

国际行星保护发展综述

张轶男¹, 彭兢², 邹乐洋², 徐侃彦³

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 3. 航天神舟生物科技集团有限公司, 北京 100094)

摘要: 首先介绍了行星保护的定义, 然后回顾了国际行星保护政策的提出和演化过程, 给出了当前国际行星保护政策针对不同目标和任务形式的最新要求, 简要介绍了美、欧、日、俄和印度等世界各主要航天国家/机构在行星保护方面的管理制度和实施情况等发展现状, 对行星保护实施过程中的主要技术途径进行了分析, 最后介绍了行星保护领域的最新进展, 并提出了思考和建议。

关键词: 行星保护; 深空探测; COSPAR

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)01-0003-06

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.01.001

引用格式: 张轶男, 彭兢, 邹乐洋, 等. 国际行星保护发展综述[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 3-8.

Reference format: ZHANG Y N, PENG J, ZOU L Y, et al. An overview of planetary protection development[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 3-8.

引言

在人类空间探测的众多目标中, 最重要的问题之一是回答生命的起源演化和地外天体是否存在生命。为了回答这一问题, 人类开展了大量的深空探测活动。据不完全统计, 迄今为止人类已发射各类深空探测任务超过250次。在这些深空探测任务中, 有的探测对象曾经被认为可能存在生命, 例如月球等; 有的探测对象至今仍有可能存在生命, 如火星、木卫二和土卫二^[1-2]。在针对这些天体的探测活动中, 无论其任务目标是否包括探测生命及其相关物质, 都应采取必要的措施, 避免地球上的微生物污染天体, 使相关探测得到错误结果, 或影响后续的生命探测任务。与此同时, 自载人登月时代起, 人类就开始策划实施火星采样返回等地外天体采样返回任务, 在实施这类任务时, 如何避免从地外天体返回的物质危及地球生物圈的安全, 也备受关注。为了避免以上两种情况, 在深空探测任务研制和实施过程中, 应采取措施, 避免地球和其他天体之间出现交叉生物污染, 这也就是所谓的行星保护。

1 行星保护的定义

所谓行星保护, 是指: 在开展深空探测时, 应避免地球和地外天体间出现交叉生物污染, 即地球生命污染其它天体, 或从其它天体返回的生命污染地球

生物圈。

行星保护一般包括两方面要求:

- 1) 正向防护: 保护被探测天体的自然状态, 避免探测结果被污染、甚至影响后续生命探测活动。
- 2) 逆向防护: 避免从地外天体带回的物质污染地球, 危及地球生物圈^[3]。

2 行星保护国际政策

1957年前苏联发射第一颗人造卫星后, 1958年国际科学联合会理事会(ICSU)发起成立了宇宙探测污染委员会(CETEX)和空间研究委员会(COSPAR)等机构。

CETEX提出需要保护地外生命体, 并陈述了4项基本原则: ①对地外生命体探索的自由必须符合行星检疫要求; ②公开COSPAR相关活动和实验信息; ③开展实验需科学数据支持; ④不应在地球附近天体进行核爆。

COSPAR的宗旨是在国际范围内通过学术交流和组织实施国际研究项目, 促进以卫星、飞船、火箭、深空探测器、高空气球等为手段的科学研究。COSPAR有7个科学小组, 其中第7组为“行星保护”分委会, 主要在政策和技术层面提出行星保护的意见建议。中国于1993年3月正式加入该组织。

1967年, 联合国发布了《关于各国探索和利用包括月球和其他天体在内外层空间活动的原则条约》

(简称《外层空间条约/外太空条约》), 该条约1967年1月27日开放供签署, 1967年10月10日生效。我国于1983年签署该条约, 自1983年12月30日起生效。

《外层空间条约》第九条中规定: “各缔约国探索和利用外层空间(包括月球和其他天体), 应以合作和互助原则为准则; 各缔约国在外层空间(包括月球和其他天体)所进行的一切活动, 应妥善照顾其他缔约国的同等利益。各缔约国从事研究、探索外层空间(包括月球和其他天体)时, 应避免使其遭受有害的污染, 以及地球以外的物质, 使地球环境发生不利的变化”^[4]。

在联合国领导下, COSPAR开始制定行星保护的

有关国际政策。1964年, COSPAR咨询委员会以决议的形式出版了行星检疫要求, 即最早的行星保护政策草案, 其中要求: 探测器应采用灭菌技术, 将地外天体探测活动中地球生物污染的可能性降低到 1×10^{-4} ; 对未灭菌的低空飞越或在轨探测器, 污染概率应小于 3×10^{-5} ^[5]。1984年, COSPAR针对不同的探测对象和任务形式, 将行星保护需求划分为5类, 规定了不同类别任务的具体要求。此后, COSPAR不断发展和完善国际行星保护政策, 目前每2年更新一次。

2017年12月发布的最新版COSPAR行星保护国际政策, 具体规定如表1~2所示^[6]。

表1 行星保护任务的类别定义

Table 1 Definition of planetary protection categories in COSPAR planetary protection policy

类别	定义	任务形式	目标天体
I	对目标星球探索的直接目标不是了解生命的起源或化学演化的过程, 对以这些星球为目标星球的轨道飞行器或着陆器, 不需要实施行星保护要求。	飞越、环绕、着陆	金星、未分化的小行星
II	对星球探索的目标是为了了解生命的起源或化学演化的过程, 但由航天器造成的污染机会非常小, 不会对未来的探索计划造成危害。	飞越、环绕、着陆	彗星、月球、木星、土星、天王星、海王星、冥王星及其卫星和柯伊伯带天体
III	明确任务目标是对目标星球的生命起源或化学演化的过程进行探索, 或者科学家认为航天器会造成污染的机会较大, 从而危害未来生物学实验。	飞越、环绕	火星、木卫二、土卫二
IV	明确任务目的是对目标星球的生命起源或化学演化的过程进行探索, 或者科学家认为航天器会造成污染的机会较大, 从而危害未来生物学实验。	着陆	火星、木卫二、土卫二
V	所有执行返回任务的航天器, 重点关注保护地球和月球。	采样返回地球	限制返回: 火星、木卫二 无限制返回: 月球等其他天体

注: 其中火星IV类任务中又分为3个子类。IVa类为不研究火星生命的着陆任务; IVb类为研究火星生命的着陆任务; IVc类为到达火星特定区域的着陆任务。

表2 5类任务的行星保护任务政策性要求

Table 2 Requirements for five categories in COSPAR planetary protection policy

类别	重点关注	典型保护措施
I	不关注	无
II	记录受控撞击概率和污染控制措施	简要记录: 行星保护计划; 发射前报告; 发射后报告; 与天体相遇后的报告; 任务终止后报告。
III	限定撞击概率被动生物负荷控制	①详细记录(在II类任务措施基础上增加): 污染控制; 含有有机物的设备。 ②任务实施过程: 轨迹偏转; 洁净间; 生物负荷减缓。
IV	限定非正常撞击概率限定生物负荷(主动控制)	①详细记录(在II类任务措施基础上增加): 污染概率分析计划; 微生物减缓计划; 微生物评估计划; 含有有机物的设备。 ②任务实施过程: 轨迹偏转; 洁净间; 生物负荷减缓; 部分接触硬件净化; 生物防护罩; 生物负荷监测。
V	对限制返回: ①不得撞击地球或月球; ②净化返回硬件; ③不得污染样品。	①目标天体保护: 取决于目标天体和任务形式, 同上。 ②返回保护: a. 限制返回: 详细记录(在II类任务措施基础上增加): 污染概率分析计划; 微生物减缓计划; 微生物评估计划; 任务实施过程: 轨迹偏转、净化或密封返回地球的硬件、持续监测项目进展、相关研究活动。 b. 无限制返回: 无。

COSPAR建议: 在制定行星保护需求时, 世界各国的COSPAR委员们应告知COSPAR, 并在合理的时间向COSPAR提供任务行星保护的流程等信息, 并在有可能存在污染风险的深空探测任务结束后的1年内, 再次提供相关信息。COSPAR将向大众公布这些报告, 每年向联合国秘书长提交报告记录。针对国际合

作深空探测任务, 建议由牵头国组织提交这些报告。COSPAR制定的国际行星保护政策要求, 用于指导各国/地区航天机构在深空探测任务中开展行星保护。

3 国际行星保护发展概况

在深空探测任务的研制和执行过程中, 美欧等国

航天机构均严格遵守了行星保护的政策法规，并建立了各自的行星保护技术和管理体系，通过实行星保护，积累了丰富的经验，具有一定的技术基础。

3.1 美国行星保护现状

美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）是目前在行星保护研究方面最为规范的航天机构。NASA在成立之初就十分重视行星保护工作（见图1），1959年在喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory, JPL）成立了生物学研究办公室，后来发展为隶属于NASA总部的行星保护办公室，设立了行星保护官，专门负责行星保护技术与规范制定，审批各项深空探测任务的行星保护计划，并对全周期行星保护措施的落实情况进行监督审查。行星保护官直接向3个主管副局长之一汇报工作。

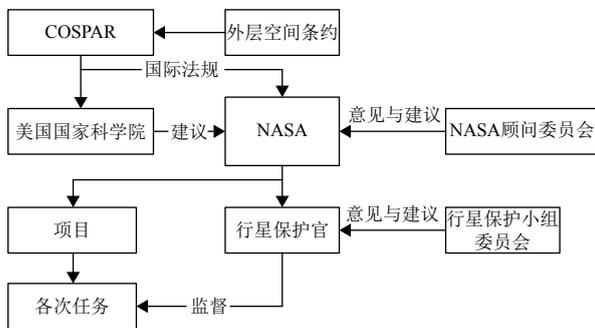


图1 NASA行星保护管理体系框架

Fig. 1 Framework of NASA planetary protection management

NASA有明确的行星保护技术体系，发布了《航天器内外部生物污染控制》等一系列标准规范，并针对不同类型的任务细化了不同的行星保护技术和管理要求，在航天器的飞行轨迹设计、单机设备研制、总装与测试等过程中，均对行星保护措施的落实情况进行严格的监督审查。

1959年美国在月球探测“徘徊者”（Ranger）系列任务中实行星保护；1975年发射的“海盗号”（Viking）最为严格，甚至占探测器的总研制经费近25%^[7]；近年来执行的火星探测（环绕/着陆/巡视）、木星和土星探测等任务中，均严密策划、严格执行COSPAP和NASA自身的行星保护政策、法规和各项管理制度^[8-10]。在最新NASA系统工程手册中，明确了开展行星保护的基本原则^[11]，并要求每个深空探测的项目执行情况都应通过COSPAP向联合国汇报。

NASA建立了行星保护网站，相关政策和标准均可以在其行星保护网站中查到^[12]。

3.2 欧洲行星保护现状

欧洲空间局（European Space Agency, ESA）有

规范的行星保护制度^[13]。在向ESA局长汇报的质量/产保部门中，设置独立的行星保护办公室，监督ESA各项任务研制过程中行星保护的执行情况。ESA规定：在每个深空探测任务顶层需求中必须明确行星保护具体需求，并在研制/出厂总结中报告研制情况；每个项目应设置行星保护负责人，直接向项目经理负责。

ESA在开展火星探测的过程中，十分重视行星保护工作。无论是“火星快车”（Mars Express）/“猎兔犬2号”（Beagle 2）^[14]、还是2016年发射的“火星生物学”2016（ExoMars2016）任务中，均对微生物总量、探测器撞击火星概率、探测器研制和发射前AIT过程的微生物检测和消杀等提出了严格的要求。其任务实施结果符合COSPAP国际行星保护政策的要求。

此外，ESA和NASA共同约定，只和执行国际行星保护规定的组织机构开展深空探测合作。ESA的火星、彗星和小行星探测等任务均严格要求实行星保护。

3.3 日本行星保护现状

日本的深空探测始于20世纪80年代。早在第一个火星探测任务“希望号”（Nozomi, 1998年）任务中，就开始了行星保护实践。在后来的“隼鸟”小行星采样返回探测任务中，也按照COSPAP的国际行星保护政策要求开展工作。近年来，日本宇宙航空研究开发机构（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）组织和参与的深空探测任务不断增多，逐步建立了行星保护机制，其框架见图2。

3.4 俄罗斯行星保护现状

苏联/俄罗斯在早期的火星、金星探测活动中，均开展了有特色的行星保护研究工作，但公开披露资料较少^[7]。俄罗斯近年来多和ESA合作开展深空探测，如“火星生物学”2016和2020等火星探测任务；其欧洲合作伙伴声称：俄方按要求开展了行星保护。

俄航局目前尚无专门的行星保护办公室等管理机构和管理制度。

3.5 印度行星保护现状

印度空间研究机构（Indian Space Research Organisation, ISRO）目前尚无专门的行星保护办公室等机构和相应的管理制度。

印度已实施火星环绕探测，但国际上对其行星保护执行情况了解不多，大多数欧美行星保护专家都对印度的行星保护现状存疑。

4 行星保护技术分析

行星保护的目的是对地外天体实施泛环保主

义, 而是保护人类开展地外生命探测的科学结果, 确保空间生命探测活动的有效性; 同时也要包括保护地球的生态系统。因此, 行星保护既是深空探测任务的内在需求, 又是确保实现探测目标的必要手段。

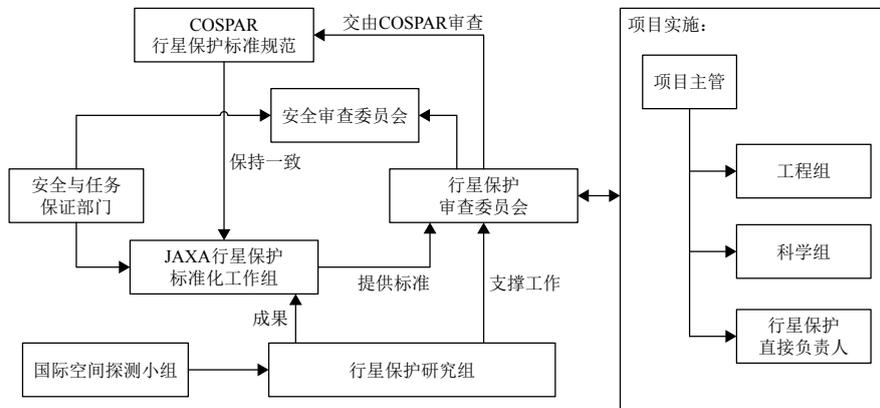


图2 JAXA行星保护管理体系框架

Fig. 2 Framework of JAXA planetary protection management

通过分析国外深空探测行星保护实践的历史, 不难看出, 在实施深空探测任务的过程中, 实行星保护的具体技术手段主要包括:

1) 任务分析和需求确定: 依据行星保护国际政策, 结合每个深空探测任务的具体设计, 如任务目标、飞行轨道、飞行过程等, 确定行星保护的总需求; 并将总需求合理分配到单机、探测器系统总体、飞行轨道、飞行程序等各方面, 最终确保在一定时间内(如50年)对特定目标天体的污染概率达到要求。

2) 开发适应深空探测任务研制过程的微生物检测和消杀技术^[15]: 基于生物医药和食品工业等相关领域的技术基础, 识别研制过程中重点关注的微生物(例如嗜极微生物)^[16-17], 开发或改进既能适应飞行器材料、又不影响单机/部组件/系统功能性能的特定微生物检测和消杀技术, 例如培养法检测技术和分子生物学检测技术^[18-19], 物理消杀技术和干热灭菌技术等^[20-21], 形成能够适应多种不同需求的微生物检测和消杀技术体系, 满足不同任务的行星保护需求。

3) 行星保护关键单机研制: 包括研制行星保护专用设备和关键单机; 例如能将火星进入/着陆器整器或关键设备包裹起来的生物防护罩^[22], 在AIT和发射前将净化后的探测器整器/部组件/关键单机/零件保护起来, 到达火星轨道或在火星表面软着陆后再打开; 针对探测地外生命及其相关物质的关键有效载荷或单机, 在研制过程中应设计专门的密封空间或结构, 并经过微生物消杀处理, 使得关键单机在交付整器前不被地球生物污染^[23]。

行星保护技术是基础科学和工程技术的有机结合, 是在对地球/地外天体生命科学认知的基础上, 采取必要、合理的技术手段, 确保空间探测活动有序进行, 从而获得可靠的科学探测成果。

4) 控制航天器总装、集成和测试(Assembly Integration and Test, AIT)过程控制: 在符合要求的单机交付后, 在深空探测器AIT和发射前与运载火箭的联合操作过程中, 应在符合微生物控制要求的洁净环境中进行操作, 同时对接触飞行产品的人、工具、操作流程等各方面提出具体的措施, 确保经过消杀后的深空探测器飞行产品在发射前所携带的微生物总量符合预定的要求^[11]。

5) 发射后的飞行控制: 针对具体的任务形式和飞行轨道, 分析不应撞击目标天体的飞行器的撞击概率, 合理设计飞行轨道, 确保在足够长的时间内撞击概率小于给定值; 对于可能/必然进入火星大气等目标天体大气的飞行器或部组件, 分析完全烧蚀和裂解的可能性, 这一过程可以将外露表面的残留微生物杀死, 但内部则不一定; 深空探测器发射后, 所经历的空间环境和时间将会对其微生物总量产生影响, 通过分析和设计, 可以选择适当的飞控措施, 降低污染概率^[9]。

5 最新进展和思考

进入21世纪以来, 人类探索地外天体的脚步不断加快, 越来越多的国家开始涉足深空探测。特别是在火星探测方面, 除了20世纪起就发射超过30次火星探测任务的美国和俄罗斯, 欧洲和印度也分别发射了火星探测器。根据统计, 2000年后人类共发射了12次火星探测任务, 是新世纪深空探测中探测次数最多的目标。与此同时, 美国和俄罗斯都提出了火星采样返回的梦想, 欧洲虽然没有独立的火星采样返回计划, 但

一直致力于和美国等国家开展国际合作实现火星采样返回。除了传统航天国家/地区政府支持的深空探测任务,蓬勃发展的私人商业航天也开始涉足深空探测,2018年2月,SpaceX公司将一辆特斯拉跑车送入了穿越火星的轨道,但发射前并未实行星保护,这甚至在美国国内引发了行星保护专家的质疑——目前,美国只有NASA致力于行星保护,没有针对商业航天的行星保护管理制度和政府机构。

作为深空探测的热点目标,火星是目前行星保护重点关注的主要天体之一。面对新的形势,行星保护的国内政策和具体实施面临新的挑战。2016年美国国家科学院(National Academy of Science)的空间研究理事会(Space Studies Board)组织开展了对国际和国内行星保护政策形成过程和发展情况的研究,并提出了后续的措施和建议^[24]。同年,欧盟“地平线(Horizon)2020”框架下支持开展了“外太阳系行星保护”(Planetary Protection of Outer Solar System)项目研究工作,针对火星以远的木星和土星冰卫星中可能存在液态海洋和生命的木卫二、木卫三和土卫六等天体探测的行星保护开展研究。

在当前深空探测领域的新形势下,行星保护方面出现了一些新的问题,例如:如何确保行星保护政策的要求合理可行,使得科学需求和工程可实现性达到合理的平衡;如何确保对每个任务行星保护实施效果的评价是客观的:以NASA为例,行星保护办公室既是政策的制定和监督者,同时又是政策的实施者,其责任存在矛盾之处;如何确保行星保护能够覆盖正在兴起的商业航天活动;目前国际上每2年甚至更长时间修订一次国际行星保护政策,随着探测目标不断扩大,探测方式不断多样化,如何建立快速响应的行星保护政策形成机制;随着探测能力的增强和科学认知的深化,行星保护政策正在逐渐放宽,原有的行星保护中对保护的时间要求设定是否合理,如何做到与时俱进;如何改变当前以美国为主制定国际行星保护政策现状,促成更多国家和机构参与,从而确保人类的深空探测活动总体上符合行星保护的基本原则和要求等等。针对以上问题,如何修订和完善行星保护的国内政策、明确各航天国家和机构(包括商业航天企业)的配套制度和实施过程,才能更有效地确保未来的深空探测活动符合行星保护的政策要求,从而保护未来的科学成果,这值得每一个国家行星保护责任机构和相关专家学者进一步研究,也值得每一位正在或将要致力于深空探索的工程师深入思考。

参 考 文 献

- [1] EHRENFREUND P, RUMMEL J, PETER N. COSPAR workshop on planetary protection for outer planet satellites and small solar system bodies[C]//38th COSPAR Scientific Assembly. Bremen, Germany: [s. n.], July 18-15, 2010.
- [2] NADINE G B. Mars: an introduction to its interior, surface and atmosphere [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [3] COSPAR. The COSPAR workshop, planetary protection policy [R]. Houston, Texas: World Space Council, 2011.
- [4] United Nations. RES 2222 (XXI)-1967, the treaty on principles governing the activities of states in the exploration and use of outer space, including the Moon and other celestial bodies [S]. USA: United Nations, 1967.
- [5] COSPAR咨询委员会. 行星检疫要求, COSPAR Information Bulletin No. 20 1964, p. 25-26[R]. [S. 1.]: COSPAR, 1964.
- [6] KMINEK G, CONLEY C, HIPKIN V, et al. COSPAR planetary protection policy[J]. *Space Res Today*, 2017, 200: 12-25.
- [7] MELTZER M. When biospheres collide: a history of NASA's planetary protection programs [M]. Washington, DC, USA: NASA, 2011.
- [8] KAZARIANS G A, BENARDINI J N, STRICKER M C, et al. The Evolution of planetary protection implementation on Mars landed missions [C]//IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: [s. n.], 2017.
- [9] BARENGOLTZ J, WITTE J. Planetary protection implementation on Mars Reconnaissance Orbiter mission[J]. *Adv Sp Res*, 2008, 42(6): 1108-1119.
- [10] DOUGLAS E B, ROBERT D A, JENNIE R J, et al. Europa planetary protection for Juno Jupiter orbiter[J]. *Adv Space Res*, 2013, 52(3): 547-568.
- [11] NASA. NPR 8020.12D-2011, Planetary protection provisions for robotic extraterrestrial missions [S]. USA: NASA.
- [12] NASA. Planetary protection[Z]. USA: NASA, <https://planetaryprotection.nasa.gov/>.
- [13] DEBUS A. The European standard on planetary protection requirements[J]. *Res Microbiol*, 2006, 157(1): 13-8.
- [14] PILLINGER J M, PILLINGER C T, SANCISIFREY S, et al. The microbiology of spacecraft hardware: lessons learned from the planetary protection activities on the Beagle 2 spacecraft[J]. *Res Microbiol*, 2006, 157(1): 19-24.
- [15] BEAUCHAMP P, BELZ A. Assessment of planetary protection and contamination control technologies for future planetary science missions[C]//39th COSPAR Scientific Assembly. Mysore, India: [s. n.], 2012.
- [16] HARRISON J P, GHEERAERT N, TSIGELNITSKIY D, et al. The limits for life under multiple extremes[J]. *Trends Microbiol*, 2013, 21(4): 204-212.
- [17] MOISSEL-EICHINGER C, COCKELL C, RETTBERG P. Venturing into new realms? microorganisms in space[J]. *FEMS Microbiol Rev*, 2016, 40(5): 722-37.
- [18] HENRICKSON, R, LUNDGREN, P, MOHAN, G B M, et al. Comprehensive measurement of microbial burden in nutrient-deprived cleanrooms [C]//47th International Conference on Environmental Systems. Charleston, South Carolina: [s. n.], 2017.

- [19] HUGERTH L W, ANDERSSON A F. Analysing microbial community composition through amplicon sequencing: from sampling to hypothesis testing[J]. *Front Microbiol*, 2017(8): 1561.
- [20] ESA. ECSS-Q-ST-70-57C-2013, Dry heat bioburden reduction for flight hardware [S]. [S. 1.]: ESA, 2013.
- [21] POTTAGE T, MACKEN S, GIRI K, et al. Low-temperature decontamination with hydrogen peroxide or chlorine dioxide for space applications[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2012, 78(12): 4169-4174.
- [22] CORLISS W R. The Viking mission to Mars, NASA SP-334[R]. Washington, DC: NASA, 1974.
- [23] BONITZ R G, SHIRAIISHI L R, MATTHEW A, et al. NASA Mars 2007 phoenix lander robotic arm and icy soil acquisition device[J]. *J. Geophys Res*, 2008, 113: E00A01.
- [24] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). Review and assessment of planetary protection policy development processes [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2018.

作者简介:

张轶男(1978-),女,高级工程师,主要研究方向:航天领域国际合作模式研究、行星保护政策与技术研究。

通信地址:北京市海淀区友谊路104号(100094)

电话:(010)68745637

E-mail: 13911590786@139.com

An Overview of Planetary Protection Development

ZHANG Yinan¹, PENG Jing², ZOU Leyang², XU Kanyan³

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 2. Beijing Institute of Space System Engineering, Beijing 100094, China;
3. Shenzhou Space Biology Science and Technology Corporation, Ltd., Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, the definition of planetary protection and the development of international planetary protection policy are introduced. The latest requirements are updated based on different mission categories. The organizations in ESA, NASA and JAXA involving to the management and supervision of planetary protection are briefly introduced. The main technical roadmap of planetary protection is analyzed.

Key words: planetary protection; technical roadmap; COSPAR

High lights:

- The history, international policy, and requirement of planetary protection are introduced.
- The present situation of planetary protection in NASA, ESA, JAXA and other countries is introduced.
- The technology required by planetary protection is analyzed.
- With the development of commercial space and outer solar system exploration, the new challenge to planetary protection is discussed.

[责任编辑:高莎,英文审校:朱恬]