



月表氦气探测进展

李健楠¹, WONG Kingwah², 贺怀宇^{1*}, MESLIN Pierre-Yves^{2*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 法国图卢兹天体物理与行星研究所, 图卢兹 44346, 法国

*联系人: 贺怀宇, E-mail: huaiyuhe@mail.igcas.ac.cn; MESLIN Pierre-yves, E-mail: pierre-yves.meslin@irap.omp.eu

收稿日期: 2025-06-11; 接受日期: 2025-09-05; 网络出版日期: 2025-12-17

国家自然科学基金(编号: 42441807, 42203036)、中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(编号: YSBR-017)和中国科学院地质与地球物理研究所重点研究项目(编号: IGGCAS-202401)资助

摘要 氦是铀/钍衰变的产物, 其迁移特性可揭示月球表层气体交换机制与内部地质活动. 嫦娥六号任务搭载的中法合作氦气探测仪(DORN), 采用高灵敏度硅半导体探测器, 实现了对氦及其子体同位素衰变释放的 α 粒子的测量. 同时, 利用钋-209校准源解决了传统任务中的校准污染问题. 任务期间, 氦气探测仪首次实现了月球表面的氦气原位探测, 并完成轨道-月面联合观测, 共获取1059.54 Mbits科学数据. 相关研究结果将为月球氦气及其他挥发分的来源、时空分布与迁移机制提供新约束. 此次合作不仅彰显了中国航天的技术实力, 更开创了深空探测国际合作的新模式, 为未来任务积累了重要经验.

关键词 嫦娥六号任务, 氦气探测仪, 氦气, 阿尔法粒子能谱, 中法合作

PACS: 07.77.-n, 23.60.+e, 29.30.Ep, 95.55.Pe

1 引言

月球因其微弱的引力和缺乏全球性磁场的保护, 长期以来被视为无大气天体的典型代表. 然而, 自阿波罗计划实施以来, 科学观测已证实月球表面存在一个极其稀薄的外逸层. 这一脆弱的外逸层能够稳定存在, 主要依赖于挥发分的持续释放(太阳风离子溅射、月球内部气体释放、放射性元素衰变和陨石撞击脱气等)与逃逸(如光电离、热逃逸等), 以及月球表面的再循环之间形成的动态平衡^[1,2]. 月球挥发分的空间分布和时间演化与其内部的地质活动、热演化历史以及表

面空间风化作用密切相关. 深入研究月球挥发分的来源、迁移机制和赋存状态, 不仅能够揭示月球内部的物质组成和演化过程, 还能为理解类地行星(如水星、火星)和冰卫星(如木卫二、土卫二等)等无大气或稀薄大气天体的挥发分循环提供关键参照. 此外, 通过对比研究月球与地球大气的演化差异, 可为行星大气形成和逃逸机制的理论模型提供重要约束.

氦是唯一的放射性惰性气体元素. 它是月球外逸层中最特殊的挥发分, 因其特殊的物理化学性质而成为研究月球挥发分循环的理想示踪剂. 这种放射性惰性气体具有三重显著特征: 其母体元素(铀和钍)可通

引用格式: 李健楠, Wong K, 贺怀宇, 等. 月表氦气探测进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 229601

Li J, Wong K, He H, et al. Progress in Detection of Outgassing RadoN (DORN) on lunar surface (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 229601, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0268](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0268)

过轨道伽马射线谱仪直接探测, 这为氦的来源研究提供了明确依据; 其惰性化学性质确保其仅通过放射性衰变(半衰期3.82天)这一单一途径消失, 避免了复杂的化学反应干扰; 其衰变产生的 α 粒子在月球真空环境中具有极强的穿透能力, 可实现远距离探测. 这些特性使得氦的迁移路径和时空分布能够清晰反映月球表层的气体交换过程. 氦的短寿命特性(相较于其他挥发分)使其成为研究月球当前地质活动的“实时指示剂”, 能够有效区分现代脱气事件与历史挥发分记录. 自月球探索的早期 α 粒子谱仪的首次探测以来, 氦及其衰变产物钋(Po)的观测数据已成为解析月球表层气体迁移机制、估算挥发分通量以及评估月球内部持续脱气活动强度的关键指标^[3-10]. 这些研究不仅深化了对月球表面-外逸层相互作用的认知, 更为理解无大气天体挥发分的动态平衡机制提供了独特视角.

月球氦气的探测历史可追溯至20世纪70年代的阿波罗计划, 迄今已有四次专门的轨道探测任务. 先驱性的阿波罗15号和16号任务通过 α 粒子谱仪/APS获得了月表氦气释放的证据^[6-8], 为后续研究奠定了基础. 进入21世纪后, 月球勘探者号^[10]和日本月亮女神号^[11,12]任务进一步扩展了氦气的全球分布数据. 在这一研究背景下, 中法合作研制的嫦娥六号氦气探测仪(Detection of Outgassing Radon, DORN)标志着月球氦气探测进入新阶段. 该仪器于2024年5月随嫦娥六号任务成功发射, 不仅在历史上首次实现了对月球背面南极-艾特肯盆地的原位氦气测量, 还创新性地结合了轨道与月面联合探测模式. DORN探测器采用多检测器阵列设计, 具备在轨定标能力和高灵敏度探测性能, 其获得的数据将首次揭示氦气在月表-外逸层系统中的三维传输过程. 这一突破性观测将为建立月球挥发分循环模型提供关键约束条件, 特别是对理解古老撞击盆地区域的现代脱气活动具有不可替代的科学价值.

嫦娥六号任务搭载中法合作氦气探测仪是我国深空探测国际合作的一次重要突破, 标志着中国探月工程进入国际合作新阶段. 嫦娥系列任务中首个中法联合研制的科学载荷, 氦气探测仪的成功实施不仅填补了月球表面氦气原位探测的空白, 更开创了我国深空探测任务国际合作的新模式. 这一合作项目充分展现了我国在月球探测领域的工程实力和技术水平, 特别是在探测器搭载能力、任务规划协调以及国际合作管理等方面的显著进步. 从科学角度看, 氦气探测仪载荷

通过创新的探测方案设计, 为解决月球挥发分迁移这一关键科学问题提供了全新数据; 从工程角度看, 该项目为我国积累了宝贵的国际合作经验, 包括技术标准对接、任务协同管理、数据共享机制等关键环节的实践经验. 同时, 该项目的成功实施也彰显了中国航天开放合作的姿态, 对促进全球月球科学研究、推动人类太空探索事业具有深远意义. 为了让相关领域科研人员和大众更好地了解氦气探测仪, 本文系统梳理了DORN载荷从科学背景、科学目标设定到产品设计的过程. 最后, 介绍了国际合作形式与任务执行情况, 这些经验将为我国后续深空探测任务(如小行星采样返回、火星采样返回等)的国际合作提供重要借鉴.

2 月球氦的产生、析出和迁移过程

作为镭 α 衰变的直接产物, 氦在自然界中存在三种主要同位素: 氦-222(^{222}Rn), 称之为镭射气(Radon, 简写Rn, 属铀-238衰变链); 氦-220(^{220}Rn), 称之为钍射气(Thoron, 简写Tn, 属钍-232衰变链); 以及氦-219(^{219}Rn), 称为锕射气(Actinon, 简写An, 属铀-235衰变链). 由于氦-219的半衰期极短且相对丰度低, 其观测难度较大, 因此在月球挥发分研究中通常不予考虑. 氦的衰变过程会产生一系列具有不同半衰期的子体产物(图1(a)和(b))^[13], 这些衰变链特征为月球氦气探测提供了独特的物理基础. 在铀-238衰变链中, 氦-222作为重要中间产物, 其前体镭-226 (^{226}Ra)通过 α 衰变生成氦-222 (半衰期1600年, α 粒子能量4.8 MeV), 随后, 氦-222又经 α 衰变转变为钋-218 (半衰期3.82天, α 粒子能量5.5 MeV), 这一系列过程构成了月球氦气探测的主要目标. 基于氦及其子体产物的 α 衰变特性, Kraner等人^[14]早在1966年就开创性地提出了利用 α 粒子能谱分析技术来探测月球表面氦及其衰变产物钋的方法. 这一技术路线充分利用了不同放射性核素 α 粒子能量的特异性(如氦-222释放5.5 MeV的 α 粒子, 其子体钋-218释放6.0 MeV的 α 粒子), 使得通过 α 粒子谱分析不仅可以识别氦的存在, 还能区分其不同衰变阶段的产物. 由于钋-210是通过铅-210 (^{210}Pb)的中长期衰变从氦-222中衍生出来的, 因此这两种物质在两个不同的时间尺度上限制了脱气: 如果检测到氦释放的 α 粒子表明脱气发生在过去数天, 如果检测到钋释放的 α 粒子则表明脱气发生在数十年前^[7,8,15]. 这一探测原理的确

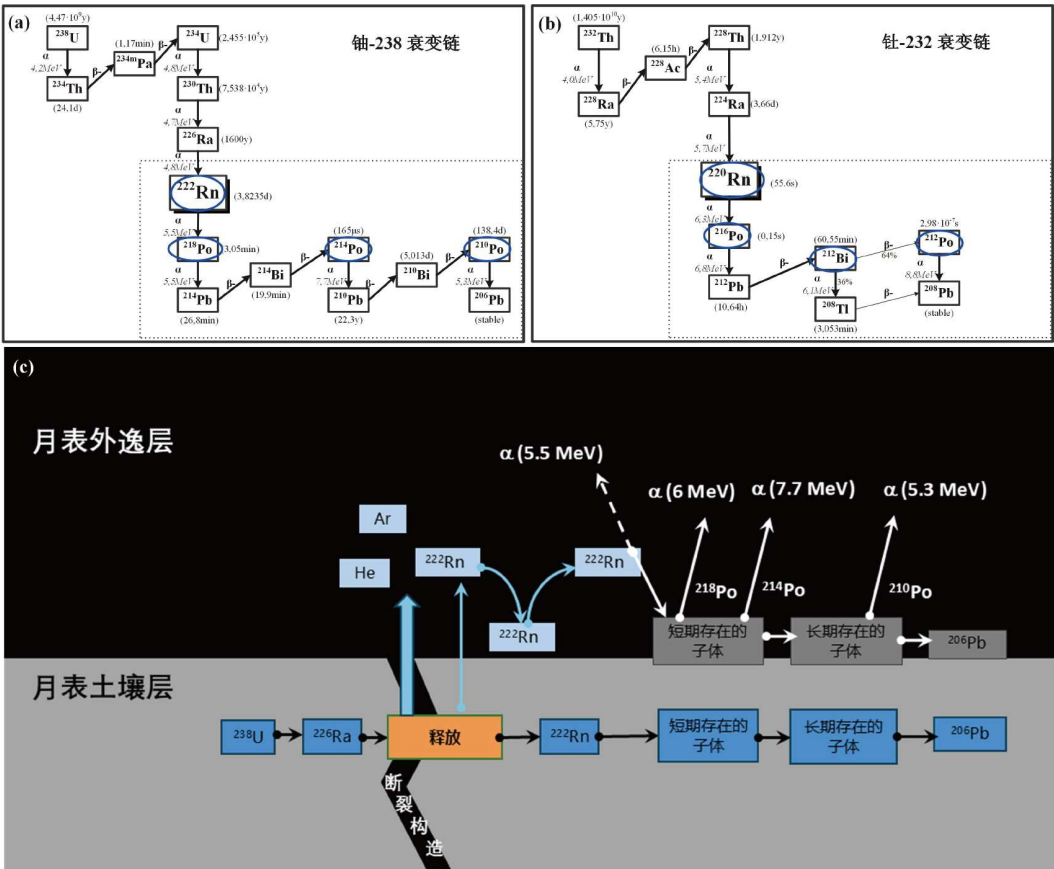


图 1 (网络版彩图) (a)铀-238衰变链和(b)钍-232衰变链的关键路径, 以及氡-222和氡-220及其子体的位置、半衰期和衰变模式。由DORN测量的放射性核素用蓝色圆圈标出^[13]。(c) 月表铀-238衰变成氡-222及其子体的产生原理图: 月球土壤和外逸层中氡的产生、释放与输运, 随后氡衰变产物(仅显示 α 粒子发射体)在月球表面形成放射性表层

Figure 1 (Color online) (a) ^{238}U and (b) ^{232}Th decay series, showing the position of ^{222}Rn and ^{220}Rn isotopes and their progeny. The radionuclides measured by DORN (alpha emitters) are circled in blue. Half-lives and decay modes are also indicated [13]. (c) Illustrates the decay mechanism of ^{238}U into ^{222}Rn and its progeny on the lunar surface. The diagram shows the production, release and transport of radon in the lunar soil and exosphere, followed by the formation of a radioactive veneer at the surface of the Moon due to the implantation of radon decay products (only alpha emitters are shown).

立, 为阿波罗任务及后续月球氦气探测任务奠定了理论基础.

月球氢气的产生与迁移过程呈现出独特的空间环境相关性. 氢作为铀和钍放射性衰变的直接产物, 其部分原子可通过 α 核反冲效应从母体矿物晶格中释放, 这一物理过程使其能够突破矿物结构的束缚进入月壤孔隙空间. 氢的化学惰性使其在月壤环境中几乎不发生任何化学反应, 因此其迁移行为完全受物理过程支配——主要包括孔隙扩散和热脱附等机制. 由于缺乏大气层的温度缓冲作用, 月表昼夜温差可达300 K以上^[16], 这种剧烈的温度波动会显著影响氢在月壤中的吸附-解吸平衡, 从而形成以月昼/月夜为周期的氢气释放节律.

氦在月表的时空分布同时受到其放射性半衰期和月壤特性的双重约束。模拟研究表明, 氦-222在其5.5天的存在寿命内仅能在月壤中扩散数米距离, 而更短寿命的氦-220在其80秒的存在周期内的迁移范围更局限在厘米尺度^[17]。这种显著的尺度差异为研究不同时间尺度的月球脱气过程提供了多维度观测窗口。当氦进入月球外逸层后, 以弹道运动形式迁移, 由于月球重力微弱, 部分氦原子可能达到逃逸速度而永久损失到行星际空间, 其动力学行为展现出与月表温度场强烈耦合的特征。根据弹道运动理论, 氦原子的平均自由程与表面温度呈正相关关系。这种温度依赖性导致月球外逸层氦密度呈现出明显的昼夜不对称性, 较低的月球表面温度会导致较高的外逸层密度。与氦-40

(^{40}Ar)等惰性气体类似, 氦在夜间寒冷表面(<211 K)会发生物理吸附现象, 这种暂时性捕获机制可使氦在月表停留时间延长至数小时, 直到日出后温度升高导致快速解吸^[18,19]. 这种“夜间吸附-日间释放”的循环模式在月球极区可能更为显著, 因为极区永久阴影区的超低温环境(<100 K), 可能形成氦的长期捕获区.

3 月球氦气研究历史

20世纪50–70年代的月球探测初期, 尽管氦气并非直接科学目标, 但美国和苏联科学家通过解译其他可能测到氦的载荷数据、分析测试返回航天器部件材料与月球样品等研究途径, 尝试探寻月球氦气的蛛丝马迹, 为后续研究奠定了重要基础.

美国探测器(Explorer) 35号轨道器搭载的阿尔法粒子测量仪(Alpha Particle Spectrometers, APS)数据的分析显示, 月球表面没有发现氦气存在的证据^[3]. 然而该设备自身配备的镅-241 (^{241}Am , 放射能量为5.49 MeV)校准源造成与 ^{222}Rn 能量范围重叠, 给氦气探测数据解译带来极大的不便. 美国勘测者(Surveyor) 5, 6, 7号系列任务上搭载的阿尔法散射测量仪(α -Scattering Experiments)数据分析显示, 仅勘测者5号着陆器在宁静海发现了可靠的钋-210和钋-218的 α 粒子证据^[4]. 但是阿尔法散射测量仪并非为探测氦气而设计, 由于其视场很小, 导致空间代表性存疑; 同时其校准源镅-254 (^{254}Es)的衰变过程复杂, 导致较大的背景值.

一些研究人员也尝试在返回样品和航天器部件上检测氦气存在的信号, 包括阿波罗11号带回的月壤和月岩^[20]、阿波罗14号的月岩^[21]、勘测者3相机遮阳板^[22], 以及阿波罗11号、12号、14号、15号和16号任务中暴露在月球表面的太阳风成分实验箔片^[5]. 其中, 仅在阿波罗12号箔片上发现了明显异常的钋-210浓度, 指示风暴洋地区曾有氦-222释放^[5]. 由于这些设备和材料均不是为探测氦而专门设计, 并且存在样本污染风险、时间分辨率不足以及空间覆盖有限的问题, 其结果仅有参考意义.

阿波罗15号和16号任务搭载的 α 粒子谱仪(Alpha Particle Spectrometer, APS)开创了月球氦气探测的先河, 其观测结果首次为月球挥发分的动态活动提供了直接证据(图2(a)和(b))^[7,8,23]. 月球表面的氦气析出活动在空间和时间维度上都表现出显著的不均匀性. 在

阿波罗15号任务期间, 当探测器飞越阿利斯塔克撞击坑(Aristarchus Crater)时, α 粒子谱仪记录到显著的 α 粒子活度异常^[6]. 其中, 氦-222的计数率比月球全球背景值高出4.3个标准差. 但是, 该区域并未检测到长寿命衰变产物钋-210的显著增强(小于3个标准差). 这一现象暗示观测到的氦气释放很可能是一次相对近期发生的地质事件(例如, 陨石撞击、构造活动等), 而非长期持续的脱气过程. 阿利斯塔克撞击坑区域铀钍元素富集. 其局部性的高氦气浓度暗示铀/钍衰变产热可能驱动深部挥发分迁移. 阿波罗16号的 α 粒子谱仪在格里马迪撞击坑(Grimaldi Crater)附近以及丰富海(Mare Fecunditatis)边缘区域检测到明显的钋-210活度增强^[8]. 综合分析阿波罗15号和16号钋-210数据发现, 除澄海(Mare Serenitatis)外, 其他主要月海边缘都显示出不同程度的钋-210浓度增强, 其中以危海(Mare Crisium)边缘的表现最为显著^[9]. 这些空间分布特征暗示月海与高地交界、撞击盆地的周缘处可能存在特殊的断层地质构造, 如玄武岩冷却收缩形成的裂隙网络, 为深部挥发分的向上迁移提供了有利通道.

阿波罗15号与16号任务的氦气探测存在若干技术局限. 由于轨道倾角较低, 两个任务仅能获取月球赤道附近狭窄纬度带的钋-210分布数据, 无法建立全球性的挥发分分布模型. 尽管阿波罗15号累计观测211小时, 16号观测85小时, 但受限于当时APS的低灵敏度, 所获数据量远未达到统计显著性要求. 其中, 阿波罗15号从未公布原始能谱数据, 而16号仅提供经过高度处理的单谱线结果, 严重制约了后续研究的再分析可能. 另外, 技术故障进一步降低了数据可靠性. 在地面校准期间, 阿波罗15号的APS检测器意外受到钋-210污染(各检测器上污染程度不均)^[6], 这一事故导致后续观测中难以准确校正真实的月表信号与仪器本底.

随着1972年阿波罗计划终止, 月球氦气探测陷入空白期. 直到新世纪, 随着深空探测技术发展和月球科学研究进入新阶段, 月球氦气探测才重新获得学界关注. 在阿波罗任务结束约30年后, 1998年美国月球勘探者号搭载的新型APS重启了月球氦气的系统性探测, 并首次获得了全月氦-222和钋-210分布图(图2(c)和(d))^[10]. 月球勘探者号APS的能量分辨率达到了0.1 MeV@5.5 MeV, 因此检测到的氦-222和钋-210特征峰强度比阿波罗任务观测值高出数倍. 虽然月球勘

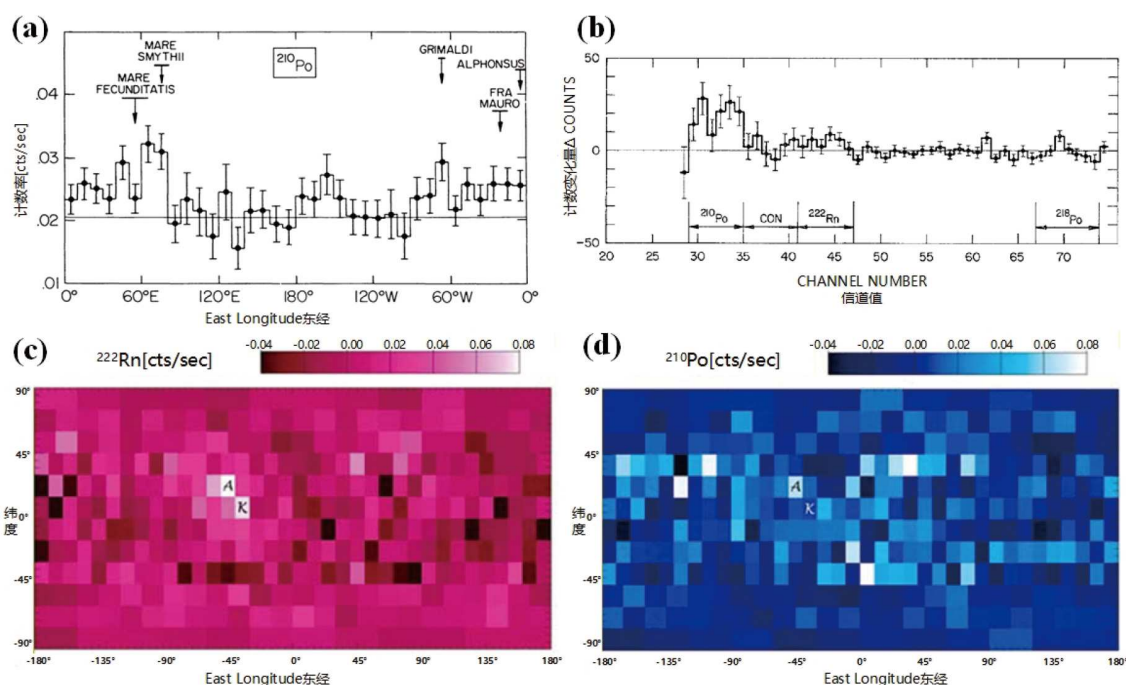


图 2 (网络版彩图) (a) 在阿波罗16号月面轨迹上观测到的钋-210的空间变化^[7,8]. (b) 阿波罗16 APS测量的阿尔法谱显示钋-210、氡-222和钋-218峰^[7,23]. 钋-210峰值大于氡-222和钋-218, 而在长期平衡状态下, 稳定状态下应较低. (c) 氡-222地图和(d) 钋-210地图由月球勘探者APS测量^[10]. 除巨大的空间变化外, 还观察到两种放射性核素之间的不平衡, 这表明氡的释放随时间变化. 氡-222信号在阿波罗任务和月球勘探者任务之间也有所不同. 字母A和K表示阿里斯塔克斯和开普勒陨石坑的位置, 曾被3个任务(月球勘探者号、阿波罗15号和月亮女神号)观测到存在氡-222或钋-210的异常

Figure 2 (Color online) (a) Spatial variations of ^{210}Po observed across the Apollo 16 ground track [7,8]. (b) Alpha spectrum measured by Apollo 16 APS showing ^{210}Po , ^{222}Rn , and ^{218}Po peaks [7,23]. The ^{210}Po peak is larger than ^{222}Rn and ^{218}Po , while at secular equilibrium, under steady state, it should be lower. (c) ^{222}Rn and (d) ^{210}Po maps measured by Lunar Prospector APS [10]. In addition to large spatial variations, disequilibrium between the two radionuclides is also observed, indicative of time-variable radon release. The ^{222}Rn signal has also varied between the Apollo missions and Lunar Prospector. The letters A and K indicate the location of the Aristarchus and Kepler crater, where ^{222}Rn or ^{210}Po anomalies have been observed by three missions (Lunar Prospector, Apollo 15 and Kaguya-Selene).

探者号与阿波罗任务APS观测结果均显示月球气体释放事件存在时间和空间上的变化, 但其具体分布呈现显著差异. 阿波罗时期发现的格里马迪撞击坑等钋-210热点区域在30年后已衰减至不可检测水平. 相较于阿波罗任务观测到的月海边缘钋-210信号普遍异常, 月球勘探者号仅在少数几个月海边缘, 包括原先不活跃的澄海边缘发现了钋-210信号增强. 开普勒撞击坑(Kepler Craters)在月球勘探者号数据中首次显示出氡释放迹象, 而阿里斯塔克撞击坑虽然持续活跃, 但释放强度呈现明显波动. 此外, 对于月背东部检测到的钋-210异常, 研究团队提出创新性解释——这可能源于近侧月海释放的气体沿晨昏线输运所致, 该假说为理解月球外逸层气体全球循环提供了新思路. 与阿波罗任务类似, 月球勘探者号APS在发射前的真空定标测试中意外受到镅-241污染^[10]. 这种地面污染虽然

通过本底扣除进行了校正, 但仍对低强度信号的定量分析造成不确定性. 此外, 月球勘探者号虽然实现了全月覆盖(历时229天跨越16个月), 但其APS在任务期间因太阳活动影响出现性能衰减^[24].

日本的月球轨道器月亮女神号(Kaguya)也搭载了阿尔法射线检测仪(Alpha-Ray Detector, ARD), 其灵敏度是阿波罗任务搭载的APS的25倍^[11]. 由于ARD的空间分辨率的增加, 探测结果显示, 阿里斯塔克撞击坑和开普勒撞击坑的钋-210信号异常比早期预测更小^[12]. 可惜的是, 日本月亮女神号搭载的ARD虽设计灵敏度达阿波罗设备的25倍^[11], 却因电源系统故障而未能获取有效数据^[25], 未有正式文章发表.

这些探测成果背后仍存在诸多技术局限性和数据不确定性, 这些问题直接影响了科学结论的可靠性. 早期的探测任务在设计上存在系统性缺陷, 视场狭窄且

灵敏度不足, 导致数据缺乏统计意义. 更令人遗憾的是, 多个关键任务接连遭遇技术失误, 导致检测器受到校准源污染, 使得本底噪声显著增加. 这些技术挫折不仅造成了科学数据的缺失, 更导致我们对月球氦气活动的认知存在明显的时空断层.

对早期月球探测任务和模型的钋-210表面活度数据(表1)^[3-5,7,8,10,14,20,22,26-29]的系统梳理可以看出, 现有数据仍存在显著的离散性和不确定性, 面对这些纷繁复杂的数据集, 要建立关于月球氦气脱气与传输过程的统一认知框架仍面临重大挑战. 虽然已有观测获得了若干具有启发性的发现——如氦气释放的时空变异性、与地质构造的相关性等——但这些结论的可靠性仍受限于数据质量和数量. 特别是在量化氦气通量、确定释放周期、阐明迁移机制等关键科学问题上, 现有数据尚不足以支撑明确的论断. 因此, 亟需开展更高统计显著性的系统观测.

4 月球氦气研究意义

综合历次月球探测任务的数据分析表明, 月球表

面氦气的释放活动呈现出复杂的时空动态特征. 值得注意的是, 氦-222和钋-210异常区域的空间分布与历史上记录的月球瞬变现象(Transient Lunar Phenomena, TLP)发生位置存在显著相关性^[30]. 月球瞬变现象长期以来一直是月球科学中最引人入胜的未解之谜之一. 自16世纪伽利略首次观测到月球表面异常闪光以来, 天文学家已记录了大量TLP事件^[30-33]. 这些现象主要表现为光学观测上局部区域的短暂亮度变化(增亮或变暗)、颜色异常或雾状模糊, 持续时间从数秒至数小时不等. 尽管缺乏确凿的仪器记录, 但TLP的空间分布呈现出明显的规律性——主要集中在撞击坑(如阿利斯塔克撞击坑、格里马迪撞击坑和开普勒撞击坑)以及月海与高地交界处(如丰富海和危海边缘)(图3)^[30-34]. 这种非随机分布强烈暗示其成因与月球内部地质活动相关.

当前学术界对TLP的成因存在多种假说, 其中最具说服力的是“月球脱气说”^[25,30,35,36]. 该理论认为, TLP可能是深部挥发分(包括氦、氢、水等)沿月壳薄弱带(如断裂系统、年轻撞击坑辐射纹)逃逸至表面时, 携带月尘颗粒或引发局部发光所致. 支持这一假说的

表 1 早期月球探测任务或模型获得的²¹⁰Po表面活度

Table 1 Summary of ²¹⁰Po surface activities measured or derived from previous missions, experiments or models

探测区域	探测任务	数据来源	²¹⁰ Po表面活度 (Bq m ⁻²)	参考文献
全月平均	Explorer 35	阿尔法发射测量仪	<1100	[3]
全月平均	理论模型	Kraner模型	1200	[14]
Mare Tranquillitatis	Surveyor 5	阿尔法散射测量仪	420±140	[4]
Sinus Medii	Surveyor 6	阿尔法散射测量仪	<210	[4]
Tycho	Surveyor 7	阿尔法散射测量仪	<210	[4]
Oceanus Procellarum	Surveyor 3	返回相机罩	<82	[22]
Mare Tranquillitatis	Apollo 11	返回月壤和岩石	<4.5	[20]
Oceanus Procellarum	Apollo 12	返回的太阳风成分实验箔片	238±35	[5]
飞行轨迹	Apollo15	阿尔法粒子谱仪	平均15±4	[7]
飞行轨迹	Apollo16	阿尔法粒子谱仪	最大40±8	[8]
Fra Mauro和Hadley-Apennine	Apollo 14	返回月壤, 估算	110	[26]
	Apollo 15			
Mare Tranquillitatis	Apollo 11	返回的太阳风成分实验箔片	<60	[27]
Fra Mauro	Apollo 14	返回的太阳风成分实验箔片	<70	[27]
Hadley-Apennine	Apollo 15	返回的太阳风成分实验箔片	87±13	[27]
Descartes	Apollo 16	返回的太阳风成分实验箔片	92±18	[27]
全月分布	Lunar Prospector	阿尔法粒子谱仪	13个区域210–350 (超过2.5σ)	[10]
		阿尔法粒子谱仪, 估算	其他地区<150–200	[10]
全月分布	Kaguya-Selene	阿尔法氦检测仪	未发表	[29]
全月平均	理论模型	Meslin模型	12–24	[28]

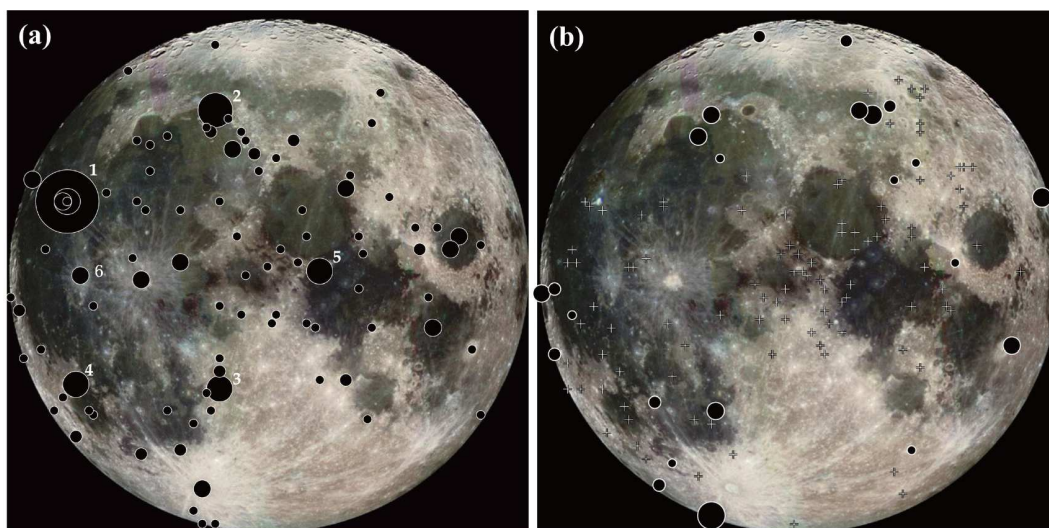


图 3 (网络版彩图) (a) 显著的月球瞬变光学现象的位置(符号的大小表示每个特性的报道数量), 显著大圆对应的是: 1为阿里斯塔克斯、2为柏拉图、3为阿方索斯、4为伽森迪、5为罗斯·D坑、6开为普勒陨石坑(照片版权归属美国国家航空航天局). (b) 浅(•)和深(+)月震的位置. 这两个过程都显示了与月海/高地边界的显著相关性^[30]

Figure 3 (Color online) (a) Locations of robust optical transient lunar phenomena (the size of the symbols encodes the number of reports per features). Marked features include: (1) Aristarchus, (2) Plato, (3) Alphonsus, (4) Gassendi, (5) Ross D, and (6) Kepler (Photo credit: NASA). (b) Location of shallow (•) and deep (+) moonquakes. Both processes show significant correlation with Mare/Highlands boundary ^[30].

关键证据包括: 地基观测到的 ^{222}Rn 羽流事件与历史TLP记录在时空分布上存在高度相关性^[36]; 高含量的 ^{210}Po 与低频率的TLP记录相关, 同样表明 ^{222}Rn 和TLP之间存在相关性^[36]. 高含量的 ^{222}Rn 信号是由月球脱气引起的. 在大型新鲜撞击坑以外的地区, TLP与深部月震的记录呈现较高的相关性^[30,36]. 此外, 阿利斯塔克撞击坑是一个TLP热点区域. 该区域钍元素富集, 暗示铀/钍衰变产热可能驱动深部挥发分迁移. 因此, 对月表氦气的观测对月球挥发分的迁移有着重要意义.

阿波罗17号任务在着陆点部署的月球大气成分实验(LACE)上搭载的中性质谱仪检测到 ^{40}Ar (^{40}K 衰变的放射性产物)呈现出周期约数月的脉冲式释放模式, 且这些释放事件与高频远震活动存在明显的时序关联^[37], 揭示了深部和浅部月震的位置与月海/高地边界之间存在相关性. 这一现象与阿波罗16号和月球勘探者号的探测结果相互印证——两个任务均观测到月海边缘区域普遍存在 ^{210}Po 活度增强. 从地质学角度分析, 月海边缘通常发育有复杂的断层系统和裂隙网络, 这些构造薄弱带很可能充当了挥发分从月球内部向表面迁移的通道. 基于这些多源数据的综合研判, 可以合理推断: 月震活动产生的机械振动和月表裂隙系统的开合作用共同构成了当前月球脱气过程的主要驱动力

制, 持续将氦气等挥发分从月球内部输送至外逸层.

5 嫦娥六号氦气探测仪的科学目标

为深入探究氦气在月球环境中的来源与演化机制, 中法两国科研机构展开深度合作. 法国图卢兹天体物理与行星研究所(Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, IRAP)和中国科学院地质与地球物理研究所联合提出并研制了新一代氦气探测仪(图4(a)和(b)), 并将其成功搭载于嫦娥六号探测器(图4(c)), 实现了人类首次在月表开展氦气及其衰变产物的原位精确测量. 该探测仪被命名为“DORN”, 这一命名具有双重深意: 一方面, 该名字致敬了氦元素的发现者、德国物理学家Friedrich Ernst Dorn的开创性贡献; 另一方面, “DORN”的发音恰与中文“氦”字高度契合, 象征着中法科学团队的精诚合作.

开展月球表面氦循环的原位监测将为轨道遥感测量提供关键的地面验证数据, 并有助于解决以下6个与月球挥发分及月尘输运相关的核心科学问题.

(1) 气体在月壤中的运移过程, 与月壤物理性质的反演

氦原子离开矿物晶格束缚的逃逸效率与三大关键

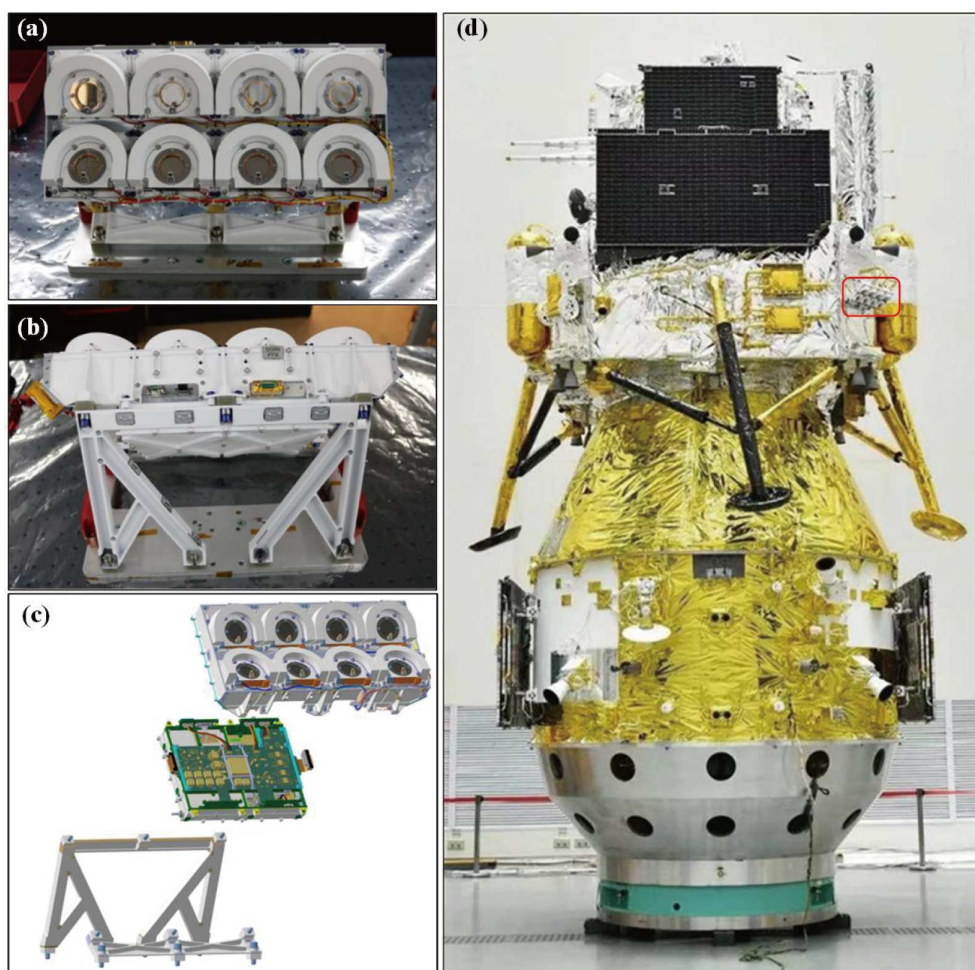


图 4 (网络版彩图) (a) 氦气检测仪整机正面外观. (b) 氦气检测仪整机背面外观. (c) 氦气检测仪本体系统组成, 从上到下分别为检测探头、电子学箱和机械支架. (d) 氦气检测仪在嫦娥六号探测器上的最终安装状态(红色方框内)
Figure 4 (Color online) (a) Front appearance of DORN. (b) Back appearance of DORN. (c) System composition of DORN (from top to bottom: sensor probe, electronics box, and mechanical mount). (d) Final integration state of DORN on the Chang'e 6 probe (within the red square).

参数密切相关: 月壤颗粒粒径分布、比表面积特征以及镭元素的赋存状态^[17,38,39]. 进入月壤孔隙后, 氦气的迁移行为主要受控于双重机制: 一方面是多孔介质微观结构决定的扩散传输, 包括孔隙连通度等; 另一方面是温度依赖的月壤吸附-解吸平衡过程, 这一特性使得氦气在月表的释放速率受昼夜周期的调节. 这种独特的物理化学行为使氦成为研究月表-外逸层相互作用的理想指示剂. 通过精确监测氦同位素的释放通量, 可以揭示月壤最上层数米范围内的热通量, 从而量化气体在风化层与外逸层界面的交换动力学参数. 氦同位素的释放速率可以用于反演有效扩散距离及其来源深度, 从而与传输模型进行比较^[28,40-42].

(2) 月球脱气活动特征与活跃脱气区识别

除常规扩散迁移外, ^{222}Rn 还可能在释气过程中被其他放射性元素(如 ^4He 和 ^{40}Ar 等)携带而发生间歇性释放^[43]. 这种突发性脱气过程可能由多种地质动力因素触发, 包括月震活动引发的裂隙开闭效应、月海玄武岩平原沉降导致的构造应力释放, 以及潮汐力与月亮相互作用产生的周期性应变. 若此类事件发生在探测器工作期间, 将能在着陆区观测到明显的氦气活度异常.

通过建立外逸层气体传输模型, 不仅可以追溯异常信号的释放源区位置, 还能定量评估脱气强度与持续时间, 从而识别并评价月球表壳构造薄弱点. 结合

相机、雷达、重力测量等遥感和原位探测技术, 精确识别活跃脱气点及关联裂隙网络是理解月球内部结构与演化历史、未来探测任务选址及资源开发的关键, 为月球可持续探索奠定基础.

(3) 月球外逸层挥发分的传输机制

进入月球外逸层的氦原子遵循弹道运动规律, 直至发生放射性衰变. 在这一迁移过程中, 氦原子通过与月壤颗粒的反复吸附-解吸作用而逐渐减速, 这种相互作用显著影响其空间分布特征. 由于该过程受表面温度控制, 与阿波罗17号观测到的氦气日变化规律^[37]类似, 外逸层的氦浓度理论上将呈现显著的昼夜波动. 因此, 研究²²²Rn的时空变化规律及传输过程可为理解⁴⁰Ar, H₂O等其他挥发分的传输机制提供理论框架.

(4) 月尘的传输机制

月表²¹⁰Po活度的测量值反映了数十年来氦气释放速率的变化历史和月尘迁移运动的综合结果. 微陨石撞击和太阳风诱导的静电浮扬等表面过程引起的翻耕过程可扰动与²¹⁰Po释放的 α 粒子射程相当的月尘表层, 导致²¹⁰Po在垂向和水平方向上的再分布, 并造成²¹⁰Po表面分布与²²²Rn时间积分信号之间的不平衡. 因此, 这一过程会影响测量的信号, 并导致²¹⁰Po表面分布和时间积分²²²Rn信号之间的不平衡^[4]. 这种不平衡状态为研究月尘迁移速率和方向提供了独特的示踪手段.

(5) 建立月表原位氦气基准观测体系

通过获取高时空分辨率的氦气通量、同位素组成及其衰变产物分布等数据, 可为轨道遥感观测提供可靠的原位验证基准. 这种“轨道-原位”协同观测模式, 能够有效解决轨道数据反演中遇到的关键参数不确定性问题. 同时, 原位监测数据可帮助厘清轨道观测中出现的异常信号本质, 区分真实脱气活动与仪器噪声或环境干扰.

(6) 提高月球铀含量分布测绘的准确度

在使用 γ 谱仪对近表层²³⁸U浓度进行测量时, 会测量其衰变链中²¹⁴Pb和²¹⁴Bi的浓度信号. ²²²Rn的迁移会增加²¹⁴Pb和²¹⁴Bi的浓度, 从而导致²³⁸U含量及U/Th比值的测量产生误差. 这一现象已在火星和水星的探测中得到证实^[28,40]. 因此, 月球表面²²²Rn的原位测量可用于修正轨道测量铀分布中可能存在的干扰^[44].

嫦娥六号任务为月球挥发分研究提供了前所未有的机遇. 氦气探测仪的月表原位测量将与返回样品的

实验室分析互为补充, 为揭示月球背面南极-艾特肯盆地的挥发分来源和迁移提供独特视角. 通过对月表氦通量的高灵敏度测量, 并与火星和水星的氦通量^[13,17,28,29,40–42,45,46]开展比较行星学研究, 可对太阳系不同天体的风化层特性差异开展研究.

6 嫦娥六号氦气探测仪的工作原理与系统设计

6.1 工作原理

在月球表面的高真空环境中, 氦同位素衰变释放的 α 粒子具有极强的穿透能力. 表2详细列出了主要探测核素²²²Rn和²²⁰Rn及其衰变子体的关键参数, 包括半衰期、 α 粒子能量及产率. 氦气探测仪采用基于硅半导体探测器的 α 粒子能谱分析技术, 通过测量 α 粒子与探测器表面相互作用的辐射能量来识别不同核素. 该探测系统对多种带电粒子均具有敏感性, 包括 α 粒子、质子、重离子、中子及二次电子等. 因此, 在轨测量时除目标核素信号外, 还将记录到来自三方面的背景辐射: 太阳高能粒子、银河宇宙射线以及月表反向散射粒子.

6.2 性能指标

(1) 探测能量范围, 仪器主要针对5–9 MeV能量区间的Rn和Po同位素 α 粒子进行测量, 同时具备0.5–12 MeV宽能区的探测能力, 可有效区分目标 α 粒

表 2 DORN可测量的放射性核素及其半衰期、 α 能量和 α 衰变产率

Table 2 Radionuclides measured by DORN, with half-life, alpha energy and alpha decay yield

同位素	半衰期	α 能量 (MeV)	产率 (%)
²³⁸ U衰变链			
²²² Rn	3.8235 d	5.49	100
²¹⁸ Po	3.05 min	6.00	100
²¹⁴ Po	164 μ s	7.69	100
²¹⁰ Po	138 d	5.30	100
²³² Th衰变链			
²²⁰ Rn	55.6 s	6.29	100
²¹⁶ Po	0.15 s	6.78	100
²¹² Bi	60.6 min	6.05	25.2
		6.09	9.6
²¹² Po	3×10^{-7} s	8.80	100

子与来自太阳风和银河宇宙射线的质子干扰信号.

(2) 能量分辨率, 仪器在标准工作温度(20℃)下优于30 keV, 确保仪器能够有效区分相距185 keV的 ^{210}Po 和 ^{222}Rn 特征峰(满足 $\text{FWHM} \leq 108 \text{ keV}$ 的技术要求, 对应 1.96σ 峰分离度).

图5展示了地面理想真空条件下获得的标准 α 能谱, 该谱线未受空间环境干扰, 清晰显示了各特征峰的能量分辨率.

6.3 仪器架构及工作场景

氦气探测器由探测仪器本体(4.51 kg)和配套线缆组件(0.47 kg, 包括与着陆器之间的一次供电电缆和422通信电缆以及接地线)构成, 整体尺寸为246 mm × 406 mm × 232 mm. 仪器本体包含检测探头、电子学箱和机械支架三个核心功能模块(图4(c)). 其中, 电子学箱集成高压电源板、低压电源板和数字板.

检测探头采用上下平行排列的双视场组设计, 共集成8个检测单元, 总有效探测面积可达42 cm². 其中, 上列为近视场组(可见视场示意图见图6(a)), 朝向着陆器阴影区, 用于监测相对低温环境下氦气及其子体同位素的放射性平衡状态; 下列为远视场组(可见视场示

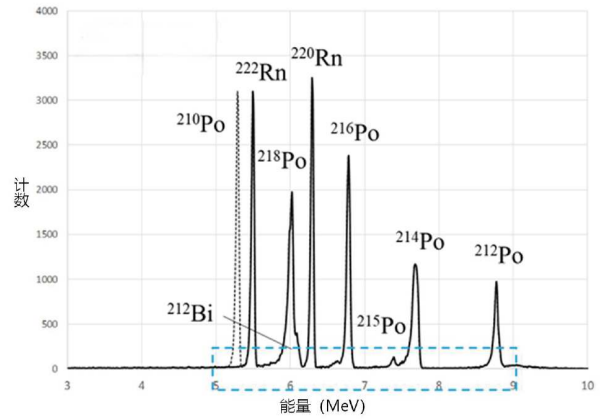


图5 (网络版彩图)真空下测得的氦-222和氦-220及短寿命衰变产物的阿尔法能谱(蓝色虚线框为感兴趣探测能量范围)

Figure 5 (Color online) Alpha spectrum of ^{222}Rn , ^{220}Rn and short-live decay products measured under vacuum (the blue dashed square refers to the range of interest for detection).

意图见图6(b)), 朝向部分天空及远方月面, 用于追踪悬浮氦同位素的迁移特征. 每个检测单元均包含两个硅探测器和一个屏蔽外壳和它们相关的前端电路板, 以及2个调度板(用于数模转换)与电子学箱进行接口.

机械支架包含上下两个专用支架, 斜安装于着陆

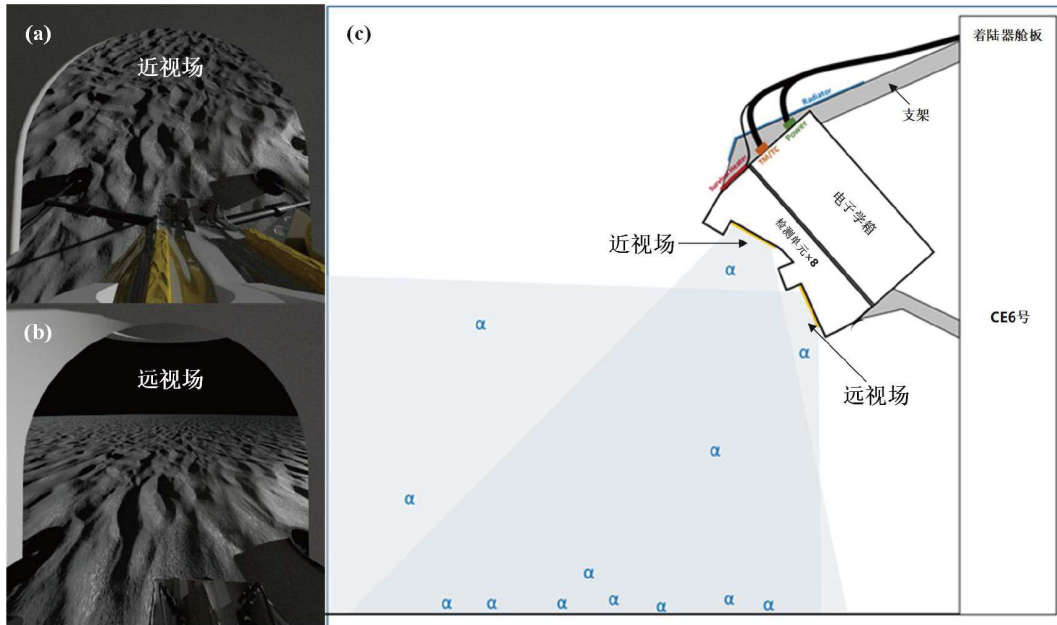


图6 (网络版彩图)氦气探测器月面探测状态视场示意图. (a) 月面近视场示意图; (b) 月面远视场示意图; (c) 氦气探测器月面探测整体视场示意图

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of DORN's surface detection state field. (a) The near-field of view on the lunar surface; (b) the far-field of view on the lunar surface; (c) schematic diagram of DORN on the lunar surface.

器侧面, 确保其具有所需的着陆器周边区域视场覆盖(图6(c)), 以满足科学探测所需的几何观测条件. 氦气探测器采用M8隔热螺钉将其安装于着陆器斜侧板. 着陆器上安装位置如图4(c)所示.

氦气探测器的温度控制与供电系统设计充分考虑了月球极端环境条件. 该仪器最佳工作温度上限为 25°C . 为了尽可能降低环境温度条件, 探测器着陆后, 氦气探测器在月表工作期间, 始终处于着陆器背阳面阴影区, 完全避免太阳直射辐射. 在整个任务阶段, 着陆器为氦气探测器供电. 供电系统采用双路直流电源设计(26–32 V), 其中1路用于发射至着陆前过程中单机自主生存控温, 另外1路用于环月和月面工作段的科学探测工作供电及探测器温控供电. 每路配置独立保护电路及继电器开关. 典型工况29 V输入下, 总平均功耗不大于33 W. 其中一次电源小于33 W (包括工作12 W, 工作加热21 W), 生存加热小于30 W.

为确保系统可靠性, 氦气探测器配备了完善的监测与通信系统. 通过着陆器提供1路专用温度采集回

路实时监测设备状态, 并将数据通过遥测通道传回地面控制中心. 氦气探测器与着陆器的通信采用双向RS422总线, 以115.2 kbps ($\pm 3\%$ 容差)的通信波特率进行工作状态控制和信息交互. 任务周期的科学探测数据总量被严格控制在3.5 Gbits以内, 通过着陆器进行存储和传输.

6.4 检测单元设计

氦气探测器的检测单元是其核心敏感部件, 专门用于探测氦及其子体同位素衰变释放的 α 粒子. 该单元采用高灵敏度硅半导体探测器设计, 主要由机械外壳、塑料屏蔽材料、校准源、硅半导体探测器、前端板和法拉第罩组成(图7(a)).

为有效排除月球表面环境中存在的各类干扰粒子(包括太阳风粒子、宇宙射线及探测器自身释放等不属于任何放射性衰变链特征的粒子), 氦气探测器采用了三重防护设计.

(1) 屏蔽外壳设计

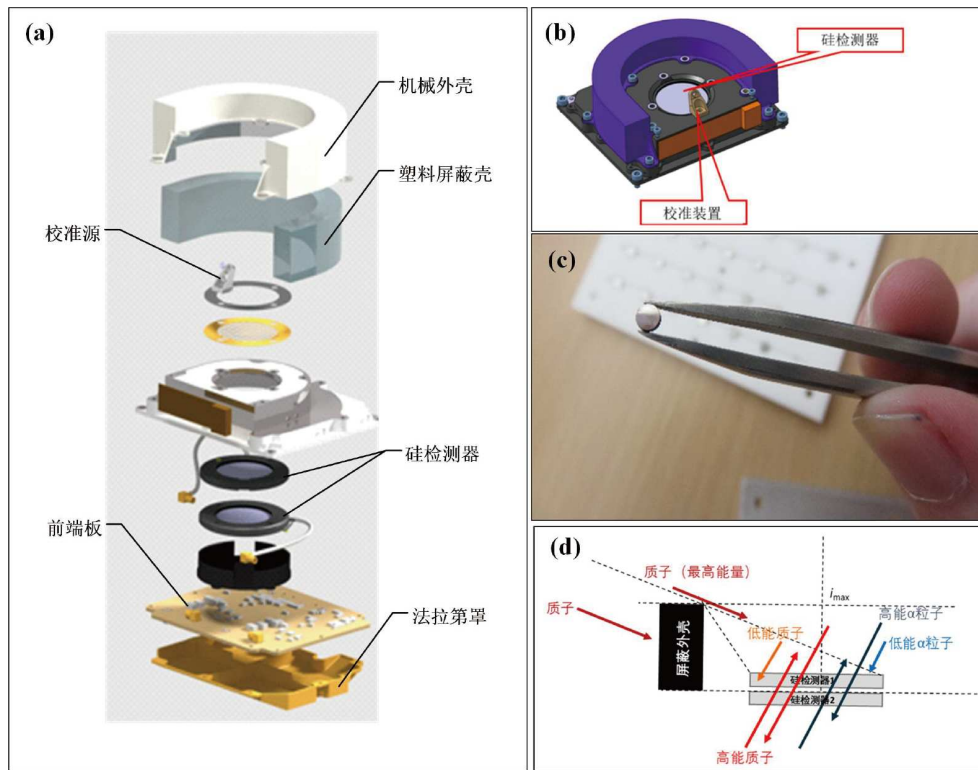


图 7 (网络版彩图) (a) 检测单元组成图; (b) 钋-209校准源组成图; (c) 钋-209校准物; (d) 反符合设计示意图

Figure 7 (Color online) (a) The detection unit; (b) the Polonium-209 calibration source; (c) Polonium-209 calibration ball; (d) schematic diagram of anticoincidence design.

采用半圆形塑料外壳覆盖部分检测器的视场, 将每个检测单元的视场角控制在 108° 范围内. 该设计通过减小入射粒子的入射角, 被动屏蔽来自视场外角外入射的太阳和银河系的粒子. 同时减少粒子在检测器上穿越的有效厚度, 降低因入射角度差异导致的能量测量差异, 并限制沉积在探测器中的能量.

(2) 硅半导体探测器设计

硅探测器表面用单铝层覆盖, 以防止可见光到近红外范围内的光子干扰. 同时, 不同视场的硅探测器具有差异化厚度设计. 远视场组配置 $65\ \mu\text{m}$ 硅探测器, 使能量相同的质子在沉积足够的能量前便穿过探测器, 从而抑制能量高达 $9\text{--}12\ \text{MeV}$ 的 α 粒子和来自太阳风及银河宇宙射线的质子干扰. 由于不太可能接收到从表面扩散的质子, 近视场组采用 $300\ \mu\text{m}$ 厚型硅探测器, 以减少能量低于 $900\ \text{keV}$ 的质子和能量高于 $9\ \text{MeV}$ 的氦和钋同位素的 α 粒子的干扰.

(3) 反符合机制设计

反符合机制设计通过一对前/后硅探测器堆叠构型实现粒子鉴别(图7(d)). 每个硅探测器检测到的信号视为一个事件, 如果两个硅探测器在一个反符合时间窗口内同步接收到一个信号, 则结果将以质子的形式存储, 并以不同的方式进行分析. 通过软件采集到的此类双重事件的时间差, 明确辨别质子或 α 粒子.

6.5 钋-209校准源设计

校准源用于在轨探测提供精确的定标基准, 用于标定目标光谱范围、监测温度变化对能谱的影响, 以及监测能量分辨率, 对低信号强度条件下的数据获取尤为重要. 该设计既便于后续处理谱数据, 也便于在仪器研发的所有阶段进行快速的功能测试. 针对以往任务中出现的校准源污染问题, 团队经过充分论证, 最终选定钋-209 (^{209}Po)作为理想的在轨定标物质. 这一选择主要基于三个关键特性: 首先, 钋-209释放的 α 粒子能量为主峰 $4.883\ \text{MeV}$ (79%), 次峰 $4.885\ \text{MeV}$ (20%)和 $4.622\ \text{MeV}$ (0.5%)与目标探测核素的特征能量峰不产生叠加; 其次, 其长达115年的半衰期确保在整个嫦娥六号任务周期内的活度保持相对稳定; 最后, 严格的 105°C 热稳定性测试证实钋-209会发生分离现象.

校准源为特制的沉积有钋-209校准物质的金属小球(图7(c)), 通过胶水粘贴在铝质机械支架, 支架通过

螺丝将源安装固定在每个检测单元的前侧方向(图7(b)).

7 氦气探测器任务实施

7.1 合作与分工

氦气探测器载荷是中法航天合作的典范成果, 其研制工作充分融合了双方的技术优势. 法国天体物理与行星研究所凭借在行星挥发分探测领域的专业积累, 主要负责载荷整机及线缆的工程研制, 并为产品交付后由中方实施的集成测试、发射实施、运行管理和数据处理等提供关键技术支持. 中国科学院地质与地球物理研究所则发挥航天工程经验优势, 重点负责氦气探测器与着陆器相关接口和技术协调、航天标准测试、系统集成、在轨运行管理等工作.

根据中法两国签订的合作协议, 中国国家航天局与法国国家空间研究中心将在载荷研制、在轨运控及科学研究等项目全周期展开平等合作, 双方按照分工合作完成了本次嫦娥六号氦气探测任务. 在工程实施阶段, 法国天体物理与行星研究所负责交付符合要求的探测器产品, 并全程参与关键设计评审以及里程碑检查; 中国科学院地质与地球物理研究所在参与氦气探测器的方案设计、定标实验工作的同时, 完成中方对产品质量保证管理, 保障关键设计评审和里程碑检查. 在正样件交付后, 中方确保载荷满足嫦娥六号任务的所有航天标准要求, 完成载荷分系统级和探测器级的总装、集成测试及整器试验和发射场相关工作. 任务运行期间, 中方负责设备在轨运行管理, 包括在轨运控和故障预案实施, 以及数据的接收与预处理. 在科学研究阶段, 双方共同处理探测数据. 经联合确认后共同发布研究成果, 开展深入的科研合作. 这种优势互补的合作模式, 既保证了工程实施的可靠性, 又确保了科学目标的实现.

7.2 在轨探测

氦气探测器设计上为保障在整个任务周期的安全运行和科学探测效率, 设置了三种工作模式.

(1) 待机模式: 仪器保持通电状态, 但不进行科学数据采集或校准操作, 主要用于设备状态维持和快速响应指令.

(2) 生存温控模式: 从发射至着陆月面前, 仪器自

主维持适宜温度范围. 此时科学探测功能处于断电状态, 确保设备安全.

(3) 科学探测模式: 仪器加电处于全功能运行状态, 进行科学数据采集和校准测量, 是获取月球氦气数据的主要工作模式.

2024年5月3日至6月4日期间, 氦气探测器严格遵循在轨飞控协同程序和指令计划, 顺利完成全部预定探测任务. 在为期33天的任务周期中, 仪器相继完成了地月转移段、环月段及月面段3个关键阶段的科学探测工作, 累计开机时长185 h (表3). 氦气探测器在轨运控工作进展顺利. 在轨监测数据表明, 探测器各系统工作状态稳定, 圆满完成了科学探测任务.

氦气探测器成功获取了包括月球轨道及月表原位观测在内的完整氦气探测数据集, 总数据量达1059.54 Mbits. 这是首次获得的月表原位氦气观测数据. 目前, 中法联合科研团队正开展联合数据校正与分析工作.

7.3 预期性能

氦气探测器的检测限性能可以用物理单位 Bq m^{-2} 表示, 或用最小可检测活度(Minimum Detectable Activity, MDA)来描述, 即在一定的背景噪声水平下, 可以探测到95%可信度的最低氦和钚同位素的表面放射性水平.

最小可检测活度可以通过探测器探测效率 η 、探测器的表面积 S 、积分时间 t , 以及作为能量函数的背景噪声水平 b (来自太阳风和银河系宇宙射线)的值进行计算, 具体公式如下:

$$\text{MDA} = \frac{1}{\eta} \left[\frac{k^2}{S \cdot t} + 2k \sqrt{\frac{2b}{S \cdot t}} \right]. \quad (1)$$

根据式(1), 检测器的表面积 S 被设定为 42.4 cm^2 (8个探测器, 每个 5.3 cm^2). 仪器的性能, 应估计仪器的检测效率 η 和背景噪声. 探测效率 η 是通过计算分析和使

用欧洲核子研究中心的GEANT-4代码对更复杂的几何形状进行蒙特卡罗模拟计算的, 例如, 作为相对于水平面的倾斜角的函数, 需结合在轨探测视场情况进行分析. 背景噪声 b 是通过两种不同的方式估计的. 首先, 通过分析Kaguya-Selene阿尔法粒子谱仪(APS)的背景, 发现它与阿波罗16号和勘测者5号、7号APS硅探测器测量的背景水平相对接近. 其次, 考虑到2024年任务期间的太阳风暴活动程度较高, 通过在轨实测和模拟来估计太阳风和银河系宇宙射线的带电粒子(质子、 α 粒子)作用影响. 此外, 注意在式(1)中, 积分时间 t 受到仪器探测时间的限制. 性能的提高(最小可检测活度MDA的降低)与积分时间正相关, 这意味着积分时间越长越重要.

因此, 检测限性能评估仍需要进一步处理任务期间氦气探测器的探测数据, 包括视域指向、背景值扣除和有效探测时间等.

8 总结与展望

作为中法首个月球探测合作项目, 氦气探测器随嫦娥六号发射后, 设备在轨运行期间状态良好, 圆满完成了预定科学探测目标. 该仪器灵敏度较以往任务提升了1个数量级, 且解决了校准源污染问题. 获取的高质量科学数据将与其他飞行任务的轨道观测提供重要验证. 任务期间, 氦气探测器成功实施了人类首次月球背面南极-艾特肯盆地的氦气原位测量, 获得了着陆区视场范围内的氦气通量及其时空变化特征. 通过月球轨道与月面联合观测, 科研人员将首次掌握氦及其衰变产物的完整迁移数据, 为研究月球挥发分的产生机制、空间分布及运移规律创造了难得机遇.

此次合作具有重要的工程示范意义. 作为探月工程四期的首发飞行器, 嫦娥六号不仅完成了具有国际影响力的月背采样主任务, 还通过搭载氦气探测器开

表 3 氦气探测器工作过程

Table 3 The working profile of the DORN

任务阶段	工作模式	探测目的	开机时长 (h)
地月转移段	生存温控模式、科学探测模式	背景测量: 来自太阳风和宇宙射线的质子和 α 粒子	10
近月制动段	生存温控模式、待机模式	—	—
环月飞行段	生存温控模式、科学探测模式	环月探测: 获得全月氦气分布信息	143
着陆下降段	生存温控模式	—	—
月面工作段	待机模式、科学探测模式	月面探测: 获得着陆区原位实测信息	32

创了中法航天合作新模式. 该项目的成功实施, 既展示了中国航天的月球运载能力, 也为后续深空探测国际合作积累了宝贵经验. 在此过程中, 中法双方建立了从技术研发到科学研究的全链条合作机制, 这一创新模式将为我国航天任务国际合作积累技术储备与管理经验, 为我国航天事业的高质量发展注入新动能.

在后续数据分析过程中, 需进一步与其他任务载荷数据开展多载荷协同分析. 例如, 结合伽马射线谱仪的钍(Th)元素分布数据, 建立Rn/Po和Th/U的空间相关性模型; 整合地形相机与雷达测高仪数据, 精确标定氦气释放点位的地形特征; 关联返回月壤成分分析结果^[17], 研究挥发分迁移与月壤特性的关系.

致谢 感谢国家航天局探月与航天工程中心、法国空间研究中心(法国航天局)、中国空间技术研究院、中国科学院月球与深空探测总体部在本氦气探测仪任务实施过程中的指导、帮助与支持. 感谢本刊编辑和两位审稿人对本文的改进提升.

参考文献

- 1 Dukes C, Hurley D. Sampling the Moon's atmosphere. *Science*, 2016, 351: 230–231
- 2 Stern S A. The lunar atmosphere: History, status, current problems, and context. *Rev Geophys*, 1999, 37: 453–491
- 3 Yeh R S, Van Allen J A. Alpha-particle emissivity of the Moon: An observed upper limit. *Science*, 1969, 166: 370–372
- 4 Turkevich A L, Patterson J H, Franzgrote E J, et al. Alpha radioactivity of the lunar surface at the landing sites of surveyors 5, 6, and 7. *Science*, 1970, 167: 1722–1724
- 5 Brudzinski R L. Radon-222 in the lunar atmosphere. *Nat Phys Sci*, 1972, 238: 107–109
- 6 Gorenstein P, Bjorkholm P. Detection of radon emanation from the crater aristarchus by the Apollo 15 alpha particle spectrometer. *Science*, 1973, 179: 792–794
- 7 Bjorkholm P J, Golub L, Gorenstein P. Distribution of ²²²Rn and ²¹⁰Po on the lunar surface as observed by the alpha particle spectrometer. In: *Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference*. Houston, 1973. 2793–2802
- 8 Bjorkholm P, Golub L, Gorenstein P. Detection of a nonuniform distribution of Polonium-210 on the Moon with the Apollo 16 alpha particle spectrometer. *Science*, 1973, 180: 957–959
- 9 Gorenstein P, Golub L, Bjorkholm P. Detection of radon emission at the edges of lunar maria with the Apollo alpha-particle spectrometer. *Science*, 1974, 183: 411–413
- 10 Lawson S L, Feldman W C, Lawrence D J, et al. Recent outgassing from the lunar surface: The lunar prospector Alpha particle spectrometer. *J Geophys Res*, 2005, 110: 2005JE002433
- 11 Nishimura J, Kashiwagi T, Takashima T, et al. Radon alpha-ray detector on-board lunar mission SELENE. *Adv Space Res*, 2006, 37: 34–37
- 12 Kinoshita K, Kojima K, Itoh M, et al. Radon gas emanation on the lunar surface observed by Kaguya/ARD. In: *Proceedings of the 47th Annual Lunar and Planetary Science Conference*. Woodlands, 2016. 3070
- 13 Meslin P-Y. Radon as a Geophysical Tracer on Mars: Study of Its Transport, First Evidence and Development of an Instrument for Its Measurement Le Radon, Traceur Geophysique de l'Environnement Martien: Etude de Son Transport, Premiere Mise En Evidence Et Developpement d'Une Instrumentation Pour Sa Mesure. Dissertation for Doctoral Degree. Paris: Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 2008
- 14 Kraner H W, Schroeder G L, Davidson G, et al. Radioactivity of the lunar surface. *Science*, 1966, 152: 1235–1236
- 15 Grava C, Killen R M, Benna M, et al. Volatiles and refractories in surface-bounded exospheres in the inner solar system. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 61
- 16 Williams J P, Paige D A, Greenhagen B T, et al. The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Icarus*, 2017, 283: 300–325
- 17 Meslin P Y, Sabroux J C, Bassot S, et al. Experimental study of radon production and transport in an analogue for the Martian regolith. *Geochim Cosmochim Acta*, 2011, 75: 2256–2270
- 18 Heymann D, Yaniv A. Distribution of Radon-222 on the surface of the Moon. *Nat Phys Sci*, 1971, 233: 37–39
- 19 Lambert G, Le Rouley J, Bristeau P. Accumulation and circulation of gaseous radon between lunar fines. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1977, 285: 331–336

- 20 Lindstrom R M, Evans Jr. J C, Finkel R C, et al. Radon emanation from the lunar surface. *Earth Planet Sci Lett*, 1971, 11: 254–256
- 21 Grjebine T, Lambert G, Le Rouley J C. Alpha spectrometry of a surface exposed lunar rock. *Earth Planet Sci Lett*, 1972, 14: 322–324
- 22 Economou T E, Turkevich A L. Examination of returned Surveyor III camera visor for alpha radioactivity. In: *Proceedings of the Lunar Science Conference*. Houston, 1971. 2699
- 23 Gorenstein P, Golub L, Bjorkholm P. Radon emanation from the moon, spatial and temporal variability. *Moon*, 1974, 9: 129–140
- 24 Binder A B. Lunar prospector: Overview. *Science*, 1998, 281: 1475–1476
- 25 Crotts A P S, Hummels C. Lunar outgassing, transient phenomena, and the return to the moon. II. Predictions and tests for outgassing/regolith interactions. *Astrophys J*, 2009, 707: 1506–1523
- 26 Lambert G, Grjebine T, Bristeau P, et al. Excess of Polonium 210 at the surface of Apollo 15 fines. In: *Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference*. Houston, 1973. 2183–2188
- 27 Brodzinski R L, Langford J C. Radon concentrations at the Apollo landing sites. In: *Proceedings of the Lunar Science Conference*. Houston, 1975
- 28 Meslin P-Y, Peplowski P, Deprez G. Radon outgassing from the surface of Mercury evidenced by its low Th/U ratio. In: *Proceedings of the Mercury: Current and Future Science of the Innermost Planet*. Columbia, 2018. 6111
- 29 Meslin P, Wong R, d’Uston L, et al. Detection of Polonium-210 on spirit dust magnets and implications for the global martian dust cycle. In: *Proceedings of the Fifth International Workshop on the Mars Atmosphere: Modelling and Observation*. Oxford, 2014
- 30 Crotts A P S. Lunar outgassing, transient phenomena, and the return to the Moon. I. Existing data. *Astrophys J*, 2008, 687: 692–705
- 31 Buratti B J, Johnson L L. Identification of the lunar flash of 1953 with a fresh crater on the Moon’s surface. *Icarus*, 2003, 161: 192–197
- 32 Cameron W S. Comparative analyses of observations of lunar transient phenomena. *Icarus*, 1972, 16: 339–387
- 33 Middlehurst B M. A survey of lunar transient phenomena. *Phys Earth Planet Inter*, 1977, 14: 185–193
- 34 Middlehurst B M. Transient lunar phenomena, deep moonquakes, and high-frequency teleseismic events: Possible connections. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1977, 285: 485–487
- 35 Crotts A P. Lunar outgassing, transient phenomena and the return to the Moon, III: Observational and experimental techniques. arXiv: [0706.3954](https://arxiv.org/abs/0706.3954)
- 36 Crotts A P S. Transient lunar phenomena: Regularity and reality. *Astrophys J*, 2009, 697: 1–15
- 37 Hodges Jr. R R. Release of radiogenic gases from the moon. *Phys Earth Planet Inter*, 1977, 14: 282–288
- 38 Tanner A B. Radon Migration in the Ground: A Supplementary Review. Open-File Report, US Geological Survey. 1978. 78-1050
- 39 Tanner A B. Radon migration in the ground: A review. In: Adams J A S, Lowder W M, eds. *The Natural Radiation Environment*. Chicago: University of Chicago Press, 1964. 161–190
- 40 Meslin P-Y, Hamara D, Boynton W, et al. Analysis of uranium and thorium lines in Mars Odyssey gamma spectra and refined mapping of atmospheric radon. In: *Proceedings of the 43rd Annual Lunar and Planetary Science Conference*. The Woodlands, 2012. 1659
- 41 Meslin P-Y, He H, Kang Z, et al. Radon and Polonium as tracers of lunar outgassing, volatiles, and dust: Going back to the Moon? In: *Proceedings of the 51st Annual Lunar and Planetary Science Conference*. The Woodlands, 2020. 2326
- 42 Meslin P, Sabroux J, Berger L, et al. Evidence of ^{210}Po on martian dust at meridiani planum. *J Geophys Res*, 2006, 111: 2006JE002692
- 43 Friesen L J, Adams J A S. Low pressure radon diffusion: A laboratory study and its implications for lunar venting. *Geochim Cosmochim Acta*, 1976, 40: 375–380
- 44 Yamashita N, Hasebe N, Reedy R C, et al. Uranium on the Moon: Global distribution and U/Th ratio. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: 2010GL043061
- 45 Wong R, Meslin P, Sabroux J, et al. Detection of Polonium-210 on spirit dust magnets and implications for the global martian dust cycle. In: *Proceedings of the AGU Fall Meeting*. San Francisco, 2013. P41C-1935
- 46 Meslin P-Y, Boynton W, Sabroux J-C, et al. New evidence of the presence of radon in the Martian atmosphere and perspective of use as a geophysical tracer. In: *Proceedings of the Third International Workshop on The Mars Atmosphere: Modeling and Observations*. Williamsburg, 2008

Progress in Detection of Outgassing RadoN (DORN) on lunar surface

LI Jiannan¹, WONG Kingwah², HE Huaiyu^{1*} & MESLIN Pierre-Yves^{2*}

¹ *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

² *Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse 44346, France*

*Corresponding authors (HE Huaiyu, email: huaiyuhe@mail.igcas.ac.cn; MESLIN Pierre-yves, email: pierre-yves.meslin@irap.omp.eu)

Radon is the decay products of uranium and thorium. Monitoring the radon cycle on the lunar surface could provide critical insights into gas transport mechanisms and internal geological activity on the Moon. The China-France Detection of Outgassing RadoN (DORN) instrument, equipped with a highly sensitive silicon semiconductor detector, measures α particles emitted by the decay of radon and its daughter nuclides. Designed to exclude interference from other particles in the lunar environment, DORN also incorporates a Polonium-209 calibration source to address contamination issues encountered in prior missions. As part of China's Chang'e-6 far-side lunar mission, DORN—the first active French instrument deployed on the Moon—conducted the first *in-situ* radon measurements on the lunar surface. Combined with orbital observations, it returned 1059.54 Mbits of scientific data. These findings are expected to yield new constraints on the sources, spatiotemporal distribution, and transport mechanisms of radon and other volatiles. This collaboration not only highlights China's aerospace technological capabilities but also establishes a pioneering model for international cooperation in deep-space exploration.

Chang'e 6 mission, Detection of Outgassing RadoN (DORN), radon, alpha spectrum, China-France collaboration

PACS: 07.77.-n, 23.60.+e, 29.30.Ep, 95.55.Pe

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0268](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0268)