ZHANG Shenyi, HOU Donghui, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, SUN Yueqiang, WANG Chunqin, CHANG Zheng, XU Zigong, SHEN Guohong, YUAN Bin, XUE Changbin. Radiation dose of LND on the lunar surface in two years (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(3): 439-444. DOI:10.11728/cjss2021.03.439

LND 两年月表辐射剂量测量结果 *

张珅毅[1,2,3,4] 侯东辉[1,2,3,4] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F[1,5]
孙越强[1,2,3] 王春琴[1,2,3] 常 峥[1,2,3] 徐子贡[5]
沈国红[1,2,3] 袁 斌[1,2,3] 薛长斌[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)
2(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)
3(中国科学院空间态势感知重点实验室 北京 100190)
4(中国科学院大学 北京 100049)
5(德国基尔大学实验应用物理研究所 基尔 24118)

摘 要 月球表面的辐射剂量是影响航天员安全和月表驻留时间的重要参数, 通过对月表的粒子辐射测量可以为航天员的辐射安全防护提供重要依据. 利用嫦娥四号着陆器上搭载的月表中子与辐射剂量探测仪二年的观测数据得到: 月表粒子辐射在硅中的平均总吸收剂量率为 12.66±0.45 μGy·h^{-1}, 中性粒子吸收剂量率为 2.67±0.16 μGy·h^{-1}. 辐射剂量率随时间出现缓慢的下降, LET 谱的变化则很小. 同时观测到了 2020 年 12 月太阳活动末期由于银河宇宙线福布斯下降导致的辐射剂量率降低.

关键词 嫦娥四号, 月表, 辐射剂量, 航天员
中图分类号 V 478

Radiation Dose of LND on the Lunar Surface in Two Years

ZHANG Shenyi[1,2,3,4] HOU Donghui[1,2,3,4] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F[1,5]
SUN Yueqiang[1,2,3] WANG Chunqin[1,2,3] CHANG Zheng[1,2,3] XU Zigong[5]
SHEN Guohong[1,2,3] YUAN Bin[1,2,3] XUE Changbin[1]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)
2(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing* 100190)
3(*Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Beijing* 100190)
4(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)
5(*Institute of Experimental and Applied Physics, Christian-Albrechts-University, Kiel* 24118)

* 国家自然科学基金项目资助 (41941001, D020104)
2021-04-16 收到原稿, 2021-05-03 收到修定稿
E-mail: zsy@nssc.ac.cn

Abstract The radiation dose on the lunar surface is an important parameter affecting the safety of astronauts and the residence time of the lunar surface. The measurement of the particle radiation on the lunar surface can provide an important basis for the radiation safety protection of astronauts. Based on the two-year observation data of lunar neutron and radiation dose detector on Chang'E-4 lander, the average total absorbed dose rate of lunar particle radiation in silicon is $12.66\pm0.45\,\mu\mathrm{Gy\cdot h^{-1}}$, and the absorbed dose rate of neutral particle is $2.67\pm0.16\,\mu\mathrm{Gy\cdot h^{-1}}$. The radiation dose rate decreases slowly with time, but the change of LET spectrum is very small. The decrease of radiation dose rate due to the decrease of fubusch of GCR at the end of solar activity in December 2020 was observed.

Key words Chang'E-4, Lunar surface, Radiation dose, Astronaut

0 引言

随着中国嫦娥四号/五号任务的圆满成功, 月球科研站及月球基地等月球探测步伐也正在逐步开展, 最终实现人类月球深空的长期驻留. 空间辐射暴露是影响航天员健康的主要风险之一 [1−3], 因为长期暴露在银河宇宙射线中可能引起航天员一系列缓发的健康问题, 例如白内障、癌症以及中枢神经系统或其他器官系统 [4,5] 的退化性疾病.

月球表面的粒子辐射来源主要有三种: 一是长期存在银河宇宙线 (GCR)[6], GCR 受到行星际磁场的调制发生缓慢的变化; 二是偶发的太阳高能粒子事件, 太阳发生耀斑及日冕物质抛射时会发出大量的高能粒子, 在较短的时间内对月球表面产生强烈的辐射 [7]; 三是 SEPs 和 GCR 通过与月壤的作用产生的二次粒子, 主要是中子和 γ 射线 [8].

嫦娥四号着陆器 [9] 在 2019 年 1 月 3 日 02:26 UT 登陆月球背面的冯卡门陨石坑. 在此之前, 尚未对月球表面的辐射剂量率进行过主动测量 (即时间分辨). 在阿波罗任务期间, 航天员到达月球时虽然随身携带了剂量仪, 但是在月球表面的时间段内的辐射数据从未进行过报告 [10].

为了评估辐射暴露, 必须利用探测器系统测量相关量. 吸收剂量 D 是沉积在探测器中的能量 E (单位: keV) 与探测器质量 (m) 的比值, 常用的单位为格瑞 ($\mathrm{Gy=J\cdot kg^{-1}}$). 将吸收剂量除以累积的时间可以得到剂量率 (单位: $\mathrm{Gy\cdot h^{-1}}$). 利用两个探测器符合的逻辑工作方式以及其中一个探测器中的沉积能量分布, 可以获得线性能量转移谱 LET (单位: $\mathrm{keV\cdot\mu m^{-1}}$). 由于人体不是由硅构成的, 为了便于比较不同测量的剂量、剂量率以及 LET 谱, 通常使用 1.30[11] 的恒定剂量转换系数, 将硅中的测量值转换为在水中相应的物理量.

嫦娥四号任务在 2019 年 1 月登陆月球背面后, 目前已持续在轨工作超过 25 个月昼, 月表中子与辐射剂量探测仪 (Lunar Lander Neutrons and Dosimetry, LND)[12,13] 对月表的粒子辐射环境和辐射剂量进行测量, 包括质子、电子、重离子能谱, 带电粒子和中性粒子的辐射剂量以及 LET 谱 [14].

LND 安装在嫦娥四号着陆器的有效载荷舱内, 由 10 片双灵敏区硅固体探测器 (SSD) 组成, 这 10 片硅探测器命名为 A-J. 总吸收剂量和剂量率通过探测器 B 测量, 中性粒子的吸收剂量和剂量率通过探测器 C 的内灵敏区 C1 测量, 紧密靠近的探测器 B 和 D 以及探测器 C 的外灵敏区 C2 作为反符合用于区别带电粒子, LET 谱由 $\mathrm{d}E/\mathrm{d}x$ 确定.

1 数据结果

图 1 给出了 LND 探头在嫦娥四号着陆器的位置, 图 1 中的红色箭头指向为 LND 的探测指向, 为了保护 LND, 舱门在寒冷的月夜关闭, 在月昼时打开. 图 2 显示了 LND 在 2019 年 5 月至 2021 年 1 月两年时间共 21 个月昼期间 (着陆器未休眠期间) 获得的辐射剂量测量结果. 图 2(a) 为辐射总剂量率, 包括带电粒子和中性粒子 (中子、γ 射线) 的贡献; 图 2(b) 为中性粒子的辐射剂量率; 图 2(c) 为带电粒子的辐射剂量率; 图 2(d) 为穿透高能带电粒子的通量 (质子 $>34.8\,\mathrm{MeV}$, He $>40\,\mathrm{MeV}$), 也代表了银河宇宙线的通量; 图 2(e) 为地面测量到的奥卢中子结果, 其也

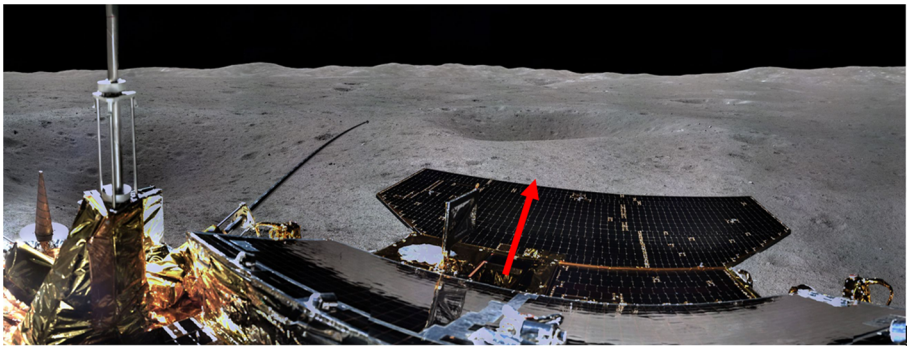


图 1　LND 探头在嫦娥四号着陆器的位置, 红色箭头为视场方向

Fig. 1　LND sensor head (whose field of view is indicated by red arrow) is installed in the Chang'E-4 lander payload compartment

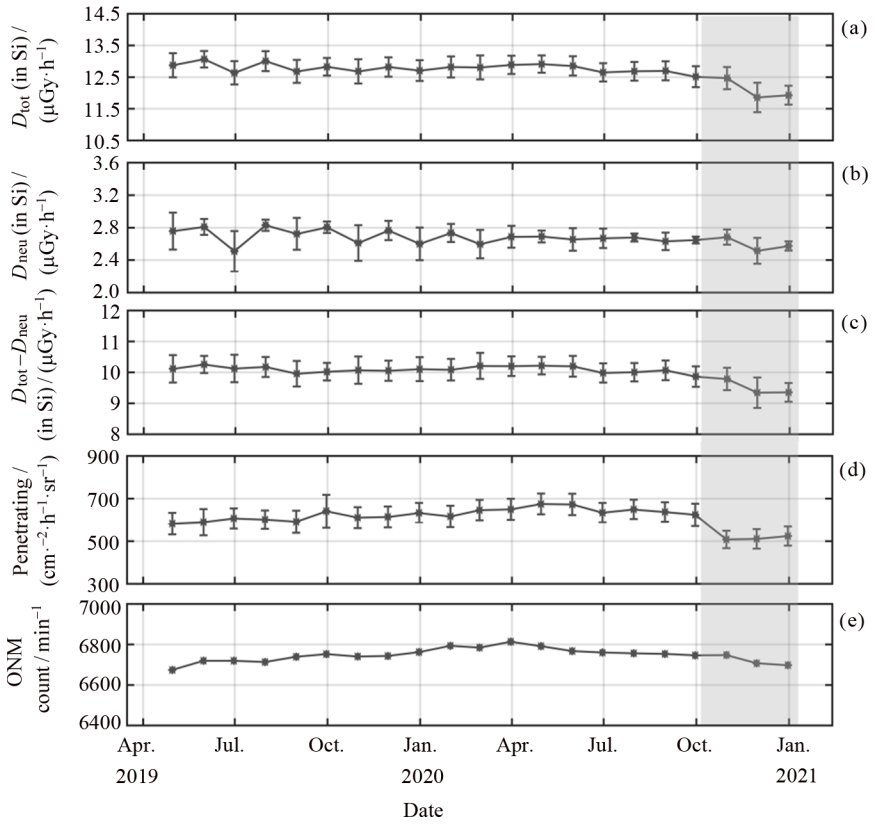


图 2　LND 在嫦娥四号测量到的辐射环境随时间演化结果

Fig. 2　Temporal evolution of the radiation environment on the Moon as measured by LND on Chang'E-4

代表了宇宙线的变化情况. 通过图 2 可以看到 21 个月昼内月球表面的平均辐射剂量率为 12.66±0.45 μGy·h^{-1} (Si), 等效到人体中的辐射剂量率为 16.46 μGy·h^{-1} (H_2O), 其中, 中性粒子的辐射剂量率为 2.67±0.16 μGy·h^{-1} (Si), 约占总辐射剂量的 21%. 从图 2 可以看到辐射总剂量率和中性粒子辐射剂量率的变化与穿透粒子的通量有明显的正相关, 与空间物理学认知相符.

从 2020 年 10 月的第 21 个月昼开始辐射剂量率出现了缓慢的下降 (见图 2 阴影部分), 这是由于行星际磁场的变化造成了银河宇宙线的通量降低导致的, 最直接的证据是 LND 测量到的同时间段的穿透粒子数量和奥卢中子数量也出现了降低.

图 3 显示了 LND 在第 7, 9, 13, 16, 20 月昼期间

获得的 LET 谱结果. 可以看到在近两年的时间内月表粒子辐射 LET 谱的变化很小, 这是因为银河宇宙线的变化很小, 更大的变化需要更长期的观测.

LND 在轨期间遇到了两次太阳粒子爆发事件, 分别为 2019 年 5 月 6 日 [15] 和 2020 年 12 月 1 日, 2019 年 5 月的太阳质子事件中 LND 的 9~21 MeV 高能质子通量出现了少量增长, 但 LND 的辐射剂量率并没有出现明显的变化. 这是因为太阳质子事件爆发等级不高, 能够加速质子的通量和能量也较低, 被仪器挡光层和第一片探测器 A 阻挡或者降低了能量, 导致了其在 B 探测器的剂量测量中所占比例较小. 2020 年 12 月 1 日的太阳活动中, 磁场出现了明显的变化, keV 量级的粒子增长大约持续了 10 天, 而 MeV 量级的高能粒子并没有出现明显变化, LND 在 2020 年 12 月 9 日开机, 处于太阳活动的末期, 从图 4 可以看到此时测量到的辐射剂量出现了一个明显的下降, 这是因为太阳活动造成了行星际磁场的扰动, 该扰动引起了银河宇宙线的福布斯下降导致辐射剂量降低, 该福布斯下降使辐射剂量比正常水平少下降了约 10% 左右.

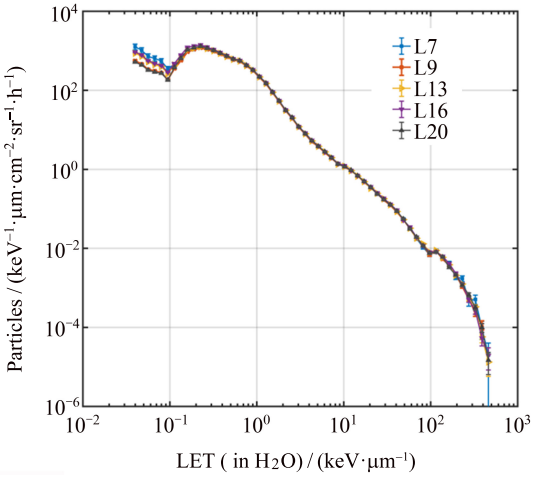


图 3 在不同月昼得到的 LND 的 LET 谱 (已转化为水)

Fig. 3 Linear Energy Transfer (LET) spectra (converted to LET in water) measured during four different time periods

2 分析讨论

将 LND 的测量结果与月船一号 (Chandrayaan-1) 上的粒子载荷 RADOM[16] 和月球轨道器 (LRO) 上的载荷 CRaTER[17] 的测量结果进行比较, 结果列于表 1.

由于 Chandrayaan-1, LRO 和嫦娥四号进行的测量是在太阳平静期进行的, 可以假设剂量率的差异主要是由轨道高度的差异造成的, 即月球提供的屏蔽不同. 然而这种简单的解释并不合理, 通过将文中的结果与没有被月球遮挡的部分 (立体角) 进行比较可以看出, 屏蔽与吸收剂量并不存在相应的比例关系.

RADOM 在 2008 年离月球很远的地方测得的剂量率与 2019 年在月球表面测得的剂量率不可比. 原因主要有两点: 第一, 其处在不同的太阳周期. 例如, 从 2015 年开始, 美国好奇号上的辐射评估探测器 RAD 在火星观测到银河宇宙射线的剂量率增加了 50%. 第二, LND 测量的能量范围与 RADOM 和

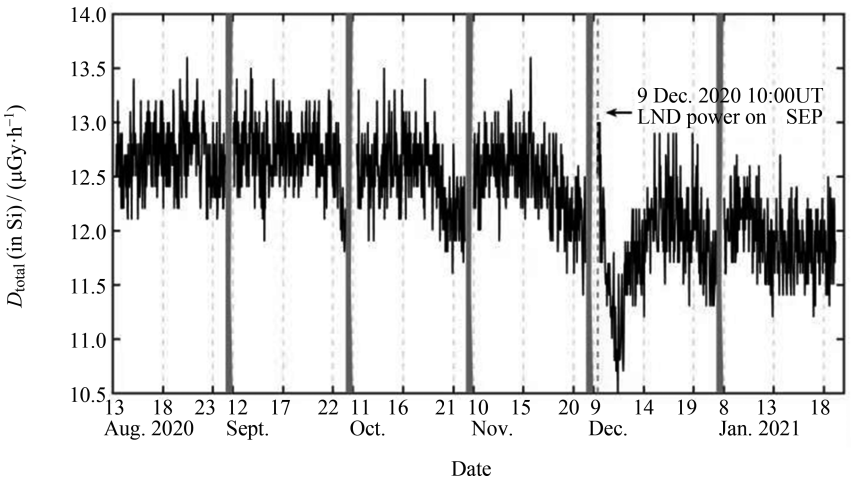


图 4 太阳质子爆发期间辐射剂量的变化情况

Fig. 4 Dose rate measured in period of SEP

CRaTER 不同, LND 也能够测量更低能量的粒子, 这些低能粒子比能量更高、穿透力更强的粒子更多, 对剂量率的贡献也更大.

LND 与 CRaTER 测量能量范围不同对剂量结果的影响可以通过具体实例看到, 通过对比同一时间段、同一位置 (2019 年 2 月 2 日 01:30 UT) LND 和 CRaTER 测量值可以看出 LND 和 CRaTER 覆盖不同能量测量范围对剂量的影响 (见图 5). 此时, 两台仪器都处于相同的日球层条件, 但在各自测量上下能量截止阈值上存在差异.

图 5 给出了 LND 和 CRaTER 在 2019 年初 LND 活动时间段的测量, 垂直线表示 LRO 和嫦娥四号在月球经纬度大致相同的时间段, 并在图中给出了测量剂量率值. 结果表明, D1 和 D2 的剂量率为 13.2 μGy·h^{-1}, LND 剂量率为 13.29 μGy·h^{-1}, LND 测量的剂量率与 CRaTER 的结果十分类似. 需要注意的是, 月球的屏蔽效应已经在公布的 CRaTER 剂量率数据中得到修正, 但是如果没有详细考虑两种仪器的响应范围及其屏蔽差异, 仍然不能比较 CRaTER 和 LND 的剂量率. 虽然 LND 的 B 探测器由于其位于 LND 和嫦娥四号着陆器内受到不同程度的屏蔽, 但 CRaTER 的 D1 和 D2 探测器也

表 1 不同时间段内不同轨道测量到的月球辐射剂量率

Table 1 Dose rate measured in different orbits of the Moon at different time

卫星	测量时间段	轨道高度/km	辐射剂量/(μGy·h^{-1})	未被月球遮挡/(%)	参考文献
Chandrayaan-1	3 to 8 Nov. 2008	20 000~30 000	12.76	100	[18]
Chandrayaan-1	20 May to 28 Aug. 2009	200	10.7	72	[18]
Chandrayaan-1	20 Nov. 2008 to 18 May 2009	100	9.76	66	[18]
LRO	17 Sept. 2009 to 31 May 2010	50	9.17~11.25	62	[19]
Chang'E-4	1 May 2019 to 19 Jan. 2020	0	12.66	50	–

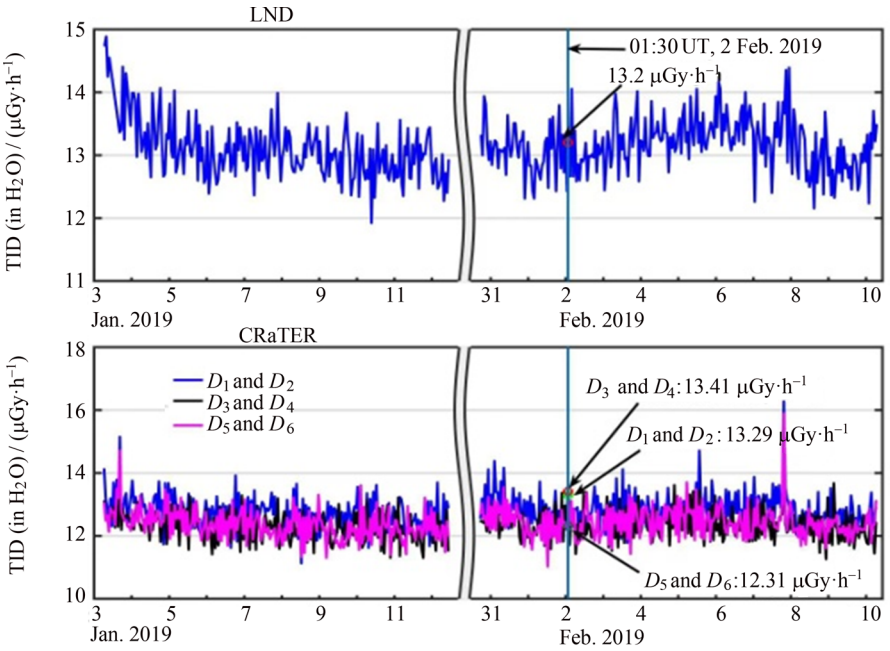


图 5 LND 和 CRaTER 的剂量率测量. CRaTER 测量到的剂量率已对月球提供的几何屏蔽进行了修正. 垂直线标记 LRO 位于嫦娥四号正上方的时间点, 指示剂量率值是此时的测量值

Fig. 5 Dose rate measurements by LND and CRaTER. Dose rates measured by CRaTER are corrected for the geometrical shielding provided by the Moon. The vertical line marks the time point when LRO was located right above Chang'E-4, and the dose rate values indicated in the panels are the values measured at this time

被来自仪器和 LRO 卫星的不同材料厚度屏蔽. CRaTER 探测器 D1 (148 μm) 探测器由 0.82 mm 厚的铝入口窗口屏蔽, 其 1 mm 厚的 D2 探测器被 0.82 mm Al 和 148 μm 的硅屏蔽. LND 的 B 探测器在最小屏蔽方向上被 25 μm 的 Al 及 50 μm 的 kapton 和 0.5 mm 的硅屏蔽.

本文的测量结果涵盖了 LND 在月表两年的辐射剂量结果, 这些结果与未来人类月球任务的安排和规划直接相关.

参考文献

[1] NASA. Space Radiation Cancer Risk Projections and Uncertainties-2012 [R]. Houston: NASA, 2013

[2] STRAUBE U, BERGER T, REITZ G, *et al.* Operational radiation protection for astronauts and cosmonauts and correlated activities of ESA Medical Operations [J]. *Acta Astronaut.*, 2010, **66**: 963-973

[3] CUCINOTTA F A, MANUEL F K, JONES J, *et al.* Space radiation and cataracts in astronauts [J]. *Radiat. Res.*, 2001, **156**: 460-466

[4] CHANG P Y, CUCINOTTA F A, BJORNSTAD K A, *et al.* Harderian gland tumorigenesis: low-dose and LET response [J]. *Radiat. Res.*, 2016, **185**: 449-460

[5] CUCINOTTA F A. Review of NASA approach to space radiation risk assessments for Marsexploration [J]. *Health Phys.*, 2015, **108**: 131-142

[6] SIMPSON J A. Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays [J]. *Ann. Rev.Nucl. Part. Sci.*, 1983, **33**: 323-382

[7] REAMES D V. Particle acceleration at the sun and in the heliosphere [J]. *Space Sci. Rev.*, 1999, **90**: 413-491

[8] BOYNTON, DROEGE G F, MITROFANOV I G. High spatial resolution studies of epithermal neutron emission from the lunar poles: constraints on hydrogen mobility [J]. *J. Geophys. Res. Planet.*, 2015, **117**(12): 1991-2012

[9] JIA Yingzhuo, ZOU Yongliao, XUE Changbin, *et al.* Scientific objectives and payloads of Chang'E-4 missionormalsize [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(1): 118-130 (贾瑛卓, 邹永廖, 薛长斌, 等. 嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置 [J]. 空间科学学报, 2018, **38**(1): 118-130)

[10] ENGLISH R A, BENSOTZ R E, VERNON BUILEY J, *et al.* Apollo Experience Report-Protection against radiation, NASA Technical Note NASA TN D-7080 [OL]. [1973-03-01]. https://ntrs.nassa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19730010172.pdf

[11] ZEITLIN C, NARICI L, RIOS R R, *et al.* Comparisons of high-linear energy transfer spectra on the ISS and in deep space [J]. *Space Weather*, 2019, **17**: 396-418

[12] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, YU J, BÖTTCHER S I, *et al.* The Lunar Lander Neutron and Dosimetry (LND) experiment on Chang'E-4 [J]. *Space Sci. Rev.*, 2020, **216**: 104

[13] HOU D, ZHANG S, YU J, *et al.* Removing the dose background from radio active sources from active dose rate measurements in the Lunar Lander Neutron & Dosimetry (LND) experiment on Chang'E-4 [J]. *J. Instrum.*, 2020, **15**(1): P01023-P01032

[14] ZHANG S, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, YU J, *et al.* First measurements of the radiation dose on the lunar surface [J]. *Sci. Adv.*, 2020, **6**. DOI: 10.1126/sciadv.aaz1334

[15] XU Zigong, GUO Jingnan, ROBERT F, *et al.* First solar energetic particles measured on the lunar far-side [J]. *Astrophys. J. Lett.*, 2020, **902**: 30

[16] BHANDARI N. Chandrayaan-1: science goals [J]. *J. Earth Syst. Sci.*, 2005, **114**: 701-709

[17] CHIN G, BRYLOW S, FOOTE M, *et al.* Lunar reconnaissance orbiter overview: the instrument suite and mission [J]. *Space Sci. Rev.*, 2007, **129**: 391-419

[18] DACHEV T P, TOMOV B T, YU N, *et al.* An overview of RADOM results for earth and moon radiation environment on Chandrayaan-1 satellite [J]. *Adv. Space Res.*, 2011, **48**(5): 779-791

[19] SPENCE H E. Crater science team: an overview of results from the Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) Cosmic Ray Telescope for the effects of Radiation (CRaTER) [C]//Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group. Washington: LPI, 2010