DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.04.023

# 深空安全研究现状与未来发展

吴克[1]，张哲[2,3]，杨文飞[4]，何建峰[4]，张天柱[3,4]，简抗抗[5]，吴伟仁[3,5]

（1. 北京空间飞行器总体设计部，北京 100094；2. 北京理工大学宇航学院，北京 100081；3. 深空探测实验室，合肥 230088；4. 中国科学技术大学信息科学技术学院，合肥 230026；5. 国家航天局探月与航天工程中心，北京 100190）

**摘要：**世界各国深空探测活动日益增多、探测环境趋于复杂、任务难度越来越大，开展深空安全问题研究具有现实意义。本文从深空安全的基本内涵出发，概述了深空安全的研究意义与关键问题，梳理了空间辐射威胁、行星保护、太空遗产保护、空间立法等深空安全关键问题的研究现状并展望了未来发展。空间辐射具有威胁类型多、辐射强度大的特点，应从物理防护、生物医学防护、化学防护等角度开展研究。行星保护主要面临深空航天器的污染和撞击挑战，应从深空微生物检测与消毒杀菌技术、应对政策制定等角度开展研究。太空遗产保护因各国间的政治、文化、法律差异而在评估及保护措施方面存在争议，应从国际协作、深空航天器以及人类影响降低等角度开展研究。深空立法因各国间存在复杂的国际关系而导致当前的法律法规效力难以成为国际社会共识，应从国际立法组织、国内研究机构、国内法律体系完善等方面开展研究。

**关键词：**深空安全；空间辐射威胁；行星保护；太空遗产保护；空间立法

**中图分类号：**V11　　**文献标识码：**A

# Research Status and Future Development of Deep Space Security

**Wu Ke[1], Zhang Zhe[2,3], Yang Wenfei[4], He Jianfeng[4], Zhang Tianzhu[3,4], Jian Kangkang[5], Wu Weiren[3,5]**

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094 , China; 2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230088, China; 4. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 5. Lunar Exploration and Space Engineering Center, China National Space Administration, Beijing 100190, China)

**Abstract:** As deep space exploration activities increase worldwide, the exploration environment becomes increasingly complex and the exploration tasks become increasingly difficult. Therefore, it is of great practical significance to research on deep space security issues. In this study, we first clarify the basic connotation of deep space security, briefly describe the significance and key issues of deep space security research, and summarize the research status and future development of four key deep space security issues: space radiation threat, planetary protection, space heritage protection, and space legislation. The study indicates that space radiation has the characteristics of multiple threat sources and high radiation intensity and should be researched from the perspectives of physical, biomedical, and chemical protection. Planetary protection mainly faces the challenges of pollution and impact of deep space spacecraft, and research should be conducted from the perspectives of deep space microbial detection and disinfection technologies as well as policy formulation. Space heritage protection is controversial in terms of evaluation and protection measures owing to

**收稿日期：**2022-06-26；**修回日期：**2022-07-18

**通讯作者：**张哲，北京理工大学宇航学院研究员，研究方向为深空探测、智能感知与通信技术；E-mail: cnclepzz@126.com

**资助项目：**国防基础科研计划项目(JCKY2020903B002)；国家自然科学基金项目(12150007)

**本刊网址：**www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

political, cultural, and legal differences among countries, and it should be researched from the perspectives of international cooperation, deep space spacecraft, and reduction of human impact. Due to the complex international relations among countries, it is difficult for the effectiveness of current laws and regulations to become the consensus of the international community; therefore, research should be conducted from the aspects of international legislative organizations, domestic research institutions, and the improvement of domestic legal systems.

**Keywords:** deep space security; space radiation threat; planetary protection; space heritage protection; space legislation

## 一、前言

深空探测指对月球及以远的天体或空间开展的探测活动 [1]，相关技术水平事关国家战略利益保障能力，也是国家科技竞争力的重要标志。有研究表明，月球上可能存在氦-3 等稀缺物质资源，在火星、木星轨道之间的小行星带可能富含大量的贵重金属矿物资源 [2]。开发利用深空资源，有可能弥补地球上相应资源短缺的情况，为人类拓展地外生存空间提供能源、材料等物质资源 [3]。近年来，深空探测技术的快速进步使人类探测深空天体与环境、开发利用深空资源的可行性进一步增强。世界航天大国积极发展深空探测事业。在深空探测日益活跃、探测环境趋于复杂的背景下，深空安全的重要性与紧迫性愈发突出 [4]。

就目前的研究进展看，深空安全主要涉及深空资源、深空活动、深空环境威胁3个方面，具体而言：① 各国共同并和平利用太空资源，避免出现因深空探测领域无序竞争而导致的安全问题 [5]；② 科学开展深空探测活动，避免地外天体和地球之间的微生物感染；③ 应对深空复杂未知的极端环境威胁带来的安全问题 [6]。深空安全重点关注空间辐射、行星保护、太空遗产保护、空间立法4个关键问题，航天大国就此开展了必要的研究活动，以精准支持有关策略制定。也要注意到，现有研究多为自发且显分散，仅着重针对某一类深空安全问题展开探讨；缺乏系统性的总结，在问题分析、发展现状、未来趋势方面的工作不够全面。本文作为我国深空安全领域的先导研究内容，力求系统性阐述深空安全的基本内涵，梳理研究现状并总结未来趋势，以期为深空领域规划制定、探测任务总体设计提供基础参考。

## 二、深空安全的基本内涵与重要意义

深空安全概念在航天领域中相对宽泛，国际上尚未形成明确定义。英国发布了《国家空间安全政策》（2014 年），将深空安全表述为“安全、可靠、可持续地获取空间资源的能力以及能够应对威胁和灾害的抗破坏能力”[6]。加拿大等国联合出版了《太空安全索引》（2020 年），将深空安全描述为“能够安全、可持续地进入和利用太空资源，避免受到来自深空环境的威胁”[7]。《中华人民共和国国家安全法》（2015 年）阐述了深空安全相关内容：国家坚持和平探索和利用外层空间，增强安全进出、科学考察、开发利用的能力，加强国际合作，维护我国在外层空间的活动、资产和其他利益的安全。综合上述观点，本研究认为深空安全主要指：国家能够合理利用并保护太空内的自然与人造资源，进行自由、安全、可持续的太空活动，有效预警并应对各种可能的深空威胁。

一般认为，深空资源、深空活动、深空环境威胁对于深空安全至关重要（见图 1）。① 深空资源包括深空探测器、地－月平动点中继卫星等深空资产，轨位和频谱资源等，在合理开发与利用深空资产、合理保护太空遗产等方面具有重要作用。② 深空活动强调自由进出深空，核心内容在于充分利用深空，如建立深空基准体系，开展各种遥感或原位科学探测任务；关注重点是避免地球生物污染其他天体以及保护地球免遭其他天体生物污染。③ 深空环境威胁指可能对深空活动、深空资源造成干扰或破坏的因素，分为自然威胁、人为威胁两类：前者是深空空间辐射等环境造成的威胁，后者表现为人类

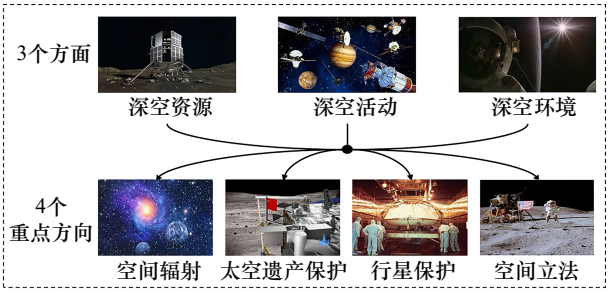


图1　深空安全涉及的基本方面与重点方向

日益发展的深空活动导致的深空环境污染问题。

深入研究深空安全问题，符合国家战略需求，对提升航天科技水平、空间安全保障能力具有重大意义，也是航天强国建设的标志性活动，兼具理论与现实价值。

## 三、深空安全重点方向与发展历程

### （一）空间辐射

深空安全的主要辐射威胁来自银河宇宙射线、太阳质子事件等。空间辐射可致航天员产生严重的辐射损伤，增加中枢神经系统患病、急性辐射症状等风险 [7,8]。深空探测设备中的集成电路对辐射较为敏感，当高能量的宇宙辐射粒子穿透航天器的防护材料并入射到集成电路的敏感区域时，可导致集成电路出现错误甚至永久损伤，从而影响太空舱和空间站设备的正常运行。因此，空间辐射威胁是影响深空探测尤其载人深空探测任务实施的重要因素之一，有效开展空间辐射防护是确保航天员健康、深空探测任务顺利实施的必要措施。

虽然国际上完成了诸多深空探测工程任务，科学家也在深入研究空间辐射防护策略，但因空间辐射环境的独特性与复杂性，目前的辐射防护技术体系仍然不够完善。中国国家航天局、美国国家航空航天局（NASA)、欧洲航天局（ESA）以及各国的航天医学研究机构均给予高度关注 [8~10]。例如，在 NASA 修订的“战略性空间技术投资计划”（2015 年）中，空间辐射防护、空间辐射缓解等技术被列为核心技术以及探测任务实施前必须解决的重要问题 [9]。

### （二）行星保护

行星保护指在深空探测活动中采用相应保护措施，使地球及地外行星天体的生态环境免受外来干扰的行为 [11]。早在人类开展太空探索的初期，行星保护的观点就应运而生，旨在避免出现其他天体生物与地球生物交叉污染的情况 [12]。行星保护是实现可持续深空探测活动的重要影响因素，发展主要分为5个阶段 [13]。

第一阶段为定性分析阶段。1958年国际空间研究委员会（COSPAR）成立 [14]，对行星保护划分了相应的防护类别和等级 [15]；联合国和平利用外层空间委员会（COPUOS）随后成立。这些组织主导开展了行星保护的早期研究。

第二阶段为“空间条约”阶段。1964 年 COSPAR 制定了第一个量化的行星保护目标 [16]，《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外太空活动所应遵守原则的条约》（1967 年）随后被提出 [17]；一些国家和组织相继制定了各自的行星保护准则及政策，行星保护成为开展深空探测任务的国际共识性行为。COSPAR 针对伦理问题展开研究并颁布了相应的政策和法规，但因当时复杂的国际关系而未能有效实施。

第三、四阶段均为“外空软法”阶段，指国际社会在外空探索中形成的不具有法律约束力但能产生实际执行效力的法律规范。第三阶段指 20 世纪 80—90 年代的“外空软法”起步期。经过前期各方的博弈以及行星保护实践的推动，各国认识到仅依靠条约的约束来完成行星保护目标是不现实的，多数国家倾向于将内容上更具象而约束力相对弱的联合国大会决议以及 COSPAR 政策作为首选。第四阶段指从 1995 年起历时约 20 年的“外空软法”发展期。在起步期的基础上，国际上出台了各方一致支持的文件，如《关于开展探索和利用外层空间的国际合作，促进所有国家的福利和利益，并特别要考虑到发展中国家的需要的宣言》（1996 年） [18]为《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外太空活动所应遵守原则的条约》的基本原则提供了更明确的表述，但在相关利益集团冲突的背景下，最终版本仍具有灵活性和不确定性；《与和平开发和利用外层空间相关的国内立法建议的决议》（2013 年）建议各国制定国内空间法，呼吁各国在探索深空时履行其行星保护的义务。

第五阶段是指近年来各主要航天国家启动的国内立法阶段，暂无明确的时间划分。截至 2021 年年底，约有 25 个国家完成了国内空间立法。然而，国际空间立法仍处于初期阶段，需要进一步发展和完善。

在行星保护的各个发展阶段，各国航天机构逐步完善了行星保护政策及空间管理机构。NASA 在行星保护工作方面的规范程度最高，也设立了完整的行星保护管理架构 [19~21]。ESA 同样制定了明确的行星保护制度 [22]。俄罗斯联邦航天局尽管没有成立专门的行星保护管理机构，但在执行深空探

测活动时实施了行星保护。日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）开始建立行星保护机制。我国正在不断深化行星保护措施，在“天宫一号”项目中成功实施了微生物防护，在“嫦娥四号”任务、“天问一号”火星探测任务中对月球和火星采取了星体保护措施；但尚未出台行星保护专项政策法规，专门的监管机构职能也待完善。

### （三）太空遗产保护

按照联合国教科文组织（UNESCO）《保护世界文化和自然遗产公约》的定义，太空遗产分为人文遗产、自然遗产，其中的人文遗产包括：与太空开展科学研究过程相关的遗产，近地载人航天、深空探测活动等相关遗产，位于地外的文化遗产（主要指具有艺术和研究价值的地外自然现象）。太空遗产作为全球天文学遗产的重要组成部分，在科学史、考古、艺术等方面价值突出。

1957年“斯普特尼克1号”及随后的“先锋1号”发射入轨，揭开了人类太空时代的序幕：前者虽然只在太空停留了数月，却是首个在太空中漂浮的人造物体，也将人类的考古前沿拓展到深空；后者是目前在轨时间最久的人造物体，预计未来600年内依然存在于深空 [23]。此后，具有特别意义的太空遗产不断涌现，如空间科学仪器方面的哈勃太空望远镜、开普勒空间望远镜卫星、詹姆斯·韦伯太空望远镜等，深空探测器方面的“旅行者1号”“旅行者2号”等。这些太空遗产不仅曾经或正在为人类的深空探测事业服务，而且在部分领域具有里程碑式的意义。人类深空探测活动不断深入，留下了许多具有纪念意义的太空遗产，如1969年“阿波罗11号”留下的人类登月脚印、2020年“嫦娥五号”在月球展开的国旗。地外与地球迥异的自然环境同样具有极高的科学价值，如“阿波罗”探月任务、“嫦娥五号”任务带回的月壤样本，提供了关于地月系统、太阳系早期演化阶段的重要信息。

对深空探测过程中人类创造和发现的人文遗产、自然遗产加以保护，将是人类深空探测活动的重要考虑因素。也要注意到，由于国家间政治、文化、法律的差异，对太空遗产的评估和保护仍存在较大争议，很多关于太空遗产的条约效力还没有成为国际共识；人类自身航天活动的开展，同样会对太空遗产保护造成难以预料的影响。

### （四）深空立法

深空探测活动促进了相关技术的发展，也为人类开发利用地外资源、拓展生存空间提供了可能途径。20世纪60年代，联合国提出了与深空探测活动相关的“外层空间法”，由《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外太空活动所应遵守原则的条约》《关于营救宇航员、遣返宇航员和归还发射到外层空间的物体的协定》《外空物体所造成损害之国际责任公约》《关于登记射入外层空间物体的公约》《关于各国在月球和其他天体上活动的协定》5项国际条约构成，引导国际社会和平利用太空并规范有序地开展各类深空探测活动。其中，《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外太空活动所应遵守原则的条约》（1967年）[23]、《关于各国在月球和其他天体上活动的协定》（1979年）[24]与深空探测密切相关。

《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外太空活动所应遵守原则的条约》的核心观点是，所有国家都可以在遵循国际约定下自由探索外层空间，任何国家不得以任何方式将外层空间和天体据为己有，任何组织在外层空间活动应承担相应的国际责任 [25]。该条约得到了美国、中国、俄罗斯、法国、德国、意大利、日本等国家的认可。《关于各国在月球和其他天体上活动的协定》以《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外太空活动所应遵守原则的条约》为基础，是针对月球探测活动的拓展延伸；提出任何国家不得将月球据为己有，月球上的自然资源均不应成为任何国家、政府或非政府国际组织、国家组织或非政府实体、任何自然人的财产 [2]。然而，各国的航天法律尚未完善，存在很多不合理、不清晰的条款，无法为相关活动提供明确指导。例如，在COPUOS关于美国提出的《2015空间资源探索和利用法》讨论会议上，各国代表没有达成统一意见，未能形成明确结论 [26]。

当前，国际社会在深空探测领域相关的法律法规主要以《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外太空活动所应遵守原则的条约》《关于各国在月球和其他天体上活动的协定》为基础，对相关国际条约规定进行适当修改以指导各国的深空立法活动 [25]。在我国，深空探测领域尚未制定专门的法律法规，但已有研究者就国际深空探测立法开展探索 [26~29]，结合国情提出了相关法律问题的意

见与建议 [30]。深空探测作为国际航天发展的新兴热点，不仅关乎国家利益，也涉及国际交往和政治；积极制定深空探测相关的法律法规，有助于维护国家安全，规范包括商业航天在内的深空探测活动，还能促进履行国际义务并彰显大国担当 [31]。

## 四、深空安全重点方向面临的挑战

### （一）空间辐射

地磁场、星体活动等因素导致了复杂多样的空间辐射环境。银河宇宙射线、太阳质子事件等空间辐射源，对载人登月等深空探测任务中的航天员空间活动、航天设备安全运行构成了不同程度的威胁 [32~36]。空间环境辐射具有威胁类型多、辐射强度大等特点，开展有效防护是实施以载人深空探测为代表的深空探测重大任务的现实挑战。

银河宇宙射线主要源自太阳系外的高能粒子，射线中绝大部分为质子（氢核）、$\alpha$粒子（氦核），同时含有极少量的重原子核；射线能量高达太电子伏特级 [33]。航天器舱壁无法完全阻挡这些高能粒子，航天员接触后可能会损伤身体器官。此外，在舱壁金属与高能粒子的相互作用下可能产生次级辐射粒子生，诱发辐射强度提升 [37]。

太阳质子事件也称太阳宇宙射线、高能太阳粒子，绝大部分为质子，少量为$\alpha$粒子，极少量为重离子。渐进型太阳质子事件具有周期长、行进缓慢的特点，由日冕质量喷射引起；脉冲太阳质子事件发生时长很短，因太阳耀斑产生。

### （二）行星保护

行星保护面临立法和技术两方面挑战。在立法层面，主要面临三重挑战。① 行星保护法律与政策制定，宜兼顾科学性、当前的技术可行性，而涉及技术、政策的复合型人才缺乏。② 行星探测技术发展迅速，探测的目标、任务、范围均在不断变化；而当前的行星保护政策更新缓慢，应建立快速反应机制以应对趋于复杂的探测任务。③ 行星保护政策的重点在于确保脱离地面支撑后仍能快速响应并自主维持较长时间。行星保护政策多由美国主导，不利于其他国家积极参与以更好保护人类社会的共同利益；应促成更多国家和机构参与，确保人类深空探测活动整体上符合行星保护的原则和要求。

在技术层面，行星保护主要分为正向污染防护（保护地球免遭外来生物侵袭）、逆向污染防护（保护其他行星免遭地球生物污染）。例如，NASA 制定了用于指导各类天体探测任务的行星保护要点文件 [38]。相应的技术挑战涉及四方面。① 生物污染。微生物污染较为常见，主要是产芽孢菌，其数量已作为飞行器微生物负荷的标准；有关极端环境下微生物的生存能力认识得到进一步提升 [39]。生物污染防护在消除微生物对行星环境造成污染同时，也可避免相关生命探测设备得出错误的分析结论。② 有机污染。航天器携带的部分化合物、排放产物等有机物，可能对当前的探测任务产生影响，也可能会以遗留物的形式进一步对未来的深空探测活动造成干扰，导致对行星生命探测的潜在破坏 [40]；还有可能会污染行星大气，产生不可预测的严重后果。③ 深空航天器撞击。深空航天器与行星表面的撞击会给行星保护造成严重影响。例如，行星表面的固态水会因为撞击产生的高温而融化，进而在行星表面形成可影响未来生命探测的区域；撞击可能导致行星表面被航天器表面和内部的生物污染，剧烈的撞击还可能导致小行星偏离固有飞行轨道；撞击产生的碎片在行星大气中可能对未来的行星探测任务产生危害。④ 二次污染。深空航天器消毒灭菌是行星保护中防止微生物污染的重要步骤，但伴生的二次污染也是行星保护面临的严峻挑战。应避免一次污染物经物理、化学反应形成的新污染物及其再次污染。消杀后的着陆器需使用生物防护罩进行严格防护，防止微生物渗透穿过。为防止低消杀等级探测器的其他部分造成二次污染，需在着陆器、巡视器等地外天体探测器上增加额外的防护部件。

### （三）太空遗产保护

深空和许多星体（如月球）表面不存在风、水、有机过程等地球上存在的侵蚀力；除了昼夜温差、微陨石撞击等影响外，太空遗产状态几乎不受影响 [41]。当前，太空遗产保护受人为活动影响较大，各国尚未形成保护共识，有必要针对太空遗产保护问题进行应对策略研究。

一是制定国际法律法规。迄今为止，对于太空遗产的管控仍是有争议的法律领域，多数条约和协定仅在国家内部生效。例如，美国发布了《保护人

类太空的一小步法》（2020 年），旨在保护“阿波罗”登月时代在月球上留下的历史遗迹和人造物体，也是 NASA 发布的有关太空活动实体建议（2011 年）的延续。为有效保护太空遗产，需要在各国和国际法律法规、条约政策错综复杂且相互交织的状况下探索解决方案。

二是研究太空遗产的鉴定标准。由于人类的太空活动更为频繁，保护太空遗产需要耗费巨大的资源。有研究建议，将所有的早期月球探索地点列为重要保护区域，保护其免受任何人类的影响 [42]；在保护南极等极端环境遗址的原则上，建立月球公园 [43]。这些建议虽有一定价值，但难以指导具体实践。对太空遗产进行准确定义并科学建立分类系统，成为迫切且现实的问题。

三是明确深空探测活动中探测器与人类活动的影响。人类深空探测活动的持续深入，必然给太空遗产保护带来了增量干扰。深空航天器在地外天体着陆或低空航行时的轨迹，同样可能对附近的太空遗产造成损坏。在地外天体探测过程中，管理规则的缺失可能难以阻止人为活动破坏太空遗产。

### （四）深空立法

深空资源的开发利用成为深空探测活动的新热点。为了科学合理、可持续地利用深空资源，除了提升深空探测技术，还需制定法律法规以约束不合法的开发及技术滥用。国际社会目前普遍遵循的深空探测相关法律法规有：联合国发布的《关于各国探索和利用包括月球和其他天体的外太空活动所应遵守原则的条约》《关于各国在月球和其他天体上活动的协定》，美国、卢森堡等国颁布的政策法规性文件 [26,30]。尽管深空探测领域快速发展，但因复杂的国际关系，立法方面始终面临挑战。

一是不同国家的探测需求难以平衡。部分航天大国已经开始对太阳系外的星体进行探测，而多数国家的深空探测任务局限在太阳系内，一些发展滞后国家未能开展深空探测任务。不同国家的深空探测任务覆盖范围不尽相同，探测重点也有差异。开展国际深空立法，应考虑各国深空探测发展现状，合理平衡各国的现实需求。

二是存在错综复杂国际形势影响。深空资源是全人类共同的财富，深空探测的相关法律离不开各国的共同制定和认可。鉴于国际形势复杂多变，相关法律的设立不可避免地受到包括政治因素在内的阻碍，给深空探测技术的稳定发展与和平应用带来挑战。

三是航天立法人才队伍匮乏。深空法律法规有其超越常规立法的独特性，需要众多掌握航天知识、具有法律专业背景的人员共同参与起草工作。然而，国际社会对航天立法领域的重视程度不够，知名的法学专业高校没有开展深空立法的系统性研究，导致深空立法领域专业人才匮乏，不利于保障深空安全领域的立法需求。

## 五、深空安全重点方向应对策略分析

### （一）空间辐射

空间辐射防护主要分为物理防护、生物医学防护、化学防护。目前，物理防护手段较为成熟，而生物医学防护、化学防护研究较少。在实际应用中，全面考虑真实宇宙空间辐射的复杂性以及太空部件的物理特性，据此进行方案优选。

物理防护细分为被动辐射防护、主动辐射防护。被动辐射防护是目前主流的辐射防护手段，通过增加屏蔽或选用抗辐射元器件来防护辐射。增厚舱壁并设计特定结构的屏蔽材料，可使带电粒子在穿过舱壁的过程中因能量损失而沉积下来，阻止绝大部分高能粒子穿透舱壁 [44]；但增加了舱体质量，带来了额外的发射和运行代价。采取特殊的设计和工艺技术能够大幅提升元器件的防辐射能力，所形成的抗辐射元器件可以保障探测器系统的安全性，但成本较普通元器件高很多 [45]。

主动辐射防护通过人工创造防护场来偏转辐射粒子的路径，主要有磁场、静电场、等离子体等方法 [46]。① 磁场方法通过强磁场产生的洛伦兹力来偏转带电粒子，避免粒子正面撞击深空航天器，可消除大多数的次级辐射；传统导电线圈的机械强度限制了磁场强度，超导技术发展成熟后具有良好的应用前景。② 静电场方法在深空航天器设备的周围区域人工产生静电场，利用电场的高电势使带电粒子减速或者偏移。③ 等离子体方法是静电场和磁场方法的结合，其中静电场用于偏移正电粒子。

生物医学防护也是太空辐射防护的重要手段之一，通过服用药物、补充营养等方式使航天员身体产生相应的辐射抗性和耐受性，从而适应一定程度

的太空辐射；诱导抗辐射基因和蛋白的表达，调节生物炎性、抗炎性能力以及抗氧化保护能力，据此实现辐射防护 [33]。

化学辐射防护的应用有局限性，这是因为适合航天员长期使用的化学辐射防护方法尚未成熟。清除辐射诱导的自由基，中和脱氧核糖核酸等重要生物大分子上的氧效应，从而促进细胞高效处理辐射，这是化学辐射防护方法的基本机理 [31]。

### （二）行星保护

从宏观角度看，合理分析任务并确定需求是制定行星保护策略的关键 [11]。针对具体的深空探测任务方案，以行星保护国际政策为基础，规划设计并合理分配相应要求，是确保目标污染概率合规的有效策略。对于深空环境的合理分区管理和深入研究，有助于增强保护效果。采用自动化、遥操控的无人工具，能够避免正向和逆向的直接接触或相互污染。

从微观角度看，深空微生物检测和消毒杀菌是行星保护的技术基础。识别深空探测全过程中的重点微生物（如嗜极微生物） [46]，研究环境、材料友好的物理消毒杀菌技术 [46]，开发抑菌且不影响系统组件功能的航天材料 [45]，适应复杂环境、多种需求的微生物监测消杀系统等。还应严格控制深空探测过程中的有机物含量和废物排放量。

从社会角度看，平衡行星保护政策以兼顾工程可实现性和科学性是未来的发展目标 [11]。以NASA为例，行星保护办公室同时负责政策制定、实施和监督，妥善处理好行星保护中的“执行者”“监管者”关系，发挥了有效保护未来科学成果的作用。商业公司正在加快开展深空探测活动，制定商业航天活动的行星保护规范也显迫切。

从人文关怀看，兼顾航天员和外太空环境的友好性是行星保护政策发展的必经之路。正向或逆向的污染防护，都离不开航天员和外太空环境的交互；深空科学与深空应用的成果产出，也与航天员的工作状态、深空受污染程度密切相关。研发污染可控且性能优越的航天生命保障系统，开展深空环境生态体系探索，建立地球生态中转站点等，都是行星保护的应有内容。

### （三）太空遗产保护

在国际协作方面，设立国际太空遗产保护委员会，接受太空遗产保护提名并进行必要性审查，监督应受保护场所和物品的管理情况。根据“外层空间的探索和利用应为所有人民的利益而进行，无论其经济或科学发展的程度如何”原则 [47]，国际太空遗产保护委员会应由代表尽可能多的不同类型利益相关者的成员组成，如空间科学家、文化遗产专家、来自航天和非航天国家的政府代表等。

在太空遗产的评估与分类方面，鉴于目前相关原则和法律尚不完善，可在参与UNESCO相关事务、确定“太空遗产分类法”基本准则与具体细节的同时，响应UNESCO号召，确定潜在的天文和科学地点并向世界遗产名录（WHL）提名。通过以下途径为WHL提名提供支持：总结有关太空遗产的现有文献，强调提名为WHL作出贡献的潜力以及与“平衡、有代表性、可信的遗产名单”的关联性。

在航天器效应以及人类或人造物体的影响方面，确定下降/着陆边界，避免航天器或航天员破坏太空遗产。针对航天员破坏遗迹的可能性，确定人为活动边界，避免人造物体进入太空遗迹的安全范围内。具体的下降/着陆边界、人为活动边界，应根据航天器规模等因素进行合理规划。

### （四）深空立法

注重国际交流协作，建立国际性的深空立法组织。秉承尊重主权、平等互利原则，协调各国商讨和完善法律法规，促成国际共识，促进深空探测活动的长期可持续发展。

在国内建立相应的研究机构，为参与国际深空立法提供理论基础与实践论据。相关机构开展深空各天体组成成分及演化历史研究，与矿产资源管理机构开展合作探索；跟踪和研究国际太空活动，为参与国际上深空法规制定提供依据。在国家层面合理加强空间相关的法律研究和投入力度，吸纳、集聚、培养航天法律人才。

完善国内相关法律法规，促进深空探测活动良性发展。在国家安全方面，坚持和平利用深空，反对外空武器化，维护国家权益，确保我国的深空探测活动不受非法干扰与侵袭。在规划管理方面，明确相关管理部门的职责分工，消除职能交叉以及空白地带，构建深空探测领域的管理制度体系 [3]。在商业化方面，支持社会资本、商业航天企业参与

深空探测及资源开发活动 [31]，确立参与深空资源开发各实体的权利与义务。在国际义务方面，基于国际相关公约制定相对应的国内法规，鼓励在深空探测活动中积极进行国际协作和互助。

## 五、结语

本文较为全面地分析了深空安全面临的空间辐射、行星保护、太空遗产保护、深空立法等问题的研究现状。物理防护是当前应对空间辐射的主要手段，发展化学防护、生物防护技术具有远期应用价值；微生物消杀是当前行星保护的主要手段，攻克深空微生物检测技术并建立合适的应对政策，对后续复杂探测任务至关重要；太空遗产的评估和保护目前仍存在极大争议，加强国际协作、降低深空航天器及人类的影响是未来必经之路；深空立法面临着法律法规的效力难以成为国际社会共识的挑战，成立国际性的立法组织、建立国内研究机构、完善国内法律体系具有重要意义。

深空安全涵盖了深空内部的环境因素、外部的技术因素以及国际政治因素，问题复杂性高。本文从深空安全的基本内涵入手，总结深空安全关注的重点方向并提炼各方向面临的挑战，针对性提出应对策略，可为我国深空安全相关的后续研究提供基础参考。

**参考文献**


[1] 吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术 [J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 5–17.
Wu W R, Yu D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5–17.

[2] 白青江, 范全林, 任丽文, 等. 关于太阳系深空资源开发立法的思考 [J]. 卫星应用, 2018 (8): 49–53.
Bai Q J, Fan Q L, Ren L W, et al. Reflections on the legislation for the development of deep space resources in the solar system [J]. Satellite Applications, 2018 (8): 49–53.

[3] 王冀莲. 加快航天立法建设航天强国 [J]. 国际太空, 2018 (5): 33–37.
Wang J L. Accelerating space legislation, building space power [J]. Space International, 2018 (5): 33–37.

[4] 武立军, 王旭, 王建斌. 未来深空安全问题的几点思考 [J]. 现代防御技术, 2021, 49(2): 8–12.
Wu L J, Wang X, Wang J B. Some thoughts on deep space safety in future [J]. Modern Defense Technology, 2021, 49(2): 8–12.

[5] 《学术前沿》编者. 太空战略: 现状、趋势与大国竞争 [J]. 人民论坛 • 学术前沿, 2020 (16): 4–5.
Editors of *Frontiers*. Space strategy: Status quo, trends and great power competition [J]. Frontiers, 2020 (16): 4–5.

[6] 陈瑛, 卫国宁, 唐生勇, 等. 国际太空安全形势分析与发展建议 [J]. 空天防御, 2021, 4(3): 99–104.
Chen Y, Wei G N, Tang S Y, et al. Global space security situation analysis and development proposal [J]. Air & Space Defense, 2021, 4(3): 99–104.

[7] Space Security Index. The future of the Earth and humanity is tied to activities in outer space [EB/OL]. (2020-01-01) [2022-05-05]. https://spacesecurityindex.org/.

[8] National Aeronautics and Space Administration. Managing space radiation risk in the new era of space exploration [R]. Washington DC: National Research Council, 2008.

[9] 齐玢, 果琳丽, 张志贤, 等. 载人深空探测任务航天医学工程问题研究 [J]. 航天器环境工程, 2016, 33(1): 21–27.
Qi B, Guo L L, Zhang Z X, et al. Issues of space medical-engineering in manned deep space exploration mission [J]. Space Environment Engineering, 2016, 33(1): 21–27.

[10] 吴大蔚, 张华, 赵亚丽, 等. 载人航天飞行空间辐射研究进展 [J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 152–162.
Wu D W, Zhang H, Zhao Y L, et al. Research progress of space radiation for manned spaceflight [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2018, 31(2): 152–162.

[11] Willams D R, Turnock M. Human space exploration the next fifty years [J]. McGill Journal of Medicine, 2011, 13(2): 76–81.

[12] 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.
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.

[13] 李帅帅, 宋甘雨, 刘红, 等. 行星保护发展现状及我国行星保护政策实施建议 [J]. 中国航天, 2021 (5): 31–36.
Li S S, Song G Y, Liu H, et al. The curent status of planetary protection and recommendations for the implementation of China's planetary protection policy [J]. Aerospace China, 2021 (5): 31–36.

[14] Messina P, Vennemann D. The European space exploration programme: Current status of ESA's plans for Moon and Mars exploration [J]. Acta Astronautica, 2005, 57(2–8): 156–160.

[15] 张兰涛, 杨宏, 印红, 等. 行星保护的防控环节分析及实施建议 [J]. 航天器工程, 2016, 25(5): 105–110.
Zhang L T, Yang H, Yin H, et al. Prevention and control links analysis and implementation suggestions of planetary protection [J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(5): 105–110.

[16] Cooley W, Schalkowsky S. Analysis of planetary quarantine requirements [R]. Brian Dunbar: National Aeronautics and Space Administration, 1996.

[17] Froehlich A. A fresh view on the outer space treaty [M]. Cham: Springer, 2018.

[18] 联合国外层空间事务厅. 联合国关于外层空间的条约和原则、大会有关决议以及其他文件 [EB/OL]. (2008-11-02)[2022-05-05]. https://www. unoosa. org/res/oosadoc/data/documents/2013/stspace/stspace61_0_html/st_space_61C.pdf.

[19] Kazarians G A, Benardini J N, Stricker M C, et al. The evolution

of planetary protection implementation on Mars landed missions [C]. Big Sky: 2017 IEEE Aerospace Conference, 2017.

[20] Barengoltz J, Witte J. Planetary protection implementation on Mars reconnaissance orbiter mission [J]. Advances in Space Research, 2008, 42(6): 1108–1119.

[21] Bernard D E, Abelson R D, Johannesen J R, et al. Europa planetary protection for Juno Jupiter orbiter [J]. Advances in Space Research, 2013, 52(3): 547–568.

[22] Debus A. The European standard on planetary protection requirements [J]. Research in Microbiology, 2006, 157(1): 13–18.

[23] Darrin A, O'Leary B L. Handbook of space engineering, archaeology, and heritage [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.

[24] Dembling P G, Arons D M. The evolution of the outer space treaty [EB/OL]. (1967-06-30)[2022-05-05]. https://anyflip. com/youw/stpu/basic.

[25] Dula A. Free enterprise and the proposed Moon treaty [EB/OL]. (1980-01-14)[2022-05-05]. https://arc. aiaa. org/doi/abs/10.2514/6.1980-367.

[26] 中国长城工业集团有限公司法律事务部. 国际空间法体系和外空安全国际规则谈判进程 [J]. 中国航天, 2021 (11): 9–15.
Legal Affairs Department of China Great Wall Industry Group Co., Ltd. International space law and the negotiation process of international rules for space security [J]. Aerospace China, 2021 (11): 9–15.

[27] 赵理海. 外层空间法介绍(二)——外层空间的法律地位(续) [J]. 法学杂志, 1994 (1): 40–41.
Zhao L H. Introduction to outer space law(2): Legal status of outer space(continued) [J]. Law Science Magazine, 1994 (1): 40–41.

[28] 冯艳昌, 何山. 论外层空间的法律地位 [J]. 中国商界, 2008 (3): 143.
Feng Y C, He S. On the legal status of outer space [J]. Business China, 2008 (3): 143.

[29] 夏春利. 试论近空间的法律地位——兼谈空气空间和外层空间的定界问题 [J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2009, 22(4): 47–51.
Xia C L. On the legal status of the near space: The demarcation of air space and outer space [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics(Social Sciences Edition), 2009, 22(4): 47–51.

[30] 王晓海. 太空资源的科学开发与合理利用 [J]. 数字通信世界, 2006 (11): 64–66.
Wang X H. Scientific development and rational utilization of space resource [J]. Digital Communication World, 2006 (11): 64–66.

[31] 徐祥民, 王岩. 外空资源利用与外空环境保护法律制度的完善 [J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(4): 111–115.
Xu X M, Wang Y. On the perfection of the legal system about the use of outer space resource and protection of the outer space environment [J]. China Population Resources and Environment, 2007, 17(4): 111–115.

[32] 程彭超, 闵锐. 近地空间辐射环境与防护方法概述 [J]. 辐射防护通讯, 2017 (1): 14–21.
Cheng P C, Min R. An overview of near-Earth space radiation and its protection [J]. Radiation Protection Bulletin, 2017 (1): 14–21.

[33] Sihver L, Ploc O, Puchalska M, et al. Radiation environment at aviation altitudes and in space [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2015, 164(4): 477–483.

[34] Sanzari J K, Diffenderfer E S, Hagan S, et al. Dermatopathology effects of simulated solar particle event radiation exposure in the porcine model [J]. Life Sciences in Space Research, 2015, 6: 21–28.

[35] Ukhorskiy A Y, Sitnov M I, Mitchell D G, et al. Rotationally driven "zebra stripes" in Earth's inner radiation belt [J]. Nature, 2014, 507(7492): 338–340.

[36] 朱国阳, 王栖溪, 杨文凯. 太空辐射环境对宇航员的影响与防护 [J]. 生命与灾害, 2017 (10): 33–35.
Zhu G Y, Wang Q X, Yang W K. Influence and protection of space radiation environment on astronauts [J]. Life & Disaster, 2017 (10): 33–35.

[37] Office of Safety and Mission Assurance, NASA. Planetary protection provisions for robotic extraterrestrial missions [EB/OL]. (2011-03-20) [2022-05-05]. https://nodis3. gsfc. nasa. gov/npg_img/N_PR_8020_012D_/N_PR_8020_012D_.pdf.

[38] Harrison J P, Gheeraert N, Tsigelnitskiy D, et al. The limits for life under multiple extremes [J]. Trends Microbiol, 2013, 21(4): 204–212.

[39] 徐侃彦, 马玲玲, 印红, 等. 火星无人探测与行星保护 [J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 9–15.
Xu K Y, M L L, Yin H, et al. Mars robotic exploration and planetary protection [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 9–15.

[40] O'Leary B L. Space heritage protection [M]. New York: Springer, 2019.

[41] Stooke P J. Preserving exploration heritage in the Moon 2.0 era [EB/OL]. (2008-12-15)[2022-05-05]. https://www. lpi. usra. edu/meetings/nlsc2008/pdf/2021.pdf.

[42] Capelotti P J. Space: The final archaeological frontier [J]. Archaeology, 2004, 57(6): 46–51.

[43] Spillantini P, Casolino M, Durante M, et al. Shielding from cosmic radiation for interplanetary mission: Active and passive methods [J]. Radiation Measurements, 2007, 42(1): 14–23.

[44] 陈世适, 张宁博, 熊芬芬. 主动太空辐射防护方法分析与研究 [C]. 杭州: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会, 2012.
Chen S S, Zhang N B, Xiong F F. Analysis and research on active space radiation protection methods [C]. Hangzhou: The 9th Annual Academic Conference of the Deep Space Exploration Technology Professional Committee of the Chinese Astronautical Society, 2012.

[45] Henrickson R, Lundgren P, Mohan G B M, et al. Comprehensive measurement of microbial burden in nutrient-deprived cleanrooms [C]. Charleston: 47th International Conference on Environmental Systems, 2017.

[46] Europeam Space Agency. Dry heat bioburden reduction for flight hardware [EB/OL]. (2013-08-30)[2022-05-05]. https://ecss. nl/standard/ecss-q-st-70-57c-dry-heat-bioburden-reduction-for-flighth-ardware-30-august-2013/.

[47] 马呈元. 国际法(第三版) [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012.
Ma C Y. International law(third edition) [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2012.