0254-6124/2026/46(2)-0312-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CHEN Guanyu, MA Tao, ZHANG Yongqiang, ZHANG Yan, HUANG Yongyi, WU Kefan. Geant4 Simulation on Lunar Surface Water Content Inversion Using the Chang'E-7 Neutron and Gamma-ray Spectrometer (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 312–319. CSTR:32142.14.cjss.2025–0144. DOI:10.11728/cjss2026.02.2025–0144

# 基于 Geant4 模拟的嫦娥七号中子伽玛谱仪月表水含量反演模型*

陈冠宇[1,2] 马 涛[1,2] 张永强[2]
张 岩[2] 黄永益[2] 吴柯汎[1,2]

1(中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

2(中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

**摘 要** 嫦娥七号计划于 2026 年发射, 开展月球南极永久阴影区内的水冰探测是其重要的科学目标之一. 基于 Geant4 工具包构建嫦娥七号有效载荷月球中子伽玛谱仪 (LNGS) 的精细模型, 建立月表水含量与超热中子计数率之间的定量反演关系. 通过模拟银河宇宙射线 (GCR) 轰击月表产生的次级中子能谱, 结合中国散裂中子源 (CSNS) 的束流标定实验验证, 得到如下结果探测器建模的模拟效率与实验数据吻合良好 (相对误差<6%); 探测器具备区分不同含水量土壤的能力; 月表水冰质量含量在 0.01%～20% 范围内时, 超热中子计数率随氢含量增加呈显著下降趋势, 其关系符合修正的 Lawrence 模型 ($R^2$=0.9993). 研究为嫦娥七号在轨数据解译提供了可靠的理论模型, 并为月球资源原位利用的探测技术发展奠定了基础.

**关键词** Geant4, 中子伽玛谱仪, 月球极区, 水冰含量

**中图分类号** P184.5

# Geant4 Simulation on Lunar Surface Water Content Inversion Using the Chang'E-7 Neutron and Gamma-ray Spectrometer

CHEN Guanyu[1,2] MA Tao[1,2] ZHANG Yongqiang[2]
ZHANG Yan[2] HUANG Yongyi[2] WU Kefan[1,2]

1(*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210023)

2(*School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026)

**Abstract** The Chang'E-7 lunar mission, scheduled for launch in 2026, has the primary scientific objective of detecting water-ice deposits within the Permanently Shadowed Regions (PSRs) at the lunar

* 国家自然科学基金面上项目资助 (42474234)

2025-08-05 收到原稿, 2025-11-11 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/)

south pole. Understanding the distribution and concentration of lunar water ice is crucial for both fundamental science and future *In-situ* Resource Utilization (ISRU). In this study, we developed a high-fidelity model of the Chang'E-7 Lunar Neutron and Gamma-ray Spectrometer (LNGS) payload using the Geant4 toolkit (Version 10.07.p02) and established a quantitative inversion relationship between lunar surface water content and epithermal neutron count rates. The LNGS model, constructed by importing a detailed CAD model into Geant4, was rigorously validated against neutron beam calibration experiments conducted at the China Spallation Neutron Source (CSNS) Back-n facility. The results are as follows. The detector model shows excellent agreement with experimental data across the 0.4 eV to 1000 eV energy range, with a relative error of less than 6%, confirming the accuracy of the mass modeling and simulation setup. LNGS exhibits significant capability in discriminating soils with varying water content, as evidenced by both simulation and ground-based validation experiments using layered soil and water samples. Within the water-ice content range of 0.01% to 20%, simulations of Galactic Cosmic Ray (GCR) bombardment and subsequent neutron transport show that the epithermal neutron (400～700 keV) count rate decreases significantly with increasing hydrogen abundance. This relationship follows a modified Lawrence model with an exceptional coefficient of determination ($R^2 = 0.9993$). The slight parameter differences compared to the original Lawrence model are attributed to the different simulation tools, lunar regolith composition models, and distinct detector designs and energy responses between LNGS and the Lunar Prospector neutron spectrometer. This study provides a robust theoretical framework and a specific, validated inversion model for interpreting Chang'E-7 orbital neutron data, directly enabling the mapping of hydrogen concentrations from measured count rates. It establishes fundamental technical support for the development of *in-situ* resource utilization technologies on the Moon and paves the way for high-precision assessment of water ice resources in the lunar polar regions.

**Key words** Geant4, Neutron and Gamma-ray spectrometer, Lunar polar regions, Water-ice content

## 0 引言

月球极区永久阴影区 (PSRs) 中水冰的探测研究是当前深空探测领域的重要科学目标之一. 水冰的存在不仅对未来月球基地建设和原位资源利用 (ISRU) 具有重大意义, 还为理解太阳系挥发分的分布与演化历史提供了关键线索[1,2]. 根据理论模型, 月球极区 PSRs 内温度常年低于 110 K, 能够长期保存水冰[3]. 经过多波段、多种方式的极区观测, 目前只能确定在 PSRs 表面确实存在少量且高空间异质性的水冰[4]. 然而次表层水冰的分布特征 (丰度、埋深、空间异质性等) 仍存在较大争议, 亟须通过遥感探测手段获取高精度数据. 中子探测是一种有效的探测手段.

在类似月球这样的没有大气层的行星体上, 银河宇宙线 (GCR) 会不间断地轰击行星表面并通过散裂反应产生高能量的中子. 中子会通过与周边原子发生弹性或非弹性碰撞而损失能量, 直到变为热中子后被吸收或逃离月表. 氢具有与中子几乎相等的质量, 可以有效地通过弹性散射使中子能量损失[5–7]. 相关研究已证明, 由月表逃逸的超热中子能量范围为 $4\times10^{-4}$～500 keV, 对氢含量最敏感[5]. 通过中子遥感探测的手段研究行星体表面氢含量已在国际上得到成功应用[8–10].

中国计划于 2026 年发射嫦娥七号月球探测器, 开展 PSRs 附近的水冰探测是其主要科学目标之一. 嫦娥七号探测器由轨道器、着陆器、巡视器和微型飞行探测器组成[11,12]. 月球中子伽玛谱仪 (LNGS) 作为轨道器有效载荷, 服务于这一科学目标, 预计在轨运行 8 年. LNGS 通过测量极区附近中子通量与赤道附近干燥月壤情况下中子通量的比值来反演极区氢 (H) 含量分布, 因此有必要提前通过模拟等手段建立 H 含量与相对中子通量之间的关系, 以便根据中子计数直接在轨得出星下点附近的 H 含量.

Geant4 (Geometry and tracking 4) 是一个面向对象的开源工具包, 用于模拟粒子在物质中的输运过程, 由欧洲核子研究中心 (CERN) 主导开发, 广泛应用于高能物理、核物理、医学物理、空间辐射探测等领域.

本文通过在 Geant4 中构建 LNGS 质量模型, 模拟宇宙线轰击月球产生中子并最终在探测器内产生中子计数的全过程, 得到 LNGS 对月面超热中子计数与月壤含水量之间的关系. 通过中子束流标定实验验证探测器建模的准确性以及探测水分子含量的能力.

# 1 月球中子伽玛谱仪

月球中子伽玛谱仪 (LNGS) 通过观测月表中子通量与伽玛射线能谱, 实现对全月面 (特别是南极永久阴影区) 的次表层 (几十 cm 至 1 m 深) 水冰分布以及主量元素丰度的高精度测量. 这要求探测器具备获取 3 个能段 (快中子 700～5000 keV, 超热中子 $4\times10^{-4}$～700 keV, 热中子<0.4 eV) 中子通量的能力.

LNGS 由 8 个形状相同的中子探测单元拼成的立方体形探测器阵列和中间的伽玛射线探测器组成, 其结构如图 1(a) 所示. 中子探测单元采用的是 EJ254 型号掺硼塑料闪烁体, 其横截面是直角梯形, 晶体尺寸如图 1(b) 所示, 与直径 3.8 cm 的 R3886 A 型号光电管耦合. 三个方向的中子探测单元和光电管采用 0.63 mm 厚镉全包覆, 用以吸收热中子. 伽玛射线探测器采用的是直径 7.6 cm 溴化铈闪烁体与型号为 R6233 的光电管耦合. 中子探测器阵列同时作为反符合探测器, 抑制伽玛射线探测器中的带电粒子本底.

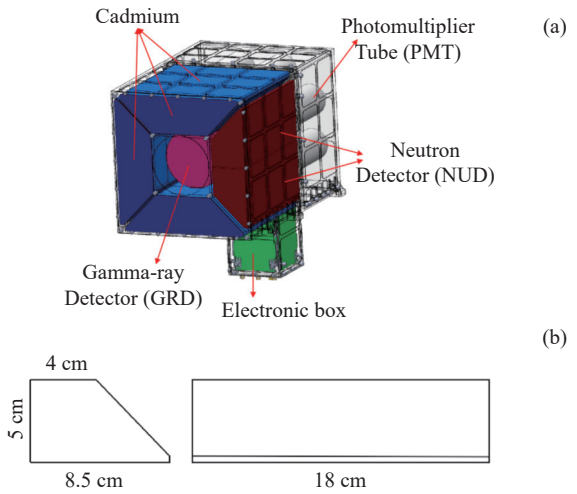


图 1 嫦娥七号月球中子伽玛谱仪结构 (a) 及 EJ254 晶体尺寸 (b)

Fig. 1 Schematic of the Chang'E-7 lunar neutron and gamma-ray spectrometer (a), and size of the EJ254 scintillator of a detector unit (b)

# 2 模拟方法

模拟在 Geant4 10.07.p02 版本上进行, 物理列表采用了 QGSP_BERT_HP.

## 2.1 质量建模

Geant4 可以自行构建一些规则的几何体. 但是考虑到 LNGS 内部结构的复杂性, 采用外部导入的方式构建探测器的几何模型. 利用在建模软件 SolidWorks 中构建的中子伽玛谱仪 CAD (计算机辅助设计) 模型, 根据材料的不同分别生成 stl 格式文件, 其中包含相对位置坐标信息以及模型的几何属性. CADMesh 是用于将 CAD 模型转换为计算网格的工具, 可以将复杂的 CAD 模型划分为许多四面体或六面体网格结构, 以便进行模拟. 在 Geant4 中只需要在头文件中加入 CADMesh.hh 文件可以实现复杂 CAD 模型的直接导入生成. 然后根据不同部分设置材料和密度, 即可完成 LNGS 在 Geant4 内的质量建模, 如图 2 所示.

模拟过程分为两步. 第一步, 得到月壤不同含水量情况下的逃逸中子能谱; 第二步, 用该能谱作为平面中子源在探测器下方 10 cm 处进行模拟, 得到 LNGS 对月面的中子探测单元超热中子计数率.

在 Geant4 中构建一个半径为 1738.1 km 的球体作为月球的模型, 材料设置为干燥月壤与不同含量水构成的混合物, 密度 1.6 g·cm$^{-3}$, 温度 273 K. 干燥月壤元素组成列于表 1[13]. 水的质量含量设置了 10 种情况, 分别为 0, 0.01%, 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20%.

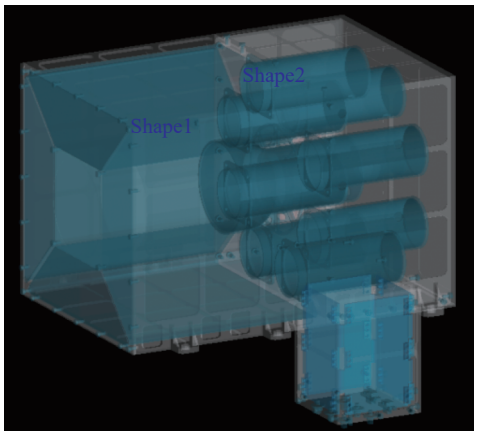


图 2 在 Geant4 内构建 LNGS 几何模型

Fig. 2 LNGS geometry model built within Geant4

### 2.2 宇宙射线源项设置

GCR 是一种来自太阳系外的各向同性背景高能带电粒子射线. GCR 通常由大约 89% 的质子、10% 的 α 粒子和 1% 的重核组成, 这里只考虑质子和 α 粒子. 在太阳系内, 日球层磁场强烈地影响着 GCR 的能量分布以及通量, 作用于月球表面的是调制后的 GCR 能谱.

原始的质子微分能谱模型计算公式如下[14]:

$$J_0(T) = 2.7\times10^3\frac{T^{1.12}}{\beta^2}\left(\frac{T+0.67}{1.67}\right)^{-3.93}. \tag{1}$$

式中, $T$ 表示宇宙线质子动能 (单位 GeV), $\beta$ 表示质子速度与光速之比. 对于 α 粒子认为其原始积分能谱与质子相同, 只需要乘以通量系数 0.11. 经过日球层磁场调制的 GCR 能谱模型计算公式为[13]

$$J(T) = J_0(T+\Phi)\frac{E^2-E_{\rm r}^2}{(E+\Phi)^2-E_{\rm r}^2}. \tag{2}$$

其中, $E$ 为粒子的总能量; $E_{\rm r}$ 为粒子的静态能量, 质子 $E_{\rm r}$ = 938 MeV, α 粒子 $E_{\rm r}$=3727 MeV. $\Phi$为粒子穿过日球层磁场时的能量损失, 其计算公式为

$$\Phi_i = e\varphi\frac{Z_i}{A_i}. \tag{3}$$

其中, $e$ 为带电粒子电荷量; $Z$ 与 $A$ 分别表示带电粒子的原子序数以及质量数, 下标 $i$ 代表宇宙线中的不同种粒子. 太阳调制势 $\varphi$ 随着太阳活动强度呈周期性变化, 大约 12 年为一个周期, 由于这里研究的是月球次表层不同水含量对中子通量的改变, 所以不考虑 $\varphi$ 的时变效应. 此处设为 2026 年前后的 $\varphi$ 值 650 MV. 需要注意的是, 式 (2) 中的 $T$ 与式 (1) 中并不相同, 式 (2) 中 $T$ 指的是经过调制后位于月球附近的宇宙线粒子动能.

根据式 (1)～(3) 计算得到的 GCR 微分能谱如图 3 所示. 其能量范围为 1～$10^6$ MeV.

模拟分两步进行. 首先模拟不同水含量月壤情况下的月表逃逸中子能谱. 在月球表面以上 1 m 处设置一个球面作为宇宙线粒子源. 根据图 3 中的能谱分别进行质子与 α 粒子的模拟. 为了保证生成的中子能谱统计量不低于 $1\times10^7$, 将输入的质子与 α 粒子数分别设置为 $1\times10^6$ 和 $1.12360\times10^5$. 出射粒子的角度分布服从余弦规律. 统计从月表逃逸的中子的能量形成不同含水量情况下月表逃逸中子能谱.

之后以逃逸中子能谱作为输入粒子源模拟不同情况下 LNGS 的响应. 在距 LNGS 对月面方向 10 cm 处设置一个边长为 1.1 m 的正方形平面源. 以 2.1 节提到的 10 种情况的能谱作为输入. 输入源的角度分布设置为各向同性. 球面坐标系下 $\theta$ 角范围为 0°～70°. 模拟输入事例数 $2\times10^9$. 中子能量覆盖 $1\times10^{-8}$～10 MeV. 统计不同含水量情况下 LNGS 对月面中子探测单元的中子俘获峰面积计数.

### 2.3 标定实验验证

探测器建模的准确性需要通过探测效率标定实验进行验证. 束流标定实验在中国散裂中子源

表 1 干燥月壤元素组分

Table 1 Dry lunar soil elemental composition

| 元素名称 | 含量占比 |
|---|---|
| O | 0.41739 |
| Na | 0.00292 |
| Mg | 0.06162 |
| Al | 0.06061 |
| Si | 0.19026 |
| K | $726.24\times10^{-6}$ |
| Ca | 0.07541 |
| Ti | 0.05144 |
| Cr | 0.00287 |
| Mn | 0.00176 |
| Fe | 0.13496 |
| Sm | $8.3342\times10^{-6}$ |
| Eu | $1.8164\times10^{-6}$ |
| Gd | $10.997\times10^{-6}$ |
| Th | $0.9449\times10^{-6}$ |

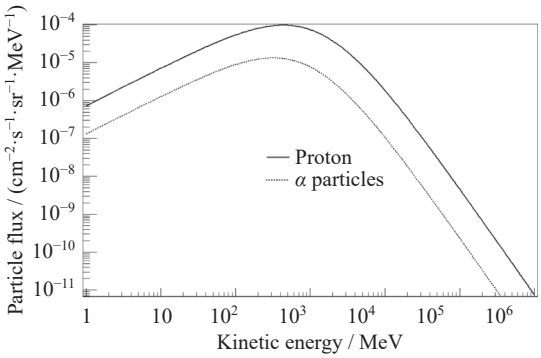


图 3 宇宙线质子与 α 粒子的微分能谱 ($\Phi$=650 MV)

Fig. 3 Differential energy spectra of cosmic ray protons and α particles ($\Phi$=650 MV)

(CSNS) 进行. 通过 1.6 GeV 质子束以 25 Hz 频率轰击厚钨靶, 产生能量覆盖 $3\times10^{-7}$～200 MeV 的高通量宽谱散裂中子. 散射靶后向产生的中子通过真空管道被引出, 成为反角白光中子源 (Back-n)[15]. 实验在 Back-n 的 2 号实验大厅 (距靶约 76 m) 进行, 实验期间束流功率为 160 kW. 中子束流采用低通量工作模式, 束斑直径 2 cm, 束流通量为 $7.36\times10^{4}$ $\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}$.

依据飞行时间法 (TOF), 即不同能量的中子直线飞行相同距离的时间不同, 可以分别研究不同能量中子的响应, 实验装置在研究能段的本征时间分辨率< 0.5%. 中子能量 $E_{\mathrm{n}}$ 计算公式如下:

$$v_{\mathrm{n}}=\frac{L}{t_{\mathrm{n}}-t_0}, \tag{4}$$

$$E_{\mathrm{n}}=(\gamma-1)\,m_{\mathrm{n}}c^2, \tag{5}$$

$$\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v_{\mathrm{n}}}{c}\right)^2}}. \tag{6}$$

式中, $L$ 为中子从靶到 LNGS 的飞行距离, 经测量其值为 76.9 m; $m_{\mathrm{n}}$ 为中子质量, 值为 $1.6749\times10^{-27}$ kg; $t_{\mathrm{n}}$ 为中子产生时间, 通过测量 γ-flash 得到, 值为 3075.8±6.7 ns[16]; $c$ 为光速.

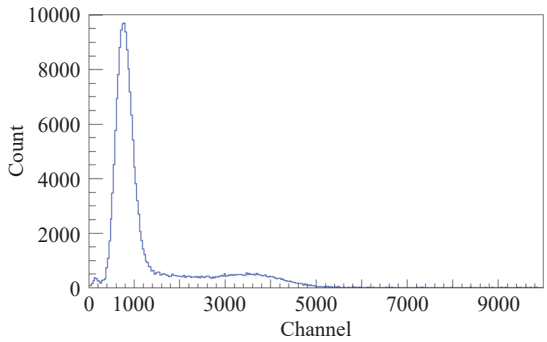


图 4 中子能量窗口为 1～1.258 eV 的脉冲幅度谱 (已扣除本底)

Fig. 4 Pulse amplitude spectra with a neutron energy window of 1～1.258 eV (background subtracted)

**表 2 水含量实验数据**

**Table 2 Science data of the water content experiment**

| | 实验 | 模拟 | 能量范围/keV |
|---|---|---|---|
| 1层土 | 1 | 1 | 12.6～25.1 |
| 1层土+1层水 | 0.3513±0.00466 | 0.3389±0.039 | 39.8～63.1 |
| 1层土+2层水 | 0.3103±0.00438 | 0.3086±0.031 | 100～199.5 |

在标定实验中, 统计中子俘获峰面积作为有效计数. 图 4 给出的是中子能量窗口为 1～1.258 eV 的脉冲幅度谱. 750 道左右的单能峰代表中子俘获特征峰.

中子探测效率 $\eta$ 计算公式为

$$\eta=\frac{C}{tFS}. \tag{7}$$

式中, $C$ 为有效中子计数, 通过对中子俘获峰进行高斯拟合并取 $\pm3\sigma$ 范围内的计数得到; $t$ 为测量时间, 值为 3600 s; $F$ 为束流通量, 由实验装置方提供[16]; $S$ 为束斑面积, 值为 3.1416 $\mathrm{cm^2}$.

计算得到中子探测单元 0.4～1000 eV 的探测效率曲线, 并与模拟结果进行比对, 结果如图 5 所示. 残

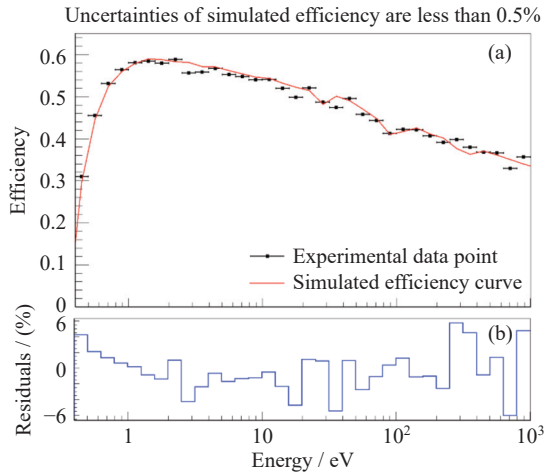


图 5 0.4～1000 eV 中子模拟效率曲线与实验数据点 (a) 及实验数据与模拟曲线之间的残差 (b)

Fig. 5 0.4～1000 eV neutron simulation efficiency curve with experimental data points (a), and the residual plot between the experimental data and the simulated curves (b)

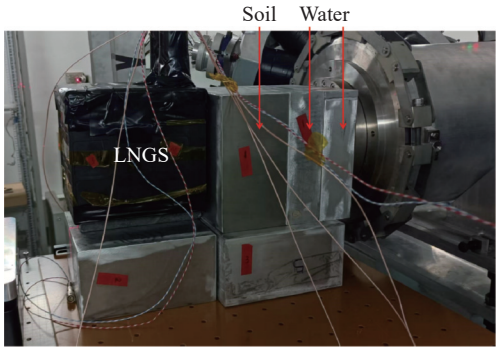


图 6 1 层土和 2 层水情况下的实验现场

Fig. 6 Diagram of the experimental site under 1 layer of soil and 2 layers of water

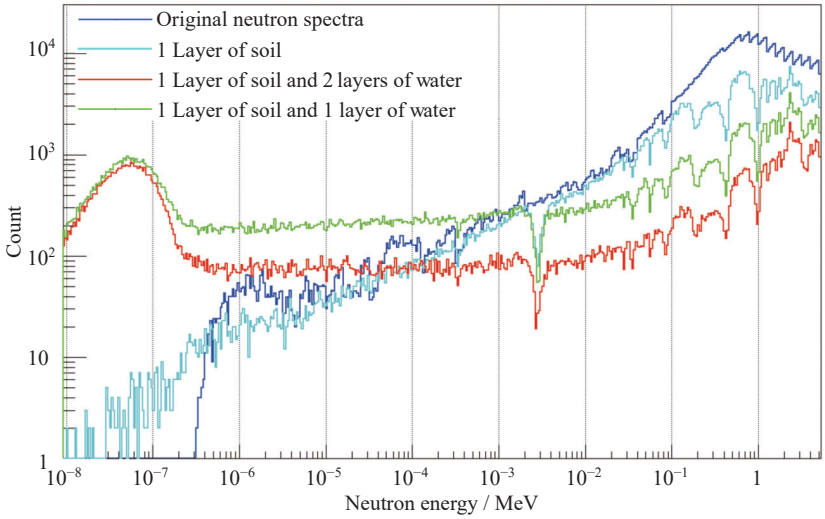


图 7　模拟得到的中子束流穿过不同材料后的能谱

Fig. 7　Energy spectra of neutron beams after passing through different materials obtained by simulation

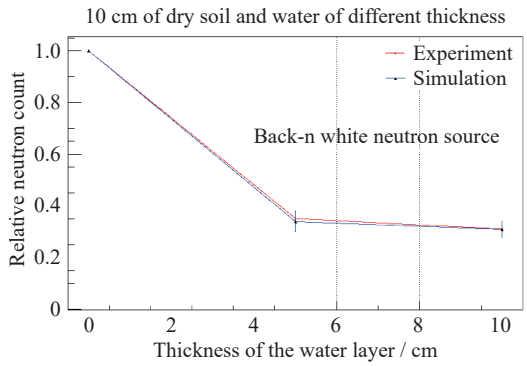


图 8　实验与模拟得到的超热中子计数率随水层厚度的变化

Fig. 8　Relationship between the count rates of epithermal neutrons obtained by experiments and simulations and the thickness of the water layer

差图显示相对误差小于 6%, 这表明模拟效率与实验数据之间的吻合效果很好, 进一步证明了 Geant4 内质量建模的准确性, 可以用于仿真工作.

## 3　水含量实验

由于 LNGS 通过测量中子通量的变化来反演月表水含量, 有必要在地面验证这一能力. 利用反角白光中子束流结合人为设置的土层和水层来研究中子探测单元超热中子计数与水含量之间的关系.

在探测器与束流之间构建土壤与水的分层结构. 土层由烘干土壤制成, 厚度 10 cm, 装于铝箱中. 水层厚度 5 cm, 同样装在铝箱中. 铝箱壁厚 2 mm, 且可以完全覆盖 LNGS 的对月面. 实验包括三种实验情况 (见表 2). 图 6 显示的是 1 层土壤和 2 层水情况下的实验现场. 中子束穿过不同厚度的土层和水层后, 能谱结构会有明显变化, 通过模拟可以得到中子束流穿过不同材料后能谱结构的变化情况 (见图 7).

通过图 7 可以看到随着水层的增加, 能谱结构明显软化, 快中子以及 1 keV 以上的超热中子的通量大幅下降, 而这部分中子一部分经过弹性散射离开了实验区域, 另一部分被显著慢化到低能超热中子以及热中子区域. 由于束流实验是通过 TOF 法确定入射中子事例的中子能量, 在束流出口处的土层和水层会改变中子事例的飞行时间, 因此在本实验中通过 TOF 计算得到的中子能量并不准确, 所以无法在进行不同实验情况下, 用同一能段中子通量比较. 因此本实验采用不同能段中子计数结合模拟完成. 实验统计面向束流方向的两个中子探测单元的有效计数之和, 并用 1 层土情况下的有效计数做了归一化处理.

实验与模拟的结果对比如图 8 所示. 实验误差来源主要是特征峰计数的统计误差, 而模拟结果的误差则指的是蒙卡模拟的系统误差. 可以看到随着水层厚度的增加, LNGS 测量到了超热中子通量受到明显的抑制, 并且实验与模拟结果比对良好, 证明已完成的蒙卡建模可以用于进一步的月表水含量反演规律的模拟.

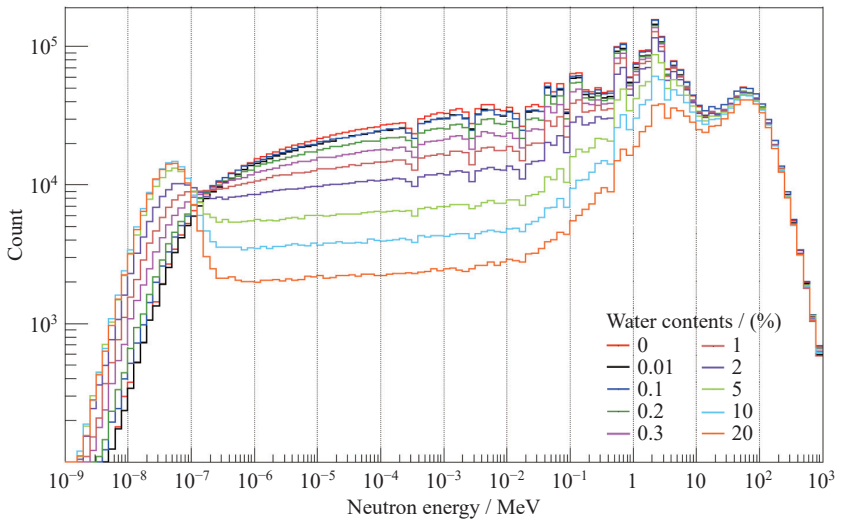


图 9 模拟月表不同含水量情况下的中子逃逸能谱

Fig. 9 Neutron leakage spectra of the lunar surface under different water contents

## 4 结果与分析

分别模拟 10 种水含量情况下的月表逃逸中子能谱 (见图 9), 可以看到在 $2\times10^{-7}$～10 MeV 能段中子通量随着水含量的上升而降低, 而其中 $4\times10^{-4}$～700 keV 超热中子能段通量下降最显著.

根据 LNGS 对月面中子探测单元的超热中子有效计数之和, 可以得到相对于干燥区计数的相对值与月壤水含量之间的关系. 针对这一关系, Feldmann 等[6] 基于 ONEDANT 代码模拟了对于不同含水量的铁制斜长岩 (FAN), LP 上搭载的中子谱仪测量到的中子计数率, 并通过公式建立起了关系, 公式如下:

$$\frac{c_{\rm epi}(w)}{c_{\rm epi}(0)}=\frac{1}{1+61w}. \tag{8}$$

式中, $w$ 为月壤的含水量百分比. Lawrence 等[5] 对模型进行了优化, 基于 MCNPX 模拟了从 GCR 轰击月球到 LP 上的中子谱仪探测到中子计数的整个过程, 并使用三个参数进行拟合, 有

$$\frac{c_{\rm epi}(w)}{c_{\rm epi}(0)}=\frac{1.01}{1+28.28w^{0.87}}. \tag{9}$$

式 (9) 在水质量含量 0.01%～100% 范围内实现了很好的拟合, 并且与 Feldmann 模型存在差异, 二者在低水含量时符合较好, 随着水含量增加, 差异变大. 本文采用 Lawrence 模型进行模拟结果的拟合, 结果如图 10 所示. 利用非线性最小二乘法计算拟合优度, $R^2$=0.9993. 本文给出的模型与 Lawrence 模型的参数值存在细微差别, 导致这一现象的原因包括: 本文采用了与之不同的仿真软件, 这会造成结果存在系统性的偏差; 采用了不同的月壤组分模型, 这会导致不同水含量下的逃逸中子能谱及通量存在细微的差别; LNGS 与 LP 的中子谱仪探测器结构不同, 后者采用的是氦三正比计数器, 二者测量的超热中子能段范围不同, LNGS 可以探测到 100 keV 以上的超热中子, 而 LP 对于 100 keV 以上中子的探测效率极低, 这也会对结果造成影响.

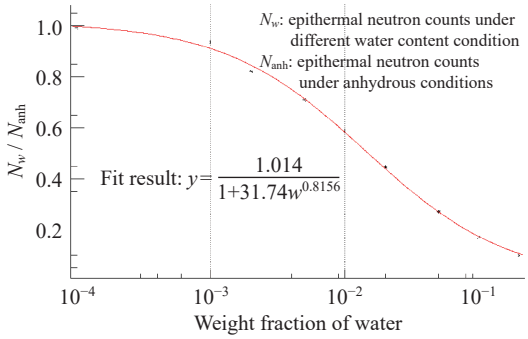


图 10 LNGS 超热中子计数与水含量之间的关系

Fig. 10 Relationship between the LNGS epithermal neutron counts and water contents

## 5 结论

基于 Geant4 工具包构建了 LNGS 的精细模型, 并通过 CSNS 的反角白光中子束流标定实验验证了

模型的准确性. 实验结果表明, 模拟效率与实测数据吻合良好, 相对误差小于 6%, 证明了建模的可靠性. 在此基础上, 通过模拟不同水质量含量 (0.01%～20%) 月壤中 GCR 诱发的中子能谱及 LNGS 的响应, 建立了 LNGS 超热中子计数与月表水含量之间的定量反演关系. 该关系符合修正的 Lawrence 模型 ($R^2$=0.9993), 表明超热中子 ($4\times10^{-4}$～700 keV) 计数随氢含量增加呈显著下降趋势. 这一关系作为适用于 LNGS 的水含量反演模型, 将用于未来卫星在轨数据分析.

本研究为嫦娥七号在轨数据的水含量反演提供了可靠的理论依据和模型支持. 然而, 仍需进一步讨论若干问题: 首先, 月表元素组成的空间异质性可能对中子通量产生影响, 未来需结合伽玛谱仪数据进行多信息融合反演; 其次, 本文假设水冰均匀分布于次表层, 实际上水冰可能以分层或团块形式存在, 其埋深与分布形态对中子探测的影响尚未充分评估; 此外, GCR 能谱受太阳活动调制, 长期在轨观测需考虑太阳周期效应对反演结果的影响.

未来工作将聚焦于在轨数据与模拟结果的交叉验证, 优化模型以提升反演精度, 并开展水冰埋深与分层结构的敏感性研究, 为月球极区水冰资源的原位利用提供更全面的技术支撑.

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突.

## 参考文献


[1] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, *et al.* Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 463-468

[2] LI C L, LIU D W, LIU B, *et al.* Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials[J]. *Nature*, 2019, **569**(7756): 378-382

[3] WATSON K, MURRAY B C, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, **66**(9): 3033-3045

[4] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, *et al.* Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(36): 8907-8912

[5] LAWRENCE D J, FELDMAN W C, ELPHIC R C, *et al.* Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: implications for hydrogen deposits at the lunar poles[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, **111**(E8): E08001

[6] 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

[7] 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

[8] FELDMAN W C, AHOLA K, BARRACLOUGH B L, *et al.* Gamma ray, neutron, and alpha particle spectrometers for the Lunar Prospector mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2004, **109**(E7): E07S06

[9] FELDMAN W C, PRETTYMAN T H, TOKAR R L, *et al.* Fast neutron flux spectrum aboard Mars Odyssey during cruise[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2002, 107(A6): SSH 2-1-SSH 2-9

[10] PRETTYMAN T H, FELDMAN W C, MCSWEEN JR H Y, *et al.* Dawn's gamma ray and neutron detector[J]. *Space Science Reviews*, 2011, **163**(1): 371-459

[11] YU Houman, RAO Wei, ZHANG Yiyuan, *et al.* Mission analysis and spacecraft design of Chang'E-7[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, **10**(6): 567-576 (余后满, 饶炜, 张益源, 等. "嫦娥七号"探测器任务综述 [J]. 深空探测学报, 2023, **10**(6): 567-576)

[12] WANG C, JIA Y Z, XUE C B, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission[J]. *National Science Review*, 2024, **11**(2): nwad329

[13] VOS E E, POTGIETER M S. New modeling of galactic proton modulation during the minimum of solar cycle 23/24[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, **815**(2): 119

[14] MESICK K E, FELDMAN W C, COUPLAND D D S, *et al.* Benchmarking Geant4 for simulating galactic cosmic ray interactions within planetary bodies[J]. *Earth and Space Science*, 2018, **5**(7): 324-338

[15] TANG J Y, AN Q, BAI J B, *et al.* Back-n white neutron source at CSNS and its applications[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, **32**(1): 11

[16] CHEN Y H, LUAN G Y, BAO J, *et al.* Neutron energy spectrum measurement of the back-n white neutron source at CSNS[J]. *The European Physical Journal A*, 2019, **55**(7): 115


## 作者简介

**陈冠宇** 男, 1996 年 4 月出生于黑龙江省哈尔滨市, 现为中国科学院紫金山天文台在读博士研究生. 主要研究方向为中子伽马射线探测技术与探测器标定方法.

E-mail: chengy@pmo.ac.cn

**马 涛 (通信作者)** 男, 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文实验室正高级工程师, 主要研究方向空间高能粒子探测技术.

E-mail: matao@pmo.ac.cn