DOI: 10.20103/j.stxb.202505221270

白锦涛,郑涵,金钊,包含,王志文.宇宙射线中子法在黄土丘陵沟壑区土壤水分监测中的适用性评价.生态学报,2026,46(8): - .
Bai J T, Zheng H, Jin Z, Bao H, Wang Z W.Evaluation of cosmic-ray neutron sensing method in measuring soil moisture in the loess hilly-gully region, China.Acta Ecologica Sinica,2026,46(8): - .

宇宙射线中子法在黄土丘陵沟壑区土壤水分监测中的适用性评价

白锦涛[1,2],郑 涵[1,2,3,*],金 钊[4,5,6],包 含[3,7,8],王志文[9]

1 长安大学水利与环境学院旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054

2 长安大学水利部旱区生态水文与水安全重点实验室(筹),西安 710054

3 长安大学黄土科学全国重点实验室,西安 710054

4 中国科学院地球环境研究所黄土科学全国重点实验室,西安 710061

5 中国科学院地球环境研究所黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站,西安 710061

6 北京师范大学地球科学前沿交叉研究中心,北京 100875

7 长安大学公路学院,西安 710064

8 长安大学西安市绿色智慧交通岩土工程重点实验室, 西安 710064

9 北京师范大学水科学研究院,北京 100875

摘要:利用宇宙射线中子法(Cosmic-ray neutron sensing,CRNS)能够监测百米尺度源区内的土壤含水量,其在下垫面地形较为复杂的黄土丘陵沟壑区的适用性和准确性还有待检验。本研究选取黄土丘陵沟壑区典型小流域为研究对象,以 CRNS 为技术手段,于 2018—2019 年开展了 12 次大范围分布式烘干称重法测量(0—350 m),首先分析了研究期内整个研究区与沟道区域的土壤水分变化特征;然后根据三种权重计算方法(动态加权法、直接平均法和平均加权法)获得的土壤含水量进行 N_0值的校准,评估 CRNS 法在黄土丘陵沟壑区的测量足迹和准确性;并通过与时域反射法(TDR)的连续监测数据对比,分析了 CRNS 法连续性反演结果的稳定性及其对降雨事件的响应能力。结果表明,烘干称重法测量的整个研究区的平均土壤含水量小于沟道区域平均土壤含水量,且二者变化趋势一致;CRNS 的水平足迹半径与垂向测量足迹平均值分别为 336.0 m 和 23.4 cm,水平测量足迹受气压影响变化较为稳定,而垂向测量足迹随距离仪器中心的位置和土壤水分状况呈现出明显的波动性;CRNS 法与烘干称重法的线性拟合结果 R^2>0.9、RMSE 介于 0.027—0.037 cm^3/cm^3,表明 CRNS 法在黄土丘陵沟壑区能够准确测量源区平均土壤含水量;在稳定性方面,CRNS 法反演的沟道区域平均土壤含水量与 TDR 点尺度测量结果的变化趋势保持一致(冬季结冰期除外),二者对于降水过程均有明显响应,且 CRNS 法的灵敏性更优。综上,CRNS 法凭借其较大的测量源区、非破坏性及对黄土质地和地形的适配性,在黄土丘陵沟壑区百米级范围平均土壤含水量的测量准确可信,可弥补传统点尺度测量与大尺度遥感反演方法的不足。

关键词:宇宙射线中子法;土壤水分;黄土丘陵沟壑区;流域尺度

Evaluation of cosmic-ray neutron sensing method in measuring soil moisture in the loess hilly-gully region, China

BAI Jintao[1,2], ZHENG Han[1,2,3,*], JIN Zhao[4,5,6], BAO Han[3,7,8], WANG Zhiwen[9]

1 *Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region, Ministry of Education, School of water and environment, Chang'an University, Xi'an* 710054, *China*

2 *Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an* 710054 *China*

3 *State Key Laboratory of Loess Science, Chang'an University, Xi'an* 710054, *China*

基金项目:国家自然科学基金项目(32571815,32071586);中央高校基本科研业务费资助项目(300102293207)

收稿日期:2025-05-22; **网络出版日期**:2026-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhenghan@chd.edu.cn

4 *State Key Laboratory of Loess Science*, *Institute of Earth Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xi'an* 710061, *China*
5 *National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau of Shaanxi*, *Institute of Earth Environment*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xi'an* 710061, *China*
6 *Interdisciplinary Research Center of Earth Science Frontier*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*
7 *School of Highway*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710064, *China*
8 *Xi'an Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Green and Intelligent Transport*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710064, *China*
9 *College of Water Science*, *Beijing Normal University*, 100875, *China*

Abstract: Cosmic-ray neutron sensing (CRNS) can monitor soil water content (SWC) in the 100-meter scale source area, but its applicability and accuracy in the loess hilly-gully region with complex terrain require validation. In this study, a typical sub-watershed in the loess hilly-gully region was selected as the research object, and CRNS was used as the technical means. Twelve large-scale distributed oven-drying method measurements (0—350 m) were carried out in 2018—2019. Firstly, we analyzed the characteristics of soil moisture changes in the whole study area and gully region during the study period; then, according to the soil moisture content obtained by three weighting methods (dynamic weighting, average and uniform weighting) was calibrated to the N_0 value to assess the measurement footprint and accuracy of the CRNS method in the loess hilly -gully region; and we analyzed the stability of the continuous CRNS-inversed soil water content (SWC) and its responsiveness to rainfall events by comparing them with the continuous monitoring data of the time-domain reflectance (TDR) method. The results showed that the average SWC of the whole study area measured by the oven-drying method was smaller than the average SWC of the gully region, and both of them have the same trend of change; the average values of the horizontal footprint radius and the vertical footprint of the CRNS method were 336.0 m and 23.4 cm, respectively, and the horizontal footprint varied steadily under the influence of air pressure, while the vertical footprint showed obvious fluctuation according to the distance from the center of the instrument and the soil moisture condition; the R^2 of the linear fit between the CRNS method and the oven-drying method was greater than 0.9, and the RMSE was in the range of 0.027—0.037 cm^3/cm^3, which indicated that the CRNS method was able to accurately measure the soil moisture content of the region in the loess hilly-gully region. In terms of stability, the trends of regional CRNS-inversed SWC and the average soil water content at 20 cm depth in the gully region obtained by the TDR method were identical except for the winter freezing period, and both of them responded significantly to the precipitation process, and the sensitivity of the CRNS method was better. In conclusion, the CRNS method, with its large-scale coverage, non-destructiveness, and adaptability to loess texture and topography, can accurately and reliably measure the average SWC at the hectometer scale in the loess hilly-gully region, and can make up for the deficiencies of the traditional point-scale and remote sensing methods.

Key Words: cosmic-ray neutron method; soil moisture; loess hilly and gully area; watershed scale

土壤水是“五水”(即大气、植物、地表、土壤和地下水层中的水)转化的纽带,对水资源的分配、地表能量平衡和生态环境的稳定性都有着深远的影响[1]。黄土丘陵沟壑区位于干旱半干旱区,是我国旱作农业的重要分布区之一,土壤水分是该地区植被生长和农业发展的重要限制因子[2—3]。作为中国乃至全球范围内生态环境最为脆弱、水土流失最为严重的地区之一[4—5],黄土丘陵沟壑区也是我国实施植被恢复(如退耕还林还草)、沟道治理(如治沟造地、梯田、淤地坝)等生态治理措施的关键区域[6],这导致该地区地形地貌、土地利用、植被分布等空间异质性较大。加之降雨的季节性特征明显,黄土丘陵沟壑区的土壤水分时空变异性极强。因此,黄土丘陵沟壑区中小尺度范围内(如小流域)土壤水分的精确测量较为困难[7—8]。

目前在黄土丘陵沟壑区常用的土壤水分测量方法分为点尺度和大尺度两种[9]。点尺度观测方法主要包括烘干称重法、中子仪法、基于土壤介电特性的频域反射法(FDR)和时域反射法(TDR)等[10—11]。已有学者将 TDR 数据与地统计学等空间插值方法结合,研究了黄土丘陵沟壑区小流域尺度或坡沟系统土壤水分的时空变化特征[12]。但是这些测量方法往往会在一定程度上破坏土壤结构,且测量数据易受地形起伏、景观类型和土壤性质的影响,导致测量结果在区域尺度上存在一定的不确定性[13]。大尺度土壤水分的观测方法以遥感技术为主,包括可见光—近红外法、微波遥感法和热红外法等为主[14]。针对多源遥感产品在土壤水分反演

中的适用性的研究表明,在黄土丘陵沟壑区不同季节、不同地形条件下,部分遥感产品更适宜用于区域土壤水分监测,但遥感反演结果仅代表表层土壤水分状况(<10 cm),空间分辨率低[15—16],且遥感反演模型受环境因子、植被状况和地形条件的制约影响仍需进一步消除[17]。因此,针对目前在黄土高原地区中、小尺度范围内的农业、气象、水文、生态等问题,以上两种方法均存在尺度上的缺失。

宇宙射线中子技术(Cosmic-ray neutron sensing,CRNS)作为近年来新兴的一种被动的、非侵入性的中尺度土壤水分直接测量方法,能够代表水平半径约 300 m 范围内的平均土壤含水量[18]。CRNS 法较大的测量源区填补了传统点尺度观测与遥感大尺度反演之间的尺度空白,同时有着测量深度较深(12—76 cm)、不受土壤结构异质性影响、可连续测量等优点[18]。近年来,CRNS 法已被应用于不同气候条件下的森林、草地、农田等各类生态系统的土壤水分研究,但在黄土高原丘陵沟壑区等地形地貌、土地利用、植被分布等空间异质性较大的复杂下垫面的应用则较少。已有学者分析了 CRNS 法在黄土高原不平坦且破碎的下垫面条件下土壤水分监测中的适用性,但其用于 CRNS 校准和验证的地面采样范围(75—175 m)往往小于 CRNS 源区范围(约 300 m)[19—20],这限制了本研究对于黄土高原异质地表下 CRNS 校准及准确性的整体认知。因此,CRNS 法在地形起伏明显、土壤水分分布复杂的黄土丘陵沟壑区土壤水分监测中的适用性还需结合地面大范围分布式采样进一步探讨。

本研究在黄土丘陵沟壑区一典型小流域沟道内设置了 CRNS 土壤水分观测系统。研究区沟道为土地整治工程形成的坝地农田,坡面为退耕还林还草工程形成的林地或草地,测量环境复杂,空间异质性大。本研究利用 2018 年 9 月至 2019 年 10 月的 CRNS 连续监测数据,结合 12 次大范围分布式烘干称重法测量(0—350 m)和点尺度 TDR 传感器连续监测数据,明晰了 CRNS 法在黄土丘陵沟壑区的测定范围和权重分布,并系统评价了 CRNS 法的准确性、稳定性和灵敏性。研究结果可为 CRNS 法在不同类型下垫面土壤水分监测中的应用以及区域土壤水分信息的获取提供科学依据。

1　研究区域与数据获取

1.1　研究区概况

研究区位于陕西省延安市顾屯流域(36°45′—36°51′N,109°46′—109°51′E),地处黄土高原中部,为典型的黄土丘陵沟壑区。顾屯流域地势西北高东南低,平均海拔约为 1105 m。流域总面积约为 24 km^2,沟道截面均为“U”形,主沟道自西北向东南延伸,长度约为 12.5 km。为实现增加耕地面积和保护环境并重的目标,2011—2014 年延安市通过实施大规模的沟道土地整治工程(即治沟造地工程)在顾屯流域建造 200 hm^2平坦的沟道坝地农田[6,21—22]。顾屯流域原始沟道冲沟下切强烈,地形坡度较大,通过沟道治理和流域地貌改造后坡度变缓,靠近山脊处坡度也相对平缓,但是坡体坡度变得陡峭。

研究区属于暖温带半干旱大陆性季风气候,多年平均气温为 10.6℃,年内温差大,最低气温为-18℃,最高气温达 31℃;多年平均降雨量为 530.9 mm,具有明显的年内与年际变异趋势[23]。降雨主要集中在夏秋两季,这也是植物生长的旺季,6—9 月的降雨量达到全年总降水量的 70%。研究区土壤主要为黄壤土,土壤质地为粉砂质壤土。研究期内沟道坝地农田主要种植旱作春玉米,地下水位埋深约为 4 m,土壤容重在 1.4—1.76 g/cm^3之间。坡面土层深厚(30—80 m),土壤容重约为 1.4 g/cm^3,主要为退耕还林还草工程形成的刺槐林(阳坡)和草地(阴坡)[23]。

1.2　数据获取

1.2.1　宇宙射线土壤水分观测系统

CRNS 土壤水分观测系统(CRS-1000/B,Hydroinnova LLC,Albuquerque,USA)于 2018 年 9 月 10 日安装于研究区一处沟道农田的中心位置处(36°47′ N,109°48′ E),距离地面高度为 0.5 m。CRNS 系统由中子探测器、数据采集器和供电系统组成,数据采样间隔设定为 30 min。本研究使用 CRNS 系统 2018 年 9 月至 2019 年 10 月之间的观测数据。

1.2.2 分布式采样

本研究利用分布式采样与烘干称重法获得土壤含水量数据校正和验证 CRNS 测量结果。取样规则在 Zreda[18] 提出的方法基础上结合实际情况进行了调整,具体为:分布式采样点以 CRNS 为中心呈轴对称分布,每间隔 60°为一个方向,在各个方向上距离中子探测器 25、75、175 和 350 m 处设置采样点位,共计 24 个采样点(图 1)。每个点位在距地面 10、20 和 30 cm 处各取样一次,即每个取样点可获取 3 个样品,一次分布式采样可获得 72 个土壤样品。

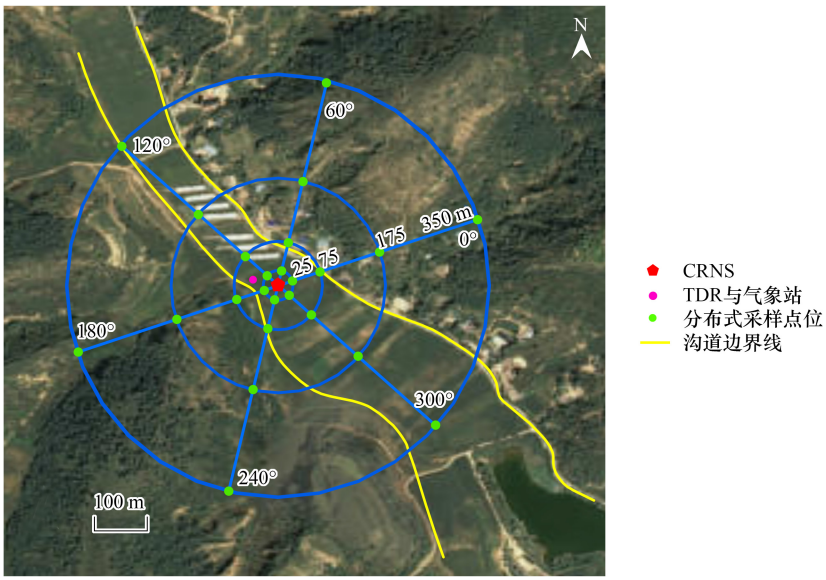

图 1 仪器布置与烘干法采样点分布示意图

Fig.1 Distribution of instruments and sampling points

研究期内共计开展了 12 次分布式土壤样品采集,采样期覆盖了研究区的旱季和雨季、以及沟道作物的不同生长期,并且在降雨多发的 6—9 月增加采样频率。12 次采样时间分别为 2018 年 9 月 20 日、2018 年 11 月 26 日、2019 年 5 月 28 日、2019 年 6 月 27 日、2019 年 7 月 3 日、2019 年 7 月 16 日、2019 年 7 月 27 日、2019 年 8 月 16 日、2019 年 8 月 29 日、2019 年 9 月 15 日、2019 年 10 月 2 日、2019 年 10 月 18 日。利用环刀法计算土壤容重,利用土壤重量含水量,进而计算土壤体积含水量。

1.2.3 时域反射法土壤水分数据和气象数据获取

研究区 CRNS 同一观测场地内设置了土壤含水量观测设备和自动气象站。采用 CS650 土壤水分时域反射仪(Campbell Scientific,Logan,美国)自动连续监测 5、10、20、40 cm 深度土层的土壤体积含水量。同时,利用自动气象站对研究区的大气压强(CS106, Campbell Scientific Inc., Logan, 美国)、空气温/湿度(HMP155A, Campbell Scientific Inc., Logan, 美国)、降雨量(TE525MM, Campbell Scientific, Logan, 美国)等气象要素进行自动连续观测,为后续 CRNS 原始中子数的校正、CRNS 系统对降雨事件的响应能力等研究提供数据基础。以上数据使用 CR1000X 数据采集器(Campbell Scientific,Logan,美国)采集数据,采样频率设置为 10 s,通过在线计算并输出与 CRNS 系统同步的 30 min 平均值。

2 研究方法

2.1 CRNS 测量范围与权重分布

2.1.1 水平测量足迹与权重分布

CRNS 法的水平测量足迹通常被定义为以 CRNS 为中心测量到区域内 86%的快中子数的测量半径[24]。CRNS 的测量足迹大小主要与大气的物理化学属性有关,而与土壤含水量等因素无关,测量半径与气压呈反

比关系[25]。即:

$$R=R_0\left(\frac{P_0}{P}\right) \tag{1}$$

式中,R 为基于该方法计算的当前气压条件 P 下的足迹半径值(m);R_0为参考气压 P_0(101.325 kPa)下的参考半径(300 m)[25]。

根据 Köhli 等[26]的研究,在 SWC 大于 0.02 cm^3/cm^3的土壤中,某一区域探测到的快中子数量与到 CRNS 的距离存在权重关系。将水平足迹半径的加权函数 dN/dr 视作 W_r,其随半径变化不连续。该函数可用一个分段函数表示:

$$W_r\approx\begin{cases}F_1e^{-F_2r}+F_3e^{-F_4r}, 0.5\ \text{m}<r\leqslant 50\ \text{m}\\ F_5e^{-F_6r}+F_7e^{-F_8r}, 50\ \text{m}<r\leqslant 600\ \text{m}\end{cases} \tag{2}$$

式中,W_r代表 dN/dr,作为水平距离的加权函数;r 为到 CRNS 的距离(m);F_i的值由经验公式得出[26]。

距离中子探测器 r_1和 r_2区域内的权重则为:

$$W_{r_1-r_2}=\frac{\int_{r_1}^{r_2}W_r dr}{\int_0^R W_r dr}, 0\leqslant r_1<r_2\leqslant R_m \tag{3}$$

式中,R_m为 CRNS 水平足迹半径最大值(m);r 为探测点距仪器中心水平距离(m),$r\leqslant R$;W_r代表水平距离的权重函数。参考 CRNS 在本研究区的最大测量半径(结果 3.2.1,最大划分范围向十位取整)以及分布式采样点的采样距离,本研究将观测场划分为 0—50 m、50—125 m、125—262.5 m、262.5—350 m 等数个范围,以计算水平足迹权重。

2.1.2　垂向测量足迹与权重分布

CRNS 的垂向测量足迹定义为测到的区域内 86%的快中子数的测量深度,随土壤含水量增大而降低[24]。当土壤水分较多时,土壤中慢化的快中子数就越多,能够继续往下传播的快中子数就越少,测量深度越浅。CRNS 的平均有效测量深度(Z_0,cm)可用下式计算[27]:

$$Z_0=\frac{5.8}{\rho_b\times\tau+\theta+0.0829} \tag{4}$$

式中,ρ_b为土壤容重(g/cm^3);τ 为晶格含水量,数值较小,在计算中忽略不计;θ 为土壤含水量(cm^3/cm^3)。

同样 Köhli 等[26]的研究表明,CRNS 的测量深度与距离和 SWC 成反比。即距离仪器越近,SWC 越小,测量深度则越深。CRNS 测量深度(Z,cm)计算公式如下:

$$Z=\left(p_0+p_1(p_2+e^{-r/100})\frac{p_3+\theta}{p_4+\theta}\right)/\rho_b \tag{5}$$

式中,r 为计算点到 CRNS 的距离(m);θ 为土壤含水量($cm^{3/}$ cm^3);p_0、p_1、p_2、p_3、p_4均为常数,取值分别为 8.321、0.14249、0.96655、26.42 和 0.0567。

垂向上 CRNS 的权重随着深度和距离仪器的距离呈指数函数形式递减[26]:

$$W_z=e^{-\frac{2z}{Z}} \tag{6}$$

$$W_{z_1-z_2}=\frac{\int_{z_1}^{z_2}W_z dz}{\int_0^Z W_z dz}, 0\leqslant z_1<z_2\leqslant Z_m \tag{7}$$

式中,W_z为垂向距离上的权重函数;Z_m为 CRNS 观测最大深度(cm);z 为探测点土壤深度(cm),$z\leqslant Z$;$W_{z1—z2}$为距 CRNS 不同距离处垂向上 z_1—z_2区间内的权重。本研究将垂向深度范围按 10 cm 划分,即 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 三个范围,以计算垂向足迹权重。

2.2　原始中子数校正

地表附近的快中子密度会受到大气压、空气水汽、太阳辐射等因素的影响,因此在利用 CRNS 法估算

SWC 之前需要对原始中子密度进行校正。本研究监测期从 2018 年 9 月一直持续到 2019 年 10 月,监测周期长、频率高,设备更换、环境改变等难免会造成测量误差。因此,在开展原始中子数校正之前,首先对 CRNS 的原始监测数据进行质量控制,剔除仪器非正常工作情况下的数据,并利用线性内插法进行插补。在此基础上,本研究按照 Zreda[18] 提出的方法对原始中子数进行气压校正、空气水汽校正和太阳辐射校正,具体计算公式如下:

$$N = N_{raw} \times f_p \times f_{wv} / f_i \tag{8}$$

$$f_p = \exp\left(\frac{P_0 - P}{L}\right) \tag{9}$$

$$f_{wv} = 1 + 0.0054(\rho - \rho_0) \tag{10}$$

$$f_i = \frac{I_m}{I_0} \tag{11}$$

式中,N 为校正后中子数;N_{raw}为原始中子数;f_p、f_{wv}和f_i分别为气压、水汽和辐射校正因子;P_0为参考大气压强(kPa),取研究期内的气压平均值;P 为实际大气压(kPa);L 为高能中子的质量衰减长度(g/cm^2),介于 128 g/cm^2(高纬度)和 142 g/cm^2(低纬度)之间,经计算本研究区 L 约为 136 g/cm^2;ρ 为绝对水汽密度(g/cm^3);ρ_0为参考条件下的水汽密度,通常取 0;I_m为校准期间实测快中子数;I_0为参考快中子数,即同期测量的平均中子密度。I_m和 I_0数据来源于瑞士少女峰观测站(东经 7.89°,北纬 46.55°,海拔 3750m)的观测数据(http://cosray.unibe.ch/)。

2.3 CRNS 法土壤含水量计算与验证

为了从 CRNS 获得的中子强度数据计算土壤含水量,Desilets[28] 利用 MCNPX 模型模拟快中子运动状态,建立宇宙射线中子法的反演函数。该函数描述了快中子数与土壤含水量之间的关系:

$$\theta(N) = \frac{a_0}{\frac{N}{N_0} - a_1} - a_2 \tag{12}$$

式中,$\theta(N)$为测量源区内的平均土壤体积含水量(cm^3/cm^3);修正参数 a_0、a_1、a_2分别取值 0.0808、0.372、0.115;N 为经过校正的快中子数(公式 8);N_0为研究区土壤完全干燥条件下的快中子数。

2.3.1 N_0值校准

利用上述 N_0参数法估算 SWC 时最重要的是 N_0值的校准,该值通常是利用分布式采样获得的 SWC 实测值,并结合一定的加权算法获得代表 CRNS 测量源区的平均土壤含水量,然后由公式(12)反推得出[28]。本研究利用 3 种权重计算方法[29]获得的 SWC 值反推 N_0值,分别为:1)动态加权法(Dynamic weighting):根据 2.1 节获得的本研究区 CRNS 的水平和垂直方向上的权重分布,分别按照不同距离和不同深度的加权比例计算得到 12 次分布式采样日相应的加权 SWC(12 个值); 2)平均权重法(Uniform weighting):按照 12 次采样日不同距离和不同深度的平均权重值计算一个加权 SWC 值;3)直接平均法(Average):将 12 次分布式采样获得的所有 SWC 数据(共计 12×72 个数据)直接取算术平均值。由此,将 3 种权重计算方法获得的区域平均 SWC 分别代入公式(12)可反推求取相应的 N_0值,分别记为 N_{0D}、N_{0U}和 N_{0A}。

本研究根据 3 种 N_0校准方案,每个采样日可获得 3 个 N_0值。本研究取不同校准方案下 12 次采样日的 N_0值的平均值作为相应校准方案的固定 N_0值。

2.3.2 土壤含水量反演与精度评价

结合校正后的 CRNS 中子数(公式 8)和 N_0值,利用公式(12)可以反演计算研究期内 3 种 N_0校准方案下的 SWC 数据。为评估 CRNS 法测量区域平均 SWC 的准确性,本研究将其与研究区内烘干称重法获得的 SWC 加权平均值进行比较,并采用决定系数(coefficient of determination,R^2)、Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)和均方根误差(root mean square error,RMSE)三个评价指标对 CRNS 测量结果的精确性进行评价。R^2与 NSE 越接近

于 1,表示烘干法和 CRNS 测量的 SWC 线性相关性越高,土壤水分反演模型可信度越高[30];RMSE 值越小,表明烘干法和 CRNS 测量的 SWC 平均值差异越小。

为了分析 CRNS 反演结果的稳定性和灵敏性,本研究还利用沟道区域分布式采样获得的 SWC 实测值,结合平均权重法校准 N_0 值(根据结果 3.3 为最优校准方案,$N_{0CU}=1787$),根据公式(12)获得研究期内沟道区域 CRNS-SWC 的时间序列。本研究将 TDR 传感器测量的 0—20 cm 深土层(与 CRNS 测量深度相匹配)的平均 SWC 连续数据与沟道区域 CRNS—SWC 序列进行比较,以此评价 CRNS 反演结果的稳定性及其对降雨事件的响应能力(即灵敏性评价)。

3　结果与分析

3.1　研究期内土壤水分变化特征

研究期内本研究开展了 12 次多点人工取样,覆盖沟道和边坡植物的完整生长季。结果表明,在整个试验期间,烘干称重法测量的整个研究区(即沟道+坡面)的加权平均 SWC 小于沟道区域,平均值分别为 0.177 cm^3/cm^3和 0.204 cm^3/cm^3(图 2)。结合研究区中心 TDR 点尺度连续土壤水分数据,可以将整个研究区和沟道区域 SWC 的变化趋势分为三个阶段:下降阶段、稳定波动阶段和上升阶段。第一阶段 SWC 从 2018 年 9 月的 0.243 cm^3/cm^3下降到 2019 年 6 月份的 0.104 cm^3/cm^3和 0.110 cm^3/cm^3。第二阶段 2019 年 6 月—8 月 SWC 波动较小。第三阶段,随着 8 月下旬开始降雨增多,2019 年 9 月—11 月土壤水分明显增加,10 月 18 日达到最大值 0.285 cm^3/cm^3和 0.294 cm^3/cm^3。沟道区域平均 SWC 大于整个研究区的平均 SWC,这主要是由于沟道内地形对降水的汇集作用[31—32],而造成三个阶段不同的土壤水分变化特征的主要原因是降水与蒸散之间的平衡[21,33]。

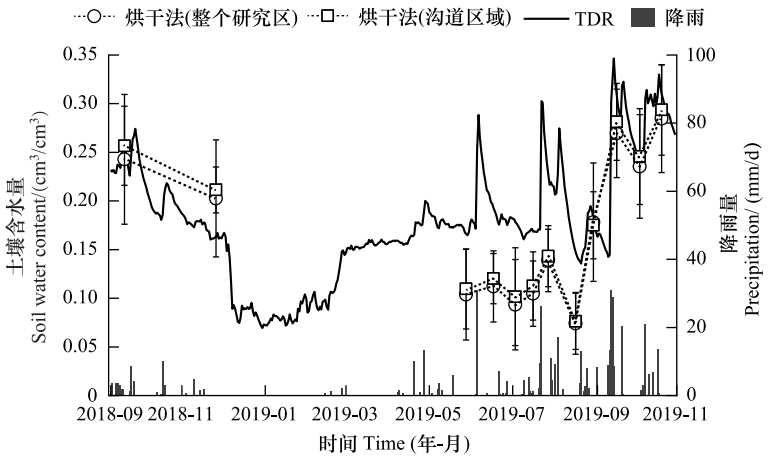

图 2　烘干称重法和时域反射法测量土壤含水量及降雨的动态变化

Fig.2　Dynamics of soil water content measured by oven-drying and time-domain reflectance method, and rainfall

3.2　CRNS 法测量范围

3.2.1　水平测量足迹与权重分布

根据公式(1)与每日气压数据计算得出研究期内 CRNS 在黄土丘陵沟壑区测量土壤水分的水平足迹半径的时间序列如图 3 所示。由图可知,CRNS 的水平足迹半径在研究期内较为稳定(变异系数为 0.69%),介于 329.0—341.1 m,平均值为(336.0 ±2.3)m,比海平面 CRNS 的测量半径(300 m)[25]大 12.4%,这主要是由于在本研究区的研究期内平均气压为(90.5±0.6) kPa,较标准气压低约 10%导致的。

根据研究方法 2.1.1 部分将研究区划分为 4 个区域:0—50 m、50—125 m、125—262.5 m 和 262.5—350 m,通过公式(2)计算不同区域的土壤水分(快中子数)对 CRNS 测量结果的权重分布情况如表 1 所示。结果显

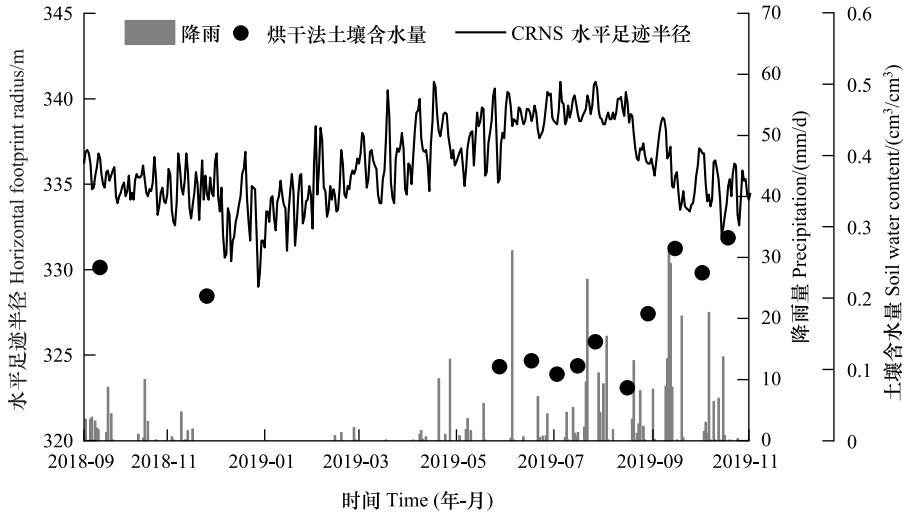

图 3 观测期内 CRNS 法的水平足迹半径随时间的变化

Fig.3 Variation in the horizontal footprint radius for the CRNS method during observation period

示,距离 CRNS 中心位置越近,其对 CRNS 测量结果的贡献越大。其中,0—50 m 空间范围的平均权重达 54.96%,而距离 CRNS 中心位置 125 m 之外的区域平均权重合计不到 21%。

表 1 CRNS 的水平测量足迹权重分布

Table 1 Radial weight distribution of CRNS

距 CRNS 的距离/m Distance from CRNS	代表区域/m Representative area	权重 Weights	距 CRNS 的距离/m Distance from CRNS	代表区域/m Representative area	权重 Weights
25	0—50	54.96%	175	125—262.5	16.35%
75	50—125	24.16%	350	262.5—350	4.53%

3.2.2 垂向测量足迹与权重分布

根据分布式采样获得 SWC 数据和公式(5)计算可知,CRNS 的测量深度随距离仪器中心的位置和采样时期的土壤水分状况呈现出明显的波动性(图 4)。整体而言,距离仪器越近、SWC 越低时,CRNS 的测量深度越深(从距离仪器中心 25 m 到 350 m 处,平均测量深度由 27.6 cm 减小至 19.4 cm,表 2)。整个研究区内 CRNS 的平均有效测量深度则根据公式(4)计算,结果表明深度在 16.4 cm (2019 年 9 月 15 日,SWC = 0.2716 cm^3/cm^3) 和 31.2 cm(2019 年 8 月 16 日,SWC = 0.1030 cm^3/cm^3)之间变化,研究期内平均测量深度为 23.4 cm。

表 2 CRNS 的测量深度与权重分布

Table 2 Measuring depth and weight distribution of CRNS

距 CRNS 的距离 Distance from CRNS/m	代表区域 Representative area/m	平均土壤体积含水量 Average soil volumetric water content/(cm^3/cm^3)	测量深度 Measuring depth/cm	权重 Weights		
				0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm
25	0—50	0.1849	27.6	59.64%	28.88%	11.48%
75	50—125	0.1942	22.9	67.27%	28.14%	4.59%
175	125—262.5	0.1678	21.2	70.55%	27.51%	1.94%
350	262.5—350	0.1627	19.4	74.35%	25.65%	—

262.5—350 m 范围平均测量深度小于 20 cm,故 20—30 cm 处权重缺失

为分析 CRNS 的垂向足迹对降雨事件的响应特征,本研究将 CRNS 法反演的 SWC 数据代入公式(4)获得了 CRNS 测量深度的动态变化,如图 5 所示。结果表明,两种 SWC 数据计算的测量深度具有较好的一致性

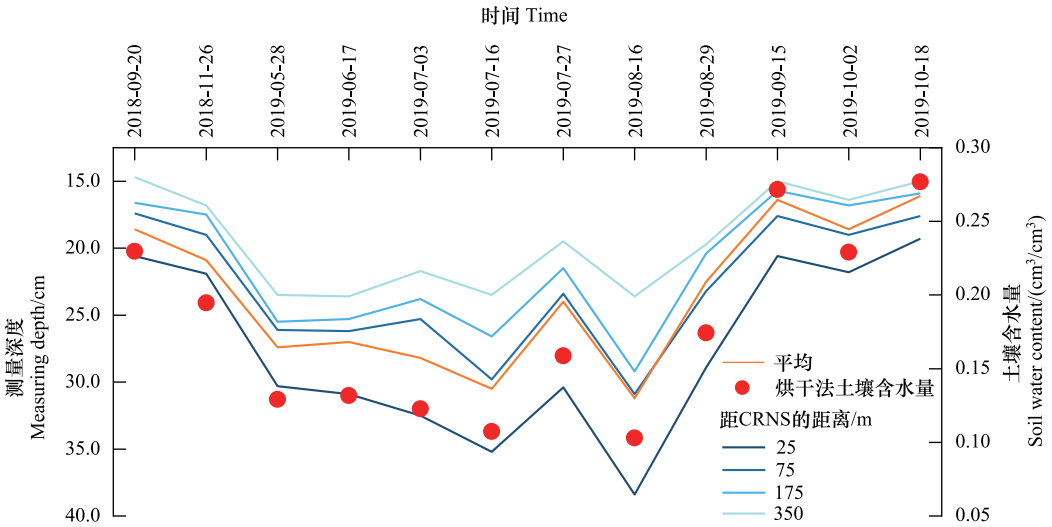

图 4　基于分布式采样数据的不同空间位置下 CRNS 的有效测量深度

Fig.4　Effective measuring depth of CRNS at different spatial locations obtained based on distributed sampling data

(图 4 和图 5)。由图 5 可以看出,研究期内 CRNS 的垂向足迹变化剧烈,对降雨事件十分敏感。降雨事件的发生往往伴随着测量深度的减小,尤其是 2019 年 8—9 月多次持续性降雨事件导致 CRNS 测量深度减小至 11.2 cm。

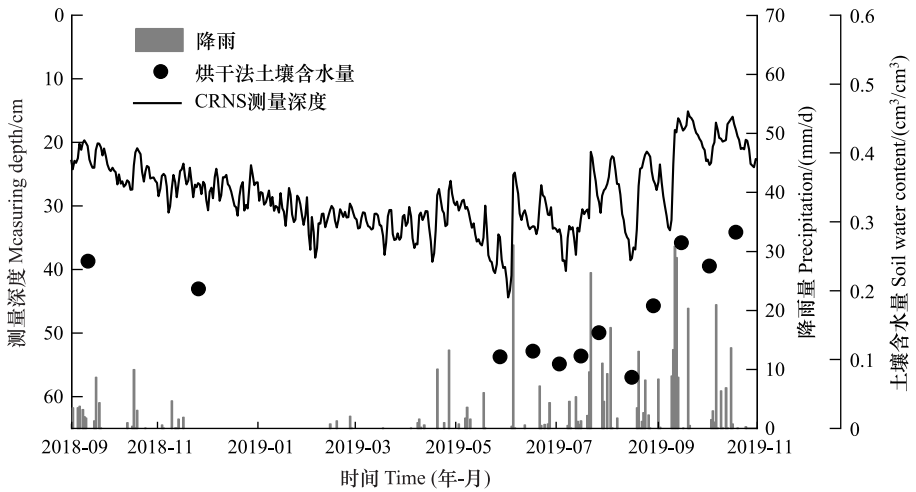

图 5　观测期内 CRNS 法的平均有效测量深度随时间的变化

Fig.5　Variation in the mean effective measuring depth of the CRNS method during observation period

CRNS 在本研究区的垂向足迹权重也随空间位置以及土壤水分变化呈现出不同的分布情况,如表 2 所示。从中可以看出,三个垂向深度范围(0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm)土壤水分对 CRNS 测量结果的贡献随采样位置而变化。整体上,0—10 cm 土层 SWC 权重最大,采样期内距仪器中心 25 m 处的平均权重为 65.0%,距仪器中心 350 m 处的权重则高达 79.5%(表 2)。

3.3　CRNS 法与烘干称重法测量结果的比较

基于 3 种 N_0 校准方案获得的 N_0 值($N_{0D}=1768$,$N_{0U}=1786$,$N_{0A}=1803$)和经过校正后的中子数,根据公式(12)可以获得研究期内 CRNS 测量源区的平均 SWC(CRNS-SWC)的时间序列,如图 6 所示。结果表明,3 种 N_0 校准方案获得的 CRNS-SWC 在研究期内变化趋势基本一致,其波动情况均对降雨事件非常敏感。同时,分

布式采样获得的研究区平均 SWC 数据点均分布于 CRNS-SWC 曲线附近(图 6),这表明 CRNS 在黄土丘陵沟壑区土壤水分监测中具有较高的精度。

为进一步评估 CRNS 测量结果的准确性,本研究将烘干称重法加权平均 SWC 实测数据与对应日期的 3 种 N_0校准方案获得的 CRNS-SWC 数据进行线性回归分析。由图 7 可知,拟合直线的斜率介于 1.12—1.22,R^2 均大于 0.9,RMSE 介于 0.027—0.037 cm^3/cm^3,NSE 介于 0.737—0.854,表明 3 种 N_0校准方案获得的 CRNS 测量值均与烘干称重法测量值具有较好的匹配度。其中,平均权重法(即 $N_{0U}=1768$)校准的 CRNS 测量值与烘干称重法测量值相关性最强($R^2=0.908$),RMSE 仅为 0.027 cm^3/cm^3,NSE 则高达 0.854。

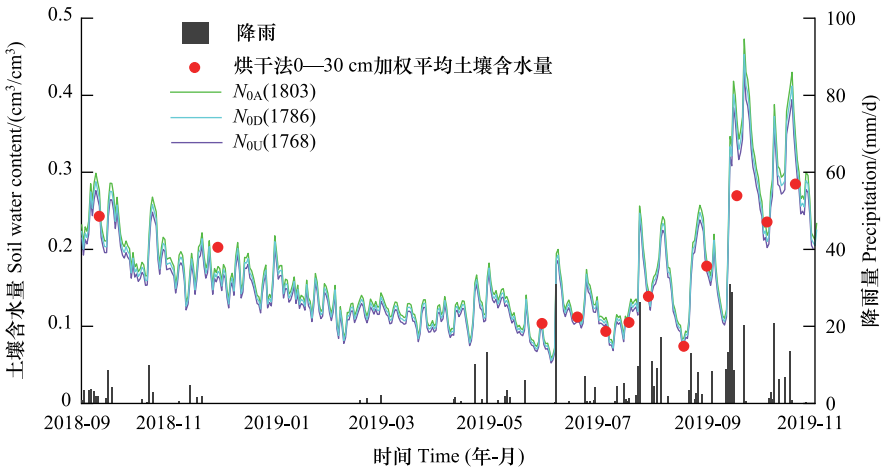

图 6 CRNS 法反演的源区平均土壤含水量的时间序列及其与烘干法土壤含水量观测值的比较

Fig.6 Time series of average soil water content in source areas inverted by the CRNS method and its comparison with soil water content observations by the oven-drying methods

N_{0D}、N_{0U}和 N_{0A}分别表示基于动态加权法、平均权重法和直接平均法获得的 N_0值

3.4 CRNS 法与 TDR 测量结果比较

沟道区域 CRNS-SWC 数据($N_{0CU}=1787$)与 TDR 法测量的点尺度 SWC 连续数据对比结果以及不同深度土壤含水量对降雨的响应如图 8 所示。结果表明,观测期内沟道区域 CRNS-SWC 数据大于整个研究区,TDR 法及烘干法不同深度测量结果与 CRNS 测量结果的变化趋势大体一致,依次呈现为下降、稳定波动和上升三个阶段,但波动情况不尽相同。比如,在降雨事件频发且降雨量较大的 2019 年 8—10 月,CRNS 和 TDR 测量结果均剧烈波动、且数值大小较为接近,不同深度的土壤含水量差异较小;而在降雨量较少的 2019 年 4—7 月,TDR 测量结果的波动变化相对较弱、且烘干法土壤含水量在不同深度差异明显(图 8)。

4 讨论

4.1 CRNS 法的测量范围及其影响因素

本研究分析了 CRNS 法在地形较为复杂的黄土丘陵沟壑区土壤水分监测中的适用性,表明 CRNS 法能够有效地获取源区土壤水分,其准确性、稳定性和灵敏性均可以满足实际的应用需求。然而,CRNS 法在不同研究区的测量范围有所不同。在本研究中,CRNS 的水平测量足迹半径介于 329.0—341.1 m,平均值为(336.0 ± 2.3) m,该结果远大于学者在黄土高原三种土壤质地的研究结果(127—170 m),这是因为该研究计算足迹半径时综合考虑了气压、空气湿度、SWC 等因素的影响。研究表明,不同研究区 CRNS 水平测量半径间的差异主要是由海拔高度不同造成的,如在青藏高原高寒草甸生态系统的研究中,其研究区海拔为 4600 m,高海拔区域气压较低,较低的空气密度使得有效碰撞变少,中子转移距离变长[26],从而导致 CRNS 在该研究区的测量半径(580 m)明显大于本研究区[34]。

与水平测量范围不同,CRNS 法的有效测量深度主要取决于研究区的土壤水分状况,往往随土壤含水量的增大而减小[27]。在本研究采样期内,CRNS 的平均有效测量深度介于 16.4—31.2 cm(平均值为 23.4 cm),对比发现大于武强等[35](17.3—21.0 cm)和 Pang 等[33](16.0—23.0 cm)在复杂下垫面中的测量深度,这是因为其研究周期内的表层土壤含水量均大于本研究(分别为 0.24 kg/kg[35]与 0.23 cm^3/cm^3[33])。而对于土壤含水量较小的黄土高原草地生态系统[19]和青藏高原高寒草甸生态系统[34](SWC 最大值约为 0.2 cm^3/cm^3),其测量深度最大可以达到 50 cm。值得注意的是,石耀辉等[36]评估了 CRNS 法在草地、农田和林地三种不同生态系统土壤水分监测中的测量深度,发现 CRNS 在相对干旱的草地生态系统中的测量深度(~20 cm)反而小于较为湿润的农田和林地生态系统(~30 cm),这是因为在久旱逢雨的时段会出现短暂表层土过湿的复杂情形。由于各种天气因素特别是降雨过程的影响、以及地面植被分布的复杂程度,氢原子在垂直方向上的分布通常比较复杂,因此,在实际应用中并不能认为 CRNS 的测量深度与土壤水分状况为简单的反比关系。

4.2　N_0参数校准方案对 CRNS 测量结果的影响

N_0参数法是将 CRNS 监测的中子计数转换为土壤含水量的最常用的方法[24,28,37],而该方法中最重要的则

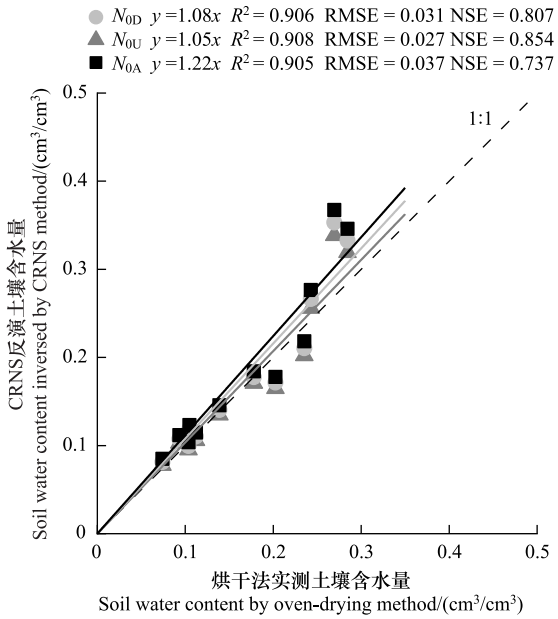

图 7　不同权重计算方法下 CRNS 反演土壤含水量与烘干法实测土壤含水量的对比

Fig.7　Comparison of CRNS-inversed soil water content (SWC) under different weight calculation methods with measured SWC by oven-drying method

N_{0D}、N_{0U}和 N_{0A}分别表示基于动态加权法、平均权重法和直接平均法获得的 N_0值

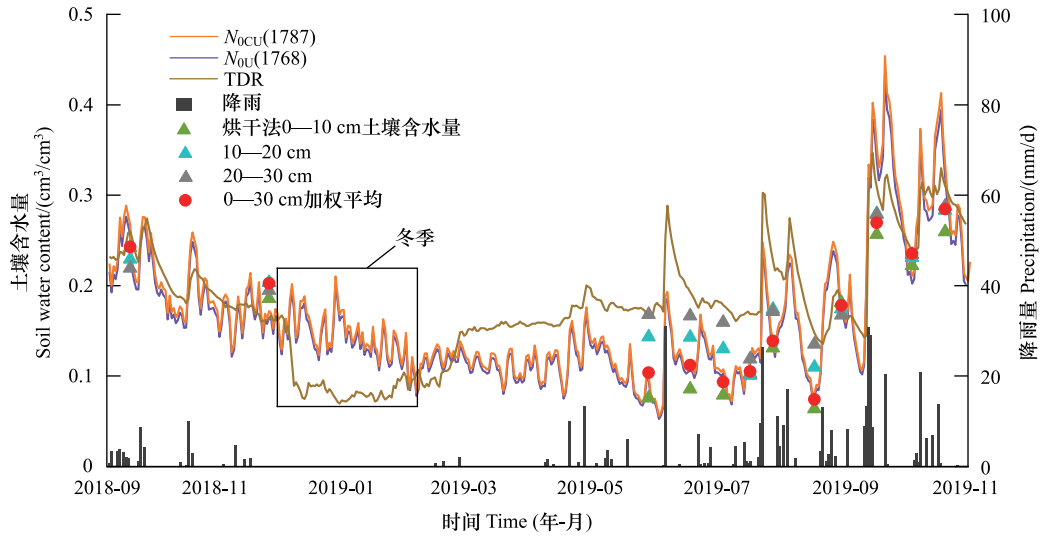

图 8　CRNS 反演的土壤含水量与 TDR 测量值的对比以及烘干法测量的分层土壤含水量

Fig.8　Comparison of soil water content from CRNS inversion with that measured by TDR and stratified soil water content measured by the drying method

N_{0CU}和 N_{0U}分别表示基于平均权重法获得的沟道区域和整个研究区的 N_0值

是 N_0值的校准,该值通常是利用烘干称重法获得的 SWC 实测值反推获得(公式 12)。因此,N_0值校准方案的选择对于 CRNS 法土壤含水量测量方法的准确性和可靠性至关重要。本研究对比分析了动态加权法、平均权重法和直接平均法三种 N_0校准方案对 CRNS 反演结果的影响。结果表明,当研究区土壤含水量较小时(SWC 小于 0.2 cm^3/cm^3),三种 N_0校准方案获得的 CRNS 测量值均与烘干称重法测量值具有较好的匹配度,即拟合直线均接近于 1∶1 线。而当土壤含水量增大时(SWC 接近 0.3 cm^3/cm^3),采用动态加权法和直接平均法的校准方案获得的 CRNS 测量值明显大于烘干称重法测量值(图 7),而采用平均加权法获得的结果则更接近于实测值。具体而言,平均加权法对比动态加权法与直接平均法在决定系数(R^2)均大于 0.9 的情况下 RMSE 分别减小 0.004 cm^3/cm^3和 0.010 cm^3/cm^3,NSE 分别增大 0.047 和 0.117。武强等[38]的研究也发现,采用垂直足迹线性加权方法的反演结果要比采用等权重方法的反演结果更接近于烘干称重法实测值。因此,在 N_0校准过程中选择适当的加权方案(本研究为平均加权法),有助于提升 CRNS 反演模型的精度。

值得注意的是,三种 N_0校准方案获得的 CRNS 土壤水分测量值在个别时期与烘干称重法实测值存在一定偏差。如第二次采样时(2018 年 11 月 26 日)CRNS 测量结果明显小于烘干称重法测量值,而第十次与第十二次采样时(2019 年 9 月 15 日、10 月 18 日)CRNS 测量结果又明显大于烘干称重法(图 6)。同样,武强等[35]在土壤异质性较大的山地地形的观测中发现,CRNS 法在土壤水分耗散阶段呈现一定的系统性低估,主要源于 CRNS 法对异质土壤含水量的空间平均效应。而蒋一飞等[39]在华北平原冬小麦农田生态系统的研究表明,地表植被生物量氢源可导致 CRNS 测量结果产生一定高估。因此,造成 CRNS 测量结果偏差的原因,可能是由于本研究区位于地形复杂破碎的黄土丘陵沟壑区,分布式采样点可能不足以代表整个源区内复杂的土壤质地空间分异,从而导致测量结果出现差异;同时,在蒸发、降雨、植被物候周期等因素影响下,源区内的土壤水分呈现出显著的空间异质性,这也会影响 CRNS 法测量结果的准确性。

4.3 CRNS 测量结果对降雨响应的灵敏性与稳定性

土壤水分是旱区植被生长和农业发展的重要限制因子,分析不同土壤水分测量结果对降雨事件响应的灵敏性是开展土壤水分—降雨关系研究的前提。通过对比分析研究期内沟道区域 CRNS 测量结果和 TDR 传感器观测结果的时间序列,发现二者的变化趋势基本一致(图 8),但二者随气象因素、植被耗水等条件改变而产生的波动情况有所不同,这主要与降雨强度、传感器位置、测量原理等因素有关[33,35,40]。就降雨强度而言,TDR 法对较大的降雨事件可以做出明显响应(如 2019 年 8—10 月),而 CRNS 法能够捕捉到测量源区内土壤水分对不同量级降雨事件的响应情况(图 8)。由此可见,在黄土丘陵沟壑区土壤水分监测中,CRNS 法对降雨过程的响应更为灵敏,蔡静雅等[40]、武强等[35]分别在荒漠草原与复杂山地地形的研究均得出相似结论。

同时,研究结果表明,CRNS 测量结果的波动性整体上要比 TDR 测量结果更为剧烈,尤其是在冬季(2018 年 12 月—2019 年 2 月)时期,TDR 测量结果较为稳定、且明显小于 CRNS 测量结果(图 6)。这主要是因为基于土壤介电特性的 TDR 法在冬季土壤冻结时期测得的数值主要为土层中未冻结的液态含水量,而 CRNS 法测量的快中子数因受测量源区范围内所有瞬时变化的氢源影响[41—43]测量结果为总含水量,即使在土壤冻结时期也呈现出剧烈的短时波动状态。

需要说明的是,CRNS 的测量原理决定了 CRNS 测量结果的灵敏性是其对探测源区内氢原子总量的敏感性。然而,源区内氢原子的来源复杂且具有一定的动态变化(如土壤水、地表生物水、降雨冠层截留、灌溉积水、积雪等[39,44]),不同氢源对 CRNS 测量结果的相对贡献随时间和环境条件显著波动。在本研究区,受植被恢复和沟道治理措施的影响,地形地貌、土地利用、植被分布等空间异质性较大,这为 CRNS 测量结果的校正带来了巨大挑战。在后续研究中,应重点关注 CRNS 探测源区内不同氢源对测量结果的影响,研究 CRNS 中子信号中非土壤水源(特别是植被动态变化和积雪)贡献的有效分离方法,以提升 CRNS 估算土壤水分的精度。

5 结论

本研究利用 2018 年 9 月至 2019 年 10 月的 CRNS 连续监测数据,结合 12 次大范围分布式烘干称重法测

量和点尺度 TDR 传感器连续监测数据,评估了宇宙射线中子法在黄土丘陵沟壑土壤水分监测中的适用性。主要结论如下:

(1)烘干称重法测量的整个研究区与沟道区域平均 SWC 的变化趋势一致,分为下降阶段、稳定波动阶段和上升阶段三个阶段,且沟道因为对水的汇集作用表现出更高的 SWC。

(2)CRNS 水平足迹半径和垂向测量足迹平均值分别为 336.0 m 和 23.4 cm。水平足迹半径受气压影响随时间变化较为稳定,测量深度受土壤含水量等因素的影响变化更为明显。距离仪器中心越近对测量结果的权重贡献越大:水平方向 0—125 m、垂向 0—10 cm 的空间范围内贡献了 75%左右的中子来源。

(3)在黄土丘陵沟壑区的复杂测量环境下,CRNS 法与烘干称重法的测量结果在百米尺度半径范围内匹配度良好,对比三种 N_0校准方法,平均权重法(即 $N_{0U}=1768$)校准的 CRNS 测量值与烘干称重法测量值相关性最强($R^2=0.908$),均方根误差(RMSE)最小(仅为 0.027 cm^3/cm^3),NSE 高达 0.854。与 TDR 法相比,CRNS 法对降雨事件的响应具有更高的灵敏性,能够捕捉到测量源区内土壤水分对不同量级降雨事件的响应情况。相比费时费力的传统点尺度测量土壤水分方式,CRNS 可以连续无损监测的优势能有效获取中尺度样地土壤含水量,更能反映测量源区的土壤水分平均状况 ,可以为土壤水分估算、山地农业生态系统中的水分管理提供依据。

参考文献(References):

[1] Raffelli G, Previati M, Canone D, Gisolo D, Bevilacqua I, Capello G, Biddoccu M, Cavallo E, Deiana R, Cassiani G, Ferraris S. Local- and plot-scale measurements of soil moisture: time and spatially resolved field techniques in plain, hill and mountain sites. Water, 2017, 9(9): 706.

[2] Wang S, Fu B J, Liu J B. Soil moisture temporal stability analysis for typical hilly and gully re-vegetated catchment in the Loess Plateau, China. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 789.

[3] Yang L, Chen L D, Wei W, Yu Y, Zhang H D. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions. Journal of Hydrology, 2014, 513: 314-321.

[4] Zheng H, Lin H, Zhu X J, Jin Z, Bao H. Divergent spatial responses of plant and ecosystem water-use efficiency to climate and vegetation gradients in the Chinese Loess Plateau. Global and Planetary Change, 2019, 181: 102995.

[5] Zheng H, Lin H, Zhou W J, Bao H, Zhu X J, Jin Z, Song Y, Wang Y Q, Liu W Z, Tang Y K. Revegetation has increased ecosystem water-use efficiency during 2000-2014 in the Chinese Loess Plateau: Evidence from satellite data. Ecological Indicators, 2019, 102: 507-518.

[6] Jin Z, Guo L, Wang Y Q, Yu Y L, Lin H, Chen Y P, Chu G C, Zhang J, Zhang N P. Valley reshaping and damming induce water table rise and soil salinization on the Chinese Loess Plateau. Geoderma, 2019, 339: 115-125.

[7] Feng Q, Zhao W W, Qiu Y, Zhao M Y, Zhong L N. Spatial heterogeneity of soil moisture and the scale variability of its influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. Water, 2013, 5(3): 1226-1242.

[8] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 243-263.

[9] Dong J N, Ochsner T E. Soil texture often exerts a stronger influence than precipitation on mesoscale soil moisture patterns. Water Resources Research, 2018, 54(3): 2199-2211.

[10] Romano N. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. Journal of Hydrology, 2014, 516: 6-20.

[11] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, Hornbuckle B K, Jones S B, Knight R, Ogden F, Selker J, Wendroth O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review. Vadose Zone Journal, 2008, 7(1): 358-389.

[12] 王子涵, 龚铭, 赵炯昌, 池金洺, 朱洪盛, 左启林, 王丽平, 王百群, 于洋. 黄土残塬沟壑区人工林小流域土壤水分时空变化特征. 水土保持研究, 2025, 32(1): 92-100.

[13] Brocca L, Ciabatta L, Massari C, Camici S, Tarpanelli A. Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities. Water, 2017, 9(2): 140.

[14] Fang B, Lakshmi V. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. Journal of Hydrology, 2014, 516: 258-272.

[15] Bindlish R, Barros A P. Subpixel variability of remotely sensed soil moisture: an inter-comparison study of SAR and ESTAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(2): 326-337.

[16] 陈伟, 郭宇星, 张齐飞, 孙从建. 多源遥感产品在黄土丘陵沟壑区土壤水分反演中的适用性评估. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(5): 1155-1169.

[17] 张新平, 乔治, 李皓, 闫杰, 张芳芳, 赵栋锋, 王得祥, 康海斌, 杨航, 冯扬. 基于 Landsat 影像和不规则梯形方法遥感反演延安城市森林表层土壤水分. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 120-131.

[18] Zreda M, Shuttleworth W J, Zeng X, Zweck C, Desilets D, Franz T, Rosolem R. *COSMOS*: the COsmic-ray soil moisture observing system.

Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(11): 4079-4099.
[19] 赵纯, 袁国富, 刘晓, 邵明安, 易小波. 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.
[20] Wang Q M, Fan J, Wang S, Yong C X, Ge J M, You W. Application and accuracy of cosmic-ray neutron probes in three soil textures on the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2019, 569: 449-461.
[21] Zheng H, Sun Y C, Bao H, Niu P P, Jin Z, Niu Z E. Drought effects on evapotranspiration and energy exchange over a rain-fed maize cropland in the Chinese Loess Plateau. Agricultural Water Management, 2024, 293: 108711.
[22] Zheng H, Bai J T, Niu P P, Peng T, Jin Z, Bao H, Naqvi S A F, Guan Y J. Soil water balance in response to rainfall variability over a dammed valley farmland in the Chinese Loess Plateau. Ecological Indicators, 2025, 175: 113594.
[23] 贺美娜, 童永平, 王云强, 卢玉东, 赵亚丽. 黄土区坡面尺度微地形和次降雨对 5 m 土壤水分影响的典型个例分析. 地球环境学报, 2017, 8(4): 357-366.
[24] Zreda M, Desilets D, Ferré T P A, Scott R L. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. Geophysical Research Letters, 2008, 35(21): 2008GL035655.
[25] Desilets D, Zreda M. Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and Monte Carlo simulations. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3566-3575.
[26] Köhli M, Schrön M, Zreda M, Schmidt U, Dietrich P, Zacharias S. Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. Water Resources Research, 2015, 51(7): 5772-5790.
[27] Franz T E, Zreda M, Ferre T P A, Rosolem R, Zweck C, Stillman S, Zeng X, Shuttleworth W J. Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources. Water Resources Research, 2012, 48(8): 2012WR011871.
[28] Desilets D, Zreda M, Ferré T P A. Nature′s neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. Water Resources Research, 2010, 46(11): 2009WR008726.
[29] Schrön M, Köhli M, Scheiffele L, Iwema J, Bogena H R, Lv L, Martini E, Baroni G, Rosolem R, Weimar J, Mai J, Cuntz M, Rebmann C, Oswald S E, Dietrich P, Schmidt U, Zacharias S. Improving calibration and validation of cosmic-ray neutron sensors in the light of spatial sensitivity. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(10): 5009-5030.
[30] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.
[31] 甘淼, 贾玉华, 李同川, 毛娜, 赵明阳. 黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析. 干旱区研究, 2018, 35(2): 315-324.
[32] 董起广, 陈田庆, 雷娜. 黄土高原丘陵沟壑区沟道土壤水分分布特征. 西部大开发: 土地开发工程研究, 2018, 3(9): 45-49.
[33] Pang Z, Jia Y H, Peng X H, Ju X N, Gao L. Applicability of cosmic-ray neutron sensing for measuring soil water content to heterogeneous landscapes under subtropical hydroclimatic conditions. Journal of Hydrology, 2021, 596: 126068.
[34] Zhu X C, Shao M A, Zeng C, Jia X X, Huang L M, Zhang Y J, Zhu J T. Application of cosmic-ray neutron sensing to monitor soil water content in an alpine meadow ecosystem on the northern Tibetan Plateau. Journal of Hydrology, 2016, 536: 247-254.
[35] 武强, 贺开利, 罗孳孳, 杜爱军, 刘亮, 唐云辉. 宇宙射线中子法在复杂下垫面土壤水分测量中的应用. 中国农业气象, 2020, 41(1): 34-42.
[36] 石耀辉, 王海龙, 朱永超, 吴东丽, 丁明明, 勾秋磊, 侯飙, 张全军, 刘聪, 杨大生, 张静. 宇宙射线中子法土壤水分监测在不同生态系统雨季的适用性. 气象科技, 2024, 52(1): 1-9.
[37] Shuttleworth J, Rosolem R, Zreda M, Franz T. The COsmic-ray Soil Moisture Interaction Code (COSMIC) for use in data assimilation. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(8): 3205-3217.
[38] 武强, 徐倩倩, 朱玉涵, 闫梦玲, 罗孳孳. 基于垂直足迹线性加权算法的宇宙射线中子法土壤水分测量校准与验证. 水土保持研究, 2021, 28(4): 113-120.
[39] 蒋一飞, 李晓鹏, 宣可凡, 纪景纯, 贾仁浩, 王灿, 刘建立. 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.
[40] 蔡静雅, 庞治国, 谭亚男. 宇宙射线中子法在荒漠草原土壤水测量中的应用. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(6): 456-460.
[41] Bogena H R, Huisman J A, Baatz R, Hendricks Franssen H J, Vereecken H. Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario. Water Resources Research, 2013, 49(9): 5778-5791.
[42] Tian Z C, Li Z Z, Liu G, Li B G, Ren T S. 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.
[43] Baroni G, Oswald S E. A scaling approach for the assessment of biomass changes and rainfall interception using cosmic-ray neutron sensing. Journal of Hydrology, 2015, 525: 264-276.
[44] Zhang Y Y, Wu S X, Zhao W Z, Xiao J H. Mesoscale soil moisture measurements along the rover route using the mobile cosmic-ray neutron sensing in the eastern Tibetan Plateau. Geoderma, 2024, 450: 117046.