



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于 LAMOST 研究疏散星团视向速度和金属丰度的性质

作者姓名: 张书会

指导教师: 邵正义 研究员 中国科学院上海天文台

常瑞香 研究员 中国科学院上海天文台

钟靖 副研究员 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: 中国科学院上海天文台

2021 年 6 月

Radial velocities and metallicities of Open clusters based on
LAMOST

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

By

Shuhui Zhang

Supervisor:

Professor Zhengyi Shao

Professor Ruixiang Chang

Associate Professor Jing Zhong

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences

June, 2021

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提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。尽我所知，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已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

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有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、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

疏散星团是研究星族和银河系形成与化学演化的理想示踪体。为了降低场星的污染, 获得更加准确的疏散星团运动学与化学丰度特性, 我们基于 LAMOST 低分辨率光谱在视向速度和金属丰度两维空间上构建包含团星和场星的混合模型, 解算疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其弥散。

对于混合模型中的团星, 我们构建在视向速度和金属丰度上的两维正高斯分布; 对于场星, 以星团周边场星在视向速度和金属丰度两维空间上的真实概率密度分布作为场星的分布模型。在混合模型的解算中, 我们还严格考虑了 LAMOST DR7 星表数据中观测误差的改正因子 k , 并在模型中引入了观测误差, 从而拟合得到星团的视向速度与金属丰度的内禀弥散, 以区别于相应的表观弥散值。最终, 我们对 112 个疏散星团进行了拟合, 结果与结论如下: (1) 观测误差改正因子分别为: $K_{RV} = 0.644$ 和 $K_{[Fe/H]} = 0.526$, 两者均小于 1, 说明 LAMOST DR7 低分辨率光谱高估了视向速度及金属丰度的观测误差。(2) 考虑误差与否的情况下, 混合模型所得疏散星团视向速度和金属丰度的均值基本一致, 但内禀弥散明显小于表观弥散。这说明用 LAMOST 低分辨率光谱讨论疏散星团内部性质时, 严格地考虑观测误差是必须的。(3) 在严格考虑了观测误差的影响后, 疏散星团金属丰度内禀弥散的典型值为: $0.09^{+0.07}_{-0.03}$ dex, 这说明疏散星团内部存在一定的化学丰度弥散。这种现象可能是有以下两种原因: 其一, 形成疏散星团的巨分子云是由多个不同金属丰度的小分子云组成 (Gouliermis, 2018; Guszejnov 等, 2018); 其二, 疏散星团内部的大质量恒星快速演化, 造成疏散星团内部气体的化学增丰 (Krumholz 等, 2019)。(4) 与 Zhong 等 (2020) 样本比较, 两个工作都是基于 LAMOST 低分辨率光谱得到疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其表观弥散, 但算法不同。我们发现两者所得均值及其表观弥散的偏差很小, 结果保持一致; 与 Pang 等 (2018) 和 Soubiran 等 (2018) 样本比较, 均值的偏差分别由 LAMOST 低分辨率光谱和 APOGEE 高分辨率光谱及 Gaia DR2 光谱的系统差所致。

进一步对 112 个疏散星团的整体运动学和化学特性进行分析, 我们得到疏散星团的径向和垂向金属丰度梯度及金属丰度-年龄关系的斜率分别为: -0.061 ± 0.009

dex kpc^{-1} , $-0.198 \pm 0.039 \text{ dex kpc}^{-1}$, $-0.038 \pm 0.012 \text{ dex Gyr}^{-1}$, 与他人结果一致。此外, 与薄盘星相比, 我们发现: (1) 疏散星团的径向和垂向金属丰度梯度略陡。(3) 疏散星团的轨道偏率更小, 近圆轨道。(4) 疏散星团的三维速度弥散更小。以上几点结论均说明疏散星团受到银河系动力学影响更小, 导致径向迁移效应和加热效应均更小。

关键词: 疏散星团, LAMOST 巡天, 视向速度, 金属丰度, 混合模型

Abstract

Open Clusters are the excellent tracers to study the stellar population and the formation and evolution of Galactic Disk. In order to reduce the field contamination and derive more accurate kinematics and abundances of open clusters, we establish a mixture model including cluster members and field stars using the radial velocities and metallicities of stars from LAMOST DR7 low-resolution spectroscopy (hereafter LRS) to calculate the mean and scatter of radial velocities and metallicities of open clusters.

For the cluster members in the mixture model, we construct a 2D Gaussian probability density function (PDF) of radial velocity and metallicity with no intercorrelation between them, while the model of field part are directly measured from the observed 2D distribution of the field stars surrounding the cluster. In the process of mixture modeling solution, we also strictly consider the correction factors (k) of the observational errors from LAMOST DR7, and the observational errors are taken into account in this model. The intrinsic dispersions of radial velocity and metallicity of the open cluster are therefore determined as distinguished from the apparent dispersions. Finally, 112 open clusters are fitted with the results and conclusions are as follows: (1). Correction factors of observational errors, $k_{RV} = 0.644$ and $k_{[Fe/H]} = 0.526$, are both less than 1, indicating LAMOST DR7 LRS overestimates the observational errors of radial velocity and metallicity. (2). Considering the observational errors or not, the average values of radial velocity and metallicity are similar, but the intrinsic dispersions are significantly smaller than the apparent dispersions. This suggests that it is necessary to strictly consider the observational errors when we use LAMOST LRS to study the internal properties of open clusters. (3). By strictly considering the observational errors, the typical intrinsic dispersion of the metallicity of open clusters are $0.09^{+0.07}_{-0.03}$ dex, which is suggestive of a certain range of metallicities available in open clusters. This might attribute to the following two reasons: Firstly, the giant molecular clouds in which open clusters formed are composed of multiple small fragments with various metallicities (Gouliermis, 2018; Guszejnov 等, 2018); Secondly, the massive stars in open clusters evolve rapidly, re-

sulting in chemical enrichment of the gas within open clusters (Krumholz 等, 2019). (4). Compared with Zhong 等 (2020), both studies show the mean values and apparent dispersions of radial velocities and metallicities, respectively, of open clusters using LAMOST LRS but applying different algorithms. We find that the mean values and apparent dispersions derived from both studies show a high level of consistency. Compared with Pang 等 (2018) and Soubiran 等 (2018), the deviations of the mean values are determined by the systematic difference among LAMOST LRS, APOGEE high-resolution spectroscopy, and *Gaia* DR2.

By further analyzing the overall kinematics and chemical properties of 112 open clusters, we derive the slopes of radial and vertical metallicity gradients, and age-metallicity relation are $-0.061 \pm 0.009 \text{ dex kpc}^{-1}$, $-0.198 \pm 0.039 \text{ dex kpc}^{-1}$, $-0.038 \pm 0.012 \text{ dex Gyr}^{-1}$, respectively, which are consistent with other studies. In addition, compared with the thin disk stars, we find that: (1). The radial and vertical metallicity gradients of open clusters tend to be slightly steeper. (2). The orbital ellipticity of open clusters is smaller, close to a circular orbit. (3). The 3D velocity dispersion of open clusters tend to be smaller. All of the above conclusions indicate that the open clusters are less affected by the dynamics of the Milky Way, leading to less radial migration and disk heating effects.

Keywords: open cluster, LAMOST, radial velocity, metallicity, mixture model

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 银河系概况	1
1.2 疏散星团研究意义及成员星判定方法与算法	2
1.2.1 星团简介	2
1.2.2 疏散星团的研究意义	2
1.2.3 疏散星团的成员星判定方法与算法	4
1.2.4 疏散星团星表研究进展	5
1.3 LAMOST	9
1.3.1 现有的光谱巡天望远镜概况	9
1.3.2 LAMOST 观测概述及其科学目标	16
1.3.3 LAMOST 观测到的疏散星团在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间的分布情况	22
1.4 本文的研究目的和内容	27
第 2 章 星团的混合模型与相关算法	29
2.1 视向速度与金属丰度“空间”的混合模型	29
2.1.1 团星模型构建	30
2.1.2 场星模型构建	31
2.2 参数估计和拟合参数	34
2.2.1 似然函数与后验概率	34
2.2.2 拟合参数	35
2.2.3 表观弥散与内禀弥散	35
2.3 LAMOST 的观测误差改正因子 k	36
2.4 本章小结	38
第 3 章 疏散星团视向速度和金属丰度的性质	41
3.1 样本选取	41
3.1.1 星团样本及星团中拟合样本的选取	41
3.1.2 用于构建场星模型的场星样本选取	45
3.1.3 LAMOST 观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$	45
3.2 混合模型的最佳拟合参数	49
3.2.1 表观弥散的最佳拟合结果	49
3.2.2 内禀弥散的最佳拟合结果	53

3.3 分析与比对	60
3.3.1 表观弥散和内禀弥散拟合结果的分析与比较	60
3.3.2 相同巡天而不同算法之间结果的比较	61
3.3.3 与其他巡天的结果比较	68
3.4 本章小结	72
第 4 章 利用星团示踪银盘的演化	75
4.1 星团和盘星及控制样本的选取	75
4.1.1 疏散星团样本选取	75
4.1.2 盘星及其控制样本的选取	76
4.2 疏散星团的化学性质	79
4.2.1 疏散星团金属丰度内禀弥散 ($\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}],\text{int}}$) 的性质	79
4.2.2 AMR	79
4.2.3 金属丰度梯度	81
4.2.4 疏散星团与盘星化学性质的比较	84
4.3 星团运动学	87
4.3.1 视向速度 R_V 和银经 ℓ 的关系	87
4.3.2 疏散星团与盘星的运动学和动力学参数的比较	87
4.4 本章小结	91
第 5 章 总结与展望	93
5.1 总结	93
5.2 展望	95
参考文献	97
附录 A 表格全表	113
致谢	135
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	137

图形列表

1.1 RAVE DR6 中恒星重复观测的情况在银道坐标系下的投影 (Steinmetz 等, 2020b)	10
1.2 SEGUE-1 和 SEGUE-2 天区覆盖图: 蓝色和红色分别表示 SEGUE-1 和 SEGUE-2 的巡天区域 ¹	11
1.3 APOGEE DR16 在银道坐标系中的巡天天区覆盖图: 其中蓝绿色和蓝色分别是 7 平方度视场的 APOGEE-1 和 APOGEE-2N, 红色是 2.8 平方度视场的 APOGEE-2S 巡天的天区覆盖区域 (Ahumada 等, 2020)	12
1.4 APOGEE DR16 巡天在银道坐标系中观测到的恒星数密度分布图 (包含: APOGEE-1, 2N 和 2S): 其中银盘部分主要分布在 $ b < 15^\circ$ 对称的区域; 分布在 $b < 30^\circ$ 的核球和 'inner Galaxy' 区域; 其他的特殊项目, 比如 <i>Kepler - 2</i> 天区 (Ahumada 等, 2020)	13
1.5 GALAH 巡天天区覆盖图-图中蓝色和橙色分别是避开银盘的 GALAH main 和暗源两部分天区分布, 绿色是落入 Kepler 天区的 K2-HERMES, 红色和紫色分别是 TESS-HERMES 和其他 HERMES other 天区覆盖 (Buder 等, 2020)	14
1.6 <i>Gaia</i> -ESO 观测到的目标源 (iDR6 数据: 整个观测时间为:2011.12.31 - 2018.1.26) 在赤道坐标系上的分布情况-MW 表示银河系观测, CL 表示星团观测, SD 表示定标观测 ²	15
1.7 LAMOST 的结构示意图 (Cui 等, 2012)	17
1.8 夕阳中的 LAMOST (Shi J R., 2016)	18
1.9 LAMOST DR7 低分辨率光谱数据情况 ³	19
1.10 LAMOST 先导巡天和低分辨率巡天前七年天区覆盖图 ⁴	19
1.11 LAMOST 中分辨率光谱巡天第一年天区覆盖图 ⁴	21
1.12 LAMOST 中分辨率光谱非时域巡天天区覆盖 (Liu 等, 2020)	21
1.13 LAMOST 中分辨率光谱关于疏散星团研究的天区覆盖 (Liu 等, 2020)	22
1.14 银河系光谱巡天的分辨率与得到光谱观测的恒星数目的关系 (Majewski 等, 2017)	23
1.15 NGC 2682 在 LAMOST 的视向速度 RV 和金属丰度 [Fe/H] 空间分布: 上下图中的散点都是 Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给 NGC 2682 的成员星, 图中 RV 和 [Fe/H] 均是 LAMOST DR7 所给; 图中的颜色条代表 Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给成员星的成员概率的大小; 上图也给出了 RV 和 [Fe/H] 的分布; 下图中的灰色等高线代表 LAMOST 所给星团场星的分布情况	25

1.16 NGC 6791 在 LAMOST 的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间分布：
 上下图中的散点都是 Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给 NGC 6791 的成员星，图中 RV 和 $[Fe/H]$ 均是 LAMOST DR7 所给；图中的颜色条代表 Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给成员星的成员概率的大小；上图也给出了 RV 和 $[Fe/H]$ 的分布；下图中的灰色等高线代表 LAMOST 所给星团场星的分布情况。 26

2.1 NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 752 周边的场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间的个数分布和概率密度分布：左边三幅图分别是三个疏散星团的数目分布 $\Psi_{m,n}(RV, [Fe/H])$ ，中间三幅图分别是三个疏散星团未进行 smooth 的归一化概率密度分布 $\Phi_f(RV, [Fe/H])$ ，右边三幅图分别是三个疏散星团 smooth 后的归一化概率密度分布 $\Phi_f(RV, [Fe/H])$ 。 32

3.1 LAMOST DR7 视向速度观测误差 RV_{err} 和金属丰度观测误差 $[Fe/H]_{err}$ 的概率密度分布。图中坐标轴分别是 RV_{err} 和 $[Fe/H]_{err}$ 的对数，黑直线和虚直线分别是两者的中位值和 3σ 边界。 42

3.2 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得重复观测 2 次以上的重复观测次数 N_{dup} 的直方图：其中黑色虚线是指有 5 次重复观测的源 43

3.3 疏散星团 NGC 2682 拟合样本及其周边场星在空间位置 (α, δ) 、自行 $(\mu_\alpha^*, \mu_\delta)$ 及 CMD 图上的分布情况：图中彩色点是 NGC 2682 的拟合样本，其颜色表示 CG20 中所给成员星的成员概率，灰色点是 NGC 2682 周边场星；图 $\alpha-\delta$ 中红色和蓝色圆圈分别是 NGC 2682 的半径 R_{max} 及其满足场星个数 10000 以上的场星半径 R_{field} ；自行空间分布中蓝绿色和蓝色圆圈分别是 CG20 所给 NGC 2682 的平均自行的 3σ 和 6σ 范围。 44

3.4 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得重复观测 5 次以上恒星样本 (37, 273 颗恒星) 的观测误差改正因子 $\log_{10}(k)$ 的分布图：上下两图分别是视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 $\log_{10}(k_{RV})$ 和 $\log_{10}(k_{[Fe/H]})$ 的直方图，其中直线和虚线分别是其分布的中位值和 1σ 的位置。 47

3.5 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得重复观测 5 次以上的源的视向速度观测误差改正因子 k_{RV} 和金属丰度观测误差改正因子 $k_{[Fe/H]}$ 随重复观测次数 N_{dup} 的变化：上下图分别是 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 随重复观测次数的变化，其中红实线和红虚线分别是所有 5 次以上重复观测源的改正因子的中位值及其 1σ 的范围；蓝点是各重复观测次数相应的源的改正因子的中位值，蓝色误差棒是其 1σ 范围。 48

3.6 MCMC 方法得到疏散星团 NGC 2682 拟合样本中各拟合参数的概率密度分布函数 (PDF)：每一列的第一张图表示不同参数的 PDF，中间虚线是其中位值所在位置，是其最佳拟合参数；左右两条虚线是其 1σ 范围。 50

- 3.7 疏散星团 NGC 2682 拟合样本在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布: 彩色散点是此团的拟合样本, 颜色条表示 CG20 所给团成员概率, 红色大点是 MCMC 方法得到的拟合参数 (平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$) 最佳值, 红色误差棒是其表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 的最佳拟合; 上图和右图是其考虑重复观测之后的直方图, 红线是其最佳拟合参数所对应的高斯分布, 红虚线是其平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 的最佳拟合值。 51
- 3.8 疏散星团 NGC 2682 拟合样本和周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布: 上图中散点表示拟合样本, 颜色条表示 CG20 所给成员星概率, 下图是 MCMC 方法得到最佳拟合参数 (平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$); 上下两幅图中的等高线是场星经过 smooth 之后的概率密度分布。 .. 52
- 3.9 疏散星团 NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 1245 拟合样本及其周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布和三个疏散星团的最佳拟合参数结果, 图中各标示分别见图 3.7 和 3.8。 54
- 3.10 疏散星团 Gulliver 26 和 Czernik 23 拟合样本及周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布, 图中彩色散点是 CG20 所给疏散星团的成员星, 颜色条是 CG20 所给疏散星团的成员概率。 · 55
- 3.11 MCMC 方法得到疏散星团 NGC 1039 拟合样本中各拟合参数 (平均视向速度、平均金属丰度及其内禀弥散) 的概率密度分布函数 (PDF): 每一列的第一张图表示不同参数的 PDF, 中间虚线是其中位值所在位置, 是其最佳拟合参数; 左右两条虚线是其 1σ 范围。 56
- 3.12 疏散星团 NGC 1039 拟合样本在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布: 其中颜色条表示 CG20 所给成员星概率, 蓝点和红点分别对应不考虑和考虑视向速度和金属丰度观测误差及其改正因子两种情况下, MCMC 方法所得拟合参数 (平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$) 的最佳值, 蓝色和红色误差棒分别是这两种情况所得表观弥散 ($\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$) 和内禀弥散 ($\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],int}$) 的最佳拟合结果。上图和右图是其考虑重复观测之后的直方图, 红线是考虑观测误差及其改正因子时所得最佳拟合参数所对应的高斯分布, 红虚线是其平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 的最佳拟合值。 57
- 3.13 MCMC 方法得到疏散星团 NGC 2682 拟合样本中各拟合参数 (平均视向速度、平均金属丰度及其内禀弥散) 的概率密度分布函数 (PDF): 每一列的第一张图表示不同参数的 PDF, 中间虚线是其中位值所在位置, 是其最佳拟合参数; 左右两条虚线是其 1σ 范围。 58

- 3.14 疏散星团 NGC 2682 拟合样本在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布: 其中颜色条表示 CG20 所给成员星概率, 蓝点和红点分别对应不考虑和考虑视向速度和金属丰度观测误差及其改正因子两种情况下, MCMC 方法所得拟合参数 (平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$) 的最佳值, 蓝色和红色误差棒分别是这两种情况所得表观弥散 ($\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$) 和内禀弥散 ($\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],int}$) 的最佳拟合结果。上图和右图是其考虑重复观测之后的直方图, 红线是考虑观测误差及其改正因子时所得最佳拟合参数所对应的高斯分布, 红虚线是其平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 的最佳拟合值。 59
- 3.15 112 个疏散星团不考虑与考虑视向速度和金属丰度观测误差 RV_{err} 和 $[Fe/H]_{err}$ 及其改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 时所得最佳拟合参数 (团星比、视向速度和金属丰度均值及其表观弥散和内禀弥散) 的关系: 图中红点表示 112 个疏散星团样本, 蓝点是视向速度的内禀弥散只能给出 84% 上限的 78 个疏散星团样本, 绿点是金属丰度的内禀弥散只能给出 84% 上限的 8 个疏散星团样本, 虚线是 1 : 1 线, 蓝色误差棒是其拟合误差。 62
- 3.16 混合模型得到 112 个疏散星团金属丰度内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 的直方图: 图中红实线和绿实线分别是其中位值 ($Med = 0.089$) 和峰值 ($Peak = 0.073$), 两条红虚线是其 1σ 范围。 63
- 3.17 ZL20 样本和本文 112 个疏散星团公共的 75 个疏散星团视向速度的均值及其表观弥散的比较: 第一列上下两图表示两个样本所得疏散星团视向速度的均值及其表观弥散的关系, 虚线是 1 : 1 的线; 右边上下两图表示两个样本中疏散星团视向速度的均值及其弥散之间的差异。红色散点是 75 个疏散星团, 蓝绿色是 75 个疏散星团中在 ZJ20 样本中因高概率成员星太少或者成员星在视向速度 RV 上弥散特别大的未做高斯拟合处理的 10 个疏散星团。上图误差棒是疏散星团的表观弥散, 下图误差棒是表观弥散的拟合误, 黄点是两个工作中差异较大的疏散星团, 比如 King 5, 虚线表示排除黄点所代表的疏散星团后两者差异的均值 64
- 3.18 ZL20 样本和本文 112 个疏散星团公共的 75 个疏散星团金属丰度的均值及其表观弥散的比较: 第一列上下两图表示两个样本所得疏散星团金属丰度的均值及其表观弥散的关系, 虚线是 1 : 1 的线; 右边上下两图表示两个样本中疏散星团金属丰度的均值及其弥散之间的差异。红色散点是最佳拟合参数, 深绿色是 75 个疏散星团中在 ZJ20 样本中因高概率成员星太少或者成员星在金属丰度 $[Fe/H]$ 上弥散特别大的未做高斯拟合处理的 11 个疏散星团。上图误差棒是疏散星团的表观弥散, 下图误差棒是表观弥散的拟合误差。黄点是两个工作中差异较大的疏散星团, 比如 Berkeley 72, 虚线表示排除黄点所代表的疏散星团后两者差异的均值 65

3.19 基于混合模型得到的疏散星团 King 5 最佳参数：图中各标示同图 3.7 和 3.8。·····	66
3.20 Pang18 样本和本文 112 个疏散星团中 12 个公共疏散星团视向速度的均值及其内禀弥散的比较：虚对角线是 1 : 1，虚横线是两者的差异，在 $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{RV,int} - \sigma_{RV,Pang18}$ 的关系中，横向和纵向误差棒分别表示 $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{RV,Pang18}$ 的拟合误差，红蓝绿标识与图 3.15 相同。·····	69
3.21 Pang18 样本和本文 112 个疏散星团中 12 个公共疏散星团金属丰度的均值及其内禀弥散的比较：虚对角线是 1 : 1，虚横线是两者的差异，在 $\sigma_{[Fe/H],int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],int} - \sigma_{[Fe/H],Pang18}$ 的关系中，横向和纵向误差棒分别表示 $\sigma_{[Fe/H],int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],Pang18}$ 的拟合误差，红蓝绿标识与图 3.15 相同。·····	70
3.22 SC18 样本和本文 112 个疏散星团的 71 个公共疏散星团最佳参数 (视向速度的均值及其内禀弥散) 的差异：图中红蓝标识与图 3.15 相同。71 个公共疏散星团在我们的样本和 SC18 样本之间的偏移量分别为： $\overline{\Delta RV} = 5.81 \pm 2.99 \text{ kms}^{-1}$ ， $\overline{\Delta \sigma_{RV,int}} = 0.63 \pm 2.37 \text{ kms}^{-1}$ 。·····	72
4.1 <i>Gaia</i> DR2 和 APOGEE DR14 公共星在 $[\alpha/M]$ 和 $[Fe/H]$ 的分布，虚线用于区分薄厚盘 (Re Fiorentin 等, 2019) ·····	77
4.2 LAMOST DR7 和 APOGEE DR16 星表交叉匹配所得公共源在 $[\alpha/Fe]$ 和 $[Fe/H]$ 上的分布，黑色的点为所有公共样本星 (85,630)，灰色为盘星 (71,123)。·····	78
4.3 星团成员星、和盘星控制样本和所有盘星的年龄分布：左图为星团成员星和盘星控制样本的年龄分布。红色为星团成员星，蓝色为盘星控制样本。右图为盘星控制样本和所有盘星的年龄分布。蓝色同左图，灰色是所有盘星样本 ·····	78
4.4 疏散星团金属丰度内禀弥散与年龄 (左上图)、金属丰度 (右上图)、银心距 (左下图) 和银面距 (右下图) 的关系，其中橘色点的大小代表其金属丰度内禀弥散拟合误差的大小。·····	80
4.5 疏散星团的年龄-金属丰度关系。在我们的样本中对于 $age < 6 \text{ Gyr}$ 的星团的斜率为 $-0.038 \pm 0.012 \text{ dex Gyr}^{-1}$ ，其中 NGC 6791 和 Berkeley 17 在线性拟合中被移除。黑色的虚线为拟合的直线。·····	81
4.6 AMR：上图蓝色为 ZJ20 的所有样本的 AMR，下图中橘色为本文 112 个疏散星团的 AMR，海绿色是两者公共的 75 个疏散星团。·····	82
4.7 径向丰度梯度。橘红色为疏散星团样本，黑色的虚线为本工作拟合的线性函数，蓝色虚线为 ZJ20 工作中得到的径向丰度梯度。·····	83
4.8 112 个疏散星团的垂向金属丰度梯度：橘红色为 112 个疏散星团，黑色虚线和蓝色虚线分别为：为本文和 ZJ20 所得疏散星团的垂向金属丰度梯度。·····	84

4.9 径向金属丰度梯度。橘红色为 112 个疏散星团样本，蓝色为盘星控制样本，灰色为所有盘星样本。黑线和黄线分别是疏散星团和盘星控制样本的径向丰度梯度。·····	85
4.10 金属丰度和本轮中心半径的关系：图例与图 4.9 相同。·····	86
4.11 垂向径向丰度梯度：点的形状和颜色与图 4.9 相同。·····	86
4.12 所有盘星、盘星控制样本和疏散星团的空间分布：点的形状和颜色与图 4.9 相同。·····	87
4.13 疏散星团的视向速度随银经的变化：浅紫色为 Kharchenko 等 (2007b) 中 516 个疏散星团。·····	88
4.14 盘星、盘星控制样本和疏散星团的三维速度分布：点的形状和颜色与图 4.9 相同。·····	88
4.15 盘星、盘星控制样本和疏散星团的 Toomre diagram。图例与图 4.9 相同。·····	89
4.16 盘星、盘星控制样本和疏散星团的轨道偏心率（左上图）， Z_{max} （右上图），近心距（左下图），远心距（右下图）的统计直方图分布。·	90
4.17 盘星、盘星控制样本和疏散星团的 L_{θ} 。·····	90
4.18 三个样本轨道偏心率与旋转速度的关系，图例与图 4.9 相同。·····	91

表格列表

第 1 章 引言

1.1 银河系概况

我们的宇宙是由数千亿个星系组成，而星系又是由大量恒星和星际物质构成的引力束缚系统。作为宇宙中大尺度结构的基本单元，银河系可以揭示宇宙中星系形成规律；另一方面，由于我们身处银河系中，可以分辨出单颗普通恒星，因而银河系又是特殊的，也是唯一一个我们可以详尽了解和研究的星系。

因为我们身处银河系的银盘中，大量的尘埃的遮挡和消光使得我们难以得到银河完整和精确的全貌。尽管如此，随着科学技术的发展，人们对银河系结构的了解和研究越来越全面和深刻。现在，我们认识到，银河系是一个典型的盘状星系，主要由银盘、核球、银晕、银冕几部分构成。其中银盘是一个从银心径向延展 15 – 20 kpc，垂向延展 1 – 3 kpc 的扁平圆盘状的盘。银盘集中了银河系大部分重子物质，主要由大量的恒星（星族 I 的天体，如大量的 O、B 型星、金牛 T 型星、经典造父变星、疏散星团、星协等）、气体和尘埃构成。银盘不仅是银河系恒星活动的主要场所，还是恒星形成和演化的主要场地。比如，我们赖以生存的太阳就身处银盘中，距银河系中心约 8 kpc(Reid, 1993)，银面距约 25 pc 的地方(Jurić 等, 2008)。不仅如此，由于银河系引力势的不对称性，银盘上存在着大量不对称的子结构，比如大尺度的旋臂结构。目前已知的旋臂有：人马臂、英仙臂、猎户臂和 3 kpc 臂等；根据组成的星族和标高的不同，银盘又可分为：薄盘和厚盘。其中，薄盘在银面距 1 kpc 以内，其主要由富金属的年轻恒星构成，且标高 (100 – 300 pc) 较小，厚盘在银面距 5 kpc 的范围内，主要由贫金属的年老恒星构成，其标高 (800 – 1300 pc) 相对较大(赵君亮, 2005)。研究发现，薄盘和厚盘在其对应恒星的年龄、运动学和化学性质上也存在显著差异：与薄盘恒星相比，厚盘恒星在年龄上更老，金属丰度上更贫，但是存在 α 元素增丰，其速度弥散和轨道偏心率较大 (e.g., Fuhrmann, 1998, 2008; Bensby 等, 2005; Soubiran 等, 2003; Haywood 等, 2013)。除了银盘，还有位于银河系中心，半径几个 kpc 大小，由一个棒状结构主导的核球 (e.g., Binney 等, 1997; Babusiaux 和 Gilmore, 2005; Martinez-Valpuesta 和 Gerhard, 2011)，核球是恒星和星际物质的密集区域。同时，在银河系中心有一个 ~ 200 pc 大小的由一个盘状结构主导的银核 (Launhardt 等, 2002)，

其中心存在一个质量约 400 万个太阳质量的超大质量黑洞 (Ghez 等, 2008); 银河系中还有一个围绕着核球和银盘近似球形的银晕, 半径 ~ 50 kpc, 这里的恒星和星际介质密度很低, 主要分布着大量老年的球状星团。近年来的研究显示, 根据结构和起源的不同, 银晕还可以划分为内晕和外晕 (Carollo 等, 2008; Yuan 等, 2015)。与此同时, 观测表明, 银河系的恒星晕外面还有分布更延展的银冕, 其主要由等离子气体构成。总之, 对银河系尽可能地详尽地观测和研究对理解银河系的形成历史, 进而对理解和研究盘状星系的形成和演化历史具有重大意义。

1.2 疏散星团研究意义及成员星判定方法与算法

1.2.1 星团简介

我们知道, 银河系的重子物质由许多天体组成, 主要包括恒星、气体和尘埃等。当我们在光学波段观测银河的时候, 大部分的光线都是来自于自身会发光发热的恒星。但是, 这些恒星之间离我们太阳的距离不同, 从 pc 到 kpc 不等。不仅距离不同, 绝大多数恒星之间的运动学特性及化学性质也各不相同。

与零散分布的场星不同, 星团作为星系中因引力束缚在一起的恒星系统, 因其中的恒星诞生于同一片巨分子云, 因而可以认为它们具有相同的年龄, 相似的化学组成。星团中的恒星诞生于巨大分子云中 (Lada 和 Lada, 2003), 因而星团是一种具有共同起源的恒星系统。因而, 与场星相比, 星团中的恒星在空间分布和运动学上比较聚集。同时, 具有相同的初始化学组成, 相似的年龄、距离等 (Yadav 等, 2011; Elsanhoury 等, 2016; Joshi 等, 2016)。其中, 由数千到数十万颗的恒星组成, 并以球对称分布的, 年龄较老 (~ 10 Gyr), 金属丰度较贫的星团称为球状星团 (大约 200 个)。球状星团趋向银河系中心聚集。与之相对的是, 更年轻的星团 (Myr-Gyr), 一般包含十余颗到数千颗恒星组成, 主要分布于银盘上, 具有较高的银面聚度, 结构松散, 形状不规则的星团, 这种星团就是疏散星团 (银河系中大约有几万到几十万个疏散星团)。

1.2.2 疏散星团的研究意义

1.2.2.1 疏散星团自身的研究意义

对于单个疏散星团来说, 由于星团中的恒星有共同的起源, 几乎是在同一片巨分子云中同时产生, 因而疏散星团是研究恒星形成与演化的实验室。疏散星团的研究, 对我们研究不同阶段的恒星以及整个星团的性质及其演化过程等都

是很重要的。其中,针对不同阶段的恒星的研究内容主要有以下几部分:双星比例(e.g., Elson 等, 1998; de Grijs 等, 2013),发现蓝离散星(因为疏散星团的年龄比单颗恒星的年龄更准,蓝离散星比疏散星团年轻,故可以在疏散星团中选出蓝离散星。e.g., NGC 188(Geller 等, 2008)、Melotte 66(Carraro 等, 2014)、Berkeley 17(Bhattacharya 等, 2019)、Collinder 261(Rain 等, 2020)),红团簇星(Bragaglia 等, 2005)、主序拐点星(Stello 等, 2007),多星族(Pancino, 2018)等;整个星团的性质及其演化过程主要包括:初始质量函数(Bastian 等, 2010; Offner 等, 2014; Guneski 等, 2020; Sariya 等, 2021)、子结构(Oosterhoff, 1937; Zhong 等, 2019; Currie 等, 2010)、动力演化过程(e.g., 疏散星团内部结构(核半径和团半径)、能量均分过程(e.g., Çakmak 等, 2020)、质量分层和蒸发(Ann 和 Lee, 2002; Shao 等, 2015)),以及星团与巨分子云相遇后的存活率等。

1.2.2.2 疏散星团对银河系形成与演化的研究意义

疏散星团不仅是研究星族的理想探针,还是研究银盘结构(Janes 和 Adler, 1982)和化学演化(Hou 等, 2002; Chen 等, 2003; Magrini 等, 2009)的理想示踪体。疏散星团适合做示踪体主要有以下两个原因:其一,疏散星团是在银盘上形成的,所以疏散星团的整体性质可以反应银盘的性质。不同年龄的星团可以表征银盘的不同结构。比如,年轻疏散星团可以描绘银河系的旋臂结构;年老的疏散星团可以用来探索银盘外部的运动学。疏散星团的年龄从几个 Myr 到 10Gyr,这么宽的年龄谱可以用来研究银盘的现在和过去的演化;疏散星团宽质量谱可以探索初始质量函数。其二,与单颗恒星(特别是远距离的恒星)相比,疏散星团的基本性质(空间位置、自行、视向速度、年龄、距离、金属丰度和红化)可以得到更高的测量精度。由于疏散星团是由同一时期形成于同一片分子云因引力束缚在一起的恒星构成,因而,其成员星具有相似的特征(年龄、距离、运动学和金属丰度等)。

长期以来,疏散星团作为研究银盘结构和演化的理想探针。基于疏散星团主要可以研究以下几方面:因为年轻星团尚未离开其诞生地,因而可以根据星团的位置确定银河系旋臂的结构(Moitinho 等, 2006; Vázquez 等, 2008; Bobylev 和 Bajkova, 2014);通过年轻疏散星团得到银河系旋臂的旋转曲线(旋转速度和共转半径)(Schmidt, 1965; Hron, 1987; Dambis 等, 2001; Loktin 和 Popova, 2012; Dias 等, 2019);在银盘金属度的空间梯度和时间演化研究中,疏散星团金属度样本具有

可观测距离远、年龄跨度大、测定较可靠的特点。因而可以利用疏散星团研究银盘的径向和垂向金属丰度梯度 (Lépine 等, 2011; Donor 等, 2020), 金属丰度和年龄的关系 (简称“AMR”) 以及丰度梯度的演化 (Janes, 1979; Friel, 1995; Friel 和 Janes, 1993; Carraro 等, 1998; Hou 等, 2002; Friel 等, 2002; Bragaglia 等, 2008; Sestito 等, 2008; Magrini 等, 2009; Friel 等, 2010; Carrera 和 Pancino, 2011; Reddy 等, 2016; Zhong 等, 2020; Spina 等, 2021b); 径向迁移 (Netopil 等, 2016; Martinez-Medina 等, 2018; Villanova 等, 2018; Quillen 等, 2018; Chen 和 Zhao, 2020); 银河系翘曲结构 (Vázquez 等, 2008; Cantat-Gaudin 等, 2020); 得到太阳相对银盘的距离, 也就是银面距 (Cantat-Gaudin 等, 2020)。

1.2.3 疏散星团的成员星判定方法与算法

正如前文所述, 疏散星团是研究恒星演化和银河系结构及其化学演化等领域理想示踪体之一。但是要想精确地得到疏散星团的基本物理量 (如: 空间位置、自行、视向速度、金属丰度、距离、年龄、红化等), 我们需要将疏散星团的成员星从一片混有场星 (前景星和背景星) 的天区中准确的挑选出来。因为, 我们知道大多数恒星形成于星团中 (Lada 和 Lada, 2003), 但是只有一小部分形成于引力束缚的星团中, 剩下的恒星将会很快的弥散到星系的场星中 (Bastian, 2008; Longmore 等, 2014)。因而, 从场星中, 挑选疏散星团的成员星是研究这些科学问题的关键所在。因为, 成员星判定的好坏会直接影响星团各基本物理量的估计。

由于疏散星团分布在银盘上, 背景污染是很大的。这使得将疏散星团的成员星从背景星中挑选出来成为一件很难的事情。在从场星中挑选疏散星团成员星时, 有个关键前提就是, 疏散星团的这些物理特性和场星不一样, 可以区分开。基于这个前提和前文所述, 疏散星团的成员星几乎是同一时间诞生于同一片巨分子云, 因而可以认为成员星具有相同的年龄和金属丰度、相同的距离; 在空间分布和运动学上具有相似的特征 (比如, 空间位置相较场星比较聚集; 在自行、视向速度上具有共同的空间运动)。于是, 根据疏散星团有别于场星的这些性质, 可以有以下几种成员星判定方法: 空间分布 (两维度或三维度, 统计假设是成员星向团中心聚集); 运动学方法 (自行、视向速度, 统计假设是成员星共同运动, 运动空间聚集); 多色测光方法 (颜色-星等图, CMD) 以及这几种结合 (Vasilevskis 等, 1958; Sanders, 1971; Cabrera-Cano 和 Alfaro, 1990; Zhao 和 He, 1990; Galadí-Enriquez 等, 1998; Balaguer-Núñez 等, 2020; Mahmudunnobe 等, 2021)。其中, 运

运动学方法需要恒星的自行或视向速度数据，还需要做一些运动学上的数学假设，比如，场星和团星的自行或视向速度都满足高斯分布 (Zhao 和 He, 1990; Gao 和 Chen, 2010, 2012; Gao 等, 2014; Pang 等, 2018; Zhong 等, 2020; Gao, 2020)。在 Gaia 问世之前，恒星的自行精度差；团星数目少于场星数目；在 LAMOST 之前，有恒星视向速度的数据比较少等各种原因，使得运动学方法并不是总有效。而测光方法一般是在缺乏自行或视向速度的情况下，作为挑选出团成员的一种替补方法，或者可以相互验证。因为基于星团的颜色-星等图 (CMD) 很难像运动学方法那样建立严格的数学模型。但是不论基于哪种方法，都无法百分之百将团星从场星中剔除干净，仍有场星的混入和污染。

基于以上判定依据，目前有很多种从场星中挑选疏散星团成员星的算法，其中机器学习部分的算法主要有以下几种：DBSCAN(Ester 等, 1996; Gao, 2014; Bhattacharya 等, 2017)，HDBSCAN(Hunt 和 Reffert, 2021)，K-MEANS(El Aziz 等, 2016)，the Gaussian mixture model(Pang 等, 2018; Gao, 2020)，ML-MOC(一种基于 K 最近邻法 (KNN) 和混合 (GMM) 相结合的机器学习方法)(Agarwal 等, 2021)，RANDOMFOREST(Gao, 2018)，UPMASK(Cantat-Gaudin 等, 2018a) 以及神经网络 (Castro-Ginard 等, 2018) 等。

不论哪种判定方法和算法，都无法完全将场星剔除干净；虽然有这么多中算法可以从场星中挑选出团成员，但是很多工作都有一定的局限性。比如，只能研究少数年老疏散星团，Gao (2014) 基于三维运动学空间 (两维自行和视向速度) 运用 DBSCAN 算法只给出了 NGC 188 的成员星；El Aziz 等 (2016) 人于 2016 年基于天体测量和测光数据运用 K-MEANS 方法只得到了 NGC 188 和 NGC 2266 的团星；Agarwal 等 (2021) 基于 ML-MOC 得到了 15 个疏散星团 (G 星等暗至 ~ 20 mag) 的团成员；或者对初始样本的挑选 (需要 5 维或者更多维度数据) 极为敏感，使得这种方法无法大规模地应用于团成员的挑选工作 (Gao, 2018, 2020)。总之，不论那种判定方法和算法，都无法避免场星的混入及污染；与此同时，成员星判定的好坏成为研究星团和银河系化学演化及结构至关重要的基石。

1.2.4 疏散星团星表研究进展

利用疏散星团研究银河系依赖于疏散星团的样本，比如：样本的大小、样本中疏散星团的一些物理参数 (比如，距离、年龄、自行、视向速度、金属丰度和半径等) 的精度和疏散星团的成员星判定等。关于疏散星团星表，有很多工作，这

里主要介绍 *Gaia* 之前和之后疏散星团星表的概况。

关于银河系的疏散星团星表,早在 1982 年, [Lynga \(1982\)](#) 给出了包括 ~ 2000 个疏散星团的星表,其中几百个疏散星团有参数(比如: 50 个疏散星团有金属丰度 $[Fe/H]$ (测光所得), 130 个疏散星团有质量, 98 个疏散星团有视向速度 RV)。 [Zhao 和 Tian \(1995\)](#) 等人基于两维自行空间构建团星和场星的混合高斯模型,得到 43 个疏散星团的平均自行及其内禀弥散,同时得到每颗星的成员概率。除此之外, *Gaia* 之前比较重要的疏散星团星表还有以下三个: (1) [Mermilliod \(1995\)](#) 的 WEBDA 星表,最新的 WEBDA 星表¹中包括约 2000 个疏散星团的天体测量、测光、光谱信息; (2) DAML02([Dias 等, 2002, 2014](#)) 星表的最新版本给出了 ~ 2200 个疏散星团,大部分疏散星团在太阳 2kpc 以内。其中, 99.7% 有星团半径, 92.4% 有距离、红化和年龄, 97.2% 有平均自行, 43.1% 有平均视向速度。由于星表中疏散星团的参数是由不同人基于各种各样的技术和观测设备得到,因而 DAML02 星表是一个非均匀的星表 ([Cantat-Gaudin 等, 2018a](#))。 (3) Milky Way Star Clusters, 简称“MWSC”) 星表 ([Kharchenko 等, 2013](#)) 中有 3006 个恒星系统,其中大部分是疏散星团,还有 160 个球状星团和 200 个星协,同时给出星团的中心位置、大小、潮汐半径、自行、距离、色指数和年龄等。MWSC 星表是一个太阳邻域 1.8kpc 内完备的星表,且覆盖近邻旋臂,其中有 1500 个星团的基本物理参数是第一次得到,有 953 个星团有视向速度(来自 CRVAD-2(catalogue of radial velocities of Galactic stars with high precision astrometric data, 2nd version ([Kharchenko 等, 2007a](#)))、SIMBAD、RAVE 及 SDSS DR9 等), 386 个有金属丰度(来自 DAML02 和 ([Conrad 等, 2014](#)))。MWSC 星表是一个均匀的星表,因为其团星的空间位置和测光信息都是来自 2MASS([Skrutskie 等, 2006](#)), 自行均来自 PPMXL([Roeser 等, 2010](#))。疏散星团的参数是由来源相同的观测数据或者处理方法得到,这样的疏散星团样本对于研究银盘结构和化学演化才更有意义,更可靠。

基于不同的数据和分析方法得到的疏散星团样本,因其不均匀性会导致疏散星团参数的不同。疏散星团的参数可能来自不同观测精度的数据,比如,自行可能源自全天的 Tycho-2(自行测量精度 $\sim 2.5 \text{ mas yr}^{-1}$ ([Høg 等, 2000](#))), PPMXL(自行测量精度 $4\text{-}10 \text{ mas yr}^{-1}$ ([Roeser 等, 2010](#))) 或者 UCAC4(自行测量的典型精度 $1\text{-}4 \text{ mas yr}^{-1}$ ([Zacharias 等, 2013](#)))。由于天体测量数据精度的局限性,由此得到的

¹<https://webda.physics.muni.cz>

疏散星团成员星及其参数仍然是不确定的。

尽管很多疏散星团样本被认为在太阳邻域 1.8kpc(Kharchenko 等, 2013; Joshi 等, 2016; Yen 等, 2018) 内是完备的, 但是仍有一些疏散星团, 特别是年老星团在太阳邻域被发现 (Moeckel 和 Bate, 2010; Piskunov 等, 2018)。银河系中的疏散星团总数 $\sim 10^5$ 个 (Bonatto 等, 2006; Piskunov 等, 2006), 因而还有很多疏散星团未被发现。

总之, 在 *Gaia* 之前的疏散星团样本由于自行、视差等测量精度不高, 由此得到疏散星团的成员星及其基本参数 (比如, 年龄、金属丰度、视向速度、自行、红化等) 误差比较大。*Gaia* (Perryman 等, 2001; Gaia Collaboration 等, 2016b) 是一个可以提供前所未有的高精度天体测量、测光和光谱的全天巡天项目。Cantat-Gaudin 等 (2018b) 等人基于 Tycho-Gaia Astrometric Solution(TGAS(Gaia Collaboration 等, 2016a; Michalik 等, 2015)) 的自行和视差得到 128 个疏散星团的平均自行和平均视差。*Gaia* DR2(Gaia Collaboration 等, 2018) 观测深度可以达到 $G \sim 21 mag$, 这比 TGAS 深了 9 mag, 在暗端, *Gaia* DR2 的测量精度与 TGAS 差不多; 可是对于亮于 15mag 的恒星, *Gaia* DR2 测量精度比 TGAS 高十倍, 这使得我们可以得到暗星的成员判定及观测遥远的恒星。*Gaia* DR2 星表包含三个波段星等 G 、 G_{BP} 和 G_{RP} , 而 TGAS 只有 G 波段。

欧空局新一代天体测量卫星 *Gaia* 巡天对银河系整个恒星星族具有普查意义。*Gaia* DR2 给出前所未有的 ~ 17 亿源的高精度测量, 其中超过 ~ 13 亿源 (大部分是恒星) 具有 5 维测量参数 (空间位置 ra 和 dec , 二维自行 μ_α^* 和 μ_δ , 视差 ϖ) 及三个测光波段星等 G 、 G_{BP} 和 G_{RP} (Evans 等, 2018; Gaia Collaboration 等, 2018), 典型测量误差如下: 对于亮源 ($G < 14 mag$), 其自行和视差的典型误差分别是 $0.05 mas yr^{-1}$ 和 $0.02 mas$; 对于暗源 ($G \sim 21 mag$), 其自行和视差的典型误差高达 $5 mas yr^{-1}$ 和 $2 mas$ 。Cantat-Gaudin 等 (2018a) 等人选取 *Gaia* DR2 中亮于 18 mag (自行和视差的典型误差分别是 $0.3 mas yr^{-1}$ 和 $0.15 mas$) 的恒星, 在其 *Gaia* 二维自行和视差空间利用 UPMASK 聚类方法 (Krone-Martins 和 Moitinho, 2014) 得到 1229 个疏散星团的成员星和成员概率, 同时给出疏散星团的平均参数 (比如, 距离)。

Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人将除了 Cantat-Gaudin 等 (2018a) 得到的 1229 个疏散星团之外, 新发现的疏散星团样本 (包括: 利用 DBSCAN 方法 (Ester

等, 1996) 得到的 57 个 UBC 星团 (Castro-Ginard 等, 2018, 2019), 在 NGC 5999 区域发现 3 个 UFMG 星团 (Ferreira 等, 2019), 46 个 COIN 星团 (Cantat-Gaudin 等, 2019), 138 个 UPK 星团 (Sim 等, 2019)) 重新运行 UPMASK, 最终得到 1481 个疏散星团的成员星及其成员概率。

Cantat-Gaudin 等 (2020) 等人在 1481 个疏散星团 (Cantat-Gaudin 和 Anders, 2020) 的基础上, 加上 Liu 和 Pang (2019) 等新发现的 56 个候选疏散星团及新发现的 UBC 星团 (Castro-Ginard 等, 2018, 2019, 2020), 同样基于 *Gaia* DR2 中 $G < 18 \text{ mag}$ 的源, 利用 UPMASK 聚类方法, 最终得到 1867 个疏散星团的高概率成员星 ($p_{\text{memb}} \geq 0.7$) 及其平均空间位置、平均自行、平均视差、距离、消光及年龄。

总之, *Gaia* 全天巡天得到的前所未有的高精度自行和视差, 对于基于恒星的自行和视差选出疏散星团的成员星 (Cantat-Gaudin 等, 2018a; Cantat-Gaudin 和 Anders, 2020; Cantat-Gaudin 等, 2020)、发现新的疏散星团 (Ferreira 等, 2019; Zhong 等, 2019; Liu 和 Pang, 2019) 及研究疏散星团外晕的子结构 (比如, 双星团 h and χ Persei 的外晕子结构 (Zhong 等, 2019), Hyades 的潮汐尾 (Röser 等, 2019; Meingast 和 Alves, 2019) 等具有重大意义。但 *Gaia* 巡天自行和视差精度虽高, 选出的疏散星团成员星中仍有场星的混入。

Gaia DR2 RVS 提供了 7,224,631 颗 FGK 型恒星 (Sartoretti 等, 2018) 的高精度视向速度, 但是这个样本在测光上并不完备。*Gaia* DR2 RVS 的光谱分辨率 $R = 11,1500$, 对于亮端, 视向速度测量精度 $0.2\text{-}0.3 \text{ kms}^{-1}$; 对于暗端, 视向速度测量误差从 K 型恒星的 $\sim 1.4 \text{ kms}^{-1}$ 到 F 型恒星的 3.7 kms^{-1})。因为 *Gaia* DR2 光谱巡天是无缝光谱模式 (Cropper 等, 2018), 无法得到高密度区域的光谱, 只能得到亮星 ($G_{RVS} = 12 \text{ mag}$) 的光谱, 也就是只有亮星的视向速度。Soubiran 等 (2018) 等人利用 (Cantat-Gaudin 等, 2018a) 得到的 1229 个疏散星团的成员星结合 *Gaia* DR2 RVS 提供的视向速度, 最终得到 861 个疏散星团的 6 维参数 (空间位置、两维自行、视差和视向速度)。Soubiran 等 (2018) 等人所得 861 个疏散星团, 其中 35% 的疏散星团只有一颗成员星有 *Gaia* DR2 RVS 的视向速度, 将近 50% 的疏散星团至少有三颗成员星有视向速度。那么, 根据其成员星得到疏散星团的平均视向速度可靠性是不一样的, 成员星越多, 越可靠 ($\propto \frac{1}{\sqrt{N}}$, N 为成员星数目)。

由于其他光谱巡天 (比如, SDSS、APOGEE、RAVE、*Gaia* DR2 RVS 等) 所

得恒星的视向速度数目有限，但 LAMOST 大视场兼备大口径光谱巡天是目前世界上第一个获取光谱数超千万的光谱巡天。因此，可以得到更多疏散星团成员星的基本参数（比如，视向速度和金属丰度等），由此可以得到更准确的疏散星团整体性质，比如，平均视向速度、平均金属丰度、年龄等。本文研究疏散星团的视向速度和金属丰度的性质，就是基于 LAMOST 低分辨率光谱恒星参数，结合混合模型得到。

1.3 LAMOST

不论是团星还是场星，我们肉眼能分辨的着实有限，好在我们可以借助于望远镜。望远镜观测模式分为测光观测和光谱观测，由于我们的工作是基于光谱观测，这里我们仅对光谱巡天做简要介绍。对于光谱巡天，若我们想要提高望远镜的观测效率。即是说，望远镜能在同样的观测时间里得到尽可能多的天体光谱。那么，望远镜不仅需要应用多目标光纤光谱仪，还必须具备两个关键要素：其一是望远镜要有大视场，这样才能同时观测足够多的目标天体，并确保能在视场中放置尽可能多的光纤同时进行光谱观测，且在较短时间里完成对大面积天区的巡天覆盖；其二是望远镜要有大口径。因为望远镜的口径越大，它所能收集的光就越多，进而能提高光谱观测效率。不过，对于传统的望远镜来说，一般很难同时具备大视场和大口径两个条件。比如，英国的施密特望远镜 (UKST) 具有 6° 的大视场，但是其有效口径只有 1.2 m；与此相反，甚大望远镜 (VLT) 具有 8.2 m 的大口径，但视场仅仅 $6.8'$ 。

1.3.1 现有的光谱巡天望远镜概况

这里我们主要简单介绍几个关于银河系的光谱巡天项目，比如：RAVE, SDSS, LAMOST, APOGEE, GALAH, GAIA-ESO 等。由于我们的工作是基于 LAMOST 的低分辨率光谱巡天，因而，将在下一节详尽介绍 LAMOST 光谱巡天望远镜设备、科学目标及其观测数据。

1.3.1.1 RAVE 巡天

RAVE(Radial Velocity Experiment) 巡天 (Steinmetz 等, 2020b,a) 使用的是澳洲天文台 1.2 m 的 UK 施密特望远镜 (UK Schmidt Telescope)，这个光谱巡天项目旨在获得南天百万量级恒星的中分辨率光谱。RAVE 所用的 1.2 m UK 施密特望

远镜具有 6° 的视场，但仅有 150 根光纤。RAVE(Steinmetz 等, 2020b) 是中分辨率的光谱巡天项目，其分辨率为： $R \sim 7500$ ，其波长覆盖范围是 CaII 的三重线的波长范围在 $8410 - 8795 \text{ \AA}$ 。RAVE 光谱巡天的观测目标是南天且星等范围在 $9 < I < 12 \text{ mag}$ 内的恒星，通过其观测光谱确定了这些恒星的视向速度和元素丰度 (Fe, Al, Ni, $[\alpha/\text{Fe}]$) (Steinmetz 等, 2020a)，用于研究银河系的结构和化学动力学演化。此巡天项目始于 2003 年四月份，于 2013 年四月份完成观测，对于最新数据版本是 RAVE DR6。RAVE DR6(Steinmetz 等, 2020b) 中有 518,387 次观测，一共是 451,783 颗星。这些观测中有重复观测，具体的重复观测在天区的分布见图 1.1，从图中可以看出，重复观测 > 4 的观测主要集中在 $-120^\circ < l < 30^\circ$ 和 $b > 30^\circ$ 的地方。对于 RAVE 光谱观测，其信噪比的特征值是 $S/N=40$ ，视向速度的特征误差是 ($RV_{\text{err}} < 2 \text{ kms}^{-1}$)。

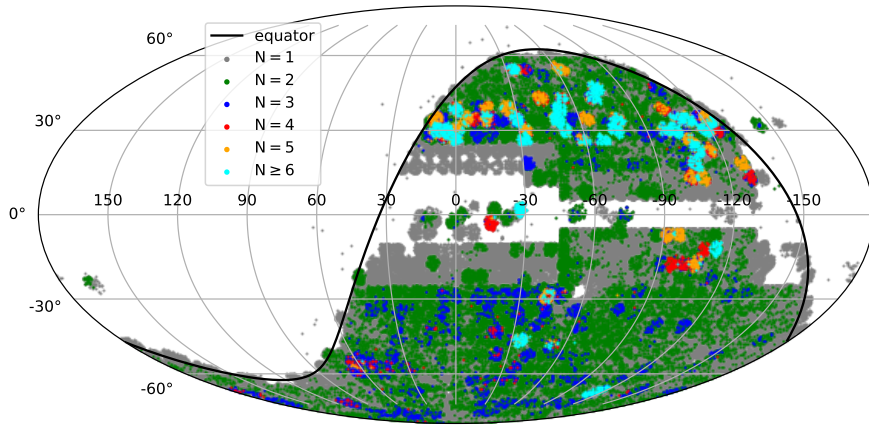


图 1.1 RAVE DR6 中恒星重复观测的情况在银道坐标系下的投影 (Steinmetz 等, 2020b)

1.3.1.2 SDSS/SEGUE 光谱巡天

SDSS²(Sloan Digital Sky Survey) (Yanny 等, 2009) 是使用位于美国新墨西哥州阿帕奇山顶天文台的 2.5 m 口径望远镜，对北半球 $\sim 10,000 \text{ degree}^2$ 的天区进行观测，主要包括多波段测光 (u, g, r, i, z 五个波段) 和光谱两种观测模式。SDSS 巡天计划中的 SEGUE (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration (Yanny 等, 2009)) 是针对银河系巡天的观测，也包括测光巡天和光谱巡天。SEGUE 的观测波长范围在 $3900 - 9000 \text{ \AA}$ 内，光谱分辨率 $R \sim 1800$ ，具有 7 degree^2 的视场，有 640 根光纤。SEGUE 光谱巡天的测量精度分别为 $g < 18 \text{ mag}$ 时， $\sigma(RV) \sim 4 \text{ kms}^{-1}$ ；

²<https://www.sdss.org>

$g \sim 20$ mag 时, $\sigma(\text{RV}) \sim 15 \text{ kms}^{-1}$; 对于信噪比 $S/N > 30$ 和星等 $g < 18.5$ mag 时, $\sigma([M/H]) \sim 0.2 \text{ dex}$, $\sigma(T_{\text{eff}}) \sim 200\text{K}$, $\sigma(\log g) \sim 0.3 \text{ dex}$ 。其中 SDSS-I/II(2000-2008 年)(York 等, 2000; Yanny 等, 2009), SDSS-III(2008-2014 年)(Eisenstein 等, 2011) 这三期观测, 分别得到了 SEGUE-1(Yanny 等, 2009) 和 SEGUE-2(Rockosi 等, 2009) 的光谱数据。其中 SEGUE-1 得到了 $\sim 230,000$ 颗不同类型恒星的光谱数据, 用于探究银河系结构; SEGUE-2 得到 $\sim 119,000$ 颗恒星的光谱数据, 主要用于探究晕星的空间运动和化学丰度。SEGUE-1 和 SEGUE-2 光谱巡天一共得到 24 万颗左右恒星的基本物理参数(视向速度、金属丰度、有效温度、表面重力加速度)(Rockosi, 2012), 其天区覆盖情况见图 1.2。从图 1.2, 我们可以看出这些恒星分布在一个个分离的铅笔束里, 而且恒星种类很多, 具有很强的选择效应。因而, 很难开展有意义的大规模统计分析工作。

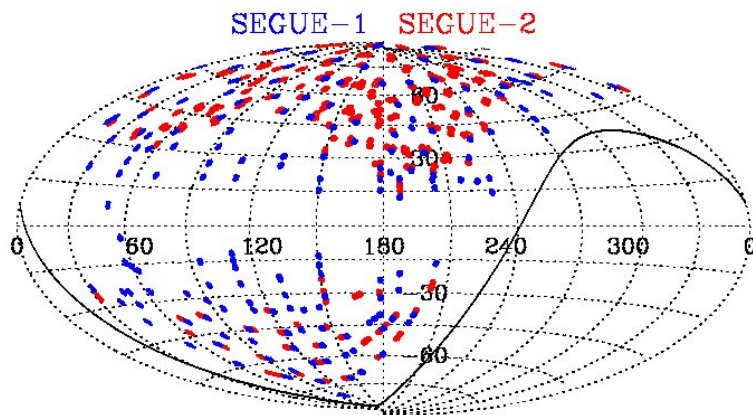


图 1.2 SEGUE-1 和 SEGUE-2 天区覆盖图: 蓝色和红色分别表示 SEGUE-1 和 SEGUE-2 的巡天区域¹。

1.3.1.3 SDSS/APOGEE 光谱巡天

SDSS 中针对银河系开展的光谱巡天不仅有低分辨率的 SEGUE(光谱分辨率 $R \sim 1800$), 还有高分辨率的巡天项目 APOGEE(The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment)。APOGEE 巡天 (Smith 等, 2021) 可以提供 $\sim 700,000$ 颗恒星的高分辨 ($R \sim 22,500$)、高信噪比 ($S/N \sim 100$) 的近红外 (H 波段: $\lambda = 1.51 - 1.70 \mu\text{m}$) 光谱数据, 这些恒星主要来自银河系、麦哲伦星云及近邻矮星系的红巨星, 以及部分冷 (FGKM) 矮星 (Zasowski 等, 2013, 2017)。APOGEE

¹<https://www.sdss.org/surveys/segue>

巡天 (Majewski 等, 2017) 是有两个阶段的光谱观测 (巡天区域见图1.3), 分别是 APOGEE-1 和 APOGEE-2, 其中 APOGEE-1 是 SDSS 第三期 (SDSS-III, 2008-2014 年)(Eisenstein 等, 2011; Alam 等, 2015) 的一个子项目, APOGEE-2 是 SDSS 第四期 (SDSS-IV, 2014-2020 年, 又分为 APOGEE-2N 和 APOGEE-2S, (Blanton 等, 2017)) 光谱巡天的一个子项目。APOGEE 光谱巡天的超 70 万恒星光谱数据是由有三台望远镜³提供, 分别是: 位于北半球美国新墨西哥州阿帕奇山顶天文台的 2.5 m 斯隆望远镜 (7 平方度的视场, 300 根光纤)(Gunn 等, 2006) 和新墨西哥州立大学负责正常运行的 1 m 望远镜 (Holtzman 等, 2010), 以及位于南半球智利的拉斯坎帕纳斯天文台 (Las Campanas Observatory) 的 2.5 m 杜邦望远镜 (3.5 平方度的视场, 300 根光纤)(Bowen 和 Vaughan, 1973)。APOGEE DR16(Ahumada 等, 2020) 星表可以提供 437,485 颗恒星的基本物理参数, 比如: 视向速度 RV 、有效温度 T_{eff} 、表面重力加速度 $\log g$ 、化学丰度 $[M/H]$ 和 $[\alpha/M]$ 十几种元素的丰度信息。APOGEE DR16 巡天在每个观测区域的数密度分布见图1.4, 我们可以看到恒星在空间范围跨越整个银河系的核球、棒、银盘和晕, 因而可以利用其结合星系动力学和金属丰度来构建银河系图像, 还可以研究其他一些特殊项目, 比如 Kepler 天区。

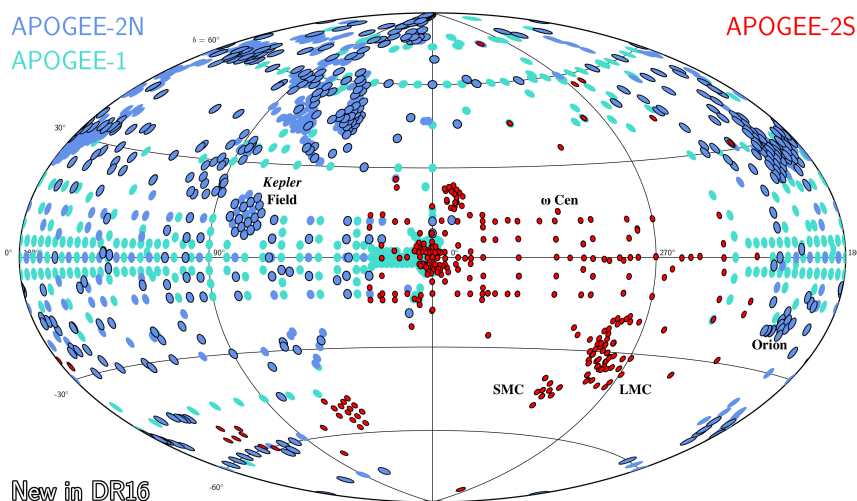


图 1.3 APOGEE DR16 在银道坐标系中的巡天天区覆盖图: 其中蓝绿色和蓝色分别是 7 平方度视场的 APOGEE-1 和 APOGEE-2N, 红色是 2.8 平方度视场的 APOGEE-2S 巡天的天区覆盖区域 (Ahumada 等, 2020)。

³<https://www.sdss.org/surveys/apogee-2>

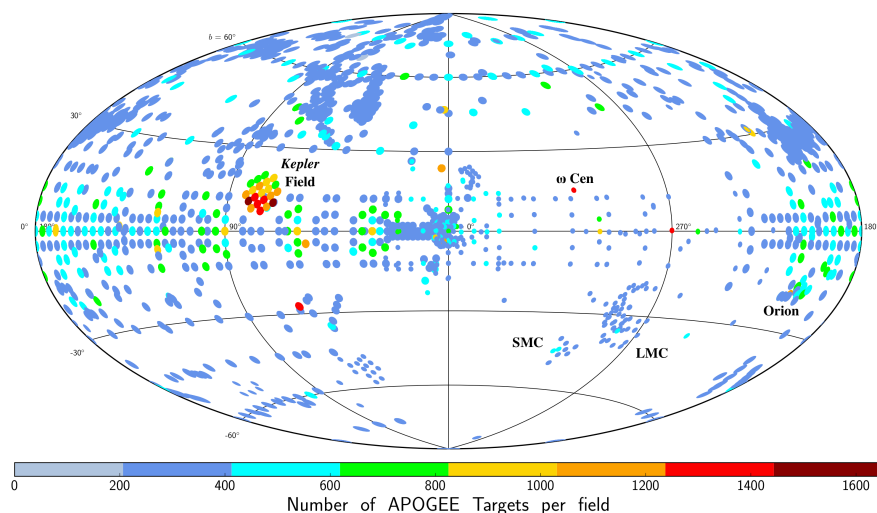


图 1.4 APOGEE DR16 巡天在银道坐标系中观测到的恒星数密度分布图 (包含: APOGEE-1, 2N 和 2S): 其中银盘部分主要分布在 $|b| < 15^\circ$ 对称的区域; 分布在 $b < 30^\circ$ 的核球和 'inner Galaxy' 区域; 其他的特殊项目, 比如 *Kepler-2* 天区 (Ahumada 等, 2020)。

1.3.1.4 GALAH 光谱巡天

HERMES (A High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph) 巡天 (Zucker 等, 2012; Sheinis 等, 2015) 使用的望远镜是 3.9 m 的 AAT (Anglo-Australian Telescope) 望远镜, 此望远镜有 400 根光纤, 2° 的视场大小, 有四个波段, 波长范围⁴为: $\lambda = 470 - 490 \text{ nm}$, 分辨率是 $R \sim 28,000$, 能获得 30 种元素的丰度 (Li, C, O, Na, Al, K, Mg, Si, Ca, Ti, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Zr, Ba, La, Nd, Ce, Dy, 和 Eu 等 (Ting 等, 2012))。星系考古 GALAH (Galactic Archaeology with HERMES) 是 HERMES 巡天的一个主要项目, 旨在对 $\sim 10^6$ 颗且 $V < 14 \text{ mag}$ 的恒星进行高信噪比 ($S/N \sim 100$) 高分辨率 $R \sim 28,000$ 的光谱观测, 进而获得详细的恒星元素丰度信息 (30 种元素丰度), 通过寻找低质量恒星的金属丰度等恒星形成和吸积事件的遗迹揭示银河系恒星形成和化学增丰历史 (Freeman 和 Bland-Hawthorn, 2002; Zucker 等, 2012)。GALAH 最新公开数据是 *GALAH + DR3* (Buder 等, 2020), 其具体情况如下: 一共有 588,571 颗恒星的 678,423 条光谱, 其中 81.2% 是太阳附近 2 kpc 之内的近邻星。GALAH + DR3 星表包括 *GALAH main* 和 *faint* (占比 70%)、*K2-HERMES* (占比 17%)、*TESS-HERMES* (占比 5%) 以及 GALAH 相关项目 (包括核球和超过 75 个星团, 占比 8%), 除了提供 30 种

⁴https://galah-survey.org/survey_design#spectral_resolution

元素的金属丰度，还给出恒星参数 (比如, T_{eff} 、 $\log g$ 、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 、 v_{mic} 、 v_{broad} 和视向速度 v_{rad})。GALAH + DR3 星表中恒星的天区分布见图1.5, 图中避开银盘的 GALAH main 和 faint 两部分 (Buder 等, 2018) 天区分布, 绿色是落入 Kepler 天区的 K2-HERMES (Wittenmyer 等, 2018; Sharma 等, 2019), 红色和紫色分别是 TESS-HERMES 和其他 HERMES other 天区覆盖 (Sharma 等, 2018)。GALAH 虽然能使用高分辨率的恒星光谱, 可以对恒星的有效温度、表面重力加速度、金属丰度和视向速度等给出精确测量, 但是只能对亮星进行观测, 在观测得到的光谱数和效率方面并不占优势。

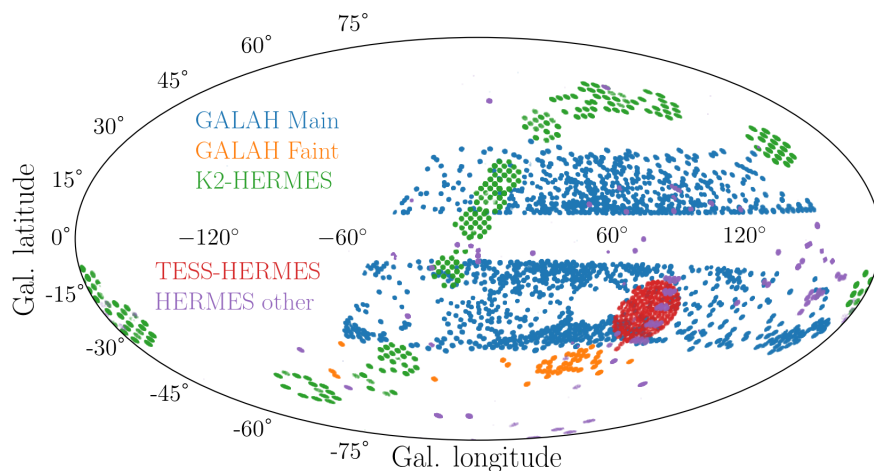


图 1.5 GALAH 巡天天区覆盖图-图中蓝色和橙色分别是避开银盘的 GALAH main 和暗源两部分天区分布, 绿色是落入 Kepler 天区的 K2-HERMES, 红色和紫色分别是 TESS-HERMES 和其他 HERMES other 天区覆盖 (Buder 等, 2020)。

1.3.1.5 GAIA-ESO 光谱巡天

2013 年 12 月 9 日升空的欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 研制的高精度天体测量卫星 *Gaia*, 能够对银河系整个进行恒星普查。*Gaia* 不仅对全天进行多历元的测光和低分辨率光谱观测, 将给出前所未有的 10 亿颗恒星的高精度三角视差和自行, 同时也将给出 1 亿颗深至 15 等的恒星的视向速度及几百万颗深至 12 等恒星的大气参数 (Shi J R., 2016)。Gaia RVS(Radial Velocity Spectrometer)⁵可以为每颗亮于 17 mag 的恒星提供空间三维速度, 其覆盖波段在近红外波段 $\lambda = 845 - 872 \text{ nm}$, 高分辨率 ($R = 11,500$)。Gaia-ESO 巡天 (*Gaia-*

⁵<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/radial-velocity-spectrometer>

ESO Survey, 简称“GES”⁶ (Gilmore 等, 2012; Randich 等, 2013)) 是在 VLT 光纤设备上安装一个 FLAMES (Fibre Large Array Multi Element Spectrograph) 光谱仪 (Pasquini 等, 2002), 这台光谱仪可以提供两种分辨率的恒星光谱, 分别是: 一种是 UVES(高分辨率: $R = 47,000$, 8 根光纤) 得到的恒星 (主要是 FGK 恒星) 高分辨率光谱 (Smiljanic 等, 2014; Frasca 等, 2015; Lanzafame 等, 2015); 另一种是 GIRAFFE(中分辨率: $R = 5500 - 6500$, 130 根光纤) 的处在主序前或者主序阶段的晚型星恒星光谱 (F 到 M 型恒星)(Gutiérrez Albarrán 等, 2020)。GES(最新观测数据 iDR6 天区分布见图1.6, 整个观测时间是 2011.12.31-2018.1.26, 有针对星团的观测, 还有针对银河系其他成员的观测) 得到了超过 100,000 颗 $V < 19$, mag 的银河系恒星, 这些恒星包括银河系的主要成分 (比如, 银晕到恒星形成区, 覆盖范围比较广)。有了这些恒星高精度的三角视差、自行、视向速度及金属丰度, 可以为研究银河系的动力学及化学元素丰度分布提供全方位的视角。特别是对年轻疏散星团的观测 (40% 的时间给了疏散星团), 可以为研究疏散星团的内部结构、运动学和化学演化提供新的视角 (Lanzafame 等, 2015)。

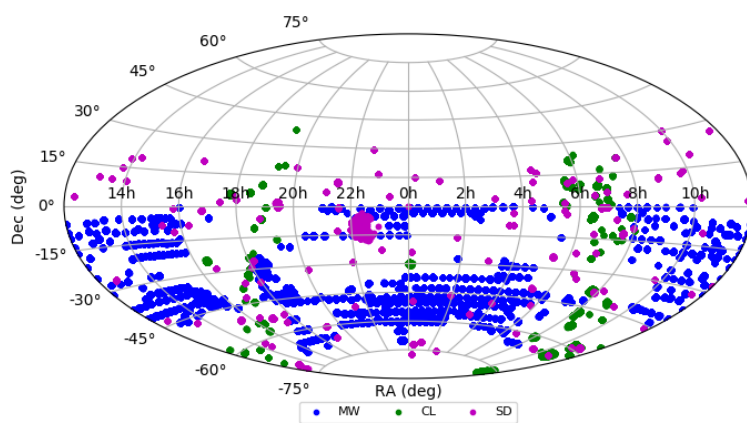


图 1.6 *Gaia*-ESO 观测到的目标源 (iDR6 数据: 整个观测时间为:2011.12.31 – 2018.1.26) 在赤道坐标系上的分布情况-MW 表示银河系观测, CL 表示星团观测, SD 表示定标观测²。

⁶<https://www.gaia-eso.eu/>

²<https://www.gaia-eso.eu>

1.3.1.6 下一代光谱巡天计划

除了前文提到的正在进行或者已经完成观测任务的光谱巡天之外，还有一些即将开展的光谱巡天，比如 WEAVE(William Herschel Telescope⁷,2021 年开始，为期 5 年，4.2 m 口径，2° 视场，有两种观测模式：中分辨率 ($R \sim 5000, \lambda = 370 - 1000\text{nm}$) 和高分辨率 $R \sim 20,000$)(Dalton 等, 2020)),4MOST(4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope,4 m 口径，4.1 平方度视场，2400 根光纤，2022 年开始，为期 5+5+5 年，有两种观测模式：中分辨率 ($R \sim 6500, \lambda = 370 - 950\text{nm}$, 1600 根光纤) 和高分辨率 ($R \sim 20,000$, 三个波段: $\lambda = 392.6 - 435.5, 516 - 573, 610 - 679\text{nm}$, 800 根光纤)(Feltzing 等, 2018), 将对南半球约 20,000 平方度的天区进行中高光谱观测) 等。

1.3.2 LAMOST 观测概述及其科学目标

1.3.2.1 LAMOST 概况

郭守敬望远镜 (The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, 简称 LAMOST) 是一台大天区面积多目标光纤光谱望远镜，是第一台中国自主研发的 6 ~ 8 米级大视场多光纤光谱巡天望远镜 (Wang 等, 1996; Cui 等, 2012)。LAMOST 是世界上首台拥有大视场兼备大口径的望远镜，即“王-苏反射施密特望远镜”。LAMOST 是一台反射式施密特望远镜，其结构示意图如图 1.7(Wang 等, 1996; Cui 等, 2012) 所示。它是由三部分构成，分别是由位于北边的大小为 5.72 米 × 4.40 米，24 块对角线长 1.1 米，厚度为 25 毫米的六角形平面子镜拼接而成，且可以转动的非球面反射施密特改正板 MA；位于南边的大小为 6.67 米 × 6.05 米，37 块对角线长 1.1 米，厚度为 75 毫米的六角形平面子镜拼接而成，固定着的球面主镜 MB 以及焦面构成。这三部分在 LAMOST 光谱观测中的作用如下：球面主镜 MB 及焦面被固定在地基上，而反射施密特改正板 MA 用于跟踪天体的运动，望远镜在天体经过中天前后时可以进行观测。LAMOST 观测天体获得光谱的光路如下：观测到的天体的光先经反射施密特改正板 MA 反射到球面主镜 MB，再经 MB 反射后成像在焦面上。而焦面上所放置的光纤可以将天体的光分别传输到光谱仪的狭缝上，然后再通过光谱仪后的 CCD 探测器同时获得大量天体的光谱。LAMOST 的视场约为 20 平方度，有效口径 4 米，可以观测到暗达 20.5 等的

⁷<https://www.ing.iac.es/weave/>

天体，使其成为大口径兼大视场光学望远镜的世界之最。同时，LAMOST 的直径为 1.75 米的焦面上放置了 4000 根 3.3 角秒的光纤，这样就可以同时获得 4000 个天体的 $3700 - 9000 \text{ \AA}$ 波长范围内的光谱，使得 LAMOST 成为世界上光谱获取率最高的望远镜。LAMOST 后端安置了 16 台光谱仪和 32 台 CCD，因而 4000 根光纤分到 16 台光谱仪上面，每台光谱仪分到 250 根光纤所对应的星光，并将天体的光线分为红蓝两束。其中，蓝端波长范围大致为 $3700 - 6000 \text{ \AA}$ ，红端波长范围大致为 $5800 - 9000 \text{ \AA}$ 。LAMOST 的低分辨率 $R \sim 1800$ 。总之，LAMOST 的建成，突破了天文望远镜大视场与大口径难以兼得的难题，成为目前国际上口径最大的大视场望远镜。同时，LAMOST 所具有的大视场、大口径和多光纤的优势使得其成为世界上光谱获取率最高的望远镜，使得 LAMOST 在大规模光谱观测和大视场天文学研究方面，居于国际领先地位。

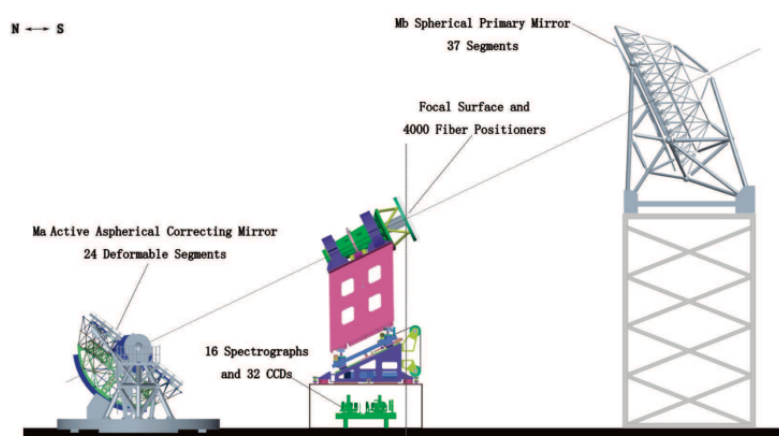


图 1.7 LAMOST 的结构示意图 (Cui 等, 2012)

LAMOST 地处河北兴隆观测站 (见图1.8)，该站地处燕山主峰南麓，位于河北省兴隆县连营寨 (东经 7 小时 50 分，北纬 40 度 23 分)，海拔 960 米。此观测站处在深山中，大气视宁度和透明度较好。LAMOST 所处的位置可以观测赤经 $-10^\circ < \delta < 90^\circ$ ；每年最佳观测季节在冬季，对应于银河系反银心方向上中天，因而 LAMOST 特别适合观测反银心方向的恒星。因而，每年主要在 9 月份至次年的 3 月份进行光谱观测，春夏季阴雨天较多，可观测时间较少。整体下来，一年中大致有 240 天到 260 天的光谱观测夜。因为此地的气候具有很强的季节性，尤其是夏季风的影响比较大，这段时间一般用于望远镜的测试和仪器的维护工

作。



图 1.8 夕阳中的 LAMOST(Shi J R., 2016)

1.3.2.2 LAMOST 中低分辨率观测数据概况及其科学目标

LAMOST 在 2011 年 10 月 23 日正式启动先导巡天，并于 2012 年 6 月 24 日结束。从 2012 年 9 月到 2017 年 6 月，LAMOST 完成了为期五年的第一期光谱正式巡天任务。LAMOST 在 2019 年 6 月，LAMOST 完成七年巡天，获取首次超千万量级的光谱数，也成为世界上第一个获取光谱数超千万的光谱巡天项目。与此同时，也完成了中分辨率($R \sim 7500$)的第一年巡天。包含先导巡天和正式巡天前七年的 LAMOST DR7 数据中详情见图 1.9，DR7 V1.2 数据中一共包括了 4922 个低分辨率观测天区，680 个中分辨率观测天区。一共发布光谱总数 1448 万：其中低分辨率光谱 1060 万，中分辨率非时域光谱 101 万，中分辨率时域光谱 287 万。DR7 中有 1141 万条高质量光谱 ($S/N > 10$)，与此同时，包括一个大约 693 万条有恒星光谱参数的星表。LAMOST DR7 v1.2 低分辨率光谱观测的天区覆盖见图 1.10，图 1.10 中给出了先导巡天和低分辨率前七年的正式巡天在赤道坐标系中的分布情况；图 1.11 给出了 LAMOST 中分辨率光谱第一年天区覆盖情况。

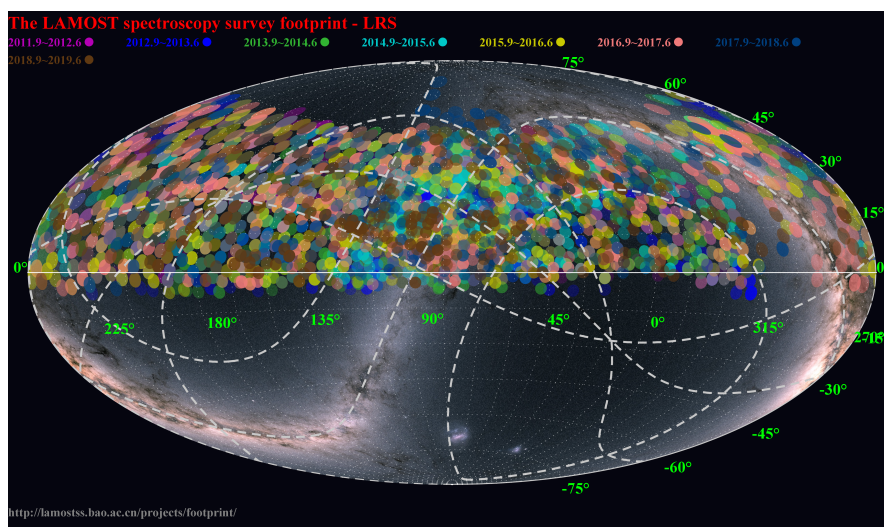
³<http://www.lamost.org/public/node/398>

分类	低分辨率数据	中分辨 非时域数据	中分辨 时域数据	DR7总数
发布光谱数	1060万	101万	287万	1448万
高质量光谱 (S/N>10)	914万	67万	160万	1141万
恒星参数	613万	51万	29万	693万

图 1.9 LAMOST DR7 低分辨率光谱数据情况³。

1.3.2.3 LAMOST 低分辨率观测数据及其科学目标

在 LAMOST DR7 V1.2 给出的有恒星光谱参数的星表包括两部分：一个有 613 万低分辨率的恒星参数星表和一个 51 万中分辨率的恒星参数星表。其中，LAMOST DR7 V1.2 低分辨率 AFGK 恒星参数星表主要是给出由 LAMOST 恒星参数计算软件 (LASP) 得到的恒星参数：有效温度 T_{eff} ，表面重力加速度 $\log g$ ，金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 、视向速度 RV 及其误差。

图 1.10 LAMOST 先导巡天和低分辨率巡天前七年天区覆盖图⁴。

LAMOST 在大规模光谱观测和大视场天文学研究方面占有绝对优势，郭守敬望远镜光谱巡天 (LAMOST) 计划分为两部分，一个是关于河外星系的巡天 (LAMOST ExtraGalactic Survey, 简称:LEGAS), 另一个是关于银河系的巡天 (LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration, 简称:LEGUE)。其中，LAMOST 银河系光谱巡天计划-LEGUE 巡天的天区 (Newberg 等, 2012) 分为

⁴<http://lamostss.bao.ac.cn/projects/footprint/>

三部分:银晕、银盘和反银心。其中,银晕巡天天区主要在 $|b| > 20^\circ$ 范围内;银盘覆盖 $|b| < 20^\circ$ 的低银纬部分;反银心巡天天区范围主要在 $|b| \leq 30^\circ$ 和 $150^\circ < l < 210^\circ$ (Deng 等, 2012)。实际观测中,对于 $20^\circ \leq l \leq 80^\circ$ 的区域,由于兴隆观测站夏季的晴朗夜较少 (Yao 等, 2012), 此天区的实际观测效率很低 (Deng 等, 2012)。

LEGUE 巡天可以充分利用 LAMOST 高效获取光谱的能力, 进而对银河系进行大规模的光谱巡天观测。LEGUE 巡天可以开展的科学研究课题 (Deng 等, 2012) 主要有:(1) 寻找银晕中的极贫金属星 (贫金属星可以作为宇宙早期元素丰度诞生和演化的活化石, 对研究早期银河系化学演化有着重要意义。因而, 可以通过研究贫金属的金属丰度分布 (MDF) 来分析银晕的形成和化学演化);(2) 通过研究薄盘和厚盘上恒星的运动学和恒星的金属丰度分布情况, 得到包括暗物质在内的质量分布、银盘的动力学情况和化学演化、盘的结构和起源;(3) 通过对反银心附近的银盘和银晕的分析判定潮汐流是反银心的结构还是银盘的子结构;(4) 通过寻找可能跟矮星系相关的移动星团, 进而观测银晕的星流和子结构;(5) 通过探究银河系的结构、动力学特征以及盘的演化, 进而作为研究疏散星团的探针;(6) 寻找超高速星, 确定它们的产生机制;(7) 寻找银河系中的 O、B 星, 进而示踪银河系盘的三维消光图;(8) 对银盘上年轻恒星的完备性样本进行研究, 为研究恒星大尺度形成和银河系恒星形成历史提供重要的线索。

在上述众多可基于 LAMOST 开展的科学研究中, 本文中是基于 LAMOST DR7 中观测到的疏散星团来研究疏散星团自身的视向速度和金属丰度的性质以及作为研究银河系结构和化学演化的示踪体。

1.3.2.4 LAMOST 中分辨率观测数据及其科学目标

LAMOST DR7 v1.2 中分辨率参数星表不仅给出了恒星的有效温度 T_{eff} , 表面重力加速度 $\log g$, 金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 、视向速度 RV 及投影转动速度 ($v \sin i$) 以及它们的误差, 还给出了分别使用蓝端光谱、红端光谱以及使用拉平后的红端和蓝端光谱采用交叉相关方法得到的视向速度: $rv_{\sim b0}$ 、 $rv_{\sim r0}$ 、 $rv_{\sim br0}$, 与此同时还给出了使用基于卷积神经网络的标签迁移方法得到了恒星的 α 元素丰度、有效温度、表面重力、金属丰度及 Li 、 C 、 Si 、 Ca 、 Ti 、 Cr 、 Fe 、 O 、 Ni 、 Cu 、 N 、 α 等 12 个元素的丰度。

LAMOST 的中分辨率 $R \sim 7500$, 其光谱仪的波长范围分别为: 蓝端 (4950 – 5350 Å) 和红端 (6300 – 6800 Å) (Liu 等, 2020)。其观测 G 星等范围在 9 – 15 mag。

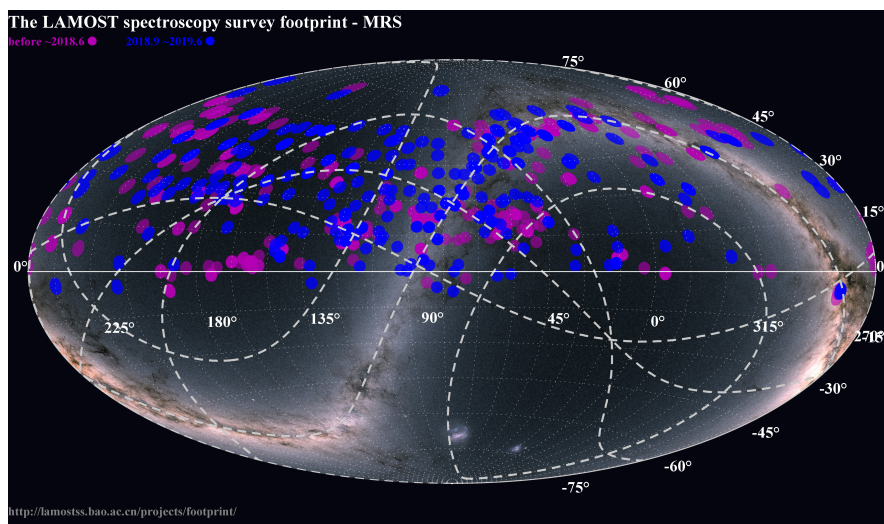


图 1.11 LAMOST 中分辨率光谱巡天第一年天区覆盖图⁴。

中分辨率光谱在各恒星参数的精度分别为： $RV < 1 \text{ kms}^{-1}$, $[Fe/H] < 0.1 \text{ dex}$, $T_{\text{eff}} < 100 \text{ K}$, $\log g < 0.1 \text{ dex}$, $[alpha/Fe] < 0.1 \text{ dex}$ 。中分辨率观测在视向速度上的精度随信噪比的变化如下： $S/N = 10$ 时, $RV \sim 1.3 \text{ kms}^{-1}$ ； $S/N = 20$, $RV \sim 1.0 \text{ kms}^{-1}$ ； $S/N = 50$, $RV \sim 0.5 \text{ kms}^{-1}$ ； $S/N = 100$, $RV \sim 0.3 \text{ kms}^{-1}$ (Liu 等, 2019)。LAMOST 在中分辨率巡天中包括两部分巡天：非时域光谱巡天和时域光谱巡天，天区覆盖如图 1.13 (Liu 等, 2020) 所示。其中非时域光谱巡天，主要用于研究星云、星团、银河系、恒星形成区；时域巡天计划主要用于研究特殊双星、开普勒天区、TESS 天区和恒星形成区。

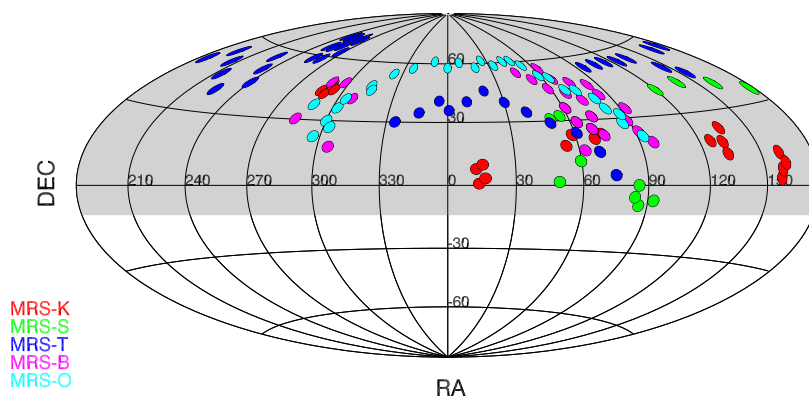


图 1.12 LAMOST 中分辨率光谱非时域巡天天区覆盖 (Liu 等, 2020)

LAMOST 中分辨率巡天中关于疏散星团的巡天 (MRS-O) 可以得到团成员的

大量光谱, 图1.13(Liu 等, 2020) 所示, MRS-O 巡天覆盖了 18 个疏散星团相关天区。由于对每一个星团观测次数比较多, 因而通过 8 个 plate 的光谱观测, 尽可能多的覆盖疏散星团及其成员星, 使得星团成员星完备性 ($G15 \text{ mag}$) 可以高达 80%。大多数疏散星团都在银盘上, 得到这么多的疏散星团成员星的光谱观测可以更好的研究疏散星团及银盘性质。不过, 本文工作主要是基于低分辨率光谱进行疏散星团相关研究, 关于中分辨率的疏散星团研究工作会在后期进行。

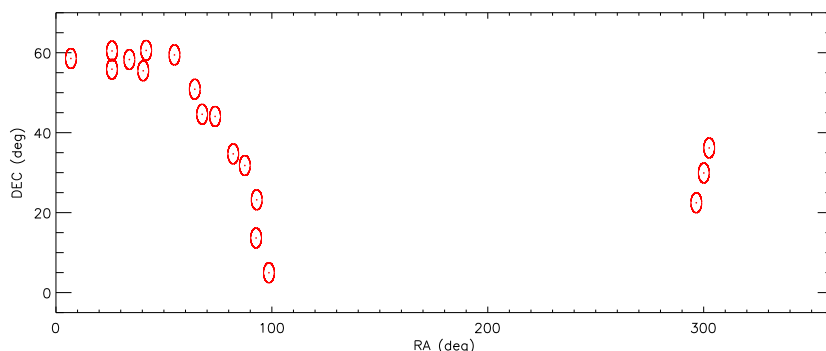


图 1.13 LAMOST 中分辨率光谱关于疏散星团研究的天区覆盖 (Liu 等, 2020)

1.3.3 LAMOST 观测到的疏散星团在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间的分布情况

疏散星团是研究银河系结构与星族形成历史的理想示踪体。与此同时, 星团中成员星的选取又关乎到疏散星团各种基本参量的质量的高低。根据前文所述, 不论哪种判定方法或算法, 哪怕 Gaia 高精度的自行和视差也是不能完全剔除场星的。由于之前缺乏大量恒星的视向速度, 但现在我们有具有大视场兼备大口径的 LAMOST, 我们可以得到大量恒星的视向速度。我们知道, 疏散星团在空间运动上, 比场星更加聚集; 诞生于同一块巨分子云, 具有相似的化学组成。因而, 我们的工作是基于 LAMOST 光谱巡天得到的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 来研究疏散星团的性质以及银盘的结构和化学演化。

1.3.3.1 LAMOST 关于视向速度和金属丰度的测量

在关于银河系的众多光谱巡天中, 它们的光谱分辨率及所得到的恒星数目的关系见图1.14, 从图中我们可以看出, 虽然 LAMOST 低分辨率光谱巡天 ($LAMOST_LR$ 与 $SEGUE$ 都是低分辨率光谱巡天, 且具有相同的分辨率 ($R \sim 1800$), 但是 LAMOST 低分辨率所得恒星数目比 $SEGUE$ 高出一个数量级; 与中

高分辨率光谱巡天(比如, RAVE, *Gaia*, APOGEE 等)相比, LAMOST 低分辨率巡天在得到有光谱的恒星数目上同样具有绝对优势。LAMOST 使得人类首次得到超千万量级的光谱数, 也成为世界上第一个获取光谱数超千万的光谱巡天项目。

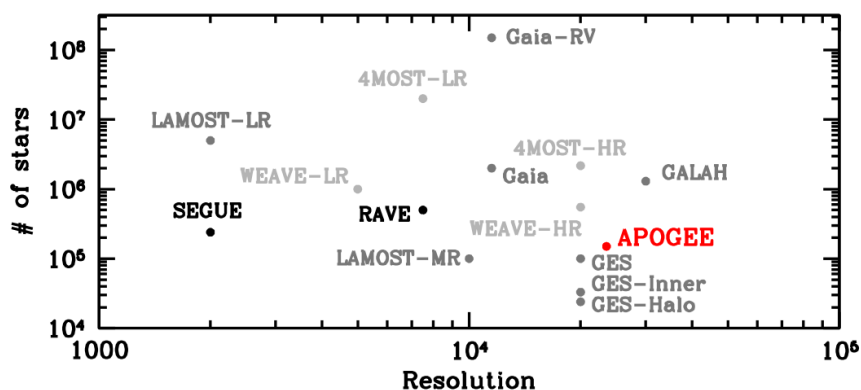


图 1.14 银河系光谱巡天的分辨率与得到光谱观测的恒星数目的关系 (Majewski 等, 2017)

如前文所述, LAMOST 光谱巡天观测得到了超千万条光谱, 其中有恒星参数的有六百多万条恒星光谱。我们知道, 天体光谱观测得到的天体物理信息远胜于测光观测。对于恒星, 光谱分析可以对恒星进行分类, 获得恒星的化学组成、各种物理参数和运动参数(表面温度、金属丰度、电子密度、压强、湍流、自转、视向速度、距离)等。

其中, 恒星的视向速度 RV 是根据多普勒效应(光源远离我们的方向运动, 其光谱就会向红端移动, 也就是红移; 反之, 若光源朝靠近我们的方向运动, 其光谱就会向蓝端移动, 也就是蓝移。且红移或蓝移越大, 代表光源移动的速度也就越快。)得到的, 也就是根据光谱吸收线的线心位置得到恒星的红移 (redshift, z), 进而得到恒星的视向速度 ($RV = c \cdot z$)。而恒星的金属丰度 $[Fe/H]$ 是根据恒星光谱谱线的强度得到的, 恒星金属丰度越富, 吸收坑越深; 因而对于恒星的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 在测量上是两个独立的测量量。故我们的工作中构建模型时, 才可以将团的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 假定为两维正高斯, 认为两者是不相关的。对于一颗星的多次重复观测, 根据统计学原理, 我们知道其视向速度 RV_i 服从高斯 $N \sim (\overline{RV}, \sigma_{RV})$ 的分布, 那么理想情况下, $(RV_i - \overline{RV})/(\sigma_{RV})$ 应该服从标准正态分布 $N \sim (0, 1)$ 。但是由于从恒星光谱得到恒星的视向速度 RV 受很多因素的影响, 比如: 光谱观测的信噪比 (S/N)、光谱分辨率、波长定标、恒

星的光谱型、波长范围、测量方法等 (Bouchy 等, 2001; Wang 和 Luo, 2012; Wang 等, 2014, 2019)。因而, LAMOST 对恒星的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 都可能高估或者低估。搞清楚 LAMOST 光谱观测的测量质量, 这对我们基于 LAMOST 恒星的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 进行相关科学研究具有重大意义。

1.3.3.2 LAMOST 对疏散星团的观测视向速度和金属丰度的观测

我们知道疏散星团不仅是恒星形成与演化的理想实验室, 还是研究银盘结构和化学演化的理想示踪体。而在众多光谱巡天中, LAMOST 给出了超千万条光谱, 有恒星参数的有六百多万条光谱, 是唯一一个能够给出这么视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 的巡天项目。因而, 我们这个工作是基于 LAMOST 来研究银河系的疏散星团的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$, 以及利用疏散星团来示踪银河系结构和化学演化。

在这里我们给出 LAMOST 所观测的两个疏散星团 NGC 2682 和 NGC 6791 在视向速度和金属丰度空间的分布情况, 以此来说明我们选成员星的必要性和我们这个工作的重要性。Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人基于 Gaia DR2 中所给高精度的空间位置, 自行和视差, 利用 UPMASK 方法给出了 1481 个疏散星团的成员星及其成员概率。图1.15和图1.16分别给出了Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给疏散星团 NGC 2682 和 NGC 6791 的成员星在 LAMOST DR7 所给视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间的分布情况。图中的颜色条代表Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给星团的成员星的成员概率。从图1.15和图1.16可以看出, Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给的成员星, 哪怕是高概率成员, 在 LAMOST 所给视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间仍然没有聚集在团中心区域, 也就是说这些高概率的离散点很有可能就是场星。与此同时, 我们从图1.15和图1.16中的下图可以看出, 这两个疏散星团的场星 (选取见第二章章节) 在 LAMOST 所给视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间并不是标准的两维单高斯, 因而不能用两维正交单高斯来形容场星的分布, 而且, Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 所给的两个疏散星团的那些高概率的离散点应该就是场星。总之, 无论什么观测, 什么算法挑选团成员, 都无法避免场星的污染, 这也是我们这个工作的出发点。

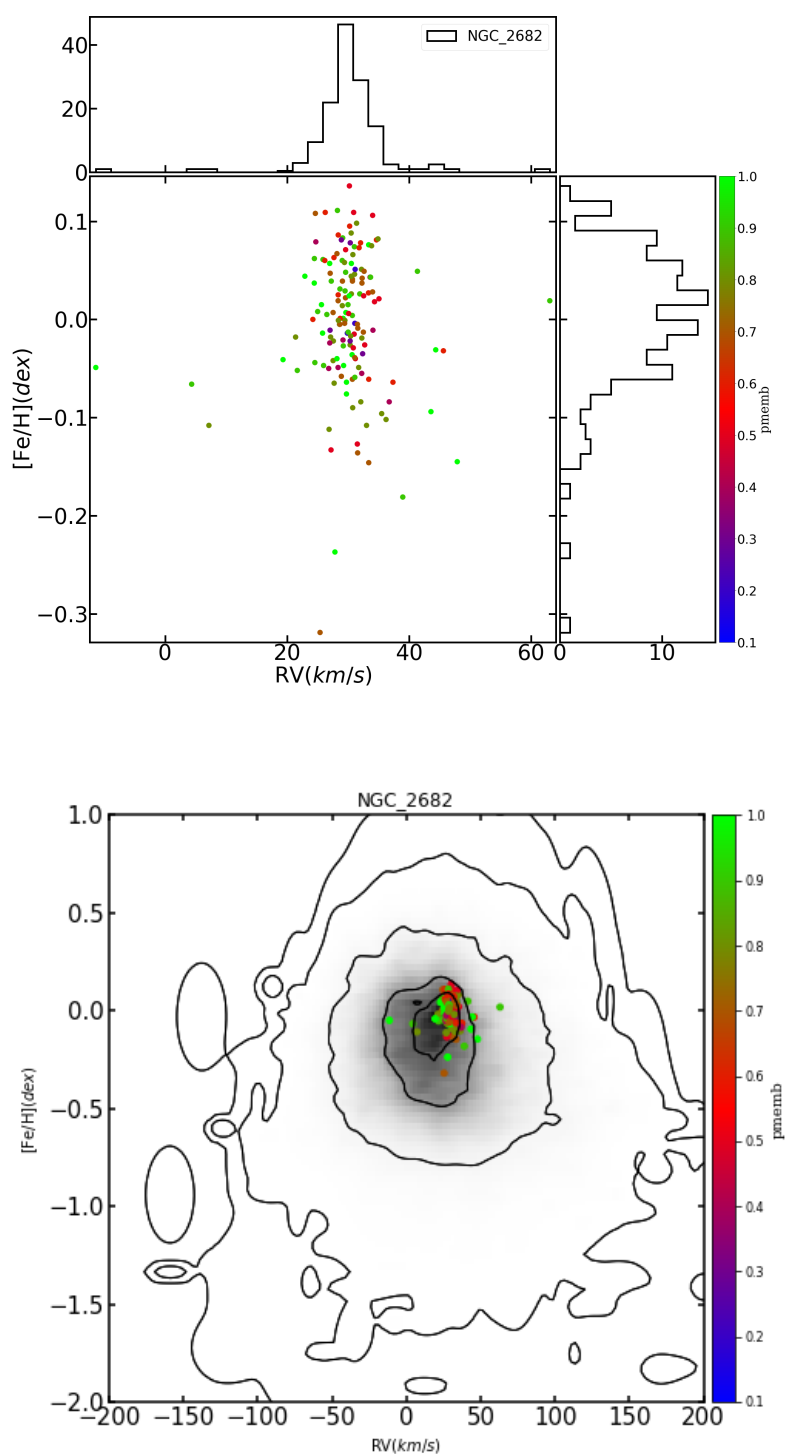


图 1.15 NGC 2682 在 LAMOST 的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间分布：上下图中的散点都是Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给 NGC 2682 的成员星，图中 RV 和 $[Fe/H]$ 均是 LAMOST DR7 所给；图中的颜色条代表Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给成员星的成员概率的大小；上图也给出了 RV 和 $[Fe/H]$ 的分布；下图中的灰色等高线代表 LAMOST 所给星团场星的分布情况。

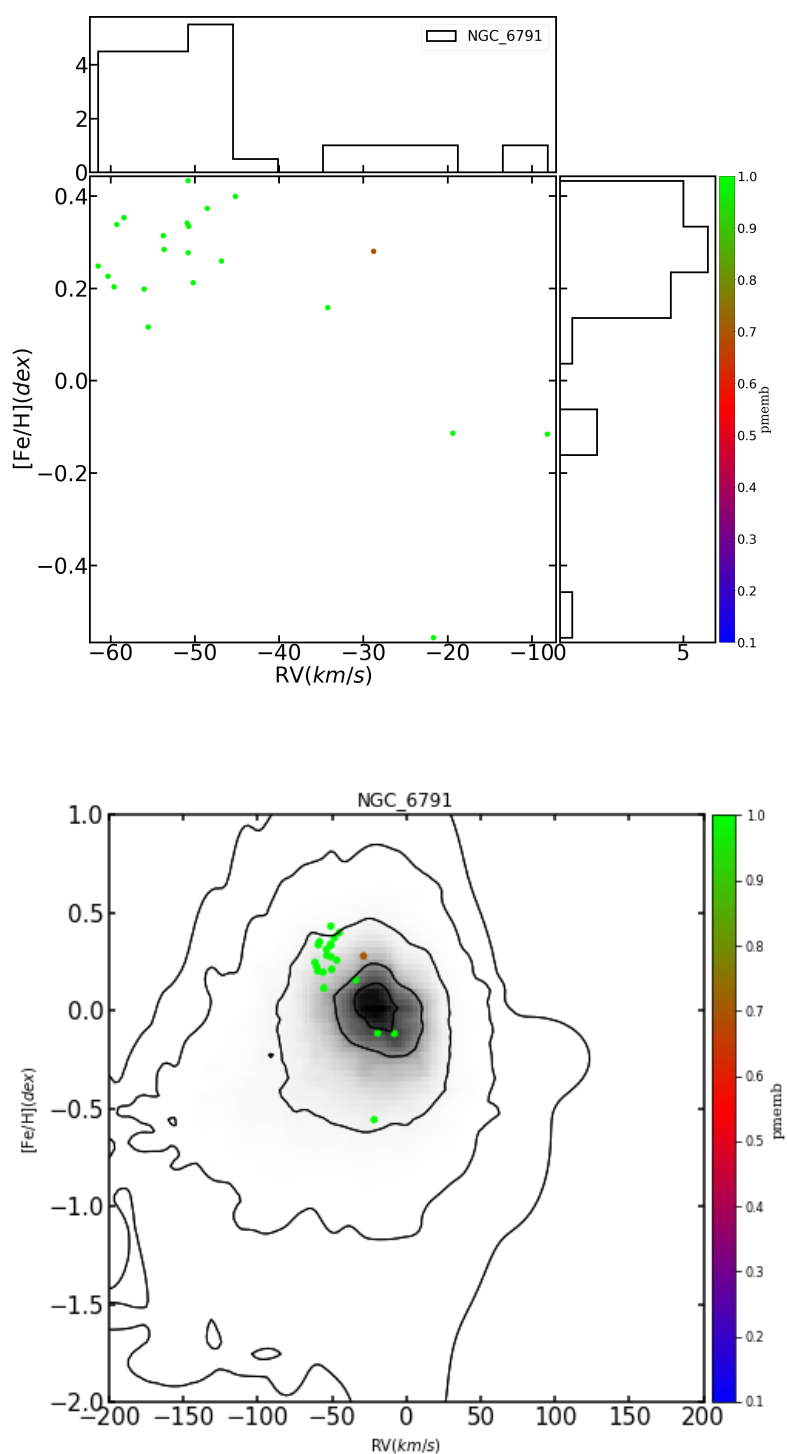


图 1.16 NGC 6791 在 LAMOST 的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间分布：上下图中的散点都是Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给 NGC 6791 的成员星，图中 RV 和 $[Fe/H]$ 均是 LAMOST DR7 所给；图中的颜色条代表Cantat-Gaudin 和 Anders (2020) 等人所给成员星的成员概率的大小；上图也给出了 RV 和 $[Fe/H]$ 的分布；下图中的灰色等高线代表 LAMOST 所给星团场星的分布情况。

1.4 本文的研究目的和内容

银河系作为宇宙中千亿个星系中的一员,因为我们身处其中,使其成为唯一一个容许我们详尽探究的特殊星系。疏散星团作为星系中因引力束缚在一起的恒星系统,因其中的恒星诞生于同一片巨分子云,因而可以认为它们具有相同的年龄,相似的化学组成。相比场星,团星在运动学空间和金属丰度上均比较聚集,因而可以利用恒星的自行、视差、视向速度和金属丰度等将团星从众多场星中挑选出来。只有比较靠谱的挑选出团星中的成员星,才可以得到高精度的疏散星团的基本物理性质(比如,年龄、红化、距离、半径等),才能更准确的研究星族和银盘的结构及化学演化。

在 *Gaia* 问世之前,恒星的自行精度差;在 LAMOST 之前,有恒星视向速度的数据比较少等各种原因,使得运动学方法并不是总有效。有了 *Gaia*,能为我们提供前所未有的高精度的空间位置、两维自行和视差。我们知道,精度越高,团星和场星分的越开,越能很好将团星从场星中挑选出来。但是从图1.7和 1.8 中,我们可以看到,哪怕是 [Cantat-Gaudin 和 Anders \(2020\)](#) 等人基于 *Gaia* 巡天所给疏散星团 NGC 2682 和 NGC 6791 的成员星在 LAMOST DR7 所给视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上也有高概率的离散点,这些离散点很可能就是混入的场星。因为场星远多于团星,两者又混在一起,故不论哪种判断方法,无论多高精度的测量都无法百分之百将团星从场星中剔除干净,仍有场星的混入和污染。

我们国家自主研发的大视场兼备大口径的光纤光谱望远镜-LAMOST 成为了世界上光谱获取率最高的望远镜,为我们提供了一个 613 万有恒星基本物理参数(有效温度 T_{eff} , 表面重力加速度 $\log g$, 金属丰度 $[Fe/H]$ 、视向速度 RV 及其误差)的低分辨率星表和一个 51 万还包括 12 中金属丰度的中分辨率星表。这么大的数据为我们更好的研究疏散星团提供了很大的便利,可以弥补疏散星团缺乏足够的视向速度 RV 的缺憾,因而,我们的工作是基于 LAMOST 低分辨率所给的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间来给出疏散星团的视向速度和金属丰度的均值及其表观弥散、内禀弥散,进一步示踪疏散星团自身运动学和化学演化的性质以及银河系结构和化学演化。

与此同时,由于视向速度和金属丰度的精度受很多因素的影响,比如:光谱的信噪比、恒星类型、波长定标等,因而,我们的工作还讨论了 LALMOST 低分

辨率光谱巡天对恒星的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 的质量 (高估或低估)。

本论文的后续内容安排如下：第二章将介绍基于 LAMOST 研究银河系疏散星团的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 所构建模型及算法。在第三章，将介绍样本的选取及拟合所得结果，同时跟他人工作进行分析与比对。第四章，详细分析疏散星团的化学性质、运动学及动力学来示踪银盘的结构和化学演化。第五章是对全文的总结及对后续工作的展望。

第 2 章 星团的混合模型与相关算法

本章我们主要介绍基于 LAMOST 低分辨率光谱解算疏散星团视向速度和金属丰度的均值及弥散所构建的模型及算法。首先，2.1 节介绍如何基于恒星视向速度和金属丰度两维空间构建团星和场星的混合模型。其次，2.2 节主要介绍贝叶斯参数估计的相关背景知识及混合模型所得拟合参数。然后，在 2.3 节主要介绍如何评估 LAMOST 低分辨率光谱所得恒星视向速度和金属丰度观测误差的测量质量。最后，在 2.4 节，对本章内容进行总结。

2.1 视向速度与金属丰度“空间”的混合模型

在天文学研究中，混合模型是一种常见的统计方法 (Kuhn 和 Feigelson, 2017)。混合模型表示了观测数据在总体中的概率密度分布，是由多个子成分的概率密度分布构成的一个混合概率密度分布。基于混合模型的工作有很多，比如，Pang 等 (2018) 等人利用 APOGEE 高分辨率光谱得到的恒星参数 (视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$)，基于团星和场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 及其观测误差的混合模型得到 26 个疏散星团的内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],int}$ ；Shao 和 Li (2019) 基于团星和场星的混合模型得到 120 个球状星团的平均视差；Li 等 (2020) 等人基于疏散星团中单星和测光无法分辨的双星在颜色-星等图 (CMD) 上的混合模型，进而得到疏散星团 NGC 3532 中双星比例 f_b 和质比 γ_q 。

虽然 *Gaia* 可以提供高精度自行和视差，更精确地选出团成员，但无法避免场星的混入且 *Gaia* 也没有足够的视向速度观测。在本文中，我们用在 LAMOST 低分辨率光谱视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的混合模型 (团星和场星两个成分) 来解算疏散星团的视向速度和金属丰度的均值及弥散。

在我们的混合模型中，包含团星和场星的恒星样本在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间的概率密度分布：

$$\Phi(RV, [Fe/H]) = f_c \Phi_c(RV, [Fe/H]) + (1 - f_c) \Phi_f(RV, [Fe/H])$$

(2.1)

其中 $\Phi_c(\text{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])$ 和 $\Phi_f(\text{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])$ 分别为团星和场星的归一化概率密度分布, f_c 是团星所占比例。

2.1.1 团星模型构建

疏散星团的成员星诞生于同一片巨分子云, 因而, 它们具有相同的年龄、金属丰度及距离, 具有相似的空间运动(自行、视向速度)。相较场星, 疏散星团的成员星在空间分布、年龄、运动学和金属丰度上更为聚集, 表现出与场星不同的性质。为了得到疏散星团的整体运动学性质, 需要做一些运动学上的数学假设, 比如, 场星和团星的自行或视向速度都满足高斯分布 (Zhao 和 He, 1990; Gao 和 Chen, 2010, 2012; Gao 等, 2014; Pang 等, 2018; Zhong 等, 2020; Gao, 2020)。

在本文中, 我们是基于 LAMOST 低分辨率光谱所得视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 来得到疏散星团的平均视向速度 $\overline{\text{RV}}$ 和平均金属丰度 $\overline{[\text{Fe}/\text{H}]}$ 及其弥散。由于恒星的视向速度 RV 是根据多普勒效应得到, 也就是根据恒星光谱吸收线的线心位置得到恒星红移, 进而得到恒星的视向速度 ($\text{RV} = c \cdot z$)。而恒星的金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 是根据恒星光谱谱线的强度得到, 恒星金属丰度越富, 吸收坑越深。所以, 恒星的视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 在测量上是两个独立的测量量, 两者不相关。因而, 我们在构建混合模型时假定星团在此两维空间上是一个两维正高斯, 其成员星在视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 两维空间上的概率密度分布如下:

$$\Phi_c(\text{RV}, [\text{Fe}/\text{H}]) = \phi_c(\text{RV})\phi_c([\text{Fe}/\text{H}]) \quad (2.2)$$

其中, $\phi_c(\text{RV})$ 和 $\phi_c([\text{Fe}/\text{H}])$ 分别是团星在视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 一维空间上的概率密度分布, 如公式2.3和公式2.4所示:

$$\phi_c(\text{RV}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{RV}}} \exp\left[-\frac{(\text{RV} - \overline{\text{RV}})^2}{2\sigma_{\text{RV}}^2}\right] \quad (2.3)$$

$$\phi_c([\text{Fe}/\text{H}]) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}} \exp\left[-\frac{([\text{Fe}/\text{H}] - \overline{[\text{Fe}/\text{H}]})^2}{2\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}^2}\right] \quad (2.4)$$

其中, $\overline{\text{RV}}$ 、 $\overline{[\text{Fe}/\text{H}]}$ 、 σ_{RV} 和 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]}$ 分别是疏散星团在视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 上分布的均值及其弥散。

2.1.2 场星模型构建

团星与场星表现出不同的性质，在很多工作 (Zhao 和 He, 1990; Gao 和 Chen, 2010, 2012; Gao 等, 2014; Pang 等, 2018; Zhong 等, 2020; Gao, 2020) 中，建立团星和场星的混合模型时，也将场星的分布假定为高斯分布。比如，Gao 和 Chen (2010) 等人基于 SEGUE 巡天将团星和场星的视向速度假定为不同的高斯分布，得到了 5 个疏散星团的平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 。但我们基于 LAMOST 低分辨率光谱数据研究疏散星团及其场星在视向速度和金属丰度空间的分布时发现，场星在视向速度或金属丰度上并不是对称的高斯分布。场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间上的不对称性，我们用描述数据分布偏斜方向和程度的偏度 (skewness) 来描述。

场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布如图2.1所示，我们可以看出，NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 752 三个疏散星团的场星 (场星选取见 3.1 节) 在视向速度 RV 或金属丰度 $[Fe/H]$ 上并不是对称的高斯分布，而且不同疏散星团的场星分布也不同。比如，NGC 2632 在视向速度 RV 上表现为左偏度，NGC 1039 和 NGC 752 表现为右偏度，三个疏散星团在金属丰度 $[Fe/H]$ 上均表现为右偏度。

既然场星在视向速度或金属丰度上并不是对称的高斯分布，那么，场星在视向速度和金属丰度两维空间上就不能简单地用高斯分布来描述。那么，我们构建各个疏散星团周边足够多的场星在视向速度和金属丰度两维空间上的归一化概率密度分布，以此分布作为团天区场星的在视向速度和金属丰度上的归一化概率密度分布模型。

我们对每个疏散星团所选的场星样本 (足够多的场星，样本选取见 3.1 节) 在 $RV-[Fe/H]$ 空间分成 $2.5 \text{ km s}^{-1} \times 0.03 \text{ dex}$ 大小的格子 (也就是: $\Delta bin_{RV} = 2.5 \text{ km s}^{-1}$, $\Delta bin_{[Fe/H]} = 0.03 \text{ dex}$)。通过计数，得到每个格子 (m, n) 中落入的恒星数目:

$$\Psi_{m,n}(RV, [Fe/H]) = W_{f,m,n} \cdot N_{m,n}(RV, [Fe/H]) \quad (2.5)$$

其中， $W_{f,m,n}$ 是所有观测 (包括重复观测) 落在格子 (m, n) 中的权重之和，所有格子中的 $W_{f,m,n}$ 之和就是恒星的总数目 N ， $\Psi_{m,n}(RV, [Fe/H])$ 是未进行平滑 (smooth) 时，所有观测落在格子 (m, n) 中的恒星数目。

将所有格子中恒星数目分布 $\Psi(RV, [Fe/H])$ 进行归一化，得到未进行平滑处

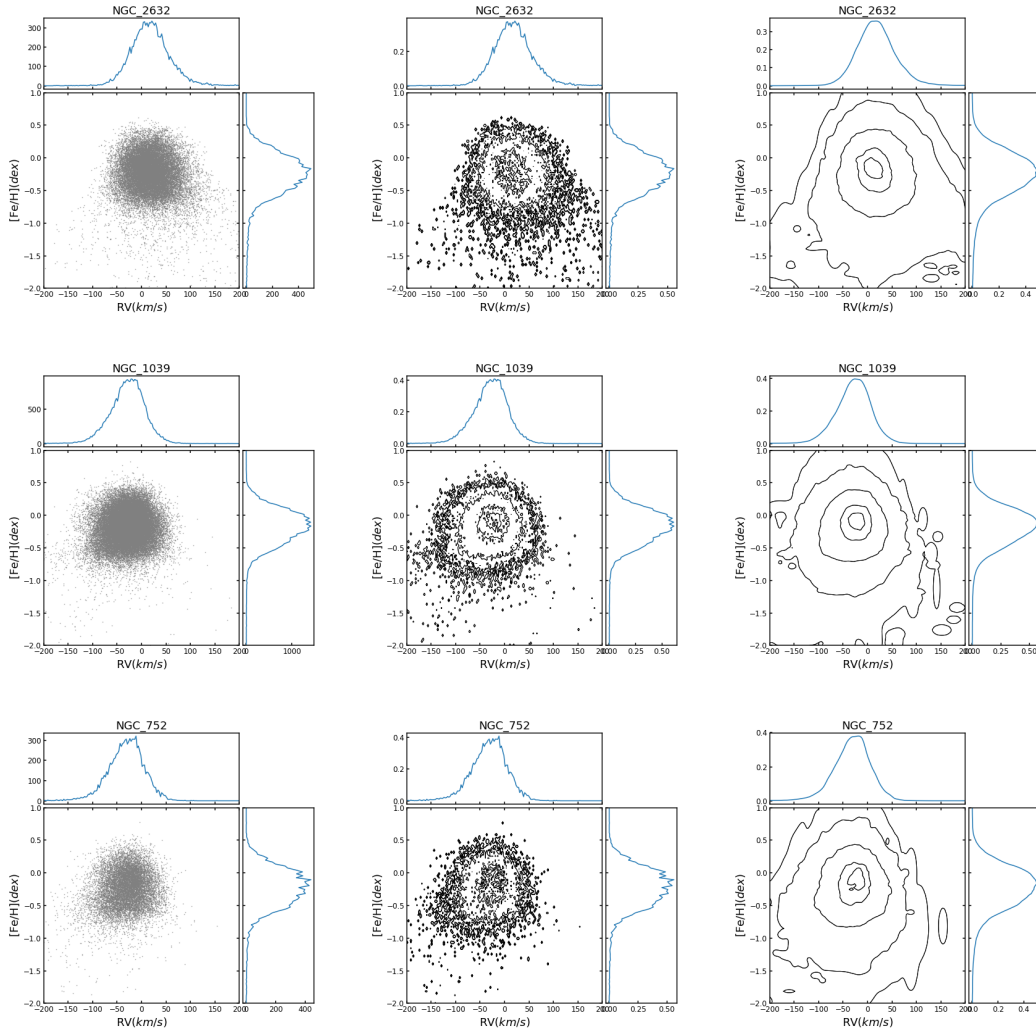


图 2.1 NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 752 周边的场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 空间的个数分布和概率密度分布：左边三幅图分别是三个疏散星团的数目分布 $\Psi_{m,n}(RV, [Fe/H])$ ，中间三幅图分别是三个疏散星团未进行 smooth 的归一化概率密度分布 $\Phi_f(RV, [Fe/H])$ ，右边三幅图分别是三个疏散星团 smooth 后的归一化概率密度分布 $\Phi_f(RV, [Fe/H])$ 。

理的归一化概率密度分布 $\Phi_f(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])$:

$$\Phi_f(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}]) = \frac{\Psi(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])}{N \cdot \Delta\text{bin}_{\mathbf{RV}} \cdot \Delta\text{bin}_{[\text{Fe}/\text{H}]}} \quad (2.6)$$

未进行平滑处理的数目分布 $\Psi(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])$ 和归一化的概率密度分布 $\Phi_f(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])$ 分别如图 2.1 中的左图和中图所示, 我们可以看到, NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 752 三个疏散星团周边的场星在视向速度 \mathbf{RV} 或金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 上不仅是不对称的高斯分布, 在低密度区, 因泊松涨落引起的概率密度分布不够平滑, 故我们要对其进行平滑 (smooth) 处理。

本文中, 我们用每颗星每次观测视向速度和金属丰度的观测误差 \mathbf{RV}_{err} 和 $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{err}}$ 作为平滑的带宽, 做高斯展开, 进而得到经过平滑过程, 每颗恒星每次观测在格子 (m, n) 中的数目 $\Psi_{m,n}(\mathbf{RV}_{j,k}, [\text{Fe}/\text{H}]_{j,k})$:

$$\Psi_{m,n,\text{smooth}}(\mathbf{RV}_{j,k}, [\text{Fe}/\text{H}]_{j,k}) = w_{f,j,k} \psi_{m,n}(\mathbf{RV}_{j,k}) \psi_{m,n}([\text{Fe}/\text{H}]_{j,k}) \quad (2.7)$$

其中,

$$w_{f,j,k} = \frac{1}{n_{j,k}} \quad (2.8)$$

其中, $\psi_{m,n}(\mathbf{RV}_{j,k})$ 和 $\psi_{m,n}([\text{Fe}/\text{H}]_{j,k})$ 分别是第 j 颗恒星的第 k 次观测用其视向速度和金属丰度观测误差作为带宽进行高斯展开后, 落入此格子的概率。

那么, 对所有恒星的所有重复观测经过平滑过程后, 我们得到平滑之后场星在所有格子中的归一化概率密度分布:

$$\Phi_f(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}]) = \frac{\Psi_{\text{smooth}}(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])}{N \cdot \Delta\text{bin}_{\mathbf{RV}} \cdot \Delta\text{bin}_{[\text{Fe}/\text{H}]}} \quad (2.9)$$

通过此平滑过程, 我们构建了各个疏散星团周边足够多的场星 (包括重复观测) 在视向速度和金属丰度两维空间上的归一化概率密度分布, 并以此分布作为混合模型中场星在视向速度和金属丰度上的归一化概率密度分布 $\Phi_f(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])$ 。

图 2.1 中的右图分别是 NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 752 三个疏散星团经过上述平滑过程之后场星的归一化概率密度分布 $\Phi_f(\mathbf{RV}, [\text{Fe}/\text{H}])$ 。我们可以看出经过平滑过程, 三个疏散星团的场星在视向速度 \mathbf{RV} 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 两维空间上的分布足够平滑, 已经降低了泊松涨落的影响。

2.2 参数估计和拟合参数

2.2.1 似然函数与后验概率

基于混合模型和参数估计，我们知道第 i 颗恒星的似然为：

$$\mathcal{L}_i = \Phi(\text{RV}_i, [\text{Fe}/\text{H}]_i) \quad (2.10)$$

在用似然函数求解最佳拟合参数时，通常使用似然函数的自然对数形式。在没有重复观测时，包含 N 颗恒星的拟合样本的联合似然函数为：

$$\ln \mathcal{L} = \ln \prod_{i=1}^N \mathcal{L}_i = \sum_{i=1}^N \ln \mathcal{L}_i \quad (2.11)$$

在考虑重复观测时，第 i 颗恒星第 j 次观测的联合似然函数值 $\ln \mathcal{L}_i$ 如下：

$$\ln \mathcal{L}_i = \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{n_i} \cdot \ln \mathcal{L}_{i,j} \quad (2.12)$$

其中， n_i 是拟合样本中第 i 颗恒星的重复观测次数。

根据贝叶斯推断 (Bayesian inference)，我们可以这样来描述数据和模型的关系：

$$p(P|D, M) = \frac{p(D|P, M) \times p(P|M)}{p(D|M)} \quad (2.13)$$

其中 $p(P|D, M)$ 是后验概率 (posterior probability)，也就是在给定的理论模型 (M) 及数据 (D) 的情况下，拟合参数 P 的概率密度分布； $p(D|P, M)$ 是似然概率 (likelihood)，也就是给定理论模型 (M) 及模型参数 P 的情况下，数据 (D) 的概率密度分布； $p(P|M)$ 是先验概率 (prior probability)，是给定理论模型时，模型参数的先验分布，通常设置为均匀分布；而分母项 $p(D|M)$ 称为证据 (evidence)。evidence 这一项就是在很多应用中并不重要，只是一个归一化成分，因此，我们很多时候都可以省略它 (此项可以用于比较不同模型的好坏)。

在本文工作中，也不考虑 evidence 这一项。拟合参数中视向速度和金属丰度的先验概率设置为均匀分布，视向速度和金属丰度的弥散取对数形式，在对数空间设定为均匀分布，此时似然函数为：

$$p(D|\Theta, M) = \mathcal{L} \quad (2.14)$$

其中, D 是观测数据, Θ 是模型参数, 分别如下所示:

$$D = [RV, [Fe/H]] \quad (2.15)$$

其中 RV 和 $[Fe/H]$ 表示所有恒星所有观测的视向速度和金属丰度。

$$\Theta = [\overline{RV}, \sigma_{RV}, \overline{[Fe/H]}, \sigma_{[Fe/H]}] \quad (2.16)$$

其中, \overline{RV} 、 $\overline{[Fe/H]}$ 、 σ_{RV} 和 $\sigma_{[Fe/H]}$ 分别表示疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其弥散。

为了得到模型的最佳拟合参数, 这里我们运用可以实现马尔科夫链蒙特卡罗方法 (Markov Chain Monte Carlo (Goodman 和 Weare, 2010), 简称 MCMC) 的 python 包-emcee(Foreman-Mackey 等, 2013) 对拟合参数进行随机采样, 进而得到拟合参数的概率密度分布 (PDF)。

2.2.2 拟合参数

在基于 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得恒星视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上构建团星和场星的混合模型中, 结合混合模型及其似然函数形式公式 2.1、公式 2.11、公式 2.12 和公式 2.14, 结合贝叶斯推断 (Bayesian inference) 和 python emcee 包, 公式 2.16 中参数均不固定, 对其进行随机采样, 利用 MCMC 方法可以得到疏散星团平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 及其弥散 σ_{RV} 和 $\sigma_{[Fe/H]}$ 的概率密度分布 PDF 及其最佳拟合值。

2.2.3 表观弥散与内禀弥散

2.2.3.1 表观弥散

在我们的混合模型中, 当不考虑视向速度和金属丰度观测误差时, 混合模型的似然函数如公式 2.14 所示, 数据 (D) 是所有恒星的所有重复观测的视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 。此时, 模型参数 (Θ) 有疏散星团的平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 及其表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 。这些参数均不固定, 这时混合模型需要得到的拟合参数有: 疏散星团的平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 。

2.2.3.2 内禀弥散

基于混合模型，不仅可以得到疏散星团的表观弥散，在考虑观测误差时，我们还可以得到疏散星团的内禀弥散。

我们知道，测量某个量的弥散时，其表观弥散 σ_i 是由两部分造成，互不相关的两个量，分别是内禀弥散 σ_0 和观测误差 err_i ：

$$\sigma_i^2 = \sigma_0^2 + err_i^2 \quad (2.17)$$

因此，当我们考虑视向速度和金属丰度观测误差时，结合 LAMOST 低分辨率光谱所得恒星的视向速度误差 RV_{err} 和金属丰度误差 $[Fe/H]_{err}$ ，可以得到疏散星团视向速度和金属丰度的内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[Fe/H],int}$ 。此时公式2.3和公式2.4转换为公式2.17。

考虑视向速度和金属丰度的观测误差时，模型参数 (Θ) 有：疏散星团的平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、及其内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[Fe/H],int}$ 。这时我们可以得到拟合参数 (疏散星团的平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、及其内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[Fe/H],int}$) 的概率密度分布 (PDF)。

2.3 LAMOST 的观测误差改正因子 k

LAMOST 根据观测到的恒星光谱,通过 LAMOST Stellar Parameter Pipeline(以下简称“LASP”)可以得到恒星的基本参数(有效温度- T_{eff} 、表面重力- $\log g$ 、金属丰度- $[Fe/H]$ 和视向速度- RV 及它们的观测误差)。从恒星光谱得到恒星的视向速度 RV 受很多因素的影响,比如:光谱观测的信噪比(SNR)、光谱分辨率、波长定标、恒星的光谱型、波长范围、测量方法等(Bouchy 等, 2001; Wang 和 Luo, 2012; Wang 等, 2014, 2019)。因而, LAMOST 低分辨率光谱可能高估或低估恒星视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 的观测误差。搞清楚 LAMOST 低分辨率光谱观测的测量质量,这对我们基于 LAMOST 恒星视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 进行相关科学研究具有重大意义。比如,研究疏散星团的内禀弥散,考虑观测误差是很有必要的。

根据概率论,我们知道若随机变量 X 服从 $N(\mu, \sigma)$ 分布,对随机变量 X 进行标准化,其标准化随机变量 (standardized random variable, 亦称“规范随机变量”

) $Z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ 亦服从高斯分布, 且是标准正态分布 $N(0, 1)$ 。

对于实际测量, 我们不知道随机变量 X 的真实均值 μ , 只知道多次观测值及其误差, 这里用加权平均值代替随机变量 X 的真实均值 μ 。权重、加权均值及规范随机变量 Z 分别为:

$$w(x) = \frac{1}{x_{err}^2} \quad (2.18)$$

$$\bar{x}_w = \frac{\sum_{i=1}^n (w_{x,i} \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n w_{x,i}} \quad (2.19)$$

$$Z(x) = \frac{x - \bar{x}_w}{x_{err}} \sim N(0, 1) \quad (2.20)$$

当我们不知道随机变量 X 的测量误差 x_{err} 是否准确时, 我们可以引入测量误差改正因子 k 对测量质量 (高估或低估) 进行定量评估, 此时公式 2.17 转变为:

$$\sigma_i^2 = \sigma_0^2 + (k \cdot err_i)^2 \quad (2.21)$$

其中, k 是观测误差改正因子, k 的不同数值具有不同含义, 有以下三种情况:

- (1) 当 $k > 1$ 时, 观测误差低估;
- (2) 当 $k \sim 1$ 时, 观测误差可靠;
- (3) 当 $k < 1$ 时, 观测误差高估。

考虑随机变量 X 的观测误差 x_{err} 及其改正因子 k 之后, 随机变量 X 的规范随机变量 $Z = \frac{x-\mu}{\sigma}$ 理论上不再服从标准正态分布, 公式 2.20 转换成:

$$Z(x) = \frac{x - \bar{x}_w}{x_{err}} \sim N(0, k) \quad (2.22)$$

同样, 对于 LAMOST 低分辨率光谱给出的恒星视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$, 其规范随机变量 Z_{RV} 和 $Z_{[Fe/H]}$ 均应服从 $N(0, k_{RV})$ 和 $N(0, k_{[Fe/H]})$ 分布, 这里我们计算规范随机变量 Z_{RV} 和 $Z_{[Fe/H]}$ 的标准差时也强制认为其均值为 0 (真实值也是一个接近 0 的数)。

同时, 考虑到不同重复观测次数的影响 (观测次数越多, 精度越高 ($\propto \frac{1}{\sqrt{N}}$, 越接近于期望值, N 为重复观测次数)。这里我们针对不同的重复观测次数, 给

视向速度和金属丰度的标准化随机变量 Z_{RV} 和 $Z_{[Fe/H]}$ 加个权重 $w_n = \sqrt{\frac{n}{n-1}}$ ，以降低此影响，则 LAMOST 低分辨率光谱中同一颗恒星的多次重复观测所给的视向速度和金属丰度观测误差改正因子 k_{RV} 、 $k_{[Fe/H]}$ 分别为：

$$k_{RV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{\frac{n}{n-1}} \cdot Z_{RV_i})^2}{n}} \quad (2.23)$$

$$k_{[Fe/H]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{\frac{n}{n-1}} \cdot Z_{[Fe/H]_i})^2}{n}} \quad (2.24)$$

这里我们将所有恒星在视向速度和金属丰度上观测误差改正因子的中位值 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 作为混合模型中两者的改正因子。观测误差改正因子 k 可能与光谱型、信噪比等因素有关系，这里我们不予详细讨论。

考虑观测误差时，混合模型的拟合参数有：平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 和内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[Fe/H],int}$ 及其观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 。由于我们已经得到视向速度和金属丰度观测误差改正因子 k ，因而，此时混合模型要得到的拟合参数有：疏散星团的平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、及其内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[Fe/H],int}$ 。

2.4 本章小结

疏散星团作为研究恒星形成与演化及银盘结构和化学演化的理想示踪体。疏散星团中的成员星（诞生于同一块巨分子云）具有相同的年龄、金属丰度及距离，同时具有相似的空间运动（自行、视向速度）。而且，团星在空间分布、年龄、运动学和金属丰度上更为聚集，表现出与场星不同的性质。因而，我们可以建立团星和场星在视向速度和金属丰度两维空间上的混合模型，得到疏散星团运动学和化学的性质。比如，可以得到疏散星团的视向速度和金属丰度的均值及其弥散。

在2.1节，我们基于恒星视向速度和金属丰度两维空间，构建了团星和场星的混合模型。我们用视向速度和金属丰度上的一个两维正高斯来表示疏散星团团星的归一化概率密度分布，用疏散星团周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的真实概率密度分布作为混合模型中场星的归一化概率密度

分布。其次，2.2节主要介绍参数估计、似然函数及混合模型所得到的拟合参数。然后，在2.3节主要引入改正因子 k 对 LAMOST 低分辨率光谱所得恒星视向速度和金属丰度观测误差的测量质量进行定量评估。

第3章 疏散星团视向速度和金属丰度的性质

本章中,在3.1节主要介绍如何选取做混合模型的星团样本及其拟合样本,同时介绍构建场星模型时场星的选取。在3.1.3节中,得到 LAMOST DR7 低分辨率光谱对恒星视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 。在3.2节介绍混合模型得到的最佳拟合参数(疏散星团的平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 及其内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],int}$)的结果。在3.3节中,我们对考虑和不考虑视向速度和金属丰度观测误差这两种情况所得结果进行分析,并与他人工作进行比较。

3.1 样本选取

3.1.1 星团样本及星团中拟合样本的选取

本文中,恒星的视向速度和金属丰度由 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得。LAMOST DR7 低分辨率光谱 ($R \sim 1800$) 观测所得星表包括一年先导巡天和七年正式巡天观测数据,共有 1060 万条光谱、613 万条得到恒星参数(有效温度 T_{eff} , 表面重力加速度 $\log g$, 金属丰度 $[Fe/H]$ 、视向速度 RV 及其误差)的光谱。LAMOST DR7 低分辨率光谱波长覆盖范围是 $3700 - 9000 \text{ \AA}$, 蓝端波长范围大致为 $3700 - 6000 \text{ \AA}$, 红端波长范围大致为 $5800 - 9000 \text{ \AA}$ 。LAMOST Stellar Parameter Pipeline(简称“LASP”)所得大气参数:有效温度 T_{eff} , 表面重力加速度 $\log g$, 金属丰度 $[Fe/H]$ 、视向速度 RV 的精度分别为: 150 K , 0.25 dex , 0.15 dex 和 5.0 km s^{-1} (Luo 等, 2015; Xiang 等, 2015)。

同时,我们选用 Cantat-Gaudin 和 Anders (2020)(以下简称“CG20”)等人基于 *Gaia* DR2 高精度天体测量量 (μ_{α}^* , μ_{δ} , ϖ) 运用 UPMASK 得到近 1500 个疏散星团的成员星作为拟合样本的基本参考,CG20 星表中给出了各个疏散星团成员星的成员概率 ($p_{memb} = 0.1 - 1.0$) 及其 *Gaia* 星等 G 和颜色 $G_{BP} - G_{RP}$ 等信息。虽然 CG20 工作中所给疏散星团的成员星具有较高的可靠性,但是,我们发现疏散星团的某些高概率成员星在 LAMOST 低分辨率光谱所得视向速度和金属丰度两维空间上分布及其弥散,应该是混入的场星。我们经过以下几个步骤选取星团样本及星团拟合样本:

(1) 我们对 LAMOST DR7 低分辨率光谱中有恒星参数的 613 万个 AFGK 型星表进行预处理, 将其视向速度观测误差 RV_{err} 和金属丰度观测误差 $[Fe/H]_{\text{err}}$ 中无效及 3σ 之外的异常点丢掉, 余下 6,103,625 次观测。其中, 视向速度观测误差和金属丰度观测误差的 3σ 范围如图3.1所示。

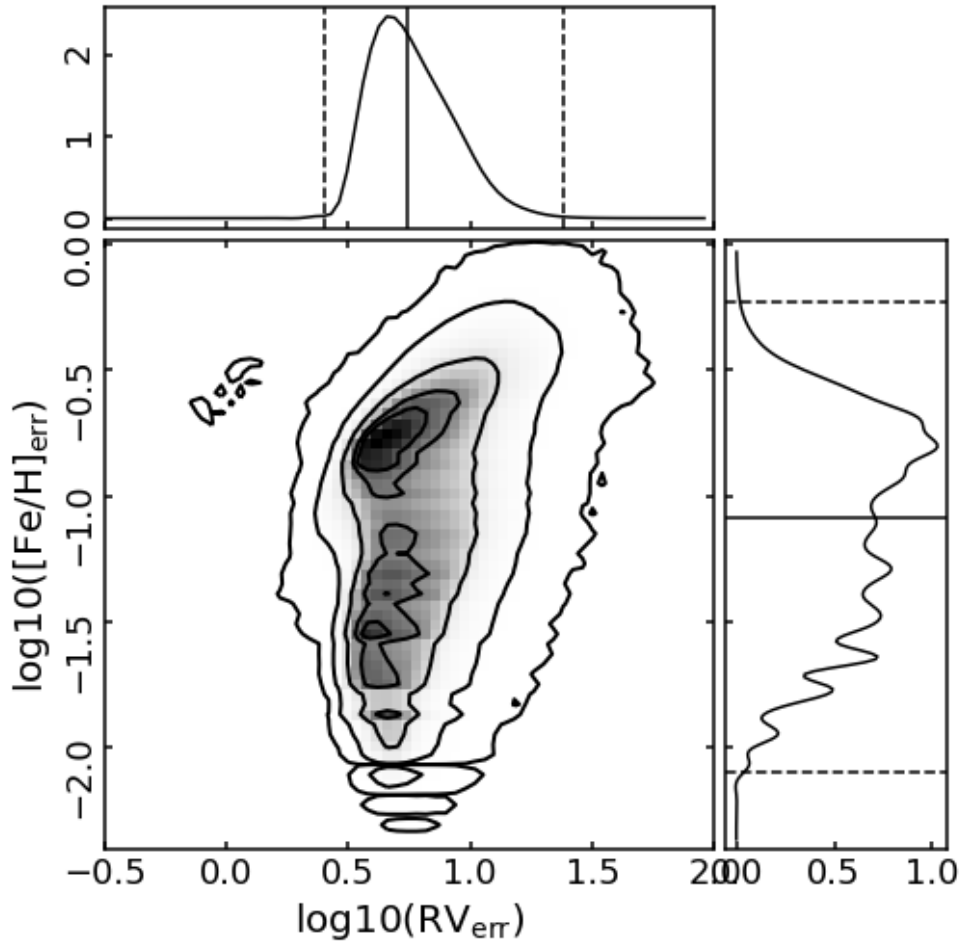


图 3.1 LAMOST DR7 视向速度观测误差 RV_{err} 和金属丰度观测误差 $[Fe/H]_{\text{err}}$ 的概率密度分布。图中坐标轴分别是 RV_{err} 和 $[Fe/H]_{\text{err}}$ 的对数, 黑直线和虚直线分别是两者的中位值和 3σ 边界。

(2) 将 (1) 中所得样本在 $3''$ 内进行内部匹配, 得到 LAMOST DR7 中有 4,559,355 颗恒星。其中 1,035,195 颗恒星有重复观测 (2 ~ 33 次, 如图3.1.3所示), 共计 257,465 条光谱。

(3) 将 (2) 中 4,559,355 颗恒星与 *Gaia* DR2 在 $3''$ 内进行匹配, 得到恒星的天

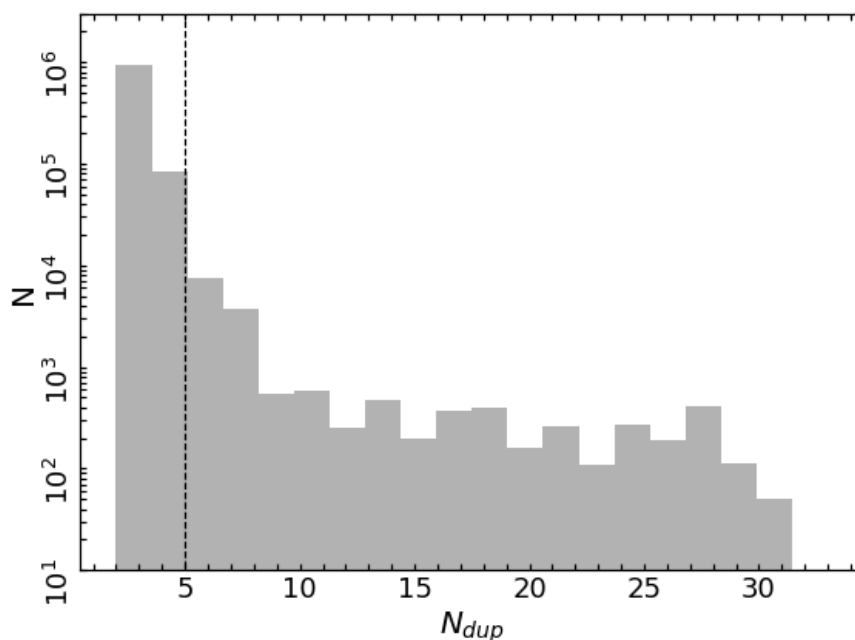


图 3.2 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得重复观测 2 次以上的重复观测次数 N_{dup} 的直方图：
其中黑色虚线是指有 5 次重复观测的源

体测量参数。在交叉匹配中，有一对多的情况 (LAMOST 一颗恒星对应 *Gaia* DR2 多颗恒星)。这时，我们选择最亮的一颗 *Gaia* DR2 恒星作为最佳匹配源，得到 4,540,076 颗有 *Gaia* DR2 恒星天体测量和测光参数的恒星样本，占比 99.6%。

(4) 第 (3) 步所得样本中一共有 367 个疏散星团，包括 5,417 颗 CG20 样本中的成员星，共有 8,237 条 LAMOST 低分辨率光谱 (包括重复观测)。

(5) 根据 (4) 中所得既有 CG20 中 *Gaia* DR2 信息又有 LAMOST 光谱观测所得恒星参数的 367 个疏散星团的成员星样本，选出有 LAMOST DR7 低分辨率光谱观测恒星数目 10 以上的疏散星团，共有 132 个疏散星团。故我们可用来做混合模型的星团样本有 132 个。

(6) 第 (5) 步中 132 个疏散星团样本所含 CG20 的成员星中有 LAMOST DR7 低分辨率光谱观测的源作为每个疏散星团的拟合样本。比如，疏散星团 NGC 2682 经以上筛选得到的拟合样本在空间位置 (α, δ) 、自行 $(\mu_{\alpha}^*, \mu_{\delta})$ 及 CMD 图中的分布如图 3.3 所示。对于疏散星团 NGC 2682，其拟合样本有 137 颗恒星，共 147 条 LAMOST 光谱观测 (包括重复观测)。

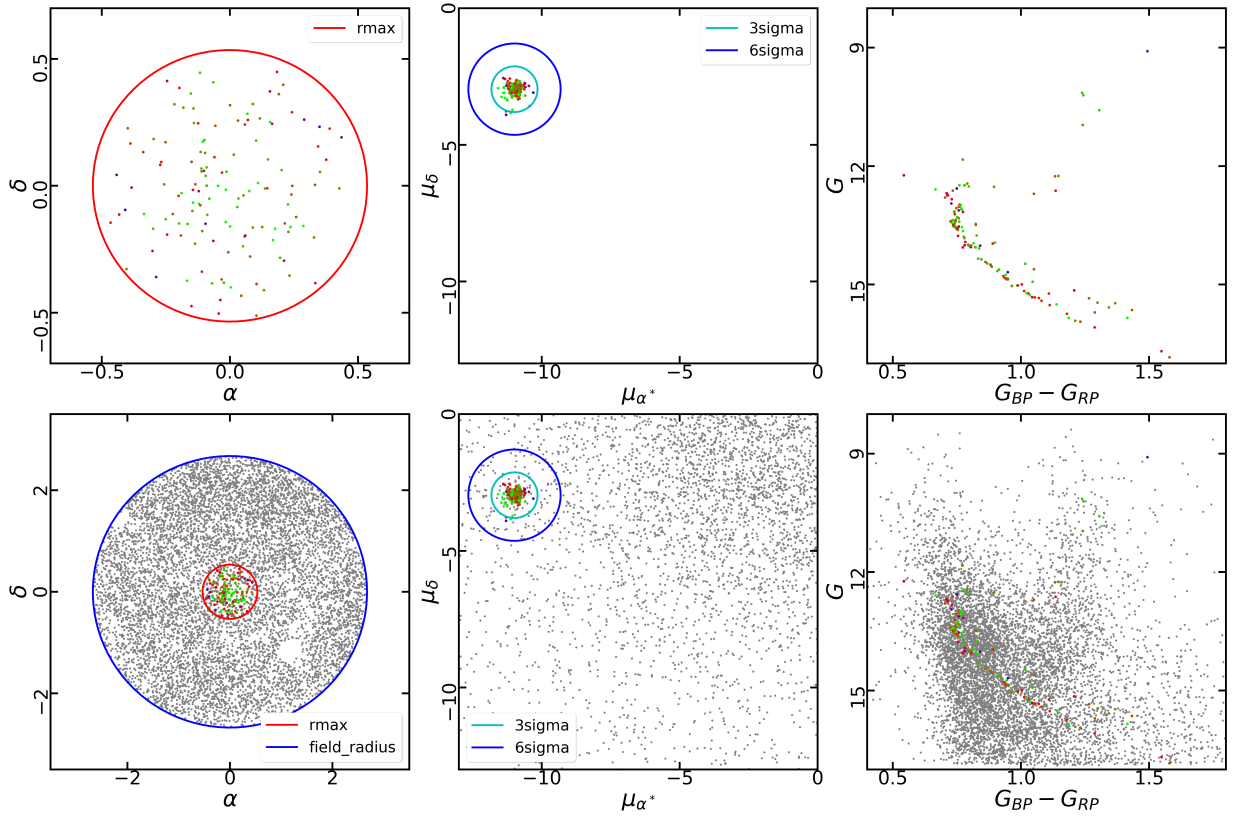


图 3.3 疏散星团 NGC 2682 拟合样本及其周边场星在空间位置 (α, δ)、自行 ($\mu_{\alpha}^*, \mu_{\delta}$) 及 CMD 图上的分布情况: 图中彩色点是 NGC 2682 的拟合样本, 其颜色表示 CG20 中所给成员星的成员概率, 灰色点是 NGC 2682 周边场星; 图 α - δ 中红色和蓝色圆圈分别是 NGC 2682 的半径 R_{max} 及其满足场星个数 10000 以上的场星半径 R_{field} ; 自行空间分布中蓝绿色和蓝色圆圈分别是 CG20 所给 NGC 2682 的平均自行的 3σ 和 6σ 范围。

3.1.2 用于构建场星模型的场星样本选取

在第2章节，我们基于 LAMOST DR7 低分辨率光谱在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间构建团星和场星的混合模型，混合模型中场星数密度分布用其周边足够多的场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间的数密度分布来代替。以下步骤是 132 个疏散星团周边场星的选取：

(1) 根据 CG20 中 1481 个疏散星团的 435,833 颗成员星星表，得到每个疏散星团中成员星在赤经 α 和赤纬 δ 空间上分布的最大半径，此半径作为构建场星模型时各个疏散星团选取周边场星时的参考半径 R_{max} 。

(2) 从 4,559,355 颗恒星中选出剔除 367 个疏散星团的成员星后，剩下的恒星作为 LAMOST DR7 低分辨率光谱观测的场星总表。场星总表中有 4,534,696 颗恒星，6,072,248 次观测。(3) 场星总表和 132 个疏散星团的空间半径 R_{max} ，以及 132 个疏散星团的空间位置得到各个团构建场星模型所用的场星样本，此样本的选择标准是：若 R_{max} 内有一万次以上光谱观测，场星半径就取 R_{max} ；不足一万，那么取多倍 R_{max} 使得此半径内场星观测达到 10,000 以上，各个疏散星团周边场星样本的选源半径如附录表格A.1所示。比如，疏散星团 NGC 2682 经此筛选所得满足条件的场星在空间位置、自行和颜色-星等图中的分布如图3.3所示，疏散星团 NGC 2682 周边场星有 7709 颗恒星，共 11,247 条光谱观测。

3.1.3 LAMOST 观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$

为了评估 LAMOST DR7 低分辨率光谱对恒星视向速度和金属丰度观测误差的测量质量，在第2.3节中，我们引入视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 。

本文中，我们从 LAMOST 低分辨率光谱所得 257,465 次重复观测中选取重复观测 5 次以上的源（如图3.1.3所示，其中黑色虚线是指有 5 次重复观测的源，重复观测 5 次以上的源中，重复观测次数 5 ~ 33，以 5 次为主，10 以上占极少数。）来计算 LAMOST 低分辨率光谱对恒星视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 的观测误差改正因子。重复观测 5 次以上的源一共有 37,273 颗恒星，256,341 次光谱观测。根据2.3节中公式2.23和2.24计算得到每颗恒星视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 。

37,273 颗重复观测 5 次以上的源所得视向速度和金属丰度的观测误差改正

因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 的分布如图3.4所示，图中给出两者的中位值及其 1σ 的范围，中位值分别是： $Med(k_{RV}) = 0.644$ 和 $Med(k_{[Fe/H]}) = 0.526$ 。我们将这两个特征值作为混合模型中所有 LAMOST DR7 低分辨率光谱源视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 。由于视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 均小于 1，因而 LAMOST DR7 低分辨率光谱高估了恒星的视向速度和金属丰度观测误差。

我们得到 37,273 颗重复观测 5 次以上的源视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 随重复观测次数的变化，如图3.5所示，图中红实线和红虚线分别是所有 5 次以上重复观测源的观测误差改正因子的中位值及其 1σ 的范围；蓝点是各重复观测次数相应的源的改正因子的中位值，蓝色误差棒是其 1σ 范围。我们可以看出，对于重复观测 5 ~ 9 源的视向速度观测误差改正因子 k_{RV} 比较一致，10 次以上的观测误差改正因子有下降趋势。对于金属丰度的观测误差改正因子 $k_{[Fe/H]}$ 随重复观测次数呈现出先上升再下降，再上升的趋势。LAMOST DR7 低分辨率光谱的观测误差改正因子 k 与恒星光谱型、波长定标、信噪比、单星和双星比例等因素相关，这里我们不予详细讨论。

总之，我们将 LAMOST DR7 中 37,273 颗重复观测 5 次以上恒星的视向速度和金属丰度观测误差改正因子的中位值 $Med(k_{RV}) = 0.644$ 和 $Med(k_{[Fe/H]}) = 0.526$ 作为我们混合模型中拟合样本的观测误差改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 。

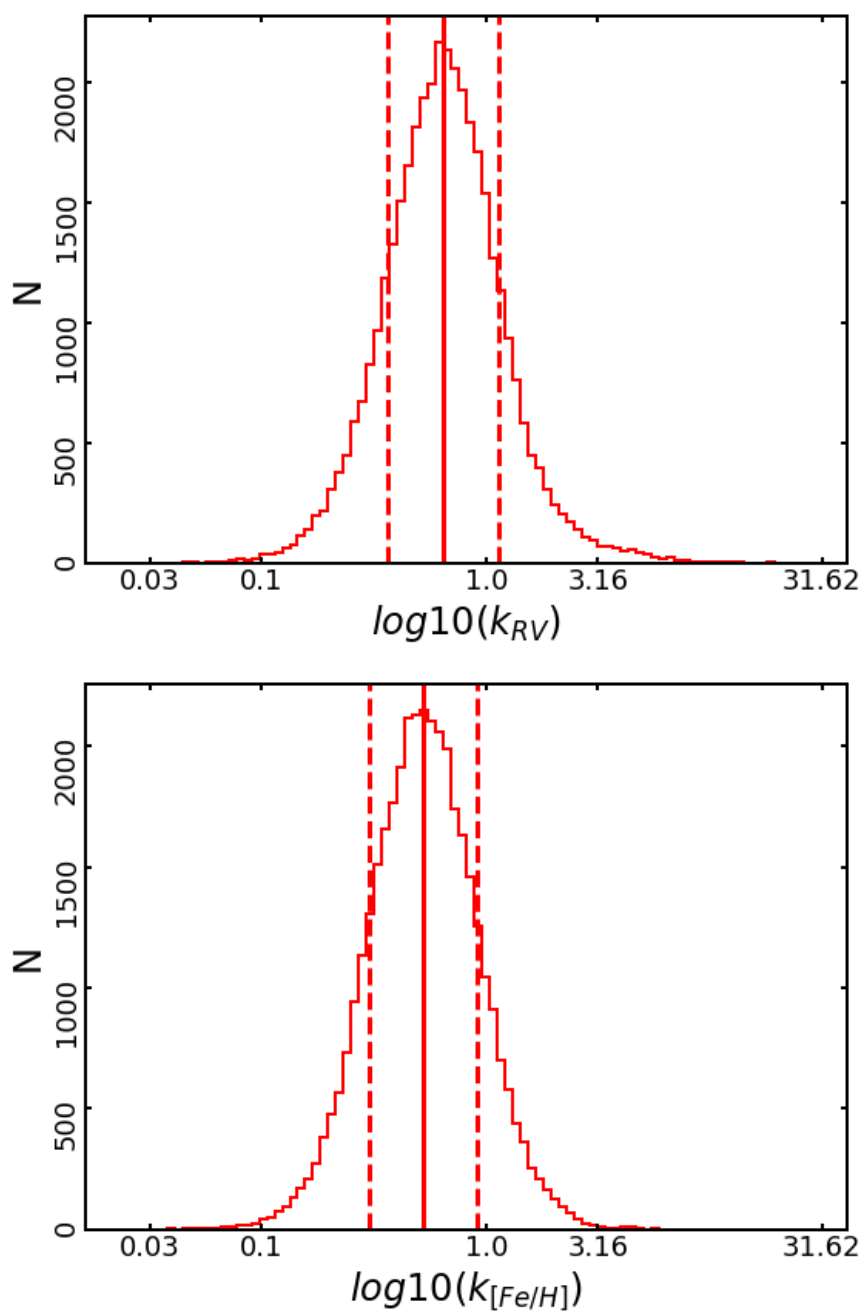


图 3.4 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得重复观测 5 次以上恒星样本 (37, 273 颗恒星) 的观测误差改正因子 $\log_{10}(k)$ 的分布图: 上下两图分别是视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 $\log_{10}(k_{RV})$ 和 $\log_{10}(k_{[Fe/H]})$ 的直方图, 其中直线和虚线分别是其分布的中位值和 1σ 的位置。

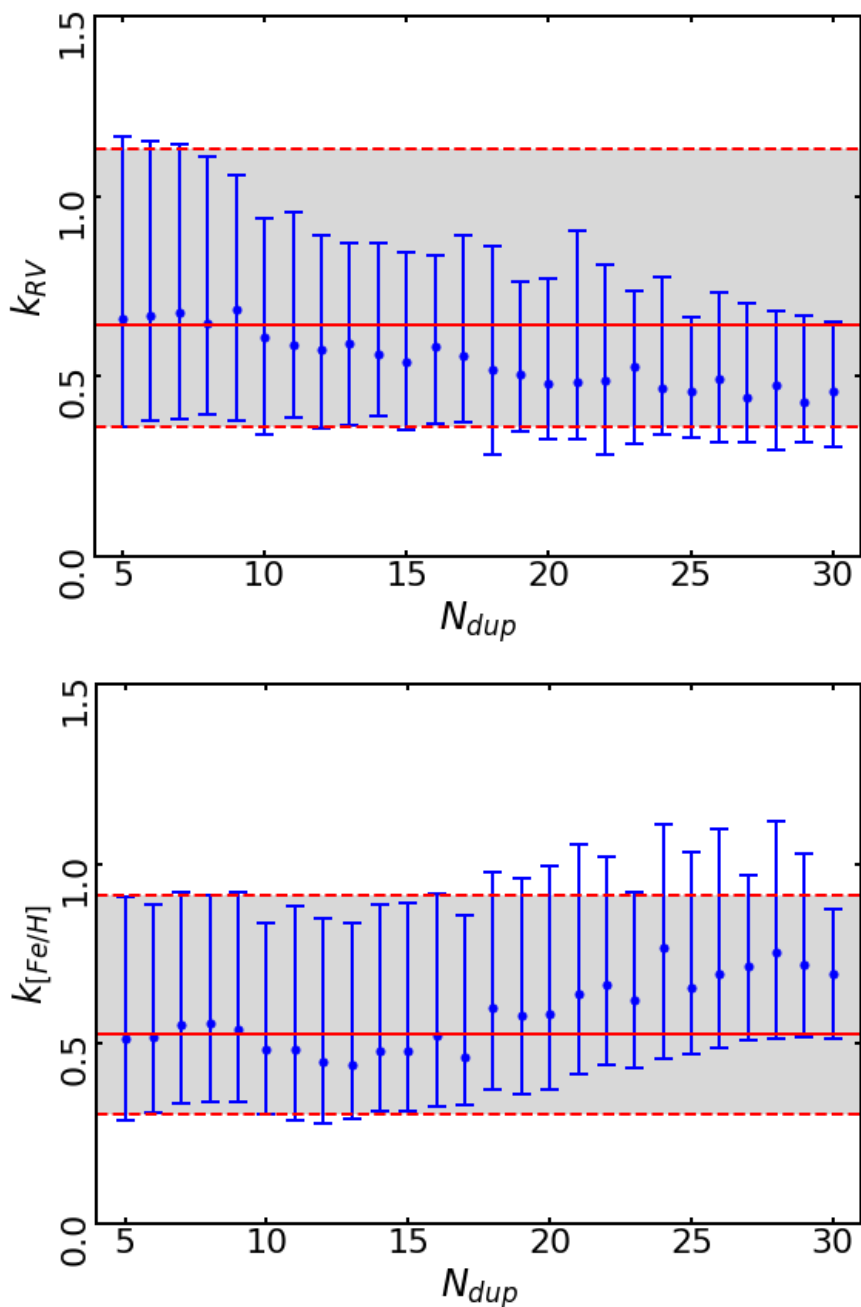


图 3.5 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得重复观测 5 次以上的源的视向速度观测误差改正因子 k_{RV} 和金属丰度观测误差改正因子 $k_{[Fe/H]}$ 随重复观测次数 N_{dup} 的变化：上下图分别是 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 随重复观测次数的变化，其中红实线和红虚线分别是所有 5 次以上重复观测源的改正因子的中位值及其 1σ 的范围；蓝点是各重复观测次数相应的源的改正因子的中位值，蓝色误差棒是其 1σ 范围。

3.2 混合模型的最佳拟合参数

在第3.1.1章节中得到 132 个疏散星团的拟合样本，此拟合样本既有 CG20 中基于 *Gaia* DR2 自行 μ_α^* 和 μ_δ ，视差 ϖ 利用 UPMASK 得到的团成员星信息，又有 LAMOST DR7 低分辨率光谱观测所得恒星参数。本文中，我们将此 132 个拟合样本结合第2章中基于 LAMOST DR7 低分辨率光谱所得恒星视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上所构建的包括团星和场星的混合模型，得到各个疏散星团拟合参数 (团星比 f_c 、平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 及其内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[Fe/H],int}$) 的概率密度分布及其最佳拟合参数。最终，得到 112 个疏散星团有可信的拟合结果，其中拟合参数的 PDF 的中位值及其 16%–84% 范围的均值分别作为其最佳拟合参数和其拟合误差。

3.2.1 表观弥散的最佳拟合结果

不考虑 LAMOST 低分辨率光谱所得视向速度和金属丰度的观测误差时，根据团星和场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的混合模型，利用 MCMC 方法，我们得到 112 个疏散星团的团星比 f_c 、平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 及其表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 。这里以疏散星团 NGC 2682、NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 1245 为例，说明我们的混合模型的结果，见图3.6-图3.9。

图3.6是 MCMC 方法得到疏散星团 NGC 2682 拟合样本中各拟合参数 (团星比 f_c 、平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 及其内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[Fe/H],int}$) 的概率密度分布函数 (PDF)，其最佳拟合参数分别为: $f_c = 0.91_{-0.02}^{+0.03}$ ， $\overline{RV} = 29.88_{-0.29}^{+0.28} \text{ kms}^{-1}$ ， $\sigma_{RV,app} = 0.49 \pm 0.03 \text{ kms}^{-1}$ ， $\overline{[Fe/H]} = 0.01 \pm 0.01 \text{ dex}$ ， $\sigma_{[Fe/H],int} = -1.23 \pm 0.03 \text{ dex}$ 。

图3.7是疏散星团 NGC 2682 拟合样本在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布。图中彩色散点表示拟合样本，颜色条表示 CG20 所给团成员概率，红色大点是 MCMC 方法得到的拟合参数 (平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$) 最佳值，红色误差棒是其表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 的最佳拟合。从图中，我们可以看到，由 CG20 所给疏散星团 NGC 2682 的成员星中那些离散的高概率成员 (绿点) 在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上表现为场星，这就说明 CG20 所得团成员中有场星混入。

图3.8是疏散星团 NGC 2682 拟合样本和周边场星在视向速度 RV 和金属丰

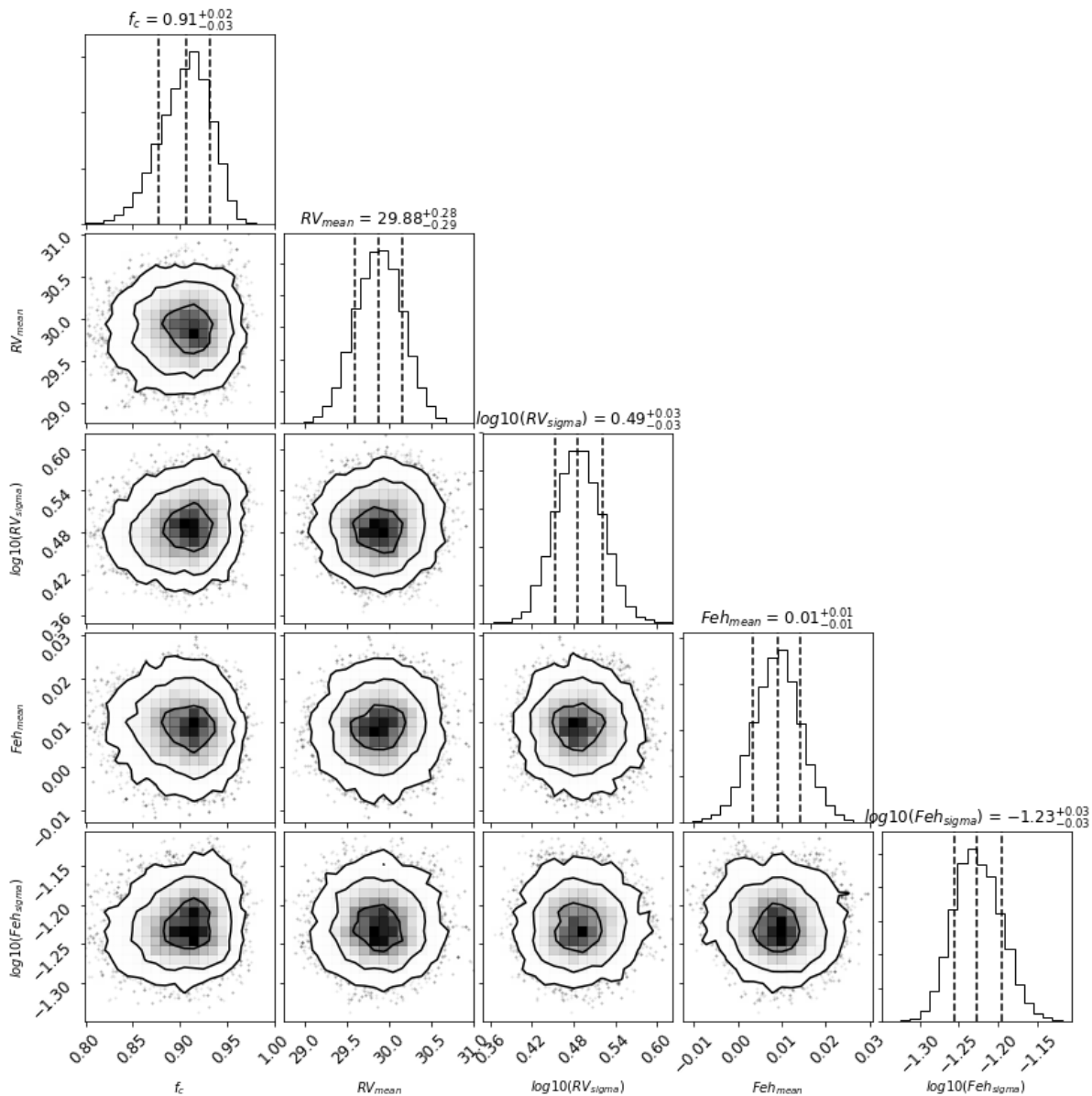


图 3.6 MCMC 方法得到疏散星团 NGC 2682 拟合样本中各拟合参数的概率密度分布函数 (PDF): 每一列的第一张图表示不同参数的 PDF, 中间虚线是其中位值所在位置, 是其最佳拟合参数; 左右两条虚线是其 1σ 范围。

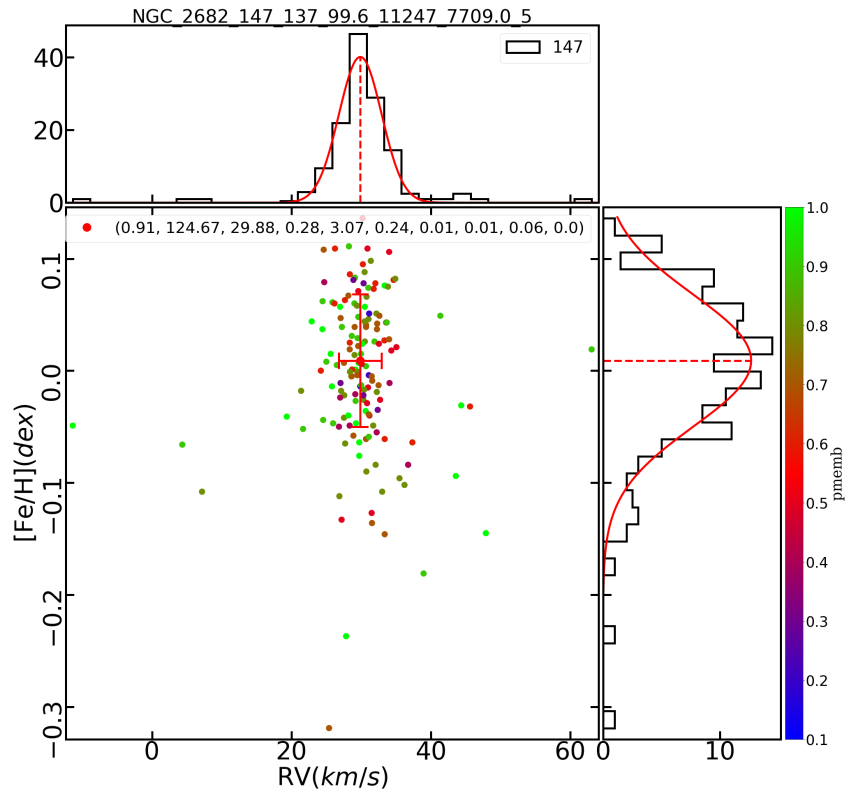


图 3.7 疏散星团 NGC 2682 拟合样本在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布：彩色散点是此团的拟合样本，颜色条表示 CG20 所给团成员概率，红色大点是 MCMC 方法得到的拟合参数 (平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$) 最佳值，红色误差棒是其表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ 的最佳拟合；上图和右图是其考虑重复观测之后的直方图，红线是其最佳拟合参数所对应的高斯分布，红虚线是其平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 的佳拟合值。

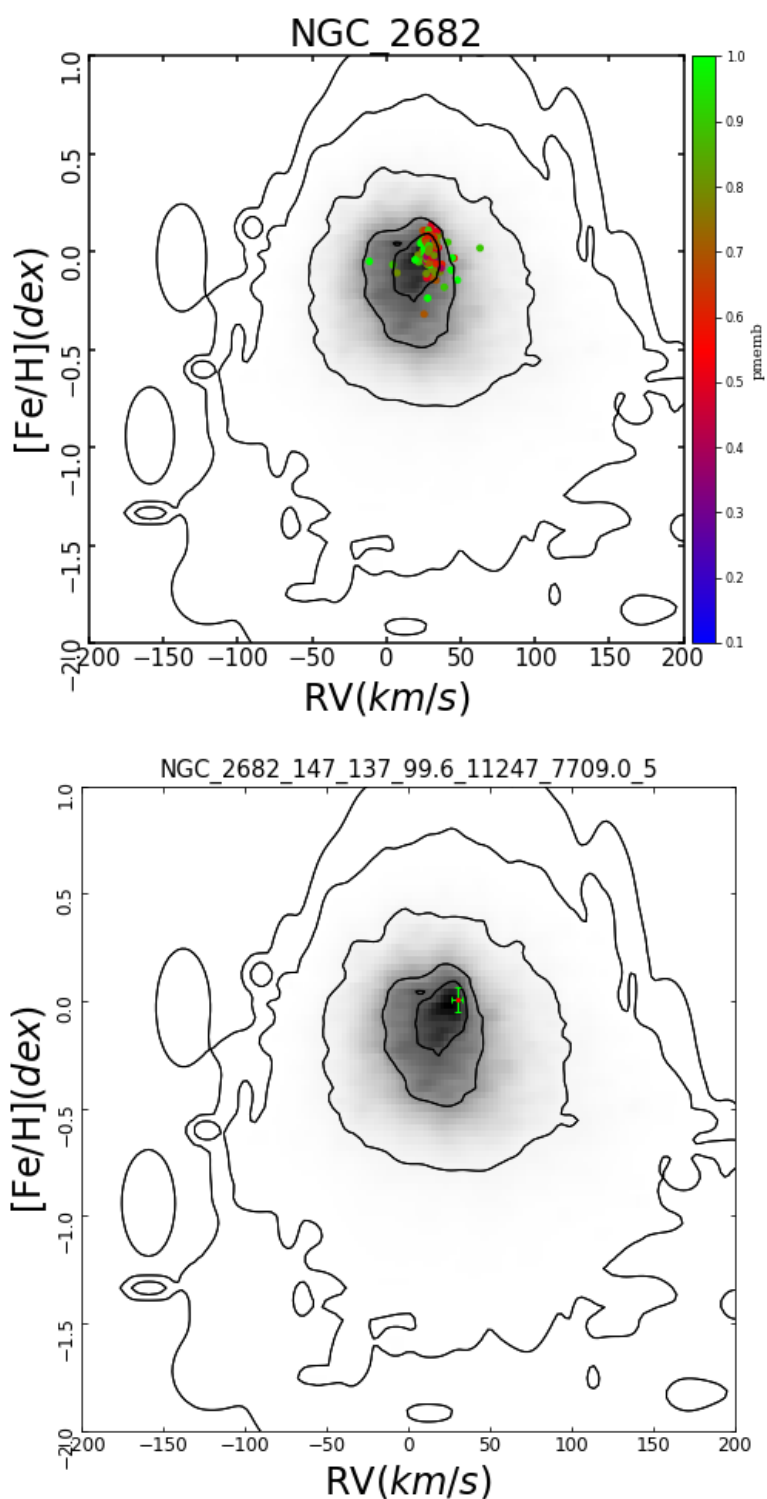


图 3.8 疏散星团 NGC 2682 拟合样本和周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布: 上图中散点表示拟合样本, 颜色条表示 CG20 所给成员星概率, 下图是 MCMC 方法得到最佳拟合参数 (平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 、表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$); 上下两幅图中的等高线是场星经过 smooth 之后的概率密度分布。

度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 两维空间上的分布，红色点及绿色的误差棒是其最佳拟合参数。从上图我们可以看到，CG20 所给疏散星团 NGC 2682 的成员星中那些离散的高概率成员可能是混入的场星。

图3.9是三个疏散星团 NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 1245 拟合样本及其周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 两维空间上的分布及其最佳拟合参数。从图中可以看出疏散星团 NGC 2632、NGC 1039 和疏散星团 NGC 1245 的拟合样本中均有 CG20 给的成员星中的离散高概率成员星是混入的场星，利用混合模型得疏散星团视向速度和金属丰度的性质可以降低场星混入的影响，得到更靠谱的疏散星团视向速度和金属丰度均值及其弥散。

图3.10是疏散星团 Gulliver 26 和 Czernik 23 拟合样本及其周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 两维空间上的分布。从图中可以看出，这两个疏散星团高成员概率的成员星很少，而且拟合样本在视向速度和金属丰度两维空间上的分布特别弥散，其与周边场星混合度比较高。对于这类 CG20 所给团成员在视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 两维空间上极其弥散的疏散星团，我们的混合模型不能得到很好的结果。最终，我们利用 MCMC 方法得到 112 个疏散星团的最佳拟合参数(平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[\text{Fe}/\text{H}]}$ 、表观弥散 $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H},app]}$)，其拟合样本及周边场星信息见表格A.1，其最佳拟合参数如表A.2所示。

3.2.2 内禀弥散的最佳拟合结果

考虑视向速度的观测误差 RV_{err} 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]_{err}$ 及其观测误差改正因子 $k_{RV} = 0.644$ 和 $k_{[\text{Fe}/\text{H}]} = 0.526$ 时，根据团星和场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 两维空间上的混合模型，利用 MCMC 方法，我们得到疏散星团的平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[\text{Fe}/\text{H}]}$ 和内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H},int]}$ 。112 个疏散星团的最佳拟合结果见表格A.3，这里我们以疏散星团 NGC 1039 和 NGC 2682 为例，见图3.11-图3.14。

图3.11和图3.13分别是疏散星团 NGC 1039 和 NGC 2682 利用 MCMC 得到的模型最佳拟合参数(团星比例 f_c 、平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[\text{Fe}/\text{H}]}$ 和内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H},int]}$) 的 PDF 分布，从图中我们可以看到，疏散星团 NGC 1039 的各个参数的 PDF 分布均符合很好的高斯分布，我们选用其中位值作为参数的最佳拟合结果；而对于疏散星团 NGC 2682，其内禀视向速度的对数不服从高斯分布，我们只能得到其上限(比如: 84% 的位置)，无法得到其下限。这说明

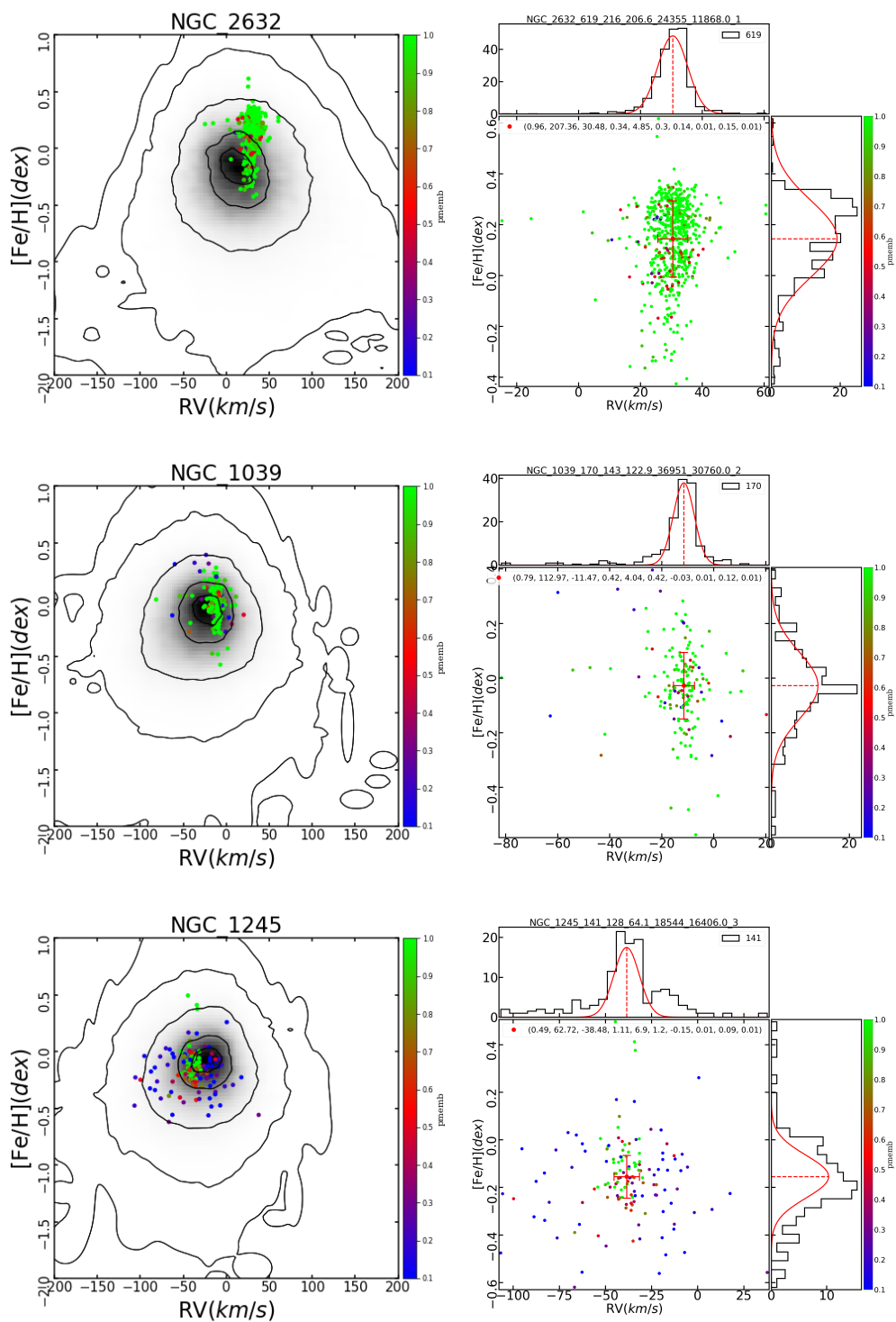


图 3.9 疏散星团 NGC 2632、NGC 1039 和 NGC 1245 拟合样本及其周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 [Fe/H] 二维空间上的分布和三个疏散星团的最佳拟合参数结果，图中各标示分别见图3.7和3.8。

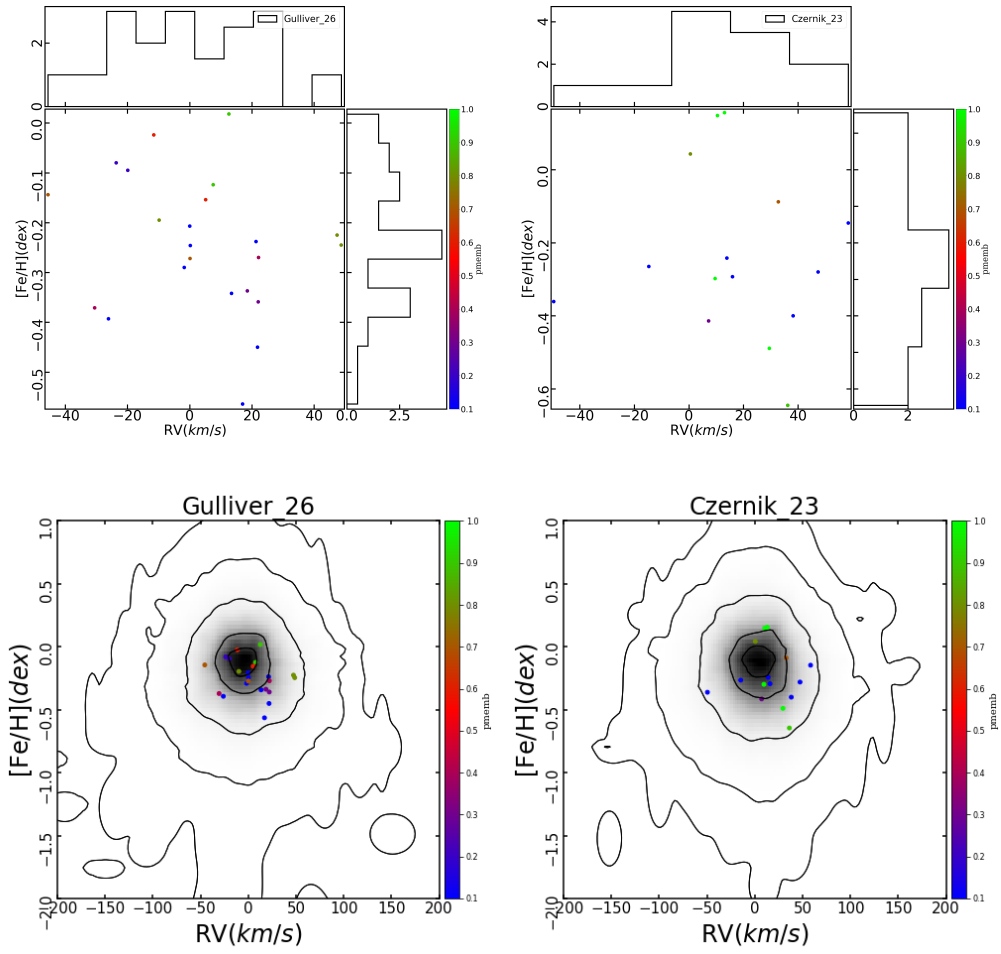


图 3.10 疏散星团 Gulliver 26 和 Czernik 23 拟合样本及周边场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布，图中彩色散点是 CG20 所给疏散星团的成员星，颜色条是 CG20 所给疏散星团的成员概率。

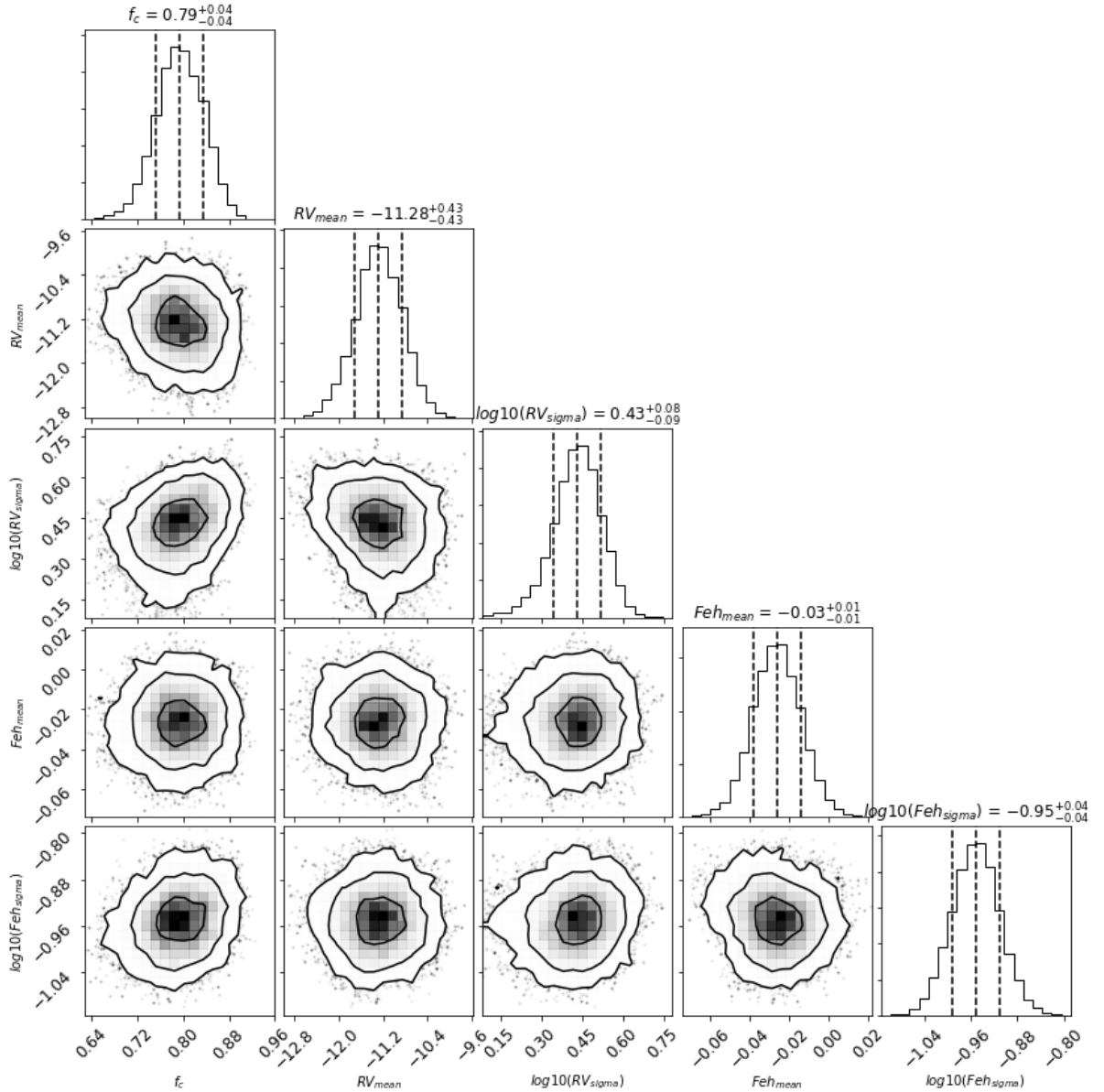


图 3.11 MCMC 方法得到疏散星团 NGC 1039 拟合样本中各拟合参数 (平均视向速度、平均金属丰度及其内禀弥散) 的概率密度分布函数 (PDF): 每一列的第一张图表示不同参数的 PDF, 中间虚线是其中位值所在位置, 是其最佳拟合参数; 左右两条虚线是其 1σ 范围。

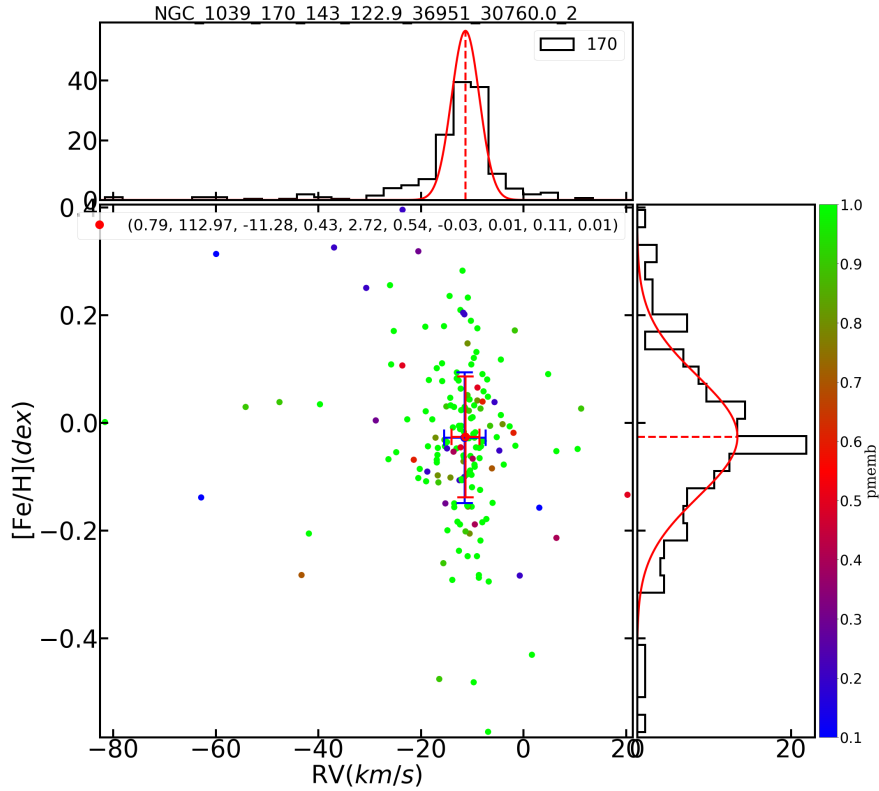


图 3.12 疏散星团 NGC 1039 拟合样本在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布：其中颜色条表示 CG20 所给成员星概率，蓝点和红点分别对应不考虑和考虑视向速度和金属丰度观测误差及其改正因子两种情况下，MCMC 方法所得拟合参数（平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ ）的最佳值，蓝色和红色误差棒分别是这两种情况所得表观弥散（ $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ ）和内禀弥散（ $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],int}$ ）的最佳拟合结果。上图和右图是其考虑重复观测之后的直方图，红线是考虑观测误差及其改正因子时所得最佳拟合参数所对应的高斯分布，红虚线是其平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 的最佳拟合值。

LAMOST DR7 低分辨率光谱观测对于这类内禀弥散较小的疏散星团无法准确给出其内禀弥散, 只能给出其上限, 但对于研究疏散星团内部运动等具有重要的参考价值。

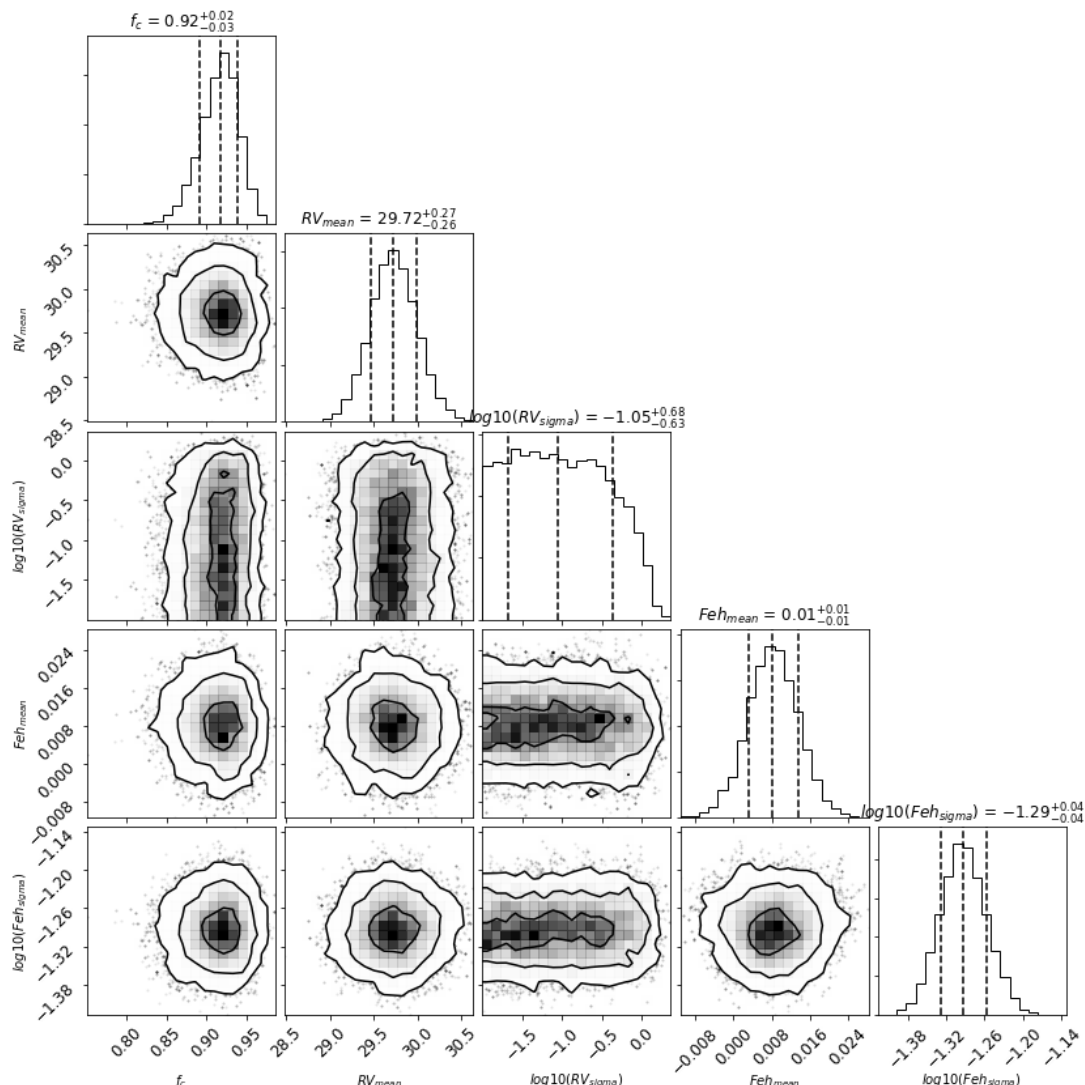


图 3.13 MCMC 方法得到疏散星团 NGC 2682 拟合样本中各拟合参数 (平均视向速度、平均金属丰度及其内禀弥散) 的概率密度分布函数 (PDF): 每一列的第一张图表示不同参数的 PDF, 中间虚线是其中位值所在位置, 是其最佳拟合参数; 左右两条虚线是其 1σ 范围。

图3.12和图3.14分别是疏散星团 NGC 1039 和 NGC 2682 拟合样本视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布, 及其利用 MCMC 得到的模型最佳拟合参数 (团星比例 f_c 、平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 和内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 、 $\sigma_{[Fe/H],int}$)。从图中我们可以看出, 考虑和不考虑视向速度和金属丰度的观测误差

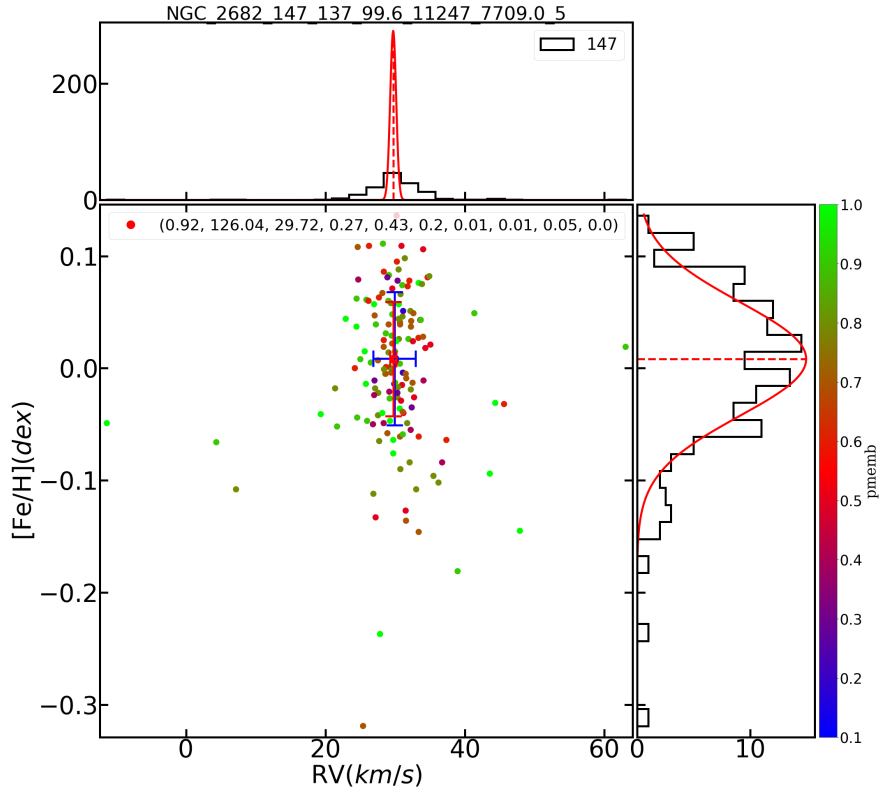


图 3.14 疏散星团 NGC 2682 拟合样本在视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 两维空间上的分布：其中颜色条表示 CG20 所给成员星概率，蓝点和红点分别对应不考虑和考虑视向速度和金属丰度观测误差及其改正因子两种情况下，MCMC 方法所得拟合参数（平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ ）的最佳值，蓝色和红色误差棒分别是这两种情况所得表观弥散（ $\sigma_{RV,app}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],app}$ ）和内禀弥散（ $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],int}$ ）的最佳拟合结果。上图和右图是其考虑重复观测之后的直方图，红线是考虑观测误差及其改正因子时所得最佳拟合参数所对应的高斯分布，红虚线是其平均视向速度 \overline{RV} 和平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 的最佳拟合值。

及其改正因子的两种情况下，通过混合模型所得疏散星团的视向速度和金属丰度的均值基本一致，但内禀弥散明显小于表观弥散，这说明基于 LAMOST 低分辨率光谱研究疏散星团运动学和化学性质时，考虑观测误差及其改正因子是极其必要的。而且，通过团星和场星的混合模型，我们可以降低场星混入的影响，得到更加准确的疏散星团的视向速度及金属丰度的均值及其内禀弥散。这对于研究恒星形成历史和演化，以及银河系结构和化学演化均具有重大意义。

3.3 分析与比对

3.3.1 表观弥散和内禀弥散拟合结果的分析与比较

在不考虑和考虑视向速度和金属丰度的观测误差 (RV_{err} 、 $[Fe/H]_{\text{err}}$) 及其观测误差改正因子 ($k_{RV} = 0.644$ 和 $k_{[Fe/H]} = 0.526$) 两种情况下，我们分别得到拟合样本大于 10 颗恒星的 112 个疏散星团的表观弥散 ($\sigma_{RV,\text{app}}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],\text{app}}$) 和内禀弥散 ($\sigma_{RV,\text{int}}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],\text{int}}$)，两者均能得到其平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $\overline{[Fe/H]}$ 。

图3.15是 112 个疏散星团不考虑和考虑视向速度和金属丰度的观测误差 (RV_{err} 、 $[Fe/H]_{\text{err}}$) 及其观测误差改正因子 (k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$) 时，混合模型所得最佳拟合参数的比较。从图中可以看出，两种情况下，大多数疏散星团的团星比基本一致。虽然个别疏散星团相差大，但是在误差范围内；其视向速度和金属丰度的均值基本上均分布在 1 : 1 的对角线上；绝大数疏散星团的视向速度内禀弥散 $\sigma_{RV,\text{int}}$ 明显小于其表观弥散 $\sigma_{RV,\text{app}}$ ，这是因为疏散星团的表观弥散包括其内禀弥散和观测误差两部分。有个别疏散星团的内禀弥散 $\sigma_{RV,\text{int}}$ 大于其表观弥散，这是因为那两个疏散星团的视向速度内禀弥散只能给出上限，大于其表观弥散实属正常，且考虑拟合参数的拟合误差，也在合理的范围内。说明在基于 LAMOST 低分辨率光谱数据得疏散星团视向速度和金属丰度性质时，考虑视向速度和金属丰度的观测误差及其观测误差改正因子是极其必要的。

我们知道，当星团达到位力平衡时，空间速度弥散正比于 $\sigma_v(\text{kms}^{-1}) \propto \sqrt{\frac{M_D}{R_{\text{eff}}}}$ (Spitzer, 1987), 其中 M_D 是其动力学质量， R_{eff} 是其有效半光半径。疏散星团是被引力束缚的恒星系统，其典型大小为 1 pc 量级，质量通常 $< 10^5 M_{\odot}$ ，其中 M_{\odot} 是太阳质量，故疏散星团成员星的视向速度内禀弥散很小 ($\sim 1 \text{kms}^{-1}$)；球状星团的典型大小几个 pc，典型质量为 $10^6 M_{\odot}$ ，因此球状星团的典型速度弥散为几 km

s^{-1} 。但是 LAMOST DR7 低分辨率光谱视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 的测量精度分别为: 5.0 km s^{-1} 和 0.15 dex (Luo 等, 2015; Xiang 等, 2015), 而疏散星团典型的视向速度内禀弥散约 1 km s^{-1} (Mermilliod 等, 2009; Bonatto 和 Bica, 2011)。对于内禀弥散小的疏散星团, LAMOST DR7 低分辨率光谱视向速度观测精度太大, 不能很好的约束疏散星团视向速度的内禀弥散, 只能给出 84% 的上限值。112 个疏散星团里面有 34 个疏散星团可以通过混合模型得到视向速度内禀弥散的最佳拟合值, 余下的疏散星团给其上限值 (84% 所在位置)。对于金属丰度的内禀弥散, 有 104 个疏散星团可以通过混合模型得到其最佳拟合值, 剩下的 8 个疏散星团也是只给出其上限值 (84% 所在位置)。

图3.16是 112 个疏散星团金属丰度内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 的直方图。图中红实线和绿实线分别是其中位值 ($Med = 0.09 \text{ dex}$) 和峰值 ($Peak = 0.073 \text{ dex}$), 两条红虚线是其弥散范围 ($[0.056, 0.156]$)。由此, 可以看出疏散星团金属丰度内禀弥散的典型值: $0.09^{+0.07}_{-0.03} \text{ dex}$ 。还有个别疏散星团金属丰度内禀弥散 $\sigma_{[Fe/H],int}$ 大于 0.2 dex 。从图中可以看出, 疏散星团内部的确存在一定的化学丰度弥散。这种现象可能是有以下两种原因: 其一, 形成疏散星团的巨分子云是由多个不同金属丰度的小分子云组成 (Gouliermis, 2018; Guszejnov 等, 2018); 其二, 疏散星团内部的大质量恒星快速演化, 造成疏散星团内部气体的化学增丰 (Krumholz 等, 2019)。

3.3.2 相同巡天而不同算法之间结果的比较

CG20 样本是基于 *Gaia* DR2 所给恒星高精度的两维自行和视差, 利用 UP-MASK 聚类方法得到 1229 个疏散星团的成员星及其成员概率。Zhong 等 (2020, 以下简称“ZJ20”) 等人基于此 1229 个疏散星团的高概率成员星 ($p_{memb} \geq 0.5$), 结合 LAMOST DR5 中低分辨率光谱所给恒星的视向速度 (由其光谱红移所得) 及恒星参数星表中的金属丰度, 对于有 6 颗以上高概率成员的疏散星团得到 295 个疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其表观弥散。其方法是分别在恒星视向速度和金属丰度一维空间上进行高斯拟合。其中 109 个疏散星团视向速度的均值及其弥散和 74 个疏散星团金属丰度的均值及其弥散是通过高斯拟合得到, 其余高概率成员星比较少或者弥散比较大的疏散星团, 直接计算其均值和标准差。

图3.17和图3.18是我们的样本和 ZJ20 样本中 75 个公共疏散星团的最佳拟合参数 (视向速度、金属丰度的均值及其表观弥散) 之间的比较。其中, 有 10 个疏散星团 (图中的蓝绿色的点) 因在 ZJ20 工作中高概率成员星太少或者在视向速度

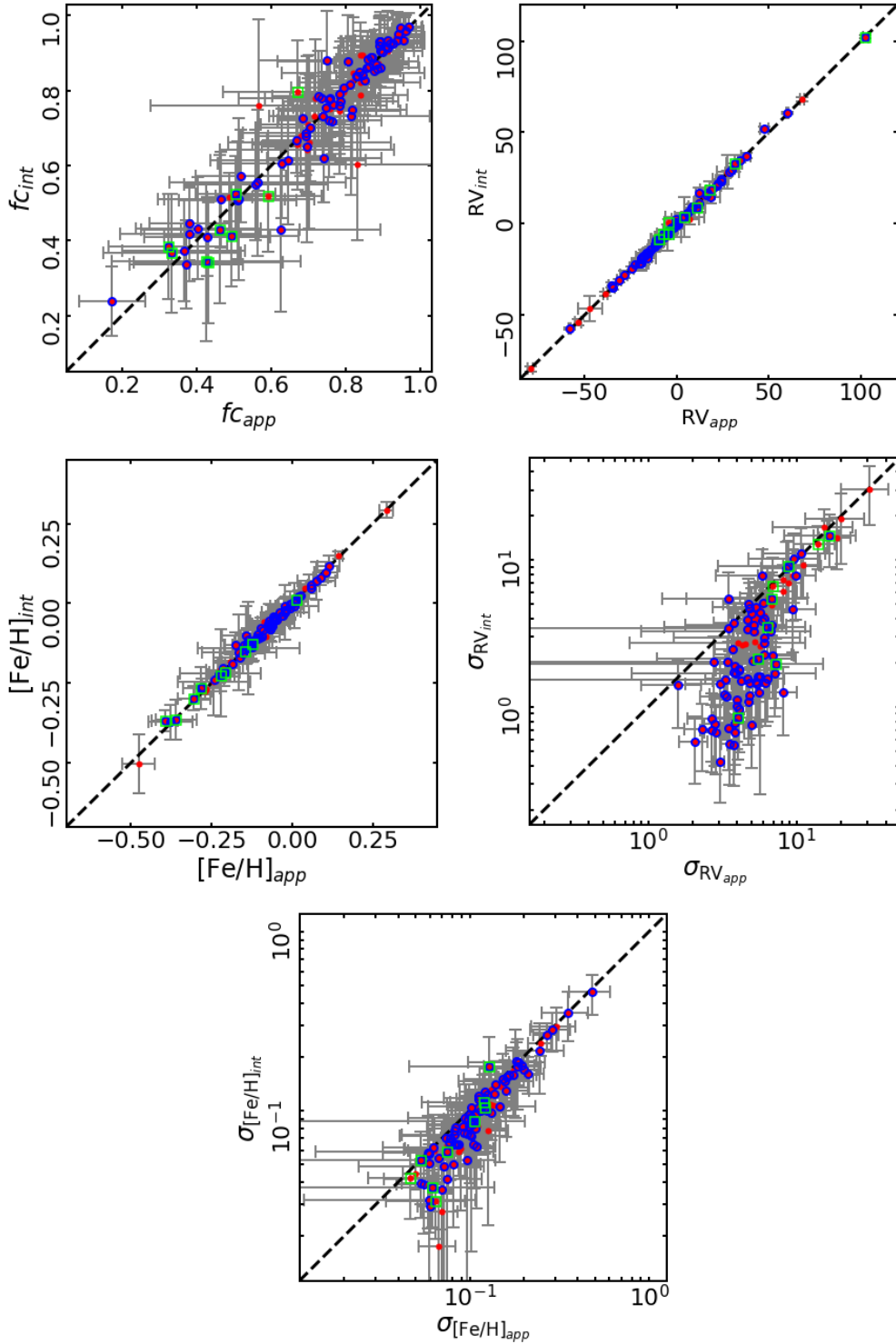


图 3.15 112 个疏散星团不考虑与考虑视向速度和金属丰度观测误差 RV_{err} 和 $[Fe/H]_{err}$ 及其改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ 时所得最佳拟合参数 (团星比、视向速度和金属丰度均值及其表观弥散和内禀弥散) 的关系: 图中红点表示 112 个疏散星团样本, 蓝点是视向速度的内禀弥散只能给出 84% 上限的 78 个疏散样本, 绿点是金属丰度的内禀弥散只能给出 84% 上限的 8 个疏散星团样本, 虚线是 1 : 1 线, 蓝色误差棒是其拟合误差。

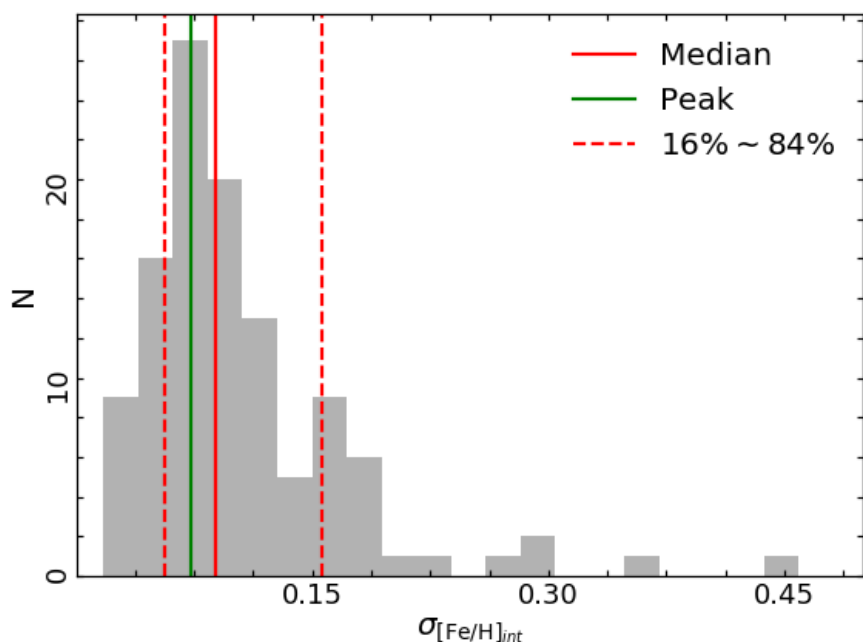


图 3.16 混合模型得到 112 个疏散星团金属丰度内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 的直方图：图中红实线和绿实线分别是其中位值 ($Med = 0.089$) 和峰值 ($Peak = 0.073$)，两条红虚线是其 1σ 范围。

RV 上弥散较大而未做高斯拟合，直接将其均值和标准差作为疏散星团视向速度的均值及其弥散。有 11 个疏散星团 (图中的深绿色的点) 因在 ZJ20 工作中高概率成员星太少或者在金属丰度 $[Fe/H]$ 上弥散较大而未做高斯拟合，直接将其均值和标准差作为疏散星团金属丰度的均值及其弥散两个样本之间的差异如图 3.17 和图 3.18 中的右边上下两张图所示，我们的样本和“ZJ20”公共的 75 个疏散星团最佳拟合参数偏移量分别为： $\Delta\overline{RV} = -0.14 \pm 4.28 \text{ km s}^{-1}$ (剔除差异比较大的疏散星团 King 5 所得)， $\Delta\overline{[Fe/H]} = 0.03 \pm 0.05 \text{ dex}$ (剔除差异比较大的三个疏散星团 Berkeley 72、Alessi 20、Koposov 63 所得)， $\Delta\overline{\sigma_{RV,app}} = -1.82 \pm 4.07 \text{ km s}^{-1}$ (剔除差异比较大的三个疏散星团 NGC 2194、King 5、Berkeley 72 所得)， $\Delta\overline{\sigma_{[Fe/H],app}} = 0.03 \pm 0.05 \text{ dex}$ (剔除差异比较大的四个疏散星团 Berkeley 72、IC 348、Alessi 20 和 Czernik 21 所得)。我们的样本和 ZJ20 样本所得结果的差异相对于 LAMOST 低分辨率光谱视向速度 RV 和金属丰度 $[Fe/H]$ 的测量精度 (5.0 km/s 和 0.15 dex, Luo 等, 2015; Xiang 等, 2015) 来说是个小量，因而均是基于 LAMOST 低分辨率光谱但不同算法所得疏散星团的视向速度和金属丰度的均值及弥散基本一致。

从图 3.17 中可以看出，我们基于混合模型所得疏散星团视向速度的均值和 ZJ20 绝大多数分布很一致，只有一个疏散星 King 5 在 ZJ20 是由 13 颗恒星直

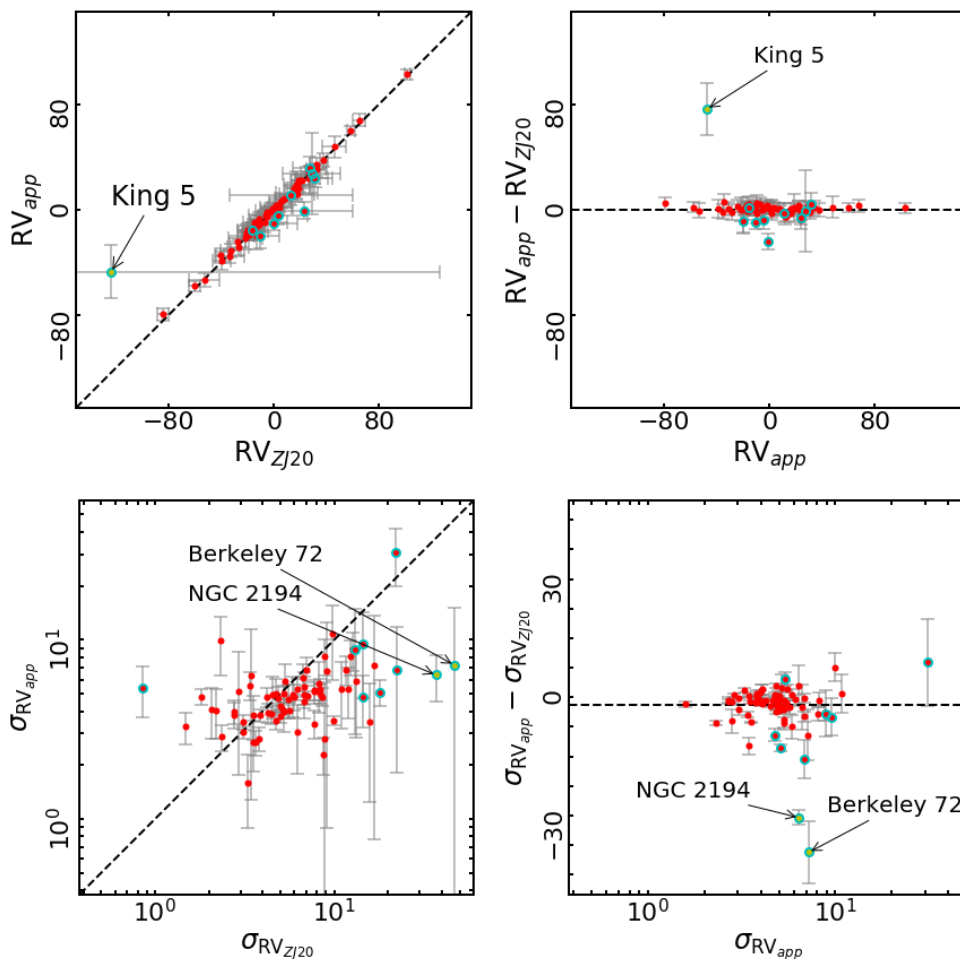


图 3.17 ZL20 样本和本文 112 个疏散星团公共的 75 个疏散星团视向速度的均值及其表观弥散的比较：第一列上下两图表示两个样本所得疏散星团视向速度的均值及其表观弥散的关系，虚线是 1 : 1 的线；右边上下两图表示两个样本中疏散星团视向速度的均值及其弥散之间的差异。红色散点是 75 个疏散星团，蓝绿色是 75 个疏散星团中在 ZJ20 样本中因高概率成员星太少或者成员星在视向速度 RV 上弥散特别大的未做高斯拟合处理的 10 个疏散星团。上图误差棒是疏散星团的表观弥散，下图误差棒是表观弥散的拟合误，黄点是两个工作中差异较大的疏散星团，比如 King 5，虚线表示排除黄点所代表的疏散星团后两者差异的均值

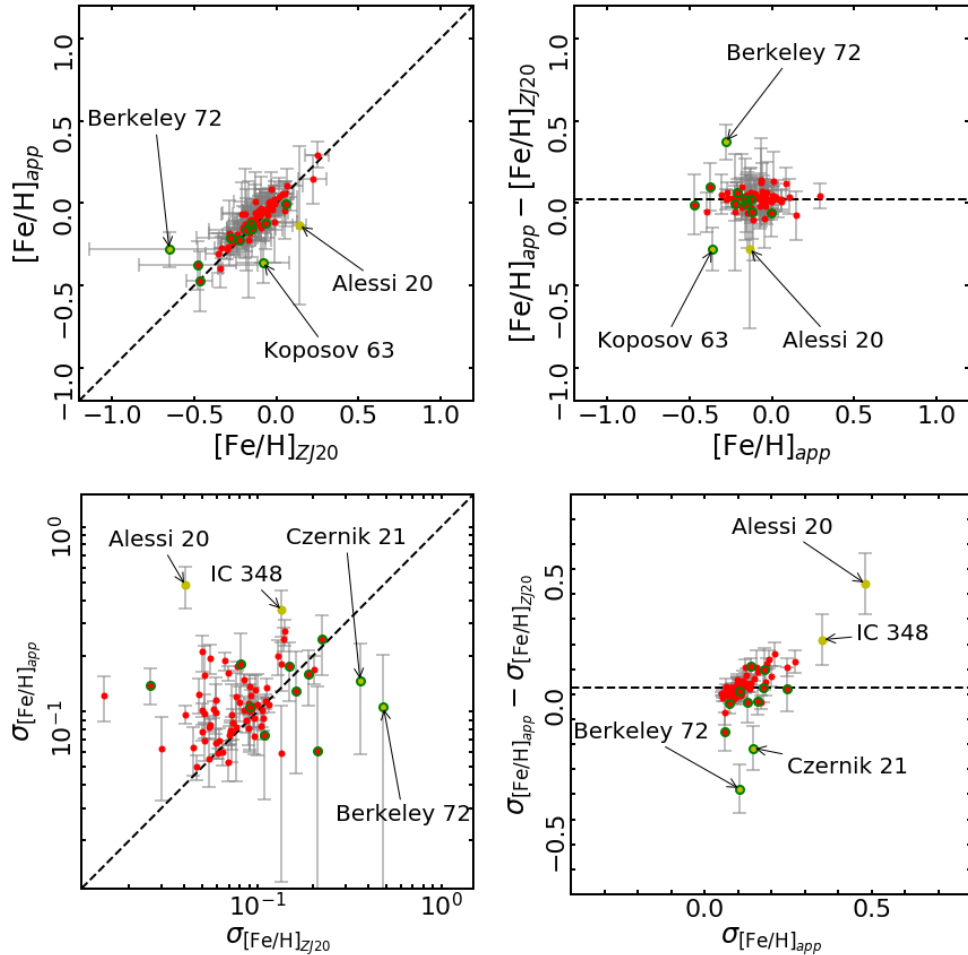


图 3.18 ZL20 样本和本文 112 个疏散星团公共的 75 个疏散星团金属丰度的均值及其表观弥散的比较：第一列上下两图表示两个样本所得疏散星团金属丰度的均值及其表观弥散的关系，虚线是 1 : 1 的线；右边上下两图表示两个样本中疏散星团金属丰度的均值及其弥散之间的差异。红色散点是最佳拟合参数，深绿色是 75 个疏散星团中在 ZJ20 样本中因高概率成员星太少或者成员星在金属丰度 $[Fe/H]$ 上弥散特别大的未做高斯拟合处理的 11 个疏散星团。上图误差棒是疏散星团的表观弥散，下图误差棒是表观弥散的拟合误差。黄点是两个工作中差异较大的疏散星团，比如 Berkeley 72，虚线表示排除黄点所代表的疏散星团后两者差异的均值

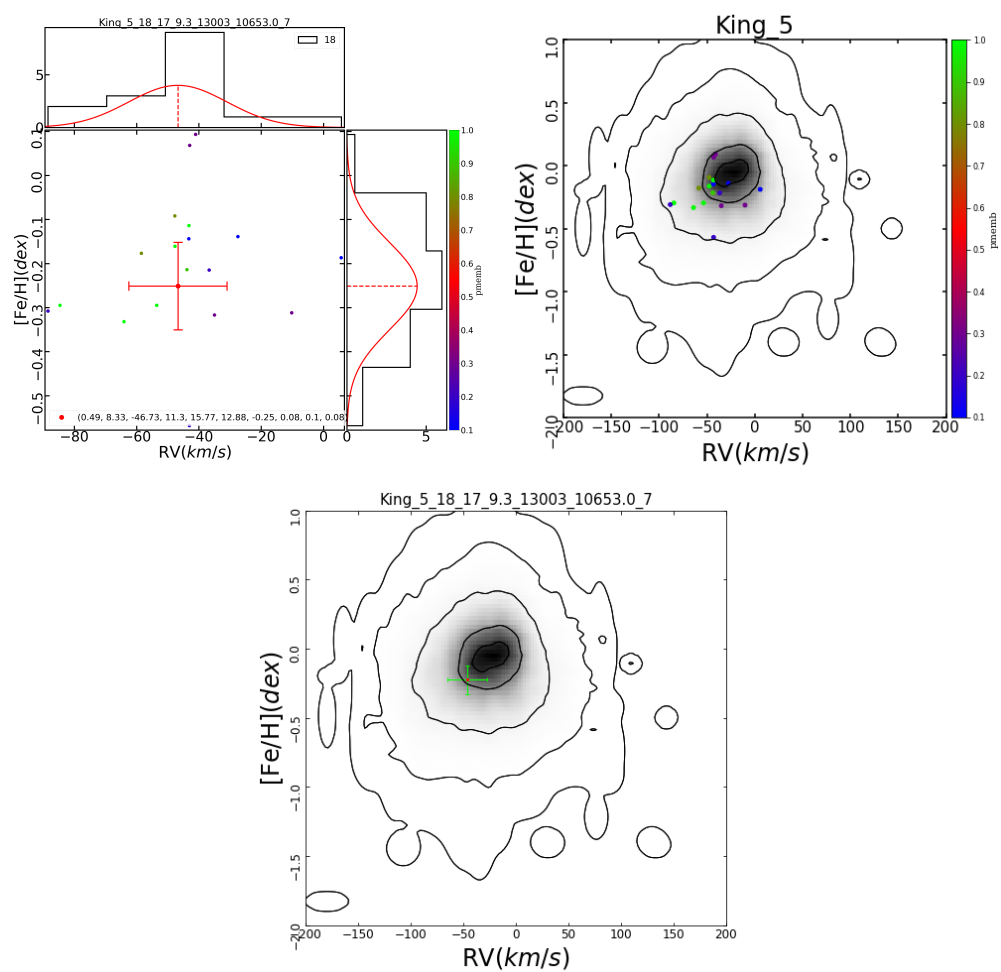


图 3.19 基于混合模型得到的疏散星团 King 5 最佳参数：图中各标示同图3.7和3.8。

接计算均值得到，之所以没有做高斯拟合，是因为 ZJ20 样本中所用此团的成员星在 LAMOST DR5 低分辨率光谱恒星视向速度空间分布比较弥散，由左上图也能发现，ZJ20 所得疏散星团 King 5 视向速度的弥散特别大。而我们的样本是由 LAMOST DR7 中 17 颗恒星的 18 次光谱观测，基于混合模型得到，拟合结果如图 3.19 所示。从图中可以看出，LAMOST DR7 低分辨率光谱得到 King 5 的平均视向速度应该小于 -100 km s^{-1} 。对于两者所得疏散星团视向速度的表观弥散，有三个疏散星团 NGC 2194、King 5、Berkeley 72 差异较大，这三个疏散星团在 ZJ20 中均是因为高概率成员星个数少或者视向速度弥散大而未做高斯拟合。我们的混合模型考虑了 CG20 所给疏散星团成员星中场星混入的影响，且疏散星团 King 5 和 Berkeley 72 的拟合样本的数目均比 ZJ20 多，我们的结果应该更可靠。

从图 3.18 中可以看出，两者所得疏散星团的平均金属丰度大多数基本一致，只有三个团的差异比较大，分别是 Alessi 20、Koposov 63、Berkeley 72。其中，Alessi 20 在两个样本中均有 11 颗恒星，ZJ20 对其在金属丰度上做高斯拟合，而我们基于视向速度和金属丰度二维空间上的包括团星和场星的混合模型得其最佳拟合参数，我们的结果更合理一些。对于 Koposov 63（在 ZJ20 样本中只有 3 颗高概率成员星，而我们的样本中有 32 次观测，11 颗恒星）、Berkeley 72（在 ZJ20 样本中只有 2 颗高概率成员星，而我们的样本中有 16 次观测，12 颗恒星的金属丰度）两个疏散星团在 ZJ20 中由于高概率成员星过少或者金属丰度弥散较大，均未做高斯拟合；我们的样本应该更可靠一些。对于两者所得疏散星团金属丰度的表观弥散基本一致，只有四个疏散星团（Berkeley 72、IC 348、Alessi 20 和 Czernik 21）金属丰度的表观弥散比较大。其中，Berkeley 72 和 Czernik 21 两个疏散星团在我们样本中的个数比 ZJ20 多，且 ZJ20 对这两个团均因为有金属丰度的高概率成员星过少或者金属丰度过于弥散而未做高斯拟合；其中 Alessi 20 的情况如上，IC 348 在 ZJ20 中只有 11 颗高概率成员星有金属丰度，而我们的样本中有 18 次观测，12 颗恒星。因而，对于这四个疏散星团金属丰度的表观弥散，我们的结果更可靠一些。

总体来说，ZJ20 与我们的工作都是基于 LAMOST 低分辨率光谱所得恒星视向速度和金属丰度得到疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其表观弥散，但算法不同。两种方法所得疏散星团视向速度和金属丰度的均值及表观弥散基本一致，个别不一样的疏散星团在 ZJ20 中因有视向速度或金属丰度个数过少或者

分布弥散比较大，不能做高斯拟合，直接计算其均值和标准差作为其均值和弥散。因而，对于这些疏散星团，我们基于视向速度和金属丰度两维空间上所构建的包括团星和场星的混合模型所得结果更可靠一些。

3.3.3 与其他巡天的结果比较

3.3.3.1 与 APOGEE 巡天的结果比较

Pang 等 (2018, 以下简称“Pang18”) 等人基于 APOGEE 高分辨率 ($R = 22,500$, 对于高信噪比的恒星, APOGEE 光谱巡天的典型视向速度误差小于 0.125 kms^{-1}) 光谱观测所得恒星视向速度和金属丰度及其观测误差, 构建团星和场星在视向速度和金属丰度两维空间上的两维双高斯混合模型, 得到 26 个疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其内禀弥散。本文中, 我们的样本和 Pang18 样本共有 12 个公共的疏散星团。两个光谱巡天项目, 不同分辨率, 场星不同模型所得疏散星团的最佳拟合参数之间的关系如图 3.20 和图 3.21 所示。

两个样本之间的差异见图 3.20 和 3.21, 我们的样本和 Pang18 样本公共的 12 个疏散星团最佳拟合参数 (平均视向速度 \overline{RV} 、平均金属丰度 $[\overline{Fe/H}]$ 、内禀弥散 $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{[Fe/H],int}$) 的偏移量分别为: $\Delta\overline{RV} = -4.65 \pm 2.74 \text{ kms}^{-1}$, $\Delta[\overline{Fe/H}] = -0.08 \pm 0.04 \text{ dex}$, $\Delta\overline{\sigma_{RV,int}} = 1.79 \pm 1.76 \text{ kms}^{-1}$ (剔除差异较大的疏散星团 King 5 所得), $\Delta\overline{\sigma_{[Fe/H],int}} = 0.02 \pm 0.03 \text{ dex}$ (剔除差异较大的疏散星团 Melotte 22 所得)。这 12 个公共疏散星团的平均视向速度偏移量是 $-4.65 \pm 2.74 \text{ kms}^{-1}$, 这和 ZJ20 中所得 LAMOST DR5 和 APOGEE 公共疏散星团平均视向速度的偏移量 ($-5.5 \pm 5.4 \text{ kms}^{-1}$) 保持一致, 两个工作所得 LAMOST 和 APOGEE 公共疏散星团平均金属丰度的偏离量分别是: $-0.08 \pm 0.04 \text{ dex}$, $-0.02 \pm 0.10 \text{ dex}$, 两者保持一致。从图 3.20 中可以看出, 我们基于 LAMOST 低分辨率和 Pang18 基于高分辨率 APOGEE 光谱得到疏散星团的视向速度内禀弥散, 我们的总体高于 Pang18。视向速度内禀弥散的拟合误差除了 King 5 在我们的样本中内禀弥散拟合误差比较大之外, 其他疏散星团的拟合误差相当, 个别疏散星团, 我们的拟合误差更小。从图 3.21 中可以看出, 我们对于疏散星团金属丰度内禀弥散的拟合误差整体小于 Pang18 所得。这说明两者的金属丰度内禀弥散分布在两者的拟合误差范围内是基本一致的。

总之, 我们的样本与 Pang18 所得视向速度和金属丰度均值的偏差是主要由 LAMOST 低分辨率光谱和 APOGEE 高分辨率光谱关于恒星视向速度和金属丰

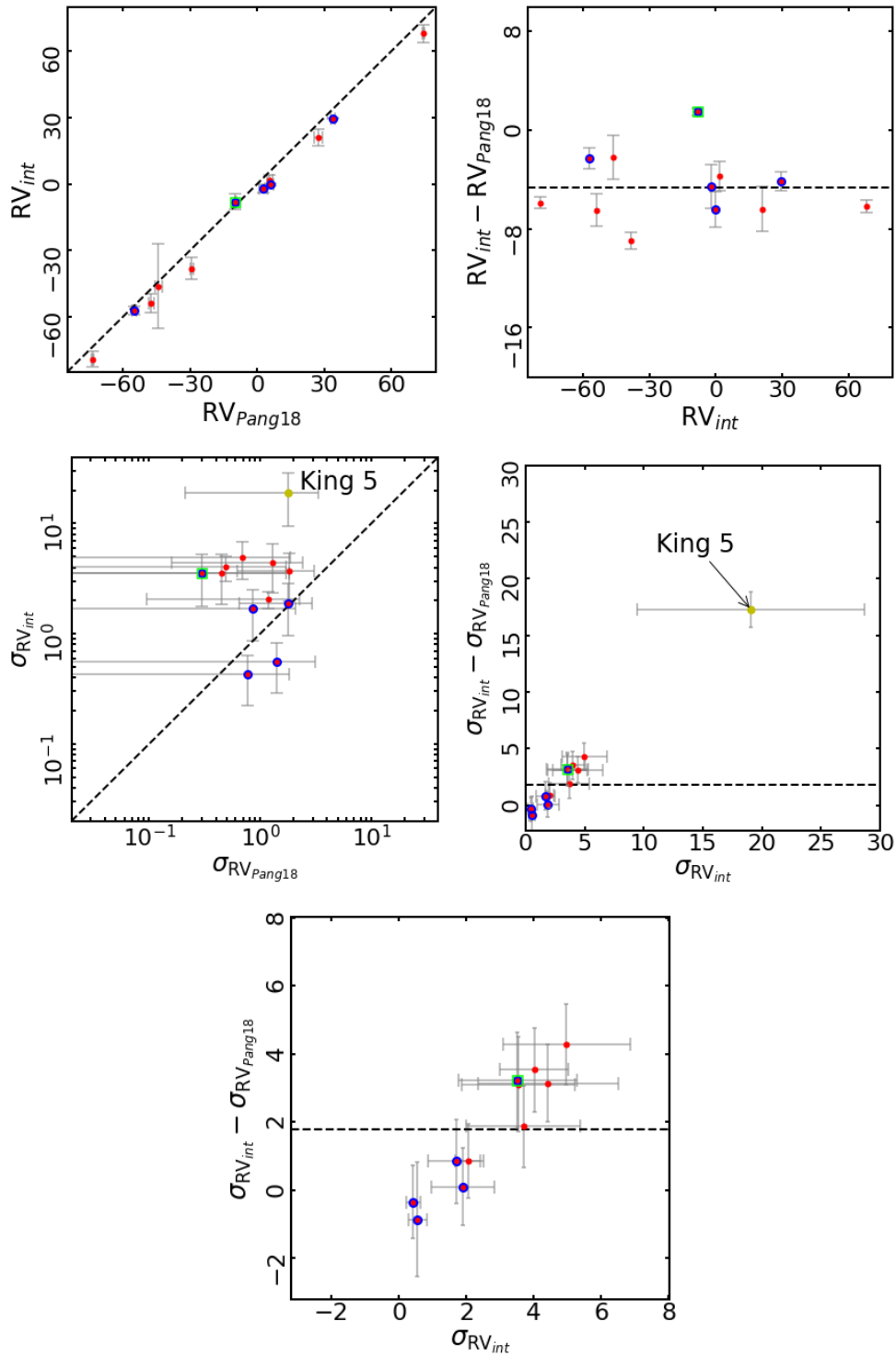


图 3.20 Pang18 样本和本文 112 个疏散星团中 12 个公共疏散星团视向速度的均值及其内禀弥散的比较：虚对角线是 1 : 1，虚横线是两者的差异，在 $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{RV,int} - \sigma_{RV,Pang18}$ 的关系中，横向和纵向误差棒分别表示 $\sigma_{RV,int}$ 和 $\sigma_{RV,Pang18}$ 的拟合误差，红蓝绿标识与图3.15相同。

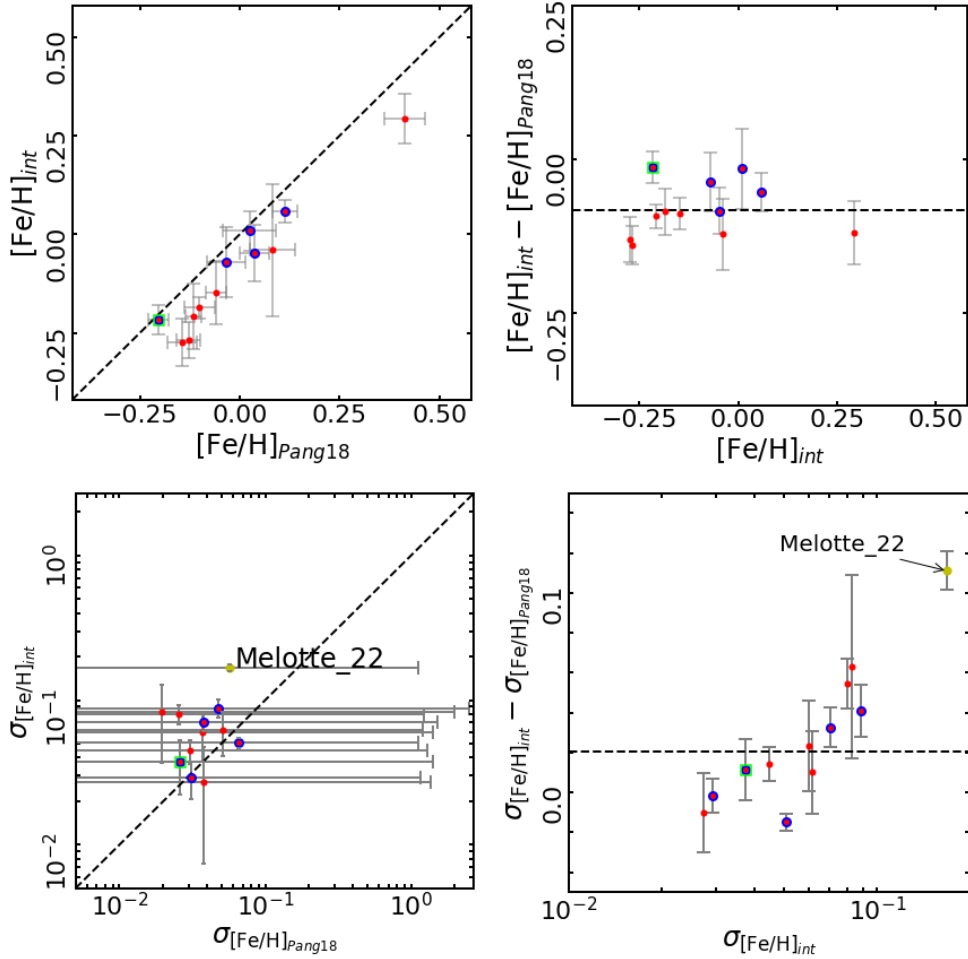


图 3.21 Pang18 样本和本文 112 个疏散星团中 12 个公共疏散星团金属丰度的均值及其内禀弥散的比较: 虚对角线是 1 : 1, 虚横线是两者的差异, 在 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{int}}}$ 和 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{int}} - \sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{Pang18}}}$ 的关系中, 横向和纵向误差棒分别表示 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{int}}}$ 和 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{Pang18}}}$ 的拟合误差, 红蓝绿标识与图3.15相同。

度测量的系统差 ($-4.7 \pm 9.8 \text{ kms}^{-1}$ 和 $-0.001 \pm 0.11 \text{ dex}$, Zhong 等, 2020) 所致, 除此之外, APOGEE 高分辨率光谱主要得到巨星的恒星参数, 而我们的样本所用 LAMOST 低分辨率光谱巡天主要是矮星的恒星参数。

3.3.3.2 与 *Gaia* DR2 巡天的结果比较

Soubiran 等 (2018, 以下简称“SC18”) 等人利用 CG20 所得 1229 个疏散星团的成员星结合 *Gaia* DR2 提供的视向速度, 最终得到 861 个疏散星团的 6 维参数 (空间位置、两维自行、视差和视向速度)。861 个疏散星团, 其中 35% 的疏散星团只有 1 颗成员星有 *Gaia* DR2 的视向速度, 将近 50% 的疏散星团至少有 3 颗成员星有视向速度。我们的 112 个疏散星团样本与 SC18 中 861 个疏散星团样本相同的有 71 个疏散星团, 这些疏散星团视向速度的均值及其内禀弥散的关系及其差异见图 3.22 所示, 这是 LAMOST DR7 与 *Gaia* DR2 巡天的差异, 其偏移量为: $\overline{\Delta RV} = 5.81 \pm 2.99 \text{ kms}^{-1}$ (剔除差异比较大的 5 个疏散星团 Berkeley 71、Koposov 63、NGC 2266、NGC 2194、NGC 2244 所得), $\overline{\Delta \sigma_{RV,int}} = 0.63 \pm 2.37 \text{ kms}^{-1}$ (剔除差异比较大的疏散星团 King 5 所得), 这个结果与 ZJ20 中结果 ($5.1 \pm 6.4 \text{ kms}^{-1}$) 一致。

在这 71 个公共疏散星团中, 我们的样本和 SC18 所得疏散星团视向速度的均值有 5 个星团 (Berkeley 71、Koposov 63、NGC 2266、NGC 2194、NGC 2244) 的差异比较大。其中, Berkeley 71 在我们的样本中有 11 次观测, 11 颗恒星, 但在 SC18 中只有 1 颗成员星用来计算此团的平均视向速度; NGC 2266 在我们的样本中有 34 次观测, 27 颗恒星, 但在 SC18 中只有 1 颗成员星用于计算此团的平均视向速度; NGC 2194 在我们的样本中有 36 次观测, 31 颗恒星, 但在 SC18 中只有 9 颗成员星, 其中 2 颗用于计算此团的平均视向速度; NGC 2244 在我们的样本中有 45 次观测, 38 颗恒星, 但在 SC18 中只有 5 颗成员星, 其中 3 颗用于计算此团的平均视向速度。由此可知, 对于这四个疏散星团, 我们的拟合样本大于 SC18 参与计算平均视向速度的成员星数目, 我们的结果应该更可靠一些。对于内禀弥散差异较大的疏散星团 King 5 在我们的样本中有 18 次观测, 17 颗恒星, 在 SC18 中有 16 颗成员星, 14 颗用于计算此团的视向速度内禀弥散。有图 3.19 可知, 疏散星团 King 5 的成员星在视向速度和金属丰度上分布较为弥散 (混合模型约束不好), SC18 基于 *Gaia* DR2 所得平均视向速度, 在恒星数差不多的情况下, 应该 SC18 更可靠一些。

总之，我们的样本与 SC18 所得视向速度和金属丰度均值的偏差是由 LAMOST 低分辨率光谱和 *Gaia* DR2 关于恒星视向速度测量的系统差 ($-4.9 \pm_{8.2}^{8.2} \text{ km s}^{-1}$, Zhong 等, 2020) 所致，4 个平均视向速度差异比较大的疏散星团，我们的样本多于 SC18，我们的结果更可靠一些。

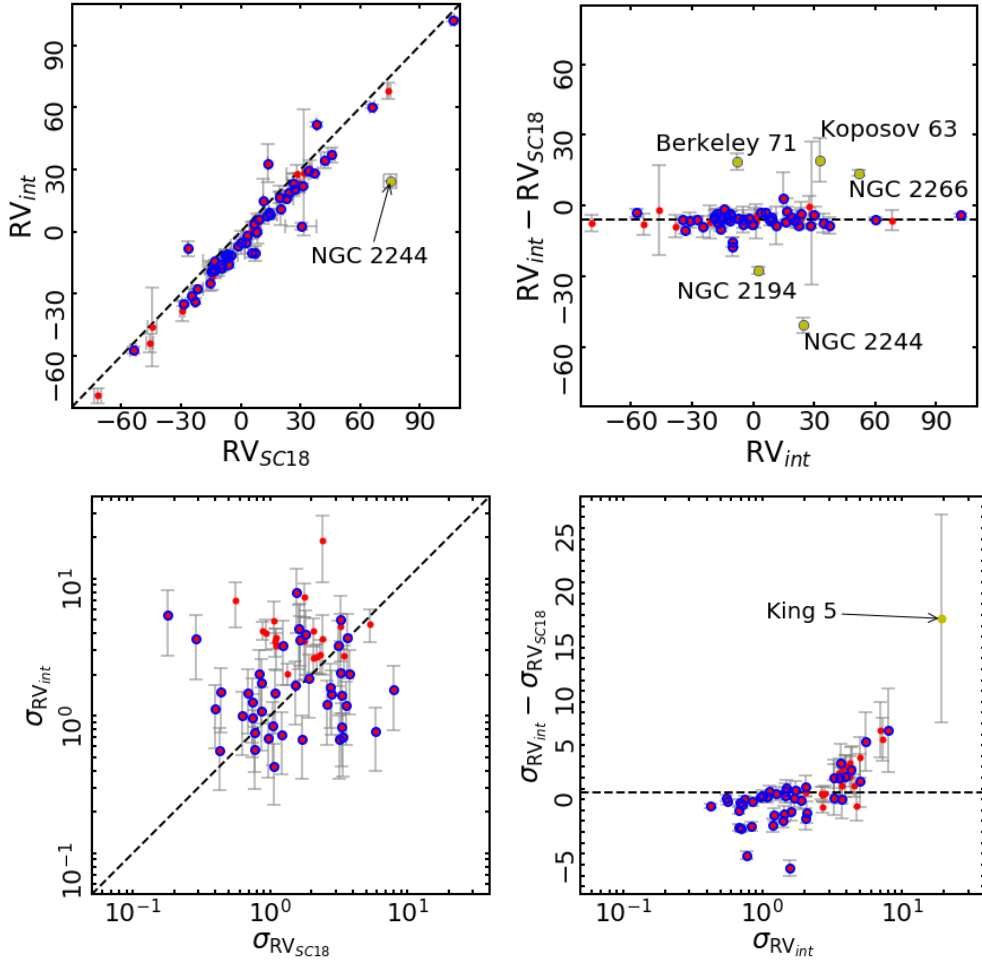


图 3.22 SC18 样本和本文 112 个疏散星团的 71 个公共疏散星团最佳参数 (视向速度的均值及其内禀弥散) 的差异: 图中红蓝标识与图 3.15 相同。71 个公共疏散星团在我们的样本和 SC18 样本之间的偏移量分别为: $\overline{\Delta RV} = 5.81 \pm 2.99 \text{ km s}^{-1}$, $\overline{\Delta \sigma_{RV,int}} = 0.63 \pm 2.37 \text{ km s}^{-1}$ 。

3.4 本章小结

本章主要介绍如何选取星团样本和其拟合样本，以及各个疏散星团中场星模型的构建。

通过 LAMOST 中 5 次以上重复源的光谱结果，我们得到了 LAMOST DR7 低分辨率光谱对恒星视向速度和金属丰度的观测误差改正因子 $k_{RV} = 0.644$ 和

$k_{[\text{Fe}/\text{H}]} = 0.526$ 。两者都小于 1，说明 LAMOST DR7 低分辨率光谱高估了恒星视向速度和金属丰度观测误差。根据视向速度和金属丰度的观测误差改正因子，我们可以准确地考虑两者的观测误差，并得到疏散星团可信的内禀弥散。

根据团星和场星在视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 两维空间上的混合模型，利用 MCMC 方法，我们得到 112 个疏散星团的最佳拟合参数（平均视向速度 $\overline{\text{RV}}$ 、平均金属丰度 $\overline{[\text{Fe}/\text{H}]}$ ，表观弥散 $\sigma_{\text{RV,app}}$ 、 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H},\text{app}]}$ 及其内禀弥散 $\sigma_{\text{RV,int}}$ 、 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H},\text{int}]}$ ）。考虑误差与否的情况下，混合模型所得疏散星团视向速度和金属丰度的均值基本一致；但内禀弥散明显小于表观弥散。这说明用 LAMOST 低分辨率光谱讨论疏散星团内部性质时，严格地考虑观测误差是必须的。由于疏散星团典型速度弥散 $\sim 1 \text{ km s}^{-1}$ ，LAMOST DR7 低分辨率光谱对恒星视向速度的测量精度 $\sim 5 \text{ km s}^{-1}$ ，因而有部分疏散星团不能得到其视向速度的内禀弥散，我们只给出其上限值 84% 的位置。

将我们的 112 个疏散星团样本与他人工作进行比较，得到如下几点结论：其一，与 ZJ20 样本有 75 个公共疏散星团，两者所得视向速度和金属丰度均值及其表观弥散的偏差分别为： $\Delta\overline{\text{RV}} = -0.14 \pm 4.28 \text{ km s}^{-1}$ ， $\Delta\overline{[\text{Fe}/\text{H}]} = 0.03 \pm 0.05 \text{ dex}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{\text{RV,app}}} = -1.82 \pm 4.07 \text{ km s}^{-1}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{[\text{Fe}/\text{H},\text{app}]}} = 0.03 \pm 0.05 \text{ dex}$ 。我们的样本和 ZJ20 样本所得结果的差异相对于 LAMOST 低分辨率光谱视向速度 RV 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的测量精度 (5.0 km/s 和 0.15 dex, Luo 等, 2015; Xiang 等, 2015) 来说是个小量，因而均是基于 LAMOST 低分辨率光谱但不同算法所得疏散星团的视向速度和金属丰度的均值及弥散基本一致。其二，与 Pang18 样本有 12 个公共疏散星团，两者所得视向速度和金属丰度均值及其内禀弥散的偏差分别为： $\Delta\overline{\text{RV}} = -4.65 \pm 2.74 \text{ km s}^{-1}$ ， $\Delta\overline{[\text{Fe}/\text{H}]} = -0.08 \pm 0.04 \text{ dex}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{\text{RV,int}}} = 1.79 \pm 1.76 \text{ km s}^{-1}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{[\text{Fe}/\text{H},\text{int}]}} = 0.02 \pm 0.03 \text{ dex}$ 。这 12 个公共疏散星团的平均视向速度和平均金属丰度的偏差是由 LAMOST 低分辨率光谱和 APOGEE 高分辨率光谱关于恒星视向速度和金属丰度测量的系统差 ($-4.7 \pm 9.8 \text{ km s}^{-1}$ 和 $-0.001 \pm 0.11 \text{ dex}$, Zhong 等, 2020) 所致。其三，与 SC18 样本有 71 个公共疏散星团，两者所得视向速度的均值及其内禀弥散的偏差分别为： $\Delta\overline{\text{RV}} = 5.81 \pm 2.99 \text{ km s}^{-1}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{\text{RV,int}}} = 0.63 \pm 2.37 \text{ km s}^{-1}$ ，此偏差是由 LAMOST 低分辨率光谱和 Gaia DR2 光谱关于恒星视向速度测量的系统差 ($-4.9 \pm_{8.2}^{8.2} \text{ km s}^{-1}$, Zhong 等, 2020) 所致。

除此之外，在严格考虑了观测误差的影响后，我们得到 112 个疏散星团金

属丰度内禀弥散的典型值为: $0.09_{-0.03}^{+0.07}$, 峰值为 0.07。这说明疏散星团内部存在一定的化学丰度弥散。这种现象可能是有以下两种原因: 其一, 形成疏散星团的巨分子云是由多个不同金属丰度的小分子云组成 (Gouliermis, 2018; Guszejnov 等, 2018); 其二, 疏散星团内部的大质量恒星快速演化, 造成疏散星团内部气体的化学增丰 (Krumholz 等, 2019)。

第4章 利用星团示踪银盘的演化

由于疏散星团的成员星近乎形成于同一片巨分子云，它们具有相似的视向速度、自行等空间运动，具有相同的年龄、金属丰度、距离等。在第二章中，我们在 LAMOST 低分辨率光谱所得视向速度和金属丰度两维空间上构建了包括团星和场星的混合模型，可以得到疏散星团的平均视向速度和平均金属丰度。疏散星团的平均视向速度反应了其在银河系中的整体空间运动，可以研究银河系的运动学和动力学。比如，银河系的旋转速度、银盘天体速度弥散等。疏散星团的平均金属丰度反应了疏散星团整体的化学丰度性质，可以示踪银盘的径向、垂向金属丰度梯度、丰度梯度随时间的演化以及金属丰度和年龄的关系等银盘的化学演化问题。

通过混合模型的解算，我们还可以得到疏散星团视向速度和金属丰度的表观弥散和内禀弥散。疏散星团的视向速度弥散可以分析疏散星团是否处于位力平衡状态，研究疏散星团的基本面等反应疏散星团内部运动特性；对疏散星团的金属丰度内禀弥散存在与否及其成因的探讨。是否存在金属丰度弥散这一现象？及其可能的原因？可以分析形成疏散星团的巨分子云内部多个小分子云之间的金属丰度差异，大质量恒星化学增丰等物理过程。

在本章中，一方面我们研究疏散星团的径向和垂向金属丰度梯度、AMR 以及比较星团和盘星的化学特性；另一方面，我们通过对比疏散星团和盘星的运动学及动力学研究银河系的动力学演化过程。

4.1 星团和盘星及控制样本的选取

4.1.1 疏散星团样本选取

在第3章中，基于 LAMOST DR7 低分辨率光谱视向速度和金属丰度两维空间上所构建的团星和场星的混合模型，我们最终得到 112 个疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其内禀弥散。

ZJ20 和我们一样都是基于 LAMOST 低分辨率光谱数据得到疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其表观弥散，但 ZJ20 是在视向速度和金属丰度一维空间分别做一维高斯拟合，但我们算法不同。我们和 ZJ20 样本有 75 个公共疏散星

团，本章将对这 75 个公共疏散星团的径向、垂向金属丰度梯度和 AMR 关系进行分析。

4.1.2 盘星及其控制样本的选取

疏散星团的运动学和动力学的特征均与银盘的形成与动力学的演化过程有关。90% 以上的恒星形成于星团，随着星团瓦解，其成员成为银盘中场星的一部分。通过对比疏散星团和盘星的化学丰度、运动学及动力学，对研究银河系的化学形成和动力学演化有着很重要的意义。

4.1.2.1 盘星样本选取

对于盘星的选取，我们将有 LAMOST DR7 低分辨率光谱有恒星参数及 *Gaia* DR2 自行的星表与 APOGE DR16 的增值星表 (Mackereth 等, 2019) 通过 α, δ 进行交叉匹配，得到有恒星年龄、化学丰度、空间位置、自行及视向速度的星表。由于疏散星团大部分位于薄盘上，所以，在对比星团和盘星的特性时，我们选择盘星作为比对样本。盘星和厚盘星在 $[\alpha/\text{Fe}]$ 分布上呈现双峰特性，利用 Re Fiorentin 等 (2019) 等人工作中公式 (1) 区分薄厚盘星，也就是图4.1中的虚折线来区分薄厚盘。图4.2是 LAMOST DR7 和 APOGEE DR16 星表交叉匹配所得 85,630 个公共源在 $[\alpha/\text{Fe}]$ 和 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 上的分布，黑色的点为所有公共样本星（包括薄盘和厚盘），灰色的点是图4.1中的虚折线以下的部分，也就是盘星（一共有 71,123 个源）。

4.1.2.2 控制样本选取

疏散星团的年龄分布和盘星的年龄分布不相同，我们对其进行物理特性分析时，需要考虑年龄的影响，否则所得结果会出现偏差。因而，在进一步盘星样本的选取中，我们利用年龄作为控制样本的参数，得到一批与疏散星团年龄分布相同的盘星样本（图4.3中，蓝色柱状图是盘星控制样本）。在分析疏散星团的年龄时，我们发现，Cantat-Gaudin 等 (2020) 等人所给疏散星团年龄与 APOGEE DR16 增值星表给出的团星年龄不一致。所以，在我们工作中不直接利用星团的年龄，而是利用星团的成员星的年龄分布作为控制样本的参数。图4.3中的左图为选取的盘星控制样本（蓝色）的年龄分布和星团成员星（红色）的年龄分布。右图为选取出的盘星控制样本和所有盘星年龄分布的比较，从图中可以看出所有成员星（灰色）的年龄分布与盘星控制样本的年龄分布差异很大，这进一步说明我们选取盘星控制样本的必要性。在以下工作的讨论中，我们利用 112 个疏散

星团，盘星控制样本（14,002 个源）以及所有盘星（71,123）这三个样本分析星团和盘星的化学、运动学以及动力学特性上的差异。

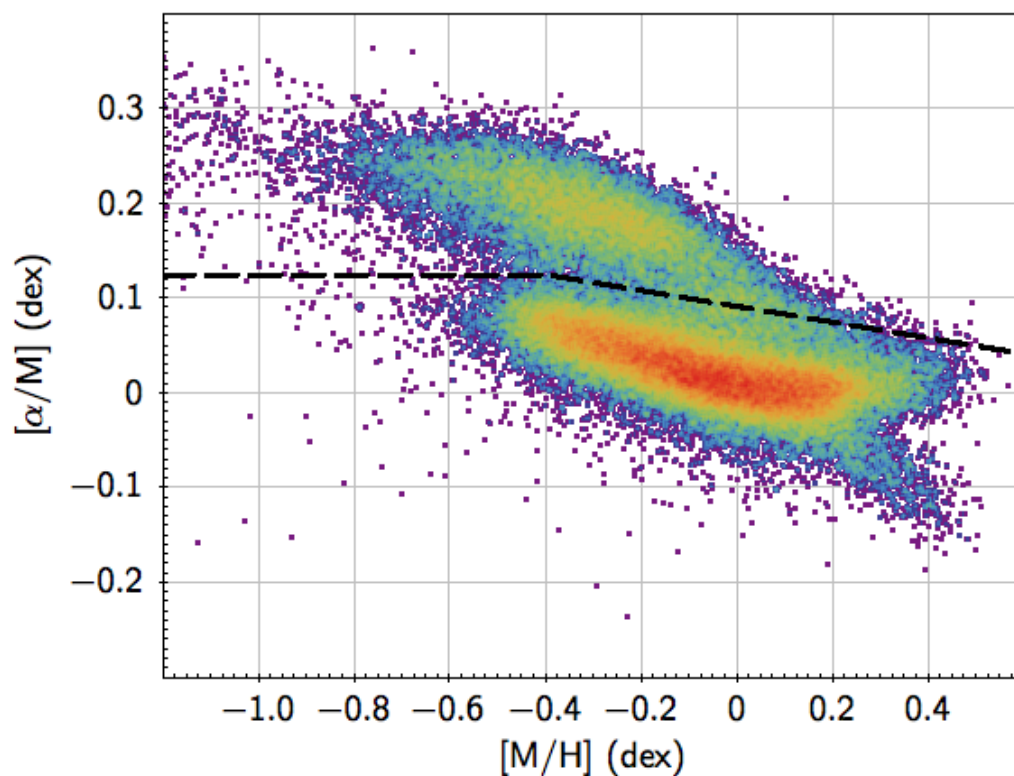


图 4.1 *Gaia* DR2 和 APOGEE DR14 公共星在 $[\alpha/M]$ 和 $[Fe/H]$ 的分布，虚线用于区分薄厚盘 (Re Fiorentin 等, 2019)

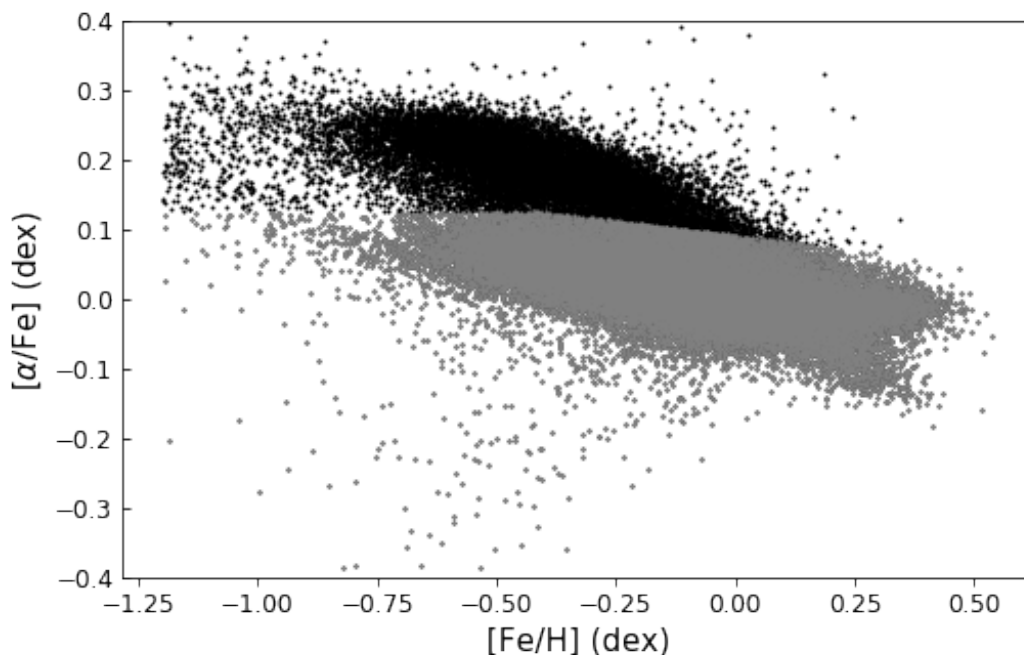


图 4.2 LAMOST DR7 和 APOGEE DR16 星表交叉匹配所得公共源在 $[\alpha/\text{Fe}]$ 和 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 上的分布，黑色的点为所有公共样本星 (85,630)，灰色为盘星 (71,123)。

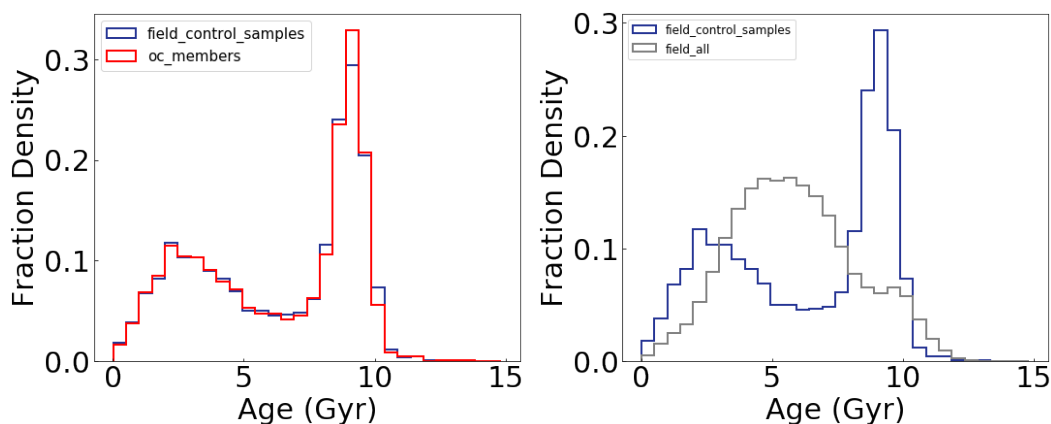


图 4.3 星团成员星、和盘星控制样本和所有盘星的年龄分布：左图为星团成员星和盘星控制样本的年龄分布。红色为星团成员星，蓝色为盘星控制样本。右图为盘星控制样本和所有盘星的年龄分布。蓝色同左图，灰色是所有盘星样本

4.2 疏散星团的化学性质

4.2.1 疏散星团金属丰度内禀弥散 ($\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}],\text{int}}$) 的性质

一般我们认为，疏散星团形成于同一块巨分子云中，其成员星具有相似的金属丰度。但我们发现严格考虑金属丰度观测误差之后，112个疏散星团金属丰度的内禀弥散典型值为： $0.09_{-0.03}^{+0.07}$ dex，这说明疏散星团内部存在一定的化学丰度弥散。这种现象可能是有以下两种原因：其一，形成疏散星团的巨分子云是由多个不同金属丰度的小分子云组成 (Gouliermis, 2018; Guszejnov 等, 2018)；其二，疏散星团内部的大质量恒星快速演化，造成疏散星团内部气体的化学增丰 (Krumholz 等, 2019)。在本小节中，我们研究疏散星团金属丰度的内禀弥散与年龄、金属丰度、银心距和银面距的关系，如图4.4所示。从图4.4的左上图，我们发现随着星团年龄的增加，金属丰度内禀弥散有略微下降的趋势。这是由于晚期银盘的化学增丰明显高于早期的化学增丰，所以，在银盘早期，金属丰度弥散小于晚期的金属丰度弥散。这也就不难理解金属丰度内禀弥散和金属丰度的关系，金属丰度的增加意味着周围星际介质的增丰明显，所以形成疏散星团的星云自身内禀弥散也增大。图4.4的左下图，随着银心距的增大，金属丰度内禀弥散有略微下降的趋势，这是由于在银河系内部金属丰度的增丰明显高于银河系外部的增丰。而4.4的右下图，随着银面距的变化，金属丰度内禀弥散无明显的变化。而关于金属丰度内禀弥散更详细的定量分析会在以后的工作中进一步讨论。

4.2.2 AMR

年龄和金属丰度的关系 (AMR) 是研究银盘化学增丰历史的重要线索，并且可以对银河系化学演化模型提供很好的约束。20世纪70年代以来，天文学家主要是通过观测太阳邻域内的恒星，分析得到恒星的年龄和金属丰度，试图给银河系的化学演化模型提供一个观测约束。不同的工作得到的结论也不尽相同，比如，有些研究发现太阳邻域内恒星存在 AMR，但有的研究认为 AMR 是由年龄或金属元素丰度的测量误差较大造成的。比如：Twarog (1980) 和 Carlberg 等 (1985) 以及 Meusinger 等 (1991) 利用相同的样本得出不同的结论，Carlberg 等 (1985) 得出非常平坦的 AMR，而 Twarog (1980) 和 Meusinger 等 (1991) 发现明显的 AMR。随着观测技术的提高和观测数据的不断增加，特别是观测到大量年老的富金属星的存在，使人们对盘星 AMR 的存在性产生了异议。比如， Ibukiyama 和 Arimoto

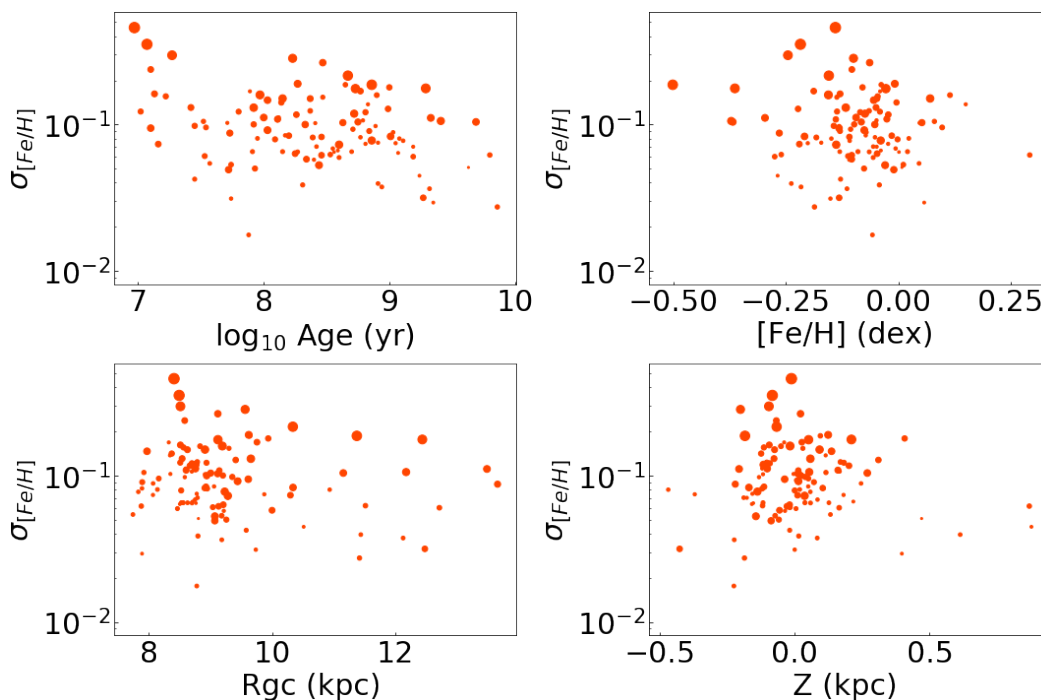


图 4.4 疏散星团金属丰度内禀弥散与年龄（左上图）、金属丰度（右上图）、银心距（左下图）和银面距（右下图）的关系，其中橘色点的大小代表其金属丰度内禀弥散拟合误差的大小。

(2002) 等人分析了太阳附近 1,658 颗恒星的 AMR，并考虑了星族效应对 AMR 的影响，但无论薄盘还是厚盘的 AMR 都不明显。近二十年来，许多工作用不同的示踪体研究 AMR，比如 Cameron (1985); Carraro 和 Chiosi (1994); Feltzing 等 (2001) 用近邻的恒星或者 Chen 等 (2003); Netopil 等 (2016) 用各个年龄段的疏散星团。不论用什么示踪体均表明随着年龄的增加金属丰度减小，这是由于随着银河系的化学演化星际介质不断被增丰造成的。对于疏散星团，其成员星有共同的起源和增丰历史，所以用疏散星团研究 AMR 更有优势。然而，一些基于疏散星团的研究工作表明这种关系并不是很明显。鉴于 AMR 问题的重要性和目前仍存在的争议，我们就 112 个疏散星团讨论 AMR 的问题。

我们利用严格考虑 LAMOST 低分辨率光谱观测误差及其误差改正因子之后所得金属丰度以及 *Gaia* 给出的疏散星团年龄来研究 AMR。图 4.5 展示了 112 个疏散星团的年龄和金属丰度的关系。丢掉 2 个年老疏散星团 NGC 6791 和 Berkeley 17，我们利用 MCMC 的方法拟合梯度，最后得到对于年龄小于 6 Gyr 的 110 个疏散星团，其金属丰度随着年龄变化的斜率为 $-0.038 \pm 0.012 \text{ dex Gyr}^{-1}$ 。

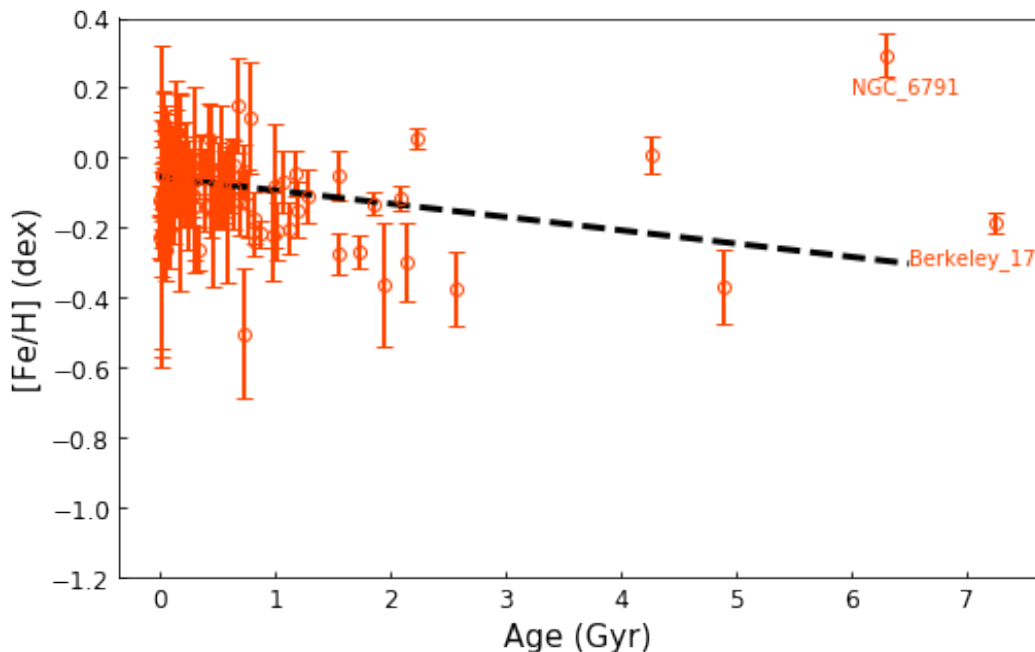


图 4.5 疏散星团的年龄-金属丰度关系。在我们的样本中对于 $\text{age} < 6 \text{ Gyr}$ 的星团的斜率为 $-0.038 \pm 0.012 \text{ dex Gyr}^{-1}$, 其中 NGC 6791 和 Berkeley 17 在线性拟合中被移除。黑色的虚线为拟合的直线。

本工作中的 112 个疏散星团与 ZJ20 工作中有 75 个公共的疏散星团, 图 4.6 显示了 ZJ20 对 75 个共同疏散星团的 AMR 分析结果, 上图为 ZJ20 的 AMR, 下图为本工作的 AMR, 其中绿色为 75 个公共疏散星团。从图 4.6 中, 对比 ZJ20 和本工作的 AMR 结果, 我们发现对于年龄较大的疏散星团, 我们得到的疏散星团金属丰度内禀弥散更小, 可以得到更准确的 AMR。

4.2.3 金属丰度梯度

4.2.3.1 径向金属丰度梯度

径向丰度梯度在研究银河系的化学形成及演化的过程中起着很重要的作用。过去的二十几年里, 人们利用不同类型的探针研究银盘的径向丰度梯度, 如年轻的探针有造父变星 (Andrievsky 等, 2002; Luck 等, 2006; Yong 等, 2006)、OB 型星 (Daflon 和 Cunha, 2004)、电离氢区 (Balsler 等, 2011) 和疏散星团 (Friel, 1995; Friel 等, 2002; Chen 等, 2003; Magrini 等, 2009); 中老年年龄的探针有行星状星云 (Maciel 和 Quireza, 1999; Costa 等, 2004; Henry 等, 2010)、FGK 型星 (Katz 等, 2011; Cheng 等, 2012) 和红巨星 (Hayden 等, 2014)。人们用线性函数拟合恒星金属丰度随着银心距 R_{gc} 的变化得到径向丰度梯度。尽管由于研究样本不同得到的结果存在差

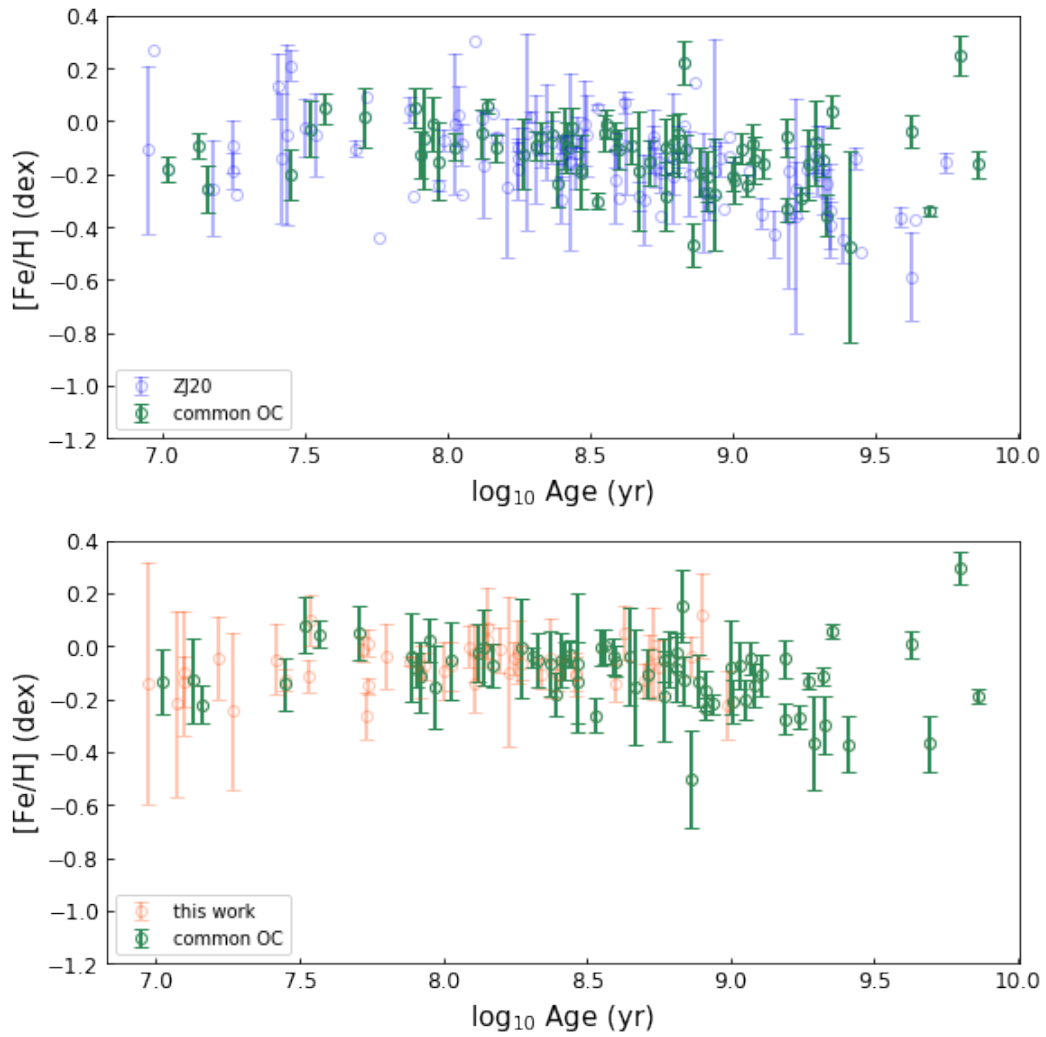


图 4.6 AMR: 上图蓝色为 ZJ20 的所有样本的 AMR, 下图中橘色为本文 112 个疏散星团的 AMR, 海绿色是两者公共的 75 个疏散星团。

异,但总体上这些研究得到的大体结论一致,即:银盘在径向存在负的径向金属丰度梯度, R_{gc} 越大恒星金属丰度越贫。化学演化模型预言了这个径向金属丰度梯度形成于早期,并且认为过去的梯度更陡。这与盘“由内而外”(“inside-out”)的形成机制是一致的,即银盘外围区域恒星更年轻且金属丰度更贫(de Jong, 1996; Muñoz-Mateos 等, 2007)。由于疏散星团具有较宽的年龄跨度和银心距,并且疏散星团的成员星具有相似的金属丰度,所以疏散星团是研究银河系的金属丰度梯度的理想示踪体。

图4.7展示的是112个疏散星团的径向金属丰度梯度,随着银心距的增大,金属丰度越贫。本工作的金属丰度梯度 $-0.061 \pm 0.009 \text{ dex kpc}^{-1}$ 比ZJ20的径向丰度梯度 $-0.053 \pm 0.004 \text{ dex kpc}^{-1}$ 略陡,基本保持一致。我们基于112个疏散星团样本得到的银盘径向金属丰度梯度与他人同样基于疏散星团所得梯度结果同样保持一致(Friel 等, 2002; Chen 等, 2003; Wu 等, 2009; Reddy 等, 2016; Donor 等, 2018)。

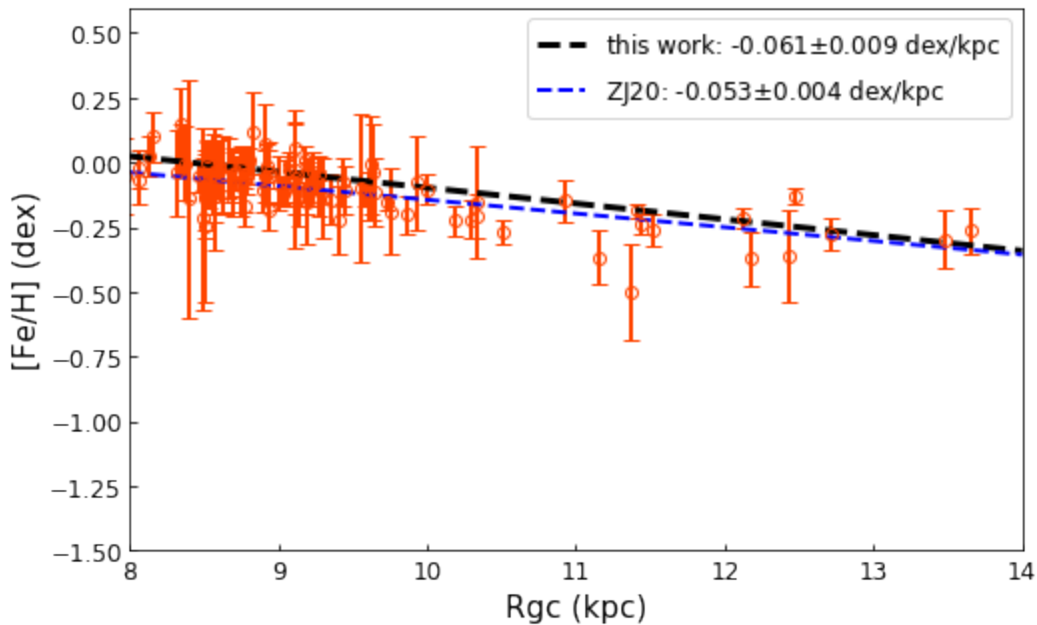


图 4.7 径向丰度梯度。橘红色为疏散星团样本,黑色的虚线为本工作拟合的线性函数,蓝色虚线为 ZJ20 工作中得到的径向丰度梯度。

4.2.3.2 垂向金属丰度梯度

垂向的金属丰度梯度是研究银盘的恒星形成历史的又一重要线索,但是垂直于银盘方向是否存在金属丰度梯度是多年来一直争论不休的一个问题。比如,

Piatti 等 (1995) 研究 63 个疏散星团中 233 颗红巨星的金属丰度, 得出在离银道面 1.5 kpc 范围内的垂向金属丰度梯度为 $-0.34 \text{ dex kpc}^{-1}$, Piatti 等 (1995) 得出的垂向金属丰度梯度为 $-0.25 \text{ dex kpc}^{-1}$, 而 Friel (1995) 发现不存在垂向金属丰度梯度。Chen 等 (2003) 等人通过对疏散星团的研究发现, 在离银道面 1.5 kpc 范围内银盘法向梯度为 $-0.295 \text{ dex kpc}^{-1}$ 。不同人得到不同的结果可能主要是样本选取的不同造成的。

图4.8是疏散星团的金属丰度随银面距的变化, 从图中看出随着银面距的增大, 金属丰度减小。垂向金属丰度梯度为 $-0.198 \pm 0.039 \text{ dex kpc}^{-1}$, 略小于 ZJ20 的垂向金属丰度梯度 $-0.252 \pm 0.039 \text{ dex kpc}^{-1}$, 基本保持一致

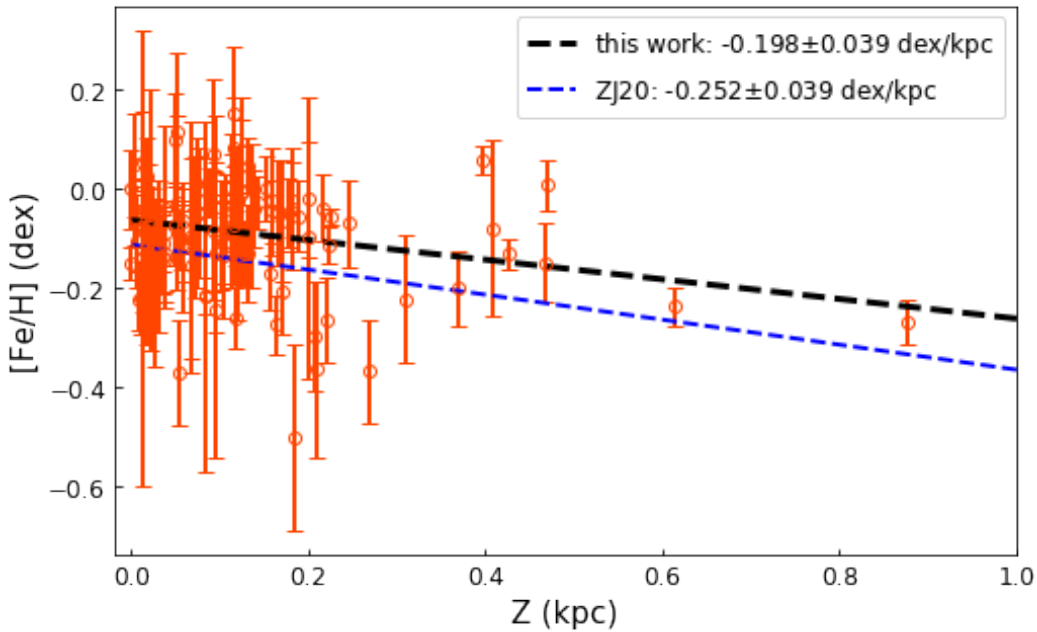


图 4.8 112 个疏散星团的垂向金属丰度梯度：橘红色为 112 个疏散星团，黑色虚线和蓝色虚线分别为：为本文和 ZJ20 所得疏散星团的垂向金属丰度梯度。

4.2.4 疏散星团与盘星化学性质的比较

90% 以上的场星是由团星受到各种动力学的影响瓦解而成的, 比较盘星和疏散星团的径向丰度梯度可以定性的研究星团和盘星 (大部分是场星) 受到径向迁移的影响。拟合盘星的金属丰度和银心距的关系, 可得盘星的径向金属丰度梯度为: $-0.059 \pm 0.011 \text{ dex kpc}^{-1}$, 疏散星团的径向金属丰度梯度为 $-0.061 \pm 0.009 \text{ dex kpc}^{-1}$ 。通过比较, 我们发现疏散星团的径向金属丰度梯度略微比盘星的陡,

这可反映盘星现在的梯度已经是受到各种动力学的影响后的金属丰度梯度，而疏散星团相对能保留着初始的丰度梯度。

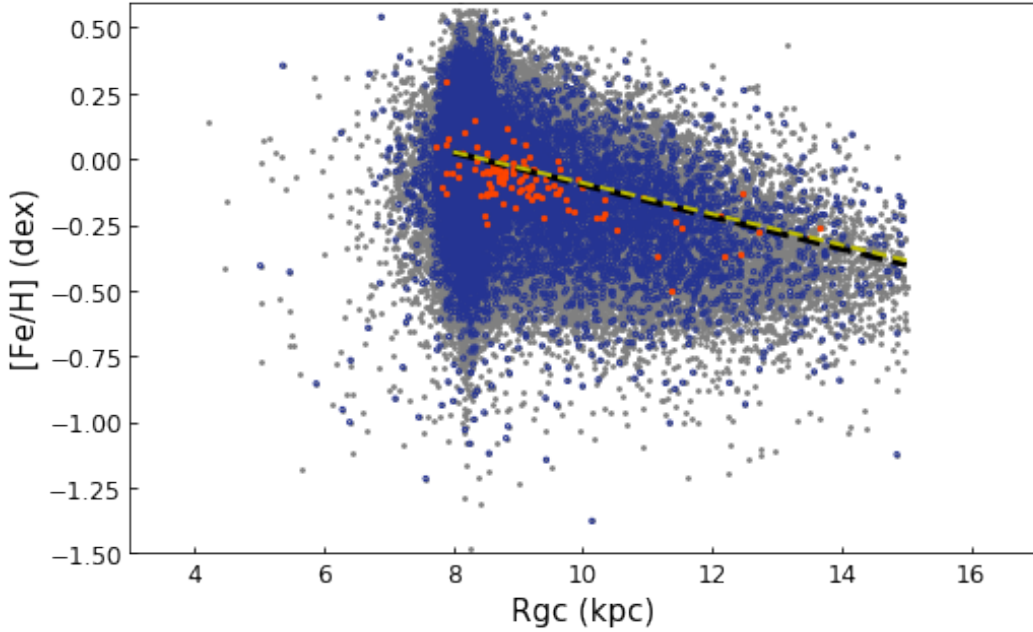


图 4.9 径向金属丰度梯度。橘红色为 112 个疏散星团样本，蓝色为盘星控制样本，灰色为所有盘星样本。黑线和黄线分别是疏散星团和盘星控制样本的径向丰度梯度。

而盘星绕着银心转动，其轨道偏心率会逐渐变大，今天的位置无法代表其真实的半径，这将导致金属丰度梯度变得“模糊” (Holmberg 等, 2007; Aumer 和 Binney, 2009)。但本轮中心半径 (guiding radius, R_g)，并不因轨道偏心率的变化而发生变化。因此通过本轮中心半径得到的径向金属丰度梯度可以消除偏心运动带来的“模糊化”效应。图4.10展示了三个样本金属丰度和本轮中心半径之间的关系。从图中可以看出存在明显的负的径向丰度梯度。通过使用线性拟合最小卡方误差的方法得到径向丰度梯度，疏散星团的径向丰度梯度为： $-0.073 \pm 0.001 \text{ dex kpc}^{-1}$ 。从金属丰度分别与银心距和本轮中心半径的梯度可以看出由于某种或某些（径向迁移或其他“模糊”效应）会使径向丰度梯度变小。同样对于盘星金属丰度和 R_g 梯度为： $-0.066 \pm 0.003 \text{ dex kpc}^{-1}$ ，也小于金属丰度和银心距的梯度。

图4.11展示的是星团和盘星金属丰度随银面距的变化，从此图可以看出星团的银面距集中于 1kpc 的范围内，而盘星可达 4kpc。在本工作中，疏散星团和盘星的垂向金属丰度梯度分别为： $-0.198 \pm 0.039 \text{ dex kpc}^{-1}$ 、 $-0.155 \pm 0.038 \text{ dex kpc}^{-1}$ ，

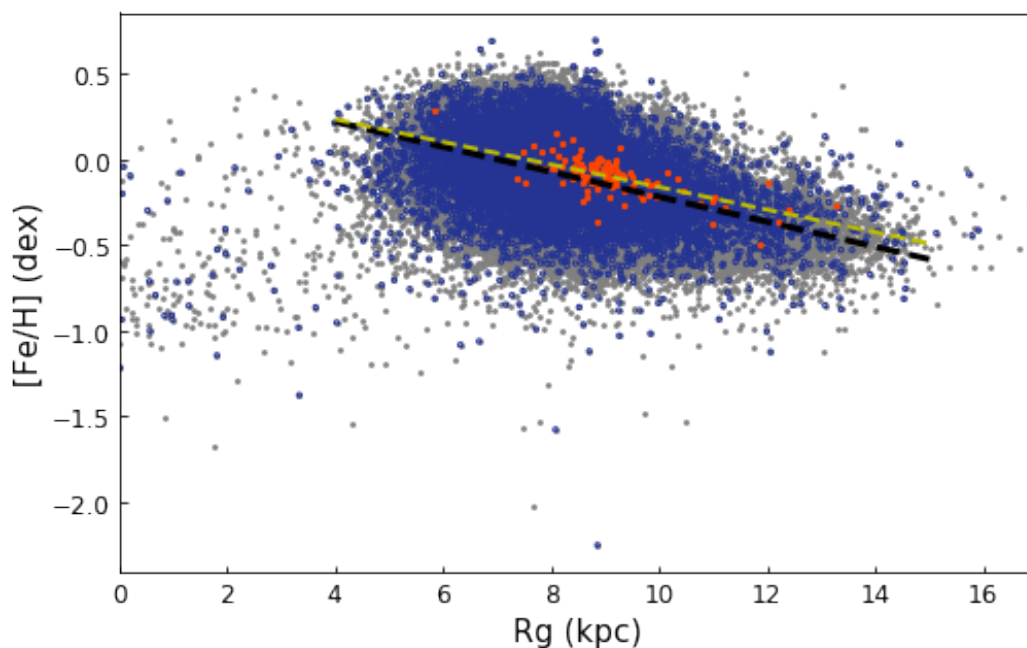


图 4.10 金属丰度和本轮中心半径的关系：图例与图4.9相同。

疏散星团的垂向金属丰度梯度大于盘星的垂向金属丰度梯度。这表明动力学的扰动不仅在径向方向上，在垂直方向上也有扰动。

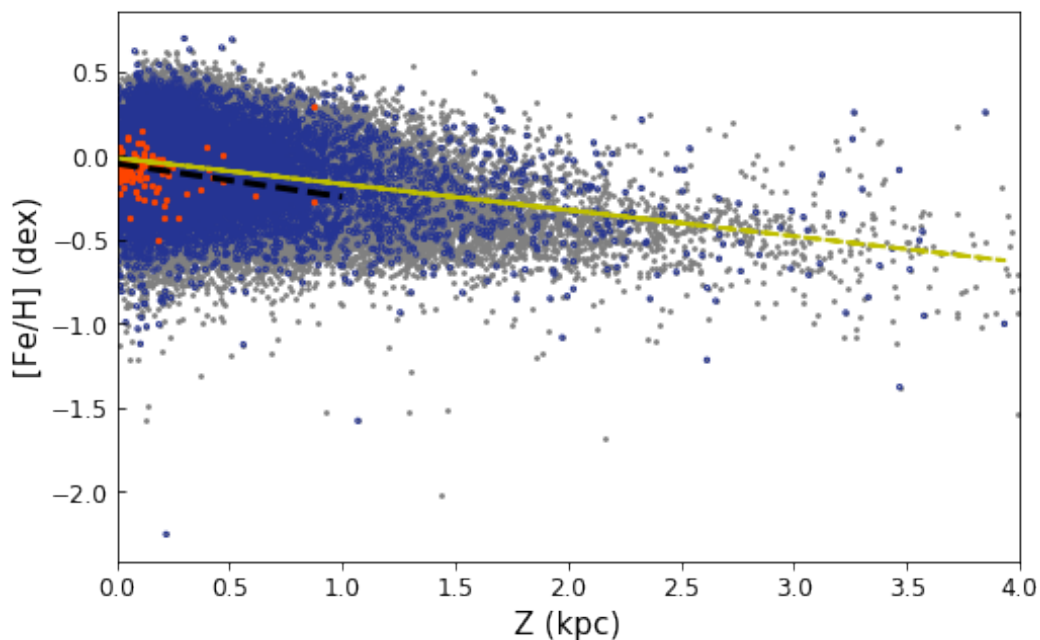


图 4.11 垂向径向丰度梯度：点的形状和颜色与图4.9相同。

4.3 星团运动学

我们利用星团及盘星的赤经、赤纬、自行和视向速度，通过 *astropy* 计算星团和盘星在银心笛卡尔坐标系的空间位置及速度 (X, Y, Z, U, V, W) 以及柱坐标系的三维速度 (V_R, V_ϕ, V_Z)。在本文工作中，太阳在银心笛卡尔坐标系中的位置是 $(x_0, y_0, z_0) = (-8.2, 0, 0.015)$ kpc, $(u_0, v_0, w_0) = (11.1, 232.24, 7.25)$ km s⁻¹。我们进一步利用 *galpy* 计算星团和盘星的轨道参数，包括离银河系中心距离的近心点 (R_{peri})、远心点 (R_{apo})、轨道偏心率 (eccentricity)、和到达距离银盘最大的垂直距离 (Z_{max})，关于 112 个疏散星团的运动学和动力学参数见表A.4。

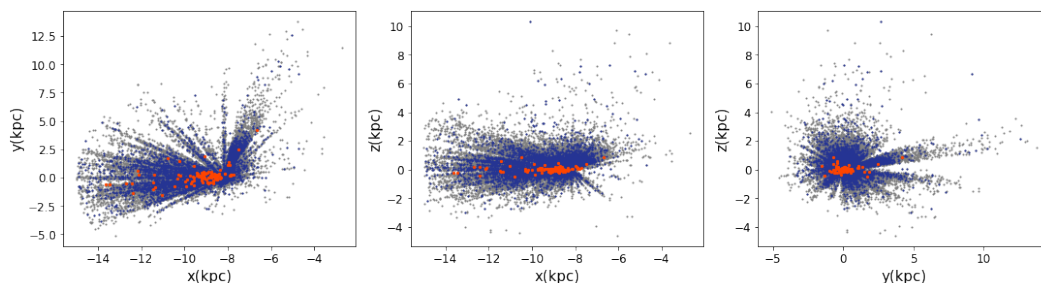


图 4.12 所有盘星、盘星控制样本和疏散星团的空间分布：点的形状和颜色与图4.9相同。

图4.12所示，星团主要聚集在反银心方向，这是由于 LAMOST 的观测主要集中在在这个区域。疏散星团的银面距明显小于盘星的，说明疏散星团集中在薄盘；盘星控制样本的银面距也大于星团的银面距，空间分布说明已经由团星瓦解成的盘星经过动力学或其他加热机制到达更高的地方，星团处在更为薄盘的位置。

4.3.1 视向速度 R_V 和银经 ℓ 的关系

图4.13展示的是视向速度 R_V 和银经 ℓ 的关系，其中淡紫色的星团为 Kharchenko 等 (2007b) 工作中 516 个疏散星团。从图中，可以看出视向速度 R_V 随银经 ℓ 的变化曲线为正弦曲线，这是由于大部分疏散星团在银道面附近做近圆运动，疏散星团的平均视向速度 $\overline{R_V}$ 与相应曲线的偏差小于 50 km s⁻¹。

4.3.2 疏散星团与盘星的运动学和动力学参数的比较

图4.14为盘星和疏散星团三维速度的分布图，从图中可以看出，大部分疏散星团的速度弥散度明显小于盘星的速度弥散度。疏散星团的三维速度 $V_R \sim 0$ km

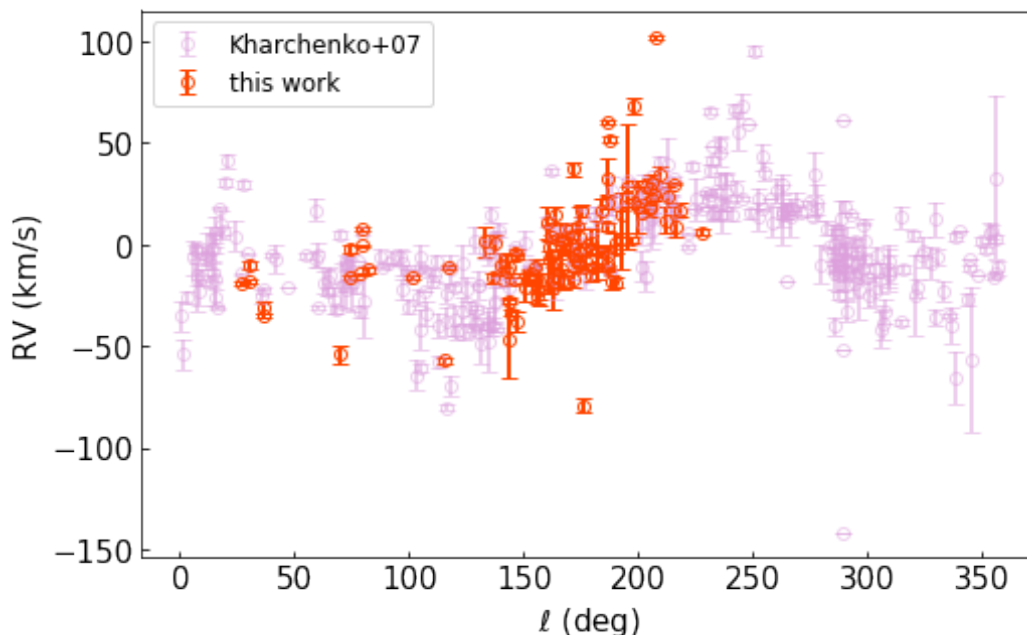


图 4.13 疏散星团的视向速度随银经的变化：浅紫色为Kharchenko 等 (2007b) 中 516 个疏散星团。

s^{-1} 并且 $V_Z \sim 0 \text{ km s}^{-1}$ ，说明疏散星团的运动轨道为近圆轨道。另一种表示恒星运动学的方法见图4.15，此图中，蓝色等高线为盘星控制样本中密度最高的10%，50%，90%。绿色的虚线分别为以太阳旋转速度为中心 $V_{total}=50 \text{ km s}^{-1}$ 和 $V_{total}=100 \text{ km s}^{-1}$ ，从图中可以看出大部分星团分布在 $V_{total}<50 \text{ km s}^{-1}$ 内。疏散星团的速度弥散度明显小于盘星控制样本和所有盘星样本的速度弥散度，说明疏散星团受到各种加热机制的影响小于盘星控制样本和所有盘星样本所受到的影响。

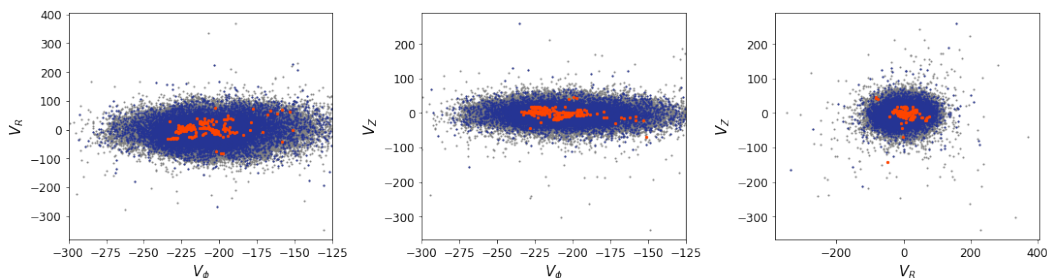


图 4.14 盘星、盘星控制样本和疏散星团的三维速度分布：点的形状和颜色与图4.9相同。

轨道偏心率 $e=(R_{apo}-R_{peri})/(R_{apo}+R_{peri})$ ，它描述了恒星绕银心运动的轨道形状。 $e=0$ 时，轨道形状为圆形； $0<e<1$ 时，轨道形状为椭圆。因此，若恒星轨道偏心

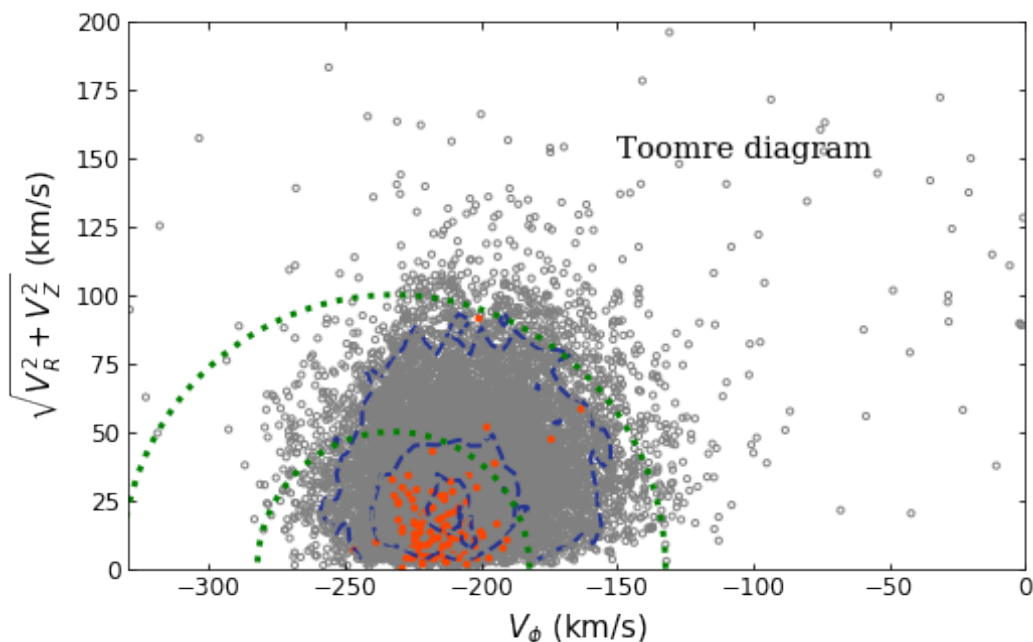


图 4.15 盘星、盘星控制样本和疏散星团的 Toomre diagram。图例与图4.9相同。

率越小, 轨道越接近圆形; 若恒星轨道偏心率越大, 则椭圆轨道越扁。三个样本的轨道偏心率如图4.16中左上图所示, 从图中可以看出, 星团的轨道偏心率明显小于盘星的轨道偏心率, 并且星团 e 的峰值在 0.1 左右, 略小于盘星的轨道偏心率峰值, 并且绝大部分星团的 $e < 0.2$, 这说明星团的运动轨道是近圆轨道, 然而盘星和盘星控制样本还有一大部分 $0.2 < e < 0.4$ 。

图4.16中右上图为三个样本的 Z_{max} 的统计直方图。由图可知, 疏散星团可到达距银道面最大的距离大部分在 1 kpc 内, 并且明显小于盘星的最大银面距 Z_{max} 。这也可以说明星团受到的动力学的加热小于盘星受到的加热影响。图4.16中下面两幅图为样本近心距和远心距的统计直方图, 从左图中可以看出较小的近心距没有疏散星团的存在, 只有盘星。这说明离银河系中心较近的地方, 星团已经被瓦解掉成为场星。

L_θ 指的是垂直方向的角动量 L_Z 与总的角动量 L_{total} 之间的夹角, 其中 $L_{total} = \sqrt{L_X^2 + L_Y^2 + L_Z^2}$ 。 $L_X = Y \times W - Z \times V$, $L_Y = Z \times U - X \times W$ 。 L_θ 越小说明星团或恒星的轨道平面与银道面的夹角越小。从图4.17可以看到, 星团的 L_θ 集中在小于 2.5° 的范围内, 而盘星控制样本和所有盘星的 L_θ 峰值在 3° 左右。这说明疏散星团的轨道与银道面的夹角很小, 而瓦解掉的盘星的轨道与银道面的夹角比疏散星团的大。

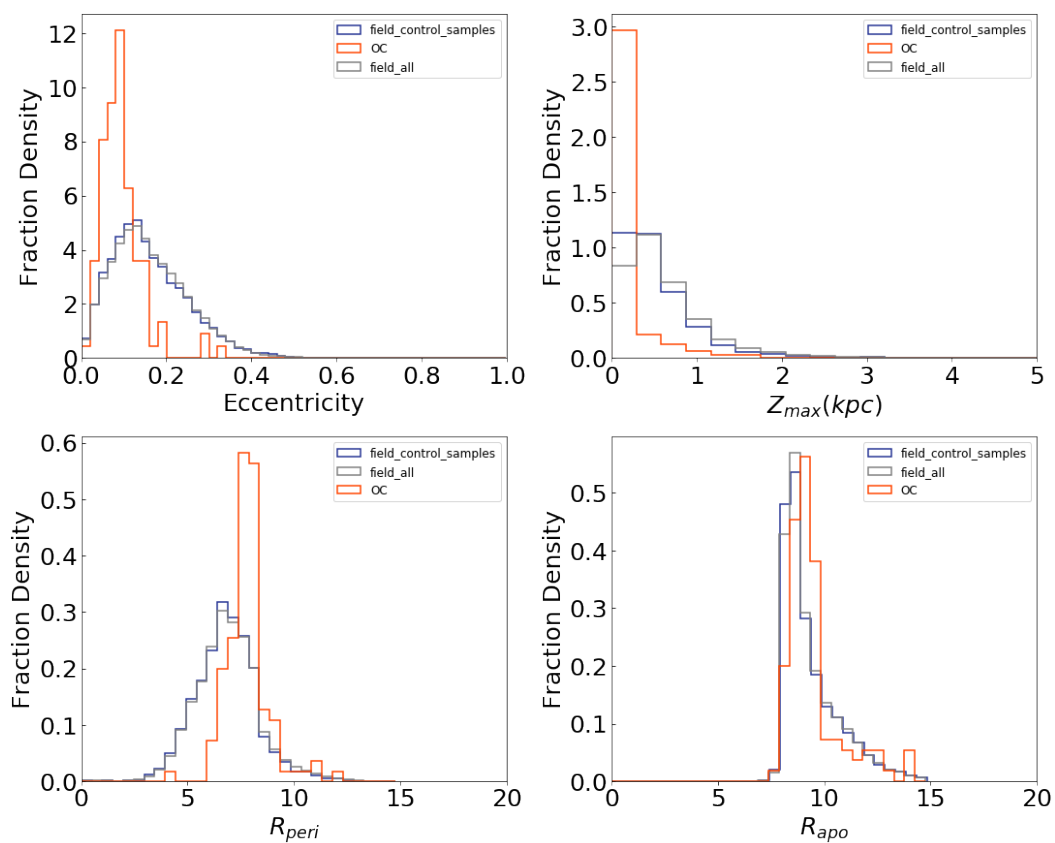


图 4.16 盘星、盘星控制样本和疏散星团的轨道偏心率 (左上图), Z_{max} (右上图), 近心距 (左下图), 远心距 (右下图) 的统计直方图分布。

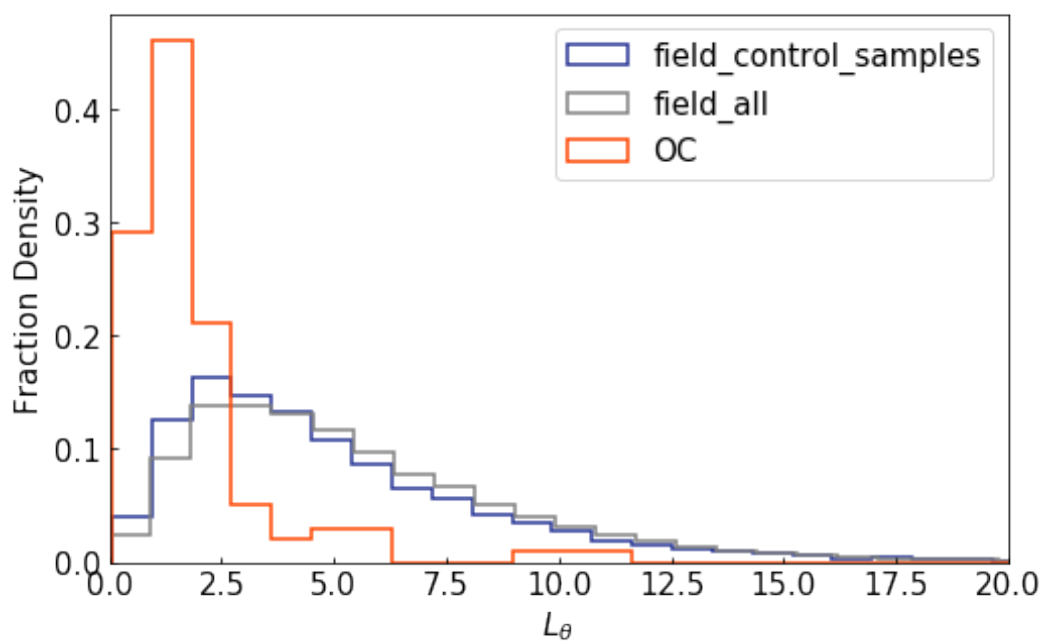


图 4.17 盘星、盘星控制样本和疏散星团的 L_{θ} 。

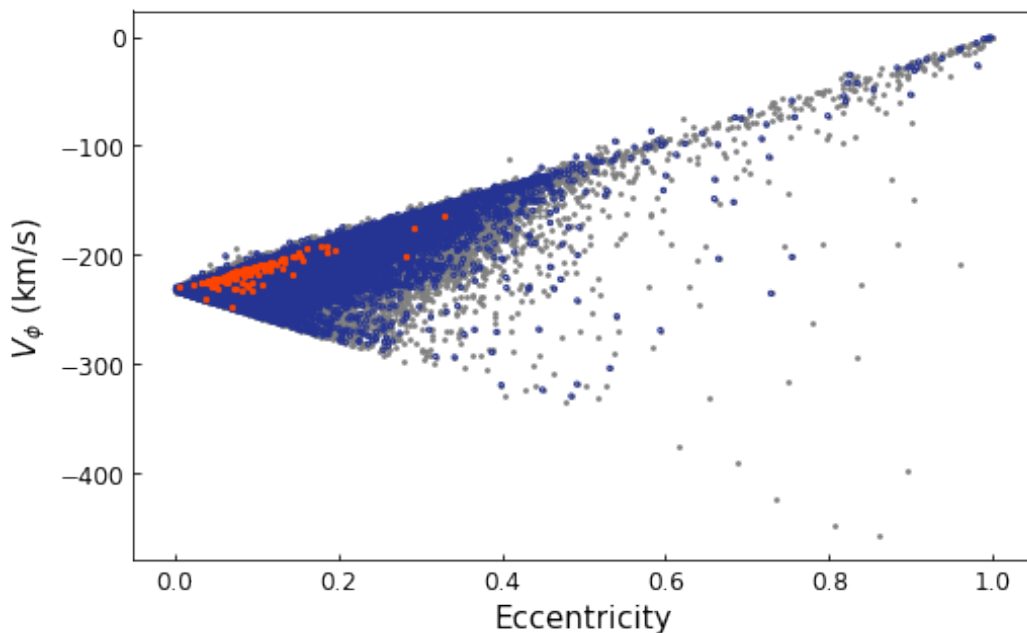


图 4.18 三个样本轨道偏心率与旋转速度的关系，图例与图4.9相同。

图4.18是恒星轨道偏心率与金属丰度的关系。从图中，我们可以看出，随着轨道偏心率的增加，疏散星团的旋转速度越小。我们可以看到上下两个楔形，这上下两个楔形分别对应恒星运动轨道的远心距和近心距，而疏散星团绝大部分处于上楔形，说明疏散星团大部分时间处在远心点的位置，这与恒星处于远心点的时间更长相符。在Li 等 (2018) 的文章中提到，越接近楔形位置的恒星在柱坐标系中的径向速度越接近为零，这与本文在4.3.2中对疏散星团运动学的分析保持一致。

4.4 本章小结

本章中，我们详细地分析了疏散星团的化学、运动学及动力学特性，进而分析银盘的化学及动力学演化过程。

首先，疏散星团金属丰度内禀弥散和年龄的关系中，我们发现，随着年龄的增大，金属丰度的内禀弥散减小；随着银心距的增加而变小。这也反映了在银河系演化早期化学增丰没有现在化学增丰明显。其次，我们研究了金属丰度和年龄的关系：随着年龄的增大，金属丰度减小，这也证实了上一条结论。再者，我们研究了疏散星团的径向和垂向金属丰度梯度，发现随着银心距和银面距的增大，金属丰度逐渐减小，本文工作和他人工作的结果保持一致。最后，对于疏散星团

和盘星的化学特性，疏散星团的径向金属丰度梯度比盘星的径向金属丰度梯度略陡。这是因为盘星已经经历了各种动力学的扰动，进行了径向迁移和加热，而疏散星团还尽量保留着当时形成时的金属丰度梯度。对于盘星和星团，其金属丰度和本轮半径 R_g 的丰度梯度比金属丰度和银心距 R_{gc} 的丰度梯度更陡一些。这是由于现在的银心距是经历了“迁移”以后的位置，而刚形成时的金属丰度梯度更陡一些。

本章节的最后，进一步对疏散星团和盘星的运动学和动力学进行分析，我们发现：疏散星团的轨道偏心率、轨道平面与银道面的夹角、三维速度弥散度、 Z_{max} 均小于盘星。这说明疏散星团受到潮汐力或其他动力学的扰动小于盘星，这与造成疏散星团和盘星在化学性质上差异的物理图像一致。

第5章 总结与展望

5.1 总结

长久以来，疏散星团不仅是研究恒星形成与演化的实验室，也是研究银盘结构和化学演化的理想示踪体。疏散星团分布在银盘上，其成员星在观测上和场星混合在一起。为了降低场星污染的影响，获得更加准确的疏散星团运动学与化学丰度特性，我们构建了团星和场星的混合模型。在 *Gaia* DR2 所给运动学成员星的基础上，我们基于 LAMOST 低分辨率光谱在视向速度和金属丰度两维空间上构建包含团星和场星的混合模型，解算疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其弥散。

在第二章，我们讲述了如何构建混合模型及对 LAMOST 视向速度和金属丰度观测误差的改正。由于疏散星团成员星有相似的视向速度和金属丰度，故对于混合模型中的团星，我们构建其在视向速度和金属丰度上的两维正高斯分布。对于混合模型中的场星，我们以星团周边足够多 ($\geq 10,000$) 的场星在视向速度和金属丰度两维空间上的真实概率密度分布作为拟合样本中场星的分布模型。在混合模型的解算中，我们还严格考虑了 LAMOST DR7 星表数据中观测误差的改正因子 k ，以区别于相应的表观弥散值。

第三章主要介绍了星团样本、星团拟合样本以及混合模型中场星的选择。同时，结合混合模型及视向速度和金属丰度观测误差的改正因子 k_{RV} 和 $k_{[Fe/H]}$ ，最终，我们对 112 个疏散星团进行了拟合，结果与结论如下：

(1) 基于 LAMOST DR7 低分辨率光谱中重复观测 5 次以上的源，我们得到视向速度和金属丰度的观测误差改正因子分别为： $k_{RV} = 0.644$ 和 $k_{[Fe/H]} = 0.526$ 。观测误差改正因子均小于 1，说明 LAMOST DR7 低分辨率光谱高估了恒星视向速度及金属丰度的观测误差。根据视向速度和金属丰度的观测误差改正因子，我们可以准确地考虑两者的观测误差，并得到疏散星团可信的内禀弥散。

(2) 考虑误差与否的情况下，混合模型所得疏散星团视向速度和金属丰度的均值基本一致；但内禀弥散明显小于表观弥散。这说明用 LAMOST 低分辨率光谱讨论疏散星团内部性质时，严格地考虑观测误差是必须的。

(3) 在严格考虑了观测误差的影响后，112 个疏散星团金属丰度内禀弥散的

典型值为： $0.09_{-0.03}^{+0.07}$ dex，这说明疏散星团内部存在一定的化学丰度弥散。这种现象可能是有以下两种原因：其一，形成疏散星团的巨分子云是由多个不同金属丰度的小分子云组成 (Gouliermis, 2018; Guszejnov 等, 2018)；其二，疏散星团内部的大质量恒星快速演化，造成疏散星团内部气体的化学增丰 (Krumholz 等, 2019)。

(4) 将我们的 112 个疏散星团样本与他人工作进行比较，得到如下几点结论：其一，与 ZJ20 样本有 75 个公共疏散星团，两者所得视向速度和金属丰度均值及其表观弥散的偏差分别为： $\Delta\overline{RV} = -0.14 \pm 4.28 \text{ kms}^{-1}$ ， $\Delta\overline{[Fe/H]} = 0.03 \pm 0.05 \text{ dex}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{RV,app}} = -1.82 \pm 4.07 \text{ kms}^{-1}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{[Fe/H],app}} = 0.03 \pm 0.05 \text{ dex}$ 。我们的样本和 ZJ20 样本所得结果的差异相对于 LAMOST 低分辨率光谱视向速度 RV 和金属丰度 [Fe/H] 的测量精度 (5.0 km/s 和 0.15 dex, Luo 等, 2015; Xiang 等, 2015) 来说是个小量，因而均是基于 LAMOST 低分辨率光谱但不同算法所得疏散星团的视向速度和金属丰度的均值及弥散基本一致。其二，与 Pang18 样本有 12 个公共疏散星团，两者所得视向速度和金属丰度均值及其内禀弥散的偏差分别为： $\Delta\overline{RV} = -4.65 \pm 2.74 \text{ kms}^{-1}$ ， $\Delta\overline{[Fe/H]} = -0.08 \pm 0.04 \text{ dex}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{RV,int}} = 1.79 \pm 1.76 \text{ kms}^{-1}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{[Fe/H],int}} = 0.02 \pm 0.03 \text{ dex}$ 。这 12 个公共疏散星团的平均视向速度和平均金属丰度的偏差是由 LAMOST 低分辨率光谱和 APOGEE 高分辨率光谱关于恒星视向速度和金属丰度测量的系统差 ($-4.7 \pm 9.8 \text{ kms}^{-1}$ 和 $-0.001 \pm 0.11 \text{ dex}$, Zhong 等, 2020) 所致。其三，与 SC18 样本有 71 个公共疏散星团，两者所得视向速度的均值及其内禀弥散的偏差分别为： $\Delta\overline{RV} = 5.81 \pm 2.99 \text{ kms}^{-1}$ ， $\Delta\overline{\sigma_{RV,int}} = 0.63 \pm 2.37 \text{ kms}^{-1}$ ，此偏差是由 LAMOST 低分辨率光谱和 Gaia DR2 光谱关于恒星视向速度测量的系统差 ($-4.9 \pm_{8.2}^{8.2} \text{ kms}^{-1}$, Zhong 等, 2020) 所致。

在第四章，进一步对 112 个疏散星团的整体运动学和化学特性进行分析，我们发现：

(1) 金属丰度的内禀弥散随年龄及银心距均有轻微下降趋势，随其金属丰度和银面距无明显变化。这与银盘化学增丰过程相符。

(2) 疏散星团径向和垂向金属丰度梯度及金属丰度-年龄关系（简称“AMR”）的斜率分别为： $-0.061 \pm 0.009 \text{ dex kpc}^{-1}$ ， $-0.198 \pm 0.039 \text{ dex kpc}^{-1}$ ， $-0.038 \pm 0.012 \text{ dex Gyr}^{-1}$ ，与他人工作结果相符。

(3) 相比薄盘星，疏散星团的径向和垂向梯度略陡；疏散星团的轨道椭率更

小，接近近圆轨道；三维速度弥散更小。

以上几点结论均说明疏散星团受到银河系动力学影响更小，导致径向迁移效应和加热效应更小 (Frankel 等, 2020; Sharma 等, 2020; Spina 等, 2021a)。

5.2 展望

在本文工作的基础上，基于 LAMOST 低分辨率光谱，我们将开展以下两个工作：

其一，我们将重复观测 5 次以上源的改正因子分布的中位值作为整体样本的改正因子，因为观测误差跟受信噪比、光谱型、波长定标等因素的影响，而观测误差改正因子 K 又是评估 LAMOST 低分辨率光谱观测误差测量质量的参量。所以，我们可以更详细地研究视向速度和金属丰度的误差改正因子和恒星光谱型、信噪比等因素的关系。同时，改正因子可以为他人基于 LAMOST 低分辨率光谱观测误差的研究提供误差修正。

其二，CG20 中提供了基于 *Gaia* DR2 高精度自行和视差所得疏散星团的成员概率，本文中基于 LAMOST 低分辨率光谱视向速度和金属丰度的混合模型，可以得到每颗星基于视向速度和金属丰度二维空间上属于疏散星团的成员概率。两者结合，可以得到每颗星基于两维自行、视差、视向速度和金属丰度 5 维空间上的成员概率。

中分辨率相比低分辨率测量精度更高，同样的混合模型，基于 LAMOST 中分辨率光谱，我们可以开展以下几方面工作：

其一，疏散星团典型的视向速度内禀弥散 $\sim 1 \text{ km s}^{-1}$ (Mermilliod 等, 2009; Bonatto 和 Bica, 2011)，而 LAMOST DR7 低分辨率光谱视向速度观测精度 ($\sigma_{RV} \sim 5 \text{ km s}^{-1}$)，对于视向速度内禀弥散比较小的疏散星团，LAMOST DR7 低分辨率光谱巡天不能很好地约束疏散星团视向速度的内禀弥散，只能给出 84% 的上限值。LAMOST 中分辨率光谱具有高精度的视向速度测量 ($RV < 1 \text{ km s}^{-1}$)，此精度与疏散星团视向速度内禀弥散相当，可以更好地约束疏散星团的视向速度内禀弥散。

其二，本文中得到疏散星团金属丰度内禀弥散的典型值为 $0.09_{-0.03}^{+0.07} \text{ dex}$ ，峰值为 0.07，这与 LAMOST 中分辨率金属丰度精度 $[\text{Fe}/\text{H}] < 0.1 \text{ dex}$ 相当。因而，可以研究一下 LAMOST 中分辨率光谱所得疏散星团金属丰度内禀弥散和低分辨

率光谱的结果是否一致? 同时, LAMOST 中分辨率光谱可以更好地约束疏散星团的金属丰度及其内禀弥散。

其三, LAMOST 中分辨率光谱巡天覆盖了 18 个疏散星团天区, 对每一个疏散星团观测次数比较多, 因而可以尽可能多的覆盖疏散星团及其成员星, 使得星团成员星完备性 ($G < 15 \text{ mag}$) 高达 80%, 可以更详尽地开展关于疏散星团中双星、蓝离散星等方面的研究。

其四, LAMOST 中分辨率测量精度虽高, 但仍有必要研究其观测误差改正因子。

参考文献

- 赵君亮. 银河系厚盘恒星的年龄-金属度关系[J]. 天文学进展, 2005, 23(4):346.
- Agarwal M, Rao K K, Vaidya K, et al. ML-MOC: Machine Learning (kNN and GMM) based Membership determination for Open Clusters[J/OL]. MNRAS, 2021, 502(2):2582-2599. DOI: [10.1093/mnras/stab118](https://doi.org/10.1093/mnras/stab118).
- Ahumada R, Prieto C A, Almeida A, et al. 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]. ApJS, 2020, 249(1):3. DOI: [10.3847/1538-4365/ab929e](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab929e).
- Alam S, Albareti F D, Allende Prieto C, et al. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III[J/OL]. ApJS, 2015, 219(1):12. DOI: [10.1088/0067-0049/219/1/12](https://doi.org/10.1088/0067-0049/219/1/12).
- Andrievsky S M, Kovtyukh V V, Luck R E, et al. Using Cepheids to determine the galactic abundance gradient. III. First results for the outer disc[J/OL]. A&A, 2002, 392:491-499. DOI: [10.1051/0004-6361:20021035](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021035).
- Ann H B, Lee S H. UBVI CCD Photometry of the Open Cluster NGC 559[J/OL]. Journal of Korean Astronomical Society, 2002, 35(1):29-34. DOI: [10.5303/JKAS.2002.35.1.029](https://doi.org/10.5303/JKAS.2002.35.1.029).
- Aumer M, Binney J J. Kinematics and history of the solar neighbourhood revisited[J/OL]. MNRAS, 2009, 397(3):1286-1301. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15053.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15053.x).
- Babusiaux C, Gilmore G. The structure of the Galactic bar[J/OL]. MNRAS, 2005, 358(4):1309-1319. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.08828.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08828.x).
- Balaguer-Núñez L, López del Fresno M, Solano E, et al. Clusterix 2.0: a virtual observatory tool to estimate cluster membership probability[J/OL]. MNRAS, 2020, 492(4):5811-5843. DOI: [10.1093/mnras/stz3610](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3610).
- Balser D S, Rood R T, Bania T M, et al. H II Region Metallicity Distribution in the Milky Way Disk [J/OL]. ApJ, 2011, 738(1):27. DOI: [10.1088/0004-637X/738/1/27](https://doi.org/10.1088/0004-637X/738/1/27).
- Bastian N. On the star formation rate - brightest cluster relation: estimating the peak star formation rate in post-merger galaxies[J/OL]. MNRAS, 2008, 390(2):759-768. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13775.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13775.x).
- Bastian N, Covey K R, Meyer M R. A Universal Stellar Initial Mass Function? A Critical Look at Variations[J/OL]. ARA&A, 2010, 48:339-389. DOI: [10.1146/annurev-astro-082708-101642](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101642).
- Bensby T, Feltzing S, Lundström I, et al. α -, r-, and s-process element trends in the Galactic thin and thick disks[J/OL]. A&A, 2005, 433(1):185-203. DOI: [10.1051/0004-6361:20040332](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20040332).

- Bhattacharya S, Mahulkar V, Pandaokar S, et al. Morphology of open clusters NGC 1857 and Czernik 20 using clustering algorithms[J/OL]. *Astronomy and Computing*, 2017, 18:1-7. DOI: [10.1016/j.ascom.2016.10.001](https://doi.org/10.1016/j.ascom.2016.10.001).
- Bhattacharya S, Vaidya K, Chen W P, et al. The blue straggler population of the old open cluster Berkeley 17[J/OL]. *A&A*, 2019, 624:A26. DOI: [10.1051/0004-6361/201834449](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834449).
- Binney J, Gerhard O, Spergel D. The photometric structure of the inner Galaxy[J/OL]. *MNRAS*, 1997, 288(2):365-374. DOI: [10.1093/mnras/288.2.365](https://doi.org/10.1093/mnras/288.2.365).
- Blanton M R, Bershadsky M A, Abolfathi B, et al. Sloan Digital Sky Survey IV: Mapping the Milky Way, Nearby Galaxies, and the Distant Universe[J/OL]. *AJ*, 2017, 154(1):28. DOI: [10.3847/1538-3881/aa7567](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7567).
- Bobylev V V, Bajkova A T. The Milky Way spiral structure parameters from data on masers and selected open clusters[J/OL]. *MNRAS*, 2014, 437(2):1549-1553. DOI: [10.1093/mnras/stt1987](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1987).
- Bonatto C, Bica E. From proper motions to star cluster dynamics: measuring the velocity dispersion in deconvolved distribution functions[J/OL]. *MNRAS*, 2011, 415(1):313-322. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.18699.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18699.x).
- Bonatto C, Kerber L O, Bica E, et al. Probing disk properties with open clusters[J/OL]. *A&A*, 2006, 446(1):121-135. DOI: [10.1051/0004-6361:20053573](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053573).
- Bouchy F, Pepe F, Queloz D. Fundamental photon noise limit to radial velocity measurements[J/OL]. *A&A*, 2001, 374:733-739. DOI: [10.1051/0004-6361:20010730](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010730).
- Bowen I S, Vaughan J, A. H. The optical design of the 40-in. telescope and of the Irénée DuPont telescope at Las Campanas Observatory, Chile.[J/OL]. *ApJ*, 1973, 12:1430-1434. DOI: [10.1364/AO.12.001430](https://doi.org/10.1364/AO.12.001430).
- Bragaglia A, Held E V, Tosi M. Radial velocities and membership of stars in the old, distant open cluster Berkeley 29[J/OL]. *A&A*, 2005, 429:881-886. DOI: [10.1051/0004-6361:20041049](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041049).
- Bragaglia A, Sestito P, Villanova S, et al. Old open clusters as key tracers of Galactic chemical evolution. II. Iron and elemental abundances in NGC 2324, NGC 2477 NGC 2660, NGC 3960, and Berkeley 32[J/OL]. *A&A*, 2008, 480(1):79-90. DOI: [10.1051/0004-6361:20077904](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077904).
- Buder S, Asplund M, Duong L, et al. The GALAH Survey: second data release[J/OL]. *MNRAS*, 2018, 478(4):4513-4552. DOI: [10.1093/mnras/sty1281](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1281).
- Buder S, Sharma S, Kos J, et al. The GALAH+ Survey: Third Data Release[J]. *arXiv e-prints*, 2020:arXiv:2011.02505.
- Cabrera-Cano J, Alfaro E J. A non-parametric approach to the membership problem in open clusters. [J]. *A&A*, 1990, 235:94.
- Cameron L M. Metallicities and distances of galactic clusters as determined from UBV-data. III. Ages and abundance gradients of open clusters.[J]. *A&A*, 1985, 147:47-53.

- Cantat-Gaudin T, Anders F. Clusters and mirages: cataloguing stellar aggregates in the Milky Way [J/OL]. *A&A*, 2020, 633:A99. DOI: [10.1051/0004-6361/201936691](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936691).
- Cantat-Gaudin T, Jordi C, Vallenari A, et al. A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way[J/OL]. *A&A*, 2018, 618:A93. DOI: [10.1051/0004-6361/201833476](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833476).
- Cantat-Gaudin T, Vallenari A, Sordo R, et al. Characterising open clusters in the solar neighbourhood with the Tycho-Gaia Astrometric Solution[J/OL]. *A&A*, 2018, 615:A49. DOI: [10.1051/0004-6361/201731251](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731251).
- Cantat-Gaudin T, Krone-Martins A, Sedaghat N, et al. Gaia DR2 unravels incompleteness of nearby cluster population: new open clusters in the direction of Perseus[J/OL]. *A&A*, 2019, 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. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters[J/OL]. *A&A*, 2020, 640:A1. DOI: [10.1051/0004-6361/202038192](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038192).
- Carlberg R G, Dawson P C, Hsu T, et al. The age-velocity-dispersion relation in the solar neighborhood.[J/OL]. *ApJ*, 1985, 294:674-681. DOI: [10.1086/163337](https://doi.org/10.1086/163337).
- Carollo D, Beers T C, Lee Y S, et al. Two stellar components in the halo of the Milky Way[J/OL]. *Nature*, 2008, 451(7175):216. DOI: [10.1038/nature06542](https://doi.org/10.1038/nature06542).
- Carraro G, Chiosi C. The Galactic system of old open clusters: age calibration and age-metallicity relation[J]. *A&A*, 1994, 287:761-768.
- Carraro G, Ng Y K, Portinari L. On the Galactic disc age-metallicity relation[J/OL]. *MNRAS*, 1998, 296(4):1045-1056. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.01460.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01460.x).
- Carraro G, de Silva G, Monaco L, et al. Updated properties of the old open cluster Melotte 66: Searching for multiple stellar populations[J/OL]. *A&A*, 2014, 566:A39. DOI: [10.1051/0004-6361/201423714](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423714).
- Carrera R, Pancino E. Chemical abundance analysis of the open clusters Berkeley 32, NGC 752, Hyades, and Praesepe[J/OL]. *A&A*, 2011, 535:A30. DOI: [10.1051/0004-6361/201117473](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117473).
- Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al. A new method for unveiling open clusters in Gaia. New nearby open clusters confirmed by DR2[J/OL]. *A&A*, 2018, 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. Hunting for open clusters in Gaia DR2: the Galactic anti-centre[J/OL]. *A&A*, 2019, 627:A35. DOI: [10.1051/0004-6361/201935531](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935531).
- Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al. Hunting for open clusters in Gaia DR2: 582 new open clusters in the Galactic disc[J/OL]. *A&A*, 2020, 635:A45. DOI: [10.1051/0004-6361/201937386](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937386).
- Çakmak H, Güneş O, Karataş Y. Astrophysical and Structural Parameters, And Dynamical Evolution Of The Open Clusters NGC 1245 And NGC 2099[J]. *arXiv e-prints*, 2020:arXiv:2012.15587.

- Chen L, Hou J L, Wang J J. On the Galactic Disk Metallicity Distribution from Open Clusters. I. New Catalogs and Abundance Gradient[J/OL]. *AJ*, 2003, 125(3):1397-1406. DOI: [10.1086/367911](https://doi.org/10.1086/367911).
- Chen Y Q, Zhao G. Open clusters as tracers on radial migration of the galactic disc[J/OL]. *MNRAS*, 2020, 495(3):2673-2681. DOI: [10.1093/mnras/staa1079](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1079).
- Cheng J Y, Rockosi C M, Morrison H L, et al. Metallicity Gradients in the Milky Way Disk as Observed by the SEGUE Survey[J/OL]. *ApJ*, 2012, 746(2):149. DOI: [10.1088/0004-637X/746/2/149](https://doi.org/10.1088/0004-637X/746/2/149).
- Conrad C, Scholz R D, Kharchenko N V, et al. A RAVE investigation on Galactic open clusters. I. Radial velocities and metallicities[J/OL]. *A&A*, 2014, 562:A54. DOI: [10.1051/0004-6361/201322070](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322070).
- Costa R D D, Uchida M M M, Maciel W J. Chemical abundances of planetary nebulae towards the Galactic anticenter[J/OL]. *A&A*, 2004, 423:199-207. DOI: [10.1051/0004-6361:20034539](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034539).
- Cropper M, Katz D, Sartoretti P, et al. Gaia Data Release 2. Gaia Radial Velocity Spectrometer [J/OL]. *A&A*, 2018, 616:A5. DOI: [10.1051/0004-6361/201832763](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832763).
- Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST)[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(9):1197-1242. DOI: [10.1088/1674-4527/12/9/003](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/9/003).
- Currie T, Hernandez J, Irwin J, et al. The Stellar Population of η and χ Persei: Cluster Properties, Membership, and the Intrinsic Colors and Temperatures of Stars[J/OL]. *ApJS*, 2010, 186(2): 191-221. DOI: [10.1088/0067-0049/186/2/191](https://doi.org/10.1088/0067-0049/186/2/191).
- Daflon S, Cunha K. Galactic Metallicity Gradients Derived from a Sample of OB Stars[J/OL]. *ApJ*, 2004, 617(2):1115-1126. DOI: [10.1086/425607](https://doi.org/10.1086/425607).
- Dalton G, Trager S, Abrams D C, et al. Integration and early testing of WEAVE: the next-generation spectroscopy facility for the William Herschel Telescope[C/OL]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: volume 11447 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 2020: 1144714. DOI: [10.1117/12.2561067](https://doi.org/10.1117/12.2561067).
- Dambis A K, Glushkova E V, Mel'Nik A M, et al. The Distance scale and the rotation curve of young supergiants and open clusters[J/OL]. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2001, 20(1):161-164. DOI: [10.1080/10556790108208206](https://doi.org/10.1080/10556790108208206).
- de Grijs R, Li C, Zheng Y, et al. Gravitational Conundrum? Dynamical Mass Segregation versus Disruption of Binary Stars in Dense Stellar Systems[J/OL]. *ApJ*, 2013, 765(1):4. DOI: [10.1088/0004-637X/765/1/4](https://doi.org/10.1088/0004-637X/765/1/4).
- de Jong R S. Near-infrared and optical broadband surface photometry of 86 face-on disk dominated galaxies. IV. Using color profiles to study stellar and dust content of galaxies.[J]. *A&A*, 1996, 313:377-395.

- Deng L C, Newberg H J, Liu C, et al. LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration (LEGUE) — The survey's science plan[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 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. New catalogue of optically visible open clusters and candidates[J/OL]. *A&A*, 2002, 389:871-873. DOI: [10.1051/0004-6361:20020668](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020668).
- Dias W S, Monteiro H, Caetano T C, et al. Proper motions of the optically visible open clusters based on the UCAC4 catalog[J/OL]. *A&A*, 2014, 564:A79. DOI: [10.1051/0004-6361/201323226](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201323226).
- Dias W S, Monteiro H, Lépine J R D, et al. The spiral pattern rotation speed of the Galaxy and the corotation radius with Gaia DR2[J/OL]. *MNRAS*, 2019, 486(4):5726-5736. DOI: [10.1093/mnras/stz1196](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1196).
- Donor J, Frinchaboy P M, Cunha K, et al. The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping Survey. II. Precision Cluster Abundances for APOGEE Using SDSS DR14[J/OL]. *AJ*, 2018, 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. The Open Cluster Chemical Abundances and Mapping Survey. IV. Abundances for 128 Open Clusters Using SDSS/APOGEE DR16[J/OL]. *AJ*, 2020, 159(5):199. DOI: [10.3847/1538-3881/ab77bc](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab77bc).
- Eisenstein D J, Weinberg D H, Agol E, et al. SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems[J/OL]. *AJ*, 2011, 142(3):72. DOI: [10.1088/0004-6256/142/3/72](https://doi.org/10.1088/0004-6256/142/3/72).
- El Aziz M A, Selim I M, Essam A. Open cluster membership probability based on K-means clustering algorithm[J/OL]. *Experimental Astronomy*, 2016, 42(1):49-59. DOI: [10.1007/s10686-016-9499-9](https://doi.org/10.1007/s10686-016-9499-9).
- Elsanhoury W H, Haroon A A, Chupina N V, et al. 2MASS photometry and kinematical studies of open cluster NGC 188[J/OL]. , 2016, 49:32-37. DOI: [10.1016/j.newast.2016.06.002](https://doi.org/10.1016/j.newast.2016.06.002).
- Elson R A W, Sigurdsson S, Davies M, et al. The binary star population of the young cluster NGC 1818 in the Large Magellanic Cloud[J/OL]. *MNRAS*, 1998, 300(3):857-862. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.01948.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01948.x).
- ESTER M, KRIEGEL H P, SANDER J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]//KDD'96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. AAAI Press, 1996: 226–231.
- Evans D W, Riello M, De Angeli F, et al. Gaia Data Release 2. Photometric content and validation [J/OL]. *A&A*, 2018, 616:A4. DOI: [10.1051/0004-6361/201832756](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832756).
- Feltzing S, Holmberg J, Hurley J R. The solar neighbourhood age-metallicity relation - Does it exist? [J/OL]. *A&A*, 2001, 377:911-924. DOI: [10.1051/0004-6361:20011119](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20011119).
- Feltzing S, Bensby T, Bergemann M, et al. Galactic Archeology with 4MOST[C/OL]//Chiappini C,

- Minchev I, Starkenburg E, et al. Rediscovering Our Galaxy: volume 334. 2018: 225-232. DOI: [10.1017/S1743921317008730](https://doi.org/10.1017/S1743921317008730).
- Ferreira F A, Santos J F C, Corradi W J B, et al. Three new Galactic star clusters discovered in the field of the open cluster NGC 5999 with Gaia DR2[J/OL]. MNRAS, 2019, 483(4):5508-5517. DOI: [10.1093/mnras/sty3511](https://doi.org/10.1093/mnras/sty3511).
- Foreman-Mackey D, Hogg D W, Lang D, et al. emcee: The MCMC Hammer[J/OL]. PASP, 2013, 125(925):306. DOI: [10.1086/670067](https://doi.org/10.1086/670067).
- Frankel N, Sanders J, Ting Y S, et al. Keeping It Cool: Much Orbit Migration, yet Little Heating, in the Galactic Disk[J/OL]. ApJ, 2020, 896(1):15. DOI: [10.3847/1538-4357/ab910c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab910c).
- Frasca A, Biazzo K, Lanzafame A C, et al. The Gaia-ESO Survey: Chromospheric emission, accretion properties, and rotation in γ Velorum and Chamaeleon I★★★[J/OL]. A&A, 2015, 575:A4. DOI: [10.1051/0004-6361/201424409](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424409).
- Freeman K, Bland-Hawthorn J. The New Galaxy: Signatures of Its Formation[J/OL]. ARA&A, 2002, 40:487-537. DOI: [10.1146/annurev.astro.40.060401.093840](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.40.060401.093840).
- Friel E D. The Old Open Clusters Of The Milky Way[J/OL]. ARA&A, 1995, 33:381-414. DOI: [10.1146/annurev.aa.33.090195.002121](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.33.090195.002121).
- Friel E D, Janes K A. Metallicities and radial velocities of old open clusters.[J]. A&A, 1993, 267: 75-91.
- Friel E D, Janes K A, Tavares M, et al. Metallicities of Old Open Clusters[J/OL]. AJ, 2002, 124(5): 2693-2720. DOI: [10.1086/344161](https://doi.org/10.1086/344161).
- Friel E D, Jacobson H R, Pilachowski C A. Abundances of Red Giants in Old Open Clusters. V. Be 31, Be 32, Be 39, M 67, NGC 188, and NGC 1193[J/OL]. AJ, 2010, 139(5):1942-1967. DOI: [10.1088/0004-6256/139/5/1942](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/5/1942).
- Fuhrmann K. Nearby stars of the Galactic disk and halo[J]. A&A, 1998, 338:161-183.
- Fuhrmann K. Nearby stars of the Galactic disc and halo - IV[J/OL]. MNRAS, 2008, 384(1):173-224. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.12671.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12671.x).
- Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties[J/OL]. A&A, 2016, 595:A2. DOI: [10.1051/0004-6361/201629512](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629512).
- Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. The Gaia mission[J/OL]. A&A, 2016, 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. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties[J/OL]. A&A, 2018, 616:A1. DOI: [10.1051/0004-6361/201833051](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051).
- Galadi-Enriquez D, Jordi C, Trullols E. The overlapping open clusters NGC 1750 and NGC 1758. III. Cluster-field segregation and clusters physical parameters[J]. A&A, 1998, 337:125-140.

- Gao X H. Membership determination of open cluster NGC 188 based on the DBSCAN clustering algorithm[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(2):159-164. DOI: [10.1088/1674-4527/14/2/004](https://doi.org/10.1088/1674-4527/14/2/004).
- Gao X H, Chen L. Kinematic and chemical properties of five open clusters based on SDSS DR7 [J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, 10(8):761-776. DOI: [10.1088/1674-4527/10/8/006](https://doi.org/10.1088/1674-4527/10/8/006).
- Gao X H, Chen L. A Study on the Fundamental Properties of Open Cluster NGC 6791 Based on the SDSS-DR8 and 2MASS Data[J/OL]. , 2012, 36(1):1-11. DOI: [10.1016/j.chinastron.2011.12.003](https://doi.org/10.1016/j.chinastron.2011.12.003).
- Gao X H, Chen L, Hou Z J. A New Method of Open Cluster Membership Determination[J/OL]. , 2014, 38(3):257-264. DOI: [10.1016/j.chinastron.2014.07.004](https://doi.org/10.1016/j.chinastron.2014.07.004).
- Gao X. Memberships of the Open Cluster NGC 6405 Based on a Combined Method: Gaussian Mixture Model and Random Forest[J/OL]. *AJ*, 2018, 156(3):121. DOI: [10.3847/1538-3881/aad690](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aad690).
- Gao X. 5D memberships and fundamental properties of the old open cluster NGC 6791 based on Gaia -DR2[J/OL]. *Ap&SS*, 2020, 365(2):24. DOI: [10.1007/s10509-020-3738-2](https://doi.org/10.1007/s10509-020-3738-2).
- Geller A M, Mathieu R D, Harris H C, et al. WIYN Open Cluster Study. XXXII. Stellar Radial Velocities in the Old Open Cluster NGC 188[J/OL]. *AJ*, 2008, 135(6):2264-2278. DOI: [10.1088/0004-6256/135/6/2264](https://doi.org/10.1088/0004-6256/135/6/2264).
- Ghez A M, Salim S, Weinberg N N, et al. Measuring Distance and Properties of the Milky Way's Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits[J/OL]. *ApJ*, 2008, 689(2):1044-1062. DOI: [10.1086/592738](https://doi.org/10.1086/592738).
- Gilmore G, Randich S, Asplund M, et al. The Gaia-ESO Public Spectroscopic Survey[J]. *The Messenger*, 2012, 147:25-31.
- Goodman J, Weare J. Ensemble samplers with affine invariance[J/OL]. *Communications in Applied Mathematics and Computational Science*, 2010, 5(1):65-80. DOI: [10.2140/camcos.2010.5.65](https://doi.org/10.2140/camcos.2010.5.65).
- Gouliermis D A. Unbound Young Stellar Systems: Star Formation on the Loose[J/OL]. *PASP*, 2018, 130(989):072001. DOI: [10.1088/1538-3873/aac1fd](https://doi.org/10.1088/1538-3873/aac1fd).
- Gunn J E, Siedmund W A, Mannery E J, et al. The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey [J/OL]. *AJ*, 2006, 131(4):2332-2359. DOI: [10.1086/500975](https://doi.org/10.1086/500975).
- Gunsheski L, Paust N, van Belle G. Determining the Initial Mass Function of Open Cluster NGC6811 by Using the UPMASK Method[C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts: volume 235 American Astronomical Society Meeting Abstracts #235. 2020: 110.02.
- Guszejnov D, Hopkins P F, Grudić M Y. Universal scaling relations in scale-free structure formation [J/OL]. *MNRAS*, 2018, 477(4):5139-5149. DOI: [10.1093/mnras/sty920](https://doi.org/10.1093/mnras/sty920).
- Gutiérrez Albarrán M L, Montes D, Gómez Garrido M, et al. The Gaia-ESO Survey: Calibrat-

- ing the lithium-age relation with open clusters and associations. I. Cluster age range and initial membership selections[J/OL]. *A&A*, 2020, 643:A71. DOI: [10.1051/0004-6361/202037620](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037620).
- Hayden M R, Holtzman J A, Bovy J, et al. Chemical Cartography with APOGEE: Large-scale Mean Metallicity Maps of the Milky Way Disk[J/OL]. *AJ*, 2014, 147(5):116. DOI: [10.1088/0004-6256/147/5/116](https://doi.org/10.1088/0004-6256/147/5/116).
- Haywood M, Di Matteo P, Lehnert M D, et al. The age structure of stellar populations in the solar vicinity. Clues of a two-phase formation history of the Milky Way disk[J/OL]. *A&A*, 2013, 560:A109. DOI: [10.1051/0004-6361/201321397](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321397).
- Henry R B C, Kwitter K B, Jaskot A E, et al. Abundances of Galactic Anticenter Planetary Nebulae and the Oxygen Abundance Gradient in the Galactic Disk[J/OL]. *ApJ*, 2010, 724(1):748-761. DOI: [10.1088/0004-637X/724/1/748](https://doi.org/10.1088/0004-637X/724/1/748).
- Høg E, Fabricius C, Makarov V V, et al. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars[J]. *A&A*, 2000, 355:L27-L30.
- Holmberg J, Nordström B, Andersen J. The Geneva-Copenhagen survey of the Solar neighbourhood II. New uvby calibrations and rediscussion of stellar ages, the G dwarf problem, age-metallicity diagram, and heating mechanisms of the disk[J/OL]. *A&A*, 2007, 475(2):519-537. DOI: [10.1051/0004-6361:20077221](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077221).
- Holtzman J A, Harrison T E, Coughlin J L. The NMSU 1 m Telescope at Apache Point Observatory [J/OL]. *Advances in Astronomy*, 2010, 2010:193086. DOI: [10.1155/2010/193086](https://doi.org/10.1155/2010/193086).
- Hou J L, Chang R X, Chen L. Abundance Gradient from Open Clusters and Implications for the Galactic Disk Evolution[J/OL]. *ApJ*, 2002, 2:17-32. DOI: [10.1088/1009-9271/2/1/17](https://doi.org/10.1088/1009-9271/2/1/17).
- Hron J. Kinematics of young open clusters and the rotation curve of our Galaxy.[J]. *A&A*, 1987, 176:34-52.
- Hunt E L, Reffert S. Improving the open cluster census. I. Comparison of clustering algorithms applied to Gaia DR2 data[J/OL]. *A&A*, 2021, 646:A104. DOI: [10.1051/0004-6361/202039341](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039341).
- Ibukiyama A, Arimoto N. HIPPARCOS age-metallicity relation of the solar neighbourhood disc stars[J/OL]. *A&A*, 2002, 394:927-941. DOI: [10.1051/0004-6361:20021157](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021157).
- Janes K, Adler D. Open clusters and galactic structure.[J/OL]. *ApJS*, 1982, 49:425-446. DOI: [10.1086/190805](https://doi.org/10.1086/190805).
- Janes K A. Evidence for an abundance gradient in the galactic disk.[J/OL]. *ApJS*, 1979, 39:135-156. DOI: [10.1086/190568](https://doi.org/10.1086/190568).
- Joshi Y C, Dambis A K, Pandey A K, et al. Study of open clusters within 1.8 kpc and understanding the Galactic structure[J/OL]. *A&A*, 2016, 593:A116. DOI: [10.1051/0004-6361/201628944](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628944).
- Jurić M, Ivezić Ž, Brooks A, et al. The Milky Way Tomography with SDSS. I. Stellar Number Density Distribution[J/OL]. *ApJ*, 2008, 673(2):864-914. DOI: [10.1086/523619](https://doi.org/10.1086/523619).

- Katz D, Soubiran C, Cayrel R, et al. Probing the Galactic thick disc vertical properties and interfaces [J/OL]. *A&A*, 2011, 525:A90. DOI: [10.1051/0004-6361/201014840](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014840).
- Kharchenko N V, Scholz R D, Piskunov A E, et al. VizieR Online Data Catalog: 2nd Cat. of Radial Velocities with Astrometric Data (Kharchenko+, 2007)[J]. *VizieR Online Data Catalog*, 2007: III/254.
- Kharchenko N V, Scholz R D, Piskunov A E, et al. Astrophysical supplements to the ASCC-2.5: Ia. Radial velocities of ~55000 stars and mean radial velocities of 516 Galactic open clusters and associations[J/OL]. *Astronomische Nachrichten*, 2007, 328(9):889. DOI: [10.1002/asna.200710776](https://doi.org/10.1002/asna.200710776).
- Kharchenko N V, Piskunov A E, Schilbach E, et al. Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters[J/OL]. *A&A*, 2013, 558:A53. DOI: [10.1051/0004-6361/201322302](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322302).
- Krone-Martins A, Moitinho A. UPMASK: unsupervised photometric membership assignment in stellar clusters[J/OL]. *A&A*, 2014, 561:A57. DOI: [10.1051/0004-6361/201321143](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321143).
- Krumholz M R, McKee C F, Bland-Hawthorn J. Star Clusters Across Cosmic Time[J/OL]. *ARA&A*, 2019, 57:227-303. DOI: [10.1146/annurev-astro-091918-104430](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091918-104430).
- Kuhn M A, Feigelson E D. Mixture Models in Astronomy[J]. *arXiv e-prints*, 2017: arXiv:1711.11101.
- Lada C J, Lada E A. Embedded Clusters in Molecular Clouds[J/OL]. *ARA&A*, 2003, 41:57-115. DOI: [10.1146/annurev.astro.41.011802.094844](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.011802.094844).
- Lanzafame A C, Frasca A, Damiani F, et al. Gaia-ESO Survey: Analysis of pre-main sequence stellar spectra[J/OL]. *A&A*, 2015, 576:A80. DOI: [10.1051/0004-6361/201424759](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424759).
- Launhardt R, Zylka R, Mezger P G. The nuclear bulge of the Galaxy. III. Large-scale physical characteristics of stars and interstellar matter[J/OL]. *A&A*, 2002, 384:112-139. DOI: [10.1051/0004-6361:20020017](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020017).
- Lépine J R D, Cruz P, Scarano J, S., et al. Overlapping abundance gradients and azimuthal gradients related to the spiral structure of the Galaxy[J/OL]. *MNRAS*, 2011, 417(1):698-708. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19314.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19314.x).
- Li C, Zhao G, Zhai M, et al. The Formation and Evolution of Galactic Disks with APOGEE and the Gaia Survey[J/OL]. *ApJ*, 2018, 860(1):53. DOI: [10.3847/1538-4357/aac50f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac50f).
- Li L, Shao Z, Li Z Z, et al. Modeling Unresolved Binaries of Open Clusters in the Color-Magnitude Diagram. I. Method and Application of NGC 3532[J/OL]. *ApJ*, 2020, 901(1):49. DOI: [10.3847/1538-4357/abaef3](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abaef3).
- Liu C, Fu J, Shi J, et al. LAMOST Medium-Resolution Spectroscopic Survey (LAMOST-MRS): Scientific goals and survey plan[J]. *arXiv e-prints*, 2020:arXiv:2005.07210.

- Liu L, Pang X. A Catalog of Newly Identified Star Clusters in Gaia DR2[J/OL]. *ApJS*, 2019, 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. Radial velocity measurements from LAMOST medium-resolution spectroscopic observations: a pointing towards the Kepler field[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(5):075. DOI: [10.1088/1674-4527/19/5/75](https://doi.org/10.1088/1674-4527/19/5/75).
- Loktin A V, Popova M E. Rotation curve of the Galaxy from the motions of open star clusters[J]. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, 2012, 27(2):379-388.
- Longmore S N, Kruijssen J M D, Bastian N, et al. The Formation and Early Evolution of Young Massive Clusters[C/OL]//Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. *Protostars and Planets VI*. 2014: 291. DOI: [10.2458/azu_apress_780816531240-ch013](https://doi.org/10.2458/azu_apress_780816531240-ch013).
- Luck R E, Kovtyukh V V, Andrievsky S M. The Distribution of the Elements in the Galactic Disk [J/OL]. *AJ*, 2006, 132(2):902-918. DOI: [10.1086/505687](https://doi.org/10.1086/505687).
- Luo A L, Zhao Y H, Zhao G, et al. The first data release (DR1) of the LAMOST regular survey[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2015, 15(8):1095. DOI: [10.1088/1674-4527/15/8/002](https://doi.org/10.1088/1674-4527/15/8/002).
- Lynga G. Open clusters in our galaxy.[J]. *A&A*, 1982, 109:213-222.
- Maciel W J, Quireza C. Abundance Gradients in the Outer Galactic Disk[J/OL]. *Ap&SS*, 1999, 265:269-270. DOI: [10.1023/A:1002199408686](https://doi.org/10.1023/A:1002199408686).
- Mackereth J T, Bovy J, Leung H W, et al. Dynamical heating across the Milky Way disc using APOGEE and Gaia[J/OL]. *MNRAS*, 2019, 489(1):176-195. DOI: [10.1093/mnras/stz1521](https://doi.org/10.1093/mnras/stz1521).
- Magrini L, Sestito P, Randich S, et al. The evolution of the Galactic metallicity gradient from high-resolution spectroscopy of open clusters[J/OL]. *A&A*, 2009, 494(1):95-108. DOI: [10.1051/0004-6361:200810634](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810634).
- Mahmudunnobe M, Hasan P, Raja M, et al. Membership of Stars in Open Clusters using Random Forest with Gaia Data[J]. *arXiv e-prints*, 2021:arXiv:2103.05826.
- Majewski S R, Schiavon R P, Frinchaboy P M, et al. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)[J/OL]. *AJ*, 2017, 154(3):94. DOI: [10.3847/1538-3881/aa784d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa784d).
- Martinez-Medina L A, Gieles M, Pichardo B, et al. New insights into the origin and evolution of the old, metal-rich open cluster NGC 6791[J/OL]. *MNRAS*, 2018, 474(1):32-44. DOI: [10.1093/mnras/stx2739](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2739).
- Martinez-Valpuesta I, Gerhard O. Unifying A Boxy Bulge and Planar Long Bar in the Milky Way [J/OL]. *ApJL*, 2011, 734(1):L20. DOI: [10.1088/2041-8205/734/1/L20](https://doi.org/10.1088/2041-8205/734/1/L20).
- Meingast S, Alves J. Extended stellar systems in the solar neighborhood. I. The tidal tails of the Hyades[J/OL]. *A&A*, 2019, 621:L3. DOI: [10.1051/0004-6361/201834622](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834622).
- Mermilliod J C, Mayor M, Udry S. Catalogues of radial and rotational velocities of 1253 F-K

- dwarfs in 13 nearby open clusters[J/OL]. *A&A*, 2009, 498(3):949-960. DOI: [10.1051/0004-6361/200810244](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200810244).
- Mermilliod J C. The Database for Galactic Open Clusters (BDA): volume 203[M/OL]. 1995: 127. DOI: [10.1007/978-94-011-0397-8_2](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0397-8_2).
- Meusinger H, Reimann H G, Stecklum B. The age-metallicity-velocity dispersion relation in the solar neighborhood and a simple evolution model.[J]. *A&A*, 1991, 245:57-74.
- Michalik D, Lindegren L, Hobbs D. The Tycho-Gaia astrometric solution . How to get 2.5 million parallaxes with less than one year of Gaia data[J/OL]. *A&A*, 2015, 574:A115. DOI: [10.1051/0004-6361/201425310](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425310).
- Moeckel N, Bate M R. On the evolution of a star cluster and its multiple stellar systems following gas dispersal[J/OL]. *MNRAS*, 2010, 404(2):721-737. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.16347.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16347.x).
- Moitinho A, Vázquez R A, Carraro G, et al. Spiral structure of the third galactic quadrant and the solution to the Canis Major debate[J/OL]. *MNRAS*, 2006, 368(1):L77-L81. DOI: [10.1111/j.1745-3933.2006.00163.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2006.00163.x).
- Muñoz-Mateos J C, Gil de Paz A, Boissier S, et al. Specific Star Formation Rate Profiles in Nearby Spiral Galaxies: Quantifying the Inside-Out Formation of Disks[J/OL]. *ApJ*, 2007, 658(2):1006-1026. DOI: [10.1086/511812](https://doi.org/10.1086/511812).
- Netopil M, Paunzen E, Heiter U, et al. On the metallicity of open clusters. III. Homogenised sample [J/OL]. *A&A*, 2016, 585:A150. DOI: [10.1051/0004-6361/201526370](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526370).
- Newberg H J, Carlin J L, Chen L, et al. The LAMOST Spectroscopic Survey of Milky Way Stars (LEGUE)[C]//Aoki W, Ishigaki M, Suda T, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series: volume 458 Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way. 2012: 405.
- Offner S S R, Clark P C, Hennebelle P, et al. The Origin and Universality of the Stellar Initial Mass Function[C/OL]//Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. Protostars and Planets VI. 2014: 53. DOI: [10.2458/azu_apress_780816531240-ch003](https://doi.org/10.2458/azu_apress_780816531240-ch003).
- Oosterhoff P T. A study of the double cluster in Perseus, based on photographic magnitudes and effective wavelengths derived from plates taken by E. Hertzsprung at the Potsdam and Mount Wilson observatories[J]. *Annalen van de Sterrewacht te Leiden*, 1937, 17:A1-A127.
- Pancino E. Globular cluster chemistry in fast-rotating dwarf stars belonging to intermediate-age open clusters[J/OL]. *A&A*, 2018, 614:A80. DOI: [10.1051/0004-6361/201732351](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732351).
- Pang X, Shen S, Shao Z. The Fundamental Plane of Open Clusters[J/OL]. *ApJL*, 2018, 868(1):L9. DOI: [10.3847/2041-8213/aaedaa](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaedaa).
- Pasquini L, Avila G, Blecha A, et al. Installation and commissioning of FLAMES, the VLT Multi-fibre Facility[J]. *The Messenger*, 2002, 110:1-9.

- Perryman M A C, de Boer K S, Gilmore G, et al. GAIA: Composition, formation and evolution of the Galaxy[J/OL]. *A&A*, 2001, 369:339-363. DOI: [10.1051/0004-6361:20010085](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010085).
- Piatti A E, Claria J J, Abadi M G. Chemical Evolution of the Galactic Disk: Evidence for a Gradient Perpendicular to the Galactic Plane[J/OL]. *AJ*, 1995, 110:2813. DOI: [10.1086/117731](https://doi.org/10.1086/117731).
- Piskunov A E, Kharchenko N V, Röser S, et al. Revisiting the population of Galactic open clusters [J/OL]. *A&A*, 2006, 445(2):545-565. DOI: [10.1051/0004-6361:20053764](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053764).
- Piskunov A E, Just A, Kharchenko N V, et al. Global survey of star clusters in the Milky Way. VI. Age distribution and cluster formation history[J/OL]. *A&A*, 2018, 614:A22. DOI: [10.1051/0004-6361/201732337](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732337).
- Quillen A C, Nolting E, Minchev I, et al. Migration in the shearing sheet and estimates for young open cluster migration[J/OL]. *MNRAS*, 2018, 475(4):4450-4466. DOI: [10.1093/mnras/sty125](https://doi.org/10.1093/mnras/sty125).
- Rain M J, Carraro G, Ahumada J A, et al. A Study of the Blue Straggler Population of the Old Open Cluster Collinder 261[J/OL]. *AJ*, 2020, 159(2):59. DOI: [10.3847/1538-3881/ab5f0b](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab5f0b).
- Randich S, Gilmore G, Gaia-ESO Consortium. The Gaia-ESO Large Public Spectroscopic Survey [J]. *The Messenger*, 2013, 154:47-49.
- Re Fiorentin P, Lattanzi M G, Spagna A. Evidence of a large-scale positive rotation-metallicity correlation in the Galactic thick disc[J/OL]. *MNRAS*, 2019, 484(1):L69-L74. DOI: [10.1093/mnrasl/sly198](https://doi.org/10.1093/mnrasl/sly198).
- Reddy A B S, Lambert D L, Giridhar S. The evolution of the Milky Way: new insights from open clusters[J/OL]. *MNRAS*, 2016, 463(4):4366-4382. DOI: [10.1093/mnras/stw2287](https://doi.org/10.1093/mnras/stw2287).
- Reid M J. The distance to the center of the Galaxy.[J/OL]. *ARA&A*, 1993, 31:345-372. DOI: [10.1146/annurev.aa.31.090193.002021](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.002021).
- Rockosi C, Beers T C, Majewski S, et al. SEGUE-2 and APOGEE: Revealing the History of the Milky Way[C]//astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey: volume 2010. 2009: 14.
- Rockosi C M. The SEGUE Survey: Overview Context[C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts: volume 219 American Astronomical Society Meeting Abstracts #219. 2012: 205.01.
- Roeser S, Demleitner M, Schilbach E. The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS)[J/OL]. *AJ*, 2010, 139(6):2440-2447. DOI: [10.1088/0004-6256/139/6/2440](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/6/2440).
- Röser S, Schilbach E, Goldman B. Hyades tidal tails revealed by Gaia DR2[J/OL]. *A&A*, 2019, 621:L2. DOI: [10.1051/0004-6361/201834608](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834608).
- Sanders W L. An improved method for computing membership probabilities in open clusters.[J]. *A&A*, 1971, 14:226-232.
- Sariya D P, Jiang I G, Bisht D, et al. Astrometric and Photometric Investigation of Three Old Age

- Open Clusters in the Gaia Era: Berkeley 32, Berkeley 98, and King 23[J/OL]. *AJ*, 2021, 161(3): 102. DOI: [10.3847/1538-3881/abd31f](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd31f).
- Sartoretti P, Katz D, Cropper M, et al. Gaia Data Release 2. Processing the spectroscopic data[J/OL]. *A&A*, 2018, 616:A6. DOI: [10.1051/0004-6361/201832836](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832836).
- Schmidt M. Rotation Parameters and Distribution of Mass in the Galaxy[M]. 1965: 513.
- Sestito P, Bragaglia A, Randich S, et al. Open clusters as key tracers of Galactic chemical evolution. III. Element abundances in Berkeley 20, Berkeley 29, Collinder 261 and Melotte 66[J/OL]. *A&A*, 2008, 488(3):943-958. DOI: [10.1051/0004-6361:200809650](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200809650).
- Shao Z, Li L. Gaia parallax of Milky Way globular clusters - A solution of mixture model[J/OL]. *MNRAS*, 2019, 489(3):3093-3101. DOI: [10.1093/mnras/stz2317](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2317).
- Shao Z, Chen L, Lin C C, et al. Bayesian inference of mass segregation of open clusters[C]//IAU General Assembly: volume 29. 2015: 2251290.
- Sharma S, Stello D, Buder S, et al. The TESS-HERMES survey data release 1: high-resolution spectroscopy of the TESS southern continuous viewing zone[J/OL]. *MNRAS*, 2018, 473(2): 2004-2019. DOI: [10.1093/mnras/stx2582](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2582).
- Sharma S, Stello D, Bland-Hawthorn J, et al. The K2-HERMES Survey: age and metallicity of the thick disc[J/OL]. *MNRAS*, 2019, 490(4):5335-5352. DOI: [10.1093/mnras/stz2861](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2861).
- Sharma S, Hayden M R, Bland-Hawthorn J. Chemical Enrichment and Radial Migration in the Galactic Disk – the origin of the $[\alpha/\text{Fe}]$ Double Sequence[J]. arXiv e-prints, 2020: arXiv:2005.03646.
- Sheinis A, Anguiano B, Asplund M, et al. First light results from the High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph at the Anglo-Australian Telescope[J/OL]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2015, 1:035002. DOI: [10.1117/1.JATIS.1.3.035002](https://doi.org/10.1117/1.JATIS.1.3.035002).
- Shi J R. The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (in Chinese)[J/OL]. *Chin Sci Bull*, 2016, 61(12):1330-1335. DOI: [10.1360/N972015-00975](https://doi.org/10.1360/N972015-00975).
- Sim G, Lee S H, Ann H B, et al. 207 New Open Star Clusters within 1 kpc from Gaia Data Release 2[J/OL]. *Journal of Korean Astronomical Society*, 2019, 52:145-158. DOI: [10.5303/JKAS.2019.52.5.145](https://doi.org/10.5303/JKAS.2019.52.5.145).
- Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. The Two Micron All Sky Survey (2MASS)[J/OL]. *AJ*, 2006, 131(2):1163-1183. DOI: [10.1086/498708](https://doi.org/10.1086/498708).
- Smiljanic R, Korn A J, Bergemann M, et al. The Gaia-ESO Survey: The analysis of high-resolution UVES spectra of FGK-type stars[J/OL]. *A&A*, 2014, 570:A122. DOI: [10.1051/0004-6361/201423937](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423937).
- Smith V V, Bizyaev D, Cunha K, et al. The APOGEE Data Release 16 Spectral Line List[J]. arXiv e-prints, 2021:arXiv:2103.10112.

- Soubiran C, Bienaymé O, Siebert A. Vertical distribution of Galactic disk stars. I. Kinematics and metallicity[J/OL]. *A&A*, 2003, 398:141-151. DOI: [10.1051/0004-6361:20021615](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021615).
- Soubiran C, Cantat-Gaudin T, Romero-Gómez M, et al. Open cluster kinematics with Gaia DR2 [J/OL]. *A&A*, 2018, 619:A155. DOI: [10.1051/0004-6361/201834020](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834020).
- Spina L, Ting Y S, De Silva G M, et al. The GALAH survey: tracing the Galactic disk with open clusters[J/OL]. *MNRAS*, 2021, 503(3):3279-3296. DOI: [10.1093/mnras/stab471](https://doi.org/10.1093/mnras/stab471).
- Spina L, Ting Y S, De Silva G M, et al. The GALAH survey: tracing the Galactic disk with open clusters[J/OL]. *MNRAS*, 2021. DOI: [10.1093/mnras/stab471](https://doi.org/10.1093/mnras/stab471).
- Spitzer L. Dynamical evolution of globular clusters[M]. 1987.
- Steinmetz M, Guiglion G, McMillan P J, et al. The Sixth Data Release of the Radial Velocity Experiment (RAVE). II. Stellar Atmospheric Parameters, Chemical Abundances, and Distances [J/OL]. *AJ*, 2020, 160(2):83. DOI: [10.3847/1538-3881/ab9ab8](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9ab8).
- Steinmetz M, Matijevič G, Enke H, et al. The Sixth Data Release of the Radial Velocity Experiment (RAVE). I. Survey Description, Spectra, and Radial Velocities[J/OL]. *AJ*, 2020, 160(2):82. DOI: [10.3847/1538-3881/ab9ab9](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab9ab9).
- Stello D, Bruntt H, Kjeldsen H, et al. Multisite campaign on the open cluster M67 - II. Evidence for solar-like oscillations in red giant stars[J/OL]. *MNRAS*, 2007, 377(2):584-594. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.11585.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11585.x).
- Ting Y S, Freeman K C, Kobayashi C, et al. Principal component analysis on chemical abundances spaces[J/OL]. *MNRAS*, 2012, 421(2):1231-1255. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.20387.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20387.x).
- Twarog B A. The chemical evolution of the solar neighborhood .I. A bias-free reduction technique and data sample .[J/OL]. *ApJS*, 1980, 44:1-29. DOI: [10.1086/190683](https://doi.org/10.1086/190683).
- Vasilevskis S, Klemola A, Preston G. Relative proper motions of stars in the region of the open cluster NGC 6633.[J/OL]. *AJ*, 1958, 63:387-395. DOI: [10.1086/107787](https://doi.org/10.1086/107787).
- Vázquez R A, May J, Carraro G, et al. Spiral Structure in the Outer Galactic Disk. I. The Third Galactic Quadrant[J/OL]. *ApJ*, 2008, 672(2):930-939. DOI: [10.1086/524003](https://doi.org/10.1086/524003).
- Villanova S, Carraro G, Geisler D, et al. NGC 6791: A Probable Bulge Cluster without Multiple Populations[J/OL]. *ApJ*, 2018, 867(1):34. DOI: [10.3847/1538-4357/aae4e5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae4e5).
- Wang F F, Luo A L. Improvement of LAMOST spectral classification and radial velocity determination[C]//Prugniel P, Singh H P. *Astronomical Society of India Conference Series: volume 6* Astronomical Society of India Conference Series. 2012: 253.
- Wang F, Luo A, Zhang H. Error Analysis of SDSS/LAMOST Stellar Radial Velocity Measurement [C/OL]//Feltzing S, Zhao G, Walton N A, et al. *Setting the scene for Gaia and LAMOST: volume 298*. 2014: 444-444. DOI: [10.1017/S1743921313007096](https://doi.org/10.1017/S1743921313007096).
- Wang R, Luo A L, Chen J J, et al. Properties of Radial Velocities Measurement Based on

- LAMOST-II Medium-resolution Spectroscopic Observations[J/OL]. *ApJS*, 2019, 244(2):27. DOI: [10.3847/1538-4365/ab3cc0](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab3cc0).
- Wang S G, Su D Q, Chu Y Q, et al. Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation[J/OL]. *ApJ*, 1996, 35(25):5155-5161. DOI: [10.1364/AO.35.005155](https://doi.org/10.1364/AO.35.005155).
- Wittenmyer R A, Sharma S, Stello D, et al. The K2-HERMES Survey. I. Planet-candidate Properties from K2 Campaigns 1-3[J/OL]. *AJ*, 2018, 155(2):84. DOI: [10.3847/1538-3881/aaa3e4](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaa3e4).
- Wu Z Y, Zhou X, Ma J, et al. The orbits of open clusters in the Galaxy[J/OL]. *MNRAS*, 2009, 399(4):2146-2164. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2009.15416.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15416.x).
- Xiang M S, Liu X W, Yuan H B, et al. The LAMOST stellar parameter pipeline at Peking University - LSP3[J/OL]. *MNRAS*, 2015, 448(1):822-854. DOI: [10.1093/mnras/stu2692](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2692).
- Yadav R K S, Glushkhova E V, Sariya D P, et al. Optical photometric study of the open clusters Kopusov 12, Kopusov 53 and Kopusov 77[J/OL]. *MNRAS*, 2011, 414(1):652-658. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.18430.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18430.x).
- Yanny B, Rockosi C, Newberg H J, et al. SEGUE: A Spectroscopic Survey of 240,000 Stars with $g = 14-20$ [J/OL]. *AJ*, 2009, 137(5):4377-4399. DOI: [10.1088/0004-6256/137/5/4377](https://doi.org/10.1088/0004-6256/137/5/4377).
- Yao S, Liu C, Zhang H T, et al. The site conditions of the Guo Shou Jing Telescope[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(7):772-780. DOI: [10.1088/1674-4527/12/7/005](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/7/005).
- Yen S X, Reffert S, Schilbach E, et al. Reanalysis of nearby open clusters using Gaia DR1/TGAS and HSOY[J/OL]. *A&A*, 2018, 615:A12. DOI: [10.1051/0004-6361/201731905](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731905).
- Yong D, Carney B W, Teixeira de Almeida M L, et al. Elemental Abundance Ratios in Stars of the Outer Galactic Disk. III. Cepheids[J/OL]. *AJ*, 2006, 131(4):2256-2273. DOI: [10.1086/500538](https://doi.org/10.1086/500538).
- York D G, Adelman J, Anderson J, John E., et al. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary [J/OL]. *AJ*, 2000, 120(3):1579-1587. DOI: [10.1086/301513](https://doi.org/10.1086/301513).
- Yuan H, Liu X, Xiang M, et al. Stellar Loci. III. Photometric Metallicities for Half Million FGK Stars of Stripe 82[J/OL]. *ApJ*, 2015, 803(1):13. DOI: [10.1088/0004-637X/803/1/13](https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/1/13).
- Zacharias N, Finch C T, Girard T M, et al. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4)[J/OL]. *AJ*, 2013, 145(2):44. DOI: [10.1088/0004-6256/145/2/44](https://doi.org/10.1088/0004-6256/145/2/44).
- Zasowski G, Johnson J A, Frinchaboy P M, et al. Target Selection for the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)[J/OL]. *AJ*, 2013, 146(4):81. DOI: [10.1088/0004-6256/146/4/81](https://doi.org/10.1088/0004-6256/146/4/81).
- Zasowski G, Cohen R E, Chojnowski S D, et al. Target Selection for the SDSS-IV APOGEE-2 Survey[J/OL]. *AJ*, 2017, 154(5):198. DOI: [10.3847/1538-3881/aa8df9](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa8df9).
- Zhao J L, He Y P. An improved method for membership determination of stellar clusters with proper motions with different accuracies.[J]. *A&A*, 1990, 237:54.

Zhao J L, Tian K P. Catalogue of membership for 43 open clusters (1994 version)[J]. Bulletin d'Information du Centre de Donnees Stellaires, 1995, 47:5.

Zhong J, Chen L, Kouwenhoven M B N, et al. Substructure and halo population of Double Cluster h and χ Persei[J/OL]. A&A, 2019, 624:A34. DOI: [10.1051/0004-6361/201834334](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834334).

Zhong J, Chen L, Wu D, et al. Exploring open cluster properties with Gaia and LAMOST[J/OL]. A&A, 2020, 640:A127. DOI: [10.1051/0004-6361/201937131](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937131).

Zucker D B, de Silva G, Freeman K, et al. The Galactic Archaeology with HERMES Survey[C]// Aoki W, Ishigaki M, Suda T, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series: volume 458 Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way. 2012: 421.

附录 A 表格全表

表 A.1 章节 3-112 个疏散星团及其周边场星信息

Cluster	α deg	δ deg	N_{CG20}	N_{obs}	N_{star}	$sump_{CG20}$	R_{max} deg	$N_{R_{max}}$	N_{field}	μ_{α}^* mas yr ⁻¹	$s_{\mu_{\alpha}^*}$ mas yr ⁻¹	μ_{δ} mas yr ⁻¹	$s_{\mu_{\delta}}$ mas yr ⁻¹	plx mas	s_{plx} mas	$DMODE$ pc	$\log(Age)$ yr
NGC 2168	92.272	24.336	1705	1168	222	181.2	1.405	1	19409	2.308	0.239	-2.905	0.235	1.13	0.064	862.4	8.17
Melotte 22	56.601	24.114	1061	482	217	202.2	4.058	1	30070	20.077	1.062	-45.503	1.183	7.35	0.177	135.6	7.89
NGC 2632	130.054	19.621	719	619	216	206.6	2.375	1	24355	-36.09	1.115	-12.919	0.997	5.36	0.129	185.5	8.83
NGC 1039	40.531	42.722	695	170	143	122.9	2.256	2	-28585	0.722	0.292	-5.681	0.325	1.95	0.105	505.5	8.12
NGC 2281	102.091	41.06	417	256	140	138.6	1.889	1	10079	-2.946	0.274	-8.321	0.257	1.9	0.089	519.4	8.79
NGC 2682	132.846	11.814	848	147	137	99.6	0.535	5	11247	-10.986	0.193	-2.964	0.201	1.14	0.051	859.1	9.63
NGC 1245	48.691	47.235	1991	141	128	64.1	1.078	3	18544	0.504	0.113	-1.579	0.1	0.29	0.05	3147.7	9.08
NGC 1647	71.481	19.079	645	150	120	115	1.998	2	28357	-1.057	0.253	-1.502	0.236	1.68	0.076	586.7	8.56
NGC 6811	294.34	46.378	355	160	106	96.3	0.896	2	13042	-3.399	0.116	-8.812	0.123	0.87	0.039	1112.5	9.03
Melotte 20	51.617	48.975	873	149	102	93.9	10.584	1	25590	22.864	1.127	-25.378	1.205	5.67	0.192	175.5	7.71
NGC 1750	75.926	23.695	512	113	92	79.1	1.806	2	25533	-0.96	0.246	-2.366	0.201	1.36	0.09	719.5	8.41
NGC 2099	88.074	32.545	1913	94	92	81.5	0.802	3	12852	1.924	0.201	-5.648	0.175	0.67	0.068	1438.1	8.65
NGC 2548	123.412	-5.726	535	106	81	75.2	1.476	2	12589	-1.313	0.194	1.029	0.178	1.29	0.065	758.8	8.59
NGC 1912	82.167	35.824	807	99	80	47.8	0.505	4	11936	1.58	0.175	-4.424	0.156	0.87	0.064	1107.4	8.47
NGC 1817	78.139	16.696	668	72	72	58.4	0.602	6	14510	0.485	0.118	-0.89	0.1	0.55	0.056	1723	9.05
NGC 752	29.223	37.794	253	68	64	59.2	2.612	1	12090	9.81	0.272	-11.713	0.266	2.24	0.071	441	9.07
NGC 7789	359.334	56.726	3646	63	63	57.5	0.839	7	12257	-0.922	0.14	-1.933	0.138	0.45	0.049	2074.7	9.19
NGC 1662	72.198	10.882	241	76	54	52.7	2.567	2	24725	-1.128	0.225	-1.962	0.229	2.4	0.096	411.7	8.89
NGC 1342	52.894	37.38	404	57	53	42.9	0.812	4	15148	0.52	0.233	-1.604	0.195	1.5	0.056	653.2	8.91
NGC 6819	295.327	40.19	1915	73	50	47.4	0.437	5	14064	-2.916	0.128	-3.856	0.14	0.36	0.047	2599.5	9.35
COIN-Gaia 13	83.186	42.087	311	67	49	30.2	2.852	1	16347	-3.828	0.185	-1.676	0.172	1.93	0.092	511.3	8.27
Alessi 2	71.602	55.199	276	89	47	35.5	2.091	2	21299	-0.904	0.141	-1.046	0.115	1.59	0.07	618.2	8.55
ASCC 11	53.056	44.856	382	60	42	31.4	1.395	2	16313	0.926	0.163	-3.03	0.147	1.14	0.061	854.5	8.39
Collinder 69	83.792	9.813	821	45	42	35.9	2.449	2	26308	1.194	0.55	-2.118	0.393	2.46	0.124	401.5	7.1

Cluster	α deg	δ deg	N_{CG20}	N_{obs}	N_{star}	$sump_{CG20}$	R_{max} deg	N_{Rmax}	N_{field}	μ_g^* mas yr ⁻¹	$s_{\mu_g^*}$ mas yr ⁻¹	μ_b mas yr ⁻¹	s_{μ_b} mas yr ⁻¹	plx mas	s_{plx} mas	D_{MODE} pc	$log(Age)$ yr
COIN-Gaia 11	68.11	39.479	185	57	41	25.65	1.202	2	13273	3.574	0.155	-5.62	0.131	1.49	0.046	660.5	8.9
ASCC 23	95.047	46.71	160	47	40	34	1.873	2	24840	1.098	0.179	-0.598	0.182	1.59	0.061	616.3	8.37
NGC 2244	98.045	4.914	1701	45	38	18.2	0.73	4	10675	-1.598	0.3	0.179	0.352	0.62	0.127	1548.8	7.1
NGC 2420	114.602	21.575	513	67	38	32.8	0.17	11	10201	-1.19	0.139	-2.125	0.126	0.36	0.064	2552.9	9.24
COIN-Gaia 25	91.691	20.276	325	45	36	15.68	1.173	2	24116	-0.499	0.152	-2.595	0.124	1.2	0.072	813	8.75
NGC 2141	90.734	10.451	1727	48	36	15.5	0.339	8	10690	-0.028	0.167	-0.767	0.167	0.2	0.116	4441.3	9.27
NGC 2184	91.69	-2	166	43	35	28.2	2.338	2	21212	-0.648	0.198	-0.288	0.281	1.71	0.071	575.3	8.81
NGC 6866	300.983	44.158	229	44	35	22.5	0.297	8	12146	-1.365	0.081	-5.743	0.092	0.69	0.033	1398.3	8.81
UBC 54	64.747	46.453	143	49	34	34	0.385	5	10916	3.32	0.111	-3.758	0.111	0.88	0.047	1100.8	8.4
Collinder 350	267.018	1.525	208	35	33	31.4	4.208	1	10763	-4.965	0.387	-0.019	0.243	2.71	0.129	365.4	8.77
Collinder 359	270.598	3.26	548	34	33	19.9	4.894	1	13496	0.637	0.234	-8.668	0.294	1.79	0.105	551	7.57
ASCC 10	51.87	34.981	121	33	32	21.7	1.664	2	17501	-1.737	0.159	-1.368	0.143	1.46	0.1	672	8.42
COIN-Gaia 23	87.449	27.008	369	43	32	14.23	1.113	2	11281	-0.318	0.156	-0.928	0.132	1.03	0.077	942	8.11
COIN-Gaia 27	85.76	13.743	444	34	32	8.03	1.027	3	13554	0.697	0.128	-3.594	0.116	0.91	0.049	1062.9	8.86
NGC 2194	93.44	12.813	1247	36	31	19.9	0.305	7	11069	0.535	0.15	-1.468	0.144	0.26	0.075	3424.6	8.53
COIN-Gaia 24	90.693	23.203	242	134	30	13.76	0.835	2	18276	2.536	0.097	-2.954	0.092	0.97	0.047	1005.8	7.92
NGC 2112	88.452	0.403	734	30	30	27	0.613	6	11753	-2.713	0.2	4.27	0.172	0.88	0.066	1103.6	9.32
Roslund 6	307.185	39.798	263	30	29	28.1	2.708	2	13490	5.875	0.34	2.155	0.274	2.81	0.076	352.3	7.95
UBC 31	61.146	32.532	84	45	28	28	2.618	1	24426	3.803	0.192	-5.468	0.219	2.72	0.057	363.4	7.42
ASCC 12	72.4	41.744	284	28	27	19.9	1.024	3	18481	-0.634	0.181	-2.794	0.122	0.94	0.069	1030.7	7.97
NGC 1960	84.084	34.135	345	35	27	23.5	0.353	6	11659	-0.155	0.202	-3.388	0.16	0.84	0.064	1156.9	7.45
NGC 2266	100.832	26.976	345	34	27	24.3	0.172	9	10239	-0.473	0.132	-1.272	0.126	0.27	0.062	3313.8	8.91
Stock 8	81.956	34.452	766	28	27	14.5	0.447	5	13929	0.094	0.145	-2.249	0.216	0.45	0.051	2107	7.16
COIN-Gaia 17	81.244	37.558	233	35	26	12.4	0.633	3	11937	0.358	0.157	-4.297	0.12	0.89	0.067	1093.7	8.6
COIN-Gaia 19	82.188	34.29	224	27	26	16.24	0.719	3	12867	-1.477	0.126	-4.641	0.093	0.77	0.056	1244.7	8.03
NGC 1528	63.878	51.218	393	31	26	22.9	0.668	5	12692	2.181	0.156	-2.246	0.127	0.95	0.057	1023.9	8.47
NGC 1664	72.763	43.676	374	26	26	22.1	0.307	9	11033	1.703	0.169	-5.738	0.146	0.73	0.069	1310.2	8.71

Cluster	α deg	δ deg	N_{CG20}	N_{obs}	N_{star}	$sump_{CG20}$	R_{max} deg	N_{Rmax}	N_{field}	μ_{α^*} mas yr ⁻¹	$s_{\mu_{\alpha^*}}$ mas yr ⁻¹	μ_{δ} mas yr ⁻¹	$s_{\mu_{\delta}}$ mas yr ⁻¹	plx mas	s_{plx} mas	D_{MODE} pc	$log(Age)$ yr
NGC 1907	82.033	35.33	359	27	26	20.8	0.237	8	10426	-0.04	0.144	-3.418	0.128	0.61	0.062	1563.3	8.77
Berkeley 32	104.53	6.433	618	26	25	17.5	0.202	11	10997	-0.335	0.176	-1.608	0.179	0.28	0.076	3237.2	9.69
COIN-Gaia 9	47.748	48.023	192	27	25	10.74	1.009	3	17894	-1.934	0.111	-2.81	0.119	1.12	0.064	870.8	8.2
IC 4756	279.649	5.435	545	25	25	22.3	2.292	4	13848	1.26	0.254	-4.927	0.263	2.09	0.075	471.3	9.11
NGC 2355	109.247	13.772	328	31	25	22.2	0.245	8	12022	-3.802	0.137	-1.086	0.133	0.5	0.056	1901.7	9
Stock 10	84.808	37.85	150	30	25	23.4	1.377	2	18213	-3.114	0.265	-0.464	0.246	2.76	0.086	358.7	7.91
COIN-Gaia 14	77.696	39.195	163	34	24	7.9	0.818	3	14436	1.331	0.094	-6.598	0.081	1.04	0.032	933.3	8.63
UPK 418	112.39	5.557	135	31	24	8.6	1.233	2	10533	-2.651	0.134	-1.17	0.5	1.12	0.058	870.1	7.8
IC 4665	266.554	5.615	175	25	23	22	2.272	2	15311	-0.909	0.28	-8.52	0.283	2.87	0.129	345.2	7.52
UBC 8	84.519	57.124	103	41	23	23	2.32	2	22827	-3.149	0.143	-3.989	0.153	2.05	0.041	480.5	8.7
NGC 1758	76.175	23.813	174	25	22	17.5	0.321	7	10490	3.156	0.146	-3.465	0.129	1.1	0.059	883.7	8.44
RSG 1	75.508	37.475	99	22	21	20.6	2	2	26696	0.77	0.34	-12.33	0.316	3	0.087	330	8.09
Skiff J0619+18.5	94.829	18.546	357	25	21	5.6	0.675	3	13046	-0.529	0.116	-1.284	0.078	0.64	0.06	1485.5	7.92
Berkeley 21	87.93	21.812	252	24	20	9.7	0.196	10	10840	0.562	0.164	-1.051	0.101	0.16	0.108	5312.7	9.33
Gulliver 6	83.278	-1.652	384	22	20	16.6	1.801	3	14251	-0.007	0.39	-0.207	0.365	2.37	0.109	417.3	7.22
NGC 6633	276.845	6.615	233	23	20	13.6	1.009	6	11009	1.198	0.325	-1.811	0.297	2.53	0.073	391.6	8.84
UPK 296	42.667	48.571	93	28	20	17.7	2.288	2	-30661	1.771	0.319	-6.647	0.285	1.84	0.112	534.7	8.37
COIN-Gaia 21	84.766	28.402	229	19	19	3.91	0.404	6	10228	-0.115	0.086	-3.849	0.081	0.7	0.038	1378.4	7.45
NGC 6791	290.221	37.778	1722	22	19	18.7	0.337	7	11683	-0.421	0.165	-2.269	0.193	0.19	0.084	4530.8	9.8
Stock 2	33.856	59.522	1209	22	19	18.8	3.807	2	19299	15.966	0.65	-13.627	0.591	2.64	0.076	374.5	8.6
COIN-Gaia 20	78.634	31.691	226	19	18	5.43	0.814	3	13235	0.548	0.141	-1.455	0.091	0.91	0.049	1063.4	7.93
Berkeley 17	80.13	30.574	282	21	17	13.9	0.252	9	11798	2.618	0.281	-0.35	0.176	0.28	0.106	3229.7	9.86
COIN-Gaia 18	78.408	35.498	130	23	17	12.05	1.015	3	18329	0.767	0.121	-4.955	0.136	0.95	0.069	1018	8.25
King 5	48.682	52.695	773	18	17	9.3	0.477	7	13003	-0.282	0.152	-1.2	0.127	0.37	0.058	2523.6	9.01
COIN-Gaia 26	83.771	15.721	310	26	16	10.64	0.508	6	13661	0.267	0.108	-2.376	0.108	0.69	0.06	1395.2	8.23
NGC 2126	90.658	49.883	166	20	16	15.6	0.295	9	10372	0.848	0.112	-2.615	0.103	0.75	0.043	1287.9	8.99
ASCC 16	81.198	1.655	386	16	15	9	1.218	4	12098	1.355	0.265	-0.015	0.248	2.84	0.104	348.8	7.13

附录 A 表格全表

Cluster	α deg	δ deg	N_{CG20}	N_{obs}	N_{star}	$sump_{CG20}$	R_{max} deg	N_{Rmax}	N_{field}	μ_{α}^* mas yr $^{-1}$	$s_{\mu_{\alpha}^*}$ mas yr $^{-1}$	μ_{δ} mas yr $^{-1}$	$s_{\mu_{\delta}}$ mas yr $^{-1}$	plx mas	s_{plx} mas	D_{MODE} pc	$log(Age)$ yr
ASCC 19	81.982	-1.987	393	17	15	9.2	1.602	3	10721	1.152	0.252	-1.234	0.219	2.77	0.089	357.6	7.02
Alessi 37	341.961	46.342	202	15	15	12.2	1.23	4	10354	0.351	0.135	-1.569	0.129	1.38	0.066	707.9	8.14
COIN-Gaia 10	68.385	40.509	263	17	15	4.81	0.815	3	14343	2.025	0.086	-3.355	0.108	0.94	0.041	1028.9	7.74
COIN-Gaia 41	89.835	19.026	230	17	15	5.43	0.622	4	13616	-0.314	0.097	-3.685	0.098	0.52	0.072	1822	8.34
COIN-Gaia 8	39.048	50.013	163	16	15	7.08	1.019	4	19230	2.51	0.11	-2.499	0.11	1.36	0.039	720.2	8
FSR 0850	86.257	24.74	260	16	15	9.8	0.447	5	11149	1.301	0.161	-2.555	0.106	0.44	0.062	2139.7	8.67
NGC 2301	102.943	0.465	553	15	15	12.9	0.466	10	12655	-1.367	0.208	-2.179	0.187	1.14	0.068	859.5	8.33
COIN-Gaia 40	81.874	33.526	404	15	14	3.54	0.502	4	10850	0.393	0.057	-2.762	0.054	0.47	0.035	2002.5	0
FSR 0686	66.353	46.098	66	16	14	7.4	0.637	4	14214	-1.088	0.118	-2.556	0.068	1.09	0.038	896.4	0
NGC 2158	91.862	24.099	1633	41	14	12.1	0.174	6	10175	-0.177	0.185	-2.002	0.173	0.19	0.106	4535.1	9.19
RSG 5	303.482	45.574	200	18	14	13	2.082	2	22051	3.573	0.277	1.605	0.308	2.95	0.102	336.2	7.54
UBC 88	58.17	45.969	88	29	14	14	0.41	6	13420	-1.421	0.178	-2.926	0.185	1	0.046	970.1	7.72
UPK 282	30.363	43.773	56	14	14	12.2	0.622	4	14156	-2.777	0.163	-3.118	0.214	1.2	0.103	811.9	7.88
COIN-Gaia 28	96.333	11.159	424	13	13	5.54	0.559	6	13987	-1.12	0.155	-0.942	0.146	0.59	0.065	1615.7	7.74
UPK 305	41.115	39.027	51	14	13	11.9	3.081	1	13416	2.982	0.171	-6.538	0.136	2.39	0.122	413.3	8.15
UPK 381	95.5	29.205	101	14	13	10.3	1.797	2	27062	0.48	0.152	-2.986	0.122	1.38	0.09	711.2	8.46
ASCC 108	298.306	39.349	487	15	12	9	1.86	2	17946	-0.519	0.099	-1.69	0.129	0.84	0.048	1154	8.03
Berkeley 72	87.559	22.247	391	16	12	3.3	0.28	7	11186	0.853	0.193	-0.261	0.126	0.15	0.099	5482.2	7.73
COIN-Gaia 39	69.612	42.95	121	16	12	6.93	0.896	3	13495	0.238	0.113	-2.467	0.079	0.99	0.04	980.1	8.46
FSR 0942	91.487	13.667	303	16	12	7.3	0.266	9	12530	-0.412	0.174	0.092	0.129	0.28	0.085	3265.5	8.86
IC 348	56.132	32.159	149	18	12	10.9	0.254	10	11936	4.483	0.593	-6.447	0.603	3.08	0.152	321.7	7.07
UBC 13	120.914	3.54	36	20	12	12	2.859	1	14019	-7.749	0.158	-1.13	0.21	1.61	0.058	610.6	8.26
UBC 4	61.002	35.347	44	15	12	12	2.11	1	11918	-0.759	0.135	-5.696	0.132	1.65	0.052	595.8	8.72
Alessi 20	2.593	58.742	128	11	11	10.7	0.651	9	10775	8.195	0.293	-2.341	0.28	2.31	0.068	427.3	6.97
Berkeley 71	85.233	32.272	197	11	11	5.1	0.211	11	11839	0.65	0.162	-1.614	0.102	0.23	0.056	3930	8.94
COIN-Gaia 12	79.209	41.708	172	14	11	7.11	1.194	2	10066	2.616	0.129	-4.681	0.092	1.03	0.051	944.4	8.73
Czernik 21	81.671	36.013	171	17	11	7.8	0.199	10	11819	2.244	0.2	-0.907	0.179	0.22	0.112	4000.3	9.41

Cluster	α deg	δ deg	N_{CG20}	N_{obs}	N_{star}	$sump_{CG20}$	R_{max} deg	N_{Rmax}	N_{field}	μ_{α^*} mas yr ⁻¹	$s_{\mu_{\alpha^*}}$ mas yr ⁻¹	μ_{δ} mas yr ⁻¹	$s_{\mu_{\delta}}$ mas yr ⁻¹	plx mas	s_{plx} mas	$DMODE$ pc	$log(Age)$ yr
Koposov 63	92.499	24.567	218	32	11	5.1	0.169	6	10287	0.546	0.118	-0.447	0.117	0.21	0.07	4259	9.29
Tombaugh 5	56.984	59.07	576	11	11	9.5	0.479	13	11510	0.515	0.113	-2.388	0.12	0.56	0.041	1695	8.27
UBC 17a	83.422	-1.671	180	12	11	11	2.721	2	14553	1.582	0.322	-1.2	0.275	2.75	0.044	359.4	7.27
UBC 55	66.364	46.122	56	12	11	11	0.342	7	12623	-1.067	0.141	-2.604	0.098	1.08	0.048	902.6	7.53
UPK 350	101.646	48.702	50	16	11	9.9	2.718	1	12811	-4.849	0.151	-6.363	0.154	2.26	0.112	437.3	8.11
UPK 429	108.961	-0.884	180	11	11	8.8	1.41	3	15263	-2.066	0.174	0.083	0.124	1.12	0.078	867.3	8.15
King 6	51.982	56.444	241	11	10	9.6	0.462	10	11419	3.864	0.219	-1.814	0.244	1.35	0.067	727.3	8.31

表 A.2 章节 3-112 个疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其表观弥散

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV kms ⁻¹	e_{RV} kms ⁻¹	$\sigma_{RV,app}$ kms ⁻¹	$e_{\sigma_{RV,app}}$ kms ⁻¹	[Fe/H] dex	$e_{[Fe/H]}$ dex	$\sigma_{[Fe/H],app}$ dex	$e_{\sigma_{[Fe/H],app}}$ dex
NGC 2168	0.77	0.03	-11.03	0.33	4.07	0.27	-0.07	0.01	0.1	0.01
Melotte 22	0.95	0.02	1.83	0.26	3.56	0.21	-0.04	0.01	0.18	0.01
NGC 2632	0.96	0.02	30.49	0.36	4.87	0.29	0.15	0.01	0.15	0.01
NGC 1039	0.79	0.04	-11.46	0.42	4.06	0.4	-0.03	0.01	0.12	0.01
NGC 2281	0.89	0.04	16.25	0.43	4.5	0.33	-0.05	0.01	0.13	0.02
NGC 2682	0.91	0.03	29.9	0.27	3.04	0.24	0.01	0.01	0.06	0
NGC 1245	0.49	0.06	-38.54	1.16	6.78	1.2	-0.16	0.01	0.09	0.01
NGC 1647	0.9	0.03	-11.24	0.37	3.8	0.3	0.01	0.01	0.08	0.01
NGC 6811	0.83	0.04	-0.62	0.43	3.75	0.33	-0.06	0.01	0.1	0.01
Melotte 20	0.91	0.04	-4.67	0.46	4.28	0.38	0.04	0.01	0.11	0.01
NGC 1750	0.84	0.05	-15.38	0.64	5.21	0.59	-0.04	0.01	0.11	0.01
NGC 2099	0.69	0.06	0.04	0.72	5.01	0.63	-0.03	0.03	0.19	0.02
NGC 2548	0.86	0.05	5.7	0.64	4.82	0.56	-0.03	0.01	0.08	0.01
NGC 1912	0.88	0.05	-6.84	0.61	4.83	0.49	-0.13	0.02	0.16	0.02
NGC 1817	0.84	0.05	59.91	0.44	3.46	0.33	-0.21	0.01	0.1	0.01
NGC 752	0.86	0.05	0.4	0.7	4.99	0.52	-0.05	0.01	0.07	0.01
NGC 7789	0.83	0.05	-57.9	0.57	3.93	0.47	-0.05	0.01	0.08	0.01
NGC 1662	0.96	0.03	-18.57	0.7	4.79	0.59	-0.13	0.01	0.1	0.01
NGC 1342	0.92	0.04	-17.2	0.51	3.51	0.39	-0.16	0.01	0.09	0.01
NGC 6819	0.85	0.06	-2.92	0.62	3.86	0.45	0.06	0.01	0.06	0.01
COIN-Gaia 13	0.67	0.08	-17.01	0.95	4.84	0.96	-0.06	0.02	0.09	0.01
Alessi 2	0.82	0.07	-16.8	0.92	5.31	0.75	0	0.01	0.08	0.01
ASCC 11	0.72	0.12	-21.2	2.1	8.82	2.13	-0.19	0.02	0.11	0.03
Collinder 69	0.78	0.09	23.6	1.03	5.32	0.75	-0.11	0.05	0.25	0.04

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV kms ⁻¹	e_{RV} kms ⁻¹	$\sigma_{RV,app}$ kms ⁻¹	$e_{\sigma_{RV,app}}$ kms ⁻¹	[Fe/H] dex	$e_{[Fe/H]}$ dex	$\sigma_{[Fe/H],app}$ dex	$e_{\sigma_{[Fe/H],app}}$ dex
COIN-Gaia 11	0.75	0.09	-9.92	1.18	5.7	1.04	0.11	0.03	0.17	0.03
ASCC 23	0.86	0.08	-19.06	0.73	3.79	1.04	-0.07	0.02	0.14	0.02
NGC 2244	0.37	0.15	23.96	4.26	6.65	5.75	-0.14	0.05	0.1	0.04
NGC 2420	0.84	0.06	68.01	0.95	5.01	1.07	-0.27	0.01	0.05	0.01
COIN-Gaia 25	0.43	0.17	-16.06	4.62	6.12	5.36	-0.07	0.04	0.11	0.03
NGC 2141	0.17	0.09	21.89	2.2	2.79	3.01	-0.17	0.03	0.06	0.05
NGC 2184	0.76	0.1	34.52	1.05	4.65	0.99	-0.09	0.03	0.11	0.02
NGC 6866	0.88	0.07	7.57	0.9	4.74	0.73	-0.02	0.02	0.08	0.04
UBC 54	0.78	0.08	-22.57	1.19	5.54	1.18	-0.11	0.01	0.06	0.01
Collinder 350	0.87	0.06	-19.31	0.5	2.68	0.43	-0.05	0.02	0.09	0.01
Collinder 359	0.76	0.09	-10	1.09	5.11	0.81	0.06	0.01	0.07	0.01
ASCC 10	0.75	0.09	-24.39	1.11	4.95	1.26	-0.06	0.02	0.07	0.02
COIN-Gaia 23	0.84	0.12	-2.91	3.58	16.29	3.14	-0.12	0.03	0.13	0.02
COIN-Gaia 27	0.83	0.2	7.22	5.05	18.64	4.45	-0.02	0.03	0.13	0.04
NGC 2194	0.38	0.11	-0.61	2.26	6.37	1.85	-0.28	0.02	0.06	0.03
COIN-Gaia 24	0.74	0.15	-11.01	2.87	9.43	3.97	-0.11	0.03	0.12	0.03
NGC 2112	0.88	0.07	22.14	0.79	3.98	0.59	-0.13	0.01	0.07	0.01
Roslund 6	0.81	0.08	-14.13	0.59	2.82	0.43	0.03	0.02	0.08	0.01
UBC 31	0.9	0.08	15.15	1.27	5.39	1.01	-0.05	0.03	0.13	0.04
ASCC 12	0.56	0.24	-19.46	4.29	9.52	4.79	-0.15	0.07	0.17	0.06
NGC 1960	0.7	0.12	-10.26	1.74	5.89	1.45	-0.15	0.03	0.13	0.03
NGC 2266	0.69	0.1	47.52	2.16	8.14	1.86	-0.24	0.01	0.05	0.01
Stock 8	0.38	0.19	-9.77	3.85	7.16	6.39	-0.21	0.05	0.1	0.04
COIN-Gaia 17	0.37	0.16	2.79	4.02	6.02	4.52	-0.12	0.05	0.1	0.06
COIN-Gaia 19	0.52	0.12	8.19	1.69	4.65	2.24	-0.07	0.04	0.09	0.05
NGC 1528	0.91	0.09	-16.6	1.56	6.8	1.25	-0.06	0.06	0.27	0.04
NGC 1664	0.87	0.09	3.47	0.91	3.95	0.89	-0.1	0.02	0.1	0.02

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV	e_{RV}	$\sigma_{RV,app}$	$e_{\sigma_{RV,app}}$	[Fe/H]	$e_{[Fe/H]}$	$\sigma_{[Fe/H],app}$	$e_{\sigma_{[Fe/H],app}}$
			kms^{-1}	kms^{-1}	kms^{-1}	kms^{-1}	dex	dex	dex	dex
NGC 1907	0.89	0.1	-5.31	1.39	6.14	1.22	-0.19	0.05	0.2	0.04
Berkeley 32	0.5	0.11	102.38	1.31	4.04	1.25	-0.39	0.04	0.12	0.03
COIN-Gaia 9	0.47	0.17	-18.31	1.55	3.3	3.66	-0.01	0.04	0.1	0.04
IC 4756	0.97	0.04	-31.29	1.01	5.16	0.77	-0.1	0.02	0.08	0.01
NGC 2355	0.95	0.06	28.9	0.8	3.82	0.65	-0.07	0.04	0.19	0.04
Stock 10	0.93	0.06	-17.03	1.11	4.83	0.79	-0.1	0.02	0.08	0.02
COIN-Gaia 14	0.67	0.12	1.63	1.8	6.12	1.71	0.05	0.03	0.11	0.03
UPK 418	0.76	0.12	12.41	2.31	8.16	1.91	-0.05	0.03	0.13	0.03
IC 4665	0.96	0.05	-17.95	0.62	2.88	0.48	0.09	0.02	0.1	0.02
UBC 8	0.95	0.05	-11.63	1.31	6.07	0.98	-0.14	0.02	0.1	0.02
NGC 1758	0.74	0.12	-1.51	1.23	4.07	1.29	-0.04	0.03	0.1	0.04
RSG 1	0.85	0.1	8.07	0.82	3.41	0.62	-0.01	0.04	0.11	0.05
Skiff J0619+18.5	0.63	0.27	18.49	5.03	10.76	4.83	-0.12	0.06	0.16	0.05
Berkeley 21	0.49	0.18	-4.51	3.01	6.79	4.97	-0.3	0.05	0.12	0.04
Gulliver 6	0.93	0.08	27.82	1.39	5.45	1.11	-0.06	0.04	0.17	0.03
NGC 6633	0.86	0.09	-34.76	1.36	5.57	0.98	-0.13	0.03	0.1	0.03
UPK 296	0.78	0.16	-12.53	2.97	9.47	3.96	-0.04	0.04	0.16	0.03
COIN-Gaia 21	0.59	0.14	-4.4	2.36	6.95	1.7	-0.12	0.02	0.05	0.02
NGC 6791	0.78	0.09	-53.38	1.63	5.3	1.68	0.29	0.02	0.08	0.02
Stock 2	0.94	0.07	1.46	1.95	8.08	1.79	-0.05	0.02	0.09	0.02
COIN-Gaia 20	0.4	0.17	-4.06	3.19	6.03	3.25	-0.1	0.04	0.08	0.03
Berkeley 17	0.68	0.11	-79.27	1.47	4.95	1.31	-0.19	0.02	0.07	0.02
COIN-Gaia 18	0.56	0.19	0.7	1.6	3.49	5.11	-0.06	0.04	0.11	0.03
King 5	0.7	0.22	-46.97	6.52	19.94	8.5	-0.22	0.04	0.11	0.04
COIN-Gaia 26	0.69	0.17	-3.1	2.62	6.9	2.73	-0.14	0.08	0.29	0.07
NGC 2126	0.91	0.09	-18.43	1.01	3.83	0.75	-0.23	0.04	0.12	0.03
ASCC 16	0.89	0.09	16.17	0.64	2.3	0.54	-0.15	0.06	0.21	0.05

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV kms ⁻¹	e_{RV} kms ⁻¹	$\sigma_{RV,app}$ kms ⁻¹	$e_{\sigma_{RV,app}}$ kms ⁻¹	[Fe/H] dex	$e_{[Fe/H]}$ dex	$\sigma_{[Fe/H],app}$ dex	$e_{\sigma_{[Fe/H],app}}$ dex
ASCC 19	0.94	0.07	18.93	0.88	3.28	0.66	-0.14	0.03	0.12	0.03
Alessi 37	0.89	0.11	-15.3	1.79	5.41	1.73	0	0.04	0.14	0.03
COIN-Gaia 10	0.32	0.16	-7.06	3.79	5.55	4.4	0.01	0.04	0.05	0.05
COIN-Gaia 41	0.51	0.16	-0.49	2.62	5.36	2.65	-0.09	0.03	0.06	0.03
COIN-Gaia 8	0.72	0.21	-9.52	2.32	6.43	2.23	-0.1	0.04	0.12	0.06
FSR 0850	0.51	0.2	12.37	1.87	3.47	2.22	-0.16	0.12	0.25	0.09
NGC 2301	0.76	0.14	24.32	1.63	4.76	1.55	-0.05	0.04	0.11	0.04
COIN-Gaia 40	0.42	0.25	4.42	10.36	16.82	8.49	-0.22	0.04	0.07	0.06
FSR 0686	0.64	0.21	-20.2	4.02	9.92	3.6	-0.13	0.03	0.07	0.04
NGC 2158	0.7	0.13	21.85	1.68	4.92	1.29	-0.27	0.02	0.06	0.02
RSG 5	0.73	0.12	-11.81	0.56	1.59	0.7	0.1	0.04	0.11	0.03
UBC 88	0.7	0.15	-14.12	1.52	4.24	1.53	-0.02	0.03	0.07	0.05
UPK 282	0.88	0.09	-17.2	1.67	5.71	1.23	-0.09	0.02	0.07	0.02
COIN-Gaia 28	0.67	0.2	18.01	5.47	13.92	4.31	-0.15	0.03	0.06	0.03
UPK 305	0.94	0.06	-4.56	0.58	2.07	0.45	0.02	0.02	0.08	0.02
UPK 381	0.78	0.13	-3	1.47	4.08	1.23	-0.11	0.03	0.1	0.03
ASCC 108	0.75	0.18	-15.01	1.27	3.05	1.27	-0.07	0.06	0.16	0.07
Berkeley 72	0.43	0.2	10.9	4.67	7.24	7.92	-0.28	0.06	0.11	0.1
COIN-Gaia 39	0.57	0.29	-4.71	7.3	15.32	8.44	-0.08	0.04	0.09	0.05
FSR 0942	0.69	0.23	27.66	5.88	30.89	10.99	-0.47	0.05	0.18	0.08
IC 348	0.82	0.15	11.96	2.47	5.9	3.05	-0.22	0.13	0.35	0.1
UBC 13	0.93	0.09	16.98	1.42	4.67	1.12	-0.02	0.03	0.11	0.03
UBC 4	0.89	0.1	-1.02	1.25	3.73	0.91	-0.07	0.04	0.12	0.05
Alessi 20	0.89	0.11	-11.11	0.93	2.68	0.85	-0.13	0.16	0.48	0.12
Berkeley 71	0.33	0.18	-9.57	4.54	6.35	5.07	-0.21	0.05	0.06	0.08
COIN-Gaia 12	0.81	0.21	-11.83	3.4	8.62	2.82	-0.02	0.07	0.18	0.06
Czernik 21	0.63	0.17	37.53	2.31	5.19	3.42	-0.38	0.07	0.15	0.09

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV kms ⁻¹	e_{RV} kms ⁻¹	$\sigma_{RV,app}$ kms ⁻¹	$e_{\sigma_{RV,app}}$ kms ⁻¹	[Fe/H] dex	$e_{[Fe/H]}$ dex	$\sigma_{[Fe/H],app}$ dex	$e_{\sigma_{[Fe/H],app}}$ dex
Koposov 63	0.46	0.21	31.49	4.27	8.87	5.9	-0.36	0.06	0.13	0.08
Tombaugh 5	0.81	0.19	-35.07	2.07	5.33	2.13	0.01	0.07	0.18	0.05
UBC 17a	0.84	0.16	18.14	2.2	5.68	1.89	-0.24	0.11	0.3	0.08
UBC 55	0.82	0.19	-17.73	4.22	11.16	3	-0.11	0.03	0.08	0.03
UPK 350	0.73	0.15	-3.82	1.31	3.35	1.12	-0.02	0.05	0.12	0.05
UPK 429	0.79	0.15	8.83	2.33	6	2.57	0.07	0.06	0.15	0.06
King 6	0.79	0.14	-28.47	2.13	5.7	1.8	-0.06	0.02	0.06	0.02

表 A.3 章节 3-112 个疏散星团视向速度和金属丰度的均值及其内禀弥散

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV kms ⁻¹	e_{RV} kms ⁻¹	$\sigma_{RV,int}$ kms ⁻¹	$e_{\sigma_{RV,int}}$ kms ⁻¹	[Fe/H] dex	$e_{[Fe/H]}$ dex	$\sigma_{[Fe/H],int}$ dex	$e_{\sigma_{[Fe/H],int}}$ dex	$\sigma_{RV,int-flag}$	$\sigma_{[Fe/H],int-flag}$	$\sigma_{RV,int-Value}$ kms ⁻¹	$\sigma_{[Fe/H],int-Value}$ dex
NGC 2168	0.76	0.04	-11.34	0.35	0.14	0.47	-0.07	0.01	0.08	0.01	1	0	0.97	0
Melotte 22	0.95	0.02	1.87	0.24	2.05	0.37	-0.04	0.01	0.17	0.01	0	0	0	0
NGC 2632	0.96	0.02	30.54	0.33	3.72	0.33	0.15	0.01	0.14	0.01	0	0	0	0
NGC 1039	0.8	0.04	-11.3	0.45	2.73	0.57	-0.03	0.01	0.11	0.01	0	0	0	0
NGC 2281	0.87	0.04	16.51	0.4	2.68	0.64	-0.05	0.01	0.11	0.01	0	0	0	0
NGC 2682	0.92	0.02	29.72	0.27	0.09	0.2	0.01	0.01	0.05	0	1	0	0.43	0
NGC 1245	0.52	0.07	-38.3	1.27	4.97	1.88	-0.15	0.01	0.08	0.01	0	0	0	0
NGC 1647	0.9	0.03	-11.03	0.34	0.65	0.85	0	0.01	0.06	0.01	1	0	1.74	0
NGC 6811	0.84	0.04	-0.3	0.45	0.1	0.27	-0.07	0.01	0.09	0.01	1	0	0.56	0
Melotte 20	0.91	0.04	-4.82	0.44	2.64	0.56	0.05	0.01	0.1	0.01	0	0	0	0
NGC 1750	0.89	0.04	-15.42	0.59	2.81	0.77	-0.05	0.01	0.1	0.01	0	0	0	0
NGC 2099	0.73	0.06	-0.09	0.73	0.11	0.36	-0.04	0.03	0.19	0.02	1	0	0.75	0
NGC 2548	0.86	0.04	5.95	0.55	0.2	0.72	-0.04	0.01	0.07	0.01	1	0	1.46	0
NGC 1912	0.86	0.05	-7.07	0.72	0.18	0.58	-0.14	0.02	0.15	0.02	1	0	1.19	0
NGC 1817	0.85	0.04	60.4	0.56	0.13	0.35	-0.2	0.01	0.07	0.01	1	0	0.72	0
NGC 752	0.88	0.04	0.52	0.74	4.21	0.62	-0.05	0.01	0.06	0.01	0	0	0	0
NGC 7789	0.84	0.05	-57.18	0.56	0.35	0.83	-0.05	0.01	0.07	0.01	1	0	1.69	0
NGC 1662	0.96	0.03	-18.33	0.69	3.52	0.8	-0.13	0.02	0.1	0.01	0	0	0	0
NGC 1342	0.92	0.04	-17.27	0.53	0.11	0.27	-0.17	0.01	0.08	0.01	1	0	0.57	0
NGC 6819	0.84	0.06	-2.01	0.52	0.58	0.93	0.06	0.01	0.03	0.01	1	0	1.9	0
COIN-Gaia 13	0.67	0.09	-17.17	0.99	2.9	2.3	-0.06	0.02	0.06	0.02	1	0	4.74	0
Alessi 2	0.83	0.07	-16.56	0.87	3.25	1.1	-0.01	0.01	0.07	0.01	0	0	0	0
ASCC 11	0.73	0.11	-21.43	1.87	6.96	2.52	-0.18	0.02	0.08	0.03	0	0	0	0
Collinder 69	0.78	0.09	23.56	1.12	4.54	1.02	-0.1	0.05	0.24	0.03	0	0	0	0

Cluster	f_c	e_{-f_c}	RV	e_{-RV}	$\sigma_{RV,int}$	$e_{-\sigma_{RV,int}}$	[Fe/H]	$e_{-[Fe/H]}$	$\sigma_{[Fe/H],int}$	$e_{-\sigma_{[Fe/H],int}}$	σ_{RV,int_flag}	$\sigma_{[Fe/H],int_flag}$	σ_{RV,int_value}	$\sigma_{[Fe/H],int_value}$	dex
COIN-Gaia 11	0.76	0.09	-10.84	1.21	2.35	2.15	0.12	0.03	0.16	0.02	1	0	4.39	0	0
ASCC 23	0.88	0.08	-18.72	0.72	1.92	1.82	-0.06	0.02	0.12	0.02	1	0	3.72	0	0
NGC 2244	0.34	0.12	24.54	2.34	0.36	1.63	-0.13	0.05	0.09	0.05	1	0	3.29	0	0
NGC 2420	0.89	0.05	68.05	1.1	4.02	1.02	-0.27	0.01	0.04	0.01	0	0	0	0	0
COIN-Gaia 25	0.41	0.1	-18.75	1.59	0.35	1.35	-0.08	0.04	0.1	0.04	1	0	2.73	0	0
NGC 2141	0.24	0.09	20.76	1.73	0.24	1	-0.13	0.04	0.03	0.03	1	0	2.03	0	0
NGC 2184	0.78	0.1	34.54	1	1.05	1.95	-0.08	0.03	0.12	0.03	1	0	3.95	0	0
NGC 6866	0.87	0.06	7.51	0.77	0.14	0.53	-0.02	0.01	0.07	0.01	1	0	1.09	0	0
UBC 54	0.79	0.08	-22.11	1.17	0.2	0.79	-0.11	0.01	0.06	0.01	1	0	1.6	0	0
Collinder 350	0.89	0.06	-19.03	0.69	0.13	0.34	-0.05	0.02	0.08	0.01	1	0	0.69	0	0
Collinder 359	0.72	0.09	-10.23	0.97	0.26	1.02	0.05	0.02	0.05	0.01	1	0	2.07	0	0
ASCC 10	0.78	0.09	-24.55	1.06	2.3	2.12	-0.06	0.02	0.07	0.01	1	0	4.32	0	0
COIN-Gaia 23	0.79	0.17	-2.79	3.53	14.74	3.72	-0.14	0.03	0.11	0.03	0	0	0	0	0
COIN-Gaia 27	0.6	0.2	2.38	2.46	14.13	5.46	-0.04	0.03	0.08	0.05	0	0	0	0	0
NGC 2194	0.44	0.1	2.69	1.25	0.19	0.77	-0.26	0.03	0.06	0.02	1	0	1.56	0	0
COIN-Gaia 24	0.62	0.12	-8.93	1.54	0.43	2.31	-0.1	0.03	0.1	0.03	1	0	4.65	0	0
NGC 2112	0.85	0.07	22.38	0.97	0.14	0.49	-0.11	0.01	0.04	0.01	1	0	1.01	0	0
Roslund 6	0.82	0.08	-14.41	0.61	0.14	0.37	0.02	0.02	0.08	0.01	1	0	0.77	0	0
UBC 31	0.91	0.08	15.08	1.26	3.97	1.39	-0.05	0.04	0.13	0.04	0	0	0	0	0
ASCC 12	0.55	0.2	-21.33	4.04	1.89	5.07	-0.16	0.06	0.16	0.07	1	0	10.19	0	0
NGC 1960	0.65	0.13	-10.5	1.75	0.51	1.91	-0.14	0.03	0.1	0.03	1	0	3.86	0	0
NGC 2266	0.68	0.1	51.79	1.25	0.16	0.62	-0.24	0.01	0.04	0.01	1	0	1.26	0	0
Stock 8	0.42	0.13	-8.58	1.79	0.23	0.84	-0.22	0.04	0.07	0.03	1	0	1.71	0	0
COIN-Gaia 17	0.37	0.14	3.51	2.23	0.25	1.46	-0.14	0.04	0.07	0.06	1	0	2.95	0	0
COIN-Gaia 19	0.57	0.12	9	1.6	0.21	0.77	-0.08	0.04	0.09	0.05	1	0	1.57	0	0
NGC 1528	0.91	0.08	-15.64	1.41	0.54	1.81	-0.06	0.06	0.26	0.04	1	0	3.65	0	0
NGC 1664	0.89	0.07	3.68	1.02	0.17	0.55	-0.11	0.02	0.09	0.02	1	0	1.13	0	0

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV	e_{RV}	$\sigma_{RV,int}$	$e_{\sigma_{RV,int}}$	[Fe/H]	$e_{[Fe/H]}$	$\sigma_{[Fe/H],int}$	$e_{\sigma_{[Fe/H],int}}$	σ_{RV,int_flag}	$\sigma_{[Fe/H],int_flag}$	σ_{RV,int_value}	$\sigma_{[Fe/H],int_value}$
			kms^{-1}	kms^{-1}	kms^{-1}	kms^{-1}	dex	dex	dex	dex			kms^{-1}	dex
NGC 1907	0.93	0.07	-5.2	1.19	0.19	0.72	-0.19	0.04	0.17	0.03	1	0	1.47	0
Berkeley 32	0.52	0.1	102.28	0.97	0.12	0.41	-0.37	0.03	0.05	0.05	1	1	0.85	0.1
COIN-Gaia 9	0.51	0.13	-17.36	1.39	0.19	0.75	-0.01	0.04	0.08	0.03	1	0	1.53	0
IC 4756	0.97	0.04	-31.06	0.96	0.97	1.62	-0.11	0.02	0.08	0.01	1	0	3.29	0
NGC 2355	0.97	0.04	28.32	0.91	0.13	0.32	-0.08	0.04	0.18	0.03	1	0	0.67	0
Stock 10	0.93	0.06	-17.21	1.06	4.2	0.92	-0.09	0.02	0.07	0.02	0	0	0	0
COIN-Gaia 14	0.66	0.12	1.94	1.83	4.18	2.07	0.05	0.04	0.1	0.04	0	0	0	0
UPK 418	0.75	0.13	12.15	2.3	6.15	2.64	-0.04	0.04	0.12	0.03	0	0	0	0
IC 4665	0.96	0.04	-17.9	0.74	0.14	0.33	0.08	0.02	0.1	0.02	1	0	0.68	0
UBC 8	0.93	0.06	-11.19	1.32	1.16	1.96	-0.13	0.02	0.07	0.01	1	0	3.97	0
NGC 1758	0.73	0.11	-2.16	1.09	0.22	0.9	-0.03	0.02	0.05	0.05	1	0	1.83	0
RSG 1	0.83	0.09	8.13	0.82	0.33	1	0	0.02	0.08	0.03	1	0	2.03	0
Skiff J0619+18.5	0.43	0.22	14.66	3.43	2.25	5.52	-0.12	0.06	0.13	0.06	1	0	11.1	0
Berkeley 21	0.41	0.14	-5.26	1.75	0.55	2.73	-0.3	0.04	0.05	0.05	1	1	5.5	0.11
Gulliver 6	0.94	0.06	27.78	1.45	4.72	1.27	-0.05	0.04	0.16	0.03	0	0	0	0
NGC 6633	0.86	0.08	-34.78	1.05	0.17	0.62	-0.13	0.02	0.09	0.03	1	0	1.26	0
UPK 296	0.75	0.17	-12.61	2.93	7.9	4.04	-0.05	0.05	0.15	0.04	0	0	0	0
COIN-Gaia 21	0.52	0.15	1.07	1.24	6.62	3.87	-0.13	0.02	0.02	0.02	0	1	0	0.04
NGC 6791	0.78	0.1	-53.88	1.74	4.43	2.1	0.29	0.02	0.06	0.02	0	0	0	0
Stock 2	0.95	0.06	1.39	2.04	7.31	2.02	-0.06	0.02	0.06	0.02	0	0	0	0
COIN-Gaia 20	0.43	0.14	-3.48	2.46	0.24	1.13	-0.08	0.03	0.05	0.03	1	0	2.29	0
Berkeley 17	0.68	0.11	-79.3	1.41	3.55	1.68	-0.19	0.02	0.03	0.02	0	0	0	0
COIN-Gaia 18	0.55	0.15	-0.43	2.13	0.33	1.71	-0.05	0.03	0.06	0.03	1	0	3.46	0
King 5	0.66	0.23	-46.33	6.73	19.06	9.6	-0.21	0.04	0.08	0.05	0	0	0	0
COIN-Gaia 26	0.69	0.16	-2.4	2.12	0.24	1.11	-0.1	0.09	0.28	0.07	1	0	2.26	0
NGC 2126	0.93	0.08	-18.34	1.08	0.12	0.38	-0.22	0.04	0.13	0.03	1	0	0.78	0
ASCC 16	0.92	0.07	16.02	0.77	0.11	0.34	-0.13	0.04	0.16	0.04	1	0	0.71	0

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV kms ⁻¹	e_{RV} kms ⁻¹	$\sigma_{RV,int}$ kms ⁻¹	$e_{\sigma_{RV,int}}$ kms ⁻¹	[Fe/H] dex	$e_{[Fe/H]}$ dex	$\sigma_{[Fe/H],int}$ dex	$e_{\sigma_{[Fe/H],int}}$ dex	σ_{RV,int_flag}	$\sigma_{[Fe/H],int_flag}$	σ_{RV,int_value} kms ⁻¹	$\sigma_{[Fe/H],int_value}$ dex
ASCC 19	0.93	0.08	18.84	0.77	0.19	0.59	-0.14	0.03	0.12	0.03	1	0	1.21	0
Alessi 37	0.91	0.1	-16.04	1.15	0.22	0.7	0	0.04	0.14	0.03	1	0	1.43	0
COIN-Gaia 10	0.38	0.14	-5.34	2.41	0.25	1.05	0.01	0.03	0.02	0.02	1	1	2.13	0.05
COIN-Gaia 41	0.51	0.16	0.77	2.46	0.58	2.36	-0.1	0.04	0.06	0.04	1	0	4.76	0
COIN-Gaia 8	0.78	0.16	-9.96	2.23	5.53	2.51	-0.09	0.04	0.11	0.05	0	0	0	0
FSR 0850	0.51	0.22	16.75	3.33	0.36	2.73	-0.15	0.12	0.22	0.09	1	0	5.49	0
NGC 2301	0.72	0.15	23.33	1.94	1.45	2.48	-0.05	0.04	0.1	0.04	1	0	5	0
COIN-Gaia 40	0.34	0.21	3.82	10.98	9.6	5.82	-0.23	0.05	0.03	0.02	1	1	14.72	0.06
FSR 0686	0.61	0.17	-21.85	3.1	2.45	3.85	-0.12	0.02	0.04	0.03	1	0	7.8	0
NGC 2158	0.71	0.12	21.12	1.76	3.69	1.71	-0.28	0.03	0.06	0.02	0	0	0	0
RSG 5	0.79	0.12	-12.37	1.06	0.23	0.69	0.1	0.03	0.1	0.02	1	0	1.41	0
UBC 88	0.7	0.14	-13.9	1.7	0.17	0.74	-0.01	0.02	0.05	0.04	1	0	1.51	0
UPK 282	0.87	0.09	-16.51	1.31	2.59	2.33	-0.06	0.01	0.02	0.01	0	0	0	0
COIN-Gaia 28	0.8	0.14	18.4	4.81	12.85	4.19	-0.15	0.01	0.02	0.01	0	1	0	0.03
UPK 305	0.95	0.06	-4.4	0.9	0.11	0.28	0.02	0.02	0.07	0.02	1	0	0.58	0
UPK 381	0.76	0.13	-2.96	1.58	0.19	0.87	-0.11	0.04	0.08	0.03	1	0	1.77	0
ASCC 108	0.88	0.13	-16.07	1.84	0.2	0.71	-0.05	0.05	0.15	0.05	1	0	1.45	0
Berkeley 72	0.34	0.16	9.13	2.32	0.24	0.96	-0.26	0.07	0.04	0.04	1	1	1.95	0.09
COIN-Gaia 39	0.76	0.23	-7.42	7.24	16.7	5.56	-0.1	0.04	0.06	0.03	0	0	0	0
FSR 0942	0.64	0.25	28.54	9.25	30.44	13.18	-0.5	0.09	0.19	0.1	0	0	0	0
IC 348	0.75	0.18	11.2	2.32	3.63	3.87	-0.22	0.14	0.35	0.11	1	0	7.93	0
UBC 13	0.93	0.08	16.93	1.38	0.67	1.67	-0.02	0.04	0.12	0.03	1	0	3.37	0
UBC 4	0.86	0.11	-0.83	1.48	0.34	1.23	-0.07	0.04	0.12	0.05	1	0	2.5	0
Alessi 20	0.93	0.08	-11.22	1.01	0.13	0.41	-0.14	0.14	0.46	0.11	1	0	0.83	0
Berkeley 71	0.37	0.16	-8.15	1.71	0.36	1.75	-0.22	0.02	0.01	0.02	1	1	3.53	0.04
COIN-Gaia 12	0.73	0.21	-11.97	3.04	4.22	4.36	-0.03	0.09	0.18	0.07	1	0	8.88	0
Czernik 21	0.61	0.15	37.21	1.34	0.4	1.78	-0.37	0.05	0.11	0.05	1	0	3.6	0

Cluster	f_c	e_{f_c}	RV kms ⁻¹	e_{RV} kms ⁻¹	$\sigma_{RV,int}$ kms ⁻¹	$e_{\sigma_{RV,int}}$ kms ⁻¹	[Fe/H] dex	$e_{[Fe/H]}$ dex	$\sigma_{[Fe/H],int}$ dex	$e_{\sigma_{[Fe/H],int}}$ dex	σ_{RV,int_flag}	$\sigma_{[Fe/H],int_flag}$	σ_{RV,int_value} kms ⁻¹	$\sigma_{[Fe/H],int_value}$ dex
Koposov 63	0.43	0.2	33.03	4.42	1.79	4.54	-0.36	0.06	0.06	0.08	1	1	9.12	0.18
Tombaugh 5	0.88	0.13	-33.55	1.42	0.19	0.74	-0.01	0.07	0.19	0.05	1	0	1.5	0
UBC 17a	0.82	0.16	18.08	2.24	4.63	2.25	-0.25	0.11	0.3	0.08	0	0	0	0
UBC 55	0.85	0.15	-18.22	3.89	9.24	3.71	-0.11	0.03	0.06	0.03	0	0	0	0
UPK 350	0.78	0.13	-3.72	1.09	0.18	0.58	-0.03	0.04	0.11	0.04	1	0	1.18	0
UPK 429	0.77	0.16	9.19	2.2	0.6	2.54	0.07	0.06	0.15	0.06	1	0	5.11	0
King 6	0.81	0.13	-27.82	1.99	0.19	0.8	-0.04	0.02	0.04	0.02	1	0	1.62	0

表 A.4 章节 4-112 个疏散星团的运动学及动力学信息

Cluster	U kms ⁻¹	V kms ⁻¹	W kms ⁻¹	GX kpc	GY kpc	GZ kpc	Rgc kpc	VT kms ⁻¹	VR kms ⁻¹	R _{apo} kpc	R _{peri} kpc	Z _{max} kpc	ecc	R _g kpc	LX kms ⁻¹ kpc	LY kms ⁻¹ kpc	LZ kms ⁻¹ kpc
NGC 2168	24.175	218.698	9.305	-9.056	-0.099	0.05	9.056	-218.42	-26.569	9.447	7.695	0.16	0.102	8.991	-11.884	85.478	-1978.114
Melotte 22	7.635	203.028	-5.411	-8.321	0.029	-0.039	8.321	-203.054	-6.925	8.336	6.408	0.084	0.131	7.68	7.781	-45.32	-1689.597
NGC 2632	-28.508	213.373	-4.752	-8.341	-0.069	0.115	8.341	-213.6	26.754	8.638	6.845	0.139	0.116	8.098	-24.155	-42.909	-1781.611
NGC 1039	17.977	217.983	-0.84	-8.592	0.288	-0.121	8.597	-218.463	-10.658	8.669	7.524	0.122	0.071	8.537	26.049	-9.386	-1878.189
NGC 2281	-10.233	217.68	-1.575	-8.695	0.044	0.167	8.695	-217.626	11.334	8.773	7.554	0.17	0.075	8.601	-36.378	-15.397	-1892.228
NGC 2682	-33.578	209.735	-15.731	-8.791	-0.425	0.47	8.802	-211.113	23.402	9.038	7.194	0.596	0.114	8.446	-91.952	-154.09	-1858.145
NGC 1245	34.426	194.358	-2.708	-10.799	1.709	-0.469	10.933	-197.351	-3.619	10.946	8.049	0.475	0.153	9.807	86.463	-45.375	-2157.641
NGC 1647	23.074	230.79	5.748	-8.762	-0.004	-0.153	8.762	-230.78	-23.169	9.349	8.1	0.184	0.072	9.191	35.399	46.82	-2022.088
NGC 6811	59.909	223.705	2.154	-7.996	1.069	0.246	8.067	-229.67	-29.737	8.749	7.292	0.264	0.091	8.422	-52.706	31.955	-1852.735
Melotte 20	0.881	206.016	1.03	-8.347	0.094	-0.004	8.347	-206.012	1.441	8.348	6.603	0.014	0.117	7.817	0.984	8.597	-1719.67
NGC 1750	27.552	227.401	2.812	-8.907	0.011	-0.117	8.907	-227.434	-27.274	9.514	7.997	0.13	0.087	9.208	26.741	21.814	-2025.783
NGC 2099	9.093	192.453	-0.969	-9.635	0.059	0.095	9.635	-192.505	-7.913	9.653	6.724	0.096	0.179	8.431	-18.35	-8.472	-1854.751
NGC 2548	2.721	231.293	6.703	-8.691	-0.542	0.217	8.708	-230.674	-17.122	9.111	8.197	0.254	0.053	9.13	-53.889	58.845	-2008.607
NGC 1912	14.81	207.585	1.203	-9.297	0.149	0.03	9.298	-207.795	-11.483	9.353	7.42	0.036	0.115	8.783	-6.087	11.636	-1932.165
NGC 1817	-46.367	217.716	-7.015	-9.87	-0.181	-0.37	9.871	-218.53	42.365	10.829	8.107	0.423	0.144	9.805	81.929	-52.056	-2157.148
NGC 752	-2.115	208.412	-9.425	-8.496	0.276	-0.159	8.501	-208.233	8.892	8.533	6.845	0.216	0.11	8.046	30.493	-79.74	-1770.16
NGC 7789	47.873	184.994	-4.092	-9.09	1.864	-0.177	9.28	-190.84	-9.738	9.305	6.386	0.193	0.186	8.05	25.188	-45.693	-1770.921
NGC 1662	29.728	232.889	10.079	-8.581	-0.052	-0.132	8.581	-232.704	-31.142	9.471	7.822	0.214	0.095	9.077	30.3	82.552	-1996.837
NGC 1342	25.121	221	8.862	-8.771	0.267	-0.157	8.775	-221.662	-18.39	9.017	7.772	0.213	0.074	8.841	37.023	73.792	-1945.076
NGC 6819	66.827	212.816	15.635	-7.49	2.471	0.397	7.887	-223.039	3.22	7.908	7.302	0.478	0.04	7.996	-45.869	143.639	-1759.098
COIN-Gaia 13	27.312	230.272	-4.175	-8.697	0.111	0.058	8.698	-230.601	-24.381	9.302	8.002	0.086	0.075	9.117	-13.929	-34.714	-2005.765
Alessi 2	24.979	224.233	1.413	-8.744	0.285	0.085	8.749	-224.928	-17.653	9.018	7.932	0.089	0.064	8.945	-18.552	14.463	-1967.819
ASCC 11	25.591	212.346	2.961	-8.935	0.415	-0.121	8.944	-213.305	-15.717	9.065	7.449	0.13	0.098	8.672	26.841	23.371	-1907.859

Cluster	U	V	W	X	Y	Z	R _{gc}	VT	VR	R _{tip}	R _{peri}	Z _{max}	ecc	R _g	LX	LY	LZ
	km s ⁻¹	km s ⁻¹	km s ⁻¹	kpc	kpc	kpc	kpc	km s ⁻¹	km s ⁻¹	kpc	kpc	kpc	-	kpc	km s ⁻¹ kpc	km s ⁻¹ kpc	km s ⁻¹ kpc
Collinder 69	-9.915	221.754	2.271	-8.579	-0.103	-0.068	8.58	-221.857	7.26	8.622	7.752	0.076	0.053	8.652	14.875	20.156	-1903.475
COIN-Gaia 11	15.586	209.314	4.658	-8.827	0.197	-0.051	8.829	-209.61	-10.907	8.879	7.164	0.085	0.107	8.412	11.591	40.324	-1850.669
ASCC 23	28.699	225.34	4.685	-8.782	0.129	0.169	8.783	-225.738	-25.374	9.279	7.855	0.195	0.083	9.012	-37.587	46.009	-1982.735
NGC 2244	-13.501	227.397	-3.372	-9.587	-0.687	-0.037	9.612	-227.78	-2.793	9.628	9.208	0.066	0.022	9.951	10.785	-31.828	-2189.323
NGC 2420	-51.491	192.49	8.495	-10.484	-0.747	0.877	10.51	-195.664	37.674	11.033	7.418	0.933	0.196	9.348	-175.206	43.891	-2056.487
COIN-Gaia 25	30.92	227.788	0.728	-9.001	-0.14	0.013	9.002	-227.28	-34.453	9.832	7.914	0.018	0.108	9.3	-3.169	6.973	-2045.972
NGC 2141	-3.466	212.948	-3.124	-12.402	-1.369	-0.426	12.477	-212.043	-19.912	12.778	10.436	0.451	0.101	12.026	95.092	-37.27	-2645.736
NGC 2184	-18.151	215.765	-1.093	-8.692	-0.279	-0.092	8.696	-216.236	11.219	8.766	7.463	0.094	0.08	8.547	20.237	-7.826	-1880.383
NGC 6866	49.248	234.272	-4.068	-7.948	1.365	0.181	8.065	-239.228	-8.873	8.616	7.976	0.199	0.039	8.769	-47.957	-23.416	-1929.269
UBC 54	20.62	199.343	6.456	-9.203	0.451	-0.036	9.214	-200.113	-10.844	9.252	6.879	0.107	0.147	8.381	10.075	58.67	-1843.843
Collinder 350	-5.2	219.433	9.776	-7.885	0.16	0.108	7.886	-219.282	9.655	7.945	6.978	0.171	0.065	7.861	-22.045	76.522	-1729.369
Collinder 359	14.398	211.72	-6.462	-7.735	0.271	0.132	7.74	-212.094	-6.977	7.761	6.474	0.158	0.09	7.461	-29.785	-48.077	-1641.507
ASCC 10	35.089	223.517	8.244	-8.784	0.263	-0.189	8.788	-224.468	-28.381	9.343	7.738	0.239	0.094	8.966	44.42	65.784	-1972.545
COIN-Gaia 23	14	229.52	3.908	-9.141	-0.035	0.013	9.141	-229.465	-14.878	9.46	8.595	0.061	0.048	9.535	-3.188	35.909	-2097.629
COIN-Gaia 27	13.499	214.983	0.739	-9.226	-0.232	-0.138	9.229	-214.577	-18.892	9.416	7.731	0.14	0.098	9.001	29.532	4.948	-1980.3
NGC 2194	16.108	207.528	3.39	-11.468	-1.014	-0.119	11.513	-205.302	-34.331	12.062	8.782	0.142	0.157	10.744	21.281	36.96	-2363.623
COIN-Gaia 24	22.185	215.231	10.741	-9.198	-0.121	0.024	9.199	-214.922	-25.007	9.512	7.645	0.179	0.109	8.987	-6.489	99.334	-1977.123
NGC 2112	-19.68	246.638	0.407	-9.169	-0.47	-0.224	9.181	-247.322	7.024	10.506	9.151	0.249	0.069	10.322	55.072	8.145	-2270.769
Roslund 6	-0.258	219.906	1.272	-8.13	0.345	0.018	8.137	-219.697	9.587	8.196	7.206	0.025	0.064	8.126	-3.622	10.337	-1787.684
UBC 31	-5.51	225.436	1.181	-8.537	0.1	-0.077	8.538	-225.356	8.141	8.61	7.926	0.079	0.041	8.746	17.411	10.502	-1924.045
ASCC 12	29.332	217.773	-3.201	-9.185	0.301	-0.017	9.19	-218.618	-22.173	9.484	7.889	0.053	0.092	9.132	2.79	-29.903	-2009.109
NGC 1960	19.889	216.127	-3.679	-9.351	0.11	0.039	9.352	-216.346	-17.345	9.527	7.964	0.069	0.089	9.197	-8.795	-33.632	-2023.281
NGC 2266	-40.086	210.218	1.589	-11.429	-0.442	0.613	11.438	-211.609	31.939	12.048	9.261	0.643	0.131	11.002	-129.639	-6.426	-2420.341
Stock 8	17.41	212.168	-4.429	-10.293	0.245	0.011	10.296	-212.523	-12.351	10.384	8.583	0.079	0.095	9.946	-3.342	-45.404	-2188.048
COIN-Gaia 17	4.178	213.651	-3.644	-9.278	0.182	0.037	9.28	-213.692	0.014	9.28	7.845	0.067	0.084	9.014	-8.508	-33.652	-1983.064
COIN-Gaia 19	0.157	215.38	-15.174	-9.437	0.14	0.014	9.438	-215.359	3.031	9.444	8.119	0.265	0.075	9.239	-5.12	-143.197	-2032.527
NGC 1528	17.802	211.498	6.615	-9.105	0.48	0.022	9.117	-212.142	-6.652	9.139	7.587	0.104	0.093	8.792	-1.385	60.614	-1934.144

Cluster	U	V	W	X	Y	Z	R _{gc}	VT	VR	R _{apo}	R _{peri}	Z _{max}	ecc	R _g	LX	LY	LZ
	km s ⁻¹	km s ⁻¹	km s ⁻¹	kpc	kpc	kpc	kpc	km s ⁻¹	km s ⁻¹	kpc	kpc	kpc	-	kpc	km s ⁻¹ kpc	km s ⁻¹ kpc	km s ⁻¹ kpc
NGC 1664	-3.068	200.906	-7.346	-9.444	0.412	0.007	9.453	-200.582	11.822	9.5	7.082	0.12	0.146	8.618	-4.42	-69.393	-1896.033
NGC 1907	13.469	210.849	-7.088	-9.75	0.201	0.026	9.752	-211.082	-9.125	9.795	8.037	0.122	0.099	9.357	-7.009	-68.751	-2058.544
Berkeley 32	-70.829	166.471	-0.421	-11.051	-1.513	0.269	11.154	-174.54	47.592	11.695	6.395	0.281	0.293	8.849	-44.153	-23.705	-1946.762
COIN-Gaia 9	27.48	222.105	-4.086	-8.911	0.485	-0.114	8.925	-223.271	-15.362	9.122	8.046	0.133	0.063	9.057	23.269	-39.537	-1992.621
IC 4756	-8.21	207.441	-3.044	-7.822	0.278	0.058	7.827	-207.019	15.572	7.907	6.217	0.071	0.12	7.365	-12.888	-24.284	-1620.285
NGC 2355	-23.321	223.747	-21.31	-9.908	-0.738	0.407	9.935	-224.861	6.628	10.001	9.365	0.659	0.033	10.155	-75.428	-220.637	-2234.099
Stock 10	28.09	231.925	1.253	-8.554	0.052	0.038	8.554	-232.091	-26.691	9.266	7.872	0.044	0.081	9.024	-8.725	11.787	-1985.39
COIN-Gaia 14	3.391	206.285	-5.299	-9.111	0.202	0.012	9.113	-206.31	1.191	9.114	7.214	0.081	0.116	8.546	-3.526	-48.243	-1880.165
UPK 418	-1.233	225.146	-2.128	-8.922	-0.456	0.182	8.933	-224.915	-10.268	9.049	8.244	0.187	0.047	9.133	-40.085	-19.214	-2009.255
IC 4665	4.252	212.979	-2.702	-7.915	0.168	0.116	7.917	-213.022	0.257	7.918	6.678	0.121	0.085	7.666	-25.099	-20.896	-1686.548
UBC 8	16.856	224.752	-5.791	-8.623	0.198	0.127	8.625	-225.08	-11.686	8.764	7.94	0.155	0.049	8.825	-29.633	-47.797	-1941.415
NGC 1758	12.547	212.701	9.754	-9.069	0.013	-0.144	9.069	-212.718	-12.247	9.146	7.558	0.217	0.095	8.769	30.72	86.658	-1929.188
RSG 1	0.266	218.205	-3.939	-8.522	0.07	0	8.523	-218.2	1.516	8.524	7.492	0.054	0.064	8.453	-0.285	-33.573	-1859.614
Skiff J0619+18.5	-2.021	222.881	0.123	-9.648	-0.33	0.058	9.653	-222.82	-5.597	9.687	8.836	0.058	0.046	9.777	-12.965	1.068	-2150.971
Berkeley 21	19.933	203.095	6.173	-13.471	-0.63	-0.206	13.485	-201.942	-29.4	13.964	10.23	0.277	0.154	12.378	37.985	79.05	-2723.24
Gulliver 6	-12.585	220.687	-1.549	-8.559	-0.169	-0.114	8.561	-220.892	8.223	8.612	7.667	0.117	0.058	8.595	25.475	-11.823	-1890.967
NGC 6633	-15.117	210.625	-1.206	-7.887	0.228	0.071	7.89	-210.099	21.208	8.052	6.376	0.074	0.116	7.535	-15.287	-10.59	-1657.731
UPK 296	15.618	214.146	-3.48	-8.618	0.321	-0.075	8.624	-214.579	-7.627	8.654	7.325	0.09	0.083	8.411	14.869	-31.152	-1850.495
COIN-Gaia 21	10.261	211.36	-6.807	-9.578	0.007	-0.019	9.578	-211.368	-10.1	9.629	7.903	0.114	0.098	9.202	3.893	-65.385	-2024.475
NGC 6791	38.665	168.518	-15.983	-6.674	4.18	0.869	7.875	-163.345	56.673	8.361	4.226	1.037	0.328	5.847	-213.325	-73.053	-1286.329
Stock 2	-14.733	209.201	-6.622	-8.457	0.272	0.005	8.462	-208.619	21.45	8.631	6.734	0.093	0.123	8.024	-2.808	-56.078	-1765.257
COIN-Gaia 20	13.903	224.33	5.482	-9.255	0.111	-0.059	9.256	-224.48	-11.217	9.389	8.497	0.104	0.05	9.444	13.792	49.918	-2077.716
Berkeley 17	86.104	199.27	42.06	-11.414	0.244	-0.186	11.417	-201.065	-81.825	13.873	7.739	1.671	0.284	10.434	47.377	464.044	-2295.509
COIN-Gaia 18	8.436	210.856	-3.723	-9.204	0.163	-0.019	9.206	-210.952	-4.708	9.216	7.586	0.06	0.097	8.827	3.386	-34.431	-1941.973
King 5	46.459	200.587	-3.321	-10.23	1.487	-0.17	10.338	-205.185	-17.115	10.465	8.048	0.185	0.131	9.642	29.096	-41.855	-2121.165
COIN-Gaia 26	16.944	218.745	0.963	-9.557	-0.239	-0.201	9.56	-218.251	-22.418	9.877	8.197	0.206	0.093	9.484	43.743	5.796	-2086.57
NGC 2126	22.845	211.371	0.572	-9.4	0.362	0.31	9.407	-212.093	-14.698	9.519	7.79	0.314	0.1	9.069	-65.359	12.466	-1995.205

Cluster	U	V	W	X	Y	Z	R _{gc}	VT	VR	R _{tip}	R _{peri}	Z _{max}	ecc	R _g	LX	LY	LZ
	kms ⁻¹	kms ⁻¹	kms ⁻¹	kpc	kpc	kpc	kpc	kms ⁻¹	kms ⁻¹	kpc	kpc	kpc	-	kpc	kms ⁻¹ kpc	kms ⁻¹ kpc	kms ⁻¹ kpc
ASCC 16	-3.25	225.493	4.069	-8.509	-0.119	-0.094	8.51	-225.516	0.086	8.51	7.976	0.111	0.032	8.723	20.796	34.931	-1919.091
ASCC 19	-4.083	222.144	1.701	-8.506	-0.142	-0.103	8.507	-222.181	0.373	8.508	7.746	0.106	0.047	8.592	22.738	14.889	-1890.142
Alessi 37	15.887	216.122	5.302	-8.341	0.679	-0.124	8.369	-216.698	1.713	8.371	7.271	0.146	0.07	8.243	30.493	42.25	-1813.543
COIN-Gaia 10	10.653	212.678	3.933	-9.175	0.318	-0.073	9.18	-212.919	-3.277	9.186	7.703	0.095	0.088	8.885	16.681	35.313	-1954.612
COIN-Gaia 41	15.664	206.372	-10.943	-9.992	-0.32	-0.056	9.997	-205.765	-22.263	10.201	7.766	0.214	0.136	9.35	15.135	-110.225	-2057.104
COIN-Gaia 8	11.841	216.831	4.525	-8.742	0.46	-0.102	8.754	-217.154	-0.428	8.754	7.629	0.123	0.069	8.64	24.2	38.351	-1900.894
FSR 0850	-3.742	202.279	4.369	-10.334	-0.131	-0.067	10.335	-202.31	1.178	10.336	7.909	0.104	0.133	9.504	12.972	45.403	-2090.856
NGC 2301	-5.735	215.14	-1.608	-8.924	-0.463	0.021	8.936	-215.149	-5.407	8.953	7.635	0.031	0.079	8.739	-3.692	-14.466	-1922.652
COIN-Gaia 40	4.968	208.884	-4.274	-10.192	0.208	-0.009	10.194	-208.942	-0.712	10.194	8.283	0.075	0.103	9.681	1.016	-43.602	-2129.879
FSR 0686	29.748	219.306	-2.826	-9.024	0.352	-0.018	9.03	-220.3	-21.168	9.319	7.863	0.047	0.085	9.043	2.972	-26.04	-1989.407
NGC 2158	-6.532	194.181	-16.282	-12.702	-0.524	0.165	12.713	-194.286	-1.474	12.715	9.192	0.528	0.161	11.227	-23.461	-207.893	-2469.961
RSG 5	4.173	221.177	2.594	-8.152	0.331	0.051	8.158	-221.164	4.799	8.176	7.351	0.061	0.053	8.202	-10.339	21.359	-1804.363
UBC 88	23.133	222.063	-5.736	-9.058	0.442	-0.087	9.068	-222.927	-12.285	9.201	8.207	0.127	0.057	9.189	16.878	-53.979	-2021.561
UPK 282	30.331	223.277	-1.733	-8.759	0.538	-0.225	8.775	-224.716	-16.594	9.022	7.978	0.233	0.061	8.963	49.411	-22.016	-1971.941
COIN-Gaia 28	-5.274	223.747	-3.876	-9.718	-0.554	0	9.734	-223.685	-7.461	9.798	8.957	0.063	0.045	9.897	2.145	-37.671	-2177.251
UPK 305	10.743	219.254	0.266	-8.524	0.22	-0.117	8.527	-219.458	-5.083	8.545	7.569	0.118	0.061	8.506	25.808	1.007	-1871.247
UPK 381	14.257	222.729	3.742	-8.904	-0.045	0.104	8.904	-222.654	-15.383	9.093	7.989	0.121	0.065	9.012	-23.277	34.795	-1982.579
ASCC 108	15.918	214.548	3.327	-7.891	1.105	0.137	7.968	-214.682	13.993	8.059	6.748	0.144	0.089	7.775	-25.618	28.43	-1710.536
Berkeley 72	3.244	214.104	22.42	-13.644	-0.598	-0.22	13.657	-213.757	-12.613	13.842	11.907	0.874	0.075	13.27	33.76	305.195	-2919.385
COIN-Gaia 39	15.322	220.93	0.774	-9.124	0.323	-0.029	9.13	-221.334	-7.492	9.177	8.215	0.031	0.055	9.185	6.623	6.619	-2020.77
FSR 0942	-17.218	228.855	0.635	-11.34	-0.875	-0.184	11.373	-229.501	-0.446	11.377	11.269	0.185	0.005	11.865	41.619	10.377	-2610.205
IC 348	-1.903	224.592	0.833	-8.489	0.102	-0.083	8.489	-224.553	4.61	8.512	7.869	0.084	0.039	8.665	18.698	7.233	-1906.332
UBC 13	-11.307	224.098	-7.983	-8.657	-0.359	0.201	8.665	-224.374	2.01	8.67	8.055	0.24	0.037	8.837	-42.205	-71.39	-1944.161
UBC 4	11.641	222.177	-5.499	-8.751	0.185	-0.115	8.753	-222.374	-6.947	8.795	7.952	0.144	0.05	8.848	24.629	-49.47	-1946.466
Alessi 20	2.644	214.65	0.686	-8.398	0.378	-0.012	8.406	-214.552	7.006	8.431	7.142	0.015	0.083	8.198	2.889	5.726	-1803.565
Berkeley 71	17.265	199.902	1.463	-12.123	0.231	0.083	12.125	-200.194	-13.455	12.21	9.141	0.091	0.144	11.033	-16.351	19.178	-2427.313
COIN-Gaia 12	16.89	206.219	4.234	-9.116	0.227	0.051	9.119	-206.575	-11.763	9.173	7.2	0.084	0.12	8.562	-9.656	39.468	-1883.738

Cluster	U	V	W	X	Y	Z	R _{gc}	VT	VR	R _{apo}	R _{peri}	Z _{max}	ecc	R _g	LX	LY	LZ
	kms ⁻¹	kms ⁻¹	kms ⁻¹	kpc	kpc	kpc	kpc	kms ⁻¹	kms ⁻¹	kpc	kpc	kpc	-	kpc	kms ⁻¹ kpc	kms ⁻¹ kpc	kms ⁻¹ kpc
Czernik 21	-30.849	199.823	33.336	-12.16	0.564	0.054	12.173	-198.178	40.079	12.879	8.83	1.213	0.186	10.966	8.049	403.705	-2412.456
Koposov 63	-19.946	215.393	14.068	-12.427	-0.482	0.21	12.436	-216.005	11.58	12.578	10.91	0.456	0.071	12.211	-52.052	170.636	-2686.33
Tombaugh 5	28.588	200.74	-7.336	-9.567	0.996	0.124	9.619	-202.621	-7.656	9.642	7.362	0.179	0.134	8.859	-32.177	-66.646	-1949.024
UBC 17a	-3.53	221.919	3.031	-8.509	-0.146	-0.096	8.51	-221.947	-0.284	8.511	7.733	0.105	0.048	8.586	20.775	26.133	-1888.843
UBC 55	26.322	220.504	-3.121	-9.029	0.355	-0.018	9.036	-221.368	-17.639	9.26	7.99	0.05	0.074	9.092	2.855	-28.65	-2000.319
UPK 350	8.035	223.619	-7.074	-8.602	0.091	0.16	8.603	-223.692	-5.672	8.637	7.918	0.194	0.043	8.747	-36.445	-59.571	-1924.386
UPK 429	0.711	229.788	0.713	-8.894	-0.514	0.092	8.909	-229.364	-13.969	9.188	8.39	0.095	0.045	9.288	-21.553	6.403	-2043.428
King 6	24.746	203.97	9.577	-8.783	0.434	0.015	8.794	-204.943	-14.645	8.87	6.838	0.145	0.129	8.192	1.127	84.49	-1802.306

致 谢

时间真的过的很快，六年的研究生学习和生活即将告一段落。回想这六年的点点滴滴，得到的不止是知识，还有心智的成熟及成长。这几年是我人生中变化和成长最大的一段时光，也将是我一生中最为珍贵的回忆。

首先，我要向我的三位导师：邵正义研究员、常瑞香研究员和钟靖副研究员表示衷心的感谢和诚挚的敬意。感谢邵正义老师对我这个学生的不抛弃不放弃，没有因为我的愚钝而放弃我这个学生。邵老师不仅知识渊博、严谨治学，在讨论科学问题时，您总能快速地发现问题、提出问题，严格且全面地思考问题。您对科学问题的超高敏锐度令我折服，您思考问题的方式、看待问题的态度及生活中的为人处事等方面都值得我学习。感谢邵老师平日里对我工作的耐心指导和帮助，感谢您在本篇博士论文修改过程中倾注的大量时间和心血，甚至下班后及周末休息日加班给我指导论文的修改。感谢常瑞香老师这些年对我工作的耐心引导，讨论问题时，您总是温声细语地且委婉地指出我学习中存在的问题，能够让我认识到自己的不足，感谢您平日里对我学习和生活上给予的无私帮助。感谢钟老师在系统安装、软件应用、IDL 语言学习以及对 LAMOST 光谱巡天的深入了解和相关科学问题的讨论中给予的无私帮助。感谢您这些年对我工作的耐心指导和帮助，不论何时向您请教问题，您总能毫无保留地耐心地传授理论知识及数据处理的相关方法和技巧。再次感谢三位老师这些年对我学习和生活中给予的耐心指导和付出的心血，感谢三位老师在本篇论文修改中提出的宝贵意见!!!

其次，感谢我们星团组的侯金良研究员、陈力研究员、沈世银研究员、赵东海研究员、尹君副研究员、袁方婷副研究员、富坚副研究员对我的关心和帮助！星团组不论哪个老师都是和蔼可亲的，向你们请教问题时，总能及时给与指导和帮助。每周的组会上，各位老师活跃的思维、对科学问题极高的敏锐度及热爱，并能提出建设性的建议，这些都值得我学习。在此特别感谢邵老师讨论小组内的几个师妹：李璐、刘蓉蓉、胡国真、潘翠云和李国景，感谢几位在科学讨论、python 画图及算法应用和论文修改中给予的无私帮助。特别特别感谢师妹胡国真在数据处理和科学问题讨论、论文修改中和作为我的答辩秘书给予的很多帮

助! 特别感谢刘蓉蓉在学习和论文修改上提出的宝贵建议, 以及在心理上的沟通与交流, 你让我更清楚地认识自我和直面内心, 获得心智上的成熟与成长, 成为更好的自己。感谢茜茜姐、郑云亮、卢家风在画图、`latex` 插入表格和论文修改中给予的帮助和宝贵建议。感谢已经毕业的王有芬师姐、李静师姐、谢晓宜师姐、李林林师姐和冯帅、张燕琼和黄轶琦在学习和生活中的帮助。同时, 感谢组内其他同学: 张茜、郑云亮、卢家风、钟文心、居梦婷、张文粳、李春燕、白乐娅、单星美、沈梦婷、穆子豪和邱佳杰在学习和生活中的帮助。

感谢已毕业的好友廖迈、周敏华、李佳文和袁野在学习和日常生活中给予的关心和照顾, 感谢 1510 办公室原有和现有的师兄师姐师弟师妹: 乔海花、郭恒潇、胡京馥、姚广瑞、游贝、李尚活、李菲、刘慧、赵汝双、杨丽、来自巴基斯坦的 Anjum、邵曦、刘京浩、苏仁智、冯俊杰、潘鑫。

感谢天物室杨炆老师、李彩丽老师、姜璐玲老师以及储怡老师、马金老师和原有的王慧老师, 感谢你们对我在天文台学习和生活中的关心和帮助。

感谢我的父母、公婆和家人, 感谢你们一直以来对我的关心和支持!

最后, 特别感谢我即将两岁半的孩子张夏天, 这两年对你陪伴的缺失, 我内心始终有愧, 感谢你的乖巧和懂事, 愿你健康快乐成长! 感谢我的爱人张璐先生, 感谢你对我一直以来的支持和理解。

最后的最后, 感谢这几年的自己。特别是今年, 感谢自己的变化和成长。人都需要成长的, 不论人生的哪个阶段, 只要你愿意, 都为时不晚。希望自己在以后的人生中能不断学习、虚心倾听他人建议、不再固守己见, 一直保持一颗好奇心, 保持对学习、工作和生活的热爱。

张 书 会

2021 年 05 月

作者简介及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简介

张书会，女，1989年4月出生于河南省商水县，中国科学院上海天文台博士研究生。

教育状况

2008年09月—2012年07月，在河南师范大学获得学士学位

2012年09月—2015年07月，在上海师范大学获得硕士学位

2014年04月—2015年07月，在中国科学院上海天文台联合培养

2015年09月—2021年06月，在中国科学院上海天文台攻读博士学位

已发表(或正式接受)的学术论文:

Chang, R., **Zhang, Shuhui**, Shen, Shiyin, et al. Why do disk galaxies present a common gas-phase metallicity gradient?[C], 2017.

Zhang, Shuhui, Shao, Zhengyi, et al. Radial Velocities and metallicities of Open clusters from LAMOST based on mixture model (in preparation)

Zhang, Shuhui, Shao, Zhengyi, et al. The correction factors for uncertainty of radial velocity and metallicity in LAMOST DR7 (in preparation)

