

太阳系小天体表面环境综述

季江徽^{1,2,3}, 胡寿村^{1,2,3}

(1. 中国科学院 紫金山天文台; 2. 中国科学院 行星科学重点实验室: 南京 210033;
3. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026)

摘要: 地面和空间望远镜观测, 特别是最近 30 多年来的历次深空探测任务极大提高了我们对太阳系小天体的认识。现已知小天体表面具有复杂多样的形貌特征, 这些特征与其历史上所经历过的地质演变有密切关系, 亦可为理解早期太阳系的动力学环境提供重要信息。文章首先简要介绍了通过天文观测数据反演小行星形貌信息的基本原理和方法; 然后基于已实施的深空探测任务获取的数据资料, 回顾和总结了 433 Eros、25143 Itokawa、4179 Toutatis、162173 Ryugu、101955 Bennu 及 486958 2014 MU69 这 6 颗小行星的表面环境和物理性质, 其中着重介绍了对这几颗小行星的形状、表面碎石形态和分布、撞击坑形貌和分布、表面坡度、沟槽和山脊等线性结构以及表壤运动痕迹等的认识, 以及如何根据这些信息推测各小行星的形成历史; 最后简要介绍了目前认为可能影响小行星表面形貌的几种机制, 以期为我国即将开展的小天体深空探测任务提供借鉴。

关键词: 太阳系小天体; 地形地貌; 动力学环境; 天体演化; 深空探测; 数据反演

中图分类号: V524.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2019)06-0519-14

DOI: [10.12126/see.2019.06.001](https://doi.org/10.12126/see.2019.06.001)

A review of the surface environment of small bodies in solar system

Ji Jianghui^{1,2,3}, Hu Shoucun^{1,2,3}

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences; 2. CAS Key Laboratory of Planetary Sciences: Nanjing 210033, China; 3. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026, China)

Abstract: The observations with the ground- and space-based telescopes and especially in several space missions in recent over 30 years have enormously improved our understanding of small bodies in the solar system. It is already known that the complex and diverse topographical features of the surface of those small bodies are closely related to their geological evolution, and therefore, they have provided important information of the early solar system. This paper first gives a brief introduction of the rationales and the methods of how to determine the shape and the topography of small bodies based on the astronomical observations. Then, based on the retrieved data from the related launched spacecrafts, the surface environments and the physical characteristics of asteroid 433 Eros, 25143 Itokawa, 4179 Toutatis, 162173 Ryugu, 101955 Bennu and 486958 2014 MU69 are discussed, focusing on their bulk shapes, the configurations and the distributions of the boulders, the appearance and distributions of the craters, the slope angles, the linear features like the grooves and the ridges, and the mass loss evidence of the surface regolith, as well as their relationships with the formation history of each asteroid. Finally, we present several mechanisms that may affect the topography of asteroids, to provide some guidance for the scientific research of target asteroids concerning the next Chinese missions.

Keywords: solar system small bodies; topography and landforms; mechanical environment; cosmogony; deep space explorations; data inversion

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-11-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 11873098, 11473073, 11661161013); 中国科学院创新交叉团队项目

引用格式: 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

Ji J H, HU S C. A review of the surface environment of small bodies in solar system[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(6): 519-532

0 引言

太阳系小天体包括小行星、彗星、流星体以及其他星际物质。对它们的轨道分布、地形地貌、化学成分、内部结构、形成演化等方面的研究有助于了解太阳系的早期演化历史,探索地球表面的水和生命的起源,以及研究如何防御一些对地球安全造成潜在威胁的小天体^[1]。

基于天文学手段,通过地基或空间望远镜对这些小天体开展研究,可获取可见光(包括测角数据和测光数据)、反射地面雷达回波、近红外反射光谱和热辐射光谱等观测数据。这些数据可用于确定小天体轨道,建立小天体形状与自转模型,推断小天体表面成分与热物理性质,研究彗星彗发成分等。基于实验室分析地球上获取的陨石样品,可研究小天体的化学成分与形成历史。近年来,由于计算机水平的发展,数值模拟亦成为一种重要手段,可用于研究小天体轨道的起源与演化、表面形貌改造、撞击坑形成、形状与内部结构演化等。

美国发射的“国际彗星”探测器于1985年首次飞越了彗星21P Giacobini-Zinner,自此开始了小天体深空探测的序幕。6年后,美国的“伽利略号”探测器首次飞越小行星951 Gaspra。目前,小天体探测已成为国际深空探测的热点。截至2019年11月,美国、欧空局、日本、俄罗斯(苏联)和中国一共发射过18个小天体探测器,以飞越、着陆和采样返回等方式对14颗小行星、8颗彗星和2颗矮行星开展了探测。通过分析这些探测任务采集到的数据,极大提高了对小天体的认识。现在已知大部分直径百米级以上的小行星(甚至彗星)具有疏松的碎石堆结构,成分多样,孔隙率高而密度低;在大行星引力摄动影响下有些小天体有着非常复杂且难以预测的轨道迁移;而且小天体之间的碰撞,潮汐效应、空间风化、太阳热辐射、表面物质挥发等都会直接或间接影响其地形地貌、形成演化与内部结构。2012年12月13日,我国对近地小行星4179 Toutatis成功开展了飞越探测,未来还将对近地小行星469219 Kamo'oalewa和主带彗星(或称活动小行星)133P/Elst-Pizarro开展采样返回和绕飞探测^[2]。

本文关注的小天体对象主要是小行星,其数目众多且广泛分布于太阳系内,按照轨道特征可分为

近地小行星、主带小行星、特洛伊小行星、柯依伯带天体以及半人马天体;按照组成构型可分为单小行星、多小行星系统(目前观测到的有双小行星和三合小行星)和轨道上分离的小行星对(原来可能是相互绕转的双小行星);按照形状则可分为陀螺型小行星、延长型小行星和接触双小行星等;按照光谱成分特征可主要分为C类、S类和M类小行星;按照自转特征可分为慢自转小行星、快自转小行星和非主轴自转小行星等。这些不同的分类方法反映了小行星多样而且复杂的形成演化机制以及丰富的科学研究内涵。

小行星表面地形地貌是探测器最容易观察到而望远镜无法直接获取的物理信息。过去多年的小行星探测任务返回的数据让我们了解到小行星表面具有丰富多样而复杂的形貌细节,例如光滑或粗糙的地表、坡度较大的斜坡、表面不均匀分布的反照率、尺寸从厘米级到几十米级甚至以上的碎石、断裂或带棱角的石块、地表以下的洼地或凹陷、尺度分布广泛而形貌多样的撞击坑、多个紧密相连的坑链、蜿蜒盘绕在小行星表面的沟槽和山脊等线性结构,以及在撞击坑内或斜坡上直接或间接观察到的小行星表壤迁移证据。这些信息能够反映小行星的内部结构并为解释其独特的形成演化历史提供有力证据。

本文首先介绍基于地面和空间望远镜观测数据开展小行星形状和表面物理性质研究的原理方法以及存在的局限性;随后着重分别对6颗已经探测过的小行星433 Eros、25143 Itokawa、4179 Toutatis、162173 Ryugu、101955 Bennu和486958 2014 MU69的表面形貌信息进行了回顾和梳理;然后简要介绍了几种可能影响小行星表面形貌演化的机制;最后对这些探测结果进行了总结和比较。

1 望远镜观测

为了能够在小行星深空探测任务中做好科学合理的任务规划,需要事先对目标小行星表面环境有正确认识。形状和地形地貌是小行星表面最直接的物理环境,前者与小行星引力场密切相关,会直接影响探测器的绕飞轨道;而形貌细节,如表面坡度、碎石大小和分布、撞击坑等则对探测器进行着陆采样至关重要。除了在真正飞抵目标小行星后直接拍照之外,地面和空间望远镜观测,包括光学、雷

达和红外波段的观测,也能获得一定的形状和地形地貌信息。

光学观测获取的是小行星表面在反射太阳光后被望远镜收集到的光学波段的电磁辐射。小行星的自转、相位角和形状会影响望远镜终端最终接收到的辐射流量,相应地可以获取小行星视亮度随时间变化的光变曲线。如果光变曲线能够覆盖小行星的完整相位和自转周期,理论上可以通过最小二乘法反演出小行星的形状和自转周期。然而光变曲线反演得到的形状模型较为粗糙,且一般是凸面的,难以解析到小行星表面地形细节,例如光变曲线反演得到的 Ryugu 形状就明显不同于其真实的陀螺形状^[3]。事实上,大部分小行星的光变曲线数据都不足以准确反演出其形状模型,此时可根据光变曲线数据给出的最大振幅来估算小行星的长宽比,并用长椭球体($a > b = c$)来近似建立小行星形状模型。

雷达是获取小行星物理参数的另一种重要手段,其原理是利用地面天线向小行星发射电磁波并接收从小行星表面反射后的回波,通过测量多普勒时延和多普勒频移来生成延迟多普勒图像。如果雷达数据能覆盖全部小行星表面,则可通过获取的延迟多普勒图像反演得到小行星的形状、自转参数甚至是小行星内部密度分布^[4]。相比于光变曲线反演方法,通过雷达数据反演的形状模型可以获得凹坑信息,而且往往有更高的精度,例如2012年Goldstone雷达站获得的小行星4179 Toutatis的延迟多普勒图像精度可达3.75 m。但雷达波从地面发射后接收到的回波衰减程度与距离的4次方成正比,因此雷达观测主要用于近地小行星。目前(截至2019年7月)美国的Arecibo和Goldstone雷达望远镜已经对138颗主带小行星、861颗近地小行星和21颗彗星开展过雷达观测,但事实上大部分的雷达观测数据都不足以用于反演形状模型,截至目前JPL网站仅公开发布了2颗主带小行星和23颗近地小行星的雷达观测的形状模型。

小行星在太阳照射下表面会有一些温度,因而能够产生红外辐射,利用地基望远镜(如西班牙的GTC望远镜和日本的“昴星团”望远镜)或空间望远镜(如IRAS、Spitzer、Herschel和WISE红外卫星望远镜)可以接收到相应波段的热辐射观测数据。利用建立的热物理模型也可计算出小行星表面发出的红外辐射流量的理论值,通过和观测数据比

较拟合后即可推算出小行星的反照率、表面粗糙度、热惯量和有效直径等信息^[5-6]。目前学者们已经提出过多个小行星的热物理模型,如:考虑自转和热惯量等因素后提出的经典小行星热物理模型(TPM);假设小行星是由三角面元构成的多面体且考虑了不同面元之间的相互辐射后提出的先进热物理模型(ATPM)。ATPM模型在提出后已被广泛应用于推测小行星表面热物理性质,且现在仍在进一步完善中^[7]。

2 空间任务探测

人们一度认为小行星应该是表面光滑、无表壤覆盖的一整块单石,因为即使在微陨星撞击后有溅射物产生,考虑到其极其微弱的引力场,岩石碎片组成的溅射物也将难以落回小行星表面。然而随着探测器获取到951 Gaspra、243 Ida、433 Eros等小行星的真实图像后,我们才知道小行星表面存在复杂的结构。本章将回顾和梳理空间任务探测过的5颗近地小行星(Eros, Itokawa, Toutatis, Ryugu, Benu)和1颗柯伊伯带小天体(2014 MU69)的表面地形地貌。它们的真实形状见图1,可以明显发现Itokawa、Toutatis和2014 MU69具有接触双小行星构型(有学者也曾经将Eros认为是接触双小行星),而Benu和Ryugu则为陀螺构型,这说明此2类形状在小行星中非常常见,而且这些构型与小行星的形成演化机制密切相关。下面逐一展开介绍这几颗小行星的详细形貌及其反映的形成演化机制。

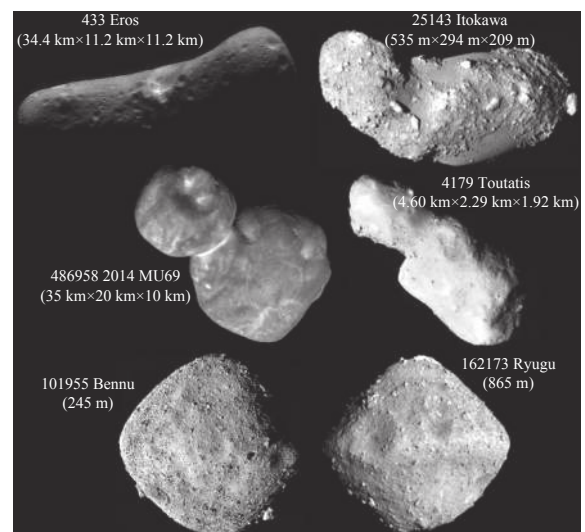


图1 NASA、JAXA、CNSA在空间任务中探测过的6个小天体的形状和大小
Fig. 1 The shape and size of 6 asteroids visited by spacecrafts launched by NASA, JAXA, and CNSA

2.1 433 Eros

美国的 NEAR 探测器于 2000 年 2 月 14 日进入近地小行星 Eros 的环绕轨道,并在 1 年后成功着陆,是第一个实现在小行星上环绕并着陆的探测器。Eros 的光谱型为 S 型,自转周期为 5.27 h,大小为 $34.4 \text{ km} \times 11.2 \text{ km} \times 11.2 \text{ km}$,是太阳系内尺寸第二大的近地小行星。Eros 的质心和形心存在一些偏移,这可能与其深达上百米的疏松表壤有关。引力场测量结果表明,Eros 内部结构比较均匀,其平均密度为 2.67 g/cm^3 ,小于地球上普通球粒陨石的密度。不过 Eros 的孔隙率仅约为 20%,远远小于 Itokawa 的该项数值(41%),因此有学者质疑 Eros 的内部结构不应是传统意义上认为的类似 253 Mathilde 小行星的“碎石堆”^[8]。

Eros 的表面十分粗糙,表壤物质涵盖了 cm 级以下的小砂砾到 10 m 级以上的巨石,粒径分布曲线斜率约为 -3。从整体上看,Eros 表面的颜色和反照率变化较小,说明其表面成分分布比较均匀。然而,在一些坡度较大的区域仍然能够看到一些反照率较高的区域,而且边缘轮廓很清晰(参见图 1),这表明这些区域最近才发生过表壤迁移或滑坡,将新鲜的内部物质裸露出来,而太空风化还没来得及影响它们。值得一提的是,进一步研究表明并不是所有表壤滑坡区域的坡度都比较大,有些区域的坡度明显小于休止角,但仍然观测到了滑坡,其具体原因还存在一些争议。另外,观测数据表明,Eros 表面的 Rahe Dorsum 山脊某些位置的坡度大于 60° ,明显超过了休止角(图 2(a)),有些山脊甚至发生了扭曲变形(图 2(b)),这都说明这些区域的地质构造存在一定的强度。

NEAR 探测器对 Eros 拍摄的照片显示其表面分布有大量的撞击坑,然而进一步研究发现直径 $< 2 \text{ km}$ 的撞击坑数目偏少,这可能是由于一些大的撞击事件产生的地震波将这些小撞击坑抹掉的^[9]。另外,Eros 上撞击坑深度与直径之比的平均值为 0.13,小于月球表面年轻撞击坑 0.2 的值,进一步表明这些撞击坑确实是在形成后被改造过的。值得注意的是,Eros 表面还发现了一些方形的撞击坑(图 2(c)),类似于地球上的巴林杰陨石坑,这被认为是由于这些撞击发生于 Eros 的断裂地形带。直径

7.6 km 的 Shoemaker 撞击坑被认为是 Eros 上最年轻的大撞击坑,研究认为其对应的撞击事件导致了 Shoemaker 坑附近非均匀的撞击坑和碎石分布密度。

此外,在 Eros 上还观察到一些明显的线性结构,如高达 300 m、长度达 15 km 的 Rahe Dorsum 山脊(如图 2(a)和 2(b)),以及类似于火星一 Phobos 表面的沟槽(图 2(d))^[10]。包括 Eros 在内,小行星表面的线性结构有部分被认为与撞击事件有关,但也有人认为 Eros 历史上的轨道迁移导致的平均温度变化会产生热应力,从而可能形成一些沟槽。事实上,线性结构是小行星表面非常常见的形貌特征,目前空间探测过的大部分小行星上都发现过这种结构。

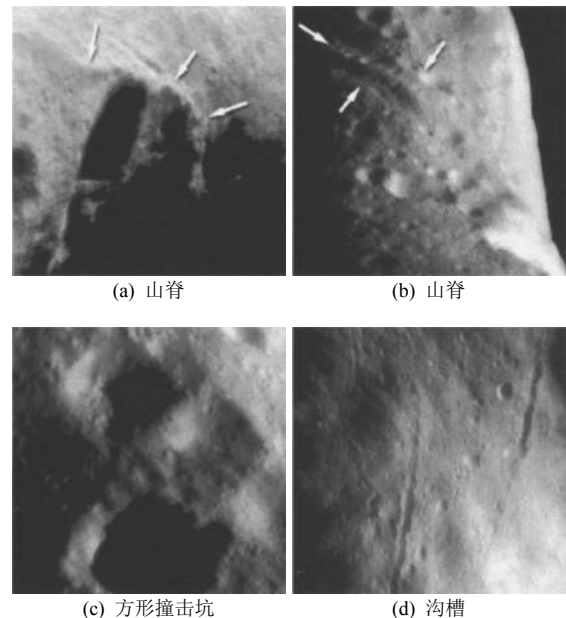


图 2 Eros 小行星表面的山脊、方形撞击坑和沟槽(数据来源:NASA)

Fig. 2 The ridges (a and b), square craters (c) and grooves (d) on Eros (data from NASA)

2.2 25143 Itokawa

日本的 Hayabusa 探测器于 2005 年 9 月到达了 Itokawa 并获取了大量探测数据,在完成采样任务后于 2010 年 6 月 13 日返回了地球。虽然 Itokawa 和 Eros 一样都是 S 型小行星,但它们的结构和表面性质完全不同。Itokawa 的大小为 $535 \text{ m} \times 294 \text{ m} \times 209 \text{ m}$,体积仅为 Eros 的 12 万分之一,平均密度为 $(1.95 \pm 0.14) \text{ g/cm}^3$,孔隙率达 41%,因此 Itokawa 被认为是一颗典型的碎石堆结构小行星^[11]。另外,与 Eros 不同,在 Itokawa 表面没有观察到明显的大尺

度线性结构,这也是支持 Itokawa 为碎石堆结构的一个证据。Itokawa 的形状看上去像是由 2 个独立的部分相接形成的(习惯上将体积更大的那部分称为“身”,更小的那部分称为“头”),这类小行星被称为接触双小行星(或双瓣小行星),类似结构的有 Toutatis 和 2014 MU69 等。从成分上看,Itokawa 的“头”和“身”并没有显著的区别,这表明它们应该来源于同样的母体^[12]。

从整体上看,Itokawa 表面的粗糙程度与地势有关,最粗糙的区域恰好位于地势最高处,覆盖有大量的碎石,且 1 cm 以下的砾石较为少见;光滑的 2 个区域——Muses Sea 和 Sagamihara 则位于低洼处,坡度小于 8°,形貌上较为平整和均匀,说明这些区域在构造上应该至少包含 1 层疏松的表壤颗粒,且分布方式遵循能量最低原则,图 3(a) 和 3(b) 展现了这 2 个区域在 Itokawa 小行星上的位置。进一步研究还表明这些小尺寸颗粒可能是在漫长的演化过程中从其他地方迁移过来的,并覆盖了原来的碎石,据估计这些光滑低洼区域的表壤厚度为 2.5 m。Itokawa 表面也观察到类似 Eros 上的反照率较高的区域,这也同样被解释为此处的表壤发生过滑坡或迁移^[13]。最近的研究甚至发现 Itokawa 表面的粗糙度在经度方向上有显著变化,这可能会影响 YORP 效应。

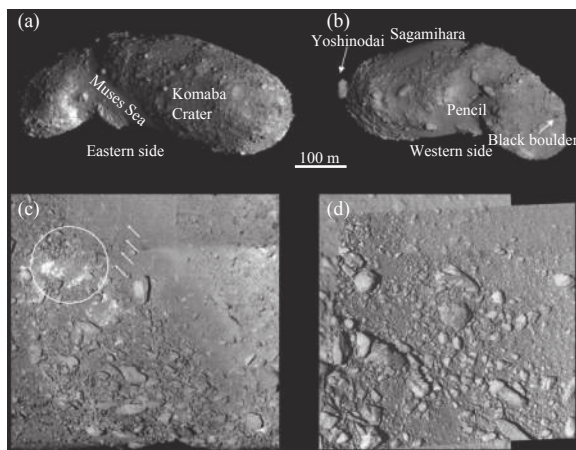


图 3 Itokawa 小行星的表面形貌(数据来源: JAXA)

Fig. 3 The surface topography of Itokawa (data from JAXA)

Hayabusa 探测器拍摄的高清照片显示 Itokawa 表面分布的碎石直径范围为 mm 级到几十 m 级,粒径分布曲线斜率为 -2.8~ -3,最大的一块名为 Yoshinodai 的巨石位于“身”部的边缘上,直径最长达 46 m(见图 3(b) 的最左侧)^[14-15]。从照片上可以

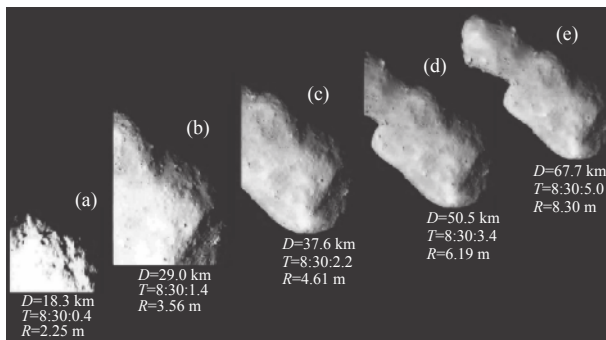
明显观察到大量 m 级(部分 10 m 级)尺寸的碎石,这说明 Itokawa 的形成与撞击事件有关,也支持了 Itokawa 的碎石堆结构猜想。从图 3(c) 还可以发现 Itokawa 上的某些区域分布有一些边缘锐利的棱角石块,这些石块的形状来源可能与撞击事件有关,同时也可能反映了这些石块本身独特的岩性。另外,图 3(d) 所示的是 Muses Sea 边缘的高清图(覆盖范围长约 15 m),恰好是粗糙和光滑地表的过渡带,地势从左下方到右上方递减,在引力作用下颗粒有向右上方迁移的趋势,且更小颗粒的表壤因为阻碍更小而更容易发生迁移^[16]。

经统计,即使将一些轮廓模糊的凹坑考虑在内,Itokawa 表面的撞击坑数目也不超过 100 个,而且直径都在 1 m 以上,也没有观察到撞击坑位置与碎石的位置分布有明显的关联。事实上,由于 Itokawa 的引力场非常微弱,计算表明撞击坑内抛射出来的溅射物绝大部分都已逃离,因此 Itokawa 上的大部分碎石都很可能起源于其形成时的母体碎片。与 Eros 类似,一般认为 Itokawa 上的小撞击坑缺失与表壤迁移或者撞击事件产生的地震有关(考虑到 Itokawa 的直径,1 cm 大小的微陨星对其产生的撞击加速度就足以与 Itokawa 的自引力相当),它们都可能导致撞击坑内边缘的滑坡和坑中心的表壤堆积;不过也有猜测认为这可能与 Itokawa 的年龄较小,刚在主带形成不久就被迁移到近地小行星轨道有关。最近的地面撞击实验研究还提出了一种观点,认为 Itokawa 表面大量分布的碎石也可作为一种“盔甲”而保护 Itokawa 的表面,从而减少小型撞击坑的形成^[17-18]。

2.3 4179 Toutatis

Toutatis 是一颗 S 型的近地小行星,中国的“嫦娥二号”探测器于 2012 年 12 月 13 日以距其表面 770 m 的距离和 10.73 km/s 的相对速度成功飞越了这颗小行星,并且由于相位角的原因采取了飞越后拍照的策略获取了 400 多幅光学图像。由于 Toutatis 的轨道周期和地球成近似 4:1 的关系,在“嫦娥二号”飞越之前 Toutatis 已多次近距离飞越地球,并在此过程中多次被地面雷达望远镜观测,结果表明 Toutatis 是一颗大小 4.60 km×2.29 km×1.92 km,自转周期 5.4 d,进动周期 7.4 d 的典型非主轴自转

小行星^[2, 19-20]。图4(a)~(e)分别是“嫦娥二号”逐渐远离 Toutatis 过程中获取的图像数据, 初始成像时刻为2012年12月13日 GMT 08:30:0.4, 其中(a)的分辨率最高, 为2.25 m, 成像距离为18.3 km, (e)为清晰度最高的一张全景图, 此时的成像距离为67.7 km, 分辨率为8.3 m。计算表明, Toutatis 在“嫦娥二号”视线垂直方向的投影大小为4.75 km×1.95 km, 误差为10%左右, 与雷达模型结果相近。结合雷达数据以及利用探测器相机的空间姿态和光学图像中 Toutatis 的指向可以确定飞越时刻 Toutatis 的主轴指向^[21]。“嫦娥二号”的飞越距离不够近且飞越速度过快, 使得其飞越 Toutatis 过程中的速度变化非常小, 所获得的观测数据难以用来计算 Toutatis 的质量, 也无法推知该小行星的密度和孔隙率。



注: D 为成像距离; T 为成像时刻; R 为分辨率

图4 Toutatis 小行星的表面形貌(数据来源: 中国国家航天局)

Fig. 4 The surface topography of Toutatis (data from CNSA)

“嫦娥二号”获取的光学图像显示 Toutatis 状如生姜, 具有明显的接触双小行星结构, 与之前的雷达探测结果一致。不过在细节上仍然有区别, 例如光学图像显示 Toutatis 的“脖子”处具有1个接近直角的结构, 而雷达模型上此处较为平缓; 光学图像上 Toutatis “身”部的末端比较粗而且有1个直径约800 m的凹陷结构, 而雷达模型中此处比较尖, 而且无法分辨出该凹陷。数值模拟研究表明, 一颗双轨旋同步双小行星在经受地球潮汐作用之后有可能导致卫星和主星发生相撞形成类似 Toutatis 这种延长型的接触双小行星^[22]。

相比于 Itokawa, Toutatis 表面的撞击坑更为明显, 已经证认出来的撞击坑数目有50个, 最小的直径约为40 m, 最大的是端部直径800 m的撞击坑(也有学者认为其不是撞击坑), 这可能是由于一颗

直径50 m的小天体撞击而形成的。该800 m撞击坑边缘上有一明显的山脊结构, 且坑内和坑外附近的位置都发现有线性结构, 其中坑外的结构可能与撞击发生时应力波的传播有关。这些撞击坑信息表明 Toutatis 也很可能是碎石堆结构。根据撞击坑直径数目分布可以推算出对应的撞击体直径, 假设这些撞击发生于主带(近地小行星在主带停留的时间一般要远远超过其在近地小行星轨道上的时间), 根据主带撞击频率模型, 可以推算出 Toutatis 表面的撞击坑保留年龄在13亿年到19亿年之间^[23]。

从光学图像上可以分辨出 Toutatis 表面(“嫦娥二号”拍摄到的可见表面)有大约222颗直径10~61 m范围内的碎石, 其中2颗直径最大的(50 m以上)石块位于“脖子”区域, 90%以上的碎石直径小于30 m。根据经验关系, 61 m直径的碎石无法从800 m撞击坑内溅射出来, 而且根据总碎石体积和撞击坑体积之比发现无法通过撞击溅射物回落的机制来解释 Toutatis 表面碎石的起源。这些证据说明 Toutatis 表面的碎石应该大部分来源于 Toutatis 形成前的母体。从整体上看, Toutatis 的体积、碎石分布数密度以及碎石/撞击坑体积比都介于 Eros 和 Itokawa 之间, 但 Toutatis 碎石的粒径分布曲线斜率为 -4.4 ± 0.1 , 曲线明显比 Eros 和 Itokawa 的都更陡, 说明 Toutatis 表面碎石的碎裂程度更强^[23]。

2.4 162173 Ryugu

2018年6月27日, 日本的 Hayabusa 2 任务成功到达目标小行星 Ryugu 并开展探测。Ryugu 是一颗直径约450 m的近地小行星, 自转周期7.63 h, 光谱型为 Cb 型, 表面反照率为 0.045 ± 0.002 (与 Cb 型小行星 253 Mathilde 类似)。Ryugu 的孔隙率超过50%, 比 Itokawa 的略大, 说明 Ryugu 内部也很可能是碎石堆结构。在 Hayabusa 2 到达 Ryugu 之前, 由于缺乏雷达观测数据, 而光变曲线数据反演的形状非常粗糙, 一直未能获知 Ryugu 的准确形状。从赤道上空看, Ryugu 的形状与 Bennu 类似, 呈一个略扁的陀螺状, 两极与赤道半径之比为 0.872 ± 0.007 , 赤道附近有一圈隆起的山脊, 中纬度到赤道地区表面沿经线方向的直线与自转轴成 $(34 \pm 4)^\circ$ 的夹角; 还有一道长长的沟槽向南极方向延伸, 光谱分析表明该沟槽的形成时间要晚于赤道隆

起(图 5(c))。Ryugu 的赤道比较圆,表明其陀螺状外形的形成可能与自转加速引起的形貌改造有关,而考虑到目前 Ryugu 的自转如此之慢,这也说明 Ryugu 的自转周期在历史上可能更快。在当前的自转状态下,Ryugu 表面坡度平均值为 11.8° ,大部分地区不超过 35° ^[3,24]。

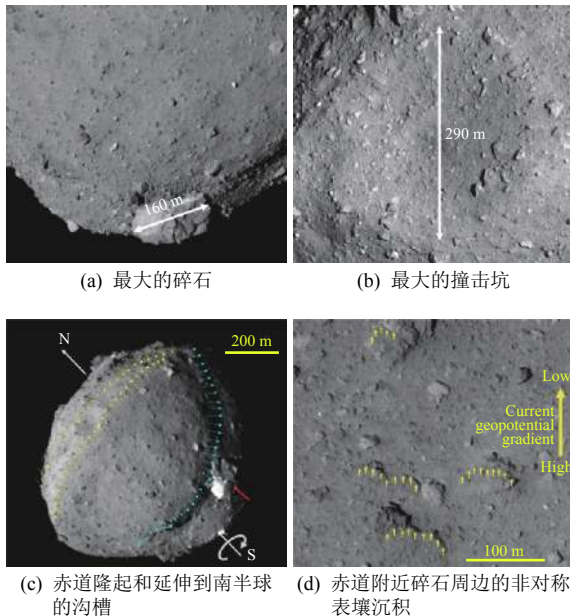


图 5 Ryugu 表面的形貌特征,包括 (a) 最大的碎石, (b) 最大的撞击坑, (c) 赤道隆起和延伸到南半球的沟槽以及 (d) 赤道附近碎石周边的非对称表壤沉积(数据来源: JAXA)

Fig. 5 The surface topography of Ryugu, which includes (a) the largest boulder, (b) the largest crater, (c) the equatorial bulge and a stretched trough extending to the south hemisphere (d) asymmetric regolith deposits near the equatorial boulders (data from JAXA)

Ryugu 的赤道隆起处存在一些特殊的地形特征:一些似乎没有受到过扰动的撞击坑位于隆起的山脊上,这说明这些撞击坑的形成要晚于这些山脊;一些相互覆盖的碎石表明可能曾经有过从赤道到中纬度区域的物质运动(图 5(d) 展现了碎石附近非对称的表壤沉积,黄色箭头为表壤运动趋势的方向,恰好与引力势下降方向一致),而且用于反映表壤暴露时长的光谱观测也支持这一猜测。通过对 4 处赤道附近和 3 处中纬度附近区域的详细观测表明这些区域之间在光学和近红外波段的反照率差异小于 15%,说明 Ryugu 表面的不同物质成分可能已充分混合。目前的观测还不足以明确 Ryugu 陀螺型形状的起源,可能的机制包括:早期 Ryugu 母体经历大碰撞后产生了大量碎片,随后在自引力

作用以及适当的角动量下重新吸积形成了目前 Ryugu 的形状,或者最初形成的 Ryugu 形状并非陀螺型,而是在后期 YORP 效应引起的自转加速下慢慢形成了目前的形状。第一种机制更有利于解释赤道上撞击坑的形成,但具体细节仍然不清楚,比如为什么在较高的自转角动量作用下形成的会是陀螺型而不是延长型小行星^[25]。

在 Ryugu 表面发现了约 4400 颗直径 5 m 以上的碎石,其中最大的一块——Otohime Saxum 位于南极附近,直径达 160 m(图 5(a))。这些碎石的分布比较均匀,不过在西半球的部分区域以及赤道隆起处的碎石分布数密度较低,但也不同于 Eros 和 Itokawa 那样存在碎石稀少的光滑表面,这说明 Ryugu 具有不同于它们的地质演化历史。据计算,Ryugu 上直径 20 m 以上碎石分布的数密度是 Itokawa 和 Bennu 上的 2 倍,而且这些较大的碎石都很可能与观测到的表面撞击坑(直径 < 300 m)抛射物无关。经测定,Ryugu 表面直径 5 m 以上碎石的粒径分布曲线斜率为 -2.65 ± 0.05 ,略小于其他小行星。碎石的长宽比分布与地面撞击实验给出的结果较为一致,直径 5 m 以上碎石的总体积与估计的所有撞击坑抛射物总体积之比约为 0.94,说明 Ryugu 表面的大部分碎石都很可能来自于母体受撞击产生的碎片^[24]。从形态上可以将直径较大的石块分为 4 类,如图 6(a)~(d) 所示:(a) 中的石块较暗,表面凹凸不平且存在分层结构;(b) 中的石块更亮一些,表面比较光滑且具有薄薄的分层结构;(c) 的中央也是一块较亮的石块,但没有明显的分层,而且从反照率上看该石块表面存在一些斑块;(d) 中是单独作为一类的石块——Otohime Saxum,其具有锐利的边缘,光滑的表面以及明显的裂纹。另外,统计分析还发现碎石的粒径分布曲线随着直径的减小而变得越来越平缓,这说明 Ryugu 表面一些小尺寸的碎石已经被表壤所覆盖。大量碎石的存在使得 Ryugu 表面也很可能存在类似 Itokawa 的“盔甲效应”,即当撞击事件发生时,由于撞击体的尺寸(0.1~1 m)可能和接触到的表面碎石尺寸接近甚至更小,这些碎石将损耗掉撞击体的一部分动能,从而减小最终形成的撞击坑直径,因此当用观测的撞击坑大小来推测掘出石块的尺寸时可能需要加入一个修正项。

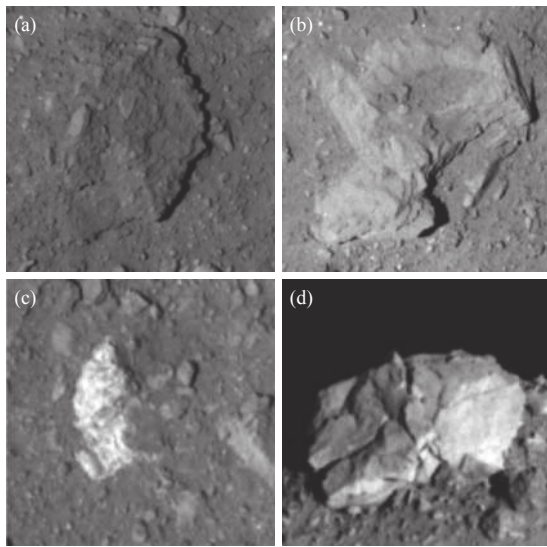


图6 Ryugu 表面不同形态的碎石(数据来源: JAXA)

Fig. 6 Different patterns of boulders on Ryugu (data from JAXA)

在 Ryugu 上发现了大约 30 个直径 > 20 m 的圆形凹坑, 其中许多包含有隆起的坑缘, 这些一般被认为是撞击坑。计算结果表明 Ryugu 表面相同直径撞击坑的分布数密度与 Itokawa 的结果相当, 说明这 2 颗小行星可能经受了类似程度的撞击事件。激光高度计的测量结果表明一些较为新鲜的撞击坑的深度直径比约为 $0.14 \sim 0.2$ 。利用 $100 \sim 200$ m 直径撞击坑的数密度(并考虑“盔甲效应”来修正撞击坑直径)可以计算出分别考虑和不考虑干性土黏聚强度时的表面年龄为 1 亿年和 1 千万年, 据推测这些撞击坑大部分来源于 Ryugu 运行于小行星主带的时期。从撞击坑分布曲线可以发现, 与 Eros 和 Itokawa 类似, Ryugu 上有许多直径小于 100 m 的撞击坑被掩埋了, 这被认为可能是撞击事件导致的地震引起的。最大的撞击坑是位于赤道附近的 Urashima, 其直径达 290 m(图 5(b)), 而且坑内缘发现有表壤滑落的痕迹。其他一些撞击坑内还发现较大尺寸的石块更倾向于分布于坑内部而非坑内边缘上, 这也反映了曾经发生过的地质滑坡, 这些现象可能导致估测的大撞击坑年龄偏老^[24]。

Hayabusa 2 已于 2019 年 2 月 21 日收集到 Ryugu 的表层样品, 并且于 2019 年 7 月 11 日从人工“撞击坑”内成功收集到一些未被太空风化“污染”的次表层样品。预计 Hayabusa 2 的样品返回舱将于 2020 年 12 月返回地球, 届时科学家将通过分析样品为解答太阳系的形成演化以及地球的生命起源提供更直接的信息。

2.5 101955 Benu

美国的 OSIRIS-REx 探测器于 2018 年 12 月 3 日抵达低反照率的 B 型小行星 Benu, 比 Hayabusa 2 抵达 Ryugu 的时间晚将近 6 个月。探测器传回的图像数据表明 Benu 也是一颗陀螺型的小行星, 与地面雷达数据反演的形状模型大体一致^[26]。Benu 的平均直径为 490 m, 自转周期 4.296 h, 平均密度 1.19 g/cm^3 , 反照率 0.044, 孔隙率 $50\% \sim 60\%$, 这表明 Benu 很可能也是一颗碎石堆结构小行星。Benu 的赤道附近有一圈明显的隆起结构, 这使得 Benu 的引力场系数中二阶和四阶带谐项的值比较大^[27]。与 Ryugu 不同, 从两极方向看 Benu 的形状类似为方块形, 即赤道区域在经度上存在约 90° 为周期的地形起伏。事实上这些起伏主要来自 4 条南北走向的山脊, 长达 $400 \sim 780$ m, 高度可达 25 m, 使得 Benu 引力场系数中四阶扇谐项系数的值也比较大。从总体上看, Benu 极区的表面有效势(引力势+离心势)高于赤道区, 因此表面坡度的朝向整体上指向赤道, 而高纬度区的平均表面坡度高于低纬赤道区的。

OSIRIS-REx 的观测表明 Benu 表面分布有大量的石块, 有超过 200 个直径 > 10 m, 其中 3 个最大的直径超过 40 m 且都分布在南半球, 尺寸与 Itokawa 表面的最大石块相近(图 7(a) 显示了一颗直径 56 m, 高度不小于 20 m 的石块)。但事实上, 在探测器到达 Benu 之前, 地面依据 Spitzer 太空望远镜对 Benu 的热红外观测推测该小行星表面表壤颗粒大小应该在 $0.1 \sim 1$ cm 的量级, 这种不一致性说明目前用热惯量来推导表壤颗粒直径的模型还需修正^[28]。根据计算, Benu 表面 10 m 级以上大小的石块都不太可能来自于表面撞击坑内掘出的物质, 也不太可能是被吸积的微陨星, 最大可能来源于 Benu 形成之初的母体碎片。Benu 上的这些碎石在反照率和颜色上并不均匀(图 7(b)), 表明 Benu 的母体和撞击体在成分上存在多样性, 这点与 Ryugu 不同。Benu 上的这些碎石分布并非是均匀的, 例如在一些低洼处分布的碎石密度比平均值能高出 1 个量级, 这显然与 Itokawa 不同。利用 OSIRIS-REx 上的多功能相机, Benu 表面直径 > 8 m 的碎石都已被分辨出来, 计算得到的粒径分布曲线斜率为 -2.9 ± 0.3 。虽然能观察到一些碎石是埋在表壤里的, 但有许多看上去就只是轻微接触在表面上; 有些区域的碎石以覆瓦状形式排布, 与

Itokawa 表面的一些碎石分布特征类似, 但分布的区域面积小于后者, 而且尚未发现这些覆瓦状排布的碎石与细颗粒物的沉积之间存在联系; 另外, 与 Itokawa 类似, Benu 上也发现了圆角和棱角碎石。这些发现都反映了 Benu 复杂而独特的演化历史和形成机制。有趣的是, Benu 表面还发现了大量明显断裂的石块, 裂纹有直线的(图 7(c) 和 7(d))也有折线的(图 7(e)), 还有一些 m 级大小的已经分裂的碎石相互间以较近的距离聚集在一起(图 7(f)), 这些裂纹的形成机制包括大规模碰撞、微陨星撞击和热疲劳。由于使得石块断裂的机制需要漫长的时间, 所以这说明这些碎石分裂后可能地表没有发生大规模形貌改造, 甚至很可能 Benu 从主带迁移到目前轨道的过程中都没有显著的表壤迁移, 不过石块断裂的机制复杂且不确定性大, 目前还无法用其来估计 Benu 的绝对表面年龄。多个证据表明 Benu 表面应该还分布有直径更小的表壤颗粒(如 mm 级以下), 但受限于目前的探测精度而还无法予以证实^[29]。

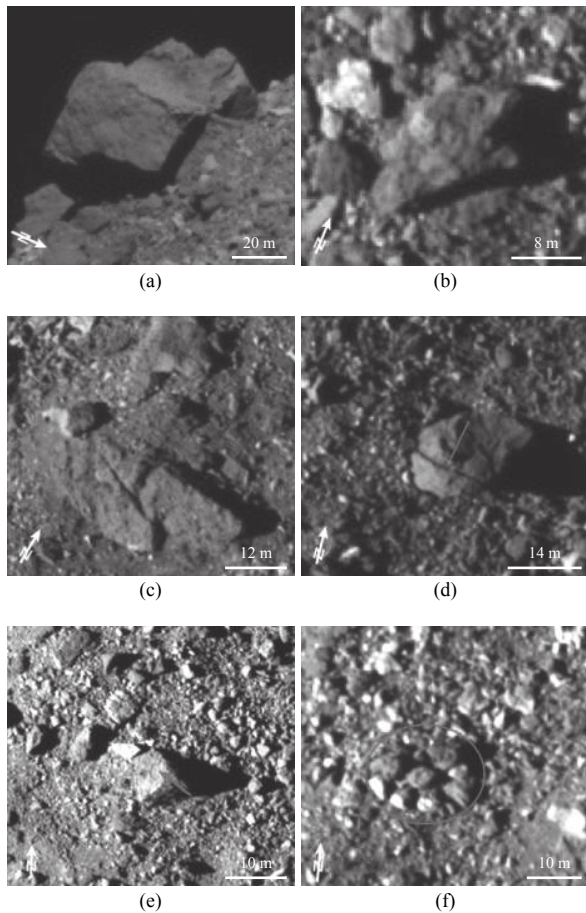


图 7 Benu 表面不同形态的碎石(数据来源: NASA)
Fig. 7 Diverse patterns of boulders on Benu (data from NASA)

目前已经在 Benu 表面证认了 12 个明显的撞击坑以及 40 多个可能的撞击坑, 它们的直径在 10~150 m 之间。有几个比较大的撞击坑分布在 Benu 的赤道隆起区, 说明这些区域的表面年龄可能比较古老, 其中最大的直径达 (157 ± 11) m。对其中 4 个较大撞击坑的几何测量发现其平均的深度直径比为 0.13 ± 0.04 , 与 Eros、Lutetia、Vesta 和 Mathilde 的结果接近, 但比 Itokawa 的值(约 0.1)要大。利用直径大于 50 m 的撞击坑直径-频率分布以及小行星主带的碰撞概率关系可以估算出这些撞击坑年龄在 1 亿年到 10 亿年之间。考虑到一些大的撞击坑恰好位于赤道隆起处, 有学者猜测 Benu 上的赤道隆起形成的时间要早于撞击坑的形成, 甚至可能是 Benu 表面最古老的地质结构。不过由于小行星表面物质参数的不确定性很大, 这样计算出来的表面年龄也存在很大误差, 还需要通过研究从 Benu 采样返回的物质来给出更确定的结果。与 Eros 和 Itokawa 相似, Benu 表面直径较小(10~50 m 之间)的撞击坑数目也少于预期, 这可能是由于更大撞击坑引起的地震抹去了更小的撞击坑, 或者类似 Itokawa 表面碎石的“盔甲效应”降低了小撞击坑的形成数量。

此外, Benu 上也发现了一些沟槽或陡坡的线性结构, 且分别具有不同的朝向, 最长的一条沟槽从极区延伸到了赤道, 宽 10~15 m, 深 (3 ± 1) m。其他沟槽也有类似的宽深比, 长度为几十 m 到几百 m。赤道附近最大撞击坑内还发现有厚达 5 m 的沉积物, 这说明坑缘上的物质经历过滑坡, 减小了坑的深度并降低了坑缘高度。这可能是由于比较大的撞击事件造成的, 不过考虑到 Benu 的表面年龄, 这种事件发生的频率应该不高, 或者即使发生了其影响也比较局限于一个小范围内。OSIRIS-REx 对 Benu 小行星的探测还在继续中, 预计将在 2020 年 7 月执行采样任务, 并最终于 2023 年 9 月携样品回到地球。

2.6 486958 2014 MU69

与前面介绍的几颗小行星不同, 2014 MU69 (以下简称 MU69) 是一颗位于外太阳系的柯伊伯带天体。事实上, 更确切地说, MU69 属于一颗冷经典柯伊伯带天体(CCKBO), “冷”的意思是这类天体

的轨道较圆, 倾角较低, 所受其他大天体的引力摄动较小, 自从形成后的轨道动力学演化程度较低, 因此较好地保留了早期太阳系的信息。美国的 New Horizons 探测器于 2019 年 1 月 1 日以 3538 km 的距离和 14.4 km/s 的速度飞越了 MU69, 是人类首次以如此近的距离观察这类小天体。New Horizons 在飞越过程中利用 7 个载荷对 MU69 开展了探测研究, 获取了大量数据。图像(图 8)表明 MU69 具有非常明显的接触双小行星结构, 而且接触点附近(“脖子”区域)没有发现断裂、挤压或变形等地质特征, 这些证据使人推测该形状结构应该是在一个“温和”的动力学环境下形成的, 例如可能是由相互绕转的双小行星以非常缓慢的速度相互靠近接触形成的, 但不清楚什么样的机制能够将其角动量耗散掉。MU69 的自转周期为 (15.92 ± 0.02) h, 其“身”部和“头”部分别被命名为 Ultima 和 Thule, Ultima 呈很扁的透镜状, 大小为 $22 \text{ km} \times 20 \text{ km} \times 7 \text{ km}$, Thule 则更接近于球体一些, 大小为 $14 \text{ km} \times 14 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, MU69 整体为 $35 \text{ km} \times 20 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 。观测上没有发现 MU69 的卫星, 因此无法给出其密度和孔隙率信息^[30]。不过如果假设“头”和“身”之间不存在拉应力, 那么可以给出 MU69 的平均密度下限为 0.28 g/cm^3 。

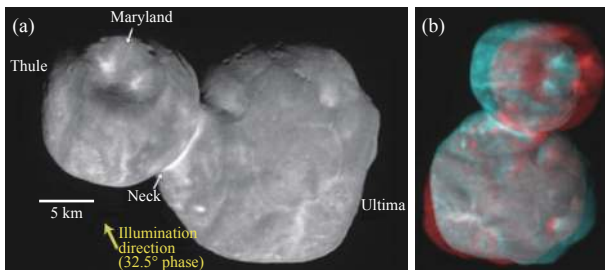


图 8 2014 MU69 的 (a) 形貌特征和命名以及 (b) 红蓝立体图(数据来源: NASA)

Fig. 8 The terrains and names, and the red-cyan stereographic anaglyph of 2014 MU69 (data from NASA)

MU69 在 V 波段的整体反照率为 0.165 ± 0.01 (与其他典型的 CCKBOs 的值类似), 最亮的区域在“脖子”附近以及 Thule 表面“Maryland”撞击坑内的 2 个明亮斑块(见图 8(a))。尽管在可见光波段上 MU69 的反照率随区域存在变化, 但在红色波段上反照率较为均匀, 这种颜色很可能反映的是冰和有机分子在紫外线和宇宙射线作用下留下的难挥发残留物。MU69 表面有许多清晰的地形单元, 但撞击坑较少, 这说明柯伊伯带区域的天体碰撞概率

相对较低。

MU69 表面较亮的区域可依形态分为 3 类, 包括直径几 km 到几十 m(精度极限)且数目随直径减小而增多的近圆形斑点, 曲线和准线性结构以及更大片的斑块。现在还不清楚这些地形的起源, 以及这 3 类地形之间的区别。不过观测发现这些区域中有许多分布在地势低洼处, 如“脖子区域”、“Maryland”撞击坑内、凹坑或沟槽内的平地, 斜坡的基底或者坡度变化的区域。因此一种猜测认为这些明亮的细颗粒物质是通过下坡向运动而落到这些区域的, 不过也无法排除其他的一些解释, 例如成分差异、热效应、太空风化以及挥发物凝结。考虑到彗星 67P/Churyumov-Gerasimenko 的密度为 $(0.533 \pm 0.006) \text{ g/cm}^3$, 可假设 MU69 的密度为 0.5 g/cm^3 , 在考虑引力和离心力后, 可发现 MU69 表面除了“脖子”区域外的坡度都小于 35° , 因此“脖子”处的物质可能需要存在除了摩擦力之外的其他力(如黏聚力)才能保证结构稳定。

MU69 表面的撞击坑较少, 比较明显的是直径约 7 km 的“Maryland”撞击坑(见图 8(a))。立体相机的观测结果表明“Maryland”坑的深度 $< 2 \text{ km}$, 2 个边界清晰的直径 1 km 左右的撞击坑分布在“Maryland”坑缘上。而“Maryland”右边靠近“脖子”处分布有 4 条沟槽。此外, MU69 的其他地方也发现了很多直径 1 km 左右的小凹坑, 研究认为一些圆形和具有清晰坑缘的凹坑是撞击坑, 但一些大小类似的坑链可能与其内部地质活动有关, 也有猜测认为一些凹坑可能与挥发物挥发或者气体喷发有关。

基于 Ultima 表面的反照率差异, 有学者将其分隔为 8 块地质单元, 其中中间的一块由一个明显的亮环带与其他区域做区分。这 8 个区域的大小和反照率类似, 因此关于 MU69 的形成也有一种观点认为, 在太阳系早期, 星子首先聚集形成了这 8 个单元, 然后各单元相互间在自引力作用下吸积形成了 Ultima。但需要良好的条件才能使得这 8 个单元能紧密地结合在一起, 而且需要解释为什么 Thule 表面没有出现类似 Ultima 的分隔现象。由于探测数据回传速度较慢, 目前还没有获得飞越过程中的完整数据, 预期需要等到 2020 年中期才能将飞越过程中的探测数据全部传输完毕, 届时可通过更

详细的信息来推断 MU69 的形成机制。

3 小行星表面环境的演化

以上几颗小行星的空间探测结果已经直接或间接地表明,小行星的地形地貌在形成之后并非是一成不变的,而可能随着时间推移发生变化。根据这些变化完成所需的时间(不考虑小行星本身可能存在的活动性),这些形貌改造机制可区分为瞬时机制和长期机制。

3.1 瞬时改造机制

小行星表面形貌改造的瞬时机制包括撞击和潮汐效应。

3.1.1 撞击事件

撞击事件是最重要的瞬时改造机制,这类事件主要发生在主小行星带,一些近地小行星表面的撞击坑可能就是当它们位于主带时产生的。撞击事件带来的直接后果是在小行星表面产生撞击坑,而且如果小行星的引力足够强,从坑内抛出的物质可能落回到小行星上。不过从我们的探测结果来看,几百 m 级的 Itokawa、Ryugu 和 Bennu 和几 km 级的 Toutatis 表面的碎石都大部分与撞击坑无关,而且数值模拟和高速撞击试验也证实了撞击溅射物难以被小行星的弱引力场所束缚。值得注意的是,撞击事件所引发的地震可能会使得小行星表面坡度较大的区域发生滑坡,且撞击坑内缘上的滑坡会导致坑底抬高而坑缘高度减小,从而影响对撞击坑年龄的判断。另外我们还注意到,对于本身表面分布有大量碎石的小行星,这些碎石可能会阻碍撞击坑的形成,即所谓的“盔甲效应”,这对于利用撞击坑来推断小行星表面年龄的研究也是一个障碍^[31]。

3.1.2 潮汐效应

对小行星光谱观测和轨道数值模拟的研究还表明,当小行星近距离飞越大行星时,潮汐效应可能会重塑小行星的表面形貌,甚至改变小行星的光学特性。不过这种机制主要发生于近地小行星上,例如有研究认为,所有观测到的 Q 型近地小行星在过去的 50 万年内都曾经近距离飞越过地球。最近的一个研究认为,火星一轨道偏心率引起的近星点变化会改变火星一的动力学环境,从而导致火星一表面物质的运动。而双小行星之间的潮汐效应是否

也可能存在类似的机制从而改变卫星或主星的表面形貌现在尚不清楚。

3.2 长期改造机制

长期的小行星形貌改造机制包括自转加速/减速、太空风化、热疲劳和静电悬浮。

3.2.1 YORP 效应

由于小行星本身非对称的地形地貌和反照率,使得从小行星表面反射和自发热辐射的光子呈现非对称性,从而给小行星本身带来一个反向净力矩,该力矩会使得小行星自转周期和自转轴指向产生长期变化。对于一个本身处于极限平衡状态的小行星(颗粒间摩擦力、黏聚力、引力和离心力恰好处于平衡状态),自转周期的变化会导致离心力的改变,并最终打破平衡状态,使得小行星表面部分区域发生滑坡或表壤迁移,在一定情况下甚至可能形成双小行星^[32-34]。

3.2.2 太空风化

对于没有大气层保护的小行星,太阳高速等离子体带电粒子流(即太阳风)的轰击、微陨星的高速撞击以及宇宙射线的照射,会改变小行星表层的物理和光学性质。目前,学者们已对月球、S 型和 V 型小行星的太空风化效应开展了广泛研究,也正在拓展到其他类型的小行星上。由于小行星表层物质的迁移改造会将更新鲜的未被太空风化影响的表壤物质裸露出来,从而可以通过研究不同区域物质的光学特性来推演小行星表层物质的迁移。

3.2.3 热疲劳

传统上认为小行星表壤的形成是由于撞击坑内抛出的溅射物以及微陨星的撞击,但最近发现热疲劳也是产生小行星表壤的一种重要机制。小行星表面的碎石在小行星自身的周日自转中不断发生冷热交替,石块内部存在温差,从而产生热应力。而地面陨石样品的试验研究表明,模拟产生的周日温度冷热循环引起的热应力会导致样品内裂纹的增加,从而使其发生碎裂,而且该机制对 cm 级以上颗粒的影响作用要高于微陨星撞击。热应力会导致小行星表壤的不断翻新,并改变其光学特性,可用于解释低近日距 C 类小行星的缺失^[35]。

3.2.4 静电悬浮

Apollo 飞船对月球表面的探测发现在晨昏线

上月表存在悬浮的尘埃,并推测该现象与晨昏线处的电场和尘埃充电效应有关。然而,小行星表面是否也存在悬浮尘埃仍然不太清楚,尽管从理论上看来尘埃颗粒肯定是受到电场力的:在小行星表面上的任意一点,一方面太阳风能带来电流,另一方面光电效应会导致电流逃逸,这两者之间的平衡决定了该处的累积电荷数。NEAR 探测器观察到 Eros 小行星表面的一些低洼区域分布有平整细小的尘埃堆积物(尘埃“池塘”),一种解释认为静电悬浮会把更细小的尘埃颗粒从表壤中筛分出来,并和重力等一起作用后将其迁移到低洼处;另外,最近的理论研究和实验研究表明黏聚力也会对静电悬浮作用产生影响,而对于引力非常微弱的小行星,悬浮尘埃甚至可能会在太阳光压的影响下从小行星表面逃离。但目前仍没有直接证据可证实小行星表面尘埃颗粒是否会受到静电力的作用^[36-37]。

3.2.5 其他

此外,小行星本身的长期轨道迁移,包括木星、土星长期摄动和 Yarkovsky 效应引起的半长径和偏心率的长期变化(也包括近距离飞越大行星时较强烈的引力摄动),可能使得小行星从主带迁移到近地小行星轨道,从而改变其动力学环境,如近地小行星轨道的碰撞概率更小,太阳热辐射更大,经历大行星潮汐效应可能性更大等,最终影响小行星表面环境的演化。

4 结束语

过去的研究实践表明,对小行星表面形貌细节的了解和分析只能依靠深空探测任务获取的探测数据。本文通过对 433 Eros、25143 Itokawa、4179 Toutatis、162173 Ryugu、101955 Bennu 以及 486958 2014 MU69 这 6 颗小行星表面形貌细节的回顾和梳理,发现它们的形貌特征存在一些共性,例如:都存在撞击坑,表面分布有大大小小形态各异的碎石,存在沟槽或山脊等线性结构,具有一定的坡度且坡度一般不大于 35°。小行星的形貌随时间也会发生变化,特别是在多颗小行星的撞击坑内和斜坡处观察到了表壤迁移的证据。

然而,除了小行星直径、轨道分布、成分、形状、自转参数等的差别,我们观察到其存在不同的形貌特征。例如:Eros、Toutatis 和 2014 MU69 表面地形

的粗糙程度就显著低于其他 3 颗小行星(当然,这也可能是因为前三者的探测数据精度还不够高);Eros 的密度显著高于 Itokawa、Ryugu 和 Bennu,因此其内部结构与后三者很可能不同,从而可以解释 Eros 表面奇怪的方形撞击坑和一些大尺度的线性结构;Itokawa 表面碎石分布与地势存在较为明显的相关性,这使得许多学者对表壤迁移行为开展了研究;Ryugu 和 Bennu 都是陀螺形状,赤道附近都有隆起的结构,但 Ryugu 的隆起更为尖锐而 Bennu 的更为平缓,且 Bennu 的赤道隆起在经度上存在一个近似 90°的周期起伏;Itokawa、Toutatis 和 2014 MU69 从形状上看都是接触双小行星,但“脖子”的显著程度各不相同,相比之下 2014 MU69 最为显著,Itokawa 最不显著;相比于其他小行星,2014 MU69 的一大特点是表面存在一些反照率明显较高的区域。总之,不同小行星的形貌特征与其自身独特的形成历史有关,因此并不存在一个统一的模型来解释和预测小行星的形成演化。

我国将于 2024 年对一颗快自转近地小行星 469219 Kamo'oalewa 和主带彗星(或活动小行星) 133P/Elst-Pizarro 分别开展采样返回和绕飞探测。Kamo'oalewa 的自转周期只有约 28 min,直径约 50 m,133P 是一颗存在活动性的小行星,这 2 类小行星都是人类之前没有探测过的,因此它们很可能具有完全不同的表面环境、内部结构和形成演化机制等待我们去揭示。

参考文献 (References)

- [1] PATRICK M, FRANCESCA E D, WILLIAM F B. Asteroids IV[M]. Tucson: University of Arizona Press, 2015
- [2] HUANG J, JI J, YE P, et al. The ginger-shaped asteroid 4179 Toutatis: new observations from a successful flyby of Chang'e-2[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 3411
- [3] 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
- [4] 张翔, 季江徽. 近地小行星地基雷达探测研究现状[J]. 天文学进展, 2014, 32(1): 24-39
ZHANG X, JI J H. Ground-based radar detection of near-Earth asteroids[J]. Progress in Astronomy, 2014, 32(1): 24-39
- [5] 余亮亮, 季江徽. 小行星热模型研究现状[J]. 天文学进

- 展, 2013, 31(2): 185-201
- YU L L, JI J H. The review of thermal models for asteroids[J]. *Progress in Astronomy*, 2013, 31(2): 185-201
- [6] 姜浩轩, 季江徽. 小行星热物理及 Yarkovsky 效应和 YORP 效应的研究进展[J]. *天文学进展*, 2018, 36(3): 213-231
- JIANG H X, JI J H. The review of thermophysics, Yarkovsky and YORP effects for asteroids[J]. *Progress in Astronomy*, 2018, 36(3): 213-231
- [7] YU L L, YANG B, JI J, et al. Thermophysical characteristics of the large main-belt asteroid (349) Dembowska[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 472(2): 2388-2397
- [8] ZUBER M T, SMITH D E, CHENG A F, et al. The shape of 433 Eros from the NEAR-Shoemaker laser rangefinder[J]. *Science*, 2000, 289(5487): 2097-2101
- [9] THOMAS P C, ROBINSON M S. Seismic resurfacing by a single impact on the asteroid 433 Eros[J]. *Nature*, 2005, 436(7049): 366
- [10] DOMBARD A J, FREED A M. Thermally induced lineations on the asteroid Eros: evidence of orbit transfer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(16): 65-1
- [11] 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
- [12] CHENG A F, BARNOUIN-JHA O S, HIRATA N, et al. Fundamentally distinct outcomes of asteroid collisional evolution: Itokawa and Eros[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9)
- [13] BARNOUIN-JHA O S, CHENG A F, MUKAI T, et al. Small-scale topography of 25143 Itokawa from the Hayabusa laser altimeter[J]. *Icarus*, 2008, 198(1): 108-124
- [14] SAITO J, MIYAMOTO H, NAKAMURA R, et al. Detailed images of asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa[J]. *Science*, 2006, 312(5778): 1341-1344
- [15] MICHIKAMI T, NAKAMURA A M, HIRATA N, et al. Size-frequency statistics of boulders on global surface of asteroid 25143 Itokawa[J]. *Earth, Planets and Space*, 2008, 60(1): 13-20
- [16] SUSORNEY H C, JOHNSON C L, BARNOUIN O S, et al. The global surface roughness of 25143 Itokawa[J]. *Icarus*, 2019, 325: 141-152
- [17] MIYAMOTO H, YANO H, SCHEERES D J, et al. Regolith migration and sorting on asteroid Itokawa[J]. *Science*, 2007, 316(5827): 1011-1014
- [18] NOGUCHI T, TSUCHIYAMA A, HIRATA N, et al. Surface morphological features of boulders on asteroid 25143 Itokawa[J]. *Icarus*, 2010, 206(1): 319-326
- [19] ZOU X, LI C, LIU J, et al. The preliminary analysis of the 4179 Toutatis snapshots of the Chang'E-2 flyby[J]. *Icarus*, 2014, 229: 348-354
- [20] ZHU M H, FA W, 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
- [21] ZHAO Y, JI J, HUANG J, et al. Orientation and rotational parameters of asteroid 4179 Toutatis: new insights from Chang'e-2's close flyby[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 450(4): 3620-3632
- [22] HU S, JI J, 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
- [23] JIANG Y, JI J, HUANG J, et al. Boulders on asteroid Toutatis as observed by Chang'e-2[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 16029
- [24] 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): eaaw0422
- [25] MICHIKAMI T, HONDA C, MIYAMOTO H, et al. Boulder size and shape distributions on asteroid Ryugu[J]. *Icarus*, 2019, 331: 179-191
- [26] 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
- [27] SCHEERES D J, MCMAHON J W, FRENCH A S, et al. The dynamic geophysical environment of (101955) Bennu based on OSIRIS-REx measurements[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(4): 352
- [28] EMERY J P, FERNÁNDEZ Y R, KELLEY M S P, et al. Thermal infrared observations and thermophysical characterization of OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu[J]. *Icarus*, 2014, 234(1): 17-35
- [29] 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
- [30] STERN S A, WEAVER H A, SPENCER J R, et al. Initial results from the New Horizons exploration of 2014 MU69, a small Kuiper Belt object[J]. *Science*, 2019, 364(6441):

- eaaw9771
- [31] TATSUMI E, SUGITA S. Cratering efficiency on coarse-grain targets: implications for the dynamical evolution of asteroid 25143 Itokawa[J]. *Icarus*, 2018, 300(1): 227-248
- [32] RICHARDSON J E, BOWLING T J. Investigating the combined effects of shape, density, and rotation on small body surface slopes and erosion rates[J]. *Icarus*, 2014, 234(1): 53-65
- [33] HOLSAPPLE K A. Spin limits of solar system bodies: from the small fast-rotators to 2003 EL61[J]. *Icarus*, 2007, 187(2): 500-509
- [34] SHARMA I, JENKINS J T, BURNS J A. Dynamical passage to approximate equilibrium shapes for spinning, gravitating rubble asteroids[J]. *Icarus*, 2009, 200(1): 304-322
- [35] 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
- [36] HARTZELL C M, WANG X, SCHEERES D J, et al. Experimental demonstration of the role of cohesion in electrostatic dust lofting[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1038-1042
- [37] ROBINSON M S, THOMAS P C, VEVERKA J, et al. The nature of ponded deposits on Eros[J]. *Nature*, 2001, 413(6854): 396

(编辑: 闫德葵)