

基于时间序列 MODIS 的农作物类型空间制图方法

黄健熙¹ 侯裔焯¹ 武洪峰² 刘峻明¹ 朱德海¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 黑龙江省农垦科学院科技情报研究所, 哈尔滨 150036)

摘要: 为快速获取大范围种植结构复杂区域的作物种植面积, 以 MODIS 数据为数据源, 选择归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI)、增强植被指数 (Enhanced vegetation index, EVI)、宽动态植被指数 (Wide dynamic range vegetation index, WDRVI)、地表水分指数 (Land surface water index, LSWI)、归一化雪被指数 (Normalized difference snow index, NDSI) 5 种特征, 结合同步的实地调查样本点, 采用支持向量机算法 (Support vector machines, SVM) 提取黑龙江省主要农作物的种植面积。研究表明, 在待选特征中 NDVI、EVI 与 LSWI 指数组合取得了最高的分类精度, 总体分类精度为 74.18%, Kappa 系数为 0.60; 支持向量机算法与最大似然算法、随机森林算法相比, 分类精度更优。该方法为在大区域中提取农作物种植面积提供了参考价值。

关键词: MODIS; 支持向量机; 黑龙江省; 作物类型; 空间制图

中图分类号: TP79; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)10-0142-06

Crop Type Mapping Method Based on Time-series MODIS Data in Heilongjiang Province

HUANG Jianxi¹ HOU Yuzhuo¹ WU Hongfeng² LIU Junming¹ ZHU Dehai¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. The Institute of Scientific and Technical Information, Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Harbin 150036, China)

Abstract: Mapping the crop planting pattern and cropped area rapidly and accurately in Heilongjiang Province is important for agricultural monitoring. MOD09 and MOD13 were selected as data source for its high time resolution and good quality. To explore the optimal feature and classification method which can obtain the spatial distribution of the main crops in Heilongjiang Province, NDVI, EVI, WDRVI, LSWI and NDSI were selected as input data for crop classification based on time-series of MODIS data and combined with field survey sample points. The results showed that the combination of NDVI, EVI and LSWI joint with support vector machine (SVM) achieved the best accuracy, the overall classification accuracy was 74.18% and the Kappa coefficient was 0.60. The results showed that the support vector machine algorithm outperformed the maximum likelihood algorithm and the random forest algorithm. In Heilongjiang Province, the best period for sorting rice is the transplanting period in May, which can be characterized by LSWI. The optimal period for distinguishing between corn and soybean was from the end of September to the beginning of October, which was the period when the soybean was harvested and the corn was not, and the optimal classification feature was EVI. This method provided a reference value for cropped area mapping in other agricultural regions.

Key words: MODIS; support vector machine; Heilongjiang Province; crop type; mapping

引言

遥感技术是目前唯一能够获取大面积农作物种植面积的有效技术手段^[1]。在农作物种植面积遥感提取方面, 徐新刚等^[2]利用高分辨率 Quick Bird

遥感影像提供的地物纹理、色调和形状等信息, 基于绵阳实验样区的辅助参量, 利用最大似然法分阶段提取作物种植面积。虽然利用高分辨率遥感影像能取得较高的分类精度, 但是由于其重返周期较长, 难以获得覆盖黑龙江省主要农作物整个生育期内有效

收稿日期: 2017-02-26 修回日期: 2017-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671418, 41471342, 41371326)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA10230103)

作者简介: 黄健熙(1976—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事农业定量遥感研究, E-mail: jxhuang@cau.edu.cn

的高分辨率遥感数据,大面积应用仍存在局限性。

近年来,随着中高分辨率卫星的快速发展,以及 GF-1 WFV、Sentinel2、Landsat8、HJ-1A/B 卫星的协同使用为中分辨率遥感分类制图提供了理想的数据源。相比于 Quick Bird 等亚米级遥感影像,中高分辨率遥感影像的分类精度也较高,且能大面积覆盖作物关键生育期。黄健熙等^[3]等利用 GF-1 WFV 16 m 空间分辨率影像,利用归一化差植被指数以及进行主成分变换的原影像作为分类特征,使用 CART 算法构建决策树对黑龙江省农场的玉米和水稻进行分类。杨闫君等^[4]等利用 GF-1 WFV 16 m 影像构建高分辨率 NDVI 时间序列,并对其利用时间序列谐波分析法进行平滑处理,对比分析多种方法后证明支持向量机算法分类方法效果最好。虽然高分一号等国产卫星有较高的分辨率并且传感器的回访周期短,但是由于单景影像覆盖面积有限、卫星过境时间与云量的影响,收集同一时期覆盖整个黑龙江省区域且能满足分类要求的影像数据仍旧比较困难。

MODIS 影像数据虽然空间分辨率较粗,但是较高的时间分辨率对农作物分类极为有利。由于经济效益影响,黑龙江省多有旱地改水田的现象。而旱地作物中,玉米和大豆的轮作频繁,其生育期较为接近,容易混淆,因此 MODIS 数据仍然是动态种植变化快速制图最为有效的数据源。在使用 MODIS 数据进行分类方面,平跃鹏等^[5]等利用时序 MODIS 数据,选取归一化水指数 (Normalized difference water index, NDWI)/NDVI 以及物候特征,在对 NDVI 时序曲线进行滤波的基础上采用分层分类的方法对松嫩平原的部分区域进行分类;王连喜等^[6]利用 2013—2014 年 250 m MODIS NDVI 数据建立时间序列曲线,采用 Savitzky-Golay 滤波方法后借助辅助信息确定训练规则,利用决策树进行单一作物冬小麦分类。CHANG 等^[7]通过 NASS CDL 数据提取玉米和大豆种植区作为样本点,结合 MODIS 数据利用回归树方法获得美国玉米与大豆种植区分布。DAMIEN 等^[8]则以时序 MODIS/TERRA EVI 数据分别分类出农业种植区、作物类别,最终完成分类作物分布区。GUSSO 等^[9]结合研究区的作物物候和种植条件等,以 MODIS EVI 数据为数据源对大豆分类。上述研究表明时间序列方法能够获取多于单一时相遥感影像所获取的作物物候信息,提高了使用中等分辨率遥感影像进行作物分类的精度,因此本文选择使用多时相遥感影像进行分类。

本文基于 2015 年 MODIS 数据和实测样本点,针对黑龙江省的种植结构和特点选取有效分类特

征,在对比不同遥感分类方法与分析精度后,选取最优分类特征与遥感分类方法,实现黑龙江省主要农作物的空间制图。

1 研究区域概况与数据

1.1 研究区域概况

黑龙江省位于我国东北部,与俄罗斯以乌苏里江、黑龙江为界,介于北纬 $43^{\circ}26'$ ~ $53^{\circ}33'$,东经 $121^{\circ}11'$ ~ $135^{\circ}05'$,面积 $4.73 \times 10^5 \text{ km}^2$,如图 1 所示。黑龙江西部属松嫩平原,东北部为三江平原,北部、东南部为山地。该省为寒温带与温带大陆性季风气候,春季低温干旱,夏季温热多雨,秋季易涝早霜,冬季寒冷漫长,气候地域性差异大,年平均气温多在 $-5 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 之间。无霜冻期全省平均为 100 ~ 150 d 之间,南部和东部在 140 ~ 150 d 之间。大部分地区初霜冻在 9 月下旬出现,终霜冻在 4 月下旬—5 月上旬结束,无霜期短。

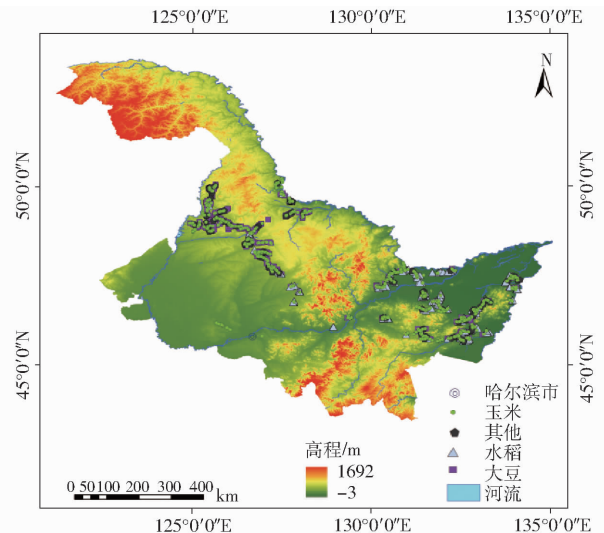


图 1 研究区与实地调查样本数据分布

Fig. 1 Study area and distribution of sample points in field survey

黑龙江地区主要农作物的生长季基本在 3 月—10 月,其中玉米在 4 月末至 5 月初播种,成熟于 9 月份,收获在 10 月前后;水稻在 4 月份播种,成熟于 9 月份,多晚于玉米成熟日期;大豆在 5 月份播种,7 月下旬至 9 月上旬结束,成熟于 9 月末至 10 月初,晚于水稻、玉米的成熟日期;其他作物或者瓜果等的生育期也基本在 3 月—10 月。

1.2 数据源及预处理

1.2.1 MODIS 数据

美国对地观测系统中搭载在 Terra/Aqua 卫星上用于观测全球生物和物理过程的中分辨率成像光谱仪 (MODIS),共 36 个离散光谱波段,光谱范围宽,空间分辨率最高可达 250 m,每天覆盖全球多频

次观测。本文所用遥感数据是由美国地址调查局 (United States Geological Survey, USGS) 提供的 2015 年 3 月—10 月的 MOD13、MOD09 系列产品: MOD13Q1 产品的空间分辨率是 250 m、时间分辨率 16 d, 包括 NDVI 和 EVI; MOD09A1 产品的空间分辨率是 500 m、时间分辨率是 8 d, 包括 7 个地表反射率波段。

1.2.2 区域时序遥感影像

本文使用 MRT^[10] (MODIS reprojection tool) 将 4 轨影像进行拼接, 影像序列号分别为 h25v03、h26v03、h26v04、h27v04, 并且利用黑龙江省边界矢量数据对拼接影像进行裁剪, 去除云覆盖较多的影像, 最终得到黑龙江省 MODIS 时间序列数据集。文献[11]研究证明覆盖作物关键生育期的时间序列长度即可满足一定分类精度, 因此, 文中去掉小范围被云覆盖的遥感影像。本文的数据集时相选择^[12] DOY65、DOY81、DOY97、DOY113、DOY129、DOY145、DOY161、DOY177、DOY193、DOY209、DOY225、DOY241、DOY257、DOY273、DOY289、DOY305, 能够覆盖黑龙江省主要农作物的生育期。

MODIS 数据虽然有较高时间分辨率, 但是, 空间分辨率较粗, 混合像元效应严重。文献[13]研究表明在分类过程中排除田间道路及附属地物的干扰, 能够提高分类精度。因此本文选择黑龙江省耕地区域进行作物分类实验来提高分类精度, 以期减少混合像元对分类的影响, 提高分类精度。

1.3 分类类别与分类样本集

2015 年 9 月对黑龙江省进行地面实地调查, 分 2 次分别获取黑龙江省东部、西部的主要作物类型。野外调查时采用手持 GPS 测量特征地块的经纬度坐标并记录作物类型、拍摄照片, 能完全调查黑龙江省主要农作物类型, 共采集 6 020 个样本点。经过选择位于耕地区域并且像元纯度较高即像元中作物种植较为单一的样本点用于研究, 共保留样本点 2 247 个, 其中玉米 1 000 个, 水稻 403 个, 大豆 719 个, 小麦、土豆、瓜果等因在黑龙江省种植面积小所以采集样本少, 将其归为其他类共 125 个(图 1)。

2 研究方法

2.1 待选分类特征集合计算

由于黑龙江省玉米与大豆 2 种作物光谱特征相似、生育期接近, 仅使用地表反射率数据难以区分, DE SOUZA 等^[14]使用时间序列 MODIS 数据在巴西南部地区分类大豆和玉米, 该地区玉米和大豆的区分难点同样在于播种时间相同、光谱特征相似, 与黑龙江地区玉米与大豆的情况有相似之处, 因此引入

NDVI、EVI、WDRVI 分类特征作为待选分类特征。

移栽期是水稻的一个重要生育期^[15], 在该时期稻田一般存有 2~15 cm 的水, 地表是水稻和水体的混合, 可通过影像中水体与水稻的混合光谱特征识别水稻在移栽期到早期营养生长阶段。水稻可以通过水稻的淹没特征(水稻和水体的混合)来识别^[16], 该特征可以通过 LSWI、NDVI、EVI 来检测。

黑龙江省北部属于寒温带, 在 3 月份多有冰雪等覆盖, 因此引入 NDSI 对其进行监测, 即

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{RED} - C_2 \rho_{BLUE} + L} \quad (2)$$

$$WDRVI = \alpha \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (3)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (4)$$

$$NDSI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{SWIR}} \quad (5)$$

式中 ρ_{NIR} ——近红外波段的反射率

ρ_{RED} ——红波段的反射率

ρ_{BLUE} ——蓝波段的反射率

ρ_{GREEN} ——绿波段的反射率

ρ_{SWIR} ——短波红外的反射率

G ——增益因子, 取 2.5^[17]

C_1 、 C_2 ——气溶胶阻抗系数, 取 6^[3]和 7.5^[17]

L ——冠层背景调整因子, 取 1^[17]

α ——权重系数, 取 0.2^[14]

2.2 选择分类特征

将待选特征 NDVI、WDRVI、LSWI、EVI、NDSI 共 5 个特征进行组合用于分类, 选取分类精度最高的组合作为最终分类特征组合。NDVI 作为广泛使用的一种植被指数, 能够监测植被的生长状态、植被覆盖度、消除部分辐射误差等, 因此选择使用根据地表反射率数据计算得来的 NDVI 作为基础分类特征参与分类^[18]。为了对玉米、大豆和水稻等作物分类, 在 NDVI 分类特征的组合上, 加入 EVI、WDRVI、LSWI、NDSI 4 种特征进行组合实验, 得到不同组合下的作物提取精度(图 2)。

采用 SVM 算法对待选的分类特征进行组合(16 种)验证, 玉米、水稻和大豆 3 种主要作物的制图精度如图 2 所示, 制图精度表示影像中所有像元正确分类的像元数与该类真实参考数的比值。由图 2 对比可知, 在 NDVI 特征的基础上分别加入 EVI、WDRVI、NDSI、LSWI 特征参与分类, 其中引入 WDRVI 特征对于分类水稻精度提升的贡献最小, 主

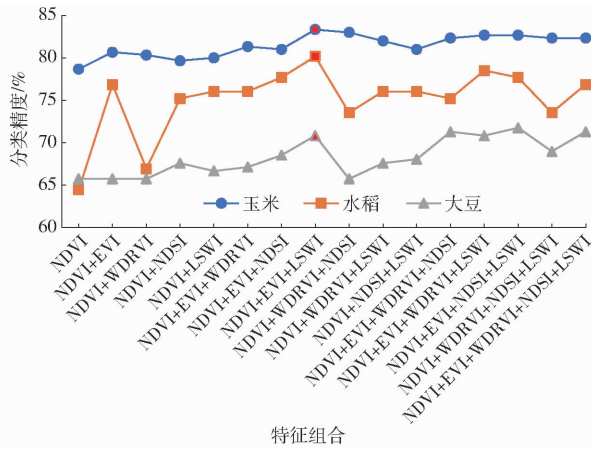


图 2 特征组合分类精度

Fig. 2 Classification accuracy of combinations of features

要是因为水稻处于移栽期,地表是水稻和水体的混合,而 WDRVI 适合对中高植被覆盖度条件下的监测,但是无法对水体信息进行有效的监测;在 NDVI 特征的基础上分别加入 EVI、NDSI、LSWI 特征,玉米、水稻、大豆 3 种作物的制图精度均有不同程度的提高,表明这 3 种特征对于玉米、大豆和水稻 3 种作物分类精度的提高都有不同程度的贡献。

在 3 种特征组合、4 种特征组合和 5 种特征组合时,玉米、水稻、大豆 3 种作物的分类精度相比于仅有 NDVI 特征或者 2 种特征组合参与分类时均有提高,变化程度较小,但是对比发现, NDVI + WDRVI 组合、NDVI + WDRVI + NDSI 组合、NDVI + WDRVI + NDSI + LSWI 组合在缺少 EVI 特征的情况下,水稻制图精度均较大幅度下降,并且 NDVI 特征在加入 EVI 特征时水稻的线段斜率绝对值最大,因此引用 EVI 特征对提高水稻识别精度有较大贡献。由图 2 可以看出,玉米与大豆 2 种作物在使用 NDVI 特征的基础上加入其他特征后分类精度都有所提高,其中玉米分类精度的变化程度在 3 种作物中最小,大豆分类精度在 NDVI + WDRVI + NDSI 组合与 NDVI + WDRVI + NDSI + LSWI 组合即缺少 EVI 特征时降低幅度较大,因此引入 EVI 特征对于提高大豆的分类精度也有重要作用。可能的原因是 NDVI 在植被覆盖较密的地区容易饱和,无法进一步对植

被覆盖变化进行持续监测,而 EVI 指数能在一定程度克服这一瓶颈^[14],适合黑龙江地区作物大面积种植且林业资源丰富的状况。如图 3a 所示,DOY225 是水稻 EVI 曲线由上升到下降的转折点,该日期处于 8 月中旬,水稻由乳熟开始逐渐成熟,谷壳、枝梗等逐渐由绿变黄,因此 EVI 指数的值也逐渐减少;而对于大豆,DOY241 才是 EVI 曲线由上升到下降的转折点,该日期处于 8 月下旬至 9 月上旬之间,此时大豆开始结荚鼓粒,绿叶逐渐变黄,EVI 指数的值也逐渐减少。大豆与水稻的 NDVI 时序曲线差别却不明显,可能是由于 NDVI 的易饱性。

对比所有特征组合,NDVI + EVI + LSWI 特征组合对玉米、水稻、大豆 3 种主要作物的制图精度相对最高(图 2)。在 NDVI 与 EVI 2 个特征的基础上,加入 LSWI 特征则是对地表水分信息进行监测,对于水稻移栽期进行有效的监测,提高作物分类精度。从图 3b 可知,在 DOY113 时期,水稻的 LSWI 值突然上升,而玉米与大豆仍维持在相似较低的水平,这是因为 LSWI 能够监测植被冠层水分,水稻在 4 月中旬已经播种出苗,而玉米与大豆并未播种;在水稻移栽期即 DOY129 至 DOY145 期间,地表是水稻与水体的混合物,LSWI 值明显高于玉米与大豆的值。移栽期是水稻明显区别于玉米与大豆的最佳时期。

从图 3a 与图 3c 对比来看,玉米与大豆 2 种作物的时序曲线差别最大时期位于 DOY273,即在 9 月末—10 月初时大豆已经收获而玉米成熟却未收获的时间。

即使在 NDVI 特征的基础上分别加入 WDRVI 特征与 NDSI 特征均提高了分类精度,但是在最佳组合基础上加入这 2 个特征反而降低了分类精度,可能的原因是 SVM 算法作为建立在统计学习理论基础上的学习方法,在高维空间中寻找一个超平面作为两类的分割,图 2 中仅利用 NDVI 已经可以将玉米与水稻、大豆区分,加入 EVI 后可以将水稻和大豆 2 种作物进行区分,LSWI 的加入则将 3 种作物的分类精度进一步提高,在此基础上加入其他特征反而增加了 SVM 算法的计算复杂度,从而影响了分

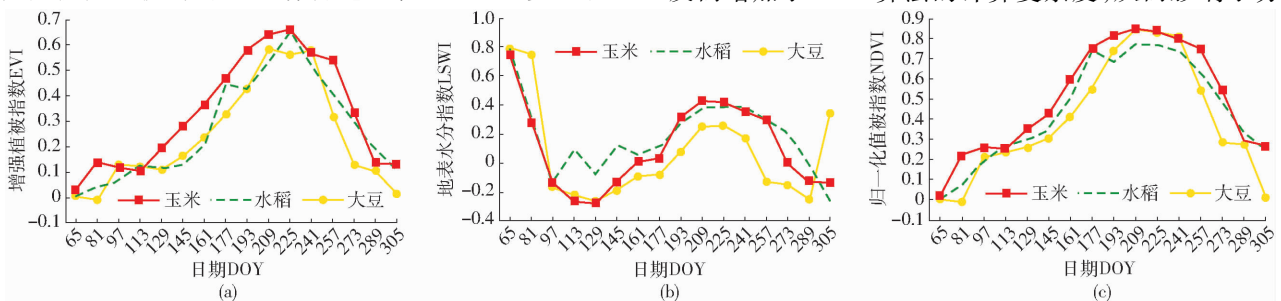


图 3 主要作物时序变化

Fig. 3 Temporal changes of main crops

类精度。

2.3 分类方法对比

支持向量机算法已经能够有效分类黑龙江省耕地区域的主要农作物,但是为了进一步验证该方法的有效性,本文将支持向量机分类结果与最大似然法分类结果、随机森林算法分类结果进行对比。将实地调查采集的 2 247 个样本点按照 7:3 的比例^[19]分为训练样本点(1 573 个)与验证样本点(674 个),分别输入到分类器中进行分类与验证,结果如表 1 所示。

表 1 不同分类方法精度对比

Tab. 1 Comparison of accuracy of different classification methods %

精度类别	作物类别	最大似然 算法	随机森林 算法	支持向量 机算法
制图精度	玉米	58.67	77.67	83.33
	其他	10.81	0	0
	水稻	85.12	67.77	80.17
	大豆	76.39	61.11	70.83
用户精度	玉米	71.84	63.49	71.43
	其他	26.67	0	0
	水稻	72.03	75.23	82.91
	大豆	60.89	67.01	73.91

由表 1 可知,3 种分类方法中,支持向量机算法的制图精度与用户精度相对较高,分类精度最高,其中玉米的制图精度为 83.33%、用户精度为 71.43%,水稻的制图精度为 80.17%、用户精度为 82.91%,大豆的制图精度为 70.83%、用户精度为 73.91%,而其他类由于种类繁多、光谱特征差异较大等原因无法进行有效的分类,但是其分布面积小,对主要农作物的分类结果影响较小。总体分类精度为 74.18%,Kappa 系数为 0.60。

最大似然算法通过计算样本间的似然度来判别像元是否属于某一类,作为一种基于统计的算法,黑龙江省玉米、大豆等作物的种植区域交错分布增大了通过似然度判别类别的难度,因此并不能够有效利用分类特征对玉米与大豆 2 种作物进行分类,分类精度较低。

虽然最大似然分类算法、支持向量机算法与随机森林算法中随机森林算法分类精度最高^[20],其数据源选用国产小卫星数据,MODIS 数据的空间分辨率低于环境一号等国产小卫星数据,混合像元效应更为明显。随机森林算法通过抽取训练样本点建立多个决策树构成森林,将分类样本放入分类器中分别进行计算,然后将分类结果通过投票确定最后的所属类别,在遥感影像空间分辨率较高时,随机森林算法能够有效避免构建单棵决策树可能出现误差造

成分类结果错误;但是在遥感影像分辨率较低且混合像元影响较大时,对多棵决策树的分类结果进行投票确定最终分类结果反而会增加分类的不确定性,因为混合像元的存在,在分别构建单棵决策树时就可能出现较大的差错。

3 结果与分析

利用支持向量机算法对黑龙江省耕地区域的主要作物进行分类,获得黑龙江省主要农作物分布图(图 4)。由图 4 可以看出,黑龙江省水稻主要分布在该省东北部地区,该地区位于三江平原,西南部位于松嫩平原的地区和松花江沿岸也有水稻分布,与水稻种植需要较多水分的情况相符;大豆则主要分布在西南部,玉米在整个黑龙江省耕地区域都有分布,其中西南部地区相对较多,这与玉米经济效益大于大豆的经济效益的现状相符。

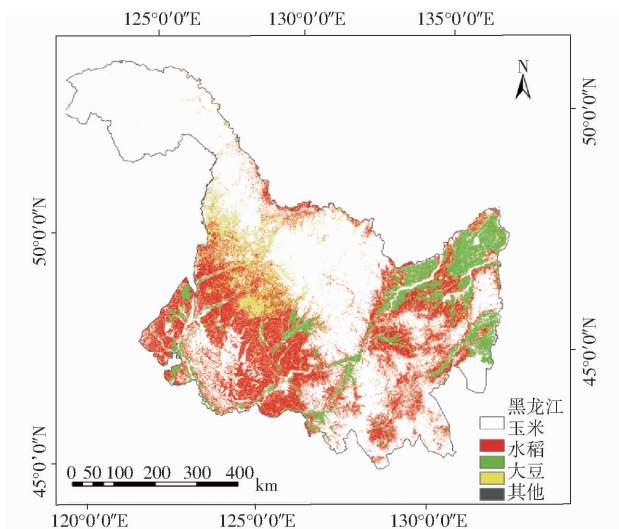


图 4 黑龙江省主要农作物分布图

Fig. 4 Classification map for main crops in Heilongjiang Province

4 结论

(1)采用支持向量机算法得到黑龙江省主要作物分类的总体精度为 74.18%,Kappa 系数为 0.60。与最大似然算法、随机森林算法相比,在黑龙江地区使用 MODIS 数据为数据源对主要农作物进行分类提取,支持向量机算法的分类精度更高。支持向量机算法通过在高维空间中寻找一个超平面作为两类的分割,更加适合混合像元问题较为严重的中等分辨率遥感影像为数据源的分类问题,能够避免随机森林算法在面对混合像元时增加的错分问题,比最大似然算法单纯通过似然度判别类别的分类精度更高,并且执行效率相对较高,适用于黑龙江省动态种植变化的快速制图。

(2) 区分玉米、水稻和大豆等主要作物时, 采用 NDVI、EVI、LSWI 特征组合分类精度最高, 能够得知黑龙江省玉米种植分布最广, 大豆主要分布在西北部, 东南部也有部分分布, 而水稻则主要分布在三江平原、松嫩平原、松花江沿岸地区。

(3) 在黑龙江地区, 识别水稻最佳时期为 5 月份, 即水稻的移栽期, 分类特征为 LSWI; 区分玉米与大豆的最佳时期是 9 月末—10 月初, 即大豆已收获而玉米未收获的时期, 分类特征最优为 EVI 指数。

参 考 文 献

- 1 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2):247-260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150237&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.037.
- 2 徐新刚, 李强子, 周万村, 等. 应用高分辨率遥感影像提取作物种植面积[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(1):17-23.
- 3 黄健熙, 贾世灵, 武洪峰, 等. 基于 GF-1 WFV 影像的作物面积提取方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊):253-259. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2015S041&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.041.
- 4 杨闰君, 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.
- 5 平跃鹏, 臧淑英. 基于 MODIS 时间序列及物候特征的农作物分类[J]. 自然资源学报, 2016, 31(3):503-513.
- 6 王连喜, 徐胜男, 李琪, 等. 基于决策树和混合像元分解的江苏省冬小麦种植面积提取[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5):182-187.
- 7 CHANG J, HANSEN M C, PITTMAN K, et al. Corn and soybean mapping in the united states using MODIS time-series data sets[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(6):1654-1664.
- 8 DAMIEN A, MILTON J, DUBREUIL V, et al. Classification of MODIS EVI time series for crop mapping in the state of MATO GROSSO, Brazil[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(22):7847-7871.
- 9 GUSSO A, ARVOR D, DUCATI J R, et al. Assessing the MODIS crop detection algorithm for soybean crop area mapping and expansion in the Mato Grosso State, Brazil[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014(1):1-9.
- 10 申健, 常庆瑞, 李粉玲, 等. 2000—2013 年关中地区耕地复种指数遥感动态监测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8):280-287. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160837&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.037.
- 11 HAO Pengyu, ZHAN Yulin, WANG Li, et al. Feature selection of time series MODIS data for early crop classification using random forest: a case study in Kansas, USA[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(5):5347-5369.
- 12 HU Qiong, WU Wenbin, SONG Qian, et al. Extending the pairwise separability index for multicrop identification using time-series MODIS images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(11):6394-6361.
- 13 周静平, 李存军, 史磊刚, 等. 基于决策树和面向对象的作物分布信息遥感提取[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9):318-326. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160943&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.043.
- 14 DE SOUZA C H W, MERCANTE E, JOHANN J A, et al. Mapping and discrimination of soya bean and corn crops using spectro-temporal profiles of vegetation indices[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(7):1809-1824.
- 15 于文颖, 冯锐, 纪瑞鹏, 等. 基于 MODIS 数据的水稻种植面积提取研究进展[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(2):56-61.

- 12 张伟豪,陈晓夫,刘晓英,等. 中国生物质炉灶技术和应用进展[J]. 化工进展,2009,28(增刊):516-520.
ZHANG Weihao, CHEN Xiaofu, LIU Xiaoying, et al. Advances in technology and application of biomass stoves in China [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2009,28(Supp.):516-520. (in Chinese)
- 13 闵海飞,张明旭. 生物质燃烧模式及燃烧特性的研究[J]. 煤炭学报,2005,30(1):104-108.
MIN Haifei, ZHANG Mingxu. Study on combustion model and combustibility of biomass[J]. Journal of China Coal Society, 2005,30(1):104-108. (in Chinese)
- 14 刘敏敏. 生物质成型燃料炊事炉的设计与研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2008.
LIU Minmin. Design and research for home-furnace of biomass briquette fuel[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2008. (in Chinese)
- 15 王翠萍,李定凯,王凤印,等. 生物质成型颗粒燃料燃烧特性的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):175-177.
WANG Cuiping, LI Dingkai, Wang Fengyin, et al. Experimental study on the combustion characteristics of biomass pellets[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(10):175-177. (in Chinese)
- 16 刘圣勇,张百良,杨群发,等. 双层炉排生物质成型燃料锅炉设计与研究[J]. 农业工程学报,2003,19(6):268-271.
LIU Shengyong, ZHANG Bailiang, YANG Qunfa, et al. Design and study of biomass briquette boiler[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(6):268-271. (in Chinese)
- 17 赵廷林,侯中兰,陈夫进,等. 生物质成型燃料炉具[J]. 可再生能源,2006(3):66-67.
ZHAO Tinglin, HOU Zhonglan, CHEN Fujin, et al. Biomass pellet fueled stove[J]. Renewable Energy, 2006(3):66-67. (in Chinese)
- 18 张全国. 燃烧学[M]. 北京:中国农业出版社,2015.
- 19 马孝琴,李刚. 小型燃煤锅炉改造成秸秆成型燃料锅炉的前景分析[J]. 农村能源,2001(5):20-22.
MA Xiaojin, LI Gang. Prospect analyse of reforming small-scalle coal boiler to straw forming fuel boiler[J]. Rural Energy, 2001(5):20-22. (in Chinese)
- 20 舒伟. 高效生物质成型燃料炊事炉设计与试验[D]. 郑州:河南农业大学,2007.
SHU Wei. Study of high efficient biomass briquette fuel cookstove[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2007. (in Chinese)
- 21 中国农村能源行业协会. 省柴节煤炉灶炕实用技术一点通[M]. 北京:科学出版社,2011.
- 22 NB/T 34014—2013 生物质炊事大灶试验方法[S]. 2013.
- 23 GB13271—2014 锅炉大气污染物排放标准的计算方法[S]. 2014.
- 24 谭文英,许勇,王述洋,等. 生物质燃料多功能炉设计与性能测试[J]. 农业工程学报,2013,29(15):10-17.
TAN Wenyong, XU Yong, WANG Shuyang, et al. Design and performance test of multi-function stove for biomass fuel[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(15):10-17. (in Chinese)
- 25 石毅新,蒋蕪,彭才望. 小型生物质直燃炉结构设计[J]. 时代农机,2015(1):25-27.
SHI Yixin, JIANG Pin, PENG Caiwang. A research on structure design of small biomass direct-fired stove [J]. Hunan Agricultural Machinery, 2015(1):25-27. (in Chinese)
- 26 NB/T 34015—2013 生物质炊事大灶通用技术条件[S]. 2013.

(上接第 147 页)

- 16 DONG Jinwei, XIAO Xiangming, MENARGUEZ M A, et al. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine[J]. Remote Sensing of Environment, 2016,185:142-154.
- 17 LIU Huiqing, HUETE A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995,33(2):457-465.
- 18 白亮亮,蔡甲冰,刘钰,等. 灌区种植结构时空变化及其与地下水相关性分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):202-211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160929&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.029.
BAI Liangliang, CAI Jiabing, LIU Yu, et al. Temporal and spatial variation of crop planting structure and ITS correlation analysis with groundwater in large irrigation area[J/OL]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):202-211. (in Chinese)
- 19 刘勇洪,牛铮. 基于 MODIS 遥感数据的宏观土地覆盖特征分类方法与精度分析研究[J]. 遥感技术与应用,2004,19(4):217-224.
LIU Yonghong, NIU Zheng. Regional land cover image classification and accuracy evaluation using MODIS Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004,19(4):217-224. (in Chinese)
- 20 刘毅,杜培军,郑辉,等. 基于随机森林的国产小卫星遥感影像分类研究[J]. 测绘科学,2012,37(4):198-200.
LIU Yi, DU Peijun, ZHENG Hui, et al. Classification of China small satellite remote sensing image based on random forests[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012,37(4):198-200. (in Chinese)