

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.017

冬小麦产量分阶段预测模型*

何亚娟^{1,2} 汪庆发¹ 裴志远¹ 王连林³ 马志平³ 潘学标²

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094;

3. 玉田县发展计划局, 唐山 064100)

【摘要】 为了解决冬小麦估产的时效性和运行化问题,通过对河北省玉田县 2007~2009 年冬小麦的连续监测,在不同生育期(抽穗期、灌浆期和收获期)对其产量构成三因子(穗数、粒数和粒质量)进行实地抽样测定,并结合冬小麦各个生长发育期的生理生态特点,建立相应的分阶段单产预测模型。试验发现,单因子模型的应用,可使冬小麦估产的预报时间提前到抽穗期,其拟合精度可达到 88% 以上。双因子模型的应用可使预报时间提前到抽穗后期至灌浆期,模型拟合精度大于 90%;结果表明,冬小麦分阶段预产模型可以作为县级区域农业遥感业务化运行系统的基础,增强农业遥感监测产量的预警能力。

关键词: 冬小麦 产量构成 多阶段预测模型

中图分类号: S165+.27; S512.1+1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)01-0089-05

Winter Wheat Yield Forecast Multi-stage Model

He Yajuan^{1,2} Wang Qingfa¹ Pei Zhiyuan¹ Wang Lianlin³ Ma Zhiping³ Pan Xuebiao²

(1. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China

3. Development Planning Board of Yutian County, Tangshan 064100, China)

Abstract

In order to search for more timeliness and accuracy of forecasting methods, Yutian County, Hebei Province was chosen as the pilot site. A three-year field experiments were conducted on winter wheat. During different growing periods, three yield-contribution factors were measured in situ and the analysis was done. The results revealed that single-factor model of application allowed the prediction of time ahead of winter wheat yield to the heading stage; the prediction accuracy can reach to 88%. Prediction of two-factor model can be advanced to the heading stage to the early filling stage, and the AI is more than 90%. This study provided an effective method namely the multi-stage prediction model to effectively predict crop yield. It can overcome the regular operation problems and provide important references for agriculture warning system by remoter sensing at all levels of agricultural crop production forecast.

Key words Winter wheat, Production component, Multi-stage production estimation model

引言

作物产量信息越来越成为社会各界普遍关心的问题,由此增强了政府宏观生产管理部门对农作物产量预报或预警的重视,同时也对作物产量预报业务的运行化和时效性有了更高的需求。作物单产预

报是作物估产的关键技术,也是难点之一。为了提高农作物产量预报的技术水平和精确度,诸多研究者对此进行了长期的大量的研究^[1-11]。作物单产预报方法主要有 4 种,即传统农学田间测产法、农业气象模型法、作物生长模拟模型法和农业遥感估产法等。这些方法各有局限性,其中以传统农学田间

收稿日期: 2011-02-16 修回日期: 2011-06-22

* 农业部农业信息预警财政专项资助项目(2130111)

作者简介: 何亚娟,工程师,中国农业大学博士生,主要从事农业气象和农业遥感应用研究,E-mail: hyjuan@gmail.com

通讯作者: 裴志远,研究员,主要从事农业遥感应用研究,E-mail: peizhiyuan@hotmail.com

测产法最为经典,目前仍在大量应用,但是其对时间有严格的要求,即必须在作物成熟后期进行,主要用于产量的后期统计,不能很好地满足宏观生产管理部门在作物不同阶段,尤其是早期对产量进行预测或预警的需求。

农业部遥感应用中心建立的全国农作物遥感监测业务化运行系统中,作物产量预测采用的农业遥感估产法主要是以作物面积提取和单产模型预测为基础,结合土壤水分状况评价和作物长势分析,进而对作物产量进行综合预测和预报。其对农作物单产预测的时效性和精确度要求较高,需要在作物生长的不同阶段及时获得作物生长动态及产量信息,从而实时调整作物生产预报情报,以便更好地为上级管理部门提供决策支持信息,进而为我国农业遥感监测产量提供预警服务。

本文以河北省冬小麦主产区为研究区域,在对传统农学田间测产方法进行分析和验证的基础上,提出一种基于农学模型的分阶段预测模型,旨在为我国农业遥感动态监测提供基础数据,以增强我国农业遥感监测系统的预警能力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省唐山市玉田县,该县属于黄淮海平原的主要农业自然经济类型区。位于东经 $117^{\circ}30' \sim 117^{\circ}56'$,北纬 $39^{\circ}33' \sim 40^{\circ}00'$ 之间,全县总面积 $1\ 165\text{ km}^2$,耕地面积约为 729 km^2 。地形地貌类型为洪积、冲击平原,地势东北高,中部平原,西南低洼。主要土壤类型为潮土和褐土。气候属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年平均温度为 11.2°C ,无霜期 190 d ,年平均降水量 693 mm 。玉田县是冀东第一产麦大县,每年全县冬小麦播种面积约为 2 万 hm^2 。其中春冬小麦占 10% 左右,冬小麦占 90% 以上。玉田县冬小麦的播种期为每年的9月下旬,在第2年4月中旬进入拔节期,5月上旬进入抽穗期,5月下旬进入灌浆期,6月上旬进入成熟期,6月中旬进入收获期。

1.2 试验设计

1.2.1 技术流程

农作物产量由农作物生长状况决定。农作物生长状况主要受到其内在遗传因子和外在环境条件的双重影响^[12-13]。其中遗传因子的影响作用主要通过其产量构成因子即穗数、粒数和粒质量进行外部表达,同时受到外在环境条件如土壤状况、气象条件和管理措施的综合作用^[14]。很早就有研究人员提出可以利用产量构成因子来解释遗传和环境因子如

何在作物发育的不同阶段影响作物收获产量,随着对生殖生长量化学理解的深入,发现利用三因子模型来模拟和预测籽粒产量及其构成方面是有用的。因此,在对传统农学产量测定方法改进的基础上,根据农业部冬小麦遥感监测时间表,分别在冬小麦生长的抽穗期(前期)、灌浆期(中期)、收获期(后期)进行数据的取样和测定,以满足农作物遥感监测不同时效的预警需求,流程如图1所示。

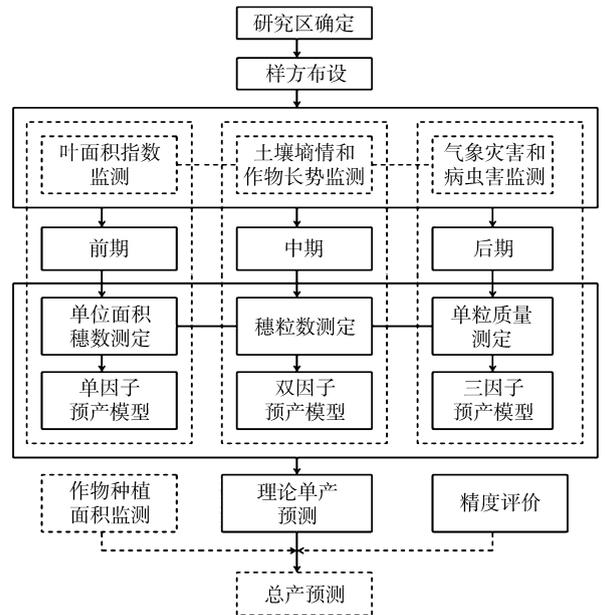


图1 试验方案流程图

Fig. 1 Flow chart of the study

1.2.2 合理取样数估计和样方布设方法

采用常用的 Cochran^[15] 针对区域纯随机取样而构造的合理取样数量计算公式

$$n = (tR_{\text{std}})^2 / d^2 \quad (1)$$

式中 n ——最佳取样数量

t ——与显著性水平相对应的标准正态偏差

R_{std} ——样本标准差

d ——样本平均值与相对误差的乘积, %

由于随机变量总体标准差未知,只能用样本方差来代替。利用玉田县多年产量调查资料,计算得到该县冬小麦产量估测的合理取样数量(表1)。

由于产量的区域平均变化率常小于田块尺度的变化率^[16],所以为了减小误差,要求所有样方点尽量均匀分布,并且在同一田块内采用3点斜线取样法进行重复取样,每个样方点都用GPS逐一定位(图2)。2007~2009年布设的样方数量分别为40、50和60个。

在冬小麦生长的3个主要阶段即抽穗期、灌浆期和收获期,对冬小麦的平均行距及 1 m^2 样方内的有效穗数、穗粒数和千粒质量进行实地调查,同时记录农户联系信息和相关管理信息。根据实际抽测产

表 1 玉田县冬小麦产量估测的合理取样数计算

Tab. 1 Rational sampling quantity of estimating winter wheat yield in Yutian County

区域变量	均值 /kg·hm ⁻²	标准差	变异系数	偏度	峰度	合理采样数 <i>n</i>			
						置信度 90%		置信度 95%	
						5%	10%	5%	10%
产量	5421	980	18.05	0.33	0.00	36	9	50	13



图 2 2009 年研究区取样点布设

Fig. 2 Location of the study area in 2009

量值划分产量水平等级,确定权重,求得估测产量;待完全收获后,调查农户收获产量,以便验证。

1.2.3 估产方法

以玉田县当年大田实际种植作物冬小麦为试验材料,以冬小麦产量构成三因子即单位面积有效穗数(以下简称穗数)、穗粒数、千粒质量为研究对象,采用随机抽样和重复抽样的方法进行样点布设。传统农学产量预测模型为

$$Y = x_1 x_2 x_3 f \quad (2)$$

式中 Y ——理论单产值,kg/hm²

x_1 ——穗数 x_2 ——穗粒数

x_3 ——千粒质量,g

f ——去除收获和晾晒损耗的实收产量系数,一般取 0.85

由于产量构成因子之一的亩穗数在作物生育中期就可获得,那么在假设后期作物不会受到明显的气象灾害或病虫害的影响下,利用单因子预产模型可以提前预测冬小麦产量。

给出单因子预产模型的定义:利用实测作物的

单位面积(666.7 m²) 茎数结合作物管理水平、叶面积系数和当年的气象条件,按茎数的 80%~95% 成穗(根据经验和当地生产条件,若作物种植密度过大,单位面积穗数超过 60 万以上,需要考虑穗粒数和千粒质量的递减因素,结合品种特性做系数调整),进行量纲换算后,得到估测产量值的一种方法。关于土、气、肥、水的配合说明如下:一般的地力要求,土壤有机质含量在 1% 以上,全氮 0.1%,有效磷 2.5~4.9 g/m²,酌施钾肥和微肥。叶面积系数要求苗期为 0.8~1.2,拔节期为 3.0 左右,抽穗期 5.0~6.0;土壤含水率保持在田间持水率的 60% 左右为宜。将传统的作物单产预测模型改造为单因子预产模型

$$Y = afx_1 / 1000 \quad (3)$$

式中 a ——经验系数

同理,双因子预产模型是指在冬小麦生长中期(灌浆期~乳熟期),假设当年冬小麦千粒质量为常年千粒质量,只需实地测定冬小麦的穗数和穗粒数,再与常年千粒质量相乘,经过系数订正后即可得到冬小麦的双因子预产值。双因子预测模型为

$$Y = bfx_1 x_2 \quad (4)$$

式中 b ——常年千粒质量,g

双因子预产模型是在假设冬小麦千粒质量与常年千粒质量相同的条件下进行的,千粒质量作为常数值出现,考虑到多种因素会对常年千粒质量产生影响^[12],此处建议采用近 5 年调查千粒质量的平均值作为常年千粒质量。

2 结果分析

2.1 气象条件分析

在冬小麦的整个生育期,气象条件的变化随时都会对冬小麦的生长产生影响,因此在进行产量预测之前有必要先对当年的气象条件进行分析。

河北省玉田县冬小麦的起身期、拔节期、抽穗期和灌浆期等关键生育期主要集中在 4~5 月份,通过对 2007~2009 年 3 年的气象数据分析,发现当地 4 月份的平均温度对冬小麦产量具有重要影响。此时,冬小麦产量对温度作用较为敏感,从图 3 可以看

出产量与4月份气温变化趋势具有正相关一致性,该现象有助于利用气象因子研究产量的时间变异性^[17]。从气象资料分析可知,2007年和2009年4月份平均气温高于常年同期值,而2008年4月份平均气温低于常年同期值;2007年和2009年降水量均略偏少,2008年略偏高,华北地区大部分冬小麦地为水浇地,所以在充分灌溉的情况下,水分对当地冬小麦产量影响较小。5月份平均气温变化与产量的变化趋势不具有 consistency。

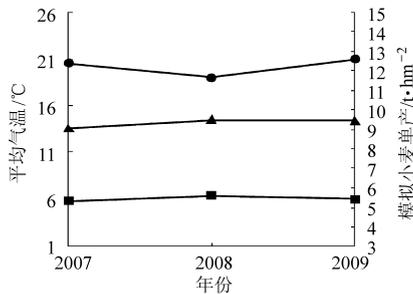


图3 2007~2009年4、5月份平均温度与冬小麦单产关系
Fig. 3 Relationship of wheat yield and average temperature of April and May in 2007~2009

2.2 模型分析

2.2.1 单因子模型

以2009年为例,分析5月11日的实地调查数据。此时冬小麦处于抽穗期,结合叶面积生产能力比例分析,采用单因子预产模型估测当年的冬小麦平均单产值为 $5\,202.9\text{ kg/hm}^2$,农户实际估测平均

值为 $5\,379.7\text{ kg/hm}^2$,二者误差范围在 $-9.9\% \sim 9.0\%$ 之间(平均误差为 3.3%),因为此时冬小麦处于抽穗期,单位面积穗数基本定型,此时应用单因子模型估产法进行产量预测,精度较高,时间上较收获后估产提前了约1个月。

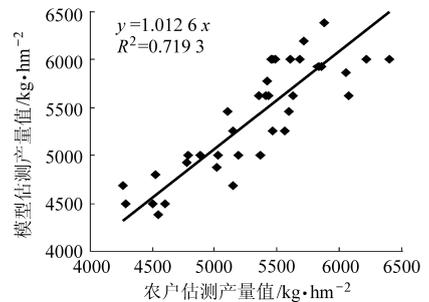


图4 2009年冬小麦单产单因子模型值与农户估测值比较
Fig. 4 Compared wheat yield forecast by single factor model with statistic data from farmers

2.2.2 双因子模型

通过2007~2009年的实测数据分析发现,在2007年和2009年冬小麦的实测千粒质量与常年千粒质量(45 g)相比,变异不大,所以在冬小麦生育中期,利用双因子法预测冬小麦产量值与实际产量值误差较小。主要是由于2007年和2009年气象条件与常年平均水平相当,后期气象条件对作物籽粒形成并未产生不利影响,千粒质量变化较小(表2),最后获得的实际产量与双因子模型预测的产量误差分别为 1.5% 和 0.2% 。

表2 2007~2009年冬小麦产量构成因子统计分析

Tab. 2 Analysis of the three yield components in 2007~2009

年份	样本量	亩穗数			穗粒数			千粒质量		
		平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%	平均值/g	标准差/g	变异系数/%
2007	40	388 519	66 012	17.0	323 016	54 217	16.8	346 862	44 895	12.9
2008	50	24	4.5	18.9	27.3	4.2	15.5	27	2.7	10.1
2009	60	44.9	3.8	8.5	49.4	5.0	10.2	46.3	3.8	8.2

2008年由于各项气象条件配合较好,且冬小麦抽穗期到灌浆期间平均气温(4、5月平均气温)较常年平均值偏低,导致冬小麦灌浆期延长,样本实际千粒质量超过了常年平均千粒质量值(表2),所以在灌浆期利用双因子法预测的产量值较实测值偏低 4.3% 。

2.2.3 分阶段模型比较

为了检验分阶段模型的实际效果,通常将模拟值与实测值进行比较,研究采用拟合指数 I_{AI} (agreement index)^[18]来比较模型间误差的大小, $I_{AI} = 1$ 时误差最小。

$$I_{AI} = 1 - |Y_i - X_i| / X_i \quad (5)$$

式中 Y_i, X_i ——第 i 次的模拟值和实测值

从表3可以看出,利用分阶段模型进行预产,首先在时效性上可以满足农业遥感监测的早期预产要求,将冬小麦产量预测时间提前到抽穗期。拟合指数反映了模型的精度,在作物生长的不同阶段利用相应模型,模拟精度亦逐阶增大。在2009年增加样

表3 分阶段模型模拟值和实测值的拟合指数比较

Tab. 3 Comparison of the agreement indexes of the three models

年份	单因子法	双因子法	三因子法
	抽穗期	灌浆期	收获期
2007	0.890	0.985	0.988
2008	0.884	0.906	0.987
2009	0.967	0.998	0.990

方数量后,每个阶段的预测精度都有相应幅度提高。

3 结论

(1) 作物产量估测是一项复杂而艰难的工作,要大面积推广使用,需要考虑技术的实用性和可操作性,又不可忽略预测结果的精确度。因为一般县级区域气候、土壤和水文条件的时间和空间异质性差异较小,且作物种植集中成片,管理水平基本一致,作物品种生态型空间差异不大,样本点的选取和人员取样比较容易,且作物对气候变化的响应具有同一性。因此,分阶段预产模型适合在我国县级区域进行推广应用。

(2) 试验区小麦产量随着4月份平均温度的升高而增加,随着4月份温度的降低而降低,产量与4月份平均气温的这种正相关关系,有助于研究产量的时间变异性,对于提前预测作物产量有积

极意义。但是由于试验周期较短,仍有待进一步验证。

(3) 单因子预产模型的应用最好选择在作物单位面积穗数基本稳定不变的时期进行。所以利用单因子预产模型,适宜在农户对冬小麦进行水肥管理措施实施后进行,根据试验经验,一般选择在抽穗中后期为宜,从而可以将产量预报的时间提前。

(4) 双因子预产模型适合在作物穗粒数基本稳定的阶段进行,穗粒数主要由小穗(码)数和小穗粒数决定。因此,最佳应用双因子预产模型的时间应该在灌浆期后期,此时籽粒退化数基本稳定,有利于穗粒数的测量。

(5) 在应用上述方法时,要结合当地作物的实际农时历进行,同时需要提前对作物的生长特性、作物管理水平、常年产量状况以及当年的气象状况有适度的了解,在作物生长不同阶段的气象灾害或病虫害均可能对产量产生影响,应密切关注。

参 考 文 献

- 1 范锦龙,孟庆岩,吴炳方,等. 基于农业气象模型的农作物单产预测系统[J]. 中国农业气象,2003,24(2):46~48.
Fan Jinlong, Meng Qingyan, Wu Bingfang, et al. Development of crop yield forecasting system [J]. China Agriculture Meteorology, 2003, 24(2):46~48. (in Chinese)
- 2 邢雅娟,刘东升,王鹏新. 遥感信息与作物生长模型的耦合应用研究进展[J]. 地球科学进展,2009,24(4):444~450.
Xing Yajuan, Liu Dongsheng, Wang Pengxin. Advances of the coupling application of remote sensing information and crop growth model [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(4):444~450. (in Chinese)
- 3 罗毅,郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题[J]. 农业工程学报,2008,24(5):307~312.
Luo Yi, Guo Wei. Development and problem of crop model [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(5):307~312. (in Chinese)
- 4 代立芹,吴炳方,李强子,等. 作物单产预测方法研究进展[J]. 农业网络信息,2006(4):22~29.
Dai Liqin, Wu Bingfang, Li Qiangzi, et al. Overview of technique used by crop yield forecasting [J]. Agriculture Network Information, 2006(4):22~29. (in Chinese)
- 5 孟庆岩,李强子,吴炳方. 农作物单产预测的运行化方法[J]. 遥感学报,2004,8(6):602~610.
Meng Qingyan, Li Qiangzi, Wu Bingfang. Operational method for crop yield prediction [J]. Journal of Remote Sensing,2004, 8(6):602~610. (in Chinese)
- 6 魏中海,王建勇,景秀. 农作物产量综合预测的数学模型[J]. 湖北农业科学,2005(2):37~40.
Wei Zhonghai, Wang Jianyong, Jing Xiu. Mathematic model for synthetic prediction of crop yield [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2005(2):37~40. (in Chinese)
- 7 杨武德,宋艳敏,宋晓彦,等. 基于3S和实测相结合的冬小麦估产研究[J]. 农业工程学报,2009,25(2):131~135.
Yang Wude, Song Yantun, Song Xiaoyan, et al. Winter wheat yield estimating based on 3S integration and field measurement [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2):131~135. (in Chinese)
- 8 钱栓,王建林. 农业气象作物产量预报的特点与思考[J]. 气象科技,2003,31(5):257~261.
Qian Shuan, Wang Jianlin. Special aspects of agro-meteorological crop yields forecast and discussion [J]. Meteorological Science and Technology, 2003, 31(5):257~261. (in Chinese)
- 9 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.
Xu Xingang, Wu Bingfang, Meng Jihua, et al. Research advances in crop yield estimation models based on remote sensing [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2):290~298. (in Chinese)
- 10 秦元伟,赵庚星,姜曙千,等. 基于中高分辨率卫星遥感数据的县域冬小麦估产[J]. 农业工程学报,2009,25(7):118~122.
Qin Yuanwei, Zhao Gengxing, Jiang Shuqian, et al. Winter wheat yield estimation based on high and moderate resolution remote sensing data at county level [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):118~122. (in Chinese)

- 14 叶齐政,姚宏霖,李黎,等. 根据水果阻抗的特性频率变化测定采后水果成熟度的方法[J]. 植物生理学通讯, 1999, 35(4):304~307.
Ye Qizheng, Yao Honglin, Li Li, et al. According to the characteristics of impedance frequency change measuring postharvest fruit maturity [J]. Plant Physiology Communications, 1999,35 (4):304~307. (in Chinese)
 - 15 宋金亚,张立彬,计时鸣. 利用介电特性的水果品质无损检测[J]. 无损检测, 2003,25(8): 420~422.
Song Jinya, Zhang Libin, Ji Shiming. Nondestructive testing system for fruit quality based on dielectric property [J]. Nondestructive Testing, 2003,25(8): 420~422. (in Chinese)
 - 16 Abu-Goukh A A, Bashir H A. Changes in pectic enzymes and cellulose activity during guava fruits ripening [J]. Food Chemistry, 2003, 83(2): 213~218.
 - 17 Bennett A B. Biochemical and genetic determinations of cell wall disassembly in ripening fruit: general model [J]. HortScience, 2002,37(3):447~449.
 - 18 茅林春,张上隆. 果胶酶和纤维素酶在桃果实成熟和絮败中的作用[J]. 园艺学报, 2001,28(2): 107~111.
Mao Linchun, Zhang Shanglong. Role of pectolytic enzymes and cellulase during ripening and woolly breakdown in peaches [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2001, 28(2): 107~111. (in Chinese)
-

(上接第 93 页)

- 11 王长耀,林文鹏. 基于 MODIS EV I 的冬小麦产量遥感 预测研究[J]. 农业工程学报,2005,21(10):90~94.
Wang Changyao, Lin Wenpeng. Winter wheat yield estimation based on MODIS EV I [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10):90~94. (in Chinese)
- 12 黄善斌,卢皖,王和芳. 高产田冬小麦千粒重农业气象条件的研究[J]. 山东气象,1997,17(1):23~26.
- 13 任根深,张国宏. 冬小麦数量性状遗传模型分析[J]. 甘肃农业科技,2000(11):10~13.
- 14 姚金保,王书文,姚国才,等. 冬小麦产量构成因素的遗传分析[J]. 上海农业学报,2004,20(1):45~48.
Yao Jinbao, Wang Shuwen, Yao Guocai, et al. Genetic analysis of components of wheat yield [J]. Acta Agriculture Shanghai, 2004, 20(1):45~48. (in Chinese)
- 15 Cochran W G. Sampling techniques [M]. 3 rd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc. , 1977.
- 16 Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Falcon W P. Yield uncertainty at the field scale evaluated with multi-year satellite data [J]. Agricultural Systems, 2007,92(1~3):76~90.
- 17 陈云坪,王秀,马伟,等. 小麦多年产量空间变异与空间关联分析[J]. 农业机械学报,2010,41(10):180~184.
Chen Yunping, Wang Xiu, Ma Wei, et al. Spatial autocorrelation analysis of wheat yield over five years [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10):180~184. (in Chinese)
- 18 潘学标. 作物模型原理[M]. 北京: 气象出版社,2003.