

基于多时相 GF-1 WFV 和高分纹理的制种玉米田识别

张超^{1,2} 童亮³ 刘哲¹ 乔敏³ 刘帝佑³ 黄健熙¹

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 为给监管部门提供更准确的数据,及时发现非法玉米制种区域,根据不同地物在多时相光谱、高空间纹理等特征上的差异,基于 163 个地面样本、多源时序优选植被指数集和高空间分辨率遥感影像纹理分析的方法,进行制种玉米田识别。通过相关性分析,从 GF-1 WFV 多光谱影像计算的 8 个植被指数(VI)中确定 6 种,多维度反映不同作物光谱差异,并利用随机森林(RF)分类方法实现玉米田块的识别;利用玉米抽雄期的 1 期 0.7 m Kompsat-3 全色影像,构建灰度共生矩阵(GLCM)纹理特征体系,并进行局部二值模式(Uniform-LBP)旋转不变处理,解决了影像中作物种植纹理的方向性问题,同时为体现制种玉米父母本间隔种植的特点,提出了 Subtract 纹理特征,进一步识别制种玉米田。以新疆维吾尔自治区奇台县为研究区,对本文提出的方法进行实例验证,试验结果表明,制种玉米田识别的制图精度、用户精度分别为 93.34%、99.19%。

关键词: 制种玉米田; 遥感监测; 随机森林; 光谱; Subtract 纹理

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0163-06

Identification Method of Seed Maize Plot Based on Multi-temporal GF-1 WFV and Kompsat-3 Texture

ZHANG Chao^{1,2} TONG Liang³ LIU Zhe¹ QIAO Min³ LIU Diyou³ HUANG Jianxi¹

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China
3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurately mastering the planting area and distribution of the seed maize field can provide more accurate data for regulatory authorities, and timely detection of illegal seed production areas. According to the differences of high temporal phase spectrum, high spatial texture and shape of features, the identification of maize seed production field was carried out based on 163 ground samples, multi-source sequential optimization of vegetation index set and texture analysis of high spatial resolution remote sensing images. Through correlation analysis, six vegetation indices (VIs) of the normalized difference vegetation index (NDVI), enhance vegetable index (EVI), normalized difference water index (NDWI), triangle vegetation index (TVI), ratio vegetable index (RVI) and difference vegetation index (DVI) were identified from eight VIs reflecting different growth conditions of vegetation. And the random forest (RF) classification algorithm was used to identify the seed maize field. The gray-level co-occurrence matrix (GLCM) texture feature system was constructed by using the 0.7 m Kompsat-3 image of tasseling stage. It contained five texture features: mean, entropy, contrast, angular second moment (ASM) and homogeneity. At the same time, Subtract texture features were proposed in order to reflect the characteristics of the intercropping of corn parents. Before constructing the texture feature system, local binary patterns (LBP) processing on the image was performed to solve the directional problem of crop planting texture in the image. The random forest was used to identify the seed maize field from maize field classification results. Qitai County in Xinjiang Uyghur Autonomous Region was taken as a research

收稿日期: 2018-08-20 修回日期: 2018-09-30

基金项目: 京津冀作物新品种推广服务云平台建设应用项目(D171100002317002)

作者简介: 张超(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事农业与国土资源遥感监测研究,E-mail: zhangchaobj@cau.edu.cn

通信作者: 刘哲(1985—),男,副教授,博士,主要从事作物品种表型获取与评价研究,E-mail: liuz@cau.edu.cn

area to verify the proposed method, the results showed that the user's accuracy and mapping accuracy of the seed maize field was 99.19% and 93.34%, respectively. The research result can provide further technical support for the monitoring and supervision of hybrid corn farming in China.

Key words: seed maize field; remote sensing monitoring; random forest; spectrum; Subtract texture

0 引言

玉米作为我国主要的粮食作物,快速、准确地监测制种玉米的生产面积,是确保农业供种安全、加强种子生产监管的迫切要求。传统农作物面积获取通常由部、省、市、县种子管理部门汇总而得,人为因素影响较大,效率低、速度慢。遥感技术以其快速、实时获取大面积地表丰富信息等特性,可更好地弥补传统技术方法的不足,成为农作物信息获取的重要手段^[1-2]。结合制种作物的种植方式、物候历特征、背景环境的区域性差异等地学信息和遥感的光谱特点、纹理结构等影像信息,客观、及时地获取作物种植的面积及空间分布信息,是实现制种玉米生产精准监管的必然选择。

国内外在遥感农作物识别应用方面已经开展了大量研究。多时相数据能反映农作物生长、发育动态变化,较单一时相影像在作物分类上优势更大。LÖW 等^[3]利用 RapidEye 时间序列多光谱数据进行作物分类,结果表明,多时相数据集与单一数据集相比,降低了分类的不确定性。HAO 等^[4-6]对基于长时间序列的分类做了各种探讨和研究。ZHAN 等^[7]研究了不同间隔时间序列对分类精度的影响,结果表明高时间分辨率的时间序列可得到高分类精度。多种植被指数(VI)可以多维度表达作物间光谱差异,苏岫等^[8]利用 RVI、NDVI、可见光抗大气指数(Visible atmospherically resistant index, VARI)和归一化差异绿度指数(Normalized difference green index, NDGI)等,进行不同类型的红树林遥感识别,发现利用多项 VI 组合进行遥感分类,可以达到更好的分类效果,文献[9-10]同样结合多种 VI 进行作物识别。

制种玉米田在高空间分辨率上呈现明显的条带状纹理,利用光谱信息结合纹理特征可以实现高精度的制种玉米田识别^[11-12]。受田块形状和种植方向的影响,目前国内外学者针对灰度共生矩阵(GLCM)在纹理旋转不变性方面的应用开展了研究分析^[13-14]。文献[15-16]通过研究发现,结合局部二值模式(Uniform-LBP)和 GLCM 的纹理特征提取技术,能够更有效地识别出图像纹理特征,而且具有较好的识别精度、计算效率。如薛翠红等^[17]将 GLCM 与 LBP 纹理特征提取方法应用于

人群密度分类。

针对分类器选择,TATSUMI 等^[18]使用随机森林(RF)分类器对作物分类进行了尝试,RF 性能好。王利民等^[19]针对作物分类,系统比较了 RF 法与最大似然法、支持向量机(Support vector machine, SVM)法的分类精度,结果表明,RF 法精度更高。ZHAN 等^[7]测试了最大似然分类器、最小距离、SVM、神经网络和 RF 分类器的分类能力,结果表明 RF 分类器精度更高,其次是 SVM 和神经网络。

本文结合多时相与高空间分辨率遥感数据的优势,基于不同作物在光谱、纹理上的差异,探索基于 RF 的多源时序优选植被指数集和高空间分辨率遥感影像纹理分析的制种玉米田识别方法,以实现快速、准确地获取杂交制种玉米种植分布和面积,为制种玉米田的监测监管提供技术支撑。

1 研究区与数据源

1.1 研究区概况

选择新疆维吾尔自治区奇台县的制种玉米种植区作为研究区,如图 1 所示。新疆维吾尔自治区耕地面积大、光热充足以及灌溉条件好,昌吉州和伊犁州为玉米制种的主要地区。奇台县位于昌吉州的东部,地理范围为 42°25'~45°29'N, 89°13'~91°22'E。昌吉州地势呈马鞍状,南北地势高中间地势低,其年平均降水量为 269.4 mm、气温为 5.5℃,无霜期约 153 d,地下水资源丰富,气候条件适合杂交玉米制种,是我国主要的杂交玉米种子生产基地。奇台县耕地面积约 $1.333 \times 10^5 \text{ hm}^2$,主要种植制种玉米、大田玉米以及冬小麦、向日葵等作物。

1.2 数据源

1.2.1 卫星遥感数据

考虑到制种作物的种植区域田块较大,作物类型简单,结合制种玉米的物候历信息和种植特征,选用国产 GF-1 卫星 WFV 多光谱影像仪,获取 2016 年 3—8 月覆盖制种玉米生育期的多时相影像数据,影像空间分辨率 16 m,扫描幅宽 800 km;为更清晰地显示制种玉米田的纹理特征,选择研究区 2016 年 7 月 17 日砍除父本行后的韩国阿里郎 3 号(Korea multi-purpose satellite 3, Komsat-3)全色遥感影像作为数据源。卫星参数见表 1。

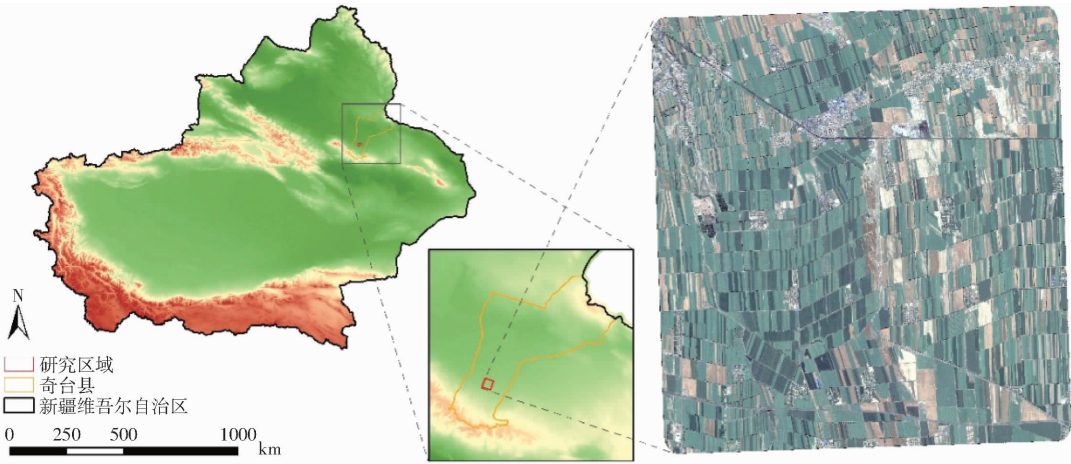


图 1 研究区域和遥感数据示意图
Fig. 1 Study area and remote sensing data

表 1 研究区卫星影像数据参数

Tab. 1 Satellite image data parameters in study area			
参数	卫星类型		
	GF-1 WFV	Kompsat-3	
谱段范围/ μm	谱段 1	0.45 ~ 0.52	0.45 ~ 0.52
	谱段 2	0.52 ~ 0.59	0.52 ~ 0.60
	谱段 3	0.63 ~ 0.69	0.63 ~ 0.69
	谱段 4	0.77 ~ 0.89	0.76 ~ 0.90
空间分辨率/m	16	0.7	
重访周期/d	2	3	
时相	03-29, 04-18, 04-23,		
	05-09, 06-07, 06-19,		
	06-27, 07-01, 07-21,	07-17	
	07-26, 08-11		

1.2.2 外业调查数据

于 2016 年 8 月到研究区开展了实地调查,这个时间段制种玉米田父本已砍除。调查时以精度在 3 m 左右的手持 GPS 记录调查地块的地理坐标,采集样本遵循空间上均匀分布的原则。后期根据实地采集的样本,利用高空间分辨率影像进行目视解译,增加样本的数量,最终确定的样本信息见表 2,按照 7:3 随机确定训练和验证样本,样本的具体分布情况如图 2 所示。

表 2 研究区样本数量

Tab. 2 Sample size in study area			
地物类型	样本数	地物类型	样本数
制种玉米	27	南瓜	16
大田玉米	28	其他作物	12
冬小麦	17	建筑物	24
向日葵	19	裸地	20

2 研究方法

以国产 GF-1 卫星 WFV 时间序列的 16 m 影像、Kompsat-3 高空间分辨率影像数据为基础,形

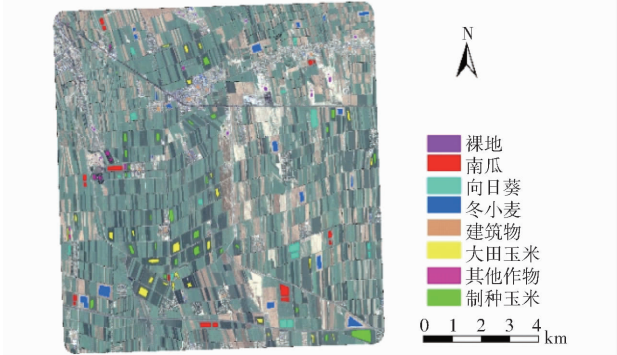


图 2 研究区样本分布图
Fig. 2 Sample distribution map of study area

成多源的多时相遥感数据源,综合分析不同作物在光谱、纹理特征上的差异,并结合制种玉米田反射特性与形态结构特征,在先验知识的基础上,进行制种玉米田的识别。具体流程如图 3 所示。

2.1 多时相 VI 选择

VI 是为了反映植被与土壤背景之间的反射情况差异^[20],通过波段间的组合和运算,定量表征植被生长状况的指标。考虑不同作物物候历、季相差异以及不同 VI 的意义和抗饱和性程度,将常用的 VI 分为 4 类:①反映作物长势的综合变化情况:NDVI、EVI。②反映作物绿度情况:TVI、RVI、GNDVI。③反映作物土壤背景情况:DVI、SAVI。④反映作物冠层含水量状况:NDWI。本文对各时相的 8 种指数,8 维数据做相关性分析,可知 GNDVI 与 NDWI 为负相关,同时,SAVI 与 NDVI 为正相关。为减少数据冗余,提高计算速率,本文选择 NDVI、EVI、NDWI、TVI、RVI 和 DVI 6 种 VI 来反映不同地类间的光谱差异,时序曲线如图 4 所示。

2.2 Uniform-LBP 算子

LBP 有 3 种描述纹理特征的模式:旋转不变模式 $LBP_{P,R}^i$ 、均匀模式 $U(LBP_{P,R})$ 以及旋转不变均匀模式 $LBP_{P,R}^{i,u2}$ 。大量研究表明,局部二值模式

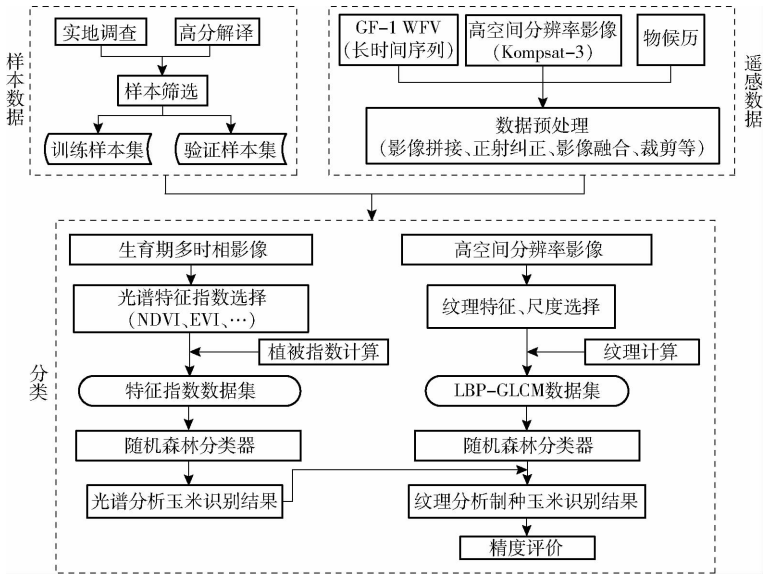


图 3 制种玉米田识别技术路线图

Fig. 3 Technology roadmap for identification of seed maize field

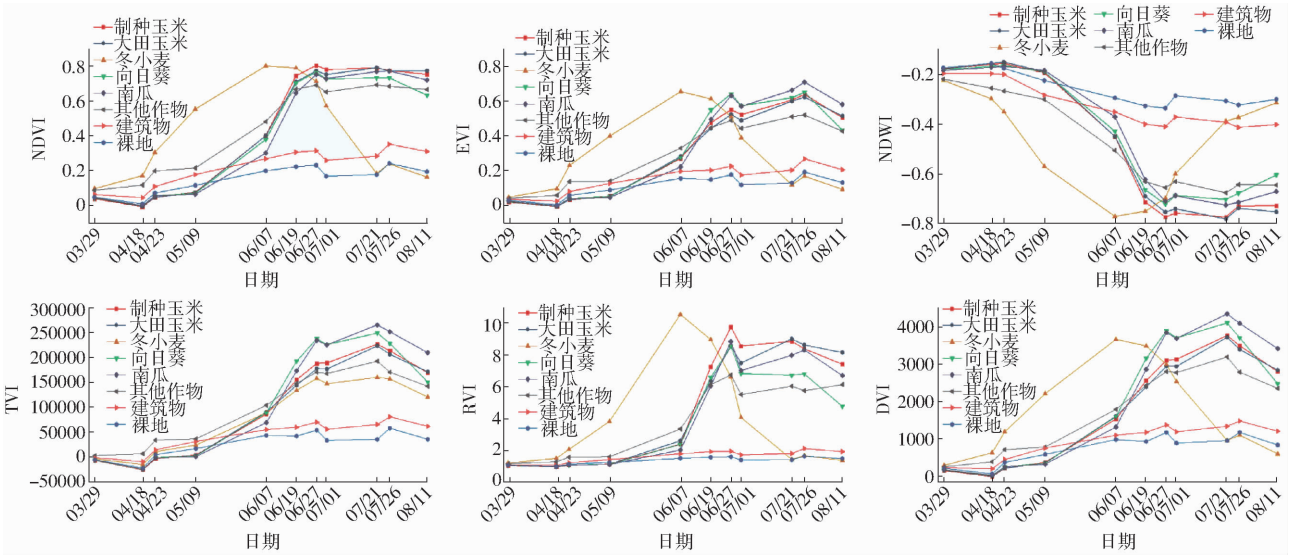


图 4 多时相植被指数体系时序曲线

Fig. 4 Time series curves of multi-temporal vegetation index system

(Uniform - LBP)既保留了影像的纹理信息同时又提高了计算效率,因此本文在提取田块纹理信息前,为了消除作物种植方向的影响,以及从提高计算效率的角度出发,选择 Uniform - LBP 对影像进行处理。具体表达式为

$$LBP_{P,R}^{riu2} = \begin{cases} \sum_{p=0}^{P-1} s(g_p - g_c) & (U(LBP_{P,R}) \leq 2) \\ P + 1 & (U(LBP_{P,R}) > 2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 R ——邻域半径
 P ——LBP 算法所作用圆形邻域内像素数
 g_c ——邻域中心像元的灰度
 g_p ——领域内除中心像元外,其他所有像元的灰度

阈值化公式为

$$S(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中 x ——灰度 g_c 与 g_{p-1} 的差值

2.3 Subtract 纹理特征

制种玉米田的父、母本种植行比 1:6 ~ 1:8,并在抽穗期后去除父本的雄穗,授粉后砍除父本行,这使得制种玉米田在优于 1 m 分辨率的遥感影像上,表现出明显条带状纹理特征(图 5)。本文对经过 Uniform - LBP 处理得到的具有旋转不变性的影像,利用作物行间差,得到 Subtract 纹理,增强父本行与相邻母本行之间的对比,以突出制种玉米田的条状纹理特征,有利于提高制种玉米识别的准确性,具体结果如图 5d 所示。

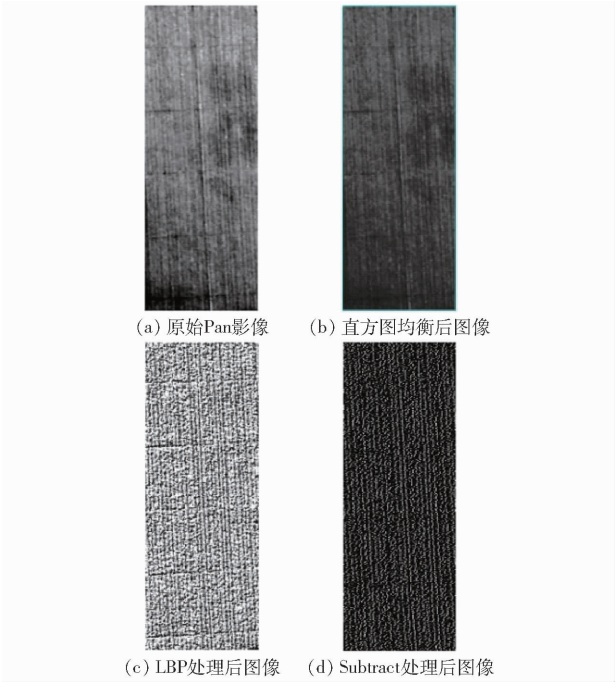


图 5 纹理处理结果对比

Fig. 5 Comparison diagrams of texture processing results

2.4 RF 分类方法

RF 使用 Bootstrapping 的方法来增强分类树的多样性,根据树的集合最大投票数,将每个像素分配给一个类。在 RF 建立决策树过程当中,采样和分裂规则判别是两个关键环节。采样为随机有放回,避免了过拟合,包含分裂属性采样(列采样)和样本采样(行采样)。分裂规则遵守自上而下的递归分裂,每次分裂时,根据信息增益、基尼指数选择最好的特征进行分裂。本文利用 RF 进行作物分类时,把作物类型作为行属性,光谱或纹理特征的种类作为列属性,作物对应的影像时间序列光谱特征值、纹理特征值作为属性值,建立样本数据集;将样本集、影像数据集输入 RF 分类器中,进行训练学习,并分类得到不同作物分类结果。

3 试验与结果分析

3.1 基于多时相 VI 的玉米识别结果与分析

利用覆盖研究区作物生育期的 GF-1 卫星 WFV 多时相影像,构建多时相 NDVI、EVI、NDWI、TVI、RVI 和 DVI 植被指数数据集,依据不同作物的光谱差异,利用 70% 样本训练分类器,对研究区地物分类,分类结果如图 6 所示。利用 30% 的验证样本对上述分类结果进行精度评价,地物总体分类精度为 93.73%,Kappa 系数为 0.91,精度评价结果见表 3。其中玉米的制图精度、用户精度均在 96% 以上,为后续利用纹理信息进一步识别制种玉米奠定了基础。

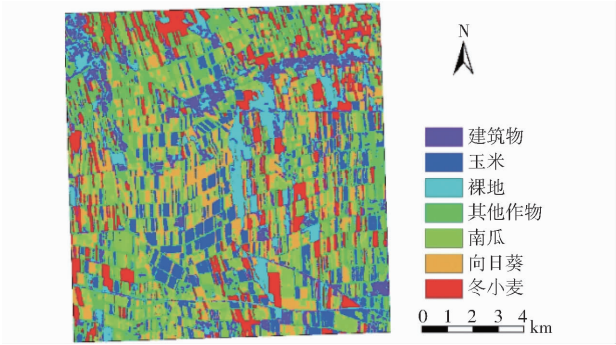


图 6 多时相 VI 分类结果

Fig. 6 Multi-temporal VI classification results

表 3 多时相 VI 分类结果混淆矩阵

Tab. 3 Multi-temporal VI classification results

confusion matrix		%
类型	制图精度	用户精度
建筑物	85.21	92.31
裸地	88.89	81.89
玉米	96.39	99.82
其他作物	75.68	71.79
南瓜	93.15	82.23
向日葵	84.46	79.26
冬小麦	97.40	100

3.2 基于纹理特征的制种玉米识别结果与分析

通过试验对比分析,得出最适宜制种玉米田块纹理识别的尺度为 0.6~0.9 m^[21],本文选择制种玉米田砍除父本后的 0.7 m Kompasat-3 全色波段影像,对经过 Uniform-LBP 处理的影像,计算均值(Mean)、对比度(Contrast)、熵(Entropy)、角二阶矩(ASM)和同质性(Homogeneity)等 5 个纹理特征,与原始全色影像、Subtract 纹理,形成一个具有 7 波段特征的影像,作为基于纹理分析 RF 分类器的输入影像,共同参与分类。制种玉米与大田玉米各特征值的差异如图 7 所示。分类结果如图 8 所示。利用制种玉米、大田玉米验证样本,对分类结果计算混淆矩阵,得到制种玉米的制图精度为 93.34%、用户精度为 99.19%。

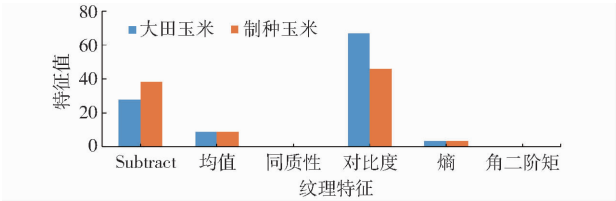


图 7 制种玉米与大田玉米的纹理特征值差异

Fig. 7 Differences in texture value between seed maize and grain maize

4 结论

(1) 利用全生育期 3—8 月的多时相 GF-1

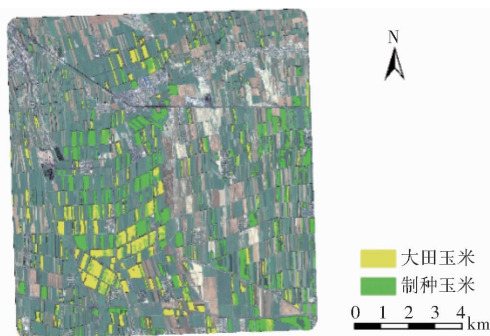


图8 基于纹理的制种玉米识别结果

Fig.8 Texture-based seed maize identification results

WV影像,通过相关分析遴选 DVI、EVI、NDVI、NDWI、RVI、TVI 6 种 VI,不同维度反映作物间的差异,采用 RF 方法实现玉米田块的识别,最终地物总体分类精度为 93.73%,其中玉米的制图精度为 96.39%,用户精度为 99.82%,为进一步识别制种玉米田奠定了基础。

(2)利用 0.7 m Komsat-3 全色波段影像,进行 Uniform-LBP 结合 GLCM 的纹理分析,并构建 Subtract 纹理特征,利用 RF 分类器进一步识别制种玉米田,得到的制种玉米制图精度、用户精度分别为 93.34%、99.19%。

参 考 文 献

- [1] BROWN J C, KASTENS J H, COUTINHO A C, et al. Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time-series MODIS vegetation index data[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 130: 39-50.
- [2] 宋茜. 基于 GF-1/WFV 和面向对象的农作物种植结构提取方法研究[D]. 北京:中国农业科学院,2016.
SONG Qian. Object-based image analysis with machine learning algorithms for cropping pattern mapping using GF-1/WFV imagery [D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2016. (in Chinese)
- [3] LÖW F, KNÖFEL P, CONRAD C. Analysis of uncertainty in multi-temporal object-based classification[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 105: 91-106.
- [4] HAO Pengyu, ZHENG Niu, LI Wang. Crop classification using multi-temporal HJ satellite images: case study in Kashgar, Xinjiang[C]//Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2014, 9260: 926005-926005-7.
- [5] HAO Pengyu, WANG Li, NIU Zheng, et al. The potential of time series merged from Landsat-5 TM and HJ-1 CCD for crop classification: a case study for Bole and Manas counties in Xinjiang, China[J]. Remote Sensing, 2014, 6(8): 7610-7631.
- [6] 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.
- [7] ZHAN Yulin, SHAKIR M, HAO Pengyu, et al. The effect of EVI time series density on crop classification accuracy[J]. OPTIK—International Journal for Light and Electron Optics, 2018, 157: 1065-1072.
- [8] 苏岫, 耿杰, 马晓瑞, 等. 基于多种植被指数信息与联合稀疏表示的红树林种类识别[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 114-120.
SU Xiu, GENG Jie, MA Xiaorui, et al. Mangrove species classification based on multiple vegetation index extraction and joint sparse representation[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(1): 114-120. (in Chinese)
- [9] JUNIOR S C A, FRANK T, RODRIGUES T, et al. Discrimination of soybean areas through images EVI/MODIS and analysis based on geo-object[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2014, 18(1): 44-53.
- [10] ZHONG L, GONG P, BIGING G S. Efficient corn and soybean mapping with temporal extendability: a multi-year experiment using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(1): 1-13.
- [11] 张超, 金虹杉, 刘哲, 等. 基于 GF 遥感数据纹理分析识别制种玉米[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 183-188.
ZHANG Chao, JIN Hongshan, LIU Zhe, et al. Seed maize identification based on texture analysis of GF remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 183-188. (in Chinese)
- [12] 张超, 乔敏, 刘哲, 等. 基于时序光谱和高分纹理分析的制种玉米田遥感识别[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 218-225.
ZHANG Chao, QIAO Min, LIU Zhe, et al. Seed maize field identification based on analysis of remote sensing timing spectrum and high resolution texture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 218-225. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180525&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.025. (in Chinese)
- [13] 商立群, 杜亚娟. Hu 矩和 Zernike 矩在图象识别中的应用[J]. 西安科技学院学报, 2000, 20(1): 53-56.
SHANG Liqun, DU Yajuan. On application of Hu moments and Zernike moments in images identification [J]. Journal of Xi'an Institute of Science and Technology, 2000, 20(1): 53-56. (in Chinese)
- [14] 杨清跃, 高飞, 聂青. 纹理图像识别中的旋转不变性分析[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(33): 205-207.
YANG Qingyue, GAO Fei, NIE Qing. Analysis of rotation invariance in texture image recognition[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(33): 205-207. (in Chinese)
- [15] 杨龙飞. 基于局部二值模式和灰度共生矩阵的纹理特征提取技术研究[D]. 兰州:兰州大学,2016.
YANG Longfei. The study on texture feature extraction method based on LBP and GLCM [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese)

- [20] 聂新山. 高效网式过滤器的试验研究与特点分析[J]. 新疆水利, 2011(3):25-27.
NIE Xinshan. Experimental research and characteristic analysis of high efficiency net filter[J]. Xinjiang Water Resources, 2011(3):25-27. (in Chinese)
- [21] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [22] 傅琳, 董文楚, 郑耀全. 微灌工程技术指南[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988:1-7.
- [23] 吴显斌. 再生水灌溉下滴灌系统抗堵塞性能试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
WU Xianbin. Experimental study of drip irrigation system anti-clogging performance under reclaimed water irrigation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [24] 李宏燕. 微灌叠片过滤器泥沙过滤与反冲洗研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2014.
LI Hongyan. Study on the filtration and backwashing for the disc filter in micro-irrigation[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2014. (in Chinese)
- [25] ZHOU B, LI Y, SONG P, et al. Anti-clogging evaluation for drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2017, 35(3):181-192.
- [26] 张重. 叠片过滤器流动特性的研究及分形流道设计与验证[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
ZHANG Chong. Study on flow characteristics of laminated filter and design and verification of fractal flow channel[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [27] 邱元锋, 孟戈, 罗金耀. 微灌旋流网式一体化水砂分离器试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5):77-81.
QIU Yuanfeng, MENG Ge, LUO Jinyao. Experiment of screen hydrocyclone separator for micro-irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5):77-81. (in Chinese)
- [28] PEI Y, LI Y, LIU Y, et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2014, 32(2):141-157.
- [29] 李云开, 杨培岭, 任树梅, 等. 分形流道设计及几何参数对滴水水力性能的影响[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7):109-114.
LI Yunkai, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of fractal flow path designing and its parameters on emitter hydraulic performance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7):109-114. (in Chinese)
- [30] 王睿, 王文娥, 胡笑涛, 等. 微灌用施肥泵施肥比例与肥水比对过滤器堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23):117-122.
WANG Rui, WANG Wene, HU Xiaotao, et al. Impact of fertilizer proportion and fertilizer-water ratio on clogging of filter by fertilizer pump in micro-irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23):117-122. (in Chinese)
- [31] 张文正, 翟国亮, 吕谋超, 等. 微灌条件下三种过滤器过滤效果试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4):88-93.
ZHANG Wenzheng, ZHAI Guoliang, LÜ Mouchao, et al. Experiment study on the efficacy of sandfilter, screen filter and disc filter for removing silts from the yellow river water for micro-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4):88-93. (in Chinese)

(上接第 168 页)

- [16] 王国德, 张培林, 任国全, 等. 融合 LBP 和 GLCM 的纹理特征提取方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(11):199-201.
WANG Guode, ZHANG Peilin, REN Guoquan, et al. Texture feature extraction method fused with LBP and GLCM[J]. Computer Engineering, 2012, 38(11):199-201. (in Chinese)
- [17] 薛翠红, 于洋, 张朝, 等. 融合 LBP 与 GLCM 的人群密度分类算法[J]. 电视技术, 2015, 39(24):7-10.
XUE Cuihong, YU Yang, ZHANG Chao, et al. Fusing LBP and GLCM for crowd density classification algorithm[J]. Video Engineering, 2015, 39(24):7-10. (in Chinese)
- [18] TATSUMI K, YAMASHIKI Y, TORRES M, et al. Crop classification of upland fields using random forest of time-series Landsat 7 ETM+ data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115:171-179.
- [19] 王利民, 刘佳, 杨玲波, 等. 随机森林方法在玉米-大豆精细识别中的应用[J]. 作物学报, 2018, 44(4):569-580.
WANG Limin, LIU Jia, YANG Lingbo, et al. Application of random forest method in maize-soybean accurate identification[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(4):569-580. (in Chinese)
- [20] 王行汉, 刘超群, 丛沛桐, 等. 基于增强温度植被指数的农业旱情遥感监测[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5):165-170.
WANG Xinghan, LIU Chaoqun, CONG Peitong, et al. Agriculture drought monitoring using remote sensing based on enhanced temperature vegetation dryness index[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5):165-170. (in Chinese)
- [21] 张超, 乔敏, 刘哲, 等. 基于无人机和卫星遥感影像的制种玉米田识别纹理特征尺度优选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17):98-104.
ZHANG Chao, QIAO Min, LIU Zhe, et al. Texture scale analysis and identification of seed maize fields based on UAV and satellite remote sensing images[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17):98-104. (in Chinese)