

王海仙, 张勇勇, 肖建华, 陈涛, 马世军, 康文蓉, 吴绍雄. 移动式宇宙射线中子技术在荒漠光伏电站土壤水分监测中的适用性[J]. 土壤学报, 2026,

WANG Haixian, ZHANG Yongyong, XIAO Jianhua, CHEN Tao, MA Shijun, KANG Wenrong, WU Shaoxiong. Applicability of Mobile Cosmic-Ray Neutron Sensing for Mesoscale Soil Moisture Monitoring in Desert Photovoltaic Power Stations[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

移动式宇宙射线中子技术在荒漠光伏电站土壤水分监测中的适用性*

王海仙^{1,2}, 张勇勇^{1,2†}, 肖建华^{1,2}, 陈涛³, 马世军⁴, 康文蓉^{1,2}, 吴绍雄^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院/中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站/干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室/山水林田湖草沙系统治理国家林业和草原局重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国华电集团甘肃能源有限公司, 兰州 730000; 4. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要: 为评估宇宙射线中子技术 (Cosmic-Ray Neutron Sensing, CRNS) 在荒漠光伏电站中尺度土壤水监测中的适用性, 选取甘肃省张掖市三个荒漠光伏电站及其邻近对照区, 结合蒙特卡洛中子传输模型 (Monte Carlo N-Particle, MCNPX) 与移动式 CRNS 野外观测, 采用 N_0 参数法反演土壤水, 基于加权函数量化空间代表性。结果表明: (1) 光伏组件对近地表中子通量的干扰可忽略; MCNPX 模拟结果显示, 有/无光伏板条件下总中子通量相对差异约 1.27%, 快中子段 (0.5~1000 eV) 通量相对差异为 0.12%; 此外, CRNS 实测结果显示有/无光伏板条件下中子强度无显著差异 ($P>0.05$); (2) CRNS 反演值与烘干法实测值一致 ($R^2=0.73$, $RMSE=0.01\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$), 证实移动式 CRNS 可准确监测荒漠光伏电站土壤水分; (3) CRNS 有效探测深度和水平半径范围分别为 21~49 cm 和 123~151 m, 光伏区平均有效探测深度 (32 cm) 略小于对照区 (39 cm)。结果验证移动式 CRNS 在荒漠光伏电站中尺度土壤水监测的可行性, 为干旱区光伏电站土壤水监测提供新技术。

关键词: 宇宙射线中子技术; 中尺度监测; 光伏生态水文; MCNPX 模拟

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

Applicability of Mobile Cosmic-Ray Neutron Sensing for Mesoscale Soil Moisture Monitoring in Desert Photovoltaic Power Stations

WANG Haixian^{1,2}, ZHANG Yongyong^{1,2†}, XIAO Jianhua^{1,2}, CHEN Tao³, MA Shijun⁴, KANG Wenrong^{1,2}, WU Shaoxiong^{1,2}

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences/ Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network/ State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands/ Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on "Mountain-River-Forest-Farmland-Lake-Grassland-Desert System Governance", Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huadian Gansu Energy Corporation Limited, Lanzhou 730000, China; 4. POWERCHINA Beijing Engineering Corporation

* 甘肃省科技计划项目 (25JRRA493)、中国华电集团有限公司重点科技项目 (CHDKJ23-04-01-61) 和干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室创新团队 (E4520102) 资助 Supported by the Gansu Provincial Science and Technology Program (No. 25JRRA493), the Key Science and Technology Project of China Huadian Corporation Ltd. (No. CHDKJ23-04-01-61), and the Innovation Team of the State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands (No. E4520102).

† 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyongyong@lzb.ac.cn

作者简介: 王海仙 (2002-), 女, 宁夏盐池人, 硕士研究生, 主要从事干旱区土壤水文研究。E-mail: wanghaixian23@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2025-08-13; 收到修改稿日期: 2026-04-17; 网络首发日期 (www.cnki.net):

Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to evaluate the applicability of cosmic-ray neutron sensing (CRNS) for mesoscale soil moisture monitoring in desert photovoltaic (PV) power stations. 【Method】 Three desert PV stations and adjacent control areas in Zhangye, Gansu Province, China, were investigated by integrating Monte Carlo N-Particle Transport (MCNPX) simulations with mobile CRNS field observations. Soil moisture was inverted using the N_0 parameter method, and spatial representativeness was quantified through neutron weighting functions.

【Result】 (1) PV panels exerted negligible interference on near-surface neutron flux. MCNPX simulations revealed a 1.27% relative difference in total neutron flux and a 0.12% difference in the fast neutron range (0.5~1000 eV) between panel-present and panel-absent scenarios. Moreover, mobile CRNS field measurements showed no statistically significant difference ($P>0.05$) in neutron intensity under panel-present and panel-absent conditions. (2) CRNS-inverted values exhibited strong agreement with oven-dried measurements ($R^2 = 0.73$, RMSE = 0.01 g g⁻¹), confirming the accuracy of mobile CRNS for soil moisture retrieval in desert PV environments. (3) The effective vertical detection depth and horizontal footprint radius of CRNS were estimated to range from approximately 21~49 cm and 123~151 m, respectively. The mean detection depth within the PV areas (32 cm) was slightly lower than that in the control areas (39 cm). 【Conclusion】 Mobile CRNS provides a technically feasible solution for non-invasive, mesoscale soil moisture monitoring in desert PV power stations, offering an innovative approach for hydrological assessment in arid-region solar energy installations.

Key words: Cosmic-ray neutron sensing (CRNS); Mesoscale monitoring; Photovoltaic ecohydrology; MCNPX simulation

全球能源结构加速向低碳转型,太阳能光伏发电作为最具发展潜力的清洁能源之一,正在全球范围内迅速发展^[1]。我国西北荒漠区依托充足的太阳能资源和广阔的土地资源,已成为大规模光伏电站建设的核心区域^[2-3]。然而,荒漠生态系统水分匮乏且植被稀疏,对外界扰动高度敏感^[4-5]。土壤水分作为该区域生态系统结构与功能的核心限制因子^[6],直接调控地表径流、植被根系吸水和能量交换等关键过程^[7]。因此,准确掌握光伏电站区域土壤水分时空动态,对评估光伏工程生态效应和指导植被恢复等具有重要意义。

光伏电站在建设和运行过程中改变地表反照率和粗糙度,影响地表能量平衡和水分循环,引发微气候和生态环境变化^[8]。研究表明,光伏板下的微环境与对照区存在显著差异,但现有研究多集中于气温、风速等气象因素,针对土壤水分的系统研究相对较少^[9-11]。Wu 等^[12]基于数值模拟发现甘肃戈壁光伏电站板下和板前土壤水分较对照区显著增加 (59.8%~113.6%),主要归因于板下阴影区抑制蒸发;而 Devitt 等^[13]在美国莫哈韦沙漠光伏电站的实地观测发现,板下土壤水分显著下降,可能与板下土壤温度升高导致蒸发增强有关。此外,光伏组件还会改变降雨再分配格局,导致不同位置的降水输入量不同,产生土壤水分空间异质性^[14]。然而,目前关于光伏电站土壤水分的研究多集中于小尺度(单个光伏板)或全球尺度,难以反映整个电站尺度(即中尺度)的土壤水分空间分布特征。传统点测方法,如烘干法、时域反射法(TDR)和频域反射法(FDR)虽测量精度高,但其空间代表性有限,难以捕捉电站尺度的土壤水分变化^[15];遥感方法虽覆盖范围广,但受限于探测深度(0~5 cm)和地表粗糙度等干扰,难以反映根区土壤水分状况^[16-19]。这些监测手段的局限性明显制约了对电站尺度土壤水文过程的认识。

宇宙射线中子技术(CRNS)在中尺度土壤水分监测中具有良好的应用前景。该方法通过探测近地表快中子(0.5~1000 eV)的计数变化,实现对数百米半径范围内和数十厘米深度土壤水分的实时监测^[20-21],已在农田、草地、荒漠和绿洲等多种生态系统中得到验证^[22-27]。在理论模拟方面,基于 MCNPX 或 URANOS 模型的研究分析了中子在大气-土壤界面的传输机制,证实地表快中子通量与氢含量呈负相关,且受土壤湿度、密度等因素显著影响^[28-29]。为提高反演精度,已提出多种校正模型以削弱大气压强、空气湿度、入射中子强度、植被覆盖、土壤有机质和晶格水等生物或非生物因子的影响^[30-33]。例如,引入 NDVI 进行植被生物

量校正可显著提升 CRNS 的反演精度 (R^2 由 0.68 增至 0.85, RMSE 由 $0.09 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 降至 $0.03 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) [34]; Schrön 等[33]采用结构校正模型消除道路等人工构筑物对 CRNS 测量的影响,将误差降低至可忽略水平。然而,目前尚缺乏针对光伏组件(如铝合金框架和钢化玻璃等)对近地表中子通量可能产生的遮挡、散射和吸收效应的系统研究。

基于上述背景与问题,选取甘肃省张掖市临泽县和民乐县三个荒漠光伏电站及其邻近对照区,结合蒙特卡洛中子输运模拟(MCNPX)与移动式 CRNS 实测,系统评估光伏组件对 中子通量分布及能谱特征的影响;验证 CRNS 在光伏场景下的土壤水分反演精度与空间代表性。研究旨在拓展 CRNS 技术在光伏电站场景下的应用,为荒漠电站尺度土壤水分监测和区域水资源管理提供理论依据和技术手段。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与试验设计

研究区位于甘肃省张掖市(图 1),属于温带大陆性干旱气候区。该地区年均气温约 7.6°C , 年均降水量为 128.5 mm , 年均蒸发量为 2010 mm [35]。天然植被以超旱生小灌木(红砂、珍珠柴)和多年生草本植物(矮生蒿草、冰草、西北针茅等)为主[36], 土壤类型以贫瘠的风沙土、灰棕荒漠土为主[37](表 1)。选择临泽县板桥镇、民乐县南古镇和民乐县六坝镇共 3 个光伏电站及其邻近自然荒漠对照区作为试验区(图 1)。光伏电站均采用固定倾角(35°)和集中式排列布局。对照区布设在与光伏区相邻、地形地貌、土壤类型及初始植被状况基本一致且未受光伏工程扰动的自然荒漠区域。光伏区与对照区的植被盖度均维持在 $1\%\sim 5\%$ 。

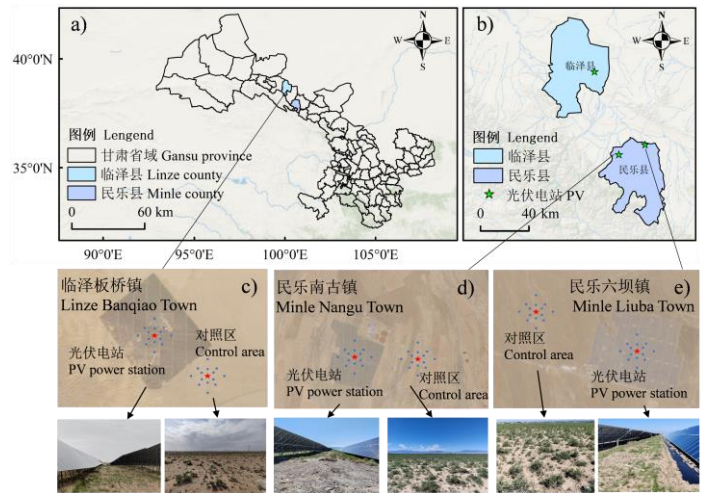


图 1 研究区位置 (a~b) 和样地分布示意图 (c~e)

Fig. 1 Location of the study area (a~b) and distribution of sampling sites (c~e)

试验分别于 2025 年 4 月和 7 月开展。使用移动式宇宙射线中子传感器(型号: RV-01, Hydroinnova LLC, Albuquerque, NM, USA)进行快中子计数测量(图 2)。该设备内置 16 根中子计数管,中子计数频率为 30 s^{-1} 。观测期间,同步采用烘干法实测土壤水分、容重以及土壤有机质和晶格水含量。每次试验在 3 个光伏电站及其对照区共布设 6 个 $200 \text{ m}\times 200 \text{ m}$ 的大样地(图 1)。每个样地以 CRNS 为圆心,设置半径分别为 5 m、50 m、100 m 三个同心圆采样带,沿不同方位布设土壤剖面采样点。具体采样方案为:在 5 m 处以正北为起点,间隔 60° 布置 6 个剖面点;在 50 m 处以 45° 为起点,间隔 90° 布置 4 个剖面点;在 100 m 处以 0° 为起点,间隔 90° 布置 4 个剖面点;共计 14 个剖面点(图 2)。在每个土壤剖面点按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 深度分层取环刀样,每个剖面点 3 层,共采集 42 份土

样。由于 2025 年 7 月试验期间在板桥镇光伏区内开展安全检查，未能在该站点开展观测，因此该时段数据缺失。

表 1 光伏电站及其对照区基本概况

Table 1 Basic information of photovoltaic power stations and their control areas

样地名称 Site name	纬度 Latitude /°	经度 Longitude /°	海拔 Elevation /m	降雨量 Precipitation /mm	土壤				
					深度 Soil depth /cm	砂粒 Sand /%	粉粒 Silt /%	黏粒 Clay /%	质地 Soil texture
板桥镇对照					10	75.89	23.55	0.56	砂壤土 ^①
Banqiao Town	39.31	100.37	1468	118	20	52.03	46.21	1.76	壤土 ^③
Control					30	52.96	45.34	1.69	壤土 ^③
板桥镇光伏					10	85.14	14.42	0.43	砂壤土 ^①
Banqiao Town	39.30	100.36	1478	118	20	21.38	77.33	1.29	粉壤土 ^②
PV					30	64.76	34.51	0.73	砂壤土 ^①
南古镇对照					10	41.85	56.81	1.34	粉壤土 ^②
Nangu Town	38.68	100.57	1719	300	20	41.28	57.06	1.67	粉壤土 ^②
Control					30	43.62	54.50	1.88	粉壤土 ^②
南古镇光伏					10	49.85	48.75	1.40	壤土 ^③
Nangu Town	38.68	100.58	1684	300	20	72.66	26.73	0.61	砂壤土 ^①
PV					30	74.68	24.80	0.52	砂壤土 ^①
六坝镇对照					10	81.21	17.80	0.99	砂壤土 ^①
Liuba Town	38.76	100.80	1631	230	20	82.49	17.02	0.49	砂壤土 ^①
Control					30	73.90	22.95	3.14	砂壤土 ^①
六坝镇光伏					10	78.11	13.42	8.47	砂壤土 ^①
Liuba Town	38.75	100.83	1652	230	20	88.94	10.48	0.59	砂壤土 ^①
PV					30	77.22	22.02	0.76	砂壤土 ^①

注：“PV”与“Control”分别代表光伏电站样地及其邻近的自然荒漠对照样地。下同。Note: “PV” and “Control” denote the photovoltaic power station site and its adjacent natural desert control site, respectively. The same below. ①Sandy loam; ②Silt loam; ③Loam.

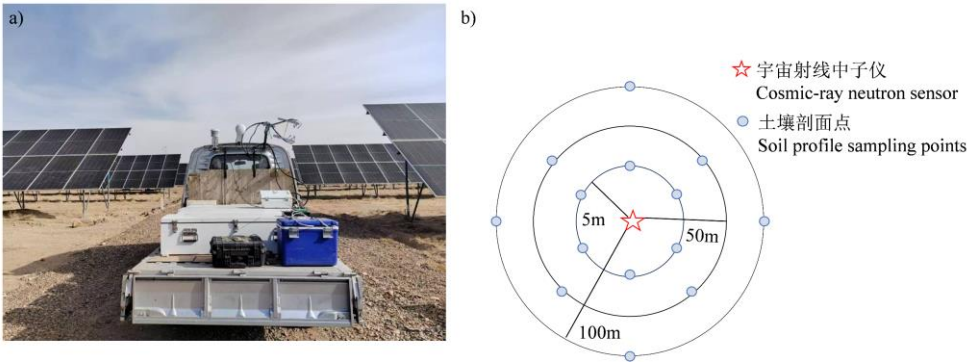


图 2 移动式宇宙射线中子仪 (a) 及土壤剖面点分布图 (b)

Fig. 2 Distribution map of the mobile cosmic-ray neutron sensor (a) and soil profile sampling points (b)

1.2 MCNPX 中子运输模拟

为评估光伏组件对 CRNS 探测的潜在影响, 基于 MCNPX 软件构建包含大气层、土壤层、探测器和光伏结构的三维中子运输模型 (图 3)。模拟区域范围为 2000 m×2000 m×1000 m 的大气空间和 4 m 厚的壤砂土层。土壤和空气的密度及成分参数根据实际情况设定, 土壤界面数据参照 ENDF/B-VII.1 核素截面^[38]。模拟源为 2 m 高空垂直下射的宇宙射线次级中子, 其高能谱采用 Sato 和 Niita^[39]提出的大气二次中子模型, 空间与方向分布假定均匀, 以模拟垂直入射特征。探测器设置为 1 m 厚的矩形体, 用于记录中子通量和能谱信息。光伏组件模型基于实地测量构建, 光伏板距地面 4 m、厚度 0.25 m, 由钢化玻璃、EVA 膜、硅基电池片及铝合金边框等构成。通过在模型中加入光伏板结构, 模拟其对中子散射和吸收的影响。每组模拟运行 1×10^8 个粒子以提高统计精度^[40-41]。通过对比有光伏板与无光伏板情景下探测器处中子通量的差异, 评估光伏组件对 CRNS 响应的影响。

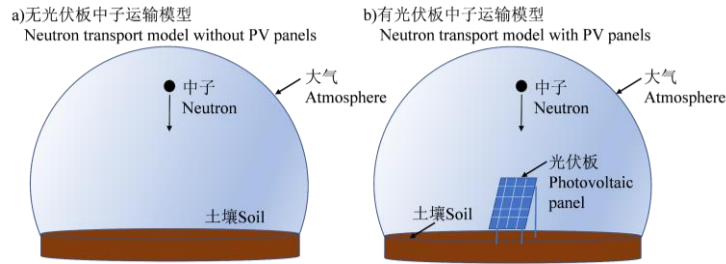


图 3 MCNPX 模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the MCNPX model

1.3 中子强度校正与水分反演方法

CRNS 观测的原始中子强度 (N_{raw}) 受大气压强、空气湿度和入射中子强度等因素影响。研究采用 Desilets 等^[28]和 Köhli 等^[21]提出的标准校正流程, 对原始中子强度进行修正, 得到校正后的中子强度 (N), 其计算公式如下:

$$N = N_{\text{raw}} \times f_p \times f_{\text{RH}} \times f_{\text{IRc}} \quad (1)$$

式中, f_p 、 f_{RH} 、 f_{IRc} 分别为大气压强、空气湿度和入射中子强度校正系数, 可通过式 (2) ~ 式 (6) 计算:

(1) 大气压强校正。

$$f_p = \exp\left(\frac{P_0 - P}{L}\right) \quad (2)$$

$$L = \frac{x_2 - x_1}{\int_{x_1}^{x_2} \left[n(1 + \exp(-\delta R_c^k))^{-1} + (b_0 + b_1 R_c + b_1 R_c^2)x + (b_3 + b_4 R_c + b_5 R_c^2)x^2 + (b_6 + b_7 R_c + b_8 R_c^2)x^3 \right] dx } \quad (3)$$

式中, P 为观测时大气压强 (hPa); P_0 为标准大气压强 (hPa); L 为高能中子质量衰减长度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); x 为大气质量深度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); x_1 为观测时的大气质量深度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), x_2 为标准条件下的大气质量深度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); R_c 为截止刚度 (GV); n 、 δ 、 k 和 $b_0 \sim b_8$ 为常数^[42]。

(2) 空气湿度校正。

$$f_{\text{RH}} = 1 + 0.0054 \times (\text{RH} - \text{RH}_0) \quad (4)$$

式中, RH 为试验时绝对空气湿度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); RH_0 为参考绝对空气湿度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。

(3) 入射中子强度校正。

$$f_{\text{IRc}} = \left[\left(\frac{I_m}{I_0} - 1 \right) \times (1 - 0.075 \times (R_c - R_{\text{cMXCO}})) + 1 \right]^{-1} \quad (5)$$

式中, I_m 为试验期间墨西哥中子观测站点计算率 (选择与研究区截止刚度相近的中子观测站

点); I_0 为参考中子计数率 (<https://www.nmdb.eu>); R_c 为试验期间样地截止刚度; R_{cMXCO} 为墨西哥观测站点截止刚度。

(4) 土壤水分反演方法。

通过以上校正后的 CRNS 中子强度 (N), 采用广泛应用的 N_0 参数法反演土壤水分:

$$\theta_{CRNS} = \left(\frac{a_0}{\frac{N}{N_0} - a_1} - a_2 \right) \quad (6)$$

式中, θ_{CRNS} 为宇宙射线中子仪测得的土壤水分 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); N 为校正后中子强度 ($\text{counts} \cdot \text{min}^{-1}$); N_0 为完全干燥条件下中子强度 ($\text{counts} \cdot \text{min}^{-1}$); $a_0 \sim a_2$ 常数分别为 0.080 8、0.372、0.115。

(5) 土壤水分加权。

为匹配 CRNS 的空间探测权重, 对观测数据进行垂向和径向加权处理。垂向有效探测深度 (D_{86}) 可根据以下公式计算:

$$D_{86} = \rho_b^{-1} \times \left(p_0 + p_1 (p_2 + e^{-r/100}) \times \frac{p_3 + \theta}{p_4 + \theta} \right) \quad (7)$$

垂向权重函数为:

$$W_z = e^{-2z/D_{86}} \quad (8)$$

式中, D_{86} 为宇宙射线中子仪有效探测深度 (cm); W_z 为对应土壤深度的权重函数; r 表示采样点距探测器的距离 (m); θ 为场地土壤水分 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); ρ_b 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $p_0 \sim p_4$ 为常数^[30]。

径向有效探测半径 R_{86} 和径向权重函数 W_r 由 Köhli 等^[21]给出的经验公式计算:

$$\int_0^{R_{86}} W_r dx = (1 - e^{-2}) \int_0^\infty W_r dx \quad (9)$$

$$W_r = \begin{cases} F_1 e^{-F_2 r} + F_3 e^{-F_4 r}, & 0.5 < r \leq 50 \text{ m} \\ F_5 e^{-F_6 r} + F_7 e^{-F_8 r}, & 50 < r \leq 600 \text{ m} \end{cases} \quad (10)$$

式中, W_r 为对应径向加权函数; R_{86} 为宇宙射线中子仪观测的平均水平观测范围; $F_1 \sim F_8$ 为经验函数^[43]。

1.4 数据处理

对实测中子数进行质量控制, 剔除采样点间隔小于 30 s 的异常值。基于式 (1) ~ 式 (5) 对原始中子强度 (N_{raw}) 进行校正, 得到校正后的中子强度 (N)。校正过程中, 利用试验所得的土壤水分反演各样地的 N_0 值; 随后通过式 (6) 将校正后的中子强度 (N) 转化成土壤水分。数据分析与可视化采用 PyCharm 2.7 进行。利用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 评价 CRNS 反演结果的拟合优度和精度。

2 结 果

2.1 光伏板对中子场影响的模拟与实测

MCNPX 模拟结果显示, 在模拟能量范围内 ($10^{-7} \sim 10^4$), 有光伏板与无光伏板两种情境下的中子能谱趋势基本一致 (图 4)。与无光伏板情景相比, 有光伏板情境下总中子通量由 $1.607 \times 10^{-7} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $1.627 \times 10^{-7} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对差异约为 1.27%, 在 CRNS 最敏感的

快中子能区（0.5~1000 eV），两种情境下中子通量相对差异为 0.12%（表 2）。结果表明，光伏板结构对近地表快中子的散射和吸收影响极其微弱，理论上不会对 CRNS 测量产生显著干扰。

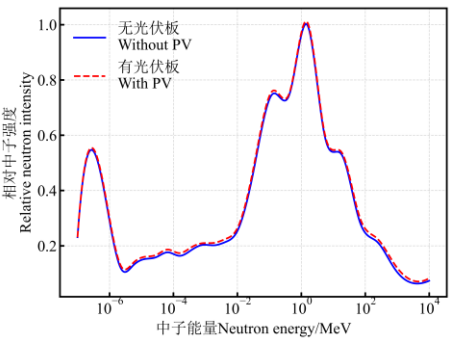


图 4 MCNPX 模拟有/无光伏板情境下中子通量能谱变化

Fig. 4 Neutron flux energy spectrum variations simulated by MCNPX under scenarios with and without photovoltaic panels

表 2 MCNPX 模拟有/无光伏板情境下不同能段中子通量对比

Table 2 Comparison of neutron flux in different energy bands simulated by MCNPX under scenarios with and without photovoltaic panels

模拟情景 Simulation scenario	总通量 Total flux/(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)	快中子段通量(0.5~1 000 eV) Fast neutron flux /(n·cm ⁻² ·s ⁻¹)
有光伏板 With photovoltaic panels	1.627 × 10 ⁻⁷	2.783 × 10 ⁻¹⁴
无光伏板 Without photovoltaic panels	1.607 × 10 ⁻⁷	2.786 × 10 ⁻¹⁴

CRNS 实地观测结果进一步验证模拟结论。观测期间，光伏电站及其对照区的原始中子强度介于 1144~1530 counts·min⁻¹，其中光伏电站平均值（1361 counts·min⁻¹）高于对照区（1340 counts·min⁻¹）。经大气压强、空气湿度和入射中子强度校正后，6 个样地的最终校正中子强度介于 350~416 counts·min⁻¹，均值为 390 counts·min⁻¹（表 3）。率定得到的中子强度基准值 N_0 为 424.0 ± 23.8 counts·min⁻¹。对各采样期光伏区与对照区的校正后中子强度（ N ）和原始中子强度（ N_{raw} ）进行独立样本 t 检验，结果均显示两组间差异不显著（ $P > 0.05$ ）（图 5），即光伏结构未对 CRNS 的中子强度产生显著干扰。

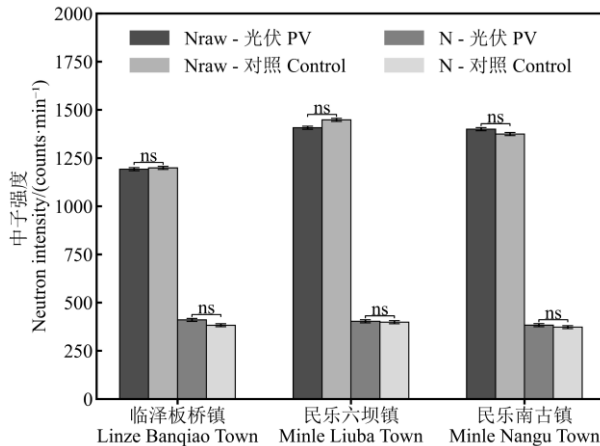
综合模拟与实测结果表明，光伏组件对近地面宇宙射线中子场的影响可忽略不计。理论模拟和实测验证均表明光伏板对 CRNS 探测信号的干扰微弱，因此在荒漠光伏电站应用 CRNS 技术时，可忽略光伏板本身对数据的额外校正需求。

表 3 光伏电站及其对照区中子强度校正与率定结果

Table 3 Neutron count correction and calibration results in photovoltaic power stations and their control areas

日期 Date	样地名称 Site name	$N_{\text{raw}}/$ (counts·min ⁻¹)	f_p	f_{RH}	f_{IRC}	$N/$ (counts·min ⁻¹)	$N_0/$ (counts·min ⁻¹)
2025-04	板桥镇对照	1254	0.299	1.107	0.999	415	464
	板桥镇光伏	1192	0.309	1.113	1.001	410	440
	南古镇对照	1452	0.242	1.086	1.001	382	394
	南古镇光伏	1450	0.249	1.096	1.007	398	412
	六坝镇对照	1530	0.262	1.043	0.995	416	402
	六坝镇光伏	1484	0.264	1.059	1.000	415	426
2025-07	板桥镇对照	1144	0.280	1.077	1.015	350	444
	南古镇对照	1296	0.242	1.136	1.019	363	444
	南古镇光伏	1350	0.249	1.078	1.015	368	396
	六坝镇对照	1366	0.253	1.083	1.019	381	402
	六坝镇光伏	1330	0.260	1.111	1.019	391	438
	平均值 Average	1350	0.264	1.090	1.008	390	424

注: N_{raw} 为原始中子强度; f_p 为大气压强校正系数; f_{RH} 为空气湿度校正系数; f_{IRC} 为入射中子强度校正系数; N 为校正后的中子强度; N_0 为完全干燥条件下的中子强度。下同。Note: N_{raw} is the raw fast-neutron intensity; f_p is the atmospheric pressure correction factor; f_{RH} is the atmospheric humidity correction factor; f_{IRC} is the incoming cosmic-ray intensity correction factor; N is the corrected neutron intensity; N_0 is the neutron intensity under completely dry conditions. The same below.



注: ns 表示光伏区与对照区之间的中子强度无显著差异。Note: ns indicates no statistically significant difference in neutron intensity between the PV and control areas.

图 5 光伏电站及其对照区校正前后中子强度对比

Fig. 5 Comparison of neutron intensity before and after correction in photovoltaic power stations and their control areas

2.2 CRNS 反演精度评估

反演精度评估结果显示, CRNS 校正后的中子强度与实测土壤水分之间关系良好。试验验证点基本分布于 Desilets 等^[28]基于 MCNPX 模拟获取的拟合曲线附近(图 6)。基于 N_0 参数法估算的土壤水分与烘干法实测值的线性回归方程为 $y = 1.102x - 0.002$, 决定系数 $R^2 = 0.73$, 均方根误差 $\text{RMSE} = 0.01 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (图 7)。这表明移动式 CRNS 能较准确地估算光伏电站及其对照区的平均土壤水分, 精度较高。值得注意的是, CRNS 估算值整体略高于烘干法实测值

(表 4)。

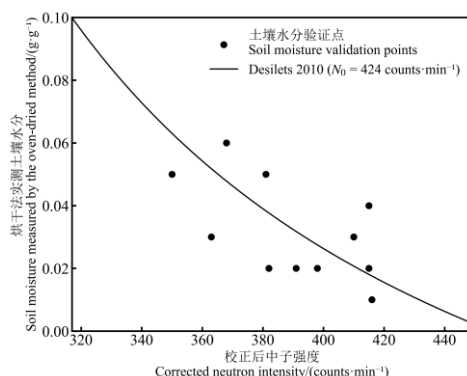


图 6 烘干法实测土壤水分与校正后中子强度之间的关系

Fig. 6 Relationship between oven-dried soil moisture and corrected neutron intensity.

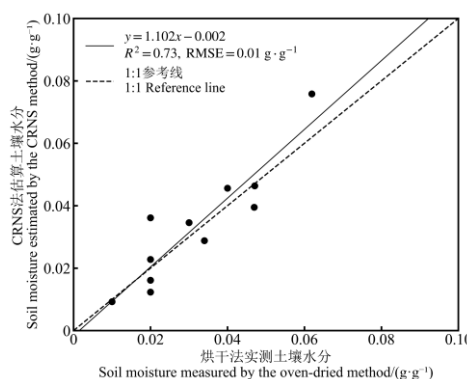


图 7 土壤水分 CRNS 法估算和烘干法实测值之间的关系

Fig. 7 Relationship between soil moisture estimated by CRNS method and measured values by drying method

2.3 CRNS 空间代表性

垂向有效探测深度 (D_{86}) 在 6 个样地间变化范围为 20.76~49.15 cm (表 4), 表现出随土壤水分增加而减小的趋势。4 月平均土壤水分 ($0.02 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) 低于 7 月份 ($0.05 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$), 与之对应, 4 月平均 D_{86} (41 cm) 大于 7 月 (30 cm), 进一步验证了 D_{86} 对土壤水分的敏感性。此外, 对照区的 D_{86} (39 cm) 普遍高于光伏区 (32 cm), 而对照区的土壤水分 ($0.03 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) 和土壤容重 ($1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 均低于光伏区 (分别为 $0.04 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 说明 D_{86} 与土壤水分和土壤容重均呈负相关。这表明土壤水分和土壤容重共同调控中子在实际土壤中的有效探测深度。

相比之下, 径向有效探测半径 (R_{86}) 结果相对稳定, 各样点 R_{86} 分布于 123.04~151.50 m 之间 (表 4)。光伏电站与对照区之间的 R_{86} 差异较小, 分别为 134 m 和 132 m, 表明土壤水分和光伏组件的存在未对 R_{86} 产生显著影响。

表 4 各站点实测与估算土壤水分、有效探测深度及径向距离

Table 4 Measured and estimated soil moisture, effective detection depth, and radial distance at sampling sites

样地名称 Site name	实测土壤水分 Measured soil moisture/(g·g ⁻¹)	N_0 / (counts·min ⁻¹)	反演土壤水分 Inverted soil moisture/(g·g ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	D_{86} /cm	R_{86} /m
4 月 ^① 板桥镇对照 Banqiao Town Control	0.04	464	0.05	1.58	32	131
4 月 ^① 南古镇对照 Nangu Town Control	0.02	394	0.02	1.58	49	140
4 月 ^① 六坝镇对照 Liuba Town Control	0.01	402	0.01	1.39	49	151
7 月 ^② 板桥镇对照 Banqiao Town Control	0.05	444	0.04	1.50	33	129
7 月 ^② 南古镇对照 Nangu Town Control	0.03	444	0.03	1.52	41	125
7 月 ^② 六坝镇对照 Liuba Town Control	0.05	402	0.05	1.40	30	129
对照区平均值 Average (Control)	0.03	425	0.03	1.50	39	134
4 月 ^① 板桥镇光伏 Banqiao Town PV	0.03	440	0.04	1.59	36	133
4 月 ^① 南古镇光伏 Nangu Town PV	0.02	412	0.02	1.60	44	138
4 月 ^① 六坝镇光伏 Liuba Town PV	0.02	426	0.01	1.51	36	142
7 月 ^② 南古镇光伏 Nangu Town PV	0.06	396	0.08	1.59	25	126
7 月 ^② 六坝镇光伏 Liuba Town PV	0.02	438	0.04	1.49	21	123
光伏区平均值 Average(PV)	0.03	422	0.04	1.56	32	132

注: D_{86} 为宇宙射线中子仪有效探测深度 (cm), R_{86} 为宇宙射线中子仪观测的平均水平观测范围。Note: D_{86} is the effective detection depth (cm) of the cosmic-ray neutron sensor, and R_{86} is the average horizontal footprint of the cosmic-ray neutron sensor observation. ①April; ②July.

3 讨 论

基于 MCNPX 数值模拟与移动式 CRNS 实测相互验证, 证实光伏组件对近地面宇宙射线中子强度的影响可忽略 (图 4, 图 5, 表 2, 表 3)。MCNPX 模拟结果显示, 在总中子通量层面, 光伏组件引入的相对差异为 1.27%, 而在 CRNS 信号最敏感的快中子能段内通量差异小于 1% (表 2)。这是因为总中子通量涵盖全能谱中子, 而光伏组件作为低氢材料, 其对高能快中子的慢化效应远弱于其对热中子的吸收; 在快中子能区, 中子与物质相互作用的截面相对较小^[40-41], 因此光伏板在此关键能段内的干扰信号极为微弱。实地观测进一步支撑这

一结论,校正后中子强度在光伏区与对照区间无显著差异 ($P>0.05$) (图 5)。这表明,在荒漠光伏电站应用 CRNS 技术时,无需针对光伏设施本身引入额外校正步骤,显著简化了实际应用流程。

从探测机理上看,CRNS 探测信号主要由区域内氢原子含量(主要是土壤水)控制。光伏组件材料由钢化玻璃、EVA 胶膜、硅基电池片和铝合金边框等材料构成,其氢原子密度普遍低于 $5\times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ ^[44],远小于土壤水的氢原子密度 ($\sim 10^{21}\text{ cm}^{-3}$)。此外,光伏板厚度仅为数毫米至数厘米^[44],安装高度约 4 m,而 CRNS 的探测体积更大,其中垂向有效探测深度 (D_{86}) 为数十厘米量级(约 21~49 cm)、径向有效探测半径 R_{86} 为百米量级(约 123~151 m) (表 4)。在该尺度的体积加权效应下,光伏板对中子散射的整体贡献被稀释。以上结果与 Schrön 等^[43]及 Desilets 等^[28]在定量层面研究一致,共同表明低氢材料在 CRNS 有效探测空间内的物理影响可忽略。

在空间代表性方面,CRNS 的垂向有效探测深度 D_{86} 对土壤水分变化响应敏感,整体上随土壤水分升高而减小,该趋势与 Schrön 等^[43]基于 URANOS 模型的研究结论一致。同时,光伏区 D_{86} 普遍低于对照区(表 4),该差异不仅源于土壤水分含量和土壤容重的不同,还可能是光伏板引入的微环境水文效应:光伏阵列通过遮荫效应减少地表蒸发并可能影响降水再分配,从而维持了相对较高的浅层土壤水分,增强近地表中子热化,导致有效探测深度变浅^[21,43]。相比之下,径向探测半径 R_{86} 在不同样地间变化较小,表现出良好的稳定性,其主要受大气因素调控,而对地表局地结构及土壤水分空间异质性响应不敏感^[30]。这一特征使得 CRNS 能在百米尺度上稳定表征区域平均土壤水分,有效弥补了传统点测量与遥感观测之间的尺度空白。

在反演精度方面,移动式 CRNS 在荒漠光伏环境中表现出可靠的区域土壤水分估算能力 ($R^2=0.73$, $\text{RMSE}=0.01\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) (图 7),该精度与类似干旱环境的研究结果 ($R^2=0.68$, $\text{RMSE}=0.01\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) 相似^[27,45]。然而,CRNS 反演值整体略高于烘干法实测值(表 4),存在一定系统性偏差。其主要原因在于 CRNS 对不同深度土层的加权贡献并不均匀^[21,46],快中子在浅层水分较低而深层水分相对湿润的剖面条件下,仍能携带深层信号返回探测器,导致反演值偏高。这一机制决定了 CRNS 更容易高估根区有效水分状况,尤其在存在明显土壤剖面水分梯度的情况下。其次,环境中氢原子不仅来源于土壤水分这一目标信号,还包括土壤有机质和晶格水等相对稳定的非目标氢源^[28]。这些额外的氢源会显著增强快中子的散射与吸收,导致 CRNS 估算的土壤水分偏高^[47]。此外,研究区地表存在稀疏耐旱植被,其生物量所含的氢会对中子信号产生贡献,但由于光伏区与对照区的植被盖度基本一致,此类非目标氢源对两个区域中子强度的贡献基本一致,因此不影响本研究光伏组件影响的对比结论^[48]。未来仍需系统量化植被生物量等非目标氢源的影响,并将其纳入校正框架。

同时,有限的观测点位与移动观测对降水等瞬变事件捕捉不足导致的代表性误差也是潜在因素。为提高 CRNS 在光伏电站及类似环境下的反演精度与结果的稳健性,后续研究应致力于多方面的改进。首先,增加观测点位的密度并优化空间代表性,获取更丰富的实测土壤水分数据,与 CRNS 估算值建立更可靠的区域校正关系或引入经验校正系数,以降低系统偏差。其次,系统量化非目标氢源(如植被生物量、土壤有机质和晶格水)及土壤质地对中子信号的影响,并将其纳入反演算法或误差评估体系。最后,结合固定式 CRNS 长期观测、多尺度土壤水分传感器、无人机遥感以及土壤水分模型(如 HYDRUS、CLM 或 Richard 方程模型),实现动态校正与多尺度匹配,从而提升 CRNS 在复杂下垫面条件下的适用性和监测精度。

4 结 论

通过 MCNPX 中子运输模拟与移动式 CRNS 实地观测,系统验证了 CRNS 在荒漠光伏电站土壤水分监测中的适用性。模拟与实测结果一致表明,光伏组件因其低氢材料构成及物理厚度远小于 CRNS 的有效探测范围,对近地面宇宙射线中子通量的影响极其微弱,故在该应用场景下无需针对光伏板进行额外校正。基于 N_0 参数法的土壤水分估算值与烘干法实测值高度一致,证实了 CRNS 在低植被覆盖、土壤相对均质的荒漠环境中适用性。此外,CRNS 的有效探测深度 (D_{86}) 和水平半径范围 (R_{86}) 适用于中尺度土壤水分监测,且光伏电站的有效探测深度小于对照区,可满足荒漠光伏电站生态水文研究需求。综上,移动式 CRNS 为荒漠光伏电站中尺度土壤水分监测提供了可靠技术手段,丰富了干旱区光伏电站生态环境监测方法体系。

参考文献 (References)

- [1] Tanner K E, Moore-O'Leary K A, Parker I M, et al. Simulated solar panels create altered microhabitats in desert landforms[J]. *Ecosphere*, 2020, 11(4): e03089.
- [2] Adeh E H, Good S P, Calaf M, et al. Solar PV power potential is greatest over croplands[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 11442.
- [3] Shang X W, Wang Y Z, Huo Y, et al. Climate ecological impact mechanism and vegetation restoration modes of desert centralized photovoltaic power stations[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(1): 10-20. [尚小伟, 王云正, 霍毅, 等. 荒漠集中式光伏电站的气候生态影响机制与植被恢复模式[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(1): 10-20.]
- [4] Liu Y, Zhang R Q, Huang Z, et al. Solar photovoltaic panels significantly promote vegetation recovery by modifying the soil surface microhabitats in an arid sandy ecosystem[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(18): 2177-2186.
- [5] Bindlish R, Barros A P. Subpixel variability of remotely sensed soil moisture: An inter-comparison study of SAR and ESTAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(2): 326-337.
- [6] Yao Y, Liu Y X, Zhou S, et al. Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(13): 3562-3574.
- [7] Baatz R, Hendricks Franssen H J, Han X J, et al. Evaluation of a cosmic-ray neutron sensor network for improved land surface model prediction[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(5): 2509-2530.
- [8] Armstrong A, Waldron S, Whitaker J, et al. Wind farm and solar park effects on plant-soil carbon cycling: Uncertain impacts of changes in ground-level microclimate[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 1699-1706.
- [9] Wu C D, Su Z B, Liu H, et al. Eco-hydrological effects of photovoltaic power generation facilities on dryland ecosystems: A review[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(3): 690-701. [吴川东, 苏泽兵, 刘鹤, 等. 干旱、半干旱区光伏发电设施的生态-水文效应研究评述[J]. *高原气象*, 2021, 40(3): 690-701.]
- [10] Yang L W, Gao X Q, Lü F, et al. Study on the impact of large solar farm on radiation field in desert areas of Golmud[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2015, 36(9): 2160-2166. [杨丽薇, 高晓清, 吕芳, 等. 光伏电站对格尔木荒漠地区太阳辐射场的影响研究[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(9): 2160-2166.]
- [11] Zhu S K. Research on the impact on the local ecological environment during the operation of photovoltaic plants[D]. Xining: Qinghai University, 2022. [朱少康. 光伏电站运行过程中对局地生态环境的影响研究[D]. 西宁: 青海大学, 2022.]
- [12] Wu C D, Liu H, Yu Y, et al. Ecohydrological effects of photovoltaic solar farms on soil microclimates and moisture regimes in arid Northwest China: A modeling study[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149946.
- [13] Devitt D A, Apodaca L, Bird B, et al. Assessing the impact of a utility scale solar photovoltaic facility on a down gradient mojave desert ecosystem[J]. *Land*, 2022, 11(8): 1315.

- [14] Jahanfar A, Drake J, Sleep B, et al. Evaluating the shading effect of photovoltaic panels on green roof discharge reduction and plant growth[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 919-928.
- [15] Shao M A, Wang Q J, Huang M B. Soil physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [16] Wang D L, Shu Y G. Research progress in determination methods for soil water content[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2017, 36(2): 61-65. [王大龙, 舒英格. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2017, 36(2): 61-65.]
- [17] Guo H, Bu X D, Huang K J, et al. Inversion of soil moisture in corn field based on thermal infrared remote sensing image[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(10): 203-210. [郭辉, 卜小东, 黄可京, 等. 基于热红外遥感影像的玉米田间土壤水分反演研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(10): 203-210.]
- [18] Li Z J, Chen J P, Liu Y M, et al. Soil moisture retrieval from remote sensing[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(3): 474-481. [李占杰, 陈基培, 刘艳民, 等. 土壤水分遥感反演研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 474-481.]
- [19] Wang L L, Qu J J. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review[J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3(2): 237-247.
- [20] Franz T E, Zreda M, Ferre T P A, et al. Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(8): 2012WR011871.
- [21] Köhli M, Schrön M, Zreda M, et al. Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(7): 5772-5790.
- [22] McJannet D, Hawdon A, Baker B, et al. Multiscale soil moisture estimates using static and roving cosmic-ray soil moisture sensors[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(12): 6049-6067.
- [23] Jeong J, Lee S, Cho S, et al. Multi-scale assessment of a cosmic-ray neutron probe observation of soil moisture for surface layer applications in a mountainous forest environment[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 356: 110155.
- [24] Zhu X C, Shao M A, Jia X X, et al. Application of temporal stability analysis in depth-scaling estimated soil water content by cosmic-ray neutron probe on the northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 299-308.
- [25] Zhao C, Yuan G F, Liu X, et al. Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1438-1444. [赵纯, 袁国富, 刘晓, 等. 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1438-1444.]
- [26] Wu S X, Zhang Y Y, Zhao W Z, et al. Retrieving soil moisture using cosmic-ray neutron technology based on COSMIC model in the desert-oasis region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(9): 2445-2452. [吴绍雄, 张勇勇, 赵文智, 等. 基于 COSMIC 模型的宇宙射线中子反演荒漠-绿洲区土壤水分[J]. 应用生态学报, 2023, 34(9): 2445-2452.]
- [27] Tian Z H, Zhang Y Y, Zhao W Z, et al. A review of researches and application to mesoscale soil moisture in desert-oasis regions using the cosmic-ray soil moisture observation system[J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(9): 979-990. [田子晗, 张勇勇, 赵文智, 等. 宇宙射线中子技术的中尺度土壤水研究进展及在荒漠绿洲区的应用[J]. 地球科学进展, 2022, 37(9): 979-990.]
- [28] Desilets D, Zreda M, Ferré T P A. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(11): 2009WR008726.
- [29] Schattan P, Baroni G, Oswald S E, et al. Continuous monitoring of snowpack dynamics in Alpine terrain by aboveground neutron sensing[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(5): 3615-3634.
- [30] Zreda M, Shuttleworth W J, Zeng X, et al. COSMOS: The COsmic-ray soil moisture observing system[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(11): 4079-4099.

- [31] Jakobi J, Huisman J A, Schrön M, et al. Error estimation for soil moisture measurements with cosmic ray neutron sensing and implications for rover surveys[J]. *Frontiers in Water*, 2020, 2: 1-15.
- [32] Baroni G, Scheffele L M, Schrön M, et al. Uncertainty, sensitivity and improvements in soil moisture estimation with cosmic-ray neutron sensing[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 873-887.
- [33] Schrön M, Rosolem R, Köhli M, et al. Cosmic-ray neutron rover surveys of field soil moisture and the influence of roads[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(9): 6441-6459.
- [34] Wu S X, Zhang Y Y, Kang W R. Employing NDVI as vegetation correction variable to improve soil moisture measurements of mobile cosmic-ray neutron sensor near the Qilian Mountains[J]. *Geoderma*, 2024, 441: 116764.
- [35] Chai X J, Qi G P. Temperature and precipitation characteristics and catastrophe analysis of Zhangye City in the middle and upper reaches of Heihe River basin from 1960 to 2016[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019(1): 40-45. [柴小军, 齐广平. 张掖市 1960—2016 年气温和降水特征及突变分析[J]. *水利规划与设计*, 2019(1): 40-45.]
- [36] Li J, Chen B, Tian X P, et al. Relationship between plant community species diversity and soil water content in grasslands of the Central Hexi Corridor[J]. *Grassland and Turf*, 2025, 45(3): 124-131. [李静, 陈斌, 田晓萍, 等. 河西走廊中段草原植物群落物种多样性与土壤含水量的关系[J]. *草原与草坪*, 2025, 45(3): 124-131.]
- [37] Teng Y F, Chen B, Ma J, et al. Vegetation community species diversity and soil moisture variation characteristics in desert-oasis transition zone of Zhangye City, Gansu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(4): 45-54. [滕玉凤, 陈斌, 马剑, 等. 甘肃省张掖市荒漠—绿洲过渡带植被群落物种多样性及土壤水分变化特征[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(4): 45-54.]
- [38] Chadwick M B, Herman M, Obložinský P, et al. ENDF/B-VII.1 nuclear data for science and technology: Cross sections, covariances, fission product yields and decay data[J]. *Nuclear Data Sheets*, 2011, 112(12): 2887-2996.
- [39] Sato T, Niita K. Analytical functions to predict cosmic-ray neutron spectra in the atmosphere[J]. *Radiation Research*, 2006, 166(3): 544-555.
- [40] Zreda M, Desilets D, Ferré T P A, et al. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(21): 2008GL035655.
- [41] Andreas M, Schrön M, et al. Improving calibration and validation of cosmic-ray neutron sensors with hydrogeophysical methods[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(3): e2019WR026695.
- [42] Desilets D, Zreda M, Prabu T. Extended scaling factors for *in situ* cosmogenic nuclides: New measurements at low latitude[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 246(3/4): 265-276.
- [43] Schrön M, Köhli M, Scheffele L, et al. Improving calibration and validation of cosmic-ray neutron sensors in the light of spatial sensitivity[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(10): 5009-5030.
- [44] Zhang H Z, Meng W J. Research on simulation of optimal design scheme of PV module structure[J]. *Solar Energy*, 2022(8): 27-36. [张汉中, 孟文俊. 光伏组件结构最优设计方案的模拟研究[J]. *太阳能*, 2022(8): 27-36.]
- [45] Wu S X, Ma D K, Chen K, et al. Study on region-scale soil moisture measurements using mobile cosmic-ray neutron technology[J]. *Arid Zone Research*, 2025, 42(5): 810-819. [吴绍雄, 马登科, 陈昆, 等. 基于移动式宇宙射线中子技术的区域尺度土壤墒情监测研究[J]. *干旱区研究*, 2025, 42(5): 810-819.]
- [46] Zweck C, Zreda M, Desilets D. Snow shielding factors for cosmogenic nuclide dating inferred from Monte Carlo neutron transport simulations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 379: 64-71.
- [47] Kodama M, Nakai K, Kawasaki S, et al. An application of cosmic-ray neutron measurements to the determination of the snow-water equivalent[J]. *Journal of Hydrology*, 1979, 41(1/2): 85-92.
- [48] Cai J Y. Measuring and verifying soil moisture from scale of pixel in the desert steppe based on cosmic-ray neutron method[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017. [蔡静雅. 基于宇宙射线中子法的荒漠草原像元尺度土壤水分监测与验证[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.]

(责任编辑: 檀满枝)