

县域尺度上基于 GF-1 PMS 影像的冬小麦种植面积遥感监测

田海峰^{1,2} 周伯燕³ 陈燕芬^{1,2} 邬明权^{1*} 牛铮^{1,2}

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室,北京 100101;

2. 中国科学院大学 环境与资源学院,北京 100049;

3. 河南大学 环境与规划学院,河南 开封 475004)

摘要 为探究县域尺度上基于高分一号卫星(GF-1)PMS 影像进行冬小麦遥感监测的可行性及精准性,以河南省滑县为研究区,遴选 2015 年 2 月上旬 GF-1 PMS 影像 6 景,对影像进行辐射定标、FLAASH 大气校正、NNDiffuse 融合、几何精校正、地图投影转换等预处理后,在外业调查和样本分析的基础上构建一种新的冬小麦决策树分类模型,模型第 1 层决策方案中 NDVI>0.311 的像元为冬小麦,得到冬小麦的粗分类结果;在此基础上进行第 2 层决策分类,以进一步提高冬小麦的分类精度,分类方案为第 1 波段地表反射率<0.146、第 2 波段地表反射率<0.148、第 3 波段地表反射率<0.135、第 4 波段地表反射率>0.250 的像元为冬小麦。对分类结果进行形态学滤波处理,以消除或减少分类结果中孤立的像元。分别基于决策树分类模型与 ENVI 软件自带的 IsoData 非监督分类模型,对比分析 GF-1 PMS 影像和同时期 Landsat-8 OLI 影像在冬小麦面积提取上的精度。结果表明:基于新构建的决策树分类模型,2015 年滑县冬小麦种植面积为 115 715.81 hm²,混淆矩阵检验总体精度为 99.62%,Kappa 系数为 0.99;PMS 影像提取冬小麦的混淆矩阵总体精度比 OLI 影像高出 9 个百分点。说明县域尺度上基于单时相 GF-1 PMS 影像在冬小麦收获前提取冬小麦种植面积是可行的,提取精度较高。

关键词 冬小麦;高分一号;县域尺度;决策树;PMS 影像;Landsat

中图分类号 TP79; S127

文章编号 1007-4333(2017)10-0139-08

文献标志码 A

Extraction of winter wheat acreage based on GF-1 PMS remote sensing image on county scale

TIAN Haifeng^{1,2}, ZHOU Boyan³, CHEN Yanfen^{1,2}, WU Mingquan^{1*}, NIU Zheng^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract The aim of this study was to understand the feasibility and accuracy of monitoring winter wheat acreage based on the GF-1 PMS image of county scale by taking Huaxian County of Henan Province as study area. Six scenes of GF-1 PMS image in early February 2015 were selected. The pretreatment work included radiometric calibration, FLAASH atmospheric correction, NNDiffuse Pan Sharpening, image geometry registration, map projection transformation, etc. Based on field survey data and sample data, a new decision tree model for winter wheat classification was constructed. The pixel was considered to winter wheat if its NDVI value is more than 0.311 in the level 1 decision scheme. However, this decision scheme was not very accurate for winter wheat classification. In order to improve the classification accuracy, the level 2 decision scheme was designed that the pixel was considered to winter wheat if its first band was less than 0.146, second band was less than 0.148, third band was less than 0.135, and fourth band was more than

收稿日期: 2016-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301390,4137138); 国家“973”计划项目(2013CB733405); 国家“863”计划项目(2014AA06A511); 云南省科技计划(2010AD004); 高分辨率国家重大专项(20-Y30B17-9001-14/16)

第一作者: 田海峰, 博士研究生, E-mail: haifeng_d_tg@163.com

通讯作者: 邬明权, 副研究员, 博士, 主要从事农业遥感与多源遥感数据融合研究, E-mail: wumq@radi.ac.cn

0.250. The morphological filter was performed in the classification results in order to eliminate or reduce the isolated cells in classification results. The result showed that the winter wheat acreage based on our established decision tree model was 115 715.81 hm² in 2015, overall accuracy was 99.62%, and Kappa coefficient was 0.99. The accuracy of extraction winter wheat based on PMS images was better than that based on Landsat-8 OLI images (more than 9%). This study proved that it was feasible and accurate to extract winter wheat acreage based on GF-1 PMS imagery on county scale. This study will provided technical support for monitoring winter wheat on the county scale based on high resolution remote sensing data.

Keywords winter wheat; GF-1; county scale; decision tree; PMS imagery; Landsat

冬小麦是我国主要粮食作物之一,播种面积占我国粮食作物总播种面积的21.5%^[1],利用遥感技术获取冬小麦种植面积已成为农业遥感和农业统计领域的热点^[2-4]。高分一号卫星(GF-1)是我国高分辨率对地观测系统重大专项天基系统中的首发卫星,填补了国内高分辨率对地遥感观测的空白,高分系列遥感技术的快速发展为我国乃至全球农业遥感提供了新的重要数据源^[5-6]。在我国高分一号卫星发射之前,国内外农业遥感常用影像的空间分辨率多为中低分辨率,如Landsat影像(分辨率为30 m/15 m)、MODIS影像(分辨率为1 000 m/250 m)等^[7-10]。较低的空间分辨率必然造成混合像元大量存在,虽然利用错分率和漏分率相互抵消的方法或混合像元分解方法能够提高分类结果的数量精度,但是总体精度以是难以提高的^[11-12]。对县域尺度上作物种植分布精细制图而言,中低分辨率影像无疑是无法满足精细制图要求的^[13]。

高分一号卫星于2013-04-26由长征二号丁运载火箭在酒泉卫星发射基地成功发射入轨,搭载了4台空间分辨率为16 m的宽视场(Wide Field View, WFV)传感器,2台全色和多光谱传感器(Pan and Multispectral Sensor, PMS),其中全色影像的空间分辨率为2 m,多光谱影像的空间分辨率为8 m。目前国内外基于GF-1 WFV影像开展农业遥感研究已取得一定成果^[14-17]。采用更高空间分辨率的影像开展农业遥感研究是遥感技术不断发展进步的必然趋势^[18-20],如徐新刚等^[21]采用空间分辨率为2.44 m的Quick Bird影像提取了四川绵阳实验区2015年冬小麦和油菜的种植情况,但目前尚未检索到基于GF-1 PMS影像的农业遥感相关文献,这无疑是国产高分辨率遥感数据应用推广的空白点。因此,本研究拟以县域为研究单元,基于GF-1 PMS影像开展冬小麦遥感监测的技术流程和方法研究,分析GF-1 PMS影像在提取冬小麦种植面积上的可行性和精准性,以期为县域尺度上冬小麦遥感监测提

供技术支撑。Landsat影像是我国GF影像出现之前的农业遥感常用数据,本研究拟对这2种影像的冬小麦提取精度进行对比分析,旨在说明GF-1 PMS影像相对Landsat影像在冬小麦遥感监测中的优势。

1 材料及方法

1.1 研究区概况

滑县位于河南省北部,地跨黄河、海河两大流域,地势平坦,气候属于温带季风气候,雨量较为充沛,年平均气温13.7℃,年平均降水量634.3 mm,日照2365.5 h,无霜期201 d,适宜小麦、玉米等作物的种植。滑县是河南省直管县,是中原经济区粮食生产核心区,有“豫北粮仓”之称。

1.2 遥感影像及预处理

本研究使用的遥感影像包括GF-1 PMS影像和Landsat-8 OLI影像。单景GF-1 PMS影像的幅宽为36 km,包含4个多光谱波段(空间分辨率为8 m)和1个全色波段(空间分辨率为2 m),多光谱波段的中心波长分别为0.502 μm(蓝光)、0.576 μm(绿光)、0.680 μm(红光)、0.810 μm(近红外光),全色波段的中心波长为0.814 μm。Landsat-8 OLI影像包括7个多光谱波段(空间分辨率为30 m)和1个全色波段(空间分辨率为15 m),关于该影像的详细参数详见文献[22]。

首先采用ENVI软件(<http://www.esrichina.com.cn/softwareproduct/EI/>)最先进的正射校正方法对GF-1多光谱影像进行正射校正,辅助数据包括30 m空间分辨率的DEM数据(<http://www.gscloud.cn/>)和Landsat-8全色影像(参考影像)。受多种因素影响,目前GF-1 PMS影像存在几何形变;Landsat已有近40年的发展,技术成熟,几乎不存几何形变,因此采用Landsat全色影像作为GF-1影像正射/几何校正的参考影像。ENVI软件一般要求参考影像的空间分辨率不低于待校正的影像的

空间分辨率,因此将 Landsat 全色影像的空间分辨率由 15 m 重采样到 8 m。对 PMS 全色影像正射校正时,为取得较好的校正效果,将已经正射校正后的 GF-1 多光谱影像的第 3 波段重采样为 2 m,代替 8 m 的 Landsat 全色影像作为辅助参考影像,这种正射校正方法能够同时满足几何精校正的要求。然后根据中国资源卫星应用中心公布的高分一号定标参数和光谱响应函数对正射校正后的多光谱影像进行辐射定标、大气校正,得到地表反射率影像,采用 NNDiffuse Pan Sharpening 融合^[23]方法和 2 m 空间分辨率的 PMS 全色影像对 GF-1 多光谱反射率影像进行融合处理,以使其空间分辨率提高至 2 m。然后进行镶嵌处理。最后根据国家基础地理信息中心公布的 1:400 万滑县行政边界对影像进行裁剪,完成影像预处理工作,预处理后研究区影像数据大小为 5.33 GB。图 1 示出预处理后按照真彩色合成的滑县 2015 年 2 月 GF-1 PMS 影像。

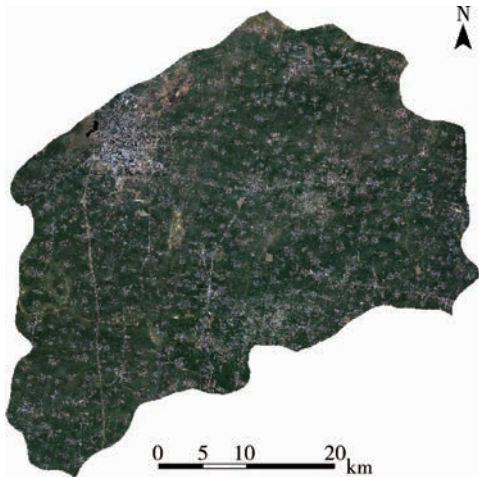


图 1 滑县 2015 年 2 月 GF-1 PMS 影像

Fig. 1 GF-1 PMS remote sensing image in Huaxian County on Febury 2015

本研究使用的 GF-1 PMS 影像数据来源于中国科学院遥感与数字地球研究所高分一号所内分发系统(<http://210.72.27.76/SNFFWeb>),共遴选出 6 景高质量影像(覆盖滑县全县),其中 1 景影像的获取日期为 2015-02-04,其余 5 景影像的获取日期为 2015-02-08。2 月上旬,滑县冬小麦处于越冬期,而其他植被处于枯萎凋零期,因此这一时期冬小麦与其他植被易于区分,有利于提高冬小麦种植面积的提取精度。

本研究使用的 Landsat-8 影像(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)共 2 景,受影像质量的约束,遴选出的 2 景影像的成像时间分别为 2015-01-10 和 2015-02-11,数据预处理流程包括大气校正、融合、镶嵌、裁剪等,处理后的影像为 15 m 空间分辨率的地表反射率影像。

1.3 冬小麦提取方法

决策树分类方法具有分类运算速度快、分类精度高的优势^[24-25],因此本研究采用决策树分类方法提取冬小麦种植面积。

归一化植被指数(NDVI)是根据绿色植被对红光强吸收、对近红外强反射的特性构造的,取值范围为 $[-1,1]$,对绿色植被具有较强的指示作用。预处理后的 GF-1 PMS 影像中第 3 波段(B_3)是红光波段,第 4 波段(B_4)是近红外波段,因此 NDVI 的计算方法为:

$$NDVI = (B_4 - B_3) / (B_4 + B_3) \quad (1)$$

研究区内主要地物类型有冬小麦、蔬菜大棚、水泥道路、柏油道路、村落、城市、水体、林地(已落叶)、裸地等,通过大量采样分析,预处理后的 GF-1 PMS 影像中冬小麦、部分蔬菜大棚和部分水泥道路的 NDVI 值在 0.311 以上,后 6 类地物的 NDVI 值均小于这一阈值,据此构造决策树模型的第 1 层决策方案(图 2(a)),实现冬小麦的粗分类。部分蔬菜大棚会错分为冬小麦,主要是因为蔬菜大棚在影像上的特征受大棚内作物的长势和种类的影响较大,例如大棚内的作物的植株较高,枝叶茂盛且接近棚顶时,影像上看到的大棚就呈现绿色,其 NDVI 值可能 >0.311 ;部分水泥道路会错分为冬小麦,主要是因为水泥道路的宽度影响其在影像上的特征,例如很窄的道路(宽度约为 4 m)的光谱特征易受到周围冬小麦光谱的影响,表现为混合像元特征,因此 NDVI 值可能 >0.311 。

冬小麦在预处理后的 GF-1 PMS 影像中第 1、2、3 波段上的反射率分别 <0.146 、 0.148 、 0.135 ,在第 4 波段上的反射率 >0.250 ,那些错分为冬小麦的蔬菜大棚、水泥道路的反射率与之相反,据此构造决策树模型的第 2 层决策方案(图 2(a)),实现冬小麦与蔬菜大棚、水泥道路的完全分离,即完成冬小麦的提取工作。

同理得到基于 Landsat-8 OLI 影像的提取冬小麦的决策树模型(图 2(b))。

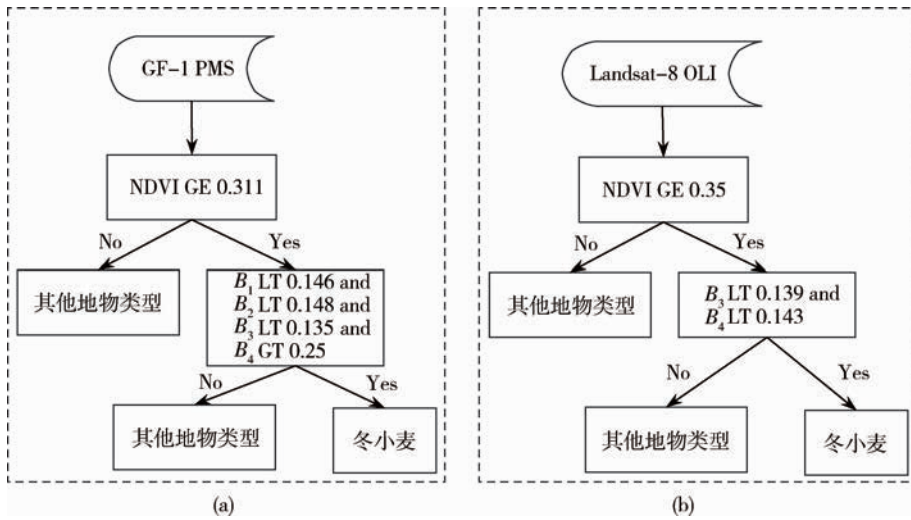


图2 基于GF-1 PMS(a)和Landsat-8 OLI(b)提取冬小麦的决策树模型

Fig. 2 The decision tree model for extraction of winter wheat based on GF-1 PMS (a) and Landsat-8 OLI (b), respectively

1.4 分类后处理方法

受多种因素影响,分类结果中存在一些孤立像元或线状地物出现断点,影响分类精度及制图美观,因此需要采用分类后处理方法以解决或减少以上问题。具体方法是:依次对分类结果进行 3×3 窗口的数学形态学滤波 Dilate 运算, 3×3 窗口(中心权重为1)的卷积滤波 Majority Analysis 运算, 3×3 窗口的数学形态学滤波 Erode 运算, 3×3 窗口(中心权重为7)的卷积滤波 Majority Analysis 运算。

最后将分类结果转成.shp格式,并将地图投影转换为Albers等积投影(中央经线为 114.666° ,第1、2标准纬线分别为 35.28333° 、 35.61667°),进行冬小麦种植面积的统计。PMS和OLI影像的原始地图投影方式为通用横轴墨卡托(Universal Transverse Mercator, UTM)投影。UTM投影是一种“等角横轴割圆柱投影”,该投影从本初子午线为起始将地球划分为60个投影带(每带经差为 6°),2条相割的经线上没有变形,而中央经线上长度比0.9996(造成面积形变),详见文献[28]和[29]。等积投影顾名思义,即投影后的面积保持不变,常用以编制行政区划图等。

1.5 精度评价

遥感分类精度包括3种形式,即数量精度、位置精度和类型精度^[30]。数量精度(A_i)是指分类结果中第*i*类地物的面积(s'_i)与该类实际面积(s_i)的接近程度,计算公式如下:

$$A_i = (1 - |s_i - s'_i| / s_i) \times 100\% \quad (2)$$

位置精度是指分类单元与参考图上对应单元在空间坐标上的位置差异;类型精度是指像元分类类型与像元实际类型相比较,正确分类的程度,常用混淆矩阵的生产者精度、用户精度、总体分类精度和Kappa系数等度量。生产者精度与漏分率相对应,表示第*i*类正确分类的像元数与真实参考数据中对应类的像元数之比;用户精度与错分率相对应,表示第*i*类正确分类的像元数与分到这一类的像元数之比;总体分类精度等于正确分类的像元数与真实参考数据中总像元数之比;Kappa系数*K*是通过把所有真实参考数据中总像元数(N)乘以 $n \times n$ 混淆矩阵对角线的和,再减去某一类中真实参考像元数与被分到该类的像元数之积对所有类别求和之后,再除以真实参考数据中总像元数的平方减去某一类中真实参考像元数与被分到该类的像元数之积对所有类别求和的结果, $K > 0.8$ 则认为分类效果为优,具体计算公式为:

$$K = \frac{N \times \sum_{i=1}^n x_{ii} - \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n x_{ij} \times \sum_{j=1}^n x_{ji})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n x_{ij} \times \sum_{j=1}^n x_{ji})} \quad (3)$$

式中: $\sum_{i=1}^n x_{ii}$ 表示混淆矩阵对角线的和; n 为混淆矩阵行列数; $\sum_{j=1}^n x_{ij}$ 表示第*i*类地物真实参考像元数;

$\sum_{j=1}^n x_{ji}$ 表示被分到第 i 类地物的像元数。由式(2)可见,数量精度与漏分率负相关,与错分率正相关,因此存在漏分率和错分率相互抵消导致数量精度较总体精度高的现象。这说明数量精度的稳定性及代表性差,因此本研究以总体精度作为衡量提取精度的测度指标。

2 结果与分析

2.1 提取结果

基于 GF-1 PMS 影像和决策树分类方法提取的滑县 2015 年冬小麦种植分布结果见图 3,本研究提取的滑县 2015 年冬小麦种植面积为 115 715.81 hm^2 , 占全县总面积的 66.12%。

滑县西北部主要为县城建设用地,冬小麦分布较少;东北部部分区域有少量连片非冬小麦分布,主要是春耕用地(用于种植其他作物)。总体上冬小麦在滑县全县有广泛种植(图 3)。

基于 GF-1 PMS 影像和本研究处理方法能够实现研究区内主要线状地物(道路、河流等)的有效、准确提取(图 3 局部放大图)。研究区内道路网密集,研究发现基于 GF-1 PMS 影像的决策树提取模型对宽度 $> 6 \text{ m}$ 的道路能够完全提取;部分 $6 \sim 3 \text{ m}$ 的道路不能完全提取,但这类宽度的道路较少;3 m 以下的道路主要是农田间的小路,且多为土路,这些道路几乎无法提取。

华北农区耕地地块相对大型农场的耕地地块,具有破碎度高的特征:一方面是因为农区内存在大量农村居民点;另一方面是因为存在大量道路网,这些是影响农业遥感精度的重要因素。GF-1 PMS 影像的多光谱影像的空间分辨率为 8 m,与全色影像融合后空间分辨率为 2 m,大幅减小了耕地破碎对农业遥感精度的限制。

为了进一步说明本研究提取结果的可靠性和准确性,采用混淆矩阵精度评价方法对提取结果进行精度评价,验证数据为野外实测的 23 个样方(共计 54 373 个像元),结果表明:基于 GF-1 PMS 影像和决策树分类方法的总体精度、冬小麦生产者精度、冬小麦用户精度分别为 99.62%、99.40%、99.98%,Kappa 系数为 0.99。本研究总体精度比已有研究成果^[11,27-28]约高 5~15 个百分点,说明国产 GF-1 PMS 影像在冬小麦的遥感监测中具有十分可靠的精度保障,将成为农业遥感领域的重要数据源。

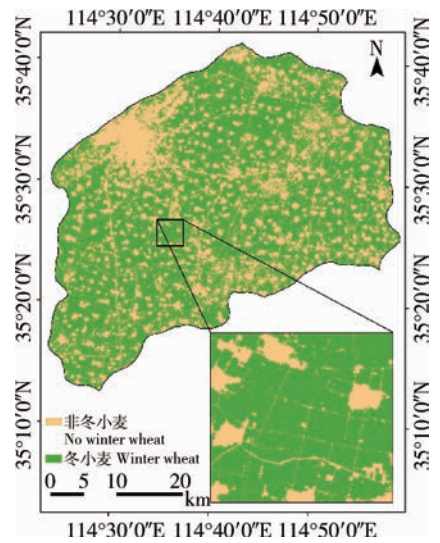


图 3 滑县 2015 年 2 月冬小麦分布

Fig. 3 Distribution map on winter wheat about Huaxian County on February 2015

2.2 与 Landsat 提取结果对比

分别基于 IsoData 非监督分类、决策树分类 2 种方法,对比分析 PMS 影像与 OLI 影像提取冬小麦的精度差异,结果见表 1。

表 1 基于 PMS 和 OLI 影像的冬小麦提取精度比较

Tab. 1 Comparison of winter wheat extraction accuracy based on PMS and OLI imagery

分类方法 Classification method	影像 Image	提取面积/ hm^2 Area	生产者精度/% Pro. accuracy	用户精度/% User accuracy	总体精度/% Overall accuracy	Kappa 系数 K
IsoData 非监督分类	GF-1 PMS	113 202.01	99.90	97.40	98.29	0.963 4
IsoData unsupervised	Landsat-8 OLI	129 036.87	98.03	87.90	89.77	0.758 4
决策树分类 Decision tree classification	GF-1 PMS	115 715.81	99.40	99.98	99.62	0.991 9
	Landsat-8 OLI	117 701.64	91.24	94.34	90.59	0.793 0

IsoData 非监督分类几乎不受人为主观因素的干扰,主要依据影像自身特征进行计算机自动分类,对评价 2 种影像的冬小麦识别能力具有客观性。由表 1 可见,IsoData 非监督分类精度中,PMS 影像的总体分类精度比 OLI 影像的总体分类精度高 8.5 个百分点。就冬小麦提取结果的用户精度而言,OLI 的用户精度为 87.90%(比 PMS 低 9.5 个百分点),说明基于 OLI 影像提取的冬小麦中有 12.10% 是错分的,这些错分的原因主要是 OLI 影像受空间分辨率的影响而难以识别宽度在 10 m 以下的线状地物,易将这类非冬小麦地物错分成冬小麦(图 4(e))。对于地块较为破碎的区域(图 4(f)),OLI 也易出现大量错分现象。就冬小麦提取结果的生产者精度而言,PMS 和 OLI 相近,都在 98% 以

上,说明两者在冬小麦提取结果中的漏分率很低。

2 种影像的决策树分类精度都优于 IsoData 分类精度;PMS 影像的总体精度为 99.62%,OLI 影像的总体精度为 90.59%,PMS 高于 OLI 9 个百分点。图 4 示出不同地块环境下分别基于 PMS 和 OLI 影像的冬小麦提取效果。比较图 4(a)与(e)、图 4(c)与(g),PMS 对宽度 6 m 以上的道路能够有效准确识别,OLI 影像则难以识别而造成错分现象;对于高等级干线道路(含道旁沟渠宽度 > 20 m),OLI 影像提取的宽度一般比实际宽度宽,易造成冬小麦的漏分。比较图 4(b)与(f)、图 4(d)与(h),对于地块破碎的田地,OLI 影像中错分、漏分的现象更加严重。因此,PMS 影像相对 OLI 影像而言,具有提取农区地类分布细节的优势。

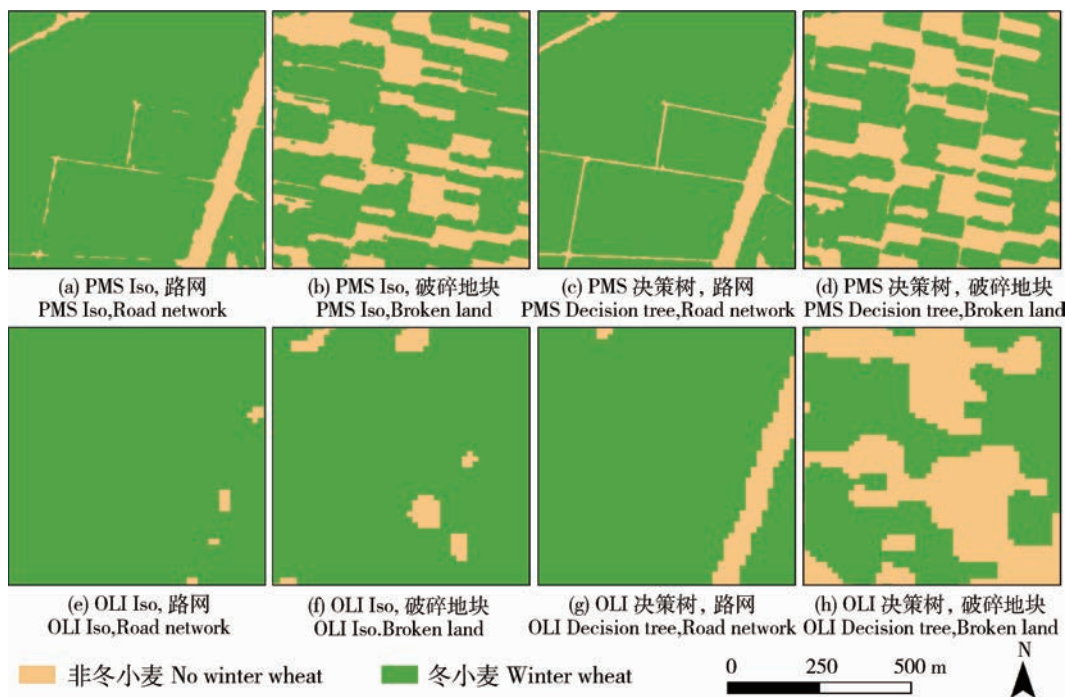


图 4 基于 PMS 和 OLI 影像的冬小麦提取效果对比

Fig. 4 Comparison of the extraction results of winter wheat based on PMS and OLI image

3 结论与讨论

1) GF-1 PMS 影像在冬小麦种植面积遥感监测中具有广泛应用前景,总体分类精度达到 99.62%,对冬小麦种植分布的空间细节具有良好的表达效果;与 Landsat 影像相比,PMS 影像在冬小麦遥感监测中具有极大优势,将成为全球范围内冬小麦遥感监测的重要数据源。

2) 冬小麦越冬一起身期(12 月—翌年 3 月)是

遥感监测冬小麦的最佳时期:一方面越冬一起身期内冬小麦与背景地物的景观特征差异显著;另一方面越冬一起身期的时间跨度长(约 4 个月),期间多晴天,可以获取足够多的高质量(无云影响)的遥感影像。

3) 地图投影问题是农业遥感分类文献中常常被忽略的一个问题,遥感影像的投影方式一般为 UTM 投影,这种投影不是等积投影,对分类结果进行面积统计时需要将分类结果的投影方式转换成

Albers 等积投影, 否则会造成一定的误差。例如本研究基于 GF-1 PMS 影像的冬小麦提取结果中, 基于 UTM 投影的统计结果比基于 Albers 等积投影的统计结果多出 36.47 hm²。如果在省域尺度或全国尺度上, 这种误差将会更大, 这一问题值得高度关注。

参考文献 References

- [1] 王利民, 刘佳, 杨福刚, 富长虹, 滕飞, 高建孟. 基于 GF-1 卫星遥感的冬小麦面积早期识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 194-201
Wang L M, Liu J, Yang F G, Fu C H, Teng F, Gao J M. Early recognition of winter wheat area based on GF-1 satellite[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 194-201 (in Chinese)
- [2] Ren J, Chen Z, Zhou Q. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-Information*, 2008, 10(S1): 403-413
- [3] 郭明权, 杨良闯, 于博, 王玉, 赵昕, 牛铮, 王长耀. 基于遥感与多变量概率抽样调查的作物种植面积测量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 146-152
Wu M Q, Yang L C, Yu B, Wang Y, Zhao X, Niu Z, Wang C Y. Mapping crops acreages based on remote sensing and sampling investigation by multivariate probability proportional to size [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(2): 146-152 (in Chinese)
- [4] 田海峰, 郭明权, 牛铮, 王长耀, 赵昕. 基于 Radarsat-2 影像的复杂种植结构下旱地作物识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 154-159
Tian H F, Wu M Q, Niu Z, Wang C Y, Zhao X. Dryland crops recognition under complex planting structure based on Radarsat-2 images[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 154-159 (in Chinese)
- [5] 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. 中国航天, 2013(8): 5-9
Bai Z G. Technical feature of GF1 satellite [J]. *Aerospace China*, 2013(8): 5-9 (in Chinese)
- [6] 刘琨, 付晶莹, 李飞. 高分一号卫星 4 种融合方法评价[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 980-986
Liu K, Fu J Y, Li F. Evaluation study of four fusion methods of GF-1 PAN and multispectral images [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30 (5): 980-986 (in Chinese)
- [7] 赵文亮, 贺振, 贺俊平, 朱连奇. 基于 MODIS-NDVI 的河南省冬小麦产量遥感估测[J]. 地理研究, 2012, 31(12): 2310-2320
Zhao W L, He Z, He J P, Zhu L Q. Remote sensing estimation for winter wheat yield in Henan based on MODIS-NDVI data [J]. *Geographical Research*, 2012, 31 (12): 2310-2320 (in Chinese)
- [8] 田海峰, 王力, 牛铮. 基于 OLI 影像的县域冬小麦种植面积提取[J]. 河南农业科学, 2015, 44(6): 156-160
Tian H F, Wang L, Niu Z. Study on planting area extraction of winter wheat based on OLI images at county level [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44 (6): 156-160 (in Chinese)
- [9] 任建强, 陈仲新, 唐华俊. 基于 MODIS-NDVI 的区域冬小麦遥感估产: 以山东省济宁市为例[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2371-2375
Ren J Q, Chen Z X, Tang H J. Regional scale remote sensing based yield estimation of winter wheat by using MODIS-NDVI data: A case study of Jining City in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2371-2375 (in Chinese)
- [10] Kouadio L, Newlands N K, Davidson A. Assessing the performance of MODIS NDVI and EVI for seasonal crop yield forecasting at the ecodistrict scale [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 10193-10214.
- [11] 许文波, 张国平, 范锦龙, 钱永兰. 利用 MODIS 遥感数据监测冬小麦种植面积[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 144-149
Xu W B, Zhang G P, Fan J L, Qian Y L. Remote sensing monitoring of winter wheat areas using MODIS data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(12): 144-149 (in Chinese)
- [12] 冯美臣, 杨武德, 张东彦, 曹亮亮, 王慧芳, 王芊. 基于 TM 和 MODIS 数据的水旱地冬小麦面积提取和长势监测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 103-109
Feng M C, Yang W D, Zhang D Y, Cao L L, Wang H F, Wang Q. Monitoring planting area and growth situation of irrigation-land and dry-land winter wheat based on TM and MODIS data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(3): 103-109 (in Chinese)
- [13] 杨红卫, 董小华. 中高分辨率遥感影像在农业中的应用现状[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 138-149
Yang H W, Tong X H. Application status of middle and high resolution remote sensing images in agriculture [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(24): 138-149 (in Chinese)
- [14] Wu M, Huang W, Niu Z. Combining HJ CCD, GF-1 WFV and MODIS data to generate daily high spatial resolution synthetic data for environmental process monitoring [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(8): 9920-9937
- [15] Wu M, Zhang X, Huang W. Reconstruction of daily 30 m data from HJ CCD, GF-1 WFV, Landsat, and MODIS data for crop monitoring [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(12): 16293-16314
- [16] 黄健熙, 贾世灵, 武洪峰, 苏伟. 基于 GF-1 WFV 影像的作物面积提取方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(S1): 253-259
Huang J X, Jia S L, Wu H F, Su W. Extraction method of crop planted area based on GF1 WFV data [J]. *Transaction of the*

- Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46 (S1): 253-259 (in Chinese)
- [17] 贺鹏,徐新刚,张宝雷,李振海,金秀良,张秋阳,张勇峰. 基于多时相 GF-1 遥感影像的作物分类提取[J]. 河南农业科学, 2016, 45(1):152-159
He P, Xu X G, Zhang B L, Li Z H, Jin X L, Zhang Q Y, Zhang Y F. Crop classification extraction based on multi-temporal GF-1 remote sensing image [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(1):152-159 (in Chinese)
- [18] 李卫国,赵丽花. 中高分辨率遥感影像在小麦监测中的比较[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(4):736-739
Li W G, Zhao L H. Wheat growth monitoring based on medium and high resolution images [J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*, 2011, 27(4):736-739 (in Chinese)
- [19] 杨红卫,童小华. 中高分辨率遥感影像在农业中的应用现状[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24):138-149
Yang H W, Tong X H. Application status of middle and high resolution remote sensing images in agriculture [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(24):138-149 (in Chinese)
- [20] 朱光良. IKONOS 等高分辨率遥感技术的发展与应用分析[J]. 地球信息科学, 2004, 6(3):108-110
Zhu G L. Study on the progress and application of high resolution remote sensing technology [J]. *GEO-Information Science*, 2004, 6(3):108-110 (in Chinese)
- [21] 徐新刚,李强子,周万村,吴炳方. 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
Xu X G, Li Q Z, Zhou W C, Wu B F. Classification application of QuickBird imagery to obtain crop planting area [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(1):17-23 (in Chinese)
- [22] 田海峰,王力,牛铮,秦耀辰. 基于新遥感数据源的县域冬小麦种植面积提取[J]. 中国农学通报, 2015, 31(5):220-227
Tian H F, Wang L, Niu Z, Qin Y C. Winter wheat planting area extraction based on new remote sensing data at county level [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(5):220-227 (in Chinese)
- [23] 刘锟,付晶莹,李飞. 高分一号卫星 4 种融合方法评价[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5):980-986
Liu K, Fu J Y, Li F. Evaluation study of four fusion methods of GF-1 PAN and multispectral images [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(5):980-986 (in Chinese)
- [24] 潘琛,杜培军,张海荣. 决策树分类法及其在遥感图像处理中的应用[J]. 测绘科学, 2008, 33(1):208-211
Pan T, Du P J, Zhang H R. Decision tree classification and its application in processing of remote sensing images [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(1):208-211 (in Chinese)
- [25] 刘晓娜,封志明,姜鲁光. 基于决策树分类的橡胶林地遥感识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24):163-172
Liu X N, Feng Z M, Jiang L G. Application of decision tree classification to rubber plantations extraction with remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(24):163-172 (in Chinese)
- [26] 宋军伟,张友静,李鑫川,杨文治. 基于 GF-1 与 Landsat-8 影像的土地覆盖分类比较[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2):255-263
Song J W, Zhang Y J, Li X C, Yang W Z. Comparison between GF-1 and Landsat-8 images in land cover classification [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2):255-263 (in Chinese)
- [27] 张霞,帅通,杨杭,黄长平. 基于 MODIS EVI 图像时间序列的冬小麦面积提取[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1):220-224
Zhang X, Shui T, Yang H, Huang C P. Winter wheat planting area extraction based on MODIS EVI image time series [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(S1):220-224 (in Chinese)
- [28] 刘明波,雷建朝,韦婵. UTM 投影及投影变形处理[J]. 西北水电, 2010(6):7-9
Liu M B, Lei J C, Wei C. UTM projection and projection deformation treatment [J]. *Northwest Hydropower*, 2010(6):7-9 (in Chinese)
- [29] 周朝宪,房志峰,于彩虹,张云国,高应波,燕丹晨. UTM 投影和 Gauss-Krüger 投影及其变换实现[J]. 地质与勘探, 2013, 49(5):882-889
Zhou C X, Fang Z F, Yu C H, Zhang Y G, Gao Y B, Yan D C. UTM projection and Gauss-Krüger projection and their conversion [J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(5):882-889 (in Chinese)
- [30] 吴健平,杨星卫. 遥感数据分类结果的精度分析[J]. 遥感技术与应用, 1995, 10(1):17-24
Wu J P, Yang W X. Accuracy analysis of classification of remotely sensed data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1995, 10(1):17-24 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春