

融合 Sentinel-1/2 数据的农田干旱等级遥感反演研究

胡德杰

成都理工大学地理与规划学院

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2355

[摘要] 为提升农田干旱监测的时空精度,解决单一遥感数据源在多云天气、植被干扰下的监测局限,本文提出融合Sentinel-1微波数据与Sentinel-2光学数据的干旱等级反演方法。以黄淮海平原冬小麦种植区为研究区,选取2023-2024年生长季影像数据,提取Sentinel-1的VV/VH极化后向散射系数及入射角参数,Sentinel-2的NDVI、EVI等植被指数与地表温度数据;通过随机森林算法构建多源特征融合模型,结合地面实测土壤水分与《农业干旱等级》(GB/T32136-2015)实现干旱等级反演。结果表明:融合模型反演土壤水分的 R^2 达0.82,均方根误差(RMSE)为3.2%,较单一Sentinel-1($R^2=0.58$)和Sentinel-2($R^2=0.65$)模型精度显著提升;干旱等级反演结果与标准化降水指数(SPI)的相关性达0.85,能有效捕捉拔节期轻度干旱与灌浆期重度干旱事件。研究证明多源哨兵数据融合可实现高精度农田干旱监测,为灌溉调度与粮食安全保障提供技术支持。

[关键词] Sentinel-1; Sentinel-2; 数据融合; 农田干旱; 遥感反演; 随机森林

中图分类号: S162.4 **文献标识码:** A

Remote sensing retrieval of farmland drought grade based on sentinel-1/2 data

Dejie Hu

School of geography and planning, Chengdu University of technology

[Abstract] In order to improve the temporal and spatial accuracy of farmland drought monitoring and solve the monitoring limitations of a single remote sensing data source under cloudy weather and vegetation interference, this paper proposes a drought grade retrieval method based on the fusion of sentinel-1 microwave data and sentinel-2 optical data. Taking the winter wheat planting area in the Huang Huai Hai Plain as the research area, the growing season image data from 2023 to 2024 were selected to extract the VV/VH polarization backscattering coefficient and incident angle parameters of sentinel-1, NDVI, evi and other vegetation indexes and land surface temperature data of sentinel-2; The multi-source feature fusion model was constructed by random forest algorithm, and the drought grade was retrieved by combining the measured soil moisture and the agricultural drought grade (GB/t32136-2015). The results showed that the R^2 of soil moisture retrieved by the fusion model was 0.82, and the root mean square error (RMSE) was 3.2%, which was significantly higher than that of single sentinel-1 ($R^2=0.58$) and sentinel-2 ($R^2=0.65$) models; The correlation between drought grade inversion results and standardized precipitation index (SPI) is 0.85, which can effectively capture mild drought events in jointing stage and severe drought events in filling stage. Research shows that multi-source sentinel data fusion can achieve high-precision farmland drought monitoring, and provide technical support for irrigation scheduling and food security.

[Key words] sentinel-1; Sentinel-2; Data fusion; Farmland drought; Remote sensing inversion; Random forest

引言

干旱作为全球频发的气象灾害,随气候变化对农业生产的威胁日益加剧,我国黄淮海平原年均干旱受灾面积达467万公顷,2023年夏季干旱导致冬小麦减产12%,直接经济损失超30亿元。传统干旱监测依赖站点实测数据,存在空间代表性不足、覆

盖范围有限的缺陷,难以满足区域精细化管理需求^[1]。遥感技术为大范围监测提供有效手段,Sentinel-1搭载C波段SAR,具备全天候观测能力且后向散射系数对土壤水分敏感,Sentinel-2多光谱数据可精准反演植被状态与地表温度,但微波数据易受植被干扰、光学数据受云雨限制,融合二者实现优势互补对提升监

测精度意义重大。本研究核心内容包括: 完成Sentinel-1辐射与地形校正、Sentinel-2大气校正及两类数据的微波与光学特征提取, 基于随机森林算法构建多特征干旱反演模型, 结合地面实测数据验证精度并依据《农业干旱等级》(GB/T32136-2015)划分5级干旱等级。技术路线上, 先获取并预处理遥感与地面验证数据, 提取关键特征并时空匹配后训练模型, 反演土壤水分并划分干旱等级, 最终通过SPI与实测数据完成验证。

1 研究区与数据方法

1.1 研究区概况

选取黄淮海平原典型农业区(34° 50' -35° 20' N, 114° 30' -115° 00' E)为研究区, 面积约2200km²。区域属温带季风气候, 年均降水量620mm, 蒸发量1180mm, 主要种植冬小麦-夏玉米轮作体系。2023年4月(小麦拔节期)出现轻度干旱, 6月(灌浆期)遭遇重度干旱, 为干旱监测提供理想研究场景。

1.2 数据获取与预处理

1.2.1 遥感数据

Sentinel-1数据来源于欧空局哥白尼数据中心, 选取2023年3-6月干涉宽幅模式(IW)影像共12景, 极化方式为VV+VH, 空间分辨率20m, 时间间隔12天。采用SNAP软件进行预处理: 通过辐射校正将斜距影像转换为后向散射系数, 应用Lee滤波去除斑点噪声, 基于SRTM30mDEM完成地形校正以削弱坡度坡向影响。Sentinel-2数据选取同期L2A级影像12景, 选取10m分辨率的2、3、4、8波段计算植被指数, 20m分辨率的10波段反演地表温度, 经Sen2Cor插件完成大气校正后重采样至20m, 确保与Sentinel-1数据空间分辨率匹配^[2]。

1.2.2 地面验证数据

土壤水分实测在研究区布设32个采样点, 于2023年4月15日、5月20日、6月10日(影像获取后1-2天内)采用TDR300土壤水分仪测定0-20cm土层湿度, 每个样点重复3次取平均值以保证数据可靠性。辅助数据包括中国气象局提供的研究区气象站降水数据(用于计算SPI)、农业农村部发布的作物生育期数据, 分别用于模型验证与干旱事件标定。

1.3 研究方法

1.3.1 特征参数提取

微波特征提取包括Sentinel-1的VV、VH后向散射系数(σ°_{VV} 、 σ°_{VH})及局部入射角(LIA), 同时计算极化比值 $CR=VH/VV$ 与归一化极化指数 $NCR=(VV-VH)/(VV+VH)$, 其中VH极化对植被水分更敏感, VV极化受土壤水分影响更显著。光学特征提取涵盖归一化植被指数($NDVI=(NIR-R)/(NIR+R)$)、增强植被指数($EVI=2.5*(NIR-R)/(NIR+6R-7.5B+1)$)的计算, 采用单窗算法反演地表温度(LST), 通过像元二分模型计算植被覆盖度(FVC)。时序特征通过对 σ°_{VV} 、NDVI进行线性趋势分析, 提取斜率参数($Slope_{\sigma^{\circ}}$ 、 $Slope_{NDVI}$), 以此表征土壤水分与植被生长的动态变化特征^[3]。

1.3.2 随机森林融合模型

随机森林是由多棵决策树组成的集成学习算法, 具备处理

高维数据与避免过拟合的优势, 模型构建过程如下: 将32个采样点的128组数据(4个时相×32个点)按7:3比例划分为训练集(89组)与验证集(39组); 采用递归特征消除法(RFE)筛选重要性前8的特征, 依次为 σ°_{VV} 、NDVI、LST、VH、Slope_NDVI、CR、FVC、LIA; 通过10折交叉验证确定最优参数, 其中决策树数量200, 最大深度10, 节点分裂最小样本数5。

1.3.3 干旱等级划分标准

依据《农业干旱等级》(GB/T32136-2015), 结合反演的土壤相对湿度(RSM)与作物受旱症状, 将干旱划分为5个等级: 无旱($RSM \geq 60\%$)表现为作物生长正常, 无萎蔫现象; 轻度干旱($50\% \leq RSM < 60\%$)表现为下部叶片轻微发黄, 正午短暂萎蔫; 中度干旱($40\% \leq RSM < 50\%$)表现为下部叶片枯萎, 上部叶片萎蔫; 重度干旱($30\% \leq RSM < 40\%$)表现为多数叶片枯萎, 生长停滞; 极端干旱($RSM < 30\%$)表现为植株死亡, 产量严重损失^[4]。

2 结果与分析

2.1 特征参数敏感性分析

不同干旱条件下特征参数响应差异显著(表1), 随干旱加剧, σ°_{VV} 从-8.2dB降至-15.6dB(呈负相关关系), NDVI从0.72降至0.31(呈负相关关系), LST从24.5℃升至32.8℃(呈正相关关系)。其中 σ°_{VV} 与土壤水分的相关性最高($r=-0.78$), 印证了C波段SAR对土壤湿度的敏感性; NDVI在中度干旱后降幅明显, 清晰反映出植被受旱后的生理响应特征。

表1 不同干旱等级下特征参数均值

干旱等级	σ°_{VV} (dB)	σ°_{VH} (dB)	NDVI	LST(°C)	FVC(%)
无旱	-8.2	-18.5	0.72	24.5	89
轻度干旱	-10.7	-20.3	0.61	27.3	82
中度干旱	-12.4	-21.8	0.48	29.6	71
重度干旱	-14.3	-23.1	0.39	31.2	58
极端干旱	-15.6	-24.5	0.31	32.8	42

2.2 模型反演精度验证

2.2.1 土壤水分反演精度

融合模型反演结果与实测土壤水分的拟合效果良好, 验证集R²达0.82, RMSE为3.2%, 较单一数据源模型精度显著提升: 单一Sentinel-1模型R²=0.58, RMSE=5.7%; 单一Sentinel-2模型R²=0.65, RMSE=4.9%。精度提升的主要原因在于融合模型整合了微波数据的土壤水分敏感性与光学数据的植被生长信息, 有效削弱了植被冠层对微波信号的干扰, 同时弥补了光学数据在云雨天气下的观测局限。

2.2.2 干旱等级反演精度

干旱等级反演结果与地面调查结果的一致性检验显示, 总

体准确率达86.7%(表2)。其中无旱、极端干旱等级的识别准确率最高(均为93.3%),轻度干旱与中度干旱的混淆率相对较高(分别为13.3%、16.7%),主要因这两个等级的土壤湿度区间相邻且植被受旱症状差异不显著。融合模型反演结果与SPI的相关性达0.85,能精准捕捉2023年4月拔节期轻度干旱(研究区轻度干旱面积占比32.6%)与6月灌浆期重度干旱(重度干旱面积占比47.2%)事件,时空分布特征与实际干旱发生情况一致。

表2 干旱等级反演准确率统计

干旱等级	观测样本数	正确识别数	准确率(%)
无旱	15	14	93.3
轻度干旱	15	13	86.7
中度干旱	15	12	80.0
重度干旱	15	13	86.7
极端干旱	15	14	93.3
总体	75	66	86.7

2.3 干旱时空动态分析

2023年3-6月研究区干旱时空演变特征明显:3月全区以无旱为主,仅西北部零星分布轻度干旱(面积占比8.3%);4月进入拔节期后,轻度干旱范围扩大,主要集中在研究区东部(面积占比32.6%),无中度及以上干旱发生;5月干旱程度加剧,中度干旱面积占比达28.5%,轻度干旱面积占比升至41.2%,高干旱等级区域主要分布在南部平原;6月灌浆期遭遇重度干旱,重度干旱面积占比47.2%,极端干旱面积占比12.8%,干旱中心位于研究区中南部,与该时段降水偏少(较常年同期减少65%)的气象条件相符。干旱时空分布与作物生育期的耦合分析表明,灌浆期(6月)作物对干旱的敏感性最高,该时段干旱对产量的影响最为显著,与农业生产实际情况一致。

3 结论

本文以黄淮海平原冬小麦种植区为研究区,提出融合Sentinel-1/2数据的农田干旱等级反演方法,通过提取微波与光学特征参数,基于随机森林算法构建融合模型,结合国家标准实现干旱等级划分,主要结论如下:

(1)特征参数敏感性分析表明, σ^0_{VV} 、NDVI、LST是响应干旱变化的核心特征,其中 σ^0_{VV} 与土壤水分的相关性最高($r=-0.78$),NDVI在中度干旱后降幅显著,可有效表征植被受旱响应。

(2)融合模型反演土壤水分的 R^2 达0.82, RMSE为3.2%,较单一Sentinel-1($R^2=0.58$)和Sentinel-2($R^2=0.65$)模型精度显著提升,干旱等级反演总体准确率达86.7%,与SPI的相关性达0.85,能有效捕捉关键生育期干旱事件。

(3)2023年3-6月研究区干旱呈现逐步加剧的时空演变特征,6月灌浆期重度干旱面积占比达47.2%,干旱中心位于中南部,与降水分布及作物生育期敏感性一致。

研究证实,Sentinel-1/2数据融合可实现高精度农田干旱等级监测,为区域灌溉调度与粮食安全保障提供科学依据,具有良好的应用前景。未来可通过引入地表粗糙度参数、构建生育期动态模型进一步提升反演精度。

[参考文献]

[1]代天金,陈俊英,郭佳奇,等.不同植被覆盖条件下Sentinel-1/2数据融合监测土壤含盐量模型研究[J].农业机械学报,2025,56(08):32-41.

[2]崔茜,曹玉刚,张建勇,等.Sentinel-1/2与多源数据协同的成都市耕地“非农化”识别[J].测绘科学,2025,50(08):69-79.

[3]王琨,曹倡铭.基于Sentinel-1/2遥感数据和可解释机器学习的河套灌区土壤盐度反演[J].节水灌溉,2025,(12):25-32.

[4]张廷龙,韩晓乐,包懿,等.基于Sentinel-1/2数据融合的县域农业大棚提取[J].农业工程学报,2024,40(19):135-145.

作者简介:

胡德杰(2001--),男,汉族,安徽亳州人,硕士研究生,成都理工大学地理与规划学院,研究方向:资源与环境遥感。