

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 Qishun, Zhu Zhongli, Liu Shaomin, 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.]

宇宙射线快中子法在农田土壤水分 测量中的研究与应用^{*}

焦其顺¹, 朱忠礼^{1*}, 刘绍民¹, 晋 锐², 杜 帆¹

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感科学重点实验室, 北京 100875;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 区域地表土壤水分的获取是长期以来的研究难点。近年来, 利用宇宙射线快中子法测量区域地表土壤含水量的研究得到了长足发展。作为一种新型的中尺度土壤水分无损测量方法, 宇宙射线快中子法能够获得半径 300 m 左右源区内的土壤水分, 较大的测量源区使其填补了传统点观测和遥感大面积观测尺度之间的空白。利用宇宙射线土壤水分观测系统(COSMOS)、无线传感器网络对张掖绿洲农田下垫面的土壤水分进行观测。研究结果表明 COSMOS 观测数据很好地反映了农田尺度下土壤水分的变化趋势。COSMOS 土壤水分主要受源区内灌溉和降水的影响, 源区内不同地区灌溉顺序的不同使观测的 COSMOS 土壤水分呈现明显的双峰变化趋势。利用 COSMOS 源区内无线传感器网络数据对观测结果进行了验证, 灌溉期受地面积水的影响, COSMOS 观测结果偏高, 剔除灌溉期数据后两者一致性较好, 均方根误差(RMSE)由 $0.037 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 降低到 $0.028 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。宇宙射线土壤水分观测系统能够有效测量高异质性状况下的农田区域土壤水分, 为遥感反演的土壤水分提供真正意义上的面状地面验证数据。

关 键 词: 土壤含水量; 无线传感器网络; 农田尺度; 黑河流域

中图分类号: P343.8; S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2013)10-136-08

1 引 言

土壤水作为水资源的重要组成部分, 在多种尺度的水分运动过程中扮演着重要角色。长期以来, 如何准确测量土壤含水量一直是相关学科研究的重点。到目前为止, 国内外科研人员提出的土壤水分测定方法多达几十种^[1]。传统的测量方法包括: 称重法(烘干法)、中子仪法、电容法、张力计法、时域

反射计(Time-Domain Reflectometry, TDR)^[2]、频域反射计(Frequency-Domain Reflectometry, FDR)等, 这些测量方法都属于有损、点测量方式, 其测量尺度多为小尺度, 空间代表性差, 难以得到土壤含水量在区域分布上的信息^[3]。遥感监测土壤水分的可行性研究始于 20 世纪 60 年代, 应用研究在 70 年代中期开展起来。利用遥感技术可以实现快速、大面积区域土壤水分监测^[4], 但遥感获取的土壤含水量是

* 收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-09-02。

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“黑河流域生态—水文过程综合遥感观测试验: 水文气象要素与多尺度蒸散发观测”(编号: 91125002); 遥感科学国家重点实验室自由探索项目“基于宇宙射线系统和无线传感器网络的土壤水分异质性分析及像元尺度土壤水分获取试验”(编号: ZY12-8)资助。

作者简介: 焦其顺(1988-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事中尺度土壤水分观测研究。E-mail: dream2qsj@gmail.com

* 通讯作者: 朱忠礼(1972-), 男, 河南商丘人, 讲师, 主要从事遥感水文方面的研究。E-mail: zhuzl@bnu.edu.cn

像元尺度的平均值^[5], 其空间分辨率一般在数十米(航空遥感)到数十公里(航天遥感)之间, 且只是飞机或卫星过境时刻的瞬时值, 无法获取连续数据, 限制了遥感大尺度测量在实际土壤水分监测中的应用。

传统点测量和遥感大尺度监测之间存在一个缺口, 即无法获取农田或小流域尺度上的区域土壤水分信息。同样, 在验证遥感反演的土壤水分过程中无法获取所需的像元尺度土壤水分数据^[6]。近几年来, 利用宇宙射线快中子测量地表土壤含水量的研究逐渐引起人们的重视, 地表以上宇宙射线快中子强度与土壤水分含量呈反比关系, 通过架设在地表上方的中子探头测量宇宙射线快中子的强度, 从而反演地表土壤水分含量^[7, 8]。宇宙射线快中子法是一种被动、非侵入式的中尺度土壤水分测量方法, 其测量半径在 300 m 左右, 有效测量深度为 12 ~ 76 cm^[7]。本文利用宇宙射线仪器对黑河中游张掖地区农田土壤水分进行长时间序列连续监测, 并与土壤水分无线传感器数据(Wireless Sensor Network, WSN)^[9]进行对比分析, 以研究宇宙射线观测结果的可靠性。

2 数据与方法

2.1 数据集

本文使用的数据集均来自 2012 年“黑河流域生态—水文综合遥感观测试验”^[10, 11], 主要包括宇宙射线土壤水分数据集、无线传感器网络数据集(SoilNET 部分)^[9]和降雨数据集(大满站^[12])。

宇宙射线土壤水分数据集主要包括快中子原始数据、气压原始数据等, 采样频率为 1 小时, 利用快中子数据可以反演研究区的土壤水分信息; SoilNET 主要包含位于大满超级站的 MODIS 像元内的 50 个 SoilNET 土壤水分/温度节点观测数据, 每个节点可以连接 4 个 SISOMOP(Simple SOil MOisture Probe)土壤水分/温度探头^[13, 14], 分别探测 4、10、20 和 40 cm 土壤水分和温度, 其中 19 个分布在宇宙射线源区内。SoilNET 节点的采样频率为 10 分钟, 文中主要使用 SoilNET 节点土壤水分数据对宇宙射线观测结果进行验证, 使用时需将原始 10 分钟数据聚合为 1 小时数据, 以便与宇宙射线数据同步; 降雨数据集(大满超级站)主要包含原始降雨数据, 采样频率为 10 分钟, 使用过程中需将原始数据聚合为 1 小时数据, 以便分析宇宙射线土壤水分变化与降雨之间的关系。

2.2 宇宙射线土壤水分观测系统

太空中存在大量的高能粒子流, 受地球磁场的影响, 这些高能粒子流被捕获进入大气层, 并与大气中存在的原子核发生碰撞产生次级宇宙射线(cascades of secondary cosmic rays), 次级宇宙射线穿过大气层进入土壤, 再与土壤中的原子核发生碰撞产生能量在 1 ~ 2 MeV 的快中子(fast neutrons)。这些快中子与土壤中的各种原子发生碰撞会失去部分能量而慢化, 成为热中子(能量为 0.025 eV)或超热中子(能量为 1 ~ 10 eV), 因此土壤中的快中子一部分经过慢化而被土壤吸收, 而另一部分则会散射到空气中。

快中子被慢化的过程主要受 3 个方面影响: ①物质基本的散射截面或散射能力; ②每次碰撞中能量的对数衰减, 这直接说明每次碰撞的有效性; ③单位质量中的原子数, 与物质浓度成正比, 与质量数成反比。研究表明氢原子对快中子具有最高的减缓和慢化能力^[15], 如能量在 2 MeV 的快中子只需要与氢原子发生 18 次碰撞就能慢化到 0.025 eV, 远小于其他原子的碰撞次数(碳原子要 113 次, 氧原子要 149 次)^[7]。

通常来讲, 扩散到空气中的快中子量与地面含水量呈反比例关系, 地表含水量越大, 含有的氢原子越多, 对快中子的慢化和吸收量越大, 从而在地面探测到的快中子数就越少。相对于土壤中的水分含量, 植被含水量、空气中水分含量^[16]以及土壤中晶格水^[17]的含量相对较小, 虽然近期有学者研究其对快中子的影响^[18], 但研究还有待深入, 本文探讨中忽略其影响。快中子强度与土壤含水量的反比例关系是宇宙射线快中子法测量的物理基础, 宇宙射线快中子法通过监测土壤上方快中子的浓度从而实现陆地表面土壤含水量的反演^[19]。

宇宙射线土壤水分观测系统(COSmic-ray Soil Moisture Observing System, COSMOS)是由美国 Hydroinnova 公司生产的土壤水分探测装置, 一套宇宙射线土壤水分探测仪器包括: 采集器(内置气压传感器、湿度传感器和无线传输模块)、40 Ah 电池、快中子探头、热中子探头和机箱, 其中快中子和热中子探头均为白色柱状物, 直径 10 cm、高 130 cm。在进行土壤水分观测时只需要安装快中子探头即可, 本试验初期即只安装一个快中子探头进行土壤水分的观测。

2.2.1 探测源区和深度

宇宙射线快中子法测量的源区通常定义为 86% 仪器探测到的快中子来源地区, 根据中子传输

程序 MCNPX^[20] (Monte Carlo N-Particle eXtended) 模拟的结果,在海拔为 0 m 的地区,其源区半径约为 300 m^[7],模拟的结果与早期中子传输理论相一致^[21-22]。源区大小主要跟空气的物理化学属性相关,而与地表的土壤水分含量无关。这主要是因为中子的平均散射自由程与每立方米空气中的分子数呈反比,空气密度越大,单位体积空气中的分子数越多,中子传输的距离越小,源区越小。反之,源区越大。在高海拔地区,气压较低,测量源区会比低海拔地区大,海拔 3 000 m 地区的源区会比海平面地区的源区大 25% 左右^[18]。通常情况下源区半径与气压关系可用下式(根据文献[23]中的公式(21)改写)表示:

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

式中: $R_{s, \rho}$ 为参考气压 $P_{s, \rho}$ 下的源区半径(通常使用 1 个标准气压下的半径值,为 300 m^[23]); R_s 为当前气压 P_s 下的半径值。本试验研究区海拔为 1 557 m,经计算试验探测源区在 362 m 左右。

宇宙射线快中子法的探测深度 z 定义为探测器记录的快中子 86% 来源于 0 ~ z 深度土壤中, z 与源区内的土壤含水量呈反比。当土壤中的含水量高时,其含有的氢原子数较多,使得土壤中的快中子快速被慢化和吸收而无法继续向下传播。根据 MCNPX 的模拟结果,探测深度从 12 cm(土壤湿润,模拟含水量为 0.40 m³/m³) 增长到 76 cm(土壤干燥,模拟含水量为 0)^[7]。近年来,有研究^[24]指出反演深度 z (单位: cm) 可用下式计算得到:

$$z = \frac{5.8}{\rho_{bd} \times \tau + \theta + 0.0829} \quad (2)$$

式中: ρ_{bd} 为土壤的容重; τ 为晶格含水量(lattice water, 定义为土壤中矿物质和土壤颗粒束缚水的质量比^[17],通常比较小,为 0 ~ 0.05,本文计算中忽略); θ 为土壤体积含水量。

2.2.2 反演函数

由于快中子传播过程中受气压影响较大,在反演土壤水分时要去除气压随时间变化带来的影响,根据仪器使用说明书中提供的公式对测量得到的快中子数进行气压订正,见公式(3)。

$$N = N_{raw} \times \text{Exp}(\beta \times (P - P_0)) \quad (3)$$

式中: N_{raw} 为原始快中子数, β 为常数 0.0077, P 为测量气压值, P_0 为当地气压理论值。经过气压订正的快中子数与土壤质量含水量存在非线性关系,本文使用仪器手册中的土壤含水量计算公式(公式

(4)):

$$\theta_m = \frac{1}{a_1} \left(\frac{a_2}{(N/N_0) - a_3} - a_4 \right) \quad (4)$$

式中: θ_m 为质量含水量; N 为订正后快中子数; N_0 为干燥条件下的快中子数,需要根据源区实测土壤含水量进行率定; $a_1 = 0.079$, $a_2 = 0.64$, $a_3 = 0.37$ 和 $a_4 = 0.91$ 为常数项。

3 试验区介绍

研究区位于甘肃黑河流域中游张掖地区大满农业灌区^[11],该地区处于温带干旱半干旱气候区,多年平均降水量为 121.5 mm。大满灌区属河西走廊的低平原部分,为荒漠中的一片绿洲,主要由人工灌溉的农田组成。2012 年 5 ~ 9 月试验开展期间,宇宙射线源区内农作物主要为制种玉米,源区共包含五星村 3 个社区的农田,即四社农田(占源区面积 51.6%)、五社农田(占源区面积 42.6%)和六社农田(占源区面积 0.04%)。源区东南方向分布有六社村落。图 1 为研究区示意图。

试验中宇宙射线土壤水分探测仪器架设在大满超级站西侧(100.37°E, 38.86°N),仪器装有 1 台快中子探测器,探测器底部距离地面约 50 cm,采集器内置气压传感器,采样频率为 1 小时。

4 宇宙射线仪器率定

为计算地表土壤含水量,需要对宇宙射线仪器进行率定以确定公式(4)中的 N_0 。2012 年 7 月 11 日下午和 9 月 16 日下午分别在 COSMOS 仪器东、南、西、北的 50, 100, 200 和 300 m 距离上进行土壤采样,其中每个点分别在膜下和膜间各取 1 个样本。用称重法获取源区 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 深度的土壤含水量,并在源区内采集 4 个土壤容重样本,测量的土壤容重数据主要用于将宇宙射线测量得到的质量含水量转化为体积含水量。

对采集的土样进行烘干称重,得到每个点位 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 的平均质量含水量,通过对比发现,膜下土壤水分和膜间土壤水分相差不大,标准差(SD)比较小。采样点均匀分布于仪器源区内,因此对所有测点进行算术平均得到 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 深度的区域土壤质量含水量^[23-25]。对采集的土壤容重样本进行烘干分析得到平均容重为 1.49,测量数据见表 1。

根据测量得到的源区内土壤样本数据和公式(2),宇宙射线的有效代表深度介于 10 ~ 20 cm 之

表 1 土样采样数据

Table 1 Data of soil samples

| 类别 | 深度 /cm | 2012-07-11 | | 2012-09-16 | | Bd /(g/cm ³) |
|----|-----------|------------|------|------------|------|-----------------------------|
| | | SWC/% | SD | SWC/% | SD | |
| 膜间 | 0~10 | 17.49 | 1.96 | 15.56 | 1.00 | 1.49 |
| 膜间 | 10~20 | 16.95 | 1.32 | 16.21 | 0.91 | |
| 膜下 | 0~10 | 18.24 | 1.30 | 16.52 | 1.02 | |
| 膜下 | 10~20 | 17.65 | 0.99 | 16.71 | 1.30 | |

注: SWC 为土壤质量含水量; SD 为标准差; Bd 为土壤容重

间, 设定土样 10~20 cm 土壤水分线性分布, 根据公式(5) 计算 10+x cm 各深度土壤水分。

$$SWC_{10+x} = \frac{(SWC_{0-10} + \frac{x}{10} \times 100\% \times SWC_{10-20})}{1 + \frac{x}{10}} \quad (5)$$

式中: SWC_{0-10} 、 SWC_{10-20} 分别为 0~10 和 10~20 cm 平均土壤水分, x 取值范围为 1~10。

计算结果表明 7 月 11 日根据称重法测量的 17 cm 深度土壤含水量反求的宇宙射线对应深度与设定值最接近 9 月 16 日为 18 cm 深度值, 因此率定时分别选用 7 月 11 日 17 cm 深度土壤含水量和 9 月 16 日 18 cm 深度土壤含水量作为 θ_m 。仪器探测到的快中子数进行气压订正后, 分别选取对应土壤样本采集时间(15:00~20:00) 的快中子订正数据进行平均, 得到对应土壤水分的快中子数 N , 最后根据公式(3) 反求 N_0 。经计算 7 月 11 日 N_0 为 3 195, 9 月 16 日 N_0 为 3 364。在计算土壤水分时选用两者的平均值 3 280 作为最终的 N_0 。

5 结果分析

根据率定后 N_0 和公式(2) 可以计算出 6 月 1 日至 9 月 30 日玉米生长季内的区域土壤水分变化, 如图 2 所示, 其中 COSMOS 绿色线表示未平滑处理前的土壤水分数据, 由于快中子传播过程中存在一定的随机性, 因此宇宙射线仪器记录的快中子数据存在一定的波动性, 其测量得到的土壤水分数据在 1 小时数据中会出现较小范围的波动。分析中常使用 12 小时平滑后的数据, 图 2 中蓝色线 COSMOS_12 为经过 12 小时平滑后的数据。

5.1 宇宙射线测量土壤含水量的变化特征

通过图 2 可以看出宇宙射线反演的土壤水分主要受灌溉和降水的影响, 并且在灌溉期源区内土壤含水量呈现双峰变化。其主要原因是源区内 3 个社的灌溉顺序不同, 五星四社农田(图 1) 先进行灌溉,

灌溉完毕后出现第一个峰值; 然后是五星六社农田灌溉, 由于五星六社田块占源区面积比重很小, 灌溉期约为 1 天, 源区内田块总含水量减少, 对快中子的慢化作用降低, 使探头测量到的快中子数有所上升, 从而使反演的土壤水分降低; 在六社灌溉完毕, 五社开始灌溉时, 由于 COSMOS 源区 42.6% 的面积位于五社农田内, 因此在其灌溉时源区内土壤含水量会明显升高, 此时出现第二个峰值。

灌溉期源区内土壤水分呈现双峰变化在前 3 轮灌溉(第一轮 6 月 1~5 日, 第二轮 7 月 1~5 日, 第三轮 7 月 27 日至 8 月 1 日) 过程中反应比较明显, 而在第四轮灌溉(8 月 20~28 日) 时, 由于水流小, 灌溉持续时间较长, 且四社灌溉完后, 五社和六社同时灌溉, 并没有出现中间的低谷区, 双峰变化不明显。

从时间序列上, 源区内土壤水分可分为 3 个阶段: 6 月 26 日以前土壤水分约为 $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 在 6 月 26 日至 9 月 1 日期间, 平均土壤水分为 $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 在 9 月 1 日之后, 土壤含水量持续减少, 约为 $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。第一阶段属于封垄前, 玉米植株较矮, 在强日照条件下, 地表蒸发比较大, 土壤水分含量减少很快, 整体含水量比较低; 第二阶段为封垄后, 玉米植株高大茂盛, 减弱了地表土壤水分的蒸发, 虽然植物蒸腾量增大, 但考虑到该阶段内灌溉间隔短、降水较多, 土壤总体储水量大于其他 2 个阶段; 第三阶段为玉米生长后期, 玉米接近成熟并逐渐枯萎, 地表蒸发较大, 期间无灌溉补充水分, 土壤含水量减少较快, 整体含水量较低。

5.2 基于无线传感器网络数据的验证

在宇宙射线源区范围内共有 19 个 SoilNET 站点, 选取数据质量较好的 6 月 22 日至 8 月 18 日数据对宇宙射线观测值进行验证。由于在该时间段内宇宙射线反演的土壤水分平均值为 $0.31 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 其探测深度在 14 cm 左右, 因此选取 4 和 10 cm 数据进行算术平均作为验证值。图 3 表示 6 月 22 日至 8 月 18 日宇宙射线土壤水分和 SoilNET 平均土壤水分变化对比图, 可以看出两者的变化趋势比较一致, 相关系数为 0.79, 均方根误差(RMSE) 为 $0.037 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

Zreda 等^[18] 指出源区内的氢原子是影响快中子强度最重要的元素。当地面存在积水时, 源区内氢原子含量明显增高, 土壤中产生的快中子在穿透积水层过程中很容易被慢化, 因此宇宙射线探测到的快中子在灌溉期会明显减少, 从而使反演的土壤水分增高(如图 3 散点图中圆圈内数据)。而 SoilNET

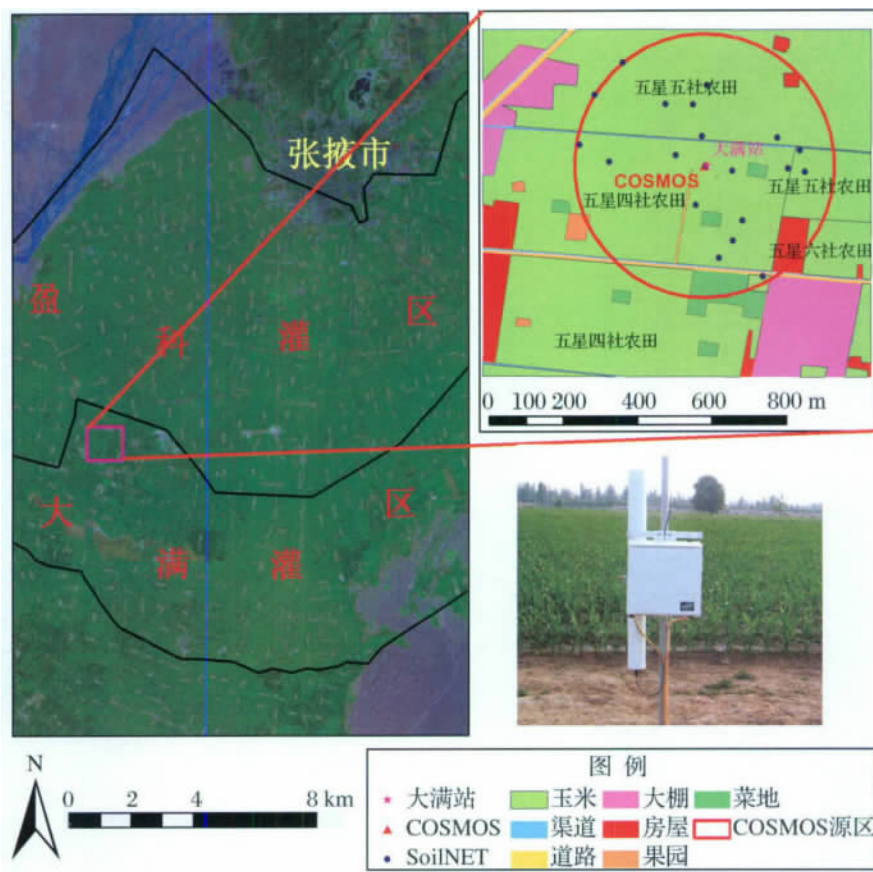


图 1 仪器架设源区示意图

Fig. 1 Land use of the footprint of instrument

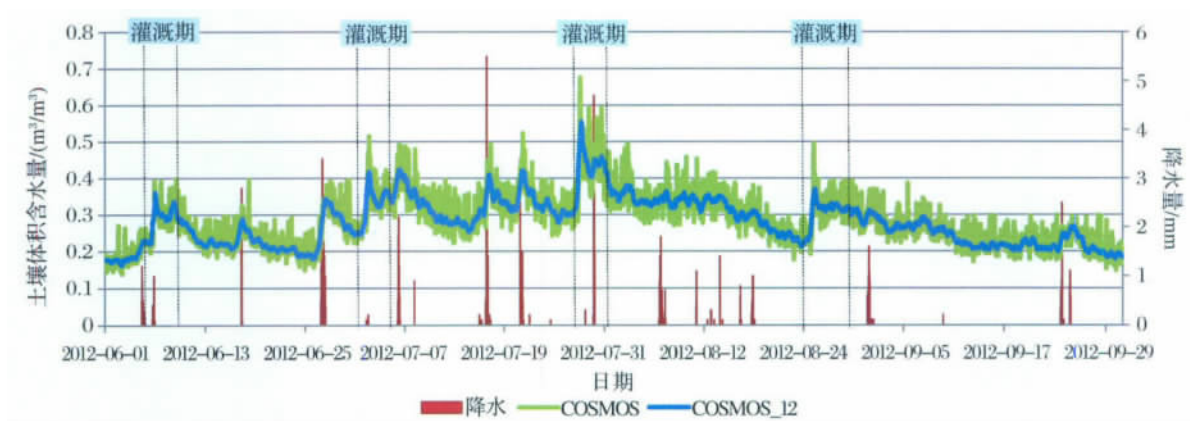


图 2 宇宙射线反演土壤含水量变化

Fig. 2 Variation of the soil moisture inverted by cosmic-ray fast neutron method

探头埋设在地下,并不受积水影响,从而使得宇宙射线观测的值(包含地面积水)大于无线传感器网络观测的值(不含积水)。

剔除灌溉期(7月1~5日,7月27日至8月1

日)数据后相关系数明显升高,达到0.86, RMSE降低为 $0.028 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (图4)。通过对比可以得出,宇宙射线反映的是一种面上的土壤水分变化值,能够很好地反映出农田下垫面下土壤水分的变化趋势,但

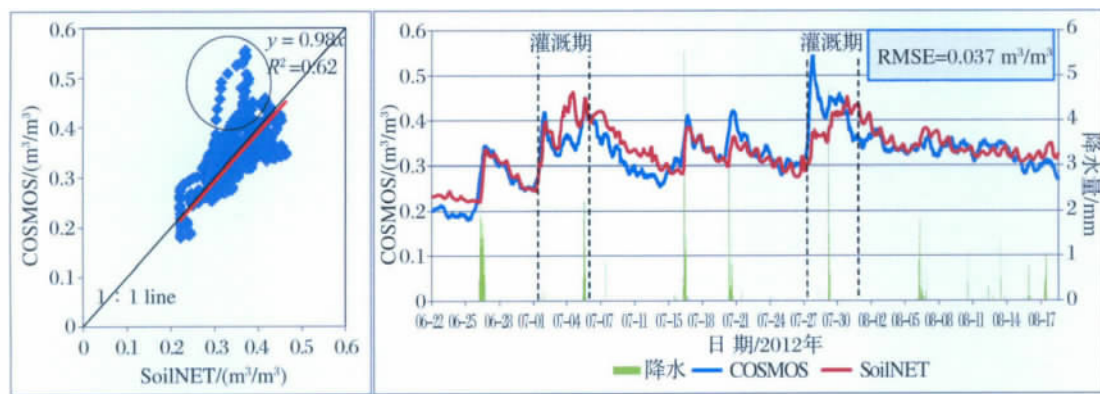


图 3 COSMOS 与 SoilNET 土壤水分对比分析

Fig. 3 Comparison of the COSMOS and SoilNET soil moisture

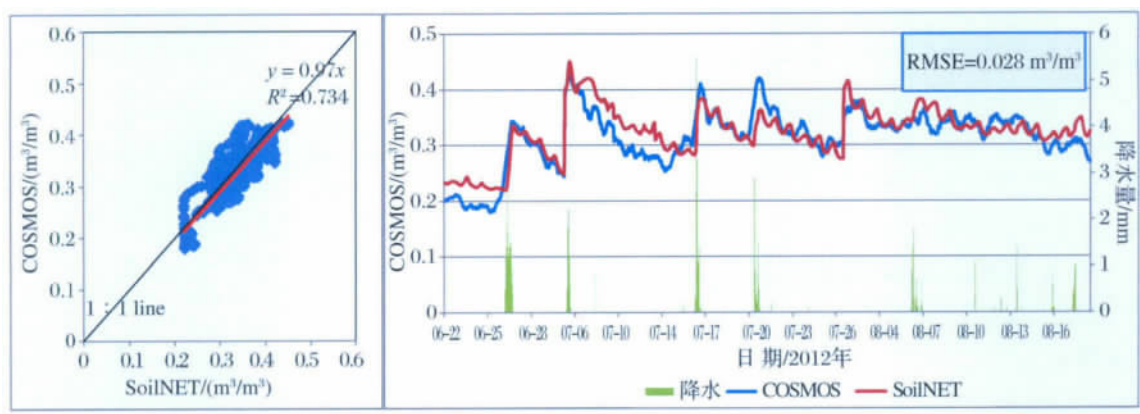


图 4 非灌溉期 COSMOS 与 SoilNET 土壤水分对比分析

Fig. 4 Comparison of the COSMOS and SoilNET soil moisture in non-irrigation time

在积水情况下宇宙射线存在一定的高估现象。不过,不论是在自然下垫面下,还是在农田下垫面下,积水现象总是很短暂的,对整体观测影响有限。

6 结论与讨论

目前,传统土壤水分测量方式多是有损、点测量方式,在获取农田区域土壤水分数据时费时、费力,并且在为遥感像元尺度土壤水分数据做验证时多采用以点代面或者插值的方式进行,无法达到尺度间的匹配。在遥感技术迅速发展的情况下,如何获取遥感像元尺度上的土壤含水量信息,以利于遥感反演精度的验证和评价,是急需解决的问题。宇宙射线快中子法作为一种新型的区域土壤含水量测量方式,其探测源区半径在 300 m 左右,并且可以实时获取土壤水分数据。本文分析了张掖绿洲农田中开展的区域土壤含水量观测实验结果,表明宇宙射线土壤水分观测系统能够有效地获取区域土壤含水量,不仅可以准确获取长时间序列农田尺度土壤水分,

也将为遥感反演的土壤水分提供真正意义上的面状地面验证数据。

当然,利用宇宙射线快中子法测量土壤水分还有许多问题要解决。首先,宇宙射线源区内的氢原子不只存在于土壤水分中,在晶格水、土壤有机质、植被以及水汽中均存在氢原子,这些氢原子源的存在势必会对快中子的传播产生影响。Zreda 等^[18]指出晶格水的存在会使得宇宙射线探测深度降低,不过在认为晶格水、土壤有机质不变的情况下,这些影响可以通过一次源区实地土壤水分校正进行消除;在稀疏植被区,植被的影响也可以根据实地土壤水分校正进行消除,但在快速生长植被的下垫面下,植被含水量对观测存在一定的影响,目前还没有完善的方法对此进行校正;水汽的存在会影响宇宙射线的测量源区,MCNPX 模拟表明饱和水汽下的探测半径会比干空气下的探测半径下降 10% 左右。水汽不仅仅影响宇宙射线测量源区,还会对源区内快中子强度造成影响。Zreda 等^[18]建议增加水汽测量相

关设备对快中子数据进行水汽校正,以消除土壤水分反演过程中水汽变化带来的影响。此外,当地表被积水覆盖时,宇宙射线反演土壤水分会受到很大的影响,本文研究中指出在灌溉的情况下宇宙射线反演的土壤水分较站点测量土壤水分高,关于积水对宇宙射线快中子技术的影响还有待进一步研究。最后,根据中子散射传播理论,不同深度的土壤水分对宇宙射线的影响也不完全相同,深度加权也是目前研究的热点^[24, 25]。

宇宙射线土壤水分观测系统的原理表明,源区内氢原子的含量是影响其观测结果的核心变量,而在其源区内,土壤水分是氢原子的主要来源,但其他来源,如地上生物体内的含水量、降雨后冠层截留的雨量、灌溉期间的地表积水等,都在不同时期提供不同比例的氢原子来源,这是影响宇宙射线观测土壤水分的主要误差来源,在未来的研究中需要通过更加细致的观测工作加以剔除。另一方面,如果能够通过构建更加合理的定标公式,将上述氢原子来源予以分离,宇宙射线观测系统将能够为地表生物量的时空变化、冠层截流量等研究提供更好的区域观测数据。

致 谢: 感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院以及中国科学院寒区旱区环境与工程研究所各位老师给予的帮助和指导。

参考文献 (References):

- [1] Deng Yingchun, Xu Yonghui. Introduction to the methods of soil moisture content measuring [J]. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(4): 20-24. [邓英春, 许永辉. 土壤水分测量方法研究综述 [J]. 水文, 2007, 27(4): 20-24.]
- [2] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574-582.
- [3] 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.
- [4] Vinnikov K Y, Robock A, Qiu S, et al. Satellite remote sensing of soil moisture in Illinois, United States [J]. *Journal of Geophysical Research—Atmospheres*, 1999, 104(D4): 4 145-4 168.
- [5] Famiglietti J S, Devereaux J A, Laymon C A, et al. Ground-Based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) hydrology experiment [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(6): 1 839-1 851.
- [6] Weiermuller L, Huisman J A, Lambot S, et al. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(3/4): 205-216.
- [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] Shuttleworth W J, Zreda M, Zeng X, et al. The COsmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS): A non-invasive, intermediate scale soil moisture measurement network [C] // Proceedings of the British Hydrological Society's Third International Symposium. UK: Newcastle University, 2010.
- [9] Jin Rui, Li Xin, Yan Baoping, et al. Introduction of eco-hydrological wireless sensor network in the Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(9): 993-1 005. [晋锐, 李新, 阎保平, 等. 黑河流域生态水文传感器网络设计 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(9): 993-1 005.]
- [10] Li X, Cheng G, Liu S, et al. Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER): Scientific objectives and experimental design [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 2013, 94(8): 1 145-1 160.
- [11] Li Xin, Liu Shaomin, Ma Mingguo, et al. HiWATER: An integrated remote sensing experiment on hydrological and ecological processes in the Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(5): 481-498. [李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(5): 481-498.]
- [12] Liu S. Multi-Scale Observation Experiment on Evapotranspiration over heterogeneous land surfaces (MUSOEXE-42): Flux observation matrix [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, in press.
- [13] Mittelbach H, Lehner I, Seneviratne S I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 430/431: 39-49.
- [14] Schlaeger S, Huebner C, Becker R. Simple soil moisture probe for low-cost measurement applications [C] // Proceedings of the 6th Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. ISEMA, 2005: 258-265.
- [15] Zreda M, Zeng X, Shuttleworth W J, et al. Cosmic-ray neutrons, an innovative method for measuring area-average soil moisture [J]. *GEWEX News*, 2011, 21(3): 6-10.
- [16] Rosolem R, Shuttleworth W, Zreda M, et al. The effect of atmospheric water vapor on the Cosmic-ray soil moisture observing system [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, doi: 1175/JHM-D-12-0120.1.
- [17] 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.
- [18] 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): 4 079-4 099.

- [19] 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) , doi: 10. 1029/2009WR008726.
- [20] Pelowitz D. MCNPX User's Manual , Version 2. 5. 0. LA-CP-05-0369 [M]. Los Alamos: Los Alamos National Labs ,2005.
- [21] Glasstone S ,Edlund M C. The Elements of Nuclear Reactor Theory [M]. New York: Van Nostrand ,1952.
- [22] Hess W N ,Patterson H W ,Wallace R , *et al.* Cosmic-ray neutron energy spectrum[J]. *Physical Review* , 1959 , 116(2) : 445–457.
- [23] Desilets D , Zreda M. Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and monte carlo simulations [J]. *Water Resources Research* , 2013 , doi: 10. 1022/wrcr. 20187.
- [24] 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.
- [25] 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.

Research and Application of Cosmic-ray Fast Neutron Method to Measure Soil Moisture in the Field

Jiao Qishun¹ , Zhu Zhongli¹ , Liu Shaomin¹ , Jin Rui² , Du Fan¹

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science , School of Geography , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China)

Abstract: It is very difficult to measure large region soil moisture. In recent years , measurement of surface soil moisture by the cosmic-ray fast neutron probe has gradually attracted more attention. By this passive , non-invasive and intermediate scale measurement , soil moisture at a horizontal scale of around 300 m can be observed , which makes this method available to fill the gap between little scale of traditional point measurement and large scale of remote sensing in the measurement of soil moisture. In this paper , Cosmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS) and Wireless Sensor Network (WSN) were used to observe field soil moisture in Zhangye Oasis. The results of the COSMOS soil moisture well reflected the variation trend of soil moisture at the field scale. There were some regular changes with the cosmic-ray soil moisture during the irrigation period. Combined with irrigation data in cosmic-ray probe footprint , a bimodal change was showed in the cosmic-ray soil moisture figure during irrigation period. This was because that the order of irrigation of the three communities was different in cosmic-ray probe footprint. WSN data were used to validate this result and we found that root-mean-square error between cosmic-ray soil moisture and SoilNET average soil moisture was very large during irrigation periods because of the impact of cosmic-ray measurement theory. While root-mean-square error would decrease from 0.037 m³/m³ to 0.028 m³/m³ after we eliminated the data in irrigation period. So COSMOS can be used to measure field soil moisture under high heterogeneity condition and provide truly ground data for the validation of remote sensing soil moisture.

Key words: Soil water content; Wireless Sensor Network; Field scale; Heihe River Basin.