Draft version November 25, 2026年 使用 LaTeX 双栏 样式排版，采用 AASTeX7.0.1

arXiv:2611.32613v1 [astro-ph.GA] 24 Nov 2026

零富集稀有天体（ZERO）巡天 I：NB395 的测光校准与金属丰度估计

Bowen Huang (黄博闻),[1, 2, 3, 4] Nozomu Tominaga (冨永望),[3, 5, 6] Masashi Chiba (千葉柾司),[7] Haibo Yuan (苑海波),[1, 2] Kai Xiao (肖凯),[4] Yutaka Komiyama (小宮山裕),[8] Miho N. Ishigaki (石垣美歩),[3] Rosemary F. G. Wyse ,[9] Evan N. Kirby ,[10] Carrie Filion ,[11] Kohei Hayashi (林航平) ,[12] Tomoaki Ishiyama (石山智明) ,[13] Mikito Tanaka (田中幹人) ,[8] Hajime Susa (須佐元) ,[14] László Dobos ,[9,15] Alexander S. Szalay ,[9,16] Tamás Budavári ,[17,9] Viska Wei ,[17] Itsuki Ogami (小上樹),[3, 18] and Yoshihisa Suzuki (鈴木善久) [3, 7]

[1] School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University No.19, Xinjiekouwai St, Haidian District, Beijing, 100875, China
[2] Institute for Frontiers in Astronomy and Astrophysics, Beijing Normal University, Beijing, 102206, China
[3] National Astronomical Observatory of Japan 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan [4] National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Chaoyang District, Beijing, 100101, China [5] Department of Astronomical Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo,181-8588, Japan [6] Department of Physics, Faculty of Science and Engineering, Konan University, 8-9-1 Okamoto, Kobe, Hyogo 658-8501, Japan [7] Astronomical Institute, Tohoku University, 6-3 Aoba, Sendai 980-8578, Japan [8] Department of Advanced Sciences, Faculty of Science and Engineering, Hosei University, 3-7-2 Kajino-cho, Koganei, Tokyo 184-8584, Japan [9] The William H. Miller III, Dept. of Physics & Astronomy, Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA [10] University of Notre Dame, Department of Physics & Astronomy, 225 Nieuwland Science Hall, Notre Dame, IN 46556 [11] Center for Computational Astrophysics, Flatiron Institute, 162 Fifth Ave, New York, NY 10010, USA [12] National Institute of Technology, Sendai College, 4-16-1 Ayashi-Chuo, Sendai, Japan
[13] Digital Transformation Enhancement Council, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan
[14] Department of Physics, Konan University, Okamoto, Kobe, Japan [15] Eötvös Loránd University, Department of Information Systems, Pázmány Péter sétány 1/c, Budapest, Hungary 1117 [16] Johns Hopkins University, Department of Computer Science, 3400 N Charles Street, Baltimore, MD 21218
[17] Johns Hopkins University, Department of Applied Mathematics and Statistics, 3400 N Charles Street, Baltimore, MD 21218
[18] The Institute of Statistical Mathematics, 10-3 Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8562, Japan

摘要

我们介绍零富集稀有天体（ZERO）巡天的首批结果。这项窄带测光巡天利用昴星团望远镜上的超广角主焦相机，观测对金属丰度敏感的窄带。本文概述了其科学目标、巡天策略、当前观测现状、测光校准和金属丰度估计。目前，ZERO 巡天覆盖区域由 21 个指向组成，在 NB395 波段沿天球赤道覆盖约 35 度，单小时曝光可达到 NB395 $\sim$ 24.5 等（10σ），比典型的同类钙 H&K 巡天深得多。NB395 测光采用校正后的盖亚 BP/RP 光谱和重新校准的斯隆数字巡天条带 82 星表进行校准，实现了 $\sim$0.3% 的典型零点精度，以及优于 1% 的平场精度（适用于大于 $8'$ 的空间尺度）。在典型观测条件下（三次重复观测；总曝光时间为 $\sim$1 小时），测光精度在 NB395 $\approx$ 12 处达到 $\sim$1.1%，在 20 等处达到 $\sim$1.5%，在 24 等处达到 $\sim$10 %。我们采用物理约束恒星轨迹拟合法估计 [钙/H] 。对于亮于 NB395 $\sim$ 20 的源，所得 [钙/H] 精度优于 0.18 dex，覆盖从富金属到极贫金属区间的宽广金属丰度范围（$-3 \leq$[钙/H]$\leq +0.5$）。我们还表明，相较于 [Fe/H]，NB395 能更直接地追踪 [钙/H]。最终星表包含一百万个具有 NB395 测光的源，其中 379,216 个经过重复观测，61,845 个具有 [钙/H]估计值。这些结果为未来的 ZERO 巡天奠定了坚实基础，包括

Em邮箱：huangbw@nao.cas.cn、nozomu.tominaga@nao.ac.jp、chiba@astr.tohoku.ac.jp、yuanhb@bnu.edu.cn

测光校准、恒星参数测定，以及对银河系结构和化学演化的研究。

关键词：测光（1234）—定标（2179）— 金属丰度（1031）—化学丰度（224）— 银河系（1054）

1. 引言

根据标准宇宙学模型，宇宙约于 138 亿年前起源于大爆炸（Planck Collaboration et al. 2020）。标准大爆炸核合成只产生了氢、氦和微量的锂（Steigman 2007）。此后，早期宇宙中的结构增长由暗物质主导：暗物质晕通过层级并合和吸积不断增加质量。总质量为 $\sim 10^6 M_\odot$ 的微型晕在 $z \sim 20$ –30 时坍缩，时间约为大爆炸后 1 亿年。微量 H_2 的冷却促成了第一代恒星的形成（例如，Palla et al. 1983；Haiman et al. 1996；Tegmark et al. 1997；Nishi & Susa 1999；Fuller & Couchman 2000；Abel et al. 2002；Bromm et al. 2002；Yoshida et al. 2003）。这些第一代恒星不含金属，即第三星族（Pop III）恒星。由于 H_2 冷却效率相对较低，预计它们的典型质量会更大，为$10M_\odot$（例如，Omukai & Nishi 1998；Omukai & Palla 2001, 2003；Bromm & Larson 2004；Yoshida et al. 2006, 2008；Hosokawa et al. 2011；Hirano et al. 2014, 2015）。与此同时，冷却效率低有利于形成大质量、引力不稳定的环星盘，其碎裂可产生低质量的第三星族恒星（例如，Clark et al. 2011a,b；Smith et al. 2011；Greif et al. 2012；Susa 2013；Susa et al. 2014）。

大质量第三星族星在形成后几百万年以超新星形式爆发，产生宇宙中最早的重元素（例如，Heger& Woosley 2010;Nomoto等2013年）。随后，第二代恒星由重元素与原初气体的混合物形成。由于这些恒星含有重元素，它们被归类为第二星族（Pop II）；并且由于重元素提高了冷却效率，其中低质量恒星所占比例可以超过第三星族星中的相应比例（例如，Bromm等2001年; Schneider等2002;Chon等2021）。与此同时，暗物质晕继续层级式增长。当晕质量达到$\sim 10^8 M_\odot$时，原子冷却变得高效，第一批星系得以组装形成（例如，Wise &Abel 2007, 2008; Greif等2008, 2010）。因此，第一批星系并非不含重元素，并且已经包含第二代恒星。第一批星系的暗物质质量与环绕着的矮星系相当现今的银河系（Tolstoy等2009; Ricotti 2010）。暗物质晕的持续并合推动了最早期星系的出现，这些星系目前正由詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST，Chen等2023）所证认；而在更晚时期，则推动了诸如银河系等大质量系统的出现（例如，Helmi2020）。

早期宇宙的演化以及银河系的形成历史，保存在早期宇宙中形成的长寿命低质量恒星里。这类恒星金属丰度较低，被称为贫金属星（Beers & Christlieb2005；Frebel & Norris2015；Bonifacio etal. 2025）。大多数第三星族星质量较大、寿命较短，因此在当今不太可能被观测到（近期综述见 Klessen& Glover 2023 ）；而低质量的第三星族星或第二族恒星则可能存活至今。在银河系和邻近星系中，可以分辨出单颗贫金属星并对其进行详细研究。观测可提供它们的运动学、化学丰度、空间分布、质量和年龄。这些信息对于探究早期宇宙的历史、银河系早期的组装过程及其卫星星系至关重要。

贫金属星的化学丰度为研究第一代恒星的性质提供了独特视角，包括其初始质量函数（Wyse 1998；Ishigakiet al. 2018）、第一代恒星超新星的核合成产额（例如，Tominaga et al. 2007）、金属富集的历史（例如，Kobayashietal. 2006），以及支配其自身形成的过程（例如，Chiaki et al. 2018）。例如，碳增强贫金属星（CEMP）在金属丰度较低时所占比例不断上升，这表明基于碳的冷却在早期宇宙中发挥了主导作用（例如，Norris et al.2013；Chiaki et al. 2017）。由Gaia任务大幅增强的运动学信息揭示了过去星系并合的遗迹，例如以恒星流、星云和碎屑的形式存在（Helmi2020；Deason& Belokurov 2024；Suzuki et al. 2024）。目前已认识到，银河系近期最重要的一次并合是盖亚香肠-恩克拉多斯（GSE）（Belokurov etal.2018；Helmiet al. 2018；Deason& Be-lokurov 2024）。空间信息同样至关重要；根据预测，低质量的第三星族星会集中分布在晕及子晕的中心区域（例如，Ishiyama et al.2016；Griffenet al. 2018）。第一批星系可能存活至今

作为环绕银河系的矮星系（Tolstoyet al. 2009）。相比之下，质量更大的经典矮星系经历了显著的内部演化，而超暗矮星系中有许多是在诸如斯隆数字化巡天（SDSS；例如，Simon 2019）等大面积巡天中发现的，它们可能很早便停止了恒星形成，因此保留了银河系古老构成单元的性质。

贫金属星极其罕见：在太阳邻域的富金属盘中，金属丰度为 [Fe/H][19] < -3 的极贫金属（EMP）星，其出现频率约为千分之一。因此，人们开展了大量针对贫金属星的巡天。值得注意的例子包括20世纪90年代开展的施密特目标棱镜光谱巡天，这些巡天通过395纳米附近的钙II H&K线（Beers 等，1992；Christlieb 等，2008）来筛选候选星。在21世纪00年代至10年代期间，人们开展了大面积、低分辨率的光谱巡天，采用多目标光谱仪，例如银河系理解与演化扩展巡天（SEGUE；York 等，2000；Yanny 等，2009；Rockosi 等，2022）和大天区多目标光纤光谱望远镜（LAMOST；Deng 等，2012；Liu 等，2014）。

近年来，采用对钙 IIH&K 线敏感的窄带（NB）滤光片的测光巡天日益受到重视。先驱工作包括使用 1 米 Skymapper 望远镜开展的 SkyMapper 南天巡天（Wolf et al. 2018；Onken et al.2019；Chiti et al. 2021；Huangetal. 2022），以及使用 4 米加拿大-法国-夏威夷望远镜（CFHT）开展的 Pristine 巡天（Starkenburg 等，2017；Youakim et al. 2017；Martin等（2024））。窄带成像结合现代电荷耦合器件的高灵敏度，以及窄带滤光片透射边缘处较高的截止精度，相较于早期方法具有多项优势。这些巡天能够为视场内所有达到成像深度的恒星提供金属丰度，因此具有较高的观测效率；同时，窄带成像所能达到的星等比光谱观测更暗。例如，Pristine 巡天成功识别出 C-19 星流，有研究认为它是最贫金属球状星团的潮汐残留物（Martin et al. 2022）。此外，人们还开展了其他项目，例如 Javalambre 加速宇宙物理巡天（J-PAS；Benitezetal. 2014）、Javalambre 局部宇宙测光巡天（J-PLUS；Cenarro et al.2019）、南方邻近宇宙测光巡天（S-PLUS；Mendes de Oliveira 等，2019）、恒星丰度与银河系演化巡天（SAGES；Zheng 等，2018；Fan 等，2023），以及 Tomo-e Gozen 明亮贫金属星巡天（TeMPS，Okadaetal. 2026）。

然而，上述光谱和测光巡天通常只能达到 ~ 21 等（Starken- burg 等，2017）。这限制了可探测的体积，进而限制了对银河系外晕和附近矮星系的研究。事实上，巡天深度对于识别低质量第三星族星至关重要（Ishiyama 等，2016）。因此，我们团队致力于开发一种对钙 II H&K 线敏感的新型窄带滤光片，用于斯巴鲁望远镜/Hyper Suprime-Cam（HSC；Miyazaki 等，2018），并开展一项名为零金属丰度稀有天体（ZERO）巡天的深度、大面积窄带成像巡天。HSC 安装在一台 8 米级望远镜上，拥有极宽的视场，并支持窄带成像。大孔径与宽视场相结合，能够高效地对银河系外晕、附近矮星系和银河系子结构进行大范围、深度测绘，并有望识别低质量第三星族星，从而更全面地了解银河系的早期组装过程。

本文概述了 ZERO 巡天的科学目标、观测策略和当前状态。我们介绍了 NB395 的测光校准、使用基于物理约束的恒星序列拟合方法推导恒星 [Ca/H]，以及首个经过校准的测光星表的构建。本文结构如下：第 2 节介绍该巡天及其观测；第 3 节介绍本研究使用的数据集；第 4 节介绍测光校准；第 5 节详细说明 [Ca/H] 的测量；第 6 节总结主要结果，并展望未来研究方向。

2. 巡天

2.1. 概念

ZERO 巡天是一项深度、大面积窄带巡天计划，目标是银河系晕和附近矮星系中的贫金属及潜在无金属恒星（首席研究员：M. Chiba）。该计划采用高效率的宽视场成像仪斯巴鲁望远镜/HSC，并配备两个定制窄带滤光片：NB395，对 CaII H&K 线敏感；NB430，对 CH 分子（G- 带）特征敏感。图 1 展示了两个滤光片的透射曲线与具有不同金属丰度和碳丰度的合成恒星光谱叠加后的结果，说明了它们对这些光谱特征的敏感性。ZERO 巡天的滤光片研制团队确定了滤光片透射率的中心波长和宽度，以最大限度地

[19] 此处 $[A/B] = \log_{10}(N_A/N_B) - \log_{10}(N_A/N_B)_\odot$，其中下标 $\odot$ 表示太阳值，N_A 和 N_B 分别表示元素 A 和 B 的丰度。

提高通过测光测量金属丰度[20]和碳丰度的能力。NB395 和 NB430 滤光片分别于 2021年8月和 2020年2月投入使用。中心处的透射曲线和面积加权平均值由 Kawanomoto 等人（2018）在实验室中测量。[21]

积分一小时后，NB395 和 NB430 波段的 10σ 极限星等分别达到 24.5 和 24.4 等。对于贫金属星的典型颜色，这相当于 $G \sim 22.5 - 23.4$ 等。在这一探测深度下，可探测到距离最远 ~ 1 百万秒差距的红巨星，以及距离最远 ~ 100 千秒差距的矮星。因此，该巡天可观测银河系外晕及银河系周围的矮星系，并检验低质量第三星族星是否存在。

巡天视场位于 HSC 斯巴鲁战略计划（HSC-SSP; Aihara 等人 2018a,b, 2019年, 2022年）的 Wide 层，该区域已有宽带 g 和 i 波段成像数据。我们使用 NB395 和 NB430 两种窄带滤光片，并结合 HSC-SSP 的宽带测光数据。由于对大量暗弱源进行光谱观测颇具挑战，测光金属丰度为表征广阔区域内暗弱星族的金属丰度提供了一种有力的替代方法，先前的研究已展示了这一点（例如 Hong 等人 2025年; Ogami 等人 2026年）。鉴于低金属丰度下碳增强金属贫乏星的比例很高，测定测光碳丰度对于约束贫金属星的形成机制及研究早期宇宙的演化也至关重要。此外，结合测光金属丰度与测光碳丰度，对于识别既无钙II 也无 CH 吸收、真正不含金属的恒星至关重要。

ZERO 巡天的目标是

1. 发现原始的低质量第三星族星$\leq 0.8M_{\odot}$，或对其存在施加严格限制；2. 在银河系外晕和矮星系中识别贫金属星；3. 限制银河系及其矮星系中金属丰度分布函数（MDF）的低金属丰度端；4. 限制第一代恒星的初始质量函数（IMF）；5. 限制贫金属星的形成场所；6. 研究初始质量函数随金属丰度的演化；7. 为正在进行的光谱观测（例如使用斯巴鲁望远镜/Prime Focus Spectrograph（Takada 等人 2014年; Tamura 等人 2016; Chiba 等人 2026年）以及未来的30米级望远镜提供贫金属观测目标。

2.2. 观测与覆盖范围

ZERO 巡天的试观测于 2021 年九月至十月间的多个夜晚进行（首席研究员：M. Chiba，ID：S21 B-102）。观测使用斯巴鲁HSC开展，包括 9月3日和 4 日的后半夜观测、10月1日的整夜观测，以及10月2日的后半夜观测。每个观测轮次期间均进行一次 NB395 观测的穹顶平场采集（Bosch 等，2018）；观测轮次指约两周的无月观测时段。因此，9 月 3–4 日的观测使用同一组穹顶平场，10 月 1–2 日的观测则使用另一组。为试观测设定的视场布局（赤经 $=-30^{\circ} \sim 40^{\circ}$，赤纬 $\sim 0^{\circ}$）覆盖 HSC-SSP Wide Fall赤道视场区域，各个视场覆盖区之间间隔 1.5 度。这些视场覆盖区标记为 ZERO 1 至ZERO 47，而ZERO 42C 和FEIGE110 则位于天球赤道稍偏离的位置。试观测中的观测视场覆盖区见表 1，不包括FEIGE110等标准星视场。

图2 展示了 ZERO 巡天与 HSC-SSP Wide Layer（Aihara 等人 2018a，b，2019年，2022年）以及 Pristine DR1 视场覆盖区的天空覆盖范围。为试观测划定的视场布局大致沿天球赤道延伸，从赤经 $=-30^{\circ}$ 到 40°，与 HSC-SSP Wide Layer 的覆盖范围重叠；本研究使用的宽带测光数据由该层提供。观测视场另行标出。这些视场是专为试观测划定的，并不意味着后续 ZERO 观测也会采用相同的视场布局。图中还显示了 Pristine DR1（Martin等（2024））的视场覆盖区以供比较，背景中则绘出了银河平面以及 Schlegel 等人（1998年）的二维尘埃图（下文简称 SFD98）。

为优化观测条件，选取了高度角范围为 $65 \sim 70^{\circ}$ 的视场覆盖区进行每次观测

[20] 我们采用 [Ca/H] 作为金属丰度指标，而非 [Fe/H]，因为 NB395 滤光片对钙II 谱线敏感（见第 5 节）。[21] https://subarutelescope.org/Instruments/HSC/sensitivity.html

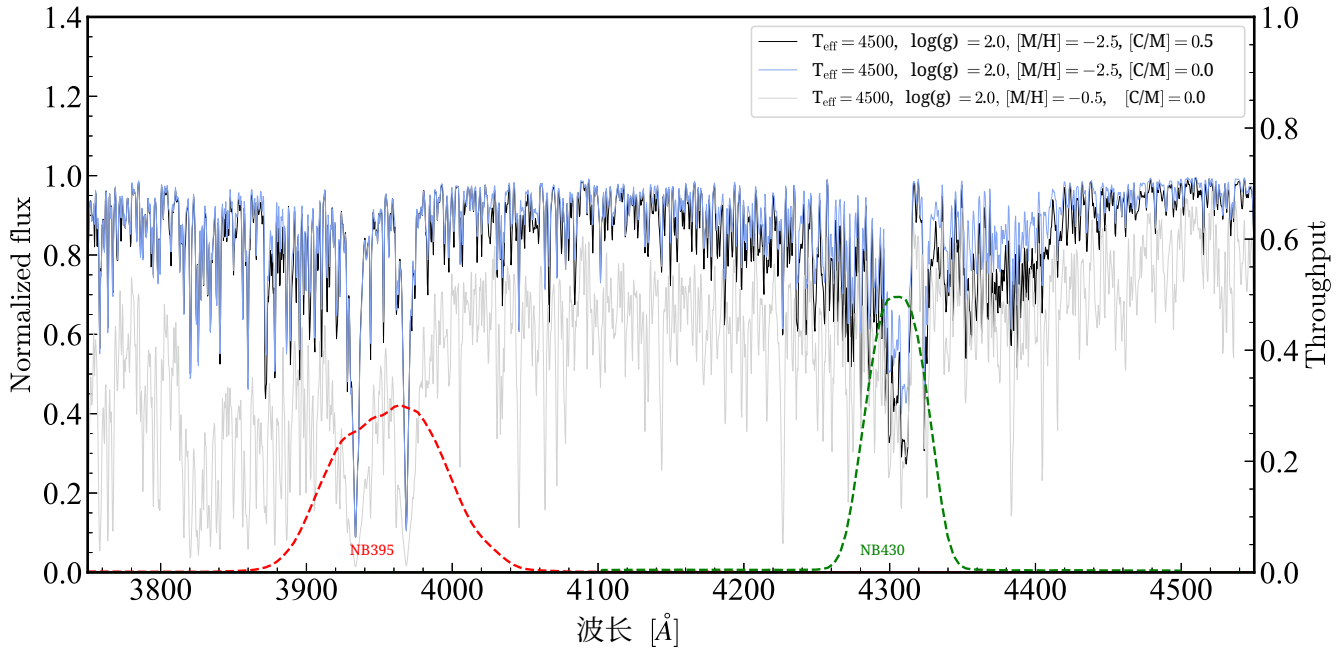


图1. NB395 和 NB430 滤光片的透射曲线，叠加在具有不同金属丰度和碳丰度的 BOSZ（M´esz´aros 等，2024）合成恒星光谱上。光谱展示了 NB395 对钙 II H&K 线以及 NB430 对 CH 分子（*G*-带）特征的敏感性。

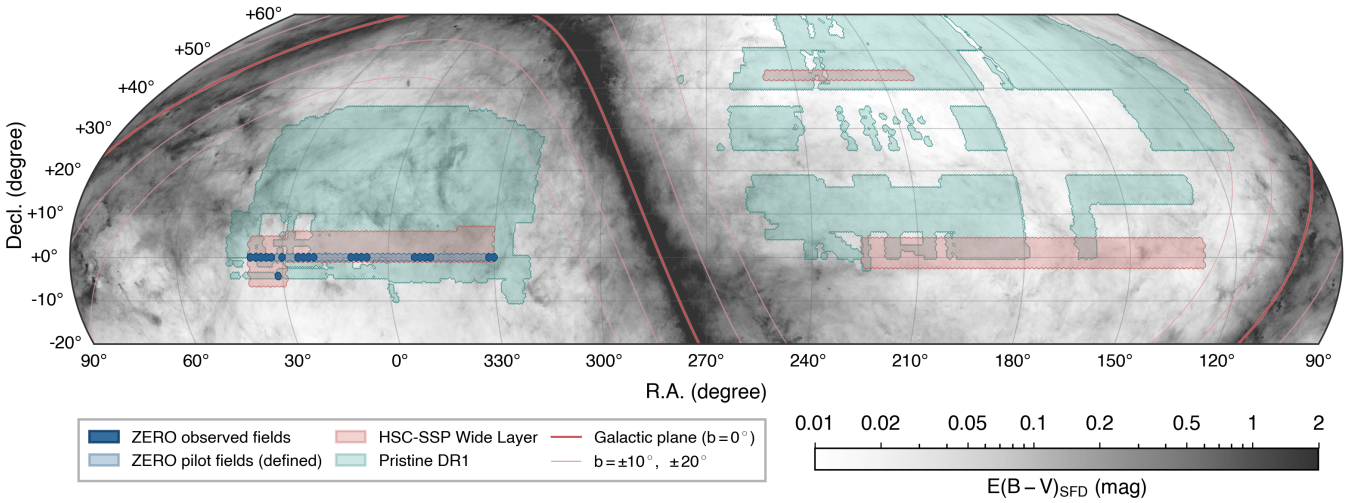


图2. ZERO 巡天的天空覆盖范围，以及 HSC-SSP Wide Layer 和 Pristine DR1 视场覆盖区。分别展示了为试观测规划的视场布局和实际观测的视场。背景为 SFD98 尘埃图，并标出了银河平面以供参考。

。每个指向的总观测时间为 1 小时，包括一次用于定标的 30 秒短曝光，随后进行三次各 1170 秒的长曝光。该巡天覆盖的区域也与 Pristine巡天的视场重叠，是比较 HSC/NB395 与 Pristine Ca H&K 数据的关键区域。目前收集的数据包含 21 个视场，覆盖约 35 deg^2，并这些视场并不连续，因此我们计划在完整巡天中覆盖更广阔的区域。

2.3. 初步数据处理

我们使用 HSC 的标准 CCD 处理流程（`hscPipe`v8.5.3，Bosch 等，2018）。`hscPipe` 提供了用于分析 HSC 获取图像的完整软件包。由于我们采用专为窄带测光学定制的光度定标（

表1. ZERO 巡天的观测覆盖范围。

视场	赤经 (度)	赤纬 (度)	l (度)	b (度)
ZERO 1	−30.000	+0.000	+59.101	−40.721
ZERO 2	−28.500	+0.000	+60.314	−41.913
ZERO 13	−12.000	+0.000	+77.474	−53.855
ZERO 14	−10.500	+0.000	+79.486	−54.790
ZERO 15	−9.000	+0.000	+81.590	−55.690
ZERO 16	−7.500	+0.000	+83.792	−56.552
零点 25	+6.000	+0.000	+108.153	−62.082
零点 26	+7.500	+0.000	+111.306	−62.387
零点 27	+9.000	+0.000	+114.516	−62.619
ZERO 28	+10.500	+0.000	+117.769	−62.777
ZERO 35	+21.000	+0.000	+140.349	−61.766
ZERO 36	+22.500	+0.000	+143.363	−61.333
ZERO 37	+24.000	+0.000	+146.290	−60.835
ZERO 38	+25.500	+0.000	+149.122	−60.275
ZERO 41	+30.000	+0.000	+157.005	−58.262
ZERO 42c	+31.325	−4.275	+163.806	−61.141
ZERO 43	+33.000	+0.000	+161.742	−56.675
ZERO 44	+34.500	+0.000	+163.958	−55.818
ZERO 45	+36.000	+0.000	+166.077	−54.923
ZERO 46	+37.500	+0.000	+168.102	−53.993
ZERO 47	+39.000	+0.000	+170.036	−53.031

第4节），CCD 处理中仅进行偏置扣除、平场校正、全局背景扣除、天体测量、源检测和源测量。天体测量校准是相对于 PS1星表进行的，采用直径为 4.0 角秒（24 像素）的孔径。对于仅检测到少量源的 CCD图像，天体测量校准会失败。这种情况常见于曝光时间较短的图像。校准失败的 CCD图像将从后续分析中排除。

3. 数据集

本节详细介绍了用于测光校准和金属丰度估计的数据集。

3.1. *Gaia*数据发布第*3*版

ESA Gaia任务旨在对银河系和本星系群中的恒星进行精确的天体测量、测光和光谱测量（Gaia合作组等, 2016）。Gaia数据发布第3版（DR3）为约14.7亿个源提供天体测量数据，且这些源均具有完整的五参数解（位置、视差和自行）；此外，还为超过18亿个天体提供宽带 G、 BP和 RP 测光数据（Gaia合作组等, 2023a）。

此外，DR3还包含约2.2亿条低分辨率BP/RP（XP）光谱，覆盖336–1020 nm的波长范围，可据此在该波长范围内任意波段生成合成测光（XPSP）（Gaia合作组等，2023b）。这些数据并非以波长为自变量、以流量为因变量的形式提供，而是表示为BP和RP通道各自55个正交归一厄米基函数上的投影（Carrasco等，2021；De Angeli等，2023；Montegriffo等，2023）。然而，已发现XP光谱存在系统性趋势，这些趋势取决于颜色、星等和星际消光（Montegriffo等，2023；Huang等，2024a；Ye等，2025）。Huang等（2024a）针对这些影响开发了波长域校正，适用于 $-0.5 < BP - RP < 2$、 $3 < G < 17.5$和E（$B-V$）< 0.8。验证结果表明，这些校正能有效降低系统误差，内部精度达到约1–2%。

3.2. 重新定标的*SDSS Stripe 82*标准星

反复扫描的Stripe 82区域（|赤纬.| <1.266°, $-51.5° <$ R。A. $< 60°$）是SDSS中一片连续的赤道区域，面积约为300平方度。 Ivezi´等人(2007)发布了一份精准的测光星表，包含约一百万颗恒星，覆盖 u、 g、 r、 i和 z 波段，内部定标一致性约为百分之一。对于在 u、 g、 r、 i和 z 波段分别亮于19.5、20.5、20.5、20.0和18.5等的恒星，随机测光误差低于0.01等，从而为SDSS测光系统提供了实用定义。

本研究采用了 Thanjavur 等人 2021 年提出的 Stripe 82 v4.2 星表重新校准版本（Huang 与 Yuan(2022a)（以下称 RS82）。原始 v4.2 星表每颗恒星的测量次数多出 2–3 倍，随机误差比Ivezi´c 等人 (2007) 的数据小 1.4–1.7 倍。RS82 星表识别并校正了原始 SDSS Stripe 82 测光数据中存在的大尺度相关零点误差。重新校准揭示出 u 波段约 2.5% 的系统偏移，以及 $griz$ 波段约 1% 的系统偏移。校正后，RS82 的内部精度提升至 u约 5 毫星等，且在 $griz$达到 2 毫星等；与原始星表相比，精度约提升了五倍。

3.3. *SDSS SEGUE*

斯隆数字化巡天数据发布12（SDSS DR12；Alam等，2015年），作为 SDSS-III 项目的最终数据发布，收录了截至2014年7月获得的所有光谱观测。SDSS 的恒星光谱使用 SEGUE恒星参数流水线进行分析

（Lee 等，2008a，b；Smolinski 等，2011），该流水线为一有效温度（$T_{\rm eff}$）、表面重力（log g）和金属丰度（[Fe/H]）这三项基本恒星参数提供了测量值，适用于温度范围为4000–10,000 K且光谱信噪比大于10的大多数恒星。定标过程中采用 SEGUE 作为辅助光谱参考。

3.4. *HSC-SSP Wide* 层

Hyper Suprime-Cam Subaru 战略计划（HSC-SSP）是一项利用 HSC 开展的宽域深场成像巡天。该巡天于 2014年3月至 2022年1月进行，历时约 7.5 年（Aihara 等人 2018a、b、2019年、2022年），覆盖大部分天空，并在多个光学波段以不同深度获取了测光数据。在本研究中，我们仅使用 Wide 层来估计恒星金属丰度。Wide 层目前覆盖约 670 平方度[2]，最终数据发布时将在 g、r、i、z 和 y 波段覆盖约 1100 平方度[2]，相应的 5σ 极限星等约为 26.5、26.5、26.2、25.2 和 24.4（Aihara 等人 2022年）。该星表由基于 Vera C. Rubin 天文台开发的管线（`hscPipe` v8.4，并使用 FGCM 代码更新为 `hscPipe` v8.5.3）生成（Ivezic 等人 2008；Juri´c 等人 2017；Bosch 等人 2019年），并通过 Pan-STARRS1 测光数据和天体测量数据进行标定（Schlafly 等人 2012；Tonry 等人 2012；Magnier 等人 2013；Chambers 等人 2016）。

3.5. *HSC-SSP* 测光系统中的 *BEST* 标准恒星

BEst STars（BEST）数据库（Xiao等，2026）包含超过2亿颗XPSP 标准恒星，其构建采用了更新版的 XPSP 方法（Xiao等，2023c），并应用于校正后的 Gaia XP 光谱（Huang等，2024a）。我们采用 HSC-SSP测光系统的透射曲线[22]，生成NB395、g、r 和i 波段的合成星等。XPSP 方法及标准恒星构建过程的详细说明见Xiao等（2023c）第3.2节。这些标准星遍布整个天空，采用AB 星等系统（Oke 与 Gunn，1983年）报告。

[22] https://subarutelescope.org/Instruments/HSC/sensitivity. html

3.6. *LAMOST DR9* 的 *DD-Payne*

我们使用LAMOST DR9目录中的恒星大气参数和元素丰度，该目录通过数据驱动的Payne方法（DD-Payne；Zhang等（2025））得出，并将其作为金属丰度估计的光谱参考。该目录基于低分辨率 LAMOST光谱，为数百万颗恒星提供了均一测量的有效温度、表面重力和22种单个元素丰度。在该目录中，[Fe/H] 测量值的可靠范围可低至 ~ -4.0，而大多数元素丰度比[X/Fe] 对于满足 [Fe/H] ≥ -2.0的恒星具有稳健性。对于高信噪比光谱（S/N > 50），轻元素的典型不确定度可达 $\sim$ 0.05 dex；测量误差强烈取决于光谱质量，且大致与S/N成反比。

4. NB395 的测光校准

4.1. 概述

当前数据集包含对 21 个视场的观测，共计 89 次观测访问（曝光）。其中，58 次观测访问的曝光时间为 1170 s，21 次观测访问的曝光时间为 30 s。此外，还有 7 次观测访问的曝光时间为 600 s，主要覆盖 ZERO_44 和 ZERO_47 视场。其他几次观测访问因天气或技术问题而提前终止，导致测光质量不可靠。

我们首先移除受饱和、混叠或坏像素影响的测量值，以及位于CCD边缘附近的测量值和信噪比低于1的测量值。对于具有 $G < 21$的源，其 $NB395$星等通常亮于22–24等，绝大多数都具有Gaia DR3测光对应体，这些对应体通过Gaia坐标和源编号加以识别。该子集包含113,314个源，共计330,695次单独观测。对于在1.5角秒范围内没有Gaia对应体的测光数据，我们根据赤道坐标中的位置接近程度（在5角秒以内）以及校准后的 $NB395$的相似性来识别重复观测。这得到906,280个独特源和1,313,111次单独观测，其中288,834个源至少有两次重复观测，其余源仅被探测到一次。

鉴于这些特征，我们构建了以下测光校准模型，该模型对每次观测分别进行独立定标，并应用于每次观测。模型表示为：

$$NB395_{\rm cali} = NB395_{\rm uncali} + ZP(i) + SS(i,n,nX,nY) + ZP_{\rm Blue/Red}(i) \quad (1)$$

其中， $NB395_{\rm cali}$和 $NB395_{\rm uncali}$分别表示每次观测中恒星校准后的NB395星等和未校准的NB395星等。项 $ZP(i)$表示每次观测的零点偏移； i、 $SS(i,\ n,\ nX,\ nY)$描述视场内的空间结构，其中 n表示HSC上的电荷耦合器件编号， nX 和 nY是相对于电荷耦合器件中心的位置；而 $ZP_{Blue/Red}(i)$表示每次观测中针对蓝星和红星施加的额外零点偏移，分别由 $BP-RP<1.25$ 和 $BP-RP>1.25$定义。然而， $ZP_{Blue/Red}(i)$所需的颜色信息来自Gaia测光。因此，ZERO巡天中缺少Gaia对应体的测光测量不包含这一校正项。该校正的幅度通常小于1%。由于没有Gaia对应体的源通常较暗，其测光不确定度远大于这一幅度，因此预计省略该校正不会引入显著的系统效应。对于每个 $SS(i,\ n,\ nX,\ nY)$，空间结构以恒星位置（nX, nY）为变量，用二阶二维多项式建模:

$$\begin{aligned} SS(i,n,nX,nY) = {} & a_1(i,n)nX^2 + a_2(i,n)nX \\ & + a_3(i,n)nY^2 + a_4(i,n)nY \\ & + a_5(i,n)nX\cdot nY + a_6(i,n) \end{aligned} \quad (2)$$

上述校准模型中的所有参数均由标准星确定。尽管常数项$a_6(i,\ n)$ 在形式上与方程中的访问 $ZP(i)$ 存在退化关系 1，但在迭代过程中，这些项是按顺序求解的，其中 $ZP(i)$ 首先用于表征每次访问的整体偏移，而 $SS(i,\ n,\ nX,\ nY)$ 随后用于建模视场内的相对空间变化。

测光校准的核心是构建一组规模足够大的NB395窄带标准星，以约束模型参数。最直接的方法是利用HSC NB395滤光片曲线，通过合成测光（XPSP）从Gaia XP 光谱中推导NB395测光。然而，由于Gaia XP 光谱仅限于 $G<17.65$，在当前ZERO 巡天策略下，1170年代曝光中仅覆盖少量明亮源。这些源在视场内的分布也不均匀，一些视场在Gaia XP覆盖范围内呈现条带状空缺，这很可能是由Gaia的扫描规律造成的。相比之下，RS82星表提供了大量暗星，完整覆盖当前ZERO 巡天的赤道区域。正如恒星颜色回归方法（SCR；Yuan等，2015；Huang和Yuan，2022a）所示，RS82 ugi测光可以转换到NB395系统，从而得到一组规模大、分布均匀的标准星，用于约束校准参数。对于远离天球赤道的视场，零点 $ZP(i)$由数量有限的XPSP标准恒星推导，而空间结构项 $SS(i,\ n,\ nX,\ nY)$则直接取自时间上相邻的赤道区域观测访问。

完整的校准流程如图 3所示。我们首先使用 XPSP 标准星约束零点，然后根据 RS82源建立变换关系。随后利用两个数据集联合约束所有校准参数，并通过迭代确保变换和校准具有稳健性。

4.2. 数据筛选

与 Gaia XP 光谱匹配的共同源约有 17,000 个（约 70,000 次测量），与 RS82 匹配的共同源约有 70,000 个（180,000 次测量）。为确保 HSC 测光、校准模型以及从 SDSS系统到 NB395 的变换关系的可靠性，我们对 ZERO、XPSP 和 RS82数据集应用以下筛选标准:

1. 对于 HSC 测光，采用固定孔径半径为 12 像素（2 角秒）的孔径测光。

2. 对于 Gaia XP 光谱，剔除 phot bp rp超额因子值较大，或显著偏离 phot bp rp超额因子与 $BP-RP$颜色之间一般关系的源。具体而言，满足以下条件的源

$$\begin{aligned} \texttt{phot_bp_rp_excess_factor} > {} & \\ -0.020(BP-RP)^3 + 0.135(BP-RP)^2 & \\ -0.133(BP-RP) + 1.232 & \end{aligned}$$

将被排除。phot bp rp超额因子定义为 $C = \frac{I_{BP}+I_{RP}}{I_G}$，用于评估 BP和RP测光及光谱中的背景和污染效应。这一经验判据有助于排除Gaia测量质量较低的源，并有效去除星系等潜在延展源。

3. 对于 RS82，我们将颜色范围限制为 $0.25<g-i<3$。为确保有足够的暗星标准星，仅排除少量标准误差显著大于主要星等误差关系的源。此外，我们要求 u msig <0.5。

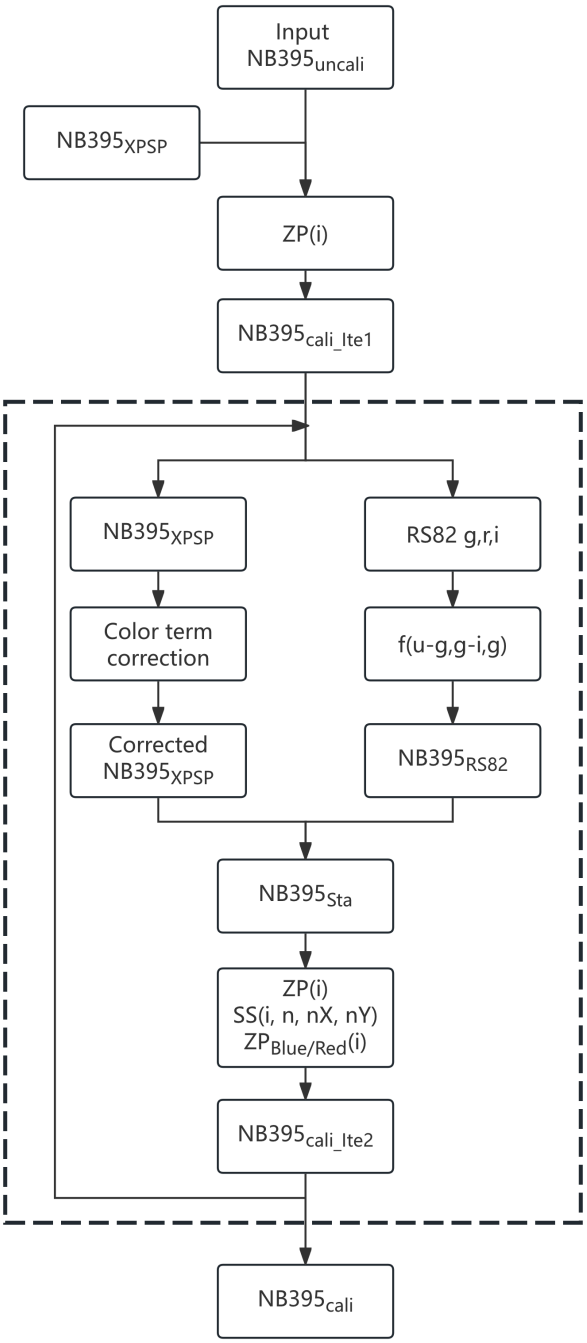


图3。 校准流程图。虚线框内的步骤会再迭代一次。

4.3. 标准星

如前文所述，我们的标准星由两部分组成，即 XPSP 和 RS82。本小节重点介绍标准星的生成以及 $NB395$ 波段的实际定义。

在宽视场测光观测中，滤光片的透射曲线会随入射角和视场内的位置而变化。若无辅助测量，通常难以准确确定这些变化。因此，当测光定标完全依赖标准星时，必须明确定义测光波段。尽管实验室测得了 $NB395$ 波段的平均透射曲线，但实验室表征与原位性能之间可能存在细微差异，导致 $NB395$ 波段的平均透射曲线有所不同。因此，在试点巡天中， $NB395$ 的定义最终是由测光观测而非实验室测量精确且隐式地确定的，尽管二者高度一致。

对于 XPSP 样本，合成测光使用 Gaia XP 光谱与 HSC $NB395$滤光片的面积加权平均透射曲线进行计算。由于 Gaia XP 光谱存在系统误差，且采用的透射曲线与实际透射曲线之间可能存在差异，$NB395_{\rm XPSP}$与观测到的 $NB395$之间可能存在颜色项。我们假定该颜色项呈线性，并在每次定标迭代中进行校正，以确保平均 $NB395_{\rm XPSP}$值与观测到的 $NB395$保持一致。

对于 RS82 样本，我们应用最小二乘提升（ LSBoost）回归方法，基于第 1 步结果 $NB395 = f$（$u-g$、$g-i$、g）建立经验关系 $NB395_{\rm cali\ Ite1}$，然后利用 RS$NB395_{\rm RS82}$ 星等生成82 ugi 。经过迭代拟合过程得到的最终经验关系，以代表性星等 $g = 19$为例，见附录B中的图B1 。在该关系中， f 隐含地纳入了根据实际观测得到的$NB395$ 波段平均透射曲线，这意味着 $NB395_{\rm RS82}$ 是相对于观测得到的平均透射曲线定义的。

标准星$NB395_{\rm XPSP}$ 与 $NB395_{\rm RS82}$ 和最终迭代得到的观测值$NB395_{\rm cali\ Ite2}$ 之间的比较如图 4所示。XPSP 样本仅限于 $G < 17.65$，不确定度随恒星变得更暗、更红而增大。相比之下，RS82 的结果与观测吻合良好，富金属星和贫金属星之间没有显著的系统差异。这证实了 $NB395 = f(u-g, g-i, g)$变换的可靠性。为确保后续分析中模型参数约束的稳健性，我们从 XPSP 样本中移除满足 $BP - RP > 1.5$ 的源。然后，我们要求 XPSP 满足$|NB395_{\rm XPSP} - NB395_{\rm cali\ Ite_2}| < 0.20$;

并对 RS82 采用更严格的条件 $|NB395_{\rm RS82} - NB395_{\rm cali\ Ite2}| < 0.15$。

在后续的测光校准流程中，将 XPSP 和 RS82 标准星样本合并。鉴于 RS82 具有更高的精度和更大的样本量，对于两个星表中共有的源，仅保留 RS82 的结果，而将 XPSP 仅作为补充数据集。因此，在赤道区域，RS82标准恒星主导着校准模型参数的约束。由 XPSP 和 RS82 标准恒星得到的 NB395星等样本，以下简称为 $NB395_{\rm Sta}$。

4.4. 观测访问的零点和空间结构

最终迭代的零点 $ZP(i)$（图 5）主要由大气条件和观测高度（大气质量）决定。在10月1日夜间的前半段，持续的薄云导致视宁度和零点均出现明显变化。在9月3日和4日等稳定的夜晚，高海拔处的零点变化通常低于0.05-0.06星等，且视宁度保持稳定。相比之下，在10月1日和2日等条件较差的夜晚，零点变化更大。

对于空间结构分量 SS（i、n、nX、nY），图 6 展示了 ZERO1场区典型长曝光和短曝光观测访问的视场空间结构。附录C中给出了来自四个观测夜晚的更多示例。在长曝光中，整个视场内可以看到清晰的环状图案，其振幅最高达 ± 0.4 星等，以及CCD之间不连续的零点跳变。尽管短曝光中具有有效读出的CCD数量有限，但仍出现了类似的图案。图 6 还显示，我们的校正能够有效去除这些结构。校正后，$NB395_{\rm cali}$ 与标准星之间的$NB395_{\rm Sta}$ 离散度在长曝光中约为0.041星等，在短曝光中约为0.058星等（这可能是由于每个CCD中可用的标准星数量较少，从而导致校正中的随机不确定度更大）。

4.5. 颜色依赖的零点和空间结构

我们进一步研究了校正 $ZP(i)$ 和$SS(i, n, nX, nY)$ 后，观测星等与标准星预测值之间残差的颜色依赖性。结果见图7。我们以 $BP - RP = 1.25$为界，将所有源分为蓝星和红星，并分别计算每次观测访问中蓝星和红星的零点。如左图所示，蓝星与红星之间 1–2% 水平的残差差异在各次观测访问中持续存在。除 2021年10月1日 夜间前半段（当时大气条件较差且湿度较高）外，蓝星和红星之间的零点差异与视宁度呈现明显相关性：视宁度增大时，红星相对于蓝星显得更亮。一种合理的解释是，点扩散函数（PSF）的大小主要由大气湍流决定，而在斯巴鲁望远镜/HSC观测中，红星的点扩散函数本身较小（Carlsten等（2018））。在固定孔径下，随着视宁度增大，红星的通量损失因此会减轻。尽管我们定标模型中的 $ZP(i)$ 和 $SS(i, n, nX, nY)$ 项有效校正了整体的孔径相关通量损失，但仍需增加一个校正项，以处理这种颜色相关孔径校正。

鉴于单颗标准星的典型不确定度为 0.04–0.06 星等（见图 6），至少需要~30 颗标准星，才能获得不确定度低于 1% 的校正项。由于在当前样本及红星/蓝星定义下，红星的数量远少于蓝星，因此我们仅对可获得超过 30 颗红标准星的观测访问应用附加校正项 $ZP_{\rm Blue/Red}(i)$；这一点由图 7左图中的结果所示。

原则上，这种颜色相关孔径校正不仅应影响每次观测访问的零点，还应在同一次观测访问内的不同 CCD 之间发生变化（即随视场中的位置而变化）。然而，由于可用标准星数量有限，我们仅对每个 CCD 的颜色相关零点（即颜色相关空间结构）进行表征，而不进行校正。图 8 展示了视场 ZERO 1连续三次长曝光观测的颜色相关空间结构，该视场包含数量最多的标准星。这些结构的典型幅度处于 1% 以内，并且在三次观测访问之间表现出明显的时间变化。对所有观测访问进行人工检查证实，该效应会随时间变化，并且通常在整个视场内连续分布。

对于标准星密度最高的视场（ZERO 1），CCD层面颜色相关零点的不确定度与修正量本身相当（蓝星）甚至更大（红星）。这是因为该方法实际上利用标准星来追踪每次观测期间整个视场内的点扩散函数变化，而单颗标准星的固有不确定度大于这些变化的尺度。因此，需要足够多且颜色测量可靠的标准星，才能在统计上降低这些不确定度。

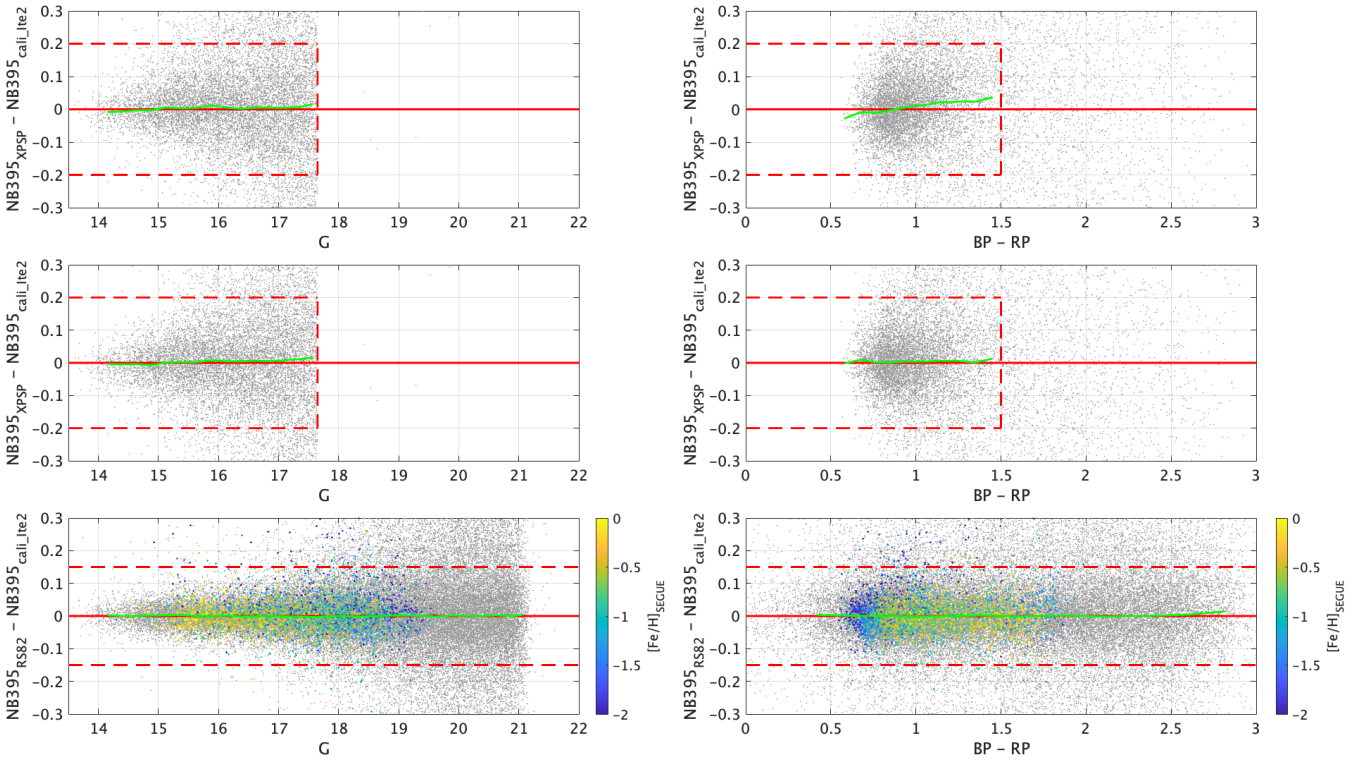
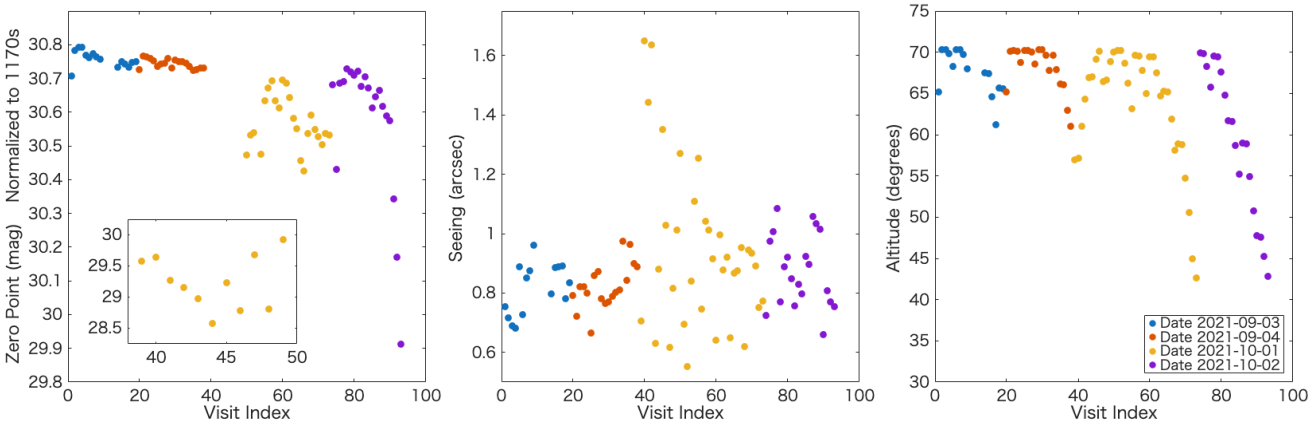


图4. XPSP（上）、颜色项校正后的XPSP（中）和RS82（下）标准星相对于$NB395_{\mathrm{cali\ Ite2}}$的差值，显示为Gaia G 星等和 $BP-RP$ 颜色的函数。底部各面板中圆点的颜色表示来自SDSS SEGUE的[Fe/H] 值。每个面板中的绿色曲线表示中位数趋势。实水平线表示差值为零，虚线表示采用的标准星筛选界限。只有位于虚线范围内的源才纳入标准星样本。



F图5. 四个夜晚所有观测访问的零点、视宁度和海拔概览。

不过，目前的标准星数量仅能对颜色相关空间结构进行定性评估，不足以推导出可靠的定量修正。因此，我们不再在CCD层面应用进一步修正。

4.6. 结果与比较

在ZERO 巡天中，每个源通常有一至四次观测。我们根据孔径测光不确定度作为权重计算加权平均值，将这些观测合并，从而为每个源获得合并校准星等 $NB395_{\mathrm{cali\ uni}}$。不过，鉴于该巡天的波段和深度，最终定标

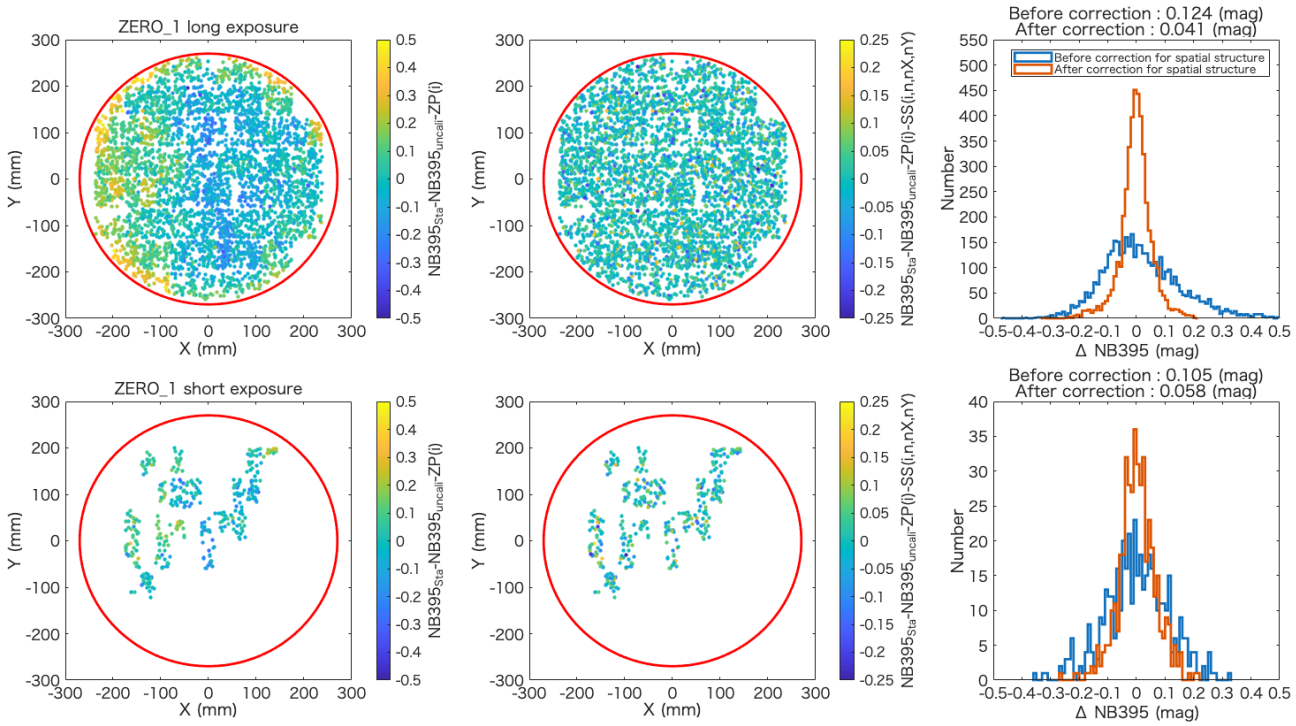


图6。 ZERO 1视场一次长曝光观测和一次短曝光观测的典型空间结构及其校正。第一列显示空间结构校正前观测到的 $NB395$ 与标准星 $NB395_{\mathrm{Sta}}$ 之间差异的空间分布。第二列呈现校正后的残差，第三列则比较了校正前后标定星等与标准星的差异。

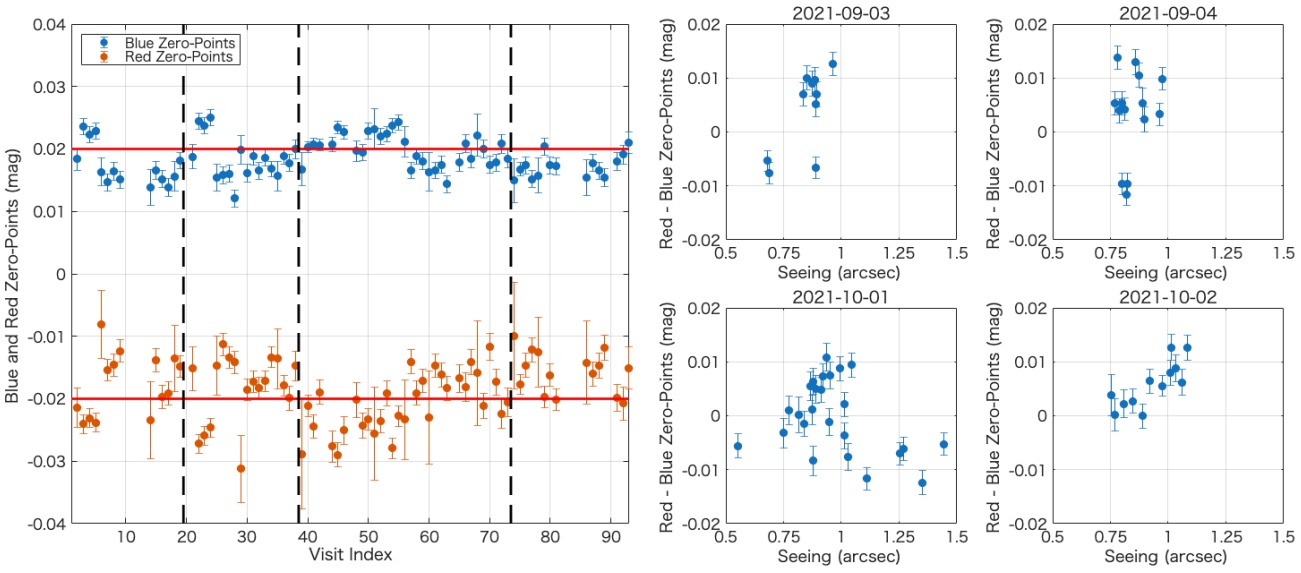


图7。 左图显示每次观测的蓝星和红星零点，分别向上和向下移动0.02星等。误差条表示零点的不确定度，该不确定度根据可用标准星的数量估算得出。黑色竖直虚线分隔四个观测夜晚。右侧的四个面板分别展示每个夜晚视宁度与蓝星和红星之间零点差异的关系。

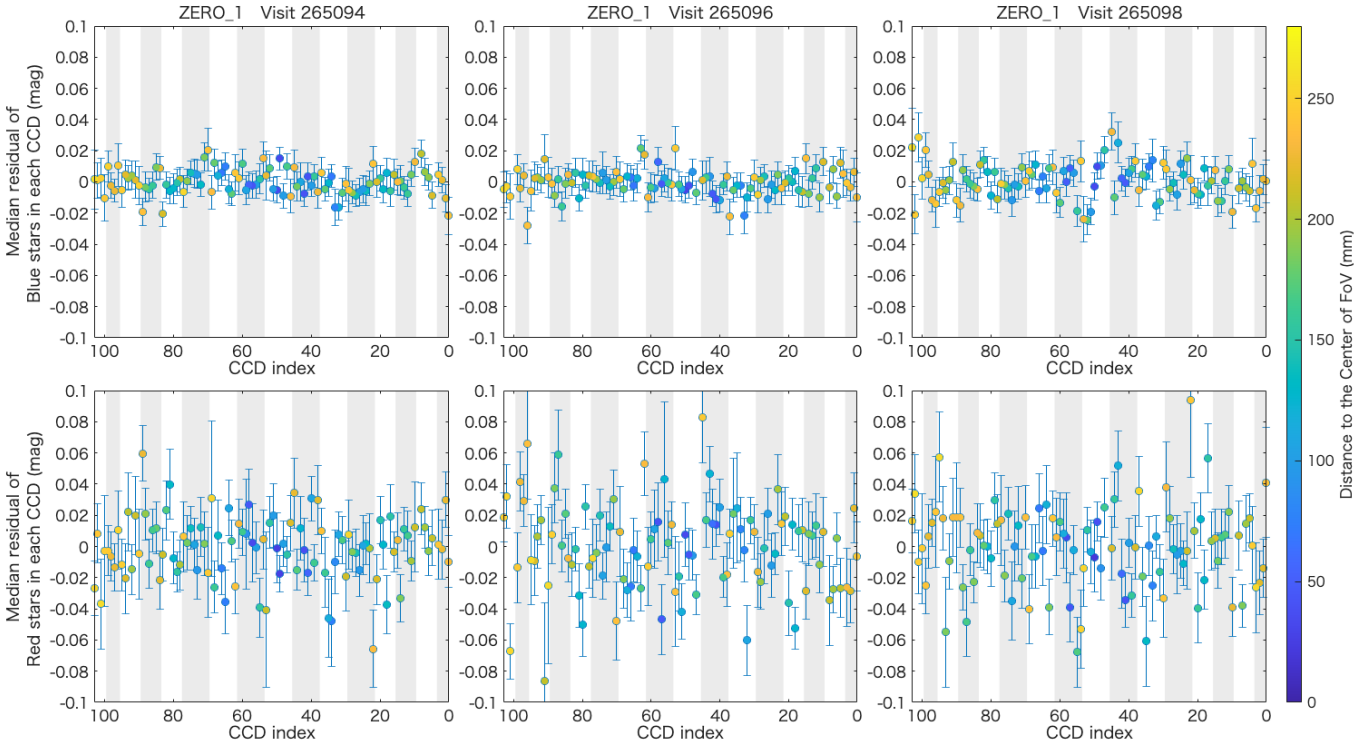


图 8. 三个连续长曝光观测中，视场 ZERO 1 各 CCD 的颜色相关零点随 CCD 索引的变化。上方面板对应蓝星，下方面板对应红星。每个点的颜色表示其与视场中心的距离。误差条表示零点的不确定度，根据可用标准星的数量估算得出。灰白交替区域表示 HSC 中不同的 CCD 列。对于 ZERO 巡天的观测，位置角固定为 PA = 0°。每列内，CCD 索引从东向西递增（对应于图 6 中从下到上），而各列按从南到北的顺序排列（对应于图 6 中从右到左），索引在左侧下一列的底部继续递增。有关 CCD 排列的详细信息，请参阅仪器文档 https://www.naoj.org/Instruments/HSC/ccd.html。

此外，由于 HSC 数据和标准星星等都存在不可忽略的不确定性，因此无法直接利用标准星评估测光精度。

校准精度定义为$ZP(i) + SS(i,n,nX,nY) + ZP_{Blue/Red}(i)$的精度。为消除 HSC 测光和标准星中的测量不确定度所造成的影响，我们采用两种基于重复观测内部离散度的方法来评估这一精度。首先，对于观测次数超过三次的源，我们评估重复观测的离散度随 $NB395$的变化，如图 9 左图所示。在亮端，测光不确定性可以忽略，重复观测的标准差渐近于 0.016 mag，我们将其作为校准精度下限的估计值。标准差在 $NB395 = 20$处增至 0.03 mag，并在 $NB395 = 22.5$ 处达到 0.1 mag，此时测光不确定性占主导。值得注意的是，在合并多次观测后，通过将该标准差除以$\sqrt{n\ obs}$来估计不确定度$NB395_{err}$，其中 $n\ obs$ 为观测次数。其次，我们在 89 次观测访问中构建观测相同视场的观测访问对，共得到 140 对观测访问。对于每一对观测访问，我们在视场内不同尺度的环形空间分箱中，计算两次观测访问之间 $NB395_{\rm cali}$ 的中位数差异，然后评估这 70 个中位数之间的离散度（仅针对位于赤道区域的长曝光观测访问），将其作为校准精度的指标。通常，每个环形空间分箱包含超过一百个源，因此每个中位数的不确定度远小于单个源测量的不确定度。因此，HSC 的测量不确定度不再影响校准精度的评估。利用这一方法，我们得到不同空间尺度下中位数差异的离散度，如图 9 右图所示。当空间尺度接近完整视场时，离散度主要反映 $ZP(i)+ZP_{\rm Blue/Red}(i)$的精度。随着空间尺度减小，它刻画$ZP(i) + ZP_{\rm Blue/Red}(i) + SS(i,n,nX,nY)$的精度，离散度从约 0.003 mag 逐渐增加至 0.008 mag。需要指出的是，这一增加不仅反映了校准精度随空间尺度的变化，也源于每个分箱中的源数减少。尽管如此，该结果仍为不同空间尺度下的相对校准精度提供了可靠评估，表明在至少 20 角分及更大的尺度上，我们的校准精度优于 0.01 mag。

上述评估仅对不同空间尺度下的校准精度进行了统计评价。鉴于我们的 $NB395$ 滤光片与 Pristine Ca H&K滤光片（Martin等（2024））非常接近，因此，与 Pristine巡天进行比较可作为一种良好的外部离散度检验。然而，这两种滤光片并不完全相同，二者之间存在颜色项。此外，Pristine星表提供的是本征星等。因此，我们使用 SFD98 的二维尘埃图进行消光校正，同时采用通过与 Pristine巡天比较定标得到的经验消光系数 4.5；该系数总体上与 NB395 波段标准消光曲线的预期一致，并进一步对我们的 $NB395$ 测光应用颜色项校正。图10所示的比较表明，两者符合得非常好：我们的定标 $NB395_{\rm cali\ uni}$ 测光与 Pristine测量值之间的散布仅为 0.029 mag。图 10 右下角的图展示了我们的 ZERO 与 Pristine测光之间的离散度随亮度的变化。我们针对不同亮度水平以及不同观测次数的子样本，评估我们的 ZERO 与 Pristine测光之间的离散度（`n obs` = 1 – 4，以及取平均值），如图中从蓝色到红色的曲线所示。当 ZERO 中只有一次观测时，我们的 $NB395$ 测光精度略有降低。当存在多次观测时，在 $NB395 < 18$ 处符合程度优于 0.03 mag，在 $NB395 < 20$处优于 0.05 mag。我们还展示了由我们的定标提供的不确定度估计，以及 Pristine 提供的不确定度估计，二者结果相当。

Pristine星表还提供 $P_{\rm var}$，该指标基于多历元 $Gaia$ 测光（Martin等（2024））表示某个源具有变异性的概率。根据他们建议的判据，我们在图 $P_{\rm var} \geq 0.3$ 的顶部中间面板中标出了具有10的源。尽管 ZERO–Pristine 离散度总体上随星等变暗而增大，主要是由较低的测光信噪比驱动的，但恒星变异可以解释亮端的一些离群值。具体而言，少数极端离群值中的大多数具有较高的 $P_{\rm var}$，这表明这些极端差异很可能是由恒星变异造成的，其中最大的差异约为 0.83 星等。

4.7. 延展源

我们设置了星系候选体标志，以表示源是否为延展源。对于具有可用Gaia测光的源，该标志根据

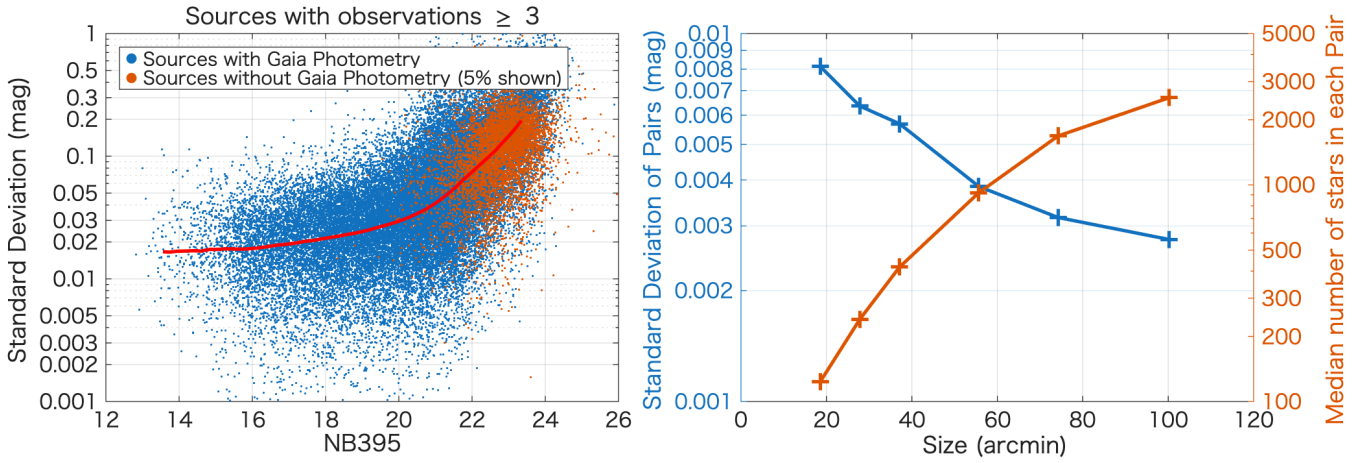


图 9. 左图显示了观测次数超过三次的源，其重复观测标准差随亮度的变化。右图展示了不同环形空间分箱中各观测访问对之间恒星星等差的中位数，以及每个分箱中的典型恒星数量。

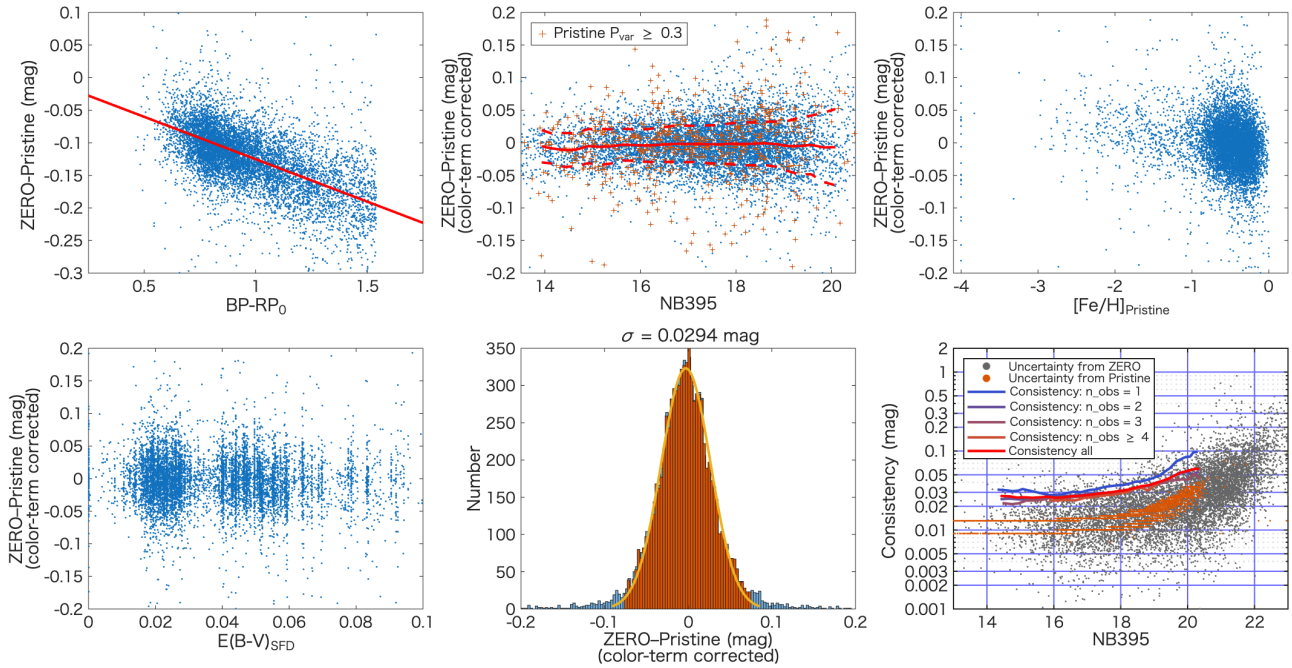


图10. 各面板依次展示了 ZERO（NB395滤光片）与 Pristine测光的比较：颜色项及其校正、随亮度变化的星等差（红色曲线表示差值的中位数和 $\pm 1\sigma$ 范围， $P_{\rm var} \geq 0.3$ 的源以橙色叉号标出）、 $[\mathrm{Fe/H}]_{\rm Pristine}$和 $E(B-V)_{\rm SFD}$，以及星等差的高斯拟合。右下方面板还展示了 ZERO 与 Pristine 之间的离散度，以及两个巡天提供的不确定度随亮度的变化。

phot_bp_rp超额因子 > 2 确定。对于没有Gaia测光的源，则使用 ZERO 巡天数据，通过比较较大孔径内测得的流量与固定的 12 像素（2 角秒）孔径内测得的流量来确定该标志；当较大孔径的流量亮度高出超过 0.3 等时，设置该标志。这为具有-Gaia测光，因为并非所有 ZERO 源都有 Gaia 或 HSC-SSP宽带测光。

根据这一标准，点源/延展源比率随星等增加而降低：在$NB395 \sim 22$时降至1以下，在 $NB395 \sim 23$时降至0.5以下，这表明大多数暗弱源被分类为延展源。通过随机目视检查HSC DR2 Wide层 g 波段图像可以确认，大多数延展

源是星系。然而，在较暗的星等处，这一标记越来越受到选择效应的影响，因为较大的测光不确定度往往会导致源被误分类为延展源。因此，在后续的金属丰度测量中，将采用基于HSC-SSP高信噪比宽带测光的额外恒星筛选标准。此外，对于延展源，本研究采用的固定孔径不可避免地会遗漏总流量中的相当一部分。由于本研究主要关注恒星的金属丰度，我们不尝试进一步校正延展源的测光结果，仅提供初步的点源/延展源分类。

5. [Ca/H]测量

本节介绍我们如何利用 ZERO 巡天的 $NB395$ 波段，以及 HSC-SSP Wide 巡天和 XPSP 的 g 和 i波段测量[Ca/H]，并结合我们开发的一种新技术——“物理约束恒星序列拟合方法”（Physics-constrained Stellar Locus Fitting Method）。

在以往的光度金属丰度研究中（例如 Lu 等，2024年；Martin等（2024年）），如果只使用一个对金属丰度敏感的波段（例如 NUV），可测量参数的数量就仅限于一个。由于铁吸收线广泛分布于近紫外和光学波段，在这种情况下测得的金属丰度通常是 [M/H]或 [Fe/H]。只有使用多个光度波段，才能约束碳、氮、氧、镁和钙等其他元素的丰度（例如 Yang 等，2022年）。即使是使用瞄准 Ca H&K吸收线的窄带滤光片的 Pristine巡天，其主要观测量也是 Ca H&K特征，但最终报告的量仍是 [Fe/H]的估计值。Ca H&K线是贫金属星光学光谱中最强的金属吸收特征之一，因此长期以来一直被用作低分辨率光谱学和窄带测光巡天中的金属丰度示踪物。这种做法隐含地假设 [Ca/Fe]为常数，从而能够通过简单的变换，将直接测得的[Ca/H] 转换为 [Fe/H] 。虽然这一假设通常适用于富金属银河盘或贫金属晕，但在更宽的 [Fe/H] 范围内，[Ca/Fe] 并非常数。因此，推断出的 [Fe/H] 可能会因 [Ca/Fe]的变化而出现系统偏差。公平地说，展宽后的 Ca H&K特征不仅取决于钙丰度本身，也取决于连续不透明度，而后者对总体金属丰度十分敏感。尽管如此，Ca H&K吸收仍然是 Pristine 滤光片探测到的主要金属敏感特征。例如，在图11中，我们比较了 Pristine DR1 与 APOGEE（Majewski等（2017））中约 1,000 颗共同源的巨星的金属丰度。结果表明，Pristine 提供的[Fe/H]与 APOGEE 的 [Ca/H]更为一致——两者仅相差一个恒定偏移量——而与 APOGEE 的 [Fe/H]则不然。此外，在 $[\mathrm{Fe/H}] \sim -0.4$处，量 $[\mathrm{Fe/H}]_{\mathrm{Pristine}} - [\mathrm{Fe/H}]_{\mathrm{APOGEE}}$ 与 [Ca/Fe]呈现明显相关性。尽管如此，在Pristine巡天目标最关注的低金属丰度范围内，Pristine 的 [Fe/H] 估计值仍与 APOGEE 的 [Fe/H], 相当吻合，尽管即使在晕族群中， [Ca/Fe] 也并非严格恒定，因为钙和铁源自不同的核合成通道，且具有不同的富集时间尺度。

鉴于 ZERO 巡天的$NB395$ 波段与 Pristine Ca H&K窄带滤光片相似，在后续分析中我们采用 [Ca/H] 作为主要的金属丰度指标，因为它提供了更直接的测量结果，并且较少依赖于关于 [Ca/Fe]的假设。附录中给出了基于模型的研究，探讨了$NB395$ 波段直接测量的化学丰度指标。

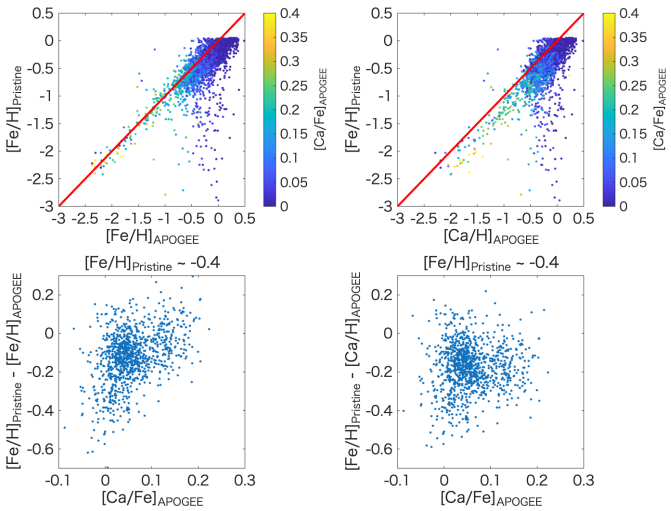


图11. 各面板展示了$[\mathrm{Fe/H}]_{\mathrm{Pristine}}$ 与 $[\mathrm{Fe/H}]_{\mathrm{APOGEE}}$ 和 $[\mathrm{Ca/H}]_{\mathrm{APOGEE}}$的比较。图中数据点表示 Pristine 与 APOGEE 的共同源，这些源经筛选后满足 APOGEE 中的信噪比 $>$ 400 和 $\log g < 3$ 。

5.1. 数据选择

由于恒星轨迹方法至少需要一种颜色来表征恒星有效温度，且 ZERO 巡天视场位于 HSC-SSP 覆盖范围内，其星等范围涵盖了更暗的恒星

因此，我们使用 HSC-SSP 宽层 $g-i$ 颜色作为温度指标。然而，部分区域位于 HSC-SSP 覆盖范围之外，且 HSC-SSP 测光在 $NB395 < 18$处会饱和。对于这些源，我们因此使用 XPSP 方法，结合 Gaia XP 光谱和 HSC-SSP 透射曲线，通过合成 $g-i$ 颜色来补充温度指标。随后，我们应用以下筛选标准，以确保这些源为恒星，且其 $NB395$、 g和 i测光可靠：

1. 对于具有Gaia对应体的源，我们要求phot bp r p超额因子- ≤- 2。对于具有HSC-SSP 宽层宽带测光的源，我们要求i 波段扩展度标志 $= 0$ 和恒星概率 > 0.9 ，该标志来自HSC摄影z 组（Tanaka 等（2018）），以筛选恒星源。

2. 对于HSC-SSP 测光，我们采用三个颜色-颜色图：$g-i$与 $g-r$、 $g-i$与 $g-z$，以及 $g-i$ 与 $g-y$，以排除明显偏离恒星轨迹的源，从而去除HSC-SSP 测光不可靠的天体。

3. 对于XPSP g 和 i 测光，移除phot bp rp超额因子值较大的源，或明显偏离phot bp rp超额因子与 $g-i$颜色之间总体关系的源。具体而言，满足以下条件的源

$$\texttt{phot_bp_rp_excess_factor} > 0.0067 \times (g-i)^3 - 0.0049 \times (g-i)^2 - 0.0508 \times (g-i) + 1.1720$$

被排除在外。

基于上述筛选标准，我们获得了一个包含127,872颗恒星的样本，这些恒星具有Gaia XP或HSC-SSP宽层的对应源。其中，21,340个源具有可靠的 $g-i$ XPSP颜色，84,254个源具有来自HSC-SSP 观测的颜色，如图12所示。对于同时具备两种测量结果的源，我们仅保留HSC-SSP数值，因为对于这些较暗的恒星，Gaia XP的不确定性通常更大。对于由Gaia XP合成的$g-i$ 颜色，我们利用同时具有Gaia XP和HSC-SSP测量结果的少量源进行颜色校正，以确保与HSC-SSP 测光系统的一致性。

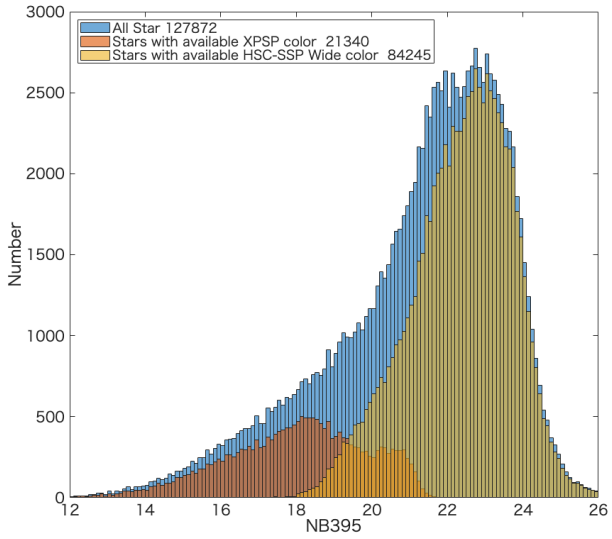


图 12. ZERO 巡天中 NB395 波段恒星的星等分布。

对于 $NB395$、 g和 i波段的消光校正，我们采用 SFD98 二维尘埃图。鉴于ZERO 巡天区域位于高银纬地区，且通常消光较低，该尘埃图能够提供可靠的消光估计（$E(B-V) \sim 0.02$ 等）。对于消光系数， $NB395$ 波段采用固定值4.5；对于 g 和 i 波段，我们采用 Zhang等人提供的依赖于温度和消光的系数（(2024年）。

当前恒星样本的赫罗图（HRD）如图13所示，其中绝对星等 Mg_0 是利用Bailer-Jones等人（2021）提供的距离推导得到的。根据图中所示的红色曲线，并在范围 $0.2 < (g-i)_0 < 1.5$内，我们将样本划分为若干子样本，同时排除颜色可能受分子带变化影响的M型矮星。由于Mg_0 会受到距离不确定度的显著影响，当一颗恒星的 Mg_0 不确定度上限高于上方红色曲线时，将其分类为巨星；其余源则视为矮星。位于下方红线之下且具有 $(NB395-g)_0 < 0.3$的源，即紫外增亮天体，被归入矮星II区域，以尽量减少主矮星区域中的白矮星**和类星体**污染。与矮星区域相比，预计矮星II区域含有更高比例的白矮星。具有Gaia对应体但没有Gaia距离测量值的源被归入无Gaia距离样本，

而没有Gaia对应体的源则被归入无盖亚测光样本。

总的来说，最终用于推导 [Ca/H]测量值的样本包括1,948颗巨星、21,336颗矮星、18,238颗矮星II、3,438个无Gaia距离源，以及23,418个无Gaia测光源。它们的颜色-颜色图如图14所示。如图 14所示，能够被分类为巨星或矮星的源通常较亮且具有较高的信噪比，从而形成清晰分离的恒星轨迹，尤其是在红端（$(g-i)_0 > 1$）。对于矮星II样本，其中的源较暗，因此不确定度更大。因此，一些离群值偏离了恒星轨迹，并且有相当数量的源位于颜色-颜色空间中预期的白矮星位置，与之相符（$NB395-g)_0 < 0.3$。对于无Gaia测光样本中的暗弱源，离散度明显更大。然而，这种离散度主要由仅有一次观测（曝光时间为 < 20 分钟）的暗星等源（$NB395 > 23$）所主导，这些源约占该样本的34%。对于曝光时间更长或星等更亮的源，其离散度与无Gaia距离样本相当，或仅略大于后者。

我们进一步将我们的样本与 LAMOST DR9 进行交叉匹配，并选取共同源作为 $S/N > 10$ 后续恒星序列拟合的参考样本。参考样本中巨星源和矮星源的颜色-颜色图显示在图14的底行。

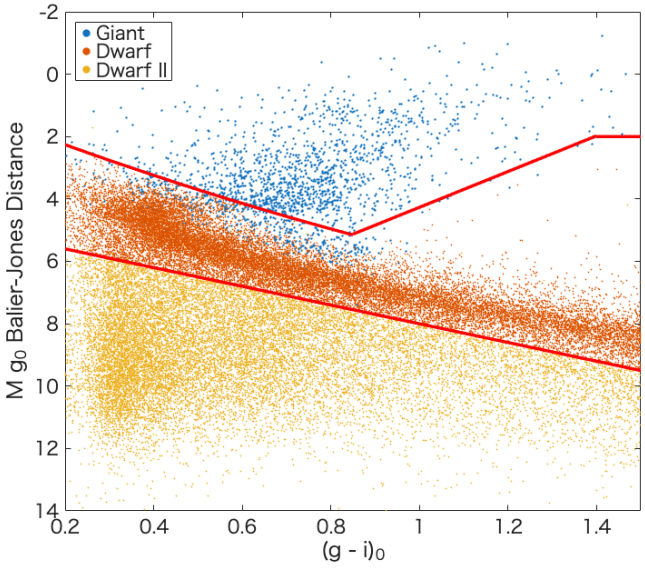


图 13。 ZERO 巡天中恒星的赫罗图。红色曲线 delineate 不同区域之间的边界。

5.2. 物理约束恒星轨迹拟合法

我们采用一种受物理约束的恒星轨迹拟合方法，构建分别针对巨星和矮星、将恒星颜色映射到金属丰度的经验恒星轨迹模型：

$$(NB395-g)_0 = \mathcal{F}((g-i)_0, [\mathrm{Ca/H}]) \quad (3)$$

其中 $\mathcal{F}$ 表示四阶二元多项式。对于矮星样本，由于其颜色范围更宽，恒星轨迹呈现出更复杂、更高阶的结构（Huang 等，2025）。因此，函数 $\mathcal{F}$中（$NB395-g)_0$与（$g-i)_0$之间与金属丰度无关的关系，是通过数值插值而非显式的解析形式推导得到的。

恒星轨迹方法依赖于对 $\mathcal{F}$ 的系数施加强约束。其主要局限在于，基于光谱恒星参数的参考样本大多覆盖富金属丰度区间，而处于关键贫金属区间的参考恒星（例如，[Fe/H] < -2 或 [Fe/H] < -3）极为稀少。因此，该区域的恒星轨迹受到的约束较弱。

物理约束恒星轨迹拟合方法通过同时利用光谱大气参数和恒星大气模型对恒星轨迹施加约束，从而解决这一问题。这种方法在概念上类似于在数据驱动的光谱恒星标签测定中，利用理论光谱梯度作为物理约束（例如 Ting 等，2017；Xiang 等，2019）。在这里，我们利用恒星大气模型来约束测光颜色对金属丰度的响应，而不是直接采用其绝对合成颜色。我们主要依赖于我们的样本与 LAMOST DR9 的 DD-Payne 星表之间的共同源，并采用它们的光谱 [钙/H]值作为参考。

此外，我们使用维也纳原子谱线数据库（VALD；Piskunov 等，1995）和 MARCS 大气模型（Gustafsson 等，2008），通过 turbospectrum（Plez，2012）计算（$g-i)_0$和（$NB395-g)_0$，并在（$g-i)_0$的每个取值处评估 $\partial(NB395-g)/\partial[\ /\ ]^0$钙H。

我们要求，对于 [Ca/H] < -3，$\partial\mathcal{F}/\partial[\ /\ ]^0$钙氢</style}保持一致，从而为贫金属区间内的恒星轨迹模型提供有效约束。具体而言，我们对多项式 $\mathcal{F}$ 关于 [Ca/H]进行解析微分，并在所选恒星大气模型的 $(g-i)_0$ 和[Ca/H] 取值处计算所得导数。随后，将这些导数约束与观测恒星颜色同时进行拟合，以确定多项式系数。因此，光谱参考样本主要决定经验恒星轨迹，而恒星大气模型则约束其

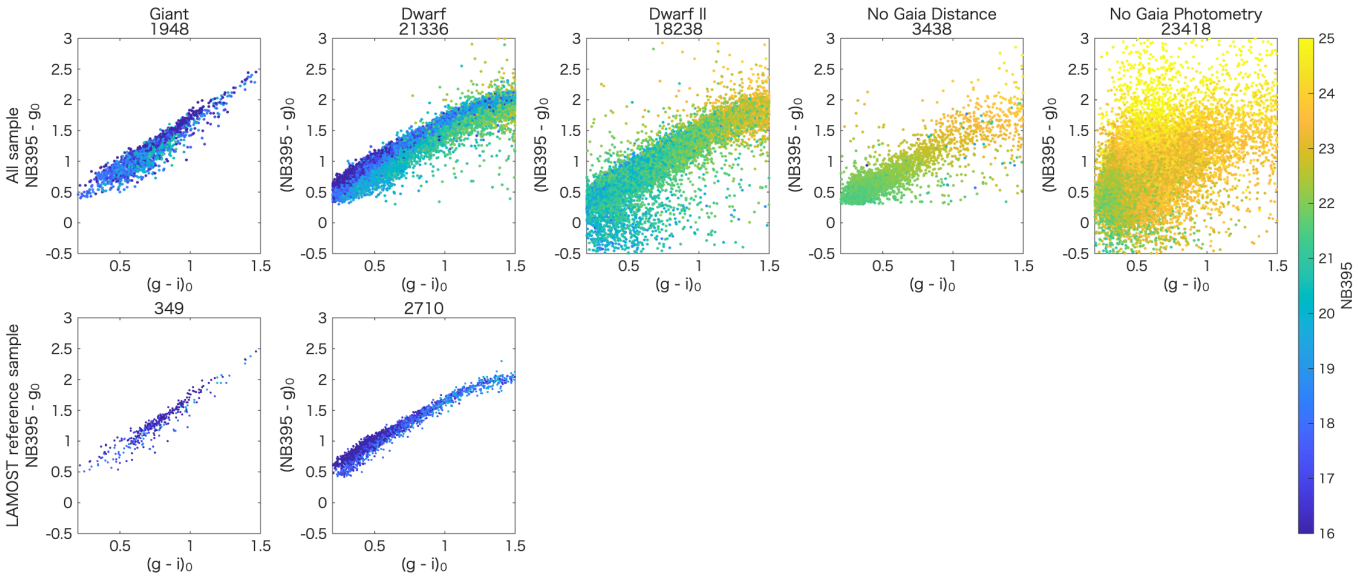


图 14。 五个样本的颜色-颜色图：巨星、矮星、矮星II和距离不可用源。顶行显示每个样本中的所有源，底行则展示相应的参考样本，这些参考样本由与LAMOST交叉匹配的源组成。点的颜色表示 $NB395$星等。每个样本中的源数量标注在各面板顶部。

在贫金属区间内的金属丰度依赖性。这只是纳入物理约束的一种可能方式；另一种方法是将模型预测导数作为约束优化框架中的显式约束。

鉴于 $\log g$ 对 $(NB395-g)_0$ 颜色有显著影响，并且极贫金属恒星的 $\log g$ 与颜色之间呈现出明显的相关性，我们使用默认的太阳标度 PARSEC模型（ [M/H]$= -2$ 和 [M/H] $= -1.4$ 计算了金属丰度为 120亿年的等时线，Bressan等（2012）；Nguyen等（2022），2025年）。MARCS模型网格点仅选取位于这两条等时线所界定区域内的点。

5.3. 结果

巨星和矮星样本的恒星序列模型、其偏导数以及拟合残差分别如图15 和16所示。恒星序列模型与富金属 LAMOST 参考样本一致，并且在[钙/H] < -3处与 MARCS预测相符。

恒星序列残差在[Ca/H] 或 [Ca/Fe]方面均未显示出系统误差。（$NB395 - g$）$_0$ 颜色残差的离散度对于巨星为 0.040 mag，对于矮星为 0.035 mag。我们的 [Ca/H]值与$[\mathrm{Ca/H}]_{\mathrm{LAMOST}}$符合良好，对于巨星和矮星，其总体离散度均为 0.18 dex。这些离散度以及 [Ca/H] 一致性包含了 LAMOST 的测量不确定性，以及由 $\log g$ 变化引起的系统偏差。如图15 和16所示，我们的 [Ca/H]估计值随 $\log g$呈现系统性趋势，尤其是对于巨星。红团簇（RC）星的轨迹不同于典型的红巨星分支星，也显示出系统性的 [Ca/H]偏移（Huang 等, 2025），如图15所示。由于当前的金属丰度估计仅使用一个金属敏感波段，而 Gaia距离对于可靠的光度约束而言不确定性过大，我们不尝试进行额外的 $\log g$ 系统误差校正。相反，我们仅将巨星的 LAMOST $\log g$ 作为辅助信息，用于评估表面重力对离散度的影响。在恒星轨迹拟合中加入 LAMOST $\log g$ 后，与 LAMOST [Ca/H] 的一致性提高到 0.13 dex。

此外，利用 ZERO 巡天、XPSP 和 HSC-SSP 提供的$NB395$、 g和 i 中的测光不确定性，我们通过蒙特卡罗模拟估计了估计的 [Ca/H] 的第16和第84百分位置信区间。 [Ca/H]的不确定度同时取决于三个巡天中的测光不确定性，以及不同颜色和金属丰度下颜色–金属丰度关系的灵敏度。由于这种灵敏度变化很大，推断得到的 [Ca/H]不确定度分布可能高度不对称，尤其是在极贫金属区间和暗星等处，使得不确定度估计颇具挑战性。利用 HSC-SSP 宽带测光，并要求具有（$g - i$）$_0 < 0.8$的源至少包含三次 ZERO观测，对于 $NB395 = 20$的源，典型的 [Ca/H] 不确定度在 [Ca/H] $= -1$处约为 0.08 dex，在 [Ca/H] $= -2$处约为 0.13 dex，在 [Ca/H] $= -3$ 处约为 0.2 dex。对于更暗的源，

$NB395 = 23$，相应的不确定度增加到在 [Ca/H] $= -1$ 处约为 0.4 dex，在 [Ca/H] $= -2$处约为 0.7 dex。

图 17 展示了最终样本的 [Ca/H]分布。对于每个天体，我们分别使用矮星模型和巨星模型估算其金属丰度。若有可靠的距离数据，应根据基于距离的矮星/巨星分类来选择模型。若没有可靠的距离数据，由于矮星和巨星的轨迹主要在红端分化，因此很难将二者区分开来。对于颜色接近主序转折点的天体（$0.4 < (g-i)_0 < 0.6$），矮星和巨星模型给出的金属丰度估计相近，因此可以优先采用巨星模型的结果。若巨星模型的估计值超出有效范围（[Ca/H] < -5 或 [Ca/H] $> +1$），而矮星模型的估计值仍在范围内，则应改用矮星模型的结果。

如图 17所示，巨星样本和矮星样本的峰值位于 [Ca/H] ~ -0.3 ，向低金属丰度端逐渐下降，整体呈近似幂律的变化趋势。相比之下，矮星II、无盖亚距离和无盖亚测光样本的峰值位于 [Ca/H] ~ -1.5，这主要是由筛选标准造成的：这些通常较暗、因而在统计上距离更远的源，更可能是晕星，而晕星通常具有较低的金属丰度。随着测光不确定度增大，分布也会变宽，导致部分源超出测量边界；这是由较大的金属丰度误差造成的观测效应。

6. 总结

本研究介绍了 ZERO 巡天，这是一项窄带测光计划，专门通过沿天球赤道开展对钙敏感的窄带成像来推断恒星金属丰度。该巡天使用安装在斯巴鲁望远镜上的 Hyper Suprime-Cam 仪器所配备的专用 NB395 滤光片，并将这些观测与 Gaia XP 光谱仪（XPSP）和 HSC-SSP Wide 层的宽带测光数据相结合。这个综合数据集能够高效探测并详细表征贫金属恒星族群。

当前的 ZERO 数据集由 21 个 HSC 指向组成，覆盖天球赤道附近约 35 平方度的区域。得益于昴星团望远镜的大孔径和 HSC 的宽视场，该巡天在一小时积分下可达到 NB395 $\sim$ 24.5 等的 10σ 极限深度，使具有典型颜色的贫金属星能够被探测到 $G \sim 22.5$-23.4 等，并大幅拓展了光度金属丰度研究可探测的距离范围，超出现有宽视场巡天的能力。在这样的深度下，红巨星可探测到 ~ 1 百万秒差距，而矮星则可探测到 ~ 100 千秒差距。

我们介绍了基于 Gaia XP 光谱和重新定标的 SDSS Stripe 82 标准星星表对 NB395 波段进行的测光定标。最终定标的典型零点精度约为 0.3%，空间尺度大于 8 角分时，平场精度优于 1%。在典型观测条件下进行三次重复观测时，NB395 $\approx$ 12 的测光精度约为 1.1%，NB395 $\approx$ 20 约为 1.5%，NB395 $\approx$ 24 则约为 10%。

我们进一步发展了一种受物理约束的恒星轨迹拟合方法，利用 NB395 和宽带颜色估计恒星钙丰度。该方法引入了基于模型的约束，对经典恒星轨迹方法进行了扩展，从而稳定了贫金属区间中的经验恒星轨迹。所得测光 [钙/H] 估计值的精度优于 0.18 dex；对于亮于 NB395 $\sim$ 20 的源，根据其相对于 LAM-OST 光谱测量的离散度进行评估，这些估计值覆盖了从富金属恒星到极贫金属区间（$-3 \leq$ [钙/H]$\leq +0.5$）的宽广金属丰度范围。分析表明，与 [Fe/H]相比，NB395 波段能够更直接地追踪 [钙/H] 。

基于这些方法，我们获得了对四个夜晚观测的约一百万个源进行校准后的NB395测量结果，并建立了一个包含 61,845 个源且具有可靠 [钙/H] 估计值的测光金属丰度星表。由于在测光上区分暗弱巨星和矮星本质上存在歧义，因此我们针对每个源分别利用巨星和矮星恒星序列模型推导测光金属丰度估计值，以便灵活开展科学应用。我们计划通过专门的 ZERO 巡天网站（https://sites.google.com/view/zerosurvey/home）公开发布 ZERO 巡天数据，包括本文介绍的源星表；该网站目前正在筹备中。数据将尽早发布，但具体发布日期尚未确定。本研究使用的金属丰度拟合代码也将通过 ZERO 巡天网站提供。此外，该代码还将在 https://doi.org/10.5281/zenodo.24079010上公开发布。

ZERO 巡天为遥远恒星族群的金属丰度研究提供了一套全新且经过良好标定的测光数据集。未来的巡天扩展计划，包括沿 HSC-SSP Wide 层观测更多视场，以扩大研究银河系晕的天空覆盖范围，以及纳入 NB430

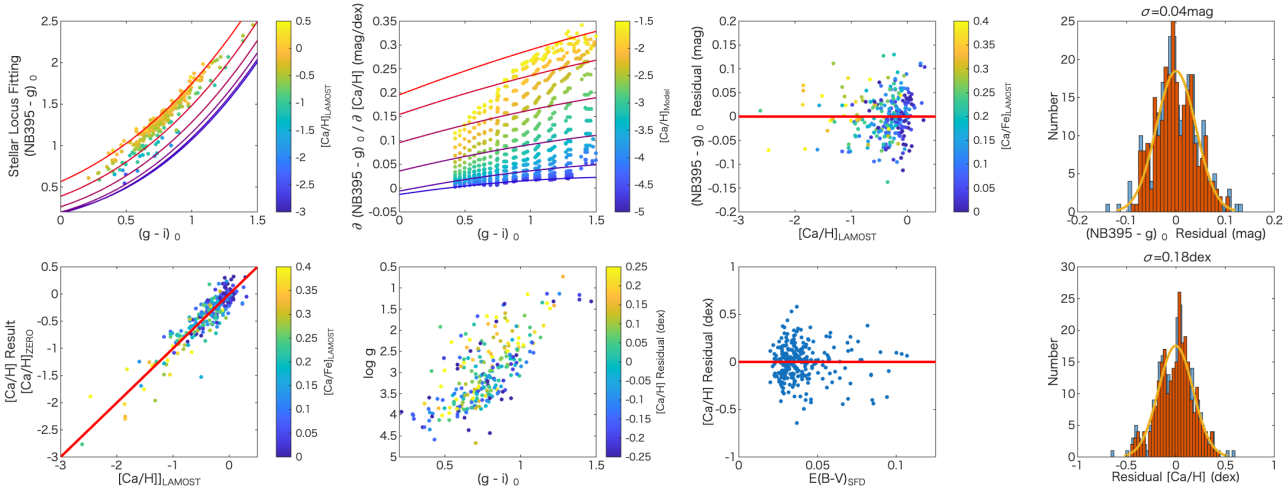


图15。 巨星模型的恒星序列拟合结果及推导出的 [Ca/H] 估计值。顶行展示了恒星序列拟合结果，包括拟合得到的恒星轨迹及其偏导数 $\partial(NB395-g)_0/\partial$[Ca/H]。前两个面板中，从红色到蓝色的曲线分别对应 [Ca/H] $=0$至 -5，间隔为1 dex。第三个面板展示了$(NB395-g)_0$ 残差随 $[\mathrm{Ca/H}]_{\mathrm{LAMOST}}$的分布，第四个面板给出了残差的直方图。底行展示了光度学估计的 [Ca/H] 与LAMOST测量值之间的比较。从左到右，各面板依次展示估计的 [Ca/H] 与LAMOST [Ca/H], 的直接比较、 [Ca/H] 残差在赫罗图中的分布、其随 $E(B-V)$的变化，以及相应的直方图。每个分布的离散度标注在面板顶部，并根据应用 3σ 截断后的红色柱状条计算得到。

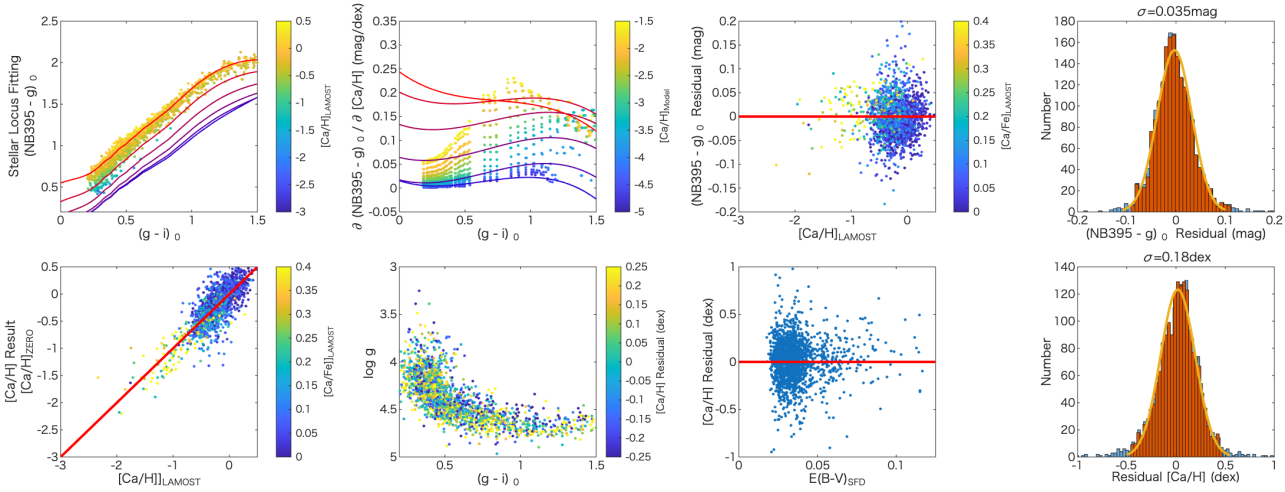


图16。 与图 15相同，但针对矮星系　　样本。

滤光片，以探测 CH吸收特征并进一步提高对碳丰度的灵敏度，将进一步增强其识别化学特殊星的能力并研究银河系晕的结构和化学演化。

附录

A. NB395 的性质

如第5节所述，以Ca H&K线为目标的窄带测光更适合追踪[Ca/H] ，而不是 [Fe/H]。然而，NB395滤光片还涵盖了其他元素的吸收线。此外，即使是 Ca H&K特征本身，也不仅对钙丰度敏感，还会通过连续不透明度和阻尼项受到总体金属丰度的影响。

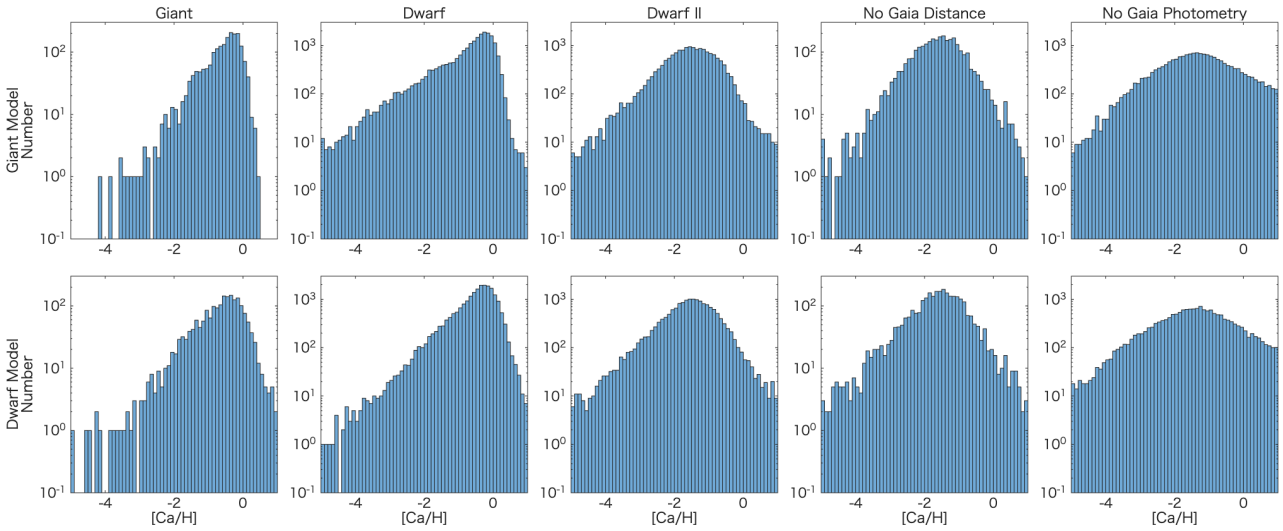


图17。 五个样本的估计 [Ca/H] 分布：巨星、矮星、矮星II、无盖亚距离和无盖亚测光源。

因此，NB395测光，或等价的（$NB395-g$）$_0$ 色，可能反映了钙和总体金属丰度效应的综合影响，其中钙的影响占主导。本节使用 MARCS模型，对（$NB395-g$）$_0$色中直接编码的化学丰度信息进行初步研究。合成计算采用以下丰度模式： α元素（O、Ne、Mg、Si、S、Ar、Ti）在 [Fe/H] <-1时遵循 $[\alpha/\mathrm{Fe}]=+0.4$ ，在 $-1<$ [Fe/H] <0时遵循$[\alpha/\mathrm{Fe}]=-0.4\times$ [Fe/H] ，而在 [Fe/H] >0时遵循$[\alpha/\mathrm{Fe}]=0$ ；所有其他元素则假定为 [X/Fe] $=0$。这一模式近似遵循银河系恒星族群中观测到的典型化学演化趋势。

基于 [Ca/H]和 [M/H]的颜色–颜色图如图 A1所示。为尽量减小表面重力的影响，我们采用log $g=2$ 和 log $g=4.5$的MARCS模型点，分别代表巨星和矮星。我们发现，在$-1\lesssim$ [M/H] $\lesssim-0.5$范围内，具有相同 [M/H]的模型点在颜色–颜色平面上大多重合，而使用 [Ca/H] 时则不存在这种简并现象。这一行为表明，在混合盘与晕恒星族群中， [Ca/Fe] 的变化可能会对从此类颜色–颜色图中推断的 [M/H]（MARCS模型提供的金属丰度参数，与 [Fe/H]近似等价）造成显著偏差。

然而， [Ca/H]并不是完美的丰度指标。我们考察了一个具有代表性的巨星案例，其 log $g=2$、 $T_{\mathrm{eff}}=5500$ K $((g-i)_0\sim0.5-0.6)$ 和 [Ca/Fe] ≥0如图A2所示。在固定参考颜色（$g-i$）$_0$, 下，丰度敏感颜色（$NB395-g$）$_0$ 不会随 [M/H]呈单调变化并且会受到 [Ca/Fe] 变化的强烈影响。相比之下，($NB395-g)_0$ 对 [Ca/H]，呈现出近似单调的依赖关系，但仍对 [Ca/Fe]具有较弱的敏感性。因此，我们考虑采用如下形式的复合化学丰度指标：[M/H] $+k\times$ [Ca/Fe] （等价表达式为 $k\times$[Ca/H] $+(1-k)\times$ [M/H]）。

我们发现， k 的特征值会随条件不同而变化。对于当前情形，在贫金属区间， k 约为 0.6–0.9。当 $k=1$ 时，这一复合指标会简化为 [钙/H]。然而，在富金属丰度区间， k 会大于 1。这是因为，在当前模型所采用的丰度模式假设下， α元素丰度的变化会影响该指标的响应，因此被纳入推断得到的 k值中，导致其表观高估。因此， k 的变化反映出，当 $(NB395-g)_0$ 用作金属丰度指标时，它仍会受到多种元素丰度的影响，不过钙仍是主要贡献因素。

B. RS82标准恒星的经验关系

图 B1展示了使用 LSBoost 回归，在第4.3节所述的迭代拟合过程之后得到的最终经验关系$NB395=f(u-g,g-i,g)$。该关系展示的是代表性星等 $g=19$。

C. 空间结构的变化

图 C1 展示了四个观测夜晚中每晚的空间结构的三个示例。整个观测夜晚期间，空间结构仅逐渐演化

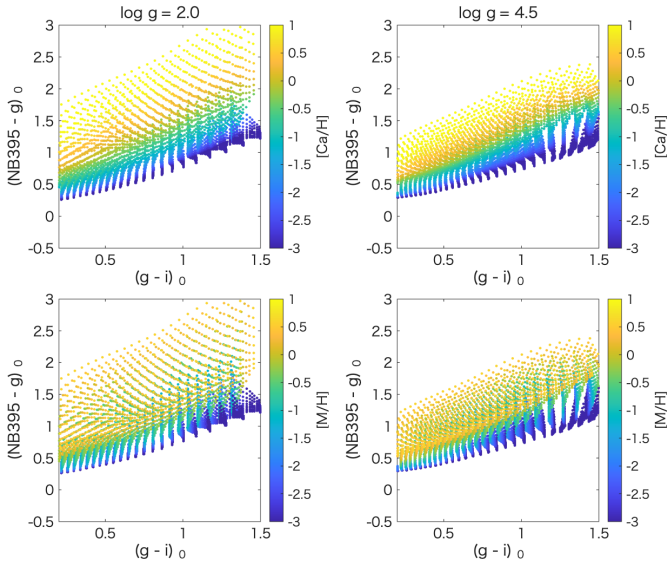


图 A1. 颜色-颜色图展示了基于 NB395 的颜色对 [钙/H] 和 [M/H]的敏感性。左列给出了代表巨星的 MARCS 模型预测（$\log g = 2$），右列则展示了代表矮星的模型（$\log g = 4.5$）。

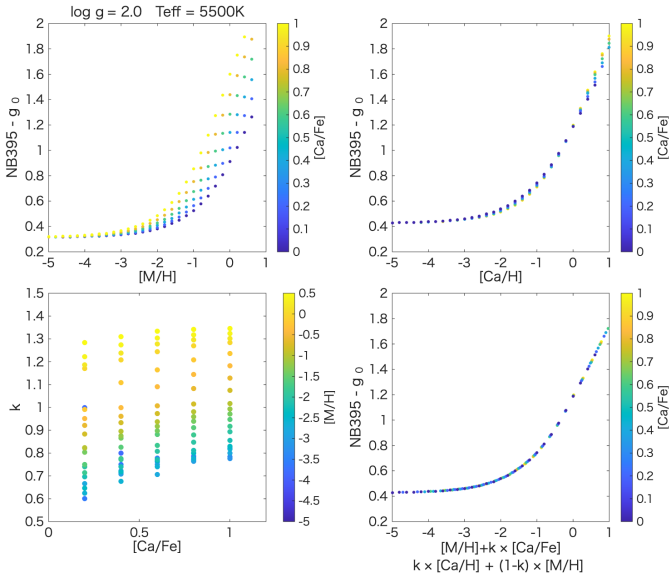


图 A2. 在一个代表性案例中， [Ca/Fe] 和 [M/H] 对（$NB395 - g$）$_0$ 颜色的影响。

九月3日、九月4日和十月2日。相比之下，十月1日出现了更快速的变化，当时的观测条件较差。除单个观测夜晚内的这些变化外，十月观测到的空间结构也与九月的空间结构存在明显差异。这些结果表明，空间结构既会在不同观测时段之间发生变化，也会

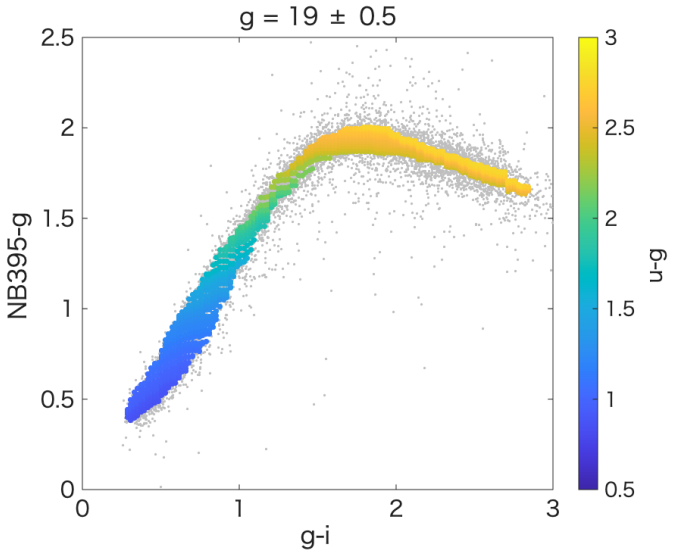


图 B1. 使用 LSBoost 回归得到的最终经验关系$NB395 = f(u - g, g - i, g)$，展示了代表性星等 $g = 19$ 下的结果。灰色点表示训练样本，彩色点表示 LSBoost 预测，并按 $u - g$进行颜色编码。

在较短的时间尺度上，这促使我们对每次观测分别确定空间校正。

致谢 B.H. 感谢 Haining Li 教授（李海宁）促成此次联系，使访问与合作得以实现。B.H. 感谢中国国家自然科学基金委员会（NSFC）项目（编号：124B2055）、中国国家重点研发计划项目（编号：2024YFA1611601），以及中国博士后科学基金（CPSF）博士后资助项目（编号：GZB20260765）提供的支持。N.T. 感谢日本学术振兴会科研费项目（编号：23H04894、24K00682、25K24630、25K01046、25H02196、25H00674 和 26K21726）提供的支持。M.C. 感谢日本学术振兴会科研费项目（编号：JP17H01101、JP24K00669 和 JP25K24687）提供的支持。他特别感谢 JP17H01101 项目资助 HSC/NB395 滤镜。H.Y. 感谢中国国家自然科学基金委员会通过项目（编号：12222301 和 12173007）提供的支持，以及中国国家重点研发计划项目（编号：2024YFA1611901）提供的支持。K.X. 感谢中国国家自然科学基金委员会项目（编号：12403024）、中国博士后科学基金项目（编号：GZB20240731）、国家天文数据中心青年数据科学家项目，以及中国博士后科学基金项目（编号：2023M743447）提供的支持。R.F.G.W. 感谢获得日本学术振兴会邀请研究员奖学金（编号：S26010），这项奖学金

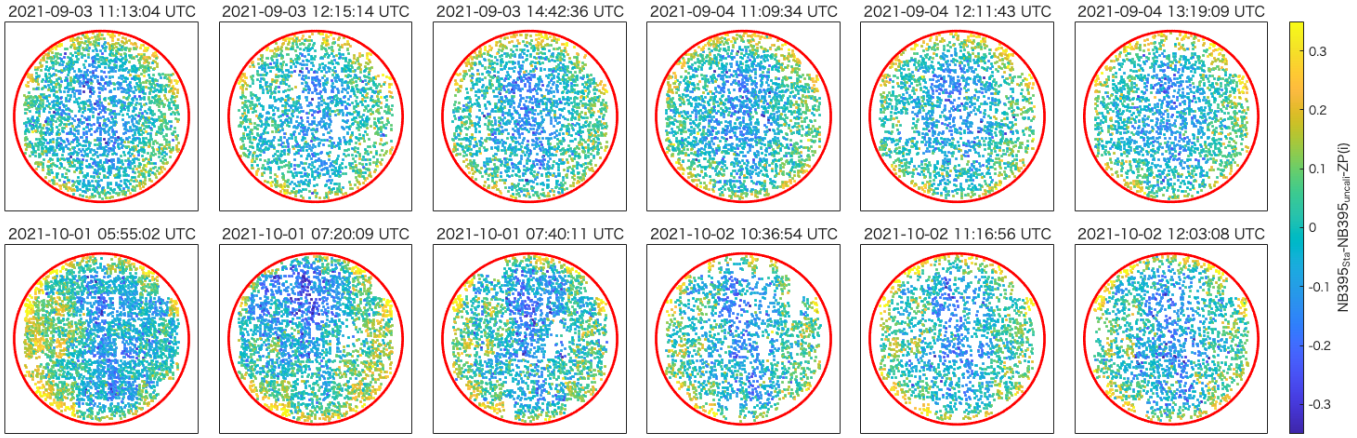


图 C1。 四个观测夜晚的空间结构示例。每个面板的 X–Y 空间布局与左上面板中的相同 图6的面板。

促成了她参与此次合作。她感谢 Schmidt Sciences 提供的支持。E.N.K. 和 M.C. 衷心感谢圣母大学全球亚洲研究合作资助提供的支持。T.I. 获得了日本千叶大学 IAAR 研究支持计划的资助。Y.S. 感谢综合研究大学院大学（SOKENDAI）的数据科学家型研究者培训项目提供的支持。

超广角主焦相机（HSC）合作组织包括日本和台湾的天文学界以及普林斯顿大学。HSC 的仪器和软件由日本国立天文台（NAOJ）、Kavli 宇宙物理与数学研究所（Kavli IPMU）、东京大学、高能加速器研究机构（KEK）、台湾中央研究院天文及天体物理研究所（ASIAA）以及普林斯顿大学开发。经费由日本内阁府的 FIRST 计划、文部科学省（MEXT）、日本学术振兴会（JSPS）、日本科学技术振兴机构（JST）、东丽科学基金会、NAOJ、Kavli IPMU、KEK、ASIAA 以及普林斯顿大学提供。

本文使用了为大型综合巡天望远镜开发的软件。我们感谢 LSST 项目将其代码作为自由软件公开，网址为 http://dm.lsst.org。

本文部分基于在斯巴鲁望远镜收集的数据，以及从由日本国立天文台的斯巴鲁望远镜和天文学数据中心（ADC）运营的 HSC 数据档案系统中获取的数据。数据分析的部分工作是在计算天体物理中心（CfCA）、日本国立天文台的合作下完成的。斯巴鲁望远镜对能够从具有夏威夷文化、历史和自然意义的茂纳凯亚观测宇宙，深感荣幸并心怀感激。

本研究使用了欧洲空间局（ESA）任务 *Gaia*（https://www.cosmos.esa.int/gaia）提供的数据，这些数据由 Gaia 数据处理与分析联盟（DPAC，https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium）处理。DPAC 的经费由各国机构提供，尤其是参与盖亚多边协议的机构。

本研究使用了 LAMOST（大天区面积多目标光纤光谱望远镜，又称郭守敬望远镜）（https://cstr.cn/31118.02.LAMOST）提供的数据。LAMOST 是中国的一项国家重大科技基础设施，由中国科学院国家天文台运行。

Pan-STARRS1巡天（PS1）和PS1公共科学档案得以建立，离不开以下机构的资助：天文学研究所、夏威夷大学、Pan-STARRS项目办公室、马克斯·普朗克学会及其参与机构、海德堡的马克斯·普朗克天文学研究所和加兴的马克斯·普朗克地外物理研究所、约翰斯·霍普金斯大学、杜伦大学、爱丁堡大学、贝尔法斯特女王大学、哈佛-史密森天体物理中心、拉斯昆布雷斯天文台全球望远镜网络有限公司、台湾国立中央大学、空间望远镜科学研究所、美国国家航空航天局通过其科学任务理事会下属的行星科学部颁发的第NNX08AR22G号资助，以及美国国家科学基金会第

AST-1238877号资助、马里兰大学、厄特沃什·罗兰大学（ELTE）、洛斯阿拉莫斯国家实验室和戈登与贝蒂·摩尔基金会。

参考文献

Abel, T., Bryan, G. L., & Norman, M. L. 2002年，《科学》，295，5552，93。数字对象唯一标识符:10.1126/science.1063991 Aihara, H., Arimoto, N., Armstrong, R., 等 2018年，《日本天文学会出版物》，70，S4。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psx066 Aihara, H., Armstrong, R., Bickerton, S., 等 2018年，《日本天文学会出版物》，70，S8。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psx081 Aihara, H., AlSayyad, Y., Ando, M., 等 2019年，《日本天文学会出版物》，71，6，114。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psz103 Aihara, H., AlSayyad, Y., Ando, M., 等 2022年，《日本天文学会出版物》，74，2，247。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psab122 Alam, S., Albareti, F. D., Allende Prieto, C., 等 2015，《天体物理学杂志增刊》，219，1，12。数字对象唯一标识符:10.1088/0067-0049/219/1/12 Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., 等 2021，《天文学杂志》，161，3，147。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-3881/abd806 Beers, T. C. & Christlieb, N. 2005，《天文学与天体物理学年评》，43，1，531。数字对象唯一标识符:10.1146/annurev.astro.42.053102.134057 Beers, T. C., Preston, G. W., & Shectman, S. A. 1992，《天文学杂志》，103，1987。数字对象唯一标识符:10.1086/116207 Belokurov, V., Erkal, D., Evans, N. W., 等 2018，《皇家天文学会月刊》，478，1，611。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/sty982 Benitez, N., Dupke, R., Moles, M., 等 2014年，arXiv:1403.5237。数字对象唯一标识符:10.48550/arXiv.1403.5237 Bonifacio, P., Caffau, E., Fran˛cois, P., 等 2025年，《天文学与天体物理学评论》，33，1，2。数字对象唯一标识符:10.1007/s00159-025-00159-2 Bosch, J., Armstrong, R., Bickerton, S., 等 2018年，《日本天文学会出版物》，70，S5。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psx080 Bosch, J., AlSayyad, Y., Armstrong, R., 等 2019，《第二十七届天文数据分析软件与系统会议》，523，521。数字对象唯一标识符:10.48550/arXiv.1812.03248 Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., 等 2012，《皇家天文学会月刊》，427，1，127。数字对象唯一标识符:10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x Bromm, V.,Kudritzki, R.P.,& Loeb,A.2001年，《天体物理学杂志》，552，2，464。数字对象唯一标识符:10.1086/320549 Bromm, V., Coppi, P. S., & Larson, R. B. 2002，《天体物理学杂志》，564，1，23。数字对象唯一标识符:10.1086/323947 Bromm, V. & Larson, R. B. 2004，《天文学与天体物理学年评》，42，1，79。数字对象唯一标识符:10.1146/annurev.astro.42.053102.134034 Carlsten, S. G., Strauss, M. A., Lupton, R. H., 等 2018年，《皇家天文学会月刊》，479，2，1491。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/sty1636 Carrasco, J. M., Weiler, M., Jordi, C., 等 2021，《天文学与天体物理学》，652，A86。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202141249 Cenarro, A. J., Moles, M., Crist´obal-Hornillos, D., 等 2019年，《天文学与天体物理学》，622，A176。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/201833036 Chambers, K. C., Magnier, E. A., Metcalfe, N. 等 2016，arXiv:1612.05560。数字对象唯一标识符:10.48550/arXiv.1612.05560 Chen, Y., Mo, H. J., & Wang, K. 2023，《皇家天文学会月刊》，526，2，2542。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/stad2866 Chiaki, G., Tominaga, N., & Nozawa, T. 2017，《皇家天文学会月刊》，472，1，L115。数字对象唯一标识符:10.1093/mnrasl/slx163 Chiaki, G., Susa, H., & Hirano, S. 2018，《皇家天文学会月刊》，475，4，4378。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/sty040 Chiba, M., Wyse, R. F. G., Kirby, E. N. 等 2026，arXiv:2604.09875。数字对象唯一标识符:10.48550/arXiv.2604.09875 Chiti, A., Frebel, A., Mardini, M. K. 等 2021，《天体物理学杂志增刊》，254，2，31。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4365/abf73d Clark, P. C., Glover, S. C. O., Smith, R. J. 等 2011，《科学》，331，6020，1040。数字对象唯一标识符:10.1126/science.1198027 Clark, P. C., Glover, S. C. O., Klessen, R. S. 等 2011，《天体物理学杂志》，727，2，110。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/727/2/110 Chon, S., Omukai, K., & Schneider, R. 2021，《皇家天文学会月刊》，508，3，4175。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/stab2497 Christlieb, N., Sch¨orck, T., Frebel, A. 等 2008，《天文学与天体物理学》，484，3，721。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361:20078748 De Angeli, F., Weiler, M., Montegriffo, P. 等 2023，《天文学与天体物理学》，674，A2。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202243680 Deng, L.-C., Newberg, H. J., Liu, C. 等 2012，《天文学与天体物理学研究》，12，7，735。数字对象唯一标识符:10.1088/1674-4527/12/7/003 Deason, A. J. & Belokurov, V. 2024，《新天文学评论》，99，101706。数字对象唯一标识符:10.1016/j.newar.2024.101706 Fan, Z., Zhao, G., Wang, W. 等 2023，《天体物理学杂志增刊》，268，1，9。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4365/ace04a Frebel, A. & Norris, J. E. 2015，《天文学与天体物理学年评》，53，631。数字对象唯一标识符:10.1146/annurev-astro-082214-122423 Fuller, T. M. & Couchman, H. M. P. 2000，《天体物理学杂志》，544，1，6。数字对象唯一标识符:10.1086/317187 Gaia合作组, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J. 等 2016，《天文学与天体物理学》，595，A1。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/201629272 Gaia合作组, Vallenari, A., Brown, A. G. A. 等 2023，《天文学与天体物理学》，674，A1。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202243940 Gaia合作组, Montegriffo, P., Bellazzini, M. 等 2023，《天文学与天体物理学》，674，A33。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202243709 Greif, T. H., Johnson, J. L., Klessen, R. S. 等 2008，《皇家天文学会月刊》，387，3，1021。数字对象唯一标识符:10.1111/j.1365-2966.2008.13326.x Greif,T. H., Glover, S.C. O., Bromm, V.,等 2010，《天体物理学杂志》，716，1，510。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/716/1/510

Greif, T. H., Bromm, V., Clark,P. C. 等 2012, 《皇家天文学会月刊》, 424, 1, 399。数字对象唯一标识符: 10.1111/j.1365-2966.2012.21212.x Griffen, B. F., Dooley, G. A., Ji, A. P. 等 2018, 《皇家天文学会月刊》, 474, 1, 443。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/stx2749 Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K. 等 2008, 《天文学与天体物理学》, 486, 3, 951。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361:200809724 Haiman, Z., Thoul, A. A., & Loeb, A. 1996, 《天体物理学杂志》, 464, 523。数字对象唯一标识符:10.1086/177343 Heger, A. & Woosley, S. E. 2010, 《天体物理学杂志》, 724, 1, 341。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/724/1/341 Helmi, A., Babusiaux, C., Koppelman, H. H. 等 2018, 《自然》, 563, 7729, 85。数字对象唯一标识符:10.1038/s41586-018-0625-x Helmi, A. 2020, 《天文学与天体物理学年评》, 58, 205。数字对象唯一标识符:10.1146/annurev-astro-032620-021917 Hirano, S., Hosokawa, T., Yoshida, N. 等 2014, 《天体物理学杂志》, 781, 2, 60。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/781/2/60 Hirano, S., Hosokawa, T., Yoshida, N. 等 2015, 《皇家天文学会月刊》, 448, 1, 568。数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/stv044 Hong, J., Kirby, E. N., Tang, T. M. 等 2025, 《天体物理学杂志》, 989, 48。数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4357/ade679 Hosokawa, T., Omukai, K., Yoshida, N. 等 2011, 《科学》, 334, 6060, 1250。数字对象唯一标识符:10.1126/science.1207433 Huang, B. & Yuan, H. 2022, 《天体物理学杂志增刊》, 259, 1, 26。数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4365/ac470d Huang, Y., Beers, T. C., Wolf, C. 等 2022, 《天体物理学杂志》, 925, 2, 164。数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4357/ac21cb Huang, B., Yuan, H., Xiang, M. 等 2024, 《天体物理学杂志增刊》, 271, 1, 13。数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4365/ad18b1 Huang, B., Yuan, H., Xu, S. 等 2025, 《天体物理学杂志增刊》, 277, 1, 7。数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-4365/ada9e6 Ishigaki, M. N., Tominaga, N., Kobayashi, C. 等 2018, 《天体物理学杂志》, 857, 1, 46。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4357/aab3de Ishiyama, T., Sudo, K., Yokoi, S. 等 2016, 《天体物理学杂志》, 826, 1, 9。数字对象唯一标识符:10.3847/0004-637X/826/1/9 Ivezi´c, ˇZ., Smith, J. A., Miknaitis, G. 等 2007, 《天文学杂志》, 134, 3, 973。数字对象唯一标识符:10.1086/519976 Ivezic, Z., Axelrod, T., Brandt, W. N. 等 2008, 《塞尔维亚天文学杂志》, 176, 1。数字对象唯一标识符 : 10.2298/SAJ0876001I Juri´c, M., Kantor, J., Lim, K.-T. 等 2017, 第二十五届天文数据分析软件与系统会议, 512, 279。数字对象唯一标识符:10.48550/arXiv.1512.07914 Kawanomoto, S., Uraguchi, F., Komiyama, Y. 等 2018, 《日本天文学会出版物》, 70, 4, 66。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psy056 Klessen, R. S. & Glover, S. C. O. 2023, 《天文学与天体物理学年评》, 61, 65。数字对象唯一标识符:10.1146/annurev-astro-071221-053453 Kobayashi, C., Umeda, H., Nomoto, K. 等 2006, 《天体物理学杂志》, 653, 2, 1145。数字对象唯一标识符:10.1086/508914 Lee, Y. S., Beers, T. C., Sivarani, T. 等 2008, 《天文学杂志》, 136, 5, 2022。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-6256/136/5/2022 Lee, Y. S., Beers, T. C., Sivarani, T. 等. 2008年, 《天文学杂志》, 136, 5, 2050。数字对象唯一标识符: 10.1088/0004-6256/136/5/2050 Liu, X.-W., Yuan, H.-B., Huo, Z.-Y. 等. 2014年, 《为Gaia和LAMOST营造背景》, 298, 310。数字对象唯一标识符:10.1017/S1743921313006510 Lu, X., Yuan, H., Xu, S. 等. 2024年, 《天体物理学杂志增刊》, 271, 1, 26。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4365/ad1eea Magnier, E. A., Schlafly, E., Finkbeiner, D. 等. 2013年, 《天体物理学杂志增刊》, 205, 2, 20。数字对象唯一标识符:10.1088/0067-0049/205/2/20 Majewski, S. R., Schiavon, R. P., Frinchaboy, P. M. 等. 2017, 《天文学杂志》, 154, 3, 94。数字对象唯一标识符: 10.3847/1538-3881/aa784d Martin, N. F., Venn, K.A., Aguado,D. S.等.2022年, 《自然》, 601, 45。数字对象唯一标识符:10.1038/s41586-021-04162-2 Martin, N. F., Starkenburg, E., Yuan, Z. 等. 2024年, 《天文学与天体物理学》, 692, A115。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202347633 Mendes de Oliveira, C., Ribeiro, T., Schoenell, W. 等. 2019年, 《皇家天文学会月刊》, 489, 1, 241。数字对象唯一标识符: 10.1093/mnras/stz1985 M´esz´aros, S., Bohlin, R., Allende Prieto, C. 等. 2024年, 《天文学与天体物理学》, 688, A197。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202449306 Miyazaki, S., Komiyama, Y., Kawanomoto, S. 等. 2018, 《日本天文学会出版物》, 70, S1。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psx063 Montegriffo, P., DeAngeli, F., Andrae, R. 等. 2023, 《天文学与天体物理学》, 674, A3。数字对象唯一标识符: 10.1051/0004-6361/202243880 Nguyen, C. T.,Costa, G., Girardi, L.等.2022, 《天文学与天体物理学》, 665, A126。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202244166 Nguyen, C. T.,Costa, G., Bressan, A. 等. 2025年, 《天文学与天体物理学》, 701, A258。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202556005 Nishi, R. & Susa, H. 1999年, 《天体物理学杂志快报》, 523, 2, L103。数字对象唯一标识符:10.1086/312277 Nomoto, K., Kobayashi, C., & Tominaga, N. 2013年, 《天文学与天体物理学年评》, 51, 1, 457。数字对象唯一标识符: 10.1146/annurev-astro-082812-140956 Norris, J. E., Yong, D., Bessell, M. S. 等. 2013年, 《天体物理学杂志》, 762, 1, 28。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/762/1/28 Ogami, I., Ishigaki, M. N., Kuzma,P. B. 等. 2026年, arXiv:2602.03014。数字对象唯一标识符:10.48550/arXiv.2602.03014 Okada, H., Iwasaki, T., Tominaga,N. 等. 2026年, arXiv:2608.27220。数字对象唯一标识符:10.48550/arXiv.2608.27220, 《日本天文学会出版物》, 印刷中。Oke, J. B. & Gunn, J. E. 1983年, 《天体物理学杂志》, 266, 713。数字对象唯一标识符:10.1086/160817 Omukai, K. & Nishi, R. 1998年, 《天体物理学杂志》, 508, 1, 141。数字对象唯一标识符:10.1086/306395 Omukai, K. & Palla, F. 2001, 《天体物理学杂志快报》, 561, 1, L55。数字对象唯一标识符:10.1086/324410 Omukai, K. & Palla, F. 2003, 《天体物理学杂志》, 589, 2, 677。数字对象唯一标识符:10.1086/374810 Onken, C. A.,Wolf, C., Bessell, M. S. 等. 2019年, 《太平洋天文学会出版物》, 36, e033。数字对象唯一标识符: 10.1017/pasa.2019.27

Palla, F., Salpeter, E. E., & Stahler, S. W. 1983年，《天体物理学杂志》，271，632。数字对象唯一标识符:10.1086/161231 Piskunov, N. E., Kupka, F.,Ryabchikova, T. A. 等. 1995，《天文学与天体物理学增刊》，112，525。Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y. 等. 2020，《天文学与天体物理学》，641，A6。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/201833910 Plez, B. 2012，《天体物理学源代码库》。ascl:1205.004 Ricotti, M. 2010，《天文学进展》，2010，271592。数字对象唯一标识符:10.1155/2010/271592 Rockosi, C. M., Lee, Y.S., Morrison, H. L. 等. 2022年，《天体物理学杂志增刊》，259，2，60。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4365/ac5323 Schlafly, E. F., Finkbeiner, D.P., Juri´c, M. 等. 2012，《天体物理学杂志》，756，2，158。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/756/2/158 Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998年，《天体物理学杂志》，500，2，525。数字对象唯一标识符:10.1086/305772 Schneider, R., Ferrara,A., Natarajan, P. 等. 2002，《天体物理学杂志》，571，1，30。数字对象唯一标识符:10.1086/339917 Simon, J. D. 2019年，《天文学与天体物理学年评》，57，375。数字对象唯一标识符:10.1146/annurev-astro-091918-104453 Smith, R. J., Glover, S. C. O., Clark, P. C. 等. 2011，《皇家天文学会月刊》，414，4，3633。数字对象唯一标识符:10.1111/j.1365-2966.2011.18659.x Smolinski, J. P., Lee, Y. S., Beers, T. C. 等. 2011，《天文学杂志》，141，3，89。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-6256/141/3/89 Starkenburg, E., Martin,N., Youakim, K. 等. 2017，《皇家天文学会月刊》，471，3，2587。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/stx1068 Steigman, G. 2007，《AnnualReview of Nuclear and Particle Science》，57，1，463。数字对象唯一标识符:10.1146/annurev.nucl.56.080805.140437 Susa, H. 2013，《天体物理学杂志》，773，2，185。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/773/2/185 Susa, H., Hasegawa,K., & Tominaga, N. 2014年，《天体物理学杂志》，792，1，32。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/792/1/32 Suzuki, Y., Chiba, M., Komiyama, Y. 等. 2024年，《日本天文学会出版物》，76，205。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psae003 Takada, M., Ellis, R. S., Chiba, M. 等. 2014，《日本天文学会出版物》，66，R1。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/pst019 Tamura, N., Takato, N., Shimono, A. 等. 2016，SPIE会议论文集，9908，99081M。数字对象唯一标识符:10.1117/12.2232103 Tanaka, M., Coupon,J., Hsieh, B.-C. 等. 2018，《日本天文学会出版物》，70，S9。数字对象唯一标识符:10.1093/pasj/psx077 Tegmark, M., Silk, J., Rees, M. J. 等. 1997，《天体物理学杂志》，474，1。数字对象唯一标识符:10.1086/303434 Thanjavur, K., Ivezi´c, ˇZ., Allam,S. S. 等. 2021，《皇家天文学会月刊》，505，4，5941。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/stab1452 Ting, Y.-S., Rix, H.-W., Conroy, C., 等，2017，《天体物理学杂志快报》，849，1，L9。数字对象唯一标识符:10.3847/2041-8213/aa921c Tolstoy, E., Hill, V., & Tosi, M. 2009，《天文学与天体物理学年评》，47，1，371。数字对象唯一标识符:10.1146/annurev-astro-082708-101650 Tominaga, N., Umeda, H., & Nomoto, K. 2007，《天体物理学杂志》，660，1，516。数字对象唯一标识符:10.1086/513063 Tonry, J. L., Stubbs, C. W., Lykke, K. R., 等，2012，《天体物理学杂志》，750，2，99。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/750/2/99 Wise, J. H. & Abel, T. 2007，《天体物理学杂志》，665，2，899。数字对象唯一标识符:10.1086/520036 Wise, J. H. & Abel, T. 2008，《天体物理学杂志》，685，1，40。数字对象唯一标识符:10.1086/590417 Wolf, C., Onken, C. A., Luvaul, L. C., 等，2018，《太平洋天文学会出版物》，35，e010。数字对象唯一标识符:10.1017/pasa.2018.5 Wyse, R. F. G. 1998年，《恒星初始质量函数》（第38届赫斯特蒙苏会议），142，89。Xiang, M., Ting, Y.-S., Rix, H.-W., 等，2019年，《天体物理学杂志增刊》，245，2，34。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4365/ab5364 Xiao, K., Yuan, H., L´opez-Sanjuan, C., 等，2023，《天体物理学杂志增刊》，269，2，58。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4365/ad0645 Xiao, K., Huang, Y., Yuan,H., 等，2026，《自然·科学数据》，13，1，265。数字对象唯一标识符:10.1038/s41597-026-06590-z Yang, L., Yuan, H., Xiang, M., 等，2022，《天文学与天体物理学》，659，A181。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202142724 Yanny, B., Rockosi, C., Newberg, H. J., 等，2009，《天文学杂志》，137，5，4377。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-6256/137/5/4377 Ye, X., Wu, W., Allende Prieto, C., 等，2025，《天文学与天体物理学》，695，A75。数字对象唯一标识符:10.1051/0004-6361/202452871 York, D. G., Adelman, J., Anderson, J. E., 等，2000，《天文学杂志》，120，3，1579。数字对象唯一标识符:10.1086/301513 Yoshida, N., Abel, T., Hernquist, L., 等，2003，《天体物理学杂志》，592，2，645。数字对象唯一标识符:10.1086/375810 Yoshida, N., Omukai, K., Hernquist, L., 等，2006，《天体物理学杂志》，652，1，6。数字对象唯一标识符:10.1086/507978 Yoshida, N., Omukai, K., & Hernquist, L. 2008，《科学》，321，5889，669。数字对象唯一标识符:10.1126/science.1160259 Youakim, K., Starkenburg, E., Aguado, D. S., 等，2017，《皇家天文学会月刊》，472，3，2963。数字对象唯一标识符:10.1093/mnras/stx2005 Yuan, H., Liu, X., Xiang, M., 等，2015，《天体物理学杂志》，799，2，133。数字对象唯一标识符:10.1088/0004-637X/799/2/133 Zhang, R., Yuan, H., Huang, B., 等，2024年，《天体物理学杂志》，971，2，127。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4357/ad613e Zhang, M., Xiang, M., Ting, Y.-S., 等，2025年，《天体物理学杂志增刊》，279，1，5。数字对象唯一标识符:10.3847/1538-4365/add016 Zheng, J., Zhao, G., Wang, W., 等，2018，《天文学与天体物理学研究》，18，12，147。数字对象唯一标识符:10.1088/1674-4527/18/12/147