

# 土壤渗透参数空间变异性及其影响因子研究

刘强<sup>1</sup>, 何岩<sup>2</sup>, 崔保山<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875; 2. 中国科学院, 北京 100864)

**摘要:** 土壤渗透参数的空间变异性是地形因子以及土壤理化性质综合作用的结果, 是影响水以及溶质迁移转化的关键因素。在坡地随机布设 24 个点位, 测定 30 cm 土壤的渗透参数、地形指数、容重、颗粒组成、有机质、交换性钠、CEC(阳离子交换量)和 ESP。在经典统计学以及 Kolmogorov—Smirnov( $K-S$ )正态分布检验概率( $P_{k-s}$ )检验基础上对数据进行了空间结构分析。结果表明,  $K_{fs}$ 、容重、砂粒、黏粒、有机质、CEC 等符合正态分布, 交换性钠和 ESP 等属于对数正态分布; 粉粒属于均匀分布;  $K_{fs}$ 、容重、砂粒、黏粒、有机质、交换性钠和 ESP 等空间结构明显, CEC 空间变异性较大; 并以相关分析和主成分分析相结合的方法, 分析了土壤渗透参数空间变异的主要影响因子。

**关键词:** 土壤渗透参数; 地形指数; 空间变异; 主分量分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)02-0024-05

中图分类号: S152.72

## Spatial Variability and Its Influencing Factors of Soil Hydraulic Parameter

LIU Qiang<sup>1</sup>, HE Yan<sup>2</sup>, CUI Bao-shan<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

**Abstract:** The spatial variability of soil hydraulic properties influenced by topographic and soil physical and chemical factors is one of the key factors which have considerable effects on water flow and solute transport. An experiment was conducted on a 80 m × 40 m plot. Saturated conductivity,  $K_{fs}$ , was measured at a depth of 30 cm, and soil physical and chemical properties were also considered, such as wetness index, bulk density, particle composition, organic matter, exchangeable sodium, CEC and ESP in the 24 sampling sites selected randomly. Based on classic statistics and the Kolmogorov—Smirnov( $K-S$ ) normality test, spatial structure was analyzed using the GIS<sup>+</sup> for Window 5. The result indicated a normal distribution for  $K_{fs}$ , bulk density, organic matter, sand, clay and CEC, a lognormal distribution for exchangeable Na<sup>+</sup> and ESP, and a uniform distribution for silt.  $K_{fs}$ , bulk density, organic matter, sand, clay, exchangeable sodium and ESP showed the spatial correlation characteristic, but CEC had more distinct spatial heterogeneity than other factors. The influencing factors were also analyzed based on the correlation and PCA method.

**Keywords:** soil hydraulic parameter; topographic index; spatial variability; PCA

土壤物理、化学以及水力特性的时空变异性是土壤中水盐迁移规律研究中关键点与难点。自 20 世纪 70 年代开始, 国内外学者就土壤特性的空间变异性展开了一系列的研究<sup>[1-3]</sup>, 其中就土壤渗透参数的空间变异而言, 由于涉及到有效降水的入渗、作物根系生长环境的水分动态监测和预报以及大规模地下水环境动态监测等一系列问题, 成为该方向研究中关注的焦点问题<sup>[4-6]</sup>。本文在野外试验的基础上, 运用经典统计学和地统计的原理方法探讨了土壤饱和和渗透参数  $K_{fs}$  及其影响因子的空间变异结构; 并以地形指数作为地形影响因子结合土壤颗粒组成、有机

质、容重、土壤交换性钠、CEC(阳离子交换性量)和 ESP(碱化度)等因子分析了其对土壤渗透参数空间变异的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验点选择在松嫩平原西部大安地区, 海拔在 127.7~160.8 m 之间, 比降为 1/5 000, 相对高差 33.1 m, 为半湿润、半干旱中温带大陆性季风气候。由于自然因素和人为干扰双重作用之下, 大安市水土矛盾突出, 沙化、盐渍化问题尤为严重, 其中盐渍化土

地面积为 2877.80 km<sup>2</sup>, 占土地总面积的 59%, 轻度盐渍化面积 570.81 km<sup>2</sup>, 中度盐渍化面积 174.15 km<sup>2</sup>, 重度盐渍化面积为 2132.84 km<sup>2</sup>, 是盐渍土集中分布区域之一<sup>[7]</sup>。

## 1.2 试验布置

试验布置在 40 m × 80 m 的坡地玉米田, 应用随机布点的方法布设 24 个点, 应用 2800KI 型 Guelph 渗透仪测定 30 cm 深度土壤的饱和渗透参数  $K_{fs}$ , 并同步采集土壤样品测定土壤的颗粒组成、土壤容重、有机质含量、交换性钠、CEC, ESP 等土壤物理化学性质(图 1)。其中土壤颗粒组成采用 RS-1000 粒度分布自动测定仪测定; 有机质采用重铬酸钾氧化外加热法测定; 交换性钠应用乙酸铵—氢氧化铵交换—火焰光度法测定; CEC 应用乙酸铵交换法测定。

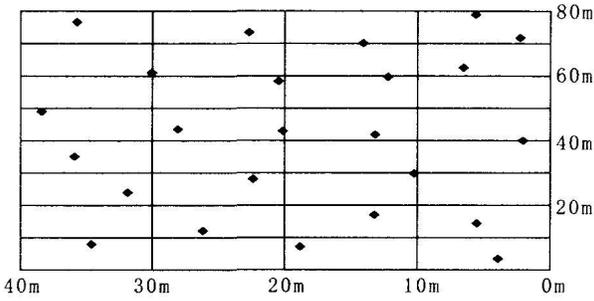


图 1 小区随机布点图

地形因素是物质、能量和信息迁移转化的关键性因子, 研究中结合  $I_w$ ——地形指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  对土壤渗透参数的影响, 为深入探讨更大尺度上土壤特性参数的空间变异性提供依据。1979 年, Beven 和 Kirkby 提出了  $I_w$ ——地形指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$ , 用于反映流域饱和和缺水量的空间分布<sup>[8]</sup>, 是水文模拟模型 Topmodel 的核心<sup>[9]</sup>。地形指数成为地形的水文效应概化指标<sup>[10]</sup>。本文用 GTS601AF——地球同步技术卫星自动聚焦水准仪在测定了地表相对高程的情况下, 利用 ARC/INFO 8.3 建立了小区的 DEM, 并提取了  $I_w$ ——地形指数  $\ln(\alpha/\tan\beta)$ , 作为一个影响土壤渗透参数空间变异的地形因子(附图 5)。

## 1.3 渗透参数获取的原理和方法

2800KI 型 Guelph 渗透仪是根据马里奥特虹吸管原理设计的定水头入渗仪器, 它通过测量定水头条件下井孔中的从孔底渗入非饱和土壤的稳定入渗速率, 利用 Richards 分析方法获取饱和和渗透参数( $K_{fs}$ )、基质通量势( $\phi_m$ )土壤特性参数  $\alpha$ 。当考虑压力和重力项时, Reynolds et al. (1985) 通过对来自井孔的稳定出流条件下的 Richards 方程求解, 得出:

$$CQ = 2\pi H^2 K_{fs} + C\pi r^2 K_{fs} + 2\pi H \phi_m \quad (1)$$

式中:  $\phi_m$ ——基质通量势(m<sup>2</sup>/s);  $Q$ ——流出井孔的稳定状态的水流速率(m<sup>3</sup>/s);  $H$ ——井孔中稳定的水深度(m);  $r$ ——井孔半径(m);  $C$ ——主要取决于  $H/r$  的无量纲比例常数。

$$\phi_m = \int_{\phi_i}^0 K(\phi) d\phi = \frac{K_{fs}}{\alpha} (1 - e^{\alpha\phi_i}) \quad (2)$$

一般情况下土壤的初始含水率  $\theta$  满足:  $\theta \leq \theta_f$  (田间持水率), 有  $e^{\alpha\phi_i} \ll 1$ , 式(4)可近似写为

$$\phi_m \approx \frac{K_{fs}}{\alpha} \quad (3)$$

最终由式(1)可得到  $K_{fs}$  和土壤特性参数  $\alpha$  的表达形式分别为:

$$K_{fs} = \frac{CQ - 2\pi H \phi_m}{2\pi H^2 + C\pi r^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2\pi H K_{fs}}{CQ - 2\pi H^2 K_{fs} - C\pi r^2 K_{fs}} \quad (5)$$

通过 Guelph 仪测定 2 个水头  $H_1$  和  $H_2$  测量, 分别对应于 2 个水量  $Q_1$  和  $Q_2$ , 由式(7)可得到:

$$K_{fs} = \frac{G_2 Q_2 - G_1 Q_1}{Q_2 - Q_1} \quad (6)$$

其中:

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi[2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (7)$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi[2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (8)$$

$$Q_1 = (X)(R_1) \text{ 或 } Q_1 = (Y)(R_1) \quad (9)$$

$$Q_2 = (X)(R_2) \text{ 或 } Q_2 = (Y)(R_2) \quad (10)$$

野外试验如采用内管供水时用  $(X)$  (cm<sup>2</sup>), 内外管同时供水时用  $(Y)$  (cm<sup>2</sup>),  $X, Y$  大小取决于 Guelph 仪的不同;  $R_1, R_2$  分别为对应于稳定水头为  $H_1$  和  $H_2$  时的平均水流速率(cm/s);  $r$  为水井直径(cm);  $C_1$  和  $C_2$  分别为取决于  $H_1/r$  和  $H_2/r$  的比例因子, 其与土壤特性有关, 可查有关曲线。通过式(6)即可计算获取  $K_{fs}$ , 同时亦可进一步获得土壤特性参数  $\alpha$  和  $\phi_m$ <sup>[8, 15-16]</sup>。

## 2.4 数据统计分析方法

(1) 经典统计中变异函数( $C_v$ )。经典统计学空间变异分析时要求分析的空间变量在研究区域内符合随机分布特征, 变异分析主要应用变异函数  $C_v$  分析, 变异函数用公式表示为:

$$C_v = S/x \quad (11)$$

式中:  $S$ ——标准方差;  $x$ ——变量均值。根据变异程度分级,  $C_v \leq 0.1$  属于弱变异性;  $0.1 \leq C_v \leq 1$  属于中等变异性;  $C_v \geq 1$  属于强变异性。

(2) 地统计学原理和方法。地统计学是以区域化变量、内蕴假设、平稳性假设等理论为基础, 以半方差

函数为主要工具, 研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性, 或空间相关性和依赖性的自然现象的科学。其中半方差函数的公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (12)$$

式中:  $r(h)$  —— 半方差函数;  $h$  —— 分隔两样点的矢量, 即步长;  $N(h)$  —— 相距为  $h$  的样点对数目;  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$  —— 为区域化变量  $Z(x_i)$  在位置  $x_i$  和  $x_i + h$  的实测值。

同时, 由不同距离  $h$  和半方差值构成的半方差图可以获取块金值  $C_0$ , 基台值  $C$  和变程  $\alpha$  等 3 个重要参数, 由此可以空间变量的自相关程度(变程)以及变异程度。半方差图形可以用数学模型拟合, 常用的模型有球形模型、线性模型、指数模型和高斯模型等。具体模型公式参见文献<sup>[13]</sup>。

(3) 分维分析方法。分维数  $D$  反映出的自相关部分的空间异质性程度,  $D$  用公式可表示为:

$$D = (4 - m) / 2 \quad (13)$$

式中:  $m$  —— 双对数半方差图的斜率。

$D = 2$  时, 统计意义上各项同性, 即在所研究的区域内是同质的,  $D$  越小于 2, 空间复杂性越大, 研究

对象的空间相关程度高。 $r^2$  说明模型中对被研究对象解释效率。

研究中借助了 SPSS 10.0, Statistica 6.0 对数据进行了基本统计特征分析、相关分析和主分量分析; 借助于 Statistica 6.0 完成了数据的正态检验; 应用 GIS+ 5.0 for Window 分析了数据的空间变异结构。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 坡地土壤特性统计分析

经典统计分析表明饱和渗透参数  $K_{fs}$ ,  $I_w$ , 容重, 有机质, 颗粒组成, 交换性钠, CEC 和 ESP 等土壤特性参数的统计量呈现出一定的空间变异性(表 1)。以经典统计学变异分析表明容重的变异系数为  $0.053 < 0.1$ , 属于弱变异性,  $K_{fs}$ , 有机质, 颗粒组成,  $I_w$ , 交换性钠, CEC 和 ESP 等均属于中等变异性, 其中地形指数  $<$  粉粒  $<$  CEC  $<$  砂粒  $<$  有机质  $<$  黏粒  $<$   $K_{fs}$   $<$  交换性钠  $<$  ESP。地形指数  $I_w$ , 粉粒, CEC, 砂粒, 有机质, 黏粒等空间变异性相近, 交换性钠和 ESP 空间变异性较大, 分别达到 0.709 和 0.894, 其中饱和渗透参数  $K_{fs}$  也表现出了较大的空间变异性, 变异系数达到了 0.609。

表 1 小区内地形指数以及土壤基本物理、化学特性统计结果

参量	$K_{fs}/$ ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$\ln I_w$	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	砂粒/ $\%$	粉粒/ $\%$	黏粒/ $\%$	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\ln(\text{交换性钠})/$ ( $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CEC/ ( $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\ln(\text{ESP})/$ $\%$
最大值	92.698	2.392	1.459	46.690	43.580	49.340	27.435	3.592	196.800	3.290
最小值	2.037	1.407	1.188	24.380	24.320	13.030	9.170	-1.604	120.600	-1.956
极差	90.660	0.984	0.271	22.310	19.260	36.310	18.265	5.196	76.200	5.246
均值	35.133	1.822	1.348	37.715	34.267	28.019	17.975	1.894	151.125	1.489
标准差	21.397	0.222	0.072	6.504	4.265	8.386	4.795	1.342	19.494	1.331
$C_V$	0.609	0.122	0.053	0.172	0.124	0.299	0.267	0.709	0.129	0.894
$P_{k-s}$	0.191	0.232	0.114	0.034	0.834	0.546	0.120	0.082	0.515	0.494

随机变量的正态分布检验是应用地统计学进行空间分异结构分析的前提, 数据的非正态分布会使变异函数产生比例效应, 比例效应的存在会使试验变异函数产生畸变, 抬高基台值和块金值, 增加估计误差。变异函数点的波动大, 甚至会掩盖固有的结构, 因此应该消除比例效应<sup>[11-12]</sup>。研究中借助于 Statistica 6.0 利用 Kolmogorov-Smirnov ( $K-S$ ) 正态分布检验概率 ( $P_{k-s}$ ) 对试验数据的统计分布进行了非参数检验, 检验时取显著性水平  $\alpha = 0.05$ 。若  $P_{k-s} > 0.05$ , 则认为数据服从正态分布。结果表明饱和渗透参数  $K_{fs}$ , 容重, 砂粒, 黏粒, 有机质, CEC 等符合正态分布, 交换性钠和 ESP 等属于对数正态分布; 粉粒属于均匀分布。

#### 3.2 土壤渗透参数及其影响因子的空间变异分析

土壤渗透参数及其影响因子的各向同性半方差函数和分形维数的研究结果(表 2)显示,  $K_{fs}$ ,  $\ln(I_w)$ , 砂粒, 黏粒,  $\ln(\text{交换性钠})$ , CEC 和  $\ln(\text{ESP})$  为球形模型, 容重为指数模型; 从反映出的随机部分的空间异质性程度, 比值大空间异质性小, 砂粒及  $\ln(\text{交换性钠})$  的空间异质性最小, 其次为容重, 黏粒,  $K_{fs}$ ,  $\ln(I_w)$ , 有机质, CEC, 其中  $K_{fs}$  的空间结构比率为 0.998, 空间依赖性较高, CEC(阳离子交换量)的空间异质性较高,  $C/(C + C_0)$  为 0.704。分维数  $D$  反映出的自相关部分的空间异质性程度, 各因子的分维数  $D: K_{fs} = 1.952 > \text{CEC} > \ln(\text{ESP}) > \ln(\text{交换钠}) > \text{容重} > \ln(I_w) > \text{砂粒} > \text{黏粒}$ 。

### 3.3 土壤渗透参数空间变异的影响因素分析

为深入探讨土壤空间变异的影响因子, 本研究中着重考虑了地形指数  $I_w$ 、土壤颗粒组成、容重、有机质、交换性钠、CEC 和 ESP 等指标作为影响土壤渗透参数的关键性因子, 经相关分析的结果(如表 3),  $K_{fs}$  与  $I_w$ 、容重, 土壤颗粒组成中的砂粒和黏粒以及有机质、CEC 等相关性较高, 分别达到  $-0.42$ ,  $0.42$ ,  $0.53$ ,  $-0.38$ ,  $-0.53$  和  $-0.33$ 。土壤质地与饱和渗透参数的影响中黏粒成负相关, 与砂粒成显著正相关, 粉粒对  $K_{fs}$  的影响不大, 黏粒具有涨缩性和较大的比表面积, 当黏粒吸水后膨胀导致通气孔隙阻塞, 导致渗透性能的下降。由于选取的小区为农田, 表层 30 cm 有机质含量相对较高, 饱和渗透参数  $K_{fs}$  与有机质含量成极显著负相关, 这一结论与前人研究的当

有机质含量  $> 15.0 \text{ g/kg}$  时随有机质含量增加土壤饱和和渗透参数呈减小趋势相一致<sup>[17]</sup>。而容重与  $K_{fs}$  成显著正相关的结论, 可能连续耕作对土壤结构的破坏、植物根系及残体等因素对饱和渗透参数  $K_{fs}$  影响有关, 故需要进一步研究。盐分对渗透参数的影响较为复杂, 具有时空的差异性, 并且随着盐分组成不同也有差异, 研究中 CEC 与  $K_{fs}$  成负相关, 但是与交换性钠以及 ESP(碱化度) 的关系并不十分清晰。通常情形下, 土壤中交换性盐尤其是钠离子含量高会导致土壤中黏粒扩张分散, 渗透性能下降。地形指数作为一个综合的因子, 反映了小区地形的变化, 也反映了区域内水、盐以及较为黏重物质的迁移方向, 地形指数  $I_w$  高值区, 土壤相对水分含量高, 同时也是盐分及粘重物质淀积区域, 因而土壤饱和和渗透性能较低。

表 2 小区内  $K_{fs}$ ,  $\ln I_w$  以及土壤理化参数的半方差函数、检验参数

参 数	模型	半方差函数				分形维数		
		块金值 $C_0$	基台值 ( $C_0 + C$ )	有效变程 $A_0$	空间结构比率 [ $C/(C_0 + C)$ ]	$r^2$	分维 $D$	$r^2$
$K_{fs}/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	Spherical	1.00	402.70	6.80	0.998	0.000	1.952	0.040
$\ln I_w$	Spherical	0.00	0.05	41.60	0.998	0.877	1.590	0.746
容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Exponential	0.00	0.01	78.90	0.999	0.806	1.630	0.838
砂粒(1.00~ 0.05)/%	Spherical	6.83	56.64	125.10	1.000	0.806	1.564	0.899
黏粒( $< 0.002$ )/%	Spherical	0.10	69.90	36.10	0.999	0.590	1.563	0.621
有机质/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	linear	0.10	41.19	69.70	0.998	0.899	1.528	0.832
$\ln(\text{交换性钠})/(\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1})$	Spherical	0.00	2.12	33.00	1.000	0.688	1.697	0.550
CEC/ $(\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1})$	Spherical	131.80	444.60	59.30	0.704	0.525	1.765	0.441
$\ln(\text{ESP})/\%$	Spherical	0.00	2.04	30.00	1.000	0.676	1.737	0.501

表 3  $K_{fs}$  及其影响参量的相关系数矩阵

参 量	$K_{fs}/$ ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$I_w/$ $\text{m}^2$	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %	有机质/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	交换性钠/ ( $\text{mmol} \cdot$ $\text{kg}^{-1}$ )	CEC/ ( $\text{mmol} \cdot$ $\text{kg}^{-1}$ )	ESP/ %
$K_{fs}/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	1.00									
$I_w/\text{m}^2$	$-0.42^*$	1.00								
容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$0.42^*$	0.14	1.00							
砂粒/ %	$0.53^{**}$	$-0.34$	$0.56^{**}$	1.00						
粉粒/ %	$-0.06$	$-0.37$	$-0.34$	0.18	1.00					
黏粒/ %	$-0.38$	$0.45^*$	$-0.26$	$-0.87^{**}$	$-0.65^{**}$	1.00				
有机质/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$-0.53^{**}$	0.40	$-0.35$	$-0.80^{**}$	$-0.03$	$0.64^{**}$	1.00			
交换性钠/ $(\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.05	$-0.05$	$-0.26$	$-0.11$	0.21	$-0.02$	0.22	1.00		
CEC/ $(\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1})$	$-0.33$	0.32	$-0.41^*$	$-0.83^{**}$	$-0.32$	$0.80^{**}$	$0.65^{**}$	0.07	1.00	
(ESP)/ %	0.09	$-0.08$	$-0.17$	0.03	0.22	$-0.14$	0.13	$0.98^{**}$	$-0.12$	1.00

注: \* 表示显著相关( $P < 0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $P < 0.01$ )。

为了更深入地分析地形指数以土壤理化性质对土壤饱和和渗透参数的影响, 对其进行了主成分分析。相关系数矩阵  $R$  的特征值及贡献量见表 4。变量的

相关系数矩阵的三大特征根: 3.74, 2.10 和 1.11, 总的方差解释量为 86.83% (累积贡献率), 前 3 个主成分反映了原始数据所提供的足够信息。同时, 基于过

程内特征根大于 1 的原则,主成分分析过程中相应地提取 3 个主分量  $F_1, F_2, F_3$ 。取前 3 个主分量的载荷(表 5)表明第一主分量中起主要作用的是砂粒、黏粒、有机质和 CEC,分别为 0.966, -0.885, -0.850 和 -0.888,分别在正负方向上起作用。第二主分量中交换性钠和 ESP 起主要作用,分别为

-0.959 和 -0.970,它在负方向上影响土壤渗透参数的空间变异。第三主分量中地形指数  $I_W$  起主要作用,从中可以看出地形控制着物质、能量分异,从而影响土壤理化性质的空间变异,并影响到土壤渗透参数的空间分异格局。主成分分析获取的结果与相关分析获得的结果具有较高的一致性。

表 4 主成分分析的特征值及其贡献率

变量	初始因子 $F_1-F_8$			初始因子 $F_1-F_8$		
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	3.74	46.76	46.76	3.74	46.76	46.76
2	2.10	26.26	73.02	2.10	26.26	73.02
3	1.11	13.82	86.83	1.11	13.82	86.83
4	0.45	5.61	92.45			
5	0.35	4.42	96.87			
6	0.20	2.52	99.39			
7	0.04	0.55	99.94			
8	0.00	0.06	100.00			

表 5 前 3 个主成分载荷量

参数	第一	第二	第三
	主分量	主分量	主分量
地形指数/ $m^2$	-0.461	0.249	-0.736
容重/ $(g \cdot cm^{-3})$	0.519	0.326	-0.656
砂粒/%	0.966	-0.031	-0.134
黏粒/%	-0.885	0.218	-0.086
有机质/ $(g \cdot kg^{-1})$	-0.850	-0.094	-0.125
交换性钠/ $(mmol \cdot kg^{-1})$	-0.175	-0.959	-0.176
CEC/ $(mmol \cdot kg^{-1})$	-0.888	0.121	0.100
ESP/%	-0.028	-0.970	-0.226

### 3 结论

(1) 经典统计学分析表明土壤渗透参数影响因素中,容重的变异系数最小,属于弱变异性; $K_{fs}$ ,有机质,颗粒组成,地形指数,交换性钠,CEC 和 ESP 等属中等变异。

(2) Kolmogorov-Smirnov( $K-S$ )正态分布检验概率( $P_{k-s}$ )检验表明饱和渗透参数  $K_{fs}$ 、容重、砂粒、黏粒、有机质、CEC 等属于正态分布;交换性钠和 ESP 等属于对数正态分布;粉粒属于均匀分布。

(3) 地统计学中半方差函数和分形维数分析土壤饱和和渗透参数及其影响因子的变异结构表明, $K_{fs}$ ,地形指数,容重,颗粒组成(砂粒、黏粒),有机质,交换性钠,CEC 和 ESP 等具有明显的空间结构,其中 CEC 的空间异质性最大。

(4) 地形指数以及土壤基本理化性质与土壤饱和和渗透参数  $K_{fs}$  相关分析和主成分分析结果具有较高的一致性。砂粒、有机质与饱和和渗透参数分别为正、负相关,并且都达到极显著相关;容重、黏粒以及盐分中 CEC 等都对土壤饱和和渗透参数产生影响;其中地形指数反映了地形因素对土壤渗透参数空间分异的综合调控作用,同时,地形因子作为水盐参数尺度扩张的重要参数,它对土壤渗透参数的影响需要进一步深入研究。主成分结果表明第一主分量中砂粒、黏粒、有机质和 CEC 起到主要作用;第二主分量中交换性钠和 ESP 在负方向上影响饱和和渗透参数;而第三主分量中地形指数  $I_W$  在负方向上起到决定作用。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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,1988.321-377.
- [2] Mahmoud M. Moustafa, Atsushi Yomota. Use of a covariance variogram to investigate influence of subsurface drainage on spatial variability of soil-water properties[J]. Agricultural Water Management, 1998(37): 1-19.
- [3] Hangsheng Lin, Dan Wheeler, Jay Bell, et al. Assessment of soil spatial variability at multiple scales[J]. Ecological Modelling, 2005(182): 271-290.
- [4] 黄冠华.土壤水力特性空间变异的试验研究进展[J].水科学进展,1999,10(4):450-457.
- [5] Huang Guanhua. Spatial Variability of Unsaturated Flow Parameters: Field study[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 73-78.

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Quinn P F, Beven K J, Chevallier P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models[ J ]. Hydrological Processes, 1991( 5 ): 59—79.
- [ 2 ] Zhang W, Montgomery D R. Digital elevation model grid size, Landscape representation, and hydrological simulation[ J ]. Water Resources Research, 1994, 30( 4 ): 1019—1028.
- [ 3 ] Wolock D M. Simulating the variable-source-area concept of streamflow generation with the watershed model TOPMODEL[ R ]. U S Geol Surv Water Resour Invest Rep, 1993. 93—4124.
- [ 4 ] Robson A J, Whitehead P G, Johnson R C. An application of a physically based semi-distributed model to the Balquhider catchments[ J ]. J Hydrol, 1993, 145: 357—370.
- [ 5 ] 张镛光, 王克林, 陈洪松, 等. 基于 DEM 的地形指数提取方法及应用[ J ]. 长江流域资源与环境, 2005, 14( 6 ): 715—719.
- [ 6 ] O' Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[ J ]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 323—344.
- [ 7 ] 孔凡哲, 芮孝芳. TOPMODEL 中地形指数计算方法的探讨[ J ]. 水科学研究进展, 2003, 14( 1 ): 41—45.
- [ 8 ] 王春, 汤国安, 张亭, 等. 黄土模拟小流域降雨侵蚀中地面坡度的空间分异[ J ]. 地理科学, 2005, 25( 6 ): 683—689.
- [ 9 ] 崔灵周. 流域降雨侵蚀产沙与地貌形态特征耦合关系研究[ D ]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002.
- [ 10 ] 姚文艺, 李占斌, 康玲玲. 黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[ M ]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [ 11 ] 孔凡哲, 芮孝芳. 基于地形特征的流域水文相似性[ J ]. 地理研究, 2003, 22( 6 ): 709—715.
- [ 12 ] BEVEN K, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[ J ]. Hydrological Science Bulletin, 1979, 24( 1 ): 43—69.
- [ 13 ] Quinn P, Beven K J, Lamb R. The index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework[ J ]. Hydro Process, 1994, 9: 161—185.
- ( 上接第 28 页 )
- [ 6 ] G Ciollaroa, N Romano. Spatial variability of the hydraulic properties of a volcanic soil[ J ]. Geoderma, 1995, 65( 3 ): 263—282.
- [ 7 ] 裘善文, 张柏, 王志春. 中国东北平原西部荒漠化现状、成因及其治理途径研究[ J ]. 第四纪研究, 2005, 25( 1 ): 63—73.
- [ 8 ] 杨诗秀, 段新杰. 田间测定土壤水分参数的研究—圭尔夫渗透仪的应用[ J ]. 灌溉排水, 1991, 10( 2 ): 43—47.
- [ 9 ] Beven K, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[ J ]. Hydro Sci Bull, 1979, 24: 43—69.
- [ 10 ] 邓慧平, 李秀彬. 地形指数的物理意义分析[ J ]. 地理科学进展, 2002, 21( 2 ): 103—110.
- [ 11 ] 任立良, 刘新仁. 基于 DEM 的水文物理过程模拟[ J ]. 地理研究, 2000, 19( 4 ): 369—376.
- [ 12 ] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计方法[ J ]. 地理学报, 1997, 52( 2 ): 184—192.
- [ 13 ] 赵斌, 蔡庆华. 地统计学分析方法在水生态系统研究中的应用[ J ]. 水生生物学报, 2000, 24( 5 ): 514—520.
- [ 14 ] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[ M ]. 北京: 科学出版社, 1999. 60—101.
- [ 15 ] 蔡树英, 杨金忠, 伍靖伟. 土壤渗透参数空间变异性的试验研究[ J ]. 中国农村水利水电, 2002( 11 ): 13—17.
- [ 16 ] Soil moisture equipment corp. 2800KIGuelph permeameter operating instructions, Santa Barbara, CA 93105, U. S. A. 1991.
- [ 17 ] 单秀枝, 魏由庆, 刘继芳, 等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[ J ]. 土壤学报, 1998, 35( 1 ): 1—9.