

宇宙射线中子法测量区域土壤水分准确性季节变化研究

武强^{1,2} 黄娜³ 罗孳孳^{1,2} 唐余学^{1,2} 朱玉涵^{1,2} 徐倩倩⁴

(1. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147; 2. 重庆市江津现代农业气象试验站, 重庆 402260;
3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 4. 合肥市气象局, 合肥 230041)

摘要: 为证实典型气象条件下宇宙射线中子法测量区域土壤水分准确性的差异和应用普适性,以季节为时间划分尺度,并选取典型气象条件时段,对比研究山地地形下垫面宇宙射线中子法(CRNS)与频域反射法(FDR)土壤水分连续观测效果差异。结果表明:山地地形下垫面,CRNS水平测量足迹的季节变化较为稳定,垂直足迹在耕作层范围内有一定波动。不同季节降水过程的量级差异是引起CRNS测量结果偏差的主要因素,夏秋两季,在高温少雨导致的持续失墒以及较大量级降水过程等土壤水分变化较为剧烈的时段,CRNS与FDR测量结果一致性较好,春季多为小量级降水,作物冠层截留作用导致二者一致性略差,冬季降水量与蒸散发接近平衡,且单次降水量级极小,CRNS与FDR偏差极小。分析典型土壤水分条件下的CRNS测量准确性变化,进一步明确了降水过程对CRNS准确性的干扰,而在持续高温干旱时段则一致性良好,均方根误差(RMSE)、纳什效率系数(NSE)和Kling-Gupta系数(KGE)分别达到0.014 m³/m³、0.925、0.919。研究可为CRNS的应用场景选取与数据质量控制提供科学依据。

关键词: 土壤水分; 测量准确性; 季节变化; 宇宙射线中子法

中图分类号: S163 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0321-10 OSID: 

Seasonal Variations of Regional Soil Moisture Measurement Accuracy
Based on Cosmic-ray Neutron Sensing

WU Qiang^{1,2} HUANG Na³ LUO Zizi^{1,2} TANG Yuxue^{1,2} ZHU Yuhan^{1,2} XU Qianqian⁴

(1. Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China
2. Chongqing Jiangjin Modern Agrometeorology Test Station, Chongqing 402260, China
3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China
4. Hefei Meteorological Bureau, Hefei 230041, China)

Abstract: The cosmic-ray neutron sensing method is a mesoscale and non-contact method for measuring soil moisture, which has been widely studied and applied. However, whether the accuracy and the applicability of the measurement results was consistent under the influence of typical meteorological conditions have not been clearly confirmed. The seasons were divided into time scales and typical meteorological periods were selected to study the difference of continuous observation effect between cosmic-ray neutron sensing (CRNS) and frequency domain reflection(FDR) under mountainous terrain. The result indicated that the seasonal variation of CRNS horizontal footprint was relatively stable under mountainous terrain, while the vertical footprint was fluctuated within the tillage layer. Different precipitation levels in different seasons was the main factor causing CRNS measurement deviation, during the period of severe soil moisture change, such as the continuous loss of soil moisture caused by high temperature and little rain and the process of precipitation of larger magnitude in summer and autumn, the results of CRNS and FDR were consistent. The spring precipitation was also smaller magnitude, canopy interception results in slightly different consistency between CRNS and FDR. In winter,

收稿日期: 2020-12-04 修回日期: 2020-12-30
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42175193)、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(cstc2020jszx-msxmX0111)、重庆市气象局科技计划项目(QNJJ-201703)、重庆市气象部门业务技术攻关项目(YWJS GG-201905)和重庆市气象部门智慧气象技术创新团队项目(ZHCXTD-202016)
作者简介: 武强(1989—),男,工程师,主要从事农田小气候与气象仪器研究,E-mail: theodorus@yeah.net
通信作者: 徐倩倩(1986—),女,工程师,主要从事农业气象与天气学研究,E-mail: nancy013@163.com

precipitation and evapotranspiration were basically balanced, and the single precipitation was smaller magnitude, CRNS and FDR had a minimal deviation. The variation of CRNS measurement accuracy under typical soil moisture conditions was analyzed to further explain the influence of precipitation on the accuracy of CRNS, while the consistency was good in the period of continuous high temperature and drought, the root mean square error (RMSE), Nash – Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) and Kling – Gupta efficiency coefficient (KGE) was $0.014\text{ m}^3/\text{m}^3$, 0.925 and 0.919, respectively. The research results can provide a scientific basis for the selection of application scenarios and data quality control of CRNS.

Key words: soil moisture; measurement accuracy; seasonal variation; cosmic-ray neutron sensing

0 引言

土壤水分通过径流、蒸散发、植被水分供给等方式,在地表与大气的物质和能量交换中起着重要作用^[1-4]。土壤水分也作用于植物光合作用以及土壤微生物群落功能,从而影响着生态系统初级生产力^[5-7]。因此,准确获得土壤水分含量及其时空动态变化,对水土保持、水资源管理及利用等研究具有现实意义^[8-11]。

宇宙射线中子法是一种介于原位点测量与遥感大尺度反演的中等尺度非入侵、被动获取式土壤水分测量方法^[12],可以反映测量区域土壤水分平均状况,且不受土壤结构异质性以及土壤化学性质影响,不破坏土壤结构、可连续观测^[13-14]。其原理为宇宙射线初级粒子经过一系列级联反应以及与大气粒子碰撞后,由激发态至稳定态的过程中会释放出快中子,快中子在近地面层与氢原子碰撞发生慢化直至吸收^[15],而土壤水分是陆表的主要氢源^[16],宇宙射线中子法通过测量与氢原子碰撞慢化的快中子强度来反演计算测量源区内土壤水分含量。

宇宙射线中子法区域土壤水分监测系统由美国研发生产,并在其境内组建形成 70 多个站点的大型观测网络^[17],围绕宇宙射线中子法的反演方法、参数订正、结果修正以及不同观测方法的比较验证等开展了诸多研究^[12,15-17]。2012 年以来,我国学者开始将宇宙射线中子法应用于不同下垫面的土壤水分测量,并就其测量效果开展了评估,在农田、草原、山地等应用场景下,均取得了较好的测量效果^[18-21],但受标准样本采样时间间隔较长或研究区域冬季冻土等影响,完整数据集时间跨度多为非冻土时段的数月时长,一方面忽略了短期天气条件变化的影响,另一方面未能涵盖生态环境条件周期性变化下的全部情况。较长时间序列的研究多关注于下垫面生态系统特征,如地表生物量对测量结果准确性的影响以及土壤水分反演模型适用性等方面,宇宙射线中子法土壤水分测量结果准确性在典型气象条件的影响下是否存在差异以及普适性尚未得到证实^[22-23]。

土壤水分时空变异性受到气候^[24-25]、地形^[26]、植被^[27-28]等诸多因素的影响,由于对不同控制因子和过程的强烈非线性反馈,从而表现出土壤水分的时空变异性^[29-30]。宇宙射线中子法作为新型的土壤水分测量方法,应用其进行土壤水分的长期连续测定,需对其应用场景的下垫面因素、气象条件等的动态变化影响进行全面考量,从而对应用可行性有全面的掌握。本文研究区域的下垫面植被以灌木型茶树为主,伴随茶叶适龄期的采摘、打顶修整等农事活动以及冬季休眠停止生长等因素,植被生物量变化较小,对宇宙射线中子法的土壤水分测量结果影响基本恒定,而伴随季节变化的气象条件是影响土壤水分变化最具变异性的因素。本文拟研究不同季节气象条件特征以及典型天气条件下宇宙射线中子法测量结果准确性,以季节为时间划分尺度,并选取典型气象条件时段,对比分析宇宙射线中子法在不同气象条件下的土壤水分连续测量效果差异与影响因素,以期宇宙射线中子法在同一下垫面不同气象条件的适用性以及典型天气条件下的土壤水分数据质量控制与结果订正提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

试验区域设置于重庆市巴南区白象山,为典型山地地形下垫面,地势自西向东倾斜,整体海拔落差约 100 m,坡度约 18°,土质以壤土和黏质土为主,局部区域为砂质土或岩性紫色土。下垫面植被主要为灌木型茶树,株高 50 ~ 80 cm,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。参数率定于 2018 年 6 月 22 日—8 月 11 日进行,对比研究时段为 2019 年 3 月—2020 年 2 月,按照春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12—2 月)的标准进行时间划分。

1.2 数据来源

研究区域中心(29°28'30"N,106°44'7"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,设置空气温度、空气相对湿度、气压、降水

量、风向、风速、土壤温度等观测要素。观测数据用于研究时段内气象要素分析以及宇宙射线中子法参数率定。

土壤水分测定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、空间尺度的测量方法。参数率定试验采用烘干称重法多点采样获取区域土壤水分标准值,率定得到 CRNS 区域土壤水分反演模型。准确性季节变化特征研究由 FDR 得到多点连续观测数据计算结果作为区域土壤水分连续观测标准值。ODM 与 FDR 均结合 CRNS 足迹,采取同样的垂直足迹线性加权、水平足迹等权重加权处理,得到对照数据集,与 CRNS 进行对比分析。

宇宙射线中子法区域土壤水分观测系统 (Cosmic-ray soil moisture observing system, COSMOS) 设置于研究区域中心观测场内,数据采样间隔设定为 1 h,原始数据中子数经参数修正后,采用 12 h 滑动平均滤除随机误差,反演计算获得区域土壤含水率。

频域反射型土壤水分自动站两套,分别位于 COSMOS 所在的观测场内及 COSMOS 西南方向约 100 m 处 (29°26'35"N, 106°45'2"E, 海拔 580.70 m), 测量深度 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm 共 5 个梯度。数据采样间隔 1 h, 与 COSMOS 同步。数据集时间为 2019 年 3 月—2020 年 2 月,期间每月 1 日、16 日采用便携式土壤水分测定仪 (FDR) 按照图 1 烘干称重法取样位置进行补充测定,校准 FDR 区域土壤水分连续观测标准值。

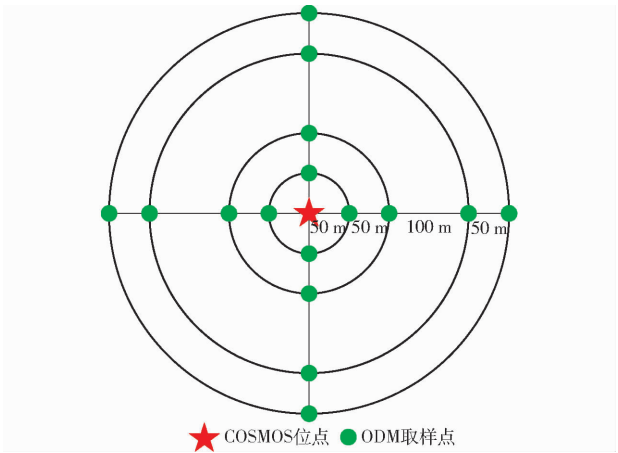


图 1 宇宙射线中子法参数率定样点分布示意图
Fig. 1 Distribution of CRNS parameter calibration sample points

烘干称重法为国际上沿用的土壤含水率测定标准方法,以多点、多土层土壤含水率计算得到区

域土壤含水率作为标准值代表。土样于 105℃ 下干燥至质量恒定,土壤失水质量与原土样质量的比值即为质量含水率,结合土壤容重换算得到体积含水率。

1.2.1 测量足迹

CRNS 水平测量足迹为以 COSMOS 为中心的面圆区域^[16],与气压呈反比关系,其关系式为

$$R_s = R_{s,o} \frac{P_{s,o}}{P_s} \tag{1}$$

式中 $P_{s,o}$ ——参考气压,取标准大气压 101.325 kPa
 P_s ——实际气压, kPa
 $R_{s,o}$ ——水平足迹参考半径,取 300 m
 R_s ——实际气压 P_s 下的水平足迹半径, m

垂直测量足迹即探测深度,主要与测量区域土壤含水率有关,探测有效深度可表示为

$$Z = \frac{5.8}{\frac{\rho_{bd}}{\rho_w} \tau + \theta + 0.0829} \tag{2}$$

式中 Z ——垂直足迹有效测量深度, cm
 ρ_{bd} ——测量源区土壤容重, g/cm³
 ρ_w ——液态水密度, g/cm³
 τ ——晶格水占矿质颗粒和束缚水质量总和的比例, %
 θ ——测量源区土壤体积含水率, cm³/cm³

CRNS 水平足迹采用等权重加权方法进行处理,垂直足迹采用线性加权方法进行处理,从而获得测量足迹内的区域土壤含水率标准值。等权重加权方法即测量足迹内水平距离多点均匀采样,计算平均值。垂直足迹线性加权方法^[31-32]即认为不同土层深度的土壤含水率对区域土壤含水率反演呈线性权重分配,线性加权函数为

$$w_i(h) = \begin{cases} a \left(1 - \frac{h}{Z}\right) & (0 \leq h \leq Z) \\ 0 & (h > Z) \end{cases} \tag{3}$$

$$\int_0^Z a \left(1 - \frac{h}{Z}\right) dh = 1 \tag{4}$$

可以得到

$$a = \frac{2}{Z} \tag{5}$$

式中 $w_i(h)$ ——垂直测量足迹内的深度权重系数
 h ——土层深度, cm

1.2.2 数据处理

CRNS 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含量^[15]。土壤水分以外的含氢物质如空气中的水汽也会起到慢化快中子的作用^[33];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^[16]；太阳长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^[15]，从而影响土壤水分测量结果准确性。基于上述因素，需对 CRNS 快中子数原始数据进行相应的校正。校正函数为

$$f_{CWV}=1+0.005\,4(\rho-\rho_0)$$

(6)

$$f_p=e^{\frac{p_0-p}{L}}$$

(7)

$$f_i=\frac{I_o}{I_m}$$

(8)

式中 f_{CWV} ——水汽修正系数
 f_p ——气压修正系数
 f_i ——太阳活动修正系数
 ρ ——地表绝对水汽密度，g/cm³
 ρ_0 ——参考条件下地表绝对水汽密度，一般取 0
 P_0 ——气压参考值，kPa
 P ——试验期内平均气压，kPa
 L ——高能中子质量衰减长度，按其随纬度变化规律，试验地点取 137 g/cm³
 I_o ——中子基准强度，使用海拔 3 560 m 瑞士少女峰站宇宙线数据作为中子基准强度
 I_m ——探测器测得的中子强度
得到 CRNS 中子数校正函数为

$$N_{CORR}=N_{RAW}f_{CWV}f_pf_i$$

(9)

式中 N_{CORR} ——CRNS 校正后中子数
 N_{RAW} ——CRNS 原始中子数
CRNS 的反演函数^[34]，即中子量与土壤含水率之间的函数关系为

$$\theta(N)=\frac{a_0}{\frac{N_{CORR}}{N_0}-a_1}-a_2$$

(10)

式中 $\theta(N)$ ——测量源区平均土壤体积含水率
 N_0 ——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 不变^[35-37]

其中修正参数 $a_0=0.080\,8$ ， $a_1=0.372$ ， $a_2=0.115$ 。

1.3 评价指标

CRNS 区域土壤水分反演结果的评价采用 1:1 线、偏差均值 (Mean value of difference, d)、相关系数 (Pearson correlation coefficient, R)、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)、Kling-Gupta 系数 (Kling-Gupta efficiency coefficient, KGE)。其中

d 越小，一致性越高；RMSE 表示测量值和标准值的偏离程度，RMSE 越趋近于 0，测量值与标准值越接近，误差越小；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。KGE 为综合考虑了模拟值与实际观测值的相关系数、变异性以及偏差量的一致性评价指标，KGE 越趋近于 1，表示模拟值与实际观测值综合一致性越好。

2 结果与分析

2.1 参数率定

2018 年 6 月 22 日—8 月 11 日开展参数率定试验，以 ODM 区域土壤含水率标准值作为基准进行 CRNS 参数率定。样点分布如图 1 所示，以 COSMOS 为圆心，垂直方向 4 个方位，50、100、200、250 m 处共计 16 个取样点，取样深度 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 和 30~40 cm，结合试验期间 CRNS 垂直足迹实际情况，确定以 0~20 cm 土层测量结果，按照垂直足迹线性加权、水平足迹等权重加权方法进行处理，获得 ODM 区域土壤含水率标准值。试验期间每 5 d 取样 1 次，累计 11 次。计算 CRNS、ODM 获得的区域土壤含水率，结果比较如图 2 所示，计算得到 RMSE 为 0.014 m³/m³，NSE 为 0.995，KGE 为 0.745，回归直线斜率与 1:1 线偏差仅 0.211，可见经参数率定后，CRNS 对区域土壤水分的反演结果与 ODM 得到的标准值一致性良好，CRNS 区域土壤水分计算模型可信度高。

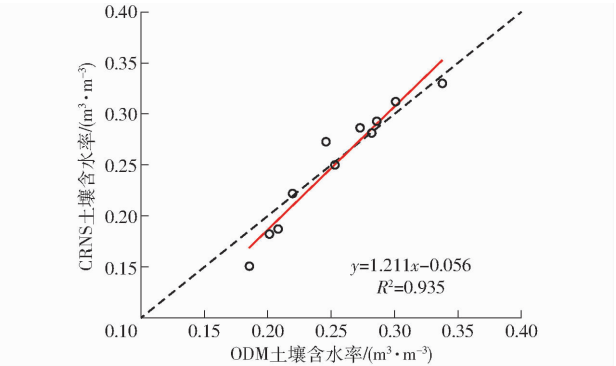


图 2 宇宙射线中子法参数率定结果

Fig. 2 Comparison of CRNS parameter calibration results

2.2 测量足迹季节变化

2019 年 3 月—2020 年 2 月 CRNS 测量足迹如图 3 所示，试验期内水平足迹较为稳定，年平均值为 320.5 m，最小值 314.5 m，最大值 326.0 m，变化率为 ±2%；其中春季平均值 321.2 m，夏季平均值 323.5 m，秋季平均值 319.5 m，冬季平均值 318.4 m。垂直足迹变化较大，年平均值 16.9 cm，最小值 12.3 cm，最大值 25.3 cm，变化率为 -37%~50%，尤其夏季、秋季受降水及持续高温天气等影响，土壤

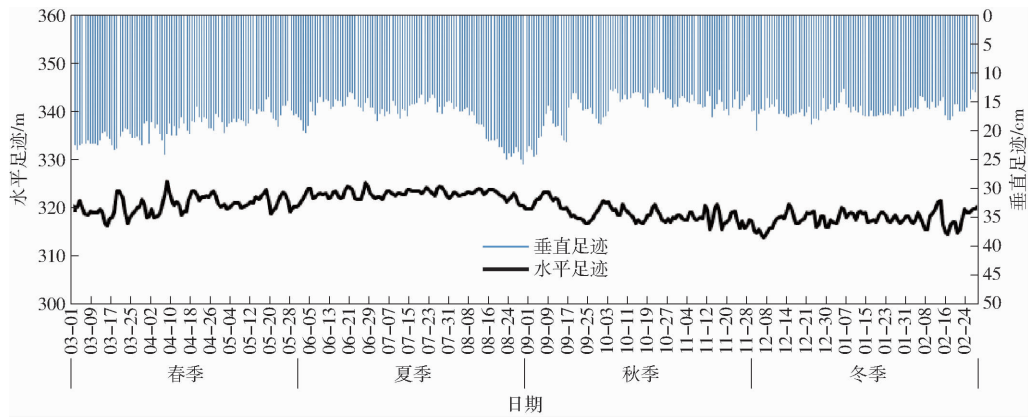


图 3 宇宙射线中子法测量足迹变化
Fig. 3 Diagram of CRNS footprint

持续失墒或降水补充等导致垂直测量足迹出现相应变化,具体表现为与土壤含水率呈负相关性,即土壤含水率越低,垂直足迹越大,土壤含水率越高,垂直足迹越小;其中春季平均值 19.0 cm,夏季平均值 17.1 cm,秋季平均值 15.7 cm,冬季平均值 16.0 cm。可见在本试验区域,CRNS 水平足迹基本稳定,对时间、气象条件以及土壤含水率等的变化响应不明显;垂直足迹受到土壤含水率变化的影响而波动,但是基本维持在 15.7 ~ 19.0 cm 之间,受降水影响出现过极小值 12.3 cm,但在雨后随着地表水的径流与渗透,可恢复到平均水平。耕作层有效深度大约 20 cm,是土壤水分和养分含量发生波动的主要土层。因此,在山地地形下垫面,CRNS 水平足迹基本稳定,随季节变化不明显,垂直足迹在不同季节随降水差异而有一定波动,但均集中在耕作层范围内变化,即 CRNS 能够较为稳定地反映测量源区内耕作层土壤水分的变化情况。

2.3 测量结果准确性季节变化

统计研究区域气象数据得到,春季平均气温 17.0℃,极端最高气温 34.3℃,极端最低气温 5.7℃。雨日数 53 d,降水总量 431.5 mm,雨量分布情况为 3 月 20%,4 月 30%,5 月 50%。春季 CRNS 与 FDR 的测量结果对比如图 4a 所示,总体变化趋势基本一致,两种方法测量偏差均值为 0.019 m³/m³。对两种方法得到的区域土壤含水率日值进行拟合(图 4a),得到线性方程 $y = 1.638x - 0.177, R^2 = 0.442$ 。具体地,3 月气温较为稳定,降水较少,偏差均值为 0.004 m³/m³;4 月气温回升,土壤水分蒸腾量增加,且在 4 月中下旬有两次较强降水过程,土壤水分含量变化较大,偏差均值为 0.017 m³/m³;5 月雨日数较多,雨量较大,土壤增墒明显,偏差均值为 0.041 m³/m³。

夏季平均气温 25.6℃,极端最高气温 37.7℃,极端最低气温 17.6℃。雨日数 43 d,降水总量

431.3 mm,雨量分布情况为 6 月 42%,7 月 53%,8 月 5%。夏季 CRNS 与 FDR 的测量结果对比如图 4b 所示,两种方法的变化趋势一致性较好,两种方法测量偏差均值为 0.020 m³/m³。对两种方法得到的区域土壤含水率日值进行拟合(图 4b),得到线性方程 $y = 1.299x - 0.083, R^2 = 0.777$ 。在降水集中的 6、7 月,受降水影响气温波动大,土壤短期失墒与水分补充变化较大,偏差均值分别为 0.039、0.023 m³/m³,雨量较少的 8 月,气温较高,平均值 26.3℃,土壤持续失墒,8 月中下旬,日最高气温均在 35℃以上,8 月下旬,土壤含水率状况逐渐由轻旱发展为中度干旱,整个 8 月土壤含水率测量偏差均值仅 0.001 m³/m³。

秋季平均气温 17.3℃,极端最高气温 35.4℃,极端最低气温 5.9℃。雨日数 54 d,降水总量 367.9mm,雨量分布情况为 9 月 25%,10 月 57%,11 月 18%。秋季 CRNS 与 FDR 的测量结果对比如图 4c 所示,两种方法测量偏差均值为 0.034 m³/m³,但是在几次主要降水过程时,表现出较为明显的测量差异。对两种方法得到的区域土壤含水率日值进行拟合(图 4c),得到线性方程 $y = 1.407x - 0.103, R^2 = 0.648$ 。9 月雨日数较少,降雨过程较为集中,偏差均值为 0.024 m³/m³;10 月雨日数多,但多为较小量级的降水,偏差均值为 0.062 m³/m³;11 月雨日数较少,雨量较小,偏差均值为 0.034 m³/m³。

冬季平均气温 8.2℃,极端最高气温 16.8℃,极端最低气温 0.3℃。雨日数 43 d,降水总量 86.4 mm,雨量分布情况为 12 月 30%,1 月 34%,2 月 36%。冬季 CRNS 与 FDR 的测量结果对比如图 4d 所示,可见两种方法的变化趋势一致性较好,两种方法测量偏差均值为 0.001 m³/m³。对两种方法得到的区域土壤含水率日值进行拟合(图 4d),得到线性方程 $y = 1.929x - 0.349, R^2 = 0.182$ 。冬季降水过程分布较为平均,且均为小雨量级降水,12、1、

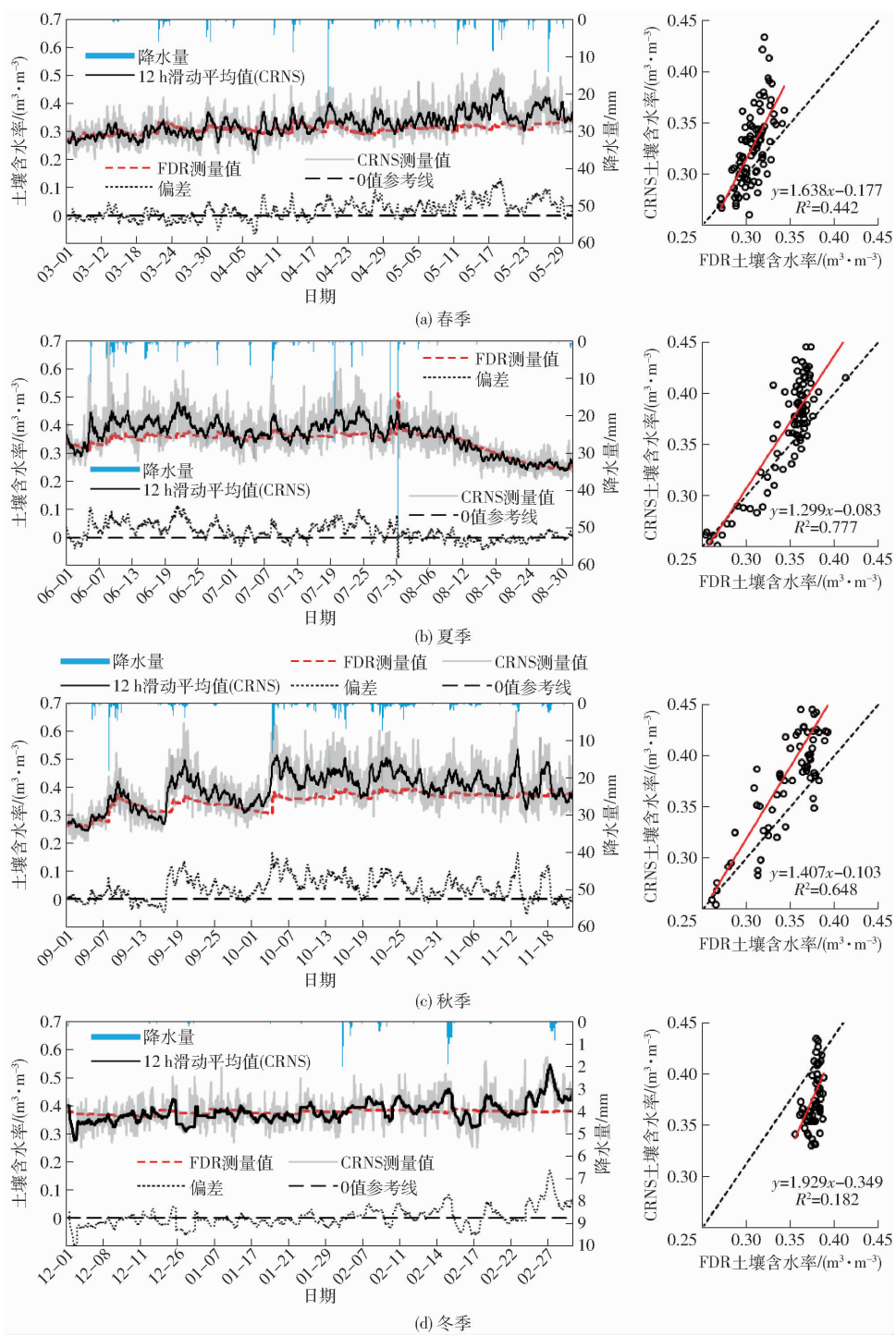


图4 宇宙射线中子法区域土壤含水率季节变化
Fig.4 Seasonal variations of regional soil moisture by CRNS

2月偏差均值分别为0.018、0.011、0.021 m³/m³。各季节CRNS与FDR统计指标如表1所示,二者平均值μ差异较小,但是CRNS标准差σ明显偏大,主要与二者测量原理差异有关,CRNS通过测定与氢原子碰撞慢化的中子数反演计算得到土壤含水率,快中子计数在一定范围内变化,较为离散;而FDR传感器设置于土层中,通过电磁波在不同土壤含水率即不同介电常数介质中的变化来反演土壤含水率,除蒸腾与降水渗透以外,不受其他地上因素干

扰,而土层中的水分变化相对较为稳定连续,因而测得土壤含水率也较为稳定。相关系数R夏季、秋季均达到0.8以上,冬季最低,为0.427。RMSE春季、夏季均为0.035 m³/m³,秋季0.055 m³/m³,冬季0.031 m³/m³。NSE与KGE均在夏季最高,分别达到0.604、0.508,其余季节均较低。主要与各季节的降水、土壤水分蒸散以及下垫面特征有关。结合研究区域下垫面蒸散量计算得到春季有效降水量为40.8 mm,夏季200.0 mm,秋季136.4 mm,冬季

13.7 mm。由于研究区域下垫面主要为茶树,种植较为密集,树冠对于降水截留作用明显,较小量级的降水受到茶树冠层的截留削减,到达土层的入渗水量过小不足以引起频域反射传感器的明显响应,而 CRNS 反演结果涵盖了测量区域内所有含氢物质的总和,包括地表植被,尤其是降水期间冠层的截留水量。茶树下垫面主要为密植灌木,生长较为缓慢,加之采茶以及打顶等农管措施对幼嫩芽叶的削减,地表生物量总体较为稳定,因而主要是降水引起的冠层截留水量会导致测量结果的偏

差。尤其在冬季,天气条件以阴天为主,总日照时数 90.3 h,日照时数在 1 h 以上日数仅 22 d,期间有效降水量极小,即水分蒸腾与补充基本接近平衡,埋入式的 FDR 传感器得到的土壤含水率在整个冬季也十分稳定,维持在 $0.36 \sim 0.39 \text{ m}^3/\text{m}^3$,而历次降水过程日降水量均不超过 10 mm,主要为冠层截留水与土表吸收,该部分氢源的增加导致 CRNS 明显的响应,尤其 2 月有几次较为集中的降水过程,在 FDR 土壤含水率基本不变的情况下,CRNS 表现出较为明显的结果差异。

表 1 宇宙射线中子法与频域反射法区域土壤水分测量结果统计指标
Tab.1 Statistical index values of regional soil moisture measurement results by CRNS and FDR

时期	$\mu_{\text{FDR}}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	$\mu_{\text{CRNS}}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	σ_{FDR}	σ_{CRNS}	$d/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	R	$\text{RMSE}/(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	NSE	KGE
春季	0.308	0.327	0.015	0.037	0.019	0.665	0.035	0.108	-0.502
夏季	0.344	0.364	0.037	0.055	0.020	0.882	0.035	0.604	0.508
秋季	0.353	0.393	0.033	0.058	0.041	0.805	0.055	0.086	0.217
冬季	0.377	0.378	0.007	0.032	0.001	0.427	0.031	0.135	-2.564
多雨偏湿期	0.366	0.389	0.011	0.029	0.023	0.522	0.034	-0.399	-0.687
高温干早期	0.312	0.311	0.047	0.050	0.001	0.962	0.014	0.925	0.919

2.4 典型土壤水分条件下宇宙射线中子法测量准确性变化

进一步分析典型土壤水分条件下 CRNS 测量准确性变化,选取 2019 年 3 月—2020 年 2 月自然条件下多雨偏湿以及高温干旱时段作比较。7 月作为多雨偏湿的代表时段,平均气温 25.7℃,极端最高气温 37.5℃,极端最低气温 19.1℃。雨日数 18 d,降水总量 228.4 mm,其中 7 月 8 日、7 月 19 日、7 月 29 日达到大雨量级,7 月 31 日达大暴雨量级,其余降水时段为小雨量级,在整个多雨偏湿期,土壤表现为逐渐增墒效应,土壤含水率约增加 $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。对比多雨偏湿期 CRNS 与 FDR 的测量结果,两种方法测量偏差均值为 $0.002 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。对几次强降水过程,CRNS 与 FDR 区域土壤含水率测量值均表现出明显的瞬时响应。对两种方法得到的区域土壤含水率日数据进行拟合(图 5a),得到线性方程 $y = 1.366x - 0.110$, $R^2 = 0.272$ 。8 月作为高温干旱的代表时段,平均气温 28.2℃,极端最高气温 37.7℃,极端最低气温 18.1℃。雨日数 9 d,降水总量 20.1 mm,其中除 8 月 31 日达到中雨量级,日降水量为 12.2 mm,其余降水时段以零星小雨为主,日降水量不超过 2 mm,在整个干旱期,土壤持续失墒,土壤含水率降低约 $0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。对比高温干早期 CRNS 与 FDR 的测量结果,两种方法测量偏差均值为 $0.001 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。对两种方法得到的区域土壤含水率日数据进行拟合(图 5b),得到线性方程 $y =$

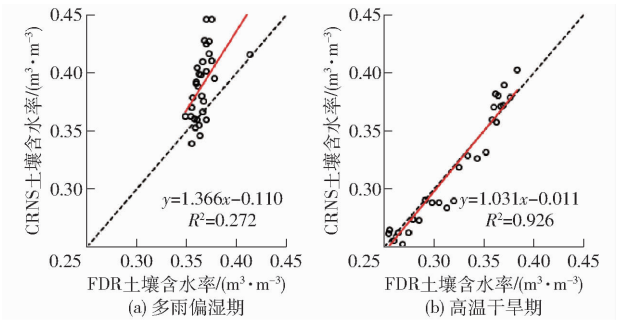


图 5 典型土壤水分条件下宇宙射线中子法测量结果
Fig.5 Result by CRNS in typical soil moisture conditions

$1.031x - 0.011$, $R^2 = 0.926$ 。

典型土壤含水率条件下 CRNS 与 FDR 统计指标值如表 1 所示,二者平均值 μ 在高温干早期基本一致,多雨偏湿期较大。在多雨偏湿期、高温干早期, R 分别为 0.522、0.962; RMSE 分别为 0.034、 $0.014 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。NSE 与 KGE 在多雨湿润期均为负值,在高温干早期则高达 0.925、0.919。可见在降水干扰较小,即下垫面氢源较为稳定的时段,CRNS 与 FDR 的测量结果可表现出良好的一致性,测量结果偏差极小,CRNS 区域土壤含水率反演模型准确度高,反演值与标准值匹配度良好。在降水较多的土壤湿润期,即便受降水过程干扰,CRNS 反演区域土壤含水率结果准确性受到一定影响,但是在土壤含水率的变化趋势以及量级较大降水过程时土壤含水率的响应等基本一致,测量结果偏差均值仅为 $0.023 \text{ m}^3/\text{m}^3$,测量结果准确性较好。

3 讨论

不同土层往往表现不同的水文过程和生态功能^[38],浅层土壤受降水入渗和蒸散发影响大,同时也是植被生长常用水分来源,深层土壤水分相对较为稳定,形成“土壤水库”。山地地形下垫面条件下,CRNS的水平测量足迹基本稳定,不随时间、气象条件以及土壤含水率等的变化而发生明显变化,因而在代表性样点的选取时,应注意如岩石、建筑、水源等水平足迹范围内干扰项的规避;在测量结果的订正,如水平足迹范围内植被含水率的排除计算等方面,则可根据水平足迹较为稳定的特点而给出理想试验方案。垂直足迹则主要受到土壤含水率变化的影响而波动,但测量足迹基本在耕作层范围内变化,因此,CRNS可应用于耕作层土壤水分反演,或地表生物量、植物水分截留等相关研究。

比较 CRNS 在不同季节的土壤水分测量结果,总体上 CRNS 与 FDR 的测量结果一致性较好,在土壤含水率较为稳定(冬季)表现为与 FDR 极小的偏差,在少雨持续失墒(夏季)以及多雨水分得到补充(秋季)的土壤含水率剧烈变化的时段,CRNS 与 FDR 表现出一致的变化趋势。但是由于研究区域下垫面主要为密植的灌木型茶树,有明显的降水截留效果,被截留降水无法参与地面径流或地下水分运动过程^[39],但是截留水作为氢源可以被 CRNS 捕捉;通常雨量较大时,植被截留率较低,但是雨量较小时,植被截留则显得尤为重要,研究显示,在湿润森林区,植被截留损失占年降水量 10% ~ 30%^[40-42],而在降水偏少的地区,植被截留损失可

以达到 40% ~ 50%^[43]。因而在试验过程中,存在 FDR 几乎无变化,但 CRNS 已出现明显波动的情况。对于较小量级的短期降水(春季)与量级较大的持续降水(夏季),CRNS 较 FDR 能够更加灵敏地响应,就土壤水分测定而言,结果包含了冠层截留水等干扰,但对于水资源评估、作物水分平衡等研究具有重要的指示意义。

进一步分析典型土壤水分条件下的 CRNS 测量结果准确性变化,在高温干旱期,CRNS 表现出最佳测量结果,与 FDR 表现出极高的一致性。在多雨偏湿的增墒时段,则受降水过程影响,相较于高温干旱时段表现为较大偏差。因此在应用 CRNS 对测量区域的土壤水分整体评价中,合理排除降水时段的土壤水分测量偏差尤为重要。

4 结束语

CRNS 水平测量足迹的季节变化较为稳定,垂直足迹在耕作层范围内有一定波动。不同季节降水过程的量级差异是引起 CRNS 测量结果偏差的主要因素,CRNS 对不同量级降水均可作出明显响应。夏秋两季,在高温少雨导致的持续失墒以及较大量级降水过程等土壤水分变化较为剧烈的时段,CRNS 与 FDR 测量结果一致性较好。春季多较小量级降水,作物冠层截留作用导致小量级降水不足以引起探入式 FDR 的响应,但 CRNS 则可以灵敏捕捉到水分的变化,二者一致性略差。典型土壤水分条件下的 CRNS 测量准确性变化,进一步说明降水过程对 CRNS 准确性的干扰,而在持续高温干旱时段则一致性良好, RMSE、NSE 与 KGE 分别为 0.014 m³/m³、0.925、0.919。

参 考 文 献

[1] SENEVIRATEN S I, CORTI T, DAVIN E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review[J]. *Earth Science Reviews*, 2010, 99(3-4):125-161.

[2] LEGATES D R, MAHMOOD R, LEVIA D F, et al. Soil moisture: a central and unifying theme in physical geography[J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(1):65-86.

[3] WANG L, D'ODORICO P, EVANS J P, et al. Dryland ecohydrology and climate change: critical issues and technical advances[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8):2585-2603.

[4] CHEEMA M J M, BASTIAANSSEN W G M, RUTTEN M M. Validation of surface soil moisture from AMSR-E using auxiliary spatial data in the transboundary Indus Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(1-2):137-149.

[5] 段萌,杨伟才,毛晓敏. 覆膜和水分亏缺对春小麦光合特性影响及模型比较[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1):219-227. DUAN Meng, YANG Weicai, MAO Xiaomin. Effects of water deficit on photosynthetic characteristics of spring wheat under plastic mulching and comparison of light response curve models[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1):219-227. (in Chinese)

[6] 刘继龙,任高奇,付强,等. 秸秆还田下土壤水分时间稳定性与玉米穗质量的相关性[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5):320-326. LIU Jilong, REN Gaoqi, FU Qiang, et al. Relationship between temporal stability of soil water and corn ear weight under straw returning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5):320-326. (in Chinese)

[7] 焦炳忠,孙兆军,EL-SAWY S M,等. 基于土壤水分下限的灵武长枣微孔渗灌灌溉制度研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(5):305-314. JIAO Bingzhong, SUN Zhaojun, EL-SAWY S M, et al. Irrigation schedule of microporous infiltration irrigation for Lingwu Jujube

- based on lower limit of soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 305 – 314. (in Chinese)
- [8] WANG X P, PAN Y X, ZHANG Y F, et al. Temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture for a transect in artificial revegetation desert area, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 507: 100 – 109.
- [9] STARKS P J, HEATHMAN G C, JACKSON T J, et al. Temporal stability of soil moisture profile[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1–4): 400 – 411.
- [10] 朱绪超, 邵明安, 朱军涛, 等. 高寒草甸生态系统表层土壤水分时间稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 212 – 218.
ZHU Xuchao, SHAO Ming'an, ZHU Juntao, et al. Temporal stability of surface soil moisture in alpine meadow ecosystem on northern Tibetan plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 212 – 218. (in Chinese)
- [11] 王钧, 李广, 聂志刚, 等. 保护性耕作下土壤水分变化特征模拟研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 263 – 274.
WANG Jun, LI Guang, NIE Zhigang, et al. Simulation on variation characteristics of soil water content under conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 263 – 274. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] COOPERSMITH E J, COSH M H, DAUGHTRY C S T. 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [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): 402.
- [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] 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.
SONG Shangkun, TIAN Jing, HE Honglin. Application of cosmic-ray fast neutron method in soil moisture measurement of typical farmland in North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9): 2915 – 2924. (in Chinese)
- [19] 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 Xiaojun, SHI Shengjin, HUANG Binxiang, 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)
- [20] 武强, 徐倩倩, 朱玉涵, 等. 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[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 113 – 120.
WU Qiang, XU Qianqian, ZHU Yuhang, et al. Improving calibration and validation of soil moisture measurements using cosmic-ray neutron method based on linear depth weighting[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 113 – 120. (in Chinese)
- [21] 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.
WU Qiang, HE Kaili, LUO Zizi, et al. Application of cosmic-ray neutron method in soil moisture measurement on complex underlying surface[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2020, 41(1): 34 – 42. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] 谈幸燕, 张兰慧, 贺缠生, 等. 宇宙射线中子法在西北农牧交错带土壤水分测量中的适用性研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(11): 1596 – 1610.
TAN Xinyan, ZHANG Lanhui, HE Chansheng, et al. Applicability of cosmic-ray neutron sensor for measuring soil moisture at the agricultural-pastoral ecotone in Northwest China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2020, 50(11): 1596 – 1610. (in Chinese)
- [24] LONGOBARDI A. Observing soil moisture temporal variability under fluctuating climatic conditions[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2008, 5(2): 935 – 969.
- [25] JIN T T, FU B J, LIU G H, et al. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(8): 2519 – 2530.
- [26] WILSON D J, WESTERN A W, GRAYSON R B. A terrain and data-based method for generating the spatial distribution of soil moisture[J]. Advances in Water Resources, 2005, 28(1): 43 – 54.
- [27] VIVONI E R, GEBREMICHAEL M, WATTS C J, et al. Comparison of ground-based and remotely-sensed surface soil moisture estimates over complex terrain during SMEX04[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 314 – 325.
- [28] 张璐, 朱仲元, 张圣微, 等. 半干旱草原型流域土壤水分变异及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 124 – 132.
ZHANG Lu, ZHU Zhongyuan, ZHANG Shengwei, et al. Analysis of soil moisture variation and its influencing factors in semi-arid steppe watershed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 124 – 132. (in Chinese)
- [29] HU W, SHAO M G, HAN F P, et al. Watershed scale temporal stability of soil water content[J]. Geoderma, 2010, 158(3/

4); 181 – 198.

[30] HEATHMAN G C, COSH M H, MERWADE V, et al. Multi-scale temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture within the Upper Cedar Creek Watershed, Indiana[J]. CATENA, 2012, 95: 91 – 103.

[31] 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): 515.

[32] 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, 2015, 11(4): 841 – 852.

[33] 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.

[34] 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): 505.

[35] 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.

[36] 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, 2015, 206(1 – 2): 21 – 42.

[37] DESILETS D M. Cosmogenic nuclides as a surface exposure dating tool; improved altitude/latitude scaling factors for production rates[D]. Tucson: The University of Arizona, 2005.

[38] YANG L, WEI W, CHEN L, et al. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(9): 3199 – 3217.

[39] 郭建平. 植物对降水截留的研究进展[J]. 应用气象学报, 2020, 31(6): 641 – 652.

GUO Jianping. Research progress of precipitation interception by plants[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(6): 641 – 652. (in Chinese)

[40] ROWE L K. Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand[J]. Journal of Hydrology, 1983, 66(1 – 4): 143 – 158.

[41] 马雪华, 杨茂瑞, 胡星弼. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J]. 林业科学, 1993, 29(3): 199 – 206.

MA Xuehua, YANG Maorui, HU Xingbi. A study on hydrological function of subtropical plantations of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1993, 29(3): 199 – 206. (in Chinese)

[42] ASDAK C, JARVIS P G, GARDINGEN P V, et al. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia[J]. Journal of Hydrology, 1998, 206(3 – 4): 237 – 244.

[43] BALDOCCHI D. Evaporation in the uplands[J]. Agricultural Water Management, 1991, 20(1): 84 – 85.

(上接第 290 页)

[39] 李亮. 基于遥感技术与 HYDRUS – 1D 模型河套灌区盐荒地水盐运移规律研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.

LI Liang. Study on the transport of soil water and salt based on remote sensing technology and HYDRUS – 1D model in Hetao Irrigation District[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)

[40] 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 102 – 109.

HUANG Quanzhong, XU Xu, LÜ Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 102 – 109. (in Chinese)

[41] 李亮, 李美艳, 张军军, 等. 基于 HYDRUS – 2D 模型模拟耕荒地水盐运移规律[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 66 – 71.

LI Liang, LI Meiyang, ZHANG Junjun, et al. The moving rule of salt and water in cultivated land and saline wasteland based on HYDRUS – 2D model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 66 – 71. (in Chinese)

[42] 邹晓霞, 王维华, 王建林, 等. 垦殖与自然条件下黄河三角洲土壤盐分的时空演化特征研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 309 – 316.

ZOU Xiaoxia, WANG Weihua, WANG Jianlin, et al. Time-spatial evolution characteristics of soil salinity in the Yellow River Delta under different land cultivation and natural conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 309 – 316. (in Chinese)

[43] 张冈, 周志宇, 张彩萍. 利用方式对盐渍化土壤有机质和盐分的影响[J]. 草业学报, 2007, 16(4): 15 – 20.

ZHANG Gang, ZHOU Zhiyu, ZHANG Caiping. The effect of land use on the levels of salt and organic matter in saline soil[J]. Pratacultural Science, 2007, 16(4): 15 – 20. (in Chinese)

[44] 于淑会, 刘金铜, 李志祥, 等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1664 – 1672.

YU Shuhui, LIU Jintong, LI Zhixiang, et al. Mechanism of saline-alkali lands improvement of subsurface pipe drainage systems and agro-ecosystem response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(12): 1664 – 1672. (in Chinese)

[45] 岳卫峰, 杨金忠, 童菊秀, 等. 干旱地区灌区水盐运移及平衡分析[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 623 – 626, 632.

YUE Weifeng, YANG Jinzhong, TONG Juxiu, et al. Transfer and balance of water and salt in irrigation district of arid region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 623 – 626, 632. (in Chinese)