doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.042

基于决策树和混合像元分解的玉米种植面积提取方法*

苏　伟[1,2]　姜方方[1,2]　朱德海[1,2]　展郡鸽[1,2]　马鸿元[1,2]　张晓东[1,2]
(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: Landsat 8 影像具有较高空间分辨率和时间分辨率,长时间序列 Landsat 8 - NDVI 曲线反映农作物的物候历、种植模式和种植结构信息,是精确提取玉米种植面积的理想数据源。基于时序 Landsat 8 - NDVI 影像提取玉米种植面积的方法中,决策树方法快速、高效,可通过多阈值限定进行分类,但由于混合像元问题,如果阈值设置过宽,提取面积偏大;阈值设置过窄,提取面积偏小;混合像元分解通过计算端元组分丰度可以排除异质地类干扰。因此,以时序 NDVI 为数据源、耦合使用 2 种算法是精确提取作物种植面积的有效方法。本研究基于时序 Landsat 8 - NDVI,提取河北省保定市大田玉米的种植面积。首先,分析典型作物区的 NDVI 曲线特征,并构建决策树从而初步提取早播夏玉米、小麦夏玉米和春玉米的分布范围。然后,根据端元平均 NDVI 波谱曲线,进行 3 种玉米混合度分解,进而根据玉米丰度比例精确提取玉米种植面积。精度评价结果表明:利用本方法提取的玉米种植区总分类精度在 98% 以上,Kappa 系数在 0.97 以上;所提取的玉米种植类型主要是夏玉米,春玉米种植主要集中在涿州市中部,这与实地调查结果一致。上述定量和定性的评价结果表明该方法可用于快速、精确提取玉米种植面积。

关键词: 玉米　种植面积提取　决策树　混合像元分解　归一化差分植被指数
中图分类号: S127　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)09-0289-07

Extraction of Maize Planting Area Based on Decision Tree and Mixed-pixel Unmixing Methods

Su Wei[1,2]　Jiang Fangfang[1,2]　Zhu Dehai[1,2]　Zhan Junge[1,2]　Ma Hongyuan[1,2]　Zhang Xiaodong[1,2]
(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Landsat 8 remote sensingimages possess higher spatial resolution and higher temporal resolution. The time-series Landsat 8 - NDVI metrics could reflect the phenology calendar, planting pattern, planting structure and planting area information due to its high spatial resolution and high temporal resolution, thus it is an ideal data source for accurate extraction of maize planting area. In most extraction methods, the decision tree classification method is considered to be rapid and efficient, which could extract maize planting area using multi-threshold. However, because of the mixed-pixel, both the larger and smaller threshold will lead to errors. This problem could be resolved by mixed-pixel unmixing method using endmember abundance calculation to eliminate the disturbance of heterogeneous classes. Therefore, taking time-series Landsat 8 - NDVI metrics as data source and using the combined method of decision tree and mixed-pixel unmixing methods are effective way to extract crop planting area. The maize planting area in Hebei Province was extracted in this paper based ontime-series Landsat 8 - NDVI. Firstly, the features of time-series Landsat 8 - NDVI curves were analyzed and the decision tree was built to get the distribution of early sowing maize, interplanted summer maize and spring maize. Secondly,

收稿日期: 2014 - 12 - 11　修回日期: 2015 - 03 - 19
* 国家自然科学基金资助项目(41371327)、"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAD20B0103)和北京高等学校青年英才计划资助项目(YETP0316)
作者简介: 苏伟,副教授,博士生导师,主要从事农业遥感应用研究,E-mail: suwei@cau.edu.cn
通讯作者: 朱德海,教授,博士生导师,主要从事土地利用和农业信息化研究,E-mail: zhudehai@cau.edu.cn

mixedness decomposition was calculated among three kinds of maize based on mean NDVI spectral curve of endmember, so maize planting area could be extracted accurately by using computed maize endmember abundance. The accuracy assessment results indicated that the overall classification accuracy of maize planting area was higher than 98% and Kappa coefficient was higher than 0.97. Generally speaking, the main planting crop was summer maize, and spring maize was mostly planted in the south part of Zhuozhou City. These results were accordant with field work data. The above quantitative and qualitative accuracy assessment results indicated that this method can be used to extract maize planted area quickly and accurately.

Key words: Maize Planted area extraction Decision tree Unmixing of mixed-pixel NDVI

引言

及时、准确地了解农作物种植结构和分布状况，对政府部门制定粮食政策、调整农业结构、保障国家粮食安全具有重要意义。玉米是世界上分布最广泛的粮食作物之一，自 20 世纪 70 年代后期，中国的玉米主产区呈现不断扩张的趋势，使玉米从第三大粮食作物晋升为第一大粮食作物[1]，因此精确提取玉米的种植面积具有重要意义。目前获取不同农作物种植面积的主要方法是地面农情采样，即首先根据地面农情采样获取各种作物当年种植成数，再根据区域耕地面积得出作物播种总面积[2]。卫星遥感为快速、准确、大范围获取农作物种植面积信息、监测空间分布状况提供了重要的技术手段[3]。目前利用遥感影像提取农作物的方法主要集中在利用遥感像素的波谱信息，采用距离、角度、概率等聚类准则或神经网络分类方法[4]，以一个像元为最小单位，而没有考虑亚像元下的分类问题。马丽等[4-8]基于多时相 NDVI 及特征波段的决策树分类方法，提取出了大豆、玉米和水稻 3 种作物的种植信息，分类总体精度为 85.87%，Kappa 系数为 0.769 6。决策树分类算法[2-4,6-8]快速、高效，通过多级阈值限定，从距离上进行分类。但是由于像元纯度问题，当采用决策树方法时，如果阈值设置过宽，提取面积偏大；阈值设置过窄，提取面积偏小。吴黎等[9-11]利用不同端元在一期影像中体现的波段反射率差异进行混合像元分解提取水稻和大豆的种植面积。对比传统遥感分类方法，此方法虽然可以提高提取精度，但是当所选时相遥感影像上植被的生长状态相似时，植被波段间反射率差异小，难以很好地区分特定农作物，即“同物异谱”和“异物同谱”现象严重。景元书等[12]结合时间序列 MODIS - EVI 指数，采用相似性分析及线性光谱混合模型分析并估算了双季稻的面积。多时相 EVI 或 NDVI 数据[5,13]的时间变化曲线能够充分表现同一作物在不同生育期及不同作物在同一生育期的差异，从而减弱地类波谱混淆现象。

在农作物面积提取时，影响提取面积精度的原因主要是混合像元的存在[14]，特别是在地类边界处和离散地块区，提取精度更低。尤其是在我国家庭联产承包责任制下，面对非常复杂的种植结构，农作物种植面积的提取尤为具有挑战性。鉴于这些问题，本研究首先根据时间序列 NDVI 曲线提供的农作物物候历、种植模式和种植结构信息，构建专家决策树，提取玉米的空间分布范围；然后结合纯净像元指数 PPI 和野外调查数据提取端元的 NDVI 曲线；进而根据不同种植模式玉米地块和不同种植结构地块的 NDVI 曲线的差异性，采用混合像元分解 NDVI 的算法精确、快速地提取保定市 3 县（市）的玉米种植面积，探索玉米种植面积提取新方法。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

涿州市、高碑店市和定兴县都隶属于河北省保定市，位于保定市东北部，北邻北京市，东临廊坊市，在北纬 39°36′ ~ 39°50′、东经 115°30′ ~ 116°15′之间，如图 1 所示。年平均气温 12℃，年降水量 550 mm，属于温带大陆性季风性气候，四季分明，冬季寒冷有

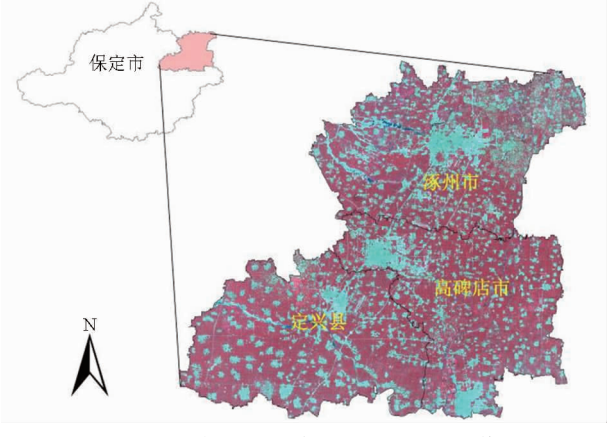


图 1 研究区地理位置（Landsat 8 影像，R（Band 5），G（Band 4），B（Band 3））

Fig. 1 Map of study area

雪，夏季炎热干燥，春季多风沙，秋季凉爽舒适。研究区总面积大约为 2 128.5 km^2，其中涿州市 742.5 km^2，高碑店市 672 km^2，定兴县 714 km^2。该区域地处黄淮平原春、夏玉米种植区，是保定市玉米主要种植地区之一。其中夏玉米根据播种时期的早晚，分为早播夏玉米与铁茬直播夏玉米。早播夏玉米，即在白地播种、蔬菜或豌豆收获后播种的夏玉米；铁茬直播夏玉米，即小麦夏玉米种植模式，是在上茬小麦收获后直接播种的夏玉米。

1.2　数据源与数据预处理

研究区内的玉米根据种植模式不同，分为早播夏玉米、小麦夏玉米和春玉米。整个生育期从 4 月份下旬持续到 10 月份上中旬。根据研究区玉米种植和收获的物候历信息，获取玉米全生育期的 Landsat 8 遥感影像，空间分辨率为 30 m，时间分辨率为 16 d。对全部遥感影像进行筛选，去除含云量较高的影像，最后选出 2014 年 4 月 29 日、5 月 15 日、8 月 19 日、9 月 4 日和 10 月 6 日共 5 期影像用于玉米空间分布和种植面积提取。在遥感影像的预处理过程中，首先对所有的影像进行辐射定标、大气校正，然后根据研究区范围对所有影像进行掩模，最后利用公式

$$V_{NDVI}=\frac{\rho_{NIR}-\rho_{RED}}{\rho_{NIR}+\rho_{RED}} \tag{1}$$

式中　V_{NDVI}——归一化植被指数

ρ_{NIR}——近红外波段的反射率

ρ_{RED}——红光波段的反射率

计算每个时期的 NDVI，并进行 NDVI 最大值合成。

1.3　农作物种植结构调查与分析

本研究根据具体应用需求，结合野外调查和种植业管理司公布的河北省农时农事情况，获得玉米的主要种植模式和物候特点，辅助用于本研究中的玉米种植面积提取。研究区内主要农作物的物候历信息如表 1 所示。

表 1　主要农作物的物候历信息

Tab. 1　Phenology calendar information of main crops in study area

作物	4 月 29 日	5 月 15 日	5 月 31 日	6 月 16 日	7 月 2 日	7 月 18 日	8 月 3 日	8 月 19 日	9 月 4 日	9 月 20 日	10 月 6 日	10 月 22 日
冬小麦	抽穗开花	开花乳熟	开花乳熟	成熟收获								
夏玉米				播种三叶	七叶拔节	七叶拔节	抽雄吐丝	吐丝	吐丝乳熟	乳熟成熟	成熟	收获
春玉米	播种出苗	三叶七叶	七叶	七叶拔节	拔节抽雄	抽雄吐丝	吐丝乳熟	吐丝乳熟	乳熟	乳熟成熟	成熟收获	
水稻	播种	三叶移栽	三叶返青	返青分蘖	分蘖拔节	分蘖孕穗	拔节抽穗	孕穗抽穗	抽穗乳熟	抽穗乳熟	乳熟	乳熟成熟
棉花	播种	出苗三叶	三叶五叶	现蕾	开花	开花	开花	开花吐絮	开花吐絮	开花吐絮	吐絮	吐絮停长
大豆				三叶	分枝	开花	结荚	结荚	鼓粒	鼓粒	成熟收获	
花生		播种分枝	下针分枝	开花	下针	下针	下针	下针	下针成熟	成熟收获		

野外调查数据是玉米种植面积提取方法确定的依据，也是后期方法精度验证的检验数据。课题组分别于 2014 年 5 月 31 日、8 月 19 日和 9 月4 日对河北省涿州市、高碑店市和定兴县进行野外实测点的地类和作物种植类型进行调查，并进行 GPS 定位。野外调查时间点的确定依据研究区内的物候历和玉米种植模式进行：5 月 31 日是小麦乳熟收获期，此时调查既可获得白地、小麦等的实测点分布，又可获得春玉米的实测点分布；8 月 19 日和 9 月 4 日正处于玉米生育期内，这两次的调查结果再结合 5 月 31 日的实测点分布，即可确定早播夏玉米和小麦夏玉米的实测点分布，3 次调查共获得 73 个实测样点，均匀分布于整个研究区。

研究区的主要地物类型包括居民点、道路、水体、树木和农作物。因为玉米跨度的整个生育期都是其余植被生长旺盛期，居民点、道路、水体和其余植被穿插分布在玉米周围，所以如果仅用单一时相的遥感影像提取玉米种植信息会同时存在“同物异谱”、“异物同谱”和混合像元现象。

2　研究方法

2.1　决策树方法提取玉米分布范围

决策树算法的基本思想是通过一些判断条件对原始数据集逐步二分和细化。其中，每一个分叉点代表一个决策判断条件；每个分叉点下有两个叶节点，分别代表满足条件和不满足条件。决策树方法在遥感影像分类提取应用中最显著的特点是快速、高效，该方法最关键的技术是各地类分割阈值的确定。本文根据种植模式和种植结构将研究区分为早播夏玉米、小麦夏玉米、春玉米、非植被、树、水稻和棉花。首先，将各时相 NDVI 按时间先后顺序进行波段叠加并进行最大值合成，且将最大值合成结果作为一个特征波段也叠加进时间序列影像。然后，结合野外实测点数据、先验知识、典型地类在 15 m 分辨率 Landsat 8 融合影像上的目视解译结果，选取感兴趣区，确保不同地类感兴趣区间的分离度都大于 1.85，进而基于多像元统计分析各地类多时相 NDVI 的分割阈值，最后采用决策树方法提取出早

播夏玉米、小麦夏玉米和春玉米的分布范围，各地类 NDVI 阈值的确定情况见图 2。

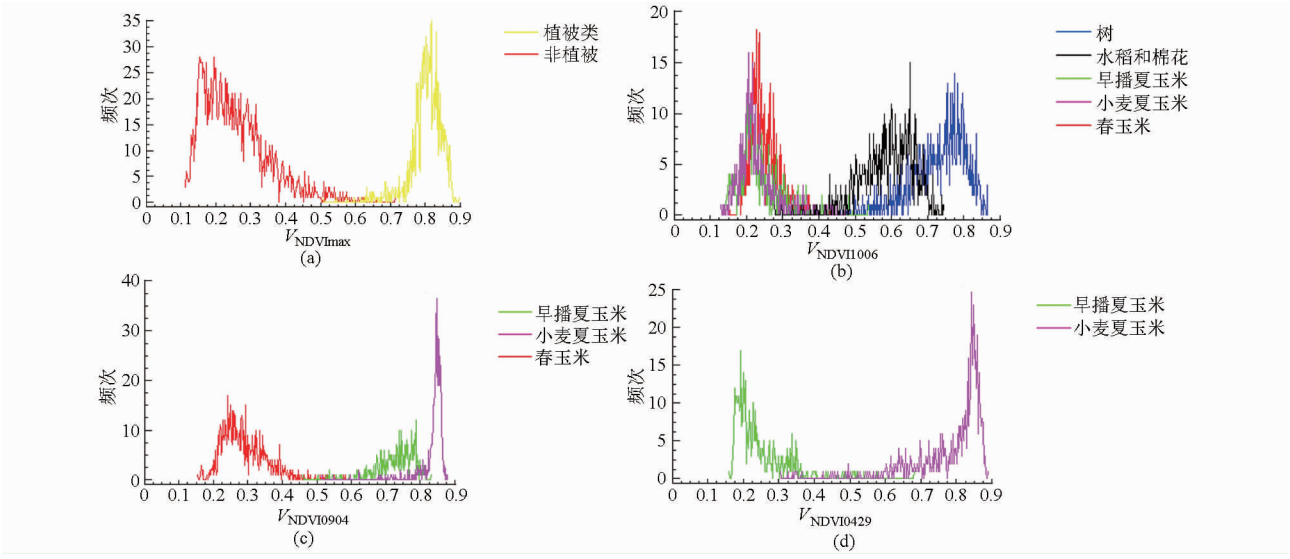


图 2 特定时相的 NDVI 阈值直方图

Fig. 2 Histograms of NDVI threshold in special phase

（a）各类在 NDVI 最大值合成处的阈值直方图 （b）各类在 10 月 6 日的 NDVI 阈值直方图

（c）各类在 9 月 4 日的 NDVI 阈值直方图 （d）各类在 4 月 29 日的 NDVI 阈值直方图

在应用决策树算法时，采用逐级分类排除的思想。首先根据 $V_{NDVImax}$，将非植被类排除，4—10 月份是植被高度覆盖期，非植被类的 NDVI 值相对较低，此时的非植被主要是指居民点、道路、水体和裸地，其中也夹杂有少量在 4—10 月份不会出现高植被覆盖的作物，如蔬菜。根据统计结果设定植被类和非植被类的分割阈值判别条件是 $V_{NDVImax} > 0.6$。其次，排除树、水稻和棉花等非玉米作物。因在 10 月 6 日所有的玉米基本都已收获，根据生长期，此时树、水稻和棉花的 NDVI 反而较大，因此设定玉米和非玉米类的阈值分割条件是 $V_{NDVI1006} < 0.38$。要想排除少量大豆和花生干扰，精确玉米类的提取，还要在 8 月 19 日当所有玉米的 NDVI 值都处于极大值附近时，附加一个阈值分割条件，即 $V_{NDVI0819} < 0.6$。最后，根据玉米不同种植模式和物候历提取早播夏玉米、小麦夏玉米和春玉米。春玉米在 9 月 4 日处于乳熟阶段，因此 NDVI 偏低，而此时夏玉米处于抽丝阶段，因而 NDVI 较大。所以，设定阈值判别条件 $V_{NDVI0904} < 0.55$ 从而提取春玉米。根据夏玉米的种植模式特点，早播夏玉米是在蔬菜、豌豆收获后或白地上播种，小麦夏玉米是在上茬冬小麦收获后直接播种的，因此利用阈值判别条件 $V_{NDVI0429} > 0.48$ 将早播夏玉米和小麦夏玉米进行分割。

2.2 混合像元线性分解模型

按照光谱混合分析方法的不同，混合像元分解模型可以分为线性和非线性两种[15]。线性混合光谱模型是最简单、使用最多的一种混合光谱模型，是采用一种线性关系来表达遥感系统中一个像元内各地物的组分比例与地物的光谱响应，具体公式为

$$N_{i\lambda} = \sum_{k=1}^{n} f_{ki} C_{k\lambda} + \varepsilon_{i\lambda} \tag{2}$$

其中 $\sum_{k=1}^{n} f_{ki} = 1 \quad 0 \leqslant f_{ki} \leqslant 1 \quad n \leqslant m+1$

式中 $N_{i\lambda}$——第 λ 波段第 i 像元的 NDVI 值（已知）

f_{ki}——对应于第 i 像元的第 k 个端元组分所占的分量值（待求）

$C_{k\lambda}$——第 k 个端元组分在第 λ 波段的 NDVI 值（端元提取）

$\varepsilon_{i\lambda}$——残余误差

n——基本端元组分数目

m——可用波段数

该算法是利用最小二乘法的原理求解，用均方根误差（RMS）来检验结果的适合性。当 RMS 较大时，说明线性像元混合模型适用错误，或者选取了错误的端元地类，或者漏选了某些重要的端元组分[16]。

在应用混合像元线性分解算法时最关键的是端元光谱像元的确定。本研究中端元像元的获取主要有两种。一种是采用 MNF 即最小噪声分离变换判别定标后影像数据的内在的维数，分离出噪声。此处采用的影像是各植被覆盖率都较高且影像质量好的 9 月 4 日定标后的影像。在变换后得到的 MNF 特征值曲线中，特征值越高，代表信息量越丰富，因此根据特征值选取前 3 个波段生成纯净像元指数 PPI（Pixel purity index）。纯净像元指数 PPI 是用来选择具有高纯度像元的一个指标[17]。根据前文应用决策树算法提取玉米空间分布时选择的感兴趣

区，并找出每类感兴趣区中 PPI 指数较高的像元。第 2 种方法是在感兴趣区类别中找不到高 PPI 值时，采用野外采样点上的像元，综合上述两种方式获得各类的端元像元。

3　结果与分析

3.1　混合像元分解结果与分析

当植被覆盖度由 25% 增加至 80% 时，其 NDVI 值随植物量的增加呈线性迅速增加，但是当 NDVI 在 0.8 左右时出现饱和现象，线性现象失衡，为了更好地应用混合像元线性分解模型，在保持 NDVI 曲线形态不变的前提下，通过降低 NDVI 的高值阈值恢复线性关系。主要处理方法是将 NDVI 大于 0.8 的，全部降低为 0.8，然后计算端元像元内随时间变化的平均 NDVI 曲线作为标准端元组分 NDVI 曲线，如图 3 所示。其中 5 月 15 日的影像由于受薄云的影响，这一时间点的 NDVI 值比正常值普遍偏小。

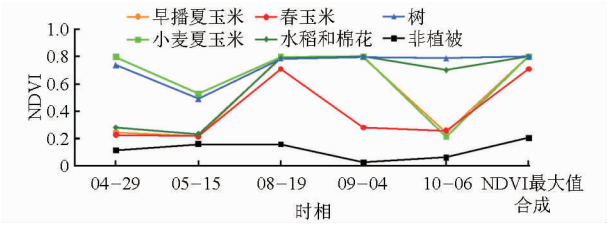


图 3　不同端元组分 NDVI 曲线

Fig. 3　NDVI curves from different endmembers

利用决策树提取的研究区玉米的分布范围做掩膜，根据获得的端元组分 NDVI 曲线，利用混合像元线性分解模型进行分解，可得到 6 幅端元组分丰度图和 1 幅 RMS 误差图。其中早播夏玉米、小麦夏玉米、春玉米和 RMS 误差图如图 4 所示，误差的平均值是 0.013，精度较高。根据早播夏玉米、小麦夏玉米和春玉米的丰度图，算出研究区各类玉米的面积情况。整个研究区共提取出玉米面积 873.89 km^2，其中涿州市提取出玉米 208.72 km^2，高碑店市提取出玉米 292.44 km^2，定兴县提取出玉米 372.73 km^2；在提取出的所有玉米中早播夏玉米 436.08 km^2，小麦夏玉米 396.73 km^2，春玉米 41.08 km^2。在涿州市，西北部主要是早播夏玉米，面积为 95.97 km^2，东南部主要是小麦夏玉米，面积是 84.78 km^2，春玉米主要分布于涿州市中部，面积是 27.97 km^2，也是 3 个地区中春玉米的主要聚集地。在高碑店市，早播夏玉米 166.23 km^2，在该市南部集中分布，小麦夏玉米 118.38 km^2，在该市北部集中分布。在定兴县，早播夏玉米均匀分布，面积为 173.88 km^2，小麦夏玉米主要集中在该县南部，面积为 193.57 km^2。

3.2　玉米种植面积提取结果与精度验证

精度验证从定性评价和定量分析两个方面进行。因“同物异谱”和“异物同谱”现象存在，基于单期时相的分类精度普遍偏低，尤其是植被间的区分度很低时，因此所有参与精度验证的算法结果都是基于时间序列 NDVI 的特征得到的。在定性评价方面，如图 5 所示，其中“决策树 + 混合像元分解”的空间显示结果是比较同一个像元内 3 种玉米的丰

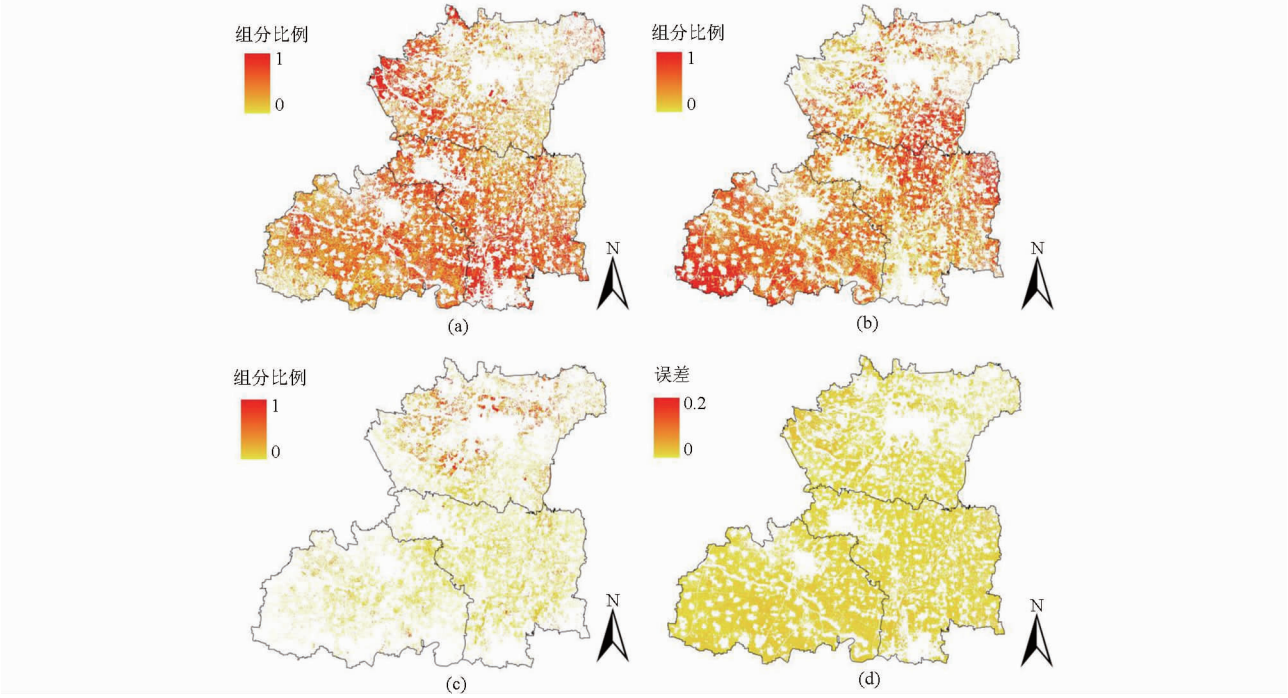


图 4　各类玉米丰度指数分布图

Fig. 4　Abundance index map for all kinds of maize planted in study area

（a）早播夏玉米　（b）小麦夏玉米　（c）春玉米　（d）误差

度,取丰度最大的玉米类作为空间显示类别。从图中看到4 种算法所得到的3 种玉米的空间分布基本一致,早播夏玉米主要分布在高碑店市南部和涿州市西部,春玉米主要分布在涿州市中部,其余是小麦夏玉米。

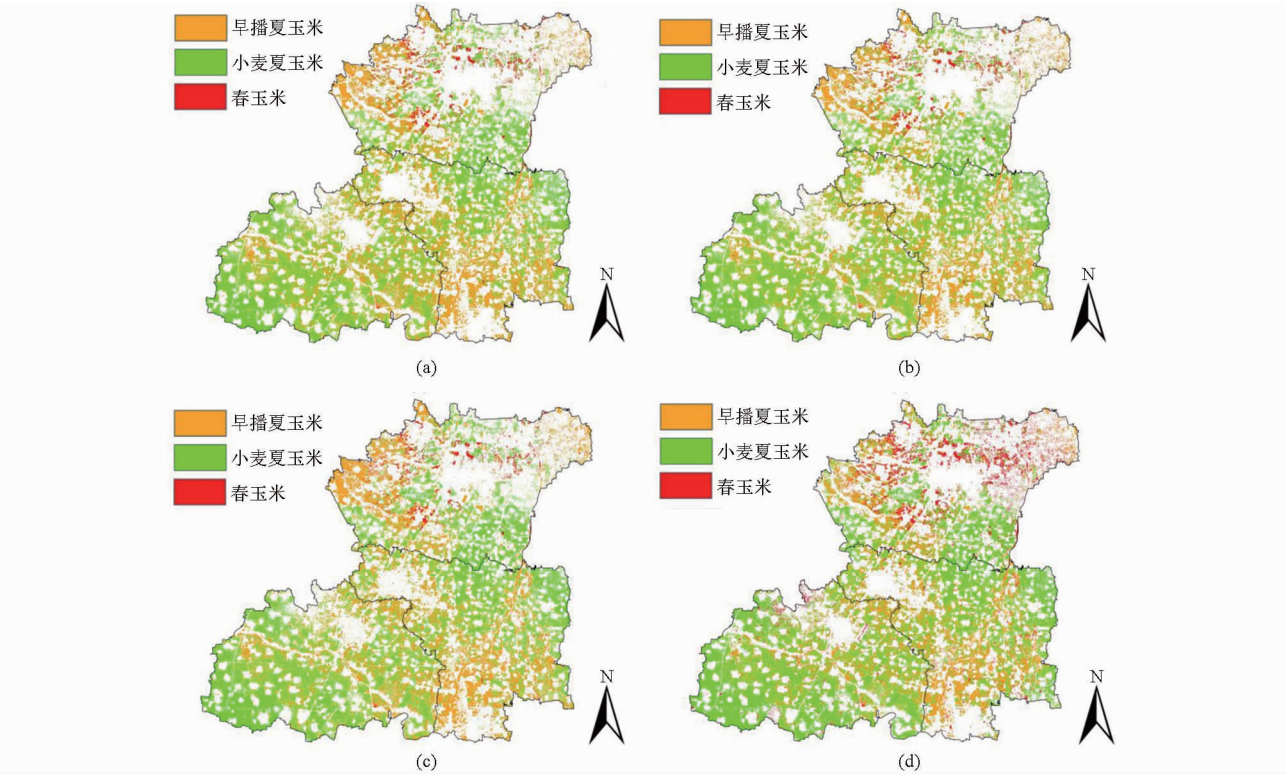


图5 4 种分类算法提取玉米种类的空间分布图

Fig. 5 Extraction results for maize using 4 different classification methods

(a) 决策树 + 混合像元分解法 (b) 决策树法 (c) 波谱角法 (d) 最大似然法

在定量验证方面,通过多指标进行综合定量评价。根据1.3 节所述野外地类调查获得的73 个实测点分布和Landsat 8 融合后的15 m 分辨率解译出的典型地类结果进行分类精度验证,综合评价指标分别为总体分类精度、Kappa 系数、总错分误差和总漏分误差4 个指标,结果如表2 所示。通过分析4 种指标显示的分类精度,最大似然法精度最低。决策树和波谱角法相比,除总漏分误差大于波谱角法外,其余3 种指标都优于波谱角。但是通过对比分析2 种算法的错分、漏分情况发现,决策树错分、漏分误差来源于3 种玉米之间的区分和混合,原因是在运用决策树算法设定3 种玉米的分割阈值时,类型转变的过渡性阈值区间较大,可参见图3c、3d,另一个原因是混合像元的存在使时间序列NDVI 表现的类间特征不明显,因而阈值设置过窄漏分的误差就越大;然而波谱角的错分、漏分误差来源于玉米类和非玉米类像元间的区分和混合,原因是波谱角可以很好的通过波谱曲线间的形状进行分类,但是不能很好地控制距离,从而使非玉米类的像元部分被错分为玉米。决策树 + 混合像元分解与决策树方法相比,虽然二者的总体分类精度相差不大,但是就总错分和总漏分误差而言,前者优于后者。原因是混合像元线性分解NDVI 曲线,其实是考虑的波谱形状的分解,再耦合决策树方法可以修正单独使用决策树从距离角度上进行分类的误差。换言之,决策树 + 混合像元分解耦合了决策树和波谱角分别从

表2 玉米种植面积精度验证结果

Tab. 2 Accuracy assessment results for maize planted area extraction

指标	5 年平均(2009—2013 年)	决策树 + 混合像元分解	决策树	混合像元分解	波谱角	最大似然
面积/km^2	862.23	873.89	973.80	1 033.73	984.50	1 022.65
总体分类精度/%		98.45	98.23		96.95	95.14
Kappa 系数		0.976 2	0.972 9		0.954 0	0.926 6
总错分误差/%		5.19	6.56		16.21	23.69
总漏分误差/%		9.41	10.43		9.54	20.79

距离和波谱形状考虑的优势。此外，定量验证还将 5 种算法提取的玉米面积与研究区连续 5 年的统计年鉴数据（2009 年 832.50 km^2，2010 年 846.21 km^2，2011 年 872.89 km^2，2012 年 884.07 km^2，2013 年 875.5 km^2）进行对比。混合像元分解因遍历研究区中的每一个像元，故提取面积偏大。新算法在运用决策树方法获得玉米空间分布趋势的前提下，再耦合混合像元线性分解进行面积精确提取，精度明显高于其余几类。

4　结束语

鉴于我国农作物种植地块较小、种植面积提取问题多、精度低的问题，本研究以河北省保定市为研究区，探索了耦合决策树分类算法和混合像元分解算法快速、精确提取玉米种植面积的方法。玉米的整个生育期都是其余植被的生长茂盛期，利用单一时相的遥感影像很难将其种植面积精确提取出来，尤其是在以中等分辨率遥感影像为数据源的情况下，提取过程存在的问题更多。针对这些问题，本研究选择以长时间序列 Landsat 8 影像为数据源，充分利用不同地类物候历、耕作模式和种植结构的差异带给不同地类时间序列 NDVI 曲线上大的可分离度，采用 NDVI 曲线参与分类，从而解决基于单一时相影像分类上的“同物异谱”和“异物同谱”问题。决策树分类算法通过多阈值限定，快速、高效，混合像元分解通过计算端元组分丰度可避免忽略亚像元下的分类信息，因此 2 种算法的耦合，既可以充分利用长时间序列影像的优势，又可以解决中分辨率影像在精确提取小地块区农作物种植面积方面的问题。精度评价结果表明，利用该方法可以精确提取玉米种植面积。所以，耦合后的算法在区域物候条件差异不大的情况下可以用于大范围的农作物提取，可作为将来业务化精确提取玉米种植信息的方法之一。此外，本算法具有移植性，可以将算法进一步推广到低分辨率的影像如 MODIS 中进行应用。通过对比多种算法提取玉米的分类精度，结果表明把像元的分类属性定位为耦合算法分解得到的丰度值最大的端元类型，并进行空间分布显示的精度最高，因此这种空间显示对了解农业种植结构，辅助政府部门做出宏观决策更有价值。目前，该研究存在的问题是：用于精度验证的测试样本主要来自于野外调查，野外调查样本受调查者可达性的限制，因此测试样本的分布和数量对评价精度可能会有一定程度的影响。再者，基于决策树算法的阈值设定对分类精度影响较大，尤其是当过渡性变化阈值区间较大时，因此下一步可以探索如何利用模糊数学方法在过渡性变化阈值区间内确定分类的分割阈值。此外，本研究采用的是带全约束条件的混合像元分解模型，考虑到在 30 m 分辨率的像元内，不可能有过多个端元组分，因此下一步可以耦合基于可变端元的混合像元分解模型加以改进。

参　考　文　献

1　郭庆海. 中国玉米主产区的演变与发展[J]. 玉米科学，2010，18(1)：139－145.
Guo Qinghai. The development and evolution of the major maize producing areas in China[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(1): 139－145. (in Chinese)

2　杨小唤，张香平，江东. 基于 MODIS 时序 NDVI 特征值提取多作物播种面积的方法[J]. 资源科学，2004，26(6)：17－22.
Yang Xiaohuan, Zhang Xiangping, Jiang Dong. Extraction of multi-crop planting areas from MODIS data[J]. Resources Science, 2004, 26(6): 17－22. (in Chinese)

3　郭伟，赵春江，顾晓鹤，等. 乡镇尺度的玉米种植面积遥感监测[J]. 农业工程学报，2011，27(9)：69－74.
Guo Wei, Zhao Chunjiang, Gu Xiaohe, et al. Remote sensing monitoring of maize planting area at town level[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 69－74. (in Chinese)

4　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 CASE, 2008, 24(Supp. 2): 191－195. (in Chinese)

5　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)

6　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)：218－273.
Huang Qing, Tang Huajun, Zhou Qingbo, et al. Remote-sensing based monitoring of planting structure and growth condition of major crops in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 218－273. (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 water wheat in China based on MODIS data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 163－167. (in Chinese)

（下转第 301 页）

(UAV) imagery for rangeland monitoring[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,2010,48(6):661 - 672.

9 张珍梅. 无人飞行器遥感影像飞行质量检查及影像快速拼接方法研究[D]. 北京:首都师范大学,2011.
Zhang Zhenmei. Study on remote sensing images flying quality checking and quick mosaicbased on UAV system[D]. Beijing: Capital Normal University,2011. (in Chinese)

10 李胜睿,李翠华. 基于梯度滤波的彩色图像快速拼接与实现技术[J]. 厦门大学学报,2003,42(1):29 - 34.
Li Shengrui, Li Cuihua. Fast stitching algorithm & implimentation for color images based on grad-filtering[J]. Journal of Xiamen University,2003,42(1):29 - 34. (in Chinese)

11 Zhou Guoqing . Near real time ortho rectification and mosaic of small UAV video flow for time critical event response[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2009,47(3):739 - 747.

12 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91 - 110.

13 Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra,1999:1150 - 1157.

14 袁修孝, 朱武, 武军郦, 等. 无地面控制 GPS 辅助光束法区域网平差[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2004, 29(10): 852 - 857.
Yuan Xiuxiao, Zhu Wu, Wu Junli, et al. GPS-supported bundle block adjustment without ground control points[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(10): 852 - 857. (in Chinese)

15 袁修孝, 季顺平, 谢酬. 基于已知定向参数影像的光束法区域网平差[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2005, 30(11): 955 - 959.
Yuan Xiuxiao, Ji Shunping, Xie Chou. Bundle block adjustment based on imagery given orientation parameters[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(11): 955 - 959. (in Chinese)

(上接第 295 页)

8 何诚,董志海,张思玉,等. 基于决策树系统的遥感植被分类技术[J]. 测绘科学,2014,39(1):83 - 86.
He Cheng, Dong Zhihai, Zhang Siyu, et al. Vegetation classification technology of hyperspectral remote sensing based on decision tree tool[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(1): 83 - 86. (in Chinese)

9 吴黎,张有智,解文欢,等. 基于 TM 的混合分解模型提取水稻种植面积研究[J]. 农机化研究,2013,35(2):44 - 47.
Wu Li, Zhang Youzhi, Xie Wenhuan, et al. The mixture model extraction of rice planted area based on TM data[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(2): 44 - 47. (in Chinese)

10 李霞,王飞,徐德斌,等. 基于混合像元分解提取大豆种植面积的应用探讨[J]. 农业工程学报,2008,24(1):213 - 217.
Li Xia, Wang Fei, Xu Debin, et al. Application research on the method for extracting soybean covered areas based on the pixel unmixing[J]. Transactions of the CSAE,2008, 24(1): 213 - 217. (in Chinese)

11 Wang Lei, Satoshi Uchida. Use of linear spectral mixture model to estimate rice planted area based on MODIS data[J]. Rice Science, 2008, 15(2): 131 - 136.

12 景元书,李根,黄文江. 基于相似性分析及线性光谱混合模型的双季稻面积估算[J]. 农业工程学报,2013,29(2):177 - 183.
Jing Yuanshu, Li Gen, Huang Wenjiang. Estimation of double cropping rice planting area using similar index and linear spectral mixture model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 177 - 183. (in Chinese)

13 Zhang Jiahua, Feng Lili, Yao Fengmei. Improved maize cultivated area estimation over a large scale combining MODIS - EVI time series data and crop phenological information [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2014,94:102 - 113.

14 Lv Tingting, Liu Chuang. Study on extraction of crop information using time-series MODIS data in the Chao Phraya Basin of Thailand[J]. Advances in Space Research, 2010,45(6):775 - 784.

15 Hu Y H, Lee H B, Scarpace F L. Optimal linear spectral unmixing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999,37(1):639 - 644.

16 卢远,林年丰. 半干旱地区土地退化遥感动态监测方法——以吉林省通榆县为例[J]. 干旱区资源与环境,2004,18(1): 94 - 98.
Lu Yuan, Lin Nianfeng, A method of remote sensing dynamic monitoring of land degradation in semi-arid region—a case study: Tongyu County in Jilin Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(1): 94 - 98. (in Chinese)

17 王立辉,黄进良,孙俊英. 基于线性光谱混合模型的油菜种植面积遥感监测方法研究[J]. 遥感信息,2010(3):55 - 59.
Wang Lihui, Huang Jinliang, Sun Junying. Study on remote sensing monitoring of rape acreage based on linear spectral mixture model[J]. Remote Sensing Information, 2010(3): 55 - 59. (in Chinese)