

# 基于光能利用率模型的松嫩平原玉米单产估算

史晓亮<sup>1</sup>, 杨志勇<sup>2</sup>, 王馨爽<sup>3</sup>, 薛羽梅<sup>1</sup>, 刘峰<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2. 中国水利水电科学研究院  
水资源研究所, 北京 100038; 3. 国家测绘地理信息局陕西基础地理信息中心, 西安 710054)

**摘要:**区域作物产量估测对于农业用地管理、粮食安全和宏观调控具有重要意义。以中国重要的玉米主产区之一松嫩平原为研究区,利用2001—2013年长时间序列遥感和气象数据,基于光能利用率模型估算玉米生育期5—9月累积地上生物量,进而根据地面实测的玉米收获指数校正,建立了研究区玉米单产估算模型。结果表明:该模型估算结果达到了大范围估产的精度要求;2001—2013年松嫩平原年均玉米单产为12 397.44 kg/hm<sup>2</sup>,总体呈增加趋势。该区玉米单产空间分布差异显著,总体为西低东高。从玉米单产年际变化的空间分布来看,研究区91.7%的区域玉米单产均有所增加,尤其是在松嫩平原西部的白城、齐齐哈尔等地,增产趋势更为明显。松嫩平原南部地区玉米单产与降水间具有显著的正相关性,但与气温呈负相关性,而研究区其他地区玉米单产与降水和气温相关性不明显。

**关键词:**松嫩平原;玉米单产;遥感;光能利用率

**中图分类号:**S127

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2017)05-0385-06

## Maize Yield Estimation Based on Light Efficiency Model in Songnen Plain, Northeast China

SHI Xiaoliang<sup>1</sup>, YANG Zhiyong<sup>2</sup>, WANG Xinshuang<sup>3</sup>, XUE Yumei<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;  
3. Shannxi Geomatics Center of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Regional estimation of crop yield is critical for many applications such as agricultural land management, food security and macro-control. In the paper, the accumulated aboveground dry biomass in maize growing season from May to September every year were estimated using the long time sequenced remote sensing and meteorological data from 2001 to 2013 based on light use efficiency. Finally, we built the estimation model of maize yield through converting the calculated ground dry biomass to yield by harvest index. The results showed that the estimated yields can meet the precision requirements for estimating crop yield on a great scale, and it was feasible to predict maize yield by crop biomass based on remote sensing. Average annual maize yield from 2001 to 2013 was 12 397.44 kg/hm<sup>2</sup> in Songnen Plain, and the maize yield had increased over recent decades. There was significant spatial difference of maize yield, and the yield of the eastern part of the study area was higher than that of the western part. The spatial distribution of change trend of maize yield in study area from 2001 to 2013 was analyzed, which showed that about 91.7% of the study area presented an increasing yield trend, especially in the west of study area including Baicheng, Qiqihar, etc., where significant increase in maize yield had been seen. The maize yield had a significant positive correlation with the precipitation, and it had an obvious negative with temperature in the southern part of Songnen Plain. However, the maize yield had no obvious relationship with precipitation and temperature in the other area of the plain.

**Keywords:** Songnen Plain; maize yield; remote sensing; light use efficiency

收稿日期:2017-01-17

修回日期:2017-02-23

资助项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201401001);国家自然科学基金资助项目(51409204);西安科技大学科研培育基金资助项目(201605,2014008)

第一作者:史晓亮(1985—),男,陕西宝鸡人,讲师,研究方向:资源环境遥感。E-mail:s\_xiaoliang@126.com

通信作者:杨志勇(1979—),男,湖南常德人,教授级高级工程师,主要从事水文水资源、分布式水文模拟,气候变化对水资源影响等基础研究。E-mail:yangzy@iwhr.com

由于人口的不断增加和土地资源的快速减少,粮食安全问题在世界范围内备受关注,因此,及其准确地掌握一个国家或区域的粮食产量及其动态变化,对于政府部门应对粮食安全问题,维护社会可持续发展具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。传统的作物产量估测多是采用人工区域调查方法,但不可避免地存在成本高、速度慢、统计主观性强等问题,很难满足大范围估产的要求<sup>[3]</sup>。随着遥感技术的发展,凭借其宏观、及时和动态等特点,可以克服传统方法的局限,为实现快速、准确的农作物估产提供了技术手段<sup>[4]</sup>。美国每年投入8 000多万美元用于估计全球农作物产量,在世界粮食贸易中获益18亿美元<sup>[5]</sup>。中国于20世纪80年代后期开始作物长势遥感监测和估产方面的研究<sup>[6]</sup>。经过近几十年的发展,遥感估产取得了长足的发展,并得到了广泛应用<sup>[7]</sup>。

目前,作物单产的遥感估算模型主要包括产量—遥感光谱指数的简单统计相关模型、潜在一胁迫产量模型、产量构成三要素模型、作物干物质质量—产量模型等四类<sup>[7]</sup>。前三种模型均是通过将遥感信息及其辅助因子直接与产量相联系构建模型,Balaghi等利用归一化植被指数(NDVI)、降雨和温度数据建立了摩洛哥小麦经验回归模型<sup>[8]</sup>。邓坤枚等以内蒙古春小麦产区陈巴尔虎旗为研究区,利用春小麦乳黄熟期的环境减灾卫星的NDVI数据和单产构建估产模型<sup>[9]</sup>。Ren等以山东省济宁市为例,采用MODIS NDVI数据对冬小麦产量进行了估算<sup>[10]</sup>。但是此类模型均是针对特定区域,外推的适用性不高,而且缺少明确的生物物理机制,难以反映作物的生长生育过程。作物干物质—产量模型则是基于遥感数据估算地面干物质质量,进而再依据其与果实间的关系得到作物产量。由于遥感数据一般主要反映作物整体的长势状况,相对于前三种模型直接估算产量,利用其估算干物质质量更为合理,因此该方法成为当前作物单产估算的研究热点,具有更加广泛的适用性。目前计算作物干物质质量较常用的方法是基于能量平衡的参数模型。任建强等<sup>[1,4]</sup>在黄淮海典型县市基于CASA参数模型估算得到冬小麦关键生育期累积作物生物量,进而采用收获指数加以校正,构建了作物生物量与产量间的关系模型,并证明了该方法估算冬小麦单产是可行的。

松嫩平原是中国重要的农产品生产基地之一,是北方春玉米带的主要分布区,在保证国家粮食安全中起着至关重要的作用。因此,及时准确监测该地区的玉米产量,直接关系到国家农业经济的健康发展,但是目前相关研究较少。本文拟利用2001—2013年长时间序列的遥感和气象数据,基于光能利用率模型估

算松嫩平原玉米生长季累积地上生物量,通过收获指数校正估算得到研究区玉米单产,并验证模拟精度,进而分析2001—2013年松嫩平原区域玉米单产的时空演变特征。以期为大范围长时间序列作物估产提供一种可行的技术手段,并为相关政府部门制定粮食政策提供科学参考。

## 1 研究区概况

松嫩平原位于中国东北地区中西部,由松花江、嫩江冲积而成,是东北三大平原之一,也是我国重要的商品粮生产基地。松嫩平原南以松辽分水岭为界、与辽河平原相隔,北与小兴安岭山脉相连,西以大兴安岭东麓丘陵和台地为界,东至长白山外缘山麓台地,是一个四周高、中部低、由周边向中部缓慢倾斜的半封闭、不对称的沉积盆地<sup>[11]</sup>(图1)。该区地处中国湿润季风区与内陆干旱区之间的过渡带,属半干旱半湿润气候,春季干旱多风,夏季短促,冬季寒冷漫长。年均气温0~5℃,全年平均降水量400~600 mm,呈自西向东递减趋势<sup>[12]</sup>。松嫩平原的西部形成了农牧交错区,中部为典型的农业耕作区,东部为低山丘陵区。

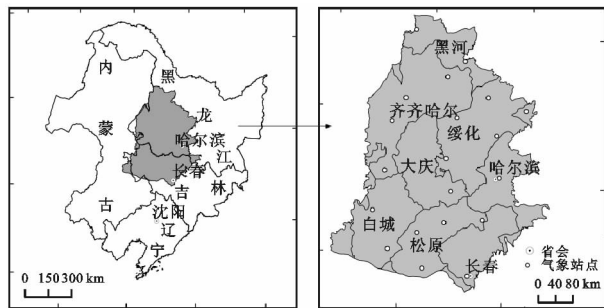


图1 松嫩平原在东北地区位置及气象站点分布

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源与处理

MODIS NDVI数据来自美国NASA的地球观测系统的2001—2013年玉米生长季5—9月的MOD13A3月值NDVI数据,空间分辨率为1 km。通过MODIS网站提供的专业处理软件MRT(MODIS Reprojection Tools)对下载获取的MODIS NDVI数据完成镶嵌、裁切、投影与格式转换等处理,得到松嫩平原长时间序列的MODIS NDVI数据集。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn>),包括研究区19个气象站点2001—2013年的逐月降水量、平均气温、逐日日照时数(图1)。日太阳总辐射量根据童成立等建立的基于站点位置和日照时数的模拟方法估算得到<sup>[13]</sup>,并汇总得到各气象站月太阳辐射量。采用IDW插值方

法,获取与 NDVI 数据具有相同投影和像元大小的月太阳辐射、降水和平均气温栅格数据集。

2009 年 9 月中下旬进行了玉米野外采样,采样范围分布在整個研究区,随机选择 32 个样点,利用收割法测量包括玉米、叶、茎等地上生物量,玉米单株产量,以及种植的株距和行距。选择其中 10 个样点估算研究区最大光能利用率和收获指数,其余样点实测数据用来对估算的玉米单产进行精度验证。

## 2.2 作物单产估算方法

本研究采用光能利用率模型和遥感数据估算作物地上生物量,然后通过收获指数校正地上生物量,估算得到作物产量<sup>[14-15]</sup>,其计算公式如下:

$$\text{Yield} = B \times \text{HI} \quad (1)$$

式中:Yield 为作物产量(g/m<sup>2</sup>);B 为作物生长季的累积地上生物量(g/m<sup>2</sup>);HI 为作物收获指数。

作物地上累积生物量可以由植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率( $\epsilon$ )两个因子来确定。

$$B = \sum \text{APAR} \times \epsilon \quad (2)$$

式中:APAR 表示作物吸收的光合有效辐射(MJ/m<sup>2</sup>); $\epsilon$  表示实际光能利用率(g/MJ)。作物吸收的光合有效辐射(APAR)计算方法为:

$$\text{APAR} = \text{SOL} \times \text{FPAR} \times 0.5 \quad (3)$$

式中:SOL 表示太阳总辐射量(MJ/m<sup>2</sup>),可由大气上界太阳辐射量和日照百分比计算。常数 0.5 表示植被利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例,FPAR 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例,计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$\text{FPAR} = \min \left[ \frac{\text{SR} - \text{SR}_{\min}}{\text{SR}_{\max} - \text{SR}_{\min}}, 0.95 \right] \quad (4)$$

式中:SR<sub>min</sub> 取值为 1.08;SR<sub>max</sub> 的大小与植被类型相关,可由文献获取<sup>[17]</sup>。SR 由 NDVI 计算得到。

$$\text{SR}(x, t) = \left[ \frac{1 + \text{NDVI}}{1 - \text{NDVI}} \right] \quad (5)$$

光能利用率  $\epsilon$  表示植被将吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率(g/MJ),可由下式计算。

$$\epsilon = T_{e1} \times T_{e2} \times W_{\epsilon} \times \epsilon_{\max} \quad (6)$$

式中: $T_{e1}$  和  $T_{e2}$  分别表示低温和高温对光能利用率的影响系数,其中, $T_{e1}$  为低温和高温情况下植物内在生化作用对光合的限制,由下式计算。

$$T_{e1} = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}} - 0.0005 \times (T_{\text{opt}})^2 \quad (7)$$

式中: $T_{\text{opt}}$  表示研究区玉米生长季内 NDVI 值达到最大时当月的平均气温。 $T_{e2}$  表示环境温度由最适宜温度向高温和低温变化时植被光能利用率逐渐变小的趋势。

$$T_{e2} = \frac{1.1814}{1 + \exp[0.2 \times (T_{\text{opt}} - 10 - T)]} \times \frac{1}{1 + \exp[0.3 \times (-T_{\text{opt}} - 10 + T)]} \quad (8)$$

式中: $W_{\epsilon}$  为水分胁迫影响系数,表示水分条件对光能利用率的影响。随着环境中有效水分的增加,其取值范围为 0.5(极端干旱条件)~1(非常湿润条件),计算式为

$$W_{\epsilon} = 0.5 + 0.5 \times \text{EET}(x, t) / \text{PET}(x, t) \quad (9)$$

式中:EET( $x, t$ ) 为实际蒸散量(mm),可根据区域实际蒸散模型求取;PET( $x, t$ ) 为潜在蒸散量(mm),可根据 Boucher 提出的互补关系求取<sup>[18]</sup>。 $\epsilon_{\max}$  表示在理想条件下植被的最大光能利用率,其取值因植被类型不同有较大差别。对于收获指数 HI,在作物成熟期将作物地上部分进行实地脱粒、晾晒和称重,将单位面积玉米粒质量与地上生物量之比确定为样点的收获指数。

## 2.3 数据分析方法

应用一元线性回归分析方法在像元尺度分析松嫩平原 2001—2013 年玉米单产的变化趋势。计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{Yield}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{Yield}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (10)$$

式中: $\theta_{\text{slope}}$  为趋势斜率,即研究时段玉米单产的变化趋势; $n$  为研究时段的年数;Yield<sub>*i*</sub> 为第  $i$  年的玉米单产。斜率为正表示研究区玉米单产在 13 a 间的变化趋势是上升的,反之表示下降。

此外,利用基于像元的相关分析方法,对 2001—2013 年松嫩平原玉米单产与主要气候因子(降水与气温)进行逐像元相关分析,使用相关系数的空间分布情况来反映玉米单产与主要气候因子的相关性。相关系数计算公式如下<sup>[20]</sup>:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

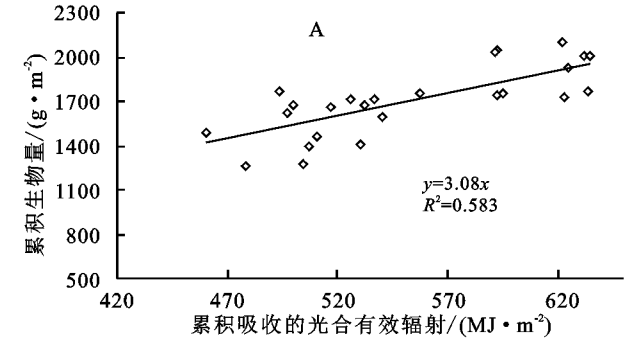
式中: $r_{xy}$  为相关系数,表示玉米单产与气候因子(降水或气温)两个要素之间的相关程度,相关系数越大,说明该像元处二者要素相关性越强。 $x_i$  表示第  $i$  年的玉米单产; $y_i$  表示第  $i$  年的降水量或气温; $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别表示两个要素的平均值。

## 3 结果与分析

### 3.1 最大光能率和收获指数估算

在基于光能利用率的作物估产方法中,最大光能率和作物收获指数是直接影响估算精度的重要参数。受到研究区所处地理位置、气候条件、土壤性质等多种因素的影响,不同区域上述两个参数的取值会有所不同。本研究中选择 10 个样点的实测玉米地上生物量与基于遥感数据估算的玉米生长季累积吸收的光

合有效辐射建立线性模型,估算得到研究区最大光能利用率为 3.08 g/MJ。在此基础上,根据实测玉米产



量和估算的地上生物量建立线性模型,获取该地区玉米的收获指数为 0.46(图 2)。

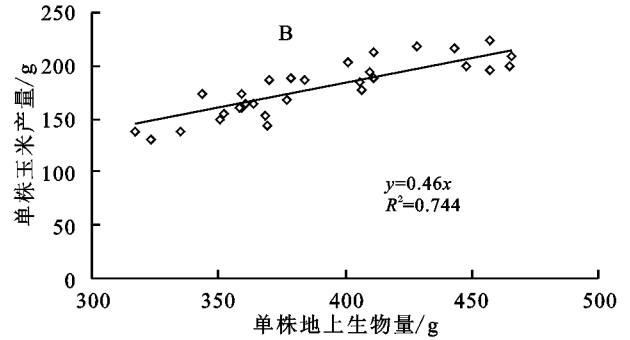


图 2 松嫩平原最大光能利用率和收获指数估算

### 3.2 玉米单产估算精度验证

为了验证研究区玉米单产估算的精度,利用其余 22 个采样点测量的单株玉米粒重及种植的株距和行距等参数计算样点玉米单产,并与估算的玉米单产进行对比发现,松嫩平原 2009 年玉米预测单产的平均绝对误差为 -484.08 kg/hm<sup>2</sup>,平均相对误差为 -5.31%,基本达到了大范围估产精度的要求。

### 3.3 松嫩平原 2001—2013 年玉米单产的时空变化特征

3.3.1 研究区玉米单产平均值的年际变化 由图 3 可见,松嫩平原 2001—2013 年玉米单产年际波动变化较大,但整体呈增加趋势。研究区玉米单产由 2001 年的 10 423.77 kg/hm<sup>2</sup> 增加到 2013 年的 13 922.7 kg/hm<sup>2</sup>,年增速为 167.55 kg/hm<sup>2</sup> ( $p<0.05$ ),13 a 间该区玉米平均单产为 12 397.44 kg/hm<sup>2</sup>。从不同阶段来看,2001—2002 年,松嫩平原玉米单产增加显著,之后到 2008 年玉米单产虽有波动,但整体呈增加趋势,2007 年产量较低,2008—2010 年研究区玉米单产有所减少,此后呈显著增加趋势。

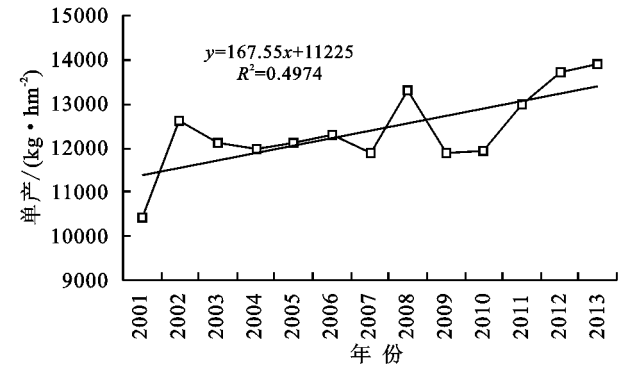


图 3 2001—2013 年松嫩平原年均玉米单产变化动态

3.3.2 研究区年均平均单产的空间分布特征 松嫩平原玉米单产分布受到气候、土壤类型、品种、耕作措施等多种因素的综合影响,空间差异显著,总体上呈西低东高。从图 4 可以看出,在吉林省白城、扶余和黑龙江省的大庆等地,由于分布有范围较大的盐碱

地,主要土壤类型为风沙土,土地生产力不高,且降水相对较少,因此玉米单产较低,多在 8 000 kg/hm<sup>2</sup> 以下。而在研究区东部的黑龙江省的黑河市、哈尔滨市以及吉林省的长春市等地,主要土壤类型为黑土和草甸黑钙土,有机质含量高,土壤肥沃,且气候适宜,因此玉米平均单产大于 13 000 kg/hm<sup>2</sup>。

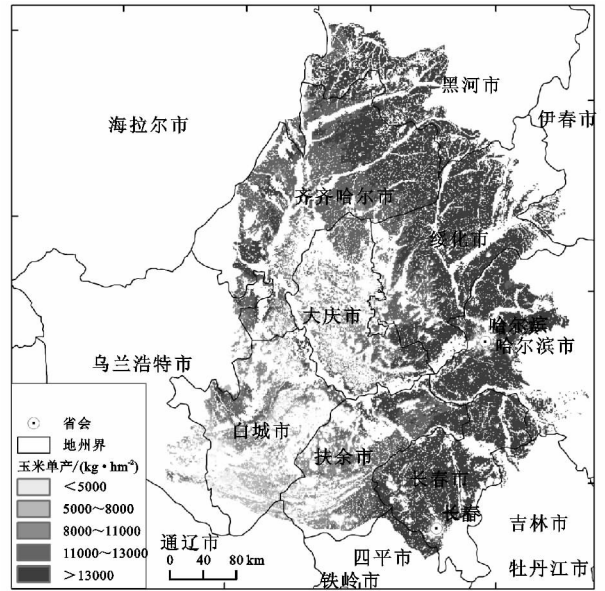


图 4 2001—2013 年松嫩平原年均玉米单产的空间分布

3.3.3 研究区年均平均单产变化趋势的空间分布 本研究进一步采用逐像元线性趋势法对 2001—2013 年松嫩平原玉米单产变化趋势进行分析。从图 5 可以看出,13 a 来整个研究区的玉米单产发生了不同程度的变化,其中松嫩平原 91.7% 的区域玉米单产有所增加,尤其是在松嫩平原西部的白城市、齐齐哈尔市南部等地,由于自然条件较差,玉米产量较低,而随着近年来节水增粮等项目的实施,玉米产量增加趋势明显。另有 8.3% 的区域玉米产量有所减少,主要分布在哈尔滨、长春市北部等部分地区,但减少趋势不明显。

### 3.4 研究区玉米单产与气候因子的相关分析

降水和气温等气候因子的变化对作物的生长发

育具有重要影响,因此本文利用逐像元的相关分析方法,分别对 2001—2013 年研究区玉米单产、年降水量和年平均气温的相关系数进行分析,从而在空间尺度上分析松嫩平原玉米产量与主要气候因子的关系,如图 6A 所示,研究区玉米单产与降水量的相关系数为 0.37,呈显著正相关( $p<0.05$ )。而从像元尺度来看,除了黑龙江省齐齐哈尔市的部分地区之外,松嫩平原大部分地区玉米单产与降水量之间表现为显著正相关( $p<0.05$ ),呈显著正相关的区域面积占全区玉米种植面积的比例达到 55.69%( $p<0.05$ )。尤其是在吉林省的白城、扶余和黑龙江省的大庆市南部等地玉米单产与降水量的相关性较高。

从图 6B 可以看出,整个松嫩平原玉米单产与平均气温的相关系数为  $-0.16 (p < 0.05)$ ,不存在明显的相关性。而从像元尺度来看,研究区玉米单产与气温呈显著负相关的地区占玉米总种植面积的  $34.87\% (p < 0.05)$ ,主要分布在吉林省的白城、扶余和长春市,黑龙江省的南部地区,以及黑河市等地。研究区玉米单产与气温呈显著正相关的地区占总面

积的 7.57%, 主要分布在黑龙江省的绥化市、齐齐哈尔市等地。可以看出, 松嫩平原大部分地区玉米单产与气温之间呈负相关性。

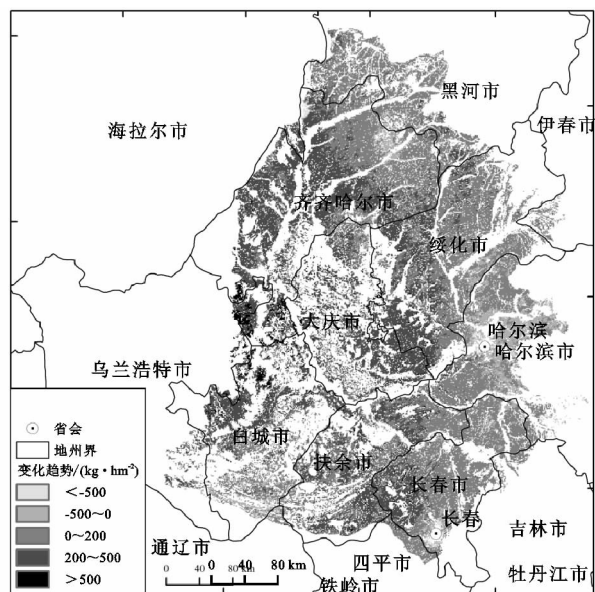


图 5 2001—2013 年松嫩平原玉米单产变化趋势

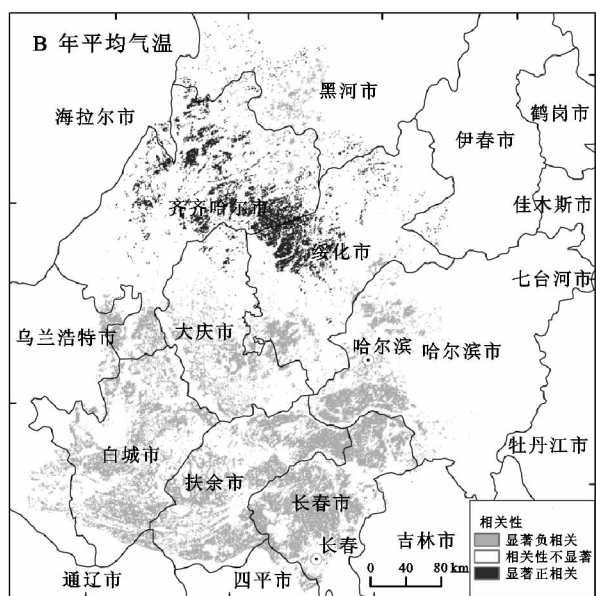
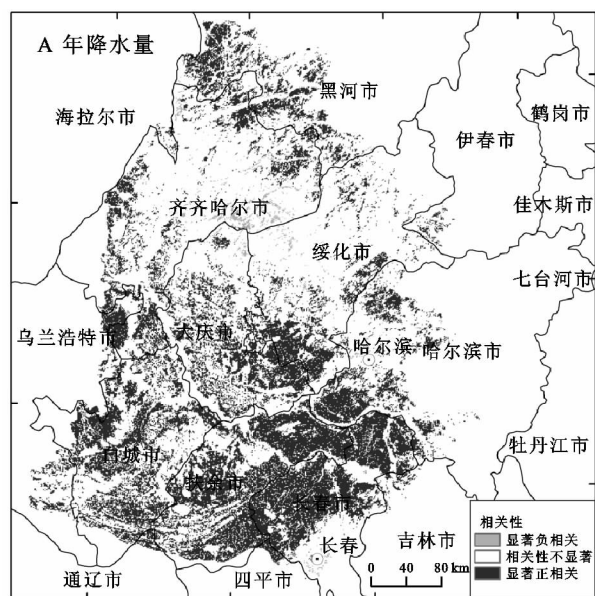


图 6 松嫩平原玉米单产与年降水量、年平均气温间的相关性空间分布

## 4 结 论

本文利用长时间序列遥感、气象等多源数据,在基于光能利用率模型计算松嫩平原玉米生育期累积生物量的基础上,构建了研究区玉米单产估算模型,并分析了时空变化特征及其与气候因子的关系,取得以下结论:

(1) 本研究基于作物干物质质量—产量模式估算松嫩平原玉米单产,结果表明该方法的估算精度可以应用于大范围作物估产研究。

(2) 松嫩平原 2001—2013 年平均玉米单产为 12 397.44 kg/hm<sup>2</sup>, 总体呈增加趋势。玉米单产空间

分布差异显著,总体表现为西低东高。而从玉米单产变化趋势的空间分布来看,研究区 91.7% 的区域玉米单产有所增加,尤其是在松嫩平原西部的白城市、齐齐哈尔市南部等地。

(3) 松嫩平原的吉林省白城、扶余、长春以及黑龙江省南部地区等地玉米单产与降水量具有较强的正相关,而与气温呈显著负相关关系。而研究区的其他地区降水和气温对玉米单产影响不明显。

## 参考文献:

- [1] 任建强,陈仲新,唐华俊,等. 基于植物净初级生产力模型的区域冬小麦估产研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22

- (5):111-117.
- [2] 赵文亮,贺振,贺俊平,等.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.
  - [3] 冯美臣,肖璐洁,杨武德,等.基于遥感数据和气象数据的水旱地冬小麦产量估测[J].农业工程学报,2010,26(11):183-188.
  - [4] 任建强,刘杏认,陈仲新,等.基于作物生物量估计的区域冬小麦单产预测[J].应用生态学报,2009,20(4):872-878.
  - [5] 吴炳方.全国农情监测与估产的运行化遥感方法[J].地理学报,2000,55(1):25-35.
  - [6] 钱永兰,侯英雨,延昊,等.基于遥感的国外作物长势监测与产量趋势估计[J].农业工程学报,2012,28(13):166-171.
  - [7] 徐新刚,吴炳方,蒙继华,等.农作物单产遥感估算模型研究进展[J].农业工程学报,2008,24(2):290-298.
  - [8] Balaghi R, Tychon B, Eerens H, et al. Empirical regression model using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008,10(4):438-452.
  - [9] 邓坤枚,孙九林,陈鹏飞,等.利用国产环境减灾卫星遥感信息估测春小麦产量:以内蒙古陈巴尔虎旗地区为例[J].自然资源学报,2011,26(11):1942-1952.
  - [10] Ren J Q, Chen Z X, Zhou Q B, et al. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China[J]. International of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008,10(4):403-413.
  - [11] 曾丽红,宋开山,张柏,等.基于SEBAL模型与MODIS产品的松嫩平原蒸散量研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(1):140-147.
  - [12] 黄志刚,王小立,肖烨,等.气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响[J].应用生态学报,2015,26(1):260-268.
  - [13] 童成立,张文菊,汤阳,等.逐日太阳辐射的模拟计算[J].中国农业气象,2005,26(3):165-169.
  - [14] Bastiaanssen W G M, Ali S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2003,94(3):321-340.
  - [15] Moriondo M, Maselli F, Bindi M. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data[J]. European Journal of Agronomy, 2007,26(3):266-274.
  - [16] 朱文泉,潘耀忠,龙中华,等.基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算:以中国内蒙古为例[J].遥感学报,2005,9(3):300-307.
  - [17] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
  - [18] 罗玲.基于遥感—机理模型的松嫩西部草地净初级生产力(NPP)模拟[D].长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2010.
  - [19] 穆少杰,李建龙,周伟,等.2001—2010年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J].生态学报,2013,33(12):3752-3764.
  - [20] 史晓亮,李颖,赵凯,等.诺敏河流域植被覆盖时空演变及其与径流的关系研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(6):54-60.

(上接第384页)

#### 参考文献:

- [1] 黄进.中国丹霞地貌研究汇报[J].热带地理,1992(SI):1-36.
- [2] 马晓勇,上官铁梁.太岳山森林群落物种多样性[J].山地学报,2004,22(5):606-612.
- [3] 岳永杰,余新晓,牛丽丽,等.北京雾灵山植物群落结构及物种多样性特征[J].北京林业大学学报,2008,30(S2):165-170.
- [4] 谢春平,方彦,方炎明.不同地区乌冈栎群落物种多样性的比较分析[J].四川师范大学学报:自然科学版,2013,36(3):451-455.
- [5] 朱渊,王小德,胡永起.浙江方岩丹霞地貌岩生植被群落特征分析[J].北方园艺,2010(10):107-109.
- [6] 周园园,王小德,符秀玉,等.浙江省江郎山丹霞地貌岩生植被群落特征[J].浙江林学院学报,2010,27(5):699-705.
- [7] 李传磊,王小德,沈年华,等.新昌丹霞地貌岩生植被群落特征研究[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2010,36(4):470-473.
- [8] 李传磊.浙江省丹霞地貌岩生植被群落特征研究[D].浙江临安:浙江农林大学,2010.
- [9] 沈年华,李传磊,王小德.浙江省丹霞地貌岩生植被类型[J].浙江农林大学学报,2011,28(4):614-618.
- [10] 贺金生,陈伟烈,江明喜,等.长江三峡地区退化生态系统植物群落物种多样性特征[J].生态学报,1998,18(4):399-407.
- [11] 王辉,贺康宁,胡兴波,等.高寒区不同树种配置对林下植被物种多样性的影响[J].水土保持研究,2012,19(3):147-150.
- [12] 邵水仙,李红丽,董智,等.退化砂石山地人工林林下植物群落特征与物种多样性[J].水土保持研究,2015,22(5):146-151,157.
- [13] 曹小玉,李际平.福寿林场杉木人工林林下植物物种多样性研究[J].西北林学院学报,2014,29(3):57-61.
- [14] 史作民,程瑞梅,刘世荣,等.宝天曼植物群落物种多样性研究[J].林业科学,2002,38(6):17-23.
- [15] 曾月娥,岳永杰,张永刚,等.图里河白桦群落结构及其物种多样性研究[J].水土保持研究,2013,20(3):155-160,166.