

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.01

基于 Gaia DR3 数据在 Cygnus 天区的星团群搜寻研究

刘桂梅^{1,2}, 钟靖¹, 单星美³, 秦松梅^{1,2}, 李春燕^{1,2}

(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. 上海天文馆 (上海科技馆分馆), 上海 201306)

摘要: 星团群由多个运动学和年龄相似并且空间位置邻近的疏散星团构成, 其对研究疏散星团形成机制与演化模式有重要意义。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。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。

我们基于 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。我们根据星团的空间分布和运动学性质, 在 Cygnus 天区发现了 4 个新的星团群, 分别命名为星团群 G1, G2, G3, G4。其中, G1 包含 6 个星团, G2 包含 8 个星团, G3 和 G4 各包含 3 个星团。这 4 个星团群各自占据相对独立的空间, 就其中任一星团群而言, 成员星团整体在空间上相互毗邻并且具有一致的切向速度, 表明成员星团在同一片巨分子云中形成。4 个星团群中恒星形成的持续时间分别为 13 Myr、29 Myr、10 Myr 和 12 Myr, 符合连续恒星形成事件的时标, 表明各自成员星团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, 以便研究星团群真实的空间分布形态。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; 此外, 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 中的成员星团皆存在明显的相互作用。最后, 我们利用 Galpy 程序包, 进一步细致地研究了这 4 个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

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

: 项目基金: 国家自然科学基金 (12090040/12090042, 12073060); 中国科学院青年创新促进会; 中国国家留学基金 (202304910547)

: 通讯作者: 钟靖, jzhong@shao.ac.cn

1 引言

疏散星团是由诞生于同一片分子云且受引力束缚的数十至上千颗恒星组成的恒星系统^[1]。大部分疏散星团是独立的恒星系统^[2]，少部分疏散星团倾向于成群形成，例如双星团甚至星团群^[3-5]。在空间上相互靠近且来自同一巨分子云（giant molecular cloud, GMC）的、具有共同起源的多星团系统被称为星团复合体^[6]（cluster complexes）或者原初星团群^[2]（primordial groups），本文以“星团群”统称。

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（尺度大约为 pc 至数十 pc 量级）^[7]。通常，星团群包含多个 OB 星协 and 年轻的星团，其恒星形成过程持续几百万年到几千万年^[5, 8]。因此，星团群可以作为探讨恒星与星团形成模式的绝佳平台，星团群性质的研究能够加深对巨分子云中恒星等级成团形成模式的理解^[9]。研究星团群内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模式。同时，探究星团群可以帮助我们将恒星的等级形成模式扩展至尺度更大的星系，从而理解星系的形成模式^[10]。

为了深入研究原初星团群，首先需要从观测上辨认原初星团群。在 *Gaia* 时代之前，受天体测量数据精度等观测因素的制约，大样本疏散星团成员星的可靠判定比较困难，对星团群的辨认和研究则更受限制。2018 年后，*Gaia* 发布了海量恒星高精度的五维天体测量参数（ α , δ , ϖ , μ_{α}^* , μ_{δ} ）和多波段测光数据（ G , G_{BP} and G_{RP} ）^[11-13]，以及数量空前的大样本恒星视向速度数据^[14, 15]；结合机器学习，尤其是聚类算法的广泛运用，人们在银河系内搜寻到越来越多新的疏散星团^[16-21]。

同样地，得益于 *Gaia* 提供的高精度空间、运动学数据，以及日益完备的疏散星团样本，越来越多的原初星团群被发现。这些新发现的原初星团群的空间分布特征各异，被赋予了非常有趣的名称，比如“pearls”^[22]，“rings”^[23]，“strings”^[24]，“relic filaments”^[25]以及“snakes”^[26]等。尤其 Vela 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^[25-28]，为星团群的形成机制与演化模式提供了新的视角。

首先，Giacomo Beccari 等人^[25]基于 *Gaia* DR2 数据，使用 DBSCAN 聚类算法，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 等人^[26]同样借助 *Gaia* DR2 数据在丝状恒星结构附近，新发现了一个大约 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相似。与 Giacomo Beccari 等人^[25]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 Giacomo Beccari 等人提出的丝状恒星结构^[25]在 5 维相空间（ α , δ , ϖ , μ_{α}^* , μ_{δ} ）具有相似的特征，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 Giacomo Beccari 等人与 Tian 等人的研究基础上, Wang 等人^[27] 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。其在 *Gaia* 提供的位置、距离以及自行数据的基础上, 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 天区中的蛇形结构以及丝状恒星结构。结果表明, 两个结构在空间上相互毗连, 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。

对于 Vela OB2 天区星团形成模式, Pang 等人^[28] 在 2021 年提出了另一种假设。他们基于 *Gaia* EDR3 数据在 Vela 天区中发现了由五个新的疏散星团 (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, 引发了其附近分子云塌缩, 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。然而, 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。

尽管星团群的搜寻证认工作有了较大的进展, 但是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。

天鹅座 (Cygnus) 天区正是一个包含着庞大星际尘埃、恒星形成区域以及大型超新星遗迹 Cygnus Loop 的天区, 它位于银河系的北面。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。通过对天鹅座天区星团群的深入观测和研究, 能够更全面地了解恒星的形成模式与演化机制。因此, 我们的工作基于 *Gaia* DR3 数据报道在天鹅座天区证认的新的星团群。在第二章中, 我们介绍使用的数据与方法, 包括星团样本数据来源, 星团参数测定方法和星团群搜寻的方法。第 3 章介绍星团群搜寻的结果, 包括星团群样本的性质详细分析以及未来的动力学状态的讨论。第 4 章进行总结和展望。

2 数据与方法

2.1 星团样本

迄今为止, 基于 *Gaia* 数据已经证认出数千个疏散星团。由于这些疏散星团来自不同的工作, 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 等人^[29-31] 等开展了一系列工作, 旨在基于 *Gaia* DR2 数据, 对以往报道的星团使用一致的方法进行成员星判定, 并且确定星团的平均性质参数。

首先, Cantat-Gaudin 等在 2018 年^[29] 整合了以往多个工作^[32-37] 报道的 3328 个疏散星团, 其中大部分来自 Dias 等^[32], Kharchenko 等^[33]。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 等人^[30, 31] 两次针对先前遗漏的以及后续新发现的星团^[16–20, 38, 39] 展开成员星判定, 并给出相应的星团参数。他们最终聚类得到了 2017 个疏散星团的成员星, 并以统一的方法确定了其中大多数星团的参数, 包括位置、距离和年龄等。Cantat-Gaudin 等人^[31] (简称 CG20) 提供的 2017 个星团的详尽列表, 不仅为我们提供了一套完整且方法统一的星团数据, 更为星团及银河系结构的研究奠定了坚实的数据基础。

值得注意的是, Qin 等人^[21] (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近区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, 该研究还提供了包括五维参数、年龄、星团结构参数等在内的详尽星团参数。此外, 该研究还补充了部分在 CG20 中未给出成员的星团信息以及 CG20 之后新报道的星团, 从而构建了太阳邻域 500 pc 以内较为完备的疏散星团成员星表。

在考察天鹅座天区 (约 1 kpc 以内) 的星团群时: 对于 500 pc 以内的区域, 以 Qin23 提供的星团表为主; 而对于 500 pc 以外的区域, 则使用 CG20 的星团表。将二者结合使用, 以获取天鹅座天区内更大样本的疏散星团数据。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 28 个来自 Qin23, 8 个来自 CG20。

2.2 星团参数

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, *Gaia* DR3), 并且考虑到 *Gaia* DR3 在自行、视差测量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^[14] 大幅增加到 *Gaia* DR3 的约 3400 万^[15]。这种数量级的增长为我们系统地研究星团的 3 维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, 我们将在 2.1 节中筛选以及汇总的成员星数据与 *Gaia* DR3 数据进行了交叉匹配。并且重新确定了目标星团 6 维参数 (位置, 自行, 视向速度) 以及年龄, 距离模数以及红化和星团质量等参数 (见表 1)。

为了得到目标星团可靠的中心位置和平均自行参数, 我们利用 KDE 算法分别在 (l, b) 和 (pml, pmb) 两个参数空间对星团的成员星进行了二维核密度估计。在这个过程中, 我们利用 (l, b) 和 (pml, pmb) 空间分布中密度最高的 10 个点的平均值来作为星团的平均位置 (glon, glat) 和平均自行 (pml, pmb)。同时, 为了得到目标星团可靠的平均视向速度 (R_v), 我们假设成员星的视向速度遵循高斯分布。由此, 我们对成员星视向速度分布做了高斯拟合, 将拟合得到的高斯函数的均值 (μ) 作为星团的平均视向速度。并且, 我们将每一个星团的所有成员星视差分布的中位值取倒数, 以此作为目标星团的平均距离。

而后根据星团以及星团成员星的 6 维性质参数 (glon, glat, dist, pml, pmb, R_v), 我们使用 `astropy`^[40] 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三维速度 $(U, V, W)=[10, 235, 7] \text{ km s}^{-1}$, 太阳到银心的距离 $R_0=8.0 \text{ kpc}$ ^[41] 作为默认参数。

为了确定每一个星团的年龄, 我们在星团的颜色-星等图 (CMD) 上进行等龄线拟合。在等龄线拟合之前, 我们进一步检查星团成员星在 CMD 上的分布, 去除明显偏离主序的部分恒星 (可能是场星)。接着, 我们从 CMD 3.7^① 下载 *Gaia* 测光系统的理论等龄线^[42-44], 通过肉眼拟合的方式来获取每一个星团的年龄参数。我们用于拟合的一系列等龄线的对数年龄范围 $\log(\text{Age}[\text{yr}]) = 6\sim 10$, 间隔为 0.01, 金属丰度值为太阳金属丰度 ($Z_\odot=0.0152$ ^[45])。我们通过改变距离模数 (DM)、红化值 ($E(B-V)$) 来移动等龄线并进行目视检查得到最佳拟合等龄线, 从而得到每个星团的年龄、距离模数、红化参数, 如表 1 所示。同时, 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, 由此确定了星团质量。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。

2.3 星团群搜寻方法

关于星团群的筛选方法, 我们主要参考了 Conrad 等人^[2] 的研究。他们首次利用包括位置、自行、视差以及视向速度信息的 6 维空间数据, 深入探讨了银河系疏散星团中是否存在成对或成群的现象。在分析了 432 个星团样本后, 他们发现星团与最邻近星团之间的 3 维距离分布在 50 pc 和 100 pc 附近存在显著峰值, 这被认为是银河系中最邻近疏散星团间距离的典型特征。并且他们还认为, 存在物理联系的双星团之间的速度差应小于 $10\text{-}20 \text{ km s}^{-1}$ 。

在本工作中, 我们进一步细化了筛选标准, 考虑了年龄因素。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 K-D Tree (K-Dimension Tree) 算法^[46], 对 2.1 节中筛选得到的 35 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, 通过在 6 维参数空间的搜寻和限制, 我们确认了 4 个星团群, 共包含 20 个成员星团。

3 结果与讨论

3.1 星团群搜寻结果

原初星团群的所有子结构都是在相同的巨分子云中形成的, 并且继承了母分子云内部的运动学性质^[47]。因此, 基于原初星团群成员星团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 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。

在图 1 中展示了四个星团群在 (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, G2 的切向运动方向

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

表 1 四个星团群成员星团的基本性质参数

Group	cluster	glon (deg)	glat (deg)	pml (mas yr ⁻¹)	pmb (mas yr ⁻¹)	dist (pc)	Rv (km s ⁻¹)	logt	DM (deg)	E(B-V) (deg)	mass (M _⊙)	rt (pc)
星团群 G1	ASCC_105	62.88	2.10	-0.68	-2.03	558.45	-16.75	7.85	9.30	0.18	120.49	7.05
	OCSN_152	66.19	5.86	0.03	-2.86	435.56	-20.13	7.91	8.63	0.11	86.46	6.31
	OCSN_113	68.10	-0.36	0.61	-3.86	372.73	-18.53	7.82	8.28	0.09	263.00	9.14
	OCSN_117	71.28	-0.05	2.43	-4.37	329.65	-18.20	7.76	7.83	0.05	147.45	7.54
	Roslund_5	71.39	0.14	0.12	-2.39	545.16	-18.01	7.87	9.04	0.14	164.87	7.82
	UPK_82	63.26	-0.54	-0.69	-3.04	540.86	-16.26	7.93	8.94	0.11	83.93	6.25
星团群 G2	OCSN_16	62.47	13.52	-2.76	-2.47	372.45	-16.50	7.54	8.04	0.07	124.37	7.12
	OCSN_18	63.92	15.40	-2.54	-1.69	371.13	-17.58	7.56	8.06	0.07	62.80	5.67
	Stephenson_1	66.89	15.34	-2.31	-2.21	356.57	-18.42	7.58	8.01	0.08	120.94	7.06
	UPK_101	70.21	15.64	-0.80	-1.80	351.17	-18.99	7.59	7.89	0.06	194.28	8.27
	UPK_64	56.47	10.33	-4.65	-1.31	430.20	-15.96	7.60	8.95	0.26	127.69	7.19
	UPK_72	57.98	10.21	-4.35	-1.45	456.91	-16.62	7.63	8.83	0.18	77.81	6.09
	UPK_78	61.02	16.65	-3.39	-1.54	372.82	-16.79	7.56	8.06	0.06	55.7	5.45
	UPK_83	64.40	12.67	-2.03	-3.23	352.72	-16.00	7.48	7.99	0.06	42.68	4.99
星团群 G3	OCSN_13	55.66	2.05	-5.06	-4.54	499.51	-9.71	7.35	8.55	0.23	268.57	9.21
	OCSN_14	56.93	3.20	-4.39	-3.92	514.11	-4.23	7.25	8.47	0.14	48.53	5.21
	UPK_70	56.28	6.24	-4.90	-2.52	493.50	-12.06	7.45	8.52	0.20	90.72	6.41
星团群 G4	OCSN_22	80.94	13.19	3.43	-2.09	306.14	-13.69	7.72	7.35	0.03	82.87	6.22
	OCSN_23	84.88	6.73	3.31	-1.39	345.67	-6.87	7.61	7.91	0.08	142.09	7.45
	RSG_5	81.75	6.05	3.34	-2.21	337.20	-7.12	7.60	7.89	0.07	167.04	7.86

注：表格的第 1 列和第 2 列分别表示星团群以及其包含的成员星团；第 3、4 列表示成员星团中心的坐标；第 5、6 列表示成员星团的平均自行；第 7 列表示成员星团的平均视差得到的距离；第 8 列表示成员星团的平均视向速度；第 9-11 列表示通过等龄线拟合得到的成员星团的年龄、距离模数和红化值。第 10 列是成员星团的质量，第 11 列是成员星团的潮汐半径。

与 G3, 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, 成员星团间空间分布相互毗邻, 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。

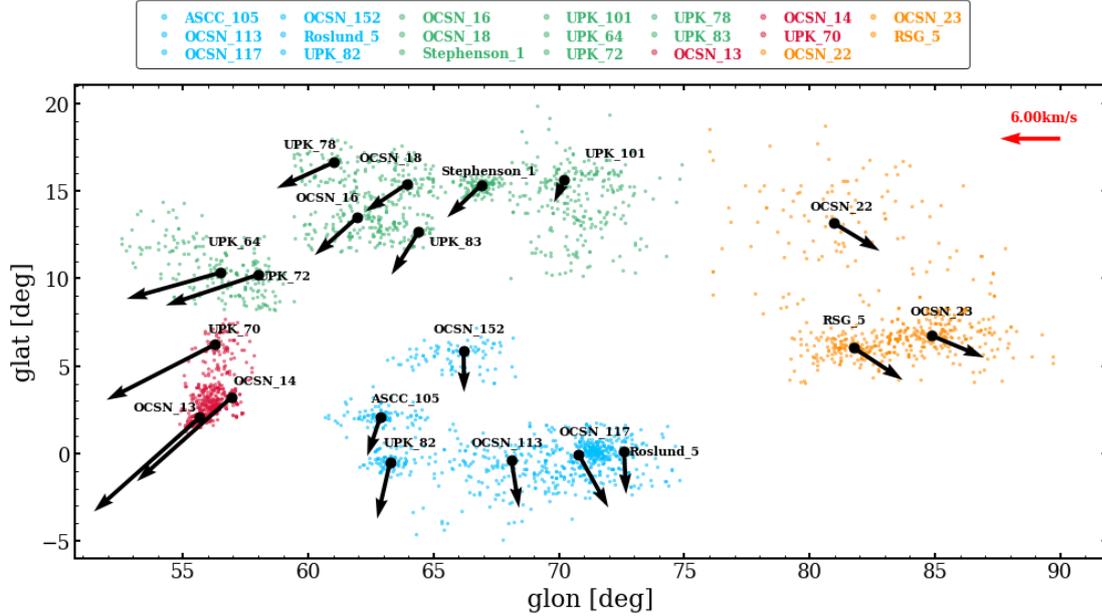


图 1 4 个星团群成员在 l-b 空间分布

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。

3.2 星团群的恒星形成持续时标

Efremov 等人^[48]的研究发现, 大麦哲伦云中的星团群, 其恒星形成持续时间与空间尺度紧密相关。具体来说, 尺度在数百至上千 pc 的星团群, 其恒星形成通常持续 $10 \sim 30 \text{ Myr}$ 。图 2 呈现了 4 个星团群成员星团的等龄线拟合结果, 进一步揭示了各星团群的年龄特征。星团群 G1 中的 6 个成员星团年龄分布在 $58 \sim 87 \text{ Myr}$, 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 $30 \sim 43 \text{ Myr}$, 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 $18 \sim 28 \text{ Myr}$, 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 $40 \sim 52 \text{ Myr}$, 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。

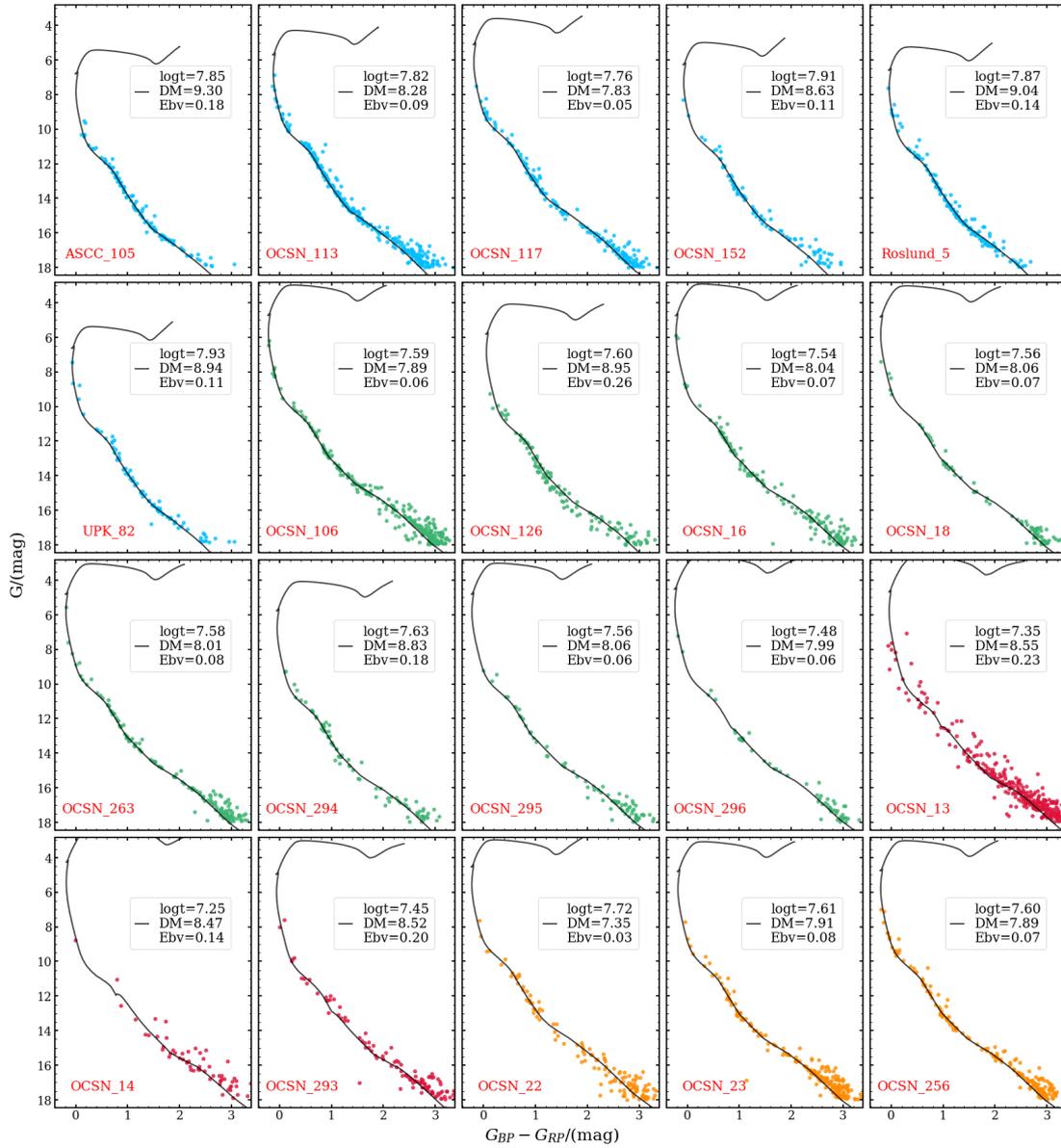


图 2 4 个星团群等龄线拟合结果

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。

3.3 星团群的 3D 空间分布

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 等人^[49] 和 Pang^[50] 等人介绍的贝叶斯方法, 对每一颗成员星的距离进行改正, 以期得到更为可靠的成员星团空间分布。

Innanen 等人在 1972 年^[51] 的研究中指出, 对于双星团而言, 如果它们的相对距离小于潮汐半径的三倍, 那么它们之间就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, 我们采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 等人^[52] 所使用的方法, 计算了星团的潮汐半径:

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

其中, G 是引力常数, 取值为 $4.3 \times 10^{-6} \text{ kpc} (\text{km s}^{-1})^2 M_{\odot}^{-1}$, A 和 B 是 Oort 常数, 分别取 $15.3 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ 和 $-11.9 \pm 0.4 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ ^[53]。 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 所示, 图中灰色虚线圆圈标记了各星团 3 倍潮汐半径 ($3 r_t$) 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)^[7]。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。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_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。三个星团在空间分布相互毗邻, 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。

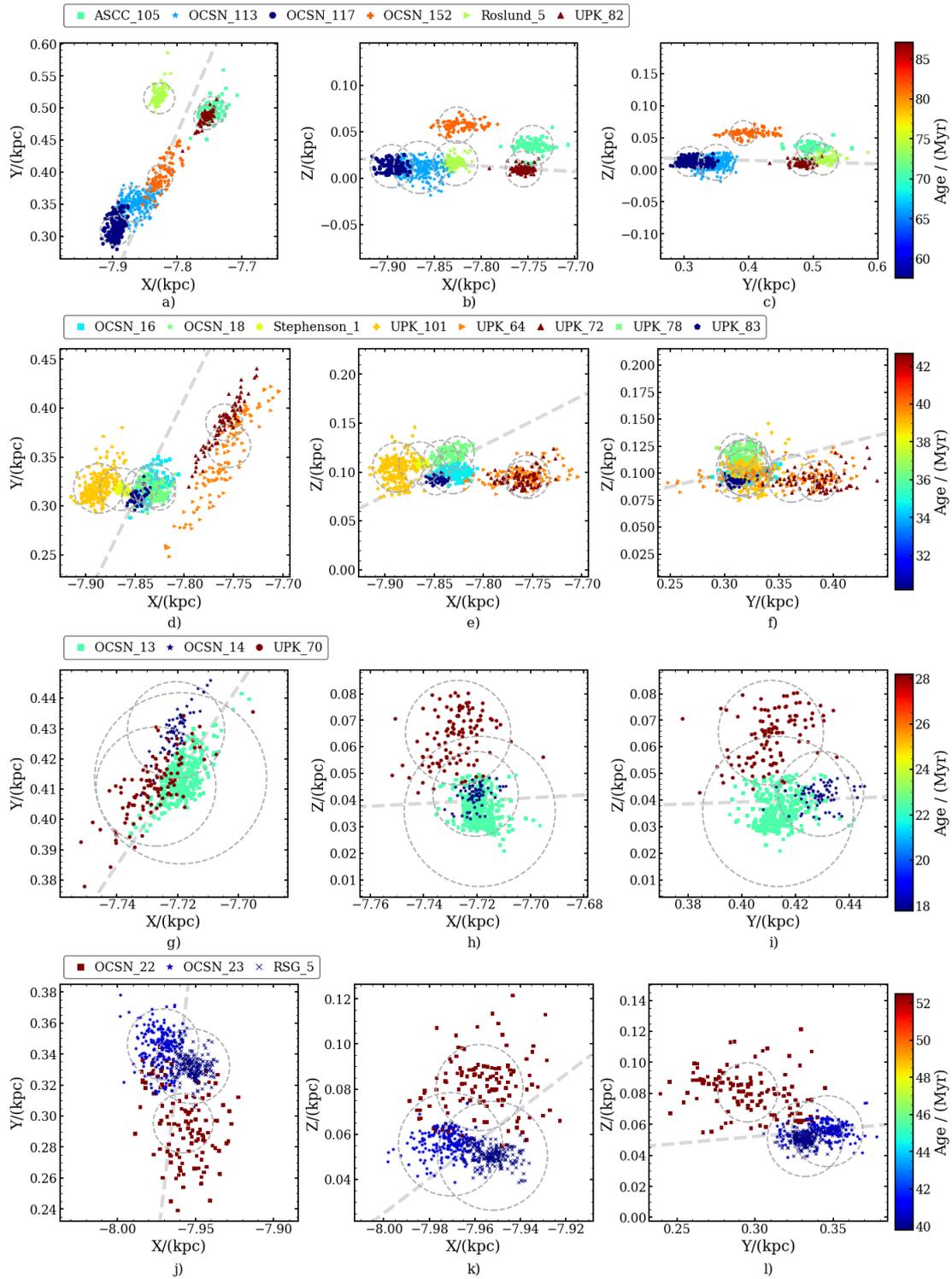


图 3 4 个星团群的三维空间分布

注: a-c、d-f、g-i、j-l 分别展示了 4 个星团群的成员星团在距离改正以后的 3D 空间分布, 每一列子图分别为 X - Y、X - Z 和 Y - Z 平面上的空间分布。子图中不同形状的散点表示不同的星团成员星, 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)。

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。

3.4 星团群轨道特征

为了深入理解各星团的形成与演化过程, 我们利用 Galpy^[41] 工具包, 根据表 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, 我们取太阳到银心的距离为 8 kpc, 太阳的轨道速度为 $[10, 235, 7]$ km s⁻¹[41]; 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。由此, 我们追溯了每个星团从诞生至未来 100 Myr 的轨道运动, 图 4 展示了四个星团群的轨道积分结果。子图 a、b 展示了星团群成员星团在银河系中的轨道运动, 通过对比可以看出它们是否有着相似的运动模式。子图 c 展示了以星团群中最年老的星团为参照, 其他成员星团与其轨道间距随时间的变化。选择最年老星团作为参照, 能更全面地记录其余星团从诞生起的相对轨道间距变化。而子图 d 则展示了成员星团与其最近邻星团间距的平均值随时间的变化, 若该间距平均值逐渐增大, 意味着星团群可能正在膨胀, 成员星团间相互作用减弱, 最终可能瓦解成独立的星团。

其中, 星团群 G1 的成员星团在 X-Y 平面上呈现近圆运动轨迹, 且轨道相互重叠 (图 4 G1.a-b); 在 Z 轴方向上, 这些星团沿银盘平面进行周期相近的上下振荡运动。这表明它们具有相似的轨道运动模式, 而非偶然重合。为进一步探究星团间的相对运动, 我们选取星团群 G1 中最年老的星团 UPK_82 为参考星团, 绘制了其他成员星团与 UPK_82 的轨道间距图 (G1.c)。结果显示, Roslund_5 与 UPK_82 的间距有周期性变化的趋势, ASCC_105 与 UPK_82 的间距在未来保持相对稳定。此外, 图 4(G1.d) 显示, 成员星团与其最近邻星团间距的平均值在未来将持续增大, 预示着星团群的空间分布将逐渐扩大, 特别是在未来约 66 Myr 时将超过 100 pc, 这表明星团群中成员星团之间的相互作用正在减弱, 最终它们可能瓦解成独立的星团。

对于星团群 G2, 图 4 (G2.a-b) 展示了其成员星团在 X-Y 平面上的近圆运动轨迹, 且轨道相互重叠, Z 轴方向上的运动周期和振幅也相近, 表明它们具有一致的轨道运动模式。同样以该星团群中最年老的 UPK_72 为参考星团, 其他成员星团与它的轨道间距如图 (G2.c) 所示。其中, UPK_64 与 UPK_72 的间距在长时间内保持平稳。此外, 图 4 (G2.d) 表明, 尽管成员星团与其最近邻星团间距的平均值在未来将持续增大, 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。

在星团群 G3 中, 成员星团在 X-Y 平面做近圆运动, 但 UPK_78 在 Z 轴方向上的振幅略大。未来, OCSN_14 的轨道将明显远离其他星团, 而其余星团分离趋势较缓。以 UPK_70 为参考星团, OCSN_14 与它的间距将迅速增大, 而 OCSN_13 则可能保持相对稳定。此外, 图 4 (G3.d) 显示, 成员星团与其最近邻星团间距的平均值将迅速增大, 在未来 25 Myr 左

右将大于 100 pc, 预示着该星团群将在未来快速分散到空间中, 演化成为独立的星团。

对于星团群 G4, 成员星团在 X-Y 平面做近圆运动, Z 轴方向上的运动周期和振幅也相近。以 OCSN_22 为参考, 其他成员星团与它的轨道间距变化一致, 尤其是 OCSN_23 和 RSG_5 的轨道运动尤为接近 (见图 G4.a-c)。此外, 图 4 (G4.d) 显示, 自最年轻星团诞生以来, 成员星团与其最近邻星团间距的平均值将在未来逐渐增大, 预计在未来约 25 Myr 内将超过 100 pc。这一趋势预示着成员星团最终也将瓦解成独立的星团。

4 总结与展望

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 35 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, 我们在六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, 成员星团整体在空间上相互毗邻并且具有一致的切向速度, 并且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, 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真实的空间分布形态, 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。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, 标志着成员星最终将瓦解成独立的星团。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, 由于其成员星团较少, 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。可见, 4 个星团群演化的最终命运皆是瓦解成为独立的星团。

我们期望在未来能借助 LAMOST、APOGEE、*Gaia* 等光谱巡天提供的恒星金属丰度数据, 对 4 个星团群的化学组成做更多的探讨, 更准确地确认星团群的化学起源。同时, 我

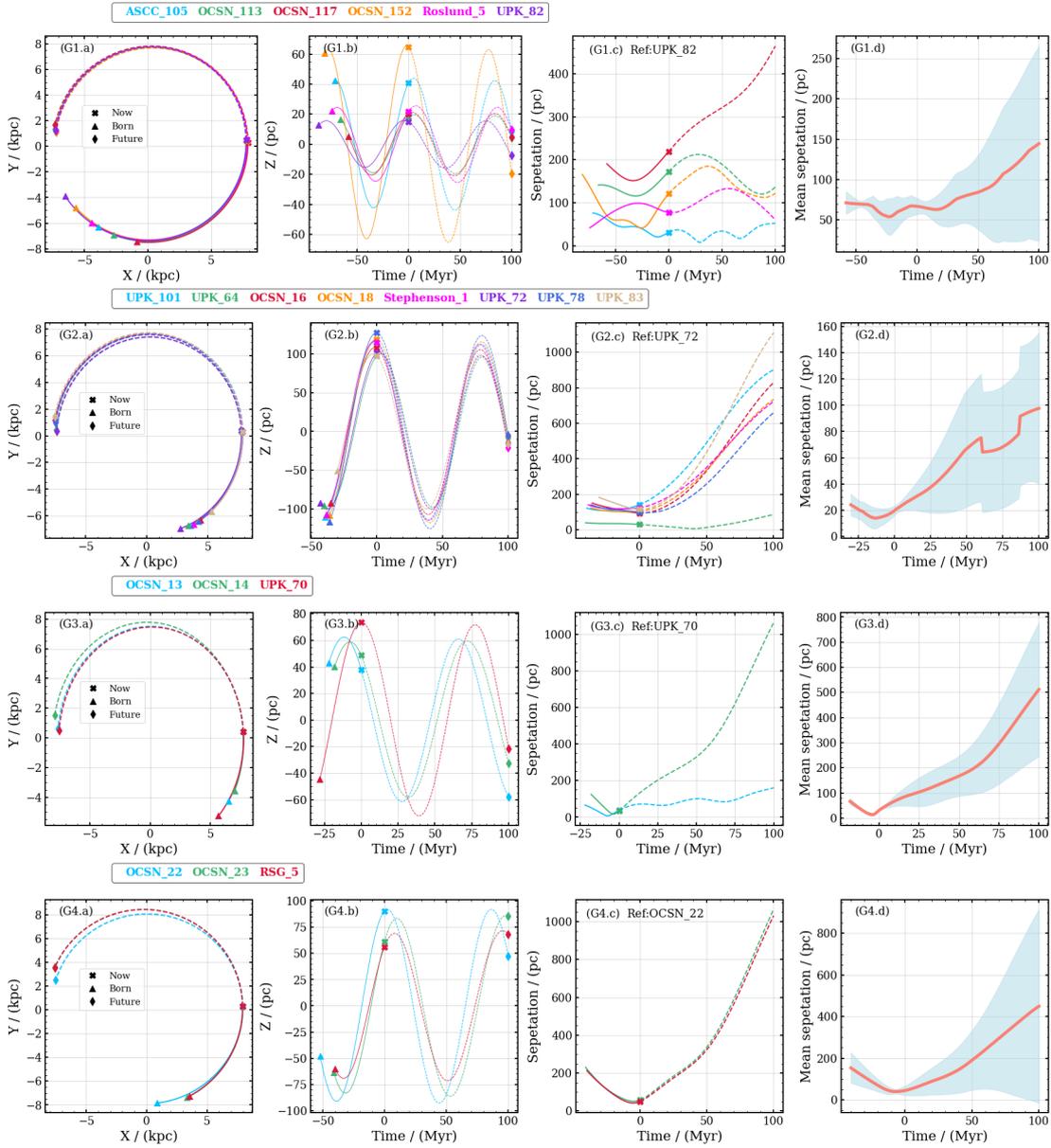


图 4 4 个星团群轨道运动

子图 a、b 分别展示了星团群成员星团从诞生至未来 100 Myr 的轨道运动。子图 c) 展示了成员星团从诞生至未来 100 Myr, 与该星团群中最年老星团的间距随着时间的变化。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间距平均值随着时间的变化, 蓝色阴影为成员星与最邻近星团的间距的标准差。G1-G4: 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 100 Myr 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 100 Myr 的轨道。

们也会将这些星团群的观测数据与 N -body 数值模拟相结合, 将成员星团之间的相互作用纳入考虑范围, 以进一步深入讨论星团群的起源机制和演化模式。在未来, 我们将致力于构建更大的星团群样本, 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。

参考文献:

- [1] Lada C J, Lada E A. *ARA&A*, 2003, 41: 57–115
- [2] Conrad C, Scholz R D, Kharchenko N V, et al. *A&A*, 2017, 600: A106
- [3] Bica E, Bonatto C, Dutra C M. *A&A*, 2003, 405: 991–998
- [4] Camargo D, Bica E, Bonatto C. *MNRAS*, 2016, 455(3): 3126–3135
- [5] Casado J. *Astronomy Reports*, 2021, 65(9): 755–775
- [6] Piskunov A E, Kharchenko N V, Röser S, et al. *A&A*, 2006, 445(2): 545–565
- [7] Efremov Y N. *Soviet Astronomy Letters*, 1978, 4: 66–69
- [8] Casado J. *Universe*, 2022, 8(2): 113
- [9] Bonnell I A, Bate M R, Vine S G. *MNRAS*, 2003, 343(2): 413–418
- [10] Elmegreen B G, Efremov Y N. *ApJ*, 1996, 466: 802
- [11] Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. *A&A*, 2018, 616: A1
- [12] Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. *A&A*, 2021, 649: A1
- [13] Gaia Collaboration, Vallenari A, Brown A G A, et al. *A&A*, 2023, 674: A1
- [14] Katz D, Sartoretti P, Cropper M, et al. *A&A*, 2019, 622: A205
- [15] Katz D, Sartoretti P, Guerrier A, et al. *A&A*, 2023, 674: A5
- [16] Cantat-Gaudin T, Krone-Martins A, Sedaghat N, et al. *A&A*, 2019, 624: A126
- [17] Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al. *A&A*, 2018, 618: A59
- [18] Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al. *A&A*, 2019, 627: A35
- [19] Castro-Ginard A, Jordi C, Luri X, et al. *A&A*, 2020, 635: A45
- [20] Liu L, Pang X. *ApJS*, 2019, 245(2): 32
- [21] Qin S, Zhong J, Tang T, et al. *ApJS*, 2023, 265(1): 12
- [22] Coronado J, Fürnkranz V, Rix H W. *ApJ*, 2022, 928(1): 70
- [23] Cantat-Gaudin T, Mapelli M, Balaguer-Núñez L, et al. *A&A*, 2019, 621: A115
- [24] Kounkel M, Covey K. *AJ*, 2019, 158(3): 122
- [25] Beccari G, Boffin H M J, Jerabkova T. *MNRAS*, 2020, 491(2): 2205–2216
- [26] Tian H J. *ApJ*, 2020, 904(2): 196
- [27] Wang F, Tian H, Qiu D, et al. *MNRAS*, 2022, 513(1): 503–515
- [28] Pang X, Yu Z, Tang S Y, et al. *ApJ*, 2021, 923(1): 20
- [29] Cantat-Gaudin T, Jordi C, Vallenari A, et al. *A&A*, 2018, 618: A93
- [30] Cantat-Gaudin T, Anders F. *A&A*, 2020, 633: A99
- [31] Cantat-Gaudin T, Anders F, Castro-Ginard A, et al. *A&A*, 2020, 640: A1
- [32] Dias W S, Alessi B S, Moitinho A, et al. *A&A*, 2002, 389: 871–873
- [33] Kharchenko N V, Piskunov A E, Schilbach E, et al. *A&A*, 2013, 558: A53
- [34] Froebrich D, Scholz A, Raftery C L. *MNRAS*, 2007, 374(2): 399–408
- [35] Schmeja S, Kharchenko N V, Piskunov A E, et al. *A&A*, 2014, 568: A51
- [36] Scholz R D, Kharchenko N V, Piskunov A E, et al. *A&A*, 2015, 581: A39
- [37] Röser S, Schilbach E, Goldman B. *A&A*, 2016, 595: A22
- [38] Sim G, Lee S H, Ann H B, et al. *Journal of Korean Astronomical Society*, 2019, 52: 145–158
- [39] Ferreira F A, Santos J F C, Corradi W J B, et al. *MNRAS*, 2019, 483(4): 5508–5517
- [40] Astropy Collaboration, Robitaille T P, Tollerud E J, et al. *A&A*, 2013, 558: A33

- [41] Bovy J. *ApJS*, 2015, 216(2): 29
- [42] Bressan A, Marigo P, Girardi L, et al. *MNRAS*, 2012, 427(1): 127–145
- [43] Chen Y, Bressan A, Girardi L, et al. *MNRAS*, 2015, 452(1): 1068–1080
- [44] Marigo P, Girardi L, Bressan A, et al. *ApJ*, 2017, 835(1): 77
- [45] Caffau E, Ludwig H G, Steffen M, et al. *Sol. Phys.*, 2011, 268(2): 255–269
- [46] McMillan S L W, Vesperini E, Portegies Zwart S F. *ApJ*, 2007, 655(1): L45–L49
- [47] Elmegreen B G, Efremov Y, Pudritz R E, et al. In: Mannings V, Boss A P, Russell S S, eds. *Protostars and Planets IV*. . [S.l.]: [s.n.] , 2000: 179
- [48] EFREMOV Y N, ELMEGREEN B G. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1998, 299(2): 588–594. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01819.x>
- [49] Carrera R, Pasquato M, Vallenari A, et al. *A&A*, 2019, 627: A119
- [50] Pang X, Li Y, Tang S Y, et al. *ApJ*, 2020, 900(1): L4
- [51] Innanen K A, Wright A E, House F C, et al. *MNRAS*, 1972, 160: 249
- [52] Pinfield D J, Jameson R F, Hodgkin S T. *MNRAS*, 1998, 299(4): 955–964
- [53] Bovy J. *MNRAS*, 2017, 468(1): L63–L67

Search for open cluster group in the Cygnus region based on Gaia DR3 data

LIU Gui-mei^{1,2}, ZHONG Jing¹, SHAN Xing-mei³, QIN Song-mei^{1,2}, LI Chun-yan^{1,2}

(1. *Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China;* 2. *School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, No. 19A, Yuquan Road, Beijing 100049, China;* 3. *Shanghai Astronomy Museum (Branch of Shanghai Science and Technology Museum), Shanghai 201306, China)*

Abstract: Open cluster group consists of multiple open clusters with similar kinematics, ages, and proximate spatial distribution, making them crucial for studying open clusters' formation mechanisms and evolution patterns. Despite significant progress in the search and identification of cluster groups, their origin mechanisms remain unclear due to limited samples and data precision. Therefore, there is a need to expand the sample of primordial cluster groups to provide reliable observational constraints for further studies on cluster formation and evolutionary patterns.

Based on the high-precision astrometric and photometric data from *Gaia* DR3, we have re-determined the parameters of existing open clusters to identify cluster groups. As a result, We have discovered four new open cluster groups in the Cygnus region based on the clusters' spatial distribution and kinematic properties. These new groups are named Cluster Groups G1, G2, G3, and G4. Group G1 contains 6 clusters, G2 consists of 8 clusters, and G3 and G4 contain 3 clusters.

These four cluster groups each occupy a distinct spatial region. Within each group, the member clusters are closely adjacent, exhibit tight connectivity, and share consistent tangential velocities, indicating that they formed within the same giant molecular cloud. The durations of stellar formation in the four cluster groups are 13 Myr, 29 Myr, 10 Myr, and 12 Myr, respectively. These durations align with the timescales of continuous star formation events, suggesting that the member clusters within each group likely formed sequentially. To conduct the 3D spatial distributions of the cluster groups, We used Bayesian methods to correct the artificial elongation generated by parallax errors. The results reveal that cluster groups G1 and G2 exhibit obvious filamentary structures in their spatial distribution, while the member clusters of groups G3 and G4 are more concentrated. Some member clusters in groups G1 and G2 currently show no significant interactions, whereas all member clusters in groups G3 and G4 exhibit interactions. Finally, using the Galpy package, we performed a detailed analysis of the cluster groups' orbital motion within the Milky Way's gravitational field. The orbital analysis results indicate that the member clusters of these cluster groups will gradually move apart and eventually evolve into independent individual clusters.

Key words: Open Cluster; Star Cluster Groups; Milky Way