

韩东枫,李峰,秦泉,等.基于 GEE 和 Sentinel-1/2 数据的夏玉米种植面积精细化识别方法[J].海洋气象学报,2024,44(3):122-132.  
HAN Dongfeng, LI Feng, QIN Quan, et al. Recognition methods of summer maize planting areas based on GEE and Sentinel-1/2 data[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 122-132. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240128001. (in Chinese)

## 基于 GEE 和 Sentinel-1/2 数据的夏玉米种植面积精细化识别方法

韩东枫<sup>1,2,3</sup>, 李峰<sup>1,2,3</sup>, 秦泉<sup>1,2,3</sup>, 胡先锋<sup>1,2,3</sup>, 王晗<sup>1,2,3</sup>, 段金馈<sup>1,2,3</sup>, 冯冬含<sup>1,2,3</sup>, 崔颖<sup>4</sup>

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 山东省气候中心, 山东 济南 250031; 3. 长岛国家气候观测台, 山东 长岛 265800; 4. 自然资源部国土空间规划研究中心, 北京 100034)

**摘要** 作物种植面积提取方式的选取, 对农作物遥感监测有重要意义。为探究夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序和夏玉米遥感识别光学与星载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 融合时序 3 种方案在夏玉米种植区识别的差异, 选取山东商河为研究区。基于谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 云平台 Sentinel-1/2 数据, 构建分类数据集, 结合地面调查制作分类样本, 采用随机森林法进行 3 种方案下研究区夏玉米种植区域提取, 并分析各方案精度。结果表明: 3 种方案均能较高精度地实现夏玉米与其他作物的区分; 相对于夏玉米遥感识别最佳时相方案, 夏玉米遥感识别光学时序方案下夏玉米总体分类精度由 83.01% 提高到 89.44%, Kappa 系数由 0.77 提高到 0.86; 相对于夏玉米遥感识别最佳时相和夏玉米遥感识别光学时序方案, 夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序方案的总体分类精度最高, 达 92.51%, Kappa 系数达 0.89。研究表明, 夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序方案可以在较高精度下有效识别夏玉米种植区, 为发育期内的农情调查管理提供参考。

**关键词** 谷歌地球引擎 (GEE); Sentinel-1/2 卫星; 夏玉米; 随机森林法

中图分类号: S127 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)03-0122-11

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240128001

## Recognition methods of summer maize planting areas based on GEE and Sentinel-1/2 data

HAN Dongfeng<sup>1,2,3</sup>, LI Feng<sup>1,2,3</sup>, QIN Quan<sup>1,2,3</sup>, HU Xianfeng<sup>1,2,3</sup>, WANG Han<sup>1,2,3</sup>,  
DUAN Jinkui<sup>1,2,3</sup>, FENG Donghan<sup>1,2,3</sup>, CUI Ying<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 3. Changdao National Climatology Observatory, Changdao 265800, China; 4. Research Center for Territorial Spatial Planning, Ministry of Natural Resources, Beijing 100034, China)

**Abstract** The selection of methods for extracting crop planting areas is of great significance for agricultural remote sensing monitoring. To explore the differences between optimum phase scheme, time

收稿日期: 2024-01-28; 修回日期: 2024-04-18

基金项目: 新一代人工智能国家科技重大专项 (2022ZD0119500); 山东省自然科学基金项目 (ZR2020MF130); 山东省气象局气象软科学重点项目 (2024SDZDIANXM01); 山东省气象局科研项目 (2021sdqx03)

第一作者简介: 韩东枫, 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事卫星遥感技术研究与应用, hayecer@gmail.com。

通信作者简介: 胡先锋, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事卫星遥感技术应用研究, sdhufeng@163.com。

series optical data scheme and optical-SAR (synthetic aperture radar) fusion phase scheme in remote sensing recognition of summer maize planting areas, Shanghe County of Shandong Province is taken as the study area. Based on the Sentinel-1/2 data from the GEE (Google Earth Engine) cloud platform, three datasets are constructed. Combined with ground survey samples, random forest method is used to extract the summer maize planting areas in the study area using three schemes, and the accuracy of each scheme is analyzed. The result shows that all the three schemes can achieve high accuracy in distinguishing summer maize planting areas from other crops. Compared with the optimum phase scheme, the time series optical data scheme improves the overall classification accuracy of summer maize from 83.01% to 89.44%, and the Kappa coefficient increases from 0.77 to 0.86. Compared with the optimum phase scheme and time series optical data scheme, the overall classification accuracy of the optical-SAR fusion phase scheme is the highest, reaching 92.51%, and the Kappa coefficient reaches 0.89. The classification results show that the optical-SAR fusion phase scheme can effectively recognize summer maize planting areas with high accuracy, providing reference for agricultural investigation and management during the growing season.

**Keywords** GEE (Google Earth Engine); Sentinel-1/2 satellite; summer maize; random forest method

## 引言

玉米是世界三大粮食作物之一,在农业生产中占据重要地位,客观、及时、准确提取玉米种植信息,对保障国家粮食安全和经济持续发展尤为重要<sup>[1-4]</sup>。夏玉米精细化提取依赖于对夏玉米和大豆玉米带状复合种植的精确提取,特别是大豆玉米带状复合种植推广面积连年增长,使得对夏季作物的田间管理等有了新的要求<sup>[5]</sup>,准确估计夏玉米及大豆玉米带状复合种植面积对农业生产有重要意义。

早期,通过人工地面抽样调查和层层上报等方式获取农作物种植面积信息,存在效用低、数据空间分布不连续的问题<sup>[6]</sup>。遥感自诞生以来,以其快速、连续、高效的特点为监测农作物种植面积信息提供了极佳的数据源<sup>[7-8]</sup>,遥感结合抽样调查的技术手段调查农作物面积在农作物种植面积提取方面具有潜在的应用价值<sup>[9]</sup>。近年来,随着高时空分辨率遥感数据日渐丰富,遥感数据已经具备了明显的大数据特征,如何利用不断更新的遥感影像精确提取作物种植面积,继而服务于农业生产一直是农业遥感关注的主要问题<sup>[10-11]</sup>。

2015年谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)公测上线,标志着利用云计算进行遥感分析的时代正式到来<sup>[12]</sup>。GEE是一个专门处理卫星影像和其他地球观测数据的云端运算平台(<https://earthengine.google.com/>),由谷歌、卡内基梅隆大学、美国地质调查局共同开发,能够支持海量的数据运算与地理信息数据可视化<sup>[13]</sup>。此平台存储了大量

的遥感数据,包括中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、美国陆地卫星(Landsat)和哨兵卫星(Sentinel)等系列影像数据集及各类产品数据集,在相关领域的研究中提供了极大的便利。宫诏健等<sup>[14]</sup>利用MODIS数据构建玉米归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)时序曲线,采用动态振幅阈值等方法提取了玉米关键物候期,利用决策树分类法估计了辽宁春玉米种植面积,精度超过89.29%。张健康等<sup>[15]</sup>和李莉等<sup>[10]</sup>运用多时相Landsat和MODIS增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)遥感影像数据,采用监督分类与决策树分类相结合的方法对研究区主要农作物进行遥感解译,结果表明多时相数据分类精度高,能较好地反映作物的分布状况。单捷等<sup>[16]</sup>利用Radarsat-2影像和支持向量机及最大似然法对各时相水稻种植面积进行提取,精度均超过90%。谷祥辉等<sup>[17]</sup>利用Sentinel-2时间序列数据和多种植被指数,采用多种分类方法进行作物分类研究,结果表明随机森林法结合时间序列植被指数的分类效果最佳。Huang等<sup>[18]</sup>和Fan等<sup>[19]</sup>基于Sentinel-2时间序列影像使用随机森林和分段逻辑函数算法进行作物提取,在准确度和时效性方面显现出较大优势。Bhogapurapu等<sup>[20]</sup>利用GEE和Sentinel-1地距多视影像(Ground Range Detected, GRD)数据的完整极化信息,提取双极化指标,用于小麦和油菜的生长评估。叶智燕<sup>[21]</sup>利用Sentinel-2计算的EVI时序曲线锁定冬小麦关键物候期,并结合Sentinel-1影

像,极化方式为垂直-垂直极化 (vertical-vertical polarization, 简称为“VV”) 的后向散射系数在冬小麦关键物候期的特征,实现冬小麦的种植面积提取。董心君等<sup>[22]</sup> 利用动态归一化后向散射系数 (normalized difference sigma naught index, NDSI) 实现水稻快速分类。夏季作物种植结构复杂,大豆玉米带状复合种植的不断推广使得遥感用于夏玉米(大豆玉米带状复合种植)的提取面临更多难点。目前,夏季作物遥感提取对夏玉米(大豆玉米带状复合种植)精细化提取研究仍较为缺乏,已有研究大多局限于中大尺度或单一指标,如 MODIS、Landsat 相关指标及 Sentinel-1 的 VV 波段、Sentinel-2 的 NDVI 等,基于多源数据与多种指标的 10 m 级空间分辨率夏玉米(大豆玉米带状复合种植)精细化空间分布特征有待深入研究。

此文拟基于 GEE 云平台构建夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序和夏玉米遥感识别光学与星载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 融合时序及其相关指数如 NDVI、EVI、地表水体指数 (land surface water index, LSWI), 构建 3 种分类数据集应用于夏玉米种植区提取中,并分析各方法精度。首先,基于米级分辨率数据和带有地理信息的实地调查图片制作夏季作物分类样本点;其次,基于 GEE 云平台按照不同时间段统筹 3 种数据集及相应指数;最后,将样本和数据集作为 GEE 随机森林分类器的输入,导出分类结果并进行整体和样例的精度验证,比较分析不同数据集情境下夏玉米种植区域提取结果。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区为山东省济南市商河县(图 1),地处山东东北部,地理位置为  $116^{\circ}58' \sim 117^{\circ}26' E$ 、 $37^{\circ}06' \sim 37^{\circ}32' N$ ,地势平缓、河流较多,属大陆性暖温带半湿润季风气候,年均气温为  $12.3^{\circ} C$ ,年降水量大约为 600 mm。商河是典型农业县,种植结构较为单一。由于前茬作物的不同,夏玉米播种时间存在差异,主要分为大蒜茬夏玉米和小麦茬夏玉米。

### 1.2 研究数据

#### 1.2.1 地面数据采集与样本构建

利用外业数据采集地图软件外业精灵分别于

2023 年 7 月中旬和 8 月中旬在商河现场采集样本,现场采集的地面调查地块共 201 处。基于现场采集样本和卫星影像,制作间距大于 30 m 的样本点数据集,地类主要包括玉米、大豆玉米带状复合种植和其他类型,样本点总数为 3 987 个(图 1)。在样本点中随机抽取 90% 进行训练,其余样本点用于精度验证。

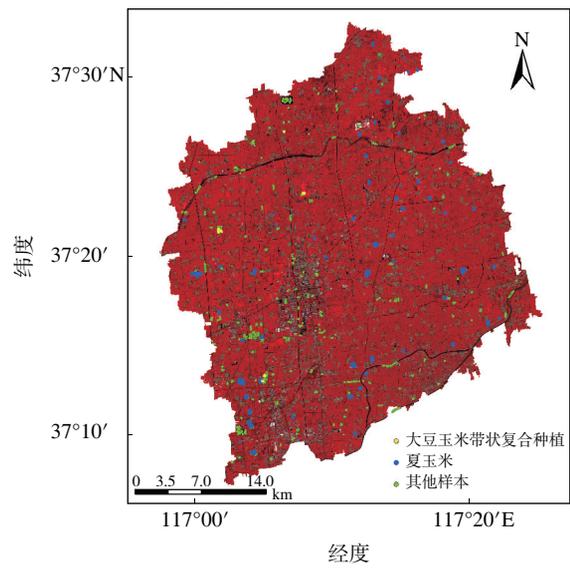


图 1 研究区地理位置及农作物地面验证点分布  
Fig.1 Geographical location of the study area and distribution of crop sample points

#### 1.2.2 分类影像选择

本研究以 Sentinel-1 和 Sentinel-2 为数据源(表 1), Sentinel-1 目前仅有 Sentinel-1A 在轨工作,重访周期为 12 d,搭载基于 C 波段雷达成像系统; Sentinel-2 由 Sentinel A、B 两颗卫星组成星座,组成星座后重访周期仅为 6 d,搭载多光谱成像仪有 13 个通道。本研究采集 2023 年 6 月 1 日—10 月 31 日的 Sentinel-2 大气校正产品 (Sentinel-2 L2A) 和 Sentinel-1 GRD 产品。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 技术路线

为准确探究不同分类指标组合对夏玉米和大豆玉米带状复合种植识别的影响,基于 GEE 云平台 and 不同分类指标组合进行夏玉米和大豆玉米带状复合种植面积提取,并进行精度验证。选取 Sentinel-1/2 构建包含波段特征和相关指数的夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序、夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序特征数据集 3 种方案(表 2),

分析不同分类指标组合情境对夏玉米及大豆玉米带状复合种植提取精度的影响(图2)。

表1 Sentinel-1/2 数据信息

卫星	波段编号	波段英文名称	波段中文名称	波长 /nm	分辨率 /m
Sentinel-1	VV	V-V polarization	垂直-垂直极化		10
	VH	V-H polarization	垂直-水平极化		10
Sentinel-2	B1	Aerosol	海岸气溶胶波段	443	60
	B2	BLUE	蓝波段	490	10
	B3	GREEN	绿波段	560	10
	B4	RED	红波段	665	10
	B5	Red edge 1	红边 1	705	20
	B6	Red edge 2	红边 2	740	20
	B7	Red edge 3	红边 3	783	20
	B8	NIR	近红外波段	842	10
	B8A	Red edge 4	红边 4	865	20
	B9	Water vapor	水汽波段	940	60
	B10	Cirrus	卷云波段	1 375	60
	B11	SWIR1	短波红外 1	1 610	20
B12	SWIR2	短波红外 2	2 190	20	

表2 不同分类指标组合方案

方案编号	方案名称	分类指标
1	夏玉米遥感识别最佳时相	BLUE、GREEN、RED、NIR、SWIR1、SWIR2、NDVI、NDWI、EVI、LSWI
2	夏玉米遥感识别光学时序	BLUE、GREEN、RED、NIR、SWIR1、SWIR2、NDVI、NDWI、EVI、LSWI
3	夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序	BLUE、GREEN、RED、NIR、SWIR1、SWIR2、NDVI、NDWI、EVI、LSWI、VV、VH、SDWI

注: BLUE、GREEN、RED、NIR、SWIR1、SWIR2、VV、VH 为 Sentinel-1/2 对应的波段, NDVI、归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)、EVI、LSWI、Sentinel-1 双极化水体指数(Sentinel-1 dual-polarized water index, SDWI)为计算的相应指数。

### 1.3.2 数据集构建

Sentinel-1 影像经过按照时间、研究区和工作模式的筛选处理, Sentinel-2 影像经过按照时间、研究区的筛选以及利用 Cloud Score+ 的去云处理。选取 Sentinel-1 的 VV、垂直-水平极化(vertical-horizontal polarization, 简称为“VH”)波段及 SDWI<sup>[23]</sup> [公式(1)], Sentinel-2 的 6 个波段(蓝、绿、红、近红外、短波红外 1、短波红外 2)、NDWI<sup>[24]</sup> [公式(2)]和 3 个常用植被指数 NDVI<sup>[25]</sup> [公式(3)]、EVI<sup>[26]</sup> [公式(4)]和 LSWI<sup>[27]</sup> [公式(5)]共 10 个指标参与监督分类(表 2)。

$$I_{SDW} = \ln(10 \cdot \rho_{VV} \cdot \rho_{VH}) - 8, \quad (1)$$

$$I_{NDW} = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}}, \quad (2)$$

$$I_{NDV} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (3)$$

$$I_{EV} = \frac{2.5(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE} + 1}, \quad (4)$$

$$I_{LSW} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2}}。 \quad (5)$$

式中:  $I_{SDW}$  为 Sentinel-1 双极化水体指数,  $\rho_{VV}$  为 Sentinel-1 VV 波段反射率,  $\rho_{VH}$  为 Sentinel-1 VH 波段反射率,  $I_{NDW}$  为归一化水体指数,  $\rho_{GREEN}$  为 Sentinel-2 绿色波段反射率,  $\rho_{NIR}$  为 Sentinel-2 近红外波段反射率,  $I_{NDV}$  为归一化植被指数,  $\rho_{RED}$  为 Sentinel-2 红色波段反射率,  $I_{EV}$  为增强植被指数,  $\rho_{BLUE}$  为 Sentinel-2 蓝色波段反射率,  $I_{LSW}$  为地表水体指数,  $\rho_{SWIR1}$  和  $\rho_{SWIR2}$  为 Sentinel-2 短波红外波段反射率。

夏玉米遥感识别最佳时相一般在穗期—抽雄期(8月10—20日)<sup>[28-29]</sup>, 因此以8月中旬拼接的 Sentinel-2 影像为最佳时相。为了避免夏季多云和重访次数不均匀导致可用性数量不确定的问题, 应为时间序列影像的融合指定适当的时间间隔, 构建最佳时相、光学时序和光学与 SAR 融合时序及相关指数的 3 种数据集。时间序列步长应满足各期 Sentinel-1/2 影像覆盖整个研究区, 经验证步长应以月为周期可满足需求, GEE 云平台统计数据显示序列影像共包含 5 期数据(图 3)。

### 1.3.3 随机森林法与指标重要性评价

目前遥感监督分类常用方法有决策树法、最大似然值法、支持向量机法、随机森林法等<sup>[30]</sup>。本研究通过 GEE 平台建立随机森林分类模型, 进而提取研究区地类信息。随机森林法通过随机采样并放回地抽取的方式对样本进行重采样, 其中约 80% 的样本数据作为袋内数据创建决策树, 约 20% 的样本作为袋外数据进行模型验证, 相对于其他方法, 随机森林法具有更高的准确率且不会过度拟合数据<sup>[31]</sup>。

特征重要性指的是特征指标对于分类结果的影响程度, 能够判断输入指标对于结果的贡献。随机森林可以用来对特征重要性进行评估, 主要分为 2 种方法: (1) 平均不纯度减少 (Mean Decrease Impurity, MDI), 通过统计节点分裂时不纯度的下降数值来衡量某个节点的重要性; (2) 平均精确率减少 (Mean Decrease Accuracy, MDA), 方法是随机交

换袋外数据集中某个特征的值,然后重新进行预测,通过衡量分类或回归的准确度下降程度来计算该特征的重要性。本研究采用 GEE 随机森林法重要性

评估方法对方案 3 中包含的相关特征重要性进行评估并统计制作柱状图,重要性越高,表明特征对结果的贡献值和重要性越大。

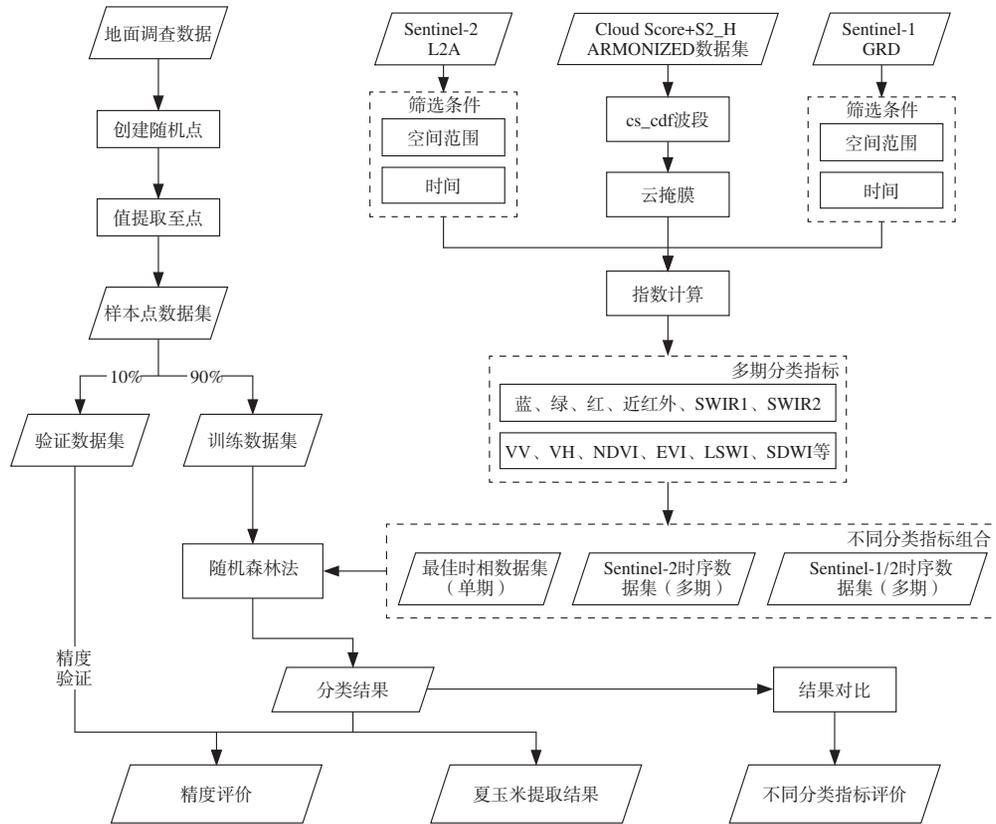


图2 技术流程图

Fig.2 Technical flow chart

### 1.3.4 精度验证

混淆矩阵也称误差矩阵,是对实地验证的像元类型与遥感影像相对应分类结果的比较,通过混淆矩阵方法可以得到总体精度 (overall accuracy, OA) [公式(6)]、生产者精度 (producer accuracy, PA) [公式(7)]、用户精度 (user accuracy, UA) [公式(8)]和 Kappa 系数 (Kappa coefficient) [公式(9)]等精度衡量指标。

$$V_{OA} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ii}}{X}, \quad (6)$$

$$V_{PA} = \frac{X_{ii}}{X_{i*}}, \quad (7)$$

$$V_{UA} = \frac{X_{ii}}{X_{*i}}, \quad (8)$$

$$K = \frac{X \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i*} X_{*i}}{X^2 - \sum_{i=1}^n X_{i*} + X_{*i}}. \quad (9)$$

式中:  $n$  为类别总数;  $X_{ii}$  为正确分类的像元数量;  $X_{i*}$

和  $X_{*i}$  分别为第  $i$  行和第  $i$  列的像元数量;  $X$  为评估样本像元总数;  $V_{OA}$  为总体精度,指所有正确分类的土地覆盖类别的检验点数所占总抽取的检核点数的百分比;  $V_{PA}$  为生产者精度,表示在此次分类中,该类别的地面真实参考数据被正确分类的概率;  $V_{UA}$  为用户精度,表示在分类图上,落在该类别上的检验点,被正确分类为该类别的比率;  $K$  为 Kappa 系数,表示分类结果比随机分类好多少的指标, Kappa 值的范围为 0~1, Kappa 值越大表示分类精度越高。

## 2 结果与分析

### 2.1 结果及各分类方法比较

基于夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序、夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序 3 种方案提取商河玉米和大豆玉米带状复合种植面积 (图 4)。3 个方案提取结果均表明夏玉米全县分

布广泛,中部和西南地区城市、工业用地集中的区域玉米分布相对稀疏。大豆玉米带状复合种植区主要分布在西部和北部,分布相对集中,与实地调查及从当地农业部门获取的信息较为符合。2022年统计年鉴显示全县夏玉米播种6.20万  $\text{hm}^2$ 、大豆玉米带状复合种植播种 620.00  $\text{hm}^2$ ,占耕地总面积的84.03%。

方案 1—3 夏玉米提取面积分别为7.33 万、7.53万和 6.90万 $\text{hm}^2$ ,大豆玉米带状复合种植面积分别为 913.33、813.33和600.00  $\text{hm}^2$ 。与2023年统计年鉴相比,方案 3 提取的玉米和大豆玉米带状复合种植面积结果与统计数据仅差1.03万 $\text{hm}^2$ 和20.00  $\text{hm}^2$ ,精度分别达到86.96%和97.05%(表 3)。

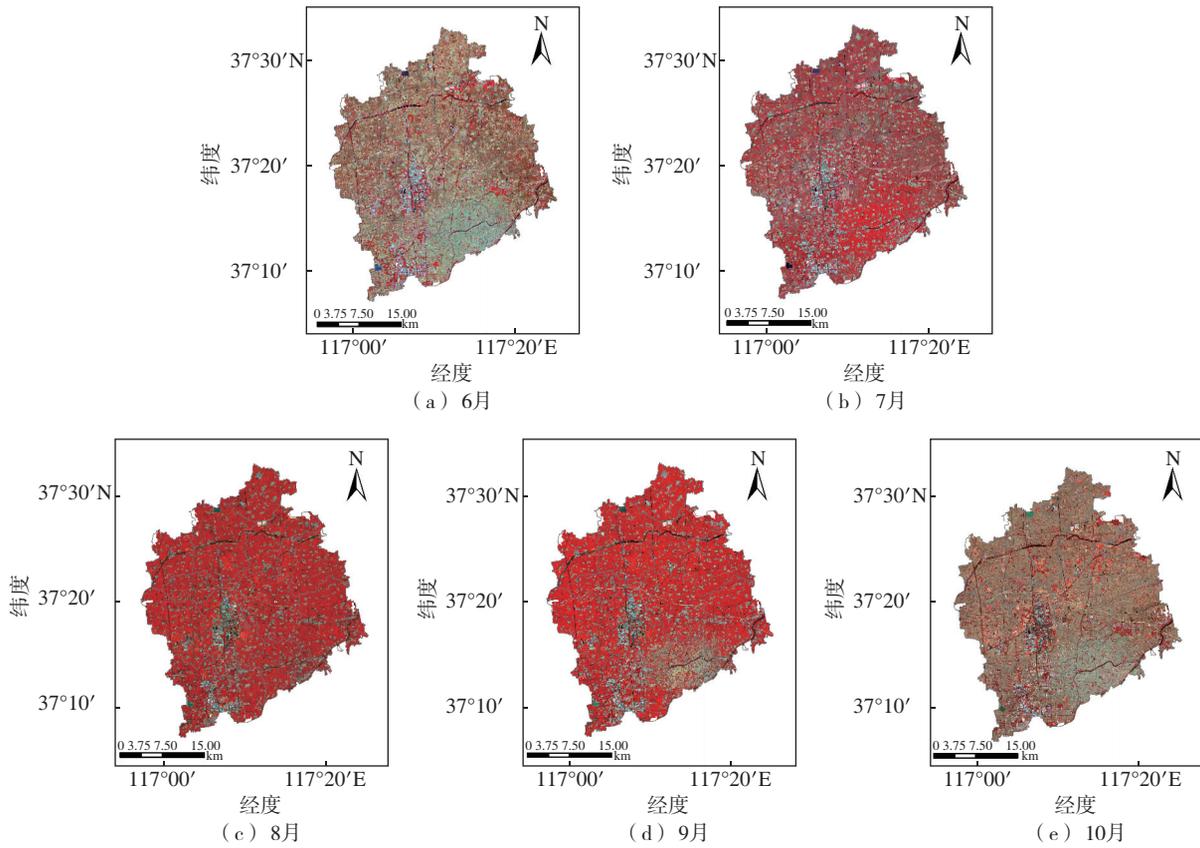
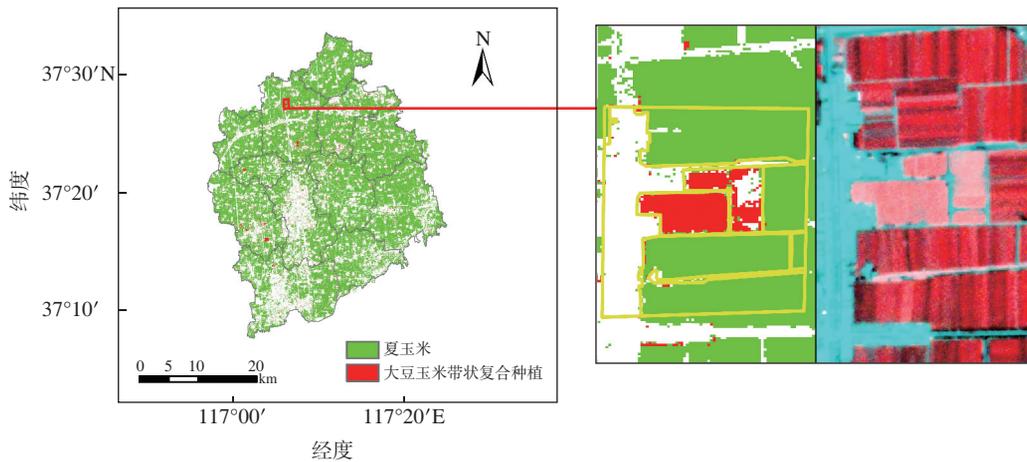


图3 夏玉米发育期 Sentinel-2 假彩色时序影像

Fig.3 Time series of Sentinel-2 false color phases of summer maize during growing season



左图一分类结果;右图一分类结果放大图及Sentinel-2假彩色合成图

(a) 方案1

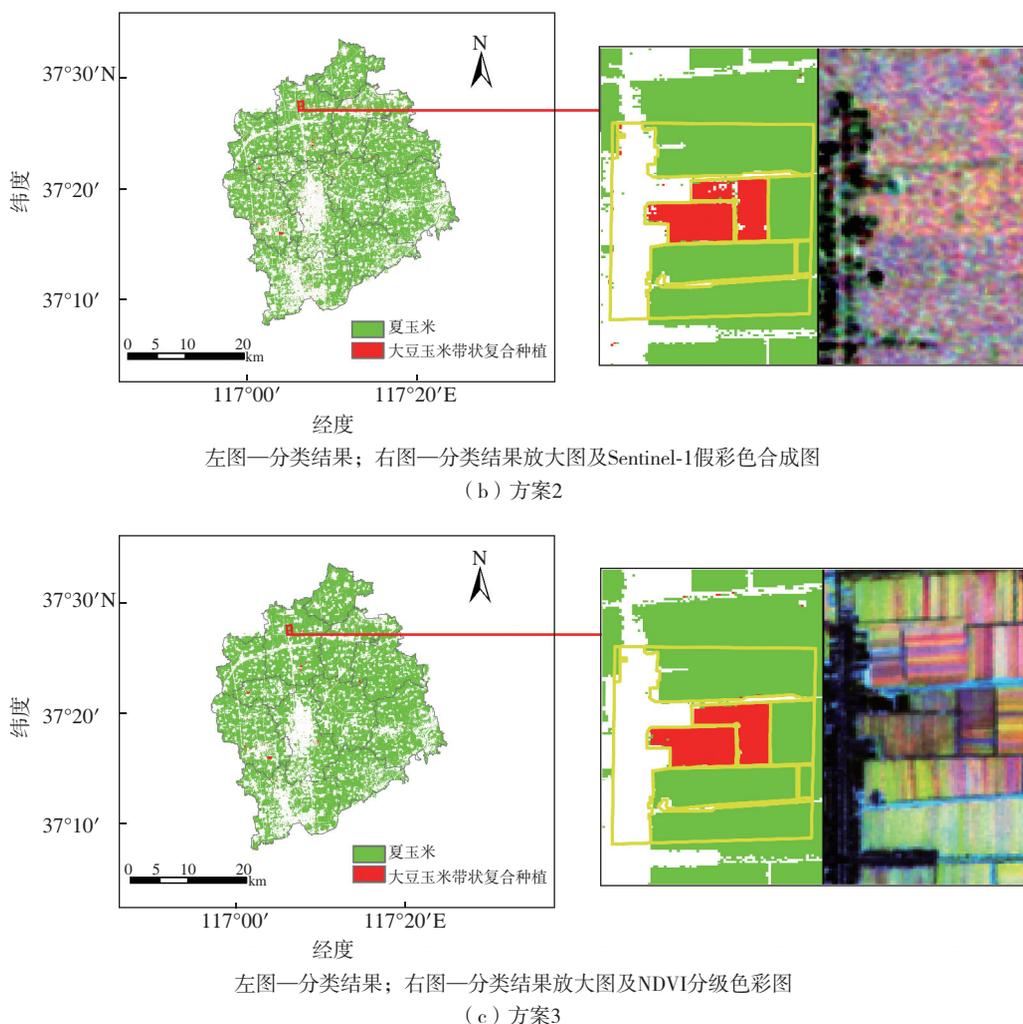


图4 不同方案提取的商河夏玉米及大豆玉米带状复合种植分布

Fig.4 Distribution of summer maize and belt compound planting of soybean and maize in Shanghe by different schemes

表3 作物信息提取结果与统计数据对比  
Table 3 Comparison between extraction results of crop area and statistical data

方案	夏玉米		大豆玉米带状复合种植	
	面积/万 $\text{hm}^2$	精度/%	面积/ $\text{hm}^2$	精度/%
1	7.33	82.13	913.33	53.58
2	7.53	79.07	813.33	69.31
3	6.90	86.96	600.00	97.05

利用验证数据集通过混淆矩阵得到分类精度评价(表4)。所有分类方案的总体精度均大于80%, Kappa系数均大于0.77。方案1的总体精度最低,其分类特征仅包含光学卫星波段及衍生指数,OA和Kappa系数分别为83.01%、0.77。方案2在方案1的基础上加入了时序影像,OA和Kappa系数分别提高到89.44%、0.86。方案3的OA和Kappa系数最高,其加入SAR卫星波段及衍生指数,与方

案1比较,OA和Kappa系数分别提高了9.5%、0.12,达到92.51%、0.89(表4)。这表明方案3夏玉米遥感识别光学与SAR融合时序是研究区夏玉米、大豆玉米带状复合种植面积提取的最佳方案。

表4 不同方案下作物分类精度

方案	OA/%	Kappa系数
1	83.01	0.77
2	89.44	0.86
3	92.51	0.89

图4鹰眼图区域展示3种方案分类结果与夏玉米遥感识别最佳时相RGB合成(R: B8, G: B4, B: B3)、6—8月SAR影像VV波段RGB合成(R: 6月, G: 7月, B: 8月)和6—8月NDVI数据RGB合成(R: 6月, G: 7月, B: 8月)进行对比分析,结果显示

3种方案均包含区分夏玉米和大豆玉米带状复合种植的部分信息,时间序列数据和 SAR 数据挖掘了夏玉米和大豆玉米带状复合种植的其他信息,使得作物信息提取结果在图斑边缘和“椒盐现象”有一定改善,图斑边界平滑性明显提升。针对样例区域进行人工提取玉米、大豆玉米带状复合种植和其他作物面积的正确分类像元,正确分类像元验证各方案提取各作物面积的用户精度(表5)。所有分类方案中玉米和其他的分类精度均较高,超过92%,大豆玉米带状复合种植的分类精度在时序特征和 SAR 特征加入后有明显提升。其中方案1的大豆玉米带状复合种植分类精度为71.81%,方案2分类精度为89.97%,方案3分类精度为95.07%。结果表明,夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序、夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序3种方案均能实现夏玉米的有效提取,且3种方案数据数量不断增加提升了夏玉米和大豆玉米带状复合种植面积提取精度。

表5 样例区域不同方案下作物分类精度  
Table 5 Crop classification accuracy under different schemes in sample areas 单位:%

类别	精度		
	方案1	方案2	方案3
玉米	95.98	98.16	98.29
大豆玉米带状复合种植	71.81	89.97	95.07
其他	92.00	93.05	98.06

### 2.2 分类贡献度

基于最优方案3,利用 GEE 计算12个分类特征在不同时段的重要性,并根据分类指标和时段进行统计。

按照分类特征进行特征重要性均值汇总,光谱分类特征中 SWIR1、BLUE 和 NIR 重要性相对较高,重要性分别达到322.06、316.52和316.15;衍生指数中 EVI、NDWI 和 LSWI 指数重要性相对较高,重要性分别达到312.82、310.91和310.53;光谱分类特征及其衍生指数重要性偏差较大,SAR 卫星及其衍生指数重要性相对较低(图5)。重要性均值反映的是各指标整体的贡献程度,不同分类特征重要性标准差反映各指标在不同月份贡献程度的差异性,其中标准差最小的是 LSWI,其重要性指数也相对较高,表明 LSWI 指数在各月对分类结果的贡献程度均较大(图6)。

按照不同时段进行特征重要性月度汇总,8月重要性为309.69。9月和10月重要性相对较低,分别为283.64和297.63(图7);不同分类时段内各指标重要性标准差反映各指标贡献程度的差异,不同时段重要性标准差最大月份为8月,最小为10月(图8)。这说明8月对夏秋作物识别具有较高价值,其间月合成影像及其指数对夏季作物识别重要性的差异最大。

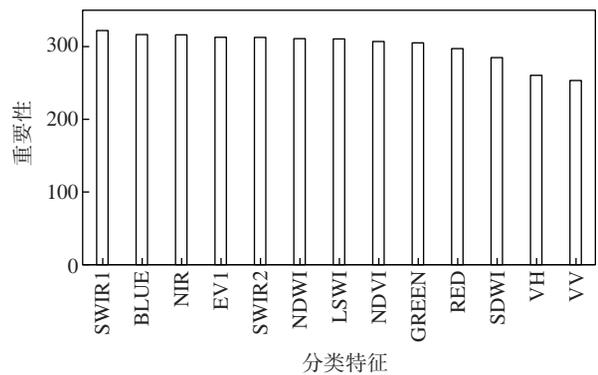


图5 基于方案3的分类特征重要性排序  
Fig.5 Importance of classification features based on the scheme 3

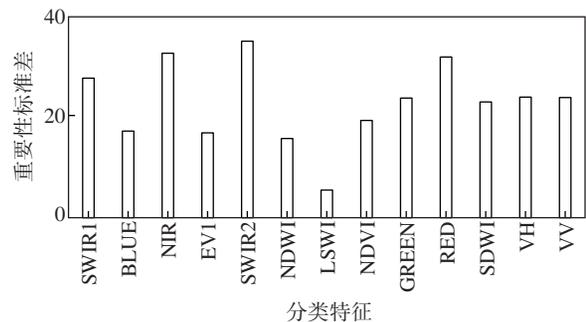


图6 基于方案3的分类特征重要性标准差排序  
Fig.6 Standard deviation of importance of classification features based on the scheme 3

### 3 讨论

GEE 云平台的发展有力推动了卫星遥感影像的数据挖掘、研究及应用,如土地利用分类和变化监测等诸多方面<sup>[7,13,31-34]</sup>。传统遥感影像处理方法存在数据收集、存储、预处理繁琐和运算缓慢等问题,与传统方法相比,GEE 云平台极大地简化了对遥感影像的预处理、筛选和运算过程。统计表明 GEE 云平台综合效率提升超过90%,如果将内存资源消耗、用户使用体验等因素加权在内,GEE 云平台的综合效率会提升更多<sup>[35-36]</sup>。在以往的作物面积信

息提取工作中,在地面调查完成的情况下仍需要花费数天时间,占用大量存储和运算资源,本文使用 GEE 云平台则显著提升了效率。

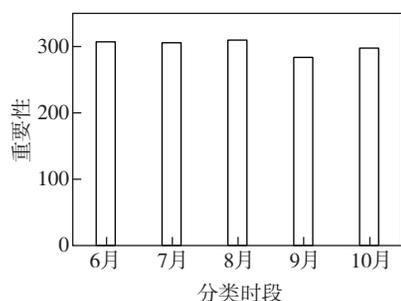


图7 基于方案3的分类时段重要性排序  
Fig.7 Importance of classification periods based on the scheme 3

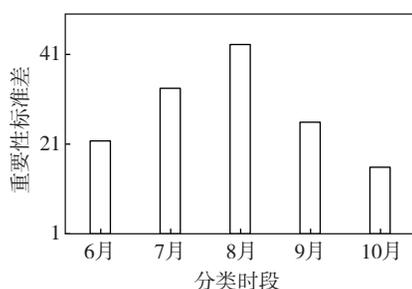


图8 基于方案3的分类时段重要性标准差排序  
Fig.8 Standard deviation of importance of classification periods based on the scheme 3

夏季作物提取的研究主要集中于夏玉米,大豆玉米带状复合种植的情况较少受到关注,且现有的夏季作物提取研究多使用中低分辨率卫星数据,很少采用高分辨率图像,这使得破碎地块环境下存在大量混合像元,导致作物种植面积的错估,特别是种植面积较少的作物如大豆玉米带状复合种植的低估。本文基于高分辨率光学和 SAR 影像,在 GEE 云平台中设计实现了基于夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序和夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序的作物面积信息提取,夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序和夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序 3 种方案识别作物分布总体趋势一致,光学与 SAR 融合时序在作物面积信息提取精度上最为优异。

以往诸多农业遥感的研究均致力于探索解决作物最佳时相的选择,依靠其弱化其他因素的干扰,降低遥感信息中可能存在的误差,减少信息处理难

度<sup>[37-38]</sup>。夏玉米遥感识别最佳时相一般在穗期—抽雄期前<sup>[28-29,39]</sup>,本文以对应的 8 月中旬 Sentinel-2 L2A 与植被相关的可见光、近红外、红边波段为夏玉米遥感识别最佳时相数据<sup>[6,28,34]</sup>,结果实现了 80% 以上的总体精度。Sentinel-2 空间分辨率最高达 10 m,相对于 MODIS、Landsat8/9 数据 250 m 和 30 m 的分辨率,较好分类依赖于其能够更为精细地识别破碎地块及减少混合像元。夏玉米遥感识别光学时序通过夏玉米发育期内构建每月 Sentinel-2 夏玉米遥感识别最佳时相用于作物面积提取,作物信息提取结果显示基于时序特征的分类结果比夏玉米遥感识别最佳时相分类结果总体精度高 6.43% 以上,尽管夏玉米统计值仅差 3.16% (方案 2) 和 1.69% (方案 3),但图斑存在的“椒盐现象”得到了改正,地块连续性、完整以及边界平滑性明显提升。各分类指标对分类结果重要性上相差不大,但各指标在不同时段中重要性有较大差异,这可能与作物不同发育期的作物形态等特性有关,不同时段重要性稳定的指标对作物发育早期作物信息的提取有较大贡献,通过这些指标可能实现作物在发育早期的面积提取。夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序在夏玉米遥感识别光学时序加入 Sentinel-1A GRD 相关波段和 SDWI 指数,基于光学与 SAR 融合时序特征的提取结果显示,大豆玉米带状复合种植面积仅比统计值偏小 20 hm<sup>2</sup>,表明具有时序特征的分类指标特别在玉米及大豆玉米带状复合种植区精准识别上具有优势。在作物种植结构复杂的夏季,“同谱异物”现象导致作物光谱信息差别不显著<sup>[29]</sup>,无法将作物特别是玉米及大豆玉米带状复合种植区分开,SAR 及相关指标为研究区的夏玉米和大豆玉米带状复合种植的区分提供额外的信息,如土壤水分、植株高度等信息,有助于提高分类模型的作物分类能力<sup>[22,40-41]</sup>。但重要性评估结果 SAR 波段重要性较低,其原因一方面可能是 SAR 数据的噪声难以避免,另一方面可能是未充分利用双极化 Sentinel-1 数据中包含的后向散射系数等极化信息<sup>[20]</sup>。

主要存在 2 方面不足:一是按月构建时间序列可能存在多云导致的无数据现象,可能存在的数据缺失问题值得进一步研究,如 Sentinel-2 后续卫星如期发射,将极大改善数据不足的现象;二是分类指标选择依赖于文献报道,仅选择了 2 个卫星的 8 个

波段及衍生的 5 个指数,未考虑其他波段、指数及其他数据的作用,如海拔、坡度、后向散射系数和目标极化分解参数等,有待进一步探索。

#### 4 结论

基于高分辨率光学和 SAR 影像,在 GEE 云平台中设计实现了基于夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序和夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序的作物面积信息提取,光学与 SAR 融合时序的分类结果总体准确率(92.51%)高于其他 2 种方案(83.01%和 89.44%),结果表明夏玉米遥感识别最佳时相、夏玉米遥感识别光学时序和夏玉米遥感识别光学与 SAR 融合时序 3 种方案识别作物分布总体趋势一致,光学与 SAR 融合时序在作物面积信息提取精度上最为优异。后续拟基于 GEE 进一步优化多源数据融合与时序分析指标等,提高作物识别和提取能力。

#### 参考文献:

- [1] 周松.玉米种植户带状复合种植模式采纳行为及影响因素研究:以东营市垦利区为例[D].泰安:山东农业大学,2023.
- [2] 罗桓.县域夏玉米生长遥感监测与产量估算研究[D].南京:南京信息工程大学,2020.
- [3] 张娟.玉米大豆分布遥感图首次服务秋粮产量预测[N].中国气象报,2023-09-25(3).
- [4] 王雪婷,张莎,邓帆,等.基于作物空间物候差异提取黄淮海夏玉米种植面积[J].中国农业气象,2019,40(10):647-659.
- [5] 冀建华.河南省大豆玉米带状复合种植技术的研究与思考[J].河南农业,2024(1):55-56.
- [6] 田海峰.基于 Sentinel-1&2 卫星影像的中国主产区冬小麦遥感识别研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所),2019.
- [7] 周珂,柳乐,张俨娜,等.GEE 支持下的河南省冬小麦面积提取及长势监测[J].中国农业科学,2021,54(11):2302-2318.
- [8] 赵诗童,时晓蒙,吴晓京,等.三种经典夜间陆地雾遥感反演方法的适用性对比分析[J].海洋气象学报,2021,41(1):45-57.
- [9] 申克建,何浩,蒙红卫,等.农作物面积空间抽样调查研究进展[J].中国农业资源与区划,2012,33(4):11-16.
- [10] 李莉,刘志红,韩晨琛,等.基于卫星遥感的临沂市冬小麦种植时空变化特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(3):126-135.
- [11] 李新磊,陈桂芬,焦鸿斌.基于时序遥感数据的玉米种植面积提取方法研究[J].农业网络信息,2010(11):25-27.
- [12] 王小娜,田金炎,李小娟,等.Google Earth Engine 云平台对遥感发展的改变[J].遥感学报,2022,26(2):299-309.
- [13] 钱鑫.基于 GEE 云平台的苏北湖泊时空变化分析研究[D].连云港:江苏海洋大学,2022.
- [14] 宫诏健,田景仁,陈杰,等.基于 MODIS NDVI 数据的辽宁省玉米种植面积提取研究[J].江西农业学报,2020,32(9):119-126.
- [15] 张健康,程彦培,张发旺,等.基于多时相遥感影像的作物种植信息提取[J].农业工程学报,2012,28(2):134-141.
- [16] 单捷,邱琳,孙玲,等.基于 Radarsat-2 的水稻种植面积提取[J].江苏农业学报,2017,33(3):561-567.
- [17] 谷祥辉,张英,桑会勇,等.基于哨兵 2 时间序列组合植被指数的作物分类研究[J].遥感技术与应用,2020,35(3):702-711.
- [18] HUANG C, ZHANG C C, HE Y, et al. Land cover mapping in cloud-prone tropical areas using Sentinel-2 data: integrating spectral features with NDVI temporal dynamics[J]. Remote Sens,2020,12(7):1163.
- [19] FAN X Y, VRIELING A, MULLER B, et al. Winter cover crops in Dutch maize fields: variability in quality and its drivers assessed from multi-temporal Sentinel-2 imagery[J]. Int J Appl Earth Obs Geoinf,2020,91:102139.
- [20] BHOGAPURAPU N, DEY S, BHATTACHARYA A, et al. Dual-polarimetric descriptors from Sentinel-1 GRD SAR data for crop growth assessment[J]. ISPRS J Photogramm Remote Sens,2021,178:20-35.
- [21] 叶智燕.基于 Sentinel-1 和 Sentinel-2 的河南省冬小麦种植面积提取[J].测绘与空间地理信息,2023,46(6):49-52.
- [22] 董心君,田馨.基于 Sentinel-1 的动态 NDSI 水稻分类方法研究[J].测绘工程,2023,32(5):27-33.
- [23] 贾诗超,薛东剑,李成绕,等.基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究[J].人民长江,2019,50(2):213-217.
- [24] GAO B C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sens Environ,1996,58(3):257-266.
- [25] TUCKER C J. Red and photographic infrared linear

- combinations for monitoring vegetation [J]. *Remote Sens Environ*, 1979, 8(2): 127-150.
- [26] HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [27] XIAO X M, BOLES S, LIU J Y, et al. Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 82(2/3): 335-348.
- [28] 段金馈, 李峰, 秦泉, 等. 高分六号红边波段对夏玉米种植区识别的影响 [J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(3): 104-112.
- [29] 王楠. 黑龙江省作物种植结构提取及时空变化研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [30] 王立国, 赵亮, 刘丹凤. SVM 在高光谱图像处理中的应用综述 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(6): 973-983.
- [31] 陈印, 刚成诚, 刘欢欢, 等. 基于 GEE 的苹果园地遥感信息提取研究: 以陕西省渭北旱塬区为例 [J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(1): 36-43.
- [32] 潘力, 夏浩铭, 王瑞萌, 等. 基于 Google Earth Engine 的淮河流域越冬作物种植面积制图 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 211-218.
- [33] FENG S Y, LI W L, XU J, et al. Land use/land cover mapping based on GEE for the monitoring of changes in ecosystem types in the upper Yellow River basin over the Tibetan Plateau [J]. *Remote Sens*, 2022, 14(21): 5361.
- [34] TIAN F Y, WU B F, ZENG H W, et al. Efficient identification of corn cultivation area with multitemporal synthetic aperture radar and optical images in the Google Earth Engine cloud platform [J]. *Remote Sens*, 2019, 11(6): 629.
- [35] 郝斌飞, 韩旭军, 马明国, 等. Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展 [J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(4): 600-611.
- [36] AZZARI G, LOBELL D B. Landsat-based classification in the cloud: an opportunity for a paradigm shift in land cover monitoring [J]. *Remote Sens Environ*, 2017, 202: 64-74.
- [37] 张峰, 吴炳方, 刘成林, 等. 利用时序植被指数监测作物物候的方法研究 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 155-159.
- [38] 齐腊, 刘良云, 赵春江, 等. 基于遥感影像时间序列的冬小麦种植监测最佳时相选择研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(2): 154-160.
- [39] 赵秀兰, 徐玲玲, 张艳红, 等. 未来黄淮海地区夏玉米光温水资源适宜度及灾害风险演变特征 [J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(3): 88-103.
- [40] 郑少兰, 刘龙威. 单时相 Sentinel-1A 卫星 SAR 数据水稻信息提取 [J]. *地理空间信息*, 2020, 18(4): 61-64.
- [41] 卢献健, 张焕铃, 晏红波, 等. 协同 Sentinel-1/2 多特征优选的甘蔗提取方法 [J]. *自然资源遥感*, 2024, 36(1): 86-94.