

# 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

武强<sup>1,2,3</sup>, 徐倩倩<sup>4</sup>, 朱玉涵<sup>1,2,3</sup>, 闫梦玲<sup>5</sup>, 罗孳孳<sup>1,2,3</sup>

(1.重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 2.重庆市农业气象与卫星遥感工程技术研究中心, 重庆 401147;

3.重庆市江津现代农业气象试验站, 重庆 402260; 4.合肥市气象局, 合肥 230041; 5.永川区气象局, 重庆 402181)

**摘要:**为了研究宇宙射线中子法不同测量足迹模拟对土壤水分反演结果准确性的影响,以烘干称重法为标准对比,频域反射法为趋势稳定性对照,基于垂直足迹线性加权方法对宇宙射线中子法反演区域土壤水分进行参数校准与测量结果验证,比较了相对于测量足迹等权重加权方法的区域土壤水分反演准确性。结果表明:相较于测量足迹等权重加权方法,垂直足迹线性加权处理的宇宙射线中子法区域土壤水分反演结果与通过烘干称重法获得的标准值一致性更好,反演模型准确性提高,与烘干称重法多点平均所代表的区域土壤水分值进行拟合,决定系数  $R^2$  增加 0.036,均方根误差 RMSE 减小 0.002 3 kg/kg,纳什效率系数 NSE 提高 0.041;与频域反射法连续性测量结果比较,研究宇宙射线中子法连续性测量结果稳定性,结果显示除降水时段外,利用等权重加权与垂直足迹线性加权算法的结果趋势具有相似的一致性;垂直足迹线性权重配比更符合不同深度土壤水分在宇宙射线中子法反演计算区域土壤水分的贡献差异,基于垂直足迹线性加权的宇宙射线中子法区域土壤水分反演结果能够更加客观地反映测量足迹内土壤水分的实际情况。

**关键词:**宇宙射线中子法;垂直足迹线性加权;测量足迹等权重加权;土壤水分

**中图分类号:**S163; S152.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)04-0113-08

## Improving Calibration and Validation of Soil Moisture Measurements Using Cosmic-Ray Neutron Method Based on Linear Depth Weighting

WU Qiang<sup>1,2,3</sup>, XU Qianqian<sup>4</sup>, ZHU Yuhuan<sup>1,2,3</sup>, YAN Mengling<sup>5</sup>, LUO Zizi<sup>1,2,3</sup>

(1.Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China;

2.Chongqing Engineering Research Center of Agrometeorology and Satellite Remote Sensing,

Chongqing 401147, China; 3.Chongqing Jiangjin Modern Agrometeorology Test Station, Chongqing 402260, China;

4.Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230041, China; 5.Yongchuan Meteorological Bureau, Chongqing 402181, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different footprint simulation of cosmic-ray neutron method on the accuracy of soil moisture inversion results, and the optimization effect relative to the footprint equal weighting method, the parameter calibration and result validation of soil moisture inversion by the cosmic-ray neutron method based on the linear depth weighting method, as the oven-drying method being the standard comparison, while the frequency domain reflection method being the continuous comparison. The accuracy of measurement results was compared with the standard value represented by the oven-drying method, the determination coefficient of linear equation ( $R^2$ ) increased by 0.036, the root-mean-square error (RMSE) decreased by 0.002 3 kg/kg, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) increased by 0.041, the consistency of measurement results was better and the accuracy of inversion model was improved. The results of continuous measurement were compared with the frequency domain reflection method, the results showed no

收稿日期:2020-08-20

修回日期:2020-09-13

**资助项目:**中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J068, CXFZ2021J073);重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2020jcsx-msxmX0111);重庆市气象部门智慧气象技术创新团队项目(ZHCXTD-202016);重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJSGG-201905);重庆市气象局科技计划项目(QNJJ-201703)

**第一作者:**武强(1989—),男,山西河曲人,工程师,主要从事农田小气候和气象仪器研究。E-mail:theodorus@yeah.net

**通信作者:**罗孳孳(1980—),男,重庆北碚人,高级工程师,主要从事农业气象研究。E-mail:showerluo@163.com

significant difference in trend stability between the two methods except the precipitation period. This study indicated that the inversion result based on the linear depth weighting method in improved consistency and accuracy of inversion model as the standard value obtained by oven-drying method, and the stability was close to the results of frequency domain reflection method in continuous observation compared with the footprint equal weighting method. The linear depth weighting was more consistent with the contribution of soil moisture in different depth. The soil moisture inversion by the cosmic-ray neutron method based on the linear depth weighting method can reflect the actual situation of soil moisture in the footprint more objectively.

**Keywords:** cosmic-ray neutron method; linear depth weighting; footprint equal weighting; soil moisture

土壤水分是地表主要物理参量之一,在农业、水文和陆表模型的参与运行与评价中都有着重要的意义<sup>[1-2]</sup>,洪涝灾害风险评估<sup>[3-4]</sup>、作物水分盈亏实时判定<sup>[5-6]</sup>以及土壤干旱的预测分析等<sup>[7-8]</sup>对于不同尺度根区土壤水分的准确估测有着切实的需求。相较于目前应用较为广泛的烘干称重法、介电常数法(频域反射法、时域反射法、时域透射法等),宇宙射线中子法是可以反演区域范围土壤水分平均状况的测量方法,具有区域测量尺度、不破坏土层结构、不受土壤化学性质影响、可连续观测等优点。国外已有诸多针对宇宙射线中子法测量区域土壤水分的校准以及与传统测量手段的性能比较研究<sup>[9-11]</sup>,国内也已将该方法应用于农田<sup>[12-13]</sup>、草原<sup>[14]</sup>、山地<sup>[15]</sup>等不同下垫面,且得到较好的测量效果,但是在应用过程中,普遍按照宇宙射线中子法测量足迹范围内的土壤水分状况对区域土壤水分测量结果是等权重无差别贡献的思路进行数据处理,即选取测量足迹范围内不同水平距离、垂直距离的多个样点获取土壤水分含量,计算平均值代表测量区域土壤的标准含水量,并以此对宇宙射线中子法进行参数校准与测量结果验证。

宇宙射线中子法的测量足迹定义为以探测器为圆心,能够测量到区域内快中子发源强度 86% 的范围,其水平测量足迹为直径约 600 m 的圆形区域;垂直测量足迹约 12—76 cm,随土壤含水状况不同而变化<sup>[16-17]</sup>。随着研究的不断深入,宇宙射线中子法测量足迹范围内的土壤水分贡献权重差异已被证实,水平足迹范围内,随着与传感器水平距离的差异而表现不同土壤水分贡献权重<sup>[18-20]</sup>;垂直足迹范围内,土壤水分含量随着土层深度的增加在土壤水分整体估算中所占权重逐渐减小<sup>[21-22]</sup>。基于合理的测量足迹理解,精准估算土壤水分标准含量,获取高质量的数据集,对宇宙射线中子法的反演模型的校准和验证至关重要。宇宙射线中子法测量足迹理解与区域土壤水分估算精度的匹配决定了利用宇宙射线中子法反演土壤水分的准确性。

本研究以宇宙射线中子法足迹范围内不同加权

方法为切入点,比较研究不同加权方法对区域土壤水分反演结果准确性的提升效果。由于试验场景为山地地形的复杂下垫面,实地勘测发现土壤结构存在较大的空间异质性,加之坡地地形的复杂性,水平足迹加权算法所面临的影响因素较多,不合理的加权方法选取有可能增大土壤水分反演结果的不确定性<sup>[16]</sup>,故本研究利用垂直足迹等权重加权与线性加权分别对宇宙射线中子法测量区域土壤水分的反演参数进行校准,并验证土壤水分反演结果的准确性,水平足迹数据则统一采用常规的等权重加权处理。研究结果可对山地地形下垫面基于宇宙射线中子法的区域土壤水分的反演计算性能的提升提供科学依据与应用实例。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

设置宇宙射线中子法(Cosmic-ray Neutron Sensing, CRNS)、频域反射法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)、烘干称重法(Oven-drying Method, ODM)3 种不同时间、空间尺度的土壤水分测量方法进行对比研究。研究区域位于重庆市巴南区白象山茶园,属于山地地形的复杂下垫面。土质以壤土和黏质土为主,局部区域有砂质土或岩性紫色土。植被主要为株高 50~80 cm 的灌木型茶树,间种高大乔木作为防护林与遮阴树,空地多为原生草本地被植物。研究时间 2018 年 6 月 22 日—8 月 11 日,平均气温 28.6℃,极端最高气温 40.8℃,极端最低气温 21.9℃。降水总量 255.8 mm,雨日数 27 d。

研究区域中心(29°28'30"N, 106°44'07"E, 海拔 558.60 m)为 4 m×4 m 观测场,观测场内安装有自动气象站、土壤水分自动站以及宇宙射线中子法区域土壤水分观测系统。为减小单位换算产生的累积误差,保证烘干称重法作为标准测量方法的结果准确性,本研究土壤含水量统一采用烘干称重法测量单位质量含水量(kg/kg)。

宇宙射线中子法区域土壤水分观测系统(Cos-

mic-ray Soil Moisture Observing System, COSMOS)数据采样间隔设定为1 h,原始数据中子数经反演计算获得区域土壤水分含量。反演结果需进行12 h滑动平均滤除随机误差。参数修正所需的空气相对湿度与气压数据由自动气象站提供。

烘干称重法为国际上沿用的土壤含水量测定标准方法,以多点、多土层土壤含水量计算得到区域土壤含水量,并作为标准值代表。取土采样点以 COSMOS 为中心,距离垂直方向4个方位50,100,200,250 m处,共16个取样点,取样深度0—10,10—20,20—30,30—40 cm。采样时间为6月22日—8月11日,每5 d取样1次,累计11次。

频域反射型土壤水分自动站两套,测量结果的平均值作为连续性观测对照,两套土壤水分自动站分别位于 COSMOS 所在的观测场内,以及 COSMOS 西南方向约100 m处(29°26′35″N,106°45′02″E,海拔580.70 m),测量深度0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm共5个梯度。数据采样间隔1 h,与 COSMOS 同步。

## 1.2 宇宙射线中子法的数据处理

宇宙射线中子法是通过测量与氢原子碰撞而慢化了的快中子的强度来反演计算测量源区内土壤水分的含量<sup>[23]</sup>。近地面层氢原子除湖泊江河等大型水体外,主要存在于土壤水中,土壤水分以外的含氢物质尤其是空气中的水汽也会起到慢化快中子的作用,从而影响土壤水分测量结果的准确性<sup>[24]</sup>。气压的变化改变高能粒子与空气粒子碰撞而丢失能量发生级联反应的几率,影响土壤水分测量结果<sup>[16]</sup>。另外,太阳周期变化如太阳黑子周期、昼夜变化等也会直接影响高能粒子密度<sup>[23]</sup>。基于上述因素,需要对宇宙射线中子法测得的快中子数原始数据进行相应的修正。

$$CWV=1+0.0054(\rho-\rho_0) \quad (1)$$

式中: CWV 为水汽修正系数;  $\rho$  为地表绝对水汽密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_0$  为参考条件下地表的绝对水汽密度,一般可取为0。

$$f_p=e^{\frac{P_0-P}{L}} \quad (2)$$

式中:  $f_p$  为气压修正系数;  $e$  为自然常数;  $P_0$  为气压参考值;  $P$  为试验期内的平均气压值;  $L$  为高能中子的质量衰减长度,按其随纬度变化规律,试验地点纬度29°28′30″N,  $L$  取值137  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

太阳活动修正系数:

$$f_i=\frac{I_m}{I_0} \quad (3)$$

式中:  $f_i$  为太阳活动修正系数;  $I_m$  为探测器测得的中子强度;  $I_0$  为指定的中子基准强度,一般使用海拔3 560 m

处的瑞士少女峰站的宇宙射线数据作为中子基准强度。

宇宙射线中子法原始数据  $N_{\text{RAW}}$  经过水汽修正、气压修正与太阳活动修正,参与土壤水分计算的中子数  $N_{\text{CORR}}$  表示为:

$$N_{\text{CORR}}=N_{\text{RAW}} \cdot CWV \cdot f_p/f_i \quad (4)$$

Desilets 等<sup>[25]</sup>利用 MCNPX 模型模拟中子运动及其运动轨道,建立宇宙射线中子法的反演函数,即中子量与土壤水分之间的函数关系为:

$$\theta(N)=\frac{a_0}{\frac{N}{N_0}-a_1}-a_2 \quad (5)$$

式中:  $\theta(N)$  为测量源区内相应测量足迹的平均土壤质量含水量;修正参数  $a_0=0.0808$ ,  $a_1=0.372$ ,  $a_2=0.115$ ;  $N$  为经过修正的中子数;  $N_0$  为测量源区土壤不含水条件下的中子数,其取值受地理纬度、海拔高度、土壤质地影响,对于同一测量源区;  $N_0$  值不变<sup>[26-28]</sup>。通常采用 Zreda 等<sup>[16]</sup>提出的取具代表性的区域土壤水分值带入公式反推求取  $N_0$ 。

## 1.3 反演函数参数校准方法

### 1.3.1 测量足迹等权重加权

测量足迹等权重加权方法认为宇宙射线中子法土壤水分测量值是测量足迹内,即水平和垂直范围内的各点土壤水分值无差别贡献的综合结果。即在宇宙射线中子法测量足迹内,水平与垂直距离多点均匀采样,测量土壤含水量求取平均值代表区域土壤水分状况,推导求取参数  $N_0$ ,获得土壤水分反演函数,并利用多点采样平均值在较长时间序列的周期观测结果作为对比标准,验证宇宙射线中子法测量区域土壤水分的准确性。

宇宙射线中子法水平测量足迹为以 COSMOS 为中心的面圆区域<sup>[16]</sup>,与气压呈反比关系,其关系式为:

$$R_s=R_{s,0} \cdot \frac{P_{s,0}}{P_s} \quad (6)$$

式中:  $R_{s,0}$  为参考气压  $P_{s,0}$  条件下的半径;  $R_s$  为当前气压  $P_s$  条件下的半径。参考气压取标准大气压1 013.25 hPa,参考半径取300 m。

宇宙射线中子法垂直测量足迹即探测深度,主要与测量区域土壤含水量有关,在模拟土壤含水量饱和的条件下,测量深度为12 cm,随着土壤含水量减少直至模拟含水量为0的条件下,测量深度为76 cm<sup>[16]</sup>。探测有效深度可表示为:

$$Z=\frac{5.8}{\frac{\rho_{bd}}{\rho_w}\tau+\theta+0.0829} \quad (7)$$

式中:  $Z$  为 COSMOS 有效测量深度(cm);  $\rho_{bd}$  为测量源区内土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_w$  为液态水密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\tau$  为晶格水占矿质颗粒和束缚水质量总和的比例;  $\theta$



为测量源区内土壤的体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )。

1.3.2 垂直足迹线性加权 垂直足迹线性加权方法认为宇宙射线中子法的垂直足迹内的土壤水分值对源区土壤水分含量的估算不是无差别贡献,不同土层深度的土壤水分值对区域土壤含水量反演呈线性权重分配。对于宇宙射线中子法测量土壤水分的反演函数参数校准以及测量结果验证,需对烘干称重法的点测量土壤水分标准值进行垂直足迹线性加权计算,获得区域土壤水分含量,推导求取参数  $N_0$ ,获得土壤水分反演函数。

宇宙射线中子法测量土壤的垂直足迹,即传感器的有效测量深度是随土壤含水量、晶格水含量和土壤有机质等变化而变化。Franz 等<sup>[17,21]</sup>利用三维中子传输模型(Monte Carlo N-Particle extended model, MCNPx)估算了在干土、湿土和液体水 3 种输送条件下,86%快中子的发源强度累积深度灵敏度曲线与有效深度内的水分含量积分建立关系得到宇宙射线中子法测量有效深度的关系:

$$\varphi(Z) = W_s + \int_0^Z \left[ \frac{\rho_{bd}(h)\tau(h)}{\rho_w} + \theta(h) \right] dh \quad (8)$$

式中:  $W_s$  为地表水(cm),一般情况下可视为 0。在体积密度、孔隙水、晶格水均匀分布的情况下,该关系式即简化为一个封闭解公式(6)。而 Franz 等<sup>[21]</sup>提出垂直测量足迹内的深度线性加权函数  $wt(h)$ :

$$\begin{cases} wt(h) = a(1 - \frac{h}{Z}) & 0 \leq h \leq Z \\ wt(h) = 0 & h > Z \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $wt(h)$  为垂直测量足迹内的深度权重系数;  $Z$  为有效测量深度;  $h$  为土层深度;  $a$  为常数。

$$\int_0^Z a(1 - \frac{h}{Z}) dh = 1 \quad (10)$$

可以得到:

$$a = \frac{1}{Z - \frac{Z^2}{2Z}} \quad (11)$$

## 1.4 评价指标

基于不同加权方法宇宙射线中子法区域土壤水分反演结果的评价,采用 1:1 线图直观判断测量值与标准值吻合程度,测量值与标准值的散点距离 1:1 线越近、趋势线斜率与 1:1 线偏差越小表示测量效果越好。在连续性测量结果比较中,采用了研究对象与对照值的偏差均值(Mean value of difference)讨论宇宙射线中子法与频域反射法测量结果一致性,偏差均值越小,一致性越高。运用统计指标对测量值准确性与反演模型精确度进行评价,包括决定系数(Coefficient of Determination,  $R^2$ ),均方根误差(Root

Mean Square Error, RMSE), 纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)。 $R^2$  表示因变量中的变异可由自变量解释的比例,  $R^2$  越接近于 1, 表示不同方法测量结果的拟合程度越好。RMSE 表示测量值和标准值的偏离程度,反映误差的大小,当 RMSE 越趋近于 0, 表示测量值与标准值越接近,误差越小; NSE 是验证水文模型模拟结果的好坏的参数,取值为  $-\infty \sim 1$ ,  $NSE=1$  表示反演结果与标准值完美匹配,因而 NSE 越趋近于 1, 反演模型精度越高,反演结果与标准值一致性越好。

## 2 结果与分析

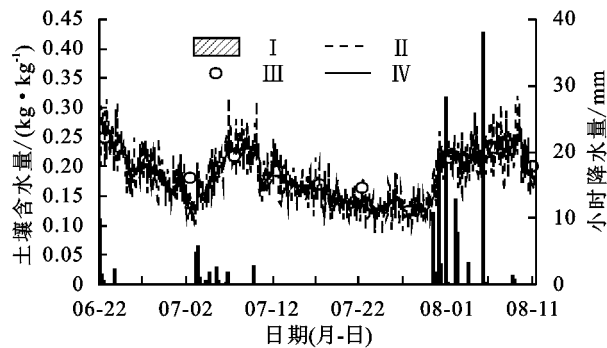
### 2.1 测量足迹等权重加权

经计算,试验测量时间段内,随着测量环境气压变化,测量有效半径维持在 275~279 m 范围,平均有效测量半径为 278 m。垂直足迹随试验期间降水情况导致的土壤水分含量改变而在 17.3~21.0 cm 变化,平均有效测量深度为 19.3 cm。为与宇宙射线中子法有效测量深度匹配,选取烘干称重法 0—10 cm, 10—20 cm 两层取样点的土壤质量含水量,求取算术平均值等权重加权处理,代表区域土壤水分标准值,计算得到测量足迹等权重加权反演函数。

2.1.1 测量足迹等权重加权结果准确性 以烘干称重法多点采样平均值作为区域土壤水分标准值,比较宇宙射线中子法测量足迹等权重加权反演结果(图 1)。可见,在试验期内伴随晴热高温土壤失墒以及降水过程带来的水分补充,宇宙射线中子法测量足迹等权重加权反演结果与烘干称重法多点采样平均值得到的土壤水分质量含水量对土壤水分逐渐消耗失墒的变化情况响应完全一致,选取烘干称重法采样日期对应的宇宙射线中子法测量足迹等权重加权反演结果,对二者进行线性拟合见图 2,拟合散点均位于 1:1 线附近,回归直线斜率与 1:1 线偏差为 0.218。拟合得到线性方程为  $y = 1.218x - 0.046$ , 决定系数  $R^2 = 0.899$ , 均方根误差 RMSE 为 0.015 8 kg/kg, 测量足迹等权重加权反演结果与区域土壤水分标准值偏离程度较小。纳什效率系数 NSE 达 0.864, 表明宇宙射线中子法测量足迹等权重加权反演模型可信度较高,模拟值与实测值匹配度良好。

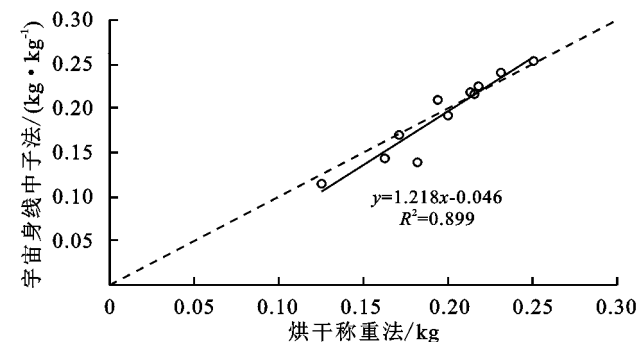
2.1.2 测量足迹等权重加权结果趋势稳定性 因烘干称重法效率较低,无法对测量点进行连续性原位监测,因而以频域反射法测量结果作为趋势稳定性观测对照,研究宇宙射线中子法测量足迹等权重加权的连续测量的趋势稳定性结果(图 3)。可见,在试验期内

伴随晴热高温土壤失墒以及降水过程带来的水分补充,土壤水分质量含水量表现出3次下降过程,比较宇宙射线中子法与频域反射法的测量土壤水分变化趋势,可见二者对土壤水分逐渐消耗失墒的变化情况响应完全一致,测量足迹等权重加权的宇宙射线中子法反演结果与频域反射法测量足迹内偏差均值在0.05 kg/kg以内。在降水过程时段偏差较大,观测时段内因降水引起的偏差均值约0.12 kg/kg,因为瞬时地表水量变化[公式(8)]在无降雨的时段地表无积水,  $W_s$  值为0,影响测量垂直足迹的主要是土壤中的自由水  $W_p$  和晶格水  $W_L$ ;在降水时段,尤其是雨量较大的时段形成地表径流,地表水  $W_s$  值不为0,影响宇宙射线中子法垂直测量足迹,测量结果也随之瞬时变化。而频域反射法只受土壤水分变化影响,所测得土壤水分变化是较为缓慢的渐进过程。在土壤水分稳定变化的时段二者偏差较小,基本维持在-0.04~0.02 kg/kg。选取无地表水干扰的非降水时段7月12—27日的土壤含水量逐日数据,计算得到频域反射法土壤含水量变化趋势系数为0.039,宇宙射线中子法测量足迹等权重加权方法测得的土壤含水量变化趋势系数为0.041,变化趋势基本一致,但是在降水时段,尤其是7月2—5日、8月8—9日的土壤含水量表现出较为明显的差异。



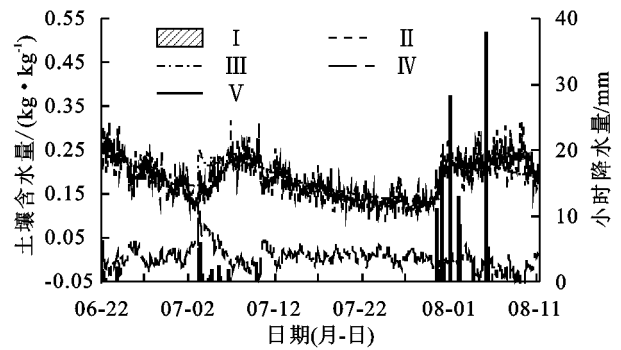
注:测量足迹等权重加权, I 为小时降水量; II 为宇宙射线中子法; III 为烘干称重法; IV 为 12 h 滑动平均(CRNS)。

图1 宇宙射线中子法与烘干称重法土壤水分测量值比较



注:测量足迹等权重加权。

图2 宇宙射线中子法与烘干称重法土壤水分测量值拟合度



注:测量足迹等权重加权, I 为小时降水量; II 为宇宙射线中子法; III 为频域反射法; IV 为偏差均值; V 为 12 h 滑动平均(CRNS)。

图3 宇宙射线中子法与频域反射法逐小时土壤水分测量值比较

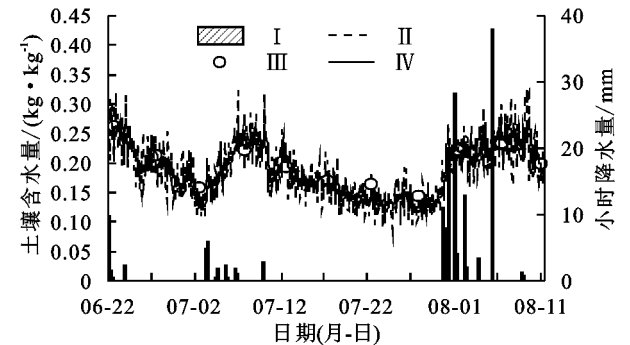
## 2.2 垂直足迹线性加权

经计算,以垂直足迹线性加权方法计算试验期间,垂直足迹变化范围15.2~23.4 cm,平均有效测量深度为20.0 cm。为与宇宙射线中子法有效测量深度匹配,选取烘干称重法0—10 cm,10—20 cm 两层取样点的土壤质量含水量测量值,利用垂直足迹线性加权方法处理代表区域土壤水分标准值。水平测量足迹随着测量环境气压变化,变化范围为275~279 m,平均有效测量半径为278 m。

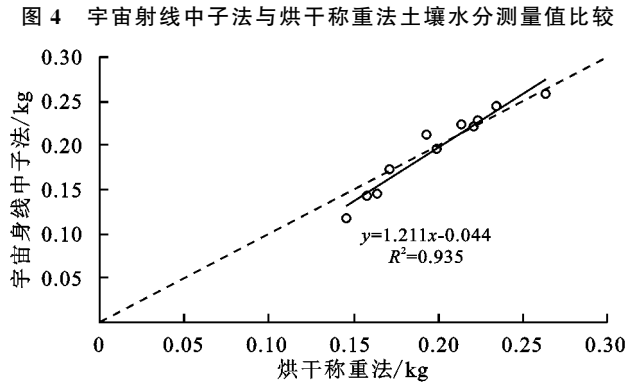
**2.2.1 垂直足迹线性加权结果准确性** 比较宇宙射线中子法垂直足迹线性加权反演结果与烘干称重法垂直足迹线性加权方法处理所代表的区域土壤水分标准值,结果见图4。可见,在试验期内伴随晴热高温土壤失墒以及降水过程带来的水分补充,经垂直足迹线性加权处理的宇宙射线中子法反演结果与烘干称重法获得的区域土壤水分质量含水量变化趋势在每个土壤水分逐渐消耗失墒的阶段完全一致。选取烘干称重法采样日期对应的宇宙射线中子法垂直足迹线性加权反演结果,对二者进行线性拟合见图5,拟合散点均位于1:1线附近,回归直线斜率与1:1线偏差仅0.211。拟合得到线性方程  $y = 1.211x - 0.044$ , 决定系数  $R^2 = 0.935$ , 均方根误差 RMSE 为 0.013 5 kg/kg, 宇宙射线中子法垂直足迹线性加权反演结果与区域土壤水分标准值偏离程度较小。纳什效率系数 NSE 高达 0.905, 表明宇宙射线中子法垂直足迹线性加权反演模型可信度高,模拟值与实测值匹配度良好。

**2.2.2 垂直足迹线性加权方法结果趋势稳定性** 以频域反射法测量足迹内土壤水分测量值作为对照,研究宇宙射线中子法垂直足迹线性加权的连续性测量稳定性(图6)。可见,在试验期内伴随晴热高温土壤失墒以及降水过程带来的水分补充,表现出3次下降过程,比较两种测量方法的区域土壤水分变化趋势,可见二者对土壤水分逐渐消耗失墒的变化情况响应完全一致,且连续性的测量性能稳定,垂直足迹线性

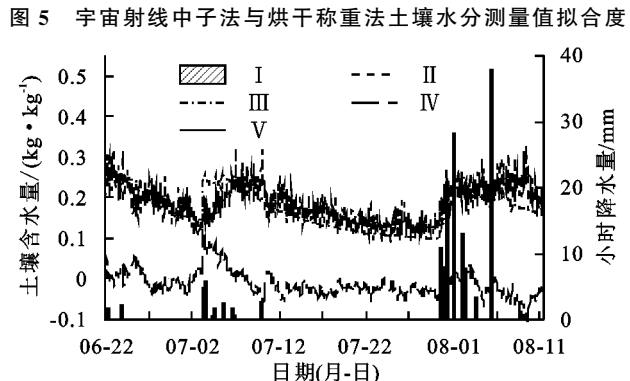
加权的宇宙射线中子法反演结果与频域反射法测量结果的偏差在土壤水分稳定变化的时段基本维持在 0~0.05 kg/kg。选取无地表水干扰的非降水时段 7 月 12—27 日的土壤含水量逐日数据,计算得到频域反射法测得的土壤含水量变化趋势系数为 0.039,宇宙射线中子法测量足迹等权重加权方法测得的土壤含水量变化趋势系数为 0.042,变化趋势基本一致,但是在降水时段,表现出较为明显的差异,相较于等权重加权算法,并没有明显改进。



注:垂直足迹线性加权, I 为小时降水量; II 为宇宙射线中子法; III 为烘干称重法; IV 为 12 h 滑动平均(CRNS)。



注:垂直足迹线性加权。



注:垂直足迹线性加权, I 为小时降水量; II 为宇宙射线中子法; III 为频域反射法; IV 为偏差均值; V 为 12 h 滑动平均(CRNS)。

图 6 宇宙射线中子法与频域反射法逐小时土壤水分测量值比较

### 2.3 两种加权方法反演结果比较

将烘干称重法多点测量值作为对比标准,比较不同加权方法处理的宇宙射线中子法区域土壤水分反

演结果(表 1),相较于测量足迹等权重加权处理结果,垂直足迹线性加权的反演结果与烘干称重法测量结果线所代表的标准值线性拟合的决定系数  $R^2$  增加 0.036,一致性更好;均方根误差 RMSE 减小 0.002 3 kg/kg,测量值与标准值偏离程度更小;纳什效率系数 NSE 增大 0.041,宇宙射线中子法土壤水分反演模型的准确性提高。

将频域反射法土壤水分测量值作为连续观测的趋势稳定性对照,比较不同加权方法处理的宇宙射线中子法区域土壤水分反演结果在连续观测情境下的表现,在无降水过程的土壤水分稳定变化时段,宇宙射线中子法变化趋势与频域反射法一致性均较好,就二者测量结果的偏差来看,测量足迹等权重加权法与垂直足迹线性加权法与频域反射法测量结果偏差分别为  $-0.04 \sim 0.02$  kg/kg,  $0 \sim 0.05$  kg/kg,也即宇宙射线中子法垂直足迹线性加权结果与频域反射法结果相比略偏高,这一结果也更接近宇宙射线中子法的实际反演结果,因为测量区域内,氢源的丰寡决定了其测量结果的高低。在实际测量中,除了土壤水分这一主要氢源以外,植被含水也会影响宇宙射线中子法的测量结果。本研究并未排除植被含水量对测量结果的影响,所以垂直足迹线性加权测量结果更接近真实试验场景下的水分反演情况。

表 1 不同加权方法的宇宙射线中子法土壤水分反演结果与烘干称重法标准值的对比

加权方法	决定系数	均方根误差	纳什效率系数
测量足迹等权重加权	0.899	0.0158	0.864
垂直足迹线性加权	0.935	0.0135	0.905

## 3 讨论

宇宙射线种子法测量区域土壤水分在国外的应用已经较为广泛,由美国科学基金会资助并建设的宇宙射线子法测量区域土壤水分监测网络,截至 2012 年已在美国及其周边国家建成 53 个区域土壤水分监测站点<sup>[23]</sup>。而我国对于该方法主要还处于试验研究阶段,在实际应用中普遍使用等权重加权方法进行测量结果的校准与验证,具有便捷高效等优势。但是在多点采样过程中,由于测量足迹内不同样点与传感器的距离以及土层深度的不同,对于土壤水分率定有着贡献差异<sup>[22]</sup>。本研究区域为地形较为复杂的山地下垫面,测量足迹内地形呈东西向  $18^\circ$  的坡地,土壤异质性较大,测量足迹内水平权重加权处理, Bogena 等<sup>[20]</sup>提出的指数加权法以及 Köhli 等<sup>[18]</sup>提出的径向足迹加权法都可能因地形以及土壤异质性导致更大



的计算偏差,因此本研究对水平足迹的处理沿用了较为普遍的等权重加权处理,一方面可以减少不同水平距离的异质性土壤对区域土壤水分估算因权重赋值引起的异常贡献,另一方面可以对比说明单纯垂直权重加权方法对于测量结果的校准效果。

Franz<sup>[17]</sup>, Köhl<sup>[18]</sup>等研究表明,垂直测量足迹内,上层土壤对快中子的能量衰减更加敏感。因此,针对不同土层赋予合理的权重加权,对宇宙射线中子法反演区域土壤水分的校准具有重要意义。利用 Franz 等<sup>[21]</sup>提出的垂直足迹线性加权模型,对宇宙射线中子法测量复杂山地下垫面的区域土壤水分进行率定,研究结果较等权重加权方法的准确性有所提升,与烘干称重法多点平均所代表的区域土壤水分值进行拟合,模拟值与实测值匹配度提高,结果偏差更小,反演模型可信度更高。该方法是将测量足迹范围内,0—20 cm 土层进行权重赋值使之更加匹配宇宙射线中子法的信号敏感规律,所以在实际应用过程中需要明确该方法具有面尺度土壤水分整体反演的优势,但是在有效测量深度中,浅层土壤水分的贡献更大。而 20 cm 左右深度的土层恰好是耕作层的有效深度<sup>[29]</sup>,因此,宇宙射线中子法测量区域土壤水分可作为农田耕作层的土壤水分监测与农业干旱监控的有效手段。另外,宇宙射线中子法具有面尺度的土壤水分含量准确测定的优势,在基于卫星遥感的土壤干旱反演验证应用方面有着相较于点测量的绝对优势<sup>[30-31]</sup>。

在应用宇宙射线中子法进行区域土壤水分反演计算的过程中,通过在测量足迹合理理解的基础上进行测量结果的校准,可有效提高该方法的准确性。但是仍有一些不确定性因素会干扰测量结果的准确性,如生物量含水也是影响结果准确性的氢源之一<sup>[32]</sup>,本研究未对地表植被以及地下根系生物量作出有效估算,这也是在利用垂直足迹线性加权率定以后,宇宙射线中子法对土壤水分反演结果整体偏高的原因之一,一方面是频域反射法单点测量无法准确反映整个测量区域内异质性土壤的平均含水量,另一方面则是地表植被以及地下根系含水未从结果中排除。但是由于复杂环境下生物量准确估算的难度较大,且生物量含水相比土壤含水所占比重较小,所以本研究将生物量含水包含在内作整体反演估算,后期可做进一步研究,在准确判定复杂区域生物量的基础上,排除地表植被以及地下根系含水对宇宙射线中子法区域土壤水分测量的影响,使结果更加接近真实值。

宇宙射线中子法测量土壤水分的应用场景有一定的限制,如降水过程时段。主要是在降水过程期间,空气湿度饱和以及冠层截留水等影响可能造成数据过度校准,使得结果产生较大偏差<sup>[22]</sup>。如本研究中,7月2—5日以及8月8—9日的降水过程时段,显示较大的测量

结果偏差。因此在宇宙射线中子法的具体应用中,对于降水时段的测量结果应当排除。同时,研究显示在测量区域出现大量的流动性动物群体也可能导致宇宙射线中子法测量信号的巨大变化<sup>[22]</sup>,从而导致结果偏差。因此,对于宇宙射线中子法区域土壤水分的应用与布设选址,应当避免流动性动物群体活动区域,比如草原下垫面的牧场区域等。

## 4 结论

(1) 本研究基于垂直足迹线性加权方法对宇宙射线中子法土壤水分测量算法进行优化,对比测量足迹等权重加权方法的处理结果,在测量结果准确性方面,与烘干称重法测量结果所代表的标准值相比,决定系数  $R^2$  由 0.899 增加到 0.935,一致性更好,均方根误差 RMSE 由 0.015 8 kg/kg 降低到 0.013 5 kg/kg,纳什效率系数 NSE 由 0.864 提高到 0.905,说明模拟值与实测值匹配度提高,结果偏差更小,反演模型可信度更高。

(2) 比较不同加权方法的宇宙射线中子法区域土壤水分反演结果显示,等权重加权处理的区域土壤水分反演结果相对于真实值有所低估,垂直足迹线性加权的区域土壤水分反演结果与烘干称重法获得的标准值以及频域反射法获得的连续测量值一致性更好,说明垂直足迹经线性加权处理的结果更符合不同深度土壤水分在宇宙射线中子法反演计算区域土壤水分的贡献差异,利用垂直足迹线性加权处理的宇宙射线中子法土壤水分反演结果更能客观反映测量足迹内土壤水分的实际情况。

### 参考文献:

- [1] Vereecken H, Huisman J A, Bogaen H, et al. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review[J]. *Water Resources Research*, 2008,44(4):1-21.
- [2] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A Review[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008,7(1):358-389.
- [3] 霍治国,范雨娴,杨建堂,等.中国农业洪涝灾害研究进展[J].*应用气象学报*,2017,28(6):641-653.
- [4] Norbiato D, Borga M, Esposti S D, et al. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins [J]. *Journal of Hydrology*, 2008,362(3/4):274-290.
- [5] 王晓宁,岳大鹏,赵景波,等.黑龙江省 1958—2017 年极端降水时空变化与灾害效应[J].*水土保持研究*,2020,27(5):138-146.
- [6] 宋春雨,韩晓增,于莉,等.CROPWAT 模型在调亏灌溉研究中的应用[J].*土壤与作物*,2003,19(3):214-217.
- [7] 郑金涛,彭涛,董晓华,等.三峡库区气象干旱演变特征

- 及致灾因子危险性评价[J].水土保持研究,2020,27(5):213-220.
- [8] 郑越馨,吴燕锋,潘小宁,等.三江平原气象水文干旱演变特征[J].水土保持研究,2019,26(4):177-184,189.
- [9] 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]. *Sensors Journal Ieee*, 2014,14(10):3465-3472.
- [10] Coopersmith E J, Cosh M H, Daughtry C S. Field-scale moisture estimates using COSMOS sensors: A validation study with temporary networks and Leaf-Area-Indices[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,519:637-643.
- [11] 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.
- [12] 宋尚琨,田静,何洪林.宇宙射线快中子法在华北平原典型农田土壤水分测量中的应用[J].应用生态学报,2018,29(9):2915-2924.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 武强,贺开利,罗孳孳,等.宇宙射线中子法在复杂下垫面土壤水分测量中的应用[J].中国农业气象,2020,41(1):34-42.
- [16] 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).DOI: 10.1029/2008GL035655.
- [17] Franz T E, Zreda M, Ferré 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).DOI: 10.1029/2012WR011871.
- [18] 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.
- [19] Franz T E, Zreda M, Ferré T P A, et al. An assessment of the effect of horizontal soil moisture heterogeneity on the area-average measurement of cosmic-ray neutrons[J]. *Water Resources Research*, 2013,49(10):6450-6458.
- [20] Bogen 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.
- [21] 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.
- [22] Schrön M, Köhli M, Scheffele L, et al. Improving calibration and validation of cosmic-ray neutron sensors in the light of spatial sensitivity[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017,21(10):5009-5030.
- [23] 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.
- [24] Rosolem R, Shuttleworth W J, Zreda M, et al. The effect of atmospheric water vapor on the cosmic-ray soil moisture signal[J]. *Urban History Review Revue Dhistoire Urbaine*, 2013,10(14):1659-1671.
- [25] Desilets D, Zreda M, Ferré T P A, et al. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays[J]. *Water Resources Research*, 2010,46(11).DOI: 10.1029/2009WR008726.
- [26] Desilets D, Zreda M, Prabu T. Extended scaling factors for in situ cosmogenic nuclides: New measurements at low latitude[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006,246(3/4):265-276.
- [27] Desilets D, Zreda M. Spatial and temporal distribution of secondary cosmic-ray nucleon intensities and applications to in situ cosmogenic dating [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003,206(1/2):21-42.
- [28] Desilets D M. Cosmogenic Nuclides as A Surface Exposure Dating Tool: Improved Altitude/Latitude Scaling Factors For Production Rates[D]. Arizona, USA: The University of Arizona, 2005.
- [29] 赵华甫,高鹏,范树印.基于线性规划的耕作层土壤剥离利用空间配置方法研究[J].农业机械学报,2018,49(6):176-183.
- [30] Duygu M B, Akyürek Z. Using cosmic-ray neutron probes in validating satellite soil moisture products and land surface models[J]. *Water*, 2019,11(7).DOI:10.3390/w11071362.
- [31] Montzk C, Bogen 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).DOI:10.3390/rs9020103.
- [32] 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*, 2013,17(9):453-460.