

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.039

# 县域尺度玉米产量信息空间变异性研究\*

何亚娟<sup>1,2</sup> 潘学标<sup>1</sup> 裴志远<sup>2</sup> 王连林<sup>3</sup> 马志平<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100091; 2. 农业部规划设计研究院, 北京 100125;

3. 玉田县发展计划局, 唐山 064100)

**摘要:** 采用传统统计学和地统计学相结合的方法, 研究县级尺度作物产量信息的空间变异特征及其空间相关性。在确定合理采样数的基础上, 利用传统统计学方法研究样本的统计特征, 获得传统方法估计的总体产量信息分布概况, 利用地统计学理论分析其空间变异性特征和克里格插值对作物产量的空间格局进行分析。传统统计学分析表明, 玉米产量及其构成因子的空间变异系数均在 10% ~ 100% 之间, 属于中等变异性, 而利用地统计学方法进行最佳半方差函数拟合发现, 县域尺度上的玉米产量信息表现为强烈的空间相关性, 说明产量的空间变异性主要是由其结构性因素决定的, 随机性因素对该尺度下的变量空间变异性影响较小, 且相关范围较大, 在 3 400 m 左右。

**关键词:** 玉米产量 克里格插值 相关性分析 空间变异性

**中图分类号:** S11<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0214-04

## Spatial Variability of Corn Yield at County-scale

He Yajuan<sup>1,2</sup> Pan Xuebiao<sup>1</sup> Pei Zhiyuan<sup>2</sup> Wang Lianlin<sup>3</sup> Ma Zhiping<sup>3</sup>

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

2. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China

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

**Abstract:** For analyzing the spatial variability and correlation of corn yield, the combined method of traditional statistical methods and geostatistics methods were compared. Firstly, the reasonable sampling number was sampled and its statistical characteristics were analyzed. The crop yield information was obtained by traditional statistical methods. Then, the spatial variability and correlation of crop yield at county-scale were studied by geostatistics methods. The regional spatial distribution map of crop yield was made by kriging interpolation methods. The results showed that the corn yield and its components had intermediate variability and the coefficient of variability was 10% ~ 100% by traditional statistics. However, the spatial distribution of corn yield was found that it had relatively strong spatial correlation by geostatistics analysis. Further analysis showed that the spatial variability of corn yield was depended on its consistent factors rather than random factors and the spatial heterogeneity scales was about 3 400 m.

**Key words:** Corn yield Kriging interpolation Correlation analysis Spatial variability

## 引言

县域经济是中国经济的主体, 在县域尺度上有关生物、自然和社会经济方面的数据在系统边界上有着良好的重合性<sup>[1]</sup>。对县域尺度作物产量信息

的空间变异性进行分析和理解是提高农作物产量和对其进行科学分区管理的基础。一般来说, 影响农作物产量区域空间分布的主要因素可以分为两类, 第一类为研究区域的地形、土壤、地理位置、农户常规管理方式等随时间会发生稳定性变化的结构性因

收稿日期: 2012-08-17 修回日期: 2012-08-28

\* 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, 博士生, 农业部规划设计研究院工程师, 主要从事农业气象和农业遥感应用研究, E-mail: hjy414@yahoo.com.cn

**通讯作者:** 潘学标, 教授, 博士生导师, 主要从事农业气候与区域发展研究, E-mail: Panxb@cau.edu.cn

素;第二类为气候、农田租赁、管理-气候互作模式等经常会随时间发生不连续变化的随机性因素<sup>[2]</sup>。

考虑到作物产量信息与气候条件、土壤地理特性以及农业耕作管理水平关系密切,当某一区域的气候条件和农业技术水平基本一致时,作物产量变异主要与土壤特性的变异相关,即作物产量空间分布信息可以表达为其对全体作用因子的集中反映,但主要表达为对土壤特性空间变异的间接反映。研究认为在一定尺度范围内作物信息具有空间结构特征<sup>[3-5]</sup>。但是,目前对作物产量信息的空间分析研究大多集中在农田区域的较小尺度上的精准农业研究范围<sup>[6-9]</sup>,对较大尺度范围如县级区域尺度上的作物产量信息的空间变异性及其相关联合分析尚未见报道。玉米是我国主要种植的重要农作物之一,也是黄淮海地区的主要大田作物,其产量的空间结构性和变异性决定了产量信息的分布特征。进行玉米产量空间变异性分析有利于县级农业区划,并精确指导县域农业分区管理和产量分析,对于提高玉米产量具有重要的指导意义。本研究拟在采用经典概率统计法对玉米产量信息进行分析的基础上,将地统计学方法引入作物产量信息空间分析中,对县域尺度上玉米产量的空间信息进行分析研究,定量反映处于不同空间位置的作物产量的变异程度和空间尺度,目的是探讨和发现该尺度上作物信息变量的空间分布特征和变异规律,可以确定引起作物产量空间变异的因子<sup>[10]</sup>,为区域化产量评估和遥感监测提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验区概况

试验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<sup>[11]</sup>,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 $729\text{ km}^2$ 。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 $11.2^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 $190\text{ d}$ ,年平均降水量 $693\text{ mm}$ ,主要集中在夏季 $7 \sim 9$ 月。主要耕作制度为冬小麦-夏玉米的一年两熟制。其中小麦和玉米的种植面积分别为 $285\text{ km}^2$ 和 $432\text{ km}^2$ ,玉米为该县种植面积最大的作物,主要生长期为 $5 \sim 9$ 月。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 取样方法

研究采用GPS定位技术,在河北省玉田县玉米种植区内进行,取样时间为2009年9月中旬。取样数目的估计用Cochran<sup>[3]</sup>针对区域纯随机取样而构

造的最佳取样数量计算公式,即

$$n = (tR)^2 / d^2 \quad (1)$$

式中  $n$ ——取样数量  $R$ ——样本标准差  
 $t$ ——与显著性水平 $\alpha$ 相对应的标准正态偏差  
 $d$ ——样本平均值与相对误差的乘积

结合在玉田县进行的连续3年(2007—2009年)的玉米产量监测信息,经计算,在允许误差范围5%、置信水平95%下,该县玉米产量估计的合理采样数为60个,取样点的空间分布如图1所示,取样点基本为均匀随机分布。

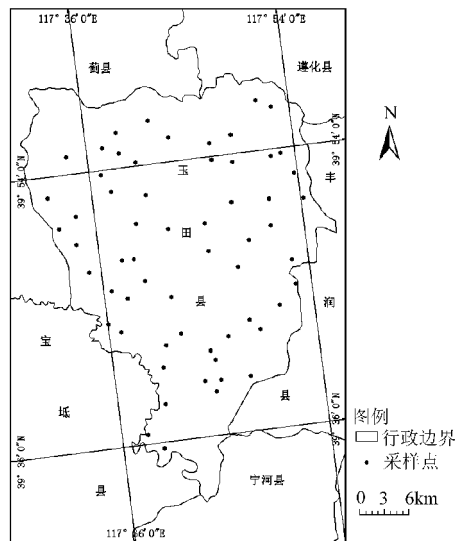


图1 试验区2009年玉米测产取样点分布图

Fig. 1 Location of experiment area in 2009

#### 1.2.2 分析方法

通过统计学软件Mintab 15完成玉米产量及其构成因子的正态分布性检验;采用地统计学软件GS+V9完成试验半方差函数的计算、理论模型拟合;用ArcGIS 9.3软件的地统计学模块完成Kriging分析和图形绘制。

传统统计学理论将研究的变量假设为纯随机变量,但许多研究对象的性质在空间上并不完全独立,而在一定范围内存在空间相关性。地统计学是以具有空间分布特点的区域化变量理论为基础,研究自然现象的空间变异与空间结构的一门学科。地统计学的主要理论是法国统计学家Matheron创立的,经过不断完善和改进,目前已成为具有坚实理论基础和实用价值的数学工具。地统计学的应用范围十分广泛,不仅可以研究空间分布数据的结构性和随机性、空间相关性和依赖性、空间格局与变异,还可以对空间数据进行最优无偏内插,以及模拟空间数据的离散性及波动性。地统计学由分析空间变异与结构的变异函数及其参数和空间局部估计的Kriging插值法2个主要部分组成,目前已在地球物理、地

质、生态、土壤等领域应用。进行半方差函数(也称为半变异函数)计算时,运用 Matheron 推荐的试验半方差函数公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (2)$$

式中  $\gamma(h)$ ——半方差函数

$h$ ——滞后距,为信息点间的间隔(或距离)

$N(h)$ —— $x$ 轴上相隔  $h$  的点对数

$Z(x_i)$ 、 $Z(x_i + h)$ ——区域化变量在位置  $x_i$  和  $x_i + h$  的观测值

如果随机函数  $Z(x)$  具有二阶平稳性,则半方差函数  $\gamma(h)$  可用  $Z(x)$  的方差  $S^2$  和空间协方差  $C(h)$  来定义:  $\gamma(h) = S^2 - C(h)$ 。  $\gamma(h)$  反映了  $Z(x)$  中的空间相关部分,它等于所有以给定间距  $h$  相隔的样点测值之差平方的数学期望。  $N(h)$  是以  $h$  为间距的所有观测点的成对数目。某个特定方向半方差函数图通常是由  $\gamma(h)$  对  $h$  作图而得。通常半方差函数值都随着样点间距的增加而增大,并在一定的间距升大到一个基本稳定的常数(基台)。

半方差图通常可以被某些曲线方程拟合,用于拟合的曲线方程称为半方差函数的理论模型,常见的有线性模型、球状模型、指数模型和高斯模型等。变异函数可以反映和刻画区域化变量的许多性质,是分析其空间结构的重要工具。本文利用实测数据分别采用以上 4 种理论变异函数模型,通过比较找到最佳拟合模型。模型中有 3 个重要参数:变程  $a$ 、基台值  $(C + C_0)$  和块金值  $C_0$ 。其中变程反映变量的影响范围;基台值反映变量在该方向上的变异程度;块金值反映在采样尺度下不能区分出来的那些变异的总和。块金值占基台值的百分数  $[C_0 / (C + C_0)] \times 100\%$  可以表明系统中变量的空间相关度。若  $[C_0 / (C + C_0)] \times 100\%$  小于 25%,空间相关性

强,在 25% ~ 75% 之间,空间相关度中等,大于 75% 则空间相关性很弱,若比值接近于 1,说明在整个尺度上有恒定的变异<sup>[12]</sup>。进行作物信息空间变异性分析的关键是拟合出精度较高的半方差函数模型,选择最佳模型时,首先要考虑模拟模型的决定系数  $R^2$  和残差 RSS,其次综合考虑块金值与变程的大小,以保证变量在采样条件下具备较高的空间变异性。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 经典统计理论分析

图 2 为玉米产量的频率分布。从图中可以看出,产量的频率分布基本呈正态分布,满足地统计学空间变异性分析的前提条件要求。

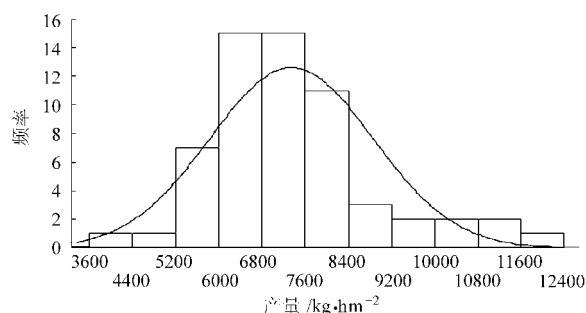


图 2 玉米产量频数分布

Fig. 2 Frequency of corn yield

玉米产量构成(单位面积穗数、穗粒数和千粒质量)以及产量等的特征参数表现为不同的差异性(表 1)。其中,单位面积穗数的变异系数  $C_v$  较大,最大值为最小值的 3.1 倍。根据反映离散程度的变异系数  $C_v$  对空间变异性进行粗略分级标准判断,本试验中玉米产量及其构成因子的空间变异系数均在 0.1 ~ 1.0 之间,属于中等变异性。从偏度系数和峰度系数可知,产量的概率分布基本符合正态分布,与图 2 的结果一致。

表 1 玉米产量及其构成因子的统计特征值

Tab. 1 Statistical feature of maize yield and its component

参数	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数 $C_v$	偏度系数 $C_s$	峰度系数 $P_c$
穗粒数	60	377.00	644.00	500.00	70.70	0.141 0	0.12	-0.95
单位面积穗数/穗·m <sup>-2</sup>	60	2.90	8.90	4.70	1.10	0.234 8	1.35	2.42
千粒质量/kg	60	0.20	0.40	0.30	0.04	0.124 0	-0.04	0.09
产量/kg·hm <sup>-2</sup>	60	4 382.00	11 751.00	7 340.00	1 519.00	0.207 0	1.02	1.27

## 2.2 地统计学分析

### 2.2.1 模型选择和空间变异分析

传统统计理论虽然可以概括变量总体的变化,但是对于局部特性的变化反映存在不足,即不能定量的刻画变量的随机性和结构性、独立性和相关性,需要进一步采用地统计学方法进行空间变异的分析。半方差函数是分析区域化变量空间变异性的重

要工具,可以反映区域化变量的空间自相关性<sup>[13]</sup>。

由图 3 知,在变程 21 671.59 m、步长 3 400 m 内拟合的半方差函数相对稳定,随着步长的增加,试验半方差函数变化开始不稳定,可能是由于变量空间变异的各向异性导致的。

在选取产量的半方差模型时,根据式(1)进行半方差模型拟合,通过反复拟合,综合比较,得到了

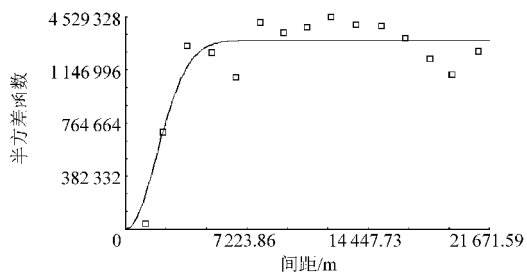


图 3 玉米产量各向同性试验理论半方差图

Fig. 3 Model-fitted semivariogram of corn yield

在 3 400 m 步长间距下的 Gaussian 模型为最佳拟合模型(表 2),其决定系数  $R^2$  为 0.771, RSS 为  $2.23 \times 10^{-4}$ , 优于其他模型, 故为最佳拟合模型。

表 2 玉米产量各向同性半方差函数理论模型及相关参数

Tab. 2 Theoretical isotropic semivariogram model and corresponding parameters of corn yield

模型	步长/m	块金值	基台值	变程/m	$[C_0/(C_0 + C)] \times 100/\%$	$R^2$	RSS
Gaussian 模型	3 400	0.000 01	0.026 02	21 671.59	0.038 42	0.771	$2.23 \times 10^{-4}$
指数模型	3 540	0.000 01	0.027 02	21 671.59	0.037 00	0.738	$2.78 \times 10^{-4}$
线性模型	21 022	0.014 00	0.030 46	21 671.59	45.961 9	0.363	$6.19 \times 10^{-4}$
球状模型	8 680	0.000 01	0.026 42	21 671.59	0.037 84	0.766	$2.30 \times 10^{-4}$

2.2.2 产量信息的空间分布特征

根据上述分析结果,以 Gaussian 模型为最佳拟合模型,进行 Kriging 插值分析。通过对试验区玉米产量信息进行 Kriging 插值,得到该试验区玉米产量空间分布图(图 4),可以看出试验区玉米产量的空间分布具有明显的地带性,呈现北高南低、东高西低的空间分布趋势,这可能跟当地的地质地貌特点相关,因为试验区的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,由此也验证了地形地质土壤等地理条件(即内部结构性因素)对产量的空间分布具有决定性影响,作物产量信息可以作为试验区地理空间格局的间接反映。可以直观地反映作物产量信息的空间分布特征,对于整个试验区

域的产量分布格局进行预测,有利于县级农业区划并精确指导县域农业分区管理和产量分析,同时对玉米的大尺度遥感产量采样提供参考。

3 结论

(1)通过传统统计理论分析发现,试验区玉米产量及其构成因子的空间变异系数均在 0.1 ~ 1.0 之间,属于中等变异性。

(2)通过地统计学分析发现,试验区玉米产量信息在空间上不是完全独立的,而是在一定区域范围内表现为强烈的空间相关性,说明采样点间的内部结构性非常好,且相关范围较大,在 3 400 m 左右。

(3)利用 4 种理论半方差模型拟合和比较,得出试验区最佳拟合模型为 Gaussian 模型;地统计学分析方法的引入弥补了单纯采用经典概率统计学方法对作物信息分析的片面性。

(4)在县域尺度上,作物产量信息结构特征既具有结构性又具有随机性,但是其空间变化主要由其内部结构性因素决定,随机性因素对该尺度下的产量空间变异影响较小。

(5)利用 Kriging 插值分析大尺度作物产量的空间分布特征,可以直观地表征区域化变量的空间变化规律,具有明显的趋势性。

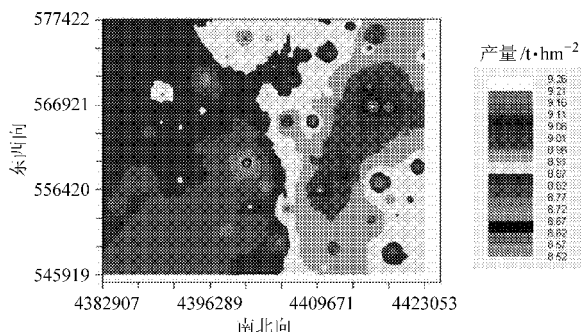


图 4 玉米产量的空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of corn yield

参 考 文 献

1 齐伟,徐艳,张凤荣. 黄淮海平原农区县域土壤养分平衡评价方法及其应用[J]. 中国农业科学,2004,37(2):238 ~ 243.  
 Qi Wei, Xu Yan, Zhang Fengrong. Study on evaluation methods of soil nutrient balance and application at county level in Huang-huai-hai plain[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2004, 37(2): 238 ~ 243. (in Chinese) (下转第 231 页)

- 10 Roberts F S. Meaningfulness of conclusions from combinatorial optimization[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 1990,29(2~3): 221~241.
- 11 Sotskov Y N, Werner F. Stability of an optimal schedule in a job shop [J]. *European Journal of Operation Research*, 1991, 55(1):91~102.
- 12 Nicholas G Hall, Marc E Posner. Sensitivity analysis for scheduling problems[J]. *Journal of Scheduling*, 2004,7(1): 49~83.
- 13 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987.
- 14 Liu Mingzhou, Tang Juan, Ge Maogen, et al. Dynamic prediction method of production logistics bottleneck based on bottleneck index[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(5): 710~716.
- 15 凌琳,刘明周,唐娟,等. 制造车间生产物流瓶颈指数研究[J]. *农业机械学报*, 2012,43(5): 197~202.  
Ling Lin, Liu Mingzhou, Tang Juan, et al. Research on bottleneck index of production logistic in manufacturing shop[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(5): 197~202. (in Chinese)
- 16 张公绪. 新编质量管理学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- 17 苏文斌,刘兆栋,孙俊成,等. 基于敏感性分析的注塑成型工艺参数优化[J]. *塑性工程学报*,2009, 16(3): 202~206.  
Su Wenbin, Liu Zhaodong, Sun Juncheng, et al. Research on the optimization of injection molding process parameters based on sensitivity analysis[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(3): 202~206. (in Chinese)
- 18 李志刚. 基于DEMATEL的制造业企业动态平衡计分卡的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.  
Li Zhigang. Application research of the dynamic BSC based on DEMATEL about manufacturing enterprise[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- 19 Lu J C, Jinho Park, Qing Yang. Statistical inference of a time-to-failure distribution derived from linear degradation data [J]. *Technometrics*,1997,39(4):391~400.
- 20 Meeker M Q, Escobar L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York: John Wiley&Sons Inc., 1998.
- 21 易树平,郭伏. 基础工业工程[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

(上接第217页)

- 2 Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Falcon W P. Yield uncertainty at the field scale evaluated with multi-year satellite data[J]. *Agricultural System*, 2007(92):76~90.
- 3 Cochran W G. Sampling techniques[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1977.
- 4 Tatsuya Inamura, Kei Goto, Michihisa, et al. Geostatistical analysis of yield, soil properties and crop management practices in paddy rice fields[J]. *Plant Production Science*, 2004,7(2):230~239.
- 5 薛亚峰,周明耀,徐英,等. 水稻叶面积指数及产量信息的空间变异性分析[J]. *农业工程学报*,2005, 21(8): 89~92.  
Xue Yafeng,Zhou Mingyao,Xu Ying, et al. Spatial structure of leaf area index and yield of rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(8): 89~92. (in Chinese)
- 6 李为萍,史海滨,霍再林,等. 向日葵株高和茎粗的空间结构性初步分析[J]. *农业工程学报*,2004,20(4):30~33.  
Li Weiping,Shi Haibin,Huo Zailin, et al. Spatial structure of the height and diameter of sunflower stem[J]. *Transactions of the CSAE*,2004,20(4):30~33. (in Chinese)
- 7 高祥照,胡克林,郭焱,等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥[J]. *中国农业科学*,2002,35(6):660~666.  
Gao Xiangzhao,Hu Kelin,Guo Yan, et al. Spatial variability of soil nutrients and crop yield and site-specific fertilizer management [J]. *Scientia Agricultural Sinica*,2002,35(6):660~666. (in Chinese)
- 8 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. Analysis of wheat yield over five years[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2010,41(10):180~184. (in Chinese)
- 9 陈树人,肖伟中,朱云开,等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析[J]. *农业机械学报*,2008,39(10):140~143.  
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10):140~143. (in Chinese)
- 10 李琳一. 作物产量空间相关性分析及遥感估产抽样研究[D]. 北京:中国科学院,2001.
- 11 黄绍文,金继运,杨莉萍,等. 粮田土壤养分的空间格局及其与土壤颗粒组成之间的关系[J]. *中国农业科学*,2002, 35(3):297~302.  
Huang Shaowen, Jin Jiyun, Yang Liping, et al. Spatial distribution of soil nutrient and relationship between soil nutrient and soil granule composition for grain crop region[J]. *Scientia Agricultural Sinica*,2002,35(3):297~302. (in Chinese)
- 12 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999:162~192.
- 13 薛亚峰,周明耀,徐英,等. 冬小麦叶面积指数的空间结构性分析[J]. *扬州大学学报:农业与生命科学版*,2006,27(1): 54~57.  
Xue Yafeng, Zhou Mingyao,Xu Ying, et al. Spatial structure of the LAI of winter wheat [J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2006,27(1):54~57. (in Chinese)