

在银河系开放星团中搜寻紫外光度恒星。来自紫外线测光的线索

G. Cordoni,^{1★}, A. P. Milone^{2,3}, L. Casagrande¹, L. Venuti^{4,5}, E. P. Lagioia⁶,
A. F. Marino^{3,7}, G. S. Da Costa¹, F. Dell’Agli⁸, F. D’Antona⁸

¹ Research School of Astronomy and Astrophysics, The Australian National University, Canberra, ACT 2611, Australia

²Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei” - Univ. di Padova, Vicolo dell’Osservatorio 3, Padova, IT-35122

³Istituto Nazionale di Astrofisica - Osservatorio Astronomico di Padova, Vicolo dell’Osservatorio 5, Padova, IT-35122

⁴SETI Institute, 339 Bernardo Ave., Suite 200, Mountain View, CA 94043, USA

⁵Visiting Fellow, School of Physics, UNSW Science, Kensington, NSW 2052, Australia

⁶South-Western Institute for Astronomy Research Yunnan University, Kunming, 650500, P.R. China

⁷Istituto Nazionale di Astrofisica - Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Largo Enrico Fermi, 5, Firenze, IT-50125

⁸Istituto Nazionale di Astrofisica, Osservatorio Astronomico di Roma, Via Frascati 33, 00077 Monte Porzio Catone, Italy

接受 XXX。收到 YYY；原始形式 ZZZ

ABSTRACT

拆分主序星 (MSs) 和扩展的主序转折点 (eMSTOs) 已在几乎所有的麦哲伦云中年龄小于 2 Gyr 的星团中被观测到。最近, 哈勃空间望远镜 (HST) 的紫外光度测量发现了一个令人困惑的新恒星群体, 这些恒星被称为 “UVdim”, 在五个年龄介于 40 和 200 Myr 之间的麦哲伦云中的星团以及一个 1.5 Gyr 的老星团中均有出现。这些 UVdim 恒星主要位于由慢速自转恒星组成的蓝主序上, 并且它们独特的紫外性质被认为源自尘埃状的 circumstellar 碟。

尽管 eMSTOs 在大小麦哲伦云和年龄相当的银河系疏散星团 (OCs) 中都很常见, 但在银河系疏散星团中尚未研究 UV 暗星。在这项工作中, 我们通过结合快速/UVOT、SkyMapper 和 Gaia 光度测量来将对 UV 暗星的搜索扩展到 35 个年龄小于 2 Gyr 的银河系 OCs, 填补了这一空白。通过构建与 HST WFC3/UVIS 中使用的色-色图类似的图表, 我们在大多数银河疏散星团中未发现类似 UV 暗星的证据, 并仅在五个系统中识别出可能的 UV 暗星候选体。年轻 OCs 中 UV 暗星的稀有性表明麦哲伦云星团和它们的银河系对应物之间可能存在差异, 尽管其根本原因尚不清楚。

Key words: 星图: 赫茨普龙-Russell 图和色度-光度图——演化; 银河系: 开放星团和关联体: 一般性——开放星团和关联体: 个别研究

1 介绍

在过去二十年里, 我们对年轻星团的理解发生了巨大的变化。来自哈勃空间望远镜 (HST) 的高精度光学和

★ E-mail: giacomo.cordoni@anu.edu.au

近紫外光度测量揭示了大麦哲伦云和小麦哲伦云中年轻星团的颜色-星等图 (CMDs) (SMC, LMC Bastian & de Mink 2009; Milone et al. 2009, and series) 中出乎意料的特征。年龄在大约 7 亿年到 20 亿年之间的星团具有狭窄的主序带, 但主序拐点 (eMSTOs Mackey & Broby Nielsen 2007; Bastian & de Mink 2009; Milone et al. 2009; Goudfrooij et al. 2014; Milone et al. 2023b) 延伸, 这不能用未解析的双星系统或光度测量误差来解释。此外, 年龄小于约 7 亿年的星团显示出分裂或宽广的主序带 (MSs, Milone et al. 2016, 2023b), 包含一个蓝主序和一个红主序 (bMS, rMS)。

多项研究探讨了分裂-MS (see e.g. Milone et al. 2009, 2018; Bastian & de Mink 2009; Bastian & Niederhofer 2015; Goudfrooij et al. 2014, 2017; Niederhofer et al. 2015; D’Antona et al. 2017; Ettorre et al. 2025) 的起源, 从而导致一种广泛的解释, 即分裂-MS 和 eMSTOs 是由于存在具有不同旋转速率的恒星造成的。这些旋转差异导致 MS 分裂或展宽以及在转折区域的颜色扩散 (Georgy et al. 2013)。后来的光谱研究证实了这种解释, 直接测量了 MS 和转折恒星的投影恒星旋转 ($v \sin i$) (see e.g. Dupree et al. 2017; Marino et al. 2018a,b; Kamann et al. 2020, 2023), 发现慢速和快速旋转的恒星主要位于 bMS 和 rMS 上, 分别。

最近, 盖亚任务的 (Gaia Collaboration et al. 2018, 2021) 数据表明, 在年轻的银河系开放星团 (OCs) 中也能发现 eMSTOs 和分裂主序带, 并不仅仅是在麦哲伦云中的星团 (see e.g., Marino et al. 2018b; Bastian et al. 2018; Cordoni et al. 2018; Sun et al. 2019; Li et al. 2024; Bu et al. 2024a; Cordoni et al. 2024, and references therein)。然而, 尽管几乎所有年龄小于约 7 亿年的 MCs 星团都显示出分裂的 MS (see e.g., figure 13 of Milone et al. 2023b), 只有少数 OCs 是这样 (NGC 2287、NGC 3532, 以及可能是 NGC 2548 (see e.g. Sun et al. 2019; Cordoni et al. 2024)。这引发了关于分裂主序带起源及其在 OCs 和 MCs 星团之间差异的原因的问题。

虽然旋转被广泛认为是导致裂分 MS 的原因, 但双峰旋转分布的起源以及推动这一现象的整体旋转差异仍不清楚且存在争议。已提出了几种解释: i) 所有恒星最初都是快速旋转者, 但由于潮汐相互作用而减

速 (see, e.g., D’Antona et al. 2015; Sun et al. 2019; Bu et al. 2024a; Muratore et al. 2024, for details and tests); 二) 由前主序 circumstellar 碟子寿命的变异和碟子锁定机制引起的双峰旋转分布 (Bastian et al. 2020; Bu et al. 2024b); 以及 iii) 恒星合并和不同的演化路径对观测到的 eMSTOs 和裂分-MSs 的贡献 (Wang et al. 2022)。

1.1 紫外线维度的恒星在麦哲伦云星团中

最近的研究在年轻的和中等年龄的星团中识别出了一种新特征。利用哈勃空间望远镜 (HST) F225W/F275W 滤光片进行 NUV 成像, Milone et al. (2023b,a) 发现了一批表现出强烈紫外线吸收的恒星群体, 被称为 UVdim 恒星。这些 UVdim 恒星首次在 1.5 亿年的 LMC 星团 NGC 1783 中被探测到。它们的光度特性表明存在边缘朝向我们的尘埃环, 这很可能是由快速旋转恒星在质量损失事件 (D’Antona et al. 2023) 期间排出的吸积盘所致。

最近, Milone et al. (2023a) 和 Martocchia et al. (2023) 将分析扩展到其他麦哲伦云星团, 这些星团的年龄小于 2 亿年和大于 20 亿年。通过利用一个双色图 ($m_{F225W} - m_{F336W}$ 对比 $m_{F336W} - m_{F814W}$), Milone et al. (2023a) 在这些年轻的星团中识别出了 UVdim 恒星。这些年轻星团中的 UVdim 恒星主要位于蓝色主序带¹上, 该区域主要是由旋转速度较慢的恒星组成。

值得注意的是, 尽管光度学研究表明蓝主序星的自转速率可以忽略不计, 但光谱观测表明情况更为复杂。具体而言, 蓝主序星与红主序星相比表现出较低的自转速度, 但仍涵盖了广泛的自转速度范围 (e.g., Kamann et al. 2023; Bodensteiner et al. 2023)。支持 UVdim 星低自转特性的观点, Leanza et al. (2025) 最近分析了来自大麦哲伦云中 1.5 Gyr 龄星团 NGC 1783 的 MUSE 数据, 发现 UVdim 星的自转速度始终慢于大多数主序星。

另一方面, Kamann et al. (2023) 分析了 LMC 星团 NGC 1850 的 MUSE 光谱学数据, 暗示 UVdim 恒星可能是 Be 星——通过环星减损盘从侧边观测到的快速旋转 B 型星。此外, 在年龄超过 2 Gyr 的星团中,

¹ 蓝色主序传统上定义为在 m_{F814W} 与 $m_{F336W} - m_{F814W}$ 的 CMD 中更蓝的一序列。

UVdim 恒星似乎消失了，这一行为类似于 eMSTO 现象的消失 (Martocchia et al. 2023)。

UVdim 恒星的本质仍然存在高度争议，对于它们的旋转或非旋转起源没有达成共识。

这些近期的发展共同表明分裂 MS/eMSTO、恒星旋转和原行星盘之间存在明确的联系。然而，这种关系的确切性质以及 UV 暗星的起源仍然不清楚。需要进一步的观测和理论努力来更好地理解 UV 暗星的形成及其在塑造星团 CMDs 中的作用。

同时，关于年轻星团更广泛背景的一些关键开放性问题仍然存在。虽然 eMSTO 在麦哲伦云中的星团和银河系疏散星团中均有观测到，但分裂主序星似乎在疏散星团中较为罕见。是什么导致了这种差异？年轻的银河系疏散星团中是否存在 UVdim 恒星？回答这些问题对于揭示年轻银河系和麦哲伦云星团中多代恒星的物理机制及其与环境的关系至关重要。

在这项研究中，我们通过结合快速/Ultraviolet-Optical Telescope Stars (UVOT) Stars Survey (Siegel et al. 2014, 2019)、SkyMapper Southern Sky Survey Data Release 4 (Onken et al. 2024, DR4)² 和 Gaia DR3 (Gaia Collaboration et al. 2021) 的紫外线测光，将对 UVdim 恒星的研究扩展到年轻的银河系疏散星团。本文组织如下：第 2 节描述了数据和选择标准，第 3 节展示了我们的结果，第 4 节讨论了我们的发现和结论。

2 数据与数据选择

为了调查年轻银河星团中是否存在 UVdim 恒星，并将它们与 HST 观测到的大麦哲伦云和小麦哲伦云中的星团进行比较，我们使用了 Swift 开放星团调查中的紫外线 NUV 光度测量数据、SkyMapper DR4 的 u 波段光度测量数据以及 Gaia DR3 的 G_{RP} 光度测量数据。关于调查和数据的详细信息，请参阅第 1 节列出的参考文献。

HST、UVOT、SkyMapper 和 Gaia 滤光片的传输曲线³显示在图 1 中，说明了用于研究麦哲伦星云 (i.e. UVIS F2225W/F275W, F336W and F814W

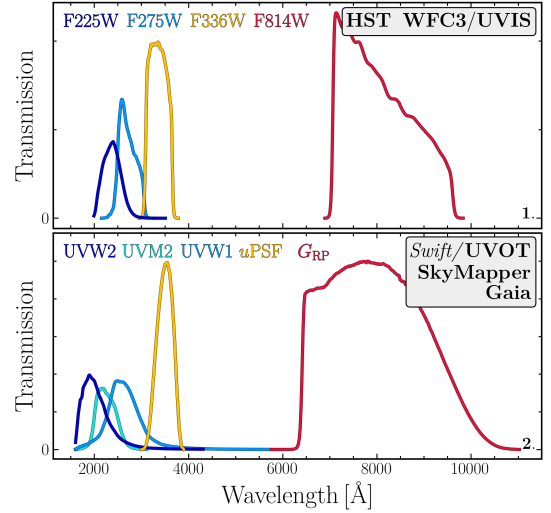


Figure 1. HST WFC3/UVIS 滤镜的传输曲线 (上图, F225W、F275W、F336W 和 F814W) 以及快速/UVOT、SkyMapper 和 Gaia 滤镜的传输曲线 (下图, UVW2、UVM2、UVW1、 u 、 G_{RP})。

Milone et al. 2023a) 中 UVdim 恒星的 HST 滤光片与本研究用于疏散星团的滤光片之间的对应关系。根据图 1 中显示的比较结果，我们发现快速/UVOT 之一与 SkyMapper u 和 Gaia G_{RP} 的组合提供了最接近 HST 色色的匹配。

2.1 快速 UVOT 星星调查

快速/UVOT 恒星调查包括了三个紫外滤光片中 103 个疏散星团的测光：UVW1 ($\lambda_{\text{eff}} = 2600$)、UVM2 ($\lambda_{\text{eff}} = 2246$) 和 UVW2 ($\lambda_{\text{eff}} = 1928$)。这些滤光片提供了 NUV 光谱范围的全面覆盖，使热的、紫外亮星得以被检测。关于观测策略和数据还原的详细描述，请参见 Siegel et al. (2014, 2019)。我们在这里仅提到，公共目录中发布的测光星等是通过点扩散函数 (PSF) 测光得出的，结合了距离星团中心 $7'.5$ 内的所有图像⁴。根据 Siegel et al. (2014, 2019) 的规定，我们排除了比饱和极限 AB 星等 12.52、12.11 和 12.68 更亮的恒星，在 UVW1、UVM2 和 UVW2 过滤器中分别。此外，根据每个分析波段提供的不确定度以及卡方和锋利的测光质量参数，我们选择了测量良好的恒星。简言之，卡方表示 PSF 拟合的质量，较高的值通常对应于拟合较差或合并源的情况，而锐利的参数衡量的是一个

² DR4 发布: [10.25914/5M47-S621](https://doi.org/10.25914/5M47-S621)

³ 滤波器的传输曲线可在 <http://svo2.cab.intacsic.es/svo/theory/fps3/> 获取

⁴ 这适用于大多数聚类，但有一些示例中的图像跨越了更大的视野。

源的内在锐度：接近零的值对应点状源（例如恒星），而显著偏离可能表示扩展物体、宇宙射线或混合物。

集群成员是通过将 UVOT 光度目录与来自 [Hunt & Reffert \(2024\)](#) 的集群成员进行交叉匹配来选择的，后者是通过 Gaia DR3 精确自行和视差确定的。我们还参考了 [Hunt & Reffert \(2023, and references therein\)](#) 以获得方法论的详细描述。为了保持一致性，文中讨论的所有集群属性，例如年龄、质量等，都是在 [Hunt & Reffert \(2024\)](#) 中得出的。

为了将 UVOT 测光目录与 Gaia 数据进行交叉匹配，我们把 Gaia 坐标转换到 UVOT 参考历元，并考虑了自行运动，保留了最大分离距离为 1.5 角秒的匹配。为了评估潜在的不匹配情况，我们在 5 角秒范围内检查了备选匹配，并通过视觉评估它们在 Gaia-UVOT CMDs 中的位置。我们发现，在 1.5 角秒范围内的主要匹配始终与星团 CMD 一致，而次级匹配则不是。最后，我们对每个 CMD 进行了视觉检查以确认测光质量充足，并将最终样本限制为年龄小于 2 Gyr 的星团。

2.2 南方天区勘察 SkyMapper 南方天区勘察

SkyMapper DR4 为南半球的数百万颗恒星提供了高质量的 *ugriz* 测光数据。在这项工作中，我们使用了 *u* 带 PSF 测光 (u_{PSF}) 来补充 UVOT 提供的紫外线数据，允许与在 [Milone et al. \(2023a\)](#) 中引入的 HST 紫外-光学双色图进行比较。为了确保精确的 *u* 带光度测量，我们使用了 [Onken et al. \(2024\)](#) 中描述的质量标志，包括尼玛标志 u_{N} 标志和 u_{N} 不好，仅选择那些测量良好的恒星。如同 UVOT 光度测量所做的那样，我们将具有较大光度不确定性的恒星排除在外。如同 UVOT 光度测量所做的那样，我们将具有较大光度不确定性的恒星排除在外。

最终样本包括 35 个星团，年龄范围从 0.02 Gyr (NGC 2571) 到 1.89 Gyr (NGC 2627)，在 Gaia、快速/UVOT 和 SkyMapper 光度带中具有精确的测光数据。作为进一步的选择，我们利用了 GaiaGvs. $G_{\text{BP}} - G_{\text{RP}}$ CMD 来仅选择主序星和转折点星。最终的 UVOT/SkyMapper/Gaia 测光目录在最年轻和最近的样本星团中未能达到星团的转折点，因为在 UVOT 波段出现了饱和现象，但对于年龄超过 ~ 0.2 Gyr 的星团，则几乎覆盖了整个主序。

3 结果

为了识别年轻银河系星团中的 UVdim 恒星，我们结合了来自快速/UVOT、SkyMapper DR4 和 Gaia DR3 的光度数据，以重现 HST F225W/F275W-F336W 与 F336W-F814W 在 [Milone et al. \(2023a\)](#) 中用于五个年轻 MC 星团的对比。如图 1 所示，UVW1- u_{PSF} 对比 $u_{\text{PSF}} - G_{\text{RP}}$ 表示最佳匹配组合，我们在图 2 中展示了年龄在 0.1 到 1.1 Gyr 之间的 OCs 的 UUVW1- u_{PSF} 与 $u_{\text{PSF}} - G_{\text{RP}}$ 颜色-颜色图。为了便于视觉比较，我们包含了用于识别大麦哲伦云星团 NGC 1850 中 UVdim 恒星的 [Milone et al. \(2023a\)](#) 所使用的图表（在第 2 个面板中以黄色背景突出显示）。所有集群和不同滤光组合的额外颜色-颜色图提供在附录 A 中。

在每个图板 2 中，虚线灰色线条显示了用于识别 UVdim 恒星的阈值，如果有这些恒星的话，则用天青色十字标记。该阈值是通过将颜色-颜色图中的参考线（以实心黑灰线表示）沿其标准差三倍的位置进行移动来确定的。参考线是通过使用在 [Cappellari et al. \(2013\)](#) 中描述的局部加权回归 (LOESS) 算法得出的，其标准差通过对样本进行自助法采样、重复 1,000 次 LOESS 拟合并取最终分布的 68th 百分位数来估算。为了处理一些分析星团中恒星数量相对较少的情况，我们应用了一种经典的野生自助法方法。简而言之，每个数据点保留其原始 x 值，但通过向参考 LOESS 拟合添加重新采样的残差被赋予新的 y 值。对于一个残差为 r 的点（观测值 y 减去 LOESS 预测值），我们将新的 y 值绘制为 LOESS 拟合加上 $\pm r$ 。此过程保留所有原始数据点（没有放回抽样），同时将观测残差纳入每个重采样数据集。

所有分析的星团的颜色-颜色图示于附录 A，其中 UVdim 恒星再次用天蓝色十字标记，具有稳健识别的星团则以浅黄色背景突出显示。更多细节在第 4 节中提供。

图 A1（以及附录中的图 A）显示，大多数分析的开放星团在各种颜色-颜色图中表现出狭窄且明确趋势。只有五个星团，即 NGC 2301、NGC 2396、NGC 2437、NGC 2658 和 NGC 2447（显示在图 A1-A4 的第 7、13、17、18 和 22 个面板中），在所有颜色-颜色图中有至少一个 UVdim 星候选者。三个星团，即 Collinder 220、NGC 2548 和 NGC 3680，在仅分析的一种颜色组合中显示具有类似 UVdim 的颜色的恒星，

并且因此不被包括在有稳健检测的星团列表中。最后，我们在较老的星团（Berkeley 37、NGC 2818、NGC 2508 和 NGC 2627）中找到了可能的 UVdim 候选者；然而，考虑到总体光度质量较低以及颜色范围较大，我们不将这些恒星视为可靠的 UVdim 候选者。我们将一致检测到所有颜色-颜色组合中的 UVdim 候选者定义为稳健，并将仅出现在一组颜色中的那些定义为可能。稳健和可能的候选者在所有面板中用天蓝色十字标记，而对应于有稳健检测星团的面板则以黄色背景突出显示。Gaia 源_id 数据为所有已识别的 UVdim 候选对象提供，以及用于检测它们的颜色组合见表 1。

3.1 未检测到的统计显著性

年轻的麦哲伦星云星团通常比银河系的疏散星团更庞大，因此拥有更多的恒星。由于 UV 暗淡恒星预计占总恒星数的比例很小 (see e.g. figure 5 of Milone et al. 2023a) 在银河系疏散星团中探测这些恒星可能会受到较低数量集群恒星以及光度目录不完整性的阻碍。这些因素的结合降低了在银河系疏散星团中观测到 UV 暗淡恒星的概率。为了评估未检测到的重要性，我们使用麦哲伦星云星团作为基准，模拟了不完备性对预期的 UV 暗淡恒星数量的影响。

对于每个 OC，首先创建一个合成星团，其中 5% 的恒星被指定为 UVdim，并且恒星的数目 (N_{stars}) 等于 Hunt & Reffert (2024) 中的星团成员数量。UVdim 的比例是基于 Milone et al. (2023a) 确定的，我们重复了使用 2.5% 的分析。最后，为了模拟 UVOT 测光目录，我们通过随机选择 $N_{\text{stars}} \times \text{Completeness}$ 颗恒星来考虑测光不完备性。此处，完备性被定义为 UVOT/SkyMapper/Gaia 目录中的恒星数量与来自 Hunt & Reffert (2024)⁵ 的总恒星数量之比。

然后我们确定了在完整性限制样本中发现的 UV 暗星的比例。对于每个聚类，我们重复采样过程 500 次，记录每次迭代中恢复的 UV 暗星比例。为了量化未检测到的可能性，我们计算了返回零颗 UV 暗星的实际结果的比例，表示为 P_{ND} 。根据定义， $P_{\text{ND}} = 0$ 表示在所有实际结果中至少检测到了一颗 UV 暗星，而

$P_{\text{ND}} = 1$ 意味着从未检测到任何一颗。一个低的 P_{ND} 表明未检测是统计上稳健的；高的 P_{ND} 则暗示由于不完整性可能错过了 UV 暗星。

为了探讨未检测显著性与恒星数量及不完备性的依赖关系，我们在参数网格上重复了模拟。我们将完备性从 10% (0.1) 到 100% (1.0) 以 0.05 的步长变化，并将聚类恒星的数目从 10 变到 1500，以 10 为步长。结果显示的 P_{ND} 图，在图 3 中展示了未检测概率如何随这些参数变化。为了便于解释 P_{ND} ，我们将 P_{ND} 的值转换成标准偏差 σ 的单位。在地图中，白色表示 P_{ND} 大于 3σ ，而黑色则表示 $P_{\text{ND}} < 1\sigma$ 。分析的 OCs 被叠加在地图上，使用相同的颜色编码和不同的标记来区分稳健、可能和未检测到 UVdim 恒星（如前一节所定义）。作为进一步检查，我们还假设较低的输入比例 UVdim 恒星，即 2.5%，重复了这些步骤，发现我们的结论没有受到显著影响。可以看到，较少的恒星数量和较低的完整度值（地图左下角在图 3 中）导致统计意义降低（即，更有可能错过 UVdim 恒星）。相反，较多的恒星数量和较高完整度值（图 3 右上角）返回更稳健的未检测结果。

4 讨论与结论

我们分析了 35 个银河系疏散星团的 NUV-光学颜色-颜色图，以调查是否存在 UV 暗星。在分析的 35 个疏散星团中，五个星团 (~ 14%) 在所有颜色-颜色图中显示出一致的潜在 UV 暗星候选者。另外三个星团 (~ 9%) 表现出可能的 UV 暗星候选者，但仅在一个图表中显示。另有四个星团 (~ 11%) 显示出 UV 暗星迹象，但由于这些星团目录的光度质量较差，检测结果不确定。其余 22 个星团 (~ 66%) 没有显示出任何 UV 暗星的证据。值得一提的是，所有具有可靠 UV 暗星检测的星团年龄都小于 1 Gyr，并且在少于 200 Myr 的 14 个疏散星团中，有两个星团有可靠的 UV 暗星检测结果。考虑到 UV 暗星和星团成员数量较低以及光度不完整的情况，我们避免计算具有可靠检测的五个星团中的 UV 暗星比例。

在没有 UVdim 检测的星团中，13% (三个星团) 显示出低于 1σ 的未检测显著性，65% (15 个星团) 落在 1 到 3σ 范围内，而 22% (五个星团) 表现出 3σ 或更高的显著性。我们还注意到，在七个可能有 UVdim

⁵ 为了此次分析的目的，我们假设来自 Hunt & Reffert (2024) 的盖亚星团数据是完整的。虽然这是一个简化处理，但对于本研究中考察的大多数星团来说，这是一个合理的近似值。对于不完整性的详细描述，请参见 Hunt & Reffert (2024)。

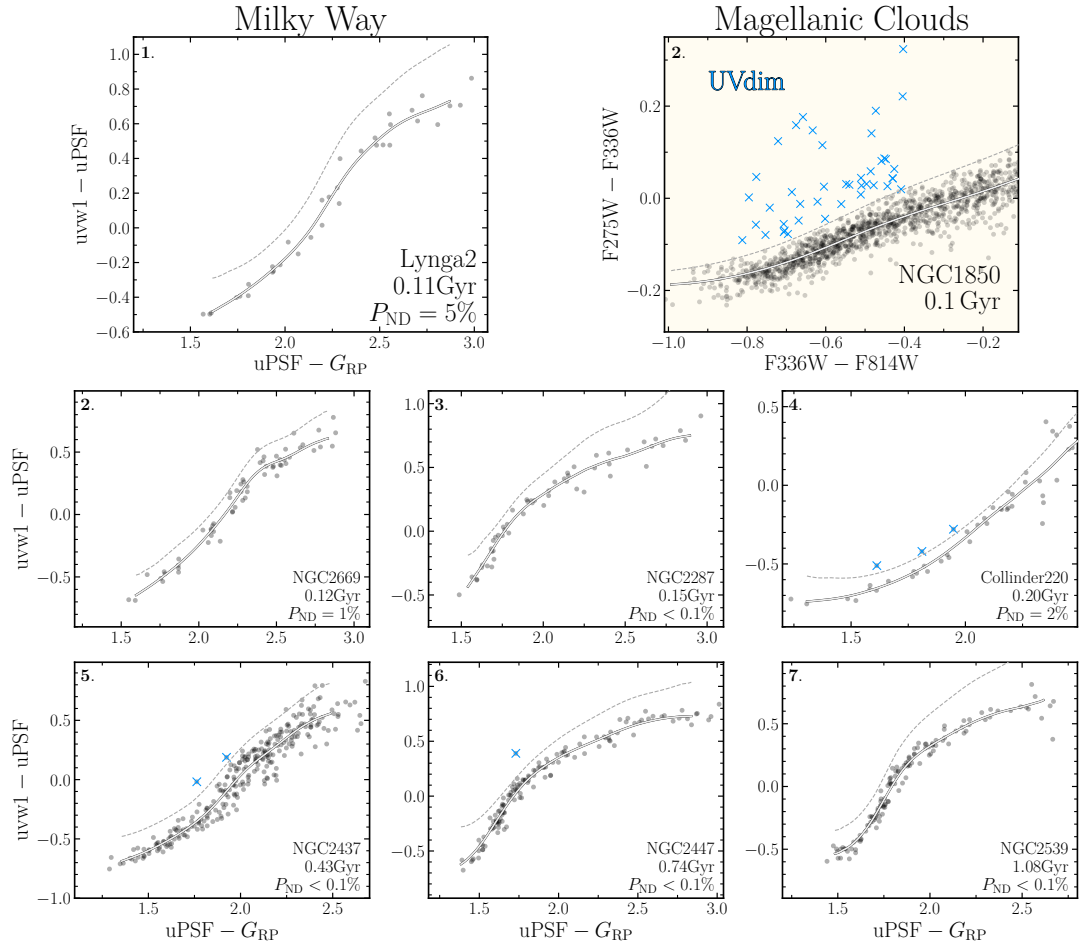


Figure 2. 0.1 到 1.1 Gyr 年龄范围内的星团的 UVW1 - uPSF 与 uPSF - G_{RP} 颜色-颜色图集。右上角面板 (第 2 个面板), 以黄色背景突出显示, 展示了由 [Milone et al. \(2023a\)](#) 使用的大麦哲伦云星团 NGC 1850 的 HST 图。NGC 1850 和星团中的 UVdim 恒星用天蓝色十字标记。实线代表参考颜色-颜色趋势的 LOESS 拟合, 而虚线通过将参考 LOESS 移动 3 倍来确定, 表示识别 UVdim 恒星的阈值。右下角插图显示了每个星团的名称、年龄和未检测到的意义 (详情见 3 节)。

检测的星团中, 四个具有 $P_{ND} > 3\sigma$, 而其余三个具有较低的 P_{ND} 值。

我们的分析表明, 在银河星团中, UV 暗星很少或不存在。这一结果与年轻的麦哲伦云星团形成了鲜明对比, 在那里, 年龄小于 ~ 200 百万年的系统中始终观测到 UV 暗星。事实上, 虽然由于 200 百万年至 15 亿年之间的星团缺乏紫外线数据, 潜在的 UV 暗星-星团年龄依赖性仍然不确定, 但所有具有可用 F225W/F275W 测光的年轻于 200 百万年的星团都显示出 UV 暗星。这表明, 在麦哲伦云中的年轻星团中, UV 暗星很可能很常见。相比之下, 仅有 14 个星团中有两个 (14%) 年龄小于 200 百万年且有可靠的 UV 暗星探测。

我们在图 4 中总结了我们的结果, 其中展示了 Magellanic Clouds 星团与 UVdim (天蓝色十字) 和

本研究分析的 MW 星团之间的比较, 区分了具有稳健 UVdim 检测的 OCs (填充三角形)、可能的 UVdim (填充正方形) 和没有 UVdim (黑白圆圈, 根据 P_{ND} 进行颜色编码)。关于这三个 OCs 组的描述, 请参见第 3 节的讨论。浅灰色背景区域表示在图 [Hunt & Reffert \(2024\)⁶](#) 中识别出的 OCs 位置。图 4 显示, Magellanic Clouds 星团平均而言至少比 OCs 大一个数量级, 并且五个具有稳健检测的星团位于 OCs 质量分布的高质端, 除了 NGC 2396。我们不能排除这可能是由分析样本引入的偏差, 然而, 我们也注意到它可能暗示了这一现象的质量依赖性。一个显著的例外是 NGC 6649, 其质量与具有相似年龄的 Magellanic Clouds 星团相当, 但未检测到 UVdim 恒星。

⁶ 为了简化图表, 我们仅显示银河星团在星团质量和年龄平面中的位置, 而不是该平面上的星团密度。

Table 1. 紫外暗星候选体信息。表格的第一部分列出了在附录 A 中所有分析的颜色-颜色图中检测到的紫外暗候选体。

聚类	源 ID	uvw1 - u_{PSF}	uvw2 - u_{PSF}	uvw2 - uvw1	uvm2 - u_{PSF}	稳健
NGC 2301	3113578541997114240	yes	yes	yes	yes	True
NGC 2396	3034562521129150848	yes	yes	yes	yes	True
NGC 2437	3029160826659377280	yes	yes	yes	yes	True
NGC 2447	5615576491486822272	yes	yes	yes	yes	True
NGC 2658	5639313023392485120	yes	yes	yes	yes	True
Collinder 220	5255630091479539584	yes	no	no	no	False
Collinder 220	5351701431777153536	yes	no	no	no	False
Collinder 220	5351706757536723072	yes	no	no	no	False
NGC 2437	3029210991877405312	no	no	yes	no	False
NGC 2548	3064480537453897728	yes	no	yes	no	False
Berkeley 37	3109968334229971968	yes	yes	yes	yes	False
Berkeley 37	3109975584134663552	no	yes	no	no	False
Berkeley 37	3109976718006011392	no	yes	no	no	False
Berkeley 37	3109979844742190080	no	yes	yes	yes	False
Berkeley 37	3109980257059027968	yes	yes	no	no	False
NGC 2818	5623380167892292352	no	no	yes	no	False
NGC 2818	5623381306063068032	no	yes	yes	no	False
NGC 2818	5623386631822488832	no	no	yes	no	False
NGC 2818	5623386734901699840	yes	yes	yes	no	False
NGC 3680	5382184567010401792	yes	no	no	no	False
NGC 2509	5714215638128218880	no	yes	no	no	False
NGC 2509	5714215741207424640	no	yes	no	yes	False
NGC 2627	5643760513568537984	no	no	yes	no	False
NGC 2627	5643766457803209728	no	no	yes	no	False

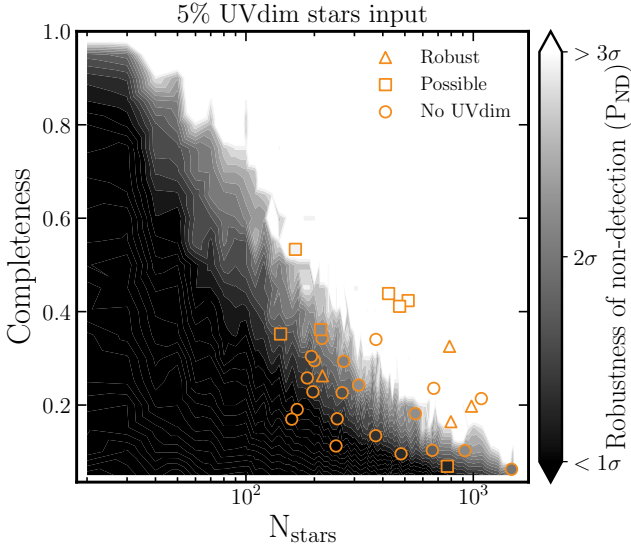


Figure 3. P_{ND} 作为 $(N_{\text{stars}}, \text{Completeness})$ 的函数映射，同时绘制了观测到的星团。颜色编码显示在右侧的颜色条中，黑色表示更可靠的未检测结果。 P_{ND} 的值已转换为标准差单位，假设单尾概率。具有可靠、可能或无紫外暗星检测的星团分别用三角形、正方形和圆形标记。

年轻 OC 中 UVdim 恒星的明显稀少与 OC 中缺乏分裂主序星总体一致，这可能与 UVdim 恒星有关，因为它们主要分布在蓝色主序带上。确实，几乎所有年龄小于 700 Myr 的 MC 星团都显示出分裂的主序

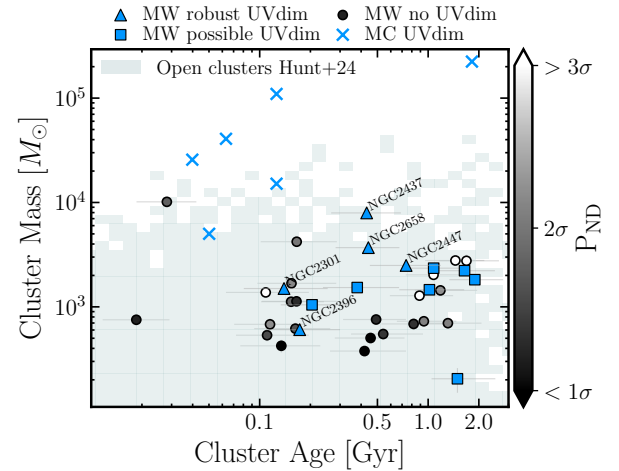


Figure 4. 麦哲伦星云与银河系星团年龄和质量的比较，区分有无紫外线暗淡的星团，如第 3 节所述。麦哲伦星云由天蓝色叉号表示，而具有稳健和可能检测到的银河系星团则分别用实心三角形和正方形标记。未检测到紫外线暗淡的 OCs 根据非检测的稳健性用白色或黑色圆圈表示（右侧色条）。关于计算 P_{ND} 所采用的方法描述，请参阅第 3 节。来自 Hunt & Reffert (2024) 的银河系星团的质量-年龄分布以灰色阴影背景显示。

带，而只有少数 OC，如 NGC 2287 和 NGC 3532，表现出类似特征。不幸的是，对于 NGC 3532 我们缺少快速 UVOT 测光数据，且 NGC 2287 受到饱和的严重影响；然而，它的大部分未饱和恒星仍然遵循相同的趋势，没有紫外线过剩。另一方面，其余的星团则没

有显示出分裂主序带的证据。尽管这种差异的本质超出了本研究的范围，我们认为有必要指出，星团质量可能会对观测到的星团特性产生影响。

另一个引人入胜的差异涉及银河系和麦哲伦云中围绕恒星盘的寿命。最近，De Marchi et al. (2024) 使用 JWST NIRSpec 光谱研究了小型麦哲伦云星团 NGC 346 中的年轻恒星，发现低金属环境中类似太阳的恒星周围的周围盘可以存在更长时间，长达 30 Myr。这与银河系形成对比，在银河系中，围绕恒星盘通常在最初的 5/10 Myr (Komaki & Yoshida 2025, and references therein) 内消散。由于没有盘的恒星一般比仍然带有盘的恒星 (Venuti et al. 2017) 自转更快，麦哲伦云中延长的盘寿命可能会阻止一些恒星通过盘锁定机制加速旋转，从而有助于形成分裂的主序星和双峰自转分布。相比之下，银河系中较短的盘寿命会抑制这种自转双峰性，解释了在银河系开放式星团中缺少（或罕见）分裂的主序星和 UVdim 现象。

最后，He et al. (2024) 在年轻的疏散星团 NGC 3532 中识别出具有 H_α 发射的 A 型和 F 型恒星，并提出它们可能是具有环绕减缩盘的 UV 暗星候选体。然而，我们也注意到，在 Milone et al. (2023a) 中识别出的 UV 暗星位于慢速旋转主序上，而 He et al. (2024) 中的 UV 暗星候选体则具有高速旋转速度。此外，最近通过 MUSE 光谱，Leanza et al. (2025) 确认了在 15 亿年的 NGC 1873 中 UV 暗星的慢速旋转特性。

虽然关于 UVdim 恒星的本质存在激烈争论，但我们发现它们在银河系的 OC 中似乎比麦哲伦云中的星团更为罕见。可能的差异可能是由银河系和麦哲伦云星团的不同质量、金属度和/或原行星盘寿命造成的。未来结合确认的 UVdim 候选体的光度测量和光谱分析的工作可能会增加重要的限制条件。

致谢

EPL 感谢“科技领军人物项目”（202005AB160002）和“顶尖团队项目”（202305AT350002），这些项目均由“云南人才振兴支持计划”资助。这项工作获得了“PRIN 2022 2022MMEB9W -理解球状星团及其多代恒星的形成”（项目负责人 Anna F. Marino）和意大利国家天体物理研究所研究 GTO-Grant Normal RSN2-1.05.12.05.10 -（参考 Anna F. Marino）的资助，后者属于“INAF 2022 年度基础研究资助计划”。SkyMap-

per 的国家级设施能力已通过澳大利亚研究委员会的 ARC LIEF 拨款 LE130100104 获得资金支持，该款项授予悉尼大学、澳大利亚国立大学、斯威本科技大学、昆士兰大学、西澳大利亚大学、墨尔本大学、科廷科技大学、蒙纳士大学和澳大利亚天文台。SkyMapper 由澳大利亚国立大学的研究天文学与天体物理学学院拥有并运营。调查数据由 ANU 的 SkyMapper 团队处理并提供。全天空虚拟天文台 (ASVO) 的 SkyMapper 节点托管在国家计算基础设施 (NCI) 中。ASVO 的 SkyMapper 节点的研发和支持部分获得了澳大利亚天文学有限公司 (AAL) 和通过联邦教育投资基金 (EIF) 以及国家合作研究设施战略 (NCRIS)，特别是国家 eResearch 协作工具与资源项目 (NeCTAR) 和澳大利亚国立数据服务项目 (ANDS) 提供的资金支持。这项工作利用了欧洲空间局 (ESA) 任务地母神 (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>) 的数据，这些数据由盖亚数据处理和分析联盟 (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>) 进行处理。DPAC 的资金来源于国家机构，尤其是参与了盖亚多边协议的机构。

数据可用性

与这项工作相关的相关数据目前在以下存储库中公开可用：Hunt & Reffert (2024) 的 Gaia 开星团目录：<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/A+A/686/A42>；Siegel et al. (2019) 的 Swift UVOT 星星巡天：<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/AJ/158/35>；以及 SkyMapper 南方天空巡天 (Onken et al. 2024)：<https://skymapper.anu.edu.au/tap/>。如有合理要求，将向相应作者共享更多数据和图表。

REFERENCES

- Bastian N., Niederhofer F., 2015, *MNRAS*, **448**, 1863
 Bastian N., de Mink S. E., 2009, *MNRAS*, **398**, L11
 Bastian N., Kamann S., Cabrera-Ziri I., Georgy C., Ekström S., Charbonnel C., de Juan Ovelar M., Usher C., 2018, *MNRAS*, **480**, 3739
 Bastian N., Kamann S., Amard L., Charbonnel C., Haemmerlé L., Matt S. P., 2020, *MNRAS*, **495**, 1978
 Bodensteiner J., et al., 2023, *A&A*, **680**, A32
 Bu Y., He C., Wang L., Lin J., Li C., 2024a, *arXiv e-prints*, p. [arXiv:2404.12331](https://arxiv.org/abs/2404.12331)
 Bu Y., He C., Fang M., Li C., 2024b, *arXiv e-prints*, p. [arXiv:2412.00520](https://arxiv.org/abs/2412.00520)

Cappellari M., et al., 2013, *MNRAS*, 432, 1862

Cordoni G., Milone A. P., Marino A. F., Di Criscienzo M., D’Antona F., Dotter A., Lagioia E. P., Tailo M., 2018, *ApJ*, 869, 139

Cordoni G., et al., 2024, *MNRAS*, 532, 1547

D’Antona F., Di Criscienzo M., Decressin T., Milone A. P., Vesperini E., Ventura P., 2015, *MNRAS*, 453, 2637

D’Antona F., Milone A. P., Tailo M., Ventura P., Vesperini E., di Criscienzo M., 2017, *Nature Astronomy*, 1, 0186

D’Antona F., et al., 2023, *MNRAS*, 521, 4462

De Marchi G., et al., 2024, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2412.10361

Dupree A. K., et al., 2017, *ApJ*, 846, L1

Ettorre G., et al., 2025, *MNRAS*, 539, 2537

Gaia Collaboration et al., 2018, *A&A*, 616, A1

Gaia Collaboration et al., 2021, *A&A*, 649, A1

Georgy C., Ekström S., Granada A., Meynet G., Mowlavi N., Eggenberger P., Maeder A., 2013, *A&A*, 553, A24

Goudfrooij P., et al., 2014, *ApJ*, 797, 35

Goudfrooij P., Girardi L., Correnti M., 2017, *ApJ*, 846, 22

He C., Li C., Li G., 2024, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2412.09217

Hunt E. L., Reffert S., 2023, *A&A*, 673, A114

Hunt E. L., Reffert S., 2024, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2403.05143

Kamann S., et al., 2020, *MNRAS*, 492, 2177

Kamann S., et al., 2023, *MNRAS*, 518, 1505

Komaki A., Yoshida N., 2025, *ApJ*, 979, 46

Leanza S., et al., 2025, *A&A*, 698, A27

Li C., Milone A. P., Sun W., de Grijs R., 2024, *arXiv e-prints*, p. arXiv:2401.08062

Mackey A. D., Broby Nielsen P., 2007, *MNRAS*, 379, 151

Marino A. F., Przybilla N., Milone A. P., Da Costa G., D’Antona F., Dotter A., Dupree A., 2018a, *AJ*, 156, 116

Marino A. F., Milone A. P., Casagrande L., Przybilla N., Balaguer-Núñez L., Di Criscienzo M., Serenelli A., Vilardell F., 2018b, *ApJ*, 863, L33

Martocchia S., Bastian N., Saracino S., Kamann S., 2023, *MNRAS*, 520, 4080

Milone A. P., Bedin L. R., Piotto G., Anderson J., 2009, *A&A*, 497, 755

Milone A. P., Marino A. F., D’Antona F., Bedin L. R., Da Costa G. S., Jerjen H., Mackey A. D., 2016, *MNRAS*, 458, 4368

Milone A. P., et al., 2018, *MNRAS*, 477, 2640

Milone A. P., et al., 2023a, *MNRAS*, 524, 6149

Milone A. P., et al., 2023b, *A&A*, 672, A161

Muratore F., et al., 2024, *A&A*, 692, A135

Niederhofer F., Georgy C., Bastian N., Ekström S., 2015, *MNRAS*, 453, 2070

Onken C. A., Wolf C., Bessell M. S., Chang S.-W., Luvaul L. C., Tonry J. L., White M. C., Da Costa G. S., 2024, *Publ. Astron. Soc. Australia*, 41, e061

Siegel M. H., et al., 2014, *AJ*, 148, 131

Siegel M. H., LaPorte S. J., Porterfield B. L., Hagen L. M. Z., Gronwall C. A., 2019, *AJ*, 158, 35

Sun W., Li C., Deng L., de Grijs R., 2019, *ApJ*, 883, 182

Venuti L., et al., 2017, *A&A*, 599, A23

Wang C., et al., 2022, *Nature Astronomy*, 6, 480

APPENDIX A: 额外的两色图

我们在图 A1-A4 中展示了所有 35 个分析集群的颜色-颜色图，并且使用了不同的颜色组合。如同图 2，UVdim 星以天蓝色叉号标记，而那些在所有颜色组合中都能识别到 UVdim 星的可靠检测集群则用黄色背景突出显示。每个面板中，均值趋势和用于识别 UVdim 的阈值分别以实线和虚线展示，同时，在右下角标出了集群名称、年龄和 P_{ND} 值。空面板在图 A2-A4 指的是 NGC 6400，其在 UVW2 波段的光度数据缺失⁷。我们参考章节 3 和 4 来描述用于识别紫外线暗星的方法，并将检测结果分类为稳健或可能。

⁷ 我们决定将面板留空，而不是删除面板，以便于比较不同图形中的相同聚类。

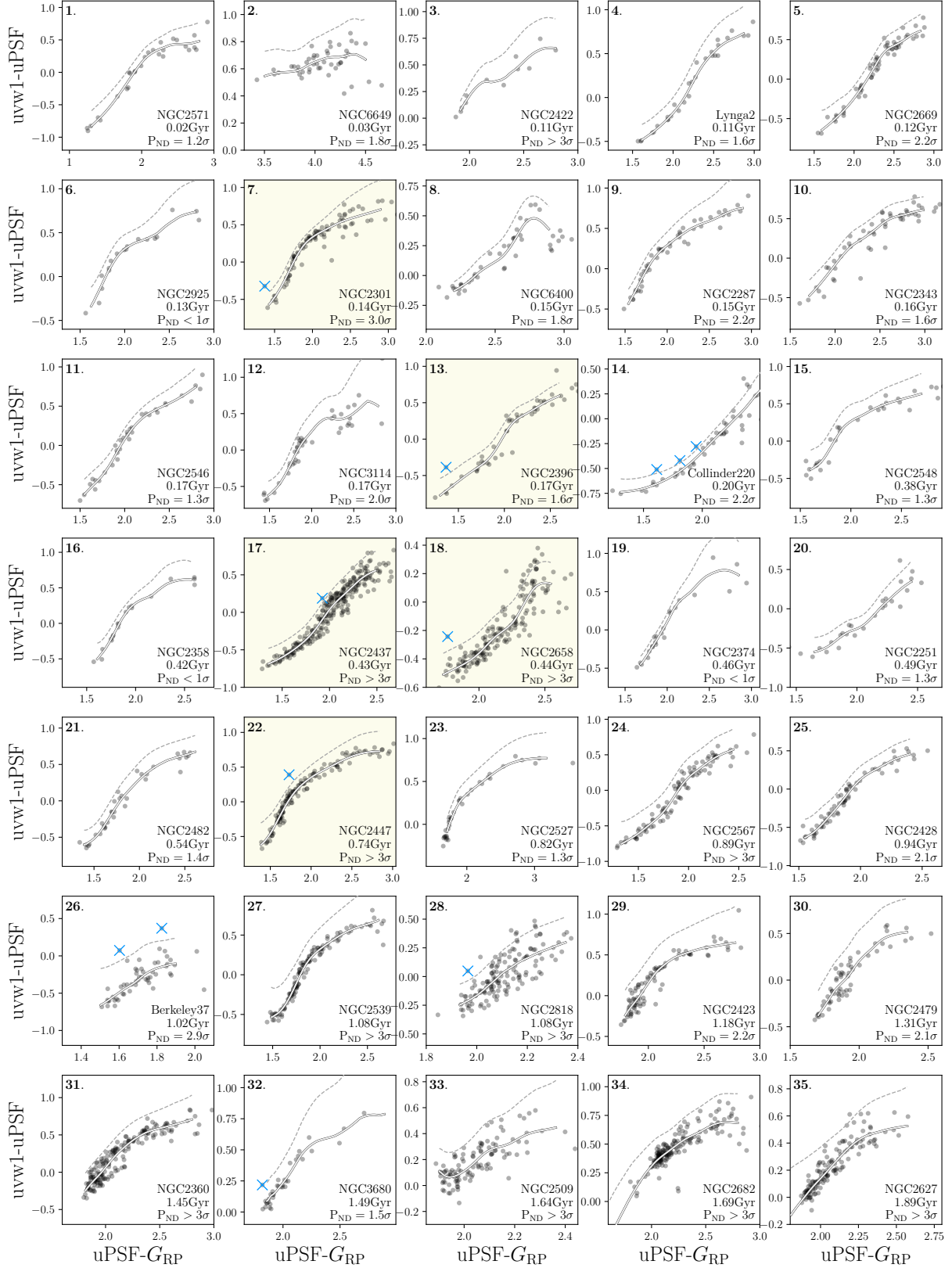
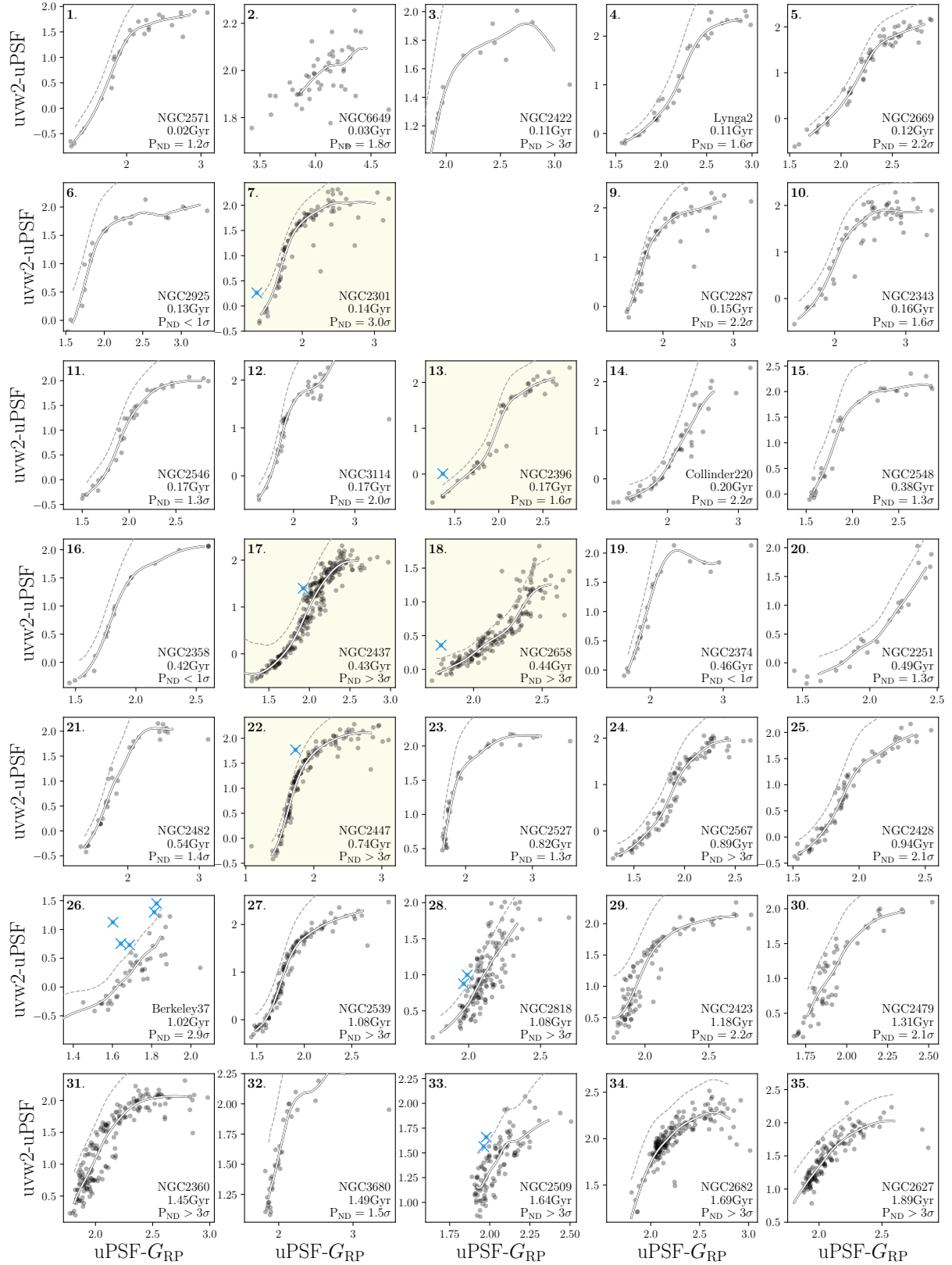
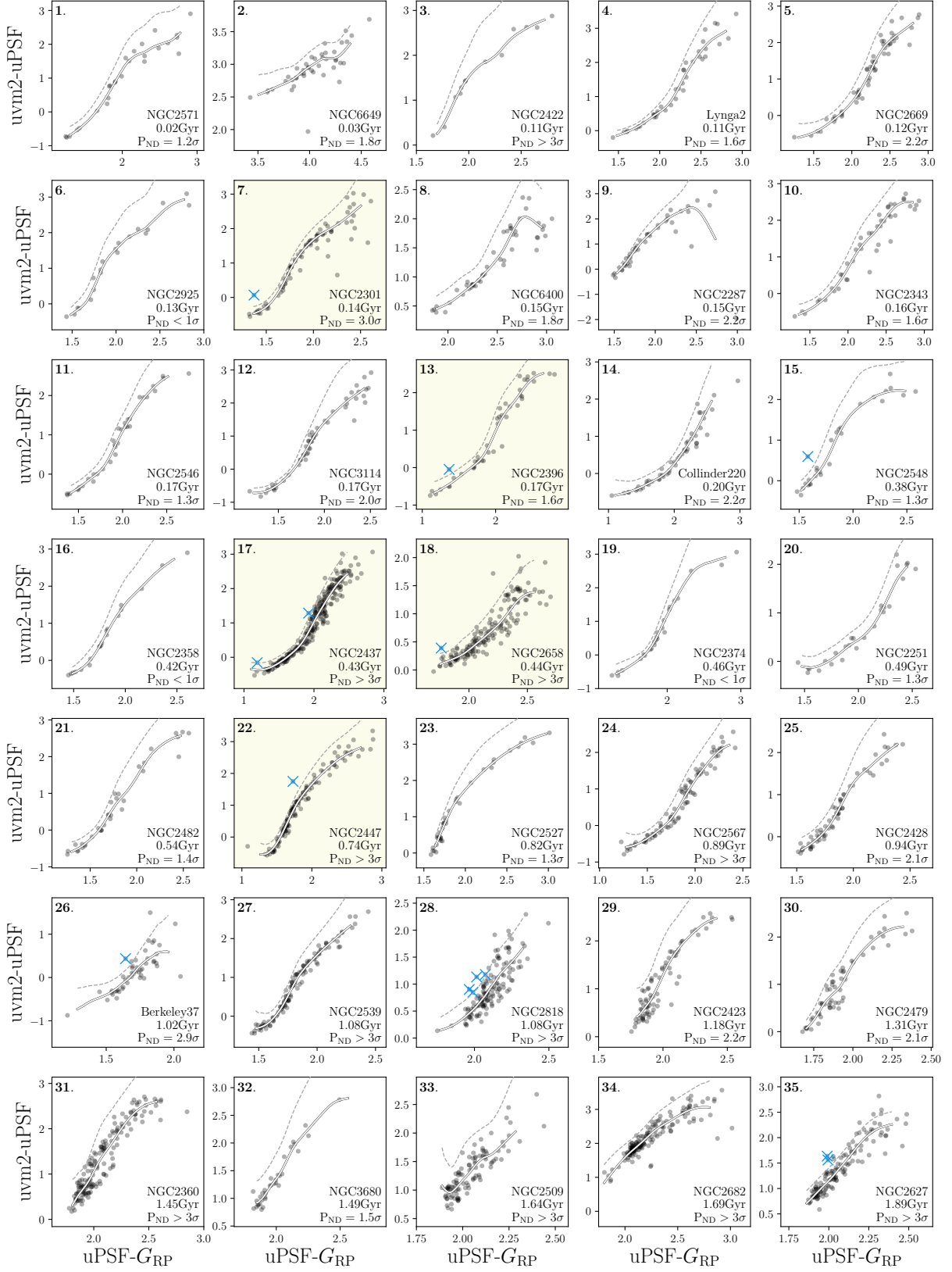
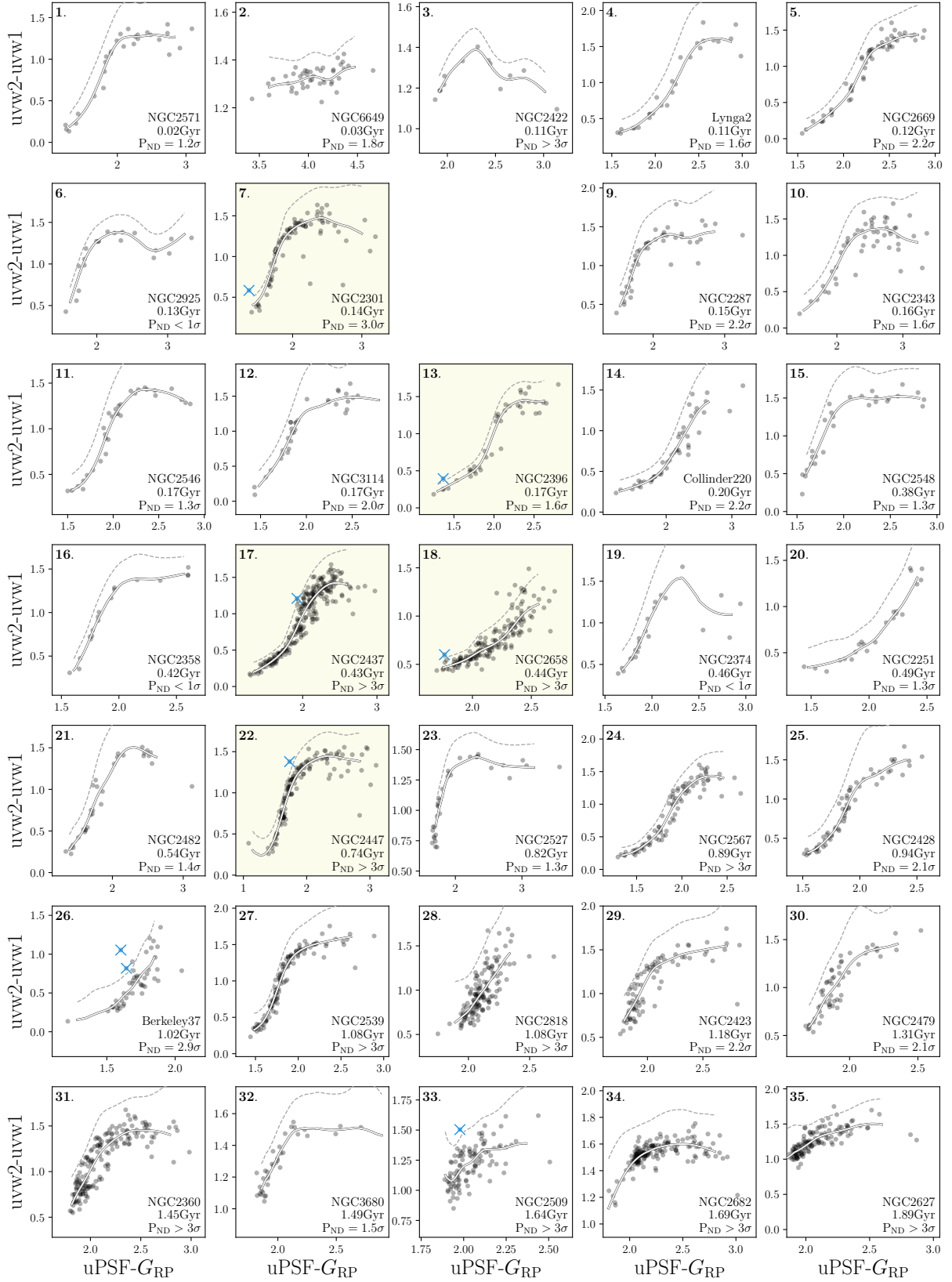


Figure A1. $UVW1 - uPSF$ 对比 $uPSF - G_{RP}$ 分析了 35 个星团的双色图，这些星团同时具有快速/UVOT、SkyMapper DR4 和 Gaia DR3 的光度数据。

Figure A2. 与图 A1 中的 UVW2 - u_{PSF} 与 $u_{\text{PSF}} - G_{\text{RP}}$ 相同。

Figure A3. 与图 A1 相同, 展示 $UVM2 - u_{PSF}$ 与 $u_{PSF} - G_{RP}$ 的对比。

Figure A4. 同图 A1, UVM2 - UVW1 对比 $u_{\text{PSF}} - G_{\text{RP}}$.