

4~400 MeV 宇宙线质子对近月空间轨道 γ 能谱中湮灭辐射的贡献

赵剑锟^{1,2} 姜爽² 李泳琿² 曾奇² 吴和喜² 刘玉娟² 刘义保²

1(东华理工大学 江西省核地学数据科学与系统工程技术研究中心 南昌 330013)

2(东华理工大学 核科学与工程学院 南昌 330013)

摘要 为进一步明确月球表面湮灭辐射的主要来源和影响机理,构建了轨道 γ 能谱仪中湮灭辐射特征峰定量分析模型,采用GEANT4模拟不同能量质子轰击月岩诱发 γ 射线微分能谱,并以“嫦娥一号”高能粒子探测器(Chang'e-1 High-energy Particle Detector, CE1-HPD)数据作为输入项,计算了宇宙射线中4~400 MeV质子在月表5种典型岩石中诱发湮灭辐射的特征峰信息。在对“嫦娥一号” γ 能谱仪(Chang'e-1 Gamma-ray Spectrometer, CE1-GRS)获取的0.511 MeV特征峰进行本底扣除和天然放射性核素影响剥离后,与4~400 MeV质子诱发湮灭辐射结果进行比较。研究表明:级联簇射产生湮灭辐射的概率与入射质子能量呈正相关,在4~400 MeV能量范围内,典型月岩的成分差异对诱发湮灭辐射的影响不明显。虽然该能量段质子的注量率较高,但由于其能量较低,无法有效地通过级联簇射形成正电子,最终导致湮灭辐射贡献率较低,仅为 $(1.97\pm 0.66)\times 10^{-4}$ 。

关键词 湮灭辐射, GEANT4, 高能粒子, 贡献率

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050201

Contribution of 4~400 MeV protons galactic cosmic rays to annihilation radiation in orbital gamma spectrum near lunar space

ZHAO Jiankun^{1,2} JIANG Shuang² LI Yonghui² ZENG Qi² WU Hexi² LIU Yujuan² LIU Yibao²

1(Jiangxi Engineering Technology Research Center of Nuclear Geoscience Data Science and System,

East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

2(School of Nuclear Science and Engineering, East China university of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract [Background] The annihilation radiation exhibits conspicuous features in the low-energy segment of the orbital gamma spectrum, which contains a substantial amount of geological information about the lunar surface. The fluence rate can reflect the element composition, density, maturity, and other characteristics directly. [Purpose] In order to further clarify the primary source and influencing mechanism of annihilation radiation on the lunar surface. [Methods] A quantitative model for the annihilation radiation characteristic peak of orbital gamma spectrometers was

国家自然科学基金(No.12105043, No.41804114)、江西省核地学数据科学与系统工程技术研究中心开放基金(No.JETRCNGDSS202105)、江西省自然科学基金(No.20212BAB201005)资助

第一作者: 赵剑锟, 男, 1988年出生, 2017年于成都理工大学获博士学位, 研究领域为核信息获取与数据处理

通信作者: 刘义保, E-mail: ybliu@ecut.edu.cn

收稿日期: 2022-07-20, 修回日期: 2022-11-18

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12105043, No.41804114), Open Fund of Jiangxi Nuclear Geoscience Data Science and System Engineering Technology Research Center (No. JETRCNGDSS202105), Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20212BAB201005)

First author: ZHAO Jiankun, male, born in 1988, graduated from Chengdu University of Technology with a doctoral degree in 2017, focusing on nuclear information acquisition and data processing

Corresponding author: LIU Yibao, E-mail: ybliu@ecut.edu.cn

Received date: 2022-07-20, revised date: 2022-11-18

established. The gamma rays induced by protons of varying energies were simulated using GEANT4 to further understand the primary source and mechanism of annihilation radiation on the lunar surface. The data from the "Chang'e-1" high-energy particle detector (CE1-HPD) was used as the input term, and the annihilation radiation characteristic information induced by 4~400 MeV protons galactic cosmic rays interacting with five typical rocks was calculated. After subtracting the 0.511 MeV characteristic peak collected by the "Chang'e-1" gamma spectrometer (CE1-GRS) from natural radioactivity, the results were compared with the annihilation radiation fluence rate induced by 4~400 MeV protons galactic cosmic rays. **[Results]** The results indicate that the rock's composition have a negligible effect on the annihilation radiation. The probability of cascading shower generating annihilation radiation is directly proportional to the incident proton energy. Additionally, the contribution of 4~400 MeV protons to the annihilation radiation present in the orbital gamma spectrum is relatively low, only $(1.97 \pm 0.66) \times 10^{-4}$. **[Conclusions]** The established model has proven to be accurate in reflecting the related characteristics of the gamma radiation field on the lunar surface and can be used for quantitative analysis of annihilation radiation. The results indicate that the contribution of 4~400 MeV protons galactic cosmic rays to the annihilation radiation present in the orbital gamma spectrum is minimal.

Key words Annihilation radiation, GEANT4, Energetic particle, Contribution rate

轨道 γ 能谱探测是获取空间天体表面核素分布的重要手段之一^[1-3],自20世纪60年代,国内外学者通过对轨道 γ 能谱数据解译,相继在“月表元素分布、岩石形成和核素迁移理论”等领域取得丰硕成果^[4-6]。2008年后,随着我国连续两次轨道 γ 能谱数据成功返回,国内轨道 γ 能谱解析研究进入新阶段,相关学者在“高精度的核素分布反演、典型地质构造演化、多次探月数据解析结果比对”等领域开展了广泛研究^[7-10]。

正电子湮灭 γ 辐射(简称“湮灭辐射”)在轨道 γ 能谱低能段(<0.6 MeV)上具有非常明显的特征^[2,11-13],并承载大量的天体表面地质信息,其通量变化可直接反映月表介质的元素组成、密度以及成熟度等特征^[14-15]。湮灭辐射主要来自宇宙射线中质子在月表的级联簇射过程,包括“强子级联直接产生的正电子湮灭”、“电磁级联产生的正电子湮灭”和“中子辐射俘获和非弹性散射产生的正电子湮灭”。进而形成对轨道 γ 能谱中0.511 MeV能量窗的贡献^[16]。由此可见,准确获取近月空间质子注量率信息有利于实现湮灭辐射的定量分析。目前,近月空间质子注量率计算方法主要参考CREME86模型和Castagnoli模型,但是由于以上模型基准点为地球南极的McMurdo观测站^[17-18],通过地表观测数据对近月空间质子注量率进行反演,其结果精度受大气层、地磁场变化、太阳活动周期影响较大。

“嫦娥一号”太阳高能粒子探测器(Chang'e-1 High energy Particle Detector, CE1-HPD)作为对月探测重要载荷,在轨飞行过程中同步获取近月空间质子的能量和时空分布特征^[19]。因此,CE1-HPD的近月轨道质子测量数据与轨道能谱湮灭辐射的激发源

保持更好的同源性^[20-21],测量结果与上述经验模型相比具有更高的精度。

本文通过确定论结合蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)方法,对宇宙射线中4~400 MeV质子轰击月表岩石诱发的微分 γ 能谱进行研究,获取了质子诱发湮灭辐射的反应率,并以CE1-HPD数据作为输入项,计算了4~400 MeV质子对近月空间轨道 γ 能谱中湮灭辐射的贡献率,进一步阐述了轨道 γ 能谱中湮灭辐射的来源。

1 原理与方法

1.1 月表湮灭辐射形成机理

月表湮灭辐射原理如图1所示,银河宇宙射线(Galactic Cosmic Rays, GCR)主要由质子和氦核构成,能量范围为0.1~10 GeV,粒子注量率与其能量呈负相关,受太阳活动周期影响较大^[6]。高能带电粒子可直接轰击月球表面介质并在浅层发生核反应,进而形成以 π 介子为核心的强子级联簇射和以 γ 射线为核心的电磁级联簇射^[15],该过程中还伴随中子物理过程,期间不同能量 γ 射线的电子对效应和 π^0 介子衰变均可产生 e^+ ,湮灭后产生能量为0.511 MeV的湮灭 γ 辐射。

1.2 湮灭辐射定量模型

湮灭辐射在轨道 γ 能谱仪中的沉积规律由式(1):

$$N_{0.511} = \sigma_A \cdot \eta_\Omega \cdot \eta_{re-0.511} \cdot \sum_{i=1}^n N_{E_i}^P \cdot \sum_{j=1}^m (\sigma_{E_{ij}}^{\text{ISC}-e^+} + \sigma_{E_{ij}}^{\text{ISC}-e^-} + \sigma_{E_{ij}}^{e^+}) \quad (1)$$

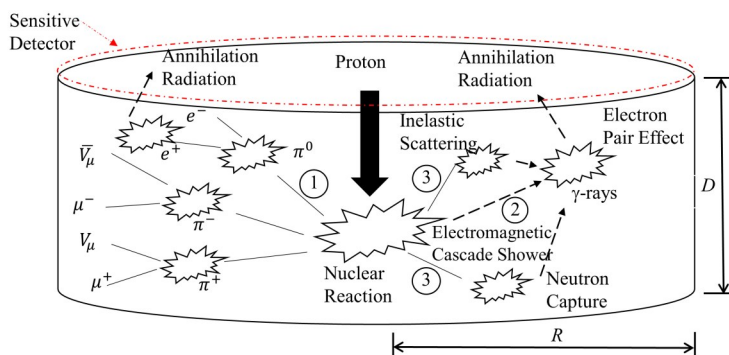


图1 月表湮灭辐射形成机理

Fig.1 Formation mechanism of lunar annihilation radiation

式中： $N_{0.511}$ 为轨道 γ 能谱仪中湮灭辐射特征峰计数率， s^{-1} ； $N_{E_i}^p$ 为能量为 E_i 质子的计数率， s^{-1} ； $\sigma_{E_i,j}^{HSC-e^+}$ 为能量为 E_i 的质子与月表第 j 种元素发生强子级联簇射产生正电子(图1中,过程①)的概率； $\sigma_{E_i,j}^{ESC-e^+}$ 为能量为 E_i 的质子与月表第 j 种元素发生电磁级联簇射产生正电子(图1中,过程②)的概率； $\sigma_{E_i,j}^{n-e^+}$ 为能量为 E_i 的质子与月表第 j 种元素发生中子辐射俘获和非弹性散射产生正电子(图1中,过程③)的概率， σ_A 为上述3个过程产生正电子湮灭发射 0.511 MeV γ 射线的概率； η_{Ω} 为轨道能谱仪的对月探测立体角效率； $\eta_{re-0.511}$ 为 CsI(Tl) 探测器对 0.511 MeV 的全能峰的探测效率。

湮灭辐射的产生、输运和沉积过程具有明显的随机性特征，受月表介质的化学成分、密度等参数影响。此外，产生正电子的级联簇射过程十分复杂，很难实现精确解析。因此，本文通过蒙特卡罗方法控制级联簇射中各反应通道贡献来实现湮灭辐射的定

量分析，采用确定论方法获得轨道 γ 能谱仪对月探测立体角效率。

2 参数获取

2.1 各反应通道中正电子产生及湮灭概率

为了获取 $\sigma_{E_i,j}^{HSC-e^+}$ 、 $\sigma_{E_i,j}^{ESC-e^+}$ 、 $\sigma_{E_i,j}^{n-e^+}$ 和 σ_A ，使用 GEANT4 (10.06_p01) 构建质子在月表岩石中级联簇射过程的 MC 模型，主要采用 QGSP_BIC_HP 模型对质子轰击月球典型岩石的物理过程进行模拟。模型中忽略月表地形起伏，以半径 $R=200$ cm、厚度为 $D=200$ cm 的圆柱代替月表岩层，岩石成分如表1所示；发射粒子为质子，能量范围如表2所示。源粒子以平行束入射岩层，为使收集到的湮灭 γ 辐射具有较好的各向均匀性特征^[22]，将模型上表面设置为灵敏探测器(图1中虚线所示)，记录诱发 γ 原始谱特征，进而计算 $\sigma_A \cdot \sum_{j=1}^m (\sigma_{E_i,j}^{HSC-e^+} + \sigma_{E_i,j}^{ESC-e^+} + \sigma_{E_i,j}^{n-e^+})$ 。

表1 月球表面岩石成分含量(wt,%)^[14]
Table 1 Components of some representative Lunabase (wt,%)^[14]

岩性 Lithology	高铝玄武岩 High alumina basalt	克里普岩 KREEP	斜长岩 Anorthosite	低钛玄武岩 Low titanium basalt	高钛玄武岩 High titanium basalt
O	41.62	44.04	46.13	40.70	38.32
Na	0.50	0.67	0.22	0.17	0.30
Mg	4.05	2.17	0.15	8.90	4.04
Al	6.73	6.74	18.63	4.15	5.54
Si	21.92	26.58	20.84	20.26	18.70
K	0.06	1.73	0.00	0.04	0.05
Ca	8.27	5.84	13.75	5.87	7.98
Ti	2.81	1.62	0.01	2.24	9.14
Cr	0.05	<0.01	<0.01	0.65	0.17
Mn	0.20	<0.01	0.01	0.22	0.23
Fe	13.79	10.61	0.24	16.80	15.51

表2 CE1-HPD 技术指标^[20]
Table 2 CE1-HPD technical indicators^[20]

质子能道 Proton channel	能量区间 Detection energy level / MeV	几何因子 Geometric factor / $\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$
P1	4~8	0.85
P2	8~14	
P3	14~26	
P4	26~60	0.45
P5	60~150	
P6	150~400	

2.2 探测立体角效率

“嫦娥一号”轨道高度约为200 km(2H),月球半径为1738 km(17H),“嫦娥一号”所携带的CsI(Tl)主探测器晶体规格为 $\varnothing 11.8\text{ cm}\times 7.8\text{ cm}$,相对位置如图2所示。由图2参数可知,“嫦娥一号”对月探测立体角效率可按照“面源对点探测器贡献”问题求解^[23-24]。其中, $L=2H$ 为点探测器到面源中心的距离, $\theta=63.45^\circ$ 为探测器对面源所张锥角的一半,探测立体角效率计算由式(2):

$$\eta_{\Omega} = \int_0^{63.45} \int_0^{2\pi} \frac{\sin\theta}{4\pi} d\theta d\varphi \quad (2)$$

式中: φ 为 γ 射线入射点在面源极坐标中的圆心角。经计算,立体角效率 $\eta_{\Omega}=0.273$ 。

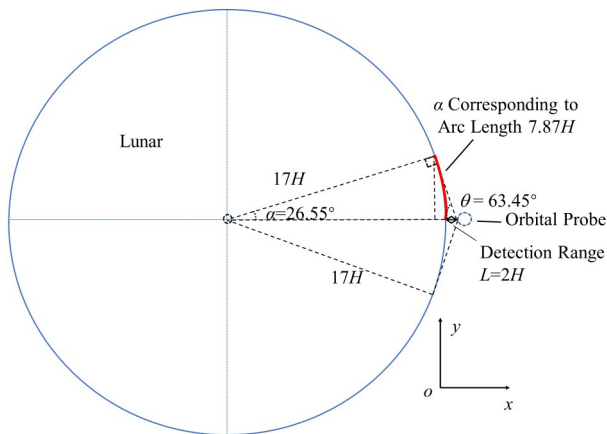


图2 等效计算模型
Fig.2 Equivalent calculation model

2.3 探测器对0.511 MeV全能峰的探测效率

使用GEANT4对0.511 MeV的特征 γ 射线在探测器中的能量响应进行模拟,根据文献[10]构建空间模型,模拟 γ 射线在CE1-GRS主探测器上信号的能谱与强度,其作用是对模拟的谱线进行修正与标定,得到其在探测器上的响应谱。经模拟计算, $\eta_{re-0.511}=0.88$ 。

2.4 CE1-HPD数据处理

本文所使用HPD_2C级数据是经排序、去重、两站优化拼接、系统校正、计数率转换、几何因子校正和入射角校正后的数据,在此基础上,对数据进行二次加工:

1) 数据筛选与剔除

“嫦娥一号”绕月飞行期间正处于太阳活动低年,空间环境相对稳定,但月球附近的高能粒子的注量率变化可能受到月球磁异常区域和月表反射的影响,须剔除无效及异常的能谱数据。

2) 数据网格化

在对全月数据进行经纬度转换后,整个月面按照 $1^\circ\times 1^\circ$ (30 km \times 30 km)的空间分辨率进行数据网格化,采用墨卡托投影法绘制6个能量道的全月质子注量率分布图(图3,图中负值代表西经或南纬,正值代表东经或北纬)。由图3可见,质子能量与注量率呈负相关,能量为4~400 MeV的质子注量率差异可达一个数量级。此外,同一能量区间的质子,其空间分布呈现一致性,全月范围内的注量率差异在 ± 0.3 粒子数/($\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{sr}$)。

3 结果分析与讨论

构建了表1中玄武岩(高铝玄武岩、高钛玄武岩、低钛玄武岩)、克里普岩、斜长岩的仿真模型(密度设置为 $1.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),通过控制输入质子能量(4~400 MeV),分别获取上述5种岩石产生的诱发 γ 射线原始谱,如图4所示。同时,计算了不同能量的质子在岩石中产生湮灭辐射的概率,结果如图5所示。

由图5可知,级联簇射产生湮灭辐射的概率与入射质子能量呈正相关,这一现象与既有研究成果^[25]相一致;就不同岩石产生湮灭辐射的概率而言,其受岩性差异影响并不显著。为进一步分析诱发 γ 谱特征峰计算模型的准确度,分别计算了 $^{24}\text{Mg}(n, n\gamma; 1.1297\text{ MeV}, 1.3686\text{ MeV}, 1.8087\text{ MeV}, 3.8671\text{ MeV})$, $^{27}\text{Al}(n, n\gamma; 1.72\text{ MeV}, 2.21\text{ MeV}, 2.734\text{ MeV}, 3\text{ MeV})$, $^{28}\text{Si}(n, n\gamma; 2.23\text{ MeV}, 3.2\text{ MeV}, 4.4972\text{ MeV})$ 3种核素的11种诱发 γ 射线的概率谱(proton^{-1}),并与国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)提供的参考实验核数据^[26-29]进行比较。为进一步降低数据库中不同时期参考实验结果的差异,分别对本文计算结果和参考实验结果进行归一化处理,结果如表3所示。在此基础上,通过式(3)计算相对误差,以此评价本文计算模型的准确度。

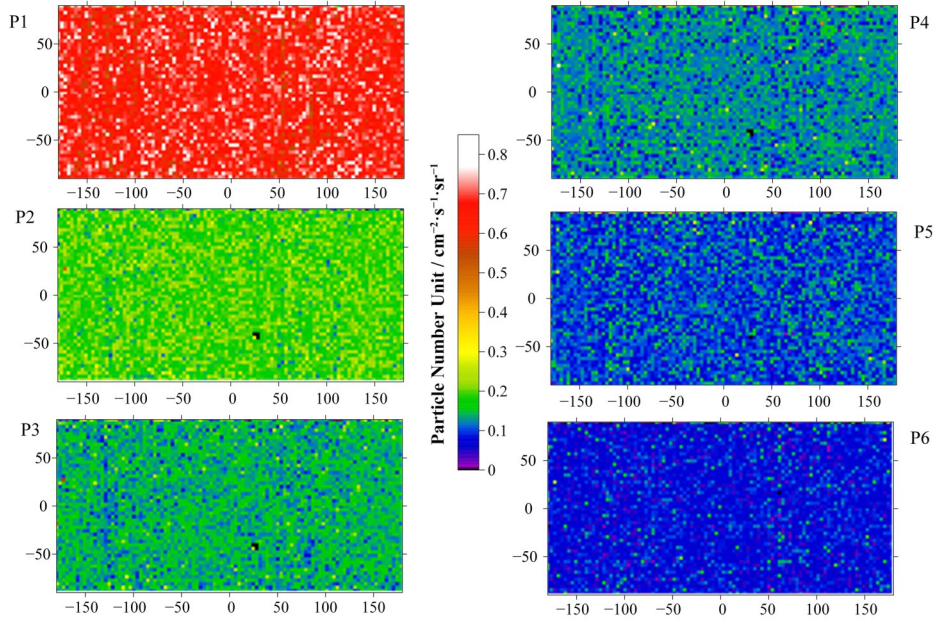


图3 全月质子注量率分布
Fig.3 Distribution of proton fluence rate on the entire lunar surface

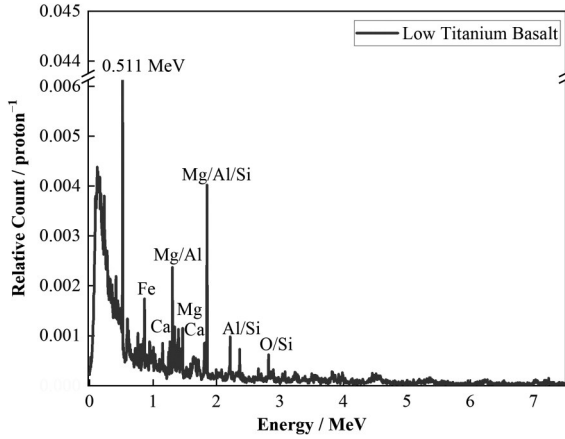


图4 月表岩石诱发 γ 射线模拟结果(以P6道质子轰击低钛玄武岩为例)

Fig.4 Simulation results of lunar rock-induced γ rays (set proton in P6 impacting on low titanium basalt as an example)

$$\Delta = \frac{N_E^C - N_E^R}{N_E^R} \times 100\% \quad (3)$$

在扣除其他相关特征 γ 射线的干扰后,三种核素不同能量特征 γ 射线计算结果的相对误差总体控制在 $-3.35\% \sim 4.95\%$ 。其中,1~3 MeV能量区间的相对误差较高,而3 MeV以上能量区间的相对误差较低。这主要是由于1~3 MeV能量区间包含不同核素的特征射线种类较多且能量相近^[15,22],在通过分支比扣除法剔除其他核素特征峰影响的过程中,引入传递误差的可能性较高,进而导致该能区的计算结果相对误差较大。

根据§2.1构建的计算模型,采用能量抽样方法分别计算4~400 eV能量质子轰击典型月表岩石诱

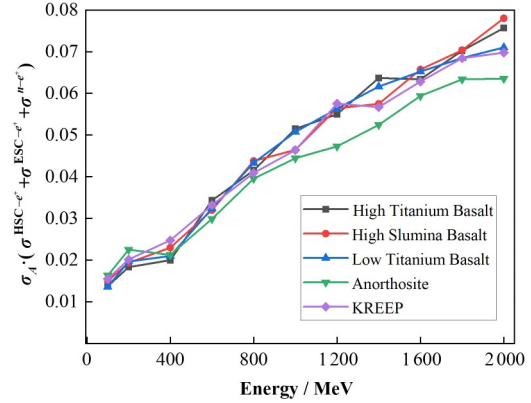


图5 不同能量的质子在�同岩性中产生湮灭辐射的概率
Fig.5 Probability of annihilation radiation produced by protons with different energies in different lithology

发的特征 γ 射线微分谱,如式(4):

$$\begin{aligned} S_{\text{rock}}^{\text{ori}} &= \sum_{E_i=4}^{400} N_{E_i}^P \cdot D_{\text{rock}}^k \\ &= D_{\text{rock}}^k \cdot \left(\sum_{i=1}^3 \phi_i \cdot G_1 + \sum_{i=4}^6 \phi_i \cdot G_2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $S_{\text{rock}}^{\text{ori}}$ 是以CE1-HPD数据为输入项获取的月表某种岩石的微分 γ 能谱; $\sum_{E_i=4}^{400} N_{E_i}^P$ 为全月特定区域4~400 MeV质子的计数率, s^{-1} ; ϕ_i 为CE1-HPD数据中4~400 MeV质子所对应的能道(P1~P6)质子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$; D_{rock}^k 为GEANT4计算的质子在第 k 种岩石诱发 γ 射线的概率谱(图6), G_1 和 G_2 分别为CE1-HPD探测器不同能量道的几何因子, $\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。

选取历史上5次登月着陆点处对应的CE1-HPD

表3 Al、Si、Mg特征 γ 射线计算结果
Table 3 Calculation results of Al, Si, Mg characteristic γ ray

核素 Nuclide	特征 γ 射线能量 Characteristic γ ray energy / MeV	本文净计数率 Net count rate of this paper / 10^{-5} proton $^{-1}$ ·s $^{-1}$	净计数率归一化 Net count rate normalization / N_E^C	IAEA 参考实验值 IAEA reference experimental values	参考值归一化 Reference value normalization / N_E^R / %	相对误差 Relative error
^{24}Mg	1.129 7	2	0.054	0.038	0.052	3.85
	1.368 6	37	1	0.727	1	—
	1.808 7	7.5	0.202	0.152	0.209	-3.35
	3.867 1	3	0.081	0.06	0.082 5	-1.82
^{27}Al	1.72	6.5	1.3	0.08	1.333	-2.48
	2.21	3.5	0.7	0.04	0.667	4.95
	2.734	3	0.6	0.035	0.583	2.92
	3.00	5	1	0.06	1	—
^{28}Si	2.23	4	1	0.117	1	—
	3.2	3	0.75	0.088	0.752	-0.27
	4.497 2	3.5	0.875	0.105	0.897	-2.45

质子注量率信息和月岩种类信息(表4),计算4~400 MeV质子诱发湮灭辐射在轨道 γ 能谱仪中的能量沉积结果,并与CE1-GRS实测谱线^[30]进行比较,截取0~3 MeV能量范围的 γ 能谱,参考SNIP(Scale

Normalization for Image Pyramids)方法对本底进行扣除,采用分支比扣除法对0.511 MeV能量窗中干扰峰(铀系、钍系)进行剥离,结果如图6所示。

表4 历次登月探测点的质子注量率 ϕ_i ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$)
Table 4 Proton fluence rate of previous lunar landing detection points ($\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$)

任务 Mission	经度 Longitude	纬度 Latitude	岩石 Rock	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Apollo 12	23°20'W	2°27'S	克里普岩 KREEP	0.74	0.15	0.10	0.058	0.063	0.053
Apollo 16	15°30'E	9°S	斜长岩 Anorthosite	0.76	0.18	0.18	0.084	0.110	0.029
Apollo 17	30°44'E	20°9'N	玄武岩 Basalt	0.70	0.17	0.22	0.170	0.082	0.063
Luna 16	56°18'E	0°41'S	玄武岩 Basalt	0.66	0.22	0.13	0.075	0.070	0.047
Luna 24	62°12'E	12°15'N	斜长岩 Anorthosite	0.82	0.15	0.15	0.120	0.065	0.120

计算4~400 MeV质子对轨道 γ 轨道能中谱湮灭辐射的贡献率($\eta_{0.511}$):

$$\eta_{0.511} = \frac{N_{0.511}^{\text{rock}}}{N_{\text{GRS}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $N_{0.511}^{\text{rock}}$ 为质子轰击月表某种岩石产生的湮灭辐射计数率的计算结果, s^{-1} ; N_{GRS} 为CE1-GRS实测谱中湮灭辐射计数率, s^{-1} 。经计算,4~400 MeV质子对轨道 γ 轨道能谱湮灭辐射的贡献率仅为 $(1.97 \pm 0.66) \times 10^{-4}$ 。Apollo17和Luna16着陆区采样点的岩石为玄武岩,根据 TiO_2 的含量可将玄武岩分为:高钛玄武岩、低钛玄武岩和高铝玄武岩,三种岩石的湮灭辐射的注量率相差 $(\pm 9 \times 10^{-6}) \text{s}^{-1}$ 。由此可见,在质子注量率空间分布差异性较低条件下,月表典型岩石种类(成分)差异对湮灭辐射注量率变化的影响不明显。

根据本文所构建的计算模型可知,4~400 MeV质子诱发湮灭辐射的计数率约为 $1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$,与CE1-GRS实测谱中湮灭辐射计数率相差近4个数量级。

CE1-HPD所观测的质子能量范围为4~400 MeV,与近月空间其他高能($\sim 10 \text{ GeV}$)质子相比,虽然其注量率较高,但能量较低,这使得:1)无法产生足够多的高能电子($> 83 \text{ MeV}$)和高能 γ 射线($> 84 \text{ MeV}$)形成有效的电磁级联簇射;2)参与强子级联簇射(阈值为 280 MeV ^[25])的质子数较少。以上两点导致产生的正电子数量较少,进而影响月表发射的湮灭辐射注量率,最终无法对轨道 γ 能谱中湮灭辐射形成较高的贡献。

4 结语

构建了质子轰击月表典型岩石产生湮灭辐射并在轨道 γ 能谱仪中沉积的数理模型,以CE1-HPD数据为输入项,研究4~400 MeV质子对轨道 γ 谱中湮灭辐射的贡献率。结果表明:月表典型岩石种类(成分)差异对湮灭辐射注量率变化的影响不明显,且4~400 MeV的质子对湮灭辐射的贡献较低。随着我国深空探测工程的不断发展,高精度、宽能阈的轨道

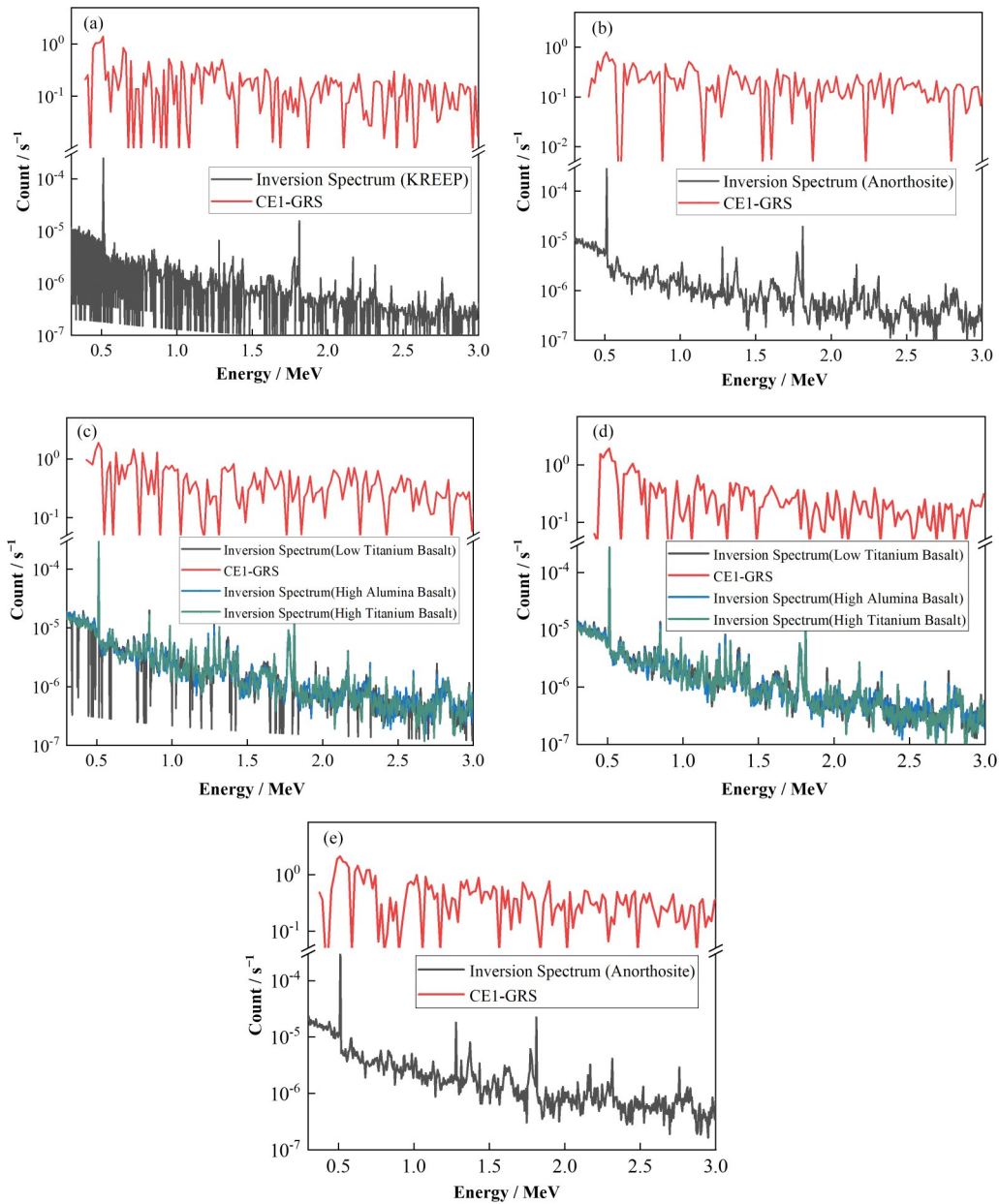


图6 5次登月着陆点的计算结果与CE1-GRS实测结果比较
(a) Apollo 12, (b) Apollo 16, (c) Apollo 17, (d) Luna 16, (e) Luna 24

Fig.6 Comparison of calculation results with the measured results of CE1-GRS at five lunar landing sites
(a) Apollo 12, (b) Apollo 16, (c) Apollo 17, (d) Luna 16, (e) Luna 24

质子探测技术日益完善,增加400 MeV以上质子探测载荷具有利于进一步探究轨道湮灭辐射的成因和扰动机理。400 MeV以上质子探测数据的获取,可为湮灭辐射定量分析提供研究基础,为我国即将进行的小行星轨道 γ 能谱探测,为能谱解析和数据新应用研究提供参考。

致谢 感谢“嫦娥一号”有效载荷团队的任务操作和中国国家航天局提供的嫦娥一号数据。本数据集由中国月球与深空探测工程地面应用系统处理制作,由中国国家航天局提供(<http://moon.bao.ac.cn>)。

作者贡献声明 赵剑锟负责研究的提出及设计、数据的收集和整理、文章的起草和最终版本的修订;姜爽负责数据的收集和整理、文章的起草;李泳琿负责数据的收集和整理;曾奇、吴和喜、刘玉娟负责研究的设计;刘义保负责最终版本的修订、项目的监督和管理。

参考文献

- 1 Lawrence D J, Peplowski P N, Beck A W, *et al.* Measuring the elemental composition of phobos: the

- mars-moon exploration with gamma rays and neutrons (MEGANE) investigation for the Martian moons eXploration (MMX) mission[J]. *Earth and Space Science*, 2019, **6**(12): 2605 - 2623. DOI: [10.1029/2019ea000811](https://doi.org/10.1029/2019ea000811).
- 2 Evans L G. The MESSENGER gamma-ray spectrometer: calibration and operations[J]. *Icarus*, 2017, **288**: 186 - 200. DOI: [10.1016/j.icarus.2017.01.022](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.01.022).
- 3 Gillis J J, Jolliff B L, Korotev R L, *et al.* Lunar surface geochemistry: global concentrations of Th, K, and FeO as derived from lunar prospector and Clementine data[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, **68**(18): 3791 - 3805. DOI: [10.1016/j.gca.2004.03.024](https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.03.024).
- 4 Prettyman T H, Hagerty J J, Elphic R C, *et al.* Elemental composition of the lunar surface: analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, **111**(E12): 7 - 48. DOI: [10.1029/2005je002656](https://doi.org/10.1029/2005je002656).
- 5 Lawrence D J. Gamma-ray measurements from Lunar Prospector: time series data reduction for the gamma-ray spectrometer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(E7): E07S05. DOI: [10.1029/2003je002206](https://doi.org/10.1029/2003je002206).
- 6 Hasebe N, Shibamura E, Miyachi T, *et al.* First results of high performance Ge gamma-ray spectrometer onboard lunar orbiter SELENE (KAGUYA) [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2009, **78**(Suppl. A): 18 - 25. DOI: [10.1143/jpsjs.78sa.18](https://doi.org/10.1143/jpsjs.78sa.18).
- 7 欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果[J]. *自然杂志*, 2013, **35**(6): 391 - 395. DOI: [10.3969/j.issn.0253-9608.2013.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-9608.2013.06.001).
OUYANG Ziyuan. Chang'E-2 preliminary results[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, **35**(6): 391 - 395. DOI: [10.3969/j.issn.0253-9608.2013.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-9608.2013.06.001).
- 8 杨佳, 葛良全, 熊盛青, 等. 利用 CE1-GRS 数据分析月表钾元素分布特征[J]. *原子能科学技术*, 2013, **47**(8): 1417 - 1421.
YANG Jia, GE Liangquan, XIONG Shengqing, *et al.* Global distribution analysis of potassium on lunar surface using CE1-GRS data[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, **47**(8): 1417 - 1421.
- 9 Ma T. Gamma-ray spectrometer onboard Chang'E-2[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, **726**: 113 - 115. DOI: [10.1016/j.nima.2013.05.162](https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.05.162).
- 10 张婧瑶, 王南萍. MCNP 模拟月表关键性元素 γ 射线与实测结果比较分析[J]. *原子核物理评论*, 2014, **31**(1): 112 - 117. DOI: [10.11804/NuclPhysRev.31.01.112](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.31.01.112).
- ZHANG Jingyao, WANG Nanping. Monte Carlo simulation and analysis of γ rays for the important elements of lunar surface[J]. *Nuclear Physics Review*, 2014, **31**(1): 112 - 117. DOI: [10.11804/NuclPhysRev.31.01.112](https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.31.01.112).
- 11 Yamashita N, Hasebe N, Reedy R C, *et al.* Uranium on the Moon: global distribution and U/Th ratio[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(10): 198 - 209. DOI: [10.1029/2010gl043061](https://doi.org/10.1029/2010gl043061).
- 12 Zhu M H. Chang'E-1 gamma ray spectrometer and preliminary radioactive results on the lunar surface[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, **58**(12): 1547 - 1554. DOI: [10.1016/j.pss.2010.07.022](https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.07.022).
- 13 Zhu M H, Chang J, Xie M G, *et al.* The uniform K distribution of the mare deposits in the Orientale Basin: insights from Chang'E-2 gamma-ray spectrometer[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, **418**: 172 - 180. DOI: [10.1016/j.epsl.2014.11.009](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.11.009).
- 14 Ge L Q, Zhao J K, Zhang Q X, *et al.* Mapping of the lunar surface by average atomic number based on positron annihilation radiation from Chang'E-1[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(3): 238 - 246.
- 15 赵剑锷. 月表诱发伽玛辐射场特征与有效原子序数研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
ZHAO Jiankun. A study on the characteristic of cosmic-induced gamma radiation field and average atomic number on lunar surface[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- 16 Zhu M H, Chang J, Ma T, *et al.* Potassium map from Chang'E-2 constraints the impact of crismium and orientale basin on the moon[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 1611. DOI: [10.1038/srep01611](https://doi.org/10.1038/srep01611).
- 17 Castagnoli G, Lal D. Solar modulation effects in terrestrial production of carbon-14[J]. *Radiocarbon*, 1980, **22**(2): 133 - 158. DOI: [10.1017/s0033822200009413](https://doi.org/10.1017/s0033822200009413).
- 18 Masarik J, Reedy R C. Gamma ray production and transport in Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1996, **101**(E8): 18891 - 18912. DOI: [10.1029/96je01563](https://doi.org/10.1029/96je01563).
- 19 中国月球与深空探测工程地面应用系统. 嫦娥一号高能粒子探测器科学数据集[DB/OL]. [2020-11-20]. <http://moon.bao.ac.cn>.
Ground Application System of China Lunar and Deep Space Exploration Project. Scientific data set of Chang'E-1 high-energy particle detector[DB/OL]. [2020-11-20].

- <http://moon.bao.ac.cn>.
- 20 王馨悦, 荆涛, 张坤毅, 等. “嫦娥一号”卫星太阳高能粒子探测器的首次观测结果[J]. 地球物理学进展, 2012, **27**(6): 2289 - 2295. DOI: [10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.003](https://doi.org/10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.003).
WANG Xinyue, JING Tao, ZHANG Shenyi, *et al.* The first results of Chang'E-1 high energetic particles detector [J]. Progress in Geophysics, 2012, **27**(6): 2289 - 2295. DOI: [10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.003](https://doi.org/10.6038/j.issn.1004-2903.2012.06.003).
 - 21 王洁, 秦刚. 基于嫦娥一号高能粒子数据的地球磁层屏蔽效应研究[J]. 空间科学学报, 2013, **33**(5): 532 - 539.
WANG Jie, QIN Gang. Study of magnetospheric shielding effect with energetic particles data from Chang'E-1[J]. Chinese Journal of Space Science, 2013, **33**(5): 532 - 539.
 - 22 赵剑锬, 葛良全, 张庆贤, 等. 月表岩石诱发 γ 辐射场原始谱特征模拟[J]. 核技术, 2015, **38**(11): 110501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110501).
ZHAO Jiankun, GE Liangquan, ZHANG Qingxian, *et al.* Simulation study on original characteristic spectrum of gamma radiation field cosmic-induced on lunabase rocks [J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(11): 110501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110501](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110501).
 - 23 葛良全, 熊盛青, 曾国强. 航空 γ 能谱探测技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
GE Liangquan, XIONG Shengqing, ZENG Guoqiang. Airborne gamma ray spectrum detection and application [M]. Beijing: Science Press, 2016.
 - 24 Seligman H. Airborne gamma ray spectrometer surveying, technical reports series No. 323[J]. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part A Applied Radiation and Isotopes, 1992, **43**: 469. DOI: [10.1016/0883-2889\(92\)90124-W](https://doi.org/10.1016/0883-2889(92)90124-W).
 - 25 Aharonian F A. Very high energy cosmic gamma radiation: a crucial window on the extreme universe[M]. River Edge, NJ: World Scientific, 2004.
 - 26 Reedy R C. Planetary gamma-ray spectroscopy[C]. Proceedings of the lunar and planetary science conference 9th, Houston TX, 1978: 2961 - 2984.
 - 27 Schmidt H H, Hungerford P, Daniel H, *et al.* Levels and gamma energies of ^{28}Al studied by thermal neutron capture [J]. Physical Review C, 1982, **25**(6): 2888 - 2901. DOI: [10.1103/physrevc.25.2888](https://doi.org/10.1103/physrevc.25.2888).
 - 28 Brückner J, Reedy R C, Englert P A, *et al.* Experimental simulations of planetary gamma-ray spectroscopy using thick targets irradiated by protons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2011, **269**(22): 2630 - 2640. DOI: [10.1016/j.nimb.2011.07.010](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.07.010).
 - 29 Nyström G, Lundberg B, Bergqvist I. Neutron capture cross sections in F, Mg, Al, Si, P and S from 20 to 80 keV [J]. Physica Scripta, 1971, **4**(3): 95 - 99. DOI: [10.1088/0031-8949/4/3/002](https://doi.org/10.1088/0031-8949/4/3/002).
 - 30 中国月球与深空探测工程地面应用系统. 嫦娥一号 γ 射线谱仪科学数据集[DB/OL]. [2022-10-11]. <http://moon.bao.ac.cn>.
China Lunar and Deep Space Exploration Project Ground Application System. Scientific data set of Chang'E-1 γ -ray spectrometer[DB/OL]. [2022-10-11]. <http://moon.bao.ac.cn>.