

载人火星探测的行星保护

徐侃彦^{1,2,3}, 马玲玲^{1,2,3}, 印红^{1,2,3}, 张秦^{1,2,3}, 邹乐洋⁴

(1. 航天神舟生物科技集团有限公司, 北京 100190; 2. 北京市空间生物工程技术研究中心, 北京 100190;
3. 中国航天科技集团公司空间生物工程研究中心, 北京 100190; 4. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100086)

摘要: 行星保护是影响载人火星探索任务的重要问题之一。载人探测的行星保护包括3个方面, 即防止来源于地球的微生物污染目标星球的正向污染防治、防止外来生物对地球的潜在危害的逆向污染防治, 以及确保航天员的健康和安全。国际宇航界已经开始针对载人火星探测的行星保护制定政策法规和开展技术研讨。本文介绍了行星保护的定义和法理依据, 简要回顾了美国国家航空航天局在“阿波罗登月”中的行星保护措施, 并对未来载人火星探测中的主要污染物、污染途径以及污染防治策略进行了初步探讨。

关键词: 行星保护; 载人火星探测; 正向污染; 逆向污染; 污染物; 污染途径

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)01-0023-08

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.01.004

引用格式: 徐侃彦, 马玲玲, 印红, 等. 载人火星探测的行星保护[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 23-30.

Reference format: XU K Y, MA L L, YIN H, et al. Planetary protection for manned Mars exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 23-30.

1 背景介绍

1.1 火星探索的历史和计划

人类向深空探索的步伐永无停歇, 火星作为距离地球最近的两个行星之一, 是最有可能存在地外生命的星球之一, 长期以来一直是国际航天界和宇宙生物学界的重点研究对象。无人火星探索起始于20世纪60年代, 美国的“海盗号”(Viking)在1975年首次实现了在火星表面的着陆和地外生命探索, 成为火星探索的第一个高峰^[1]。从20世纪90年代开始, 美国陆续发射了“火星探路者号”(Mars Pathfinder)、“勇气号”(Spirit)、“机遇号”(Opportunity)、“凤凰号”(Phoenix)以及“好奇号”(Curiosity)着陆器, 对火星环境进行了大量的科学研究, 无人火星探索进入了第二个高峰期。

大量的无人探索研究使人类对火星的认识越来越深入, 载人航天技术的进步也为载人火星探索创造了条件。2004年, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)开始制定载人火星探索计划, 根据NASA深空探索发展路线图, 如果进展顺利, 2033年将开展首次载人火星探索任务^[2]。而欧洲空间局(European Space Agency, ESA)

也计划在2033年左右实施载人火星探索^[3]。

1.2 行星保护的定义和法理依据

“行星保护”是指在深空探测过程中, 为避免地球生物污染其它星球, 以及保护地球免遭其它星球的生物侵袭所采取的行为^[4]。行星保护包括正向污染防治和逆向污染防治, 其中正向污染防治指的是避免地球物质通过航天器被带到地外天体上, 从而干扰地外天体生命探索的进行, 甚至污染地外天体的生物进化或生物圈的行为。逆向污染防治指的是避免探测地外天体的航天器返回后带回其它天体物质, 对地球生物圈带来未知的生物风险的行为。

行星保护是国际社会公认的行为准则, 1967年生效的《外太空条约》的第九条中写道: “开展包括对月球和其它行星在内的外太空研究和探索时, 要避免对这些星球产生有害的污染, 也要避免地球外的物质导致地球环境产生有害变化, 在必要时应采取适当的措施达到上述目的”^[5]。1967年成立的空间研究委员会(Committee for Space Research, COSPAR)是行星保护的主要管理机构, 负责制定行星保护的標準和要求, 世界各航天大国在以往开展深空探索的过程中, 均严格遵照COSPAR的要求执行了行星保护。

2 载人深空探索的行星保护

2.1 载人深空探索对行星保护的挑战

载人深空探索对行星保护提出了新的挑战,载人深空探索的行星保护所面临的主要问题是:①航天员是大量微生物的携带者,因此会对正向污染防治造成远大于无人深空探索的压力;②航天员及其所在飞船作为地球生物圈的延伸,不可避免的会与地外星球物质接触,从而使逆向污染防治的难度大大增加;③逆向污染防治与航天员健康的关系密切,航天员健康防护成为载人深空探索行星保护的重点关注对象^[6];④载人探索任务周期长,行星保护技术需要减少对地面支持的依赖。尽管面对这些问题,COSPAR认为不能放松载人深空探索任务中对行星保护的要求,载人深空探索拥有无人深空探索所无法比拟的技术优势,但这一优势发挥的前提是必须控制所有和人类相关的污染^[7]。

2.2 载人深空探索行星保护的实例——“阿波罗计划”

目前人类唯一的载人深空探索实例是美国的“阿波罗登月计划”,因此可以“阿波罗计划”中采取的行星保护措施为参考,探讨未来载人火星探索所应该采取的行星保护技术和实施方法。

美国在“阿波罗登月计划”启动之初,就开展了行星保护方面的论证工作。NASA对返回地球的航天员和样品制定了极为严格的行星保护逆向防护措施,其中既包括对月球样品的防护,也包括对接触月球环境的航天员的防护。为此,美国建造了一座8 000 m²的月球样品回收实验室(Lunar Receiving Laboratory, LRL),负责对航天员和月球样品进行隔离和分析处理^[8]。“阿波罗计划”行星保护的主要措施包括:

1) 由航天员在返回地球途中对舱内沾染的月球灰尘进行清洁和过滤。

2) 着陆回收后航天员第一时间穿上生物隔离服,并和月球样品储存容器一起进入移动隔离舱。

3) 月球样品储存容器在灭菌处理后空运到LRL,并在真空分析室中进行分析处理,直到确定不具有生物风险才被解除隔离。

4) 航天员随移动隔离舱一起运往LRL,并在LRL的隔离室进行观察和医护,直至21天的隔离期结束。

5) 对返回舱以及所有在回收过程中可能接触月球物质的设备和表面,均作了消毒灭菌处理。

美国在“阿波罗登月计划”实施过程中所采取的行星保护措施,为载人深空探索的行星保护积累了宝贵的经验和教训。然而,由于月球和火星的环境差异较

大,且地月之间距离远比地火距离近,因此“阿波罗计划”所采用的许多行星保护技术并不完全适用于载人火星探索的行星保护。

2.3 载人火星探索行星保护的原则和政策文件

国际宇航界在启动载人火星探索论证的同时,就开始讨论载人火星探索中的行星保护,COSPAR于21世纪初在载人深空探索行星保护的原则和指导方面达成了国际共识^[4,7,9],主要的行星保护原则包括:

1) 保护地球不被逆向污染是火星探索行星保护的最优先目标。

2) 只有在与人相关的污染能被控制和理解的前提下,人类的能力才能在火星宇宙生物学的探索中发挥正面作用。

3) 对于一个涉及火星表面操作的着陆任务,将所有与人相关的任务操作行为限制在完全闭合系统是不可能实现的。

4) 探索火星的航天员和他们的支持系统将不可避免的暴露于火星物质与环境中。

根据这些原则,COSPAR提出了载人火星任务的行星保护指导意见,这些意见进一步成为COSPAR以及NASA等机构后续制定载人深空探索行星保护政策、需求和实施文件的基础^[4]。

NASA根据COSPAR的指导意见,于2012年开始制定有关载人深空探索的行星保护政策,最终在2014年5月发布了关于载人深空探索行星保护的政策文件——NPI8020.7。该文件对进一步制定载人深空探索行星保护具体执行文件所必须开展的理论研究和技术开发提出了建议^[10]。

3 载人火星探索的行星保护策略

针对载人火星探索的行星保护策略,国际宇航界从21世纪初开始召开了多次研讨会,对载人火星探索产生的主要污染物、污染途径、相应的污染防治策略以及需要开展的技术研发工作进行了深入的探讨^[11-15]。载人火星探索行星保护的主要关注领域包括3个方面:①保护火星和火星样品不受正向污染影响,即“保护火星和科学”;②保护航天员健康免遭火星环境的威胁,即“保护人类健康”;③保护地球免遭火星有害污染的逆向污染防治,即“保护地球”^[11]。

3.1 主要污染物

3.1.1 正向污染物

载人火星探测的正向污染物主要来自发射后,航天员在地火转移和火星表面活动的过程中产生的可能对火星生态环境造成污染的物质,包括:

1) 航天员

人类是大量微生物的载体,航天员的活动会对舱内表面和设备造成污染,呼吸排出的微生物会污染居住舱的空气,代谢活动和日常生活会产生含有大量微生物的废物。因此,航天员是载人火星探索绝大多数正向污染物的来源^[16-19]。

2) 人类生命保障系统废物

生命保障系统会产生各种类型的废物,包括:人类固体废物、食物残渣、种植物的不可食部分、包装物、医学废物、布和纸张、滤膜以及各种气体等;此外,生命保障系统更换下来的组件也是废物的重要来源^[20]。这些废物如果不能有效处理,将成为火星表面主要的微生物和有机物污染的来源。

3) 科学应用载荷和废物

在火星表面开展包括地外生命探索在内的各种科学研究所使用的装置和产生的废弃物也会对火星造成污染。尤其是从事火星样品采集和原位资源利用的装置和工具,由于接触火星特殊区域^[21] (“地球生命有可能繁殖或火星生命存在可能很高的区域”)的可能性较大,因此是火星探索行星保护的重要污染源之一。

4) 热/动力系统的废物

火星基地和巡游车的热控/动力系统也会产生不同类型的废物,包括散热器、热交换液体、太阳能阵列和核废物等。一些系统会释放大量的废热,会破坏当地的局部环境/生态(例如:融化表面冰层),从而人为创造一个局部的特殊区域,为地球微生物的生长繁殖创造了条件^[22]。

5) 其它

载人火星探索任务结束后会在火星表面遗留大量的废弃装置和设备。废弃不用的巡游车和火星舱外活动用的航天服,甚至使用完毕的火星基地,都可能成为正向污染物的来源。

3.1.2 逆向污染物

载人火星探索的逆向污染物是指火星上的生命体以及可作为潜在的火星生命载体的任何火星固体或液体物质。这类污染物一旦在不受控制的条件下进入地球环境,将具有危害人类健康和生态,甚至危害地球生态系统的潜力^[23-24]。

返回地球的飞船的设备、内表面、携带火星返回样品的容器以及接触过火星环境的航天员,都可能是逆向污染物的载体,其中航天员或其它生物系统(例如:受控生保系统中的植物、生物处理废物系统中的活性污泥等)还可能作为火星生命体的食物来源,从而使污染放大。

3.2 污染途径

3.2.1 正向污染途径

1) 火星表面的废物处理

虽然将废弃物储存或丢弃在火星表面时都会采取隔离措施,但任何隔离容器最终都会失效,一旦隔离容器失效,废弃物就会被释放并污染火星环境,火星大气的流动可以进一步扩大污染的范围。地下掩埋的方法虽然可以限制空气传播,但同时也产生了两个不利因素:①屏蔽了火星表面强辐射的灭菌效应;②增加了废弃物接触火星亚表面生态系统的可能。由此可见,对于火星上的废物处理必须设立严格的标准和操作准则,包括:是否允许在火星表面储存/丢弃废物,需要采取什么级别的隔离措施,隔离措施的有效时间,对需要储存/丢弃的废弃物状态的要求等^[20]。

2) 居住地和其它舱室容器的气体泄漏

火星基地、巡游车等工具内部和火星环境之间存在压力差,由于舱室的气密性技术的限制,会存在气体泄漏的问题;此外,在人员或设备进/出舱室的过程中,以及出于安全原因所进行的压力释放操作,或发生气体或液体管道破裂或其它事故时,都会产生气体泄漏。气体泄漏会导致大量舱内污染物直接释放到火星大气,对火星环境造成污染,因此在设计和建造火星居住基地和巡游车时需要尽量减少气体的泄漏^[25]。

3) 舱外活动

航天员在火星表面的舱外活动行为是正向污染的又一个重要途径,舱外活动所使用的设备可能会携带污染物,加压的航天服和居住舱一样也会有气体泄漏,而航天员在舱外活动期间会污染航天服的内部空间,这些污染物会随着航天服气体的泄漏排放到火星环境中^[26-27]。

3.2.2 逆向污染途径

任何与火星特殊区域接触的操作都可能导致逆向污染,其中航天员所参与的活动、火星样品采集和原位资源利用造成的污染风险最大。主要的逆向污染途径包括:人员进出火星基地过程,火星样品采集和进/出基地的过程,火星资源(例如火星土壤中的水)获取和利用的过程,以及火星上升器和返回飞船对接过程等。进入居住地的逆向污染物根据状态的不同可以通过诸如空气粒子传播、接触转移(例如样品处理、多表面接触)以及基地内部运输系统(例如水管、过滤膜)等不同方式传播,火星基地和返回地球的飞船内部的生命保障系统也有助于逆向污染物在舱内的扩散^[25]。

3.3 主要防护策略

载人深空探索的行星保护包括3个要点:①正向污染防治;②逆向污染防治;③航天员健康和安全的防

护。载人火星探索的行星保护和航天员的健康和安全是密切相关的。

载人火星探索行星保护的主要工作从发射后才开始, 覆盖地火转移过程、火星表面活动、返回地球过程, 直至着陆后的隔离检疫结束, 是一个长期、复杂的过程。其中主要的防控策略包括如下几点。

3.3.1 对火星表面的分区

根据火星环境的不同, 对火星表面进行分区, 即将载人火星探索可能接触到的火星环境划分为“安全区”“未知区”和“风险区”, 并将人类活动的区域限制在“安全区”。对于后两个区域的探索, 可通过自动化或可远程遥控的无人工具进行, 这样既可以降低对火星环境的正向污染, 又最大程度的避免了航天员与火星环境或样品的直接接触^[28-30]。

为了对火星表面进行正确分区, 首先需要加深对火星环境的认识, NASA自20世纪90年代重启火星探索计划以来, 就利用大量的轨道探索器和着陆器, 对火星大气和表面环境进行了深入的研究, 其中“凤凰号”“好奇号”等着陆器对火星表面水冰和液态水存在证据的研究结果, 为未来载人火星探索的选址和火星特殊区域的划分奠定了坚实的基础^[31-32]。此外, 对地球生物生存环境极限的研究也有助于火星区域的划分, 研究发现: 一些嗜极生物可以在地球上任何类似火星环境的地区生长^[33], 也能够实验室模拟火星环境条件下存活^[34-35], 甚至能在一定的防护下存活于空间暴露环境^[36-37]。上述研究加深了宇宙生物学对生命生存极限的认识, 同时为火星表面和亚表面特殊区域的划分提供了理论依据。

3.3.2 微生物原位检测

对“未知区”和“风险区”中具有特殊科学价值位点的探索需要由无人探索器进行, 包括在火星表面/亚表面进行采样的采样机器人。由于需要接触火星的“特殊区域”, 这些无人探索器需要满足无人探索IVc类任务的行星保护要求, 即探索工具所包含的微生物总量不能超过30个芽孢^[38]。为此, 需要开发可在火星表面操作的原位检测技术, 其中拉曼光谱技术^[39-40]、生物检测芯片^[41]以及纳米孔测序技术^[42]等先进的快速生物检测技术已经在阿卡塔马沙漠等地球表面类似火星环境的生命探索中得到了使用, 未来可以利用月球进行原位生物检测技术的技术验证, 为载人火星探索创造条件^[43-44]。

3.3.3 生物风险的检测和预警技术

载人火星探索器和火星基地由于距离地球较远, 难以靠地面专家的协助进行舱内微生物的监测和预警, 因此需要建立一套能独立对舱内微生物风险进行快速检测和评估, 并具备区分地球微生物和潜在火星生物能

力的检测预警系统, 以满足实时、实地监测和预警需求。为此, 国外航天强国利用地面模拟火星基地^[45]和国际空间站^[46-48]试验了一系列微生物快速检测技术和装置, 同时还加强了对火星生命探索技术的研究^[49-50]。

3.3.4 降低微生物和有机物负荷的技术

1) 微生物清除

载人火星探索的不同阶段所采用的微生物清除手段各不相同, 其中在飞船发射前, 通过在洁净厂房环境进行装配和测试, 可以清除环境中大多数微生物, 从而有效降低飞船的微生物水平, 对于舱内的一些通用设备和科学载荷, 需要开发不影响材料和设备功能的微生物清除技术。在载人火星探索的空间飞行过程中, 微生物清除的对象主要是人类活动所产生的微生物。其中矿化处理是有效的废弃物处理手段, 它一方面能杀灭废弃物中的微生物, 另一方面还可以消除可被生物体利用的营养物, 同时还可以有效降低废物的体积^[51]。对于飞船舱内环境的微生物, 可以利用现有的空间站微生物清除技术, 并在空间站对新技术进行试用和验证。对于火星表面活动期间从事生命探索活动或在特殊区域操作的舱外设备, 由于需要满足行星保护IVb和IVc类的要求, 需要在建造阶段进行严格的灭菌和生物隔离, 目前美欧通用的灭菌技术是干热灭菌和伽马射线灭菌。对于无法采用上述灭菌技术的一些紧密设备, NASA还在积极研究替代性的微生物清除技术, 包括: 过氧化氢蒸汽技术^[52]、低温等离子体技术^[53-54]、短波长紫外线灭菌技术^[55]等。此外, 还可以利用空间环境和火星环境的灭菌效应, 在空间飞行和火星表面停留期间对这些设备进行原位灭菌, 这也是NASA火星着陆器所采用的主要灭菌方法之一。地面和空间试验证明, 空间和火星环境能有效杀灭大多数地球微生物, 但对于芽孢和一些耐辐射微生物的杀灭作用并不能满足行星保护的要求^[56-58], 因此原位灭菌只能作为行星保护的辅助灭菌方法^[59]。

2) 有机物控制

除了控制微生物, 行星保护正向污染防护对于有机物也有严格的控制要求。有机物除可以作为生物印记, 干扰地外生命探索以外, 还是一些地球微生物的食物来源。对于载人火星探索任务的有机物污染防治, 可以在参考对火星采样返回任务的有机物污染防治要求^[60]的基础上, 进一步通过提升生命保障系统的物质闭合度减少有机废物的产生量, 同时利用矿化的处理方法将废物中的绝大多数有机物转化为无机物^[51]。

3.3.5 废物处理技术

1) 固体和液体废物的隔离和处理

对于从地球到火星的转移期间产生的废物, 可开

发行星际飞行期间的废物处理技术,如在地火转移期间向行星际空间抛射废物。对于火星表面产生的固体和液体废物,必须采取严格隔离的措施后才能丢弃到火星环境,而隔离的标准随着废物的状态和特性,及丢弃处的火星环境的不同而有所差异^[51]。

2) 废气的处理和排放

通过提升火星基地、火星车以及舱外航天服的生命保障系统的气密性,可以减少向火星环境排放/泄漏的气体,如果必须要向火星环境排放气体,需要开发相应的处理技术,例如:通过先进的空气过滤处理系统捕获空气中的微生物和颗粒物,去除可能干扰地外生命探索的特定气体成分^[13]。相关技术的地基试验可以在地球上类似火星环境的地区,利用模拟的火星车或航天服进行^[16,27]。此外,由于航天员出入舱操作是最容易产生气体泄漏的操作之一,国外有专家提出利用系统工程的方法,优化航天员出入舱的过程,对每一个出入舱相关的细节操作进行分解,并制定相应的防止气体泄漏的措施^[61]。

3.3.6 逆向污染防护

1) 切断与火星的接触链

逆向污染防护的关键是切断地球与火星的接触链^[24,62]。尽量避免接触过火星环境的设备和物品进入火星基地和返回地球,可将它们留在火星上,或在进入地球之前抛射到行星际空间。

2) 舱外活动

包括航天服在内的所有舱外活动所涉及的设备和工具应与居住舱隔离,航天服更换应在一个隔离的空间进行,舱外活动用的设备工具可以储存在居住舱外,同时对于舱外活动完毕的航天员,在进入居住舱前还应进行必要的清洗消毒^[62]。

3) 处理火星污染物

鉴于目前火星基地或飞船的隔离技术难以完全避免火星污染物进入,因此生命保障系统应具备一定控制和清除火星污染物的能力,其中可利用空气处理系统去除舱室空气中的火星尘埃或粒子;水回收系统处理水,以防航天员通过饮水将火星污染物引入体内;废物处理系统可负责处理可能被火星物质污染的物质;同时,食物生产系统应负责防止人类食物和农作物生长对舱室的污染。此外,还需要开发针对潜在火星生物的消毒和灭菌技术,用于对接触过火星物质的设备、样品、航天服等的清洁和污染危机处理^[63]。

4) 原位资源利用和农作物种植

火星原位资源利用(包括利用火星土壤进行农业种植)是航天员在火星表面长期驻留的前提条件,但

也是最容易引发逆向污染的操作,对于将要被人类利用的火星资源,以及农业种植所需要的火星物质,必须采取严格的检测和灭菌措施消除潜在的火星生物威胁,从事原位资源利用和农业种植的舱室也应该和人类居住舱隔离^[64]。

3.3.7 返回地球途中的隔离技术

1) 对火星样品的隔离

开发可以覆盖从火星样品收集、原位分析、储存到回收全过程的隔离技术,对火星样品的隔离措施必须要等到确定样品没有生物风险之后才能解除。由于火星返回地球所需的时间较长,为确保航天员健康和安

2) 成员的隔离

在任务执行期间,应设置针对个别成员的隔离设备,以应对单个航天员患病或与火星物质接触而产生健康问题的情况,保护其他成员。飞船返回地面之前,应在地面建立人员隔离中心,全体成员在返回地面后必须通过隔离检疫程序才能与公众接触^[65]。

3.3.8 火星生物污染疾病的诊断和治疗

需要建立能够在轨判断航天员是否被火星微生物感染的诊断系统,以迅速确定是否需要为生病的航天员进行隔离。同时,需要开发在有限的地面协助下,在轨对火星生物感染引起的疾病的治疗技术和设备^[64,66]。

4 未来技术研究方向和建议

由于载人火星探索所涉及的行星保护技术的复杂性,国际航天界经过多次研讨会的交流,在2016年COSPAR关于载人火星探索行星保护的技术需求研讨会上,从微生物和人类健康检测、污染控制、以及污染传播机制这3个方面总结出20多项与载人火星探索行星保护相关的知识和技术的不足之处,并从中精炼出4项优先度最高的未来研究方向^[64]:

1) 火星上地球生物污染的自然传播。

2) 无人和载人飞行系统上微生物组学的状态和演化。

3) 火星环境因素对地球微生物生存的影响和杀菌作用。

4) 可接受的从人类生命保障系统中释放到火星环境的生物和有机污染的等级。

针对这4个研究方向,研讨会进一步提出了未来载人火星探索行星保护研究的途径建议:

1) 在至少一个火星年的周期内,对于计划开展载人火星探索的火星表面区域进行环境监测,获取包括

空气温度、气压、湿度和风速、灰尘浓度、大气柱丰度、灰尘的沉积和腐蚀率在内的数据,建立并验证污染传播模型。

2) 研究开发针对无人火星飞船(在硬件装配、测试和发射期间在地面进行)和载人飞船的微生物群体和组学监测技术,系统性的监测微生物多样性和时间演化,并利用空间站或后续运载工具进行在轨试验。

3) 利用地面自然和模拟环境,以及空间暴露试验,研究火星环境因素的协同杀菌对飞船所携带微生物的生存和生长的影响。

4) 对人类生命保障系统(包括航天服、飞船、火星基地等)中释放的微生物和有机污染的特性进行测量研究。

这些建议为后续开发载人火星探索行星保护的关键技术,填补相关技术鸿沟指明了方向。

5 结束语

火星是继月球之后人类迈向太空的下一个重要目标。然而,人类登陆火星并建立有人驻留的火星基地必然会对火星当地环境造成重大的影响,并对探索地外生命的科学行为造成严重威胁;另一方面,火星上的未知生物对航天员健康及地球生物圈的危害也不容忽视。因此,无论是从科学探索角度,还是从人类自身安全角度出发,行星保护都是每一个计划开展载人火星探索的国家必须遵守的行为准则。

我国虽然尚未制定载人火星登陆的计划,但是作为一个航天大国,为了紧跟国际上载人深空探索的技术前沿,应该在载人火星探索方面进行必要的技术积累,而行星保护正是载人火星探索的关键技术之一。因此,在现阶段开展载人火星探索行星保护相关策略和技术的研究,对未来我国载人火星探索和其它非地星球探索中确保任务成功,满足国际社会对行星保护的要求,维护我国负责任的航天大国的形象具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] WILLIAMS D R, TURNOCK M. Human space exploration the next fifty years[J]. *Mcgill J Med*, 2011, 13(2): 76-81.
- [2] SALOTTI J M, HEIDMANN R. Roadmap to a human Mars mission[J]. *Acta Astronaut*, 2014, 104(2): 558-564.
- [3] MESSINA P, VENNEMANN D. The European space exploration programme: current status of ESA's plans for Moon and Mars exploration[J]. *Acta Astronaut*, 2005, 57(2-8): 156-60.
- [4] The COSPAR Workshop. Planetary protection policy [R]. Houston, Texas: World Space Council, 2011.
- [5] 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.
- [6] RUMMEL J D, RACE M S, CONLEY C A, et al. The integration of planetary protection requirements and medical support on a mission to Mars[J]. *J. Cosmol*, 2010, 12(2010): 34-41.
- [7] CONLEY C A, RUMMEL J D. Planetary protection for human exploration of Mars[J]. *Acta Astronaut*, 2010, 66(5-6): 792-797.
- [8] MELTZER M. When biospheres collide: A history of NASA's planetary protection programs [M]. Washington DC, USA, NASA History Publication, 2011.
- [9] RACE M, CONLEY C, RUMMEL J, et al. Planetary protection as a crosscutting consideration in human missions and technologies beyond low earth orbit[C]//41st International Conference on Environmental Systems. Portland, OR, USA: [s. n.], 2011.
- [10] NASA. NPI8020.7, NASA policy in planetary protection requirements for human extraterrestrial missions[S]. USA: NASA, 2014.
- [11] CRISWELL M E, RACE M S, RUMMEL J D, et al. Planetary protection issues in the human exploration of Mars, NASA/CP-2005-213461[R]. Washington, DC, United States: NASA, 2005.
- [12] RACE M S, CRISWELL M E, RUMMEL J D. Planetary protection issues in the human exploration of space[C]//International Conference on Environmental Systems, Society of Automotive Engineers. Warrendale, PA: [s. n.], 2003.
- [13] Workshop on planetary protection & human system research and technology[C]//European Space Research and Technology Centre (ESTEC), Noordwijk, Netherlands: ESA, NASA, 2005.
- [14] CONLEY C A, RUMMEL J D. Planetary protection for human in space: Mars and the Moon[J]. *Acta Astronaut*, 2008, 63(7-10): 1025-1030.
- [15] RUMMEL J D, RACE M S, HORNECK G, et al. Ethical considerations for planetary protection in space exploration: a workshop[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(11): 1017-1023.
- [16] BRUCKNER J C, OSMAN S, CONLEY C, et al. Space microbiology: planetary protection, burden, diversity and significance of spacecraft associated microbes[J]. *Encyclopedia of Microbiology*, 2009: 52-65.
- [17] BIOSCIENCE L. Man and his spaceships: Vehicles for extraterrestrial colonization?[J]. *Mobile Genetic Elements*, 2012, 2(6): 272-278.
- [18] VENKATESWARAN K, LA DUC M T, HORNECK G. Microbial existence in controlled habitats and their resistance to space conditions[J]. *Microbes Environ*, 2014, 29(3): 243-249.
- [19] MAYER T, BLACHOWICZ A, PROBST A J, et al. Microbial succession in an inflated lunar/Mars analog habitat during a 30-day human occupation[J]. *Microbiome*, 2016, 4(1): 22.
- [20] HOGAN J A, FISHER J W, LEVRI J A, et al. Influence of planetary protection guidelines on waste management operations [C]//International Conference on Environmental Systems, Society of Automotive Engineers. Warrendale, PA: [s. n.], 2005.
- [21] RETTBERG R, ANESIO A M, BAKER V R, et al. Planetary protection and Mars special regions—a suggestion for updating the definition[J]. *Astrobiology*, 2016, 16(2): 119-25.
- [22] DEBUS A. Estimation and assessment of Mars contamination[J]. *Adv Space Res*, 2005, 35(9): 1648-53.
- [23] National Research Council. The quarantine and certification of Martian samples [M]. Washington, DC: National Academy Press, 2002.
- [24] AMMANN W, BARROS J, BENNETT A, et al. Mars sample return backward contamination – strategic advice and requirements-Report

- from the ESF-ESSC Study Group on MSR planetary protection requirements [M]. Köln-Porz, Germany: European Science Foundation, 2012.
- [25] RACE M S, KMINEK G, RUMMEL J D. Planetary protection and humans on Mars: NASA/ESA workshop results[J]. *Adv Space Res*, 2008, 42(6): 1128-38.
- [26] SCHUERGER A C, LEE P. Microbial ecology of a crewed rover traverse in the arctic: low microbial dispersal and implications for planetary protection on human Mars missions[J]. *Astrobiology*, 2015, 15(6): 478-491.
- [27] GROEMER G E, STORRIE-LOMBARDI M, SATTTLER B, et al. Reducing biological contamination by a space suited astronaut: Laboratory and field test results from Aouda. X[J]. *Acta Astronaut*, 2011, 68(1-2): 218-225.
- [28] BEATY D W, SNOOK K, ALLEN C C, et al. An Analysis of the precursor measurements of Mars needed to reduce the risk of the first human mission to Mars[J]. *Università Degli Studi Di Trieste*, 2005, 19(2): 280-284.
- [29] National Research Council, Space Studies Board. Safe on Mars: precursor measurements necessary to support human operations on the Martian surface [M]. Washington, DC: National Academy Press, 2002.
- [30] BUSSEY B, HOFFMAN S J. Human Mars landing site and impacts on Mars surface operations[C]//IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2016.
- [31] RUMMEL J D, BEATY D W, JONES M A, et al. A new analysis of Mars "Special Regions": findings of the second MEPAG Special Regions Science Analysis Group (SR-SAG2)[J]. *Astrobiology*, 2014, 14(11): 887-968.
- [32] SMITH P H, TAMPPARI L, ARVIDSON R E, et al. Introduction to special section on the Phoenix mission: landing site characterization experiments, mission overviews, and expected science[J]. *J Geophys Res Atmos*, 2008, 113(3): 1-7.
- [33] VITEK P, EDWARDS H G M, JEHLICKA J, et al. Microbial colonization of halite from the hyper-arid Atacama Desert studied by Raman spectroscopy[J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2010, 368(1922): 3205-3221.
- [34] NICHOLSON W L, KRIVUSHIN K, GILICHINSKY D, et al. From the cover: growth of *Carnobacterium* spp. from permafrost under low pressure, temperature, and anoxic atmosphere has implications for Earth microbes on Mars[J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2013, 110(2): 666-667.
- [35] SCHUERGER A C, ULRICH R, BERRY B J, et al. Growth of *Serratia liquefaciens* under 7 mbar, 0°C, and CO₂-enriched anoxic atmospheres[J]. *Astrobiology*, 2013, 13(2): 115-131.
- [36] HORNECK G, MOELLER R, CADET J, et al. Resistance of bacterial endospores to outer space for planetary protection purposes—experiment PROTECT of the EXPOSE-E mission[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(5): 445-56.
- [37] MEEBEN J, WUTHENOW P, SCHILLE P, et al. Resistance of the Lichen *Buellia frigida* to simulated space conditions during the preflight tests for BIOMEX—Viability Assay and Morphological Stability[J]. *Astrobiology*, 2015, 15(8): 601-15.
- [38] National Research Council. Preventing the forward contamination of Mars [M]. Washington, DC: National Academy Press, 2005.
- [39] EDWARDS H G M, SADOONI F, VITEK P, et al. Raman spectroscopy of the dukhan sabkha: identification of geological and biogeological molecules in an extreme environment[J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2010, 368(1922): 3099-3107.
- [40] VÍTEK P, JEHLICKA J, EDWARDS H G, et al. The miniaturized Raman system and detection of traces of life in halite from the Atacama desert: some considerations for the search for life signatures on Mars[J]. *Astrobiology*, 2012, 12(12): 1095-1099.
- [41] PARRO V, DE DIEGOCASTILLA G, MORENOPAZ M, et al. A microbial Oasis in the hypersaline atacama subsurface discovered by a life detector chip: Implications for the search for life on Mars[J]. *Astrobiology*, 2011, 11(10): 969-996.
- [42] REZZONICO F. Nanopore-based instruments as biosensors for future planetary missions[J]. *Astrobiology*, 2014, 14(4): 344-351.
- [43] GLAVIN D P, DWORKIN J P, LUPISELLA M, et al. In situ biological contamination studies of the Moon: Implications for planetary protection and life detection missions[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2010, 107(1): 87-93.
- [44] LUPISELLA M L, MUELLER T. Advanced technologies for robotic exploration leading to human exploration: results from the SpaceOps 2015 workshop [C]//International Conference on Space Operations. Daejeon, Korea: [s. n.], 2016.
- [45] YAMAGUCHI N, ROBERTS M, CASTRO S, et al. Microbial monitoring of crewed habitats in space—current status and future perspectives[J]. *Microbes Environ*, 2014, 29(3): 250-260.
- [46] MAULE J, WAINWRIGHT N, STEELE A, et al. LOCAD-PTS: Operation of a new system for microbial monitoring aboard the International Space Station (ISS) [C]//AIAA Space 2008 Conference and Exposition. San Diego, CA, United States: AIAA, 2008.
- [47] ICHIO T, HIEDA H, ISHIHARA R, et al. Bacterial monitoring with adhesive sheet in the international space station—"Kibo", the Japanese experiment module[J]. *Microbes Environ*, 2013, 28(2): 264-268.
- [48] MAULE J, WAINWRIGHT N, STEELE A, et al. Rapid culture-independent microbial analysis aboard the International Space Station (ISS) stage two: quantifying three microbial biomarkers[J]. *Astrobiology*, 2009, 9(8): 759-775.
- [49] GERHARD K, CATHERINE C, CARLTON C, et al. Report of the workshop for life detection in samples from Mars[J]. *Life Sci Space Res*, 2014(2): 1-5.
- [50] DIREITO S O, MAREES A, RÖLING W F. Sensitive life detection strategies for low-biomass environments: optimizing extraction of nucleic acids adsorbing to terrestrial and Mars analogue minerals[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2012, 81(1): 111-23.
- [51] HOGAN J A, RACE M S, FISHER J W, et al. Life support and habitation and planetary protection workshop [R]. Houston, Texas: Center for Advanced Space Studies, 2005.
- [52] 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.
- [53] SCHIRMACK J, FIEBRANDT M, STAPELMANN K, et al. Effects of low-temperature plasma-sterilization on Mars analog soil samples mixed with *deinococcus radiodurans*[J]. *Life*, 2016, 6(2): 22.
- [54] STAPELMANN K, FIEBRANDT M, RAGUSE M, et al. Utilization of low-pressure plasma to inactivate bacterial spores on stainless steel screws[J]. *Astrobiology*, 2013, 13(7): 597-606.
- [55] COBB T C. UV-C decontamination: NASA, prions, and future perspectives[J]. *Appl Biosaf*, 2016, 21(2): 84-88.
- [56] FAJARDO-CAVAZOS P, SCHUERGER A C, NICHOLSON W L. Exposure of DNA and *Bacillus subtilis* spores to simulated martian environments: Use of quantitative PCR (qPCR) to measure inactivation

- rates of DNA to function as a template molecule[J]. *Astrobiology*, 2010, 10(4): 403-11.
- [57] MASTASCUSA V, ROMANO I, DONATO P D, et al. Extremophiles survival to simulated space conditions: An astrobiology model study[J]. *Orig Life Evol Biosph*, 2014, 44(3): 231-237.
- [58] FENDRIHAN S, BÉRCES A, LAMMER H, et al. Investigating the effects of simulated martian ultraviolet radiation on halococcus dombrowskii and other extremely halophilic archaeobacteria[J]. *Astrobiology*, 2009, 9(1): 104-112.
- [59] FRICK A, MOGUL R, STABEKIS P, et al. Overview of current capabilities and research and technology developments for planetary protection[J]. *Adv Space Res*, 2014, 54(2): 221-240.
- [60] SUMMONS R E, SESSIONS A L, ALLWOOD A C, et al. Planning considerations related to the organic contamination of martian samples and implications for the Mars 2020 rover[J]. *Astrobiology*, 2014, 14(12): 969-1027.
- [61] LEE J H, CHO C H, SONG J B, et al. A Path to planetary protection requirements for human exploration: a literary analysis and systems engineering approach[C]//40th COSPAR Scientific Assembly. Moscow, Russia: COSPAR, 2014.
- [62] FARMER J D, BELL J F, BENISON K C, et al. Assessment of planetary protection requirements for Mars sample return missions [M]. Washington, DC: National Academy Press, 2009.
- [63] BARTA D J, HOGAN J A. Planetary protection considerations for life support and habitation systems [C]//18th IAA Humans in Space Symposium. Houston, TX, USA: [s. n.], 2011.
- [64] SPRY J A, RACE M S, KMINEK G, et al. Planetary protection knowledge gaps for future Mars human missions: stepwise progress in identifying and integrating science and technology needs [C]//48th International Conference on Environmental Systems. Albuquerque, New Mexico: [s. n.], 2018.
- [65] RUMMEL J D, CONLEY C. Preparing for the human exploration of Mars: health care and planetary protection requirements and practices [C]//International Astronautical Congress. Naples, Italy: [s. n.], 2012.
- [66] MERMEL L A. Infection prevention and control during prolonged human space travel[J]. *Clin Infect Dis*, 2013, 56(1): 123-130.

作者简介:

徐侃彦(1973—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向: 航天器微生物防护技术、深空探测行星保护、空间环境生物效应。

通信地址: 北京市海淀区知春路61号康拓科技大厦(100081)

电话: (010)68379298

E-mail: xukanyan@cast.cn

印红(1973—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 空间微生物防控技术研究及行星保护技术。本文通讯作者。

通信地址: 北京市海淀区知春路61号(100190)

电话: 13671284958

E-mail: yinhong06@163.com

Planetary Protection for Manned Mars Exploration

XU Kanyan^{1,2,3}, MA Lingling^{1,2,3}, YIN Hong^{1,2,3}, ZHANG Qin^{1,2,3}, ZOU Leyang⁴

(1. Shenzhou Space Biology Science and Technology Cooperation, Ltd., Beijing 100190, China;

2. Space Biology Research and Technology Center, Beijing 100190, China;

3. Space Biology R & D Center of China Aerospace Science and Technology Corporation Ltd., Beijing 100190, China;

4. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100086, China)

Abstract: Planetary protection is one of the key problems which will greatly affect the future human missions to Mars. Planetary protection has three major goals: 1) The protection of extraterrestrial planet from terrestrial life contamination (forward contamination prevention); 2) The protection of Earth from extraterrestrial life (back contamination prevention); 3) The protection of the health and safety of astronauts. The international aerospace community has begun to formulate policies and conduct technical discussions on planetary protection for human Mars missions. In this review, the definition and legal base of planetary protection are introduced, and the planetary protection implementation of NASA Apollo program is reviewed, and the major contaminants, contamination pathway, and contamination control strategy for future human Mars missions are discussed.

Key words: planetary protection; human Mars mission; forward contamination; back contamination; contaminant; contamination pathway

High lights:

- The concept and legal base of planetary protection are introduced.
- The planetary protection implementation of Apollo program is summarized.
- The major contaminants and contamination pathways for planetary protection in a human Mars mission are analyzed.
- The major planetary protection strategies for forward contamination, back contamination and astronaut health in human Mars missions are discussed.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]