

基于CE2-GRS数据的月表氢元素分布特征研究

李泳瑋^{1,2} 赵剑锟^{1,2} 姜爽^{1,2} 王飞亮^{1,2} 吴和喜^{1,2} 刘义保^{1,2}

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 为解决嫦娥二号 γ 射线谱仪(Chang'E-2 gamma-ray spectrometer, CE2-GRS)数据中氢(H)特征 γ 射线($^2\text{H}@2.223\text{ MeV}$)微弱信息提取困难的问题,提出了衰变分支比剥离谱与非线性最小二乘拟合高斯函数结合的方法,并基于全月幅铝(Al)丰度的研究结果,构建了剥离Al-H合峰中Al计数的特征函数,实现了对2.1~2.5 MeV能窗内干扰核素($^{214}\text{Bi}@2.204\text{ MeV}$ 、 $^{27}\text{Al}@2.210\text{ MeV}$ 、 $^{49}\text{Ca}@2.371\text{ MeV}$)的特征 γ 射线的剥离,最终获取了全月幅氢元素特征 γ 射线的3 s计数空间分布。对全月14个典型月海地区内氢元素特征 γ 射线计数进行分析,结果表明:月球背面的艾肯盆地、智海与月球正面的雨海、风暴洋表现出高值特征,其计数达到平均值的2.6倍。将月表氢元素分布特征与月球勘探者(Lunar Prospector, LP)超热中子数据对比发现:二者在月球正面的雨海、风暴洋地区以及月球背面艾肯盆地的分布特征呈高度负相关。月表氢元素分布特征进一步预测了智海、雨海、风暴洋区域可能大量存在结构水,实现了对轨道 γ 能谱数据的深入挖掘和科学应用。

关键词 CE2-GRS, 衰变分支比, 非线性最小二乘拟合, 氢元素分布

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120201

Distribution characteristics of hydrogen elements on lunar surface based on CE2-GRS data

LI Yonghui^{1,2} ZHAO Jiankun^{1,2} JIANG Shuang^{1,2} WANG Feiliang^{1,2} WU Hexi^{1,2} LIU Yibao^{1,2}

1(Jiangxi Research Center of Nuclear Geo-Data Science and System Engineering Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

2(College of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract [Background] Water is the primary resource required for the exploitation of lunar resources. Investigating the distribution of water on the surface of the moon has become a focal point in the lunar exploration plans of several nations. [Purpose] This study aims to quantify the presence of hydrogen and analyze its spatial distribution on the lunar surface using data from the Chang'E-2 gamma-ray spectrometer (CE2-GRS). [Methods] Firstly, an analytical method combining branch specific stripping with the nonlinear least-square fitting Gaussian function was proposed to subtract the characteristic γ rays of interfering nuclides ($^{214}\text{Bi}@2.204\text{ MeV}$, $^{27}\text{Al}@2.210\text{ MeV}$, $^{49}\text{Ca}@2.371\text{ MeV}$) ranging from 2.1 MeV to 2.5 MeV. Then, a characteristic function between the

国家自然科学基金(No.12105043, No.12265003)、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)

第一作者: 李泳瑋, 男, 1999年出生, 2021年毕业于成都理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为核信息获取与数据处理

通信作者: 赵剑锟, E-mail: martin1945@ecut.edu.cn

收稿日期: 2023-02-23, 修回日期: 2023-06-02

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12105043, No. 12265003), Open Fund of Jiangxi Provincial Key Laboratory of Nuclear Geoscience Data Science and System Engineering Technology (No. JETRCNGDSS202105)

First author: LI Yonghui, male, born in 1999, graduated from Chengdu University of Technology in 2021, master student, focusing on nuclear information acquisition and data processing

Corresponding author: ZHAO Jiankun, E-mail: martin1945@ecut.edu.cn

Received date: 2023-02-23, revised date: 2023-06-02

abundance and counts of aluminum γ rays around the moon was established to subtract the counts of aluminum in the mixed peak. Finally, the spatial distribution of hydrogen γ rays for counts per 3 s on the whole lunar surface was obtained. **[Results]** The analysis results show that high-value characteristics exhibited in some areas, including the Aiken basin, Mare Ingenii, Mare Imbrium, and Oceanus Procellarum, are approximately 2.6 times the average value of hydrogen counts among the 14 major maria. Comparison between the distribution characteristics of hydrogen elements on the lunar surface and the data of epithermal neutrons from Lunar Prospector (LP) reveals a highly negative correlation between the distribution characteristics of the two in these regions. **[Conclusions]** The distribution characteristics of hydrogen elements on the lunar surface further predict that there may be a large amount of structural water in the Mare Ingenii, Mare Imbrium, and Oceanus Procellarum, formed by the combination of hydroxyl groups or molecular hydrogen (H_2), achieving a better understanding of the orbit γ deep mining and scientific application of energy spectrum data.

Key words CE2-GRS, Decay branching ratio, Nonlinear least-square fitting, Distribution of hydrogen

水是月球资源开发过程中重要的物质补给,研究月表水的分布是各国对月探测计划的热点之一^[1-3]。月表水(又称“水冰”)分别以“结构水”和“冰水”两种形态存在。其中,结构水以分子氢(H_2)和羟基($-OH$)的形式与其他物质结合形成矿物^[4];而冰水则以水分子的形式存在于温度极低的月球两极永久阴影区^[5-7]。由于结构水与冰水中均含有氢(H),故开展月表H及其同位素的空间分布研究可为月表水分布提供直接依据^[8]。现阶段,针对月表水的常规探测方法有:雷达探测水冰的圆极化比^[8],光谱法探测羟基($-OH$)和 H_2O 进而反演水冰含量^[9-11],撞击实验确认极区撞击坑内水的挥发分和含量,采集月球岩石(土壤)样品对水的直接测量^[12]。

全月幅放射性测量方法主要有:轨道中子能谱探测^[13]和 γ 能谱探测。虽然已有中子能谱探测表征H含量空间分布的研究成果^[14-15],但是由于中子慢化过程易受C、Be等原子的影响,所以该方法的探测精度有待提高。而针对 γ 能谱探测方法,由于月表水含量较低, $^3H@2.223$ MeV特征 γ 射线计数的获取易受统计涨落和月表其他放射性核素的影响。此外,嫦娥二号 γ 射线谱仪(Chang'E-2 gamma-ray spectrometer, CE2-GRS)主探测器(LaBr₃)中含有一定量的铀系核素及其子体,以上核素衰变产生的特征射线也会对2.1~2.5 MeV能窗的计数形成干扰^[16],进一步增加了 $^3H@2.223$ MeV特征 γ 射线的解析难度。

本文基于CE2-GRS能谱数据,采用高斯函数作为峰形函数,将分支比剥离与非线性最小二乘拟合高斯函数结合,构建剥离Al-H合峰中Al计数的特征函数,实现2.1~2.5 MeV能窗内干扰核素($^{214}Bi@2.204$ MeV、 $^{27}Al@2.210$ MeV、 $^{40}Ca@2.371$ MeV)特征 γ 射线的剥离,进而获取 $^3H@2.223$ MeV特征 γ 射线的净计数。在综合月球地貌形态与月球勘探者

(Lunar Prospector, LP)超热中子通量分析结果的基础上,对月表H的空间分布特征进行研究。

1 理论基础

1.1 H特征 γ 射线产生机理

月球外围的大气密度极低,高能宇宙射线可以直接轰击月表并伴随产生大量的中子、 γ 射线等次级粒子^[17]。能量较低的热中子与H原子核发生辐射俘获形成激发态的复合核,其在发射出能量为2.223 MeV的特征 γ 射线后回到基态,形成机理如图1所示。

1.2 算法原理

首先,假设重峰区域共有 m 种核素的特征 γ 射线,确定可利用分支比剥离的核素种类个数为 n , R'_i 为重峰区域内第 i 种核素特征 γ 射线对应的分支比, R_i 为重峰区域外第 i 种核素的特征 γ 射线对应的分支比, N_i 是重峰区域内扣除本底后的净计数,该核素在重峰区域内的分布函数为:

$$f_i(x) = \frac{N_i R'_i}{R_i} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-P)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: $f_i(x)$ 是重峰区域内第 i 种核素特征 γ 射线的计数; P 是特征 γ 射线的峰位; x 是道址,设 $Ch_L \leq x \leq Ch_R$ (Ch_L 与 Ch_R 分别是重峰区域的左右边界); σ 是高斯函数的标准差。

CE2-GRS的能量分辨率($\eta_{CE2-GRS}$)^[16]如式(2)所示:

$$\eta_{CE2-GRS} = 0.93 \times E^{-0.5} \quad (2)$$

式中: E 是入射射线的能量,keV。能量分辨率与特征射线的半高宽(Full Wave at Half Maximum, FWHM)的关系如式(3)所示:

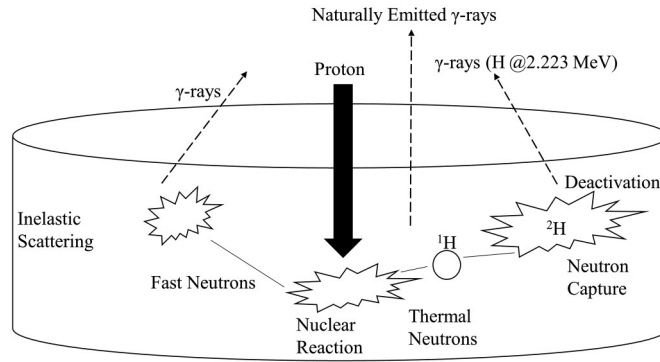


图1 月表H特征γ射线形成机理

Fig.1 Mechanism for producing hydrogen characteristic γ-rays on lunar surface

$$\eta_{\text{CE2-GRS}} = \frac{\text{FWHM}}{E_{\text{peak}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： E_{peak} 是特征峰位对应的能量，keV。FWHM是半高宽，计算方法如式(4)所示：

$$\text{FWHM} = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \quad (4)$$

联立式(2)、(3)、(4)可得高斯函数标准差 σ 与特征射线能量的关系：

$$\sigma = \frac{0.93 \times \sqrt{E_{\text{peak}}}}{2 \times \sqrt{2\ln 2}} \quad (5)$$

则利用分支比剥离后的谱线分布函数($f_0(x)$)，如式(6)：

$$f_0(x) = F(x) - \sum_{i=1}^n \frac{N_i R'_i}{R_i} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-p_i)^2}{2\left(\frac{0.93 \times \sqrt{E_{\text{peak}}}}{\sqrt{2\ln 2}}\right)^2}} \quad (6)$$

式中： $F(x)$ 是经扣除本底后的 γ 谱线。

之后，采用非线性最小二乘拟合法拟合多个重峰^[18]，此时重峰区域的谱线，如式(7)：

$$f_0(x) = \sum_{j=1}^{m-n} G_j(x) = \sum_{j=1}^{m-n} A_j \times e^{-\frac{(x-p_j)^2}{2\sigma_j^2}} \quad (7)$$

式中： $G_j(x)$ 是理想高斯分布条件下第 j 个峰在重峰区域中的分布函数； A_j 是第 j 个峰的峰高； σ_j 是第 j 个峰的标准差。联立式(6)、(7)得到分支比剥离 n 个干扰核素后的非线性最小二乘拟合的函数，如式(8)：

$$\sum_{j=1}^{m-n} A_j \times e^{-\frac{(x-p_j)^2}{2\sigma_j^2}} = F(x) - \sum_{i=1}^n \frac{N_i R'_i}{R_i} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-p_i)^2}{2\left(\frac{0.93 \times \sqrt{E_{\text{peak}}}}{\sqrt{2\ln 2}}\right)^2}} \quad (8)$$

对上述方程求解得到 A_j 与 σ_j ，则第 j 个峰的净计数(S_j)，如式(9)：

$$S_j = \sum_{\text{Ch}_L}^{\text{Ch}_H} f_0(x) \cdot \frac{A_j \cdot \sigma'_j}{\sum_{j=1}^{m-n} A_j \cdot \sigma'_j} \quad (9)$$

2 数据获取与分析

2.1 数据预处理

首先，对CE2-GRS的2C级数据进行筛选、宇宙射线校正、谱线累计、能谱去噪^[16,18]，并利用SNIP (Sensitive Nonlinear Iterative Peak)算法扣除每条谱线的康普顿散射本底^[16]；其次，筛选出2.1~2.5 MeV能量窗口中计数最少的80条谱线，将其平均值作为铀系核素及其子体的 α 射线计数。采用文献^[16,18-20]方法，对谱线0~3 MeV能窗进行定性分析，结果如图2所示。

采用协方差法进行寻峰，结果如图3所示。

图3中， r 为峰高与其偏差的比值，结合图2进行分析可知，在2.1~2.5 MeV能量窗口内存在4种核素

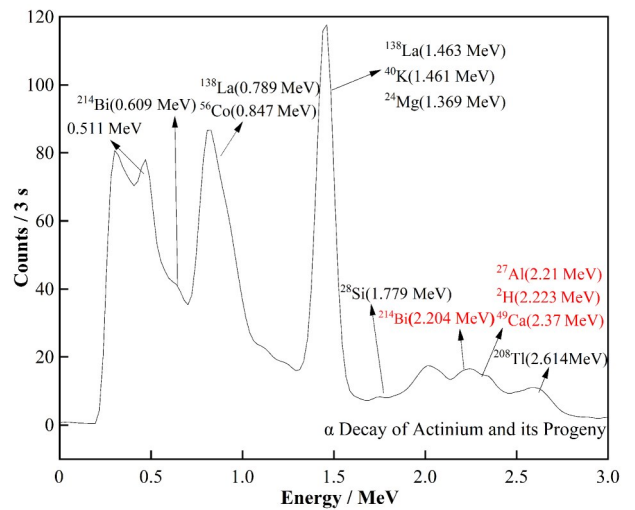


图2 0~3 MeV的定性分析结果(月表0°, -30°处)

Fig.2 Qualitative analysis results of 0~3 MeV energy window (at 0° latitude and 30° west longitude of the lunar surface)

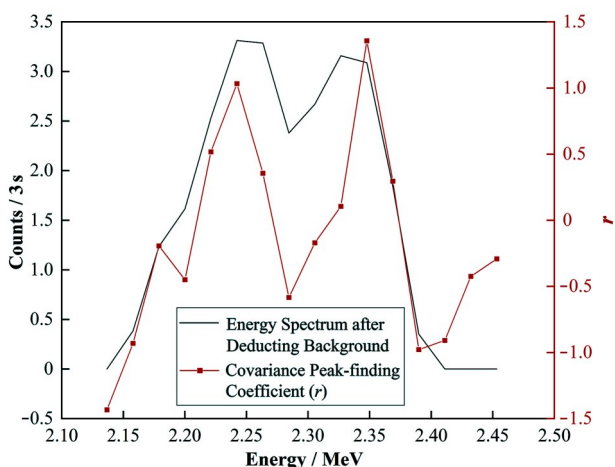


图3 经过预处理后的2.1~2.5 MeV 能窗谱线信息 (月表0°, -30°处)

Fig.3 Spectral information of 2.1~2.5 MeV energy window after pretreatment (at 0° latitude and 30° west longitude of the lunar surface)

的特征 γ 射线;其中, $^{27}\text{Al}@2.210$ MeV 特征 γ 射线计数贡献最高,而 $^{214}\text{Bi}@2.204$ MeV、 $^3\text{H}@2.223$ MeV、 $^{49}\text{Ca}@2.371$ MeV 特征 γ 射线计数相对较低。由此可见,4种核素特征 γ 射线能量十分接近,采用非线性最小二乘拟合直接解析 $^3\text{H}@2.223$ MeV 的效果较差。因此,需先结合分支比法剥离 $^{214}\text{Bi}@2.204$ MeV 特征 γ 射线干扰;之后,将能量相近的 $^3\text{H}@2.223$ MeV 与 $^{27}\text{Al}@2.210$ MeV 视为一个特征峰(AI-H 合峰),再利用非线性最小二乘拟合法剥离 $^{49}\text{Ca}@2.371$ MeV 特征 γ 射线干扰。

2.2 干扰核素剥离

首先,根据表1中的 ^{214}Bi 特征 γ 射线分支比^[18],对2.1~2.5 MeV 能量窗口中 $^{214}\text{Bi}@2.204$ MeV 干扰核素特征 γ 射线进行剥离。

表1 ^{214}Bi 的两种特征射线分支比

来源 Source	特征 γ 射线能量 Energy / MeV	分支比 Branch ratio / %
^{214}Bi	0.609	45.49
	2.204	4.924

其次,采用式(8)对2.1~2.5 MeV 能窗内的AI-H 合峰和 $^{49}\text{Ca}@2.371$ MeV 特征 γ 射线进行剥离,相关参数如表2所示。其中, m 由协方差寻峰法和既有文献^[16-21]确定; n 是利用分支比扣除的核素种类; R_1 和 R_1 分别是 $^{214}\text{Bi}@2.204$ MeV、0.609 MeV 特征射线对应的分支比; P_1 和 E_{peak} 分别是 $^{214}\text{Bi}@2.204$ MeV 特征 γ 射线对应的道址和能量(keV)。剥离结果如图4所示。

表2 式(8)中的参数
Table 2 Parameters in Eq.(8)

参数 Parameter	值 Value
m	3
n	1
R_1	4.924
R_1	45.49
P_1	105
E_{peak}	2 204

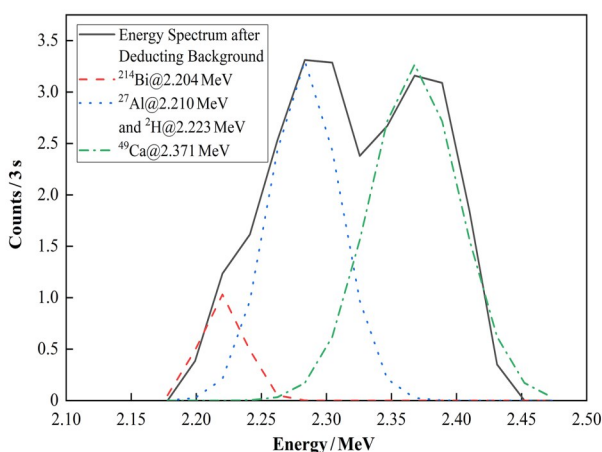


图4 2.1~2.5 MeV 的定量分析结果(月表0°, -30°处)

Fig.4 Quantitative analysis results of 2.1~2.5 MeV energy window (at 0° latitude and 30° west longitude of the lunar surface)

对AI-H 合峰中 $^{27}\text{Al}@2.210$ MeV 特征 γ 射线进行剥离,具体步骤如下:

a) 确定典型低H位置,由于超热中子通量与H含量呈负相关,根据LP采集的月表超热中子通量空

间分布结果^[13-15](图5),提取超热中子通量为145~156的区域信息。月表高地区域以及月球背面部分月海地区超热中子通量普遍较高,因此可在该区域内提取典型低H位置。

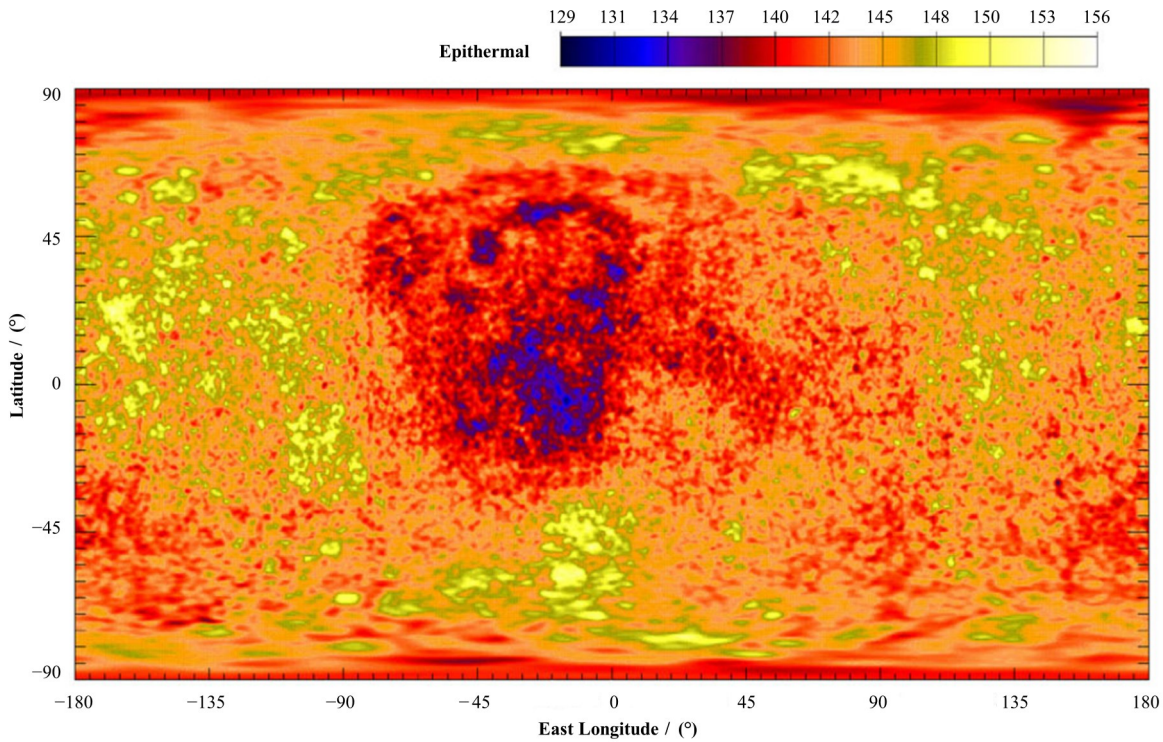


图5 全月幅LP超热中子通量分布

Fig.5 Distribution of epithermal neutron flux from LP

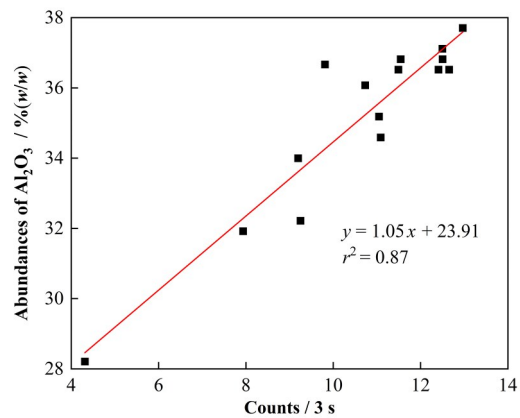
b) 确定典型低H位置的 Al_2O_3 丰度,根据全月幅 Al_2O_3 的红外光谱探测结果^[21],结合典型低H区域信息,提取对应位置处 Al_2O_3 丰度信息。

c) 提取上述坐标对应的特征 γ 能谱中Al-H合峰计数,相关信息如表3所示。

表3 月表典型低H位置处 Al_2O_3 的丰度和 $^{27}\text{Al}@2.210$ MeV的计数Table 3 Abundance of Al_2O_3 and counts of $^{27}\text{Al}@2.210$ MeV in the typical low H position on the lunar surface

经度 Longitude	纬度 Latitude	计数 Counts / 3 s	丰度 Abundance / wt%
-120°	30°	9.2	32.2
-60°	30°	7.9	31.9
120°	30°	11.0	35.2
-120°	0°	13.0	37.7
60°	0°	12.5	37.1
-60°	-30°	10.7	36.1
120°	-30°	12.7	36.5
-120°	-30°	11.5	36.5
0°	20°	11.1	34.6
180°	20°	4.3	28.2
-120°	-20°	9.2	34.0
0°	-20°	12.5	36.8
60°	-20°	11.5	36.8
120°	-20°	9.8	36.7
180°	-20°	12.4	36.5

d) 构建特征函数,拟合Al-H合峰计数与 Al_2O_3 丰度信息,结果如图6所示。

图6 Al特征峰计数与 Al_2O_3 拟合结果Fig.6 Fitting results of counts of Al characteristic peaks to abundance of Al_2O_3

e) 剥离Al-H合峰中 $^{27}\text{Al}@2.210$ MeV特征 γ 射线,根据图6的特征函数计算月表-60°~60°纬度范围内Al特征 γ 射线计数 S_{Al} ,结果如图7所示。

f) 通过式(10)获得 $^3\text{H}@2.223$ MeV特征 γ 射线计数 S_{H} 。

$$S_{\text{H}} = S_{\text{Al,H}} - S_{\text{Al}} = S_{\text{Al,H}} - \frac{C_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 23.91}{1.05} \quad (10)$$

式中: $S_{\text{Al,H}}$ 为Al-H合峰计数; $C_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为Al的丰度。

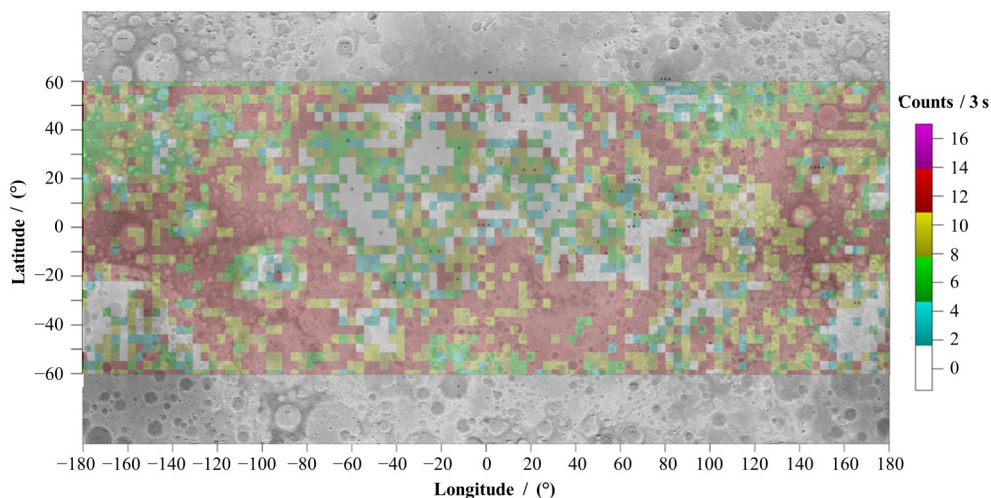


图7 月表Al的3 s计数分布
Fig.7 Distribution of Al counts per 3 s on lunar surface

3 结果与讨论

根据式(10)计算结果,获取月表 $-60^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 纬度范围内H特征 γ 射线计数分布特征,如图8所示。

由图8可知,位于月球正面的月海以及平原地区表现出H计数高的特征,而高地区域内H计数普遍较低;此外,月球背面的绝大部分区域表现出H计数增强的特征,特别是在艾肯盆地内表现出了H计

数的异常高值特征。与LP获取的全月超热中子通量分布特征(图5)进行对比后发现:二者在月球背面大部分区域以及月球正面的月海地区(雨海、风暴洋)呈现高度负相关关系。但是,二者在月表艾肯盆地的中纬地区以及智海区域存在差异。为深入分析月海地区的H分布特征,统计了月表14个主要月海区域内H特征 γ 射线计数信息,如表4所示。

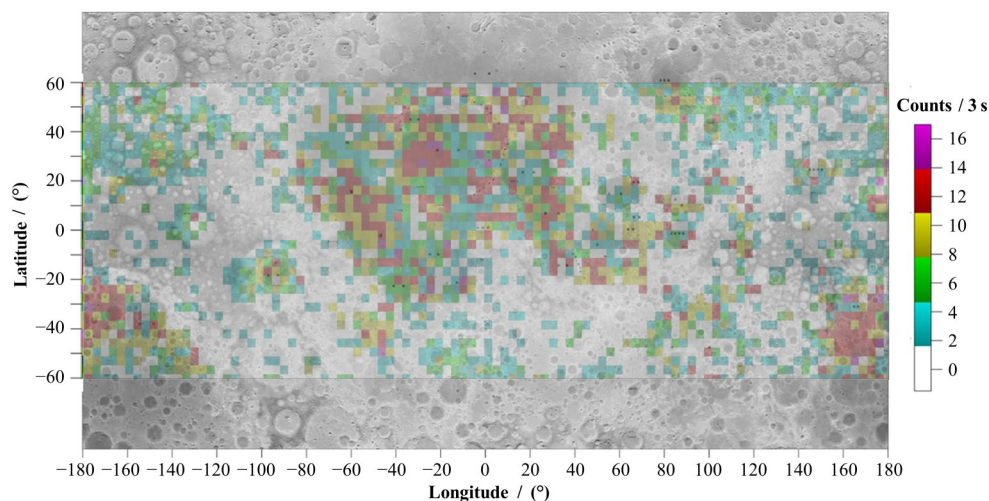


图8 月表H的3 s计数分布
Fig.8 Distribution of H counts per 3 s on lunar surface

由表4,危海、冷海、洪保德海、莫斯科海、酒海、东方海、云海、澄海和史密斯海的计数低于平均值。其中,冷海、洪保德海、莫斯科海、酒海、云海的计数仅为平均值的2.5%。这是由于上述月海位于月球的低纬度地区,受光照时间更长,月表温度更高,相较于高纬度地区不易赋存水分子形成冰水,同时推测上述月表区域岩石中结构水含量较少,从而表现出H的特征 γ 射线计数较低的特征。

此外,雨海、智海和风暴洋的H特征 γ 射线计数约为上述平均值的2.6倍,且风暴洋与雨海位于月球正面,LP超热中子通量值较低,进一步证明了上述地区月球表层物质中H的含量较高。但是,雨海、智海和风暴洋均不处于月球的永久阴影区,较长的光照时间使得上述区域存在冰水的概率较低。因此,基于以上分析推测出:上述地区大量存在的“水”应该是以分子氢(H_2)、羟基($-OH$)与物质结合形成的结构水。

表4 14个主要月海的H的计数
Table 4 Counts of hydrogen in 14 major maria

位置 Location	序号 Number	月海名称 Name	坐标 Coordinate	计数 Counts / 3 s
月球正面 Nearside	1	知海 Mare Cognitum	-10.0°, -23.1°	4.9
	2	危海 Mare Crisium	17.0°, 59.1°	4.3
	3	冷海 Mare Frigoris	56.0°, 1.4°	0.01
	4	湿海 Mare Humorum	-24.4°, -38.6°	5.7
	5	雨海 Mare Imbrium	32.8°, -15.6°	10.9
	6	酒海 Mare Nectaris	-15.2°, 35.5°	0.2
	7	云海 Mare Nubium	-21.3°, -16.6°	0.3
	8	东方海 Mare Orientale	-19.4°, -92.8°	3.4
	9	澄海 Mare Serenitatis	28.0°, 17.5°	1.3
	10	风暴洋 Oceanus Procellarum	18.4°, -57.4°	12.8
月球背面 Farside	11	智海 Mare Ingenii	-33.7°, 163.5°	13.7
	12	洪保德海 Humboldtianum	56.8°, 81.5°	0.1
	13	莫斯科海 Mare Moscoviense	27.3°, 147.9°	0.01
交界处 Junction	14	史密斯海 Mare Smythii	1.3°, 87.5°	4.2

4 结语

本文提出的“基于全月幅铝(Al_2O_3)丰度分布和分支比结合非线性最小二乘拟合高斯函数重峰分解法”可以实现 $^2H@2.223$ MeV特征 γ 射线微弱信息提取。通过解析CE2-GRS数据,获取的全月幅H特征 γ 射线3 s计数分布特征与LP超热中子数据在月球正面的风暴洋、雨海地区,月球背面和南极艾肯盆地区域的部分区域的分布呈现高度负相关关系,证明了计算结果的准确性。基于CE2-GRS数据获取的风暴洋、智海和雨海等地区H的高值特征,推测上述区域存在大量的结构水。

致谢 感谢嫦娥二号有效载荷团队和中国国家航天局提供的嫦娥二号数据。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 李泳瑛负责研究的设计、数据的获取和处理、文章的起草和最终版本的修订;赵剑锐负责研究的提出、文章的审阅和最终版本的修订;姜爽、王飞亮负责数据的收集和整理、文章的修订;吴和喜负责研究的设计和文章的审阅;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 吴伟仁,于登云,王赤,等.月球极区探测的主要科学与技术问题研究[J].深空探测学报(中英文),2020,7(3): 223 - 231, 240. DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200113001.
WU Weiren, YU Dengyun, WANG Chi, *et al.* Research

on the main scientific and technical problems of lunar polar exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 223 - 231, 240. DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200113001.

- 2 杜宇,盛丽艳,张焱,等.月球水冰赋存形态分析及原位探测展望[J].航天器环境工程,2019,36(6): 607 - 614. DOI: 10.12126/sec.2019.06.012.
DU Yu, SHENG Liyan, ZHANG He, *et al.* Analysis of the occurrence mode of water ice on the moon and the prospect of in situ lunar exploration[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(6): 607 - 614. DOI: 10.12126/sec.2019.06.012.
- 3 Anand M. Lunar water: a brief review[J]. Earth, Moon, and Planets, 2010, 107(1): 65 - 73. DOI: 10.1007/s11038-010-9377-9.
- 4 Carpenter J, Fisackerly R, Houdou B. Establishing lunar resource viability[J]. Space Policy, 2016, 37: 52 - 57. DOI: 10.1016/j.spacepol.2016.07.002.
- 5 Vasavada A R, Paige D A, Wood S E. Near-surface temperatures on mercury and the moon and the stability of polar ice deposits[J]. Icarus, 1999, 141(2): 179 - 193. DOI: 10.1006/icar.1999.6175.
- 6 Nozette S, Spudis P D, Robinson M S, *et al.* Integration of lunar polar remote-sensing data sets: evidence for ice at the lunar south pole[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2001, 106(E10): 23253 - 23266. DOI: 10.1029/2000je001417.
- 7 Thomson B J, Bussey D B J, Neish C D, *et al.* An upper limit for ice in Shackleton crater as revealed by LRO Mini

- RF orbital radar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(14): 14021 - 14024. DOI: [10.1029/2012GL052119](https://doi.org/10.1029/2012GL052119).
- 8 何成旦, 李亚胜, 温智, 等. 月表水冰探测与赋存形态研究进展[J]. *真空与低温*, 2021, **27**(6): 589 - 600. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7086.2021.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7086.2021.06.011).
- HE Chengdan, LI Yasheng, WEN Zhi, *et al.* Research progress of lunar surface water ice detection and occurrence form[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2021, **27**(6): 589 - 600. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7086.2021.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7086.2021.06.011).
- 9 Sunshine J M, Farnham T L, Feaga L M, *et al.* Temporal and spatial variability of lunar hydration As observed by the deep impact spacecraft[J]. *Science*, 2009, **326**(5952): 565 - 568. DOI: [10.1126/science.1179788](https://doi.org/10.1126/science.1179788).
- 10 Paige D A, Siegler M A, Zhang J A, *et al.* Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the Moon's south polar region[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 479 - 482. DOI: [10.1126/science.1187726](https://doi.org/10.1126/science.1187726).
- 11 Hayne P O, Hendrix A, Sefton-Nash E, *et al.* Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements[J]. *Icarus*, 2015, **255**: 58 - 69. DOI: [10.1016/j.icarus.2015.03.032](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.03.032).
- 12 Crotts A. *The new moon: water, exploration, and future habitation*[M]. USA: Cambridge University Press, 2014.
- 13 Feldman W C, Maurice S, Binder A B, *et al.* Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles[J]. *Science*, 1998, **281**(5382): 1496 - 1500. DOI: [10.1126/science.281.5382.1496](https://doi.org/10.1126/science.281.5382.1496).
- 14 Feldman W C, Maurice S, Lawrence D J, *et al.* Evidence for water ice near the lunar poles[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, **106**(E10): 23231 - 23251. DOI: [10.1029/2000je001444](https://doi.org/10.1029/2000je001444).
- 15 Feldman W C, Lawrence D J, Elphic R C, *et al.* Polar hydrogen deposits on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, **105**(E2): 4175 - 4195. DOI: [10.1029/1999je001129](https://doi.org/10.1029/1999je001129).
- 16 李晓丽. 嫦娥二号伽玛谱数据处理及月表放射性元素填图[D]. 成都: 成都理工大学, 2016. DOI: [10.26986/d.cnki.gcdlc.2016.000004](https://doi.org/10.26986/d.cnki.gcdlc.2016.000004).
- LI Xiaoli. Data processing of Chang'E-2 gamma spectrum and mapping of radioactive elements on the lunar surface [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. DOI: [10.26986/d.cnki.gcdlc.2016.000004](https://doi.org/10.26986/d.cnki.gcdlc.2016.000004).
- 17 赵剑锟, 姜爽, 李泳琿, 等. 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[J]. *核技术*, 2023, **46**(5): 050201. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050201](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050201).
- ZHAO Jiankun, JIANG Shuang, LI Yonghui, *et al.* Contribution of 4~400 MeV protons galactic cosmic rays to annihilation radiation in orbital gamma spectrum near lunar space[J]. *Nuclear Techniques*, 2023, **46**(5): 050201. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050201](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050201).
- 18 杨佳. 月球伽玛能谱数据处理试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- YANG Jia. Experimental study on database processing of lunar gamma-ray spectrum[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- 19 Reedy R C. *Planetary gamma-ray spectroscopy*[R]. Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM (United States), 1978.
- 20 赵剑锟. 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. Study on the characteristics and effective atomic number of gamma radiation field induced by lunar surface[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- 21 Ma M, Li B Z, Chen S B, *et al.* Global estimates of lunar surface chemistry derived from LRO diviner data[J]. *Icarus*, 2022, **371**: 114697. DOI: [10.1016/j.icarus.2021.114697](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114697).