

“天问二号”任务科学目标和有效载荷配置

李春来^{1,2}, 刘建军^{1,2}, 任鑫^{1,2}, 严韦^{1,2}, 张舟斌^{1,2}, 李海英^{1,2}, 欧阳自远¹

(1. 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100101)

摘要: 回顾了近30年国际上小行星探测任务的科学目标和载荷配置。在总结小行星探测主要科学问题的基础上, 对中国行星探测工程“天问二号”探测任务的对象选择、科学目标和有效载荷配置进行了论述。围绕实现科学目标探测, 并提出了相应的科学研究内容和有效载荷技术指标。

关键词: 天问二号; 小行星探测; 科学目标; 有效载荷

中图分类号: V57

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)03-0304-07

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230185

引用格式: 李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(3): 304-310.

Reference format: LI C L, LIU J J, REN X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(3): 304-310.

引言

小行星 (Minor Planet/Asteroid) 是围绕太阳运行、体积和质量比行星和矮行星小, 且不易释放出气体和尘埃的天体^[1]。小行星保存着太阳系形成、演化的原始信息, 是研究太阳系起源的“活化石”, 可为太阳系起源与演化提供科学线索。在历史上, 小行星撞击事件多次发生, 并导致地球环境灾变和生物灭绝, 直接威胁人类的生存和发展, 因此小行星成为深空探测的热点。小行星探测是太阳系空间探测活动的新发展方向, 也是探索太阳系起源重要的研究领域。实施小行星探测任务, 可以深化太阳系起源和行星形成演化规律的认识, 加深人类对小行星轨道演变的认识, 为应对小天体撞击方法和途径提供科学依据。中国科学院发布的《2023 研究前沿》报告中指出小行星地表特征和样本成分分析是2023年地球科学领域 Top 10 热点前沿^[2]。近年来, 行星科学研究越来越依赖于近距离观测、表面原位探测、取样返回分析等深空探测技术, 在月球和火星探测热潮的同时, 小行星深空探测也吸引了越来越多的目光。

中国在探月工程“绕”“落”“回”取得阶段性成果的基础上, 《2016 中国的航天》白皮书中明确指出: “深空探测……开展火星采样返回、小行星探测、木星系及行星穿越探测”等的方案深化论证和关键技术攻

关, 适时启动工程实施, 研究太阳系起源与演化、地外生命信息探寻等重大科学问题”。目前, 中国行星探测工程已立项, 继“天问一号”首次火星探测任务圆满完成, 下一步将开展“天问二号”小行星探测。

本文在小行星探测主要科学问题综述的基础上, 对中国“天问二号”小行星探测任务的探测对象选择、科学目标和有效载荷配置分别进行论述, 并围绕科学目标, 提出了相应的科学研究内容和有效载荷技术指标。

1 小行星探测主要科学问题

小行星空间探测已有 30 多年历史。从发展历程看, 小行星探测从近距离飞越、绕飞、附着就位探测, 发展到小行星表面采样返回。其中, 近距离飞越探测方式有美国“伽利略号” (Galileo) 探测器飞越小行星“盖斯普拉” (951 Gaspra) 和“艾女星” (243 Ida)^[3], “深空 1 号” (Deep Space 1) 探测器飞越近地小行星“布拉叶” (9969 Braille)^[4], 欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 的“罗塞塔号” (Rosetta) 探测器飞越“斯坦因斯” (2867 Steins) 和“司琴星” (21 Lutetia)^[5-6]小行星, 中国“嫦娥二号” (Chang'E-2) 探测器飞越小行星“图塔蒂斯” (4179 Toutatis)^[7]。绕飞探测方式主要有美国“尼尔号” (Near Earth Asteroid Rendezvous, NEAR) 探测器和“黎明号” (Dawn) 探

探测器, 分别对“爱神星”(433 Eros)^[8]以及“灶神星”(4 Vesta)和“谷神星”(1 Ceres)进行了绕飞探测^[9]。附着就位探测最具代表性的是欧洲航天局“罗塞塔-菲莱”(Rosetta-Philae)探测器, 对楚留莫夫-格拉希门克彗星(67P/Churyumov-Gerasimenko)进行了就位探测^[10]。小行星表面采样返回任务包括有日本“隼鸟号”(Hayabusa)^[11]、“隼鸟2号”(Hayabusa 2)^[12]和美国“冥王号”(Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer, OSIRIS-REx)^[13]。与此同时, 持续对一些独特的小行星开展形

式多样的探测, 如“双小行星重定向测试”(Double Asteroid Redirection Test, DART)、“特洛伊”(Trojan)小行星探测(“露西号”(Lucy)任务)和金属小行星探测(“赛姬号”(Psyche)任务)等。

从近30年来国际已实施和正在开展的小行星探测任务来看(见表1), 小行星探测的主要科学问题可以概括为以下6个方面^[14-15]: 小行星轨道演化机制; 小行星的形成与演化; 太阳系起源与演化历史; 探索地球生命起源; 探索恒星演化及其与行星形成的关系; 研究太阳活动对小天体的影响。

表1 国际上近30年小行星探测任务的科学目标和有效载荷配置

Table 1 Scientific objectives and payload configuration of international asteroid exploration missions in the past 30 years

探测任务	发射时间	科学目标/任务目标	有效载荷
尼尔号 ^[16]	1996	确定小行星主要物理参数——大小、形状、体积、质量、密度和自转轴; 测量小行星表面化学成分、元素丰度和矿物组成; 探测“爱神星”表面地貌特征; 分析“爱神星”表面风化层特征及其演化机理; 测量“爱神星”和太阳风的相互作用、寻找可能的内部磁场; 通过“爱神星”周围尘埃和气体探寻其活动的证据; 确定“爱神星”内部结构	多光谱成像仪 近红外光谱仪 X射线/射线谱仪 激光测距仪 磁强计
深空1号 ^[14]	1998	探测彗星和小行星的大小、形状、表面特征、亮度、质量、密度、彗星核的自转状态, 研究彗发的等离子体特征、彗发和太阳风的相互作用、亮度和彗星核喷发的尘埃和气体流的特征。验证太阳电引擎、自导航系统、高级微电子和通讯设备, 以及其它的尖端技术, 为后续深空探测任务提供试验数据	相机-光谱综合仪 行星探测等离子实验设备 离子推进系统
隼鸟号 ^[17]	2003	探测小行星“糸川”(25143 Itokawa)的质量、体积、形状、自转状态、物质成分、内部结构等; 结合地面观测、空间遥感探测与试验室的陨石分析, 研究S型小行星与陨石的相关性; 理解小行星的演化历史	多光谱相机 近红外光谱仪 X射线谱仪 激光测距仪
罗塞塔-菲莱号 ^[18]	2004	探究彗星的起源; 研究彗核的形态和动力学特性, 并获取化学、矿物学和同位素组成信息; 细化分析彗星的物理特性, 研究其挥发物和其它成分的相互作用; 分析彗发如何形成, 彗发的分层特性与随着太阳风的生长特性	罗塞塔轨道器: 紫外成像光谱仪、可见红外热红外谱仪、彗核射电波透射仪、彗星次级离子质量分析仪、颗粒分析和集尘器、显微成像尘埃分析系统、微波辐射计、轨道器成像系统、离子和中性成分分析仪、等离子体探测器、无线电探测器 “菲莱号”附着器: 粒子激发X射线谱仪、可见-红外分析仪、彗核射电波透射仪、彗星取样和成分实验仪、同位素测量仪、表面和次表层多功能探测仪、着陆器成像系统、磁强计和等离子体监视器, 以及电、声、尘埃撞击检测设备
黎明号 ^[19]	2007	观察太阳系早期行星形成与演化的条件和过程, 通过测量小行星的质量、形状、体积、自转轴和重力场, 探测其内部结构密度和地质环境	可见/红外光谱仪、 γ 射线/中子探测仪、框幅式相机
嫦娥二号 ^[7]	2010	测算分析小行星“图塔蒂斯”(4179 Toutatis)表面撞击坑和岩块的大小与分布特征, 建立小行星的光学多面体模型	监视相机对小行星进行光学成像
隼鸟二号 ^[12]	2014	返回原始碳质近地小行星(C型小行星)“龙宫”(162173 Ryugu)(1999 JU3)的样品并进行实验室分析, 进一步解释内行星的起源和演化问题, 尤其是地球上水和有机化合物的起源问题	光学导航相机、近红外相机、热红外相机、激光测距仪以及各种采样装置, 配备4台小型巡视器(MASCOT、Rover-1A、Rover-1B和Rover-2)
冥王号 ^[20]	2016	返回原始C型小行星的样品并进行实验室分析; 描绘小行星的全球影像、化学, 以及矿物学特征, 表征其地质和历史动态, 并提供采集样本的背景; 测量采样区的光谱特性; 测量该小行星的雅科夫斯基效应; 与地基望远镜观测数据进行比较研究	相机套件、激光高度计、热辐射光谱、可见红外光谱仪、风化层和表层X射线绘图光谱仪、采样返回系统
双小行星重定向测试 ^[21,22]	2021	撞击近地双体小行星, 开展小行星防御技术先期在轨验证, 测试是否能够改变具有潜在威胁天体的轨道	侦察和小行星光学导航相机, LICIA Cube立方体卫星配置窄视场全色相机和宽视场彩色相机
露西号 ^[23]	2021	飞越探测特洛伊小行星, 探测7颗小天体的表面成分、地质地貌、内部结构、质量和密度, 寻找特洛伊小行星的环和卫星	高分辨率可见光相机、彩色可见光相机和红外成像光谱仪、热辐射光谱仪、宽角相机
赛姬号 ^[24]	2023	探测主带M型灵神星, 探测小行星表面地貌、相对年龄, 对小行星的引力场进行高精度测量, 揭示其内部结构。开展深空光通信试验	多光谱成像仪, 伽马射线和中子能谱仪、磁强计、X波段重力探测仪

2 “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置

在30多年小天体探测的历程中, 美、欧、日先后

完成了各自独特的标志性任务, 并取得了非常显著的科学探测成果。中国“天问二号”小行星探测任务高起点起步, 计划3年内完成近地小行星探测和取样返回,

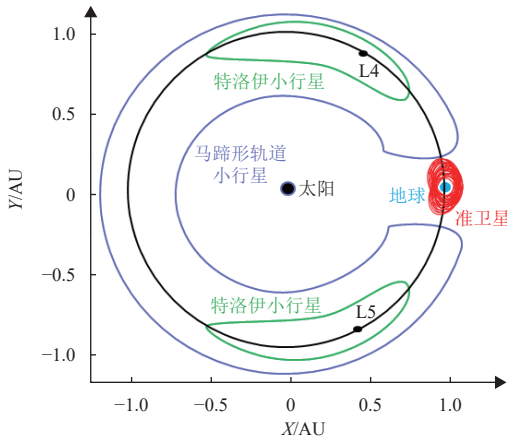
10年内到达主带开展环绕探测。实现中国小行星探测跨越式的发展,首先需要回答其探测对象、科学目标和有效载荷配置的问题,为工程实施提供顶层输入。

2.1 探测对象选择

国际天文联合会小天体中心的统计数据表明,截至2022年12月总共发现125万颗小天体,已编号的有619 999颗,其中近地小行星30 898颗,彗星4 436颗^[25]。根据其在太阳系中的位置(轨道特性)、反照率和光谱特征,小行星可划分为C、S和M等多种类型。如何从数目众多、类型多样的小行星中,选择探测对象直接关系到工程任务目标和科学目标的实现。

1) 近地小行星目标选择

近地小行星有3万多颗,包含了代表不同演化阶段的各种光谱类型小行星,其探测科学意义各有不同。轨道类型方面,绝大多数近地小行星具有较大偏心率的椭圆轨道,与地球共轨状态的小行星较为稀有。而地球准卫星是地球共轨天体3种动力学状态(即准卫星、特洛伊小行星和马蹄形轨道小行星)之一,是最稀有的一种共轨状态(见图1)。



注:地球共轨小行星包括准卫星(quasi-satellite or retrograde satellite)、特洛伊(Trojan or tadpole)小行星,以及马蹄形(horseshoe)轨道小行星

图1 地球共轨天体轨迹示意图

Fig.1 Schematic diagram of the trajectory of the Earth's co-orbiting celestial bodies

目前,近地天体共轨状态通常是通过轨道动力学演化的模拟数值分析结果来确定的,该数值分析基于简化的限制性 N 体问题模型,缺乏严格的理论依据。因此,利用环绕器对地球准卫星进行热辐射测量、表面测绘、成分分析和内部结构探测,采样返回进行样品分析等一系列手段,可以获知目标小天体的热辐射状态、表面特征、成分和密度,进而对研究其来源给出更为全面、准确的约束,将有可能回答地球准卫星的起源(例如是撞击地球或月球形成的碎块,亦或是后期被地球捕获的小天体),以及轨道的演化(包括

其历史、现状和今后的演化趋势)等科学问题。

2) 主带小天体探测目标选择

彗星和小行星在传统上被认为是两种截然不同的群体,它们具有不同的动力学特性、观测特性和成分特性。大多数可见的小行星都被认为来源于内太阳系,具有低偏心率轨道,主要存在于火星和木星轨道之间的主带(小行星带)中。而彗星则被认为形成于雪线(snow-line, 170 K以下的挥发物凝聚区)之外的外太阳系,主要存在于柯伊伯带(Kuiper Belt)和奥尔特云(Oort Cloud)这两个寒冷的库源。柯伊伯带的彗星在巨行星引力作用下会转移到椭圆轨道,而奥尔特云彗星的转移机制则主要是由银河系质量分布、偶发经过的星以及巨型分子云的潮汐效应引起的。柯伊伯带主要提供木族彗星,而奥尔特云则是哈雷族彗星和长周期彗星的库源。在物质成分上,彗星形成于雪线之外,因此含有大量包括水冰在内的冰冻挥发物,而小行星则缺少这类物质。

在最近20多年的研究中,越来越多的证据表明小行星和彗星代表了小天体连续体的两个极端,并不是两种截然不同的类别,它们在成分上表现为极度岩性和极度冰性。而Hsieh等^[26]发现的被称为主带彗星(或称冰质小行星,也叫活跃小行星)的新类别则是它们之间的过渡形式。主带彗星同时具有小行星的轨道特征和彗星的物理特征,即其轨道离心率和轨道倾角都与主带内的小行星相似,但同时在外形和成分上又很像彗星,因为它表现出彗星活动的特征,活跃时具有彗发和彗尾。目前已经观测到的主带彗星只有15颗,主带彗星的起源和形成问题、主带彗星气体活动机制问题、主带彗星的普遍性、非活跃期主带彗星的特性和主带彗星的挥发分成分等诸多科学问题需要深入研究。

基于工程技术能力和上述科学意义的考虑,在小行星数据库中遴选了近地小行星采样目标,首选最近发现的地球准卫星2016HO₃,主带绕飞探测首选主带彗星311P。

截至目前地球共轨小行星中,准卫星有5颗。2016 HO₃是被认证的第5颗地球准卫星,于2016年4月27日被美国全景巡天望远镜和快速反应系统(Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System, Pan-STARRS)发现。该小行星轨道确定后,获得永久编号469219,取名为Kamo'oalewa,夏威夷语意为“摆动的天体”,其轨道半长轴1.001 AU,绝对星等24.3,直径30~100 m^[27-28]。目前的准卫星动力学状态始于约100年前,并将持续约300 a,是目前距离地球最近(~0.2 AU且当前准卫星动力学状态周期内不会超过0.3 AU)、稳定性最高(Lyapunov time接近7 500 a)

的一颗地球准卫星^[29]。2016 HO₃实际是一颗轨道半长径与地球非常接近的小天体, 因此其日心轨道角速度与地球相当。这颗准地球卫星距地球的距离大约在0.1~0.3 AU, 对地面测控要求相对较低, 转移轨道需要的能量也相对较小, 这是探测该小行星的两个优点, 适合就位探测和采样返回探测。

主带彗星311P/PANSTARRS[P/2013 P5 (PANSTARRS)]最初由美国“泛星计划”望远镜(Pan-STARRS)于2013年8月发现。311P的轨道位于主带内侧, 发现时观测到其具有与彗星相似的多条尘埃喷发尾迹, 目前的模型认为其可能是食双星系统(Eclipsing Binary)。研究表明, 在2013年4月15日(距离太阳2.304 AU)—2013年12月26日(距离太阳1.989 AU)的近9个月时间内, 311P共发生了9次尘埃喷发事件, 分别间隔数个星期到数月不等^[30]。开展311P的绕飞探测, 有望回答主带彗星的诸多科学问题。

2.2 科学目标

以飞越、伴飞、附着、采样返回等方式, 对目标小天体进行整体性遥感探测、局部区域就位探测和采样返回, 开展目标小天体形成与演化、轨道动力学演变, 以及返回样品与陨石、地面观测与遥感就位探测数据之间的关联性研究。

1) 近地小行星探测科学目标

(1) 测定2016 HO₃轨道参数、自转参数、形状大小和热辐射等物理参数, 研究地球准卫星的来源和轨道动力学演化。

(2) 探测2016 HO₃形貌、表面物质组分、内部结构, 获取小行星样品的背景信息。

(3) 对2016 HO₃返回样品, 开展实验室分析研究, 测定小行星样品的物理性质、化学与矿物成分、同位素组成和结构构造, 为小行星的起源与演化、早期太阳系的形成与演化过程提供科学依据; 测定和研究小行星样品的年龄, 研究小行星的吸积形成、撞击分裂和行星际空间的运行历史; 与陨石进行比较研究, 建立返回样品与陨石、地面观测与遥感就位分析数据之间的联系, 拓展、丰富小行星和太阳系起源与演化的研究。

2) 主带彗星探测科学目标

(1) 测定主带彗星311P的轨道参数、自转参数、形状大小和热辐射等物理参数, 研究主带彗星的轨道及其动力学演化;

(2) 探测主带彗星311P形貌、表面物质组分、内部结构、临近空间环境, 以及可能的水和有机物等信息, 获取太阳系早期演化信息, 研究主带彗星的形成和演化、气体活动机制, 为太阳系起源与演化提供重

要线索。

2.3 科学研究内容

从解决小行星探测主要的科学问题出发, 围绕近地小行星和主带彗星探测科学目标, 中国小行星探测任务设计了“认知小天体、解密小天体, 追溯小天体的前世和今生, 探索生命和地球水的起源, 揭示太阳对小天体的影响, 以及探究小天体对地球的危害”等5大类科学目标, 29项科学研究内容(见表2), 以期取得创新性研究成果。

表2 小行星探测科学研究内容

Table 2 Scientific research content of asteroid explorations

序号	科学目标	科学研究内容
1		近地小行星2016 HO ₃ 表面精细形貌研究
2		近地小行星2016 HO ₃ 表面物质成分研究
3		近地小行星2016HO ₃ 表面物质的热物理性质研究
4	(一) 认	近地小行星2016HO ₃ 内部结构研究
5	知小天	小行星返回样品光谱特征数据库构建与研究
6	体、解密	主带彗星311P表面精细形貌研究
7	小天体	主带彗星311P表面物质成分研究
8		主带彗星311P表面物质的热物理性质研究
9		主带彗星311P表面物质的形成机制研究
10		主带彗星311P内部结构研究
11		小行星返回样品岩石学 and 同位素年代学研究
12	(二) 追	利用返回样品开展2016HO ₃ 小行星与地球亲缘关系研究
13	溯小天体	建立陨石和小行星之间的直接联系
14	的前世和	小行星2016HO ₃ 返回样品的金属同位素研究
15	今生	小行星返回样品稀有气体同位素研究
16		利用主带彗星尘埃对太阳系吸积过程的研究
17		小行星2016HO ₃ 返回样品有机物研究
18	(三) 探	小行星返回样品的挥发分研究
19	索生命和	主带彗星水特征及其成因分析
20	地球水的	主带彗星有机物特征及其成因研究
21	起源	主带彗星含水矿物研究
22		主带彗星挥发分特征及其成因分析
23	(四) 揭	太阳风和小天体表面物质的相互作用研究
24	示太阳对	磁化或非磁化小尺度星体对太阳风扰动的研究
25	小天体的	主带彗星微磁层研究
26	影响	小行星和主带彗星周边粒子特性研究
27		飞行路径上太阳风动力学演化过程研究
28	(五) 探	基于多源数据的小行星精密定轨方法研究
29	究小天体	类2016HO ₃ 小行星轨道长期演化与雅科夫斯基效应影响机理研究
	对地球的危害	

2.4 有效载荷配置和技术指标

为完成上述科学目标和科学研究内容, “天问二号”任务配置了可见红外成像光谱仪、热辐射光谱仪、多光谱相机、中视场彩色相机、探测雷达、磁强计、带电粒子与中性粒子分析仪、喷发物分析仪、窄视场导航敏感器和激光一体化导航敏感器等10种有效载

荷,其中窄视场导航敏感器和激光一体化导航敏感器为工程导航和科学探测复用仪器,共同完成既定的科

学探测任务。有效载荷的主要功能、主要技术指标和预期实现的科学目标如表3所示。

表3 有效载荷探测任务和技术指标
Table 3 Payload detection tasks and technical specifications

序号	有效载荷	主要功能	性能指标	预期可实现的科学目标
1	可见红外成像光谱仪	1) 获取小行星表面可见至红外谱段高分辨率成像光谱数据 2) 对小行星采样区进行近距离探测,获取表面兴趣位置的可见至近红外的高分辨率光谱数据	光谱范围: 优于0.45~4.50 μm 谱段数: 不少于500个 像元分辨率: 优于0.5 m@轨道高度3 km 在目标反射率0.2, 太阳高度角30°时, 图像信噪比 ≥ 40 dB	探测小行星和主带彗星的表面物质成分、可能的水和有机物等, 获取小行星样品的背景信息
2	热辐射光谱仪	1) 获取小行星表面热辐射的光谱图像信息, 探测小行星表面热辐射特性, 用于亚尔科夫斯基效应研究 2) 获取小行星热辐射光谱数据, 用于表面矿物质分布研究	光谱范围: 优于5.0~50.0 μm 光谱分辨率: 优于10 /cm 谱段数: 不少于100 探测单元角分辨率: 优于3.3 mrad 像元分辨率: 优于15 m@轨道高度3 km	探测小行星和主带彗星的表面物质成分、可能的水和有机物等, 以及热辐射物理特性, 获取小行星样品的背景信息
3	多光谱相机	1) 对小行星进行多光谱成像, 用于表面形貌和物质类型研究 2) 对采样区进行特定谱段的光谱探测, 为样品采集提供背景信息, 并辅助采样目标选择	光谱范围: 优于480~1 000 nm 谱段数: 不少于8个 视场角: 不小于6°×6° 有效像元数量: 不小于2 048×2 048 成像距离: 满足0.5 m~ ∞	探测小行星和主带彗星的形貌、表面物质成分, 获取小行星样品的背景信息
4	中视场彩色相机	对小行星进行全球成像, 获得形状、大小、表面形貌、自转周期等特征	波段范围: 优于0.45~0.76 μm 成像距离: 4 m~ ∞ 像元分辨率: 优于0.3 m@轨道高度3 km	测定小行星和主带彗星的自转参数、形状大小等物理参数, 探测小行星和主带彗星的形貌
5	探测雷达	获取小行星表层和次表层雷达回波数据, 开展小行星次表层结构探测	低频通道中心频率150 MHz \pm 500 kHz, 工作带宽 ≥ 40 MHz 高频通道中心频率900 MHz \pm 500 kHz, 工作带宽 ≥ 1.2 GHz 轨道高度600 m, 介电常数实部9, 损耗正切0.01情况下, 低频通道探测深度大于35 m, 高频通道探测深度大于5 m	探测小行星及主带彗星的内部结构
6	磁强计	1) 对小行星磁场探测, 获取小行星可能的磁场分布数据 2) 对主带彗星磁场探测, 了解主带彗星本体剩磁强度和分布	最大量程: 不小于 ± 65 000 nT 测量动态范围: 不小于2 000 nT 分辨率: 优于0.01 nT 噪声水平: 优于0.01 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 零漂: 优于0.01 nT/°C	探测小行星和主带彗星的临近空间环境信息
7	带电粒子与中性粒子分析仪	1) 对主带彗星附近中性气体成分及其同位素、冷等离子体离子及其同位素测量, 结合尘埃颗粒环境测量, 研究主带彗星大气层和电离层形成与演化、主带彗星的活动性驱动力起源和机制 2) 对主带彗星和小行星等离子体环境测量, 结合空间磁场测量, 研究太阳风与小行星的相互作用	中性大气和电离层离子成分的质量数范围: 不小于1~150 amu 离子的能量范围: 不小于5 eV~30 keV 电子的能量范围: 不小于5 eV~10 keV	探测小行星和主带彗星临近空间环境信息
8	喷发物分析仪	探测主带彗星的尘埃物理、动态特性及其空间分布特征, 主带彗星挥发分及游离气体分子的特征	挥发分质量数范围: 不小于1~150 amu 挥发分测量灵敏度: 优于10 ⁻⁴ 计数/s/(1/cm ³) 探测的尘埃颗粒质量范围: 不小于1×10 ⁻¹⁰ ~4×10 ⁻¹ g 尘埃通量范围: $\geq 6 \times 10^{-13}$ g/cm ² ·s 尘埃累积质量: 1×10 ⁻⁹ ~3×10 ⁻⁴ g/cm ²	探测主带彗星尘埃粒子大小、质量、速度等物理特性, 以及可能的气体分子种类和含量
9	窄视场导航敏感器	对小行星/主带彗星进行成像, 获得小行星/主带彗星的形状、大小、表面形貌、自转特性及轨道等特征	光谱范围: 450~800 nm(全色), 窄带光谱不少于5个 角分辨率: ≤ 8 μrad 对角线视场: 2.9° 探测灵敏度: >10星等(积分时间100 ms)	测定小行星和主带彗星的自转参数、形状大小等物理参数, 探测小行星和主带彗星的形貌, 获取小行星样品的背景信息
10	激光一体化导航敏感器	实现小天体地形三维点云扫描, 获取测距、测速及位姿测量数据	测量距离: 600 m(反射率0.2) 视场: 不小于6°×6.5° 测距精度: ≤ 3 cm(3 σ)@300 m 成像水平分辨率: 3 cm@300 m	探测小行星采样区的形貌, 获取小行星样品的背景信息

3 “天问二号”探测特点分析

中国“天问二号”探测任务在国际上首次选择地球准卫星和主带彗星为探测对象,具有鲜明的特色。

地球准卫星是地球共轨天体3种动力学状态之一,是最稀有的一种共轨状态。截至目前,地球共轨小行星中,准卫星只发现了5颗。2016 HO₃是最近被认证的地球准卫星,对其轨道和自身各种特性的了解十分缺乏。在国际上首次对其进行热辐射测量、表面测绘、成分分析和内部结构探测,可获知目标小天体的热辐射状态、表面特征、成分和密度等一手探测数据,进而对研究其来源给出更全面、准确的约束,将有可能回答地球准卫星的起源等重要科学问题;同时,可在小行星的约普效应和亚尔科夫斯基效应以及小行星动力学演化规律等方面取得创新性研究成果。对获取的2016 HO₃样品开展实验室精细分析,在其类型、成因以及对太阳系演化和生命前期有机化合物的形成等科学问题研究方面,将取得创新性成果。

主带彗星兼具小行星和彗星的部分特性,目前已经观测到的主带彗星只有15颗。在国际上首次开展主带彗星311P探测,有望在主带彗星的起源和形成、主带彗星的挥发分成分、主带彗星气体活动机制、非活跃期主带彗星的特性、临近空间环境,以及主带彗星与其它彗星、小行星之间的关系等研究方面获得原创性的科学成果。

4 结 论

本文主要总结了30多年来国际小行星探测的历程和关注的主要科学问题,结合“天问二号”工程实施方案,提出了中国小行星探测任务的科学目标,并给出了相应的有效载荷配置。

致 谢

感谢“天问二号”工程实施方案论证组成员和专家提供的意见和建议。

参 考 文 献

- [1] 国家标准化管理局. 空间科学及其应用术语 第4部分: 月球与行星科学. GB/T 30114.4-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [2] 中国科学院科技战略咨询研究院. 2023研究前沿 [EB/OL]. (2023-11-28)[2023-12-11]. <http://www.casisd.cn/zkcg/zxcg/202311/P020240105542012235470.pdf>.
- [3] VEVERKA J, BELTON M, KLAASEN K, et al. Galileo's encounter with 951 Gaspra: overview[J]. *Icarus*, 1999, 107(1): 2-17.
- [4] RAYMAN M D, VARGHESE P, LEHMAN D H, et al. Results from the Deep Space 1 technology validation mission[J]. *Acta Astronautica*, 2000, 47(2-9): 475-487.
- [5] AUSTER H U, RICHTER I, GLASSMEIER K, et al. Magnetic field

investigations during Rosetta's 2867 Steins flyby[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(9): 1124-1128.

- [6] PATZOLD M, ANDERT T P, ASMAR S W, et al. Asteroid 21 lutetia: low Mass, high density[J]. *Science*, 2011, 334(6055): 491-492.
- [7] ZOU X D, LI C L, LIU J J, et al. The preliminary analysis of the 4179 Toutatis snapshots of the Chang'E-2 flyby[J]. *Icarus*, 2014, 229: 348-354.
- [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] RUSSELL C T, RAYMOND C A. The Dawn mission to Vesta and Ceres[J]. *Space Science Reviews*, 2011(163): 3-23.
- [10] GLASSMEIER K H, BOEHNHARDT H, KOSCHNY D, et al. The Rosetta mission: flying towards the origin of the solar system[J]. *Space Science Reviews*, 2007(128): 1-21.
- [11] AKIRA F. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa[J]. *Science*, 2006, 312(5778): 1330-1334.
- [12] YUICHI T, MAKOTO Y, MASANAO A, et al. System design of the Hayabusa 2 asteroid sample return mission to 1999 JU3[J]. *Acta Astronautica*, 2013(91): 356-362.
- [13] LAURETTA D S, BALRAM-KNUTSON S S, BESHORE E, et al. OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Benu[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212: 925-984.
- [14] 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(中英文)*, 2019, 6(5): 424-436.
- LI C L, LIU J J, YAN W, et al. Overview of scientific objectives for minor planets exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 424-436.
- [15] 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): 107-114.
- XU W B, ZHAO H B. Deep space exploration of asteroid: the science perspectives[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(11): 107-114.
- [16] NASA. NSSDC master catalog: spacecraft-NEAR shoemaker [EB/OL]. (2019-04-21)[2023-12-11]. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1996-008A>.
- [17] NASA. Solar system exploration: hayabusa [EB/OL]. (2019-04-21)[2023-12-11]. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/hayabusa/in-depth/>.
- [18] ESA. Science & technology: Rosetta [EB/OL]. (2019-09-01)[2023-12-11]. <https://sci.esa.int/web/rosetta/-/47366-fact-sheet>.
- [19] JPL NASA. Dawn: mission overview [EB/OL]. (2019-04-21)[2023-12-11]. <https://dawn.jpl.nasa.gov/mission/>.
- [20] NASA. Explorers and heliophysics projects division. OSIRIS-Rex factsheet [R]. USA: NASA, 2011.
- [21] 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.
- [22] RUMFORD T E. Demonstration of autonomous rendezvous technology (DART) project summary[C]//Proceedings of SPIE 5088, Space Systems Technology and Operations. [S. l.]: SPIE, 2003.
- [23] SWRI. Lucy mission overview[EB/OL]. (2018-06-25)[2023-12-11]. <http://lucy.swri.edu/mission/Overview.html>.
- [24] NASA. Solar system exploration: in depth Psyche mission[EB/OL]. (2023-01-03)[2023-12-11]. https://www.nasa.gov/mission_pages/psyche/overview/index.html.

- [25] International Astronomical Union. Minor planet center: latest published data [EB/OL]. (2022-12-31)[2023-12-11]. <https://www.minorplanetcenter.net/mpc/summary>.
- [26] HSIEH H H, JEWITT D. A population of comets in the main asteroid belt[J]. *Science*, 2006, 312(5773): 561-563.
- [27] REDDY V, KUHN O, THIROUIN A, et al. Ground-based characterization of Earth quasi satellite (469219) 2016HO₃ [C]//Proceedings of American Astronomical Society, DPS Meeting. USA: AIAA, 2017.
- [28] WARNER B D, HARRIS A W, PRAVEC P. The asteroid lightcurve database[J]. *Icarus*, 2009, 202(1): 134-146.
- [29] MARCOS C F, MARCOS R F. Asteroid (469219) 2016 HO₃, the smallest and closest Earth quasi-satellite[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 462(4): 3441-3456.
- [30] JEWITT D, WEAVER H, MUTCHLER M, et al. The nucleus of active asteroid 311P/(2013 P5) PANSTARRS[J]. *The Astronomical Journal*, 2018(155): 231.

作者简介:

李春来(1965-)男,研究员,主要研究方向:深空探测、行星科学等。

本文通信作者。

通信地址:北京朝阳区大屯路甲20号(100101)

电话:(010)64888708

E-mail: licl@nao.cas.cn

Scientific Objectives and Payloads Configuration of the Tianwen-2 Mission

LI Chunlai^{1,2}, LIU Jianjun^{1,2}, REN Xin^{1,2}, YAN Wei^{1,2}, ZHANG Zhoubin^{1,2},
LI Haiying^{1,2}, OUYANG Ziyuan¹

(1. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In this paper, scientific objectives and payloads configuration of international asteroid exploration missions in the past three decades were reviewed. On the basis of summarizing the main scientific questions of asteroid exploration, the selection of detection objects, scientific objectives and payloads configuration of China's asteroid exploration project, which named Tianwen-2 mission were discussed. Focusing on the realization of scientific objectives, corresponding scientific research contents and payload technical specifications were proposed.

Keywords: Tianwen-2; asteroid exploration; scientific objectives; payloads

Highlights:

- Asteroid exploration was a new development direction for space explorations in the Solar system and an important research field for exploring the origin of the solar system.
- With the experience of the successful implementation of lunar and Mars exploration projects, China's Tianwen-2 asteroid exploration mission has the advantage of a high starting point.
- The selection of detection objects, scientific objectives and payloads configuration of Tianwen-2 mission were discussed.
- Tianwen-2 mission is the first in the world to choose Earth quasi-satellites and main-belt comets as exploration objects, which was a distinctive characteristic

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]