“罗塞塔”历时十载成功登陆彗星

季江徽^{①②*}, 田蕾^{①③}

① 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;

② 中国科学院行星科学重点实验室, 南京 210008;

③ 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: jijh@pmo.ac.cn

2014-12-22 收稿, 2014-12-29 接受

国家自然科学基金(11273068, 11473073)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB09000000)、中国科学院新兴与交叉学科布局试点项目(KJZD-EW-Z001)、江苏省自然科学基金(BK20141509)和紫金山天文台小行星基金资助

摘要 2004年欧洲航天局发射的“罗塞塔”轨道器经过10年飞行到达彗星67P/Churyumov-Gerasimenko。“罗塞塔”释放的菲莱探测器安全降落于彗星67P表面,成为首个在彗核表面着陆的探测器。着陆后菲莱开展了系列探测,顺利完成了主要的预定任务,并已传回彗星表面和浅层物质的分析数据。然而,登陆彗星后不久菲莱的主电池电量耗尽,且日照不足,太阳能电池无法支持其继续工作。“罗塞塔”和菲莱拍摄的图像显示,彗星67P表面被毫米至米尺寸的表壤和碎石覆盖。“罗塞塔”采集的彗星67P水蒸气样本的分析结果显示其水蒸气中D/H(氘氢比)约为地球海洋中水的3倍。探测小行星和彗星有助于揭示太阳系形成、地球上水的来源乃至生命起源的奥秘,还有助于减缓近地小天体灾害。虽然国内在彗星、小行星方面的研究起步较晚,但中国的小天体深空探测亦在推进之中。

关键词

菲莱
罗塞塔
彗星
深空探测

北京时间2014年11月13日00:02左右(11月12日16:02 GMT),欧洲航天局地面控制中心收到的测控信号确认由“罗塞塔”轨道器释放的菲莱探测器已经安全降落在67P/Churyumov-Gerasimenko彗星表面,这是人类的探测器首次在彗星上着陆。人类为什么要探测彗星?这是因为彗星是太阳系的“时间胶囊”,蕴藏着45亿年前太阳系形成初期留存的原始物质,对其喷发的气体、尘埃及彗核结构和相关有机物的详细研究,将有助于揭示太阳系形成、地球上水的来源乃至生命起源的奥秘。

菲莱着陆器由底板、仪器平台和多边形夹层结构组成(如图1),由碳纤维制成,携带了一系列仪器用于图像拍摄及彗核表面样品分析。菲莱着陆器脚部的传感器在其着陆彗星时记录下了触地的声音,这个仪器SESAME-CASSE清晰地记录了菲莱脚部的震

动。由于没有向下推进器,并且用于固定自身的自动鱼叉系统也失灵了,菲莱触地后又弹跳了2次,共3次触地,最终靠3条腿上的冰螺栓将其固定在引力非常微弱的彗星上。“罗塞塔”轨道器的导航相机(NavCam)拍下的图像显示了菲莱第一次触地的位置,如图2,图中大圈中是菲莱着陆扬起尘埃云的影子,2个小圈分别标示的是菲莱的首次着陆点和菲莱的影子。科学家们通过仔细检查NavCam的高分辨率图像,结合传回的信息来寻找菲莱最终着陆点。菲莱携带的仪器CONSERT可以测得“罗塞塔”与菲莱的距离,科学家由此可以缩小菲莱最终着陆区的可能范围,由于采用不同的彗星形状模型,可能的范围有2条,如图3。科学家推测菲莱位于一处峭壁的阴影中,光照很少。按照设计,菲莱在主电池电量耗尽后将依靠太阳能电池供电。但由于太阳光照不足,菲莱目前已

引用格式: 季江徽, 田蕾. “罗塞塔”历时十载成功登陆彗星. 科学通报, 2015, 60: 164-169

Ji J H, Tian L. Philae lands on comet after Rosetta's 10-year expedition (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 164-169, doi: 10.1360/N072014-01399

图1 菲莱着陆器结构图. 来源: ESA

Figure 1 Configuration of Philae Lander. Source: ESA

图2 菲莱第一次触地的位置. 来源: ESA/Rosetta/NavCam

Figure 2 Position of Philae's first touch-down. Source: ESA/Rosetta/NavCam

处于休眠状态, 无法继续工作。

从11月14日09:58 (GMT)开始, 菲莱与母船“罗塞塔”轨道器失去联系, 因为菲莱必须借助正在围绕彗星运转的“罗塞塔”才能与地面建立联系, 但由于当时“罗塞塔”已经进入彗星地平线下的位置, 菲莱获取的数据无法通过其中继传送至地球。直到14日22:19(GMT)“罗塞塔”与菲莱重新取得联系, 此后的近3 h内菲莱将各个仪器上的科学数据传了回来。11月15日00:36(GMT)之后菲莱再次与“罗塞塔”失

图3 菲莱最终着陆点的可能范围. 来源: ESA/Rosetta/Philae/CONSERT

Figure 3 Philae's final potential landing site, estimated by CONSERT. Source: ESA/Rosetta/Philae/CONSERT

联, 其主电池的电量耗尽, 太阳能充电效率也极低, 短期内已无法再次取得联系。尽管遇到了这些突发状况, 但菲莱顺利完成了主要的预定任务, 在着陆后开展了系列探测, 并已传回彗星表面和浅层物质的分析数据。

菲莱登陆的彗星67P/Churyumov-Gerasimenko由Churyumov和他的学生Gerasimenko在1969年发现, 其公转周期为6.45年, 自转周期为12小时24分。这颗彗星的质量约为 10^{13} kg, 平均密度为 0.4 g/cm^3 , 其引力场很弱, 是由非常松散的水冰、尘埃和岩石构成的组合体, 外形也非常不规则, 67P的外观很像一个“黄

小鸭”(如图4(a)), 大头(“身体”)尺寸约为 $4.1\text{ km} \times 3.2\text{ km} \times 1.3\text{ km}$, 小头(“头部”)尺寸约为 $2.5\text{ km} \times 2.5\text{ km} \times 2\text{ km}$, 这是一种非常明显的双体结构(在很多太阳系小行星中也存在类似的结构, 如密近双小行星Itokawa与Toutatis等). 图4(b)为2014年12月2日“罗塞塔”的导航相机拍摄的彗星67P的图像, 彗星的小头朝向图左侧, 大头向右侧, 小头上分布着众多巨石特征, 部分被细颗粒的物质所覆盖. 细颗粒物质呈现波纹图案, 可能由于下垫面地形影响或地表升华作用的侵蚀. 从图中可以正面看到彗星小头的大凹陷以及其内壁细节, 这个大凹陷直径约 1 km . 科学家估算的菲莱最终着陆点的可能范围即位于大凹陷的边缘.

从菲莱着陆前下降时所拍摄的图像(图5)来看,

图 4 “罗塞塔”拍摄的彗星 67P 图像. (a) “罗塞塔”的仪器 OSIRIS 于 2014 年 8 月 3 日相距彗星 285 km 处拍摄的彗星 67P 的图像, 分辨率为 5.3 m/pixel , 来源: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team/MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA; (b) “罗塞塔”的导航相机于 2014 年 12 月 2 日拍摄的彗星 67P 图像, 来源: ESA/Rosetta/NAVCAM

Figure 4 Images of 67P taken by Rosetta. (a) An image of Comet 67P taken with Rosetta's OSIRIS on 3 August 2014 from a distance of 285 km. The image resolution is 5.3 m/pixel . Source: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA; (b) an image of Comet 67P taken with Rosetta's NAVCAM on 2 December 2014. Credits: ESA/Rosetta/NAVCAM

图 5 菲莱下降过程中拍摄的彗星 67P 表面. 当时距彗星表面 40 m, 来源: ESA/Rosetta/Philae/ROLIS/DLR

Figure 5 The surface of Comet 67P from the lander's down-looking descent camera ROLIS when 40 m above the surface. Source: ESA/Rosetta/Philae/ROLIS/DLR

彗星表面被毫米至米尺寸的表壤和碎石覆盖, 右上角的大石块约 5 m 大小, CIVA拍摄的全景图像(图6)显示了一些看起来更硬的物质形成的分层峭壁. 根据菲莱传回的彗星表面和浅层物质分析的数据来看, 在其最终着陆点MUPUS仪器记录下了表面温度约为 -153°C (<http://blogs.esa.int/rosetta/2014/11/18/philae-settles-in-dust-covered-ice/>). 科学家们认为低温是由于与周围冰冷的峭壁辐射转移造成的, 还有可能是探测器落在了一个冰冷的尘堆里. 菲莱尝试锤击彗星表面, 但是很难深入地下, 最多只能向下前进几毫米, 通常认为彗星的坚硬表面与冰的硬度相当, 初步估计彗

图 6 菲莱下降过程中拍摄的彗星 67P 图像. 来源: ESA/Rosetta/Philae/CIVA

Figure 6 An image of Comet 67P taken by Philae during its descent. Source: ESA/Rosetta/Philae/CIVA

星表面有10~20 cm厚的表壤,覆盖在坚硬的尘土与冰的混合物上,再往深处,冰可能是多孔状的,因为早前测得彗核的密度较低.科学家们确认了菲莱的钻头已对彗星周围气体和地表物质进行了取样,但样本提取情况目前尚不清楚.希望在今后彗星离太阳更近的时候,菲莱可以完成充电,开展更为细致深入的科学探测活动.

早在2014年8月6日,“罗塞塔”进入围绕彗星运行的轨道时,其搭载的仪器ROSINA就已采集了彗星67P水蒸气样本,对其进行采样分析有助于解决地球上水的来源之谜.46亿年前,地球在形成之初温度很高,原生的水分早已蒸发耗尽,如今地球上的水很可能是在地球冷却后,由彗星和小行星撞击地球而带来的.然而各种天体对地球水源的贡献多少仍然未知,通过测量不同类型天体的水中氘(氢的同位素)含量,并与地球海水进行比对,可获知各类天体对地球水的贡献.近日欧洲航天局的科学家在*Science*杂志刊登了彗星67P水蒸气样本的分析结果:彗星67P的水蒸气中D/H(氘氢比)为 $(5.3 \pm 0.7) \times 10^{-4}$,约为地球海洋中水的3倍^[1].在11颗已测得D/H的彗星中,只有2011年欧洲航天局的Herschel空间望远镜测量的彗星103P/Hartley 2与地球水的D/H一致.已测量的各个彗星D/H差异很大,说明彗星上的水与地球上的绝非相同.这次测量结果使得地球上水的来源之谜变得更为复杂.氘的含量是太阳系形成与早期演化的重要指示器,理论模拟发现氘含量随离开太阳的距离变化,且在太阳系形成之初的几百万年内还随时间变化.ROSINA的采样分析结果也反映了彗星在早期太阳系中的形成位置可能比之前的设想更广.

彗星探测开始于20世纪80年代,近年来实施的计划有美国的Deep Space 1, Stardust, Deep Impact和欧洲的“罗塞塔”(Rosetta)等,这些任务经历了从飞越探测到绕飞着陆探测的阶段,聚焦于彗星的彗尾成分、彗核形态结构等科学问题.“罗塞塔”是欧洲航天局运行的一项里程碑式的彗星探测任务,它包含了“罗塞塔”轨道器及菲莱着陆器.

“罗塞塔”这一任务名称取自著名的“罗塞塔”石碑.1799年,“罗塞塔”石碑(Rosetta Stone)在埃及被发现.石碑上镌刻了3段分别用埃及象形文字、通俗体文字和希腊文书写文字.由于文字的内容完全相同,考古学家借此破译出了古埃及的象形文字,打开了通向古埃及历史文明的大门.而菲莱探测器则是以

尼罗河中小岛的名字菲莱命名,岛上发现的一块方尖碑协助解读了“罗塞塔”石碑.科学家们希望“罗塞塔”任务成为天文学的“罗塞塔”石碑,获取彗星上尘封了数十亿年之久的太阳系初期信息,以便打开通向太阳系古老历史的大门.

“罗塞塔”任务最早是在20世纪70年代开始酝酿,其最初的设计是一项彗星取样返回任务.欧洲航天局科学项目委员会在1993年11月批准了“罗塞塔”任务的实施.最初确定的科学探测目标是彗星46P/Wirtanen,但随后在确定“罗塞塔”的发射时间被定在2004年之后,任务的探测目标被重新确定为67P/Churyumov-Gerasimenko彗星.

“罗塞塔”轨道器重约3吨(3000 kg),外形是个2.8 m×2.1 m×2.0 m的铝箱.它共装备了11个科学仪器,这些仪器将用以研究彗星的物理和化学构成及其电磁和引力的特性等.科学仪器安装在箱顶,子系统在箱底,一侧是直径2.2 m的碟形通讯天线,反面一侧安装着菲莱登陆探测器.其余两面延展着2片各32 m²的太阳能帆板,两端距离约32 m,每片包含5块面板,可旋转以获取尽可能多的太阳能.轨道器的中心是主要动力系统,垂直的推进管周围安装了燃料箱和氧化剂箱.“罗塞塔”任务的主要科学目标是研究彗核特性,测量其动力学特征,表面形态及组成成分;测定彗核的挥发物和难熔物的矿物组成、同位素组成;研究彗星活动以及表层的尘埃和气体相互作用,进而探索46亿年前太阳系的起源之谜,以及探测彗星是否为地球带来生命诞生时所必需的水分和有机物质.

2004年3月2日7:17(GMT),“罗塞塔”轨道器从南美洲法属圭亚那的库鲁航天中心由1枚阿丽安-5型火箭发射升空,随后进行了3次地球引力助推和1次火星引力助推,并且在2008和2010年相继飞越了2867号小行星Steins及21号小行星Lutetia,之后在2011年6月进入休眠状态.2014年“罗塞塔”开始进入执行任务状态,1月20日按计划从休眠中苏醒,继续追星之路.经过10年追赶,“罗塞塔”于2014年8月6日安全进入围绕彗星运行的轨道.在8月至11月间,“罗塞塔”围绕彗星运行,其搭载的各项仪器对彗星表面进行了详细勘察,确定其地表环境条件.11月12日,“罗塞塔”轨道器释放菲莱探测器至彗星表面.接下来的几个月,“罗塞塔”将会进行一系列的科学探测,预计距彗星中心最近距离仅8 km左右,仍将持续追踪彗星一

直到过其近日点,考察彗星在此期间发生的变化.而后,双方将不断向太阳靠近,直至彗星到达近日点时,“罗塞塔”的科学探测使命也将随即终结.“罗塞塔”释放菲莱探测器登陆彗星事件引起了巨大的反响,同时被*Nature*与*Science*评为2014年度十大新闻.

“罗塞塔”从任务开始规划到结束,历经了40年,从2004年发射到2014年菲莱登陆,也经历了漫长的10年,期间它沿着复杂的轨道围绕太阳运行超过 6×10^9 km,克服了重重困难,终于不辱使命顺利完成任务.这充分反映了国际上日益先进的航天技术和小天体研究的先进水平.虽然国内在彗星、小行星方面的研究起步较晚,但中国的小天体深空探测亦有一个好的开端.

2012年,中国的嫦娥二号探测器圆满完成探月先导技术验证、飞赴日地L2点试验的任务之后,于2012年12月13日在距地球约 7×10^6 km远的深空,精确实现千米级飞越探测4179号小行星图塔蒂斯(Toutatis)的任务.在国际上第一次成功获取了图塔蒂斯的高分辨率光学图像,随后的科学研究结果进一步揭示了该小行星的物理特性、表面特征、内部结构及可能的起源.这是我国首次实现对小行星深空探测,也是国际上首次实现对图塔蒂斯的近距离探测^[2],在国内外引起了巨大的反响与良好的评价(<http://www.natureasia.com/zh-cn/research/highlight/8969>, <http://www.helsinki.fi/acm2014/invited.shtml>).

众所周知,小行星和彗星是太阳系中的重要成员,它们保存着太阳系形成初期的原始成分和演化历史,是研究太阳系起源的“活化石”.目前在地球上收集到的陨石绝大部分来自小行星,在其中发现的有机物可能与地球生命起源有关,通过对小行星的探测将能获得地球生命起源的直接证据.从更为现实的角度来看,小天体撞击地球在历史上多次导致地球的气候环境灾变和生物灭绝,因此将直接威胁人类的生存和发展.科学家估计在地球附近存在着数百万颗几十米大小的近地天体.2013年2月15日,俄罗斯车里雅宾斯克陨石事件中约1200人受伤,近3000座建筑受损,这是由1颗直径约15 m的小天体在

空中发生爆炸所致.2029年4月13日,1颗直径约400 m的99942号小行星阿波菲斯(Apophis)将掠过地球,最近距离约为 2.9×10^4 km;它将于2036年重新“光临”地球,并很可能撞击地球.科学研究表明,若阿波菲斯撞上地球,这种石质小天体的陆地撞击将摧毁北京或纽约大小的城市,若是海洋撞击将造成大海啸.对于直径超过1 km的近地天体,如果它们撞击地球将导致全球气候发生灾难性改变,而彻底摧毁人类文明.

目前,中国科学院紫金山天文台与中国空间技术研究院总体部合作研制完成小行星采样一体化装置.计划在2029年前让该装置落在小行星阿波菲斯或其他小行星上,采集其样本,从而为防范未来的近地天体灾害做好准备.该项装置主要用于完成小行星表层土壤样品的采集、样品的分配和贮存及样品分析的预处理等任务,将来在小行星上可实现钻取收集分析的全套动作,通过地面的远程遥控就可以原位探测小行星表层以下岩石的组成成分.它的工作原理和菲莱着陆器SD2相似.相比之下,小行星采样面临的探测环境更为复杂,因为相对于松软的彗星表面,小行星表层以下可能是非常坚硬的石头,所以,钻头要足够坚硬才行,同时还要对小行星有足够的研究.该仪器将来可对小行星岩石的成分,包括岩石中的气体等进行原位采样分析研究,应用于我国未来的小行星深空探测任务.

国际上开展的对小天体的空间探测表明,这些任务周期长、风险高、技术难度大、但科学成果突出,对产业带动性强.这对我国将来开展小行星和彗星探测有很好的启发,围绕关键科学问题,结合航天技术能力、科学研究和经济发展水平,坚持科学目标牵引、推动技术发展;坚持高起点和前瞻性,突出创新和特色;坚持以我为主,并积极拓展国际合作.未来将围绕太阳系起源、地球生命起源和水起源以及地外生命物质存在、小天体对地球环境的影响等重大科学问题,通过对小行星和彗星开展深空探测,探索宇宙中原始生命的存在形式,为勘测利用太阳系天然资源以及保护地球和人类安全等方面做好充分的准备.

参考文献

- 1 Altwegg K, Balsiger H, Bar-Nun A, et al. 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science*, 2014, doi: 10.1126/science.1261952

- 2 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. *Sci Rep*, 2013, 3: 3411

Philae lands on comet after Rosetta's 10-year expedition

Ji JiangHui^{1,2} & TIAN Lei^{1,3}

¹ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

² Key Laboratory of Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The Rosetta mission of the European Space Agency soft-landed its Philae probe on Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, which marks the first time in history that a probe has landed on a comet. Rosetta was launched in 2004 and made a 10-year-long journey in slow pursuit of comet 67P. After mapping the surface of the duck-shaped comet, Rosetta released its small lander Philae on 12 November. Philae bounced across the comet's surface before settling in the shadow of a cliff. Without sufficient sunlight to recharge its batteries, Philae ran out of power quickly. Nevertheless, Philae completed a series of scientific experiments and transmitted much precious data about 67P before losing power. Rosetta is set to continue to survey the comet from a distance of a few dozen kilometers over the next year as the comet sweeps closer and closer to the Sun, during which time great filaments of dust and ice will pour from the surface of the comet. Among the discoveries made by Rosetta was the measurement that water on Comet 67P contains about three times more deuterium than water on Earth. The isotope signature of water on comet 67P is thus very different from that of water on Earth, overturning the theory that ice from comets colliding with Earth provided the water from which our oceans formed. The images taken by Rosetta and Philae show that the surface of the comet is covered by dust and debris ranging from millimeter to meter sizes. More scientific results will be released in the future. Through the investigation of small bodies in the Solar System such as comets and asteroids, we will be able to study the formation and evolution of the Solar System and to determine the origin of water and life on Earth. Although China is chasing foreign space agencies in beginning its exploration of deep space, the country has made a good start with the Chang'e-2's successful fly-by of the asteroid 4179 Toutatis. Furthermore, to prevent potential damage to the Earth from near-Earth objects, China is developing a series of plans to explore asteroids and comets.

Philae, Rosetta, comet, deep-space exploration

doi: 10.1360/N072014-01399