

基于 GEE 平台潘庄引黄灌区土壤水分监测分析

张清华, 白怀明

(山东黄河勘测设计研究院有限公司, 山东 济南 250013)

【摘要】本研究借助 Google Earth Engine(GEE)平台,运用 Sentinel-1 雷达影像数据与 SMAP 土壤水分数据构建线性回归模型,对潘庄引黄灌区的土壤水分展开反演分析。研究结果显示:2020 年该灌区土壤水分含量在 $0.12\sim 0.32\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之间波动,呈现出明显的季节性差异:春季土壤相对湿润,冬季较为干旱;在空间分布上也不均衡,西部干旱,东北部湿润。研究也表明,冬小麦成熟期、玉米生长期以及棉花全生育期均需要进行人工灌溉。该研究成果为精准灌溉提供了数据支撑,同时也展现了遥感技术在农业水分监测领域的巨大潜力。

【关键词】线性回归模型;土壤水分监测;反演分析;潘庄灌区

【中图分类号】S274

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-05-0073-04

Analysis on Soil Moisture Monitoring in Panzhuang Yellow River Diversion Irrigation District Based on GEE Platform

ZHANG Qinghua, BAI Huaiming

(The Yellow River Survey, Design and Research Institute Co., LTD., of Shandong Province, Jinan, Shandong 250013, China)

Abstract: This study uses the Google Earth Engine (GEE) platform, constructs a linear regression model by integrating Sentinel-1 radar image data and SMAP soil moisture data, and conducts inversion analysis of soil moisture in the Panzhuang Yellow River Diversion Irrigation District. The results show that the soil moisture content in the irrigation district fluctuated between 0.12 and $0.32\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ in 2020, showing obvious seasonal differences: relatively moist in spring and dry in winter; the spatial distribution was also uneven, with arid conditions in the west and moist conditions in the northeast. The study also indicates that artificial irrigation is required during the maturity period of winter wheat, the growth period of corn, and the entire growth period of cotton. The research results provide data support for precision irrigation and demonstrate the great potential of remote sensing technology in the field of agricultural moisture monitoring.

Key words: Linear regression model; Soil moisture monitoring; Inversion analysis; Panzhuang Irrigation District

土壤水分作为地表与大气之间能量交换的关键参数之一,不仅直接影响着生态系统的稳定性,在农业生产中更是起着举足轻重的作用^[1]。传统的土壤水分监测方法主要依赖实地采样,存在空间覆盖范围有限、监测成本高以及实时性差等诸多弊端^[2],难以满足大面积农业生产对土壤水分监测的需求。

相关学者^[3-4]研究表明,合成孔径雷达(SAR)传感器具备估算土壤湿度的能力,能为土壤水分监测提供较为精确的信息。Sentinel-1 是由欧洲空间局(ESA)发射的合成孔径雷达(SAR)卫星,

搭载 C 波段雷达传感器,能够提供高精度的雷达影像。该卫星主要支持 VV(垂直发射-垂直接收)和 VH(垂直发射-水平接收)两种极化方式,其核心观测数据为后向散射系数,这一参数与地表特性(如土壤水分、地表粗糙度和植被覆盖等)密切相关。因其较高的空间分辨率(约 $10\sim 20\text{ m}$),Sentinel-1 特别适用于精细尺度的土壤水分研究,为地表水文和农业监测提供了重要支持。SMAP (Soil Moisture Active Passive) 是由美国

收稿日期:2025-10-27

作者简介:张清华(1994—),女,工程师

NASA 发射的卫星,主要通过被动微波观测技术获取土壤水分数据,其数据以体积含水量(m^3/m^3)为单位,具有较高的精度和可靠性。本研究基于 GEE 平台利用 Sentinel-1 卫星数据对潘庄灌区的土壤水分进行监测。通过运用随机森林算法和物候法识别作物区域,进而精确评估灌区作物的水分需求,判断作物是否缺水,并确定所需的灌溉量。

1 数据与方法

1.1 数据来源及预处理

本研究采用的 Sentinel-1 数据为干涉宽幅(IW)模式下的 Level-1GRD 数据,极化方式为垂直-垂直(VV),空间分辨率达 20 m,数据均来自于 GEE 云计算平台。为实现对土壤水分的有效反演,研究选取了 2020 年潘庄灌区的 Sentinel-1 数据集,并在反演过程中对数据进行了一系列预处理操作。

首先,对原始数据进行地形校正,以消除因地形起伏引起的误差,确保数据的准确性和可靠性;其次,通过去噪处理有效降低数据中的随机噪声,进一步提升数据的质量和稳定性;在此基础上,对数据进行分贝化处理,将其转换为对数尺度,以便于后续分析中的数据比较与解释。经过上述步骤,最终得到 VV 极化方式的后向散射系数,为后续的地表特性研究奠定了坚实基础。

土壤水分数据选用存储于 GEE 平台的 NASA-USDA 增强型 SMAP 全球土壤水分数据,其分辨率为 9 km,能够提供较为精细的土壤水分信息。土地利用数据引用中国年度土地覆盖数据集(annual China Land Cover Dataset, CLCD),空间分辨率为 30 m。这些数据集相互结合,为准确反演和分析土壤水分奠定了坚实的数据基础,确保了研究结果的可靠性和科学性,有助于全面深入地了解潘庄灌区的土壤水分状况,为后续研究和应用提供了宝贵的数据支持。

1.2 研究方法

综合运用 Sentinel-1 的后向散射系数数据、SMAP 土壤水分数据、CLCD 土地利用数据以及机器学习方法,系统地对潘庄灌区的土壤水分和作物需水量进行分析与估算。在本研究中,机器学习方法被用于挖掘不同数据之间的复杂内在

联系,以此更精准地估算土壤水分和作物需水量。机器学习中的随机森林算法通过构建多个决策树,将决策树的预测结果进行综合分析,最终得出更为准确和稳定的预测结论。在识别作物种植区域时,随机森林算法利用大量带有作物类别标签的样本数据进行训练学习,从而掌握不同地物在多源数据(如遥感影像的光谱信息、纹理信息等)上呈现出的特征差异。基于这些差异,随机森林算法能够对研究区域内的像素进行分类,准确判断其是否属于农作物区域。物候法是依据植物不同生长发育阶段(即物候期)所呈现出的特征来识别作物种植区域的方法。不同作物在不同的生长阶段,其物候特征存在明显差异,例如播种、出苗、开花、结果、成熟等阶段都会有独特的表现。通过对研究区域的遥感影像进行时间序列分析,并结合作物典型的物候特征,就可以有效区分不同的作物类型及其种植区域。以冬小麦为例,春季返青时,其植被指数会发生显著变化,利用这一特征便能将其与其他作物或地物区分开来。

本研究基于 GEE 平台的 Sentinel-1 数据,构建 VV 极化方式的后向散射系数与 SMAP 土壤水分数据之间的线性回归模型。通过最小二乘法等优化算法,对大量样本数据进行拟合,求解出回归系数和。得到回归模型后,输入 Sentinel-1 的后向散射系数数据,即可反演出潘庄灌区的土壤水分分布情况。利用 CLCD 提供的土地利用数据,提取研究区域内的农田分布信息,进而获取农田区域的土壤水分数据。在确定农作物种植范围时,综合运用随机森林算法和物候法,成功识别出小麦、玉米和棉花 3 种主要作物的种植区域。根据相关学者^[9]研究获取 3 种作物的需水强度,利用以下公式计算土壤体积含水量 θ_v :

$$\theta_v = ET/10Z_r \quad (1)$$

式中: ET 为需水强度, cm^3/cm^3 ; Z_r 为根系深度, cm 。

依据公式(1)计算得到的土壤体积含水量,进一步估算作物的灌溉量。

2 土壤水分反演

基于 Sentinel-1 数据的农田土壤水分反演结果如图 1 所示,清晰展示了研究区域内土壤水

分的空间分布情况。日土壤水分主要集中在 0.12~0.32 cm³/cm³ 之间,该结果与 SMAP 数据的变化趋势基本一致,充分表明了基于 Sentinel-1 数据的反演方法具有较高的准确性和可靠性。时间序列分析结果显示,灌区土壤水分在不同季节和气候条件下波动明显。日土壤水分均值为 0.19 cm³/cm³,最低值出现在 2020 年 6 月 21 日,为 0.12 cm³/cm³,最高值出现在 2020 年 4 月 22 日,达到 0.32 cm³/cm³。这些数据直观地反映了土壤水分在一年中的动态变化规律,有助于深入理解土壤水分的季节性变化特征及其影响因素。

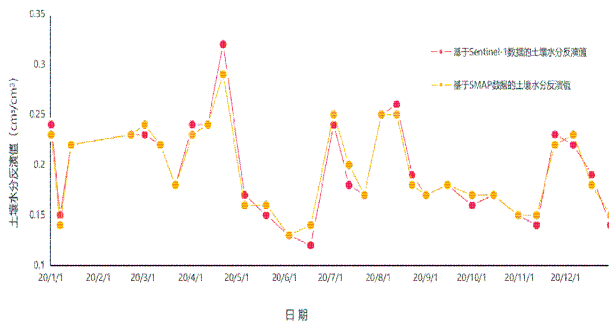


图 1 2020 年潘庄灌区土壤水分反演值在时间序列上的变化

经复核,春季土壤水分平均值为 0.22 cm³/cm³。春季土壤水分波动相对较为平缓,是 2020 年土壤水分季节性变化的高峰期。这一现象可能是由于春季降水量逐渐增多,同时气温较为适中,降水补充了土壤水分,而适宜的气温又减少了土壤水分的蒸发损失,使得土壤水分较为充足。

相比之下,夏季、秋季和冬季的土壤水分波动幅度较大。夏季高温和强烈的太阳辐射加速了土壤水分的蒸发,尽管夏季降水较多,但因蒸发量过大,土壤水分波动依然显著。秋季气温逐渐下降,降水量也随之减少,导致土壤水分波动较大。冬季土壤水分平均值降至最低点,为 0.17 cm³/cm³ (此为冬季土壤水分平均最低值,与全年日最低值 0.12 cm³/cm³ 不冲突),这主要是由于冬季降水量大幅减少,且气温较低,土壤水分补给不足,土壤中的水分逐渐消耗所致。

潘庄灌区的土壤水分在空间分布上呈现出显著的异质性(如图 2 所示)。灌区西部土壤水分相对较低,而东北部土壤水分相对较高。总体而言,土壤水分主要分布在 0~0.52 cm³/cm³ 之间。在不同日期,土壤水分的变化反映了灌区土壤水分的波动情况。6 月 21 日土壤水分达到日最低值,

当天土壤水分范围在 0~0.24 cm³/cm³ 之间,此时整个灌区土壤水分普遍偏低,仅灌区中部少数区域的土壤水分略高。4 月 22 日,日土壤水分达到最高值,范围在 0~0.52 cm³/cm³ 之间,当日低土壤水分区域主要集中在灌区西部和北部,高土壤水分区域则主要分布在东部和南部。

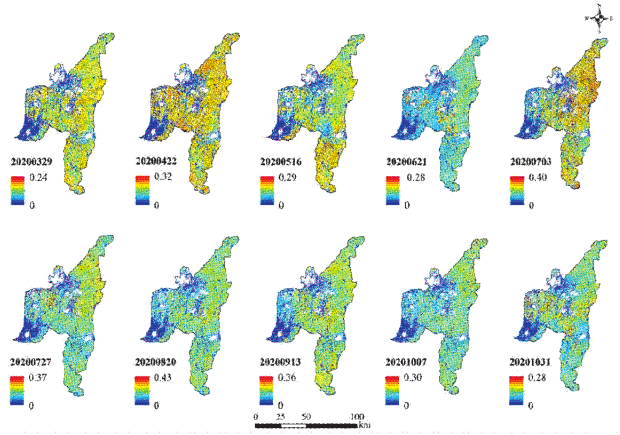


图 2 潘庄灌区农田土壤水分分布图

由此可见,潘庄灌区的土壤水分分布在空间和时间上均存在明显差异。灌区西部和北部土壤水分普遍偏低,东部和南部相对较高。这种差异可能是由地形、土壤类型、灌溉方式以及降雨分布等多种因素共同作用导致的。

3 灌溉需求评估

依据相关学者研究成果^[6],确定了小麦、玉米和棉花三种主要农作物在不同生育期的需水强度,并据此计算出三种作物在不同阶段的土壤水分阈值,具体数据详见表 1。冬小麦的平均土壤水分阈值为 0.17 cm³/cm³,玉米和棉花的平均土壤水分阈值均为 0.13 cm³/cm³。

结合表 1 不同时间节点的土壤水分阈值,对图 3 中三种作物不同时期的灌溉量进行分析:冬小麦在 2 月 22 日至 4 月 22 日期间,土壤水分高于相应的土壤水分阈值,处于较为充足的状态,未出现明显缺水现象。但在生长后期,即 5 月 16 日至 5 月 28 日,土壤水分低于阈值,出现缺水情况,需要进行额外灌溉,平均灌溉水量为 0.20 cm³/cm³。玉米在整个生育期内,大部分时间土壤水分高于阈值,水分供应充足。仅在 9 月 1 日左右,土壤水分低于阈值,出现短暂缺水现象,所需灌溉水量为 0.03 cm³/cm³。棉花在整个生育期内,土壤水分普遍低于阈值,缺水现象较为严重,

表 1 潘庄灌区三种作物在不同时期的土壤水分阈值

冬小麦		玉米		棉花	
日期	土壤水分阈值/ (cm ³ /cm ³)	日期	土壤水分阈值/ (cm ³ /cm ³)	日期	土壤水分阈值/ (cm ³ /cm ³)
2020/2/22	0.04	2020/6/21	0.03	2020/5/16	0.02
2020/3/5	0.05	2020/7/3	0.06	2020/5/28	0.03
2020/3/17	0.06	2020/7/15	0.08	2020/6/9	0.04
2020/3/29	0.11	2020/7/27	0.12	2020/6/21	0.08
2020/4/10	0.15	2020/8/8	0.17	2020/7/3	0.14
2020/4/22	0.20	2020/8/20	0.24	2020/7/15	0.16
2020/5/16	0.38	2020/9/1	0.22	2020/7/27	0.19
2020/5/28	0.35	2020/9/13	0.15	2020/8/8	0.21
				2020/8/20	0.23
				2020/9/1	0.20
				2020/9/13	0.17
				2020/9/25	0.14
				2020/10/7	0.11
均值	0.17	均值	0.13	均值	0.13

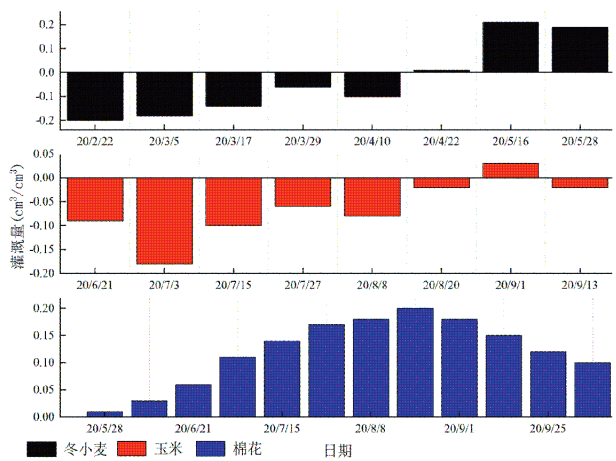


图 3 潘庄灌区三种作物不同时期灌溉量

且呈现出先增加后减小的趋势。在生长初期和中期,随着时间推移,土壤水分与阈值的差距逐渐增大,缺水量逐渐增多;到生长后期,缺水现象虽有所缓解,但土壤水分仍低于阈值,平均需灌溉水量为 0.11 cm³/cm³。

综合分析可知,冬小麦在生长初期至中期,土壤水分状况良好,表明该阶段自然降水或土壤保水能力较强。然而,在生长后期,随着气温升高和作物需水量增加,土壤水分显著减少,需通过人工灌溉补充水分。玉米在整个生育期内基本能够依靠自然降水和土壤自身储水满足生长需求,仅在特定短时间内需要灌溉,这表明玉米的需水

规律较为稳定,对自然环境的适应能力较强。相比之下,棉花在整个生育期内对水分需求较高,且对土壤水分变化较为敏感,土壤水分普遍不足。在生长初期和中期,缺水现象尤为突出,尽管后期有所缓解,但仍需频繁进行人工灌溉以保证其正常生长。

4 结 语

通过研究发现,潘庄灌区土壤水分在时间和空间上存在显著异质性,时间上春季湿润、冬季干旱,空间上西部干旱、东北部湿润,土壤水分含量在 0.12~0.32 cm³/cm³ 之间变动。通过确定冬小麦、玉米和棉花三种主要作物的土壤水分阈值,评估其灌溉需求,结果表明这三种作物在不同生育阶段均有不同程度的灌溉需求。该研究成果为潘庄灌区的精准灌溉提供了重要的数据支持,充分展示了遥感技术结合 GEE 平台在农业水分监测中的应用潜力。随着遥感技术的不断进步和应用范围的进一步扩大,将为农业生产的可持续发展提供更有力的技术支持。

参考文献

[1] 方西瑶,蒋玲梅,崔慧珍.基于 Sentinel-1 雷达数据的青藏高原地区土壤水分反演研究[J].遥感技术与应用,2022,37(6):1447-1459.

[2] 刘炳忠,张鑫.国内外土壤墒情监测技术及应用[J].山东水利,2008(12):13-17.

[3] Urso G D, Minacapilli M. A semi-empirical approach for sur-face soil water content estimation from radar data with-out a-priori information on surface roughness [J]. Journal of Hydrology,2006,321(1):297-310.

[4] M. El Hajj, N. Baghdadi, M. Zribi, and H. Bazzi. Synergic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Images for Operational Soil Moisture Mapping at High Spatial Resolution overAgri-cultural Areas [J]. Remote Sensing, 2017,9(12):1292.

[5] M. Aubert, N. N. Baghdadi, M. Zribi, K. Ose, M. El Hajj, E. Vaudour, and E. Gonzalez-Sosa. Toward an operational bare soil moisture mapping using TerraSAR -X data ac-quired overagricultural areas [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013,6(2):900-916.

[6] 左余宝,田昌玉,唐继伟,等.鲁北地区主要作物不同生育期需水量和作物系数的试验研究 [J]. 中国农业气象, 2009,30(1):70-73,78.

(责任编辑 赵其芬)