# 不同植被覆盖下宇宙射线中子法土壤水分反演

# 刘 欣,王树果\*,尹培霖,许晶晶,梁 亮

(江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院,徐州 221116)

**摘 要:** 土壤水分是影响农业生产和生态环境的关键变量,准确获知土壤水分空间分布信息具有重要意义。宇宙射线中 子法(cosmic ray neutron probe, CRNP)可以实现对田块尺度土壤水分的连续观测,但其在不同地理环境及植被覆盖类 型条件下观测土壤水分的能力还需要进一步加深理解。该研究在全球范围内选择了具有代表性的16个观测站点数据, 采用统一的数据处理流程和土壤水分估算方法,开展了不同植被覆盖条件下的CRNP土壤水分观测能力的系统性综合比 较。结果表明,总体而言,CRNP观测对土壤水分的动态变化敏感性强,且能够明确响应降水事件。在草地覆盖条件下, 除1个站点结果相对较差外,其他站点表现出了非常高的土壤水分估算精度,RMSE最优达0.03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,Bias最优达-0.01 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, *R*<sup>2</sup> 高达 0.93;对于农田和森林覆盖的站点,观测结果质量仍然较高,RMSE 最优为 0.05 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,ubRMSE 最优为 0.03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,Bias 最优为 0.006 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,*R*<sup>2</sup> 最优为 0.88;在灌木地区,所选站点的CRNP 观测效果受局地环境 强烈影响,土壤水分估算精度存在较大差异。研究有助于深入了解 CRNP 观测土壤水分的能力和潜力,为在不同植被覆 盖下应用 CRNP 观测捕捉田块尺度土壤水分时空变化信息提供科学依据和参考。

关键词:土壤水分;农业;宇宙射线中子法;田块尺度;植被覆盖

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404167

中图分类号: S152.7; TP79

文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2024)-22-0098-10

刘欣,王树果,尹培霖,等.不同植被覆盖下宇宙射线中子法土壤水分反演[J].农业工程学报,2024,40(22):98-107. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.202404167 http://www.tcsae.org

LIU Xin, WANG Shuguo, YIN Peilin, et al. Investigation on the applicability of cosmic ray neutron probe for observing soil moisture over diverse vegetation covers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 98-107. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404167 http://www. tcsae.org

## 0 引 言

土壤水分是全球能水循环中的关键变量,其在各种 尺度上对农业生产、水资源管理及气候变化等相关领域 均具有重要影响<sup>[1]</sup>。从观测能力来说,可以通过不同手 段获取点尺度、田块/中尺度和大尺度的土壤水分空间分 布信息。传统基于单点的地面测量方法包括时域反射 法<sup>[2]</sup>、频域反射法<sup>[3]</sup>、烘干法<sup>[4]</sup>、中子仪法等<sup>[5]</sup>。其主要 优点是准确度高、可控性强,但仅能获得观测点局部范 围信息<sup>[6]</sup>。基于遥感的手段可以获得面状信息,通过同 步获取百公里乃至千公里幅宽的影像进而实现对土壤水 分的估算,特别是微波遥感<sup>[7]</sup>。但通过被动微波辐射计<sup>[8]</sup>、 主动微波散射计<sup>[9]</sup>、全球导航卫星系统反射测 量<sup>[10-11]</sup>等得到的土壤水分空间分辨率较大(25~40 km), 难以支持田块尺度应用。而主动微波遥感中的合成孔径 雷达虽然可以提供米级空间分辨率的观测,但受地表几 何结构和植被的强烈影响,使得反演得到的土壤水分存

收稿日期: 2024-04-24 修订日期: 2024-07-22 基金项目: 国家自然科学基金项目(42371322; 41971305), 江苏师范大学 研究生科研与实践创新计划项目(2024XKT0191) 作者简介: 刘欣,研究方向为土壤水分遥感。 Email: 2020221577@jsnu.edu.cn ※通信作者: 王树果,博士,副教授,研究方向为生态环境遥感。 Email: swang@jsnu.edu.cn 在较大的不确定性<sup>[12]</sup>。因此,仍然需要其他手段实现对 田块尺度土壤水分的连续准确观测,以支持精细农业等 相关应用。

宇宙射线中子法(cosmic ray neutron probe, CRNP) 是一种非接触式的自动监测土壤水分的观测方法。其观 测足迹的面积和深度会受土壤水分、植被和空气湿度等 因素的影响而变化,如以仪器架设地点为中心,在水平 方向上最大可覆盖半径 300 m 左右,测量深度最大可达 地下 80 cm 左右<sup>[13]</sup>。CRNP 观测具有受土壤化学性质影 响小、不破坏土壤结构并可连续观测等特点[13]。其基本 原理为宇宙空间高能粒子流受到地球磁场的影响进入地 球大气层,与大气和土壤中的原子核发生相互作用产生 中子,中子在近地面层与氢原子碰撞发生慢化直至吸收[14]。 由于土壤水分是地表的主要氢原子来源[15],故可利用 CRNP 观测的中子数反演出对应观测足迹范围的土壤水 分状况。一般而言,中子数的多少与土壤水分的高低呈 反比关系<sup>[16]</sup>。2008年ZREDA等<sup>[15]</sup>基于中子传输理论, 探讨了利用宇宙射线中子法反演中尺度土壤水分的可能 性。其后,ZREDA等<sup>[14,17-18]</sup>围绕反演方法、不同观测方 法的比较验证、反演中的参数化方案及反演结果修正等 开展了诸多研究,构建了 CRNP监测地表土壤水分的理 论框架。DESILETS 等<sup>[19]</sup> 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)。ZHANG等<sup>[20-21]</sup>均采用 $N_0$  参数法反演了土壤水分。除 $N_0$ 参数法,SHUTTLEWORTH 等<sup>[22]</sup>对基于蒙特卡罗方法的三维中子输运模型进行了参 数化,提出了 COSMIC 模型。吴绍雄等<sup>[23]</sup>基于该模型 反演土壤水分。而 FRANZ 等<sup>[16]</sup>则使用氢摩尔分数法来 反演土壤水分。上述 3 种方法( $N_0$ 参数法、蒙特卡罗方 法、氢摩尔分数法)均得到了一定应用,蒙特卡罗方法 运算复杂、耗时较长;氢摩尔分数法则需要对样品进行 详尽的化学元素分析,流程繁琐且技术要求高;相比 之下, $N_0$ 参数法更为简便高效。在这些基础上,大量研 究就 CRNP 在不同下垫面的土壤水分观测开展了应用和 评估,例如在岩石区<sup>[20]</sup>、农田<sup>[21]</sup>、荒漠-绿洲区<sup>[23]</sup>、风沙 区<sup>[24]</sup>和多种作物农田<sup>[25]</sup>等,均获得了较好的土壤水分估 算结果。

以往研究体现出利用 CRNP 观测土壤水分的工作越 来越受到重视,但不同案例研究中采用的技术流程和方 法体系具有差异(如不同的反演方法、不同的气压订正 方案、不同来源的驱动数据等),且个案研究针对的地 理环境相对单一。若能以统一的数据预处理及土壤水分 估算方法,并在全球范围内开展不同气候带、不同植被 覆盖类型条件下的 CRNP 土壤水分估算能力的系统性综 合比较,将会更深入理解不同地理环境下 CRNP 观测土 壤水分的能力。此外,随着预期提供全球 200 m 空间分 辨率遥感土壤水分产品的 NASA-ISRO SAR (NISAR) 任务即将发射,将为土壤墒情的业务化监测提供新的数 据选择<sup>[26]</sup>。用尺度接近的地面 CRNP 土壤水分观测对其 进行质量评价无疑是重要的途径,这也需要以对 CRNP 土壤水分观测能力的了解为前提,从而更好地发挥 CRNP 在全球不同地区的验证作用<sup>[27-28]</sup>。因此,本研究利用中 国、美国、欧洲和澳大利亚地区的 CRNP 观测及其他辅 助数据开展土壤水分的估算,并通过与土壤水分原位实 测和降水数据对比,系统地探讨不同气候带和植被覆盖 类型状况下 CRNP 观测土壤水分的差异,以期为该观测 方式的进一步应用提供参考和科学依据。

### 1 研究区与数据来源

#### 1.1 研究区概况

目前,全球有许多长期稳定的 CRNP 观测站点正在运行,主要分布在中国、欧洲、美国和澳大利亚等地区。 根据观测时间的连续性、相匹配的原位土壤水分观测 (点尺度)数据的可获取性、不同的地理位置、气候带 以及植被覆盖类型条件,选择了 COSMOS-Europe (https:// www.tereno.net/)、 COSMOS-UK (https://cosmos.ceh. ac.uk/)、COSMOZ (https://cosmoz.csiro.au/)、COSMOS\_ USA (http://cosmos.hwr.arizona.edu/)和黑河流域地表过 程综合观测网 5 个宇宙射线观测网络的具有代表性的 16 个站点。各观测站点具体信息如表 1 所示,其中气候类 型按照柯本气候分类。

观测网络	站点	位置	植被覆盖类型	气候类型	持续观测时间	头测工壤水分
Observation network	Station	Location	Vegetation cover type	Climate type	Observation period	Measured soil
			· •g•••••••••••••••••			moisture/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>3</sup> )
COSMOS_Europe	Schoeneseiffen	6.38°E, 50.52°N	草地	Dfb	2017-02-04-2018-12-31	0.13~0.35
	Selhausen	6.45°E, 50.87°N	农田(甜菜/冬小麦/冬 大麦/玉米/油菜籽)	Cfb	2020-01-01-2021-03-31	0.12~0.35
	Wildenrath	6.17°E, 51.13°N	森林 (针叶林)	Cfb	2016-01-01-2017-12-31	0.09~0.32
	Rollesbroich1	6.30°E, 50.62°N	草地(黑麦草和草甸 草)	Dfb	2016-02-03-2017-12-31	0.10~0.49
	Gevenich	6.32°E, 50.99°N	农田(小麦/玉米/甜菜/ 大麦)	Cfb	2016-01-01-2017-12-31	0.09~0.35
	Ruraue	6.43°E, 50.86°N	草地	Cfb	2016-01-01-2017-12-31	0.10~0.44
	Wuestebach	6.33°E, 50.50°N	森林(挪威云杉)	Dfb	2016-03-18-2017-12-31	0.27~0.56
COSMOS_UK	Alice Holt	0.86°W, 51.15°N	森林(橡树和白蜡树)	Cfb	2021-01-01-2022-12-31	0.10~0.50
	Balruddery	3.11°W, 56.48°N	农田 (麦类)	Cfb	2021-01-01-2022-12-31	0.19~0.44
	Bickley Hall	2.70°W, 53.03°N	草地	Cfb	2021-01-01-2022-12-31	$0.08{\sim}0.40$
COSMOS_USA	Lucky hills	110.05°W, 31.74°N	灌木	Bwh	2014-04-10-2016-01-31	0.03~0.23
	Kendall	109.94°W, 31.74°N	灌木(部分草地)	Bwh	2016-01-01-2017-07-22	0.08~0.33
	Tonzi Ranch	120.97°W, 38.43°N	草地(橡树稀树草原和 放牧草地)	Csa	2016-01-01-2017-12-31	0.10~0.44
COSMOZ	Yanco	146.30°E, 35.01° S	草地(牧草)	Bsk	2017-05-29-2017-11-16	0.23~0.29
黑河流域地表过程综合	大满	100.37° E, 38.86° N	农田 (玉米)	Bsk	2021-01-01-2022-12-31	0.06~0.45
观测网	四道桥	101.13 °E, 42.00° N	灌木 (柽柳)	Bwk	2021-01-01-2022-12-31	$0.08{\sim}0.42$

表 1 宇宙射线中子观测站基本信息 Table 1 Basic information of the cosmic neutron observatory used in this study

COSMOS-Europe: 由来自 12 个欧洲国家的 66 个 CRNP 站点组成,站点涵盖 8 个气候带,广泛覆盖了欧 洲主要的植被覆盖类型<sup>[29]</sup>。根据前述原则,在该网络中 选择了 7 个站点,分别是 Schoeneseiffen、Selhausen、 Wildenrath、 Rollesbroich1、 Gevenich、 Ruraue 和 Wuestebach。除 Schoeneseiffen 和 Selhausen 站点的中子 传感器类型是 CRS2000/B,其余站点传感器类型均为

# CRS1000.

COSMOS-UK: 英国 CRNP 观测网络,由 51 个站点 组成<sup>[30]</sup>。提供土壤水分及其他观测,包括降水、气温、 相对湿度、气压、土壤热通量、风速和风向等<sup>[30]</sup>。本研 究选择了 COSMOS-UK 网络内的 3 个站点,分别是 Alice Holt、Balruddery 和 Bickley Hall。中子传感器类型 均为 CRS2000/B。 COSMOZ:从 2010 年 10 月开始,CSIRO Land and Water 在澳大利亚各地安装了宇宙射线探测器,形成了 首个 COSMOZ 网络<sup>[31]</sup>。本研究选取了 COSMOZ 网络中的 Yanco 站点。中子传感器类型为 CRS1000/B。

COSMOS\_USA: 网络已经部署了超过 50 个站点, 广泛覆盖了美国的各种地表覆盖类型和气候带<sup>[14]</sup>。本研 究选取了 COSMOS\_USA 网络内中的 3 个站点,分别是 Lucky hills、Kendall 和 Tonzi Ranch。中子传感器类型为 CRS1000。

黑河流域地表过程综合观测网:以中国第二大内陆 河黑河流域为研究目标建立的观测网络。黑河上游位于 青海的祁连县与门源县,中游位于甘肃的张掖市,而下 游延伸至内蒙古的额济纳旗<sup>[32]</sup>。本研究选取了该网络的 2个站点,分别是中游大满和下游四道桥超级站。中子 传感器类型为 CRS1000/B。

综上,共选择了16个站点的数据,覆盖了多种气候 和植被覆盖类型,站点的详细信息如表1所示。

#### 1.2 数据处理

本研究使用了 COSMOS\_Europe<sup>[29]</sup>、COSMOS\_UK<sup>[30]</sup>、 COSMOS\_USA<sup>[14]</sup>、COSMOZ<sup>[31]</sup>以及黑河流域地表过程 综合观测网络提供的共 16 组宇宙射线中子数据集<sup>[32]</sup>。每 个数据集选择观测时间连续性较好时段的原始中子数据

(均在2016年1月1日—2022年12月31日内;除Yanco站点外,其余站点时间均大于1a)。此外,在反演土壤水分的过程中还利用了欧洲中期天气预报中心

(European center for medium-range weather forecasts, ECMWF)的第五代陆面再分析数据集(ERA5-Land)。 该数据集提供了气象数据,包括降水、温度和露点温度 等关键变量,以及欧洲空间局(European space agency, ESA)气候变化倡议(climate change initiative, CCI)(https:// climate.esa.int/)的土地覆盖数据和地上生物量数据,用 于校正地上生物量中氢元素对中子信号的影响。

以来自地球环境观测网络(terrestrial environmental observatories, TERENO, https://www.tereno.net/)、Petzenkirchen 水文开放空气实验室(the hydrological open air laboratory, HOAL, https://hoal.hydrology.at/the-hoal/)、 土壤气候分析网络(soil climate analysis network, SCAN, http://www.wcc.nrcs.usda.gov/)、澳大利亚东南部的土壤水分监测网络 OZNET(http://www.oznet.org.au/)网络<sup>[33]</sup> 以及国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/) 提供的原位土壤水分实测数据作为参考<sup>[32]</sup>,验证 CRNP 反演土壤水分的精度,结合降雨数据分析在不同的下垫 面条件下的响应差异。

需要特别说明的是,在 CRNP 数据集选择时,考虑 了实测土壤水分可获取性较好的站点,便于开展验证工 作。然而这 2 种观测在采样间隔上往往存在一定的差异, 为了确保时间统一性,本研究将所有使用的土壤水分实 测数据聚合为逐日采样间隔。同时,为了确保空间上的 一致性,选择位于 CRNP 站点半径 300 m 范围内的实测 土壤水分站点用于验证。以 Wuestebach 站点为例<sup>[34]</sup>,如 图 1 所示,选择了 CRNP 观测源区内的名为 54、55、56 和 57 的 4 个实测土壤水分观测节点,每个节点的探头 (EC5 或 5TE)分别对 0.05、0.20 和 0.50 m 的深度进行 了测量。故选择了这 4 个站点的 12 组数据作为验证数据, 其余站点情况类似。



注: 左侧圆形为水平方向观测示意,右侧为剖面方向观测示意。 Note: The left and right panels schematically show the observation deployed in horizontal and vertical direction, respectively.

#### 图 1 Wuestebach 站 CRNP 以及地面实测土壤水分 观测站的分布

Fig.1 Distribution of cosmic ray neutron probe and soil moisture observation probes at the Wuestebach station

### 2 研究方法

利用全球不同区域的 CRNP 观测开展土壤水分反演, 并以地面实测土壤水分作为验证,结合对降雨的响应探 究 CRNP 在不同的植被覆盖下观测能力的差异,总体流 程图如图 2 所示。首先,对近地表中子强度进行校正, 而后进行土壤水分估算。



由于站点跨越的尺度较大,在反演前需要对 CRNP 观测的近地表中子强度进行校正,以减少外界环境对中 子强度变化的干扰,而后进行土壤水分估算并对反演结 果进行验证与分析讨论。

### 2.1 宇宙射线中子法的环境因素校正

2.1.1 大气压力校正

宇宙射线中子法在测量土壤水分时,需要考虑大气 压力的影响。为了校正这一影响,ZREDA等<sup>[15]</sup>提出了 大气压力校正系数,表示为

$$f_p = \exp(\beta_\beta \ (P_P - P_0) \tag{1}$$

式中  $f_p$  是气压校正系数;  $P_p$  是试验时观测大气压 (hPa);  $P_0$  为标准大气压(hPa);  $\beta_\beta$  为中子质量衰减 长度系数。 $\beta_\beta$  和标准大气压值可根据各站点纬度、海拔 及截止刚度计算得出<sup>[35]</sup>。其中,传感器位置截至刚度值 可由截止刚度计算器计算得出(http://www.cmslab.org/ util/rigidity.php)。

2.1.2 空气湿度校正

空气中的氢原子会使中子计数率随着大气湿度的增加而降低。此因素需去除,以确保中子计数率的变化主要归因于土壤水分,而不是空气中的水分。空气湿度校正系数如下所示<sup>[15]</sup>:

$$f_h = 1 + 5.4 \times 10^{-3} \rho_v \tag{2}$$

式中 $f_h$ 为大气水汽校正因子, $\rho_v$ 为绝对湿度(g/m<sup>3</sup>)。 有些站点没有公布空气湿度数据,在这种情况下,可以 利用 ERA5\_Land 数据将露点温度转换为大气压力,再使 用大气压力与温度一起用于计算绝对湿度。(详细步骤 见文献[36] 附录部分)。

2.1.3 入射中子强度校正

太阳活动会对宇宙射线的传播产生影响,进而影响 近地面中子数<sup>[15]</sup>。校正时使用中子监测库 NMDB(https:// www.nmdb.eu/),该数据库包含来自世界各地的中子监 测站的资料,提供了全球监测站每小时的中子计数率。使 用入射中子强度校正系数对太阳活动的影响进行校正。

$$f_i = \frac{I_m}{I_0} \tag{3}$$

式中 $f_i$ 为入射宇宙射线强度修正系数, $I_m$ 为传感器测量 时入射宇宙射线强度, $I_0$ 为基准参考入射中子强度。本 研究基于 HAWDON 等<sup>[31]</sup>提出的使用瑞士少女峰监测站 的截止刚度对观测站点截止刚度进行校正。

$$R_{\rm corr} = -0.75 \ (R_c - R_{\rm cjung}) + 1 \tag{4}$$

式中 *R*<sub>corr</sub> 为截止刚度差值的校正量, *R*<sub>c</sub> 为传感器位置的截止刚度(GV), *R*<sub>cjung</sub> 为少女峰监测站的截止刚度(值为 4.49 GV)。得到最终的校正值如下:

$$f'_{i} = (f_{i} - 1)R_{corr} + 1$$
(5)

*f*<sub>i</sub>'与*f*<sub>i</sub>相比,包含对截止刚度的校正,以校正使用的 CRNP 站点与少女峰中子站之间的截止刚度差异。 2.1.4 地上生物量校正

地上生物量也会影响中子计数,但站点通常没有公

布的地上生物量数据。因此,为减少地上生物量对中子 信号的影响,本研究使用来自 ESA CCI 全球数据集对地 上生物量的估计值,并采用 BAATZ 等<sup>[37]</sup>提出的校正方 法,校正地上生物量,系数如下所示:

$$f_v = \frac{1}{1 - (0.009A_{\rm agb})} \tag{6}$$

式中 $f_{t}$ 为地上生物量校正系数, $A_{agb}$ 为该站点的地上干 生物量 ( $kg/m^2$ )。

### 2.2 土壤水分估算

土壤水分计算式如下所示[17,31]:

$$\theta_{\text{vol}} = \left[ \frac{a_0}{\frac{N_{\text{raw}} \cdot f_p \cdot f_i' \cdot f_h \cdot f_v}{N_0} - a_1} - a_2 - L_{\text{LW}} - W_{\text{WSOM}} \right] \frac{\rho_{\text{bd}}}{\rho_w}$$
(7)

式中 $\theta_{vol}$ 为土壤水分( $cm^3/cm^3$ ), $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 为中子粒子物理建模获得的常数系数<sup>[15,17]</sup>, $L_{LW}$ 为晶格含水量(g/g),  $W_{WSOM}$ 为土壤有机碳的水当量(每克土壤中水的克数),  $\rho_{bd}$ 为干土容重(g/cm<sup>3</sup>), $\rho_w$ 为水的密度,定义为1g/cm<sup>3</sup>,  $N_{raw}$ 为未校正的原始中子数, $f_p$ 、 $f_i$ 、 $f_h$ 和 $f_v$ 分别表示用 于校正大气压力、入射中子强度、空气湿度和地上生物 量的校正因子, $N_0$ 为在绝对干燥条件下所测中子数。

N<sub>0</sub>的计算采用 ZREDA 等<sup>[14-15]</sup> 提出的取土壤水分平 均值代入公式反推 N<sub>0</sub>的方法。使用的土壤水分数据是在 距 CRNP 站点不同位置和深度进行采样,利用烘干法所 测得,后使用 SCHRÖN 等<sup>[38]</sup> 提出的加权求平均土壤水 分的方法,根据土壤水分平均值代入公式反推 N<sub>0</sub>。后再 利用 Crspy 工具<sup>[35]</sup> 进行中子数据的进一步处理和反演, 以得到 CRNP 所测区域土壤水分值。

#### 2.3 误差评定指标

采用决定系数(*R*<sup>2</sup>)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、无偏均方根误差(unbiased root mean square error, ubRMSE)与偏差(Bias)4个指标评价CRNP反演土壤含水量效果,其计算方法参考文献<sup>[27]</sup>。通过*R*<sup>2</sup> 来反映CRNP观测土壤水分与实测土壤水分之间的相关程度,RMSE、ubRMSE和Bias可以反映估算误差。相比于RMSE,ubRMSE能够去除作为真实值使用的地面实测土壤水分中可能存在的附加误差。由于CRNP可以感知到一定深度的土壤水分,因此土壤水分实测值采用不同层深的土壤水分实测平均值。

## 3 结果与分析

#### 3.1 草地覆盖下土壤水分估算结果

从含水量反演值动态变化来看(图3),在6个草 地覆盖下的站点,CRNP可明确地捕捉到土壤水分的动 态变化和对降雨的响应。由定量反演评价值可知(图4), 大部分站点均呈现较为理想的反演结果,*R*<sup>2</sup>均高于0.85, RMSE、ubRMSE和Bias绝对值均小于0.07 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。其 中,Yanco站点结果较差,如图3e和图5e所示,虽然 Bias和RMSE 仅为0.07 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,ubRMSE为0.02 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, 但反演结果相关性及一致性较差,*R*<sup>2</sup>为0.46。



注: RMSE 为均方根误差; ubRMSE 为无偏均方根误差; Bias 为偏差; 单位均与纵坐标相同。下同。 Note: RMSE is root mean square error; ubRMSE is unbiased root mean square error; Bias is bias; all units are the same as the vertical coordinate. Same as below.

图 4 CRNP 反演草地土壤水分结果的验证 Fig.4 Validation of CRNP retrieved soil moisture of grassland

#### 3.2 农田覆盖下土壤水分估算结果

农田覆盖下土壤水分估算结果如图 5,4 个植被覆盖为农作物的站点,仅 Selhausen 站点在 2020 年 4 月份的一次强降雨没有捕捉到,其他 CRNP 站点均可明确捕捉到土壤水分的动态变化和对降雨的响应。与草地植被覆盖条件下相比,农田 CRNP 观测土壤水分的精度普遍降低。而且,由于作物具有更强的物候特征,CRNP 观测结果也相应呈现明显的季节性。由评价指标可知(图 6),仅 Selhausen 站点反演结果较差, *R*<sup>2</sup> 为 0.29, RMSE 为 0.13 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, ubRMSE 为 0.10 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

Bias 为  $0.08 \text{ cm}^3$ . 其他站点均显示出较为理想的反 演结果,  $R^2$ 均不低于 0.74, RMSE、ubRMSE 和 Bias 绝 对值均不高于  $0.06 \text{ cm}^3$ .

#### 3.3 森林覆盖下土壤水分估算结果

图 7 和图 8 为 3 个森林覆盖下的 CRNP 站点观测结果。 森林地区所有站点的 RMSE、ubRMSE 以及 Bias 均较为 理想,都不大于 0.06 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,但  $R^2$  存在差异,Wuestebach 站点与另外 2 个站点相比  $R^2$  较低,仅为 0.32。在 Alice Holt 站点存在多次较大的偏差;Wuestebach 站点的土壤水分 值全年处于较高的水平,该站点的  $R^2$  较其他站点较低。

















### 3.4 灌木覆盖下土壤水分估算结果

图 9 和图 10 为 3 个灌木覆盖下的 CRNP 站点结果, 比较而言,仅极端干旱的四道桥站点观测结果较差。虽 偏差较小(RMSE 和 ubRMSE 均为 0.09 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, Bias 为-0.02 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),但 R<sup>2</sup> 仅为 0.02。综上,CRNP 估算 结果与实测土壤水分之间的趋势和对降雨事件的响应趋 势较为符合,仅四道桥站点的趋势及响应较差。





## 4 讨 论

本研究表明 CRNP 观测的土壤水分在不同站点均存 在偏差,偏差绝对值最大可达 0.08 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,最小仅为 0.006 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。在植被单一且稳定的草地地区, CRNP 观 测结果最好,  $R^2$  最高为 0.93, RMSE 最优为 0.03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, Bias 最优为-0.01 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。在农田、森林和灌木地区, 结果也较为理想。作为非接触性测量, CRNP 反演估算 土壤水分是存在一定的不确定性的[31]。以往研究表明, 地表植被覆盖(包括植被类型、密度和季节生长)、晶 格水含量以及土壤中有机碳等其他氢元素都会影响中子 数,进而影响 CRNP对土壤水分观测的灵敏度及其探测 深度,从而给反演结果带来了误差<sup>[38]</sup>。验证过程中也蕴 含着不确定性<sup>[28]</sup>。一方面,2种观测机制存在固有差异, CRNP 观测的是足迹尺度土壤水分,而实测验证数据来 源于点尺度观测,两者在空间尺度上存在不匹配性。尽 管已对 CRNP 观测足迹范围内的所有土壤水分单点观测 做了聚合,进而与 CRNP 结果进行足迹尺度的对比,但 仍然可能存在其他问题,例如聚合方法的选择<sup>[39]</sup>。另一 方面,站点位置、地形以及土壤水分在垂直和水平层面 的分布差异均会影响实测土壤水分测量的准确性[16],也 会造成2种观测结果间的差异。除了上述外部环境因素 外,估算模型本身的局限性也是不容忽视的。特别是在 环境因素校正环节,大气压力的校正依赖于站点纬度、 海拔及截止刚度的精确计算,而估算的截止刚度值存在

一定的不确定性。进一步地,入射中子强度的校正虽已 纳入截止刚度因素,但当前采用的 HAWDON 等<sup>[31]</sup> 基于 少女峰中子监测站的校正方法,在广泛分布的站点应用 中显现出区域适配性不足的问题。加之实测这些校正参 数的难度,共同构成了影响土壤水分估算精度的因素。 最后,是反演中所用数据可靠性的影响。一是反演用到 的中子观测数据均来源于各观测站点官网/站点数据共享 平台,公布的数据本身可能存在误差。二是数据处理中 用到的各种参数和辅助数据,如用于空气湿度与地上生 物量校正的 ERA5 Land 和 ESA CCI 地上生物量数据。 这2类数据本身就不是直接测量,数据本身可能存在不 可靠性,给数据的反演结果带来误差。同时,这2类数 据与 CRNP 测量足迹之间存在空间不匹配问题,可能引 入观测误差[38]。三是用于验证的单点土壤水分地面观测 通常是地面实测,而这种地面实测通常是可信可靠的。 总之,以上三方面的因素均会造成2种观测之间的误差。 下面从不同植被覆盖的角度来解释估算误差,揭示不同 下垫面条件下观测土壤水分的能力差异。

不同的植被覆盖类型下有些站点估算结果较差:

1) 在草地覆盖下的 Yanco 站点,造成反演结果存在 较大误差的可能原因有 2 个方面。首先是该站位于积水 易发地区<sup>[27]</sup>,由于原位土壤水分观测区存在积水,导致 实测土壤水分在时间上的波动不明显(图 3e),测量结 果存在误差。同时积水也会导致 CRNP 观测中子数的敏 感性降低,从而引起二者间存在较大偏差。其次可能是 由于半干旱气候和土壤质地的高砂成分相结合,降低了 土壤的保水能力<sup>[29]</sup>。同时,随着植被的生长(牧草), 土壤表层水被植被吸收,使得 CRNP 观测较深埋的原位 土壤水分探测而言,持续低于实测土壤水分值。

2) 在农田覆盖下的 Selhausen 站点作物种类较多, 主要有甜菜、冬小麦、冬大麦、玉米和油菜等,多种植 被覆盖类型造成了很强的地表异质性。因此, CRNP 观 测足迹内包含了多种农田作物的贡献,通常在校正时难 以去除,对 CRNP 观测造成额外的干扰,使得该站点测 量结果不够理想<sup>[28]</sup>。故除种植作物的物候外,作物的种 类也可能对 CRNP 的观测结果造成影响。其次,农田特 有的灌溉及其他人为活动也会对 CRNP 测量产生影响, CRNP 和原位土壤水分观测对灌溉活动的响应通常会存 在偏差,这使得二者之间的误差及相关性会受到影响。 例如,大满站存在4个灌溉期<sup>[21]</sup>,由图5d,可以看出 CRNP 对监测农田区域的灌溉事件具有较好的响应,但 也可以看出二者对灌溉活动的响应也存在差异。总之, 相对于草地植被覆盖类型下的 CRNP 观测站,在农田地 区的 CRNP 观测精度有所降低,但大部分站点仍处于较 好的水平,且对农田人为活动(灌溉)有较好的响应。

3)在森林覆盖下的 Alice Holt 站点,除影响 CRNP 测量结果的普遍因素外,造成偏差的原因也可能与森林 地区独有的活动(间伐、清除老树和清除砍伐时的杂草 等)有关<sup>[40]</sup>。以上活动均可能会导致土壤表面的其他氢 源发生骤减。同时该地区为橡树林,橡树树冠庞大且枝 叶茂盛,会对中子传播路径产生较大的影响。以上2方 面因素均会使观测到的中子数减少,使得 CRNP 观测土 壤水分处于高估的水平。在森林覆盖下的 Wuestebach 站 点,这种低一致性可能与 Wuestebach 站点的高额外氢库 和高土壤含水量(林内壤中流)有关<sup>[41]</sup>,这些因素会使 得 CRNP 观测产生高估。同时该地区为云杉林,其高大 密集的树冠限制了宇宙射线中子的穿透深度,导致测量 深度较浅,同时也会引起宇宙射线中子的散射,导致探 测器感知到的中子计数减少,造成土壤水分的估算偏差, 进而影响 CRNP 观测和实测土壤水分之间的一致性。

4) 在灌木覆盖下的四道桥站点,造成估算结果较差 的原因可能有两方面。首先,四道桥站点的植被类型为 柽柳(河岸林),该植被具有丰富的根系,根系具有很 强的储水能力,根系中的储水量可能被 CRNP 观测到, 而原位土壤水分观测无法观测到这一变化,故 CRNP 观 测较原位土壤土壤水分观测存在更多的波动。其次,该 站点气候干旱降水很少,主要的水分来源是河水漫溢, 每一次的河水漫溢都会导致 CRNP 测量结果与原位土壤 水分观测值之间存在较大的差异<sup>[42]</sup>,进而使得测量结果 的相关性下降。以上因素均可能会导致该站点的测量结 果持续存在差异。

相较于 ZHU 等<sup>[21]</sup> 在农田、吴绍雄等<sup>[23]</sup> 在荒漠-绿洲 带的相关工作,本研究结果显示了不同气候类型和植被 覆盖类型等均会影响 CRNP 观测土壤水分的能力。这些 因素为中子数原始观测带来了其他氢源影响,进而使得 土壤水估算结果产生误差,类似情况在 BOGENA 等<sup>[41]</sup>的研究中也有报道。同时,CRNP 土壤水分观测能力在 草地、农田等植被覆盖条件下会随季节的变化而变化, 在不同季节,植被的长势以及经历的人为活动不同(如 收割、播种)。在植被生长旺盛季节测量偏差较大,在 植被生长相对缓慢季节偏差会减小,在这与前人的研究 结论一致<sup>[43]</sup>。在不同气候带和植被覆盖类型下,CRNP 观测土壤水分具有不同的响应差异,这与石耀辉等<sup>[44]</sup>的 研究结果相似。因此,利用 CRNP 观测土壤水分,需要 结合植被覆盖情况对结果加以校正,以减小植被氢源对 CRNP 观测土壤水分的影响,这也是今后该领域研究的 一个重要方向。

## 5 结 论

为探究在不同气候带和植被覆盖类型下宇宙射线中 子(cosmic ray neutron probe, CRNP)观测土壤水分的 适用性,本研究选取位于中国、欧洲、美国和澳大利亚 地区具有代表性的共 16 个 CRNP 站点。通过与地面实测 土壤水分和降水数据进行对比,探讨了在草地、农田、 森林和灌木 4 种植被覆盖类型条件下, CRNP观测的土壤 水分动态变化特征、时间稳定性以及影响因素,结果表 明,总体而言,除个别站点外,大部分站点都取得了较 好的土壤水分估算结果。特别是在植被单一且稳定的草 地地区, CRNP 观测结果最好,  $R^2$  最高为 0.93, RMSE 最优为 0.03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, Bias 最优为-0.01 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。在农田、 森林和灌木地区,结果也较为理想。此外,CRNP 观测 可以捕捉到降水和灌溉对农田土壤水分带来的影响。对 于观测结果不够理想的几个站点,造成误差的原因不尽 相同,主要为特殊的局地土壤水分环境(如观测区存在 积水的 Yanco 站点和河水漫溢的四道桥站点),以及高 大乔木对中子观测数的影响(如 Wuestebach 站点)。

未来的工作需要进一步探索在不同植被覆盖和气候 条件下,环境因素是如何影响中子数的观测,进而影响 CRNP 对土壤水分的观测精度,例如更好地理解植物水、 土壤有机质等其他氢源对中子信号的影响。此外,需要 进一步发展针对不同地理环境下截止刚度的校正方法, 特别是对于校正时的地上生物量和空气湿度参数,构建 更为精确的校正公式从而改善 CRNP 土壤水分估算的精 度和稳健性,从而更好地支持田块尺度土壤水分的监测。

#### [参考文献]

- 吕天,刘珺,李子璇,等. 土壤湿度农业干旱指数的改进 及其适用性[J]. 农业工程学报,2023,39(17):116-123.
   LYU Tian, LIU Jun, LI Zixuan, et al. Improvement and applicability of the soil moisture based agricultural drought index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(17):116-123. (in Chinese with English abstract)
- [2] LEDIEU J, DE RIDDER P, DE CLERCK P, et al. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry[J]. Journal of Hydrology, 1986, 88(3-4): 319-328.
- [3] GARDNER C M K, DEAN T J, COOPER J D. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 71(4): 395-403.

- [4] ASTM International. Standard test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass: D2216-19[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- [5] SU S L, SINGH D N, BAGHINI M S. A critical review of soil moisture measurement[J]. Measurement, 2014, 54: 92-105.
- [6] VEREECKEN H, HUISMAN J A, BOGENA H, et al. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review[J]. Water Resources Research, 2008, 44(4): 2008WR006829.
- [7] 马红章,孟庆涛,刘素美. TAU-OMEGA 遥感辐射模型改进与参数化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 292-298.
  MA Hongzhang, MENG Qingtao, LIU Sumei. Improvement and parameterization of the TAU-OMEGA radiation model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(11): 292-298. (in Chinese with English abstract)
- [8] WIGNERON J, LI X J, FRAPPART F, et al. SMOS-IC data record of soil moisture and l-vod: Historical development, applications and perspectives[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 254: 112238.
- [9] WAGNER W, HAHN S, KIDD R, et al. The ASCAT soil moisture product: A review of its[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2013, 22(1): 1-29.
- [10] WU X R, MA W X, XIA J M, et al. Spaceborne GNSS-R soil moisture retrieval: status, development opportunities, and challenges[J]. Remote Sensing, 2020, 13(1): 45.
- [11] GRUBER A, SCANLON T, VAN D S R, et al. Evolution of the ESA CCI soil moisture climate data records and their underlying merging methodology[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(2): 717-739.
- [12] MA C, LI X, NOTARNICOLA C, et al. Uncertainty quantification of soil moisture estimations based on a bayesian probabilistic inversion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(6): 3194-3207.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] ZREDA M, DESILETS D, FERRÉ T, et al. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(21): 402.
- [16] FRANZ T E, WAHBI A, VREUGDENHIL M, et al. Using cosmic-ray neutron probes to monitor landscape scale soil water content in mixed land use agricultural systems[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2014, 519: 637-643.
- [17] ANDREASEN M, JENSEN K H, DESILETS D, et al. Status and perspectives on the cosmic-ray neutron method for soil moisture estimation and other environmental science applications[J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(8): 1-12.
- [18] ALMEIDA A C, DUTTA R, FRANZ T E, et al. Combining cosmic-ray neutron and capacitance sensors and fuzzy inference to spatially quantify soil moisture distribution[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(10): 3465-3472.
- [19] DESILETS D, ZREDA M, FERRÉ T P. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays[J]. Water Resources Research, 2010, 46(11): 505.
- [20] ZHANG Z H, OU H D, SHI Y F, et al. Application of cosmicray neutron probes for measuring soil moisture in rocky areas of the taihang mountains, north china[J]. Vadose Zone Journal, 2023, 22(6): e20291.
- [21] ZHU Z L, TAN L, GAO S G, et al. Observation on soil moisture of irrigation cropland by cosmic-ray probe[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 12(3): 472-476.
- [22] SHUTTLEWORTH J, ROSOLEM R, ZREDA M, et al. The

cosmic-ray soil moisture interaction code (COSMIC) for use in data assimilation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(8): 3205-3217.

- [23] 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.
  WU Shaoxiong, ZHANG Yongyong, ZHAO Wenzhi, 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. (in Chinese with English abstract)
- [24] 台晓丽,胡振琪,陈超.西部风沙区不同采煤沉陷区位土壤 水分中子仪监测[J].农业工程学报,2016,32(15):225-231. TAI Xiaoli, HU Zhenqi, CHEN Chao. Monitoring soil moisture at different subsidence areas of mining in western windy and sandy region with neutron instrument[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(15): 225-231. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张杰,刘刚,李保国,等. 3He 管中子土壤水分测量装置提高测量精度[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 90-97. ZHANG Jie, LIU Gang, LI Baoguo, et al. 3He tube neutron moisture measurement device improving measuring accuracy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(2): 90-97. (in Chinese with English abstract)
- [26] LAL P, SINGH G, DAS N N, et al. A multi-scale algorithm for the NISAR mission high-resolution soil moisture product[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 295: 113667.
- [27] MONTZKA C, BOGENA H, ZREDA M, et al. Validation of spaceborne and modelled surface soil moisture products with cosmic-ray neutron probes[J]. Remote Sensing, 2017, 9(2): 103.
- [28] SCHMIDT T, SCHRÖN M, LI Z, et al. Comprehensive quality assessment of satellite-and model-based soil moisture products against the COSMOS network in germany[J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 301: 113930.
- [29] BOGENA H R, SCHRÖN M, JAKOBI J, et al. COSMOSeurope: A European network of cosmic-ray neutron soil moisture sensors[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(3): 1125-1151.
- [30] COOPER H M, BENNETT E, BLAKE J, et al. COSMOS-uk: National soil moisture and hydrometeorology data for environmental science research[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(4): 1737-1757.
- [31] HAWDON A, MCJANNET D, WALLACE J. Calibration and correction procedures for cosmic-ray neutron soil moisture probes located across Australia[J]. Water Resources Research, 2014, 50(6): 5029-5043.
- [32] LIU S M, LI X, XU Z W, et al. The heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-21.
- [33] SMITH A B, WALKER J P, WESTERN A W, et al. The murrumbidgee soil moisture monitoring network data set[J]. Water Resources Research, 2012, 48(7): 2012WR011976.
- [34] BOGENA H R, HERBST M, HUISMAN J A, et al. Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability[J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(4): 1002-1013.
- [35] POWER D, RICO-RAMIREZ M A, DESILETS S, et al. Cosmic-ray neutron sensor python tool (crspy 1.2. 1): An opensource tool for the processing of cosmic-ray neutron and soil moisture data[J]. Geoscientific Model Development, 2021, 14(12): 7287-7307.
- [36] ROSOLEM R, SHUTTLEWORTH W J, ZREDA M, et al. The effect of atmospheric water vapor on neutron count in the cosmic-ray soil moisture observing system[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(5): 1659-1671.
- [37] BAATZ R, BOGENA H R, HENDRICKS FRANSSEN H J, et al. An empirical vegetation correction for soil water content

quantification using cosmic ray probes[J]. Water Resources Research, 2015, 51(4): 2030-2046.

- [38] SCHRÖN M, KÖHLI M, SCHEIFFELE 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.
- [39] GRUBER A, DE LANNOY G, ALBERGEL C, et al. Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors?[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 244: 111806.
- [40] BENHAM S E, VANGUELOVA E I, PITMAN R M. Short and long term changes in carbon, nitrogen and acidity in the forest soils under oak at the alice holt environmental change network site[J]. Science of the Total Environment, 2012, 421: 82-93.
- [41] BOGENA H R, HUISMAN J A, BAATZ R, et al. Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: the worst case scenario[J]. Water Resources Research, 2013, 49(9): 5778-5791.
- [42] 董世玉,朱忠礼,徐自为,等.黑河流域表层土壤水分干

化特征研究[J]. 高原气象, 2023, 42(3): 771-784.

DONG Shiyu, ZHU Zhongli, XU Ziwei, et al. Characteristics of Surface soil moisture drydown in the Heihe river basin[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(3): 771-784. (in Chinese with English abstract)

- [43] 姜山,刘国睿,刘军涛,等.基于宇宙射线缪子的土壤含水率监测[J].农业工程学报,2022,38(6):330-336.
  JIANG Shan, LIU Guorui, LIU Juntao, et al. Soil moisture monitoring using cosmic ray muons[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(6): 330-336. (in Chinese with English abstract)
- [44] 石耀辉,王海龙,朱永超,等. 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[J]. 气象科技, 2024, 52(1): 1-9. SHI Yaohui, WANG Hailong, ZHU Yongchao, et al. Suitability of cosmic ray neutron probe for soil moisture in different ecosystems during rainy season [J]. Meteorological Science and Technology. 2024, 52(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)

# Investigation on the applicability of cosmic ray neutron probe for observing soil moisture over diverse vegetation covers

# LIU Xin , WANG Shuguo<sup>\*</sup> , YIN Peilin , XU Jingjing , LIANG Liang

(School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Soil moisture is a key variable affecting agricultural production and ecological environment. It is therefore of great significance to acquire accurate spatial distribution information of soil moisture. Compare to conventional point-scale based measurements, the Cosmic Ray Neutron Probe (CRNP) provides an alternative approach for capturing soil moisture dynamics to address drought monitoring, plant water stress detection, as well as various hydrological applications. CRNP can realize continuous observation of soil moisture at the field scale and estimate average soil water content with a 0.1-0.2 km<sup>2</sup> quasicircular footprint by monitoring the neutron intensity near the ground. However, previous studies conducted soil moisture observation using CRNP are often limited to a single landscape, its ability to observe soil moisture in different geographical environments and vegetation cover types still needs to be further understood. In this study, data from 16 representative stations located in different climatic zones and under different vegetation cover conditions worldwide were selected, including seven grasslands covered stations, three farmlands covered stations, three forests covered stations and three shrubs covered stations, and a unified data processing procedure and soil moisture estimation method were used to invert the average soil moisture observation value in the observation area. The environmental factors affecting the neutron data were corrected, including atmospheric pressure correction, air humidity correction, incident neutron intensity correction and aboveground biomass correction to remove their influence to neutron counts. The  $N_0$  parameter method was used to invert the soil water value. Ground point-scale based soil moisture measurements within the CRNP footprint were aggregated to validate the soil moisture estimates based on CRNP observations. Therefore, a systematic and comprehensive comparison of soil moisture observation capabilities of CRNP over different climatic zones and vegetation cover conditions can be performed. The results indicate that, in general, CRNP observations under different vegetation covers and vegetation cover conditions were highly sensitive to soil water dynamics and can clearly respond to precipitation events. However, there were significant differences in the estimation accuracies. CRNP outperforms over grasslands, except result of one station was relatively poor, the other stations showed high reliability, with the optimal RMSE of 0.05 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, the optimal ubRMSE of 0.03 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, the optimal Bias of 0.006 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, and the optimal  $R^2$  of 0.88. In shrub covered areas, the CRNP observation effect of selected sites was strongly affected by the local environment, and the accuracy of soil water estimation was quite different. It was shown  $R^2$  value varies greatly, from 0.91 at the best to 0.02 at the worst, while ubRMSE, RMSE and Bias were repectively of 0.01 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, 0.02 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, and -0.02 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> at the best condition. In terms of the CRNP sites under grassland cover, the differences in CRNP observations are mainly related to the growth of surface vegetation, etc.; at sites under crop cover, the differences in CRNP observations are mainly related to anthropogenic activities in the agricultural areas and surface heterogeneity; at sites under forest cover, the differences are mainly related to the high canopy, etc. With repsect to the sites under shrub cover, the differences are mainly related to climate, etc. The Yanco and Sidaoqiao sites have the worst observational accuracy among all the sites, with an  $R^2$  of only 0.46 at Yanco and 0.02 at Sidaoqiao, which have weak data consistency may be mainly related to special local soil moisture environments. In conclusion, CRNP observations of soil moisture are more likely to capture regional moisture fluctuations than point-scale in situ observations. This study helps us better understand the capabilities and potentials of CRNP in observing soil moisture, and provide a scientific basis and reference for applying CRNP observation to capture the spatiotemporal changes of soil water at field scale under different vegetation cover and climate conditions.

Keywords: soil moisture; agriculture; CRNP; field scale; vegetation cover