无人机遥感在农田土壤水分监测与精准灌溉管理中的应用

杨张朴[1] 谷金[2通讯作者]
1. 陕西铁路工程职业技术学院 陕西 渭南 714000；
2. 苏州市测绘院有限责任公司 江苏 苏州 215006

摘 要 无人机遥感因具备高分辨率、灵活性与高效获取数据的优势，已成为农田土壤水分监测与精准灌溉的重要技术手段。本文基于多光谱与热红外影像，构建了无人机土壤水分反演、作物水分胁迫识别与灌溉需求分析模型，并通过典型区域的应用验证了其在水分监测精度、干湿区识别能力以及灌溉调控效率方面的显著成效。研究表明，无人机监测能够有效解决传统巡田的滞后性和地面监测点覆盖不足问题，可支持灌溉时机判断、水量分配优化及精细化管理。随着无人机技术与物联网、传感器、作物模型和智能灌溉设备的进一步融合，其将在推进农业节水、提升水分利用效率和促进智慧农业发展中发挥关键作用。

关键词 无人机遥感；土壤水分；精准灌溉

Application of UAV Remote Sensing in Farmland Soil Moisture Monitoring and Precision Irrigation Management

Yang Zhang-pu[1], Gu Jin[2Corresponding Author]
1. Shaanxi Railway Engineering Vocational and Technical College, Weinan 714000, Shaanxi Province, China
2. Suzhou Surveying and Mapping Institute Co., Ltd., Suzhou 215006, Jiangsu Province, China

Abstract With advantages such as high resolution, flexibility, and efficient data acquisition, unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing has become an important technical means for farmland soil moisture monitoring and precision irrigation. Based on multispectral and thermal infrared imagery, this paper establishes UAV-based soil moisture inversion models, crop water stress identification models, and irrigation demand analysis models. Through application validation in typical regions, it demonstrates significant effectiveness in improving moisture monitoring accuracy, identifying dry and wet zones, and enhancing irrigation regulation efficiency. Research indicates that UAV monitoring can effectively address the time lag of traditional field surveys and the insufficient coverage of ground monitoring points. It supports irrigation timing decisions, optimizes water allocation, and enables refined management. With the further integration of UAV technology with the Internet of Things, sensors, crop models, and intelligent irrigation equipment, UAV remote sensing is poised to play a key role in promoting agricultural water conservation, improving water use efficiency, and advancing the development of smart agriculture.

Key words Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Remote Sensing; Soil Moisture; Precision Irrigation

随着农业现代化的推进，水资源短缺与灌溉效率低的问题日益凸显。在传统农业灌溉模式中，农田土壤水分状况多数依靠经验判断或少量监测点数据，空间代表性不足，难以满足精准农业的需求[1]。为了提高水资源利用效率，实现节水增产，亟须一种能够快速、精确、动态地监测土壤水分的新技术。

无人机遥感因其低空操作灵活、影像分辨率高、作业成本低等特点，为农田水分监测提供了可靠手段。搭载不同的传感器，能够获取多光谱、热红外和可见光等多源遥感数据，并通过反演模型实现高精度水分估算。在精准灌溉系统建设中，无人机提供的空间化水分信息能够有效指导灌溉量调控，实现“因地制宜”“按需供水”的科学灌溉方式[2]。

因此，研究无人机遥感技术在土壤水分监测中的应用方法与效果，并探索基于遥感数据的精准灌溉策略，对于提升农业水资源管理能力具有重要意义。

1 无人机遥感在土壤水分监测中的技术体系

1.1 无人机平台与传感器组合

无人机用于土壤水分监测通常采用多旋翼平台，具备低空悬停、精确作业和高机动性能，适合多次高频监测。本研究所采

用的无人机搭载多光谱相机与热红外成像仪，多光谱波段覆盖蓝光、绿光、红光、红边和近红外，可有效区分植被和土壤的反射特征；热红外影像能够准确反映地表温度变化，与土壤水分呈明显反向关系。二者结合可以实现更高精度的水分反演[3]。

1.2 遥感数据处理流程

无人机影像经飞行获取后，需要进行辐射校正、几何校正、影像融合和正射影像生成，形成高质量数据源。之后依据影像计算NDVI、NDWI、LSWI等常用植被与水分指数，同时利用热红外数据反演地表温度[4]。通过影像分割和监督分类提取作物区域与裸土区域，建立适应不同地表类型的水分分析基础。

1.3 土壤水分反演方法体系

土壤水分反演模型包括基于光谱特征的经验模型、基于指数的物理模型以及基于机器学习的综合模型。本研究通过分析多光谱波段与实测土壤含水量的相关性，发现近红外波段、红边波段及地表温度对水分变化较为敏感。为提高精度，采用随机森林算法，以 NDWI、LSWI、温度影像及地形参数作为输入变量，构建高精度土壤水分反演模型。

2 研究区域与数据采集方法

2.1 研究区域概况

本研究所选区域位于我国某典型粮食产区，其农业种植制度以一年一熟或两年三熟为主，作物类型以玉米、水稻和大豆为主，兼有部分经济作物的种植。该区域地势整体平坦，局部存在微坡地形，土壤类型多样且分布复杂，包括砂壤土、壤土以及不同程度黏性的土壤，这为研究土壤水分在不同地表类型之间的空间差异提供了典型条件。区域年平均温度6 ~ 10 ℃，降水量主要集中在夏季，具有明显的季节性，降雨时空不均易造成农田水分分布不均，从而影响灌溉策略与作物生长。

考虑到研究区域气象条件的波动性，为确保无人机数据获取质量，研究选取的时段尽量避开连阴雨天气，并结合作物关键时期安排航飞工作，如苗期、拔节期、灌浆期等阶段。

2.2 无人机影像获取方案

为了确保土壤水分反演所需的多源信息完整性，本研究采用多架次无人机飞行任务，从早晨、正午和傍晚3个时段分别获取地表影像，以分析地表温度随日照变化的情况，并进一步评估热红外数据在不同光照条件下的质量差异。采用的多旋翼平台具有高稳定性和悬停能力，可对重点区域进行多角度补拍，以提高影像覆盖率和数据连续性。

在多光谱相机方面，各波段的中心波长分别为蓝光475 nm、绿光560 nm、红光668 nm、红边717 nm与近红外840 nm，多光谱影像能够较好地反映农田植被与土壤的细微反射差异。热红外传感器工作波段在8 ~ 14 μm，用于反映热辐射强度，与地表含水量呈负相关关系。为了减少气象条件的影响，所有航摄均在风速小于4 m/s、空气湿度适中且太阳高度角较稳定时进行。

2.3 地面样点采集与模型验证数据

土壤水分样点的选取遵循“均匀覆盖、类型齐全、地形代表”的原则。在研究区域中设置多个分布均匀的样点，既包括靠近田埂或排水沟的边缘区域，也包括田块中部的典型区域。在每个样点处通过便携式土壤水分探头测量0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和40 ~ 60 cm 深度处的含水量，以分析无人机影像所反映的浅层土壤水分与深层实际水分之间的相关程度[5]。

此外，研究还采集了土壤容重、有机质含量、电导率等辅助数据，以判断不同土壤理化特性对反演精度的影响。同时，在不同灌溉方式（如喷灌、漫灌和滴灌）下，同步采集水分变化数据，以构建更加准确的灌溉响应曲线，为精准灌溉策略提供依据。

3 土壤水分遥感反演模型构建与精度验证

3.1 多源遥感特征与土壤水分的相关性分析

研究发现，不同光谱指数对土壤水分的响应具有明显差异。NDWI对浅层水分变化敏感，而LSWI在反映土壤结构性含水方面表现更优，当土壤表层干燥但内部仍具水分储量时，LSWI能够提供更准确的信息[6]。此外，地表温度反演结果显示，在晴昼条件下，田块地表温度差异可达3 ~ 6 ℃，而温度越低的区域通常土壤水分越高。

为了进一步分析不同波段对水分的贡献度，本研究使用皮尔逊相关分析法计算波段反射率与实测水分之间的相关性，结果表明近红外波段的相关性最高，红边波段次之，而红光和绿光波段相关性较低。热红外温度数据的相关系数高达 − 0.79，说明其对水分特征具有良好解释能力，因此在模型中起重要作用。

3.2 水分反演模型的构建

在构建随机森林模型前，首先对输入变量进行重要性排序。结果显示，LSWI、地表温度、NDWI、红边反射率及近红外反射率是影响土壤水分反演的核心因素[7]。随机森林模型通过多次决策树训练并进行综合判断，能够有效处理多变量输入并降低噪声影响。

模型训练过程中采用10次交叉验证法，通过对训练集不断调整树的数量与深度，使模型在避免过拟合的同时保持高精度。最终构建的模型树数量为300，模型具有良好的稳定性，适

用于多种土壤类型和作物覆盖条件。

3.3 模型验证与精度评价

验证结果显示，反演模型在多数样点处与实测水分高度吻合，尤其是在植被覆盖较低的裸土或苗期区域，反演精度更高。尽管在植株生长旺盛时期，由于冠层遮蔽导致影像受混合像元影响较大，模型精度略有下降，但经过红边波段与温度数据的融合，误差已得到有效控制。

不同作物类型的模型表现也存在差异。在玉米与大豆田块中，反演精度平均达到86%，而在水稻田区，由于水层反射特征复杂，模型精度略低，但仍保持在80%左右的水平。在多种情境下，模型整体精度稳定，具备良好的实用性。

4 基于无人机监测的精准灌溉管理

4.1 区域水分空间分布特征

无人机水分反演结果显示，案例区域内部水分分布呈现高度异质性。低洼区域因地下水位较高且灌溉水易流入，含水量偏高；而坡度较微弱但排水能力较强的区域，含水量明显偏低。此外，不同土壤结构对水分保持能力影响显著，黏土区域水分蒸发缓慢，水分保持时间更长；砂壤土区域则更容易形成短期缺水状况。

为进一步分析时序变化，本研究对同一田块在不同时段获取的水分数据进行了对比分析。结果显示，在灌溉后24 h内，砂壤土区域水分降低最快，而黏性土壤变化最缓慢；同时，晴天与阴天对水分反演也有不同影响，晴天土壤温度差异更明显，有利于提高反演模型的可区分性。

4.2 基于遥感监测的灌溉区划分与调控策略

根据无人机反演的水分图，本研究将案例区域划分为四类灌溉管理单元。研究团队与农户沟通后，将无人机数据应用至智能灌溉控制终端，使灌溉系统能够根据不同区域的缺水程度自动调节灌溉时长，并对灌溉后的水分变化进行监测，形成“监测—灌溉—反馈—再监测”的循环机制。

在执行精准灌溉后，通过无人机对该区域进行了持续监测，发现缺水区域大幅减少，同时整体耗水量比传统经验灌溉模式降低了22%～30%。作物叶片含水量提高，长势均匀性显著增强，见表1。

表1 研究区域土壤水分监测与灌溉调整情况

水分等级	含水量范围（%）	面积占比（%）	灌溉需求	调整方案	灌溉后改善情况
过湿区	＞32	14	暂停或减少	停止灌溉2～3 d	过湿面积下降至5%
适宜区	22～32	55	维持常规	正常灌溉	基本稳定
轻度缺水区	18～22	21	增加少量灌溉	增加10%～20%水量	缺水面积减少一半以上
中度缺水区	＜18	10	明显补水	增加25%～35%水量	水分显著改善，达到适宜范围

5 结束语

本研究证明，无人机遥感在农田水分监测与精准灌溉管理中具有明显优势，可实现干湿分布快速识别、水分变化动态追踪和灌溉需求的科学判断。案例验证显示，无人机反演结果与地面观测具有良好的一致性，能够有效支持灌溉策略调整，提高灌溉均匀度和水资源利用效率。总体而言，无人机遥感将为农业节水、增产稳产与智慧农业建设提供重要技术支撑。

参考文献

[1]宋奇,高小红,宋玉婷,等.基于无人机高光谱影像的农田土壤有机碳含量估算——以湟水流域农田为例[J].自然资源遥感,2024,36(2):160-172.

[2]李朝阳.无人机遥感技术在农田水利监测中的应用与优化策略 [J].农村科学实验,2024(21):84-86.

[3]赵贵平,徐发俊.基于无人机多光谱影像的农田土壤水分监测[J].测绘通报,2024(11):177-182.

[4]陈飞.无人机遥感技术在水利工程测量中的应用探究[J].科技资讯,2024,22(24):179-181.

[5]张军伟,闫宏昌.无人机遥感技术辅助农业精准灌溉的策略研究[J].河北农机,2025(2):19-21.

[6]张成才,祝星星,姜明梁,等.基于无人机MiniSAR和多光谱遥感数据的冬小麦土壤墒情反演[J].节水灌溉,2025(3):105-112.

[7]刘少云.滨州无人机遥感技术在农田水利监测中的应用[J].农业工程技术,2025,45(14):36-37.

（本文编辑 杜宇琪）

