0254-6124/2026/46(5)-1132-15 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HE Pengzhi, SUI Li, HUA Daoben, WANG Zhimin, SHAO Changsheng, SHI Quanqi, JIA Xianghong. Space Radiation Environment, Effects and Detection in Manned Space Missions (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1132–1146. CSTR:32142.14.cjss.2025-0233. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025-0233

载人航天任务中的空间辐射环境、效应与探测*

贺鹏志[1] 隋 丽[2] 华道本[3] 王志敏[4]
邵长胜[5] 史全岐[1] 贾向红[1,6]

1(山东大学空间科学研究院 威海 264209)

2(中国原子能科学研究院核物理研究所 北京 102413)

3(苏州大学放射医学及交叉学科研究院 苏州 215123)

4(北京理工大学前沿交叉科学院 北京 100081)

5(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230026)

6(西藏大学理学院 西藏自治区青藏高原生态环境与人群健康重点实验室 拉萨 850000)

摘 要 随着人类航天活动由近地空间向地月空间和行星际区域拓展, 空间辐射已成为制约任务可靠性与人类长期驻留能力的基础安全问题. 多源、高能、强时变的空间辐射环境, 对航天器安全和人体健康构成持续且难以预测的风险挑战. 尤其在失去地磁场保护的深空探测任务中, 空间辐射的时空特征与作用机制更加复杂, 对辐射监测与风险评估提出更高要求. 针对上述挑战, 有必要在环境认知、辐射影响和探测技术等层面开展研究. 本文围绕空间辐射环境特征及其航天器和生物效应, 以及辐射探测与剂量表征方法, 梳理相关研究进展, 并结合典型航天任务加以分析, 可为载人航天任务的辐射监测与风险评估提供科学依据, 对未来深空探测的安全性论证具有重要参考价值.

关键词 空间辐射环境, 空间辐射效应, 辐射探测, 载人航天, 深空探测

中图分类号 P353, R852

Space Radiation Environment, Effects and Detection in Manned Space Missions

HE Pengzhi[1] SUI Li[2] HUA Daoben[3] WANG Zhimin[4]
SHAO Changsheng[5] SHI Quanqi[1] JIA Xianghong[1,6]

1(*Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai* 264209)

2(*Institute of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy* (*CIAE*), *Beijing* 102413)

3(*School for Radiological & Interdisciplinary Sciences* (*RAD-X*), *Soochow University, Suzhou* 215123)

* 国家自然科学基金项目 (42225405), 中国原子能科学研究院抗辐照应用技术创新中心创新基金项目 (KFZC2023021002), 西藏自治区科技计划项目 (XZ202601ZY0001) 和山东大学交叉学科培育项目共同资助

2025-12-26 收到原稿, 2026-05-07 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

4(*School of Interdisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081)

5(*Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei* 230026)

6(*Key Laboratory of Eco-Environment and Population Health of Xizang Autonomous Region, College of Science, Xizang University, Lhasa* 850000)

Abstract As human space activities extend from low Earth orbit to the cislunar region and interplanetary space, space radiation has emerged as a fundamental safety issue constraining mission reliability and the feasibility of long-term human presence beyond Earth. Characterized by multiple sources, high particle energies, and strong temporal variability, the space radiation not only affects the reliability of spacecraft structural materials and electronic systems, but also poses potential risks to the physiological functions and long-term health of astronauts. In low Earth orbit, the radiation environment is primarily composed of trapped particle radiation, galactic cosmic rays, and sporadic high-intensity solar particle events. For deep-space exploration missions beyond the protection of the geomagnetic field, the spatiotemporal behavior and interaction mechanisms of space radiation become increasingly complex, exposing both spacecraft systems and astronauts to elevated radiation levels and cumulative effects. Meanwhile, long-duration missions involving extended habitation within spacecraft or extraterrestrial bases further amplify the effect of radiation on mission design and feasibility. This necessitates greater rigor in radiation monitoring, effects analysis, and risk assessment. To address these challenges, a systematic study integrating environmental characterization, radiation effects, and detection technologies is needed. This paper reviews the characteristics of the space radiation environment and its effects on both spacecraft systems and biological organisms. It further introduces the principles and current development of radiation detection technologies, including various dosimetric methods, particle identification techniques, and energy spectrum measurement approaches. In addition, representative space missions are examined as case studies to illustrate the evolution of radiation monitoring strategies and in-orbit measurement capabilities. Overall, this study provides a comprehensive review of the space radiation environment, its effects, and associated detection technologies in the context of human spaceflight. This study provides a scientific basis for radiation monitoring and risk assessment in manned spaceflight, and offers important references for safety analyses and mission design in deep-space exploration.

Key words Space radiation environment, Space radiation effects, Radiation detection, Manned spaceflight, Deep space exploration

0 引言

空间辐射是人类开展航天活动难以避免的重要环境因素之一. 相较于地面环境, 航天器与航天员在轨运行过程中长期暴露于复杂辐射场, 辐射粒子来源多样、时空变化明显, 且难以有效规避. 空间辐射不仅影响航天器结构材料和电子系统的可靠性, 也对航天员的生理功能与长期健康构成潜在风险. 因此, 空间辐射始终是航天工程与空间生命科学交叉领域中的核心问题.

随着载人航天任务由近地轨道向月球及更远深空拓展, 空间辐射暴露水平及不确定性随之增加. 在近地轨道, 地磁场可缓解辐射暴露; 而在深空环境下, 这种天然屏蔽减弱甚至消失, 使航天器系统和航天员面临更高的辐射风险与累积效应. 同时, 舱内或基地长期驻留等任务周期较长, 空间辐射直接影响任务设计与可行性, 这对空间辐射环境认知、效应分析、探测及防护技术提出了更高要求.

在此背景下, 空间辐射相关研究经历了系统性发展. 辐射效应研究拓展为同时关注空间辐射对航天器材料与电子系统性能的影响, 以及对航天员生理功能与健康风险的影响, 并引入辐射品质与组织敏感性等因素, 用于分析不同暴露条件下的辐射风险; 辐射探测技术由早期以剂量累积测量为主的方式, 逐步发

展, 形成能够表征辐射场能谱分布与时空特征的综合监测体系.

围绕上述发展脉络, 本文综述了空间辐射环境及其对航天任务的影响, 梳理了任务周期内不同辐射暴露条件下航天器系统与航天员的辐射效应, 并对空间辐射探测技术的发展现状进行系统阐述, 以期为未来载人深空探测任务中的辐射监测与风险评估提供参考.

1 空间辐射环境

空间辐射环境是由多源高能粒子在不同时间与空间尺度上共同构成的复杂辐射场, 随轨道高度、空间位置及太阳活动水平发生变化. 在近地轨道、地月空间与行星际空间等不同区域, 辐射环境及其对航天任务的影响差异显著. 系统认识空间辐射环境的组成特征, 是开展辐射探测与剂量评估的基础.

1.1 空间辐射背景环境及特征

近地轨道的空间辐射主要由地磁捕获辐射(TPR)、银河宇宙射线 (GCR) 和偶发性高强度的太阳粒子事件 (SPE) 组成[1]. 中国空间站轨道高度约为380～400 km, 倾角为 41°, 其主要辐射源包括 GCR 和南大西洋异常区 (SAA) 的 TPR[2]. 在深空探测任务中, 航天员和航天器脱离地球轨道进入行星际空间, 失去地磁场的保护, 面临的辐射环境由持续存在的 GCR 和偶发性的 SPE 主导.

1.1.1 地磁捕获辐射

地磁捕获辐射带指地球周围空间大量高能带电粒子的聚集区, 又称为范艾伦辐射带. 按照空间分布特征, 辐射带通常分为内、外两层结构. 内辐射带位于距离地心约 1.2～2.0 个地球半径的区域, 其空间结构相对稳定, 特征粒子为能量在几十至几百 MeV 的质子; 外辐射带主要分布在距地心约 3～7 个地球半径的区域, 以能量范围覆盖百 keV 至 MeV 的高能电子为主. 外辐射带受太阳活动影响较大, 其电子通量在磁暴期间可能发生多个数量级的波动[3,4]. 在内、外辐射带之间, 存在一个粒子通量相对较低的“槽区”, 通常位于 2.5 个地球半径附近[5,6].

辐射带并非等距环绕整个地球, 在南大西洋上空存在磁场强度减弱区域, 被称为 SAA. 在该磁场的约束下, 空间高能带电粒子环境分布改变, 尤其在内辐射带该区域的高度明显降低, 其下边缘最低可降至约 200 km 高度, 而在其他经纬度该区域的高度通常在 1200～1300 km[7]. 中国空间站及其他低地球轨道的航天器在运行过程中会周期性穿过该区域, 暴露于通量增强的高能粒子中, 该区域是辐射诱发异常与器件失效的高风险区域.

1.1.2 银河宇宙射线

GCR 是源自太阳系外的高能带电粒子, 通常认为其能量来源于银河系内的强激波加速过程, 如超新星爆发、超新星遗迹、脉冲星、中子星以及活跃星系核等高能天体事件. 其粒子成分以质子为主, 质子占比可达 87%, α 粒子约为 12%, 高电荷数重离子约为 1%. GCR 具有极宽的能谱范围, 最高能量可达 10^{20} eV 量级[8].

GCR 通量具有明显的时间变化特征, 主要受太阳活动周期调制. 观测表明, GCR 通量随太阳活动呈显著负相关, 即在太阳活动极大期达到最低值, 而在太阳活动极小期达到最高值, 以约 11 年周期的变化最明显. 日球层磁场极性约 22 年发生一次翻转, 对 GCR 粒子的传播路径和各向异性分布产生重要影响; 短时间尺度上, 磁云或行星际日冕物质抛射等太阳扰动还可引发典型的“福布斯下降”现象[9,10].

1.1.3 太阳粒子事件

SPE 是太阳系内重要的高能粒子辐射来源, 通常与太阳耀斑、日冕物质抛射等剧烈太阳活动过程密切相关. 这类太阳扰动能够在短时间内将粒子加速至高能状态, 并在行星际空间中形成强激波, 对近地空间及更远的深空环境产生影响[11,12]. SPE 的粒子成分以质子为主, 同时伴随一定比例的电子、氦核以及少量原子序数大于 3 的重核粒子, 其中碳、氮、氧等元素具有较高丰度. 在强烈 SPE 过程中, 能量超过 10 MeV 的质子积分注量可达到 $10^{10}\mathrm{cm}^{-2}$ 以上, 显著增强了短时间内的辐射剂量水平[13].

统计表明, 每个太阳活动周期内发生极端强 SPE 及地面增强事件的次数较低, 平均约 12 次[14]. 然而, 这类低概率、高剂量率的辐射事件往往构成载人航天任务中的主要急性辐射风险源. 尤其在深空探测任务中, 由于缺乏地磁场的有效屏蔽, SPE 可能在短时间内对航天员和航天器系统造成严重影响, 其风险评估与防护策略始终是空间辐射研究的重点.

1.2 特定环境与任务下的复杂粒子辐射

航天器实际所承受的空间辐射由背景辐射环境

与任务相关因素共同决定. 航天器的轨道位置、运行状态及结构特征等, 会对粒子的传播路径和能量沉积过程进行调制. 依据物理过程, 粒子首先作用于航天器外表面, 部分电子和离子在航天器表面及近表层沉积, 主导表面和深层充放电等效应; 随后, 高能粒子及其次级粒子穿透航天器结构, 在多层材料与复杂结构中传播和相互作用, 形成粒子成分与能谱特征更加复杂的混合辐射场.

1.2.1 任务期航天器内部混合辐射场

在航天器和地外驻留设施内部, 实际辐射环境并不等同于空间中背景辐射环境. 当 GCR、太阳高能粒子入射到航天器时, 部分初级高能粒子无需发生核反应即可穿透舱体, 另一部分会与舱体壁板、设备材料及内部载荷等发生核反应, 产生包括质子、中子、电子及轻核碎片等大量次级粒子. 类似地, 月球等无大气天体表面, 高能粒子入射月壤后也会通过核反应产生反照粒子, 从而对局部辐射环境产生影响[8].

舱内带电粒子以质子和 α 粒子为主, 占总带电粒子通量的 95% 以上, 主要来源于入射的 GCR 和太阳高能粒子[15]. 同时, 高能 GCR 与舱体发生核反应时可产生次级质子, 使舱内质子通量高于舱外水平; 锂、铍等轻核在舱内的相对丰度明显提高, 主要由更高原子序数的 GCR 核反应产生. 次级中子在舱内辐射场中不可忽略, 其能量范围可从热中子到数百 MeV[16]. 由于航天器的多层结构和复杂材料, 入射的高能带电粒子在传播过程中不断损失能量并诱发级联反应, 使舱内辐射能谱呈现出由高能到低能连续展宽的特征. 不同类型粒子在舱内各位置的通量随结构布局和材料分布而变化, 导致局部辐射环境具有明显的空间非均匀性.

1.2.2 航天器表面及深层充电相关粒子辐射

航天器在空间环境中与带电粒子相互作用, 会在其外表面或内部介质中产生电荷积累, 从而引发充电效应. 参与该过程的粒子主要包括来自太阳风和地球风的低能电子与离子, 以及能量较高、能够穿透航天器表层的高能电子[17]. 不同能区粒子在材料中的沉积方式不同, 决定了电荷积累位置及其电场分布特征[18].

表面充电主要由能量低于约 100 keV 的等离子体电子和离子引起, 其在航天器外表面沉积, 并与光电子发射和二次电子发射等共同作用, 导致航天器整体或局部区域电位发生变化. 由于表面材料的介电特性、几何结构、受光条件等情况不同, 可能会导致航天器表面出现不等量充电, 形成局部静电电位差, 在航天器表面与航天器结构地之间也形成电位差. 当电位差增大至一定数值后, 可能导致相邻部位之间产生较强局部电场并诱发静电放电[19]. 航天器内部充电主要由能量高于约 100 keV 的高能电子造成, 高能电子可穿透航天器外覆层并在绝缘材料内部沉积电荷, 又称深层介质充电. 内部充电不仅发生在航天器内部, 也存在于舱外裸露或屏蔽较薄的绝缘部件, 如天线座、镜头玻璃、电缆绝缘护套等材料中[20]. 内部充电具有累积特性, 受高能电子通量和介质电导率控制, 而放电多为瞬发过程, 并依赖于充电水平. 由于该效应主要发生在介质内部或靠近敏感电子器件位置, 其潜在危害通常大于表面放电, 是航天器故障和异常的主要诱因之一.

2 空间辐射效应

航天器在轨运行过程中, 长期暴露于复杂多变的空间辐射环境中, 容易引发材料性能退化、电子器件失效以及系统功能异常, 严重情况下可导致任务中断, 甚至航天器失效[21–23]. 与此同时, 随着载人航天和深空探测任务的不断推进, 航天员在长期飞行及行星基地驻留期间, 也将面临由高能辐射引起的多种健康风险[24]. 因此, 系统认识空间辐射对航天器系统与生物体的多层次影响机理, 是保障航天任务安全性与可持续性的关键科学问题之一. 本节从航天器系统效应与航天员生物效应两个层面, 对空间辐射的主要影响进行概述.

2.1 航天器在轨辐射损伤类型与效应

空间辐射对航天器的影响在历史任务中已有大量实例. 1989−1991 年间发生的多次强烈太阳活动恶化了地球空间辐射环境, NOAA 的地球同步轨道气象卫星 GOES-5, GOES-6 和 GOES-7 均遭受不同程度的辐射影响. 其中 GOES-7 的太阳能电池阵列在数天内出现的功率衰减, 已相当于其设计寿命中约一半的累计退化量, 严重削弱了卫星在轨运行能力[25,26]. 此外, 范艾伦探测器任务在穿越内、外地球辐射带约 5 年的运行期间, 记录到超过千次单粒子事件, 对卫星系统可靠性构成持续挑战[27]. 类似事件在商业和科研卫星中亦有报道, 例如 2010 年银河 15 号卫星在地

球同步轨道运行期间发生的异常, 被认为与器件内部静电放电诱发的现场可编程门阵列锁死有关[28]. 从机理上看, 航天器在轨辐射损伤主要可分为累积辐射效应、单粒子效应和充放电效应三大类.

累积辐射效应主要包括总电离剂量效应和位移损伤效应. 总电离剂量效应指带电粒子在器件材料中通过电离作用持续沉积能量引起的累积性损伤, 其效应强度与累积剂量密切相关. 电离过程中产生的电子−空穴对在材料内部迁移、俘获并逐步积累, 改变局部电场分布和载流子输运特性, 进而引起半导体器件阈值电压漂移、漏电流增大以及噪声性能退化; 位移损伤通过破坏晶格结构, 导致少子寿命降低、载流子迁移率退化, 对光电器件和双极型器件造成危害. 长期辐照还会引发航天器结构与光学材料的老化、脆化和透光率下降等问题, 如玻璃材料在强辐射环境中可能出现明显变色或发黑现象[21,29].

单粒子效应是指单个高能粒子穿过微电子器件的敏感体积时, 通过强电离作用或核反应过程, 在短时间内局部沉积大量能量, 产生大量电子–空穴对或次级带电粒子, 从而形成瞬态电荷积累. 该电荷被器件内部电场快速收集后, 会导致局部电位突变与电路工作状态异常, 引发逻辑翻转、功能紊乱或异常导通等; 在能量沉积或电流触发条件更为严重时, 还可能诱发不可逆的结构或功能损伤. 典型效应包括单粒子翻转、锁存或烧毁等. 随着集成电路特征尺寸不断缩小、工作电压持续降低, 器件对单粒子效应的敏感性提高, 使其成为制约电子系统可靠性的关键因素[22,27].

充电效应主要源于航天器在高能电子和离子环境中的电荷积累过程, 可分为表面充电和内部充电两类. 表面充电主要发生在能量低于约 100 keV 的等离子体环境中, 由于电子质量小、热运动速度快, 在相同条件下到达航天器表面的电子通量显著高于离子通量, 易在表面快速积累并形成负电位. 不同表面区域因材料组成、几何结构及光照条件差异, 其充电过程和稳态电位并不一致, 从而在航天器表面或不同部件之间产生电位差. 当局部电场强度超过表面材料的击穿阈值时, 可能引发表面静电放电, 对天线、传感器及外露导体造成干扰. 内部充电则主要由辐射带中的高能电子引起, 其能量足以穿透航天器表面防护层并在绝缘介质内部逐渐沉积, 不同能量电子对应不同的沉积深度, 形成层状空间电荷分布并建立内部电场. 由于介质材料电导率较低, 内部电荷释放过程缓慢, 易在磁暴或强太阳活动期间持续累积, 当内部电场达到临界条件时, 可能发生深层静电放电, 对邻近电子器件产生强烈干扰, 甚至导致功能失效或永久性损伤[30,31].

2.2 航天员在轨辐射生物效应类型与机制

空间辐射对航天员及未来行星基地驻留人员构成长期而复杂的健康威胁, 其主要来源包括 GCR, SPE 以及由高能粒子与航天器材料和组织相互作用产生的次级粒子. 在脱离地磁场和大气层的深空环境中, 辐射场由高能带电粒子组成, 这类粒子能谱宽、穿透力强, 对生物组织的损伤特点与地面 X 和 γ 射线等低传能线密度 (LET) 辐射不同, 这种高 LET 辐射不但能量沉积密集, 而且造成的损伤模式更复杂, 对 DNA 和细胞功能的长期风险更高[32,33].

2.2.1 基于生物对象层次的航天员辐射生物效应

在分子和细胞层面, 高 LET 粒子如 GCR 中的 HZE (高电荷数、高能量) 离子可在径迹上产生复杂的 DNA 损伤, 包括密集 DNA 双链断裂、碱基损伤和染色质结构异常, 这类复杂损伤很难被细胞修复机制有效处理, 并可能导致基因组不稳定、突变及细胞死亡. 另外, 空间辐射还会通过间接作用产生大量活性氧和自由基, 进而引发持续的氧化应激反应和细胞信号通路失衡, 与免疫抑制、细胞周期紊乱和凋亡密切相关[34]. 更复杂的是, 在实际辐射暴露条件下还观察到非靶效应, 即未直接受辐照的细胞和组织也可因细胞间信号传递、炎症介质释放等途径发生损伤或功能改变[35].

在组织和器官层面, 长期的空间辐射暴露可能引发多种系统性健康风险. 根据 NASA 的空间辐射风险评估框架, 其辐射风险通常归纳为 4 类: 辐射致癌、急性辐射综合征、中枢神经系统损伤以及退行性组织效应[36,37]. 长期暴露于高能粒子辐射环境可能增加多种癌症的发生风险, 这是深空任务中最受关注的长期健康风险之一. 此外, 空间辐射还可能导致中枢神经系统受损、认知功能下降、心血管系统异常、免疫系统抑制和眼部晶状体混浊等多种生物效应. GCR 的 HZE 粒子具有较高 LET 和较强组织穿透能力, 可能对神经组织产生累积性损伤, 并增加神经退行性病变的风险; 而在强烈的 SPE 中, 短时间内的高剂量辐射暴露可能引发急性辐射损伤[38,39].

2.2.2 基于辐射剂量学层次的航天员辐射生物效应

在辐射剂量学层面, 通常用吸收剂量、剂量当量和有效剂量等指标表示航天员辐射暴露. 吸收剂量反映辐射在组织中沉积的能量水平, 剂量当量在此基础上引入辐射权重因子, 用以体现不同辐射类型的相对生物学效应, 而有效剂量则进一步考虑不同组织和器官对辐射风险的敏感性, 用于评估整体健康风险[40]. 基于上述指标, 不同剂量水平对应的生物效应类型和严重程度存在明显差异.

在长期低剂量辐射条件下, 例如国际空间站任务中, 航天员每日有效剂量约为 0.41 $\mathrm{mSv\cdot d^{-1}}$, 该剂量以 GCR 贡献为主, 航天员一般不会出现急性临床症状, 但辐射可在分子和细胞层面引发持续损伤. 研究表明, 50～100 mGy 的空间带电粒子辐射即可导致神经元结构改变和突触数量减少, 神经网络连通性功能下降; 不同 LET 电离辐射可在内皮细胞中诱发动脉粥样硬化相关反应及持续的 DNA 损伤[41,42]. 这类效应发生概率随累积剂量增加而升高, 是长期在轨及深空任务中需重点关注的风险.

当航天员在较短时间内接受中等至较高剂量辐射时, 生物效应开始呈现明显的剂量依赖特征. 典型场景如质子通量可达到 $10^9\mathrm{cm^{-2}}$ 的强 SPE, 导致部分器官的剂量当量超过 1 Sv, 显著增加组织损伤风险[37]. 此时辐射对人体的影响不再局限于概率性事件, 而是发展为具有阈值特征的确定性效应, 尤其对表层和近表层器官影响显著[24].

在高剂量暴露条件下, 如遭遇极端 SPE 或防护不足的舱外活动, 航天员可能发生急性辐射综合征, 其临床表现和严重程度与所受剂量相关. 研究表明, 当全身或关键器官吸收剂量达到 1～10 Gy 时, 主要表现为骨髓造血系统损伤; 剂量进一步升高至 10～50 Gy 时, 将出现明显的消化系统损伤; 当剂量超过 50 Gy, 则可能引发中枢神经系统的严重损害, 直接威胁生命安全[24]. 相应的剂量限值已被用于评估白内障、皮肤损伤、心血管疾病及癌症发生等风险, 并构成航天员辐射防护标准的重要依据[43,44].

综上, 空间辐射引发的生物效应由低剂量随机性效应向高剂量确定性效应逐级演化, 具有高 LET、慢性低剂量、非靶效应及系统性影响等特点. 国际上通常采用有效剂量, 结合辐射品质、剂量率及个体因素, 对航天员职业生涯辐射风险进行评估, 并提出相应的剂量控制目标. 如载人登火任务的估算结果表明, 航天员在整个任务周期内 (1000 天) 可能接受 1 Sv 量级的有效剂量, 其潜在风险显著高于近地轨道任务.

3 空间辐射探测技术的发展

3.1 探测原理

空间辐射粒子探测的核心在于将粒子与介质相互作用产生的物理效应转化为可测信号. 根据物理机制的不同, 可以归纳为三类测量: 粒子在介质中的能量沉积及其空间分布特征, 包括沉积能量及 LET 分布; 粒子的运动学信息, 如速度、动量及质量; 粒子与物质相互作用产生的次级信号.

在具体实现层面, 典型如 ΔE-E 望远镜式探测器, 通过多层探测器记录的沉积能量梯度反演粒子能量[45]; 近年来兴起的像素阵列探测器, 可通过带电粒子在探测器像素单元中的沉积能量分布和像素簇形态, 实现高分辨率的粒子鉴别与能谱重建[46]. 飞行时间法 (ToF) 通过测量粒子在两个位置间的飞行时间来推算其速度, 结合能量信息进一步反演粒子的质量和动量[47]; 磁谱仪方法利用带电粒子在磁场中的偏转行为, 实现动量及电荷符号的测量[48]. 此外, 还包括基于光电转换的闪烁探测方法[49]; 对于中子等不带电粒子, 借助核反应产生的次级带电粒子实现间接探测.

基于上述探测原理, 已发展出多种辐射探测器, 并广泛应用于空间科学任务, 通常按信号获取方式分为主动型与被动型两类. 主动型探测器依赖电子学系统对粒子与介质相互作用产生的瞬态信号进行实时采集与处理, 可获得粒子通量、能谱及时间信息等; 被动型探测器则通过记录辐射在材料中诱导的结构缺陷或激发效应, 对辐射信息进行累积存储, 通常在任务结束后通过离线分析获得测量结果. 两类探测器在能量分辨率、时间分辨率、灵敏度、累积剂量测量和空间适应性方面各具特色, 实际任务中往往需要将多片或多类探测器组合使用, 以兼顾通量、能谱和粒子成分的探测需求.

3.2 常用探测器类型

基于前述粒子与探测介质相互作用及信号形成机制, 空间辐射探测技术在具体实现上发展出多种类型的探测器. 其中主动型探测器主要分为气体、闪烁体和半导体探测器, 被动型探测器则主要包括核径

迹、荧光及核乳胶探测器等. 不同类型探测器在信号产生机制、响应特性及适用能区等方面存在显著差异, 构成了空间辐射探测技术的基础. 各类探测器工作示意图或实物如图 1 所示, 空间辐射探测器类型及性能特征见表 1.

3.2.1 气体探测器

气体探测器是最早应用于电离辐射测量的一类探测器, 其物理机制源于入射粒子在气体介质中引发的电离过程. 带电粒子穿过气体时, 通过库仑力使原子或分子发生电离, 产生电子–离子对; 中性粒子 (光子) 则需通过光电效应、康普顿散射或 (中子) 核反应产生次级带电粒子, 间接实现探测. 在外部偏置电场作用下, 电离产生的电荷定向迁移并被电极收集, 转化为可记录的电信号[50]. 该类探测器的核心构成通常包括壳体、电极系统及工作气体, 其中, 工作气体多采用惰性气体或混合气体, 以优化电离效率及放电稳定性.

气体探测器从宏观电流测量向单粒子微观探测发展, 早期的电离室通过测量平均电离电流来表征辐射强度[51]. 随后, 基于圆柱形几何结构的电极配置, 相继发展出正比计数器与盖格－米勒 (GM) 计数管[52,53]. 正比计数器的出现奠定了现代气体探测器的基础, 而 GM 计数管则实现了对单粒子的响应. 20 世纪下半叶, 受高能物理实验对大面积、位置灵敏探测需求的驱动, 多丝正比室的研发引起了技术创新, 并进一步发展出漂移室与时间投影室等, 提升了探测器的空间分辨率与多维测量能力[54]. 根据电场强度及电荷收集机制的不同, 气体探测器呈现出明显的应用特性. 电离室工作于饱和区, 无内部气体放大, 构造简单且运行稳定, 输出电流与辐射剂量呈线性关系, 广泛应用于核工业剂量监测及标准放射性活度计量. 正比计数器利用电子碰撞引起的有限倍增效应, 输出脉冲幅度与入射粒子的初始电离能成正比. 该特性使其具备良好的能谱分辨能力与线性响应, 可用于高灵敏度能量分析. GM 计数管两端通常施加几百伏直流高压, 高能辐射粒子或射线进入管道内, 会使管内的气体分子电离, 产生正离子和自由电子. 在高压电场作用下, 自由电子被显著加速, 引发雪崩式电离后产生了明显且易于测量的电脉冲. 其优点在于灵敏度极高、成本低廉且耐用, 适用于个人辐射防护与现场环境巡检, 但由于其脉冲幅度与初始电离无关, 不具备能量分辨能力, 且存在死时间限制[55,56].

综上, 气体探测器凭借其结构可靠、成本适中及环境适应性强等优势, 在空间探测、核工业及医学成像等领域发挥着不可替代的作用. 各类型气体探测器在灵敏度、能谱响应及稳定性方面各有侧重, 同时整

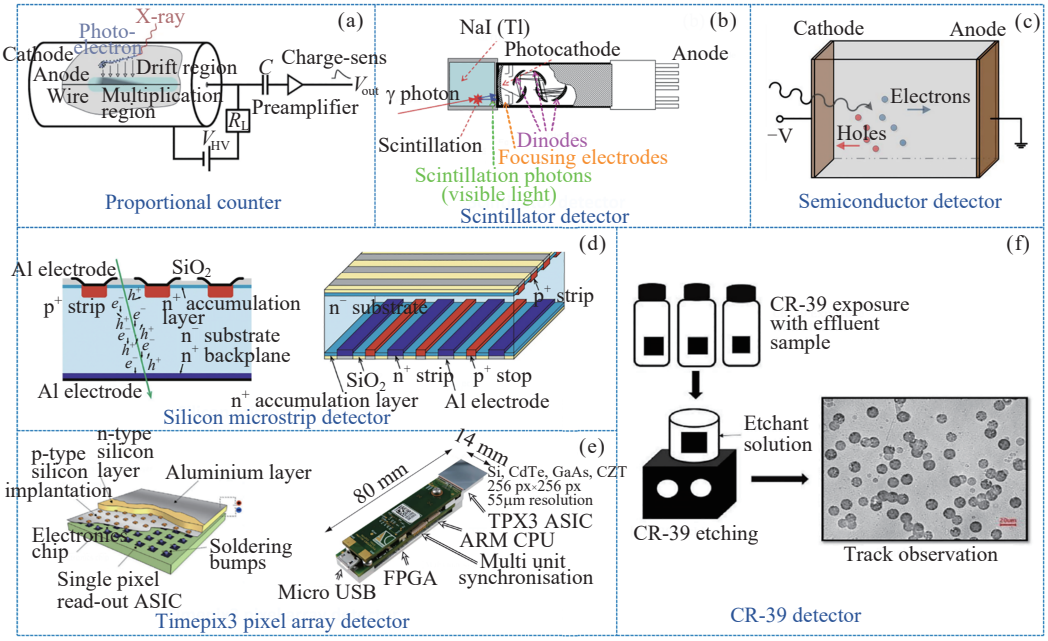


图 1 各类探测器工作原理与实物[77–82]

Fig. 1 Schematic and physical diagrams of various types of detectors[77–82]

表 1　空间辐射探测器类型及性能特征概述

Table 1　Overview of types and performance characteristics of space radiation detectors

探测器类型		代表器件	探测原理	主要监测指标	数据主要用途	监测能力
主动型探测器	气体探测器	电离室 正比计数器 GM计数管 多丝正比室	带电粒子在气体中电离产生电子–离子对, 外加电场收集电荷形成电信号	电离电流、脉冲计数、沉积能量	辐射剂量监测、粒子计数、能谱分析	结构可靠、环境适应性强, 高计数率及累积测量能力, 空间分辨率中等
	闪烁体探测器	无机闪烁体(NaI(Tl)和CsI(Tl)等) 有机闪烁体(液体及塑料闪烁体) 气体闪烁体	入射粒子激发介质原子或分子, 退激释放光子, 光电器件转换为电信号	光子信号、沉积能量、时间信息	粒子快速计数、能谱分析、时间分辨测量	响应快、探测效率高、具备高通量监测能力, 能量分辨率中等
	半导体探测器	硅、锗 宽禁带(碳化硅、氮化镓等) 超宽禁带(金刚石、氧化镓、氮化铝等)	粒子在半导体中产生电子－空穴对, 偏置电场收集电荷, 信号与沉积能量成正比	感生电荷、沉积能量、能量分辨	能谱精密测量、粒子种类判别、辐射环境监测	能量分辨率高、体积较小, 对高温和强辐照环境适应性强
	多通道阵列探测器	硅微条 混合像素阵列 CMOS像素阵列	基于半导体原理, 每个像素独立收集电子－空穴对, 经集成读出电路实现空间、能量及时间信息同步采集	空间分布、径迹形态、沉积能量、飞行时间	粒子径迹重建、事件成像、混合辐射场分析	高空间分辨率、多维信息采集、实时在轨监测、可区分高能粒子与背景
被动型探测器		核径迹探测器 荧光探测器(如热释光和光致发光探测器) 核乳胶探测器	入射粒子在材料中形成微观损伤或亚稳态缺陷, 然后通过化学或热处理读取信号	累积剂量、径迹密度	长期剂量评估、辐射风险分析、校准主动型探测器	灵敏度高、体积小、结构稳健, 但无实时测量, 种类和能谱分辨能力有限

体正朝着高计数率、长寿命、大面积阵列化方向持续演进, 仍是空间辐射探测领域的重要基础手段.

3.2.2　闪烁体探测器

随着有机与无机闪烁晶体合成工艺的日趋成熟, 光电倍增器件的性能日益提升, 闪烁体探测器已成为核辐射测量与空间粒子探测领域的核心手段之一. 该类探测器的工作机制在于辐射能与光能的转化, 当高能粒子或射线穿透闪烁介质时, 通过电离与激发效应将能量传递给介质原子或分子; 处于激发态的粒子在退激过程中释放出光子, 随后由光电倍增管或光电二极管捕获并转换为电信号. 在上述发光过程中, 闪烁介质的发光效率与荧光衰减动力学特征表明了探测器在能量刻度与时间响应上的分辨能力[57,58].

闪烁材料的选择直接影响探测器性能. NaI(Tl)、CsI(Tl)、锗酸铋 (BGO) 及钨酸铅 (PWO) 等无机闪烁体具有较高的原子序数和密度, 表现出优异的阻止本领与光产额, 能够提供高质量的能谱信息[59]. 由芳香族化合物构成的有机闪烁体 (如液体及塑料闪烁体) 虽然能量分辨率有限, 但具有响应速度快和制造成本较低的优势, 适用于粒子快速计数. 此外, 氙、氦等气体闪烁体虽发光效率较低, 但衰减时间极短, 常被用于精密时间测量[60]. 在实际的空间探测任务中, 材料的选择需要综合考虑探测效率、光谱匹配度以及环境适应性等因素.

随着材料科学与后端读出技术的不断进步, 闪烁体探测器在探测效率、响应时间以及大规模构建方面优势明显, 适用于高通量及宽能段的空间辐射监测任务. 尽管其能量分辨率在原理上难以超越半导体探测器, 且易受温度波动与材料老化带来的不稳定性, 但通过引入具备高光产额、快衰减特性的新型晶体材料, 并探索与其他探测器构成复合探测系统, 可以满足天体物理与深空探测任务对高精度、长期稳定辐射探测的需求.

3.2.3　半导体探测器

半导体探测器凭借其较高的电荷收集效率和优异的能量分辨能力, 在辐射探测领域得到广泛应用和快速发展. 当入射粒子或射线进入半导体介质时, 通过电离作用产生电子–空穴对, 这些载流子在外加偏

置电场驱动下向电极迁移, 进而转化为与沉积能量成正比的感生电荷信号. 相较于气体探测器, 半导体材料的平均电离能明显较低, 使其在相同沉积能量条件下能够产生更多的初始载流子. 电荷产量的提升有效降低了能量测量过程中的统计涨落, 赋予了半导体探测器良好的能量分辨能力[61,62].

在空间物理探测器应用中, 硅和锗探测器逐渐在部分场景中取代传统的闪烁体和气体探测器, 成为辐射探测的重要手段. 硅探测器凭借较低的本底噪声和高度成熟的微电子工艺, 已成为构建空间位置灵敏探测器及硅微条望远镜的核心组件, 广泛应用于宇宙线成分分析与太阳高能粒子监测. 相比之下, 高纯锗探测器在 γ 射线、X 射线探测中具有优异的能量分辨率, 在空间天文观测中发挥着重要作用[63,64]. 相较于传统闪烁体探测器, 半导体探测器不仅在能量分辨方面具有优势, 较高的材料密度和原子序数也使其粒子阻止能力更强, 能够在小体积条件下实现对高能粒子的有效探测, 契合了空间载荷向小型化和高度集成化发展的需求.

近年来, 针对深空环境及太阳近邻任务中面临的高温差、强辐射的挑战, 宽禁带 (碳化硅、氮化镓) 及超宽禁带 (金刚石、氧化镓、氮化铝等) 半导体材料的研究已成为空间辐射探测领域的前沿热点. 该类探测器具有较高的位移阈能, 表现出优异的抗辐照性能, 能够有效预防高通量高能粒子造成的晶格损伤. 此外, 由于宽禁带材料本征载流子浓度低、热激发载流子产生率小, 此类探测器无需复杂冷却系统, 在高温环境下仍可维持极低的漏电流与高信噪比, 从而在极端空间环境下实现长期、稳定的辐射探测[65].

随着空间辐射环境探测需求从简单的剂量与通量测量逐步拓展至粒子种类判别、能谱反演及径迹结构解析, 传统单通道半导体探测器在信息维度和测量能力方面存在不足. 尤其在复杂混合辐射场中, 单一探测单元难以同时兼顾高统计效率、空间分辨能力及单粒子级信息获取. 依托成熟的半导体微加工与集成电路技术, 半导体探测单元由单点结构发展为多通道、阵列化乃至高度集成探测系统, 成为提升空间辐射探测能力的必然趋势.

3.2.4 多通道阵列探测器

随着半导体工艺与集成电路技术的发展, 高集成度的多通道阵列空间辐射探测器技术成为重要发展方向. 多通道阵列探测器的核心在于将大量独立探测单元以矩阵形式集成排列, 使每个通道能够独立获取入射粒子的物理信息. 相较于传统单通道探测器, 阵列化结构通过对带电粒子入射位置、沉积能量空间分布及飞行时序的同步记录, 不仅提高了探测效率和空间分辨率, 还可以进行粒子径迹重建, 实现了从简单的“计数分析”向复杂的“事件成像”的升级[66].

在空间辐射探测器的具体实现中, 硅微条探测器、混合像素阵列探测器以及基于 CMOS 工艺的成像型探测器, 构成了当前的技术主力. 该类探测器的基本原理仍基于半导体中电子－空穴对的收集, 但其关键革新在于传感器与专用集成电路 (ASIC) 的高密度互连技术. 例如, 欧洲核子研究中心 (CERN) 开发的 Timepix 通过将读出电子学层直接键合于传感器像素之下, 使每个像素点均具备独立的能量测量与计时功能, 能够精确描绘粒子在介质中的能量分布及簇射形态[67]. Timepix 探测器已在国际空间站的实时辐射监测及复杂宇宙线成分识别中展现出卓越性能, 能够有效区分高能粒子辐射与背景噪声[68].

硅微条探测器利用并联的微细条状电极实现对带电粒子径迹的精确追踪, 作为磁谱仪的核心径迹测量系统, 应用于国际空间站上的 AMS-02 实验, 实现宇宙线粒子电荷和动量的高精度测量[69]. CMOS 传感器基于高集成度、低功耗的 CMOS 工艺, 应用于欧空局的 JUICE 任务中, 作为辐射监测子系统的核心部件, 用于监测木星极端磁环境下的高能带电粒子辐射, 体现了其在极端环境下的应用潜力[70]. 化合物像素阵列探测器凭借高原子序数和常温运行优势, 成为硬 X 射线和伽马射线探测的首选. 例如 NASA 的 NuSTAR 望远镜任务中, 碲锌镉像素阵列用于捕获和成像来自黑洞、中子星等高能天体源的硬 X 射线, 提供关键能谱数据[71].

集成化像素阵列探测器实现了探测效率与时间、空间多维测量能力的协同提升, 不仅解决了大面积探测与寄生电容之间的矛盾, 还通过精细的空间采样实现了对带电粒子能量及径迹的精准识别. 此外, 随着星载系统与嵌入式人工智能算法的深度融合, 空间辐射探测系统正逐步具备在轨实时数据压缩、异常事件筛选、粒子径迹与类型识别等自主处理能力, 标志着空间辐射探测技术正由以事后分析为主的测量模式, 向具备高时间、空间及能谱分辨能力的在轨智能探测

模式发展.

3.2.5 被动型探测器

被动型探测器是一类发展历史悠久的辐射探测器, 不依赖复杂的电子学系统, 通常在任务结束后对探测样品进行分析[72]. 探测器类型包括核径迹探测器 (例如 CR-39 探测器)、荧光探测器 (例如热释光探测器和光致发光探测器), 以及核乳胶探测器等, 其原理在于辐射在材料中造成缺陷、离子化或激发效应. 核径迹探测器可以记录高能带电粒子在聚合物材料中产生的微观损伤径迹, 这些径迹经过化学蚀刻放大后, 可通过显微镜计数与分析, 实现粒子通量与剂量的测量[73]. 热释光探测器利用晶体材料在辐射作用下形成亚稳态缺陷, 在加热过程中缺陷发生复合, 并以光信号形式释放储存的能量, 其发光强度与吸收的辐射剂量呈正比[74]. 核乳胶探测器的工作原理与摄影胶片类似, 入射带电粒子或射线在乳胶中的溴化银晶体内产生电离并形成潜像中心, 经过化学显影和定影处理后转化为可见颗粒, 进而记录粒子的三维径迹[75].

被动型探测器具有灵敏度高、体积小、重量轻等特点, 在早期空间探测任务的长期累积剂量测量方面发挥了重要作用[76]. 然而, 这类探测器缺乏实时测量能力, 研究数据通常在任务结束后通过离线分析获得. 测量结果主要由材料产生的微观损伤或激发效应获得, 对入射粒子种类和能谱信息的分辨能力相对有限. 尽管存在上述局限, 但被动型探测器成本低、可靠性高、结构稳健, 至今仍常与主动型探测器联合部署, 例如用于国际空间站航天员的长期辐射暴露评估, 并为主动探测器的在轨校准与对比验证提供重要参考数据.

3.3 特定辐射的针对性探测技术

空间辐射环境覆盖从低能等离子体到高能 GCR 的宽能区范围, 不同粒子在电荷属性、能量沉积及与材料相互作用方面存在明显区别, 所以并不能通过统一手段进行有效探测. 典型代表包括航天器结构内部产生的次级中子, 以及诱发表面充电效应的低能电子. 中子不带电, 无法通过直接电离产生可测信号, 且能量分布跨度大、屏蔽效果有限, 在航天器内的剂量贡献和辐射效应不可忽视; 低能电子沉积于航天器外表面, 其作用过程高度依赖于局部等离子体环境、电势分布及材料特性, 直接关联航天器的充电效应. 上述粒子明显区别于背景辐射环境, 因此有必要发展针对性探测技术, 以满足工程应用需求.

3.3.1 次级中子探测技术

由于中子不带电, 无法通过直接电离产生可测信号, 需依赖中子与原子核相互作用产生的次级带电粒子或特征辐射信号. 在空间辐射环境中, 次级中子来源复杂, 能量范围宽, 包括热中子到 GeV 量级的高能中子, 对探测器能量响应范围和粒子甄别能力要求较高.

按照中子与物质相互作用机理的不同, 常用的中子探测方法主要包括核反冲法、核反应法、核裂变法和核活化法. 核反冲法利用中子与轻核 (如氢核) 弹性散射产生的反冲核进行探测, 适用于快中子测量, 常见实现形式包括有机闪烁体和正比计数器. 核反应法通过中子与特定核素 (^{3}He, ^{10}B, ^{6}Li 等) 发生反应, 产生 α 粒子、质子或 γ 射线, 实现中子探测, 是空间中子剂量与能谱测量应用最广的方法. 核裂变法利用重核在中子诱发下发生裂变并记录裂变产物, 主要用于特定能区中子的监测; 核活化法则通过测量辐照后放射性核素的衰变辐射, 实现中子累积剂量的评估[83,84].

空间中子探测常采用气体探测器、闪烁体探测器、半导体探测器及被动型剂量计等多种形式. 气体型探测器 (如^{3}He 正比计数器、组织等效正比计数器) 具有灵敏度高、能量响应范围较宽的特点, 适用于舱内中子剂量与微剂量学测量; 闪烁体探测器通过核反冲或核反应产生光信号, 具有探测效率高、时间响应快的优势, 可用于快中子和高能中子测量; 半导体探测器则通常结合中子转化层实现间接探测, 具备小型化和集成度高的特点. 此外, 多球中子探测器 (Bonner 球) 通过不同慢化体结构获得宽能区响应, 是空间中子能谱测量的典型方案之一[58,83,85].

综上, 由于空间次级中子能量范围宽、γ 射线背景复杂, 单一探测器难以实现对中子通量、能谱和剂量的全面表征, 通常需结合多种探测原理与探测器类型实现对次级中子的可靠探测.

3.3.2 诱发表面充电低能电子的探测技术

诱发表面充电效应的粒子主要为能量在 eV 至 100 keV 的低能电子, 其在航天器外表面沉积, 并影响表面电荷积累与电流平衡过程. 与高能粒子不同, 低能电子对航天器的危害并非直接辐射损伤, 而是通过改变航天器表面及局部区域的电位分布, 引发差分充电和静电放电[86]. 因此, 探测重点不在于单纯测量

电子能通量, 而是获取航天器表面的电位状态及时变特征.

目前, 表面充电效应在轨探测主要采用表面电位或悬浮电位测量方法. 通过布设表面电位传感器或双探针装置, 直接测量航天器不同部位相对于环境等离子体的电势, 从而识别表面充电强度和差分充电特性. 相关探测技术已在多项航天任务中得到应用, 例如国际空间站搭载的表面电位监测装置, 以及中国卫星上配置的表面电位探测器[87,88].

除直接电位测量外, 近年来还提出了基于制动辐射 X 射线的非接触式充电诊断方法, 通过对电子−材料相互作用产生的辐射信号进行反演, 实现对航天器表面充电状态的远程识别[89]. 作为补充手段, 低能电子环境参数还可通过等离子体能谱仪与电场探测器间接获取; 电子能谱用于分析航天器充电发生的环境条件, 由探针电位反演得到的航天器悬浮电位可用于评估充电及演化过程[90].

诱发表面充电的低能电子探测并非依赖单一的电子探测器, 而是以表面电位测量为核心、结合等离子体与电场参数监测的综合技术路线. 由于表面充电过程高度依赖于局部等离子体状态、材料特性及光照条件, 不同测量手段在时间覆盖、动态范围和极端充电条件下均存在一定局限, 实际应用中通常需要多种探测方式的协同使用.

4 结论与展望

空间辐射是制约航天器可靠运行与人类深空探索能力的关键因素之一. 本文系统梳理了载人航天任务中的空间辐射环境、效应与探测, 重点综述了航天器关键器件与航天员的辐射效应特征, 以及当前主流的辐射探测技术, 旨在为未来深空探测任务的辐射风险评估与防护策略提供参考.

在辐射效应方面, 空间辐射对航天员的影响呈现出高 LET、慢性低剂量暴露与非靶效应并存的特点, 生物学效应涵盖分子、细胞及组织器官等多个层次. 长期低剂量暴露与随机性健康风险有关, 而在极端 SPE 等条件下, 短时高剂量暴露可能引发具有阈值特征的确定性效应, 对航天任务安全构成直接威胁. 综合典型任务经验可知, 不同空间区域与任务模式对辐射探测与剂量评估提出了差异化需求, 近地轨道任务侧重连续监测与累积暴露管理, 深空探测任务更关注 GCR 及强太阳活动带来的长期与突发风险.

在辐射探测方面, 空间辐射探测技术已由早期以总剂量监测为主, 发展为能够同步获取粒子种类、能谱、LET 及剂量学参数的多维度探测体系. 国际空间站通过辐射监测设备与被动剂量学探测系统的长期联合部署, 实现舱内外辐射环境的连续观测, 为航天员剂量管理、在轨预警及辐射传输模型验证提供了重要依据[91]. 中国空间站依托自主研发的主动辐射测量仪器与舱外监测载荷, 获取了舱内外辐射环境的实测数据, 提升了中国在轨辐射监测与风险评估能力[92]. 历史任务方面, 阿波罗计划首次获得了地磁层外载人飞行的辐射暴露记录[93], 而火星科学实验室揭示了地火转移及火星表面的辐射环境特征, 为载人火星任务的剂量预测提供了关键实测依据[94]. 与此同时, 星链卫星在大规模商业卫星平台上集成辐射传感器, 采用抗辐射设计方案, 展示了在成本与规模约束下开展空间辐射监测和器件可靠性管理的新模式[95].

随着载人航天任务由近地轨道向深空拓展, 空间辐射效应的复杂性和不确定性持续增加, 对辐射环境认知、剂量监测及辐射风险控制提出了更高要求. 未来, 有必要依托典型空间环境实测数据, 进一步加强辐射场特性、剂量学参数与生物效应之间的关联研究. 在此基础上, 通过空地协同建模与微剂量学研究, 持续利用在轨观测数据修正粒子输运与剂量评估模型, 深化剂量学参数与生物学响应之间的定量认识, 从而提升空间辐射风险评估的科学性与适用性, 为长期载人深空探索任务的安全论证提供更加可靠的依据.

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] BOURDARIE S, XAPSOS M. The near-earth space radiation environment[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55**(4): 1810-1832

[2] GU Y D. The China space station: a new opportunity for space science[J]. *National Science Review*, 2021, **9**(1): nwab219

[3] CHEN H F, ZOU H, SHI W H, *et al*. High energy charged particle experiment—a payload proposal to KuaFu-B mission[J]. *Advances in Space Research*, 2009, **44**(1): 39-45

[4] KOSKINEN H E J, KILPUA E K J. Radiation belts and

their environment[M]//KOSKINEN H E J, KILPUA E K J. Physics of Earth's Radiation Belts: Theory and Observations. Cham: Springer, 2022: 1-25

[5] CAO Xing, NI Binbin, LEI Yuan, *et al*. Research advances in the data assimilative modeling of the earth's radiation belt electrons[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2026, **57**(3): 292-309 (曹兴, 倪彬彬, 雷源, 等. 地球辐射带电子数据同化建模研究进展 [J]. 地球与行星物理论评, 2026, **57**(3): 292-309)

[6] ZONG Q G, YUAN C J, WANG Y F, *et al*. Dynamic variation and the fast acceleration of particles in earth's radiation belt[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, **56**(7): 1118-1140

[7] ANDERSON P C, RICH F J, BORISOV S. Mapping the south Atlantic anomaly continuously over 27 years[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **177**: 237-246

[8] SHI Quanqi, ZHANG Jiang, YUE Chao, *et al*. Review of particle radiation environment of the earth-moon space and its impact on Lunar surficial material generation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, **66**(7): 2685-2702 (史全岐, 张江, 乐超, 等. 地月空间粒子辐射环境及其对月表物质的影响研究进展 [J]. 地球物理学报, 2023, **66**(7): 2685-2702)

[9] BELOV A, SHLYK N, ABUNINA M, *et al*. Solar energetic particle events and Forbush decreases driven by the same solar sources[J]. *Universe*, 2022, **8**(8): 403

[10] MELKUMYAN A A, BELOV A V, SHLYK N S, *et al*. Forbush decreases and geomagnetic disturbances: 1. Events associated with different types of solar and interplanetary sources[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2023, **63**(6): 686-700

[11] MA Yuqian, WANG Huanyu, ZHANG Chengmo, *et al*. A conjunctive study of solar flare 20010402 and related solar proton events by the observation of SZ2/XD and ZY1/CBMC[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(5): 737-742 (马宇倩, 王焕玉, 张承模, 等. 2001 年 4 月 2 日太阳耀斑及其太阳质子事件的观测结果研究 [J]. 地球物理学报, 2004, **47**(5): 737-742)

[12] ZOU Hong, XIAO Zuo, HAO Yongqiang, *et al*. Observation of the disturbed events by the particle detector inside "ZY-1" satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, **49**(3): 636-641 (邹鸿, 肖佐, 郝永强, 等. "资源一号"卫星星内粒子探测器对扰动事件的观测 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(3): 636-641)

[13] REAMES D V. What are the sources of solar energetic particles? Element abundances and source plasma temperatures[J]. *Space Science Reviews*, 2015, **194**(1/2/3/4): 303-327

[14] GOPALSWAMY N, XIE H, AKIYAMA S, *et al*. Major solar eruptions and high-energy particle events during solar cycle 24[J]. *Earth, Planets and Space*, 2014, **66**(1): 104

[15] JIN W, WEI W S, CHEN L, *et al*. The charged particle detection system of the SRD module onboard the China space station[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2024, **1064**: 169463

[16] ZEITLIN C, CASTRO A J, BEARD K B, *et al*. Results from the radiation assessment detector on the international space station, part 2: the fast neutron detector[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2023, **39**: 76-85

[17] WANG H Z, ZHANG J, SHI Q Q, *et al*. Earth wind as a possible exogenous source of lunar surface hydration[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **907**(2): L32

[18] YU X Q, CHEN H F, ZONG Q G, *et al*. Mitigating deep dielectric charging effects in space[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, **64**(11): 2822-2828

[19] YANG Yan, ZHENG Yi, GAO Zhiqiang, *et al*. Research on detection scheme and application technology of surface charge effect for spacecraft[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2020, **41**(6): 51-56,68 (杨艳, 郑义, 高志强, 等. 等离子体对空间飞行器表面充电效应探测研究 [J]. 遥测遥控, 2020, **41**(6): 51-56,68)

[20] HUANG Jianguo, HAN Jianwei. Analysis of a typical internal charging induced spacecraft anomaly[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2907-2913 (黄建国, 韩建伟. 航天器内部充电效应及典型事例分析 [J]. 物理学报, 2010, **59**(4): 2907-2913)

[21] LU Y F, SHAO Q, YUE H H, *et al*. A review of the space environment effects on spacecraft in different orbits[J]. *IEEE Access*, 2019, **7**: 93473-93488

[22] Khamidullina N M, Zefirov I V, Chernikov P S. Analysis of single event effects created by space ionizing radiation in the microcircuits of the interplanetary spacecraft radio electronic equipment[J]. *Solar System Research*, 2022, **56**(7): 537-544

[23] JIA Xianghong, ZOU Hong, XU Feng, *et al*. Research progress of space electrons radiation risk and its protection strategy[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2014, **27**(6): 453-457 (贾向红, 邹鸿, 许峰, 等. 空间电子辐射风险及其防护策略研究进展 [J]. 航天医学与医学工程, 2014, **27**(6): 453-457)

[24] ZHAO Lei, SHANG Yuxuan, YUAN Shuang, *et al*. Research progress of space radiation protection technologies in manned deep space exploration missions[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, **64**(20): 2087-2103 (赵磊, 尚钰轩, 袁爽, 等. 载人深空探索中空间辐射防护技术的研究进展 [J]. 科学通报, 2019, **64**(20): 2087-2103)

[25] SIMONSEN L C, NEALY J E, SAUER H H, *et al*. Solar flare protection for manned lunar missions: analysis of the October 1989 proton flare event[C]//International Conference on Environmental Systems. San Francisco: SAE, 1991

[26] NWANKWO V U J, JIBIRI N N, KIO M T. The impact of space radiation environment on satellites operation in near-Earth space[M]//DEMYANOV V, BECEDAS J. Satellites Missions and Technologies for Geosciences. Lon-

don: IntechOpen, 2020

[27] MAURER R H, FRETZ K, ANGERT M P, *et al*. Radiation-induced single-event effects on the Van Allen probes spacecraft[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, **64**(11): 2782-2793

[28] LOTO'ANIU T M, SINGER H J, RODRIGUEZ J V, *et al*. Space weather conditions during the Galaxy 15 spacecraft anomaly[J]. *Space Weather*, 2015, **13**(8): 484-502

[29] SHEN Zicai, XIA Yan, YANG Yanbin, *et al*. Protection of materials and structures from space radiation environments on spacecraft[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, **50**(2): 1-7 (沈自才, 夏彦, 杨艳斌, 等. 航天器空间辐射防护材料与防护结构 [J]. 宇航材料工艺, 2020, **50**(2): 1-7)

[30] ANDERSON P C. Characteristics of spacecraft charging in low earth orbit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A7): A07308

[31] HAMMERL J, SCHAUB H. Coupled spacecraft charging due to continuous electron beam emission and impact[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2024, **61**(5): 1258-1271

[32] ECONOMIDES S. Biological effects of ionizing radiations[M]//GEROULAKOS G, AVGERINOS E, BECQUEMIN J P, *et al*. Mastering Endovascular Techniques: Tips and Tricks in Endovascular Surgery. Cham: Springer, 2024: 3-7

[33] SABOL J. Exposure pathways and potential biological effects at different biological organizational levels[M]// GUPTA D K, WALTHER C. Radionuclide Uptake in Food and Consequences for Humans. New Jersey: World Scientific, 2025: 205-245

[34] POHJOISMÄKI J L O, GOFFART S. Adaptive and pathological outcomes of radiation stress-induced redox signaling[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2022, **37**(4/5/6): 336-348

[35] CUCINOTTA F A. Non-targeted effects and space radiation risks for astronauts on multiple International Space Station and lunar missions[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2024, **40**: 166-175

[36] CHANCELLOR J C, SCOTT G B I, SUTTON J P. Space radiation: the number one risk to astronaut health beyond low earth orbit[J]. *Life*, 2014, **4**(3): 491-510

[37] KANG Jinlan, XING Lei, ZHAO Yali, *et al*. Research progress of space radiation risk and medical countermeasure for manned deep space exploration mission[J]. *Manned Spaceflight*, 2025, **31**(5): 701-710 (康金兰, 邢雷, 赵亚丽, 等. 载人深空探索任务空间辐射风险及医学对策研究进展 [J]. 载人航天, 2025, **31**(5): 701-710)

[38] HU S W, MONADJEMI S, BARZILLA J E, *et al*. Acute Radiation Risks Tool (ARRT) development for the upcoming human exploration missions[OL]. Authorea Preprints, 2022. DOI: 10.1029/2020SW002586

[39] TOMSIA M, CIEŚLA J, ŚMIESZEK J, *et al*. Long-term space missions' effects on the human organism: what we do know and what requires further research[J]. *Frontiers in Physiology*, 2024, **15**: 1284644

[40] WU Kang, FANG Meihua, ZHANG Zhao, *et al*. Analysis of the dose effect of space radiation to astronauts on the space station[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2023, **40**(5): 475-483 (吴康, 方美华, 张昭, 等. 空间辐射对空间站航天员的剂量影响分析 [J]. 航天器环境工程, 2023, **40**(5): 475-483)

[41] BASELET B, AZIMZADEH O, ERBELDINGER N, *et al*. Differential impact of single-dose Fe ion and X-ray irradiation on endothelial cell transcriptomic and proteomic responses[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2017, **8**: 570

[42] MARTIN C J. The LNT model provides the best approach for practical implementation of radiation protection[J]. *The British Journal of Radiology*, 2005, **78**(925): 14-16

[43] KENNEDY A R. Biological effects of space radiation and development of effective countermeasures[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2014, **1**: 10-43

[44] SISHC B J, ZAWASKI J, SAHA J, *et al*. The need for biological countermeasures to mitigate the risk of space radiation-induced carcinogenesis, cardiovascular disease, and central nervous system deficiencies[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2022, **35**: 4-8

[45] KOLANOSKI H, WERMES N. Particle Detectors: Fundamentals and Applications[M]. Oxford: Oxford University Press, 2020

[46] JAKUBEK J, CEJNAROVA A, HOLY T, *et al*. Pixel detectors for imaging with heavy charged particles[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2008, **591**(1): 155-158

[47] WILLIAMS M C S. Particle identification using time of flight[J]. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2012, **39**(12): 123001

[48] CAPPUZZELLO F, CARBONE D, CAVALLARO M. Measuring the ions momentum vector with a large acceptance magnetic spectrometer[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, **638**(1): 74-82

[49] TAVERNIER S. Detectors based on scintillation[M]// TAVERNIER S. Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics. Berlin: Springer, 2009: 167-208

[50] HILKE H J, RIEGLER W. Gaseous detectors[M]//FABJAN C W, SCHOPPER W. Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation. Cham: Springer, 2020: 91-136

[51] FLAKUS F. Detecting and measuring ionizing radiation - a short history[J]. *IAEA Bulletin*, 1982, **23**(4): 31-36

[52] DASTGHEIBI-FARD A, GERIBIER G. Development of spherical proportional counter for light WIMP search within NEWS-G collaboration[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,*

Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, **958**: 162390

[53] KARTALOVIĆ N, DALIBOR A, JUSIĆ A, *et al*. Stability of Geiger-Müller counter characteristics under operating conditions[J]. *Vacuum*, 2025, **235**: 114150

[54] BERNARD D, HUNTER S D, TANIMORI T. Time projection chambers for gamma-ray astronomy[M]//BAMBI C, SANTANGELO A. Handbook of X-Ray and Gamma-Ray Astrophysics. Singapore: Springer, 2024: 2123-2172

[55] LIU X, CHENG S T, LIU H, *et al*. A survey on gas sensing technology[J]. *Sensors*, 2012, **12**(7): 9635-9665

[56] YUAN Z Y, LI R, MENG F L, *et al*. Approaches to enhancing gas sensing properties: a review[J]. *Sensors*, 2019, **19**(7): 1495

[57] LECOQ P, GEKTIN A, KORZHIK M. Inorganic Scintillators for Detector Systems: Physical Principles and Crystal Engineering[M]. 2nd ed. Cham: Springer, 2017

[58] AN B Y, DENG Y J, JIN Z W, *et al*. Scintillators for neutron detection and imaging: advances and prospects[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, **35**(19): 2422522

[59] SINGH P, DOSOVITSKIY G, BEKENSTEIN Y. Bright innovations: review of next-generation advances in scintillator engineering[J]. *ACS Nano*, 2024, **18**(22): 14029-14049

[60] KOSHIMIZU M. Recent progress of organic scintillators[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2023, **62**(1): 010503

[61] MORAB S, SUNDARAM M M, PIVRIKAS A. Review on charge carrier transport in inorganic and organic semiconductors[J]. *Coatings*, 2023, **13**(9): 1657

[62] WU Rui, FAN Donghai, KANG Yang, *et al*. Research progress on semiconductor materials and devices for radiation detection[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2021, **50**(10): 1813-1829 (武蕊, 范东海, 康阳, 等. 半导体辐射探测材料与器件研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2021, **50**(10): 1813-1829)

[63] MILBRATH B D, PEURRUNG A J, BLISS M, *et al*. Radiation detector materials: an overview[J]. *Journal of Materials Research*, 2008, **23**(10): 2561-2581

[64] OWENS A, PEACOCK A. Compound semiconductor radiation detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2004, **531**(1/2): 18-37

[65] RAFIN S M S H, AHMED R, HAQUE M A, *et al*. Power electronics revolutionized: a comprehensive analysis of emerging wide and ultrawide bandgap devices[J]. *Micromachines*, 2023, **14**(11): 2045

[66] ENGEL G L, HALL M J, PROCTOR J M, *et al*. Design and performance of a multi-channel, multi-sampling, PSD-enabling integrated circuit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, **612**(1): 161-170

[67] LLOPART X, BALLABRIGA R, CAMPBELL M, *et al*. Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, **581**(1/2): 485-494

[68] STOFFLE N, PINSKY L, KROUPA M, *et al*. Timepix-based radiation environment monitor measurements aboard the international space station[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, **782**: 143-148

[69] KOUNINE A, COLLABORATION A. AMS experiment on the international space station[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, **1441**(1): 63-70

[70] SOMAN M R, ALLANWOOD E A H, HOLLAND A D, *et al*. Proton irradiation of the CIS115 for the JUICE mission[C]//Proceedings of SPIE 9602, UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VII. San Diego: SPIE, 2015: 96020O

[71] HARRISON F A, CRAIG W W, CHRISTENSEN F E, *et al*. The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) high-energy X-ray mission[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **770**(2): 103

[72] AMBROŽOVÁ I, BRABCOVÁ K, SPURNÝ F, *et al*. Monitoring on board spacecraft by means of passive detectors[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2011, **144**(1/2/3/4): 605-610

[73] Schollmeier M S, Bekx J J, Hartmann J, *et al*. Differentiating multi-MeV, multi-ion spectra with CR-39 solid-state nuclear track detectors[J]. *Scientific Reports*, 2023, **13**(1): 18155

[74] EFENJI G I, ISKANDAR S M, YUSOF N N, *et al*. Structural properties of thermoluminescence dosimeter materials, preparation, application, and adaptability: a systematic review[J]. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 2024, **28**(4): 1129-1150

[75] DE LELLIS G, EREDITATO A, NIWA K. Nuclear emulsions[M]//FABJAN C W, SCHOPPER H. Detectors for Particles and Radiation. Part 1: Principles and Methods. Berlin: Springer, 2011: 262-287

[76] KODAIRA S, KAWASHIMA H, KITAMURA H, *et al*. Analysis of radiation dose variations measured by passive dosimeters onboard the International Space Station during the solar quiet period (2007–2008)[J]. *Radiation Measurements*, 2013, **49**: 95-102

[77] CHAVAN S S, BAGLA H K. Measurements of alpha radioactivity in thermal power plant effluents employing CR-39 detector based improved alpha track detection method[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, **233**: 106574

[78] DIEBOLD S. Proportional counters and microchannel plates[M]//BAMBI C, SANTANGELO A. Handbook of X-Ray and Gamma-Ray Astrophysics. Singapore: Springer, 2024: 573-608

[79] GRANJA C, JAKUBEK J, POLANSKY S, *et al*. Resolv-

ing power of pixel detector Timepix for wide-range electron, proton and ion detection[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, **908**: 60-71

[80] MATOVIC M. Basic principles of scintillation detectors and gamma camera[J]. *Serbian Journal of Experimental and Clinical Research*, 2010, **11**(2): 73-77

[81] TAJIMA H, HAGINO K. Silicon strip detectors[M]// BAMBI C, SANTANGELO A. Handbook of X-Ray and Gamma-Ray Astrophysics. Singapore: Springer, 2024: 991-1015

[82] ZHANG Q S, ZHANG C Z, LU Y Y, *et al*. Progress in the development of CdZnTe unipolar detectors for different anode geometries and data corrections[J]. *Sensors*, 2013, **13**(2): 2447-2474

[83] GAO Xin, YANG Shengsheng. Detection techniques of neutron irradiation inside spacecraft[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, **27**(5): 595-599 (高欣, 杨生胜. 航天器舱内中子辐射探测技术 [J]. 航天器环境工程, 2010, **27**(5): 595-599)

[84] LIU Yina, YE Hongsheng, LI Wei, *et al*. Review of measurement lechnique for dosimetry in space[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2013, **33**(5): 68-73 (刘毅娜, 叶宏生, 李玮, 等. 空间辐射剂量测量技术发展 [J]. 宇航计测技术, 2013, **33**(5): 68-73)

[85] ZHANG Zixia, WEI Zhiyong, FANG Meihua, *et al*. Neutron radiation effects of space environment and measuring technique[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2009, **6**(4): 5-11 (张紫霞, 魏志勇, 方美华, 等. 空间环境中子效应及测量技术 [J]. 装备环境工程, 2009, **6**(4): 5-11)

[86] AHMAD N, DARSONO, FEBRIANTO I R, *et al*. Revisiting the Midori-II satellite anomaly: evidence of electrostatic discharge from SPENVIS simulations[J]. *Advances in Space Research*, 2026, **77**(4): 5354-5363

[87] SARNO-SMITH L K, LARSEN B A, SKOUG R M, *et al*. Spacecraft surface charging within geosynchronous orbit observed by the Van Allen Probes[J]. *Space Weather*, 2016, **14**(2): 151-164

[88] WANG Runfu, SUN Yingping, LIU Haibo. Research on spacecraft charging in low orbit plasma environment and in orbit experiments[J]. *Journal of Space Science and Experiment*, 2024, **1**(1): 102-109 (王润福, 孙迎萍, 刘海波. 低轨等离子体环境中航天器充电研究及在轨试验 [J]. 空间科学与试验学报, 2024, **1**(1): 102-109)

[89] WILSON K T, BENGTSON M T, SCHAUB H. X-ray spectroscopic determination of electrostatic potential and material composition for spacecraft: experimental results[J]. *Space Weather*, 2020, **18**(4): e2019SW002342

[90] BENGTSON M T, WILSON K T, SCHAUB H. Experimental results of electron method for remote spacecraft charge sensing[J]. *Space Weather*, 2020, **18**(3): e2019SW002341

[91] WILSON J W, CUCINOTTA F A, GOLIGHTLY M J, *et al*. International space station: a testbed for experimental and computational dosimetry[J]. *Advances in Space Research*, 2006, **37**(9): 1656-1663

[92] ZHANG H X, SHEN G H, HOU D H, *et al*. Space environment monitoring unit on Wentian laboratory cabin module of China Space Station[J]. *Aerospace*, 2024, **11**(12): 1006

[93] SCHAEFER H J, BENTON E V, HENKE R P, *et al*. Nuclear track recordings of the astronauts' radiation exposure on the first lunar landing mission Apollo XI[J]. *Radiation Research*, 1972, **49**(2): 245-271

[94] EHRESMANN B, HASSLER D M, ZEITLIN C, *et al*. Charged particle spectra measured during the transit to mars with the Mars Science Laboratory Radiation Assessment Detector (MSL/RAD)[J]. *Life Sciences in Space Research*, 2016, **10**: 29-37

[95] BACCELLI F, CANDEL S, PERRIN G, *et al*. Large Satellite Constellations: Challenges and Impact[R]. Paris: Académie des Sciences, 2024

作者简介



贺鹏志 男, 1997 年 11 月出生于山东省潍坊市, 现为山东大学空间科学研究院在读博士生, 主要研究方向为空间辐射环境数据分析、粒子探测、辐射生物效应等.
E-mail: hpz@mail.sdu.edu.cn



贾向红（通信作者） 女, 1973 年 9 月出生于山西省太原市, 现为山东大学空间科学研究院研究员, 主要研究方向为空间辐射探测技术、辐射防护、剂量学等.
E-mail: jiaxh@sdu.edu.cn