

老年疏散星团的金属丰度及银盘金属丰度梯度演化研究*

张文粦^{1,2†} 常瑞香^{1‡} 张茜^{1,2,3}

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站 长春 130117)

摘要 疏散星团是探究银河系结构与演化的良好示踪体, 一直以来颇受关注. 之前关于疏散星团的研究中, 仅有一小部分疏散星团有金属丰度参数, 而且, 金属丰度的测量, 是基于不同质量的观测数据, 采用了不同的方法. 收集了一个年龄大于2 Gyr的老年疏散星团样本, 通过整理这些星团成员星的金属丰度数据, 一方面, 以星团NGC 2682为例, 对比了不同光谱巡天项目给出的星团成员星金属丰度的系统差异; 另一方面, 计算了星团成员星金属丰度的平均值和中位值, 作为该疏散星团的金属丰度推荐值. 此外, 还利用该样本探究了银盘径向金属丰度梯度随时间的演化, 结果表明, 早期银盘有着更加陡峭的径向金属丰度梯度, 随着演化时间的增加, 银盘径向金属丰度梯度逐渐趋于平缓, 为银盘化学演化模型提供了更加严格的观测约束.

关键词 银河系: 疏散星团, 银河系: 丰度, 银河系: 银盘, 银河系: 演化

中图分类号: P154; **文献标识码**: A

1 引言

银盘金属丰度梯度及其演化研究, 一直以来都是银河系乃至星系形成和演化研究的热点和难点之一.

早在上世纪80年代, Shaver等^[1]就通过分析HII区的金属丰度的观测结果, 发现银盘存在负的金属丰度梯度, 即: 随着银心距的增加, 星际介质的金属丰度逐渐减少. 关于现今星际介质的丰度梯度研究, 示踪体可以选用HII区、早型恒星、年轻疏散星团等^[2-3], 不同示踪体给出的结果也比较一致. 例如, Mollá等^[4]收集了之前研究中不同示踪体的金属丰度观测数据, 并对不同来源的同一示踪体

进行统一拟合, 最终给出了不同示踪体得到的银盘径向金属丰度梯度. 其中以HII区为示踪体得到的银盘径向氧丰度梯度为 (-0.048 ± 0.005) dex/kpc, 而通过造父变星观测数据得到的氧丰度梯度为 (-0.0498 ± 0.0516) dex/kpc^[4]. 但是, 在丰度梯度如何随时间演化这个问题上, 早期工作得到的结果差别很大^[5], 还有待进一步研究. 一般认为, 疏散星团的金属丰度, 反映的是星团诞生时刻诞生区域处星际介质的金属丰度, 而且, 疏散星团的银心距跨度和年龄跨度都较大, 因此, 疏散星团可以作为研究银盘金属丰度梯度随时间演化的重要示踪体^[6-7].

金属丰度是疏散星团的重要基本参数之一. 遗

2021-08-16收到原稿, 2021-10-18收到修改稿

*国家重点研发计划(2019YFA0405501)资助

†zhangwenjing18@mails.ucas.ac.cn

‡crx@shao.ac.cn

憾的是, 仅有一小部分疏散星团有金属丰度的测量, 而且, 该参数基于不同质量的观测数据, 采用了不同的方法. Netopil等^[8]整理了自1990年以来有关疏散星团金属丰度研究的文献, 其中金属丰度的测量分别是基于测光数据、高质量光谱数据、低质量光谱数据. 他们用统一的方法, 重新计算了每个星团成员星的金属丰度分布函数, 最终得到172个疏散星团的金属丰度. 由Netopil等^[8]给出的确定疏散星团金属丰度的方法很值得借鉴和学习.

近几年来, 随着Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics)、APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment)、LAMOST (the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope)等大型巡天项目数据的释放, 使疏散星团基本参数在测定的数量和质量上, 都有了飞跃性的提高. 特别是海量的光谱巡天数据为更多的疏散星团的成员星提供了更加可靠的金属丰度数据. 例如, 基于APOGEE巡天数据, OCCAM (Open Cluster Chemical Abundances and Mapping)项目为数百个疏散星团建立了基于统一数据的包含星团年龄、距离、红化和金属丰度的高质量星表. GALAH (The GALactic Archaeology with HERMES)巡天以矮星为主要观测对象, 获得了大约一百万颗恒星的精确径向速度, 部分高信噪比恒星甚至可以求得15种以上不同化学元素的丰度. Spina等^[9]结合Gaia-DR2 (Gaia Data Release 2)的成员星概率判定, 基于GALAH巡天数据测定了134个疏散星团的金属丰度. LAMOST光谱巡天则是提供了大量恒星的低分辨率光谱数据. Zhong等^[10]将该LAMOST DR5的恒星参数星表与Cantat-Gaudin等^[11]确定的星团成员星交叉匹配, 得到了295个疏散星团的视向速度和金属丰度, 并以疏散星团为示踪体, 研究了银盘金属丰度梯度及其随时间演化. 遗憾的是, 由于老年疏散星团的数目较少, 年龄大于2 Gyr的只有23个, 很难严格约束银盘丰度梯度随时间的演化.

简而言之, 目前已经发表的疏散星团金属丰度参数有几种不同的来源, 并且基于不同分辨率、不同信噪比的光谱数据或者基于不同测光系统的测光数据. 因此, 列出的金属丰度值还不能被整合为同质数据集, 需要以一致的方法对它们进行校订,

尽可能地降低可能存在的系统偏差, 得到较为可靠的金属丰度数据.

本文的研究目标之一是确定老年疏散星团的金属丰度参数. 我们收集了一个年龄大于2 Gyr的老年疏散星团样本, 通过整理和比较不同巡天项目给出的星团成员星的金属丰度测量值, 最终给出疏散星团的金属丰度推荐值. 此外, 还利用该样本探究了银盘金属丰度梯度随时间的演化.

本文安排如下: 第2部分介绍样本的数据来源和收集数据的方法; 第3部分是主要结果, 比较了不同巡天项目给出的同一星团成员星的金属丰度分布函数, 最终得到我们推荐的老年疏散星团的金属丰度数据. 不仅如此, 我们利用该样本为示踪体, 统计研究了银盘在不同年龄处的金属丰度梯度, 并将其与由年轻疏散星团样本得到的金属丰度梯度对比, 了解了银盘金属丰度梯度的演化历史; 第4部分是结论.

2 数据

Cantat-Gaudin等^[11]研究了银河系中一千多个疏散星团的成员星概率. 他们根据Gaia-DR2的数据, 对恒星采用了成员星分配代码UPMASK (Unsupervised Photometric Membership Assignment In Stellar Clusters). 最终为401448颗恒星提供了范围为0.1–1的成员星概率. 我们将这个星表作为筛选成员星的最基础依据.

Cantat-Gaudin等^[12]根据Gaia-DR2的数据, 估算了1867个疏散星团的基本参数, 包括年龄和距离信息. 通过初步筛选, 我们从这个星表中得到了111个年龄大于2 Gyr的老年疏散星团. 接下来我们将这111个疏散星团与有金属丰度的疏散星团的星表匹配, 最终得到45个有金属丰度数据的老年疏散星团, 其中金属丰度的主要来源是APOGEE、GALAH、LAMOST等大型光谱巡天以及Netopil等^[8]在2016年收集的疏散星团样本. 表1给出了这45个疏散星团的基本信息, 数据均取自Cantat-Gaudin等^[12]在2019年发布的星表. 其中, 第1列是我们样本中星团的编号, 第2列是疏散星团名称, 第3、4列中列出了对应星团的位置信息, 第5列是星团年龄, 第6列是银心距.

表 1 老年疏散星团的主要参量
Table 1 The main parameters of old open clusters

OC no.	Cluster name	RA	DEC	Age ^[12] /Gyr	R_{gc} ^[12] /kpc	OC no.	Cluster name	RA	DEC	Age ^[12] /Gyr	R_{gc} ^[12] /kpc
1	Berkeley 12	71.1	42.691	2.0	12.49	24	FSR 1083	110.503	3.557	2.0	12.66
2	Berkeley 14	74.935	43.488	2.7	13.13	25	FSR 1113	107.3	-1.502	2.8	11.59
3	Berkeley 17	80.13	30.574	7.2	11.67	26	FSR 0866	103.823	29.745	2.1	9.55
4	Berkeley 18	80.531	45.442	4.4	13.81	27	King 2	12.741	58.188	4.1	13.26
5	Berkeley 19	81.014	29.575	2.2	14.89	28	LP 5	156.138	-72.51	2.7	7.84
6	Berkeley 20	83.152	0.185	4.8	16.32	29	Melotte 66	111.573	-47.585	4.3	10.28
7	Berkeley 21	87.93	21.812	2.1	14.73	30	NGC 188	46.486	44.383	7.1	9.29
8	Berkeley 25	100.317	-16.487	2.5	13.81	31	NGC 1193	11.798	85.244	5.1	12.71
9	Berkeley 29	103.268	16.93	3.1	20.58	32	NGC 2112	88.452	0.403	2.1	9.36
10	Berkeley 31	104.406	8.285	2.8	15.09	33	NGC 2204	93.882	-18.67	2.1	11.34
11	Berkeley 32	104.53	6.433	4.9	11.14	34	NGC 2243	97.395	-31.282	4.4	10.58
12	Berkeley 39	116.702	-4.665	5.6	11.29	35	NGC 2682	132.846	11.814	4.3	8.96
13	Berkeley 66	46.03	58.731	3.1	12.35	36	NGC 3680	171.392	-43.24	2.2	8.10
14	Berkeley 68	71.053	42.134	2.1	11.60	37	NGC 6253	254.778	-52.712	3.2	6.88
15	Berkeley 70	81.457	41.951	2.2	13.20	38	NGC 6791	290.221	37.778	6.3	7.94
16	Berkeley 78	110.913	5.37	3.9	11.99	39	NGC 6819	295.327	40.19	2.2	8.03
17	Berkeley 98	340.665	52.407	2.5	9.79	40	NGC 7142	326.29	65.782	3.1	9.26
18	Collinder 261	189.519	-68.377	6.3	7.26	41	NGC 7762	357.472	68.035	2.0	8.78
19	Czernik 21	81.671	36.013	2.6	12.35	42	Ruprecht 147	289.087	-16.333	3.0	8.05
20	Czernik 24	88.848	20.876	2.7	12.29	43	Skiff J0507+30.8	76.78	30.846	2.5	14.38
21	Czernik 30	112.796	-9.945	2.9	13.78	44	Teutsch 11	96.352	13.878	2.0	14.48
22	FSR 0278	307.761	51.021	2.2	8.45	45	Trumpler 5	99.126	9.466	4.3	11.21
23	FSR 0496	6.656	64.01	2.0	9.14						

Notes: Age and galactic distance of 45 open clusters in the sample. The first column is the uniform number of star clusters in our sample; the second column contains the names of open clusters; the third and fourth columns list the location information of the corresponding open clusters; the fifth column is the open clusters age; the sixth column is the galactic distance. The source of reference is the work of Ref. [12].

关于样本星团成员星的金属丰度数据, 首先, 基于APOGEE巡天数据, 我们重点参考了Donor等^[13]的OCCAM项目, 并从中收集了18个老年疏散星团及其成员星的金属丰度; 其次, 根据Spina等^[9]的工作, 我们将GALAH光谱巡天的高分辨率光谱数据和Gaia-DR2的数据进行交叉匹配, 并从中收集了10个年龄在2 Gyr以上的疏散星团的金属丰度及其成员星数据. 另外, OCCASO (The Open Clus-

ters Chemical Abundances from Spanish Observatories survey)项目根据高分辨率($R \geq 65000$)光谱数据, 分析了18个疏散星团的金属丰度^[14], 我们从这个项目中收集了6个老年疏散星团的数据. 基于Gaia-ESO (European Southern Observatory)巡天项目, 我们参考了Magrini等^[15]的数据, 并从中收集到2个基于高分辨率($R = 47000$)光谱信息的疏散星团的金属丰度.

以上几项工作中所收集到的数据全部是来自近几年的大型巡天项目. 而对于2016年以前的疏散星团数据, 我们则是直接参考了文献[8]在2016年发表的疏散星团样本中的高分辨率($R \geq 25000$)光谱数据. 在这个大样本中, 我们筛选到了17个年龄在2 Gyr以上的老年疏散星团, 根据其参考来源与Gaia-DR2的交叉匹配, 进而又得到了这17个疏散星团成员星的金属丰度数据.

除了上述高分辨率光谱得到的疏散星团金属丰度外, 我们还参考了Zhong等^[10]的工作, 他们将LAMOST DR5的低分辨率光谱数据与Gaia-DR2进行匹配, 最终得到了一个基于LAMOST光谱巡天的疏散星团的大样本. 我们在其中选择出了23个老年疏散星团成员星的金属丰度, 并计算了其平均值.

接下来, 对于收集到的成员星数据在保证成员星数量的前提下, 我们对成员星进行了筛选. 首先, 根据Cantat-Gaudin等^[11]的成员星资格判定, 剔除了成员星概率小于0.7的恒星. 其次, 根据Heiter等^[16]的工作对成员星的有效温度 T_{eff} 和表面重力 $\lg g$ 给出了限制条件, 以剔除快速旋转的热矮星或具有化学特性的恒星. 我们在筛选样本星团成员星的过程中, 同样采用了Heiter等^[16]的判据, 即: 只选取了 $4400 \text{ K} < T_{\text{eff}} < 6500 \text{ K}$, $\lg g > 2 \text{ dex}$ 的成员星的数据.

3 结果

3.1 老年疏散星团的金属丰度

由于不同巡天数据得到的金属丰度可能存在系统性差异, 我们首先来对比几个不同巡天给出的同一星团成员星的金属丰度差异. 在我们收集到的样本中, 疏散星团NGC 2682的数据来源最为广泛, Spina等^[9]、Donor等^[13]、Casamiquela等^[14]、Netopil等^[8]和Zhong等^[10], 皆为其提供了有效的金属丰度参考值, 因此, 我们下面就以NGC 2682为例, 分两步来对比几个不同巡天给出的样本星金属丰度的差异.

首先, 我们对比了几个大型巡天项目公共成员星的金属丰度. 在星团NGC 2682中, APOGEE与

GALAH的公共成员星有30个, APOGEE与LAMOST有28颗公共成员星, GALAH与LAMOST有24颗公共成员星, 图1分别画出了这些公共成员星的金属丰度的比较. 由图1可见, LAMOST低分辨率光谱巡天得到的金属丰度数据比APOGEE和GALAH给出的数值略高, 但差异的平均值在0.1 dex以内, 和LAMOST的金属丰度的典型观测误差一致.

其次, 为了做进一步对比, 我们分别绘制了星团NGC 2682基于GALAH、APOGEE与LAMOST巡天数据的成员星金属丰度分布, 如图2所示. 图2的虚线给出了对金属丰度分布函数的最佳高斯拟合. 我们用算术平均法, 计算了每个巡天数据下成员星金属丰度的平均值 μ 与标准偏差 σ , 并将结果标注在图2中. 结果表明, GALAH和OCCAM得到的星团NGC 2682的金属丰度非常接近, 由LAMOST得到的金属丰度则偏高约0.01 dex, 远低于LAMOST的金属丰度的典型观测误差. 我们的结果表明, 基于GALAH、APOGEE与LAMOST巡天数据得到的疏散星团NGC 2682的金属丰度具有很好的一致性, 都具备参考价值.

我们将图2中计算星团NGC 2682成员星金属丰度的方法应用到所有的样本星团, 即: 首先按照数据来源分类, 对疏散星团中有同一数据来源的成员星, 画出金属丰度分布函数, 计算得到该数据来源给出的星团金属丰度平均值, 详细结果展示在表2中. 表2分别给出了从OCCAM、GALAH、OCCASO、Gaia-ESO、LAMOST光谱巡天和Netopil等^[8]中收集到的老年疏散星团金属丰度的总体情况以及我们对于样本中所有疏散星团给出的推荐金属丰度. 其中: 第1列是星团编号, 第2列是疏散星团名称. 另外, 我们按照光谱分辨率的不同, 分为了高分辨率光谱(HQS)和低分辨率光谱(LQS)两部分. 又根据所收集的疏散星团的来源, 分为来自GALAH、OCCAM、OCCASO、Gaia-ESO、LAMOST和Netopil等^[8]的样本共6个部分, 每部分对应3列数据: 第1列表示该星团中有金属丰度数据的成员星的个数 n , 第2列与第3列分别表示星团金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的平均值 μ 和标准偏差 σ .

对比表2中同一星团基于不同巡天数据得到的金属丰度平均值发现: 除了疏散星团NGC 2243、

NGC 6253与NGC 6791的结果差异比较大, 其余星团的金属丰度平均值的差异都在0.1 dex以内. 对于NGC 2243, 我们收集到了该星团基于GALAH、OCCAM和Gaia-ESO这三个巡天的数据. 其中由GALAH巡天数据得到的金属丰度平均值是最高的, 而由OCCAM得到的结果最低. 这两个巡天的差异大约在0.25–0.3 dex之间. 而NGC 6253所收集到的金属丰度中, Netopil等^[8]给出的金属丰度略高

于我们的结果. 此外, NGC 6791在不同巡天中金属丰度的平均值差异也比较明显. 该星团的数据来源是OCCAM、OCCASO、Netopil等^[8]的样本数据. 其中金属丰度平均值最高的是基于OCCAM的数据, 最低的是基于LAMOST巡天的数据, 差异大约在0.1–0.2 dex之间. 关于这两个星团的金属丰度, 有待进一步研究.

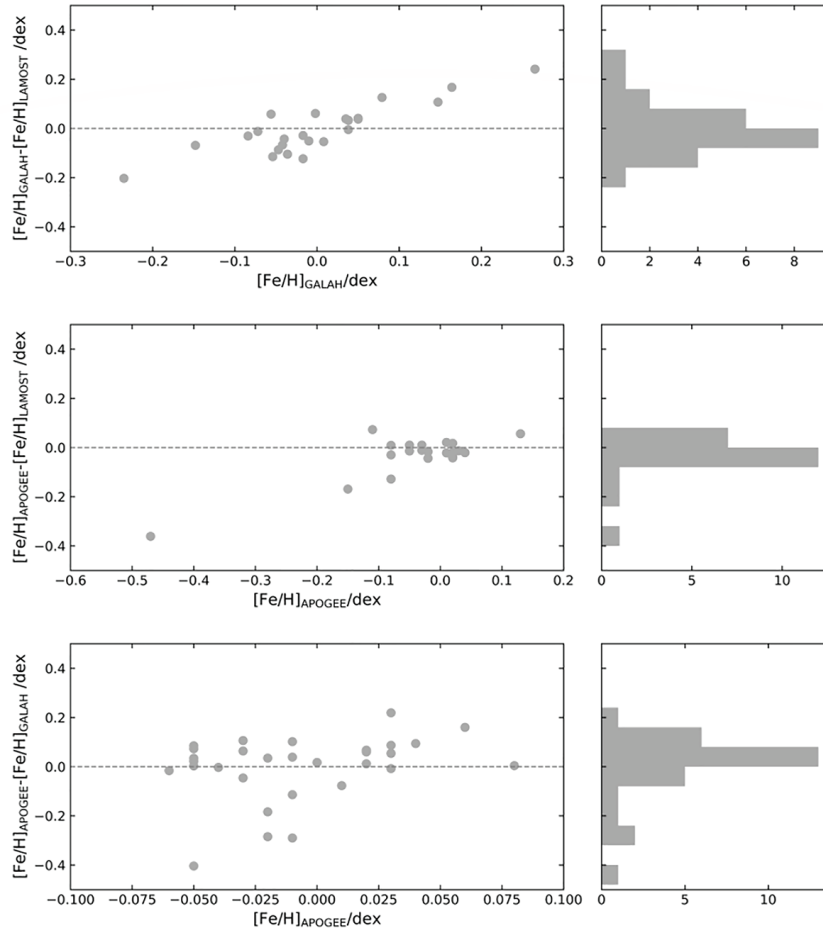


图1 星团NGC 2682中不同巡天数据中的公共成员星的金属丰度对比. $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{LAMOST}}$ 表示LAMOST巡天下的疏散星团金属丰度; $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{GALAH}}$ 表示GALAH巡天下的疏散星团金属丰度; $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{APOGEE}}$ 表示APOGEE巡天下的疏散星团金属丰度.

Fig. 1 Public member star metallicity comparison of different sky surveys in cluster NGC 2682. $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{LAMOST}}$ indicates the metallicity of the open clusters under the LAMOST survey, $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{GALAH}}$ indicates the metallicity of the open clusters under the GALAH survey, and $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{APOGEE}}$ indicates the metallicity of the open clusters under the APOGEE survey.

表 2 老年疏散星团的推荐金属丰度
Table 2 Recommended metallicity of old open clusters

OC No.	Cluster name	GALAH			OCCAM			OCCASO			Netopil et al. ^[8]			Gaia-ESO			LQs			Res H/L	σ /dex	μ /dex	σ /dex	$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{med}}$ /dex		
		n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex						Recommend	
1	Berkeley 12																			L	2	-0.230	0.101	-0.230	0.101	-0.230
2	Berkeley 14																			L	2	-0.140	0.040	-0.140	0.040	-0.140
3	Berkeley 17				6	-0.158	0.037				2	-0.053	0.088							H	8	-0.132	0.067	-0.132	0.067	-0.140
4	Berkeley 18										2	-0.383	0.110							H	2	-0.383	0.110	-0.383		-0.383
5	Berkeley 19																			L	3	-0.395	0.089	-0.395	0.089	-0.405
6	Berkeley 20										2	-0.365	0.120							H	2	-0.365	0.120	-0.365	0.120	-0.365
7	Berkeley 21																			L	4	-0.256	0.147	-0.256	0.147	-0.295
8	Berkeley 25											3	-0.253	0.046						H	3	-0.253	0.046	-0.280		-0.280
9	Berkeley 29										2	-0.368	0.124							H	2	-0.368	0.124	-0.368		-0.368
10	Berkeley 31				1	-0.390														H	1	-0.390		-0.390		-0.390
11	Berkeley 32										15	-0.295	0.059							H	30	-0.365	0.224	-0.350		-0.350
12	Berkeley 39										8	-0.219	0.051							H	8	-0.219	0.051	-0.223		-0.223
13	Berkeley 66																			H	2	-0.185	0.007	-0.185		-0.185
14	Berkeley 68																			L	4	-0.249	0.094	-0.221		-0.221
15	Berkeley 70																			L	2	-0.337	0.177	-0.337		-0.337
16	Berkeley 78																			L	3	-0.353	0.038	-0.357		-0.357
17	Berkeley 98																			H	5	-0.018	0.016	-0.010		-0.010
18	Collinder 261																			H	190	-0.009	0.166	-0.006		-0.006
19	Czernik 21										8	0.079	0.105							H	2	-0.325	0.007	-0.325		-0.325
20	Czernik 24																			L	4	-0.194	0.086	-0.180		-0.180
21	Czernik 30				1	-0.400														H	1	-0.400		-0.400		-0.400
22	FSR 0278																			L	1	0.083		0.083		0.083
23	FSR 0496				1	-0.100														H	1	-0.100		-0.100		-0.100
24	FSR 1083																			L	1	-0.371		-0.371		-0.371
25	FSR 1113				1	-0.300														H	1	-0.300		-0.300		-0.300

表 2 续
Table 2 Continued

OC No.	Cluster name	GALAH			OCCAM			OCCASO			Netopil et al. ^[8]			Gaia-ESO			LQs			Recommend				
		n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	n	μ /dex	σ /dex	Res	n	μ /dex	σ /dex	$[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{med}}$ /dex
26	FSR 0866																			L	1	-0.257	0.000	-0.257
27	King 2				1	-0.160														H	1	-0.160	0.000	-0.160
28	LP 5	1	-0.128																	H	1	-0.128	0.000	-0.128
29	Melotte 66									6	-0.328	0.029								H	6	-0.328	0.029	-0.325
30	NGC 188				22	0.068	0.113	5	0.024	0.026	8	0.100	0.043							H	35	0.069	0.094	0.090
31	NGC 1193				2	-0.335	0.007			2	-0.235	0.042								H	4	-0.285	0.063	-0.298
32	NGC 2112	35	-0.118	0.139						3	0.055	0.184								H	38	-0.104	0.148	-0.087
33	NGC 2204	16	-0.252	0.172	24	-0.261	0.072													H	40	-0.258	0.120	-0.260
34	NGC 2243	3	-0.220	0.095	11	-0.476	0.048													H	28	-0.394	0.094	-0.390
35	NGC 2682	72	-0.022	0.119	166	-0.024	0.073	4	0.039	0.046	25	-0.006	0.067	14	-0.366	0.043			H	267	-0.021	0.087	-0.010	
36	NGC 3680	1	-0.197																	H	1	-0.197	0.000	-0.197
37	NGC 6253	28	0.172	0.116						5	0.381	0.067								H	33	0.204	0.133	0.211
38	NGC 6791				34	0.328	0.136	2	0.237	0.021	8	0.415	0.030							H	44	0.340	0.127	0.365
39	NGC 6819				41	0.057	0.032	3	0.070	0.051	3	0.110	0.000							H	47	0.061	0.035	0.060
40	NGC 7142									7	0.101	0.030								H	7	0.101	0.030	0.090
41	NGC 7762									5	0.026	0.037								H	5	0.026	0.037	0.012
42	Ruprecht 147	65	0.010	0.183	39	0.099	0.065	23	0.078	0.060	5	0.116	0.084							H	132	0.052	0.142	0.080
43	Skiff J0507+30.8																			L	4	-0.449	0.087	-0.439
44	Teutsch 1																			L	1	-0.204	0.000	-0.204
45	Trumpler 5				9	-0.436	0.017													H	9	-0.436	0.017	-0.430

Notes: Sources and recommended metallicity of 45 open clusters in the sample. According to the different spectral resolution, it can be divided into high resolution spectrum (HQS) and low resolution spectrum (LQS). According to the sources of the collected open clusters, it can be divided into GALAH, OCCAM, OCCASO, Ref.[8] samples, Gaia-ESO and LAMOST, each of which corresponds to three columns of data: the first column shows the mean and standard deviation of metallicity [Fe/H], respectively. The first column of the with metallicity data, while the second and third columns show the mean and standard deviation of metallicity [Fe/H], respectively. The first column of the recommendation part represents the observation type, H indicates that the recommended value comes from high-resolution spectral observation, L indicates that the recommended value comes from low-resolution spectral observation; the second column is the number of observations; the third and fourth columns represent the calculated mean value and standard deviation of open cluster member stars, respectively; the fifth column represents the median value of open cluster member stars.

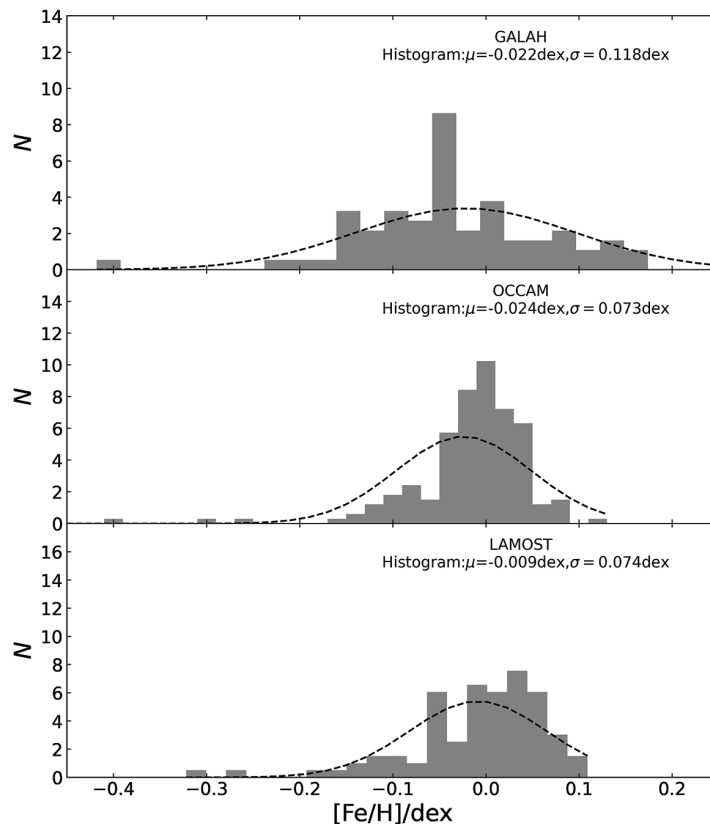


图 2 疏散星团 NGC 2682 的成员星基于 GALAH、APOGEE、LAMOST 巡天数据的金属丰度分布情况。N 表示疏散星团个数。

Fig. 2 The metallicity distribution of the member stars of open cluster NGC 2682 based on the GALAH, APOGEE and LAMOST data. N indicates the number of open clusters.

接下来, 我们采用和 Netopil 等^[8]相似的方法, 计算了样本星团最终的金属丰度推荐值. 我们将成员星的金属丰度分为两类: 一类是基于 APOGEE 等高分辨率光谱巡天得到的金属丰度数据, 另一类是基于 LAMOST 中低分辨率光谱巡天得到的金属丰度数据. 对于每个老年疏散星团, 如果有高分辨率光谱观测的成员星金属丰度, 就取其平均值和中位值作为该疏散星团的金属丰度推荐值. 对于不同巡天观测得到的同一颗成员星的数据, 我们按照观测次数记录, 例如 APOGEE 和 GALAH 对同一颗成员星都有观测数据, 那么这颗星的两个不同的金属丰度值同样有效, 在我们的平均值与中位值计算过程中, 它们算作两次数据. 此外, 对于没有基于高分辨率光谱巡天得到的成员星金属丰度的疏散星团, 或者是该星团的所有成员星均未能通过我们的筛选

条件, 那么我们就选择基于 LAMOST 中低分辨率观测的金属丰度为该星团的金属丰度推荐值. 与高分辨率下的数据处理方式一样, 我们依旧将星团成员星金属丰度的平均值和中位值作为该疏散星团的金属丰度推荐值. 表 2 中最后 5 列给出样本星团的金属丰度推荐值, 列表中推荐部分的第 1 列表示的是观测类型(分辨率, Res), H 表示推荐值来自于高分辨率光谱观测, L 表示推荐值来自于低分辨率光谱观测; 第 2 列表示观测次数; 第 3 列和第 4 列分别表示计算所得的疏散星团成员星的平均值和标准偏差; 第 5 列表示疏散星团成员星的中位值. 平均值和中位值两列即老年疏散星团的金属丰度推荐值.

3.2 银盘径向金属丰度梯度

在这一部分, 我们利用表 2 的疏散星团的金属

丰度推荐值(本文采用的是金属丰度平均值), 探究银盘金属丰度梯度随时间的演化. 图3给出整个样本中老年疏散星团的金属丰度随银心距的变化,

实心点是观测数据, 实线是最小二乘法得到的最佳线性拟合, 拟合得到银盘径向金属丰度梯度为 -0.047 dex/kpc .

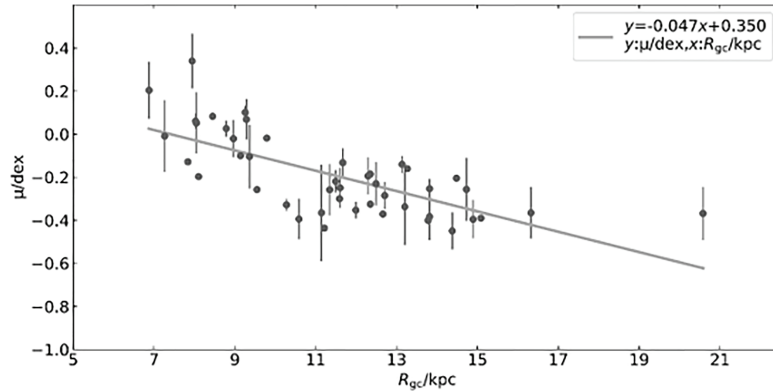


图3 老年疏散星团样本给出的银盘金属丰度径向轮廓, 横坐标是银心距, 纵坐标是 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的平均值 μ , 图中散点是样本中老年疏散星团的观测值, 直线是用最小二乘法拟合的结果.

Fig. 3 The radial metal abundance gradient of the Galactic disk, the abscissa is the galactic center distance. The ordinate is μ , which is the average of $[\text{Fe}/\text{H}]$. The scattered points in the figure represent our samples of old open clusters, and the straight line is the result of the ordinary least squares.

在OCCAM项目中, Donor等^[13]利用APOGEE数据和年龄大于2 Gyr的疏散星团子样本, 得到银盘径向金属丰度梯度为 -0.094 dex/kpc (见Donor等^[13]的图11). Zhong等^[10]则利用LAMOST数据和年龄大于2 Gyr的疏散星团子样本得到的金属丰度梯度为 -0.053 dex/kpc (见Zhong等^[10]的图13). 表3将这两篇文献的结果与我们的结果进行了比较, 其中, 第1列是不同研究得到的银盘径向金属丰度梯度; 第2列是样本的银心距范围; 第3列是样本中疏散星团的个数; 第4列是不同结果的研究来源. 由表3可见, 我们得到的银盘径向金属丰度更加平缓, 原因之一可能是因为OCCAM与Zhong等^[10]的样本中老年疏散星团的数目偏少. 另外, 我们的样本中, 疏散星团的银心距范围是最大的. 在此之前, 不少银盘径向金属丰度梯度的研究表明, 银盘径向金属丰度梯度并非单一的, 即银盘的内盘与外盘呈现不同的梯度, 一般而言, 内盘梯度会比外盘的更加陡峭一些^[13]. 由于分两段拟合梯度, 会引入更多的参数和不确定性, 本文仅给出最简单的单一梯度拟合结果.

表3 使用年龄大于2 Gyr疏散星团作为示踪体的径向金属丰度梯度研究结果

Table 3 Radial metallicity gradient studies using open clusters older than 2 Gyr as tracers

The radial metallicity gradient/ (dex/kpc)	R_{gc}/kpc	N	Reference
-0.094 ± 0.005	6–14	12	[13]
-0.053 ± 0.012	7–15	12	[10]
-0.047	6–22	45	this work

Notes: Comparison of radial metallicity gradient studies using open clusters older than 2 Gyr as tracers. The first column is the radial metallicity gradient of the Galactic disk obtained by different studies; the second column is the galactic distance range of the sample; the third column is the number of open clusters in the sample; the fourth column is the source of the different results.

由于老年疏散星团的年龄跨度较大, 为了更细致地研究银盘径向金属丰度梯度随时间的演化, 我们将老年疏散星团样本, 按照年龄分为了两个子样本, 分别为2–4 Gyr和4–8 Gyr. 为了和年轻疏散星团的结果进行比较, 参考了Cantat-Gaudin等^[12]中星表给定的疏散星团的年龄与银心距, 我们从

Zhong等^[10]的样本中, 整理出了年龄在2 Gyr以内的年轻疏散星团的金属丰度, 并将样本按年龄分为两个子样本, 一个样本的年龄是0–1 Gyr, 另一个为1–2 Gyr. 这4个样本中疏散星团的银心距范围都在6–22 kpc之间. 图4是银盘径向金属丰度梯度随时间的演化, 4个子图给出这4个子样本得到的银盘径向金属丰度梯度, 由上到下年龄逐渐增加.

其中, 实心三角形是Zhong等^[10]得到的疏散星团金属丰度, 实心圆点是本文样本的数据, 实线是由最小二乘法得到的最佳线性拟合结果. 0–1 Gyr的子样本和1–2 Gyr的子样本得到的梯度分别为 -0.011 dex/kpc与 -0.037 dex/kpc, 2–4 Gyr的子样本和4–8 Gyr的子样本得到的梯度分别为 -0.044 dex/kpc和 -0.060 dex/kpc.

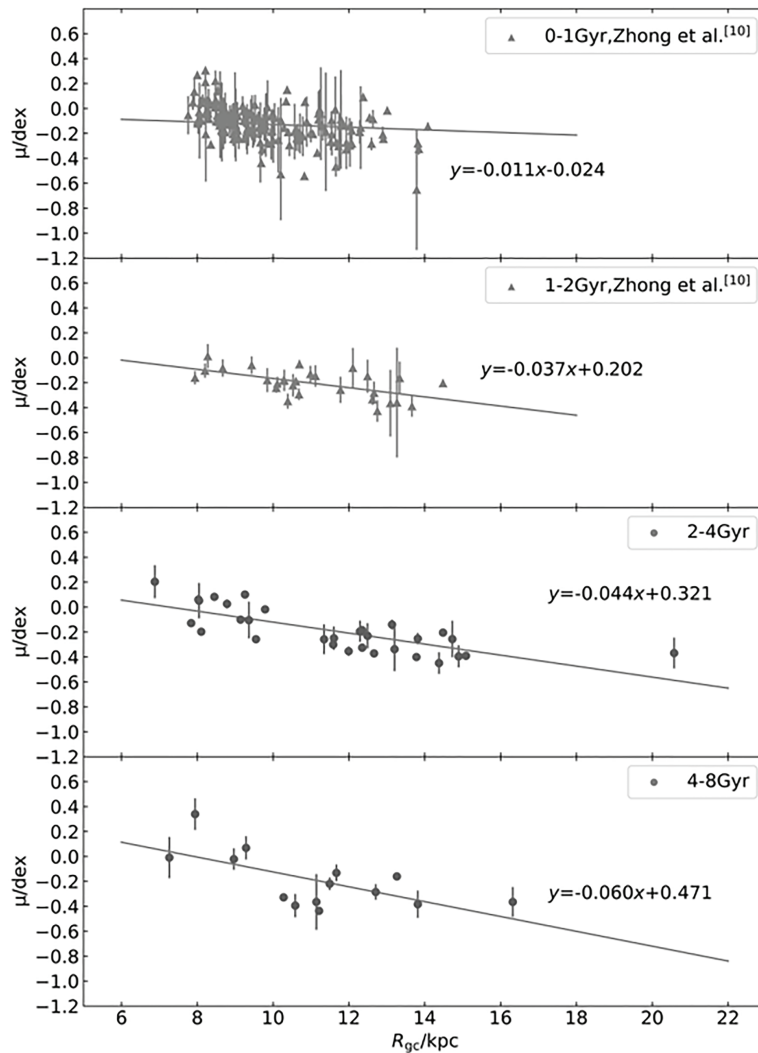


图4 银盘径向金属丰度梯度随时间演化, 横坐标是银心距, 纵坐标是 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的平均值 μ . 图中实心三角形是Zhong等^[10]得到的疏散星团的样本数据, 实心圆点是本文工作的样本数据. 直线是用最小二乘法拟合的结果. 从上到下4个子图中样本的年龄分别是0–1 Gyr、1–2 Gyr、2–4 Gyr、4–8 Gyr.

Fig. 4 The radial metallicity gradient of the Galactic disk evolves over time, and the abscissa is the galactic distance. The ordinate is μ , which is the average of $[\text{Fe}/\text{H}]$. The solid triangle in the figure is the sample data of open star cluster obtained by Ref.[10], and the solid dots are the sample data of this paper. The straight line is the result of the ordinary least squares. The ages of the samples in the four subgraphs from top to bottom are 0–1 Gyr, 1–2 Gyr, 2–4 Gyr, and 4–8 Gyr, respectively.

我们的结果表明, 整体而言老年疏散星团样本得到的银盘径向金属丰度梯度比年轻样本得到的结果要更加陡峭, 这表明早期银盘有着更加陡峭的径向金属丰度梯度, 随着时间的增加, 银盘径向金属丰度梯度逐渐趋于平缓. 该观测结果为银盘化学演化模型提供了更加严格的观测约束, 与模型结果的进一步比较将在后续工作中给出.

4 结论与展望

疏散星团是同一时期由同样的物质形成的一批恒星, 它们在银盘上分布广泛, 其年龄几乎跨越了整个银盘的年龄, 是用来研究银盘结构与元素丰度的良好示踪体. 但疏散星团是一个相对年轻的群体, 绝大多数疏散星团的年龄都在2 Gyr以下, 而能测得其金属丰度的又属少数, 而且金属丰度的测量还基于不同质量的观测数据和不同的方法. 本文的重点内容之一是收集和整理老年疏散星团样本, 用一致的方法得到星团的金属丰度参数. 具体而言, 通过参考与匹配Gaia-DR2的数据, 我们从不同巡天的数据中, 收集了年龄在2 Gyr以上有成员星金属丰度参数信息的疏散星团, 并计算了成员星金属丰度的平均值和中位值作为该疏散星团最终的金属丰度. 另外, 我们还利用这个样本, 分年龄区间研究了银盘径向金属丰度梯度, 结果发现4–8 Gyr的年龄区间内的金属丰度梯度最为陡峭, 而2–4 Gyr的疏散星团所呈现的金属丰度比4–8 Gyr的要平缓一些. 对比Zhong等^[10]样本中年轻疏散星团得到的金属丰度梯度, 老年疏散星团得到的结果的确更加陡峭, 所以银盘径向的金属丰度梯

度曾经更加陡峭. 该观测结果为银盘化学演化模型提供了更加严格的观测约束, 与模型结果的深入比较还有待进一步的研究.

致谢 感谢ADS数据库的协助, 感谢中国科学院上海天文台提供的学术氛围及研究条件.

参考文献

- [1] Shaver P A, McGee R X, Newton L M, et al. MNRAS, 1983, 204: 53
- [2] Chang R X, Hou J L, Shu C G, et al. PrA, 2001, 19: 120
- [3] Fu J, Hou J L, Yin J, et al. ApJ, 2009, 696: 668
- [4] Mollá M, Díaz Á I, Cavichia O, et al. MNRAS, 2019, 482: 3071
- [5] Hou J L, Prantzos N, Boissier S. A&A, 2000, 362: 921
- [6] 侯金良, 常瑞香. 天文学进展, 2001, 19: 68
- [7] Chen L, Hou J L, Wang J J. AJ, 2003, 125: 1397
- [8] Netopil M, Paunzen E, Heiter U, et al. A&A, 2016, 585: A150
- [9] Spina L, Ting Y S, De Silva G M, et al. MNRAS, 2021, 503: 3279
- [10] Zhong J, Chen L, Wu D, et al. A&A, 2020, 640: A127
- [11] Cantat-Gaudin T, Jordi C, Vallenari A, et al. A&A, 2018, 618: A93
- [12] Cantat-Gaudin T, Anders F. A&A, 2020, 633: A99
- [13] Donor J, Frinchaboy P M, Cunha K, et al. AJ, 2020, 159: 199
- [14] Casamiquela L, Blanco-Cuaresma S, Carrera R, et al. MNRAS, 2019, 490: 1821
- [15] Magrini L, Spina L, Randich S, et al. A&A, 2018, 617: A106
- [16] Heiter U, Soubiran C, Netopil M, et al. A&A, 2014, 561: A93

Metallicity of Old Open Star Clusters and Study on the Evolution of Metallicity Gradient of Galactic Disk

ZHANG Wen-jing^{1,2} CHANG Rui-xiang¹ ZHANG Xi^{1,2,3}

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117)

ABSTRACT Open clusters are good tracers for the study of the structure and evolution of the Milky Way. Previous studies of open clusters have shown that only a small number of open clusters have metallicity measurements. Moreover, these measurements based on different qualities of observed data, using different methods. In this paper, we collected a sample of an elderly open cluster older than 2 Gyr by collating the metallicity data of these cluster members. On the one hand, the systematic errors of metallicity of members given by different spectral survey projects are compared as the example of NGC 2682. On the other hand, the mean and median values of metallicity of the members are calculated as the recommended values of metallicity of the open cluster. In addition, the evolution of the radial metallicity gradient of the disk with time was investigated using this sample. The results show that the radial metallicity gradient of the disk is steeper in the early stage, and gradually becomes flat with the increase of evolution time, which provides a more strict observation constraint for the chemical evolution model of the disk.

Key words Galaxy: open cluster, Galaxy: abundances, Galaxy: disk, Galaxy: evolution