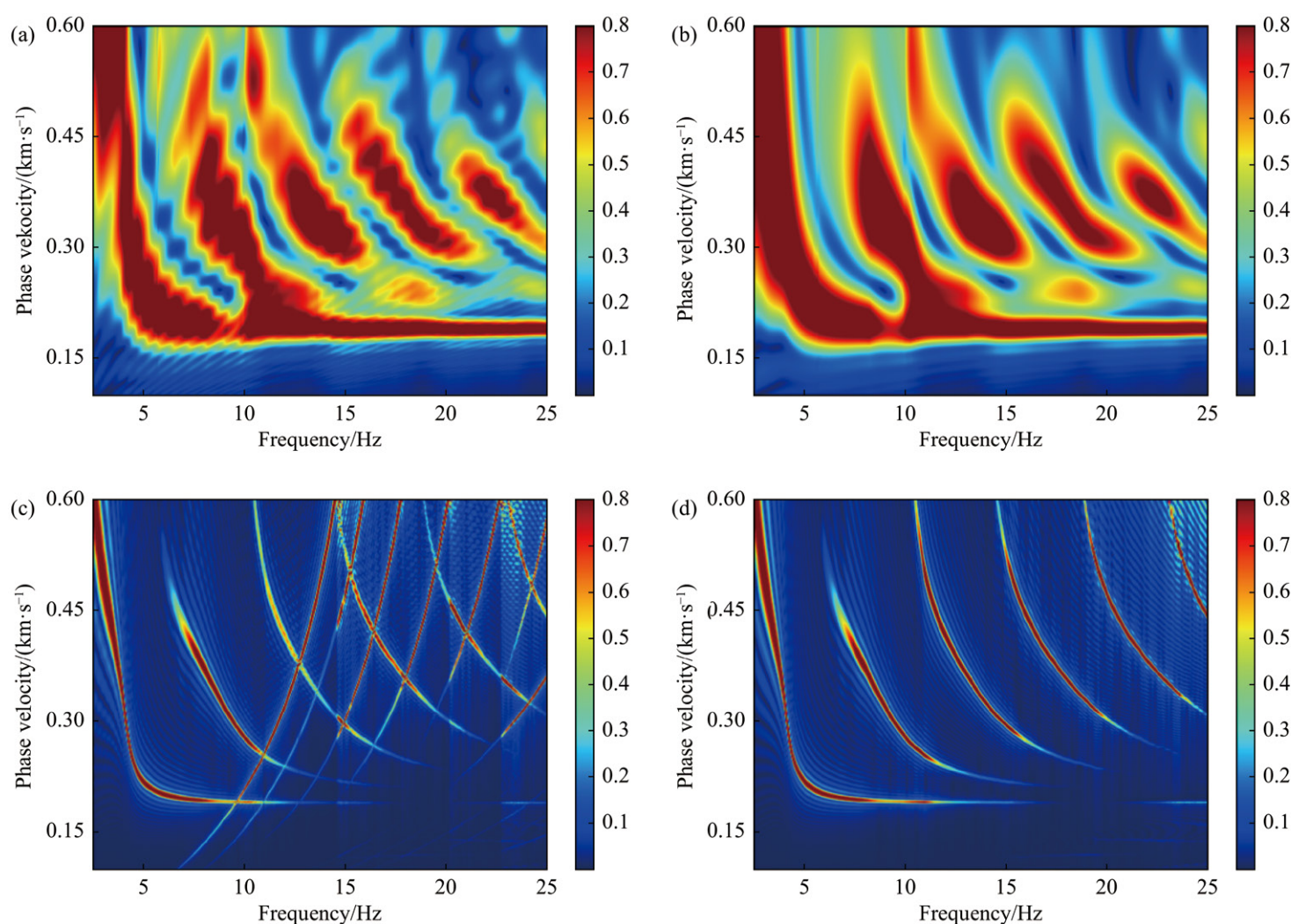


ISSN 2097-1893
CN 10-1855/P

地球与行星物理论评 (中英文)

Reviews of Geophysics and Planetary Physics

第55卷 第2期 Vol. 55 No. 2 2024



中国地震局地球物理研究所 主办
中国地球物理学会 协办
中国地震局地球物理勘探中心

地球与行星物理论评(中英文)

2024年第55卷第2期(总332期)

目次

综述

地球陨石坑地球物理探测研究进展 邓阳凡, 罗恒, 张周, 朱晟, 黄润青, 胡仲发, 李鑫 (153)

火星无线电掩星探测进展 肖洛, 肖存英, 胡雄, 吴小成, 王泽伟, 吴小其 (164)

木星特洛伊小行星研究综述 黄海涛, 吴昀昭 (175)

气象卫星大气导风研究进展和未来展望 周润东, 夏攀, 张晓虎, 徐娜, 闵敏 (184)

对流层臭氧污染对植物生理影响的研究进展 黎武标, 王永达, 姜文英 (195)

青藏高原东部深部构造与动力学机制研究进展 李心怡, 李抒予, 高原, 夏新宇 (205)

研究论文

倾斜和加速度的地面地下观测对比分析 邵泉洋, 付广裕, 王赞 (217)

一种适合于行星探测的单台观测系统研究 黎昌成 (229)

“岩石物理”(I)(本栏特约主编: 赵建国、邓继新、何涛、孙卫涛、曹丹平、邹冠贵、郭智奇)

复杂砾岩油水核磁弛豫特性的实验分析 田超国, 王雪亮, 魏博, 梁晶, 毛文红, 耿雪杰, 李慧莹 (241)

南堡4号构造东营组岩石物理相特征及其分类评价 陈晶莹, 曾静波, 赵建斌, 殷秋丽, 牛爱荣 (248)

基于偏微分方程的声波神经网络 孙卫涛, 杨志芳, 晏信飞 (257)

封面图片

频率贝塞尔函数法和修正频率贝塞尔函数法的频散曲线提取结果。(a) 短偏移量的频率贝塞尔函数变换方法(FJ)的结果; (b) Hankel函数(MFJ)变换在短偏移下结果; (c) 贝塞尔函数变换(FJ)长偏移距下结果; (d) Hankel函数变换(MFJ)方法在长偏移距下结果. 见: 黎昌成的文章 (doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-018), 页码: 229-240. 图片提供: 黎昌成.

Reviews of Geophysics and Planetary Physics

Vol. 55 No. 2 2024 (Total No. 332)

CONTENTS

REVIEWS

| | |
|--|---|
| Recent progress of geophysical exploration in Earth's impact craters | |
| Deng Yangfan, Luo Heng, Zhang Zhou, Zhu Sheng, Huang Runqing, Hu Zhongfa, Li Xin | (153) |
| Progress of radio occultation exploration of Mars | |
| Xiao Luo, Xiao Cunying, Hu Xiong, Wu Xiaocheng, Wang Zewei, Wu Xiaoqi | (164) |
| Review of Jupiter-Trojan asteroids research | Huang Haitao, Wu Yunzhao (175) |
| Research progress and prospects of atmospheric motion vector based on meteorological satellite images | |
| Zhou Rundong, Xia Pan, Zhang Xiaohu, Xu Na, Min Min | (184) |
| Impacts of tropospheric ozone pollution on plant physiology: Current status and future perspectives | |
| Li Wubiao, Wang Yongda, Jiang Wenying | (195) |
| Advancements in deep tectonics and dynamic mechanisms beneath the eastern Tibetan Plateau— Inspirations from the 9th and 10th WTGTP Workshops | Li Xinyi, Li Shuyu, Gao Yuan, Xia Xinyu (205) |

RESEARCH ARTICLES

| | |
|--|---------------------|
| Comparative analysis of underground and ground-level tilt and acceleration | |
| Shao Quanyang, Fu Guangyu, Wang Yun | (217) |
| One-station method for planetary exploration | Li Changcheng (229) |

ROCK PHYSICS (Guest Editors: Zhao Jianguo, Deng Jixin, He Tao, Sun Weitao, Cao Danping, Zou Guangui, Guo Zhiqi)

| | |
|--|---|
| Experimental analysis of oil-water nuclear magnetic relaxation characteristics of complex conglomerate reservoir | Tian Chaoguo, Wang Xueliang, Wei Bo, Liang Jing, Mao Wenhong, Geng Xuejie, Li Huiying (241) |
| Petrophysical facies characteristics and classification evaluation of Dongying Formation of Nanpu No. 4 structure | Chen Jingying, Zeng Jingbo, Zhao Jianbin, Yin Qiuli, Niu Airong (248) |
| Sound wave neural network based on partial differential equation | Sun Weitao, Yang Zhifang, Yan Xinfei (257) |

COVER

Dispersion curve extraction results for the FJ method and MFJ method. (a) Results of the frequency-Bessel function transformation method (FJ) with a short offset; (b) Hankel function (MFJ) transformation results with a short offset; (c) Bessel function transformation (FJ) results with a long offset; and (d) Hankel function transformation (MFJ) results with a long offset. Please refer the article by Li C C (doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-018), pp. 229–240. Picture provided by: Li Changcheng.

MANAGING EDITORS: Zhu Yuping He Yang

黄海涛, 吴昀昭. 2024. 木星特洛伊小行星研究综述. 地球与行星物理论评 (中英文), 55(2): 175-183. doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-022.

Huang H T, Wu Y Z. 2024. Review of Jupiter-Trojan asteroids research. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 55(2): 175-183 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2023-022.

木星特洛伊小行星研究综述

黄海涛^{1,2}, 吴昀昭^{1*}

1 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023

2 中国科学技术大学 天文与空间科学学院, 合肥 230026

摘要: 木星特洛伊小行星 (Jupiter-Trojan asteroids) 是位于木星稳定拉格朗日点上与木星以相同周期围绕太阳稳定运行的小天体. 木星特洛伊小行星作为行星形成过程的活化石记录了行星起源、类地行星有机物与挥发物来源及行星系统整体演化的独特信息. 迄今仅通过地基望远镜或空间望远镜对它们进行过远距离光谱观测, 它们仍是太阳系最神秘的天体群之一. 在物质成分上, 细粒硅酸盐被认为是构成特洛伊小行星的重要物质. 过去认为特洛伊小行星形成在 5 AU 附近, 新的动力学模型认为特洛伊小行星来自柯伊伯带. NASA 的“露西”小行星探测任务 (Lucy) 将首次近距离探索这些神秘的小天体, 有望为解开特洛伊小行星的身世之谜提供重要证据. 本文梳理了木星特洛伊小行星的观测历史、物理性质、光谱性质、物质组成以及形成和演化, 并介绍了“露西”的探测任务与目标, 为未来我国深空探测计划中的小行星探测提供支撑.

关键词: 木星特洛伊小行星; 光谱性质; 物质组成; 形成; 演化

doi: 10.19975/j.dqyxx.2023-022

中图分类号: P185

文献标识码: A

Review of Jupiter-Trojan asteroids research

Huang Haitao^{1,2}, Wu Yunzhao^{1*}

1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China

2 College of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Jupiter-Trojan asteroids, as fossils of planet formation, orbiting the Sun in Jupiter's stable Lagrange points, provide a unique and critical insight into planetary origins, the sources of volatiles and organics on the terrestrial planets, and the evolution of the planetary system as a whole. To present, Jupiter-Trojan asteroids have only been observed through remote spectroscopic measurements using ground-based telescopes or space telescopes, and they remain one of the most enigmatic groups of celestial bodies. In the past decade, significant advances in understanding their physical and spectral properties have been made, and there has been a revolution in thinking about the origin and evolution of Trojans. Fine-grained silicates that appear to be similar to cometary silicates have gradually replaced water ice and organics as a significant component of the surface composition of Trojan asteroids, and a color bimodality may indicate distinct compositional groups among the Trojans. Whereas Trojans had traditionally been thought to have formed near 5 AU, a new paradigm in which the Trojans formed in the proto-Kuiper Belt, were scattered inward, and then captured in the Trojan swarms as a result of resonant interactions of the giant planets has developed. There are significant differences between the currently determined physical properties of Trojans and Kuiper Belt objects. These differences may be indicative of surface modification attributable to the inward migration of the objects that became the Trojans. The upcoming Lucy mission will provide a unique opportunity to conduct close-up exploration of these enigmatic small celestial bodies, potentially yielding evidence important for

收稿日期: 2023-05-06; 录用日期: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12150009)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12150009)

第一作者: 黄海涛 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事小行星遥感和深空探测研究. E-mail: ht.huang.pmo@qq.com

*通信作者: 吴昀昭 (1977-), 男, 研究员, 主要从事行星遥感和深空探测研究. E-mail: wu@pmo.ac.cn



unraveling the mysteries surrounding the origin and evolution of Jupiter-Trojan asteroids. This paper provides a comprehensive overview of the observational history, physical and spectral properties, material composition, and formation and evolution of Jupiter-Trojan asteroids, as well as an introduction to the goals and objectives of the Lucy mission. This study provides support for potential future deep space exploration missions that may have the capacity of exploring asteroids.

Keywords: Jupiter-Trojan asteroids; spectroscopy; composition; formation; evolution

0 引言

特洛伊小行星 (Trojan asteroids) 是指位于行星 L4 和 L5 拉格朗日点与行星以 1:1 轨道共振稳定运行的小天体 (Dotto et al., 2008). 行星圆形轨道的拉格朗日点 L4 和 L5 位于行星轨道平面上, 和行星以太阳为 60° 夹角分为领航轨道 (L4) 与尾随轨道区域 (L5) (Pitjeva and Pitjev, 2019). 在太阳-木星-小行星的三体引力系统中, 这些区域处于稳定的平衡状态.

目前在火星、木星、地球、天王星和海王星轨道上都确认了特洛伊天体的存在. 地球的首颗特洛伊小行星 2010 TK₇ 在 2010 年被广域红外巡天望远镜 (Wide-field Infrared Explorer, WISE) 偶然发现 (Connors et al., 2011), 随后 2020 年夏威夷哈雷阿卡拉天文台的泛星计划望远镜 (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System telescope at Haleakala Observatory, Hawaii) 发现并确认了第二颗地球特洛伊小行星 2020 XL₅ (Hui et al., 2021). 对于火星而言, 在最新三颗长期稳定的特洛伊小行星被确定后, 火星已经拥有 8 颗特洛伊小行星 (1 颗位于 L4, 7 颗位于 L5) (de La Fuente Marcos and de La Fuente Marcos, 2013). 2011 年 Alexandersen 等人利用加拿大-法国-夏威夷望远镜 (Canada-France-Hawaii Telescope, CFHT) 发现天王星目前唯一一颗特洛伊小行星 2011 QF₉₉ (Alexandersen et al., 2013). 据估计, 海王星特洛伊小行星的数量大约是木星特洛伊小行星的 20 倍 (Dotto et al., 2008), 但目前仅确认了 17 颗. 截至目前, 在木星 L4 与 L5 拉格朗日点发现的特洛伊小行星数量最多, 粗略估计约上万颗 (见图 1).

木星特洛伊小行星以古希腊“特洛伊战争”双方阵营名字命名, 其中 L4 点附近的小行星以战争中希腊一方的英雄命名, 也被称为“希腊阵营”, L5 点附近的小行星以战争中特洛伊一方的英雄命名, 被称之为“特洛伊阵营” (Sheppard and Trujillo, 2006). 在该命名规则外有两个例外, 分别是

“特洛伊阵营”中的 (617) Patroclus 和“希腊阵营”中的 (624) Hektor, 这两颗小行星的命名早于该规则的俗成约定, 故分别被冠以对方“阵营”的名字 (Wyse, 1938).

木星特洛伊小行星是截至目前太阳系内唯一尚未被探测器近距离观测的可接近稳定小行星储层, 因而是太空任务的优先探测对象 (Levison et al., 2021a, 2021b). 木星特洛伊小行星相较于其他类地行星特洛伊天体, 提供了研究太阳系演化的独特小行星储层; 相较于其他类木行星特洛伊天体, 具有最近可接触距离与最多观测数量的优势. 因此深入理解木星特洛伊小行星的复杂历史将为太阳系演化提供关键证据. 作为一类原始小天体, 特洛伊小行星原始星云的组成为其形成区域的星云条件提供了直接指示; 作为一个小天体群体, 特洛伊小行星成为太阳系历史演化、行星间相互作用和独特物理过程的关键指示器 (Emery et al., 2015). 本文重点聚焦于木星特洛伊小行星, 下文各节分别叙述了木星

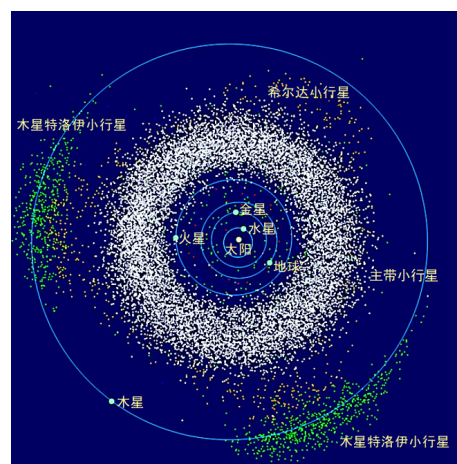


图 1 内太阳系小行星分布示意图 (蓝线为行星轨道, 绿色为木星特洛伊小行星, 白色为主带小行星, 橘色为希尔达小行星) (修改自维基百科)

Fig. 1 Distribution of internal solar system minor planets (The blue lines are the planet orbits, the green dots are the Jupiter-Trojan asteroids, the white dots are main-belt asteroids, and the orange dots are Hildas) (Credit: "InnerSolarSystem-en" by Mdf at English Wikipedia-Transferred from en.wikipedia to Commons. Licensed under Public Domain via Commons)

特洛伊小行星的观测历史、物理性质、光谱性质、物质组成、形成演化以及未来展望.

1 观测历史

Max Wolf 在 19 世纪晚期利用广域天体摄影技术寻找小行星的过程中开启了特洛伊小行星探索历史, 也正式给仅存于理论的拉格朗日点问题提供了实际证据 (Tenn, 1994). 1906 年 2 月 22 日, 他在木星 L4 点附近首次发现一个天体, 标志着拉格朗日三体解的第一次观测证实. 1906 年 10 月 17 日, August Kopff 在木星 L5 点附近发现一个天体, 1907 年 2 月又在木星 L4 点附近发现另一个天体. 这三个特洛伊天体后来分别被命名为 (588) Achilles、(617) Patroclus 和 (624) Hektor (Sheppard and Trujillo, 2006).

随着 20 世纪 70—80 年代观测技术及物理研究的迅速发展, 首批特洛伊小行星的大小、反照率、自转周期和光谱 (可见光) 研究相继发表 (Chapman and Gaffey, 1979; Cruikshank, 1977; Dunlap and Gehrels, 1969; Hartmann and Cruikshank, 1978). 20 世纪 80 年代, Gradie 和 Veverka (1980) 根据观测得到的特洛伊小行星光谱, 通过比对与主带小行星光谱的差异, 对这一类具有典型红色光谱斜率和无吸收特征的光谱提出了一个至今仍被广泛接受的假设——特洛伊小行星表面存在复杂的类干酪根结构的有机分子, 同时认为该类物质因需要低温储存的特点仅存于 4 AU 之外. 当 1989 年《小行星 II》出版时, 已发现 157 个木星特洛伊小行星, Shoemaker 等 (1989) 据此估计特洛伊小行星与主带小行星数量相当.

1999—2002 年间, Emery 和 Brown (2003) 利用多镜面望远镜 (Multiple Mirror Telescope, MMT) 的 NSFCAM 红外照相机 (Infrared camera NSF-CAM)、中分辨率近红外光谱仪/成像仪 SpeX (Medium Resolution Near-Infrared spectrograph / imager SpeX) 以及近红外光谱仪 FSPEC (Near-Infrared spectrometer FSPEC) 观测特洛伊小行星近红外及部分中红外区域 ($0.8\sim 4.0\ \mu\text{m}$), 获得了光谱吸收特征. 地基望远镜观测特洛伊小行星光谱不可避免被地球大气污染降低信噪比, Emery 等 (2006) 利用斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope, SST) 观测木星特洛伊小行星 $5.2\sim 38\ \mu\text{m}$ 范围光谱发射曲线并加以分析.

如今, 发现的木星特洛伊小行星数量达 12 000 多颗 (Greenstreet et al., 2022). 美国国家航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 于 2021 年 10 月发射的“露西”小行星探测器 (Lucy) 将在 2027 年、2028 年以及 2033 年对包括 L4、L5 点附近的 7 颗特洛伊小行星飞越观测, 为解开木星特洛伊小行星物理性质、形成演化提供新的有力证据 (Khan et al., 2022).

2 物理性质

2.1 大小分布特征

大多数小行星观测基于可见光, 在反照率未知的情况下无法得出小行星大小. 因此, 小行星大小分布通常用绝对星等 (H_v) 的分布替代. 对于木星特洛伊小行星, 其反照率分布非常均匀 (见 2.2 节), 因此绝对星等 H_v 分布应与实际大小分布紧密相关 (Emery et al., 2015).

1996 年 10 月, Jewitt 等 (2000) 利用夏威夷大学 2.2 m 口径望远镜观测木星 L4 点特洛伊小行星, 数据表明绝对星等 $H_v \geq 10.5$ 时 (假设视反照率为 0.04, 对应直径 $D \leq 40\ \text{km}$), 小行星数量关于星等的函数斜率变缓, 对应幂律指数 $q = 3.0 \pm 0.3$, 推测较小的特洛伊小行星是较大天体碰撞后产生的碎片. Yoshida 和 Nakamura (2005) 通过观测证实了 Jewitt 等 (2000) 发现的斜率变缓存在且数值一致, 并在绝对星等 $H_v \sim 16$ (假设视反照率为 0.04, $D \sim 5\ \text{km}$) 处发现了第二次斜率变缓. 但 Yoshida 和 Nakamura (2008) 后续对木星 L5 区域的观测并没有发现类似现象, 表明特洛伊小行星两个天体群存在不对称性.

NASA 的 NEOWISE 太空望远镜通过热红外波段观测特洛伊小行星进而推导小行星的有效直径, 减少从绝对星等转换为直径的不确定性. Grav 等 (2011) 通过对 NEOWISE 观测得到的 1 739 个特洛伊小行星分析, 发现直径在 $10\ \text{km} \leq D \leq 100\ \text{km}$ 区间内累计 1 660 颗特洛伊小行星数量与直径符合幂律形式: $N(>D) = a_0 D^{-a}$, 其中 $a=2$, 该值与 Jewitt 等 (2000) 计算结果类似.

2.2 反照率

最初对特洛伊小行星研究的几十年里, 地基望远镜 (Cruikshank, 1977; Fernández et al., 2003) 和

天基望远镜 (Tedesco et al., 2002; Usui et al., 2011) 揭示特洛伊小行星几何反照率仅百分之几, 是太阳系最暗的小天体群之一. NEOWISE 项目在 2010 年 1 月至 10 月观测得到 1700 多颗特洛伊小行星热测量数据, 相比之前所有特洛伊小行星观测数据近乎一个数量级的增长 (Grav et al., 2011, 2012). NEOWISE 在其观测尺度范围内得到的特洛伊小行星反照率分布非常均匀, 平均反照率为 0.07 ± 0.03 . 这一平均反照率略高于以往的结果, 推测是不同观测和分析技术导致. 即便如此木星特洛伊小行星依旧是太阳系最暗的天体群之一. NEOWISE 观测到的 L4 和 L5 区域小天体反照率分布没有明显差异.

Fernández 等 (2009) 基于斯皮策空间望远镜的观测数据认为直径小于 20 km 的特洛伊小行星反照率有所上升, 而 NEOWISE 的观测中特洛伊小行星的反照率几乎保持不变, 直到最小的特洛伊小行星 (直径约 10 km) 反照率有所上升.

2.3 密度

目前已获得两颗特洛伊小行星密度数据: (617) Patroclus 和 (624) Hektor. (617) Patroclus 是首个被发现的特洛伊双星系统中的一颗. 最初通过轨道测量估计其体密度约为 1.3 g/cm^3 (Merline et al., 2002; Noll, 2005). Marchis 等人利用激光导引星自适应光学系统 (Laser Guide Star adaptive optics system) 对 (617) Patroclus 进行了几次观测, 提供了其更好的自转周期及双星轨道距离测量数据, 基于 Fernández 等 (2003) 的热测量模型得到该天体的体密度约为 $1.08 \pm 0.33 \text{ g/cm}^3$ (Marchis et al., 2006). 与目前其他已知的小行星密度相比, (617) Patroclus 的密度相当低.

最初 (624) Hektor 被认为是一颗极其细长的小天体, Marchis 等 (2014) 经过测量认为其体密度为 $1.0 \pm 0.3 \text{ g/cm}^3$. 近期, Descamps (2015) 根据哑铃状模型重新分析 (624) Hektor 的光曲线数据和自适应光学图像, 发现较过去细长模型相比具有更好的拟合效果, 给出了该天体新的体密度为 $2.43 \pm 0.35 \text{ g/cm}^3$. 因此, (624) Hektor 和 (617) Patroclus 可能具有不同的内部结构 (Emery et al., 2015).

3 光谱性质

3.1 光谱斜率

20 世纪 80 年代, Gradie 和 Veverka (1980)

观测到特洛伊小行星首个缺乏吸收特征、但具典型红色光谱斜率的可见光反射光谱. 随着观测技术提升, 红色斜率由可见光覆盖到近红外, 不同学者也对特洛伊小行星斜率数值展开计算并分类.

1998—2002 年间, Bendjoya 等 (2004) 利用欧洲南方天文台 (European Southern Observatory, ESO) 丹麦 1.54 m 口径望远镜观测得到超过 30 颗特洛伊小行星可见光波段光谱曲线 ($0.5 \sim 0.75 \mu\text{m}$). 他们采用 Jewitt 和 Luu (1990) 在研究特洛伊小行星时引入的光谱斜率 S' , 定义为光谱在 6000 Å 归一化后的斜率趋势 [见公式 (1)], 同时选择 Dahlgren 和 Lagerkvist (1995) 和 Dahlgren 等 (1997) 在研究希尔达 (Hilda) 小行星光谱时提出的分类方法, 该方法定义 S' 大于 $7.0\%/10^3 \text{ Å}$ 为 D 型、在 $2\% \sim 5\%/10^3 \text{ Å}$ 之间为 P 型、小于 $2\%/10^3 \text{ Å}$ 并表现出紫外吸收定义为 C 型, 在 P 型和 D 型间的 PD 和 DP 型对应的 S' 分别为 $5\% \sim 6\%/10^3 \text{ Å}$ 和 $6\% \sim 7\%/10^3 \text{ Å}$. 基于该方法对比 L4 与 L5 点特洛伊小行星光谱斜率, 其中 L5 点几乎为 P 型和 D 型, L4 点类型复杂推测由于演化过程中受其他类型小行星污染所致. 此外该观测首次得到蓝色光谱斜率的特洛伊小行星 (5283) Phryrus 和 (7641) Cteatus.

S' 光谱斜率定义为:

$$S' = dS/d\lambda \quad (1)$$

其中 S' 为计算得到的光谱斜率, $d\lambda$ 为光谱波长差值, dS 为对应波长的归一化反照率差值.

2003—2007 年间, Emery 等 (2010) 利用 NASA 红外望远镜设备将特洛伊小行星光谱范围覆盖至 $2.5 \mu\text{m}$. 基于 58 颗特洛伊小行星的 68 个光谱曲线归一化后计算得到的色指数斜率 [见公式 (2)] 划分为两组, 分别是色指数大于 0.2 的“红色组”和色指数小于 0.2 的“弱红组”, 在特定波长范围内色指数数量直方图出现明显双峰性. 同时采用前人观测得到的特洛伊小行星可见光谱 (Bus and Binzel, 2002; Fornasier et al., 2004, 2007; Jewitt and Luu, 1990; Lazzaro et al., 2004; Vilas et al., 1993; Xu et al., 1995), 在 $0.55 \mu\text{m}$ 归一化后, 根据 $0.55 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 间最小二乘法结果将斜率值分为小于 0.5 的“弱红组”和大于 0.5 的“红色组”. 根据可见光和近红外波段光谱各自平均后组合绘制的光谱曲线的明显差异 (如图 2) 推测光谱曲线差异源于小天体内部结构, 并进一步假设不同光谱组在太阳系形成的位置不同.

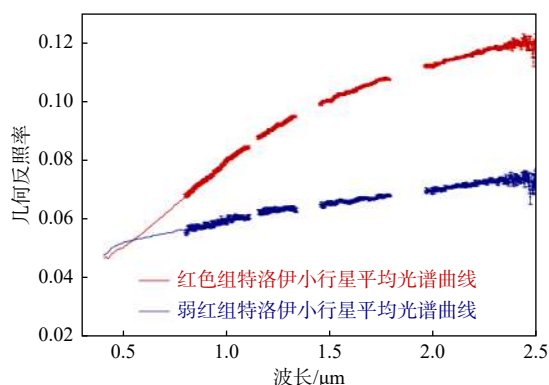


图 2 两个光谱组的可见光和近红外平均光谱曲线 (修改自 Emery et al., 2010)

Fig. 2 Combined visible and near infrared average spectra of the two spectral groups (modified from Emery et al., 2010; Credit: AAS. Reproduced with permission)

光谱色指数定义为:

$$m_{\lambda 1} - m_{\lambda 2} = 2.5 \log(R_{\lambda 2}/R_{\lambda 1}) \quad (2)$$

式中, $m_{\lambda 1} - m_{\lambda 2}$ 为波长的色指数, $R_{\lambda 2}/R_{\lambda 1}$ 为该波长对应的归一化反射率比。

3.2 光谱吸收特征

特洛伊小行星光谱曲线相对平滑, 缺少典型吸收特征. 观测得到的大部分光谱曲线都不具备吸收特征, 但少量光谱具有吸收特征: 近红外部分 (0.8~4.0 μm) 吸收特征主要来自 Emery 和 Brown (2003) 的观测结果; 中红外部分 (5.2~38 μm) 发射特征主要来自 Emery 等 (2006) 的观测结果。

1999—2002 年间, Emery 和 Brown (2003) 通过观测得到 20 颗特洛伊小行星的光谱, 所有光谱均包含 1.95~2.5 μm , 其中 8 颗小行星额外包含 2.8~4.0 μm , 14 颗额外包含 0.8~1.95 μm . (617) Patroclus 在 2000 年 9 月的观测中展现出与某些水合硅酸盐吸收特征相匹配的 2.3 μm 吸收特征和 2.2 μm 模糊吸收特征, 但另一次观测中没有类似特征或由于小行星自转导致的异质性. (5144) Achates 具有 2.4~2.5 μm 宽低吸收特征, 与托林 (Tholin) 等有机物的吸收特征类似. (588) Achilles 在 3.9 μm 附近存在类 N_2O 第二吸收的较明显光谱特征. (911) Agamemnon 在 3.0 μm 中心附近存在宽约 0.2 μm 的吸收特征, 该特征可以用某些有机物或层状硅酸盐中的 OH 振动来解释, 此外在 3.21 μm 处具有更明显、更强的吸收特征。

Emery 等 (2006) 通过斯皮策空间望远镜观测得到 3 颗特洛伊小行星 [(1172) Aneas、(911) Agamemnon 和 (624) Hektor] 的中红外光谱 (5.2~

38 μm). 这三颗特洛伊小行星的发射光谱非常相似, 在约 9.1~11.5 μm 与 18~28 μm 处都具有发射高台. 其中 (624) Hektor 在 10 μm 处的发射高台稍微倾斜, 峰值位于 11.2 μm , 而 (911) Agamemnon 和 (1172) Aneas 在该处的发射高台则相对平坦. 此外, (624) Hektor 和 (911) Agamemnon 在 14 μm 附近表现出一个 (1172) Aneas 所不具备的微小发射特征。

4 物质组成

截至目前, 特洛伊小行星内部结构最清晰的迹象来自对 (617) Patroclus 的密度测定, 这颗小行星的体密度接近 1 g/cm^3 , 如此低的体密度表明其内部是低密度物质 (如冰) 或具大孔隙结构或二者兼具 (Emery et al., 2015). 此外, 不同学者基于各自观测的特洛伊小行星光谱斜率与吸收特征推测特洛伊小行星表面由有机物或硅酸盐组成。

1980 年, Gradie 等人根据观测得到的特洛伊小行星可见光光谱比对主带 C 型小行星后推测: 类干酪根结构有机物导致典型红色斜率, 这类有机物形成于 4 AU 外且需低温才能稳定存在 (Gradie and Veverka, 1980; Gradie and Tedesco, 1982). 随后光谱范围覆盖至近红外但没有发现吸收特征, 尤其缺少 1 μm 和 2 μm 典型硅酸盐吸收特征. 因此, 一些学者认为特洛伊小行星的低反照率与典型红色光谱斜率是有机物的可能性增大 (Dumas et al., 1998; Luu et al., 1994)。

Cruikshank 等 (2001) 在观测 (624) Hektor 时将波长范围覆盖到 3.6 μm 以寻找可以指示有机分子的 CH 和 NH 的吸收带. 但观测得到的光谱曲线中缺乏有机分子吸收特征, 同时指出无定形硅酸盐和碳的组合可以充分模拟该特洛伊小行星光谱曲线. 在另一项类似的研究中, Emery 和 Brown (2004) 将大量特洛伊小行星的观测数据扩展到 4.0 μm , 基于 2.8~4.0 μm 光谱区域缺乏有机物典型吸收特征得出结论——无水硅酸盐而非有机物最有可能导致特洛伊小行星典型红色光谱斜率. Emery 等 (2006) 通过不受地球大气影响的斯皮策空间望远镜观测得到三颗特洛伊小行星的中红外光谱数据, 比对各粒径大小硅酸盐的光谱发射特征后进一步认为特洛伊小行星表面存在细粒硅酸盐物质。

根据动力学模型描述, 特洛伊小行星形成于挥发份丰富的外太阳系, 但截至目前对其表面观测表明不存在挥发份和有机化合物, 硅酸盐类作为可能

存在的物质提供了最好的拟合效果. 近期, Sharkey 等 (2019) 利用富辉石模型、辉石-托林模型、水合硅酸盐模型和水冰模型对露西探测器将要观测的其中 5 颗特洛伊小行星物质组成及粒径大小进行反演, 提出了上述可以被露西任务验证的物质组成假设.

5 起源和演化

目前解释木星特洛伊天体种群的俘获机制大致有两类: 第一类模型为经典模型, 该模型认为木星特洛伊小行星最初是木星轨道附近形成的星子 (Dotto et al., 2008). 木星在大质量大气吸聚后引力急剧增加 (下拉机制), 捕获其拉格朗日平衡点轨道附近的星子 (Fleming and Hamilton, 2000). Marzari 和 Scholl (1998) 对 Pollack 等 (1996) 的木星质量随时间演化模型进行数值模拟, 表明该捕获机制十分有效: 木星轨道延伸 0.4 AU 环形区域中的星子有 40% 到 50% 能被捕获成为特洛伊小行星. 气体阻力也有助于从原位星子群中捕获特洛伊天体 (Peale, 1993).

经典模型的问题在于模拟特洛伊小行星轨道分布与实际观测结果不完全相符. 理论模拟中被捕获的特洛伊小行星通常有较大振幅, 但实际观测的天体振幅相当均匀. 另一个更严重的问题是倾角分布. 下拉机制对于星子偏心率和倾角影响不大, 因此被捕获的特洛伊小行星偏心率和倾角分布应与原始小行星盘类似且较小. 观测得到的特洛伊小行星倾角分布高达 40° 左右, 远超预期. 截至目前, 经典模型不能再现所观测特洛伊小行星的轨道分布.

另一类模型 (Nice 模型) 认为特洛伊小行星来自柯伊伯带 (Kuiper-Belt), 在木星土星 1:2 共振迁移时由柯伊伯带小天体向内抛射, 最终被木星在拉格朗日 L4 和 L5 点附近捕获 (Morbidelli et al., 2005). 在该假设下, 原木星拉格朗日点附近区域变得不稳定, 先前存在的特洛伊小行星全部离开该轨道区域, 来自外部的小天体进入同一区域并被暂时困住, 当木星土星距 1:2 共振足够远时该区域变得稳定, 新特洛伊小行星形成. 该模型模拟结果中特洛伊小行星动力学三个基本量: 偏心率、倾角及振幅与观测数值分布非常相似.

除上述两种主流观点外, 也有其他研究通过对光谱曲线分析提出不同的形成演化理论. 发现特洛伊小行星光谱双峰性分布的 Emery 等 (2010) 认

为这种双峰性分布是由于小行星起源于太阳系中不同区域: “红色组”小行星由柯伊伯带向内抛射, 靠近太阳经历类彗星过程致挥发物质耗尽后被捕获; “弱红组”小行星形成于主小行星带延伸区域, 由主带小行星向外抛射. Brown (2016) 在 Emery 等 (2010) 的基础上发现特洛伊小行星在 $4.0\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 附近有类似的宽深吸收, 推测是造成 $10\ \mu\text{m}$ 附近发射光谱高台的细粒硅酸盐所致, 认为两组小行星形成于太阳系相同区域才形成相似吸收特征.

上述几种模型虽能解释捕获过程, 但 Nice 模型效果最好, 同时拟合了总体数量、大小分布及 L4/L5 种群不对称性, 因此普遍认为木星特洛伊小行星来自柯伊伯带. 然而, 特洛伊小行星独特的低反照率和红色斜率光谱特征使其表面成分解释相对开放. 特洛伊小行星光谱曲线相比柯伊伯带小行星具有显著差异: 柯伊伯带小行星反照率高且范围宽, 特洛伊小行星和部分柯伊伯带小行星 (以及半人马天体) 虽具有光谱双峰性, 但二者不重叠, 表明柯伊伯带小行星向内迁移时表面成分遭受太空风化 (Emery et al., 2015).

部分柯伊伯带小行星和半人马天体光谱在 $3.6\ \mu\text{m}$ 和 $4.5\ \mu\text{m}$ 的极红色斜率、宽而强吸收及 $2.35\ \mu\text{m}$ 附近甲醇吸收特征表明存在复杂有机物 (Barucci et al., 2006; Cruikshank et al., 1998; Dalle Ore et al., 2013, 2015; Emery et al., 2007). 这些物质遭受辐照后光谱斜率降低 (Moroz et al., 2004). 特洛伊小行星无任何有机物吸收特征同时存在细粒硅酸盐使单一辐照过程难以解释 (Jewitt et al., 2000). 基于 Morbidelli 等 (2005) 的理论, 迁移到当前位置的原柯伊伯带小天体在轨道上花费大量时间, 但目前仍没有满意的演化过程可以解释来自单一区域的特洛伊小行星出现不同光谱种群.

6 展 望

尽管动力学模型推测特洛伊小行星极大可能来自柯伊伯带, 但目前仍因柯伊伯带小天体和特洛伊小行星的光谱差异而存在“原位形成”与“异地迁移”两种起源假说, 利用空间风化解释“异地迁移”过程中光谱变化也存在挑战 (Marzari and Scholl, 1998; Peale, 1993). 特洛伊小行星本身缺乏特征的光谱曲线使其表面成分解释尤为困难, 目前以 Emery 等 (2006) 通过中红外发射特征推断的细粒硅酸盐为主 (Melita et al., 2009). 与此同时, 特洛

伊小行星的内部结构也未被探明,唯一证据来自几颗推测出密度的小行星 (Dotto et al., 2008). 综上所述, 目前关于木星特洛伊小行星主要的科学问题是: (1) 它们由什么组成? (2) 它们在哪里形成 (Emery et al., 2015)?

目前几项太空任务有望为解开特洛伊小行星谜题做出贡献. 在物质组成方面, 特洛伊小行星的下一个飞跃可能来自詹姆斯·韦布太空望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST). 韦布望远镜 1~28 μm 光谱范围非常适合水冰和有机物的搜索、硅酸盐的表征和热物理性质的测定. 同时 2.5 μm 波长处

灵敏度超过地基望远镜, 能观测到更小的特洛伊小行星 (Emery et al., 2015). 露西首次近距离观测木星特洛伊小行星, 计划在 2025—2033 年间飞掠 1 颗主带小行星、5 颗 L4 点特洛伊小行星及 2 颗 L5 点特洛伊小行星 (见表 1). 露西的目标囊括特洛伊小行星所有类型: (1) 7 颗小天体的可见光-近红外波段光谱 (2 颗 C 型、3 颗 P 型、2 颗 D 型); (2) L4 和 L5 区域小天体; (3) 类似大小的双星系统; (4) 特洛伊小行星碰撞家族中最大的天体, 同时包括一颗可能在这次撞击中形成的小卫星 (Levison et al., 2021a).

表 1 露西探测任务飞掠时间表

Table 1 Lucy mission flight time

| 位置 | 小行星 | 光谱类型 | 飞越时间 |
|-----------|------------------------------|------|------------|
| 主小行星带 | (52246) Donaldjohanson | C | 2025-04-25 |
| | (3548) Eurybates 卫星 Queta | C | 2027-08-12 |
| 特洛伊小行星L4群 | (15094) Polymele | P | 2027-09-15 |
| | (11351) Leucus | D | 2028-04-18 |
| | (21900) Orus | D | 2028-11-11 |
| 特洛伊小行星L5群 | (617) Patroclus 双星系统 | P | 2033-03-03 |

我国嫦娥工程六战六捷实现国际上首次月背巡视探测, 返回最年轻的月球玄武岩样品、天问一号实现火星轨道环绕探测和表面软着陆巡视探测、长征五号大推力运载火箭成功首飞共同标志着我国具备太阳系边际探测的基本条件 (吴伟仁等, 2023). 小行星探测任务聚焦探寻宇宙的起源演化、物质结构等重大基础前沿科学问题, 已成为深空探测的热点, 同时小行星探测的实施将牵引我国空间科学与探测技术协调发展, 选准时机实施小行星探测任务, 将进一步推动航天技术、空间科学等领域的创新和突破 (张荣桥等, 2019). 2049 年前后, 我国太阳系边际探测希望实现“两个一百年计划” (王赤等, 2020; 吴伟仁等, 2019). 在未来我国太阳系边际以及木星系等外太阳系探测任务中, 如能探测木星特洛伊小行星, 将对于深入认识特洛伊小行星的物质组成、起源、行星系统演化等具有重要意义.

References

Alexandersen M, Gladman B, Greenstreet S, et al. 2013. A Uranian Trojan and the frequency of temporary giant-planet co-orbitals[J]. *Science*, 341(6149): 994-997.

Barucci M A, Merlin F, Dotto E, et al. 2006. TNO surface ices-observations of the TNO 55638 (2002 VE) and analysis of the population's spectral properties[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 455(2): 725-730.

Bendjoya P, Cellino A, Di Martino M, et al. 2004. Spectroscopic observations of Jupiter Trojans[J]. *Icarus*, 168(2): 374-384.

Brown M E. 2016. The 3-4 μm spectra of Jupiter Trojan asteroids[J]. *The Astronomical Journal*, 152(6): 159.

Bus S J, Binzel R P. 2002. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey: A feature-based taxonomy[J]. *Icarus*, 158(1): 146-177.

Chapman C R, Gaffey M J. 1979. Reflectance Spectra for 277 Asteroids[M]//Gehrels T. Asteroids. Tucson: University of Arizona Press, 655-687.

Connors M, Wiegert P, Veillet C. 2011. Earth's Trojan asteroid[J]. *Nature*, 475(7357): 481-483. DOI: 10.1038/nature10233.

Cruikshank D P. 1977. Radii and albedos of four Trojan asteroids and Jovian satellites 6 and 7[J]. *Icarus*, 30(1): 224-230.

Cruikshank D P, Roush T L, Bartholomew M J, et al. 1998. The composition of centaur 5145 Pholus[J]. *Icarus*, 135(2): 389-407.

Cruikshank D P, Dalle Ore C M, Roush T L, et al. 2001. Constraints on the composition of Trojan asteroid 624 Hektor[J]. *Icarus*, 153(2): 348-360.

Dahlgren M, Lagerkvist C I. 1995. A study of Hilda asteroids. I. CCD spectroscopy of Hilda asteroids[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 302: 907-914.

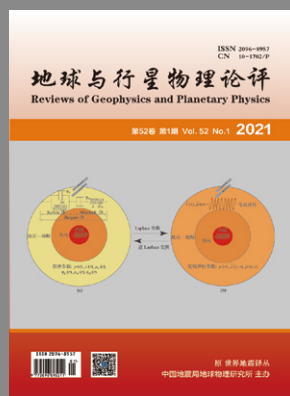
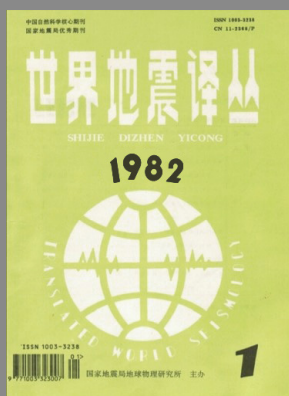
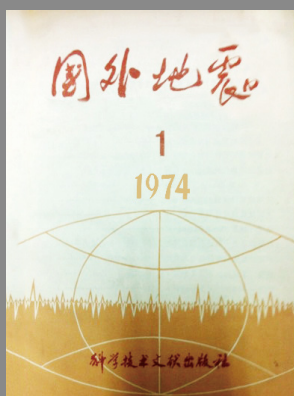
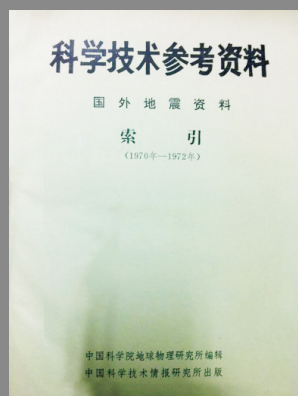
Dahlgren M, Lagerkvist C I, Fitzsimmons A, et al. 1997. A study of

- Hilda asteroids. II. Compositional implications from optical spectroscopy[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 323: 606-619.
- Dalle Ore C M, Dalle Ore L V, Roush T L, et al. 2013. A compositional interpretation of trans-neptunian objects taxonomies[J]. *Icarus*, 222(1): 307-322.
- Dalle Ore C M, Barucci M A, Emery J P, et al. 2015. The composition of "ultra-red" TNOS and Centaurs[J]. *Icarus*, 252: 311-326.
- de La Fuente Marcos C, de La Fuente Marcos R. 2013. Three new stable L5 Mars trojans[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 432(1): L31-L35.
- Descamps P. 2015. Dumb-bell-shaped equilibrium figures for fiducial contact-binary asteroids and EKBOs[J]. *Icarus*, 245: 64-79.
- Dotto E, Emery J P, Barucci M A, et al. 2008. De Troianis: The Trojans in the Planetary System[M]/Barucci M A. *The Solar System Beyond Neptune*. Tucson: University of Arizona Press, 383-395.
- Dumas C, Owen T, Barucci M A. 1998. Near-infrared spectroscopy of low-albedo surfaces of the solar system: Search for the spectral signature of dark material[J]. *Icarus*, 133(2): 221-232.
- Dunlap J L, Gehrels T. 1969. Minor planets. III. Lightcurves of a Trojan asteroid[J]. *The Astronomical Journal*, 74: 796.
- Emery J P, Brown R H. 2003. Constraints on the surface composition of Trojan asteroids from near-infrared (0.8-4.0 μm) spectroscopy[J]. *Icarus*, 164(1): 104-121.
- Emery J P, Brown R H. 2004. The surface composition of Trojan asteroids: Constraints set by scattering theory[J]. *Icarus*, 170(1): 131-152.
- Emery J P, Cruikshank D P, Van Cleve J. 2006. Thermal emission spectroscopy (5.2-38 μm) of three Trojan asteroids with the Spitzer Space Telescope: Detection of fine-grained silicates[J]. *Icarus*, 182(2): 496-512.
- Emery J P, Dalle Ore C M, Cruikshank D P, et al. 2007. Ices on (90377) Sedna: confirmation and compositional constraints[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 466(1): 395-398.
- Emery J P, Burr D M, Cruikshank D P. 2010. Near-infrared spectroscopy of Trojan asteroids: Evidence for two compositional groups[J]. *The Astronomical Journal*, 141(1): 25.
- Emery J P, Marzari F, Morbidelli A, et al. 2015. The Complex History of Trojan Asteroids[M]/Michel P, Demeo F E, Bottke W F. *Asteroids IV*. Tucson: University of Arizona Press, 203-220.
- Fernández Y R, Sheppard S S, Jewitt D C. 2003. The albedo distribution of Jovian Trojan asteroids[J]. *The Astronomical Journal*, 126(3): 1563.
- Fernández Y R, Jewitt D, Ziffer J E. 2009. Albedos of small Jovian Trojans[J]. *The Astronomical Journal*, 138(1): 240.
- Fleming H J, Hamilton D P. 2000. On the origin of the Trojan asteroids: Effects of Jupiter's mass accretion and radial migration[J]. *Icarus*, 148(2): 479-493.
- Fornasier S, Dotto E, Marzari F, et al. 2004. Visible spectroscopic and photometric survey of L5 Trojans: Investigation of dynamical families[J]. *Icarus*, 172(1): 221-232.
- Fornasier S, Dotto E, Hainaut O, et al. 2007. Visible spectroscopic and photometric survey of Jupiter Trojans: Final results on dynamical families[J]. *Icarus*, 190(2): 622-642.
- Gradie J, Veverka J. 1980. The composition of the Trojan asteroids[J]. *Nature*, 283(5750): 840-842.
- Gradie J, Tedesco E. 1982. Compositional structure of the asteroid belt[J]. *Science*, 216(4553): 1405-1407.
- Grav T, Mainzer A K, Bauer J, et al. 2011. WISE/NEOWISE observations of the Jovian Trojans: Preliminary results[J]. *The Astrophysical Journal*, 742(1): 40.
- Grav T, Mainzer A K, Bauer J M, et al. 2012. WISE/NEOWISE observations of the Jovian Trojan population: Taxonomy[J]. *The Astrophysical Journal*, 759(1): 49.
- Greenstreet S, Gladman B, Juric M. 2022. Jupiter Trojan temporary interlopers and libration amplitude distributions[C]//AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts. 54(8): 520.02.
- Hartmann W K, Cruikshank D P. 1978. The nature of Trojan asteroid 624 Hektor[J]. *Icarus*, 36(3): 353-366.
- Hui M T, Wiegert P A, Tholen D J, et al. 2021. The second Earth Trojan 2020 XL₅[J]. *The Astrophysical Journal Letter*, 922: L25.
- Jewitt D C, Luu J X. 1990. CCD spectra of asteroids. II-The Trojans as spectral analogs of cometary nuclei[J]. *The Astronomical Journal*, 100: 933-944.
- Jewitt D C, Trujillo C A, Luu J X. 2000. Population and size distribution of small Jovian Trojan asteroids[J]. *The Astronomical Journal*, 120(2): 1140.
- Khan M, Witasse O, Martens W, et al. 2022. Design of an in-situ science mission to a Jupiter Trojan[J]. *Planetary and Space Science*, 225: 105610.
- Lazzaro D, Angeli C A, Carvano J M, et al. 2004. S3OS2: The visible spectroscopic survey of 820 asteroids[J]. *Icarus*, 172(1): 179-220.
- Levison H F, Marchi S, Noll K, et al. 2021a. NASA's Lucy mission to the Trojan asteroids[C]//2021 IEEE Aerospace Conference (50100). IEEE, 1-10.
- Levison H F, Olkin C B, Noll K S, et al. 2021b. Lucy mission to the Trojan asteroids: Science goals[J]. *The Planetary Science Journal*, 2(5): 171.
- Luu J, Jewitt D, Cloutis E. 1994. Near-infrared spectroscopy of primitive solar system objects[J]. *Icarus*, 109(1): 133-144.
- Marchis F, Hestroffer D, Descamps P, et al. 2006. A low density of 0.8 g cm⁻³ for the Trojan binary asteroid 617 Patroclus[J]. *Nature*, 439(7076): 565-567.
- Marchis F, Durech J, Castillo-Rogez J, et al. 2014. The puzzling mutual orbit of the binary Trojan asteroid (624) Hektor[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 783(2): L37.
- Marzari F, Scholl H. 1998. The growth of Jupiter and Saturn and the capture of Trojans[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 339: 278-285.
- Melita M D, Strazzulla G, Bar-Nun A. 2009. Collisions, cosmic radiation, and the colors of the Trojan asteroids[J]. *Icarus*, 203(1): 134-139.
- Merline W J, Weidenschilling S J, Durda D D, et al. 2002. Asteroids Do Have Satellites[M]/Bottke W F. *Asteroids III*. Tucson: University of Arizona Press, 1: 289-312.
- Morbidelli A, Levison H F, Tsiganis K, et al. 2005. Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early solar system[J]. *Nature*, 435(7041): 462-465.
- Moroz L, Baratta G, Strazzulla G, et al. 2004. Optical alteration of complex organics induced by ion irradiation: 1. Laboratory experi-

- ments suggest unusual space weathering trend[J]. *Icarus*, 170(1): 214-228.
- Noll K S. 2005. Solar system binaries[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 1(S229): 301-318.
- Peale S J. 1993. The effect of the nebula on the Trojan precursors[J]. *Icarus*, 106(1): 308-322.
- Pitjeva E V, Pitjev N P. 2019. Masses of the Trojan groups of Jupiter[J]. *Astronomy Letters*, 45(12): 855-860.
- Pollack J B, Hubickyj O, Bodenheimer P, et al. 1996. Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas[J]. *Icarus*, 124(1): 62-85.
- Sharkey B N L, Reddy V, Sanchez J A, et al. 2019. Compositional constraints for Lucy mission Trojan asteroids via near-infrared spectroscopy[J]. *The Astronomical Journal*, 158(5): 204.
- Sheppard S S, Trujillo C. 2006. A survey for Trojan asteroids of Saturn, Uranus and Neptune[C]//AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts#38. 38: 44.
- Shoemaker E M, Shoemaker C S, Wolfe R F. 1989. Trojan Asteroids: Populations, Dynamical Structure and Origin of the L4 and L5 Swarms[M]//Binzel R P, Gehrels T, Matthew M S. Asteroids II. Tucson: University of Arizona Press, 487-523
- Tedesco E F, Noah P V, Noah M, et al. 2002. The supplemental IRAS minor planet survey[J]. *The Astronomical Journal*, 123(2): 1056.
- Tenn J S. 1994. Max Wolf: The Twenty-fifth Bruce Medalist[J]. *Mercury*, 23: 27.
- Usui F, Kuroda D, Müller T G, et al. 2011. Asteroid catalog using Akari: AKARI/IRC mid-infrared asteroid survey[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 63(5): 1117-1138.
- Vilas F, Larson S M, Hatch E C, et al. 1993. CCD reflectance spectra of selected asteroids. II. Low-albedo asteroid spectra and data extraction techniques[J]. *Icarus*, 105(1): 67-78.
- Wang C, Li H, Guo X C, Xu X F. 2020. Scientific objectives for the exploration of the boundary of solar system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 7(6): 517-524 (in Chinese). DOI: .
- Wu W R, Yu D Y, Huang J C, et al. 2019. Exploring the solar system boundary[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 49(1): 1-16 (in Chinese).
- Wu W R, Wang C, Liu Y, et al. 2023. Frontier scientific questions in deep space exploration[J]. *Chinese Science Bulletin*, 68(6): 606-627 (in Chinese).
- Wyse A B. 1938. The Trojan group[J]. *Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific*, 3: 113.
- Xu S, Binzel R P, Burbine T H, et al. 1995. Small main-belt asteroid spectroscopic survey: Initial results[J]. *Icarus*, 115(1): 1-35.
- Yoshida F, Nakamura T. 2005. Size distribution of faint Jovian L4 Trojan asteroids[J]. *The Astronomical Journal*, 130(6): 2900.
- Yoshida F, Nakamura T. 2008. A comparative study of size distributions for small L4 and L5 Jovian Trojans[J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 60(2): 297-301.
- Zhang R Q, Huang J C, He R W, et al. 2019. The development overview of asteroids exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 6(5): 417-423+455 (in Chinese).

附中文参考文献

- 王赤, 李晖, 郭孝城, 徐欣峰. 2020. 太阳系边际探测项目的科学问题[J]. *深空探测学报 (中英文)*, 7(6): 517-524. DOI: .
- 吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 2019. 太阳系边际探测研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 49(1): 1-16.
- 吴伟仁, 王赤, 刘洋, 等. 2023. 深空探测之前沿科学问题探析 [J]. *科学通报*, 68 (6): 606-627
- 张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 2019. 小行星探测发展综述[J]. *深空探测学报*, 6(5): 417-423+455.



收录情况

国际数据库：

瑞典开放存取期刊目录 (DOAJ) (2023年入选)
波兰哥白尼索引期刊数据库 (ICI World of Journals) (2023年入选)
EBSCO数据库 (2023年入选)
乌利希国际期刊指南 (2023年入选)

国内数据库：

中国期刊全文数据库 (CNKI)
中国核心期刊 (遴选) 数据库 (万方数据—数字化期刊群)
维普网中文科技期刊数据库
超星期刊出版数据库
国家科技学术期刊开放平台

地球与行星物理论评 (中英文)

Diqiu Yu Xingxing Wuli Lunping

(双月刊 1970年创刊)

2024年 第55卷 第2期 (总第332期)

2024年3月出版

Reviews of Geophysics and Planetary Physics

(Bimonthly, Started in 1970)

Vol. 55 No. 2 (Total No. 332) 2024

Mar. 2024

主管单位：中国地震局

主办单位：中国地震局地球物理研究所

主 编：丁志峰

编 辑：《地球与行星物理论评 (中英文)》编辑委员会

出 版：《地球与行星物理论评 (中英文)》编辑部

(北京市海淀区民族大学南路5号)

邮政编码：100081)

印刷装订：廊坊市瑞美印务有限公司

订购发行：本刊编辑部发行组

电子邮箱：dqyxx@cea-igp.ac.cn

电 话：010-68729337

网 址：<https://www.sjdz.org.cn/>

Responsible Institution: China Earthquake Administration

Sponsored by: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration

Editor-in-Chief: Ding Zhifeng

Edited by: Editorial Board of Reviews of Geophysics and Planetary Physics

Published by: Editorial Office of Reviews of Geophysics and Planetary Physics

(No.5 Minzudaxue Nanlu, Haidian District, Beijing 100081, P. R. China)

Distributed in China: Editorial Office of Reviews of Geophysics and Planetary Physics

<https://www.sjdz.org.cn/>

(如有印书装订问题, 请与本刊编辑部联系调换)

公开发行人 国际标准刊号: ISSN 2097-1893 国内统一刊号: CN 10-1855/P 每期定价: 50.00元 (含邮费)