



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于 LAMOST 中分辨率巡天的疏散星团性质研究

作者姓名: 张 茜

指导教师: 刘承志 研究员 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站

钟靖 研究员 中国科学院上海天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天体物理

培养单位: 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站

中国科学院上海天文台

2025 年 6 月

Study of the Properties of Open Clusters Based on LAMOST
Medium-Resolution Survey

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Natural Science
in Astrophysics

By

ZHANG Xi

Supervisor: Professor LIU Cheng Zhi and Professor ZHONG Jing

Changchun Observatory, National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences
Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences

June, 2025

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。承诺除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘要

疏散星团是广泛分布于银河系盘面的一类重要天体系统，由数百至数千颗恒星在引力作用下聚集而成。这些恒星通常来源于同一团分子云，具有单星族特性，即它们在年龄、距离、视向速度和金属丰度等参数上表现出相似性。通过深入分析疏散星团的赫罗图，可以推断出恒星的年龄、质量及演化阶段等关键信息。正因其独特的性质，疏散星团成为研究恒星演化的重要场所。疏散星团不仅具有从百万年到数十亿年的年龄跨度，且在空间分布上十分广泛，其金属丰度反映了银盘的化学演化历史，因此被视为研究银河系性质的理想“探针”。作为连接恒星与银河系的重要纽带，疏散星团在天体研究中占据着举足轻重的地位。

得益于 Gaia 发布的十亿颗恒星的高精度空间位置、自行和视差等天体测量参数，疏散星团成员星的判定变得更加精准。结合新兴的聚类算法，银河系中不断被搜索和识别出大量新星团，导致疏散星团的数量迅速增加。目前，最大的星团表已包含近 5000 个疏散星团。

疏散星团星表是相关研究的重要基础。尽管基于 Gaia 数据不断更新的疏散星团表已包含高精度的天体测量与测光参数，但仍缺乏由光谱观测获得的许多物理和化学参数，如恒星视向速度、大气参数和金属丰度等。我国的 LAMOST 光谱巡天通过高效的大规模观测，获取了海量恒星的光谱数据，为疏散星团研究提供了宝贵的数据，包括成员星的视向速度和金属丰度等光谱信息。基于 LAMOST 低分辨率光谱巡天数据，研究人员已获取了 300 多个疏散星团的平均视向速度和金属丰度等物理性质，并进行了相关的大样本统计分析。

随着 LAMOST 第二期观测任务的推进，中分辨率光谱巡天的疏散星团子项目也得以实施。截止第二期任务结束，我们已顺利完成了 10 个疏散星团相关天区的观测任务。为充分利用 LAMOST 中分辨率光谱数据来研究疏散星团，我们选取了包含 5 年中分辨率光谱观测数据的 LAMOST DR11v1.1 和 Hunt 基于 Gaia DR3 获得的最新最全的疏散星团星表，构建了基于 LAMOST 中分辨率光谱数据的大样本疏散星团参数表。样本中包含 1033 个疏散星团的中分辨率视向速度参数，以及 446 个星团的平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 、 α 元素丰度和 12 种化学元素丰度等参数。此外，还提供了成员概率大于 50% 的 6800 多颗成员星的视向速度、大气参数、元素丰度观测值及其误差等信息。我们的工作构建了迄今为止最大的包含 LAMOST 中分辨光谱参数的疏散星团表，为大样本疏散星团的统计性质研究提供了关键数据支持。

我们对该样本的星团平均视向速度、金属丰度和 13 种元素丰度以及成员星的大气参数（有效温度、表面重力）进行了统计分析和比较。其中星团视向速度与高分辨率光谱巡天（APOGEE）结果做比对，平均差值小于 1km s^{-1} ，标准偏差小于 10km s^{-1} ；与低分辨率光谱（LAMOST）数据相比较，平均差值约 -5km s^{-1} ，标准偏差约 10km s^{-1} 。星团金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与高分辨率文献结果比较，平

均差值 μ 为 0.02~0.04dex, 标准偏差 σ 为 0.06~0.08dex; 与低分辨率 (LAMOST) 比较, 平均差值 μ 小于 0.02dex, 标准偏差 σ 小于 0.2dex。研究结果表明, 基于 LAMOST 中分辨率光谱的疏散星团性质参数具有较高的精度, 便于以此为探针开展银河系化学演化的深入研究。

我们基于该疏散星团样本对银河系金属丰度梯度进行了研究。通过对 442 个疏散星团的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 沿银心距 (R_{gc}) 和 230 个星团沿银面距 ($|Z|$) 的分布进行线性拟合, 得到梯度斜率分别为 $-0.041 \pm 0.008 \text{dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.044 \pm 0.067 \text{dex kpc}^{-1}$ 。此外, 发现在银心距为 11.5kpc 的位置, 金属丰度径向梯度存在拐点, 小于和大于该拐点 (11.5kpc) 的拟合斜率分别为 $-0.047 \pm 0.006 \text{dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.014 \pm 0.017 \text{dex kpc}^{-1}$ 。

关键词: LAMOST 中分辨率巡天, 疏散星团, 数据分析, 大气参数

Abstract

Open clusters are a class of important celestial systems that are widely distributed in the disk of the Milky Way. They are formed by hundreds to thousands of stars that are bound together by gravitational forces. These stars usually originate from the same molecular cloud and exhibit characteristics of a coeval population, meaning they share similar parameters such as age, distance, radial velocity, and metallicity. By analyzing the Hertzsprung-Russell diagram of open clusters in depth, key information such as the stars' age, mass, and evolutionary stage can be inferred. Due to their unique properties, open clusters serve as important sites for studying stellar evolution. Open clusters not only span a wide range of ages, from millions to billions of years, but also have a broad spatial distribution. Their metallicity reflects the chemical evolutionary history of the Galactic disk, making them ideal 'probes' for studying the Milky Way. As a crucial link between stars and the Galaxy, open clusters occupy a significant position in astrophysical research.

Thanks to the high-precision astrometric parameters, such as spatial positions, motions, proper motions, and parallaxes, of billions of stars released by Gaia, the identification of open cluster members has become more accurate. Combined with emerging clustering algorithms, a large number of new clusters are continuously being searched for and identified in the Milky Way, leading to a rapid increase in the number of open clusters and continuously breaking records. Currently, the largest cluster catalog contains nearly 5,000 open clusters.

Open cluster catalogs are important foundational tools for related research. Although the open cluster catalogs, continuously updated based on Gaia data, include high-precision photometric parameters, they still lack many key physical and chemical parameters obtained from spectroscopic observations, such as stellar radial velocities, atmospheric parameters, and metallicities. China's LAMOST spectral survey, through efficient large-scale sky area observations, has acquired a vast amount of stellar spectral parameters, providing valuable data for open cluster research, including spectral information such as radial velocities and metallicities of member stars. Previously, based on LAMOST low-resolution spectral survey data, researchers had obtained spectral parameters like radial velocities and metallicities for 300 to 400 open clusters and performed relevant large-sample statistical analyses.

With the advancement of the second phase of the LAMOST observation mission, the open cluster sub-project of the medium-resolution spectral survey has also begun implementation. By the end of the second phase, we have completed observations in 10 sky areas, obtaining spectral parameters for 82 open clusters. In order to make full

use of the LAMOST medium-resolution spectral data to study open clusters, we selected the latest and most complete open cluster catalog, which includes five years of medium-resolution spectral observation data from LAMOST DR11v1.1 and the catalog from Hunt based on Gaia DR3. This has led to the construction of a large-sample open cluster parameter catalog containing LAMOST medium-resolution spectral data. The catalog includes radial velocity parameters for 1033 open clusters, as well as metallicity, α element abundance, and the abundance of twelve chemical elements for 446 clusters. In addition, the sample provides radial velocities, atmospheric parameters, element abundances, observational values, and their errors for over 6,800 member stars with membership probabilities greater than 50%. Our work has created the largest catalog of open star clusters to date, incorporating spectral parameters from LAMOST, providing crucial data support for the statistical study of large sample open star clusters.

We performed statistical analysis and comparison of the cluster's average radial velocity, metallicity, the abundances of 13 elements, and the atmospheric parameters (effective temperature, surface gravity) of the member stars. The cluster's radial velocity was compared with high-resolution spectroscopic survey results (APOGEE), with an average difference of less than 1 km s^{-1} and a standard deviation of less than 10 km s^{-1} ; when compared to low-resolution spectra (LAMOST) data, the average difference was approximately -5 km s^{-1} , with a standard deviation of about 10 km s^{-1} . The cluster's metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$ was compared with high-resolution literature values, with an average difference μ ranging from 0.02 to 0.04 dex and a standard deviation σ of 0.06 to 0.08 dex; compared to low-resolution (LAMOST) data, the average difference μ was less than 0.02 dex, with a standard deviation σ smaller than 0.2 dex. The comparison results suggest that the spectral parameters observed by LAMOST at lower resolution generally show good quality.

Finally, we performed a linear fit of the metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$ distribution along the Galactic center distance (R_{gc}) for 442 open clusters, and along the Galactic vertical distance ($|Z|$) for 230 clusters. The gradient slopes obtained were $-0.041 \pm 0.008 \text{ dex kpc}^{-1}$ and $-0.044 \pm 0.067 \text{ dex kpc}^{-1}$, respectively. Moreover, at the Galactic center distance of 11.5 kpc, our sample shows a 'knee' in the radial gradient distribution of metallicity that is similar to what has been reported in high-resolution literature. The fitting slopes for regions smaller and greater than this inflection point (11.5 kpc) are $-0.047 \pm 0.006 \text{ dex kpc}^{-1}$ and $-0.014 \pm 0.017 \text{ dex kpc}^{-1}$, respectively.

Key Words: LAMOST-Medium Resolution Spectroscopic Survey , Open Cluster, Data Analysis, Atmospheric Parameters

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 疏散星团的研究意义	1
1.2 疏散星团的研究概况	2
1.2.1 疏散星团的早期观测和星表	3
1.2.2 Gaia 时代的疏散星团研究	5
1.2.3 光谱巡天	15
1.3 研究目的和内容	18
第 2 章 LAMOST 光谱巡天简介	21
2.1 LAMOST 望远镜	21
2.2 LAMOST 光谱巡天概况	23
2.2.1 LAMOST 低分辨率光谱巡天	23
2.2.2 LAMOST 中分辨率光谱巡天	24
2.3 基于 LAMOST 数据的疏散星团研究	27
2.3.1 大样本统计研究	28
2.3.2 星团中的特殊恒星研究	31
2.3.3 星团性质研究	32
2.4 小结	33
第 3 章 LAMOST 中分辨率疏散星团观测	35
3.1 LAMOST-MRS-O 项目	35
3.1.1 科学目标	36
3.1.2 观测计划和策略	37
3.2 观测进展	38
3.3 观测的完备性	39
3.4 观测参数	42
3.4.1 视向速度	42
3.4.2 金属丰度	44
3.5 小结	49
第 4 章 基于 LAMOST 中分辨率的疏散星团性质研究	51
4.1 数据和样本	51
4.1.1 LAMOST-MRS 数据	51
4.1.2 疏散星团样本	52

4.2 视向速度	54
4.3 大气参数	58
4.4 金属丰度和化学元素丰度	61
4.4.1 与外部数据的比较	61
4.4.2 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的丰度梯度	65
4.4.3 $[\text{X}/\text{Fe}]$ 的丰度梯度	70
4.5 星团参数表和星团成员参数表	74
4.6 小结	77
第 5 章 总结和展望	79
5.1 总结	79
5.2 展望	80
参考文献	85
附录一 222 个疏散星团的 LAMOST-MRS 光谱参数表	101
致谢	117
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果 ..	119

图目录

图 1-1 银河系疏散星团 NGC 6193 和 M7.	4
图 1-2 利用 Gaia EDR3 判定疏散星团 LP 589(青色) 和 NGC 2509(黄色) 的成员星.	6
图 1-3 Qin et al. (2023) 新发现的银河系疏散星团.	6
图 1-4 来自 He et al. (2022) 新发现银河系疏散星团(红点) 和已知星团(灰点).	7
图 1-5 Rain et al. (2021) 对疏散星团 IC 4651, Jadhav et al. (2021) 对星团 NGC 2682 和 Li et al. (2024) 对星团 NGC 752 中蓝离散星 (BSS) 的研究.	8
图 1-6 Hao et al. (2022a) 利用 Gaia DR3 数据, 拓展了对银河系疏散星团中经典造父变星的普查, 综合分析表明, 共有 50 颗经典造父变星与 45 个疏散星团存在关联, 其中 39 对星团-造父变星关联具有较高可信度.	8
图 1-7 Li et al. (2022) 由混合模型 MiMO 得到的疏散星团 NGC 188 单, 双星成员概率与其他方法的比较 (左图); Jiang et al. (2024) 对疏散星团 OCSN 280 的质量分布研究 (右图).	9
图 1-8 Röser et al. (2019a) 对疏散星团 NGC 2632, Zhang et al. (2020) 对疏散星团 Blanco 1 的延展结构研究.	10
图 1-9 疏散星团 NGC 2972 的 “King 分布 + 双成分” 模型.	10
图 1-10 在银盘旋臂上的 3 千多个按年龄分布的疏散星团.	11
图 1-11 在银盘旋臂上恒星形成区的年轻疏散星团.	12
图 1-12 Hunt 在 Gaia 星表密度图上的星团搜寻目标区域.	13
图 2-1 LAMOST 望远镜的光学系统.	21
图 2-2 LAMOST 望远镜的改正镜 Ma(左) 和主镜 Mb(右).	22
图 2-3 LAMOST 焦面上光纤分布及光纤收集光谱数示意图, 数字为光谱仪编号.	22
图 2-4 LAMOST 低分辨率光谱巡天区域.	23
图 2-5 LAMOST 低分辨率光谱示意图.	24
图 2-6 LAMOST 中分辨率光谱巡天区域.	25
图 2-7 LAMOST 中分辨率光谱示意图 (1).	26
图 2-8 LAMOST 中分辨率光谱示意图 (2).	27
图 2-9 (a)295 个疏散星团在不同年龄段的径向金属丰度梯度 (b) 垂向金属丰度梯度.	28
图 2-10 疏散星团的年龄-金属丰度关系: 斜率为 $-0.022 \pm 0.008 \text{ dex Gyr}^{-1}$ (age<0.6Gyr).	29

图 2-11 LAMOST 星团的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 中位值随银心距 R_{gc} 的演化分布.	29
图 2-12 具有 LAMOST-LRS 光谱参数的疏散星团成员星 (红点) 与 Cantat-Gaudin et al. (2020) 星团成员星 (灰点) 的天区覆盖图.	30
图 2-13 具有 LAMOST-MRS 光谱参数的疏散星团成员星 (红点) 与 Hunt et al. (2024) 星团成员星 (灰点) 的天区覆盖图.	30
图 3-1 LAMOST-MRS-O 项目计划观测的 180 多个星团的空间 (左图) 和年龄分布 (右图).	38
图 3-2 LAMOST-MRS-O 项目: 计划观测 18 个天区, 已完成十个天区的观测 (淡蓝).	39
图 3-3 左图: 输入星表的恒星 (灰色) 和观测到的恒星 (红色) 的直方图, 在 $G_{\text{mag}}=9\sim 15\text{mag}$ 范围内的观测完备率约为 70%; 右图: 10 个天区观测到的恒星数相对同天区 Gaia DR3 的完备率, 在 $G_{\text{mag}}=10\sim 13\text{mag}$ 范围的观测完备率可超过 75%.	40
图 3-4 恒星被观测的次数分布直方图.	40
图 3-5 左图: 星团成员相对 CG20 成员的观测完备率; 右图: 星团 Stock 2 的观测完备率 (其中星等亮于 14mag 的观测完备率超过 80%).	41
图 3-6 星团 NGC 1528, NGC 1960, NGC 869, NGC 1912 外围区域的成员星采样率约为 70%, 基本达到预期要求 (红点).	41
图 3-7 LAMOST-MRS 与 Gaia DR3 的 72,737 颗共同恒星视向速度的比较: 平均差值 $\mu=0.08\text{ km s}^{-1}$, 标准偏差 $\sigma=3.09\text{ km s}^{-1}$, 说明中分辨率光谱获得的恒星视向速度有较高的准确性.	43
图 3-8 左图: LAMOST 与 CG20 的 33 个共同星团视向速度的比较, 差值 $\mu=-2.78\text{ km s}^{-1}$, 标准偏差 $\sigma=11.21\text{ km s}^{-1}$; 右图: LAMOST 与 Tarricq21 的 57 个共同星团视向速度的比较, 差值 $\mu=-1.87\text{ km s}^{-1}$, 标准偏差 $\sigma=14.38\text{ km s}^{-1}$	44
图 3-9 LAMOST-LRS 与 LAMOST-MRS 视向速度比较: 与 Zhong20 (42 个共同星团) 和 Fu22 (41 个共同星团) 的比较结果平均差值分别为 $\mu=-5.0\text{ km s}^{-1}$ 和 -7.69 km s^{-1} , 标准偏差分别为 $\sigma=11.19\text{ km s}^{-1}$ 和 9.72 km s^{-1}	45
图 3-10 APOGEE DR17 与 LAMOST-MRS 的 1137 颗共同恒星 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值和 968 颗共同恒星 $[\alpha/\text{M}]$ 值的比较: $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ 差值 $\mu=-0.013\text{ dex}$, 标准偏差 $\sigma=0.025\text{ dex}$; $\Delta[\alpha/\text{M}]$ 差值 $\mu=0.015\text{ dex}$, 标准偏差 $\sigma=0.012\text{ dex}$	46
图 3-11 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的比较, 左图: LAMOST-MRS 与 Zhong et al. (2020) 的 36 个共同星团对比, 差值 $\mu=0.002\text{ dex}$, 标准偏差 $\sigma=0.121\text{ dex}$; 右图: LAMOST-MRS 与 Fu et al. (2022) 的 37 个共同星团对比, 差值 $\mu=0.041\text{ dex}$, 标准偏差 $\sigma=0.105\text{ dex}$	47
图 3-12 Stock 2 的 9 种丰度参数直方图和高斯分布图.	48

图 3-13 Stock 2 颜色-星等图中, 由 $[\alpha/M]$ 丰度指示成员星颜色. 在 LAMOST-MRS 星表中, 热星的 $[\alpha/M]$ 测量值往往表现出较大的偏差, 如 Stock 2 主序上端颜色偏蓝的热星.	49
图 4-1 星团成员累计频数分布图显示: 在具有视向速度, 金属丰度和其它元素丰度的 446 个星团样本中, 52.9% 的星团具有 5 个及以上的成员星具有视向速度 (蓝线点), 而 20.4% 的星团有 5 个及以上的成员星具有金属丰度值 (红线点).	53
图 4-2 1033 个星团样本的 RV-MRS 比较: 与高分辨率 Hunt24 和 Tarricq21 星团表比较 (上), 平均差值 $\mu = -0.86 \text{ km s}^{-1}$ (左), 0.15 km s^{-1} (右), 相应的标准偏差为 $\sigma = 16.19 \text{ km s}^{-1}$, 9.85 km s^{-1} ; 与 Zhong20 和 Fu22 的 LAMOST 低分辨率星团表比较 (下), 平均差值 $\mu = -3.45 \text{ km s}^{-1}$ (左) 和 -4.50 km s^{-1} (右), 标准偏差 $\sigma = 10.22 \text{ km s}^{-1}$, 8.48 km s^{-1}	55
图 4-3 图展示了早期观测研究的星团 (上) 和新星团 (下) 的 CMD 图, 颜色标识为 LAMOST 中分辨率视向速度; 圆点 (LAMOST-MRS), 灰点 (Hunt24 成员), 黑色虚线是 Bressan et al. (2012) 的星团理论等龄线.	57
图 4-4 图示为 6 个疏散星团的赫罗图, 显示出各星团成员星有效温度 T_{eff} 和表面重力 $\log(g)$ 观测值随恒星理论演化趋势 (黑色虚线是各星团 PARSEC 理论等龄线) 的一致性, 以金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 标识颜色, 其中最年轻的星团 NGC 2632 主序星的颜色最深, 符合多数年轻星团的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 比年老星团高的观测特征.	59
图 4-5 上图是星团 Melotte 22 的赫罗图, 黑色虚线为星团 PARSEC 理论等龄线, 以金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 代表颜色; 下图是以 $\log(g)$ 为颜色的 T_{eff} - $[\text{Fe}/\text{H}]$ 关系图.	60
图 4-6 星团 NGC 2632 的赫罗图和 T_{eff} - $[\text{Fe}/\text{H}]$ 关系图, 黑色虚线为理论等龄线.	60
图 4-7 疏散星团 NGC 2682 的赫罗图, 以 9 种元素丰度值为颜色条.	62
图 4-8 图示为 LAMOST 中分辨率金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与高分辨率的 Spina21 (左图) 和低分辨率的 Zhong20 (右图) 相比较, 平均差值分别为 0.038 dex 和 0.012 dex, 其标准偏差分别为 0.062 dex 和 0.116 dex, LAMOST-MRS 星团的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 显示的误差棒是每个星团其成员 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 均值的标准偏差.	63
图 4-9 LAMOST-MRS 星团样本与高分辨率 Donor et al. (2020); Spina et al. (2021); Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) 星团表交叉分别获得的 38, 45, 12 个共同星团, 比较了其中 9 种 (CH24 缺氧元素) 化学元素丰度: 粉色圆点, 蓝色三角和橘色星形分别表示 LAMOST-MRS 与 Donor20, Spina21 和 CH24 的共同星团.	64
图 4-10 442 个疏散星团的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 沿银心距 (R_{gc}) 和 230 个星团沿银面距 ($ Z $) 的拟合梯度分别为 $-0.041 \pm 0.008 \text{ dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.044 \pm 0.067 \text{ dex kpc}^{-1}$	66

图 4-11 Donor 用 OCCAM 光谱数据得到的疏散星团金属丰度沿银心距的丰度梯度.	66
图 4-12 CH24 的疏散星团金属丰度沿银心距的丰度梯度, 拐点在 $R_{gc} = 11.3$ kpc.	67
图 4-13 疏散星团的金属丰度 $[Fe/H]$ 沿银心距的分布在 $R_{gc}=11.5$ kpc 处有个明显拐点, 在 $R_{gc}<11.5$ kpc 区域 387 个星团的分布的拟合斜率为 $-0.047 \pm 0.006 \text{dex kpc}^{-1}$; 在 $R_{gc}>11.5$ kpc 区域的 55 个星团分布的拟合斜率为 $-0.014 \pm 0.017 \text{dex kpc}^{-1}$, 颜色表征星团年龄 $\log(\text{Age})$	67
图 4-14 展示了 442 个疏散星团在 4 个年龄区间的金属丰度 $[Fe/H]$ 沿银心距和银面距的分布; 颜色标识有金属丰度值的成员星数目, 少数星团具有 50-100 个以上成员, 绝大多数则低于 50 个.	69
图 4-15 222 个疏散星团子样本的 $[Fe/H]$ - $[X/Fe]$ 关系, $\log(\text{Age})$ 为 colorbar.	71
图 4-16 222 个疏散星团子样本的 12 种元素丰度径向梯度, $\log(\text{Age})$ 为 colorbar.	72
图 4-17 222 个疏散星团子样本的 12 种元素丰度径向梯度线性拟合.	73
图 4-18 222 个疏散星团子样本的 12 种元素丰度随年龄的分布.	73
图 5-1 疏散星团 NGC 752 的赫罗图, 以 9 种元素丰度值为颜色条.	81
图 5-2 左图: 年老星团 NGC 2682 中巨星 (橘红色) 的氮丰度明显偏高; 右图: 年老星团 (蓝色) 的氮丰度普遍比年轻星团偏高.	82
图 5-3 三个年老星团 NGC 7789, NGC 6940 和 NGC 1907 的平均氮丰度明显偏高.	82
图 5-4 疏散星团 Stock 2 的空间分布图.	82
图 5-5 经典双星团示例: NGC 869 和 NGC 884.	83
图 5-6 候选双星团示例: HSC 1486 和 HSC 1493.	83

表目录

表 1-1 疏散星团和球状星团的区别.	2
表 1-2 大型光谱巡天项目.	17
表 3-1 LAMOST-MRS-O 计划观测天区.	37
表 3-2 疏散星团 Stock 2 的 LAMOST-MRS-O 元素丰度.	47
表 4-1 星团样本的视向速度比较 ($RV_{\text{Literature}} - RV_{\text{MRS}}$)	54
表 4-2 18 个星团 $RV(\text{km s}^{-1})$ 示例.	56
表 4-3 $[Fe/H]$ 的比较 ($[Fe/H]_{\text{Literature}} - [Fe/H]_{\text{MRS}}$)	62
表 4-4 $[X/Fe]$ 的比较 ($[X/Fe]_{\text{Literature}} - [X/Fe]_{\text{MRS}}$)	63
表 4-5 径向金属丰度梯度的比较.	68
表 4-6 不同年龄区间的径向金属丰度梯度的比较.	69
表 4-7 12 种化学元素丰度梯度的比较.	74

表 4-8 疏散星团视向速度参数表	75
表 4-9 疏散星团成员星视向速度参数表	75
表 4-10 疏散星团化学元素丰度参数表	76
表 4-11 疏散星团成员星化学元素丰度参数表	76
表 -1 222 个疏散星团的 LAMOST-MRS 光谱参数表 1	102
表 -2 222 个疏散星团的 LAMOST-MRS 光谱参数表 2	109

符号列表

字符

Symbol	Description	Unit
RV	Radial Velocity	$\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
T_{eff}	Effective Temperature	K
$logg$	Surface Gravity	dex
$[Fe/H]$	Metallicity	dex
Gyr	Age(Giga-year)	$10^9 \cdot \text{yr}$
Myr	Age(Mega-year)	$10^6 \cdot \text{yr}$
S/N	Signal-to-Noise Ratio	
R	Resolution	

算子

Symbol	Description
Δ	difference
μ	mean value
σ	standard difference

缩写

LAMOST	Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope
MRS	Medium Resolution Survey
LRS	Low Resolution Survey
OCs	Open Clusters
LASP	LAMOST Stellar Parameters Pipeline
CNN	Convolutional Neural Network
DR	Data Release
MWSC	Milky Way Star Clusters

第1章 引言

银河系中存在上千亿颗恒星，它们处于不同的演化阶段。有的是分子云坍缩后刚刚诞生的原恒星；有的经历氢核聚变，进入主序阶段，成为年轻恒星；还有的在主序阶段持续稳定地燃烧氢核，处于壮年时期。此外，还有氢壳层燃烧的红巨星、氦壳层燃烧的渐近巨星支巨星，以及恒星演化末期留下的白矮星和中子星等。恒星并非都独自存在。由于恒星主要诞生场所—分子云的环境存在差异，形成了具有不同引力束缚和聚集形态的恒星集群。银盘中的大多数原始恒星群在后续的动力学演化中逐渐瓦解，转化为场星。仅有一部分能够维持引力束缚的星群，最终形成了今天观测到的疏散星团（Open Cluster）。对疏散星团性质开展研究，不仅有助于了解恒星的形成和演化历程，还将为银河系银盘形成和演化的理论模型提供可靠的观测依据。

1.1 疏散星团的研究意义

疏散星团是银河系内一类重要的天体系统，由数百至数千颗恒星在引力作用下聚集形成。与球状星团 (Chaboyer et al., 1996; Bica et al., 2006; Massari et al., 2019) 相比 (表 1-1 所示)，疏散星团具有显著不同的特征：其恒星数量相对较少，分布较为松散，整体形状呈现出不规则的状态，成员星之间的引力束缚也相对较弱。

疏散星团的年龄跨度极大，涵盖了从仅有几百万年 (Myr) 的年轻星团，如著名的嵌埋星团 NGC 2244，到年龄高达几十亿年 (Gyr) 的年老星团，如 M67。它们在银河系中的分布主要集中于银盘区域，特别是旋臂附近。这些区域星际气体和尘埃较为丰富，为恒星的形成提供了有利条件。疏散星团在银盘的分布范围十分广泛，目前观测到的样本，其所在区域从太阳附近开始，一直延伸至反银心方向，距离银心约 20kpc 的位置。

在天文学领域，人们普遍认为恒星往往是成群诞生的，这些恒星被视作源自同一团分子云 (Lada et al., 2003; Kruijssen et al., 2011; Pfalzner et al., 2012)，具有单星族的特性，也就是说，它们的成员星在年龄、距离、视向速度以及金属丰度等参数上表现出相似性。通过对疏散星团赫罗图的深入分析，天文学家们能够推断出恒星的年龄、质量以及所处的演化阶段等关键信息。

正是由于这些独特的性质，疏散星团成为了研究恒星演化的绝佳场所。人们常常借助疏散星团来研究处于特定演化阶段且具有特殊性质的恒星，例如红团簇星、蓝离散星和 Be 型星等。从动力学的角度来看，疏散星团的引力束缚相对较弱，随着时间的推移，它会逐渐瓦解，其中的成员星会逐渐融入银河系，成为场星。

此外，疏散星团是由银盘中的分子云坍缩形成的，它们继承了分子云的初始

表 1-1 疏散星团和球状星团的区别

Table 1-1 The differences between open clusters and globular clusters

基本特征	疏散星团	球状星团
形成物质	银河系银盘上的分子云	早期宇宙超大质量分子云
	$M > 10^3 M_{\odot}$	$M > 10^6 \sim 10^7 M_{\odot}$
空间分布	银河系盘和旋臂	银河系晕或并合遗迹区
形态	不规则形状	较规则的球状
恒星数量	数百到数千颗	数万到数十万颗
年龄	年轻 (1Myr~1Gyr)	年老 (> 10Gyr)
金属丰度	接近太阳丰度	极贫
引力束缚	弱	强
星族特性	单星族	多星族

化学成分，其金属丰度在一定程度上反映了银盘的化学演化历史。因此，疏散星团的运动学、动力学以及化学演化性质，为构建和完善银河系恒星系统形成与演化的理论模型，提供了极为重要的观测依据。

疏散星团在天体研究领域占据着关键地位，它是连接恒星与银河系的重要纽带。相较于单独估算一颗恒星的年龄和距离，估算星团的这两项参数更为简便。长期以来，疏散星团一直被视作研究银河系的理想“探针”之一。对疏散星团展开深入探究，不仅有助于更透彻地理解恒星的形成机制和演化历程，还能为揭示银河系结构的形成过程、剖析其动力学特征以及探究化学演化规律，提供至关重要的信息。

1.2 疏散星团的研究概况

天体物理学作为一门基于观测的科学，疏散星团的研究自然也依赖于对各类基本参数的精准观测。这些关键参数涵盖天球坐标、自行 (Proper Motion)、视差 (Parallax)、视向速度 (Radial Velocity)、年龄 (Age)、金属丰度 (Metallicity) 以及质量 (Mass) 等。其中，空间位置、自行和视差等参数，主要通过 (多历元) 测光观测进行获取；而视向速度、金属丰度以及其他化学元素丰度，则是借助光谱数据得以确定。大量不同类型的光谱巡天观测，为疏散星团参数测定积累了海量且关键的数据。

回顾疏散星团研究历史，从早期天文学家的零星观测，到现代大规模巡天项目的开展，星表一直是梳理和整合观测成果的重要“工具”。它将不同时期、不同来源的观测数据系统整理，为后续研究提供了坚实的数据支撑。

基于此，我们将以观测数据和星表随时间的动态更新为脉络，并以具有天文学里程碑意义的 Gaia 巡天数据发布作为关键节点，对疏散星团研究的整体概况

与阶段性进展作简要介绍，旨在呈现其研究的发展轨迹与前沿成果。

1.2.1 疏散星团的早期观测和星表

早期对疏散星团进行观测和研究的天文学家之一，是 18 世纪末的威廉·赫歇尔 (William Herschel)，在 (Herschel, 1786) 中记载了如昴星团与毕星团等疏散星团。同一时期，法国天文学家查尔斯·梅西耶 (Charles Messier) 编制了梅西耶星表，该星表主要涵盖 110 个深空天体，其中包含 29 个疏散星团 (像 M34、M35、M36 等) (Messier, 1781)。他们的工作为后续研究奠定了基础。19 世纪末至 20 世纪初，天文学家通过持续的观测以及理论探究，逐步揭示了疏散星团的性质与演化规律，并着手对疏散星团展开搜集与整理工作。1888 年，约翰·路易斯·埃米尔·德雷尔 (J.L.E. Dreyer) 编制出著名的 NGC 星表 (New General Catalogue) (Dreyer, 1888)，其中囊括星云、星团、星系等多种类型的银河系及河外星系的深空天体，共计 7840 个，详细记载了天体的天球坐标、类型、亮度、大小、形态等参数，当中包含众多疏散星团 (例如 NGC 2164、NGC 2516 等)。

20 世纪初至中期，在疏散星团形态分布的理论研究方面成果显著。颇具影响力的哈洛·沙普利 (Harlow Shapley) 经观测提出，疏散星团或许具有延展结构的猜想 (Shapley, 1916)，他认为疏散星团的核心区域可能仅仅是其整体结构的一部分，外围或许存在低密度的延展成分。这一猜想在当今 Gaia 时代得到了观测数据的证实。1930 年，美国天文学家罗伯特·特朗普勒 (Robert Trumpler) 对疏散星团进行形态分类后，编制出 Trumpler 星表 (Trumpler Catalogue)，其中涵盖 37 个疏散星团的密度、亮度范围等信息 (Trumpler, 1930)。1962 年，伊凡·金 (Ivan King) 提出著名的 “King 模型” (King, 1962)，用于描述疏散星团结构的径向密度分布，该方法至今仍应用于疏散星团结构研究领域。

到了 20 世纪 80 年代，随着观测仪器的进步以及科学技术的发展，大型巡天项目数据陆续发布，疏散星团的研究进入活跃期。1989 年，欧洲空间局 (ESA) 发射的天体测量卫星依巴谷 (HIPPARCOS: High Precision Parallax Collecting Satellite)，观测了约 118,000 颗近距离 (距地球 500pc) 恒星高精度的位置、视差、自行和光度数据，这些参数能够用来精准判定星团成员并描述星团性质。借助依巴谷星表数据，Pinsonneault et al. (1998); Baumgardt et al. (2000) 分别对疏散星团的距离展开研究，并探讨了系统误差；Robichon et al. (1999); Castellani et al. (2002) 计算了一些疏散星团样本的自行、视差及相应精度 (约 0.5mas yr^{-1})。

20 世纪 90 年代，美国国家航空航天局 (NASA) 发射的哈勃太空望远镜 (HST)，凭借其卓越性能，获取了大量天体的高分辨率图像，其中就包括疏散星团 NGC 6193 中罕见的 O 型星，相关图像如图 1-1 所示。2MASS 巡天项目专注于近红外波段的观测，于 2001 年圆满完成任务。借助 2MASS 覆盖全天的近红外测光数据，人们在疏散星团研究领域取得了一系列重要成果。例如，Grocholski et al. (2002) 研究表明，对于年龄大于 2Gyr 的疏散星团，K 波段红团簇星的绝对星等主要受星团金属丰度的影响，与年龄关联甚微，同时利用红团簇成员星校

准计算出了疏散星团 NGC 2158 的距离；Chen et al. (2004) 通过恒星计数法分析 2MASS 数据，得出银河系疏散星团呈拉长结构的结论；Yong et al. (2005) 则结合 2MASS 数据与光谱数据，精确测定了 6 个星团的视向速度、金属丰度，以及在慢中子或快中子俘获过程中合成的化学元素丰度。这些研究极大地深化了我们对疏散星团性质和演化的认知。

Lee et al. (2008, 2011) 借助美国斯隆数字巡天 (SDSS) 项目所获取的光谱及测光数据，精确测定了星团中恒星的视向速度、大气参数以及金属丰度，并进一步推算出星团各参数的不确定度。同时，依据相关数据得到星团 NGC 2420、M67 和 NGC 6791 可靠的 $[\alpha/\text{Fe}]$ 值；Chen et al. (2011) 同样利用 SDSS 数据，针对五个古老疏散星团 (NGC 6791、NGC 2420、NGC 2682、NGC 2158 和 NGC 7789) 展开深入研究，精准获取了它们的金属丰度和视向速度；Cheng et al. (2012) 则通过分析 SEGUE 观测数据，测量了银河系银盘中老年星团的径向和垂直金属丰度分布，为银盘系统的化学丰度和动力学演化提供了关键的约束条件。

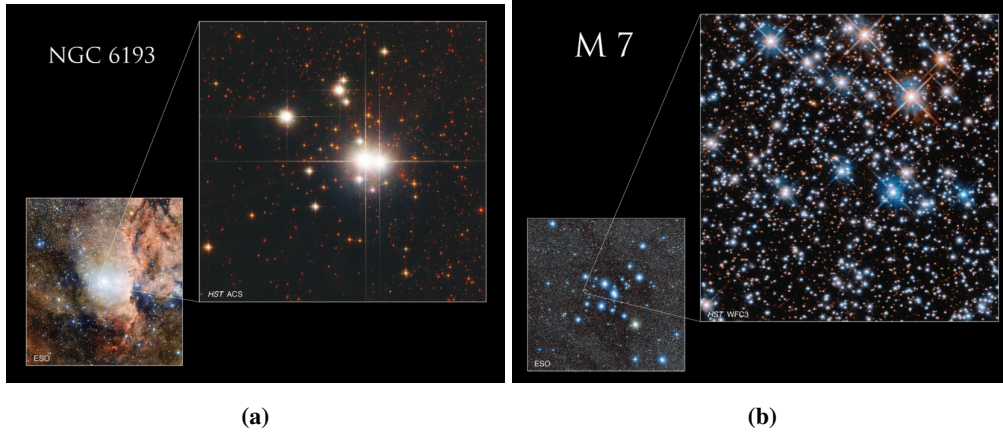


图 1-1 银河系疏散星团 NGC 6193 和 M7.

Figure 1-1 The galactic open clusters NGC 6193 and M7.

注：图片来源:NASA-ESA.

在 20 世纪后期至 2016 年 Gaia 数据发布之前的这段时期，有三个星表及一个在线数据库，成为疏散星团研究领域至关重要的资源宝库。首先是由瑞典天文学家戈斯塔·林格 (Gosta Lynga) 精心编制的星表 (Lynga Catalogue) (Lynga, 1982)。林格通过对大量文献的系统梳理以及整合已有的观测数据，构建了这一星表，其中包括了 1200 多个疏散星团。在此基础上，Mermilliod (1995) 创建了 WEBDA 数据库。其次，Dias et al. (2002) 通过汇集整理相关文献的结果，编制出 DAML02 星表。该星表进一步扩充了疏散星团的收录数量，涵盖了 1500 多个疏散星团。再者，Kharchenko et al. (2013) 基于 2MASS 巡天数据和 PPMXL 天体测量星表，编制出 Kharchenko 星团表 (MWSC)。此星表包含 3000 多个银河系疏散星团及星协，提供了疏散星团的位置、距离、平均自行和年龄等参数，极大地丰富了相关研究的数据基础。另外，WEBDA 作为专门在线数据库，涵盖了数千

个疏散星团成员的详细观测信息，并进行了持续更新和维护，为疏散星团研究提供了动态且较全面的数据支持。

1.2.2 Gaia 时代的疏散星团研究

2013 年 12 月，欧洲空间局 (ESA) 成功发射盖亚 (Gaia) 太空任务航天器 (Gaia Collaboration et al., 2016)。该航天器凭借卓越的观测能力，以前所未有的精度对全天恒星位置开展多历元观测，获取了高精度的天体测量数据，其中涵盖空间位置、自行、视差和视向速度等关键参数。

2016 年 9 月，Gaia DR1 数据正式发布，其中囊括了超过十亿个星源的位置信息以及 G 波段星等，同时列出了 200 万颗恒星的自行和视差。2018 年，DR2 数据发布 (Gaia Collaboration et al., 2018)，其天体测量精度、光度测量深度和质量均达到了全新高度。在自行及视差测量方面，精度相较于以往星表提高了一百倍，G 波段观测极限星等则达到了 20.5mag。2020 年，DR3 早期数据 EDR3 发布，到 2022 年完整的 DR3 发布 (Gaia Collaboration, 2022)，该数据包含了 18 亿个星源的天体测量值。

Gaia 巡天所提供的高精度恒星空间位置、自行及视差等测光数据，为疏散星团研究领域带来了根本性变革。借助这些数据，能够显著提高对已知疏散星团成员星的识别精度，同时在银河系范围内探测到更多新星团，从而极大地丰富了疏散星团的样本数量。地面光谱巡天所补充的恒星光谱参量，与 Gaia 数据形成有效互补，二者共同促使疏散星团研究进入一个快速发展的全新阶段。这为深入探究疏散星团的物理性质、演化过程等科学问题，提供了极为坚实且强有力的数据支持，有效推动了疏散星团研究的发展。

1.2.2.1 成员判定和新星团

在基于 Gaia 数据开展的疏散星团研究工作中，一项极为突出的成果是借助 Gaia 所提供的高精度空间位置、自行以及视差数据，系统性地对已知疏散星团（主要源自 Dias et al. (2002) 与 Kharchenko et al. (2013) 所编制的疏散星团表）重新进行成员星判定。其目的在于获取一份纯净且相对完备的星团成员表，进而依据该新星表全面普查银河系内星团（成员星）的空间位置分布情况，以此深入探究银河系的结构特征。

来自 Cantat-Gaudin (2022) 的图 1-2，展示了运用 Gaia 数据人工判定星团成员星的典型常用方法，图上排从左到右表示成员星在二维空间分布、自行分布的聚集程度，下排结合颜色-星等图 (CMD)（判断是否有共同年龄）以及星等-视差图（判断是否有相同距离）作出初步直观的判定。图中 LP 589（青色）为新近发现星团，NGC_2509（黄色）为早在威廉·赫歇尔与 Dreyer (1888) 就有记载的星团。实际运用中，对于数量众多（上千个）的星团，借助 UPMASK（二维空间坐标、自行及视差为其中的核心参量）等机器学习算法来完成成员星判定工作，如 Cantat-Gaudin et al. (2018, 2020) 在先前已知星团表的基础上，用聚类方法，重新获得了 2017 个疏散星团的成员星样本及更为可靠的星团性质参数；Dias et al.

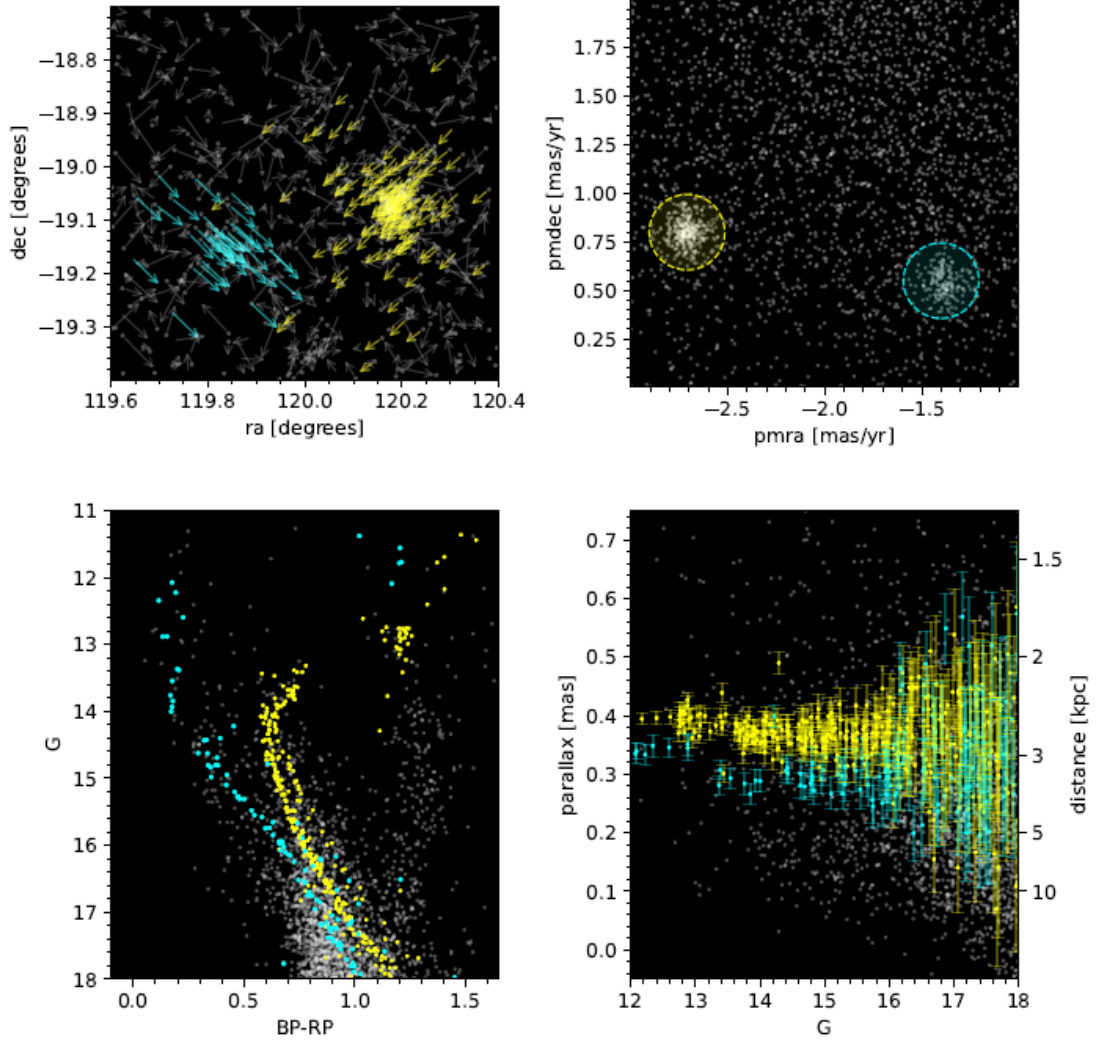


图 1-2 利用 Gaia EDR3 判定疏散星团 LP 589(青色) 和 NGC 2509(黄色) 的成员星.
Figure 1-2 Using Gaia EDR3 to determine the member stars of the open clusters LP 589 (cyan) and NGC 2509 (yellow).

注: 图引用自Cantat-Gaudin (2022).

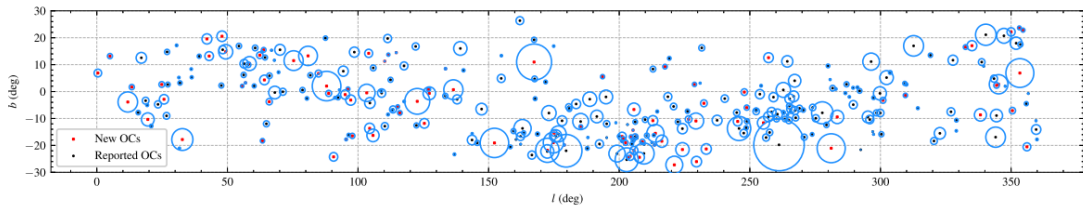


图 1-3 Qin et al. (2023) 新发现的银河系疏散星团.
Figure 1-3 The newly discovered Galactic open clusters by Qin et al. (2023).

注: 图引用自Qin et al. (2023).

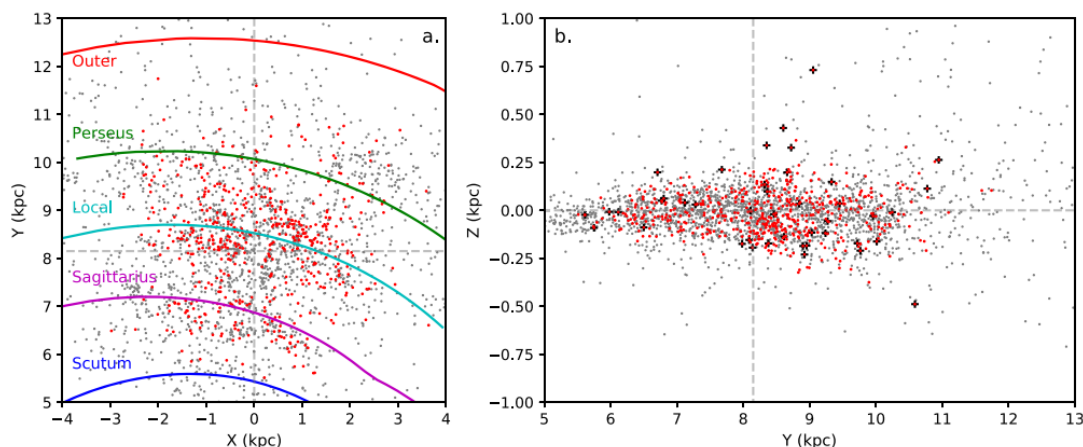


图 1-4 来自He et al. (2022) 新发现银河系疏散星团 (红点) 和已知星团 (灰点).

Figure 1-4 Newly discovered Galactic open clusters from He et al. (2022) (red dots) and known clusters (gray dots).

注: 图引用自He et al. (2022).

(2021) 基于 Gaia 数据获得的准确成员判定, 利用等龄线拟合估算了星团的距离, 重新编制了有别与 DAML02 星表的包含 1700 多个星团的同质新星表。

大量新星团的搜索和发现, 也是 Gaia 数据发布以来疏散星团研究领域的突出亮点。在发现新星团这项工作中, Gaia DR2 或 DR3 数据的主要优势是其高精度的自行, 即基于运动学性质的一致性, 辅之以各种聚类算法的运用 (典型聚类算法代码可在 Python 软件包 scikit-learn Pedregosa et al. (2011) 等程序库中获得), 能够在银盘的密集星场背景上有效地开展疏散星团乃至移动星群的探测。Castro-Ginard et al. (2018), Cantat-Gaudin et al. (2019), Sim et al. (2019), Liu et al. (2019a), Castro-Ginard et al. (2020), He et al. (2021, 2022, 2023b); Hao et al. (2022b), Qin et al. (2021, 2023), Hunt et al. (2021) 等利用 Gaia 数据, 使用 DBSCAN(Krone-Martins et al., 2014)、HDBSCAN、高斯混合模型 (GMMs) 等各种聚类方法, 在银河系搜寻到了数十个到上百个不等的新发现疏散星团。图 1-3所示为Qin et al. (2023) 在太阳周围 500 秒差距内发现的新星团; 图 1-4所示为He et al. (2022) 搜索到的 541 个银河系疏散星团 (红点), 从天球北极和侧面视角看到的银盘上的新疏散星团。

1.2.2.2 特殊恒星和子结构

除了对已知星团表中的成员星进行重新判定和发现新的星团之外, 研究者还利用 Gaia 提供的高精度、大规模测光数据, 以及极低的极限星等 ($G \sim 20\text{mag}$), 结合星团的颜色-星等图, 精准识别处于不同演化阶段且具有重要天体物理意义的成员星, 并对这些恒星的演化规律进行了深入研究, 并取得了丰富的成果。

例如, Luo et al. (2019) 利用 Gaia DR2 结合 LAMOST DR5 数据, 从光谱中确认了 924 颗热亚矮星, 并计算了热亚矮星的三维银河系空间运动与轨道, 通过速度分布和轨道分析, 发现不同氮丰度的热亚矮星在银晕、薄盘、厚盘中的占比

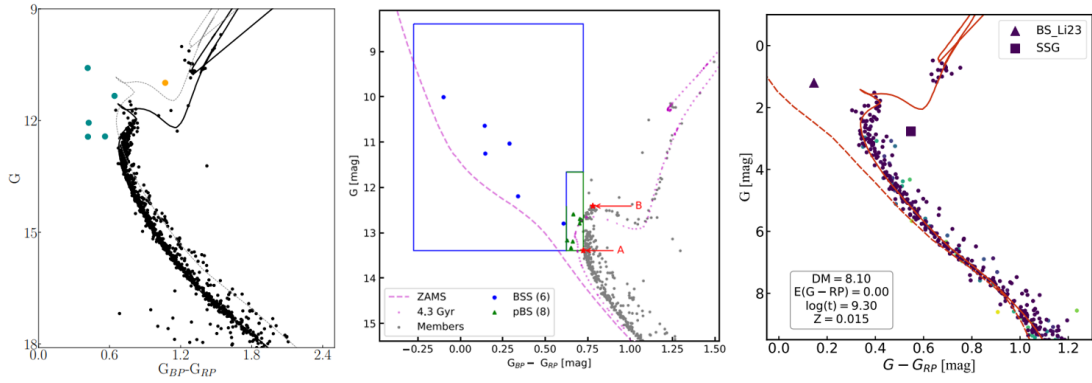


图 1-5 Rain et al. (2021) 对疏散星团 IC 4651, Jadhav et al. (2021) 对星团 NGC 2682 和 Li et al. (2024) 对星团 NGC 752 中蓝离散星 (BSS) 的研究。

Figure 1-5 Rain et al. (2021), Jadhav et al. (2021), and Li et al. (2024)'s studies on the blue straggler stars (BSS) in the open clusters IC 4651, NGC 2682, and NGC 752, respectively.

注: 图引用自 Rain et al. (2021); Jadhav et al. (2021); Li et al. (2024).

存在显著差异, 如银晕和薄盘中氦丰度大于零的的恒星数量分别超理论预测的 6 倍和 2 倍, 暗示低质量主序星与氦白矮星的并合并非为这类热亚矮星形成的主要途径。

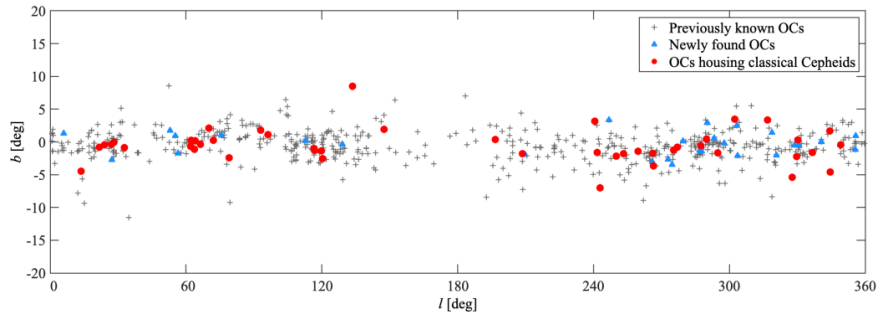


图 1-6 Hao et al. (2022a) 利用 Gaia DR3 数据, 拓展了对银河系疏散星团中经典造父变星的普查, 综合分析表明, 共有 50 颗经典造父变星与 45 个疏散星团存在关联, 其中 39 对星团-造父变星关联具有较高可信度。

Figure 1-6 Hao et al. (2022a) used Gaia DR3 data to extend the survey of classical Cepheid variables in Galactic open clusters. The comprehensive analysis indicates that a total of 50 classical Cepheid variables are associated with 45 open clusters, of which 39 cluster-Cepheid variable associations have a high degree of reliability.

注: 图引用自 Hao et al. (2022a).

如图 1-5 所示的疏散星团中蓝离散星的研究: Rain et al. (2021) 利用 Gaia DR2 数据搜寻到了 408 个疏散星团中的 897 颗蓝离散星 (BSS) 和 77 颗黄离散星 (YSS); Jadhav et al. (2021) 基于 Gaia DR2 数据, 构建了首个疏散星团 BSS 星表:

在 670 个年龄超过 3 亿年的星团中，发现 228 个星团存在 868 颗 BSS，208 个星团存在 500 颗候选 BSS，并发现所有年龄超过 10 亿年、质量高于 1000 倍太阳质量的星团均含有 BSS，其平均数量随星团年龄和质量的增加而增长，且星团质量与最大 BSS 数量间存在幂律关系；Li et al. (2023, 2024) 基于 Gaia DR3 识别了 50 个疏散星团中的 138 颗未报道过的蓝离散星。

Canton et al. (2021) 则对通过 Gaia EDR3 确定的疏散星团 M67 内的高温 DA 型白矮星（有效温度约 10,000 K）进行了高信噪比光谱分析，测定其质量并追溯前身星质量。结果显示 M67 白矮星平均质量与本地场白矮星质量分布一致，表明近期形成的场白矮星主要源自前身质量约 1.5 倍太阳质量的恒星，此发现为揭示银河系恒星形成率提供了更精确的建模依据。

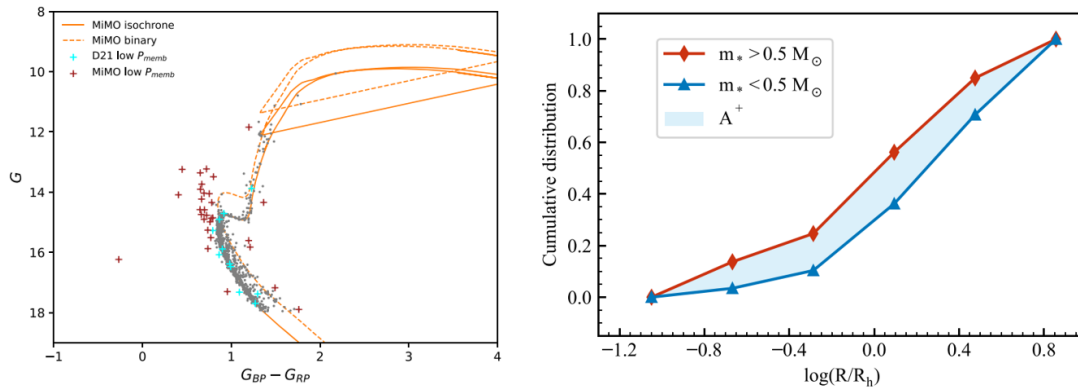


图 1-7 Li et al. (2022) 由混合模型 MiMO 得到的疏散星团 NGC 188 单、双星成员概率与其他方法的比较 (左图); Jiang et al. (2024) 对疏散星团 OCSN 280 的质量分布研究 (右图).

Figure 1-7 The left figure shows the comparison of the single and binary star membership probabilities of the open cluster NGC 188 obtained by Li et al. (2022) using the MiMO mixed model with other methods; the right figure shows Jiang et al. (2024)'s study on the mass distribution of the open cluster OCSN 280.

注: 图引用自 Li et al. (2022); Jiang et al. (2024).

变星的研究如 Michalska (2019) 在年轻疏散星团 NGC 2244 中开展了 UBV_Ic 多波段测光变星巡天研究，共发现 245 颗变星。其中 211 颗为不规则光变星，23 颗具有周期性光变特征，另有 4 颗 δ Scuti 型变星候选体及 7 颗食双星。进一步从变星样本中筛选出前主序星，即 97 颗经典金牛 T 型星候选体（96 颗不规则光变星与 1 颗周期变星）、68 颗弱线金牛 T 型星候选体（54 颗不规则光变星与 14 颗周期变星），以及 6 颗 Herbig Ae/Be 星；Zhou et al. (2021) 利用 Gaia EDR3 精确测光数据，对疏散星团中的经典造父变星展开系统性普查，最终筛选出 33 颗符合空间位置、自行、视差及演化阶段筛选条件的星团造父变星样本，其中 13 颗为新发现成员。并基于疏散星团独立测距结果，以 3.5% 的精度建立了 W1 波段周光关系；利用星团年龄数据建立了经典造父变星周期-年龄的直接关系；Drimmel et al. (2023) 利用 Gaia DR3 发布的数据，在银河系外盘发现了一种新的类共振结

构特征。该特征在年轻经典造父变星的角动量分布中最为显著，这类变星可在银盘大范围内提供精确的距离测量。疏散星团中造父变星的相关研究如图例 1-6。

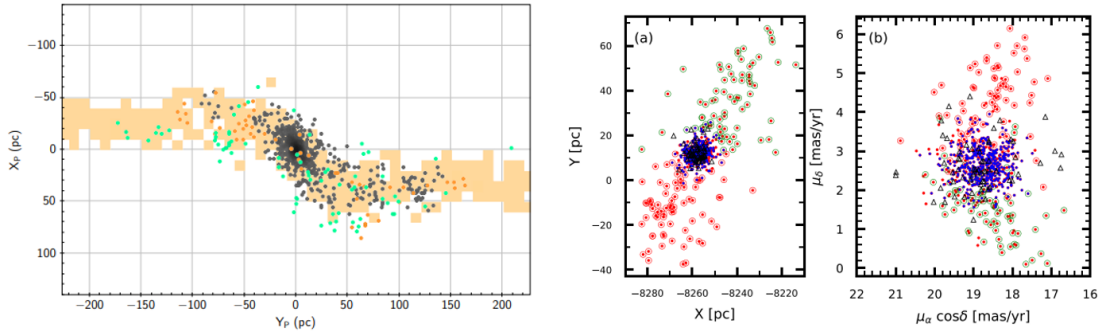


图 1-8 Röser et al. (2019a) 对疏散星团 NGC 2632, Zhang et al. (2020) 对疏散星团 Blanco 1 的延展结构研究.

Figure 1-8 This is the study of the extended structures of the open clusters NGC 2632 (left) and Blanco 1 (right) by Röser et al. (2019a) and Zhang et al. (2020), respectively.

注: 图引用自Röser et al. (2019a); Zhang et al. (2020).

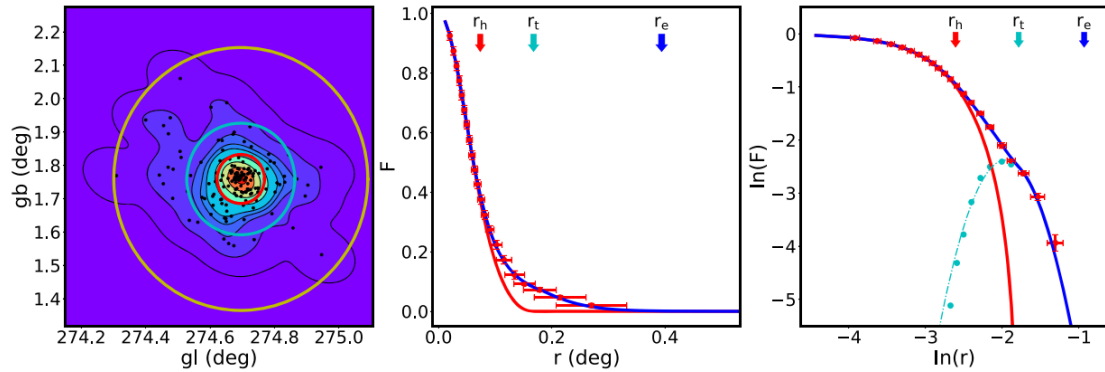


图 1-9 疏散星团 NGC 2972 的 “King 分布 + 双成分” 模型.

Figure 1-9 The “King distribution + binary component” model of the open cluster NGC 2972.

注: 图引用自Zhong et al. (2022).

以及疏散星团双星质比分布 Li et al. (2022)、质量函数 Jiang et al. (2024) 和质量分层等研究 (图 1-7所示)、Li et al. (2019); Bu et al. (2024) 通过变星、双星相互作用和恒星自转来解释年轻疏散星团的主序拐点扩展 (eMSTO) 形态等方面的研究, 极大地加深了科研人员对恒星系统形成和演化的理解Könyves et al. (2015); André et al. (2019)。疏散星团已成为验证恒星演化理论的理想试验场, 为构建和完善恒星形成与演化模型提供了关键约束条件。

此外, Gaia 数据在星团结构研究领域同样展现出巨大优势。借助这些高精度数据, 研究人员能够获得比以往更多的星团成员, 从而发现星团中更为丰富

多样的子结构。如Meingast et al. (2019)、Röser et al. (2019a); Zhang et al. (2020); Bai et al. (2022); Bhattacharya et al. (2022) 等发现了多种星团的延展结构形态（如图 1-8所示）；Zhong et al. (2022) 则提出关于星团“King 分布 + 对数高斯分布”的双成分模型，有力地揭示了疏散星团的致密核心与延展外晕结构的不同特点，如图 1-9所示；(Pang et al., 2022) 利用 Gaia EDR3 和机器学习算法 StarGO 对太阳邻域的 65 个疏散星团进行成员星识别，结合已有研究中 20 个星团的成员星数据，最终对 85 个星团的形态与运动学特征进行了系统研究，并根据潮汐半径外子结构特征，提出四类划分标准，即年龄小于 100Myr 的星团分为丝状和分形结构；年龄大于 100Myr 的星团分为晕状和潮汐尾结构等，还进行了丝状结构瓦解和子群并合等动力学演化研究。

1.2.2.3 银河系示踪

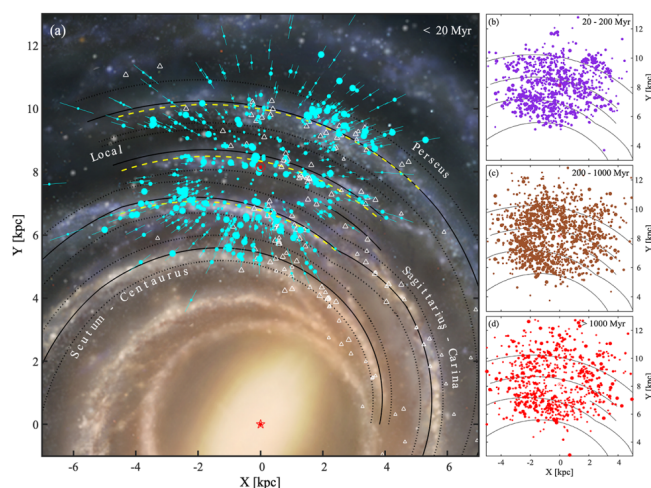


图 1-10 在银盘旋臂上的 3 千多个按年龄分布的疏散星团。

Figure 1-10 Over 3,000 open clusters distributed by age on the galactic disk's spiral arms.

注：图引用自Hao et al. (2021).

依托 Gaia 数据和具有可靠成员的星团表，人们开展了一系列以疏散星团为探针，示踪银河系结构和演化的研究工作。例如，Tarricq et al. (2021) 整合了 1382 个星团的银河系轨道数据，研究结果表明星团主要在银盘附近的近圆轨道上运动，对于年老的星团偏心率有增大的趋势；Bossini et al. (2019); Cantat-Gaudin et al. (2020); Monteiro et al. (2019) 通过拟合星团等龄线展开研究，成功给出了星团的可靠年龄；Hao et al. (2021) 基于 Gaia EDR3 数据，编制了包含 3794 个疏散星团的星表，其中大多数星团已精确测定了视差、自行和径向速度；年龄参数则来自文献引用或本研究中的计算。为理解银河系邻近螺旋结构及其演化，分析了疏散星团子样本的空间分布、运动学特性、垂直分布以及回归特性。研究发现，邻近的螺旋臂符合长寿命螺旋模式的特征，特别是太阳系当前所处的本地臂，本质上也被认定为长寿命结构，如图 1-10所示（旋臂为Reid et al. (2019) 模

型)；[Cantat-Gaudin et al. \(2020\)](#)；[Castro-Ginard et al. \(2021\)](#) 利用年轻星团的空间分布来表征银河系旋臂状态，尤其是针对如图 1-11所示的英仙臂呈现破损状态的成因展开了深入讨论（旋臂为 [Reid et al. \(2019\)](#) 模型）。

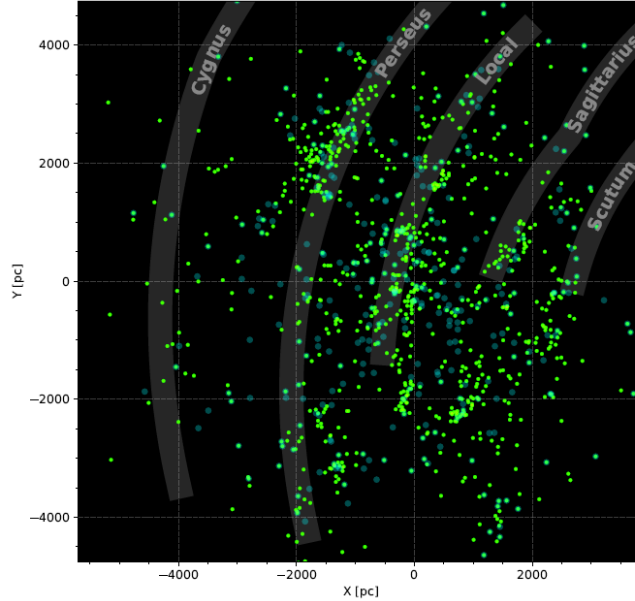


图 1-11 在银盘旋臂上恒星形成区的年轻疏散星团。

Figure 1-11 Young open clusters in star formation regions on the galactic disk's spiral arms.

注：图引用自[Cantat-Gaudin \(2022\)](#)。

1.2.2.4 疏散星团表

星团及其成员星表，作为疏散星团信息数据库，是研究此类天体不可或缺的关键工具，发挥着基础与核心作用。其重要性体现在两大层面：首先，这些星表蕴藏着丰富的数据资源，凭借详尽的参数信息，不仅支持大样本统计研究，还促进了恒星演化、银河系结构等领域的深入探索。其次，作为基础性星表，它们持续接收并整合新观测参数与新星团数据，为已知星团信息的更新与扩充提供了坚实的信息数据支持。

随着时代变迁、观测技术日新月异及观测数据不断涌现，星团表亦随之迭代升级。尤其步入 Gaia 时代，广受推崇的[Cantat-Gaudin et al. \(2020\)](#) 星表（此后简称 CG20）与当前收录星团数量最多的[Hunt et al. \(2024\)](#) 星表（此后简称 Hunt24）星表相继问世，为疏散星团研究提供了更加完整可靠的成员判定基础。

CG20 星表和 Hunt24 星表是分别基于 Gaia DR2 和 DR3 数据构建的两个星团表，其星团参数具有相似之处，主要包括：Gaia 提供的高精度星团成员星的位置信息、距离、视差、星等、自行、年龄等参数；以及通过 Gaia 卫星的星载窄带光栅光谱仪（RVS, Radial Velocity Spectrometer）获取的恒星视向速度数据。这些参数值在 Gaia DR2 和 DR3 中基本一致。

然而，两个星表也有不少差异，体现了星表紧随时代科学进步而不断更新的特点。首先，星表中疏散星团的数量存在明显差异。2018 年，Cantat-Gaudin 基于 Kharchenko et al. (2013) 和相关文献，整理出一份包含数千个已知或候选星团的列表，并使用无监督成员分配算法 UPMASK 对 Gaia DR2 数据进行了分析，获得了 1229 个星团的成员及参数，其中还发现了 60 个新的疏散星团 Cantat-Gaudin et al. (2018) (此后以 CG18 表示)。该研究发现，数千个在 Kharchenko 星表及文献中的已知星团未能在 Gaia 数据中获得证认。随后，采用从粗到细的搜索方法，在距离太阳 1.8kpc 范围内发现了 41 个新疏散星团 Cantat-Gaudin et al. (2019)，最终利用 Gaia 测光数据 (G 星等至 $G \sim 18\text{mag}$)，对约 2000 个通过 Gaia DR2 测量识别的疏散星团进行了距离、年龄及星际红化的估算，得到了 1867 个可靠星团参数的 CG20 星表。

得益于 Gaia 卫星的测量精度，疏散星团的普查规模在短短几年间得到了大幅扩展。Hunt et al. (2023) 指出，Gaia 数据正在彻底改变我们对银河疏散星团系的认知，每次新数据发布，都促进着疏散星团普查的更新。她利用 Gaia DR3 数据中的 7.29 亿个星源 (至 $G \sim 20\text{mag}$) 进行了全天盲搜 (图 1-12 是 Hunt24 星表在银河系搜寻疏散星团的区域)，采用 HDBSCAN 聚类算法识别星团成员，并得出了星团的基本天体测量参数、年龄、消光与距离等。最终，识别出 7167 个星团，其中 2387 个是新候选天体，4782 个与文献中的星团匹配，包括 134 个球状星团。通过严格筛选，最终确定了 4105 个高度可靠的星团样本，其中包括 739 个新发现的星团。Hunt 还注意到，银河系星团 (MWSC) 星表中 1152 个本应由 Gaia 数据探测到的星团并未被发现，初步推测这些星团可能并不真实存在，这与 Cantat-Gaudin 的普查结果一致。在 Hunt24 星表中，Hunt 进行了星团光度质量的完整性校正，并利用这些数据计算了星团的洛希表面大小 (即雅可比半径)，通过雅可比半径区分了受束缚和未受束缚的星团，从而发布了在 2023 年星表基础上更新的星团数据，包含了质量数据和改进的星团分类，其中包括 3530 个高质量疏散星团样本。

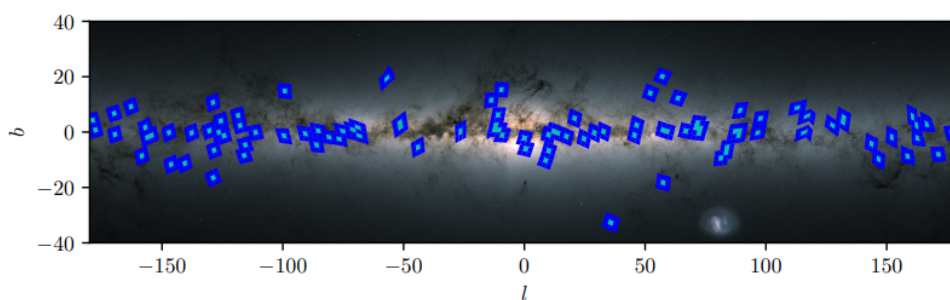


图 1-12 Hunt 在 Gaia 星表密度图上的星团搜寻目标区域。

Figure 1-12 Hunt's target cluster search area on the Gaia star catalog density map.

注：图引用自 Hunt et al. (2021)。

其次，两个星表在具有视向速度参数的成员星（星团）数目上也存在显著差异。Gaia DR3 发布了超过 3000 万颗恒星的视向速度数据，比 DR2 增加了五倍。因此，许多在 CG20 星表中没有视向速度数据的星团，在 Hunt24 星表中均得到了补充。例如，CG20 星团表包含 2017 个疏散星团的 234,128 颗成员星，其中 1190 个星团（约占 59%）提供了视向速度数据。而 Hunt24 星团表中，5647 个星团被标记为疏散星团，其中 4472 个（约占 79%）提供了视向速度参数。

由于两个星表使用了不同的数据、聚类方法和搜索范围，尽管它们可能包含相同的疏散星团，但星团成员及其成员概率会有所不同。通常，Hunt24 星团表能够识别更多来自星团中心外围的成员星，展现出一些星团的延展结构，但在大样本统计上，两个星表的星团参数并无显著差异。CG20 星表尽管包含的疏散星团数量较少，但经过大量实际应用得以验证其可靠性，如 [Niu et al. \(2020\)](#); [Alonso-Santiago et al. \(2020\)](#); [Gutiérrez Albarrán et al. \(2020\)](#); [Ferreira et al. \(2020\)](#); [Zhong et al. \(2020\)](#); [Magrini et al. \(2021\)](#); [Casamiquela et al. \(2021\)](#); [Donor et al. \(2020\)](#); [Bhattacharya et al. \(2022\)](#); [Spina et al. \(2021\)](#); [Widmark et al. \(2022\)](#) 等都基于该星表展开了一系列相关疏散星团的研究工作。Hunt24 星表则是迄今为止包含最多疏散星团的星表，尽管其中的少数星团仍需通过自行、视差、颜色-星等图和等龄线拟合等方法进一步验证，有些新发现的星团还需通过其他观测数据加以确认。

以 CG18、CG20 和 Hunt23、Hunt24 等大样本疏散星团表为基础，结合各种光谱巡天得到的恒星参数（如视向速度、成员星大气参数、金属丰度等），我们可以获得更全面、丰富的星团信息，有助于细致研究疏散星团的性质，并构建兼具测光和光谱参数的星团样本。例如，[Zhong et al. \(2020\)](#); [Fu et al. \(2022\)](#) 分别使用星表 CG18 和 CG20 结合 LAMOST 低分辨率光谱巡天数据进行研究星团的运动学、化学演化规律以及银河系径向和垂直金属丰度梯度；[Donor et al. \(2020\)](#) 使用星表 CG20 结合 APOGEE/OCCAM 高分辨率光谱巡天数据来详细讨论以疏散星团为示踪体的银盘金属丰度及多种化学元素的丰度梯度分布；[Spina et al. \(2021\)](#) 使用星表 CG20 结合 GALAH 高分辨率光谱巡天数据、[Carbajo-Hijarrubia et al. \(2024\)](#) 结合 OCCASO 高分辨率光谱巡天数据等，详细讨论了星团的金属丰度和多种化学元素丰度的分布性质，从而示踪银河系盘的金属丰度分布趋势；[Zhang et al. \(2024\)](#) 使用星表 Hunt23 结合 LAMOST 低分辨率光谱巡天数据的得到了 1000 多个星团（若按 Hunt24 分类，其中部分星团属于移动星群）的 LAMOST 视向速度和金属丰度参数等。星团表结合不同的光谱巡天数据，可用于分析和比较不同疏散星团样本的参数，从而多角度验证和了解疏散星团某些性质的一致性或存在的差异，从而推动疏散星团研究的深入发展。

总之，基于大样本疏散星团测光参数表，结合不同波长和分辨率的光谱巡天参数，在疏散星团研究中起到了基础性和关键性的作用。疏散星团星表提供了丰富的数据资源，支持了从统计研究到恒星演化、银河系结构等多个领域的研究，帮助人们能够更全面地理解疏散星团的性质和演化，进而揭示银河系的奥秘。

1.2.3 光谱巡天

尽管 Gaia 为研究疏散星团成员星提供了前所未有的高精度天体测量数据,但要获取疏散星团的其他物理参数,如成员星的视向速度、大气参数、金属丰度以及恒星在不同演化阶段的化学元素丰度等,还需依赖大量的光谱观测数据。这些参数对于研究疏散星团及其成员星的性质至关重要。虽然 Gaia 也可以提供恒星的视向速度和金属丰度,但由于其光谱范围较窄 ($845\text{nm} < \lambda < 872\text{nm}$) 且曝光时间较短,其测量深度和精度无法与专门的光谱巡天观测相媲美。Gaia DR2 发布了 700 多万颗具有视向速度数据的恒星,而当时光谱观测效率最高的望远镜 LAMOST(Zhao et al., 2012) 能提供上千万颗恒星的视向速度数据。目前, Gaia DR3 版本已经达到千万量级的视向速度数据,比 DR2 多出了五倍,但对于金属丰度、化学元素丰度等参数的精确估计(包括更高精度的视向速度和恒星大气参数)仍然有赖于专门的光谱巡天。

1.2.3.1 巡天项目

目前的大型光谱巡天项目主要有:中国自主研制的 LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope),即大天区面积多目标光纤光谱望远镜(Zhao et al., 2012; Cui et al., 2012; Deng et al., 2012; Luo et al., 2012),巡天区域在北天;欧南台(ESO)、欧空局(ESA)、英国、意大利和西班牙等国家联合的 Gaia-ESO (Gaia-European Southern Observatory Survey) 巡天(Gilmore et al., 2012; Randich et al., 2013)、英澳联合观测的南天巡天 GALAH (Galactic Archaeology with HERMES) (De Silva et al., 2015)、美国全天巡天项目 SDSS/APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) (Frinchaboy et al., 2013; Majewski et al., 2017) 和 WEAVE(Dalton et al., 2012)、以及欧南台和欧洲多各国参与的 4MOST(de Jong et al., 2012) 等。

直接与疏散星团相关的专项巡天项目有 SDSS 项目中专门用于观测星团金属丰度的子项目 OCCAM (The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping)、西班牙天文台疏散星团化学元素丰度的专项巡天 OCCASO (the Open Clusters Chemical Abundances from Spanish Observatories) 和 LAMOST 的疏散星团子项目 LAMOST-MRS-O(Liu et al., 2020; Zhang et al., 2025) 等。

APOGEE 项目依托美国新墨西哥州的阿帕奇点天文台的 2.5 米望远镜。尽管该望远镜的口径相对较小,但其通过精心设计的光谱仪系统,最大限度地发挥了观测效能。APOGEE 的观测波长范围为 $1.51\mu\text{m}$ 至 $1.70\mu\text{m}$,主要集中在近红外波段。由于该波段的光在星际介质中的消光较小,能够穿透尘埃云,观测到银河系内部及遥远区域的恒星,因此为研究银河系的结构和演化提供了宝贵的信息。APOGEE 的分辨率高达约 22500,属于高分辨率光谱观测,这使其能够精确测量恒星光谱中的细微特征,从而更准确地确定恒星的化学组成。主要观测目标为银河系晕、盘及核球区域的恒星,通过研究不同区域和不同演化阶段恒星的化学组成,揭示银河系的形成与演化历史。APOGEE 能够精确测量多种化学元素的丰

度,如铁、碳、氮、氧等几十种元素,并获得恒星的视向速度、表面重力等参数。这些元素丰度的精确测量为研究恒星的形成环境和银河系的化学演化过程提供了重要数据。

GALAH项目利用澳大利亚英澳天文台(AAO)的3.9米望远镜,结合其配备的HERMES光谱仪,实现了对大量恒星的高效观测。该望远镜的较大口径为获取高质量的光谱数据提供了基础,而光谱仪的分辨率约为28000,属于高分辨率光谱观测。GALAH的目标是覆盖可见光至近红外波段(370-785nm),能够捕捉到多种恒星光谱特征,从而精确测量恒星的有效温度、表面重力、金属丰度及数十种化学元素的丰度。GALAH的主要科学目标是研究银河系盘的形成和演化过程。它计划观测约100万颗恒星,庞大的样本量使得其研究结果具有更好的统计意义。通过对恒星的化学组成和运动学特征进行分析,GALAH能够追溯银河系的演化历史,为银河系考古研究提供了丰富的数据支持。

Gaia-ESO项目结合了地基望远镜和空间观测的优势,主要在可见光波段(470-680nm)进行光谱观测,光谱分辨率在11500至47000之间。该项目旨在全面观测银河系内的各种恒星类型,从不同演化阶段的恒星到不同位置的恒星,构建银河系的三维结构和演化模型。通过测量恒星的位置、运动、亮度和光谱信息,Gaia-ESO能够获取恒星的有效温度、表面重力和金属丰度等基本参数,并结合Gaia卫星的天体测量数据,精确测定恒星的视差、自行和径向速度等运动学参数。这些数据的综合应用,为研究恒星的演化、银河系的动力学结构以及恒星形成环境提供了重要的支持。

上述大型光谱巡天项目在多个方面展现了各自的优势,同时也相互补充。例如,APOGEE和GALAH在高分辨率光谱观测中表现突出,能够精确测量恒星的化学元素丰度,而LAMOST尽管光谱分辨率相对较低,但其高效的巡天观测能力为大规模恒星及星系普查和研究提供了海量光谱数据支持。Gaia-ESO侧重星团和银河系结构,已发布约10万颗恒星光谱,提供约20~30种元素丰度;APOGEE优先观测尘埃遮蔽区的冷巨星,已发布约70万颗恒星光谱,提供约20~25种元素丰度;GALAH聚焦场星化学演化与银河系考古,已发布约60万颗恒星光谱,约30~35种元素丰度;LAMOST侧重于银河系、恒星物理、致密天体,已发布约上千万颗恒星光谱,能够提供近20多种元素丰度。

这些项目的观测设备、波段选择和科学目标各有侧重,为天文学家提供了多样化的光谱数据支持,共同推动了人类对银河系结构、演化以及恒星性质的理解。随着设备的更新和更多高质量数据的发布,未来这些项目将为天文学研究提供更加丰富和详细的光谱信息。几个大型光谱巡天项目的基本信息如表1-2所示。

1.2.3.2 光谱巡天与疏散星团研究

研究疏散星团的性质以Gaia高精度测光数据对星团成员的精准判定为基础,而与成员星的运动学、动力学和化学性质密切相关的视向速度、金属丰度等参

表 1-2 大型光谱巡天项目

Table 1-2 Large-scale Spectroscopic Survey Project

项目	口径 (m)	光纤数	视场 (deg ²)	观测波长 (nm)	光谱分辨率 R	科学目标
LAMOST	4.9	4000	20	370-900	1800-7500	银河系, 恒星物理, 致密天体
APOGEE	2.5	300	7	151-170	22500	银河系、化学演化, 恒星形成
GALAH	3.9	392	1.5	470-790	28000	银河系形成和演化, 化学丰度
Gaia-ESO	8	132	25	370-950	11500-47000	银河系化学演化、动力学性质
4MOST	4.1	2400	4.2	370-950	5,000-20,000	银河系, 宇宙大尺度结构形成
WEAVE	4.2	1000	2	370-950	5,000-20,000	银河系, 邻近星系的化学演化

数的测定, 则依赖于光谱观测, 二者相辅相成。基于 Gaia 的测光数据, 结合各大光谱巡天的数据, 已成为当代研究疏散星团的一个重要范式, 例如 Zhong et al. (2020); Fu et al. (2022) 等工作。通过测光与光谱数据的有机结合, 研究人员对疏散星团及其成员星的运动学、动力学和化学性质有了更深入的了解。

光谱巡天, 无论其分辨率如何, 首先都可以通过光谱数据获取恒星的视向速度。视向速度是研究恒星运动学、恒星系统、恒星演化、系外行星、星系以及宇宙学的重要工具。通过视向速度, 可以揭示天体的动力学特性及其演化历史。大量成员星的视向速度不仅能够用来研究疏散星团的动力学演化, 包括质量分层和潮汐力的作用 (He, 2023c), 还能够揭示星团内双星系统的轨道特性, 例如轨道周期、偏心率和质量比 (Jiang et al., 2024) 等。此外, 大量恒星的视向速度数据还可以用来研究银河系的旋转曲线、盘结构以及晕的动力学特性等。

光谱巡天获得的另一个关键参数是恒星的金属丰度以及多种化学元素丰度, 这些数据对于研究恒星 (成员星) 的化学演化规律以及恒星、星团和银河系的形成与演化历史至关重要。在银河系研究中, 金属丰度梯度问题是一个常见的主题。由于成员星的平均金属丰度可代表疏散星团的金属丰度, 因此常被用作研究该问题的理想示踪体。通过疏散星团金属丰度随银心距分布的梯度, 可以表征银河系银盘的径向金属丰度梯度, 相关研究如 Zhong et al. (2020); Fu et al. (2022); Donor et al. (2020); Spina et al. (2018); Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) 等工作。其中 Donor et al. (2018, 2020) 利用 OCCAM 数据得到的 128 个疏散星团参数, 研究了金属丰度与银心距的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 梯度为 $-0.061 \pm 0.004 \text{ dex kpc}^{-1}$, 并发现银心距约 13kpc 处存在一个拐点 (被称为 “knee”), $R_{\text{gc}} < 13.9 \text{ kpc}$ 时梯度较陡, 而 $R_{\text{gc}} > 13.9 \text{ kpc}$ 时梯度较为平缓; Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) 利用 OCCASO 光谱数据研究了疏散星团金属丰度随银心距的梯度分布, 也发现 11.3kpc 处存在一个拐点。此外, Zhong et al. (2020) 利用 LAMOST 低分辨率光谱 (DR5) 获得了 295 个疏散星团的视向速度和金属丰度的平均值, 研究了银河系盘的径向和垂直金属丰度梯度及其随星团年龄的变化; 另有 Fu et al. (2022) 利用 LAMOST 低分辨

率光谱 DR8 提供的 386 个星团光谱参数，研究了银河系的金属丰度分布及银盘的动态演化特性。Zhang et al. (2024) 的研究也利用 LAMOST 低分辨率光谱 DR8 数据获得了超过 1000 个疏散星团的平均金属丰度和视向速度值。

1.3 研究目的和内容

随着 Gaia 时代的到来，疏散星团的研究进入了飞速发展的阶段。Gaia 的高精度天体测量和测光为星团成员提供了精确的空间位置、自行、视差（距离）等关键参数。得益于这些高精度数据，星团成员的可靠判定促使新星团的不断发现。至今，已被文献报道的银河系疏散星团数量已接近 5 千个，为研究银河系结构和星团演化提供了丰富的样本。

要全面了解疏散星团的性质，除了天体测量与测光数据之外，成员星的视向速度、金属丰度等光谱参数对于揭示星团的物理特性至关重要。尽管目前已有多个光谱巡天项目能够提供不同分辨率的恒星光谱参数，但对于研究数千个疏散星团来说，这些数据仍然显匮乏。虽然 Gaia-DR3 已经能够提供大量星团成员的视向速度，但准确可靠的恒星金属丰度及多种化学元素丰度参数仍需依赖地面光谱观测来获取。

我国自主研制的 LAMOST 光谱巡天望远镜在光谱获取能力方面展现出了独特的优势。该望远镜具有强大的观测能力，一次曝光即可获取 4000 个目标天体的光谱，从而为疏散星团的研究提供了海量的视向速度、大气参数和金属丰度等数据。在 LAMOST 的低分辨率巡天中，已有数百个 (Zhong et al., 2020; Fu et al., 2022) 至近千个 (Zhang et al., 2024) 疏散星团获得了高质量的光谱参数，这一数量远超其他光谱巡天项目的贡献。

LAMOST 中分辨率光谱巡天任务历时 5 年，于 2023 年 6 月圆满结束，并向用户发布了 DR11v1.1 数据，包含了首期（5 年）巡天的所有观测结果，不仅提供了恒星的视向速度、金属丰度和十多种化学元素丰度参数，还包括部分恒星的 $v \sin i$ （投影自转速度）值。值得注意的是，LAMOST 中分辨率光谱在视向速度参数的精度上优于 LAMOST 低分辨率巡天数据，为后续研究提供了更高的可信度。

本文主要目标是详细介绍我们深度参与的 LAMOST-II 中分辨率光谱巡天任务中的疏散星团观测子项目 (LAMOST-MRS-O)，并进一步利用 LAMOST-DR11v1.1¹ 的全部中分辨率数据，提取恒星的光谱参数（包括大气参数、视向速度、金属丰度及 13 种化学元素丰度），同时结合基于 Gaia-DR3 测光数据得到的 Hunt24 星团表所判定的成员星，来构建一个具有 LAMOST 中分辨率光谱巡天 (LAMOST-MRS) 参数的疏散星团大样本。基于该样本，对星团光谱参数作比较和统计分析，同时以样本为探针，示踪银河系金属丰度的径向梯度和垂向梯度的分布特征，这将为探究银河系的结构和演化提供重要的参考依据。

¹<http://www.lamost.org/dr11/v1.1/>

主要内容及章节安排如下：第一章引言；第二章介绍 LAMOST 光谱巡天的概况；第三章介绍 LAMOST 中分辨率巡天的疏散星团观测子项目 (LAMOST-MRS-O)，主要介绍我们对项目的观测计划、科学目标、观测策略的制定、对实施进展的跟踪以及最终对观测结果的初步讨论；第四章介绍基于 LAMOST-MRS-DR11 光谱数据和 Hunt24 星团成员，构建具有 LAMOST-MRS 光谱参数的疏散星团大样本，并对其主要光谱进行比较和统计分析；第五章是对现有工作的总结以及对未来工作的展望。

第2章 LAMOST 光谱巡天简介

大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜（LAMOST: The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope）又称郭守敬望远镜，是我国自主研发的大型特殊准子午反射式施密特望远镜，位于中国科学院国家天文台兴隆观测站。LAMOST 结合了大口径和宽视场的优势，大焦面可容纳多达 4000 根光纤，极限星等为 19 等，使得遥远且暗弱天体的光也能传输到光谱仪中。每晚的观测可获取数万条光谱，是迄今为止效率最高的光谱巡天项目之一，为天文学研究提供了海量且珍贵的光谱数据，极大地推动了天文学多个领域的发展。

2.1 LAMOST 望远镜

LAMOST 望远镜的设计包括光学系统、主动光学和镜面支撑系统、安装和跟踪系统、望远镜控制系统、焦平面仪器、望远镜罩、天文台控制和数据处理、以及输入目录和巡天策略等八个子系统。光学系统如图 2-1 所示。

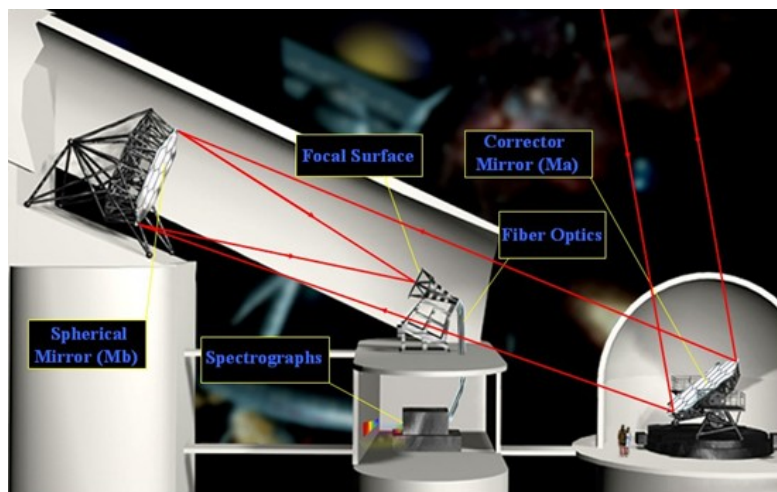


图 2-1 LAMOST 望远镜的光学系统。

Figure 2-1 The optical system of the LAMOST telescope.

注: 图引用自[LAMOST 官网](http://www.lamost.cn/)。

LAMOST 的光学系统的光轴固定沿南北子午线方向，由反射施密特改正镜（MA）、焦面和球面主镜（MB）组成。施密特改正镜 MA（5.72m×4.4m）置于北端，由 24 块六边形平面子镜组成，每块子镜的对角线直径为 1.1 米，厚度为 25 毫米。主镜 MB（6.67m×6.05m）置于南端，由 37 块六边形球面子镜组成，每块子镜的对角线直径为 1.1 米，厚度为 75 毫米，如图 2-2 所示。在 MA 和 MB 之间的焦平面是直径为 1.75m（约 5°）圆形，焦距为 20m，4000 根光纤几乎均匀分布

在其上。主镜和焦面都固定在地基上，反射改正镜跟踪天体的运动，天体在其子午圈附近被观测 (Cui et al., 2012)。

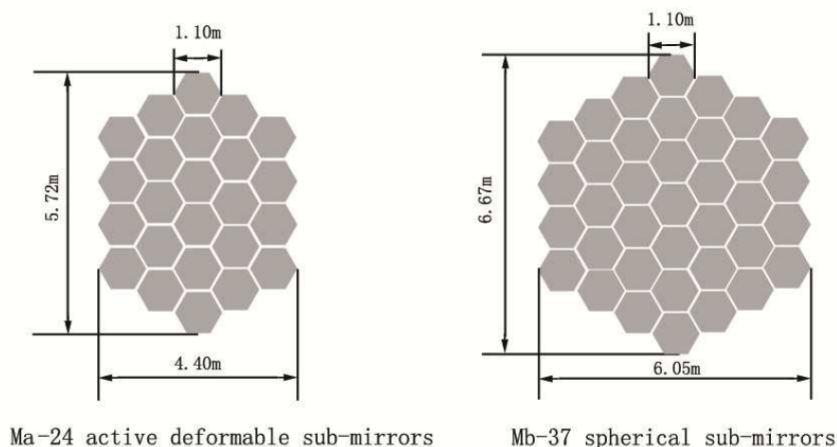


图 2-2 LAMOST 望远镜的改正镜 Ma(左) 和主镜 Mb(右)。

Figure 2-2 The corrector mirror Ma (left) and the primary mirror Mb (right) of the LAMOST telescope.

注: 图引用自Cui et al. (2012).

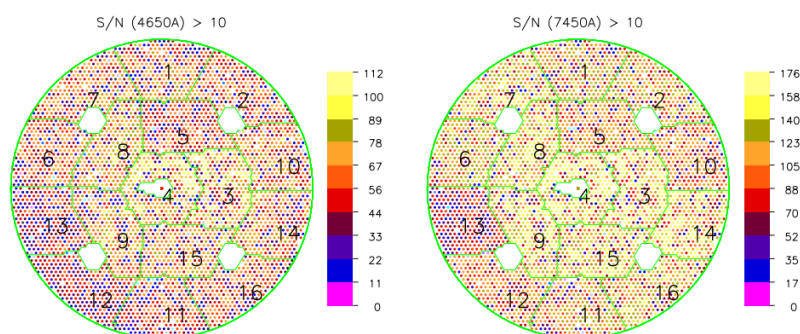


图 2-3 LAMOST 焦面上光纤分布及光纤收集光谱数示意图, 数字为光谱仪编号。

Figure 2-3 Schematic diagram showing the fiber distribution on LAMOST's focal plane and the quantity of spectra collected by the fibers, with numerical labels denoting spectrometer identifiers.

注: 图引用自Yuan et al. (2015).

位于改正镜和主镜之间的焦平面上有 16 个光谱仪 (可根据需要更换光谱仪, 从而进行不同分辨率的观测) (Zhu et al., 2000), 每个光谱仪可容纳 250 根直径为 320 微米 (对应 3.3 角秒) 的光纤 (Zhu et al., 2006), 总共 4000 根光纤均匀分布其上。如图 2-3所示的是光纤分布的一个示例: LAMOST 反银心方向巡天项目 (LSS-GAC) 中, 焦平面上不同位置的每根光纤观测到的大致光谱数目由不同颜色所显示。

2.2 LAMOST 光谱巡天概况

LAMOST 巡天根据观测目标不同,可分为两个主要部分: LAMOST 河外巡天 (LEGAS) (Zhao et al., 2012; Kong et al., 2010) 和 LAMOST 银河系结构与探索巡天 (LEGUE) (Deng et al., 2012; Chen et al., 2012; Liu et al., 2014)。LAMOST 的独特设计使其能够在单次曝光中获取 4000 条光谱, 极限星等可达 $r=19\text{mag}$, 分辨率 $R=1800 \sim 7500$, 因此具有高效地巡天恒星和星系的巨大潜力。若按光谱分辨率的不同, LAMOST 巡天可分为低分辨率光谱巡天 (此后简称 LAMOST-LRS) 和中分辨率光谱巡天 (此后简称 LAMOST-MRS) (Liu et al., 2020)。

2.2.1 LAMOST 低分辨率光谱巡天

低分辨率光谱巡天具有高效的光谱获取能力, 能够在较短时间内构建大规模天文光谱数据库。LAMOST 低分辨率光谱巡天 (LAMOST-LRS) 的波长覆盖范围为 370nm-900nm, 在 550nm 处的分辨率 $R \sim 1800$, 正式观测任务于 2012 年 9 月 28 日启动, 到 2018 年完成了第一阶段观测 (Cui et al., 2012; Zhao et al., 2012), 获得总光谱 900 多万条, 其中包括约 530 万条恒星光谱。

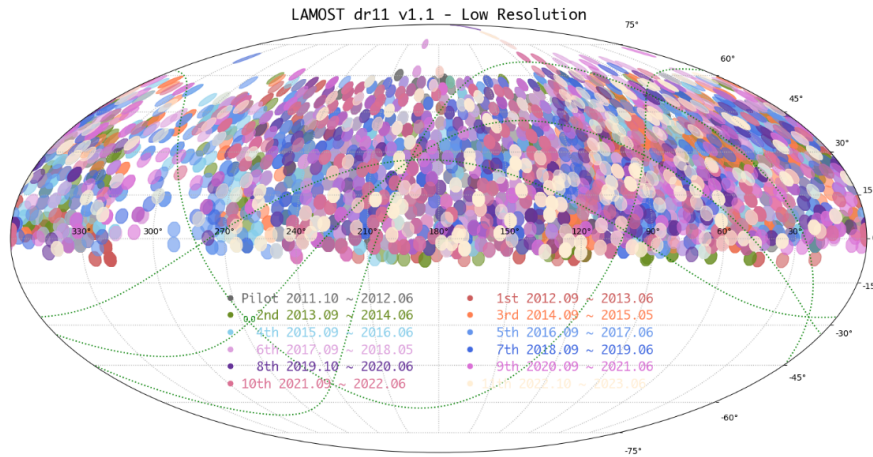


图 2-4 LAMOST 低分辨率光谱巡天区域.

Figure 2-4 The low-resolution spectroscopic survey region of LAMOST.

注: 图引用自LAMOST-DR11 官网.

LAMOST 第一、二期低分辨率光谱巡天的科学目标基本相同, 包括寻找银河系椭球体中极低金属丰度的恒星; 薄盘/厚盘恒星的运动学特征和化学丰度, 目的是推导质量分布 (包括暗物质质量)、动力学和化学演化, 以及银河盘的结构和起源; 对反银河系中心附近的盘/椭球体接口进行深入分析; 发现可能与矮星系相关的恒星运动群, 并跟踪银河椭球体中已知的星流和亚结构后续观测; 调查银河系疏散星团的属性, 包括疏散星团所探测到的银盘结构、动力学和演化; 寻找超高速恒星并确定它们的形成机制; 调查银河系中的 OB 恒星, 追踪银河系盘中的三维消光; 完整普查银河系盘上的年轻恒星体, 为大规模恒星形成及银河系

恒星形成历史提供重要线索 (Deng et al., 2012)。

图 2-4是 2024 年 9 月对内部用户发布的 LAMOST DR11 数据所对应的所有观测天区, 包含从 2012 年 9 月正式巡天开始到 2023 年 6 月结束, 历时 11 年的 LAMOST 第一、二期巡天观测任务, 几乎覆盖了整个北天球区域, 总共提供了 1194 多万条低分辨率光谱, 其中包含 1158 多万颗恒星光谱、27.54 万多条星系光谱和 8.25 万条类星体光谱。除光谱数据, 此次还发布了 11 个参数星表, 星表中包含了很多主要参数, 如赤经、赤纬、信噪比、恒星大气参数、金属丰度、视向速度、元素丰度、光谱谱线指数、光谱谱线宽度、敏感于金属丰度的参数以及标记是否存在磁活动的参数等LAMOST-DR11 官网。

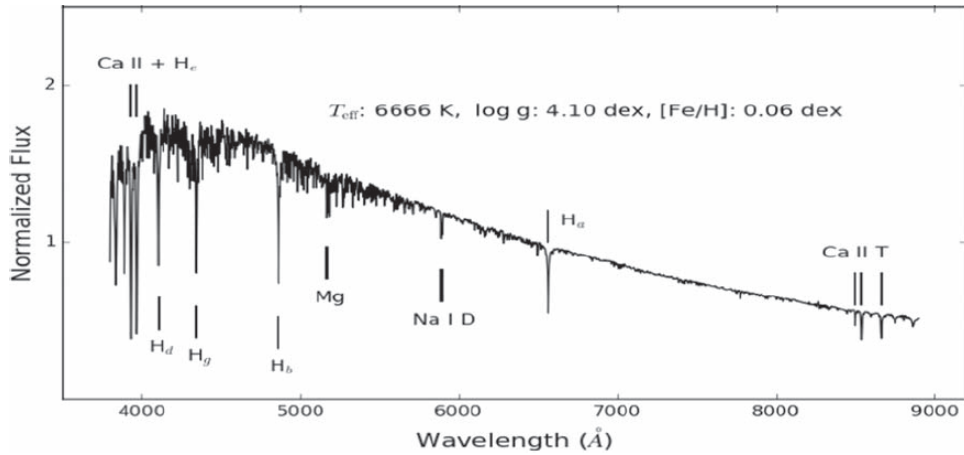


图 2-5 LAMOST 低分辨率光谱示意图.

Figure 2-5 Schematic Representation of LAMOST Low-Resolution Spectra.

注: 图引用自Du et al. (2019).

图 2-5是 LAMOST 低分辨率高温恒星的光谱示意图。利用光谱计算恒星视向速度一般使用交叉相关函数 (CCF, Cross-Correlation Function) 方法, 即把观测光谱与高信噪比的模板光谱 (如理论恒星大气模型或经验模板) 进行交叉相关分析, 通过计算互相关函数的峰值位置偏移, 确定光谱的整体多普勒位移, 这位移就对应着视向速度。观测光谱通常选取恒星光谱中显著且稳定的吸收线, 如 Ca II 三重线 (近红外波段, $\lambda=849.8, 854.2, 866.2(\text{nm})$), H_α (Balmer 线, $\lambda=656.3\text{nm}$), Mg Ib 三重线 ($\lambda=516.7, 517.3, 518.4(\text{nm})$) 等, 对不同光谱型的恒星采用适当的吸收线。具体的计算方法可以参看Du et al. (2019) 的相关文献。

2.2.2 LAMOST 中分辨率光谱巡天

中分辨率光谱巡天既覆盖广泛的天体类型, 又能够提供较为详细的天体化学信息。常用于星系、恒星、星云的观测以及进行红移测量、恒星分类、化学成分分析等。与低分辨率光谱相比, 中分辨率光谱能够平衡分辨率和波长覆盖范围, 捕捉到更多的光谱特征, 因此光谱参数如恒星视向速度等的精度比低分辨率

参数要高,而且也能够从光谱分析出更多的化学元素丰度,为研究恒星化学演化提供重要数据。

2017年,LAMOST上安装的16台光谱仪进行了升级,不仅能够支持与第一阶段巡天相同的LAMOST-LRS观测,还能进行新的LAMOST-MRS模式($R \sim 7500$)。所有光谱仪都可以在白天切换模式,以适应不同的巡天需求。LAMOST于从2018年10月正式开启了第二期巡天观测,该项目包括两个任务,即“LAMOST-LRS”和“LAMOST-MRS”光谱巡天。第二期任务将用约一半的观测时间(暗夜/灰夜)继续LAMOST-LRS巡天,用另一半观测时间(亮夜/灰夜)开展LAMOST-MRS巡天。在 $R \sim 7500$ 分辨率下,每台光谱仪上的蓝色和红色相机无法覆盖像低分辨率那样大的波长范围。蓝色相机只能覆盖495nm-535nm的波长范围,而红色相机覆盖630nm-680nm的波长范围(Liu et al., 2020)。LAMOST第二期巡天从2018年9月开始至2023年6月结束,从2023年9月开始的LAMOST第三期观测,与二期相似,同时进行着低分辨率和中分辨率两种模式的观测,将会产出更多天体的更多光谱。如图2-6所示,从2018年9月到2023年6月共观测了5年的LAMOST-MRS巡天“足迹”。

LAMOST第二期(此后用LAMOST-II)巡天任务中,将利用大约50%的观测夜进行新增加的中分辨率光谱巡天,其科学目标包括银河考古学、恒星物理学、星团、恒星形成、系外行星宿主恒星、银河星云等天体。在这些科学目标中,与其他国际空间望远镜巡天的协同作用将体现中分辨率巡天的影响,LAMOST-MRS巡天将为大量开普勒、K2和TESS观测的恒星提供地面光谱数据,将显著扩展这些任务的科学研究,并预计大幅增强其科学影响力Liu et al. (2020); Frasca et al. (2016)。

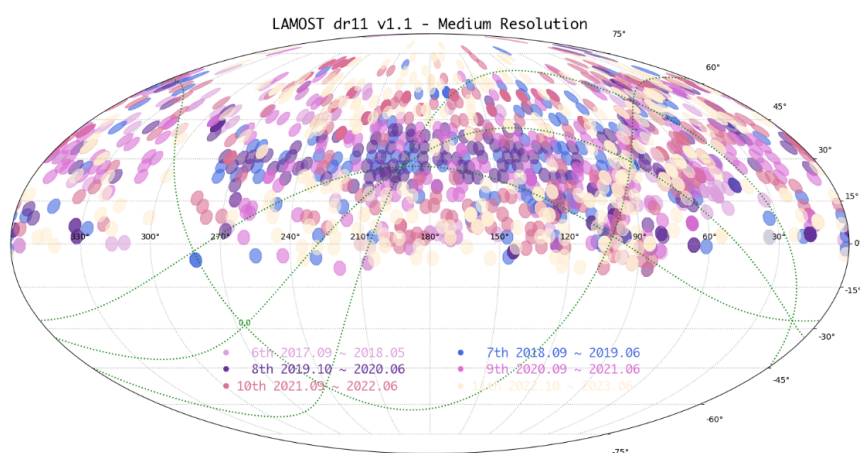


图 2-6 LAMOST 中分辨率光谱巡天区域.

Figure 2-6 The medium-resolution spectroscopic survey region of LAMOST.

注: 图引用自LAMOST-DR11 官网.

LAMOST DR11 发布了 3690 多万条单次曝光光谱和 1000 多万条合并光谱,

其中包含数百万条非时域巡天合并光谱和上千万条时域巡天单次曝光光谱。发布了五个参数星表LAMOST-DR11 官网。从中分辨率光谱“总星表”可以得到恒星的视向速度参数，视向速度的定标过程使用了Huang et al. (2018) 提供的视向速度标准星，Wang et al. (2019) 改正了光谱仪之间的系统差。由“恒星参数表”可得到恒星的大气参数、金属丰度、 α 元素丰度和 12 种元素丰度值以及信噪比大于 10 的恒星视向速度。其中恒星大气参数、金属丰度和 α 元素丰度有两套数据，分别由Wu et al. (2014) 的 LASP 和Wang et al. (2023) 的 CNN（基于卷积神经网络的标签迁移方法）估算得到的。Liu et al. (2020) 介绍中分辨率观测的基本情况中指出，晚型恒星的视向速度测量精度可达到约 1km s^{-1} ；恒星的自转可以通过中分辨率光谱以约 10km s^{-1} 的不确定性很好地检测到；波长覆盖范围使得可以测量约 20 种元素的丰度，包括 Li、C、Na、Mg、Si、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Ba、Y、Sm 和 Nd。同时，光谱的红端可以很好地覆盖 $H\alpha$ 、[NII] 和 [SII] 发射线，这对于与银河系星云（如 HII 区、超新星遗迹、行星状星云等）相关科学研究至关重要。

LASP(LAMOST Stellar Parameters Pipeline) 和 CNN(Convolutional Neural Network) 是 LAMOST 处理光谱的两种主要方法。从统计方法而言，LASP 本质上是一种最大似然法，即通过建模和光谱拟合来求参数，而 CNN 则是一种回归方法，即建立光谱流量和参数之间的经验回归关系。CNN 的精度一般稍高于 LASP，但受限于训练样本，有一定的选择效应。LAMOST 低分辨率数据完全由 LASP 方法获得，中分辨率数据则同时提供了由这两种方法得到的参数，但受限于中分辨率光谱波长范围比低分辨率窄，因此 LASP 方法从中分辨率获得的参数相对比 CNN 少，CNN 则不仅获得了比 LASP 更多的恒星视向速度，还提供了 12 种化学元素丰度。

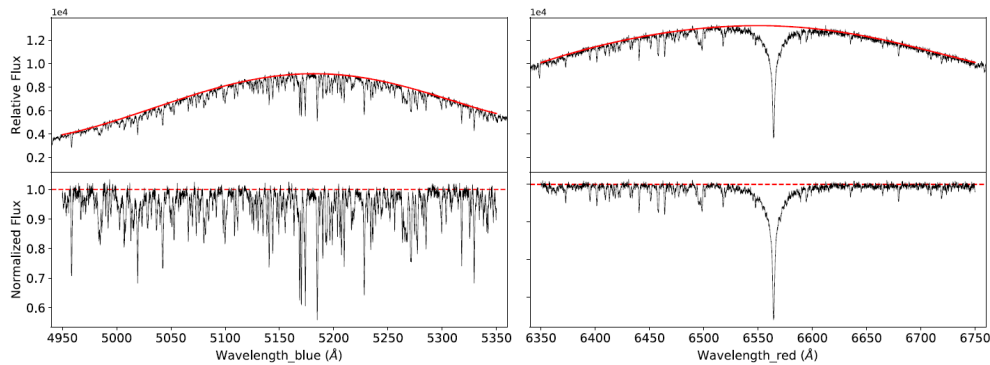


图 2-7 LAMOST 中分辨率光谱示意图 (1).

Figure 2-7 Schematic Representation of LAMOST Medium-Resolution Spectra(Part 1).

注：图引用自Wang et al. (2019).

图 2-7和 2-8分别是 LAMOST 中分辨率用于测量视向速度和元素丰度的光谱示意图。LAMOST-MRS 光谱分为蓝端（图左）和红端（图右）两个部分，视向速

度的计算通常选用蓝端的恒星吸收线 Mg Ib 三重线 ($\lambda=516.7, 517.3, 518.4(\text{nm})$) 以及红端的 H_α (Balmer 线, $\lambda=656.3\text{nm}$)。图 2-8 是用于观测元素丰度的光谱示意图, 显示出蓝端光谱吸收线 (短黑线) 明显比红端丰富。在测量元素丰度时, 主要依赖于对特定光谱吸收线的分析和建模。元素丰度测量方法通常有合成光谱拟合方法 (如 LASP 方法), 即通过理论恒星大气模型 (如 Kurucz 模型或 MARCS 模型) 生成合成光谱, 调整元素丰度、有效温度、表面重力等参数, 使合成光谱与观测光谱最佳匹配 (例如最小化 χ^2)。或者采用机器学习方法, 即结合 LAMOST 海量光谱数据, 训练深度神经网络 (如 CNN 方法), 直接从光谱特征中回归元素丰度。具体的处理方法可参考 Wang et al. (2019, 2020) 的文献。

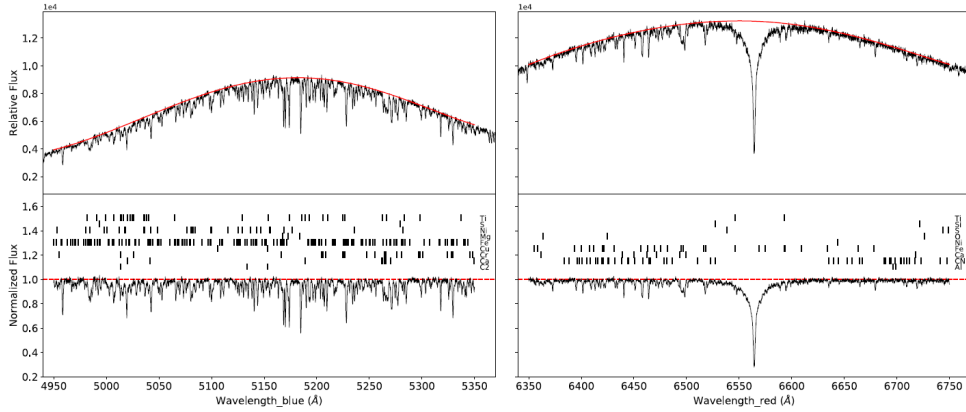


图 2-8 LAMOST 中分辨率光谱示意图 (2).

Figure 2-8 Schematic Representation of LAMOST Medium-Resolution Spectra(Part 2).

注: 图引用自 Wang et al. (2020).

2.3 基于 LAMOST 数据的疏散星团研究

疏散星团作为一种有着共同起源的恒星系统, 本身为恒星演化的理论提供了理想的检验场所; 而疏散星团作为银盘性质的“探针”, 无论是大样本的统计性质, 还是单个星团的内部运动与特性, 都会对银河系结构和演化模型提供关键性的约束。

最早在 LAMOST 巡天计划测试阶段, Chen et al. (2008, 2009) 为疏散星团的巡天计划搜集了 993 个星团样本, 接着在 LAMOST 第一期巡天任务的测试阶段, Chen et al. (2012); Hou et al. (2014) 为疏散星团观测选择了 8 个天区, 覆盖 22 个已知的疏散星团, Deng et al. (2012) 把疏散星团观测以及通过疏散星团探测银盘结构、动力学和演化列为 LAMOST 巡天的科学目标之一。Liu et al. (2020) 在 LAMOST 第二期任务中的中分辨率光谱巡天也把疏散星团的观测 (LAMOST-MRS-O) 列入子项目中, 充分体现了 LAMOST 巡天对疏散星团这类天体观测的重视。

2.3.1 大样本统计研究

利用 LAMOST 巡天数据研究疏散星团，方法之一是结合光谱参数数据库与有 Gaia 测光参数的星团表，建立大样本星团综合参数星表，并基于该样本进行统计分析。

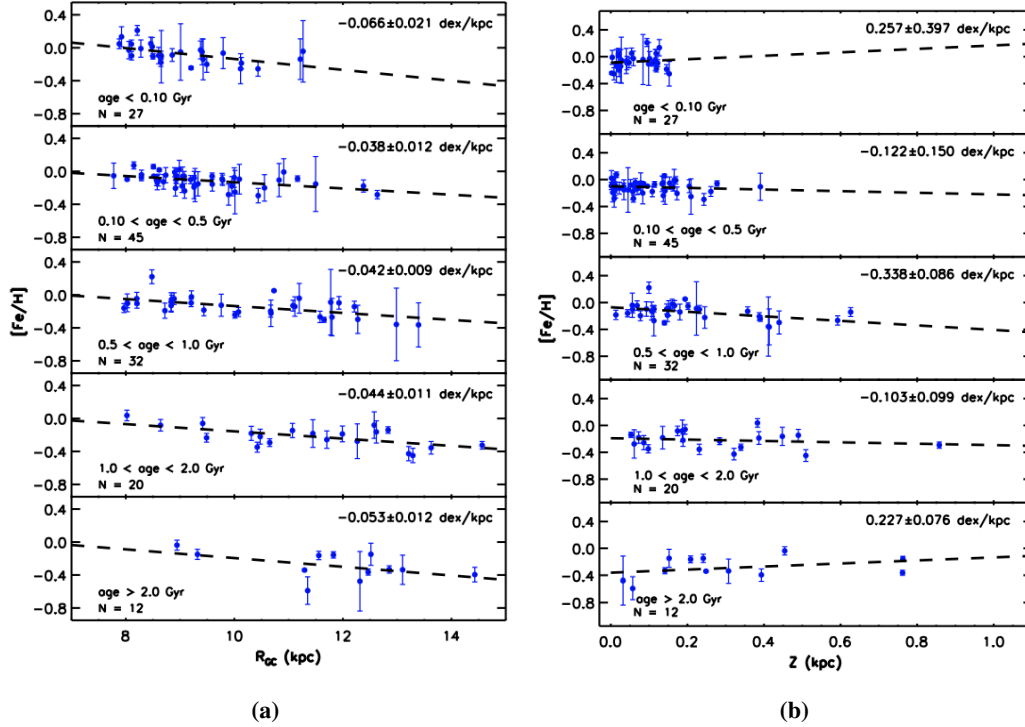


图 2-9 (a)295 个疏散星团在不同年龄段的径向金属丰度梯度 (b) 垂向金属丰度梯度。

Figure 2-9 (a) Radial metallicity gradients of 295 open clusters across different age ranges; (b) Vertical metallicity gradients.

注: 图引用自 Zhong et al. (2020).

首先利用 LAMOST 第一期巡天数据，建立疏散星团光谱参数星表的工作是由 Zhong et al. (2020) 完成的，此工作使用了 LAMOST 低分辨率 DR5 光谱数据，结合以 Gaia DR2 为测光基础的 CG18 星团表，首次获得具有 LAMOST 光谱参数的疏散星团大样本星表，包括 8811 个成员星列表和 295 个星团性质的星表。星团表参数包括天体测量参数、推导出的运动学和轨道参数、视向速度与金属丰度，以及等龄线拟合的年龄；并研究了银河系径向和垂直金属丰度梯度（图 2-9 所示）以及年龄-金属丰度关系（图 2-10 所示），得到的梯度斜率分别为 $-0.053 \pm 0.004 \text{ dex kpc}^{-1}$ 、 $-0.252 \pm 0.039 \text{ dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.022 \pm 0.008 \text{ dex Gyr}^{-1}$ 。

两年之后，Fu et al. (2022) 利用 LAMOST-II 巡天数据中的 LAMOST-LRS DR8，并结合基于 Gaia DR2 的 CG20 星团表，获得一个新的包含 386 个疏散星团的综合参数星表。该星表提供了统一使用蒙特卡洛方法确定的参数，其中包括星团的视向速度、金属丰度以及动力学性质（轨道、离心率、角动量、总能量）和

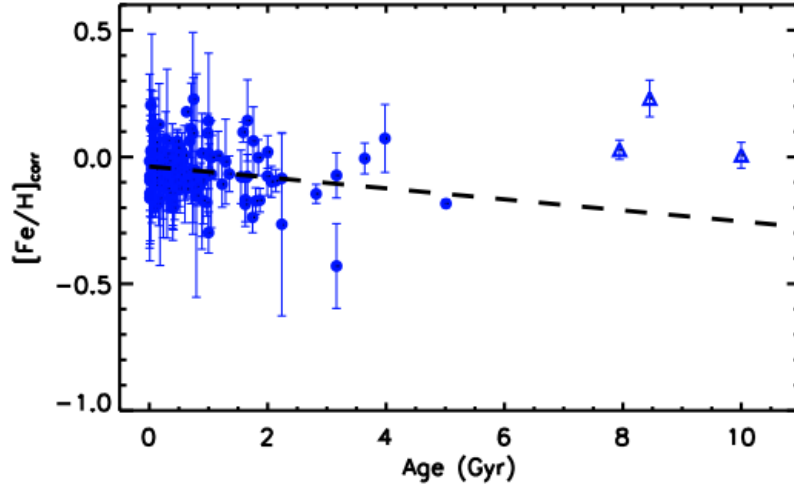


图 2-10 疏散星团的年龄-金属丰度关系: 斜率为 $-0.022 \pm 0.008 \text{ dex Gyr}^{-1}$ ($\text{age} < 0.6 \text{ Gyr}$).

Figure 2-10 The age-metallicity relation of open clusters: the slope is $-0.022 \pm 0.008 \text{ dex Gyr}^{-1}$ ($\text{age} < 0.6 \text{ Gyr}$).

注: 图引用自Zhong et al. (2020).

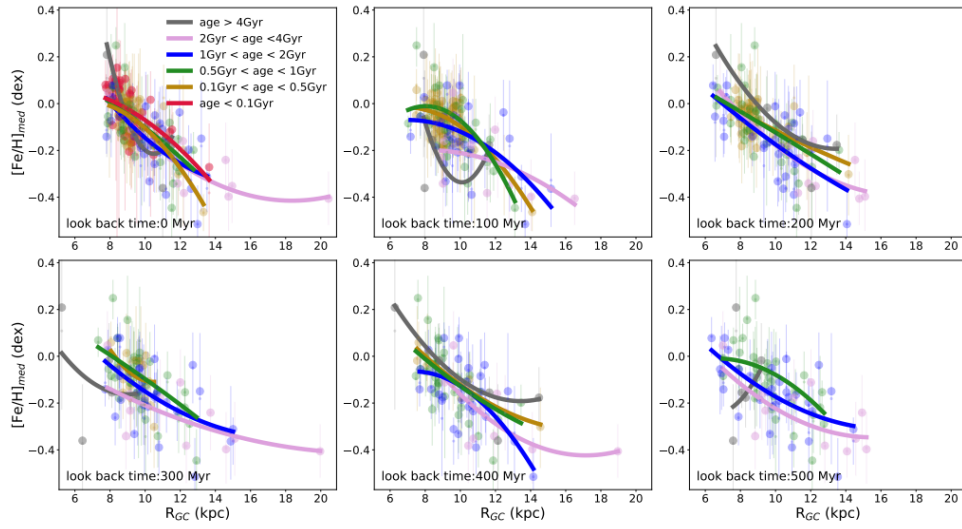


图 2-11 LAMOST 星团的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 中位值随银心距 R_{gc} 的演化分布.

Figure 2-11 The evolutionary distribution of the median metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$ of LAMOST clusters as a function of Galactocentric radius (R_{gc}).

注: 图引用自Fu et al. (2022).

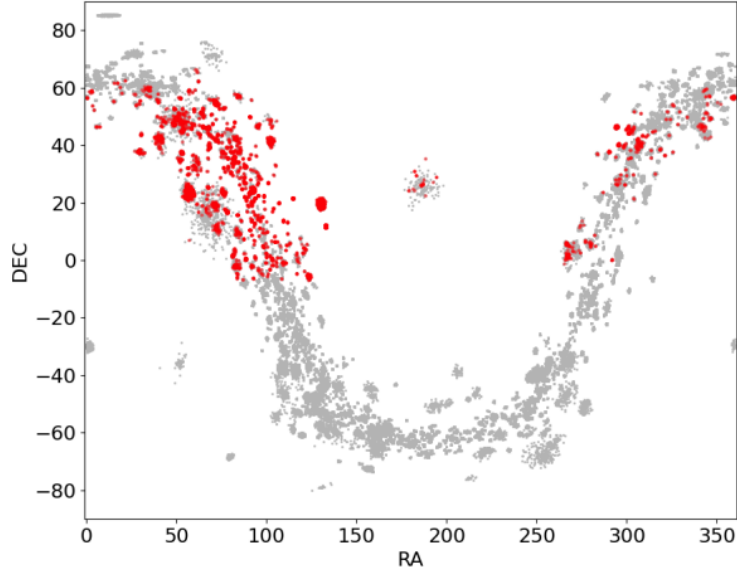


图 2-12 具有 LAMOST-LRS 光谱参数的疏散星团成员星 (红点) 与 Cantat-Gaudin et al. (2020) 星团成员星 (灰点) 的天区覆盖图.

Figure 2-12 Sky coverage map of member stars in open clusters with LAMOST-LRS spectroscopic parameters (red dots) and member stars in cluster Cantat-Gaudin et al. (2020) (gray dots).

注: 图引用自 Fu et al. (2022).

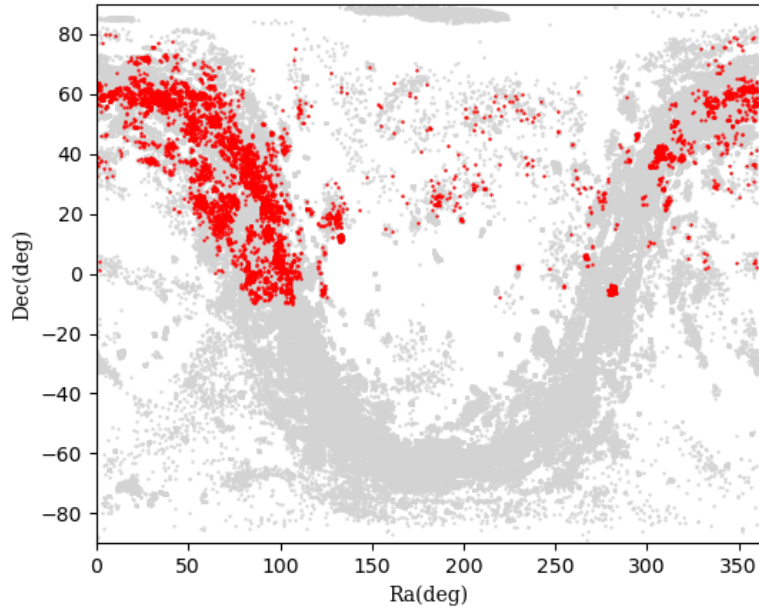


图 2-13 具有 LAMOST-MRS 光谱参数的疏散星团成员星 (红点) 与 Hunt et al. (2024) 星团成员星 (灰点) 的天区覆盖图.

Figure 2-13 Sky coverage map of member stars in open clusters with LAMOST-MRS spectroscopic parameters (red dots) and member stars in cluster Hunt et al. (2024) (gray dots).

三维银河系坐标内的速度。这些参数首次为 44 个星团确定了平均视向速度，以及首次为 137 个星团提供了金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 。图 2-11 展示了不同年龄星团的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 梯度分布在 5 亿年间随时间演化的可能趋势，图 2-12 则展示了这 386 个疏散星团的所有成员星（红点）在银河系中的分布，灰点是 CG20 星团表的成员星 (Fu et al., 2022)。

近期对疏散星团大样本光谱参数的研究来自 Zhang et al. (2024) 的工作，即结合基于 Gaia DR3 的 Hunt23 星团表，从 LAMOST DR8 低分辨率光谱数据库中选择 1131 个距离太阳 3 千秒差距以内的疏散星团，并使用人工神经网络结合 GALAH-DR3 高分辨率光谱数据来校正 LAMOST 恒星金属丰度参数，获得星团成员的可靠 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值。

图 2-13 展示的是本文工作得到的星团成员星在银河系上的分布。8 千多颗成员星（红点）具有 LAMOST 中分辨率光谱参数，分属 1033 个疏散星团；灰色点为 1 百多万颗 Hunt24 星表的成员星。与图 2-12 相比较，红点和灰点的数量显著增加，彰显了疏散星团在银河系版图中的急剧扩张，以及各种巡天观测对疏散星团研究提供的强大数据支持。

基于 LAMOST 光谱参数的大样本疏散星团的研究，其意义不仅在于能够获得具有光谱参数的星团表，为统计分析或具体星团的研究提供较全面的数据库，还在于星团样本能够示踪银河系金属丰度梯度，为银盘结构以及化学演化理论模型提供可靠的观测约束。

2.3.2 星团中的特殊恒星研究

利用 LAMOST 光谱参数研究疏散星团成员星的物理性质，可以通过多种途径。比如根据色球活动指数，可以深入了解恒星的磁活动现象，包括磁场的起源、结构、演化，以及了解恒星大气活动、恒星内部结构等性质，如 Fang et al. (2018) 利用 Pleiades（昴星团）、M34、Praesepe（鬼星团）和 Hyades（毕星团）成员星的 LAMOST 光谱，研究色球活动如何随着质量和自转在不同年龄下的变化；Zhang et al. (2019) 在 LAMOST 巡天中识别了 90 多个疏散星团的成员星，计算了 82 个疏散星团中 1091 颗成员星的色球活动指数；Zhao et al. (2015) 对 LAMOST DR1 的 119,995 颗 F、G 和 K 型恒星计算了色球活动指数 SHK，并用年轻和年老的疏散星团进行了对比验证；Cordoni et al. (2024) 利用 Gaia DR3 的数据，在 32 个年龄小于 24 亿年的银河系疏散星团样本中研究了主序拐点展宽（eMSTO）的恒星自转速度，并评估了它们与 LAMOST 光谱中磁活动测量结果的相关性；Núñez et al. (2023) 利用星团的 X 射线、GALEX 紫外线、以及包括 SDSS、LAMOST 和 Hiltner 望远镜进行的多年观测活动数据，对距离地球 250 秒差距内最古老（约 700 百万年）的疏散星团毕星团和鬼星团中的成员星进行磁活动与自转之间的依赖关系研究。

此外，还有很多关于疏散星团双星的研究，如 Niu et al. (2020) 利用 LAMOST 的低分辨率光谱数据和 Gaia DR2 测光数据，选择 12 个疏散星团来研究它们的基

本参数和双星成分 (BFs); [Niu et al. \(2023\)](#) 以疏散星团 M44 为样本, 利用 Gaia 宽距双星, 发现 LAMOST 低分辨率光谱和 Gaia RVS 光谱的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和 $[\alpha/\text{Fe}]$ 测量值存在与温度相关的偏差; [Paunzen et al. \(2021\)](#) 对食双星系统 BD+09 1467 的研究, 并通过使用 LAMOST 的光谱数据以及自己的观测数据证实了该星是处于零龄主序的疏散星团 NGC 2264 的成员; [Kovalev et al. \(2022\)](#) 提出了一种通过光谱拟合得到的 $V_{\text{sin}i}$ 值来检测双谱线光谱双星 (SB2s) 的新方法, 并用 LAMOST 中分辨率合并光谱进行了测试, 在疏散星团 M11 中发现了一个新的 SB2 候选对象。

2.3.3 星团性质研究

对具有较多观测参数或是性质独特的星团的研究, 相关报道如 [Ye et al. \(2021\)](#) 利用 Gaia DR2 数据, 采用 Clusterix2.0 和 HDBSCAN 算法识别了疏散星团 Stock 2 的 1325 个成员星, 得到 LAMOST DR7 中分辨率提供的星团平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$; [Gao \(2020\)](#) 对可能有潮汐尾结构的老年疏散星团 M67 进行了研究; [Bisht et al. \(2021\)](#) 利用 CCD UBVI 光度学首次研究了中等年龄疏散星团 SAI 35 (Juchert 20) 和 [Singh et al. \(2021\)](#) 利用 LAMOST 数据推算疏散星团 Coma Ber 的金属丰度和星际红化, 估算星团年龄; [Boyle et al. \(2023\)](#) 分析 TESS、Gaia 和 LAMOST 的数据组合, 在疏散星团 α Persei 的年龄范围内校准基于自转周期的年龄测定方法 (gyrochronology), 并揭示该星团的真实形态等。

双星团或多星团的研究, 如 [Hu et al. \(2025\)](#) 利用 Gaia 数据, 发现一个新的年轻 (约 8.9 百万年) 星团对, ASCC 19 和 ASCC 21, 这两个星团的三维距离、年龄相同, 有相似的视向速度以及金属丰度 (来自 LAMOST-DR11 低分辨率和高分辨率), 两个星团可能起源于同一分子云的碎片, 形成了一个原始星团对; [Ye et al. \(2022\)](#) 使用 Gaia 和 LAMOST-LRS 的数据对疏散星团 UPK 39、UPK 41 和 PHOC 39 的光度、红化和消光进行了研究, 估算了它们的年龄, 自行和视向速度, 认为 UPK 39 和 UPK 41 是原初双星团, 而 PHOC 39 未来可能会俘获这对疏散星团。

还有一类相关疏散星团的研究, 是用星团来验证某些参数的估算方法以及某些数据处理技术和方法的可靠性。例如, 疏散星团的年龄可通过星团颜色-星等图, 进行等龄线拟合得到可靠值, 因此也成为检验恒星年龄的标准, 相关研究如 [Casamiquela et al. \(2024\)](#) 利用公开版本的 SPInS 代码, 为 LAMOST DR8 低分辨率和中分辨率巡天中的 35,096 颗亚巨星和 243,768 颗主序星拐点的恒星确定了可靠的年龄估计, 并用 14 个疏散星团和球状星团的 4000 多颗成员星验证了方法的可靠性; [Wang et al. \(2024\)](#) 基于梯度提升决策树 (GBDT) 算法估计了 LAMOST DR8 红巨星分支 (RGB) 恒星的年龄, 经疏散星团的年龄进行检验, 不确定性约为 15%~30%。

用疏散星团验证数据处理技术可靠性的研究, 如 [Du et al. \(2021\)](#) 利用 BT-Settl 模型网格, 开发的 LASPM 管道, 旨在从 LAMOST 低分辨率光谱中测量 M 型星

的大气参数 (T_{eff} 、 $\log g$ 、 $[M/H]$)，并通过疏散星团 NGC 632、Melotte 22、ASCC 16 等的成员星验证了 LASPM 的可靠性；Zhou et al. (2023) 通过筛选 APOGEE 和 LAMOST 巡天的 254,882 颗明亮红巨星分支 (LRGB) 恒星组成的样本，结合 2MASS 和 Gaia 巡天的光度和天体测量信息，采用监督式机器学习算法（梯度提升决策树），精确确定了样本恒星的距离，并利用球状星团和疏散星团的成员星测试了距离的准确性。

2.4 小结

LAMOST 光谱巡天，以其大天区覆盖范围和高效率的光谱获取能力，显著推动了天体物理研究的进展。光谱数据不仅涵盖了不同类型的天体（如恒星、星团、星系、类星体等）以及它们的多维信息（如光谱特征、运动学参数等），还为研究提供了长期、连续的观测基础。LAMOST 的光谱数据广泛应用于银河系结构、恒星形成、星系演化、暗物质等多个研究领域，成为理论研究的重要验证工具和构建新理论的基础。

LAMOST 光谱巡天通过为数千万颗恒星建立详细的光谱参数数据库，为银河系疏散星团的物理和化学性质研究提供了极大的观测支持。通过低分辨率光谱巡天，LAMOST 为疏散星团提供了大量的视向速度和金属丰度数据，而中分辨率光谱巡天则进一步提高了这些参数的精度，并测量了十几种其他化学元素的丰度。这些数据不仅为研究疏散星团及其成员星的形成、演化、动力学和化学成分提供了重要支持，还为构建大样本疏散星团光谱参数星表奠定了坚实的基础，进而有助于揭示银河系银盘的结构特征及其径向金属丰度梯度，加深我们对银河系演化的理解。

未来，LAMOST 光谱巡天将继续凭借其高效的光谱观测优势，推动天文学各领域的深入研究。随着观测技术的不断进步，LAMOST 光谱巡天有望结合一系列新技术，进一步提升观测能力和数据精度。同时，这些技术的进步将促进更加高效和先进的数据处理算法及软件工具的开发，从而为疏散星团、恒星演化、银河系结构与演化等天文学各领域的研究作出积极的贡献。

第3章 LAMOST 中分辨率疏散星团观测

疏散星团的成员星在年龄、距离、速度和化学成分等方面具有相似性，但类型各异，涵盖不同质量和演化阶段，这使得它成为研究恒星形成和演化的理想场所。此外，疏散星团广泛分布于银盘，能够有效示踪银盘的动力学特性和金属丰度的分布与变化，这些独特的性质吸引人们利用多种探测手段和观测数据进行深入研究。

自 2018 年 Gaia DR2 数据发布以来，凭借高精度的天体测量和测光数据，疏散星团成员星判定结果的可靠性得到了显著提升，从而极大地推动了疏散星团的研究。然而，进行深入探究疏散星团及其成员星的性质，仍需要通过光谱观测获取更多关于成员星的重要物理信息，如视向速度、大气参数、元素丰度和自转速度等。尽管国外的光谱巡天项目（如 APOGEE、GALAH、Gaia-ESO 等）具有较高的分辨率，但其光谱数据量有限，无法充分满足由大量不同光谱型成员星组成的疏散星团研究需求。相较之下，LAMOST 巡天能够提供海量的光谱数据，并且覆盖较长的观测波长范围，这为疏散星团的研究提供了极为宝贵的数据支持。

LAMOST 中分辨率疏散星团观测项目简称 LAMOST-MRS-O，是 LAMOST 第二期新增中分辨率光谱巡天任务中的一个子项目。我们设计了 LAMOST-MRS-O 针对疏散星团天区采用多次采样的观测模式，即在同一天区采用变换光纤位置的方式重复进行观测。这种观测模式能够尽可能多地观测到不同的星团成员，从而提高星团成员星的采样率。LAMOST-MRS-O 通过获取成员星的中分辨率光谱，能够比之前观测的低分辨率 LAMOST 光谱更精确地提供视向速度（老年恒星的测量精度可达近 1 km s^{-1} ）、大气参数和金属丰度，以及多种化学元素丰度（数十种）(Liu et al., 2020) 等。此外，LAMOST-MRS-O 项目旨在获得更高完整度的星团成员光谱样本（ $G_{\text{mag}}=9\sim 15\text{mag}$ ），这将为研究星团特性以及恒星形成和演化、示踪银河系银盘径向金属丰度梯度等提供非常重要的数据支持。

本人作为 LAMOST-MRS-O 项目的主要参与者，在项目主持人的指导下，深度参与了观测天区和星团成员星的筛选、巡天策略的规划设计、对观测执行情况的追踪、观测数据的整理和观测完备度的分析等工作。本章主要内容将具体介绍这项工作。

3.1 LAMOST-MRS-O 项目

LAMOST 能够同时获得约 4000 个天体的光谱信息，在大样本光谱巡天方面具有独特优势。然而，对于疏散星团天区的特定观测，根据对 LAMOST 低分辨率巡天数据（DR5）结果的分析，在低银纬（ b ）区域（ $-10^\circ < b < 10^\circ$ ）的平均采样密度约为每平方度 280 颗恒星。由于 LAMOST 焦面板上的光纤分布近乎均匀，大多数疏散星团在半数目半径范围内（平均尺度约为 10 角分）采样的恒星

数量仅为10颗左右 (Zhong et al., 2020)。成员星的低采样率将严重限制相关星团研究工作的开展。

为了解决上述问题，LAMOST-MRS 于2018年9月启动了疏散星团观测子项目 (LAMOST-MRS-O)。观测星等范围为 $G_{\text{mag}}=9\sim 15\text{mag}$ ，成员星的采样密度可达每平方度约1000~2000颗。考虑到LAMOST的光纤密度为约每平方度200根，计划对同一星团天区的不同成员星使用多次观测模式进行。对于每个天区，总观测次数将不少于8次，因此预计在星团区域 (约10角分) 内观测到的成员星总数将超过50颗。基于此观测方案，星团特性的统计分析将得到显著改善。同时，在LAMOST改变光纤位置进行多次观测模式下，星团天区中的部分恒星不可避免地会经历重复观测。这也将为研究星团成员星和场星的时域特性提供宝贵数据。

与LAMOST低分辨率光谱相比，LAMOST中分辨率光谱有望以更高的精度获取更多元素丰度和恒星大气参数。例如，在信噪比 $S/N \geq 10$ 的条件下，视向速度的精度约为 1km s^{-1} ， $[\text{Fe}/\text{H}]$ 约为0.06 dex，其他元素丰度约为0.06–0.12 dex，恒星表面重力约为0.17 dex，有效温度约为110K (Wang et al., 2020)。

3.1.1 科学目标

近年来，利用高精度的Gaia天体测量和测光数据，越来越多的疏散星团被发现 (Bica et al., 2019; Cantat-Gaudin et al., 2020; Liu et al., 2019a; Castro-Ginard et al., 2021; Qin et al., 2021, 2023; He et al., 2021, 2022; Hunt et al., 2023, 2024)。星团的数量得到了极大的扩展。随着疏散星团成员星识别可靠性和完整性的提高，越来越多的星团被观测到具有潮汐尾结构 (Röser et al., 2019b,a; Carrera et al., 2019; Zhang et al., 2020; Bai et al., 2022)，甚至原始延展结构 (Zhong et al., 2019)。特别是，除了发现星团区域比以前更加延展外，还发现大部分疏散星团的径向密度分布可以用双成分分布来描述，这表明疏散星团的延展结构不仅仅是核心成分的简单延伸，而可能具有不同的起源或动力学演化特征 (Zhong et al., 2022)。这些对星团的新认识和发现需要更多的观测和深入研究。

结合盖亚 (Gaia) 数据，LAMOST-MRS-O项目将观测更多的星团成员光谱，并获取成员星的视向速度、大气参数 (有效温度，表面重力) 和化学丰度等，这将为全面理解星团成员星的物理特性提供独特的贡献。此外，基于成员星的三维速度、空间分布和化学丰度，还可统计研究星团的动力学瓦解过程 (Odenkirchen et al., 2003)、星团的延展结构 (Zhong et al., 2019; Bai et al., 2022) 以及星团的化学演化特征 (Zhong et al., 2020)。

此外，LAMOST-MRS-O项目可能为某些星团提供高度完整的成员星光谱，特别是在外围区域，这对于各类恒星的统计研究具有重要的科学意义，如造父变星 (Pietrukowicz et al., 2021; Hao et al., 2022a; Lin et al., 2022)、Be星 (Tarasov et al., 2012; Lin et al., 2015)、蓝离散星 (Sindhu et al., 2018; Rain et al., 2020, 2021; Li et al., 2023, 2024)、红团簇星 (Chen et al., 2017, 2020; Magrini et al., 2021) 和金牛T型星

表 3-1 LAMOST-MRS-O 计划观测天区

Table 3-1 Planned survey fields of LAMOST-MRS-O

Plan ID	Central Star	R.A.(2000)	Decl.(2000)	Nstar	Nocs	N_memb	Remark
NT002740+583314C	HIP 2191	00:27:40.51	+58:33:14.08	23927	8	992	Y
NT014347+555239C	HIP 8081	01:43:47.05	+55:52:39.11	25538	4	885	Y
NT014355+602612C	HD 10474	01:43:55.05	+60:26:12.23	24349	13	1315	
NT021558+581737C	HD 13744	02:15:58.69	+58:17:37.00	24592	13	3186	Y
NT024142+552853C	HIP 12575	02:41:42.76	+55:28:53.76	18401	6	904	Y
NT024709+603414C	HIP 13004	02:47:09.67	+60:34:14.74	16096	20	1948	
NT033932+592643C	HIP 17075	03:39:32.64	+59:26:43.51	11761	5	782	Y
NT041712+505156C	HIP 19986	04:17:12.30	+50:51:56.95	13220	9	767	Y
NT043052+443610C	HIP 21062	04:30:52.88	+44:36:10.98	13944	4	923	
NT045451+440349C	HIP 22842	04:54:51.22	+44:03:39.56	18941	11	1446	Y
NT052826+344150C	HIP 25624	05:28:26.39	+34:41:50.93	20667	15	2961	Y
NT054955+314708C	HIP 27538	05:49:55.53	+31:47:08.66	23671	10	1616	
NT061047+133934C	HIP 29310	06:10:47.36	+13:39:34.09	20206	18	1227	Y
NT061156+231225C	HIP 29425	06:11:56.25	+23:12:25.42	20727	13	2178	
NT063435+045804C	HIP 31363	06:34:35.61	+04:58:04.87	21081	15	1801	Y
NT184324-054140C	HD 173005	18:43:24.07	-05:41:40.52	43882	19	3379	
NT194619+222809C	HIP 97289	19:46:19.48	+22:28:09.95	22572	11	1209	
NT200015+295514C	HIP 98460	20:00:15.53	+29:55:14.30	33955	9	1311	

NOTES: 表引用自Zhang et al. (2025).

“Nstar”表示所有恒星的数量，而“Nmemb”表示计划观测的疏散星团成员星的数量；
字母“Y”表示截至目前已完成观测的区域。

(Preibisch et al., 2005; Maucó et al., 2018) 等。特别是对于疏散星团中恒星演化的一些独特现象，如锂耗竭 (Smiljanic et al., 2010; Romano et al., 2021)、延展的主序拐点 ((Li et al., 2019; Sun et al., 2019; He et al., 2023a) 等，LAMOST 中分辨率光谱的锂丰度和恒星自转速度测量结果将为这些研究提供重要的数据支持。

3.1.2 观测计划和策略

为了在 LAMOST-MRS-O 项目中获取大量星团成员的光谱，我们选择了 18 个与疏散星团相关的天区（以下简称 OCs 天区，如表 3-1 所示）。每个 OCs 天区包含至少 4-5 个疏散星团，总计约 180 个星团及成员取自 Cantat-Gaudin et al. (2018)（以下简称 CG18），以及 397,356 颗 ($G_{\text{mag}} < 15 \text{mag}$) 包括成员星和场星的恒星。由于大多数疏散星团位于银河系盘面附近，18 个 OCs 天区大部分分布在低银纬区域，且集中在反银心方向 ($130^\circ < l < 240^\circ$ ，且 $-10^\circ < b < 10^\circ$ ，其中 l 和 b 分别表示银经和银纬)，距离银河系中心约 8 至 14 千秒差距，年龄范围在 30 Myr 至 1 Gyr 之间，如图 3-1 所示。每个天区的重叠部分不超过 10%。基于每个天区 20 平方度的覆盖范围，LAMOST-MRS-O 项目的总覆盖面积约为 360 平方度。

LAMOST-MRS-O 项目于 2018 年 9 月启动，并于 2023 年 6 月结束，历时五年。每年的观测时间从当年 9 月持续至次年 6 月中旬。LAMOST-MRS-O 项目被归类为非时域观测模式（以下简称 NT 模式），安排在灰夜进行。由于 NT 观测

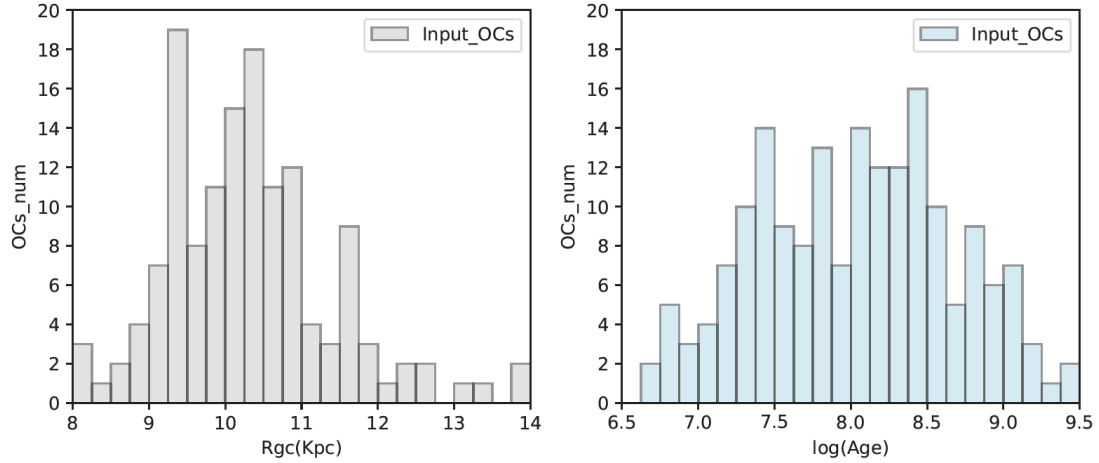


图 3-1 LAMOST-MRS-O 项目计划观测的 180 多个星团的空间 (左图) 和年龄分布 (右图).
Figure 3-1 Spatial (left panel) and age (right panel) distributions of the over 180 star clusters planned for observation in project LAMOST-MRS-O.

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

模式不依赖单次曝光信息, 可以对同一颗恒星的多条单次曝光光谱进行叠加, 以获得更高的信噪比 (S/N)。通常情况下, LAMOST-MRS-O 的一个观测天区会连续进行三次曝光, 每次曝光 1200 秒, 总曝光时间为 3×1200 秒, 最后将光谱进行合并。这样在信噪比 $S/N \sim 10$, 可以使光谱蓝端达到 $G = 14.5\text{mag}$ 、红端达到 $G = 15\text{mag}$ 的极限星等。在观测策略方面, 为了提高成员星的采样率, 通过调整光纤排布进行八次光谱观测, 所获取的星团成员星的完整度将提高至 70%, 极限星等可达到 $G = 15\text{mag}$ 。

3.2 观测进展

LAMOST DR11 v1.1 版本于 2024 年 9 月发布¹, 其中包含了从 2018 年 10 月底至 2023 年 6 月的中分辨率光谱数据。LAMOST DR11 v1.1 提供了超过 1000 万条中分辨率光谱, 其中超过 258 万条光谱具有大气参数。数据发布中包含两种星表: 一种是总星表 (general catalog), 仅包含视向速度等基本信息; 另一种是恒星参数表 (stellar catalog), 除了视向速度还提供了大气参数以及 13 种不同化学元素的丰度信息。

在 LAMOST DR11 中, LAMOST-MRS-O 项目内的十个疏散星团 (OCs) 天区已完成观测任务, 如图 3-2 所示, 淡蓝色天区是 10 个已完成观测天区, 黑点是每个天区的定标中心星。具体而言, 每个 OCs 天区均进行了八次不同光纤排布的观测, 以期通过这样的观测模式观测到尽量多的恒星。总星表包含了分布在十个星团天区 133,792 颗恒星的 235,184 条合并光谱, 这些光谱包含蓝端或红端

¹<http://www.lamost.org/dr11/v1.1/>

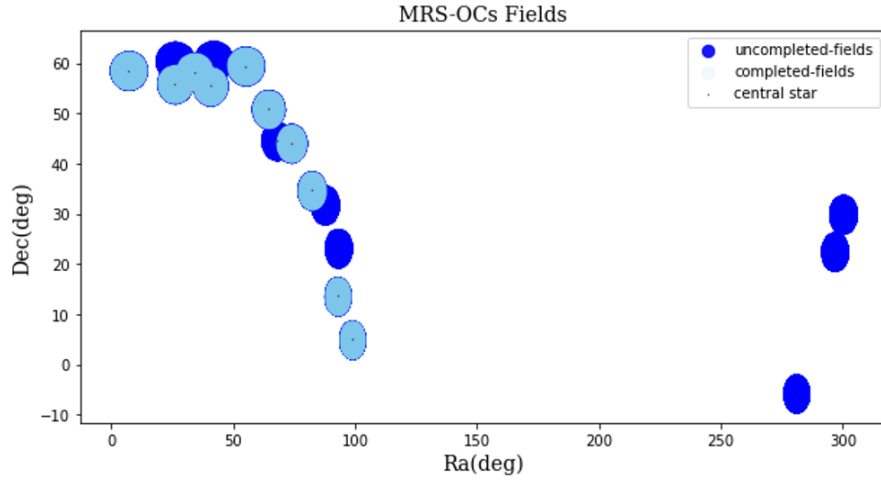


图 3-2 LAMOST-MRS-O 项目: 计划观测 18 个天区, 已完成十个天区的观测 (淡蓝).

Figure 3-2 Project LAMOST-MRS-O: 18 survey fields planned for observation, with ten fields completed (light blue).

的详细信息, 且所有光谱的信噪比 $S/N \geq 5$ 。此外, 恒星参数星表包含了相同十个星团天区内 67,318 颗恒星的 105,068 条光谱, 几乎所有光谱的信噪比 ($S/N \geq 10$), 并提供了视向速度、大气参数、金属丰度 ($[M/H]$ 、 $[Fe/H]$) 以及 12 种其他化学元素的丰度信息, 这为深入研究星团特征和恒星演化提供了重要支持。

3.3 观测的完备性

在 $G_{\text{mag}} = 9 \sim 15 \text{ mag}$ 的范围内, 输入星表中的大多数恒星已成功完成观测 (参见图 3-3 左侧), 这表明观测计划得到了有效实施。在十个 OCs 天区中, 计划观测的恒星数量为 197,357 颗 (灰色直方图), 而实际观测的恒星数量为 133,792 颗 (红色直方图), 完成率达到了约 70%。图 3-3 右侧展示了被观测恒星在每一星等区间内相对同天区 Gaia DR3 恒星数目的相对完备率。对于星等在 $10 \text{ mag} \sim 13 \text{ mag}$ 之间的恒星, 其观测完备率可超过 75%。此外, 图 3-4 绘制了十个 OCs 天区中恒星观测次数的直方图。这些天区中的大多数恒星被观测了至少 1~2 次, 这与预先设定的星团区域观测策略相符。对于那些被多次观测的恒星, 其光谱可用于研究视向速度的变化以及参数测量的稳定性, 从而为后续的天文研究提供宝贵的数据支持 (Zhang et al., 2025)。

为了进一步研究星团成员的观测完备率, 利用 Cantat-Gaudin et al. (2020) (以下简称 CG20) 中的疏散星团成员星表, 并与 LAMOST-MRS-O 十个天区观测到的恒星进行了误差直径为 3 角秒的交叉匹配, 从而获得了属于 89 个星团的 2170 颗成员星。其中, 约 73% 的成员星 (约 1577 颗) 具有 LAMOST 测量的视向速度。图 3-5 展示了观测到的星团成员相对同一星等区间内的 CG20 星团成员的完备率, 结果显示, 十个天区内星等在 10 mag 至 13 mag 之间的大多数星团, 约 70% 的成员星被观测到。

以疏散星团 Stock 2 为例, 在图 3-5 的右侧展示了其观测完备率。在 $G_{\text{mag}} =$

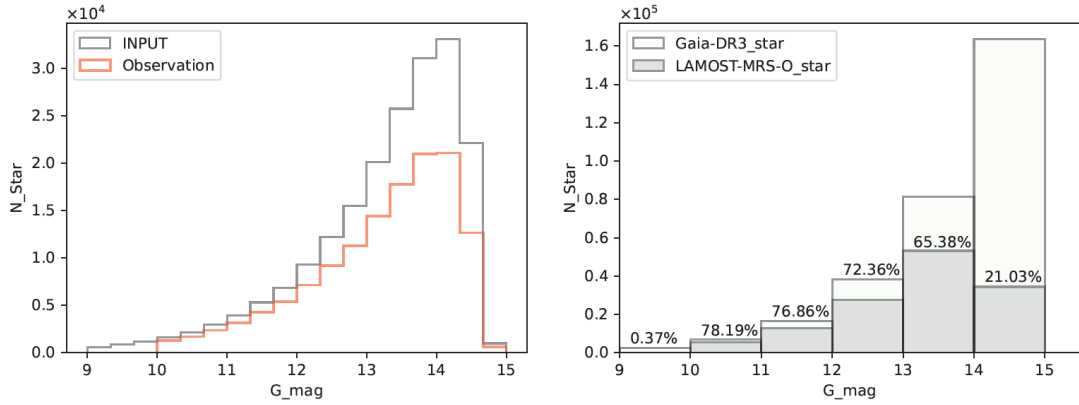


图 3-3 左图: 输入星表的恒星 (灰色) 和观测到的恒星 (红色) 的直方图, 在 $G_{\text{mag}}=9\sim15\text{mag}$ 范围内的观测完备率约为 70%; 右图: 10 个天区观测到的恒星数相对同天区 Gaia DR3 的完备率, 在 $G_{\text{mag}}=10\sim13\text{mag}$ 范围的观测完备率可超过 75%.

Figure 3-3 Left panel: Histogram of stars from the input catalog (gray) and observed stars (red), with an observation completeness rate of approximately 70% in the range $G_{\text{mag}} = 9\sim15\text{ mag}$;Right panel: Completeness rate of observed stars relative to Gaia DR3 in the same 10 fields, exceeding 75% in the range $G_{\text{mag}} = 10\sim13\text{ mag}$.

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

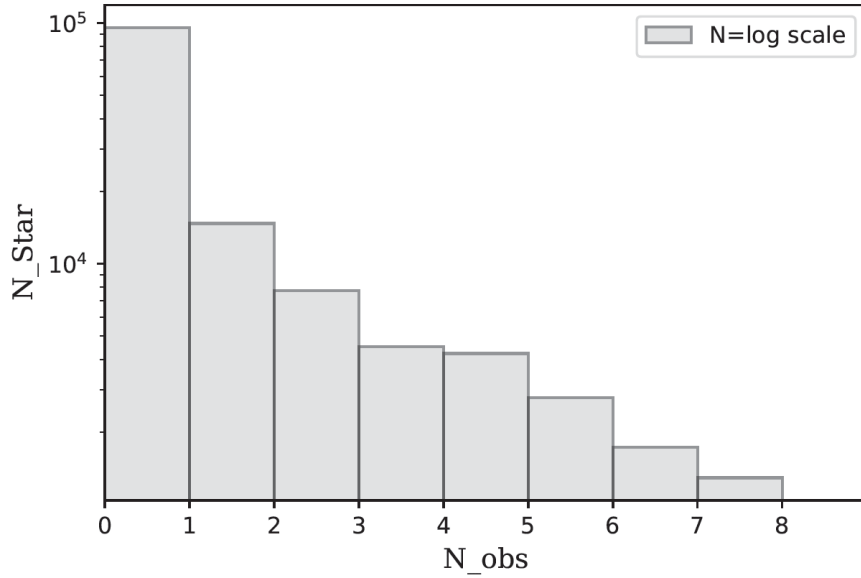


图 3-4 恒星被观测的次数分布直方图.

Figure 3-4 Histogram of the distribution of the number of observations of stars.

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

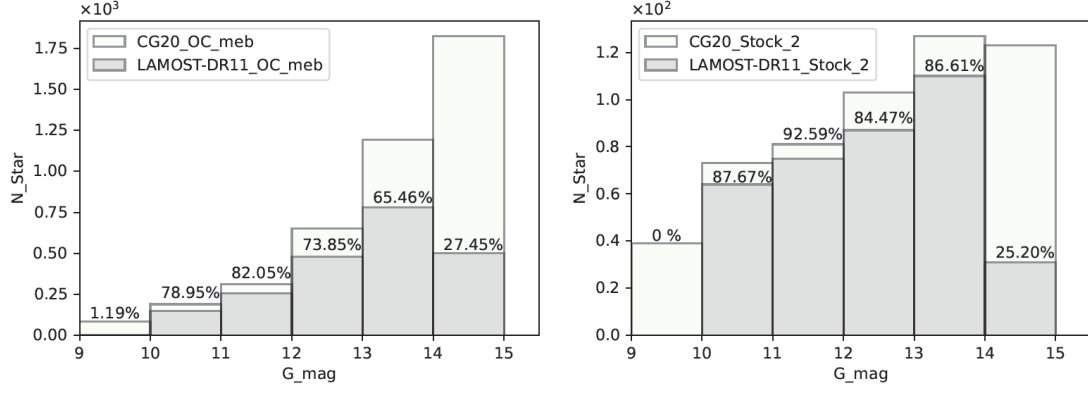


图 3-5 左图: 星团成员相对 CG20 成员的观测完备率; 右图: 星团 Stock 2 的观测完备率 (其中星等亮于 14mag 的观测完备率超过 80%).

Figure 3-5 Left panel: Observation completeness of cluster members relative to CG20 members; Right panel: Observation completeness of the Stock 2 cluster (where the observation completeness for stars brighter than 14 mag exceeds 80%).

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

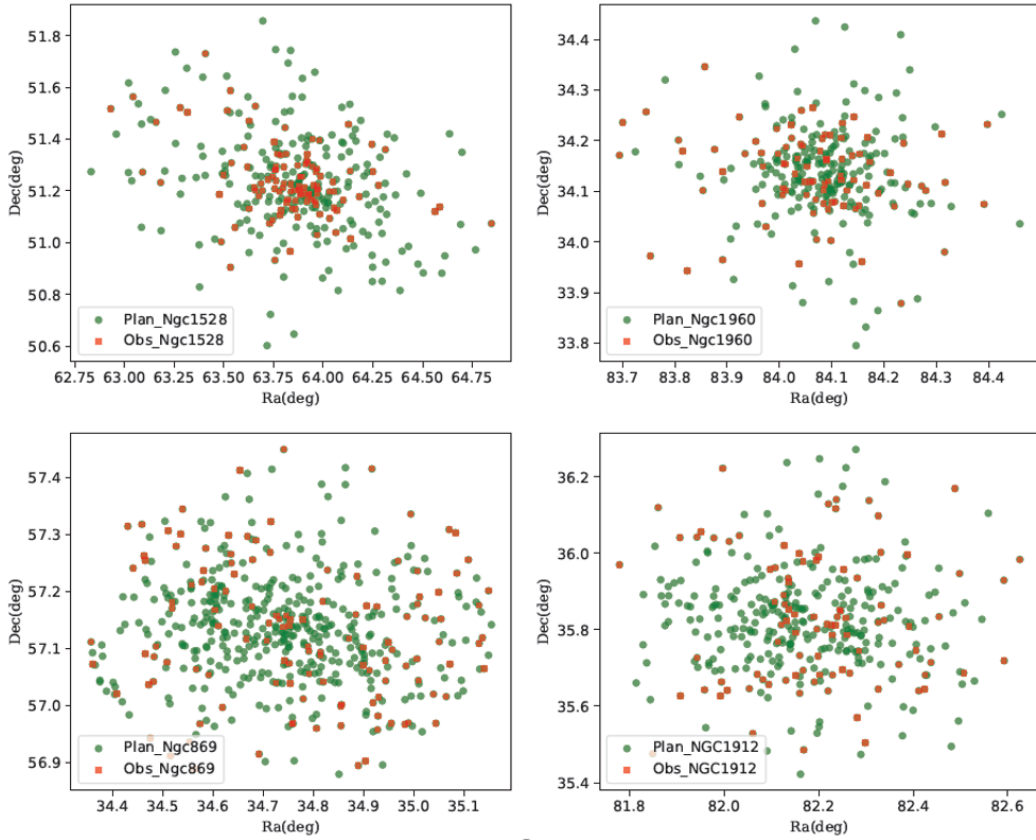


图 3-6 星团 NGC 1528, NGC 1960, NGC 869, NGC 1912 外围区域的成员星采样率约为 70%, 基本达到预期要求 (红点).

Figure 3-6 The sampling completeness of member stars in the outer regions of the star clusters NGC 1528, NGC 1960, NGC 869, and NGC 1912 is approximately 70%, largely meeting the expected requirements (red dots).

9~15mag 的范围内, 该星团在 CG20 星表中共有 546 颗成员星。其中 367 颗恒星在 LAMOST-MRS-O 巡天中被观测到。值得注意的是, 对于星等小于 14mag 的恒星, 观测完备率超过了 80%。考虑到 LAMOST 的光纤分布接近均匀, 即使在星团密集区域进行了八次采样, 仍可能遗漏部分成员星。然而, 对于像 Stock 2 这样成员星分布相对分散的星团, LAMOST-MRS-O 观测模式却能够实现相对较高的成员星采样率。

总体来看, 星团外围区域观测基本能够达到平均 70% 的采样率, 如图 3-6 中的 4 个星团, 其中也存在一些观测得比较好的星团, 即便在恒星密集的星团核心区域, 依然能够观测到较多成员星, 如图中的星团 NGC 1528。

3.4 观测参数

3.4.1 视向速度

LAMOST 中分辨率光谱巡天 (MRS) 通用星表提供了八种不同的视向速度测量结果及其对应的测量误差, 我们选择了 `rv_br1` 作为样本恒星的视向速度参数, 该参数是通过结合红端和蓝端光谱计算得出的。在总星表中, 十个疏散星团天区共包含 133,792 颗恒星的 235,184 条合并光谱。从中筛选出 $S/N \geq 10$ 且 `rv_br_flag=0` 的恒星。在该样本中, 约 25% 的恒星被观测了两次或更多次, 其平均视向速度值将根据每次观测的误差进行加权计算。对于单次测量的视向速度及其误差, 保留了 LAMOST-MRS 总星表提供的数据 (Zhang et al., 2025)。

将这 97,479 颗恒星样本与 Gaia DR3 数据进行了交叉匹配, 获得了 72,737 颗共同恒星的视向速度。如图 3-7 所示, LAMOST-MRS 与 Gaia DR3 之间相比较的视向速度差值及其标准偏差非常小, 分别为 0.08 km s^{-1} 和 3.09 km s^{-1} 。这表明从 LAMOST MRS 光谱中获取的恒星视向速度具有较高的准确性。

为了研究疏散星团的平均视向速度, 将中分辨率恒星样本与 CG20 的星团成员星表进行了交叉匹配。结果获得了 84 个星团中的 1577 颗成员星, 其中 77 个星团拥有两颗或更多的成员星。每个星团的视向速度及其离散度通过该星团内所有成员星视向速度的平均值和标准偏差来表示。在排除了视向速度离散度异常大 (超过 50 km s^{-1}) 的星团后, 样本包含 72 个星团, 其中 7 个星团仅有一颗成员星。发现其中有 33 个星团的视向速度在 CG20 中也有提供。图 3-8 的左图展示了这两个样本的对比结果, 显示视向速度的差值和弥散 (标准偏差) 较均较小, 分别为 -2.78 km s^{-1} 和 11.21 km s^{-1} 。

Tarricq et al. (2021) 结合了 Gaia DR2 (Sartoretti et al., 2018; Katz et al., 2019; Randich et al., 2013)、APOGEE DR16 (Ahumada et al., 2020), RAVE DR6 (Steinmetz et al., 2020) 和 GALAH DR3 (Barros et al., 2020) 的光谱数据, 计算了 1382 个疏散星团的视向速度。与中分辨率样本进行交叉匹配后, 发现有 57 个共同星团, 其视向速度平均差值及其标准偏差分别为 -1.87 km s^{-1} 和 14.38 km s^{-1} 。详情请参见图 3-8 的右图。

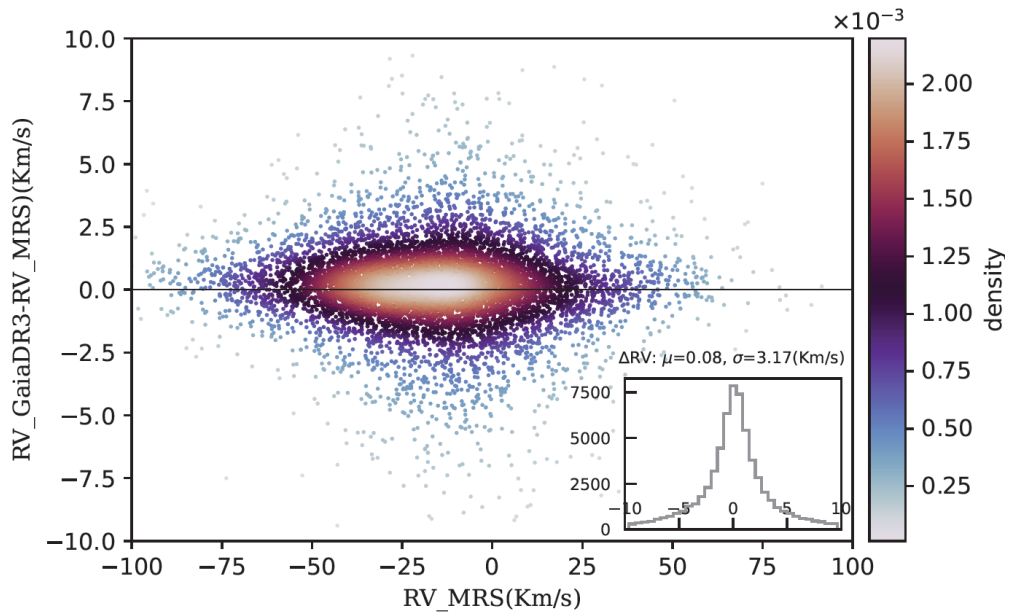


图 3-7 LAMOST-MRS 与 Gaia DR3 的 72,737 颗共同恒星视向速度的比较: 平均差值 $\mu=0.08$ km s^{-1} , 标准偏差 $\sigma=3.09$ km s^{-1} , 说明中分辨率光谱获得的恒星视向速度有较高的准确性.

Figure 3-7 Comparison of radial velocities for the 72,737 common stars between LAMOST-MRS and Gaia DR3: The mean difference is $\mu=0.08$ km s^{-1} with a standard deviation of $\sigma=3.09$ km s^{-1} indicating high accuracy of stellar radial velocities derived from medium-resolution spectra.

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

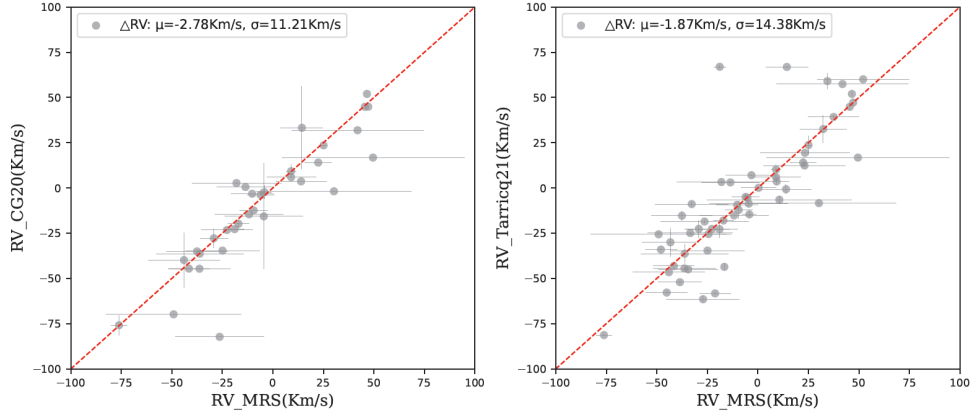


图 3-8 左图: LAMOST 与 CG20 的 33 个共同星团视向速度的比较, 差值 $\mu = -2.78 \text{ km s}^{-1}$, 标准偏差 $\sigma = 11.21 \text{ km s}^{-1}$; 右图: LAMOST 与 Tarricq21 的 57 个共同星团视向速度的比较, 差值 $\mu = -1.87 \text{ km s}^{-1}$, 标准偏差 $\sigma = 14.38 \text{ km s}^{-1}$.

Figure 3-8 Left panel: Comparison of radial velocities between LAMOST and CG20 for 33 common star clusters, showing a mean difference $\mu = -2.78 \text{ km s}^{-1}$ with standard deviation $\sigma = 11.21 \text{ km s}^{-1}$; Right panel: Comparison of radial velocities between LAMOST and Tarricq21 for 57 common star clusters, showing a mean difference $\mu = -1.87 \text{ km s}^{-1}$ with standard deviation $\sigma = 14.38 \text{ km s}^{-1}$.

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

此外, 利用 LAMOST DR5 和 DR8 的低分辨率光谱, Zhong et al. (2020) 和Fu et al. (2022) 分别获得了 295 个和 386 个星团的平均视向速度。将星团样本与这两篇论文中的星表进行交叉匹配后, 分别获得了 42 个和 41 个共同星团。平均差值分别为 -5.00 km s^{-1} 和 -7.69 km s^{-1} , 标准偏差为 11.19 km s^{-1} 和 9.72 km s^{-1} , 如图 3-9 所示。

总体而言, 与近期文献结果相比, 通过 LAMOST-MRS-O 获取的恒星视向速度差值和弥散 (标准偏差) 相对较小。这与Wang et al. (2019) 提出的结论基本一致, 表明在信噪比 $S/N \geq 10$ 时, 内部精度为 1.36 km s^{-1} 。值得注意的是, 除了观测误差外, 部分疏散星团内较大的平均视向速度标准偏差可能归因于双星成员的影响以及不同颜色恒星的测量误差差异所导致 (Zhang et al., 2025)。

3.4.2 金属丰度

从 LAMOST-MRS DR11v1.1 恒星参数星表中获取了十个已完成观测天区内 67,318 颗恒星的 $[M/H]$ 和 $[Fe/H]$ 丰度以及 12 种化学元素的丰度参数。利用该样本对 LAMOST-MRS-O 目标疏散星团的金属丰度 $[Fe/H]$ 进行了分析 (大多数文献的星团金属丰度由 $[Fe/H]$ 给出, 因此以铁元素丰度 $[Fe/H]$ 作为金属丰度, 对 $[M/H]$ 不再进行比较)。由于 LAMOST DR11v1.1 恒星参数星表未提供元素丰度的观测误差, 对于被多次观测的恒星, 其金属丰度用观测数据的平均值和标准偏差表示。对于每个星团, 其平均金属丰度 $[Fe/H]$ 及其相关误差由成员星丰度的

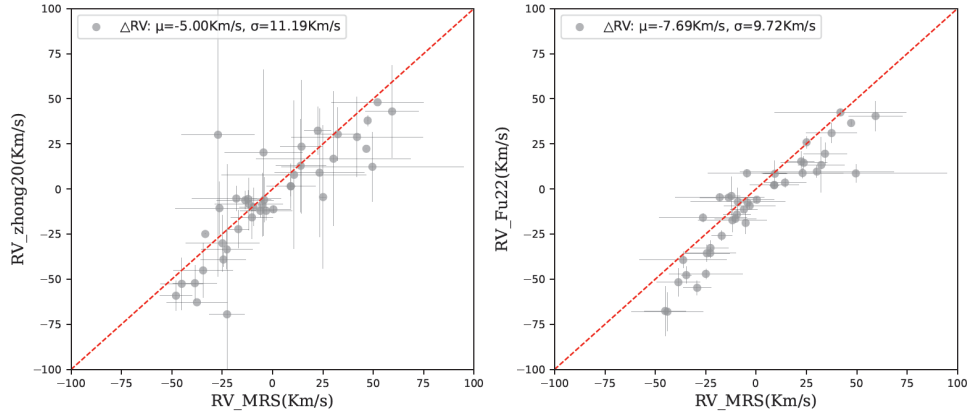


图 3-9 LAMOST-LRS 与 LAMOST-MRS 视向速度比较: 与 Zhong20 (42 个共同星团) 和 Fu22 (41 个共同星团) 的比较结果平均差值分别为 $\mu = -5.0 \text{ km s}^{-1}$ 和 -7.69 km s^{-1} , 标准偏差分别为 $\sigma = 11.19 \text{ km s}^{-1}$ 和 9.72 km s^{-1} .

Figure 3-9 Comparison of radial velocities between LAMOST-LRS and LAMOST-MRS: Results from comparisons with Zhong20 (42 common clusters) and Fu22 (41 common clusters) show mean differences of $\mu = -5.0 \text{ km s}^{-1}$ and $\mu = -7.69 \text{ km s}^{-1}$, with standard deviations of $\sigma = 11.19 \text{ km s}^{-1}$ and $\sigma = 9.72 \text{ km s}^{-1}$, respectively.

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

平均值和标准偏差表示。

将 67,318 颗恒星的样本与高分辨率 APOGEE DR17 进行了交叉匹配, 得到了 1,137 颗具有 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值的恒星、904 颗具有 $[\text{M}/\text{H}]$ 值的恒星以及 968 颗具有 $[\alpha/\text{M}]$ 值的共同恒星。 $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ 和 $\Delta[\alpha/\text{M}]$ 的平均值分别为 -0.013 dex 和 0.015 dex , 对应的标准偏差分别为 0.025 dex 和 0.012 dex 。如图 3-10所示, LAMOST-MRS 提供的化学丰度值与 APOGEE 的结果一致。

进一步将 67,318 颗恒星的样本与 CG20 进行了交叉匹配, 获得了属于 62 个疏散星团的 555 颗成员星。这 62 个星团分别与Zhong et al. (2020) 和Fu et al. (2022) 的文献进行了交叉匹配, 分别得到了 36 个和 37 个具有 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 参数的共同星团。疏散星团金属丰度参数的对比结果如图 3-11所示。与Zhong et al. (2020) 相比, $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ 的平均值约为 0.002 dex , 标准偏差约为 0.121 dex ; 而与Fu et al. (2022) 相比, $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ 的平均差异值约为 0.041 dex , 标准偏差约为 0.105 dex , 略高于前者。

为了检验 LAMOST-MRS 元素丰度结果的精度, 选择了一个星团 Stock 2 作为示例, 展示其元素丰度的一致性。在 LAMOST-MRS-O 巡天中, Stock 2 共有 304 颗成员星进行了光谱观测。这些成员星中, 大多数提供了元素丰度数据, 包括铁、碳、氮、镁、硅、钙、镍等。表 3-2列出了 Stock 2 中这些元素的平均值和标准偏差。可以看出, 对于九种元素丰度参数, Stock 2 中有足够多的成员星进行了光谱观测, 而对于另外六种元素丰度参数, 只有两颗成员星有光谱数据可用。在图 3-12中, 绘制了其中光谱数据较多的 9 种元素的丰度分布直方图, 并进行

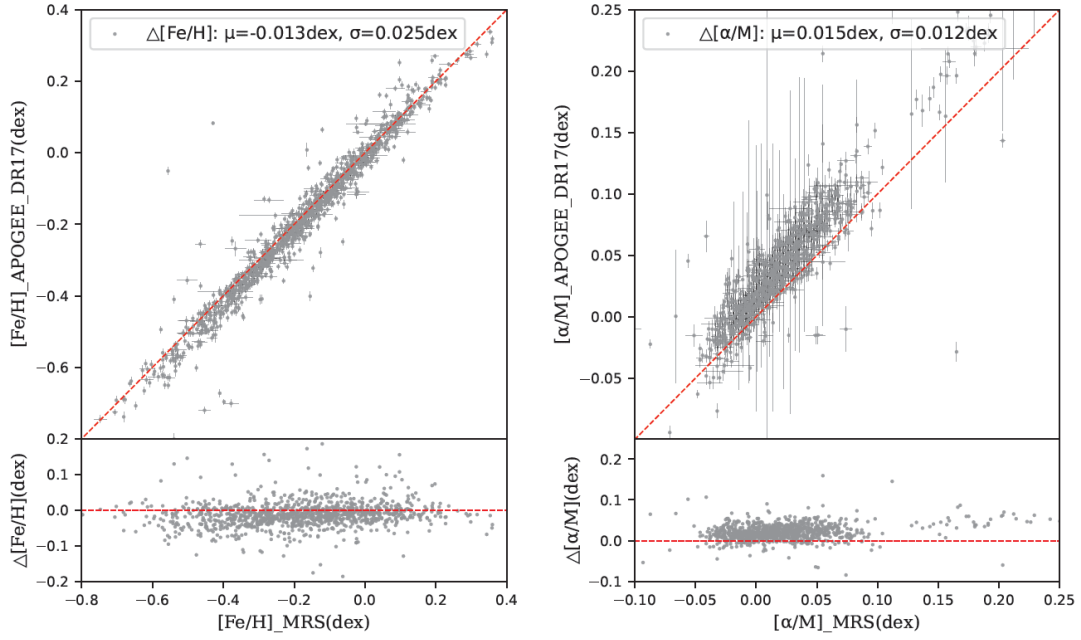


图 3-10 APOGEE DR17 与 LAMOST-MRS 的 1137 颗共同恒星 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值和 968 颗共同恒星 $[\alpha/\text{M}]$ 值的比较: $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]$ 差值 $\mu = -0.013$ dex, 标准偏差 $\sigma = 0.025$ dex; $\Delta[\alpha/\text{M}]$ 差值 $\mu = 0.015$ dex, 标准偏差 $\sigma = 0.012$ dex.

Figure 3-10 Comparison of $[\text{Fe}/\text{H}]$ and $[\alpha/\text{M}]$ between APOGEE DR17 and LAMOST-MRS: Results from 1137 common stars for $[\text{Fe}/\text{H}]$ and 968 common stars for $[\alpha/\text{M}]$ show mean differences of $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = \mu = -0.013$ dex and $\Delta[\alpha/\text{M}] = \mu = 0.015$ dex, with standard deviations $\sigma = 0.025$ dex and $\sigma = 0.012$ dex, respectively.

注: 图引用自 [Zhang et al. \(2025\)](#).

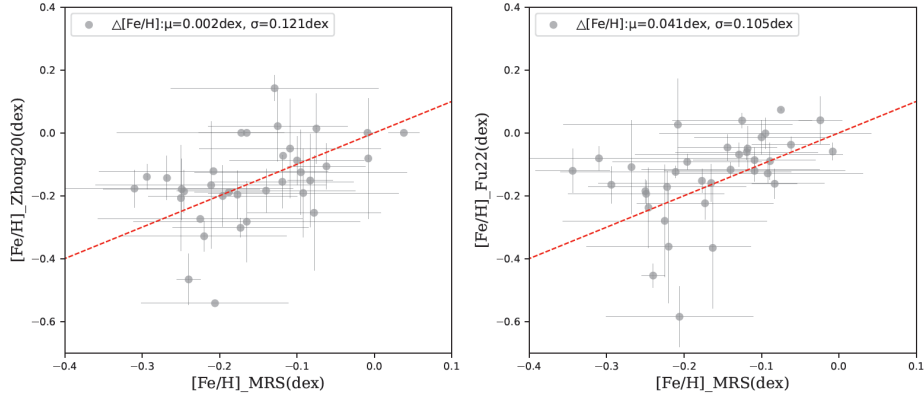


图 3-11 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的比较, 左图: LAMOST-MRS 与 [Zhong et al. \(2020\)](#) 的 36 个共同星团对比, 差值 $\mu=0.002$ dex, 标准偏差 $\sigma=0.121$ dex; 右图: LAMOST-MRS 与 [Fu et al. \(2022\)](#) 的 37 个共同星团对比, 差值 $\mu=0.041$ dex, 标准偏差 $\sigma=0.105$ dex.

Figure 3-11 Comparison of $[\text{Fe}/\text{H}]$: Left panel: LAMOST-MRS vs. [Zhong et al. \(2020\)](#) (36 common clusters), showing a mean difference $\mu=0.002$ dex with standard deviation $\sigma=0.121$ dex; Right panel: LAMOST-MRS vs. [Fu et al. \(2022\)](#) (37 common clusters), showing a mean difference $\mu=0.041$ dex with standard deviation $\sigma=0.105$ dex.

注: 图引用自 [Zhang et al. \(2025\)](#).

表 3-2 疏散星团 Stock 2 的 LAMOST-MRS-O 元素丰度

Table 3-2 Chemical abundances of the Stock 2 derived from LAMOST-MRS-O spectra.

Element	μ (dex)	σ (dex)	N_member
$[M/H]$	-0.066	0.050	200
$[\alpha/M]$	-0.005	0.035	200
$[Fe/H]$	-0.061	0.051	200
$[C/Fe]$	-0.029	0.059	200
$[N/Fe]$	-0.002	0.071	200
$[Mg/Fe]$	-0.005	0.065	200
$[Si/Fe]$	-0.020	0.051	200
$[Ca/Fe]$	0.012	0.044	200
$[Ni/Fe]$	-0.025	0.024	200
$[O/Fe]$	0.043	0.010	2
$[Al/Fe]$	-0.017	0.029	2
$[S/Fe]$	0.063	0.031	2
$[Ti/Fe]$	-0.049	0.027	2
$[Cr/Fe]$	-0.009	0.011	2
$[Cu/Fe]$	0.015	0.019	2

表引用自 [Zhang et al. \(2025\)](#).

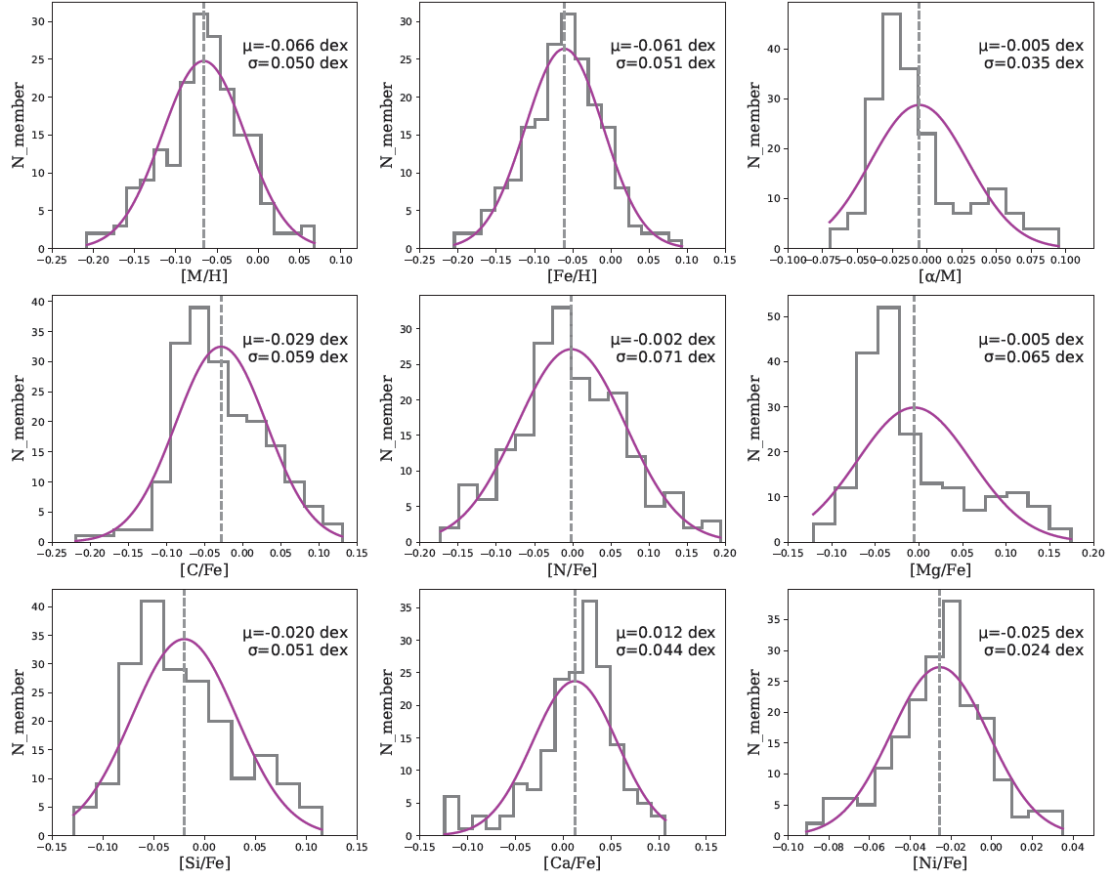


图 3-12 Stock 2 的 9 种丰度参数直方图和高斯分布图.

Figure 3-12 Histograms and Gaussian distribution profiles for the nine abundance parameters of open cluster Stock 2.

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

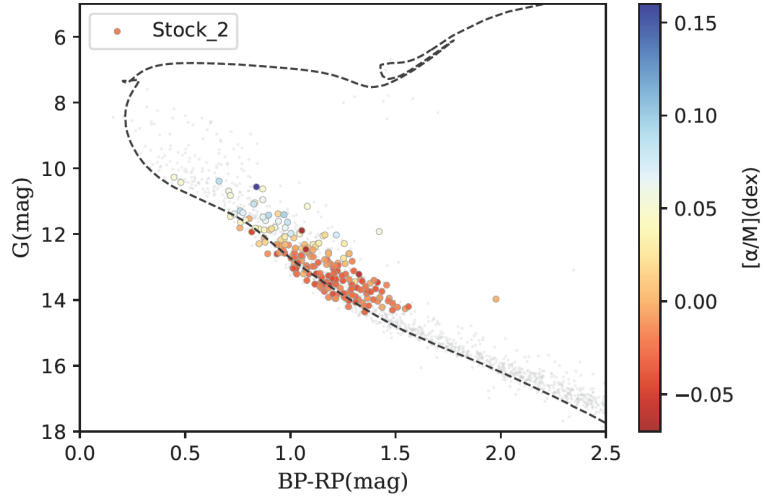


图 3-13 Stock 2 颜色-星等图中, 由 $[\alpha/\text{M}]$ 丰度指示成员星颜色. 在 LAMOST-MRS 星表中, 热星的 $[\alpha/\text{M}]$ 测量值往往表现出较大的偏差, 如 Stock 2 主序上端颜色偏蓝的热星.

Figure 3-13 In the color-magnitude diagram of Stock 2, stellar colors are color-coded by $[\alpha/\text{M}]$ abundances. The LAMOST-MRS catalog reveals systematic offsets in $[\alpha/\text{M}]$ measurements for hot stars, particularly evident in the bluer stars at the upper main sequence of this cluster.

注: 图引用自Zhang et al. (2025).

了高斯拟合。大多数丰度参数显示出良好的高斯分布和较小的标准偏差, 表明不存在显著偏差, 且 LAMOST-MRS 光谱测量具有较高的精度 (Zhang et al., 2025)。

然而, 观察到参数分布呈现出延展的尾部, 特别是在 $[\alpha/\text{M}]$ 和 $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ 这两个参数上。图 3-13展示了 Stock 2 光谱成员星在颜色-星等图中的分布, 其中颜色代表 $[\alpha/\text{M}]$ 丰度。可以明显看出, $[\alpha/\text{M}]$ 的延展尾部与恒星类型密切相关: 热星的丰度测量往往表现出较大的偏差。

3.5 小结

本章介绍了我们规划与执行 LAMOST 中分辨率光谱疏散星团巡天(LAMOST-MRS-O) 项目的过程与基本结果, 包括其科学目标、观测计划与策略的设计、光谱数据的获取、观测完备率的分析以及星团巡天成果。

LAMOST-MRS-O 是一项非时域巡天, 也是 LAMOST 中分辨率光谱巡天计划的七个主要子项目之一, 旨在针对 100 多个银河系疏散星团设计高完备度的观测模式, 并获取星团成员的高精度视向速度、恒星参数以及多种元素的丰度。至 2024 年, LAMOST-MRS-O 已顺利完成为期 5 年的观测计划。

LAMOST-MRS-O 巡天已经完成观测的十个天区共获得了 133,792 颗恒星的 235,184 条中分辨率光谱。本章针对这十个星团观测天区的光谱数据, 进行了统计分析, 得出天区和星团成员星的观测完备性, 同时获得了一个近 80 个疏散星

团的成员星样本光谱参数表；对于部分特别关注的星团，G 星等小于 15 等的成员星采样率可达 70%，分析表明 LAMOST-MRS-O 的观测结果已达到最初的设计目标。上述成果成为后续大样本疏散星团统计性质研究的主要观测基础。以上关于 LAMOST-MRS-O 项目的实施总结与数据分析初步结果已在 SCI 刊物正式发表 (Zhang et al., 2025)。

LAMOST-MRS-O 项目的成功实施使我们获得了疏散星团高完备率的恒星光谱观测样本，结合 Gaia 的高精度天体测量和测光数据，对样本星团成员的年龄、距离、质量分布和运动学等特性作进一步准确分析，将为基于星团的恒星物理研究提供全面的数据支持和观测约束，同时为后续的疏散星团大样本统计性质研究奠定基础。

第4章 基于LAMOST中分辨率的疏散星团性质研究

在LAMOST-MRS-O观测项目中,我们尽管获得了一批(数十个)具有高观测完备率的疏散星团,但若要以星团为探针,进行示踪银河系的径向金属丰度梯度等研究,星团数量显然还远远不够。另一方面,随着Gaia和多个大型光谱巡天数据的不断发布,结合测光和光谱参数的大样本疏散星团星表也在迅速更新中,如基于LAMOST低分辨率光谱巡天数据获得了数百乃至数千个疏散星团的视向速度、金属丰度等光谱参数(Zhong et al., 2020; Fu et al., 2022; Zhang et al., 2024)。而目前还没有基于LAMOST中分辨率数据的大样本疏散星团光谱参数表,因此,本人的第二个工作就是充分利用LAMOST中分辨率光谱参数,结合迄今为止基于Gaia DR3最大的疏散星团表Hunt et al. (2024) (Hunt24)所认证的星团成员,构建一个具有LAMOST中分辨率光谱参数的大样本疏散星团表及其成员星列表,并对该样本疏散星团的参数作初步统计分析和讨论。

下面将详细介绍大样本疏散星团光谱参数表的构建及其基本数据情况,并通过将该样本星团的视向速度、金属丰度([Fe/H])和其它化学元素丰度等参数与外部数据进行比较,来确定疏散星团平均参数的精度,同时基于该星团样本对银河系银盘的径向丰度梯度示踪进行初步探究。

4.1 数据和样本

4.1.1 LAMOST-MRS 数据

2023年6月,LAMOST-II(第二期)完成了为期5年的观测任务,于2024年9月对内部用户发布了LAMOST-LRS&MRS DR11_v1.1¹,涵盖了从2018年10月下旬至2023年6月期间观测的中分辨率光谱数据,共包含4693.8万多条中分辨率(单次曝光&合并)光谱,其中有1千多万条由红、蓝两端(红端波长范围630nm-680nm,蓝端波长范围495nm-535nm(Liu et al., 2020))得到的合并光谱。这些数据收录在DR11_v1.1的“总星表”(General_Catalogue)中;另一个“参数星表”(Stellar_Catalogue)则包含信噪比较高(约 $S/N > 10$)的258万条合并光谱对应的119万颗恒星的视向速度、大气参数、金属丰度([M/H]和[Fe/H])以及其它12种元素丰度等参量。

依据Wang et al. (2019, 2020)对LAMOST中分辨率光谱信噪比的评估,我们在两个星表中选用了合并光谱(coadd标记为1)得到的信噪比范围在 $10 < S/N < 999$ 的数据。LAMOST中分辨率“总星表”和“参数星表”都提供了8种不同的视向速度测量值及相应测量误差,其中,由红蓝两端“拼合”光谱得到的rv_br1所含光谱信息更为丰富并经过了零点改正,因此选择它作为恒星视向速度参数(统一采用rv_br1作为中分辨率视向速度RV-MRS),与我们第一个工作(Zhang et al.,

¹<http://www.lamost.org/dr11/v1.1/>

2025) 的数据选取方法是一致的。且考虑到相比“参数星表”，“总星表”中包含更多恒星的视向速度 (RV-MRS) 参量，因此星团成员星的视向速度参量就选用此表中的数值。此外，RV-MRS 只选择了 `rv_br_flag` 标记为“0”的 `rv_br1` 数据。

我们从“总星表”中得到了 1,483,440 颗恒星的中分辨率视向速度 (RV-MRS)，其中约 29% 的恒星被重复观测，因此它们的视向速度参量是通过以其观测误差为权重计算得到的加权平均值和加权误差，而只被单次测量的恒星，则保持星表里恒星的 RV-MRS 观测值和误差。

对于“参数星表”，经过信噪比的筛选 ($10 < S/N < 999$)，从中获得 2,586,379 条光谱数据，对于被重复观测的约 28.75% 的恒星，其各参数值通过计算多次观测的平均值和标准偏差作为恒星参数值和误差，最终从“参数星表”获得了 1,193,219 颗恒星的大气参数、金属丰度 ($[M/H]$ 、 $[Fe/H]$) 和 12 种化学元素的丰度值。表中包含“LASP”和“CNN”两种方法得到的恒星大气参数和金属丰度，还包含 12 种由“CNN”单独提供的化学元素丰度。为了在统计分析星团的各参数性质时，保持数据的一致性，将选取由“CNN”提供的所有恒星参数来构建星团参数样本。

4.1.2 疏散星团样本

由 LAMOST-MRS 获得的 148.34 万颗恒星视向速度星表以及 119.32 万颗恒星参数星表分别与 Hunt24 星表通过交叉匹配 (选用恒星位置坐标赤经 Ra ，赤纬 Dec 为交叉条件，最大误差为 3.0 个角秒)，获得 Hunt24 成员概率 $Prob > 50\%$ 的 8145 颗成员星 (分属 1365 个星团) 的视向速度和 3787 颗成员星 (分属 827 个星团) 的视向速度、金属丰度和其它化学元素丰度。最后通过计算各星团成员星参量的平均值和标准偏差 (循环去除大于 3σ 的异值)，分别得到星团的平均视向速度、平均金属丰度 ($[M/H]$ 、 $[Fe/H]$) 和 12 种化学元素平均丰度及相应的标准偏差。

在具有平均视向速度的 1365 个星团中，除去两个在 Hunt24 标记为“r” (remove) 的星团 (被确定不是星团而需要移除的星团)，余下 9 个标记为“g”的球状星团，322 个标记为“moving_group”的移动星群，剩余 1033 个为疏散星团。具有平均金属丰度等参量的 826 个星团中，有“CNN”参量的星团有 679 个团，其中 5 个为球状星团，228 个为“moving_group”，446 个为疏散星团。最终，获得 1033 个有 LAMOST-MRS 视向速度的疏散星团样本，其中的 446 个星团因同时具有视向速度、金属丰度及其它化学元素丰度等参量而单独作为另一个星团参量样本。1033 个星团的样本中，有 5 个及以上 RV 参量成员的星团占比为 30.68%。我们对 446 个星团样本的 RV-MRS、 $[Fe/H]$ 参数进行了累积频数分布的分析 (如图4-1星团成员星累计频数分布图所示)，拥有 5 个 (灰色虚线对应的横坐标刻度) 及以上视向速度参量成员星的星团占比则达到 52.9% (蓝线点对应的纵坐标)，拥有 5 个及以上金属丰度参量 ($[Fe/H]$) 成员星的星团占比为 20.4% (红线点对应的纵坐标)。

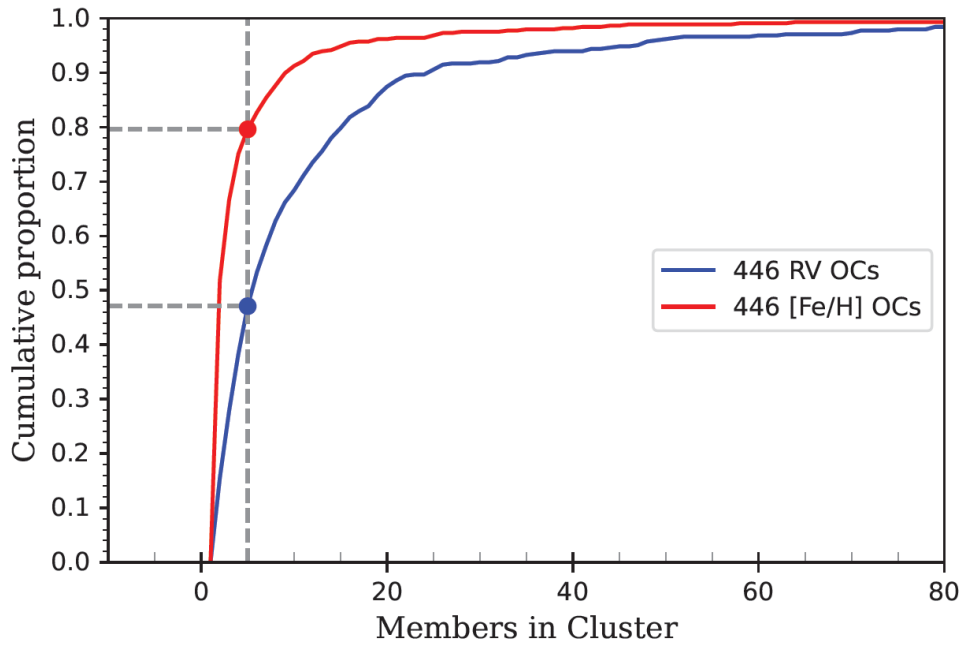


图 4-1 星团成员累计频数分布图显示: 在具有视向速度, 金属丰度和其它元素丰度的 446 个星团样本中, 52.9% 的星团具有 5 个及以上的成员星具有视向速度 (蓝线点), 而 20.4% 的星团有 5 个及以上的成员星具有金属丰度值 (红线点)。

Figure 4-1 The cluster membership cumulative frequency distribution reveals that within a sample of 446 star clusters with radial velocities, metallicities, and other elemental abundances: 52.9% of the clusters have ≥ 5 member stars with radial velocities (denoted by blue points), while 20.4% possess ≥ 5 member stars with metallicity measurements (indicated by red points).

4.2 视向速度

LAMOST-MRS 的视向速度测量具有较好的内部精度，能够用来准确测定疏散星团的平均视向速度。Liu et al. (2019b) 利用一个 Kepler 子天区的多次曝光数据对 LAMOST-MRS 视向速度内部精度进行了分析，发现视向速度测量精度在光谱信噪比 $S/N=20$ 时可达 1km s^{-1} ；Wang et al. (2019) 曾报导 LAMOST-MRS 在信噪比 $10<S/N<50$ 和 $S/N>50$ 区间里，单颗恒星的视向速度内部精度分别可达到 1.37km s^{-1} 和 0.91km s^{-1} ；Zong et al. (2020) 也指出，从 g 波段信噪比为 $S/N=10$ 的 LAMOST 中分辨率光谱获得的视向速度精度约为 1.00km s^{-1} ；Zhang et al. (2021a) 估算得到的中分辨率视向速度在信噪比为 $50 < S/N < 100$ 时，蓝端/红端的总体精度分别达到 $0.84/0.80\text{ km s}^{-1}$ ；信噪比在 $5<S/N<10$ 时，则精度分别为 $1.26/1.99\text{km s}^{-1}$ 。为了检验 LAMOST-MRS 星团视向速度的测量结果，我们将 1033 个星团样本分别与不同光谱分辨率和 RV 精度的文献数据进行了比较 ($RV_{\text{Literature}}-RV_{\text{LAMOST-MRS}}$)。

Hunt24 星表中的成员星视向速度来自 Gaia DR3，光谱分辨率 $R\approx 11500$ ，视向速度精度的中位值在 GRVS=12 星等时为 1.3km s^{-1} ，在 GRVS=14 星等时为 6.4km s^{-1} (Katz et al., 2023)。LAMOST-MRS 星团样本与 Hunt24 交叉获得了 824 个共同星团，比较得到的 RV 平均差值 μ 为 -0.86km s^{-1} ，平均弥散 σ 为 16.19km s^{-1} 。

Tarricq et al. (2021) (Tarricq21) 星团表是通过搜集整理 Gaia DR2，以及 Gaia-ESO、APOGEE、RAVE、GALAH 等分辨率 $R>20,000$ 的巡天光谱获得的恒星视向速度，并通过对单星及星团的 RV 加权平均处理，最终获得的 1382 个具备视向速度值的疏散星团，其 RV 最高精度（不确定度）约 3km s^{-1} ，与 LAMOST-MRS 星团样本交叉之后获得 294 个共同星团，它们之间的 RV 平均差值 μ 为 0.15km s^{-1} ，标准偏差 σ 为 9.85km s^{-1} 。

Zhong et al. (2020) (Zhong20) 和 Fu et al. (2022) (Fu22) 的星团表中的视向速度分别来自 LAMOST-LRS DR5 和 DR8，光谱分辨率为 $R\approx 1800$ ，典型精度为 5km s^{-1} ，与 LAMOST-MRS 星团样本交叉分别获得 161 和 203 个共同星团，比较得到的 RV 平均差值 μ 分别为 -3.45km s^{-1} 和 -4.50km s^{-1} ，标准偏差 σ 分别为 10.22km s^{-1} 和 8.48km s^{-1} 。这 4 组共同星团的视向速度比较结果如表 4-1 和图 4-2 所示。

表 4-1 星团样本的视向速度比较 ($RV_{\text{Literature}}-RV_{\text{MRS}}$)

Table 4-1 Radial Velocity Comparison for the Open Cluster Sample ($RV_{\text{Literature}}-RV_{\text{MRS}}$)

Literature	Survey	$\mu_{\Delta RV}(\text{km s}^{-1})$	$\sigma_{\Delta RV}(\text{km s}^{-1})$	N_OCs
Hunt24	Gaia DR3	-0.86	16.19	824
Tarricq21	Gaia DR2;GES;APOGEE;GALAH	0.15	9.85	294
Zhong20	LAMOST-LRS-DR5	-3.45	10.22	161
Fu22	LAMOST-LRS-DR8	-4.50	8.48	203

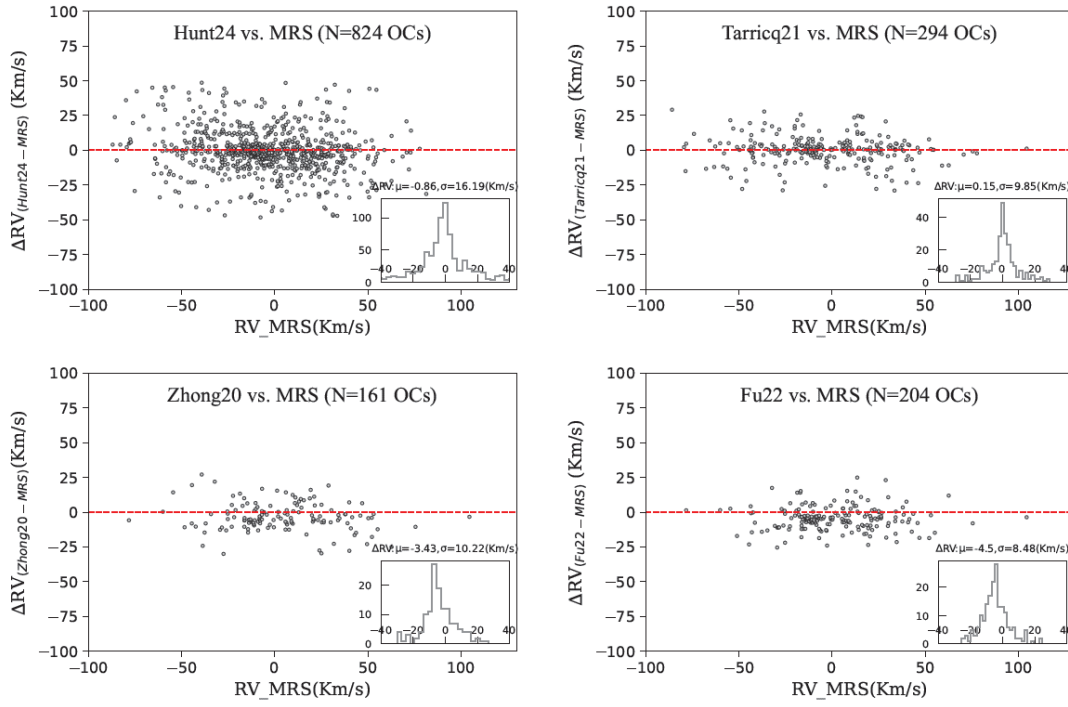


图 4-2 1033 个星团样本的 RV-MRS 比较: 与高分辨率 Hunt24 和 Tarricq21 星团表比较 (上), 平均差值 $\mu = -0.86 \text{ km s}^{-1}$ (左), 0.15 km s^{-1} (右), 相应的标准偏差为 $\sigma = 16.19 \text{ km s}^{-1}$, 9.85 km s^{-1} ; 与 Zhong20 和 Fu22 的 LAMOST 低分辨率星团表比较 (下), 平均差值 $\mu = -3.45 \text{ km s}^{-1}$ (左) 和 -4.50 km s^{-1} (右), 标准偏差 $\sigma = 10.22 \text{ km s}^{-1}$, 8.48 km s^{-1} .

Figure 4-2 Comparison of RV-MRS for the sample of 1033 star clusters: When cross-referenced with high-resolution Hunt24 and Tarricq21 catalogs (upper), the mean differences are $\mu = -0.86 \text{ km s}^{-1}$ (left) and 0.15 km s^{-1} (right), with corresponding standard deviations $\sigma = 16.19 \text{ km s}^{-1}$ and 9.85 km s^{-1} . When compared with Zhong20 and Fu22's LAMOST low-resolution catalog (lower), the mean differences become $\mu = -3.45 \text{ km s}^{-1}$ (left) and -4.50 km s^{-1} (right), with standard deviations $\sigma = 10.22 \text{ km s}^{-1}$ and 8.48 km s^{-1} respectively.

表 4-2 18 个星团 RV(km s⁻¹) 示例
Table 4-2 Example of RV(km s⁻¹) of 18 open clusters

Cluster	RV-MRS	σ_{MRS}	N_RV	RV_H24	σ_{H24}	N_RV	RV_T21	σ_{T21}	N_RV
NGC 2682	33.96	1.19	188	33.77	4.97	387	34.18	0.13	360
Stock 2	9.02	1.97	272	8.17	7.59	495	8.61	0.13	177
Mellotte 22	5.39	1.3	217	5.34	21.89	398	5.88	0.03	426
Mellotte 25	38.47	2.45	111	39.26	6.66	252	37.97	0.16	186
NGC 2186	-8.09	4.31	122	-9.30	19.53	356	-7.86	0.25	32
Trumpler 2	-4.26	3.52	78	-8.32	11.77	112	-3.97	1.14	12
NGC 1039	-7.84	2.5	69	-7.08	10.62	228	-6.91	0.6	42
NGC 2632	38.18	1.25	46	33.94	11.21	348	34.94	0.08	219
NGC 869	-44.48	8.48	41	-67.64	25.53	6	-44.09	7.52	1
NGC 884	-37.61	10.64	32	-43.90	2.28	2	-33.66	4.03	5
NGC 752	6.21	1.21	70	5.71	10.26	135	5.44	0.04	102
Tombaugh 5	-23.04	12.89	59	-24.86	8.67	24	-23.1	0.19	5
FSR 0596	-38.0	7.12	4	...	...	...	...	...	...
CWNU 2352	-34.6	7.2	4	...	...	...	...	...	...
UBC 1253	-49.71	8.52	2	...	...	...	...	...	...
OC 0237	-39.22	3.07	3	...	...	...	...	...	...
UBC 1253	-49.71	8.52	2	...	...	...	...	...	...
HSC 1170	-40.07	6.4	2	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

NOTES: “RV_H24”, “RV_T21” 分别指 Hunt2024 和 Tarricq2021

在表 4-2, 我们列出了观测较好的部分早期记录的星团和近 5 年新发现疏散星团的 RV-MRS。从列表显见, 早期有研究的星团的 RV-MRS 与 Hunt24 (Gaia DR3) 和 Tarricq21 的高分辨率视向速度值是比较一致的; 表最下部分是 6 个新星团视向速度示例, 中分辨率疏散星团样本中包含的 105 个新星团的 RV 参数, 在文献中均尚未报导过。不足之处是这 105 个新星团的成员星数目均少于 10 个, 且 50% 的星团只有 1 个成员星。

图 4-3 则分别展示了三个早期观测研究较多的星团 (上) 和新发现并观测较好的星团 (下) 的颜色-星等图, 颜色标识为各成员星的 RV-MRS。上排三个星团 NGC 2682、NGC 2632 和 Melotte 25 的平均视向速度和弥散分别为 $33.96 \pm 1.19 \text{ km s}^{-1}$ 、 $34.18 \pm 1.25 \text{ km s}^{-1}$ 和 $38.47 \pm 2.45 \text{ km s}^{-1}$; 下排星团 Theia 1722、Theia 754 和 COIN-Gaia 13 的平均视向速度和弥散分别为 $-7.35 \pm 11.87 \text{ km s}^{-1}$ 、 $-11.4 \pm 6.96 \text{ km/s}$ 和 $-13.31 \pm 4.1 \text{ km s}^{-1}$ 。由于上排的星团平均视向速度标准偏差较小, 星团成员的 RV-MRS 值相对一致, 显示出比较均匀的浅蓝色; 下排的 Theia 1722 弥散较大, 因此相比其它 5 个星团, 成员星颜色不够均匀。对于一个星团而言, 其成员星在颜色-星等图中的不同位置代表处于不同的演化阶段。星团成员尽管因诞生时的质量不同而使演化速度不同, 但均具有相似的年龄和视向速度, 因此在图中显示的颜色基本是一致的。

总体而言, LAMOST 中分辨率星团平均视向速度与文献比较的结果是: 与

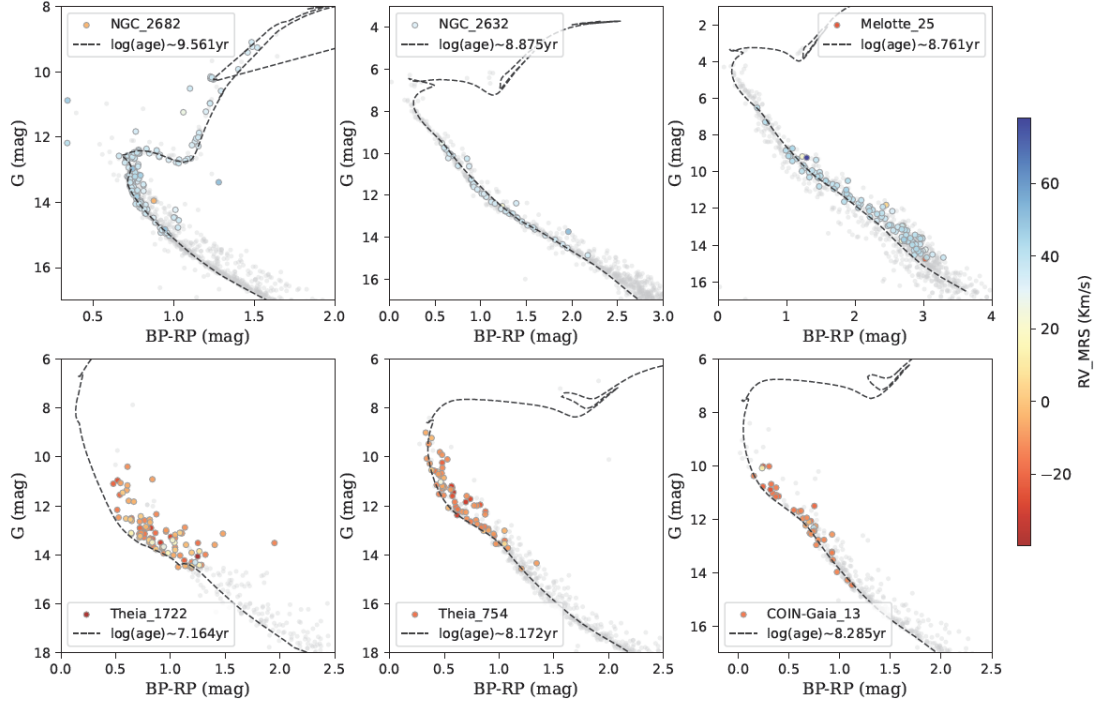


图 4-3 图展示了早期观测研究的星团(上)和新星团(下)的 CMD 图, 颜色标识为 LAMOST 中分辨率视向速度; 圆点 (LAMOST-MRS), 灰点 (Hunt24 成员), 黑色虚线是 Bressan et al. (2012) 的星团理论等龄线.

Figure 4-3 The figure presents Color-Magnitude Diagrams (CMDs) of early-observed open clusters (upper panel) and newly discovered clusters (lower panel), with color-coding corresponding to LAMOST-MRS radial velocities. Symbol notation: open circles (LAMOST-MRS data), gray dots (Hunt24 data). The black dashed line indicates the theoretical isochrone from Bressan et al. (2012).

Gaia、APOGEE 等高分辨率的平均差值大约为 1km s^{-1} ，与 LAMOST 低分辨率的平均差值在 $3\text{km s}^{-1} < \mu < 5\text{km s}^{-1}$ 范围内。相比 LAMOST 低分辨率和 APOGEE，与 Gaia 比较的星团 RV 标准偏差偏大 ($\sigma > 15\text{km s}^{-1}$)，主要原因很可能是与 Gaia 的 824 个共同星团中，LAMOST-MRS 只有约 53% 的星团有超过 3 个及以上的成员星。一般在相同测量精度下，包含星团成员星越多，星团获得的平均视向速度就越接近真值，弥散就越小。与外部数据的比较结果显示，LAMOST 中分辨率星团平均视向速度基本符合 Liu et al. (2019b); Zhang et al. (2021a); Zong et al. (2020) 等的报道。

4.3 大气参数

恒星大气参数是体现恒星性质的重要参数之一。疏散星团包含了不同质量、不同光谱型以及不同演化阶段的成员星，因此了解成员星的大气参数分布，以及与其它参数的相关性，能够帮助我们更好地利用观测数据，来研究星团和成员星的性质及其演化规律。

我们选择了观测到 5 个以上成员的若干星团，通过它们的赫罗图来了解 LAMOST-MRS 恒星大气参数的数据情况。如图 4-4 所示的 NGC 2682、NGC 752、Melotte 111、NGC 7789、NGC 2112 和 NGC 2632 等六个星团的赫罗图，黑色虚线是 PARSEC (Bressan et al., 2012) 与星团各自的金属丰度 $[M/H]$ 观测值相对应的理论等龄线，圆点代表具有 LAMOST-MRS 大气参数的星团成员星。可以显见，老年星团中的巨星成员在赫罗图中较好地遵循了 PARSEC 理论等龄线所代表的恒星演化趋势。铁丰度 $[Fe/H]$ 所标识的颜色分布也比较均匀（除了 NGC 752 的部分热星的 $[Fe/H]$ 偏低），符合一般认为的疏散星团具有共同金属丰度的性质，其中年龄最小的 NGC 2632 主序矮星的铁丰度较高（颜色最蓝），也符合大部分年轻星团的金属丰度通常比老年星团更高的观测特征。

但少部分星团中超出 $4200\text{K} < T_{eff} < 6000\text{K}$ 温度范围的主序星，即高温端的热星和低温端的冷星，其有效温度 T_{eff} 与表面重力 $\log(g)$ 、金属丰度 $[Fe/H]$ 之间显示出一定的相关性。图 4-4 中的 NGC 752 和图 4-5 所示的疏散星团 Melotte 22，以理论等龄线（黑色虚线）为基准，星团中超出上述温度范围的主序星， $\log(g)$ 相比理论值在高温端偏低，低温端则偏高，金属丰度则都偏低（下图）。另外，部分成员星尽管分布在 $4300\text{K} < T_{eff} < 5500\text{K}$ 温度区间内，但仍偏离理论等龄线较远（偏上），表面重力 $\log(g)$ 比理论值偏低，金属丰度也明显偏低（显红）。

通过进一步对比 LAMOST 中分辨率数据中由 LASP 和 CNN 两种测量方法得到的这部分偏离等龄线的恒星有效温度，发现两者差值从几百开 (K) 到上千开 (K) 不等，且同一恒星的 LASP 值总是高于 CNN 值。值得注意的是，在 Fu et al. (2022) 文献中提到，星团 NGC 2632 的 $T_{eff} < 4000\text{K}$ 的主序冷星，其 LAMOST 低分辨率的 $\log(g)$ 观测值比理论值偏低（如图 4-6 所示），但同样在此温度的星团 Melotte 22 的主序冷星，其 LAMOST-MRS 的 $\log(g)$ 却比理论值偏高。与 Melotte 22 类似的较年轻星团中，无论是 LAMOST 中分辨率还是低分辨率观测，均存在

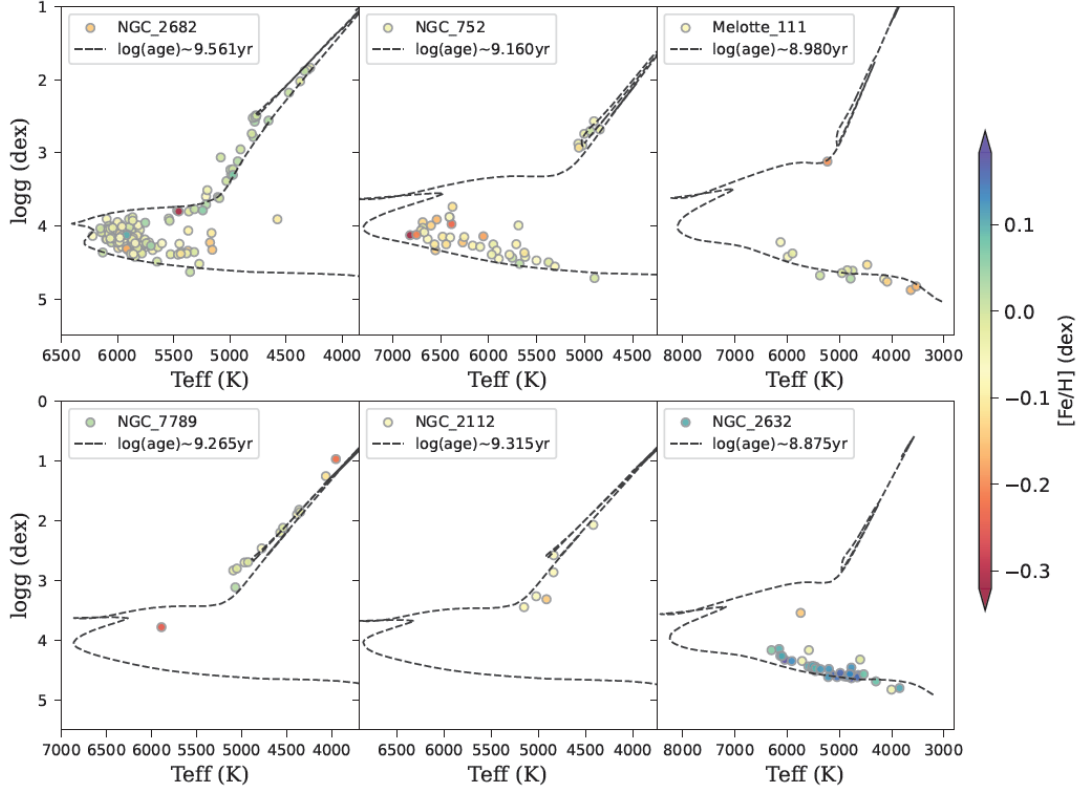


图 4-4 图示为 6 个疏散星团的赫罗图, 显示出各星团成员星有效温度 T_{eff} 和表面重力 $\log(g)$ 观测值随恒星理论演化趋势 (黑色虚线是各星团 PARSEC 理论等龄线) 的一致性, 以金属丰度 $[Fe/H]$ 标识颜色, 其中最年轻的星团 NGC 2632 主序星的颜色最深, 符合多数年轻星团的 $[Fe/H]$ 比年老星团高的观测特征.

Figure 4-4 The figure displays Hertzsprung-Russell diagrams of six open clusters, demonstrating the consistency between observed parameters (effective temperature T_{eff} and surface gravity $\log(g)$ of member stars) and theoretical stellar evolutionary trends. The black dashed lines represent PARSEC theoretical isochrones for respective clusters, while color-coding corresponds to metallicity $[Fe/H]$. Notably, the main-sequence stars in the youngest cluster NGC 2632 exhibit the darkest hue, aligning with the observational characteristic that younger clusters generally show higher $[Fe/H]$ values compared to older stellar populations.

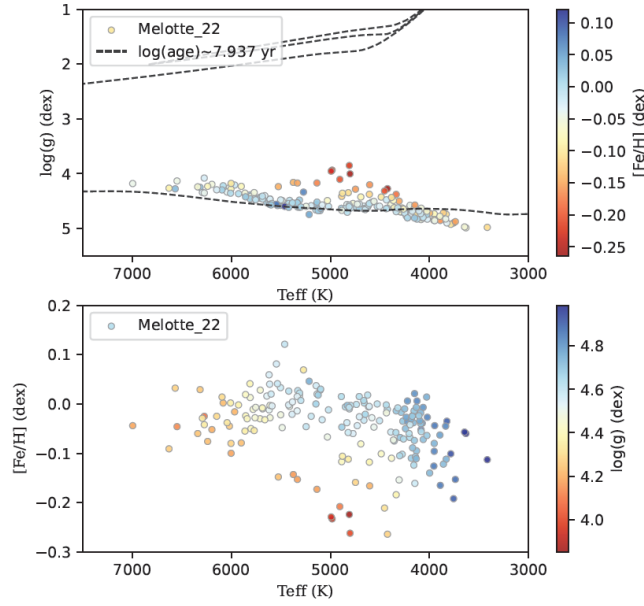


图 4-5 上图是星团 Melotte 22 的赫罗图, 黑色虚线为星团 PARSEC 理论等龄线, 以金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 代表颜色; 下图是以 $\log(g)$ 为颜色的 $T_{\text{eff}}-[\text{Fe}/\text{H}]$ 关系图.

Figure 4-5 The upper panel shows the Hertzsprung-Russell (HR) diagram of cluster Melotte 22, where black dashed lines denote the PARSEC theoretical isochrones for the cluster, with color-coding corresponding to metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$. The lower panel displays the $T_{\text{eff}}-[\text{Fe}/\text{H}]$ correlation diagram color-mapped by surface gravity $\log(g)$.

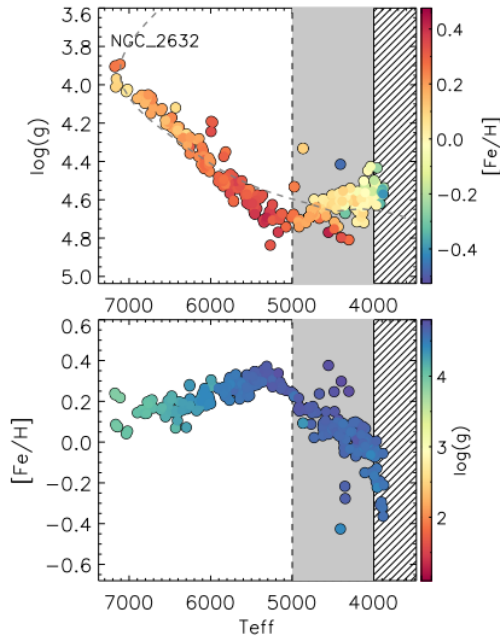


图 4-6 星团 NGC 2632 的赫罗图和 $T_{\text{eff}}-[\text{Fe}/\text{H}]$ 关系图, 黑色虚线为理论等龄线.

Figure 4-6 The HR diagram and $T_{\text{eff}}-[\text{Fe}/\text{H}]$ correlation diagram of star cluster NGC 2632 are presented, with black dashed lines indicating the theoretical isochrones.

注: 图引用自Fu et al. (2022).

部分成员星其有效温度和表面重力的观测值与理论不太相符的情况，而对于年老星团中已经演化到巨星阶段的成员，这两个观测参量与理论值符合得很好。要弄清这些现象背后的原因，还需进一步对观测数据和等龄线理论模型进行深入研究。

4.4 金属丰度和化学元素丰度

LAMOST-MRS 恒星参数表除了提供恒星的总金属丰度 $[M/H]$ 、 α 元素丰度 $[\alpha/M]$ ，还提供了典型 α 元素碳、氧、镁、铝、硅、硫、钙、钛等的丰度；轻元素氮以及铁族元素铬、镍、铜、铁等一共 13 种化学元素的丰度。如前面所介绍，星团的另一个样本是通过 LAMOST 中分辨率恒星参数表与 Hunt24 星团成员表交叉，获得的成员概率大于 50% 的具有元素丰度参数的 446 个疏散星团。其中 33% 的星团 $[Fe/H]$ 丰度值由 3 个及以上成员星平均获得；92% 的星团（412 个）具有 $[M/H]$ 、 $[\alpha/M]$ 和其它七种（碳、氮、镁、硅、钙、镍、铁）元素丰度；35% 的星团（156 个）则具有全部 13 种元素丰度值。这里需要说明的是，考虑到大多数文献以铁元素丰度 $[Fe/H]$ 作为星团金属丰度，下文中所讨论的金属丰度就是指 $[Fe/H]$ 。

在我们的样本中，有十几个星团各自被 LAMOST-MRS 观测到上百颗成员星，因此，相应地它们有较多成员星具有视向速度、金属丰度和其它元素丰度等参数，如图 4-7 就是观测较好的疏散星团 NGC 2682 的赫罗图，以金属丰度、 α 元素丰度和其它 7 种化学元素丰度 $[X/Fe]$ 为颜色标识，从颜色的均匀性可以基本判断：除了氮元素丰度 $[N/Fe]$ ，尽管成员星处于不同演化阶段，但均具有相似的某种元素丰度。单个星团的观测通常并不足以说明整个疏散星团样本的观测质量，因此，需要将星团样本与文献数据进行比较，获得初步的统计分析结果。

4.4.1 与外部数据的比较

为了深入探究 LAMOST-MRS 星团的金属丰度以及其它化学元素丰度的测量精度，我们将 LAMOST-MRS 的疏散星团样本与外部巡天数据展开了细致的比较分析。这些文献包括利用高分辨率光谱巡天数据的 Donor et al. (2020) (Donor20)，利用 APOGEE DR16 数据得到了 128 个疏散星团的金属丰度和其它 10 种化学元素丰度；Spina et al. (2021) (Spina21) 利用 GALAH+ 和 APOGEE DR16 数据获得 134 个具有高质量数据的星团参数，讨论了视向速度和金属丰度的银盘径向梯度；Netopil et al. (2022) (Netopil22) 利用他们自己之前的研究结果和 APOGEE 数据得到 136 个疏散星团的金属丰度；Zhong20, Fu22 和 Zhang et al. (2024) (Zhang24) 分别利用 LAMOST-LRS DR5、DR8 和 DR11 获得数百至上千个疏散星团的视向速度和金属丰度。

446 个 LAMOST-MRS 星团与这六篇文献的星团表交叉，分别获得 38、45、40、93、127 和 275 个共同星团，这些星团的金属丰度比较结果如表 4-3 所示。图 4-8 则展示了 LAMOST-MRS 星团分别与 Spina21 和 Zhong20 共同星团的 $[Fe/H]$ 比

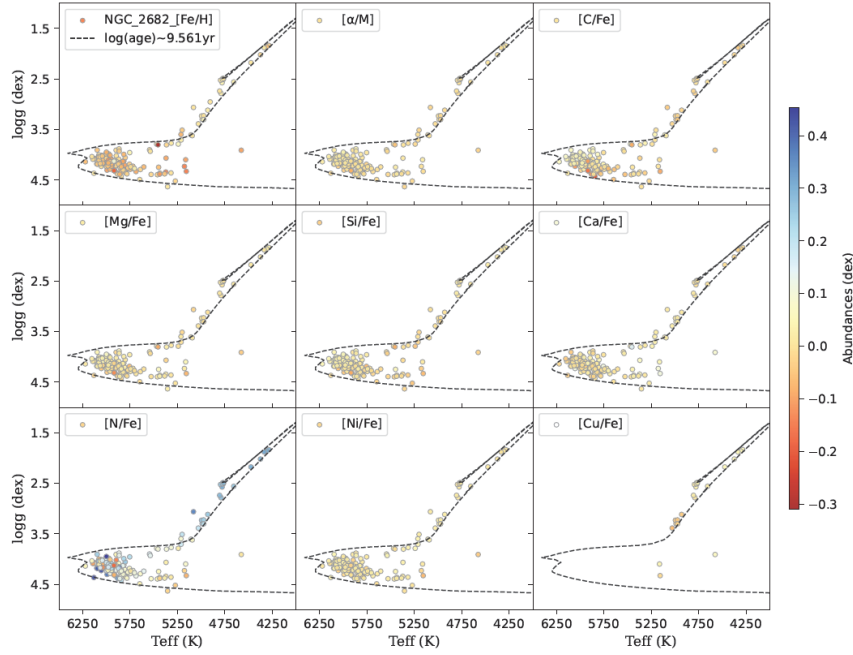


图 4-7 疏散星团 NGC 2682 的赫罗图，以 9 种元素丰度值为颜色条。

Figure 4-7 HR Diagram of NGC 2682 Open Cluster, Color-Coded by Abundances of 9 Elements

 表 4-3 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的比较 ($[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{Literature}} - [\text{Fe}/\text{H}]_{\text{MRS}}$)

 Table 4-3 Comparison of $[\text{Fe}/\text{H}]$

Literature	Survey	$\mu_{\Delta[\text{Fe}/\text{H}]}(\text{dex})$	$\sigma_{\Delta[\text{Fe}/\text{H}]}(\text{dex})$	N_OCs
Donor20	APOGEE DR16	0.024	0.076	38
Spina21	APOGEE DR16, GALAH	0.038	0.061	45
Netopil22	APOGEE DR16	0.036	0.062	40
Zhong20	LAMOST-LRS DR5	0.012	0.116	93
Fu22	LAMOST-LRS DR8	0.068	0.114	127
Zhang24	LAMOST-LRS DR8	0.021	0.123	275

较散点图和残差图。从这些图表中可以看出，LAMOST-MRS 所得到的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与文献具有较高的一致性。

除了比较星团的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ ，还与文献 Donor20、Spina21 和 Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) (CH24) 比较了星团的 9 种化学元素丰度，其中 CH24 的星团元素丰度来自 OCCASO 光谱巡天数据（分辨率 $R > 60,000$ ）。LAMOST-MRS 星团样本与 Donor20、Spina21 和 CH24 星团表交叉分别得到了 38、45、12 个共同星团，这些星团共有的 9 种化学元素丰度的比较结果如图 4-9 所示，X 分别代表氧、镁、铝、硅、钙、钛、铬、镍、铜 9 种元素。可见，镍元素丰度与文献数据最为一致，弥散最小；其次是铝、铬和铜元素丰度的分布比较均匀，尽管比镍元素弥散大，但系统偏差较小；镁、硅、钙和钛元素的分布则呈现微弱的负梯度分布趋势，说明 LAMOST-MRS 对这些元素的测量可能存在一定程度的系统偏差；氧元素的

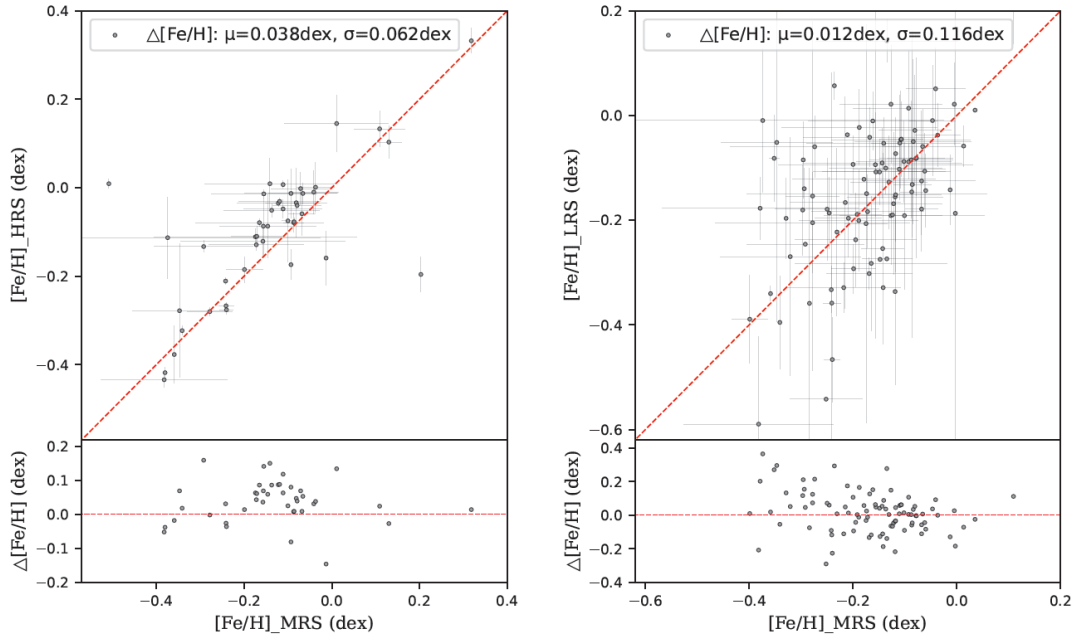


图 4-8 图示为 LAMOST 中分辨率金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与高分辨率的 Spina21 (左图) 和低分辨率的 Zhong20 (右图) 相比较, 平均差值分别为 0.038 dex 和 0.012 dex, 其标准偏差分别为 0.062 dex 和 0.116 dex, LAMOST-MRS 星团的 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 显示的误差棒是每个星团其成员 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 均值的标准偏差.

Figure 4-8 The figure shows a comparison of the LAMOST-MRS metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$ with high-resolution Spina21 (left panel) and low-resolution Zhong20 (right panel). The mean differences are 0.038 dex and 0.012 dex, respectively, with standard deviations of 0.062 dex and 0.116 dex. The error bars displayed for the $[\text{Fe}/\text{H}]$ of the LAMOST-MRS clusters represent the standard deviation of the mean $[\text{Fe}/\text{H}]$ values of their member stars.

表 4-4 $[\text{X}/\text{Fe}]$ 的比较 ($[\text{X}/\text{Fe}]_{\text{Literature}} - [\text{X}/\text{Fe}]_{\text{MRS}}$)

Table 4-4 Comparison of $[\text{X}/\text{Fe}]$ ($[\text{X}/\text{Fe}]_{\text{Literature}} - [\text{X}/\text{Fe}]_{\text{MRS}}$)

$[\text{X}/\text{Fe}]$	$\mu_{\Delta[\text{X}/\text{Fe}]} D (\text{dex})$	$\sigma_{\Delta[\text{X}/\text{Fe}]} D (\text{dex})$	N_D	$\mu_{\Delta[\text{Fe}/\text{H}]} S (\text{dex})$	$\sigma_{\Delta[\text{Fe}/\text{H}]} S (\text{dex})$	N_S
O	-0.021	0.021	26	0.147	0.204	24
Mg	-0.034	0.059	37	-0.050	0.058	39
Al	-0.032	0.076	29	0.046	0.077	29
Si	-0.012	0.035	37	-0.016	0.063	39
Ca	-0.008	0.068	37	0.039	0.025	39
Ti	-0.007	0.045	25	0.027	0.069	29
Cr	-0.008	0.048	26	0.006	0.067	9
Ni	-0.017	0.027	37	-0.015	0.027	39
Cu	-0.007	0.061	28	-0.054	0.096	29

NOTES: 'D' ~ Donor et al. (2020), 'S' ~ Spina et al. (2021).

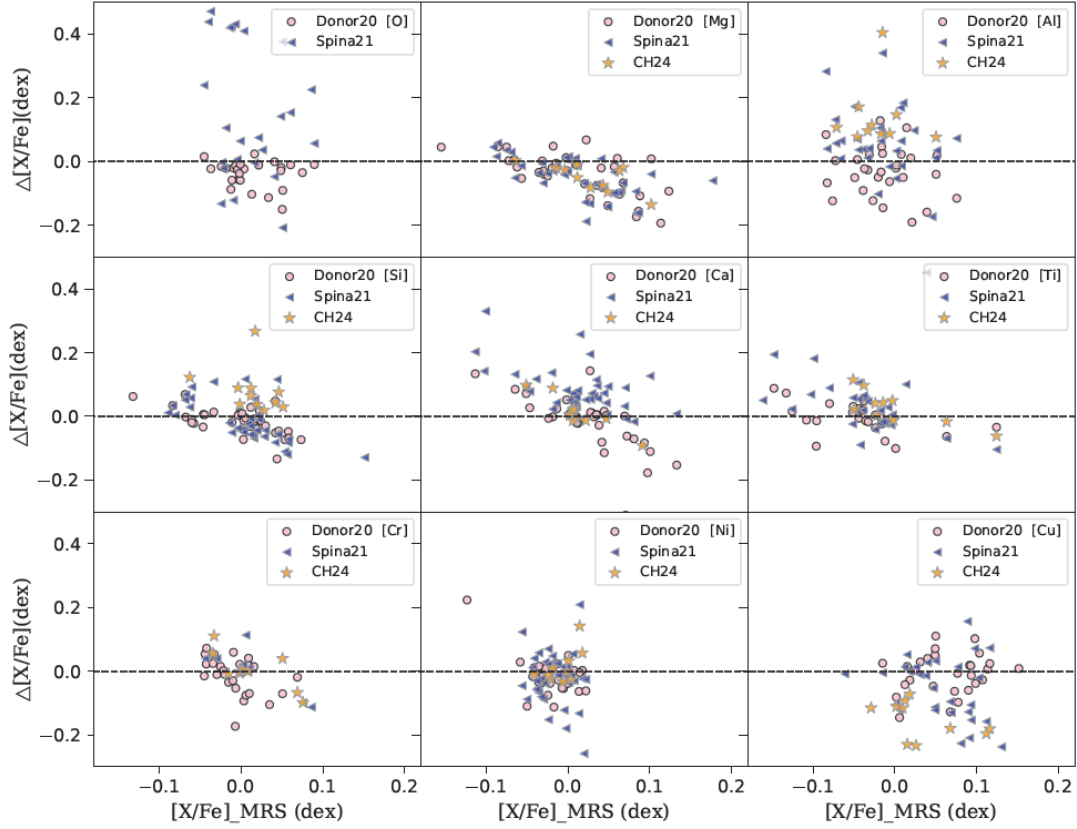


图 4-9 LAMOST-MRS 星团样本与高分辨率 Donor et al. (2020); Spina et al. (2021); Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) 星团表交叉分别获得的 38,45,12 个共同星团, 比较了其中 9 种 (CH24 缺氧元素) 化学元素丰度; 粉色圆点, 蓝色三角和橘色星形分别表示 LAMOST-MRS 与 Donor20, Spina21 和 CH24 的共同星团。

Figure 4-9 The LAMOST-MRS cluster sample, cross-matched with the high-resolution cluster catalogs from Donor et al. (2020); Spina et al. (2021); Carbajo-Hijarrubia et al. (2024), yielded 38, 45, and 12 common clusters, respectively. The abundances of 9 chemical elements (CH24, oxygen-deficient elements) were compared among them. Pink circles, blue triangles, and orange stars denote the common clusters between LAMOST-MRS and Donor20, Spina21, and CH24, respectively.

丰度，与 Donor20 比较的结果弥散比较小，但与 Spina21 相比弥散较大。星团 9 种元素丰度的比较结果如列表 4-4 所示。图和表说明 LAMOST-MRS 对这 9 种星团元素丰度的测量值与使用高分辨率巡天 APOGEE 的 Donor20 测量值最为接近，与综合应用 GALAH 和 APOGEE 数据的 Spina21 以及使用 OCCASO 数据的 CH24 相差则稍偏大。

通过与外部数据的比较说明，LAMOST-MRS 金属丰度和 12 种元素丰度的测量值与高分辨率光谱测量值是比较一致的，特别是与 APOGEE 相比较， $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和 12 种元素的 $[\text{X}/\text{Fe}]$ 丰度系统偏差均小于 0.04dex ，相应的标准偏差小于 0.08dex 。下面，我们将利用该疏散星团样本，对星团的金属丰度和其它化学元素丰度的分布性质做初步的统计分析，首先对丰度梯度进行分析和比较。

4.4.2 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的丰度梯度

疏散星团广泛分布于银河系的银盘上 ($5\text{kpc} < R_{gc} < 20\text{kpc}$)，并具有一定的年龄跨度，常常被当作银河系结构和演化的理想示踪天体。例如，星团金属丰度沿银心距的梯度分布可以作为检验银河系化学演化理论模型的约束条件。多数研究表明，银河系盘的金属丰度随银心距增加而下降，并在较远距离变平。但由于不同巡天项目探测深度和筛选的星团样本具有差异，加上观测误差和系统误差等可能的影响因素，目前文献所报道的径向金属丰度梯度的斜率范围从 -0.04dex/kpc 到 -0.07dex/kpc 不等 (Chen et al., 2003; Reddy et al., 2016; Zhong et al., 2020; Recio-Blanco et al., 2023)。

我们在 446 个星团的样本种去除了 4 个 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 观测值不好的星团（只有一颗成员星且只观测到 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 参数，并偏离大部分星团较远）。用 442 个星团分别拟合了金属丰度沿银心距 (R_{gc}) 和沿银面距 ($|Z|$) 梯度斜率。用于计算银心距 R_{gc} 的星团三维空间位置参数 (X, Y, Z) 取自 Hunt24 星团表，太阳位置 ($R_{sun}=8.0\text{kpc}, Z_{sun}=0.025\text{kpc}$) 取自 Bovy (2015) 并使用了其中的 R_{gc} 计算方法，年龄值取自 Hunt24 星团表中的 “logAge50”。拟合结果如图 4-10 所示，LAMOST-MRS 疏散星团的铁丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 沿银心距和银面距的梯度分别为 $-0.041 \pm 0.008\text{dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.044 \pm 0.067\text{dex kpc}^{-1}$ 。

近五年来，不同分辨率的大型地面光谱巡天数据提供了更为精确的恒星金属丰度及其它化学元素丰度。在星团金属丰度分布的研究中，发现银盘径向丰度在距银心 12kpc 附近存在一个称为 “knee” 的拐点，银心距大于 “knee” 的梯度明显比小于 “knee” 的分布梯度更为平缓。如表 4-5 所示，利用高分辨率光谱数据 APOGEE 的 Donor et al. (2020); Myers et al. (2022)、APOGEE 和 GALAH 的 Spina et al. (2022)、利用 Gaia-ESO 的 Magrini et al. (2023)、OCCASO 的 Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) 等都在各自的星团样本中找到了类似的 “knee”，尽管 “knee” 的具体位置目前还不统一。图 4-11 是 Donor et al. (2018, 2020) 利用 OCCAM 的数据发现 “knee” 的位置在银心距为 13kpc 附近， $R_{gc} < 13.9\text{kpc}$ 的区间梯度比较陡峭，而 $R_{gc} > 13.9\text{kpc}$ 的区间梯度比较平缓；图 4-12 是 Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) 利用

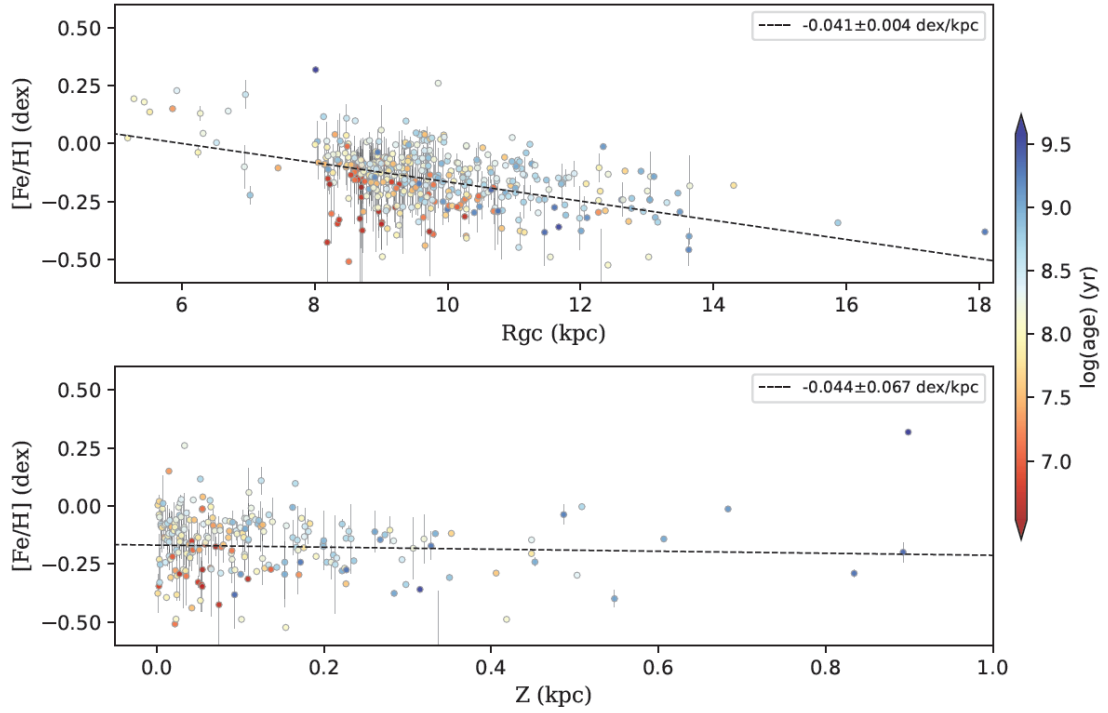


图 4-10 442 个疏散星团的金属丰度 $[Fe/H]$ 沿银心距 (R_{gc}) 和 230 个星团沿银面距 ($|Z|$) 的拟合梯度分别为 $-0.041 \pm 0.008 \text{ dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.044 \pm 0.067 \text{ dex kpc}^{-1}$ 。

Figure 4-10 The fitted gradients of metallicity $[Fe/H]$ for 442 open clusters along the Galactocentric distance (R_{gc}) and for 230 clusters along the vertical distance from the Galactic plane ($|Z|$) are $-0.041 \pm 0.008 \text{ dex kpc}^{-1}$ and $-0.044 \pm 0.067 \text{ dex kpc}^{-1}$, respectively.

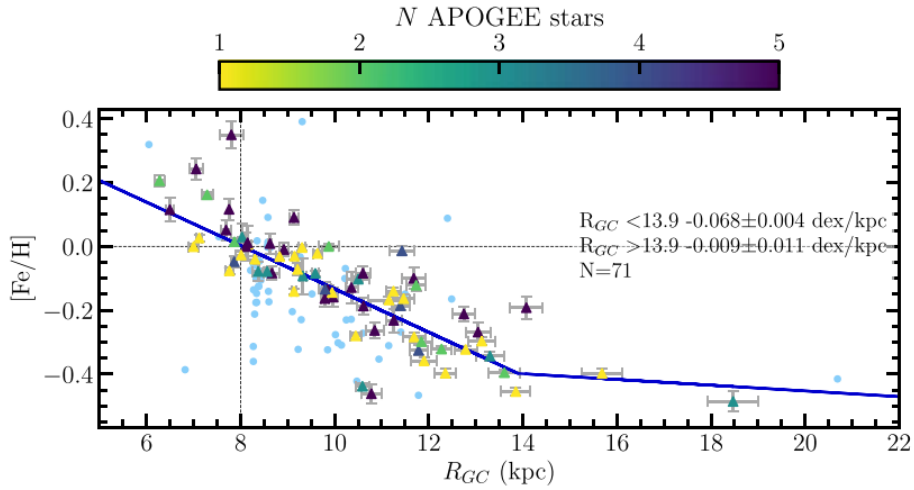


图 4-11 Donor 用 OCCAM 光谱数据得到的疏散星团金属丰度沿银心距的丰度梯度。

Figure 4-11 The abundance gradient of metallicity in open clusters along the Galactocentric distance (R_{gc}), derived by Donor using OCCAM spectral data.

注: 图引用自 Donor et al. (2020).

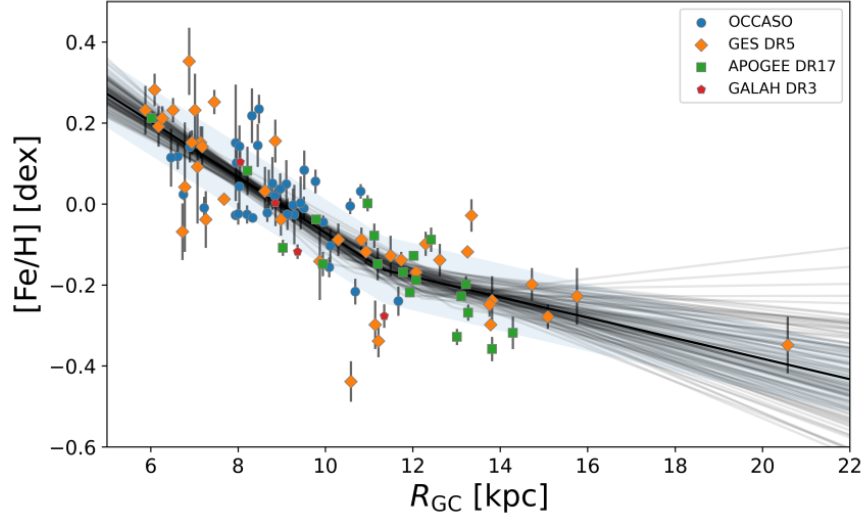


图 4-12 CH24 的疏散星团金属丰度沿银心距的丰度梯度, 拐点在 $R_{gc} = 11.3$ kpc.

Figure 4-12 The metallicity gradient ($[Fe/H]$) of open clusters from CH24 along the Galactocentric distance (R_{gc}), with a break point at $R_{gc} = 11.3$ kpc.

注: 图引用自 [Carbajo-Hijarrubia et al. \(2024\)](#).

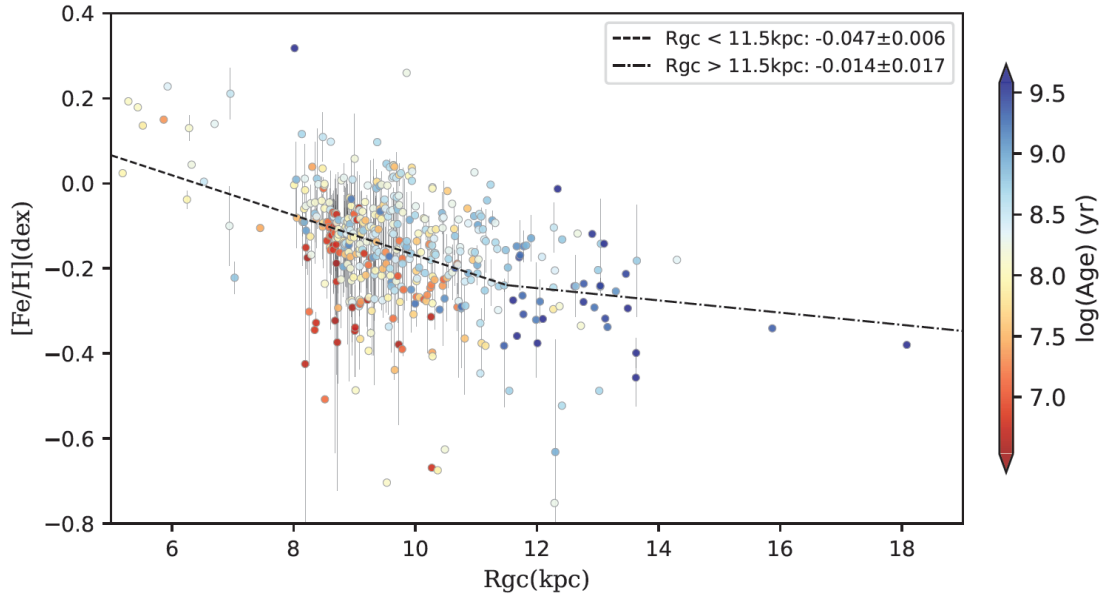


图 4-13 疏散星团的金属丰度 $[Fe/H]$ 沿银心距的分布在 $R_{gc}=11.5$ kpc 处有个明显拐点, 在 $R_{gc}<11.5$ kpc 区域 387 个星团的分布的拟合斜率为 $-0.047 \pm 0.006 \text{ dex kpc}^{-1}$; 在 $R_{gc}>11.5$ kpc 区域的 55 个星团分布的拟合斜率为 $-0.014 \pm 0.017 \text{ dex kpc}^{-1}$, 颜色表征星团年龄 $\log(\text{Age})$.

Figure 4-13 The metallicity distribution ($[Fe/H]$) of open clusters along the Galactocentric distance exhibits a distinct break point at $R_{gc}=11.5$ kpc. For the 387 clusters in the region $R_{gc}<11.5$ kpc, the fitted slope is $-0.047 \pm 0.006 \text{ dex kpc}^{-1}$. For the 55 clusters in the region $R_{gc}>11.5$ kpc, the fitted slope is $-0.014 \pm 0.017 \text{ dex kpc}^{-1}$. The color scale represents the cluster ages in logarithmic units ($\log(\text{Age})$).

表 4-5 径向金属丰度梯度的比较
Table 4-5 Comparison of radial metallicity gradients

Reference	Slope (dex kpc ⁻¹)	Range (kpc)	N_OCs
This work	-0.041 ±0.004	5-18	442
	-0.047 ±0.006	<11.5	387
	-0.014 ±0.017	>11.5	55
Donor et al. (2020)	-0.068 ±0.004	<13.9	68
	-0.009 ±0.011	>13.9	3
Spina et al. (2022)	-0.064 ±0.007	<12.1	-
	-0.019 ±0.008	>12.1	-
Myers et al. (2022)	-0.055 ±0.001	6-18	85
	-0.073 ±0.002	<11.5	51
	-0.032 ±0.002	>11.5	34
Magrini23	-0.054 ±0.004	6-21	62
	-0.081 ±0.008	<11.2	42
	-0.044 ±0.014	>11.2	20
CH24	-0.062 ±0.007	-	99
	-0.069 ±0.008	<11.3	71
	-0.025 ±0.011	>11.3	28
Chen et al. (2003)	-0.063 ±0.008	<17	118
Reddy et al. (2016)	-0.052 ±0.011	<12	79
Zhong20	-0.053 ±0.004	7-15	183
Zhang et al. (2021b)	0.066 ±0.005	6-15.5	157
Gaia Collaboration23	0.054 ±0.008	5-12	503

OCCASO 光谱数据得到疏散星团金属丰度，并发现“knee”的位置在 11.3kpc 附近。LAMOST-MRS 金属丰度的银盘径向梯度分布也在银心距为 11.5kpc 的位置存在类似的一个拐点，小于和大于该拐点区域的拟合斜率分别为 $-0.047 \pm 0.006 \text{ dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.014 \pm 0.017 \text{ dex kpc}^{-1}$ ，如图 4-13 所示。Donor et al. (2020) 提到，“knee”的位置和斜率与所选择的星团样本关系较为紧密。期待在将来获得更多更精确的星团金属丰度观测值之后能揭开有关“knee”的秘密及银河系化学演化的历史。

图 4-10 和图 4-13 中的颜色显示了不同年龄的星团沿银心距的分布，反映出绝大部分的年轻星团在银心距为 6~9kpc 之间，而年老星团均在 10kpc 之外（除了极个别的老年星团），与 Gaia 发布数据以来相关疏散星团研究的文献报道是非常一致的，与 Cantat-Gaudin et al. (2020) 研究中整个星团样本的年龄分布对比（使用了三个径向区间：内盘 $R_{gc} < 7 \text{ kpc}$ ；太阳区域 $7 \text{ kpc} < R_{gc} < 9 \text{ kpc}$ ；外盘 $R_{gc} > 9 \text{ kpc}$ ），

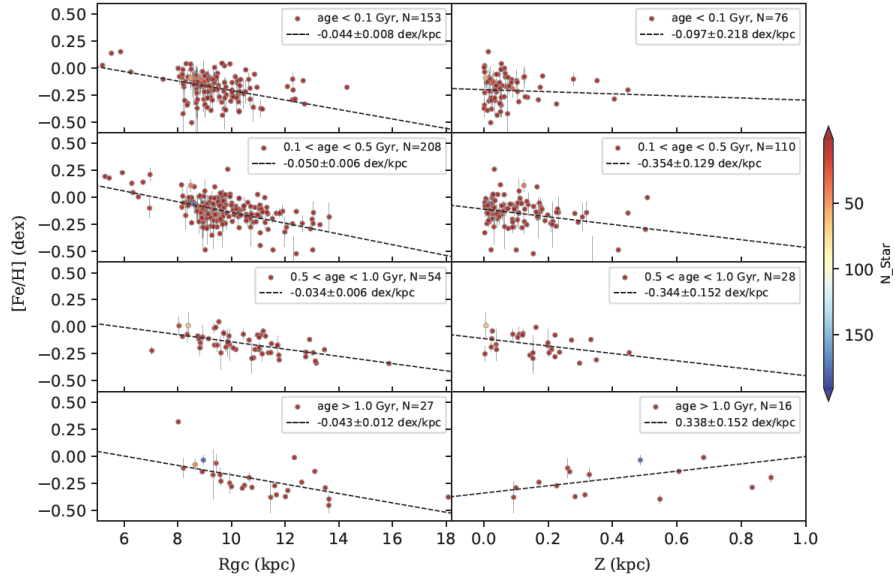


图 4-14 展示了 442 个疏散星团在 4 个年龄区间的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 沿银心距和银面距的分布; 颜色标识有金属丰度值的成员星数目, 少数星团具有 50-100 个以上成员, 绝大多数则低于 50 个。

Figure 4-14 The figure shows the metallicity $[\text{Fe}/\text{H}]$ distribution of 245 open clusters across four age bins as functions of Galactocentric distance and vertical distance. The color scale indicates the number of member stars with metallicity measurements. A small fraction of clusters contain 50–100 or more members, while the vast majority have fewer than 50.

表 4-6 不同年龄区间的径向金属丰度梯度的比较

Table 4-6 Comparison of radial metallicity gradients across different age bins

Reference	Age Bin (Gyr)	Slope_ R_{gc} (dex kpc $^{-1}$)	N_OCs	Slope_ Z (dex kpc $^{-1}$)	N_OCs
This work	Age < 0.1	-0.044 ± 0.008	153	-0.097 ± 0.218	76
	$0.1 < \text{Age} < 0.5$	-0.050 ± 0.006	208	-0.354 ± 0.129	110
	$0.5 < \text{Age} < 1.0$	-0.034 ± 0.006	54	-0.344 ± 0.152	28
	Age > 1.0	-0.043 ± 0.012	27	0.338 ± 0.152	16
Zhong20	Age < 0.1	-0.066 ± 0.021	27	0.257 ± 0.397	27
	$0.1 < \text{Age} < 0.5$	-0.038 ± 0.012	45	-0.122 ± 0.150	45
	$0.5 < \text{Age} < 1.0$	-0.042 ± 0.009	32	-0.338 ± 0.086	32
	$1.0 < \text{Age} < 2.0$	-0.044 ± 0.011	20	-0.103 ± 0.099	20
	Age > 2.0	-0.053 ± 0.012	12	0.227 ± 0.076	12
Donor20	Age ≤ 0.4	-0.050 ± 0.003	13	-	-
	$0.4 < \text{Age} \leq 0.8$	-0.073 ± 0.003	16	-	-
	$0.8 < \text{Age} \leq 2.0$	-0.066 ± 0.002	27	-	-
	Age ≥ 2.0	-0.094 ± 0.005	12	-	-

结果清晰地显示了基本相同的效应，即银河系内盘几乎完全不存在古老星团。Viscasillas Vázquez et al. (2022) 认为这一限制可能是内禀的，因为高密度区域的破坏性过程（如星团瓦解）效率更高；Messa et al. (2018) 也在近期在 M51 星系中的观测也印证了这一点，即发现星团的年龄分布取决于所研究的区域：仅在密集区域（如旋臂附近）存在快速瓦解现象，而在大银心距区域和旋臂间区域几乎观测不到星团瓦解，而有高效星团瓦解的区域才可能存在诞生不久的年轻星团。

为了解星团各年龄区间的金属丰度分布（分析是否为线性分布还是随年龄有起伏），样本分成了 4 个年龄区间，分别对沿银心距和银面距的分布进行了线性拟合，如图 4-14 所示，颜色指示的是每个星团有 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 值的成员星数目，大部分星团成员数小于 50，少数星团超过 50 个成员，个别星团达到上百个成员。在近似的年龄区间，拟合结果与 LAMOST-LRS 的 Zhong et al. (2020) 比较，起伏的趋势相反，但与高分辨率的 Donor et al. (2020) 在低年龄区间有近似的起伏趋势，如表 4-6。金属丰度按年龄的分布趋势，除了与星团金属丰度的测量精度有关，还与星团样本的选择、星团年龄等因素有关，因此文献中的梯度拟合结果并不彼此完全相同。相比高分辨率光谱测量数据，LAMOST-MRS 目前能观测到的星团样本中绝大部分年龄分布在 $0.1\text{Gyr} < \text{Age} < 0.5\text{Gyr}$ ，空间分布在 $8\text{kpc} < R_{gc} < 14\text{kpc}$ 范围，因此年龄较老 ($\text{Age} > 3\text{Gyr}$) 和银心距较远 ($R_{gc} > 18\text{kpc}$) 或者较近的区域 ($R_{gc} < 8\text{kpc}$) 的疏散星团数量仍极为有限，尤其对于远银心区域的丰度梯度拟合受到观测限制。

4.4.3 $[\text{X}/\text{Fe}]$ 的丰度梯度

为分析 LAMOST-MRS 星团除去 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 之外的 12 种化学元素丰度沿银心距的分布，我们在 446 个星团样本中进行了筛选，首先选取了除铁丰度外的 156 个具有全部 12 种（碳、氮、镁、硅、钙、镍、氧、铝、硫、钛、铬、铜）化学元素丰度的星团，在其余的 290 个星团中再选出具有 3 个及以上成员星同时测得这 6 种（碳、氮、镁、硅、钙、镍）元素丰度值的 66 个星团，组成一共包含 222 个星团的子样本。其中少量星团尽管只观测到了一颗成员星，如 Berkeley 9、Berkeley 19、Berkeley 20、NGC 6791 等，但均具有全部 12 种元素丰度的光谱测量值，因此也被选入了此样本中。样本中 40% 星团的年龄来自文献 Zhong20，其它则选自 Hunt24(logAge50)，进行了人工检验和修正。

图 4-15 展示了 222 个星团 $[\text{Fe}/\text{H}]-[\text{X}/\text{Fe}]$ 关系，颜色标识为星团年龄，显示出大部分年老星团的铁丰度比年轻星团的低，符合银河系化学演化的整体趋势，尽管也存在少量铁丰度高的老星团和铁丰度低的年轻星团。 α 元素氧、镁、铝、硅、硫、钙、钛的丰度随铁丰度近似线性分布，有微弱降低的趋势，基本与太阳相应元素丰度值一致。铁族元素铬、镍、铜的丰度呈水平分布，但铜铁丰度比基本在零线以上，说明这些星团的铜铁丰度比与太阳相比要高。碳元素丰度呈近似水平分布，氮元素的丰度则较明显地按年龄分成两个分布区域，年轻星团比年老星团的氮丰度低，即年轻星团的氮丰度与太阳相似，年老星团的氮丰度比太阳高许多。其中的部分元素丰度分布与 Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) 刚好相反，如铜

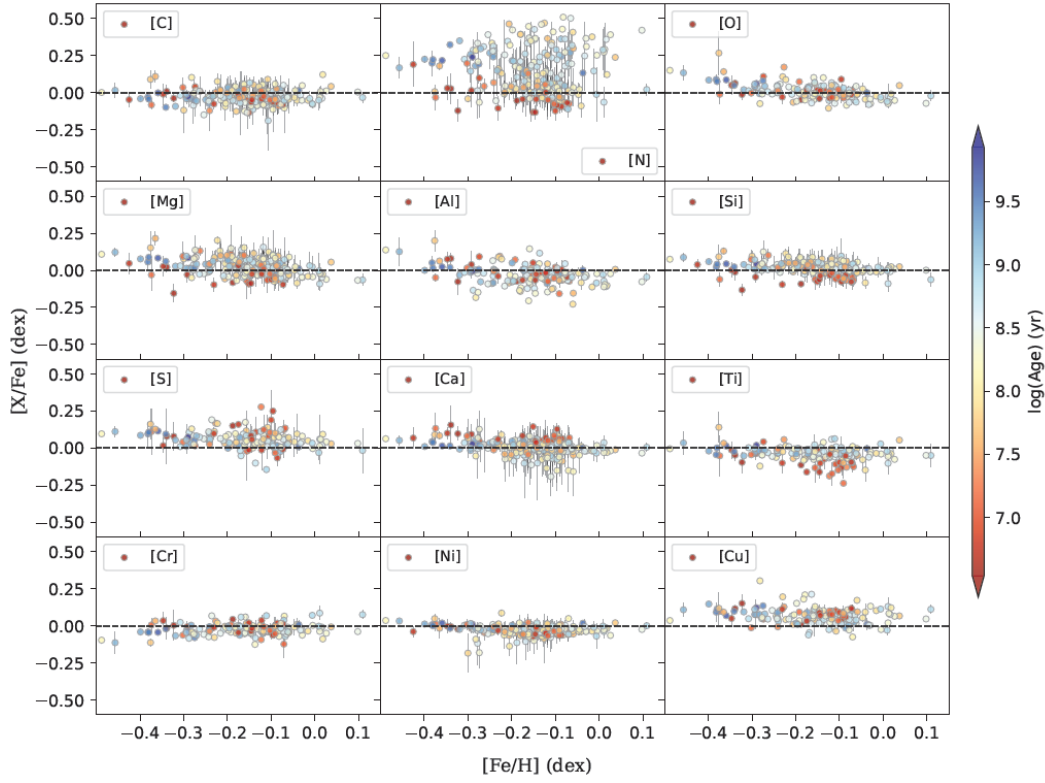


图 4-15 222 个疏散星团子样本的 $[\text{Fe}/\text{H}]-[\text{X}/\text{Fe}]$ 关系, $\log(\text{Age})$ 为 colorbar.

Figure 4-15 Visualization of $[\text{Fe}/\text{H}]-[\text{X}/\text{Fe}]$ Anti-Correlations in 222 Open Cluster Subsamples with $\log(\text{Age})$ Color Mapping.

元素。因此这 12 种元素丰度所呈现出的分布特征，其背后的物理化学机制有待进一步深入探究和认证。

图 4-16 是 12 种元素丰度随银心距 R_{gc} 的分布，颜色为星团年龄（Hunt24 中的 $\log(\text{Age}50)$ ）。图中较明显的特点是绝大部分特别年轻星团分布于 $R_{gc} < 10\text{kpc}$ 以内； $R_{gc} > 14\text{kpc}$ 的区域，能够观测到全部 12 种元素丰度的星团数只有 3 个；在 $8\text{kpc} < R_{gc} < 10\text{kpc}$ 之间，尽管（除了氮元素丰度以外的）11 种元素丰度的分布有一些起伏，最终均随 R_{gc} 趋于水平；最特别的是氮丰度，随 R_{gc} 的分布是非常陡峭的上升趋势（正梯度分布），可能的原因是通常年老星团距银心较远而氮丰度却比年轻星团高，深层次的物理化学原理仍有待进一步探索，目前还尚未见大量疏散星团类似相关统计研究结果的报道，Lum et al. (2019) 也仅单独讨论了一个星团 NGC 752 中巨星氮丰度比主序星高的可能性。

图 4-17 是各元素丰度随银心距分布的线性拟合，银心距范围从 8kpc 到 18kpc ，颜色代表具有该种元素丰度的成员星数目。12 种元素丰度随银心距的变化，除了碳和铬两种元素呈现出微弱的负梯度，氮丰度有明显的正梯度分布，其它元素丰度则随银心距有微弱增加的趋势。氮元素丰度随银心距的分布总体是明显增大的，但在图 4-17 和图 4-16 中显示出“先升后降”的趋势，而变化的拐点刚好在 $R_{gc} = 11.5\text{kpc}$ 处。在小于 11.5kpc 区间，氮丰度随银心距明显升高，而大于 11.5kpc 的区域则呈现缓慢下降的趋势。这个现象可能与观测效应有关，因为星

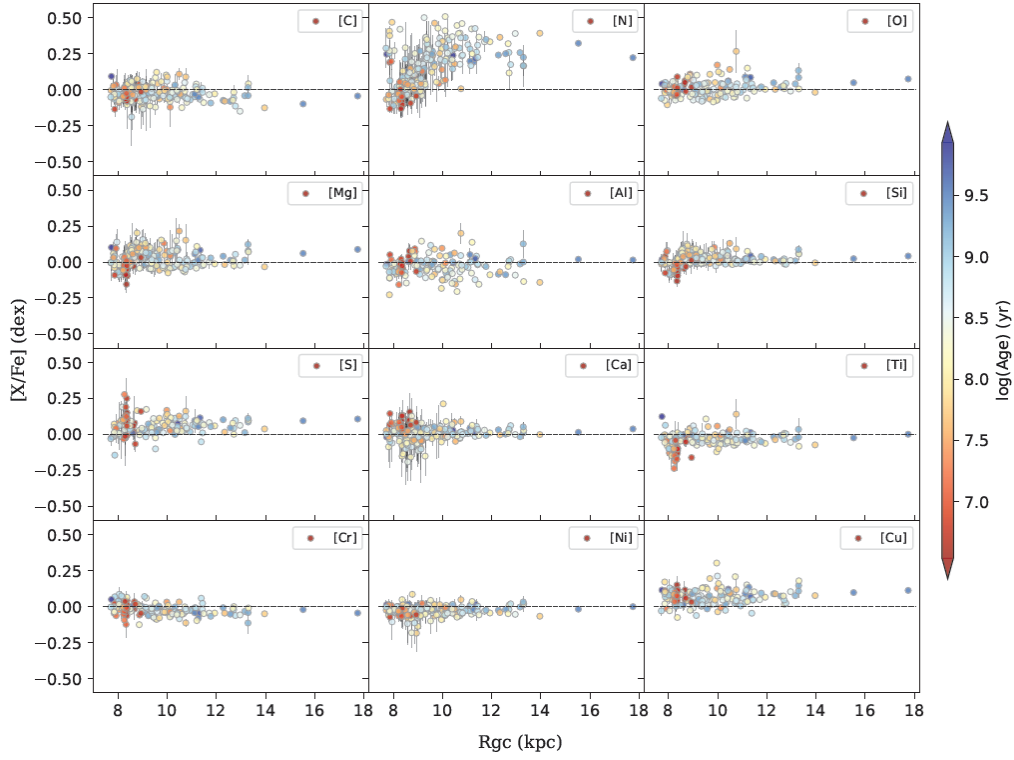


图 4-16 222 个疏散星团子样本的 12 种元素丰度径向梯度, $\log(\text{Age})$ 为 colorbar.

Figure 4-16 Visualization of Radial Abundance Gradients for 12 Elements in 222 Open Cluster Subsamples with $\log(\text{Age})$ Color Mapping.

团样本中, 大于拐点的具有氮丰度观测值的疏散星团数量较少。

图 4-18 是各元素丰度随年龄分布的线性拟合, 氮元素丰度随年龄的分布则基本呈线性增加的趋势, 不存在明显拐点。此外, 碳、硫、钙、铬和铜元素丰度随年龄呈微弱的负梯度趋势, 其余元素丰度则显示出微弱的正梯度趋势。Carbajo-Hijarrubia et al. (2024) 的结果铬和铜元素丰度随年龄呈微弱的正梯度趋势。要解释这些差别, 还有待于广泛调研相关文献和探究更深层次的科学原理。

在表 4-7 中列出了 12 种元素丰度分别在 $5\text{kpc} < R_{gc} < 18\text{kpc}$ 和 $R_{gc} < 11.5\text{kpc}$ (拐点) 范围的梯度分布, 同时列出了 Donor et al. (2020) 在 $R_{gc} < 14\text{kpc}$ (拐点) 范围的拟合结果。与该文献比较, 除了硅、钛、铬、镍等 4 种元素的分布两者趋势相反, 其它元素丰度沿银心距则呈现一致的正梯度分布。

这部分内容仅初步展示了 LAMOST-MRS 星团子样本 (222 个星团) 的 12 种化学元素丰度 $[X/\text{Fe}]$, 随空间 (银心距) 和时间 (星团年龄) 的梯度分布, 以及拟合结果与部分文献数据的比较。这些梯度分布所蕴含的物理现象、化学演化机制等科学原理, 有待于下一步展开深入研究。

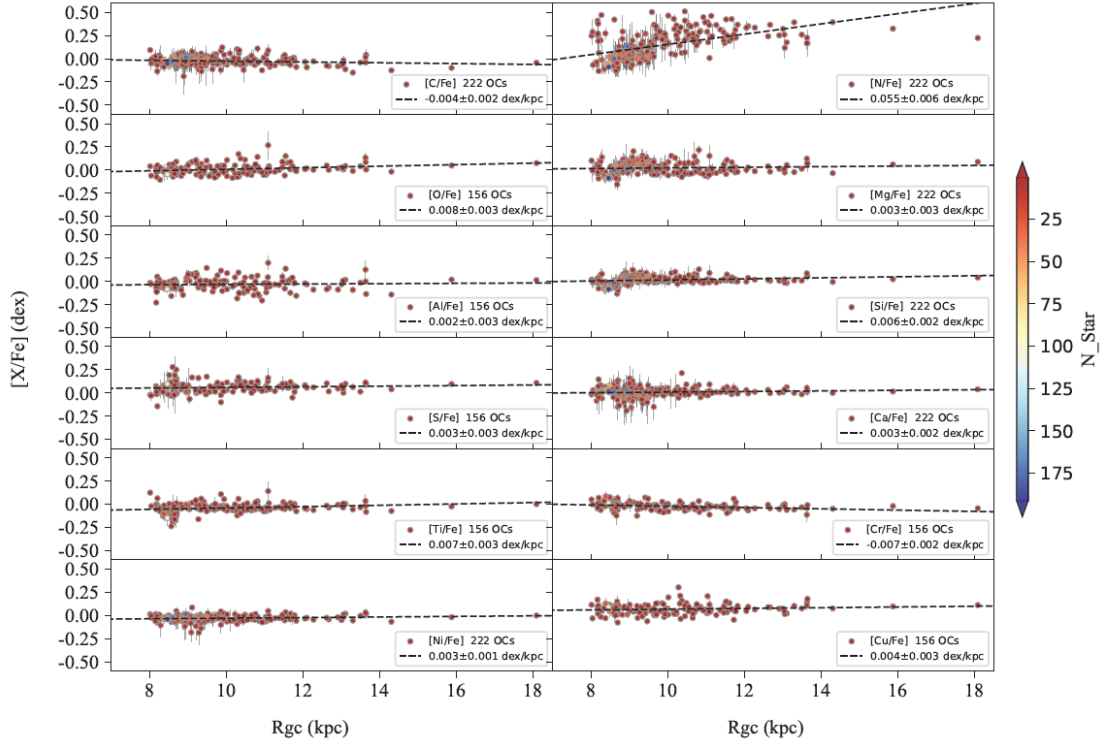


图 4-17 222 个疏散星团子样本的 12 种元素丰度径向梯度线性拟合.

Figure 4-17 Radial Gradient Linear Fitting of 12 Element Abundances in 222 Open Cluster Subsamples

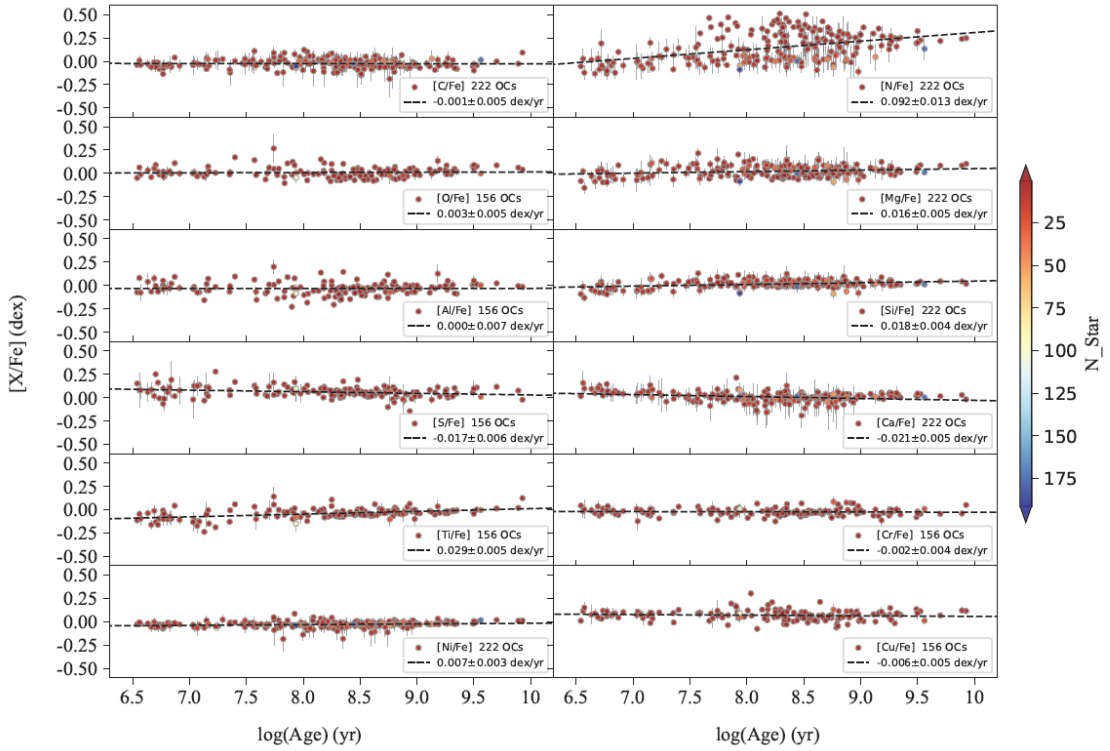


图 4-18 222 个疏散星团子样本的 12 种元素丰度随年龄的分布.

Figure 4-18 Abundance Distributions of 12 Chemical Elements as a Function of Age in 222 Open Cluster Subsamples

表 4-7 12 种化学元素丰度梯度的比较

Table 4-7 Comparison of 12 Chemical Element Abundance Gradients

[X/Fe]	This work 5 < R_{gc} < 18 (kpc) (dex kpc ⁻¹)	N	This work R_{gc} < 11.5 (kpc) (dex kpc ⁻¹)	N	Slope_D R_{gc} < 14 (kpc) (dex kpc ⁻¹)	N_D
C	-0.004 ± 0.002	222	0.002 ± 0.004	195	-	-
N	0.055 ± 0.006	222	0.100 ± 0.011	195	-	-
O	0.008 ± 0.003	156	0.010 ± 0.005	129	0.013 ± 0.002	45
Mg	0.003 ± 0.003	222	0.006 ± 0.005	195	0.009 ± 0.001	68
Al	0.002 ± 0.003	156	0.003 ± 0.006	129	0.018 ± 0.002	68
Si	0.006 ± 0.002	222	0.014 ± 0.003	195	-0.001 ± 0.001	68
S	0.003 ± 0.003	156	0.005 ± 0.006	129	0.010 ± 0.003	68
Ca	0.003 ± 0.002	222	0.003 ± 0.005	195	0.012 ± 0.001	68
Ti	0.007 ± 0.003	156	0.015 ± 0.005	129	-0.000 ± 0.002	68
Cr	-0.007 ± 0.002	156	-0.013 ± 0.003	129	0.010 ± 0.004	68
Ni	0.003 ± 0.001	222	0.002 ± 0.003	195	-0.002 ± 0.001	68
Cu	0.004 ± 0.003	156	0.002 ± 0.005	129	0.015 ± 0.004	68

Slope_D indicates [Donor et al. \(2020\)](#).

4.5 星团参数表和星团成员参数表

在这个工作中，我们获得了四个星表，它们分别是 1033 个有 LAMOST-MRS 视向速度的疏散星团表及其 6817 颗星团成员星列表；446 个具有金属丰度和 13 种化学元素丰度参量的疏散星团表及其 2226 颗星团成员列表，各表包含的具体参数如表 4-8、表 4-9、表 4-10 和表 4-11 所示。这是迄今为止，唯一具有较全面的 LAMOST 中分辨率光谱参数且疏散星团数量最多的星团表。

除了疏散星团表及其成员星列表，顺带还得到了由 Hunt24 标记为 “moving group” 的 322 个星团和 9 个球状星团的视向速度以及金属丰度、多种化学元素丰度等参数。

我们在论文最后的附录部分附上了包含 222 个疏散星团的中分辨率光谱参数表，这是在文中用于讨论除去 [Fe/H] 之外的 12 种化学元素丰度的星团子样本，其中 156 个星团具有全部 13 种化学元素丰度值。在这个星团参数表中，提供了 LAMOST 中分辨率光谱获得的星团平均视向速度、金属丰度和其它化学元素丰度的平均值及其相应标准偏差（用 σ 表示）。星团视向速度和元素丰度的均值及其标准偏差的单位分别是 km s^{-1} 和 dex。在关于化学元素丰度的成员星表中，还列入了由 LAMOST-LASP 方法获得部分恒星的参数 $V_{\text{ sini}}$ ，因为 CNN 方法没有提供此参数。

表 4-8 疏散星团视向速度参数表

Table 4-8 Radial Velocity Catalog of Open Clusters

Column	Format	Unit	Description
Cluster	String	–	Cluster name
Ra	Float	deg	Mean right ascension of members from Hunt2024
Dec	Float	deg	Mean declination of members from Hunt2024
GLON	Float	deg	Galactic longitude of members from Hunt2024
GLAT	Float	deg	Galactic latitude of members from Hunt2024
PMRa	Float	mas yr ⁻¹	Mean proper motion along Ra of members from Hunt2024
s_PMRa	Float	mas yr ⁻¹	Standard deviation of PMRa of members from Hunt2024
PMDe	Float	mas yr ⁻¹	Mean proper motion along Dec of members from Hunt2024
s_PMDe	Float	mas yr ⁻¹	Standard deviation of PMDe of members from Hunt2024
PLX	Float	mas	Mean parallax from Hunt2024
s_PLX	Float	mas	Standard deviation of Mean parallax from Hunt2024
RV_MRS	Float	km s ⁻¹	Mean radial velocity of clusters by LAMOST-MRS
RV_MRS_Std	Float	km s ⁻¹	Standard deviation of RV_MRS
RV_MRS_Num	Integer	–	Number of stars used for RV_MRS estimation
RV_MRS_flag	String	–	Flag of Gaussian fitting process for RVs estimation
Zmax	Float	Kpc	Averaged maximum vertical distances above the Galactic plane
R_{gc}	Float	Kpc	Galactocentric distance assuming the Sun is located at 8.0 kpc
Dist50	Float	mas	50th percentile of maximum likelihood distance from Hunt2024
LogAge50	Float	yr	50th percentile of logarithm of cluster age from Hunt2024

表 4-9 疏散星团成员星视向速度参数表

Table 4-9 Radial Velocity Catalog of Cluster Member Stars

Column	Format	Unit	Description
Cluster	String	–	Cluster name
Uid	Float	–	Unique source identifier calculated by LAMOST-MRS
GP_id	Float	–	For each LAMOST source of star by LAMOST-MRS
GaiaDR3	Integer	–	Gaia DR3 source ID from Hunt2024
Ra_obs	Float	deg	Fiber pointing right ascension of star by LAMOST-MRS
Dec_obs	Float	deg	Fiber pointing declination of star by LAMOST-MRS
PMRa	Float	mas yr ⁻¹	Mean proper motion along Ra of stars from Hunt2024
e_PMRa	Float	mas yr ⁻¹	Standard error of PMRa of stars from Hunt2024
PMDe	Float	mas yr ⁻¹	Mean proper motion along Dec of stars from Hunt2024
e_PMDe	Float	mas yr ⁻¹	Standard error of PMDe of stars from Hunt2024
PLX	Float	mas	Mean parallax from Hunt2024
e_PLX	Float	mas	Standard error of parallax from Hunt2024
Gmag	Float	mag	Mean G-band magnitude from Hunt2024
BP-RP	Float	mag	BP-RP colour from Hunt2024
Band	String	–	represent RV by B or R band spectra
RV_MRS	Float	km s ⁻¹	Mean radial velocity of each star by LAMOST-MRS
RV_MRS_Err	Float	km s ⁻¹	Error of RV_MRS of each star
RV_MRS_Nobs	Integer	–	Number of observation for RV_MRS of each star

表 4-10 疏散星团化学元素丰度参数表

Table 4-10 Chemical Abundances Catalog of Open Clusters

Column	Format	Unit	Description
Cluster	String	–	Cluster name
Ra	Float	deg	Mean right ascension of members in Hunt2024
Dec	Float	deg	Mean declination of members in Hunt2024
M_H	Float	dex	Mean [M/H] measured from member spectra by LAMOST-MRS(cnn)
M_H_Std	Float	dex	Standard deviation of [M/H]
M_H_Num	Integer	–	Number of stars used for [M/H] estimation
α _M	Float	dex	Mean [α /M] measured from member spectra by LAMOST-MRS(cnn)
α _M_Std	Float	dex	Standard deviation of [α /M]
α _M_Num	Integer	–	Number of stars used for [α /M] estimation
Fe_H	Float	dex	Mean [Fe/H] measured from member spectra by LAMOST-MRS(cnn)
Fe_H_Std	Float	dex	Standard deviation of [Fe/H]
Fe_H_Num	Integer	–	Number of stars used for [Fe/H] estimation
...	...	...	...
Cu_Fe	Float	dex	Mean [Cu/Fe] measured from member spectra by LAMOST-MRS(cnn)
Cu_Fe_Std	Float	dex	Standard deviation of [Cu/Fe]
Cu_Fe_Num	Integer	–	Number of stars used for [Cu/Fe] estimation

表 4-11 疏散星团成员星化学元素丰度参数表

Table 4-11 Chemical Abundances Catalog of Cluster Member Stars

Column	Format	Unit	Description
Cluster	String	–	Cluster name
Uid	Float	–	Unique source identifier calculated by LAMOST-MRS
GP_id	Float	–	For each LAMOST source of star by LAMOST-MRS
GaiaDR3	Integer	–	Gaia DR3 source ID from Hunt2024
Ra_obs	Float	deg	Fiber pointing right ascension of star by LAMOST-MRS
Dec_obs	Float	deg	Fiber pointing declination of star by LAMOST-MRS
T_{eff}	Float	K	Mean effective temperature of stars measured by LAMOST-MRS(cnn)
T_{eff} _Std	Float	K	Standard deviation of effective temperature
T_{eff} _Nobs	Integer	–	Number of observation for effective temperature of each star
Log(g)	Float	dex	Mean Surface gravity of stars measured by LAMOST-MRS(cnn)
Log(g)_Std	Float	dex	Standard deviation of Surface gravity
Log(g)_Nobs	Integer	–	Number of observation for Surface gravity of each star
M_H	Float	dex	Mean [M/H] of stars measured by LAMOST-MRS(cnn)
M_H_Std	Float	dex	Standard deviation of [M/H]
M_H_Nobs	Integer	–	Number of observation for [M/H] of each star
...	...	...	...
Cu_Fe	Float	dex	Mean [Cu/Fe] of stars measured by LAMOST-MRS(cnn)
Cu_Fe_Std	Float	dex	Standard deviation of [Cu/Fe]
Cu_Fe_Nobs	Integer	–	Number of observation for [Cu/Fe] of each star
Vsini_Lasp	Float	dex	Mean Vsini of stars measured by LAMOST-MRS(lasp)
Vsini_Lasp_Std	Float	dex	Standard deviation of Vsini_Lasp
Vsini_Lasp_Nobs	Integer	–	Number of observation for Vsini_Lasp of each star

4.6 小结

本工作通过 LAMOST-MRS DR11v1.1 光谱数据和 Hunt24 的星团表和星团成员表相交叉, 获得了 1033 个具有 LAMOST 中分辨率视向速度的疏散星团, 其中 446 个星团还获得了由 CNN 方法得到的金属丰度、 α 元素丰度和 13 种化学元素丰度等参量。LAMOST-MRS 疏散星团视向速度与高分辨率和 LAMOST 低分辨率光谱相比, 平均差值分别小于 1km s^{-1} 和 5km s^{-1} , 弥散 (标准偏差) 均小于 10km s^{-1} , 与分辨率 ($R \sim 11500$) 的 Gaia 相比, 平均差值小于 0.5km s^{-1} , 弥散小于 20km s^{-1} 。

对 LAMOST-MRS 的恒星大气参数分析发现, 对疏散星团成员星, 有效温度范围在 $4300\text{K} < T_{\text{eff}} < 5500\text{K}$ 比较可靠。在此温度范围内, 年老星团 (有成员星演化到渐近巨星支或巨星支的星团) 的金属丰度、 α 元素丰度与温度几乎没有相关性, 但超出此温度范围的年老或年轻星团成员星, 则显示出一定的相关性。

由 LAMOST-MRS 得到的星团金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与高分辨率和 LAMOST 低分辨率比较, 平均差值都小于 0.04 dex, 与高分辨率的弥散小于 0.08 dex, 与低分辨率的弥散小于 0.12 dex。氧、镁、铝、硅、硫、钙、钛、铬、镍和铜元素丰度与使用高分辨率 APOGEE 数据 (Donor20) 比较平均差值小于 -0.04 dex, 钙、钛、铬、铜四种元素丰度的平均差值较小, 均小于 -0.01 dex; 与 GALAH 数据 (Spina21) 相比平均差值和弥散稍大于 APOGEE 数据。

拟合了星团金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 沿银心距和银面距的分布变化趋势, 梯度斜率分别为 $-0.041 \pm 0.004\text{dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.044 \pm 0.067\text{dex kpc}^{-1}$ 。在银心距为 11.5kpc 的位置, 梯度分布存在类似文献报道的拐点, 小于此拐点的斜率为 $-0.047 \pm 0.006\text{dex kpc}^{-1}$, 大于此拐点的斜率为 $-0.014 \pm 0.017\text{dex kpc}^{-1}$ 。我们对 12 种化学元素也分别做了径向丰度梯度的拟合, 除了碳和铬元素丰度呈负梯度变化, 其余氮、氧、镁、铝、硅、钙、钛、镍和铜元素径向丰度呈正梯度分布。

最后, 我们获得了四个星表, 分别为含有视向速度参数的 1033 个疏散星团表和它的 6817 颗星团成员星参数表, 含有金属丰度和 13 种化学元素及 $V_{\text{sin}i}$ 的 446 个疏散星团表和它的 2226 颗星团成员星参数表。这是迄今为止, 唯一具有较全面的 LAMOST 中分辨率光谱参数且疏散星团数量最多的星团表。与此同时, 我们还获得了 322 个 “moving group” 星团和 9 个球状星团的视向速度、金属丰度和化学元素丰度等参数。

第5章 总结和展望

5.1 总结

在不断探索宇宙奥秘的过程中,光谱巡天数据因其蕴含丰富的信息,成为研究天体物理特征的重要基础。我国的郭守敬望远镜 (LAMOST) 是国际天文界中视场最大、光谱获取率最高的多目标光谱望远镜,率先实现同时观测数千个天体光谱的大规模巡天工作。前人的研究已经构建了具有 LAMOST 低分辨率光谱参数的大样本疏散星团参数表(包含 ~300 多个星团)。随着 LAMOST 第二期巡天启动中分辨率观测,分辨率的提升使得光谱分析能够揭示更多细节,从而提高了参数精度,并且比低分辨率巡天获得了更多种类的化学元素丰度。同时,近年来新发现的大量疏散星团使得及时更新星团光谱参数样本成为一项迫切任务。

本文的工作依托 LAMOST 中分辨率巡天的银河系疏散星团观测项目,充分利用巡天观测所提供的海量恒星光谱数据,结合以 Gaia 精准天体测量与测光为基础的最新版疏散星团表,构建了一个具有 LAMOST 中分辨率光谱参数的大样本疏散星团表。这些光谱数据涵盖了广泛的天区范围,包含了丰富的光谱特征,使我们能够获得精度更高的恒星视向速度、大气参数和多种化学元素丰度等重要物理参数。在此星团参数星表的基础上,可进一步统计分析疏散星团的性质,包括以星团金属丰度的分布特征来示踪银盘的径向金属丰度梯度。

本文第一个工作是本人深度参与的 LAMOST 中分辨率巡天疏散星团观测项目,至 LAMOST DR11v1.1 发布,已完成对 10 个疏散星团天区的观测,获得了 133,792 颗恒星共 235,184 条中分辨率合并光谱,基于 CG20 星团表的成员判定,得到 82 个星团的视向速度参数,72 个星团的金属丰度及其中部分星团的 13 种化学元素丰度等。对于某些特别关注的星团,我们发现 G 星等 (Gmag) 小于 15 等的成员星采样率可达到 70%,这表明 LAMOST-MRS-O 已达到我们的初步设计目标 (Zhang et al., 2025)。

为更全面地基于光谱数据开展疏散星团性质研究,本文第二个主要工作充分利用最新 LAMOST DR11 提供的所有中分辨率光谱数据,针对迄今样本数最齐备的 Hunt24 星团表进行交叉匹配,获得了 1033 个具有 LAMOST 中分辨率视向速度的疏散星团,其中 446 个星团还获得了由 LAMOST CNN 方法得到的金属丰度 ($[M/H]$)、 α 元素丰度和包括 $[Fe/H]$ 的 13 种化学元素丰度等参量。LAMOST-MRS 疏散星团平均视向速度与高分辨率和 LAMOST 低分辨率光谱相比,平均差值分别小于 1km s^{-1} 和 5km s^{-1} ,弥散(标准偏差)均小于 10km s^{-1} ,与 Gaia DR3 视向速度相比,平均差值则小于 0.5km s^{-1} ,弥散小于 20km s^{-1} 。这些外部比较的结果表明, LAMOST-MRS 所获视向速度的精度与高分辨率光谱巡天的比较相近。

通过 LAMOST-MRS 的恒星大气参数分析发现,在 $4300\text{K} < T_{\text{eff}} < 5500\text{K}$ 范围内,星团成员星相关参数较为可靠。但超出此温度范围的年老或年轻星团成

员, 金属丰度等参数显示出与温度的一定相关性。

由 LAMOST-MRS 得到的星团金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 与高分辨率和 LAMOST 低分辨率比较, 平均差值均小于 0.04dex, 与高分辨率的标准偏差小于 0.08dex, 与低分辨率的标准偏差小于 0.12dex。氧、镁、铝、硅、硫、钙、钛、铬、镍和铜、钙、钛、铬、铜等元素丰度与高分辨率 APOGEE 数据 (Donor20) 比较, 平均差值小于 -0.04dex; 与 GALAH 数据 (Spina21) 相比平均差值和标准偏差稍大于 APOGEE 数据。

基于 LAMOST-MRS 星团样本, 拟合了星团金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 沿银心距和银面距的分布变化趋势, 梯度斜率分别为 $-0.041 \pm 0.004 \text{dex kpc}^{-1}$ 和 $-0.044 \pm 0.067 \text{dex kpc}^{-1}$ 。在银心距为 11.5kpc 的位置, 梯度分布存在类似文献报道的拐点, 小于此拐点区域的分布斜率为 $-0.047 \pm 0.006 \text{dex kpc}^{-1}$, 大于此拐点区域的斜率为 $-0.014 \pm 0.017 \text{dex kpc}^{-1}$ 。我们对除 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 之外的 12 种化学元素也分别做了径向丰度梯度的拟合, 除了碳和铬元素丰度呈负梯度变化, 其余氮、氧、镁、铝、硅、钙、钛、镍和铜元素径向丰度均呈正梯度分布。

最终, 我们整理得到了两个疏散星团表及其对应的成员星表, 分别为具有视向速度参数的 1033 个疏散星团表及其 6817 颗星团成员星参数列表、具有金属丰度和 13 种化学元素等参数的 446 个疏散星团表和相应的 2226 颗星团成员星参数表。这是迄今为止, 唯一具有较全面的 LAMOST 中分辨率光谱参数且疏散星团数量最多的星团表。与此同时, 我们还获得了数百个移动星群视向速度、金属丰度和化学元素丰度等参数。

5.2 展望

基于这份大样本疏散星团参数星表, 将继续开展以下的研究工作:

首先, 将进一步筛选高质量的星团 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 子样本, 深入探讨由疏散星团的径向金属丰度梯度约束银河系银盘化学演化理论模型的相关研究。自上世纪 70 年代至 Gaia 时代, 人们应用不同的示踪体来约束银盘结构和演化模型, 比如用电离氢区 (Shaver et al., 1983; Hou et al., 2000)、行星状星云、红团簇星 (Red Clump stars) (Huang et al., 2015)、造父变星 (Cepheids) (Trentin et al., 2023)、AFGK-光谱型巨星 (Yan et al., 2019) 和 OBAF-光谱型恒星 (Hawkins, 2023) 等作为示踪体, 疏散星团则相比这些探针, 在 Gaia 测光和大型光谱观测支持下, 能够精确测定距离、年龄和金属丰度等, 在约束银河系结构和演化模型上具有特别的优势。而我们的星团样本具备独特的中分辨率光谱观测参数, 以及在 8~14kpc 范围观测到的疏散星团数量比其它分辨率的光谱巡天观测占绝对优势, 因此值得结合星系演化模型作进一步的探索研究。其中星团年龄是个重要参数, 因此在未来的工作中将采用统一的等龄线拟合方法验证 Hunt24 提供的星团年龄, 并对个别特殊星团进行人工检验, 在具备精确年龄参数的基础上, 进一步探讨星团样本的年龄-金属丰度-银心距关系。

其次, 通过对大量星团的赫罗图分析, 发现星团巨星成员的 LAMOST 中分

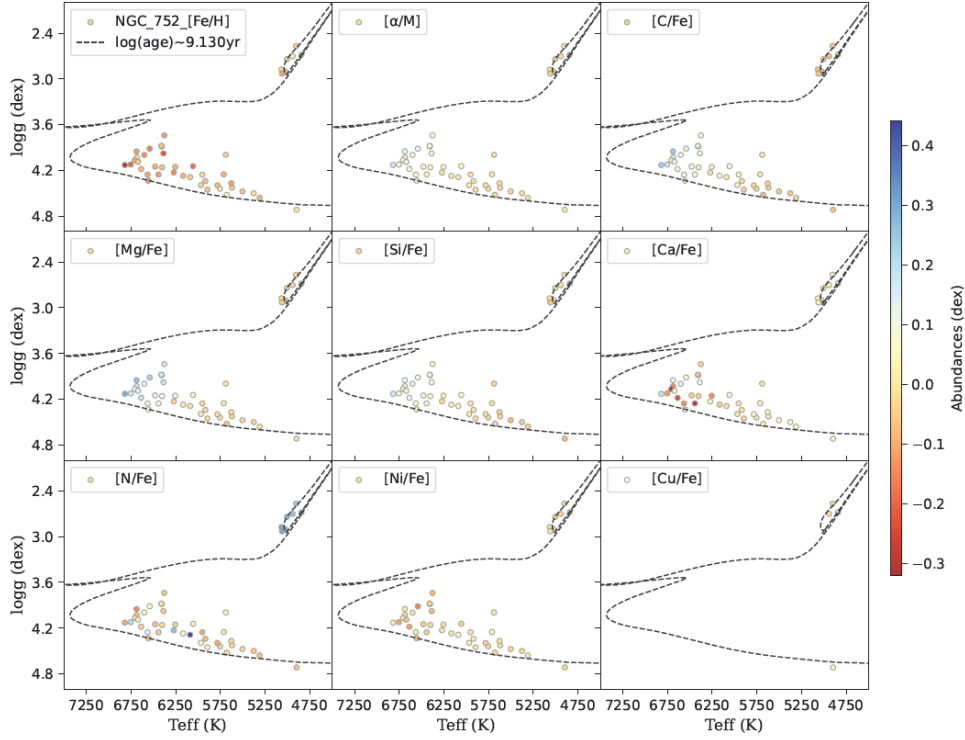


图 5-1 疏散星团 NGC 752 的赫罗图，以 9 种元素丰度值为颜色条。

Figure 5-1 HR Diagram of NGC 752 Open Cluster, Color-Coded by Abundances of 9 Elements

分辨率大气参数测量值，与理论大气参数值（理论等龄线）符合较好，但是有些星团主序星成员则偏离了理论值，特别在热星（ $T_{eff} > 6500\text{K}$ ）和冷星（ $T_{eff} < 4300\text{K}$ ）两端较为明显，而且有效温度与这两端的成员星元素丰度有一定相关性，比如图 5-1 所示的星团 NGC 752 中在 $T_{eff} > 6500\text{K}$ 的成员星的 $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ 和 $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ 等丰度值就与 $T_{eff} < 6500\text{K}$ 的成员有明显的不同，与 (Zhang et al., 2025) 中的 Stock 2 出现的情形一样。因此，继续深入探究星团理论等龄线和观测数据不符的原因，对于研究星团及恒星的演化规律具有重要的意义。

再次，我们对样本参数作初步统计分析过程中，发现了星团氮元素分布存在不同于其它元素丰度的特点：即星团巨星成员的氮丰度 $[\text{N}/\text{Fe}]$ 比主序星成员高，如 5-2 中左图（以 $\log(g)$ 表示颜色）的星团 NGC 2682，其巨星（ $\log(g) < 3.5\text{dex}$ ，橘红色）普遍比主序星（ $\log(g) \geq 3.5\text{dex}$ ，蓝色）的氮丰度高（纵坐标），从而样本统计结果整体显示出年老星团（蓝色）的氮丰度比年轻星团的要高（如 5-2 中右图所示，以年龄标识颜色），年轻星团的成员星一般尚未演化到巨星阶段。图 5-3 是三个年老星团 NGC 7789、NGC 6940 和 NGC 1907，它们的平均氮丰度明显偏高，存在一定的观测效应，即被观测到的成员基本是巨星，主序星极少，而巨星的氮丰度就比主序星高，因此星团整体的平均氮丰度就偏高，从另一个角度阐释了 5-2 右图的统计结果。

至于巨星的氮丰度为何会比主序星高，近期文献的解释为：老星团中的中等

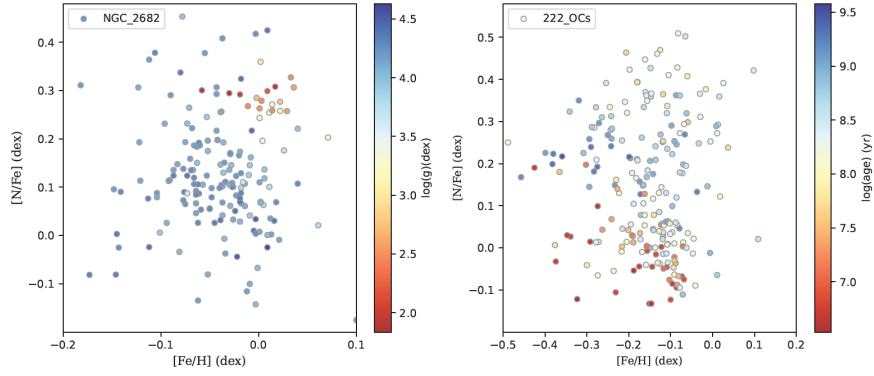


图 5-2 左图: 年老星团 NGC 2682 中巨星 (橘红色) 的氮丰度明显偏高; 右图: 年老星团 (蓝色) 的氮丰度普遍比年轻星团偏高.

Figure 5-2 Left panel: Nitrogen abundances in giant stars (marked in orange-red) of the old open cluster NGC 2682 show significantly elevated values. Right panel: Old open clusters (blue) generally exhibit systematically higher nitrogen abundances compared to young clusters.

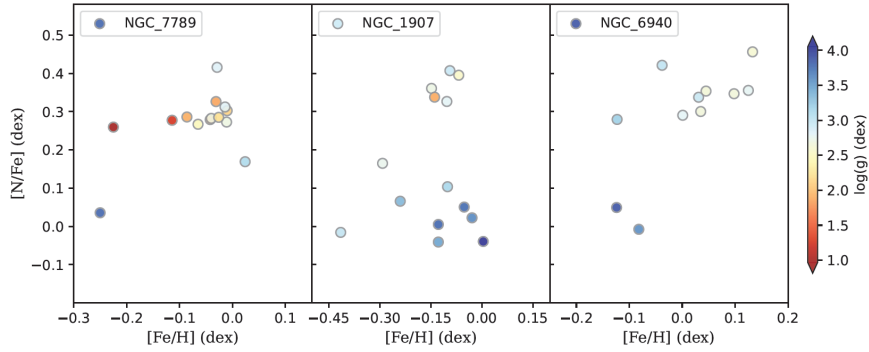


图 5-3 三个年老星团 NGC 7789, NGC 6940 和 NGC 1907 的平均氮丰度明显偏高.

Figure 5-3 The mean nitrogen abundances in three old open clusters (NGC 7789, NGC 6940, and NGC 1907) are significantly elevated, potentially influenced by observational effects.

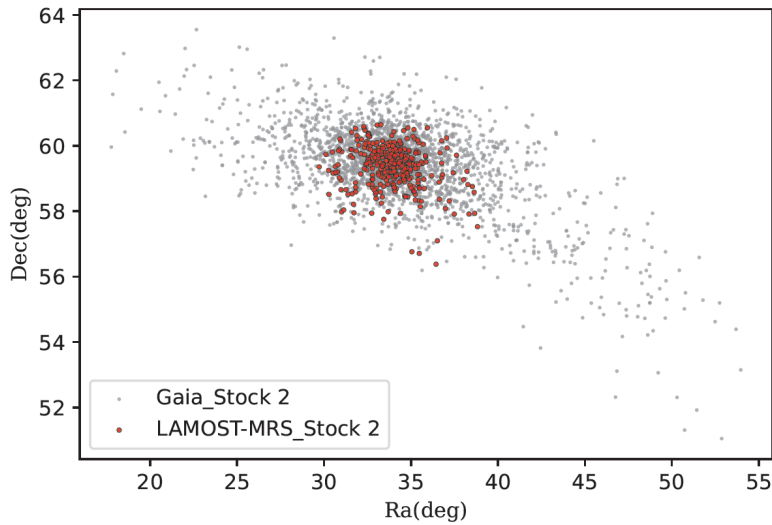


图 5-4 疏散星团 Stock 2 的空间分布图.

Figure 5-4 Spatial Distribution Map of the Open Cluster Stock 2.

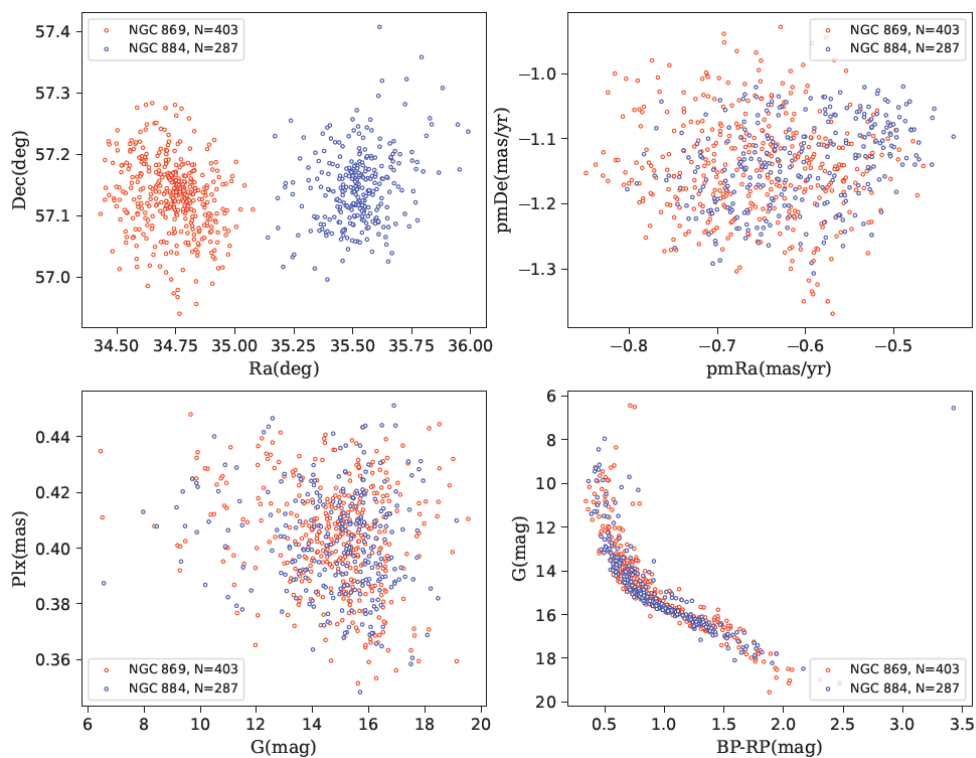


图 5-5 经典双星团示例:NGC 869 和 NGC 884.

Figure 5-5 Classic Binary Cluster Example: NGC 869 and NGC 884.

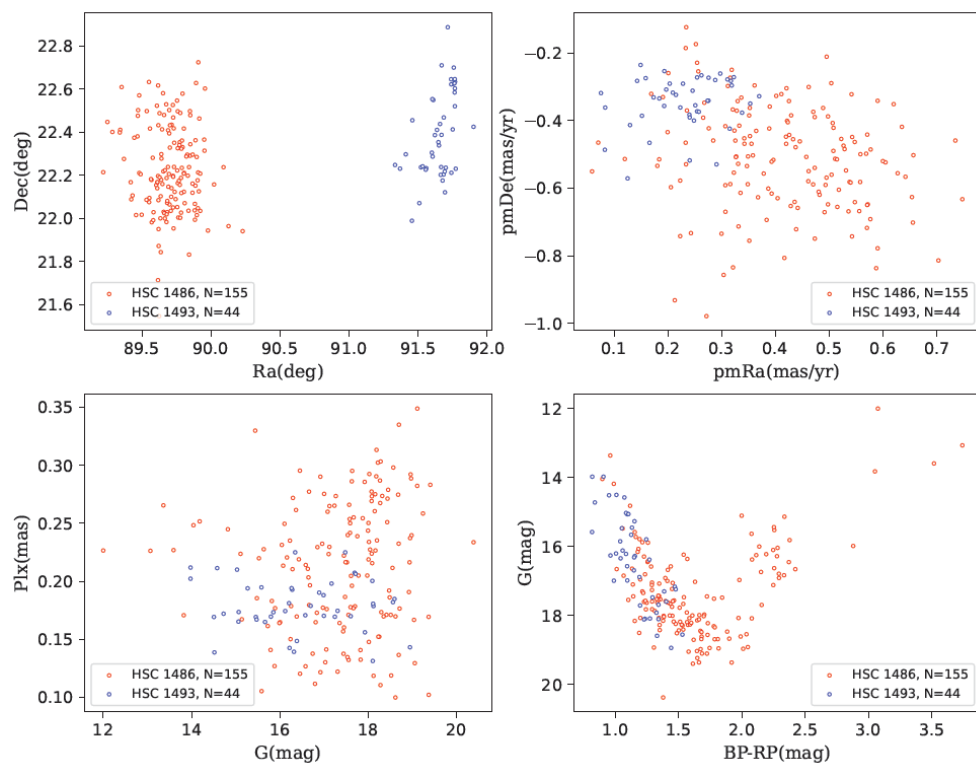


图 5-6 候选双星团示例:HSC 1486 和 HSC 1493.

Figure 5-6 Candidate Binary Cluster Example: HSC 1486 and HSC 1493.

质量成员星演化到了渐进巨星分支 (AGB) 阶段, 通过星风释放大量的氮, 导致氮丰度增加, 此外, 恒星刚开始进入巨星演化, 内部碳氮氧 (CNO) 循环产生的氮也可能通过对流带到恒星表面, 进一步增加氮丰度, 如Böcek Topcu et al. (2015); Lum et al. (2019) 等就报道了从疏散星团 NGC 752 的巨星光谱中发现了一些碳氮氧 (CNO) 循环过程的迹象, 显示出星团中巨星成员的平均氮丰度比矮星 (主序星) 成员的高。关于这个现象的解释还有待于今后进一步考证和检验。

最后对个别或一批星团、双星团开展研究。对于数十个观测效果较好的星团 (成员星数量较多、参数全面且弥散较小的星团, 如 NGC 2682、Stock 2), 可深入研究其物理和化学性质, 或对具有特殊化学丰度、形态特征的星团进行小样本分析。如图 5-4 所示的 LAMOST-MRS 观测较好 (红点) 且具有延展结构的星团 Stock 2, 可结合 Gaia 测光数据 (灰点), 研究其形成、演化、瓦解等可能的过程, 深入了解其物理化学性质。

对样本中可能的双星团可作进一步的认证、模拟双星团形成与演化等研究工作。图 5-5 是一对经典双星团 NGC 869 (红) 和 NGC 884 (蓝) (图中的圆圈为 Gaia DR3 提供测光参数的 Hunt24 星表成员星), 被 LAMOST-MRS 分别观测到了 41 和 32 颗成员星参数 (包括视向速度、金属丰度等), 为该双星团的性质研究提供了重要光谱信息。图 5-6 为本人在前期工作中筛选到的数十对具有 LAMOST-MRS 参数的双星团候选对象之一, HSC 1486 (红) 和 HSC 1493 (蓝), 也是近两年新发现的星团, 尽管它们的 LAMOST 数据较少, 但其作为单、双星团细致的相关性质研究还未见报道。今后我们将应用星团大样本及 LAMOST-MRS 参数继续深入开展这两类双星团的研究工作。

此外, 在星团样本中还可搜寻特殊恒星, 如老年疏散星团中的巨星、红团簇星以及少量的造父变星等, 进行恒星形成和演化研究。本文工作还获得了数百个移动星群的光谱参数, 下一步工作将结合 LAMOST 中分辨率参数和 Gaia 数据, 依据移动星群的特性, 进一步甄别候选星群, 继而开展相关移动星群性质的深入研究。

总之, 基于这份大样本疏散星团参数星表, 并结合 Gaia 测光数据, 我们将继续挖掘更多富有意义的研究课题。

参考文献

- Ahumada R, Allende Prieto C, Almeida A, et al., 2020. The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 249(1): 3. DOI: [10.3847/1538-4365/ab929e](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab929e).
- Alonso-Santiago J, Negueruela I, Marco A, et al., 2020. Three open clusters containing Cepheids: NGC 6649, NGC 6664, and Berkeley 55[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 644: A136. DOI: [10.1051/0004-6361/202038495](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038495).
- André P, Arzoumanian D, Könyves V, et al., 2019. The role of molecular filaments in the origin of the prestellar core mass function and stellar initial mass function[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 629: L4. DOI: [10.1051/0004-6361/201935915](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935915).
- Bai L, Zhong J, Chen L, et al., 2022. Discovery of Extended Structure Around Open Cluster COIN-Gaia 13 Based on Gaia EDR3[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 22(5): 055022. DOI: [10.1088/1674-4527/ac60d2](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ac60d2).
- Barros D A, Pérez-Villegas A, Lépine J R D, et al., 2020. Exploring the Origin of Moving Groups and Diagonal Ridges by Simulations of Stellar Orbits and Birthplaces [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 888(2): 75. DOI: [10.3847/1538-4357/ab59d1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab59d1).
- Baumgardt H, Dettbarn C, Wielen R, 2000. Absolute proper motions of open clusters. I. Observational data[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 146: 251-258. DOI: [10.1051/aas:2000362](https://doi.org/10.1051/aas:2000362).
- Bhattacharya S, Rao K K, Agarwal M, et al., 2022. A Gaia EDR3 search for tidal tails in disintegrating open clusters[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 517(3): 3525-3549. DOI: [10.1093/mnras/stac2906](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2906).
- Bica E, Bonatto C, Barbuy B, et al., 2006. Globular cluster system and Milky Way properties revisited[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 450(1): 105-115. DOI: [10.1051/0004-6361:20054351](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20054351).
- Bica E, Pavani D B, Bonatto C J, et al., 2019. A Multi-band Catalog of 10978 Star Clusters, Associations, and Candidates in the Milky Way[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 157(1): 12. DOI: [10.3847/1538-3881/aaef8d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaef8d).
- Bisht D, Zhu Q, Yadav R K S, et al., 2021. A Deep Study of an Intermediate-age Open Cluster SAI 35 (Juchert 20) Using Ground-based Imaging and Gaia EDR3 Astrometry [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 161(4): 182. DOI: [10.3847/1538-3881/abe383](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abe383).
- Böcek Topcu G, Afşar M, Schaeuble M, et al., 2015. The chemical compositions and evolutionary status of red giants in the open cluster NGC 752[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 446(4): 3562-3578. DOI: [10.1093/mnras/stu2380](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2380).

- Bossini D, Vallenari A, Bragaglia A, et al., 2019. Age determination for 269 Gaia DR2 open clusters[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 623: A108. DOI: [10.1051/0004-6361/201834693](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834693).
- Bovy J, 2015. galpy: A python Library for Galactic Dynamics[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 216(2): 29. DOI: [10.1088/0067-0049/216/2/29](https://doi.org/10.1088/0067-0049/216/2/29).
- Boyle A W, Bouma L G, 2023. Stellar Rotation and Structure of the α Persei Complex: When Does Gyrochronology Start to Work?[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 166 (1): 14. DOI: [10.3847/1538-3881/acd3e8](https://doi.org/10.3847/1538-3881/acd3e8).
- Bressan A, Marigo P, Girardi L, et al., 2012. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(1): 127-145. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x).
- Bu Y, He C, Wang L, et al., 2024. On the Roles of Stellar Rotation and Binarity in NGC 2423's Main-sequence Turnoff Region[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 968 (1): 22. DOI: [10.3847/1538-4357/ad3e6e](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad3e6e).
- Cantat-Gaudin T, Jordi C, Vallenari A, et al., 2018. A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 618: A93. DOI: [10.1051/0004-6361/201833476](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833476).
- Cantat-Gaudin T, Krone-Martins A, Sedaghat N, et al., 2019. Gaia DR2 unravels incompleteness of nearby cluster population: new open clusters in the direction of Perseus[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 624: A126. DOI: [10.1051/0004-6361/201834453](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834453).
- Cantat-Gaudin T, Anders F, Castro-Ginard A, et al., 2020. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 640: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/202038192](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038192).
- Cantat-Gaudin T, 2022. Milky Way Star Clusters and Gaia: A Review of the Ongoing Revolution[J/OL]. *Universe*, 8(2): 111. DOI: [10.3390/universe8020111](https://doi.org/10.3390/universe8020111).
- Canton P A, Williams K A, Kilic M, et al., 2021. The White Dwarfs of the Old, Solar-metallicity Open Star Cluster Messier 67: Properties and Progenitors[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 161(4): 169. DOI: [10.3847/1538-3881/abe1ad](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abe1ad).
- Carbajo-Hijarrubia J, Casamiquela L, Carrera R, et al., 2024. OCCASO. V. Chemical-abundance trends with Galactocentric distance and age[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 687: A239. DOI: [10.1051/0004-6361/202347648](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347648).
- Carrera R, Pasquato M, Vallenari A, et al., 2019. Extended halo of NGC 2682 (M 67) from Gaia DR2[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 627: A119. DOI: [10.1051/0004-6361/201935599](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935599).
- Casamiquela L, Castro-Ginard A, Anders F, et al., 2021. The (im)possibility of strong chemical tagging[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 654: A151. DOI: [10.1051/0004-6361/202141779](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141779).

- Casamiquela L, Reese D R, Lebreton Y, et al., 2024. New stellar age estimates using SPInS based on Gaia DR3 photometry and LAMOST DR8 abundances[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 692: A243. DOI: [10.1051/0004-6361/202451677](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202451677).
- Castellani V, Degl'Innocenti S, Prada Moroni P G, et al., 2002. Hipparcos open clusters and stellar evolution[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 334 (1): 193-197. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2002.05508.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2002.05508.x).
- Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al., 2018. A new method for unveiling open clusters in Gaia. New nearby open clusters confirmed by DR2[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 618: A59. DOI: [10.1051/0004-6361/201833390](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833390).
- Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al., 2020. Hunting for open clusters in Gaia DR2: 582 new open clusters in the Galactic disc[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 635: A45. DOI: [10.1051/0004-6361/201937386](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937386).
- Castro-Ginard A, McMillan P J, Luri X, et al., 2021. Milky Way spiral arms from open clusters in Gaia EDR3[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 652: A162. DOI: [10.1051/0004-6361/202039751](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039751).
- Chaboyer B, Demarque P, Sarajedini A, 1996. Globular Cluster Ages and the Formation of the Galactic Halo[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 459: 558. DOI: [10.1086/176921](https://doi.org/10.1086/176921).
- Chen B, Wang S, Hou L, et al., 2020. The distances to molecular clouds in the fourth Galactic quadrant[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496 (4): 4637-4645. DOI: [10.1093/mnras/staa1827](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1827).
- Chen L, Gao X H, 2011. Radial Velocity and Abundance Properties of Five Open Clusters Based on SDSS DR7[C]//Qain S, Leung K, Zhu L, et al. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: Vol. 451 9th Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics*. 303.
- Chen L, Hou J L, 2009. Galactic Open Clusters and the LOCS Project[C]//Murphy S J, Bessell M S. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: Vol. 404 The Eighth Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics: A Tribute to Kam-Ching Leung*. 343.
- Chen L, Hou J L, Wang J J, 2003. On the Galactic Disk Metallicity Distribution from Open Clusters. I. New Catalogs and Abundance Gradient[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 125(3): 1397-1406. DOI: [10.1086/367911](https://doi.org/10.1086/367911).
- Chen L, Hou J L, Zhao J L, et al., 2008. Open clusters: their kinematics and metallicities[C/OL]//Jin W J, Platais I, Perryman M A C. *IAU Symposium: Vol. 248 A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry*. 433-439. DOI: [10.1017/S1743921308019765](https://doi.org/10.1017/S1743921308019765).
- Chen L, Hou J L, Yu J C, et al., 2012. The LEGUE disk targets for LAMOST's pilot survey[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12(7): 805-812. DOI: [10.1088/1674-4527/12/7/008](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/7/008).

- Chen W P, Chen C W, Shu C G, 2004. Morphology of Galactic Open Clusters[J/OL]. The Astronomical Journal, 128(5): 2306-2315. DOI: [10.1086/424855](https://doi.org/10.1086/424855).
- Chen Y Q, Casagrande L, Zhao G, et al., 2017. Absolute Magnitudes of Seismic Red Clumps in the Kepler Field and SAGA: The Age Dependency of the Distance Scale [J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 840(2): 77. DOI: [10.3847/1538-4357/aa6d0f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6d0f).
- Cheng J Y, Rockosi C M, Morrison H L, et al., 2012. Metallicity Gradients in the Milky Way Disk as Observed by the SEGUE Survey[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 746(2): 149. DOI: [10.1088/0004-637X/746/2/149](https://doi.org/10.1088/0004-637X/746/2/149).
- Cordoni G, Casagrande L, Yu J, et al., 2024. Survey of extended main-sequence turn-offs in galactic open clusters: stellar rotations from Gaia RVS spectra[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 532(2): 1547-1563. DOI: [10.1093/mnras/stae1569](https://doi.org/10.1093/mnras/stae1569).
- Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al., 2012. The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST)[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 12 (9): 1197-1242. DOI: [10.1088/1674-4527/12/9/003](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/9/003).
- Dalton G, Trager S C, Abrams D C, et al., 2012. WEAVE: the next generation wide-field spectroscopy facility for the William Herschel Telescope[C/OL]/McLean I S, Ramsay S K, Takami H. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: Vol. 8446 Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. 84460P. DOI: [10.1117/12.925950](https://doi.org/10.1117/12.925950).
- de Jong R S, Bellido-Tirado O, Chiappini C, et al., 2012. 4MOST: 4-metre multi-object spectroscopic telescope[C/OL]/McLean I S, Ramsay S K, Takami H. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: Vol. 8446 Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. 84460T. DOI: [10.1117/12.926239](https://doi.org/10.1117/12.926239).
- De Silva G M, Freeman K C, Bland-Hawthorn J, et al., 2015. The GALAH survey: scientific motivation[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 449(3): 2604-2617. DOI: [10.1093/mnras/stv327](https://doi.org/10.1093/mnras/stv327).
- Deng L C, Newberg H J, Liu C, et al., 2012. LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration (LEGUE) — The survey's science plan[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 12(7): 735-754. DOI: [10.1088/1674-4527/12/7/003](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/7/003).
- Dias W S, Alessi B S, Moitinho A, et al., 2002. New catalogue of optically visible open clusters and candidates[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 389: 871-873. DOI: [10.1051/0004-6361:20020668](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020668).
- Dias W S, Monteiro H, Moitinho A, et al., 2021. Updated parameters of 1743 open clusters based on Gaia DR2[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 504(1): 356-371. DOI: [10.1093/mnras/stab770](https://doi.org/10.1093/mnras/stab770).

- Donor J, Frinchaboy P M, Cunha K, et al., 2018. The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping Survey. II. Precision Cluster Abundances for APOGEE Using SDSS DR14[J/OL]. The Astronomical Journal, 156(4): 142. DOI: [10.3847/1538-3881/aad635](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad635).
- Donor J, Frinchaboy P M, Cunha K, et al., 2020. The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping Survey. IV. Abundances for 128 Open Clusters Using SDSS/APOGEE DR16[J/OL]. The Astronomical Journal, 159(5): 199. DOI: [10.3847/1538-3881/ab77bc](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab77bc).
- Dreyer J L E, 1888. A New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars, being the Catalogue of the late Sir John F. W. Herschel, Bart, revised, corrected, and enlarged [J]. Memoirs of the Royal Astronomical Society, 49: 1.
- Drimmel R, Khanna S, D’Onghia E, et al., 2023. A new resonance-like feature in the outer disc of the Milky Way[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 670: A10. DOI: [10.1051/0004-6361/202244605](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244605).
- Du B, Luo A L, Zuo F, et al., 2019. An Empirical Template Library for FGK and Late-type A Stars Using LAMOST Observed Spectra[J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 240(1): 10. DOI: [10.3847/1538-4365/aaef3c](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aaef3c).
- Du B, Luo A L, Zhang S, et al., 2021. LASPM: the LAMOST stellar parameter pipeline for M-type stars and application to the sixth and seventh data release (DR6 and DR7)[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 21(8): 202. DOI: [10.1088/1674-4527/21/8/202](https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/8/202).
- Fang X S, Zhao G, Zhao J K, et al., 2018. Stellar activity with LAMOST - II. Chromospheric activity in open clusters[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 476(1): 908-926. DOI: [10.1093/mnras/sty212](https://doi.org/10.1093/mnras/sty212).
- Ferreira F A, Corradi W J B, Maia F F S, et al., 2020. Discovery and astrophysical properties of Galactic open clusters in dense stellar fields using Gaia DR2[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 496(2): 2021-2038. DOI: [10.1093/mnras/staa1684](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1684).
- Frasca A, Molenda-Żakowicz J, De Cat P, et al., 2016. Activity indicators and stellar parameters of the Kepler targets. An application of the ROTFIT pipeline to LAMOST-Kepler stellar spectra[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 594: A39. DOI: [10.1051/0004-6361/201628337](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628337).
- Frinchaboy P M, Thompson B, Jackson K M, et al., 2013. The Open Cluster Chemical Analysis and Mapping Survey: Local Galactic Metallicity Gradient with APOGEE Using SDSS DR10[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 777(1): L1. DOI: [10.1088/2041-8205/777/1/L1](https://doi.org/10.1088/2041-8205/777/1/L1).
- Fu X, Bragaglia A, Liu C, et al., 2022. LAMOST meets Gaia: The Galactic open clusters [J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 668: A4. DOI: [10.1051/0004-6361/202243590](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243590).

- Gaia Collaboration, 2022. VizieR Online Data Catalog: Gaia DR3 Part 1. Main source (Gaia Collaboration, 2022)[DS/OL]. DOI: [10.26093/cds/vizier.1355](https://doi.org/10.26093/cds/vizier.1355).
- Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al., 2016. The Gaia mission[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 595: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/201629272](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272).
- Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al., 2018. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 616: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/201833051](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051).
- Gao X, 2020. Detection of tidal tails around the open cluster M 67 using principal component analysis[J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 72 (3): 47. DOI: [10.1093/pasj/psaa031](https://doi.org/10.1093/pasj/psaa031).
- Gilmore G, Randich S, Asplund M, et al., 2012. The Gaia-ESO Public Spectroscopic Survey[J]. *The Messenger*, 147: 25-31.
- Grocholski A J, Sarajedini A, 2002. WIYN Open Cluster Study. X. The K-Band Magnitude of the Red Clump as a Distance Indicator[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 123(3): 1603-1612. DOI: [10.1086/339027](https://doi.org/10.1086/339027).
- Gutiérrez Albarrán M L, Montes D, Gómez Garrido M, et al., 2020. The Gaia-ESO Survey: Calibrating the lithium-age relation with open clusters and associations. I. Cluster age range and initial membership selections[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 643: A71. DOI: [10.1051/0004-6361/202037620](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037620).
- Hao C J, Xu Y, Hou L G, et al., 2021. Evolution of the local spiral structure of the Milky Way revealed by open clusters[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 652: A102. DOI: [10.1051/0004-6361/202140608](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140608).
- Hao C J, Xu Y, Wu Z Y, et al., 2022a. Open clusters housing classical Cepheids in Gaia DR3[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 668: A13. DOI: [10.1051/0004-6361/202244570](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244570).
- Hao C J, Xu Y, Wu Z Y, et al., 2022b. Newly detected open clusters in the Galactic disk using Gaia EDR3[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 660: A4. DOI: [10.1051/0004-6361/202243091](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243091).
- Hawkins K, 2023. Chemical cartography with LAMOST and Gaia reveal azimuthal and spiral structure in the Galactic disc[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 525(3): 3318-3329. DOI: [10.1093/mnras/stad1244](https://doi.org/10.1093/mnras/stad1244).
- He C, Li C, Sun W, et al., 2023a. The role of tidal interactions in the formation of slowly rotating early-type stars in young star clusters[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 525(4): 5880-5892. DOI: [10.1093/mnras/stad2674](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2674).
- He Z H, Xu Y, Hao C J, et al., 2021. A catalogue of 74 new open clusters found in Gaia Data-Release 2[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 21(4): 093. DOI: [10.1088/1674-4527/21/4/93](https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/4/93).

- He Z, 2023c. Geometry and Kinematics of a Dancing Milky Way: Unveiling the Precession and Inclination Variation across the Galactic Plane via Open Clusters[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 954(1): L9. DOI: [10.3847/2041-8213/ace77d](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ace77d).
- He Z, Li C, Zhong J, et al., 2022. New Open-cluster Candidates Found in the Galactic Disk Using Gaia DR2/EDR3 Data[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 260(1): 8. DOI: [10.3847/1538-4365/ac5cbb](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac5cbb).
- He Z, Liu X, Luo Y, et al., 2023b. Unveiling Hidden Stellar Aggregates in the Milky Way: 1656 New Star Clusters Found in Gaia EDR3[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 264(1): 8. DOI: [10.3847/1538-4365/ac9af8](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac9af8).
- Herschel W, 1786. Catalogue of One Thousand New Nebulae and Clusters of Stars. By William Herschel, LL.D. F. R. S.[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 76: 457-499.
- Hou J L, Prantzos N, Boissier S, 2000. Abundance gradients and their evolution in the Milky Way disk[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 362: 921-936. DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/0007164](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0007164).
- Hou J L, Chen L, Zhong J, et al., 2014. LAMOST Open Clusters Survey: Current Status and Perspective[C/OL]//EAS Publications Series: 67-68 EAS Publications Series. 377-377. DOI: [10.1051/eas/1567075](https://doi.org/10.1051/eas/1567075).
- Hu Q, Li Y, Qin M, et al., 2025. An In-depth Investigation of the Primordial Cluster Pair ASCC 19 and ASCC 21[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 169(2): 98. DOI: [10.3847/1538-3881/ada443](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ada443).
- Huang Y, Liu X W, Chen B Q, et al., 2018. A New Catalog of Radial Velocity Standard Stars from the APOGEE Data[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 156(3): 90. DOI: [10.3847/1538-3881/aacda5](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aacda5).
- Huang Y, Liu X W, Zhang H W, et al., 2015. On the metallicity gradients of the Galactic disk as revealed by LSS-GAC red clump stars[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 15(8): 1240. DOI: [10.1088/1674-4527/15/8/010](https://doi.org/10.1088/1674-4527/15/8/010).
- Hunt E L, Reffert S, 2021. Improving the open cluster census. I. Comparison of clustering algorithms applied to Gaia DR2 data[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 646: A104. DOI: [10.1051/0004-6361/202039341](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039341).
- Hunt E L, Reffert S, 2023. Improving the open cluster census. II. An all-sky cluster catalogue with Gaia DR3[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 673: A114. DOI: [10.1051/0004-6361/202346285](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346285).
- Hunt E L, Reffert S, 2024. Improving the open cluster census. III. Using cluster masses, radii, and dynamics to create a cleaned open cluster catalogue[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 686: A42. DOI: [10.1051/0004-6361/202348662](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348662).
- Jadhav V V, Subramaniam A, 2021. Blue straggler stars in open clusters using Gaia: dependence on cluster parameters and possible formation pathways[J/OL]. *Monthly*

- Notices of the Royal Astronomical Society, 507(2): 1699-1709. DOI: [10.1093/mnras/stab2264](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2264).
- Jiang Y, Zhong J, Qin S, et al., 2024. On the Determination of Stellar Mass and Binary Fraction of Open Clusters within 500 pc from the Sun[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 971(1): 71. DOI: [10.3847/1538-4357/ad5344](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad5344).
- Katz D, Sartoretti P, Cropper M, et al., 2019. Gaia Data Release 2. Properties and validation of the radial velocities[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 622: A205. DOI: [10.1051/0004-6361/201833273](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833273).
- Katz D, Sartoretti P, Guerrier A, et al., 2023. Gaia Data Release 3. Properties and validation of the radial velocities[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 674: A5. DOI: [10.1051/0004-6361/202244220](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244220).
- Kharchenko N V, Piskunov A E, Schilbach E, et al., 2013. Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 558: A53. DOI: [10.1051/0004-6361/201322302](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322302).
- King I, 1962. The structure of star clusters. I. an empirical density law[J/OL]. The Astronomical Journal, 67: 471. DOI: [10.1086/108756](https://doi.org/10.1086/108756).
- Kong X, Su S, 2010. Spectrum Fitting Code for LAMOST ExtraGalactic Surveys (LEGAS)[C/OL]//Bruzual G R, Charlot S. IAU Symposium: Vol. 262 Stellar Populations - Planning for the Next Decade. 295-298. DOI: [10.1017/S1743921310002942](https://doi.org/10.1017/S1743921310002942).
- Könyves V, André P, Men'shchikov A, et al., 2015. A census of dense cores in the Aquila cloud complex: SPIRE/PACS observations from the Herschel Gould Belt survey[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 584: A91. DOI: [10.1051/0004-6361/201525861](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525861).
- Kovalev M, Chen X, Han Z, 2022. Detection of 2460 double-lined spectroscopic binary candidates in the LAMOST-MRS using projected rotational velocities and a binary spectral model[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 517(1): 356-373. DOI: [10.1093/mnras/stac2513](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2513).
- Krone-Martins A, Moitinho A, 2014. UPMASK: unsupervised photometric membership assignment in stellar clusters[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 561: A57. DOI: [10.1051/0004-6361/201321143](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321143).
- Kruijssen J M D, Pelupessy F I, Lamers H J G L M, et al., 2011. Modelling the formation and evolution of star cluster populations in galaxy simulations[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 414(2): 1339-1364. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.18467.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18467.x).
- Lada C J, Lada E A, 2003. Embedded Clusters in Molecular Clouds[J/OL]. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 41: 57-115. DOI: [10.1146/annurev.astro.41.011802.094844](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.011802.094844).

- Lee Y S, Beers T C, Sivarani T, et al., 2008. The SEGUE Stellar Parameter Pipeline. II. Validation with Galactic Globular and Open Clusters[J/OL]. The Astronomical Journal, 136(5): 2050-2069. DOI: [10.1088/0004-6256/136/5/2050](https://doi.org/10.1088/0004-6256/136/5/2050).
- Lee Y S, Beers T C, Allende Prieto C, et al., 2011. The SEGUE Stellar Parameter Pipeline. V. Estimation of Alpha-element Abundance Ratios from Low-resolution SDSS/SEGUE Stellar Spectra[J/OL]. The Astronomical Journal, 141(3): 90. DOI: [10.1088/0004-6256/141/3/90](https://doi.org/10.1088/0004-6256/141/3/90).
- Li C, Sun W, de Grijs R, et al., 2019. Extended Main-sequence Turnoffs in the Double Cluster h and χ Persei: The Complex Role of Stellar Rotation[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 876(1): 65. DOI: [10.3847/1538-4357/ab15d2](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab15d2).
- Li C, Zhong J, Qin S, et al., 2023. The new detection of blue straggler stars in 50 open clusters using Gaia DR3[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 672: A81. DOI: [10.1051/0004-6361/202244998](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244998).
- Li C, Zhong J, Qin S, et al., 2024. A fast-rotating blue straggler star in the tidal tail of the open cluster NGC 752[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 686: A215. DOI: [10.1051/0004-6361/202449393](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449393).
- Li L, Shao Z, 2022. MiMO: Mixture Model for Open Clusters in Color-Magnitude Diagrams[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 930(1): 44. DOI: [10.3847/1538-4357/ac5f4f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5f4f).
- Lin C C, Hou J L, Chen L, et al., 2015. Searching for classical Be stars in LAMOST DR1[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 15(8): 1325. DOI: [10.1088/1674-4527/15/8/015](https://doi.org/10.1088/1674-4527/15/8/015).
- lin Z, Xu Y, Hao C, et al., 2022. Calibrating the Cepheid Period-Wesenheit Relation in the Gaia Bands Using Galactic Open-cluster Cepheids[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 938(1): 33. DOI: [10.3847/1538-4357/ac9051](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac9051).
- Liu C, Fu J, Shi J, et al., 2020. LAMOST Medium-Resolution Spectroscopic Survey (LAMOST-MRS): Scientific goals and survey plan[A/OL]. arXiv:2005.07210. arXiv: [2005.07210](https://arxiv.org/abs/2005.07210).
- Liu L, Pang X, 2019a. A Catalog of Newly Identified Star Clusters in Gaia DR2[J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 245(2): 32. DOI: [10.3847/1538-4365/ab530a](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab530a).
- Liu N, Fu J N, Zong W, et al., 2019b. Radial velocity measurements from LAMOST medium-resolution spectroscopic observations: a pointing towards the Kepler field[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 19(5): 075. DOI: [10.1088/1674-4527/19/5/75](https://doi.org/10.1088/1674-4527/19/5/75).
- Liu X W, Yuan H B, Huo Z Y, et al., 2014. LSS-GAC - A LAMOST Spectroscopic Survey of the Galactic Anti-center[C/OL]//Feltzing S, Zhao G, Walton N A, et al. IAU Symposium: Vol. 298 Setting the scene for Gaia and LAMOST. 310-321. DOI: [10.1017/S1743921313006510](https://doi.org/10.1017/S1743921313006510).

- Lum M G, Boesgaard A M, 2019. A Comparison of the Chemical Composition of Main-sequence and Giant Stars in the Open Cluster NCC 752[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 878(2): 99. DOI: [10.3847/1538-4357/ab1c4d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1c4d).
- Luo A L, Zhang H T, Zhao Y H, et al., 2012. Data release of the LAMOST pilot survey[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12(9): 1243-1246. DOI: [10.1088/1674-4527/12/9/004](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/9/004).
- Luo Y, Németh P, Deng L, et al., 2019. Hot Subdwarf Stars Observed in Gaia DR2 and LAMOST DR5[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 881(1): 7. DOI: [10.3847/1538-4357/ab298d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab298d).
- Lynga G, 1982. Open clusters in our galaxy.[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 109: 213-222.
- Magrini L, Smiljanic R, Franciosini E, et al., 2021. Gaia-ESO survey: Lithium abundances in open cluster Red Clump stars[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 655: A23. DOI: [10.1051/0004-6361/202141275](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141275).
- Magrini L, Viscasillas Vázquez C, Spina L, et al., 2023. The Gaia-ESO survey: Mapping the shape and evolution of the radial abundance gradients with open clusters[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 669: A119. DOI: [10.1051/0004-6361/202244957](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244957).
- Majewski S R, Schiavon R P, Frinchaboy P M, et al., 2017. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 154(3): 94. DOI: [10.3847/1538-3881/aa784d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa784d).
- Massari D, Koppelman H H, Helmi A, 2019. Origin of the system of globular clusters in the Milky Way[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 630: L4. DOI: [10.1051/0004-6361/201936135](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936135).
- Maucó K, Briceño C, Calvet N, et al., 2018. Herschel PACS Observations of 4-10 Myr Old Classical T Tauri Stars in Orion OB1[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 859(1): 1. DOI: [10.3847/1538-4357/aabf40](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabf40).
- Meingast S, Alves J, Fürnkranz V, 2019. Extended stellar systems in the solar neighborhood . II. Discovery of a nearby 120° stellar stream in Gaia DR2[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 622: L13. DOI: [10.1051/0004-6361/201834950](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834950).
- Messa M, Adamo A, Calzetti D, et al., 2018. The young star cluster population of M51 with LEGUS - II. Testing environmental dependences[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477(2): 1683-1707. DOI: [10.1093/mnras/sty577](https://doi.org/10.1093/mnras/sty577).
- Messier C, 1781. Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Étoiles (Catalog of Nebulae and Star Clusters)[Z]. 227-267.
- Michalska G, 2019. Variable stars in young open cluster NGC 2244[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487(3): 3505-3522. DOI: [10.1093/mnras/stz1500](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1500).

- Monteiro H, Dias W S, 2019. Distances and ages from isochrone fits of 150 open clusters using Gaia DR2 data[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487 (2): 2385-2406. DOI: [10.1093/mnras/stz1455](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1455).
- Myers N, Donor J, Spoo T, et al., 2022. The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping Survey. VI. Galactic Chemical Gradient Analysis from APOGEE DR17 [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 164(3): 85. DOI: [10.3847/1538-3881/ac7ce5](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac7ce5).
- Netopil M, Oralhan İ A, Çakmak H, et al., 2022. The Galactic metallicity gradient shown by open clusters in the light of radial migration[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 509(1): 421-439. DOI: [10.1093/mnras/stab2961](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2961).
- Niu H, Wang J, Fu J, 2020. Binary Fraction Estimation of Main-sequence Stars in 12 Open Clusters: Based on the Homogeneous Data of LAMOST Survey and Gaia DR2 [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 903(2): 93. DOI: [10.3847/1538-4357/abb8d6](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abb8d6).
- Niu Z, Yuan H, Liu J, 2023. Internal Calibration of LAMOST and Gaia DR3 GSP-Spec Stellar Abundances[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 950(2): 104. DOI: [10.3847/1538-4357/accf8b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/accf8b).
- Núñez A, Agüeros M, Godoy Rivera D, et al., 2023. A Multi-Wavelength Study of Magnetic Activity in Praesepe and Hyades[C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts: Vol. 241 American Astronomical Society Meeting Abstracts. 401.11.
- Odenkirchen M, Grebel E K, Dehnen W, et al., 2003. The Extended Tails of Palomar 5: A 10° Arc of Globular Cluster Tidal Debris[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 126 (5): 2385-2407. DOI: [10.1086/378601](https://doi.org/10.1086/378601).
- Pang X, Tang S Y, Li Y, et al., 2022. 3D Morphology of Open Clusters in the Solar Neighborhood with Gaia EDR 3. II. Hierarchical Star Formation Revealed by Spatial and Kinematic Substructures[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 931(2): 156. DOI: [10.3847/1538-4357/ac674e](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac674e).
- Paunzen E, Hümmelich S, Fedurco M, et al., 2021. V680 Mon - a young mercury-manganese star in an eclipsing heartbeat system[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504(3): 3749-3757. DOI: [10.1093/mnras/stab1059](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1059).
- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, et al., 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python[J/OL]. *Journal of Machine Learning Research*, 12: 2825-2830. DOI: [10.48550/arXiv.1201.0490](https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.0490).
- Pfalzner S, Kaczmarek T, Olczak C, 2012. Modes of clustered star formation[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 545: A122. DOI: [10.1051/0004-6361/201219881](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219881).
- Pietrukowicz P, Soszyński I, Udalski A, 2021. Classical Cepheids in the Milky Way [J/OL]. *Acta Astronomica*, 71(3): 205-222. DOI: [10.32023/0001-5237/71.3.2](https://doi.org/10.32023/0001-5237/71.3.2).
- Pinsonneault M H, Stauffer J, Soderblom D R, et al., 1998. The Problem of HIPPARCOS Distances to Open Clusters. I. Constraints from Multicolor Main-Sequence Fitting [J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 504(1): 170-191. DOI: [10.1086/306077](https://doi.org/10.1086/306077).

- Preibisch T, Kim Y C, Favata F, et al., 2005. The Origin of T Tauri X-Ray Emission: New Insights from the Chandra Orion Ultradeep Project[J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 160(2): 401-422. DOI: [10.1086/432891](https://doi.org/10.1086/432891).
- Qin S M, Li J, Chen L, et al., 2021. Discovery of Four New Clusters in the Cygnus Cloud[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 21(2): 045. DOI: [10.1088/1674-4527/21/2/45](https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/2/45).
- Qin S, Zhong J, Tang T, et al., 2023. Hunting for Neighboring Open Clusters with Gaia DR3: 101 New Open Clusters within 500 pc[J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 265(1): 12. DOI: [10.3847/1538-4365/acadd6](https://doi.org/10.3847/1538-4365/acadd6).
- Rain M J, Carraro G, Ahumada J A, et al., 2020. A Study of the Blue Straggler Population of the Old Open Cluster Collinder 261[J/OL]. The Astronomical Journal, 159(2): 59. DOI: [10.3847/1538-3881/ab5f0b](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab5f0b).
- Rain M J, Ahumada J A, Carraro G, 2021. A new, Gaia-based, catalogue of blue straggler stars in open clusters[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 650: A67. DOI: [10.1051/0004-6361/202040072](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040072).
- Randich S, Gilmore G, Gaia-ESO Consortium, 2013. The Gaia-ESO Large Public Spectroscopic Survey[J]. The Messenger, 154: 47-49.
- Recio-Blanco A, de Laverny P, Palicio P A, et al., 2023. Gaia Data Release 3. Analysis of RVS spectra using the General Stellar Parametriser from spectroscopy[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 674: A29. DOI: [10.1051/0004-6361/202243750](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243750).
- Reddy A B S, Lambert D L, Giridhar S, 2016. The evolution of the Milky Way: new insights from open clusters[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 463(4): 4366-4382. DOI: [10.1093/mnras/stw2287](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2287).
- Reid M J, Menten K M, Brunthaler A, et al., 2019. Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 885(2): 131. DOI: [10.3847/1538-4357/ab4a11](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4a11).
- Robichon N, Arenou F, Mermilliod J C, et al., 1999. Open clusters with Hipparcos. I. Mean astrometric parameters[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 345: 471-484. DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/9903131](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/9903131).
- Romano D, Magrini L, Randich S, et al., 2021. The Gaia-ESO Survey: Galactic evolution of lithium from iDR6[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 653: A72. DOI: [10.1051/0004-6361/202141340](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141340).
- Röser S, Schilbach E, 2019a. Praesepe (NGC 2632) and its tidal tails[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 627: A4. DOI: [10.1051/0004-6361/201935502](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935502).
- Röser S, Schilbach E, Goldman B, 2019b. Hyades tidal tails revealed by Gaia DR2 [J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 621: L2. DOI: [10.1051/0004-6361/201834608](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834608).
- Sartoretti P, Katz D, Cropper M, et al., 2018. Gaia Data Release 2. Processing the spectroscopic data[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 616: A6. DOI: [10.1051/0004-6361/201832836](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832836).

- Shapley H, 1916. Studies based on the colors and magnitudes in stellar clusters. III. A catalogue of 311 stars in Messier 67[J]. Contributions from the Mount Wilson Observatory / Carnegie Institution of Washington, 117: 1.
- Shaver P A, McGee R X, Newton L M, et al., 1983. The galactic abundance gradient. [J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 204: 53-112. DOI: [10.1093/mnras/204.1.53](https://doi.org/10.1093/mnras/204.1.53).
- Sim G, Lee S H, Ann H B, et al., 2019. 207 New Open Star Clusters within 1 kpc from Gaia Data Release 2[J/OL]. Journal of Korean Astronomical Society, 52: 145-158. DOI: [10.5303/JKAS.2019.52.5.145](https://doi.org/10.5303/JKAS.2019.52.5.145).
- Sindhu N, Subramaniam A, Radha C A, 2018. Ultraviolet stellar population of the old open cluster M67 (NGC 2682)[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 481(1): 226-243. DOI: [10.1093/mnras/sty2283](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2283).
- Singh K, Rothstein P, Curtis J L, et al., 2021. Re-crowning The Queen: Membership, Age, and Rotation Periods for the Open Cluster Coma Berenices[J/OL]. Research Notes of the American Astronomical Society, 5(4): 84. DOI: [10.3847/2515-5172/abf4e2](https://doi.org/10.3847/2515-5172/abf4e2).
- Smiljanic R, Pasquini L, Charbonnel C, et al., 2010. Beryllium abundances along the evolutionary sequence of the open cluster IC 4651 - A new test for hydrodynamical stellar models[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 510: A50. DOI: [10.1051/0004-6361/200912957](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912957).
- Spina L, Ting Y S, De Silva G M, et al., 2021. The GALAH survey: tracing the Galactic disc with open clusters[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 503(3): 3279-3296. DOI: [10.1093/mnras/stab471](https://doi.org/10.1093/mnras/stab471).
- Spina L, Meléndez J, Karakas A I, et al., 2018. The temporal evolution of neutron-capture elements in the Galactic discs[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 474(2): 2580-2593. DOI: [10.1093/mnras/stx2938](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2938).
- Spina L, Magrini L, Cunha K, 2022. Mapping the Galactic Metallicity Gradient with Open Clusters: The State-of-the-Art and Future Challenges[J/OL]. Universe, 8(2): 87. DOI: [10.3390/universe8020087](https://doi.org/10.3390/universe8020087).
- Steinmetz M, Guiglion G, McMillan P J, et al., 2020. The Sixth Data Release of the Radial Velocity Experiment (RAVE). II. Stellar Atmospheric Parameters, Chemical Abundances, and Distances[J/OL]. The Astronomical Journal, 160(2): 83. DOI: [10.3847/1538-3881/ab9ab8](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9ab8).
- Sun W, de Grijs R, Deng L, et al., 2019. Stellar Rotation and the Extended Main-sequence Turnoff in the Open Cluster NGC 5822[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 876(2): 113. DOI: [10.3847/1538-4357/ab16e4](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab16e4).
- Tarasov A E, Malchenko S L, 2012. Relative content of Be stars in young open star clusters[J/OL]. Astronomy Letters, 38(7): 428-435. DOI: [10.1134/S1063773712060059](https://doi.org/10.1134/S1063773712060059).

- Tarricq Y, Soubiran C, Casamiquela L, et al., 2021. 3D kinematics and age distribution of the open cluster population[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 647: A19. DOI: [10.1051/0004-6361/202039388](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039388).
- Trentin E, Ripepi V, Catanzaro G, et al., 2023. Cepheid Metallicity in the Leavitt Law (C- MetaLL) survey - II. High-resolution spectroscopy of the most metal poor Galactic Cepheids[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 519(2): 2331-2348. DOI: [10.1093/mnras/stac2459](https://doi.org/10.1093/mnras/stac2459).
- Trumpler R J, 1930. Preliminary results on the distances, dimensions and space distribution of open star clusters[J/OL]. *Lick Observatory Bulletin*, 420: 154-188. DOI: [10.5479/ADS/bib/1930LicOB.14.154T](https://doi.org/10.5479/ADS/bib/1930LicOB.14.154T).
- Viscasillas Vázquez C, Magrini L, Casali G, et al., 2022. The Gaia-ESO survey: Age-chemical-clock relations spatially resolved in the Galactic disc[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 660: A135. DOI: [10.1051/0004-6361/202142937](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142937).
- Wang H F, Carraro G, Li X, et al., 2024. Age Determination of LAMOST Red Giant Branch Stars Based on the Gradient Boosting Decision Tree Method[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 967(1): 37. DOI: [10.3847/1538-4357/ad3b90](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad3b90).
- Wang R, Luo A L, Chen J J, et al., 2019. Properties of Radial Velocities Measurement Based on LAMOST-II Medium-resolution Spectroscopic Observations[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 244(2): 27. DOI: [10.3847/1538-4365/ab3cc0](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab3cc0).
- Wang R, Luo A L, Chen J J, et al., 2020. SPCANet: Stellar Parameters and Chemical Abundances Network for LAMOST-II Medium Resolution Survey[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 891(1): 23. DOI: [10.3847/1538-4357/ab6dea](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab6dea).
- Wang R, Luo A L, Zhang S, et al., 2023. Stellar Parameters and Chemical Abundances Estimated from LAMOST-II DR8 MRS Based on Cycle-StarNet[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 266(2): 40. DOI: [10.3847/1538-4365/acce36](https://doi.org/10.3847/1538-4365/acce36).
- Widmark A, Widrow L M, Naik A, 2022. Mapping Milky Way disk perturbations in stellar number density and vertical velocity using Gaia DR3[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 668: A95. DOI: [10.1051/0004-6361/202244453](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244453).
- Wu Y, Du B, Luo A, et al., 2014. Automatic stellar spectral parameterization pipeline for LAMOST survey[C/OL]//Heavens A, Starck J L, Krone-Martins A. *IAU Symposium: Vol. 306 Statistical Challenges in 21st Century Cosmology*. 340-342. DOI: [10.1017/S1743921314010825](https://doi.org/10.1017/S1743921314010825).
- Yan Y, Du C, Liu S, et al., 2019. Chemical and Kinematic Properties of the Galactic Disk from the LAMOST and Gaia Sample Stars[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 880(1): 36. DOI: [10.3847/1538-4357/ab287d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab287d).
- Ye X, Zhao J, Liu J, et al., 2021. Diagnosing Open Cluster Stock 2: Member Candidates and Mass Distribution with Gaia DR2 and LAMOST[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 161(1): 8. DOI: [10.3847/1538-3881/abc61a](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abc61a).

- Ye X, Zhao J, Oswalt T D, et al., 2022. Revisit of Open Clusters UPK 39, UPK 41, and PHOC 39: A New Binary Open Cluster Found[J/OL]. The Astronomical Journal, 164(4): 132. DOI: [10.3847/1538-3881/ac8545](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac8545).
- Yong D, Carney B W, Teixeira de Almeida M L, 2005. Elemental Abundance Ratios in Stars of the Outer Galactic Disk. I. Open Clusters[J/OL]. The Astronomical Journal, 130(2): 597-625. DOI: [10.1086/430934](https://doi.org/10.1086/430934).
- Yuan H B, Liu X W, Huo Z Y, et al., 2015. LAMOST Spectroscopic Survey of the Galactic Anticentre (LSS-GAC): target selection and the first release of value-added catalogues[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 448(1): 855-894. DOI: [10.1093/mnras/stu2723](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2723).
- Zhang B, Li J, Yang F, et al., 2021a. Self-consistent Stellar Radial Velocities from LAMOST Medium-resolution Survey DR7[J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 256(1): 14. DOI: [10.3847/1538-4365/ac0834](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac0834).
- Zhang H, Chen Y, Zhao G, 2021b. Radial Migration from the Metallicity Gradient of Open Clusters and Outliers[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 919(1): 52. DOI: [10.3847/1538-4357/ac0e92](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0e92).
- Zhang J, Zhao J, Oswalt T D, et al., 2019. Stellar Chromospheric Activity and Age Relation from Open Clusters in the LAMOST Survey[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 887(1): 84. DOI: [10.3847/1538-4357/ab4efe](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab4efe).
- Zhang R, Wang G J, Lu Y, et al., 2024. When LAMOST meets Gaia DR3: Exploring the metallicity of open clusters[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 692: A212. DOI: [10.1051/0004-6361/202450726](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450726).
- Zhang X, Liu C, Zhong J, et al., 2025. LAMOST Medium-resolution Spectroscopic Survey of Galactic Open Clusters (LAMOST-MRS-O): An Overview of Survey Plan and Preliminary Results[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 25(2): 025008. DOI: [10.1088/1674-4527/ada74e](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ada74e).
- Zhang Y, Tang S Y, Chen W P, et al., 2020. Diagnosing the Stellar Population and Tidal Structure of the Blanco 1 Star Cluster[J/OL]. The Astrophysical Journal Letters, 889(2): 99. DOI: [10.3847/1538-4357/ab63d4](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab63d4).
- Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al., 2012. LAMOST spectral survey — An overview [J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 12(7): 723-734. DOI: [10.1088/1674-4527/12/7/002](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/7/002).
- Zhao J K, Oswalt T D, Chen Y Q, et al., 2015. CaII H&K emission distribution of $\sim 120\,000$ F, G and K stars in LAMOST DR1[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 15(8): 1282. DOI: [10.1088/1674-4527/15/8/013](https://doi.org/10.1088/1674-4527/15/8/013).
- Zhong J, Chen L, Kouwenhoven M B N, et al., 2019. Substructure and halo population of Double Cluster h and χ Persei[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 624: A34. DOI: [10.1051/0004-6361/201834334](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834334).

- Zhong J, Chen L, Wu D, et al., 2020. Exploring open cluster properties with Gaia and LAMOST[J/OL]. *Astronomy & Astrophysics*, 640: A127. DOI: [10.1051/0004-6361/201937131](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937131).
- Zhong J, Chen L, Jiang Y, et al., 2022. New Insights into the Structure of Open Clusters in the Gaia Era[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 164(2): 54. DOI: [10.3847/1538-3881/ac77fa](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ac77fa).
- Zhou X, Chen X, 2021. Galactic open cluster Cepheids - a census based on Gaia EDR3 [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504(4): 4768-4784. DOI: [10.1093/mnras/stab1209](https://doi.org/10.1093/mnras/stab1209).
- Zhou Y, Li X, Huang Y, et al., 2023. The Circular Velocity Curve of the Milky Way from 5-25 kpc Using Luminous Red Giant Branch Stars[J/OL]. *The Astrophysical Journal Letters*, 946(2): 73. DOI: [10.3847/1538-4357/acadd9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acadd9).
- Zhu Y, Xu W, 2000. Low-resolution spectrograph for LAMOST[C/OL]//Iye M, Moorwood A F. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: Vol. 4008 Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*. 141-147. DOI: [10.1117/12.395430](https://doi.org/10.1117/12.395430).
- Zhu Y, Hu Z, Zhang Q, et al., 2006. A multipurpose fiber-fed VPHG spectrograph for LAMOST[C/OL]//McLean I S, Iye M. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: Vol. 6269 Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy*. 62690M. DOI: [10.1117/12.671124](https://doi.org/10.1117/12.671124).
- Zong W, Fu J N, De Cat P, et al., 2020. Phase II of the LAMOST-Kepler/K2 Survey. I. Time Series of Medium-resolution Spectroscopic Observations[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 251(1): 15. DOI: [10.3847/1538-4365/abbb2d](https://doi.org/10.3847/1538-4365/abbb2d).

附录一 222 个疏散星团的 LAMOST-MRS 光谱参数表

表 -1 222 个疏散星团的 LAMOST-MRS 光谱参数表 1

Cluster	RV	RV_s	M_H	M_H_s	Alpha_M	Alpha_M_s	FeH	FeH_s	C_Fe	C_Fe_s	N_Fe	N_Fe_s	O_Fe	O_Fe_s	Mg_Fe	Mg_Fe_s
ASCC_11	-13.7	4.5	-0.199	0.111	0.031	0.051	-0.195	0.117	-0.00731	0.11863	0.05568	0.09266			0.07057	0.10068
ASCC_113	-8.1	6.55	-0.175	0.139	0.075	0.049	-0.168	0.128	0.01092	0.1313	-0.00991	0.15193			0.13946	0.08744
ASCC_12	-22.36	21.53	-0.119	0.093	0.09	0.042	-0.118	0.088	0.05525	0.0164	-0.01457	0.14318	0.06646		0.15707	0.0687
ASCC_19	23.19	3.14	-0.078	0.029	-0.016	0.02	-0.068	0.031	-0.0335	0.02257	-0.07504	0.04784	-0.00684	8.8E-4	-0.0569	0.03653
ASCC_20	31.57	3.02	-0.074	0.033	-0.023	0.033	-0.071	0.032	-0.01485	0.05445	0.00349	0.08487	0.01308	0.02762	-0.0195	0.07
ASCC_21	18.85	5.18	-0.175	0.109	-0.002	0.032	-0.156	0.103	-0.0417	0.09639	-0.0071	0.18736	-0.00211	0.01921	-0.07256	0.12018
ASCC_23	-13.25	3.64	-0.096	0.047	0.028	0.01	-0.11	0.054	-0.09231	0.18797	-0.01335	0.1114			0.06368	0.04547
ASCC_6	-22.53	9.22	-0.088	0.111	0.053	0.037	-0.084	0.112	-0.03679	0.05973	0.05416	0.0947			0.09813	0.04458
ASCC_9	-43.99	19.19	-0.159	0.05	0.047	0.045	-0.227	0.117	0.00172	0.0345	0.14024	0.09123	0.17201		0.07661	0.0629
Alessi-Teutsch_10	22.52	5.44	-0.075	-0.021	-0.021		-0.188	0.124	-0.03854		-0.05406		-0.04837		-0.08253	
Alessi_12	3.1	1.84	-0.096	0.03	0.015	0.044	-0.091	0.033	0.0129	0.05935	-0.06352	0.03632			0.05928	0.0742
Alessi_2	-11.04	3.05	-0.128	0.066	-0.001	0.035	-0.107	0.041	-0.18927	0.19655	-0.03525	0.05399			-0.00346	0.04392
Alessi_20	-7.66	3.14	-0.142	0.138	-0.004	0.018	-0.135	0.136	-0.03296	0.08384	-0.01549	0.07804	0.02184	0.03432	-0.01345	0.09302
Alessi_37	-10.75	3.54	-0.237	0.03	0.03		-0.236		-0.02837		-0.05477		0.05757		0.03682	
Alessi_50	19.09		-0.266	0.005	0.005		-0.275		-0.05194		0.19262		0.07955		0.01513	
Alessi_96	10.79	3.95	-0.081	0.058	-0.009	0.023	-0.078	0.06	0.01012	0.03839	-0.09469	0.0284			-0.00198	0.04754
Base1_4	8.66	4.22	-0.128		-0.024		-0.148		-0.0662		0.42669		0.00746		3.7E-4	
Berkeley_14	25.08	1.47	-0.285		-0.006		-0.294		-0.04149		0.25832		0.04075		0.0136	
Berkeley_19	17.05		-0.332		0.024		-0.341		-0.09894		0.32345		0.04909		0.06041	
Berkeley_20	77.81		-0.37		0.045		-0.38		-0.0437		0.22324		0.07501		0.08799	
Berkeley_23	62.66	17.25	-0.391	0.04	0.048	0.011	-0.399	0.035	-0.04077	0.00482	0.22558	0.01904	0.08478		0.07757	0.00647
Berkeley_32	104.48		-0.348		0.042		-0.359		-0.00154		0.21712		0.08606		0.08317	
Berkeley_37	20.46		-0.135		0.008		-0.142		-0.11404		0.17532		0.04389		0.05392	
Berkeley_70	-11.23		-0.107		0.001		-0.119		-0.08126		0.25124		0.01829		0.01294	
Berkeley_8	-26.54	11.42	-0.278	0.015	0.051	0.004	-0.29	0.015	-0.02608	0.01173	0.23942	0.00372	0.06145	0.00483	0.08497	0.00816
Berkeley_9	-19.02	0.67	-0.073		-0.01		-0.086		-0.0412		0.24554		-0.0082		-0.0181	
Bochum_1	26.24	23.27	-0.132	0.108	-0.02	0.015	-0.142	0.106	-0.01735	0.04562	0.11682	0.1136	0.00731		-0.0252	0.02824
Briceno_1	21.83	2.6	-0.125	0.053	0.0	0.021	-0.109	0.046	-0.04852	0.06028	-0.0459	0.07058	-9.6E-4	0.03403	-0.06591	0.07999
COIN-Gaia_13	-12.79	4.16	-0.104	0.06	0.012	0.049	-0.107	0.065	0.01236	0.06598	0.00915	0.1249			0.03327	0.09021
COIN-Gaia_19	21.62	21.31	-0.115	0.075	0.042	0.028	-0.116	0.077	0.00612	0.06007	0.05348	0.11509			0.08261	0.04748
COIN-Gaia_23	7.54	5.77	-0.324	0.127	0.075	0.013	-0.3	0.105	-0.11842	0.15177	-0.04108	0.01929			0.07679	0.0467
COIN-Gaia_24	-4.67	4.09	-0.232	0.088	0.032	0.015	-0.205	0.077	-0.09489	0.08963	0.0142	0.05811			0.04536	0.0481

续表见下页

表-1 续表

Cluster	RV	RV_s	M_H	M_H_s	Alpha_M	Alpha_M_s	FeH	FeH_s	C_Fe	C_Fe_s	N_Fe	N_Fe_s	O_Fe	O_Fe_s	Mg_Fe	Mg_Fe_s
COIN-Gaia_36	-60.82	12.71	-0.189		-0.039		-0.206		-0.06478	0.07327	0.46373		-0.06543		-0.05736	
COIN-Gaia_38	-5.67	11.86	-0.117	0.116	0.047	0.06	-0.111	0.109	-0.08392	0.07327	0.13049	0.17499	-0.07214	0.00551	0.05426	0.0814
COIN-Gaia_6	-42.29	4.24	-0.274	0.003	-0.001	0.014	-0.288	0.005	-0.04276	0.05064	0.28704	0.06812	0.03506		0.01371	0.00287
COIN-Gaia_9	-12.16	3.95	-0.163	0.053	0.035	0.07	-0.165	0.054	0.01307	0.0535	0.10578	0.11654			0.06251	0.10341
CWNU_10	2.51	8.78	-0.272	0.198	0.061	0.038	-0.272	0.202	0.01491	0.04035	0.01421	0.05112			0.08739	0.05647
CWNU_1392	-15.53		-0.088		-0.004		-0.098		-0.04743		0.29039		-0.00838		-0.00659	
CWNU_1451	-7.48	8.26	-0.172	0.081	-0.017	0.02	-0.18	0.072	-0.05584	0.0244	0.21075	0.1287			-0.03523	0.0362
CWNU_1722	-59.63	18.14	-0.188	0.076	0.086	0.092	-0.192	0.068	-0.02657	0.04616	0.17785	0.1114	-0.00448		0.14797	0.15263
CWNU_1773	-8.91	18.1	-0.09		-0.034		-0.105		-0.08317		0.41023		-0.01038		-0.02245	
CWNU_2238	-30.79		-0.274		0.011		-0.283		-0.03767		0.18116		-0.00685		0.01421	
CWNU_2494	-8.53		-0.102		-0.029		-0.125		0.01526		0.46981		-0.10482		-0.02217	
CWNU_2595	36.26	6.99	-0.231		-0.012		-0.245		-0.02867		0.33436		0.00276		-0.01262	
CWNU_518	-18.02	11.04	-0.104	0.122	0.068	0.066	-0.106	0.122	0.00324	0.07332	0.0634	0.0891			0.1241	0.09777
CWNU_519	-5.94	2.69	-0.089	0.063	-0.024	0.021	-0.084	0.068	-0.08966	0.0486	-0.08778	0.02696	-0.01211		-0.06504	0.07368
CWNU_52	-4.62	2.33	-0.115	0.197	0.024	0.039	-0.126	0.187	-0.02136	0.04393	-0.03732	0.08173			0.02277	0.04204
CWNU_80	12.11	2.01	-0.164	0.099	0.041	0.05	-0.157	0.093	-0.01278	0.12256	0.00475	0.13456			0.08382	0.08532
CWNU_87	-52.24	1.98	-0.141	0.01	-0.022	0.005	-0.158	0.008	-0.00141	0.01582	0.36179	0.05595	-0.04606	0.00303	-0.03968	0.00636
Collinder_419	23.63	49.28	-0.427	0.392	0.053	0.056	-0.425	0.38	-0.04736	0.04921	0.19032	0.14897			0.04722	0.07054
Collinder_463	-10.46	7.22	-0.195	0.189	0.069	0.047	-0.19	0.188	0.01451	0.04476	0.02809	0.13467			0.09467	0.05233
Collinder_69	21.84	10.88	-0.384	0.342	0.015	0.035	-0.374	0.348	-0.08265	0.02648	-0.03253	0.08605	-0.0112	0.06643	-0.03015	0.10253
Collinder_95	8.19	22.04	-0.297	0.114	0.001	0.024	-0.292	0.113	-0.02878	0.04426	0.01458	0.11236	0.03351	0.04076	-0.02947	0.05359
Czernik_12	-16.28	5.58	-0.242	0.103	0.024	0.073	-0.25	0.1	-0.048	0.06292	0.26781	0.10773			0.04202	0.10686
Czernik_23	63.29	117.7	-0.258	0.057	0.0	0.026	-0.278	0.051	-0.03412	0.00682	0.33385	0.06849	0.00979		8.6E-4	0.04249
FSR_0537	-48.48	5.8	-0.16		-0.037		-0.179		-0.01169		0.39388		-0.04983		-0.06872	
FSR_0665	-40.39	50.58	-0.369	0.092	0.112	0.06	-0.376	0.081	0.08946	0.05888	0.00665	0.0109	0.26725	0.14569	0.15208	0.1084
FSR_0667	12.94	18.4	-0.162	0.131	0.001	0.035	-0.155	0.12	-0.13538	0.10897	0.18395	0.12787			0.02029	0.06105
FSR_0732	2.46	5.15	-0.158	0.06	0.047	0.025	-0.162	0.059	0.02336	0.02142	0.12818	0.10464			0.10182	0.05419
FSR_0827	15.47		-0.143		-0.025		-0.164		0.05914		0.33424		-0.0696		-0.04861	
FSR_0883	9.64	11.74	-0.176	0.034	-0.024	0.001	-0.198	0.036	0.03921	0.00597	0.42326	0.01754	-0.05856		-0.04281	2.9E-4
FSR_0893	34.29	7.26	-0.126		-0.025		-0.209	0.064	-0.03353		0.3467		-0.01156		-0.0373	
FSR_0905	-2.31	10.26	-0.154	0.166	0.017	0.068	-0.149	0.127	-0.12125	0.05266	0.20647	0.23985			0.02517	0.1093
FSR_0931	33.98	9.6	-0.227	0.106	0.041	0.02	-0.23	0.106	-0.01836	0.01301	0.16166	0.05946	0.10743		0.08717	0.03999
FSR_0942	43.64	31.3	-0.229	0.014	-0.004	0.012	-0.24	0.015	-0.04884	0.00235	0.28303	0.05819	0.02754	0.01669	-0.00224	0.01345
Gulliver_11	-10.27	25.35	0.004		-0.025		-0.005		-0.07958		0.25247		-0.04833		-0.04378	

续表见下页

表-1 续表

Cluster	RV	RV_s	M_H	M_H_s	Alpha_M	Alpha_M_s	FeH	FeH_s	C_Fe	C_Fe_s	N_Fe	N_Fe_s	O_Fe	O_Fe_s	Mg_Fe	Mg_Fe_s
Gulliver_54	40.05	54.34	-0.071	0.079	-0.001	0.031	-0.078	0.07	-0.00381	0.04266	0.17916	0.17394	-0.06632	-0.00371	0.05151	
Gulliver_56	-20.12	124.85	-0.111		-0.031		-0.124		-0.04675		0.26915		-0.05294	-0.03117		
HSC_1001	-78.67	22.84	-0.363	0.141	0.158	0.042	-0.365	0.132	0.10904	0.03638	0.1804	0.02343	0.14139	0.21575	0.04515	
HSC_1021	-49.48	8.74	-0.097	0.01	0.005	0.016	-0.108	0.008	-0.05644	0.0423	0.23536	0.0101	0.04139	0.02131	0.02571	
HSC_1029	-29.07	1.8	-0.091	0.103	0.066	0.097	-0.096	0.109	-0.05203	0.09859	0.09905	0.21024		0.10692	0.16384	
HSC_1081	-58.78	16.82	-0.149		0.035		-0.157		0.02134		0.16821		0.06881	0.07039		
HSC_1101	-40.03		-0.305		0.003		-0.319		-0.09249		0.35		0.01979	0.02831		
HSC_1213	-1.69	5.01	-0.124	0.096	0.037	0.06	-0.118	0.088	-0.082	0.07273	0.03384	0.14088		0.07705	0.09314	
HSC_1219	-48.25		-0.24		-0.023		-0.254		-0.15		0.39143		-0.00951	-0.02243		
HSC_1262	25.39	7.96	-0.103	0.043	-0.031	0.022	-0.096	0.043	-0.06094	0.044	-0.08514	0.03179	0.08998	-0.04832	0.03067	
HSC_1355	9.39	22.06	-0.448	0.069	0.08	0.027	-0.457	0.068	0.01524	0.0456	0.16775	0.06959	0.13378	0.12256	0.03083	
HSC_1400	15.74	9.73	-0.118	0.088	0.066	0.019	-0.096	0.086	-0.11351	0.15212	0.03695	0.14584		0.1014	0.02525	
HSC_1403	14.82	12.6	-0.127	0.108	-0.006	0.032	-0.142	0.114	-0.0206	0.03914	0.04484	0.08921		7.5E-4	0.05207	
HSC_1432	-10.94	2.44	-0.056		-0.015		-0.072		0.04996		0.1774		-0.02763	-0.04299		
HSC_1464	23.9	7.92	-0.162		-0.039		-0.18		-0.12608		0.39336		-0.0177	-0.03294		
HSC_1477	29.55	32.13	-0.288	0.136	0.066	0.012	-0.294	0.14	-0.01177	0.0153	0.14482	0.07414	0.05766	0.09587	0.00542	
HSC_1500	23.41	6.09	-0.054	0.048	-0.005	0.043	-0.062	0.042	-0.02358	0.07692	0.31958	0.08589	-0.06326	-0.00466	0.07428	
HSC_1539	13.12	9.78	-0.199	0.067	0.054	0.025	-0.216	0.059	0.01539	0.10288	0.003	0.07306		0.10014	0.05019	
HSC_1540	27.44	8.29	-0.172	0.124	0.035	0.054	-0.182	0.131	0.04152	0.05977	0.16559	0.14144	0.00524	0.07058	0.08459	
HSC_1553	24.81	7.34	-0.101	0.073	-0.006	0.024	-0.091	0.07	-0.04648	0.05183	-0.02984	0.10762	-0.01746	-0.05732	0.06505	
HSC_1686	16.52		-0.133		-0.014		-0.147		-0.02377		0.35937		-0.03618	-0.03115		
HSC_1702	62.7	7.43	-0.247		-0.016		-0.264		0.01034		0.31021		0.00636	-0.02537		
HSC_618	3.09	21.73	-0.159		-0.023		-0.151		-0.13572		-0.13252		0.01741	-0.09156		
HSC_640	-27.74	57.67	-0.293	0.128	0.062	0.066	-0.302	0.126	0.03477	0.06379	0.19742	0.05383	-0.00318	0.09488	0.10002	
HSC_934	-67.45		0.043		-0.035		0.026		0.01158		0.39122		-0.05241	-0.06024		
HSC_938	-60.2	0.53	-0.255		-0.056		-0.282		0.10252		0.28566		-0.07436	-0.04923		
HSC_983	-49.66		-0.044		-0.024		-0.065		-0.01493		0.50223		-0.0497	-0.04576		
HSC_985	-15.22		0.033		-0.033		0.016		-0.03882		0.35932		-0.03128	-0.04738		
HXHWL_60	37.01	8.35	-0.097	0.023	-0.012	0.003	-0.109	0.023	-0.04238	0.01936	0.32002	0.15414	0.00449	-0.02554	0.00344	
IC_348	14.32	6.6	-0.162	0.083	-0.008	0.033	-0.122	0.093	-0.04294	0.05391	0.0022	0.07954	-0.03699	-0.02484	0.06211	
IC_4665	-13.95	3.11	-0.043	0.027	-0.009	0.033	-0.081	0.07	-0.0052	0.04993	-0.06721	0.05053		-0.00414	0.05314	
Juchert_9	-25.15	18.48	-0.102		-0.025		-0.118		-0.07978		0.36496		0.00242	-0.0171		
King_18	-62.61		-0.009		-0.034		-0.029		0.04756		0.31109		-0.07368	-0.04698		
King_19	-57.91	5.95	-0.016		-0.035		-0.03		-0.05181		0.36602		-0.04349	-0.04617		

续表见下页

表-1 续表

Cluster	RV	RV_s	M_H	M_H_s	Alpha_M	Alpha_M_s	FeH	FeH_s	C_Fe	C_Fe_s	N_Fe	N_Fe_s	O_Fe	O_Fe_s	Mg_Fe	Mg_Fe_s
LISC_3534	-2.46	0.74	-0.047	0.014	0.005	0.034	-0.045	0.01	0.01441	0.0311	0.02194	0.03492			0.02425	0.07412
LP_1800	-30.61	40.75	0.028	0.041	-0.012	0.026	0.013	0.033	0.0079	0.03447	0.29244	0.1765	-0.06305		-0.0228	0.04039
LP_1973	39.5	7.69	-0.064	0.02	-0.03	0.004	-0.078	0.02	-0.0569	0.01656	0.36177	0.01328	0.01873		-0.0513	0.01113
LP_2198	30.22	19.17	-0.003	0.002	-0.004	0.043	-0.006	0.01	-0.07526	0.03101	-0.01206	0.18032	-0.0313		0.02344	0.06809
LP_658	18.65	9.05	-0.227	0.033	0.036	0.049	-0.233	0.036	-0.02429	0.04169	0.14892	0.17127			0.06151	0.0707
Melotte_111	-1.27	2.3	-0.082	0.067	-0.018	0.023	-0.071	0.067	-0.03159	0.03768	-0.11097	0.05166	-0.01349	0.05331	-0.06933	0.053
Melotte_20	-0.58	2.33	-0.103	0.105	-0.022	0.018	-0.093	0.106	-0.06977	0.05363	-0.04681	0.06278	0.00365	0.05516	-0.07518	0.05935
Melotte_22	5.36	1.68	-0.056	0.062	-0.028	0.018	-0.041	0.057	-0.05264	0.03886	-0.08951	0.07308	-0.04515	0.0541	-0.08575	0.03508
Melotte_25	38.24	4.07	-0.011	0.112	-0.04	0.012	0.011	0.118	-0.01178	0.02707	-0.06452	0.09887	-0.02317	0.08321	-0.09109	0.04124
Mon_OB1-D	4.95	20.31	-0.341	0.116	0.025	0.009	-0.339	0.116	0.00841	0.04445	0.0267	0.10102	0.06338	0.0071	0.0216	0.03181
NGC_1039	-7.58	3.06	-0.106	0.148	0.013	0.045	-0.108	0.133	-0.03073	0.08164	0.00784	0.10768			0.02465	0.0846
NGC_1245	-27.8	8.41	-0.073	0.021	-0.024	0.003	-0.087	0.022	-0.07105	0.00902	0.36248	0.01964	-0.01823		-0.03156	0.00521
NGC_129	-36.19	14.39	-0.218	0.083	0.085	0.037	-0.217	0.081	0.0212	0.03523	-0.00868	0.08804			0.13122	0.06708
NGC_1342	-11.57	3.87	-0.3	0.197	0.033	0.05	-0.278	0.187	-0.08546	0.12312	0.01306	0.18409			0.03566	0.06665
NGC_1513	-14.59	11.01	-0.17	0.142	0.011	0.054	-0.179	0.138	0.01138	0.06968	0.20764	0.15196	-0.02826	0.00455	0.01076	0.07477
NGC_1528	-8.95	7.93	-0.106	0.155	0.037	0.032	-0.101	0.154	-0.00465	0.06059	0.033	0.09022			0.06319	0.05287
NGC_1545	-10.91	3.06	-0.13	0.1	0.04	0.041	-0.127	0.098	0.00221	0.08348	0.03939	0.10315			0.08399	0.06212
NGC_1647	-8.17	6.11	-0.149	0.13	0.036	0.037	-0.162	0.124	0.03232	0.06479	0.07784	0.07824			0.06961	0.05785
NGC_1662	-11.88	2.35	-0.133	0.104	0.014	0.037	-0.127	0.099	-0.03949	0.06076	0.08524	0.12756			0.01328	0.05863
NGC_1664	7.98	11.29	-0.137	0.096	0.05	0.05	-0.119	0.092	0.02715	0.05414	0.0204	0.13751			0.08624	0.07769
NGC_1758	8.4	12.78	-0.172	0.18	0.056	0.057	-0.188	0.149	-0.0528	0.11527	0.10458	0.19482			0.06998	0.06591
NGC_1798	1.81	0.23	-0.234	0.015	0.005	0.002	-0.241	0.017	-0.05734	0.01157	0.25927	0.0052	0.02143	0.01799	0.00925	0.0091
NGC_189	-20.32	8.95	-0.054	0.087	-0.005	0.055	-0.063	0.082	-0.03212	0.03607	0.19462	0.19399			0.00524	0.07402
NGC_1907	-11.2	23.24	-0.163	0.142	0.04	0.061	-0.165	0.146	-0.03753	0.05598	0.14923	0.16257	-0.0243	0.02958	0.06296	0.09606
NGC_1912	-0.39	8.22	-0.177	0.108	0.048	0.029	-0.172	0.108	0.00127	0.0683	0.02038	0.11177			0.08374	0.04781
NGC_1960	-7.61	23.43	-0.196	0.118	0.034	0.051	-0.189	0.114	-0.03672	0.08903	0.01294	0.09664			0.04704	0.08807
NGC_1980	26.4	3.64	-0.109	0.016	-0.01	0.01	-0.1	0.014	-0.05896	0.0378	-0.1231	0.06401	-0.00299	0.02133	-0.06228	0.01635
NGC_2068	27.01	1.95	-0.248	0.217	-0.014	0.015	-0.231	0.219	-0.07624	0.03672	-0.10565	0.08255	-0.02996	0.04451	-0.09704	0.0434
NGC_2112	25.42	20.05	-0.187	0.252	0.01	0.022	-0.174	0.231	0.01233	0.01533	0.15751	0.05116	0.02613	0.02163	0.02112	0.01365
NGC_2126	-8.84	6.08	-0.22		0.035	0.027	-0.172	0.06	-0.0207	0.0322	0.12736	0.12905	0.0379		0.04516	0.04032
NGC_2158	26.34	2.16	-0.243		0.014		-0.242		-0.07405		0.24137		0.04872		0.04065	
NGC_2168	-8.36	3.92	-0.14	0.117	0.025	0.043	-0.137	0.109	-0.01047	0.0659	6.3E-4	0.0723	0.10045		0.05702	0.08113
NGC_2169	22.65	12.05	-0.195	0.059	0.019	0.054	-0.175	0.092	-0.01465	0.02159	-0.04427	0.0872	0.01745		0.03143	0.08866
NGC_2183	-42.35	152.61	-0.095	0.042	0.005	0.036	-0.086	0.036	-0.06817	0.07585	-0.09424	0.03597	-0.01202	0.00814	0.00885	0.09794

续表见下页

表-1 续表

Cluster	RV	RV_s	M_H	M_H_s	Alpha_M	Alpha_M_s	FeH	FeH_s	C_Fe	C_Fe_s	N_Fe	N_Fe_s	O_Fe	O_Fe_s	Mg_Fe	Mg_Fe_s
NGC_2194	12.49	8.74	-0.153	0.089	0.019	0.04	-0.169	0.082	-0.00199	0.05051	0.26186	0.14922	0.04081	0.03075	0.05035	
NGC_2232	25.33	6.16	-0.162	0.186	0.023	0.043	-0.157	0.187	0.00592	0.06388	0.00347	0.13238	0.0606	0.03458	0.02226	0.08752
NGC_225	-12.52	14.91	-0.129	0.133	0.019	0.011	-0.128	0.13	0.04077	0.03412	0.13085	0.06791			0.04389	0.0197
NGC_2251	64.68	86.05	-0.084	0.108	0.009	0.045	-0.096	0.101	0.01009	0.03514	0.22266	0.15473	-0.01518	0.05472	0.01638	0.07374
NGC_2264	8.2	26.56	-0.348	0.103	0.025	0.03	-0.347	0.107	-0.0105	0.06828	0.02986	0.07613	0.05041	0.06096	0.02688	0.0655
NGC_2281	20.3	2.95	-0.075	0.072	0.013	0.039	-0.088	0.08	0.00763	0.05517	0.05999	0.09637			0.04032	0.07684
NGC_2301	25.18	5.61	-0.286	0.167	0.096	0.058	-0.274	0.163	-0.06108	0.09527	-0.06544	0.09772			0.13706	0.0945
NGC_2420	76.24	3.19	-0.202	0.041	0.041	0.043	-0.199	0.042	0.03285	0.07087	0.21607	0.04582	0.01643		0.06746	0.07687
NGC_2548	6.65	4.59	-0.153	0.148	0.038	0.06	-0.141	0.148	-0.06367	0.15111	0.04174	0.13225			0.05478	0.07933
NGC_2632	34.55	1.75	0.111	0.056	-0.04	0.018	0.109	0.057	-0.03314	0.03408	0.02068	0.0368	-0.02133	0.03595	-0.06454	0.03843
NGC_2682	33.96	1.4	-0.034	0.048	0.003	0.013	-0.037	0.043	0.01435	0.0354	0.1329	0.11916	-9.0E-4	0.02396	0.01128	0.01911
NGC_436	-66.42	20.54	-0.041		-0.04		-0.059		-0.0319		0.29842		-0.01032		-0.03374	
NGC_457	-31.72	28.5	-0.242	0.15	0.026	0.012	-0.241	0.141	-0.1217	0.13533	0.068	0.11777	0.01226		0.04394	0.02349
NGC_6791	-30.67	32.01	0.333		0.032		0.318		0.09324		0.24744		0.04087		0.10185	
NGC_6811	8.9	7.28	-0.114	0.088	0.013	0.051	-0.111	0.089	-0.06744	0.11845	0.06227	0.21902	0.05096		0.04282	0.07904
NGC_6940	7.15	6.78	0.022	0.09	-0.014	0.064	0.009	0.088	-0.05124	0.066	0.28928	0.13665	-0.06021	0.01362	-0.00395	0.12171
NGC_744	-26.03	6.62	-0.218	0.104	0.054	0.047	-0.215	0.107	-0.05019	0.06651	0.04547	0.08174			0.09417	0.08111
NGC_752	6.86	3.09	-0.077	0.056	0.023	0.052	-0.079	0.055	0.0265	0.08727	0.046	0.14145	-0.0045	0.04927	0.04864	0.09749
NGC_7654	-24.63	14.07	-0.214	0.038	0.13	0.023	-0.223	0.034	0.07568	0.05354	0.13027	0.12985	0.08776		0.20259	0.02184
NGC_7789	-54.04	1.4	-0.054	0.079	-0.013	0.012	-0.066	0.078	-0.05142	0.01586	0.26924	0.08163	-0.00936	0.02787	-0.01445	0.02094
NGC_957	-37.05	17.38	-0.262	0.132	0.08	0.009	-0.263	0.136	0.0094	0.0986	0.04316	0.05188			0.13135	0.03174
OCSN_61	30.31	4.48	-0.131	0.131	0.016	0.055	-0.117	0.128	-0.02562	0.06387	-0.04923	0.12844	-0.0324	0.0289	0.00922	0.11504
OC_0120	-11.41		-0.031		-0.055		-0.06		-0.04525		0.40771		-0.01186		-0.03131	
OC_0165	-13.51	14.93	0.12		-0.041		0.098		0.00407		0.42123		-0.07229		-0.06669	
OC_0266	-27.04	0.94	-0.083		0.012		-0.108		0.08962		0.33715		-0.03751		-0.00215	
OC_0279	15.09	3.19	-0.127	0.108	0.019	0.027	-0.123	0.088	0.01099	0.08693	0.05424	0.15115	0.00522		0.035	0.07951
OC_0282	-21.83		-0.066		-0.02		-0.084		-0.02314		0.42828		-0.0847		-0.03866	
OC_0289	5.4	4.84	-0.032	0.13	-0.005	0.044	-0.033	0.105	-0.01578	0.03224	0.24804	0.22921	-0.08053		-0.00903	0.07282
OC_0343	-2.12	26.22	-0.242	0.11	0.032	0.05	-0.173	0.086	-0.03568	0.10142	0.03505	0.1323			0.05621	0.06564
Roslund_6	-7.34	2.16	-0.053	0.042	-0.002	0.037	-0.047	0.044	-0.0331	0.05913	-0.01334	0.07818	0.02543	0.03543	-5.6E-4	0.07305
Sigma_Orionis	23.1	12.73	-0.184	0.068	-0.039	0.013	-0.323	0.311	-0.0383	0.02534	-0.12184	0.07329	-0.01246	0.03369	-0.1551	0.05805
Stock_10	-10.94	11.52	-0.137	0.062	-0.006	0.029	-0.131	0.074	-0.02669	0.08033	-0.03546	0.06648			0.00192	0.0618
Stock_2	9.28	2.77	-0.07	0.054	-0.002	0.036	-0.062	0.049	-0.02761	0.06001	1.6E-4	0.06962	0.04324	0.0103	0.00119	0.06557
Stock_7	-10.14	18.72	-0.142	0.08	0.071	0.046	-0.14	0.082	0.05227	0.05467	0.07819	0.05344			0.11522	0.06901

续表见下页

表-1 续表

Cluster	RV	RV_s	M_H	M_H_s	Alpha_M	Alpha_M_s	FeH	FeH_s	C_Fe	C_Fe_s	N_Fe	N_Fe_s	O_Fe	O_Fe_s	Mg_Fe	Mg_Fe_s
Teutsch_179	-21.74	5.01	-0.09	0.101	0.018	0.036	-0.088	0.105	0.02655	0.05971	-0.0363	0.0346			0.03063	0.06066
Teutsch_56	-13.6	0.12	-0.127		0.004		-0.136		-0.03827		0.20878		0.04649		0.00295	
Teutsch_60	89.61		-0.256		0.008		-0.271		-0.05523		0.29633		0.04382		0.04209	
Teutsch_89	-38.82	68.48	-0.201	0.115	0.051	0.015	-0.201	0.115	-0.00243	0.09208	0.04217	0.05401			0.10219	0.03208
Teutsch_93	70.83		-0.188		-0.011		-0.204		-0.07295		0.32068		0.02776		0.00688	
Theia_13	28.48	4.09	-0.153	0.162	0.002	0.038	-0.144	0.164	-0.04791	0.03854	-0.04491	0.0757	0.01269	0.04899	-0.02553	0.07668
Theia_1408	39.63	16.92	-0.146	0.071	0.038	0.03	-0.149	0.07	0.06576	0.03426	1.6E-4	0.07816			0.0731	0.05662
Theia_1450	-49.61	0.49	-0.069	0.019	-0.014	0.004	-0.078	0.018	-0.07923	0.02969	0.27257	0.05374	-0.0028		-0.01981	0.00552
Theia_1713	-65.67	106.61	-0.274	0.086	0.054	0.004	-0.274	0.085	0.03965	0.00737	0.09888	0.0118	0.109		0.0873	0.02004
Theia_172	15.55	12.59	-0.119	0.047	0.024	0.011	-0.12	0.048	0.05407	0.04381	0.05773	0.12405			0.07104	0.03169
Theia_1722	-7.35	11.87	-0.192	0.087	0.063	0.043	-0.192	0.088	0.02071	0.06117	0.02973	0.06702	0.07342		0.1102	0.06048
Theia_2192	-32.9	20.86	0.278		0.007		0.26		0.08496		0.27606		0.02796		0.05784	
Theia_2252	-31.7	13.42	0.05		0.026		0.037		0.04225		0.23824		0.04813		0.05556	
Theia_2488	-47.68		-0.227		-0.013		-0.242		-0.03272		0.31286		-9.6E-4		-0.00879	
Theia_2901	-9.59	5.73	-0.168	0.133	0.033	0.019	-0.159	0.124	0.00506	0.0569	-0.04028	0.08161	0.1016		-0.00137	0.03298
Theia_3202	-14.94	6.46	0.022	0.086	-0.012	0.04	0.011	0.081	-0.03065	0.06934	0.27216	0.16771	-0.0748		-0.02019	0.06284
Theia_667	-12.03	4.08	-0.082	0.054	0.015	0.018	-0.07	0.028	-0.10426	0.16464	0.01292	0.05628	-0.00806		0.0254	0.00299
Theia_754	-9.95	7.12	-0.067	0.086	0.05	0.019	-0.059	0.087	-0.0229	0.11596	0.03501	0.1251			0.0896	0.03961
Theia_780	4.25	17.53	-0.113	0.031	0.026	0.033	-0.122	0.031	0.01692	0.04155	0.14424	0.16524	-0.02946		0.0756	0.0752
Theia_862	-24.49	9.82	-0.119	0.129	0.032	0.034	-0.118	0.126	0.01355	0.07633	0.03723	0.09862	-0.03433		0.06278	0.06326
Theia_863	-31.44	3.21	-0.084	0.04	0.043	0.04	-0.091	0.036	0.05836	0.04642	0.01033	0.08357			0.08234	0.07054
Theia_900	-4.11	10.03	-0.088	0.108	0.016	0.032	-0.086	0.096	-0.03977	0.10291	0.11954	0.18354			0.03254	0.05426
Tombaugh_5	-20.79	14.44	-0.055	0.113	0.017	0.082	-0.068	0.104	-0.02147	0.05756	0.294	0.18213	-0.04817	0.02687	0.01294	0.11342
Trumpler_2	-4.02	4.1	-0.109	0.097	0.015	0.046	-0.102	0.091	7.3E-4	0.06965	0.05805	0.1109			0.04086	0.07791
Trumpler_5	30.61	34.47	-0.376	0.141	0.031	0.02	-0.382	0.144	-0.02962	0.02917	0.19889	0.08286	0.08957	0.03363	0.05664	0.04763
UBC_1176	-19.48		-0.231		0.022		-0.243		-0.05867		0.27992		0.04275		0.04209	
UBC_1183	-58.98	17.15	-0.141	0.049	-0.011	0.01	-0.156	0.053	0.01876	0.03524	0.34929	0.12358	-0.00718		-0.00746	0.02135
UBC_1195	-56.84	31.17	-0.265	0.185	0.054	0.066	-0.277	0.18	-0.00417	0.08806	0.20912	0.14216	-0.00959		0.07912	0.06766
UBC_1254	-18.35		-0.138		-0.059		-0.161		-0.12466		0.44733		-0.02507		-0.03964	
UBC_1270	0.16	8.8	-0.481		0.068		-0.488	0.004	0.00118		0.25039		0.15028		0.1088	
UBC_1278	8.39		-0.128		-0.031		-0.146		-0.08975		0.36637		-0.01129		-0.01888	
UBC_1289	-0.65	6.28	-0.205	0.037	0.048	0.071	-0.216	0.029	-0.01936	0.05905	0.255	0.23462	0.03889		0.07992	0.114
UBC_1328	24.84	14.78	-0.144		-0.015		-0.16		-0.0671		0.36955		-0.0039		-0.01636	
UBC_141	-16.98		-0.076		-0.009		-0.091		-0.05207		0.25337		0.03143		0.00877	

续表见下页

表-1 续表

Cluster	RV	RV_s	M_H	M_H_s	Alpha_M	Alpha_M_s	FeH	FeH_s	C_Fe	C_Fe_s	N_Fe	N_Fe_s	O_Fe	O_Fe_s	Mg_Fe	Mg_Fe_s
UBC_1577	-46.11	18.18	-0.162	0.064	0.092	0.019	-0.162	0.052	0.05646	0.05431	0.0323	0.13571			0.15335	0.00806
UBC_1612	36.14	0.7	-0.117		-0.02		-0.132		-0.08809		0.46078		-0.01436		-0.03204	
UBC_17a	20.54	4.85	-0.17	0.116	-0.003	0.03	-0.146	0.11	-0.06277	0.04084	-0.13243	0.04632	-0.04	0.01946	-0.08744	0.07048
UBC_184	-42.55	8.62	-0.011	0.04	0.015	0.053	-0.012	0.044	-0.03939	0.05089	0.14612	0.1498			0.03186	0.09305
UBC_199	-14.1	2.43	-0.193	0.048	0.035	0.056	-0.171	0.058	-0.07078	0.21221	0.07806	0.14055	0.02942		0.06532	0.10303
UBC_398	-35.27		0.039		-0.01		0.018		0.12149		0.12188		-0.00903		-0.02538	
UBC_419	-43.6	11.64	-0.105	0.042	0.027	0.041	-0.118	0.041	-0.00624	0.02378	0.25338	0.12835	0.04966		0.04732	0.06976
UBC_427	-16.01	7.75	-0.131	0.08	0.005	0.031	-0.136	0.074	-0.06294	0.03293	0.24115	0.12765			0.00933	0.05803
UBC_436	17.35	17.69	-0.297		0.018		-0.308		-0.01831		0.22525		0.01245		0.03044	
UBC_447	54.59		-0.064		-0.029		-0.082		-0.05606		0.50953		-0.02617		-0.04404	
UBC_52	-29.38	7.16	-0.061	0.055	0.041	0.086	-0.07	0.048	-0.0529	0.02871	0.19806	0.20753			0.07265	0.14989
UBC_585	33.57	29.38	0.004		-0.039		-0.016		-0.05164		0.37673		-0.02294		-0.0404	
UBC_6	-30.62	10.09	-0.188	0.081	0.013	0.034	-0.196	0.071	-0.02574	0.0093	0.21301	0.07888	0.02265		0.02756	0.05356
UBC_87	-7.61	3.38	-0.618		0.035		-0.626		-0.02165		0.21394		0.11122		0.06176	
UPK_300	-10.56	3.75	-0.117	0.101	0.052	0.045	-0.118	0.101	0.01114	0.02493	0.02689	0.05853			0.07895	0.0749
UPK_325	-17.51	5.02	-0.17	0.067	0.058	0.026	-0.166	0.06	-0.02923	0.08686	0.14801	0.22735			0.09842	0.07006
UPK_402	26.78	0.57	-0.091		0.001		-0.073		-0.08071		-0.06798		-0.01297		-0.09587	
UPK_422	16.77	7.41	-0.11	0.058	-0.007	0.019	-0.103	0.061	-0.04823	0.03348	-0.07588	0.03189	0.02139	0.02085	-0.02405	0.04094
Wit_2	25.78	97.72	-0.684		0.012		-0.675		-0.06494		0.06198		0.12432		-0.07516	
ZHBIZ_1	22.83	1.25	-0.097	0.045	-0.024	0.03	-0.091	0.047	-0.04056	0.06304	-0.02176	0.09457	-0.03628		-0.04641	0.05577

表 -2 222 个疏散星团的 LAMOST-MRS 光谱参数表 2

Cluster	Al_Fe	Al_Fe_s	Si_Fe	Si_Fe_s	S_Fe	S_Fe_s	Ca_Fe	Ca_Fe_s	Ti_Fe	Ti_Fe_s	Cr_Fe	Cr_Fe_s	Ni_Fe	Ni_Fe_s	Cu_Fe	Cu_Fe_s
ASCC_11			0.03894	0.06753			-0.08742	0.10479					-0.02602	0.05618		
ASCC_113			0.08051	0.05217			-0.05996	0.12837					-0.10538	0.12515		
ASCC_12	0.00754		0.08561	0.0541	0.02586		-0.01594	0.10201	0.05961		-0.0326		-0.02784	0.0388	0.0641	
ASCC_19	-0.07276	0.01671	-0.06763	0.03674	0.13506	0.00769	0.06931	0.07061	-0.12572	8.0E-4	-0.0296	7.4E-4	-0.03249	0.01825	0.03997	0.07561
ASCC_20	-0.01456	0.00162	-0.04617	0.04749	0.12452	0.06084	0.04437	0.11032	-0.11126	0.00741	-0.12317	0.09105	-0.05848	0.04466	0.10726	0.03008
ASCC_21	-0.03713	0.03007	-0.06037	0.06991	-0.02084	0.19249	0.02696	0.08796	-0.13307	0.09811	0.00912	0.04888	-0.03243	0.0274	0.07299	0.04188
ASCC_23			0.02491	0.02306			-0.192	0.12586					-0.02379	0.02191		
ASCC_6			0.06189	0.04469			-0.08843	0.15547					-0.02754	0.04705		
ASCC_9	0.09593		0.04836	0.04204	0.16741		0.02999	0.04839	0.05765		0.03217		-0.00639	0.01989	0.12816	
Alessi-Teutsch_10	-0.07326		-0.09157		0.15079		0.01489		-0.11372		0.04388		-0.02625		0.01102	
Alessi_12			0.00479	0.04279			-0.08652	0.1005					-0.05863	0.044		
Alessi_2			-0.02824	0.02327			-0.07007	0.1912					0.00666	0.01992		
Alessi_20	-0.0282	0.03705	-0.01188	0.08122	0.10848	0.09916	0.05133	0.09556	-0.07454	0.06661	-0.00894	0.04665	-0.04058	0.05944	0.08348	0.05773
Alessi_37	-0.00457		-0.01391		0.19097		0.0589		0.00384		0.06761		5.0E-4		0.10445	
Alessi_50	0.007		0.01664		0.0542		0.0225		-0.02013		-0.07967		-0.01773		0.13527	
Alessi_96			-0.00326	0.03527			-0.01523	0.10912					-0.03815	0.01356		
Basel_4	-0.12267		0.0056		0.06534		-0.01415		-0.04225		-0.04817		-0.04041		0.07175	
Berkeley_14	-0.01352		0.00833		0.01242		-0.01593		-0.03355		-0.03286		-0.00241		0.07685	
Berkeley_19	0.0194		0.02364		0.09448		0.01444		-0.02403		-0.02004		-0.01715		0.09865	
Berkeley_20	0.01437		0.04183		0.10708		0.03793		8.8E-4		-0.04411		4.6E-4		0.11341	
Berkeley_23	1.0E-4		0.05907	0.00694	0.08635		0.01052	0.00157	-0.01914		-0.04089		0.01226	0.00529	0.14752	
Berkeley_32	0.02361		0.0444		0.11545		0.01485		0.01363		-0.04366		0.01954		0.06886	
Berkeley_37	0.01734		-0.01562		0.09637		0.06105		0.00374		-0.06144		0.01999		0.02424	
Berkeley_70	-0.08821		0.00746		0.04548		0.00171		-0.00697		-0.052		-0.01819		0.07386	
Berkeley_8	-0.0054	0.01044	0.04297	5.4E-4	0.07429	0.00687	0.02798	0.0027	0.01895	0.00361	-0.0412	0.01794	0.01116	0.00362	0.12278	0.01004
Berkeley_9	-0.01805		0.00309		0.01351		0.00856		-0.01747		-0.0093		-0.01286		-0.01506	
Bochum_1	-6.4E-4		-0.01259	0.01845	7.7E-4		0.02986	0.0124	0.00747		9.0E-4		0.0104	0.01776	0.01733	
Briceno_1	-0.0268	0.03763	-0.05777	0.05753	0.07631	0.14812	0.04141	0.05505	-0.10826	0.04799	-0.01532	0.02507	-0.02763	0.02594	0.10345	0.02144
COIN-Gaia_13			0.01248	0.06555			-0.02477	0.09307					-0.02878	0.02379		
COIN-Gaia_19			0.05955	0.04205			0.0122	0.04728					-0.00925	0.03463		
COIN-Gaia_23			0.0961	0.03283			0.06579	0.13067					-0.18424	0.13102		
COIN-Gaia_24			0.04246	0.00917			-0.06819	0.11831					-0.13705	0.06395		

续表见下页

表-2 续表

Cluster	Al_Fe	Al_Fe_s	Si_Fe	Si_Fe_s	S_Fe	S_Fe_s	Ca_Fe	Ca_Fe_s	Ti_Fe	Ti_Fe_s	Cr_Fe	Cr_Fe_s	Ni_Fe	Ni_Fe_s	Cu_Fe	Cu_Fe_s
COIN-Gaia_36	-0.0845		-0.0099		0.03067		0.00645		-0.06975		-0.00324		-0.06476		0.01032	
COIN-Gaia_38	-0.04142	7.9E-4	0.06509	0.06136	0.02936	0.01264	-0.06218	0.11064	-0.05938	0.0055	-0.03757	0.00461	-0.07887	0.09352	-0.00899	0.02859
COIN-Gaia_6	-0.13439		0.00419	4.6E-4	0.10655		-6.9E-4	0.01736	-0.01662		-0.08376		-0.02326	0.0227	0.07535	
COIN-Gaia_9			0.01358	0.06019			0.04655	0.02565					-0.00554	0.01425		
CWNU_10			0.06146	0.03076			0.01388	0.1031					4.5E-4	0.01479		
CWNU_1392	-0.01286		0.02158		0.02714		0.01065		-0.03468		-0.02968		-0.0144		0.02486	
CWNU_1451			-0.02663	0.04445			0.05673	0.04286					-0.03202	0.02228		
CWNU_1722	-0.04146		0.07768	0.06537	0.02609		0.05422	0.04838	-0.02422		-0.04272		-0.01418	0.0111	0.03477	
CWNU_1773	-0.12223		-0.00119		0.04099		-0.01708		-0.03852		-0.04124		-0.05086		0.07112	
CWNU_2238	0.00208		0.01494		0.0339		0.05278		-0.01833		0.00408		-0.01466		0.07671	
CWNU_2494	-0.06073		0.00144		0.02097		0.00589		-0.05502		0.00416		-0.02799		0.07059	
CWNU_2595	-0.08851		0.01909		0.05936		0.01058		-0.06291		-0.04439		-0.04383		0.06584	
CWNU_518			0.06469	0.09458			-0.07029	0.0749					-0.00733	0.05162		
CWNU_519	-0.06606		-0.06709	0.05344	0.08021		0.06294	0.02965	-0.12894		-0.02146		-0.02221	0.02386	0.09415	
CWNU_52			0.03161	0.05664			0.02504	0.08961					-0.08752	0.16427		
CWNU_80			0.05232	0.07802			-0.05469	0.18962					-0.08334	0.08372		
CWNU_87	-0.09346	0.01126	0.01054	0.0031	0.06496	0.00737	-0.01346	0.00602	-0.06019	0.01561	-0.03603	0.01172	-0.04418	0.0069	0.0943	0.02264
Collinder_419			0.03875	0.03811			0.06808	0.06835					-0.03897	0.03443		
Collinder_463			0.08812	0.05827			-0.03161	0.10079					-0.02673	0.00973		
Collinder_69	-0.04921	0.02219	-0.06036	0.04549	0.11123	0.15354	0.133	0.1012	-0.05187	0.13416	0.00588	0.04383	0.01348	0.05026	0.09781	0.00997
Collinder_95	0.03913	0.09062	-0.04475	0.03812	0.05925	0.097	0.09344	0.06569	-0.03793	0.0384	-0.00577	0.03664	-0.01725	0.03028	0.0766	0.09936
Czernik_12			0.01789	0.07764			0.03412	0.01225					-0.02532	0.03282		
Czernik_23	-0.02046		-0.00143	0.013	0.08228		0.02926	0.01229	-0.04407		-0.04504		-0.03146	0.02501	0.04909	
FSR_0537	-0.11717		-0.0049		0.07601		-0.02802		-0.07352		-9.2E-4		-0.062		0.20938	
FSR_0665	0.20027	0.0704	0.0918	0.08034	0.16171	0.09909	0.09001	0.03328	0.1406	0.10018	-0.11271	0.02651	0.04857	0.02794	0.11859	0.10842
FSR_0667			0.01187	0.02312			-0.11352	0.09042					-0.0056	0.04725		
FSR_0732			0.02317	0.03194			-0.04343	0.08627					0.02336	0.05141		
FSR_0827	-0.12219		0.00901		0.09486		-0.00231		-0.05892		-0.01127		-0.04504		0.21316	
FSR_0883	-0.0771		0.01151	0.00161	0.09046		0.0085	0.00686	-0.05279		-0.03027		-0.05198	0.00492	0.15221	
FSR_0893	-0.07113		-2.5E-4		0.0509		0.00868		-0.03435		-0.02449		-0.03459		0.06644	
FSR_0905			0.04488	0.08607			0.04746	0.05461					-0.09946	0.09002		
FSR_0931	0.08936		0.02842	0.02606	0.11214		0.01194	0.01374	-0.02465		-0.07797		0.01359	0.00148	0.19603	
FSR_0942	0.00145	0.02053	0.01576	0.0155	0.05893	0.0012	0.02757	0.0083	-0.03273	0.01816	-0.0071	0.01668	-0.02793	0.01957	0.03101	0.0062
Gulliver_11	-0.02233		-0.0072		-0.00307		0.01728		-0.03974		0.00311		-0.03457		-0.02478	

续表见下页

表-2 续表

Cluster	Al_Fe	Al_Fe_s	Si_Fe	Si_Fe_s	S_Fe	S_Fe_s	Ca_Fe	Ca_Fe_s	Ti_Fe	Ti_Fe_s	Cr_Fe	Cr_Fe_s	Ni_Fe	Ni_Fe_s	Cu_Fe	Cu_Fe_s
Gulliver_54	-0.02343		0.01096	0.0147	0.0074		0.00459	0.00816	-0.05092		-0.01426		0.00409	0.03256	0.06973	
Gulliver_56	-0.06066		-0.0149		0.11196		0.02464		-0.06641		-0.03514		-0.03872		-0.02525	
HSC_1001	0.06297		0.1303	0.01643	0.12745		0.08372	0.02471	0.03244		0.03295		-0.01625	0.06902	0.09248	
HSC_1021	-0.02199		0.00598	0.01792	0.04534		0.01838	0.02064	0.00956		-0.02871		-0.0011	0.01383	0.04208	
HSC_1029			0.09617	0.11828			-0.07572	0.15552					-0.02062	0.01828		
HSC_1081	3.2E-4		0.02302		0.0838		0.02387		0.02233		-0.00818		0.01164		0.11332	
HSC_1101	-0.03119		0.03909		0.05415		-0.00665		-0.05196		-0.06683		-0.02358		0.09435	
HSC_1213			0.04403	0.07208			-0.06647	0.1639					-0.05984	0.06263		
HSC_1219	-0.09124		0.01087		0.06252		-9.E-4		-0.05588		-0.05734		-0.05316		0.10457	
HSC_1262	-0.00426		-0.07696	0.01395	0.25022		0.12822	0.03541	-0.13245		-0.06255		-0.05964	0.02108	0.04296	
HSC_1355	0.12669	0.09373	0.08769	0.02937	0.1115	0.03585	0.05247	0.0318	0.03493	0.07443	-0.11354	0.0698	0.03292	0.01291	0.10883	0.04596
HSC_1400			0.07098	0.0156			-0.15137	0.13473					-0.05222	0.06334		
HSC_1403			-0.00263	0.05303			2.1E-4	0.08661					-0.02332	0.02455		
HSC_1432	-0.06767		0.01999		0.05837		-0.02345		-0.05767		-0.03819		-0.03794		0.0373	
HSC_1464	-0.14178		-0.00522		0.0379		-0.00129		-0.07316		-0.04923		-0.0664		0.07746	
HSC_1477	0.00175		0.07151	0.02642	0.05548		2.9E-4	0.02752	-0.00274		-0.04542		0.01598	0.01206	0.11197	
HSC_1500	-0.04572		0.01206	0.04492	0.02684		-0.00757	0.01518	-0.03611		-0.04029		-0.01755	0.01898	0.03999	
HSC_1539			0.04867	0.0368			-0.04066	0.10182					-0.0406	0.03846		
HSC_1540	-0.1355		0.05617	0.04036	0.09753		0.02731	0.05311	-0.08291		-0.00893		0.02029	0.05116	0.18048	
HSC_1553	-0.06714	0.0446	-0.05437	0.05098	0.10083	0.06871	0.04457	0.07094	-0.10028	0.10353	-0.00294	0.06267	-0.03004	0.01038	0.0851	0.04764
HSC_1686	-0.03591		0.01165		0.06115		2.3E-4		-0.06724		-0.02428		-0.04509		0.0193	
HSC_1702	-0.01875		0.00455		0.07417		0.02487		-0.03097		-0.02074		-0.03154		0.04582	
HSC_618	0.05104		-0.07594		-0.01207		0.14493		-0.00816		0.02061		-0.07206		0.11083	
HSC_640	0.01583		0.07328	0.06441	0.04176		0.08268	0.05818	-0.04451		-0.0625		0.00895	0.03302	-0.01282	
HSC_934	-0.02257		0.00921		0.04205		-0.01869		-0.07605		-0.04986		-0.06445		0.06471	
HSC_938	-0.18343		0.02881		0.12992		-0.05289		-0.12132		-0.04189		-0.09021		0.30397	
HSC_983	-0.02902		0.01529		0.04996		-0.01034		-0.05281		-0.05609		-0.05054		0.07134	
HSC_985	-0.10917		-0.00828		0.02016		-0.01554		-0.01472		-0.00872		-0.01342		0.07679	
HXHWL_60	-0.04785		0.00859	0.00502	0.01164		0.00494	0.01381	-0.04228		-0.0362		-0.0532	0.02268	0.01895	
IC_348	-0.01621	0.06488	-0.03343	0.06243	-0.01308	0.13145	0.07043	0.06342	-0.04216	0.01186	0.03732	0.03563	-0.05007	0.0431	0.07749	0.03482
IC_4665			-0.01405	0.05119			0.02695	0.03573					-0.02395	0.01552		
Juchert_9	-0.06812		0.00698		0.01565		-0.0034		-0.03686		-0.04494		-0.04054		0.08984	
King_18	-0.03914		-0.00756		0.08071		-0.01895		-0.02608		-0.06244		-0.03253		0.13256	
King_19	-0.03003		-0.00937		0.043		-0.00288		-0.04322		-0.0269		-0.03915		0.00373	

续表见下页

表-2 续表

Cluster	Al_Fe	Al_Fe_s	Si_Fe	Si_Fe_s	S_Fe	S_Fe_s	Ca_Fe	Ca_Fe_s	Ti_Fe	Ti_Fe_s	Cr_Fe	Cr_Fe_s	Ni_Fe	Ni_Fe_s	Cu_Fe	Cu_Fe_s
LISC_3534			9.0E-5	0.02926			-0.04773	0.11727					-0.02464	0.03456		
LP_1800	-0.09474		0.01699	0.01484	0.06007		-0.0113	0.00706	-0.04678		-0.01482		-0.01915	0.00876	0.08374	
LP_1973	0.04541		-0.01097	0.00109	0.12478		0.01735	0.00643	-0.03676		-0.01546		-0.03997	0.01057	0.04201	
LP_2198	-0.08501		0.0117	0.04426	0.03358		-0.03366	0.05949	0.02816		0.07117		-0.06923	0.08178	0.11331	
LP_658			0.04562	0.06942			0.04038	0.02359					-0.01366	0.04035		
Melotte_111	-0.06629	0.01886	-0.08007	0.04852	0.01067	0.07507	0.02195	0.02818	-0.09913	0.0653	0.03806	0.02715	-0.02988	0.02941	0.08072	0.06065
Melotte_20	-0.03885	0.05245	-0.06844	0.03024	0.07188	0.11077	0.08066	0.07411	-0.08007	0.0985	-0.01009	0.06948	-0.036	0.02262	0.04927	0.063
Melotte_22	-0.08287	0.04368	-0.0837	0.03711	0.09581	0.13475	0.01216	0.03018	-0.14797	0.07676	0.01005	0.0378	-0.0387	0.02241	0.09343	0.05601
Melotte_25	-0.07196	0.03522	-0.08917	0.05037	0.06064	0.16415	0.03673	0.04637	-0.10273	0.06945	0.086	0.04519	-0.03814	0.04589	0.13058	0.0598
Mon_OBI-D	0.08032	0.03276	-0.0115	0.05169	0.07898	0.18352	0.15634	0.12733	-0.04739	0.03743	-0.01578	0.07149	-0.00517	0.02494	0.11655	0.01601
NGC_1039			0.01704	0.05558			-3.6E-4	0.07941					-0.05398	0.0982		
NGC_1245	-0.03131		-0.01106	0.01718	0.01834		0.00778	0.00891	-0.03887		-0.02511		-0.0276	0.00223	0.00561	
NGC_129			0.09132	0.04297			0.0122	0.05626					-0.06263	0.08765		
NGC_1342			0.04128	0.07185			-0.00379	0.19611					-0.11778	0.14353		
NGC_1513	-0.06363	0.00419	0.00321	0.04179	0.04334	0.01002	0.02153	0.05015	-0.04904	0.00243	-0.0258	0.00594	-0.0228	0.02748	0.03704	0.01451
NGC_1528			0.04225	0.04804			-0.00526	0.10914					-0.00543	0.03316		
NGC_1545			0.04363	0.03971			-0.06233	0.11371					-0.03054	0.02725		
NGC_1647			0.03985	0.04199			-0.03568	0.11327					-0.04925	0.07163		
NGC_1662			0.00878	0.06033			-0.01473	0.06387					-0.05158	0.08617		
NGC_1664			0.05776	0.05373			-0.01375	0.07631					-0.03549	0.07734		
NGC_1758			0.07328	0.03129			-0.05333	0.10071					-0.11328	0.1442		
NGC_1798	0.00778	0.01525	0.02239	0.00824	0.04253	0.01818	0.03572	0.00336	-0.03583	0.00753	-0.02157	0.01466	-0.01971	0.00478	0.04685	0.01801
NGC_189			0.01596	0.05505			-0.00333	0.02211					-0.01866	0.02195		
NGC_1907	-0.03318	0.02945	0.04206	0.06268	0.01455	0.01989	0.00761	0.08685	-0.05102	7.0E-4	-0.03306	0.0038	-0.0412	0.06475	0.01506	0.01651
NGC_1912			0.05372	0.03819			-0.04683	0.11376					-0.01181	0.03708		
NGC_1960			0.02823	0.06394			-0.01094	0.08285					-0.0478	0.04707		
NGC_1980	0.0209	0.00454	-0.04647	0.01999	0.19008	0.19887	0.0721	0.02141	-0.0958	0.07548	-0.04261	0.04316	-0.02458	0.00922	0.09127	0.01859
NGC_2068	-0.03906	0.05004	-0.09552	0.02037	0.0976	0.03808	0.06043	0.05624	-0.10058	0.06722	-0.01072	0.02091	-0.03202	0.03242	0.11228	0.04549
NGC_2112	0.00717	0.04464	0.00913	0.01343	0.01397	0.03115	0.04924	0.07196	-0.00845	0.00653	0.00226	0.03683	0.00617	0.01298	0.09137	0.02884
NGC_2126	-0.00312		0.04556	0.0152	0.07211		0.03895	0.02433	-0.03823		-0.06272		-0.01411	0.00653	0.05178	
NGC_2158	-0.08435		0.01697		0.10228		0.03197		-0.01596		-0.00666		-0.02405		0.08991	
NGC_2168	0.04548		0.0147	0.05019	0.0279		-0.01987	0.08261	0.03916		-0.12501		-0.03644	0.0527	0.10288	
NGC_2169	-0.06572		0.01209	0.09307	0.15993		0.08355	0.06943	-0.1614		-0.04548		-0.05629	0.05138	0.03229	
NGC_2183	0.00553	0.0593	-0.03184	0.05737	-0.06684	0.05092	0.06439	0.0511	-0.05249	0.03001	0.01816	0.00678	-0.06223	0.01106	0.05961	0.01977

续表见下页

表-2 续表

Cluster	Al_Fe	Al_Fe_s	Si_Fe	Si_Fe_s	S_Fe	S_Fe_s	Ca_Fe	Ca_Fe_s	Ti_Fe	Ti_Fe_s	Cr_Fe	Cr_Fe_s	Ni_Fe	Ni_Fe_s	Cu_Fe	Cu_Fe_s
NGC_2194	0.04126	0.03032	0.0319	0.0319	-0.0516	0.1313	0.05381	0.04599	-0.00888	0.05898	0.01573	0.0644	-0.02205	0.07091	-0.04558	0.10556
NGC_2232	0.0101	0.00529	0.0418	0.0418	0.11681	0.1313	0.03462	0.09379	-0.00466	0.09483	0.01573	0.0644	-0.0281	0.02719	0.03799	0.10556
NGC_225		0.02522	0.01472	0.01472			0.02637	0.09854					-0.03021	0.0355		
NGC_2251	0.01546	0.03599	0.02081	0.02897	0.01254	0.024	0.03318	0.04648	0.00413	0.06816	-0.01104	0.03522	-0.00969	0.04607	0.01336	0.02329
NGC_2264	0.07562	0.04617	0.0028	0.04935	0.01695	0.04887	0.10058	0.03799	-0.01211	0.05562	0.03483	0.05778	-0.00232	0.04424	0.04992	0.04074
NGC_2281		0.01056	0.04465	0.04465			-0.04237	0.12791					-0.03264	0.03986		
NGC_2301		0.12515	0.07121	0.07121			0.12741	0.12329	-0.0381		-0.00161		-0.18106	0.10371		
NGC_2420	0.05034	0.04608	0.04289	0.04289	-6.0E-4		0.04699	0.02379	-0.0381				0.00374	0.02596	0.01819	
NGC_2548		0.04533	0.0884	0.0884			-0.10079	0.24596					-0.05605	0.10547		
NGC_2632	-0.04435	0.02953	0.04257	0.04257	-0.01565	0.14973	0.00589	0.02608	-0.04984	0.07388	0.07577	0.02838	8.3E-4	0.01868	0.11185	0.02995
NGC_2682	0.00191	0.03059	0.01212	0.02301	0.00862	0.02184	0.00204	0.0192	-0.00303	0.02493	0.00822	0.03139	0.01758	0.01378	0.01228	0.03708
NGC_436	-0.15398	-0.0093	0.04188	0.04188			-0.04857		-0.04858		-0.03979		-0.0549		0.09444	
NGC_457	-0.00655	0.01876	0.00102	0.00102	0.02548		-0.01194	0.01863	-0.00615	-0.03577	-0.03577		-0.00686	0.02711	-0.00664	
NGC_6791	-0.0151	0.01724	0.01724	0.01724	-0.02237		-0.01848		0.1243	0.0507	0.0507		0.01425	0.04352	0.11608	
NGC_6811	-0.00653	0.01199	0.05521	0.05521	-0.14487		-0.05122	0.17837	0.06325	0.06891	0.06891		-0.0061	0.04566	0.0677	0.03329
NGC_6940	-0.02827	0.01339	0.00146	0.05743	-0.03037	0.05027	0.00227	0.0389	-0.0216	0.02451	-0.00253	0.01176	-0.00154	0.04818	-0.0292	
NGC_744		0.05996	0.05082	0.05082			-0.07415	0.14641					-0.01916	0.03282	0.00172	0.0316
NGC_752	-0.01693	0.01553	0.01935	0.05889	-0.02288	0.04205	0.00617	0.06753	-0.02394	0.01606	0.00208	0.01332	-0.02406	0.03282	0.00172	0.0316
NGC_7654	0.07633	0.11368	0.02752	0.16589	0.16589		0.09033	0.02454	0.0144	0.01941	0.01941		0.08646	0.01958	0.04257	
NGC_7789	-0.04593	0.02392	0.0036	0.00936	0.02261	0.01988	0.01019	0.02041	-0.01446	0.01975	-0.03439	0.03489	-0.01875	0.01649	0.02574	0.02825
NGC_957		0.10189	0.03806	0.03806			0.02255	0.18111					-0.04531	0.04815		
OCSN_61	-0.07372	0.04085	-0.01742	0.09207	0.12447	0.09925	0.0511	0.09262	-0.1725	0.0756	-0.00562	0.04181	-0.0671	0.07589	0.07659	0.04433
OC_0120	-0.22788	-0.01649	-0.01649		0.07144		-0.0226		-0.00229		-0.04602		-0.03484		0.17239	
OC_0165	-0.077	0.00129	0.00129		0.03167		-0.0336		-0.04883		-0.03887		-0.02399		0.04663	
OC_0266	-0.12638	0.03297	0.03297		0.14013		-0.01291		-0.02464		-0.03479		-0.03058		-0.03544	
OC_0279	-0.01558	-0.01005	0.05812	0.05812	0.27788		0.05089	0.13638	-0.18833		-0.0932		-0.04905	0.04851	0.10035	
OC_0282	-0.05494	0.01465	0.01465		0.0785		-0.00934		-0.06309		-0.03711		-0.05123	0.0485		
OC_0289	-0.04623	0.01232	0.03413	0.03413	0.03324		-0.02058	9.2E-4	-0.06132		-0.02872		-0.00492	0.04704	0.00447	
OC_0343		0.03818	0.07105	0.07105			0.02383	0.08572					-0.0565	0.05601		
Roslund_6	-0.01858	0.03548	-0.01195	0.04957	0.04214	0.0957	0.00278	0.05853	-0.07847	0.0673	-0.00819	0.05036	-0.03757	0.02346	0.05385	0.02646
Sigma_Orionis	-0.07628	0.08553	-0.13221	0.03608	0.07924	0.09263	0.09737	0.046	-0.09626	0.06838	0.00335	0.10154	-0.02194	0.02046	0.15163	0.05819
Stock_10		-0.01528	0.04622	0.04622			-0.07715	0.10932					-0.07094	0.02642		
Stock_2	-0.01724	0.02964	-0.01522	0.05147	0.06261	0.03052	0.01258	0.03656	-0.04898	0.02742	-0.00897	0.01073	-0.02324	0.02125	0.01498	0.0188
Stock_7		0.07693	0.06234	0.06234			0.02352	0.11859					-0.05465	0.03843		

续表见下页

表-2 续表

Cluster	Al_Fe	Al_Fe_s	Si_Fe	Si_Fe_s	S_Fe	S_Fe_s	Ca_Fe	Ca_Fe_s	Ti_Fe	Ti_Fe_s	Cr_Fe	Cr_Fe_s	Ni_Fe	Ni_Fe_s	Cu_Fe	Cu_Fe_s
Teutsch_179			0.02371	0.04278			-0.01749	0.06514					0.01213	0.03633		
Teutsch_56	0.11625		0.01446		-0.10097		0.02803		-0.0221		-0.08239		-0.01367		0.04266	
Teutsch_60	-0.0771		0.01227		0.08236		0.01065		-0.01328		-0.06288		-0.02798		0.08045	
Teutsch_89			0.04898	0.03412			-0.04377	0.04237					-0.01777	0.03788		
Teutsch_93	-0.03018		0.00921		0.07828		0.00705		-0.00543		-0.01202		-0.04837		0.07458	
Theia_13	-0.02614	0.07574	-0.03685	0.0612	0.05782	0.08809	0.03722	0.077	-0.10223	0.06527	-0.01602	0.04242	-0.00962	0.01697	0.07031	0.03547
Theia_1408			0.05653	0.04597			-0.00634	0.06783					-0.01881	0.03185		
Theia_1450	-0.01197		-0.00337	0.0041	0.00675		0.02439	0.00799	-0.01232		0.01646		-0.01872	0.00542	-0.02795	
Theia_1713	0.09255		0.03635	0.01277	0.0153		0.0485	0.03915	0.04261		-0.0579		-0.01175	0.01264	0.04584	
Theia_172			0.02204	0.00398			-0.13574	0.06353					0.01311	0.0125		
Theia_1722	0.07229		0.07225	0.04384	0.01558		7.3E-4	0.06184	-0.00415		0.00704		-0.02353	0.03578	0.0933	
Theia_2192	0.00143		0.00823		-0.02398		-0.01262		0.10761		0.02655		0.0441		0.13373	
Theia_2252	0.00671		0.02474		0.0293		-0.01089		0.05422		-0.00702		0.02059		0.06695	
Theia_2488	-0.03766		0.00569		0.06691		0.00534		-0.03124		-0.02803		-0.02561		0.05766	
Theia_2901	0.14538		-0.01243	0.03787	0.17402		0.07993	0.09088	-0.07611		0.05964		-0.01352	0.03779	0.10881	
Theia_3202	-0.11063		0.00963	0.04478	0.01394		-0.0302	0.04121	-0.05657		-0.03697		-0.02806	0.00806	0.01992	
Theia_667	-0.05801		-0.00228	0.00778	0.07432		-0.1516	0.14161	0.01134		0.06543		0.0493	3.7E-4	-0.07501	
Theia_754			0.05628	0.04145			-0.15846	0.16346					-0.00399	0.04285		
Theia_780	-0.02481		0.04186	0.02859	0.04287		-0.06356	0.11989	-0.05569		-0.03205		-0.05944	0.0581	0.02198	
Theia_862	-0.14579		0.04437	0.04688	0.09168		-0.03435	0.11606	-0.02544		-0.0326		-0.03422	0.05401	0.09816	
Theia_863			0.06351	0.04462			-0.06035	0.09113					0.00369	0.01666		
Theia_900			0.01996	0.02297			-0.00544	0.06979					-0.02056	0.04458		
Tombaugh_5	-0.03204	0.01104	0.04488	0.07424	0.06094	0.01201	0.03441	0.06697	-0.04332	0.01907	-0.07112	0.03482	-0.02902	0.02089	0.0529	0.02359
Trumpler_2			0.02475	0.0507			-0.0235	0.07564					-0.03	0.03188		
Trumpler_5	0.0514	0.04278	0.02244	0.02508	0.09584	0.07953	0.04417	0.02449	-0.04423	0.01235	-0.04224	0.02158	0.00757	0.01677	0.09284	0.064
UBC_1176	0.06581		0.03924		0.11035		0.04247		-0.0167		-0.07389		0.00891		0.04877	
UBC_1183	-0.05685		0.01273	0.00644	0.04784		0.0087	0.01257	-0.02394		-0.01562		-0.00898	0.01216	0.12987	
UBC_1195	-0.14813		0.04514	0.04854	0.02498		0.0687	0.07409	-0.04704		-0.05561		-0.01618	0.02719	0.05688	
UBC_1254	-0.2054		-0.01736		0.0205		-0.01099		-0.05178		-0.05316		-0.07275		0.05384	
UBC_1270	0.13753		0.075		0.09661		0.06312		-0.00427		-0.09656		0.03617		0.03592	
UBC_1278	-0.15493		5.3E-4		0.06505		-0.00826		-0.0762		-0.04801		-0.05653		0.1039	
UBC_1289	-0.1059		0.06771	0.08869	0.06456		-0.01774	0.05812	0.01047		-0.04979		-0.04491	0.00925	0.04626	
UBC_1328	-0.08027		0.01576		0.04222		-6.5E-4		-0.05821		-0.04763		-0.04531		0.0676	
UBC_141	-0.06892		0.00406		-0.01272		-0.00343		-0.01784		1.8E-4		-0.03453		0.09193	

续表见下页

表-2 续表

Cluster	Al_Fe	Al_Fe_s	Si_Fe	Si_Fe_s	S_Fe	S_Fe_s	Ca_Fe	Ca_Fe_s	Ti_Fe	Ti_Fe_s	Cr_Fe	Cr_Fe_s	Ni_Fe	Ni_Fe_s	Cu_Fe	Cu_Fe_s
UBC_1577			0.08915	0.05515			-0.01279	0.1556					-0.05718	0.1139		
UBC_1612	-0.05115		0.01118		0.03918		-2.1E-4		-0.05982		-0.02019		-0.04679		0.06649	
UBC_17a	-0.06569	0.02525	-0.06159	0.05361	0.08371	0.07784	0.04788	0.0333	-0.16136	0.04262	-0.0357	0.03945	-0.05621	0.04903	0.08885	0.05052
UBC_184			0.0222	0.06365			-0.01856	0.06619					-0.01015	0.03768		
UBC_199	0.00805		0.02859	0.06286	-0.01683		-0.10265	0.23447	-0.01849		-0.00428		-0.0221	0.02838	-0.06125	
UBC_398	-0.10177		0.02479		0.0934		-0.02948		-0.03777		-0.08842		-0.01756		0.12201	
UBC_419	0.04412		0.04043	0.03226	0.06121		0.03913	0.04472	-0.00164		-0.03702		0.01467	0.04735	0.04626	
UBC_427			0.00828	0.02028			-6.6E-4	0.02043					-0.04375	0.02687		
UBC_436	-0.01323		0.02042		0.01036		0.03551		0.00264		0.02346		0.00371		0.04817	
UBC_447	-0.05674		0.01044		0.07383		-0.02346		-0.07006		-0.07091		-0.06164		0.10752	
UBC_52			0.04304	0.06163			0.03691	0.03123					-0.05702	0.04907		
UBC_585	-0.11197		-0.00968		0.04944		-0.01968		-0.03512		-0.03504		-0.03588		0.10303	
UBC_6	-0.07143		0.02798	0.03302	0.03549		0.02156	0.02597	-0.0016		-0.01543		-0.0211	0.01652	0.00941	
UBC_87	0.04156		0.02315		0.111575		0.09044		-0.02326		-0.05432		0.00927		0.13494	
UPK_300			0.07689	0.03334			-0.0486	0.01635					-0.01807	0.01163		
UPK_325			0.05748	0.03162			-0.02658	0.07239					-0.01108	0.01538		
UPK_402	-0.04405		-0.07732		-0.00761		0.0213		-0.09487		0.01282		-0.02886		0.11858	
UPK_422	-0.05294	0.01433	-0.04329	0.02626	0.10518	0.0377	0.08543	0.06525	-0.14806	0.01157	-0.03069	0.04299	-0.0361	0.016	0.03513	0.04182
Wit_2	-0.0241		-0.00264		0.08712		0.21297		-0.09979		0.0097		-0.05425		0.16168	
ZHBIZ_1	-0.157		-0.05735	0.04927	-0.03268		0.06159	0.0615	-0.23725		-0.05329		-0.06477	0.02644	0.06662	

致 谢

回想读博的这六年，既充实又忙碌，经历了很多事，终于在毕业前夕，完成了从幼稚中年人到理性、专注、情绪稳定成年人的深刻转变。能够顺利完成学业，首先要感谢录取我的长春人造卫星观测站、创造良好学习环境和精心培养我的上海天文台以及允许教师脱产学习深造的工作单位大理大学的共同支持和帮助！

感谢长春人造卫星观测站的导师刘承志研究员一如既往地鼓励、支持和帮助，使我得以在上海天文台安心学习了六年。感谢长春站研究生处的樊菲老师总是不辞辛劳，帮我处理相关研究生的各项繁琐事宜。感谢邓诗宇、姜平、谢海闻等小同学帮我寄送和收发各类邮件，提交各种材料，让我避免了来回各单位的奔波。感谢刘振星、杨康等小同学作为答辩秘书提供的无私帮助。

感谢上海天文台的导师陈力研究员，是陈老师引领我踏上学习天文学的道路，为我提供了良好的学习条件。他细心严谨的治学态度、深厚的学养以及对所有学生的无限耐心、宽容和鼓励深深影响着我。感谢导师钟靖研究员，他以简洁明快、干净利索的风格，不仅直指学生所存在问题的关键，而且会给学生提供切实可行的解决方案或建议，极大提高了学生的学习效率和积极性。非常感谢钟老师，在他的帮助下，发表了第一篇科研小论文，增强了我对科研工作的信心及热情。

感谢上海天文台“幸福星团”的全体老师们！第一次在“幸福星团”学习生活的日子是我这一生除了童年之外，最感到幸福的日子！会永远记得常瑞香老师开心的笑声，侯金良老师、陈力老师、沈世银老师、邵正义老师，以及尹君、李璐、钟靖、袁芳婷、赵东海等老师为探讨一个问题热烈辩论的愉快场景，还有骑自行车比我还快的赵君亮、傅承启两位老先生在上海师大给研究生上课的场景。

感谢国家天文台的罗阿里老师、杜冰老师和施建荣老师，还有章博、王瑞小同学，总是给我耐心解答我对LAMOST数据的一些疑问。

感谢上海天文台研究生处的马金老师和储怡老师为我们付出的辛劳！感谢许许多多从年龄上可以称我为阿姨的非常优秀的小同学们！从他们身上学习到了很多我不具备的优点，让一个老阿姨也得到了快乐成长。感谢我们组的“师兄”小同学俞锦程，在学习写代码方面给予我的极大帮助！感谢我们组的白乐娅小同学，是她耐心教我修改python小代码；感谢组里秦松梅、蒋悦悦、唐通、李春燕等小同学无私的帮助；感谢我们“幸福星团”组的冯帅、张文粦、潘翠云、张书会、郑云亮、卢家风等同学帮助我解决星系课程的作业难题。特别感谢善良又漂亮的刘蓉蓉小同学，感谢她在我写论文时提出的建设性意见，而且她开导我的话终于让我有了顿悟！非常感谢她的善意和帮助！感谢多年的室友李朵朵小同学，喜欢她的幽默可爱和满嘴“金句”，令人捧腹！会永远记得我们一起走过的“肥羊”路。感谢室友万程凯小同学、同期入学的姜君和邵曦小同学的陪伴，难忘一起去上海分院上课的那个秋天。

感谢大理大学的同事段卓琦老师、张学清老师、李汝烯老师、茶国智老师、邓薇老师、庄玉昆老师、和秀梅老师、李忠木老师、谢再新老师、胡永茂老师等，在我最艰难的时候给予帮助和关怀！

最后，感谢我所有的亲人和朋友们，感谢我的哥哥和嫂子对我的关心和爱护。特别感谢我的父亲母亲给了我一个阳光幸福的童年，足以让我坚强乐观地面对长大后遇到的各种困难，希望他们在天上也能看到我的每一个进步！

2025 年 6 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历：

张茜，云南丽江人，1997年7月毕业于云南师范大学物理系，同年9月至今，任职于大理大学，从事物理学及相关学科的教学和科研工作。2004年9月至2007年7月，在云南大学数理学院凝聚态物理专业攻读硕士学位（全日制），获得理学硕士学位。从2019年8月至今，在中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站（中国科学院上海天文台联合培养）攻读博士学位（全日制）。

已发表的学术论文：

1. **Zhang X**, Liu C, Zhong J, et al., 2025. LAMOST Medium-resolution Spectroscopic Survey of Galactic Open Clusters (LAMOST-MRS-O): An Overview of Survey Plan and Preliminary Results[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 25(2): 025008. DOI: 10.1088/1674-4527/ada74e.

合作发表文章：

1. Fu X, Bragaglia A, Liu C, Zhang H, Xu Y, Wang K, Zhang Z, Zhong J, Chang J, Li L, Chen L, Chen Y, Wang F, Gjergo E, Wang C, Yue N, **Zhang X**, et al., 2022. LAMOST meets Gaia: The Galactic open clusters[J/OL]. Astronomy & Astrophysics, 668: A4. DOI: 10.1051/0004-6361/202243590.

2. He Z, Li C, Zhong J, Liu G, Bai L, Qin S, Jiang Y, **Zhang X**, et al., 2022. New Open-cluster Candidates Found in the Galactic Disk Using Gaia DR2/EDR3 Data[J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 260(1): 8. DOI:10.3847/1538-4365/ac5cbb.

3. 张文粦, 常瑞香, **张茜**. 老年疏散星团的金属丰度及银盘金属丰度梯度演化研究 [J]. 天文学报, 2020, 61(1): 1-14

即将投稿的工作: LAMOST Medium-Resolution Spectroscopic Survey of Galactic Open Clusters (LAMOST-MRS-O): Open Cluster Catalog

