

基于时空数据融合的县域水稻种植面积提取

牛海鹏^{1,2} 王占奇¹ 肖东洋¹

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000;
2. 河南理工大学黄河生态文明与高质量发展研究院, 焦作 454000)

摘要: 受云雨天气和卫星自身回访周期的影响, 县域尺度水稻种植面积的提取往往难以获取完整时间序列的高空间分辨率影像, 利用单一 MODIS 数据导致提取精度不高。针对上述问题以河南省优良水稻种植区原阳县为例, 采用增强型自适应反射率时空融合模型(Enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model, ESTARFM), 融合中高分辨率的 Landsat 数据和高时间分辨率的 MODIS 数据, 获取完整时间序列的归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)数据, 经过 TIMESAT 滤波平滑处理后, 利用研究区内水稻与其他地物的时序 NDVI 曲线, 设置合理的 NDVI 阈值, 采用决策树分类的方法提取水稻种植面积。结果显示, 总体分类精度为 92.23%, Kappa 系数为 0.9043。提取的水稻制图精度为 96.73%, 用户精度为 93.51%, 说明 ESTARFM 模型能很好地融合出高空间分辨率影像, 解决数据缺失问题, 可为县域尺度水稻种植面积提取提供参考。

关键词: 水稻; 种植面积提取; 县域尺度; 增强型自适应反射率时空融合模型; 数据融合

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0156-08

OSID:



Paddy Rice Planting Area Extraction in County-level Based on Spatiotemporal Data Fusion

NIU Haipeng^{1,2} WANG Zhanqi¹ XIAO Dongyang¹

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

2. Institute of Ecological Civilization and High-quality Development of Yellow River,

Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The extraction of rice planting area in county-level depends on the medium and high spatial resolution images of the complete time series. However, it is often difficult to obtain the high spatial resolution images of the complete time series due to the cloud and rain weather and the satellite's own visit cycle. Thus causing the problem of low precision in rice planting area based on extraction by single MODIS data. Taking Yuanyang County, an excellent rice planting area in Henan Province, as an example, an enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model (ESTARFM) was used to fuse mid- and high-resolution Landsat data and high-time-resolution MODIS data to obtain the normalized difference vegetation index (NDVI) data of the complete time series. After smoothing by TIMESAT filtering, the characteristics of time series NDVI curves of rice and other features in the study area were used to set reasonable NDVI thresholds. The decision tree classification method was used to extract the rice planting area. The results showed that the overall classification accuracy was 92.23% and the Kappa coefficient was 0.9043. The producer accuracy of rice extraction was 96.73% and the user accuracy was 93.51%, which indicated that the ESTARFM model can well integrate high spatial resolution images, solve the problem of missing data, and provide an effective reference for extracting rice planting area in a county-level.

Key words: paddy rice; planting area extraction; county-level; enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model; data fusion

收稿日期: 2019-12-26 修回日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371524)、河南理工大学创新型科研团队项目(T2018-4)和河南省科技攻关项目(182102110260)

作者简介: 牛海鹏(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事土地资源管理研究,E-mail: niuhaipeng@126.com

0 引言

水稻是世界第三大粮食作物^[1]。中国是世界上最大的水稻生产国,水稻产量在中国农业生产中占有重要地位^[2]。黄河两岸地区是河南省水稻种植区。随着自然、社会和经济的发展,原阳县水稻种植面积从约 30 000 hm² 下滑至约 18 000 hm²。因此,适时、准确监测水稻种植区,对粮食政策制定、粮食安全以及农业发展具有重要意义^[3]。

随着卫星技术的发展,利用遥感技术监测水稻种植面积已经得到广泛应用。目前最常用的提取水稻等农作物空间分布的遥感卫星为 Landsat 数据和 MODIS 数据^[4-7]。文献[8]使用多时段 MODIS 影像提取了南亚和东南亚地区的水稻分布信息,文献[9]基于多时相 MODIS 数据提取了河南省水稻种植区的分布。文献[10]利用 Landsat 数据并结合农户调查,提取了翻阳湖平原水稻主产区的水稻种植区。Landsat 数据具有较高的空间分辨率,但是时间分辨率较低,并且容易受云雨天气影响,无法获取作物关键生长期的时序数据^[11],因此只根据 Landsat 数据进行农作物区提取会受到数据缺失的限制。MODIS 数据具有 36 个光谱波段,时间分辨率较高,但其空间分辨率低,存在大量混合像元,对地面的细节表征能力不强^[12],使基于 MODIS 数据的农作物提取只能在大尺度区域上取得较好的效果。

近年来,国内外学者针对遥感影像时空融合展开了研究,并取得一些成果^[13-15]。文献[16]根据像元的空间相关性和光谱相似性,提出一种自适应遥感影像融合模型(Spatial and temporal adaptive reflectance fusion model, STARFM),该模型能较准确预测出影像的反射率。文献[17]提出了反射率变化的时空自适应融合算法(Spatial temporal adaptive algorithm for mapping reflectance change, STAARCH)。文献[18]在 STARFM 模型的基础上提出 ESTARFM (Enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model)模型,该模型能通过时间和光谱分离理论分析反射率的变化趋势,提高融合模型预测 Landsat 数据的精度。文献[19]基于类别反射率和类内像元反射率的时间变化特征,提出了 STDFM (Spatial and temporal data fusion model)模型。文献[20]对 STDFM 模型进行改进,提出了 ESTDFM (Enhanced spatial and temporal data fusion model)模型。文献[21]对 5 种主流遥感数据时空融合模型进行对比实验,结果表明,ESTARFM 模型的融合效果最好,更能反映地物的细节特征。

利用时空融合模型融合 Landsat 与 MODIS 数据对水稻种植面积进行提取的方法值得研究。本文以河南省沿黄稻区原阳县为例,基于 ESTARFM 模型,对 Landsat 和 MODIS 影像进行融合,构建完整的时序 Landsat 数据,计算得到完整的时序 NDVI 曲线,采用决策树分类的方法进行水稻种植区域的提取,以期在县域尺度上应用 ESTARFM 模型提取水稻种植面积取得理想的结果,为综合利用高空间分辨率 Landsat 数据和高时间分辨率 MODIS 数据进行农作物遥感识别和监测提供一定的实验基础。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

原阳县隶属河南省新乡市,地处豫北平原,位于 113°36′~114°15′E,34°55′~35°11′N 之间,区域总面积 1 022 km²。南邻黄河,北面是余河通道,地势从西南至东北呈逐渐降低趋势,地貌属于黄河冲积平原。农业以小麦、水稻、玉米为主,其中水稻种植以一季稻为主,每年 5 月上旬育苗播种,10 月中上旬收割。

1.2 数据与预处理

空间分辨率为 30 m 的 Landsat 数据(表 1)来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS),下载 2015 年品质较好、云量覆盖小的影像。Landsat8 OLI 影像已经基于地形数据进行几何校正处理,因此本次实验中不再对 Landsat 数据进行几何校正。投影坐标系为 UTM - WGS84 坐标系,利用 ENVI 5.3 软件对影像进行辐射定标后,使用 FLAASH 模型进行大气校正。

表 1 遥感数据类型及获取日期

Tab. 1 Remote sensing data types and acquisition date

数据类型	行列号(中心经纬度值)	日期
Landsat8 OLI	124/36	2015-05-25, 2015-07-28、
		2015-08-13, 2015-09-14、 2015-10-16
MODIS13Q1	h27/v05	全年共 23 期

全年共 23 期的空间分辨率为 500 m 的 MODIS13Q1 数据(表 1)来源于 NASA 网站(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search>)。对 MODIS 影像利用 MRT 工具(MODIS reprojection tool)重投影为 UTM - WGS84 投影,把 HDF 格式转换为 GEOTIFF 格式,采用双线性内插法(Bilinear)将影像重采样为 30 m 分辨率。处理后,影像与 Landsat 具有相同的投影方式、分辨率和像元尺寸。对 Landsat 与 MODIS 的对应波段按顺序一一对应,

如表2所示。

表2 Landsat8 OLI 与 MODIS 数据波段设置及对应关系

Tab.2 Band settings of MODIS and Landsat8 images

Landsat8 OLI 波段	波长范围/nm	MODIS 波段	波长范围/nm
2 (Blue)	450 ~ 515	3 (Blue)	459 ~ 479
4 (Red)	630 ~ 680	1 (Red)	620 ~ 670
5 (NIR)	845 ~ 885	2 (NIR)	841 ~ 876

2 研究方法

本文采用 ESTARFM 模型将 Landsat8 OLI 数据与 MODIS13Q1 数据进行融合,从而重构出完整时序的融合 Landsat 数据;计算得到融合影像的 NDVI 数据,通过 TIMESAT 软件中 savitzky - Golay (S - G) 滤波法进行平滑降噪;得到 6 种主要地物的 NDVI 曲线,根据 6 种地物的曲线特征建立专家决策树进行分类,进而提取出水稻种植区域。具体工作流程如图 1 所示。

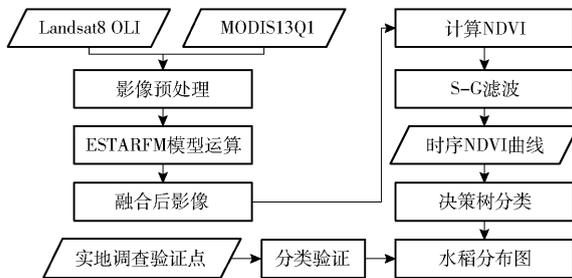


图1 技术流程图

Fig.1 Flow chart of technical structure

2.1 ESTARFM 时空数据融合模型

本文采用的 ESTARFM 模型是在 STARFM 模型基础上改进的。假设在理想情况下: Landsat 和 MODIS 影像之间的反射率差异只存在系统偏差,并且 2 个时间的影像没有产生较大的差异,此时 ESTARFM 模型预测融合影像的公式为

$$F(x, y, t_p, B) = F(x, y, t_0, B) + a(C(x, y, t_p, B) - C(x, y, t_0, B)) \quad (1)$$

式中 F ——Landsat 影像的反射率

(x, y) ——像元位置坐标

B ——影像参与计算的波段

C ——MODIS 影像的反射率

t_p, t_0 ——影像获取的时间

a ——进行线性回归时的转换系数,由传感器之间的系统偏差确定

由于 MODIS 影像中含有大量的混合像元,此时式(1)不成立。文献[22]提出假设将混合像元的反射率建模表示为该像元中存在的不同土地覆盖成分反射率的线性组合,其权重由其像元内混合土地覆盖的区域覆盖率决定。此时模型预测公式为

$$F(x, y, t_p, B) = F(x, y, t_0, B) + v(x, y)(C(x, y, t_p, B) - C(x, y, t_0, B)) \quad (2)$$

式中 $v(x, y)$ ——对 Landsat 和 MODIS 影像同一像元进行线性回归得到的转换系数

考虑到相邻的同类像元具有相似的反射率变化,文献[16]提出一种移动窗口的方法,移动窗口用于搜索窗口内的相似像元,然后将相似像元的信息集成到所需预测的 Landsat 反射率计算中,此时模型预测公式为

$$F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) = F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_0, B) + \sum_{i=1}^N W_i V_i (C(x_i, y_i, t_p, B) - C(x_i, y_i, t_0, B)) \quad (3)$$

式中 $(x_{w/2}, y_{w/2})$ ——搜索窗口中心坐标

N ——包括中央预测像元的相似像元的数目

W_i ——第 i 个相似像元的权重

V_i ——第 i 个相似像元的转换系数

(x_i, y_i) ——第 i 个相似像元的坐标

选择 2 个不同时刻 m 和 n 的 Landsat 和 t_p 时刻的 MODIS 影像进行预测融合,用 m 时刻的 Landsat 影像和在 P 时刻的 MODIS 影像预测 P 时刻的 Landsat 影像反射率,用 n 时刻的观测数据预测 P 时刻的 Landsat 影像反射率。结果分别记为 $F_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B)$ 和 $F_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B)$ 。通过 2 种预测结果的加权组合,可以获得更精确的 P 时刻反射率。因此在这种情况下,为 Landsat 影像输入设置更大的时间权重是合理的。因此模型公式为

$$T_k = \frac{1}{\left| \sum_{j=1}^W \sum_{l=1}^W C(x_j, y_l, t_k, B) - \sum_{j=1}^W \sum_{l=1}^W C(x_j, y_l, t_p, B) \right|} \sum_{k=m,n} \frac{1}{\left| \sum_{j=1}^W \sum_{l=1}^W C(x_j, y_l, t_k, B) - \sum_{j=1}^W \sum_{l=1}^W C(x_j, y_l, t_p, B) \right|} \quad (k=m, n) \quad (4)$$

最终模型预测 P 时刻的 Landsat 影像反射率计算公式为

$$F(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) = T_m F_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) + T_n F_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p, B) \quad (5)$$

2.2 融合影像数据的时序 NDVI 曲线

归一化植被指数 (NDVI) 是用于表达植被生长状况、覆盖情况的参数。本文利用 2015 年已有的质量较好的 Landsat 影像和 ESTARFM 融合预测出其他对应时间的 Landsat 融合影像,通过 ENVI 5.3 的波段运算,可以得到全年 23 期的 NDVI 数据。由于原始 NDVI 时序数据受噪声和空值的影响较大^[23],造成 NDVI 时序曲线出现不规则的波动,所以需要 NDVI 时间序列数据进行平滑降噪处理。本实验

利用 TIMESAT 软件对构建的 NDVI 时序数据进行滤波, 该软件有非对称高斯函数拟合、双 Logistic 函数拟合和 S-G 滤波法, 在本次研究中, 通过多次实验对比发现, S-G 滤波方法基于滑动窗口的平均滤波, 以局部拟合为主, 有较强的细节拟合能力, 能有效地去除时间序列数据中的噪声, 保留原始时序曲线的有效信息^[24-25]。因此本文采用 S-G 滤波方法对 23 期的 NDVI 数据进行滤波得到时序 NDVI 曲线。

3 结果分析

3.1 ESTARFM 时空融合模型结果与精度评价

根据实验数据, 对 ESTARFM 模型运行结果进行精度评价, 并与 STARFM 模型运行结果进行对比。把第 209 天和第 257 天的 Landsat 数据和 MODIS13Q1 数据、第 225 天的 MODIS13Q1 数据作为 ESTARFM 模型的输入数据; 把第 257 天的 Landsat 数据和 MODIS13Q1 数据、第 225 天的 MODIS13Q1 数据作为 STARFM 模型的输入数据; 融合预测出第 225 天的 ESTARFM 融合数据和 STARFM 融合数据; 以此融合数据与实际第 225 天的 Landsat 数据做对比, 以显示 ESTARFM 模型的预

测精度。影像数据以 R(Blue)G(Red)B(NIR) 假彩色合成。

选取其中 3 块对比明显且具有代表性的区域(建筑物、水体、植被、农作物等)进行对比, 如图 2 所示。在目视解译的基础上, ESTARFM 模型时空融合的效果相比 STARFM 模型效果更好, 各种地物大体上纹理清晰, 轮廓特征比较准确, 与原始影像在空间上基本保持一致。在图 2 中标记区域可以看出, 相对于 STARFM 模型, ESTARFM 模型的融合结果更加准确, 与真实 Landsat 影像更具有有一致性。只有小部分纹理比较粗糙, 这是由于在构建融合数据时, 使用不同时刻 Landsat 数据和 MODIS 数据存在时相的差异, 这会造成融合影像与真实影像间的偏差。

为进一步验证 ESTARFM 模型的融合预测效果, 选取融合出的第 225 天的影像, 分 3 个波段与原始影像进行对比, 获得散点图(图 3), 从图 3 看出散点基本都在 1:1 趋势线的周围, 计算真实影像与融合影像在蓝波段、红波段和近红外波段的决定系数 R^2 分别为 0.824 6、0.920 3、0.940 2。决定系数 R^2 都在 0.82 以上, 且在红波段和近红外波段达到 0.92 以上, 表明真实反射率与融合预测的反射率相关程度较高, 因此证实了 ESTARFM 模型融合预测精度

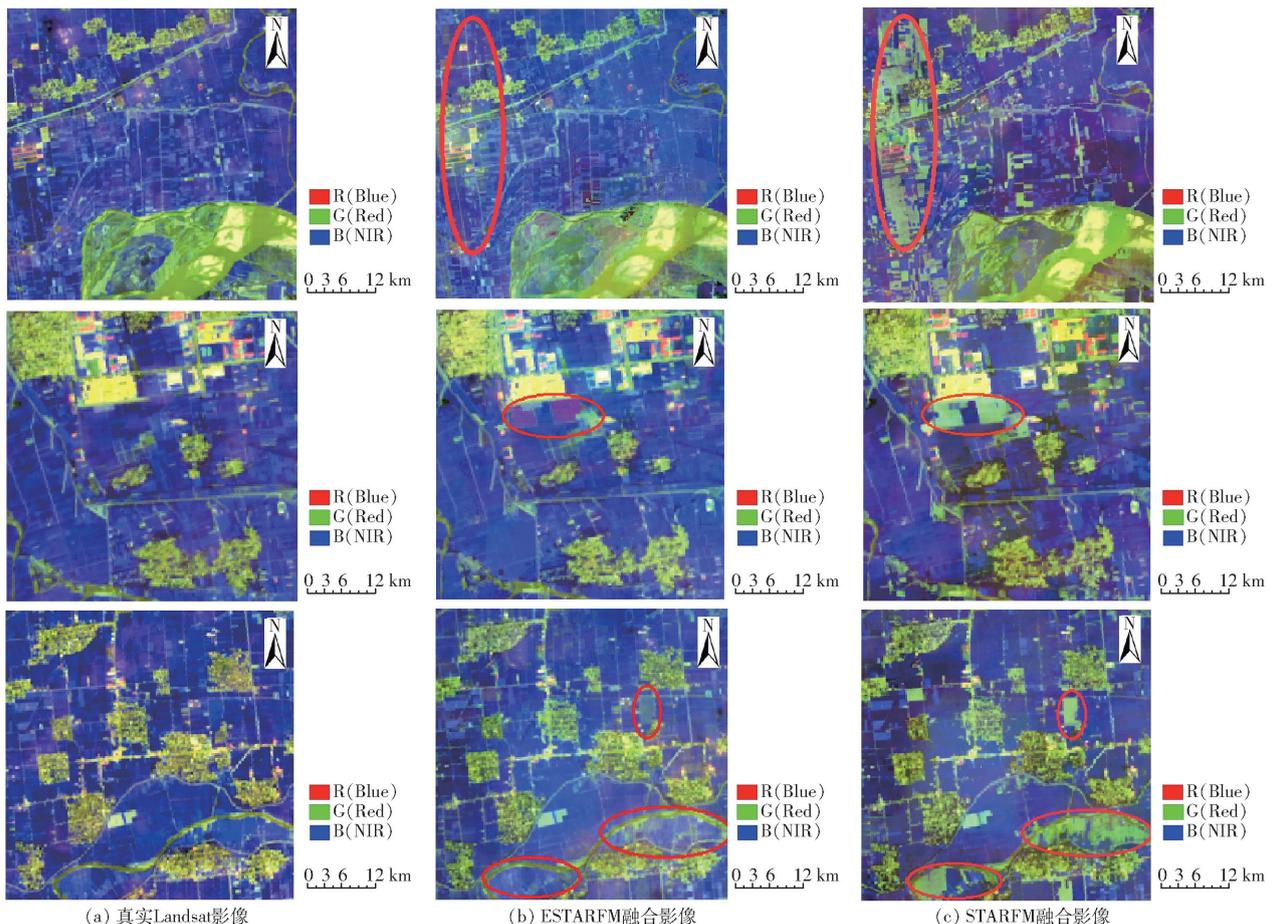


图 2 真实 Landsat 影像与 ESTARFM 模型融合影像以及 STARFM 模型融合影像对比

Fig. 2 Comparisons of real Landsat image with ESTARFM model fusion image and STARFM model fusion image

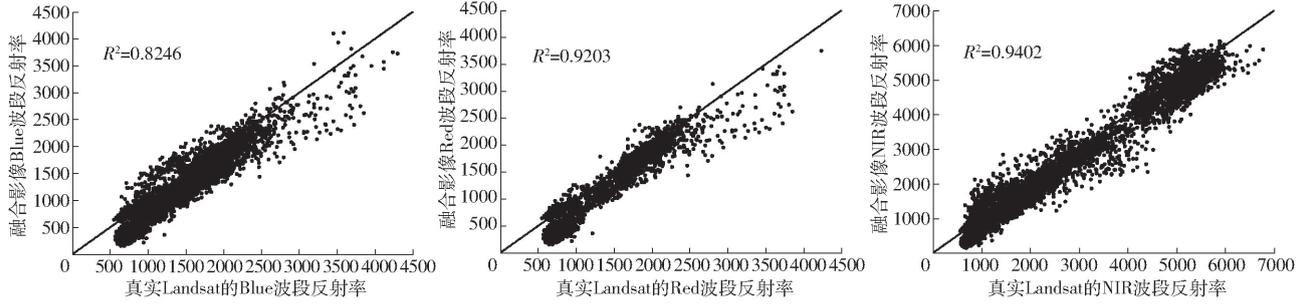


图3 各波段融合结果精度分析

Fig. 3 Accuracy analysis of fusion results at each band

较高,能取得较好的融合效果,可以作为研究区水稻面积提取的数据依据。

3.2 时序 NDVI 曲线

结合实地调研与 Google Earth 影像目视解释,将原阳县的主要地物分为 6 类:建筑用地、裸地、水体、林地、小麦-水稻以及小麦-玉米。对计算得到的 2015 年内 23 个时相的 NDVI 数据,利用 TIMESAT 软件中的 S-G 滤波函数对时序 NDVI 数据进行平滑去噪处理。利用实地调研样点,得到每种地物的 NDVI 时序曲线,如图 4 所示。

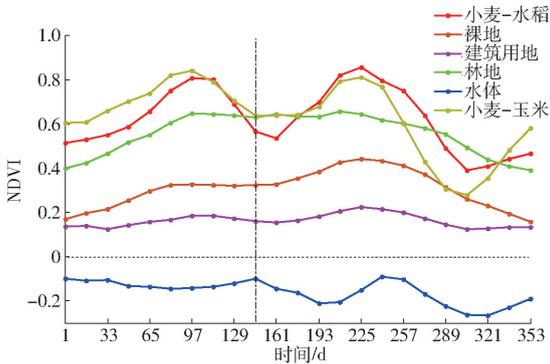


图4 主要地物时序 NDVI 曲线

Fig. 4 Time series NDVI curves of main features

从图 4 可以看出:主要作物为小麦-水稻轮作与小麦-玉米轮作,一年有 2 个波峰,在 5 月中下旬小麦成熟,此时收割小麦造成在儒略日第 145 天左右 NDVI 出现下降至波谷,并且由于水稻处于生长初期,稻田中含有大量的水,因此稻田的 NDVI 相比玉米的 NDVI 呈现出更低的现象;随后水稻和玉米逐渐生长,在 7 月下旬至 8 月上旬 NDVI 呈现波峰。因此说明 ESTARFM 模型融合影像得到的时序 NDVI 曲线与实际作物 NDVI 变化情况相一致,能够较好地反映地物的季节性变化情况,为后续提取水稻及其他地物信息提供数据基础。

3.3 主要地物类别的 NDVI 阈值设置

根据各个地物 NDVI 曲线显示不同的特征,本文利用设置 NDVI 阈值的方法,建立分层决策树的分类方法对主要地类进行提取。具体算法如图 5 所示。

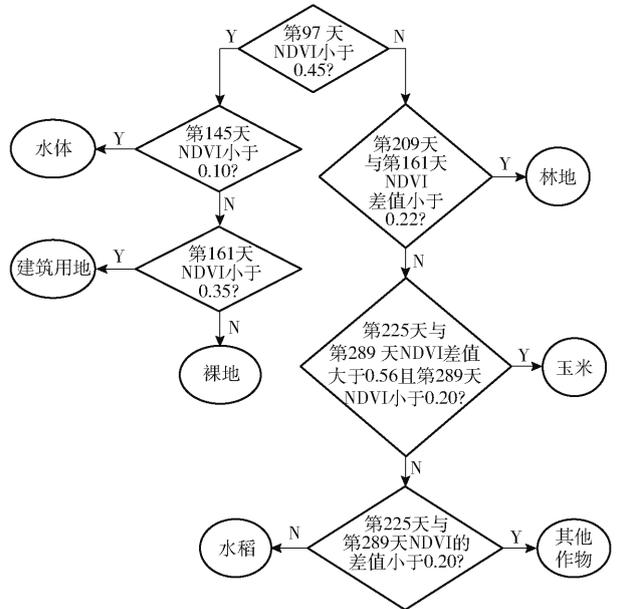


图5 分类决策树

Fig. 5 Classification decision tree

(1)由图 4 的 NDVI 时序曲线可知,植被和非植被的曲线特征差别比较明显。非植被地物全年趋于平缓,且全年的 NDVI 相对于植被的 NDVI 明显呈现较低的水平。在第 97 天时植被与非植被差异最明显,具有较好的区分性。因此利用第 97 天的 NDVI 小于 0.45 作为植被与非植被用地的阈值。

(2)水体的 NDVI 一年中大部分都为负值,虽然有少数水体像元在第 145 天呈现出正值,但都小于 0.10,因此用第 145 天的 NDVI 小于 0.10 作为水体和建筑用地、裸地的阈值。

(3)建筑用地和裸地的时序 NDVI 曲线大体趋势相似,都呈现为较低值的水平。但是裸地在春夏交替时期,呈现出增长的趋势,原因是裸地在这个时期会生长出一些野生绿色植物。因此可以用第 161 天的 NDVI 是否小于 0.35 作为判别建筑用地和裸地的阈值。

(4)林地与农作物的 NDVI 曲线相比,林地的峰值持续时间较长,呈现峰值后,NDVI 没有出现较大的波动,与水稻、玉米等农作物的时序 NDVI 曲线有明显的区别,主要农作物水稻和玉米的 NDVI 在

5月下旬至6月上旬呈现最低值,在7月下旬至8月上旬呈现峰值,因此利用波峰与波谷的差值区分林地与农作物。分别选取100个林地与农作物的样点,求取NDVI平均值,计算第209天与第161天的NDVI差值,经反复实验,对比发现,利用第209天与第161天的NDVI差值小于0.22时分类效果最好。

(5)由图4可以看出,水稻、玉米在生长初期的NDVI较低,并且水稻在生长初期田间有大量的水,NDVI比玉米更低,在7月下旬至8月上旬同时呈现峰值,且水稻的NDVI峰值比玉米略高,并且在9月下旬至10月上旬,水稻和玉米成熟,NDVI迅速下降,但下降后,水稻的NDVI比玉米的高,玉米的NDVI基本都在0.20以下,因此利用第225天与第289天NDVI的差值大于0.56作为判别玉米和水稻的阈值,第225天与第289天NDVI的差值小于0.20的判别为其他作物。

3.4 分类结果及精度验证

根据研究区内水稻与其他主要地物的时序NDVI曲线特征,利用专家决策树分类的方法,对研究区进行土地利用分类,提取出水稻种植区域。具

表3 分类结果精度评价

Tab.3 Classification result accuracy evaluation

类型	水稻	玉米	建筑用地	林地	裸地	水体	总计	用户精度/%
水稻	562	5	0	33	1	0	601	93.51
玉米	12	512	0	9	1	0	534	95.88
建筑用地	2	2	531	8	8	6	557	95.33
林地	4	33	1	356	24	0	418	85.17
裸地	1	1	2	16	246	3	269	91.45
水体	0	0	0	1	26	154	181	85.08
总计	581	553	534	423	306	163	2560	
制图精度/%	96.73	92.59	99.44	84.16	80.39	94.48		

根据原阳县2015年统计年鉴对分类结果进行定性分析,并且向当地农户访问,原阳县大面积种植水稻的区域集中在祝楼乡、太平镇和葛埠口乡,与分类结果一致。统计年鉴记录原阳县2015年的水稻种植面积为20468 hm²,分类结果中水稻面积为18556.38 hm²,提取水稻面积与统计数据的一致性为90.66%。

4 讨论

不同地物的时序NDVI曲线具有不同的特征,因此可以利用水稻的时序NDVI将其与其他地物区分。中高空间分辨率的遥感影像在农作物识别提取中作为重要的数据源,但是由于受云雨天气的影响,经常无法获取连续的中高空间分辨率影像,因此利用ESTARFM模型等数据融合技术,可以解决遥感

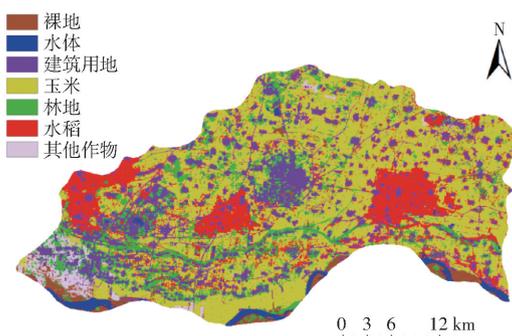


图6 决策树分类结果

Fig.6 Decision tree classification results

体的分类结果如图6所示。

利用实地采集和在Google Earth上选取的各个地类的样点共2560个,通过分类后的混淆矩阵对分类结果进行定量分析(表3),总体分类精度为92.23%,Kappa系数为0.9043。水稻、玉米、建筑用地的制图精度和用户精度均在90%以上,且水稻的制图精度达到96.73%,用户精度也达到了93.51%。由于林地分布比较分散且与其他地类相连紧密,造成林地的混合像元问题严重,制图精度和用户精度都小于90%。

数据缺失的问题,作为一种对农作物识别提取的有效手段。但是,时空融合模型构建数据的品质受基准Landsat和MODIS影像数据的影响,获取相近时刻并且高品质的Landsat和MODIS影像是构建高品质时序融合数据的关键,但是这在部分地区是比较困难的。对于零碎分散地块,融合得到的30m分辨率的Landsat数据依然存在明显的混合像元问题,导致提取精度不高。另外本次研究只选取了单一的时序NDVI指数进行分类提取,可能对有些地物反映不明显。

因此,在以后的研究中,利用ESTARFM模型融合更高空间分辨率影像和更高时间分辨率影像,进一步解决混合像元严重的问题,并且能监测出短期内地物发生快速变化的情况。另外,可以开展多种指数共同对地物提取,如EVI/NDWI指数等。探讨多种指数对水稻和其他农作物识别能力的适用性及

准确性。

5 结论

(1) ESTARFM 时空融合模型能较好地融合出缺失时相的 Landsat 影像,结果显示,空间细节信息比较清晰,在 Red 波段和 NIR 波段,与真实 Landsat 的 Red 波段和 NIR 波段一致性程度较高,决定系数 R^2 分别达到 0.920 3 和 0.940 2,因此 NDVI 的一致性同样较高。说明时空融合模型能够较好地重构高空间分辨率数据,有效解决多云多雨地区受天气影

响的 Landsat 数据缺失问题。

(2) 利用 TIMESAT 软件对研究区时序影像进行 S-G 滤波平滑处理,得到主要地类的时序 NDVI 曲线,判别出水稻以及其他主要地类的不同特征,按照一定的阈值范围设计决策树进行分类,有较好的分类效果。总体分类精度为 92.23%,Kappa 系数为 0.904 3;水稻的制图精度为 96.73%,用户精度为 93.51%;与统计数据的一致性为 90.66%。分类精度较高,在技术上具有可行性。

参 考 文 献

- [1] 杨星卫,周红妹,李军,等. 全球稻谷主产国遥感估产可行性研究[J]. 应用气象学报,1998,9(2):124-129.
YANG Xingwei, ZHOU Hongmei, LI Jun, et al. Feasibility research on estimating global paddy yield using remote sensing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1998, 9(2): 124-129. (in Chinese)
- [2] 章秀福,王丹英,方福平,等. 中国粮食安全和水稻生产[J]. 农业现代化研究,2005,26(2):85-88.
ZHANG Xiufu, WANG Danying, FANG Fuping, et al. Food safety and rice production in China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2005, 26(2): 85-88. (in Chinese)
- [3] 黄敬峰,陈拉,王晶,等. 水稻种植面积遥感估算的不确定性研究[J]. 农业工程学报,2013,29(6):166-176.
HUANG Jingfeng, CHEN La, WANG Jing, et al. Uncertainty analysis of rice planting area extraction based on different classifiers using Landsat data[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 166-176. (in Chinese)
- [4] OGURO Y, SUGA Y, TAKEUCHI S, et al. Monitoring of a rice field using Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ data[J]. Advances in Space Research, 2003, 32(11): 2223-2228.
- [5] 魏永霞,杨军明,吴昱,等. 基于多源数据融合模型的水稻面积提取[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):300-306.
WEI Yongxia, YANG Junming, WU Yu, et al. Rice planting area extraction based on multi-source data fusion [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 300-306. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181034&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.034. (in Chinese)
- [6] 张荣群,王盛安,高万林,等. 基于时序植被指数的县域作物遥感分类方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(增刊):246-252.
ZHANG Rongqun, WANG Sheng'an, GAO Wanlin, et al. Remote-sensing classification method of county-level agricultural crops using time-series NDVI [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 246-252. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S040&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.040. (in Chinese)
- [7] 张友水,原立峰,姚永慧. 多时相 MODIS 影像水田信息提取研究[J]. 遥感学报,2007,11(2):282-288.
ZHANG Youshui, YUAN Lifeng, YAO Yonghui. Study on extraction of paddy rice fields from multitemporal MODIS images [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2): 282-288. (in Chinese)
- [8] XIAO X M, BOLES S, FROIKING S, et al. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 95-113.
- [9] 杨沈斌,景元书,王琳,等. 基于 MODIS 时序数据提取河南省水稻种植分布[J]. 大气科学学报,2012,35(1):113-120.
YANG Shenbin, JING Yuanshu, WANG Lin, et al. Mapping rice paddy distribution in Henan Province based on multi-temporal MODIS imagery[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(1): 113-120. (in Chinese)
- [10] 刘影,肖池伟,李鹏,等. 基于 Landsat 影像的鄱阳湖平原水稻主产区水稻熟制动态监测[J]. 自然资源学报,2016,31(12):2086-2098.
LIU Ying, XIAO Chiwei, LI Peng, et al. Monitoring rice cropping system changes in the major rice-producing area of Poyang Lake plain using Landsat images during 2005-2013 [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(12): 2086-2098. (in Chinese)
- [11] 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.
YU Wenyong, FENG Rui, JI Ruipeng, et al. Advances in rice planting area extraction technology based on MODIS data [J]. Journal of Meteorology & Environment, 2011, 27(2): 56-61. (in Chinese)
- [12] JU J, ROY D P. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1196-1211.
- [13] 石月婵. 基于多源遥感数据的高时空地表温度生成方法研究[D]. 青岛:山东科技大学,2013.
SHI Yuechan. Research on the generation of high temporal and spatial land surface temperature based on multi-source remote sensing data [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] 郭明权,牛铮,王长耀. 利用遥感数据时空融合技术提取水稻种植面积[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊2):48-52.

- WU Mingquan, NIU Zheng, WANG Changyao. Mapping paddy fields by using spatial and temporal remote sensing data fusion technology [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2): 48–52. (in Chinese)
- [15] WU M Q, WU C Y, HUANG W J. An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining Landsat and MODIS data to generate daily synthetic Landsat imagery[J]. Inform Fusion, 2016, 31(9): 14–25.
- [16] GAO F, MASEK J, SCHWALLER M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2207–2218.
- [17] HILKER T, WULDER M A, COOPS N C, et al. A new data fusion model for high spatial-and temporal resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8): 1613–1627.
- [18] ZHU Xiaolin, CHEN Jin, GAO Feng, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2610–2623.
- [19] WU M Q, NIU Z, WANG C Y, et al. Use of MODIS and Landsat time series data to generate high-resolution temporal synthetic Landsat data using a spatial and temporal reflectance fusion model[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012, 6(1): 063507.
- [20] ZHANG Wei, LI Ailong, JIN Huaan, et al. An enhanced spatial and temporal data fusion model for fusing Landsat and MODIS surface reflectance to generate high temporal Landsat-like data[J]. Remote Sensing, 2013, 5(10): 5346–5368.
- [21] 邬明权, 牛铮, 王长耀. 多源遥感数据时空融合模型应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(5): 776–783.
WU Mingquan, NIU Zheng, WANG Changyao. Assessing the accuracy of spatial and temporal image fusion model of complex area in South China [J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(5): 776–783. (in Chinese)
- [22] ADAMS J B, SMITH M O, JOHNSO N, et al. Spectral mixture modeling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 91(B8): 8089–8112.
- [23] TANRÉ D, HOLBEN B N, KAUFMAN Y J. Atmospheric correction algorithm for NOAA AVHRR products: theory and application [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 231–248.
- [24] 宋春桥, 柯灵红, 游松财, 等. 基于 TIMESAT 的 3 种时序 NDVI 拟合方法比较研究——以藏北草地为例 [J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 147–155.
SONG Chunqiao, KE Linghong, YOU Songcai, et al. Comparison of three NDVI time-series fitting methods based on TIMESAT—taking the grassland in Northern Tibet as case [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(2): 147–155. (in Chinese)
- [25] 石月婵, 杨贵军, 李鑫川, 等. 融合多源遥感数据生成高时空分辨率数据的方法对比[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(1): 92–99.
SHI Yuechan, YANG Guijun, LI Xinchuan, et al. Intercomparison of the different fusion methods for generating high spatialtemporal resolution data [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(1): 92–99. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 112 页)

- [17] 苟爱梅. 甜菜切顶机的结构设计[J]. 新疆职业大学学报, 2012, 20(2): 75–77, 80.  
GOU Aimei. Structure design on the beet roof cutting machine [J]. Journal of Xinjiang Vocation University, 2012, 20(2): 75–77, 80. (in Chinese)
- [18] 吴惠昌, 胡志超, 彭宝良, 等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统研制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 17–24.  
WU Huichang, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Development of auto-follow row system employed in pull-type beet combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 17–24. (in Chinese)
- [19] 王申莹, 胡志超, 吴惠昌, 等. 基于 Proteus 的甜菜收获机自动对行控制系统设计仿真与试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(3): 35–40.  
WANG Shenying, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Design simulation and test of auto-follow row control system employed in beet harvester based on Proteus [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(3): 35–40. (in Chinese)
- [20] 王申莹, 胡志超, 彭宝良, 等. 基于 ADAMS 的甜菜收获机自动对行探测机构仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 62–67.  
WANG Shenying, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Simulation of auto-follow row detection mechanism in beet harvester based on ADAMS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 62–67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20131211&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131211&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.011. (in Chinese)
- [21] 王申莹, 胡志超, 吴惠昌, 等. 甜菜收获机自动对行液压纠偏执行系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(3): 155–162.  
WANG Shenying, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Design and test of hydraulic correction execution system in automated row-followed for beet harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 155–162. (in Chinese)
- [22] 顾峰玮, 胡志超, 吴惠昌, 等. 4LT-A 型错行作业挖掘甜菜联合收获机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 1–9.  
GU Fengwei, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Development and experiment of 4LT-A staggered-dig sugar beet combine [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 1–9. (in Chinese)