

国际行星保护政策解读与技术前瞻

徐冲, 辛冰牧, 吴斌, 谢琼

(中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘要: 随着人类空间探测范围的不断拓展, 行星保护成为人类后续深空探测必须要面临的一个重要问题。从行星保护的概念入手, 对其研究背景以及美国、欧洲、俄罗斯等国目前相关的研究进展做了简要介绍, 涉及了政策制定、标准规范、污染防控、技术体系等各个方面。载人深空探测过程中各个环节都可能存在污染源, 必须针对性地开展保护和防护技术研究; 深入研究国际行星保护政策、法规和技术体系, 对于我国后续开展相关研究具有很好的参考和借鉴意义。

关键词: 行星保护; 深空探测; 载人航天; 微生物控制

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)01-0016-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.01.003

引用格式: 徐冲, 辛冰牧, 吴斌, 等. 国际行星保护政策解读与技术前瞻[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 16-22.

Reference format: XU C, XIN B M, WU B, et al. Overview of policy and technology developments of international planetary protection[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 16-22.

引言

深空探测一般指人类对月球及以远的天体或空间环境开展的探测活动。深空探测是人类认识宇宙、拓展生存空间和开发太空资源的伟大实践, 对人类社会的发展将产生深远影响。世界各个航天大国都已经开展了深空探测的研究和实践, 迄今为止, 成功实施的载人深空探测只有美国“阿波罗”登月计划。

行星保护 (Planetary Protection) 是人类开展深空探测活动必须面临的一个重要问题。行星保护是指在宇宙探索过程中避免地球和地外星球之间微生物和生命体的交叉性污染, 主要涉及两个方面: 一是针对正向 (输出性) 污染, 即航天器从地球发射后, 避免将地球上的微生物等生命体带到外星球, 导致科学探测结果受到干扰或误导; 二是针对逆向 (输入性) 污染, 即航天器从地外行星返回后, 避免给地球带来未知风险^[1]。美国、欧洲、俄罗斯等国已经对行星保护技术开展了较为深入的研究, 涉及政策、标准规范、技术体系、污染防控等各个方面。深空探测各个环节都可能出现微生物污染, 行星保护是将上述两类污染发生的概率最小化的做法。

1 国际行星保护政策解读

1.1 行星保护政策的提出和发展

人类探索太空活动伊始, 科学家们就认识到人类探索宇宙的过程应该以保护其自然生态、避免外来污染为前提。1956年, 国际宇航联合会 (International Astronautical Federation, IAF) 罗马大会首次提出了保护行星环境的概念, 并对未来探索中月球和行星环境污染表示了担忧^[2]。1958年, 国际空间研究委员会 (Committee on Space Research, COSPAR) 成立, 这是一个跨多学科的协调各国外太空科研合作的国际性科学组织, 成立之初便十分重视航天飞行与生物污染问题, 并建议美苏两国针对地球生物污染外太空环境开展科学研究^[3]。

1959年, 联合国和平利用外层空间委员会 (Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, COPUOS) 成立, 由其主导推动的《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外层空间活动所应遵守原则的条约》简称《外层空间条约》 (Outer Space Treaty) 于1967年10月10日生效, 该条约是国际空间法的基础, 被称为“空间宪法”。“行星保护”体现在该条约第

IX条，其中规定了“对月球及其它天体的探索，应避免其受到地球生物污染为前提，同时也要避免将外太空的生物引入地球，为此，需有适当的检测手段并采取适当的保护措施”^[4]。无论是无人/机器人或载人太空探索活动，都应最大限度地遵守这一协定。根据《外层空间条约》对行星保护和生物污染防治的统一标准，COSPAR与IAF一起，就与条约有关的事宜向联合国和平利用外层空间委员会提供咨询意见。

美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）行星保护政策与COSPAR政策是一致的，集中体现在NASA政策指令文件NPD 8020.7中^[5]。这一现行政策适用于人类行星际飞行任务，其中也包括了机器人空间探索任务要求。一般来说，行星保护要求取决于探索任务的性质和目标行星种类，对生物进化感兴趣的行星着陆任务将受到最大程度保护。NASA制定的行星保护要求是通过内部和外部咨询团队的建议确定的，但最引人注目的是来自美国国家科学院空间研究委员会的建议，具体要求包括：航天器操作程序的限制，航天器有机物和生物污染清单，减少污染的措施，对于返回任务处理样品的限制等。

NASA行星保护委员会的成立目的是就每一个可

能造成污染危险的发射任务以及每一个样品返回任务的具体要求提供详细的审查和建议。每次任务的详细要求都记录在“行星保护计划”中——这是任务管理人员和行星保护官员之间关于任务如何实现行星保护目标的协定^[1]。

1.2 行星保护任务的分级

2007年，NASA、欧州空间局（European Space Agency, ESA）及其它12个国家的航天机构（俄罗斯、中国、英国、法国、德国、意大利、日本、韩国、印度、乌克兰、澳大利亚和加拿大）成立了国际空间探索协调组织（International Space Exploration Coordination Group, ISECG）。2011年9月，ISECG发布《全球探索路线图》，2013年8月，发布了新版《全球探索路线图》。该路线图明确了分阶段、分步骤探索月球、地月空间（包括拉格朗日点和月球轨道）、近地小行星和火星系统（火星及其卫星）等多个目的地，以及通过“月球优先”和“小行星优先”方案开发和验证了最终载人探索火星所需要的能力。也就是说，这些纳入全球探索路线图的近地小行星、月球、火星系统（火星及其卫星）等将成为行星保护的目的地。

根据目的地和飞行任务的不同（飞越、绕轨飞行、登陆和采集样本），COSPAR对行星保护任务进行了分级（表1）^[6]。

表1 行星保护任务分级

Table 1 Planetary protection categories and planetary targets

目标行星	任务类型 ^a	任务种类 ^b
未分化或已变形的小行星、Io、其它待定星体。	飞越，绕飞，着陆	I
金星、月球、彗星、不在任务类别I中的小行星、木星、土星、天王星、海王星、冥王星、柯伊伯带天体、其它待定星体。	飞越，绕飞，着陆	II
火星、木卫二、土卫二、其它待定星体；IVa适用于不调查现存火星生命或特殊地区的着陆任务，IVb适用于调查现存火星生命的着陆任务，IVc适用于调查火星特殊地区的任务。	飞越，绕飞着陆，探测	III, IV (a~c)
受限制返回地球：火星、木卫二、土卫二、其它待定星体；无限制返回地球：金星、月球、其它待定星体。	返回地球（受限或不受限）	V

注：a. 如果在飞越期间利用重力辅助，则可能需要用于具有最高保护等级的行星的约束；b. 对于瞄准或遇到多个行星的任务，可以定义多个行星保护类别。

I类任务：无生命迹象，对其化学进化和生命起源不感兴趣的星球，没有行星保护的要求。

II类任务：环境恶劣不适合生物生存，航天器的污染影响后续开发的可能性较小，仅需要一个简单的行星保护计划文件。主要内容包括：概述预期或潜在的影响目标；简要分析发射前、发射后的影响策略；总结任务报告，提供发生影响或意外接触的位置等。

III类任务：对其化学进化或生命起源感兴趣的星球，进行发射任务（飞越或者绕轨）可能会带来污染或危及未来生物探测的，要求准备计划文件和具体实

施程序。包括轨迹偏置，航天器装配和测试过程中使用10万级以上洁净室，降低生物载荷。尽管可能不会产生太多影响，还是要对有机物进行封装。

IV类任务：目标星球与III类任务相同，III类任务不接触目标星球，IV类任务要着陆和探测，即对其化学进化或生命起源感兴趣的星球实施特殊发射任务（特别是再入探测器、着陆器、探测车），或者有科学证据表明发射会带来污染，影响未来的生物探测。需要准备更详细的文件，对载荷进行生物监测，分析污染可能性，对有机物进行封存，增加执行程序次

数。可能包括轨迹偏置,飞船的组装和测试过程中要使用10万级以上洁净室,减少微生物的引入,对与目标体直接接触的硬件部分进行局部消毒,甚至对其进行整体消毒。IV类任务又分为不探测火星生命的着陆任务、研究火星生命的着陆任务和到达火星特定区域的探测任务等3个亚类。

V类任务:涉及所有返回地球的航天器及组件,主要目的是保护地球免受来自外星样品(通常是土壤和岩石)返回造成的污染,又分为“无限制返回地球”和“受限制返回地球”,前者是针对没有原住生命形式的太阳系天体定义的,主要包括金星、月球等星体的返回探测任务。后者都是“受限制返回地球”,要求最高等级关注,坚决消除返回产生的破坏性影响,对返回地球的、与目标星球或者与未灭菌的材料直接接触的飞行器,未经灭菌的采集样本都要进行严格控制。如果发现非地球生物体的任何迹象,返回的样本必须接受更严格控制,一律进行有效灭菌处理。V类与IV类任务相比更严,增加了持续的微生物监测、杀菌程序和微生物控制技术的要求。

1.3 火星探索任务行星保护原则

2008年,在加拿大蒙特利尔,COSPAR通过了“关于人类探索火星的行星保护一般原则”^[7],主要内容包括:

1) 保护地球免受潜在的逆向污染是火星探测中行星保护的首要任务。

2) 只有在人类相关污染得到控制和了解的情况下,人类才能对火星的天体生物探测做出更大贡献。

3) 对于执行星体地面操作的着陆任务来说,与人类相关的所有执行过程和任务操作不可能在完全封闭的系统中进行。

4) 探测火星的航天员,或者他们的支持系统,将不可避免地暴露在火星物质中。

基于上述政策要求,国际空间机构可以共同确保避免火星的“有害污染”以及“地球环境因引入外星物质而产生的不利变化”。COSPAR已经开始提出和制定与总体指导方针相一致的相关需求,主要包括如下内容^[8]:

1) 人类深空探测任务将携带种类和数量都不同的微生物种群,在发射时指定允许的微生物种群或潜在污染物数量标准是不切实际的。一旦确定并满足发射基线条件,就需要继续监测和评价人类携带的微生物水平,以解决任务前后污染问题。

2) 任务期间和任务结束后,针对探测过程中可能出现(或不确定)乘员与火星生命形式接触,应为全体飞行乘组实施医学隔离,防止潜在污染扩大。

3) 应制定一项全面的人类探索任务行星保护协议,包括正向和逆向污染问题,并解决任务中人-机诸多方面问题,包括地下勘探、样品处理以及和样品与人员返回地球等。

4) 机器人系统和人类活动都不应该污染火星上的“特殊区域”(COSPAR政策已经定义)。

5) 特征不明的火星地点都应该在航天员进入之前由机器人进行评估,相关信息可以通过预先安排机器人探索任务或人类探索任务中的使用机器人组件获得。

6) 任何来自火星上任何未标记地点或特殊区域的原始样品或取样组件应按照当前行星保护类别V进行处理(受限制返回地球),并有适当的处理和测试协议。

2 深空探测的主要污染环节

按照飞行任务的不同阶段,深空探测污染环节大致可以分为发射前、在轨、登陆和返回4个阶段;污染物种类可分为有机物和生物两大类;按来源可以分为来自于飞行器(包括探测器)、人和样本。

在地球上,无论是空气中、水中还是固体表面,微生物无处不在。在发射前,航天器的生产、组装、集成、测试等各个环节过程中都会引起微生物污染^[1,3]。航天器总装测试环境洁净度通常为ISO 8级,这仅为颗粒控制度,因此洁净环境组装并不能完全保证生物污染水平可达到行星保护限值要求。另外,航天员的体表和体内生活着细菌、真菌、病毒等大量微生物,它们是人体微生态平衡系统的重要组成,同时也构成了污染源之一。

在轨飞行期间,舱室环境中空气、水体和设备上都存在大量微生物。微重力环境下缺少了沉降作用,空气中细小尘埃上通常都附着各种微生物,舱内湿度也会进一步影响微生物繁殖。飞行器内部空间狭小,设备密集,其表面和狭缝易滋生微生物,且不易清除干净。个别细菌的芽孢和真菌的孢子,存活能力很强,一般的杀灭措施很难将其消除。水循环系统也存在着微生物,可在饮用水储箱或循环管道内形成生物膜,提高对消毒剂的抗性从而造成水中微生物超标。对于载人深空探测而言,最主要污染来源还是航天员的自体微生物。在航天员体表和体内生活着大量微生物,构成人体菌群系统,维持微生态平衡,正常情况下有益于人体健康。在微重力、变重力、应激、辐射、密闭狭小环境等因素下,可能出现菌群失调或者致病力变化,会通过呼吸道或其他途径传播到舱内环境,对航天器造成一定影响。

在地外天体着陆阶段,主要包括飞行器着陆和/或

航天员出舱活动等任务过程。尽管航天过程中，飞行器历经了真空、高温、低温、辐射等极端环境，但是飞行器表面仍可能携带有机物或存活的生物体，在地球外星球着陆后可能对其造成污染。在发射前对航天员自体进行微生物控制和隔离，在飞行任务过程中机体代谢和环境变化仍然会造成微生物增殖和毒力变化，故在航天员进行出舱任务时也要防止对地外天体造成污染。同时，要防止着陆、出舱探测过程中将地外物质或微生物带回飞行器并返回地球。以“阿波罗11”登月任务为例，航天员完成月面行走返回着陆器后，十分小心地去除了舱外服上沾黏的月球物质，并将鞋套和背包留在了月球；在月球舱与指挥舱对接前，登陆月球的航天员使用真空刷对月球舱内部进行了清理，以减少月球物质进入指挥舱，返回途中航天员对指挥舱进行了反复的吸尘和表面清洁。

航天器返回地球阶段，航天器及航天员很有可能将属于地外天体的物质或经宇宙辐射发生变异的微生物带回地球，另外任务中勘探的样本也可能会有微生物污染。“阿波罗”计划中，为了避免可能对地球生物圈造成污染等后果，采取了严格的预防措施。“阿波罗”11号、12号和14号任务完成后，航天员、月球样本以及迎接航天员返回地球的人员，都接受了21天的医学隔离。

载人深空探测的污染物主要指各类微生物。以“和平号”空间站为例，俄罗斯生物医学研究中心曾先后从其上分离出234种微生物，包含126种真菌和108种细菌。“和平号”上4个空气采样点平均细菌水平约为200~425 cfu/m³空气（可接受限度为500 cfu/m³），空气真菌平均值在175~325 cfu/m³之间（可接受限度为100 cfu/m³）。空气微生物最多检出的细菌为葡萄球菌、杆菌和棒状杆菌，真菌为青霉菌、曲霉菌和分枝孢子菌，从大约50%的样品中检测到了黄曲霉。表面

微生物采样分析，平均细菌水平约为2 700 cfu/100 cm²或以下，真菌水平为500 cfu/100 cm²或以下。表面微生物最多见的细菌为葡萄球菌、杆菌和微球菌，真菌为青霉菌、念珠菌和曲霉^[9]。航天器舱内环境有利于各种微生物生存，仪器表面、设备内部、管路管道、设备接缝等微环境多样，温度、湿度、冷凝水形成、材料老化和有机物累积都会促进微生物滋生；另外，辐射、微重力等环境下，微生物还会出现菌群性状、生化遗传、致病力等方面变化，如细菌生物膜形态结构，生长速度、环境适应性和耐药性，真菌的腐蚀性和破坏性，致病菌或条件致病菌的致病性和毒力等发生变化，均会导致微生物污染风险和防控难度加大。

3 行星保护中微生物防控主要技术

深空探测中，如果不对正向、逆向生物污染未雨绸缪，很可能对地外星球及地球生态系统构成潜在的威胁。本节主要介绍微生物控制和清洁方法，再污染的控制与生物屏障等行星保护中主要的微生物防控技术。

3.1 微生物控制和清洁技术

NASA飞行器地面发射前生物防控的目标是通过表面清洁去除污染物，减少可见孢子数量。发射前减少生物负荷可以在组件和子系统水平，结合再污染控制方法，或通过航天器组装最终环节额外增加最终消毒程序来实现。

目前全系统消毒方法主要为干热消毒（Dry Heat Microbial Reduction, DHMR; 125 °C, 5 h），对于减少表面及内部的生物载荷效果明显，成功应用于“海盗号”火星探测器的全系统消毒。近年，有专家也推荐使用气相过氧化氢法（Vapor-Phase Hydrogen Peroxide, VHP）作为DHMR的替代方法。还有一些在航天器组装不同阶段而采取的达到减少微生物、实现清洁效果的方法，各有其优缺点（见表2）^[6]。

表2 微生物控制和清洁技术小结

Table 2 Summary of microbial reduction and cleaning methods

方法	作用	用途	待研发技术
干热消毒	对于部件进行批量灭菌，包括封闭的和组合部件	广泛地应用在部件/子系统水平，首次应用于“海盗号”全系统水平消毒。	材料兼容性，研发供新型大型飞行器灭菌的设施。
气相过氧化氢	低温表面灭菌	广泛用于医疗行业，最近成为NASA标准方法。消毒组件的体积受限于气相过氧化氢室大小。	针对于更大的组件或系统级表面灭菌的可扩展性消毒方法；材料兼容性。
物理清洁	通过物理方法清洁飞船表面污染物的微生物控制	组装测试和发射过程常规表面清洁方法。	可在粗糙或其他特殊表面使用的替代清洁剂。
超临界二氧化碳	物理方法去除污染物包括有机物	用于医疗行业；正在研究用于行星保护。	进一步验证行星保护中的清洁度，利用火星大气原位清洁的可能性。
电离辐射	以电子束和γ射线对表面或部分穿透多种材料进行灭菌	广泛应用于食品工业，由于Beagle2降落伞不能使用DHMR，因此使用该方法消毒。	验证和评估各种方法材料兼容性，开发行星保护标准。
环氧乙烷	表面灭菌	用于医疗行业；正在研究用于行星保护。	环氧乙烷的安全性及环境控制，DHMR和VHP的材料兼容性。

1) 干热消毒 (DHMR)

20世纪70年代初,“海盗号”任务首次使用DHMR作为一种减少表面及内部生物负荷的方法,该项目用于行星保护,大部分成本花费在选择具有热兼容能力(110~125℃)的电子及其它部件上。在2012年VHP获批前,DHMR是NASA唯一发射前用于全系统微生物控制的消毒流程,直到现在也被认为是微生物控制的“金标准”,是NASA唯一批准的、具有穿透灭菌能力的、控制内部生物负荷的经典方法。后经NASA和ESA共同验证^[10],DHMR操作规范在原“海盗号”任务规范的基础上得到扩展,消毒过程可将总生物负荷降低6个数量级,同时扩大了湿度控制的允许值。

除了实施新的DHMR规范之外,未来的技术发展将聚焦于DHMR对非标准材料,复杂的机械组件和材料(例如电池,精密仪器,涂层等)的系统级微生物控制作用。

2) 气相过氧化氢法 (VHP)

经过充分研究和验证,ESA和NASA已经批准过氧化氢蒸汽(H₂O₂)作为表面微生物控制法^[11]。其优点是:既可以在小室操作,也可以扩展到整个房间,因此非常适宜表面积大、几何形状复杂的物品消毒。可在受控环境和真空条件下使微生物载荷减少2~6个数量级。与DHMR不同,VHP生物负荷降低过程并非参数过程,而是取决于蒸汽在航天器硬件上的分布,因此需要生物指示物(如嗜热脂肪芽孢杆菌)来验证消毒的有效性。指示剂须放置于VHP使用最小剂量的位置。消毒前需测定微生物载荷初始值,因为消毒后微生物数量按初始浓度的对数比例减少。

VHP有望成为替代DHMR的表面微生物控制方法,特别是对于那些不适用DHMR的材料。但是,H₂O₂是一种强氧化剂,可能会与某些材料发生化学反应,因此其应用也具有一定的挑战性。

3) 物理清洁

对于只要求进行基础水平微生物控制和清洁的飞行任务或子系统组装,酒精擦拭表面是有效的物理清洁方法,这也是将物品带入洁净室的标准程序之一。物理清洁足以满足不关注生命探测或探索火星非特殊区域的任务需要。其缺点是这种方法需要消耗大量的时间和人力,清洁及检测程序通常需要手动进行,同时必须严格执行洁净室程序,如穿防护服、遵守操作规程、使用无菌设备、频繁更换手套和擦拭巾,即使这样,仍存在再污染和灰尘残留带来的风险。这种清洁方法已被有效地应用于III、IV类火星任务中,但由于未来任务的复杂性,可能需要更加谨慎地整合到飞

行器组装的正常程序中。

未来的研究和开发领域主要包括评估粗糙的清洁和非标准表面,如织物和不同纹理的材料表面,以及评估和识别替代的清洁溶剂等。

4) 超临界CO₂清洁

使用液体或超临界CO₂是更强大的机械清洁方式。近年来,超临界和液体CO₂清洁用于污染控制和行星保护,显示出高水平清洁效果,能有效去除有机物和其他污染物^[12]。作为溶剂,CO₂清洁主要通过化学溶解和物理去除污染物,该方法有效应用于医疗器械消毒^[13]。Lin等评估了CO₂清洁方法对行星任务和行星保护的污染控制能力,建议对于疏水污染物的清洁水平约为10 ng/cm²。此外,他们还还对含有95% CO₂的火星空气混合物进行初步性研究,观察其原位清洁和微生物控制的效果。

考虑到污染控制和降低微生物的潜在能力,CO₂清洁可能是比较合适的方法,特别是在火星实施原位清洁,对于关键组件可达到较高的清洁水平,如样品处理和设备、科学仪器包装箱。

5) 电离辐射

γ射线和电子束等电离辐射法常规用于医疗和食品工业中的微生物控制,该技术在行星保护中应用不多。ESA曾采用γ射线对Beagle2降落伞进行消毒^[14],主要由于Beagle2火星探测器的降落伞选择的材料不耐高温,且其材质较薄。

6) 环氧乙烷

环氧乙烷(EtO)是一种广泛应用于医疗工业中的灭菌剂,并且在早期星际飞船的微生物控制上已得到应用。但是,由于存在健康和爆炸危险,它未被广泛用于行星保护中。EtO相较于VHP,具有不同的材料与工艺兼容性,已被NASA戈达德太空飞行中心(Goddard Space Flight Center)考虑用于仪器仪表的消毒^[15]。

3.2 再污染的防控

虽然组件、子组件或整个航天器的微生物受到了控制,但在随后的装配、测试、发射、在轨和地外着陆的任何阶段仍然存在后续再污染的可能。

1) 洁净室和无菌装配间

几乎所有航天器,在一定水平的子组装之后,都会在洁净室中组装,以提供一般水平的粒子和污染控制,忽略到底是生物性的还是有机的。10万级(相当于ISO8)洁净室,是指每立方英尺中大于或等于0.5 μm的粒子数少于10万个,航天器和航天硬件的组装通常是在该洁净度下完成的。

在10万/ISO8级洁净室中组装III类和IV类任务的生

物载荷是不满足要求的，必须采取其他的控制微生物数量的方法来减少生物载荷，并且其有效性要通过生物标记物来验证。尽管如此，洁净室仍是一个防止再污染的有效预防手段，它可以用于其他清洁程序或者其他控制微生物的方法之后。

无菌装配间通常用于制药和医疗设备制造，是一个更严格的洁净室，曾用于Beagle2火星任务的组装过程。由于着陆器尺寸相对较小，所以在100级/ISO5级洁净室中进行航空器的初始装配，根据定义，该洁净度比经典的10万级/ISO8级洁净室至少洁净3个数量级。

2) 生物屏蔽

作为再污染预防的早期例子就是，在“海盗号”火星探测器最终用DHMR法进行微生物控制之前，该“海盗号”火星探测器被封装在一个生物屏蔽室内。子系统水平、组装阶段大规模地清洁样品处理通路，然后再用热气吹扫下防止再污染，以确保有机清洁的有效性，上述程序经过采集吹扫流出来的气体进行了验证。之后用来采样或分析的硬件会一直处于过压条件下，以防止期间地球大气污染物流入。在进入火星大气层时，隔热罩和后壳的外表面将经历来自大气的高温加热，足以满足整体生物负荷要求。经检验发现，超压条件下的检测仪器和样品处理通路保持了非常好的清洁度水平。

3) 限制性样本返回处理和密封

该技术对于防止逆向污染非常关键，限制性样本返回任务主要针对从火星、木卫二或土卫二返回的样本，目前的规划以火星返回样本控制为主。没有足够的科学数据来对火星物质中微生物，或者如果将火星微生物引入地球生物圈可能会产生的后果做出结论性判断，因此在采集、控制和研究样品时必须采取严格的预防措施。

从火星喷射出来的物质经常以陨石的形式撞击地球，这种火星陨石一般认为不可能包含微生物。但是火星探测采集带回的土壤、矿石等样本则有可能含有火星微生物，故在行星保护方面受到极大关注。考虑到样本巨大的科学研究价值和不确定性，通常不考虑直接采用灭菌处理。火星探测样本采集策略主要为：首先，必须在不污染样本和采样源区域的情况下获取和保存样本，用于样品采集的材料和微生物控制技术必须与发射前过程相呼应，含有采集样本的容器将被送至火星上升运载器（Mars Ascent Vehicle, MAV）或随后着陆的航天器；然后，MAV把样品容器运送到绕火星轨道运行的航天器，后者将通过再入飞行器将样品运送到地球表面。整个运输流程必须阻断与火星

物质可能接触的环节，除了采样品外，返回地球的航天器外部及相关部件都不能存在火星物质沾染或污染^[6]。

4 结 语

深空探测是人类认识宇宙、拓展生存空间和开发太空资源的伟大实践。行星保护是人类开展深空探测活动必须面临的一个重要问题。深空探测过程中各个环节都可能存在污染源，必须针对性地开展行星保护政策和微生物防控技术研究。国际行星保护政策主要依据《外层空间条约》（Outer Space Treaty），根据目标星球的不同行星保护任务分为5类，COSPAR详细规定了火星探测行星保护原则和要求。针对正向/逆向微生物污染防控，本文介绍了DHMR、VHP等微生物控制和清洁方法，以及再污染的控制与生物屏障等行星保护中主要的微生物防控技术。深入研究国际行星保护政策、法规和技术体系，对于我国后续开展相关研究具有很好的参考和借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] CONLEY C A, RUMMEL J D. Planetary protection for humans in space: Mars and the Moon[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63(7): 1025-1030.
- [2] CONLEY C A, RUMMEL J D. Planetary protection for human exploration of Mars[J]. *Acta Astronautica*, 2010, 66(5): 792-797.
- [3] SPRY J A, RUMMEL J, RACE M, et al. Unanswered questions in the development of planetary protection policy and implementation for the human exploration of Mars[C]// *Aerospace Conference. IEEE*, 2016: 1-9.
- [4] United Nations. Treaty on principles governing the activities of states in the exploration and use of outer space, including the Moon and other celestial bodies[EB/OL]. (1967-06). <http://www.state.gov/t/ac/trt/5181.htm>.
- [5] National Aeronautics and Space Administration. Biological contamination control for outbound and inbound planetary spacecraft[EB/OL]. (1999-12). <http://nodis3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPD&c8020&s7F>.
- [6] FRICK A, MOGUL R, STABEKIS P, et al. Overview of current capabilities and research and technology developments for planetary protection[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(2): 221-240.
- [7] COSPAR. Planetary protection policy (revised 24 March 2011)[S]. France: COSPAR, 2011.
- [8] RUMMEL J D, CONLEY C. Planetary protection for human exploration of Mars, IAC A1.5-15689. Preparing for the human exploration of Mars: health care and planetary protection requirements and practices [C]// 63rd International Astronautical Congress. Naples, Italy: the International Astronautical Federation, 2012.
- [9] PIERSON D L. Microbial contamination of spacecraft[J]. *Gravitational & Space Biology Bulletin Publication of the American Society for Gravitational & Space Biology*, 2001, 14(2): 1-6.
- [10] KEMPF M, SCHUBERT W, BEAUDET R. Determination of lethality rate constants and D-values for bacillus atrophaeus(ATCC 9372) spores

- exposed to dry heat from 115 C to 170 C[J]. *Astrobiology*, 2008, 8: 1169-1182.
- [11] CHUNG S, KERN R, KOUKOL R, et al. Vapor hydrogen peroxide as alternative to dry heat microbial reduction[J]. *Adv. Space Res.*, 2008, 42: 1150-1160.
- [12] LIN Y, ZHONG F, AVELINE D, et al. Supercritical CO₂ cleaning for planetary protection and contamination control[C]//Aerospace Conference IEEE.[S.l.]: IEEE, 2010.<http://dx.doi.org/10.1109/AERO>.
- [13] WHITE A, BURNS D, CHRISTENSEN T W. Effective terminal sterilization using supercritical carbon dioxide[J]. *J. Biotechnol.*, 2016, 123: 504-515.
- [14] PILLINGER J, PILLINGER C, SANCISI-FREY 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: 19-24.
- [15] BELZ A, BEAUCHAMP P. Assessment of planetary protection and contamination control technologies for future planetary science missions, JPL D-72356 [R]. [S.l.]: Jet Propulsion Laboratory, 2013. <http://solarsystem.nasa.gov/docs/PPCCTECHREPORT3.pdf>.
- [16] BEATY D, CARLTON A, BASS D, et al. Planning considerations for a mars sample receiving facility: summary and interpretation of three design studies[J]. *Astrobiology*, 2009, 9: 745-758.

作者简介:

徐冲(1980-),男,助理研究员,主要研究方向:航天实施医学。

通信地址:北京海淀5132信箱28分箱(100094)

电话:(010)66362382

E-mail: xuc507@126.com

谢琼(1971-),女,研究员。主要研究方向:航天微生物学。本文通讯作者。

通信地址:北京海淀5132信箱28分箱(100094)

电话:(010)66362410

E-mail: xieqiao@sina.com

Overview of Policy and Technology Developments of International Planetary Protection

XU Chong, XIN Bingmu, WU Bin, XIE Qiong

(China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: With the expansion of human space exploration, planetary protection has become an important issue for future human deep space exploration. In this paper, starting from the concept of planetary protection, and the research background and the research activities of the United States, Europe, Russia and other countries are introduced, involving the policy making, standard specification, pollution prevention and control, technical system and other aspects. All stages of manned deep space exploration are possible sources of pollution, and must carry out the related protection and the protection technology research. An in-depth study of international planetary protection policies, regulations and technical systems is of great significance for China to carry out relevant studies in the future.

Key words: planetary protection; deep space exploration; manned space flight; microbiological control

High lights:

- Planetary protection is an important problem for human space explorations.
- The United States, Europe, and Russia have carried out a thorough study on planetary protection, involving technology system, pollution prevention and control, standards, policies, and related aspects.
- Microbial pollution may occur in all stages of manned deep space exploration.
- It is urgent for China to study in advance the strategies and technologies of planetary protection and biological pollution prevention and control in deep space exploration.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]