

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. 应用生态学报, 2023, 34(9): 2445–2452

Wu SX, Zhang YY, Zhao WZ, et al. Retrieving soil moisture using cosmic-ray neutron technology based on COSMIC model in the desert-oasis region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(9): 2445–2452

基于 COSMIC 模型的宇宙射线中子反演荒漠-绿洲区土壤水分

吴绍雄^{1,2} 张勇勇^{1*} 赵文智¹ 康文蓉^{1,2} 田子晗^{1,2}

(¹中国科学院西北生态环境资源研究院, 临泽农田生态系统国家野外科学观测研究站, 兰州 730000; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 宇宙射线中子技术通过监测近地面中子强度,反演百米尺度范围内平均土壤水分状况,已成功应用于森林、草地和农田等生态系统。为验证 COSMIC 模型反演干旱区中尺度土壤水分的可靠性,本研究基于移动式宇宙射线中子技术在黑河中游荒漠-绿洲区开展了土壤水分观测试验。结果表明:荒漠-绿洲区监测到的中子强度在 350~715 counts · (30 s)⁻¹,率定的高能中子强度(N_{cosmic})为(38.5±2.2) counts · (30 s)⁻¹, N_{cosmic} 受下垫面性质影响;COSMIC 模型(均方根误差 RMSE = 0.019 g · g⁻¹)和 N_0 参数法(RMSE = 0.018 g · g⁻¹)均能较好地估算中尺度土壤水分,考虑矿物晶格水的情况下,土壤水的反演精度更高;试验期间,绿洲区平均有效监测深度为 19 cm,荒漠区为 36 cm。COSMIC 模型可用于荒漠-绿洲区宇宙射线中子反演土壤水分,结合陆面模型在实现近地面气象-水文-生态各要素数据同化方面具有较大潜力。

关键词 宇宙射线中子技术;荒漠-绿洲;土壤水分;COSMIC;中尺度监测

Retrieving soil moisture using cosmic-ray neutron technology based on COSMIC model in the desert-oasis region. WU Shaoxiong^{1,2}, ZHANG Yongyong^{1*}, ZHAO Wenzhi¹, KANG Wenrong^{1,2}, TIAN Zihan^{1,2} (¹National Field Science Research Station of Farmland Ecosystem in Linze, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Cosmic-ray neutron technology could estimate average soil moisture on scale of hectometers by monitoring the neutron intensity near the ground, which has been successfully applied in forest, grassland, farmland, and other ecosystems. To verify the reliability of Cosmic-ray Soil Moisture Interaction Code (COSMIC) model for retrieving mesoscale soil moisture in arid regions, we carried out soil moisture observation experiment by using the cosmic-ray neutron rover in the desert-oasis region of the middle reaches of Heihe River. The results showed that the fast neutron intensity in the desert-oasis region were 350–715 counts · (30 s)⁻¹, and the calibrated high energy neutron intensity (N_{cosmic}) were (38.5±2.2) counts · (30 s)⁻¹, which was affected by land surface characteristics. Both COSMIC model (root mean square error=0.019 g · g⁻¹) and N_0 equation (root mean square error=0.018 g · g⁻¹) could well assess the mesoscale soil moisture, with the accuracy of soil moisture being higher considering soil lattice water. The average penetration depth was 19 cm in the oasis region and 36 cm in the desert region during the experiment. COSMIC model could be used to retrieve soil moisture by cosmic ray neutron in the desert-oasis regions, which had great potential to realize data assimilation of surface meteorological-hydrological-ecological variables by combining with land surface models.

Key words: cosmic-ray neutron technology; desert-oasis; soil moisture; COSMIC; mesoscale monitoring.

土壤水参与陆地表层生态系统水热交换过程^[1]。有效监测土壤水分状况对干旱预警、灌溉管

理及农业生产力的提升具有重要意义^[2]。目前,土壤水观测方法可分为点尺度、中尺度和大尺度。点尺度(<1 m²)观测包括烘干法、频率反射法(FDR)及核磁共振法等^[3-5],主要优点是准确度高、可操作性强,但点尺度方法的区域代表性差,且中子仪、伽

本文由国家自然科学基金项目(42071044,42230720)和中国科学院青年创新促进会项目(2020420)资助。

2023-02-09 收稿,2023-07-05 接受。

*通信作者 E-mail: zhangyongyong@lzb.ac.cn

马射线等方法具有辐射危害^[6]。大尺度基于遥感监测,利用光学遥感、全球卫星导航系统(GNSS)等反演土壤水分状况^[7],观测具有多时相、大尺度特点,然而地基和星载遥感仅能反演0~10 cm土壤水分,利用微波反演土壤水分时,后向散射系数受下垫面影响存在较大不确定性^[8-9]。此外,众多依赖于介电常数来确定土壤水分的方法如时域反射法(TDR)和主被动微波遥感等,针对冻土、盐碱土等特殊下垫面环境的适用性较差^[10]。Zreda等^[11]基于中子传输理论,提出了一种宇宙射线中子反演中尺度土壤水分的新方法,该方法弥补了点尺度与大尺度监测之间的尺度空白,能反映百米范围内平均土壤水分状况。相比较其他中尺度监测技术,如电阻率成像法(ERT)^[12]和电磁感应方法(EMI)^[13]等,该方法设备布置便捷,对土壤无破坏,适用于复杂下垫面环境^[14],在农林生产、生态环境治理和卫星遥感产品验证等方面应用前景广阔^[15-16]。

宇宙射线中子技术根据近地面快中子数与氢原子数呈反比的关系来监测中尺度土壤水分。为建立中子强度与土壤水分的定量关系,许多学者在方法上进行了大量探索^[17-18]。Zreda等^[11]利用 Monte Carlo N-Particle (MCNP) 代码模拟了高能宇宙射线从8 km高空到地表最后被慢化的传输过程,表明宇宙射线中子仪可以监测半径约300 m范围内的土壤水分状况。Desilets等^[19]建立了土壤水分与中子强度的反演方程,通过计算完全干燥土壤条件下的中子强度来反演土壤水分(N_0 参数法)^[20-22],这是目前常用的方法。Franz等^[23]综合考虑陆表各个氢库影响,提出了氢原子摩尔分数法(hydrogen molar fraction, HMF),该公式可应用于具有多个氢库的复杂环境。上述3种方法均能达到反演中尺度土壤水分的目的,其中,MCNP法是目前反演土壤水分最准确的一种方法,但运算量大、耗时较长^[24];氢摩尔分数法要对样品进行化学元素分析,过程复杂、技术要求高;相比较MCNP法和HMF法, N_0 参数法更简便高效,但 N_0 参数法的常数是在特定条件下拟合得到,在数据同化方面有一定局限性^[25-26]。利用中子强度准确高效地反演土壤水分仍存在方法学上的挑战。COsmic-ray Soil Moisture Interaction Code (COSMIC)模型是MCNP传输代码的参数化版本,根据下垫面特征设置土壤属性参数,能准确反演中尺度土壤水分状况,对不同土层设置差异土壤水分可获取探测到的中子在土壤剖面的空间分布特征,相比较MCNP法,COSMIC模型在计算效率上提升了4个

数量级^[26]。但目前缺少对该方法的实地验证,尤其是在荒漠-绿洲等干旱条件下的适用性有待进一步探索。

黑河是我国第二大内陆河,荒漠-绿洲是该流域典型景观类型^[27]。本研究在黑河中游荒漠-绿洲区,基于宇宙射线中子技术,采用COSMIC模型反演中尺度土壤水分并验证该方法的可靠性;分析荒漠-绿洲区近地面中子强度的差异及影响因素,比较该模型与 N_0 参数法的土壤水分估算精度,探究不同参数条件下土壤含水量与中子强度的关系以及不同土壤深度对中子贡献的空间分布特征,以期开展宇宙射线中子强度反演中尺度土壤水分提供方法依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况及试验设计

试验于2021年在黑河中游荒漠-绿洲区(39°15'—39°25' N, 100°5'—100°20' E, 海拔1330 m)开展,研究区属于典型温带大陆性气候,年均蒸发量2388 mm,年均降水量117 mm,降水集中在7—9月,主要景观类型为荒漠和绿洲^[28-29]。

研究采用的中子探测设备为移动式宇宙射线中子仪(RV-01, Hydroinnova LLC, Albuquerque, NM, 图1a),该设备有4组中子探测器,共16根中子计数管,中子计数频率为30 s,同时,宇宙射线中子仪辅助观测大气压强、空气湿度、气温以及样地的经纬度。

期间3次采样分别在1月5日、3月24日和5月12日进行,每次采样在荒漠区和绿洲区分别选3个200 m×200 m大样地^[22],共计18个大样地。每个大样地以宇宙射线中子仪为圆心,分别在5、50、100 m半径选择土壤剖面点,在距离圆心5 m处以0°为起点,间隔60°取样,共6个土壤剖面点;50 m处以45°为起点,间隔90°取样,共4个土壤剖面点;100 m处以0°为起点,间隔90°取样,共4个土壤剖面点。每个大样地共计14个土壤剖面点(图1b)。利用环刀在每个土壤剖面点0~10、10~20和20~30 cm深度依次采集土壤样品,每个大样地共采集42份土样。将土壤样品置于105℃烘干24 h,计算土壤含水量和土壤容重^[30],将土壤样品置于1000℃烘干24 h,计算土壤中的矿物质格水含量^[31]。

为减少下垫面随时间和景观类型变化的干扰,降低率定的不确定性。计算各个采样期荒漠和绿洲COSMIC模型参数——高能中子强度(N_{cosmic}),用于

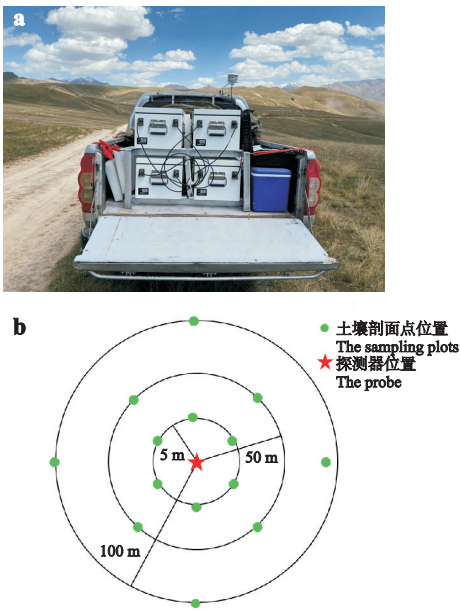


图 1 移动式宇宙射线中子仪 (a) 和土壤剖面点分布 (b)
Fig.1 Cosmic-ray neutron rover (a) and the distribution of sampling points (b).

反演土壤水分的 N_{cosmic} 为各个采样时期荒漠或绿洲 N_{cosmic} 的平均值。

1.2 中子强度环境因素校正

1) 大气压强校正公式如下^[32-33]:

$$f_p = \exp[(P - P_0)/L] \quad (1)$$

$$L = (x_2 - x_1) / [n(1 + \exp(-\delta R_c^k))^{-1} x_1 + 1/2(b_0 + b_1 R_c + b_2 R_c^2)x^2 + 1/3(b_3 + b_4 R_c + b_5 R_c^2)x^3 + 1/4(b_6 + b_7 R_c + b_8 R_c^2)x^4]^{x_2} \quad (2)$$

式中: f_p 是气压校正系数; P 为试验时观测大气压 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); P_0 为标准大气压 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); L 是高能中子的质量衰减长度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), 研究区的 L 值为 $136.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$; x_1 为当地大气压强 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); x_2 为标准大气压强 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); R_c 为截止刚度 (GV); n 、 δ 、 k 和 $b_0 \sim b_8$ 为常数。

2) 空气湿度校正公式如下^[34]:

$$f_{\text{RH}} = 1 + 0.0054 \times (RH - RH_0) \quad (3)$$

式中: f_{RH} 是空气湿度校正系数; RH 为采样时的绝对空气湿度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); RH_0 为参考条件下的绝对空气湿度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。

3) 入射中子强度校正。入射地球中子强度变化会影响近地面中子数的变化^[35]。不同地理位置截止刚度的差异会影响入射中子能谱的组成, 导致探测到的中子强度不同^[36]。入射中子强度的影响校正公式如下:

$$f_{\text{iRe}} = \left(\frac{I_m}{I_0} - 1 \right) \times [1 - 0.075 \times (R_c - R_{\text{cMXCO}})] + 1 \quad (4)$$

式中: f_{iRe} 为入射中子强度校正系数; I_m 为采样期间墨西哥中子监测站点中子计数率 (选择与研究区截止刚度相近的中子监测站点); I_0 为墨西哥中子监测站点参考中子计数率 (<http://www.nmdb.eu>); R_c 为采样期间样地截止刚度; R_{cMXCO} 为墨西哥监测站点截止刚度 (8.28GV)。

$$N = N_{\text{origin}} \times f_p \times f_{\text{RH}} / f_{\text{iRe}} \quad (5)$$

式中: N 为校正后的中子强度 [$\text{counts} \cdot (30 \text{ s})^{-1}$]; N_{origin} 为探测到的原始中子强度 [$\text{counts} \cdot (30 \text{ s})^{-1}$]。

1.3 土壤含水量空间权重

常用的加权方法包括线性加权和指数加权^[37-38], 本研究采用 Köhli 等^[38] 提出的指数加权方案, 最终加权土壤含水量的计算公式如下:

$$\theta = \sum_i \theta_i w_i / \sum_i w_i \quad (6)$$

式中: θ 为加权后的土壤含水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); θ_i 为各个土壤样品的含水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); w_i 为各个土壤样品径向或垂向权重。

1.4 COSMIC 模型

Shuttleworth 等^[26] 于 2013 年提出 COSMIC 模型, 该方法对 MCNP 法进行参数化, 并作了 3 个基本假设: 1) 入射高能中子数随土壤深度呈指数递减; 2) 中子产生于各深度的土壤中; 3) 在土壤深度 z 上产生的中子在到达地面被测量前, 中子数随着距离减少。基于以上 3 个假设的 COSMIC 模型计算公式如下^[39]:

$$N = N_{\text{cosmic}} \int_0^{\infty} \left[e^{-\left[\frac{m_s(z)}{L_1} + \frac{m_w(z)}{L_2} \right]} \right] \cdot [\alpha \rho_s(z) + \rho_w(z)] \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} e^{\left(\frac{-1}{\cos(\varphi)} \right) \cdot \left[\frac{m_s(z)}{L_3} + \frac{m_w(z)}{L_4} \right]} d\varphi dz \quad (7)$$

式中: N_{cosmic} 为高能中子强度 [$\text{counts} \cdot (30 \text{ s})^{-1}$]; z 表示土壤深度 (cm); $m_{s(z)}$ 和 $m_{w(z)}$ 分别为深度 z 到地面之间的干土和水的重量 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); $\rho_{s(z)}$ 为干土的体积密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $\rho_{w(z)}$ 为土壤含水量 (θ) 与土壤中的矿物质格水含量 (θ_i) 之和 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); φ 是中子发射点与探测点连线与深度 z 所对应平面法线的夹角; α 是土壤与水中中子产生效率的比值; $L_1 \sim L_4$ 分别为高能土壤衰减长度、高能水分衰减长度、中子土壤衰减长度和中子水分衰减长度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)。其中, L_1 、 L_2 和 L_4 为常数, α 、 L_3 为土壤容重的经验函数^[11]。

基于 Fortran 语言编写的 COSMIC 程序代码可从 <http://cosmos.hwr.arizona.edu> 网站获取,通过实测数据中子强度、土壤容重、加权后土壤含水量、土壤中矿物晶格水含量及经验参数校正来获取最优高能中子强度 (N_{cosmic})。本研究利用 Matlab R2018b 中“system”命令调用 COSMIC 程序对 N_{cosmic} 进行优化, N_{cosmic} 最小运行步长设置为 0.1, 每个大样地的 N_{cosmic} 迭代运算 10000 次, 得到最优 N_{cosmic} , 优化标准参见文献[26]。将优化后的 N_{cosmic} 输入到 COSMIC 模型, 利用实测中子强度反演中尺度平均土壤水分。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 软件统计数据, Matlab 2018b 进行数据分析和数据可视化。采用决定系数 (R^2) 评价曲线拟合优度, 利用均方根误差 (RMSE) 评价反演精度。

2 结果与分析

2.1 中子数校正和率定

试验期间, 宇宙射线中子仪观测的荒漠-绿洲区中子强度在 $350 \sim 715 \text{ counts} \cdot (30\text{s})^{-1}$, 荒漠区 [$611 \text{ counts} \cdot (30\text{s})^{-1}$] 大于绿洲区 [$469 \text{ counts} \cdot (30\text{s})^{-1}$]; 校正后的中子强度在 $129 \sim 221 \text{ counts} \cdot (30\text{s})^{-1}$, 荒漠区 [$200 \text{ counts} \cdot (30\text{s})^{-1}$] 大于绿洲区 [$154 \text{ counts} \cdot (30\text{s})^{-1}$] (表 1)。近地面中子强度影

响因素主要包括大气压强、入射中子强度、土壤性质和近地面氢库^[40]。经过环境因素校正后(不考虑土壤性质的差异), 校正后的中子数由土壤中的水和植被水决定。绿洲农田作物生育期在 5—9 月^[29], 而本试验在 1—5 月进行, 所以荒漠和绿洲生物量均较少, 植被水影响不大。此外, 中子数与氢原子数呈反比^[41], 绿洲区土壤水分显著高于荒漠区(表 1), 因此, 2 种景观校正后中子数差异由土壤水主导。

荒漠-绿洲区率定的高能中子强度 (N_{cosmic}) 为 $(38.5 \pm 2.2) \text{ counts} \cdot (30\text{s})^{-1}$ (平均值 \pm 标准差), 不同时期 N_{cosmic} 不同, 荒漠、绿洲区 N_{cosmic} 也存在差异(表 1)。 N_{cosmic} 与 N_0 参数法中 N_0 (由 N_0 参数公式计算得到^[20], 可以视为完全干燥条件下的快中子强度)的影响因素具有一定相关性^[1], N_0 不仅与当地土壤性质有关, 同时受地表植被、截流、积雪等氢库干扰而发生变化^[26]。Hornbuckle 等^[42]研究表明, 植物生物量改变会导致率定的参数发生变化。相同时期绿洲区 N_{cosmic} 大于荒漠区, 可能是因为绿洲区采样农田的土壤黏粒含量较高^[16]。在 3 个采样时期, 绿洲区土壤中的矿物结晶水平均含量为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 荒漠区平均含量为 $0.04 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ (表 1), 绿洲区土壤矿物结晶水高于荒漠区与矿物组分有关^[43]。忽视土壤晶格水时的 N_{cosmic} 减小为 $31.0 \pm 4.8 \text{ counts} \cdot (30\text{s})^{-1}$, 这是由于土壤中矿物晶格水的存在增加

表 1 中子数校正和率定

Table 1 Correction and calibration for neutron counts

日期 Date	景观类型 Landscape type	纬度、经度 Latitude, longitude	原始中子数 Original neutrons [counts · (30 s) ⁻¹]	校正中子数 Corrected neutrons [counts · (30 s) ⁻¹]	土壤容重 Soil bulk density (g · cm ⁻³)	晶格水含量 Lattice water content (g · g ⁻¹)	土壤含水量 Soil water content (g · g ⁻¹)	高能中子通量 N_{cosmic} [counts · (30 s) ⁻¹]
01-05	绿洲 Oasis	39°19' N, 100°08' E	350	129	1.45	0.07	0.24	39.1
		39°20' N, 100°14' E	412	149	1.49	0.05	0.15	
		39°17' N, 100°13' E	439	158	1.47	0.05	0.09	
荒漠 Desert	荒漠 Desert	39°20' N, 100°12' E	601	212	1.59	0.05	0.03	38.6
		39°18' N, 100°16' E	618	218	1.61	0.04	0.03	
		39°17' N, 100°17' E	600	213	1.58	0.06	0.02	
03-24	绿洲 Oasis	39°22' N, 100°06' E	485	157	1.43	0.05	0.16	39.9
		39°19' N, 100°17' E	494	159	1.48	0.03	0.11	
		39°16' N, 100°17' E	506	160	1.44	0.06	0.10	
荒漠 Desert	荒漠 Desert	39°25' N, 100°07' E	652	200	1.62	0.05	0.02	35.5
		39°25' N, 100°08' E	546	170	1.59	0.05	0.09	
		39°23' N, 100°11' E	715	221	1.59	0.03	0.01	
05-12	绿洲 Oasis	39°23' N, 100°10' E	495	158	1.45	0.06	0.16	41.4
		39°24' N, 100°10' E	544	165	1.47	0.05	0.12	
		39°24' N, 100°07' E	491	150	1.49	0.05	0.14	
荒漠 Desert	荒漠 Desert	39°24' N, 100°12' E	653	214	1.54	0.02	0.03	36.3
		39°20' N, 100°15' E	555	177	1.55	0.06	0.06	
		39°21' N, 100°16' E	556	178	1.58	0.04	0.06	

了近地面氢含量,使得近地面中子强度降低,从而导致率定的 N_{cosmic} 也随之减小^[44]。此外,相较于固定式宇宙射线中子仪,移动式宇宙射线中子仪观测时,景观类型和土壤属性变化大^[32]。因此,受多个因素干扰,不同时期不同下垫面条件下率定的 N_{cosmic} 存在差异。

2.2 中子强度与土壤水分的关系

荒漠-绿洲观测样地的 N_{cosmic} 在 $35.5 \sim 41.4$ counts \cdot (30 s)⁻¹ (表 1), 各个样地的实测值均分布于 $N_{\text{cosmic}} = 40$ counts \cdot (30 s)⁻¹ 曲线附近 (图 2), 试验结果与模拟结果基本吻合, COSMIC 模型可以再现宇宙射线中子仪探测到的近地面中子强度。此外,当 N_{cosmic} 在 $30 \sim 80$ counts \cdot (30 s)⁻¹ 时,土壤含水量与中子强度之间的关系曲线与 Desilets 等^[19] 2010 年提出的 N_0 参数法曲线类似,随着土壤含水量的增大,探测到的中子强度不断减小;相同土壤含水量条件下,中子强度随 N_{cosmic} 增大而增大。 N_{cosmic} 与下垫面条件有关,在确定该参数条件下,土壤水分与中子强度表现为函数关系^[1],土壤含水量越小,中子强度对土壤水分变化越敏感 (图 2)。因此,中子强度在不同 N_{cosmic} 条件下对土壤含水量变化响应特征不同,通过 COSMIC 模型模拟,可以建立特定条件下土壤含水量与中子强度之间的定量关系^[26]。

2.3 中子强度反演土壤水分

考虑土壤中矿物晶格水时, COSMIC 反演的土壤水分与烘干法测得土壤水分之间的 RMSE 为 $0.019 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 拟合曲线 R^2 为 0.91, 接近 1:1 曲线 (图 3), 基于 COSMIC 模型在荒漠-绿洲区反演的土壤水分结果较好,说明该方法的 3 个假设是合理的^[26]。绿洲区 RMSE ($0.023 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$) 大于荒漠区 ($0.014 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$), 此结果与前人结论一致^[22], 可能是因为宇宙射线中子仪监测的不确定性随着中子数的

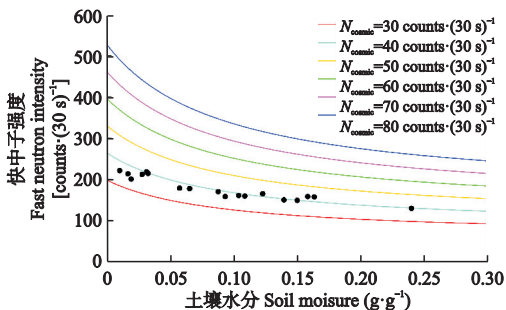


图 2 中子强度与土壤水分的关系

Fig.2 Relationship between neutron intensity and soil moisture. N_{cosmic} : 高能中子强度 High energy neutron intensity. 黑点为 18 个样地的实测值 The black points indicated the actual value at the 18 sample plots.

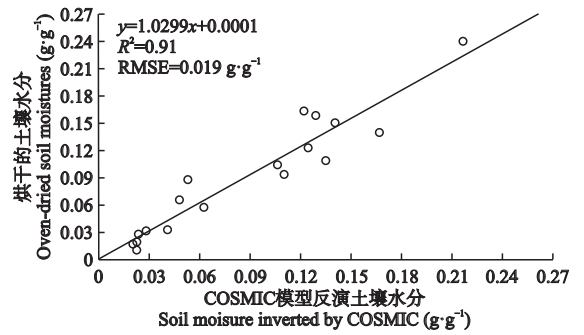


图 3 荒漠-绿洲区 COSMIC 模型反演的土壤水分与烘干法测得土壤水分的对比

Fig.3 Comparison of soil moisture by oven-drying method and determined by COSMIC model in the desert-oasis region.

R^2 : 决定系数 Coefficient of determination; RMSE: 均方根误差 Root mean square error. 下同 The same below.

增大而减小^[11],荒漠区近地面中子数更大 (表 1), 所以监测的不确定性更小。 N_0 参数法也是宇宙射线中子技术反演土壤水分常用的一种方法^[19]。考虑土壤晶格水,荒漠-绿洲区 N_0 为 (247 ± 13) counts \cdot (30 s)⁻¹ (表 2), 其中, COSMIC 模型的 N_{cosmic} 与 N_0 的平均值之比为 0.16, 这与 Baatz 等^[1] 计算结果相近。由图 4 可以看出, N_0 参数法反演的土壤水分与烘干法测得的土壤水分之间的 RMSE 为 $0.018 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 拟合曲线 R^2 为 0.92, 接近 1:1 曲线。因此,在荒漠-绿洲区, COSMIC 模型和 N_0 参数法均能较好地将中子强度转化为中尺度土壤水分,考虑土壤中的矿物晶格水时宇宙射线中子技术在荒漠-绿洲区的反演精度高。

2.4 不同土层对中子贡献的空间分布特征

相比较 N_0 参数法和氢原子摩尔分数法, COSMIC 模型可以反映监测到的中子在不同土层的空间分布特征。宇宙射线中子技术观测范围为仪器所探测到中子数占比 86% 的区域, 将 86% 中子累积灵敏度范围作为有效监测尺度^[11]。由图 5 可以看出, 试

表 2 荒漠-绿洲区的 N_0 值

Table 2 N_0 value in the desert-oasis region

日期 Date	景观类型 Landscape type	N_0 [counts \cdot (30 s) ⁻¹]
01-05	绿洲 Oasis	232
	荒漠 Desert	268
03-24	绿洲 Oasis	243
	荒漠 Desert	247
05-12	绿洲 Oasis	247
	荒漠 Desert	246

N_0 : 由 N_0 参数公式计算得到^[20], 可以视为完全干燥条件下的快中子强度 N_0 could be regarded as the fast neutron intensity over dry soil, which was calculated by the N_0 equation^[20].

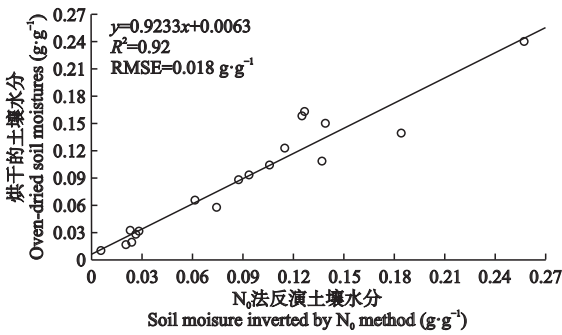


图4 荒漠-绿洲区 N_0 法反演的土壤水分与烘干法测得土壤水分对比

Fig.4 Comparison of soil moisture oven-drying method and determined by N_0 method in the desert-oasis region.

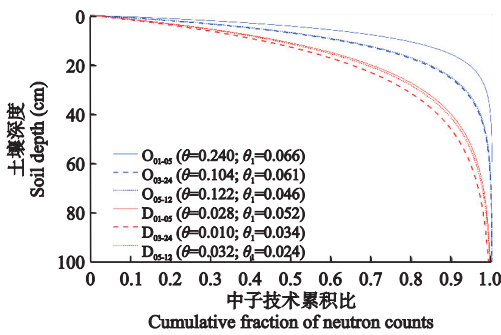


图5 荒漠-绿洲区不同土壤深度对 neutron 计数的贡献

Fig.5 Contribution of different soil depths to neutron counting in the desert-oasis region.

θ : 土壤水分 Soil moisture; θ_1 : 晶格水含量 Lattice water content. O: 绿洲 Oasis; D: 荒漠 Desert.

验期间,在 86% 中子累积灵敏度条件下,绿洲平均有效监测深度为 19 cm,荒漠区为 36 cm,由于绿洲中土壤含水量较荒漠高,3 次采样中荒漠区的有效监测深度明显比绿洲深。此外,土壤剖面中土壤水和土壤中的矿物晶格水含量越大,有效监测深度越浅,这与 Heidbüchel 等^[31]研究观点一致。利用 MCNP 模拟土壤水分与中子强度的关系发现,有效监测深度与土壤含水量呈反比关系^[34,37]。本研究 COSMIC 模型模拟探测到的中子在土壤剖面的累积曲线与 MCNP 模拟结果相似。利用 COSMIC 模型可以获取不同下垫面条件下宇宙射线中子仪有效监测深度。

3 讨论

宇宙射线中子技术在监测尺度和获取效率方面具有较大优势,土壤水分反演结果在几百米范围内具有很强的代表性^[45]。本研究计算了土壤中的矿物晶格水,但没有考虑其他氢库对中子反演土壤水

分的影响,例如地表植被层中的氢库,本试验在作物非生长季节开展,植被水对反演结果影响不大^[37],但当生物量随时间变化明显时,参数 N_0 或 N_{cosmic} 也会发生改变^[42],这时需要考虑植被氢库的影响^[46]。Baroni 等^[41]认为,可以将植物水当量视为“等效的土壤水层”来进行生物量的校正,而 Franz 等^[23]和 Köhli 等^[38]表明,植物中氢原子对中子运输的影响与冠层结构密切相关,植被氢库对近地面中子强度影响仍是亟待解决的科学问题^[47]。此外,宇宙射线中子仪探测到的中子信号受土壤有机质和道路等干扰,Heidbüchel 等^[31]表示测得土壤有机质可看成分子式为 $C_6H_{10}O_5$ 纤维素,假设有有机质水当量占有有机质总量的 0.556 来校正土壤有机质的影响,Schrön 等^[48]将道路看成含水量不同的土壤,利用 URANOS 软件设置不同地面材料模拟近地面中子强度提出了道路校正公式^[49],这些影响因素的校正在未来荒漠-绿洲中尺度土壤水分研究中需要重视。

宇宙射线到达地表的粒子可以分为许多能量级,目前研究多利用能量级在 $10^{-8} \sim 10^{-2}$ MeV 的中子对氢原子敏感性大的特点反演土壤含水量,其他许多能量级粒子与地表各指标之间的关系尚未探明^[50]。结合 MCNP 方法,GENAT4 和 PARMA 等多个中子运输模型被提出^[51],这些模型与生态水文模型相结合,可以实现数据同化,例如, WOFOST 等作物生长模型模拟的生物量能校正宇宙射线中子技术植物中氢库带来的影响。COSMIC 模型作为 MCNP 的参数化版本,根据下垫面特征设置不同土层参数^[52],可以建立中子与氢原子的定量关系。Brunetti 等^[2]利用 Python 修正 COSMIC 代码与 HYDRUS-1D 模型融合,实现了地表中子强度与各土层水力特性相互推演。未来宇宙射线中子技术不应局限于土壤水分监测以及对遥感水分产品的验证^[53-54],更大的潜力在于与陆面模型(如 Noah 模型)相结合,实现近地面气象-水文-生态各要素数据同化。

4 结论

本研究基于移动式宇宙射线中子技术,在黑河中游荒漠-绿洲区开展了中尺度土壤水分观测试验,验证了 COSMIC 模型的可靠性。研究区内观测的中子强度在 $350 \sim 715 \text{ counts} \cdot (30 \text{ s})^{-1}$, N_{cosmic} 为 $(38.5 \pm 2.2) \text{ counts} \cdot (30 \text{ s})^{-1}$,该参数受土壤、植被、截流、积雪等下垫面性质影响。COSMIC 模型和 N_0 参数法均能较好估算荒漠-绿洲区中尺度土壤水分,考虑土壤中的矿物晶格水,宇宙射线中子法土壤水

反演精度高。试验期间,绿洲区平均有效监测深度为 19 cm,荒漠区为 36 cm,COSMIC 模型可以模拟探测到中子在土壤剖面的空间分布特征。未来需要重视植物水、土壤有机质、道路等对中子信号影响的研究,COSMIC 模型在实现近地面气象-水文-生态各要素数据同化方面具有较大潜力。

参考文献

- [1] Baatz R, Bogena HR, Franssen HH, *et al.* Calibration of a catchment scale cosmic-ray probe network: A comparison of three parameterization methods. *Journal of Hydrology*, 2014, **516**: 231-244
- [2] Brunetti GJ, Šimůnek H, Bogena R, *et al.* On the information content of cosmic-ray neutron data in the inverse estimation of soil hydraulic properties. *Vadose Zone Journal*, 2019, **18**: 180123
- [3] Dobson MC. Microwave dielectric behavior of wet soil-part ii: Dielectric mixing models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23**: 35-46
- [4] He HL, Dyck M, Zhao Y, *et al.* Evaluation of five composite dielectric mixing models for understanding relationships between effective permittivity and unfrozen water content. *Cold Regions Science & Technology*, 2016, **130**: 33-42
- [5] Yi J, Zhao Y, Shao M, *et al.* Soil freezing and thawing processes affected by the different landscapes in the middle reaches of Heihe River basin, Gansu, China. *Journal of Hydrology*, 2014, **519**: 1328-1338
- [6] Vather T, Everson C, Mengistu M, *et al.* Cosmic ray neutrons provide an innovative technique for estimating intermediate scale soil moisture. *South African Journal of Science*, 2019, **114**: 2017-0422
- [7] Bindlish R, Barros AP. Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **76**: 130-137
- [8] Almeida AC, Dutta R, Franz TE, *et al.* Combining cosmic-ray neutron and capacitance sensors and fuzzy inference to spatially quantify soil moisture distribution. *IEEE Sensors Journal*, 2014, **14**: 3465-3472
- [9] 李占杰, 陈基培, 刘艳民, 等. 土壤水分遥感反演研究进展. 北京师范大学学报:自然科学版, 2020, **56** (3): 474-481
- [10] Sun Y, Cheng Q, Xue X, *et al.* Determining *in-situ* soil freeze-thaw cycle dynamics using an access tube-based dielectric sensor. *Geoderma*, 2012, **189**: 321-327
- [11] Zreda M, Desilets D, Ferré TPA, *et al.* Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**: L21402
- [12] 马东豪, 张佳宝, 吴忠东, 等. 电阻率成像法在土壤水文学研究中的应用及进展. 土壤学报, 2014, **51** (3): 439-447
- [13] 蒋志云, 李小雁, 张思毅, 等. 基于电磁感应成像植被斑块土壤水盐效应研究. 生态学报, 2019, **39** (24): 9188-9199
- [14] Nguyen HH, Kim H, Choi M. Evaluation of the soil water content using cosmic-ray neutron probe in a heterogeneous monsoon climate-dominated region. *Advances in Water Resources*, 2017, **108**: 125-138
- [15] 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. 硕士论文. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017
- [16] Wang QM, Fan J, Wang S, *et al.* Application and accuracy of cosmic-ray neutron probes in three soil textures on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2019, **569**: 449-461
- [17] 谈幸燕. 宇宙射线中子法在西北农牧交错带土壤水分测量中的适用性研究. 硕士论文. 兰州: 兰州大学, 2020
- [18] 焦其顺, 朱忠礼, 刘绍民, 等. 宇宙射线中子法在农田土壤水分测量中的研究与应用. 地球科学进展, 2013, **28**(10): 1136-1143
- [19] Desilets D, Zreda M, Ferre TPA. Nature's neutron probe: land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research*, 2010, **46**: W11505.1-W11505.7
- [20] 武强, 黄娜, 罗拳拳, 等. 宇宙射线中子法测量区域土壤水分准确性季节变化研究. 农业机械学报, 2022, **53**(1): 321-330
- [21] 蒋一飞, 李晓鹏, 宣可凡, 等. 宇宙射线中子法在农田土壤水分监测中的适用性. 应用生态学报, 2022, **33**(4): 909-914
- [22] 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. 地球科学进展, 2022, **37**(9): 979-990
- [23] Franz TE, Zreda M, Rosolem R, *et al.* A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**: 453-460
- [24] Franz TE, Zreda M, Ferre TPA, *et al.* An assessment of the effect of horizontal soil moisture heterogeneity on the area-average measurement of cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research*, 2013, **49**: 6450 - 6458
- [25] 贾晓俊, 施生锦, 黄彬香, 等. 宇宙射线中子法测量土壤水分的原理及应用. 中国农学通报, 2014, **30** (21): 113-117
- [26] Shuttleworth J, Rosolem R, Zreda M, *et al.* The Cosmic-Ray Soil Moisture Interaction Code (COSMIC) for use in data assimilation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**: 3205-3217
- [27] Zhang YY, Zhao WZ, Ochsner TE, *et al.* Estimating deep drainage using deep soil moisture data under young irrigated cropland in a desert-oasis ecotone, northwest China. *Vadose Zone Journal*, 2019, **18**: 180-189
- [28] 吕明侠, 王一博, 刘国华. 黑河上游高山区浅层土壤水分变化及其影响因素. 中国农业大学学报, 2020, **25**(2): 151-159
- [29] Zhang YY, Wu SX, Kang WR, *et al.* Multiple sources characteristics of root water uptake of crop under oasis farmlands in hyper-arid regions. *Agricultural Water Management*, 2022, **271**: 107814
- [30] Zhang YY, Zhao WZ, Li XB, *et al.* Contribution of soil

- macropores to water infiltration across different land use types in a desert-oasis ecoregion. *Land Degradation & Development*, 2021, **32**: 1751–1760
- [31] Heidbüchel I, Güntner A, Blume T. Use of cosmic-ray neutron sensors for soil moisture monitoring in forests. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, **20**: 1269–1288
- [32] Zreda M, Shuttleworth WJ, Zeng X, *et al.* COSMOS: The cosmic-ray soil moisture observing system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, **16**: 4079–4099
- [33] Desilets D. Extended scaling factors for *in situ* cosmogenic nuclides: New measurements at low latitude. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **246**: 265–276
- [34] Rosolem R, Shuttleworth WJ, Zreda M, *et al.* The effect of atmospheric water vapor on neutron count in the cosmic-ray soil moisture observing system. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, **14**: 1659–1671
- [35] Hawdon A, McJannet D, Wallace J. Calibration and correction procedures for cosmic-ray neutron soil moisture probes located across Australia. *Water Resources Research*, 2014, **50**: 5029–5043
- [36] Sato T, Niita K. Analytical functions to predict cosmic-ray neutron spectra in the atmosphere. *Radiation Research*, 2006, **166**: 544–555
- [37] Franz TE, Zreda M, Ferre TPA, *et al.* Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources. *Water Resources Research*, 2012, **48**: W08515
- [38] Köhli M, Schrön M, Zreda M, *et al.* Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research*, 2015, **51**: 5772–5790
- [39] 廖桅. 宇宙射线中子土壤水分监测仪器研制与响应规律研究. 硕士论文. 兰州: 兰州大学, 2022
- [40] Schrön M, Zacharias S, Köhli M, *et al.* Monitoring environmental water with ground albedo neutrons and correction for incoming cosmic rays with neutron monitor data. 34th International Cosmic-Ray Conference, Hague, Netherlands, 2015: 231–236
- [41] Baroni G, Oswald SE. A scaling approach for the assessment of biomass changes and rainfall interception using cosmic-ray neutron sensing. *Journal of Hydrology*, 2015, **525**: 264–276
- [42] Hornbuckle B, Irvin S, Franz T, *et al.* The potential of the COSMOS network to be a source of new soil moisture information for SMOS and SMAP. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 1243–1246
- [43] Zhang YY, Zhao WZ, He J, *et al.* Soil susceptibility to macropore flow across a desert-oasis ecotone of the Hexi Corridor, Northwest China. *Water Resources Research*, 2018, **54**: 1281–1294
- [44] Jakobi J, Huisman JA, Vereecken H, *et al.* Cosmic ray neutron sensing for simultaneous soil water content and biomass quantification in drought conditions. *Water Resources Research*, 2018, **54**: 7383–7402
- [45] Andraesen M, Jensen KH, Desilets D, *et al.* Status and perspectives on the cosmic-ray neutron method for soil moisture estimation and other environmental science applications. *Vadose Zone Journal*, 2017, **16**(8)
- [46] 王秋铭, 王胜, 樊军. 宇宙射线中子法在土壤水分测量中的应用: 以陕北六道沟流域为例. *中国水土保持科学*, 2015, **13**(5): 125–131
- [47] 宋尚琨, 田静, 何洪林. 宇宙射线中子法在华北平原典型农田土壤水分测量中的应用. *应用生态学报*, 2019, **30**(3): 906–912
- [48] Schrön M, Rosolem R, Köhli M, *et al.* Cosmic-ray neutron rover surveys of field soil moisture and the influence of roads. *Water Resources Research*, 2018, **54**: 6441–6459
- [49] 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. *土壤学报*, 2015, **52**(6): 1438–1444
- [50] Tian ZC, Liu ZZ, Bao G, *et al.* Soil water content determination with cosmic-ray neutron sensor: Correcting aboveground hydrogen effects with thermal/fast neutron ratio. *Journal of Hydrology*, 2016, **540**: 923–933
- [51] Köhli M, Schrön M, Schmidt U. Response functions for detectors in cosmic ray neutron sensing. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2018, **902**: 184–189
- [52] Han X, Franssen HH, MÁ JB, *et al.* Simultaneous soil moisture and properties estimation for a drip irrigated field by assimilating cosmic-ray neutron intensity. *Journal of Hydrology*, 2016, **539**: 611–624
- [53] 彭书艳, 赵龙, 李婷婷, 等. 基于宇宙射线观测的喀斯特槽谷区典型流域土壤水分反演研究. *遥感技术与应用*, 2021, **36**(5): 997–1008
- [54] 赵原, 李晓鹏, 纪景纯, 等. 宇宙射线中子法在土壤水分监测研究中的应用进展. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(5): 545–553

作者简介 吴绍雄, 男, 1999年生, 硕士研究生。主要从事干旱区土壤水文研究。E-mail: wsx991215@163.com

责任编辑 杨弘
