

基于物候特征的时序 SAR 水稻指数构建及验证

张 倬, 杨 娜*, 钱金良, 陈升东, 廖珩淞, 保蕴珂

(云南省农业科学院农业经济与信息研究所, 昆明 650051)

摘 要: 准确获取水稻的种植分布情况对于农业生产管理具有重要意义。针对多云雨地区缺乏有效光学影像影响水稻识别的问题, 该研究以多时相 Sentinel-1 SAR 影像为主要数据源, 基于后向散射系数的时序变化提取多个特征构建遥感指数以实现水稻提取。首先采用 SG (savitzky-golay) 滤波算法对不同地物的后向散射系数时序曲线进行平滑处理; 然后计算像元与水稻样本点在水稻生育期内时序曲线的动态时间规整距离、像元时序曲线最小值与水体的差异、像元时序曲线最大值与植被的差异这 3 个值以量化水稻生育期的不同特征, 并将三者相乘作为新的水稻遥感指数 NDRI (normalized difference rice index) 进行阈值分类后得出水稻空间分布情况。为验证该模型的有效性, 该研究选取云南省盈江县为研究区。结果表明: 1) 基于时序 SAR 特征能够实现水稻准确提取, 模型总体精度达到 89.42%, Kappa 系数为 0.82; 2) 盈江县 2023 年水稻种植面积为 199.83 km², 且大盈江沿岸种植面积占全县的 90%, 水稻种植存在着明显的集聚性。该研究为多云雨地区的水稻空间分布的准确提取提供一种方法, 并可为相关农业政策制定提供参考。

关键词: 水稻; 农业遥感; 合成孔径雷达; 时序特征; Google earth engine

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405053

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0157-08

张倬, 杨娜, 钱金良, 等. 基于物候特征的时序 SAR 水稻指数构建及验证[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 157-164.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405053 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Zhuo, YANG Na, QIAN Jinliang, et al. Construction and validation of paddy rice index using phenological features of SAR time series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 157-164. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405053 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

稻谷是云南省主要种植的粮食作物, 占全省谷物播种面积的两成以上^[1]。随着社会经济的快速发展, 耕地“非农化”“非粮化”转变对农业可持续发展及粮食安全产生了重大影响^[2,3]。近 30 年来, 云南省稻谷和小麦的种植面积分别下降了 16% 和 36%^[4]。因此, 准确把握水稻种植情况对于优化调整粮食结构、引导市场供需平衡、构建粮食生产新格局具有重要意义。

卫星遥感技术因其大范围、周期性和客观性等特点在农作物监测方面已经得到了广泛应用, 光学影像和雷达影像成为获取农作物信息的重要来源。当前, 光学影像多采用来自 MODIS^[5-6]、Landsat^[7-8] 或 Sentinel-2^[9-11] 等卫星的数据, 众多学者基于此开展了大量研究并取得丰硕成果。而合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 自带照射源, 可以不受光照和气候条件的限制进行全天候对地观测, 对于多云雨地区的农作物生长监测具有先天优势, 受到越来越多学者的重视^[12-14]。水稻由于移栽期需要灌水, 降低了地表的粗糙程度, 使得其移栽前后

的后向散射系数值发生明显变化, 这一特点是进行水稻提取的重要依据^[15]。近年来, 已有一些研究通过协同光学影像与 SAR 数据以进行水稻提取^[16-20]。张颖等^[21] 融合了 Sentinel-1 SAR 数据和 Sentinel-2 多光谱数据作为数据源, 通过独立主成分分析算法对光谱特征、纹理特征、双极化后向散射系数等特征变量进行选择后使用随机森林分类器进行分类; 黄翀等^[22] 利用 Sentinel-1 SAR 数据基于随机森林模型对泰国湄南河流域中部平原地区进行水稻种植提取; HE 等^[23] 基于谷歌地球引擎云平台, 协同 Sentinel-1 SAR 和 Sentinel-2 MSI 数据构建决策树模型分析了湖南省长株潭地区单双季水稻的种植空间分布数据; XU 等^[24] 组合了 SAR 后向散射系数的多个特征设计一个 SPRI (SAR-based paddy rice index) 指数以进行水稻制图; YANG 等^[25] 通过计算五种光谱指数的时间序列, 研究表征了水稻的两个物候现象并生成稻田潜在指数以进行水稻提取。总体上看, 已有研究大多是基于光谱信息或光学雷达影像特征耦合判别的方式, 但对于多云雨地区在缺少晴空影像时如何实现水稻种植面积的大范围快速提取还有待进一步研究^[26]。

盈江县位于云南省德宏州西北部, 其高温高湿的自然条件为水稻种植提供了良好的生长环境, 属于一季籼稻主产区^[27]。但该区域在水稻生长的 6 月至 9 月间由于云层持续大面积遮盖, 这一关键生育期内的光学影像几乎无法使用。本研究选取云南省典型多云雨地区盈江县为研究区, 基于稻田的物候特征, 利用 SAR 影像数据提取时序曲线相似度、与水体差值、与植被差值 3 个指标

收稿日期: 2024-05-10 修订日期: 2024-08-27

基金项目: 云南省农业科学院 2024 年度农业科技信息服务平台建设专项项目; 云南省重大科技专项计划 (202302AE090025); 云南省农业科学院农业经济与信息研究所立基金 (SJJ202201)

作者简介: 张倬, 硕士, 研究实习生。主要研究方向为智慧农业与农业遥感。Email: zhangzhuokm@163.com

※通信作者: 杨娜, 副研究员。主要研究方向为智慧农业集成应用。

Email: 404353694@qq.com

构建水稻遥感指数,同时结合地物样本确定阈值实现种植区域的快速判别,以期在无晴空影像时的水稻种植面积快速提取提供借鉴。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区域概况

盈江县地处中国西南边陲,介于 97°30' E~98°15' E, 24°25' N~25°20' N 之间,总面积约为 4 316.97 km²,是滇西有名的粮蔗之乡和国家级商品粮基地县。气候为南亚热带季风气候,雨量充沛,日照充足,多年平均降雨量 1 552 mm,5 月至 10 月间降雨量占全年总降雨量的 92%;年平均气温 19.6℃,良好的水热条件适宜水稻种植。盈江县南部分布有云南省八大平坝之一的盈江坝,大盈江自北向南贯穿盈江坝区,河流沿岸地势平坦,灌溉设施齐全,主要农作物为水稻、冬马铃薯、甘蔗等,其中水稻和冬马铃薯采用水旱轮作的生产方式。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 Sentinel-1 SAR GRD 数据

Sentinel-1 由两颗极轨卫星 Sentinel-1A 与 Sentinel-1B 组成星座,在 C 波段提供全天候的合成孔径雷达成像。GEE 云计算平台中的 Sentinel-1 SAR GRD 数据集已通过热噪声消除、辐射校准和地形校正的预处理操作。文中共获得研究区 2023 年全年 47 个不同日期的 Sentinel-1 SAR GRD 影像共 73 景。

1.2.2 NASADEM 数据

NASADEM 数据集由美国国家航空航天局 (NASA) 发布于 2020 年,提供了 30 m 分辨率的高程数据。NASADEM 是对 STRM 数据的再处理,通过合并 ASTER GDEM、ICESat GLAS 和 PRISM 数据集的辅助数据,提高了准确性。

1.2.3 地物样本数据集

构建不同地物后向散射时序曲线和验证水稻提取结果所需的地面样本点通过在线选取与野外定位 2 种方式获得。野外样本点沿大盈江采集,主要集中在旧城、平原、太平和弄璋 4 镇。选取样本点时按照以随机均匀为原则,并将选取的样本点导入天地图高分辨率影像进行验证,最终选取水稻样本点 160 个,其余样本点 199 个,样本点空间分布如图 1 所示。

2 研究方法

由于水稻地块在不同时段存在着裸土、水体、植株等不同状态,因此其对应的后向散射强度时序变化成为水稻提取的关键特征^[28,29]。首先,根据选取的地物样本点收集一年内所有 Sentinel-1 影像数据,构建出不同地物的 VH 后向散射系数时序曲线;然后,利用 SG (savitzky-golay) 滤波算法对时序曲线进行平滑处理,提取出不同地物的时序特征。考虑到盈江县的稻作制度为一年一季,本文基于动态时间规整 (dynamic time warping, DTW) 算法得到像元与水稻样本在水稻生育期内时序曲线的最小距离,以度量二者时序曲线形态的相似度,同时还计算出各像元后向散射强度最小值与水体均值的差异、后向散射强度最大值与植被均值的差异,将 3 个值相乘作

为新的水稻遥感指数进行水稻阈值分类。另外,结合实地考察得出盈江县水稻种植分布的地形坡度远小于 20°,在阈值分类基础上过滤剔除坡度大于 20°的水稻像元。最后,使用地物样本点对提取精度进行验证。研究流程如图 2 所示。

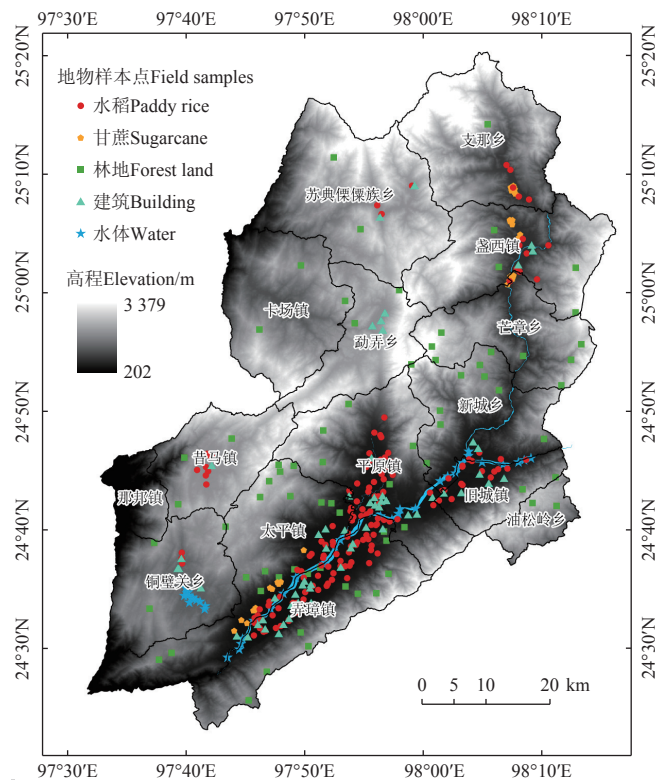


图 1 地物样本点空间分布

Fig.1 Spatial distribution of field samples

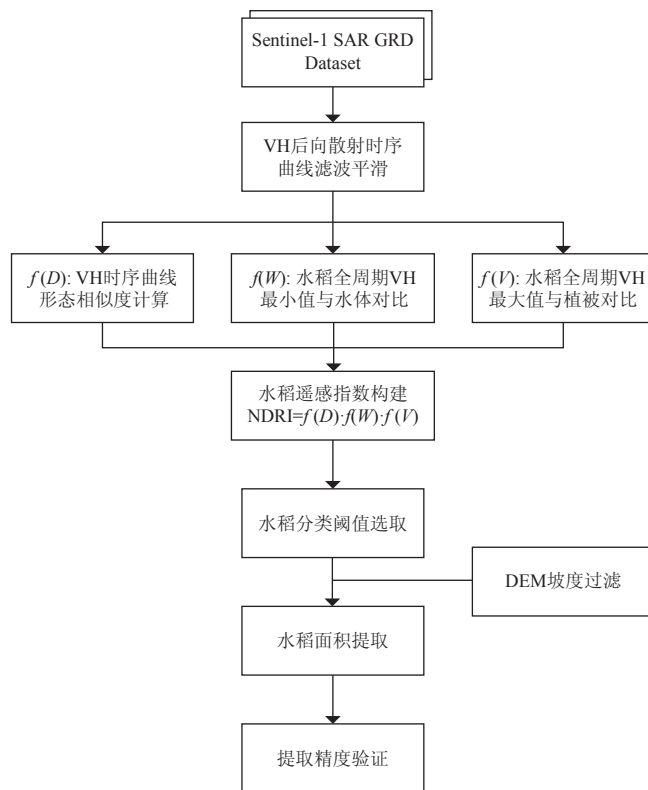


图 2 研究流程图

Fig.2 Research flowchart of paddy rice mapping

2.1 时序曲线平滑滤波

SG 滤波是一种广泛应用的数据平滑滤波降噪方法, 其通过在数据上应用滑动窗口, 并在每个窗口内使用最小二乘多项式拟合来实现平滑处理。具体来说, 对于每个窗口, 选取 $2m+1$ 个相邻数据点 (其中 m 是窗口的半宽度), 然后通过最小二乘拟合这些数据点来获得一个多项式模型。通过在窗口内进行多项式拟合, SG 滤波能够在平滑数据的同时保留数据的整体趋势。由于 SAR 数据固有的散斑噪声^[30], 后向散射原始数值存在一定地误差, 因此, 在本研究中通过利用 SG 算法对后向散射系数数值的时序曲线进行数据降噪处理, 使得数值变化趋势更明显。

2.2 DTW 时序相似度计算

DTW 算法使用动态规划来查找两个时间序列之间的最小距离, 其中序列通过拉伸或收缩时间维度来进行改变^[31]。其原理如下:

假设有两组长度分别为 m 和 n 的时间序列 $C=\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$ 、 $Q=\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$, 构建 m 行 n 列的矩阵 $A_{m \times n}$, 定义矩阵中每个位置的元素值为 C_i 与 Q_j 之间的距离 $a_{ij} = \sqrt{(C_i - Q_j)^2}$ 。在矩阵 $A_{m \times n}$ 中, 由一组相邻的元素构成一条路径 $W=\{W_1, W_2, \dots, W_k\}$, 该路径满足以下条件:

- 1) 单调性: $W_k = a_{ij}$, $W_{k+1} = a_{i'j'}$, 其中 $i' \geq i$, $j' \geq j$;
- 2) 有界性: $W_1 = a_{11}$, $W_k = a_{mn}$;
- 3) 连续性: $W_k = a_{ij}$, $W_{k+1} = a_{i'j'}$, 其中 $i' \leq i+1$, $j' \leq j+1$;

DTW 算法可以概括为应用动态规划来寻找最佳成本路径, 如计算式 (1) 所示:

$$\begin{cases} D_{(1,1)} = a_{11} \\ D_{(i,j)} = a_{ij} + \min(D_{(i-1,j-1)}, D_{(i,j-1)}, D_{(i,j)}) \end{cases} \quad (1)$$

2.3 NDRI 水稻指数合成

水稻的后向散射系数特征可以概括为: 1) 水稻在移栽期前后的后向散射系数值呈现先下降后上升的“V”型特征; 2) 移栽期秧苗矮小稀疏, 土壤淹没在水面以下, 后向散射值低, 接近水体的后向散射值; 3) 分蘖期和抽穗期水稻冠层逐渐封闭, 对散射能量的衰减作用变强, 接近植被的后向散射值。水稻地块应该同时具备这 3 个特征。

为了量化这些特征, 定义了 3 个函数 $f(D)$ 、 $f(W)$ 和 $f(V)$, 并都进行归一化处理。 $f(D)$ 利用 DTW 距离量化在整个水稻生育期内像元的后向散射强度时序与水稻样本的形态相似度, 其计算式如式 (2) 所示。 $f(W)$ 量化了水稻生育期内像元的后向散射系数最小值与水体的差异, 其计算式如式 (3) 所示。 $f(V)$ 则量化了水稻生育期内像元的后向散射系数最大值与林地的差异, 其计算式如式 (4) 所示。

$$f(D) = \frac{D - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (2)$$

式中 D 为像元与水稻样本二者的时序曲线 DTW 距离, 可由计算式 (1) 得出; D_{\max} 为像元最大 DTW 距离, D_{\min} 为像元最小 DTW 距离。

$$f(W) =$$

$$\begin{cases} 1 & , \text{VH}_{\max} \leq \text{VH}_{\text{water}} \\ \frac{\text{VH}_{\min} - \text{VH}_{\text{water}}}{\text{VH}_{\text{tree}} - \text{VH}_{\text{water}}} & , \text{VH}_{\text{water}} < \text{VH}_{\min} \text{ 且 } \text{VH}_{\max} < \text{VH}_{\text{tree}} \\ 0 & , \text{VH}_{\min} \geq \text{VH}_{\text{tree}} \end{cases} \quad (3)$$

$$f(V) =$$

$$\begin{cases} 1 & , \text{VH}_{\min} \geq \text{VH}_{\text{tree}} \\ \frac{\text{VH}_{\text{tree}} - \text{VH}_{\max}}{\text{VH}_{\text{tree}} - \text{VH}_{\text{water}}} & , \text{VH}_{\text{water}} < \text{VH}_{\min} \text{ 且 } \text{VH}_{\max} < \text{VH}_{\text{tree}} \\ 0 & , \text{VH}_{\max} \leq \text{VH}_{\text{water}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 VH_{\min} 为像元在水稻生育期内的后向散射系数时序最小值; VH_{\max} 为像元在水稻生育期内的后向散射系数时序最大值; VH_{water} 为水体阈值, VH_{tree} 为林地阈值, 因水体和植被的后向散射系数在水稻生育期内波动幅度较小, 在本研究中 VH_{water} 和 VH_{tree} 分别为水体和植被在水稻生育期内的后向散射系数均值。

对于 $f(D)$ 、 $f(W)$ 和 $f(V)$, 它们均缩放到 $[0, 1]$ 的范围内, 数值越大表明水稻的可能性越高。对此 3 个数值使用乘法运算进行组合, 因为它们都是判断地物为水稻的必要条件, 组合后的结果能更科学地对水稻进行区分。最终, 本研究将 3 个数值以相乘的方式整合为一个新的水稻遥感指数 (normalized difference rice index, NDRI) 用于水稻提取, 如计算式 (5) 所示。

$$\text{NDRI} = f(D) \cdot f(W) \cdot f(V) \quad (5)$$

2.4 水稻分类阈值选取

通过 3.3 节得出的 NDRI 指数可以反映出不同地物的信息。进一步地, 需要设定一个阈值用以区分水稻和其他地物。为了确定这一阈值, 本文通过箱形图分析了不同地物样本点的 NDRI 数值。从图 3 中可以看出, 除少数异常值外, 水稻样本点的 NDRI 数值远高于其他类型。因此, 在本研究区将水稻和非水稻分类的阈值确定为 0.25。

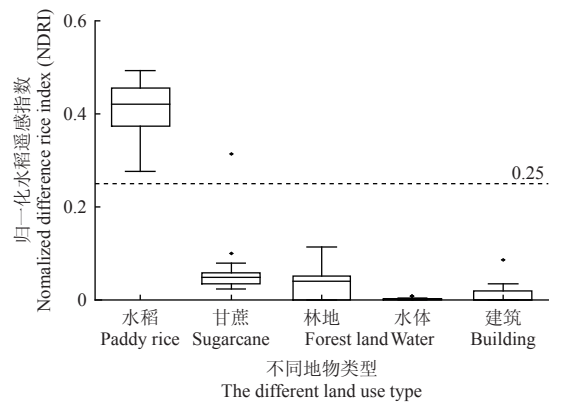


图 3 不同地物的 NDRI 遥感指数

Fig.3 NDRI index value of different objects

3 结果与分析

3.1 典型地物后向散射系数时序特征

通过应用 SG 算法进行平滑滤波处理后绘制不同地物的后向散射系数时序曲线, 如图 4 所示。在水稻生长

的4月到9月期间,不同地物的后向散射系数表现出显著的差异。具体而言,人工建筑的后向散射系数相对较高且相对稳定,长期处于-14 dB附近。盈江县气候湿润,植被终年常绿,林地后向散射系数波动范围在-14 dB到-16 dB之间。水体由于表面光滑,散射值低,后向散射系数波动范围在-28 dB到-26 dB之间。甘蔗的后向散射系数变化趋势与水稻类似,呈现出“V”型特征,但在早期地块以裸土为主,散射值高于水稻。随着甘蔗的生

长,后向散射系数快速上升并超过水稻,时序曲线与水稻在图中出现交叉点。水稻的后向散射系数随着水稻生长发育呈现出明显的“V”型变化特征:每年4月中旬至5月中旬为水稻播种移栽期,此时农田中含有较多水体,导致后向散射系数逐渐达到低值;5月至7月中下旬为分蘖抽穗期,这一阶段随着水稻生长,后向散射系数逐渐增大,在9月上旬达到最高点-16 dB;9月中下旬进入水稻成熟期,后向散射系数略有下降。

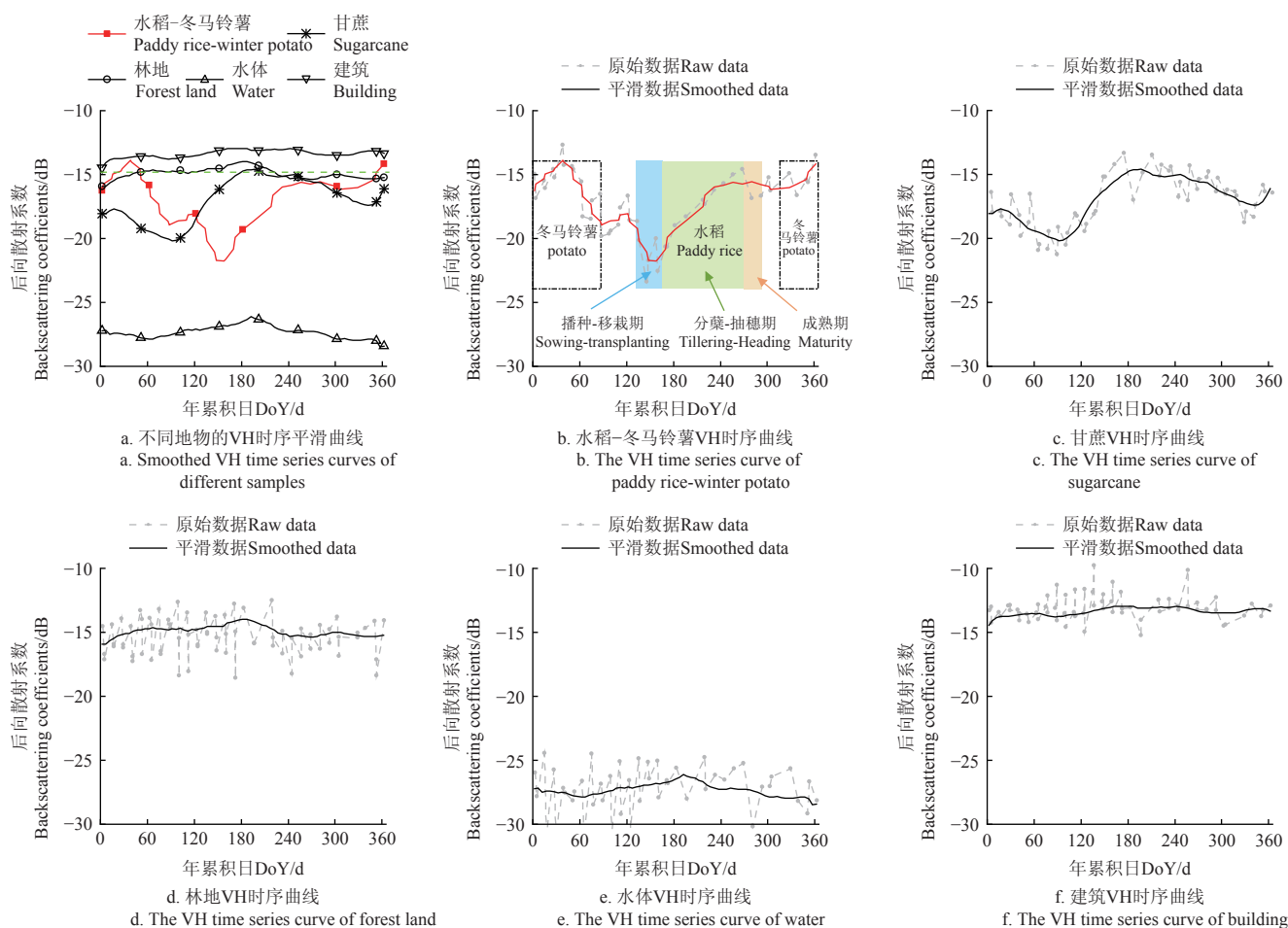


图4 不同地物在VH极化方式下的后向散射系数值

Fig.4 Back-scattering coefficient value of different objects under VH model

3.2 水稻面积提取及精度验证

本研究使用QGIS软件对提取出的盈江县水稻种植面积进行汇总。结果表明,2023年盈江县水稻种植总面积为199.83 km²。通过结合天地图高分辨率影像,对水稻、甘蔗、建筑、水体、林地、裸土等5类开展地物

采样,使用混淆矩阵对分类结果进行精度验证,结果如表1所示。从表中可以看出,水稻分类结果总体精度为89.42%,总体Kappa系数为82.06%,其中水稻的用户精度为87.20%,生产者精度为89.38%,分类结果较好。

表1 研究区2023年水稻制图精度验证
Table 1 Accuracy assessment of rice mapping in 2023

地物类型 Field type	提取结果 Extraction results		用户精度 User's accuracy /%	生产者精度 Producer's accuracy /%	总体精度 Overall accuracy /%	Kappa 系数 Kappa statistics
	水稻 Paddy rice /个	其他 Other /个				
水稻	143	17	87.20	89.38	89.42	0.82
其他	21	178	91.28	89.45		

3.3 水稻空间集聚特征

从区域分布特征(图5)来看,水稻种植在盈江县

的分布较为集中,大盈江沿岸呈连片分布状态,空间集聚效应表现明显。其中,大盈江沿岸的平原镇、旧城

镇、弄璋镇、太平镇、新城乡 5 个乡镇水稻种植面积为 181.37 km²，占全县总面积的 90.76%。近年来，盈江县引进各类农业装备，成立多家农机合作社，积极发展水稻生产全程机械化，进一步强化了大盈江沿岸坝区在水稻种植上的优势地位。

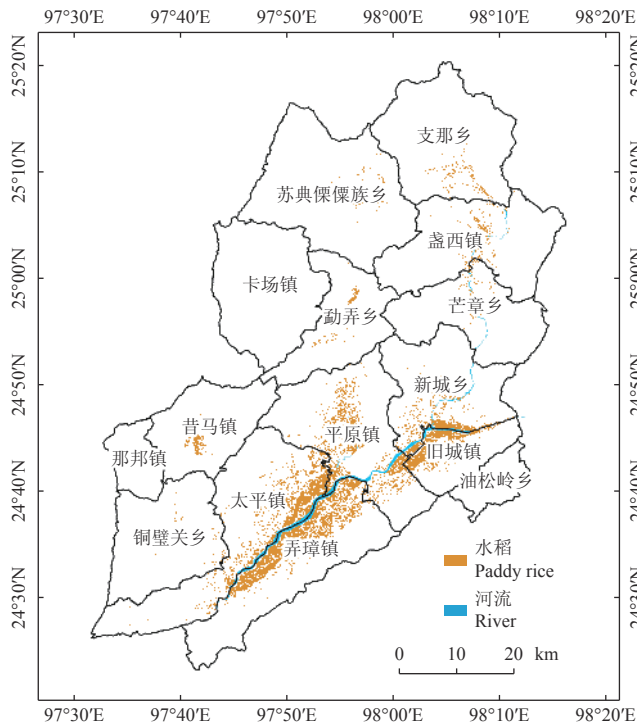


图 5 研究区 2023 年水稻空间分布提取结果
Fig.5 Extraction result of rice distribution in 2023

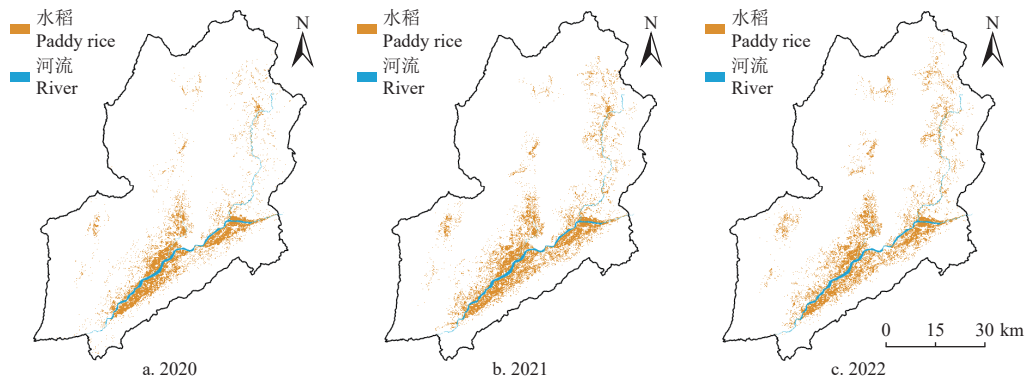


图 6 研究区历年水稻空间分布提取结果
Fig.6 Extraction result of rice distribution in 2020, 2021 and 2022

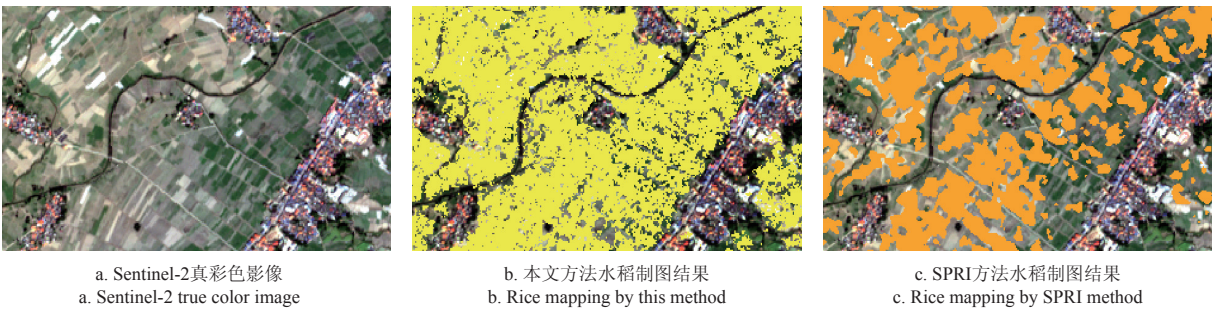


图 7 本文方法与 SPRI 方法的制图结果对比
Fig.7 Comparison of rice mapping results between this method and SPRI method

4 讨 论

4.1 提取面积与统计数据比较

以研究区为统计单元，利用本模型提取 2020、2021 和 2022 年水稻种植面积（如图 6 所示），并与农业统计数据 进行对比。从表 2 中可以看出，模型结果与农业统计数据 具有较高的一致性，但遥感提取面积相较于统计数据整体 上存在高估，相对误差分别为 4.08%、3.91% 和 4.74%。根 据实地调查发现，研究区田块面积较小且水稻田块间种 有其他作物或蔬菜，SAR 影像分辨率以及斑点噪声可能 是导致遥感提取面积与统计数据存在偏差的主要原因。

表 2 本文方法与统计年鉴数据的水稻面积对比			
Table 2 Area of paddy rice area in this method compared with the National Bureau of Statistics (NBS) data in 2020, 2021 and 2022			
年份 Year	水稻面积 Paddy rice area /km ²		相对误差 Relative error/%
	本文方法 This method	农业统计数据 The NBS data	
2020	197.87	190.11	4.08
2021	207.46	199.65	3.91
2022	216.60	201.68	4.74

4.2 与 SPRI 方法的对比

从图 7 中可以看出，本文与 XU 等^[24]提出的基于时 序雷达的水稻制图指数（SAR-based paddy rice index,SPRI）方法相比效果更好，其原因：一是本研究 中对时序曲线原始数据进行了平滑滤波处理，平滑滤波不仅能 有效地消除图像中的异常值，还能够填补由于数据缺失而 产生的空缺，从而提升了图像的质量和完整性；二是由 于某些作物具有与水稻相似的后向散射动态范围，本 研究使用时序曲线的形态相似度代替 SPRI 方法中的数值 范围，避免了其对水稻提取形成干扰。

本研究提出的方法通过综合多类型、多时相植被特征和基于重建的特征曲线提取的物候特征,从有限的数据中挖掘更多可用信息,提升了分类精度,具有更好的适应性和稳定性。与基于 SPRI 方法的分类结果相比,本文提取结果更符合实际情况。

4.3 提取结果不确定性分析

地表环境的复杂性和雷达数据的无序噪声给水稻提取带来了很大的挑战,提取过程存在的一些误差会导致提取结果的不确定性,具体包括以下几个方面:

1) SAR 影像中的斑点噪声可能导致影像细节的丢失或模糊,同时造成地物的反射强度出现不稳定的变化,进而降低影像质量和解译能力,对特征提取造成负面影响。

2) 不同的作物可能具有相似的后向散射系数时序曲线,后续有必要结合纹理、形态等特征来进一步提高作物的分类精度。此外,本文方法仍需要较为完备的数据条件,如何准确实现水稻季中分类还有待进一步研究。

3) SAR 影像的分辨率也是影响提取结果的重要因素, Sentinel-1 影像空间分辨率为 10 m,对与景观破碎的区域可能存在多个地物混合在同一个像元中的情况,这会导致地物边界不够细致,影响提取结果准确性。

5 结 论

1) SAR 影像能较好地反映出不同地物的时序变化情况,尤其是在光学遥感数据有限的多云雨地区对水稻提取具有良好地灵活性和适用性,适用于县域尺度的水稻快速制图。

2) 本文以 Sentinel-1 SAR 影像为数据源,基于后向散射系数的时序变化提取多个特征合成为新的归一化差异水稻指数 NDRI 以用于水稻提取。与 SPRI 方法相比,本文模型在平滑噪声数据的同时较好地结合了水稻后向散射系数的形态特征,提取结果更符合实际。

3) 2023 年盈江县水稻种植面积为 199.83 km²,其主要分布在大盈江沿岸的平原镇、太平镇、旧城镇和弄璋镇。模型总体准确率为 89.42%, Kappa 系数为 0.82。通过与 2020 年、2021 年和 2022 年的农业统计数据对比,模型结果与统计数据存在强一致性,总体上看模型具有较好的应用价值。

【参 考 文 献】

- [1] 国家统计局农业社会经济调查司.《中国农村统计年鉴 2023》[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [2] 陈浮, 刘俊娜, 常媛媛, 等. 中国耕地非粮化空间格局分异及驱动机制[J]. 中国土地科学, 2021, 35(9): 33-43.
CHEN Fu, LIU Junna, CHANG Yuanyuan, et al. Spatial pattern differentiation of non-grain cultivated land and its driving factors in China[J]. China Land Science, 2021, 35(9): 33-43. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张婕, 刘玉洁, 张二梅, 等. 中国县域耕地动态演变及其驱动机制[J]. 地理学报, 2023, 78(9): 2105-2127.
ZHANG Jie, LIU Yujie, ZHANG Ermei, et al. Dynamics and driving mechanisms of cultivated land at county level in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(9): 2105-2127. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王贞妍, 何云玲, 林晨. 近 30 年云南省主要粮食作物种植面积与产量变化分析[J]. 热带地理, 2023, 43(7): 1288-1301.
WANG Zhenyan, HE Yunling, LIN Chen. Spatio-temporal variation of the grain planting area and yield in Yunnan Province in the last 30 years [J]. Tropical Geography, 2023, 43(7): 1288-1301. (in Chinese with English abstract)
- [5] LUINTEL N, MA W, MA Y, et al. Tracking the dynamics of paddy rice cultivation practice through MODIS time series and PhenoRice algorithm[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108538.
- [6] HU Q, SULLA-MENASHE D, XU B, et al. A phenology-based spectral and temporal feature selection method for crop mapping from satellite time series[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 80: 218-229.
- [7] LIU L, KANG S, XIONG X, et al. Cropping intensity map of China with 10 m spatial resolution from analyses of time-series Landsat-7/8 and Sentinel-2 images[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2023, 124: 103504.
- [8] 王晓晓, 韩留生, 杨骥, 等. Sentinel-2 与 Landsat 8 数据组合下的多特征冬小麦面积提取[J]. 测绘通报, 2022(3): 111-115.
WANG Xiaoxiao, HAN Liusheng, YANG Ji, et al. Extraction of multi-feature winter wheat area based on Sentinel-2 and Landsat 8 data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(3): 111-115. (in Chinese with English abstract)
- [9] 桑国庆, 唐志光, 毛克彪, 等. 基于 GEE 云平台与 Sentinel 数据的高分辨率水稻种植范围提取——以湖南省为例[J]. 作物学报, 2022, 48(9): 2409-2420.
SANG Guoqing, TANG Zhiguang, MAO Kebiao, et al. High-resolution paddy rice mapping using Sentinel data based on GEE platform: A case study of Hunan province, China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(9): 2409-2420. (in Chinese with English abstract)
- [10] NI R, TIAN J, LI X, et al. An enhanced pixel-based phenological feature for accurate paddy rice mapping with Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 178: 282-296.
- [11] 谭深, 吴炳方, 张鑫. 基于 Google Earth Engine 与多源遥感数据的海南水稻分类研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 937-947.
TAN Shen, WU Bingfang, ZHANG Xin. Mapping paddy rice in the Hainan Province using both Google Earth Engine and remote sensing images[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(6): 937-947. (in Chinese with English abstract)
- [12] KOBAYASHI S, IDE H. Rice crop monitoring using Sentinel-1 SAR Data: A case study in Saku, Japan[J]. Remote Sensing, 2022, 14(14): 3254.

- [13] JIANG X, LUO S, GAO S, et al. An automatic rice mapping method based on constrained feature matching exploiting Sentinel-1 data for arbitrary length time series[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 114: 103032.
- [14] BAZZI H, BAGHDADI N, EL HAJJ M, et al. Mapping paddy rice using Sentinel-1 SAR time series in Camargue, France[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(7): 887.
- [15] ZHAN P, ZHU W, LI N. An automated rice mapping method based on flooding signals in synthetic aperture radar time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112112.
- [16] PARK S, IM J, PARK S, et al. Classification and mapping of paddy rice by combining Landsat and SAR time series data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 447.
- [17] XIAO W, XU S, HE T. Mapping paddy rice with Sentinel-1/2 and phenology-, object-based algorithm—A implementation in Hangjiahu Plain in China using GEE platform[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 990.
- [18] YOU N, DONG J. Examining earliest identifiable timing of crops using all available Sentinel 1/2 imagery and Google Earth Engine[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 161: 109-123.
- [19] 杨靖雅, 胡琼, 魏浩东, 等. 基于 Sentinel-1/2 数据的中国南方单双季稻识别结果一致性分析[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(16): 3093-3109.
- YANG Jingya, HU Qiong, WEI Haodong, et al. Consistency analysis of classification results for single and double cropping rice in Southern China based on Sentinel-1/2 Imagery[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(16): 3093-3109. (in Chinese with English abstract)
- [20] 姚园, 毋亭, 李一凡, 等. 基于水稻物候参数及面向对象算法的稻田识别[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(11): 150-158.
- YAO Yuan, WU Ting, LI Yifan, et al. Paddy field identification using rice phenological parameters and object-oriented algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(11): 150-158. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张颖, 何贞铭, 吴贞江. 基于多源遥感影像的农作物分类提取[J]. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 2021, 52(4): 615-618.
- ZHANG Ying, HE Zhenming, WU Zhenjiang. Crop classification and extraction based on multi-source remote sensing image[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 52(4): 615-618. (in Chinese with English abstract)
- [22] 黄翀, 许照鑫, 张晨晨, 等. 基于 Sentinel-1 数据时序特征的热带地区水稻种植结构提取方法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 177-184.
- HUANG Chong, XU Zhaoxin, ZHANG Chenchen, et al. Extraction of rice planting structure in tropical region based on Sentinel-1 temporal features integration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(9): 177-184. (in Chinese with English abstract)
- [23] HE Y, DONG J, LIAO X, et al. Examining rice distribution and cropping intensity in a mixed single- and double-cropping region in South China using all available Sentinel 1/2 images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 101: 102351.
- [24] XU S, ZHU X, CHEN J, et al. A robust index to extract paddy fields in cloudy regions from SAR time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 285: 113374.
- [25] YANG M, GUO B, WANG J. A novel and robust method for large-scale single-season rice mapping based on phenology and statistical data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 213: 14-32.
- [26] 何泽, 李世华. 水稻雷达遥感监测研究进展[J]. *遥感学报*, 2023, 27(10): 2363-2382.
- HE Ze, LI Shihua. Research progress on radar remote sensing for rice growth monitoring[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(10): 2363-2382. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张晓梅, 张巫军, 丁艳锋, 等. 云南单季水稻立体生态区划及安全成熟期时空演变研究[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(5): 998-1005.
- ZHANG Xiaomei, ZHANG Wujun, DING Yanfeng, et al. Tridimensional ecological regionalization and spatial and temporal characteristics of safe maturity dates of rice in Yunnan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(5): 998-1005. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘警鉴, 李洪忠, 华瑾, 等. 基于 Sentinel-1A 数据的临高县早稻面积提取[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(1): 191-199.
- LIU Jingjian, LI Hongzhong, HUA Cui, et al. Extraction of early paddy rice area in Lingao County based on Sentinel-1A data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(1): 191-199. (in Chinese with English abstract)
- [29] 查东平, 蔡海生, 张学玲, 等. 基于多时相 Sentinel-1 水稻种植范围提取[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(3): 184-195.
- ZHA Dongping, CAI Haisheng, ZHANG Xueling, et al. Extraction of paddy fields using multi-temporal Sentinel-1 images[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(3): 184-195. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王浩宇, 杨海涛, 王晋宇, 等. 遥感图像去噪方法研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2024, 60(15): 55-65.
- WANG Haoyu, YANG Haitao, WANG Jinyu, et al. Review of image denoising methods for remote sensing[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2024, 60(15): 55-65. (in Chinese with English abstract)
- [31] 管续栋, 黄翀, 刘高焕, 等. 基于 DTW 距离的时序相似性方法提取水稻遥感信息——以泰国为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 267-272.

GUAN Xudong, HUANG Chong, LIU Gaohuan, et al.
Extraction of paddy rice area using a DTW distance based

similarity measure[J]. Resources Science, 2014, 36(2): 267-272.
(in Chinese with English abstract)

Construction and validation of paddy rice index using phenological features of SAR time series

ZHANG Zhuo , YANG Na^{*} , QIAN Jinliang , CHEN Shengdong , LIAO Hengsong , BAO Yunke

(Institute of Agricultural Economics and Information, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650051, China)

Abstract: Rice cropping has been the great contribution to the water consumer and greenhouse gas emitter. It is of great significance to accurately monitor the water resources and rice cropping area for the food security under climate change. Among them, Yingjiang County is located in the central area of Yunnan Province, indicating the better representation of typical agriculture. However, the optical remote sensing cannot fully meet the accurate identification of some crops, due to the pixel heterogeneity, mixed pixels, and spectral similarity. Moreover, it is still lacking on the optical images for crop monitoring under the cloudy and rainy climates during the paddy rice growing period in tropical regions. Some difficulties are also remained to extract the rice using multi-spectral remote sensing. Current techniques are focused mainly on the optics and radar image fusion for mapping paddy rice. The applicability has been limited in the absence of optical images. The purpose of this study is to monitor the rice planting areas with frequent clouds and rain in the potential application of Sentinel-1 SAR data. Several features were extracted from the temporal curve of backscattering coefficient using SAR data in the entire growth period of rice. Multiple features were also extracted from the temporal changes of backscattering coefficient in the SAR images. The large-scale water rice maps were obtained to combine the new remote sensing index, named NDRI (Normalized Difference Vegetation Index). The Sentinel-1 satellite was provided all-weather synthetic aperture radar imaging in the C-band. The Sentinel-1 SAR GRD dataset was accessed in the GEE cloud computing platform. Firstly, the SG filtering was used to smooth the temporal curves of backscattering coefficients in the different land covers. Then, the dynamic time warping distances among different temporal curves were calculated using rice samples as a reference. Meanwhile, two feature values were calculated to quantify the different characteristics of rice growth, including the difference between the minimum temporal curves and water bodies, and the difference between the maximum temporal curves and vegetation. Their multiplication was taken as the remote sensing index for the classification of rice threshold. Finally, the spatial distribution of rice was further corrected to generate the slope data from NASADEM images using overlay analysis. The effectiveness of the improved model was validated, taking Yingjiang County in Yunnan Province as the study area. The optical images were almost unusable during the period from June to September in the whole growing season of paddy rice, due to the extensive cloud cover. The results showed that: 1) The temporal SAR features of rice were accurately extracted with an overall accuracy of 89.42% and a Kappa coefficient of 0.82; 2) The planting area of rice in Yingjiang County in 2023 was 199.83km², where the planting area along the Dayingjiang River was accounted for 90% of the total county. There was the significantly spatial aggregation of rice planting. This finding can provide the strong reference to accurately extract the spatial distribution of rice in the cloudy and rainy areas for the decision-making on agricultural policies.

Keywords: paddy rice mapping; agricultural remote sensing; synthetic aperture radar (SAR); temporal features; Google earth engine