

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0630

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[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 545-553.

ZHAO Yuan, LI Xiao-peng, JI Jing-chun, et al. Advances in Soil Moisture Monitoring Using Cosmic Ray Neutron Probe Method[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 545-553.

宇宙射线中子法在土壤水分监测研究中的应用进展

赵原^{1,2}, 李晓鹏², 纪景纯^{2,3}, 邹晓娟², 宣可凡^{2,3}, 王伟鹏^{1①}, 刘建立^{2②} (1. 山西大学环境与资源学院, 山西太原 030006; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 宇宙射线中子法(cosmic ray neutron probe, CRNP)是一种通过监测近地表宇宙射线中子流变化来预测土壤含水量的方法。该方法的突出特点在于百米范围的监测尺度,填补了传统点测量和遥感大范围监测间的尺度空缺,并为中小尺度农田、环境和水文等方面研究提供一种新的土壤水监测新技术。在介绍用CRNP法测量土壤含水量基本原理的基础上,分析了该方法测量结果的空间尺度代表性以及大气、土壤和植被等环境因素对其测量结果的影响;综述了近年来该方法在农业管理、水文研究和气象预报等领域的应用进展和动态以及当前研究中存在的问题和今后可能的发展方向。通过对相关研究成果的总结和分析,期望为该技术的深入发展和推广应用提供帮助。

关键词: 宇宙射线中子法; 百米尺度; 土壤水分监测; 氢原子

中图分类号: X83; S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2019)05-0545-09

Advances in Soil Moisture Monitoring Using Cosmic Ray Neutron Probe Method. ZHAO Yuan^{1,2}, LI Xiao-peng², JI Jing-chun^{2,3}, ZOU Xiao-juan², XUAN Ke-fan^{2,3}, WANG Wei-peng^{1①}, LIU Jian-li^{2②} (1. College of Environmental and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil water plays an important role in the critical zone water cycle, and the results of soil water content observation can in some way affect the allocation of water resources, determination of agricultural practices, and development of environmental disaster forecast. Cosmic ray neutron probe (CRNP) method, which measures soil water content by monitoring the change of neutron current in the near surface cosmic ray, has advanced rapidly in the last decades. The fundamental theories of using CRNP into soil moisture monitoring are introduced. The method has a support volume at hundred-meter (horizontal) and decimeter (vertical) scale, which fills the gap between field sampling and remote sensing. The sensor response is not only influenced by soil water, but other hydrogen reservoirs near land surface, and even within the support volume these factors still don't contribute evenly. Therefore, interpretation of the sensor response, which includes determination of the exact range of the support volume, allocation of spatial weighting factors within the support volume, and calibration of the impacts of atmosphere, soil and vegetation, remains the critical work during the development of the method; and a number of researchers have continuously contributed on it. The current utilization of the method in agricultural management, hydrological modeling and meteorological forecast is enumerated, and existing problems and possible development directions in future are also discussed. By the synthesis of the related work, it is expected to promote a further and extensive application of this method into the above areas.

Key words: cosmic ray neutron probe; hundred-meter scale; soil moisture monitoring; hydrogen atom

土壤水是环境地质水循环中的重要源和汇,参与岩石圈-生物圈-大气圈-水圈的水分大循环,并且对调节大气降水和环境水循环有重要作用^[1]。快速、准确地测定土壤含水量,对农业、环境、水文、气象、生态等多个学科和领域的研究都具有重要意义^[2-5]。

目前,土壤水监测以点尺度(单次取样/测量的范围通常在 1 m²以内)和遥感大尺度方法(研究单

元通常超过 100 m²)为主。点测量法包括烘干称重法、介电法(时域反射法、频域反射法)、中子法和张

收稿日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(41877021, 41771265); 中国科学院南京土壤研究所“一三五”计划和领域前沿项目(ISSASIP1661)

① 通信作者 E-mail: wpwang@sxu.edu.cn

② 共同通信作者 E-mail: jlliu@issas.ac.cn

力计法等^[6-9]。大范围的土壤水测量主要依靠遥感手段。具体技术方法包括热惯量法、微波技术遥感和植被指数法等^[10-12]。

实际上,土壤水监测在点尺度和遥感方法之间存在尺度上的空缺。在农业、环境、水文、气象、生态等领域关注的田块、景观和微小流域等尺度上,点尺度和遥感监测技术的应用均存在问题。当点测量法应用于更大尺度时,通常需要进行分布式野外采样或者布设传感器网络,然后再利用空间插值等方式将数据扩展到所需空间尺度^[13-14]。这也是目前区域土壤含水量数据来源的最主要方式。然而,尺度扩展会增加结果的不确定性,而采样点和传感器布置不合理也会造成宏观误差^[15-16];此外,大量采样对劳动力的需求和设备成本也限制了其监测密度。在大尺度上,卫星和载人航空等高空遥感测量方法虽然具有覆盖范围广、非接触和非破坏性等优点,但将高空遥应用于土壤水分监测时仍存在一些问题:(1)空间分辨率较低(高分卫星遥感的空间分辨率通常也只大于 10 m),难以完全反映土壤水的空间变异性^[17];(2)结果易受植被、土壤等环境因素以及建模方法影响而形成系统偏差,难以准确估算宏观水量,而实测数据校验又费时费力^[18];(3)时间灵活性差,难以按照研究需求进行灵活回访和数据采集;(4)应用成本高,无论是高分辨率卫星遥感影像还是载人飞行遥感影像价格都非常昂贵^[11]。因此,需要发展新的土壤水监测技术,既能在小范围内精确测量土壤含水量,又能衔接高空遥感等更大尺度的监测方法,以填补点尺度和大尺度之间数十米至几千米范围的中小尺度研究空缺。

宇宙射线中子法(cosmic ray neutron probe, CRNP)是近年来出现的一种土壤水监测新技术。该技术是一种通过监测近地表宇宙射线中子流变化来预测土壤含水量的方法,其突出特点在于百米尺度的监测范围,填补了点测量法和遥感监测方法之间的尺度空缺,且具有监测频率高、自动化测量、无损观察和准确性高等优点^[19-20]。基于这些特点,CRNP 已经备受人们关注,是一种极具前景的土壤水分监测技术。笔者综述了国内外对 CRNP 的研究现状,介绍了其测量原理、空间尺度代表性、影响因素和应用现状等方面内容,以期为后续的相关研究提供帮助。

蔡雅静等^[21]对典型荒漠草原区域土壤含水量进行连续监测,发现 CRNP 对降雨事件的反应有很高的灵敏度和精确度。ZHU 等^[22]在青藏高原北部

分别采用烘干法和 CRNP 测量土壤水分,并对结果进行分析比较,其均方根误差(RMSE)达到 $0.011 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$,纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)为 0.989,拟合程度高。KĘDZIOR 等^[23]利用 triple-collocation(TC)方法,对 CRNP 原位中子测量、下游数据处理中心(Centre Aval de Traitement des Données, CATDS)土壤水分海洋盐度(SMOS)卫星微波观测和全球土地资料同化系统(GLDAS)模拟数据中的 3 个表层土壤水分数据集进行比较研究,结果表明 CRNP 测量对于低分辨率卫星土壤湿度观测值和模拟值的验证特别有用。NGUYEN 等^[24]分别采用线性加权方法和非线性加权方法对频域反射仪(FDR)和 CRNP 测得的土壤含水量进行校准,结果表明,在高度非均匀性区域,CRNP 数据更具有代表性。

1 基本原理

CRNP 的工作原理主要根据地表以上宇宙射线快中子强度与土壤含水量呈反比关系的原理,利用架设在地表上方的中子探头测量宇宙射线快中子强度,从而反演出土壤含水量^[25-26]。

外太空(主要为银河系)中的高能粒子流,即初级宇宙射线,在地球磁场的作用下进入大气层,与大气层中的氮、氧等碰撞,产生二次粒子,即次级宇宙射线,进入土壤。这些次级宇宙射线可以分为 3 类:(1)高能中子,能量约为 GeV,由主质子和较重的原子将大气中的原子核分裂成含有中子的粒子而形成;(2)快中子,能量约为 1 MeV,由高能中子与原核子进行碰撞而产生,此过程也被称为“核蒸发”;(3)通过快中子与原子核碰撞而产生的低能热(0.025 eV)中子和超热(> 0.5 eV)中子中的一部分会被土壤所吸收。因此,进入土壤中的快中子,一部分最终会变为热中子被土壤所吸收,另一部分则会扩散到近地表中^[24, 27-28]。

近地表的氢元素在上述次级宇宙射线能量衰减变为热中子的过程中起决定性作用^[20],而近地表最大的氢库通常即为土壤水。土壤含水量越高,氢原子量就越多,快中子慢化速度也就越快,近地表所能检测到的快中子就越少。因此,扩散到近地表的快中子量与土壤含水量(氢原子)呈显著负相关关系^[25],CRNP 就是一个利用这种相关关系,通过中子探测器检测近地表的中子数(主要为快中子)进行土壤水分观测的系统^[29]。

2 空间尺度代表性

2.1 监测范围及贡献率

CRNP测量的是传感器周围某一范围内土壤含水量的加权均值,通常定义为86%快中子来源的贡献区域,其大小为以CRNP探测器为轴心、水平方向半径数百米、土壤中垂向距离数十厘米的区域,这个监测范围被称为支持容量^[19,27-28,30-32]。同时,对测量数据的解译,需要确定传感器周围三维空间内的探测范围对测量结果的贡献率,即空间权重。

在早期研究中,人们认为CRNP测量的支持容量为圆柱体,并且通过蒙特卡罗中子传输(Monte Carlo N-Particle eXtended, MCNPX)的模拟^[33]结果得到其测量范围的半径为300~500 m,测量深度在饱和土中为12 cm,在干燥土中为70 cm,测量结果即为支持容量内土壤水的算术平均值^[26]。后来人们逐渐认识到,CRNP测量的支持容量是以传感器为轴心的扁平的陀螺型或漏斗型。KÖHLI等^[31]通过MCNPX模型模拟证明支持容量在地表的足迹半径范围为130~240 m,其中,在干燥裸土条件下,海平面高度的径向足迹半径为240 m;有效测量深度同时为土壤含水量和到传感器水平距离的函数,范围为15~83 cm。实际条件下,受土壤水、大气水和植被的影响,该半径可减少40%;而相反地,该半径随气压每降低15 kPa而增加1%。

人们对空间权重因子的认识也是逐渐由等权重转变为空间分布权重。ZWECK等^[34]和FRANZ等^[35]发现与等权重相比,基于深度/距传感器水平距离的非线性和线性垂向/径向权重因子的验证结果与实测结果更加吻合。BAATZ等^[36]和KÖHLI等^[31]均从理论上进一步阐述了CRNP的测量范围,更加明确了不同径向和垂向距离土壤水对CRNP结果的权重:(1)土壤水分点测量结果的垂直权重随深度增大而减小,水平权重随径向距离增大而减小;(2)靠近传感器数米至十米内土壤对结果的影响最大,超过一半的中子强度来自于半径50 m之内。

根据KÖHLI等^[31]的研究,在土壤含水量不小于 $0.02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 的土壤中,径向距离上的加权平均值为4个指数部分来计算:

$$W_r \approx \begin{cases} F_1 e^{-F_2 r} + F_3 e^{-F_4 r}, & 0.5 < r \leq 50 \\ F_5 e^{-F_6 r} + F_7 e^{-F_8 r}, & 50 < r \leq 600 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, W_r 为径向距离信号强度; r 为取样点距CRNP传感器距离,m; F_i 值可参见文献^[31]附录A。

在土壤含水量 $\geq 0.10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 土壤中,CRNP测

量深度指数下降,且与测量距离有关,具体公式为

$$W_d \propto e^{-2d/Z} \quad (2)$$

式(2)中, W_d 为深度加权函数,与距离 r 有关; d 为土壤深度,cm, $d \leq Z$; Z 为CRNP测量深度,cm。

2.2 含水量测量方法

在测量含水量时,由于外部氢库会对测量结果产生影响,所以要对CRNP测得的原始快中子数进行修正。快中子数经过修正后,与土壤含水量之间存在非线性关系。可以通过 N_0 参数、COSMIC(cosmic ray soil moisture interaction code)算子和氢摩尔分数(hydrogen molar fraction, Hmf)3种转换方法将宇宙射线中子数据转换为土壤含水量^[29,37-38]。

2.2.1 N_0 参数法

N_0 参数法计算公式为

$$\theta_v = \frac{\rho_b}{\rho_w} \left(\frac{a_0}{N/N_0 - a_1} - a_2 \right) \quad (3)$$

式(3)中, θ_v 为土壤体积含水量, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_b 为土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_w 为水密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; N 为修正后的快中子数; N_0 为干燥条件下的快中子数,可以通过田间试验进行标定^[29]; $a_0=0.0808$, $a_1=0.372$, $a_2=0.115$,皆为常数,为半经验参数,且此系列可根据研究区实测数据进行重新标定,以提高测量精度^[39]。

N_0 参数法是目前研究中应用最普遍的方法,其中的关键点是如何求得和校正 N_0 ,在早期研究中,会选择在CRNP测量范围内选取适当的点采集土壤样品,计算所有土壤样品的平均含水量,再利用式(3)反推出 N_0 。但是,随着研究的深入,人们发现单纯地利用等权重的方法所求得的 N_0 值并不是最优结果。根据KÖHLI等^[31]的研究结果,可以分别利用式(1)~(2)求得径向和垂向权重,继而根据空间权重反推出 N_0 。

2.2.2 COSMIC 算子法

COSMIC算子法是根据快中子的形成过程来计算的,具体公式为

$$A(Z) = \left(\frac{2}{\pi} \right) \int_0^{\pi/2} \exp \left\{ \frac{-1}{\cos \beta} \cdot \left[\frac{m_s(Z)}{L_3} + \frac{m_w(Z)}{L_4} \right] \right\} d\beta \quad (4)$$

式(4)中, $A(Z)$ 为深度为 Z 的快中子的平均衰减函数; β 为所探测的快中子区域与探测器垂直线之间的角度; $m_s(Z)$ 和 $m_w(Z)$ 分别为不同深度之间干土和水的单位面积积分, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$; L_3 和 L_4 分别为高能中子与土壤和土壤含水量(包括晶格水)相互作用的长度衰减常数, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

测量点到达CRNP探测器的快中子数量为

$$N_{\text{CRNP}} = N \int_0^{\infty} \left\{ A(Z) \left[\alpha \rho_b(Z) + \rho_w(Z) \right] \exp \left(- \left[\frac{M_s(Z)}{L_1} + \frac{M_w(Z)}{L_2} \right] Z \right) \right\} dZ \quad (5)$$

式(5)中, N_{CRNP} 为测量点到达 CRNP 探测器的快中子数量; α 为一个假设因子, 是由土壤产生快中子的相对效率和水产生快中子的效率所决定的; L_1 和 L_2 分别为高能中子与土壤和氢相互作用的长度衰减常数, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

得到 N_{CRNP} 后, 再利用数据同化法结合 COSMIC 算子、MCNPX 模拟和土壤传感器数据进行计算, 得到最终所需的土壤含水量。

2.2.3 氢摩尔分数法

氢摩尔分数(Hmf, H_{mf})法是基于氢与简化的环境物质分子摩尔比的一种方法, 计算公式为

$$H_{\text{mf}} = \frac{\Sigma H}{\Sigma A} \quad (6)$$

式(6)中, ΣH 为 CRNP 探测支持范围内的氢分子摩尔数; ΣA 为对环境物质进行简化后的分子摩尔数, 包含空气、干土、土壤有机质和植被等, 分别被简化为 NO、SiO₂、C、木质素(C₆H₁₂O₃)和水。由此可见, 该方法对植被的影响因素做了单独考虑。Hmf 与 CRNP 数据间存在指数关系:

$$N/N_s = 4.486 \exp(-48.1H_{\text{mf}}) + 4.195 \exp(-6.181H_{\text{mf}}) \quad (7)$$

式(7)中, N_s 为饱和中子计数^[37]。Hmf 与土壤含水量之间存在非线性关系, FRANZ 等^[37]通过 MCNPX 模拟中子通量与氢摩尔分数的关系, 对土壤含水量进行一个合理的估算。该方法的特点在于便于整合已有数据, 进行数据同化。CRNP 对土壤含水量监测精度较高。根据不同地区试验结果, 校正后 CRNP 对土壤水的测量误差普遍在 $\pm 0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 以内^[24,30,40-41]。

3 影响因素分析

由于土壤水并非近地表唯一的氢库, 因此, CRNP 测量的中子强度不仅会受到土壤含水量的影响, 近地表附近来源于大气、土壤、植被等其他部分的氢库(包括大气水汽、地表积雪、径流水、土壤晶格水、土壤有机物以及植被体内水分等)也会影响其测量结果。当这些因素对中子强度的影响与土壤水接近时, 应该考虑这些额外的氢库。

3.1 大气因素

大气对 CRNP 的影响主要为气压和水汽 2 个方

面。气压会同时对 CRNP 的测量半径和中子数计数产生影响。其中, 测量半径与气压呈线性关系^[29]。在海拔高度较高的地区, 气压低, 测量范围会比海拔高度较低的地区大, 在海拔高度为 3 000 m 的地区, 测量范围会比海拔为 0 m 的地区大 25% 左右^[28]。测量半径(R_s, m)与气压的关系式可表示为^[30-31,42]:

$$R_s = R_{s,0} \left(\frac{0.5}{0.86 - e^{-p_s/p_{s,0}}} \right) \approx R_{s,0} \left(\frac{p_{s,0}}{p_s} \right) \quad (8)$$

式(8)中, $R_{s,0}$ 为 $p_{s,0}$ 条件下的测量半径, 通常使用一个标准大气压条件下的半径, 为 300 m^[42]; p_s 为当前气压, kPa; R_s 为 p_s 条件下的半径, m; $p_{s,0}$ 为参考气压, 通常为一个标准大气压, kPa。

同时, 随着时间的变化, 大气气压会对中子浓度产生影响, 继而影响 CRNP 的中子计数率, 因此需要对气压进行校正, 其修正系数^[43]为

$$f_p = \exp[(p_{s,0} - p_s)/L] \quad (9)$$

式(9)中, f_p 为气压修正系数; L 为高能中子的质量衰减长度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 受纬度和海拔的影响, 随纬度的降低而降低, 在 128~142 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间。

另外, 水汽也会影响测量结果。ROSOLEM 等^[44]使用 MCNPX 模拟了 492 对水汽含量(共 12 个个例)和统一的土壤水分条件(共 41 个个例)的配对组合, 发现最需要大气水汽校准的地区为季节性变化强的地区, 而不是单纯的潮湿或干燥地区, 且大气水汽对 CRNP 测量的影响与高度有关。通过模拟试验和计算, 提出相应的水汽修正系数和校准函数:

$$f_{\text{wv}} = 1 + 0.054 \Delta \rho_{v,0} \quad (R^2 = 0.99, M_{\text{RES}} = 0.00005) \quad (10)$$

式(10)中, f_{wv} 为 CRNP 测量强度随大气变化而变化的比例因子; $\Delta \rho_{v,0} = \rho_{v,0} - \rho_{\text{ref},v,0}$, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; $\rho_{v,0}$ 为地表绝对湿度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\rho_{\text{ref},v,0}$ 为参考条件下的地表绝对湿度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 这里为干燥空气, 即 $\rho_{\text{ref},v,0} = 0$ 。

经过大气水汽校正后发现, 大气水汽对测定中子数的影响最大可达 12% (强季节性时), 相应会造成土壤水预测误差达 $0.10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

3.2 土壤因素

土壤中的矿物晶格水、土壤有机质及枯枝落叶层等均含有氢元素, 会对 CRNP 测量造成影响。

3.2.1 晶格水

晶格水存在于各种矿物晶格中, 如黑云母、角闪石、石膏或黏土矿物。它主要会影响宇宙中子与土壤相互作用的速度, 进而减小测量深度。晶格水一般不会随外界气候产生大的变化, 因此, 只需要找到合适的校准函数, 就可以准确校准晶格水含量。ZREDA 等^[26,28]通过 MCNPX 建模结果发现, 对

于不同的化学成分,校准函数的形状是相似的。据此结果,ZREDA等预测存在通用的校准函数对晶格水进行校准,但此函数需要用测量地的土壤性质和地点位置构建得到,从而在计算算法中实现对晶格水的测量。校准时可以使用重力法测量晶格水。

3.2.2 土壤有机质中的氢

土壤有机质含有氢,因此具有类似于晶格水的作用,并且它在土壤中的含量也大致上处于恒定状态。土壤有机质含量与地表植被丰富度有关,地表植被越丰富,土壤有机质含量就越高。土壤有机物中水的当量大致等于碳的质量百分比,约为晶格水的一半^[28]。当有机碳质量含量超过 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,有机物中的氢对于CRNP的测量结果就会产生影响(大约每增加1%的有机质,就会使土壤含水量增加约0.85%^[35])。校准时可以利用库仑法测定 CO_2 ,并用红外技术测定总碳,然后计算土壤有机碳,得到有机质中水含量^[28]。

3.2.3 对测量深度的影响

CRNP测量深度 Z 为垂直方向上探测到86%快中子的范围,测量深度 Z 与测量范围内的土壤含水量呈反比例关系。含水量较高的土壤所含氢原子数量往往较多,从而慢化和吸收土壤中快中子的速度就会更快,使得快中子无法继续向土壤更深处扩散。因此,土壤中其他氢库会导致测量深度变小。近年来的研究^[30-31,45-46]表明,CRNP测量深度 Z 计算公式为

$$Z = \rho_b^{-1} [P_0 + P_1(P_2 + e^{-r/100}) \frac{P_3 + \theta}{P_4 + \theta}]。 \quad (11)$$

式(11)中, Z 为CRNP测量深度,cm; ρ_b 为土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; r 为距CRNP探测器的距离,m; θ 为土壤体积含水量, $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$; P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 均为常数,分别为8.321、0.142 49、0.966 55、26.42和0.056 7。

3.3 地表水

地表积雪、积水、水体和径流水等均会对CRNP测量产生影响。特别是在寒冷地区,积雪是除了土壤外最大的额外氢库,对测量结果有明显影响。TIAN等^[47]分别于2014和2015年作物季和雪季对植被水当量(BWE)和雪水当量(SWE)进行测量,发现其与热中子(TN)和快中子(FN)强度之间的中子比(Nr)呈强线性关系,根据这种线性关系进行矫正,可以精确地估算出BWE和SWE值。RIVERA-VILLARREYES等^[48]分别采用由16个探针组成的土壤含水量监测网络和CRNP传感器对冬季农田系统积雪条件下的土壤含水量进行测量后发现,CRNP测量

结果不会受到空气温度急剧下降的影响,同时在积雪期间,用CRNP测得的Nr值更为准确。地表大会减少该方向的中子强度和半径,而干燥路面等则会造成该方向含水量的高估,但大多数应用条件下仍可认为CRNP的径向足迹是各向同性的^[31]。

3.4 植被因素

植被对CRNP的影响既有植物体内水和有机物的因素,又有植被冠层截留水因素。试验证明, $1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 植被地上干物质或 $2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 植被水当量可造成约0.9%的快中子强度变化^[36]。对于短期研究,可认为植被体内水含量和植被有机质含量是常量,而长期监测中植被的盛衰会造成明显的数据波动^[41]。此外,近地表快中子的热化并不仅仅受植被生物量的影响,还受其空间分布(植被分布形态、植株大小、密度)的影响^[36]。由于植被空间分布存在强空间变异性和长期动态变化特征,使其成为最复杂的影响因素,同时也成为CRNP研究热点。

对于2.2节中列出的3种含水量算法,可采用不同的植被因素校正方法。对 N_0 法来说,可在包含植被的情况下对其重新进行拟合以消减植被影响,但仅限于植被生物量波动不大的情况;或者采用 N_v 替换式(3)中 N :

$$N_v = \frac{N}{1 - E_{\text{BW}}(r/N_0)}。 \quad (12)$$

式(12)中, N_v 为植被校正后的中子计数; E_{BW} 为植被水当量。由于Hmf法直接考虑了植被影响因素,因此可直接通过调整植被氢摩尔数进行校正。植被水当量的估算可利用热中子-快中子比值^[47],或者引入植被叶面积指数(LAI)、植被指数(NDVI)等其他源数据^[41]。

此外,KÖHLI等^[31]研究发现植被会影响CRNP测量范围,并且通过模拟试验发现随着植被高度的增加测量半径在减小,两者呈指数关系:

$$f_{\text{veg}} = 1 - 0.17(1 - e^{-0.41H_{\text{veg}}})(1 + e^{-7\theta})。 \quad (13)$$

式(13)中, H_{veg} 为植被高度,m; f_{veg} 为对应的修正系数。

然而,目前人们就环境空间变异性对CRNP影响的认识仍然不够,迫切需要快速、直观、准确地对植被和其他环境条件进行定量评价的技术方法^[31],以推进CRNP的更广泛应用。

3.5 太阳中子因素

宇宙射线密度随时间的变化主要由太阳活动引起,太阳辐射的大小可反映太阳活动,如太阳黑子周期或昼夜波动等都会对宇宙射线产生影响,故

需要对太阳辐射进行校正,ZREDA等^[28]提出了太阳中子的修正系数:

$$f_i = N_m / N_a \quad (14)$$

式(14)中, f_i 为太阳中子修正系数; N_m 为测量时间内实测的快中子密度, h^{-1} ; N_a 为参考中子密度, h^{-1} 。此数据可以使用瑞士少女峰观测站(46.55° N, 7.89° E;海拔3 750 m)的中子观测数据(<http://cosray.unibe.ch/>)进行校正。

4 应用现状

CRNP可以对土壤进行非接触式、无破坏性的连续水分监测,因此,近年来被广泛地应用于农业管理、水文研究、气象预报、植被生物量变化评估和雪深测量等各个方面。

4.1 农业管理

准确掌握土壤水分的田间尺度变化对于灌溉农业管理非常重要。由于CRNP可实现百米尺度范围的监测,为中小尺度农田土壤含水量的测量提供了一种新的监测技术,且这种技术对水分变化有很高的灵敏性和准确度;因此,可通过CRNP对农田土壤含水量进行实时监测,且随时了解植被的生物量变化,以达到在农业系统中建立长期监测点的目的。HAN等^[49]综合模拟研究了西班牙瓦伦西亚附近滴灌灌溉的柑橘农田,通过同化CRNP的中子强度调整土壤含水量后,使用局部集成变换卡尔曼滤波器(local ensemble transform Kalman filter)更新土壤水力性质(连同土壤湿度),根据作物的水分亏缺指数计算灌溉需求,结果表明:宇宙射线中子仪能够精确地反映作物根系的水分变化,为农田的灌溉调度提供了更多选择。FRANZ等^[35]在奥地利东北部的农田系统中,使用CRNP和时域透射率(time-domain transmissivity, TDT)监测网络对土壤含水量进行观测,并将两者结果进行对比分析后发现,CRNP能够在农业生态系统中提供实时和准确的土壤含水量测量结果。可见,CRNP将会为未来农业用水和养分管理决策方面的研究提供极大帮助。

4.2 水文研究

土壤含水量作为水文要素之一,是陆地水文研究中最重要内容,可以为径流形成、湖泊变化等研究提供一定帮助。通过采用CRNP对土壤含水量的测量,推测出土壤含水量在不同地区、不同土壤质地和时间上的变化规律,观测植物生长状态,可为水文研究提供一种新的测量方法。ZHU等^[19]分析了CRNP测量深度在时间稳定性上的表现, RMSE

达到0.021,表明时间稳定性在CRNP深度评估中的应用是可靠的。ALMEIDA等^[50]将电容式土壤水分传感器和CRNP数据结合在一个模糊推理系统(m-ANFIS)中,以估算澳大利亚塔斯马尼亚岛东北部一个28 hm^2 的圆形区域土壤水分的空间变化,在长期的监测中,两者误差保持在2%~6%。因此,CRNP可以为水文方面的研究提供可靠的数据保证。CHRISMAN等^[51]在亚利桑那州的图森盆地大规模地进行卫星遥感反演水文研究时发现,CRNP生成的土壤湿度图有助于卫星数据的校准和验证,为大规模的水文研究提供了一种新方法。AVERY^[52]利用CRNP的高时空分辨率及其应用规模尺度范围大的特点,为中小尺度上土壤含水量监测提供了更为精确的数据,在水文建模中将CRNP作为土壤含水量数据生成工具,验证了土壤水分在全球水循环中的重要性。

4.3 气象预报

土壤含水量作为气象和水文预测的关键指标,在相关领域发展迅速,越来越多的研究表明土壤湿度与不同时期不同气象要素间存在不同程度的关系^[53],因此,通过测量土壤含水量就可以准确地反映气象状况,达到对气象条件进行预测的目的。FRANZ等^[45-46]为亚利桑那州南部的旱地生态系统预测气候状况时,分别利用包含180个探针的高分辨率土壤湿度网络和CRNP传感器,测量数百平方米范围的土壤平均含水量,结果发现,CRNP在中小尺度上的测量精度完美地满足了气象学的要求,不但能够提供合理的水通量估算,而且其含水量数据在降雨渗透到有限深度的旱地生态系统的每日和季节时间尺度上都有较高的质量,是评估水在自然环境中作用的理想选择。

4.4 植被生物量估算

利用CRNP的测量原理,可以通过测量植物组织中固定的生物氢和植物木质部以及其他组织中含有的氢原子来估算植被水当量(BWE),再根据BWE占植被生物量的百分比来计算生物量。FRANZ等^[37]设计了森林和农田环境的试验研究,2个试验分别对黄松林和玉米田BWE进行测量,结果表明CRNP可以在一定的精确度范围内估算出黄松林和玉米田的BWE,但在试验的同时还发现其测量精度会受到土壤含水量、大气水汽含量、地下生物量和作物残渣的影响,在试验过程中需要对上述几个指标进行精确测量,以提高BWE测量的精确度。BAATZ等^[36]在研究生物量对CRNP测量结果的

影响时,假设地上植被生物量所含水当量近似于纤维素($C_6H_{10}O_5$)中含有的氢和氧的量,约占植被生物量的55.6%。对于植被水当量占制备生物量的比例,可以在CRNP测量范围内选取适当的点采样计算以提高精确度。JAKOBI等^[54]在农业干旱条件下,采用 N_r 来估算甜菜生物量,通过每月的采样,发现 N_r 与甜菜生物量呈线性关系,其RMSE最终可达 $0.013\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,但是对于地上其他植被,特别是生物质产量较低的植被的适用性并不清楚。在未来研究中,该方法的一般适用性应作为研究重点。

4.5 雪深测量

采用CRNP测量含水量主要测量的是氢原子的量,而快中子对土壤湿度变化的敏感性比热中子更高,其计数率通常更高。ZREDA等^[28]描述了美国科罗拉多州一个采用CRNP测量雪深的试验,发现随着地面上积雪厚度的增加,快中子强度下降得更快。DESILETS等^[29]对亚利桑那州冬季雪水当量深度(SWE)进行调查发现,采用CRNP测量SWE的结果与采用积雪取样装置独立收集数据后所测得结果非常接近,说明CRNP在测量雪深方面有较高的精确度。SCHATTAN等^[55]在阿尔卑斯山脉评估了CRNP在积雪测量方面的特性,该试验同时使用基于空间分布的地面激光扫描(TLS)和自动气象站对连续点尺度雪深(SD)和SWE进行测量,结果表明:无论是SD还是SWE,CRNP都表现出强的非线性相关,可将其应用于高寒积雪区空间平均SD和SWE的连续监测,但灵敏度随SWE的增加而降低。

5 应用展望

CRNP适用于中小尺度的土壤水分监测,其测量范围填补了点测量法和遥感测量法间的尺度空缺,具有自动测量、连续无破坏、结果准确、测量深度较大、范围适中等优点。然而,正如预期的那样,CRNP可精确测量土壤-植被-大气整个连续体的水分含量,但其测量精准度取决于测量范围内氢原子的量,故CRNP将会受到地表其他氢库(如晶格水、大气水汽、拦截水、雪水、植被生物量等)和具体实验场地复杂变化的时间和空间氢库的影响。因此,如何有效、快速、准确地对近地表其他氢库的影响进行分析和校正将是需要思考和解决的问题。

晶格水和大气因素对CRNP测量影响的研究已日趋成熟,但对于植被生物水、雪水等其他影响因素,可通过研究找到更为简便有效的方法校正生物水和雪水对CRNP测量的影响。如结合其他中

尺度土壤水监测方法(如探地雷达、高密度电阻法及拉曼散射TDR)或利用其他方法(如无人机遥感与其他地面验证实验)对用CRNP所测得数据进行校正,逐渐完成对CRNP数据的完善和修正。因此,如何将CRNP发展成为一个具有足够空间分辨率反映土壤水的空间变异性,同时监测范围还能够衔接高空遥感等大尺度的前沿方法来满足区域化、精量化的研究要求,将会是未来研究重点。

通过近年来不断的研究和发展,将CRNP搭载在车辆上进行移动测量已经成为可能。在农业应用中,可以搭载在拖拉机等农业设备上,再结合其他农业监测手段,可以为农业活动提供信息,如灌溉深度的时间和空间分布,最佳肥料、水量的投入,产量预测等。此外,将CRNP搭载在小型货车上,可以在一定区域内进行与土壤含水量相关的绘图工作,为全球正在进行的数字土壤绘图工作和其他高分辨率产品的验证提供一定的技术支持。

参考文献:

- [1] 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. [WANG Da-long, SHU Ying-ge. Research Progress in Determination Methods for Soil Water Content[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2017, 36(2): 61-65.]
- [2] 张学礼,胡振琪,初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(1): 118-123. [ZHANG Xue-li, HU Zhen-qi, CHU Shi-li. Methods for Measuring Soil Water Content: A Review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 118-123.]
- [3] 郎莹,汪明. 春、夏季土壤水分对连翘光合作用的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 3043-3051. [LANG Ying, WANG Ming. Effects of Soil Water on Photosynthesis of *Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl. in Spring and Summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 3043-3051.]
- [4] 柴守玺,杨长刚,张淑芳,等. 不同覆膜方式对旱地冬小麦土壤水分和产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 787-796. [CHAI Shou-xi, YANG Chang-gang, ZHANG Shu-fang, et al. Effects of Plastic Mulching Modes on Soil Moisture and Grain Yield in Dryland Winter Wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(5): 787-796.]
- [5] 云文丽,侯琼,王海梅,等. 不同土壤水分对向日葵光合响应的影响[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4): 476-482. [YUN Wen-li, HOU Qiong, WANG Hai-mei, et al. Effects of Different Soil Moistures on Photosynthetic Characteristics of Sunflower[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(4): 476-482.]
- [6] HERKELRATH W N, HAMBURG S P, MURPHY F. Automatic, Real-Time Monitoring of Soil Moisture in a Remote Field Area With Time Domain Reflectometry[J]. Water Resources Re-

- search, 1991, 27(5):857-864.
- [7] CHANZY A, CHADOEUF J, GAUDU J C, *et al.* Soil Moisture Monitoring at the Field Scale Using Automatic Capacitance Probes [J]. *European Journal of Soil Science*, 1998, 49 (4) : 637-648.
- [8] ENTIN J K, ROBOCK A, VINNIKOV K Y, *et al.* Temporal and Spatial Scales of Observed Soil Moisture Variations in the Extratropics [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000, 105(D9):11865-11877.
- [9] OCHSNER T E, COSH M H, CUENCA R H, *et al.* State of the Art in Large-Scale Soil Moisture Monitoring [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(6):1888-1919.
- [10] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3):213-224.
- [11] 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.
- [12] MALTESE A, MINACAPILLI M, CAMMALLERI C, *et al.* A Thermal Inertia Model for Soil Water Content Retrieval Using Thermal and Multispectral Images [J]. *Proceeding of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7824. DOI: 10.1117/12.864672.
- [13] VAN KUILENBURG J, DE GRUIJTER J J, MARSMAN B A, *et al.* Accuracy of Spatial Interpolation Between Point Data on Soil Moisture Supply Capacity, Compared With Estimates From Mapping Units [J]. *Geoderma*, 1982, 27(4):311-325.
- [14] YAO X L, FU B J, LÜ Y H, *et al.* Comparison of Four Spatial Interpolation Methods for Estimating Soil Moisture in a Complex Terrain Catchment [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8 (1) : e54660. DOI: 10.1371/journal.pone.0054660.
- [15] BOURENNANE H, KING D, COUTURIER A, *et al.* Uncertainty Assessment of Soil Water Content Spatial Patterns Using Geostatistical Simulations: An Empirical Comparison of a Simulation Accounting for Single Attribute and a Simulation Accounting for Secondary Information [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 205 (3/4) : 323-335.
- [16] LIAO K, LAI X, LÜ L, *et al.* Uncertainty in Predicting the Spatial Pattern of Soil Water Temporal Stability at the Hillslope Scale [J]. *Soil Research*, 2016, 54(6):739-748.
- [17] 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.
- [18] BLANCHARD M B, GREELEY R, GOETTELMAN R. Use of Visible, Near-Infrared, and Thermal Infrared Remote Sensing to Study Soil Moisture [J]. *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1974(1):693-700.
- [19] 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.
- [20] 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 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30(21):113-117. [JIA Xiao-jun, SHI Sheng-jin, HUANG Bin-xiang, *et al.* Principles and Application of Cosmic-Ray Neutron Method for Measuring Soil Moisture [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(21):113-117.]
- [21] 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 [J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2015, 13(6):456-460. [CAI Jing-ya, PANG Zhi-guo, TAN Ya-nan. Application of Cosmic-Ray Neutron Method to Soil Moisture Measurement in Desert Steppe [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2015, 13(6):456-460.]
- [22] ZHU X C, SHAO M A, ZENG C, *et al.* Application of Cosmic-Ray Neutron Sensing to Monitor Soil Water Content in an Alpine Meadow Ecosystem on the Northern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 536:247-254.
- [23] KĘDZIOR M, ZAWADZKI J. Comparative Study of Soil Moisture Estimations From SMOS Satellite Mission, GLDAS Database, and Cosmic-Ray Neutrons Measurements at COSMOS Station in Eastern Poland [J]. *Geoderma*, 2016, 283:21-31.
- [24] NGUYEN H H, KIM H, CHOI M. Evaluation of the Soil Water Content Using Cosmic-Ray Neutron Probe in a Heterogeneous Monsoon Climate-Dominated Region [J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 108:125-138.
- [25] KODAMA M. Application of Cosmic Ray for Water Utilization Purpose: Measurement of Snow Volume and Soil Water [J]. *Water Science*, 1977(19):32.
- [26] 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):L21402. DOI: 10.1029/2008GL035655.
- [27] 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. [ZHAO Chun, YUAN Guo-fu, LIU Xiao, *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.]
- [28] ZREDA M, SHUTTLEWORTH W J, ZENG X, *et al.* Corrigendum to "COSMOS: The COsmic-Ray Soil Moisture Observing System" Published in *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4079 - 4099, 2012 [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(3) : 1065-1066.
- [29] 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) : W11505. DOI:10.1029/2009wr008726.
- [30] 焦其顺, 朱忠礼, 刘绍民, 等. 宇宙射线快中子法在农田土壤水分测量中的研究与应用 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(10):1136-1143. [JIAO Qi-shun, ZHU Zhong-li, LIU Shao-min, *et al.* Research and Application of Cosmic-Ray Fast Neutron Method to Measure Soil Moisture in the Field [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(10):1136-1143.]
- [31] KÖHLI M, SCHRÖN M, ZREDA M, *et al.* Footprint Characteris-

- tics Revised for Field-Scale Soil Moisture Monitoring With Cosmic-Ray Neutrons[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(7): 5772–5790.
- [32] DONG X C. Improving the Accuracy of Cosmic-Ray Neutron Probe Estimate of Soil Water Content Using Multiple Detectors and Remote Sensing Estimates of Vegetation[D]. Lincoln, USA: University of Nebraska Lincoln, 2017.
- [33] PELOWITZ D. MCNPX User's Manual, Version 2. 5. 0. LACP-05-0369[M]. Los Alamos, New Mexico, USA, Los Alamos National Labs, 2005:2–5.
- [34] ZWECK C, ZREDA M, DESILETS D. Empirical Confirmation of the Sub-Kilometer Footprint of Cosmic-Ray Soil Moisture Probes[C]. Vienna, Austria: 8th EGU General Assembly, 2011.
- [35] 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*, 2016, 2016: 1–11. DOI: 10.1155/2016/4323742.
- [36] BAATZ R, BOGENA H R, HENDRICKS-FRANSSSEN 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.
- [37] FRANZ T E, ZREDA M, ROSOLEM R, *et al.* A Universal Calibration Function for Determination of Soil Moisture With Cosmic-Ray Neutrons[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2013, 17(2): 453–460.
- [38] 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.
- [39] LÜ L, FRANZ T E, ROBINSON D A, *et al.* Measured and Modeled Soil Moisture Compared With Cosmic-Ray Neutron Probe Estimates in a Mixed Forest[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, 13(12). DOI: 10.2136/vzj2014.06.0077.
- [40] 王秋铭, 王胜, 樊军. 宇宙射线快中子法在土壤水分测量中的应用: 以陕北六道沟流域为例[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 125–131. [WANG Qiu-ming, WANG Sheng, FAN Jun. Application of Cosmic-Ray Fast Neutron Method to Measure Soil Moisture: A Case Study of Liudaogou Basin in Shaanxi[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(5): 125–131.]
- [41] 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. [CAI Jing-ya. 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.]
- [42] DESILETS D, ZREDA M. Footprint Diameter for a Cosmic-Ray Soil Moisture Probe: Theory and Monte Carlo Simulations[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3566–3575.
- [43] DESILETS D, ZREDA M. On Scaling Cosmogenic Nuclide Production Rates for Altitude and Latitude Using Cosmic-Ray Measurements[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 193(1/2): 213–225.
- [44] 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.
- [45] 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): W08515. DOI: 10.1029/2012wr011871.
- [46] FRANZ T E, ZREDA M, ROSOLEM R, *et al.* Field Validation of a Cosmic-Ray Neutron Sensor Using a Distributed Sensor Network[J]. *Vadose Zone Journal*, 2012, 11(4). DOI: 10.2136/vzj2012.0046.
- [47] TIAN Z C, LI Z Z, LIU G, *et al.* Soil Water Content Determination With Cosmic-Ray Neutron Sensor: Correcting Aboveground Hydrogen Effects With Thermal/Fast Neutron Ratio[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 923–933.
- [48] RIVERA-VILLARREYES C A, BARONI G, OSWALD S E. Integral Quantification of Seasonal Soil Moisture Changes in Farmland by Cosmic-Ray Neutrons[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 8(4). DOI: 10.5194/hessd-8-6867-2011.
- [49] HAN X J, HENDRICKS-FRANSSSEN H J, JIMÉNEZ-BELLO M Á, *et al.* Simultaneous Soil Moisture and Properties Estimation for a Drip Irrigated Field by Assimilating Cosmic-Ray Neutron Intensity[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 611–624.
- [50] 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.
- [51] CHRISMAN B, ZREDA M. Quantifying Mesoscale Soil Moisture With the Cosmic-Ray Rover[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2013, 10(6): 7127–7160.
- [52] AVERY W A. The Cosmic-Ray Neutron Probe Method for Estimating Field Scale Soil Water Content: Advances and Applications[D]. Nebraska, USA: University of Nebraska Lincoln, 2016.
- [53] 李启芬. 土壤湿度年际异常对气候潜在可预报性的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. [LI Qi-fen. The Influence of Interannual Soil Moisture Anomaly on Climate Potential Predictability[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.]
- [54] JAKOBI J, HUISMAN J A, VEREECKEN H, *et al.* Cosmic Ray Neutron Sensing for Simultaneous Soil Water Content and Biomass Quantification in Drought Conditions[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10): 7383–7402.
- [55] SCHATTA 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.

作者简介: 赵原(1993—), 男, 山西临汾人, 硕士生, 主要研究方向为土壤物理。E-mail: 565464723@qq.com

(责任编辑: 李祥敏)