

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.043

基于时序 EVI 决策树分类与高分纹理的制种玉米识别*

刘哲¹ 李智晓¹ 张延宽¹ 张超^{1,2} 黄健熙¹ 朱德海^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100035)

摘要: 针对遥感技术区分制种玉米与大田玉米的技术难题, 以不同源、不同时相遥感数据, 构建了多时相 OLI/Landsat-8 结合 GeoEye-1 高分纹理制种玉米识别方法。首先以多时相 OLI/Landsat-8 构建各地类 EVI 时序曲线, 利用地类的物候差异, 以 C5.0 决策树算法识别玉米, 然后针对制种玉米与大田玉米田块的纹理差异, 利用 GeoEye-1 高分影像纹理信息进一步以阈值法识别制种玉米。最后, 以甘肃省张掖市临泽县为研究区, 对提出的方法进行了试验验证, 结果显示, 多时相 OLI/Landsat-8 总体分类精度为 86.31%, Kappa 系数为 0.81。玉米识别的用户精度为 88.39%, 制图精度为 95.35%, 可满足进一步对制种玉米的识别。依据 GeoEye-1 高分遥感影像的纹理差异, 识别制种玉米, 用户精度为 86.37%, 制图精度为 83.02%, 高于只利用单一 OLI/Landsat-8 数据源的分类精度。

关键词: 多时相 遥感 OLI/Landsat-8 增强型植被指数 GeoEye-1 纹理 决策树

中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)10-0321-07

Seed Maize Identification Based on Time-series EVI Decision Tree Classification and High Resolution Remote Sensing Texture Analysis

Liu Zhe¹ Li Zhixiao¹ Zhang Yankuan¹ Zhang Chao^{1,2} Huang Jianxi¹ Zhu Dehai^{1,2}

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

2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality, Monitoring and Control, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: To address the issue of distinguishing seed maize from grain maize with remote sensing, a method of multi-temporal OLI/Landsat-8 remote sensing images combined with GeoEye-1 high-resolution texture was proposed. Utilizing the phenological phase differences of all classes from multi-temporal OLI/Landsat-8 images, the C5.0 decision tree classification algorithm was applied to the constructed EVI time-series. According to the texture difference between seed maize and grain maize, thresholds were set to identify seed maize by using GeoEye-1 high-resolution texture information. Finally, Linze County of Zhangye City in Gansu Province was taken as a study area to test the method. The results showed that the overall classification accuracy of multi-temporal OLI/Landsat-8 was 86.31% and the Kappa coefficient was 0.81, the user accuracy of maize identification was 88.39% and the mapping accuracy was 95.35%, which can meet the demand of further identification of seed maize. In contrast, when combined with texture information from high-resolution images, the user accuracy of seed maize was 86.37% and the mapping accuracy was 83.02%, which were higher than those of exclusive OLI/Landsat-8 data source. The conclusion is, this method can play a technical role in monitoring seed field over large range fast and accurately with remote sensing technology, enforcing seed market supervision and improving the authorities' response time to the market.

Key words: Multi-temporal Remote sensing OLI/Landsat-8 EVI GeoEye-1 Texture Decision tree

收稿日期: 2015-06-30 修回日期: 2015-08-04

* 国家自然科学基金资助项目(41171337)

作者简介: 刘哲, 讲师, 博士, 主要从事作物品种表型获取与评价技术研究, E-mail: liuz@cau.edu.cn

通讯作者: 张超, 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

引言

作物制种生产信息获取通常采用两种方式:行业统计和抽样调查。依靠传统人工统计调查,逐级上报制种面积、生长状况和产量等信息的获取方式效率很低,准确性受人为影响大,难以满足种子市场监管和指导制种企业生产经营的需求。

近年来,已广泛开展了基于多时相遥感的农作物识别研究和应用。文献[1-8]以 NOAA-AVHRR 或 MODIS 的 NDVI 产品为数据源,分析 NDVI 时间序列曲线,利用谐波分析法、分层掩膜法、最大似然法、决策树分类法等对土地覆被进行分类,并获取特定的农作物。但多时相遥感数据空间分辨率较低,只适合大区域大尺度,难以满足不同地块尺度要求;中、高空间分辨率遥感数据,如 Landsat TM/ETM+、环境减灾小卫星星座 HJ-1A/B 等,因空间分辨率、时间分辨率较高,近年来在相关地块尺度的作物识别研究中应用广泛。文献[9-12]应用多时相 TM 数据,实现了农作物的分类。文献[13-14]利用多时相 HJ 卫星数据,实现了作物的识别。此外文献[15-17]等融合 TM 与 MODIS 时间序列产品,充分利用时相与光谱特征,获取作物分布信息。Murakami 等^[18]利用 9 景 SPOT/HRV 数据,分析作物年度 NDVI 曲线,实现日本佐贺平原作物识别,并研究了不同时相组合对分类精度的影响。决策树算法可挖掘作物多时相信息,被不少学者用于基于多时相、时间序列遥感数据的作物识别^[11-12,17,19-21]。

以上相关研究为制种玉米识别提供了基础,但不能区分大田玉米和制种玉米。纹理是高分辨率遥感影像的重要特征,利用纹理特征补充高分辨率影像的光谱信息可提高分类精度^[22-24]。因此,本文以甘肃省张掖市临泽县的核心制种区为研究区,通过玉米制种基地实地调研,研究确定大田玉米和制种玉米在物候历、种植管理方式和生物学特性等方面的关键异同点,提出一种结合 OLI/Landsat-8 多时相信息和 GeoEye-1 高分遥感影像纹理信息的制种玉米基地识别和面积提取方法,并对提取结果进行验证。

1 研究区域及试验数据

1.1 研究区域及研究作物概况

以张掖市为核心的甘肃省玉米制种基地为中国面积最大、最具优势的玉米制种基地之一。本文选择甘肃省张掖市临泽县玉米制种区域为研究区,其地理位置东经 100.154°~100.271°,北纬 39.248°~39.340°,如图 1 所示,其中右图为 GeoEye-1 多光谱数据似真彩色显示。该区域海拔 1400~1500 m,地处河西走廊中部,南依青藏高原,北缘祁连山脉,北望内蒙古高原巴丹吉林沙漠,位于我国第二大内陆河——黑河流域中游冲积形成的走廊平原区。研究区域属大陆性荒漠草原气候,云量少,晴天多,光照充足,太阳辐射强,年平均日照时数为 3052.9 h;年均降水量 118.4 mm,蒸发量 1830.4 mm,降水量低,气候干燥。该区域灌溉条件便利,适宜制种玉米种植,是制种玉米识别研究的理想试验区。

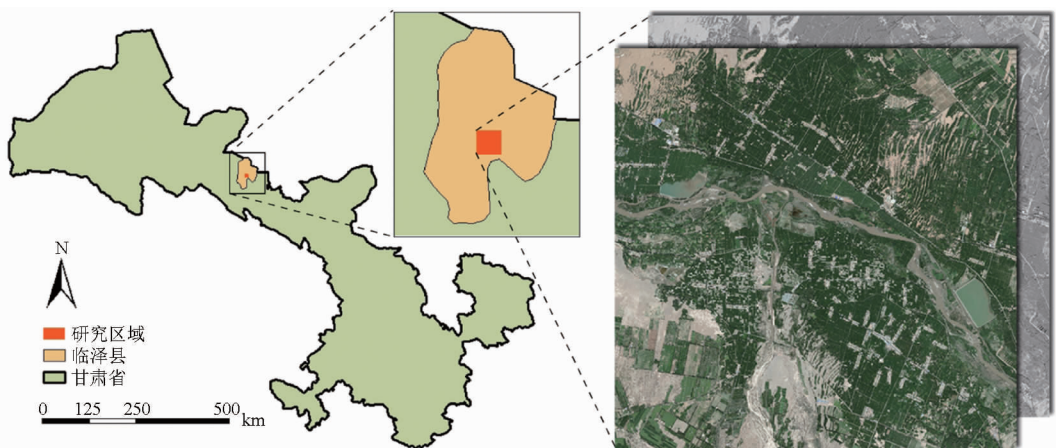


图 1 研究区域和遥感数据示意图

Fig. 1 Study area and remote sensing data

通过对玉米制种基地的实地调研,发现制种玉米与大田玉米之间有一定差异。物候上,大田玉米比制种玉米播期稍早一周。种植管理方面,制种玉米一般大面积连片种植,并且制种玉米田块周边一般有 200 m 以上的其他作物、高大树木等与大田玉

米隔离,或通过错期播种与大田玉米隔离。父母本交叉种植方面,与大田玉米均一种植不同,制种玉米父母本交叉种植,在抽穗期间,母本去雄,父本雄穗保留;在成熟期间,父本行砍掉,母本保留,这两个期间制种玉米田块在高分遥感影像上表现出明显的条

纹状纹理。

1.2 数据源

1.2.1 OLI/Landsat-8 时间序列数据集

采用美国 Landsat-8 卫星搭载的陆地成像仪 (Operational land imager, OLI) 数据 (简称 OLI/

Landsat-8), 多光谱波段空间分辨率为 30 m, 全色波段空间分辨率为 15 m。在玉米生长季 (2014 年 3 月—9 月) 共获得 14 个时相的遥感数据, 如表 1 所示, 构建 2014 年生长季时间序列影像数据集。

表 1 生长季多时相遥感数据

Tab.1 Multi-temporal remote sensing data of growing season

时相 1	时相 2	时相 3	时相 4	时相 5	时相 6	时相 7
3 月 18 日	4 月 3 日	4 月 26 日	5 月 5 日	5 月 12 日	5 月 21 日	5 月 28 日
时相 8	时相 9	时相 10	时相 11	时相 12	时相 13	时相 14
7 月 15 日	7 月 24 日	7 月 31 日	8 月 9 日	8 月 25 日	9 月 1 日	9 月 17 日

OLI/Landsat-8 数据经过辐射定标、大气校正及几何校正等处理, 其中大气校正采用 FLAASH 模型。依据处理后得到的 OLI/Landsat-8 多光谱反射率数据, 研究区时序 EVI (Enhanced vegetation index) 为

$$EVI = G(\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + C_1\rho_{RED} - C_2\rho_{BLUE} + L) \quad (1)$$

式中 ρ_{NIR} 、 ρ_{RED} 、 ρ_{BLUE} ——近红外、红波段和蓝波段的反射率

G ——增益因子, 取值为 2.5

C_1 、 C_2 ——气溶胶阻抗系数, 取值为 6 和 7.5

L ——冠层背景调整因子, 取值为 1

最终得到 OLI/Landsat-8 EVI 时序数据集。

1.2.2 GeoEye-1 高分卫星影像

GeoEye-1 是美国 Digital Global 公司的高空间分辨率遥感数据产品, 多光谱空间分辨率为 2.0 m, 全色波段空间分辨率为 0.5 m。研究区域成像时间为 2014 年 7 月 13 日, 为玉米抽穗期, 是区分制种玉米的最佳时相。对 GeoEye-1 遥感数据进行了辐射定标、大气校正、几何校正等处理。采用式 (2) 辐射定标公式, 将 GeoEye-1 数字值转换为辐亮度 L_λ , 得到大气上界辐射能量 (单位: $mW/(cm^2 \cdot \mu m)$)。最后将辐亮度 L_λ 转换为反射率, 并计算 EVI。

$$L_\lambda = D_N(K_{band} / \Delta\lambda_{band}) \quad (2)$$

式中 K_{band} ——给定波段的绝对辐射定标因子

$\Delta\lambda_{band}$ ——给定波段的有效波段宽

D_N ——给定波段的数字值

1.3 分类体系与制种玉米识别样本集

依据研究区土地利用及主要作物种植状况, 确定玉米与非玉米为第 1 层分类体系, 制种玉米与非制种玉米为第 2 层分类体系, 非玉米包括树木、甜叶菊、水体、建筑、裸地及其他零散作物。因本文主要研究对象为玉米, 而建筑与裸地光谱差异小, 因此将两者合并为非植被, 其他零散作物与树木光谱差异

小, 将两者合并为树木。

样本选择以代表性、独立性为原则选取 320 个样本, 其中一半作为训练样本, 另一半作为测试样本。其中, 对于大田玉米和制种玉米, 通过野外实地采集 100 个样点, 使用手持 GPS 测定样点地理坐标, 并经过内业处理后形成样本矢量图斑。对于非玉米类地类, 以 GeoEye-1 遥感影像为依据, 建立建筑、裸地、水体、树木、甜叶菊等地类的典型样本点集。

2 研究方法

首先利用玉米生长关键生育期 OLI/Landsat-8 数据, 构建多时相 EVI 时间序列数据, 利用 C5.0 决策树分类算法, 挖掘不同地类的物候差异, 实现玉米的识别, 接着以关键时相的 GeoEye-1 高分影像为数据源, 利用其纹理信息结合野外调查数据实现制种玉米的识别。具体流程如图 2 所示。

2.1 基于多时相 EVI 的 C5.0 决策树法玉米识别

作物全生育期的 EVI 或 NDVI 时序曲线与物候变化有着良好的对应关系。相关研究表明, 基于作物物候期的差异, 利用多时相时序数据的作物识别, EVI 优于 NDVI^[25-27]。本文以研究区玉米生育期内的多时相 EVI 时序数据, 利用 C5.0 决策树, 识别玉米作物种植区。

2.2 高空间分辨率遥感影像纹理信息提取

制种玉米父本行与母本行交错种植, 行比从 1:6~1:8 (即两行父本中间种 6~8 行母本), 进入抽雄期时还要对所有母本行去雄, 加之父母本的植株形态、生育进程等差异, 使得制种玉米田在高分遥感影像上具有条纹状纹理特征, 利用该信息可进一步区分制种玉米和大田玉米。灰度共生矩阵 (Gray level co-occurrence matrix, GLCM) 纹理分析法定义了 14 种纹理特征, 但特征之间相关性大, 因此需进

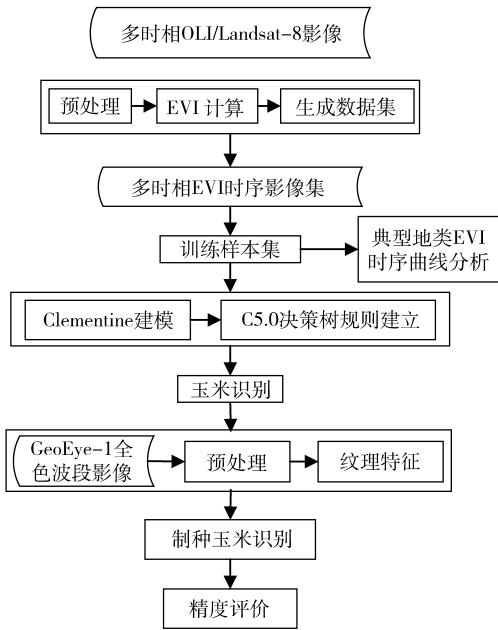


图2 制种玉米识别流程图

Fig. 2 Flow chart for identification of seed maize

一步进行特征优选。制种玉米田条纹状纹理是一种细纹理,在局部区域内灰度变化快。角二阶矩反映图像灰度分布的均匀程度和纹理的粗细度,熵表征

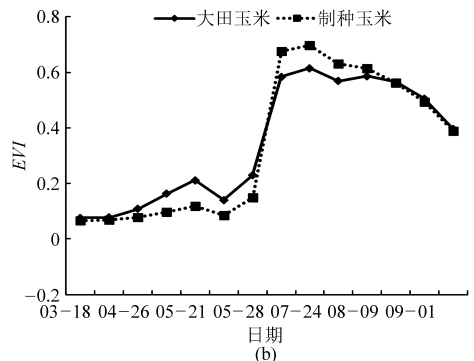
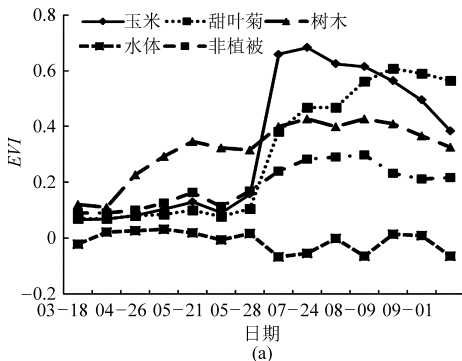


图3 多时相EVI典型地物时序曲线对比

Fig. 3 Comparison of EVI time series curves for typical class

获取研究区多时相 OLI/Landsat - 8 的 EVI 时序数据集后,根据典型地物 EVI 时序分析,利用选取的训练样本,生成 C5.0 决策树,挖掘不同地类的物候差异,实现玉米的识别,构建的 C5.0 决策树如图 4 所示,其中实线代表是,虚线代表否,EVI₈ 代表 OLI/Landsat - 8 EVI 时序数据集中第 8 个时相 EVI,图 4 中其他 EVI 下标含义相同。本文利用 Clementine 软件中 C5.0 决策树模型构建分类规则,决策树构建过程中,通过试验确定推进次数为 30,修剪严重性为 20,并在分类损失矩阵中,给玉米赋予更高的权重。首先利用 7 月 15 号抽穗期 EVI 值明显高于其他地类,识别玉米;接着,利用 9 月 17 号的 EVI 数据,甜叶菊 EVI 值达到峰值,识别甜叶菊;以此类推,利用不同地类不同时相 EVI 值差异,获

了影像中纹理的复杂程度。考虑到本文的研究目标,最后选取角二阶矩、熵纹理特征参与制种玉米识别。

3 试验结果与分析

3.1 基于多时相 OLI/Landsat - 8 的玉米田块识别

本文将各类地物训练样本集与时序 EVI 叠加,构建各类地物的 EVI 均值变化特征曲线,如图 3a 所示,可以看到水体 EVI 值在 0.1 以下;树木 EVI 值在 5 月末之前远大于其他地类;非植被 EVI 值在 7、8、9 月份明显低于植被覆盖地类,为 0.2 左右。玉米 EVI 时序曲线体现了显著的植被季节变化特征,在 5 月末进入快速生长阶段,在 7 月中旬抽穗,波峰明显,EVI 值达到最大。因此根据时序曲线变化特征可有效识别玉米。对于制种玉米与大田玉米,如图 3b 所示,大田玉米播期略早,在玉米抽穗期之前,非制种玉米长势快,EVI 值比制种玉米大。制种玉米到达抽穗期比大田玉米晚,且需要对母本去雄,将黄色雄穗去除后,制种玉米的 EVI 值比大田玉米的 EVI 值大。

取研究区基本土地覆被信息。图 5 是分类结果,可以看出玉米是研究区主要作物,田块连片性较好;甜叶菊田块小,分布零散;主河流及水域分类效果较好,但由于浅滩存在造成部分误分。

3.2 基于 GeoEye - 1 高分影像纹理分析的制种玉米田块识别

通过试验发现,直接将 0.5 m 分辨率纹理波段与 30 m 分辨率的时序 OLI/Landsat - 8 的 EVI 波段合成再分类,纹理波段被重采样,纹理信息丢失严重,纹理特征贡献率小,分类效果欠佳。因此以多时相 OLI/Landsat - 8 玉米识别结果,对 GeoEye - 1 高分分辨率纹理影像掩膜,进一步利用 GeoEye - 1 高分分辨率影像纹理识别制种玉米。参与制种玉米识别的 GeoEye - 1 高分分辨率遥感影像信息包括 EVI,以及利

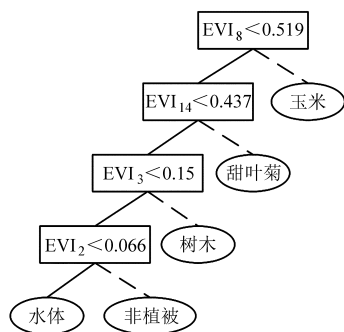


图 4 EVI 决策树

Fig. 4 Decision tree of EVI

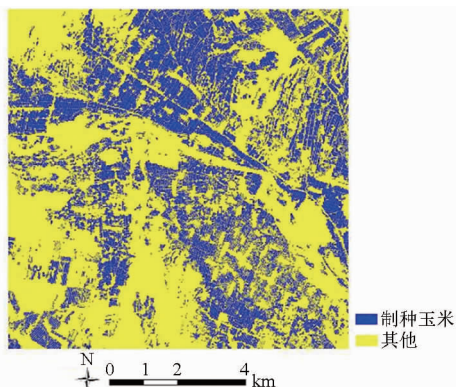


图 7 制种玉米识别结果图

Fig. 7 Identification result of seed maize with GeoEye - 1 high resolution remote sensing images

抽穗期的 EVI 值与其他地类差异明显,覆盖度高,且玉米田块较大,因此分类精度较高,可满足进一步对制种玉米的识别要求。此外,少量树木被误分为玉米,这是因为玉米田块附近通常有林带隔离,玉米与茂盛树林之间 EVI 差异小。

表 2 多时相 EVI 决策树法玉米识别混淆矩阵

Tab. 2 Confusion matrix of maize identification with EVI

	玉米	非植被	甜叶菊	树木	水体	总体	UA/%
玉米	1005	2	27	100	3	1137	88.39
非植被	31	172	12	47	129	391	43.99
甜叶菊	10	1	130	13	0	154	84.42
树木	6	15	0	302	22	345	87.54
水体	2	7	1	2	1102	1114	98.92
总体	1054	197	170	464	1256	3141	
PA/%	95.35	87.31	76.47	65.09	87.74		
OA/%				86.31			
Kappa				0.81			

注:PA 为制图精度,UA 为用户精度,OA 为总体精度。

本文构建的多时相 OLI/Landsat - 8 结合 GeoEye - 1 纹理信息与只利用多时相 OLI/Landsat - 8 对制种玉米识别精度对比如表 3 所示。结合多时相 OLI/Landsat - 8 及 GeoEye - 1 高分纹理的分类精度比多时相 OLI/Landsat - 8 略高,用户精度为 86.37%,制图精度为 83.02%,由于大田玉米基本上是农户散种,田块较小,且分布零散,因此在影像上也表现出分布零散特点,基于多时相 OLI/Landsat - 8 分类的连片性效果较好,基于高分影像分类有椒盐效

表 3 2 种方法制种玉米识别精度对比

Tab. 3 Accuracy evaluation of different classification methods of seed maize

OLI/Landsat - 8 EVI		OLI/Landsat - 8 EVI & GeoEye - 1 Texture	
PA/%	UA/%	PA/%	UA/%
80.74	80.06	86.37	83.02

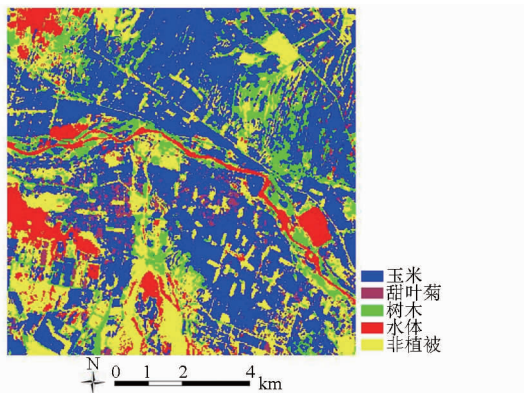


图 5 多时相 OLI/Landsat - 8 玉米田块识别结果图

Fig. 5 Identification of maize field with multi-temporal OLI/Landsat - 8 remote sensing images

用 GLCM 计算的角二阶矩、熵等纹理特征。图 6 显示了 GeoEye - 1 高分纹理影像中制种玉米、大田玉米 3 种特征差异对比,可以发现纹理特征差异比 EVI 差异大,通过分析最后选择熵纹理特征,设置纹理的熵特征阈值 1.6 来识别制种玉米与大田玉米,识别结果如图 7 所示。

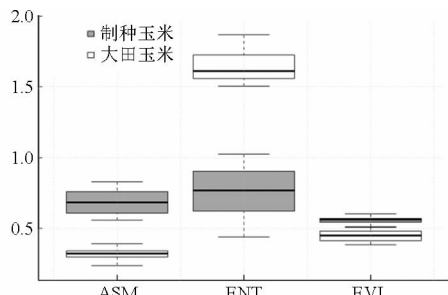


图 6 制种、大田玉米 3 种特征差异对比

Fig. 6 Comparison of three feature difference between seed maize and grain maize

3.3 识别精度评价

通过测试样本集生成的精度评价感兴趣区域 (Region of interesting, ROI), 计算混淆矩阵实现对大田玉米、制种玉米识别结果的精度评价。多时相 EVI 决策树分类的混淆矩阵如表 2 所示,总体分类精度为 86.31%, Kappa 系数为 0.81,玉米识别的用户精度为 88.39%,制图精度为 95.35%。由于玉米

应,在一定程度上影响识别精度,但较好地识别了制种玉米田块。

4 结论

(1) 设计了基于 OLI/Landsat-8 时序 EVI 的 C5.0 决策树分类方法,对玉米种植区进行识别。总体分类精度为 86.31%, Kappa 系数为 0.81。充分利用玉米关键生育期与其他地类的差异,依据 EVI

时序数据,构建简洁的决策树,符合研究区典型地物变化特性。

(2) 制种玉米田块内表现出明显的条纹状纹理,是区别于大田玉米的一个重要特征。在玉米识别的基础上,利用 GeoEye-1 高分影像的纹理信息,进一步识别制种玉米,通过精度评价,本文构建的方法识别精度高于只利用单一多时相 OLI/Landsat-8 分类法,基本满足对制种玉米的识别需求。

参 考 文 献

- 1 Wardlow B, Egbert S, Kastens J. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U. S. Central Great Plains[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(3): 290-310.
- 2 Conrad C, Colditz R R, Dech S, et al. Temporal segmentation of MODIS time series for improving crop classification in Central Asian irrigation systems[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(23): 8763-8778.
- 3 Arvor D, Jonathan M, Meirelles M S P, 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.
- 4 林忠辉,莫兴国. NDVI 时间序列谐波分析与地表物候信息获取[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12): 138-144.
Lin Zhonghui, Mo Xingguo. Phenologies from harmonics analysis of AVHRR NDVI time series[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12): 138-144. (in Chinese)
- 5 张明伟,周清波,陈仲新,等. 基于 MODIS 时序数据分析的作物识别方法[J]. *中国农业资源与区划*, 2008, 29(1): 31-35.
Zhang Mingwei, Zhou Qingbo, Chen Zhongxin, et al. Method for identifying plants analyzed by time order data based on Modis[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2008, 29(1): 31-35. (in Chinese)
- 6 陈晓苗. 基于 MODIS-NDVI 的河北省主要农作物空间分布研究[D]. 石家庄:河北师范大学, 2010.
Chen Xiaomiao. A study of the spatial distribution of major crops in Hebei Province based on MODIS-NDVI. [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2010. (in Chinese)
- 7 黄青,李丹丹,陈仲新,等. 基于 MODIS 数据的冬小麦种植面积快速提取与长势监测[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 163-167.
Huang Qing, Li Dandan, Chen Zhongxin, et al. Monitoring of planting area and growth condition of winter wheat in China based on MODIS data[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 163-167. (in Chinese)
- 8 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 Qingyun, Yang Guijun, Long Huiling, et al. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(11): 134-144. (in Chinese)
- 9 Lanjeri S, Melia J, Segarra D. A multi-temporal masking classification method for vineyard monitoring in central Spain [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(16): 3167-3186.
- 10 Turker M, Arikan M. Sequential masking classification of multi-temporal Landsat7 ETM+ images for field-based crop mapping in Karacabey, Turkey[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(17): 3813-3830.
- 11 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(增刊 2): 191-195.
Ma Li, Xu Xin'gang, Jia Jianhua, et al. Crop classification method using multi-temporal TM images [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(Supp. 2): 191-195. (in Chinese)
- 12 朱良,平博,苏奋振,等. 多时相 TM 影像决策树模型的水稻识别提取[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(3): 446-451.
Zhu Liang, Ping Bo, Su Fenzhen, et al. Using decision tree model to extract paddy rice information from multi-temporal TM images[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(3): 446-451. (in Chinese)
- 13 Tu X, Zhao D, Guo L. Spectrum analysis technology based crop mapping using time-series of HJ satellite CCD images[J]. *Sensor Letters*, 2014, 12(3-5): 609-614.
- 14 Jia K, Wu B, Li Q. Crop classification using HJ satellite multispectral data in the North China Plain[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(8): 287-297.
- 15 李颖,陈秀芳,段红伟,等. 多源多时相遥感数据在冬小麦识别中的应用研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2010, 26(4): 47-49.
Li Ying, Chen Xiuwan, Duan Hongwei, et al. Application of multi-source and multi-temporal remote sensing data in winter wheat identification [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2010, 26(4): 47-49. (in Chinese)
- 16 郝卫平,梅旭荣,蔡学良,等. 基于多时相遥感影像的东北三省作物分布信息提取[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 201-207.
Hao Weiping, Mei Xurong, Cai Xueliang, et al. Crop planting extraction based on multi-temporal remote sensing data in northeast China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 201-207. (in Chinese)
- 17 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.
Zhang Jiankang, Cheng Yanpei, Zhang Fawang, et al. Crops planting information extraction based on multi-temporal remote sensing images[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 134-141. (in Chinese)
- 18 Murakami T, Ogawa S, Ishitsuka N, et al. Crop discrimination with multitemporal SPOT/HRV data in the Saga Plains, Japan

- [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(7): 1335 - 1348.
- 19 李鑫川, 徐新刚, 王纪华, 等. 基于时间序列环境卫星影像的作物分类识别[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2): 169 - 176.
Li Xinchuan, Xu Xin'gang, Wang Jihua, et al. Crop classification recognition based on time-series images from HJ satellite [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(2): 169 - 176. (in Chinese)
- 20 刘建光, 李红, 孙丹峰, 等. MODIS 土地利用/覆被多时相多光谱决策树分类[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 312 - 318.
Liu Jianguang, Li Hong, Sun Danfeng, et al. Land use/cover decision tree classification fusing multi-temporal and multi-spectral of MODIS [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 312 - 318. (in Chinese)
- 21 李颖, 刘荣花, 郑东东. 基于多源数据和决策树估算夏玉米种植面积[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(3): 344 - 348.
Li Ying, Liu Ronghua, Zheng Dongdong. Summer maize planting area estimation based on multi-source data and decision tree [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(3): 344 - 348. (in Chinese)
- 22 Ouma Y, Tateishi R. Analysis of co-occurrence and discrete wavelet transform textures for differentiation of forest and non-forest vegetation in very-high-resolution optical-sensor imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(12): 3417 - 3456.
- 23 黄昕. 高分辨率遥感影像多尺度纹理、形状特征提取与面向对象分类研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
Huang Xin. Multiscale texture and shape feature extraction and object-oriented classification for very high resolution remotely sensed imagery [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese)
- 24 林楠, 姜琦刚, 杨佳佳, 等. 基于资源一号 02C 高分辨率数据的农业区土地利用分类[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 278 - 284.
Lin Nan, Jiang Qigang, Yang Jiajia, et al. Classifications of agricultural land use based on high-spatial resolution ZY1-02C remote sensing images [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 278 - 284. (in Chinese)
- 25 王正兴, 刘闯, Alfredo Huete. 植被指数研究进展: 从 AVHRR—NDVI 到 MODIS—EVI [J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 979 - 987.
Wang Zhengxing, Liu Chuang, Alfredo Huete. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979 - 987. (in Chinese)
- 26 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 167 - 172.
Zuo Lijun, Zhang Zengxiang, Dong Tingting, et al. Application of MODIS/NDVI and MODIS EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(3): 167 - 172. (in Chinese)
- 27 王正兴, 刘闯, 陈文波, 等. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2006, 31(5): 407 - 410.
Wang Zhengxing, Liu Chuang, Chen Wenbo, et al. Preliminary comparison of MODIS-NDVI and MODIS-EVI in eastern Asia [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(5): 407 - 410. (in Chinese)

(上接第 289 页)

- 11 Liu H X, Pei H B, Han Z N, et al. The antimicrobial effects and synergistic antibacterial mechanism of the combination of ϵ -polylysine and nisin against *Bacillus subtilis* [J]. *Food Control*, 2015, 47: 444 - 450.
- 12 王凤, 石侃, 潘涛, 等. 柠檬酸钠和生物素对白色链霉菌发酵产 ϵ -聚赖氨酸的影响 [J]. *现代食品科技*, 2013, 29(6): 1230 - 1233.
Wang Feng, Shi Kan, Pan Tao, et al. Effect of sodium citrate and biotin on ϵ -poly-lysine fermentation of *Streptomyces albulus* [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(6): 1230 - 1233. (in Chinese)
- 13 Chang S S, Lu W W, Park S H, et al. Control of foodborne pathogens on ready-to-eat roast beef slurry by ϵ -polylysine [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 141(3): 236 - 241.
- 14 Hyldgaard M, Mygind T, Vad B S, et al. The antimicrobial mechanism of action of epsilon-poly-L-lysine [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(24): 7758 - 7770.
- 15 GB 2760—2011 食品添加剂使用标准 [S]. 中华人民共和国卫生部, 2011.
- 16 Zhang J B, Yue T L, Yuan Y H. *Alicyclobacillus* contamination in the production line of kiwi products in China [J]. *PloS One*, 2013, 8: e67704
- 17 Reinders R D, Biesterveld S, Bijker P G. Survival of *Escherichia coli* O157: H7 ATCC 43895 in a model apple juice medium with different concentrations of proline and caffeic acid [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(6): 2863 - 2866.
- 18 Pettipher G L, Osmundson M E, Murphy J M. Methods for the detection and enumeration of *Alicyclobacillus acidoterrestris* and investigation of growth and production of taint in fruit juice and fruit juice-containing drinks [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 1997, 24(3): 185 - 189.
- 19 Witthuhn R C, van der Merwe E, Venter P, et al. Guaiacol production from ferulic acid, vanillin and vanillic acid by *Alicyclobacillus acidoterrestris* [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2012, 157(1): 113 - 117.