

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.01.004

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

宇宙射线中子法在复杂下垫面土壤水分测量中的应用*

武 强¹, 贺开利², 罗孳孳¹, 杜爱军³, 刘 亮³, 唐云辉^{1**}

(1.重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 2.重庆市长寿区气象局, 重庆 401220; 3.重庆市巴南区气象局, 重庆 401320)

摘要: 宇宙射线中子法是介于点测量与遥感监测的中尺度、非接触土壤水分测量方法。将测量点设于土壤异质性较大的山地地形下垫面,以烘干称重法为标准对比,以频域反射法为连续性观测对照,对宇宙射线中子法在复杂下垫面的测量进行对比研究。结果显示:在复杂下垫面条件下,宇宙射线中子法对区域土壤水分测量值与烘干称重法多点平均计算值所代表的真值间直线方程的拟合优度(R^2)为 0.8717,均方根误差(RMSE)为 $0.0159\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,纳什效率系数(NSE)为 0.854,说明宇宙射线中子法测量结果准确可信。宇宙射线中子法与频域反射法对较长时间序列的土壤水分变化趋势反映完全一致,且对降水过程引起土壤水分变化的响应,宇宙射线中子法灵敏性优于频域反射法。宇宙射线中子法能够应用于复杂下垫面的区域土壤水分测量,且具有不受土壤异质性干扰的优点,能够更好地反映中尺度土壤水分的平均状况。

关键词: 复杂下垫面; 宇宙射线中子法; 烘干称重法; 频域反射法; 土壤含水量

Application of Cosmic-ray Neutron Method in Soil Moisture Measurement on Complex Underlying Surface

WU Qiang¹, HE Kai-li², LUO Zi-zi¹, DU Ai-jun³, LIU Liang³, TANG Yun-hui¹

(1.Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China; 2. Changshou Metereological Bureau, Chongqing 401220; 3. Banan Metereological Bureau, Chongqing 401320)

Abstract: The cosmic-ray neutron method is a mesoscale and non-contact method for measuring soil moisture with the observation scale as between point measurement and remote sensing monitoring. The measuring point was located on the mountainous terrain with significant soil heterogeneity. This study used the cosmic-ray neutron method under complicated terrain as the oven-drying method being the standard comparison, while the frequency domain reflection method being the continuous comparison. This study indicated that the result of the cosmic-ray neutron method is accurate on complex underlying surface. The determination coefficient of linear equation (R^2), root-mean-square error (RMSE), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) between the value of soil moisture content measured by the cosmic-ray neutron method and the truth value represented by the multi-point mean value of the oven-drying method was 0.8717, $0.0159\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 0.854, respectively. The cosmic-ray neutron method and the frequency domain reflection method were completely consistent with the trend of soil moisture change in a longer time series, and the sensitivity of the cosmic-ray neutron method was better than the frequency domain reflection method in response to changes of soil moisture caused by precipitation. In summary, the cosmic-ray neutron method can be applied to soil moisture measurement on complex underlying surfaces with the advantage of being undisturbed by soil heterogeneity and higher ability on reflecting the average soil moisture on the mesoscale.

* 收稿日期: 2019-06-27

**通讯作者唐云辉, E-mail: tyhchongqing@sina.com

基金项目: 重庆市社会事业与民主保障科技创新专项项目“基于服务定制的智慧农业气象移动 app 的研制与应用示范”(cstc2017shms-xdny80035); 重庆市气象局科技计划项目“宇宙射线中子法在区域土壤水分测量中的应用研究”(QNJJ-201703); 重庆市气象部门业务技术攻关项目“重庆茶叶气候品质认证技术研究与应用”(YWJSGG-201905)

第一作者联系方式: 武强, E-mail: theodorus@yeah.net

Key words: Complex underlying surface; Cosmic-ray neutron method; Oven-drying method; Frequency domain reflectometry; Soil moisture

土壤水分是水循环、能量循环和生物地球化学循环中的一个关键因子, 在地表与大气的物质和能量交换中起着重要作用^[1], 更是农作物生长发育和产量预测的重要参数^[2]。因而准确测量土壤水分含量在生态、水文、气象、农业等多个研究领域都有着重要的意义^[3-4]。

土壤水分的测量方法多种多样, 按测量的空间尺度划分, 传统测量方法主要是小尺度的点测量, 有烘干称重法、中子法、介电常数法 (TDR、FDR、TDT) 等。利用点测量方法准确反映某一区域土壤含水量的真实情况, 样点选取的代表性尤为重要, 以代表性样点的测量值来表示整个区域的土壤含水量。而在实际测量条件下, 自然状态的土壤结构普遍具有较大的空间异质性, 利用单点测量的方法则不足以反映较大测量区域尤其是空间异质性较大土壤结构的含水状况。大尺度的土壤水分监测目前主要依赖卫星遥感 (光学遥感、主动微波、被动微波) 手段实现, 但此类方法具有空间分辨率较低, 不能穿透植被与冰雪, 受下垫面粗糙度、天气条件影响较大等局限^[5-6]。

宇宙射线中子法是介于点测量与遥感监测的中尺度、非接触土壤含水量测量方法。测量半径 300m 左右, 测量深度 12~76cm, 测量结果几乎不受土壤化学性质的影响^[7]。其测量基本原理为宇宙射线初级粒子级联反应产生的高能粒子在与大气碰撞时将该原子核激发到不稳定激发态, 激发态原子核发射出快中子以回到稳定态。快中子在近地面层与氢原子碰撞发生慢化直至吸收^[8]。而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^[9]。宇宙射线中子法就是通过测量与氢原子碰撞而慢化的快中子强度来反演计算测量源区内土壤水分的含量。

关于利用宇宙射线中子法测量土壤水分, 目前相关研究大多将测量环境设置在草原、农田等较为理想均一的平坦下垫面^[10-12], 并获得较好的测量效果。而在实际应用中, 下垫面条件复杂多样, 土壤结构具有很大的空间异质性。宇宙射线中子法在复杂下垫面的应用则研究较少, 其测量土壤水分的适用条件与应用环境的广泛性还需进一步探讨。本研究以宇宙射线中子法的测量环境为切

入点, 将试验地点设置为丘陵山地条件的茶树种植园, 下垫面有一定坡度, 以灌木为主, 间有乔木以及草本植物, 测量环境复杂, 实地勘测土壤结构类型多样, 空间异质性较大。以烘干称重法为标准对比, 以频域反射法为连续性观测对照, 旨在研究复杂下垫面的土壤水分测量中, 宇宙射线中子法的适用性, 为宇宙射线中子法在不同测量条件下的应用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 6 月 22 日-8 月 11 日在重庆茶业集团有限公司巴南区白象山茶园进行。试验区域地势自西向东倾斜, 整体海拔落差约 100m, 坡度约 18°。下垫面主要为条带状种植的灌木型茶树, 品种为巴渝特早、福鼎大白等, 株高 50~80cm。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。试验区域以壤土和黏质土为主, 部分区域有砂质土或岩性紫色土, 土壤空间异质性较大。茶树行间有少量混凝土步道。

试验期间雨日数 27d, 降水总量 255.8mm, 其中 7 月 7-24 日连续 18 日多连晴高温天气, 累计雨量仅 1.2mm; 试验期内平均气温 28.6℃, 极端最高气温 40.8℃, 极端最低气温 21.9℃。

1.2 对比试验设置

设置宇宙射线中子仪、土壤水分自动站、多点人工取土烘干称重 3 种测量方法进行土壤水分的对比观测。测量区域中心 (29°28'30"N, 106°44'07"E, 海拔 558.60m) 为 4m×4m 观测场, 观测场内安装自动气象站、土壤水分自动站以及宇宙射线中子仪。

宇宙射线中子仪 (The cosmic-ray sensing probe, 简称 CRS) 美国产, 型号 CRS1000/B。数据采样间隔设定为 1h。对原始数据反演土壤水分结果进行 6h 滑动平均, 以滤除随机误差。宇宙射线中子仪原始数据修正所需的空气相对湿度与气压数据由自动气象站提供。宇宙射线中子仪与自动气象站安装于同一观测场地, 保证了空气相对湿度与气压数据的代表性。

土壤水分自动站 (频域反射型 Frequency Domain Reflectometry, 简称 FDR) 两套, 一套位于宇宙射线

中子仪同一观测场地，即宇宙射线中子仪的测量中心；另一套位于宇宙射线中子仪西南方向约 100m 处 (29°26'35"N, 106°45'02"E, 海拔 580.70m)，两套土壤水分自动站数据采样间隔均为 1h，与宇宙射线中子仪同步。

烘干称重法为测定土壤含水量的标准方法，实测值可作为土壤含水量真值代表，取土采样点以 CRS 为中心，距离垂直方向 4 个方位 50、100、200、250m 处，共 16 个取样点，取样深度 0-10、10-20、20-30 和 30-40cm。以多点、多土层土壤含水量的平均值作为测量源的区域土壤水分含量。采样时间为 6 月 22 日-8 月 11 日，每 5d 取土测量 1 次，累计 11 次。

为减小单位换算产生的计算误差，确保烘干称重法作为标准测量的结果准确性，将土壤含水量与烘干称重法测量单位保持一致，均采用质量含水量 (kg·kg⁻¹)。

1.3 宇宙射线中子法的测量足迹

1.3.1 水平足迹

宇宙射线中子法测量足迹定义为以 CRS 为圆心，能够测量到区域内快中子发源强度 86% 的范围^[7]。其测量足迹在空气中是以 CRS 为中心的球形区域，区域范围大小受测量环境内氢原子含量多少决定。受下垫面阻挡，宇宙射线中子法的水平测量足迹则为以 CRS 为中心的面圆区域。由于大气压力变化改变空气密度，单位体积空气内水分子数量即氢源发生改变，CRS 能够测量到快中子发源强度 86% 的范围随之变化。Zweck 等^[13]研究发现，水平足迹与气压呈反比关系，其关系式为

$$R_s = R_{s,0} \left(\frac{P_{s,0}}{P_s} \right) \tag{1}$$

式中，R_{s,0} 为参考气压 P_{s,0} 条件下的半径，通常半径值取 300m，气压值取标准大气压 1013.25hPa；R_s 为当前气压 P_s 条件下的半径。经计算，试验测量时间段内，随着测量环境气压变化，有效测量半径维持在 275~279m 范围，平均有效测量半径为 278m。

1.3.2 垂直足迹

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，土壤含水量越高，即氢原子数越多，快中子慢化率越高，探测到快中子发源强度 86% 的范围即测量深度越浅^[14]。Zreda

等^[7]研究发现，在模拟土壤含水量饱和的条件下，测量深度为 12cm，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 76cm。探测深度 Z 可表示为

$$Z = \frac{5.8}{\left(\frac{\rho_{bd}}{\rho_w} \right) \cdot \tau + \theta + 0.0829} \tag{2}$$

式中，Z 为宇宙射线中子仪有效测量深度 (cm)；ρ_{bd} 为测量源区内土壤容重 (g·cm⁻³)；ρ_w 为液态水密度 (g·cm⁻³)；τ 为晶格水占矿质颗粒和束缚水质量总和的比例；θ 为测量源区内土壤的体积含水量 (cm³·cm⁻³)。土壤容重 ρ_{bd} 经多点测量取算术平均，为 1.31g·cm⁻³；液态水密度 ρ_w 取 1.0g·cm⁻³；晶格水占矿质颗粒和束缚水质量总和的比例 τ 取 2%；烘干称重法测得的土壤质量含水量乘以容量 ρ_{bd} 换算得到体积含水量 θ 带入公式计算得出，在试验中期降水较少时段 (7 月 7-24 日) 平均有效测量深度 21.0cm，试验后期降水较丰沛时段 (8 月 1-11 日) 平均有效测量深度 17.3cm，整个试验测量时段内，平均有效测量深度为 19.3cm。

1.4 宇宙射线中子法的数据修正

1.4.1 空气水汽修正

利用宇宙射线种子法测量土壤水分，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。另外，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，其所激发出的快中子数也随之改变，影响土壤水分测量结果。所以宇宙射线中子法测得的快中子数需进行相应修正。

Rosolem 等^[15]研究发现，宇宙射线中子法在干空气中垂直测量足迹为 412m，在饱和湿空气中为 265m；空气水汽对近地面快中子强度的影响最大可达 12%，经换算相当于 0.1m³·m⁻³ 的土壤水分。采用将中子强度修正到测量环境水汽条件下，使之不受水汽压影响的思路进行模拟实验，并提出宇宙射线中子法测量土壤水分的快中子数水汽修正系数，即

$$CWV = 1 + 0.0054(\rho - \rho_0) \tag{3}$$

式中，CWV 为水汽修正系数；ρ 为地表绝对水汽密度 (g·cm⁻³)；ρ₀ 为参考条件下地表的绝对水汽密度，一般可取为 0。

1.4.2 气压修正

气压变化改变高能粒子与空气粒子碰撞丢失能

量的几率，根据次级宇宙射线核子强度随大气深度变化规律，Zreda^[7]提出宇宙射线中子法测量土壤水分的快中子数气压修正系数，即

$$f_p = e^{\frac{P_0 - P}{L}} \quad (4)$$

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，实验地点纬度 $29^{\circ}28'30''N$ ， L 取值 $137g \cdot cm^{-3}$ 。

宇宙射线中子法原始数据 N_{RAW} 经过水汽修正与气压修正后，参与土壤水分计算的中子数 N_{CORR} 表示为

$$N_{CORR} = N_{RAW} \cdot CWV \cdot f_p \quad (5)$$

1.5 宇宙射线中子法的反演函数

Desilets 等^[16]提出，利用 MCNPX 模型模拟中子运动及其运动轨道，建立中子量与土壤水分之间的函数关系为

$$\theta(N) = \frac{a_0}{\frac{N}{N_0} - a_1} - a_2 \quad (6)$$

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； a 为修正参数， $a_0=0.0808$ ， $a_1=0.372$ ， $a_2=0.115$ ； N 为经过水汽修正与气压修正的中子数； 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^[17-19]。本研究采用 Zreda 等^[7-8]提出的取具代表性的土壤水分平均值带入公式反推求取 N_0 ，利用烘干称重法测量土壤水分，多点采样取算术平均数代表区域土壤水分，得到 N_0 取值为 1927。

2 结果与分析

2.1 宇宙射线中子法测量结果的准确性分析

2.1.1 与烘干称重法测量结果比较

为与宇宙射线中子法（CRS 法）实际测量深度匹配，选取烘干称重法 0–10cm、10–20cm 两层取样点的土壤质量含水量测量值，并求取算术平均值代表测量源区的区域土壤水分含量进行对比，结果见图 1。由图中可见，在整个试验期间，伴随夏季晴热高温以及降水情况的实际变化，烘干称重法测得的土壤质量含水量表现为三次逐渐下降的过程，按照实际取土采样日期，6 月 22 日–7 月 2 日土壤质量含水量由 $0.25kg \cdot kg^{-1}$ 降至 $0.20kg \cdot kg^{-1}$ ，平均 $0.22kg \cdot kg^{-1}$ ；7 月 7–27 日土壤质量含水量由 $0.22kg \cdot kg^{-1}$ 降至 $0.15kg \cdot kg^{-1}$ ，平均 $0.18kg \cdot kg^{-1}$ ；8 月 6–11 日土壤质量含水量由 $0.23kg \cdot kg^{-1}$ 降至 $0.20kg \cdot kg^{-1}$ ，平均为 $0.22kg \cdot kg^{-1}$ 。

宇宙射线中子法测量结果经 6h 滑动平均，选取与烘干称重法取土采样对应日期的土壤质量含水量，6 月 22 日–7 月 2 日土壤质量含水量由 $0.24kg \cdot kg^{-1}$ 降至 $0.14kg \cdot kg^{-1}$ ，平均 $0.20kg \cdot kg^{-1}$ ；7 月 7–27 日土壤质量含水量由 $0.22kg \cdot kg^{-1}$ 降至 $0.10kg \cdot kg^{-1}$ ，平均 $0.17kg \cdot kg^{-1}$ ；8 月 6–11 日土壤质量含水量由 $0.25kg \cdot kg^{-1}$ 降至 $0.23kg \cdot kg^{-1}$ ，平均为 $0.24kg \cdot kg^{-1}$ 。

可见，在每个土壤水分逐渐消耗的阶段，两种方法观测的土壤含水量变化趋势完全一致，但宇宙射线中子法测量值略偏低。选取与烘干称重法取土

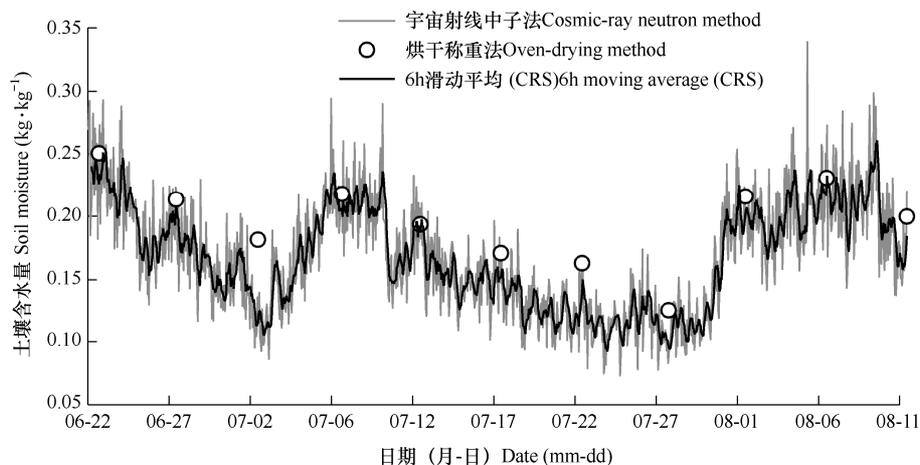


图 1 宇宙射线中子法（逐小时数据）与烘干称重法（5 日数据）土壤水分测量值比较（重庆，2018 年）

Fig. 1 Comparison of soil moisture inverted by cosmic-ray neutron method (hourly data) and oven-drying method(5-days data) (Chongqing, 2018)

采样对应日期的宇宙射线中子法测量值，对二者进行线性拟合，结果如图 2 所示，得到线性方程为 $y=1.1079x-0.0307$ ，拟合优度 $R^2=0.8717$ ($n=11$ ，相关系数 R 通过 0.01 水平的显著性检验)。宇宙射线中子法和作为真值代表的烘干称重法测量结果的散点均位于 1:1 线附近，回归直线斜率与 1:1 线偏差仅 0.1079。二者均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 为 $0.0159\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，宇宙射线中子法测量值与烘干称重法测量值偏离程度较小。纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE) 高达 0.854，表明宇宙射线中子法测量值与烘干称重法测量值匹配度良好 (NSE=1 表示测量值与模拟值完美匹配)，测量结果可信度高。

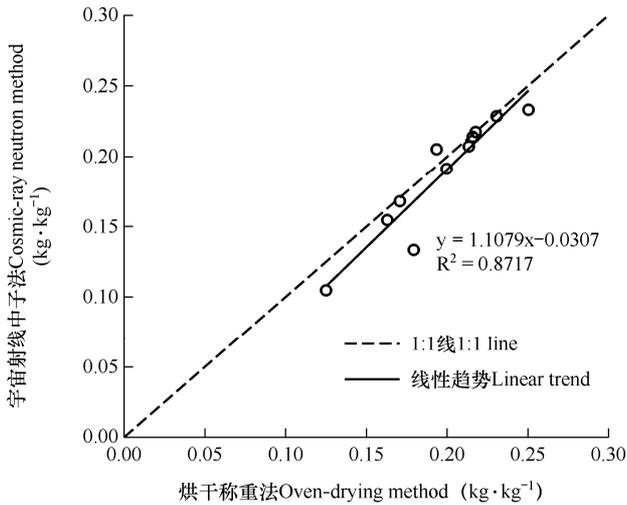


图 2 宇宙射线中子法与烘干称重法土壤水分测量值拟合度
 Fig. 2 Fitting degree of soil moisture inverted by cosmic-ray neutron method and oven-drying method

2.1.2 与频域反射法测量结果比较

烘干称重法由于取土采样频率无法达到与宇宙射线中子法相匹配的高频连续观测，故选取基于频域反射法 (FDR) 的土壤水分自动站测量数据与宇宙射线中子法进行土壤水分连续观测比较。土壤水分自动站数据采样间隔为 1h，可与 CRS 同步观测。土壤水分自动站建站地点选取的源区内具有代表性的土壤水分测量点，测量范围为传感器周围约 20cm，以代表测量区域整体土壤含水情况。试验选用的两套土壤水分自动站均坐落于研究区域内，一套位于 CRS 同一观测场地；另一套与 CRS 距离约 100m。测量深度为 10、20、30、40 和 50cm 共 5 个梯度，为与 CRS 测量深度匹配，选取两个站点 10cm、20cm 两层土壤水分测量值，开展对比试验。并对两套土壤水分自动站的测量值进行算术平均，以提高基于频域反射测量方法的区域土壤水分代表性。两套土壤水分自动站均经过气象部门对比实验鉴定，并应用于业务观测，测量数据准确可靠。

将宇宙射线中子法测量结果与频域反射法测量结果进行比较，结果见图 3。由图可见，在整个试验期间 (6 月 22 日-8 月 11 日)，伴随夏季晴热高温以及降水情况的实际变化，频域反射法测得的土壤质量含水量表现为三次逐渐下降过程，6 月 22 日-7 月 2 日土壤质量含水量由 $0.24\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $0.17\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均 $0.20\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，日变化趋势系数为 -0.008 ；7 月 6-29 日土壤质量含水量由 $0.23\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $0.13\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均 $0.17\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，日变化趋势系数为 -0.005 ；8 月 6-11 日土壤质量含水量由 $0.21\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $0.19\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均 $0.20\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，日变化趋势系数为 -0.004 。

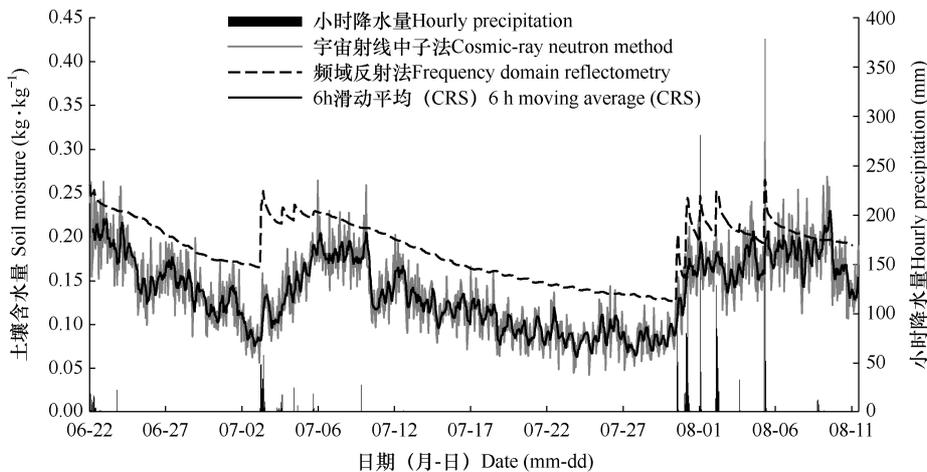


图 3 宇宙射线中子法与频域反射法逐小时土壤水分测量值比较 (重庆, 2018 年)
 Fig. 3 Comparison of soil moisture hourly data inverted by cosmic-ray neutron method and frequency domain reflectometry (Chongqing, 2018)

宇宙射线中子法测量结果经 6h 滑动平均, 6 月 22 日-7 月 2 日土壤质量含水量由 $0.21\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $0.09\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $0.15\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 日变化趋势系数为 -0.010 ; 7 月 6-29 日土壤质量含水量由 $0.18\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $0.08\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $0.12\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 日变化趋势系数为 -0.005 ; 8 月 6-11 日土壤质量含水量由 $0.19\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $0.15\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 $0.17\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 日变化趋势系数为 -0.008 。

可见, 在每个土壤水分逐渐消耗的阶段, 两种方法观测的土壤含水量变化趋势完全一致, 且在较长时间序列的变化趋势一致性较好。较短时间序列的变化趋势有所差异的原因与宇宙射线中子法和频域反射法的测量原理有关, 频域反射法只受土壤水分变化影响, 而土壤水分变化是较为缓慢的渐进过程; 宇宙射线中子法除土壤水分外还受降水等瞬时变化的氢源影响, 所以 CRS 测量值短时波动较为剧烈, 变化趋势与频域反射法存在差异。

2.2 宇宙射线中子法测量结果的灵敏性分析

试验期间 (6 月 22 日-8 月 11 日), 雨日数 27d, 降水总量 255.8mm。降水主要集中在 3 个时段, 分别为 6 月 22-23 日、7 月 2-6 日和 7 月 30 日-8 月 5 日。试验源区土壤水分受降水影响表现出相应的变化趋势。由图 3 可见, 第一次降水过程 6 月 22-23 日降水总量 20.8mm, 22 日降水量 18.6mm, 宇宙射线中子法与频域反射法测得土壤水分值均维持在较高水平; 6 月 23 日降水量 2.2mm, 雨量较小, 宇宙射线中子法有明显的响应, 频域反射法则响应不明显。其后连续 8 日无降水, 宇宙射线中子法与频域反射法测得土壤水分值均呈逐渐下降趋势。第二次降水过程 7 月 2-6 日降水总量 34.6mm, 宇宙射线中子法与频域反射法均有明显的响应; 7 月 9 日有一次 2.7mm 的降水过程, 宇宙射线中子法有明显的响应, 频域反射法则响应不明显。第三次降水过程较为集中, 量级较大, 7 月 30 日-8 月 5 日降水总量 194.4mm, 其中 8 月 5 日最大小时雨量 37.9mm, 宇宙射线中子法与频域反射法均有明显的响应, 但 8 月 8 日雨量为 3.2mm 的降水过程宇宙射线中子法有明显的响应, 频域反射法则响应不明显。可见, 对于较大量级的降水, 宇宙射线中子法与频域反射法均能灵敏地捕捉降水导致的土壤水分变化情况, 但是对于小量级降水, 宇宙射线中子法灵敏性明显优于频域反

射法。可以得出, 宇宙射线中子法对降水过程响应灵敏, 且对不同程度降水都能够捕捉到测量源区内土壤水分相应的变化情况。

2.3 宇宙射线中子法足迹距离对测量结果的权重分析

2.3.1 水平足迹距离权重

将烘干称重法所有采样点按照距 CRS 安装位置 50、100、200 和 250m 的取样距离分组, 取 0-10cm、10-20cm 两层样点求算术平均, 4 组土样测量结果平均值与宇宙射线中子测量结果线性拟合, 结果如图 4。由图可见, 4 组土样测量结果平均值与宇宙射线中子测量结果线性拟合, 斜率分别为 0.9682、0.9792、1.2476 和 1.0002, 拟合优度 R^2 分别为 0.6023、0.6689、0.8508 和 0.5595 ($n=11$, 相关系数 R 均通过 0.01 水平的显著性检验)。宇宙射线中子法与不同水平足迹距离的烘干称重法测量结果的散点均位于 1:1 线附近, 回归直线斜率与 1:1 线偏差 0.3~0.4, 无明显差异。经计算, 均方根误差 RMSE 分别为 0.0265、0.0236、0.0364 和 $0.0267\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。有限的样点数据与宇宙射线中子法测量结果比较显示, 在有效观测范围内 (278m), 其测量结果与距 CRS 安装位置 50、100、200 和 250m 处土壤含水量平均值间差异不大, 水平足迹内, 不同距离土壤含水量对于宇宙射线中子法测量结果没有明显权重差异。宇宙射线中子法测量结果能够代表水平范围内土壤含水量的平均状况。

2.3.2 垂直足迹距离权重

不同测量深度土壤水分含量对于宇宙射线中子法测量结果的权重因不同土层含水量分布情况而异。宇宙射线中子法的测量原理决定慢化后的快中子主要受氢原子碰撞而影响其检测数量。现实中, 土壤水分受天气变化尤其是降水过程影响呈现动态变化, 即氢原子分布随土壤含水量在不同深度土层相应变化。长期干旱条件下, 表层土壤含水量少, 随深度增加含水量相应增加, 宇宙射线中子法测量影响权重则深层土壤较大, 测量深度也较深; 降水较多的情况下, 表层土饱和或接近饱和, 宇宙射线中子法测量影响权重则表层土壤较大, 测量深度也较浅; 而在久旱逢雨的时段, 则会出现短暂的表层土过湿, 中层土偏干, 深层土又含水相对较多的复杂情形。因而测量深度对宇宙射线中子法测量结果的权重本研究不作具体数值分析。

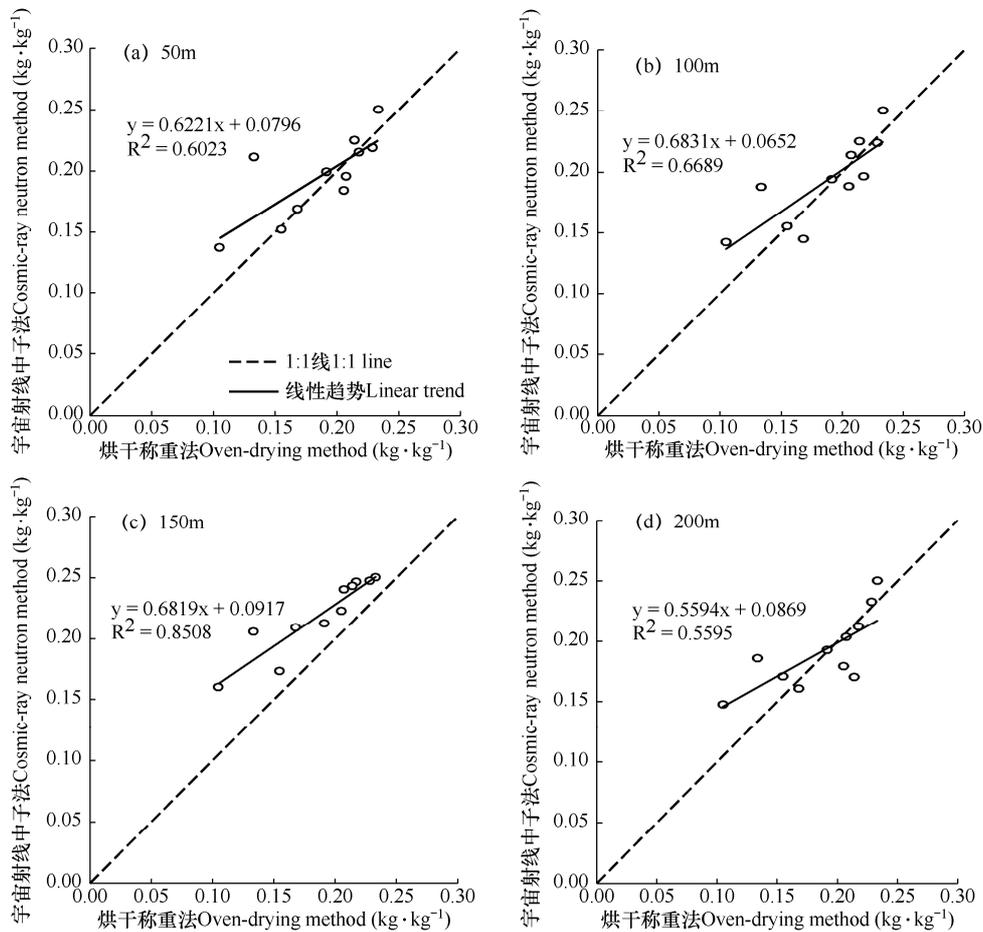


图 4 宇宙射线中子法与不同水平距离取样点烘干称重法测量结果的对比

Fig. 4 Comparison of soil moisture inverted by cosmic-ray neutron method and oven-drying method with different horizontal distance

3 结论与讨论

3.1 讨论

相较于贾晓俊等^[9]在农田下垫面、赵纯等^[10]在草地植被、蔡静雅等^[11]在荒漠草原下垫面的试验研究,本试验期间,宇宙射线中子法测量值相对于烘干称重法以及频域反射法整体均略偏低。该结果可能与重庆地区山地地形复杂下垫面的土壤空间异质性较大有关。烘干称重法与频域反射法测量点位于土壤质地为壤土的源区代表性站点,如果测量点为异于测量区域整体情况的土壤结构,则测量结果不能反映源区整体土壤水分情况,所以在站点选取阶段已经排除此类干扰区域。而实际中,土壤具有较大空间异质性。取土采样过程中发现,试验源区土壤结构主要为壤土,但也存在持水性差的沙土以及含水量极低的岩性土。宇宙射线中子法测量对象为测量面圆范围内,将不同质地土壤的含水量情况均涵盖

在内作整体平均,测量结果偏低。基于测量源区土壤类型的实际复杂性,宇宙射线中子法相较于烘干称重法与频域反射法偏低的测量结果,更能反映测量源区中尺度的土壤水分平均状况。

水平测量范围内,利用有限的标准观测数据对比分析显示,不同水平距离的土壤水分情况对测量结果的权重影响无明显差异。具体情况仍可进一步研究,如加密监测点或区域性人为控制土壤水分等方法进行研究判定。

3.2 结论

在复杂下垫面测量环境下,宇宙射线中子法与土壤含水量测定的标准方法烘干称重法的测量结果匹配度良好,测量结果准确可信;与频域反射法测量结果作连续性观测对照,二者对于较长时间序列的土壤水分变化趋势反映完全一致。且对于降水过程引起土壤水分变化的响应,宇宙射线中子法灵敏

性优于频域反射法。同时,宇宙射线中子法测量能够无权重差异地反映测量源区内土壤含水量的平均状况。

可以得出,宇宙射线中子法能够应用于复杂下垫面的区域土壤水分测量,且具有不受土壤空间异质性干扰的优点,能够更好地反映中尺度土壤水分的平均状况。可为中小尺度土壤含水量监测提供更为精确的数据;为复杂下垫面条件土壤水分估算、山地农业生态系统中的水分管理提供依据;并可为大尺度的高空遥感反演土壤水分提供更加有效的验证手段。

参考文献 References

- [1] 何斌,刘志娟,杨晓光,等.气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征(II):西北主要粮食作物干旱[J].中国农业气象,2017,38(1):31-41.
He B,Liu Z J,Yang X G,et al.Temporal and spatial variations of agro-meteorological disasters of main crops in China in a changing climate II:drought of cereal crops in northwest China[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2017,38(1):31-41.(in Chinese)
- [2] 胡程达,杨光仙,成林.干旱对冬小麦光合产物积累和分配的影响[J].中国农业气象,2014,35(3):243-249.
Hu C D,Yang G X,Cheng L.Effects of drought on distribution and accumulation of photosynthetic matter in winter wheat [J].Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(3):243-249.(in Chinese)
- [3] 何春霞,郑宁,张劲松,等.农林复合系统水热生态特征研究进展[J].中国农业气象,2016,37(6):633-644.
He C X,Zheng N,Zhang J S,et al.Research advances on hydrological and thermal characteristics of agroforestry system[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2016,37(6):633-644.(in Chinese)
- [4] 郑盛华,覃志豪,张文博.松嫩平原干旱变化特征及其对气候变化的响应[J].中国农业气象,2015,36(5):640-649.
Zheng S H,Qin Z H,Zhang W B.Drought variation in Songnen plain and its response to climate change[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2015,36(5):640-649.(in Chinese)
- [5] 姜亚珍,张瑜杰,孙琛,等.河北省土壤干湿状况遥感监测指数比较[J].中国农业气象,2014,35(6):675-681.
Jiang Y Z,Zhang Y J,Sun C,et al.Comparison of remote sensing based soil moisture indices in Hebei province [J].Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(6):675-681.(in Chinese)
- [6] 李菁,王连喜,沈澄,等.几种干旱遥感监测模型在陕北地区的对比和应用[J].中国农业气象,2014,35(1):97-102.
Li J,Wang L X,Sheng C,et al.Application and comparison of several drought monitoring models in northern Shaanxi[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(1):97-102.(in Chinese)
- [7] 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.
- [8] Zreda M,Shuttleworth W J,Zeng X,et al.COSMOS:the cosmic-ray soil moisture observing system[J].Hydrology and Earth System Sciences Discussions,2012,9(4):4505-4551.
- [9] 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 X J,Shi S J,Huang B X,et al.Principles and application of cosmic-ray neutron method for measuring soil moisture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2014,30(21):113-117.(in Chinese)
- [10] 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):1439-1444.
Zhao C,Yuan G F,Liu X,et al.Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the loess plateau[J].Acta Pedologica Sinica,2015,52(6):1439-1444.(in Chinese)
- [11] 蔡静雅,庞志国,谭亚男,等.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 J Y,Pang Z G,Tan Y N,et al.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.(in Chinese)
- [12] 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):136-143.
Jiao Q S,Zhu Z L,Liu S M,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):136-143.(in Chinese)
- [13] Zweck C,Zreda M,Desilets D.Empirical confirmation of the

- sub-kilometer footprint of cosmic-ray soil moisture probes [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2011, 13: 13393.
- [14] 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): 8515.
- [15] 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*, 2012, 3(3-78): 3739.
- [16] 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.
- [17] 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): 1-276.
- [18] 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): 1-42.
- [19] Desilets D M. Cosmogenic nuclides as a surface exposure dating tool: improved altitude/latitude scaling factors for production rates [D]. The University of Arizona, 2005.