

郭玉娣, 李 根, 李 春, 等. 基于多时相合成孔径雷达数据的水稻种植面积监测[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(5): 1179-1188.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.05.010

## 基于多时相合成孔径雷达数据的水稻种植面积监测

郭玉娣<sup>1,2</sup>, 李 根<sup>1,2</sup>, 李 春<sup>1</sup>, 梁冬坡<sup>1,2</sup>

(1. 天津市气候中心, 天津 300074; 2. 高分辨率对地观测系统天津数据与应用中心, 天津 300074)

**摘要:** 与光学遥感相比, 合成孔径雷达(SAR)遥感能够不受云雨天气影响, 为大范围作物种植信息的精准监测提供新手段。本研究以天津市小站稻为例, 基于2018–2021年的多时相 Sentinel-1A SAR 影像, 提出了结合小站稻生长特征相似性分析与随机森林分类的水稻种植分布和面积监测方法。首先提取 VV 和 VH 极化方式下不同地物的后向散射系数时间序列特征曲线, 并利用 HANTS 滤波来消除噪声影响。然后根据野外调查数据获取小站稻参考生长曲线, 构建小站稻相似性指数, 筛选出小站稻可能种植区域。最后采用随机森林分类模型提取小站稻种植面积。结果表明, 基于多时相 Sentinel-1A SAR 影像相似性分析及随机森林分类能够获得较高精度的水稻种植面积, VV 和 VH 两种极化方式下提取的水稻种植面积与统计年鉴结果的平均相对误差分别为 2.67% 和 3.80%, 总体分类精度分别达到 95.52% 和 93.40%, Kappa 系数分别为 0.94 和 0.93; 与不引入相似性指数进行分类相比, VV 和 VH 极化方式下引入相似性指数后总体分类精度分别提高 4.35 个百分点和 3.13 个百分点, Kappa 系数分别提高 0.04 和 0.03, 水稻的制图精度分别提高 3.38 个百分点和 3.25 个百分点。本研究结果为开展高精度水稻种植信息业务化监测提供参考。

**关键词:** 合成孔径雷达; 随机森林; 相似性指数; 水稻种植面积提取

**中图分类号:** S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)05-1179-10

## Rice planting area monitoring based on multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) data

GUO Yu-di<sup>1,2</sup>, LI Gen<sup>1,2</sup>, LI Chun<sup>1</sup>, LIANG Dong-po<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China; 2. High Resolution Earth Observation System Tianjin Data and Application Center, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** Compared with optical remote sensing, synthetic aperture radar (SAR) remote sensing can not be affected by cloud and rain, which provides a new means for accurate monitoring of large-scale crop planting information. Based on the multi-temporal Sentinel-1A SAR image data from 2018 to 2021, a new method for monitoring the planting distribution and area was proposed with Xiaozhan rice in Tianjin as an example, which combined the similarity analysis of growth characteristics with random forest classification. Firstly, the backscattering coefficient time series characteristic curves of different ground objects under VV and VH polarization modes were extracted, and HANTS filtering was used to eliminate the effect of noise. Then, according to the field survey data, the reference growth curve of Xiaozhan rice was obtained and the similarity index of Xiaozhan rice was constructed to screen out the possible planting areas of Xiaozhan rice. Finally, random forest classification model was used to extract the planting area of Xiaozhan rice. The results showed that the multi-temporal

收稿日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901398); 天津市气象局一般项目(202222ybxm13)

作者简介: 郭玉娣(1988–), 江苏盐城人, 硕士, 工程师, 主要从事遥感应用研究。(E-mail) guoyudi.0802@163.com

通讯作者: 李 根, (E-mail) ligen\_zt@163.com

Sentinel-1A SAR image similarity analysis combined with random forest classification could obtain high precision rice planting information. The average relative errors of rice planting area extracted by VV and VH polarization methods with the statistical data were 2.67% and 3.80%, respectively. The overall classification accuracies were

95.52% and 93.40%, respectively, and the Kappa coefficients were 0.94 and 0.93, respectively. Compared with the classification results without similarity index, the overall classification accuracy with similarity index under VV and VH polarization modes increased by 4.35 percentage points and 3.13 percentage points, the Kappa coefficients increased by 0.04 and 0.03, and the mapping accuracy of rice increased by 3.38 percentage points and 3.25 percentage points, respectively. The results of this study provide a reference for future business monitoring of high-precision rice planting information.

**Key words:** synthetic aperture radar; random forest; similarity index; rice planting area extraction

水稻是中国主要粮食作物之一,在保障国家粮食安全中发挥着重要作用。党的十九大报告提出,“确保国家粮食安全,把中国人的饭碗牢牢端在自己手中”。天津小站稻是全国首个粮食作物地理标志农产品,天津市种植的水稻均为小站稻。2018 年天津市出台《天津小站稻振兴规划方案》,计划在 3~5 年内将小站稻种植面积扩大到  $6.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,并将天津打造成为全国高端优质水稻发展引领区,提升现代农业发展质量,保护传承稻耕文化。及时准确地监测小站稻种植面积和分布信息能为政府保障粮食安全、优化种植结构、合理调配水资源等提供科学决策依据<sup>[1]</sup>。

传统的农情统计和抽样调查难以满足现代农业生产者和管理部门及时准确获取农情信息的需求<sup>[2]</sup>。近几十年来,卫星遥感技术的迅猛发展为及时准确监测农业资源信息提供可能,卫星遥感技术已成为大尺度农作物种植信息获取的重要手段<sup>[3-4]</sup>。目前,大范围农作物种植信息提取广泛采用 MODIS、Landsat、Sentinel-2 或高分系列光学卫星影像数据。杨沈斌等<sup>[5]</sup>利用 MODIS 时序影像数据,根据水稻相似性指数提取河南省水稻种植面积。李根等<sup>[6]</sup>利用 MODIS 时序影像结合混合像元线性光谱分解法,对江苏省水稻种植面积进行了提取。张晓忆等<sup>[7]</sup>利用 HJ-1A 和 GF-1 卫星影像构建基于 4 种光谱指标的决策树分类模型,获取了淮安市水稻种植分布。Cao 等<sup>[8]</sup>利用 Landsat 影像数据进行赣抚平原灌溉区不同种植时期和种植制度下的水稻种植面积监测,总体精度超过 71%。曹丹等<sup>[9]</sup>基于多年 MODIS 数据,结合分区的水稻判别条件,提取了中国东北三省的水稻种植面积及其分布,平均精度可达 90%以上。然而,MODIS 等中分辨率光学卫星在大范围农作物种植面积监测时,受空间分辨率的影响常出现大量混合像元,从而影响了精度;Landsat 等高分辨率光学卫星受重访周期长及多云阴雨天气影响,难以保障数据的连续获取,制约大范围农作物种植信息的及时准确监测。

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)相比光学遥感数据而言不受云雾雨雪天气影响,可以根据地物光谱对农作物种植状况进行全天候、全天时监测<sup>[10]</sup>,能够弥补光学影像的不足,为精准监测大范围的农作物种植信息提供了新的手段。张征云等<sup>[11]</sup>以 Sentinel-1 和 Sentinel-2 为数据源,基于水稻后向散射系数时序变化特征和水稻不同生长期光谱特征,对天津市宝坻区水稻种植面积进行了提取,并对两者精度进行了对比。Shao 等<sup>[12]</sup>基于 RADARSAT-1 的多时相数据,建立水稻时域散射经验模型,进行广东肇庆市水稻分布监测及产量预测。申双和等<sup>[13]</sup>、杨沈斌等<sup>[14]</sup>利用 ENVISAT ASAR 雷达数据开展稻田面积提取和估产研究。Clauss 等<sup>[15]</sup>利用多时相 Sentinel-1 数据,结合随机森林回归模型进行了湄公河三角洲水稻分布制图并测产。黄翀等<sup>[16]</sup>基于 Sentinel-1 时间序列数据,通过动态时间规整算法对热带地区的水稻种植信息进行提取。桑国庆等<sup>[17]</sup>利用 Sentinel-1A 数据,将后向散射系数和增强型植被指数相结合,建立决策树模型,实现了基于谷歌地球引擎(Google earth engine, GEE)云平台的多云雨地区水稻分布制图。夏俊等<sup>[18]</sup>利用 Sentinel-1A 数据,基于光谱微分变换分析法和支持向量机(SVM)模型对水稻进行识别,分类精度达到 89.88%。查东平等<sup>[19]</sup>基于多时相 Sentinel-1 数据,计算了不同物候期稻田与其他地物后向散射系数之间的 J-M 距离(Jeffries-matusita distance),确定了水稻识别的最优物候期,并利用随机森林算法提取水稻种植范围,获得了较高的分类精度。然而,利用 SAR 数据来进行水稻种植信息提取时,分类精度往往受影像的时相、样方的选取等因素影响,其原因在于特定的时相内存在异质地物的后向散射系数接近或一致。目前,结合水稻全生育期的 SAR 时序数据及水稻相似度指数进行水稻种植面积提取方面的研究较少。

本研究利用多时相 Sentinel-1A SAR 影像对天津市 2018–2021 年的小站稻种植面积进行提取。首先,

分析 VV 和 VH 极化方式下小站稻、水体、裸地和其他 4 类地物的后向散射系数时间序列曲线,并进行 HANTS 滤波以消除噪声影响。然后,根据野外调查数据获取小站稻参考生长曲线,构建小站稻相似性指数筛选小站稻可能种植区域。最后,将该指数加入随机森林分类模型提取小站稻种植面积,以期提高水稻种植信息的提取精度,为进一步利用 Sentinel-1A SAR 影像进行水稻长势监测提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与数据源

**1.1.1 研究区概况** 天津市位于华北平原东北部的海河流域下游,处于  $38^{\circ}34' \sim 40^{\circ}15'N$ ,  $116^{\circ}43' \sim 118^{\circ}04'E$ ,全市总面积  $1.1946 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。受季风环流的影响,天津地区四季分明,春季干旱少雨、夏季高温高湿、秋季冷暖适中、冬季寒冷干燥,年平均气温  $12 \sim 15^{\circ}\text{C}$ ,无霜期  $196 \sim 246 \text{ d}$ ,年均日照时间  $2471 \sim 2769 \text{ h}$ ,年平均降水量  $550 \sim 600 \text{ mm}$ ,其中夏季降水量约占全年的 75%,雨热同季,光热条件良好。天津市的主要涉农区为宝坻区、宁河区、静海区、蓟州区和武清区等(图 1),主要种植水稻、冬小麦和玉米等作物。天津市水稻每年 4 月中下旬播种,5 月中下旬移栽,10 月成熟,整个生育期约 7 个月。

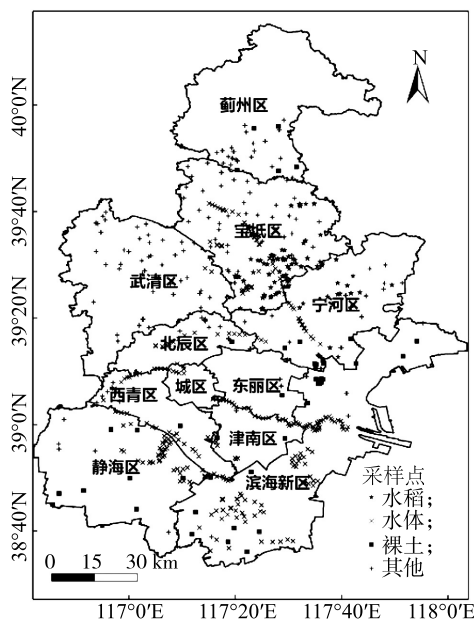


图 1 研究区概况和采样点分布

Fig.1 Overview of the study area and distribution of sampling points

**1.1.2 SAR 数据及预处理** Sentinel-1A 卫星是一颗搭载了 C 波段 (5.4 GHz) SAR 传感器的卫星,2014 年由欧洲宇航局发射。本研究选用 L1 级别干涉宽幅 (IW) 模式 VV 和 VH 双极化 Sentinel-1A SAR 数据,空间分辨率  $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ,幅宽  $250 \text{ km}$ ,重访周期  $12 \text{ d}$ 。根据天津小站稻的物候期,选取每年 4 月至 10 月的 Sentinel-1A 数据开展研究,经统计 2018–2021 年小站稻全生育期影像数分别为 16 景、17 景、16 景和 17 景。结合轨道数据和 DEM (高程数字模型),利用 SARscape 软件进行多时相 Sentinel-1A 数据预处理,主要步骤为图像配准、多时相滤波和地理编码等。

SAR 影像中雷达后向散射系数  $\sigma_{(i,j)}$  (dB) 的获取是根据预处理后雷达影像的像元灰度值 (DN) 计算获得<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_{(i,j)} = \lg \left[ \frac{DN_{(i,j)}^2}{A^2} \right] \quad (1)$$

式中  $i, j$  表示第  $i$  行第  $j$  列像素点位置;  $A$  为定标参数,由 Sentinel-1A 元数据计算得到。

**1.1.3 野外样本数据** 研究中将天津的土地利用类型分为水稻、水体、裸地和其他 4 类。为获取准确的野外样本数据,2021 年 4 月中旬和 7 月中旬在天津主要涉农区通过野外调研,利用高精度全球定位系统 (GPS) 采集不同地物分布的地理信息,结合高分辨率的 Worldview 影像和高分 1 号光学影像,在 SAR 影像上,确定不同地物类型样本。样本内中心像元位置分布如图 1 所示。其中:水稻样本 80 个、水体样本 275 个、裸地样本 48 个和其他样本 162 个。各土地利用类型随机选取 70% 样本 (2 698 像素点) 为训练样本,水稻 56 个样本 (233 像素点)、水体 192 个样本 (1 697 像素点)、裸地 34 个样本 (437 像素点) 和其他 113 个样本 (331 像素点),剩余 30% 样本 (900 像素点) 作为验证样本用于精度评价,水稻 24 个样本 (57 像素点)、水体 83 个样本 (647 像素点)、裸地 14 个样本 (118 像素点) 和其他 49 个样本 (78 像素点)。

进一步在 80 个水稻样本中,结合野外调查,选取 20 个纯水稻像元,利用多时相 SAR 数据,构建小站稻参考生长曲线。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 技术路线** 基于 2018–2021 年多时相 Sentinel-1A SAR 影像,利用小站稻生育期参考生长曲线进行



逐像元相似性分析,并结合随机森林分类模型进行天津小站稻种植面积信息的精确提取。首先构建长时间序列的 SAR 影像数据,构建水稻、水体、裸地和其他地物的后向散射系数时间序列曲线,并利用 HANTS 滤波方法对其进行平滑处理,以消除噪声影响。然后根据野外调查确定的纯小站稻像元样本的多时

相后向散射系数建立小站稻参考生长曲线,逐像元计算小站稻相似性指数,筛选出可能为小站稻的像元。再根据随机森林分类模型对疑似小站稻像元进行再提取,获得天津小站稻种植分布信息。最后对结合相似性指数先验知识与否的提取结果进行对比并进行精度验证评价。具体技术流程见图 2。

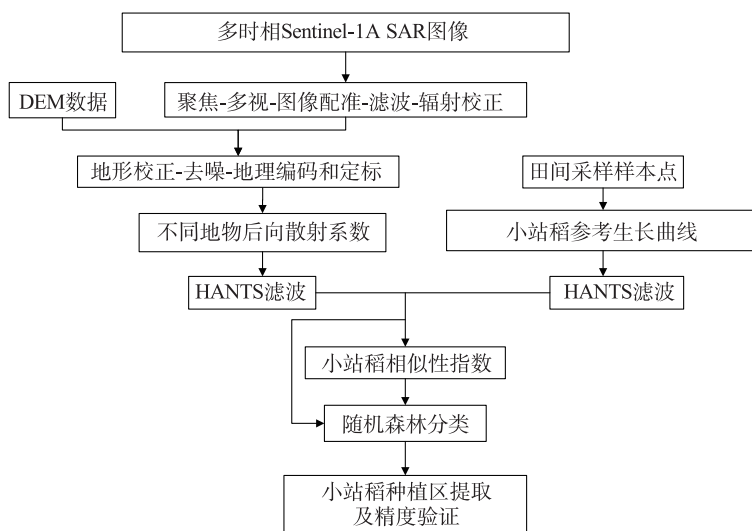


图 2 技术流程图

Fig.2 Technical flow chart

1.2.2 后向散射时序特征提取 结合野外采样样本从多时相的 SAR 影像中提取出小站稻生长季(4-10月)水稻、水体、裸地和其他类地物的 VV 和 VH 极化后向散射系数,初步得到 4 类地物后向散射系数的时序变化曲线。由于时间序列 SAR 影像会受到数据连续性波动和斑点噪声影响,原始数据的椒盐现象会导致时序后向散射系数特征曲线波动较大,因此要对其进行滤波平滑处理。HANTS 滤波对异常值较为敏感,同时对周期性波动噪声有很好的抑制作用,能有效降低噪声影响;通过傅里叶变换和最小二乘法拟合两种方法在时间维度对数值进行插值,既能够保留时序变化特征,又能消除数据连续性波动影响,最终获取更加连续的时序数据。本文通过 HANTS 滤波对水稻、水体、裸土和其他 4 类地物的后向散射系数特征曲线进行滤波平滑处理,得到更加连续的后向散射系数特征曲线。

1.2.3 小站稻相似性指数构建 利用选取的 20 个纯水稻像元多时相后向散射系数值,求取纯水稻像

元的各个时相后向散射系数平均值,建立小站稻参考生长曲线。各像元的小站稻相似性指数计算公式如下:

$$S_{\text{index}} = \sum_{i=1}^n |\sigma'_i - \sigma_i| \quad (2)$$

式中, $S_{\text{index}}$  为小站稻相似性指数; $i$  为小站稻第  $i$  个生育期时序, $\sigma_i$  为影像对应的小站稻第  $i$  时序的后向散射系数值; $\sigma'_i$  为小站稻参考生长曲线对应的第  $i$  时序的后向散射系数值, $n$  为小站稻生育期总时序。 $S_{\text{index}}$  值越小表明该像元的时序特征越接近小站稻参考生长曲线,即该像元为小站稻的可能性越大。

1.2.4 随机森林分类 随机森林分类是一种基于决策树的机器学习方法,被誉为“代表集成学习技术水平的方法”<sup>[21-22]</sup>。随机森林分类的流程如图 3 所示:在原始训练样本数据集中进行随机抽样,构成  $n$  个不同的训练样本数据集,对训练样本数据集逐个构建决策树模型,最后根据分类模型的投票情况获取最终分类结果<sup>[23-24]</sup>。

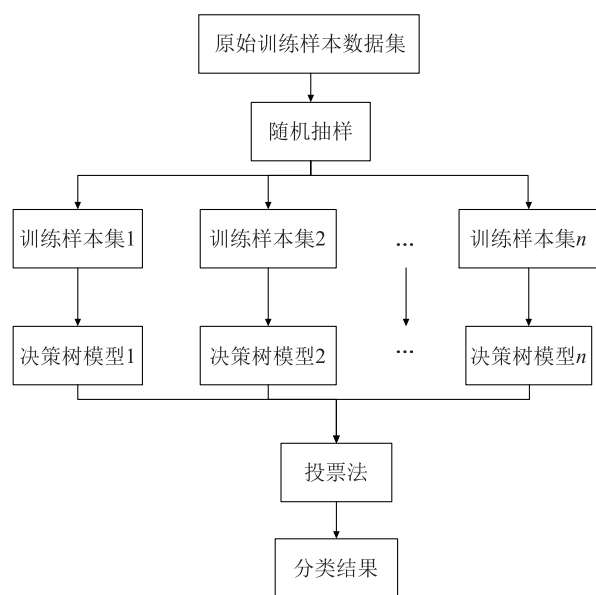


图3 随机森林分类流程图

Fig.3 Flow chart of random forest classification

## 2 结果及分析

### 2.1 后向散射系数特征分析

图4为2018–2021年水稻、水体、裸地和其他4种地物训练样本经滤波后在不同时相的后向散射系数变化曲线。VV极化方式下小站稻的后向散射系数介于-16 dB至-11 dB之间,整个生育期内呈现波动变化,2个低值区分别对应于5月20日和8月10日前后;水体的后向散射系数介于-21 dB至-18 dB之间,变化趋势为先增后减,7月中旬后缓慢降低;裸土的后向散射系数介于-16 dB至-10 dB之间,变化趋势亦为先增后减,峰值出现在8月份;其他地物的后向散射系数介于-12 dB至-7 dB之间,变化趋势亦为先增后减,峰值出现在8月上中旬。对比4种地物的后向散射系数可以看出水体的后向散射系数值最低,变化幅度较小,其他地物的后向散射系数值最高,小站稻和裸土的后向散射系数介于两者之间,裸土和其他地物的后向散射系数变化曲线较为接近,小站稻的后向散射系数曲线变化最为复杂。

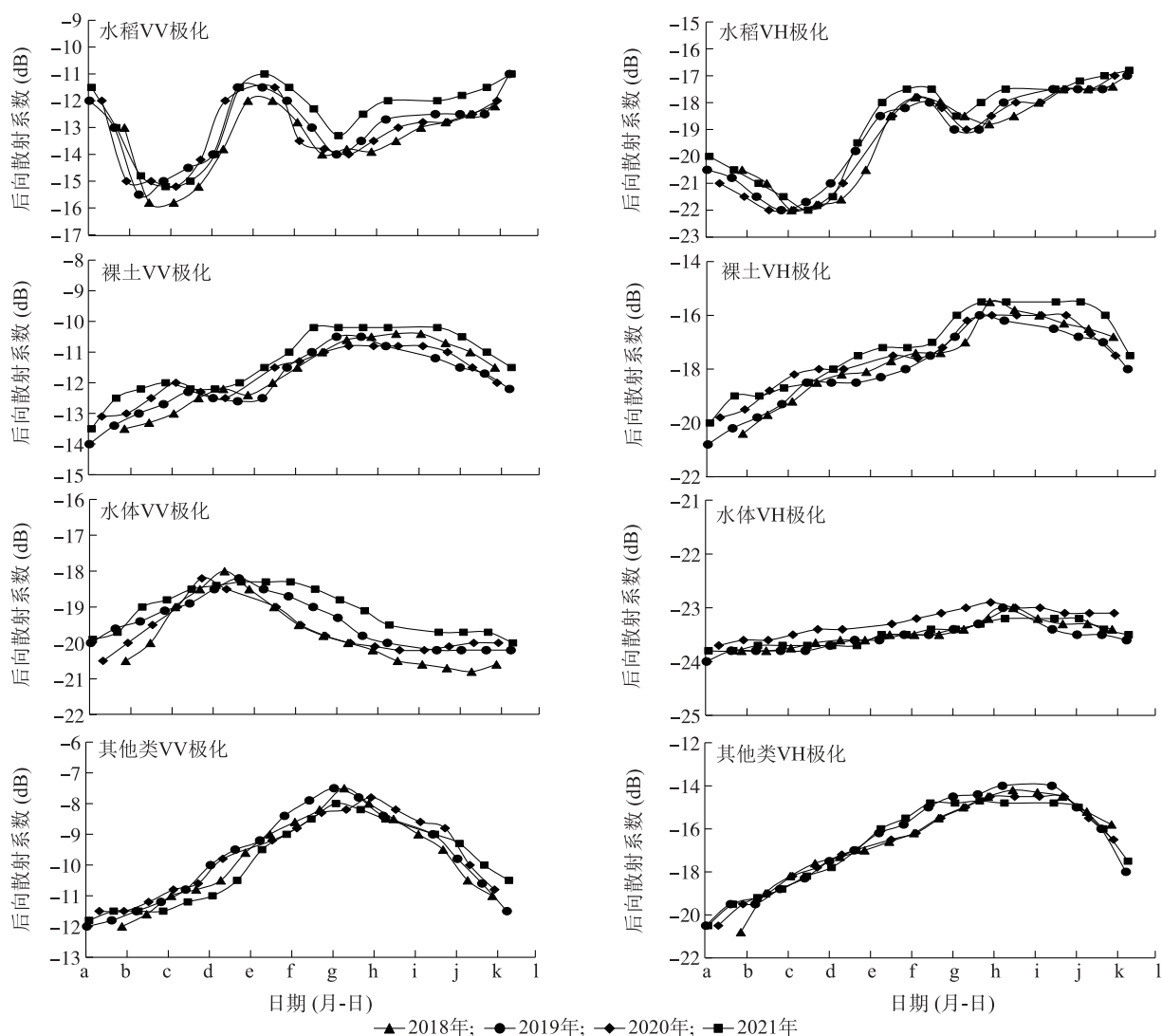
VH极化方式下2018–2021年小站稻的后向散射系数介于-22 dB至-16 dB之间,变化趋势与VV极化方式一致;水体的后向散射系数介于-24 dB至-22 dB之间,变化较为平稳,波动较小;裸土的后向散射系数介于-22 dB至-14 dB之间,变化趋势为先增后减,在8月中下旬出现转折;

其他地物的后向散射系数介于-22 dB至-13 dB之间,变化趋势亦为先增后减,峰值出现于9月份。对比4种地物的后向散射系数可以看出水体的后向散射系数值最低,其他地物和裸土的后向散射系数变化曲线较为接近,水稻的后向散射系数曲线变化幅度较大。

### 2.2 小站稻相似性指数

根据20个纯水稻像元的多时相后向散射系数,构建的小站稻参考生长曲线如图5所示。VV和VH极化方式下后向散射系数的变化波形较为相似,VV极化方式下后向散射系数略高于VH极化;VV极化方式下小站稻生长初期后向散射系数峰值出现在分蘖期,VH极化方式下小站稻生长前期后向散射系数峰值出现在拔节期,在VH极化方式和VV极化方式下后向散射系数均在孕穗期出现一次低值。这主要是由于VV极化对表面散射较为敏感,小站稻移栽前需对稻田进行翻耕,稻田表面粗糙,后向散射明显降低;移栽后水稻生长早期,秧苗稀疏,水稻冠层和水面相互作用,后向散射系数开始增大;分蘖后期,水稻冠层密集,表面散射减少,后向散射系数再次开始降低直至孕穗期;孕穗后,水稻呈现叶片和穗混合的冠层,表面散射增大,后向散射逐渐增大。而VH极化对植被冠层的密度较为敏感,移栽期以水稻冠层散射和土壤散射作用为主,散射值随着水稻的生长逐渐上升;拔节期除了水稻冠层散射作用以外,还受到土壤含水量及其与水稻相互作用的影响,因此拔节后水稻后向散射系数有所降低;自孕穗开始,后向散射以水稻冠层散射为主,后向散射系数整体呈上升趋势。

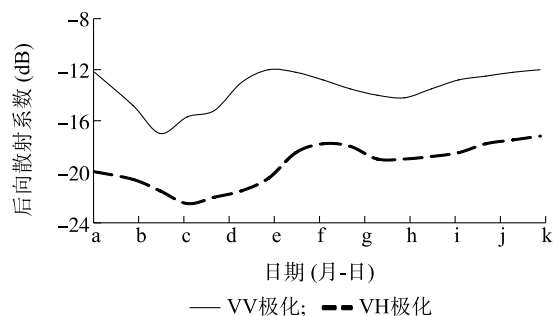
根据小站稻参考生长曲线,逐像元计算VV和VH两种极化方式下的小站稻相似性指数(图6)。由于相似性指数越小,表明该像元的多时序后向散射系数特征与小站稻参考生长曲线越相似,即各时相的后向散射系数特征越接近小站稻参考生长曲线。从图6可以看出,小站稻相似性指数低值区主要集中于宝坻区和宁河区。VV极化方式下,滨海新区亦有一定的低值区。根据野外调查信息结合高分辨率Worldview影像和高分1号影像对相似性指数图分析得出相似性指数24可能是小站稻判断的临界阈值,即相似性指数大于24的像元确定不是小站稻,相似性指数小于24的像元为疑似小站稻。



a: 04-11; b: 05-01; c: 05-21; d: 06-10; e: 06-30; f: 07-20; g: 08-09; h: 08-29; i: 09-18; j: 10-08; k: 10-28; l: 11-17。

图 4 水稻生长季 HANTS 滤波后不同地物后向散射系数动态变化

Fig.4 Dynamic changes of backscattering coefficients of different ground objects after HANTS filtering in rice growing season



a: 04-11; b: 05-01; c: 05-21; d: 06-10; e: 06-30; f: 07-20; g: 08-09; h: 08-29; i: 09-18; j: 10-08; k: 10-28。

图 5 小站稻全生育期参考后向散射系数变化曲线

Fig.5 The change curve of reference backscattering coefficient in the whole growth period of Xiaozhan rice

### 2.3 小站稻提取结果与精度验证

根据相似性指数分析提取的疑似小站稻种植区域,利用随机森林分类方法从多时相 SAR 影像中提取天津小站稻分布面积,得到2018–2021 年 VV 和 VH 极化方式下 SAR 数据提取的天津市小站稻种植面积如图 7 所示。从图 7 可以看出,天津市小站稻种植面积自 2018 年开始逐年增多,宁河区和宝坻区为小站稻的主要种植区,其他区(蓟州区、武清区、津南区、北辰区、西青区和静海区)也有少量小站稻种植区。2021 年天津市小站稻种植面积比 2018 年增加约  $1.80 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。天津市小站稻面积大幅增加主要是受天津市 2018 年出台《天津小站稻振兴规划方案》影



响。至 2021 年天津市小站稻种植面积高达 $5.93 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ 。

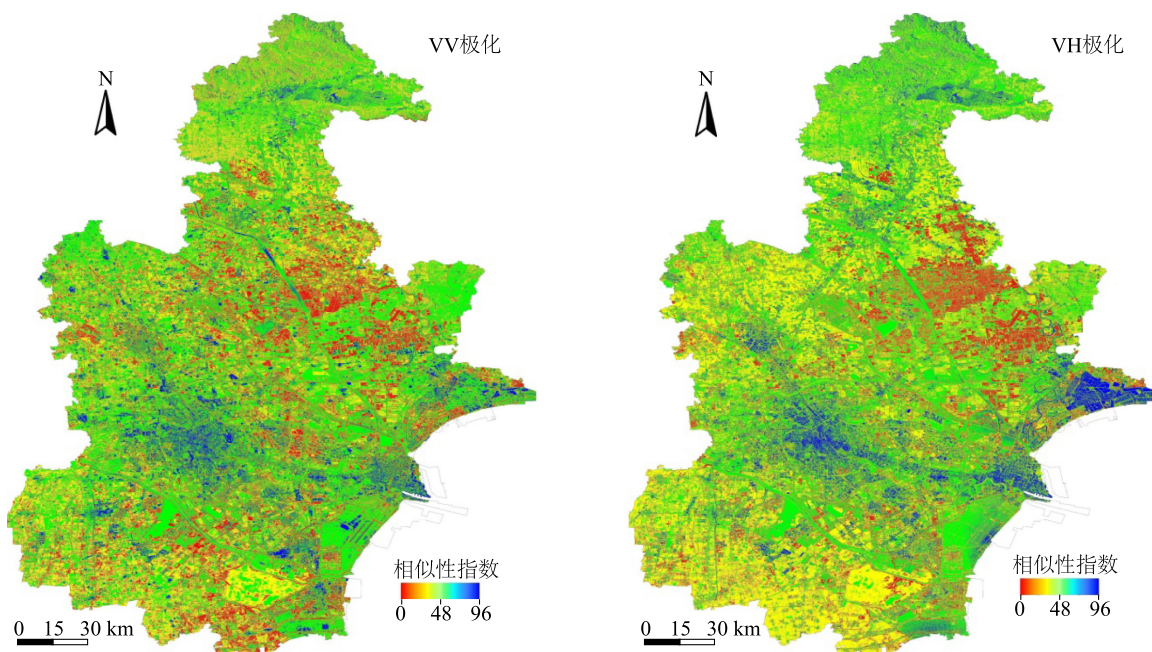


图 6 不同极化方式下天津小站稻相似性指数分布图

Fig.6 The similarity index distribution map of Tianjin Xiaozhan rice under different polarization modes

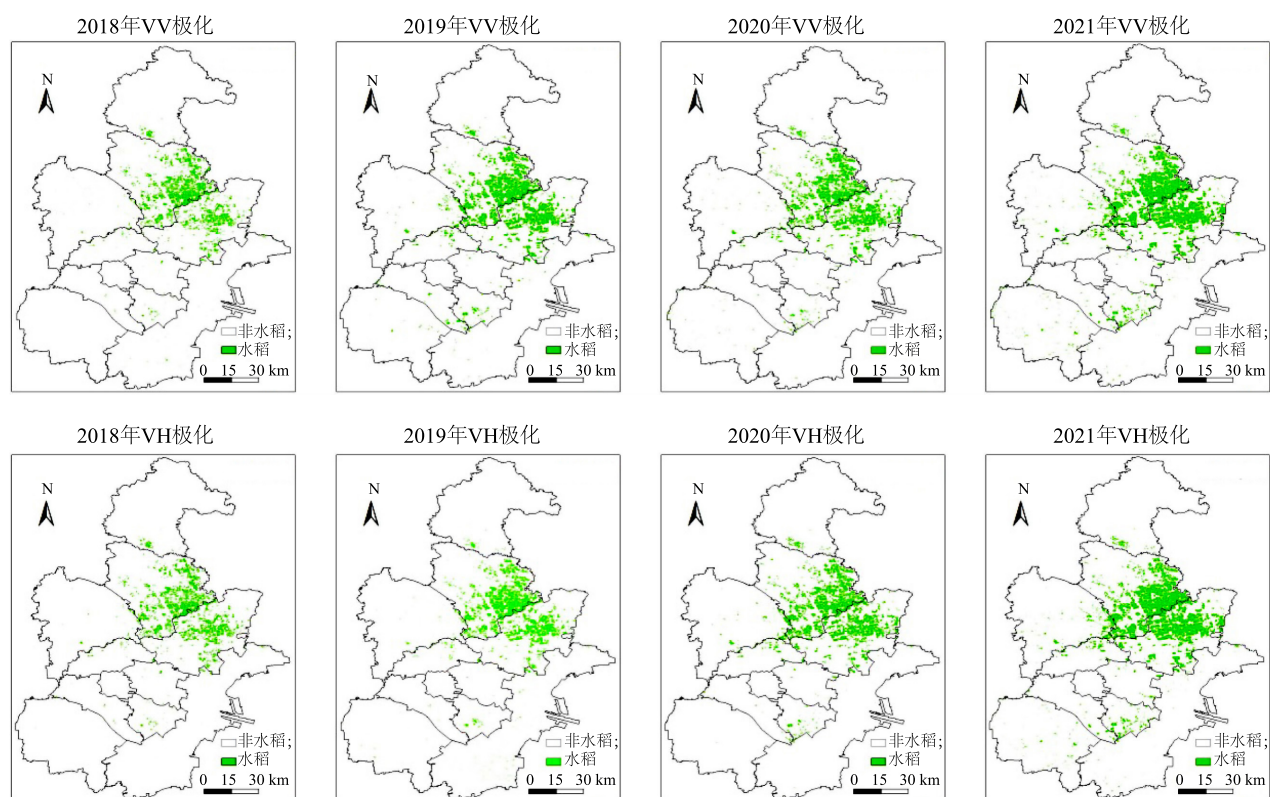


图 7 2018–2021 年天津市小站稻种植分布图

Fig.7 Distribution map of Xiaozhan rice planting in Tianjin from 2018 to 2021

图 8 为 2018–2021 年农业统计年鉴和 VV、VH 极化方式下提取的天津市小站稻种植面积。可以看出：VV 极化方式下，2018–2021 年小站稻种植面积分别为  $3.83 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $4.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $5.49 \times 10^4 \text{ hm}^2$  和  $5.82 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，与农业统计年鉴的结果对比，2018–2021 年的小站稻提取面积的相对误差分别为 3.99%、1.70%、2.59% 和 2.39%。VH 极化方式下，2018–2021 年小站稻面积分别为  $3.64 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $4.36 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、 $5.26 \times 10^4 \text{ hm}^2$  和  $5.73 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，与农业统计年鉴的结果对比，2018–2021 年的小站稻提取面积的相对误差分别为 8.87%、2.72%、1.55% 和 2.05%。2018 年以来，天津市小站稻种植面积逐年上升，其中 2020 年的增幅较大，小站稻种植面积比 2019 年增加约  $8.67 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。对比农业统计年鉴与两种极化方式下提取的小站稻种植面积发现，VV 极化方式下提取的小站稻面积偏大，VH 极化方式下提取的小站稻面积偏小。对小站稻提取的面积进行验证分析发现，VV 极化方式下提取时小站稻中混有水体中的水草，水草的生长趋势与小站稻接近，导致小站稻种植面积提取偏大；VH 极化方式下提取时小站稻稻田的部分边缘未能识别，将其分类为裸土，这是因为稻田边缘与田埂存在混合像元，使其后向散射系数与裸土相似。

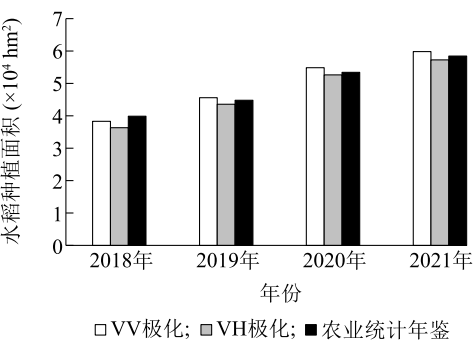


图 8 2018–2021 年天津市小站稻监测面积与统计面积比较  
Fig.8 Comparison of monitoring area and statistical area of Xiaozhan rice in Tianjin from 2018 to 2021

表 1 为不同极化方式下基于多时相 Sentinel-1A SAR 数据、小站稻相似性指数和随机森林算法得到的验证集分类误差矩阵。由于水稻、水体、裸土和其他地物后向散射系数的变化特征有较大差异，因此在两种极化方式下均具有较高的分类精度（用户精度和制图精度），水体的分类精度略高于水稻，裸土和其他地物受复杂地表类型的影响，分类精度相对较低，VV 极化方式下其他地物的制图精度仅为 81.09%。

表 1 不同极化方式下验证集分类误差矩阵

Table 1 Verification set classification error matrix under different polarization modes

VV 极化方式								VH 极化方式							
分类 结果	实际地物类型				总计	用户精度 (%)	制图精度 (%)	分类 结果	实际地物类型				总计	用户精度 (%)	制图精度 (%)
	水稻	水体	裸土	其他地物					水稻	水体	裸土	其他地物			
水稻	214	5	0	0	219	97.72	93.86	水稻	212	10	0	0	222	95.50	92.98
水体	14	2 543	29	59	2 645	96.14	98.26	水体	16	2 505	29	31	2 581	97.06	96.79
裸土	0	19	443	0	462	95.89	93.86	裸土	0	38	443	0	481	92.10	93.86
其他 地物	0	21	0	253	274	92.34	81.09	其他 地物	0	35	0	281	316	88.92	90.06
总计	228	2 588	472	312	3 600			总计	228	2 588	472	312	3 600		

表 2、表 3 为 2018–2021 年 VV 和 VH 极化方式下引入相似性指数与否对天津市小站稻种植面积提取精度的影响。未引入相似性指数时，VV 极化方式下验证集总体分类精度、Kappa 系数、水稻的制图精度分别为 91.17%、0.90 和 90.48%，引入相似性指数后，VV 极化方式下验证集总体分类精度、Kappa 系数、水稻的制图精度分别提升至 95.52%、0.94

和 93.86%；VH 极化方式下，引入相似性指数后验证集总体分类精度由 90.27% 提高到 93.40%，Kappa 系数由 0.90 提高到 0.93，水稻制图精度由 89.73% 提高到 92.98%。总体来看，引入相似性指数后不同极化方式下总体分类精度和 Kappa 系数都有所提升，水稻、裸地和其他地物的用户精度和制图精度亦有不同程度的提高。引入相似性指数后，VV



和 VH 极化方式下水稻、水体和裸土的用户精度和制图精度均高于 92.00%, VV 极化方式下用户精度和制图精度略高于 VH 极化方式。

表 2 引入相似性指数与否对 4 类地物提取用户精度和制图精度的影响

Table 2 The influence of introducing similarity index or not on the user accuracy and mapping accuracy of four kinds of ground objects extraction

地物类型	VV 极化方式				VH 极化方式			
	引入相似性指数		未引入相似性指数		引入相似性指数		未引入相似性指数	
	用户精度(%)	制图精度(%)	用户精度(%)	制图精度(%)	用户精度(%)	制图精度(%)	用户精度(%)	制图精度(%)
水稻	97.72	93.86	92.36	90.48	95.50	92.98	91.28	89.73
水体	96.14	98.26	94.96	96.54	97.06	96.79	95.94	97.20
裸土	95.89	93.86	90.64	88.60	92.10	93.86	88.73	87.36
其他地物	92.34	81.09	86.70	80.37	88.92	90.06	85.12	83.59

表 3 引入相似性指数与否对 4 类地物提取总体精度和 Kappa 系数的影响

Table 3 The influence of introducing similarity index or not on the overall accuracy and Kappa coefficient of four kinds of ground objects extraction

精度指标	VV 极化方式		VH 极化方式	
	引入相似性指数	未引入相似性指数	引入相似性指数	未引入相似性指数
总体精度(%)	95.52	91.17	93.40	90.27
Kappa 系数	0.94	0.90	0.93	0.90

### 3 结论与讨论

本文利用 2018–2021 年 4 至 10 月份多时相 Sentinel-1A SAR 影像数据,通过野外采样获取小站稻参考后向散射系数生长曲线,构建小站稻相似性指数,筛选出小站稻可能种植区域后采用随机森林分类模型提取天津市 2018–2021 年小站稻种植分布和面积信息,得到以下结论:

(1) 多时相 Sentinel-1A SAR 影像数据不受云雾干扰,其时间序列后向散射系数变化可较好地反映小站稻物候特征信息。水稻与水体、其他地物的后向散射系数有明显的差异,水体的后向散射系数值较低,而其他地物的后向散射系数值较高,两者与水稻均无交集;水稻和裸土的后向散射系数介于水体和其他地物之间,但水稻的后向散射系数随发育进程变化更为复杂。VV 和 VH 两种极化方式下水稻的后向散射系数变化曲线较为相似, VH 极化方式下后向散射系数略高于 VV 极化方式。VV 极化方式下对表面散射较为敏感, VH 极化方式下对植被冠层的密度更为敏感, VH 极化方式下水稻生长曲

线初波峰出现时间比 VH 极化方式下更为提前。

(2) 利用小站稻相似性指数结合随机森林分类,能充分发挥 SAR 影像全天候、全天时监测特点,有效提高小站稻种植信息提取精度。2018–2021 年 VV 和 VH 两种极化方式下与农业统计年鉴结果对比的平均相对误差分别为 2.67% 和 3.80%。总体分类精度分别达到 95.52% 和 93.40%, Kappa 系数分别为 0.94 和 0.93,与未构建相似性指数分类结果相比,总体分类精度分别提高 4.35 个百分点和 3.13 个百分点, Kappa 系数分别提高 0.04 和 0.03;水稻的制图精度分别提高 3.38 个百分点和 3.25 个百分点, VV 极化方式相较 VH 极化方式精度更高,可以更准确提取小站稻种植面积。研究结果表明本研究建立的小站稻分类方法能够适用于水稻种植信息的提取。

本研究引入小站稻参考生长曲线,利用水稻全生育期 Sentinel-1A SAR 数据,逐像元计算小站稻相似性指数,初步筛选水稻疑似区域,并将其输入随机森林分类模型提取水稻种植面积,一方面减少了人为因素的干扰,另一方面也提高了水稻种植面积的

提取精度。此外,虽然 Sentinel-1A 影像提取水稻种植面积具有较高的精度,但是在实际应用中仍然存在一些局限,主要体现在时间分辨率长和空间分辨率粗等方面。在今后的工作中,一方面要加强多源雷达数据的整合,缩短影像获取时间间隔;另一方面,可以考虑将雷达影像与高空间分辨率的光学卫星、无人机等数据进行融合进而实现更精细的作物生长监测。

### 参考文献:

- [1] 郭云峰,王凤行,陈子学,等.天津小站稻发展现状与振兴策略[J].作物研究,2021,35(5):431-435.
- [2] 王人潮,黄敬峰.水稻遥感估产[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [3] XIAO X,BOLES S,LIU J,et al.Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images[J].Remote Sensing of Environment,2005,95(4):480-492.
- [4] 刘佳,王利民,姚保民,等.基于多时相 OLI 数据的宁夏大尺度水稻面积遥感估算[J].农业工程学报,2017,33(15):200-209.
- [5] 杨沈斌,景元书,王琳,等.基于 MODIS 时序时间提取河南省水稻种植分布[J].大气科学学报,2012,35(1):113-120.
- [6] 李根,景元书,王琳,等.基于 MODIS 时序植被指数和线性光谱混合模型的水稻面积提取[J].大气科学学报,2014,37(1):119-126.
- [7] 张晓忆,李卫国,景元书,等.多种光谱指标构建决策树的水稻种植面积提取[J].江苏农业学报,2016,32(5):1066-1072.
- [8] CAO J J,CAI X L,TAN J W,et al.Mapping paddy rice using Landsat time series data in the Ganfu Plain irrigation system, Southern China,from 1988-2017[J].International Journal of Remote Sensing,2021,42(4):1556-1576.
- [9] 曹丹,白林燕,冯建中,等.东北三省水稻种植面积时空变化监测与分析[J].江苏农业科学,2018,46(10):260-265.
- [10] 王松寒,何隆华.雷达遥感技术在水稻识别中的研究进展[J].遥感信息,2015,30(2):3-9.
- [11] 张征云,江文渊,张彦敏,等.基于哨兵 SAR 数据和多光谱数据的水稻识别研究[J].生态与农村环境学报,2023,39(4):556-564.
- [12] SHAO Y,FAN X,LIU H,et al. Rice monitoring and production estimation using multitemporal RADARSAT[J].Remote Sensing of Environment,2001,76(3):310-325.
- [13] 申双和,杨沈斌,李秉柏,等.基于 ENVISAT ASAR 数据的水稻估产方案[J].中国科学(D辑:地球科学),2009,39(6):763-773.
- [14] 杨沈斌,李秉柏,申双和,等.基于多时相多极化差值图的稻田识别研究[J].遥感学报,2008,13(3):138-144.
- [15] CLAUS K, OTTINGER M, LEINENKUGEL P, et al. Estimating rice production in the Mekong Delta, Vietnam, utilizing time series of Sentinel-1 SAR data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018,73:574-585.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 夏俊,苏涛,刘丽娜,等.基于多时相 Sentinel-1A 数据的水稻面积提取[J].江苏农业学报,2022,38(3):666-674.
- [19] 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.
- [20] 杜伟娜,徐爱功,宋耀鑫,等.新型 SAR 传感器一级地距产品绝对辐射定标方法[J].国土资源遥感,2016,28(4):30-34.
- [21] 刘海娟,张婷,侍昊,等.基于 RF 模型的高分辨率遥感影像分类评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(1):99-103.
- [22] WATTS J D, POWELL S L, LAWRENCE R L, et al. Improved classification of conservation tillage adoption using high temporal and synthetic satellite imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(1):66-75.
- [23] BREIMAN L, LAST M, RICE J. Random forests: Finding quasars[M]. FEIGELSON E D, BABU G J. Statistical Challenges in Astronomy. New York: Springer, 2003:243-254.
- [24] 周正龙,沙晋明,范跃新,等.基于随机森林的遥感土地利用分类及景观格局分析[J].计算机系统应用,2020,29(2):40-48.

(责任编辑:石春林)