DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.01.027

黏粒含量对土壤含水率垂向空间特异性的影响

王凤君[1], 许 模[2], 段永祥[2], 丁庆忠[2], 何云龙[1]

(1. 吉林省有色金属地质勘查局 603 队, 吉林 延吉 133000;
2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 通过室内土柱试验, 利用经典统计分析、地统计学分析和分形分析, 分别对比研究了黏粒含量对土壤含水率空间变异规律的影响, 结果表明: 土壤中由于一定量黏粒的存在会影响土壤含水率空间变异的垂向距离, 从而改变土壤含水率的空间结构, 也会影响土壤含水率垂向分布的均匀程度。

关键词: 土壤含水率; 空间变异; 经典统计; 地学统计; 分形分析
中图分类号: TV93; S1 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)01-0118-05

Effects of clay content on vertical spatial variation of soil moisture content

WANG Feng-jun[1], XU Mo[2], DUAN Yong-xiang[2], DING Qing-zhong[2], HE Yun-long[1]
(1. *Jilin Nonferrous Metal Geological Exploration Bureau 603, Yanji 133000, China;*
2. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)*

Abstract: Based on the laboratory soil column experiments, the effects of clay content on the spatial variation of soil moisture content were investigated using the classical statistical analysis, geostatistical analysis, and fractal analysis. The results indicated that the occurrence of clay in the soil can prolong the vertical distance of spatial variation of soil moisture content and then change the spatial structure of soil moisture content, and can also affect the homogeneous degree of vertical distribution of soil moisture content.

Key words: soil moisture content; spatial variation; classical statistics; geostatistics; fractal analysis

即使在自然、人为条件相同的较小地块上, 土壤含水率在不同观测点、不同深度上, 由于时间的变化会得到许多不同的观测值, 即土壤水分在空间分布存在着规律[1]。一些学者对不同尺度、地形、灌溉方式的土壤含水率在水平方向上的空间变异性进行了大量的研究, 取得了很大进展[2-6]。土壤特性空间变异研究由来已久, 然而大多数是对物理对象进行简单分析, 并未与节水灌溉的问题相结合, 面对目前精准农业的趋势, 如何解决土壤水分的充分利用和改变土壤物理特性, 达到精细测土、减少成本是我们目前面临的农业土壤问题[7]。土壤含水率在水平和垂直方向上均具有高度的时空异质性, 关于水平方向变异的研究取得了很大进展, 然而对垂直方向上的变异研究比较缺乏[3,5-6]。由于土壤中黏粒具有蜂窝状的结构特性, 使得土壤含水率受到不同因素的影响时, 呈现出不同的特性[8]。本文意在利用室内试验研究黏粒的存在会如何影响土壤含水率的空间特异性, 为土壤资源和水资源的充分合理利用提供一定程度的理论指导。

1 试验设计

(1) 试验材料制备。

试验使用的黏土选自四川成都二级阶地上层; 沙取自成都龙潭寺附近, 经过烘箱烘干、过筛备用。

取 4 支透明有机玻璃柱制作土柱, 高 40 cm, 半径 8.26 cm, 分别编号 1 号、2 号、3 号、4 号; 对每个土柱按照预设计位置布孔(表 1), 用以安放标定过的 SM 2801BD-RS485 总线型土壤水分传感器, 每个土柱上安防 5 个。加水装置采用 BQ-50S 型蠕动泵。含水率(θ_v)用频域反射仪(FDR)测定, 探针长 5 cm。

在每个土柱的顶部和底部各充填 2 cm 厚的粗砂, 顶部

收稿日期: 2014-05-11 修回日期: 2014-06-25 网络出版时间: 2014-12-03
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1448.038.html
基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLGP2011Z001)
作者简介: 王凤君(1986-), 女, 四川眉山人, 主要从事水文地质、环境地质、工程地质方面的研究工作。E-mail: wfgyebaihezhu2007@126.com
通讯作者: 许 模(1963-), 男, 重庆涪陵人, 教授、博士生导师, 从事水文地质、环境地质、工程地质方面的教学、科研工作。E-mail: xm@cdut.edu.cn

粗砂起到防止加液时水流的冲刷,底部粗砂起到排气的作用;在土柱中间填充 30 cm 厚的沙壤土,由粒径小于 0.25 mm 的干沙和黏粒按照预设比例混合而成。

表 1　试验方案

Tab. 1　Test scheme

土柱编号	黏粒含量(%)	容重 /(kg• m^{-3})	布孔位置/cm				
			截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	截面 5
1 号	30	1.82	6	11	16	22	26
2 号	15	1.84					
3 号	10	1.86					
4 号	5	1.97					

(2) 试验过程。

试验时打开蠕动泵供水阀喷灌式加液:将蠕动泵转速调至 22.5 r/ min,调节自制喷灌装置的压力水头高度使加夜流量为 2.5 mL/ min,注意不要让土壤表面产生积水。按照试验填土方案,在土柱的垂直方向上特定的位置布设 FDR 水分传感器,通过数据采集设备对土壤含水率进行自动采集,以 1 min 为时间间隔。4 组试验共持续大约 96 h,期间每个独立的试验土柱中的含水率剖面达到稳定状态。本文中的各相关计算均是基于各剖面的水分上升达到稳定后进行的。

2　试验结果分析

2.1　土壤特性的空间变异性

2.1.1　经典统计分析基本原理

土壤的特性空间分布有其必然性和偶然性[9]:必然性表现在土壤特性沿一定方向具有某种明显的变化趋势,且这种变化趋势可以从环境因素的改变得到合理的解释;偶然性表现在土壤特性随空间的变化具有随机变量。

变异系数 C_v 反映了随机变量的离散程度,是经典统计学中描述土壤含水率空间变异程度的一个重要指标可,其大小为土壤含水率标准差与平均值的比值[10]:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{D(X)}}{E(X)} \tag{1}$$

式中:σ 或 $\sqrt{D(X)}$ 为样本方差的平方根,即标准差;μ 为样本均值。

根据 Nielsen 的划分标准[11],当变异系数 $C_v \leqslant 0.1$ 时为弱变异性,$0.1 \leqslant C_v \leqslant 1$ 为中等变异性,$1 \leqslant C_v$ 为强变异性。

2.1.2　空间变异性分析

本次试验利用水分传感器,针对不同黏粒含量的土柱,实时监测获得了近 1 300 个观测值,对其进行统计分析,结果见表 2。

利用表 1 数据可以获得土柱垂向深度与变异系数的变化关系图(图 1),从中可以很直观地看出:随着黏粒含量的降低,在垂向上变异系数产生突变的深度变浅。如当黏粒含量为 30% 时,突变的位置(可见拐点处)在土柱深度的 22 cm 处;黏粒含量为 15% 时,突变的位置(可见拐点处)在土柱深度的 16 cm 处;当黏粒含量为 10% 时,突变的位置在土柱深度的 11 cm 处;黏粒含量为 5% 时,突变的位置(可见拐点处)也在土柱深度的 11 cm 处。

表 2　不同黏粒含量土壤条件下垂向剖面土壤含水率描述性统计特征值

Tab. 2　The statistical characteristics of soil moisture content in the vertical profile under different clay contents

(%)

土柱编号	黏粒含量(%)	特征项	垂向深度/ cm				
			6	11	16	22	26
1 号	30	均值	18.81	17.72	13.2	9.24	3.63
		标准差	1.28	4.05	6.4	6.68	0.10
		变异系数	6.80	22.86	48.48	72.29	2.73
2 号	15	均值	18.32	15.57	11.77	9.11	6.37
		标准差	4.13	6.95	7.67	6.84	4.98
		变异系数	22.55	44.61	65.14	75.17	78.11
3 号	10	均值	14.75	10.38	9.3	10.23	4.25
		标准差	3.72	6.95	7.71	9.24	4.18
		变异系数	25.22	66.96	82.90	90.35	98.36
4 号	5	均值	25.9	16.04	14.21	10.03	4.67
		标准差	115.49	6.03	7.37	7.32	4.75
		变异系数	445.91	37.59	51.86	72.98	101.71

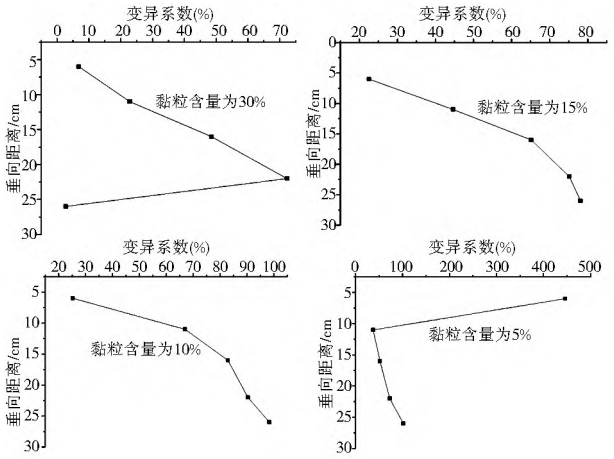

图 1　不同黏粒含量的土柱变异系数在垂向距离上变化

Fig. 1　Variation of the variable coefficient of soil column in the vertical profile under different clay contents

针对实测数据进行土柱垂向深度与变异系数的函数关系拟合,结果见表 3,可以看出变异系数与土体垂向距离有较高的二次多项式拟合关系,R^2 的值在 0.8 以上。

表 3　土体垂向距离与变异系数的函数关系

Tab. 3　Relationship between vertical distance and variable coefficient of soil column

土柱编号	黏粒含量(%)	拟合方程	R^2
1 号	30	$L = -0.23C_v^2 + 9.83C_v - 70.26$	0.83
2 号	15	$L = -0.12C_v^2 + 5.16C_v - 26.01$	0.82
3 号	10	$L = 0.0012C_v^2 + 1.22C_v - 0.62$	0.87
4 号	5	$L = -0.093C_v^2 - 1.82C_v + 18.63$	0.88

为了进一步弄清楚土壤黏粒含量对土壤含水率在垂向距离上的影响,分析土壤黏粒含量与变异系数的关系图(图 2),发现随着土壤中黏粒含量增加,在土体同一深度处变异系数总体呈现减小的趋势;在表层变异很明显,随着深度的加深,变异减小并趋于稳定。

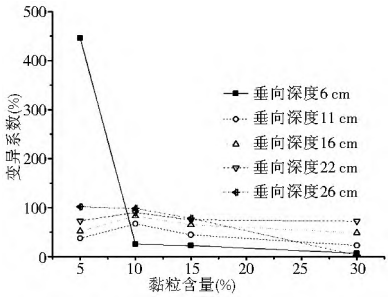

图 2　黏粒含量与变异系数关系

Fig. 2　Relationship between clay content and variable coefficient

2.2　土壤特性的空间结构

2.2.1　地学统计分析基本原理

土壤特性的空间结构可以通过地学统计方法[12]进行分析。地学统计是以区域化变量和随机函数为基础，以半方差函数为基本工具的一种统计方法。半方差分析的样本要满足两项基本假定：一是均值稳定性，即样本期望值与样本点的选取无关；二是两系列样本对应值之差的方差存在，且为有限值[8]，该值仅和间距 h 有关。根据定义，半方差值 $\gamma(h)$ 计算如下：

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

式中：N 为测点数；h 为步长间距；$y(x_i)$ 和 $y(x_i+h)$ 是间距为 h 的参数值。

利用计算得出的值可以绘制反映 h 与 $\gamma(h)$ 关系的半方差图，其拟合方程称为半方差函数的理论模型。常用的半方差函数可以分为安全型、危险型[13]。

根据 Cambardella 的划分标准[14]，当 $C_0/(C_0+C)\leqslant 25\%$ 时表现为空间依赖性强，$25\%<(C_0/(C_0+C))<75\%$ 时表现为空间依赖性中等，$(C_0/(C_0+C))\geqslant 75\%$ 时表现为空间依赖性较弱。通过该判断标准，可以获知研究尺度上剖面的土壤含水率是否有强烈的空间依赖性。

2.2.2　空间结构分析

针对 4 个土柱的含水率试验数据的半方差值，利用式(2)进行半方差计算，结果见表 4。根据协方差函数内蕴假设和非负定性[15-17]，对数值通过半方差模型的各种拟合比较，寻找适宜的理论模型进行拟合[18]。

表 4　4 个土柱不同垂向距离上的半方差值

Tab. 4　Semivariance values of four soil columns with different distances in the vertical profile

距离/cm	各土柱的半方差值			
	1 号	2 号	3 号	4 号
11	18.77	16.21	14.25	13.13
16	32.28	28.69	19.83	17.45
22	33.24	29.36	24.16	21.77
26	34.23	30.45	23.95	21.95

图 3 显示了不同黏粒含量土柱垂向距离上，剖面含水率的半方差 $\gamma(h)$ 随垂向距离 h 的变化，从该半方差图中可以获得研究该问题所需的极为重要的 3 个参数[17]：变程值 α(range)、基台值 C_0(sill)、块金值 C(Nugget)。

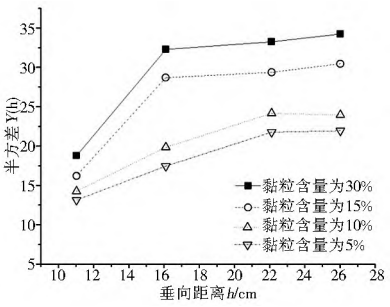

图 3　不同黏粒含量的土柱剖面含水率半方差随垂向距离变化

Fig. 3　Variation of the semivariance values of soil moisture content with the distance in the vertical profile under different clay contents

表 5 为 4 个黏粒土柱在沿其垂向距离上土壤剖面含水率的半方差分析结果。经过该半方差理论模型分析，此次将安全型模型中的球状模型[19]与危险型模型的线性基台值模型一起使用，从而更好地描述土壤含水率沿垂向距离剖面的空间变异特征，本次获得的表征空间变异特征的定量参数也在表 5 中得到体现。

表 5　不同黏粒含量的土柱垂向距离上土壤含水率半方差分析结果

Tab. 5　Semivariance values of soil moisture content with the distance in the vertical profile under different clay contents

黏粒含量(%)	理论模型	块金值	基台值	变程值	空间异质比	R^2
30	球状模型	21.24	33.50	16.53	0.63	0.86
15	球状模型	16.83	29.62	19.53	0.57	0.85
10	线性基台值模型	12.12	24.68	22.85	0.49	0.89
5	线性基台值模型	10.05	21.94	24.99	0.46	0.90

由分析结果发现随着黏粒含量的增加，变程值在逐渐减小，即在有限步长上达到基台值的步长在减小，且自相关距离也在减小，说明黏粒含量增加使得土体在垂向距离上剖面含水率的空间相关性增强[20-21]；基台值总体呈现增加的趋势，即随着黏粒含量的增加，该微区域化变量总体特征越易达到相对稳定。

当黏粒含量为 5%～30% 时，空间异质比均大于 25% 且小于 75%，根据 Cambardella 的划分标准可知，黏粒含量对土壤结构性变异在整个研究空间上表现出中等依赖性。总的来说，黏粒含量的增加能使得土壤结构更能趋于稳定。

2.3　土壤特性空间变化的分形分析

2.3.1　分形分析基本原理

分形的数学方法是通过“仿射自身相似”的办法，将不同尺度上的性质系统地联系起来[22]。其中，分形维数可以用来描述分形自相似性基本特征。自相似性是尺度函数，能直接说明尺度变异的存在而且能将变异定量化，在揭示尺度效应方面具有特定的优势[23]。

分形在解决空间变异问题时与地统计学相结合，将由地统计学计算得出的半方差函数和样本间距画在双对数纸上，对于分形曲线，$\lg\gamma(h)$ 与 $\lg h$ 存在着线性关系，用最小二乘法进行线性回归，得到回归直线的斜率 m[24]。分形维数 D 可以用下式计算：

$$D = \frac{1}{2}(4 - m) \quad (3)$$

式中: D 是分形维数, 即样本之间的结构性。D 值越小, 表示样本之间的差异越大, 即均一程度越差; 相反, 则均一程度越好。

由于土壤是个不均一的复杂体, 土壤质地、空间结构、生物等诸多因素相互作用, 导致土壤特性在空间表现出不规则性, 且有一定的随机性。因此可以用分数维布朗运动来度量[25-26]。

2.3.2 土壤特性的分形分析

把同一垂向剖面上由地统计学计算得出的半方差值(表4)和样本间距画在双对数纸上, 得到两者的散点图(图4), 反映出不同黏粒含量土柱在垂向上的含水率与样本间距呈线性正相关关系。

利用最小二乘法进行线性回归, 求得其回归直线斜率 m, 再用式(3)求得分形维数 D, 结果见表6。

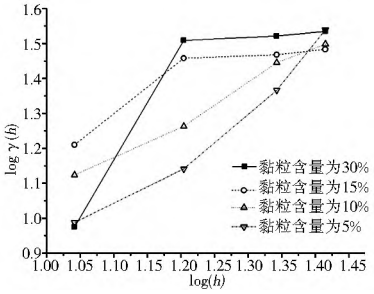

图4 土壤特性的分形分析

Fig. 4 Fractal analysis of soil properties

表6 不同黏粒含量的土柱垂向上剖面土壤含水率分形分析结果

Tab. 6 Fractal analysis results of soil moisture content in the vertical profile under different clay contents

黏粒含量(%)	$\log h$ 与 $\log \gamma(h)$ 方程拟合	R^2	m	函数分形维数 D	布朗运动分形维数 H
30	$\log \gamma(h) = 1.44\log(h) - 0.416$	0.751	1.44	1.28	0.72
15	$\log \gamma(h) = 0.7011\log(h) + 0.527$	0.784	0.70	1.65	0.35
10	$\log \gamma(h) = 1.038\log(h) + 0.033$	0.990	1.04	1.48	0.52
5	$\log \gamma(h) = 1.451\log(h) - 0.556$	0.996	1.45	1.27	0.73

从表6中可以发现, 受黏粒含量影响, 分形维数 D 值均较小; 黏粒含量为30%和5%的函数分形维数 D 均小于1.5, 其布朗运动分形维数 H 大于0.7, 说明黏粒含量极多或者极少时, 都将影响土壤含水率的均一性分布。

4 结论

(1) 黏粒含量的增加使得土壤含水率空间变异垂向距离延长, 说明当土壤中黏粒含量的增加能改善土壤含水率的空间变异范围。在进行农田水利建设时, 改变土壤中黏粒含量对改善土壤含水率空间变异性能起到一定的作用。

(2) 黏粒含量对土壤含水率在垂向剖面上的影响是矛盾的: 一方面黏粒含量的增加, 能使得土壤含水率的空间结构特异性趋于稳定; 另一方面, 黏粒含量过多或太少也使得土壤含水率分布不均一性增加。

参考文献(References):

[1] 朱首军, 丁艳芳, 薛泰谦. 农林复合生态系统土壤水分空间变异性和时间稳定性研究[J]. 水土保持研究, 2000, 3, 7(1): 46-48. (ZHU Shou-jun, DING Yan-fang, XUE Tai-qian. Study on variability and temporal stability of soil moisture in agri-forestry [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 3, 7(1): 46-48. (in Chinese))

[2] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchements and its relationship to dominant spatial hydrological processes [J]. Journal of Hydrology, 2004, 286: 113-134.

[3] 罗勇, 陈家宙, 林丽蓉, 等. 基于土地利用和微地形的红壤丘岗区土壤水分时空变异性[J]. 农业工程学报, 2009, 2, 25(2): 36-41. (LUO Yong, CHEN Jia-zhou, LIN Li-rong, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture in hilly red soil region based on lang use and microtopography[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 2, 25(2): 36-41. (in Chinese))

[4] 周世军, 雷晓云, 李芳松, 等. 棉花膜下滴灌田间土壤水分的时空变异规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(10): 22-24. (ZHOU Shi-jun, LEI Xiao-yun, LI Fang-song, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture under mulched drip irrigation of cotton[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, 10: 22-24. (in Chinese))

[5] 王树仿, 缴锡云, 王维汉, 等. 膜下滴灌田间土壤水分时空变异规律研究[J]. 排水灌溉学报, 2009, 28(5): 34-37. (WANG Shu-fang, JIAO Xi-yun, WANG Wei-han, et al. Spitial and temporal variability of soil moisture under mulched drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(5): 34-37. (in Chinese))

[6] 李毅, 门旗, 罗英. 土壤水分空间变异性对灌溉决策的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 6, 18(2): 80-90. (LI Yi, MEN Qi, LUO Ying. Effects of spatial variability of soil water on irrigation schedule [J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2000, 6, 18(2): 80-90. (in Chinese))

[7] 樊贵盛, 李雪转, 李红星. 非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (FAN Gui-sheng, LI Xue-zhuan, LI Hong-xing. Experimental study of unsaturated soil water infiltration of medium problem[M]. Beijing: China's water conservancy and hydropower press, 2012. (in Chinese))

[8] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics [M]. New York, J. Wiley & Sons, 1943.

[9] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 清华大学出版社, 1988. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan. Soil water dynamics[M]. Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))

[10] 王云强, 张兴昌. 黄土区小尺度剖面土壤含水率时空间变异性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 32-37. (WANG Yun-qiang, ZHANG Xing-chang. Temporal-spatial variability of

slope soil moisture at small scale on loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 32-37. (in Chinese))

[11] 雷志栋, 杨诗秀. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985(9): 10-21. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. SHUI LI XUE BAO, 1985(9): 10-21. (in Chinese))

[12] 李仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 科学出版社, 2005. (LI Ren-duo. Spatial variation theory and application[M]. Science press, 2005. (in Chinese))

[13] 姜秋香, 付强, 王子龙. 空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J]. 水土保持研究, 2008, 2, 15(1): 250-253. (JIANG Qiu-xiang, FU Qiang, WANG Zi-long. Research progress of the spatial variability theory in application to soil characteristic analysis[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 2, 15(1): 250-253. (in Chinese))

[14] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1501-1511.

[15] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 4, 36(2): 265-268. (LI Liang-liang, YI Yan-li, LING Guo-xin, et al. Utilization of geotatistics in soil spatial variability[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 4, 36(2): 265-268. (in Chinese))

[16] 秦耀东. 土壤空间变异研究中的半方差问题[J]. 农业工程学报, 1998(12): 42-47. (QIN Yao-dong. Semi-variogram problems in soil spatial variability[J]. Transactions of the CSAE, 1998(12): 42-47. (in Chinese))

[17] 秦耀东. 土壤变异研究中的定量分析[J]. 地球科学进展, 1992, 7(1): 44-49. (QIN Yao-dong. Quantitative analysis for soil spatial variability study[J]. Advance in Earth Sciences, 1992, 7(1): 44-49. (in Chinese))

[18] 张小艳, 谭勇. 变差函数球状模型的自动拟合与实现[J]. 物探与化探, 2010, 34(2): 253-257. (ZHANG Xiao-yan, TANG Yong. The automatic fitting and mplementation of the spherical model of variogram[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(2): 253-257. (in Chinese))

[19] 胡小荣. 变异函数球状模型的拟合研究[J]. 本溪冶金高等专科学校学报, 2000, 2(4): 41-43. (HU Xiao-rong. Regress of spherical model of variational function[J]. Journal of Benxi College of Metallurgy, 2000, 2(4): 41-43. (in Chinese))

[20] 张继光, 陈红松, 苏以荣, 等. 喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 544-549. (ZHANG Ji-guang, CHEN Hong song, Su Yi-rong, Zhang Wei, Kong Xiangli. Spatial variability of soil moisture layer in depressed karst region and its scale effect[J]. Acta Pedological Sinica, 2008, 45(3): 544-549. (in Chinese))

[21] 刘庆, 夏江宝, 谢文军. 半方差函数与 Moran's 的 I 在土壤微量元素空间分布研究中的应用_以寿光市为例[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(9): 1129-1133. (LIU Qing, XIA Jiang-bao, XIE Wen-Jun. Appilication of semi-variogram and Moran's I to spatial distribution of trace elements in soil: a case study in Shouguang County[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(9): 1129-1133. (in Chinese))

[22] 王康. 非饱和土壤水流运动及溶质迁移[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 46-57. (WANG Kang. Unsaturated soil water movement and solute migration [M]. Beijing: Science press, 2010: 46-57. (in Chinese))

[23] Bekele A, Hudnall W H, Daigle J J, et al. Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties [J]. Journal of Terramechanics, 2005(42): 339-351.

[24] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水率和容重的空间变异及其分形特征[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 1-15. (GONG Yuan-shi, LIAO Chao-zi, LI Bao-guo. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk dendity[J]. Acta Pedologica Sinica, 1988, 35(1): 11-15. (in Chinese))

[25] 丁昆仑, Hann M J. 耕作措施对土壤特性及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 49-52. (DING Kun-lun, HANN M J. Tillage measures on soil properties and crop yield [J]. Journal of agricultural engineering, 2000, 16(3): 49-52. (in Chinese))

[26] 王白群, 刘国彬. 黄土丘陵区地形对坡耕地土壤养分流失的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 18-22. (WANG Bai-qun, LIU Guo-bin. Effects of relief on soil nutrient losses in sloping fields in hilly region of loess plateau[J]. Journal of soil Erosion and soil and Water Conservation, 1999, 5(3): 18-22. (in Chinese))