维普资讯 http://www.cqvip.com

30-35

第 28 卷 第 6 期 西北农业大学学报 Vol. 28 No. 6
2000 年 12 月 Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis Dec. 2000

[文章编号]1000-2782(2000)06-0030-06

农田土壤特性的空间变异性及 Kriging 估值法

李小昱[1]，雷廷武[2]，王 为[1]

(1 西北农林科技大学 机电工程学院，陕西 杨陵 712100；
2 中国科学院 水利部西北水土保持研究所，陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 以自相关和半方差函数对 40 m×45 m 面积内的 90 个点进行了土壤容重、田间持水量的空间变异性研究。结果表明，土壤特性表现出空间变异结构，但不是完全的随机变异，在一定范围内存在着空间相关现象，且空间结构无明显的方向，并对以空间变异结构为基础的 Kriging 估值法作了探讨，其较普通平均法估值精度高。

[关键词] 土壤特性；空间变异性；Kriging 法；容重；田间持水量
[中图分类号] S152.9 [文献标识码] A

土壤特性在田间的高度变异，严重阻碍了土壤学定量和动态研究的深入以及许多新技术的应用。土壤特性的空间变异性是指一个质地视为均一的区域内，在同一时间，不同点的土壤特性存在着的明显差异性[1]。

70 年代后期，国外许多学者从事土壤特性空间变异性规律方面的研究，将地统计学理论用于土壤和水资源科学。在认识到土壤特性是一种区域化变量，同时具有地质结构特性和统计学的随机特性基础上，Burgess 与 Webster 等[2,3]进行了较为成功的探索，推动了土壤特性空间变异性的研究。80 年代中期以来，雷志栋、吕军、梁春祥、徐吉炎等[1,4~6]针对我国某些土壤进行了研究。

本研究以地统计学原理为基础研究土壤特性的空间变异性。并引入 Kriging 估值法对田间土壤特性进行估测，为土壤特性预测提供科学依据。

1 基本理论

土壤是一时空连续变异体。传统上对土壤特性变异的分析，大多只注意全体观测值的均值和它们的离散程度，很少甚至完全不考虑观测样点的坐标系统[7]。但实际上，由于土壤性质的变异是一种空间上的连续过程，这就意味着土壤特性田间观测值在空间上的分布具有一定的结构[7,8]。本文采用自相关函数和半方差函数描述土壤特性的空间变异性。

1.1 自相关函数

自相关函数是描述随机函数 $Z(x)$ 在空间位置上自相关程度的统计量，其定义为：

[收稿日期] 2000-01-20
[基金项目] 中国科学院"引进国外杰出人才基金"项目
[作者简介] 李小昱(1953—)，女，教授。

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\rho(h) = E\{[Z(x) - \mu][Z(x+h) - \mu]\}/\sigma^2。 \tag{1}$$

计算式为：

$$\rho(h) = \frac{\sum[Z(x_i) - \overline{Z}(x)][Z(x_i+h) - \overline{Z}(x)]}{\sum[Z(x_i) - \overline{Z}(x)]^2 \cdot \sum[Z(x_i+h) - \overline{Z}(x)]^2}, \tag{2}$$

式中，$\rho(h)$为自相关系数，$\rho(h)$值为$[-1,1]$时，$\rho(h)$越大，$Z(x)$的自相关性越好，反之，则自相关性越差；$Z(x_i)$，$Z(x_i+h)$为位置 x_i，x_i+h 处某特性的测定值；μ 为总体平均值；$\overline{Z}(x)$为实测平均值；σ^2 为总体方差。

1.2　半方差函数

半方差函数是描述土壤特性空间变异结构的一个函数。假设随机函数 $Z(x)$均值稳定，方差存在且有限，该值仅和间距有关，则半方差函数 $r(h)$可定义为随机函数 $Z(x)$增量方差的一半，即：

$$r(h) = \frac{1}{2}\sigma^2[Z(x+h) - Z(x)]。 \tag{3}$$

计算式为：

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2, \tag{4}$$

式中，h 为样本间距，又称位差(Lag)；$N(h)$是间距为 h 的样本"对"数。

1.3　Kriging 方法

Kriging 方法是利用原始数据和半方差函数的结构性，对未采样点的区域化变量进行无偏最优估值的一种方法[9]。设在一区域内位置 x_0 处某一变量的估值 $Z^*(x_0)$，其周围在相关范围内有 n 个已测定值 $Z(x_i)(i=1,2,\cdots,n)$，现通过这 n 个测定值 $Z(x_i)$的线性组合来求估测值 $Z^*(x_0)$，即：

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i)。 \tag{5}$$

式中，λ_i 是与 $Z(x_i)$位置有关的加权系数。要使估测最优必须满足：

1. 无偏估计，即 $E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0$； (6)

2. 方差最小，即 $\sigma^2[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = \min$。 (7)

由(4)～(7)式，利用拉格朗日极小化原理，可以导出 λ_i 与半方差之间的矩阵：

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} & 1 \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} & 1 \\ & & \cdots & & \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdots \\ \lambda_n \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{10} \\ r_{20} \\ \cdots \\ r_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{8}$$

式中，r_{ij}为 x_i、x_j 间距为$|x_i - x_j|$的半方差，φ 为拉格朗日算子。求解式(8)方程组得各 λ_i 值和 φ 值后，由式(5)可写出 x_0 点的最优估值 $Z^*(x_0)$。

2　试验设计

试验地位于西北农业大学农作一站，供试土壤为垆土、重壤土。面积为 40 m×45 m，

维普资讯 http://www.cqvip.com

按5 m×5 m设置网格，共有90个观测点，采样深度为耕层10 cm，对容重和田间持水量进行观测。容重采用环刀法，田间持水量采用容重环法。

3 结果与分析

3.1 土壤特性的经典统计特征值

按照经典方法，土壤容重、田间持水量的统计特征值列于表1。

表1 土壤特性的统计特征值

统计特征	容重 γ/(g·cm^{-3})	田间持水量 η/%
样本容量	90	90
最大值	1.49	23.30
最小值	1.18	18.20
平均值	1.33	20.25
标准差	0.078	1.22
变异系数	0.059	0.061
概率分布	正态分布	正态分布

由于土壤特性在田间的分布是连续的，因此表1所列的统计特征值只能在一定程度上反映总体，不能定量地描述土壤特性的随机性、不规则性、独立性和相关性。要解决这些问题，必须进一步进行空间变异结构方面的分析与探讨。

3.2 空间变异结构分析

3.2.1 自相关函数分析 根据公式(2)计算土壤容重和田间持水量实测值的自相关函数，并按照其所对应的间距h绘制成自相关函数图(图1)。

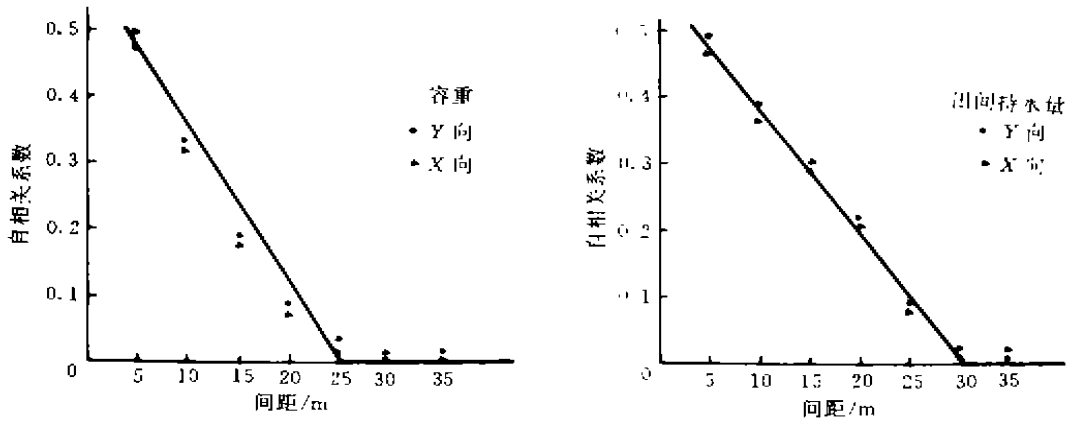

图1 土壤特性值的自相关图

由图1可以看出，在一定距离内，土壤容重和田间持水量存在着自相关关系，其自相关关系与方向无关。自相关程度随间距的增加而减小，当间距增加到某一值后，自相关系数在零附近摆动，将此间距称为最大自相关距，记为R，当$h<R$时，样本是线性相关的，当$h\geq R$时，样本是独立的。

维普资讯 http://www.cqvip.com

土壤特性的自相关距对设置采样点具有指导作用,在设置采样点时,必须避免自相关距内的重复,以保证样本的独立性。因为只有在自相关距以外,才具有抽样的独立性,才具备经典统计方法的应用条件。而在自相关距以内,必须采用地统计学去分析。

3.2.2　*半方差函数分析*　根据公式(4)计算土壤容重和田间持水量实测值的半方差函数,并按照其所对应的间距 h 绘制成半方差函数图(图 2)。

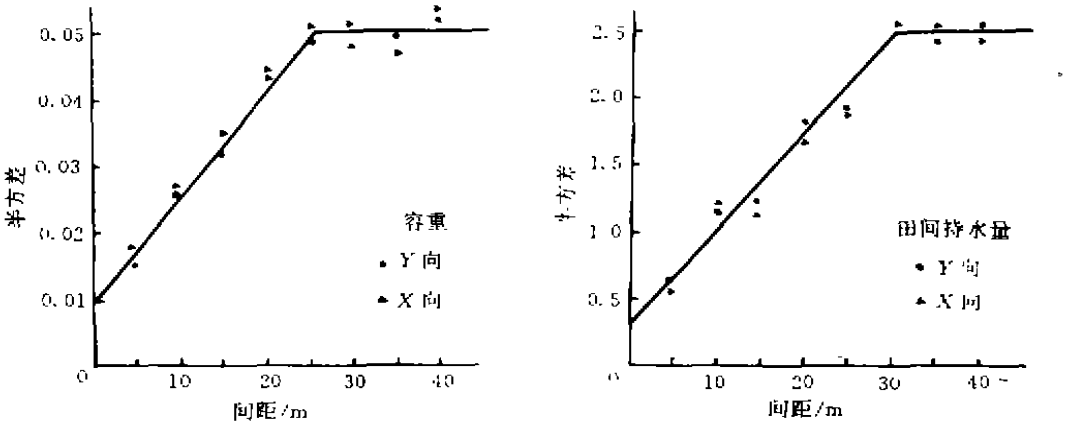

图 2　土壤特性值的半方差图

半方差函数图在一定范围内反映了不同观测点的观测值之间的依赖变化情况,由图 2 可看出,土壤容重和田间持水量的半方差均随间距的增加而增加,说明其均存在着空间变异结构,且半方差与方向无关。当间距增加到一定程度后,半方差在某一位置上下摆动,这一距离称为变程,记作 a。因此,当 $h<a$ 时,样本之间有相关关系,当 $h\geqslant a$ 时,样本是独立的。且变程 a 近似等于自相关距 R,本次试验土壤容重和田间持水量的最大相关距离分别为 25 和 30 m。

总之,自相关函数图与半方差函数图描述了土壤特性观测值在二维平面上的空间变异结构,揭示了土壤特性在田间分布和变异的基本规律。在一定范围内,它们是隶属于空间轨迹的一种有序变化,只有在这一范围以外时,变化的轨迹才消失,观测值之间的差异才具有均值为零、方差恒定的重要统计特性,才具备随机理论的应用条件[4]。在变异理论中,通常把空间相关的最大距离 $A(A=R\approx a)$ 称为极限距离。极限距离的概念对于田间实测和统计分析中观测样点的设置具有重要的意义和参考价值,在极限距离以内重复设置观测样点是无效的,也违犯了统计抽样的独立性。

3.2.3　*Kriging 估值法分析*　用 Kirging 内插法估计未能直接观测到的点上的土壤特性是以空间变异结构为基础的。以土壤容重为例,对 90 个观测点中的 20 个点进行估值,每个估值点周围采用 8 个点进行估值。为了便于比较,同时进行了普通平均法,即取 8 个点的平均值。计算结果见表 2。

维普资讯 http://www.cqvip.com

由表2可计算出Kriging估值的方差$\sigma^2=2.89\times10^{-4}$，普通平均法估值的方差$\sigma^2=2.03\times10^{-3}$，Kriging估值的精度高于普通平均法。

表2 土壤容重Kriging估值法与普通平均法结果比较

点号	实测值	Kriging法		普通平均法		误差比(1)/(2)
		估值	误差(1)	估值	误差(2)	
1	1.45	1.43	0.02	1.33	0.12	0.167
2	1.36	1.36	0.00	1.35	0.01	0.000
3	1.24	1.27	0.03	1.34	0.10	0.300
4	1.31	1.27	0.04	1.37	0.06	0.667
5	1.49	1.45	0.04	1.31	0.18	0.222
6	1.21	1.27	0.06	1.29	0.08	0.750
7	1.24	1.26	0.02	1.30	0.06	0.333
8	1.37	1.32	0.05	1.29	0.08	0.625
9	1.27	1.25	0.02	1.30	0.03	0.667
10	1.38	1.32	0.06	1.25	0.13	0.462
11	1.25	1.28	0.03	1.31	0.06	0.500
12	1.34	1.34	0.00	1.32	0.02	0.000
13	1.42	1.39	0.03	1.36	0.06	0.500
14	1.28	1.30	0.02	1.32	0.04	0.500
15	1.25	1.28	0.03	1.30	0.05	0.600
16	1.41	1.35	0.06	1.28	0.13	0.462
17	1.32	1.30	0.02	1.30	0.02	1.000
18	1.42	1.38	0.04	1.34	0.08	0.500
19	1.48	1.45	0.03	1.33	0.15	0.200
20	1.45	1.47	0.02	1.35	0.10	0.200

4 结 论

1) 所研究的土壤特性均表现出空间变异结构，但不是完全的随机变异，在一定范围内存在着空间相关现象。土壤容重和田间持水量空间结构无明显的方向性，空间相关的极限距离分别为25和30 m。

2) Kriging方法对于未观测点处的估值是优越的，它较普通平均法的估值精度高。

[参考文献]

[1] 雷志栋，杨诗秀，许志荣，等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报，1985，(9)：10—21.

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

[3] Webster R. Spatial variation in soil and the role of Kriging[J]. Agricultural Water Management，1983，(6)：111—121.

[4] 吕 军，俞劲炎. 水稻土物理性质空间变异性研究[J]. 土壤学报，1990，27(1)：8—15.

[5] 梁春祥，姚贤良. 华中丘陵红壤物理性质空间变异性的研究[J]. 土壤学报，1993，30(1)：69—77.

[6] 徐吉炎，Webster R. 土壤调查数据地域统计的最佳估值研究——彰武县表层土全氮量的半方差图和块状Kriging估值[J]. 土壤学报，1983，20(4)：419—430.

[7] Nielsen D R, Tillotson P M, vieira S R. Analysis field—measured soil water properties[J]. Agricultural Water

维普资讯 http://www.cqvip.com

Management，1983，(6)：93－109.

[8] Burrough P A. Problems of superimposed effects in the statistical study of spatial variation of soil [J]. Agricultural Water Management，1983，(6)：123－143.

[9] 沈思渊. 土壤空间变异研究中地统计学的应用及其展望[J]. 土壤学进展，1989，17(3)：11－24.

Spatial variability of field soil properties and Kriging Method

LI Xiao-yu[1]，LEI Ting-wu[2]，WANG Wei[1]

(1 College of Mechanical and Electronics Engineering，Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry，Yangling，Shaanxi 712100，China；2 Institute of Soil and Water Conservation，Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources，Yangling，Shaanxi 712100，China)

Abstract：Spatial variability of soil bulk density and field moisture capacity is studied with autocorrelogram and semi-variogram at a 40 m×45 m plot with ninety test points. The results show that the soil property is imbued with spatial variation-structure，but it's not perfect for random variation，and there exists spatial correlation phenomenon in a limited range and has no obvious direction. Based on the spatial variation-structure of soil properties，the Kringing method is much better than traditional statistical method in precision.

Key words：soil property；spatial variability；Kringing method；bulk density；field moisture capacity