0254-6124/2024/44(1)-0019-32 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WEI Sijia, HE Yuyang, LIU Tianyu, YANG Wei, LIN Yangting. History and Implications of Asteroid Exploration (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(1): 19–50. DOI:10.11728/cjss2024.01.2024–yg02

# 小行星探测历史及启示*

魏思佳[1,2] 何雨旸[1] 刘天宇[2,3]
杨 蔚[1] 林杨挺[1]

1(中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室 北京 100029)

2(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

3(中国科学院地质与地球物理研究所 矿产资源研究重点实验室 北京 100029)

**摘 要** 自 1989 年美国 Galileo 探测器在探测木星的途中顺访了小行星 951 Gaspra 和 243 Ida 起, 小行星探测已经逐渐成为各主要航天国家深空探测的重点目标之一. 过去 30 年, 小行星探测任务从飞掠探测到专访探测再到采样返回, 探测类型愈加丰富, 并逐步从单纯的科学探测发展到小行星防御与资源利用. 中国预计在 2025 年发射天问二号, 同时计划开展首次小行星防御任务. 在此背景之下, 本文详细分析了迄今为止小行星探测任务的历程、科学目标、科学载荷配置以及主要研究成果, 并重点研究了日本 Hayabusa 和 Hayabusa 2 任务及美国 OSIRIS-REx 任务的样品储存管理、分配经验和返回样品实验室初步分析流程, 以期对中国未来小行星探测任务的设计和实施提供参考. 设计低成本、多频次采样返回任务; 统筹任务规划, 注重加强任务之间的配合; 加强科学团队建设是更好地规划中国未来小行星探测任务的要点.

**关键词** 探测任务, 采样返回, 地外样品, 储存管理与分配, 分析流程

**中图分类号** P148

# History and Implications of Asteroid Exploration

WEI Sijia[1,2] HE Yuyang[1] LIU Tianyu[2,3]
YANG Wei[1] LIN Yangting[1]

1(*Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

2(*College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

**Abstract** Since 1989, the Galileo spacecraft has passed asteroids 951 Gaspra and 243 Ida on its journey to Jupiter, with asteroid exploration gradually becoming a crucial aspect of deep space exploration for major aerospace nations. Over the past three decades, the asteroid exploration has evolved from mere flybys to targeted explorations, and eventually to sample return missions. During the process, the types of targets have become more diverse, and the objectives have shifted from purely scientific exploration to

* 国家自然科学基金项目资助 (62227901)

2023-11-15 收到原稿, 2024-01-10 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

asteroid defense and resource utilization. In 2025, China plans the Tianwen-2 asteroid exploration mission and its first asteroid defense mission. To better serve China's future missions, this paper reviews the asteroid exploration history, their scientific goals, payloads, and scientific contributions. For sample return missions, a detailed review of sample storage and distribution management was provided, as well as the preliminary ground laboratory analysis of Hayabusa and Hayabusa 2, and OSIRIS-REx missions. Planning low-cost, high-freguency sample-return missions, reinforcing mission collaborations,and establishing scientific design teams can better serve China's future asteroid explorations.

**Key words** Exploration mission, Sample return, Extraterrestrial samples, Sample management and distribution, Analysis process

## 0 引言

2013 年 8 月, 由包含中国国家航天局、美国国家航空航天局 (National Aeronautics Space Administration, NASA) 和欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 在内的 12 个国家的航天局联合发布的《全球探索路线图》提出月球、火星、近地小行星是未来的重点探测目标[1]. 《2016 中国的航天》白皮书提出小行星探测是未来中国深空探测的重要发展方向[2]. 开展小行星探测和研究是解决太阳系起源与早期演化、天体的形成与演化、恒星演化及其与行星形成的关系, 以及生命起源及其物质来源等科学问题的关键[3–5]. 富含金属的小行星和富含水及有机质的小行星则是未来空间资源利用的重要对象[6,7]. 小行星质量小, 其轨道易受各种因素的扰动而改变, 一些近地小行星在未来可能接近地球, 甚至撞击地球, 威胁人类的生命安全. 了解潜在威胁近地小行星的物理化学性质和轨道迁移是开展小行星防御的基础[8]. 因此, 对小行星进行系统的科学探测和研究可为揭示太阳系演化、评估空间资源、防御小行星撞击提供理论和技术基础.

2022 年, 中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院文献情报中心和科睿唯安公司联合发布的《2022 研究前沿》报告显示, 小行星首次取代火星成为最受关注的探测对象[9]. 然而, 相对于月球科学, 中国关于小行星的研究还非常薄弱. 基于 Web of Science 数据库, 通过关键词 Lunar or Moon 和 Asteroid or Meteorite 搜索获得的 SCI 论文数分别为 31032 篇和 32908 篇, 表明当前国际月球和小行星研究领域的体量基本相当. 但是中国在小行星领域的 SCI 论文总数仅有 1706 篇, 排在第 7 位, 远少于目前排名第二的月球领域 (见图 1). 在小行星越来越受到关注的大

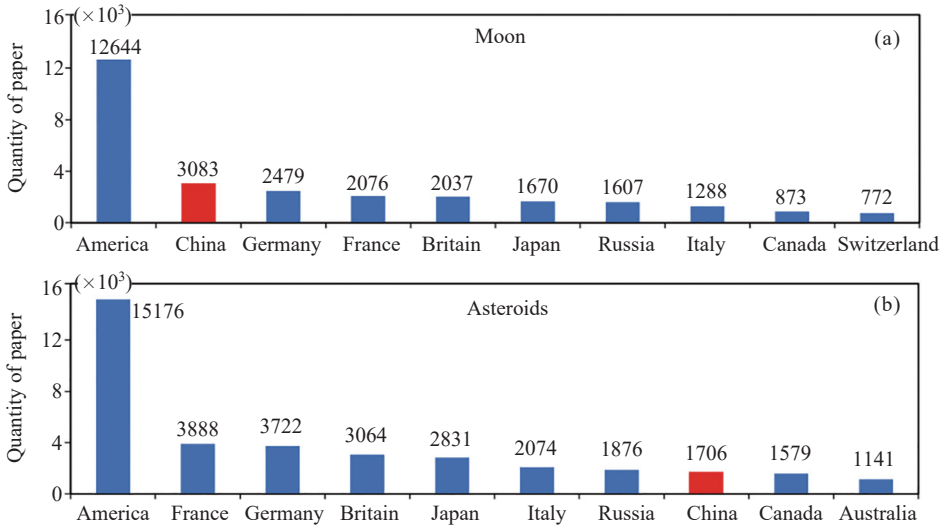



图 1 1900—2022 年发表月球 (a) 和小行星 (b) 相关的研究论文数量前十位的国家

Fig. 1 Top ten countries published research papers related to the Moon (a) and asteroids (b) from 1900 to 2022

时代背景下, 中国小行星研究亟待加强.

中国预计在 2025 年发射天问二号, 环绕探测近地小行星 469219 Kamo`oalewa 并采样返回[10], 同时计划于 2025 年开展首次小行星防御任务[11]. 为了能够更深刻地理解小行星探测的国际形势, 更好地服务小行星探测和防御任务的科学研究, 本文系统研究了迄今为止小行星探测任务及其科学目标、科学载荷配置和主要研究成果, 重点梳理了小行星探测与研究的发展趋势, 并对小行星采样返回任务 Hayabusa, Hayabusa 2 和 OSIRIS-REx 的实验室建设、样品管理与分配、样品初步分析流程和科学研究的组织进行了详细分析. 在此基础上, 讨论了小行星探测的发展趋势以及对中国未来小行星探测任务的启示, 以期对未来小行星探测任务的设计和实施提供参考.

# 1 小行星概述

## 1.1 定义及一般特征

小行星是指绕太阳公转, 体积和质量明显小于行星和矮行星, 基本不释放气体和尘埃的天体[12]. 太阳系中, 除了行星、彗星、天然卫星和矮行星外, 其余绕太阳运行的天体均可认定为小行星[12,13]. 太阳系内已被确认的 130 万颗小行星中[14], 约 92% 的小行星集中在火星与木星轨道之间的小行星带中, 被称为主带小行星[15]. 全部主带小行星的总质量约为 $3.0\times10^{21}$ kg, 约为月球质量的 4%[16]. 其余小行星主要分布于地球轨道附近 (近地小行星)、木星轨道上 (木星特洛伊小行星)、土星与天王星轨道之间 (半人马天体)、海王星轨道之外 (海外天体、柯伊伯带天体). 小行星的直径一般介于 0.010～1000 km 之间[17]. 大部分小行星形状不规则, 只有较大的小行星可能接近球形[14]. 较大的小行星被认为是太阳系形成过程中没有形成行星的残留物质[18–20]. 较小的小行星一般被认为是残余星子和小行星母体碰撞碎裂的产物, 保留了很多母体的性质[20]. 小行星可分为宏观孔隙度大约为 20% 的固体小行星, 以及宏观孔隙度 >30%, 具有碎石堆结构小行星和严重破碎的小行星[21].

小行星表面由于持续受到外来物质的高速轰击, 其表面特征会发生改变. 大部分小行星表面分布着形态各异的撞击坑, 以及粗粒碎石和细粒尘埃构成的风化层[22]. 风化层是由于小行星缺乏大气层和磁场, 其表面物质在陨石及微陨石的轰击、太阳风粒子注入及宇宙射线照射、温差风化等共同作用下, 化学组成及物理性质发生改变而形成[23]. 这些风化层保留了小行星在演化过程中地表和地形被改造的历史信息.

## 1.2 分类

小行星可依据其轨道位置、光谱特征、组成构型、形状特征、自传特性等进行分类. 前两种是最主要的分类方式.

### 1.2.1 轨道分布

按照小行星在太阳系的分布位置, 内太阳系的小行星可分为近地小行星、主带小行星和木星特洛伊小行星三种类型. 近地小行星的轨道与地球轨道部分交叉[24](见图 2[25]), 按照其轨道与地球轨道的关系又可细分为 Amors, Atens, Apollos 和 Atiras 型 (见表 1[25]). 主带小行星位于火星与木星之间. 木星特洛伊小行星是指与木星共用轨道, 一起绕着太阳运行的一大群小行星.

外太阳系的小行星可分为半人马天体 (Centaur) 及海王星外天体 (Trans-Neptune Objects, TNOs). 半人马天体的轨道主要位于木星和海王星之间, 可能穿越一个或多个巨行星的轨道. 因为受到巨行星的强烈引力摄动, 其轨道的动力学稳定周期通常为几百万年[26]. 海王星外天体是指运行轨道位于海王星以外的天体, 包括冥族小天体 (Plutinos)、柯伊伯带天体 (Kuiper Belt Objects, KBOs)、黄道离散天体 (Scattered Disc Objects, SDOs)、奥尔特云天体 (Oort Cloud, OC) 和特洛伊小行星 (Trojan, 不包含类地行星特洛伊小行星)[27].

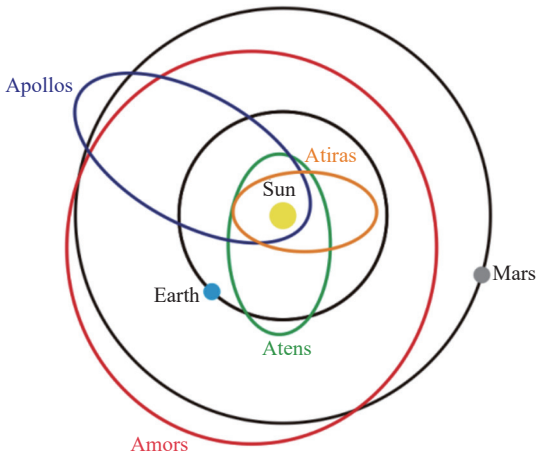



图 2 近地小行星类型

Fig. 2 Schematic diagram of near-Earth asteroid types

**表 1 近地小行星细分类型**

**Table 1 Subtypes of near-Earth asteroids**

| 类型 | 定义 | 含义 |
|---|---|---|
| Amors | $a > 1.0$ AU<br>1.017 AU $< q <$ 1.3 AU | 轨道位于地球轨道之外, 火星轨道之内 |
| Apollos | $a > 1.0$ AU<br>$q <$ 1.017 AU | 轨道与地球轨道相交, 且轨道长半轴比地球长 |
| Atens | $a <$ 1 AU<br>$Q >$ 0.983 AU | 轨道长半轴小于 1 AU, 且其中一部分与地球轨道相交, 并完全处于火星轨道之内 |
| Atiras | $a <$ 1.0 AU<br>$Q <$ 0.983 AU | 轨道完全位于地球轨道之内 |

**注** $a$ 为轨道长半轴, $q$ 为近日点, $Q$ 为远日点.

#### 1.2.2 光谱分类

小行星的成分主要取决于其形成时离太阳的距离[28], 而非其现今的轨道位置、组成及物性. 光谱特征反映了小行星的物质组成, 是最重要的分类依据. 利用反射光谱偏蓝 (波长较短的光线反射或散射的比例更高) 或偏红 (波长较长的光线反射或散射的比例更高) 的特征可将小行星分为 S 型、C 型、X 型及其他光谱类型四大类[7,29](见表 2[29–33]). S 型富含橄榄石、辉石等硅酸盐矿物. C 型与碳质球粒陨石有关, 是最普遍的小行星, 约占已知总数的 75%[7]. X 型成分复杂. Tholen[30] 根据颜色 、反照率 、光谱形状将小行星分成 14 种类型 (B, F, C, G, S, E, M, P, T, D, Q, R, V, A). Gaffey[31] 基于 2 μm/1 μm 吸收峰面积比所反映的橄榄石和辉石含量的比值, 将 S 型按橄榄石含量逐渐降低, 辉石含量逐渐增加的标准, 划分了 SI 到 SVII 7 个子类型. Bus 和 Binzel[32] 基于第二阶段主带小行星光谱调查 (Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey) 数据支持, 在可见光波段将 1447 颗主带小行星划分为 26 种类型 (B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch, S, Sa, Sq, Sr, Sk, Sl, X, Xc, Xe, Xk, T, D, Ld, L, Q, O, R, V, A, K). Bus 和 Demeo[33] 对 Bus 和 Binzel[32] 分类系统的光谱子类进行了删减、合并和新增, 最终将小行星划分 24 种类型 (B, C, Cb, Cg, Cgh, Ch, S, Sa, Sq, Sr, Sv, X, Xc, Xe, Xk, T, D, L, Q, O, R, V, A, K).

太阳系内距离太阳 2.5～2.7 AU 的位置被定义为雪线. 雪线内的水和其他挥发性物质通常以气态形式存在, 固态物质主要是岩石和金属. 该环境下形成的天体主要由岩石和金属构成[34]. 雪线外由于温度低, 水和其他挥发性物质以固态的形式存在. 因此, 外太阳系行星和其他小行星或卫星含有水冰、甲烷冰和氨冰[35]. E 型、M 型、S 型小行星形成于太阳系雪线以内, C 型、D 型、P 型形成于太阳系雪线以外. 当太阳系内天体轨道趋于相对稳定后, 残余星子持续吸积, 并在早期行星轨道迁移的过程中受到扰动而发生内外移动, 最终形成目前所观测到的分布[36], 即主带小行星内部 S 型和 C 型数量相当; 主带小行星外部则以 C 型小行星为主. 随着距离太阳的距离不断变大, 小行星由以 C 型为主逐渐变为以 P 型到 D 型为主. 其中 D 型小行星以特洛伊群小行星为主.

#### 1.2.3 其他分类

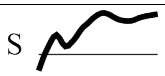
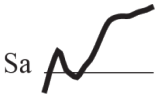
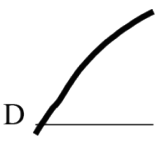
小行星按组成构型可分为单小行星、接触双星 (Contact binary)、双小行星 (Binary Asteriod)、三合小行星 (Triple Asteriod) 和小行星对 (Asteriod Pair, 可能源自相互绕转的双小行星). 按其形状可分为近圆型、陀螺型、延长型和接触双星. 按其自转特性可分为慢自转、快自转和非主轴自转小行星. 这些分类体现了小行星的多样性和演化历程[37,38].

## 2 小行星探测历程

小行星的研究主要受限于探测方式. 20 世纪 60 至 70 年代, 由于缺乏成熟的深空探测技术与经验, 当时行星探测关注的重点主要为月球、火星等行星, 对小行星的探测则主要通过地面观测获取其位置、轨道和分类等基本信息. 20 世纪 80 年代, 一些探测任务在途中对小行星进行了顺访探测. 20 世纪 90 年代开始实施专门针对小行星的探测任务. 当前, 共实施并完成小行星探测任务 13 次, 包括 7 次顺访任务和 6 次专访任务. 目前, 还有 3 次已经发射但未完成的

**表 2　小行星光谱类型**

**Table 2　Asteroid spectral type**

| 类型 | Tholen (1984) | Gaffey (1993) | Bus and Binzel (2002) | Bus and Demeo (2009) | 光谱特征描述及Bus-Demeo分类光谱特征(基线代表相对反照率为1) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 碳质 (C) | B | B | B | B | B-反照率较高的C型, 1～2 μm范围呈线性偏蓝, 约0.6 μm处为轻微的凸起 |  |
| | F | F | | | F-偏蓝的C型, 线性, 无明显吸收特征, 紫外线区域吸收较强 | |
| | C<br>G | C<br>G | C | C | C-线性, 0.6 μm附近呈现轻微凸起, 长于1.3 μm呈红色<br>G-与C型相似, 具有较深的紫外线吸收 |  |
| | | | Cb | Cb | Cb-线性, 长于1.1 μm呈红色 |  |
| | | | Cg | Cg | Cg-紫外区域特征微弱, 长于1.3 μm的略红 |  |
| | | | Cgh | Cgh | Cgh-1 μm附近略红, 与Cg相似; 紫外区域特征微弱, 0.7 μm附近存在较浅但宽的吸收带, 类似于Ch型 |  |
| | | | Ch | Ch | Ch-紫外区域特征弱, 波长长于1.1 μm的略红, 0.7 μm附近存在较浅但宽的吸收带 |  |
| 石质 (S) | S | SI | S | S | S-1 μm和2 μm处存在中等程度吸收特征, 不同天体在2 μm处的吸收带深度不同 |  |
| | | SII | Sa | Sa | Sa-1 μm处存在较宽和较深的吸收带, 类似于A型, 但斜率更小 |  |
| | | SIII | Sq | Sq | Sq-1 μm处存在较宽的吸收带, 与Q型相似, 1.3 μm处具有吸收特征 |  |
| | | SIV | Sr | Sr | Sr-1 μm和2 μm处存在吸收带, 相比于R型较浅较窄 |  |
| | | SV | Sk | Sv | Sk-介于S型和K型之间, 长于0.75 μm的形状为中等程度的上凸形状, 0.63 μm处的吸收特征较S型强 |  |
| | | SVI | Sl | | Sl-介于S型和L型之间, 长于0.75 μm的光谱与较L型为较浅到中等深度的吸收特征 | |
| | | SVII | — | | Sv-1 μm和2 μm处存吸收带, 相比于V型较浅较窄 | |
| X | E | E | X | X | X-线性, 中红到偏红变化<br>E-反照率>0.3的X型, 略红, 无明显吸收特征 |  |
| | M | M | Xc | Xc | M-反照率介于0.1到0.3的X型<br>Xc-略红到中红, 形状略微弯曲并向下凹 |  |
| | P | P | Xe | Xe | P-反照率<0.1的X型, 略红<br>Xe-略红到中红, 短于0.55 μm处存在吸收特征 |  |
| | — | — | Xk | Xk | Xk-形状略微弯曲并向下凹, 0.8～1 μm范围内存在吸收特征 |  |
| 其他 | T | T | T | T | T-线性, 中红到偏红, 形状通常具有微弱的下凹特征 |  |
| | D | D | D | D | D-线性, 偏红, 部分波长长于1.5 μm的较红, 部分可能形状略微弯曲 |  |

续表 2

| 类型 | Tholen (1984) | Gaffey (1993) | Bus and Binzel (2002) | Bus and Demeo (2009) | 光谱特征描述及Bus-Demeo分类光谱特征(基线代表相对反照率为1) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 其他 | — | — | Ld | — | Ld-短于0.7 μm的光谱紫外斜率较大, 长于0.7 μm的逐渐平缓, 0.75 μm处反照率约为1.3, 与典型的D型相比, 斜率在0.44～0.7 μm范围内通常较大, 在0.75～0.92 μm范围内更平缓 | |
| | — | — | L | L | L-0.7 μm左右的斜率从较大突然接近于0, 红外波段形状下凹, 反照率最大值在1.5 μm左右, 可能存在2 μm的吸收特征 |  |
| | Q | — | Q | Q | Q-明显的1 μm吸收特征, 2 μm处的吸收带深度不同 |  |
| | — | — | O | O | O-1 μm处的吸收光谱形状深且圆, 2 μm处存在明显的吸收特征 |  |
| | R | — | R | R | R-1 μm和2 μm处存在明显的吸收特征, 1 μm处的吸收带窄于Q型, 略宽于V型 |  |
| | V | — | V | V | V-1 μm和2 μm处存在明显的较窄吸收带 |  |
| | A | — | A | A | A-很红, 波长长于1 μm的光谱存在较深较宽的吸收带, 2 μm附近可能存在较浅的吸收带 |  |
| | — | K | K | K | K-形状弯曲相对较少, 波长长于1 μm处存在较宽的吸收带, 其波谷及左侧光谱的波峰较尖 |  |

专访任务以及 4 次计划任务 (见图 3).

目前已知的小行星探测任务中, 已经探访过以及未来即将探访的小行星具体轨道位置、形状大小如图 4 所示.

### 2.1 顺访任务

小行星顺访任务概况见表 3.

1989 年美国 Galileo 探测器在探测木星及其卫星的途中, 对小行星 951 Gaspra 和 243 Ida 进行了飞越探测, 并首次发现了 243 Ida 的卫星 Dactyl[39]. 探测结果显示, 951 Gaspra 是一颗形似花生 (18.2 km × 10.5 km × 8.9 km) 的致密天体, 密度为 4 g·cm$^{-3}$[40], 平均直径约为 12.2 km, 具有低密度撞击坑. 根据撞击坑密度及撞击频率估算, 951 Gaspra 表面年龄为 20～300 Ma[41–44]. 243 Ida 形如牛角面包 (59.8 km×25.4 km×18.6 km), 平均直径为 31.4 km, 密度较低为 2.6±0.5 g·cm$^{-3}$[21,45–47]. 其低密度指示 243 Ida 的内部可能存在大量空隙, 内部碎石堆结构则可能继承自 Koronis 石质小行星家族[48]. 243 Ida 的矿物成分类似于 LL 型球粒陨石, 表面撞击坑已达到饱和状态, 且存在大量由硅酸盐矿物橄榄石和辉石等构成的风化层[45,48,49].

20 世纪 90 年代, 国际上成功实施的顺访任务共 3 次. Cassini-Huygens 号在飞往土星的途中飞越探测了平均直径约 10.7±0.2 km, 呈球形的 S 型小行星 2685 Masursky, 从 160×10$^4$ km 外拍摄了这颗小行星一系列图像[50–52]. Deep Space 1 探测器飞越了尺寸仅 1.0～2.1 km, 几何反照率较高, 表面较为新鲜的 Q 型小行星 9969 Braille[53,54]. Stardust 探测器在对彗星 81 P/Wild2 尘粒采样返回的途中飞越了主体形似三棱柱, 底部为较小圆球体, 平均直径约为 4.8 km 的 S 型小行星 5535 Annefrank[52,55,56].

进入 21 世纪后, 国际上成功实施了 3 次顺访任务. Rosetta 任务以彗星 67 P 为主要目标, 以小行星 2867 Steins 和小行星 21 Lutetia 为拓展探测目标. 虽然其携带的 Philae 着陆器尝试登陆时, 未能有效固着在 67 P 彗核表面, 最终陷落在一处峭壁的阴影中而无法获取太阳能, 但 Rosetta 任务仍然取得了巨大成功. Rosetta 号探测发现彗星 67 P 含有机质、富氮、

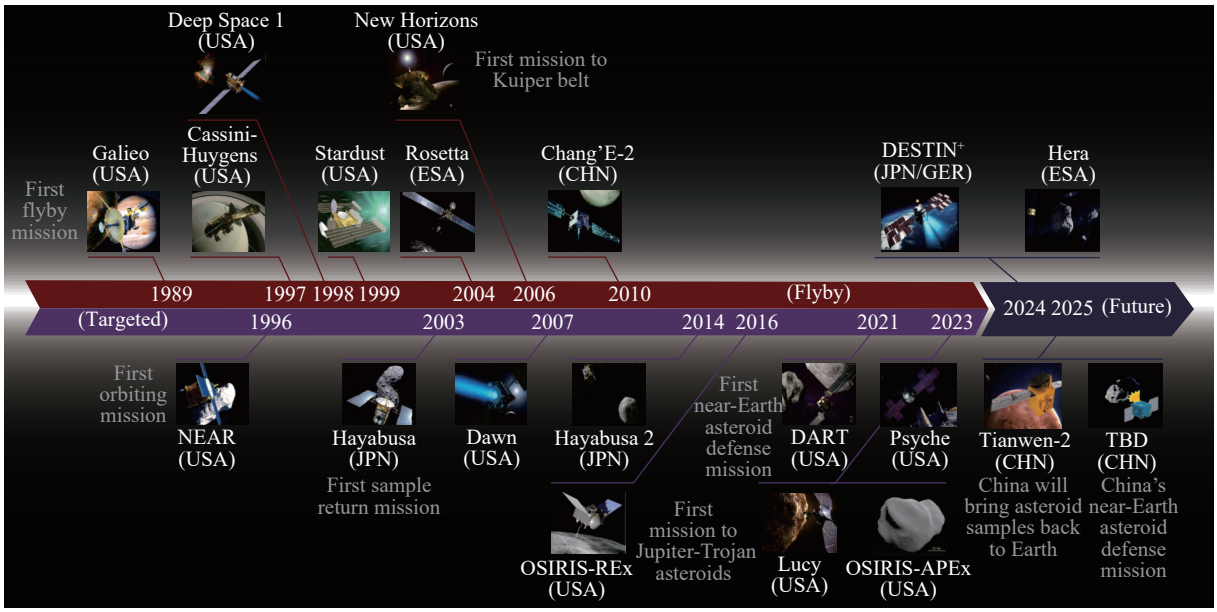
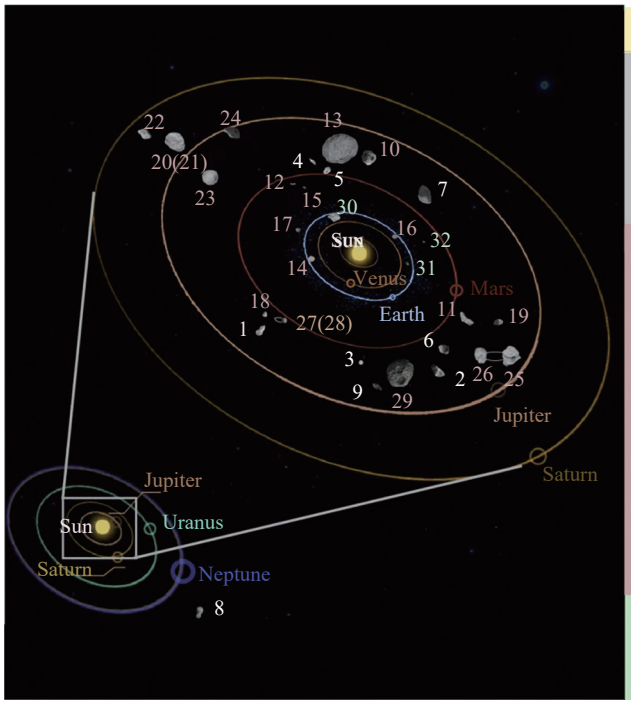



图 3 小行星探测历史 (USA-美国, ESA-欧洲航天局, CHN-中国, JPN-日本, GER-德国)

Fig. 3 History of asteroid exploration (USA-America, ESA-European Space Agency, CHN-China, JPN-Japan, GER-Germany)




| No. | Asteroids | Average diameter / km | Ref. |
|---|---|---|---|
| 1 | 951Gaspra | 12.2 | [49] |
| 2 | 243 Ida | 31.4 | [21] |
| 3 | 2685 Masursky | 10.7±0.2 | [51] |
| 4 | 9969 Braille | 2.1 | [52] |
| 5 | 5535 Annefrank | 4.8 | [52] |
| 6 | 2867 Steins | 4.9±0.4 | [62] |
| 7 | 21 Lutetia | 98.0±2.0 | [71] |
| 8 | 486958 Arrokoth | 18.26 | [74] |
| 9 | 4179 Toutatis | 5.4 | [52] |
| 10 | 253 Mathilde | 53±2.6 | [85] |
| 11 | 433 Eros | 16.84±0.06 | [52] |
| 12 | 25143 Itokawa | 0.33 | [52] |
| 13 | 4 Vesta | 525.4±0.2 | [114] |
| 14 | 162173 Ryugu | 0.869±0.004 | [120] |
| 15 | 1998 KY26 | 0.03 | [142] |
| 16 | 101955 Bennu | 0.49±0.00016 | [147] |
| 17 | 99942 Apophis | 0.34 | [155] |
| 18 | 153830 Dinkinesh | 0.55~0.87 | [158] |
| 19 | 52246 Donaldjohanson | 3.985±0.013 | [51] |
| 20 | 3548 Eurybates | 69.5 | [159] |
| 21 | Queta | 1.2±0.4 | [52] |
| 22 | 15094 Polymele | 21.075±0.136 | [52] |
| 23 | 11351 Leucus | 34.155±0.646 | [52] |
| 24 | 21900 Orus | 60.5±0.9 | [159] |
| 25 | 617 Patroclus | 140.362±0.868 | [62] |
| 26 | Menoetius | 104 | [160] |
| 27 | 65803 Didymos | 0.761±0.026 | [163] |
| 28 | Dimorphos | 0.151±0.005 | [163] |
| 29 | 16 Psyche | 226 | [168] |
| 27 | 65803 Didymos | 0.761±0.026 | [163] |
| 28 | Dimorphos | 0.151±0.005 | [163] |
| 30 | 3200 Phaethon | 5.8 | [170] |
| 31 | 469219 Kamo`oalewa | 0.046~0.058 | [171] |
| 32 | 2019 VL5 | 0.024 | [11] |

图 4 顺访 (灰色)、专访 (粉色) 和计划 (绿色) 任务中小行星的轨道位置、形状及相对大小

Fig. 4 Orbital positions, shapes, and relative sizes of asteroids in fly-by (gray), targeted (pink), and future (green) missions

富氙、无磁场、孔隙率高[57–61]. 2867 Steins 形似扁球体, 具有陀螺状外观, 平均直径约为 4.9±0.4 km, 中部具有巨型横跨赤道面发育的断层, 表面缺乏小型撞击坑, 空间风化作用较弱, 为一典型的 E 型小行星[62–65]. 21 Lutetia 形状不规则, 平均直径约为 98.0±2.0 km, 密度较小, 孔隙率较高, 地质特征较为复杂,

**表 3 小行星顺访任务概况**

**Table 3 Overview of fly-by asteroid exploration missions**

| 任务 | 国家/组织 | 主要探测目标 | 飞越小行星 | 轨道/光谱类型 | 发射时间 | 探测时间 | 相关科学载荷 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Galieo | 美国 | 木星 | 951 Gaspra<br>243 Ida | 主带/S<br>主带/S | 1989-10-18 | 1991-10-29<br>1993-08-28 | 固体成像仪、近红外成像光谱仪 |
| Cassini-Huygens | 美国 | 木星 | 2685 Masursky | 主带/S | 1997-10-15 | 2000-01-23 | Cassini成像科学分系统 |
| Deep Space 1 | 美国 | Tempel 1 | 9969 Braille | 主带/Q | 1998-10-24 | 1999-07-29 | 微型集成相机光谱仪、等离子体实验设备 |
| Stardust | 美国 | 81 P/Wild2 | 5535 Annefrank | 主带/S | 1999-02-07 | 2002-11-02 | 导航相机 |
| Rosetta | ESA | 67 P | 2867 Steins<br>21 Lutetia | 主带/E<br>主带/C/M | 2004-03-02 | 2008-09-05<br>2010-07-10 | 紫外成像光谱仪、微成像尘埃分析系统、光学、光谱和红外远程成像系统、离子中子分析光谱仪、可见光和红外热成像光谱仪 |
| New Horizons | 美国 | 冥王星 | 486958 Arrokoth | 柯伊伯带/未知 | 2006-01-19 | 2019-01-01 | 远程侦察成像仪、可见/红外光谱仪、紫外光谱仪 |
| 嫦娥二号 | 中国 | 月球 | 4179 Toutatis | 近地/S | 2010-10-01 | 2012-12-13 | 星载监视相机 |

与碳质球粒陨石或顽辉球粒陨石类似[66–71]. New Horizons 任务在探测冥王星及其卫星途中, 远距离飞越了平均直径约为 18.26 km, 表面撞击坑少, 由低速撞击形成的双小行星系统, 柯伊伯带小行星 486958 Arrokoth[72–75]. 中国嫦娥二号在圆满完成了预定的各项工程任务和科学探测后, 为最大限度利用剩余推进剂, 并进一步验证中国深空探测能力, 探测了小行星 4179 Toutatis. 研究结果表明小行星 4179 Toutatis 的最大长宽为 4.75 km×1.95 km, 平均直径约为 5.4 km, 形似生姜, 表面存在大小不一、分布不均的撞击坑, 曾遭受大量小天体撞击且可能经历了大撞击事件[52,76–79]. 此外, 根据嫦娥二号航天器获取的光学图像推测, 小行星 4179 Toutatis 可能是一个接触双星[80]; 累积巨石尺寸频率分布为–4.4±0.1, 陡峭的斜率显示了较高的破碎程度, 表明 4179 Toutatis 可能具有碎石堆结构[81].

### 2.2 专访任务

小行星专访任务概况见表 4.

#### 2.2.1 NEAR 任务

为进一步更快、更好、更便宜地探索太阳系, NASA 设立了 Discovery Program, 以支持一系列成本低且目标明确的空间探索任务. 近地小行星会合任务 (Near-Earth Asteroid Rendezvous, NEAR) 是其首个项目[82]. NEAR 任务的主要目标为了解 S 型近地小行星 433 Eros 的质量、体积、化学组成、矿物组成、形状形貌、内部结构、磁场, 并对其表土层特性、与太阳风的相互作用、表面尘埃和气体的活动, 以及自转特性等进行观测. 通过以上观测, 该任务试图探究小行星与陨石和彗星的联系, 以及早期太阳系的状况[83].

NEAR 号携带光谱成像仪、近红外成像光谱仪、X 射线/γ 射线谱仪、NEAR 激光高度计和磁力计, 于 1996 年 2 月 17 日发射, 1997 年 6 月 27 日在距离 C 型主带小行星 253 Mathilde 1200 km 处进行了飞越探测. 2000 年 2 月 14 日至 2001 年 1 月 24 日, 探测器环绕探测 253 Mathilde 一年后, 于 2001 年 2 月 12 日在 433 Eros 着陆[84]. 2000 年 3 月 14 日在 NEAR 号进入 253 Mathilde 轨道一个月后, NASA 为纪念著名行星地质学家 Eugene M. Shoemaker (1928－1997) 将 NEAR 号重新命名为 NEAR-Shoemaker 号.

探测结果显示, 253 Mathilde 形状为椭球形 (66 km×48 km×46 km), 平均直径约为 53±2.6 km, 密度较低为 1.3±0.2 g·m$^{-3}$, 孔隙度较高可达 50%, 很可能为碎石堆结构[84,85]. 表面较暗且成分均匀, 与一般的碳质球粒陨石类似物不同, 与异常热变质的 CI(Carbonaceous Ivuna-like)/CM(Carbonaceous Mighei-like) 型球粒陨石, 或冲击热变质的普通球粒

**表 4　小行星专访任务概况**

**Table 4　Overivew of specialized asteroid exploration mission**

| 任务 | 国家 | 发射时间 | 探测目标 | 轨道/光谱类型 | 探测历程/计划 | 科学载荷 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NEAR | 美国 | 1996-02-17 | 253 Mathilde<br>433 Eros | 主带/C<br>近地/S | 1997年6月27日飞越小行星253 Mathilde<br>2000年2月14日至2001年1月24日低轨环绕探测253 Mathilde<br>2001年2月12日着陆433 Eros | 光谱成像仪、近红外成像光谱仪、X射线/γ射线谱仪、NEAR激光高度计、磁力计 |
| Hayabusa | 日本 | 2003-05-09 | 25143 Itokawa | 近地/S | 2005年9月12日到达预定轨道并进行环绕探测<br>2005年11月19日着陆25143 Itokawa<br>2010年6月13日成功降落在澳大利亚沙漠 | 小行星多波段成像相机、光学雷达、近红外光谱仪、X射线荧光光谱仪、广域摄像机、四离子推进器 |
| Dawn | 美国 | 2007-09-27 | 4 Vesta<br>1 Ceres<br>(矮行星) | 主带/V<br>主带/C | 2011年7月16日至2012年9月5日环绕探测4 Vesta<br>2015年3月7日至2018年6月环绕探测1 Ceres | 可见/红外光谱仪、X射线谱仪、γ射线/中子探测仪、分幅式相机 |
| Hayabusa 2 | 日本 | 2014-12-03 | 162173 Ryugu<br>1998 KY26 | 近地/C<br>近地/未知 | 2018年6月27日抵达162173 Ryugu<br>2019年2月21日和2019年7月11日两次接触采样<br>2019年4月5日释放撞击器, 计划在2026年飞越2001 CC21<br>2031年抵达1998 KY26 | 可见/红外光谱仪、X射线谱仪、γ射线/中子探测仪、分幅式相机、小型携带撞击器、表面勘察着陆器 |
| OSIRIS-REx | 美国 | 2016-09-08 | 101955 Bennu | 近地/C | 2018年12月3日抵达<br>2020年10月20日成功采集样品<br>2023年9月24日返回地球 | 相机套件、激光高度计、可见光/红外光谱仪、热红外光谱仪、风化层X射线成像光谱仪、触地即离样品采集设备 |
| OSIRIS-APEX | 美国 | 2023-10-31 | 99942 Apophis | 近地/S | 2023年探测器继续围绕太阳运行,<br>2029年近离环绕探测99942 Apophis | 与OSIRIS-REx相同 |
| Lucy | 美国 | 2021-11-16 | 152830 Dinkinesh | 主带/S | 2023年11月1日飞越152830 Dinkinesh | 远程勘测成像仪、光学/近红外光谱仪、热红外光谱仪 |
| | | | 52246 Donaldjohanson | 主带/C | 2025年4月20日飞越52246 Donaldjohanson | |
| | | | 3548 Eurybates | 特洛伊/C | 2027年8月12日飞越3548 Eurybates及Queta | |
| | | | Queta | 特洛伊/C | | |
| | | | 15094 Polymele | 特洛伊/P | 2027年9月15日飞越15094 Polymele | |
| | | | 11351 Leucus | 特洛伊/D | 2028年4月18日飞越11351 Leucus | |
| | | | 21900 Orus | 特洛伊/D | 2028年11月11日飞越21900 Orus | |
| | | | 617 Patroclus | 特洛伊/P | 2033年3月3日飞越617 Patroclus和Menoetius | |
| | | | Menoetius | 特洛伊/P | | |
| DART | 美国 | 2021-11-24 | 65803 Didymos | 近地/S | 2022年9月26日撞击65803 Dimorphos | 光学导航相机、意大利小行星成像轻型立方星 |
| | | | Dimorphos | 近地/S | | |
| Psyche | 美国 | 2023-10-13 | 16 Psyche | 主带/M | 2029年8月至2030年5月环绕探测16 Psyche | 多光谱成像仪、磁强计、X波段无线电远程通信系统、γ射线和中子谱仪 |

陨石更为相似[86]. 253 Mathild 表面布满了撞击坑, 存在五个互不干扰的、保存完整的、直径与其平均半径近似的巨大撞击坑. 其中最大的撞击坑 Karoo 直径约为 33 km[84]. 433 Eros 形似马铃薯, 平均直径约为

16.84±0.06 km, 质量为 (7.2±1.8)×$10^{15}$ kg, 推测密度为 2.5±0.8 g·$m^{-3}$, 很可能为致密小天体, 周围无磁场[52,84,87]. 其成分类似于普通球粒陨石[84,85,88]. 433 Eros 的表面存在大量线性凹陷等地貌, 以及大量分布不均、大小不一、埋深不同的撞击碎片和细粒物质组成的复杂风化层, 撞击坑数量少, 尤其缺少小型撞击坑[89–91]. 其表面尘埃因为静电传输作用形成了“尘埃池”[92].

#### 2.2.2 Hayabusa 任务

1995 年日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 的前身日本航天科学研究所提出了小行星采样返回任务 Hayabusa. 这次任务的科学目标除了探测小行星的基本物理参数、表面形貌特征、物质成分和内部结构外, 还结合地面观测、空间遥感探测与实验室陨石分析, 研究 S 型小行星与陨石的相关性, 理解 25143 Itokawa 的热历史[13,93].

2003 年 5 月 9 日, Hayabusa 携带小行星多波段成像相机、光学雷达、近红外光谱仪、X 射线荧光光谱仪、广域摄像机从地球出发[94]. 2005 年 9 月 12 日 Hayabusa 到达预定轨道后, 开始环绕探测 S 型近地小行星 25143 Itokawa. 2005 年 11 月 19 日 Hayabusa 成功在 25143 Itokawa 着陆. 2010 年 6 月 13 日 Hayabusa 成功返回并降落在澳大利亚沙漠中.

遥感观测显示, 25143 Itokawa 的形状不规则 (0.355 km×0.294 km×0.209 km), 平均直径为 0.33 km. 质量约为 (3.58±0.18)×$10^{10}$ kg, 体密度估计值约为 1.95±0.14 g·$cm^{-3}$, 是一颗典型的碎石堆结构小行星, 自转周期为 12.1 h[95–98]. 由矿物成分均匀的较小“头部”和较大“身体”低速相碰后连接形成, “颈部”为一个收缩环状结构[95,96]. 表面由粗糙和光滑两种区域构成, 界限清晰[95–97]. 粗糙区域内巨石数量较多, 光滑区域较为平整和均匀. 表面米级别的巨石西侧较东侧多[95–97]. 经统计, 25143 Itokawa 表面的撞击坑不超过 100 个, 这些坑的直径基本 >1 m[38]. 此外, 25143 Itokawa 表面存在毫米到厘米级的风化层[95].

Hayabusa 在距离 25143 Itokawa 表面 20 km 处进行了为期 2 个月的环绕探测. 原计划发射金属球, 并将表面样品溅射到打开的样品返回舱中, 但由于金属球发射故障, 该任务未能实施成功. Hayabusa 探测器在小行星表面着陆时, 溅射出的尘埃颗粒进入了敞开的样品舱. 返回后, 研究人员在样品舱内壁发现了大小介于 10～100 μm 的 1500 颗尘埃颗粒.

与遥感观测所揭示的基本物理与地质学特征相比, 返回样品的实验室分析获得了更为丰富的研究成果. 返回的尘埃颗粒分析显示, 25143 Itokawa 表面由橄榄石、辉石、斜长石、陨硫铁, 以及少量的铁纹石、镍纹石、铬铁矿、钾长石、磷灰石、磷钙钠石构成[99–101]. 这些颗粒的矿物组成和模式含量、体密度、孔隙率、粒度和氧同位素组成都与 LL 型球粒陨石非常相似[99,101–104], 此外未发现天然有机化合物[105–107]. 这些颗粒表面从外至内又可细分为再沉积层、部分非晶态层和结晶基底层, 纳米铁较小[108,109], 具有空间风化的特征. 颗粒表面稀有气体 Ne, He, Ar 含量随深度发生变化. He 主要存在于<30 nm 的浅层, 而 Ne 则存在于 30～70 nm 的深层. 这些稀有气体主要来源于太阳风和宇宙射线等外部粒子的多次注入和扩散[110]. 根据宇宙射线产生的$^{21}$Ne 含量估算, 这些颗粒正在以数十厘米每百万年的速度流失到空间中[110].

氧同位素测温结合$^{26}$Al-$^{26}$Mg 年代学研究显示, 25143 Iokawa 母体在太阳系形成后的 1.9 到 2.2 个百万年内, 平均直径至少增生到 20 km. 太阳系形成后的 5 百万年内, 母体温度达到峰值温度即 800 ℃, 此后逐渐缓慢冷却. 某个时刻, 母体又遭受了一次灾难性碰撞, 形成了大量碎片. 这些碎片一部分聚集起来形成“头部”, 一部分聚集起来形成“身体”. 二者受到引力作用同向旋转并且逐渐靠近, 最终以较低的速度碰撞接触, 形成了 25143 Itokawa[111].

#### 2.2.3 Dawn 任务

2007 年 9 月 27 日美国发射的 Dawn 探测器, 首次实现主带小行星的环绕探测, 也是历史上第一个先后环绕探测 V 型主带小行星 4 Vesta(2011 年 7 月 16 日至 2012 年 9 月 5 日) 和 C 型矮行星 1 Ceres (2015 年 3 月 7 日至 2018 年 6 月) 两个天体的探测器. 该项任务旨在通过详细的环绕探测, 深入研究形成于太阳系早期完整分化的两个原行星, 探究导致两个天体不同形成和演化路径的关键因素, 同时深化对类地行星形成过程和形成条件的认知, 以此加深对太阳系早期形成和演化过程的理解[112]. 由于 1 Ceres 是矮行星, 相关研究成果不在本篇论文中展示. Dawn 携带了可见/红外光谱仪、X 射线谱仪、γ 射线/中子探测仪和分幅式相机等科学载荷[113].

4 Vesta 是一个扁圆球体, 平均直径为 525.4±0.2 km[114]. 表面地形复杂, 存在着一系列平行并环绕赤道的线性凹陷, 撞击坑数量庞大且南北分布不均(北半球较多) [115]. 南半球被最近两次发生的撞击事件所改造, 形成于 10±2 亿年, 直径为 500±25 km, 深度为 19±6 km 的大型撞击盆地 Rheasilvia 盆地覆盖在形成于 21±2 亿年, 直径为 400±25 km, 深度为 12±2 km 的 Veneneia 盆地之上[116,117].

4 Vesta 获得的近地光谱数据指示 4 Vesta 被认为可能是 HED 陨石 (Howardite-Eucrite-Diogenite meteorites, 古铜钙无球粒陨石、钙长辉长无球粒陨石和古铜无球粒陨石) 的来源[115–118]. 4 Vesta 经历了复杂的岩浆演化, 是一个高度分异的天体, 由铁镍核、富含橄榄石的硅酸盐幔、钙长辉长无球粒陨石组成的下地壳和以奥长古铜无球粒陨石为主的上地壳构成[114,118,119]. 赤道区域物质性质类似于钙长辉长无球粒陨石, 而南极撞击盆地物质性质则更类似于奥长古铜无球粒陨石[119].

#### 2.2.4 Hayabusa 2 任务

2014 年 12 月 3 日发射的 Hayabusa 2 探测器是日本继 Hayabusa 后由 JAXA 负责的又一项采样返回任务. 该任务旨在研究 C 型近地小行星 162173 Ryugu 表面物质的分布, 探究太阳系早期雪线周围物质的运输与混合过程; 寻找返回样品中与有机物质共存的水蚀变矿物, 探究其母体中矿物–水–有机质的反应过程; 通过年代学、后期热蚀变和空间风化的研究, 反演其形成过程; 通过与撞击过程相关的物理性质重建其碰撞历史, 探究星子在太阳系形成阶段的动力学过程; 进而探究早期太阳系、早期太阳系、原行星盘和小行星中的物质演化[120]. Hayabusa 2 携带了光学导航相机、近红外光谱仪、热红外成像仪、激光高度计、独立照相机、微/纳小行星实验机器人等科学载荷外, 配备了新研制的小型携带撞击器和表面勘察着陆器[121].

遥感观测结果显示, 162173 Ryugu 为罕见的 Cb 型小行星, 具有典型的“顶部形状”, 即具有一个突出的赤道脊, 从两极看呈菱形[122–124]. 162173 Ryugu 平均直径为 0.896±0.004 km, 孔隙度> 50%, 反射率低, 为典型的碎石堆小行星[122–124]. 自转周期为 7.63262±0.00002 h, 相较其他碎石堆小行星的速度慢了两倍[124]. 绝大部分表面撞击坑直径都大于 100 m, 缺乏小型撞击坑, 赤道脊附近的撞击坑数量最多[125]. 表面缺乏沙粒到卵石大小的风化层, 大量覆盖着鹅卵石到巨石大小的岩石[126]. 纬度 ≤70°的范围内, 每 50 $km^2$ 可见一个直径约为 20 m 的巨石[126]. 空间风化可能导致了 162173 Ryugu 表面脱水, 使得 2.7 μm 的羟基吸收带在反射光谱中相对于一般 C 型小行星较弱[127].

2019 年 2 月 20－22 日, Hayabusa 2 探测器对 162173 Ryugu 进行了第一次着陆采样, 采集到的表面样品共 3.2 g, 储存于样品舱 A 中. 为了构建 162173 Ryugu 的碰撞历史和陨石坑年代学的物理基础, 并构建基于真实小行星碰撞实验的物理模型; 原位观察撞击事件对次表层的影响, 并评估 162173 Ryugu 的次表层孔隙度、颗粒大小、物质分布等; 测量撞击引起的地形变化; 以及评估小行星的材料强度. 2019 年 4 月 3－5 日, Hayabusa 2 探测器向 162173 Ryugu 释放了一个重达 14 kg 的撞击器[128,129]. 这次撞击产生了直径超过 10 m, 深度约 2～3 m 的人造撞击坑[130]. 2019 年 7 月 8－11 日, Hayabusa 2 探测器在该人造撞击坑中进行了第二次着陆采样, 采集样品共约 2.2 g, 储存于样品舱 C 中[131]. 在首次采样和二次采样的过程中, 样品舱 B 处于打开状态, 但仅采集到 13±0.5 mg 样品, 表明三个样品舱中物质的混合较少. 返回样品于 2020 年 12 月 6 日降落于澳大利亚沙漠中.

返回样品地面分析结果显示, 162173 Ryugu 在岩石学、矿物学、同位素组成以及年代学等方面与 CI 型球粒陨石具有极高的相似性, 并具有重氮和富氘的特点, 与星际尘埃相似[132,133]. 样品中含有次生水蚀变矿物, 包括共生的蛇纹石–皂石、白云石、布伦纳石、羟基磷灰石、磁黄铁矿、镍黄铁矿, 以及磁铁矿[131–136]. 水除了以羟基形式存在于硅酸盐中外[131–133,135,136], 首次以含盐和有机物的液态碳酸水的形式存在于黄铁矿晶体包裹体中. 162173 Ryugu 样品中富含非生物成因的有机物化合物, 包括酮类、脂肪胺、羧酸、芳香烃、含氮杂环化合物, 以及 15 种氨基酸[137,138]. 采集到的气体主要包括 $H_2$, $^4He$, $N_2$ 和 $^{40}Ar$, 另有少量的 $CH_4$[139]. 162173 Ryugu 的样品颗粒表层由太阳风注入形成的平滑层和由微小流星体碰撞加热融化形成的泡沫层两部分组成. 样品中的 $Fe^{3+}$普遍被还原为 $Fe^{2+}$, 缺少空间风化中常见的纳米铁单质[127,140]. 162173 Ryugu 样品中未发现太阳系形

成和早期演化过程残留的富钙富铝难熔包体 (CAIs, Calcium Aluminum-rich Inclusions) 及高温成因的球粒, 却富含前太阳系颗粒, 例如纳米金刚石和石墨[134,135].

162173 Ryugu 母体早期可能为含冰小行星, 在太阳系形成后 180 万年时, 于外太阳系木星轨道以外形成[132,136]. 放射性元素$^{26}$Al 衰变产生的热量使得其内部温度升高, 水冰融化产生了广泛的水蚀变. 此后, 162173 Ryugu 母体又遭受了约为其自身大小 10% 的天体撞击, 形成的抛射物质逐渐吸积形成了 162173 Ryugu[136]. YORP(Yarkovsky–O'Keefe–Radzievskii–Paddack) 效应, 即旋转的小行星在温度差的作用下加速或者减缓自身的转动, 导致 162173 Ryugu 的旋转周期发生变化, 形成了其独特的"顶部形状"[122,141]. 大约 5 百万年前, 162173 Ryugu 迁移到近地轨道, 并在 1 百万年前, 再次向太阳的轨道偏移[134]. 162173 Ryugu 表面在短暂地接近太阳的过程中受到太阳的炙烤, 并伴随着微陨石的撞击而迅速红化[128,134].

Hayabusa 2 完成预定采样返回任务后, 还剩余约 30 kg 推进剂, 且各个系统工作状态良好. 因此继续进行下一步的探测任务, 计划将于 2031 年抵达平均直径约为 30 m 的小行星 1998 KY26[142].

#### 2.2.5 OSIRIS-REx 任务

"起源、光谱解释、资源识别与安全–风化层探测器" OSIRIS-REx(Origins, Spectral Interpretation, Resource identification, Security-regolith Explorer) 是 NASA 的首个小行星采样返回任务. 这次任务的主要科学目标为返回和分析 101955 Bennu 表面样品的性质、演化历史、矿物和有机质的分布, 确定原始富碳小行星的整体性质, 并与现有的小行星地基观测数据进行对比; 绘制原始富碳小行星全球性质、化学、矿物分布图, 研究其地质和动力学历史, 为返回样品提供相关的地质背景信息; 观测并测量 101955 Bennu 的 YORP 效应[143].

基于遥感观测, OSIRIS-REx 团队提出了一系列的假说. 所有的研究将围绕以下假说展开[144].

**假说 1** 对 101955 Bennu 表面的遥感观测已经准确地描述了其矿物、化学和物理特性.

**假说 2** 101955 Bennu 含有前生命有机化合物.

**假说 3** 101955 Bennu 含有不同来源的前太阳物质.

**假说 4** 101955 Bennu 母体是由原行星盘雪线之外的物质吸积形成.

**假说 5** 101955 Bennu 母体内部的地质活动发生在太阳系早期.

**假说 6** 101955 Bennu 母体形成 30 亿年后经历了一次灾难性的破坏.

**假说 7** 101955 Bennu 母体遭受了灾难性破坏后, 产生的物质重新堆积而成了其现在的碎石堆结构.

**假说 8** 亚科夫斯基效应, 即小天体由于各向不均的热辐射而获得动能的现象, 将 101955 Bennu 推向太阳穴内部, 并达到动力共振, 使得其离开主带, 成为一颗穿越类地行星轨道的小行星.

**假说 9** 表面过程贯穿了 101955 Bennu 的整个演化历史.

**假说 10** 101955 Bennu 表面物质的物理、化学和光谱特性已因暴露在空间环境中而改变.

**假说 11** Nightingale 采样点所在的 Hokioi 陨石坑是最近形成的, 含有未风化的物质.

2016 年 9 月 8 日, OSIRIS-REx 号携带相机套件、激光高度计、可见光/红外光谱仪、热红外光谱仪、风化层 X 射线成像光谱仪、样品采集器等科学荷载, 对可能代表原始太阳系成分的碳质近地小行星 101955 Bennu 进行遥感环绕探测和采样返回. OSIRIS-REx 号于 2018 年 12 月 3 日到达 101955 Bennu, 2020 年 10 月 20 日成功采集重约 121.6 g 的样品, 并于 2023 年 9 月 24 日抵达地球[145].

环绕探测表明, 101955 Bennu 是一个具有"顶部"形状的小行星[146], 平均直径为 0.49±0.00016 km, 体密度仅为 1.19 ± 0.013 g·cm$^{-3}$, 孔隙度约为 50%～60%[147]. 自转速率为 4.276057±0.000002 h, 且随时间不断变化[124,147]. 101955 Bennu 表面几乎被石块和巨石覆盖, 缺乏细粒风化层[148,149]. 其表面年龄为 1～10 亿年, 离开主小行星带的时间为 1.75±75 Ma[150,151]. 101955 Bennu 与 CM 型碳质球粒陨石最相似, 含有大量的水分, 表面存在大量水合层状硅酸盐、氧化铁, 表明母体可能发生过较为强烈的水蚀变[152,153].

OSIRIS-REx 带回了迄今为止返回地球最多的小行星样品. 目前, 已有研究在美国休斯顿约翰逊航天中心 (Johnson Space Center, JSC) 完成了对少量 101955 Bennu 样品的快速分析, 获得了 101955 Ben-

nu 富含碳和水的证据.

相比于环绕探测 NEAR 任务和 Dawn 任务, Hayabusa 任务和 Hayabusa 2 任务获得的成果尤为丰硕. 在 Hayabusa 和 Hayabusa 2 返回样品前, 对小行星的了解在很大程度上依赖于陨石样品. 然而, 将陨石样品与母体小行星匹配是非常困难的. 而这些返回样品却是来自特定的、特征保存较为完好的小行星的原始样品. 相比于飞越和环绕探测仅依靠遥感数据获得小行星的基本物理和地质学特征, 地面的高精度分析技术可对返回样品的物理化学性质进行精确测定, 从而获取小行星的物质组成, 探究小行星和太阳系的形成演化历史. 可以预见的将来, OSIRIS-REx 任务返回的样品也将为小行星的研究提供更多的信息.

#### 2.2.6 OSIRIS-APEX 任务

OSIRIS-REx 探测器成功将 101955 Bennu 小行星样本送回地球后正在前往下一个目标——最有可能撞击地球的, 构成潜在威胁的小行星 99942 Apophis. 99942 Apophis 为 S 型小行星, 将于 2029 年接近地球, 距离约为 5.6 个地球半径[154]. NASA 将这个拓展任务重新命名为 OSIRIS-APEX(OSIRIS-Apophis Explorer). OSIRIS-APEX 探测器预计于 2029 年 4 月 13 日, 对 99942 Apophis 开展为期 18 个月的调查[155], 研究 S 型碎石堆小行星演化的过程, 包括与地球相遇过程中, 其行星潮汐力对其自旋状态、轨道和表面演化的影响, 提高对太阳系潮汐过程的理解; 确定 S 型近地小行星的特征, 准确测量其轨道和运动状态评估, 以研究其动力学演化; 通过监测 99942 Apophis 在接近地球期间及之后的情况, 评估和降低其对地球的潜在威胁, 为行星防御策略的制定提供指导[156,157].

#### 2.2.7 Lucy 任务

2021 年 10 月发射的 Lucy 探测器携带远程勘测成像仪、光学/近红外光谱仪和热红外光谱仪, 计划一次详细研究 8 颗不同的小行星, 并重点探测木星轨道上的 6 颗特洛伊小行星. Lucy 已于 2023 年 11 月 1 日飞越主带小行星 152830 Dinkinesh, 光谱及图像数据显示, 152830 Dinkinesh 为直径约为 790 m 的 S 型小行星, 并具有一颗直径约为 220 m 的卫星[158]. Lucy 号预计于 2025 年 4 月 20 日、2027 年 8 月 12 日、2027 年 9 月 15 日、2028 年 4 月 18 日、2028 年 11 月 11 日、2033 年 3 月 3 日飞越 C 型主带小行星 52246 Donaldjohanson (平均直径约为 3.985 ± 0.013 km)、C 型特洛小行星 3548 Eurybates (平均直径约为 69.3±1.4 km)、C 型特洛伊小行 Queta (平均直径约为 1.2±0.4 km)、P 型特洛伊小行星 15094 Polymele (平均直径约为 21.075±0.136 km)、D 型特洛伊小行星 11351 Leucus (平均直径约为 34.155±0.646 km)、D 型特洛伊小行星 21900 Orus(平均直径约为 60.5±0.9 km) 和 P 型特洛伊小行星双星系统 617 Patroclus (平均直径约为 140.362±0.868 km) 和 Menoetius (平均直径约为 104 km) [52,159–161].

Lucy 任务的科学目标包括探测小行星的质量、体积、形状和反射率, 绘制撞击坑空间和大小频率分布图, 确定小行星地壳结构和分层性质等地质特征, 并估算表面的相对年龄; 探测小行星的表面光谱、物质组成、风化层性质, 确定矿物、水、冰的分布特征; 通过对撞击坑、裂缝、溅射毯、暴露的层理等内部特征, 确定其浅表层成分. 该任务将通过研究不同性质的特洛伊小行星来探究太阳系与行星系统的形成和演化, 以及特洛伊小行星是否存在卫星和环[161].

#### 2.2.8 DART 任务

双小行星重定向测试 (Double Asteroid Redirection Test, DART) 任务是全球首个小行星轨道偏转任务, 即小行星撞击与偏转评估计划的第一部分[8,162]. 该任务的主要目标为自主导航撞击由 S 型近地小行星 65803 Didymos(平均直径约 0.761±0.026 km) 和 Dimorphos(平均直径约为 0.151±0.005 km) 构成的双小行星系统中的 Dimorphos[163]. 通过测量撞击前后 Dimorphos 旋转周期的改变、撞击及溅射物对 Dimorphos 的影响, 来验证动能撞击技术偏转小行星轨道的可行性. 同时, 研究撞击 Dimorphos 引起 65803 Didymos 的旋转周期变化, 并利用地基观测测量其偏转量, 进而评估超高速小行星撞击的动量传递效率[162,164]. 这次任务是世界上首次进行近地天体撞击防御技术试验的任务.

2021 年 11 月 24 日, DART 探测器携带小行星光学导航和勘察相机、意大利小行星成像轻型立方星等科学荷载前往 65803 Didymos-Dimorphos 双小行星系统[163,165]. 2022 年 9 月 26 日 DART 探测器以 6.6 $km\cdot s^{-1}$ 的速度撞击了 Dimorphos. 这次撞击产生的溅射物质量约为 Dimorphos 的 0.3%～0.5% [165,166],

成功使其沿轨道速度分量瞬时减少 2.70 ± 0.10 mm·s$^{-1}$, 轨道周期改变了 33±1 min, 远超预计的 7 min[165,167]. 撞击过程中, 溅射物的反冲动量大于探测器对其产生的动量改变量[165].

DART 任务的圆满完成, 促进了世界各航天大国及组织对行星防御的重视. 中国也计划于 2025 年发射动能撞击器演示撞击小行星 2019 VL5[11].

#### 2.2.9 Psyche 任务

2023 年 10 月 13 日 Psyche 探测器在 JSC 发射, 将对主带金属小行星 16 Psyche 进行远距离环绕探测. 16 Psyche 是太阳系目前已知最大的, 含有大量铁、镍和稀有金属的小行星. 继 S 型小行星 433 Eros 和 25143 Itokawa, 以及 C 型小行星 162173 Ryugu 和 101955 Bennu 的探测任务后, 这是人类首次对 M 型小行星进行研究. 本次任务将针对其成分、形态、基础物理与地质特征进行详细研究, 探测其磁场的存在情况, 填补小行星探测领域的空白, 并探讨固体行星金属内核的形成机制[168].

### 2.3 未来任务

已公布的四项任务中, 两项任务与行星防御密切相关, 一项为采样返回任务 (见表 5).

2024 年 ESA 计划执行 Hera 任务, 对 DART 撞击后的 65803 Didymos 和 Dimorphos 的物理性质, 以及撞击后造成的撞击坑的详细特征进行探测. 该任务将评估超高速小行星撞击的动量传递效率, 并精确修正 DART 试验中的动能撞击偏转模型. 在研究双星系统的形成演化机制、早期太阳系的历史的同时, 为未来的小行星撞击偏转技术提供重要参考[169].

2024 年日本将与德国合作, 通过 Destiny$^+$探测器开展小行星尘埃探测任务. Destiny$^+$预计于 2026 年前后抵达近地小行星 3200 Phaethon 附近, 开展尘埃粒子的物理性质、化学组成及尘埃喷射机制的相关研究[170].

2025 年 5 月前后, 中国计划执行天问二号任务, 环绕探测最稳定的地球准卫星即 469219 Kamo`oalewa, 并在约一年后对其进行采样返回. 这颗小行星光谱类型未知, 直径约为 41 m, 自传周期约为 28 min[171], 光谱类型尚不确定, 但表面矿物成分与月球硅酸盐类似, 推测该小行星起源于月球的表面[3,172]. 将样品送回地球后, 天问二号将前往小行星带, 继续环绕探测主带彗星 311 P. 天问二号任务旨在了解太阳系典型小天体形貌、组成、内部结构等特征, 揭示形成和演化机理; 研究小行星和彗星中的水、有机物、矿物综合特征, 探索太阳系形成早期的物质和生命信息, 并研究太阳风与小天体的相互作用过程; 了解小天体尘埃的空间分布特征和动态变化[10].

2025 年中国计划发射动能撞击器, 将于 2026 年撞击小行星 2019 VL5, 研究该小行星的形状、大小、成分和结构, 探索该小行星的轨道特征和动力学演化规律, 并揭示撞击过程中的动量传递规律[11].

**表 5 小行星未来任务概况**

**Table 5 Overview of future asteroid exploration mission**

| 任务 | 国家/组织 | 计划时间 | 探测目标 | 轨道/光谱类型 | 探测计划 | 科学载荷 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hera | ESA | 2024 | 65083 Didymos | 近地/S | 2026年12月至2027年6月详细环绕探测65803 Didymos和Dimorphos | 小行星分幅相机、热红外成像仪、行星高度计、高分辨率多光谱成像仪、无线电科学实验设备 |
| | | | Dimorphos | 近地/S | | |
| Destiny$^+$ | 日本 德国 | 2024 | 3200 Phaethon | 近地/C | 预计4～5年时间达到3200 Phaethon远距离环绕轨道, 其后可能会对其他小行星进行探测 | 尘埃分析仪、望远镜照相、多波段相机 |
| 天问二号 | 中国 | 2025 | 469219 Kamo`oalewa | 近地/未知 | 预计环绕探测469219 Kamo`oalewa约一年后采样返回 | 广角/窄角多光谱彩色相机、热发射光谱仪、可见光/近红外成像光谱仪、质谱仪、磁力计、带电/中性粒子及尘埃分析仪 |
| | | | 311P | 主带彗星 | 7年后到达311P并对其进行环绕探测 | |
| 近地小行星防御任务 | 中国 | 2025 | 2019 VL5 | 近地/未知 | 2026年2月到达 | 征集中 |

### 2.4 小行星样品的地面处置

#### 2.4.1 小行星样品的储存管理与分配

##### 2.4.1.1 Hayabusa

为了管理样品返回任务中收集到的地外物质, 完成地外样品的记录、保存、准备、分发, JAXA 在 Hayabusa 发射之前, 规划并建立了 JAXA 地外样品管理中心 (Extraterrestrial Sample Curation Center, ESCuC) 实验室 (见图 5[173]). ESCuC 实验室主要由四个洁净度不同的超净室组成: 行星样品处理室 (ISO 5～6 级)、电子显微镜室 (ISO 6 级)、样品制备室 (ISO 6 级), 以及制造和清洁室 (ISO 7 级) 构成. 其中样品处理室中有 CC1(Sample Collection Container 1, 真空) 号和 CC2 号 (Sample Collection Container 2, $N_2$ 环境) 两个腔室 (见图 6[173]). 样品制备室中设置了酸碱处理室, 制造和清洁室中配备有机溶剂清洁室, 同时设有一间有机加工室和一个 $CO_2$ 清洁室. 此外, 配备一个地下室, 用于储存不能在洁净室中放置的设备. 对于 Hayabusa 返回样品, 所有样品处理过程都是在真空条件下打开样品容器后, 在纯化的氮气中进行的. 与样品最密切接触的手套箱材料为 304 不锈钢、合成石英玻璃、氟基橡胶密封件、铝 (1070, 6061) 和氟基橡胶手套[173,174].

Hayabusa 样品的 4% 被 JAXA 用于初步分析, 10% 的样品被转移到美国休斯敦的航天中心的地外样品管理处, 15% 的样品用于国际公开申请[174,175]. 所有研究者均可通过 Hayabusa 样品研究机会国际公告系统*进行申请. 自 2012 年起, Hayabusa 样品已发放了 10 轮 (第 9 及第 10 次开放期间无申请者), 当前正在开放第 11 轮申请. 剩余样品中, 一部分分配给 JAXA 进行研究及向公众开放, 其余部分被永久储存.

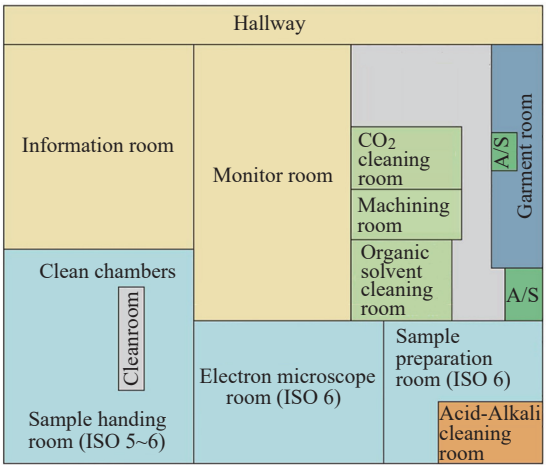



图 5 地外样品管理中心 (ESCuC) 实验室 (A/S-空气清洁)

Fig. 5 Overall design of ESCuC labratory (A/S-Air cleaning)

##### 2.4.1.2 Hayabusa 2

为了 Hayabusa 2 样品的返回, ESCuC 对样品处理室进行了全新开发, 在样品容器表面及密封系统等方面进行了改进. Hayabusa 2 处理系统从之前的两个腔室变为五个腔室 (见图 7[131]): CC3-1 可在真空条件下打开容器; CC3-2 可在真空条件下打开样品采集器并取出一些颗粒; CC3-3 将环境从真空转换为纯化氮气; CC4-1 用于拆卸样品采集器并提取样品; CC4-

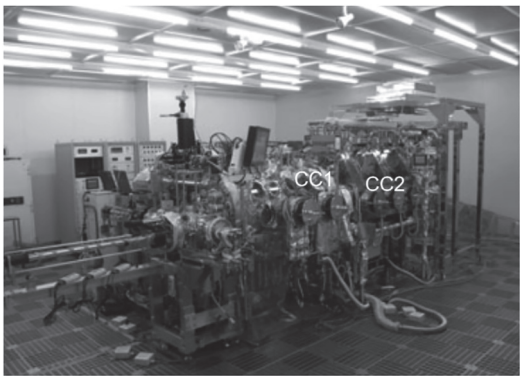



图 6 Hayabusa 返回样品处理室

Fig. 6 Curation facility for samples returned by Hayabusa

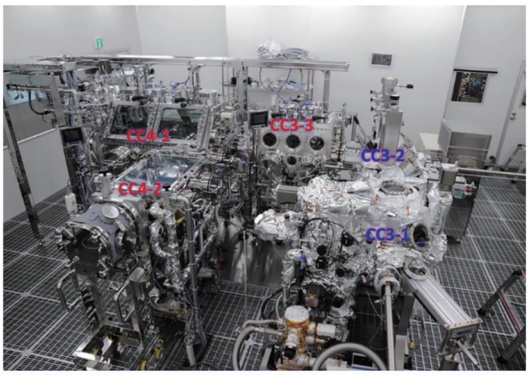



图 7 Hayabusa 2 返回样品处理室

Fig. 7 Curation facility for samples returned by Hayabusa 2

* https://curation.isas.jaxa.jp/ao/index.html

2 可对多个样品进行基本观察和称量[173,174].

Hayabusa 2 样品总重量约 5.4 g, 样品的分配及使用情况如图 8 所示[130]. 样品返回地面后, 需要在严格污染控制条件下, 以非破坏性方式收集样品. 在返回现场对样品舱内部气体进行初步分析后, 将样品送往 ESCuC. ESCuC 的研究人员在拿到样品的 6 个月内, 对所有返回样品的整体外观进行研究, 并对即将进行第一次分发的样品开展初步描述和在线编录 (Phase-1).

随后, JAXA 组织了化学、岩石材料 (≥1 mm)、砂粒材料、挥发性成分、固体有机物和可溶性有机物 6 个初步分析团队, 在一年内对 6%(0.3 g) 的样品进行初步分析[130]. 同时, 有 2%(0.1 g) 的样品在 JAXA 进行详细描述, 1% 向公众开放. 在第二阶段 (Phase-2), 4%(0.2 g) 的样品被分配给以冈山大学行星科学材料研究所 (Institute for Planetary Materials, Okayama University) 和日本海洋科学技术研究开发机构 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC) 的高知核心研究所 (Kochi Institute for Core Sample Research) 牵头的 2 个团队进行全面分析. 另有 2%(0.1 g) 的样品被交给国际合作机构进行研究. 根据 NASA-JAXA 机构间协议, 样品返回一年后, 约 10% 的样品被送往 NASA 进行研究[130]. 2021 年 12 月起, ASRG(The Astromaterials Science Research Group) 在全球范围内征集提案. 所有研究者均可通过 Hayabusa 2 样品机会公告系统*申请 15% 的公开研究样品. 2022 年 6 月起, ASRG 向提案申请成功的各国科学家和机构发放样品. 当前已完成了 3 轮样品发放, 正在进行第 4 轮样品发放. 第五次样品申请预计将于 2024 年 7 月开启. 剩余 60% 的样品被储存下来用于未来可能的研究.

#### 2.4.1.3 OSIRIS-REx

JSC 为了管理和初步分析 101955 Bennu 样品, 新建立了 101955 Bennu 样品实验, 同时为 162173 Ryugu 样品建造了一个单独的 Hayabusa 2 实验室, 二者可共享基础设施 (见图 9[176]). 该实验室由 OSIRIS-REx 洁净室 (ISO 5, 样品初步检查、分析)、超薄切片室 (ISO 7, 制样)、更衣室 (ISO 6, 更换服装和清洁)、样品初始接待室 (ISO 7, 过渡空间)、样品暂存室 (ISO 7, 样品存放及管理)、Hayabusa 2 洁净室组成[176].

OSIRIS-REx 的样品舱在犹他州沙漠着陆后, 首先采集了着陆点的土壤样本和空气样本, 并将样品舱转移至当地的临时洁净室中 (ISO 7). 拆卸部分硬件后, 在密封手套箱里对样品进行初步检查记录后, 将所有样品送往 JSC[144]. 样品返回后最初 2 周内, 使用扫描电镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、X 射线荧光光谱仪 (XRF) 和多种化学元素分析方法对样品进行快速分析. 样品返回后的 6 个月内, 初步检查团队将在 OSIRIS-REx 洁净室中对样品进行初步分类和在线编录. 编录内容包括研究样品的重量、体积、形状、颜色、密度、磁性和化学组成等[144]. 编录

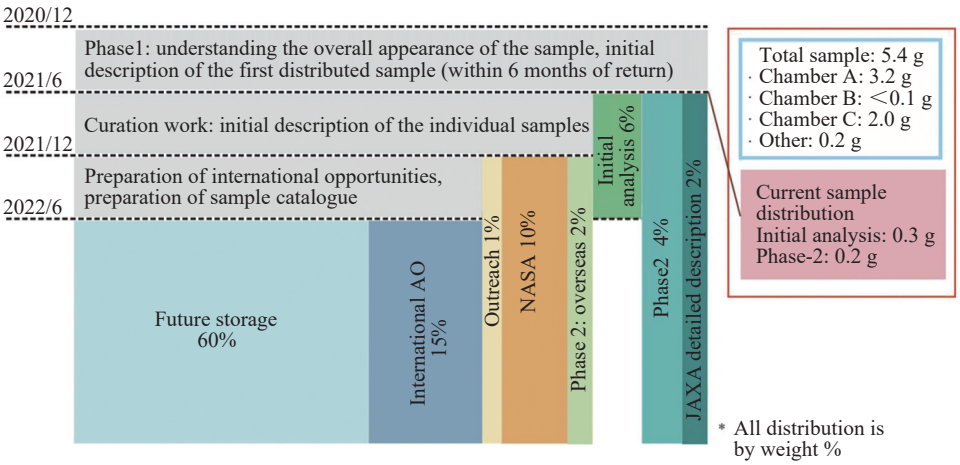



图 8 Hayabusa 2 样品数量、分配比例、分配时间

Fig. 8 Sample quantity, distribution ratio and distribution schedule of Hayabusa 2

* https://jaxa-ryugu-sample-ao.net/

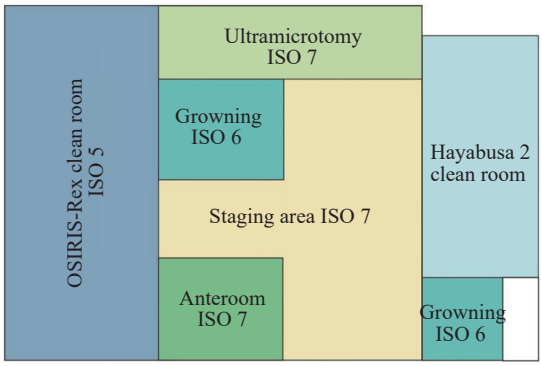



图 9 OSIRIS-REx 和 Hayabusa 2 实验室

Fig. 9 Overall design of OSIRIS-REx and Hayabusa 2

完成后, 样品将向全球开放供各国科学家或研究机构申请研究. 在接下来的二年里 OSIRIS-REx 样品分析团队将继续对样本进行详细分析[145].

为了更好地组织对 101955 Bennu 样品的分析, NASA 组织了一个国际团队进行协调实验分析, 以便全面了解 101955 Bennu 的形成和历史. 样品将在世界各地的实验室之间流动. 这种协调的分析方法将最大限度地减少破坏性分析所消耗的样本量, 并提供多种类型的数据集[144]. OSIRIS-REx 样品科学工作组分为: 光谱分析团队、矿物学和岩石学团队、元素和同位素分析团队、有机物分析团队、物理和热性质分析团队. 其他工作组侧重于支持对返回硬件的分析和数据管理, 包括: 接触垫分析团队、示例数据管理和归档团队、污染控制和知识团队、触摸式样品采集机制团队和样品返回胶囊科学团队. 为了更好地协调各实验室, NASA 制定了严格的分析流程, 并为每项任务指定了负责人. 该任务计划在 2023 年 9 月样品返回后, 10 月初将颗粒样品分发给负责人, 10 月底准备好光片样品, 11 月初将光片样品分发给负责人, 11 月底获得第一批数据.

NASA 将约 0.5% 的样品用于与 JAXA 交换 162173 Ryugu 样品; 约 4% 的样品将提供给为 OSIRIS-REx 任务提供了 OSIRIS-REx 激光高度计的加拿大航天局; 约 25% 的样品将被提供给美国、日本、法国、德国和英国等国科学家组成的 OSIRIS-REx 样品分析小组进行有组织的协调分析; 至少 70% 样品将被保存在 JSC, 供全世界科学家进一步研究[144,176].

### 2.4.2 小行星样品分析

#### 2.4.2.1 Hayabusa

ESCuC 实验室收到样品后, 首先利用 X 射线计算机断层扫描 (XCT) 检查样品容器的状态, 鉴定样品中是否存在直径>1 mm 的大颗粒样品. 然后将样品容器送入行星样品处理室的 CC1 腔室. 打开样品容器后, 将样品采集器送入 CC2 腔室, 在 CC2 中采集所有的返回样品. 随后在电子显微镜室, 使用 SEM 配合能谱仪 (EDS) 对这些样品显微特征进行初步观察, 并结合样品的相关基础物理数据对其进行在线初步编录. 如有样品需要进行处理和制备, 将会被转移到样品制备室[174].

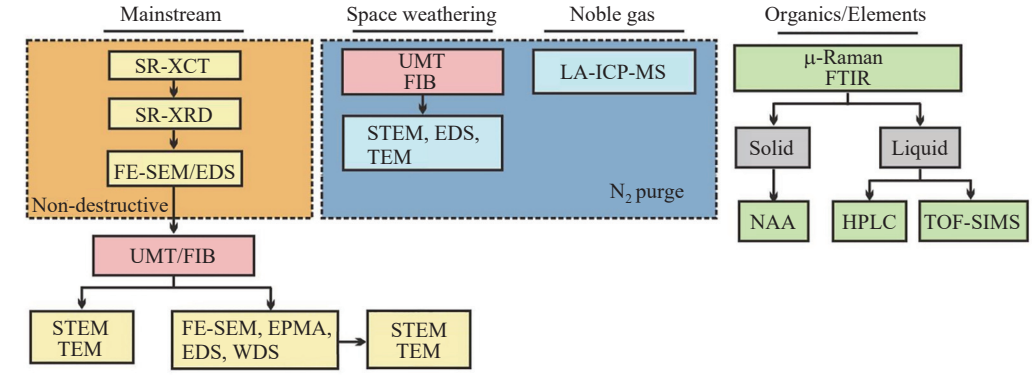
Hayabusa 返回样品中 60 颗大小在 30～180 μm 的尘粒被分为四组进行初步分析 (见图 10).

主流分析组首先使用同步辐射-X 射线计算机断层扫描仪 (SR-XCT) 和同步辐射-X 射线衍射仪 (SR-XRD) 获得颗粒的三维结构及主要的矿物组成, 为确定后续颗粒切割的最佳位置提供参考[99,103]. 首先使用场发射扫描电镜 (FE-SEM) 在纳米级别对颗粒的表面形貌特征及显微结构进行观察. 接着, 使用超薄切片机 (UMT) 或聚焦离子束 (FIB) 精准切割样品后, 再使用透射电镜 (TEM) 和扫描透射电镜 (STEM) 在纳米级别样品切片的内部结构, 并使用场发射描电子显微镜 (FE-SEM)、电子探针 (EPMA)、EDS、波谱仪 (WDS)、二次离子质谱 (SIMS) 探究其元素其同位素组成特征[99,100,102,177].

其他三组则分别利用 STEM/TEM 对空间风化作用进行研究[108,109], 利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 对稀有气体特征[110] 进行研究. 同时, 利用显微拉曼光谱 (μ-Raman) 和 FTIR 鉴定有机质中的外部官能团类型后[105], 使用高效液相色谱 (HPLC) 配合飞行时间–二次离子质谱 (TOF-SIMS) 分析液态有机化合物的种类和含量[106,107], 并利用中子活化分析 (NAA) 检测固态样品中元素的种类和含量[101,178].

#### 2.4.2.2 Hayabusa 2

样品在澳大利亚着陆后, 首先在南澳大利亚 Woomera 的快速检查设施 (Quick Look Facility) 中进行安全检查和清洁. 2020 年 12 月 7 日 样品储存器被接入四极杆质谱仪, 对舱内气体进行初步分析检测. 同年 12 月 10－11 日 样品在 JAXA 的 ESCuC 进行了类似的分析. 两次气体分析结果类似, 且 ESCuC 分析的气体样品是在澳大利亚回收气体后, 重新在样品容器中产生的. 结合密封舱机械结构的分析验




SR-XCT: Synchrotron Radiation-based X-ray Computed Tomography
SR-XRD: Synchrotron Radiation-based X-Ray Diffraction
FE-SEM: Field Emission Scanning Electron Microscopy
EDS: Energy Dispersive Spectroscopy
WDS: Wavelength Dispersive Spectrometer
UMT: Ultra-Microtome
FIB: Focused Ion Beam
TOF-SIMS: Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy

TEM: Transmission Electron Microscopy
STEM: Scanning Transmission Electron Microscopy
EPMA: Electron Probe Micro Analysis
SIMS: Secondary Ion Mass Spectroscopy
μ-Raman: Micro-Raman Spectroscopy
FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy
NAA: Neutron Activation Analysis
HPLC: High-Precision Liquid Chromatography
LA-ICP-MS: Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry

图 10 Hayabusa 初步分析流程

Fig. 10 Preliminary analysis process of the Hayabusa

证, 该气体分析结果被认为是未经污染的 162173 Ryugu 气体样品[128,139].

ESCuC 收到返回样品后, 首先将样品容器连接到 CC3-1, 在真空条件下打开样品容器同时取下样品容器上部的样品采集器后, 将样品采集器转移到 CC3-2 中. 在真空环境下打开样品采集器, 并采集样品舱 A 中样品. 然后, 将样品采集器转移到 CC3-3, 去掉内盖后, 再次转移到 CC4-2 中. 在 CC4-2 中测量样品采集器重量后, 将其转移到 CC4-1 中拆除, 并仔细采集样品舱中的所有样品. 样品采集完成后, 将这些样品转移到 CC4-2 中称重后, 使用光学显微镜和 FTIR 对其进行初步分析. 然后, 再次将这些样品转移到 CC3-3 中, 使用红外高光谱显微镜 (Micr Omega) 对其进行观察. 最后, 将样品再次转移到 CC4-2 中, 使用互补金属氧化物半导体传感器 (CMOS) 相机详细分析这些样品的可见光谱特征[131,173].

JAXA 样品初步处理以及对即将进行第一次分发的样品开展初步描述和在线编录完成后. 2021 年 6 月, 6 个初步分析团队开始样品的初步分析 (见图 11—16[132–140]).

化学分析团队使用电子显微镜获得样品的岩相学特征后, 配合使用 XRF、电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 和热电离质谱 (TIMS) 获得样品的元全

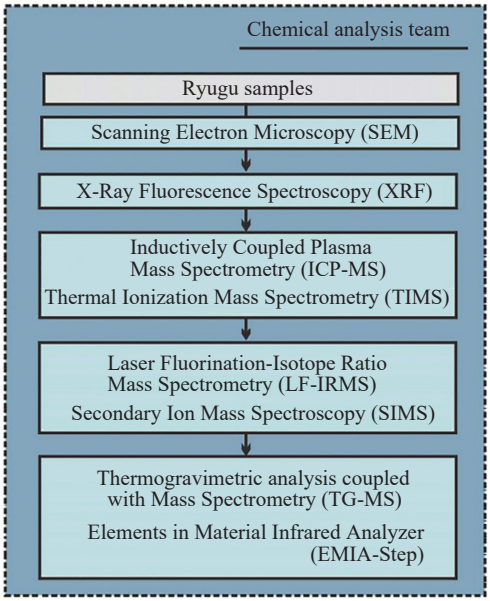



图 11 Hayabusa 2 化学分析团队初步分析流程

Fig. 11 Preliminary analysis process of the Hayabusa 2 Chemical Analysis team

岩同位素及化学组成. 然后使用激光氟化–稳定同位素比质谱仪 (LF-IRMS) 和 SIMS 获得样品的氧同位素组成. 最后使用热重–质谱联用技术 (TG-MS) 和热解燃烧组合分析技术 (EMIA-Step) 探究 $H_2O$ 和 $CO_2$ 的有机及无机来源, 以及有机/无机 C、有机/无

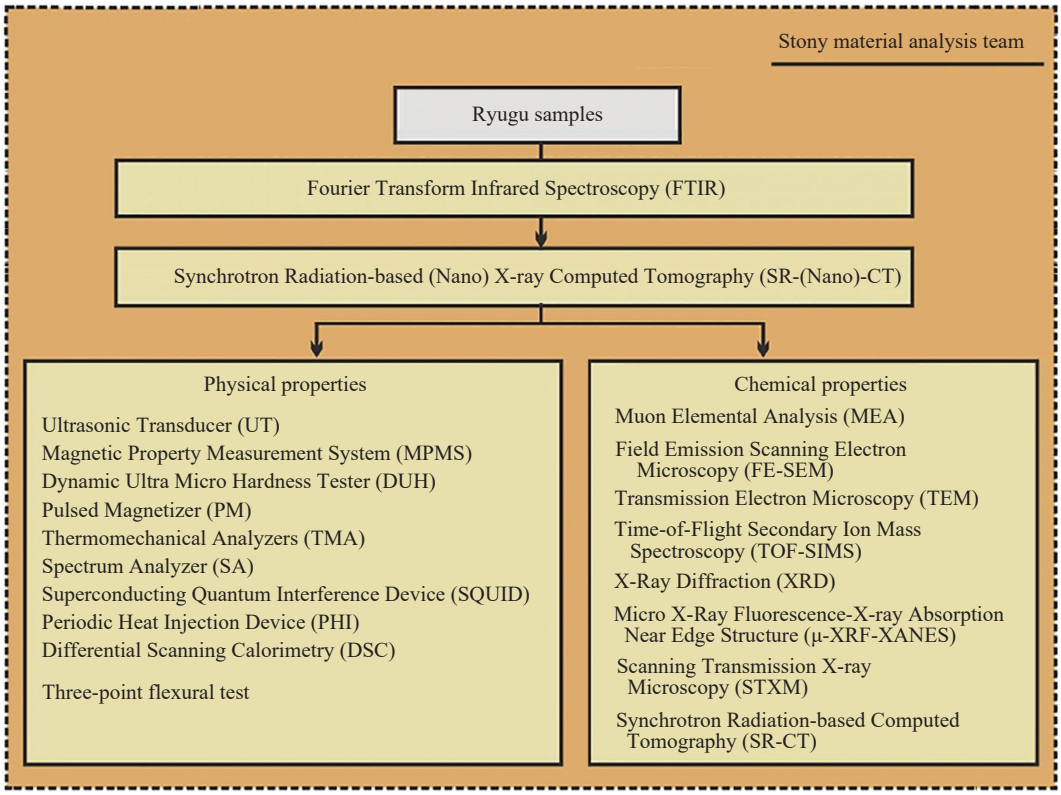



图 12 Hayabusa 2 岩石材料分析团队初步分析流程

Fig. 12 Preliminary analysis process of the Hayabusa 2 stony material analysis team

机 H 的分馏特征 (见图 11)[133].

岩石材料分析团队使用 FTIR 获得样品的光谱特征后, 使用同步辐射 (纳米) -CT(SR-(Nano)CT) 获得样品的三维结构及体积, 并据此估算样品的密度. 然后使用超声换能器 (UT)、超显微动态硬度计 (DUH)、热机械分析仪 (TMA)、差示扫描量热仪 (DSC)、周期性热激发装置 (PHI)、阻抗分析仪 (SA)、磁性测量系统 (MPMS)、超导量子干涉磁强计 (SQUID) 和脉冲磁化仪 (PM) 配合三点弯曲试验测, 测得样品的机械、热、电、磁性质. 使用 μ 子元素分析 (MEA)、FE-SEM, XRF, XRD 配合 SR-CT, TOF-SIMS、扫描透射 X 射线显微镜 (STXM)、显微 X 射线荧光光谱–显微 X 射线近边吸收结构仪 (μ-XRF-XANES) 获得样品的矿物学和矿物化学特征 (见图 12)[136].

砂粒材料分析团队使用 FE-SEM 观察所有样品的表面形貌特征后, 采用 FIB 制样技术切取具有特殊空间风化特征样品区域. 利用 TEM 观察此样品的微观结构后, 使用 X 射线纳米断层扫描 (X-ray nanotomography) 测得器微孔隙率, 再使用 EDS、电子能量

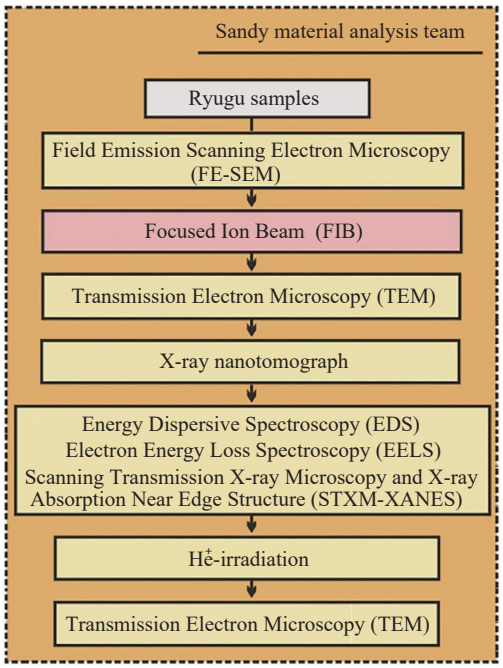



图 13 Hayabusa 2 砂粒材料分析团队初步分析流程

Fig. 13 Preliminary analysis process of the Hayabusa 2 sandy material analysis team

损失光谱仪 (EELS)、STXM-XANES 获得样品元素含量同时. 对 Fe 元素的价态和 $Fe^{3+}$与∑Fe 的比值进行详细分析. 最后, 采用氦辐照试验配合 TEM, 研究空间环境中的辐射效应对小行星表面的影响 (见图 13)[140].

挥发性成分分析团队首先使用 5 种类型的质谱仪详细分析了降落点现场提取的气体成分、丰度、同位素比值[139], 同时使用 FTIR, FE-SEM 和 EDS 详细分析阶段加热试验中, 固体样品颗粒释放的稀有气体和氮气特征 (见图 14)[134].

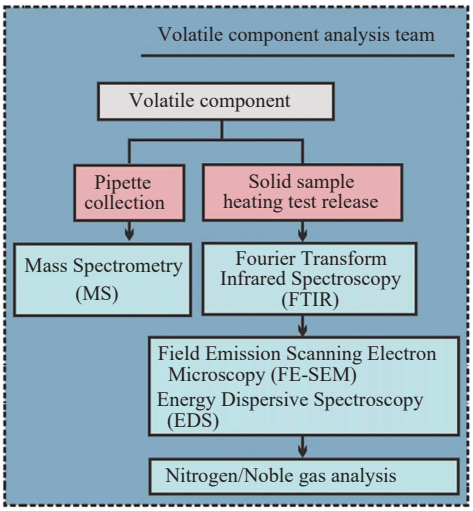
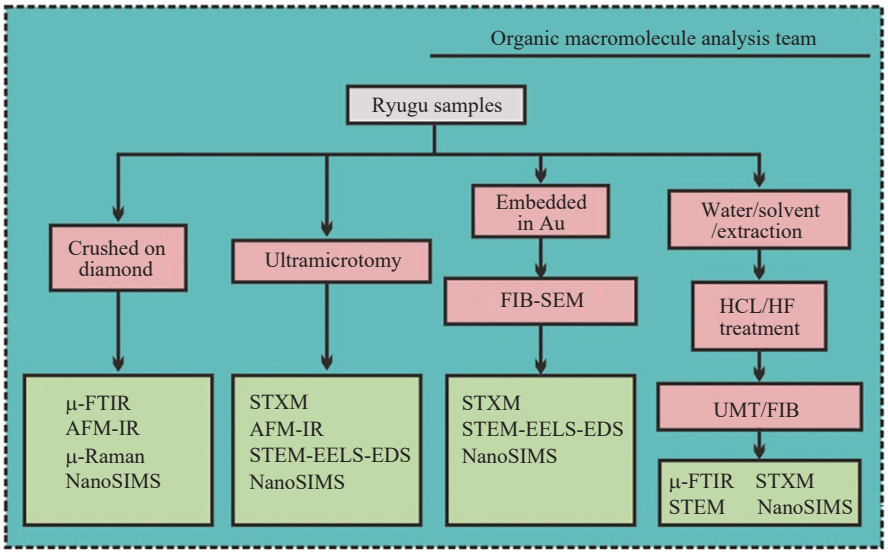



图 14 Hayabusa 2 挥发性成分分析团队初步分析流程

Fig. 14 Preliminary analysis process of the Hayabusa 2 andy material analysis team

固体有机物分析团队对一部分样品采用磨碎、超薄切片、嵌入金属金的方式处理后再进行分析, 对另一部分样品采用水、有机溶剂和酸处理, 获取酸不溶性残留物质后再进行分析. 其中 FTIR 用于分析有机物的官能团组成. μ-Raman 用于分析有机大分子结构. STXM 用于鉴定有机物的类型. TEM 和 STEM-EELS-EDS 用于观察样品和不溶性有机物纳米级形貌特征. 纳米二次离子质谱 (NanoSIMS) 被用于分析样品机及不溶性有机物的 H, C, N, O, S 元素丰度以及 H, C, N 元素同位素组成 (见图 15)[138].

可溶性有机物分析团队将嵌入合金的颗粒样品, 使用电喷雾离子化–高分辨质谱 (DESI-HRMS) 获得其表面可溶性有机物的空间分布. 对于集合体状样品, 首先使用 FTIR 在近红外波段对分析其光谱特征后, 选取一部分样品, 使用纳米元素/同位素质谱 (NanoEA/IRMS) 和元素/热转换同位素质谱 (EA/TC-IRMS) 分别分析这部分样品的 C, N, S, H, O 元素的含量及同位素组成. 剩余的样品一部分进行有机溶剂



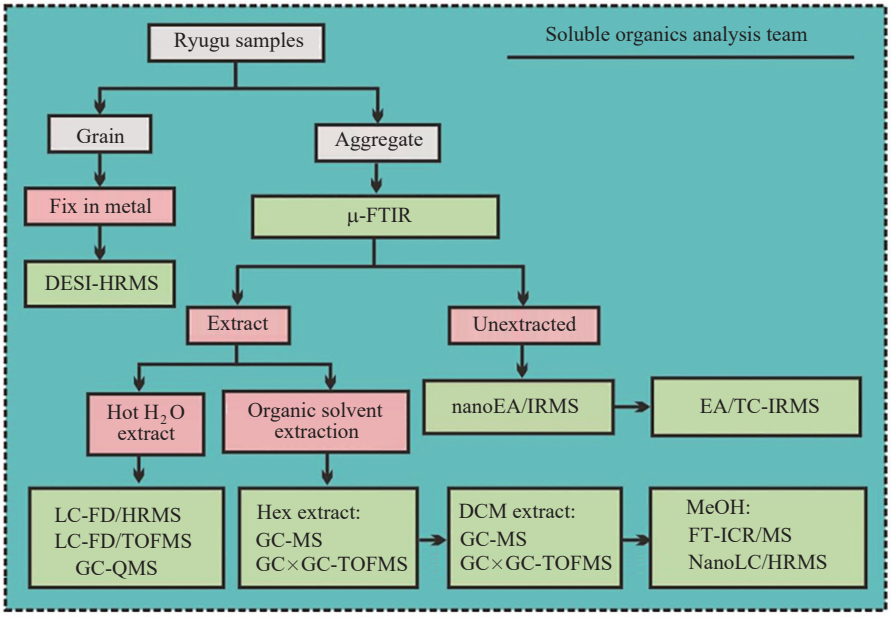

μ-FTIR: Micro-Fourier Transform Infrared Spectroscopy
AFM-IR: Atomic Force Microscope-Infrared Spectroscopy
μ-Raman: Micro-Raman Spectroscopy
NanoSIMS: Nanoscale Secondary Ion Mass Spectrometry
STXM: Scanning Transmission X-ray Microscopy
STEM-EELS-EDS: Scanning Transmission Electron Microscopy-Electron Energy Loss Spectroscopy-Energy Dispersive Spectroscopy
FIB: Focused Ion Beam
UMT: Ultra-Microtome
SEM: Scanning Electron Microscopy

图 15 Hayabusa 2 固体有机物分析团队初步分析流程

Fig. 15 Preliminary analysis process of the Hayabusa 2 organic macromolecule analysis team

萃取. 使用气相色谱–质谱联用技术 (GC-MS) 分析乙烷萃取过程中的挥发性气体, 配合使用全二维气相色谱–飞行时间质谱 (GC×GC-TOFMS) 分析萃取后的芳香烃. 随后使用二氯甲烷进行二次萃取, 并重复上述分析步骤. 对甲醇三次萃取活获得的萃取物, 使用傅里叶变换离子回旋共振质谱 (FT-ICR/MS) 和纳米液相色谱–高分辨率质谱 (Nano LC/HRMS) 分别分析非靶向可溶性有机物和 CHN 杂环化合物. 另一部分剩余样品采用热水萃取方法, 分别使用液相色谱–荧光检测/高分辨质谱 (LC-FD/HRMS), 液相色谱–荧光检测/飞行时间–二次离子质谱 (LC-FD/TOF-SIMS) 和全二维色谱–质谱联用技术 (GC-QMS) 分析氨基酸、脂肪胺和羧酸 (见图 16)[137].

以冈山大学行星科学材料研究所牵头的分析团队首选使用数字光学显微镜 (DOM) 建立样品的三维模型, 并估算其密度. 块状样品切片后, 使用 DOM 及 SEM 分析岩相学特征, 并估算样品的孔隙度. 使用 SEM 获得样品中层状硅酸盐基质、层状硅酸盐结核、碳酸盐、磁铁矿、硫化铁、磷酸盐、橄榄石、低钙辉石和碳质结核的模态丰度. 使用 μ-Raman 配合电喷雾电离离子阱质谱 (DESI-OT-MS) 原位分析可溶性和不可溶性有机物的分布. 使用 TEM 及 SIMS 原位分析了部分块状样品的亚微米级别岩相学及矿物学特征及微量元素特征. 最后使用高分辨率二次离子质谱 (HR-SIMS) 原位分析了部分块状部分样品的 C, N, O, H, B, Li, U, Pb, Mn, Cr 元素及卤素的平均同位素组成, 同时对部分块状样品的碳酸盐进行 Mn-Cr 定年. 此外, 选取共约 1000 μg 的块状样品, 使用四级杆电感耦合低离子体质谱 (ICP-SFMS) 和扇形磁场电感耦合等离子体质谱 (ICP-QMS) 对多种微量和主量元素的进行全岩分析. 选取少于 200 μg 的块状样品, 使用 TIMS 分析 Os, Cr, Ca 的同位素特征; 选取约 100 μg 的块状样品, 使用 IRMS 分析 H, C, N, O 的元素丰度和同位素特征; 最后, 再选取少于 100 μg 的块状样品使用质谱仪分析 Ne 元素的丰度和同位素特征. 对于 UMT 制样过程中产生的粉末状样



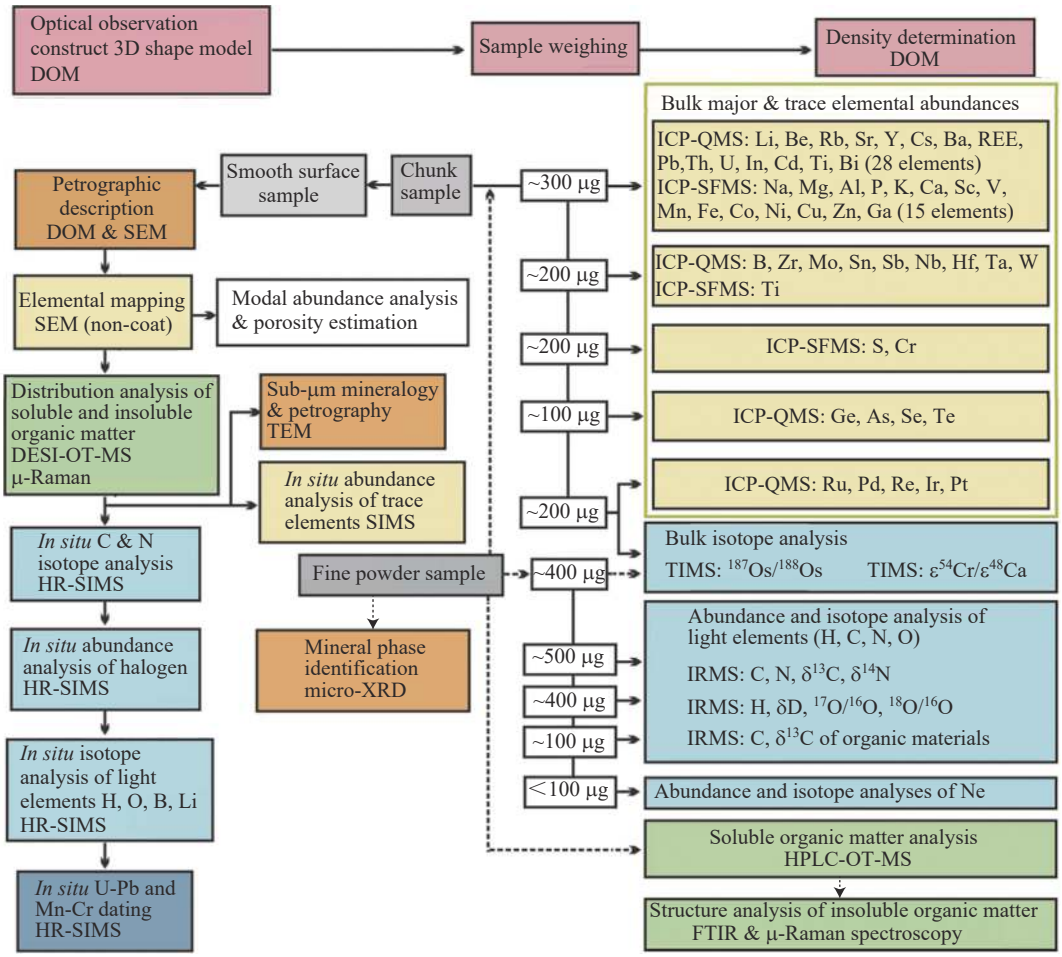

DESI-HRMS: Desorption Electrospray Ionization - High Resolution Mass Spectrometry
μ-FTIR: Micro-Fourier Transform Infrared Spectroscopy
NanoEA/IRMS: Nano Elemental Analysis/Isotope Ratio Mass Spectrometry
EA/TC-IRMS: Elemental Analysis/Thermal Conversion Isotope Ratio Mass Spectrometry
LC-FD: Liquid Chromatography-Fluorescence Detection
TOFMS: Time-of-Flight Mass Spectrometry
GC-QMS:Gas Chromatography-Quadrupole Mass Spectrometry
GC-MS: Gas Chromatography-Mass Spectrometry
GC×GC-TOFMS: Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatography-Time of Flight Mass Spectrometry
FT-ICR/MS: Fourier Transform Ion Cyclotron Mass Spectrometry
Nano LC/HRMS: Nano Liquid Chromatography/High Resolution Mass Spectrometry

图 16 Hayabusa 2 可溶性有机物分析团队初步分析流程

Fig. 16 Preliminary analysis process of the Hayabusa 2 soluble organic analysis team

品, 使用 ICP-SFMS 和 ICP-QMS 分析主微量元素的特征 (约 300 μg). 然后使用 TIMS 分析 Os, Cr, Ca 的同位素特征 (约 400 μg). 使用显微 X 射线衍射仪 (micro-XRD) 识别部分粉末状样品矿物相, 使用液相色谱–质谱联用技术 (HPLC-OT-MS) 分析另一部分粉末状样品的可溶性有机物后, 再使用傅里叶变换红外光谱及 μ-Raman 分析残余不溶性有机物的结构[135] (见图 17[135]).

以高知核心研究所牵头的分析团队使用高分辨 CT 分析所有样品的复杂微观结构后, 将样品分为两组. 一组样品采用碎样处理, 一组切割处理. 选取二种方法处理后的一部分样品, 使用 XRD、NAA、激光氟化法 (Laser Fluorination) 分析全岩化学组成. 另一部分样品用环氧树脂对其进行包裹, 在无液体环境下




DOM: Digital Optical Microscope
SEM: Scanning Electron Microscopy
DESI-OT-MS: Desorption Electrospray Ionization-Orbitrap Mass Spectrometry
μ-Raman: Micro-Raman spectroscopy
HR-SIMS: High Resolution Secondary Ion Mass Spectrometry
TEM: Transmission Electron Microscopy
SIMS: Secondary Ion Mass Spectroscopy
XRD: X-Ray Diffraction
ICP-QMS: Inductively Coupled Plasma-Quadrupole Mass Spectrometry
ICP-SFMS: Inductively Coupled Plasma-Sector Field Mass Spectrometry
TIMS: Thermal Ionization Mass Spectrometry
IRMS: Isotope Ratio Mass Spectrometry
FTIR: Fourier Transform Infrared Spectroscopy
HPLC-OT-MS: High-Precision Liquid Chromatography-Orbitrap Mass Spectrometry

图 17 Phase-2 阶段中冈山大学行星科学材料研究所主导的 Hayabusa 2 样品分析流程

Fig. 17 Hayabusa 2 sample analysis process led by the Institute for Planetary Materials, Okayama University in Phase-2

抛光后, 使用光学显微镜、FE-SEM、EPMA 和 SIMS 分析样品的矿物结构和同位素组成. 使用 FIB 对制样过程中形成的细小颗粒进行处理后, 用 STXM-NEXAFS, NanoSIMS 和 TEM 分析其中的有机物和含水矿物的特征[132](见图 18[132]).

#### 2.4.2.3 OSIRIS-REx

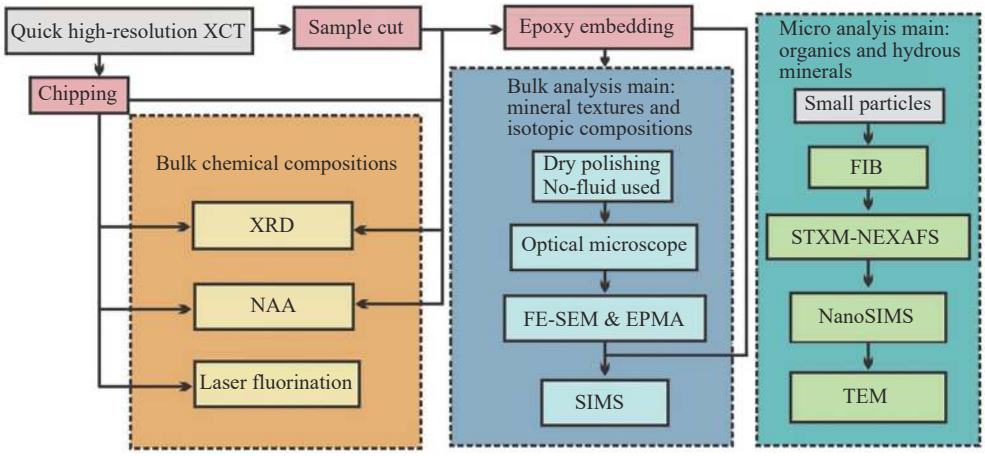
OSIRIS-REx 团队为处理返回的样品制定了一套详细的操作流程[144].

样品返回舱抵达犹他州试验与训练靶场 (Utah Test and Training Range, UTTR) 后, 将首先采集环境样本, 包括返回点和 UTTR 超净实验室的空气和液体样本、返回点的土壤样本等. 同时, 在 UTTR 和 JSC 对返回舱的各个部件拆解后进行详细的成分及结构分析后, 将收集 JSC 的返回舱外部的样品, 使用光学显微镜、XRD、SEM、EDS 和 μ-FTIR 对其进行快速的形貌和成分分析. 如果 XRD 的结果不理想, 则将使用 TEM 进行进一步分析. 随后, 这些样品将被交给样品分析团队进行下一步分析, 包括 EPMA、二阶激光质谱仪 (L2 MS)、Raman、NanoSIMS 和 SIMS.

样品舱在 JSC 打开后, 将采用触摸式样本采集法 (Touch-and-Go Sample Acquisition Mechanism) 进行处理. 将样品舱内取出的 6 份接触垫上的样品按照粒度 $>$ 2 mm 和 $<$ 2 mm 的分为两类. 粒度 $>$ 2 mm 的颗粒将首先进行 μXCT 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析, 随后所有颗粒都将进行有机质 (TEM, EELS, STXM, L2 MS 和 SOM), 纳米矿物学、岩石学和光谱 (SEM/EDS, TEM, NanoSIMS, XANES, μ-FTIR) 和稀有气体质谱 (NGMS) 研究. 此外, 颗粒样品将与样品舱外 $>$5 mm 的岩石样品一起, 分别转移至 JSC、JAXA、加拿大航天局和 White Sands 美国国家公园, 对岩石 ($>$ 5 mm)、粗粒 (0.5～5 mm)、中粒 (100～500 μm) 和细粒 ($<$ 100 μm) 的样品进行初步形貌分析, 并鉴定其岩性. 随后挑选出感兴趣的岩石样品, 使用 μXCT, SEM, EDS, Raman, μ-FTIR 和气相色谱 (GC) 进行详细的形貌、成分、密度和岩性描述. 随后连同返回舱外部的细粒样品一起移交给后续分析团队.

分析团队将所有不同岩相的颗粒、光片、粉末样品进行研究. 样品的类型包括颗粒 (岩石、粗粒和中粒)、细粒以及原始有机颗粒, 以及将粉末 ($<$ 1 μm) 与一些单独的颗粒混匀制成均一的粉末样品.

元素和同位素分析团队对粉末、细粒和颗粒样品进行总的元素和同位素分析. 四级杆激光剥蚀电感耦




XRD: X-Ray Diffraction
NAA: Neutron Activation Analysis
FE-SEM: Field Emission Scanning Electron Microscopy
EPMA: Electron Probe Micro Analysis
SIMS: Secondary Ion Mass Spectroscopy
STXM-NEXAFS: Scanning Transmission X-ray Microscopy-Near Edge X-ray Absorption Fine Structure
NanoSIMS: Nanoscale Secondary Ion Mass Spectrometry
TEM: Transmission Electron Microscopy
FIB: Focused Ion Beam
XCT: X-ray Computed Tomography

图 18 Phase-2 阶段日本海洋科学技术研究开发机构高知核心研究所主导的 Hayabusa 2 样品分析流程

Fig. 18 Hayabusa 2 sample analysis process led by the Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology in Phase-2

合等离子体质谱 (Q-ICP-MS, 0.01 g) 和电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES) 用于主量元素分析. HR/LA-ICP-MS(1.0 g), ICP-MS(0.005 g) 和 Q-ICP-MS 用于微量元素分析. 加速器质谱 (AMS) 用于宇生同位素分析 (0.013 g). 对粉末和颗粒样品, Ar-Ar 样品照射与全样品阶段加热分析 (0.010 g), NGMS 分析 (He, Ne, Ar, Kr, Xe, 0.02+0.025 g), 共振电离飞行时间稀有气体质谱分析 (RI-TOF-NGMS, Xe, I, 0.001 g) 和中子辐照稀有气体质谱 (NI-NGMS) 用于稀有气体及其同位素 (+总 N) 分析. 粉末和细粒样品使用 MC-ICP-MS 进行中等挥发性同位素分析 (0.15 g). TIMS 和 MC-ICP-MS 用于分析 Cr, Ti 同位素 (0.020 g) 以及其他主量元素的同位素分析 (0.495 g). 细粒和颗粒样品利用 EA-IRMS(H, C, N; 0.20 g) 和 LF/FINESSE(H, C, N, O; 0.100 g) 进行总 H, C, N, O 和水的丰度及同位素分析. 其中 FINESSE 是英国 Open University 设计建造的一套全自动系统, 包括定制样品加热、气体处理和三台质谱仪, 可将小体积样品从室温逐步加热至 1400℃, 并在每个温度步骤分析碳和氮的丰度和同位素组成.

矿物学和岩石学分析团队使用 XRD 和光电子能谱-X 射线衍射仪 (PS-XRD) 对细粒物质进行矿物学分析 (0.001 g).

物理和热分析团队对颗粒样品进行力学性质分析, 包括: 使用悬臂膨胀仪测定热膨胀系数; 利用地震速度与岩石超声弹性常数测定杨氏模量、剪切模量、泊松比、Lamés 常数和总模量 (0.110 g); 通过压缩实验测定弹性模量、抗压强度、破坏时的临界缺陷长度和断裂行为 (0.020 g); 并对直剪强度进行测量. 通过锁定式热成像仪 (0.150 g) 和球型电池导热系数分析仪 (0.800 g) 对颗粒物进行导热系数分析; 通过差示扫描量热仪对粉末和细粒样品进行热容量分析 (0.060 g). 细粒和颗粒物将通过原子力显微镜 (AFM) 粒子内聚力 (0.010 g) 和休止角测量分析粒子间的内聚力及静止角和摩擦角.

随后, 颗粒样品被再次转移至多个团队进行原位分析. 物理和热分析团队使用扫描热显微镜 (SThM) 配合 AFM 对颗粒和基质的热导率进行分析, 同时利用纳米和微米压痕测试对颗粒的压痕模量、压痕硬度、延展性、弹性功、非弹性功和总功、蠕变曲线、储能模量和损耗模量等力学性质进行分析. 亚利桑那 、JSC、东海岸 (Smithsonian 国家博物馆)、法国、英国和日本的分析团队各获得 100 mg 样品, 通过光学显微镜、SEM、EDS 和 EPMA 对其进行结构/岩相学/矿物学分析.

另有 3.705 g 的样品将在 JSC 制成光片. JSC 首先使用数字光学显微镜薄片对抛光和无涂层的薄片进行光学图像分析. 随后, 光片将交由美国西南研究院进行 VNMIR 光谱特征分析. 亚利桑那大学在获得这些光片后, 例如有需要, 将先进行光学图像分析. 随后喷碳, 进行 FIB-SEM、数字光学显微镜和 EPMA 分析. 同样, 亚利桑那大学团队 1 和团队 2、JSC、东海岸、西海岸、法国、澳大利亚、英国和日本的分析团队将各获得一些光片, 使用光学显微镜、SEM、EDS、EPMA、EBSD、高分辨率阴极发光 (HR-CL)、三维原子探针 (ATP)、LA-ICP-MS 和 Nano-IR 进行结构、岩相学和矿物学分析. 美国西南研究院将对光片及一些颗粒 (0.50 g) 进行 VNMIR 分析.

完成上述操作后, 光片和颗粒将再次交由矿物和岩石分析团队进行分析. 光片由亚利桑那大学团队 1 和团队 2 和 JSC 进行 FIB 切片, 颗粒和细粒物使用显微薄片切片机制样. 随后利用 TEM 结合 EDS、Imaging、选区电子衍射/纳米衍射 (SAED/Nanodiffraction) 和 EELS 进行矿物学特征分析. 交给澳大利亚的光片将使用透射菊池衍射 (TKD) 进行分析.

原始的有机颗粒交由有机分析团队进行研究. 其中不溶有机物 (0.120 g) 使用核磁共振波谱 (NMR) 和固体核磁共振波谱 (SSNMR) 进行分析. 可溶有机物 (4.545 g) 的分析分为以下几组.

(1) 极性至非极性溶剂提取后, 使用核磁共振氢谱 (1 H-NMR) 对可溶有机物的成分、化学结构及丰度进行分析 (0.020 g), 另外 0.020 g 进行分离描述.

(2) 室温下水溶液提取后, 对 N-杂环、核碱基和多元醇 (0.50 g), 以及氨基酸和多肽碎片 (0.20 g) 进行丰度分析.

(3) 100℃ 热水提取后, 对固体残留物中的不溶 CN 化合物、可溶 HCN 和可溶 CN 化合物分别测定丰度 (0.10 g). 剩余部分去掉盐类之后, 对无机离子和有机酸进行离子色谱 (IC) 和离子色谱–静电场轨道阱质谱 (IC-Orbitrap-MS) 分析; 对不含羰基的部分进行醛/酮成分和丰度分析 (0.50 g); 对羧酸和不含羟基酸的部分进行羧酸/羟基酸的成分、丰度和手性分析 (0.50 g). 去盐后剩下不含氨基酸的部分, 和未去盐的无胺类的部分和总的氨基酸分别进行成分和丰度

分析 (0.10 g), 并进行单一化合物的碳同位素分析 (1.0 g).

(4) 一部分有机物将直接用 LC-MS、SEM 和 XRD 分析单矿物中的氨基酸.

(5) 二氯甲烷萃取后, 分析氨基和糖类化合物的成分和丰度 (0.20 g).

(6) 水冰萃取后, 分析挥发气体 (0.50 g).

(7) 解吸附的有机物将通过 FTICR-MS 分析成分丰度和元素含量.

(8) 另有 0.10 g 样品将通过和 162173 Ryugu 可溶有机物的分析提取流程一样的方法进行 LC-MS、GC-MS 和 FTICR-MS 分析. 任务 (1)～(6) 分析完成后, 均将通过液相色谱–飞行时间质谱 (LC-ToF-MS)、液相色谱–三重四极杆质谱 (LC-QqQ-MS)、液相色谱–静电场轨道阱质谱 (LC-Orbitrap-MS)、液相色谱–串联质谱 (Tandem-LC/MS$^2$)、气相色谱–同位素比值质谱 (GC-IRMS)、二维气相色谱–质谱 (GC×GC-MS) 和 GC-MS 进行分析.

所有的光片、颗粒和粉末 (0.660 g)、可溶和不溶的有机残余物将再次交由元素和同位素分析团队进行进一步分析. 前太阳系物质将采用 NanoSIMS 和 TEM/STEM 进行分析. 原位不溶有机物采用 NanoSIMS、uL2 MS、EELS、Raman、电喷雾电离离子阱质谱 (DESI-Orbitrap MS) 和纳米元素–同位素质谱仪 (Nano EA-IRMS) 进行分析. 稳定同位素和微量元素采用 NanoSIMS、SIMS 和 ATP 进行分析. 放射性同位素采用 NanoSIMS(Al-Mg, Mn-Cr)、SIMS(Al-Mg, Mn-Cr)、高分辨率显微离子探针 (SHRIMP) (U-Pb)、ATP 和具有反向几何结构的灵敏高分辨率离子探针 (SHRIMP-RG, Mn-Cr、微量元素) 进行分析. 稀有气体采用稀有气体质谱仪 (NGMS) 和激光离子化质谱纳米显微镜 (溅射中性离子质谱) (LIMAS(SNMS) ) 进行分析.

# 3 小行星探测的启示

## 3.1 小行星探测任务的发展趋势

(1) 从顺访探测到采样返回. 早期深空探测的焦点主要集中在大行星上, 小行星只能作为某些任务的拓展探测目标. 进入 20 世纪 90 年代以来, 小行星探测越来越受到关注, 从 NASA 推出首个专门针对小行星的探测任务 NEAR, 到日本的 Hayabusa 和 Hayabusa 2 采样返回任务的成功实施, 小行星探测已经成为了深空探测最热的方向. 目前已知的小天体探测任务中, 约 70% 为小行星探测任务. 由于小行星引力较小, 采样返回任务的探测难度并不高, 其科学成果产出却非常突出. 例如 Hayabusa 返回的样品均为微细的尘粒, 肉眼几乎不可见. 但是, 利用最先进的实验室分析技术, 仅 50 颗 Hayabusa 尘粒就产出了大量的原创成果, 多篇论文发表在 Nature 和 Science 等顶级期刊上, 产生了巨大的国际影响力. 因此, 未来采样返回将成为小行星最普遍的探测方式, 对不同类型的小行星进行采样, 将极大提升对太阳系早期演化的认识.

(2) 探测对象的类型越来越丰富. 不同类型小行星形成于早期太阳星云不同的区域, 只有对不同类型的小行星进行系统的探测, 才能获取更为完整的太阳系早期演化历史. C 型小行星富含水和有机质, 可为生命起源等重大科学问题提供重要线索. 因此, 该类小行星过去一直是探测的首选目标, 例如 Hayabusa 2 的探测目标为 Cb 型小行星 162173 Ryugu; OSIRIS-REx 任务选择了 C 型小行星 101955 Bennu; 计划发射的 Destiny$^+$任务选择了 C 型小行星 3200 Phaethon 为目标. 随着小行星探测任务的多元化, 未来的探测任务将涵盖更加丰富的小行星类型. 例如 Hayabusa, OSIRIS-APEX 和 Hera 任务选择了 S 型近地小行星为探测目标; Psyche 任务选择了 M 型主带小行星为探测目标. 目前已知的小行星探测任务涵盖了近地、主带、柯伊伯带和特洛伊小行星, 覆盖了多种光谱类型, 例如 S 型、C 型、M 型、E 型、V 型、D 型、P 型、Q 型.

(3) 从科学探测到小行星防御与资源利用. 从 1989 年 Galileo 号首次飞越 951 Gaspra, 到 1996 年 NEAR 号首次着陆 433 Eros, 到 2007 年 Dawn 号首次环绕探测 4 Vesta, 到 2003 年 Hayabusa 号首次实现了采样返回, 小行星探测技术在不断进步, 其科学目标主要聚焦于小行星基本物理化学性质及其对太阳系起源与演化的指示. 当前小行星探测的目标已经逐步从科学研究向小行星防御和资源利用转变. 由于小行星质量小、轨道易受扰动、可能撞击地球并造成重大灾难性事件的特点, NASA 早在 1992 年就开始研讨拦截近地天体的问题. 2021 年 DART 任务首次以小行星防御为科学目标, 成功实现了动能撞击偏转小行星. 目前, 已有许多国家规划了小行星防御任务

或与小行星防御密切相关的任务, 例如 OSIRIS-APEX、Hera 和中国的小行星撞击任务. 小天体防御已成为深空探测的热点方向, 可预见的未来将会有更多国家参与到小行星防御的研究与实施中. 同时, 小行星资源的开采利用正逐渐成为未来深空探索的又一新趋势. 虽然目前小行星的采样技术不成熟, 无法在短期或中期内实现关于小行星采矿, 但针对小行星采矿已有一些观点被提出, 例如小行星采矿的技术现状、小行星空间采矿的监管现状、“争夺空间”必要性等.

### 3.2 对中国小行星探测和研究的启示

通过回顾小行星探测的历史, 梳理和总结小行星研究现状和趋势, 对未来中国小行星探测和研究可以获得如下启示.

(1) 要实现对更多类型的小行星探测, 需要规划更多的任务. 目前, 中国仅规划了天问二号小行星采样返回和首次小行星防御任务, 不能满足对更多种类小行星探测的需求. 考虑到小行星采样返回相对容易且科学成果产出显著, 最佳策略应该是低成本、多频次对各类小行星进行采样.

(2) 加强小行星任务之间的配合. 小行星探测主要是三种, 即探测采样、撞击或资源利用. 这些目标都需要对小行星开展基本的物理化学性质探测. 因此, 共享任务间的载荷技术和探测数据, 可以更好地组织和规划小行星任务. 对同一目标先进行探测采样, 获得其详细物理化学特性之后, 再开展撞击实验, 并规划未来的观测计划, 或许效果更佳. 例如 DART 任务完成撞击实验后, Hera 任务计划对撞击后的 65803 Didymos 和 Dimorphos 系统进行进一步的观测, 有望获得更多重要的研究成果.

(3) 加强科学团队建设, 统筹任务规划. 组建统一的科学团队, 统筹任务规划, 并加强对小行星研究的经费投入和平台建设, 可以在最大限度地降低样品消耗量的同时, 获得更多系统的数据和成果. 例如 Hayabusa 2 和 OSIRIS-REx 在样品分发前, 均组织了强有力的研究团队, 对样品的初步分析进行详细的规划及实施.

(4) 加强国际合作. Hayabusa 2 和 OSIRIS-REx 任务在样品返回前, 均组织了国际团队对返回样品进行详细的研究规划. 这些机构彼此之间合作紧密, 凸显任务主导国和核心参与国在基础研究中引领概念设计、掌握一手数据、优先产出原始创新重大成果的优势和可能. 同时提升任务主导国在深空探测研究中的主导优势和国际影响力.

## 4 结语

当今世界各国的小行星探测正处于起步阶段, 及时介入小行星深空探测领域将使中国在国际空间探测活动中占据有利地位. 预计在 2025 年前后执行的天问二号及中国首次小行星防御任务是中国未来深空探测的里程碑. 为更好地规划未来的小行星探测任务, 本文详细分析了当前已经执行或已公布的小行星探测任务, 根据小行星返回样品的储存管理和初步分析流程, 提出中国未来的小行星探测应以低成本、多频次采样返回任务为主, 并注重加强任务之间的配合. 与此同时, 应尽快组织开展小行星关键科学问题研判, 并在小行星样品返回前组建统一的科学团队, 统筹任务规划, 制定最优化的分析方案, 为未来样品返回的管理和使用提供基础.

**致谢** 中国科学院国家空间科学中心刘洋研究员、中国科学技术大学康晋霆副教授和中国科学院紫金山天文台蒋云副研究员对本文提出了宝贵意见.

## 参考文献

[1] LAURINI K C, GERSTENMAIER W H. The global exploration roadmap and its significance for NASA[J]. *Space Policy*, 2014, **30**(3): 149-155

[2] The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's Space Activities in 2016 [EB/OL]. (2016-12-27)[2023-07-26]. http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/34102/35723/index.html (中华人民共和国国务院新闻办公室.《2016 中国的航天》白皮书 [EB/OL]. (2016-12-27)[2023-07-26]. http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/34102/35723/index.html)

[3] ZHENG Yongchun, OUYANG Ziyuan. Development trend analysis of Solar System exploration and the scientific vision for future missions[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, **1**(2): 83-92 (郑永春, 欧阳自远. 太阳系探测的发展趋势与科学问题分析 [J]. 深空探测学报, 2014, **1**(2): 83-92)

[4] TANG Hong, ZHOU Chuanjiao, LI Xiongyao, *et al.* Infrared spectroscopic detection of organic matter on the surface of asteroids[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 117-126 (唐红, 周传娇, 李雄耀, 等. 小行星表面有机物的红外光谱探测方法 [J]. 空间科学学报, 2022, **42**(1): 117-126)

[5] LIN Y T, ZHANG Y H, HU S, *et al.* Concepts of the small body sample return missions - the 1st 10 million

year evolution of the solar system[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(4): 45

[6] PEÑA-RAMOS J A, RAMÍREZ-DE LUIS F R. Resources in space and asteroid mining: where we are and which challenges should be expected[J]. *International Journal of Technology Management*, 2020, **82**(3/4): 197-205

[7] XU Weibiao, ZHAO Haibin. Deep space exploration of asteroids: the science perspectives[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, **20**(11): 1183-1190 (徐伟彪, 赵海斌. 小行星深空探测的科学意义和展望 [J]. 地球科学进展, 2005, **20**(11): 1183-1190)

[8] CHENG A F, ATCHISON J, KANTSIPER B, *et al*. Asteroid impact and deflection assessment mission[J]. *Acta Astronautica*, 2015, **115**: 262-269

[9] PAN Jiaofeng, WANG Haixia, LENG Fuhai, *et al*. 2022 Research fronts: development trends and key research questions in 11 broad research areas[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, **38**(1): 154-166 (潘教峰, 王海霞, 冷伏海, 等.《2022 研究前沿》——11 个大学科领域发展趋势与重点研究问题 [J]. 中国科学院院刊, 2023, **38**(1): 154-166)

[10] CNSA. Announcement of Opportunities for Scientific Payloads and Projects onboard Asteroid Exploration Mission. https://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6805893/content.html[EB/OL]. (2019-04-19)[2023-08-17] (国家航天局. 小行星探测任务有效载荷和搭载项目机遇公告 [EB/OL]. (2019-04-19)[2023-08-17])

[11] CHEN Q. Near-Earth Asteroid Defense[R]. United Nations/China 2nd Global Partnership Workshop on Space Exploration and Innovation, 2022

[12] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 30114.4-2014 Terminology for space science and application —Part 4: lunar and planetary science[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 30114.4-2014 空间科学及其应用术语 第 4 部分: 月球与行星科学 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015)

[13] LI Chunlai, LIU Jianjun, YAN Wei, *et al*. Overview of scientific objectives for minor planets exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(5): 424-436 (李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望 [J]. 深空探测学报, 2019, **6**(5): 424-436)

[14] NASA. Asteroids[EB/OL]. (2022-12-15)[2023-09-02]. https://science.nasa.gov/solar-system/asteroids/

[15] International Astronomical Union. Minor Planet Center: Latest Published Data[EB/OL]. (2023-07-06)[2023-09-13]. https://minorplanetcenter.net/mpc/summary

[16] HU Zhongwei, ZHAO Haibin. Solar System Archaeological Remains: Minor Planet[M]. Beijing: Science Press, 2017 (胡中为, 赵海斌. 太阳系考古遗存–小行星 [M]. 北京: 科学出版社, 2017)

[17] XIE Huan, CHEN Jie, TONG Xiaohua, *et al*. Advances in site selection methods of asteroid sample return missions[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2023, **51**(7): 1010-1017,1032 (谢欢, 陈杰, 童小华, 等. 小行星采样返回任务的选址方法进展与启发 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2023, **51**(7): 1010-1017,1032)

[18] DAI Wensai, HU Zhongwei. On the origin of the asteroids[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1979, **20**(1): 33-42 (戴文赛, 胡中为. 论小行星的起源 [J]. 天文学报, 1979, **20**(1): 33-42)

[19] DAI Wensai, HU Zhongwei, YAN Lince. Solar System Evolution (Part 2) [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1986 (戴文赛, 胡中文, 阎林册. 太阳系演化 (下) [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986)

[20] XIAO Long, HU Xinyu. Planetary Geology [M]. Beijing: Geology Press, 2013 (肖龙, 胡新宇. 行星地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 2013)

[21] BRITT D T, YEOMANS D, HOUSEN K, *et al*. Asteroid Density, Porosity, and Structure [M]. Tucson: University of Arizona Press, 2002

[22] PRICE S D. The surface properties of asteroids[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **33**(9): 1548-1557

[23] PIETERS C M, NOBLE S K. Space weathering on airless bodies[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, **121**(10): 1865-1884

[24] WANG Qi. Asteroids and comets —the relationship between near—Earth asteroids and main—belt asteroids and conets[J]. *Publications of the Purple Mountain Observatory*, 1992, **11**(2): 75-84 (汪琦. 小行星与彗星—近地小行星、主带小行星和彗星之间相互关系探讨 [J]. 紫金山天文台台刊, 1992, **11**(2): 75-84)

[25] GREENSTREET S. Asteroids in the inner solar system [J]. *Physics Today*, 2021, **74**(7): 42-47

[26] HORNER J, EVANS N W, BAILEY M E. Simulations of the population of Centaurs-I. The bulk statistics[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2004, **354**(3): 798-810

[27] SCHULZ R. Trans-neptunian objects[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2002, **11**(1): 1-31

[28] GRADIE J, TEDESCO E. Compositional structure of the asteroid belt[J]. *Science*, 1982, **216**(4553): 1405-1407

[29] WU Yunzhao, XU Tianyi, WEN Shibo, *et al*. Remote sensing detection of asteroid target properties[J]. *Space Debris Research*, 2021, **21**(4): 11-21 (吴昀昭, 徐天弈, 温世博, 等. 小行星目标特性遥感探测 [J]. 空间碎片研究, 2021, **21**(4): 11-21)

[30] THOLEN D J. Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry[D]. Tucson: University of Arizona, 1984

[31] GAFFEY M J, BELL J F, BROWN R H, *et al*. Mineralogical variations within the S-type asteroid class[J]. *Icarus*, 1993, **106**(2): 573-602

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

[33] DEMEO F E, BINZEL R P, SLIVAN S M, *et al*. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-in-

frared[J]. *Icarus*, 2009, **202**(1): 160-180

[34] KAUFMANN W J. Discovering the Universe [M]. New York: Freeman, 1987

[35] YAMAZAKI Y, YAZAWA H, HIRATA Y. Experimental study on freeze concentration with ice-lining[J]. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 1998, **24**(1): 30-36

[36] DEMEO F E, CARRY B. Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt[J]. *Nature*, 2014, **505**(7485): 629-634

[37] JIANG H X, JI J H. Thermophysical modeling of 20 Themis family asteroids with WISE/NEOWISE observations[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **162**(2): 40

[38] JI Jianghui, HU Shoucun. A review of the surface environment of small bodies in solar system[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2019, **36**(6): 519-532 (季江徽, 胡寿村. 太阳系小天体表面环境综述 [J]. 航天器环境工程, 2019, **36**(6): 519-532)

[39] NASA.Galileo-Overview[EB/OL].(2021-07-09)[2023-08-04]. https://solarsystem.nasa.gov/missions/galileo/overview

[40] KIVELSON M G, BARGATZE L F, KHURANA K K, *et al.* Magnetic field signatures near Galileo's closest approach to Gaspra[J]. *Science*, 1993, **261**(5119): 331-334

[41] CARR M H, KIRK R L, MCEWEN A, *et al.* The geology of gaspra[J]. *Icarus*, 1994, **107**(1): 61-71

[42] THOMAS P C, VEVERKA J, SIMONELLI D, *et al.* The shape of gaspra[J]. *Icarus*, 1994, **107**(1): 23-36

[43] VEVERKA J, BELTON M, KLAASEN K, *et al.* Galileo's encounter with 951 gaspra: overview[J]. *Icarus*, 1994, **107**(1): 2-17

[44] D'AMBROSIO A, SCHIASSI E, CURTI F, *et al.* Physics-informed neural networks for optimal proximity maneuvers with collision avoidance around asteroids [C]//Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference. Big Sky: AAS/AIAA, 2021

[45] BELTON M J S, CHAPMAN C R, THOMAS P C, *et al.* Bulk density of asteroid 243 Ida from the orbit of its satellite Dactyl[J]. *Nature*, 1995, **374**(6525): 785-788

[46] BELTON M J S, CHAPMAN C R, KLAASEN K P, *et al.* Galileo's encounter with 243 Ida: an overview of the imaging experiment[J]. *Icarus*, 1996, **120**(1): 1-19

[47] THOMAS P C, BELTON M J S, CARCICH B, *et al.* The shape of Ida[J]. *Icarus*, 1996, **120**(1): 20-32

[48] CHAPMAN C R. S-type asteroids, ordinary chondrites, and space weathering: the evidence from Galileo's fly-bys of Gaspra and Ida[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1996, **31**(6): 699-725

[49] GRANAHAN J. A compositional study of asteroid 243 Ida and Dactyl from Galileo NIMS and SSI observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2002, **107**(E10): 5090

[50] NASA Photojournal of 2685 Masursky[EB/OL]. (2000-02-11)[2023-08-07]. https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02449

[51] MASIERO J R, GRAV T, MAINZER A K, *et al.* Main-belt asteroids with *wise*/neowise: near-infrared albedos[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **791**(2): 121

[52] NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). Small-Body Database Lookup[EB/OL]. [2023-11-15]. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/

[53] LAZZARIN M, FORNASIER S, BARUCCI M A, *et al.* Groundbased investigation of asteroid 9969 Braille, target of the spacecraft mission Deep Space 1[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2001, **375**(1): 281-284

[54] BURATTI B J, BRITT D T, SODERBLOM L A, *et al.* 9969 Braille: deep Space 1 infrared spectroscopy, geometric albedo, and classification[J]. *Icarus*, 2004, **167**(1): 129-135

[55] DUXBURY T C, NEWBURN R L, ACTON C H, *et al.* Asteroid 5535 Annefrank size, shape, and orientation: stardust first results[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2004, **109**(E2): E02002

[56] STRYK T, STOOKE P J. The surface of asteroid 5535 Annefrank [C]//Proceedings of the 47th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: LPI, 2016

[57] GOESMANN F, ROSENBAUER H, BREDEHÖFT J H, *et al.* Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry[J]. *Science*, 2015, **349**(6247): aab0689

[58] CAPACCIONI F, CORADINI A, FILACCHIONE G, *et al.* The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta[J]. *Science*, 2015, **347**(6220): aaa0628

[59] ALTWEGG K, BALSIGER H, BAR-NUN A, *et al.* 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio[J]. *Science*, 2015, **347**(6220): 1261952

[60] AUSTER H U, APATHY I, BERGHOFER G, *et al.* The nonmagnetic nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko[J]. *Science*, 2015, **349**(6247): aaa5102

[61] KOFMAN W, HERIQUE A, BARBIN Y, *et al.* Properties of the 67P/Churyumov-Gerasimenko interior revealed by CONSERT radar[J]. *Science*, 2015, **349**(6247): aab0639

[62] LAMY P L, JORDA L, FORNASIER S, *et al.* Asteroid 2867 Steins III. Spitzer Space Telescope observations, size determination, and thermal properties[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2008, **487**(3): 1187-1193

[63] DOTTO E, PERNA D, FORNASIER S, *et al.* Photometric and spectroscopic investigation of 2867 Steins, target of the Rosetta mission: ground-based results prior to the Rosetta fly-by[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, **494**(3): L29-L32

[64] KELLER H U, BARBIERI C, KOSCHNY D, *et al.* E-type asteroid (2867) steins as imaged by OSIRIS on board Rosetta[J]. *Science*, 2010, **327**(5962): 190-193

[65] LEYRAT C, CORADINI A, ERARD S, *et al.* Thermal properties of the asteroid (2867) steins as observed by VIRTIS/Rosetta[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, **531**: A168

[66] BARUCCI M A, CAPRIA M T, CORADINI A, *et al.* Classification of asteroids using G-mode analysis[J].

*Icarus*, 1987, **72**(2): 304-324

[67] BIRLAN M, BARUCCI M A, VERNAZZA P, *et al.* Near-IR spectroscopy of asteroids 21 Lutetia, 89 Julia, 140 Siwa, 2181 Fogelin and 5480 (1989YK8), potential targets for the Rosetta mission; remote observations campaign on IRTF[J]. *New Astronomy*, 2004, **9**(5): 343-351

[68] BARUCCI M A, FULCHIGNONI M, ROSSI A. Rosetta asteroid targets: 2867 Steins and 21 Lutetia[J]. *Space Science Reviews*, 2007, **128**(1/4): 67-78

[69] LAZZARIN M, MARCHI S, MOROZ L V, *et al.* New visible spectra and mineralogical assessment of (21) Lutetia, a target of the Rosetta mission[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, **498**(1): 307-311

[70] OCKERT-BELL M E, CLARK B E, SHEPARD M K, *et al.* The composition of M-type asteroids: synthesis of spectroscopic and radar observations[J]. *Icarus*, 2010, **210**(2): 674-692

[71] SIERKS H, LAMY P, BARBIERI C, *et al.* Images of asteroid 21 Lutetia: a remnant planetesimal from the early solar system[J]. *Science*, 2011, **334**(6055): 487-490

[72] STERN S A, WEAVER H A, SPENCER J R, *et al.* Initial results from the New Horizons exploration of 2014 $MU_{69}$, a small Kuiper Belt object[J]. *Science*, 2019, **364**(6441): eaaw9771

[73] MCKINNON W B, RICHARDSON D C, MAROHNIC J C, *et al.* The solar nebula origin of (486958) Arrokoth, a primordial contact binary in the Kuiper Belt[J]. *Science*, 2020, **367**(6481): eaay6620

[74] KEANE J T, PORTER S B, BEYER R A, *et al.* The Geophysical environment of (486958) Arrokoth-A small Kuiper belt object explored by *New Horizons*[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, **127**(6): e2021JE007068

[75] NASA. New Horizons[EB/OL]. (2022-10-05)[2023-08-05]. https://solarsystem.nasa.gov/missions/new-horizons/in-depth

[76] HUDSON R S, OSTRO S J, SCHEERES D J. High-resolution model of Asteroid 4179 Toutatis[J]. *Icarus*, 2003, **161**(2): 346-355

[77] HUANG J C, JI J H, YE P J, *et al.* The ginger-shaped asteroid 4179 Toutatis: new observations from a successful flyby of Chang'e-2[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**(1): 3411

[78] ZHU M H, FA W Z, IP W H, *et al.* Morphology of asteroid (4179) Toutatis as imaged by Chang'E-2 spacecraft[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(2): 328-333

[79] LIU Lei, LIU Yong, CAO Jianfeng, *et al.* Mission design of the CHANG'E-2 asteroid exploration[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, **35**(3): 262-268 (刘磊, 刘勇, 曹建峰, 等. "嫦娥二号"探测小行星任务转移轨道设计 [J]. 宇航学报, 2014, **35**(3): 262-268)

[80] HU S C, JI J H, RICHARDSON D C, *et al.* The formation mechanism of 4179 Toutatis' elongated bilobed structure in a close Earth encounter scenario[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, **478**(1): 501-515

[81] JIANG Y, JI J H, HUANG J C, *et al.* Boulders on asteroid Toutatis as observed by Chang'e-2[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 16029

[82] NASA. Discovery Program[EB/OL]. (2023-01-21)[2023-08-12]. https://www.nasa.gov/planetarymissions/discovery.html#Past

[83] NASA. NEAR Shoemaker[EB/OL]. (2022-10-28)[2023-08-12]. https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1996-008A

[84] CHENG A F. Near Earth Asteroid Rendezvous: Mission Summary [M]. Tucson: The University of Arizona Press, 2002

[85] VEVERKA J, THOMAS P, HARCH A, *et al.* NEAR encounter with asteroid 253 mathilde: overview[J]. *Icarus*, 1999, **140**(1): 3-16

[86] RIVKIN A S, CLARK B E, BRITT D T, *et al.* Infrared spectrophotometry of the NEAR flyby target 253 Mathilde[J]. *Icarus*, 1997, **127**(1): 255-257

[87] ANDERSON B J, ACUÑA M H. Search for solar wind–asteroid interactions at Eros[J]. *Advances in Space Research*, 2004, **33**(11): 1989-1995

[88] LARSON H P, FINK U, TREFFERS R R, *et al.* The infrared spectrum of asteroid 433 Eros[J]. *Icarus*, 1976, **28**(1): 95-103

[89] YEOMANS D K, ANTREASIAN P G, BARRIOT J P, *et al.* Radio science results during the NEAR-Shoemaker spacecraft rendezvous with Eros[J]. *Science*, 2000, **289**(5487): 2085-2088

[90] VEVERKA J, ROBINSON M, THOMAS P, *et al.* NEAR at Eros: imaging and spectral results[J]. *Science*, 2000, **289**(5487): 2088-2097

[91] VEVERKA J, THOMAS P C, ROBINSON M, *et al.* Imaging of small-scale features on 433 Eros from NEAR: evidence for a complex regolith[J]. *Science*, 2001, **292**(5516): 484-488

[92] COLWELL J E, GULBIS A A S, HORÁNYI M, *et al.* Dust transport in photoelectron layers and the formation of dust ponds on Eros[J]. *Icarus*, 2005, **175**(1): 159-169

[93] NASA. Hayabusa[EB/OL]. (2018-01-25)[2023-08-13]. https://solarsystem.nasa.gov/missions/hayabusa/in-depth

[94] NASA. Hayabusa Scientific Instruments[EB/OL]. (2007)[2023-08-13]. https://darts.isas.jaxa.jp/planet/project/hayabusa/instruments.html

[95] FUJIWARA A, KAWAGUCHI J, YEOMANS D K, *et al.* The Rubble-Pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa[J]. *Science*, 2006, **312**(5778): 1330-1334

[96] ABE S, MUKAI T, HIRATA N, *et al.* Mass and local topography measurements of Itokawa by Hayabusa[J]. *Science*, 2006, **312**(5778): 1344-1347

[97] DEMURA H, KOBAYASHI S, NEMOTO E, *et al.* Pole and global shape of 25143 Itokawa[J]. *Science*, 2006, **312**(5778): 1347-1349

[98] KITAZATO K, ABE M, ISHIGURO M, *et al.* 25143 Itokawa: direct detection of the current decelerating spin state due to YORP effect[J]. *Astronomy & Astrophysics*,

2007, **472**(1): L5-L8

[99] NAKAMURA T, NOGUCHI T, TANAKA M, *et al.* Itokawa dust particles: a direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites[J]. *Science*, 2011, **333**(6046): 1113-1116

[100] NAKAMURA T, NAKATO A, ISHIDA H, *et al.* Mineral chemistry of MUSES-C Regio inferred from analysis of dust particles collected from the first- and second-touchdown sites on asteroid Itokawa[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2014, **49**(2): 215-227

[101] EBIHARA M, SHIRAI N, SEKIMOTO S, *et al.* Chemical and mineralogical compositions of two grains recovered from asteroid Itokawa[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2015, **50**(2): 243-254

[102] YURIMOTO H, ABE K I, ABE M, *et al.* Oxygen isotopic compositions of asteroidal materials returned from Itokawa by the Hayabusa mission[J]. *Science*, 2011, **333**(6046): 1116-1119

[103] TSUCHIYAMA A, UESUGI M, UESUGI K, *et al.* Three dimensional structures of particles recovered from the asteroid Itokawa by the Hayabusa mission and a role of X-ray microtomography in the preliminary examination [C]//Proceedings of the 42nd Lunar and Planetary Science Conference. The Woodsland: LPI, 2011

[104] TSUCHIYAMA A, UESUGI M, UESUGI K, *et al.* Three-dimensional microstructure of samples recovered from asteroid 25143 Itokawa: comparison with LL5 and LL6 chondrite particles[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2014, **49**(2): 172-187

[105] KITAJIMA F, KOTSUGI M, OHKOCHI T, *et al.* A micro-spectroscopic approach to the carbonaceous matter in the particles recovered by the Hayabusa mission [C]//Proceedings of the 42nd Lunar and Planetary Science Conference. The Woodsland: LPI, 2011

[106] NARAOKA H, MITA H, HAMASE K, *et al.* Preliminary organic compound analysis of microparticles returned from Asteroid 25143 Itokawa by the Hayabusa mission[J]. *Geochemical Journal*, 2012, **46**(1): 61-72

[107] NARAOKA H, AOKI D, FUKUSHIMA K, *et al.* ToF-SIMS analysis of carbonaceous particles in the sample catcher of the Hayabusa spacecraft[J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, **67**(1): 1-9

[108] NOGUCHI T, NAKAMURA T, KIMURA M, *et al.* Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles[J]. *Science*, 2011, **333**(6046): 1121-1125

[109] NOGUCHI T, KIMURA M, HASHIMOTO T, *et al.* Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2014, **49**(2): 188-214

[110] NAGAO K, OKAZAKI R, NAKAMURA T, *et al.* Irradiation history of Itokawa regolith material deduced from noble gases in the Hayabusa samples[J]. *Science*, 2011, **333**(6046): 1128-1131

[111] WAKITA S, NAKAMURA T, IKEDA T, *et al.* Thermal modeling for a parent body of Itokawa[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2014, **49**(2): 228-236

[112] NASA. Dawn Science Payload[EB/OL]. [2023-08-14]. https://solarsystem.nasa.gov/missions/dawn/technology/science-payload

[113] NASA. Dawn Objectives[EB/OL]. (2018-12-12)[2023-08-14]. https://solarsystem.nasa.gov/missions/dawn/mission/objectives

[114] RUSSELL C T, RAYMOND C A, CORADINI A, *et al.* Dawn at Vesta: testing the protoplanetary paradigm[J]. *Science*, 2012, **336**(6082): 684-686

[115] JAUMANN R, WILLIAMS D A, BUCZKOWSKI D L, *et al.* Vesta's shape and morphology[J]. *Science*, 2012, **336**(6082): 687-690

[116] MARCHI S, MCSWEEN H Y, O'BRIEN D P, *et al.* The violent collisional history of asteroid 4 Vesta[J]. *Science*, 2012, **336**(6082): 690-694

[117] SCHENK P, O'BRIEN D P, MARCHI S, *et al.* The geologically recent giant impact basins at Vesta's south pole[J]. *Science*, 2012, **336**(6082): 694-697

[118] ZUBER M T, MCSWEEN H Y, BINZEL R P, *et al.* Origin, internal structure and evolution of 4 Vesta[J]. *Space Science Reviews*, 2011, **163**(1/4): 77-93

[119] DE SANCTIS M C, AMMANNITO E, CAPRIA M T, *et al.* Spectroscopic characterization of mineralogy and its diversity across Vesta[J]. *Science*, 2012, **336**(6082): 697-700

[120] WATANABE S I, TSUDA Y, YOSHIKAWA M, *et al.* Hayabusa 2 mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **208**(1/4): 3-16

[121] JAXA. Hayabusa2 Scientific Payloads[EB/OL]. [2023-08-15]. https://www.hayabusa2.jaxa.jp/mission/m_payloard/

[122] WATANABE S, HIRABAYASHI M, HIRATA N, *et al.* Hayabusa 2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu-A spinning top-shaped rubble pile[J]. *Science*, 2019, **364**(6437): 268-272

[123] KITAZATO K, MILLIKEN R E, IWATA T, *et al.* The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa 2 near-infrared spectroscopy[J]. *Science*, 2019, **364**(6437): 272-275

[124] HIRABAYASHI M, NAKANO R, TATSUMI E, *et al.* Spin-driven evolution of asteroids' top-shapes at fast and slow spins seen from (101955) Bennu and (162173) Ryugu[J]. *Icarus*, 2020, **352**: 113946

[125] SUGITA S, HONDA R, MOROTA T, *et al.* The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes[J]. *Science*, 2019, **364**(6437): 252

[126] GROTT M, KNOLLENBERG J, HAMM M, *et al.* Low thermal conductivity boulder with high porosity identified on C-type asteroid (162173) Ryugu[J]. *Nature Astronomy*, 2019, **3**(11): 971-976

[127] NOGUCHI T, MATSUMOTO T, MIYAKE A, *et al.* A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu[J]. *Nature Astronomy*, 2023, **7**(2): 170-

181

[128] MOROTA T, SUGITA S, CHO Y, *et al*. Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: implications for surface evolution[J]. *Science*, 2020, **368**(6491): 654-659

[129] TSUDA Y, SAIKI T, TERUI F, *et al*. Hayabusa2 mission status: landing, roving and cratering on asteroid Ryugu[J]. *Acta Astronautica*, 2020, **171**: 42-54

[130] JAXA. JAXA Hayabusa 2 Project Printed Material [EB/OL].(2022-07-29)[2023-08-15].https://www.hayabusa2.jaxa.jp/en/enjoy/material/

[131] YADA T, ABE M, OKADA T, *et al*. Preliminary analysis of the Hayabusa 2 samples returned from C-type asteroid Ryugu[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **6**(2): 214-220

[132] ITO M, TOMIOKA N, UESUGI M, *et al*. A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu's returned sample[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(10): 1163-1171

[133] YOKOYAMA T, NAGASHIMA K, NAKAI I, *et al*. Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites[J]. *Science*, 2023, **379**(6634): eabn7850

[134] OKAZAKI R, MARTY B, BUSEMANN H, *et al*. Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record its volatile sources and recent surface evolution[J]. *Science*, 2022, **379**(6634): eabo0431

[135] NAKAMURA E, KOBAYASHI K, TANAKA R, *et al*. On the origin and evolution of the asteroid Ryugu: a comprehensive geochemical perspective[J]. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 2022, **98**(6): 227-282

[136] NAKAMURA T, MATSUMOTO M, AMANO K, *et al*. Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: direct evidence from returned samples[J]. *Science*, 2023, **379**(6634): eabn8671

[137] NARAOKA H, TAKANO Y, DWORKIN J P, *et al*. Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu[J]. *Science*, 2023, **379**(6634): eabn9033

[138] YABUTA H, CODY G D, ENGRAND C, *et al*. Macromolecular organic matter in samples of the asteroid (162173) Ryugu[J]. *Science*, 2023, **379**(6634): eabn9057

[139] OKAZAKI R, MIURA Y N, TAKANO Y, *et al*. First asteroid gas sample delivered by the Hayabusa 2 mission: a treasure box from Ryugu[J]. *Science Advances*, 2022, **8**(46): eabo7239

[140] LACZNIAK D L, THOMPSON M S, CHRISTOFFERSEN R, *et al*. Characterizing the spectral, microstructural, and chemical effects of solar wind irradiation on the Murchison carbonaceous chondrite through coordinated analyses[J]. *Icarus*, 2021, **364**: 114479

[141] MICHEL P, BENZ W, TANGA P, *et al*. Collisions and gravitational reaccumulation: forming asteroid families and satellites[J]. *Science*, 2001, **294**(5547): 1696-1700

[142] OSTRO S J, PRAVEC P, BENNER L A M, *et al*. Radar and optical observations of asteroid 1998 KY26[J]. *Science*, 1999, **285**(5427): 557-559

[143] NASA. OSIRIS-REx Overview[EB/OL]. (2021-08-12)[2023-08-16]. https://science.nasa.gov/mission/osiris-rex/

[144] LAURETTA D S, CONNOLLY JR H C, GROSSMAN J N, *et al*. OSIRIS-REx sample analysis plan — Revision 3.0[OL]. arXiv preprint arXiv: 2308.11794, 2023

[145] NASA. NASA Announces OSIRIS-REx Bulk Sample Mass[EB/OL].(2024-02-15)[2024-02-20].https://blogs.nasa.gov/osiris-rex/

[146] MICHEL P, BALLOUZ R L, BARNOUIN O S, *et al*. Collisional formation of top-shaped asteroids and implications for the origins of Ryugu and Bennu[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 2655

[147] BARNOUIN O S, DALY M G, PALMER E E, *et al*. Shape of (101955) Bennu indicative of a rubble pile with internal stiffness[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(4): 247-252

[148] DELLAGIUSTINA D N, EMERY J P, GOLISH D R, *et al*. Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis[J]. *Nature Astronomy*, 2019, **3**(4): 341-351

[149] CAMBIONI S, DELBO M, POGGIALI G, *et al*. Fine-regolith production on asteroids controlled by rock porosity[J]. *Nature*, 2021, **598**(7879): 49-52

[150] WALSH K J, JAWIN E R, BALLOUZ R L, *et al*. Craters, boulders and regolith of (101955) Bennu indicative of an old and dynamic surface[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(4): 242-246

[151] BALLOUZ R L, WALSH K J, BARNOUIN O S, *et al*. Bennu's near-Earth lifetime of 1.75 million years inferred from craters on its boulders[J]. *Nature*, 2020, **587**(7833): 205-209

[152] HAMILTON V E, SIMON A A, CHRISTENSEN P R, *et al*. Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid (101955) Bennu[J]. *Nature Astronomy*, 2019, **3**(4): 332-340

[153] SIMON A A, KAPLAN H H, CLOUTIS E, *et al*. Weak spectral features on (101995) Bennu from the OSIRIS-REx Visible and Infrared Spectrometer[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **644**: A148

[154] KIM Y, DEMARTINI J V, RICHARDSON D C, *et al*. Tidal resurfacing model for (99942) Apophis during the 2029 close approach with Earth[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, **520**(3): 3405-3415

[155] DELLAGIUSTINA D N, NOLAN M C, POLIT A T, *et al*. OSIRIS-APEX: an OSIRIS-REx extended mission to asteroid apophis[J]. *The Planetary Science Journal*, 2023, **4**(10): 198

[156] NOLAN M C, GOLISH D R, GUZEWICH S, *et al*. OSIRIS-APEX: an OSIRIS-REx extended mission to Apophis [C]//Proceedings of the Asteroids, Comets, Meteors Conference 2023. Arizona: Lunar and Planetary Institute, 2023

[157] NASA. Apophis-Solar System Exploration[EB/OL]. (2022-

09-27)[2023-08-19]. https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/asteroids/apophis/in-depth

[158] MCFADDEN K D, MAINZER A K, MASIERO J R, *et al.* Size and albedo constraints for (152830) dinkinesh using WISE data[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, **957**(1): L2

[159] MOTTOLA S, HELLMICH S, BUIE M W, *et al.* Shape models of Lucy targets (3548) Eurybates and (21900) Orus from disk-integrated photometry[J]. *The Planetary Science Journal*, 2023, **4**(1): 18

[160] BUIE M W, OLKIN C B, MERLINE W J, *et al.* Size and shape from stellar occultation observations of the double Jupiter Trojan Patroclus and Menoetius[J]. *The Astronomical Journal*, 2015, **149**(3): 113

[161] NASA. Lucy Media Resources[EB/OL]. (2021-10-08)[2023-08-17]. http://www.nasa.govmission_pages/lucy/news/index

[162] CHENG A F, RIVKIN A S, MICHEL P, *et al.* AIDA DART asteroid deflection test: planetary defense and science objectives[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, **157**: 104-115

[163] DALY R T, ERNST C M, BARNOUIN O S, *et al.* Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence[J]. *Nature*, 2023, **616**(7957): 443-447

[164] NASA. DART Press Kit[EB/OL]. (2021-11-02)[2023-08-16]. https://dart.jhuapl.edu/Press-Kit/index.php

[165] CHENG A F, AGRUSA H F, BARBEE B W, *et al.* Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos[J]. *Nature*, 2023, **616**(7957): 457-460

[166] RIVKIN A S, CHENG A F. Planetary defense with the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission and prospects[J]. *Nature Communications*, 2023, **14**(1): 1003

[167] THOMAS C A, NAIDU S P, SCHEIRICH P, *et al.* Orbital Period change of Dimorphos due to the DART kinetic impact[J]. *Nature*, 2023, **616**(7957): 448-451

[168] NASA. Psyche Mission[EB/OL]. (2021-10-02)[2023-08-17]. https://psyche.asu.edu/scienc/

[169] MICHEL P, KÜPPERS M, BAGATIN A C, *et al.* The ESA Hera mission: detailed characterization of the DART impact outcome and of the binary asteroid (65803) Didymos[J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, **3**(7): 160

[170] JAXA. Joint press conference with the German Aerospace Center (DLR)[EB/OL]. (2017-09-20)[2023-08-17]. https://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/detail/10700.html (JAXA. ドイツ航空宇宙センター (DLR) との共同記者会見| ファン!ファン!JAXA![EB/OL]. (2017-09-20)[2023-08-17]. https://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/detail/10700.html)

[171] HU S C, LI B, JIANG H X, *et al.* Peculiar orbital characteristics of earth quasi-satellite 469219 Kamo`oalewa: implications for the Yarkovsky detection and orbital uncertainty propagation[J]. *The Astronomical Journal*, 2023, **166**(4): 178

[172] SHARKEY B N L, REDDY V, MALHOTRA R, *et al.* Lunar-like silicate material forms the Earth quasi-satellite (469219) 2016 $HO_3$ Kamo`oalewa[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, **2**(1): 231

[173] YADA T, FUJIMURA A, ABE M, *et al.* Hayabusa-returned sample curation in the planetary material sample curation facility of JAXA[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2014, **49**(2): 135-153

[174] ZHANG Xiadong, GU Yuantao, ZHAO Liang. Comparison of storage and management for international extraterrestrial samples and their implications[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 2021, **57**(6): 971-980 (张夏冬, 谷渊涛, 赵良. 国际地外样品储存与管理状态的对比和启示 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 2021, **57**(6): 971-980)

[175] YOSHIKAWA M, KAWAGUCHI J, FUJIWARA A, *et al.* The Hayabusa mission [M]//LONGOBARDO A. Sample Return Missions. Amsterdam: Elsevier, 2021: 123-146

[176] RIGHTER K, LUNNING N G, NAKAMURA-MESSENGER K, *et al.* Curation planning and facilities for asteroid Bennu samples returned by the OSIRIS- REx mission[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2023, **58**(4): 572-590

[177] TSUCHIYAMA A, MATSUMOTO T, NAGANO T, *et al.* Microstructures of voids in itokawa particles collected by hayabusa [C]//75th Annual Meeting of the Meteoritical Society. Cairns: Lunar and Planetary Institute, 2012

[178] EBIHARA M, SEKIMOTO S, SHIRAI N, *et al.* Neutron activation analysis of a particle returned from asteroid Itokawa[J]. *Science*, 2011, **333**(6046): 1119-1121

## 作者简介



**魏思佳** 女, 2000 年 12 月出生于陕西省汉中市. 现为中国科学院地质与地球物理研究所硕士研究生, 行星化学专业.
E-mail: weisijia23@mails.ucas.ac.cn



**何雨旸 (通信作者)** 女, 1990 年 3 月出生于四川省成都市. 现为中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理院重点实验室副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为挥发性元素的同位素效应、行星大气成分演化等.
E-mail: yhe@mail.iggcas.ac.cn