

农田土壤水分和电导率空间变异性及 确定其采样数的方法

李子忠 龚元石

(中国农业大学资源与环境学院)

摘要 应用传统统计学和地统计学方法,分析了2个氮肥用量间夏玉米田间2个10 m × 10 m 区域土壤含水量和电导率的空间变异性,在此基础上,应用普通克立格技术估算了未知点的土壤含水量和电导率,并确定了2种土壤特性的合理采样数目。结果表明,不同的氮肥用量不但影响土壤电导率的分布规律,而且影响土壤含水量的分布规律;土壤含水量和电导率的半方差函数揭示了它们的分布具有强烈的空间自相关性,纯块金效应除外;在本试验条件下,应用克立格方法,土壤含水量和电导率采样效率比传统统计学方法提高6~8倍。

关键词 土壤含水量; 电导率; 空间变异; 克立格法; 采样数目

分类号 S152; S114

Spatial Variability of Soil Water Content and Bulk Soil Electrical Conductivity and Determination of Sampling Number in Field

Li Zizhong Gong Yuanshi

(College of Resource and Environmental Sciences, CAU)

Abstract Spatial variability of soil water content and bulk soil electrical conductivity was analyzed in the two 10 m × 10 m area of summer maize fields for two nitrogen fertilizer treatments by the classical statistics and geostatistics. Furthermore, ordinary kriging technique was applied to estimate soil water content and bulk soil electrical conductivity of unknown sites, and determine reasonable sampling numbers of two soil properties. The results showed that the nitrogen fertilizer treatments affected the spatial distribution of bulk soil electrical conductivity and soil water content, and semivariograms of soil water content and electrical conductivity revealed strong spatial dependence, except pure nugget effects, and sampling efficiency was 6 to 8 times greater than that estimated soil water content and bulk soil electrical conductivity by the classical statistical methods in this study.

Key words soil water content; electrical conductivity; spatial variability; kriging; sampling number

对土壤特性空间变异性的描述,最初是根据1925年Fisher的传统统计学原理,不考虑测定位置的空间关系。但是大量的研究表明,土壤特性在一定范围内存在空间自相关性^[1]。地统计学则是以区域化变量理论为基础,以半方差函数为基本工具,研究那些在空间分布上既有随

收稿日期: 2000-03-31

中德合作项目“华北平原作物高产及高生产力条件下环境可承受的持续农业研究”资助

李子忠,北京海淀区圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094

机性又有结构性的自然现象的科学^[2]。许多研究者曾应用地统计学理论和方法研究土壤特性的空间变异性,并在土壤制图中进行土壤特性值的局部估计和设计采样方案。McBratney 和 Webster(1983)较早地详细讨论了应用地统计学理论进行土壤特性的区域估值和确定合理采样数目的方法,并以表土 pH 数据为例加以说明,结果表明,应用该方法可比传统的随机采样方法提高效率 3~9 倍^[3]。以后,有人应用该方法定量研究了土壤分类中判断冲积层的指标,如锈斑出现深度、砂砾出现深度以及壤砂土和/或较粗质地土层厚度的空间变异性,获得了克里格标准误差与采样间隔和采样数目的关系图,并从图中确定了所研究指标给定精度的合理采样数目和采样间隔,结果表明,地统计学方法比传统方法在设计采样方案时更有效:用较少数目的样品即可获得同样精度的估值^[4]。也有人用该方法研究了粉质壤土中交换性磷和钾、土壤 pH 值、有机质含量、容重以及楔入阻力等的空间变异性,并用于采样方案的设计,同样得到了用克里格方法可提高采样效率的结果^[5]。

本试验运用传统统计学和地统计学方法,研究土壤水分和电导率的半方差函数模型,用普通克里格法对其进行插值,并比较 2 种确定合理采样数的方法,从而为农田土壤水分和盐分的监测和管理提供科学方法和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 基本理论

传统统计学分析包括平均值、中值、最小值、最大值、标准差、变异系数、峰度系数和偏度系数^[2],并用 Kolmogorov-Smirnov 方法检验正态或对数正态的分布特征,即先计算检验统计量(KSt),然后与检验值(KSc)进行比较。用传统统计学方法估算土壤特性的平均值所需样本数的公式为

$$n = t_{\alpha}^2 s^2 / (x - \mu)^2 \quad (1)$$

这里 n 是在可容许偏差 d 时估算变量 x 的平均值 μ 所需的样本数。 t_{α} 是置信度为 α 时的学生氏 t 值, s^2 是样本方差。

用美国盐渍土实验室开发的 GEOPACK 1.0 软件^[6]进行地统计学分析,计算 $\gamma(h)$,拟合半方差函数,获得半方差函数的几个参数即变程 a ,块金值 C_0 ,基台值 C_1 和可反映空间异质性的 SH 值^[7]— $C_0/(C_0 + C_1)$,并用普通克里格法进行未测点的估计和方差的计算,然后,估计的结果用 Golden Software 公司开发的 SURFER 5.01 软件^[8]绘制成等直线图。在离散情况下,半方差函数的计算公式^[2]为

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

式中 $N(h)$ 是被向量 h 相隔的试验数据对的数目。

根据文献[3],当采样网格是正方形时,研究区域可被看成由观测点在中心,边长等于采样间隔的 n 个正方形组成,将 n 作为采样数目。此时,估算每个正方形的土壤特性平均值的方差为

$$\sigma^2 = 2\bar{\gamma}(x, S) - \bar{\gamma}(S, S) \quad (3)$$

式中, $\bar{\gamma}(x, S)$ 为正方形内中心点 x 和其他所有点之间的平均半方差值, $\bar{\gamma}(S, S)$ 为正方形内的

所有点的平均半方差值。如果所研究区域的正方形的估计值为 $\hat{z}_{si}, i=1, 2, \dots, n$, 那么该区域的平均值为

$$\hat{z}_{SR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{z}_{si} \quad (4)$$

相应的全局估值方差为

$$\sigma_{SR}^2 = \frac{1}{n} \sigma^2 \quad (5)$$

本研究通过改变正方形的数目, 并对每个正方形进行克里格估值, 再用同时所得的克里格估值方差结合公式(5)计算出全局估值方差 σ_{SR}^2 , σ_{SR}^2 的平方根即为克里格估值的标准误差。

1.2 试验设计

试验在北京市海淀区东北旺乡中德合作项目试验场进行。土壤类型为草甸褐土, 表层 0~10 cm 为轻壤土, 容重 $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 饱和含水量 $0.50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

取 2 个试验小区, 面积均为 $30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 。1999-06-24 播种夏玉米(京垦 114), 09-28 收获。该 2 个小区分别为 2 个氮肥处理, 第 1 次追肥在三叶期, 在玉米行之间开 5 cm 深的沟, 将肥料撒入沟内后用土覆盖。第 1 小区施尿素合纯氮 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 第 2 小区施碳酸氢氨合纯氮 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。第 2 次追肥在第 10 叶展开时(1999-08-06), 过程是在降雨前将肥料沿玉米行附近洒在土壤表面, 其中第 1 小区施尿素合纯氮 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 第 2 小区施尿素合纯氮 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。整个夏玉米生育期, 在第 1 小区共施氮素合纯氮 $110 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 称为 M 处理; 在第 2 小区共施氮素合纯氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 称为 H 处理。

从各试验小区中选择 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的测定区域, 以网格交叉点作为测定点, 共 100 个测定点。测定时间是 1999-07-08 和 1999-10-02, 期间降雨量为 216.9 mm, 无灌溉。用波兰产 FOM/m ts 时域反射仪在每个测点同时测定表层 0~10 cm 的土壤体积含水量 θ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 绝对误差为 $\pm 0.02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) 和电导率 σ ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$) (在测定范围 0.01~10 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 内, 相对误差为 $\pm 2\%$)。

2 结果与讨论

2.1 传统统计学分析

土壤含水量及电导率的测定结果(表 1)表明, 在玉米收获后试验期间的降雨使土壤含水量增加, 其平均值和中值非常接近。各处理土壤含水量的极差(最大值-最小值)约为 0.09~0.13 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 标准差约为 0.019~0.029 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, 变异系数为 8%~14.7%, 其中 07-08 的标准差和变异系数都大于 10-02 的, 说明试验期间的降雨使土壤水分分布更均匀。

混合土壤电导率 σ 是土壤固液气三相混合的电导率, 反映土壤的盐分状况, 约为 0.19~0.27 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$, 根据在河北曲周地区用四电极土壤电导仪测定的土壤电导率结果初步确定的盐化程度划分参考标准^[9], 可略知所研究土壤为非盐化土壤($< 0.21 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$), 个别时期或测定点为轻盐化(0.21~1.39 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)。经过玉米生长季, M 处理的土壤电导率降低了约 0.07 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$, H 处理略有升高。07-08 的 H 处理和 10-02 的 M 处理的平均值和中值比较接近, 而其他 2 个处

理相差较大。各处理的极差约为 0.22~0.44 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 标准差约为 0.04~0.08 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 变异系数为 21.8%~37.2%。经过玉米生长季, M 处理的极差、标准差和变异系数都减小, 而 H 处理的则都增大。并且, 从变异系数可知, 各处理小区土壤电导率变异比土壤含水量大 1.5~4.5 倍。

表 1 描述统计特征值

样本数: 100

项目	日期	处理小区	平均值	中值	最小值	最大值	标准差	CV/%
$\theta/\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	07-08	M	0.258	0.263	0.184	0.312	0.029	11.17
	07-08	H	0.189	0.183	0.138	0.280	0.028	14.70
	10-02	M	0.290	0.293	0.209	0.328	0.019	6.68
	10-02	H	0.265	0.266	0.216	0.313	0.021	8.01
$\sigma/\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$	07-08	M	0.269	0.250	0.170	0.480	0.070	25.94
	07-08	H	0.190	0.185	0.100	0.410	0.049	25.79
	10-02	M	0.201	0.200	0.130	0.350	0.044	21.82
	10-02	H	0.215	0.180	0.130	0.570	0.080	37.18

M 小区施纯 N 110 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, H 小区施纯 N 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。下同。

从各处理土壤含水量和混合电导率的统计分布特征(表 2)中可知, 07-08 的 H 处理土壤含水量分布呈正偏, 其他各处理都呈一定程度的负偏, 07-08 的 M 和 10-02 的 H 处理呈一定程度的低峰态, 其他 2 个处理呈一定程度的高峰态。经分布检验, 只有 10-02 的 2 个处理的土壤含水量在 3 个置信度下呈正态或对数正态分布, 07-08 的 2 个处理只在较低置信度下呈正态或者对数正态分布, 同时增加了犯第二类错误的可能性^[10]。

土壤电导率的分布都呈严重的正偏和高峰态, 多数情况下都不呈正态或对数正态分布, 仅在信度为 0.01 时 07-08 的 H 处理和 10-02 的 M 处理呈对数正态分布, 同样增加了发生第二类错误的可能性^[10]。

表 2 分布特征检验

项目	日期	处理小区	偏度系数	峰值系数	KS t1	KS t2	$\alpha_{0.10}$	$\alpha_{0.05}$	$\alpha_{0.01}$
θ	07-08	M	-0.5835	-0.2825	0.091	0.116	-	-	+
	07-08	H	0.7737	0.3782	0.113	0.085	-	O	O
	10-02	M	-0.8216	1.9082	0.062	0.074	+O	+O	+O
	10-02	H	-0.0825	-0.6594	0.066	0.075	+O	+O	+O
σ	07-08	M	1.2961	1.1622	0.173	0.132	-	-	-
	07-08	H	1.6394	4.4183	0.148	0.098	-	-	O
	10-02	M	1.0975	1.4202	0.129	0.093	-	-	O
	10-02	H	2.1200	5.0350	0.194	0.173	-	-	-

KS t1 和 KS t2 分别为未变换和经对数变换后的 Kolmogorov-Smirnov 正态统计量。

$\alpha_{0.10}$, $\alpha_{0.05}$ 和 $\alpha_{0.01}$ 分别代表置信度为 0.10, 0.05 和 0.01; 该 3 个置信度下的临界值(KSc)分别为 0.080, 0.089 和 0.103。

+ , O 和 - 分别表示在相应置信度下呈正态、对数正态分布和不为此二种分布中任何一种。

2.2 半方差函数及结构分析

从表 3 可知,各处理土壤含水量的空间结构基本可用球状模型描述,并将模型进行了交叉验证。结果表明,土壤含水量的变程约为 2.2~4.4 m,经过玉米生长季,不同氮肥处理小区土壤含水量的分布发生的变化不同,其中 M 处理的 SH 值降低,说明随机部分引起的土壤含水量的空间变异程度较小,空间自相关部分的作用较大;而 H 处理的 SH 值则升高为反映纯随机变化的 1,表现为纯块金效应。原因可能是氮肥用量不同使玉米的耗水量不同,也改变了土壤含水量的分布。

表 3 半方差函数模型

项目	日期	处理小区	模型类型	块金值 C_0	基台值 C_1	变程 $l(a)/m$	SH $C_0/(C_0+C_1)$	残差平方和 SSQ	误差平均值 $R\mu$	误差方差 $R\sigma^2$
θ	07-08	M	球状	0.00053	0.00038	4.39	0.58	3.754E-04	0.0144	0.948
	07-08	H	球状	0.00030	0.00045	2.94	0.40	5.745E-05	0.0304	1.031
	10-02	M	球状	0.00009	0.00029	2.20	0.24	1.024E-06	0.0032	1.000
	10-02	H	纯块金	-	-	-	1.00	-	-	-
σ	07-08	M	球状	0.00234	0.00296	4.73	0.44	7.616E-07	0.0029	1.000
	07-08	H	纯块金	-	-	-	1.00	-	-	-
	10-02	M	纯块金	-	-	-	1.00	-	-	-
	10-02	H	球状	0.00345	0.00325	5.75	0.51	1.415E-04	0.0159	1.066

土壤电导率分布用纯块金模型或球状模型描述(表 3),所有模型都进行了交叉验证。结果表明,土壤电导率的变程约为 4.7~5.8 m,经过玉米生长季,不同氮肥处理小区土壤电导率的分布发生的变化不同,其中 M 处理的 SH 值则升高为反映纯随机变化的 1,表现为纯块金效应;H 处理的 SH 值则由反映纯随机变化的 1 降低为 0.51,说明随机部分引起的土壤电导率的空间变异程度变小,空间自相关部分的作用变大。原因可能是氮肥用量不同导致了土壤电导率的分布的变化规律不同。

2.3 克里格空间插值及等值线图的绘制

利用实测点的土壤含水量及电导率估计和预测未知点的数值,可为农田土壤水分和盐分监测和管理提供依据。用普通克立格方法,在东西和南北方向的估值间隔都为 1.11 m,每个处理小区产生的土壤含水量和电导率的估计值为 100 个(分布呈纯块金效应的除外)。在估值过程中每个变量使用了变程范围内 10 个最临近的点和表 3 中的半方差函数。

根据克立格估值绘制的土壤含水量和电导率等值线图,各处理土壤含水量分布不同(图 1),M 处理在玉米生长季前后土壤含水量的分布有相似之处,H 处理在玉米生长的后期土壤含水量为随机分布,分布规律变化较大。由于存在纯块金效应,在各处理小区土壤电导率分布的变化同样较大(图 2)。各处理小区土壤含水量和电导率的普通克立格估计方差大部分为 0 或很低。

2.4 确定合理取样数目的方法比较

用传统统计学方法(公式 1)和地统计学的克里格方法(公式 5)计算的 95% 置信水平下土壤含水量和电导率的估算标准误差与相应的取样数目的关系曲线(图 3)表明,应用克里格方法确定合理的采样数目比传统统计学方法具有明显的优点,即能够以少得多的样本数达到同样的精度。从图 3 和表 4 可知,应用克里格方法,土壤含水量和混合电导率的采样效率比传统统计学方法提高约 6~ 8 倍。

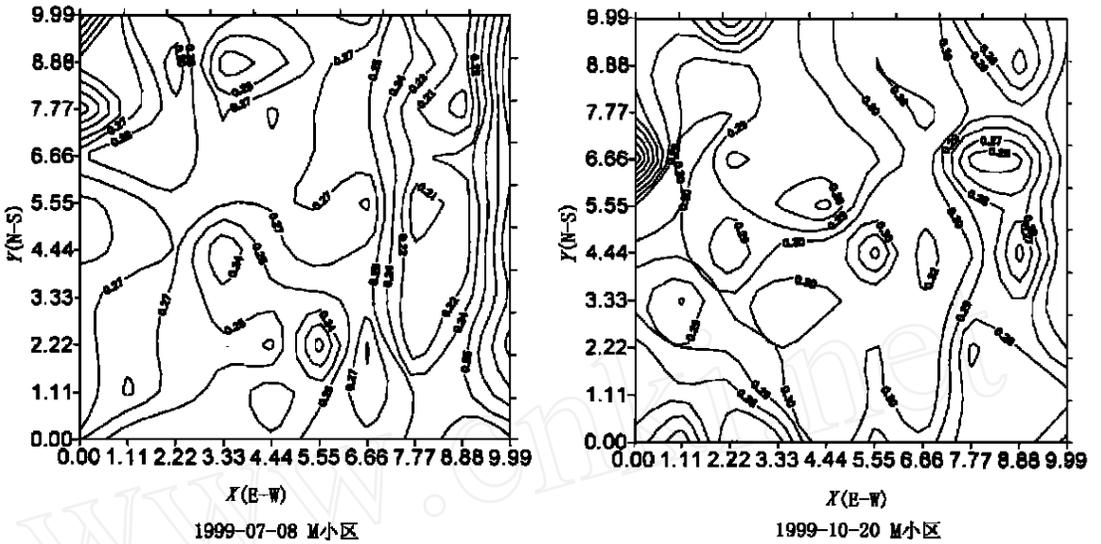


图 1 经克里格插值后土壤含水量等值线图

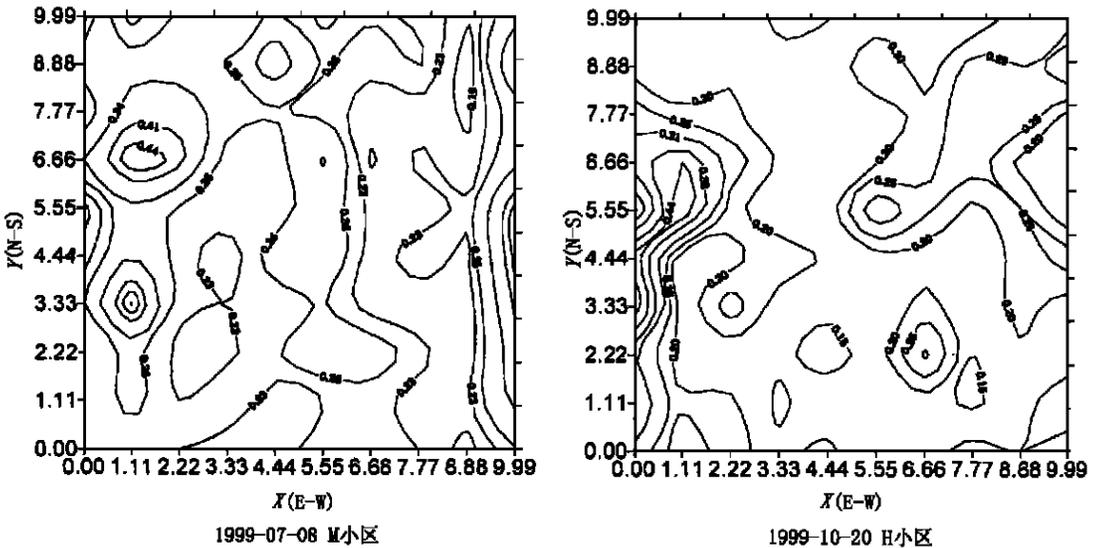


图 2 经克里格插值后土壤电导率等值线图

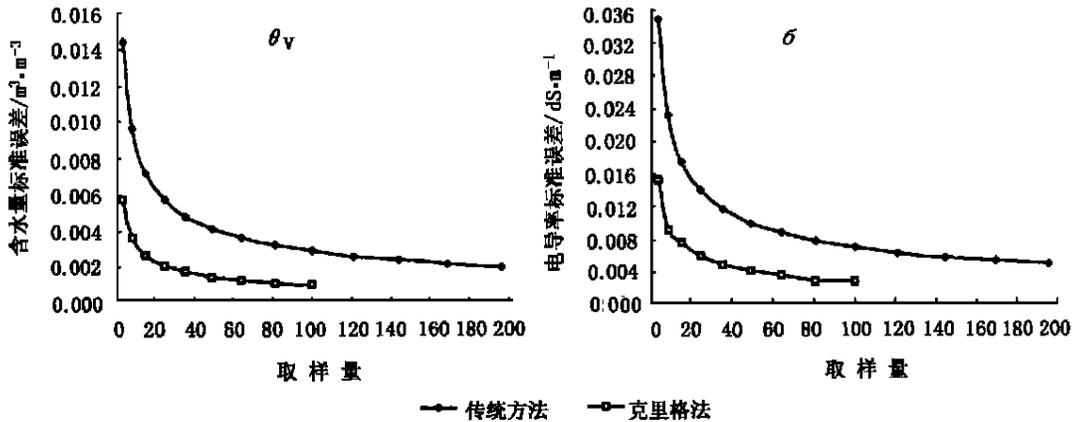


图 3 土壤含水量与电导率的标准误差和采样数的关系
(以 1999-07-08 的 M 小区为例)

表 4 传统统计学和地统计学方法确定的合理取样数比较

项目	日期	处理小区	标准误差	传统方法 确定的采样数	地统计学方法 确定的采样数
θ	07-08	M	0.005	34	5
	07-08	H	0.005	32	5
	10-02	M	0.005	16	2
	10-02	H	0.005	18	18(纯块金效应)
σ	07-08	M	0.01	49	8
	07-08	H	0.01	25	25(纯块金效应)
	10-02	M	0.01	19	19(纯块金效应)
	10-02	H	0.01	64	8

3 结论

不同的氮肥处理影响田间土壤电导率的分布,也会影响土壤含水量的分布规律。各处理土壤含水量的空间结构基本可用球状模型描述,变程约为 2.2~4.4 m。经过玉米生长季,不同氮肥处理小区土壤含水量分布的变化不同。其中 M 处理的 SH 值降低,说明随机部分引起的土壤含水量的空间变异程度较小,空间自相关部分的作用较大;而 H 处理的 SH 值则升高为反映纯随机变化的 1,表现为纯块金效应。

土壤电导率分布用纯块金模型或球状模型,变程约为 4.7~5.8 m。经过玉米生长季,不同氮肥处理小区土壤电导率的分布发生的变化不同,其中 M 处理的 SH 值则升高为反映纯随机变化的 1,表现为纯块金效应;H 处理的 SH 值则由反映纯随机变化的 1 降低为 0.51。说明随机部分引起的土壤电导率的空间变异程度变小,空间自相关部分的作用变大。

用克立格插值能够详细估算未知点的土壤含水量和电导率, 预测方差及其分布, 能够大大提高田间选取测点的效率。在本试验条件下, 土壤含水量和混合电导率的采样效率比传统统计学方法提高约 6~ 8 倍。

参 考 文 献

- 1 龚元石, 廖超子, 李保国 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征 土壤学报, 1998, 35(1): 10~ 15
- 2 侯景儒, 尹镇南, 李维明等 实用地质统计学 北京: 地质出版社, 1998
- 3 McBratney A B, Webster R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? Soil Sci, 1983b, 135: 177~ 183
- 4 DiH J, Trangnar B B, Kemp R A. U se of geostatistics in designing sampling for soil survey. Soil Sci Soc Am J, 1989, 53: 1163~ 1167
- 5 Chung C K, Chong S K, Varsa E C. Sampling strategies for fertility on a stoy siltloam soil Communication of Soil Science and Plant Analysis, 1995, 26(5&6): 741~ 763
- 6 Yates S R. Geostatistics for waste management: A user 's manual for the GEOPACK (1. 0) geostatistical software system. U S Salinity Laboratory, 1990
- 7 王政权 地统计学及在生态学中的应用 北京: 科学出版社, 1999
- 8 Smith D, Wall W, Chen Z Y, et al SURFER (5. 01) surface mapping system. Colorado: Golden Software, Inc, 1994
- 9 李韵珠, 王文新 四电极土壤电导仪在盐渍土上的应用 见: 石元春等著 盐渍土的水盐运动 北京: 北京农业大学出版社, 1986
- 10 Yates S R, Warrick A W. Estimating soil water content using cokriging Soil Sci Soc Am J, 1987, 51: 23~ 30