

# 彗星研究和彗星空间探测进展

史建春<sup>1, 2</sup>, 马月华<sup>1, 2</sup>

(1 中国科学院紫金山天文台 210008; 2 中国科学院行星科学重点实验室 210008)

DOI:10.13405/j.cnki.xdwz.2015.03.014

## 一、引言

彗星是一种冰冻的小天体,是由冰(主要是水冰)和尘埃组成的“脏雪球”,俗称扫帚星。彗星是太阳系早期形成时期遗留下的残骸,被认为是太阳系中最原始的天体,研究彗星的起源、演化和成分有助于研究太阳系的起源和行星系统形成和演化。此外,彗星富含水冰和有机分子,这些都是生命形成的必要元素,因此研究彗星也有助于研究生命起源。发育完整的彗星由彗核、彗发、氢云、离子彗尾(又称等离子体或I型彗尾)和尘埃彗尾(又称II型彗尾)构成(图1),彗核集中了彗星的绝大部分质量,是彗星的主体。

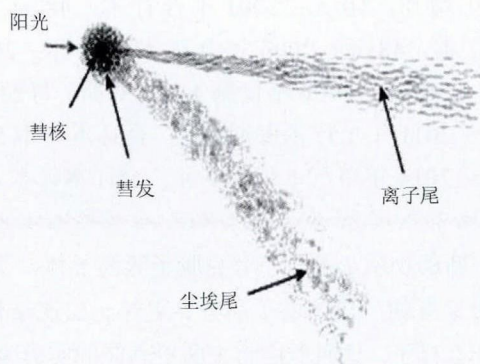


图1 彗星结构示意图

## 二、彗星的研究内容

彗星的研究内容最初主要集中在经典天体力学方面,如彗星的轨道运动和自转,随着技术的进步,特别是空间时代的来临,彗星的物理和化学研究已经成为彗星研究的主要内容。目前,彗星研究的主要内容包括:

### 1. 物理属性

彗星的物理属性主要包括彗核的大小和形状、反照率、自转周期、孔隙度、热惯量等参数。彗核的直径一般在100 m~40 km,已知彗星的平均密度为 $0.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,质量一般为 $10^{10} \sim 10^{19} \text{ kg}$ ,由于彗星质量较小,彗核在自己的引力作用下不能变为球形,因此具

有不规则的形状。如彗星坦普尔1号(9P/Tempel 1)的形状为马铃薯形,彗核大小为 $7.6 \times 4.9 \text{ km}$ ,质量为 $7.9 \times 10^{13} \text{ kg}$ ;彗星哈特雷2号(103P/Hartley 2)的彗核形状为花生形,长度大约为2 km,最窄处只有400 m(图2)。彗核是已知太阳系天体中最暗的目标,其反照率一般为0.04,彗核表面富含复杂的有机化合物,太阳加热使有机物挥发并留下了重的长链有机物质如焦油或原油,进而使表面更加黑暗。彗核的自转周期有小于5 h的,也有长达几天的,自转轴方向呈随机分布。

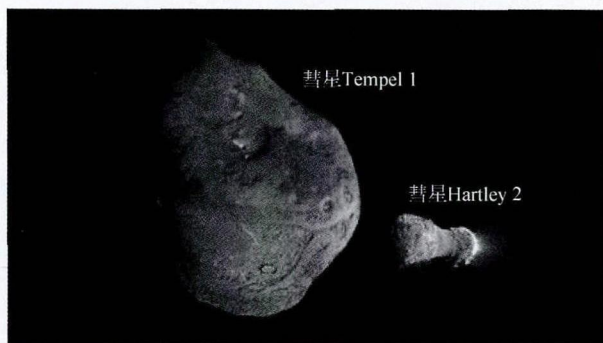


图2 彗星9P/Tempel和103P/Hartley 2的彗核

### 2. 化学成分

彗星在可见光、紫外、红外和射电波段都有辐射,彗星光谱的主要特征是在连续光谱的背景上叠加一些亮的发射谱线或谱带,这说明彗发是由尘埃(散射太阳光的连续光谱)和一些分子、原子和离子(发射线、发射带)组成。从彗星的光谱资料分析可得到彗星的成分,已识别出的成分见表1。

### 3. 活动机制

一般认为彗星的日心距大于5 AU(AU,天文单位,1AU=149597870700米,相当于地球到太阳的平均距离)时,由于温度较低和缺乏挥发性气体,水冰很难发生挥发形成彗发,此时彗星的活动性应该是很低甚至是不活动的。但观测结果表明一些彗星在大于5 AU时仍表现出明显的活动性,甚至具有彗尾。

表1 彗星中已识别出的化学成分

种类	成分
分子	CH, NH, CH <sub>4</sub> , NH <sub>2</sub> , OH, CN, C <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> O, HDO, HCN, C <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> CN, CS, S <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , HCO, NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> CO, (H <sub>2</sub> CO) <sub>n</sub> , NH <sub>4</sub> , SH, NO, H <sub>2</sub> S, SO, SO <sub>2</sub> , HCOOH, NH <sub>2</sub> CHO,
	HC <sub>3</sub> N, HCOOCH <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> CHO, HCHO
元素	H, C, O, S, Na, Fe, K, Ca, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Si, Mg, Al, Ti
离子	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> , OH <sup>+</sup> , H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> , CO <sup>+</sup> , CO <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CN <sup>+</sup> , CH <sup>+</sup> , N <sub>2</sub> <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> S <sup>+</sup> , CS <sub>2</sub> <sup>+</sup> , S <sub>2</sub> <sup>+</sup> , CS <sup>+</sup> , S <sup>+</sup> , H <sub>4</sub> <sup>+</sup> , SH <sup>+</sup> , Fe <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , C <sup>+</sup> , Ca <sup>+</sup>

在 5 AU 以内，彗星的活动性可以用标准模型即水冰的挥发驱动来解释，但在 5 AU 之外，其活动性主要是由易挥发性气体挥发所致，目前用于解释彗核在大的日心距保持活动性的模型有：CO 或 CO<sub>2</sub> 干冰混合物的挥发；HCN 的聚合作用；无定形水冰的结晶和退火等。由于气体不是组成彗核的主要物质，因此气体挥发导致的尘埃从彗核表面释放的方式与水冰挥发导致尘埃释放的方式不同。

4. 太阳辐射和太阳风与彗星的相互作用

当彗星离太阳很远时，彗星基本上是赤裸的彗核，彗核表面的冰尘受高能的紫外辐射和宇宙线作用可以生成复杂有机物。当彗星在接近太阳的过程中，彗核的冰升华并带出尘埃而形成彗发，从彗核中抛出的大量尘埃，在太阳辐射压力下和彗核的运动共同影响下形成弯曲的尘埃彗尾。太阳辐射可以使一些中性气体电离为离子气体，太阳风等离子体流及其冻结磁场与彗星物质相互作用，把彗星离子推向背太阳方向，形成等离子体彗尾，太阳风等离子体流及其磁场的变化可以导致等离子体彗尾中出现尾射线、扭折、断尾、螺旋、结等大尺度结构（图3）。

5. 起源与演化

彗星富含挥发物，这表明它们形成于太阳系外部



图3 彗星洛弗乔伊 (C/2014 Q2) 的尾射线、扭折和结等大尺度结构

寒冷区域（温度小于 100 K）。根据彗星的轨道特征，一般认为短周期彗星起源于“半人马”和柯伊伯带（在黄道面附近、距离太阳 30 AU ~ 50 AU 的天体密集的区域），而长周期彗星起源于奥尔特云（距离太阳约 50000 AU ~ 100000 AU 的球状云团）。大量像彗星一样的天体聚集在这些遥远的区域以近似圆形轨道围绕太阳运动，偶尔柯伊伯带内的天体会受到外行星的影响或奥尔特云内的天体会受到临近恒星的引力影响导致个别彗星轨道发生改变，形成新的可观测彗星。奥尔特云内的个别彗星改变轨道进入内太阳系后可能成为长周期彗星，又可能因木星等大行星摄动而变为短周期彗星（图4）。

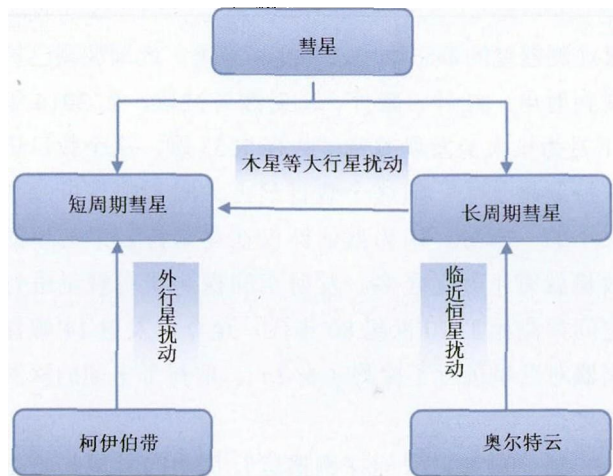


图4 彗星起源示意图

6. 与地球和生命的关系

彗星的轨道十分不稳定，容易受其他天体的引力摄动而使轨道发生改变，当彗星轨道变为跟地球或其他行星轨道交叉时，就可能发生撞击，虽然同样大小的彗星数目只有小行星数目的百分之几，但彗星的撞击速度（30 ~ 60 km/s）比小行星的撞击速度（20 km/s）大，所以同样大小的彗星撞击的危害更大。此外，分布在其轨道附近的彗星尘埃颗粒，当地球在绕太阳公转与其相遇时，这些彗星尘高速闯入地球大气，发生烧蚀而发光，就会形成流星雨。早期，彗星陨落给地球带来的水和有机物，对地球的海洋和大气的形成演化以及生命起源都起了重要作用。

三、彗星空间探测进展

长久以来，彗星探测一直是人类开展太阳系探测活动中最前沿性的科学领域。过去主要是在可见光波

表 2 彗星的空间探测概况

探测器	发射国家	发射日期	相遇时间	目标彗星
ISEE-3/ICE	美国	1978.8.12	1985.9.11	21P/Giacobini-Zinner, 1P/Halley
Vega 1	苏联	1984.12.15	1986.3.4	1P/Halley
Vega 2	苏联	1984.12.21	1986.3.9	1P/Halley
Sakigake	日本	1985.1.7	1986.3.11	1P/Halley
Suisei	日本	1985.8.18	1986.3.8	1P/Halley
Giotto	欧空局	1985.7.2	1986.3.13	1P/Halley
			1992.7.10	26P/Grigg-Skjellerup
Galileo	美国	1989.10.18	1994.7	D/1993 F2(Shoemaker Levy 9)
Ulysses	美国 / 欧空局	1990.10.8	1994 年始	很多彗星
SOHO	美国 / 欧空局	1995.12.2	全部运行期	各种彗星
Deep Space 1	美国	1998.10.24	2001.9.22	19P/Borrelly
Stardust	美国	1999.2.7	2004.1.2	81P/Wild 2
Stardust-Next	美国	1999.2.7	2011.2.14	9P/Tempel 1
Contour	美国	2002.7.3	发射失败	2P/Encke 等
Rosetta	欧空局	2004.3.2	2014.8	67P/Churyumov-Gerasimienk
Deep Impact	美国	2005.1.12	2005.7.4	9P/Tempel 1
EPOXI	美国	2005.1.12	2010.11.4	103P/Hartley 2

段观测彗星的形态结构、亮度和光谱，近来观测已扩展到射电、红外、紫外、X 射线各波段。到 2014 年 11 月为止人类发现的彗星共有 5253 颗，这个数目仍在持续增加中，但这个数目只占太阳系中彗星总数很小的一部分，因为据估计仅在奥尔特云中彗星的数量就有 1 万亿之多。发射空间探测器对彗星进行空间探测始于 20 世纪 80 年代，至今已发射 14 艘探测器对彗星进行了探测（表 2），取得了丰硕的探测成果。

第一颗通过空间探测器进行探测的彗星是哈雷（1P/Halley）彗星，在哈雷彗星 1986 年回归期间，



图 5 哈雷彗星 (1P/Halley) 的彗核

共发射了 5 艘探测器开展近距离探测（见表 2）。由此第一次获取了彗核的结构以及彗发和彗尾的形成机制的观测数据。Giotto 探测器是第一个近距离获取彗核彩色成像的探测器（图 5）。

国际彗星探测器（ICE）原是测量太阳风的探测器（ISEE-3），后借助月球引力助推而改变轨道成为国际彗星探测器（ICE），于 1985 年 9 月 8 日会合贾可比尼-秦诺（21P/Jacobini-Zinner）彗星，研究太阳风和彗星大气的相互作用，9 月 11 日从离其彗核 7860 km 穿过彗尾，实地测量粒子、场、波。它在 1986 年 3 月 28 日也观测了哈雷彗星，当时距离哈雷彗星  $3.1 \times 10^7$  km。该探测器已于 2014 年 5 月 29 日再次与地球建立了双向通信，NASA 正在尝试再次利用这颗探测器在 2017 或 2018 年对更多彗星进行观测。

深空 1 号（Deep Space 1）的主要目标是测试先进的空间飞行器技术。1999 年 9 月，深空 1 号的原计划测试任务结束，又扩展了与彗星包瑞利（19P/Borrelly）的相遇使命。深空 1 号探测器共传回 52 幅彗核成像，结果显示包瑞利彗星的彗核长 8 km，表面崎岖，没见到大于 200 m 的陨击坑（图 6），彗核的反照率约 0.01 ~ 0.035。2001 年 12 月 18 日完成使命。

星尘（Stardust）计划是第一个采集彗星样品带回地球的探测器，目标彗星是维尔特二号（81P/wild 2）。2003 年 12 月 31 日飞进 81P/Wild 2（图 7）的彗发，2004 年 1 月 2 日成功地飞越离地球  $3.9 \times 10^8$



图6 彗星 19P/Borrelly

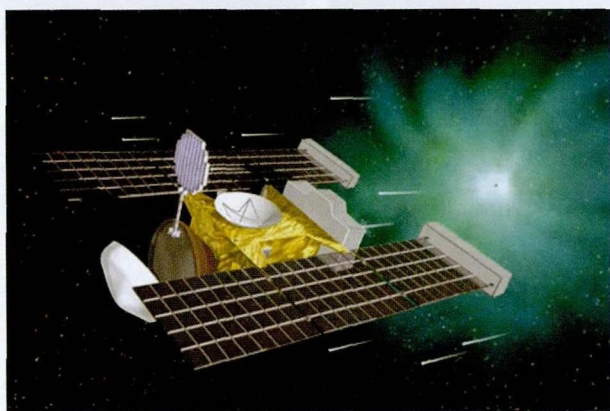


图7 星尘号探测器飞越彗星 Wild 2 概念图

km 的 81P/Wild 2, 到离彗核 300 km 内以相对速度 22000 km/h 穿越气/尘彗发, 探测器的“尘埃捕获器”于 2006 年 1 月 15 日返回地球, 在美国犹他州着陆。

星尘号探测器在飞越彗星 81P/wild 2 期间, 导航摄像机共拍摄 72 幅彗核图像, 这些图像显示彗核的直径约为 5 km, 表面有很多坑底平坦, 边缘完整的坑, 直径从很小到 2 km 不等。通过对探测器“尘埃捕获器”中捕获的彗星尘埃进行仔细研究发现, 彗星尘埃包含许多种有机化合物, 有两种有机化合物甚至包含与生命起源有关的氮。彗星尘中的脂肪族碳水化合物的分子链长度要比观测到的弥散恒星介质中的长。没有探测到含水硅酸盐或碳酸盐矿物, 这意味着彗星 81P/Wild 2 的尘埃中缺乏水成过程。

彗核旅行 (CONTOUR) 的使命是会合彗星恩克 (2P/Encke) (2003 年 11 月 12 日)、施瓦斯曼-瓦

赫曼 3 号 (73P/Schwassmann-Wchmann 3) (2006 年 6 月 18 日) 及第三颗彗星, 拍摄彗核图像 (分辨率 4 m) 和光谱以及实地分析周围的彗发气体和尘埃成分。由于引擎的燃烧, 最后在 2002 年 12 月 20 日失去联系, 观测证据表明空间探测器分裂成几个碎片。

深度撞击 (Deep Impact) 探测器在 2005 年 7 月 4 日会合彗星坦普尔 1 号 (9P/Tempel 1) (图 8)。飞临彗星前, 它所携带的高分辨率仪 (HRI) 和中分辨率仪 (MRI) 拍摄了彗核并选定彗核表面撞击区。飞越彗核前 1 天, 探测器发射 370 kg 的铜质撞击体, 以约 10.2 km/s 速度轰击彗核, 释放动能为 19 GJ (相当于 4.8 吨 TNT), 估计可产生直径为 100 m, 深度为 30 m 的陨击坑, 同时进行摄像和红外分光观测 (图 9), 从而探测该彗星内部情况。这是第一次利用太阳系天体的一个大“实验”, 重要任务是获取撞击引起彗星轨道改变的数据。

深度撞击计划的探测结果表明, 撞击彗星 9P/Tempel 1 后释放的尘埃粒子比人的头发丝还要细小, 并且发现尘埃中存在硅酸盐、碳酸盐、蒙脱石、金属硫化物、无定形碳和多轮芳香族碳氢化合物。

星尘后继 (Stardust-Next) 计划是星尘号的后续计划, 目标天体仍是 9P/Tempel 1, 飞越彗星的时间是 2011 年 2 月 14 日, 距离彗星的最近距离是 178 km。主要科学目标是, 加深对彗核表面过程的认识、对彗



图8 彗星 9P/Tempel 1

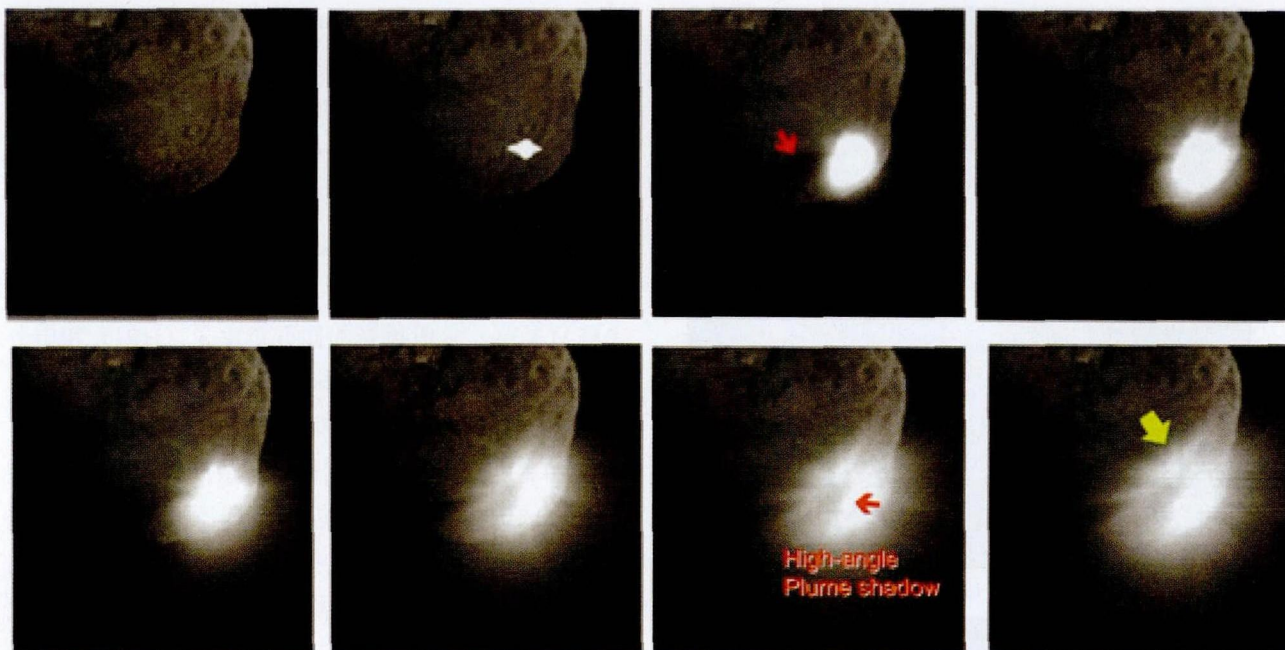


图9 撞击彗星 Tempel 1 后抛射物发展变化图

核进行地质学绘图、研究平滑流的沉积、活动面积等。此外，星尘后继计划还研究了深度撞击 (Deep Impact) 计划撞击 9P/Tempel 1 后对其表面造成的影响。

星尘后继计划共获取了 72 幅高分辨率的彗星图像，从这些图像可看出深度撞击计划在 2005 年撞击彗星时形成的陨击坑直径约为 150 m，且内部具有突起特征 (图 10)，这表明 9P/Tempel 1 的彗核是易碎的。

EPOXI 是美国深度撞击计划的扩展计划，它包含两个任务，一个是深度撞击扩展计划 (DIXI)，目标是探测彗星哈特雷 2 号 (103P/Hartley 2)，另一个是系外行星观测和特征计划 (EPOCh)，目标是

对系外行星开展观测和特性研究。飞越彗星的时间是 2010 年 11 月 4 日。EPOXI 计划在 2010 年 11 月 4 日以 44300 km/h 的速度从距离彗星 700 km 处飞越了彗星 103P/Hartley 2 并拍摄到了彗核的图像 (图 11)，得知该彗星的彗核形状类似花生状，其长度为 2 km，最窄处仅为 0.4 km。

EPOXI 计划的主要科学发现包括：103P/Hartley 2 的彗核腰部是平滑的、相对来说是不活动的；彗核在

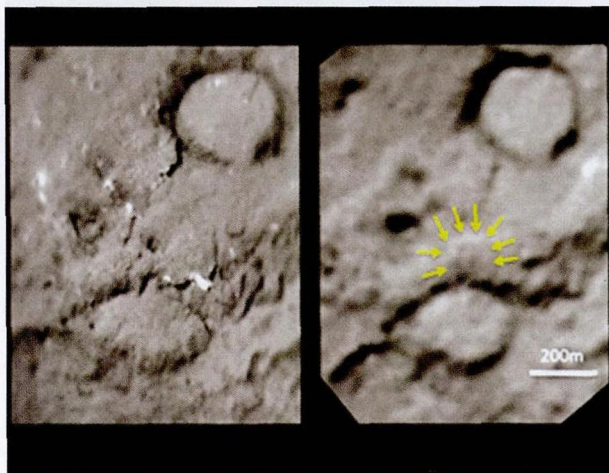


图 10 撞击前后彗星表面形态比照图



图 11 103P/Hartley 2 的彗核

围绕一个主轴旋转的同时也围绕着另一个轴翻滚；在彗核表面较大、较粗糙的一端包含一些闪光的大块物体，这些物体大约有 50 m 高和 80 m 宽，反射能力是彗核平均反射能力的 2 ~ 3 倍。

#### 四、“罗塞塔” (Rosetta) 探测计划的最新进展

“罗塞塔”是由欧洲空间局发射的人类第一颗既轨道环绕彗星又在彗星表面着陆的探测计划，包括“罗塞塔”轨道器和“菲莱” (Philae) 登陆器两部分。

“罗塞塔”探测器原来打算与彗星 46P/Wirtanen 会合，后因推迟发射于 2004 年改为与彗星丘留莫夫-格拉西缅科 (67P/Churyumov-Gerasimenko, 简称 67P) 会合，该彗星绕太阳公转的周期为 6.57 年，下次过近日点日期是 2015 年 8 月 13 日。“罗塞塔”探测器在 2004 年 3 月 2 日发射升空后，途中飞越了火星 (2007 年) 以及小行星司琴星 (21 Lutetia) (2008 年 9 月) 和 2867 (2867 Steins) (2010 年 7 月)，于 2014 年 8 月 6 日与彗星 67P 会合。2014 年 9 月 10 日“罗塞塔”进入距彗核 30 km 的环绕彗星飞行的轨道，“罗塞塔”轨道器将环绕彗星飞行 17 个月，观测彗星从较冷的区域向太阳靠近的过程中活动性的变化。

由于在“罗塞塔”到达之前，人们对该彗星的表面情况并不了解，因此着陆之前首先需要选定好着陆点。2014 年 9 月 15 日，在综合考虑着陆区地形、光照、可抵达性、危险系数以及潜在科学价值等因素后，原先选定的 5 个候选着陆区中的“J”点被确定为“菲莱”探测器的最终着陆地点，“J”点位于彗核的头部 (图 12)。2014 年 11 月 12 日“菲莱”登陆器成功在彗星 67P 上实现软着陆。任务计划于 2015 年 12 月结束。



图 12 “菲莱”探测器的着陆点

“菲莱”原计划采用反推冷气发动机、钻头和鱼叉系统使自己慢慢降落并固定在彗星表面，但反推冷气发动机和鱼叉系统先后出现故障，并且由于“菲莱”在着陆过程中发生了两次弹跳，因此，“菲莱”没有着陆在先前选定的最佳着陆点，但仍然位于彗核的“头部”。不过“菲莱”及其所携设备运转良好并传回数据和图像。照片显示，“菲莱”位于悬崖阴影里 (图 13)。由于着陆地点光照不足，仅靠“菲莱”自身携带的电量只能消耗一至两天，2014 年 11 月 15 日清晨证实，由于电量不足，“菲莱”已进入休眠。令人欣慰的是，在“菲莱”进入休眠前已传回所有实验数据。



图 13 “菲莱”传回的首张照片

从 2014 年 8 月份以来，“罗塞塔”飞船一直在对 67P 彗星开展近距离研究和观察，获得了大量细节数据以及高分辨率图像。目前为止，“罗塞塔”计划的主要科学发现有：

最初，根据“罗塞塔”轨道器携带的紫外成像光谱仪 (Alice) 返回的数据显示彗星 67P 的表面比木炭还黑，后来根据“罗塞塔”轨道器携带的光学、分光与红外远距离成像系统 (OSIRIS) 拍摄的彗星真色图像表明，该彗星呈现出红色 (图 14)，这说明彗星在不同波段下颜色是不同的。彗星

67P 气体的主要成分是氨、甲烷、硫化氢、氰化氢和甲醛，因此其气味闻起来像是臭鸡蛋、马尿、酒精和苦杏仁的综合。“罗塞塔”轨道器离子和中性分析光谱仪（ROSINA）测量的该彗星气体中重氢/氢比率是地球海洋的重氢/氢比率的三倍，与地球上水的成分存在显著差异，这个发现排除了地球之水主要起源于彗星的理论，支持了小行星是地球上海洋水体主要来源的理论。“菲莱”着陆器携带的彗星采样与成分试验仪（COSAC）获取的数据显示在彗星表面检测到有机分子，这是彗星上存在有机分子的直接证据。彗星 67P 表面粗糙，有崖壁、巨石、裂痕、凹坑、沙丘和隆起等地形（图 15）。有的悬崖高度可达 800 米，崖底布满巨石；有些裂缝的宽度可达几米，长度可达一公里；凹坑的坑壁陡峭，底部较平坦，直径从十几米到几十米不等；部分凹坑内有尘埃喷流，这说明凹坑的形成与地下喷流有关；沙丘地形、岩石后的沙粒堆积和岩石周围被风吹开沙粒形成的凹坑等特征显示，在彗星表面可能存在微风。彗星表面几乎不存在水的迹象，这点和此前探测过的彗星 Tempel 1 和 Hartley 2 一致，但科学家们已观察到从彗星内部射向太空的水气，这表明彗星地表下方就存在水冰，“菲莱”着陆器的弹跳数据已表明彗星尘埃层的厚度可达 20 cm。

随着彗星不断接近太阳，彗星将会变得更加活跃，在 2015 年 8 月中旬彗星到达近日点附近时，其地表的尘埃与气体喷流将更加剧烈，甚至可能会发生爆发活动冲掉部分地表物质并将其抛入太空。另外，欧航局工作人员称“菲莱”可能会在逐渐靠近太阳的过程

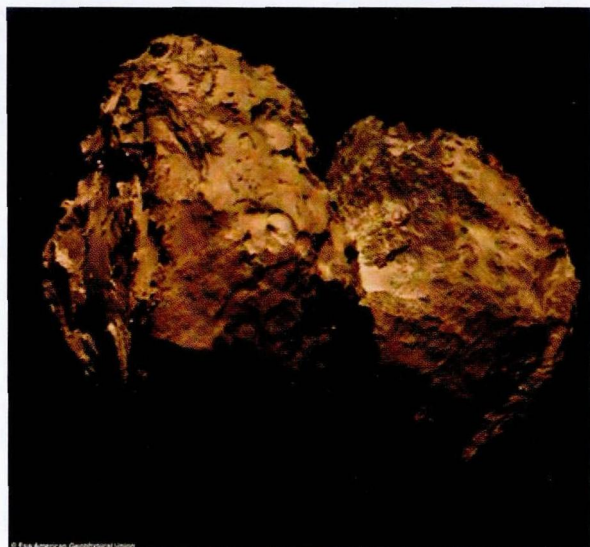


图 14 彗星丘留莫夫-格拉西缅科的第一副真色图像

中获得充足能量，有望在 2015 年 5 月份从休眠中苏醒。欧航局载人航天部主任托马斯·赖特 2015 年 1 月表示，“罗塞塔”项目可能延长一年，至 2016 年底结束。

## 五、结束语

随着科学技术的进步和人们对彗星认识逐步深入，人们已经摆脱了古代人认为彗星的出现是灾难象征的认识，并且逐渐认识到彗星是与地球和生命的起源有着密切联系，具有重大研究意义的太阳系小天体。在中国，包括彗星科学研究在内的行星科学研究相对于其他学科而言，研究基础和力量都比较薄弱，亟需更多的人加入到彗星和行星科学的研究中来。期盼着中国人自己的彗星空间探测计划能早日实现！

感谢南京大学胡中为老师为本文提供部分资料，感谢自然科学基金（11003048，10933004）和紫金山天文台小行星基金会。

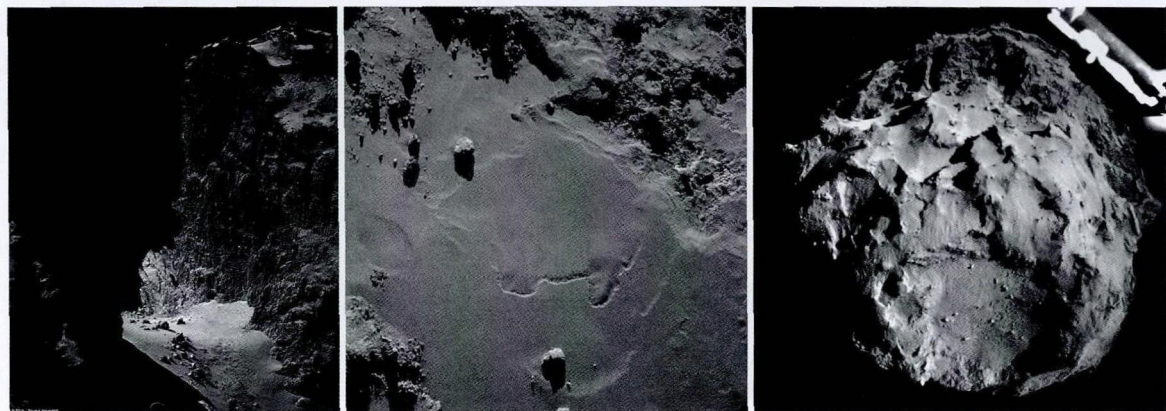


图 15 彗星丘留莫夫-格拉西缅科的表面地形