

鲁西北黄泛区农田土壤稳定入渗率空间变异性分析

徐海芳¹, 郭建青², 郑丽萍¹, 刘恩民³

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 2. 长安大学, 陕西 西安 710054;

3. 中国科学院禹城综合试验站, 山东 禹城 251200)

摘要: 以中科院禹城综合试验站 102 m × 52 m 空间的农田表层土壤入渗试验为基础, 通过对实测数据的统计得到该地块的表层土壤稳定入渗率 f_c 。具有较大的空间变异性, 并服从对数正态分布。应用变差函数对 f_c 的空间结构进行分析, 发现 f_c 的空间结构可用指数变差函数模型进行描述, 拟合模型所得到的方差值与试验结果的统计值基本相近, 其相关距离为 23.98 m; 最后利用了 Kriging 最优内插估值法, 绘制了 f_c 的空间等值分布图。

关键词: 稳定入渗率; 空间变异性; 变差函数; 相关距离

中图分类号: S 152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)06-0132-06

国内外许多土壤科学工作者从事土壤特性空间变异的研究表明, 许多土壤特性在空间上并不是独立的, 而是在一定范围内存在着空间自相关性^[1]。而 Fisher 在 1925 年提出的经典统计分析是将土壤特性视为相互独立的随机变量, 不考虑测定位置的空间关系, 利用该方法分析土壤特性的空间变异性的结果, 并不能客观地反映土壤特性在空间分布的实际情况。为了弥补经典统计分析方法的不足之处, Mat heron 提出的地统计学原理与方法被开始应用于土壤特性的区域估值和空间变异性的研究。结果表明, 地统计学方法具有提高采样效率和节省人力物力, 允许在空间不规则地采样, 且可进行优化插值计算等优点^[2]。20 世纪 80 年代以来, 利用地统计学方法来研究土壤特性空间变异已成为土壤科学研究的热点之一。大量的研究表明, 地统计学方法中变差图和 kriging 分析在研究土壤特性空间变异中取得了相当大的成功, 并得到了广泛应用^[3]。

本文在对土壤稳定入渗率实测数据进行经典统计分析的基础上, 利用地统计学中的方差分析原理与方法定量描述土壤稳定入渗率的空间相关结构, 建立表示该相关结构的变差函数模型, 并利用 Kriging 最优内插估值法绘制土壤稳定入渗率在田间的空间分布等值图。

1 试验方案

1.1 试验条件和方法

试验于 2002 年 4~5 月在中国科学院禹城综合

试验站(位于山东省禹城市郊区, 36°56'N, 114°36'E)进行。田间试验选在该站东北角一块 102 m × 52 m 的田块中进行, 试验田的土壤为轻壤土, 表层土壤干容重为 1.32 g/cm³。在田间共布设了南北 2 条、东西 4 条试验线, 相邻两试验点之间最大距离为 10 m, 最小距离为 0.5 m, 采用双环入渗法进行测试^[4], 双环内环直径 20 cm, 外环直径 40 cm, 环高 20 cm, 试验时插深 10 cm。

试验采用定量观测方法。试验开始前先在离土壤表面 5 cm 处做标记或记下刻度, 外环做相同之标记。然后同时在内、外环加水, 水至标记处开始计时。在整个试验过程中内外环维持同样水头高度 5 cm。记录内环加入定量水入渗所用的时间, 外环随时加水以保持水头高度和内环水头高度一致, 以防止水分侧向渗漏。当加入定量水入渗所用的时间相差无几时便可结束试验。整个入渗试验所需时间大约为 90~120 min。

1.2 试验数据的初步处理

本次试验共获得 49 组有效数据, 根据此 49 组所测得入渗速率和相对应的累积时间, 用 Excel 分别绘制出各试验点的入渗曲线, 从曲线上读出稳定入渗率 f_c , 其结果见表 1。

2 结果与分析

2.1 经典统计分析

2.1.1 f_c 的统计特征值及分析 经典统计分析是将土壤的特性视为相互独立的随机变量, 通过计算样本的均值、标准差、方差、变异系数以及显著性检

收稿日期: 2006-12-25

基金项目: 中国科学院禹城综合试验站开放基金课题(2002-6)

作者简介: 徐海芳(1979-), 女, 江苏常熟人, 助教, 硕士, 主要从事土壤水分运移规律方向的研究。

验来进行描述的。相应的计算公式为^[3]：

$$\text{均值 } \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{ci} \quad (1)$$

$$\text{方差 } \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f_{ci} - \mu)^2 \quad (2)$$

$$\text{变差系数 } C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

$$\text{偏态系数 } C_s = \frac{\sum_{i=1}^N (f_{ci} - \mu)^3}{N\sigma^3} \quad (4)$$

以上各式中 f_{ci} 、 N 分别为稳定入渗率值及取样数目。计算结果见表 2。

表 1 各试验点稳定入渗率 f_c 值

Table 1 The measured values of f_c

标号 Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f_c (mm/min)	0.4304	0.3116	0.1950	0.5411	0.3714	0.4807	0.5715	0.3812	1.0494	1.3408
标号 Number	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
f_c (mm/min)	0.8565	0.8759	0.5511	1.1627	0.3363	1.2068	0.8895	0.4608	1.6854	0.8221
标号 Number	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
f_c (mm/min)	0.6536	0.4323	0.7921	0.6391	0.6886	0.4089	0.6587	0.7655	0.9220	0.4878
标号 Number	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
f_c (mm/min)	0.6566	1.3032	1.9385	2.1538	2.3933	1.5243	0.7359	1.5243	1.4297	0.9546
标号 Number	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
f_c (mm/min)	0.6187	0.5106	0.9145	1.0954	0.5794	1.6132	0.3931	1.2234	0.6399	

表 2 土壤稳定入渗率 f_c 统计特征值

Table 2 Statistical results for soil steady water infiltration rate

参数 Parameter	样本容量 Sample capacity	最大值 Maximum	最小值 Minimum	均值 Average	方差 Variance	变差系数 CV	偏态系数 Skewness
f_c (mm/min)	49	2.3933	0.1950	0.8810	0.2508	0.5684	1.1747

从表 2 中可以看出土壤稳定入渗率 f_c 表现出较大的空间变异性,其最大值约是最小值的 12 倍,变差系数为 0.5684,属于中等强度变异,且表现为正偏,不符合正态分布的要求。

2.1.2 f_c 的频率分布 对 f_c 的分布类型判断涉及到对土壤稳定入渗率的正确评价。由表 1,2 可看出, f_c 在呈现较强变异性的同时其变异也呈现出明显

的随机性,因此可视其为随机变量,将各测点的 f_c 值及其累积频率:

$$P\{f_c \leq f_{ci}\} = \frac{i}{n+1} \times 100\% \quad (5)$$

点绘在正态概率纸上(见图 1) 不呈直线分布,说明 f_c 不服从正态分布。再将其取对数后,同样将其累积概率点绘在正态概率纸上,此时点阵呈现较明显的直线趋势,这说明 f_c 近似为对数正态分布^[3]。

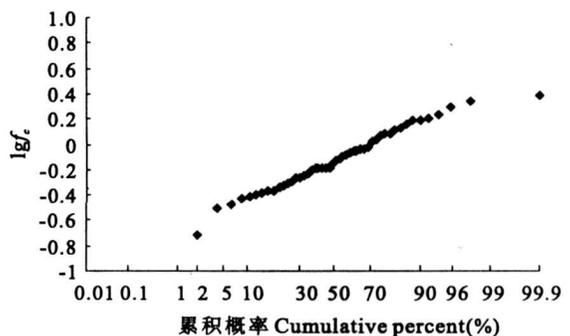
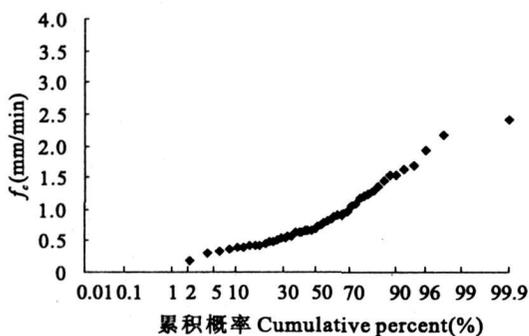


图 1 土壤稳定入渗率 f_c 的累积概率

Fig. 1 Schematic of accumulative probability of f_c

2.2 空间结构分析

在土壤稳定入渗率 f_c 空间变异的经典统计分析中,是将 f_c 随空间位置的变化看作是随机的、彼

此相互独立的。然而在一定空间范围内,不同空间点的稳定入渗率间都存在着一一定的相关性,仅当采样点间距超过某个相关距离时,采样结果才被认为是

相互独立的。

因此本文采用了变差函数来分析其空间分布特征。根据地质统计学的原理^[9]，可将土壤稳定入渗率 f_c 视为区域化变量，即 f_c 是以空间点 Z 的三个直角坐标 x, y, z 为自变量的随机函数 $Z(x, y, z)$ ，通常写作 $Z(x)$ 其空间相关特征可用相应的变差函数进行描述，采用下式计算 f_c 测定值的实验变差函数：

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{j=1}^{N(h)} [Z(x_j) - Z(x_j + h)]^2 \quad (6)$$

式中， $N(h)$ 为被距离矢量 h 分隔的 f_c 值 $Z(x_j)$ 和 $Z(x_j + h)$ 数值对的数目； $\gamma^*(h)$ 为实验变差函数。

根据式 4，应用地质统计软件以适宜间距 h 计算确定实验变差函数值之后，通过对各种理论模型拟合方差的比较分析后，选择以下形式的指数变差函数模型为描述 f_c 空间结构的模型：

$$r(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/a)] \quad (7)$$

式中， C_0 为块金值，它反映了变差函数在空间上的突变性，这可能是由于空间不相关的观测误差以及小于取样间距尺度上的空间变异引起的； C 为结构方差，由土壤母质、地形、气候等非人为的区域因素引起的变异； $C_0 + C$ 为基台值，它反映了区域化变量 f_c 的先验方差； a 为变程，对于指数模型一般可认为 $\exp(-h/a) = 0.05$ 时， $r(h)$ 即趋向于常数 $(C_0 + C)$ ，此时， $h = 3a$ ，即最大相关距离为 $3a$ ，它是 f_c 空间独立和空间非独立的界限。 f_c 值在最大相关距离以内是空间相关的，若相互间距大于最大相关距离，则 f_c 是空间独立的。

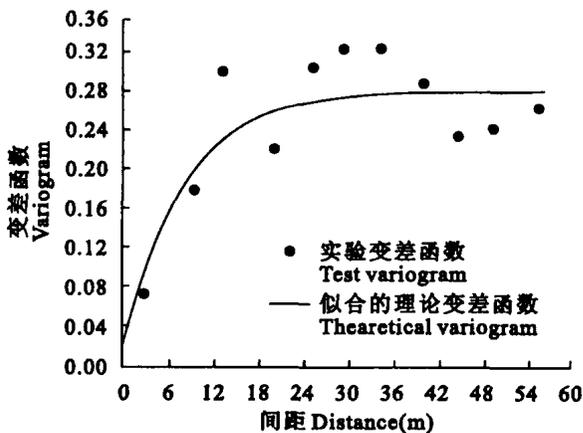


图 2 f_c 变差函数

Fig. 2 Variogram of f_c

图 2 为土壤稳定入渗率 f_c 的实验变差函数值及其相应的理论模型，从图上可以看出 f_c 的空间分布相关距离为 23.98 m，这说明在此范围内各点土壤稳定入渗率间具有相关关系，而点距一旦超出相

关距离，采样结果可视为随机独立样本处理；当 $h = 0$ 时， $\gamma(0) = C_0 = 0.02$ ，显示出一定数量的块金方差。这主要来自测量误差，故在试验中应尽量完善设备，以减小块金方差的影响；变差函数的基台值为 0.26，模拟方差模型所得到的方差值与经典统计分析中的方差值基本相同。

2.3 克立格空间插值及等值线图的绘制

变差函数图还可用来对未测点的土壤稳定入渗率 f_c 进行 Kriging 最优内插估值和成图。该法建立在估值 $Z^*(x_0)$ 对真值 $Z(x_0)$ 的无偏估计和两者之差的方差最小基础上，由于变差函数给出了相邻成对采样点间土壤稳定入渗率的相关关系，故任一未知点处的土壤稳定入渗率 $Z^*(x_0)$ 可通过环绕其四周且处于相关距离范围内的已知点 $Z(x_j)$ 给予描述，

$$Z^*(x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j Z(x_j) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

式中， λ_j 是权重因子，取决于各已知点到未知点的距离，由变差函数确定。

根据 Kriging 内插估值便可绘制 f_c 的等值分布图，描述土壤稳定入渗率的空间分布特征。图 3 是利用 Kriging 内插估值法绘制的土壤稳定入渗率 f_c 在田块内的等值分布图。

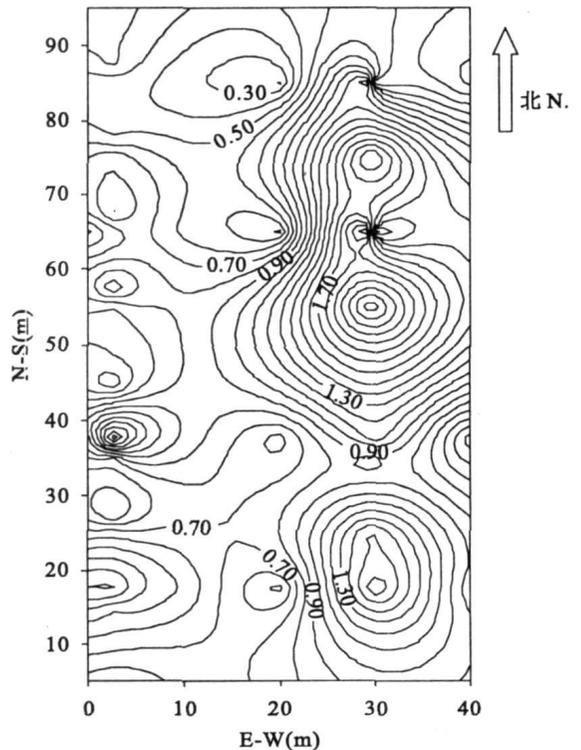


图 3 f_c 空间等值分布

Fig. 3 Spatial distribution of f_c

从图3中可以看出,稳定入渗率值总体上为南侧较北侧高,东侧较西侧高,中间区域较四周区域高,西北角区域的稳定入渗率值相对最低。分析其原因,主要是由于土壤局部含沙量的不同,中南部土壤含沙量相对较高,土壤较为松散;另外试验区中间有一片面积为 $11\text{ m} \times 23\text{ m}$ 的树林,由于植物根系作用,使得土壤次生空隙较为发育,透水性能较好;而西北角稳定入渗率值较低是因为该处为农田出入口,这就造成了来往试验人员及农机的来回压实,使得该区土壤密实度增大,垂向透水性能变差。

3 结 语

文中以禹城综合试验站的某一农田地块为例,对其表层土壤稳定入渗率 f_c 的统计特性与空间结构性进行了初步分析与讨论。

1) 该地块的表层土壤稳定入渗率 f_c 具有较强的空间变异性,且近似服从对数正态频率分布。

2) 应用指数变差模型模拟了 f_c 的变差函数,拟合模型得到的方差值与试验结果的统计值基本相近,其空间相关距离为 23.98 m 。最后,根据拟合变差函数模型的参数,利用Kriging最优内插估值方法绘制了该农田地块稳定入渗率 f_c 的等值线图。

参 考 文 献:

- [1] Burrough P A. Soil variability: a late 20th century view[J]. Soils and Fertilizers, 1993, 36(5): 529-562.
- [2] Hillel D. Research in soil physics: a review[J]. Soil Sci, 1991, 151: 30-34.
- [3] 黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展[J]. 土壤肥料, 2002, (1): 8-14.
- [4] 伍靖伟, 杨金忠. 圭夫仪与双套环测定土壤饱和和渗透系数的试验比较[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 44-47.
- [5] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. 321-340.
- [6] 孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990. 66-80.

Spatial variability of soil steady water infiltration rate in Huangfanqu of Northwest Shandong Province

XU Hai fang¹, GUO Jian qing², ZHENG Li ping¹, LI U En min³

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. Yucheng Experimental Station, Academia Sinica, Yucheng, Shandong 251200, China)

Abstract: Based on the infiltration tests of farmland in Yucheng experimental station, the statistical analysis of measured data indicated that there is a large variability of the steady water infiltration rate f_c , and it submitted to lognormal distribution. Exponential variogram model is used for the simulation of the spatial distribution of f_c . The simulation result shows that the variance from the model is very close to the statistical value from the experimental data, and the correlation scale is 23.98 m ; f_c spatial distribution over the entire plot area is estimated by using the Kriging interpolation technique.

Keywords: steady water infiltration rate; spatial variability; variogram; correlation scale