

引用格式:王九中,田海峰,邬明权,等.河南省冬小麦快速遥感制图[J].地球信息科学学报,2017,19(6):846-853. [Wang J Z, Tian H F, Wu M Q, et al. 2017. Rapid mapping of winter wheat in Henan Province. Journal of Geo-information Science, 19(6):846-853. ] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.00846

## 河南省冬小麦快速遥感制图

王九中<sup>1</sup>,田海峰<sup>2,3\*</sup>,邬明权<sup>2</sup>,王力<sup>2</sup>,王长耀<sup>2</sup>

1. 北京林业大学,北京 100083; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京 100101; 3. 中国科学院大学,北京 100049

### Rapid Mapping of Winter Wheat in Henan Province

WANG Jiuzhong<sup>1</sup>, TIAN Haifeng<sup>2,3\*</sup>, WU Mingquan<sup>2</sup>, WANG Li<sup>2</sup> and Wang Changyao<sup>2</sup>

1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** At present, there are several problems in mapping winter wheat using remote sensing technology at regional scale. These problems can be the differences in phenology of winter wheat, complex ground environment and data-processing, redundant remotely sensed data, difficulty of choosing appropriate samples and low accuracy. In order to solve these problems, a novel method was proposed and tested in Henan province. 2296 scenes of Landsat images in 2002 and 2015 were processed using Google Earth Engine. Google Earth Engine is the most advanced cloud-based geospatial processing platform in the world. It combines Google-scale storage and processing power in order to make substantial progress on global challenges involving large geospatial datasets. A novel method called Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)-remodel-amplification was proposed to construct a universal model for mapping winter wheat at regional scale. The steps of the method is as follows: Landsat images from September 15 to November 15 were chosen to compute NDVI. Then, we selected the minimum NDVI as the first sequence of NDVI (recorded as  $NDVI_1$ ) at the pixel scale. In the same way, Landsat images from December 1st to March 31st were chosen to compute NDVI. Then, we selected the maximum NDVI as the second sequence NDVI (recorded as  $NDVI_2$ ) at the pixel scale. Then, amplification between  $NDVI_1$  and  $NDVI_2$  was computed and recorded as  $NDVI_{increase}$ . A pixel would be regarded as winter wheat if its  $NDVI_{increase}$  value is more than 1.3 and its  $NDVI_2$  value is more than 0.34. The results showed that winter wheat is mainly located in the middle-eastern plains and in Nanyang basin of Henan province with the characteristics of concentrated and contiguous distribution. The planting area of winter wheat in 2015 and 2002 was 56 055.79 km<sup>2</sup> and 47 296.11 km<sup>2</sup>, respectively, with an accuracy of 97% based on statistical data. From 2002 to 2015, there was a significant change in the distribution of winter wheat in Henan Province. The trend of overall sown area was increasing. Compared with that in 2002, the area of winter wheat in 2015 increased by 8759.69 km<sup>2</sup> or 18.52%. Comparing with conditional winter wheat mapping method, this proposed method is based on Google Earth Engine showing a great improvement in both of data-processing and mapping efficiency.

**Key words:** Google Earth Engine; Landsat; Henan province; winter wheat; remote sensing

收稿日期 2017-03-07;修回日期:2017-04-14.

基金项目 国家自然科学基金项目(4130139、41371358);河北省自然科学基金项目(D2015207008)。

作者简介 王九中(1967-),男,河北人,博士生,主要从事生态学研究。E-mail: wangjiuzhong0103@163.com

\*通讯作者:田海峰(1988-),男,河南商丘人,博士生,主要从事全球变化遥感研究。E-mail: haifengd\_tg@163.com

\*Corresponding author: TIAN Haifeng, E-mail: haifengd\_tg@163.com

**摘要** 在省域尺度上,冬小麦遥感识别中存在冬小麦物候不一致、地表环境复杂、数据处理复杂、遥感数据冗余、选择适当的分类样本困难、分类精度低等问题,而遥感数据云平台为解决这些问题提供了良好的数据基础和数据处理能力。以河南省为研究区,以谷歌地球引擎(Google Earth Engine)云平台为支撑,基于2015年和2002年前后年份河南省冬小麦识别关键期内的2296景Landsat遥感影像,采用NDVI重构增幅算法建立冬小麦大区域遥感快速制图模型,实现了2015年和2002年的河南省冬小麦分布制图。结果表明:2015年和2002年冬小麦种植面积分别为56 055.79 km<sup>2</sup>和47 296.11 km<sup>2</sup>,与统计数据比,精度达到97%;2002–2015年,河南省冬小麦种植分布存在明显变化,总体播种面积呈增加趋势,2015年比2002年增加8759.69 km<sup>2</sup>,增幅为18.52%。与传统计算机冬小麦制图方法相比,基于Google Earth Engine云平台的数据处理和制图效率均获得千倍以上的提升。

**关键词** Google Earth Engine; Landsat; 河南省; 冬小麦; 遥感

## 1 引言

冬小麦是中国重要的粮食作物之一,及时掌握其种植面积是开展冬小麦长势监测和估产工作的重要环节,可为国家相关经济决策、社会政策制定提供数据依据<sup>[1–2]</sup>。相比传统农业统计调查方法,通过遥感手段获取冬小麦种植面积具有成本低、速度快、质量可靠等优势,逐渐成为农业统计调查的重要科学方法<sup>[3–6]</sup>。

目前关于省域尺度上冬小麦遥感监测的研究,主要采用中低空间分辨率的MODIS<sup>[7–11]</sup>或FY<sup>[12]</sup>卫星遥感数据,方法主要依据时间序列NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)<sup>[13]</sup>或EVI(Enhance Vegetation Index)<sup>[8]</sup>等植被指数进行冬小麦识别,部分区域也可采用冬小麦越冬–返青期的单一时相识别冬小麦<sup>[14]</sup>。中低空间分辨率影像具有较高的时间分辨率和较宽的幅宽,有利于构建精细的时间序列植被指数以及降低影像数据处理复杂度。但是,对于准确识别省域尺度上的冬小麦种植面积,这类方法主要存在以下问题:① MODIS或FY卫星遥感影像的空间分辨率最高为250 m,会造成影像上存在大量的冬小麦与其他地物的混合像元,限制了冬小麦种植面积遥感识别的精度<sup>[8,13,15]</sup>;② 大区域尺度上的物候存在一定的区域差异<sup>[8,16]</sup>,造成冬小麦时间序列植被指数曲线存在区域异质性,采用单一的时间序列植被指数样本曲线难以准确识别整个研究区的冬小麦,分子区域构建样本曲线存在工作难度大、不便开展业务化运行等问题;③ 构建时间序列植被指数曲线的时间跨度一般为冬小麦播种至收割的整个生长期,该方法获取冬小麦种植面积的时效性差<sup>[16]</sup>;④ 依据单时相影像识别冬小麦的方法要求研究区内没有常绿林种植,该方

法具有地域局限性。采用中高空间分辨率影像数据(如Landsat)可以有效提高冬小麦的识别精度<sup>[14,17–19]</sup>,但这类数据的时间分辨率和幅宽难以满足大区域尺度冬小麦遥感监测的要求<sup>[20]</sup>。较窄的幅宽意味完全覆盖研究区需要多景影像,极大地增加了影像数据传统处理的复杂度,增加数据处理难度,对计算机软硬件提出了新的要求。同时,这些影像的成像时间不一致,无论是采用时间序列植被指数方法<sup>[7]</sup>,还是机器学习等方法<sup>[9]</sup>,均增加了冬小麦遥感识别的不确定性和难度。中国高分一号卫星宽视场角传感器影像(GF1-WFV)在幅宽和时间分辨率上相对Landsat影像有了一定程度的改进,有利于大范围的遥感监测应用<sup>[21]</sup>,但依然面临大尺度遥感应用的难题,目前尚未检索到利用GF1-WFV影像在省域尺度或更大尺度上的冬小麦遥感监测研究。基于GF1-WFV影像的冬小麦遥感监测主要集中在县域或更小尺度上<sup>[1–2,22]</sup>。GF1-WFV影像需做辐射定标、大气校正、几何精校正、拼接等预处理<sup>[1]</sup>,特别是几何精校正工作量大,限制了GF1-WFV影像在大区域尺度上的应用。

以谷歌地球引擎(Google Earth Engine, <https://developers.google.com/earth-engine/>)为代表的遥感云平台,存储了Landsat、MODIS、Sentinel等国际主要卫星遥感平台的完备数据,具有强大的数据存储和管理能力以及数据处理能力,为大范围遥感技术应用提供了技术手段。目前国外已经开展了基于该平台的遥感制图研究<sup>[23]</sup>,涉及水稻遥感制图<sup>[24]</sup>、城市面积变化遥感监测<sup>[25–26]</sup>、湿地动态监测<sup>[27]</sup>等领域,但尚未检索到国内基于该平台开展的遥感制图研究。

为解决大区域尺度上冬小麦快速遥感制图面临的问题与难题,本研究以河南省为研究区,基于

Google Earth Engine 云平台, 利用 Landsat 遥感影像, 构建 NDVI 重构增幅模型进行冬小麦大区域遥感快速制图研究。

## 2 谷歌地球引擎介绍

谷歌地球引擎是世界上最先进的、专门处理卫星图像和其他地球观测数据的云端运算平台, 由谷歌、卡内基梅隆大学、美国地质调查局联合开发。该平台存储了公开可用的全球尺度上的近 40 年的遥感影像 (Landsat、MODIS、Sentinel 等) 和其他数据的 PB 级存档, 并且数据不断更新, 优化了用于地理空间数据并行处理的 Google 计算基础架构。谷歌地球引擎的各项主要功能通过 JavaScript 和 Python 中提供的应用程序接口 (Application Programming Interface, API) 实现, 该 API 支持复杂的地理空间分析, 包括叠加、地图代数、数组运算、影像处理、分类、变化检测、时间序列分析、影像拼接、栅格矢量转换、基于矢量的图像统计提取等, 算法可以不断被添加、增强和更新。通过 API, 用户可以自由地编写更复杂的分析, 并创造性地重组现有算法, 通过图表导出结果报告。计算方式上采用即时分布式并行化计算模型, 即在 Google 数据中心的许多计算机上的许多 CPU 上同时运行, 极大地提高了运算效率。其他具体介绍见谷歌地球引擎官方网站 (<https://developers.google.com/earth-engine/>)。谷歌地球引擎云平台这种结合大数据和先进技术的特点使

其具有以下优势:

(1) 前所未有的速度。在顶级的台式计算机上, 可能需要几天或几周的时间才能完成的影像计算与分析, 在谷歌地球引擎云平台上几个小时就可以完成。

(2) 易于使用和降低成本。通过任何 Web 浏览器可以轻松访问数据, 具备科学算法和超强计算能力的在线云平台可以显著降低地理空间数据分析的成本和复杂性。

(3) 全球尺度。谷歌地球引擎具备全球尺度的空间计算分析能力。

## 3 研究区概况

河南省位于中国中东部、黄河中下游, 全省介于北纬  $31^{\circ}23'$ ~ $36^{\circ}22'$ 、东经  $110^{\circ}21'$ ~ $116^{\circ}39'$  之间, 如图 1 所示。河南省地势特征总体为西高东低, 横跨暖温带半湿润半干旱气候和亚热带湿润半湿润气候, 全年无霜期从北往南为 189~240 d, 全省年均日照 1489~1848 h, 年平均气温  $12.8\sim 15.5^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量约 530~900 mm。河南省有中国第一农业大省、第一粮食生产大省之称, 是中国冬小麦主产区之一, 冬小麦播种面积及产量居全国各省市首位 (<http://www.moa.gov.cn/>)。据农业部公布的农时农事信息 (<http://www.moa.gov.cn/>), 河南省冬小麦一般 10 月播种, 11 月出苗分蘖, 12~1 月分蘖越冬, 2~3 月越冬返青, 4 月拔节抽穗, 5 月开花乳熟, 6 月成熟收

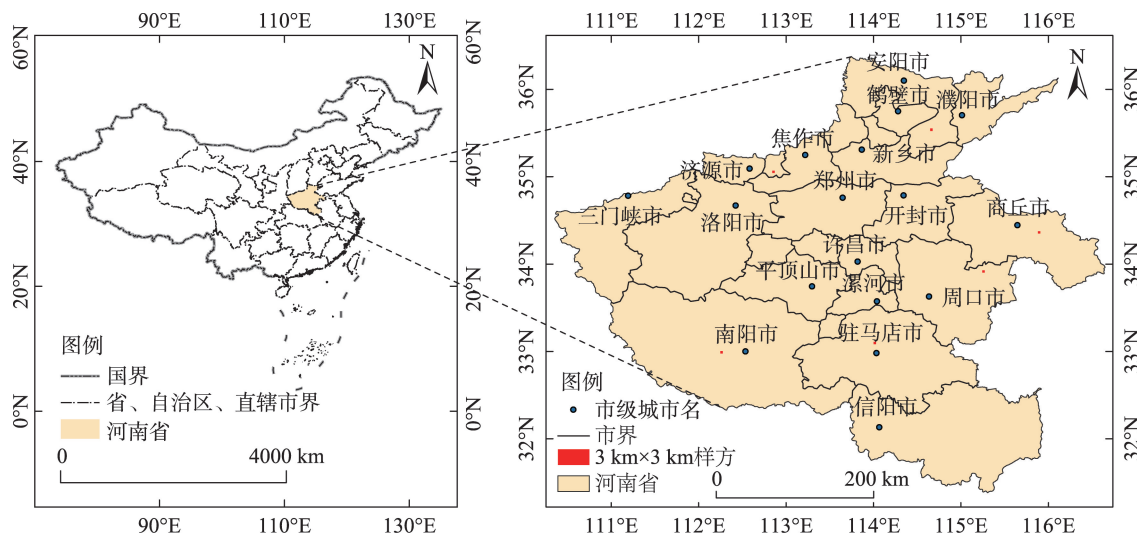


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area



获。冬小麦的越冬特性为遥感监测冬小麦提供了有利条件,10月至次年3月冬小麦的NDVI值呈现由低至高的过程,其他非越冬植被则与之相反,因此10月至次年3月是遥感监测冬小麦的关键期。

## 4 研究数据及处理

### 4.1 Landsat遥感影像及处理

美国Landsat系列卫星由美国宇航局和美国地质调查局共同管理。自1972年起,Landsat系列卫星陆续发射了8颗(第6颗发射失败),目前Landsat-7和Landsat-8在运行工作,但Landsat-7自2013年开始出现故障,导致影像存在条带状损失,其他卫星已停止工作。本文以空间分辨率为30 m的Landsat-8、Landsat-7和Landsat-5卫星影像为数据源,提取河南省2015年和2002年冬小麦种植分布状况。Landsat-5/7/8的时间分辨率为16 d,受云雨天气影响,仅1年关键期内的遥感影像不能够完全覆盖全省,同时由于相近年份的冬小麦种植区域变化不大,因此将筛选影像的时间向前后推1-2年,即选取2013-2016年相应时间段内的影像作为2015年冬小麦遥感监测的数据源,选取1999-2004年相应时间段内的影像作为2002年冬小麦遥感监测的数据源(2002年前后高质量的影像少)。

谷歌地球引擎云平台具有强大的处理遥感大数据的能力,利用该平台完成Landsat影像的辐射定标、几何校正、去除云影响、NDVI计算、影像拼接、影像下载等工作。

### 4.2 土地利用数据及统计数据

在河南省均匀选择6个约3 km×3 km(图1)、空间分辨率为0.5 m的Google earth影像样方(其中2个样方的成像时间为2015年3月28日,其余4个样方的成像时间分别为2016年5月16日、10月4日、11月13日、12月22日),通过人工目视解译获得6个样方耕地地块信息,然后结合农户走访调查数据确定种植冬小麦的地块,以获得冬小麦实际种植分布图,用于分类结果的精度评价。从农业部种植业司统计数据(<http://www.zzys.moa.gov.cn/>)下载河南省冬小麦种植面积数据,用于冬小麦提取结果的数量精度评价。

## 5 研究方法

利用谷歌地球引擎云平台对2015年和2002年

前后年份冬小麦识别关键期内的2296景Landsat遥感影像进行辐射定标、几何校正、去除云影响、NDVI计算、影像拼接、影像下载等处理,采用NDVI重构增幅算法建立冬小麦大区域遥感快速制图的通用模型,实现2002年和2015年的河南省冬小麦制图。具体技术路线如图2所示。

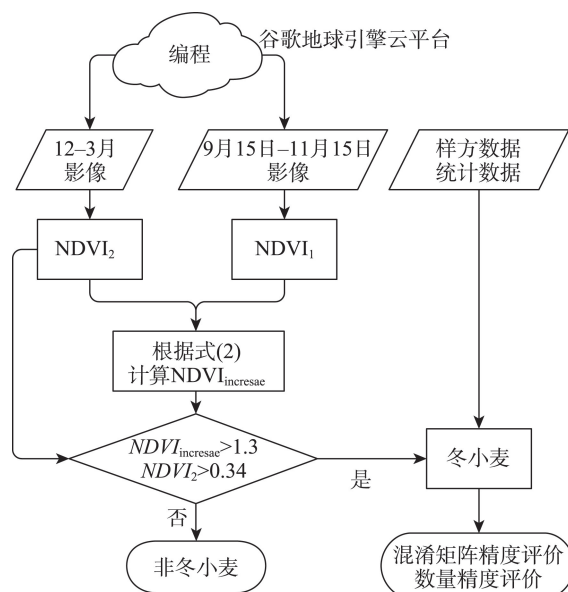


图2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

### 5.1 NDVI重构增幅算法

采用时间序列NDVI进行农作物遥感识别是常用的一种有效方法<sup>[28]</sup>。NDVI的计算公式为<sup>[29]</sup>:

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red}) \quad (1)$$

式中:  $\rho_{nir}$ 、 $\rho_{red}$  分别表示遥感影像中近红外波段、红色波段的反射率。

虽然时间序列NDVI在农作物遥感识别中十分有效,但针对冬小麦而言这种方法存在上述提及的一系列问题。NDVI重构增幅算法打破了NDVI正常时间序列,最大限度地汲取NDVI时间序列所携带的有用信息,摒弃冗余信息,同时降低NDVI时间序列长度,以构建在冬小麦生长早期获得其种植面积的通用模型,有效地解决目前大区域尺度上冬小麦遥感识别中存在的冬小麦物候不一致、地表环境复杂、数据处理复杂、遥感数据冗余、分类样本选择困难、分类精度低等问题。

本算法以像元为基本单元,在每个像元位置上筛选9月15日至11月15日NDVI的最小值,得到一幅9月15日至11月15日的最小NDVI图像,将其作为NDVI第一序列(记为NDVI<sub>1</sub>);在每个像元位置



上筛选12月1日至次年3月31日NDVI的最大值,得到一幅12月1日至次年3月31日的最大NDVI图像,作为NDVI第二序列(记为 $NDVI_2$ ),即将正常的NDVI时间序列重构为 $NDVI_1$ 和 $NDVI_2$ 。具体Landsat影像数量为:2013–2015年9月15日至11月15日317景;2013–2016年12月1日至次年3月31日693景;1999–2003年的9月15日至11月15日410景;1999–2004年的12月1日至次年3月31日876景。

9月15日至11月15日是冬小麦的播种出苗期<sup>[7]</sup>,这一时期冬小麦的NDVI值在其整个生长期中几乎是最小的,这是冬小麦NDVI时间序列中的第一个主要特征。这一时期的常绿林以及部分落叶林的叶片呈绿色,NDVI值较冬小麦种植地块的NDVI值高,因此 $NDVI_1$ 能够有效地将这部分植被与冬小麦区分开。12月1日至次年3月31日是冬小麦越冬返青期<sup>[7]</sup>,这一时期冬小麦NDVI值不断增加,因此 $NDVI_2$ 不仅能够有效区分冬小麦与建筑用地、裸土、草地等,还能够有效识别 $NDVI_1$ 未能识别的落叶林。

随着冬小麦不断生长,影像中冬小麦会对相邻的非冬小麦地物的光谱产生影响,导致其NDVI呈不断增加的趋势。为解决这一问题,本文提出了NDVI增长幅度(即增幅,记为 $NDVI_{increase}$ )这一概念,计算公式如下:

$$NDVI_{increase} = (NDVI_2 - NDVI_1) / |NDVI_1| \quad (2)$$

通过237个采样点与Google Earth影像的对照实验证明,自冬小麦播种至次年3月31日之前,冬小麦NDVI的增长幅度在1.3之上(即 $NDVI_{increase}$ 大于1.3), $NDVI_2$ 在0.34之上,据此构建冬小麦识别的决策树模型以实现冬小麦的提取。

采用前后推1–2年获取遥感数据的方法存在一定局限性,为了验证本文方法对某一年冬小麦种植面积识别的可靠性,增加遥感数据丰富的小区域研究。具体研究区域为图1中的商丘市,以2015年的冬小麦为研究对象,以2014年9月15至2015年3月31日的Landsat遥感影像为数据基础开展小区域实验研究。

## 5.2 精度验证方法

采用混淆矩阵精度和数量精度2种方式对分类结果进行精度评价。混淆矩阵精度评价方法是通过人工目视解译获得6个样方(均匀分布在河南省的6个约3 km×3 km、空间分辨率为0.5 m的

Google earth影像样方)的冬小麦真实分布的矢量数据,然后将矢量数据转成栅格数据以与分类结果构建精度评价混淆矩阵。为了与30 m空间分辨率分类结果数据匹配,在矢量转栅格的过程中,采用最大面积法将人工解译数据重采样为30 m。以2015年和2002年农业部种植业司统计数据为真值完成数量精度评价;同时,统计样方内的冬小麦面积,完成样方内的数量精度评价。

## 6 结果与分析

### 6.1 分类结果与精度评价

分类结果表明,河南省2015年和2002年冬小麦种植面积分别为56 055.79 km<sup>2</sup>和47 296.11 km<sup>2</sup>(图3(a)、(b)),冬小麦主要分布在河南省中东部平原和南阳盆地,具有分布集中连片的特征。农业部种植业司公布的河南省2015年和2002年冬小麦种植面积分别为54 256 km<sup>2</sup>和48 557 km<sup>2</sup>。与该数据相比,本文的数量精度分别为96.68%和97.40%。

利用基于Google Earth影像人工解译的冬小麦数据进行混淆矩阵精度评价,结果表明:6个样方平均总体精度为93.16%,kappa系数为0.81,以样方内冬小麦面积为真值的数量精度为97.37%(鉴于篇幅,图4仅给出了样方1的精度评价过程及结果)。本文方法的数量精度比前人大区域冬小麦识别的数量精度高5%~15%<sup>[5,8–9]</sup>,相同数据源的情况下与前人小区域尺度上(县域尺度)冬小麦识别的数量精度相当<sup>[14,20]</sup>。分析图4(d)可知,本文的冬小麦错分现象(即将其他地物识别为冬小麦)主要存在于农村道路网上,实地调研发现农村道路(含道旁沟渠)的宽度一般在15 m以下,空间分辨率为30 m的Landsat影像对这类线状地物的识别能力较差,易将其错分为冬小麦;冬小麦的漏分现象主要分布在村落周边,村落边界不规则,镶嵌在村落周边的冬小麦种植地块难以被识别。

以商丘市为例的小区域研究结果表明,采用2014年9月15至2015年3月31日的Landsat遥感影像和本文方法获取2015年商丘市冬小麦种植面积为5966.18 km<sup>2</sup>(图5),与河南省统计年鉴(<http://www.ha.stats.gov.cn/hntj/lib/tjnj/2016/indexch.htm>)公布的2015年商丘市冬小麦种植面积(5827.70 km<sup>2</sup>)相比,数量精度为97.62%。这说明本文方法在数据源充足的情况下,采用当年数据获取当年冬小麦种植面积是可行的、准确的、科学的。

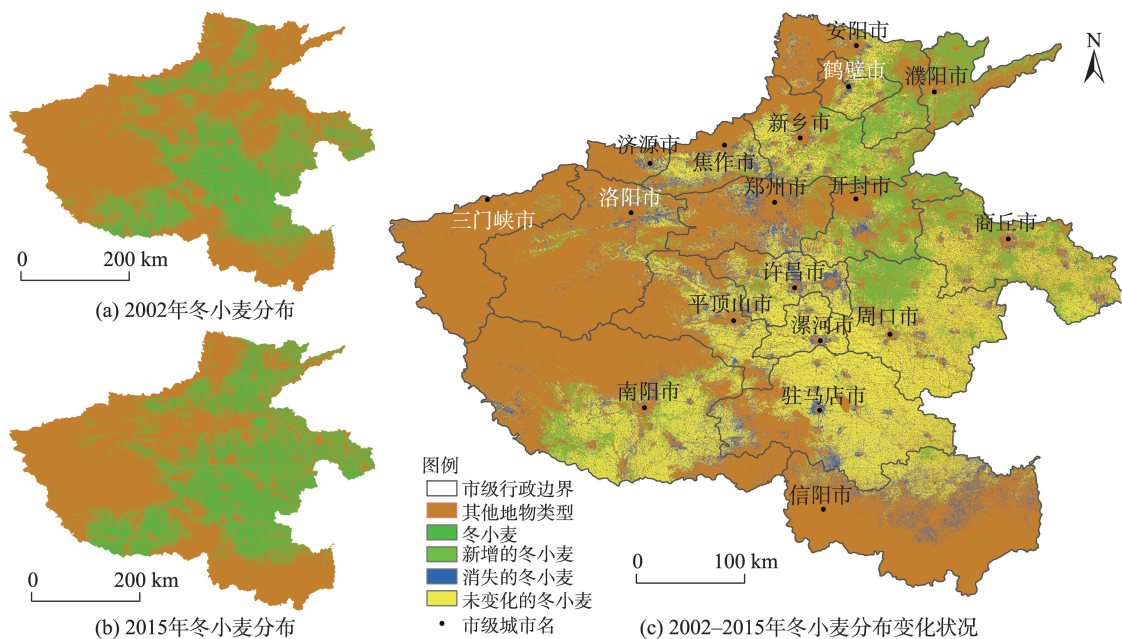


图3 河南省2002-2015年冬小麦种植分布及其变化状况

Fig. 3 The distribution of winter wheat and its change in Henan province from 2002 to 2015

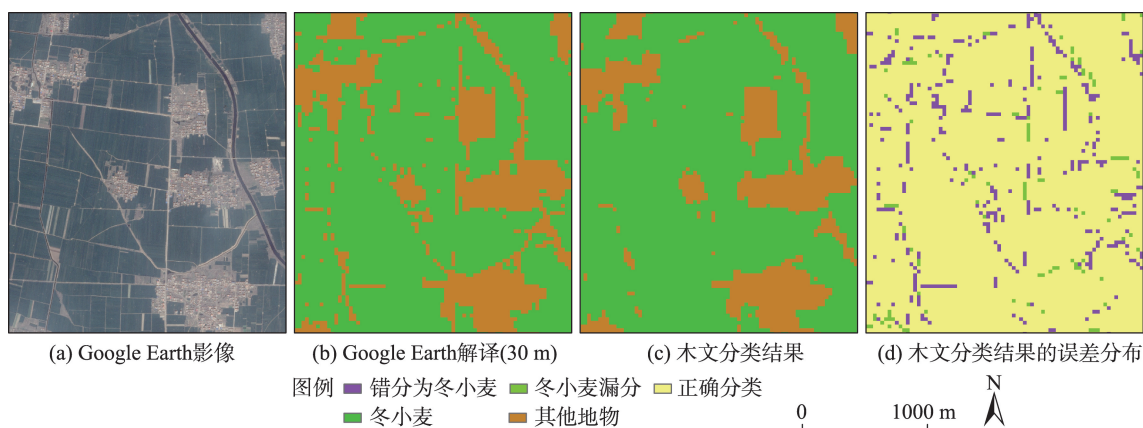


图4 冬小麦精度分析

Fig. 4 Accuracy analysis of winter wheat

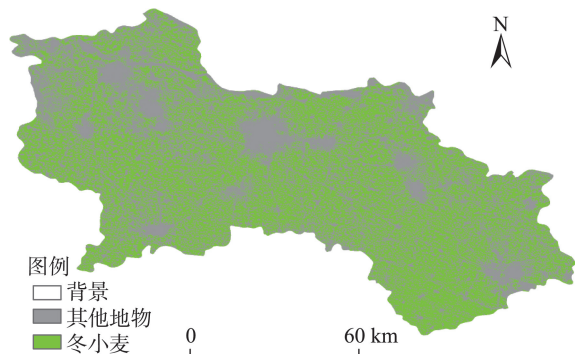


图5 商丘市2015年冬小麦种植分布

Fig. 5 The distribution of winter wheat in ShangQiu in 2015

## 6.2 冬小麦分布变化监测

2002-2015年,河南省冬小麦种植分布存在明显变化,图3(c)具体表明了河南2015省年冬小麦种植分布较2002年的变化状况。河南省2015年较2002年新增冬小麦播种面积18 269.97 km<sup>2</sup>,占2002年播种面积的38.63%,主要集中在周口北部、开封大部、商丘西北部、新乡安阳东部及其以东地区,这与当地大力改造盐碱地有很大关系。2015年比2002年消失的冬小麦面积达9510.28 km<sup>2</sup>,占2002年播种面积的20.11%,主要分散分布在城市周边以及淮河干流以南地区。随着社会经济飞速发展,城市用地不断扩张,侵占农用地是冬小麦在城市周边

消失的主要原因;淮河干流以南地区冬小麦消失与当地种植结构改变有关。总体上,河南省冬小麦种植面积呈增加趋势,2015年比2002年增加8759.69 km<sup>2</sup>,增幅为18.52%。

## 7 结论与讨论

谷歌地球引擎云平台有效地解决了遥感大数据处理复杂的问题。本文提出的NDVI重构增幅算法可以有效实现省级冬小麦面积提取,提取的河南省2015年和2002年冬小麦种植面积分别为56 055.79 km<sup>2</sup>和47 296.11 km<sup>2</sup>,与统计数据相比,精度分别为96.68%和97.40%。与传统基于普通计算机的冬小麦制图方法相比,该方法具有数据处理效率高、制图速度快等特点。然而,该方法只利用了Landsat一种遥感数据源,当遥感监测某一年的冬小麦种植分布情况时,存在数据源不能全覆盖研究区的问题,开展多源遥感数据去云算法研究以及利用多源遥感数据时空融合方法融合多源遥感数据是解决该问题的关键,是未来研究的重点之一<sup>[30-32]</sup>。油菜、大蒜等作物也有越冬习性,河南省的油菜、大蒜种植面积相对冬小麦种植面积而言是极少的,可以忽略这2种作物对冬小麦遥感识别的影响,但对于有大面积种植油菜、大蒜的区域而言,则需要考虑这种影响。如何将油菜、大蒜与冬小麦区分开,是本文模型优化的一个重要方向。

### 参考文献(References):

- [1] 王利民,刘佳,杨福刚,等.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, et al. 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.]
- [2] 马尚杰,易湘生,游炯,等.基于GF-1影像的冬小麦种植面积核算及直补政策实施评价[J].农业工程学报,2016,32(18):169-174. [Ma S J, Yi X S, You J, et al. Winter wheat cultivated area estimation and implementation evaluation of grain direct subsidy policy based on GF-1 imagery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(18):169-174.]
- [3] Ma Y, Wang S, Zhang L, et al. Monitoring winter wheat growth in North China by combining a crop model and remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008,10(4SI):426-437.
- [4] Jain M, Srivastava A K, Balwinder-Singh, et al. Mapping smallholder wheat yields and sowing dates using micro-satellite data[J]. Remote Sensing, 2016,8(10):1-18.
- [5] 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 Q, Li D D, Chen Z X, 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.]
- [6] 权文婷,王钊.冬小麦种植面积遥感提取方法研究[J].国土资源遥感,2013,25(4):8-15. [Quan W T, Wang Z. Researches on the extraction of winter wheat planting area using remote sensing method[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013,25(4):8-15.]
- [7] 王学,李秀彬,谈明洪,等.华北平原2001-2011年冬小麦播种面积变化遥感监测[J].农业工程学报,2015,38(8):190-199. [Wang X, Li X B, Tan M H, et al. Remote sensing monitoring of changes in winter wheat area in North China Plain from 2001 to 2011[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,38(8):190-199.]
- [8] 张霞,帅通,杨杭,等.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, Shuai T, Yang H, et al. 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.]
- [9] 许文波,张国平,范锦龙,等.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, et al. Remote sensing monitoring of winter wheat areas using MODIS data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(12):144-149.]
- [10] Ren J, Chen Z, Zhou Q, et al. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008,10(4SI):403-413.
- [11] Upadhyay P, Ghosh S K, Kumar A. Temporal MODIS data for identification of wheat crop using noise clustering soft classification approach[J]. Geocarto International, 2016,31(3):278-295.
- [12] 樊香所,许文波,范锦龙.FY-3/250m分辨率数据的华北平原冬小麦提取[J].遥感学报,2015,19(4):586-593. [Fan X S, Xu W B, Fan J L. Mapping winter wheat growing areas in the North China Plain with FY-3 250 m resolution data[J]. Journal of Remote Sensing, 2015,19(4):586-593.]
- [13] 李乐,张锦水,朱文泉,等.地块支持下MODIS-NDVI时间



- 序列冬小麦种植面积测量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011,31(5):1379-1383. [ Li L, Zhang J S, Zhu W Q, et al. Winter wheat area estimation with MODIS-NDVI time series based on parcel[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011,31(5):1379-1383. ]
- [14] 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.]
- [15] 李颖,陈秀万,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 Y, Chen X W, Duan H W, 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. ]
- [16] 张霞,焦全军,张兵,等.利用MODIS\_EVI图像时间序列提取作物种植模式初探[J].农业工程学报,2008,24(5):161-165. [ Zhang X, Jiao Q J, Zhang Bing, et al. Preliminary study on cropping pattern mapping using MODIS\_EVI image time series[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(5):161-165. ]
- [17] Liu J, Pattey E, Jogo G. Assessment of vegetation indices for regional crop green LAI estimation from Landsat images over multiple growing seasons[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,123:347-358.
- [18] Edlinger J, Conrad C, Lamers J P A, et al. Reconstructing the spatio-temporal development of irrigation systems in Uzbekistan using Landsat time series[J]. Remote Sensing, 2012,4(12):3972-3994.
- [19] Lyle G, Lewis M, Ostendorf B. Testing the temporal ability of Landsat imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale[J]. Remote Sensing, 2013,5(4):1549-1567.
- [20] 张建国,李宪文,吴延磊.面向对象的冬小麦种植面积遥感估算研究[J].农业工程学报,2008,24(5):156-160. [ Zhang J G, Li X W, Wu Y L. Object oriented estimation of winter wheat planting area using remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(1):156-160. ]
- [21] 王来刚,贾玉秋,李冰,等.基于GF-1与Landsat-8多光谱遥感影像的玉米LAI反演比较[J].农业工程学报,2015,31(9):173-179. [ Wang L G, Jia Y Q, Li B, et al. Comparison between GF-1 images and Landsat-8 images in monitoring maize LAI[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(9):173-179. ]
- [22] 黄健熙,贾世灵,武洪峰,等.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(S1):253-259. [ Huang J X, Jia S L, Wu H F, et al. Extraction method of crop planted area based on GF-1 WFV image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,S1:253-259. ]
- [23] Padarian J, Minasny B, McBratney A B. Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping[J]. Computers & GeoSciences, 2015,83:80-88.
- [24] Dong J, Xiao X, Menarguez M A, et al. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine[J]. Remote sensing of environment, 2016,185:142-154.
- [25] Goldblatt R, You W, Hanson G, et al. Detecting the boundaries of urban areas in India: A dataset for Pixel-Based image classification in Google Earth engine[J]. Remote Sensing, 2016,8(8):634.
- [26] Patel N N, Angiuli E, Gamba P, et al. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015,35(B):199-208.
- [27] Tang Z, Li Y, Gu Y, et al. Assessing Nebraska playa wetland inundation status during 1985-2015 using Landsat data and Google Earth Engine[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016,188(12):654.
- [28] Wei W, Wu W, Li Z, et al. Selecting the optimal NDVI time-series reconstruction technique for crop phenology detection[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2016,22(2SI):237-247.
- [29] Ke Y, Im J, Lee J, et al. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2015,164:298-313.
- [30] Wu M, Wu C, Huang W, et al. An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining Landsat and MODIS data to generate daily synthetic Landsat imagery[J]. Information Fusion, 2016,31:14-25.
- [31] Wu M, Zhang X, Huang W, et al. 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.
- [32] Wu M, Niu Z, Wang C, 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, 2012,6:1-8.