

张玉萍, 马占鸿. 不同施氮量下小麦遥感估产模型构建[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(6): 1325-1329.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2015.06.020

## 不同施氮量下小麦遥感估产模型构建

张玉萍<sup>1</sup>, 马占鸿<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学中国产业安全研究中心博士后科研工作站, 北京 100044; 2. 中国农业大学植物病理学系, 北京 100193)

**摘要:** 为了构建不同施氮量下的小麦遥感估产模型, 评估模型品种间的适用性, 以不同施氮量处理的小麦(2010年1个品种, 2011年3个品种)为试验材料, 分别利用2011年单一品种和3个品种小麦冠层一阶微分参数、植被指数、施氮量和产量数据进行产量模型构建, 共构建了6个模型, 利用2010、2011年的相关数据进行模型检验。结果显示, 建模和预测数据均来自同一品种时, 其预测效果在6个模型中均较稳定且较好( $R^2=0.419$ ); 建模数据来自3个品种时, 其预测效果在6个模型中也较好( $R^2=0.405$ ); 建模和预测效果检验来自不同品种时拟合和预测效果差异较大, 表明所建模型品种间适用性较差, 但是采用多品种数据建模可以提高估产效果; 6个模型均没有氮素因子, 可能是由于氮素对模型贡献不显著。

**关键词:** 小麦; 氮素; 遥感估产模型

**中图分类号:** S127      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2015)06-1325-05

## Yield estimation model of wheat based on remote sensing data under different nitrogen supply conditions

ZHANG Yu-ping<sup>1</sup>, MA Zhan-hong<sup>2</sup>

(1. Postdoctoral Programme of China Center for Industrial Security Research, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Department of Plant Pathology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** In order to build wheat yield estimation models under different nitrogen levels, and to evaluate the applicability of the models between varieties, canopy first-order differential parameters, vegetation index, nitrogen supply and yield data in 2011 from three varieties were used. Totally six yield estimation models were established. The data in 2010 were used for forecast test, and the data in 2011 were used for fitting test. When the modelling and forecast data were from the same variety, the forecast was stable ( $R^2=0.419$ ). while the modelling data was from three varieties, the forecast was good as well ( $R^2=0.405$ ). When the modelling and forecast data came from different varieties, big difference was presented between fitting and forecast results, suggestive of the poor applicability of the model among varieties. Due to the insignificant contribution to the yield estimation model, nitrogen was not included in the six models.

**Key words:** wheat; nitrogen; remote sensing; yield estimation

小麦是中国重要粮食作物之一, 其产量对保障中国粮食安全有重要意义, 及时掌握小麦估产信息

可以辅助政府相关部门进行科学管理及决策。由于中国小麦种植面积大, 统计上报比较费时, 而遥感技术以其大尺度、信息量大等特点, 在农作物面积、长势的宏观监测和估产方面有广泛应用<sup>[1-5]</sup>, 在小麦估产方面的研究也越来越多。

选取与产量相关性高的光谱指数在小麦遥感估产模型研究中至关重要。已有关于小麦遥感估产的

收稿日期: 2015-07-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD19B04)

作者简介: 张玉萍(1981-), 女, 河南安阳人, 博士, 研究方向为应用经济学和植物病理学。(E-mail) zhy117220@163.com

通讯作者: 马占鸿, (E-mail) mazh@cau.edu.cn

研究多是在均一种植条件下进行的,并且也取得不少研究成果。例如,有研究者发现,归一化差值光谱指数与产量在各个生育期都达到了显著或极显著相关水平<sup>[6]</sup>。但是在小麦实际生长过程中,天气、土壤、水分<sup>[7-8]</sup>、氮肥<sup>[9]</sup>、病害<sup>[10-11]</sup>等都会对小麦的长势造成影响。冯伟等研究发现叶片氮含量和氮积累量及叶面积氮指数在拔节至成熟期的累积值与成熟期籽粒产量的回归拟合效果最好<sup>[12]</sup>。在综合小麦产量形成过程与气候环境条件关系的基础上,可以建立较为简化的基于遥感信息的小麦估产模型<sup>[13]</sup>。混种小麦在条锈病胁迫条件下可以利用归一化植被指数(NDVI)进行产量估计<sup>[14]</sup>。由于小麦生态环境的复杂性,有必要研究多变量下小麦估产模型。本研究中,通过人为设置小麦条锈病病情及施氮量差异,研究条锈病及施氮量不均一条件下,一阶微分参数和植被指数在小麦遥感估产中的应用,评估利用单个小麦品种和 3 个小麦品种数据构建的小麦估产模型的适用情况。

## 1 材料与方 法

### 1.1 田间设计

试验田位于北京市海淀区上庄试验站。2009—2010 年试验,采用小麦品种京冬 8 号,氮素(纯氮)水平为 0 kg/hm<sup>2</sup> (N1)、75 kg/hm<sup>2</sup> (N2)、150 kg/hm<sup>2</sup> (N3)、225 kg/hm<sup>2</sup> (N4)、300 kg/hm<sup>2</sup> (N5),小区面积为 4 m×2 m,每个处理 3 次重复,随机区组排列。2010—2011 年试验,采用小麦品种京冬 8 号、京 0045、中麦 12,氮素(纯氮)水平为 0 kg/hm<sup>2</sup> (N1)、150.0 kg/hm<sup>2</sup> (N2)、300.0 kg/hm<sup>2</sup> (N3)、450.0 kg/hm<sup>2</sup> (N4),每个处理 2 次重复,随机区组排列。氮肥选用尿素,分 3 次施入,分别为播种前撒施 60%,返青期、拔节期各施 20%。

### 1.2 光谱测定方法

于晴天上午 9:00—12:00 进行光谱数据采集,采用 ASD Field spec PR1075 (325~1 075 nm) 手持式野外光谱仪。光谱仪距地面 1.3 m,光谱仪探头视场角为 25°,每个小区光谱数据采集后还要采集白板的光谱数据以便校正。

### 1.3 产量测定方法

每个小区随机选取 3 个点,每点剪取面积 0.5 m×0.5 m 的小麦植株,脱粒后称质量,估算小麦产量。

### 1.4 光谱数据计算

采用 7 个一阶微分参数,分别为  $SDr$ (红光一阶微分参数总和)、 $SDg$ (绿光一阶微分参数总和)、 $SDb$ (蓝光一阶微分参数总和)、 $SDr/SDg$ (红光波段一阶微分参数总和与绿光波段一阶微分参数总和的比值)、 $SDr/SDb$ (红光波段一阶微分参数总和与蓝光波段一阶微分参数总和的比值)、 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$ (红光与蓝光波段一阶微分参数总和的归一化值)、 $(SDr-SDg)/(SDr+SDg)$ (红光与绿光波段一阶微分参数总和的归一化值),另外还采用了 6 个植被指数,分别为  $REIP$ (红边拐点)、 $NDVI$ (归一化植被指数)、 $RVI$ (比值植被指数)、 $IRG$ (红外绿光植被指数)、 $IRI$ (红外指数)、 $GR$ (绿光红光比指数)。根据光谱反射率计算各波段的一阶微分参数值,某一波段的一阶微分参数值是下一波段与前一波段的反射率之差再除以 2 倍采样间隔,本研究中光谱仪的采样间隔是 1 nm,植被指数的计算方法参照文献<sup>[15]</sup>。

### 1.5 模型构建

在本研究中,主要采用氮素水平、产量数据,以及小麦抽穗期、开花期、灌浆期、乳熟期的光谱数据。由于小麦产量是小麦多个生育时期长势的综合结果,所以在模型构建中,将产量同时与 4 个生育时期(抽穗期、开花期、灌浆期、乳熟期)的 7 个一阶微分参数和 6 个植被指数进行回归分析。回归分析采用 SAS 软件中的向前回归分析模块,根据回归分析结果进行因子挑选及估产模型的构建,除此之外,为了研究氮素对估产模型的影响,将氮素作为一个变量。建模数据来源分别是:2011 年京冬 8 号、京 0045、中麦 12 单一品种的产量及光谱数据,以及 2011 年京冬 8 号、京 0045、中麦 12 3 个品种的产量及光谱数据。在 SAS 软件中所应用的程序语句如下:

```
proc reg;
title 'yield';
model y=a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8
a9 a10 a11 a12 a13 b1 b2 b3 b4 b5
b6 b7 b8 b9 b10 b11 b12 b13 c1 c2
c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 c10 c11 c12
c13 d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7 d8 d9
d10 d11 d12 d13 n/selection=forward;
alpha=0.05;
run;
```

上述程序语句中,y 表示产量,a、b、c、d 分别代

表小麦抽穗期、开花期、灌浆期、乳熟期,1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13 分别代表 6 个植被指数  $REIP$ 、 $NDVI$ 、 $RVI$ 、 $IRG$ 、 $IRI$ 、 $GR$  及 7 个一阶微分参数  $SDb$ 、 $SDg$ 、 $SDr$ 、 $SDr/SDb$ 、 $SDr/SDg$ 、 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)$ 、 $(SDr-SDg)/(SDr+SDg)$ ,  $n$  表示氮素。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦估产回归模型

经过回归分析,以  $P \leq 0.05$ ,建模因子少于 3 个

为标准挑选模型,利用 2011 年单一品种京冬 8 号和 2011 年 3 个品种京冬 8 号、京 0045、中麦 12 的相关数据各构建了 1 个模型,利用 2011 年京 0045、中麦 12 的单一品种相关数据各构建了 2 个模型,共构建了 6 个估产模型(表 1)。从表 1 可以看出 6 个估产模型中均没有氮素因子,说明氮素对估产模型没有影响,或者影响没有达到显著水平。6 个模型中, $R^2$  最高的是 3 号模型,同时其  $P$  值最小; $R^2$  最低的是 6 号模型,其  $P$  值也较大。

表 1 小麦估产回归模型

Table 1 Wheat yield estimation regression models

建模数据来源品种	编号	模 型	$R^2$	$P$ 值
2011 年京冬 8 号	1	$Y = 692.59SDr_{\text{灌浆期}} + 47.56REIP_{\text{乳熟期}} - 34314.00$ 参数估计误差 $SDr_{\text{灌浆期}}$ 为 $\pm 208.56$ , $REIP_{\text{乳熟期}}$ 为 $\pm 19.75$ ; 参数为 0 的 $P$ 值 $SDr_{\text{灌浆期}}$ 为 0.0128, $REIP_{\text{乳熟期}}$ 为 0.046 9	0.655	0.024 2
2011 年京 0045	2	$Y = 8249.81(SDr-SDb)/(SDr+SDb)_{\text{抽穗期}} - 7633.62$ 参数估计误差 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)_{\text{抽穗期}}$ 为 $\pm 1392.44$ ; 参数为 0 的 $P$ 值 $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)_{\text{抽穗期}}$ 为 0.000 4	0.814	0.000 4
	3	$Y = 6160.68(SDr-SDb)/(SDr+SDb)_{\text{抽穗期}} + 48.32REIP_{\text{抽穗期}} - 40722.00$ 参数估计误差 $REIP_{\text{抽穗期}}$ 为 $\pm 8.63$ , $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)_{\text{抽穗期}}$ 为 $\pm 737.17$ ; 参数为 0 的 $P$ 值 $REIP_{\text{抽穗期}}$ 为 0.000 8, $(SDr-SDb)/(SDr+SDb)_{\text{抽穗期}}$ 为 $< 0.000 1$	0.966	$< 0.000 1$
2011 年中麦 12	4	$Y = -169.50SDg_{\text{灌浆期}} + 946.06$ 参数估计误差 $SDg_{\text{灌浆期}}$ 为 $\pm 71.30$ ; 参数为零的 $P$ 值 $SDg_{\text{灌浆期}}$ 为 0.04	0.414	0.044 7
	5	$Y = -191.47SDg_{\text{灌浆期}} - 284.96GR_{\text{抽穗期}} + 1496.73$ 参数估计误差 $SDg_{\text{灌浆期}}$ 为 $\pm 29.28$ , $GR_{\text{抽穗期}}$ 为 $\pm 44.45$ ; 参数为 0 的 $P$ 值 $SDg_{\text{灌浆期}}$ 为 0.000 3, $GR_{\text{抽穗期}}$ 为 0.000 4	0.915	0.000 2
2011 年京冬 8 号、京 0045、中麦 12	6	$Y = 739.56IRI_{\text{乳熟期}} - 436.48$ 参数估计误差 $IRI_{\text{乳熟期}}$ 为 $\pm 308.38$ ; 参数为 0 的 $P$ 值 $IRI_{\text{乳熟期}}$ 为 0.023 4	0.170	0.023 4

### 2.2 模型检验

为了检验表 1 中的 6 个估产模型的适用性情况,分别检验了模型的拟合效果及预测效果,拟合效果的检验采用构建模型的数据,预测效果的检验采用 2010 年京冬 8 号的相关数据。6 个模型的拟合效果如图 1 所示,从图 1 中可以看出 6 个模型中,模型 6 的拟合曲线  $R^2$  最低(0.170),其余模型的  $R^2$  均较高。

对 6 个模型采用 2010 年京冬 8 号的相关数据进行预测效果检验,6 个估产模型的预测效果如图 2 所示。与拟合效果相比较,6 个模型整体的预测效果没有拟合效果好,但是模型 6 的预测效果比起拟合效果好,模型 1 的预测效果虽然没有其拟合效果好,但是在 6 个模型中其  $R^2$  最高,其余 4 个模型的

预测效果与其拟合效果相比有较大差异。由于模型 1 的建模数据来源于 2011 年京冬 8 号,而 6 个模型预测效果检验所采用的数据均为 2010 年京冬 8 号的数据,所以模型的预测效果检验结果说明估产模型品种间适用性较差,而模型 6 采用了 3 个品种的数据,一定程度上提高了模型的预测效果。

## 3 讨论

本研究通过设置不同小麦条锈病病情和施氮量水平的处理,研究小麦遥感估产模型,共建立 6 个小麦估产模型,拟合效果( $R^2$ )普遍较高,但模型的预测效果整体上没有拟合效果好,这是由于拟合效果检验采用了模型构建的数据,但是预测效果更能显示模型的适用范围。预测效果检验结果显示,构建

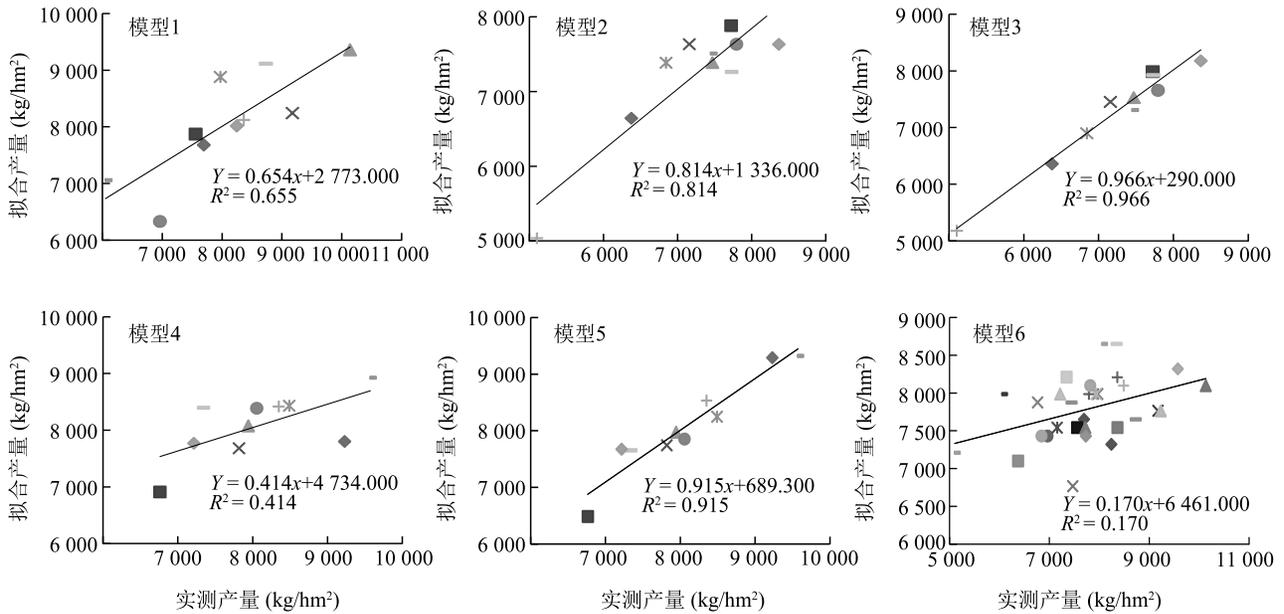


图1 小麦估产模型拟合效果  
Fig.1 Fitting result of wheat yield estimation models

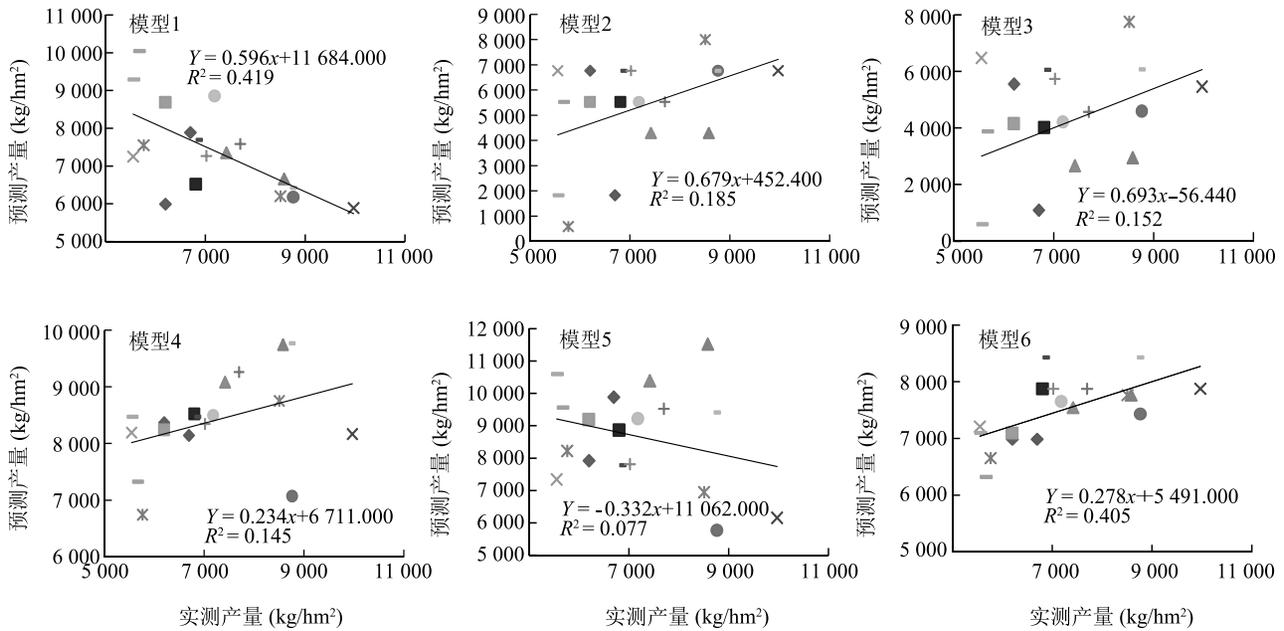


图2 小麦估产模型预测效果  
Fig.2 Forecast results of wheat yield estimation models

的估产模型预测效果存在品种间差异。当建模及检验的数据来自同一品种(京冬8号)时,所构建的模型1拟合效果( $R^2=0.655$ )和预测效果( $R^2=0.419$ )较稳定,特别是预测效果在6个模型中是最好的;而利用京0045、中麦12的数据构建的模型2和模型

5,拟合效果和预测效果差别较大,尤其以模型3的产量拟合效果( $R^2=0.966$ )、预测效果( $R^2=0.152$ )以及模型5的产量拟合效果( $R^2=0.915$ )、预测效果( $R^2=0.077$ )差异较大。说明利用不同品种数据构建的模型,品种间适用性不佳。而利用3个品种数

据构建的模型 6 拟合效果( $R^2=0.170$ )较差,可能是由于挑选的因子过少(只有 1 个),虽然这个因子对模型的影响是显著的,但是并不能完全反映小麦长势,如果增加模型因子也许会提高模型拟合效果。模型 6 的预测效果( $R^2=0.405$ )仅次于模型 1,一定程度上说明采用多品种数据构建估产模型,可以提高预测效果。

预测效果较好的模型 1 采用了灌浆期红边一阶微分参数( $SDr$ )和乳熟期植被指数红边拐点( $REIP$ ),模型 6 采用了乳熟期植被指数红外指数( $IRI$ ),相对于普遍采用的归一化植被指数( $NDVI$ )<sup>[16-17]</sup>,我们在利用一阶微分参数进行估产方面进行了探索性研究。本研究还探讨了在条锈病发病程度及施氮量差异的情况下构建估产模型,为研究多种栽培条件下的小麦估产模型、提高估产模型的适用范围进行了初步研究。本研究的估产模型没有挑选到氮素因子,可能是氮素对估产模型影响不显著。当然遥感估产最终是要在高空甚至卫星层面上应用,在采用高空甚至卫星遥感进行估产时有没有必要研究氮素因子的影响还需进一步研究,建议在高空、卫星遥感估产研究时评估氮素、病虫害、品种等对估产模型的影响,以提高模型的适用范围。在实际生产过程中,小麦生长会受到多种因素的影响,本研究中模型估产效果说明,估产模型在品种间还存在适用差异。本研究的估产模型是在有限数据基础上建立的,模型的可靠性还有待进一步检验,模型还有待优化。总之小麦估产模型普适性研究是一个复杂的工作,需要考虑多种因素。

#### 参考文献:

[1] 王丽爱,谭昌伟,马 昌,等. 农情信息遥感监测预报模型构建

算法研究进展[J]. 江苏农业科学,2013,41(11): 1-5.

- [2] 熊德兰. 基于遥感的农作物长势模板数据库构建[J]. 江苏农业科学,2014,42(8): 411-414.
- [3] 李章成,李源洪,魏 来,等. 基于 SPOT5 影像分析植被指数与水稻叶面积指数和产量的相关性[J]. 江苏农业科学,2014,42(1): 284-286.
- [4] 陈燕丽,钟仕全,莫建飞,等. HJ-1 星水稻生育期长势动态监测研究[J]. 江苏农业科学,2013,41(7): 339-342.
- [5] 王庆林,李卫国,王荣富. 基于不同时相遥感的冬小麦种植面积提取[J]. 江苏农业学报,2014,30(6): 1286-1291.
- [6] 刘良云,宋晓宇,李存军,等. 冬小麦病害与产量损失的多时相遥感监测[J]. 农业工程学报,2009,25(1):137-143.
- [7] 姚付启,蔡焕杰,孙金伟,等. 不同水氮条件下冬小麦高光谱特征差异性分析[J]. 长江科学院院报,2015,32(3):95-98.
- [8] TILLING A K, O LEARY G J, FERWERDA J G, et al. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat[J]. Field Crops Research, 2007,104(1):77-85.
- [9] 冯 伟,朱 艳,姚 霞,等. 利用红边特征参数监测小麦叶片氮素积累状况[J]. 农业工程学报,2009,25(11):194-201.
- [10] 张竞成,李建元,杨贵军,等. 基于光谱知识库的 TM 影像冬小麦条锈病监测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(6): 1579-1585.
- [11] 王 爽,马占鸿,孙振宇,等. 基于高光谱遥感的小麦条锈病胁迫下的产量损失估计[J]. 中国农学通报,2011,27(21): 253-258.
- [12] 冯 伟,朱 艳,田永超. 基于高光谱遥感的小麦籽粒产量预测模型研究[J]. 麦类作物学报,2007,27(6):1076-1084.
- [13] 李卫国,王纪华,赵春江,等. 基于遥感信息和产量形成过程的小麦估产模型[J]. 麦类作物学报,2007,27(5):904-907.
- [14] 王 爽,黄 冲,孙振宇,等. 基于高光谱遥感估测条锈病下的混种小麦产量分析[J]. 农业工程学报,2010,26(7):199-204.
- [15] 张玉萍,马占鸿. 氮素和小麦条锈病胁迫下小麦高光谱遥感估产模型研究[J]. 中国农学通报,2014,30(36):133-140.
- [16] 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.
- [17] 朱再春,陈联裙,张锦水,等. 基于信息扩散和关键期遥感数据的冬小麦估产模型[J]. 农业工程学报,2011,27(2):187-193.

(责任编辑:张震林)