



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

利用疏散星团检验恒星大气参数: 在 Gaia 与其他光谱巡天中的应用

作者姓名: 唐通

指导教师: 陈力 研究员 中国科学院上海天文台

钟靖 研究员 中国科学院上海天文台

学位类别: 理学硕士

学科专业: 天体物理

培养单位: 中国科学院上海天文台

2025 年 6 月

**Selected Open Cluster Sample for Validating Atmospheric
Parameters: Application to Gaia and Other Surveys**

**A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Natural Science
in Astrophysics**

By

Tang Tong

Supervisors: Prof. Chen Li, Prof. Zhong Jing

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences

June, 2025

中国科学院大学 学位论文原创性声明

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

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

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

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

恒星大气参数 (如有效温度 T_{eff} 、表面重力 $\log g$ 、金属丰度 $[M/H]$) 是研究恒星演化与银河系化学演化的核心依据。大规模巡天计划 (如 *Gaia* DR3、LAMOST、APOGEE、GALAH 等) 已经为海量的恒星提供了大气参数, 但因不同巡天所使用的数据以及求解方法的差异, 不可避免地存在系统误差, 其可靠性需进一步验证。我们利用疏散星团成员的独特优势 (单星族、相似年龄、相似化学丰度), 通过理论等龄线拟合构建理论大气参数参考样本, 对多个巡天的恒星大气参数结果进行了系统评估。选取了太阳邻域 500 pc 范围内 130 个主序清晰的疏散星团, 基于理论等龄线模型估计了样本成员星的理论大气参数, 系统检验了 *Gaia* DR3 的 GSP-Phot、GSP-Spec、ESP-HS 模块及 LAMOST DR11、APOGEE DR17、GALAH DR4 的大气参数质量。

我们发现这些巡天所得的恒星大气参数都严重低估了 BA 型星的有效温度以及表面重力, 除了 APOGEE DR17 的表面重力是高估。这些巡天的 FGK 型星的有效温度与理论等龄线偏差几乎在 260 K 范围内, 除了 GSP-Spec 的表面重力存在 0.43 dex 的高估, 其他的巡天都显示出低估。GSP-Phot、APOGEE DR17、GALAH DR4 的 M 型星有效温度均存在高估, GSP-Phot、GALAH DR4 的 M 型星表面重力偏差的弥散都大于 0.2 dex, 而 APOGEE DR17 的有效温度与表面重力弥散都最小, 分别为 61 K, 0.09 dex。GSP-Phot 的有效温度与消光存在强简并, 表面重力与消光、温度也存在关联。

关键词: 恒星大气参数; 疏散星团; 光谱巡天; 等龄线。

Abstract

Stellar atmospheric parameters such as effective temperature (T_{eff}), surface gravity ($\log g$), and metallicity ($[M/H]$) are fundamental for understanding stellar evolution and Galactic chemical dynamics. Large-scale surveys such as *Gaia* DR3, LAMOST, APOGEE, and GALAH have provided the atmospheric parameters for numerous stars. However, systematic discrepancies arise in different surveys due to variations in data inputs and methods, necessitating rigorous validation. This study leverages the unique advantages of open clusters—single stellar populations with uniform age and chemical composition—to establish a reference for theoretical atmospheric parameters via isochrone fitting. We selected 130 well-defined open clusters within 500 pc of the Sun and used the isochrone to systematically evaluate the quality of atmospheric parameters from *Gaia* DR3 modules (GSP-Phot, GSP-Spec, ESP-HS) and catalogs from LAMOST DR11, APOGEE DR17, and GALAH DR4.

We found that all catalogs systematically underestimate the T_{eff} and $\log g$ of B, A-type stars, except for APOGEE DR17, which slightly overestimates $\log g$. For F, G, K-type stars, T_{eff} deviations from theoretical isochrones are generally within 260 K, while $\log g$ is underestimated by most catalogs, except for GSP-Spec, which overestimates $\log g$ by 0.43 dex. For M-type stars, GSP-Phot, APOGEE DR17, and GALAH DR4 all overestimate T_{eff} , with APOGEE DR17 showing the smallest dispersion (61 K). Also, APOGEE DR17 shows the smallest dispersion of $\log g$ by 0.09 dex. In contrast, GSP-Phot and GALAH DR4 exhibit larger $\log g$ dispersion (> 0.2 dex). Additionally, GSP-Phot demonstrates a strong degeneracy between T_{eff} and extinction, with $\log g$ further correlated with these parameters.

Key Words: Stellar Atmospheric Parameters, Open Cluster, Spectroscopic surveys, Isochrones.

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 恒星大气参数简介	1
1.2 <i>Gaia</i> 巡天	2
1.2.1 <i>Gaia</i> 巡天概况	2
1.2.2 <i>Gaia</i> 数据发布	3
1.2.3 GSP-Phot 大气参数表	5
1.2.4 GSP-Spec 大气参数表	5
1.2.5 ESP-HS 大气参数表	6
1.3 地面光谱巡天	8
1.3.1 LAMOST 光谱巡天	8
1.3.2 SDSS 光谱巡天	9
1.3.3 GALAH 光谱巡天	10
1.4 疏散星团	11
1.4.1 疏散星团简介	11
1.4.2 <i>Gaia</i> 时代疏散星团样本	12
1.4.3 疏散星团的优势	13
1.4.4 疏散星团在检验恒星大气参数中的应用	14
1.5 本文研究目的与内容	15
第 2 章 样本与方法	17
2.1 疏散星团样本	17
2.2 等龄线模型	21
2.3 成员星理论大气参数估计	22
第 3 章 光谱巡天大气参数验证	23
3.1 <i>Gaia</i> DR3 的大气参数	26
3.1.1 GSP-Phot 的大气参数	26
3.1.2 GSP-Spec 的大气参数	28
3.1.3 ESP-HS 的大气参数	30
3.2 LAMOST-LRS DR11 的大气参数	31
3.3 APOGEE DR17 的大气参数	33
3.4 GALAH DR4 的大气参数	34

第 4 章 讨论	37
4.1 考虑恒星自转对结果的影响	37
4.2 GSP-Phot 大气参数在蓝端、红端的弥散	39
4.3 GSP-Spec 质量标签对其结果的影响	39
4.4 方法的局限性	40
第 5 章 总结与展望	43
5.1 总结	43
5.2 展望	44
参考文献	45
附录 A 疏散星团样本	51
附录 B 成员星理论大气参数表	55
致谢	57
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果 ..	59

图目录

图 1-1	<i>Gaia</i> 的观测技术。图片来自: ESA/ <i>Gaia</i> /DPAC。	2
图 1-2	<i>Gaia</i> 的主要科学目标。图片来自: ESA/ <i>Gaia</i> /DPAC。	3
图 1-3	Apsis 系统的模块介绍。左侧展示了每个模块的名称, 对应于中间的每个方框。中间还展示了用于处理的数据, 以及各模块使用的数据, 箭头表示了各模块的依赖关系。右侧展示了这些模块在赫罗图中的参数范围。图片引自: Creevey et al. (2023)。	5
图 1-4	GSP-Phot 的有效温度与 APGEE DR16、GALAH DR3、LAMOST DR4、RAVE DR6 有效温度的偏差在银道坐标系下的分布。颜色条代表温度偏差, 即 GSP-Phot 的有效温度减去其他巡天的值。图片引自: Andrae et al. (2023)。	6
图 1-5	<i>Gaia</i> 卫星观测到的一条高信噪比的 RVS($S/N=884$) 光谱与理论模板的匹配结果, 蓝线代表观测谱, 黄线代表理论谱。其对应的大气参数值为 $T_{\text{eff}} = 5477 \text{ K}$, $\log g = 1.44$, $[M/H] = 0.07 \text{ dex}$ 。图片引自: Recio-Blanco et al. (2023)。	7
图 1-6	GSP-Spec 大气参数与 APOGEE DR17、GALAH DR3、RAVE DR6 大气参数比较的密度图。左图为有效温度, 右图为表面重力。绿色代表最佳质量样本, 灰色代表中等质量样本。图片引自: Recio-Blanco et al. (2023)。	7
图 1-7	ESP-HS 的大气参数与 LAMOST DR5 (Luo et al., 2019)、Stromgren A、Stromgren B (Napiwotzki et al., 1993)、PASTEL (Soubiran et al., 2016)、HotPayne LAMOST DR6 (Xiang et al., 2022)、 <i>Gaia</i> ESO (Blomme et al., 2022) 大气参数的偏差随温度的分布。左图为表面重力的偏差, 右图为有效温度的偏差。橙色线代表中位值, 橙色阴影代表弥散。图片引自: Recio-Blanco et al. (2023)。	8
图 1-8	LAMOST 的结构示意图。图片引自: Cui et al. (2012)。	9
图 1-9	昴星团 (Pleiades) 的彩色合成图像。图片来自: NASA。	12
图 1-10	GSP-Phot 的大气参数与等龄线的偏差在内禀颜色-绝对星等图中的分布。颜色条代表平均偏差。图片引自: Fouesneau et al. (2023)。	15
图 2-1	Qin et al. (2023) 的 324 个疏散星团在银道坐标系下的分布。黑色点代表已经被报道过发疏散星团, 红色点代表其工作中新发现的疏散星团。蓝色的圈代表疏散星团的二维投影半径。图片引自: Qin et al. (2023)。	17
图 2-2	由左到右: 样本的年龄、红化、成员星数目柱状图。参数来自于 Qin et al. (2023) 的 OCSN 表。	18

- 图 2-3 左图为 C^* 随成员星观测的 G 星等分布, 右图为双色图。红点表示满足 $|C^*| < 3\sigma_{C^*}$ 的成员星, 灰点表示剔除的成员星, 蓝线表示 $\pm 3\sigma_{C^*}$ 。 19
- 图 2-4 OCSN_259(Roslund_6) 的内禀颜色-绝对星等图。蓝色点代表双星质比大于 0.5 需要剔除的样本, 红色点代表需要保留的样本。误差棒代表测光的不确定性。绿色实线代表理论等龄线, 等龄线参数由 Qin et al., 2023 提供, 橘黄色虚线、灰色点线分别为质比等于 0.5、1 的双星序。 20
- 图 3-1 上图: 有效温度偏差相对于其中位值的弥散随内禀颜色的分布, 下图表面重力偏差相对于其中位值的弥散随内禀颜色的分布。红、橙、蓝、绿、紫、灰线分别代表 GSP-Phot, GSP-Spec, ESP-HS, LAMOST-LRS DR11, APOGEE DR17, and GALAH DR4。 25
- 图 3-2 GSP-Phot 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。灰色虚线代表不同恒星类型的分界线。颜色条代表经 Andrae et al. (2023) 提供的金属丰度校准关系式校准后的 GSP-Phot 金属丰度, 灰点则表示不适用此金属丰度校准的源。 27
- 图 3-3 ΔA_{G_Phot} 与 ΔT_{eff_Phot} 的分布图。其中 $\Delta A_{G_Phot} = A_{G_Phot} - A_{G_iso}$ 。颜色条代表 $\Delta \log g_{Phot}$ 。 28
- 图 3-4 GSP-Phot 的大气参数偏差随观测 G 星等的分布。上图为有效温度的偏差, 下图为表面重力的偏差。黑色三角形代表偏差的中位值, 误差棒代表相对于中位值的弥散。 29
- 图 3-5 GSP-Spec 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。颜色条代表 GSP-Spec 的金属丰度。 30
- 图 3-6 ESP-HS 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。ESP-HS 模块默认所有的源金属丰度为太阳金属丰度。 31
- 图 3-7 LAMOST-LRS DR11 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。颜色条代表 LAMOST-LRS DR11 的金属丰度。 32
- 图 3-8 APOGEE DR17 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。灰色虚线代表不同恒星类型的分界线。颜色条代表 APOGEE DR17 的金属丰度, 灰点表示无金属丰度值的源。 33

图 3-9 GALAH DR4 的大气参数偏差（观测值减理论值）随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布，下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值，对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。灰色虚线代表不同恒星类型的分界线。颜色条代表 GALAH DR4 的金属丰度。	34
图 4-1 GSP-Phot 大气参数与具有自转的等龄线模型的理论大气参数偏差情况。绿、黄、红分别代表与自转角速度 $\omega_i = 0.1, 0.5, 0.9$ 的理论等龄线的偏差。	38
图 4-2 OCSN_259 成员星 (红点) 的 $T_{\text{eff_Phot}}$ 、 $\log g_{\text{Phot}}$ 与内禀颜色分布图，绿色虚线为等龄线。	39
图 4-3 GSP-Spec 中不同质量标签的大气参数偏差分布情况。红色点代表 gspspec_flags 中的 f1, f2, f3, f4, f5, f6 均为 0 的最佳样本，黑色点代表 f1, f2, f3, f4, f5, f6 其中任意一个质量标签不为 0 的样本。	40

表目录

表 2-1 我们的样本与 Gaia、LAMOST、APOGEE、GALAH 的公共成员星数目以及大气参数的典型不确定性。	21
表 3-1 GSP-Phot, GSP-Spec, ESP-HS, LAMOST-LRS DR11, APOGEE DR17, GALAH DR4 的不同恒星类型大气参数的偏差与弥散。	24
表 A-1 挑选的疏散星团样本性质表。	51
表 B-1 成员星理论大气参数表	55

符号列表

字符

Symbol	Description	Unit
T_{eff}	恒星有效温度	K
$\log g$	恒星表面重力	dex
[M/H]	恒星金属丰度	dex
$E(B - V)$	等龄线拟合的疏散星团整体红化	mag
$\log(t[\text{yr}])$	等龄线拟合的疏散星团年龄	log[yr]
A_G	G 波段的消光	mag
$(m - M)_0$	距离模数	mag
ΔT_{eff}	观测有效温度与理论值的偏差，观测值减理论值	K
$\Delta \log g$	观测表面重力与理论值的偏差，观测值减理论值	dex
$\Delta A_{G_{\text{Phot}}}$	GSP-Phot 提供的 $A_{G_{\text{Phot}}}$ 与等龄线拟合的 $A_{G_{\text{iso}}}$ 之差	mag

缩写

APOGEE	Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment
APSYS	The Astrophysical Parameters Inference System
ASPCAP	APOGEE Stellar Parameters and Chemical Abundances Pipeline
BOSS	Baryon Oscillation Spectroscopic Survey
DPAC	The Gaia Data Processing and Analysis Consortium
ESP-HS	Extended Stellar Parameterizer for Hot Stars
ESP-UCD	Extended Stellar Parameterizer for Ultra Cool Dwarfs
GALAH	GALactic Archaeology with HERMES
GSP-Phot	General Stellar Parameterizer from Photometry
GSP-Spec	General Stellar Parameterizer from Spectroscopy
HERMES	High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph
LAMOST	Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope
LASP	LAMOST Stellar Parameter Pipeline
MANGA	Mapping Nearby Galaxies at APO
PARSEC	PAdova TRieste Stellar Evolution Code
RVS	Radial Velocity Spectrometer
SDSS	Sloan Digital Sky Survey
SEGUE	Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration

第1章 引言

1.1 恒星大气参数简介

恒星是组成星系的重要单元，是研究星系演化、星际物质循环及化学丰度的关键载体。恒星演化历程从分子云坍缩开始，历经主序燃烧、红巨星膨胀等阶段，最终演化的结局为白矮星、中子星或黑洞，而这些不同的阶段可以通过其大气参数（如有效温度 T_{eff} 、表面重力 $\log g$ 、金属丰度 $[M/H]$ 等）进行描述 (Martins et al., 2005; Casey et al., 2017)。恒星大气参数是恒星物理状态的直接反映，是研究其形成环境、内部结构及演化阶段的基础数据，因此，这些大气参数的精确测量是天体物理学的核心任务之一。例如， T_{eff} 体现的是恒星等效黑体辐射能量分布， $\log g$ 揭示的是其质量与半径的关系，而 $[M/H]$ 则记录了恒星形成时的化学组成 (Kurucz, 1979; Malkov et al., 2020)。

恒星大气参数的测量方法可以分为两类：直接测量与间接测量。直接测量方法是通过对物理量的直接观测来推导其大气参数，比如结合直接测量的恒星角直径和全波段辐射流量来推导其有效温度，结合恒星的半径以及质量来推导表面重力等。但这类方法通常适用于少数邻近的恒星，比如太阳和织女星 (Quirion et al., 2010; Boyajian et al., 2012)。恒星大气参数的间接测量方法是通过分析恒星辐射特征（如光谱、测光数据）与理论模型的映射关系来反演大气参数，这也是当前测量恒星大气参数的主流技术。相较于直接测量方法（仅适用于少数邻近恒星），间接测量方法具有覆盖范围广、自动化程度高等优势，尤其适用于大规模巡天数据。光谱模板匹配是间接测量中使用最为广泛的方法之一。这类方法通常需要多维的光谱库，包括了决定光谱形状的不同参数，如有效温度、表面重力、金属丰度、微观湍流等 (Frasca et al., 2016; Li et al., 2023)。目前比较常用的理论大气参数模型有 MARCAS (Gustafsson et al., 2008)，ATLAS (Kurucz, 2005)，PHOENIX (Husser et al., 2013) 等，人们可以借助一些辐射转移代码，比如 SPECTRUM (Gray, 1999)，Turbospectrum (Plez, 2012) 等来计算理论模型光谱。模版匹配通常将观测光谱与理论模板库进行比对，通过寻找最佳匹配模板，将最佳模板的大气参数作为目标恒星的大气参数。

光谱模板匹配法充分利用整个观测光谱特征显著提升了大气参数测量的可靠性。同时高度自动化的处理流程不仅保证了测量结果的一致性，更使其成为大规模光谱巡天中高效处理海量光谱数据的核心技术。例如 *Gaia* 卫星 GSP-Phot (General Stellar Parameterizer from Photometry) 模块通过模板匹配的方式处理低分辨率 BP/RP 光谱，获得了 4.7 亿颗恒星的大气参数；LAMOST (The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) 是世界上光谱获取率最高的望远镜，通过其获取的低、中分辨率光谱，实现了千万量级恒星大气参数的反演；SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 巡天则凭借多波段覆盖与高分辨率的光谱数据，其 APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) 子项目为

70 万颗恒星提供了大气参数; GALAH (GALactic Archaeology with HERMES) 巡天通过处理高分辨率光谱, 为 90 多万颗恒星提供了大气参数。这些海量的恒星大气参数对恒星的演化以及银河系的组成与化学演化研究发挥着重要的作用。

1.2 Gaia 巡天

1.2.1 Gaia 巡天概况

Gaia 卫星¹是欧洲空间局 (ESA) 于 2013 年发射的一颗天体测量空间卫星 (Gaia Collaboration et al., 2016)。其核心任务在于运用高精度的测量数据绘制银河系恒星画卷, 不仅为银河系数十亿颗恒星提供精确的位置、距离、运动状态以及测光等关键信息, 也为深入研究恒星物理特性以及银河系结构与演化过程提供有力支持。图 1-1 展示了 *Gaia* 卫星的观测技术, 该卫星通过对天区进行周期性的重复扫描, 获取目标源高精度的天体测量参数, 涵盖二维投影位置、自行和视差。与此同时, *Gaia* 卫星能够以较高精度获取目标在不同波段的测光数据, 并借助光谱测量手段获取恒星的视向速度以及有效温度、表面重力等天体物理参数。

图 1-2 展示了 *Gaia* 卫星的主要科学目标, 涵盖多个至关重要的领域, 包括对太阳系内的天体进行探测, 聚焦恒星的形成与演化过程, 对银河系不同类型恒星进行普查, 研究银河系的起源、结构和动力学演化, 揭示银河系的发展历程。

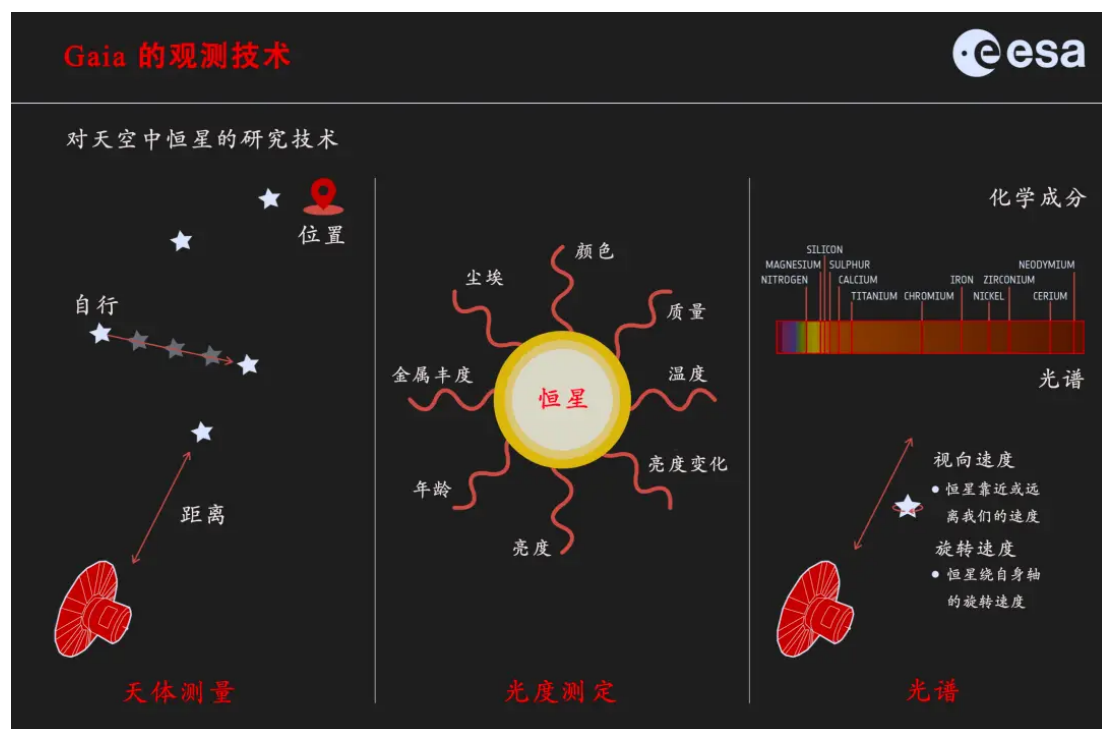


图 1-1 *Gaia* 的观测技术。图片来自: ESA/Gaia/DPAC。

Figure 1-1 The observation technology of *Gaia*.

¹https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/

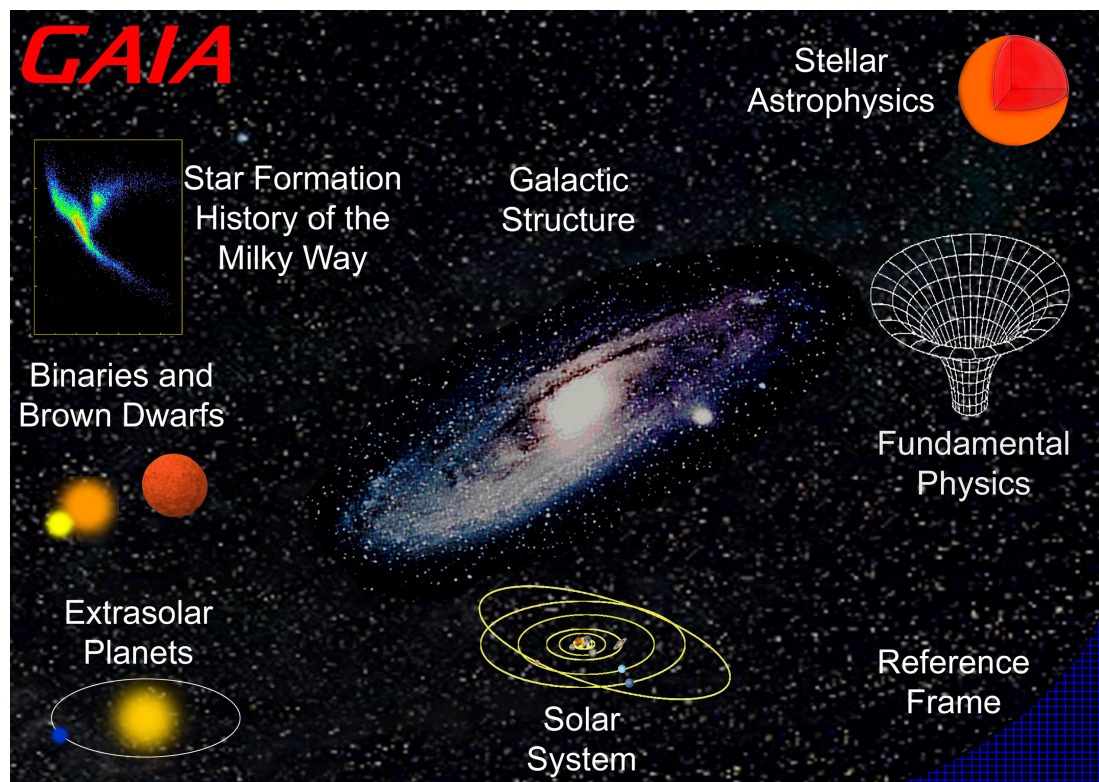


图 1-2 *Gaia* 的主要科学目标。图片来自：ESA/*Gaia*/DPAC。

Figure 1-2 The main science objectives of *Gaia*

1.2.2 *Gaia* 数据发布

Gaia 卫星自升空以来分别释放了 4 批数据，分别为 *Gaia* DR1 (*Gaia* Data Release 1, 2016 年), *Gaia* DR2 (*Gaia* Data Release 2, 2018 年), *Gaia* EDR3 (*Gaia* Early Data Release 3, 2020 年), *Gaia* DR3 (*Gaia* Data Release 3, 2022 年)。

Gaia DR1 数据于 2016 年 8 月发布，其观测周期为 14 个月。主要的内容包括：超 10 亿颗恒星的二维投影位置信息，*G* 波段星等数据，与 Tycho-2 星表共有的近 200 万颗恒星的位置、自行、视差数据等。

Gaia DR2 数据于 2018 年 4 月正式发布，该数据的观测周期累计达 22 个月。其核心内容包括：近 17 亿颗恒星在天球上的二维投影位置信息，以及这些恒星的 *G* 波段星等数据；超过 13 亿颗恒星的完整天体测量参数，具体涵盖位置、自行与视差，同时还包含 BP/RP 波段星等；此外，还包含超七百万颗恒星的视向速度等关键数据，1.6 亿颗恒星的大气参数信息。*Gaia* DR2 数据达成了对银河系内超 10 亿颗恒星进行高精度天体测量的目标。这一成果意义非凡，为天文学多个领域提供了前所未有的研究视角，比如系外行星的探寻、恒星的形成与演化、银河系的结构与演化等。然而，*Gaia* DR2 数据并非完美无缺，仍存在一定局限性。例如，对于 $G < 12$ 等的亮源观测存在不完备的情况、数据累计观测时间不到两年。这在一定程度上对其数据的应用范围和准确性产生了限制。

Gaia EDR3 数据是 *Gaia* DR3 的早期版本数据，其发布了超 18 亿颗恒星的 *G*

波段星等信息, 以及近 15 亿颗恒星的位置、自行、视差信息。相比于 *Gaia* DR2 的数据, 其在数量上得到了很大的提高。另外精度也得到了显著提升, 例如自行精度提高了 2 倍。

2022 年 6 月 *Gaia* 释放了历经 34 个月观测的第三批完整数据集 *Gaia* DR3。该数据集的内容进一步丰富, 主要涵盖了超过 18 亿颗恒星的二维投影位置信息与 *G* 波段星等, 15 亿颗恒星的完整天体测量参数以及 BP/RP 波段星等, 超三千万颗恒星的视向速度。相较于 *Gaia* DR2, *Gaia* DR3 不仅在数据产品的数量上有所提升, 而且推出了全新的数据产品, 如 BP/RP 低分辨率的光谱信息、RVS(Radial Velocity Spectrometer) 高分辨率光谱信息。同时, 通过这些光谱数据, *Gaia* 数据处理团队对三千万颗恒星的视向速度进行了重新测定, *Gaia* DR3 的数据量是 *Gaia* DR2 的 4.7 倍。其还提供超 4.7 亿颗恒星的天体物理参数, 以及约 1000 万个涵盖 24 种变星类型的光变曲线数据等。从参数精度来看, *Gaia* DR3 有着显著进步。*Gaia* DR3 的位置精度提高了一倍, 自行精度提高了 1-2 倍, *G*、*G*_{BP}、*G*_{RP} 波段星等的精度也有一定程度的提高。视向速度精度表现出色, 在 $G_{\text{RVS}} = 12 \text{ mag}$ 时可达 1.3 kms^{-1} , 在 $G_{\text{RVS}} = 14 \text{ mag}$ 时可达 6.4 kms^{-1} 。*Gaia* DR3 是有史以来发布的最大的恒星天体测量与测光数据库, 同时也是最大的恒星大气参数测量、视向速度测量数据库。其在数据量、精度和产品多样性方面取得了显著提升, 是天文学领域的重要里程碑, 为太阳系天体、系外行星、恒星物理、银河系结构与演化等方面的研究提供了前所未有的数据支持, 极大地推动了天文学的发展。

在 *Gaia* DR3 中, 不仅基于 BP/RP 低分辨率光谱获取的大气参数在数量上相比于 *Gaia* DR2 有显著的提升, 而且还新增了基于 RVS 高分辨率光谱获取的近 560 万颗恒星的大气参数。*Gaia* DR3 的大气参数是由 *Gaia* 数据处理和分析团组 (The *Gaia* Data Processing and Analysis Consortium, 简称 DPAC) 用大气参数推导模块 (The Astrophysical Parameters Inference System, 简称 Apsis) 进行分析处理的 (Creevey et al., 2023)。该模块利用 BP/RP 低分辨率光谱、RVS 高分辨率光谱以及测光数据, 并结合恒星模型获取了一系列大气参数。Apsis 针对不同的输入数据、恒星类型、分析方法等, 建立了不同的子模块, 包括 GSP-Phot、GSP-Spec (Generalized Stellar Parametrizer for Generalized Stellar Parametrizery)、ESP-HS (Extended Stellar Parametrizer for Hot Stars)、ESP-UCD (Extended Stellar Parametrizer for Ultra Cool Dwarfs) 等。图 1-3 从左至右分别展示了 Apsis 系统中各模块的名称、各模块的输入数据和相互依赖的关系、这些模块获得的大气参数在赫罗图中的分布区域。

GSP-Phot、GSP-Spec 模块是 *Gaia* 大气参数处理的核心模块, 两个模块分别利用 BP/RP 低分辨率光谱、RVS 高分辨率光谱数据获取了大量恒星的大气参数。这些参数对于揭示恒星的内部结构、演化过程以及能量产生机制至关重要, 有助于验证和完善恒星演化模型, 理解不同类型恒星的生命周期。此外, ESP-HS 是用于处理温度高于 7500K 的热星 (比如 O、B、A 型星) 数据并获取其大气参数的重要模块。

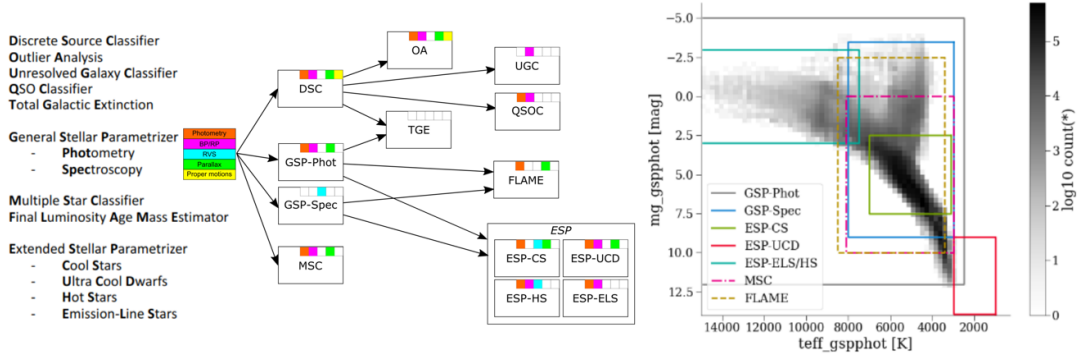


图 1-3 Apsis 系统的模块介绍。左侧展示了每个模块的名称，对应于中间的每个方框。中间还展示了用于处理的数据，以及各模块使用的数据，箭头表示了各模块的依赖关系。右侧展示了这些模块在赫罗图中的参数范围。图片引自：Creevey et al. (2023)。

Figure 1-3 Module Introduction of the Apsis. On the left side, the names of each module are displayed, corresponding to each box in the middle. In the middle, the data for processing is also shown, as well as the data used by each module. The arrows indicate the dependency relationships among the modules. On the right side, the parameter ranges of these modules in the Hertzsprung-Russell diagram are presented.

1.2.3 GSP-Phot 大气参数表

GSP-Phot 是 *Gaia* 数据处理中用于获取恒星大气参数的重要模块之一，其主要目标是基于盖亚卫星提供的低分辨率 BP/RP 光谱 (G_{BP} 波长范围为 330 – 680 nm, G_{RP} 波长范围为 640 – 1050 nm, 分辨率 $\lambda/\Delta\lambda = 20 - 60$)、天体测量和光度测量数据，为 4.7 亿颗恒星提供统一方法获取的恒星大气参数、距离和消光等参数。其通过匹配理论光谱与观测的低分辨率 BP/RP 光谱，来实现对恒星参数的估计。这些理论光谱是根据不同的恒星大气物理模型计算得到的，它们的光谱特征上反映了恒星的有效温度、表面重力、金属丰度等物理参数。通过将观测光谱与这些理论光谱进行比对，并利用 MCMC 方法进行优化拟合，同时考虑视差、视星等等因素，调整模型参数，使得理论光谱与观测光谱在最大程度上匹配。这种匹配过程不仅能够确定恒星的基本物理参数，还能够对恒星的距离、消光等参数进行估计。

在 Andrae et al. (2023) 的工作中，图 1-4 展示了 GSP-Phot 的有效温度分别与 APOGEE DR16、GALAH DR3、LAMOST DR4、RAVE DR6 大气参数的对比。可以看到 GSP-Phot 的有效温度与这些光谱巡天提供的有效温度整体上是是一致的，但是在低银纬天区的有效温度存在高估。这主要是由于 GSP-Phot 的处理流程中温度与消光强简并导致的，比如对于一颗颜色偏红的恒星而言，低分辨率的 BP/RP 光谱往往难以有效区分其是由于低温抑或视线尘埃的红化所致。

1.2.4 GSP-Spec 大气参数表

GSP-Spec 是 *Gaia* 中另一个获取恒星参数的重要模块，主要处理 RVS 高分辨率光谱 (波长范围为 846 – 870 nm, 分辨率 $\lambda/\Delta\lambda = 11\,500$)，为近 560 万颗恒星

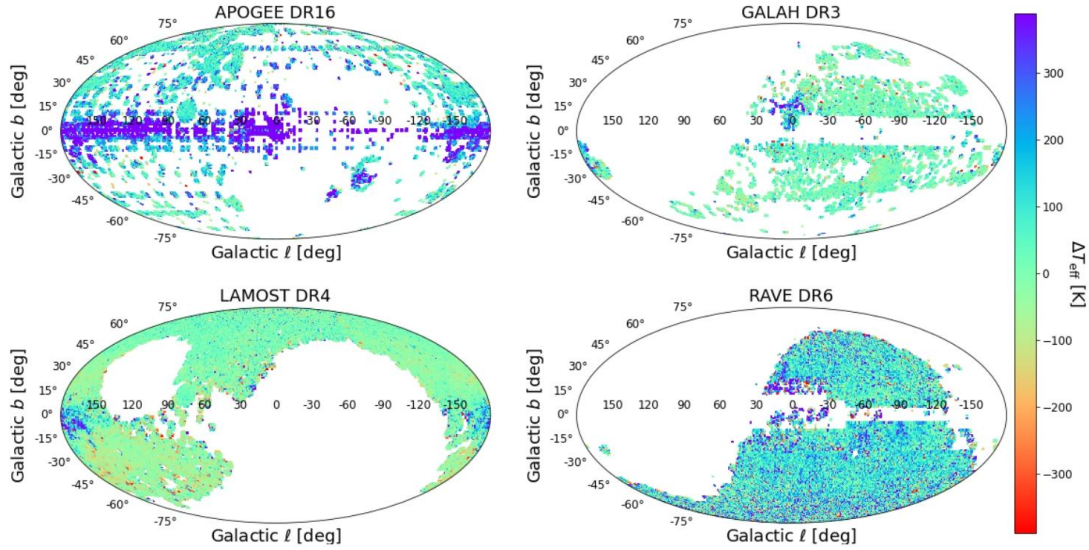


图 1-4 GSP-Phot 的有效温度与 APGEE DR16、GALAH DR3、LAMOST DR4、RAVE DR6 有效温度的偏差在银道坐标系下的分布。颜色条代表温度偏差，即 GSP-Phot 的有效温度减去其他巡天的值。图片引自：Andrae et al. (2023)。

Figure 1-4 The distribution of the deviation of the T_{eff} of GSP-Phot from the T_{eff} of APGEE DR16, GALAH DR3, LAMOST DR4 and RAVE DR6 in the Galactic coordinate system. The color bar represents the T_{eff} deviation, that is, the T_{eff} of GSP-Phot minus the values from other sky surveys.

提供了物理参数，包括 T_{eff} 、 $\log g$ 、 $[M/H]$ 、 $[\alpha/\text{Fe}]$ 等其他 13 种元素丰度。图 1-5 展示了 GSP-Spec 处理数据中的一条观测的高信噪比 RVS 光谱与合成理论谱的最佳匹配结果。同时考虑多种可能的误差源对 GSP-Spec 输出结果的影响，并制定质量标签。如针对恒星自转和宏观湍流导致的谱线展宽、径向速度不确定性、流量噪声等方面的问题，分别设置了相应的标志 (vbroad 系列、vrad 系列、fluxNoise 等)。

图 1-6 展示了 Recio-Blanco et al. (2023) 的工作中对 GSP-Spec 大气参数与 APOGEE DR17、GALAH DR3、RAVE DR6 大气参数的对比，绿色点为 GSP-Spec 的高质量样本（前 13 个标志均等于 0）分别与以上三个地基望远镜的公共星，灰色点为 GSP-Spec 中等质量标志的公共星。结果显示对于高质量的样本， T_{eff} 偏差的均值 $\mu = 9.9 \text{ K}$ ，标准差 $\sigma = 112 \text{ K}$ ， $\log g$ 偏差的均值 $\mu = -0.28 \text{ dex}$ ，标准差 $\sigma = 0.21 \text{ dex}$ 。这表明 GSP-Spec 的高质量样本的有效温度与表面重力与地基望远镜的数据整体的一致性较好。但是对于中等质量的样本，离散程度更大，存在一定的高估或低估情况，这说明 GSP-Spec 中等质量的 T_{eff} 、 $\log g$ 的准确性与一致性更差。

1.2.5 ESP-HS 大气参数表

对于一些高温恒星 ($T_{\text{eff}} > 7500 \text{ K}$)，Gaia 进行了专门的处理，主要有两种模式，BP/RP+RVS 的模式与只有 BP/RP 的模式，一共为 200 万颗恒星提供了大气

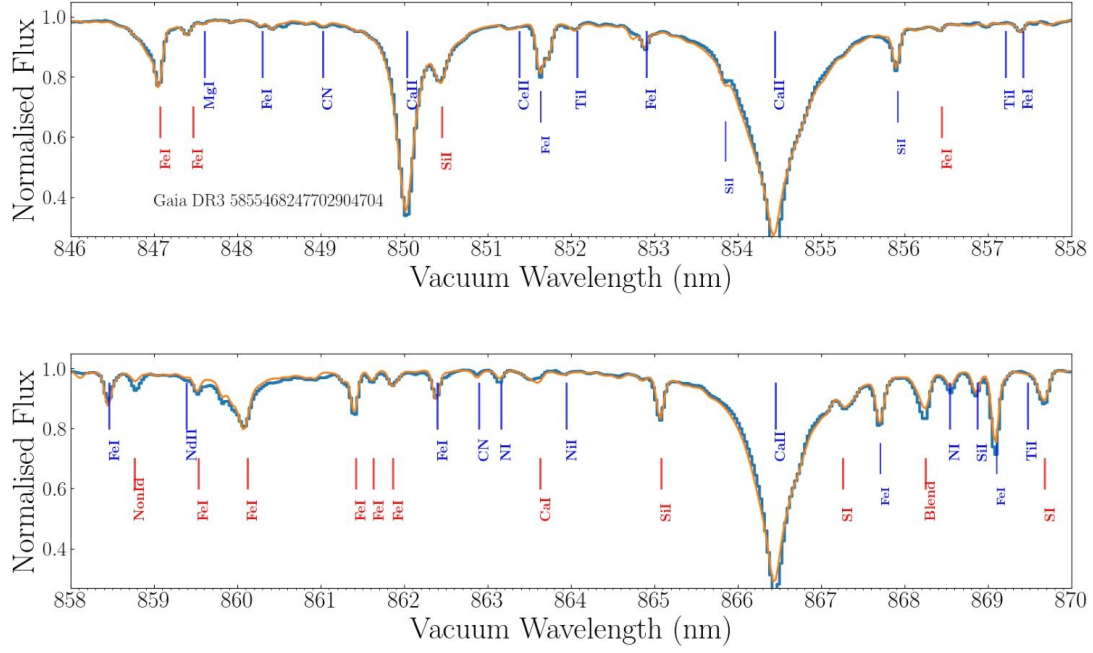


图 1-5 *Gaia* 卫星观测到的一条高信噪比的 RVS($S/N=884$) 光谱与理论模板的匹配结果，蓝线代表观测谱，黄线代表理论谱。其对应的大气参数值为 $T_{\text{eff}} = 5477$ K, $\log g = 1.44$, $[M/H] = 0.07$ dex。图片引自：Recio-Blanco et al. (2023)。

Figure 1-5 The matching result between a spectrum with a high signal-to-noise ratio ($S/N = 884$) of RVS observed by the *Gaia* satellite and a theoretical template. The blue line represents the observed spectrum, and the yellow line represents the theoretical spectrum. The corresponding atmospheric parameter values are $T_{\text{eff}} = 5477$ K, $\log g = 1.44$, $[M/H] = 0.07$ dex.

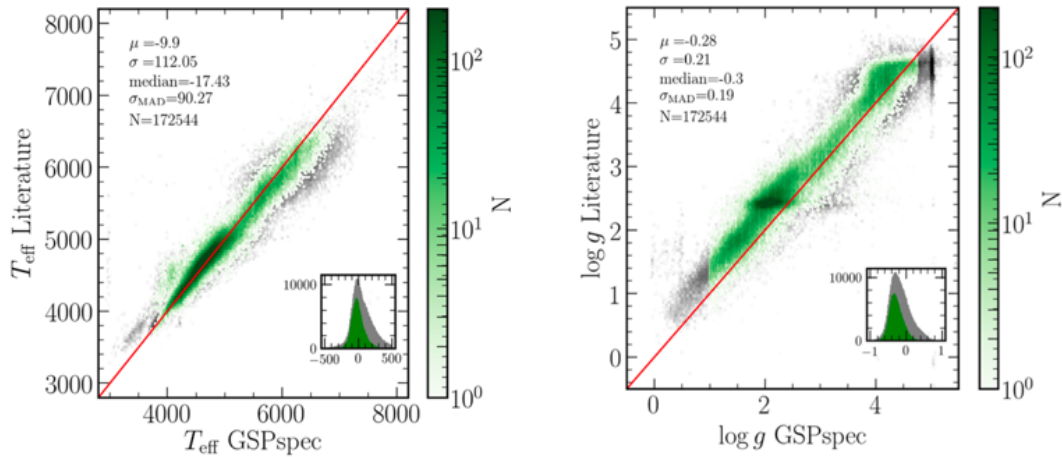


图 1-6 GSP-Spec 大气参数与 APOGEE DR17、GALAH DR3、RAVE DR6 大气参数比较的密度图。左图为有效温度，右图为表面重力。绿色代表最佳质量样本，灰色代表中等质量样本。图片引自：Recio-Blanco et al. (2023)。

Figure 1-6 Density plots comparing the atmospheric parameters of GSP-Spec with those of APOGEE DR17, GALAH DR3, and RAVE DR6. The left figure shows the T_{eff} , and the right figure shows the $\log g$. Green represents the best-quality samples, and gray represents the medium quality samples.

参数。图 1-7 展示了 Fournes et al. (2023) 工作中对比 ESP-HS 的有效温度、表面重力与其他巡天高温恒星的结果。如结果所示, 与其他巡天中的恒星参数表进行比较, 他们结果表明 ESP-HS 在温度低于 25000 K 时, 其测量的有效温度与文献值有较好的一致性, 但在较高温度区域, 特别是对于银河系的 O 型恒星, ESP-HS 倾向于提供比文献值更高的有效温度。在 A 型恒星温度范围内, 表面重力的偏差约为 0.2 dex, 到 O 型恒星温度范围, 表面重力偏差增加到约 0.4 dex。

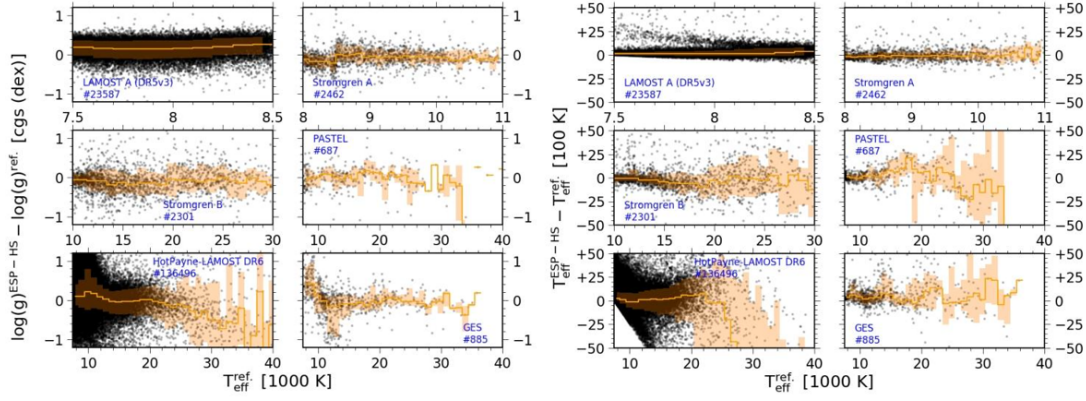


图 1-7 ESP-HS 的大气参数与 LAMOST DR5 (Luo et al., 2019)、Stromgren A、Stromgren B (Napiwotzki et al., 1993)、PASTEL (Soubiran et al., 2016)、HotPayne LAMOST DR6 (Xiang et al., 2022)、Gaia ESO (Blomme et al., 2022) 大气参数的偏差随温度的分布。左图为表面重力的偏差, 右图为有效温度的偏差。橙色线代表中位值, 橙色阴影代表弥散。图片引自: Recio-Blanco et al. (2023)。

Figure 1-7 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of ESP-HS from those of LAMOST DR5 (Luo et al., 2019), Stromgren A, Stromgren B (Napiwotzki et al., 1993), PASTEL (Soubiran et al., 2016), HotPayne LAMOST DR6 (Xiang et al., 2022) and Gaia ESO (Blomme et al., 2022) as a function of T_{eff} . The left figure shows the deviation of $\log g$, and the right figure shows the deviation of T_{eff} . The orange line represents the median value, and the orange shaded area represents the dispersion.

1.3 地面光谱巡天

1.3.1 LAMOST 光谱巡天

1.3.1.1 LAMOST 概况

LAMOST, 即“郭守敬望远镜”, 是一架由中国自主研发的新型大视场兼备大口径望远镜。其结构示意图如图 1-8 所示, 主要由北面的反射施密特改正镜 MA (由 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, 口径大小为 5.72 米 $\times$ 4.40 米)、南面的球面主镜 MB (由 37 块对角线长为 1.1 米, 厚度为 75 毫米的六角形球面子镜拼接而成, 口径大小为 6.67 米 $\times$ 6.05 米)、焦面构成。天体的光经改正镜 MA 反射到球面主镜 MB, 由 MB 再反射后成像在焦面上。焦面上可放置 4000 根光纤, 可同时获得 4000 个天体的光谱, 使其成为世界上光谱获取率最高的望远镜 (Wang et al., 1996; Cui et al., 2012)。

LAMOST 低分辨率光谱观测的波长范围为 370~900 nm，分辨率为 $R \sim 1800$ ，观测天区范围为赤经 $-10^\circ \sim +90^\circ$ 。LAMOST 的主要科学目标为研究银河系结构与演化，河外星系的观测，研究近邻宇宙的形成与演化，研究恒星物理与系外行星等。截至 2024 年 9 月 29 日，LAMOST DR11 v1.1 版本发布的恒星光谱已经超过 2500 万条。

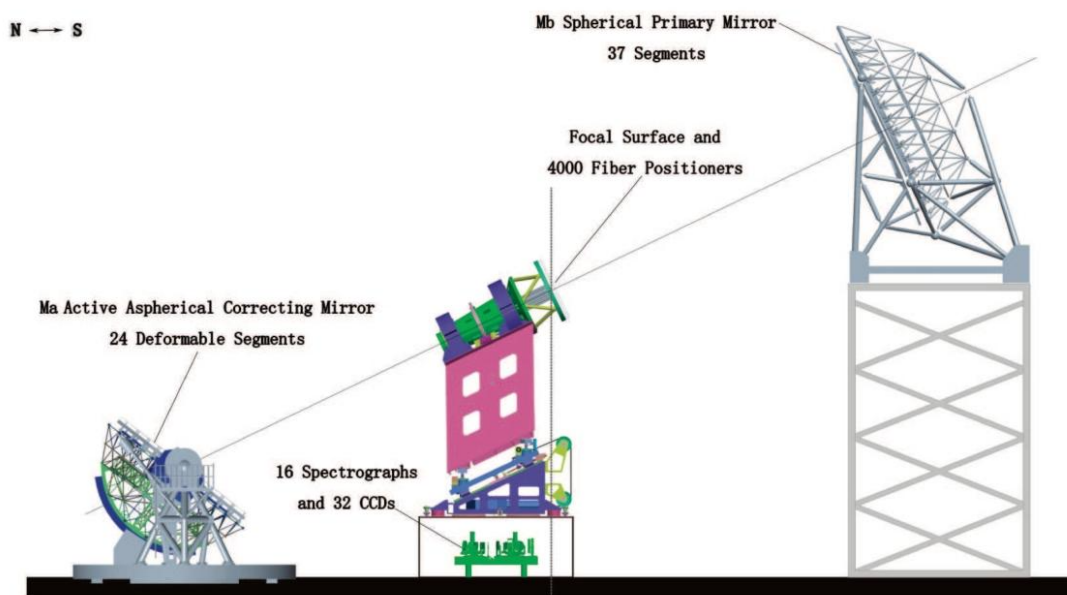


图 1-8 LAMOST 的结构示意图。图片引自：Cui et al. (2012)。

Figure 1-8 Schematic diagram of the structure of LAMOST.

1.3.1.2 LAMOST DR11 低分辨率大气参数表

恒星在光学波段的光谱包含了丰富的物理信息，通过恒星的光谱可以确定其运动、光度、温度、化学组成等物理状态。LAMOST DR11 v1.0²低分辨率数据集提供了 11,939,296 条低分辨率的天体光谱数据，包含 11,581,542 个恒星光谱、275,302 个星系光谱以及 82,452 个类星体光谱。其中主要的大气参数表包含了 7,774,147 颗 A, F, G, K 型星的大气参数 (包括有效温度，表面重力，金属丰度，视向速度等)，这些大气参数由 LAMOST 恒星参数处理程序 (LAMOST Stellar Parameter Pipeline, 简称 LASP, Wu et al. 2011) 获得。

1.3.2 SDSS 光谱巡天

1.3.2.1 SDSS 项目概括

斯隆数字巡天是一项具有重大影响力的巡天项目。其使用位于美国新墨西哥州阿帕奇山顶天文台的 2.5 米宽视场专用光学望远镜，旨在通过大天区的光谱观测计划，深入探究银河系的历史和结构、宇宙的演化历程、超大质量黑洞的物理特性，以及暗能量背后的科学原理等。项目计划观测 25% 的天区，获取超过

²<https://www.lamost.org/dr11/v1.0/>

一百万个天体的多色测光资料和光谱数据, 对应的波段为 u, g, r, i, z , 对各类天体的研究提供了全面的数据支持。

截至 2020 年, SDSS 已经完成了四期观测计划, 正在进行第五期的观测计划。早期观测计划 SDSS-I/II (2000-2008 年, York et al. 2000) 主要完成了 SEGUE-1 (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration, Yanny et al. 2009) 项目, 其目标是探索银河系的结构、动力学演化等, 获得了银河系内约 24 万颗恒星的光谱, 主要分布在高银纬天区。其波长覆盖范围为 385-920 nm, 分辨率 $\lambda/\Delta\lambda = 2000$, 典型信噪比 $S/N=25$ 。

第三期观测计划 SDSS-III(2008-2014 年, Eisenstein et al. 2011) 包含多个子项目, 如 APOGEE-1、SEGUE-2、BOSS、MARVELS 等, 这些项目从不同角度对系外行星、恒星、星系等进行观测研究。其中, APOGEE-1 (Majewski et al., 2017) 项目利用高分辨率、高信噪比的红外光谱穿透银河系盘和核球中被尘埃遮挡的区域, 总共获得了 15 万颗恒星的光谱, 以了解银河系的动态结构和化学历史。其波长覆盖范围为 1510-1700 nm, 分辨率 $\lambda/\Delta\lambda = 22\,500$, 典型信噪比 $S/N>100$, 能够提供精确的视向速度和详细的化学丰度, 包括了 T_{eff} 、 $\log g$ 、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 、 $[\alpha/\text{Fe}]$ 等恒星参数, 以及 15 种化学物质的丰度, 精度可达 0.1 dex。

第四期观测计划 SDSS-IV(2014-2020 年, Blanton et al. 2017) 继续推进相关观测研究, 主要的项目包括了 APOGEE-2、eBOSS、MaNGA。APOGEE-2 是 APOGEE-1 的延续和升级, 在观测范围、观测对象、样本规模 and 数据处理分析等方面具备优势, 为研究银河系演化提供了更全面、深入的数据支持。APOGEE-2 借助南北半球的望远镜, 实现了对更大天区的观测。这种南北半球协同观测的方式, 弥补了 APOGEE-1 可能存在的观测盲区, 能够获取更全面的银河系数据, 为研究银河系的整体结构和演化提供了更完整的视角。

1.3.2.2 APOGEE DR17 大气参数表

APOGEE DR17³(Abdurro'uf et al., 2022) 是 SDSS-IV 的最终数据, 其中的产品包括了超 73 万颗恒星提供视向速度、有效温度、表面重力、金属丰度以及多达 20 种元素丰度等, 在帮助追溯恒星形成历史、完善演化理论中发挥着重要作用。其视向速度数据用于研究银河系结构与动力学, 绘制旋转曲线, 揭示暗物质存在及内部动力学结构。其大气参数通过 APOGEE 恒星参数与化学丰度处理程序 (APOGEE Stellar Parameters and Chemical Abundances Pipeline, 简称 ASPCAP, Dawson et al. 2016) 的方法统一获取。

1.3.3 GALAH 光谱巡天

1.3.3.1 GALAH 光谱巡天概括

GALAH 巡天 (Bundy et al. 2015; De Silva et al. 2015) 计划是一项致力于通过对银河系恒星的观测和研究, 来深入探索银河系形成和演化奥秘的重要天文观测

³<https://www.sdss4.org/dr17/>

项目。该项目使用的望远镜是位于澳大利亚的 AAT(Anglo-Australian Telescope) 望远镜, 该望远镜的观测仪器是 HERMES(High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph), 一次性可以观测近 400 个目标的光谱, 其有四个不连续的光谱带, 这些波段经过精心选择, 旨在获取主要核合成过程中尽可能多的元素的丰度, 总共覆盖约 100 nm, 介于 470 – 790 nm 之间, 分辨率 $\lambda/\Delta\lambda = 28\,000$ 。其目标是获取银河系中不同年龄和位置的约 100 万颗恒星的高分辨率多维数据集, 借此探究银河系恒星形成的历史、合并事件的规律, 以及恒星动力学随时间的演化情况。

1.3.3.2 GALAH DR4 大气参数表

GALAH 于 2024 年 10 月发布了其第四批数据⁴, 涵盖了近 92 万颗恒星的光谱、恒星参数以及多达 31 种元素的丰度信息。恒星参数如有效温度、表面重力、金属丰度等, 是了解恒星物理性质的关键。多种元素丰度信息则能反映恒星的化学组成, 对于研究恒星的形成和演化至关重要。

在大规模巡天时代, 不同项目(例如 GSP-Phot、GSP-Spec、ESP-HS、LAMOST、APOGEE、GALAH 等) 所构建的恒星大气参数表, 会因光谱覆盖范围、分辨率、大气参数求解方法等差异, 相互之间不可避免的存在系统差, 因此其大气参数的可靠性值得进一步的验证。构建一个理论大气参数样本作为第三方参考库, 能够很好的对这些巡天大气参数的可靠性进行, 而疏散星团为我们提供了这样的机会。疏散星团作为天然的恒星实验室, 其成员星单星族、相似年龄、相似化学丰度的特性, 为大气参数验证提供了理想样本, 是连接观测与理论的桥梁。对于疏散星团, 通过理论等龄线拟合的方式我们能够较准确的获取其年龄, 与此同时, 等龄线为疏散星团成员星提供了大气参数的理论值。

1.4 疏散星团

1.4.1 疏散星团简介

疏散星团是由数十到至数千颗诞生于同一片巨分子云的恒星组成的恒星系统, 它们结构松散, 形状不一, 主要分布在银河系盘面上, 年龄跨度从数百万到数十亿不等 (Lada et al., 2003; Portegies Zwart et al., 2010)。如图 1-9 展示了著名的疏散星团昴星团。银河系中的大部分疏散星团会在其自身的动力学演化、周围环境以及外部潮汐场的作用下逐渐瓦解成为银河系的场星, 而未瓦解的疏散星团才有可能被人们发现 (Krumholz et al., 2019; Krause et al., 2020)。这些可观测到的疏散星团是研究银河系结构与演化的重要探针。另外年轻的疏散星团继承着母分子云的特征, 能够很好的示踪银河系的旋臂结构 (Dias et al., 2005; Monteiro et al., 2021)。疏散星团不仅是银河系结构与演化的探针, 也是恒星演化的理想实验室。同一个疏散星团的成员星具有相似的物理特征, 例如年龄、运动特征、

⁴https://www.galah-survey.org/dr4/the_catalogues/

金属丰度等, 并且包含了几乎同时诞生的不同演化阶段的恒星以及一些特殊天体, 这使得疏散星团可以为恒星的形成与演化理论提供关键性的约束 (Hernández et al., 2007; Winston et al., 2007)。



图 1-9 昴星团 (Pleiades) 的彩色合成图像。图片来自: NASA。

Figure 1-9 Color composite image of the Pleiades.

1.4.2 Gaia 时代疏散星团样本

从银河系场星中筛选出疏散星团成员星至关重要, 构建准确可靠的成员星表是疏散星团研究的基础。通常来说, 判定成员星的主要依据是疏散星团在位置空间、运动空间具有区别于场星的特征。疏散星团的成员星为同一时期内快速形成的恒星集群, 并且它们具有相似的运动状态, 而银河系的场星主要来源于瓦解了的疏散星团, 这些场星已经失去了原始的运动状态, 因此疏散星团的成员星在位置空间 (二维投影, 视差)、运动空间 (自行, 视向速度) 存在区别于其所在天区场星的聚集现象。此外, 疏散星团的成员星在颜色星等图中应呈现出单星族的分布特征。

早在 18 世纪末, 法国天文学家梅西耶将一些星云、星团和星系等 110 个深空天体汇编成表 (Messier Catalogue, Messier (1781)), 其中疏散星团占了将近 30 个, 这是最早期的疏散星团汇编表之一。随着观测技术的发展, 新的疏散星团不断地被发现, 至 21 世纪初, Dias et al. (2002) 等人通过收集整理不同文献的疏散星团数据, 并汇编成表, 发布了超过 1500 个疏散星团的性质表, 此表为人们广泛使用。Kharchenko et al. (2013) 利用 2MASS (Skrutskie et al., 2006) 近红外测光数

据以及 PPMXL(Roeser et al., 2010) 天体测量数据, 针对当时已知的 3784 个星团样本进行了统一认证。最终他们发布了包含 2800 多个疏散星团的性质参数(包括位置、自行、年龄等)表以及成员星数据, 命名为 MWSC 星团表。这是当时最大的使用统一方法获得的星团性质表以及成员星表, 基于此, 届时认为在太阳 1.8kpc 范围内疏散星团样本观测上已经接近完备。

随着 *Gaia* 卫星释放的海量且高精度的天体测量和测光数据, 疏散星团的研究迎来了全新的时代, 越来越多的疏散星团被发现, 同时随着机器学习聚类算法(Krone-Martins et al., 2014; Pera et al., 2021; McInnes et al., 2017; Hunt et al., 2021)的兴起, 疏散星团搜寻的效率以及成员星的可靠性得到了极大的提升。Cantat-Gaudin et al. (2018) 基于 *Gaia* DR2 的数据结合无监督机器学习聚类算法 UPMASK, 重新判定了以往文献中的疏散星团, 主要来自于 Dias et al. (2002) 和 Kharchenko et al. (2013), 最终获得了 1229 个疏散星团的性质参数以及其成员星。此星团表在使用的数据精度以及成员星的判定方法上相较于 *Gaia* 时代之前都得到了极大的提高与改进, 相应的星团参数以及成员星的可靠性也有很大的提升。Cantat-Gaudin et al. (2020a) 对该星团表做了进一步的补充, 最终发布了包含 1481 个疏散星团性质的星团表。Castro-Ginard et al. (2020) 利用 *Gaia* DR2 数据在低银纬天区系统的搜寻到了 580 多个新的疏散星团。在这些工作基础上, Cantat-Gaudin et al. (2020b) 发布了基于 *Gaia* DR2 数据搜寻整理得到了比较完整的包含 2017 个疏散星团的性质的表。

在我们近期的工作 Qin et al. (2023) 中, 基于 *Gaia* DR3 的天体测量以及测光数据, 结合 pyUPMASK 与 DBSCAN 的聚类算法, 在太阳领域 500 pc 范围内低银纬天区采用空间切片的方式系统地开展疏散星团的搜寻, 最终获得 324 个可靠的疏散星团样本, 其中 101 个疏散星团为新发现的。这些新发现的疏散星团为太阳邻域的疏散星团数量提高了 45%, 同时基于最新的疏散星团研究结果, 该工作还扩大了这些疏散星团的空间范围, 使得更多的成员星被找到。此外, 该工作对这些疏散星团进行了详细的性质参数测定, 例如自行、年龄、视向速度、金属丰度、星团结构参数等。而最新的工作 Hunt et al. (2024) 利用 *Gaia* DR3 数据, 构建了一个包含超 7000 个星团的星团表, 其中 3530 个疏散星团是被认为是高质量疏散星团样本。

得益于 *Gaia* 卫星的高精度天体测量数据与测光数据, 疏散星团的搜寻与认证得到迅猛发展, 成员星可靠性得到极大的提升, 人们对疏散星团的认识也更进了一步。

1.4.3 疏散星团的优势

疏散星团在天文学研究领域具有举足轻重的地位, 其重要性不仅体现在对银河系结构与演化的研究中, 在检验恒星大气参数方面也展现出独特的优势。首先, 从形成机制来看, 疏散星团内的恒星在相对短暂的时间尺度内, 由同一片巨分子云坍缩凝聚而成, 这使得它们在年龄上具有高度一致性。借助拟合等龄线这

一有效手段, 能够较为精准地测定这些恒星的年龄, 同时获取其理论大气参数。相较于场星, 这无疑是疏散星团用于恒星研究的显著优势。其次, 疏散星团成员涵盖了主序星到红巨星等不同的演化阶段。基于此特性, 疏散星团可作为理想的样本, 用于检验观测数据在不同演化阶段恒星大气参数的准确性, 进而评估观测数据质量。

此外, 随着现代天文学观测技术的飞速发展, *Gaia* 卫星凭借其卓越的观测能力, 能够提供空前高精度的天体测量数据, 为天文学研究提供了坚实的数据基础。与此同时, 机器学习领域的聚类算法在处理海量天文数据时展现出强大的优势。通过这些算法应用于 *Gaia* 数据, 能够有效识别出大量隐藏在数据中的疏散星团样本, 显著提升了疏散星团样本的数量。并且, 聚类算法能够对星团成员星进行更精准的判定, 极大地提高了成员星判定的可靠性。

1.4.4 疏散星团在检验恒星大气参数中的应用

疏散星团为检验恒星大气参数提供了有效的途径, 通过拟合等龄线的方式, 能够较为准确地获取疏散星团中恒星的年龄以及理论大气参数, 这一优势是研究场星时难以实现的。利用疏散星团检验恒星大气参数已被人们广泛应用, 在最新的工作中, [Fouesneau et al. \(2023\)](#) 选择了 [Cantat-Gaudin et al. \(2020b\)](#) 中的疏散星团样本, 共计 23 万颗成员星。他们假设同一个疏散星团成员星的消光与金属丰度均匀, 将成员星与等龄线进行匹配, 以此获得成员星的有效温度、表面重力等估计值。利用这些星团成员数据, 对比 GSP-Phot、GSP-Spec 等模块得到的大气参数与等龄线参考值, 从而验证这些观测的大气参数。对于 GSP-Phot 模块, 他们得出结论, 其 T_{eff} 、 $\log g$ 等参数总体与预期一致, 但存在一定的弥散度。对于不同类型恒星有不同表现, 其高估了巨星的 T_{eff} , 低估了超巨星的 T_{eff} , 低估了热星与巨星的 $\log g$ 。图 1-10 展示了 GSP-Phot 的大气参数与等龄线的偏差情况。对于 GSP-Spec 模块, 其 $\log g$ 与等龄线的估计值相比, 出现高达 0.3 dex 的偏差。该模块的比较结果与质量标志选择密切相关, 不同的质量标志筛选会导致结果差异较大。而对于 ESP-HS 模块的 T_{eff} 、 $\log g$ 都显示出了低估。

[Brandner et al. \(2023\)](#) 利用毕星团 (Hyades) 和昴星团 (Pleiades) 中约 1500 颗单星, 对 GSP-Phot、GSP-Spec 的大气参数进行了测试, 发现这些大气参数观测值存在显著系统不确定性。在 T_{eff} 估计方面, GSP-Phot 的结果在不同颜色范围内与等龄线拟合结果存在偏差。对于 $BP - RP < 1.35 \text{ mag}$ 的恒星, 其 T_{eff} 估计值系统地比最佳拟合等龄线结果低 150–250 K; 在 $1.35 < BP - RP < 3.0 \text{ mag}$ 区间, 有效温度估计值出现分叉; 而当 $BP - RP > 3.0 \text{ mag}$ 时, 又系统地比等龄线结果高约 50 K。GSP-Phot 提供的 $\log g$ 总体与等龄线拟合提供的值相当, 但在某些颜色区间存在明显偏差。在 $BP - RP < 1.5 \text{ mag}$ 时, $\log g$ 值通常比等龄线的值低 0.1–0.2 dex; 在 $2.0 < BP - RP < 3.0 \text{ mag}$ 区间, $\log g$ 观测值也出现分叉; 当 $BP - RP > 3.0 \text{ mag}$ 时, 观测值又系统地高于等龄线拟合的值。GSP-Spec 的 T_{eff} 在 $1.35 < BP - RP < 1.65 \text{ mag}$ 区间出现分叉现象。与 GSP-Phot 相比, 其值整体上与等龄线拟合得出的 T_{eff} 更吻合。其还指出经 [Recio-Blanco et al. \(2023\)](#)

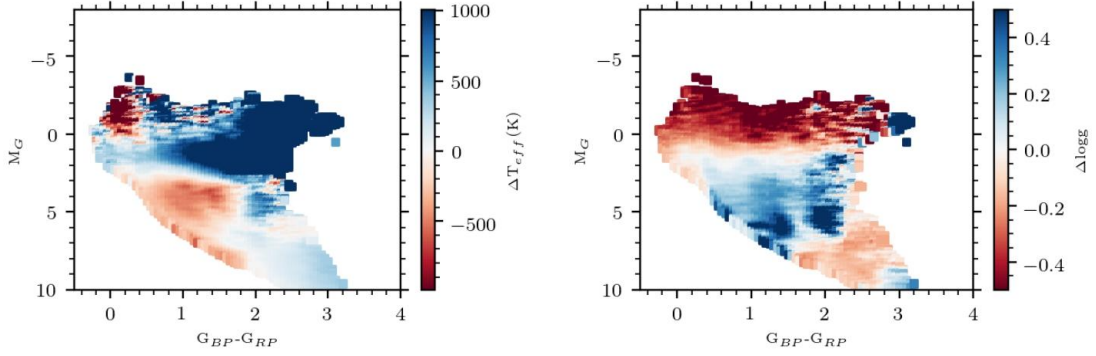


图 1-10 GSP-Phot 的大气参数与等龄线的偏差在内禀颜色-绝对星等图中的分布。颜色条代表平均偏差。图片引自：Fouesneau et al. (2023)。

Figure 1-10 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of GSP-Phot from the isochrones in the intrinsic color-absolute magnitude diagram. The color bar represents the average deviation.

校准后的 $\log g$ 观测值在较宽的颜色范围内几乎恒定在 4.7 dex，与等龄线拟合所得相差甚远。

1.5 本文研究目的与内容

对于前人的研究，已经证实了疏散星团用于检验大气参数的广泛应用，并且得到了重要的结论。但是对于疏散星团样本的选择，前人工作中还存在较大的不足。首先，银河系中的疏散星团所处环境各异，导致观测到的成员星在颜色星等图中出现很大的展宽弥散，这将导致在估计成员星理论大气参数时带来不确定性。这种主序的展宽会对检验结果带来显著的影响。Fouesneau et al. (2023) 工作中使用到的疏散星团样本经我们统计至少有 20% 的样本存在明显的主序弥散。其次，对于疏散星团中的不可分辨双星在利用等龄线估计大气参数的过程中也会影响到估计的准确性，例如 Brandner et al. (2023) 经过挑选，使用了毕星团和昴星团中的单星来验证 *Gaia* DR3 的大气参数，这在很大程度上避免了双星带来的影响。但其所使用的成员星数量太少，对于普遍的大气参数验证缺乏代表性。

在本研究工作中，针对所采用的疏散星团样本实施了严格把控。具体而言，通过人工筛选的方式，择取主序列明晰且展宽程度较小的疏散星团构建样本集合。与此同时，借助等龄线双星序列剔除了双星质比大于 0.5 的双星。这些操作能够有效降低主序弥散现象以及双星因素所带来的干扰，进而更为精准地反映观测所得的大气参数与等龄线估计值之间的偏差状况。此外，本研究挑选的样本主要分布于太阳邻域半径 500 pc 的范围内，基于此，可合理假定这些样本的金属丰度大致相近，这减小了金属丰度对大气参数估计过程的影响。

本论文后续的内容安排如下：第二章将介绍我们如何挑选的样本以及估计理论成员星大气参数；第三章将介绍使用我们估计的理论大气参数应用于 *Gaia* DR3、LAMOST、APOGEE、GALAH 的大气参数表进行验证的结果；第四章将

对我们的结果进行讨论；第五章是对文章的总结以及对后续工作的展望。

第2章 样本与方法

2.1 疏散星团样本

在我们近期的疏散星团搜寻工作Qin et al. (2023) 中，采用了全新的切片方法与聚类算法，对太阳邻域 500 pc 范围内的疏散星团进行了系统性搜寻与证认。具体而言，该切片方法是基于对银河系内疏散星团星团分布特点的深入理解而设计，能够有效将复杂的观测区域进行合理划分，以此凸显疏散星团成员在场星中的信号，提高搜寻效率。聚类算法则经过组合使用，可精准识别具有星团特征的恒星集合。该研究的结果共报道了 324 个疏散星团，其中有 101 个为先前未被报道的新疏散星团。这些新发现的疏散星团显著提高了太阳邻域疏散星团的数量，相较于此前已知数量，提升幅度约为 45%。图 2-1展示了这些团在银道坐标系下的分布。另外，该研究构建的星团表提供了疏散星团的一系列基本性质，涵盖位置、自行、视向速度、年龄以及金属丰度等关键信息。其中，年龄是通过人工仔细匹配等龄线的方式确定的，能最大程度保证疏散星团年龄的准确性。对于金属丰度，此表对前人文献中已有的疏散星团金属丰度数据进行了全面综合整理。而针对尚无文献给出金属丰度的疏散星团，采用了太阳金属丰度作为其近似值。

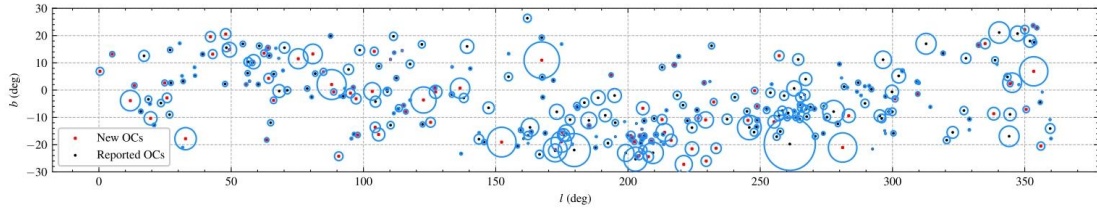


图 2-1 Qin et al. (2023) 的 324 个疏散星团在银道坐标系下的分布。黑色点代表已经被报道过疏散星团，红色点代表其工作中新发现的疏散星团。蓝色的圈代表疏散星团的二维投影半径。图片引自：Qin et al. (2023)。

Figure 2-1 The distribution of 324 open clusters from Qin et al. (2023) in the Galactic coordinate system. The black dots represent the reported open clusters, and the red dots represent the newly discovered open clusters in their work. The blue circles represent the two-dimensional projected radii of the open clusters.

众所周知，疏散星团成员星在颜色星等图中的分布，从理论层面而言，应呈现出紧致的主序列形态。然而，实际观测中存在的较差红化现象以及观测本身所固有的不确定性，往往会致使观测得到的主序列出现弥散展宽情况。在颜色星等图中对大气参数进行估计时，这种展宽现象不可避免地会引入额外的不确定性。为有效降低上述因素对研究结果的影响，我们采取了一系列针对性举措。首先，从Qin et al. (2023) 构建的太阳邻域疏散星团（OCSN）表中，筛选出满足 $E(B - V) \leq 0.3$ 的疏散星团。随后，借助人工目视检查的方式，将主序展宽较为显著的星团予以排除。经过上述严格筛选流程，最终确定了 130 个疏散星团作为本研究的样本，该样本总共涵盖了 34 424 颗成员星。我们在附录A中提供了我

们筛选的疏散星团样本表, 见表 A-1, 列出了我们挑选的 130 个疏散星团基本性质。

图 2-2展示了我们所挑选样本的等龄线拟合年龄以及红化、成员星数目的直方图分布情况。从年龄上来看, 这些疏散星团的年龄 ($\log(t[\text{yr}])$) 分布在 7-9 之间, 大多数比较年轻。样本疏散星团的成员数量范围为 46 至 1986 颗, 其平均值为 269 颗

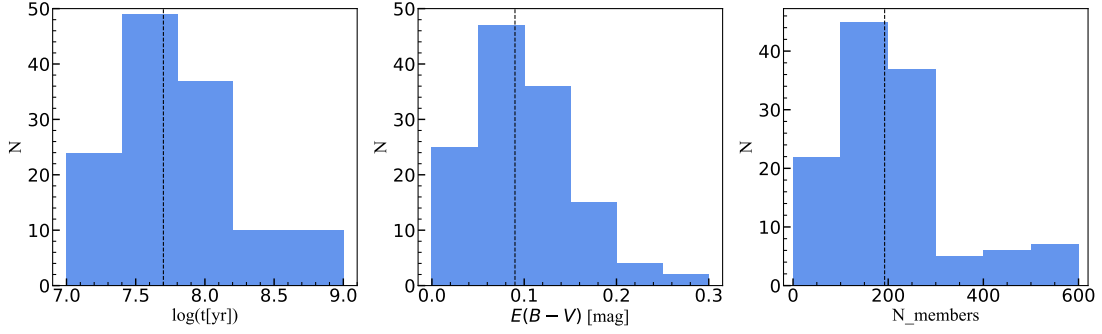


图 2-2 由左到右: 样本的年龄、红化、成员星数目柱状图。参数来自于Qin et al. (2023) 的 OCSN 表。

Figure 2-2 Histograms of the selected clusters' age, reddening, and member number. Those parameters are from the OCSN catalog of Qin et al. (2023). The black dashed lines represent the median values.

值得注意的是, Qin et al. (2023) 对其所使用的 Gaia DR3 数据已经设置了 RUWE (renormalized unit weight error, Lindegren 2018) < 1.4 的筛选条件, 已排除部分天体测量与测光不可靠的源。另外, Riello et al. (2021b) 引入了 BP、RP 波段校正后的流量过剩因子 (C^*), 其定义为:

$$C^* = C - f(BP - RP) \quad (2-1)$$

其中, $C = (I_{BP} + I_{RP})/I_G$ 是 BP、RP 波段流量的过剩因子, $f(BP - RP)$ 表示对于高质量光度测量的源在给定颜色下预期的过剩因子。其提供的 $|C^*| < N\sigma_{C^*}$ 判断条件可以用来剔除 G 波段流量与 BP+RP 波段流量不一致的源, 按照预期 C^* 的值应该在 0 附近, 我们取其中的 $N=3$ 。 σ_{C^*} 由 G 星等以 0.01 mag 为步长进行的简单幂律拟合 (Riello et al., 2021b)。图 2-3展示了我们通过 $|C^*| < 3\sigma_{C^*}$ 筛选得到的成员星, 这一步我们剔除了 Gaia DR3 的光度测量明显不一致的源, 保留下来的成员星如图中红点所示。

另外, 我们基于这些样本星团的等龄线计算了双星质比 (q) 为 0.5 的双星序, 剔除了 $q > 0.5$ 的双星成员, 如图 2-4蓝点所示, 这一步剔除了大约 32% 的成员星。

最后我们将这个样本分别与 GSP-Phot、GSP-Spec、ESP-HS、LAMOST-LRS DR11、APOGEE DR17、GALAH DR4 的大气参数表进行交叉匹配得到子样本。此外, 对于 GSP-Spec 样本, 我们应用了质量标签进行了筛选, 即要求 vbroadT、

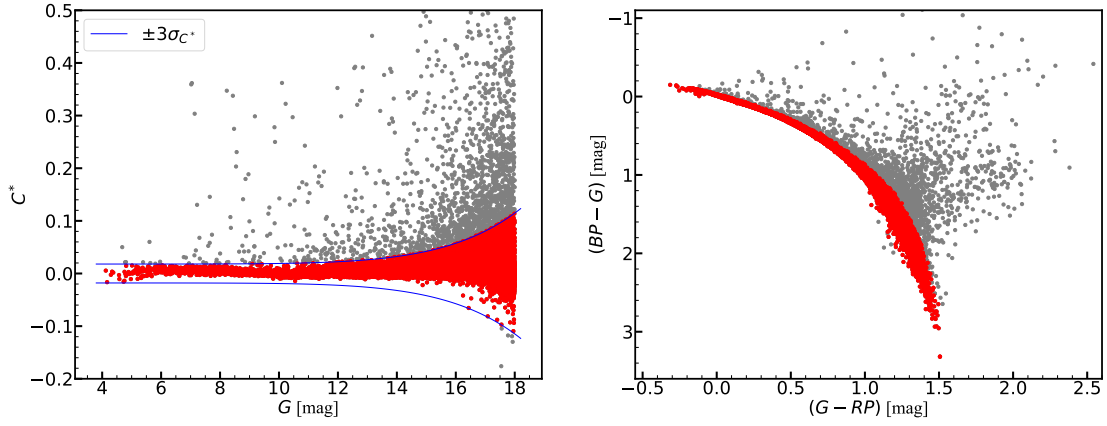


图 2-3 左图为 C^* 随成员星观测的 G 星等分布，右图为双色图。红点表示满足 $|C^*| < 3\sigma_{C^*}$ 的成员星，灰点表示剔除的成员星，蓝线表示 $\pm 3\sigma_{C^*}$ 。

Figure 2-3 In the left figure, the distribution of C^* is shown according to the observed G of the member stars. In the right figure is a two-color diagram. The red dots represent the member stars that satisfy $|C^*| < 3\sigma_{C^*}$, the gray dots represent the excluded member stars, and the blue lines represent $\pm 3\sigma_{C^*}$.

$vbroadG$ 、 $VbroadM$ 、 $vradT$ 、 $vradG$ 、 $vradM$ 均等于 0 (Recio-Blanco et al., 2023)。以此保证该样本数据的质量，使得后续对大气参数的分析更加可靠。

表 2-1 总结了这些子样本成员星的数量以及大气参数观测值的典型不确定性。对于 *Gaia* 数据，观测数据的典型不确定性定义为样本大气参数的上置信水平 (84%) 与下置信水平 (16%) 之差的中位值 (Creevey et al., 2023; Fouesneau et al., 2023; Recio-Blanco et al., 2023)。对于其他巡天，观测数据的典型不确定性定义为样本大气参数误差的中位值 (Abdurro'uf et al., 2022; Buder et al., 2024)。我们可以看到，除 GSP-Spec 样本，其他巡天观测有效温度的典型不确定性都在 80 K 以内，观测表面重力的典型不确定性都在 0.1 dex 以内。而 GSP-Spec 的典型不确定性分别为 243 K、0.22 dex。

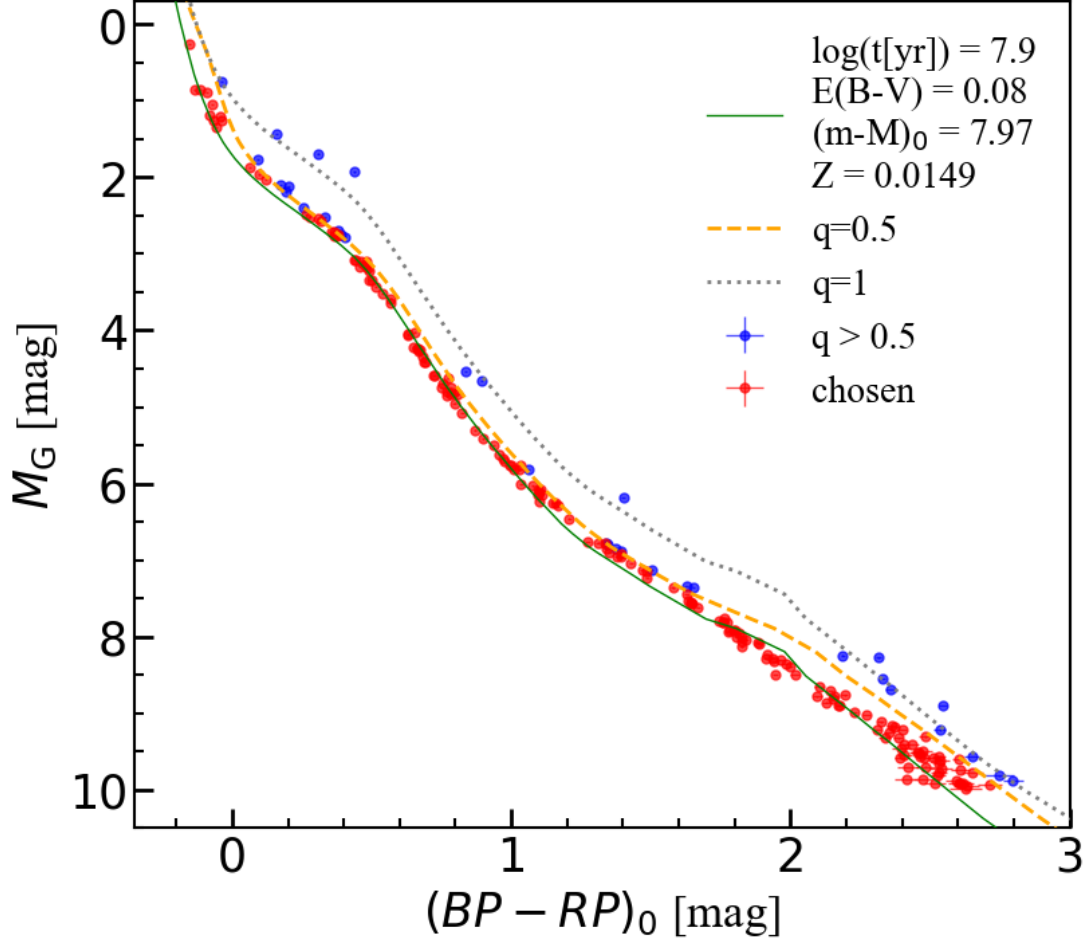


图 2-4 OCSN_259(Roslund_6) 的内禀颜色-绝对星等图。蓝色点代表双星质比大于 0.5 需要剔除的样本，红色点代表需要保留的样本。误差棒代表测光的不确定性。绿色实线代表理论等龄线，等龄线参数由 Qin et al., 2023 提供，橘黄色虚线、灰色点线分别为质比等于 0.5、1 的双星序。

Figure 2-4 The intrinsic color-absolute magnitude diagram of OCSN_259 (Roslund_6). The blue points represent the samples that need to be excluded with a binary mass ratio greater than 0.5, and the red points represent the samples that need to be retained. The error bars represent the uncertainties of the photometry. The green solid line represents the theoretical isochrone, and the isochrone parameters are provided by Qin et al., 2023. The orange dashed line and the gray dotted line are the binary sequences with a mass ratio equal to 0.5 and 1 respectively.

表 2-1 我们的样本与 *Gaia*、LAMOST、APOGEE、GALAH 的公共成员星数目以及大气参数的典型不确定性。

Table 2-1 The number of common member stars in our sample and those in *Gaia*, LAMOST, APOGEE, GALAH, and the typical uncertainties of the atmospheric parameters.

Catalogue	N	Uncertainty of T_{eff} (K)	Uncertainty of $\log g$ (dex)
GSP-Phot	17 368	21	0.02
GSP-Spec	455	243	0.22
ESP-HS	1 044	71	0.03
LAMOST-LRS DR11	777	34	0.05
APOGEE DR17	712	12	0.02
GALAH DR4	919	69	0.10

2.2 等龄线模型

PARSEC (PAdova TRieste Stellar Evolution Code, [Bressan et al. 2012](#); [Chen et al. 2014](#)) 是用于计算恒星演化轨迹的重要工具，具备强大的功能和高度的灵活性。其计算的恒星轨迹涵盖了从主序前星（PMS），即恒星处于物质吸积、逐渐凝聚成形的初始时期，主序星，一直到各个演化阶段。它整合了恒星演化多方面的物理过程和最新数据库，比如恒星内部的元素丰度、对流与辐射过程的能量传输等。这使得等龄线能够呈现恒星在不同阶段的物理状态变化，从有效温度的逐步攀升或下降，到表面重力因质量损失或物质堆积而产生的改变，以及光度随着恒星内部产能机制变化而发生的增减、半径在不同演化阶段的膨胀与收缩等参数的演变情况。在实际应用中，*PARSEC* 在研究星团和星系的恒星群体性质、确定恒星年龄和化学组成等方面发挥着关键作用，为天文学家深入探索恒星演化历程提供了不可或缺的工具。

对于等龄线模型的使用可在 *CMD 3.8*¹ 进行查询，其提供了不同质量恒星演化结果的网格插值，并且为多种不同波段的测光系统提供了光度测量值。这些等龄线模型为不同质量恒星在指定年龄以及金属丰度下，提供了理论的有效温度、表面重力、光度、不同测光系统下的星等值等参数。

需着重指出的是，恒星结构演化模型所推导的大气参数，其主要不确定性源于恒星模型的物理输入条件及所采用的算法。在物理输入方面，涵盖核反应速率、恒星元素丰度、状态方程、不透明度等核心要素；于算法层面，则涉及计算时间步长的设定、质量步长的确定以及压力标高的求解等环节。特别值得注意的是，每项物理输入皆有其固有不确定度，当这些不确定度相互耦合时，对最终模型输出结果的不确定性进行精确评估便面临巨大挑战 ([Valle et al., 2013a,b](#); [Costa et al., 2021](#))。

¹<https://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

2.3 成员星理论大气参数估计

为了检验 GSP-Phot、GSP-Spec、ESP-HS、LAMOST-LRS DR11、APOGEE DR17、GALAH DR4 的大气参数的质量, 我们挑选了太阳邻域 500 pc 范围内的 OCSN 疏散星团表作为样本。我们在颜色星等图中通过等龄线估计了成员星的理论大气参数, 然后将理论大气参数与不同星表中的观测大气参数进行比较, 图 2-4 展示了 OCSN_259 的例子, 获取成员星理论大气参数的步骤如下:

(1) 获取理论等龄线。基于 Qin et al. (2023) 提供的疏散星团年龄以及金属丰度, 我们从 CMD 3.8 获取了每个疏散星团采用 *Gaia* 测光系统 (Riello et al., 2021a) 的 PARSEC 等龄线 (Marigo et al., 2017)。然后, 对于每条等龄线, 我们在质量网格上以 $0.0005 M_{\odot}$ 的步长对一些参数, 包括 G_{iso} , BP_{iso} , RP_{iso} , $T_{\text{eff_iso}}$, $\log g_{\text{iso}}$ 进行了插值, 目的是使这些等龄线上的网格点更加密集, 以方便后续的工作。

(2) 计算成员星的内禀颜色与绝对星等。根据 Qin et al. (2023) 提供的每个疏散星团的距离模数 $(m - M)_0$ 和红化值 $E(B - V)$, 我们利用 $A_G = 2.74 \times E(B - V)$ 和 $E(BP - RP) = 1.339 \times E(B - V)$ (Casagrande et al., 2018; Zhong et al., 2019) 来计算每个疏散星团成员星的绝对星等 $M_G = G_{\text{obs}} - (m - M)_0 - A_G$ 以及内禀颜色 $(BP - RP)_0 = (BP - RP)_{\text{obs}} - E(BP - RP)$ 。

(3) 估计理论大气参数。在每个疏散星团的内禀颜色-绝对星等图中, 我们将成员星与插值后的等龄线上距离最短的理论点进行匹配, 最短距离定义为 $\sqrt{\Delta(BP - RP)_0^2 + \Delta M_G^2}$ 的最小值。然后, 将这个最近理论点的有效温度与表面重力作为成员星的理论有效温度 $T_{\text{eff_iso}}$ 与表面重力 $\log g_{\text{iso}}$ 。我们在附录 B 介绍了理论大气参数不确定性的估计, 并提供了成员星样本的理论大气参数表格, 见表 B-1。

(4) 计算大气参数的观测值与理论值的偏差。以大气参数的理论值作为参考, 我们分别计算了各个大气参数表与理论值之间的偏差, 即 $\Delta T_{\text{eff_surveys}} = T_{\text{eff_surveys}} - T_{\text{eff_iso}}$, $\Delta \log g_{\text{surveys}} = \log g_{\text{surveys}} - \log g_{\text{iso}}$ 。

第3章 光谱巡天大气参数验证

我们针对这些大气参数表中的成员星子样本，详细计算了其观测值与理论值偏差以及弥散情况。在此基础之上，对 *Gaia* DR3 的 GSP-Phot、GSP-Spec、ESP-HS，LAMOST-LRS DR11，APOGEE DR17，GALAH DR4 进行了评估，并将其总结在了表 3-1 中。表中第一列代表不同的大气参数表名称。为了方便描述有效温度与表面重力偏差的变化情况，我们在内禀颜色上大致将成员星样本划分为不同的恒星类型，展示在表的第二列。第三至第八列为有效温度、表面重力在不同恒星类型中的偏差与弥散情况，相应列的定义见表注。总体来说，不同光谱巡天的大气参数偏差以及弥散程度存在各异的变化趋势。对于这些巡天项目，就多数情况而言 F, G, K 型星大气参数与理论值的偏差都要小于 B, A, M 型星的偏差。对于 GSP-Phot 的 F, G, K, M 型星的有效温度偏差整体上相对于其他三个光谱巡天的有效温度偏差更大。

图 3-1 展示了这些巡天的大气参数偏差相对于其中位值的弥散随内禀颜色的分布。在图 3-1 上图可以看到，对于大多数样本，随着恒星颜色的变红，有效温度偏差的弥散呈现出下降趋势。从图 3-1 下图可以看到 K, M 型星的表面重力偏差的弥散程度相对于 F, G 型星的更大。需要注意的是，GSP-Spec 样本的表面重力偏差的弥散程度明显大于其他巡天的样本。

图 3-2, 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9 分别展示了不同光谱巡天的大气参数与理论值的偏差随内禀颜色分布情况。对于 GSP-Phot 的样本，我们在内禀颜色 $[-0.2, 3.4]$ mag 范围内，以 0.1 mag 为步长计算了偏差的中位值以及弥散。对于 GSP-Spec 的样本，我们在内禀颜色 $[0.5, 1.2]$ mag 范围内，以 0.05 mag 为步长进行了计算。对于 ESP-HS 样本，在内禀颜色 $[-0.25, 0.3]$ mag 范围内，以 0.05 mag 为步长进行了计算。对于 LAMOST-LRS DR11 样本，在内禀颜色 $[-0.2, 1.8]$ mag 范围内，以 0.2 mag 为步长进行了计算。对于 APOGEE DR17 样本，在内禀颜色 $[-0.3, 2.9]$ mag 范围内，以 0.2 mag 为步长进行了计算。对于 GALAH DR4 样本，在内禀颜色 $[-0.2, 3.2]$ mag 范围内，以 0.2 mag 为步长进行了计算。

上述几张图中的颜色代表了观测值的金属丰度，GSP-Phot 的金属丰度已经使用了 [Andrae et al. \(2023\)](#) 工作中提出的经验校准关系进行了校准。我们注意到，LAMOST-LRS DR11、GALAH DR4 所给出 B, A, K 型星的金属丰度值普遍低于 F, G 型星。此外，GSP-Phot 中的 M 型星金属丰度存在显著的低估。

后续小节将针对各个巡天的大气参数结果与理论值的比较展开详细总结。

表 3-1 GSP-Phot, GSP-Spec, ESP-HS, LAMOST-LRS DR11, APOGEE DR17, GALAH DR4 的不同恒星类型大气参数的偏差与弥散。

Table 3-1 The deviations and dispersions of the atmospheric parameters of different stellar types for GSP-Phot, GSP-Spec, ESP-HS, LAMOST-LRS DR11, APOGEE DR17, and GALAH DR4.

Catalogue	Stellar Type	$\text{Med}(\Delta T_{\text{eff}})$	$\text{Med}(\Delta T_{\text{eff}})_i$	$\overline{\sigma}(\Delta T_{\text{eff}})$	$\text{Med}(\Delta \log g)$	$\text{Med}(\Delta \log g)_i$	$\overline{\sigma}(\Delta \log g)$
		(K)	(K)	(K)	(dex)	(dex)	(dex)
GSP-Phot	BA	-314	522	676	-0.13	0.15	0.08
	FGK	-100	197	195	-0.08	0.08	0.08
	M	202	205	86	0.02	0.16	0.17
GSP-Spec	FGK	35	167	216	0.43	0.39	0.29
ESP-HS	BA	-678	652	549	-0.2	0.2	0.1
LAMOST	BA	-675	788	382	-0.4	0.39	0.1
	FGK	-59	110	140	-0.05	0.09	0.09
APOGEE	BA	-1060	1277	1030	0.01	0.06	0.09
	FGK	-56	148	161	-0.05	0.06	0.09
	M	144	146	56	-0.03	0.06	0.09
GALAH	BA	-712	1120	657	-0.14	0.18	0.08
	FGK	-129	173	255	-0.05	0.06	0.09
	M	88	140	168	0.01	0.18	0.18

表注: 第三 (六) 列 ($\text{Med}(\Delta T_{\text{eff}})$ 、 $\text{Med}(\Delta \log g)$) 为该恒星类型中所有成员星有效温度 (表面重力) 偏差的中位值。第四 (七) 列 ($\text{Med}(|\Delta T_{\text{eff}}|)_i$ 、 $\text{Med}(|\Delta \log g|)_i$) 为在该恒星类型颜色范围内分段计算的有效温度 (表面重力) 绝对偏差的中位值通过对应的成员星数量进行加权的平均值。第五 (八) 列 ($\overline{\sigma}(\Delta T_{\text{eff}})$ 、 $\overline{\sigma}(\Delta \log g)$) 为在该恒星类型颜色范围内分段计算的有效温度 (表面重力) 相对于其中位值的弥散的平

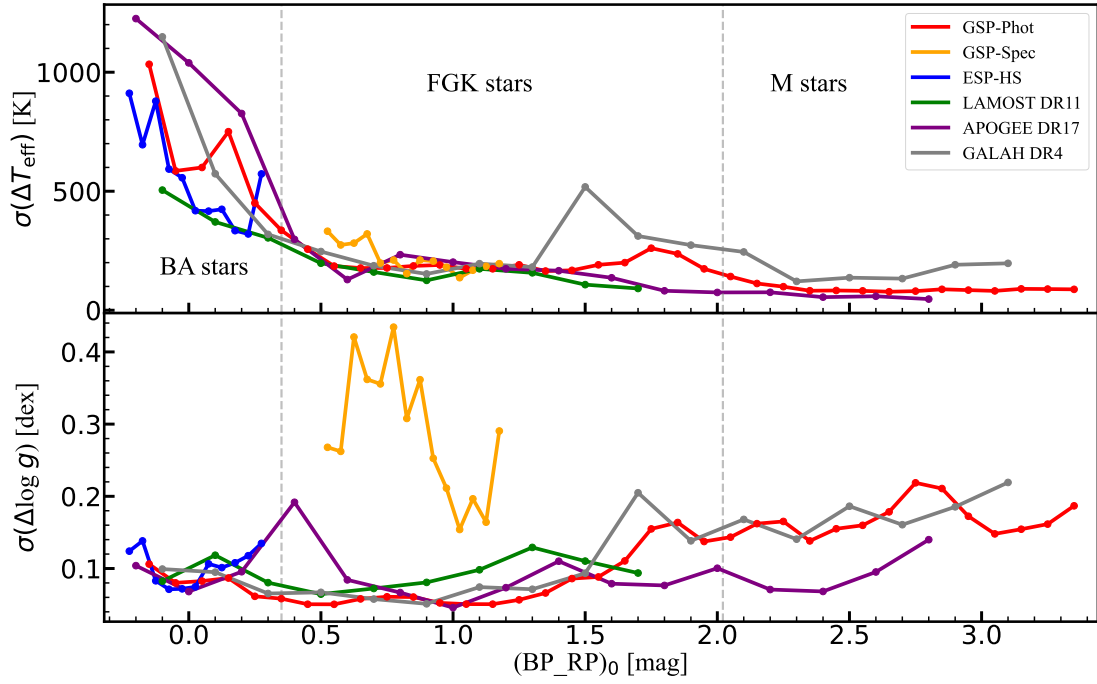


图 3-1 上图：有效温度偏差相对于其中位值的弥散随内禀颜色的分布，下图表面重力偏差相对于其中位值的弥散随内禀颜色的分布。红、橙、蓝、绿、紫、灰线分别代表 GSP-Phot, GSP-Spec, ESP-HS, LAMOST-LRS DR11, APOGEE DR17, and GALAH DR4。

Figure 3-1 The upper panel: The distribution of the dispersion of the effective temperature deviation relative to its median value as a function of the intrinsic color. The lower panel: The distribution of the dispersion of the surface gravity deviation relative to its median value as a function of the intrinsic color. The red, orange, blue, green, purple, and gray lines represent GSP-Phot, GSP-Spec, ESP-HS, LAMOST-LRS DR11, APOGEE DR17, and GALAH DR4, respectively.

3.1 Gaia DR3 的大气参数

3.1.1 GSP-Phot 的大气参数

图 3-2 分别展示了 $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{Phot}}$ 随内禀颜色的分布。对于 GSP-Phot 子样本, 所有成员星的 $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{Phot}}$ 中位值分别为 101 K、 -0.06 dex , 它们的平均绝对偏差 (MAD) 分别为 232 K、0.14 dex。值得注意的是, 我们样本的 MAD 低于 Foesneau et al. (2023) 利用 23 万颗成员星得到的结果 (其提供的 MAD 分别为 400 K、0.22 dex)。此外, 如图 3-1 中的红线所示, 我们样本的弥散的中位值分别为 174 K、0.11 dex, 这比 Andrae et al. (2023) 工作中 (见其文章的表 1、表 2) 得到的弥散更小。我们的结果相较于其他工作有更小的偏差与弥散, 这可能得益于我们筛选的疏散星团高质量样本具有清晰紧致的主序分布, 同时还排除了双星质比大于 0.5 的成员星。

我们将以不同恒星类型对 GSP-Phot 的有效温度与表面重力的偏差进行总结, 具体如下:

(1) 对于 B, A 型星: $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$ 以及相应的弥散都比较大, $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$ 的中位值为 -233 K , 弥散的中位值为 593 K。 $\Delta \log g_{\text{Phot}}$ 随着颜色的变红有上升的趋势, 中位值为 -0.11 dex , 弥散的中位值为 0.08 dex。我们的结果与 Foesneau et al. (2023); Brandner et al. (2023) 工作中的结果相一致, 对于这些高温星, GSP-Phot 提供的有效温度与表面重力都存在低估。

(2) 对于 F, G, K 型星: $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$ 的中位值为 -40 K , 弥散的中位值为 186 K。随着恒星类型由 F 型到 K 型, $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$ 从 -320 K 上升到 150 K。而 F, G, K 型星的 $\log g_{\text{Phot}}$ 则主要是被低估, 中位值为 -0.06 dex , 相应的弥散值为 0.06 dex。对于我们的结果, 有效温度的偏差情况与 Foesneau et al. (2023); Brandner et al. (2023) 的结果一致; 表面重力的结果与 Brandner et al. (2023) 一致, 即都是低估, 但与 Foesneau et al. (2023) 的结果相反, 其为高估。这很大程度上是因为我们剔除了大部分的双星, 因为在应用等龄线进行估计大气参数时往往会赋予双星更低的表面重力理论值, 这会导致偏差 (观测值-理论值) 变大, 从而在 Foesneau et al. (2023) 的结果中显示出表面重力存在高估的现象。此外, 我们也发现了 K 型星附近的表面重力偏差存在分叉结构。

(3) 对于 M 型星: 随着颜色的变红, $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$ 从 100 K 增加到 350 K, 而弥散都比较小且稳定在 100 K 附近。 $\Delta \log g_{\text{Phot}}$ 从 0.1 dex 增加到 0.39 dex, 整体的弥散较大中位值为 0.16 dex。GSP-Phot 对 M 型星的表面重力的估计不仅偏差大而且弥散也很大, 这一点在 Brandner et al. (2023) 的结果中也有体现。

Andrae et al. (2023) 在其工作中指出, GSP-Phot 模块在处理 BP/RP 光谱时得到的有效温度与消光存在简并现象。其解释道, 观测到的一颗红色的恒星既可能是一颗内禀颜色偏红的恒星, 也可能是由于视线上的尘埃消光导致的一颗蓝星变红, 对于这种情况, GSP-Phot 是难以区分的。图 3-3 展示了我们样本中 $\Delta A_{\text{G_Phot}}$ 与 $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$ 的分布情况, 点的颜色代表了 $\Delta \log g_{\text{Phot}}$ 。相似的, 我们的结果也显示了有效温度与消光强烈的简并关系。这种简并关系表明, 很大一部

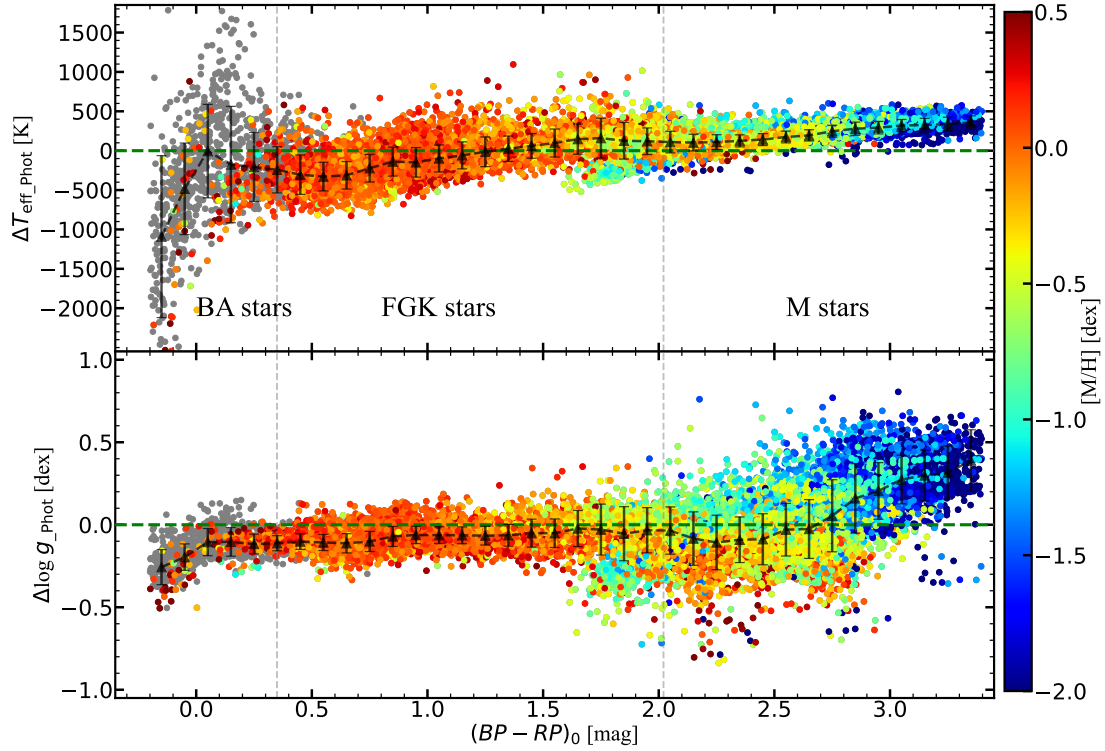


图 3-2 GSP-Phot 的大气参数偏差（观测值减理论值）随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布，下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值，对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。灰色虚线代表不同恒星类型的分界线。颜色条代表经 Andrae et al. (2023) 提供的金属丰度校准关系式校准后的 GSP-Phot 金属丰度，灰点则表示不适用此金属丰度校准的源。

Figure 3-2 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of GSP-Phot (observed value minus theoretical value) as a function of the intrinsic color $(BP - RP)_0$. The upper panel shows the distribution of the $\Delta T_{\text{eff_Phot}}$, and the lower panel shows the distribution of the $\Delta \log g_{\text{Phot}}$. The black triangles represent the median values, and the corresponding error bars represent the dispersions relative to the median values. The gray dashed lines represent the boundaries of different stellar types. The color bar represents the metallicity of GSP-Phot calibrated by the metallicity calibration relation provided by Andrae et al. (2023), and the gray points represent the sources for which this metallicity calibration is not applicable.

分的恒星在 G 波段的消光与有效温度同时被高估或者被低估。此外，对于被高估温度与消光的源，GSP-Phot 的表面重力也存在高估，如图中偏红色点所示。

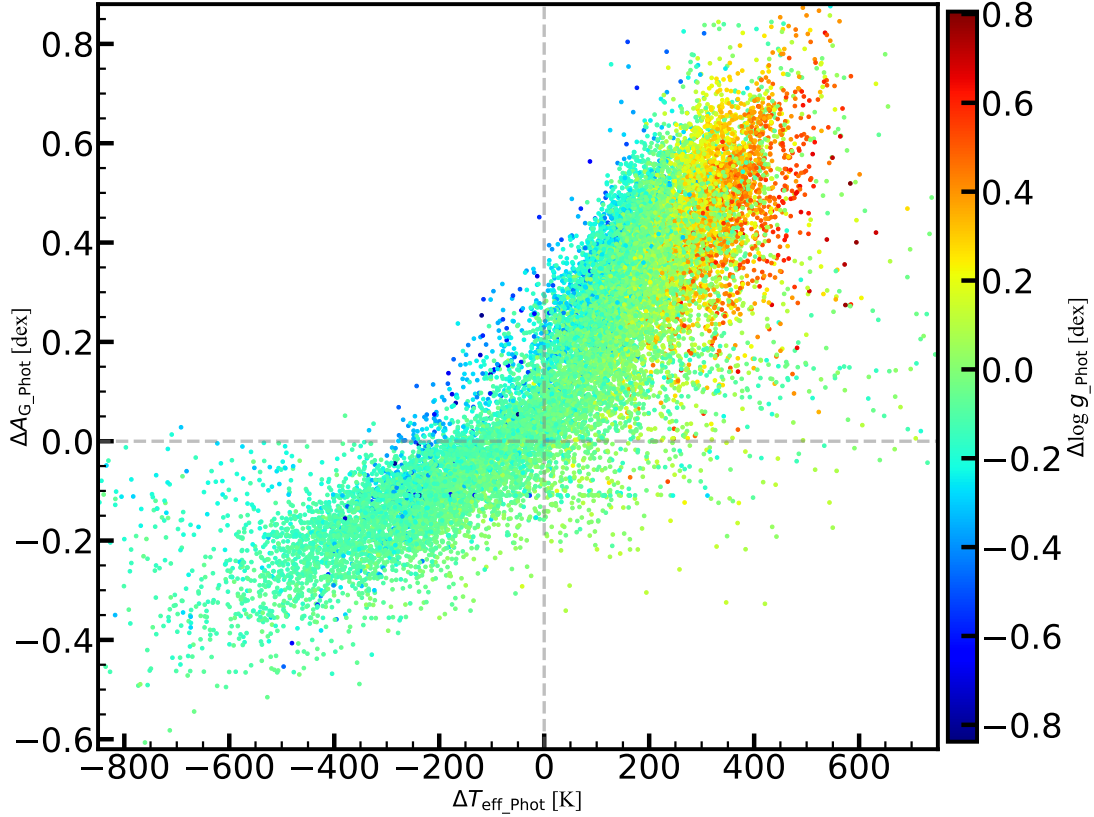


图 3-3 ΔA_{G_Phot} 与 ΔT_{eff_Phot} 的分布图。其中 $\Delta A_{G_Phot} = A_{G_Phot} - A_{G_iso}$ 。颜色条代表 $\Delta \log g_{Phot}$ 。

Figure 3-3 The distribution of ΔA_{G_Phot} versus ΔT_{eff_Phot} . Among them, $\Delta A_{G_Phot} = A_{G_Phot} - A_{G_iso}$. The color bar represents $\Delta \log g_{Phot}$.

此外，图 3-4展示了 ΔT_{eff_Phot} 、 $\Delta \log g_{Phot}$ 随 G 波段星等在 $[6, 18]$ mag 范围内的分布情况，步长为 0.5 mag。我们发现， ΔT_{eff_Phot} 的变化范围从较暗端的 240 K 下降到较亮端的 -460 K，同时弥散也在增大。 $\Delta \log g_{Phot}$ 随着恒星由暗到亮，从 0.14 dex 下降到 -0.16 dex，但其弥散在暗端更大。

3.1.2 GSP-Spec 的大气参数

在我们的成员星样本中，经过 GSP-Spec 的质量标签筛选后，保留下来的主要是 F, G 和少量的 K 型星，其 ΔT_{eff_Spec} 、 $\Delta \log g_{Spec}$ 随内禀颜色的分布如图 3-5 所示。对于 GSP-Spec 的高质量样本， ΔT_{eff_Spec} 的中位值为 60 K，相对较小，其弥散的中位值为 202 K。但是对于表面重力， $\Delta \log g_{Spec}$ 的中位值为 0.4 dex，弥散的中位值为 0.3 dex。我们注意到，GSP-Spec 的表面重力偏差存在明显的线性结构，在 $[0.6, 1.2]$ mag 的内禀颜色范围内， $\Delta \log g_{Spec}$ 从 0.6 dex 单调下降到 0.3 dex。此外，我们根据 Recio-Blanco et al. (2023) 在其文章中提出的 GSP-Spec 表面重力的经验校准关系对我们样本的表面重力进行了校准，经过校准后这种线性关系

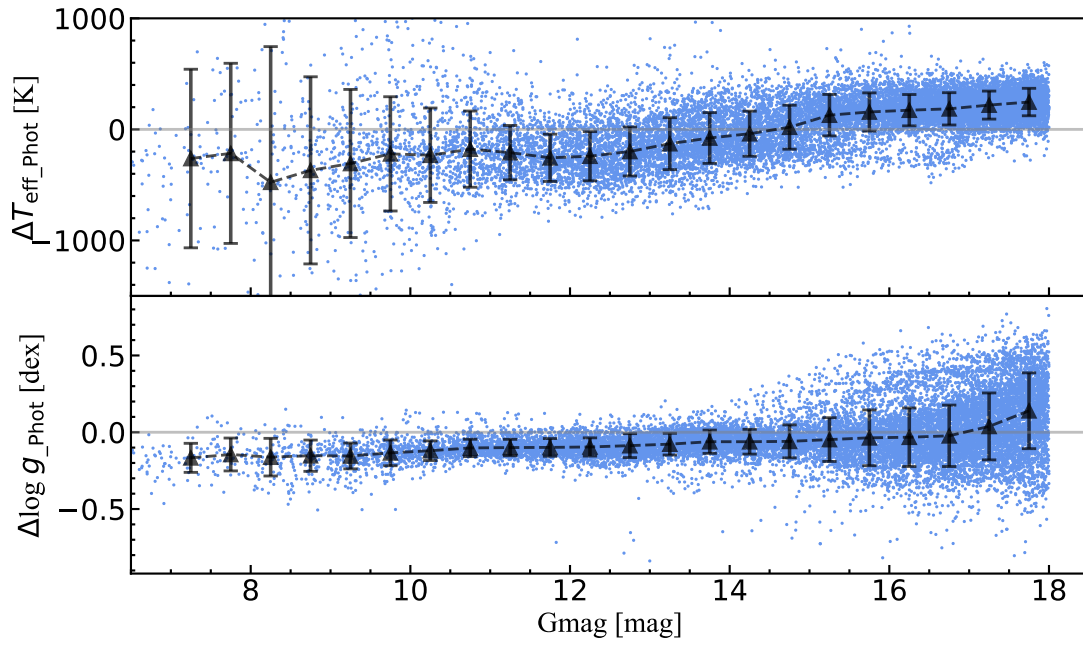


图 3-4 GSP-Phot 的大气参数偏差随观测 G 星等的分布。上图为有效温度的偏差，下图为表面重力的偏差。黑色三角形代表偏差的中位值，误差棒代表相对于中位值的弥散。

Figure 3-4 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of GSP-Phot as a function of the observed G magnitude. The upper panel shows the deviation of the T_{eff} , and the lower panel shows the deviation of the $\log g$. The black triangles represent the median value of the deviation, and the error bars represent the dispersion relative to the median value.

依然存在, 但是将 $\Delta \log g_{\text{Spec}}$ 的中位值从原来的 0.44 dex 降低到了 0.31 dex。

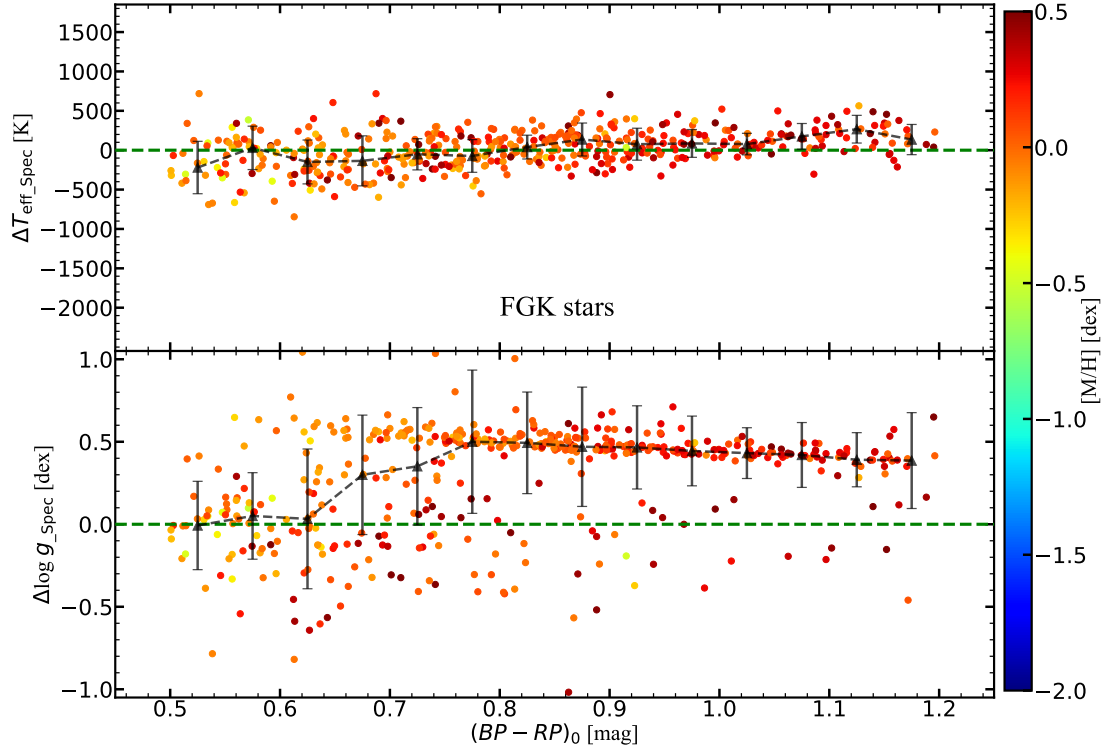


图 3-5 GSP-Spec 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。颜色条代表 GSP-Spec 的金属丰度。

Figure 3-5 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of GSP-Spec (observed value minus theoretical value) as a function of the intrinsic color $(BP - RP)_0$. The upper panel shows the distribution of the $\Delta T_{\text{eff_Spec}}$, and the lower panel shows the distribution of the $\Delta \log g_{\text{Spec}}$. The black triangles represent the median values, and the corresponding error bars represent the dispersions relative to the median values. The gray dashed lines represent the boundaries of different stellar types. The color bar represents the metallicity of GSP-Spec.

图 3-5 下图展示了 GSP-Spec 的表面重力的偏差与弥散分布情况。对比 [Recio-Blanco et al. \(2023\)](#) 中的结果, 我们的偏差以及弥散都比其结果要大。这可能跟质量标签的选择相关, 在他们的样本中, 质量标签选得非常严苛, 及前 13 个质量标签都等于 0。而我们的样本只有其中的 6 个标签为 0。在 [Brandner et al. \(2023\)](#) 的工作中, 其只选择了针对表面重力的质量标签 `vbroadG`、`vradsG` 为 0, 其结果显示, GSP-Spec 的表面重力存在高估, 并且偏差也显示出线性结构, 这与我们的结果相一致。

3.1.3 ESP-HS 的大气参数

图 3-6 展示了 ESP-HS 的大气参数偏差 ($\Delta T_{\text{eff_HS}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{HS}}$) 随内禀颜色的分布情况。值得注意的是, ESP-HS 模块在处理光谱时, 默认了这些光谱的金属丰度为太阳金属丰度, 因此该图没有使用颜色条表示金属丰度。对于 ESP-HS 样

本, 我们的样本主要是一些 B, A 型星, 对于这些星, ESP-HS 的有效温度存在低估, 中位值为 -653 K 。我们发现从 B 型到 A 型星, $\Delta T_{\text{eff_HS}}$ 的中位值从 -1450 K 上升到 -137 K , 另外 B 型星的弥散也比 A 型星的弥散更大。而对于 $\Delta \log g_{\text{HS}}$ 则是比较稳定的分布在 -0.2 dex 附近, 弥散也比较稳定, 大概为 0.1 dex 。

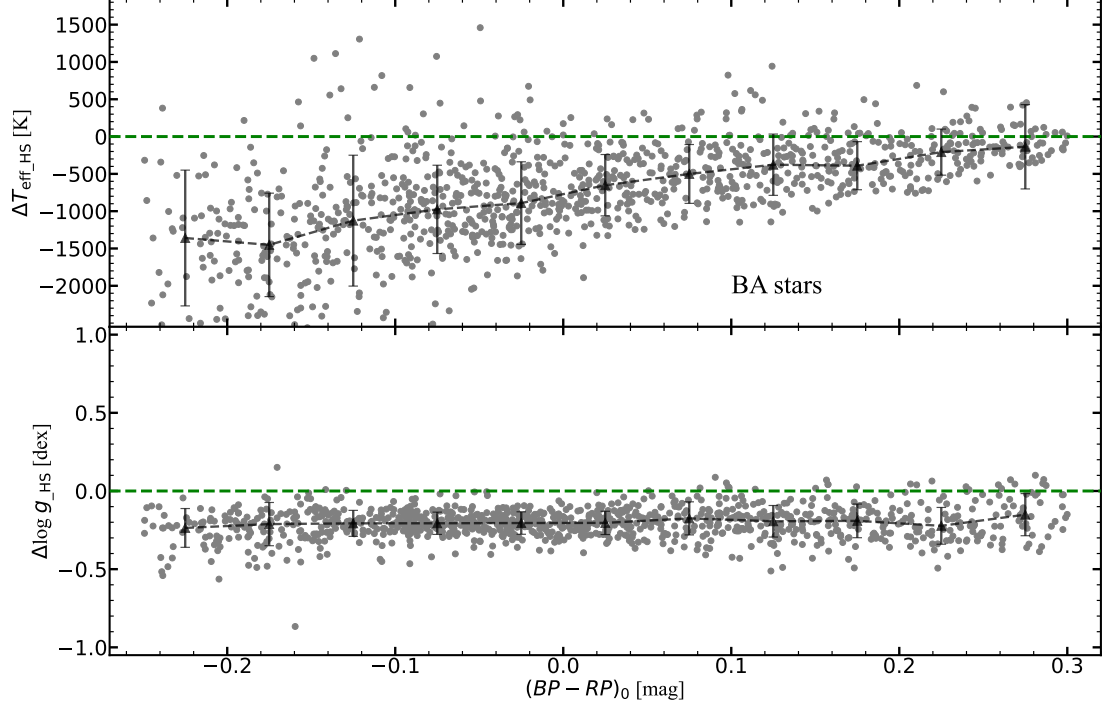


图 3-6 ESP-HS 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。ESP-HS 模块默认所有的源金属丰度为太阳金属丰度。

Figure 3-6 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of ESP-HS (observed value minus theoretical value) as a function of the intrinsic color $(BP - RP)_0$. The upper panel shows the distribution of the $\Delta T_{\text{eff_HS}}$, and the lower panel shows the distribution of the $\Delta \log g_{\text{HS}}$. The black triangles represent the median values, and the corresponding error bars represent the dispersions relative to the median values. The gray dashed lines represent the boundaries of different stellar types. The ESP-HS module assumes that the metallicity of all sources is the solar metallicity.

与Fouesneau et al. (2023) 的结果相似, 我们的结果显示, ESP-HS 的有效温度与表面重力观测值与等龄线理论值之间存在明显的系统差, ESP-HS 对 B, A 型星的观测大气参数值都是低估, 其中 B 型及 A 早型星呈现较为严重的系统差和较大的弥散。

3.2 LAMOST-LRS DR11 的大气参数

对于 LAMOST-LRS DR11 的样本, 我们的成员星主要是 F, G, K 型星和少量的 B, A 型星, $\Delta T_{\text{eff_LAMOST}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{LAMOST}}$ 随内禀颜色的分布情况如图 3-7 所示。

F, G, K 型星的 $\Delta T_{\text{eff_LAMOST}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{LAMOST}}$ 中位值分别为 -85 K、 -0.09 dex, 相应的弥散中位值为 157 K、 0.09 dex。而 B, A 型星的 $\Delta T_{\text{eff_LAMOST}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{LAMOST}}$ 则显示出了更大偏差, 中位值分别为 -579 K、 -0.37 dex, 相应的弥散中位值为 371 K、 0.08 dex。

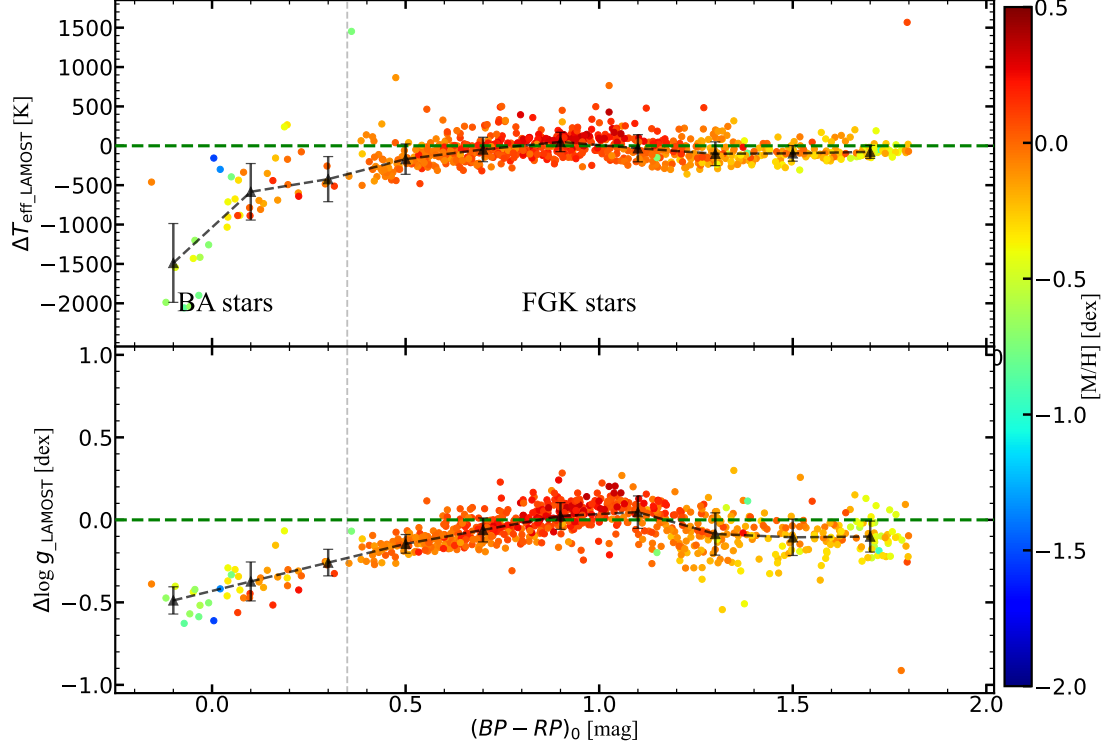


图 3-7 LAMOST-LRS DR11 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。颜色条代表 LAMOST-LRS DR11 的金属丰度。

Figure 3-7 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of LAMOST-LRS DR11 (observed value minus theoretical value) as a function of the intrinsic color $(BP - RP)_0$. The upper panel shows the distribution of the $\Delta T_{\text{eff_LAMOST}}$, and the lower panel shows the distribution of the $\Delta \log g_{\text{LAMOST}}$. The black triangles represent the median values, and the corresponding error bars represent the dispersions relative to the median values. The gray dashed lines represent the boundaries of different stellar types. The color bar represents the metallicity of LAMOST-LRS DR11.

我们的结果表明, LAMOST-LRS DR11 对 B, A, F, G 早型, K 晚型星的有效温度与表面重力都存在低估, 并且从 B 型到 K 型, $\Delta T_{\text{eff_LAMOST}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{LAMOST}}$ 的变化趋势相似, 都是先上升再下降。其中 B, A 型星的大气参数呈现严重的低估, 而 G 晚型星及 K 早型星 ($(BP - RP)_0 = 1$ mag 附近) 的有效温度与表面重力与等龄线理论值符合较好。

3.3 APOGEE DR17 的大气参数

APOGEE DR17 的 $\Delta T_{\text{eff_APOGEE}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{APOGEE}}$ 随内禀颜色的分布展示在了图 3-8。对于 B, A, F, G, K 型星的 $\Delta T_{\text{eff_APOGEE}}$ 随着颜色的变红, 总体呈现上升的趋势, 从 B, A 型星的 -942 K 上升到 F, G, K 型星的 -101 K , 相应的弥散则是减小的趋势。对于 M 型星的 $\Delta T_{\text{eff_APOGEE}}$ 则比较平稳的分布在 145 K 附近, 并且弥散较小, 大概为 57 K 。我们发现, 对于 F 晚型, G, K, M 早型星的表面重力偏差的中位值为 -0.06 dex , 这表明其与等龄线模型的理论值相当一致。但对于 B, A 型星则显示出了明显的下降趋势, 到 F 早型下降到最低, 同时在此处的弥散也达到最大, 如图 3-1 下图的紫色线条所示。

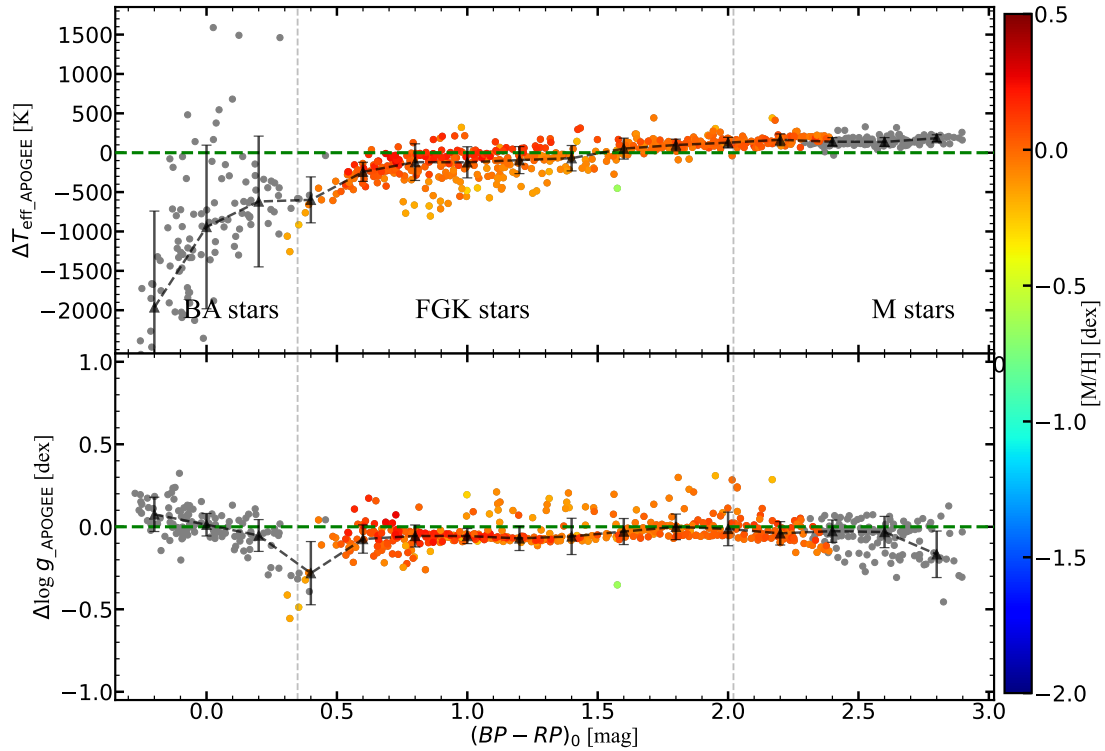


图 3-8 APOGEE DR17 的大气参数偏差（观测值减理论值）随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布，下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值，对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。灰色虚线代表不同恒星类型的分界线。颜色条代表 APOGEE DR17 的金属丰度，灰点表示无金属丰度值的源。

Figure 3-8 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of APOGEE DR17 (observed value minus theoretical value) as a function of the intrinsic color $(BP - RP)_0$. The upper panel shows the distribution of the $\Delta T_{\text{eff_APOGEE}}$, and the lower panel shows the distribution of the $\Delta \log g_{\text{APOGEE}}$. The black triangles represent the median values, and the corresponding error bars represent the dispersions relative to the median values. The gray dashed lines represent the boundaries of different stellar types. The color bar represents the metallicity of APOGEE DR17. The gray points represent the sources without metallicity.

我们的结果表明, APOGEE DR17 的有效温度从 B 型星的严重低估变到 M

型星的高估, 其中 K 晚型, M 型星的有效温度弥散最小。对于表面重力, APOGEE DR17 的 F 晚型, G, K, M 早型星的值与理论值符合得更好。

3.4 GALAH DR4 的大气参数

图 3-9 展示了 GALAH DR4 的 $\Delta T_{\text{eff_GALAH}}$ 、 $\Delta \log g_{\text{GALAH}}$ 随内禀颜色的分布。对于 F, G 型星, $\Delta T_{\text{eff_GALAH}}$ 呈现上升趋势, 而对于 K 型星 $\Delta T_{\text{eff_GALAH}}$ 呈现下降的趋势, 对于 M 型星 $\Delta T_{\text{eff_GALAH}}$ 又呈现上升的趋势, 变化的范围在 $[-300, 300]$ K 内, 对应的弥散在 K 型星最大, 可达 500 K。我们发现 F, G 型星的 $\Delta \log g_{\text{GALAH}}$ 比较平稳的分布在 -0.05 dex 附近, K, M 型星的 $\Delta \log g_{\text{GALAH}}$ 先下降再上升, 到 M 晚型星偏差最大可达 0.4 dex。而对于 B, A 型星, 有效温度与表面重力都存在严重的低估, 颜色越蓝, 低估的程度越大。

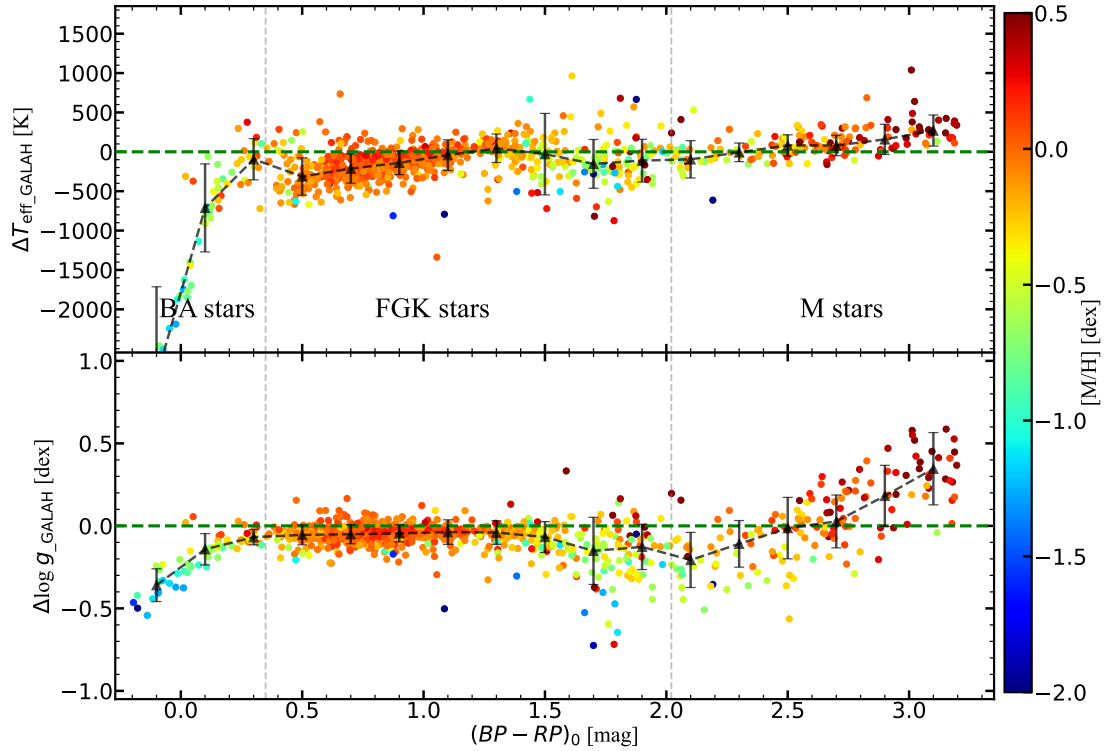


图 3-9 GALAH DR4 的大气参数偏差 (观测值减理论值) 随内禀颜色 $(BP - RP)_0$ 的分布。上图为有效温度的偏差分布, 下图为表面重力的偏差分布。黑色三角形代表中位值, 对应的误差棒代表相对于中位值的弥散。灰色虚线代表不同恒星类型的分界线。颜色条代表 GALAH DR4 的金属丰度。

Figure 3-9 The distribution of the deviation of the atmospheric parameters of GALAH DR4 (observed value minus theoretical value) as a function of the intrinsic color $(BP - RP)_0$. The upper panel shows the distribution of the $\Delta T_{\text{eff_GALAH}}$, and the lower panel shows the distribution of the $\Delta \log g_{\text{GALAH}}$. The black triangles represent the median values, and the corresponding error bars represent the dispersions relative to the median values. The gray dashed lines represent the boundaries of different stellar types. The color bar represents the metallicity of GALAH DR4.

我们的结果表明, GALAH DR4 的 B, A 型星, 其有效温度与表面重力都存在严重的低估。对于 F, G, K 型星的有效温度存在低估, 其表面重力与等龄线模型理论值比较接近但依然存在一定程度的低估。对于 M 早型星的有效温度与表面重力都存在低估, M 晚型则都是高估。

第4章 讨论

4.1 考虑恒星自转对结果的影响

PARSEC V2.0(Nguyen et al., 2022) 构建了考虑自转效应的恒星演化轨迹, 该模型通过整合最新的物理输入, 解决了传统非自转模型在解释观测数据时的局限性, 特别是一些快速自转恒星的演化特征。我们的工作中对于所有的巡天样本, B, A 型星的有效温度与表面重力都存在低估, 这可能与恒星自转有关。在本小节, 我们将采用有恒星自转的等龄线模型来探究恒星自转对我们结果可能产生的影响。

我们挑选了 6 个疏散星团 (OCSN_77, OCSN_90, OCSN_212, OCSN_218, OCSN_219, OCSN_259) 作为测试集, 分别使用了其对应年龄但恒星自转为 0.1, 0.5, 0.9 的等龄线模型进行了理论大气参数的估计。图 4-1展示了 GSP-Phot 的大气参数与考虑自转的等龄线模型的偏差情况。图 4-1下图表表明, 考虑自转的等龄线模型将使 GSP-Phot 的 B, A 以及 F 早型星的表面重力与理论值偏差程度减小, 这实际上是因为通过有自转的等龄线得到的表面重力理论值比没自转等龄线模型得到的值更小了。如图 4-1上图所示, 通过有自转等龄线模型得到的有效温度也同样比没自转等龄线模型得到的值更小, 但高自转的等龄线会得到更低的理论大气参数, 导致某些 A 型星的有效温度偏差会更大 (红线所示)。而恒星自转对 F 晚型以及 G, K, M 型星的几乎没有影响。虽然考虑自转模型能在一定程度上减小表面重力的偏差程度, 但是高自转的等龄线模型可能会使有效温度的偏差更大。

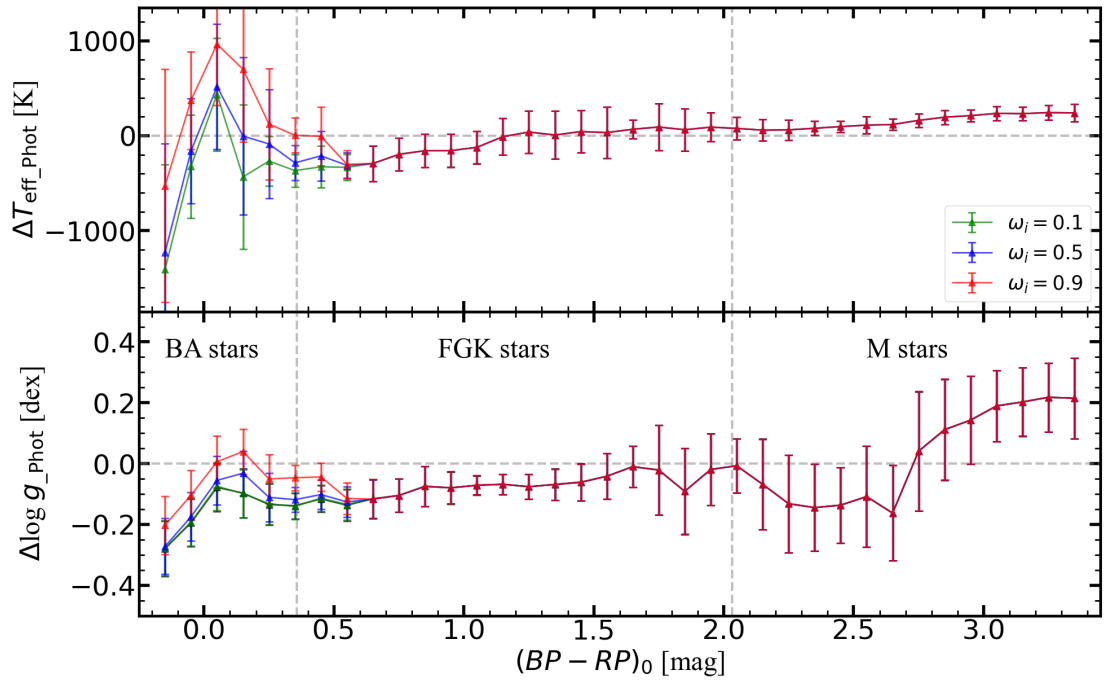


图 4-1 GSP-Phot 大气参数与具有自转的等龄线模型的理论大气参数偏差情况。绿、黄、红分别代表与自转角速度 $\omega_i = 0.1, 0.5, 0.9$ 的理论等龄线的偏差。

Figure 4-1 The deviation between the T_{eff} (upper panel) and $\log g$ (lower panel) obtained by GSP-Phot and the theoretical values of the isochrone models with different degrees of stellar rotation. The green, yellow, and red lines respectively represent the deviations from the theoretical isochrones with rotational angular velocities of $\omega_i = 0.1, 0.5, 0.9$. The error bars denote the degree of dispersion in each color bin.

4.2 GSP-Phot 大气参数在蓝端、红端的弥散

我们发现，GSP-Phot 的大气参数在蓝端以及红端出现了比较明显的偏差以及较大的弥散。为了讨论这里的偏差与弥散是否与成员星在颜色星等图中的弥散相关，我们将图 2-4 的红色点（也就是 OCSN_259 中保留下来的成员星）分别展示了 $T_{\text{eff_Phot}}$ 、 $\log g_{\text{Phot}}$ 与内禀颜色的分布关系，如图 4-2。

对于蓝端，如颜色在 0 mag 附近的成员星，我们发现其在颜色星等图中与等龄线符合得非常好，如图 2-4 所示。而在图 4-2 的相同区域出现了明显的低估，这意味着 GSP-Phot 的有效温度与表面重力在蓝端较高温的区域存在明显的低估以及较大的弥散。对于红端，如颜色在 2.5 mag 附近的成员星，我们发现其在颜色星等图中与等龄线有较明显的偏差，同时弥散也比较大。而在图 4-2 左图的相同区域，GSP-Phot 的有效温度出现了系统性的高估，并且弥散不明显。这意味着 GSP-Phot 的有效温度观测准度 (accuracy) 低但精度 (precision) 高。而在图 4-2 右图的相同区域，GSP-Phot 的表面重力的偏差以及弥散明显更大，这意味着 GSP-Phot 的红端低温星表面重力观测质量比较差。

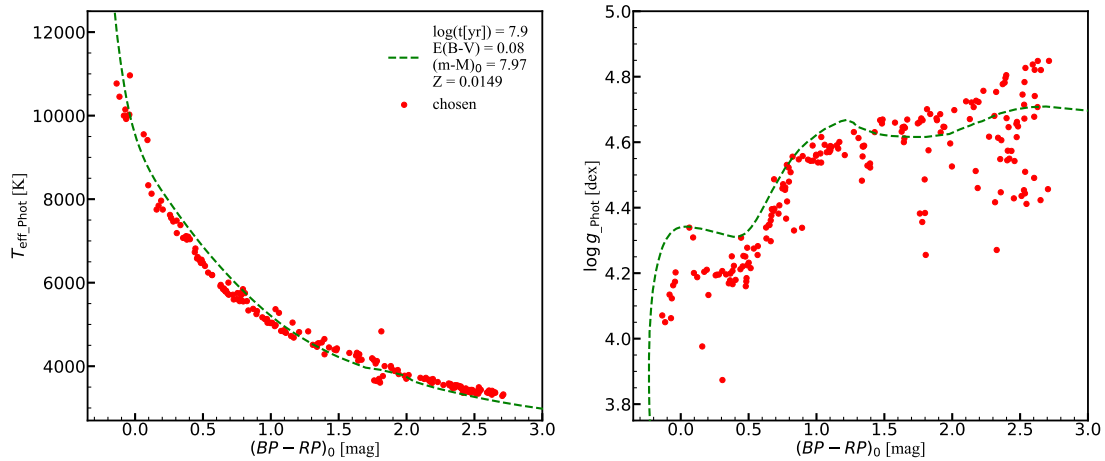


图 4-2 OCSN_259 成员星 (红点) 的 $T_{\text{eff_Phot}}$ 、 $\log g_{\text{Phot}}$ 与内禀颜色分布图，绿色虚线为等龄线。

Figure 4-2 The distribution of T_{eff} (left) and $\log g$ (right) from GSP-Phot for the retained member stars of OCSN_259 as a function of intrinsic color. The green dashed line represents the isochrone, and red dots indicate the retained member stars.

4.3 GSP-Spec 质量标签对其结果的影响

我们在前面的工作中通过使用 vbroadT、vbroadG、VbroadM、vradT、vradG、vradM 的质量标签均等于零的条件筛选了 GSP-Spec 中大气参数质量最好的样本，即对应的 gspspec_flags 中的 f1, f2, f3, f4, f5, f6=0。在这一节我们将讨论质量标签相对差的样本大气参数偏差情况。

图 4-3 的黑点展示了 GSP-Spec 在内禀颜色 [0.5, 1.2] mag 范围内成员星的质量标签 f1, f2, f3, f4, f5, f6 其中任意一个不为 0 的大气参数偏差情况，而红

色点表示最佳样本。我们发现图 4-3 上图中, 对于有效温度有很大一部分的成员星存在明显的低估, 随着颜色的变红从 -4000 K 线性增加到 -2000 K, 通过质量筛选后, 如红色点, 可以很好的将这个明显的偏差结构筛选掉。对于这些严重低估的源, 我们无法通过质量标签对其进行筛选, 很有可能是 GSP-Spec 对这些恒星的观测值存在显著的低估, 其原因有待进一步的研究。而在图 4-3 下图中, 我们发现 GSP-Spec 高质量样本的表面重力与低质量样本的表面重力偏差情况几乎一致。

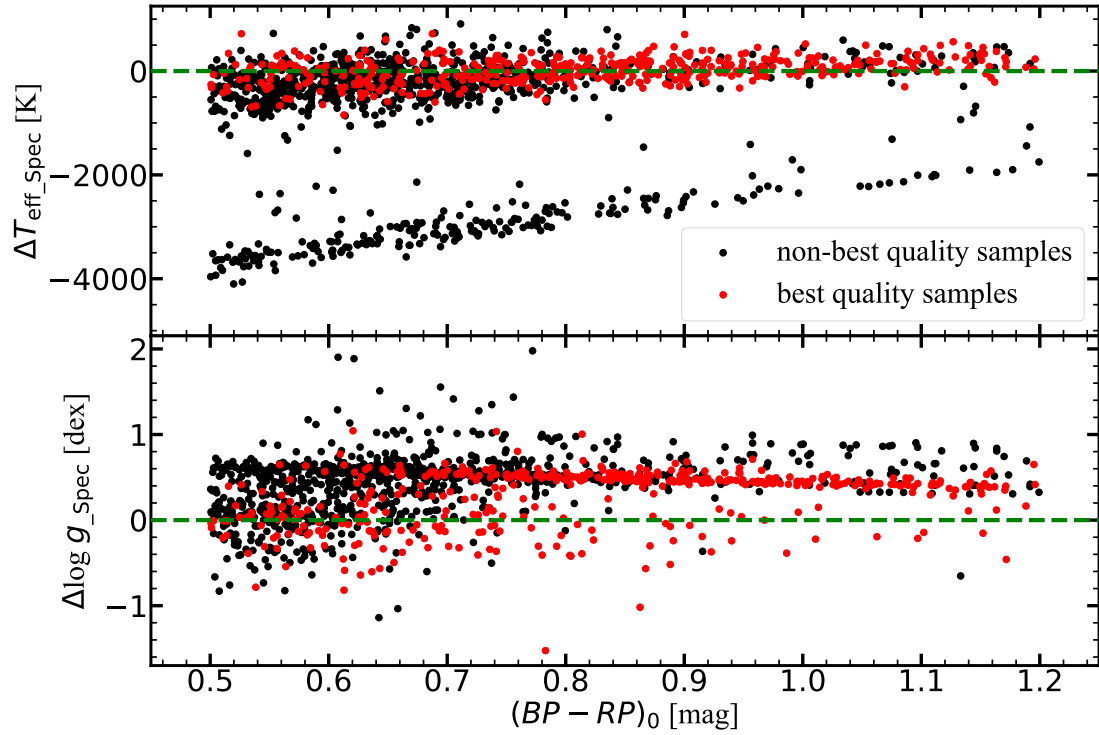


图 4-3 GSP-Spec 中不同质量标签的大气参数偏差分布情况。红色点代表 gspspec_flags 中的 f1, f2, f3, f4, f5, f6 均为 0 的最佳样本, 黑色点代表 f1, f2, f3, f4, f5, f6 其中任意一个质量标签不为 0 的样本。

Figure 4-3 The distribution of the deviations of $T_{\text{eff_Spec}}$ and $\log g_{\text{Spec}}$ for different quality flags in GSP-Spec. The red dots represent the best quality samples where f1, f2, f3, f4, f5, f6 in the gspspec_flags are all equal to 0, and the black dots represent the low quality samples where at least one of the flags f1, f2, f3, f4, f5, f6 is not equal to 0.

4.4 方法的局限性

我们的工作中依然存在一定的局限性, 首先, 我们虽然从理论等龄线获取了理论大气参数, 但是很难估计这些理论大气参数的不确定性, 这主要是由于恒星结构演化模型所推导的大气参数, 其不确定性源于恒星模型的物理输入条件及所采用的算法。这已经超出了本文的研究范围。其次, 我们虽然剔除了双星质比大于 0.5 以外的双星, 但是依然存在质比小于 0.5 的双星没有剔除, 这可能会对结果产生影响。再者, 我们的等龄线模型没有考虑恒星的自转, 如 4.1 节的讨论

所示，自转等龄线模型会导致 B，A，F 早型星估计的理论大气参数更低，从而可以在一定程度上减小实际观测结果与理论值之间的系统偏差。

第5章 总结与展望

5.1 总结

大气参数是恒星物理状态的直接反映，更是研究其形成环境、内部结构及演化阶段的重要参数。恒星大气参数的精确测量是天体物理学的核心任务之一。如今大规模巡天计划为人们提供了海量的恒星大气参数。而不同巡天计划所构建的恒星大气参数表，会因光谱覆盖范围、分辨率、大气参数求解方法差异等，相互之间不可避免地存在系统差，因此其大气参数的可靠性值得进一步的验证。而疏散星团作为天然的恒星实验室，其成员星具有单星族、相似年龄、相似化学丰度的特性，通过等龄线拟合可以较准确地估计成员星的年龄。疏散星团是连接观测与理论的桥梁，为大气参数验证提供了理想样本。

我们挑选了太阳邻域 500 pc 范围内的疏散星团作为样本，通过等龄线估计了成员星理论大气参数，并对 GSP-Phot、GSP-Spec、ESP-HS、LAMOST DR11、APOGEE DR17、GALAH DR4 的大气参数表进行了质量验证，主要的结论如下：

(1) 对于 B, A 型星：几乎所有巡天的大气参数表的有效温度都存在低估，从 A 型星到 B 型星低估程度从几百逐渐增加到 2000 K，另外温度的弥散有相似的变化，从 300 K 逐渐增加到 1000 K。对于表面重力，除了 APOGEE DR17 的表面重力与理论值符合较好，偏差为 0.01 dex，其他大气参数表的表面重力都存在低估，低估程度在 0.2-0.5 dex 范围内不等，弥散都在 0.1 dex 附近。值得一提的是，ESP-HS 的表面重力存在 0.2 dex 的系统性低估。

(2) 对于 F, G, K 型星：所有巡天的大气参数表的温度与等龄线保持一致，温度偏差几乎都在 260 K 范围以内，弥散值在 200 K 范围以内。对于表面重力，GSP-Spec 的表面重力存在 0.43 dex 的严重高估，弥散在 0.3 dex 附近。而其他大气参数表的表面重力与理论值符合较好，偏差都在 0.1 dex 以内，弥散在 0.1 dex 附近。

(3) 对于 M 型星：GSP-Phot、APOGEE DR17、GALAH DR4 的有效温度存在 100-200 K 的高估，弥散值在 200 K 范围以内。对于表面重力，APOGEE DR17 与理论值的偏差为 -0.03 dex，弥散为 0.09 dex。而 GSP-Phot 与 GALAH DR4 与理论值偏差较大，随着颜色变红，从低估 0.2 dex 到高估 0.4 dex，弥散在 0.2 dex 附近。

(4) GSP-Phot 的有效温度与消光存在强简并，同时表面重力也与这些参数存在一定的简并关系。

总的来说，对于 B, A 型星，各个巡天的有效温度都存在 1000-2000 K 的低估，除了 APOGEE DR17 的表面重力与等龄线符合更好以外，其他巡天的表面重力存在 0.2-0.5 dex 的低估。对于 F, G, K 型星，各巡天的有效温度典型偏差为 260 K，表面重力典型偏差为 0.1 dex，从数量上来说，GSP-Phot 拥有更多的大气参数源。对于 M 型星，有效温度的偏差程度相当都在 100-200 K 范围，但是

APOGEE DR17 的弥散最小, APOGEE DR17 的表面重力与等龄线符合程度更高, 偏差为 0.03 dex, GSP-Phot 与 GALAH DR4 与理论值的偏差能达到 0.4 dex。因此在使用这些巡天数据时, 不能忽略这些巡天的热星、冷星大气参数与等龄线理论值的偏差。

5.2 展望

我们通过严格筛选的疏散星团样本, 利用等龄线拟合得到的理论大气参数, 揭示了不同大气参数表在不同恒星类型中的系统偏差与弥散特征, 可以帮助研究者选择更可靠的大气参数来源。随着天体测量技术的持续革新与长期观测数据的积累, 我们的结果也可以为未来改进恒星大气参数获取方法、优化巡天数据处理流程提供依据。

在后续的工作中, 一方面可以结合包含恒星自转效应的等龄线模型, 更精确地模拟恒星演化轨迹, 来减小理论大气参数的误差。对于我们所使用的 OCSN 疏散星团样本 (Qin et al., 2023) 以及目前数目最多的疏散星团样本 (Hunt et al., 2024), 其提供的疏散星团等龄线信息都未曾考虑过恒星自转效应。在我们的第 4.1 节中, 我们初步讨论了考虑恒星自转的等龄线会使 B, A 以及 F 早型星获得更低的理论表面重力, 这在一定程度上会减小观测与理论的差距。因此, 使用有自转的等龄线模型对这些疏散星团的年龄重新测定会使大气参数检验结果更加可靠。

另一方面, 可以通过筛选更远距离范围且主序形态较为清晰完整的疏散星团, 构建更大样本的理论大气参数表。随着 *Gaia* 观测数据精度的提高, 越来越多的疏散星团得以被人们发现, 其成员星的可靠性也得到了大幅度的提升, 这为我们构建更大样本的疏散星团理论大气参数表提供了基础。选择更大范围内的疏散星团样本, 可以检验多种光谱巡天结果对银河系不同环境中恒星的大气参数测量质量是否一致, 包括进一步探究金属丰度如何影响大气参数的测量结果。

参考文献

- Abdurro'uf, Accetta K, Aerts C, et al., 2022. The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data[J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 259(2): 35. DOI: [10.3847/1538-4365/ac4414](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac4414).
- Andrae R, Fouesneau M, Sordo R, et al., 2023. Gaia Data Release 3. Analysis of the Gaia BP/RP spectra using the General Stellar Parameterizer from Photometry[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 674: A27. DOI: [10.1051/0004-6361/202243462](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243462).
- Blanton M R, Bershadsky M A, Abolfathi B, et al., 2017. Sloan Digital Sky Survey IV: Mapping the Milky Way, Nearby Galaxies, and the Distant Universe[J/OL]. The Astronomical Journal, 154 (1): 28. DOI: [10.3847/1538-3881/aa7567](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7567).
- Blomme R, Daflon S, Gebran M, et al., 2022. The Gaia-ESO Survey: The analysis of the hot-star spectra[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 661: A120. DOI: [10.1051/0004-6361/202142349](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142349).
- Boyajian T S, McAlister H A, van Belle G, et al., 2012. Stellar Diameters and Temperatures. I. Main-sequence A, F, and G Stars[J/OL]. The Astrophysical Journal, 746(1): 101. DOI: [10.1088/0004-637X/746/1/101](https://doi.org/10.1088/0004-637X/746/1/101).
- Brandner W, Calissendorff P, Kopytova T, 2023. Benchmarking Gaia DR3 Apsis with the Hyades and Pleiades open clusters[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 677: A162. DOI: [10.1051/0004-6361/202346790](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346790).
- Bressan A, Marigo P, Girardi L, et al., 2012. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427(1): 127-145. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x).
- Buder S, Kos J, Wang E X, et al., 2024. The GALAH Survey: Data Release 4[A/OL]. arXiv: [2409.19858](https://arxiv.org/abs/2409.19858).
- Bundy K, Bershadsky M A, Law D R, et al., 2015. Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory[J/OL]. The Astrophysical Journal, 798 (1): 7. DOI: [10.1088/0004-637X/798/1/7](https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/1/7).
- Cantat-Gaudin T, Anders F, 2020a. Clusters and mirages: cataloguing stellar aggregates in the Milky Way[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 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., 2018. A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 618: A93. DOI: [10.1051/0004-6361/201833476](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833476).
- Cantat-Gaudin T, Anders F, Castro-Ginard A, et al., 2020b. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 640: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/202038192](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038192).
- Casagrande L, VandenBerg D A, 2018. On the use of Gaia magnitudes and new tables of bolometric corrections[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 479(1): L102-L107. DOI: [10.1093/mnrasl/sly104](https://doi.org/10.1093/mnrasl/sly104).
- Casey A R, Hawkins K, Hogg D W, et al., 2017. The RAVE-on Catalog of Stellar Atmospheric Parameters and Chemical Abundances for Chemo-dynamic Studies in the Gaia Era[J/OL]. The Astrophysical Journal, 840(1): 59. DOI: [10.3847/1538-4357/aa69c2](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa69c2).

- Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al., 2020. Hunting for open clusters in Gaia DR2: 582 new open clusters in the Galactic disc[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 635: A45. DOI: [10.1051/0004-6361/201937386](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937386).
- Chen Y, Girardi L, Bressan A, et al., 2014. Improving PARSEC models for very low mass stars [J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444(3): 2525-2543. DOI: [10.1093/mnras/stu1605](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1605).
- Costa G, Bressan A, Mapelli M, et al., 2021. Formation of GW190521 from stellar evolution: the impact of the hydrogen-rich envelope, dredge-up, and $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ rate on the pair-instability black hole mass gap[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(3): 4514-4533. DOI: [10.1093/mnras/staa3916](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3916).
- Creevey O L, Sordo R, Pailler F, et al., 2023. Gaia Data Release 3. Astrophysical parameters inference system (Apsis). I. Methods and content overview[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 674: A26. DOI: [10.1051/0004-6361/202243688](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243688).
- Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al., 2012. The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST)[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12(9): 1197-1242. DOI: [10.1088/1674-4527/12/9/003](https://doi.org/10.1088/1674-4527/12/9/003).
- Dawson K S, Kneib J P, Percival W J, et al., 2016. The SDSS-IV Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Overview and Early Data[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 151(2): 44. DOI: [10.3847/0004-6256/151/2/44](https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/2/44).
- De Silva G M, Freeman K C, Bland-Hawthorn J, et al., 2015. The GALAH survey: scientific motivation[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449(3): 2604-2617. DOI: [10.1093/mnras/stv327](https://doi.org/10.1093/mnras/stv327).
- Dias W S, Alessi B S, Moitinho A, et al., 2002. New catalogue of optically visible open clusters and candidates[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 389: 871-873. DOI: [10.1051/0004-6361:20020668](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020668).
- Dias W S, Lépine J R D, 2005. Direct Determination of the Spiral Pattern Rotation Speed of the Galaxy[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 629(2): 825-831. DOI: [10.1086/431456](https://doi.org/10.1086/431456).
- Eisenstein D J, Weinberg D H, Agol E, et al., 2011. SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 142(3): 72. DOI: [10.1088/0004-6256/142/3/72](https://doi.org/10.1088/0004-6256/142/3/72).
- Fouesneau M, Frémat Y, Andrae R, et al., 2023. Gaia Data Release 3. Apsis. II. Stellar parameters [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 674: A28. DOI: [10.1051/0004-6361/202243919](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243919).
- Frasca A, Molenda-Żakowicz J, De Cat P, et al., 2016. Activity indicators and stellar parameters of the Kepler targets. An application of the ROTFIT pipeline to LAMOST-Kepler stellar spectra [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 594: A39. DOI: [10.1051/0004-6361/201628337](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628337).
- Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al., 2016. The Gaia mission[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 595: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/201629272](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272).
- Gray R O, 1999. SPECTRUM: A stellar spectral synthesis program[CP/OL].
- Gustafsson B, Edvardsson B, Eriksson K, et al., 2008. A grid of MARCS model atmospheres for late-type stars. I. Methods and general properties[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 486(3): 951-970. DOI: [10.1051/0004-6361:200809724](https://doi.org/10.1051/0004-6361:200809724).
- Hernández J, Hartmann L, Megeath T, et al., 2007. A Spitzer Space Telescope Study of Disks in the Young σ Orionis Cluster[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 662(2): 1067-1081. DOI: [10.1086/513735](https://doi.org/10.1086/513735).

- Hunt E L, Reffert S, 2021. Improving the open cluster census. I. Comparison of clustering algorithms applied to Gaia DR2 data[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 646: A104. DOI: [10.1051/0004-6361/202039341](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039341).
- Hunt E L, Reffert S, 2024. Improving the open cluster census. III. Using cluster masses, radii, and dynamics to create a cleaned open cluster catalogue[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 686: A42. DOI: [10.1051/0004-6361/202348662](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348662).
- Husser T O, Wende-von Berg S, Dreizler S, et al., 2013. A new extensive library of PHOENIX stellar atmospheres and synthetic spectra[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 553: A6. DOI: [10.1051/0004-6361/201219058](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219058).
- Kharchenko N V, Piskunov A E, Schilbach E, et al., 2013. Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 558: A53. DOI: [10.1051/0004-6361/201322302](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322302).
- Krause M G H, Offner S S R, Charbonnel C, et al., 2020. The Physics of Star Cluster Formation and Evolution[J/OL]. *Space Science Reviews*, 216(4): 64. DOI: [10.1007/s11214-020-00689-4](https://doi.org/10.1007/s11214-020-00689-4).
- Krone-Martins A, Moitinho A, 2014. UPMASK: unsupervised photometric membership assignment in stellar clusters[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 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, 2019. Star Clusters Across Cosmic Time [J/OL]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57: 227-303. DOI: [10.1146/annurev-astro-091918-104430](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091918-104430).
- Kurucz R L, 1979. Model atmospheres for G, F, A, B, and O stars.[J/OL]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 40: 1-340. DOI: [10.1086/190589](https://doi.org/10.1086/190589).
- Kurucz R L, 2005. ATLAS12, SYNTHE, ATLAS9, WIDTH9, et cetera[J]. *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 8: 14.
- Lada C J, Lada E A, 2003. Embedded Clusters in Molecular Clouds[J/OL]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41: 57-115. DOI: [10.1146/annurev.astro.41.011802.094844](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.011802.094844).
- Li X, Lin B, 2023. Estimating stellar parameters from LAMOST low-resolution spectra[J/OL]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 521(4): 6354-6367. DOI: [10.1093/mnras/stad831](https://doi.org/10.1093/mnras/stad831).
- LINDEGREN L, 2018. Re-normalising the astrometric chi-square in Gaia DR2[EB/OL]. Lund Observatory. http://www.rssd.esa.int/doc_fetch.php?id=3757412.
- Luo A L, Zhao Y H, Zhao G, et al., 2019. VizieR Online Data Catalog: LAMOST DR5 catalogs (Luo+, 2019)[DS/OL].
- Majewski S R, Schiavon R P, Frinchaboy P M, et al., 2017. The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE)[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 154(3): 94. DOI: [10.3847/1538-3881/aa784d](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa784d).
- Malkov O, Kovaleva D, Sichevsky S, et al., 2020. Statistical relations between stellar spectral and luminosity classes and stellar effective temperature and surface gravity[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 20(9): 139. DOI: [10.1088/1674-4527/20/9/139](https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/9/139).
- Marigo P, Girardi L, Bressan A, et al., 2017. A New Generation of PARSEC-COLIBRI Stellar Isochrones Including the TP-AGB Phase[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 835(1): 77. DOI: [10.3847/1538-4357/835/1/77](https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/1/77).
- Martins F, Schaerer D, Hillier D J, 2005. A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars [J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 436(3): 1049-1065. DOI: [10.1051/0004-6361:20042386](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20042386).

- McInnes L, Healy J, Astels S, 2017. hdbscan: Hierarchical density based clustering[J/OL]. The Journal of Open Source Software, 2(11): 205. DOI: [10.21105/joss.00205](https://doi.org/10.21105/joss.00205).
- Messier C, 1781. Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Étoiles (Catalog of Nebulae and Star Clusters)[Z]. 227-267.
- Monteiro H, Barros D A, Dias W S, et al., 2021. The distribution of open clusters in the Galaxy [J/OL]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 8: 62. DOI: [10.3389/fspas.2021.656474](https://doi.org/10.3389/fspas.2021.656474).
- Napiwotzki R, Schoenberner D, Wenske V, 1993. On the determination of effective temperature and surface gravity of B, A, and F stars using Stromgren uvby-beta photometry.[J]. Astronomy and Astrophysics, 268: 653-666.
- Nguyen C T, Costa G, Girardi L, et al., 2022. PARSEC V2.0: Stellar tracks and isochrones of low- and intermediate-mass stars with rotation[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 665: A126. DOI: [10.1051/0004-6361/202244166](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244166).
- Pera M S, Perren G I, Moitinho A, et al., 2021. pyUPMASK: an improved unsupervised clustering algorithm[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 650: A109. DOI: [10.1051/0004-6361/202040252](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040252).
- Plez B, 2012. Turbospectrum: Code for spectral synthesis[CP/OL].
- Portegies Zwart S F, McMillan S L W, Gieles M, 2010. Young Massive Star Clusters [J/OL]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 48: 431-493. DOI: [10.1146/annurev-astro-081309-130834](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130834).
- Qin S, Zhong J, Tang T, et al., 2023. Hunting for Neighboring Open Clusters with Gaia DR3: 101 New Open Clusters within 500 pc[J/OL]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 265(1): 12. DOI: [10.3847/1538-4365/acadd6](https://doi.org/10.3847/1538-4365/acadd6).
- Quirion P O, Christensen-Dalsgaard J, Arentoft T, 2010. Automatic Determination of Stellar Parameters Via Asteroseismology of Stochastically Oscillating Stars: Comparison with Direct Measurements[J/OL]. The Astrophysical Journal, 725(2): 2176-2189. DOI: [10.1088/0004-637X/725/2/2176](https://doi.org/10.1088/0004-637X/725/2/2176).
- Recio-Blanco A, de Laverny P, Palicio P A, et al., 2023. Gaia Data Release 3. Analysis of RVS spectra using the General Stellar Parametrising from spectroscopy[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 674: A29. DOI: [10.1051/0004-6361/202243750](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243750).
- Riello M, de Angeli F, Evans D W, et al., 2021a. VizieR Online Data Catalog: Gaia Early Data Release 3 photometric passbands (Riello+, 2021)[J]. VizieR Online Data Catalog: J/A+A/649/A3.
- Riello M, De Angeli F, Evans D W, et al., 2021b. Gaia Early Data Release 3. Photometric content and validation[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 649: A3. DOI: [10.1051/0004-6361/202039587](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039587).
- Roeser S, Demleitner M, Schilbach E, 2010. 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]. The Astronomical Journal, 139(6): 2440-2447. DOI: [10.1088/0004-6256/139/6/2440](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/6/2440).
- Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al., 2006. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) [J/OL]. The Astronomical Journal, 131(2): 1163-1183. DOI: [10.1086/498708](https://doi.org/10.1086/498708).
- Soubiran C, Le Campion J F, Brouillet N, et al., 2016. The PASTEL catalogue: 2016 version[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 591: A118. DOI: [10.1051/0004-6361/201628497](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628497).
- Valle G, Dell'Omodarme M, Prada Moroni P G, et al., 2013a. Cumulative physical uncertainty in modern stellar models. I. The case of low-mass stars[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 549: A50. DOI: [10.1051/0004-6361/201220069](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220069).
- Valle G, Dell'Omodarme M, Prada Moroni P G, et al., 2013b. Cumulative physical uncertainty in modern stellar models. II. The dependence on the chemical composition[J/OL]. Astronomy and Astrophysics, 554: A68. DOI: [10.1051/0004-6361/201321142](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321142).

- Wang S G, Su D Q, Chu Y Q, et al., 1996. Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation[J/OL]. *Applied Optics*, 35(25): 5155-5161. DOI: [10.1364/AO.35.005155](https://doi.org/10.1364/AO.35.005155).
- Winston E, Megeath S T, Wolk S J, et al., 2007. A Combined Spitzer and Chandra Survey of Young Stellar Objects in the Serpens Cloud Core[J/OL]. *The Astrophysical Journal*, 669(1): 493-518. DOI: [10.1086/521384](https://doi.org/10.1086/521384).
- Wu Y, Luo A L, Li H N, et al., 2011. Automatic determination of stellar atmospheric parameters and construction of stellar spectral templates of the Guoshoujing Telescope (LAMOST)[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 11(8): 924-946. DOI: [10.1088/1674-4527/11/8/006](https://doi.org/10.1088/1674-4527/11/8/006).
- Xiang M, Rix H W, Ting Y S, et al., 2022. Stellar labels for hot stars from low-resolution spectra. I. The HotPayne method and results for 330 000 stars from LAMOST DR6[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 662: A66. DOI: [10.1051/0004-6361/202141570](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141570).
- Yanny B, Rockosi C, Newberg H J, et al., 2009. SEGUE: A Spectroscopic Survey of 240,000 Stars with $g = 14-20$ [J/OL]. *The Astronomical Journal*, 137(5): 4377-4399. DOI: [10.1088/0004-6256/137/5/4377](https://doi.org/10.1088/0004-6256/137/5/4377).
- York D G, Adelman J, Anderson J E, Jr., et al., 2000. The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary[J/OL]. *The Astronomical Journal*, 120(3): 1579-1587. DOI: [10.1086/301513](https://doi.org/10.1086/301513).
- Zhong J, Chen L, Kouwenhoven M B N, et al., 2019. Substructure and halo population of Double Cluster h and χ Persei[J/OL]. *Astronomy and Astrophysics*, 624: A34. DOI: [10.1051/0004-6361/201834334](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834334).

附录 A 疏散星团样本

我们在表 A-1提供了我们挑选的主序清晰 130 个 OCSN 疏散星团样本。Name 对应Qin et al. (2023) 的疏散星团名称, (RA, DEC) 列是星团成员星在赤道坐标系下的平均二维投影位置, (pmRA, pmDE) 列是星团成员星在赤道坐标系下的平均自行, (s_pmRA, s_pmDE) 列对应的是成员星自行的标准差, (plx, s_plx) 列是星团成员星视差的平均值及其标准差, N 是成员星总数, (m-M, logt, E(B-V)) 列是等龄线拟合的距离模数、星团年龄、平均红化, N_use 列是我们最后使用的成员星数目。

表 A-1 挑选的疏散星团样本性质表。

Name	RA	DEC	pmRA	s_pmRA	pmDE	s_pmDE	plx	s_plx	N	m-M	logt	E(B-V)	N_use
	deg	deg	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas	mas		mag		mag	
OCSN 3	276.52	-20.48	7.31	0.87	-26.9	4.19	6.3	0.68	231	6.56	8.45	0.21	95
OCSN_5	286.21	-16.56	0.81	0.89	-11.69	1.42	4.12	0.34	149	7.48	7.9	0.19	95
OCSN_9	269.03	16.68	-1.45	0.4	-8.93	0.64	3.27	0.14	139	7.63	7.6	0.1	85
OCSN_10	275.41	14.82	-2.06	0.42	-7.64	0.57	2.73	0.16	88	8.49	7.45	0.19	62
OCSN_12	276.54	21.08	-1.45	0.47	-6.09	0.53	2.31	0.16	135	8.71	7.45	0.17	91
OCSN_16	283.56	32.18	1.18	0.4	-3.67	0.37	2.68	0.12	151	8.18	7.45	0.11	108
OCSN_18	282.05	34.27	0.75	0.41	-3.14	0.32	2.69	0.1	81	8.05	7.45	0.07	65
OCSN_19	294.06	29.63	1.09	0.5	-4.69	0.45	3.08	0.3	103	7.82	7.7	0.11	58
OCSN_20	303.01	27.06	1.94	0.21	-9.4	0.63	2.15	0.1	51	8.57	7.85	0.11	36
OCSN_21	292.6	42.78	3.55	1.16	-0.38	1.94	5.28	0.3	85	6.11	8.0	0.0	50
OCSN_22	293.75	48.39	3.3	0.42	1.86	0.55	3.27	0.27	130	7.63	7.7	0.07	60
OCSN_23	305.3	48.52	3.3	0.52	2.02	0.25	2.89	0.14	220	7.97	7.5	0.11	150
OCSN_24	313.69	48.17	12.11	4.51	2.54	1.89	6.1	0.58	245	6.05	8.05	0.01	92
OCSN_28	324.87	51.06	3.97	0.37	-2.09	0.21	2.33	0.13	154	8.43	7.45	0.11	95
OCSN_32	340.75	40.06	-1.99	0.37	-5.17	0.31	2.32	0.06	123	8.52	7.2	0.13	88
OCSN_33	335.34	56.57	16.18	1.51	4.89	0.72	4.11	0.14	162	7.04	8.0	0.1	105
OCSN_40	358.86	56.42	8.16	0.37	-3.32	0.34	2.49	0.09	113	8.27	7.25	0.14	69
OCSN_42	12.36	59.24	25.83	1.99	-5.19	4.0	5.44	0.23	121	6.3	7.8	0.04	82
OCSN_45	22.15	61.9	7.79	0.51	-4.1	1.1	2.64	0.13	161	8.58	7.65	0.23	98
OCSN_47	41.36	60.53	25.82	2.3	-16.84	2.89	5.64	0.31	78	6.32	7.8	0.07	59
OCSN_48	47.61	35.76	17.61	0.61	-28.59	1.79	5.02	0.23	107	6.79	7.8	0.07	74
OCSN_49	90.55	45.26	-3.97	0.73	-7.64	0.58	4.64	0.27	258	6.66	8.85	0.03	121
OCSN_56	82.65	2.51	-0.8	0.51	0.54	0.47	2.44	0.11	297	8.26	7.2	0.08	192
OCSN_57	82.1	1.71	-0.49	0.36	0.8	0.37	2.73	0.11	218	7.87	7.3	0.04	162
OCSN_61	84.14	-0.45	-1.08	0.25	-0.62	0.27	2.57	0.12	208	8.12	7.25	0.06	121
OCSN_65	83.88	-1.79	-1.34	0.41	0.93	0.3	2.37	0.06	160	8.6	7.15	0.19	116
OCSN_69	93.19	-4.86	-6.5	0.49	2.81	0.55	3.0	0.21	89	7.73	7.6	0.04	62
OCSN_74	81.19	-18.72	1.78	0.56	5.52	0.31	2.58	0.11	82	7.9	7.9	0.01	66
OCSN_75	87.89	-19.22	-7.26	0.56	1.34	0.36	3.06	0.21	85	7.71	7.9	0.03	49
OCSN_77	112.66	-12.82	-5.79	0.19	-0.99	0.25	1.88	0.07	121	8.97	8.0	0.13	101
OCSN_78	100.29	-19.48	-6.31	0.38	5.16	0.45	2.62	0.18	202	8.02	7.65	0.06	108
OCSN_80	107.96	-19.3	-8.23	0.46	3.76	0.28	2.44	0.15	73	8.38	7.5	0.13	60

续下页

表 A-1 挑选的疏散星团样本性质表

Name	RA	DEC	pmRA	s_pmRA	pmDE	s_pmDE	plx	s_plx	N	m-M	logt	E(B-V)	N_S
	deg	deg	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas	mas		mag		mag	
OCSN_81	91.48	-27.03	-6.74	0.55	0.41	0.78	3.19	0.16	74	7.62	8.65	0.04	31
OCSN_82	107.6	-33.77	-5.6	0.41	6.39	0.24	2.44	0.09	221	8.23	7.45	0.06	159
OCSN_83	120.34	-30.76	-8.94	0.42	5.52	0.35	2.03	0.1	200	8.79	7.45	0.1	148
OCSN_85	112.37	-42.72	-4.65	0.73	2.03	0.44	2.78	0.19	76	8.13	8.7	0.16	33
OCSN_86	138.66	-30.42	-20.13	2.02	15.97	1.02	3.84	0.21	74	7.52	7.9	0.15	66
OCSN_90	207.83	-63.52	-8.51	0.52	-5.31	0.42	2.23	0.04	139	8.7	8.0	0.16	93
OCSN_92	231.72	-35.96	-20.38	1.29	-23.75	0.67	7.26	0.31	83	5.76	7.3	0.02	50
OCSN_99	255.56	-30.54	-9.87	2.2	-49.0	2.14	7.34	0.31	107	5.69	8.15	0.04	53
OCSN_103	92.21	-2.08	0.13	0.27	-2.94	0.48	2.02	0.11	90	8.56	8.35	0.07	34
OCSN_104	110.3	3.81	-6.48	0.21	-5.05	0.43	2.13	0.1	195	8.35	7.95	0.01	138
OCSN_108	313.4	56.61	5.06	0.45	3.51	0.31	3.09	0.12	230	7.63	7.5	0.03	150
OCSN_109	76.0	8.17	0.91	0.42	-4.44	0.35	2.56	0.17	127	8.28	7.65	0.13	81
OCSN_113	301.06	30.69	3.97	0.75	-1.25	0.56	2.68	0.15	286	8.18	7.75	0.09	181
OCSN_114	113.68	-25.51	-7.76	0.44	5.72	0.31	2.14	0.11	127	8.49	7.45	0.09	105
OCSN_115	119.24	-43.49	-9.58	0.42	9.09	0.54	2.55	0.07	91	8.07	7.35	0.06	72
OCSN_117	302.74	33.43	5.01	0.44	-0.5	0.42	3.03	0.17	178	7.74	7.8	0.06	122
OCSN_125	233.57	-29.7	-6.84	1.45	-5.02	0.44	2.6	0.09	143	8.29	7.95	0.17	98
OCSN_128	81.95	-1.92	1.2	0.25	-1.24	0.19	2.79	0.07	264	8.03	7.0	0.09	170
OCSN_130	116.68	0.17	0.65	0.26	-3.97	0.25	3.38	0.13	130	7.58	7.9	0.09	104
OCSN_131	153.68	-55.01	-13.35	0.31	2.71	0.36	2.1	0.06	250	8.8	7.7	0.15	181
OCSN_133	288.35	36.34	0.92	0.32	1.23	0.27	2.52	0.04	72	8.11	8.05	0.08	60
OCSN_135	347.29	65.14	7.42	0.26	-1.72	0.32	2.65	0.07	185	8.3	7.25	0.19	127
OCSN_136	58.48	31.96	6.34	0.48	-9.81	0.54	3.54	0.14	207	7.72	7.25	0.25	147
OCSN_137	109.18	-46.3	-9.72	0.38	11.92	0.54	3.59	0.16	138	7.18	8.95	0.02	79
OCSN_138	160.87	-61.09	-15.36	0.36	2.52	0.35	2.5	0.08	299	8.42	7.75	0.19	183
OCSN_139	265.9	-46.83	9.77	1.16	-9.12	0.76	4.76	0.35	239	6.72	8.45	0.07	114
OCSN_144	104.21	-26.6	-5.85	0.42	6.07	0.29	2.52	0.12	291	8.07	7.65	0.03	125
OCSN_145	119.8	-45.8	-11.41	0.42	4.65	0.35	3.06	0.11	383	7.89	7.45	0.09	278
OCSN_146	123.42	-36.18	-7.14	0.25	7.18	0.42	2.26	0.11	292	8.43	7.25	0.07	211
OCSN_147	159.54	-59.14	-14.48	0.3	1.0	0.37	2.23	0.06	445	8.37	7.75	0.07	255
OCSN_148	222.19	-66.41	-7.44	0.43	-10.75	0.31	2.39	0.09	233	8.4	7.5	0.13	157
OCSN_149	83.22	41.94	-3.88	0.16	-1.7	0.14	1.96	0.07	168	8.86	8.35	0.13	97
OCSN_152	293.54	32.08	2.15	0.56	-1.5	0.38	2.3	0.16	94	8.64	7.7	0.13	67
OCSN_160	275.33	20.36	-0.78	0.64	-7.72	0.54	3.15	0.19	92	7.86	7.6	0.13	56
OCSN_163	104.96	-35.32	-12.14	1.16	8.29	1.0	4.4	0.27	250	6.95	7.55	0.06	182
OCSN_165	135.33	-55.3	-10.64	0.44	7.61	0.62	2.26	0.09	132	8.52	7.6	0.11	86
OCSN_166	116.3	-43.33	-10.16	0.6	-3.11	0.93	3.75	0.32	86	7.63	8.0	0.18	50
OCSN_167	126.22	-49.07	-10.95	0.65	9.81	0.51	2.66	0.14	142	8.11	7.55	0.08	98
OCSN_168	129.58	-51.58	-12.95	0.49	9.91	0.38	2.87	0.09	192	7.88	7.6	0.09	143
OCSN_169	163.16	-56.45	-17.99	0.57	6.31	0.67	1.99	0.09	98	8.92	7.95	0.13	57
OCSN_175	130.41	-46.45	-10.61	0.62	1.95	0.36	2.43	0.14	127	8.27	7.55	0.09	92
OCSN_177	185.87	-63.37	-37.35	1.36	-11.89	2.43	9.34	0.25	201	5.14	7.15	0.07	125
OCSN_178	191.75	-57.67	-34.7	1.86	-14.52	2.26	9.03	0.36	253	5.33	7.3	0.1	162
OCSN_179	206.64	-59.47	-13.76	0.28	-6.11	0.31	2.01	0.04	63	9.19	8.25	0.26	32
OCSN_183	132.85	-47.07	-12.48	0.61	10.31	0.67	2.0	0.11	204	8.64	7.95	0.06	86
OCSN_190	109.52	-36.88	-10.07	0.37	6.24	0.28	3.35	0.11	271	7.64	7.65	0.1	180
OCSN_191	110.91	-31.99	-8.06	0.23	4.73	0.23	2.57	0.12	230	8.18	7.5	0.07	168
OCSN_199	119.68	-49.21	-5.39	0.2	8.26	0.2	2.48	0.09	285	8.37	7.1	0.12	185

续下页

表 A-1 挑选的疏散星团样本性质表

Name	RA	DEC	pmRA	s_pmRA	pmDE	s_pmDE	plx	s_plx	N	m-M	logt	E(B-V)	N_S
	deg	deg	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas	mas		mag		mag	
OCSN_200	117.41	-46.39	-4.64	0.27	8.97	0.41	2.54	0.08	558	8.29	7.05	0.13	387
OCSN_201	126.0	-41.1	-7.1	0.25	10.02	0.31	2.93	0.1	288	7.69	7.0	0.03	201
OCSN_204	130.17	-53.13	-24.77	0.91	23.41	0.98	6.63	0.15	227	6.03	7.6	0.06	179
OCSN_205	160.77	-64.37	-17.76	1.32	10.61	1.25	6.59	0.19	415	6.07	7.45	0.06	317
OCSN_206	266.47	5.7	-0.89	0.25	-8.54	0.24	2.88	0.11	157	8.33	7.45	0.23	110
OCSN_207	279.67	5.43	1.27	0.22	-4.97	0.28	2.1	0.09	483	8.89	8.95	0.19	215
OCSN_208	11.97	50.3	7.39	0.18	-3.1	0.24	2.18	0.06	177	8.72	7.9	0.14	142
OCSN_209	95.35	-16.1	-5.44	0.53	5.13	0.43	2.81	0.19	539	8.02	7.6	0.1	353
OCSN_210	106.57	-37.65	-9.7	0.32	7.04	0.34	3.59	0.1	241	7.64	7.7	0.17	143
OCSN_211	103.75	-5.94	-7.19	0.51	-2.4	0.38	3.49	0.21	447	7.4	7.35	0.07	338
OCSN_212	249.9	-39.47	-11.94	0.84	-21.4	0.7	5.69	0.19	589	6.36	7.2	0.1	391
OCSN_217	276.58	-50.71	4.06	1.34	-21.71	1.48	2.23	0.07	578	8.61	8.9	0.13	260
OCSN_218	51.47	48.92	22.89	1.63	-25.55	2.08	5.78	0.32	886	6.39	7.8	0.09	557
OCSN_219	56.7	24.08	19.95	1.22	-45.35	1.81	7.36	0.28	1193	5.83	8.0	0.08	921
OCSN_220	66.77	16.38	98.32	26.66	-26.49	15.6	20.8	2.72	540	3.4	8.85	0.04	243
OCSN_222	40.55	42.73	0.66	0.24	-5.79	0.27	2.01	0.08	614	8.84	7.95	0.13	461
OCSN_227	96.98	-4.79	-4.71	0.24	-1.77	0.22	3.14	0.09	193	7.8	7.35	0.1	149
OCSN_229	114.16	-14.49	-7.04	0.29	1.03	0.26	2.1	0.06	557	8.41	8.2	0.07	386
OCSN_230	115.65	-38.29	-20.93	1.27	15.12	1.13	5.16	0.19	383	6.4	7.75	0.01	274
OCSN_231	116.23	-38.01	-9.62	0.32	4.84	0.21	2.74	0.08	278	8.22	7.45	0.14	217
OCSN_232	119.47	-60.79	-4.64	0.5	11.24	0.41	2.43	0.06	1655	8.3	8.35	0.09	473
OCSN_233	122.53	-49.2	-8.58	0.26	4.34	0.24	2.58	0.06	308	7.9	7.6	0.04	226
OCSN_234	130.06	19.66	-35.89	1.45	-12.9	1.01	5.41	0.14	762	6.27	8.85	0.01	345
OCSN_235	155.31	-51.83	-14.78	0.29	-0.6	0.27	2.08	0.06	108	8.58	7.45	0.07	79
OCSN_236	166.39	-58.69	-10.41	0.38	5.24	0.42	2.09	0.06	1986	8.6	8.45	0.07	830
OCSN_238	256.17	-37.95	-1.9	0.27	-4.06	0.24	1.88	0.08	556	9.1	8.35	0.2	270
OCSN_240	268.45	-34.82	3.06	0.49	-5.38	0.48	3.58	0.11	1035	7.55	8.3	0.12	338
OCSN_242	320.45	50.82	7.42	0.33	2.83	0.31	2.73	0.05	171	8.3	7.7	0.13	113
OCSN_243	322.9	48.4	-7.5	0.3	-19.8	0.38	3.38	0.06	142	7.7	8.05	0.1	102
OCSN_250	69.77	71.29	3.16	2.5	-20.97	1.07	5.68	0.22	144	6.4	8.05	0.07	114
OCSN_251	137.04	-59.36	-16.31	2.48	13.38	2.32	7.45	0.23	317	5.84	7.55	0.08	225
OCSN_252	139.35	-43.5	-26.0	4.12	13.4	0.7	5.71	0.75	228	6.48	7.7	0.07	168
OCSN_254	122.4	-47.36	-6.46	0.28	9.62	0.34	2.89	0.09	474	7.81	7.05	0.08	374
OCSN_256	303.58	45.58	3.56	0.38	1.58	0.25	2.97	0.1	204	7.72	7.6	0.03	149
OCSN_259	307.4	40.0	5.95	0.3	2.15	0.24	2.83	0.06	218	7.97	7.9	0.08	181
OCSN_263	283.6	36.87	1.15	0.2	-3.07	0.23	2.8	0.05	148	7.61	7.65	0.05	107
OCSN_264	294.11	25.13	6.0	0.35	0.16	0.48	2.45	0.08	172	8.0	8.8	0.08	97
OCSN_266	84.88	37.78	-3.16	0.23	-0.43	0.21	2.8	0.09	168	8.11	7.95	0.16	122
OCSN_267	353.99	52.66	8.53	0.22	-1.93	0.18	2.29	0.05	119	8.55	8.0	0.13	68
OCSN_275	294.14	35.74	-0.63	0.19	-2.47	0.21	2.02	0.06	170	8.7	7.9	0.1	130
OCSN_276	131.93	-42.5	-12.63	0.89	6.52	0.42	2.3	0.13	1162	8.24	7.85	0.02	241
OCSN_278	287.84	56.86	-2.5	0.37	3.6	0.51	3.06	0.08	122	7.55	7.95	0.04	98
OCSN_288	279.35	-14.21	-1.79	0.35	-9.34	0.63	3.54	0.17	230	7.97	8.6	0.3	59
OCSN_306	92.61	15.01	5.71	1.38	-16.77	1.98	4.7	0.47	370	6.93	7.55	0.08	283
OCSN_310	88.49	-7.6	0.25	0.29	-0.54	0.18	3.31	0.09	100	7.45	7.3	0.07	81
OCSN_314	130.94	-58.73	-8.87	0.55	2.61	0.61	3.05	0.11	215	7.87	7.85	0.09	146
OCSN_315	158.39	-47.08	-22.57	0.57	6.45	0.39	3.07	0.12	46	7.64	7.9	0.07	37
OCSN_317	206.08	-44.89	-25.91	2.48	-19.22	1.49	7.46	0.41	485	5.9	7.35	0.13	311

续下页

表 A-1 挑选的疏散星团样本性质表

Name	RA	DEC	pmRA	s_pmRA	pmDE	s_pmDE	plx	s_plx	N	m-M	logt	E(B-V)	N_S
	deg	deg	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas yr ⁻¹	mas	mas		mag		mag	
OCSN_319	254.62	-68.24	-13.24	1.3	-11.6	1.42	4.29	0.34	274	6.71	8.3	0.02	111
OCSN_320	227.95	-44.35	-20.4	0.74	-21.83	0.65	6.79	0.17	142	5.86	7.2	0.02	112

附录 B 成员星理论大气参数表

我们在获取成员星理论大气参数的同时也基于观测误差估计了理论大气参数的不确定性，具体做法是：假设恒星的观测颜色 BP-RP 服从高斯分布 $N(\mu, \sigma^2)$ ，其中均值 μ 为观测颜色值， σ^2 是来自 BPmag 和 RPmag 的观测误差平方和 ($\sigma^2 = \sigma_{\text{BPmag}}^2 + \sigma_{\text{RPmag}}^2$)。类似地，假设观测的 G 星等服从 $N(G_{\text{mag}}, \sigma_{G_{\text{mag}}}^2)$ 。随后，对颜色和星等进行 50 次随机采样，并利用理论等龄线计算抽出的样本对应的理论 T_{eff} 和 $\log g$ 参数。最后将 50 组参数的标准差作为理论大气参数的不确定性。值得注意的是，我们的不确定性是存在低估的，没有考虑疏散星团年龄以及恒星演化模型带来的不确定性。

表 B-1 展示了我们样本中部分成员星的信息，完整的表格可在网络下载。Name 列代表成员星所属星团，GaiaDR3 列是 *Gaia* DR3 的 ID (unique source identifier), (Gmag, Gmag_err), (BPmag, BPmag_err), (RPmag, RPmag_err) 列分别是 G, BP, RP 波段的观测星等以及观测误差。($T_{\text{eff_iso}}$, $e_{T_{\text{eff_iso}}}$), ($\log g_{\text{iso}}$, $e_{\log g_{\text{iso}}}$) 列分别是理论有效温度与表面重力值以及不确定性。

表 B-1 成员星理论大气参数表

Name	GaiaDR3	RA	DEC	Gmag	Gmag_err	BPmag	BPmag_err	RPmag	RPmag_err	$T_{\text{eff_iso}}$	$e_{T_{\text{eff_iso}}}$	$\log g_{\text{iso}}$	$e_{\log g_{\text{iso}}}$
		deg	deg	mag	mag	mag	mag	mag	mag	K	K	dex	dex
OCSN_259 2067222155330490240		306.92	39.78	12.18152	0.00283	12.47881	0.00357	11.7239	0.00408	6225.94	2.87	4.45037	0.00065
OCSN_259 2067829463705720704		307.96	41.39	12.58524	0.00294	12.94218	0.00453	12.05887	0.00472	5963.13	2.92	4.5058	0.00063
OCSN_259 2067213943352872192		306.93	39.48	14.8277	0.00295	15.48773	0.00654	14.04104	0.00457	4546.85	5.18	4.65011	0.00088
OCSN_259 2067153023536312192		306.64	38.79	12.78357	0.00336	13.15081	0.00688	12.24914	0.00656	5841.69	3.77	4.52975	0.00067
OCSN_259 2067765241055864704		308.41	41.04	14.74105	0.00329	15.39053	0.00803	13.94887	0.00667	4606.09	6.9	4.66039	0.00073
OCSN_259 2067329288993662848		307.58	39.91	13.79216	0.00348	14.26745	0.0082	13.14946	0.0069	5196.26	4.8	4.6236	0.00061
OCSN_259 2067402509596666240		307.38	40.45	13.73187	0.00357	14.21802	0.00881	13.07645	0.00698	5228.33	5.5	4.61955	0.0007
OCSN_259 2067421093916533760		307.06	40.6	14.89299	0.00381	15.57806	0.01048	14.07624	0.0079	4491.51	6.99	4.64306	0.00066
OCSN_259 2067343754443994112		307.8	40.28	16.73718	0.00296	17.95761	0.01173	15.65671	0.00529	3540.34	3.75	4.65387	0.00081
OCSN_259 2064271306637530368		307.67	39.3	16.77509	0.00289	17.9581	0.0118	15.6969	0.00486	3533.27	3.62	4.6554	0.00078
OCSN_259 2058106860340035456		306.07	38.1	17.08878	0.00291	18.39787	0.01236	15.96707	0.00536	3434.79	3.33	4.67345	0.00081
OCSN_259 2064076658722769664		307.21	38.3	16.9921	0.00302	18.25085	0.01256	15.87244	0.00531	3461.58	2.81	4.66695	0.00068
OCSN_259 2064838104881254144		308.95	40.92	16.7477	0.00293	17.9356	0.0132	15.67054	0.00489	3540.96	4.21	4.65373	0.00091
OCSN_259 2064123353606640512		307.47	38.86	17.1917	0.00289	18.49479	0.01374	16.07692	0.00528	3411.69	3.36	4.67905	0.00079
OCSN_259 2064053736476818304		308.57	39.33	16.62552	0.00292	17.76466	0.01404	15.55561	0.00547	3584.87	4.75	4.64652	0.00073
OCSN_259 2067445111376229504		306.13	39.8	16.75598	0.00292	17.89776	0.0147	15.69374	0.00541	3544.65	5.46	4.65293	0.00111
OCSN_259 2064192382322785792		307.18	39.19	16.47159	0.00305	17.55049	0.01531	15.428	0.00681	3645.33	7.27	4.63795	0.00073
OCSN_259 2067220368624348160		306.82	39.73	16.32433	0.00399	17.38884	0.01548	15.29645	0.00874	3713.64	7.07	4.63155	0.00066
OCSN_259 2067315819976414336		307.02	39.84	16.82848	0.00284	17.99567	0.0157	15.75892	0.00492	3520.48	5.24	4.6581	0.00086
OCSN_259 2064708912265582848		308.11	40.18	17.29715	0.00295	18.64249	0.01701	16.14921	0.00527	3380.3	4.64	4.68615	0.00105
OCSN_259 2064793712099600896		309.41	40.93	17.14888	0.00293	18.4902	0.01727	16.01138	0.0052	3416.99	4.14	4.67777	0.00099
OCSN_259 2064263472616918016		308.28	39.64	17.18233	0.00289	18.56245	0.01728	16.05505	0.0056	3406.31	3.92	4.68027	0.00089
OCSN_259 2067719890500296320		307.87	40.38	17.14096	0.00306	18.48772	0.01774	16.01862	0.00531	3419.61	3.74	4.67714	0.00091
OCSN_259 2067266651191897088		306.73	39.66	17.6249	0.00295	19.08888	0.01804	16.452	0.00511	3296.4	4.44	4.69897	0.00062
OCSN_259 2067746381857915392		307.88	40.79	17.21727	0.00291	18.54912	0.01837	16.08838	0.00585	3402.09	4.26	4.68122	0.00096
OCSN_259 2062294346080192256		304.71	40.47	17.54598	0.00299	18.87314	0.01922	16.37372	0.00598	3324.06	4.44	4.69496	0.00064
OCSN_259 2067427317328022784		307.37	40.76	17.29044	0.00293	18.60229	0.01995	16.15755	0.00538	3385.92	5.07	4.68488	0.00114
OCSN_259 2064090059020577408		307.31	38.63	17.48223	0.00293	18.88568	0.02123	16.3245	0.0062	3333.67	4.5	4.69357	0.00065
OCSN_259 2068923683936794368		306.31	42.59	17.27953	0.00296	18.69959	0.0213	16.10868	0.00504	3376.08	4.43	4.6871	0.00095
OCSN_259 2068433778486377600		305.93	41.43	17.53123	0.00296	18.99675	0.02216	16.35717	0.00648	3317.1	4.55	4.69597	0.00066

续下页

表 B-1 成员星理论大气参数表

Name	GaiaDR3	RA	DEC	Gmag	Gmag_err	BPmag	BPmag_err	RPmag	RPmag_err	$T_{\text{eff_iso}}$	$e_{\text{eff_iso}}$	$\log g_{\text{iso}}$	$e_{\log g_{\text{iso}}}$
		deg	deg	mag	mag	mag	mag	mag	mag	K	K	dex	dex
OCSN_259	2064296384950017024	307.77	39.62	17.51242	0.00289	18.87632	0.02355	16.36018	0.00629	3330.35	4.77	4.69405	0.00069
OCSN_259	2058120466796559360	306.76	38.25	17.56151	0.00298	19.01162	0.02383	16.39383	0.00591	3311.97	4.97	4.69671	0.00072
OCSN_259	2058091806474200576	306.39	38.05	17.37606	0.00302	18.77987	0.02403	16.23632	0.00599	3358.68	5.34	4.68994	0.00077
OCSN_259	2067482670867887872	306.36	40.2	17.56792	0.00294	19.07394	0.02465	16.36327	0.00643	3303.68	5.68	4.69791	0.00082
OCSN_259	2067591763036462336	306.72	40.76	17.48214	0.00305	18.88488	0.03053	16.31879	0.00718	3333.34	7.03	4.69362	0.00102
OCSN_259	2067351107427704960	307.41	40.24	17.43844	0.00292	18.7929	0.03139	16.2877	0.00678	3347.58	6.82	4.69155	0.00099
OCSN_259	2064319955730567552	307.78	39.68	17.59515	0.00296	19.06611	0.03256	16.42172	0.00682	3302.53	8.31	4.69808	0.0012
OCSN_259	2067858527744988672	308.75	41.18	17.47421	0.00301	18.91082	0.03271	16.33093	0.00818	3334.16	7.79	4.6935	0.00113
OCSN_259	2061170439034938624	306.2	39.01	17.83141	0.00302	19.24387	0.03378	16.66199	0.00659	3257.38	6.86	4.70298	0.00064
OCSN_259	2067779775227102336	308.43	41.21	17.70621	0.00301	19.21375	0.03398	16.49877	0.00815	3273.7	8.66	4.70146	0.00082
OCSN_259	2067221463837078784	306.97	39.78	17.84359	0.00303	19.33179	0.03591	16.63178	0.00911	3246.59	9.13	4.70399	0.00085
OCSN_259	2064626100999917440	308.72	39.7	17.66816	0.00304	19.0838	0.0364	16.49168	0.00748	3290.1	8.24	4.69988	0.00103

•
•
•

致 谢

时光飞逝，硕士阶段学习生活已经来到尾声，从 19 年的实习到 21 年以硕士身份入学直至毕业，在上海天文台的这段求学经历对我来说是炙热的，是难以忘怀的。能在星团组进行科研学习，我深感荣幸也倍感幸福，感恩一路上给予我帮助的所有人，有你们的帮助与陪伴，才拼凑出我这段意义非凡的旅程。

桃李不言，衷心感谢我的两位导师陈力研究员与钟靖研究员，两位老师不仅学识渊博、工作严谨，对待学生更是春风化雨般耐心包容。在工作上遇到困难，每次找老师们讨论，两位老师都会耐心的回应并且提出中肯的建议，在讨论中我收获颇丰，不仅是问题得以解决，更是让我学习到了看待问题的思路。当然，印象最为深刻收获最为丰富的来自于我们小组别具特色的小组会，老师们提倡大家畅所欲言，可以毫无顾忌地发表自己的看法。组会上，陈老师也会给大家分享自己关于一些科学问题的思考与总结，这也是对我们的言传身教。当我理解不到老师所表达的意思的时候，钟老师便会耐心的在屏幕上写出详细步骤帮助我理解。两位老师不仅在科研上对我们倾囊相授，而且在生活上也提倡劳逸结合。在学习之余，老师们也会带领我们感受大自然的美丽风景，崇明之旅、腾冲“拉练”、东湖骑行、西湖漫步等等，不仅为我们的生活增添了色彩，也让我们的体能向老师们靠近！很幸运也很感恩能够成为两位老师的学生，在两位老师带领下走的每一步，不管是学习上还是生活上，对我来说都受益颇多，两位老师对待工作、生活的态度更是我学习的榜样。

感谢课题组的所有老师，侯金良研究员、邵正义研究员、沈世银研究员、常瑞香研究员、赵东海老师、富坚老师、李璐师姐对我工作的指导与启发。每周大组会上激烈的讨论，老师同学们思维的碰撞，让我受益匪浅。年度交换礼物活动，也让我们充满欢乐、倍感温馨。感谢课题组的所有同学，胡国真、钟文心、潘翠云、卢家风、曾琪、赵倩文、陈宓、叶人豪等对我的帮助，大家一起学习、聚餐、小酌、聊天总是充满欢笑，一起为争取搬办公室的利益的经历也值得回忆。感谢王龙老师、吴开师兄对我在数值模拟方面的指导。

特别感谢小组成员秦松梅、蒋悦悦、刘桂梅、李春燕、单星美、张茜、白乐娅对我的帮助与照顾。感谢秦松梅对我工作上的帮助以及向我提供的非常多的中肯的意见。感谢蒋悦悦从国科大以来对我的帮助与支持。感谢刘桂梅、李春燕对我工作的帮助。感谢龙琳、林如秋对我的帮助。我们在 15 楼一起做饭、在 2 楼一起喝酒的日子，都是我珍贵的记忆。

此外，借此机会感谢家人对我的支持，一路走来，无条件支持我的所有决定，你们都是我坚强的后盾，感谢你们。感谢我的女朋友姣姣对我的陪伴与支持，在我低谷时给予我的鼓励。感谢王康的陪伴，相识十几年，足以化友情为亲情。

在上海天文台求学的日子，得遇良师，遇益友，与两位导师、各位同门相处的点滴都是我珍贵的回忆，每每想起都让我心中一暖，热泪盈眶。再次感谢一路

上给予我帮助的所有人。

2025 年 4 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历：

2017 年 9 月——2021 年 6 月，在西华师范大学物理与空间科学学院获得学士学位。

2021 年 9 月——2025 年 6 月，在中国科学院上海天文台攻读硕士学位。

已发表（或正式接受）的学术论文：

- (1) Selected Open Cluster Sample for Validating Atmospheric Parameters: Application to Gaia and Other Surveys, **Tong Tang**, Songmei Qin, Jing Zhong, Yueyue Jiang, and Li Chen. A&A, 已接受
- (2) Hunting for Neighboring Open Clusters with Gaia DR3: 101 New Open Clusters within 500 pc, Songmei Qin, Jing Zhong, **Tong Tang**, and Li Chen, 2023, ApJS, 265, 12.
- (3) On the Determination of Stellar Mass and Binary Fraction of Open Clusters within 500 pc from the Sun, Yueyue Jiang, Jing Zhong, Songmei Qin, **Tong Tang**, Li Chen, and Jinliang Hou. 2024, ApJ, 971, 71.
- (4) Unveiling the binary nature of NGC 2323, Songmei Qin, Jing Zhong, **Tong Tang**, Yueyue Jiang, Long Wang, Kai Wu, Friedrich Anders, Lola Balaguer-Núñez, Guimei Liu, Chunyan Li, Jinliang Hou, and Li Chen. A&A, 2025, 693, A317.

参加的研究项目及获奖情况：

- (1) 中国科学院大学 2022-2023 年度三好学生

