



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

硕士学位论文

Cygnus 天区的星团群搜寻研究

作者姓名: 刘桂梅

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

2024 年 6 月

Search for Cluster Groups in the Cygnus Region

**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
LIU Guimei
Supervisor: Professor CHEN Li
Professor ZHONG Jing**

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences

June, 2024

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：

导师签名：

日 期：

日 期：

摘要

人们普遍认为银盘恒星通常以成团的方式形成于疏散星团中，但对于疏散星团的结构知之甚少。一个重要的问题是：疏散星团的形成过程是否呈现等级成团模式？即星团是倾向于孤立形成，还是更倾向于以双星团或多星团（星团群）的形式相伴或成群出现？若存在这种倾向，其背后的物理因素有哪些？此外，双星团或星团群的动力学演化特性又是怎样的？

长久以来，疏散星团主要作为孤立的系统进行研究。*Gaia* 时代以来，人们逐渐认识到部分疏散星团实际上是成群形成的。这些星团在运动学上相似、年龄相近且空间位置相邻，从而构成了星团群。星团群的形成和演化，是恒星在银河系中等级成团形成过程的直观体现，这一过程受到众多因素的交织影响。对具有共同起源的疏散星团进行深入研究，有助于我们更深入地理解疏散星团的形成机制与演化模式。同时，成员星团可以作为研究巨分子云中恒星形成过程的重要示踪体，为我们提供全新的研究视角，从而深化对恒星等级形成理论的理解。深入研究恒星与星团形成机制需要对恒星形成事件的整个过程进行全面考察，星团群的研究则提供了长远的视角来研究恒星形成理论，这使得我们能够全面地了解成员星团从诞生之初到现在的整个演化过程，并深入研究驱动星团形成的机制。此外，星团群诸多物理性质的测定还为银河系动力学的观测和数值模拟研究，提供了重要的观测依据。

尽管星团群的搜寻证认工作有了较大的进展，然而样本依然十分有限，星团群的起源机制尚不明确。因此，需要扩大原初星团群样本，为进一步研究星团的形成与演化模式提供可靠的观测限制。近年来，随着 *Gaia* 时代的到来，新发现的疏散星团数量剧增，疏散星图表的完备性与可靠性不断提高，为星团群搜寻提供了更坚实的数据基础。同时，结合 *Gaia* 高精度的运动学数据，能够更加精准地搜寻星团群，从而研究其内部运动及探讨可能的起源机制。

本论文基于 *Gaia* DR3 的高精度天体测量和测光数据，以已有星团为样本，重新统一测定了星团参数。根据星团的空间分布和运动学性质，我们在 Cygnus 天区发现了 4 个新的星团群，命名为星团群 G1, G2, G3, G4，其中，G1 包含 6 个星团，G2 由 8 个星团组成，G3 和 G4 各包含 3 个星团。分析表明，这 4 个星团群各自占据相对独立的空间。就任一星团群而言，其成员星团在空间上相互毗邻且具有一致的切向速度，表明成员星团皆是在同一片巨分子云中形成的。4 个星团群中的恒星形成持续时间分别为 13 Myr、29 Myr、10 Myr 和 12 Myr，符合连续恒星形成事件的时标，因此很可能是原初相继形成的。我们通过贝叶斯方法进行了距离改正，以便研究星团群的空间分布形态。结果显示，星团群 G1 和 G2 的空间分布呈现出明显的丝状结构，星团群 G3 和 G4 的成员星团空间分布比较集中。星团群 G1 和 G2 中有部分成员星团目前相互作用不明显，而星团群 G3 和 G4 中的成员星团都存在相互作用。最后，我们利用 Galpy 程序包，进

一步细致地研究了星团群在银河系引力场中的轨道运动。轨道分析结果表明这些星团群的成员星团将会逐渐远离，最终演化成为相互独立的单个星团。

关键词：疏散星团，双星团，星团群，银河系动力学

Abstract

It is generally agreed that stars in the Galactic disk normally form in open clusters(OCs), but little is known about the actual formation pattern of the open clusters. An important question arises: does the formation process of OCs exhibit a hierarchical clustering pattern? In other words, do OCs tend to form isolated or do they prefer to form in pairs or groups? If such a tendency exists, what are the underlying physical factors? Additionally, what are the dynamical evolution characteristics of binary clusters or cluster groups? In this regard, OCs and cluster groups can provide valuable observational constraints for the study of observation and numerical simulations of Galactic dynamics.

For a long time, OCs have been mainly regarded as isolated systems. Since the era of *Gaia*, it has gradually been recognized that some OCs are actually formed in groups. These OCs are kinematically coherent, similar in age, and adjacent in spatial position, thus constituting a cluster group. In-depth studies on coeval cluster groups will contribute to a better understanding of the formation mechanisms and evolution patterns of OCs. Using OCs as tracers provides a new perspective on the process of star formation in giant molecular clouds and contributes to a deeper understanding of the theory of hierarchical star formation.

Despite significant progress in the search and identification of cluster groups, the sample remains very limited, and the formation mechanism of cluster groups is still unclear. Therefore, there is a need to expand the sample of primordial cluster groups to provide reliable observational constraints for further research on the formation and evolutionary patterns of star clusters. In recent years, with the advent of the Gaia era, the number of newly discovered open star clusters has dramatically increased, and the completeness and reliability of open star cluster catalogs have continuously improved, providing a more solid data foundation for the search for cluster groups. At the same time, combining high-precision kinematic data from *Gaia* DR3 allows for a more accurate search for star cluster groups and a deeper exploration of their internal motions and possible origin mechanisms.

This thesis is based on high-precision astrometric and photometric data from *Gaia* DR3 and re-determined the parameters of relevant OCs. Based on this, we discovered four new cluster groups in the Cygnus region, namely cluster groups G1, G2, G3, and G4. Among them, G1 contains 6 clusters, G2 consists of 8 clusters, and both G3 and G4 contain 3 clusters each. Our analysis indicates that the four cluster groups each occupy relatively independent regions in space, with member clusters being closely adjacent and connected, exhibiting consistent tangential velocities, suggesting that all member

clusters of each cluster group were formed within the same giant molecular cloud. The star formation duration of the four cluster groups are 13 Myr, 29 Myr, 10 Myr, and 12 Myr, respectively, indicating they likely formed sequentially. Distance corrections were performed using Bayesian methods to study the spatial distribution morphology of the cluster groups. The results show that cluster groups G1 and G2 exhibit distinct filamentary structures in their spatial distribution, while the member clusters of G3 and G4 are more concentrated. Some member clusters in G1 and G2 currently show no significant interactions, while interactions exist among the member clusters of G3 and G4. Finally, utilizing the Galpy package, we further investigated the orbital motions of the cluster groups in the gravitational field of the Milky Way. Orbital analysis results indicate that the member clusters of these cluster groups will gradually move away and eventually evolve into independently distinct individual clusters.

Key Words: Open cluster, Binary cluster, Cluster group, Galactic dynamics

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 疏散星团	2
1.2 星团的形成模式	2
1.2.1 等级成团形成	2
1.2.2 双星团/多星团起源机制	4
1.3 <i>Gaia</i> 数据	6
1.3.1 <i>Gaia</i> DR3	7
1.3.2 <i>Gaia</i> 对星团研究的影响	10
1.4 疏散星团以及星团群搜寻进展	13
1.4.1 星表数据	13
1.4.2 多星团搜寻标准	16
1.4.3 星团群研究进展	20
1.5 本文内容以及主要框架	22
第 2 章 数据与方法	25
2.1 星团样本	25
2.2 星团参数测定	25
2.2.1 星团 6D 参数	26
2.2.2 年龄与质量	29
2.3 星团群搜寻方法	33
第 3 章 Cygnus 天区星团群证认结果	35
3.1 星团群运动学相关性	35
3.2 星团群的恒星形成持续时标	37
3.3 距离改正与 3D 空间分布	40
3.3.1 距离改正	40
3.3.2 3D 空间分布	41
3.4 星团群轨道特征	44
3.4.1 星团群 G1	44
3.4.2 星团群 G2	45
3.4.3 星团群 G3	45
3.4.4 星团群 G4	45

第 4 章 总结与展望	49
4.1 总结	49
4.2 展望	49
参考文献	51
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 昴宿星团	1
图 1-2 恒星等级成团形成模型。	3
图 1-3 双星团 h 和 χ Persei 的空间分布	4
图 1-4 猎户座所在天区中 3 个不同等级的恒星结构	5
图 1-5 <i>Gaia</i> 卫星的观测技术。图源：ESA/Gaia。	7
图 1-6 <i>Gaia</i> 第 1-5 次数据发布的天体测量参数不确定度随 G 波段变化 ..	11
图 1-7 <i>Gaia</i> 卫星观测星团核心的优势。图源：ESA <i>Gaia</i> 。	12
图 1-8 双星团 NGC 869 和 NGC 884 的外围低密度子结构。	12
图 1-9 CG20b 的星团样本年龄以及空间分布	17
图 1-10 324 个星团在银经-银纬中的分布情况	18
图 1-11 星团与最邻近星团的间距分布以及星团内速度弥散分布	19
图 1-12 蛇形结构与丝状恒星结构在银经-银纬空间的分布图	22
图 2-1 本文所用星团样本在银经-银纬空间的分布	25
图 2-2 银经-银纬二维核密度估计结果	27
图 2-3 自行空间二维核密度估计结果	28
图 2-4 成员星团视向速度高斯拟合结果	30
图 3-1 4 个星团群成员在 l - b 空间分布	37
图 3-2 星团群中成员星团等龄线拟合结果	38
图 3-3 星团群平均对数年龄与年龄差分布	39
图 3-4 4 个星团群的三维空间分布	43
图 3-5 4 个星团群轨道运动	47

表目录

表 1-1 <i>Gaia</i> 历次数据发布包含的内容对比	8
表 1-2 <i>Gaia</i> 数据质量	9
表 1-3 Cantat-Gaudin et al. (2018, 2020a,b) 系列工作中使用的星团样本 ..	16
表 1-4 双星团及星团群主要甄选标准和结果	21
表 2-1 四个星团群成员星团的基本性质参数	32
表 3-1 星团群中的双星团	36

符号列表

字符

α	赤经, right ascension (ra)
δ	赤纬, declination (dec)
μ_{α}^*	自行相对赤经的分量, pmra
μ_{δ}	自行相对赤纬的分量, pmdec
PM	自行, proper motion
ϖ	三角视差, parallax
l	银经, galactic longitude
b	银纬, galactic latitude
pc	秒差距
kpc	千秒差距
Myr	百万年
RV	视向速度, radial velocity
X,Y,Z	银心直角坐标系的三个分量
U,V,W	银心直角坐标系下速度的三个分量
\odot	代表太阳, 如太阳质量可以写作 M_{\odot}
r_t	潮汐半径, tidal radius
Z_{\odot}	太阳金属丰度

算子

Symbol	Description
Δ	difference

缩写

2MASS	Two Micron All-Sky Survey
CG18	Cantat-Gaudin et al. (2018)
CG20a	Cantat-Gaudin et al. (2020a)
CG20b	Cantat-Gaudin et al. (2020b)
COCD	Catalogue of Open Cluster Data
GMC	Giant Molecular Cloud
NCOVOCC	The New Catalogue of Optically Visible Open Clusters and Candidates

NGC	New General Catalogue of Nebulae and Clusters
OC	Open Cluster
Qin23	Qin et al. (2023)
RAVE	RAdial Velocity Experiment
TYCHO	The TYCHO catalogues
MWSC	Milky Way Star Clusters

第1章 引言

疏散星团是由数十至上千颗恒星聚集形成的恒星系统，自古以来就引起了人类的兴趣和广泛关注，例如晴朗的夜空中肉眼可见的、明亮的昴宿星团（Pleiades，如图 1-1）。由于新的观测证据不断挑战理论模型，星团的形成与演化至今仍然是一个有趣的课题。近来的一些研究表明，疏散星团倾向于成群形成（Bica et al., 2003; Casado, 2021; Camargo et al., 2016）。它们在空间上相互靠近且来自同一巨分子云（GMC），因此具有共同起源。而且普遍比较年轻，年龄从几百万年到几千万年不等（Casado, 2021, 2022）。



图 1-1 昴宿星团

Figure 1-1 Pleiades star cluster

注：昴宿星团也被称为七姐妹星团

The Pleiades star cluster is also called the Seven Sisters. (Image credit: LazyPixel/Brunner Sébastien)

星团群的研究具有深远的意义，其成员星团是连接单颗恒星与整个星团群的纽带，研究成员星团是理解恒星和星系的形成和演化以及星系结构的关键（Dias et al., 2005; Janes et al., 1982）。星团群也是研究恒星与星团形成模式的最佳样本（Evans et al., 2009），有助于加深人们对巨分子云中恒星等级成团形成理论（hierarchical star formation, Bonnell et al. 2003）的理解。因为深入研究恒星与星团形成机制需要对恒星形成事件的整个过程进行全面考察，而非仅限于瞬间现象。例如，前几代恒星的反馈活动可能通过压缩周围分子云而诱发连续的恒星形成，但是由于早期的星团深深嵌入在分子云中，很难通过光学波段观测。而双星团和原初星团群的研究则提供了长远的视角来研究恒星形成理论，具有独特的

价值。通过对年轻星团的数值模拟研究，可以追溯数千万年前的恒星形成事件，这使得我们能够全面地了解一个星团群从诞生之初到现在的整个演化过程，并深入探究驱动星团形成的机制。通过研究成员星团的相互作用，可以揭示星团群内部动力学演化过程，从而更全面地理解星团形成机制和演化。尽管星团群的搜寻认证工作有了较大的进展，但是由于样本有限以及数据精度的局限，星团群的起源机制尚不明确，新的观测证据也在不断挑战着现有的理论模型 (Krause et al., 2020)。因此，需要扩大原初星团群样本，为进一步研究星团的形成与演化模式提供可靠的观测限制。这是将星团群作为本论文研究重点的原因之一。

1.1 疏散星团

银河系是一个经历着恒星形成、演化与死亡反复循环的复杂系统，其中绝大多数恒星以成团的方式形成 (Lada et al., 2003; Bressert et al., 2010; Megeath et al., 2016)，疏散星团也是这个复杂系统的一部分。疏散星团由数十至上千颗恒星组成，这些恒星诞生于同一片分子云且受引力束缚 (Lada et al., 2003)，大部分原始星团在嗣后的动力学演化中瓦解 (100-200 Myr)，其成员星构成银盘场星的主要部分。仍有相当一部分星团维系束缚状态至今，成为我们现在观测到的年老疏散星团 (Krumholz et al., 2019; Krause et al., 2020; Portegies Zwart et al., 2010)。

疏散星团广泛分布于整个银盘之上，并具有较宽的年龄谱（贯穿整个银盘的形成历史）和质量谱，其成员星具有诸多相同的物理性质，如速度、年龄、金属丰度、距离和红化等。这使得疏散星团成为研究恒星形成模式与演化机制最理想的实验室 (Evans et al., 2009)；同时凭借其庞大的样本数量成为研究盘族恒星系统结构和演化的绝佳样本，尤其是疏散星团金属丰度在银河系内的分布的研究能提供银盘整体化学演化方面的关键信息，还可以为银盘形成和演化的理论模型提供可靠的约束 (Dias et al., 2005; Janes et al., 1982)。

1.2 星团的形成模式

1.2.1 等级成团形成

在空间上毗邻且来自同一巨分子云的、具有共同起源的多星团系统被称为星团复合体 (cluster complexes, Piskunov et al. 2006) 或者原初星团群 (primordial groups, Conrad et al. 2017)，本文以“星团群”统称。星团群通常包含多个 OB 星协和年轻的星团，其恒星形成过程持续几百万年到几千万年不等。这些恒星通常形成于具有自引力 (self-gravity) 作用的、致密的分子云中。当分子云受到旋臂扰动 (Bonnell et al., 2006)、超新星和超级气泡扰动 (Elmegreen et al., 2004) 以及潮汐扰动 (Mihos et al., 1997) 等外界作用时，导致分子云引力不稳定和物质的局部积累，使得母分子云呈现不同程度的碎片化，从而形成团块状结构 (Elmegreen, 2007, 2010)。当团块质量大于 Jeans 质量 (Mapelli, 2017) 时，开始引力坍缩形成恒星或者进一步碎裂成更加小的结构。恒星的形成通常呈现出等级成团 (Bonnell

(et al., 2003) 的特点，即恒星和星团在多个尺度上形成的现象。等级成团形成这一概念指出，恒星形成不是一个简单且单一的过程，而是一个多层次、多阶段的演化过程 (Efremov et al., 1998)。

图 1-2 展示了恒星等级成团形成的过程。恒星形成始于大尺度分子云的坍缩 (图 1-2 第一幅子图)。这些分子云是星际介质中最大的结构之一，其中包含着丰富的气体和尘埃，足以形成数以千计的恒星。随着引力的作用，分子云开始准静态收缩，形成了更加密集的结构 (图 1-2 第二幅子图)，如分子云核 (Molecular Cloud Cores) 和原恒星核 (Protostellar Cores)。从分裂出来的同一个分子云团块中形成多个恒星，构成 Sub-cluster (图 1-2 第三幅子图)。在这个过程中大质量恒星的反馈活动将周围的气体排出。最后多个云块中诞生的 Sub-cluster 合并 (图 1-2 第四幅子图)，最终形成星团。

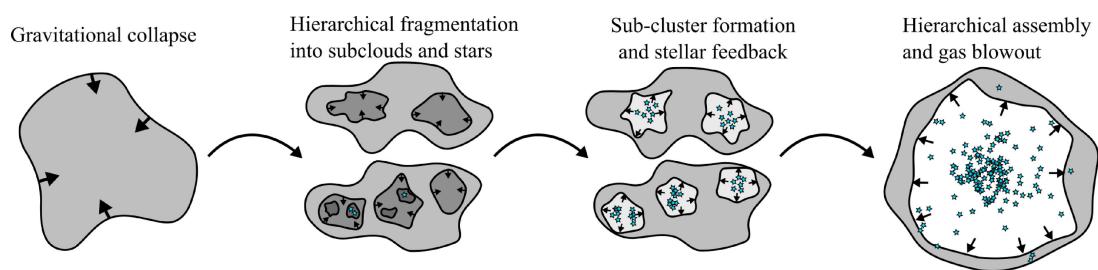


图 1-2 恒星等级成团形成模型。

Figure 1-2 The model of cluster formation from hierarchical star formation

注：从左到右开始，第一幅子图：不稳定的分子云经历引力坍缩。第二幅子图：引力不稳定性导致分子云等级化碎裂，产生一系列密度不同的分子云，最终坍缩形成恒星。第三幅子图：从相同的分子云中诞生恒星形成 Sub-cluster，伴随着来自大质量恒星的反馈活动开始吹开周围气体。第四幅子图：随着恒星反馈活动将剩余气体吹出，Sub-cluster 合并成一个星团。图片摘自 Grudić et al. (2018)。

Far left: An unstable molecular cloud undergoes gravitational collapse. Centre left: The gravitational instability causes hierarchical fragmentation, producing a hierarchy of sub-clouds that eventually fragment into individual stars. Centre right: Stars that fragmented out of the same sub-clouds form in sub-clusters. Feedback from massive stars starts to evacuate gas locally. Far right: The sub-clusters merge hierarchically into a single cluster as stellar feedback blows out any remaining gas. Image source: Grudić et al. (2018).

等级成团形成在观测上的经典实例是被反复研究的银河系双星团： η 和 χ Persei，其编录号分别为 NGC 869 及 NGC 884。图 1-3 展示了 η 和 χ Persei 的空间分布。此对星团距离我们约 2.2 ± 0.2 kpc，星团之间的距离为 21 pc，在观测上被认为属于共同形成的双星团。而更大尺度的等级成团的产物是星团群，星团群在观测上体现在较大的结构 (尺度大约数百 pc) 中包括许多较小的子结构 (尺度大约数 pc 到数十 pc)。Efremov (1978) 首次研究了 kpc 尺度上的恒星等级成团形成的产物，并称之为恒星复合体 (“star complex”)。他们的研究表明等级成



图 1-3 双星团 h 和 χ Persei 的空间分布

Figure 1-3 Spatial distribution of double star clusters h and χ Persei (NGC869 and NGC884)

注: 此区著名的 h (上) 和 χ (下) Persei 双星团, 涵盖了英仙座约 1.5 度宽的区域。
图片摘自: NASA 官网, 作者 Mårten Frosth

Note. The picture of famous double star clusters, h (top) and χ (bottom) Persei, which covers an area about 1.5 degrees wide in the constellation Perseus. Image Credit: Mårten Frosth

团形成的恒星结构尺度大到恒星复合体, 小至 OB 星协。例如著名的 Orion (猎户座), 该天区中存在许多不同尺度的恒星结构, 其中包含至少 5 个不同层级的结构 (Elmegreen et al., 2000b)。在最大尺度上, 存在所谓的“本地臂”(第一个层次), 其中包含大量年轻恒星 (Efremov, 1997), 有很强的恒星形成特征。本地臂中最大的结构是古尔德带 (Gould belt), 为第二个层次。Orion OB1 是古尔德带中的几个子结构之一, 属于第三个层次 (Poppel, 1997)。Orion OB1 中包含了 4 个子结构, 分别为 OB1a、OB1b、OB1c 和 OB1d, 属于第四个层次 (Blaauw, 1964) (如图 1-4 中左图所示)。图 1-4 右图进一步展示了 OB1c 内的子结构, 其中包含 NGC 1977, NGC 1980 和 NGC 1981 等在内的多个星团 (第五个层次)。

1.2.2 双星团/多星团起源机制

那么是何种物理因素导致星团之间相伴形成? 为了深入研究双星团以及星团群的形成模式, de la Fuente Marcos et al. 2010 基于双星团观测研究的结果 (de la Fuente Marcos et al., 2009), 结合 N 体模拟的结果, 首次系统地提出了双星团以及多星团的可能形成模式:

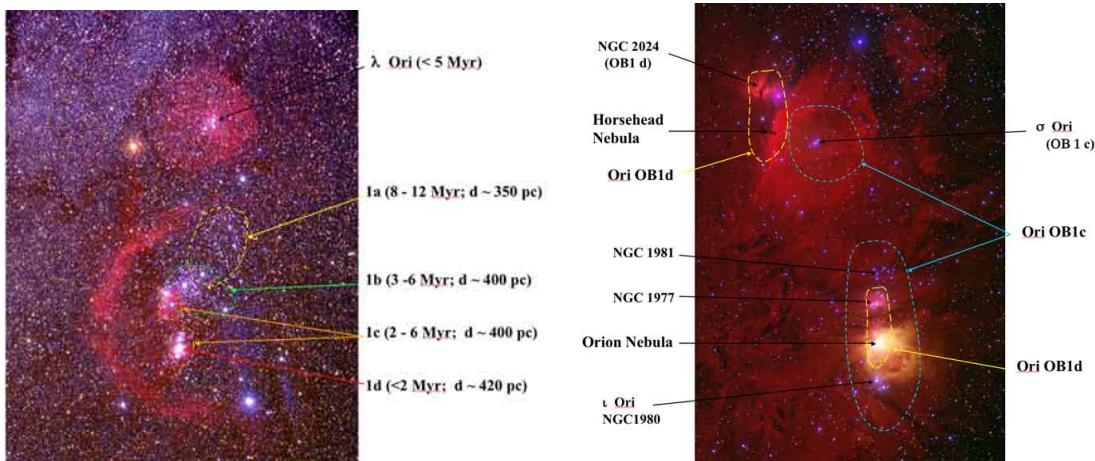


图 1-4 猎户座所在天区中 3 个不同等级的恒星结构
Figure 1-4 Hierarchical stellar structure of Orion region

注: 左图: Orion OB1 中包含的 4 个子结构, 包括 OB1a、OB1b、OB1c 和 OB1d。右图: OB1c 中的子结构细节, OB1c 中包含 NGC 1977, NGC 1980 和 NGC 1981 等在内的多个星团。图片摘自 [Bally \(2008\)](#)。

Note. Left: The four substructures contained in Orion OB1, including OB1a, OB1b, OB1c and OB1d. Right: A close-up showing the substructure in OB1c. OB1c also contains multiple star clusters including NGC 1977, NGC 1980 and NGC 1981. Image source: [Bally \(2008\)](#).

(1) 共同形成模式 (Simultaneous formation): 在同一个分子云内形成的双星团, 具有十分相近的年龄、化学丰度和共同运动, 此即为原初形成的双星团。

(2) 相继形成模式 (Sequential formation.): 在星团中, 由星风或者超新星爆发导致邻近分子云的崩塌, 从而诱发年轻一代的星团形成。[\(Goodwin, 1997; Brown et al., 1995\)](#)。可能会导致在观测上两个星团有相对较小的年龄差异, 而超新星爆发造成的金属污染可能会使两个星团产生不同的金属丰度。

(3) 俘获形成模式 (Capture): 星团各自形成之后, 由于动力学相互作用俘获而形成。由潮汐捕获形成的双星团具有共同的空间速度, 但它们的年龄和化学成分可能会有很大差异, 即两个星团不存在共同起源的关系。

[de la Fuente Marcos et al. \(2010\)](#) 的模拟结果认为双星团是非常不稳定的系统。同时 [Arnold et al. \(2017\)](#) 的 N 体数值模拟结果也表明, 原初形成的双星团很难持久, 其动力学瓦解或并合时标约为数千万年; 此外, 分子云坍缩过程中双星团的形成与分子云原初结构中超维里化区域密切相关。观测上, [Kovaleva et al. \(2020\)](#) 使用 6D 参数认证了 Collinder 135 和 UBC 7 为一对双星团: 两个星团空间分布邻近, 中心之间的距离为 24.2 ± 2.1 pc, 自行差为 0.6 ± 0.1 mas yr⁻¹ (相对切向速度为 1.42 ± 0.15 km s⁻¹), 并且两个星团的颜色星等图重叠, 具有相同的年龄和红化, 年龄大概在 40 Myr 左右。可见, 因为 Collinder 135 和 UBC 7 具有相近的位置、距离、年龄和相似的运动信息, 可以认为是同一个分子云诞生的双星团。

许多研究的结果都认为真正的原初双星团在颜色星等图中应该具有相似/重

合的分布以及共同的运动，类似于 Collinder 135 和 UBC 7。还有一种情况是非原初双星团，也就是说两个独立的疏散星团可能在运动轨道中偶然相遇，其各自成员星的空间散布范围部分重合，但两个星团年龄等性质可以各不相同。这种情况的典型例子是 Piatti et al. (2022) 发现的首个银河系内“碰撞”的双星团 IC 4665 和 Collinder 350。IC 4665（年龄 53 Myr）和 Collinder 350（年龄 617 Myr）均位于银河系平面上方约 100 pc，距离太阳约 330 pc。两个星团速度差约为 5 km s^{-1} ，在空间上仅相隔约 36 pc，小于它们各自半径之和 (de la Fuente Marcos et al., 2010)。为了探究两个疏散星团的物理起源，Piatti et al. (2022) 利用星团的位置和速度信息将轨道回溯，结果表明两个星团过去在空间上相隔较远，在 IC 4665 诞生时与 Collinder 350 的距离大于 500 pc。因此是两个独立诞生的疏散星团通过运动学演化相遇，而非原初双星团系统。IC 4665 和 Collinder 350 之间的持续碰撞不同于星团形成理论提出的典型现象。可见，双星团样本为探索不同的星团形成和演化模式提供了一个独特的实验室。

根据上述可知，双星团中的星团年龄通常较为年轻，并且没有发现由较老的星团组成的双星团，这也说明了大多数双星团是在同一个分子云中同时形成的，它们的年龄还不足以导致其动力学瓦解而成为银盘场星的一部分。de la Fuente Marcos et al. (2009) 提到的双星团/星团群的三种形成模式来说，“同时形成”意味着双星团/星团群的成员星团极有可能是年轻的，因此在颜色星等图上它们应该非常相似/重叠，并且具有相似的化学成分。对于“非同时形成”的双星团，目前还无法确切地了解通过潮汐捕获或共振俘获形成双星团的可能性，通过潮汐捕获或共振俘获形成双星团应当具有共同的运动学信息；但可能具有相当不同的化学成分和年龄。并且两个星团演化的最终命运是倾向于合并。

1.3 Gaia 数据

Gaia 卫星是欧洲空间局 (ESA) 于 2013 年发射的一颗空间天体观量卫星 (Gaia Collaboration et al., 2016)。*Gaia* 卫星被放置于日地拉格朗日 L2 点，其主要任务是制作出具有极高精度的三维银河系图景，并研究银河系中数十亿颗恒星的运动、化学成分、距离等信息。*Gaia* 卫星的观测技术 (图 1-5) 是其独特优势，不仅能够测量恒星的天体测量参数 (位置、自行、视差)、以及不同波段的光度，同时能够获取恒星光谱信息进而得到天体物理参数以及视向速度。*Gaia* 卫星的观测数据对于理解银河系的结构、演化以及宇宙的起源和演化过程具有重要意义。

目前，*Gaia* 自发射以来分别于 2016, 2018, 2020 以及 2022 年发布了 4 次观测数据，4 次数据所包含的数据内容总结于表 1-1。

Gaia DR2 (data release 2, DR2) 发布于 2018 年。它包括了 *Gaia* 卫星在最初 22 个月观测的数据，发布的数据内容包括：

- 约 13 亿颗恒星的 5 维天体测量参数 (位置、视差和自行)，暗星极限星等约为 $G=21$ 等，亮星极限星等约为 $G=3$ 等；

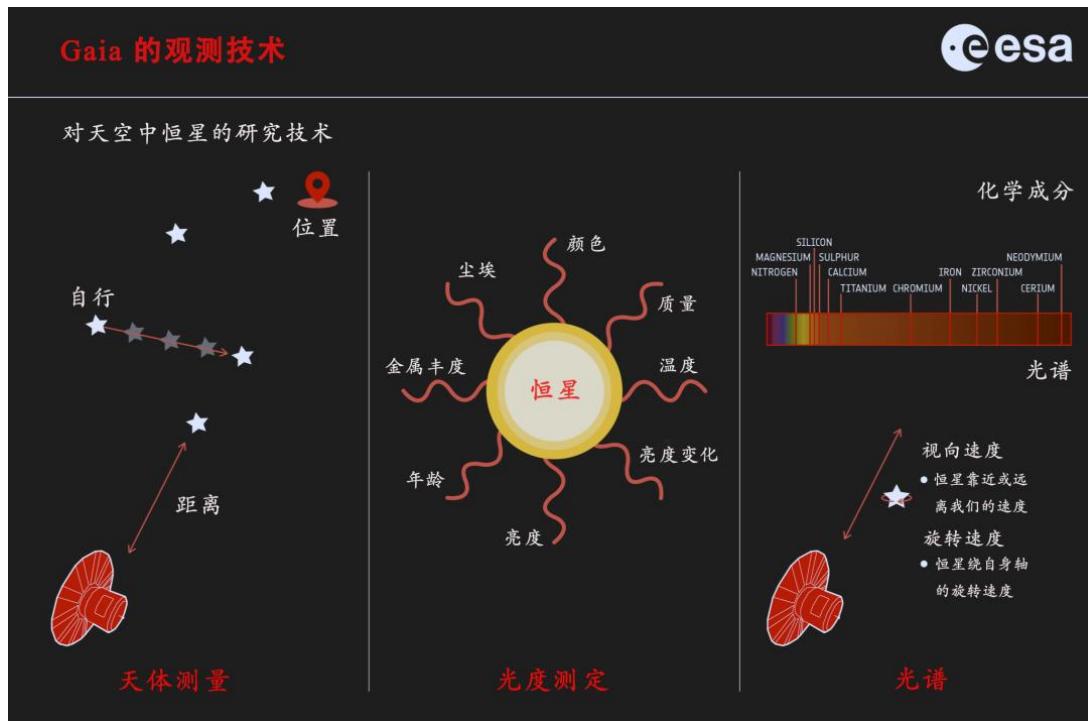


图 1-5 Gaia 卫星的观测技术。图源：ESA/Gaia。

Figure 1-5 Observation technology of Gaia satellite. Image source: ESA/Gaia

- 约 17 亿颗恒星的 G 波段的星等数据，以及近 8 千万颗恒星的红化参数 ($E(G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}})$)；
- 近七百万颗恒星的视向速度 (Katz et al., 2019)。

以上仅列出部分内容，关于 *Gaia DR2* 的更多内容，见 [Gaia Collaboration et al. \(2018\)](#)。*Gaia DR2* 代表了 *Gaia* 卫星任务的一个重大成就，实现了对超过 10 亿颗恒星的视差和自行进行高精度测量的目标。完成了为恒星样本提供视向速度和天体物理信息的第一步。该数据集成为恒星物理学、银河系以及河外天文学研究的重要数据，同时首次展示了 *Gaia* 在太阳系研究中的巨大潜力。与 *Gaia DR1* 相比，*Gaia DR2* 中新提供了恒星的 G_{BP} 和 G_{RP} 波段的星等，对星团研究中颜色-星等图的构建具有重要帮助，使得我们能够更全面地研究星团以及成员星中不同类型的恒星演化阶段。然而，由于观测数据仅限于不到两年，部分数据校准不足以及对航天器、有效载荷和仪器的掌握尚不完全，*Gaia DR2* 仍存在系统误差导致数据使用上仍存在一定的限制。

1.3.1 Gaia DR3

Gaia DR3 数据相对于 *Gaia DR2* 和 *Gaia EDR3* 有重大的进步，*Gaia DR3* 所包含的天体物理数据的数量、质量和种类前所未有的。*Gaia DR3* 数据集进一步扩展了 *Gaia EDR3* 的数据内容，为 *Gaia EDR3* 的源表提供了详细的天体物理参数。*Gaia DR3* 提供了 18 亿天体的位置和以 G 波段星等，对于其中 15 亿源，给出了视差、自行以及 G_{BP} , G_{RP} 波段的星等。*Gaia DR3* 大幅增加了视向速度的数量并

表 1-1 *Gaia* 历次数据发布包含的内容对比Table 1-1 Comparison of content included in *Gaia*'s previous data releases

数据类型	<i>Gaia</i> DR3	<i>Gaia</i> DR2	<i>Gaia</i> DR1
目标源总数量	1,811,709,771	1,692,919,135	1,142,679,769
具有天体测量信息的源	1,467,744,818	1,331,909,727	2,057,050
5 维参数天体	585,416,709		
6 维参数天体	882,328,109		
2 维参数天体	343,964,953	361,009,408	1,140,622,719
具有 G 波段信息的天体	1,806,254,432	1,692,919,135	1,142,679,769
具有 G_{BP} 波段信息的天体	1,542,033,472	1,381,964,755	-
具有 G_{RP} 波段信息的天体	1,554,997,939	1,383,551,713	-
具有视向速度的源	33,812,183	7,224,631	-
具有 G_{RVS} 波段平均星等的天体	32,232,187	-	-
具有 BP/RP 平均光谱的天体	219,197,643	-	-
具有 RVS 平均光谱的天体	999,645	-	-
变源	10 509 536	550,737	3,194
变源种类(监督学习)	24	6	2
具有 BP/RP 光谱计算的天体物理参数的天体	470,759,263	161,497,595	-
具有 RVS 光谱计算的天体物理参数的天体	5,591,594	-	-
具有 RVS 光谱计算的化学丰度的天体(高达 13 种)	2,513,593	-	-

表注：数据来源于 *Gaia*^a官网。表中 5 维参数解算：二维天球坐标位置 (α, δ)、自行 (μ_α^*, μ_δ)、视差 (ϖ)。6

维参数解算：比 5 维参数多加上视向速度参数 (Rv)。2 维参数解算仅包含 (α, δ)。

Note: The data comes from *Gaia* official website. five-parameter astrometric solution: position on the sky (α, δ), parallax (ϖ), and proper motion (μ_α^*, μ_δ);

^a<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>

且提供了大量的天体物理参数。*Gaia* DR3 包含了最新的约 3 千 3 百万颗恒星的视向速度 (Katz et al., 2023)，其中恒星 $G_{\text{RVS}} \leq 14 \text{ mag}$ 、 $3100 \leq T_{\text{eff}} \leq 14500 \text{ K}$ ；同时提供了近 4.70 亿天体物理参数。

Gaia DR3 中的新提供的数据包括低分辨率蓝端 (BP) 和红端 (RP) 光谱以及高分辨率 Radial Velocity Spectrometer (RVS) 光谱；视向速度的测量极限扩展至更暗的源；从 RVS 光谱中得到的线宽和金属丰度信息；变星分类和性质。*Gaia* DR3 还包括非单星、类星体和星系的结果。

Gaia DR2 与 *Gaia* DR3 部分测量参数的不确定度对比结果见表 1-2, *Gaia* DR3 相较于相比 *Gaia* DR2 位置精度提高 2 倍左右，自行精度提高 2-3 倍，视差精度提高 20% 以上。*Gaia* DR3 提供的恒星视向速度约为 *Gaia* DR2 的 4.5 倍，其平均精度在 $G_{\text{RVS}} = 12 \text{ mag}$ 可以达到 1.3 km s^{-1} ，在 $G_{\text{RVS}} = 14 \text{ mag}$ 时可以达到 6.4 km s^{-1} 。如此高的速度分辨率不但能够在速度空间将大部分成员星 (AFGK 型星) 和场星区分开来，甚至能够分辨星团中约 1 km s^{-1} 左右的内部运动。

表 1-2 *Gaia* 数据质量**Table 1-2 Basic performance statistics for *Gaia* data.**

数据类型	<i>Gaia</i> DR2 典型不确定度	<i>Gaia</i> DR3 典型不确定度
位置与视差	0.02–0.04 mas at $G < 15$ 0.1 mas at $G = 17$ 0.7 mas at $G = 20$ 2 mas at $G = 21$	
位置		0.01–0.02 mas at $G < 15$ 0.05 mas at $G = 17$ 0.4 mas at $G = 20$ 1 mas at $G = 21$
视差		0.02–0.03 mas at $G < 15$ 0.07 mas at $G = 17$ 0.5 mas at $G = 20$ 1.3 mas at $G = 21$
自行	0.07 mas yr ⁻¹ at $G < 15$ 0.2 mas yr ⁻¹ at $G = 17$ 1.2 mas yr ⁻¹ at $G = 20$ 3 mas yr ⁻¹ at $G = 21$	0.02–0.03 mas yr ⁻¹ at $G < 15$ 0.07 mas yr ⁻¹ at $G = 17$ 0.5 mas yr ⁻¹ at $G = 20$ 1.4 mas yr ⁻¹ at $G = 21$
G 波段光度	0.3 mmag at $G < 13$ 2 mmag at $G = 17$ 10 mmag at $G = 20$	0.3 mmag at $G < 13$ 1 mmag at $G = 17$ 6 mmag at $G = 20$
G_{BP} 波段光度	2 mmag at $G < 13$ 10 mmag at $G = 17$ 200 mmag at $G = 20$	0.9 mmag at $G < 13$ 12 mmag at $G = 17$ 108 mmag at $G = 20$
G_{RP} 波段光度	2 mmag at $G < 13$ 10 mmag at $G = 17$ 200 mmag at $G = 20$	0.6 mmag at $G < 13$ 6 mmag at $G = 17$ 52 mmag at $G = 20$
视向速度	0.3 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} < 8$ 0.6 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} = 10$ 1.8 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} = 11.75$	1.3 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} = 12$ 6.4 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} = 14$
视向速度系统误差	< 0.1 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} < 9$ 0.5 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} = 11.75$	< 0.1 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} < 11$ 0.4 km s ⁻¹ at $G_{\text{RVS}} = 11.75$

Gaia 任务原计划于 2019 年 7 月结束，现已将任务延长至 2025 年底。到那时，*Gaia* 将收集超过 10 年的数据，预计还会发布两个数据版本，即 *Gaia DR4* 和 *Gaia DR5*。*Gaia DR4* 将基于 66 个月的数据，它的一个主要新方面是将包括所有时域的观测数据，即所有历元的天体测量、宽波段测光、视向速度和光谱数据。*Gaia DR4* 预计会在 2025 年后发布。*Gaia DR5* 将基于在整个任务期间收集的数据，预计将在 2030 年底之前发布。图 1-6 总结了迄今为止 *Gaia* 所有数据发布的天体测量(视差, 自行)测量不确定度对比，并且加入了 *Gaia DR4* 和 *Gaia DR5* 预测不确定度。*Gaia DR3* 相较于相比 *Gaia DR2* 测量精度显著提升，未来 *Gaia DR4* 和 *Gaia DR5* 相较以往的数据将有更加显著的提升。高精度的天体测量参数不仅对疏散星团的成员星判定提供了坚实的数据基础，而且加入高精度的速度信息，对于双星团和星团群认证与性质研究至关重要。

1.3.2 *Gaia* 对星团研究的影响

Gaia 提供的海量高精度的运动学信息，促进了大量的科学工作，为疏散星团的整体性质研究提供了新的视角。疏散星团研究的重要基础是可靠地确定星团成员星。而在疏散星团搜寻中，认证星团成员往往依赖观测样本数据的精度。*Gaia* 任务提供了超过十亿颗恒星的高精度五维天体测量参数 (α 、 δ 、 μ_{α}^* 、 μ_{δ} 、 ϖ) 和三个波段的星等数据 (G 、 G_{BP} 、 G_{RP})。正如图 1-7 所展示，*Gaia* 对密集星场进行观测有显著的优势，使得能够更精确、更完备的认证星团成员。借助 *Gaia* 海量高精度的数据，结合不断兴起的机器学习算法，使得不仅能够准确地判定核心星团成员，同时也能有效识别低密度的外围子结构，如恒星晕，潮汐尾等。例如 [Zhang et al. \(2020\)](#); [Meingast et al. \(2021\)](#); [Tarricq et al. \(2022\)](#) 的研究表明，太阳邻域许多疏散星团在银河系潮汐力的作用下会被拉出潮汐尾，这是星团在银河系潮汐力作用下瓦解的证据；又比如，[Zhong et al. \(2019\)](#) 使用 DBSCAN 判定的星团外围低密度的恒星晕子结构（见图 1-8）。

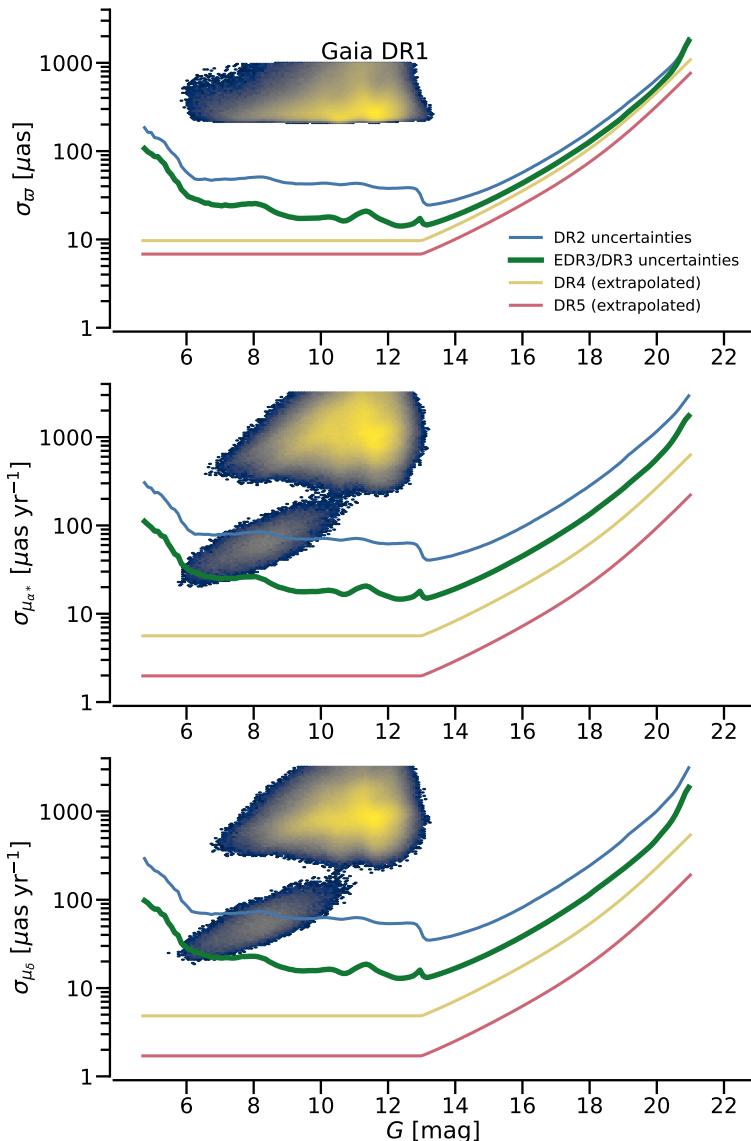


图 1-6 Gaia 第 1-5 次数据发布的天体测量参数不确定度随 G 波段变化

Figure 1-6 Uncertainties on the astrometric parameters vs. G for Gaia data releases 1–5

注: Gaia 第 4-5 次数据版本将在未来发布。上：视差 ω 不确定度随 G 波段星等的变化，中下：自行 (μ_α^* , μ_δ) 不确定度随 G 波段星等的变化。其中 Gaia DR1 以密度图表示，颜色越黄表示密度越高。图源：[Gaia Collaboration et al. \(2023\)](#)

Gaia DR4-5 will be released in the future. The panels show from top to bottom the uncertainties in parallax, proper motion in Right Ascension, and proper motion in Declination. The uncertainties for Gaia DR1 are shown in the form of density maps, with lighter colors indicating a higher density of sources. Image source: [Gaia Collaboration et al. \(2023\)](#)

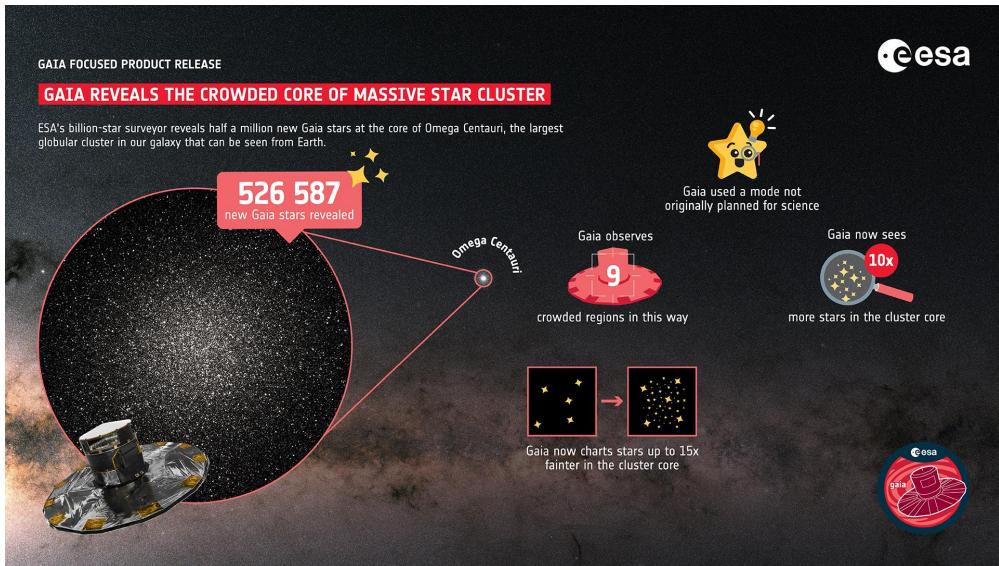


图 1-7 Gaia 卫星观测星团核心的优势。图源：ESA Gaia。

Figure 1-7 The advantages of Gaia observations on the cores of star clusters.

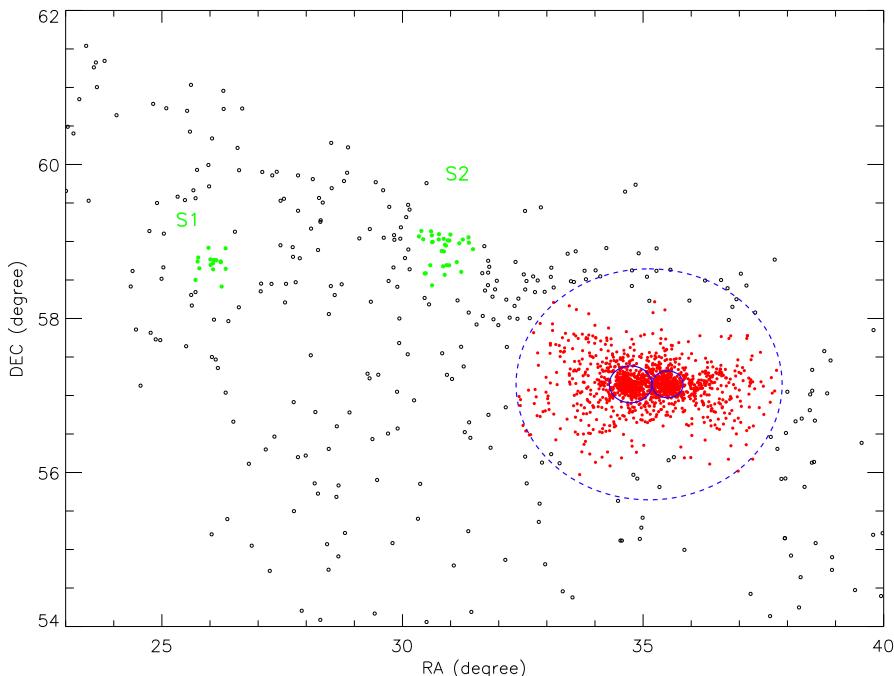


图 1-8 双星团 NGC 869 和 NGC 884 的外围低密度子结构。

Figure 1-8 Stellar halo structure outside the double cluster NGC 869 and NGC 884.

注：绿色和红色散点分别代表星团的恒星晕和核心，S1 和 S2 是双星团的延伸丝状子结构。黑色实线为星团的核半径，虚线为Zhong et al. (2019) 工作中的延展结构的区域。图片摘自Zhong et al. (2019)。

Note. The green and red dots represent the stellar halos and cores of the clusters, respectively, while S1 and S2 are the long-stretching filamentary substructures. The solid black line represents the core radius of the clusters, and the dashed line indicates the region of extended structures as identified in the work of Zhong et al. 2019.

1.4 疏散星团以及星团群搜寻进展

研究疏散星团，首要工作便是精准地判定星团成员星，即从繁多的场星中筛选出真正属于星团的成员。这一步骤是研究疏散星团的形成与演化以及银河系结构等天体物理研究问题的重要前提。常用的疏散星团成员星判定方法主要依据是恒星在位置空间、自行空间以及颜色-星等图上的分布特征。由于大多数疏散星团位于银河系银盘上，场星的干扰使得准确的成员星判定变得异常困难，进而影响到星团参数（如距离、运动学信息和年龄）的可靠性 (Netopil et al., 2015)。因此，如何有效区分星团成员星与场星，是一个颇具挑战性的课题。自 *Gaia* 卫星升空以来，疏散星团的成员星判定工作取得了显著进展，新发现的疏散星团数量大幅增加。

因此，将已有的疏散星团汇编成可公开访问的数据库显得尤为重要。建立一个包括星团位置、年龄、金属丰度、距离等参数在内的、统一的疏散星团表，不仅可以帮助研究人员研究新发现的星团，同时星团表中列出的真实星团是测试和改进新的星团检测算法最自然的训练数据集。而且统一的疏散星团表能够为双星团、星团群的研究提供更全面的数据支持。通过比较大量的双星团、星团群的特征和性质，可以深入理解星团的形成和演化历史，探讨双星团、星团群之间的相互作用以及对银河系结构和演化的影响。

1.4.1 星表数据

自 18 世纪末以来，人们做了大量的工作来建立疏散星团的汇编表，并对星团的平均位置、自行、距离等参数进行估计。最早的星团汇编目录之一是梅西耶星表 (Messier Catalogue, Messier 1774)，列出了近 30 个星团。这项工作很快被赫歇尔的 One Thousand New Nebulae and Clusters of Stars (Herschel, 1786) 所更新。一个世纪后，Dreyer 汇编的 New General Catalogue of Nebulae and Clusters (NGC, Dreyer 1888) 发表，其中列出了将近 650 个星团，比梅西耶星表中的收录的天体数量多 20 多倍，这是当时数据最全面的星表。

在那之后，星团的发现和汇编的速度放缓了。几乎在一个世纪后 Mermilliod 1995 基于 Lynga 1987 汇编的星团表进行了更新，最终获得了包含 1100 多个星团在内的星团表 (Mermilliod, 1995)。这项工作是 The Open Cluster Database (WEBDA¹, Mermilliod et al. 2003) 星表的基础，WEBDA 是星团研究中广泛使用的数据库。在接下来的十年中，随着多个大型巡天数据的发布，例如 HIPPARCOS 和 Tycho (Høg et al., 1997; Perryman et al., 1997) 的天体测量数据以及 2MASS (Skrutskie et al., 2006) 获得的宽视场红外数据，提供了数百万颗恒星的观测数据，推进了新的星团候选体的搜寻工作，尤其是对于那些暗弱的、被尘埃遮挡的以及距离较远的天体。Froebrich et al. 2007 开展的星团搜寻工作中，证认了 1788 个星团，其中 1021 个星团是首次报道。

随后，广泛使用的银河系疏散星团表包括 The New Catalogue of Optically

¹<https://webda.physics.muni.cz/webda.html>

Visible Open Clusters and Candidates (NCOVOCC², [Dias et al. 2002](#))、Milky Way Star Clusters (MWSC³, [Kharchenko et al. 2013](#))。Dias et al. (2002) 使用多种方法与多个光度系统的数据，对不同文献研究中得到的约 2200 个星团的参数进行了精心整理，其中大部分在 2 kpc 内。但是该星团表中星团的性质参数，由不同工作的测定结果编纂而成，并非通过统一方法获取，因此在使用上有一定的限制。[Kharchenko et al. 2013](#)结合 PPMXL([Roeser et al., 2010](#)) 天体测量星表的恒星位置与自行数据，以及 2MASS 中大约 4.7 亿天体的近红外光度数据，针对当时已知的 3784 个星团重新统一进行认证。经过认证，他们获得了其中 3006 个星团样本的基本性质参数（位置、自行、距离、年龄等）和成员星数据，其中 2800 多个属于疏散星团及其候选体，命名为 MWSC 星团表。在 *Gaia* 数据释放之前，MWSC 星团表是最大且采用统一方法获得的星团表。基于此项星表的结果，曾经认为距离太阳 1.8 kpc 以内的已知疏散星团样本观测上已接近完备。然而，作为 *Gaia* 时代之前的一个较为完备的星团表，MWSC 星团表也存在一定限制。受当时观测设备和方法的局限，其数据精度相对较低。此外，随着天文学研究的深入，后续不断有新发现的星团，例如[Schmeja et al. \(2014\)](#) 搜寻得到了 782 个星团，其中 139 个疏散星团是首次报道的，并且测量了星团年龄；[Scholz et al. \(2015\)](#) 搜寻得到了 327 个星团，其中包含 63 个新疏散星团。遗憾的是，MWSC 星团表未能包含这些新发现的星团。

随着 *Gaia* 数据的公布，星团搜寻工作进入了一个全新的时代。海量高精度的天体测量数据与多种机器学习聚类算法的结合使用，例如 (UPMASK⁴, DBSCAN⁵、HDBSCAN⁶、GMMs⁷、FOF⁸，使得星团搜寻的效率大大提高。[Castro-Ginard et al. \(2018, 2019, 2020\)](#) 首次报道了数百个疏散星团，其创新之处在于将机器学习算法 DBSCAN 和人工神经网络 (ANN⁹) 应用于星团聚类分析。通过在五维参数空间 (α 、 δ 、 μ_{α}^* 、 μ_{δ} 、 σ) 证认星团，最终发现了 600 多个新的疏散星团。[Cantat-Gaudin et al. \(2019a\)](#) 在 Perseus 旋臂方向上发现了 41 个新疏散星团。[Sim et al. \(2019\)](#) 通过目视检查恒星的位置以及自行空间分布，证认了 207 个新疏散星团。此外，[Liu et al. \(2019\)](#) 使用了在星系团研究中广泛使用的 FOF 方法展开星团搜寻工作，最后得到了 2443 个疏散星团及其成员，其中包括 76 个首次报道的星团。

迄今为止，基于 *Gaia* 数据已经证认出数千个疏散星团，但是由于来自不同的工作，使用的 *Gaia* 数据版本以及成员星判定方法与标准不尽相同，使得星团性质的测定结果存在差异。为此，[Cantat-Gaudin et al. \(2018, 2020a,b\)](#) 等开展了一

²<http://www.astro.iag.usp.br/~wilton/>

³<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/558/A53>

⁴ UPMASK: Unsupervised Photometric Membership Assignment in Stellar Clusters

⁵ DBSCAN: Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise

⁶ HDBSCAN: Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise

⁷ GMMs: Gaussian mixture models

⁸ Friends of Friends algorithm

⁹ ANN:artificial neural network

系列工作，旨在基于 *Gaia* DR2 数据，对以往报道的星团使用一致的方法统一进行成员星判定，并且确定星团平均参数。

首先 Cantat-Gaudin et al. (2018) (简称 CG18) 整合了 Dias et al. (2002); Kharchenko et al. (2013); Froebrich et al. (2007); Schmeja et al. (2014); Scholz et al. (2015); Röser et al. (2016) 等多个工作所报道的 3328 个疏散星团，其中大部分来自 Dias et al. (2002); Kharchenko et al. (2013)。对于这个大样本，他们基于 *Gaia* DR2 数据使用 UPMASK 聚类算法对星团进行聚类，得到了 1229 个星团的成员星以及可靠的星团参数。

而后，Cantat-Gaudin et al. (2020a) (简称 CG20a) 针对先前遗漏的以及后续新发现的星团展开成员星判定并给出星团参数，其中包括：

- Castro-Ginard et al. (2018, 2019) 新增加的星团，以 UBC 命名 (University of Barcelona)；
- Ferreira et al. (2019) 新增的命名为 UFMG 的星团；
- Cantat-Gaudin et al. (2019a) 新增的 COIN 星团 (Cosmo statistics Initiative)

基于以上星团样本，最终聚类得到了 1481 个疏散星团的成员星。

最近，Cantat-Gaudin et al. (2020b) (简称 CG20b) 编制了一个更大的疏散星团星表，在 Cantat-Gaudin et al. (2020a) 基础上加入了新的样本，其中包括 Castro-Ginard et al. (2020) 利用 DBSCAN 算法新搜寻的星团和 Liu et al. (2019) 新报道的星团。最终聚类得到了 2017 个疏散星团的成员星，并以相同的方法确定了其中大多数星团的参数，包括位置、距离和年龄。CG20b 提供了一套相对完整且方法统一的星团表，这为星团及银河系结构的研究奠定了坚实的数据基础。值得一提的是，CG20b 还采用了大量具有年龄参数的星团样本，进一步用以研究不同年龄的星团在银河系中的分布。如图 1-9 所示，年老的星团更倾向于分布在高银纬地区，这一明显的趋势在先前 Bonatto et al. (2006) 的研究中并未得到体现。通过这一发现，我们可以更加深入地理解银河系的结构及其演化历程。

表 1-3 中总结了 CG18, CG20a, CG20b 中所使用的星团样本的情况，包括以上提及的各个工作中所发现的新星团的数量。

值得注意的是，Qin et al. (2023) (简称 Qin23) 基于 *Gaia* DR3 数据，运用 pyUPMASK 和 HDBSCAN 算法，系统地搜索并研究了距离太阳 500 pc 范围内的疏散星团。经过细致的考察，该工作最终确认了 324 个疏散星团，其中包括 101 个新发现的星团。这一工作不仅将太阳邻域的疏散星团数量增加了 45%，还扩大了各个星团的成员星搜寻范围，进一步丰富了已知星团的成员星数量。同时，该研究还提供了详尽的星团参数，其中包括五维参数、年龄、星团结构等参数。此外，该研究还补充了部分在 CG20b 中未给出成员的星团信息，如 Sim et al. (2019) 以及 CG20b 之后新报道的星团，从而构建了太阳邻域 500 pc 以内相对完备的疏散星团成员星表。图 1-10 展示了 324 个星团在 l-b 空间的分布情况，许多首次报道的星团有较大的半数目半径。

表 1-3 Cantat-Gaudin et al. (2018, 2020a,b) 系列工作中使用的星团样本
Table 1-3 Open clusters sample used in the Cantat-Gaudin et al. (2018, 2020a,b) series of work

Source	ID	N
Dias et al. (2002)	DAML	2167
Kharchenko et al. (2013)	MWSC	2854
Schmeja et al. (2014)	MWSC	139
Scholz et al. (2015)	MWSC	63
Röser et al. (2016)	RSG	9
Castro-Ginard et al. (2018)	UBC	23
Castro-Ginard et al. (2019)	UBC	53
Sim et al. (2019)	UPK	207
Liu et al. (2019)	FoF	76
Ferreira et al. (2019)	UFMG	3
Cantat-Gaudin et al. (2019a)	COIN	41
Castro-Ginard et al. (2020)	UBC	570

表注: [Dias et al. \(2002\)](#); [Kharchenko et al. \(2013\)](#) 以外的工作中, N 为新发现的星团数目。

Note. In work other than [Dias et al. \(2002\)](#); [Kharchenko et al. \(2013\)](#), N is the number of newly discovered open clusters.

1.4.2 多星团搜寻标准

对于银河系中的双星团现象,早在1995年, [Subramaniam et al. \(1995\)](#)便开始了双星团的搜索工作。他们基于[Lynga \(1995\)](#)汇编的星团表进行了深入研究,发现大约8%的疏散星团可能是双星团,这一比例与大小麦哲伦星云中的双星团比例颇为相似。这一发现为我们理解银河系中星团的形成和演化提供了重要线索。随后, [de la Fuente Marcos et al. \(2009\)](#)通过深入分析WEBDA和NCOVOCC星表,进一步寻找双星团候选样本。他们的研究结果表明,在太阳附近,至少有12%的疏散星团正在通过引力作用与其他星团发生合并。这一发现不仅证实了双星团现象在银河系中的普遍性,也为我们揭示了星团之间复杂而精彩的相互作用过程。这些研究不仅丰富了我们对银河系星团结构的认识,也为我们进一步探索星团的形成、演化以及星团间的相互作用提供了宝贵的线索和启示。

[de la Fuente Marcos et al. \(2009\)](#)首次系统地探讨了双星团的可能形成模式,并编制了部分银河系双星团的候选星团表。在筛选双星团时,他们采用了纯动力学的标准,即要求双星团之间的距离必须小于银盘中星团平均潮汐半径(10 pc, [Binney et al. \(2008\)](#))的三倍。同时,他们参考[Innanen et al. 1972](#)的结论,即当两个星团之间的距离大于星团外半径的三倍时,星团之间几乎不会发生相互作用。

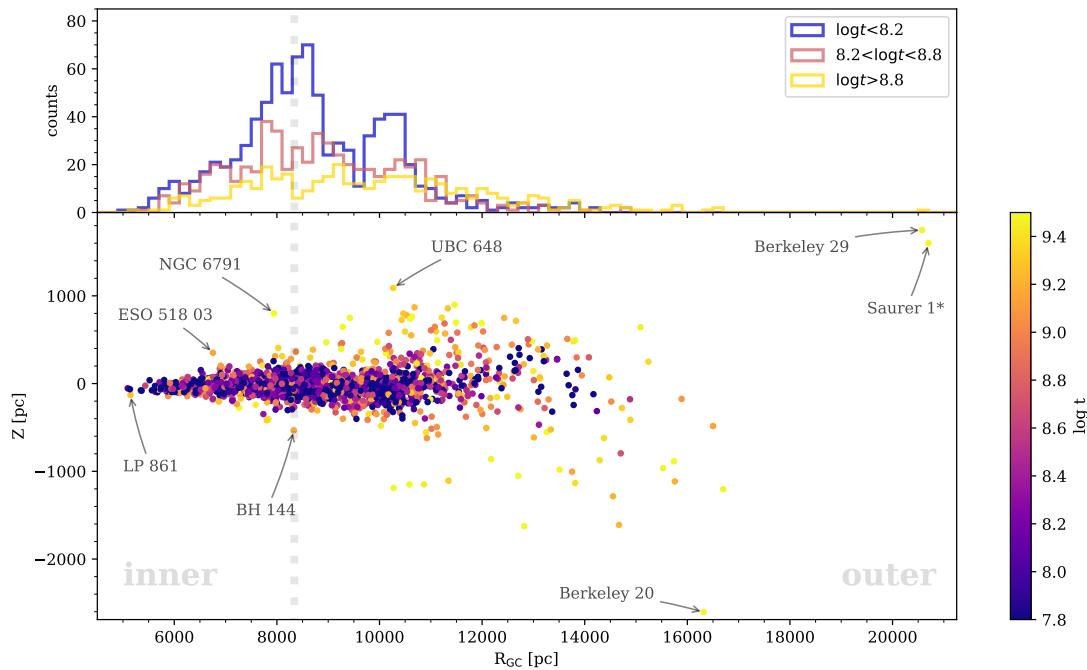


图 1-9 CG20b 的星团样本年龄以及空间分布

Figure 1-9 Age and spatial distribution of OC samples from CG20b

注: 上: 3个不同年龄范围的星团银心距分布; 下: 星团在银心距-银面距的分布情况, 颜色条表示年龄。两个图中垂直的虚线表示太阳所在位置。图片摘自 CG20b。

Note. Top: galactocentric distribution of the OC sample from CG20b in three age bins. Bottom: altitude above the Galactic mid-plane of these clusters as a function of their Galactocentric radius and coloured by age. In both panels, the vertical dotted line represents the position of the Sun.

Image source: CG20b

基于上述标准, [de la Fuente Marcos et al. \(2009\)](#) 设定了星团间距离小于 30 pc 的限制条件, 并利用 WEBDA 和 NCOVOCC 的数据进行搜寻。最终, 他们成功地在 WEBDA 数据中找到了 34 对双星团, 在 NCOVOCC 数据中找到了 27 对双星团。这一研究不仅为我们揭示了双星团在银河系中的存在情况, 也为后续的双星团研究提供了重要的参考和依据。

自从[de la Fuente Marcos et al. \(2009, 2010\)](#)率先给出银河系双星团样本后, 有关银河系双星团及星团群的研究便不断涌现。这些研究往往是基于空间投影信息来搜寻双星团, 但是实际上角距离相近的星团不一定在物理上相关联。在大多数情况下, 它们只是碰巧在视线上重叠, 不具有共同的运动学特性, 并非物理双星团。从统计学上讲, 在缺少星团三维速度信息的情况下, 将它们错误识别为真实双星团的可能性很大。

而后[Conrad et al. \(2017\)](#)首次利用 6 维空间信息(包括位置、自行、视差以及视向速度信息)来研究银河系疏散星团是否存在成对或成群现象。该研究以

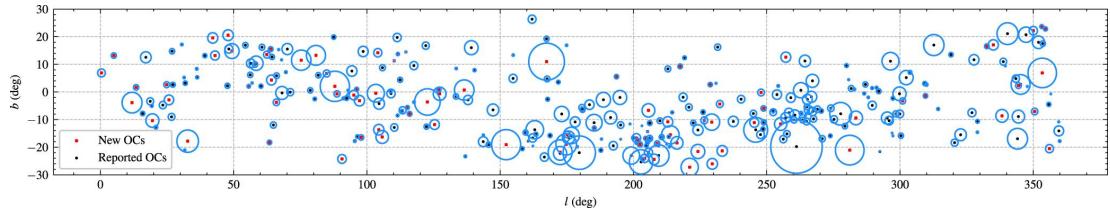


图 1-10 324 个星团在银经-银纬中的分布情况

Figure 1-10 Distribution of the 324 OCs population in Galactic coordinates

注: 黑色点是 citet{Qin2023ApJS} 证认的以往报道过的星团，红色方框是该工作中新证认的星团，蓝色圈代表星团的半数目半径。图片摘自 Qin et al. (2023)。

Note. The black points represent the reported OCs found in Qin et al. (2023), and the red squares represent the OCs newly identified in this work using *Gaia* DR3. The blue circles refer to the r_h (half number radius) values given by Qin et al. 2023. Image source: Qin et al. (2023)

COCD，即疏散星团汇编目录为基础，结合了 RAVE¹⁰(Steinmetz et al. 2006) 提供的视向速度，从中筛选出了 432 个具有完整 6D 数据信息的疏散星团作为样本，旨在寻找双星团。图 1-11展示了 432 个星团样本中星团之间的间距和星团内部速度弥散分布情况，左图展示了星团与最邻近星团之间的 3D 距离分布，我们可以看到在 50 pc 和 100 pc 附近有两个明显的峰值。根据Conrad et al. (2017) 的推断，这可能是银河系中最邻近疏散星团之间距离的典型特征值。双星团之间的距离以及星团群内成员星团的间距应该明显小于成员之间的典型间距，因此将搜寻的距离条件设定为小于 100 pc。

同时，筛选双星团以及星团群的速度标准应当与星团的内部速度弥散的典型值相关。因此，Conrad et al. (2017) 对星团内部速度弥散进行了研究。图 1-11右图展示了所用星团样本的内部 3D 速度弥散度分布情况，UVW 速度的弥散度峰值在 $3 \sim 4 \text{ km s}^{-1}$ ，大多数小于 10 km s^{-1} ，最大不超过 20 km s^{-1} 。根据右图，Conrad et al. (2017) 认为存在物理联系的双星团之间的速度差应该小于 $10 - 20 \text{ km s}^{-1}$ 。因此，他们分别使用星团之间速度差异小于 10 km s^{-1} 与 20 km s^{-1} 作为标准进行搜寻，并且将成员星团小于或等于 10 个的称为星团群 (group)，包含 10 个以上成员星团的称作星团复合体 (complex)。以空间间距小于 100 pc、速度差异小于 10 km s^{-1} 为条件，证认了 14 对双星团、4 组包括 $3 \sim 5$ 个成员星团的星团群以及 1 组具有 15 个成员星团的星团复合体。以空间间距小于 100 pc、速度差异小于 20 km s^{-1} 为条件，证认得到了 31 对双星团、4 组包括 $3 \sim 9$ 个成员星团的星团群以及 1 组具有 15 个成员星团的星团复合体。

尽管在这项工作中搜寻到了不少的双星团及星团群，但是使用的疏散星团成员星样本的完备性与可靠性仍然不足，并且仍有许多疏散星团的距离、运动学信息是缺失的，导致难以准确地研究双星团的物理性质。

¹⁰<https://www.rave-survey.org/>

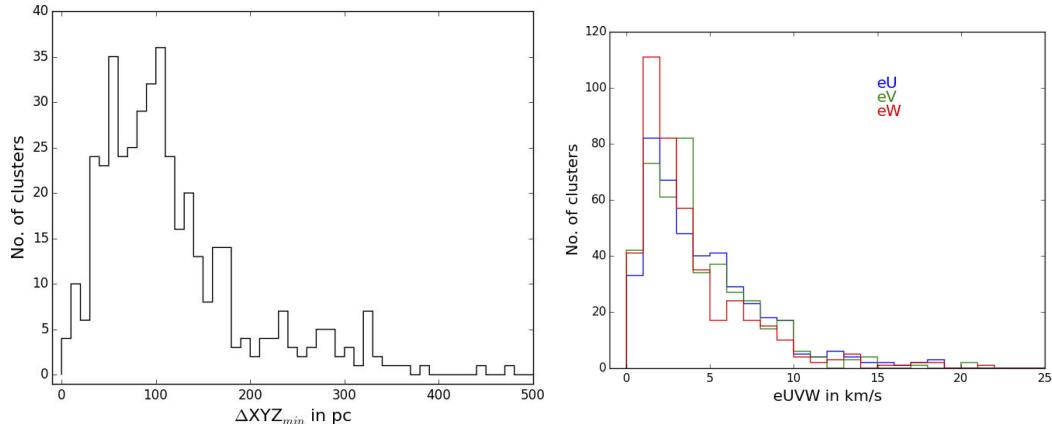


图 1-11 星团与最邻近星团的间距分布以及星团内禀速度弥散分布

Figure 1-11 Spatial separation of the nearest neighbours and intrinsic velocity dispersion distribution of OCs

注: 上: 星团样本中每个星团与最邻近星团的三维距离分布情况。下: 星团三维速度的内禀弥散, 其中蓝色, 绿色, 红色分别表示 U, V, W 三个方向的速度分量图片摘自 [Conrad et al. \(2017\)](#)。

Note. top: Histograms for the spatial separation of the nearest neighbours in XYZ-space. bottom: Histograms for the uncertainties in the computed and corrected Cartesian velocities(U-blue, V-green, W-red)in our OC working sample. Image source: [Conrad et al. \(2017\)](#).

在 *Gaia* 数据释放之前, 对银河系双星团及星团群的研究并不多, 主要原因是缺乏高精度天体测量数据, 难以进行深入探讨。随着 *Gaia* 数据的发布, 提供了大量的天体测量数据(位置、视差和自行)和多波段的测光数据([Gaia Collaboration et al., 2018](#)), 引起了对银河系双星团的研究热潮。[Soubiran et al. \(2019\)](#) 以 CG18 提供的 1229 个疏散星团为样本, 筛选出了 406 个高质量的样本。利用 *Gaia* DR2 数据, 根据星团之间的距离和三维速度之差来认证双星团, 其中星团与最邻近星团之间 3D 距离分布的峰值为 150 pc, 对应的速度差的峰值为 3 km s^{-1} 。速度差峰值较低是因为在样本中占主导地位的年轻疏散星团群体具有非常相似的速度。所以, 在此工作中将星团间距离差异小于 100 pc, 速度差异小于 5 km s^{-1} 作为双星团的选择标准, 由此搜寻得到 21 对双星团。

[Piecka et al. \(2021\)](#) 基于 CG20a 提供的 1481 个星团的数据, 使用了不同的双星团/星团群筛选标准。根据星团成员星之间的传递性进行筛选: 如果星团 A 与星团 B 具有共同的成员星, 并且星团 B 与星团 C 也有共同的成员星, 那么这三个星团就形成一个星团群。最终认证得到了 52 双星团、4 组由 3 个星团组成的星团群、3 组包含 4 个星团的星团群以及 1 个由 5 个星团组成的星团群。由于成员星团之间拥有公共成员星, 因此所得的星团群在 5D 相空间的性质非常相近。

[Casado \(2021\)](#) 根据 [Conrad et al. \(2017\)](#) 研究双星团所用的筛选标准, 基于 *Gaia* EDR3 的数据, 并利用当时最新整理的疏散星团表 CG20b。在银经 240-271 度的天区范围内搜寻银河系中的双星团及星团群样本。根据 [Conrad et al. \(2017\)](#)

研究双星团的选择标准，认为组成双星团的成员星团之间距离应该小于 100 pc，切向/视向速度差小于 10 km s^{-1} 。通过限制星团间距离及速度差筛选得到了 11 对双星团和 13 组星团群。较之以往的研究，此项研究搜寻到的双星团样本得到较大增加，但由于分析样本的不完整性，仍不足以可靠地确定银河系中双星团和星团群的比例。

[Song et al. \(2022\)](#) 以 CG20b 提供的 1867 个星团的成员星数据以及详细的星团参数，将星团之间两两间距小于 50 pc 作为筛选标准，最终筛选得到了 14 对双星团。

在最近的工作中，[Qin et al. \(2023\)](#) 基于 *Gaia* DR3 数据，系统搜寻了距离太阳 500pc 范围内的 324 个疏散星团，其中首次发现 101 个新的疏散星团；在这些太阳邻域星团样本中，基于较为严苛的筛选条件，即星团中心间距 $\Delta\text{pos} < 20 \text{ pc}$ ，速度差异小 $\Delta V < 5 \text{ km s}^{-1}$ ，年龄接近一致 $\Delta\text{Age} < 30 \text{ Myr}$ 。可靠地确认出 15 对双星团及 3 组星团群，其中 12 对双星团的证认成果为首次报道。

随着数据精度的提升，以及更大的疏散星团样本，筛选双星团的标准也略有不同，对于上述研究工作中的筛选的条件及结果我们做了简单的整理汇总，结果见表 1-4。高精度的天体测量数据有助于搜寻证认更多新的星团，同时高精度的运动学数据可以帮助我们更加深入研究双星团、多星团之间的运动学联系。基于 *Gaia* 数据，我们期待在银河系中找到更多的双星团/星团群，从而能够深入了解星团的形成和演化，加深对银盘结构与演化的理解。

1.4.3 星团群研究进展

得益于 *Gaia* 提供的高精度空间、运动学数据，越来越多的星团群被发现。这些新发现的星团群的空间分布特征与尺度各异，被赋予了非常有趣的名称，比如“pearls” ([Coronado et al., 2022](#))、“rings” ([Cantat-Gaudin et al., 2019b](#))、“strings” ([Kounkel et al., 2019](#))、“relic filaments” ([Beccari et al., 2020](#)) 以及“snakes” ([Tian, 2020](#)) 等。

尤其是 Vela–Puppis 天区的星团群被人们反复研究，一系列的工作围绕该天区星团群的起源进行了讨论 ([Beccari et al., 2020](#); [Tian, 2020](#); [Wang et al., 2022](#); [Pang et al., 2021b](#))，为星团群的形成机制与演化模式提供了新的视角。其中最著名的 Vela OB2 天区，它的距离为 300-500 pc，其包含大量年轻恒星 ($\sim 10 \text{ Myr}$)，同时也包括一些相对年老的星团 (NGC 2547、NGC 2451B、以及 Trumpler 10 等)。

最初，[Beccari et al. \(2020\)](#) 基于 *Gaia* DR2 数据，在 Vela OB2 天区发现了一个年龄与星团 NGC 2547 相似的新星团，命名为 BBJ 1，并且这两个星团由另外 7 个年轻星团组成的“桥”结构相连。整个星团群结构横跨天区 260 pc，非常年轻（大约 35 Myr），可以排除其是老年星团的潮汐尾结构。他们通过 5 维 (α 、 δ 、 ϖ 、 μ_α^* 、 μ_δ) 数据以及颜色-星等图的分析，推断这个星团群起源于同一片分子云，并称这个结构为丝状恒星结构遗迹 (relic stellar filament)。

而后，[Tian \(2020\)](#) 同样借助 *Gaia* DR2 数据在丝状恒星结构附近，新发现了

表 1-4 双星团及星团群主要甄选标准和结果

Table 1-4 Primary selection criteria and results of binary cluster and open cluster groups

序号	样本来源	数据类型	选择标准	结果	参考文献
1	WEBDA	pre- <i>Gaia</i>	$\Delta pos < 30 \text{ pc}$	34 对双星团	de La Fuente Marcos et al. (2009)
1	NCOVOCC	pre- <i>Gaia</i>	$\Delta pos < 30 \text{ pc}$	27 对双星团	de la Fuente Marcos et al. (2009)
2	COCD	pre- <i>Gaia</i>	$\Delta pos < 100 \text{ pc}$ $\Delta V < 10 \text{ km s}^{-1}$	14 对双星团 5 组星团群 1 组星团复合体	Conrad et al. (2017)
2	COCD	pre- <i>Gaia</i>	$\Delta pos < 100 \text{ pc}$ $\Delta V < 20 \text{ km s}^{-1}$	31 对双星团 9 组星团群 1 组星团复合体	Conrad et al. (2017)
3	CG18	<i>Gaia</i> DR2	$\Delta pos < 100 \text{ pc}$ $\Delta V < 5 \text{ km s}^{-1}$	21 对双星团	Soubiran et al. (2019)
4	CG20a	<i>Gaia</i> DR2	共有成员星	52 对双星团 8 组星团群	Piecka et al. (2021)
5	CG20b	<i>Gaia</i> EDR3	$\Delta pos < 100 \text{ pc}$ $\Delta V < 10 \text{ km s}^{-1}$	1 对双星团 13 组星团群	Casado (2021)
5	CG20b	<i>Gaia</i> DR2	$\Delta pos < 50 \text{ pc}$	14 对双星团	Song et al. (2022)
6	OCSN	<i>Gaia</i> DR3	$\Delta pos < 20 \text{ pc}$ $\Delta V < 5 \text{ km s}^{-1}$ $\Delta Age < 30 \text{ Myr}$	19 对双星团 3 组星团群	Qin et al. (2023)

一个大约 200 pc 的年轻“蛇”形结构 (snake)，该结构呈现出位置空间上的毗邻和速度空间上的重叠。与 [Beccari et al. \(2020\)](#) 对丝状恒星结构的研究结论相似，这个年轻的“蛇”形结构 (约 30 Myr 到 40 Myr) 也是原初形成的。此外，蛇形结构与 [Beccari et al. \(2020\)](#) 提出的丝状恒星结构在 5 维相空间 (α 、 δ 、 ϖ 、 μ_{α}^* 、 μ_{δ}) 具有相似特征，同时两者年龄相近，表明二者的形成环境可能相似。如果二者的相关性得到确认，将显著扩大 Vela OB2 天区的星团群的空间尺度，对该天区星团形成和演化历史的深入理解具有深远影响。

在 [Beccari et al. \(2020\)](#); [Tian \(2020\)](#) 的研究基础上，[Wang et al. \(2022\)](#) 基于 *Gaia* EDR3 数据进一步扩大天区范围，研究蛇形结构及其与周围结构的关系 (图 1-12)。在 *Gaia* 提供的位置、距离以及自行数据的基础上，他们新结合了 LAMOST、GALAH、APOGEE、RAVE 等光谱巡天提供的视向速度和金属丰度信息，系统地研究了 Vela OB2 天区中的蛇形结构 (图 1-12, Part I) 以及丝状恒星结构 (图 1-12, Part II)。结果表明，两个结构在空间上相互毗邻，年龄均在 30 ~ 40 Myr，并且具有一致的金属丰度，因此很可能是诞生于同一片巨分子云的大结构，是恒星等级成团的产物。

然而，[Pang et al. \(2021b\)](#) 对于 Vela OB2 天区星团形成模式提出了另一种假设。[Pang et al. \(2021b\)](#) 基于 *Gaia* EDR3 数据在 Vela 天区中发现了由五个新的疏

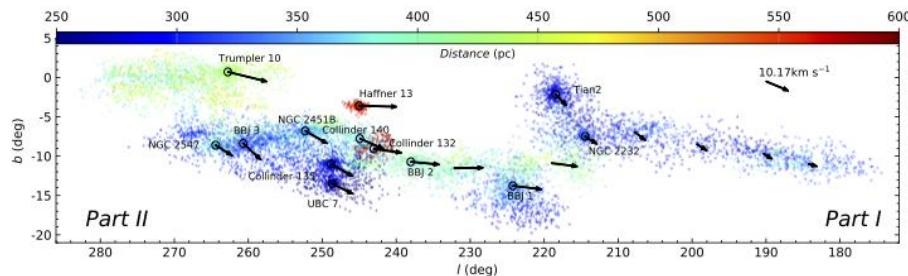


图 1-12 蛇形结构与丝状恒星结构在银经-银纬空间的分布图

Figure 1-12 Spatial distribution of snake and relic stellar filament

注: 两个结构的成员星空间分布, 颜色表示不同的距离。右上角的箭头表示整体结构的平均切向速度, 其余箭头表示该局部区域恒星的平均切向速度, 箭头的长度相对于右上角的箭头等比例缩放。图片摘自: Wang et al. (2022)。

Note: Spatial distribution ($l - b$) of the member candidates (color coded with distance as represented in the color bar). The arrows over structures illustrate the median tangential velocities of stars in localized regions, while the arrow in the top right-hand corner marks the median tangential velocity of the whole structure. The lengths of the arrows are scaled with respect to the total tangential velocity of the whole structure (Parts I and II). Image source: Wang et al. (2022)

散星团(命名为 Huluwa 1-5)构成的星团群, 并提出该星团群起源于连续的恒星形成过程, 即年龄较老的星团 Huluwa 1-3 (10-20 Myr) 在演化过程中产生的恒星反馈, 引发了附近分子云坍缩, 进而诱发了年轻一代星团 Huluwa 4-5 (7-20 Myr) 的形成。另一方面, 这五个星团恰好位于一个超新星爆发的壳层之上, 也不排除是超新星爆发诱发了 Huluwa 4-5 的形成。同时, 位于 Vela IRAS 内的超新星爆发也能迅速将 Huluwa 4-5 内的剩余气体排出, 从而阻止这两个星团内部恒星的继续形成。该工作中还使用 N 体数值模拟预测星团群未来的动力学状态, 结果表明 Vela OB2 中的 Huluwa 1-5 将在未来 100 Myr 内持续远离、膨胀并最终瓦解成为场星。

1.5 本文内容以及主要框架

总体而言, 双星团/星团群的搜寻证认工作有了较大的进展, 这使得我们对银河系中多星团系统的性质有了更深入的认识。但是由于样本有限以及数据精度的局限, 多星团系统的起源机制尚不明确。因此, 需要扩大星团群样本, 为进一步研究星团的形成与演化模式提供可靠的观测限制, 进而揭示银盘结构与演化的更多细节。随着 *Gaia* 高精度数据的不断积累和分析技术的进步, 使得星团群的研究进入一个新纪元。结合大样本的疏散星团数据与 *Gaia* DR3 提供的海量高精度运动学数据, 我们能够更加精准地搜寻星团群, 并深入探究其内部运动及探讨可能的起源机制。

天鹅座 (Cygnus), 位于银河系的北面, 是银河系中最引人注目的恒星形成

区之一。天鹅座包含着庞大的星际尘埃、恒星形成区域、致密的分子云以及大型超新星遗迹 Cygnus Loop (也称作 G74.0–8.5)。这里孕育了众多年轻的恒星与星团，使得天鹅座天区成为了研究星团以及星团群的理想之地。通过对天鹅座天区中恒星的深入观测和研究，我们能够更全面地了解恒星的形成模式与演化机制。

因此，我们针对天鹅座天区展开了一系列研究，致力于利用 *Gaia* DR3 数据搜寻其中的星团群。第 2 章介绍星团样本和平均参数测定的主要方法；第 3 章是对星团群证认结果的分析与讨论；第 4 章是对现有工作的总结以及对未来工作的展望。

第2章 数据与方法

2.1 星团样本

我们的研究范围主要集中在银河系的第一象限，以银经 70 度、银纬 7 度为中心，涵盖了约 20 度的投影范围，并聚焦于距离在 700pc 以内的区域。经过严格的位置与距离筛选，我们成功获得了该天区内的 36 个星团样本，其中其中 28 个来自 Qin23，8 个来自 CG20b。图 2-1 中呈现了这些星团样本以其成员星在银经-银纬空间的分布。

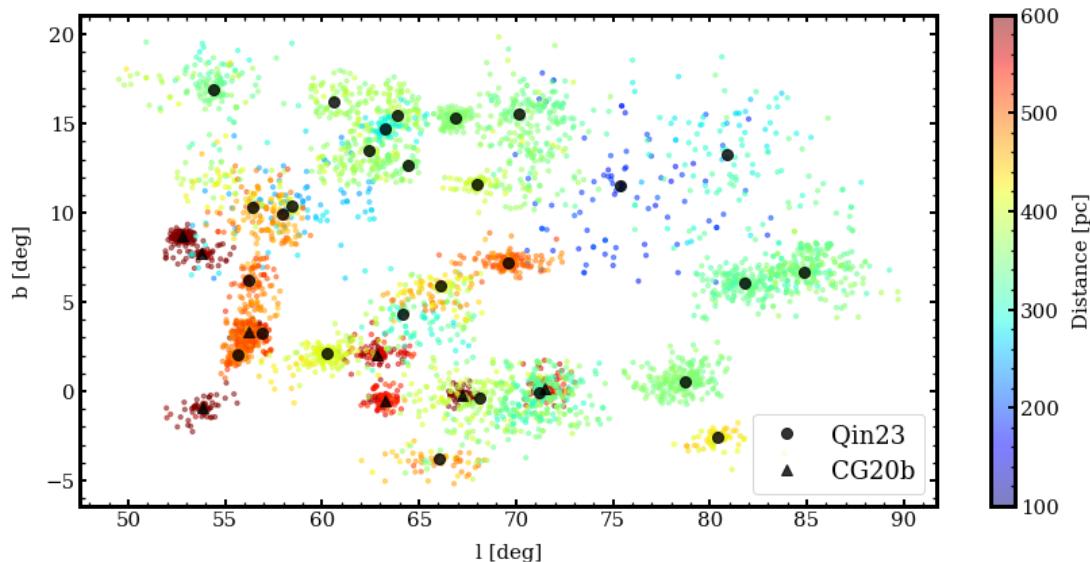


图 2-1 本文所用星团样本在银经-银纬空间的分布

Figure 2-1 Open cluster samples used in this work

注: 彩色点为星团的成员星，颜色表示不同的距离。黑色点为星团中心位置，圆形与三角形分别表示来自 Qin23 与 CG20b 的星团。

Note. The colored dots represent member stars of the clusters, with colors indicating different distances. The black dots denote the central positions of each cluster, with circles and triangles representing clusters from Qin23 and CG20b, respectively.

2.2 星团参数测定

鉴于我们使用的星团成员星数据来源于不同的 *Gaia* 数据版本 (*Gaia* DR2 和 *Gaia* DR3)，并且考虑到 *Gaia* DR3 在自行精度方面有了显著提升，同时具有视向速度数据的恒星数量也从 *Gaia* DR2 的约 700 万大幅增加到 *Gaia* DR3 的约 3400 万。这种数量级的增长为我们系统地研究星团的 3D 运动提供了有力支持。因此，为了确保数据精度的一致性并获取更多成员星的视向速度信息，我们将成员星

数据与 *Gaia* DR3 数据进行了交叉匹配。并且重新确定了目标星团 6D 参数（位置，自行，视向速度）以及年龄和星团质量。最后，我们已将重新确定的 20 个星团群成员的参数汇总在表 2-1 中，这为后续对星团群性质的深入研究奠定了重要基础。

2.2.1 星团 6D 参数

疏散星团的中心，作为密度最高的区域，对于确定其位置以及速度至关重要。为此，我们采用了核密度估计（Kernel Density Estimation, KDE）方法，以准确识别数据中的密度最高点作为星团中心。KDE 通过在每个数据点周围放置一个平滑且对称的“核”，并将这些核累加，从而实现对连续随机变量概率密度函数的估计。这一过程实际上是对数据进行平滑处理，使得到的密度函数更加连续和平滑。KDE 的核心参数包括核函数和带宽。核函数决定了每个数据点对估计分布的贡献形状，而带宽则影响着核的宽度，进而决定了估计的平滑程度。由于 KDE 不依赖于任何特定的概率分布假设，因此它具有高度的灵活性，能够适应各种不同的数据形态。此外，KDE 还允许使用不同的核函数，如高斯核、三角核等，这为不同的应用和数据特点提供了选择的灵活性。然而，KDE 方法在识别星团中心时面临着一些挑战。对于成员星在空间分布和运动学特征上均存在显著的延展性的疏散星团，KDE 方法也可能难以精确地定位星团中心。此外，星团内部的复杂动力学过程、成员星间的相互作用以及外部环境的扰动等因素，也可能对 KDE 方法的定位准确性造成干扰。因此，在运用 KDE 方法时，我们需要充分考虑这些挑战，并谨慎选择核函数和带宽等参数，以确保结果的可靠性。

在本文中，我们利用 KDE 算法分别在 (l, b) 和 $(pm\ell, pm\ell)$ 这两个参数空间对星团的成员星进行了二维核密度估计，其中采用了高斯核作为 KDE 的“核”。通过这一过程，我们确定了密度最高的 10 个点，并计算了它们对应的 (l, b) 和 $(pm\ell, pm\ell)$ 均值，以此作为星团中心。这种方法使我们能够可靠地得出每个星团的中心位置与平均自行。结果如图 2-2 和图 2-3 中的黑色十字所示。尽管存在挑战，但通过合理的参数选择和数据处理，我们成功地应用了 KDE 方法来确定疏散星团的中心位置。

并且，我们将每一个星团的所有成员星视差分布的中位数取倒数，以此作为目标星团的平均距离 ($dist$)。

为了获得星团更为可靠和准确的视向速度，我们基于一个关键假设，即成员星的视向速度遵循高斯分布，如式 (2-1) 所示。基于这一假设，我们对星团成员星的视向速度进行了高斯拟合，这种拟合方法能够有效处理成员星视向速度分布的弥散，进而得出更为精确的星团视向速度。在式 (2-1) 中，均值 (μ)、系数 a 以及 σ 是关键的拟合参数，其中拟合得出的均值 (μ) 即为星团的平均视向速度。关于星团视向速度的高斯拟合结果，可详见图 2-4。

$$f(x) = a \times e^{\frac{-(x-\mu)^2}{(2\sigma^2)}} \quad (2-1)$$

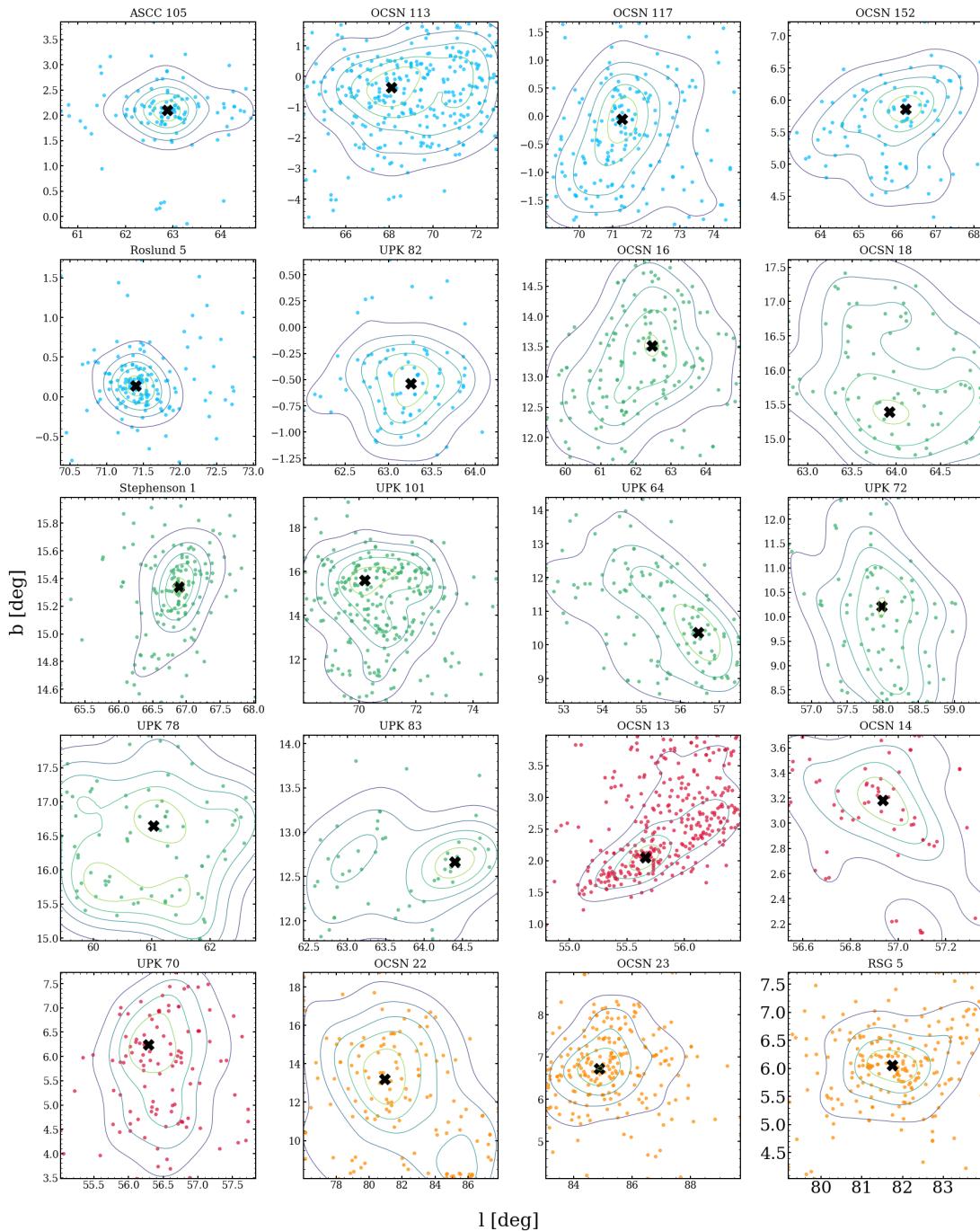


图 2-2 银经-银纬二维核密度估计结果

Figure 2-2 Results of two-dimensional kernel density estimation in (l,b)

注: 子图中彩色散点为星团成员星，其中蓝色、绿色、红色、橙色分别对应星团群 G1, G2, G3, G4。黑色叉为最终取得星团中心，线条为等密度线。

Note. The colored points in each sub-figure are cluster member stars, among which blue, green, red, and orange correspond to cluster groups G1, G2, G3, and G4 respectively. The black cross is the final star cluster center, and the lines are isopycnal lines.

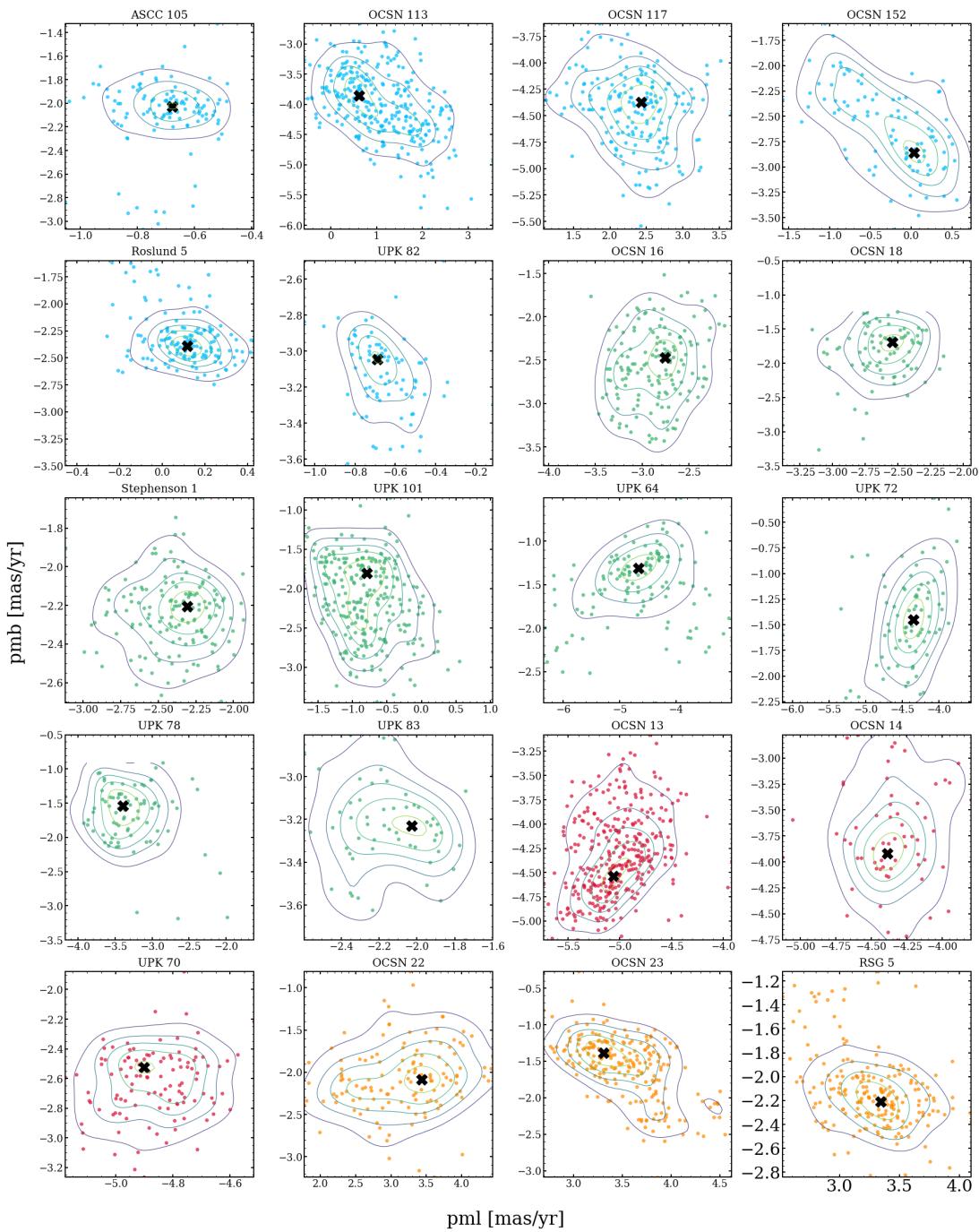


图 2-3 自行空间二维核密度估计结果

Figure 2-3 Results of two-dimensional kernel density estimation in (pml, pmb)

注: 同图 2-2

Note. Same as Figure.2-2

最后，根据星团以及星团成员星的 6 维性质参数 ($l, b, \text{dist}, \text{pm}\text{l}, \text{pm}\text{b}, R_v$)，我们使 **astropy**(Astropy Collaboration et al., 2013) 程序包计算了星团和星团成员星在银心直角坐标系中的三维位置和速度。在计算时以太阳相对于银心的的三维速度 (U, V, W)=[10, 235, 7] km s⁻¹，太阳到银心的距离 $R_0=8.0$ kpc (Bovy, 2015) 作为默认参数。

2.2.2 年龄与质量

赫罗图 (Hertzsprung-Russell diagram)，又称 HR 图，是以天文学家恩约·赫茨普龙 (Ejnar Hertzsprung) 和亨利·诺利斯·罗素 (Henry Norris Russell) 的名字命名。它展现了恒星的光谱型 (或颜色指数) 与绝对星等 (或视星等) 之间的关系。通过观察恒星在 HR 图上的分布，我们可以发现不同类型的恒星呈现出特定的分布模式，这些模式反映了恒星内在的物理特性和演化阶段。而等龄线是相同年龄的各种质量的恒星在赫罗图上的位置。在星团研究中，等龄线常被用来拟合星团成员星在颜色-星等图 (CMD) 上的分布。通过调整等龄线的年龄、金属丰度、距离模数和红化值等参数，可以寻找与星团成员星分布最佳匹配的等龄线，从而确定星团的年龄和其他相关参数，对于理解星团和恒星演化过程至关重要。

为了确定每一个星团的年龄，我们在星团的 CMD 上进行等龄线拟合。在这个过程中，我们首先仔细检查了星团成员星在 CMD 上的分布，将那些明显偏离主序的成员星作为场星污染，并将其去除，以确保我们后续的分析结果不受这些场星的干扰。接着，我们从 CMD 3.7¹ 下载了针对 Gaia DR3 测光系统的理论等龄线。我们用于拟合的一系列等龄线的对数年龄范围涵盖了 $\log(\text{Age}[yr]) = 6 \sim 10$ ，间隔为 0.01，金属丰度值设定为太阳金属丰度 ($Z_\odot=0.0152$, Caffau et al. 2011)。随后，我们利用肉眼拟合的方式来获取每一个星团的年龄参数，通过调整距离模数 (DM)、红化值 ($E(B - V)$) 来移动等龄线，使其与星团的 CMD 分布相匹配。在调整过程中，我们特别关注理论等龄线与星团 CMD 上各个关键部分（如主序拐点、主序上端等）的拟合情况。为了得到最佳拟合结果，我们使得理论等龄线与星团 CMD 的主序上端以及主序转折点部分的左包络线重合，对主序下端则使得理论等龄线穿过尽可能多的星团成员星。最终，通过对多条等龄线拟合结果的仔细比较和观察，我们确定了星团的最佳拟合等龄线，从而得到了每个星团的年龄。红化值通过式 (2-2)(Casagrande et al., 2018) 计算得到。

$$E(BP - RP) = 1.339 \times E(B - V) \quad (2-2)$$

为了估计成员星的质量，我们在最佳拟合等龄线上找到距离星团成员星最近的点，将该点的质量作为成员星的质量，由此得到了星团的质量 (mass)。我们使用 **Scikit-learn** (Millman et al., 2011; Grisel et al., 2021) 程序包中的 KDTTree (K-dimension tree) 算法 (McMillan et al., 2007)，对每颗成员星在理论等龄线上进行最邻近搜寻。KDTTree 算法是一种加速 K 近邻 (K-Nearest Neighbor, KNN) 搜

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

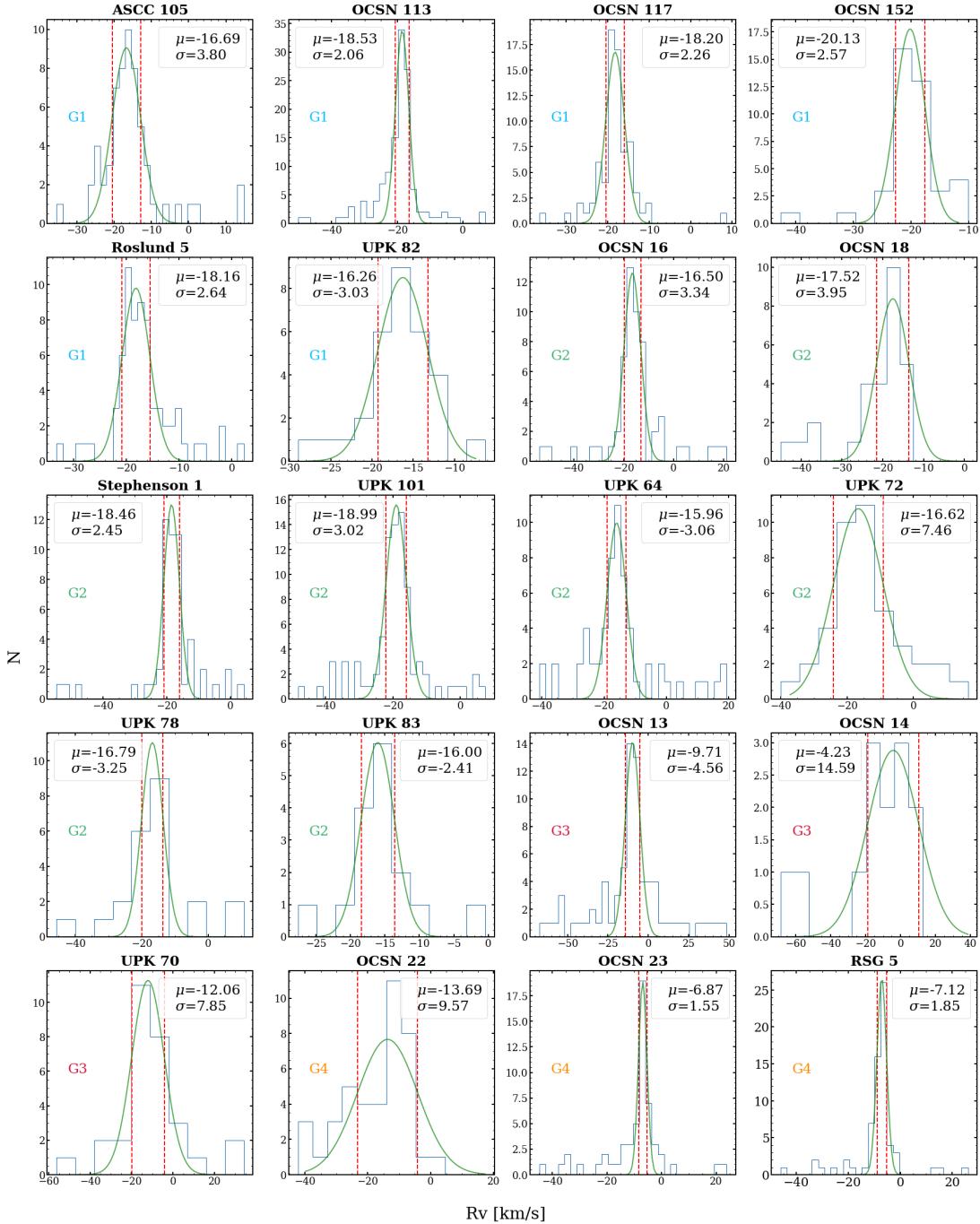


图 2-4 成员星团视向速度高斯拟合结果

Figure 2-4 Gaussian fitting results of radial velocity of member clusters

注: 每个子图中直方图为成员星视向速度分布；绿色为高斯拟合结果，红色虚线为 1σ 所在范围。每个星团所属的星团群标注在图中。

Note. The histogram in each subfigure is the radial velocity distribution of member stars; green is the Gaussian fitting result. The cluster group to which each star cluster belongs is marked in the figure.

寻效率的方法，KDTree 通过使用特殊的结构存储数据，可以有效的加快检索效率。

由于理论等龄线下端的点比较稀疏，所以我们在理论等龄线上进行插值，使得每个成员星能够找到理论等龄线上的邻近点。在计算过程中，我们假设所有成员星均为单星，未考虑双星的影响。

表 2-1 四个星团群成员星团的基本性质参数

Table 2-1 Basic property parameters of the cluster members in four cluster groups

Group	cluster	l (deg)	b (deg)	pml (mas yr ⁻¹)	pmb (mas yr ⁻¹)	dist (pc)	Rv (km s ⁻¹)	logt (mag)	DM (mag)	Ebv (mag)	mass (M _⊙)	rt (pc)
星团群 G1	ASCC 105	62.88	2.10	-0.68	-2.03	558	-16.75	7.85	9.30	0.18	120	7.05
	OCSN 152	66.19	5.86	0.03	-2.86	435	-20.13	7.91	8.63	0.11	86	6.31
	OCSN 113	68.10	-0.36	0.61	-3.86	372	-18.53	7.82	8.28	0.09	263	9.14
	OCSN 117	71.28	-0.05	2.43	-4.37	329	-18.20	7.76	7.83	0.05	147	7.54
	Roslund 5	71.39	0.14	0.12	-2.39	545	-18.01	7.87	9.04	0.14	164	7.82
	UPK 82	63.26	-0.54	-0.69	-3.04	540	-16.26	7.93	8.94	0.11	83	6.25
星团群 G2	OCSN 16	62.47	13.52	-2.76	-2.47	372	-16.50	7.54	8.04	0.07	124	7.12
	OCSN 18	63.92	15.40	-2.54	-1.69	371	-17.58	7.56	8.06	0.07	62	5.67
	Stephenson 1	66.89	15.34	-2.31	-2.21	356	-18.42	7.58	8.01	0.08	120	7.06
	UPK 101	70.21	15.64	-0.80	-1.80	351	-18.99	7.59	7.89	0.06	194	8.27
	UPK 64	56.47	10.33	-4.65	-1.31	430	-15.96	7.60	8.95	0.26	127	7.19
	UPK 72	57.98	10.21	-4.35	-1.45	456	-16.62	7.63	8.83	0.18	77	6.09
	UPK 78	61.02	16.65	-3.39	-1.54	372	-16.79	7.56	8.06	0.06	55	5.45
	UPK 83	64.40	12.67	-2.03	-3.23	352	-16.00	7.48	7.99	0.06	42	4.99
星团群 G3	OCSN 13	55.66	2.05	-5.06	-4.54	499	-9.71	7.35	8.55	0.23	268	9.21
	OCSN 14	56.93	3.20	-4.39	-3.92	514	-4.23	7.25	8.47	0.14	48	5.21
	UPK 70	56.28	6.24	-4.90	-2.52	493	-12.06	7.45	8.52	0.20	90	6.41
星团群 G4	OCSN 22	80.94	13.19	3.43	-2.09	306	-13.69	7.72	7.35	0.03	82	6.22
	OCSN 23	84.88	6.73	3.31	-1.39	345	-6.87	7.61	7.91	0.08	142	7.45
	RSG 5	81.75	6.05	3.34	-2.21	337	-7.12	7.60	7.89	0.07	167	7.86

注：表格的第 1 列和第 2 列表示星团群以及包含的星团；第 3、4 列表示星团中心的坐标；第 5、6 列表示星团的自行；第 7 列表示星团的平均距离；第 8 列表示星团的视向速度；第 9-11 列表示通过等龄线拟合得到的星团年龄、距离模数和红化值。第 10 列是星团的质量，第 11 列是星团的潮汐半径。

Note. The first and second columns of the table represent the open cluster group and the included open clusters, respectively. The third and fourth columns denote the Galactic coordinates of the cluster centers. The fifth and sixth columns represent the proper motion of the clusters. The seventh column indicates the average distance of the clusters. The eighth column represents the radial velocity of the clusters. The ninth to eleventh columns represent the ages, distance moduli, and reddening values of the clusters obtained through isochrone fitting. The tenth and eleventh column represents the total mass of cluster and the tidal radius of the clusters, respectively.

2.3 星团群搜寻方法

关于星团群的筛选方法，我们主要参考Conrad et al. (2017) 的研究。在搜寻过程中，我们进一步细化了筛选标准，考虑了年龄因素 (Qin et al., 2023)。我们将与任意成员星团间距小于 100 pc，并且年龄差距小于 30 Myr；同时与所有成员星团之间的三维速度差与切向速度速度差都小于 10 km s^{-1} 的星团作为候选的星团群成员。这些严格的筛选条件确保了我们选取的星团群成员不仅空间上接近，而且在运动学上也有紧密的联系。我们借助第 2.2.2 章中介绍的 KDTree 算法，对筛选出的 36 个星团样本，在三维位置空间做最邻近搜寻并计算最邻近星团之间的速度差。最终，我们成功确认了 4 个星团群，共计包含 20 个成员星团。

第3章 Cygnus天区星团群证认结果

3.1 星团群运动学相关性

原初星团群的特征之一是子结构间存在运动学上的相关性，这是因为所有子结构均在相同的巨分子云中形成，并继承了母分子云的运动学特性(Elmegreen et al., 2000a)。因此，基于空间与运动学的相关性，我们将20个星团划分为四个星团群，分别命名为G1、G2、G3和G4。这些星团群的性质参数详列于表2-1中。其中，G1包含6个星团，G2由8个星团组成，G3和G4各包含3个星团。此外，各星团群内的双星团信息可见于表3-1。

在图3-1中，我们可以清晰地看到四个星团群在l-b空间的位置分布及切向运动情况。从星团切向速度分布来看，存在三个明显不同的运动模式。整体上来看，星团群G1和G2的切向运动方向与G3和G4存在显著差异。

值得注意的是，尽管星团群G2中的UPK 64和UPK 72与该群内其他成员星团的切向速度大小有所不同，但这些星团的三维速度差异仍保持在 10 km s^{-1} 以内(见第2.3章)。虽然这两个星团与星团群G3中的成员星团在切向速度大小上相近，但三维速度差异却超过 10 km s^{-1} (见第2.3章)。四个星团群各自占据独立的空间，对于任一星团群而言，成员星团间紧密相连，拥有相对一致的切向速度，这表明其成员星团很可能诞生于同一片分子云中。

表 3-1 星团群中的双星团

Table 3-1 Binary clusters in each cluster group

Group	cluster1	cluster2	Δpos	ΔV	ΔV_t	ΔAge
			(pc)	(km s ⁻¹)	(km s ⁻¹)	(Myr)
G1	ASCC 105	UPK 82	31.05	1.68	2.43	16.3
G1	OCSN 113	OCSN 117	47.3	1.72	2.72	8.53
G1	Roslund 5	UPK 82	77.45	2.14	2.63	12.97
G2	OCSN 16	OCSN 18	15.31	1.16	1.43	1.63
G2	Stephenson 1	UPK 101	20.53	1.73	2.67	0.89
G2	UPK 64	UPK 72	29.09	0.73	0.48	2.85
G2	UPK 78	OCSN 18	19.9	0.94	1.54	0.0
G2	UPK 83	Stephenson 1	22.66	2.51	1.74	7.82
G3	OCSN 13	OCSN 14	21.02	6.13	1.74	4.6
G3	UPK 70	OCSN 14	34.19	8.24	3.74	10.4
G4	OCSN 22	RSG 5	50.83	6.13	0.61	12.67
G4	OCSN 23	RSG 5	20.76	1.24	1.26	0.93

表注: Δpos 表示星团之间的距离 (三维), ΔV 表示星团之间的速度差 (三维), ΔV_t 是星团之间的切向速度差。

Note. Δpos represents the distance (in three dimensions) between clusters, ΔV denotes the velocity difference (in three dimensions) between clusters, and ΔV_t stands for the tangential velocity difference between clusters. .

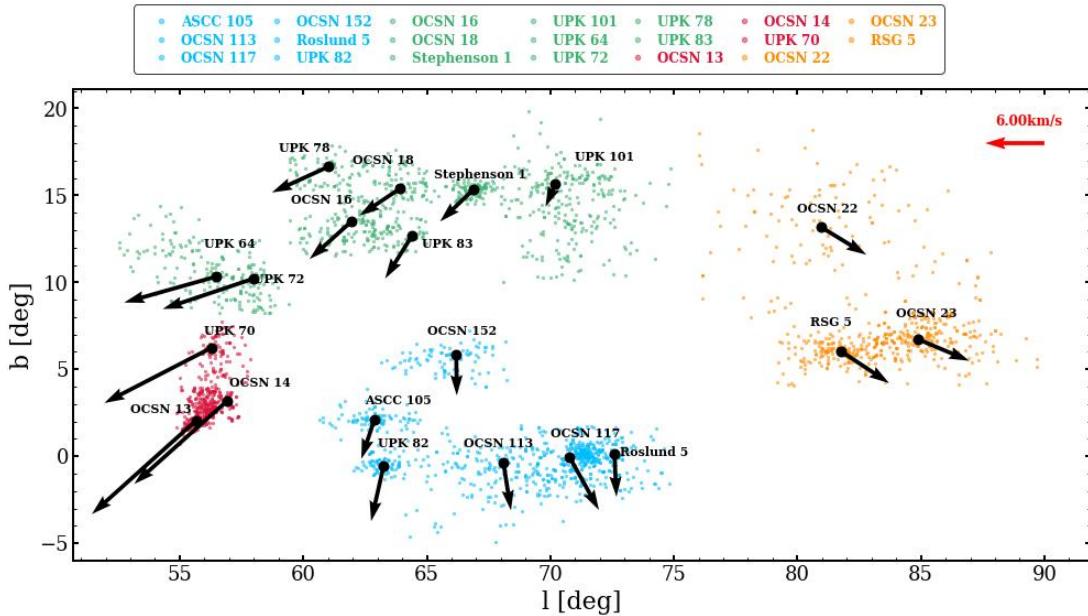


图 3-1 4 个星团群成员在 l-b 空间分布

Figure 3-1 Spatial distribution ($l - b$) of the four cluster groups

注: 彩色散点表示不同的星团群，其中蓝色、绿色、红色、橙色分别为星团群 G1 , G2 , G3 , G4。黑色箭头为星团切向速度，其长短参考图中右上角的红色箭头进行等比例缩放。

Note. Colored points represent different cluster groups, among which blue, green, red, and orange are star cluster groups G1, G2, G3, and G4 respectively. The arrows over structures illustrate the tangential velocities(V_t) of the cluster, while the red arrow in the top right-hand corner marks the reference V_t . The lengths of the arrows are scaled with respect to the reference V_t .

3.2 星团群的恒星形成持续时标

Efremov et al. (1998) 研究发现大麦哲伦云中的星团群的一个显著特征：恒星形成持续时间与其空间尺度之间存在紧密联系。具体来说，尺度在数百至千 pc 的星团群，其恒星形成通常持续 10~30 Myr。图 3-2 呈现了 4 个星团群成员星团的等龄线拟合结果，为我们提供了成员星团年龄特征的直观信息。进一步地，图 3-3 描绘了不同星团群的平均年龄与相应的年龄差分布。结合图 3-2 与图 3-3 可以清晰地观察到：星团群 G1 中的 6 个成员星团年龄范围在 58~87 Myr，恒星形成过程持续了约 29 Myr；星团群 G2 中的 9 个成员星团年龄分布在约 30~43 Myr，恒星形成过程持续了约 13 Myr；而星团群 G3 的 3 个成员星团年龄分布在 18~28 Myr，恒星形成过程持续了约 10 Myr；最后，星团群 G4 的 3 个成员星团年龄分布在 40~52 Myr，恒星形成过程持续了约 12 Myr。4 个星团群的恒星形成持续时间都符合连续恒星形成事件的时标，表明 4 个星团群的成员星团是分别在各自的母分子云中连续形成的，成员星团之间拥有共同的起源。

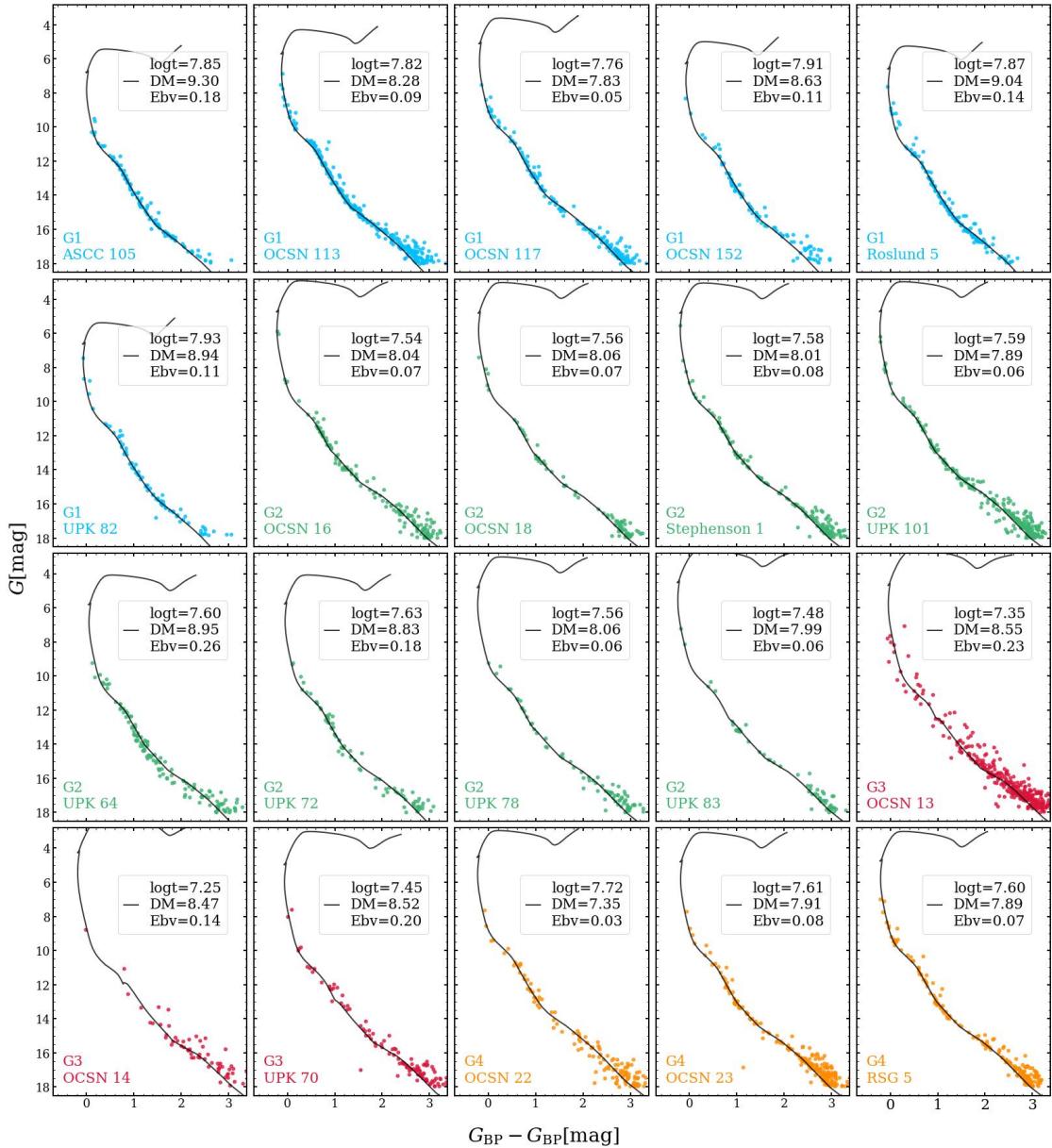


图 3-2 星团群中成员星团等龄线拟合结果

Figure 3-2 Isochrone fitting results of four star clusters

注：每子图对应的星团标注在左下角，彩色点为星团成员星，其中蓝色、绿色、红色、橙色分别对应星团群 G1 、G2、G3、G4 的成员星团。黑色线为理论等龄线。等龄线年龄以及最佳拟合参数在右上角注释。

Note. In each subplot, the labels of the open clusters correspond to the bottom left corner. The colored dots represent the cluster member stars, where blue, green, red, and orange correspond to the member clusters of star clusters G1, G2, G3, and G4, respectively. The black lines denote theoretical isochrones. The age of the isochrones and the best-fitting parameters are annotated in the top right corner.

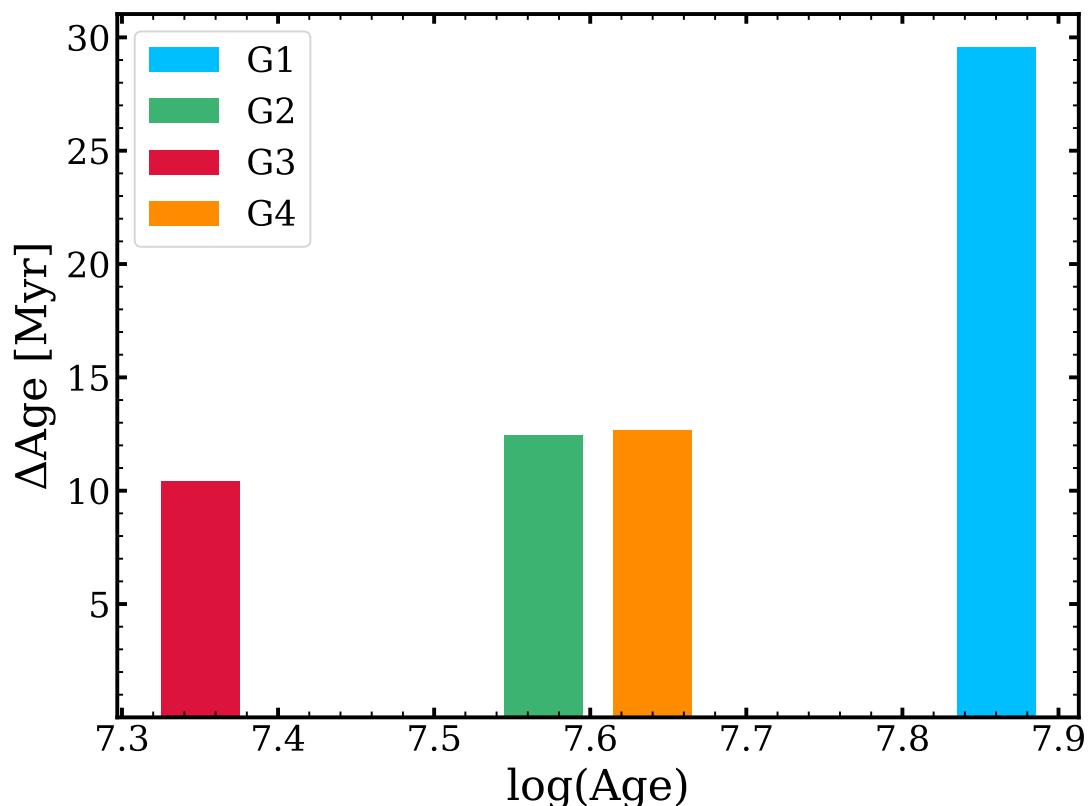


图 3-3 星团群平均对数年龄与年龄差分布

Figure 3-3 Average $\log(\text{Age})$ and age difference distribution of cluster groups

注：注：蓝色、绿色、红色、橙色分别对应星团群 G1、G2、G3、G4 的 $\log(\text{Age})$ 与成员星团最大年龄差分布

Note. Blue, green, red, and orange correspond to the $\log(\text{Age})$ of cluster groups G1, G2, G3, and G4 respectively and the maximum age difference distribution of member star clusters.

3.3 距离改正与 3D 空间分布

3.3.1 距离改正

由于视差的测量误差是不可忽略的，若直接通过成员星视差的倒数来计算距离，会将视差的测量误差传递到距离计算中。虽然视差的测量误差符合高斯分布的特征，但取倒数后会引入一个偏离正态分布的距离误差，从而导致三维空间分布中会产生明显的沿视线方向的虚假延展。在我们的工作中，需要考虑视差测量误差对构建星团群真实的形态特征可能带来的影响，以确保对星团群空间分布的准确理解。

为了修正这一问题，我们采用了Carrera et al. (2019); Pang et al. (2020, 2021a) 等人介绍的贝叶斯方法，对每一颗成员星的距离进行了校正。该方法结合了恒星距离的先验分布 ($\Pi(d)$) 和由恒星视差及其测量误差确定的似然分布 ($f(\varpi|d)$)，通过计算，我们得到了恒星的后验分布 ($f(d|\varpi)$)，如式(3-1)：

$$f(d|\varpi) \propto f(\varpi|d) \times \Pi(d). \quad (3-1)$$

其中，先验分布 ($\Pi(d)$) 为式(3-2)，涵盖了星团所在天区的恒星距离分布，该分布由两部分构成：星团成员星的距离分布 $C(d)$ 以及场星的距离分布 $P(d)$ 。

$$\Pi(d) = C(d) + \alpha P(d). \quad (3-2)$$

星团成员星的距离先验分布 $C(d)$ 服从高斯分布：

$$C(d) = (1 - \alpha) \frac{1}{\sqrt{2\sigma_d^2}} e^{-(d-d_0)^2/2\sigma_d^2}. \quad (3-3)$$

同时假设场星的距离先验分布遵循Bailer-Jones (2015) 所用的指数盘分布：

$$P(d) = \frac{1}{2L^3} d^2 e^{-d/L} \quad (3-4)$$

其中， $L = 8 \text{ kpc}$ ， d 为星团成员星改正后的距离， d_0 为星团平均距离， σ_d 为成员星相对于星团中心三维距离分布的标准差。此外， α 作为场星污染率，我们采用 5% 的数值，这一取值参考了(Pang et al., 2020, 2021a) 的研究。

在考虑到视差测量误差的情况下，我们假设恒星的视差分布遵循高斯分布。基于这一假设，我们可以构建出相应的似然函数 (likelihood) 来描述这一分布特性：

$$f(\varpi|d) \propto e^{-(\varpi - \frac{1}{d})^2/2\sigma_{\varpi}^2}. \quad (3-5)$$

其中， σ_{ϖ} 是恒星视差的测量误差。通过以上贝叶斯方法得到了每颗恒星经过改正后的距离，我们由此可以构建星团真实的三维形态分布。

3.3.2 3D 空间分布

Innanen et al. (1972) 认为对于双星团来说，如果两个星团之间的相对距离小于潮汐半径的三倍，则存在显著的相互作用。因此，为了更精确地量化成员星团之间的相互作用，我们也使用三倍潮汐半径作为判断标准，来评估两个疏散星团之间是否存在相互作用。我们根据Pinfield et al. 1998 中所使用的方法，计算了星团的潮汐半径，具体计算过程详见式 (3-6)：

$$r_t = \left[\frac{GM_{cl}}{2 \times (A - B)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3-6)$$

G 是引力常数，取值为 4.3×10^{-6} kpc (km s^{-1}) $^2 M_{\odot}^{-1}$ 。 A 和 B 是 Oort 常数，取值来自 Bovy (2017)，分别取 $15.3 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ 和 $-11.9 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ 。 M_{cl} 代表星团的总质量。

由此，我们绘制了四个星团群成员星团的经过距离改正以后的三维空间分布图，如图 3-4 所示，图中灰色圆圈标记了各星团 3 倍潮汐半径 ($3r_t$) 的位置。整体来看，这四个星团群的空间分布尺度均未超过星团群的典型尺度（几百 pc）(Efremov, 1978)。星团群的成员星团在空间上既相对独立又相互毗邻：星团群 G1 和 G2 的空间分布呈现出明显的丝状结构，而星团群 G3 和 G4 的成员星团空间分布则较为集中。在星团群 G1 和 G2 中，部分成员星团目前尚未表现出明显的相互作用，而星团群 G3 和 G4 中的成员星团则均存在相互作用。

星团群 G1 的空间分布呈现出明显的丝状结构，在 X、Y、Z 三个方向上的延展尺度分别约为 209 pc、306 pc 和 90 pc。该星团群主要分布于银盘附近，且垂直银盘方向的分布较为狭窄，沿 Y 轴方向延展显著。其中，星团 Roslund 5 与其他成员星团在空间上并不相邻，其 $3r_t$ 内不包含其他星团的成员星，因此目前与其余星团的相互作用较弱甚至目前不存在相互作用。其余星团的 $3r_t$ 内至少包含另外 1 个星团的部分成员星，表明它们之间存在一定程度的相互作用。

星团群 G2 在 X、Y、Z 方向延展分别约 212 pc、221 pc 和 72 pc；并且 X、Y 方向的延展尺度相当，在垂直银盘方向的分布范围相对比较窄，表明星团群整体主要分布在银道面上。UPK 72 与 UPK 64 在 $3r_t$ 范围相互包含部分成员星，因此它们之间可能存在相互作用，而与星团群中的其他星团相互作用较弱。特别值得注意的是，UPK 72 与 UPK 64 星团的有明显的潮汐结构，其中 UPK 64 星团的空间分布较为弥散，有较多成员星位于其 $3r_t$ 之外。

与前两个星团群不同，星团群 G3 的成员星团空间分布更为集中。三个星团在三维空间中相互毗邻，甚至有部分重叠，在 X、Y、Z 三个方向上延展尺度相当，分别约为 56 pc、68 pc 和 59 pc。三个星团在 $3r_t$ 范围互相重叠，表明 3 个星团目前存在相互作用。虽然 UPK 70 空间相对分布弥散，但是大部分成员星都在自身 $3r_t$ 内。

星团群 G4 的成员星团空间分布同样集中，在 X、Y、Z 三个方向上的延展分别约为 75 pc、138 pc 和 120 pc。在 Z 方向上的分布范围相比其他星团群更为

广泛。从各星团的 $3r_t$ 范围来看，成员星团之间目前存在一定程度的相互作用。特别是 OCSN 23 与 RSG 5 两星团之间，有更多成员星位于彼此的 $3r_t$ 内，因此它们之间的相互作用更为显著。另外，OCSN 22 星团的空间分布较为弥散，有更多成员星位于其 $3r_t$ 之外。

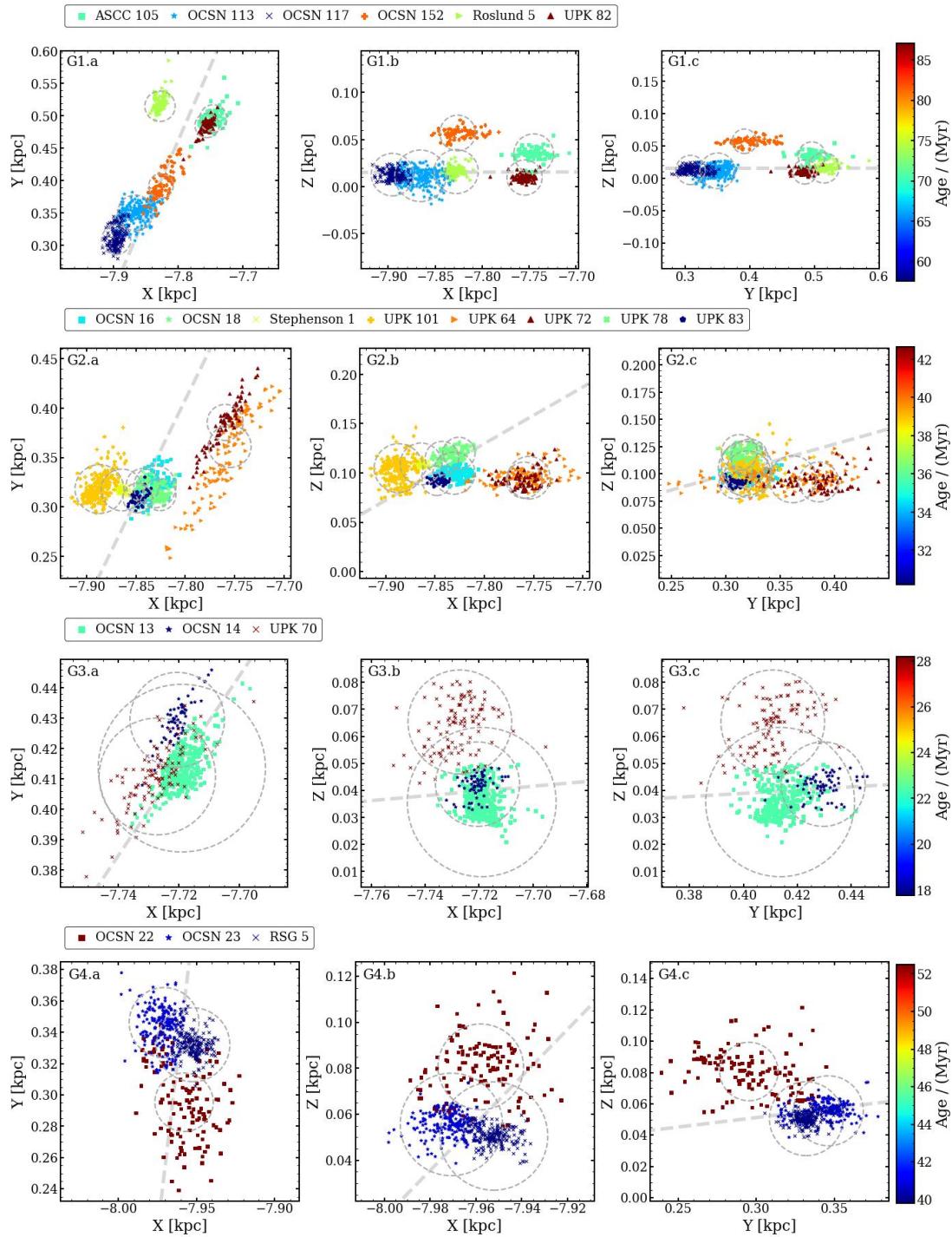


图 3-4 4 个星团群的三维空间分布

Figure 3-4 Three-dimensional spatial distribution of four cluster groups

注: 子图 a、b、c 分别为 X - Y、X - Z 和 Y - Z 平面上的空间分布。不同形状的散点表示不同星团的成员星, 散点的颜色表示星团的年龄。子图中的灰色圆圈为星团 $3r_t$ 所在位置, 虚线为视线方向 (太阳与星团群中心连线)。

Note. Panel a,b,c is a Spatial distribution on the X - Y, X - Z, and Y - Z planes, respectively. Scattered points of different shapes represent different open clusters. The color of the scatter points indicates the age of the cluster. The gray circle in the sub-figure is the location of star cluster $3r_t$. The dotted line is the line of sight.

3.4 星团群轨道特征

Galpy¹(Bovy, 2015) 是一个全新的，广泛用于银河系动力学研究的软件工具包。Galpy 致力于在外部引力势作用下，计算天体的轨道分布和动力学。Galpy 的核心部由 Potential 和 Orbit 两大模块构成，二者结合使用可以实现在各种各样的星系引力势下的轨道计算。此外，Galpy 还内置了一个关于银河系引力势的模型：MWPotential2014，用于简化银河系引力势下的天体轨道计算。

为了深入理解各星团的形成与演化过程，我们利用 Galpy 工具包，根据表 2-1 中给出的星团位置与速度数据，计算了星团的轨道，并依此分析星团群成员星团诞生位置的联系以及它们未来的运动轨迹。在计算过程中，我们设定太阳到银心的距离为 8 kpc，太阳的轨道速度为 $[10, 235, 7] \text{ km s}^{-1}$ (Bovy, 2015)；并采用轴对称的 MWPotential2014 引力势模型对疏散星团的轨道进行积分。我们回溯了每个星团的轨道至其诞生位置，并预测了未来 100Myr 的轨道运动。图 3-5 展示了四个星团群的轨道积分结果，以下是对图中所展示内容的物理内涵的说明：

- 子图 a) 和 b) 呈现了星团群成员星团从诞生至今以及未来 100Myr 在银河系中的轨道运动情况。通过对多个星团的轨道，我们可以分析星团群的整体运动模式。如果星团群的成员星团在轨道上呈现出某种一致性或规律性，这可能表明它们受到共同的引力作用或外部环境的影响。如果星团的轨道在诞生初期就展现出显著的差异，这可能意味着它们形成于银河系中不同的区域，可能受到不同的初始条件和环境因素的影响。
- 子图 c) 展示了以星团群中最年老的星团为参考，其他成员星团与其轨道间距随时间的变化情况。之所以选择最年老的星团作为参考，是因为这样够最大限度地记录其余星团从诞生时刻起与之相对的轨道间距变化情况，从而获取更丰富的信息。
- 子图 d) 则反映了星团群中最年轻星团诞生后，成员星团与最近邻星团间距平均值的变化趋势，这一变化趋势不仅可以揭示星团群内部的动态演化过程，而且也可以作为评估星团群整体稳定性的指标。如果间距平均值逐渐增大，这可能意味着星团群在膨胀，成员星团之间的相互作用减弱，星团群可能正在经历瓦解过程。相反，如果间距平均值保持稳定或有所减小，这可能表明星团群内部的成员星团在某种程度上保持着紧密的联系，可能受到共同引力作用的影响。

接下来，我们将对这四个星团群的轨道进行逐一分析。

3.4.1 星团群 G1

图 3-5 (G1.a-b) 中展示了星团群在 X、Y、Z 平面上运动轨迹。G1 星团群的所有成员星团在 X-Y 平面上做近圆运动，且轨道相互重叠；在 Z 轴方向上，所有的成员星团均沿银盘平面进行上下振荡运动，且运动周期相近。这表明 G1 星团群的成员星团具有相似的轨道运动模式，并非轨道偶然重合的结果。

¹<http://github.com/jobovy/galpy>

为了深入分析这些星团的相对运动，我们以 G1 星团群中最年老的星团 UPK 82 为参考，绘制了其他成员星团与 UPK 82 的轨道间距图 (G1.c)。结果显示，从诞生到未来 100Myr 内，Roslund 5 与 UPK 82 之间的间距呈现周期性变化；而 ASCC 105 与 UPK 82 的轨道间距在未来一段时间内则保持相对稳定。

此外，图 3-5(G1.d) 显示，自最年轻星团诞生以来，成员星团与最近邻星团间距的平均值与当前相近。然而，随着时间的推移，这一平均值在未来 100Myr 内将持续增大，预示着成员星团的空间分布将逐渐变得更为弥散。特别是在未来约 66 Myr 时，成员星团与最近邻星团间距的平均值将超过 100 pc，这表明星团群中成员星团之间的相互作用正在减弱，最终可能导致星团群瓦解成独立的星团。

3.4.2 星团群 G2

图 3-5 (G2.a-b) 清晰地展示了 G2 星团群所有成员星团在 X-Y 平面上的近圆运动轨迹，它们的轨道相互重叠，显示出高度的相似性。在 Z 轴方向上，这些星团的运动周期和振幅均相近，进一步证明了它们具有一致的轨道运动模式。

我们以星团群 G2 中最年老的星团 UPK 72 为参考星团，绘制了其他成员星团与 UPK 72 的轨道间距图 (G2.c)，如图 3-5 中 (G2.c) 展示。从图中可以看出，UPK 64 与 UPK 72 之间的间距在长达 100 Myr 的时间内都保持平稳，这进一步证实了二者在运动上的一致性。

此外，图 3-5 (G2.d) 揭示了星团群 G2 内部成员星团与最近邻星团间距的变化趋势。自最年轻星团诞生以来，这一平均值先经历了一段减小过程，随后开始逐渐增大。尽管在未来该平均值将继续增大，但在 100 Myr 时仍然小于 100 pc，这表明着星团群 G2 在短时间内不太可能瓦解成独立的星团，而是需要更长的时间来观察其动态演化过程。

3.4.3 星团群 G3

图 3-5 中 (G3.a-b) 所有的成员星团在 X-Y 平面做近圆运动；而在 Z 轴方向，UPK 78 的振幅比其余 2 个星团略大 (约 20 pc)。OCSN 14 在未来轨道将明显的远离其余两个星团，而其余两个星团的分离趋势较缓慢。

我们以星团群 G3 中最年老的星团 UPK 70 为参考，展示了其他成员星团与 UPK 70 的轨道间距变化，如图 3-5 中 (G3.c) 所示，OCSN 14 与 UPK 70 之间的间距在未来将开始迅速增大，而 OCSN 13 与 UPK 70 则可能继续保持相对稳定的轨道间距。此外，从图 3-5 (G3.d) 中可以看出，成员星团与最近邻星团间距的平均值正在迅速增大，在未来 25 Myr 左右将大于 100 pc，这表明星团群内部的相互作用正在减弱，成员星团最终将快速分散到空间，成为独立的星团。

3.4.4 星团群 G4

图 3-5 中 (G4.a-b) 所有的成员星团在 X-Y 平面做近圆运动；而在 Z 轴方向，所有成员星团的运动周期与振幅相近，表明星团群 G4 成员星团的具有一致的轨

道运动特性。

为了更深入地研究星团间的相对运动，我们以星团群 G4 中最年老的星团 OCSN 22 为参考，绘制了其他成员星团与参考星团 OCSN 22 的轨道间距，如图 3-5 中 (G4.c) 所示，其余两个星团与参考星团的间距随时间的变化一致。结合图 3-5 (G4.a-b) 的分析，我们可以发现 OCSN 23 和 RSG 5 之间的轨道运动尤为接近。

此外，从图 3-5 (G4.d) 中我们可以看出，自最年轻星团诞生以来，G4 星团群成员星团与最近邻星团间距的均值远大于当前值，并随着时间的推移逐渐减小至约 7 Myr 前。这表明在这段时间内，三个星团的空间分布一直在缩小。然而，自那以后，成员星团间的相互间距开始逐渐增大，预计在未来约 25 Myr 内将超过 100 pc。这一趋势预示着星团群 G4 最终也将瓦解成独立的星团。

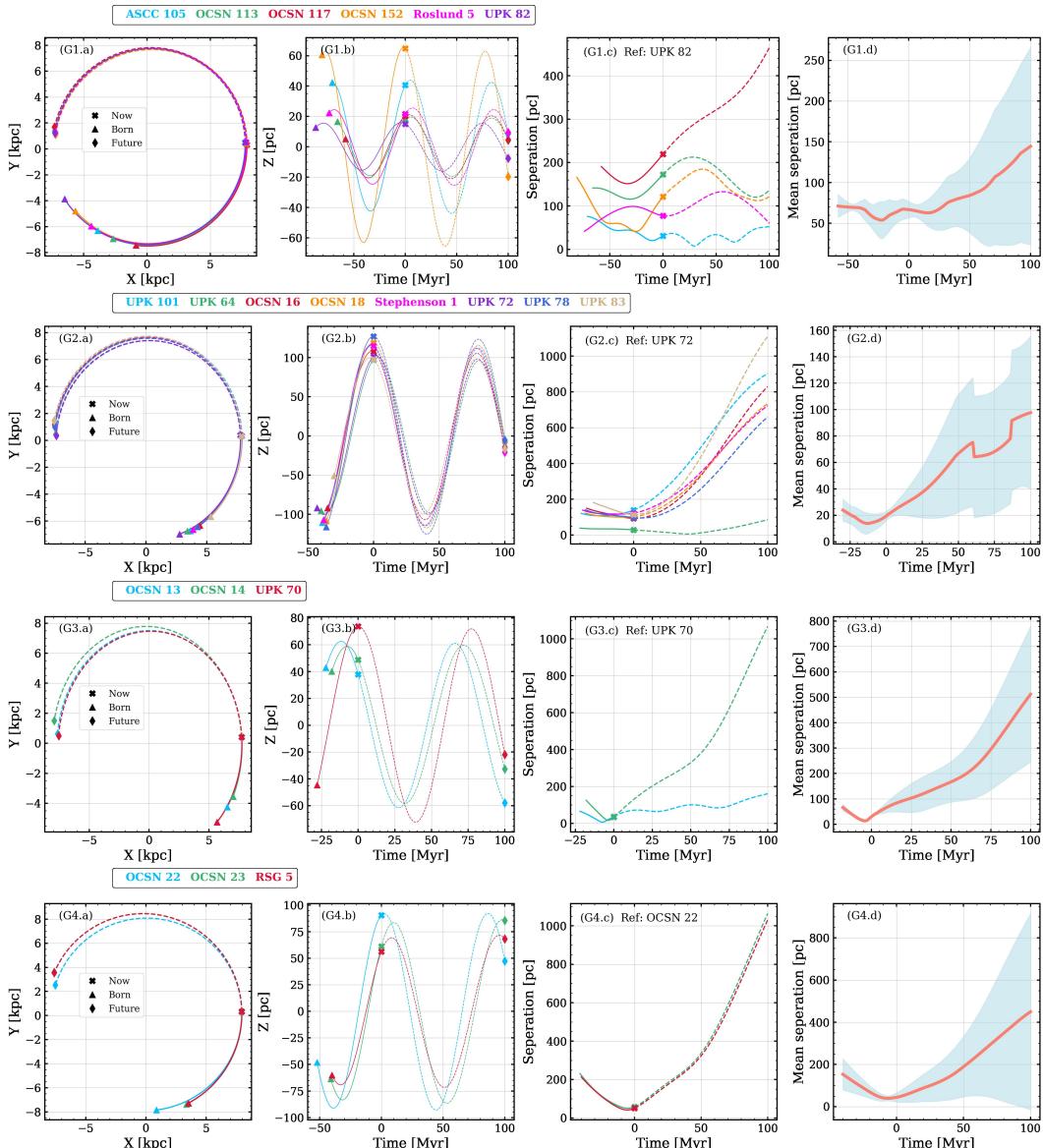


图 3-5 4 个星团群轨道运动

Figure 3-5 Orbital motion of 4 star clusters

注: 子图 a、b 分别展示了展示了成员星团从诞生到未来 100 Myr 的轨道运动。子图 c 展示了星团群成员星团自诞生时刻起到未来 100 Myr 内，距离所在星团群中最年老星团的距离随着时间的变化。子图 d 为星团群中所有成员星团诞生以后，成员星与最邻近星团的距离平均值随时间的变化，蓝色阴影为成员星与最邻近星团的距离的标准差。子图 a-d：不同的颜色表示不同的成员星团。三角形为星团诞生时的位置，菱形为 100Myr 的位置，X 为现在的位置，实线为诞生到现在的轨道，虚线为预测 100Myr 的轨道。

Note. Panel a and b show the orbital motion of the open cluster in each group, which is from their birth to the next 100 Myr in the future. Panel c shows the distance between the oldest member cluster in the group and the rest of the members, which changes with time. Panel d shows the average distance between member clusters and the nearest neighboring changes over time, which begins after the birth of all member clusters in the cluster group. Panel a-d: Different colors indicate different member clusters. The triangle is the birthplace of the star cluster, the diamond is the predicted position at 100 Myr, X is the current position, the solid line is the orbit from birth to the present, and the dotted line is the predicted orbit at 100 Myr.

第4章 总结与展望

4.1 总结

基于 *Gaia* DR3 高精度的天体测量和测光数据，我们在天鹅座（Cygnus）天区开展了星团群的证认工作。我们从以往报道的疏散星团星表中筛选出位于该天区的 36 个星团，并测定了这些星团的平均性质参数。随后，在综合考虑星团间的空间邻近性和运动学相关性的基础上，我们在五维相空间中进行了细致的星团群证认。我们采用了严格的筛选标准：星团群内任意两个成员星团之间的空间距离需小于 100 pc，且它们的年龄差异不得超过 30 Myr；同时，所有成员星团之间的三维速度差和切向速度差均需小于 10 km s^{-1} ，从而确保所选星团群的紧密性和运动一致性。

最终，我们成功证认了 4 个新的原初星团群，分别命名为 G1, G2, G3, G4。其中，G1 包含 6 个星团，G2 由 8 个星团组成，G3 和 G4 各包含 3 个星团。其中，就任一星团群而言，它们的恒星形成持续时间都符合连续恒星形成事件的时标，并且空间分布也显示出一定的关联性，因此我们推测成员星团可能是在同一片巨分子云中相继形成的。

为了更准确地研究星团群的空间分布形态，我们利用贝叶斯方法修正了由视差测量误差导致的视线方向星团形态的虚假延展，从而得到了星团群更接近真实的形态分布。分析结果显示，星团群 G1 和 G2 的空间分布呈现出显著的丝状结构，而 G3 和 G4 的成员星团则相对集中。此外，我们还发现 G1 和 G2 中的部分成员星团目前并未表现出明显的相互作用，而 G3 和 G4 的成员星团之间则存在相互作用。

为了更深入地探究星团群在银河系引力场中的运动特性，我们对其运动轨道进行了详细研究。结果表明，就任一星团群而言，其成员星团在运动轨道上呈现出较为一致的趋势。就未来的演化而言，星团群 G1 的成员星团在未来约 66 Myr 时，其与最近邻星团间距的平均值将超过 100 pc，标志着成员星团间相互作用的逐渐消失。虽然星团群 G2 的该平均值也在持续增长，但在 100 Myr 时仍小于 100 pc，表明其瓦解成独立星团的过程可能需要更长时间。而在星团群 G3 与 G4 中，该均值将皆在未来 25 Myr 左右达到 100 pc，表明其共同运动的状态只能维持较短的时间。因此，4 个星团群演化的最终命运是瓦解成为独立的星团。

4.2 展望

随着 *Gaia* 数据的不断涌现及其精度的显著提升，以及机器学习算法在星团研究领域的深入应用，大量新的星团相继被报道。随着银河系疏散星团的日益丰富，我们得以依托庞大而全面的星团数据开展更为系统和详尽的星团群搜寻工作。

恒星的化学元素含量完整记录了其诞生时的银河系星际环境的化学组成，在揭示疏散星团群起源方面扮演着至关重要的角色。因此，研究双星团、星团群化学起源的关键，在于获取足够完备的、可靠的成员星的金属丰度数据。然而，并非所有大型高分辨率光谱巡天都有专门观测疏散星团。除了为校准目的而观测的一小部分星团外，只有当疏散星团的恒星恰好位于其他观测目标的视场中时，才会将其进行观测。这意味着大多数巡天关于星团的观测结果往往仅有一、两个成员的观测数据。对于本文所研究的 4 个星团群，其中有 11 个星团，LAMOST 仅有 1 颗成员星或无观测数据。由于目前成员星的光谱数据极为有限，甚至许多星团成员星缺乏必要的光谱数据，导致相关研究难以深入开展。在未来，如果能够获取更多关于星团群成员星的金属丰度测量数据，我们有望更准确地确认星团群的起源和归属，从而深化对银河系结构和演化以及星团群起源机制的理解。本文研究了星团群从诞生到未来 100 Myr 内成员星团的运动轨迹。在研究中，我们主要考虑了成员星团在银河系潮汐力场作用下的运动，而暂时忽略了成员星团之间的相互作用。为了更全面地揭示星团群的演化过程，未来我们计划根据现有的星团性质，借助 N-body 数值模拟方法，将成员星团之间的相互作用纳入考虑范围，以进一步探究成员星团起源机制与演化模式。

随着我们对天鹅座天区星团群的实验性搜寻的成功，验证了我们所用方法的可行性与有效性。然而，目前星团群的形成机制仍是一个尚未完全明确的领域。为了更深入地理解这一复杂过程，我们将从多个方面展开进一步的研究。首先，我们将扩大星团群的样本，构建太阳邻域尽可能完备的星团群样本，为统计性质的研究提供更为全面和丰富的数据。在星团群性质的统计研究方面，我们将基于高精度的 *Gaia* DR3 数据，采用统一的成员星判定和星团性质测定方法，以确保样本参数的一致性和准确性，为我们后续的深入研究提供重要的数据基础。此外，我们将借助 N-body 数值模拟方法来模拟星团群的形成和演化过程。这将使我们能够更直观地了解其形成机制和演化历史，为解释观测结果提供有力的理论支持。同时，我们还将进一步研究星团与诞生处母分子云性质的关联性，以及恒星反馈活动对星团群形成过程的影响。特别关注与 SNR（超新星遗迹）以及 HI supershell 成协的星团群，从观测上提供证据来检验超新星（SNe）对星团形成过程的影响。这些研究将更准确地模拟星团群的形成和演化过程，并为我们的理论研究提供新的视角和思路。

参考文献

- Arnold B, Goodwin S P, Griffiths D W, et al., 2017. How do binary clusters form?[J/OL]. MNRAS, 471(2): 2498-2507. DOI: [10.1093/mnras/stx1719](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1719).
- Astropy Collaboration, Robitaille T P, Tollerud E J, et al., 2013. Astropy: A community Python package for astronomy[J/OL]. A&A, 558: A33. DOI: [10.1051/0004-6361/201322068](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322068).
- Bailer-Jones C A L, 2015. Estimating Distances from Parallaxes[J/OL]. PASP, 127(956): 994. DOI: [10.1086/683116](https://doi.org/10.1086/683116).
- Bally J, 2008. Overview of the Orion Complex[M/OL]//Reipurth B. Handbook of Star Forming Regions, Volume I: Vol. 4. 459. DOI: [10.48550/arXiv.0812.0046](https://doi.org/10.48550/arXiv.0812.0046).
- Beccari G, Boffin H M J, Jerabkova T, 2020. Uncovering a 260 pc wide, 35-Myr-old filamentary relic of star formation[J/OL]. MNRAS, 491(2): 2205-2216. DOI: [10.1093/mnras/stz3195](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3195).
- Bica E, Bonatto C, Dutra C M, 2003. Does Cyg OB2 harbour any open cluster?[J/OL]. A&A, 405: 991-998. DOI: [10.1051/0004-6361:20030700](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030700).
- Binney J, Tremaine S, 2008. Galactic Dynamics: Second Edition[M].
- Blaauw A, 1964. The O Associations in the Solar Neighborhood[J/OL]. ARA&A, 2: 213. DOI: [10.1146/annurev.aa.02.090164.001241](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.02.090164.001241).
- Bonatto C, Kerber L O, Bica E, et al., 2006. Probing disk properties with open clusters[J/OL]. A&A, 446(1): 121-135. DOI: [10.1051/0004-6361:20053573](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053573).
- Bonnell I A, Bate M R, 2006. Star formation through gravitational collapse and competitive accretion [J/OL]. MNRAS, 370(1): 488-494. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10495.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10495.x).
- Bonnell I A, Bate M R, Vine S G, 2003. The hierarchical formation of a stellar cluster[J/OL]. MNRAS, 343(2): 413-418. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06687.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06687.x).
- Bovy J, 2015. galpy: A python Library for Galactic Dynamics[J/OL]. ApJS, 216(2): 29. DOI: [10.1088/0067-0049/216/2/29](https://doi.org/10.1088/0067-0049/216/2/29).
- Bovy J, 2017. Galactic rotation in Gaia DR1[J/OL]. MNRAS, 468(1): L63-L67. DOI: [10.1093/mnrasl/slx027](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slx027).
- Bressert E, Bastian N, Gutermuth R, et al., 2010. The spatial distribution of star formation in the solar neighbourhood: do all stars form in dense clusters?[J/OL]. MNRAS, 409(1): L54-L58. DOI: [10.1111/j.1745-3933.2010.00946.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2010.00946.x).
- Brown J H, Burkert A, Truran J W, 1995. On the Formation of Globular Clusters. II. Early Dynamical Evolution[J/OL]. ApJ, 440: 666. DOI: [10.1086/175304](https://doi.org/10.1086/175304).
- Caffau E, Ludwig H G, Steffen M, et al., 2011. Solar Chemical Abundances Determined with a CO5BOLD 3D Model Atmosphere[J/OL]. SoPh, 268(2): 255-269. DOI: [10.1007/s11207-010-9541-4](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9541-4).
- Camargo D, Bica E, Bonatto C, 2016. Characterizing star cluster formation with WISE: 652 newly found star clusters and candidates[J/OL]. MNRAS, 455(3): 3126-3135. DOI: [10.1093/mnras/stv2517](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2517).
- Cantat-Gaudin T, Anders F, 2020a. Clusters and mirages: cataloguing stellar aggregates in the Milky Way[J/OL]. A&A, 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]. A&A, 618: A93. DOI: [10.1051/0004-6361/201833476](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833476).

- Cantat-Gaudin T, Krone-Martins A, Sedaghat N, et al., 2019a. Gaia DR2 unravels incompleteness of nearby cluster population: new open clusters in the direction of Perseus[J/OL]. *A&A*, 624: A126. DOI: [10.1051/0004-6361/201834453](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834453).
- Cantat-Gaudin T, Mapelli M, Balaguer-Núñez L, et al., 2019b. A ring in a shell: the large-scale 6D structure of the Vela OB2 complex[J/OL]. *A&A*, 621: A115. DOI: [10.1051/0004-6361/201834003](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834003).
- Cantat-Gaudin T, Anders F, Castro-Ginard A, et al., 2020b. Painting a portrait of the Galactic disc with its stellar clusters[J/OL]. *A&A*, 640: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/202038192](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038192).
- Carrera R, Pasquato M, Vallenari A, et al., 2019. Extended halo of NGC 2682 (M 67) from Gaia DR2[J/OL]. *A&A*, 627: A119. DOI: [10.1051/0004-6361/201935599](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935599).
- Casado J, 2021. The List of Possible Double and Multiple Open Clusters between Galactic Longitudes 240° and 270°[J/OL]. *Astronomy Reports*, 65(9): 755-775. DOI: [10.1134/S1063772921350018](https://doi.org/10.1134/S1063772921350018).
- Casado J, 2022. The Effect of Age on the Grouping of Open Clusters: The Primordial Group Hypothesis[J/OL]. *Universe*, 8(2): 113. DOI: [10.3390/universe8020113](https://doi.org/10.3390/universe8020113).
- Casagrande L, Vandenberg D A, 2018. On the use of Gaia magnitudes and new tables of bolometric corrections[J/OL]. *MNRAS*, 479(1): L102-L107. DOI: [10.1093/mnrasl/sly104](https://doi.org/10.1093/mnrasl/sly104).
- Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al., 2018. A new method for unveiling open clusters in Gaia. New nearby open clusters confirmed by DR2[J/OL]. *A&A*, 618: A59. DOI: [10.1051/0004-6361/201833390](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833390).
- Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al., 2019. Hunting for open clusters in Gaia DR2: the Galactic anticentre[J/OL]. *A&A*, 627: A35. DOI: [10.1051/0004-6361/201935531](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935531).
- Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al., 2020. Hunting for open clusters in Gaia DR2: 582 new open clusters in the Galactic disc[J/OL]. *A&A*, 635: A45. DOI: [10.1051/0004-6361/201937386](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937386).
- Conrad C, Scholz R D, Kharchenko N V, et al., 2017. A RAVE investigation on Galactic open clusters . II. Open cluster pairs, groups and complexes[J/OL]. *A&A*, 600: A106. DOI: [10.1051/0004-6361/201630012](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630012).
- Coronado J, Fürnkranz V, Rix H W, 2022. Pearls on a String: Numerous Stellar Clusters Strung Along the Same Orbit[J/OL]. *ApJ*, 928(1): 70. DOI: [10.3847/1538-4357/ac545c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac545c).
- de La Fuente Marcos R, de La Fuente Marcos C, 2009. Double or binary: on the multiplicity of open star clusters[J/OL]. *A&A*, 500(2): L13-L16. DOI: [10.1051/0004-6361/200912297](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200912297).
- de la Fuente Marcos R, de la Fuente Marcos C, 2009. Hierarchical Star Formation in the Milky Way Disk[J/OL]. *ApJ*, 700(1): 436-446. DOI: [10.1088/0004-637X/700/1/436](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/1/436).
- de la Fuente Marcos R, de la Fuente Marcos C, 2010. The Evolution of Primordial Binary Open Star Clusters: Mergers, Shredded Secondaries, and Separated Twins[J/OL]. *ApJ*, 719(1): 104-118. DOI: [10.1088/0004-637X/719/1/104](https://doi.org/10.1088/0004-637X/719/1/104).
- Dias W S, Alessi B S, Moitinho A, et al., 2002. New catalogue of optically visible open clusters and candidates[J/OL]. *A&A*, 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]. *ApJ*, 629(2): 825-831. DOI: [10.1086/431456](https://doi.org/10.1086/431456).
- Dreyer J L E, 1888. A New General Catalogue of Nebulæ and Clusters of Stars, being the Catalogue of the late Sir John F. W. Herschel, Bart, revised, corrected, and enlarged[J]. *MmRAS*, 49: 1.
- Efremov Y N, 1978. Star complexes[J]. *Soviet Astronomy Letters*, 4: 66-69.
- Efremov Y N, 1997. Concentration of Cepheids and open clusters in the spiral arms of the galaxy [J]. *Astronomy Letters*, 23(5): 579-584.

- EFREMOV Y N, ELMEGREEN B G, 1998. Hierarchical star formation from the time—space distribution of star clusters in the Large Magellanic Cloud[J/OL]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 299(2): 588-594. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01819.x>.
- Elmegreen B G, Efremov Y, Pudritz R E, et al., 2000a. Observations and Theory of Star Cluster Formation[C/OL]//Mannings V, Boss A P, Russell S S. Protostars and Planets IV. 179. DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/9903136](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/9903136).
- Elmegreen B G, Efremov Y, Pudritz R E, et al., 2000b. Observations and Theory of Star Cluster Formation[C/OL]//Mannings V, Boss A P, Russell S S. Protostars and Planets IV. 179. DOI: [10.48550/arXiv.astro-ph/9903136](https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/9903136).
- Elmegreen B, 2010. Star Formation Morphologies[C]//American Astronomical Society Meeting Abstracts: Vol. 215 American Astronomical Society Meeting Abstracts #215. 229.05.
- Elmegreen B G, 2007. On the Rapid Collapse and Evolution of Molecular Clouds[J/OL]. ApJ, 668(2): 1064-1082. DOI: [10.1086/521327](https://doi.org/10.1086/521327).
- Elmegreen B G, Scalo J, 2004. Interstellar Turbulence I: Observations and Processes[J/OL]. ARA&A, 42(1): 211-273. DOI: [10.1146/annurev.astro.41.011802.094859](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.011802.094859).
- Evans I, Neal J., Dunham M M, Jørgensen J K, et al., 2009. The Spitzer c2d Legacy Results: Star-Formation Rates and Efficiencies; Evolution and Lifetimes[J/OL]. ApJS, 181(2): 321-350. DOI: [10.1088/0067-0049/181/2/321](https://doi.org/10.1088/0067-0049/181/2/321).
- Ferreira F A, Santos J F C, Corradi W J B, et al., 2019. Three new Galactic star clusters discovered in the field of the open cluster NGC 5999 with Gaia DR2[J/OL]. MNRAS, 483(4): 5508-5517. DOI: [10.1093/mnras/sty3511](https://doi.org/10.1093/mnras/sty3511).
- Froebrich D, Scholz A, Raftery C L, 2007. A systematic survey for infrared star clusters with $|b| < 20^\circ$ using 2MASS[J/OL]. MNRAS, 374(2): 399-408. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.11148.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.11148.x).
- Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al., 2016. The Gaia mission[J/OL]. A&A, 595: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/201629272](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629272).
- Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al., 2018. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties[J/OL]. A&A, 616: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/201833051](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051).
- Gaia Collaboration, Vallenari A, Brown A G A, et al., 2023. Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties[J/OL]. A&A, 674: A1. DOI: [10.1051/0004-6361/202243940](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243940).
- Goodwin S P, 1997. Residual gas expulsion from young globular clusters[J/OL]. MNRAS, 284(4): 785-802. DOI: [10.1093/mnras/284.4.785](https://doi.org/10.1093/mnras/284.4.785).
- Grisel O, Mueller A, Lars, et al., 2021. scikit-learn/scikit-learn: scikit-learn 1.0.2[CP/OL]. Zenodo. DOI: [10.5281/zenodo.5804512](https://doi.org/10.5281/zenodo.5804512).
- Grudić M Y, Guszejnov D, Hopkins P F, et al., 2018. From the top down and back up again: star cluster structure from hierarchical star formation[J/OL]. MNRAS, 481(1): 688-702. DOI: [10.1093/mnras/sty2303](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2303).
- Herschel W, 1786. Catalogue of One Thousand New Nebulae and Clusters of Stars. By William Herschel, LL.D. F. R. S.[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I, 76: 457-499.
- Høg E, Bässgen G, Bastian U, et al., 1997. The TYCHO Catalogue[J]. A&A, 323: L57-L60.
- Innanen K A, Wright A E, House F C, et al., 1972. The stability of certain model binary stellar systems in galactic gravitational fields[J/OL]. MNRAS, 160: 249. DOI: [10.1093/mnras/160.3.249](https://doi.org/10.1093/mnras/160.3.249).
- Janes K, Adler D, 1982. Open clusters and galactic structure.[J/OL]. ApJS, 49: 425-446. DOI: [10.1086/190805](https://doi.org/10.1086/190805).

- Katz D, Sartoretti P, Cropper M, et al., 2019. Gaia Data Release 2. Properties and validation of the radial velocities[J/OL]. *A&A*, 622: A205. DOI: [10.1051/0004-6361/201833273](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833273).
- Katz D, Sartoretti P, Guerrier A, et al., 2023. Gaia Data Release 3. Properties and validation of the radial velocities[J/OL]. *A&A*, 674: A5. DOI: [10.1051/0004-6361/202244220](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244220).
- Kharchenko N V, Piskunov A E, Schilbach E, et al., 2013. Global survey of star clusters in the Milky Way. II. The catalogue of basic parameters[J/OL]. *A&A*, 558: A53. DOI: [10.1051/0004-6361/201322302](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322302).
- Kounkel M, Covey K, 2019. Untangling the Galaxy. I. Local Structure and Star Formation History of the Milky Way[J/OL]. *AJ*, 158(3): 122. DOI: [10.3847/1538-3881/ab339a](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab339a).
- Kovaleva D A, Ishchenko M, Postnikova E, et al., 2020. Collinder 135 and UBC 7: A physical pair of open clusters[J/OL]. *A&A*, 642: L4. DOI: [10.1051/0004-6361/202039215](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039215).
- Krause M G H, Offner S S R, Charbonnel C, et al., 2020. The Physics of Star Cluster Formation and Evolution[J/OL]. *SSRv*, 216(4): 64. DOI: [10.1007/s11214-020-00689-4](https://doi.org/10.1007/s11214-020-00689-4).
- Krumholz M R, McKee C F, Bland-Hawthorn J, 2019. Star Clusters Across Cosmic Time[J/OL]. *ARA&A*, 57: 227-303. DOI: [10.1146/annurev-astro-091918-104430](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-091918-104430).
- Lada C J, Lada E A, 2003. Embedded Clusters in Molecular Clouds[J/OL]. *ARA&A*, 41: 57-115. DOI: [10.1146/annurev.astro.41.011802.094844](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.011802.094844).
- Liu L, Pang X, 2019. A Catalog of Newly Identified Star Clusters in Gaia DR2[J/OL]. *ApJS*, 245 (2): 32. DOI: [10.3847/1538-4365/ab530a](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab530a).
- Lynga G, 1987. VizieR Online Data Catalog: Open Cluster Data 5th Edition (Lynga 1987)[J]. VizieR Online Data Catalog: VII/92A.
- Lynga G, 1995. VizieR Online Data Catalog: Open Cluster Data 5th Edition (Lynga 1987)[DS/OL].
- Mapelli M, 2017. Rotation in young massive star clusters[J/OL]. *MNRAS*, 467(3): 3255-3267. DOI: [10.1093/mnras/stx304](https://doi.org/10.1093/mnras/stx304).
- McMillan S L W, Vesperini E, Portegies Zwart S F, 2007. A Dynamical Origin for Early Mass Segregation in Young Star Clusters[J/OL]. *ApJL*, 655(1): L45-L49. DOI: [10.1086/511763](https://doi.org/10.1086/511763).
- Megeath S T, Gutermuth R, Muzerolle J, et al., 2016. The Spitzer Space Telescope Survey of the Orion A and B Molecular Clouds. II. The Spatial Distribution and Demographics of Dusty Young Stellar Objects[J/OL]. *AJ*, 151(1): 5. DOI: [10.3847/0004-6256/151/1/5](https://doi.org/10.3847/0004-6256/151/1/5).
- Meingast S, Alves J, Rottensteiner A, 2021. Extended stellar systems in the solar neighborhood. V. Discovery of coronae of nearby star clusters[J/OL]. *A&A*, 645: A84. DOI: [10.1051/0004-6361/202038610](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038610).
- Mermilliod J C, Paunzen E, 2003. Analysing the database for stars in open clusters. I. General methods and description of the data[J/OL]. *A&A*, 410: 511-518. DOI: [10.1051/0004-6361:20031112](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031112).
- Mermilliod J C, 1995. The Database for Galactic Open Clusters (BDA)[C/OL]//Egret D, Albrecht M A. Information & On-Line Data in Astronomy: Vol. 203. 127. DOI: [10.1007/978-94-011-0397-8_12](https://doi.org/10.1007/978-94-011-0397-8_12).
- Messier C, 1774. Catalogue des Nébuleuses des amas d'Étoiles, que l'on découvre parmi les Étoiles fixes sur l'horizon de Paris; observées à l'Observatoire de la Marine, avec differens instruments [J/OL]. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences: 435-461. <http://www.messier.seds.org/xtra/history/m-cat71.html>.
- Mihos C, Bothun G, 1997. NGC 2442: Tidal Encounters and the Evolution of Spiral Galaxies [A/OL]. astro-ph/9701015. arXiv: [astro-ph/9701015](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9701015).

- Millman K J, Aivazis M, 2011. Python for Scientists and Engineers[J/OL]. Computing in Science and Engineering, 13(2): 9-12. DOI: [10.1109/MCSE.2011.36](https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.36).
- Netopil M, Paunzen E, Carraro G, 2015. A comparative study on the reliability of open cluster parameters[J/OL]. A&A, 582: A19. DOI: [10.1051/0004-6361/201526372](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526372).
- Pang X, Li Y, Tang S Y, et al., 2020. Different Fates of Young Star Clusters after Gas Expulsion [J/OL]. ApJL, 900(1): L4. DOI: [10.3847/2041-8213/abad28](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abad28).
- Pang X, Li Y, Yu Z, et al., 2021a. 3D Morphology of Open Clusters in the Solar Neighborhood with Gaia EDR 3: Its Relation to Cluster Dynamics[J/OL]. ApJ, 912(2): 162. DOI: [10.3847/1538-4357/abeaac](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abeaac).
- Pang X, Yu Z, Tang S Y, et al., 2021b. Disruption of Hierarchical Clustering in the Vela OB2 Complex and the Cluster Pair Collinder 135 and UBC 7 with Gaia EDR3: Evidence of Supernova Quenching[J/OL]. ApJ, 923(1): 20. DOI: [10.3847/1538-4357/ac2838](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2838).
- Perryman M A C, Lindegren L, Kovalevsky J, et al., 1997. The HIPPARCOS Catalogue[J]. A&A, 323: L49-L52.
- Piatti A E, Malhan K, 2022. First evidence of a collision between two unrelated open clusters in the Milky Way[J/OL]. MNRAS, 511(1): L1-L7. DOI: [10.1093/mnrasl/slab130](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slab130).
- Piecka M, Paunzen E, 2021. Aggregates of clusters in the Gaia data[J/OL]. A&A, 649: A54. DOI: [10.1051/0004-6361/202040139](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040139).
- Pinfield D J, Jameson R F, Hodgkin S T, 1998. The mass of the Pleiades[J/OL]. MNRAS, 299(4): 955-964. DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.01754.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01754.x).
- Piskunov A E, Kharchenko N V, Röser S, et al., 2006. Revisiting the population of Galactic open clusters[J/OL]. A&A, 445(2): 545-565. DOI: [10.1051/0004-6361:20053764](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053764).
- Poppel W, 1997. The Gould Belt System and the Local Interstellar Medium[J]. FCPh, 18: 1-271.
- Portegies Zwart S F, McMillan S L W, Gieles M, 2010. Young Massive Star Clusters[J/OL]. ARA&A, 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]. ApJS, 265(1): 12. DOI: [10.3847/1538-4365/acadd6](https://doi.org/10.3847/1538-4365/acadd6).
- 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]. AJ, 139(6): 2440-2447. DOI: [10.1088/0004-6256/139/6/2440](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/6/2440).
- Röser S, Schilbach E, Goldman B, 2016. Nine new open clusters within 500 pc from the Sun[J/OL]. A&A, 595: A22. DOI: [10.1051/0004-6361/201629158](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629158).
- Schmeja S, Kharchenko N V, Piskunov A E, et al., 2014. Global survey of star clusters in the Milky Way. III. 139 new open clusters at high Galactic latitudes[J/OL]. A&A, 568: A51. DOI: [10.1051/0004-6361/201322720](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201322720).
- Scholz R D, Kharchenko N V, Piskunov A E, et al., 2015. Global survey of star clusters in the Milky Way. IV. 63 new open clusters detected by proper motions[J/OL]. A&A, 581: A39. DOI: [10.1051/0004-6361/201526312](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526312).
- Sim G, Lee S H, Ann H B, et al., 2019. 207 New Open Star Clusters within 1 kpc from Gaia Data Release 2[J/OL]. Journal of Korean Astronomical Society, 52: 145-158. DOI: [10.5303/JKAS.2019.52.5.145](https://doi.org/10.5303/JKAS.2019.52.5.145).
- Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al., 2006. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) [J/OL]. AJ, 131(2): 1163-1183. DOI: [10.1086/498708](https://doi.org/10.1086/498708).
- Song F, Esamdin A, Hu Q, et al., 2022. Binary open clusters in the Gaia data[J/OL]. A&A, 666: A75. DOI: [10.1051/0004-6361/202243524](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243524).

- Soubiran C, Cantat-Gaudin T, Romero-Gómez M, et al., 2019. Open cluster kinematics with Gaia DR2 (Corrigendum)[J/OL]. A&A, 623: C2. DOI: [10.1051/0004-6361/201834020e](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834020e).
- Steinmetz M, Zwitter T, Siebert A, et al., 2006. The Radial Velocity Experiment (RAVE): First Data Release[J/OL]. AJ, 132(4): 1645-1668. DOI: [10.1086/506564](https://doi.org/10.1086/506564).
- Subramaniam A, Gorti U, Sagar R, et al., 1995. Probable double open clusters in the Galaxy.[J]. Bulletin of the Astronomical Society of India, 23: 449-450.
- Tarricq Y, Soubiran C, Casamiquela L, et al., 2022. Structural parameters of 389 local open clusters [J/OL]. A&A, 659: A59. DOI: [10.1051/0004-6361/202142186](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142186).
- Tian H J, 2020. Discovery of a Young Stellar Snake with Two Dissolving Cores in the Solar Neighborhood[J/OL]. ApJ, 904(2): 196. DOI: [10.3847/1538-4357/abbf4b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbf4b).
- Wang F, Tian H, Qiu D, et al., 2022. The stellar 'Snake' - I. Whole structure and properties[J/OL]. MNRAS, 513(1): 503-515. DOI: [10.1093/mnras/stac843](https://doi.org/10.1093/mnras/stac843).
- Zhang Y, Tang S Y, Chen W P, et al., 2020. Diagnosing the Stellar Population and Tidal Structure of the Blanco 1 Star Cluster[J/OL]. ApJ, 889(2): 99. DOI: [10.3847/1538-4357/ab63d4](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab63d4).
- Zhong J, Chen L, Kouwenhoven M B N, et al., 2019. Substructure and halo population of Double Cluster h and χ Persei[J/OL]. A&A, 624: A34. DOI: [10.1051/0004-6361/201834334](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834334).

致 谢

研究生阶段的学习生活，对我而言，是一段充满挑战与收获的宝贵时光。在这个过程中，我深感幸运，因为有太多人给予了我无私的帮助和支持。在此，我要向所有关心、帮助过我的人表达最诚挚的谢意。

首先，特别感谢我的导师陈力老师和钟靖老师，硕士期间的工作顺利完成离不开两位老师的悉心教导。在平日里，与两位老师相处的时光总是充满温暖与收获，但少有正式的机会向两位老师表达我由衷的感谢。陈老师不仅学识渊博，而且平易近人，总是以无比的耐心和热情助我解决学习中遇到的各种难题。在我们初涉这个领域时，陈老师经常精心准备报告，亲自带着投影仪来到学生办公室，为我们详细讲解日常实践中能够应用到的天文知识与框架，使我们能够迅速掌握并有效地运用到实际研究中。他毫无保留地传授给我科研经验，让我在学术道路上少走了许多弯路。每当我取得一点小进步时，陈老师总是给予我肯定与鼓励，让我更加有信心和动力继续前行。除了学术上的指导，陈老师还非常关心我们的日常生活。他经常帮我们规划周边的游玩路线，推荐一些值得一去的景点和美食，让我们在忙碌的科研生活中也能感受到大自然的魅力。在陈老师的引导下，我们不仅在学术上取得了进步，更在生活中收获了欢笑与成长。

钟老师在我需要时也总是慷慨地伸出援手。特别是在本科实习时首次参与课题组大组会进行文献报告时，钟老师不仅事先帮我精心梳理了报告内容，还针对我困惑的地方进行了详尽的补充和讲解，让我能够自信且顺利地完成报告。在日常工作中，这样的帮助屡见不鲜。钟老师总是耐心聆听我的倾诉，无论我表达得如何紊乱，他都能敏锐地捕捉到我所遇到的问题，并为我提供中肯的建议和独到的见解。能成为两位老师的学生，是我求学路上最幸运的事情。两位老师不仅在科研上给予我悉心的指导和帮助，他们总是耐心细致地为我解答疑惑，一点一点地帮助我成长。在日常生活中，两位老师也对我们关怀备至，总是耐心地倾听我们分享生活中的点滴快乐和烦恼。每当我们谈及一些有趣或奇特的经历时，陈老师总会发出忍俊不禁的笑声，而钟老师则以其爽朗的笑声为我们增添欢乐。同时，他们也非常关注我们对未来的规划，时常在关键时刻提醒我们，一步一步地踏实完成当前应该做的事情，为未来的道路打下坚实的基础。

同时，我也要感谢课题组的侯金良老师、赵东海老师、常瑞香老师、邵正义老师、沈世银老师、尹君老师、富坚老师和袁方婷老师和李璐师姐。在这个氛围融洽的课题组中，我得到了各位老师的热情帮助和无私指导。组会上的讨论总是充满激情，让我受益匪浅；而组会后的快乐时光，也让我感受到了课题组的温暖和团结。各位老师都是非常有趣的人，他们的言传身教，让我不仅学到了专业知识，更学会了如何与人相处、如何思考。同时，感谢在科创工作中能够参与到左文文老师的课题，左老师在我迷茫与自我怀疑时，给予我鼓励与支持。感谢马金老师、储怡老师在日常学习和毕业准备过程中，不厌其烦地解答疑问，给予帮

助。

在研究生阶段的学习生活中，我有幸遇到了许多温暖的同学和伙伴，他们的帮助和陪伴让我的求学之路更加充实与快乐。首先，感谢一直以来的互相陪伴同学们，在日常生活学习中给予了我无私的帮助和关心。林如秋、郑思琪、曾琪、秦松梅和刘佳，她们不仅是办公室的工作伙伴、寝室的室友，还是课题组的伙伴。在忙碌的学习间隙，大家也经常一起分工动手做饭，楼道里时常飘着螺蛳粉的臭、火锅的香以及我们吃饭追剧时激动的吵闹声，这些都让我感到无比幸福和温暖。特别要感谢硕士期间一直以来的室友林如秋，给予了我无比坚定的支持和温暖的陪伴。她总是在我遭遇低谷时伸出援手，鼓励我继续前行；在我为工作焦头烂额，甚至在编写程序时因错误而抓耳挠腮时，她也总是不厌其烦地帮助我解决问题。同样，我也要感谢罗秋怡师姐，她以一贯的耐心倾听我的烦恼，为我提供宝贵的建议和鼓励，以及汪爱玲师姐的经验分享与日常投喂。

感谢小组成员张茜、李春燕、单星美、白乐娅、秦松梅、唐通、蒋悦悦，与我一起讨论工作，帮助我厘清思路，互相帮助，共同进步。他们对我的工作提出的建议和意见让我受益匪浅。同时作为“1513 驾校”的一份子，我们在一起叽叽喳喳的分享近来的趣闻，一起分享生活的点滴，留下了许多美好的回忆。感谢“1513 驾校”的其他成员包括钟文心师兄，潘翠云师姐，刘蓉蓉师姐、卢家凤师兄、胡国真师姐、潘鑫师兄、穆子豪师兄、沈梦婷、王左磊、曾琪、徐权峰、赵倩文、陈宓、叶人豪以及来自其他课题组黄振川、史奇奇、沈萍等小伙伴的陪伴与支持，让我的生活充满了欢笑与温暖。记得当时，我们寝室不幸成为最早封控的寝室之一，正上方的小胡师姐和曾琪用吊篮给我们送青团。我们还曾在线上共度欢乐时光，玩桌游时各自在手机屏幕前激动不已，那份欢乐至今仍历历在目。最近，我们又有了一个新的活动——周末晚上的自制饮料分享会。冰块与杯子清脆的碰撞声与大家的欢声笑语此起彼伏，这种快乐简单而纯粹。

最后，我要感谢家人的支持。他们是我求学路上的坚强后盾，他们的理解和鼓励让我能够无忧无虑地投入到学业中。

再次感谢所有关心、支持、帮助过我的人。

2024 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：

- 2020 年 09 月——2024 年 07 月，在中国科学院上海天文台攻读硕士学位。
- 2015 年 09 月——2019 年 07 月，在西华师范大学物理与空间科学学院获得学士学位。

已发表（或正式接受）的学术论文：

第一作者

- (1) 基于 Gaia DR3 数据在 Cygnus 天区的星团群搜寻研究 [J]. 天文学进展. 已正式接受

参与合作的学术论文

- (1) 单星美, 刘桂梅, 钟靖, 林清. 银河系双星团及星团群研究进展 [J]. 天文学进展. 已正式接受
- (2) He Z, Li C, Zhong J, Liu G, et al. New Open-cluster Candidates Found in the Galactic Disk Using Gaia DR2/EDR3 Data[J/OL]. ApJS, 2022,260(1):8. DOI: [10.3847/1538-4365/ac5cbb](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac5cbb).

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
- (2) 中国科学院大学 2021-2022 年度三好学生

