

引用格式: 杜保佳, 张晶, 王宗明, 等. 应用 Sentinel-2A NDVI 时间序列和面向对象决策树方法的农作物分类[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(5): 740-751. [Du B J, Zhang J, Wang Z M, et al. Crop mapping based on Sentinel-2A NDVI time series using object-oriented classification and decision tree model[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(5): 740-751.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180412

应用 Sentinel-2A NDVI 时间序列和面向对象决策树方法的农作物分类

杜保佳^{1,2}, 张晶^{1,4}, 王宗明^{1*}, 毛德华¹, 张淼³, 吴炳方³

1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 4. 通化市国土资源局, 通化 134001

Crop Mapping based on Sentinel-2A NDVI Time Series Using Object-Oriented Classification and Decision Tree Model

DU Baojia^{1,2}, ZHANG Jing^{1,4}, WANG Zongming^{1*}, MAO Dehua¹, ZHANG Miao³, WU Bingfang³

1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Tonghua Bureau of Land and Resources, Tonghua 134001, China

Abstract: Cropping pattern is a fundamental aspect of land use. Obtaining accurate and timely crop spatial distribution information is very important to guide agricultural production, rational allocation of resources, and help solve the problem of food security. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) time series have been widely used in collecting vegetation information. Identification and information extraction of different crops can be effectively achieved by analyzing the growth period of crops and the time-series spectrum characteristics of NDVI. Most existing studies on NDVI time series are limited to moderate or low resolution remote sensing imagery, which affects the accuracy of extracting crop spatial distribution information. With the successful launch of the satellite Sentinel-2A, more opportunities have emerged for the construction of NDVI time series with high temporal and spatial resolution. In this paper, by use of typical phase Sentinel-2A imagery for Beian city, a NDVI dataset with a spatial resolution of 10 m covering the whole growth period of April-October was generated based on the Savitaky-Golay filtering smoothing method, and crop identification was implemented based on decision tree model and object-oriented classification. By analyzing NDVI time series curves of crop samples, we concluded that NDVI time series was able to clearly distinguish crop phenological differences and capture crop specific features in the study area. Furthermore, we also discussed the classification accuracy based

收稿日期: 2018-08-24; 修回日期: 2019-03-14.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600302, 2016YFC0500201); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-STZ-DTP-009); 吉林省科技发展计划项目(20170301001NY)。[**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China, No.2016YFA0600302, 2016YFC0500201; Science and Technology Service Network Initiative, No.KFJ-STZ-DTP-009; Jilin Scientific and Technological Development Program, No.20170301001NY.]

作者简介: 杜保佳(1988-), 男, 吉林长春人, 博士生, 研究方向为地理景观遥感。E-mail: dubaojia@neigae.ac.cn

*通讯作者: 王宗明(1976-), 男, 内蒙古敖汉人, 研究员, 研究方向为地理景观遥感。E-mail: wangzongming@neigae.ac.cn

on the typical phase data by the methods of object-oriented classification and support vector machine. Taking the field sample survey datum as true value, we analyzed the results of the two classification methods. The results show that the processed NDVI time series with high resolution over the entire crop growth cycle represent different crop phenological characteristics appropriately. It is able to reflect the crops growth condition accurately and distinguish different crops effectively. The decision tree model integrated with the object-oriented classification method had the highest accuracy in crop classification as compared to other classification methods, with its overall accuracy and kappa coefficient being 96.2% and 0.892, respectively. This research show that Sentinel-2A NDVI with high resolution can be used for crop mapping, and can be applied to crop classification over large areas, thanks to Sentinel-2A imagery's wide coverage. Furthermore, the Savitzky Golay (S-G) method was used for NDVI time series smoothing, and the results indicate that the processed NDVI time series can better represent crop phenological characteristics. Then the decision tree model integrated with the object-oriented classification method was used for crop classification based on typical phase multi-spectral imagery and the smoothed NDVI time series, which improved the overall accuracy by 7.7% and the kappa coefficient by 0.055. The approach proposed in this paper provides important reference for crop mapping in other agricultural regions.

Key words: Sentinel-2A; time-series data; NDVI; object-oriented; decision tree; crops; planting structure; Bei'an

***Corresponding author:** WANG Zongming, E-mail: wangzongming@neigae.ac.cn

摘要:农作物种植结构是农业生产活动对土地利用的表现形式。及时精确地获取农作物的空间分布信息对指导农业生产、合理分配资源以及解决粮食安全问题等具有重要意义。目前农作物信息提取研究大多局限于中低分辨率遥感影像的NDVI时间序列,影响了作物空间分布信息提取的准确性。随着Sentinel-2A卫星成功发射,为高分辨率NDVI时间序列的构建提供了可能。本文以黑龙江省北安市为研究区,基于覆盖完整生育期的Sentinel-2A多光谱数据,构建10 m分辨率的NDVI时间序列数据集,利用Savitzky Golay (S-G)滤波器对Sentinel-2A NDVI时间序列数据进行平滑。基于典型时相的多光谱数据和NDVI时间序列构建面向对象决策树分类模型进行作物类型遥感识别。通过对样本的NDVI时间序列曲线分析,可以得出NDVI时间序列能够清晰地区分作物物候差异。此外,本文还利用面向对象分类和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类两种方法,对典型时相的多光谱数据进行了作物分类对比实验,并对结果进行了对比分析。研究结果表明:①典型时相多光谱数据引入平滑重构后的NDVI时间序列能够更好地描述作物的物候特性,能够准确刻画研究区作物发育情况,有效区分各类作物;②通过对比分类实验发现,典型时相多光谱数据引入NDVI时间序列特征,增强了不同作物之间的光谱差异,提高了作物分类精度,总体精度和kappa系数较典型时相多光谱数据进行分类的结果分别提高了7.7%和0.055;③基于面向对象的决策树分类模型在作物分类的结果中精度最高,总体精度为96.2%,kappa系数为0.892。本研究的方法为其他大区域农作物的分类提供了重要参考和借鉴价值。

关键词: Sentinel-2A; 时序数据; NDVI; 面向对象; 决策树; 农作物; 种植结构; 北安市

1 引言

准确地获取农作物种植结构及其空间分布状况^[1],对区域作物产量的预测、作物结构的调整以及农业的精细化管理有着重要意义^[2]。利用遥感技术提取农作物种植结构,比传统逐级汇总和抽样调查方法更能及时、准确和直观的掌握农作物的空间布局^[3]。在作物生育期内,不同农作物的光谱有较高的相似度,仅依靠单期遥感影像难以识别多种农作物类型,由于不同农作物类型具有独特的物候特征,并且同一作物在不同生育期及不同作物在同一

生育期的物候差异比较明显,利用植被指数时序变化能够充分体现不同作物的物候特征,实现作物类型识别和空间分布信息提取^[4]。

目前众多学者基于遥感时序植被指数进行农作物识别作了大量研究,如Wardlow等^[5]基于多时相MODIS NDVI时间序列,发现所有作物均有唯一的时序光谱曲线,通过特征变量提取能够实现大宗作物类型的识别分类。Atzberger等^[6]基于AVHRR NDVI时序数据集进行ISODATA非监督分类,对意大利托斯卡纳区冬季作物进行分类制图。许青云等^[7]基于MODIS NDVI时序数据集,结合ISO非监

督分类方法对陕西省农作物的种植模式和类型进行了识别,总体精度为87.56%。张荣群等^[8]根据作物样本点的NDVI时序特征,利用决策树分类法对河北省曲周县的农作物进行了分类,总体精度为89.2%。上述研究多是利用空间分辨率低于30 m的遥感数据构建NDVI时间序列数据集,基于像素的传统分类方法进行的农作物识别,没有充分利用到典型时相多光谱数据的光谱特征,无法有效解决“同物异谱、同谱异物”问题,并且分类结果存在明显的“椒盐现象”,难以提高作物的分类精度。近年来面向对象方法作为一种新的分类技术引起了广泛关注,与传统分类方法最大的不同是面向对象分类方法根据地物的光谱和形状信息进行对象分割,再结合对象的光谱、纹理等几何空间特征进行地物分类,能够有效弥补基于像元分类方法的不足。

随着遥感技术的发展,中高分辨率遥感数据突破了重访周期的限制,能为同一地区提供连续的时序数据。2015年6月23日发射的Sentinel-2A光学遥感卫星^[9],其综合性能超过同为10 m分辨率的SPOT5影像,可以实现利用单一数据源构建中高分辨率时序数据集。国内外相关学者对Sentinel-2A数据进行了广泛的研究。Alfonso Fernández-Mansoa等^[10]利用Sentinel-2A数据对西班牙加塔地区的森林生态系统的火灾严重程度进行了监测。Katja Dornhofer等^[11]利用Sentinel-2A数据对德国施塔恩贝格湖水体富营养化进行了监测。Antoine Lefebvre

等^[12]利用Sentinel-2A数据对布拉格和雷恩地区的城市土地覆盖和景观结构进行了变化监测。Lauri等^[13]利用Sentinel-2A数据提取了森林的覆盖度和叶面积指数。目前有关利用Sentinel-2A数据进行农作物监测方面的研究较少,还未充分挖掘其应用价值。

鉴于此,本文以黑龙江省北安市为研究区,利用作物生长季的Sentinel-2A数据构建归一化植被指数(NDVI)时间序列数据集,结合典型时相的多光谱数据,综合分析不同作物、不同生育期的NDVI时序曲线变化特征,结合面向对象的决策树分类方法提取大豆、玉米、水稻和春小麦的空间分布信息,探讨Sentinel-2A NDVI时序数据结合典型时相多光谱数据在识别作物类型方面的优势;同时也为Sentinel-2A数据在农业遥感监测领域的应用潜力提供科学的参考依据。

2 研究区概况、数据源及预处理

2.1 研究区概况

北安市隶属于黑龙江省黑河市,总面积为7193.13 km²,介于126°16'E-127°53'E和47°35'N-48°33'N之间(图1)。位于小兴安岭南麓,松嫩平原东北部边缘地带,地势南低北高、西低东高,海拔在234~312 m之间。该区河网纵横交错,水资源丰富,通肯河、乌裕尔河和鸡爪河水系流经西部的丘陵漫岗农业区,讷谟尔河水系流经东部低山河谷区;地

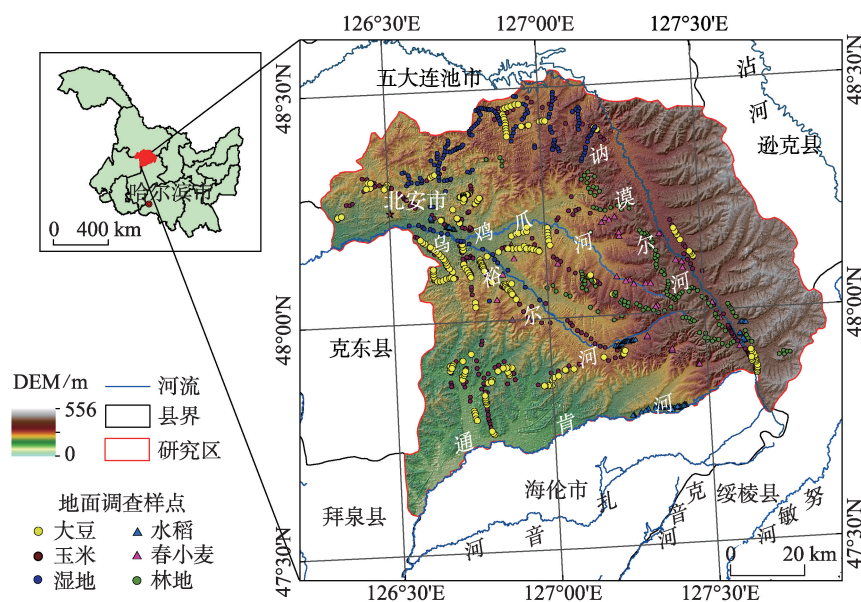


图1 研究区位置及作物样本点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and distribution of crop sample sites

处寒温带季风气候区,无霜期 90~120 d,春季少雨且蒸发量大,表现为短暂的干旱;夏季温和多雨,年降水量在 400~600 mm 之间,作物生长期在 4~10 月,约 140~180 d,由于 5 月降水偏少,气候干燥,因此常形成春旱秋涝;土质肥沃,西部丘陵农业区分布有黑土和草甸土,该区是传统的大豆主产区,还有玉米、春小麦和水稻等其他杂粮品种,种植制度为一年一熟,是黑龙江省重要的商品粮基地。

2.2 数据源及预处理

2.2.1 遥感影像数据

Sentinel-2A 遥感影像下载于欧空局数据中心 (<https://scihub.Copernicus.eu/dhus/#/home>),产品等级为 1C 级,其中红绿蓝和近红外 4 个波段的空间分辨率为 10 m。本文选取了覆盖研究区整个生育期的 2017 年 4 月 29 日至 10 月 26 日共 9 期 33 景 Sentinel-2A 卫星影像,33 景影像均以 10% 以下云量覆盖为标准。影像获取日期、云量见表 1。

表 1 北安市 Sentinel-2A 数据列表
Tab. 1 Sentinel-2A imagery of Beian (%)

日期	轨道号云量			
	51UYP	52TCT	52UCU	52UDU
2017-05-26	40.10	6.25	8.38	7.14
2017-06-15	0.52	-	-	-
2017-06-28	-	5.73	-	-
2017-07-05	0	0	0	0
2017-07-13	-	0.18	6.75	-
2017-07-25	0	0	0	9.95
2017-08-22	0	0.06	0.01	0.56
2017-09-03	0	0.24	-	6.35
2017-09-11	1.80	-	3.13	-
2017-09-23	1.10	4.28	1.33	0.32
2017-10-21	0.09	0.03	0.06	0.52

根据 Sentinel-2A 官方发布的数据预处理说明, L1C 级产品均为经过大气表观反射率处理过的 L1C 大气顶部反射率数据^[14]。对遥感影像数据进行大气校正,即可得到反射率数据。大气校正可在欧空局提供的 SNAP 软件中完成,然后获取 NDVI 时序数据集;利用 ENVI 5.4 软件对影像进行镶嵌和裁剪。

2.2.2 地面调查数据

地面样本调查数据来源于 2017 年 5~10 月作物生长季的实地调查工作,样本数据主要记录了作物的详细信息,主要包括农作物类型、物候期、生长状况和±5 m 定位精度的 GPS 采集的经纬度信息,通过对样本数据整理得到有效的样本数据 1040 个(其中

大豆 412 个、玉米 242 个、春小麦 144 个、水稻 128 个、水体 10 个、湿地 27 个、草地 26 个、林地 29 个、建筑用地 22 个),按照 7:3 的比例将其随机分为训练样本点(728 个)和分类精度验证点(312 个)。

3 研究方法

本研究利用多期 Sentinel-2A 遥感影像构建 NDVI 时序数据集,结合典型时相的多光谱数据进行多尺度分割,基于北安市的物候节律和时序光谱特征确定各作物的分类阈值,构建面向对象的决策树分类规则集,识别主要作物的空间分布信息,技术流程如图 2 所示。

3.1 NDVI 时序数据集的构建与重构

NDVI 是目前应用最广泛的植被指数^[4]。NDVI 时间序列能够反映作物从播种、生长到成熟、收割的 NDVI 变化过程。作物类型不同,NDVI 的光谱差异明显。利用 ENVI 5.4 软件处理得到北安市的 NDVI 时序数据集。NDVI 计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

式中: ρ_{nir} 为近红外波段的反射率; ρ_{red} 为红波段的反射率。

水稻是北安市的主要农作物之一,根据其水生特点,本文引入了归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)对水稻与其他作物进行了区分^[15]。NDWI 计算公式为:

$$NDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{nir}}{\rho_{green} + \rho_{nir}} \quad (2)$$

式中: ρ_{green} 绿波段的反射率; ρ_{nir} 为近红外波段的反射率。

由于水汽、气溶胶等因素的干扰,NDVI 时间序列曲线呈现不规则波动,对 NDVI 时间序列进行作物波谱分析和特征阈值提取产生影响。因此,剔除 NDVI 时序数据中的空值点及异常点,获得与作物实际生长规律相符合的 NDVI 时间剖面曲线^[16-17]。

本文利用 Savitzky-Golay (S-G) 滤波方法重构 Sentinel-2A 的 NDVI 时间序列^[18]。研究发现,利用 S-G 算法处理后的 NDVI 时序数据,能够得到较为平滑又能反映 NDVI 数值变化趋势的时间序列曲线。S-G 平滑滤波算法可以表示为:

$$Y_j^* = \sum_{i=-m}^m C_i Y_{j+1} / N \quad (3)$$

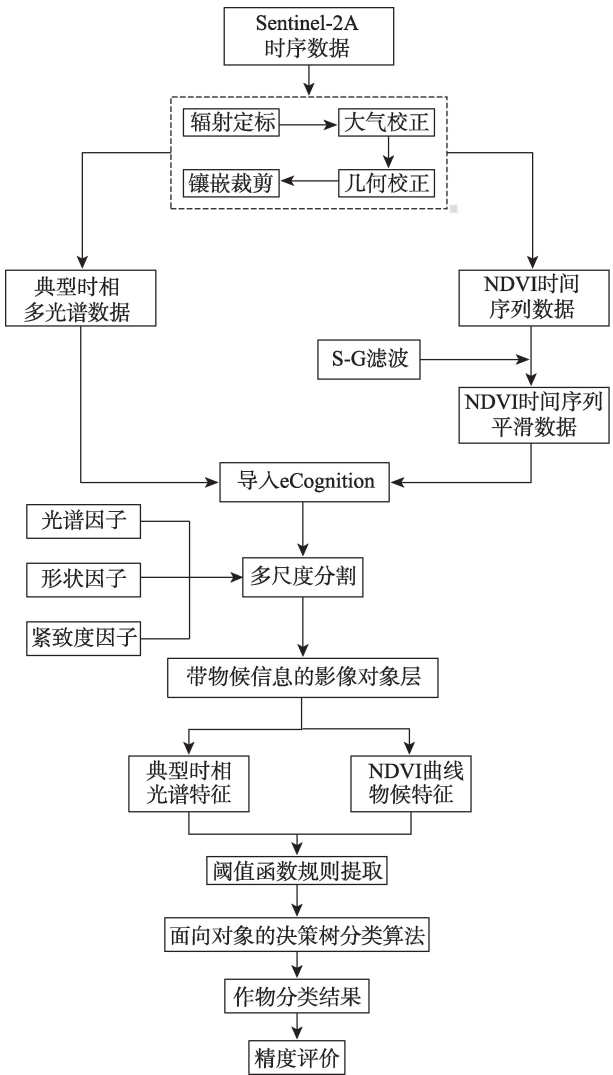


图2 农作物类型识别技术流程

Fig. 2 Methodological flowchart for the crop mapping

式中： Y 表示原始NDVI值； Y^* 表示NDVI拟合值； j 表示原始NDVI时间序列的序号； C_i 表示从滤波窗口第*i*个NDVI值的卷积系数； N 表示滤波窗口的

滑动数组宽度($2m+1$)； m 为决定移动窗口的大小。

本文利用ENVI 5.4软件的Savitzky-Golay Filter扩展工具实现NDVI时间序列数据平滑,基于多次迭代试验,参数设置为:决定移动窗口大小 $m=2$,平滑多项式次数 $d=3$ 。

3.2 多尺度分割与最优分割尺度选择

多尺度分割是指将影像中具有相似亮度、纹理和色彩相近的临近像元自下而上合并为具有不同属性的影像对象^[19-20],对象分割是后续分类识别的基础,对象分割的大小直接关系到分类精度的高低。本文利用eCognition8.9软件的Multiresolution Segmentation模块,对Sentinel-2A典型时相的多光谱数据和经过S-G平滑的NDVI时序数据进行多尺度分割。其参数包括分割尺度,形状因子、颜色因子、光滑度因子和紧致度因子。

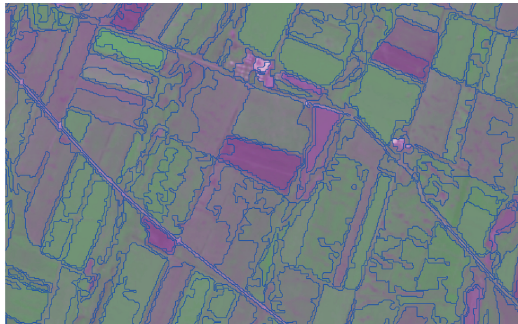
通过调整不同分割尺度和分割参数进行多次分割试验,并结合研究区的实际情况对分割效果图进行目视判读分析,最终确定采用2个尺度进行影像的多尺度分割(表2)。首先在100的分割尺度下提取林地及田间附属林带等非农作物信息;然后再执行50尺度的对象分割,对作物类型进行识别和空间分布信息提取。多尺度分割效果放大如图3所示。

表2 多尺度分割尺度及分割参数设置
Tab. 2 Scale and parameter settings for the multi-resolution segmentation

权重因子 Weight	层次 Levels	
	Level-1	Level-2
分割尺度 Scale	100	50
形状因子 Shape	0.3	0.1
颜色因子 Color	0.7	0.9
光滑度 Smooth	0.4	0.5
紧致度 Compact	0.6	0.5



(a)2017-05-26 分割效果(分割尺度100)



(b) 2017-09-09 分割效果(分割尺度50)

图3 Sentinel-2A/MSI影像多尺度分割效果对比

Fig. 3 Comparison of the multi-scale segmentation results on different scales

3.3 NDVI时间序列曲线重建特征分析

从图4中可以看出,经过滤波平滑的NDVI时间序列曲线,降低了噪声的影响,消除了锯齿状和突变的异常点,表现出明显的差异性特征。光谱曲线整体变化趋势较为平滑且清晰,能够真实反映作物的物候特征。通过对比北安市大豆、春小麦的物候历发现(表3),经过平滑的NDVI时序数据与本区作物的物候历具有较高的吻合度,达到了重建NDVI时间序列的效果。

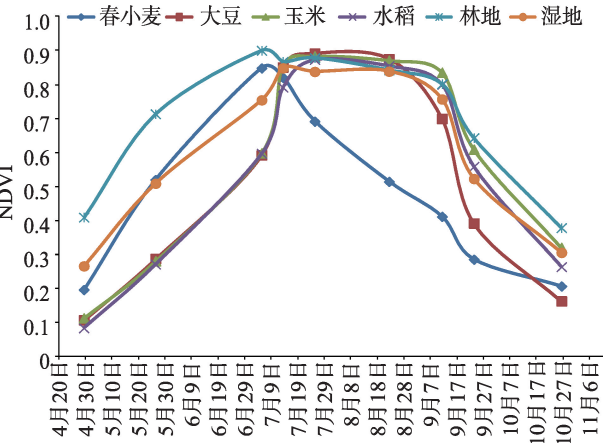


图4 典型地物S-G滤波平滑后NDVI时间序列
Fig. 4 NDVI time series of typical objects after the S-G smoothing

根据北安市主要作物的物候特征(图4和表3)可以看出,4月中旬播种春小麦,4月末至5月中旬播种水稻、玉米和大豆^[21-22]。结合地面调查结果可知,5月下旬至7月上旬,春小麦处于拔节期-抽穗期-灌浆期,7月5日小麦的NDVI值最高,此时玉米和大豆处于拔节期,NDVI值相对较低,水稻的NDVI值最低;8月中旬,收获小麦后的田块NDVI值最低。利用7月5日和8月22日的NDVI可以将春小麦进行有效区分。7月上旬,水稻处于分蘖期-孕穗期,水稻植株与水体形成的混合光谱与大豆、玉米等旱田作物存在一定的差异,此时水田的NDVI值

明显低于旱田,利用7月13日的NDVI可以将水稻进行有效区分。黑龙江省的玉米和大豆生育期接近,根据大豆和玉米的NDVI时间序列曲线可以看出,大豆和玉米在5-7月的NDVI值差异较小且光谱特征相似。在8-9月的NDVI值差异变大且变化趋势不同,大豆和玉米在9月23日的NDVI值差异最大,二者能够得到较好地区分,此时大豆已经收获,玉米尚未收获,大豆地块的植被覆盖度快速降低而玉米地的植被覆盖度变化相对较小^[23]。

3.4 作物分类方法及精度验证

本文综合野外调查样点叠加 Sentinel-2A NDVI 时间序列数据,获取各类型农作物的NDVI时序曲线,通过比对确定NDVI最大差异值来区分不同农作物类型,并在eCognition多尺度分割之后发现,同期的多光谱数据在生成对象层后,其亮度特征,近红外波段的DN值也有较好的区分作物能力。因此选取最大特征阈值对应时相的多光谱数据作为典型时相数据参与NDVI时间序列数据的多尺度分割和特征提取,结合面向对象的决策树分类方法,逐层地识别作物类型、提取其空间分布信息。根据实地调查,将本文的分类类别确定为大豆、玉米、水稻、春小麦、湿地、水体、草地、林地和建筑用地。具体步骤为:

第一层:在分割尺度为100条件下生成Level-1层,利用5月26日的NDVI图像,通过调整阈值,目视判读确定最优阈值来提取植被覆盖区域。根据图5分类规则集可知,该步骤可以将林地、草地、湿地和春小麦看作是有植被覆盖的区域先被提取出来。

第二层:在50分割尺度条件下生成的Level-2层上提取其他农作物类型。利用NDVI_{7.5}和NDWI_{7.5}掩膜掉水体对象,利用NDVI_{5.26}和NDVI_{7.5}对林地对象进行掩膜。

第三层:对比NDVI时间序列曲线发现,水稻的NDVI值在7月13日明显低于其他农作物的NDVI值,NIR波段的DN值明显低于其他作物的DN值,

表3 北安市主要作物生育期
Tab. 3 Phenological periods of the major crops in Beian

月份	4月			5月			6月			7月			8月			9月			10月		
旬	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
大豆				播种			出苗			开花			结荚			成熟			收获		
玉米				播种			出苗			拔节	抽穗		开花			灌浆			成熟		收获
春小麦	播种			出苗			拔节	抽穗		灌浆	成熟		收获								
水稻				播种			出苗			拔节			抽穗			成熟			收获		

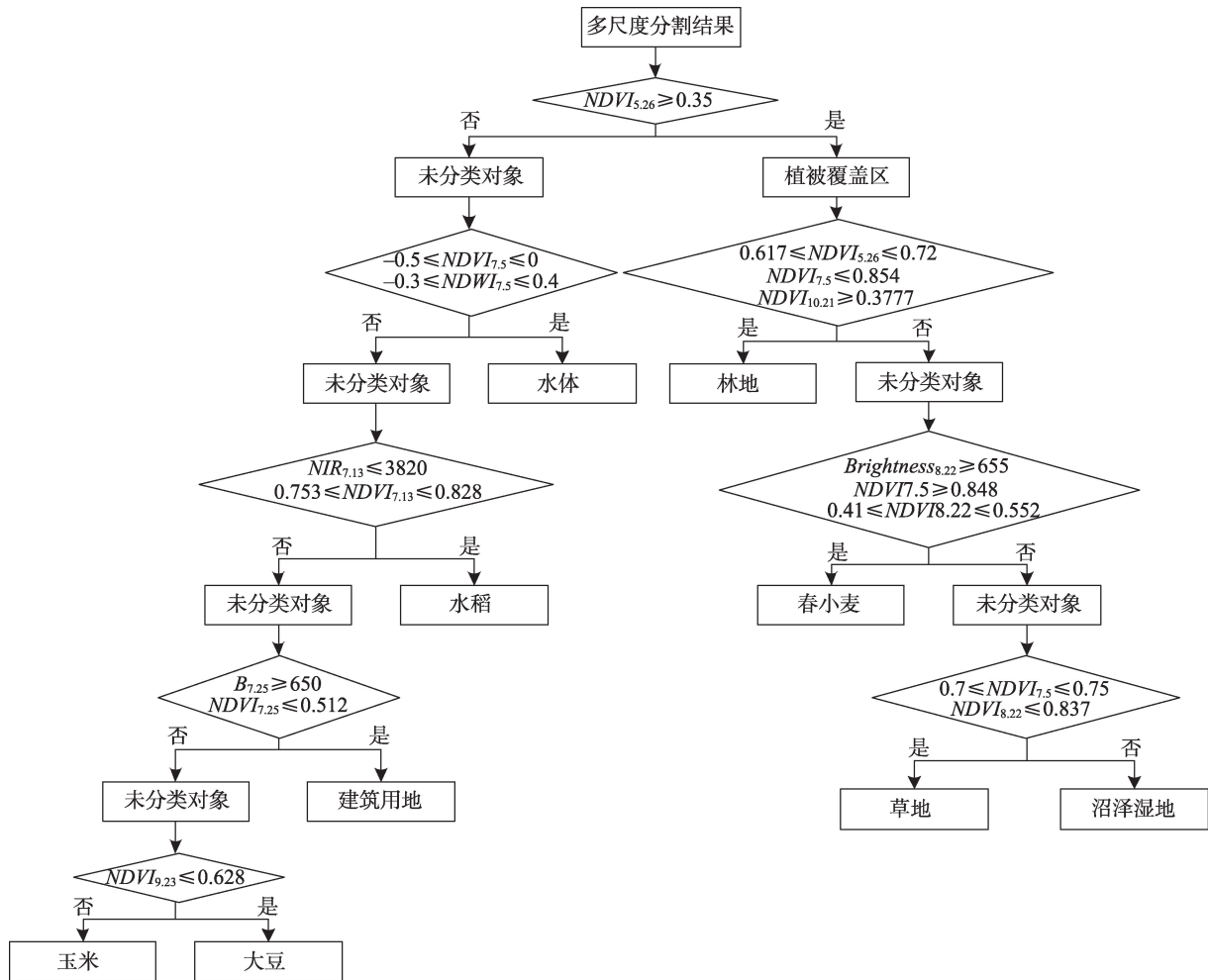


图5 分类决策树规则

Fig. 5 Classification rules of the decision tree

经试验确定 NDVI 阈值 0.753~0.828, $NIR \leq 3820$ 可以将水稻对象提取出来;春小麦的 NDVI 时间序列值在 7 月 5 日至 8 月 22 日之间明显低于其他作物 NDVI 值,但是 $Brightness_{8.22}$ 明显高于其他作物的亮度值,通过设定 NDVI、Brightness 阈值可将春小麦提取出来。

第四层:利用 $B_{7.25}$ 和 $NDVI_{7.25}$ 将建筑用地进行掩膜提取,第一层得到的植被覆盖区仅剩草地和湿地未分类,根据 $NDVI_{7.25}$ 和 $NDVI_{8.22}$ 可将草地和湿地进行区分。

第五层:对比 NDVI 时间序列光谱曲线发现,玉米和大豆的 NDVI 值在 9 月 23 日差异最大,玉米的 NDVI 值远远高于大豆的 NDVI 值,可以将仅剩的玉米、大豆对象进行有效区分。

具体的作物分类规则如图 5 所示。

本文对典型时相多光谱数据进行多尺度分割,

采用面向对象分类方法识别农作物,对比说明 NDVI 时间序列数据引入到多光谱数据中能够提高作物分类精度并具有一定的普适性;其次,利用典型时相多光谱数据,基于像元的支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类方法识别农作物,对比说明面向对象分类方法的优势。

利用 2017 年野外地面调查样点数据,生成混淆矩阵,采用总体精度、Kappa 系数、制图精度和用户精度进行定量评价^[24]。

4 结果及分析

4.1 主要农作物分布结果

结合面向对象的决策树分类方法提取了北安市 2017 年的大豆、玉米、春小麦和水稻,提取结果,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,大豆和玉米的空

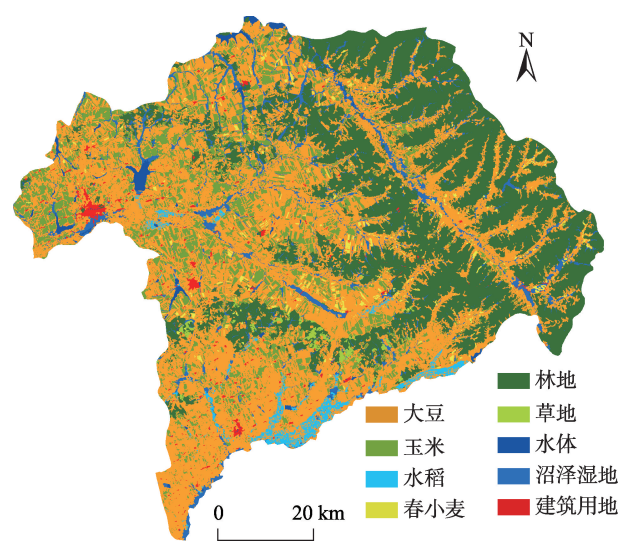


图6 北安市2017年作物分类结果

Fig. 6 Map of the crop classification in 2017 in Bei'an

间分布,相对集中。大豆的种植面积最大,玉米次之,其中大豆主要分布在西北部 and 南部,玉米主要分布于北部和中部;小麦和水稻的种植面积相对较小,其中水稻主要沿南部的通肯河以及乌裕尔河两侧沟谷地带分布,小麦零星分布于研究区,呈现与玉米、大豆混种的种植结构特点。

4.2 不同分类算法精度对比

利用随机选择的312个地面验证点,通过计算分类混淆矩阵的方法对分类结果进行精度验证,如表4所示。验证样本包括大豆102个、玉米92个、春小麦44个、水稻33个、其他41个(水体3个、湿地17个、草地10个、林地12个、建筑用地9个)。总体精度达到96.2%,kappa系数为0.892,其中春小麦的制图精度达到97.7%、用户精度达到100%,大豆的制

表4 3种不同分类算法结果混淆矩阵

Tab. 4 Confusion matrix of the classification results using three different classification methods

地面样点		分类结果					合计
		大豆	玉米	小麦	水稻	其他	
典型时相多光谱数据+NDVI时间序列数据/面向对象分类方法	大豆	96	2	0	0	4	102
	玉米	2	86	1	1	2	92
	小麦	0	0	43	0	1	44
	水稻	1	2	0	30	0	33
	其他	3	3	2	1	32	41
	合计	102	93	46	32	39	312
	制图精度/%	94.1	93.5	97.7	90.9	78.0	
	用户精度/%	94.1	92.5	93.5	93.8	82.1	
		总体精度:96.2%		Kappa系数:0.892			
地面样点		分类结果					合计
		大豆	玉米	小麦	水稻	其他	
典型时相多光谱数据/面向对象分类方法	大豆	88	3	3	3	5	102
	玉米	3	79	2	3	5	92
	小麦	3	2	38	0	1	44
	水稻	1	2	0	27	3	33
	其他	4	3	2	1	31	41
	合计	99	89	45	34	45	312
	制图精度/%	86.3	85.9	86.4	81.8	75.6	
	用户精度/%	88.9	88.8	84.4	79.4	68.9	
		总体精度:88.5%		Kappa系数:0.837			
地面样点		分类结果					合计
		大豆	玉米	小麦	水稻	其他	
典型时相多光谱数据/基于像元的SVM分类方法	大豆	81	8	4	5	4	102
	玉米	7	75	3	3	4	92
	小麦	3	3	35	2	1	44
	水稻	1	4	1	26	1	33
	其他	4	4	3	2	28	41
	合计	96	94	46	38	38	312
	制图精度/%	79.4	81.5	79.5	78.8	68.3	
	用户精度/%	84.4	79.8	76.1	68.4	73.7	
		总体精度:84.3%		Kappa系数:0.791			

图精度达到94.1%、用户精度达到94.1%，玉米和水稻的分类精度也超过90%。总体上，各作物类型的分类结果较为准确，分类精度较高。

为进一步验证本文采用分类方法的有效性，将利用多光谱数据、采用面向对象分类算法得到的结果和基于像素的SVM算法得到的结果与本研究的結果进行比较分析。从图7和表4可以看出，NDVI时间序列数据引入到典型时相的多光谱数据，利用面向对象分类算法的精度最高，总体精度为96.2%，kappa系数为0.892，得到的农作物地块比较完整（图7(b)）。大豆田块中间的河流冲沟、草地能够识别出来，比较符合研究区的实际情况，并且能够将所有类型的农作物区分出来。同样是采用面向对象分类算法，仅使用典型时相的多光谱数据得到的地块也较为完整，总体分类精度为88.5%，kappa系数为0.837。但是对比图b和图c发现，大豆田块中间的草地被错分成大豆和玉米，一部分玉米田块被错分成大豆，水稻田块中有局部斑块错分成玉米和大豆，这说明在多光谱数据中，玉米、大豆和水稻的光谱较为相似，只利用多光谱数据的特征阈值难以对其进行有效区分，局部田块的分类效果较差。从对比的分类结果来看，分类方法相同，NDVI时间序列数据的引入，总体分类精度提升了7.7%，kappa系数提升了0.055。

SVM算法虽然在处理小样本、高维度、非线性遥感影像问题中表现优越，但是在地物光谱高度相似的情况下也难以准确识别各类地物，从图7(d)中可以发现，SVM算法得到的分类效果图中存在错分现象和“椒盐现象”，3种分类方法中，基于像元的分类结果精度最低，总体精度为84.3%，Kappa系数为0.791。综合比较分类结果表明：NDVI时间序列数

据引入到典型时相的多光谱数据中，基于面向对象分类算法得到的田块最为完整，且错分概率最低，也有有效的避免了“椒盐现象”。

5 讨论与结论

5.1 讨论

Sentinel-2A影像是目前空间分辨率、时间分辨率均较高的且免费、易获取的光学卫星^[13]，作为新型遥感数据源在区域作物种植结构方面的应用和报道较少，以往大尺度的区域作物类型识别研究多是利用Landsat TM/OLI等其他中、低空间分辨率的卫星影像^[7,12,19]，由此产生的混合像素影响也限制了作物类型识别的精度，Sentinel-2A时序影像克服了以往时序数据难以获取、影像分辨率低等问题，在大区域尺度上具备作物精细识别的巨大潜力^[25]。

地物具有尺度效应，在影像分割过程中，不同的分割尺度会影响对象斑块的大小、对象之间的异质性，林地及田间附属林带等非农作物的光谱特征与某些作物的光谱特征比较相近，仅用单一尺度进行分割会造成建筑用地、草地、林地以及田间附属林带的像元合并到农作物图斑中，需根据研究区的实际情况和作物的种植结构进行多次分割试验，结合不同地物的特点选取不同的分割尺度，得到最优的参数进行多尺度分割，再进行后续分类，可以大大提高作物的分类精度。

从表4可以看出，相比仅用典型时相数据的面向对象分类方法和基于像元尺度的SVM分类方法而言，采用面向对象的分类树方法，对经过S-G滤波处理后的NDVI时间序列数据和典型时相多光谱数据进行分类总体精度达到96.2%，作物类型的识

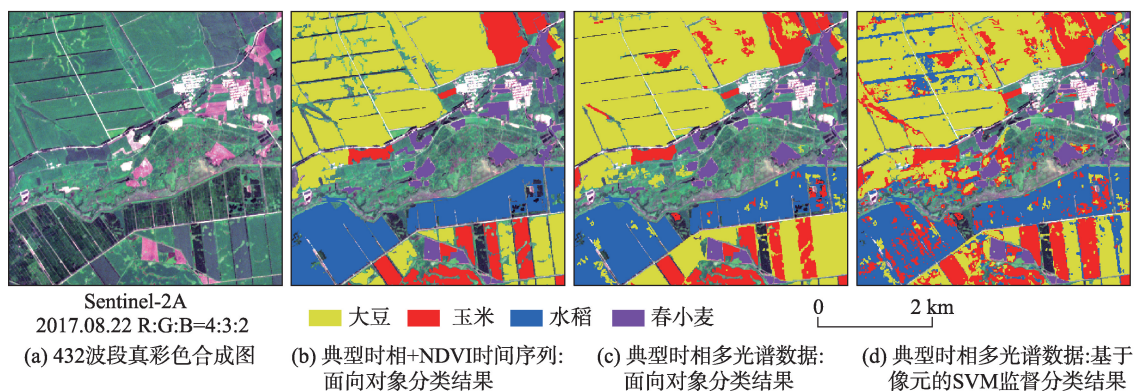


图7 3种不同分类算法结果

Fig. 7 Comparison of the results using three different classification methods

别精度有较大提升;如刘明月等^[22]利用面向对象方法对北安市典型时相的 Landsat 8 OLI 影像进行农作物识别,研究结果通过构建 MODIS NDVI 时序数据来筛选 OLI 最佳时相识别农作物,减少了数据处理和分类的复杂程度,分类精度达到 90.7%;欧阳玲等^[26]利用 GF-1 和 Landsat 8 OLI 影像基于物候信息和光谱信息确定北安市大宗作物识别的关键时期和特征参数,同样利用面向对象的分类方法,进行分析识别和产量分析,分类结果总体精度达到 87.54%。而本文提出的方法对北安市大宗作物进行识别,总体分类精度高达 96.2%。如图 4 所示,北安市 5-9 月大豆田块和玉米田块的 NDVI 时间序列曲线特征接近,7-8 月草地和大豆田块的光谱特征相似度极高,仅用典型时相的多光谱数据无法准确识别草地和农作物。通过本文实验说明,利用典型时相的影像分类得到的大豆、玉米、春小麦和水稻的分类精度分别为 86.3%、85.9%、86.4%和 81.8%,基于覆盖作物完整生育期的 Sentinel-2A NDVI 时间序列数据充分考虑了各种作物生长过程的 NDVI 动态变化特征,通过结合对象尺度构建分类决策树,可以克服地物波谱特征相似的问题,使研究区的分类决策条件更加细化、具体,在一定程度上提高了作物的分类精度^[27-28],大豆、玉米、春小麦和水稻的分类精度分别提高了 7.8%、7.6%、11.3%和 9.1%。因此,免费易获取的 Sentinel-2A 时序数据在大区域尺度农作物识别方面有较广泛的应用价值。

本研究还存在不足之处,仍有小范围的“错分”和“漏分”现象,通过对分类后的结果进行人工复检、修改,可以解决道路、草地和田间附属林带误分成农作物的问题。其次,后续的研究还需要对中高分辨率影像中包含的空间信息进行深度挖掘,例如地物的纹理特征、形状特征等,来提升作物的分类精度。

5.2 结论

本文利用作物完整生育期的 Sentinel-2A NDVI 时间序列数据和典型时相的多光谱数据,在面向对象分类方法下,开展了北安市主要农作物的识别与空间分布信息提取研究,并对比分析了不同分类方法提取的作物分类精度,以此来评价 NDVI 时间序列和面向对象方法在作物识别能力方面的优势,得到如下结论:

(1)利用覆盖作物完整生育期的 Sentinel-2A 时序遥感影像,采用 S-G 滤波对 NDVI 时间序列重构,能够准确刻画北安市的作物生长发育过程,满足作

物分类的要求,有效区分大宗作物。验证了 Sentinel-2A 卫星时序影像在大宗作物提取应用方面的技术可行性。

(2)基于典型时相多光谱数据和 NDVI 时间序列,结合面向对象尺度的决策树分类方法,较准确地提取了北安市大宗作物的种植面积,总体精度达到了 96.2%。春小麦的制图精度达到了 97.7%,用户精度达到了 100%,与利用单一时相数据的分类结果相比,明显改善了作物提取的分类精度。

(3)多尺度分割生成影像对象,作物类型的识别提取是在农田地块多种分割尺度基础上分层进行的,使作物分类结果避免了“椒盐”现象,且在分类过程中极大程度的减少了“同谱异物”和“同物异谱”现象的产生。使作物面积提取的总体精度较高、农田地块较为完整。

参考文献(References):

- [1] 胡琼,吴文斌,宋茜,等.农作物种植结构遥感提取研究进展[J]. 中国农业科学,2015,48(10):1900-1914. [Hu Q, Wu W B, Song Q, et al. Recent progresses in research of crop patterns mapping by using remote sensing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015,48(10):1900-1914.]
- [2] 黄健熙,侯裔焯,苏伟,等.基于 GF-1 WFV 数据的玉米与大豆种植面积提取方法[J].农业工程学报,2017,33(7):164-170. [Huang J X, Hou Y Z, Su W, et al. Mapping corn and soybean cropped area with GF-1 WFV data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(7):164-170.]
- [3] 李冰,梁燕华,李丹丹,等.多时相 GF-1 卫星 PMS 影像提取农作物种植结构[J].中国农业资源与区划,2017,38(9):56-62. [Li B, Liang Y H, Li D D, et al. Crop planting structure extraction based on multi-temporal GF-1 PMS remote sensing images[J]. Chinese Journal Agricultural Resources and Regional Planning, 2017,38(9):56-62.]
- [4] 杨闫君,占玉林,田庆久,等.基于 GF-1/WFV NDVI 时间序列数据的作物分类[J].农业工程学报,2015,31(24):155-161. [Yang Y J, Zhan Y L, Tian Q J, et al. Crop classification based on GF-1/WFV NDVI time series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(24):155-161.]
- [5] Wardlow B D, Egbert S L, Kastens J H. Analysis of time-series modis 250 m vegetation index data for crop classification in the US. central great plains[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,108(3):290-310.
- [6] Atzberger C, Rembold F. Mapping the spatial distribution of winter crops at sub-pixel level using avhrr ndvi time se-

- ries and neural nets[J]. Remote Sensing, 2013,5(3):1335-1354.
- [7] 许青云,杨贵军,龙慧灵,等.基于MODIS NDVI多年时序数据的农作物种植识别[J].农业工程学报,2014,30(11):134-144. [Xu Q Y, Yang G J, Long H L, et al. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014,30(11):134-144.]
- [8] 张荣群,王盛安,高万林,等.农作物种植格局对遥感分类精度的影响[J].农业机械学报,2016,47(10):318-324. [Zhang R Q, Wang S A, Gao W L, et al. Effects of crop planting structure on remote sensing classification accuracy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(10):318-324.]
- [9] 熊勤学,黄敬峰.利用NDVI指数时序特征监测秋收作物种植面积[J].农业工程学报,2009,25(1):144-148. [Xiong Q X, Huang J F. Estimation of autumn harvest crop planting area based on NDVI sequential characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(1):144-148.]
- [10] 张焕雪,曹新,李强子,等.基于多时相环境星NDVI时间序列的农作物分类研究[J].遥感技术与应用,2015,30(2):304-311. [Zhang H X, Cao X, Li Q Z, et al. Research on crop identification using multi-temporal NDVI HJ images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015,30(2):304-311.]
- [11] 刘吉凯,钟仕全,徐雅,等.基于多时相GF-1 WFV数据的南方丘陵地区甘蔗种植面积提取[J].广东农业科学 2014,41(18):149-154. [Liu J K, Zhong S Q, Xu Y, et al. Sugarcane extraction in the southern hills using multi-temporal GF-1 WFV data[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014,41(18):149-154.]
- [12] 马丽,徐新刚,贾建华,等.利用多时相TM影像进行作物分类方法[J].农业工程学报,2008,24(2):191-195. [Ma L, Xu X G, Jia J H, et al. Crop classification method using multi-temporal TM images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(2):191-195.]
- [13] 岳桢干.欧洲 Sentinel-2A 卫星即将大显身手——“哥白尼”对地观测计划简介(上)[J].红外,2015,36(8):32-36. [Yue Z G. The Sentinel-2A satellite will display skills to the full—"Copernicus" on earth observation program[J]. Infrared, 2015,36(8):32-36.]
- [14] Fernández M A, Fernández M O, Quintano C. Sentinel-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016,50:170-175.
- [15] Katja D, Anna G, Peter G, et al. Water constituents and water depth retrieval from Sentinel-2A: A first evaluation in an oligotrophic lake[J]. Remote Sensing, 2016,8(11):941-965.
- [16] Lefebvre A, Sannier C, Corpetti T. Monitoring urban areas with Sentinel-2A data: Application to the update of the copernicus high resolution layer imperviousness degree[J]. Remote Sensing, 2016,8(7):606-621.
- [17] Korhonen L, Hadi, Packalen P, et al. Comparison of Sentinel-2 and landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index[J]. Remote Sensing of Environment, 2017,195:259-274.
- [18] 郑阳,吴炳方,张森. Sentinel-2数据的冬小麦地上干生物量估算及评价[J].遥感学报,2017,21(2):318-328. [Zheng Y, Wu B F, Zhang M. Estimating the aboveground biomass of winter wheat using the Sentinel-2 data [J]. Journal of Remote Sensing, 2017,21(2):318-328.]
- [19] 彭光雄,宫阿都,崔伟宏,等.多时相影像的典型区农作物识别分类方法对比研究[J].地球信息科学学报,2009,11(2):225-230. [Peng G X, Gong A D, Cui W H, et al. Study on methods comparison of typical remote sensing classification based on multi-temporal images[J]. Journal of geo-information science, 2009,11(2):225-230.]
- [20] 李晓东,姜琦刚.基于多时相遥感数据的农田分类提取[J].农业工程学报,2015,31(7):145-150. [Li X D, Jiang Q G. Extraction of farmland classification based on multi-temporal remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(7):145-150.]
- [21] 贾明明,王宗明,张柏,等.综合环境卫星与MODIS数据的面向对象土地覆盖分类方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(3):305-310. [Jia M M, Wang Z M, Zhang B, et al. Land cover classification of compositing HJ-1 and MODIS data base on object-based method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014,39(3):305-310.]
- [22] 刘明月,王宗明,满卫东,等.基于MODIS时序数据的Landsat8影像选取及面向对象分类方法的农作物分类[J].土壤与作物,2017,6(2):104-112. [Liu Mingyue Y, Wang Zongming M, Man Weidong D, et al. Crop Classification classification Based based on Multimulti-temporal Landsat8 OLI Imagery imagery and MODIS NDVI Time time Series series Datadata[J]. Soils and Crops, 2017,6(2):104-112.]
- [23] 毕恺艺,牛铮,黄妮,等.基于 Sentinel-2A 时序数据和面向对象决策树方法的植被识别[J].地理与地理信息科学, 2017,33(5):16-33. [Bi Kaiyi Y, Niu Zheng, Huang Ni, et al. Identifying vegetation with decision tree model based on Object- Oriented method using Multimulti-temporal

- Sentinel-2A images[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017,33(5):16-33.]
- [24] 郭昱杉,刘庆生,刘高焕,等.基于MODIS时序NDVI主要农作物种植信息提取研究[J].自然资源学报,2017,32(10):1808-1818. [Guo Y S, Liu Q S, Liu G H, et al. Extraction of main crops in Yellow River Delta based on MODIS NDVI time series[J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(10):1808-1818.]
- [25] 鹿琳琳,郭华东.基于SPOT/VEGETATION时间序列的冬小麦物候提取方法[J].农业工程学报,2009,25(6):174-179. [Lu L L, Guo H D. Extraction method of winter wheat phenology from time series of SPOT/VEGETATION data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(6):174-179.]
- [26] 欧阳玲,毛德华,王宗明,等.基于GF-1与Landsat8 OLI影像的作物种植结构与产量分析[J].农业工程学报,2017,33(11):147-156. [Ou Y L, Mao D H, Wang Z M, et al. Analysis crops planting structure and yield based on GF-1 and Landsat8 OLI images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(11):147-156.]
- [27] 刘佳,王利民,杨福刚,等.基于HJ时间序列数据的农作物种植面积估算[J].农业工程学报,2015,31(3):99-206. [Liu J, Wang L M, Yang F G, et al. Remote sensing estimation of crop planting area based on HJ time-series images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(3):199-206.]
- [28] 黄青,唐华俊,周清波,等.东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测[J].农业工程学报,2010,26(9):218-223. [Huang Q, Tang H J, Zhou Q B, et al. Remote-sensing based monitoring of planting structure and growth condition of major crops in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(9):218-223.]