

文章编号: 100226819(2001)0220033204

# 精确农业田间土壤空间变异与采样方式研究<sup>3</sup>

王珂<sup>1</sup> 沈掌泉<sup>1</sup> John S. Bailey<sup>2</sup> Crawford Jordan<sup>2</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院资源科学系, 杭州 310029; 2 Department of Agriculture for Northern Ireland, Agricultural and Environmental Science Division, Belfast, U K)

**摘要:** 以英国 Hillsborough 农业研究所附近的一块 7.9 hm<sup>2</sup> 的牧草地为研究区, 采用地统计的半方差分析和克里格方法研究其空间变异性和空间插值。同时对研究田块的样点根据不同间距、不同形状进行删选, 对不同布局状况下的结果进行统计比较, 以获取满足一定精度下的最少采样个数和采样形状。研究结果表明, 单纯利用样方统计, 土壤有效钾需要 65 个采样点, 大致为原始采样点的一半。而在考虑空间采样形状和空间插值效果, 再采用最小显著性差异(LSD)进行比较, 该田块土壤有效钾采样最好使用规则三角网布点(样点数为 62 个)。

**关键词:** 地统计; 采样方法; 精确农业; 牧草田

**中图分类号:** S153.1; S126 **文献标识码:** A

70 年代就开始土壤空间变异性规律的研究<sup>[1]</sup>。到 90 年代, 随着发达国家精确农业技术的开展, 土壤特性的空间变异和空间插值技术研究得到众多农学家的关注<sup>[2,3]</sup>。同时空间采样布局和采样方式研究得到了重视。我国从 80 年代起从事这方面的研究, 但多数采用地统计方法进行土壤特性研究<sup>[4-6]</sup>, 对精确农业采样中的土壤作物的空间变异性及布局研究甚少<sup>[4]</sup>。

精确农业描述土壤空间变异性的传统野外田间格网定位采样既费钱又困难。同时许多调查研究表明田间土壤特性的平均值和变异程度受到采样田块大小和测试方法的影响, 但最重要的是受采样方式的影响。因此在满足一定精度的前提下, 通过科学合理的采样布点方法以尽量减少采样个数十分重要。目前, 国外已有一些专家对此进行相关研究, 其中多数人只是对采样数据进行直接的统计分析得出采样个数<sup>[7,8,2]</sup>, 少数人提到了采样的空间布局形状<sup>[3]</sup>。为了避免在利用传统样本容量统计分析方法时, 不能兼顾采样点空间特性的缺陷, 本研究通过对原始格网样点按一定的样点间隔和布局进行抽取并进行空间插值, 然后进行统计比较, 以制定优化采样策略。

## 1 研究材料

### 1.1 样区概括与采样试验

本研究以英国北爱尔兰 Hillsborough 农业研究所附近的一块 7.9 hm<sup>2</sup> 的坡地为试验区。该地块土壤为第三纪红砂岩上发育的棕壤, 质地为砂粘壤土, pH 为 6.0。该地块在 1990 年翻耕播草种, 一年收割 3 次。在施用一定数量有机肥的基础上, 每年施肥机以均匀方式喷洒 300 kgöhm<sup>2</sup> 氮素及混入数量不等的磷钾硫肥。1999 年开始本研究, 当年没有施用有机肥料, 而且氮肥总用量降低至 250 kgö(hm<sup>2</sup> · a), 以优化肥料管理。

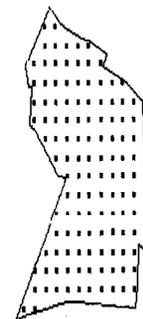


图 1 采样布点示意图

Fig. 1 Sampling distribution of study area

从北爱尔兰地籍数据库中找到该地块。将该地块图形输入到 ARCVIEW 地理信息系统软件中, 然后用 25m × 25m 网格覆盖该地块并确定各采样点, 总共为 123 个(见图 1)。再把田块取样点分布图输

收稿日期: 2000201220 修订日期: 2001201215

3 中英交流合作项目(SHA 09920297)和浙江省自然科学基金资助项目(498015)

王珂, 博士, 教授, 杭州市凯旋路 浙江大学环境与资源学院资源科学系, 310029 Email: Junkehao@telekbird.com.cn

入到 GPS 仪 (Trimble)。田间点混合取样, 取样深度 7.5 cm。土样经风干、磨碎及过筛后, 按英国农业部标准常规分析方法<sup>[9]</sup>进行有关土壤理化性质和养分含量测定。

## 1.2 不同采样布局设计

对所有 123 个原始观测点的原始田间布样称为方案 a, 然后按一定的样点间隔和方向进行抽取。方案 b 为斜向间隔抽取, 使采样点成三角形布局, 间距为  $25\sqrt{2}$  m; 方案 c 为竖向间隔抽取一行, 间距为  $50 \times 25$  m; 方案 d 为横向间隔抽取一行, 间距为  $25 \times 50$  m; 方案 e 为横竖间隔各抽取一行, 间距为  $50 \times 50$  m; 方案 f 为横向抽取二行竖向抽取一行, 间距为  $50 \times 100$  m。

## 2 研究方法

### 2.1 插值分析方法

空间样点插值方法较多采用若干临近点 ( $s_i$ ) 的线形加权或平均值来拟合待估点 ( $s_0$ )。本研究采用地统计中最为常用的克里格插值法, 它是一种局部估计的加权平均。但是它对各观察点的权重的确定是通过半方差图分析获取的。然后根据统计学上无偏和最优的要求, 利用拉格朗日极小化原理, 可推导出权重值与半方差之间的公式<sup>[11]</sup>。空间插值采用点状克里格插值, 又叫一般克里格插值法。

### 2.2 基于所有采样点的样方容量统计

在一定显著水平下 ( $A$ ) 和抽样允许误差范围内 ( $\pm d$ ), 所要求的必要样本数目 ( $n$ ) 的计算采用公式<sup>[10]</sup>:

$$n = (t_{n, \alpha/2} S \ddot{\sigma})^2 \quad (1)$$

式中  $t$ —— $t$  氏分布值;  $S$ ——样本标准方差值。如果计算所得样本数  $n$  大于总体样本容量  $N$  的 10%, 则应采用不重复抽样公式<sup>[11]</sup>,

$$\text{即 } n = n\ddot{\sigma}(1 + n\ddot{\sigma})$$

### 2.3 基于不同的采样布局的样方比较

最小显著性检验 (Least Significant Difference, 简称  $LSD$ ) 方法主要用来成对比较不同样本间平均值的差异。采用此法时, 当两个样本均数的绝对差超过最小显著差数  $LSD$  (公式 (2)), 就可以认为两样本有差异。

$$LSD = t_{n, k, \alpha} \sqrt{\frac{2}{n_i} MSE} \quad (2)$$

式中  $n_i$ ——各样本的容量数;  $MSE$ ——误差均

方。

本研究是对不同的样点布局方案进行空间插值后, 各自提取 123 个点位上的插值数据组成  $LSD$  检验样本, 其中以原始 123 网格样点插值后的数据样本为比较参考。

## 3 结果

### 3.1 基本统计特征和空间变异分析

首先采用快速 David 方法对各项土壤观测数据进行正态检验, 检验表明各数据项符合正态分布。土壤各项特性的变异系数在 14.6% ~ 35.4% 之间 (表 1)。其中土壤有效钾的变异系数比有效磷大, 因此, 在相同精度要求下有效钾的采样布点要比有效磷多。表 2 为半方差分析的各项参数, 其中基底效应是基底值与基台值的比, 该值主要反映各要素的空间独立性。本研究田块土壤特性的基底效应总体较大, 说明空间独立性相对较强<sup>[2]</sup>。

表 1 土壤各项特性的采样数据的基本统计特征

Tab 1 Statistical parameters for soil and plant properties

采样数据项	范围	平均值	标准差	变异系数 ö%
有机质ö%	2.6~6.17	4.508	0.698	15.5
有效磷ömg·L <sup>-1</sup>	15.0~60.0	29.544	7.156P	24.2
有效钾ömg·L <sup>-1</sup>	57.2~327.0	142.880	50.540	35.4
镁ömg·L <sup>-1</sup>	79.0~172.0	112.832	16.439	14.6
硫ömg·L <sup>-1</sup>	7.56~16.9	10.988	1.809	16.5

表 2 土壤各项特性数据的半方差分析结果 (球形模型)

Tab 2 Parameters for variogram spherical models for plant and soil properties

采样数据项	基底值	基台值	变程	基底效应 比值ö%
有机质ö%	0.282	0.771	350	36
有效磷ömg·L <sup>-1</sup>	38.773	53.410	166	53
有效钾ömg·L <sup>-1</sup>	1406.676	3577.735	350	39
镁ömg·L <sup>-1</sup>	204.726	311.685	325	66
硫ömg·L <sup>-1</sup>	1.397	4.919	325	28

### 3.2 基于所有采样点的样本容量统计

取 95% 的置信度, 在不同均值允许误差 (15%, 10%, 5%) 条件下样本容量计算见表 3。本研究中, 5% 和 10% 均值误差下, 土壤特性所需样本容量都超过了总体样本容量的 10% (即 12 个), 需采用不重复抽样公式进行调整。从表 3 可见, 在 5% 允许误差情况下, 土壤各种特性所需采样点不一, 其中有效钾所需采样点最多, 需要原来样点的一半。样本容量的统计与该土壤特性的变异系数直接相关, 本研究

区, 土壤有效钾的变异系数最大, 所以在 5% 允许误差下所需采样点最多。同时分析可见, 随着均值误差的提高, 所需采样数目减少。这一方面减少采样成本, 但另一方面势必降低了对田间土壤空间变异性的表达度和可信度, 而增加了后一步田间精确施肥的误差。所以在进行样本容量的统计分析时, 均值允许误差的取值非常关键。

表 3 在允许误差范围内所必要的观察样本容量

Tab 3 Estimated number of samples required obtaining sample mean

	平均值	标准差	15%	10%	5%
有机质 $\delta\%$	4 508	0 698	3	7	21
有效磷 $\delta\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	29 544	7 156	7	14	42
有效钾 $\delta\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	142 88	50 54	15	27	65
镁 $\delta\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	112 832	16 439	3	6	19
硫 $\delta\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	10 988	1 809	3	7	24

### 3.3 基于不同的采样布局的样方比较

本研究选取土壤有效磷和有效钾进行  $LSD$  检验。将 123 个原始田间格网样点经 Kriging 插值后的数据统计量作为  $LSD$  检验的参考值, 与其他 5 种不同采样布局的 Kriging 插值结果进行比较。

$LSD$  检验显示土壤有效钾三角形布点 ( $25\sqrt{2}\text{m}$  间隔, 即方案 b) 与原始布点 (方案 a) 的 Kriging 插值结果最为接近, 在 1% 显著水平下均值无明显差异。从表 4 可见方案 b、方案 c 和方案 d 三种不同样点布局有几乎相同的样点数, 但插值后的结果有明显的差异。其中方案 d, 即横向间隔抽取的结果精度最差, 为极显著差异, 这与不同采样形状对空间差异的表达效率和空间变异的方向性有关。另

表 4 经过 Kriging 插值后土壤有效钾和磷的  $LSD$  检验结果

Tab 4  $LSD$  test of soil available K and P after Kriging interpolation for obvious combinations

采样个数	布局	土壤有效钾		土壤有效磷	
		平均值	均值差	平均值	均值差
123	方案 a	139 96	—	29 60	—
62	方案 b	139 65	0 31	29 42	0 18
61	方案 c	134 82	5 14 <sup>3</sup>	29 40	0 20
63	方案 d	130 86	9 10 <sup>3 3</sup>	28 86	0 74
30	方案 e	146 73	6 77 <sup>3 3</sup>	30 24	0 64
16	方案 f	147 25	7 29 <sup>3 3</sup>	30 84	1 24 <sup>3</sup>
$LSD$ (1% 显著水平)			6 70		1 27
$LSD$ (5% 显著水平)			5 10		0 96

3 3 —1% 显著水平, 3 —5% 显著水平

外, 从  $LSD$  检验结果可见, 土壤有效钾只有 62 个样点的三角形布点通过均值无显著性差异检验; 而有效磷除了 16 个样点的方案 f 布局以外都能通过检验。说明在相同精度要求下为精确表征空间变异性土壤有效钾所需样点数明显多于有效磷。所以, 不同土壤特性空间变异程度不同, 在土壤采样布点设计时应区别对待。

## 4 结论与讨论

充分了解土壤特性、作物产量空间变异性的条件下, 因地制宜的根据田间操作单元的具体情况, 精细准确的调整各项管理措施和各项物质投入的量, 获得最佳的经济和生态效益。因此, 土壤养分的空间变异性及空间插值方法的研究是精确农业的工作基础。

格网法采样是表征空间变异性的传统及常用的方法。格网越小, 描述空间的精度越高, 但所需的人工及费用也提高。因此, 在满足精度的前提下, 制定可减少采样个数的采样策略和方法十分有意义。

从本试验结果看, 土壤有效钾、有效磷的变异系数明显比土壤镁、硫和有机质高 (表 1), 为精确描述土壤有效钾和磷空间变异性所需的采样点个数应比土壤镁、硫和有机质多。基于所有草样的样本容量统计结果也进一步说明了这一点。在 5% 允许误差的情况下, 精确描述土壤有效钾空间变异性所需的采样点最多 (65 个) (表 3)。因此, 原始采样数即使几乎减少一半, 仍能满足精度要求。若只针对性的研究其它土壤特性, 采样点数可进一步减少。

采样点总数目相同的情况下, 布局方式不同, 描述空间变异性的精度也不同, 即每一样点能表征空间变异性的范围和效率不同。本研究对土壤有效磷和有效钾不同采样布局的  $LSD$  检验表明, 三角形布点方法比较理想。但三角形布点方法在其它地形条件下是否仍是最佳, 尚需进一步研究。

总之, 不同的土壤特性, 描述其空间变异性所需的样点数不一。相同数量的采样点, 不同的布点方式所表征的空间变异精度也不一。因此, 确定采样方式时, 应充分考虑研究对象、地形等自然条件。

### 【参 考 文 献】

- [1] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: 1, The semivariogram and punctual Kriging J Soil Sci, 1980, 31: 315~ 341.

- [2] Tsegaye T, Hill R L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements. *Soil Sci*, 1998, 163(2): 155~165.
- [3] Gupta R K, Mostaghimi S, McClellan P W, et al. Spatial variability and sampling strategies for NO<sub>3</sub>-N, P, and K determinations for site-specific farming. *Trans of the ASA E*, 1997, 40(2): 337~343.
- [4] 雷志栋, 杨诗秀等. 土壤特性空间变异性初步研究. *水利学报*, 1985, 9: 10~20.
- [5] 周慧珍, 龚子同等. 土壤空间变异性研究. *土壤学报*, 1996, 33(3): 232~240.
- [6] 梁春祥, 姚贤良. 华中丘陵红壤物理性质空间变异性的研究. *土壤学报*, 1993, 30(1): 69~77.
- [7] Lascano R J, J L Hatfield. Spatial variability of evaporation along with two transects of a bare soil. *Soil Sci Soc Am J*, 1992, 56: 341~346.
- [8] Gotway C A, Ferguson R B, Hergert G W, et al. Comparison of Kriging and Inverse distance methods for mapping soil parameters. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60: 1237~1247.
- [9] Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. *The Analysis of Agricultural Materials*, MAFF/ADAS reference book 427, HMSO, London (1986).
- [10] Hald A. *Statistical Theory with Engineering Applications*. John Wiley & Sons, New York, 1960.
- [11] Sachs L. *Applied Statistics*. Springer-Verlag, New York, 1982.

## Spatial Variants and Sampling Strategies of Soil Properties for Precision Agriculture

Wang Ke<sup>1</sup> Shen Zhangquan<sup>1</sup> Jong S. Bailey<sup>2</sup> Crawford Jordan<sup>2</sup>

(1. Resource and Environment College, Zhejiang University, Hangzhou 310029; 2. Department of Agriculture for Northern Ireland, Agricultural and Environmental Science Division, UK)

**Abstract** Field nutrient distribution maps obtained from the study on soil variation within fields are the basis of precision agriculture. The quality of these maps and value for management depends on the accuracy of the predicted values, which in turn depends on the initial sampling. To produce reliable predictions efficiently the minimal sampling size and combination should be decided firstly, which avoids the mispent funds for field sampling work. A 7.9 hectare silage field close to the Agricultural Research Institute at Hillsborough, Northern Ireland, was selected for the study. Grid sampling method (25m × 25m) was adopted and there were 123 sampling points in this field. Based on all sampling data, the least required numbers of soil properties were calculated for a 95% confidence within 5% of population mean. Using the geo-statistical method of Kriging with the data in the various sampling combinations for soil available P and K were made at sampling points from which the known values had been removed. These predicted data groups were compared using Least Significant Difference (LSD) test method. The results showed that the 62 sampling size of triangle arrangement for soil available K were sufficient to fulfil the required accuracy. The triangular design to be more efficient of Kriging than a rectangular or hexagonal sampling arrangement.

**Key words:** geo-statistics; sampling strategies; precision agriculture; grass field