

引用格式: Peng Shuyan, Zhao Long, Li Tingting, *et al.* Retrieval of Cosmic-Ray-based Soil Moisture over a Typical Karst Watershed[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 997-1008. [彭书艳, 赵龙, 李婷婷, 等. 基于宇宙射线观测的喀斯特槽谷区典型流域土壤水分反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 997-1008.] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.0997

# 基于宇宙射线观测的喀斯特槽谷区典型流域土壤水分反演研究

彭书艳, 赵 龙, 李婷婷, 韩旭军, 马明国, 杨 帅, 杨跃程

(西南大学地理科学学院, 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715)

**摘要:**宇宙射线中子法是一种百米尺度的土壤水分无损测量方法。基于重庆市青木关槽谷区多个站点的多层土壤水分观测数据, 针对宇宙射线土壤水分观测系统(COSMOS)同步测得的中子序列开展了土壤含水量反演研究。在反演算法研究过程中, 引入S-G滤波对COSMOS快中子数进行平滑, 分析了植被含水量的影响, 探索和优化了算法率定和验证阶段不同的数据筛选方案。结果表明: 该区域植被含水量对COSMOS反演结果影响较小, 且考虑全时段土壤水分水平下发展的算法能得到与实测区域平均更为一致的土壤水分序列。最后应用该反演算法进一步生成了COSMOS观测时段的长时间序列土壤水分产品, 并与周边相邻土壤水分观测进行间接验证, 揭示了该区域的土壤水分季节变化特征。该研究发展的COSMOS土壤水分反演算法在该区域展现了较强的适用性, 可为重庆市青木关喀斯特槽谷区典型流域的区域尺度土壤水分观测与水文气象分析提供支持。

**关键词:** COSMOS; 土壤水分; 反演算法; 植被含水量; S-G滤波

**中图分类号:** S152.7; TP79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2021)05-0997-12

## 1 引言

土壤水参与了地球上多个圈层之间的水分循环, 在其物质和能量交换中扮演着重要角色, 因此土壤水分监测一直是相关科学研究的关注重点。传统的土壤水分观测方法包括基于传感器的单点尺度监测<sup>[1]</sup>, 但人力和物力成本较高。为了获取区域和全球尺度的土壤水分, 卫星遥感反演和陆面模型模拟成为了常用方法, 但二者往往具有较大不确定性。遥感产品的真实性检验和模型模拟结果的验证依赖于地面实测土壤水分, 但前述单点的土壤水分观测和卫星像元以及模型网格产品在空间尺度上不匹配。考虑到土壤水分的高度空间异质性,

土壤水分的代表性问题突出, 也是当前水文气象观测和卫星遥感以及陆面过程模拟关注的热点。为此, 有学者提出了基于宇宙射线的土壤水分监测<sup>[2]</sup>。

宇宙射线中子法是一种百米尺度、非接触式、自动监测的土壤水分观测方法<sup>[3]</sup>。基于宇宙射线快中子强度与土壤含水量之间的负相关关系, 利用宇宙射线土壤水分观测系统(COSMIC-ray Soil Moisture Observing System, COSMOS)探测的被慢化的快中子(本文相对地称快中子)数量反演出对应区域的土壤含水量。得益于较大的空间覆盖范围, 基于COSMOS的地面实测土壤水分作为验证卫星和模型产品提供了有效途径。焦其顺等<sup>[4]</sup>以甘肃黑河流域为研究区, 利用COSMOS监测农田土壤水分,

收稿日期: 2021-03-28; 修订日期: 2021-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41805133), 国家重点研发计划(2018YFA0605400), 国家级大学生创新创业训练计划项目(202010635101)。

作者简介: 彭书艳(1996—), 女, 贵州仁怀人, 本科生, 主要从事遥感与GIS应用相关研究。E-mail: pengshuyan\_swu@163.com

通讯作者: 赵 龙(1985—), 男, 湖北松滋人, 副教授, 主要从事陆面数据同化与水文气象观测研究。E-mail: zhaol04@swu.edu.cn

观测结果能够有效反映农田尺度的土壤水分变化趋势。王秋铭等<sup>[5]</sup>在陕北六道沟流域利用 COSMOS 对坡地土壤水分含量进行观测,证实了宇宙射线土壤水分观测系统具有较高的可靠性,能为坡面尺度土壤水分和径流预测模型提供数据。庞治国等<sup>[6]</sup>基于频域反射仪法和宇宙射线中子法获取的土壤水分数据,对不同像元尺度(30 m、1 km、3 km 和 9 km 空间分辨率)的土壤水分遥感反演产品进行了精度验证分析,结果表明宇宙射线中子法获取的土壤水分在 4 种不同尺度的遥感反演结果验证精度均优于频域反射仪法,由此体现了宇宙射线中子法在土壤水分遥感反演的地面验证方面的应用潜力。Tan 等<sup>[7]</sup>在西北农牧交错带展开试验,与烘干法土壤水分进行比较,校准并评估了宇宙射线快中子法观测土壤水分的性能,丰富了宇宙射线中子法在中国西北农牧交错带这类缺乏数据的干旱一半干旱地区的适用性研究。Pang 等<sup>[8]</sup>在中国红壤地区相对复杂的下垫面条件下,通过比较宇宙射线中子法和烘箱干燥法在研究区域的性能以及点尺度下的时域法(TDR)监测,测试了宇宙射线中子法的准确性。武强等<sup>[9]</sup>基于垂直足迹线性加权算法对山地复杂下垫面区域土壤水分进行了测量校准与验证,得到了相较于测量足迹等权重加权方法准确性更高的结果。Nguyen 等<sup>[10]</sup>将线性和非线性两种加权方法下的频域反射仪(FDR)土壤水分和 COSMOS 反演结果对比,显示线性方法性能更好,此外,时间稳定性分析结果显示 COSMOS 土壤水分在具有高度异质性的地区更具代表性。Baroni 等<sup>[11]</sup>评估了宇宙射线快中子法估计土壤含水量的不确定性及其原因,并提出了可能的改进措施。Fersch 等<sup>[12]</sup>在德国南部的前阿尔卑斯罗特源头流域建立了一个含 24 个宇宙射线中子探测器、覆盖面积为 1 km<sup>2</sup> 的密集观测网,同时对森林和草地斑块的植被生物量、气象变量、流量和地下水位进行了监测,为相关领域的研究提供了一个独特而全面的数据集。Mujumdar 等<sup>[13]</sup>分析了位于印度热带核心季风区的浦那 2017~2020 年的 COSMOS 土壤水分观测值,并与同一时期的卫星遥感、再分析和模型产品进行了比较,表明高时间分辨率的宇宙射线土壤水分观测的发展不仅有助于产生长期可靠的土壤水分数据产品,而且对于验证较粗分辨率的遥感、再分析和模型模拟土壤水分产品以及核心季风区的水文应用非常重要。Patrignan 等<sup>[14]</sup>介绍了一种基于慢化超薄锂箔

技术的新型宇宙射线中子传感器,并且在美国堪萨斯州曼哈顿附近的康扎草原生物站的一块耕地里对其进行了应用和评估。研究结果表明,该新型探测器可作为宇宙射线中子探测技术在农业土壤水分测量中高效率、低成本的有效替代方案。

上述工作极大地推动了 COSMOS 土壤水分观测的应用与发展,但不同下垫面 COSMOS 土壤水分反演还面临诸多挑战。一般来说, COSMOS 探测的快中子数会受到土壤有机质、晶格水、植被以及水汽等的影响。Zreda 等<sup>[15]</sup>对这些因素进行了初步讨论:晶格水和土壤有机质在时间上均近似恒定。晶格水可用重力法测量,可构建通用校准函数对其进行校准。土壤有机质中的水当量与碳的质量百分比大致相等,约为晶格水的一半。当有机质中碳的质量百分比超过 1% 时, COSMOS 反演结果就会受土壤有机质所包含的氢的影响<sup>[15]</sup>。对于植被而言,其影响主要表现在植被体内的液态水含量和生物质、以及植被冠层截留水方面。研究表明 1 kg m<sup>-2</sup> 生物量水当量可造成约 0.5% 的快中子强度减少<sup>[16]</sup>。一般来说,晶格水和土壤有机质储水由于占比相对较小,一般可以忽略不计。然而,植被茂密区域,植被含水量的存在可能会对 COSMOS 反演结果产生较为明显的影响。目前,对于植被的影响已有初步探索,赵原<sup>[17]</sup>在河南省新乡市封丘县潘店镇中国科学院封丘农业生态实验站尝试采用无人机遥感对植被含水量进行校正来提高宇宙射线快中子法反演精度,效果较为明显;但是该研究工作依赖于无人机的小范围采样,在大范围应用时存在一定局限性。据此,考虑基于卫星遥感影像的叶面积指数(LAI)数据来进行研究区植被含水量的估算。注意,这里提到的植被含水量与参考文献[16]中的生物量水当量、赵原<sup>[17]</sup>研究中的植被含水量有所区别,由于实验中未直接观测植株生物量水当量,参考 Paloscia 等<sup>[18]</sup>的方法,通过遥感得到的叶面积指数来指示植被冠层含水量,并初步考虑其对该区域 COSMOS 土壤水分反演的影响。

我国西南地区地形复杂,地貌形态多样,区域内分布着广泛的喀斯特地貌,在喀斯特流域内的介质多孔,土层薄,土壤蓄水能力较差。西南地区气候多样,主要为亚热带季风气候、高原山地气候和部分热带季雨林气候区。受季风环流和复杂地形影响,青藏高原以东的西南地区降水丰富,冬春季降水量整体偏少,夏秋季降水丰沛<sup>[19]</sup>。目前,由于

喀斯特地区较强的空间异质性,建立符合喀斯特流域水文特征的水文模型存在较大困难,研究喀斯特流域范围内的水文气象特征及其变化规律具有重要意义。近年来,以西南大学地理科学学院为代表的研究人员在重庆青木关流域开展了长期稳定的野外观测和生态水文研究<sup>[20]</sup>。2018年以来,西南大学地理科学学院研究人员在青木关流域内布设了一个COSMOS观测仪器和包含多个土壤温湿度/降水观测站点的土壤温湿度观测网,开展流域尺度系统的水文气象观测。此外,为了配合COSMOS土壤水分反演,在其附近进行了土壤水分的单点加密监测,开展协同观测。

研究旨在基于上述青木关流域COSMOS获取的快中子序列和土壤水分观测网积累的多站点多层土壤水分实测序列数据,探究该区域COSMOS土壤水分反演算法并评估其可靠性与适用性,为西南喀斯特槽谷区典型流域的土壤水分观测与陆面水文气象分析提供数据支持。在反演算法发展过程中,特别进行了以下4个方面的研究:①发展引入卫星遥感数据并考虑植被含水量的COSMOS土壤水分反演算法,并分析其影响;②引入S-G滤波技术对气压订正后的快中子序列进行平滑降噪;③探索了对于干燥条件下快中子数的不同标定方案,即在算法发展时段对序列数据中的校正和验证数据的筛选;④最后应用该算法生成了青木关长时间序列土壤水分产品,并与周边土壤水分观测进行交叉验

证,揭示了该区域的土壤水分季节性变化。

## 2 研究区与数据

### 2.1 研究区概况

研究区地处重庆市青木关流域虎头村,该流域位于重庆市北碚区、沙坪坝区与璧山区的交界处,属于亚热带季风气候,温暖湿润,多年平均气温约为18℃。该地雨水充足,年降雨量1100~1300mm,季节分配不均,集中分布于每年4~10月。青木关流域整体地势北高南低。虎头村地形较为平整,土地利用类型主要为苗圃地,大多种植桑树、桂树等。

### 2.2 数据

实验所用的数据包括宇宙射线土壤水分观测(COSMOS)数据、土壤水分观测站点实测数据、MODIS LAI遥感影像和气象数据。

COSMOS(106.319°E, 29.763°N)和周边土壤水分观测网站点的空间分布如图1所示。研究所用COSMOS仪器型号为CRS2000/B,安装高度1.5m,测量误差为0~4%。该观测系统主要包括:数据采集器及防护机箱、中子探测器、无线数据传输模块和太阳能供电系统。COSMOS仪器测量原理为:中子管腔内填充了固定压力的、可与热中子/超热中子发生反应的敏感气体(<sup>3</sup>He或<sup>10</sup>B)。当热中子/超热中子进入中子管并与管内分子发生碰撞后,会产生一连串电子的离子化,这些电子被阳极吸引后会产生一个电荷脉冲,这一脉冲信号经过一系列的



图1 研究区COSMOS和土壤水分观测网站点空间分布示意图

Fig.1 Spatial distribution of the COSMOS and soil moisture observation stations in the study area



复杂处理后,形成脉冲信号并记录到数据处理模块,形成最终的数据信号。该COSMOS中子探测器包括两个部分:①聚乙烯覆盖的中子探测器,主要监测超热中子-快中子的强度,测量值用于计算土壤水分(实验中涉及土壤水分研究所应用的数据);②无聚乙烯覆盖的中子探测器,主要监测热中子的强度,测量值用于计算雪深。在实地操作中,通过设置数据记录器的控制单元参数实现内部压力传感器的校准。观测数据还包括空气温度及空气相对湿度等,数据采集器观测时间间隔为1 h,观测时间段为2018年4月6日至2020年9月27日,其中部分时段存在数据缺失,分别集中在2018年12月29日~2019年1月16日、2019年10月22日~10月30日。图2(a)显示了该区域COSMOS观测得到的快中子小时时间序列。可以看到COSMOS快中

子数存在较为明显的年际周期和季节性变化。每年1月至7月,快中子数较为稳定,波动不大,8月存在明显增长,9月开始逐渐减少,10月以后恢复稳定状态。

土壤水分观测站点数据包括7个站点(S1~S7)的观测值。观测站点采用的是美国METER公司生产的Em50数据采集器和5TM土壤温湿度传感器,每个站点分别在0~5 cm、10 cm、20 cm、40 cm、60 cm深度处各埋设1个5TM传感器测量土壤体积含水量,时间分辨率为15 min。图2(b)展示了距离COSMOS设备相对较近的5个观测站点(S1~S5)表层0~5 cm的土壤水分序列示意图。可以看出5个站点的表层土壤水分在观测时段内呈现出较强的时间变异性,而整体上变化趋势较为一致,体现了对区域大范围降水的一致响应。

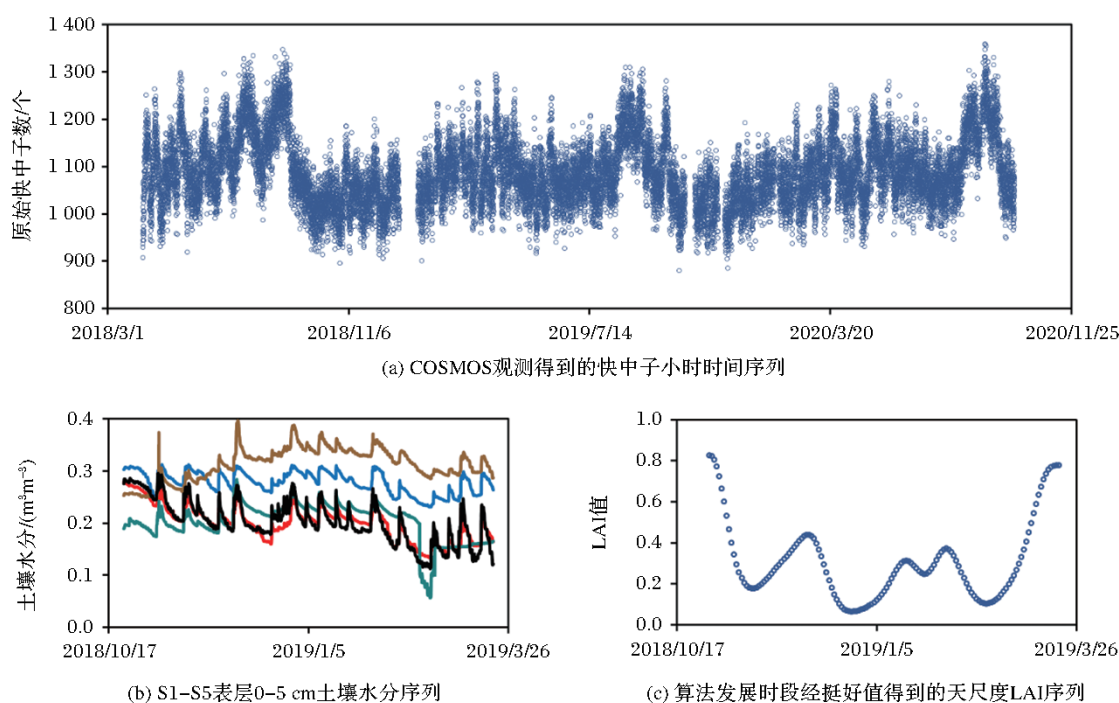


图2 COSMOS反演算法相关数据示意图

Fig.2 Schematic of data related to the COSMOS-based soil moisture retrieval algorithm

研究中借助MODIS生产的LAI数据引入植被含水量信息。该遥感影像为MODIS生产的复合数据集,时间分辨率为8 d、空间分辨率500 m。所用数据时间为2018年至2020年,可在线免费获取([https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=C203669659-LPDAAC\\_ECS](https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=C203669659-LPDAAC_ECS))。下载的原始MODIS LAI遥感影像为HDF文件,对原始影像进行研究所需的LAI数据图层提取、裁剪、属性值读取、剔除异常值、时间序列平滑、并插值得到研究时段内

植被含水量计算所需的每天LAI序列值。图2(c)为算法发展时段的LAI序列,其显示了研究区内LAI在10月、11月上旬和3月相对较高,在11月中下旬至2月(冬季)则处于相对较低水平。

实验还采用了包括气压和降水在内的气象数据。其中,气压数据用于中子数的校正,由布设在COSMOS附近的自动气象站提供,采样频率为1 min。降水数据用于对反演的土壤水分进行间接验证,由配有雨量筒(ECRN-100)的S6、S7站点观

测得到,采样时间间隔为15 min。

研究中所用到的几种数据存在不同的时间分辨率,为匹配COSMOS观测的时间分辨率,分别对气压数据和土壤水分数据进行1 h时间平均预处理。

### 3 COSMOS反演算法

#### 3.1 COSMOS基本原理

一般来说,来源于太空的高能粒子流受地球磁场吸引进入大气层,与大气中的原子核碰撞产生次级宇宙射线,穿过大气层的次级宇宙射线进入土壤后再与土壤中的原子核碰撞反应产生能量为1~2 MeV的快中子。生成的快中子一部分与土壤中的各种原子碰撞失去部分能量生成0.025 eV的热中子(也叫慢中子)或大于0.5 eV的超热中子,之后被土壤吸收,另一部分则散射到空气中。散射到地表部分的快、慢中子会在地表迅速达到平衡。通常而言,散射到空气中的中子强度与土壤含水量成负相关:土壤含水量越高,氢原子含量越高,被慢化和吸收的快中子数目越多,因而在地面检测到的中子数目越少。宇宙射线中子法就是基于中子强度与土壤含水量的负相关关系,通过检测土壤上方被慢化的快中子(本文中仍相对称作快中子)浓度来反演土壤含水量。

#### 3.2 探测源区半径

宇宙射线快中子法探测的水平空间范围定义为COSMOS能探测到的86%的快中子来源区域<sup>[2]</sup>。Zreda等<sup>[2]</sup>指出该覆盖区在海平面上是一个直径约为670 m的圆。探测源区的大小主要取决于大气的密度和湿度。其主要原因包括两点,一是中子的平均散射自由程与单位体积中的分子数成反比,空气密度越大,单位体积空气中的分子数越多,中子的传输距离越小,则源区越小,反之源区越大。气压随海拔的增大而降低,因此源区半径随海拔的升高而增大。二是空气中的水蒸气会缩短中子的平均散射自由程,因而探测源区半径会随水蒸气分压的增加而减小。

通常情况下探测源区半径和气压的关系<sup>[24]</sup>可表示为 $R_s = R_{s,0} \left( \frac{P_{s,0}}{P_s} \right)$ 。其中 $R_{s,0}$ 为参考气压 $P_{s,0}$ 下的源区半径(通常气压 $P_{s,0}$ 取值 $1.01 \times 10^5$  Pa,半径 $R_{s,0}$ 取值300 m), $R_s$ 为当前气压 $P_s$ 下的半径值。研究区气象站观测到的2018年4月至2020年9月期间的气压平均值为952.34 hPa,代入上式计算得到研究区COSMOS探测源区半径约为318 m。为此,

结合图1,距离COSMOS设备相对较近的5个观测站点(S1~S5)数据用于COSMOS土壤水分的反演,其余两个较远的站点(S6、S7)数据用于反演结果的间接验证。

#### 3.3 考虑植被含水量的有效探测深度

宇宙射线快中子法的探测深度 $z$ (cm)定义为垂直方向上COSMOS探测到的86%的快中子来源的土壤深度, $z$ 与源区内的土壤含水量成负相关关系<sup>[2]</sup>。土壤含水量高,其含有的氢原子数多,对快中子的慢化程度更强,使快中子难以持续向下传播。事实上,探测源区内的土壤有机质、晶格水、植被以及水汽等均可作为除土壤水分以外的氢源。实验将植被含水量考虑其中,以消除其对COSMOS土壤水分反演的影响。Franz等<sup>[25]</sup>提出了86%快中子数累计灵敏度等值线 $\varphi$ (cm)的经验公式:

$$\varphi(z) = 5.8 - 0.0829z \quad 0 \leq z \leq 70 \text{ cm} \quad (1)$$

其中: $z$ 为土壤垂直深度(cm),向下为正。

假设在相同的垂直位置上,所有氢原子对快中子强度的影响相同,把不同的氢池组合成水的等效长度单位LW(cm),则有 $LW = W_s + W_L + W_p$ (式中 $W_s$ 为地表上的水(cm), $W_L$ 为晶格水(cm), $W_p$ 为孔隙水(cm))。可改写上式使函数依赖于土壤深度:

$$LW(z) = W_s + \frac{\rho_{bd}(z)\tau(z)z}{\rho_w} + \theta(z) \quad (2)$$

其中: $W_s$ 为地表上的水(cm); $\rho_{bd}$ 为干燥土壤的容重( $\text{g cm}^{-3}$ ); $\rho_w$ 为液态水的密度(假设为 $1 \text{ g cm}^{-3}$ ); $\tau$ 为矿物颗粒和结合水中晶格水(在 $105^\circ\text{C}$ 下干燥至 $1000^\circ\text{C}$ 时释放的水量,即每克干矿物含有的水的重量分数); $\theta$ 为体积孔隙水( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )。

设86%快中子数累计灵敏度等值线与COSMOS探测到的土壤剖面 and 地表所有水分的总和的等效长度相等,即 $\varphi(z) = LW(z)$ 。结合式(1)和式(2)推导可得传感器的有效深度 $z^*$ (cm)如下:

$$z^* = \frac{5.8 - W_s}{\rho_{bd}\tau + \theta + 0.0829} \quad (3)$$

考虑到反演算法在大尺度的适用性,实验尝试在COSMOS反演中基于卫星遥感数据来指征植被含水量信息。参考Paloscia等<sup>[18]</sup>假设LAI与植被含水量 $Q$ ( $\text{kg m}^{-2}$ )有如下关系:

$$\text{LAI} = y \times \ln(1 + Q) \quad (4)$$

其中: $y$ 是二者关系的系数,建议取 $y=3.3$ 。

由式(3)、(4),并结合 $Q$ 与 $W_s$ 的关系,可推导考虑植被含水量影响的传感器的有效深度 $z^*$ (cm):

$$z^* = \frac{5.8 - \frac{\left[ \text{Exp}\left(\frac{\text{LAI}}{3.3}\right) - 1 \right]}{10}}{\rho_{bd}\tau + \theta + 0.0829} \quad (5)$$

其中: LAI为叶面积指数;  $\rho_{bd}$ 为干燥土壤的容重( $\text{g cm}^{-3}$ );  $\tau$ 为晶格水的重量分数,通常较小,实验计算中忽略不计;  $\theta$ 为体积孔隙水( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )。

实验利用同步实测的多层土壤水分数据来辅助获取 COSMOS 有效探测土壤深度,并据此发展青木关 COSMOS 系统的土壤水分反演算法。其中 5 个站点(S1~S5)布设在 COSMOS 观测范围内(318 m),观测时间段为 2018 年 10 月至 2019 年 3 月(其中 S5 持续观测,观测时间至 2020 年 9 月)。其余两个站点(S6、S7)安装在距离 COSMOS 仪器较远

的位置,观测时间段为 2019 年 12 月至 2020 年 9 月,其观测数据用于 COSMOS 土壤水分反演结果的间接验证。

假设在探测源区内水平方向上的土壤水分均匀分布,对上述 5 个站点(S1~S5)相同探测深度的土壤水分取平均值,供计算有效探测深度。为提高有效探测深度推算的准确性,实验针对 5 个土壤水分观测站点根据不同 COSMOS 探测深度进行加权。结合站点土壤水分探头埋深(0~5 cm、10 cm、20 cm、40 cm 和 60 cm),假设 5 个深度层内(0~5、5~15、15~25、25~55、55~65 cm)土壤水分均匀分布,则可根据 COSMOS 探测深度  $z$  按比例计算得到对应的源区实际土壤水分  $\theta$ ,二者关系式如下:

$$\theta = \begin{cases} \frac{\theta_{0.5} \times z}{z}, & 0 < z \leq 5 \text{ cm} \\ \frac{5\theta_{0.5} + \theta_{10} \times (z - 5)}{z}, & 5 < z \leq 15 \text{ cm} \\ \frac{5\theta_{0.5} + 10\theta_{10} + \theta_{20} \times (z - 15)}{z}, & 15 < z \leq 25 \text{ cm} \\ \frac{5\theta_{0.5} + 10\theta_{10} + 10\theta_{20} + \theta_{40} \times (z - 25)}{z}, & 25 < z \leq 55 \text{ cm} \\ \frac{5\theta_{0.5} + 10\theta_{10} + 10\theta_{20} + 30\theta_{40} + \theta_{60} \times (z - 55)}{z}, & 55 < z \leq 65 \text{ cm} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $z$ 为探测深度(cm);  $\theta_x$ 为站点观测的对应  $x$ (0~5 cm、10 cm、20 cm、40 cm、60 cm)深度的土壤体积含水量( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )。

将式(5)、(6)联立,则在每一种深度范围内,均可得到一个有效探测深度  $z$  与不同深度层土壤水分  $\theta_x$  之间的关系式。由此结合站点实测土壤水分可分析得到 COSMOS 的有效探测深度。

### 3.4 土壤水分反演算法

在应用 COSMOS 测得的中子强度  $N_{\text{raw}}$  进行土壤水分反演之前,需要对中子强度针对气压<sup>[15]</sup>和水汽<sup>[28]</sup>的变化进行修正,以消除其对土壤水分信息反演的影响。修正后的中子强度可通过式(7)计算:

$$N = N_{\text{raw}} \times f_p \times C_{\text{wv}} \quad (7)$$

上式中,  $f_p = e^{\frac{P_0 - P}{L}}$  为气压修正系数<sup>[15]</sup>。其中,  $P_0$  为气压参考值,选择研究区 COSMOS 观测时段内的平均气压 952.34 hPa 为参考值;  $P$  为实测气压值(由自动气象站获得);  $L$  为高能中子的质量衰减长度,从高纬度至低纬度地区,其范围在  $128 \text{ g cm}^{-2} \sim 142 \text{ g cm}^{-2}$  之间渐变变化<sup>[26]</sup>,参考武强等<sup>[27]</sup>在重庆市巴南区(纬度为  $29.475^\circ \text{N}$ )的工作,取  $L$  为  $137 \text{ g cm}^{-2}$ 。

$C_{\text{wv}} = 1 + 0.0054(\rho_{\text{v}0} - \rho_{\text{v}0}^{\text{ref}})$ , 为水汽修正系数<sup>[28]</sup>。其中,  $\rho_{\text{v}0}$  为测量时的绝对湿度( $\text{g m}^{-3}$ );  $\rho_{\text{v}0}^{\text{ref}}$  为参考条件下的绝对湿度( $\text{g m}^{-3}$ ),一般设为 0。

Desilets 等<sup>[29]</sup>提出了修正后的快中子数与土壤含水量之间的非线性关系:  $\theta = \frac{a_0}{\left(\frac{N}{N_0}\right) - a_1} - a_2$ 。实际

上,根据 COSMOS 反演模型计算的得到的土壤含水量中包含植被含水量的部分,则有:

$$\theta + \theta_v = \frac{a_0}{\left(\frac{N}{N_0}\right) - a_1} - a_2 \quad (8)$$

其中:  $\theta$  为土壤体积含水量( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_v$  为植被体积含水量( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $N$  为修正后的快中子数;  $N_0$  为干燥条件下的快中子数目,需要根据源区实测土壤含水量标定(将在 4.3 节中进行说明);参照 Desilets 等<sup>[29]</sup>提供的经验系数,取  $a_0 = 0.0808$ ,  $a_1 = 0.372$ ,  $a_2 = 0.115$ (下同)。

已知植被含水量  $Q$  ( $\text{kg m}^{-2}$ ) 与 LAI 的关系(式(4)),引入 COSMOS 有效探测深度  $z$  (cm),则  $\theta_v$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )可等效为:



$$\theta_v = \frac{Q}{z} = \frac{\left[ \text{Exp}\left(\frac{\text{LAI}}{3.3}\right) - 1 \right] \times 10^{-3}}{z \times 10^{-2}} \quad (9)$$

由式(8)、(9)可推导得到考虑植被含水量的COSMOS源区土壤体积含水量计算公式如下:

$$\theta = \frac{a_0}{\left(\frac{N}{N_0}\right) - a_1} - a_2 - \frac{\left[ \text{Exp}\left(\frac{\text{LAI}}{3.3}\right) - 1 \right] \times 10^{-3}}{z \times 10^{-2}} \quad (10)$$

其中: $\theta$ 为土壤体积含水量( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ );实验中 $N$ 为修正基础上经S-G滤波处理后的快中子数; $N_0$ 为干燥条件下的快中子数;LAI为植被叶面积指数; $z$ 为有效探测深度(cm)。

## 4 COSMOS反演与结果分析

### 4.1 COSMOS有效探测深度的确定及植被含水量影响分析

基于原始的COSMOS快中子序列,首先在天平均的尺度上结合式(5)、(6)计算得到算法发展时间窗口内每24h对应的有效探测深度序列,如图3所示。图3(a)为有效探测深度 $z$ 随时间变化的序列图,可看出 $z$ 在试验阶段具有一定波动性。图3(b)进一步展示了有关有效探测深度 $z$ 的箱型图,其最小值、下四分位数、中位数、均值、上四分位数、最大值分别为15.3、16.3、16.6、16.7、17.1、18.1 cm。考虑代表性,本文选择平均值16.7 cm为最终确定的有效探测深度。

由此,结合LAI,根据式(9)换算得到算法发展时间窗口内,植被等效体积含水量 $\theta_v$ ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ )大概在0.000 1~0.001 7  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ 之间,而实测土壤体积含水量在0.22~0.32  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ 之间,可看出其占比非常小,即该区域植被含水量对COSMOS土壤水分反演的

影响相对较小。需要注意的是,实验参考经验性方法估算得到植被含水量,可能存在一定的局限性,而在更高植被覆盖或者植被季节性变化较大的区域,则需进一步探索植被含水量的影响。

### 4.2 基于S-G滤波的COSMOS快中子预处理

COSMOS原始测量的快中子数时间序列在小时尺度上波动较大(图2(a)),具有一定随机测量误差。这些误差的可能来源既包括仪器本身灵敏度的影响,也包括上述水汽和气压订正后仍残余的外部因素引起的随机波动。为此,在COSMOS土壤水分反演之前,引入S-G滤波技术对气压和水汽订正后的快中子序列进行处理。Savitzky-Golay滤波器(又称Savitzky-Golay平滑器,简称S-G滤波器)是由Savitzky A和Golay M于1964年提出的一种低通滤波器。其基本原理是在时域内基于局域多项式,通过最小二乘法进行最优拟合<sup>[30]</sup>。

具体执行过程中,需要定义多项式阶数 $O$ 和平滑窗口长度 $\text{Flen}$ , $\text{Flen}$ 须为奇数,且 $O$ 必须小于 $\text{Flen}$ 。当 $O = \text{Flen} - 1$ 时,滤波器不进行平滑。本文选择 $O = 3$ ,依次尝试 $\text{Flen} = 5, 7, 9, 11, \dots, 47$  h的情形,比较不同 $\text{Flen}$ 情况下降噪后的快中子数所反演的土壤水分与站点实测深度加权水分的相关系数 $R$ 的大小(图4),结果显示相关系数 $R$ 随 $\text{Flen}$ 的增大而升高且逐渐趋于稳定。结合该实验结果,实验最终选用 $\text{Flen} = 31$ 对快中子数进行S-G平滑,结果如图5所示。可看出降噪后的中子数 $\text{SG\_N31}$ 时间变率更为平滑。图中两条蓝线中间部分为算法发展时段(2018年10月30日至2019年3月19日)。

### 4.3 考虑不同数据筛选方案的土壤水分反演算法对比

土壤水分反演需要先对土壤干燥条件下的快中子数 $N_0$ 进行率定,通常根据土壤水分反演公式

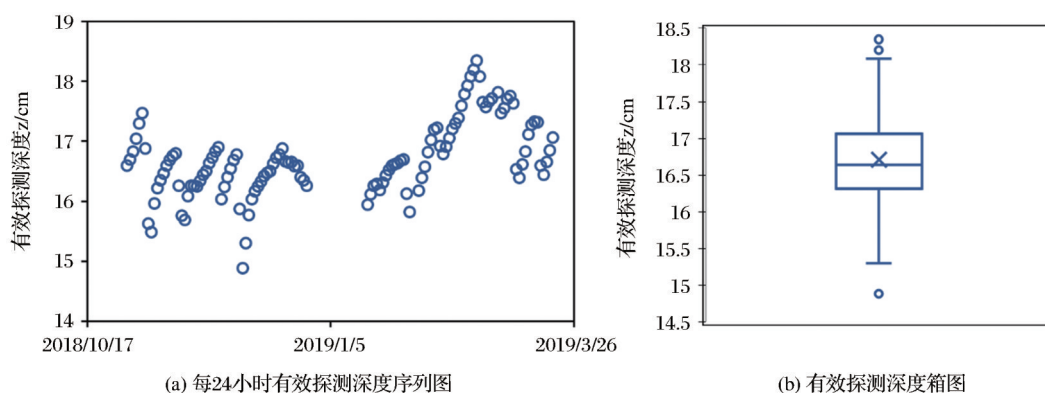


图3 研究区COSMOS土壤水分有效探测深度 $z$ (cm)

Fig.3 Effective measurement depth of COSMOS in the study area

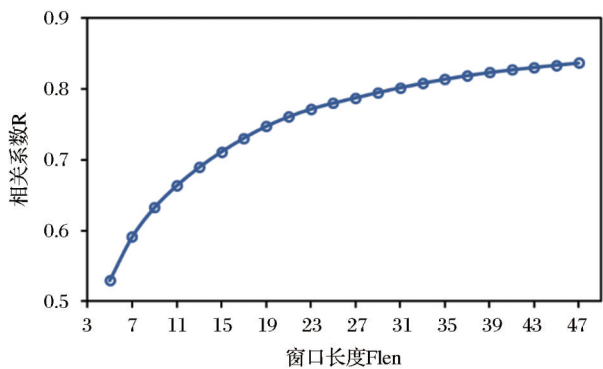


图 4 S-G 滤波中不同窗口长度下 COSMOS 反演得到的与站点实测的土壤水分相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between station-observed and COSMOS-estimated soil moisture under different S-G filtering time windows

(10)采用反推法计算 $N_0$ ,而 $N_0$ 率定的准确性也会影响土壤水分反演的精度。考虑到反演算法发展时间窗口内不同的土壤水分水平,基于上述S-G滤波处理后的快中子数,实验对比测试了4种标定与验证数据筛选方案来率定 $N_0$ 。这些方案分别从反演算法发展时段所用数据中(2018年10月30日至2019年3月19日)选用了不同时间段或比例的标定数据和验证数据,具体设置情况如表1所示。

表 1 针对 $N_0$ 率定的不同数据筛选方案  
Table 1 Different data screening schemes for  $N_0$  calibration

筛选方案	率定数据	验证数据
方案一	每隔一条数据记录选择一条	所用序列中剩余的数据
方案二	每三条数据记录中选择前两条	所用序列中剩余的数据
方案三	所用序列的前 1/2	所用序列的后 1/2
方案四	所用序列的前 2/3	所用序列的后 1/3

数据筛选方案的优选过程如下:

(1) 根据反推计算的 $N_0$ 序列情况,假设 $N_0$ 的取值范围为1 500~2 500。

(2) 对于每一种方案,首先根据每个 $N_0$ 计算出相应的土壤水分,结合实测深度加权土壤水分数据和每个 $N_0$ 估算的土壤水分计算二者之间的均方根误差 RMSE,选择最小 RMSE 对应的 $N_0$ 作为对应方案率定的 $N_0$ 。

(3) 将4种方案率定的 $N_0$ 用于各自的验证数据进行反演,并与实测深度加权土壤水分数据进行比较;选择二者最接近的方案作为 $N_0$ 标定的最终方案。

4种筛选标定方案对比结果如图6所示,可看出方案一、二 $R^2$ 明显高于方案三、四,且方案一、二的趋势线斜率更接近1。这是因为快中子数时间序列所表征的土壤水分具有较为明显的季节性变化,方案一和二在方案率定阶段可以确保覆盖整个算法发展时段的多数土壤水分状况,而方案三和四只能覆盖前期(或者后期)部分土壤水分状况,不一定适用于所有土壤水分水平。

据此本研究选用 $R^2$ 最大且观测和反演结果更接近1:1线的方案二标定的 $N_0=1984$ 应用于全时段的COSMOS土壤水分反演。

4.4 COSMOS土壤水分产品生成与验证

基于本研究发展的COSMOS土壤水分反演算法,对2018年10月30日至2019年3月19日整个算法发展时间窗口进行土壤水分反演。图7显示了站点实测(深度加权)和本研究COSMOS反演得到的土壤水分的时间变化,可以看到二者变化趋势整体

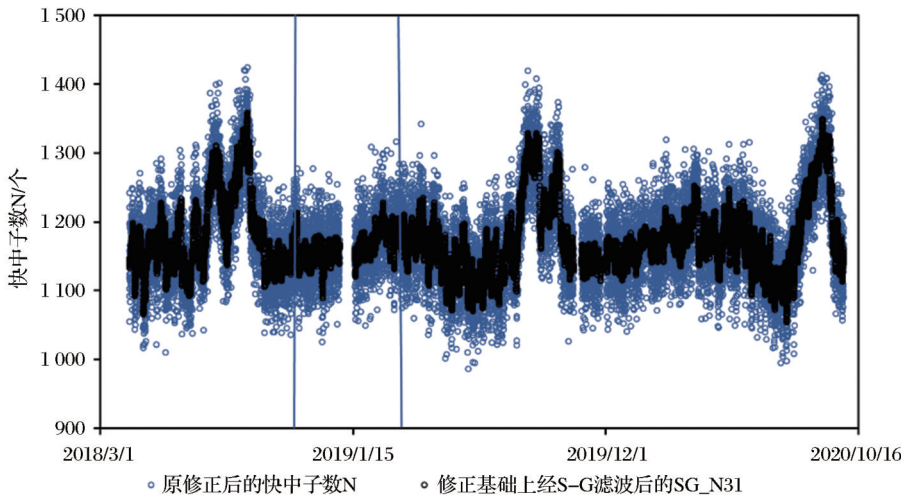


图 5 修正基础上经 S-G 滤波处理的快中子数和原修正后的快中子数时间序列

Fig.5 Time series of pressure and atmospheric water vapor corrected fast neutrons with and without S-G filtering



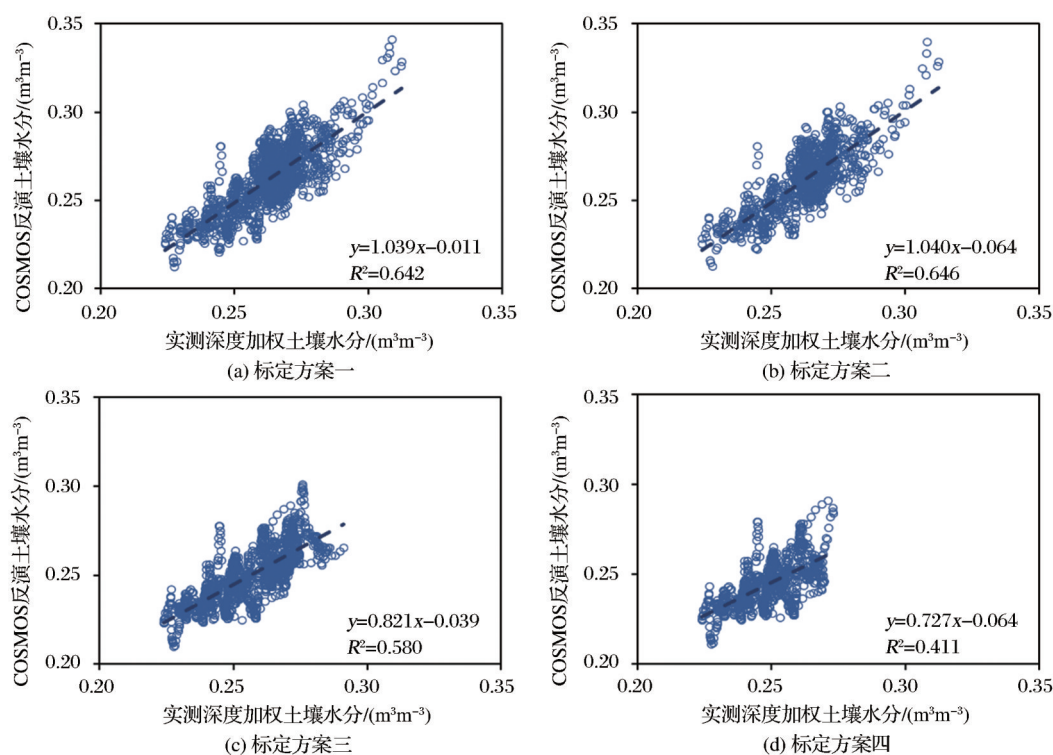


图6 四种标定方案得到的(验证部分)COSMOS与实测深度加权的土壤水分散点图

Fig.6 Scatter plots of observed and COSMOS-estimated soil moisture using four calibration schemes for the verification phase

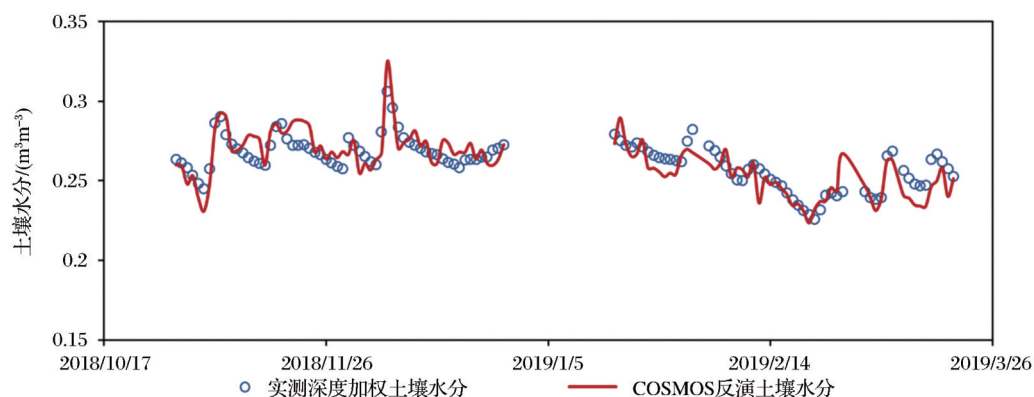


图7 算法发展时间窗口内站点实测和COSMOS反演得到的土壤水分时间序列

Fig.7 Time series of observed and COSMOS-estimated soil moisture for the algorithm development period

一致,反演得到的土壤水分序列能较好地反映区域的土壤含水量状况。

在此基础上,进一步反演得到了青木关 COSMOS 2018年4月6日至2020年9月27日有观测记录以来的区域全时段土壤水分序列,如图8所示。和COSMOS站点周边的土壤水分序列对比发现:①在算法发展时段(2018年10月30日~2019年3月19日),COSMOS反演土壤水分和S1~S5 5个站点现有数据的时间变化趋势整体上较为一致;②在整个COSMOS观测时段(2018年4月6日~2020年9月27日),COSMOS土壤水分和S5、S6、S7实测的

深度加权的土壤水分序列变化基本一致,且COSMOS土壤水分与探测源区内站点S5的实测深度加权水分接近;S6、S7站点观测时段内,该区域3~7月降水量大且持续时间较长,通过与站点降雨事件对比,可看出宇宙射线反演的土壤水分对降水响应与实测土壤水分较为一致,间接证明了该反演算法的科学性和适用性。总体来看,该区域土壤水分呈现出一定的季节性变化。春、秋、冬季(10月至次年7月)土壤水分较为稳定,整体波动不大;夏季土壤水分波动明显,7月中下旬至10月上旬该区域土壤水分起伏较大。结合现有降雨数据分析,出现这种现象的可能原因是7月中下旬至九月初降水明显减少,

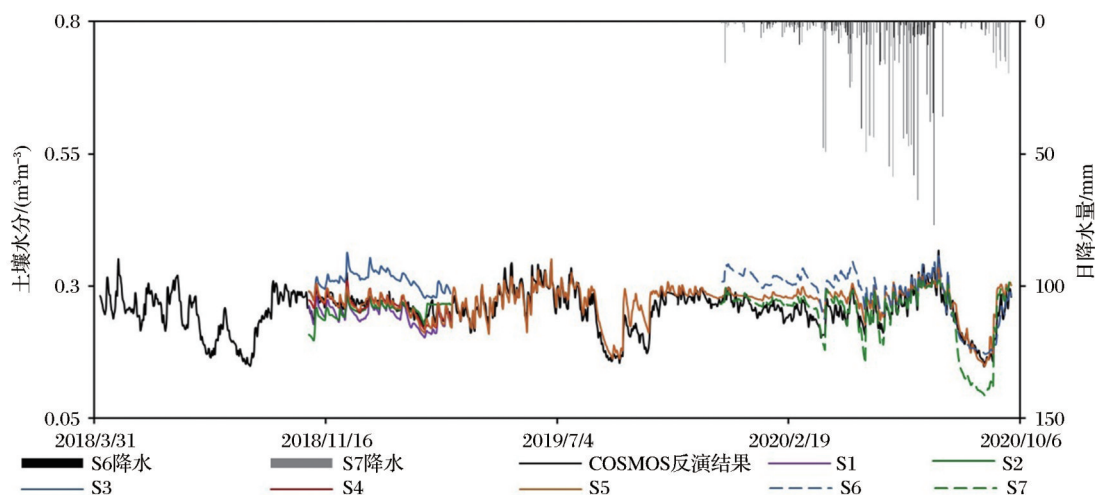


图8 整个COSMOS观测时段反演与站点实测深度加权的土壤水分以及降水时间序列对比

Fig.8 Comparison of COSMOS-estimated and station-observed soil moisture as well as station-observed precipitation time series for the whole measuring time window

雨水补给不足,且受太阳辐射、气温等因素影响,地表蒸散发作用较强,使得土壤水分含量减少;相反,随着9月降水增多,土壤水分含量呈现增加趋势。9月末至10月受降水影响呈现出类似增减变化。

## 5 结 语

实验基于重庆青木关槽谷区宇宙射线土壤水分观测系统(COSMOS)和包含多个土壤水分自动监测站点在内的实测多层土壤水分数据,发展了针对喀斯特槽谷区典型流域COSMOS观测的土壤水分反演算法。为减小反演不确定性,基于S-G滤波对COSMOS气压订正后的快中子数进行平滑处理,引入遥感反演的LAI产品考虑植被含水量影响,同时检验了算法率定和验证阶段不同的数据筛选方案。分析发现以LAI遥感产品表征的植被含水量在该区域的土壤水分反演中影响较小,而实验提出的COSMOS反演算法得到的区域土壤水分与实测结果较为一致,能较好地反映该区域局部土壤水分含量的变化,表明了该宇宙射线土壤水分反演算法在重庆青木关流域的适用性。在此基础上,进一步将该反演算法应用到更长时间尺度,基于得到的COSMOS土壤水分序列揭示了该区域的土壤水分的季节变化特征。该算法将为该区域的COSMOS土壤水分长期监测和水文气象分析及陆面模拟提供数据支持。

需要指出的是,实验仍存在部分局限性,有待进一步研究。首先,实验在COSMOS反演过程中针对植被因素考虑了植被冠层水含量的影响,而植被生物质氢源也会对COSMOS中子信号产生影响。一般短期监测中植被生物质含量可看作常量,

而长期监测中,在植被不同生长期,其体内变化的氢含量会影响COSMOS观测的波动<sup>[31]</sup>。此外,研究区内全年降水事件频率和降水量较大,期间植被冠层截留水分对 neutron 强度观测的影响可能无法依靠简单的水汽订正完全消除。与此同时,植被冠层空间分布(形态、位置等)具有不确定性,难以用等效假设来量化其影响<sup>[32]</sup>。其次,实验考虑植被含水量影响时将其等效为土壤含水量,但实际上二者对中子的影响作用应该是有所区别的<sup>[32]</sup>,该假设的合理性仍有待深入研究。最后,实验计算有效探测深度时假设不同深度层的土壤水分对 neutron 强度的吸收慢化作用等权重,忽略了垂直方向上中子信号对表层土壤水分灵敏度最高的规律<sup>[25]</sup>,进而可能导致一定程度的有效探测深度估算误差。另一方面,实验对COSMOS源区内土壤水分站点数据在水平方向上作等权重处理,而Schrön等<sup>[33]</sup>则指出COSMOS对其附近区域的土壤水分更为敏感,并且开展了依赖于气压、空气湿度、土壤湿度和植被高度的非线性垂直权重和水平权重研究。后续工作中可进一步积累植被和土壤水分观测等多源信息,进一步完善该区域的COSMOS反演算法,提高区域土壤水分反演精度。

## 参考文献(References):

- [1] Yang K, Qin J, Zhao L, *et al.* A multi-scale soil moisture and freeze-thaw monitoring network on The Third Pole[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94: 1907-1916. DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00203.1.
- [2] Zreda M, Desilets D, Ferre 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.
- [3] 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. [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.]
- [4] 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): 1136-1143. [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.]
- [5] Wang Qiuming, 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. [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.]
- [6] Pang Zhiguo, Lu Jingxuan, Lu Yizhu, *et al.* Multi-scale soil moisture product verification analysis based on ground monitoring and remote sensing[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 271-278. [庞治国, 路京选, 卢奕竹, 等. 基于遥感和地面测量的多尺度土壤水分产品验证分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(4): 271-278.]
- [7] Tan X Y, Zhang L H, He C S, *et al.* Applicability of cosmic-ray neutron sensor for measuring soil moisture at the agricultural-pastoral ecotone in northwest China [J]. Science China (Earth Sciences), 2020, 63(11): 1730-1744. DOI: 10.1007/s11430-020-9650-2.
- [8] Pang Z, Jia Y H, Peng X H, *et al.* Applicability of cosmic-ray neutron sensing for measuring soil water content to heterogeneous landscapes under subtropical hydroclimatic conditions [J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: 126068. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126068.
- [9] Wu Qiang, Xu Qianqian, Zhu Yuhan, *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. [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.]
- [10] Nguyuen 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. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.07.020.
- [11] Baroni G, Scheffele L M, Schrön M, *et al.* Uncertainty, sensitivity and improvements in soil moisture estimation with cosmic-ray neutron sensing[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 873-887. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.053.
- [12] Fersch B, Francke T, Heistermann M, *et al.* A dense network of cosmic-ray neutron sensors for soil moisture observation in a highly instrumented pre-Alpine headwater catchment in Germany [J]. Earth System Science Data, 2020, 12(3): 2289-2309. DOI: 10.5194/essd-12-2289-2020.
- [13] Mujumdar M, Goswami M M M, Morrison R, *et al.* A study of field-scale soil moisture variability using the COSMIC-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS) at IITM Pune site [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126102. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126102.
- [14] Patrignani A, Tyson E O, Montag B, *et al.* A Novel lithium foil cosmic-ray neutron detector for measuring field-scale soil moisture [J]. Frontiers in Water, 2021, 3: 67. DOI: 10.3389/frwa.2021.673185.
- [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. DOI: 10.5194/hess-16-4079-2012.
- [16] Baatz R, Bogena H R, Hendricks Franssen 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. DOI: 10.1002/2014WR016443.
- [17] Zhao Yuan. Research on small and medium scale soil moisture monitoring method based on Cosmic Ray Neutron Method [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019. [赵原. 基于宇宙射线中子法的中小尺度土壤水分监测方法研究[D]. 太原: 山西大学, 2019.]
- [18] Paloscia P, Pampaloni P. Microwave polarization index for monitoring vegetation growth [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(5): 617-621. DOI: 10.1109/36.7687.
- [19] Zhang Qi, Li Yueqing. Climatic variation of rainfall and rain day in southwest China for last 48 years [J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 372-383. [张琪, 李跃清. 近48年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 372-383.]
- [20] Liang Xuan. Characteristics and controlling factors of hydrochemical variations of soil water in Qingmuguan karst catchment [D]. Chongqing: Southwest University, 2013. [梁轩. 青木关岩溶流域土壤水化学变化特征及其控制因素[D]. 重庆: 西南大学, 2013.]
- [21] Chen Xuebin. The Simulation of hydrological process in Qingmuguan Karst Underground River, Chongqing, China [D]. Chongqing: Southwest University, 2014. [陈雪彬. 重庆青木关岩溶地下水水文过程模拟[D]. 重庆: 西南大学, 2014.]
- [22] Xi Rui, Jiang Yongjun, Wu Jinquan. The COPK model of karst groundwater vulnerability in Qingmuguan Underground River Basin, Chongqing [J]. Geological Review, 2015, 61(3): 579-586. [蕙瑞, 蒋勇军, 吴金权. 重庆市青木关地下河流域岩溶水脆弱性评价的COPK模型[J]. 地质论评, 2015, 61(3): 579-586.]
- [23] Zhan Zhaojun, Chen Feng, Yang Pingheng, *et al.* Comparison on the hydrogeochemical characteristics of typical karst groundwater system in southwest China, a case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing [J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3365-3374. [詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 等. 西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比: 以重庆市青木关、老龙洞为例[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3365-3374.]
- [24] 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. DOI: 10.1002/wrcr.20187.
- [25] 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.
- [26] 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: 21 - 42. DOI: 10.1016/S0012-821X (02) 01088-9.
- [27] 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. [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.]
- [28] 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 Hydrometeorol*, 2013, 14: 1659 - 1671. DOI:10.1175/JHM-D-12-0120.1.
- [29] Desilets D, Zreda M, Ferre 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] Lei Linping. Curve smooth denoising based on Savitzky-Golay algorithm [J]. *Computer and Information Technology*, 2014, 22(5): 30-31. [雷林平. 基于 Savitzky-Golay 算法的曲线平滑去噪[J]. *电脑与信息技术*, 2014, 22(5): 30-31.]
- [31] Cai Jingya. Measuring and verifying soil moisture from scale of pixel in the desert steppe base on cosmic-ray neutron method [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017. [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.]
- [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(168): 453-460. DOI: 10.5194/hess-17-453-2013.
- [33] 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. DOI:10.5194/hess-21-5009-2017.

## Retrieval of Cosmic-Ray-based Soil Moisture over a Typical Karst Watershed

Peng Shuyan, Zhao Long, Li Tingting, Han Xujun, Ma Mingguo,  
Yang Shuai, Yang Yuecheng

(Chongqing Jinpo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The cosmic-ray is a non-destructive method of measuring soil moisture at the 100-meter scale. Using multi-layer observations from a dense monitoring network, this study explores the retrieval of soil water content through fast neutron time series obtained from COsmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS) in a typical Karst watershed in Qingmuguan, Chongqing. Some specific treatments/investigations are conducted toward improving the overall retrieving accuracy, including ① using Savitzky-Golay filter to smooth the fast neutron time series; ② analyzing the role of vegetation water content, and ③ comparing different data screening schemes during the calibration and verification phrases. Results suggest that the vegetation water content has negligible impacts on the COSMOS retrieving in this specific area, and the calibration by considering longer and different soil moisture records delivers the best agreement with the ground truth. Finally, the calibrated algorithm was applied to the whole COSMOS measuring period to produce a complete soil moisture record, which is further indirectly verified with neighboring soil moisture and precipitation observations, and help reveal the seasonal soil water content variations. In general, the proposed COSMOS soil moisture retrieval algorithm shows robust applicability and is expected to support regional scale of long-term soil moisture monitoring and hydrometeorological studies in this region.

**Key words:** COSMOS; Soil moisture; Retrieval algorithm; Vegetation water content; Savitzky-Golay filter