

水稻叶面积指数及产量信息的空间结构性分析

薛亚锋¹, 周明耀¹, 徐 英¹, 王俊农², 顾玉芬²

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 常熟市水利科学研究所, 常熟 215500)

摘 要: 通过对水稻抽穗期叶面积指数及产量信息的采样研究, 探讨了叶面积指数及产量信息的空间结构性, 并建立了半方差函数模型, 结果表明该变量具有明显的区域化变量特征和较好的空间结构特征。该文引入区域化变量理论, 弥补了单纯采用经典概率统计法对作物信息进行分析的片面性。水稻抽穗期叶面积指数与产量信息之间呈抛物线关系, 相关性达显著水平, 说明可以通过对叶面积指数的科学调控, 使一定尺度范围内的水稻产量获得全面提高。对作物信息进行空间结构性和定量化研究为精确农业的实施提供了必要的技术支撑。

关键词: 水稻; LAI; 区域化变量; 空间结构性

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)08-0089-04

薛亚锋, 周明耀, 徐 英, 等. 水稻叶面积指数及产量信息的空间结构性分析[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 with English abstract)

0 引言

作物信息与气候条件、土壤特性及农业耕作水平密切相关。当某一区域的农业技术水平相同时, 作物信息仅与土壤特性相关, 即作物信息是土壤特性的间接反映, 故亦具有空间结构特征^[1]。

地统计学理论自被引入到土壤特性的空间变异性分析中以来, 已广泛应用于土壤—水科学、水文水资源等领域中^[2, 3], 但在作物信息方面应用较少。叶面积指数是反映作物长势与预报作物产量的一个重要农学参数^[4]。抽穗期适宜的叶面积指数及其结构是水稻高产的主要标志, 是协调库源关系和各部器官平衡发展的基础。对水稻抽穗期叶面积指数、产量信息的空间结构性及其相关性进行研究, 可以获得田间作物生长、产量形成的变异规律, 为有针对性地调控生理性状进而获得水稻的高产优质提供科学依据。国内外关于土壤特性与作物信息的空间变异性研究虽有报道, 但一般仅局限于分析各自的空间变异性, 真正将产量或其他生理性状指标与土壤特性的空间变异性联系起来, 研究它们之间关系的报告不是很多^[5-7], 对作物生育指标与产量信息的空间变异性进行联合分析则未见报道。本文运用地质统计学原理对水稻抽穗期叶面积指数与产量信息的空间结构及相关性进行了分析。

1 研究方法

地统计学理论以区域化变量、随机函数和平稳性假

设等概念为基础, 以半方差函数为核心, 以克立格插值手段, 分析研究既有随机性又有结构性的自然现象的空间变异性问题。半方差函数是地统计学中研究空间变异性的工具函数。进行变差函数的具体计算时, 运用 Matheron 推荐的传统计算公式, 即实验半方差函数公式

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

式中 $\gamma(h)$ ——半方差函数; h ——分隔两点的矢量; $N(h)$ —— x 轴上相隔 h 的点个数; $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ ——观测值 $Z(x)$ 和 $Z(x + h)$ 的 $N(h)$ 对实现。

半方差图是地统计学解释空间变异结构的基础, 它的精确估值是成功的空间内插和栅格地图制作的关键。半方差图通常可以被某些曲线方程所拟合, 用于拟合的曲线方程称为半方差函数的理论模型。理论模型常见的有: 线性模型、球状模型、指数模型等。理论模型的选择需要视具体的情况而定, 且须考虑拟合精度问题。

2 试验设计

2.1 试验区概况

试验区设在江苏常熟市水利科学研究所试验田。供试品种为苏香粳。试验地东西长 30 m, 南北长 42 m, 面积约为 1260 m²。土壤为重黏土, 容重为 1.3 g/cm³。种植方式为行种, 行距为 24 cm, 株距为 13 cm。

2.2 信息的采集

采用密集采样方案, 按 6 m × 6 m 网格布点, 共布 48 个点。于抽穗期测定各网格点处代表叶面积指数。采测仪器为 SunScan 冠层分析系统。该系统由 SunScan 探测器、漫射系数传感器(BFS)、DCT1 型掌上电脑、SunData 软件等部件组成。系统利用冠层吸收光强的 Beer 法则, 根据所测光的传输值, 求得叶面积指数, 可以用来测定田间作物的叶面积指数。在田间测值时, 具有简捷方便的特点, 并且试验证明具有较高精度^[8], 首先安装并调整好漫射系数传感器, 于每个网格点处, 将

收稿日期: 2005-01-17 修订日期: 2005-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(30370816); 江苏省水利科技重点项目(2003012)共同资助

作者简介: 薛亚锋(1980-), 男, 江苏如皋人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业水土资源高效利用与管理。江苏 扬州大学水利科学与工程学院, 225009

通讯作者: 周明耀(1958-), 男, 江苏阜宁人, 教授, 主要从事农业水土资源高效利用管理理论与技术研究工作。江苏 扬州大学水利科学与工程学院, 225009。Email: myzhou@yzu.edu.cn

SunScan 探测器置于水稻植株的根部(地表处,于无水层时测定),按南北、东西方向测定 2 次,由掌上电脑读数,取其平均值作为该点处测得值。水稻成熟期取代表植株 5 穴,测定理论产量及产量结构。

3 结果与分析

3.1 经典统计理论分析

3.1.1 叶面积指数及产量信息分布类型

对水稻抽穗期叶面积指数及产量信息绘制频数分布图(结实率略),从图中可以看出其概率分布均基本符合正态分布(见图 1、2),这就为其空间变异性研究提供了理论分析的前提条件。

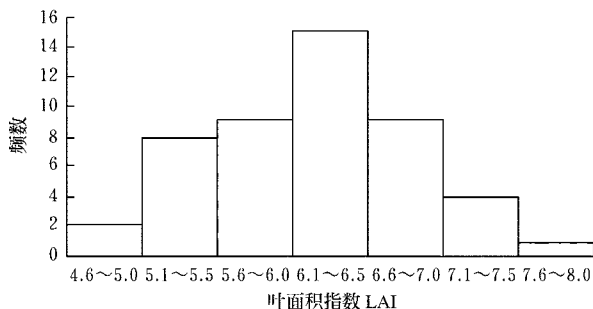


图 1 水稻叶面积指数频数分布图

Fig 1 Frequency distribution of Leaf Area Index (LAI) of rice

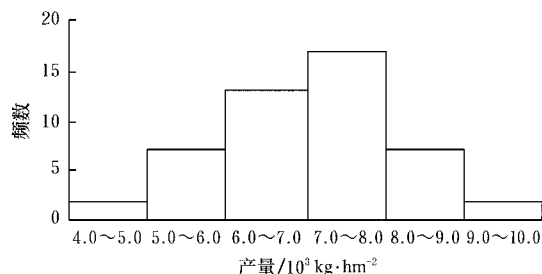


图 2 理论产量频数分布图

Fig 2 Frequency distribution of the theoretical yield of rice

经统计分析可知,各区域变量的特征参数均表现出明显的差异性(见表 1)。叶面积指数的最大值是最小值的 1.6 倍,结实率的最大值是最小值的 1.5 倍,理论产量的最大值是最小值的 2.1 倍,变幅较大。按照反映离散程度的变异系数的大小可以将空间变异性的大小进行粗略的分级($C_v < 10\%$ 为弱变异性, $C_v = 10\% \sim 100\%$ 为中等变异性; $C_v > 100\%$ 为强变异性^[9])。叶面积指数的变异系数为 11.69%,理论产量的变异系数为 16.1%,均在 10%~100% 之间,属中等变异性。结实率的变异系数为 8.81%,属于弱变异性。从偏度系数(C_s)及峰度系数(P_c)可以看出,各参数的分布基本符合正态分布,验证了上面的频数分布图。

表 1 各参数统计特征值

Table 1 Statistical characteristic values of the parameters

区域变量	均值	最大值	最小值	标准差	C_v	C_s	P_c	合理采样数
抽穗期 LAI	6.2	7.9	4.9	0.7277	0.1169	0.1079	3.1306	16
结实率	0.74	0.84	0.56	0.0654	0.0881	-0.3711	3.2344	9
理论产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	6836.5	9056.9	4251.4	1100.6	0.1610	-0.2969	2.6277	30

注:精度条件为 $\Delta = 0.05x$,置信水平为 $\alpha = 0.05$ 。

3.1.2 合理采样数

为使由有限的观测值去估计参变量的数学期望具有足够的精度,取样点或观测点的数目应保持一定的数量,因此,需确定合理的采样数目,既使工作量最小,又能满足一定的精度要求。

所谓合理采样数是指在总体中抽出一定量的样本,用所抽样本的均值与方差能较好地估计总体的均值与方差,即抽取样本的均值具有足够的精度和较大概率近似于总体均值^[10]。由统计学原理可知,取样数目愈大,随机变量 x 的均值 \bar{x} 的方差愈小,因此, \bar{x} 的分布愈集中, \bar{x} 落在 $(\mu(\text{总体均值}) \pm \Delta)$ 范围内的概率愈大。对正态分布总体,合理取样数目应满足这样的要求:样本均值 \bar{x} 和总体均值 μ 之差的绝对值小于或等于某一规定精度 Δ 这一事件的概率达到所规定的置信水平 p ,即 $p\{|\bar{x} - \mu| \leq \Delta\}$ 。经计算,结果见表 1。

3.2 半方差分析

3.2.1 模型选择

各区域变量的经典统计分析只能说明总体的变化,不能反映其空间结构性及相关性。半方差函数是分析区

域化变量空间结构的重要工具,它可反映区域化变量的空间自相关性。在选取半方差理论模型时,首先根据式(1)计算出 $\gamma(h)$ 的散点图,然后用不同类型的理论模型进行拟合,选取拟合度最好的模型类型。经计算,发现各参数的半方差函数理论模型均较好地符合球状模型分布,即

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left[\frac{3}{2} \times \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h < a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (2)$$

式中 C_0 ——块金值,块金值由测量误差和最小取样间距内采样特性(如土壤特性、作物信息)的变异性所引起;基台值表示系统内总的变异,用 $(C + C_0)$ 表示; a ——观测点之间的相关范围,采样特性在范围值内相关,在范围值外空间独立。

3.2.2 拟合精度检验

模型拟合之后,还需进行模型的检验。常用的检验方法有 3 种:交叉检验法、估计方差检验法和 I 值检验法。交叉检验法是把“各实测点上 Kriging 估计值与实

测值之差的平方平均最小”直接作为拟合的理论半方差函数模型的最优性检验。估计方差检验法是用实际与理论的估计方差之比来做检验的方法,如果理论半方差函数确定得较好,则应当围绕 1 来波动。 I 值检验法是把上述两种检验性指标综合成一个统一的检验理论半方差函数最优性的指标^[11]:

$$I = \frac{(Z^* - Z)^2 \times \left[P \times \left| 1 - \frac{1}{[(Z^* - Z)/s]^2} \right| + (1 - P) \right]}{100} \quad (3)$$

其中, $P = \begin{cases} 0.1, & \text{当 } 0 \leq (Z^* - Z)^2 \leq 100 \text{ 时} \\ 0.2, & \text{当 } (Z^* - Z)^2 > 100 \text{ 时} \end{cases}$,
 P 为经验性参数。 I 值越小表明半方差函数模型拟合精度越高。利用交叉检验法、估计方差法和 I 值检验法分别对叶面积指数及产量信息所拟合的理论球状模型进行检验。适当调整 C_0 、 C 及 a , 多次检验拟合精度。结果如表 2 所示。对应的半方差函数图见图 3~5。

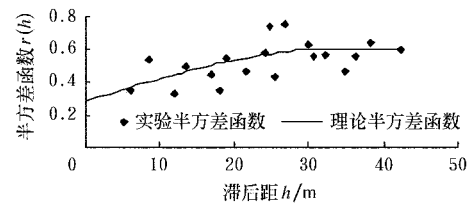


图 3 叶面积指数半方差函数图
Fig 3 Semivariogram of diameter of LAI

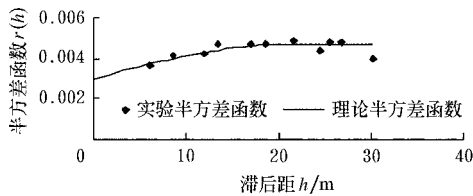


图 4 结实率半方差函数图
Fig 4 Semivariogram of diameter of the saturation

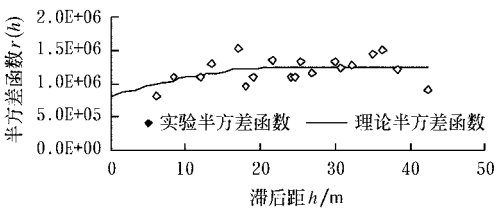


图 5 理论产量半方差函数图
Fig 5 Semivariogram of diameter of the theoretical yield

3.2.3 自相关关系分析
基台值表示系统内总的变异,块金值占基台值的百分数 $C_0/(C + C_0)$ 可以表明系统中变量的空间相关度。本次试验,各区域变量 $C_0/(C + C_0)$ 均在 25%~75% 之间(见表 2),表明均具有中等相关性^[12],但产量信息的自相关性比叶面积指数稍弱。从相关距离看,叶面积指数比产量大。这些指标值说明,还有其他因素影响了产量的形成,诸因素与叶面积指数一起作用,使得产量信息的空间相关性有所减弱。另外可以看出,抽穗期叶面积指数与产量信息的相关距离均在 20~35 m 内,大于本试验所采用的取样间距 6 m,表明该取样尺度已满足本试验研究的要求。

3.3 叶面积指数与产量信息的空间相关分析
相关性分析得知,产量信息与叶面积指数呈抛物线关系(见表 3)。结实率与叶面积指数呈正相关,相关系数为 0.35,相关性显著(查相关系数检验表^[12],相关系数大于 0.285,小于 0.368);理论产量与叶面积指数呈正相关,相关系数为 0.45,相关性达到极显著水平(查相关系数检验表,相关系数大于 0.368)。说明抽穗期叶面积指数是产量信息的主要影响因子之一,水稻高产群体存在适宜的叶面积指数范围^[13],低于这个数量值,水稻群体的生物产量不足,单位面积总粒数较少,产量难以提高;高于这个数量值,水稻群体生态、生理状况随之恶化,群体质量难以改善。

表 2 各区域变量理论球状模型检验表							
Table 2 Test of the spherical model of the regionalized variable							
区域变量	C_0	$C_0/(C + C_0)$	a	$(Z^* - Z)^2$	$[(Z^* - Z)/s]^2$	P	I
抽穗期 LAI	0.2862	0.48	33.66	0.4019	0.99	0.1	0.362
结实率	0.0029	0.62	20.33	0.0038	0.94	0.1	0.0035
理论产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	8168.6	0.65	24.15	9401.05	0.87	0.2	7778.1

表 3 叶面积指数与产量信息相关特性			
Table 3 Correlation between LAI and the parameters of yield			
区域变量 y	区域变量 x	回归方程	相关系数
结实率	抽穗期叶面积指数	$Y = -0.0092X^2 + 0.1X + 0.49$	0.35*
理论产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	抽穗期叶面积指数	$Y = -313.9X^2 + 3579.5X - 3008$	0.45**

注: $N = 48$, $\alpha = 0.05, 0.01$; “*”表示相关系数达到显著水平,“**”表示相关系数达到极显著水平。

4 结 论
本文将地质统计学理论引入到水稻作物信息的研
究中,拓宽了地质统计学的应用领域。通过研究得出如下 4 点结论:
1) 水稻抽穗期叶面积指数及产量信息在空间上的

分布不是完全独立的,而是在一定的区域范围内具有空间结构特征,即既具有随机性又具有结构性。

2) 空间结构性分析表明,水稻抽穗期叶面积指数及产量信息均具有中等变异性及自相关性,且具有相似性,均较好地符合球状模型分布。该理论的引入弥补了单纯采用经典概率统计法对作物信息进行分析的片面性。

3) 相关性分析表明,抽穗期叶面积指数与产量信息呈抛物线关系,相关性达到显著水平,说明抽穗期叶面积指数是影响产量的主要因子之一,高产水稻群体存在适宜的叶面积指数范围。该结论验证了前人在小区试验中得出的结论,为小区试验成果向大面积种植的推广提供了理论依据。

4) 本次研究表明,通过对群体叶面积结构及各项指标的改善,可以获得一定区域范围内水稻产量的全面提高。改善的途径及水肥管理与叶面积指数之间的相关关系将是进一步研究的重点。另外,实现田间作物管理有针对性的、定量化的指导,必须搞清楚作物信息分布的情况及趋势,这就涉及到信息估值的问题,关于叶面积指数与产量信息、品质指标的克立格估值及协同关系分析将在另文讨论。

[参 考 文 献]

- [1] 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
- [2] 史海滨,陈亚新. 土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值[J]. 水利学报, 1994, (7): 70- 77.
- [3] 史海滨,陈亚新. 线性非平稳农田土壤水分信息空间变异

- 性及预测研究[J]. 农业工程学报, 1996, 12(3): 77- 82
- [4] 薛利红,曹卫星,罗卫红,等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 47- 52
- [5] 杨玉玲,田长彦,盛建东,等. 灌淤土壤可溶性盐分空间变异性与棉花生长关系研究[J]. 干旱区地理, 2002, (4): 329 - 335
- [6] Masek T J, Schepers J S, et al. Use of precision farming to improve applications to feed to increase nutrient use efficiency and protect water quality [J]. Soil Sci Plant Anal, 2001, 32(7- 8): 1355- 1369
- [7] Dobemann A, Ping J L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps[J]. Agronomy Journal, 2004, 96: 285- 297.
- [8] 陈红卫,周明耀,柏彦超,等. 基于Beer法则的冠层分析系统叶面积指数测定方法[J]. 灌溉排水学报, 节水灌溉与水资源专刊, 2003, 22: 17- 19
- [9] Dirk Mallants, Binayak P, et al. Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile [J]. Soil Science, 1996, 161(3): 167- 181.
- [10] 郭旭东,傅伯杰. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与 Kriging 插值分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 555- 566
- [11] 王仁铎,胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1988
- [12] 彭美云. 概率论与数理统计[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [13] 张林青,苏祖芳,张亚洁,等. 水稻拔节期群体茎蘖结构与叶面积指数及产量关系的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2004, 25(1): 55- 58

Spatial structure of leaf area index and yield of rice

Xue Yafeng¹, Zhou Mingyao¹, Xu Ying¹, Wang Junnong², Gu Yufen²

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2 Changshu Institute of Water Resources Research, Changshu 215500, China)

Abstract Through the study of leaf area index (LAI) and yield of rice, the spatial structure of LAI and yield of rice was discussed, their semi-sphere models were developed. The results show that LAI and yield have good regionalized variable characteristics and spatial structures. Using this method could offset the shortage of using classical statistics to study the messages of plant. The correlation analysis of LAI at the period of flowering and yield of rice showed that there existed outstanding correlation, and the correlation was subject to parabola. Researches on the spatial variability and the quantification of the crop information can provide basis for the precision farming.

Key words: rice; LAI; regionalized variable; spatial structure