

基于多时相 Sentinel-1 SAR 数据的喀斯特石漠化区地表土壤水分反演研究

陈全^{1,2,3}, 周忠发^{1,2,3}, 王玲玉^{1,2,3}, 但雨生^{1,2,3}, 汤云涛^{1,2,3}

- (1. 贵州师范大学地理与环境科学学院/喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001;
2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550001;
3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 土壤水分是地球表层水循环、能量循环和生物地球化学循环中的重要组成部分, 是研究喀斯特石漠化地区生态系统的参数。基于多时相的 Sentinel-1 SAR 数据与 Alpha 近似模型构建土壤水分观测方程组, 反演喀斯特石漠化地区地表土壤水分并对其时空变化特征及误差影响因素展开分析。研究发现观测周期内区域土壤水分总体变化趋势与降雨量变化趋势高度一致, 石漠化地区土壤水分高值与空间异质性程度明显高于非石漠化地区。精度验证结果显示土壤水分反演结果的均方根误差为 $0.059 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 平均误差为 $0.026 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 该方法在区域地表土壤水分反演中表现出一定的适用性, 分析认为地表土壤因周边的复杂生境条件产生的混合像元问题是导致反演误差的主要影响因素。研究可为利用短时间周期重复遥感观测方法获取复杂山区环境下的土壤水分提供参考, 为喀斯特石漠化地区生态系统修复和生态产业发展提供支撑。

关键词: 土壤水分; 合成孔径雷达; 多时相; 反演; 喀斯特石漠化

中图分类号: TP79; S152.7 **文献标识码:** A

Surface soil moisture retrieval using multi-temporal Sentinel-1 SAR data in karst rocky desertification area

CHEN Quan^{1,2,3}, ZHOU Zhong-Fa^{1,2,3}, WANG Ling-Yu^{1,2,3}, DAN Yu-Sheng^{1,2,3}, TANG Yun-Tao^{1,2,3}

- (1. School of Geography and Environmental Science/School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;
2. The State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China;
3. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: Soil moisture is the core component that links the earth's surface water cycle, energy cycle and biogeochemical cycle, and it is also the key parameter to study the ecosystem in karst rocky desertification area. The aim of this study was to retrieve the soil moisture with multi-temporal Sentinel-1 C-band SAR data and observation equations were constructed by using the Alpha approximation model over karst rocky desertification area. The spatial and temporal variation characteristics and the error influencing factors of the soil moisture retrieval results were analyzed. It is found that the overall change trend of soil moisture in the observation period is highly consistent with the trend of rainfall change. The maximum value of soil moisture and the degree of spatial heterogeneity in karst rocky desertification area is significantly higher than those in non-rocky desertification area. The results were validated

收稿日期: 2019-10-15, 修回日期: 2019-12-18

Received date: 2019-10-15, Revised date: 2019-12-18

基金项目: 国家自然科学基金地区项目(41661088); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726-57); 贵州省高层次创新型人才培养计划—“百”层次人才(黔科合平台人才[2016]5674)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41661088); Science and Technology Program of Guizhou Province, China(2017-5726-57); Program for Fostering High-level Innovative Talents of Guizhou Province, China(2016-5674)

作者简介(Biography): 陈全(1988-), 男, 河南信阳人, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究领域为: 喀斯特生态环境遥感, E-mail: cnqu123@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): Email: fa6897@163.com

using ground measurements of one acquisition date, with root mean squared error (RMSE) value of $0.059 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ and mean bias value of $0.026 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. The method of retrieval of soil moisture by Alpha approximate model is applicable to karst rocky desertification area, the mixed pixel problem caused by the surrounding complex habitat conditions of the surface soil is the main influencing factor of inversion error. These results can provide reference to obtaining soil moisture under mountain complex environment by multi-temporal observation method, and provide support for ecosystem restoration and ecological industry development in karst rocky desertification area.

Key words: soil moisture, synthetic aperture radar, multi-temporal, inversion, karst rocky desertification

PACS:07.57.Pt

引言

土壤水分是地球表层水循环、能量循环和生物地球化学循环中的重要组成部分,是进行水文、气候、生态以及陆面过程研究与模型化的关键输入参数^[1-2]。喀斯特石漠化地区土壤水分是推动喀斯特地貌发育与维持生态系统的关键因子,同时也是区域生态修复先锋植物与农作物生长的重要影响因子,针对区域土壤水分进行监测研究对于加强喀斯特石漠化山区生态系统修复和促进生态产业发展都具有重要意义^[3]。随着区域生态环境保护和农业产业发展对土壤水分监测的需求逐步向连续化、空间化以及常态化方向演变,传统的以结合地面站点为主的土壤水分点测量监测方法在相关应用领域内也逐渐被具有大范围尺度、连续监测特点的遥感反演方法所取代^[4]。

土壤水分遥感反演方法从数据源上区分主要包括光学遥感反演和微波遥感反演。光学遥感主要基于地表土壤反射特性,通过建立各类指数与土壤水分之间的关系,这些方法受气象因素影响较大,导致在多云多雨地区的应用受到较为严重的制约。微波遥感利用土壤水分和土壤的介电常数敏感的响应关系进行土壤表面水分监测和反演,输入参数相对光学遥感较为简单,同时还具有全天候、全天时的特征,相对光学遥感应用优势明显^[5]。在微波遥感方面,随着近年来合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)数据获取渠道的增多和空间分辨率的提高,在国内外的土壤水分监测研究中得到广泛应用,并基于后向散射系数与土壤水分介电常数、地表粗糙度、植被覆盖信息等主要参数间的响应关系,建立了一系列理论模型及经验、半经验模型并得到较为广泛的应用,例如小扰动模型(SPM)^[6]、积分方程模型(IEM)^[7]、Oh模型^[8]、Dubois模型^[9]和水云模型等^[10-12]。但基于SAR的土壤水分

反演由于受雷达传感器、地表参数与植被覆盖影响,土壤水分与后向散射系数之间还存在无法回避的不确定性^[13],需要依赖多种观测模式、多源遥感数据以及复杂的地面观测数据来减小遥感反演过程中的不确定性,在实际的研究和应用中制约因素较多。为此,近年来利用短时间周期内的重复观测数据联合反演以降低土壤水分反演不确定性的相关研究逐渐增多^[14],该方法通过短期内同一区域的多组独立观测数据来校正土壤粗糙度和植被覆盖的影响,同时降低了对遥感数据源与地面先验知识的要求。Wagner等^[15]提出了时间序列变化检测算法,并将该方法用于全球土壤水分的估算,该算法忽略了短时间观测期内的地表粗糙度和植被变化的影响,假定只有土壤水分的变化与后向散射系数的变化直接关联,反演得到的结果是土壤水分的相对值。在后续的相关研究中,Pathe c^[16], Wickel A J^[17]等将该方法应用于其他不同尺度地区的土壤水分估算研究中,表现出较好的适用性。Balenzano等^[18]基于变化检测法的假设进行了改进,运用两个时相雷达后向散射系数的比值通过Alpha近似模型(Alpha Approximation)构建观测方程组反演得到不同时期土壤水分的绝对值,在HH极化数据下反演精度可达 $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。He^[19], Zhang^[20], 陈婷婷^[21]等分别从土壤水分的上下界确定、多源数据协同以及入射角变化校正等方面对Alpha算法进行了扩展和改进,提升了该方法土壤水分反演的适用性与可靠性,Alpha近似模型应用在土壤水分反演中的合理性已得到有效验证。

中国西南喀斯特石漠化地区由于受特殊的地质地貌条件影响,地形起伏度大、土壤分布破碎且地表种植结构复杂,在该区域开展基于SAR的土壤水分监测并解决地表粗糙度与植被覆盖对后向散射系数影响问题较其他平原地区更为困难。而目

前针对喀斯特石漠化区域的相关研究非常有限,采用的模型方法^[22-23]也未较好回应区域土壤水分反演过程中地表粗糙度与植被覆盖造成的不确定性影响。基于短时间周期重复独立观测数据的Alpha近似模型方法可以减小对地面同步观测数据的依赖,并减小和缓解喀斯特石漠化地区土壤水分反演的病态问题,并且该方法在复杂环境条件下的喀斯特石漠化地区土壤水分监测需求的适用程度也有待进一步研究验证。为此,本文拟采用欧洲太空局(European Space Agency, ESA)“哨兵系列”的Sentinel-1 SAR数据作为连续观测数据源,辅以Sentinel-2等光学数据与地面同步观测数据,基于Alpha近似模型利用4个时相雷达后向散射系数的比值建立观测方程,减小地表粗糙度与植被覆盖因素影响的的同时反演喀斯特石漠化地区地表土壤水分,并针对观测周期内土壤水分反演结果的时空变化特征及误差影响因素展开分析讨论。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据集

1.1.1 研究区概况

关岭—贞丰花江石漠化综合治理示范区(105°36'30"~105°46'30"E、25°39'13"~25°41'00"N)位于贵州省西南部关岭县与贞丰县交界处的北盘江峡谷两侧(图1)。研究区总面积51.62 km²,从流域尺度地貌的组合类型上可将研究区分为:箱型峡谷区、

丘峰台地区、侵蚀台地区、峰丛洼地区和溶蚀、侵蚀陡坡区,区内喀斯特面积占总面积的87.92%,非喀斯特区域主要集中于北盘江北岸侵蚀台地区域。研究区属中亚热带低热河谷气候,年均温18.4℃,年均降水量1100 mm,海拔650~1450 m,坡度25°以上区域占到总面积40%,地形起伏破碎,石漠化程度高,生态环境脆弱,是贵州高原喀斯特峡谷石漠化地区的典型代表。区内土壤以石灰土为主,土层浅薄且分布连续性差,土壤结构不良、质地黏重、缺乏团粒结构、保水耐旱性较差。

1.1.2 数据集

采用空间分辨率为1.2 m,获取时间为2018年4月份并覆盖研究区域的Google影像作为研究底图。多光谱图像选取2018年6月8日、7月18日获得的两期Sentinel-2A L1C数据(幅宽290 km,13波段,最高空间分辨率10m)。SAR时间序列数据构建采用获取时间分别为2018年6月9日(T1)、6月21日(T2)、7月3日(T3)、7月15日(T4)的四期Sentinel-1A干涉宽幅模式(Interferometric Wide, IW)下的GRD双极化数据(幅宽250 km,C波段,VH极化、VV极化,空间分辨率5 m×20 m)。SAR数据具体信息见表1。

为验证土壤水分反演精度,研究于2018年7月13日至7月15日利用土壤水分仪(TDR300,3.8 cm探针)开展样地地表土壤水分采集工作,共布置47

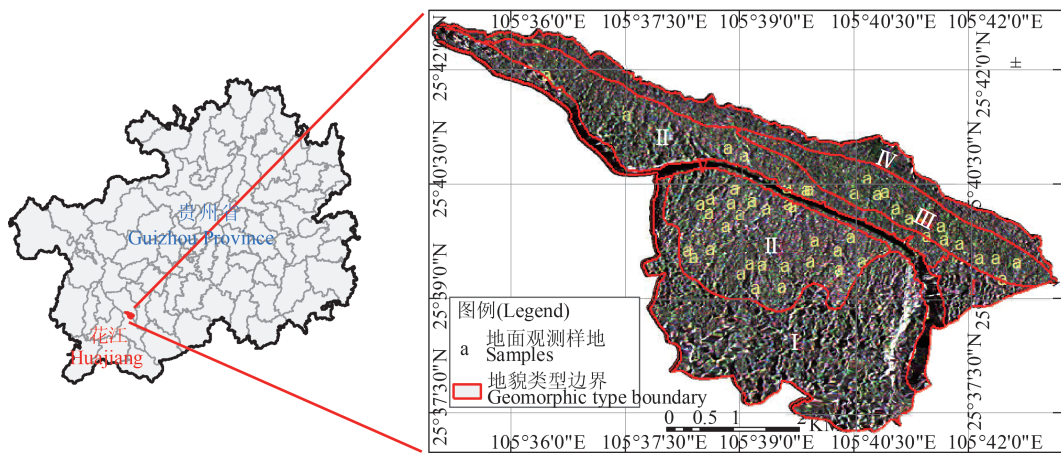


图1 研究区域与地面观测样地分布图。注:左图为贵州省示意图;右图为研究区SAR数据(R: 2018/06/09VV极化,G:2018/06/21 VV极化,B:2018/07/03 VV极化)、地貌类型(I:峰丛洼地,II:丘峰台地,III:侵蚀台地,IV:侵蚀陡坡,V:箱型峡谷)和地面观测样地分布

Fig. 1 Study area and sampling spots. Note: The left-hand section provides a sketch map of Guizhou province. The right-hand section provides an overview of the SAR data (R: 2018/06/09VV polarization, G: 2018/06/21 VV polarization, B: 2018/07/03 VV polarization) and geomorphic type (I: Peak cluster depression, II: Mound-peak platform, III: Erosion platform, IV: Erosion steep slope, V: Box canyon) and sample spots of the field survey

表1 研究区SAR数据信息表

Table 1 List of Sentinel-1 SAR images

序号 ID	成像时间 Acquisition date	平均入射角 Mean incidence angle/ (°)	成像模式 Imaging model	数据类型 Data type	极化方式 Polarization
T1	2018/06/09/22:57	38.6	IW	Level1 GRD	VH/VV
T2	2018/06/21/22:57	38.6	IW	Level1 GRD	VH/VV
T3	2018/07/03/22:57	38.6	IW	Level1 GRD	VH/VV
T4	2018/07/15/22:57	38.6	IW	Level1 GRD	VH/VV

个土壤环境较为均匀的监测样地。在样地范围内布置3个5 m×5 m的样方,样方呈对角线分布,每个样方点测5次,取测量值的均值作为该监测样地的土壤水分值。同时记录了样地的地理位置(在WGS 84地理坐标系统中,使用了定位精度为3 m的手持GPS定位仪)、植被覆盖状况、土壤温度和土壤类型等环境特征。调查样地点分布如图1所示。研究区气象、土壤质地参数与石漠化相关数据来自国家喀斯特石漠化防治与工程技术研究中心。

1.2 数据处理

利用ESA发布的Sen2cor对2018年6月8日、7月18日获得的两期Sentinel-2A L1C数据进行辐射定标、大气校正等预处理,随后运用ENVI5.3进行波段合成和裁剪得到覆盖研究区的多光谱数据。采用SNAP中的S1-Ttoolbox对多时相Sentinel-1A GRD影像进行预处理:(1)对Sentinel-1A GRD产品进行热噪声去除和辐射校正,获得VH波段和VV波段的强度图像。(2)采用3×3窗口的Refine Lee滤波器对灰度图像进行滤波,以降低散斑噪声。(3)利用空间分辨率为30 m STRM DEM对强度图像进行地形校正,最后经裁剪得到覆盖研究区的多时相SAR图像。将覆盖研究区域的Google卫星影像(空间分辨率为1.2 m,获取时间为2018年4月,采用Google Tile Map Service制作)作为参考底图,记录地面观测数据,保证样点落位精度。同时,在ENVI 5.3软件中,采用人工选取地面控制点(均匀分布于图像中)的多项式模型分别对经预处理后的SAR数据和光学数据进行几何校正,控制配准误差在两者的空间分辨率下均小于0.5个像元。

1.3 研究方法

基于多时相、多源遥感数据和Alpha近似模型研究估测喀斯特石漠化区地表土壤水分,研究方法包括以下三个主要步骤:(1)基于多光谱数据的喀斯特石漠化区地表土壤提取;(2)基于多时相SAR

数据和Alpha近似模型求解土壤介电常数;(3)基于Dobson土壤介电模型求解土壤体积含水量。

1.3.1 喀斯特石漠化区地表土壤分布范围提取

研究区内的地表土壤具有分布破碎、在耕作期外的短时间周期内整体状况变化幅度小的特点,为更好的贴合变化检测模型反演土壤水分对于土壤粗糙度与植被覆盖的假设前提,研究基于多时相光学遥感数据提取区域内受植被、地形和人为活动等因素影响较小且分布相对较为连续的土壤斑块。首先,基于对研究区多年的监测样本积累并辅助Google卫星影像,利用ENVI5.3对Sentinel-2A数据进行监督分类,解译结果经专家检查并校正属性,完成研究区土地利用状况分布图;其次采用波段运算工具,提取计算两期Sentinel-2A数据的植被覆盖度并利用变化检测工具提取植被覆盖度小于10%且观测期内变化幅度小于5%的区域;将以上二者叠加分析,提取耕地、未利用地、裸岩地等地类中植被覆盖未发生明显变化、无明显人为活动干扰的土壤斑块。但将土壤斑块与区域地貌类型、坡度图进行叠加分析后发现,土壤斑块集中于地形较为平缓的丘峰台地(Ⅱ)和侵蚀台地(Ⅲ),其他地貌类型只有峰丛洼地(Ⅰ)有零星分布,为减小地形坡度带来的不确定性,选择采用丘峰台地(Ⅱ)和侵蚀台地(Ⅲ)的土壤斑块作为重点分析区域,并将其测周期内土壤粗糙度和植被变化视为不显著。

1.3.2 基于Alpha近似模型求解土壤介电常数

土壤介电常数反演是进行地表土壤水分遥感估测的关键。Alpha近似模型的构建基于经典微波散射理论SPM模型,并假设在观测周期内地表土壤粗糙度与植被覆盖状况不变,且将其对于雷达后向散射系数的影响视为是乘性的,观测周期内地表土壤雷达后向散射系数的变化可以直接反应土壤介电常数的变化。利用地表土壤不同时相雷达后向散射系数的比值构建Alpha近似模型^[18]:

$$\frac{\sigma_{PP}^{T_2}}{\sigma_{PP}^{T_1}} \approx \left| \frac{\alpha_{PP}^{T_2}(\theta, \varepsilon_r)}{\alpha_{PP}^{T_1}(\theta, \varepsilon_r)} \right|^2, \quad (1)$$

式中 σ_{PP} 表示 PP 极化方式下的后向散射系数; θ 为入射角度; ε_r 为土壤介电常数; T_1 和 T_2 分别表示两期雷达数据获取的时刻; α_{PP} 为极化幅度; PP 为雷达数据的极化方式。

基于 T_1 和 T_2 的 SAR 数据, 根据上式可得到观测方程:

$$\left| \alpha_{PP}^{T_2}(\theta, \varepsilon_r) \right| - \sqrt{\frac{\sigma_{PP}^{T_2}}{\sigma_{PP}^{T_1}}} \times \left| \alpha_{PP}^{T_1}(\theta, \varepsilon_r) \right| = 0, \quad (2)$$

对于 N 期连续的观测数据 ($T_1, T_2, T_3, \dots, T_N$), 可以参照式(2)构建 $N-1$ 个有效观测方程, 对方程组进行变形可得到公式(3):

$$\begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{\frac{\sigma_{PP}^{T_1}}{\sigma_{PP}^{T_2}}} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\sqrt{\frac{\sigma_{PP}^{T_2}}{\sigma_{PP}^{T_3}}} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -\sqrt{\frac{\sigma_{PP}^{T_{N-2}}}{\sigma_{PP}^{T_{N-1}}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -\sqrt{\frac{\sigma_{PP}^{T_{N-1}}}{\sigma_{PP}^{T_N}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left| \alpha_{PP}^{T_1}(\theta, \varepsilon_r) \right| \\ \left| \alpha_{PP}^{T_2}(\theta, \varepsilon_r) \right| \\ \dots \\ \left| \alpha_{PP}^{T_{N-1}}(\theta, \varepsilon_r) \right| \\ \left| \alpha_{PP}^{T_N}(\theta, \varepsilon_r) \right| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

当磁导率取值为 1 时, HH 与 VV 极化方式下的 α_{PP} (极化幅度) 可简化的表达为:

$$\left| \alpha_{HH}(\theta, \varepsilon_r) \right| = \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta}} \right|, \quad (4)$$

$$\left| \alpha_{VV}(\theta, \varepsilon_r) \right| = \left| \frac{(\varepsilon_r - 1) [\sin^2\theta - \varepsilon_r(1 + \sin^2\theta)]}{(\varepsilon_r \cdot \cos\theta + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta})^2} \right|, \quad (5)$$

基于公式(3), 利用经 2.3.1 中得到的土壤斑块边界裁剪后的四期 Sentinel-1A VV 极化数据构建欠定观测方程组。该欠定方程组理论上存在无数个解,

首先需要根据雷达入射角度和实际地面调查积累的土壤水分范围对 α_{PP} 取值边界进行限定。基于研究区雷达入射角度和土壤水分范围, 对研究区 α_{vv} 取值约束条件表达如下:

$$\alpha_{MIN}(\theta, \varepsilon) \leq \alpha_{VV}(\theta, \varepsilon) \leq \alpha_{MAX}(\theta, \varepsilon), \quad (6)$$

公式(6)中入射角 θ 的取值范围为 $[30.935, 46.214]$; 土壤介电常数 ε 的取值范围为 $[3.535, 72.493]$; $\alpha_{min}(\theta, \varepsilon)$ 和 $\alpha_{max}(\theta, \varepsilon)$ 分别表示极化幅度 $\alpha_{VV}(\theta, \varepsilon)$ 在给定入射角 θ 和土壤介电常数 ε 范围条件下的最小值和最大值。其次利用 MATLAB2018 采用边界约束最小二乘法对观测方程组进行求解, 在求解得到极化幅度 α_{vv} 后, 根据公式(5)反算土壤介电常数 ε_r 。

2.3.3 基于 Dobson 土壤介电模型求解土壤体积含水量

在反演得到土壤介电常数之后, 还需将其转换为土壤体积含水量。研究采用目前应用广泛的 Dobson 半经验介电模型^[24]求解土壤体积含水 M_v , 该模型通过雷达入射波频率、土壤体积含水量、土壤质地、土壤温度来构建与土壤介电常数的关系。土壤介电常数表达式为:

$$\varepsilon_m^\alpha = V_s \varepsilon_s^\alpha + V_a \varepsilon_a^\alpha + V_{fw} \varepsilon_{fw}^\alpha + V_{bw} \varepsilon_{bw}^\alpha, \quad (7)$$

其中, $\varepsilon_s, \varepsilon_a, \varepsilon_{fw}, \varepsilon_{bw}$ 分别为固体土壤、空气、自由水和结合水的介电常数, V_s, V_a, V_{fw}, V_{bw} 分别为固体土壤、空气、自由水和结合水所占的体积比, α 为松弛参数, 对所有土壤类型的最优值为 0.65。将自由水与结合水合并设为土壤含水量 m_v , 且将空气介电常数近似视为 1, 则公式(7)可化简为:

$$\varepsilon_m^\alpha = 1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\varepsilon_s^\alpha - 1) + m_v^\beta \varepsilon_{fw}^\alpha - m_v, \quad (8)$$

其中 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ 是固体土壤介质平均密度; ρ_b 其表示土壤容重; β 作为可调参数与土壤质地参数有关, 可通过土壤中砂土和黏土的含量比例 S 和 C 计算。基于国家喀斯特石漠化防治与工程技术研究中心在研究区积累的 5cm 深度土壤监测数据集, 选择相同地貌类型和土壤类型的监测点数据取其土壤质地参数均值, 土壤容重 ρ_b 取 1.16 g/cm^3 , 砂土含量比例 S 取 4.76%, 黏土含量比例 C 取 30.63%。最后再次利用 MATLAB2018 将 2.3.2 中得到的土壤介电常数代入公式(8)中, 求解得到研究区地表土壤体积含水 M_v 。

2 结果与讨论

2.1 土壤体积含水量反演结果

2.1.1 土壤体积含水量反演结果数值特征

利用互相相隔 12 d 的时间序列 Sentinel-1A 数据构建土壤水分反演的观测方程,基于 Alpha 近似模型与土壤介电模型,得到的 4 个时期土壤体积含水量反演结果(表 2)。T1 时刻(6月 9 日)由于较长时间无有效降水,土壤较为干燥,土壤体积含水量反演结果的最大值与平均值都处于四个时期的最低水平;T2 时刻(6月 21 日)土壤体积含水量表现出强烈的上升趋势,土壤体积含水量最大值与平均值均达到观测周期的峰值,该峰值与 6 月 20 日~21 日累计降雨量约为 125mm 的强降雨过程高度重合;T3 时刻(7月 3 日)前一周无有效降水,土壤体积含水量整体回落,直至 7 月 8 日~11 日持续的降雨过程出现,T4 时刻(7月 15 日)土壤体积含水量又随之整体回升,表明区域内的土壤水分在观测周期内的变化与降水条件密切相关。另外对比分析不同时刻土壤体积含水量反演结果方差(Var)与标准差(Stdev)的变化特征,发现随着土壤水分含量的升高,反演结果的数值离散分布程度也在升高,且表现出的变化幅度较其他地区的观测结果^[19]也更为剧烈。

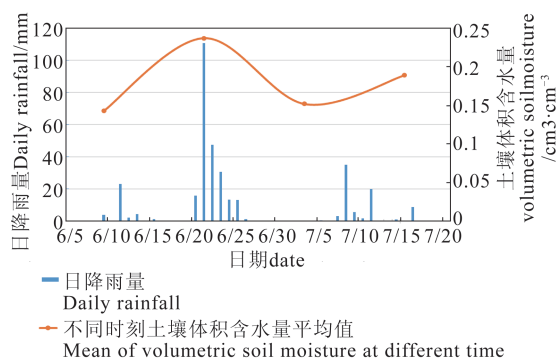


图2 不同时期土壤体积含水率反演结果统计图

Fig. 2 Statistics maps of soil moisture for different acquisition dates

表2 土壤体积含水量反演结果统计

Table 2 Statistics of soil moisture for different acquisition dates

日期 Date	含水量最小值 Min soil moisture / (cm ³ ·cm ⁻³)	含水量最大值 Max soil moisture/ (cm ³ ·cm ⁻³)	含水量均值 Mean soil moisture / (cm ³ ·cm ⁻³)	方差 Var	标准差 Stdev
T1	0.024	0.309	0.143	0.004	0.065
T2	0.051	0.638	0.237	0.014	0.116
T3	0.035	0.361	0.152	0.006	0.076
T4	0.039	0.451	0.189	0.008	0.091

2.1.2 土壤体积含水量反演结果空间特征

为了更直观地反映研究区土壤体积含水量反演结果的空间分布特征,针对 4 个 SAR 数据获取时刻的研究区土壤体积含水量反演结果进行对比分析(图 3)。T1 时刻土壤较为干燥,研究区土壤体积含水量整体偏低且空间分布较为均匀,无明显的空间异质性。T2 时刻处于连续且强烈的降雨过程中,T2 时刻土壤体积含水量较 T1 时刻呈现整体的快速上升趋势,但石漠化区与非石漠化区土壤含水量上升表现出的空间特征并不相同,相较于非石漠化区土壤含水量快速上升的斑块较为连续,且上升幅度也较为一致,石漠化区土壤含水量的上升幅度差异明显,导致图像整体斑块较为破碎,表现出很强的空间异质性,与 3.1.1 中统计特征的反映出的问题一致。研究认为该现象与区域地表土壤周围的小生境条件高度相关,非石漠化地土壤分布与周边生境条件较石漠化地区更为连续,而石漠化区土壤分布连续性差,周边生境因岩石不同程度的出露也更为复杂,导致局部地块的土壤水分变化产生明显的空间差异性。T3 时刻至 T4 时刻与 T1 时刻至 T2 时刻相似,土壤含水量随着降雨过程同样经历回落到上升的过程,且表现出的空间变化特征也存在较高的一致性。

2.2 土壤体积含水量反演精度验证与误差分析

2.2.1 土壤体积含水量反演精度验证

研究于 2018 年 7 月 13 日至 7 月 15 日开展地面数据采集工作,且工作期间研究区气象条件较为一致,因而可将该 47 个地面样地观测数据视为与 T4 时刻 Sentinel-1 SAR 数据获取基本同步,并基于观测数据对 T4 时刻的土壤水分反演结果进行了验证。图 4 给出了全部 47 个地面样点观测数据与 T4 时刻土壤水分反演值的散点分布图,最大误差为 0.159 cm³/cm³,平均误差为 0.026 cm³/cm³,均方根误差 RMSE 为 0.059 cm³/cm³,R² 为 0.789。验证结果表明 T4 时刻土壤水分反演结果与地面土壤水分观测数

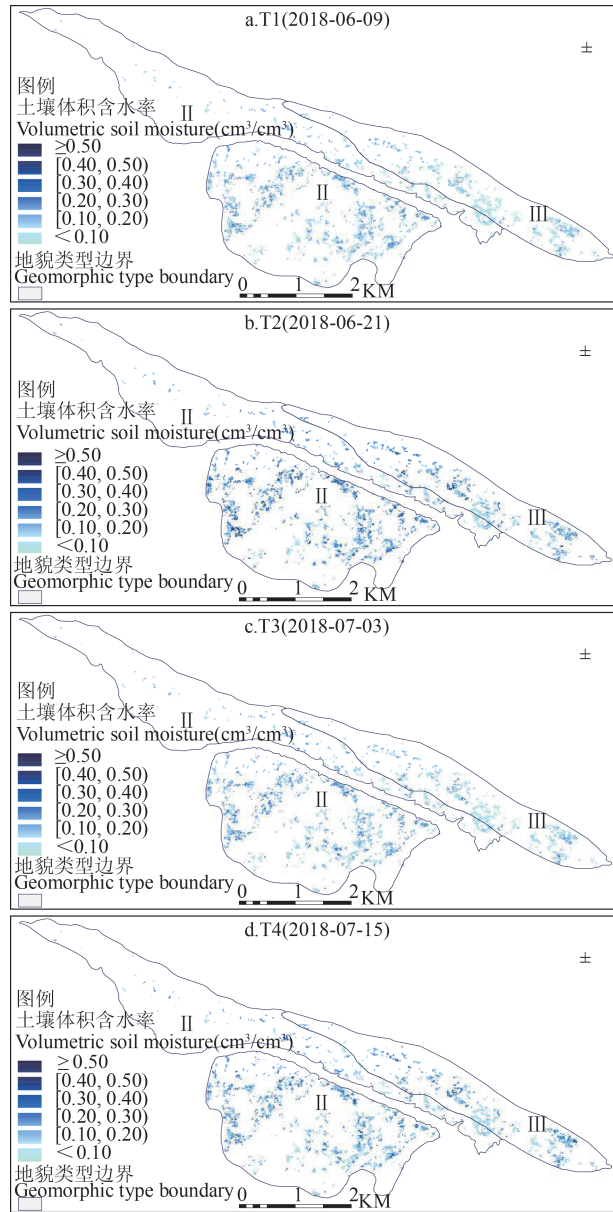


图3 不同时期土壤体积含水率反演结果图
Fig.3 Soil moisture maps for different acquisition dates

据具有较好的相关关系,且回归直线较为靠近1:1线,利用多时相Sentinel-1 SAR数据驱动的Alpha近似模型反演方法在喀斯特石漠化区土壤水分反演中表现出一定的适用性。但值得注意的是有5个样点的土壤水分反演结果绝对误差大于 $0.10\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,且反演误差随着土壤水分实测值的升高有逐步增大的趋势。

2.2.2 土壤体积含水量反演误差分析

为了更好地分析喀斯特石漠化地区地表土壤水分反演的误差来源,采用2018年7月13日-15日期间的47个地面样点观测数据与T4时刻的土壤水分反演结果进行对比分析(见图5)。在所有47个土

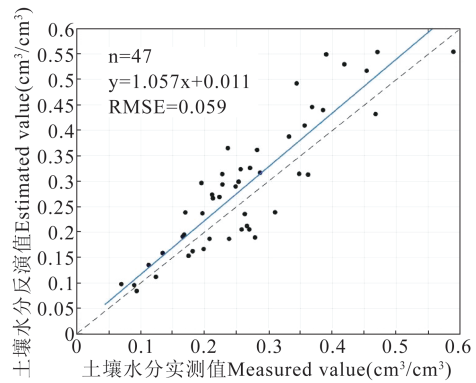


图4 土壤水分实测值与T4时刻土壤水分估算值对比
Fig. 4 Comparison between of measured and estimated soil moisture at time T4

壤体积含水量地面观测样点中,30个样点的反演结果数值较观测值偏高,占到所有观测样点的64%。土壤体积含水量观测值在 $0\sim 0.10\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 区间内平均反演误差最小为 $0.018\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,在 $0.10\sim 0.20\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的观测区间范围内的误差呈V字型上升趋势,平均反演误差为 $0.021\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,在 $0.20\sim 0.30\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 观测区间范围内误差变化较为随机,但平均反演误差同为 $0.021\text{ cm}^3/\text{cm}^3$,在 $0.30\sim 0.58\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 观测区间范围内误差存在明显上升趋势,平均反演误差翻倍并达到最大值为 $0.042\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。结合地面观测记录对导致反演误差升高的现象进行分析表明,较为纯净的裸土像元样点土壤含水量数值大多位于 $0\sim 0.30\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的观测区间且误差低于区间平均误差,而土壤水分反演误差大于 $0.10\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的5个观测样地内存在零星的植被和裸岩,其中出现误差最大值的土壤样地与周边环境边界模糊,研究认为石漠化区地表土壤由于周边环境影响造成遥感影像存在的混合像元问题是影响区域土壤水分反演误差的主要因素。

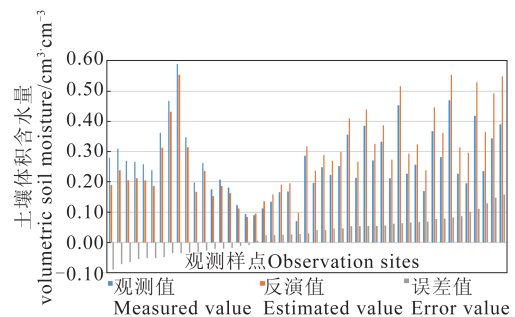


图5 47个实测样地的土壤水分反演值、观测值与误差值数据分布图
Fig. 5 Data distribution maps of soil moisture measured, estimated values and error values in 47 measured plots

2.3 讨论

研究设想是综合利用 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 的 SAR 数据,构建具有高时间分辨率(6d)、不同观测角度的时间序列数据,以更好地抑制植被覆盖与地表粗糙度对土壤水分反演的不确定影响。但由于研究区域 Sentinel-1B 数据缺失,只有采用四期 Sentinel-1A SAR 数据来构建观测方程,由于土壤水分进行反演的观测周期正处于夏季植被生长期,虽然提取了观测期内植被覆盖度小于 10% 且观测期内变化幅度小于 5% 的地表土壤区域来尽量减小植被生长带来的影响,但零星植被覆盖的增长可能会对土壤水分反演精度造成一定影响。高时间分辨率观测数据预计可以较好缓解和改善当前研究面临的不确定性,研究将在观测数据源方面重点优化。另外本文对观测期内土壤环境的监测还存在不足,土壤质地参数来源于国家石漠化防治工程技术研究中心的历史监测样地数据,其对反演结果的影响都还存在一定的不确定性,在后续的研究中还需加强地面观测和实验。

在喀斯特石漠化区复杂特殊的环境条件下,地表土壤空间分布破碎、岩石不同程度裸露以及与周边环境边界模糊的现象较为普遍。虽然在地面观测的样地选择与监测过程中尽量选择较为均质的裸露土壤,由于受到 Sentinel-1A SAR 数据的空间分辨率(5 m×20 m)的限制,以像元为单元的反演结果受混合像元的影响无法避免,直接导致 5 个监测样地的土壤水分反演结果绝对误差大于 0.10 cm³/cm³ 以及反演误差最大值(0.159 cm³/cm³)的出现。喀斯特石漠化地区的混合像元问题是以像元为单元的遥感反演方法的瓶颈,从将区域土壤地块作为对象的角度出发可能是解决目前该瓶颈问题较为可行的方法之一。后续研究将结合亚米级光学数据支持下完成的地块级土壤制图,根据不同植被、岩石出露状况对土壤地块进行分级分类,深入分析不同地块雷达后向散射特征和土壤含水特征,完善反演模型和修正算法,估算地块级的土壤水分变化,更好的支持喀斯特石漠化地区生态修复工程实施和生态产业发展。

3 结论

基于短时间周期的多时相 Sentinel-1A SAR 观测数据,辅以 Sentinel-2 等光学数据与地面同步观测数据,运用 Alpha 近似模型开展喀斯特石漠化地区地表土壤水分反演研究,验证了该方法在喀斯特

石漠化地区的适用性,并针对区域土壤水分反演结果的时空变化特征及误差影响因素进行分析。研究结果表明:

(1)利用 Alpha 近似模型得到了研究区 4 个时刻的地表土壤水分反演结果,观测周期内区域土壤水分总体变化趋势与降雨量变化趋势高度一致。石漠化地区地表土壤水分反演结果在空间分布上的异质程度明显高于非石漠化地区,且与区域地表土壤周围的小生境条件复杂程度表现出较为明显关联。

(2)采用 47 个地面观测数据对 T4 时刻的反演结果进行了精度验证,结果显示平均误差为 0.026 cm³/cm³, RMSE 为 0.059 cm³/cm³, R² 为 0.789。但随着土壤实际含水量的升高,由于受石漠化地区复杂生境条件产生的混合像元问题影响,Alpha 近似模型反演结果表现出一定的不确定性。

(3)针对在喀斯特石漠化地区的土壤反演中还存在时序监测数据不足、混合像元对反演结果影响不明确等问题,后续研究将在数据源与实验方法上进行改进,选择具有更高时空分辨率的 SAR 数据构建观测序列,在研究方法与模型改进上更全面的考虑植被覆盖和地表粗糙度的影响和修正问题,以期获得可以更为精细的土壤水分监测结果,支撑喀斯特石漠化地区生态修复和生态产业的发展。

References

- [1] GAO Feng, WANG Jie-Min, SUN Cheng-Quan, et al. Advances in Study on Microwave Remote Sensing of Soil Moisture [J]. *Remote Sensing Technology and Application*. (高峰, 王介民, 孙成权, 等. 微波遥感土壤湿度研究进展. *遥感技术与应用*), 2001, 16(2): 97-102.
- [2] Legates D R, Mahmood R, Levina D F, et al. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography [J]. *Progress in Physical Geography*, 2010, 35(1): 65-86.
- [3] CHEN Hong-Song, WANG Ke-Lin. Soil Water Research in Karst Mountain Areas of Southwest China [J]. *Research of Agricultural Modernization*. (陈洪松, 王克林. 西南喀斯特山区土壤水分研究. *农业现代化研究*), 2008, 29(6): 734-738.
- [4] Yu Fan, Zhao Ying-Shi. A new semi-empirical model for soil moisture content retrieval by ASAR and TM data in vegetation-covered areas [J]. *China Earth: earth science*. (余凡, 赵英时. ASAR 和 TM 数据协同反演植被覆盖地表土壤水分的新方法. *中国科学:地球科学*), 2011, 41(4): 532-540.
- [5] Tian Guo-Liang. Remote Sensing Monitoring Method of Soil Moisture [J]. *Remote Sensing of Environmental*. (田国良. 土壤水分的遥感监测方法. *环境遥感*), 1991, 6(2): 89-98.
- [6] Rice S O. Reflection of electromagnetic waves from slightly

- rough surfaces [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 1951, **4**(2-3): 351 - 378.
- [7] Bindlish R, Barros A P. Multi frequency soil moisture inversion from SAR measurements with the use of IEM [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **71**(1): 67-88
- [8] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surface [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(2): 370-381.
- [9] Dubois P C, Van Zyl J, Engman E T. Measuring soil moisture with imaging radars [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**(4): 915-926.
- [10] Attema E.P.W, Ulaby F T. Vegetation modeled as water cloud [J]. *Radio Science*, 1978, **13**(2): 357-364.
- [11] YANG Gui-Jun, YUE Ji-Bo, LI Chang-Chun, *et al.* Estimation of soil moisture in farmland using improved water cloud model and Radarsat-2 data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. (杨贵军, 岳继博, 李长春, 等. 基于改进水云模型和 Radarsat-2 数据的农田土壤含水率估算. *农业工程学报*), 2016, **32**(22): 146-153.
- [12] ZHAO Xin, HUANG Ni, SONG Xian-Feng, *et al.* A new method for soil moisture inversion in vegetation-covered area based on Radarsat 2 and Landsat 8 [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵昕, 黄妮, 宋现锋, 等. 基于 Radarsat 2 与 Landsat 8 协同反演植被覆盖地表土壤水分的一种新方法. *红外与毫米波学报*), 2016, **35**(5): 609-616.
- [13] Li L, Wang Di, Wang Peng-Xin, *et al.* Progress on monitoring soil moisture using SAR data [J]. *Resources Science*. (李俐, 王荻, 王鹏新, 等. 合成孔径雷达土壤水分反演研究进展. *资源科学*), 2015, **37**(1): 1929-1940.
- [14] Chen Shu-Lin, Liu Yuan-Bo, Wen Zuo-Min. Satellite retrieval of soil moisture: An overview [J]. *Advances in Earth Science*. (陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述. *地球科学进展*), 2012, **27**(11): 1192-1203.
- [15] Wagner W, Lemoine G, Rott H. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **70**(2): 191-207.
- [16] Pathe C, Wagner W, Sabel D, *et al.* Using ENVISAT ASAR global mode data for surface soil moisture retrieval over Oklahoma, USA [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(3): 468-480.
- [17] Wickel A J, Jackson T J, Wood E F. Multi-temporal monitoring of soil moisture with RADARSAT SAR during the 1997 Southern Great Plains hydrology experiment [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(8): 1571-1583.
- [18] Balenzano A, Mattia F, Satalino G, *et al.* Dense temporal series of C- and L-band SAR data for soil moisture retrieval over agricultural crops [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, **4**(2): 439-450.
- [19] He L, Qin Q M, Panciera R, *et al.* An extension of the Alpha approximation method for soil moisture estimation using Time-Series SAR Data over bare soil surface [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, **14**(8): 1328-1332.
- [20] Zhang X, Tang X M, Gao X M, *et al.* Multitemporal soil moisture retrieval over bare agricultural areas by means of Alpha model with multisensor SAR data [J]. *Advances in Meteorology*, 2018: 1-17.
- [21] CHEN Ting-Ting, PAN Yao-Zhong, SUN Lin. Modification of Alpha Approximation Model for Retrieving Soil Moisture Data Based on Multi-temporal Sentinel-1 SAR [J]. *Acta Pedologica Sinica*. (陈婷婷, 潘耀忠, 孙林. 基于多时相 Sentinel-1 SAR 地表土壤水分反演的 Alpha 近似模型改进. *土壤学报*), 2018. DOI: 10.11766/trxb201807270361.
- [22] YIN Chao, ZHOU Zhong-Fa, TAN Wei-Yi, *et al.* Inversion model of soil profile moisture content in rocky desertification area based on microwave and optical remote sensing [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (殷超, 周忠发, 谭玮颐, 等. 基于微波与光学遥感的石漠化地区土壤剖面含水率反演模型研究. *红外与毫米波学报*), 2018, **37**(3): 360-370.
- [23] WANG Ping, ZHOU Zhong-fa, LIAO Juan. Study on Soil Moisture Retrieval of Tobacco Field in Karst Plateau Mountainous Area Based on Freeman Decomposition [J]. *Geography and Geo-Information Science*. (王平, 周忠发, 廖娟. 基于 Freeman 分解的喀斯特高原山区烟田土壤水分反演研究. *地理与地理信息科学*), 2016, **32**(2): 72-77.
- [24] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, *et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(1): 35-46.