

# 农田尺度小麦产量的空间变异研究

杨玉建, 朱建华, 王殿昌, 刘淑云, 张晓艳, 尚明华, 王风云, 封文杰

(山东省农业科学院 科技信息工程技术研究中心, 山东 济南 250100)

**摘要:**以潮土区 2007 年 GPS 实时定位的 104 个采样点小麦产量数据为基础, 基于地统计学原理和方法, 结合 GIS 空间分析技术, 探讨了小麦产量的空间变异特征, 建立了小麦产量的空间变异模型, 形成了小麦产量的空间分布图, 阐明了影响小麦产量分布不均衡的原因。研究结果表明, 潮土区农田地块小麦产量平均值为 47.426 g/kg, 最高值为 64.508 g/kg, 最低值为 20.163 g/kg, 球状模型是本研究小麦产量连续性分布的最佳模型, 其块金值/基台值为 1.655, 表明在变程为 171.62 m 范围内具有弱的空间变异性, 农田地块东南部和南部为小麦产量的高值区, 由此向外小麦产量逐渐降低, 基本呈圈层分布, 说明小麦产量具有一定的渐变分布规律, 其空间变异主要来自施肥、灌溉、管理水平等随机因素的影响。

**关键词:** 农田尺度; 地统计学; 小麦产量

中图分类号: S158 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2008)增刊-0325-04

## The Spatial Variability Research of Wheat Yield at the Field Scale

YANG Yu-jian, ZHU Jian-hua, WANG Dian-chang, LIU Shu-yun, ZHANG Xiao-yan,  
SHANG Ming-hua, WANG Feng-yun, FENG Wen-jie

(Science and Technology Information Engineering Research Center of Shandong Academy  
of Agriculture Science, Jinan 250100, China)

**Abstract:** This paper took the wheat field of alluvial soil as the research site, aimed to the spatial pattern of wheat yield. With the help of GPS, 104 observing points were made in a wheat field approximate 3 ha on the north of Xiaoqinghe River in Shandong province in 2007. Geostatistics combined with geographical information system (GIS) was applied to reveal the spatial variability of wheat yield. Research results indicated the average wheat yield was 47.426 g/kg, the high value was 64.508 g/kg, the low value was 20.163 g/kg. Field experiments and model prediction were employed in this paper, the range, nugget and sill were calculated, semi-variogram model of wheat yield was established, the interpolation methods were decided, the optimal interpolation by ordinary Kriging was selected, and the spatial distributing map of wheat yield was drawn. It is shown that the semi-variogram structure of wheat yield was spherical, the nugget/sill of wheat yield was 1.655 and belonged to low intensity, there is high wheat yield in the southeast and south of the field, the spatial correlation distance of wheat yield was 171.62 m, a geostatistical analysis indicated that random factors (fertilizer utilization, environmental pollution, cultivation measures, management etc.) were the main factors of the spatial correlations of wheat yield.

**Key words:** Field scale; Geostatistics; Wheat yield

精确农业研究本身是以空间变异作为其理论基础, 美国、加拿大等国的精确农业研究取得成效, 与他们对土壤空间变异性研究的重视密切相关。土壤是作物生长的基础, 土壤特性变异会引起作物生长以及作物产量的变异, 了解并掌握作物产量的空间

连续分布对于提高作物产量循环过程中肥料利用率具有重要意义。遥感是大面积作物产量监测和预测的有效方法, 获取面状信息有其优势, 但由于遥感信息分辨率、获取信息的及时性及解析等方面的局限性, 没有被广泛应用。地统计学以其对既有随机性

收稿日期: 2008-08-13

作者简介: 杨玉建(1974-), 男, 山东济南人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业信息工程研究。

又有结构性的变量进行统计学研究方面的优势,成为点状信息从点到面扩展的重要数学分析工具。本研究引入地统计学方法和空间分析技术通过点到面的扩展实现潮土区小麦产量的预测,形成其空间连续分布表面图,掌握其空间变异规律,有利于深刻认识农业生产的复杂性和时空变异性,有利于精确农业的实施<sup>[1]</sup>。

1 研究区概况

试验样区为山东济南小清河段北岸一块约 3 hm<sup>2</sup> 的坡地,位于东经 117°04'130",北纬 36°42'979",其地形南高北低。受地下水潮化作用影响,研究田块经耕作熟化而形成潮土,土体深厚,沉积层理明显,中下层有锈纹锈斑,表层质地则因沉积过程水流快慢影响而有砂、轻、中壤之别,质地为砂粘壤土。此区属于暖温带半湿润季风气候,气候特点春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季温和凉爽,冬季寒冷少雨雪。小麦—玉米一年两作,采样当季种植小麦。

2 研究方法

2.1 样点分布及实验室测定

采样方案的设计、预测方法的选择等因素影响着以空间结构分析为基础的空间插值结果的准确性,采样方案的选择一方面决定着对空间信息的表达是否准确有效;另一方面通过影响理论半变异函数拟合的合理性进而影响空间插值效果。本次研究以采样定位点为圆心,以 5 m 为半径,在每四分之一的圆周上随机采集一个小麦样品,并与圆心的样品混合,成为一个混合样,装入样品袋,注明编号,即为一个点位的小麦产量样品,GPS 实时定位,通过拷种采集小麦产量样品 104 个,采样时间为 2007 年 6 月。

2.2 数据处理

采用 SPSS 15.0 和 Origin7 软件,进行经典统计学

分析和小麦产量的正态分布检验。利用 ARCGIS8.3 地统计学模块和 Surfer8 的有关空间插值内容开展半方差模型的拟合,绘制小麦产量空间分布图。处理步骤为:基于增加点事件的 GIS 方法将小麦产量数据标准化,对采样点数据进行投影和坐标转化,生成用于地统计学分析的样点分布图,对小麦产量进行探索性空间数据分析,包括对数据的均值、方差、协方差、独立性和变异函数的计算、估计和检验等,对样点的空间结构进行量化分析,通过地统计学计算程序进行变异函数的计算,求得最佳的拟合模型参数和变量,运用地统计学进行 Kriging 表面预测与结果评估<sup>[2-4]</sup>。本研究由于基本遵循网格采样,没考虑小麦产量的分组事宜。

3 结果与分析

3.1 小麦产量统计特征值和正态分布检验

区域化变量的正态分布性检验是 Kriging 方法使用的前提,由于半方差函数的计算一般要求数据符合正态或近似正态分布,否则可能存在比例效应。因此只有当数据服从正态分布时,Kriging 插值方法才有效。P-P 正态概率图是一种检验正态分布的统计图形,它是根据变量分布积累比和正态分布累积比生成的图形,如果数据是正态分布,则被检验数据基本成一直线。研究利用 P-P 正态概率图方法,对小麦产量进行正态检验,每组数据的 P-P 样点图分布基本在一条直线上,说明样本数据符合正态分布,表明所测数据满足地统计学分析的要求,样点小麦产量数据的统计指标参考表 1。变异系数可以粗略地估计变量的变异程度,变异系数的划分等级有:弱变异性(C.V. < 0.1);中等变异性(C.V. = 0.1~1.0);强变异性(C.V. > 1.0),研究区样点小麦产量的变异系数为 0.149,属于中等程度变异性<sup>[5]</sup>。

表 1 小麦产量含量变异特征统计值

Tab.1 Statistics characteristics of wheat yield

项目 Items	样本数 Sample	平均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	标准差 Std. D	方差 Var.	偏度 Skew.	峰度 Kur.	变异系 数/% C. V.	分布类型 Distribution type
产量 Yield	104	47.426	64.508	20.163	7.088	50.240	-0.493	2.248	0.149	正态

3.2 小麦产量空间变异及其模型结构

半方差函数一般有 3 个重要参数:块金值(Nugget= Co)、变程值(Range)和基台值(Sill= Co+C)。其中块金值由测量误差和最小取样间距内小麦产量的变异性引起,是由试验误差和小于试验取样尺度施肥、灌溉、管理水平等随机因素引起的变异,较大的块金方差表明较小尺度的某种过程不容忽视,用 C<sub>0</sub>表示。C 为结构方差,由土壤母质、地形、

气候等非人为的区域因素(空间自相关部分)引起的变异。变程值反映小麦产量特性的空间变异,指半方差达到基台值的样本间距,在变程值外小麦产量空间独立、在变程值内相关。基台值指不同采样间距内存在的半方差极大值,表示半方差函数随间距递增到一定程度后出现的平稳值,表示系统内总的变异<sup>[6,7]</sup>。小麦产量的空间变异模型主要基于块金值、变程值和基台值变量之间的关系,进行半方差模

型拟合,得到最优模型和参数,通过了解小麦产量的空间变异然后插值,最后对于小麦产量的空间变异进行解释并分析其影响因素,开展模型精度检验。

表 2 小麦产量半方差函数理论模型及其结构参数和模型的检验

变量 Var.	模型 Model	块金值 Nugget C <sub>0</sub>	基台值 Sill C <sub>0</sub> + C	变程/m Range	块金值/ 基台值 C <sub>0</sub> / ( C <sub>0</sub> + C)	最优拟合/ % Optimal	预测误差 Estimated error				
							ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE
产量 Yield	S	35. 606	21. 514	171. 62	1. 655	94. 19	- 0. 042 69	6. 854	6. 402	- 0. 006 36	1. 069

注: S. 代表球状模型。 Note: S. Spherical model.

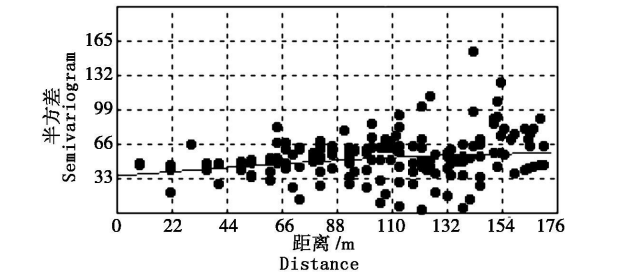


图 1 小麦产量半方差图  
Fig.1 Semivariogram of wheat yield

模型的检验和验证是研究的重要一环。本研究运用交叉验证法对小麦产量的空间连续性分布模型进行检验,即将建立的产量半方差模型与 Kriging 预测方法相结合进行检验<sup>[10- 12]</sup>。这个方法的优点是在检验过程中对所选定的模型参数不断进行修改,直至达到一定的精度。具体来说,每次删掉一个或一组观测值,用余下的数据估计模型,最后选择能够反映整个数据集的模型作为最优模型。该方法的基本思路是依次假设每一个实测点未被测定,由所选定的半方差函数模型,根据 N-1 个其他测定点数据用特定的 Kriging 方法估算这个点的值。设测定点的实测值为  $z(x_1)$ , 预测值为  $Z'(x_1)$ , 二者的标准化值分别为  $Z_1(x_1)$  和  $Z_2(x_1)$ , 则它们的平均误差 ME (Mean standardized error)、均方根误差 ASE (Average standard error)、平均标准误差 RMSE (Root mean-square error) 和标准化均方根误差 RMSSE (Root mean-square standardized error) 可分别表示为:

$$ME= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i)- Z'(x_i)] \tag{1}$$

$$MSE= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z_1(x_i)- Z_2(x_i)] \tag{2}$$

$$ASE= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z'(x_i)- \frac{\sum_{i=1}^N Z'(x_i)}{N}]^2} \tag{3}$$

$$RMSE= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i)- Z'(x_i)]^2} \tag{4}$$

$$RMSSE= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z_1(x_i)- Z_2(x_i)]^2} \tag{5}$$

若模型的平均误差 ME 的绝对值接近于 0; 标准化平均误差 MSE 接近于 0; 平均标准误差 ASE 与均方根误差 RMSE 最接近; 标准化均方根误差

此次研究小麦产量半方差函数理论模型及其结构参数参考表 2, 半方差模型的拟合如图 1。

RMSSE 接近于 1, 则该模型的验证精度符合要求<sup>[8, 9]</sup>。表 2 列出了模型精度验证参数, 拟合的半方差模型结构对于研究区小麦产量是适合的, 最后用普通 Kriging 进行插值, 获得图 2 的小麦产量空间连续分布图。

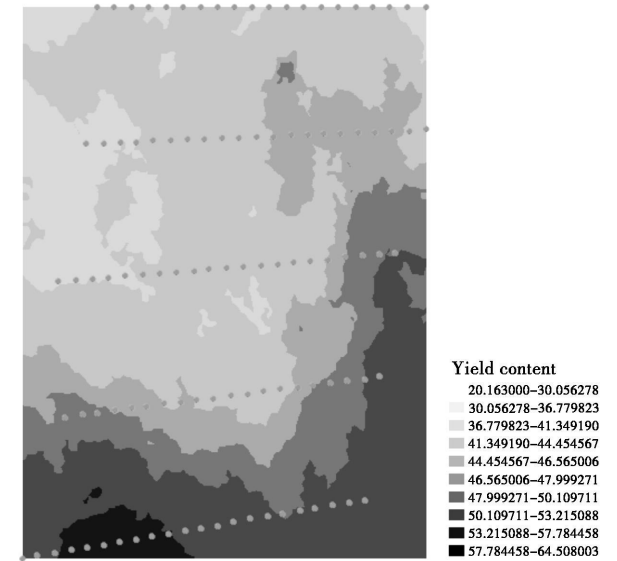


图 2 小麦产量空间分布图  
Fig.2 Spatial distribution map of wheat yield

3.3 空间地统计学分析

限制小麦产量提高的主要因素包括生态类型复杂、水利设施条件差、自然灾害频繁、病虫害害严重以及栽培水平低等。对于本研究来说,小麦产量总的变异既受自然因素土壤母质、地形地貌等空间变异因素的影响,同时也受一些随机因素如施肥、灌溉、环境污染和管理水平等的影响。块金值与基台值的比例可以表明系统变量空间相关性的程度,如果比值小于 25%,说明系统具有强烈的空间相关性;如果比例在 25% ~ 75%,表明系统具有中等的空间相关性;大于 75% 则说明系统空间相关性很弱。本次建立的小麦产量变异函数的最佳理论模型为球状模型,块金值/基台值为 1.655,表明小麦产量空间变异具有弱的空间相关性和结构性,其空间变异主要来自随机因素(如施肥、管理水平和灌溉等水利设施)。在地块的南部和东南部为小麦产量的

高值区域,由此向外小麦产量含量逐渐降低,基本呈圈层分布,小麦产量具有一定的渐变性分布规律。地形与土壤特性和小麦产量变异有直接的关系,地形影响土壤水热条件和成土物质的再分配,因而不同地形位置有着不同的土壤特性,进而影响土壤-作物系统,对小麦产量空间分布也有影响。

## 4 结论与讨论

研究表明,农田地块小麦产量平均值为 47.426 g/kg,最高值为 64.508 g/kg,最低值为 20.163 g/kg。基于 GIS 的栅格数据模型和地统计学原理、方法,利用有限的小麦产量采样点数据,建立了小麦产量空间分布模型,研究表明小麦产量在变程为 171.62 m 范围内具有弱的空间结构变异性,其块金值/基台值为 1.655,球状模型是其含量拟合的最佳半方差模型,小麦产量的区域分布基本呈圈层分布,地块东南和南部为产量较高的区域,向外扩展产量逐渐降低,主要受随机因素施肥、环境污染和管理水平等的影响。

应加强小麦产量和其他影响小麦产量因子的相关性分析,分析多因素作用下小麦产量空间变异的原因,开展小麦产量与土壤典型属性信息的相关分析、回归分析等研究,探索影响小麦产量的空间格局,阐明影响因素和小麦产量耦合机制。结合区域小气候状况,根据主要农田生态系统土壤养分转化与平衡施肥的有关知识,依据定位观测数据,提供区域施肥的调控对策,将小麦产量的空间变异和土壤-作物系统的联合模拟模型结合起来进行研究,开展农田以及区域尺度养分元素和产量因素空间变异预测研究,进而实现土壤-作物互作系统的区域模拟。

## 参考文献:

- [1] 李翔,潘瑜春,赵春江,等.基于多年产量数据的精准农业管理分区提取与尺度效应评价[J].中国农业科学,2005,38(9):1825-1833.
- [2] 高辉,张洪程,戴其根,等.不同土种土壤氮素等养分与水稻基础产量的关系[J].扬州大学学报:农业与生命科学版,2007,28(1):49-53.
- [3] 杨玉建,杨劲松.潮土区土壤有机质量的趋势演变研究[J].土壤通报,2005,36(5):647-651.
- [4] Van Groenigen J W. The influence of variogram parameters on optimal sampling schemes for mapping by kriging[J]. Geoderma, 2000, 97(3): 223-236.
- [5] 张仁铎.空间变异理论与变异[M].北京:科学出版社,2005.
- [6] Cation C, Cfitto A, Marcomini A, *et al.* Risk based characterization of contaminated industrial site using multivariate and geostatistical tools[J]. Environmental Pollution, 2001, 111: 417-427.
- [7] 李瑞,白由路.上海市规模经营农场的土壤养分与水稻产量空间变异特征[J].中国土壤与肥料,2007(3):40-42.
- [8] 许红卫,王珂.田间土壤采样数据的统计特征与空间变异性研究[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2000,26(6):665-669.
- [9] 孔祥斌,张凤荣,王茹.近20年城乡交错带土壤养分时间空间变异特征分析-以北京市大兴区为例[J].土壤,2004,36(6):636-643.
- [10] 张有山,林启美,秦耀东,等.大比例尺区域土壤养分空间变异定量分析[J].华北农学报,1998,13(1):122-128.
- [11] 李红,周连第,张有山.北京郊区平原粮田土壤水分垂直变异特征[J].华北农学报,2002,17(2):82-87.
- [12] 李红,周连经,张有山.京郊平原区粮田土壤水分垂直变异性的半方差表征[J].华北农学报,2003,18(1):111-113.