

# 坡面尺度土壤特性的空间变异性

陈洪松

(中国科学院 亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125)

**摘要:** 通过对 20 m 长坡面土壤特性空间变异性的经典统计学分析, 结果表明: (1) 在同一土壤剖面内, 各级粒径含量呈弱变异性, 而有机质含量随土层深度的增大而逐渐降低, 呈中等变异性; (2) 土壤干容重的空间变异性较小, 呈弱变异性, 但土壤饱和导水率的空间变异性较大, 呈中等变异性; (3) 水分特征曲线具有一定的空间变异性, 比水容量空间变异性较大, 呈中等变异性。坡面土壤饱和导水率和干容重的等值线图表明, 土壤饱和导水率的变化趋势并不仅仅取决于土壤干容重的相对大小, 可能与有机质含量、黏粒含量以及根系分布情况等也有一定的关系。

**关键词:** 坡面; 土壤特性; 空间变异; 经典统计

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2004)06—0045—04

中图分类号: S152.7

## Hillslope-scale Spatial Variability of Some Soil Properties

CHEN Hong-song

(Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, Hunan Province, China)

**Abstract:** Spatial variability of some soil properties at a 20 m long hillslope on the Loess Plateau was studied with the classical statistical analysis. The results show that in the same soil profile, sand, silt and clay contents have small variability, and organic matter content decreases from upper layer to lower layer with moderate variability. Soil dry bulk density has small variability, but saturated hydraulic conductivity has moderate one. Soil water characteristic curve has some spatial variability and specific water capacity has moderate one. The isograms of soil saturated hydraulic conductivity and dry bulk density indicate that the change of soil saturated hydraulic conductivity does not only depend on soil dry bulk density, and has some relations with organic matter content, clay content and root distribution.

**Keywords:** hillslope; soil properties; spatial variability; classical statistical analysis

在严重土壤侵蚀和频繁干旱并存的黄土高原地区, 土壤水分是作物生长、植被恢复的关键性限制因素<sup>[1-2]</sup>。在黄土高原特定的生物—气候条件下, 复杂多变的地貌类型、深厚的黄土及其上发育的各种类型的土壤、多种多样的植被类型和土地利用状况都对土壤水分有着重要的影响<sup>[2]</sup>。由于不同地区在气候、母岩、地形、植被和动物等方面的不同, 形成了各种土壤类型, 所以土壤性质存在明显的差异。即使在同一土壤类型区, 不同的时间和不同的空间上土壤的某些性质仍然具有一定的差异<sup>[3]</sup>。这种土壤特性在空间分布上的非均一性, 称为土壤特性的空间变异性<sup>[4]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来, 国内外学者对土壤特性的空间变异性作了大量的研究, 取得了许多重要的进展<sup>[3-9]</sup>。但是, 上述研究多集中在农田, 在小流域则较少考虑植被类型的一致性。本文主要分析坡面

尺度土壤机械组成、有机质含量、干容重、饱和导水率以及水分特征曲线等的空间变异性, 以期分析坡面降雨入渗及土壤水分再分布规律提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

在黄土高原沟壑区长武王东沟小流域沟坡中下部, 布设有 4 个径流小区, 规格为: 长 × 宽 = 3 m × 20 m。1, 2 区为上陡下缓(坡度由上到下依次为 34°, 30° 和 24°)的荒草地(夹杂有少量灌木), 坡面上留有造林整地的水平阶; 3, 4 区为 35° 荒草地, 坡面较为均一。2001 年 11 月中旬, 分别在 1 区, 3 区右侧(距小区外侧约 1 m)坡面, 由小区顶端向下每隔 4 m 挖深 1 m, 宽 0.5 m 的剖面 6 个。用环刀分层取原状土, 测定各层土壤容重、饱和导水率以及土壤水分特征曲线。

收稿日期: 2004-09-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(01200220055413); 国家自然科学基金重大研究计划(90102012)

作者简介: 陈洪松(1973—), 男(汉族), 湖北通山人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤物理与水土保持方面的研究工作。电话(0731)4615226, E-mail: hbchs@isa.ac.cn。

其中,小区底端剖面深 2 m,宽 0.5 m。同样用环刀分层取原状土,除了测定各层土壤容重、饱和导水率和水分特征曲线外,还测定了各层有机质含量和机械组成。由于土壤在剖面上并没有明显的层次性,所以我们以 20 cm 为间隔取样,每层 2~3 个重复。

## 1.2 研究方法

土壤容重用环刀法,饱和导水率用定水头法,水分特征曲线用离心机法,有机质含量用重铬酸钾法,机械组成用比重计法,土壤特性空间变异性用经典统计学分析方法。随机变量的离散程度,即土壤特性空间变异性的程度,可用变异系数  $C_v$  的大小来反映,其计算公式为:

$$C_v = s / \bar{x} \quad (1)$$

式中:  $\bar{x}$  ——样本平均值;  $s$  ——标准差,其计算公式为:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中:  $n$  ——样本(观测值)总个数;  $x_i$  ——样本的第  $i$  个观测值。

一般认为:  $C_v < 0.1$  为弱变异性;  $0.1 < C_v < 1$  为中等变异性;  $C_v > 1$  为强变异性<sup>[4]</sup>。根据样本的标准差和平均值,可知合理的取样数目  $N$  为<sup>[4]</sup>:

$$N = \frac{2}{a.f} \left( \frac{C_v}{k} \right)^2 \quad (3)$$

式中:  $k$  ——表征精度的系数,可取 5%, 10%, 15%;  $a.f$  ——分布的特征值,可由显著水平  $\alpha = 1 - P_t$  ( $P_t$  为置信水平,一般可取 90%, 95%, 99%) 和自由度  $f = N - 1$  查  $t$  分布表求得。

## 2 土壤特性的空间变异性

### 2.1 各级粒径含量的空间变异性

由于剖面内土壤没有明显不同的层次,所以主要以 20 cm 为间隔分析各级粒径含量的空间变异性。由表 1 可知,剖面内各级粒径含量为正态分布 ( $K-S > 0.05$ ),其空间变异性较小,为弱变异性,但砂粒的变异程度略高于粉粒和黏粒。考虑到黄土高原地区土壤颗粒组成的一致性,本文没有分析各级粒径含量沿坡面分布的空间变异性。

### 2.2 有机质含量的空间变异性

同样以 20 cm 为间隔分析有机质含量在剖面内的空间变异性。由表 1 可知,剖面内有机质含量的空间变异性较大,为中等变异性。至于各层有机质含量沿坡面的空间变异性,本文也没有加以分析。但是,考虑到坡面植被类型的一致性,可以推测有机质含量沿坡面的空间变异性较小。

表 1 剖面(0—200cm)内各级粒径、有机质含量的统计特征值

分析项目	$n$	最大值	最小值	平均值	中值	$s$	$C_v$	$K-S$
砂粒	12	30.03	23.03	27.10	27.23	2.59	9.60	1.00
粉粒	12	40.18	36.72	38.37	38.22	1.35	3.50	0.98
黏粒	12	36.79	32.89	34.53	34.75	1.39	4.00	0.80
有机质	12	1.05	0.33	0.57	0.51	0.27	47.00	0.89

注:经典统计以每层测定结果的平均值进行分析,下表同。

### 2.3 土壤干容重的空间变异性

为了分析坡面降雨入渗、产流及土壤水分再分布规律的差异,研究各层土壤干容重沿坡面的空间变异性,可能具有更大的实际意义。由表 2,3 可知,各层土壤干容重沿坡面分布的空间变异性较小,为弱变异性,这与已有的研究成果相符<sup>[4]</sup>。至于剖面内土壤干容重的空间变异性,若以 0—100 cm 土层进行分析,则其空间变异性较小,为弱变异性;若以 0—200 cm 土层进行分析,则其空间变异性较大,为中等变异性。考虑到表层土壤特性对降雨入渗、产流的影响相对较大,在下文分析中,除非特别说明,剖面都特指 0—100 cm 土层。

表 2 各层土壤干容重沿坡面分布的统计特征值  $g/m^3$

土层/cm	$n$	最大值	最小值	平均值	中值	$s$	$C_v/\%$	$K-S$
0—20	13	1.29	1.11	1.16	1.13	0.07	5.84	0.87
20—40	13	1.31	1.06	1.17	1.16	0.09	7.91	1.00
40—60	12	1.33	1.10	1.18	1.13	0.10	8.16	0.36
60—80	12	1.29	1.08	1.19	1.19	0.07	6.12	1.00
80—100	12	1.26	1.09	1.16	1.13	0.07	6.04	0.75

注:样本取自 1 区右侧坡面。

表 3 各层土壤干容重沿坡面分布的统计特征值  $g/m^3$

土层/cm	$n$	最大值	最小值	平均值	中值	$s$	$C_v/\%$	$K-S$
0—20	12	1.23	1.12	1.18	1.19	0.05	4.27	0.95
20—40	12	1.35	1.14	1.23	1.21	0.09	7.42	0.65
40—60	12	1.38	1.19	1.29	1.30	0.07	5.49	1.00
60—80	12	1.34	1.15	1.27	1.28	0.07	5.52	1.00
80—100	12	1.38	1.18	1.25	1.24	0.07	5.52	0.71

注:样本取自 3 区右侧坡面。

### 2.4 土壤饱和导水率的空间变异性

与已有的研究成果相符<sup>[4-9]</sup>,土壤饱和导水率沿坡面的空间变异性较大,为中等变异性,但各层饱和导水率的变异程度没有明显的变化规律(表 4,5)。同样,剖面内各层饱和导水率的空间变异性也较大,

为中等变异性。土壤饱和导水率的空间变异性,主要是由土壤结构的差异引起的。

表 4 各层饱和导水率沿坡面分布的统计特征值 cm/d

土层/cm	n	最大值	最小值	平均值	中值	s	C <sub>v</sub> /%	K - S
0—20	13	13.97	6.19	8.66	8.09	2.78	32.13	0.56
20—40	13	11.59	8.77	10.75	11.34	1.16	10.83	0.50
40—60	12	28.54	8.77	17.78	16.93	7.16	40.28	1.00
60—80	12	53.08	8.99	21.00	14.49	16.26	77.41	0.60
80—100	12	35.01	7.95	18.37	13.94	10.05	54.69	0.56

注:样本取自 1 区右侧坡面。

表 5 各层饱和导水率沿坡面分布的统计特征值 cm/d

土层/cm	n	最大值	最小值	平均值	中值	s	C <sub>v</sub> /%	K - S
0—20	12	16.90	4.84	9.06	7.32	4.35	48.05	0.71
20—40	12	17.25	8.19	11.51	10.43	3.17	27.56	0.83
40—60	12	14.37	11.10	12.37	12.26	1.25	10.12	0.99
60—80	12	13.90	7.14	11.12	11.16	2.37	21.28	0.79
80—100	12	22.40	10.75	14.06	12.43	4.31	30.64	0.76

注:样本取自 3 区右侧坡面

### 2.5 土壤水分特征曲线的空间变异性

在黄土高原地区,土壤水分特征曲线的影响因素主要为土壤质地和结构,而有机质含量的影响通常可以忽略<sup>[10]</sup>。水分特征曲线可用幂函数进行拟合:

$$= aS^{-b} \quad (0 < S \leq 10) \quad (4)$$

式中:  $\theta$  ——土壤容积含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $S$  ——吸水(巴);  $a, b$  ——经验参数。比水容量  $C(\theta)$  为:

$$C(\theta) = -d\theta/dS = abS^{-b-1} \quad (5)$$

以 1 区右侧坡面为例进行分析,水分特征曲线(以参数  $a, b$  表示)和比水容量  $C(\theta)$  (以参数  $a \times b$  及  $b + 1$  表示)沿坡面具有一定的空间变异性,参数  $a, b$  的空间变异性较小,  $a \times b$  的空间变异性较大,而  $b + 1$  的空间变异性很小(表 6)。3 区右侧坡面水分特征曲线和比水容量沿坡面的空间变异性,与 1 区右侧坡面所得结果相似。上述土壤水分特征曲线和比水容量的空间变异性,可能主要是由于土壤结构的差异引起的。至于剖面内土壤水分特征曲线和比水容量的空间变异性,与上述结果类似。

表 6 各层土壤水分特征曲线沿坡面分布的统计特征值

参数	土层/cm	n	最大值	最小值	平均值	中值	s	C <sub>v</sub> /%
a	0—20	13	0.23	0.19	0.21	0.20	0.02	7.25
	20—40	13	0.24	0.18	0.21	0.20	0.02	10.24
	40—60	12	0.24	0.19	0.21	0.20	0.02	8.91
	60—80	12	0.23	0.20	0.22	0.21	0.01	6.05
b	80—100	12	0.23	0.19	0.21	0.21	0.01	6.93
	0—20	13	0.24	0.19	0.21	0.20	0.02	8.04
	20—40	13	0.22	0.18	0.20	0.20	0.02	7.95
	40—60	12	0.23	0.18	0.20	0.20	0.02	7.70
a × b	60—80	12	0.22	0.18	0.20	0.19	0.01	7.51
	80—100	12	0.23	0.17	0.20	0.20	0.02	9.75
	0—20	13	0.05	0.04	0.04	0.04	0.01	12.48
	20—40	13	0.05	0.04	0.04	0.04	0.01	12.68
b + 1	40—60	12	0.05	0.04	0.04	0.04	0.01	13.48
	60—80	12	0.05	0.04	0.04	0.04	0.00	11.57
	80—100	12	0.05	0.04	0.04	0.04	0.01	14.14
	0—20	13	1.21	1.18	1.20	1.20	0.01	1.02
b + 1	20—40	13	1.22	1.17	1.19	1.19	0.02	1.54
	40—60	12	1.23	1.18	1.20	1.20	0.02	1.46
	60—80	12	1.21	1.18	1.20	1.20	0.01	0.68
	80—100	12	1.24	1.18	1.21	1.20	0.02	1.99

注:样本取自 1 区右侧坡面

### 3 样本数据的空间分析

各层土壤干容重、饱和导水率沿坡面并没有完全一致的变化规律。1 区右侧坡面深层土壤干容重有沿坡向下递增的趋势,但浅层坡中下部较大,坡上、坡下次之,坡中上部较小(图 1);而 3 区右侧坡面土壤干容重沿坡向下大致呈递增的趋势(图 2)。1 区右侧坡面土壤饱和导水率有沿坡向下递增的趋势(图 3),3 区右侧坡面土壤饱和导水率坡中部较小,而坡上、坡下较大(图 4)。上述结果表明,土壤饱和导水率的变化趋势并不仅取决于土壤干容重的相对大小,可能还与有机质含量、黏粒含量以及根系分布情况等有一定的关系。

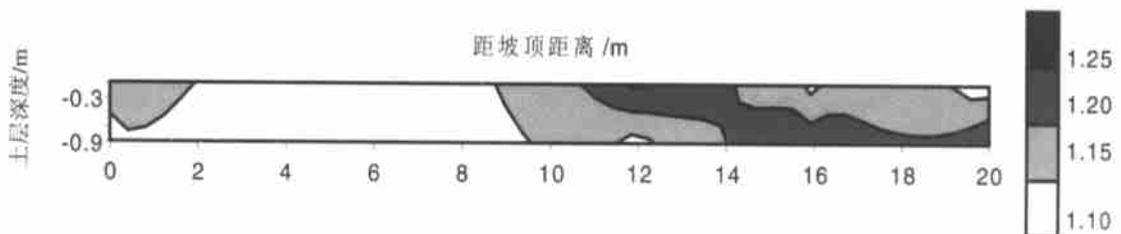
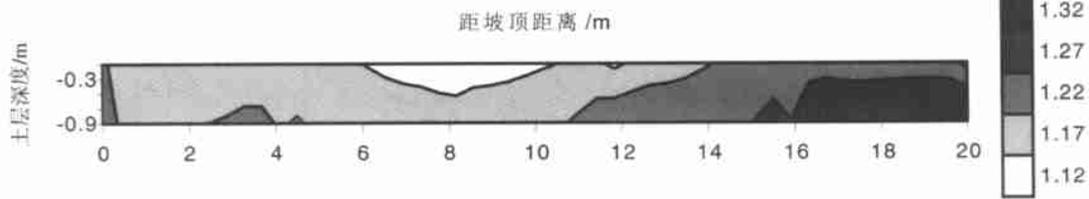
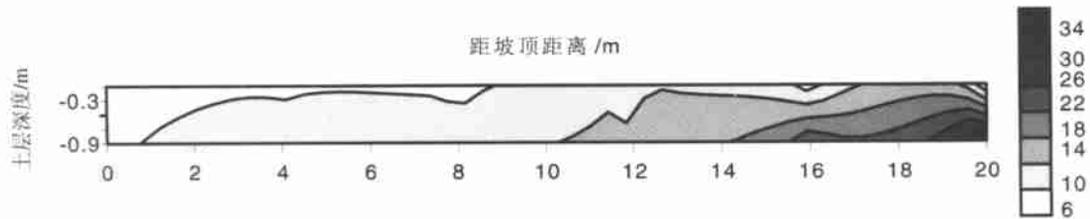
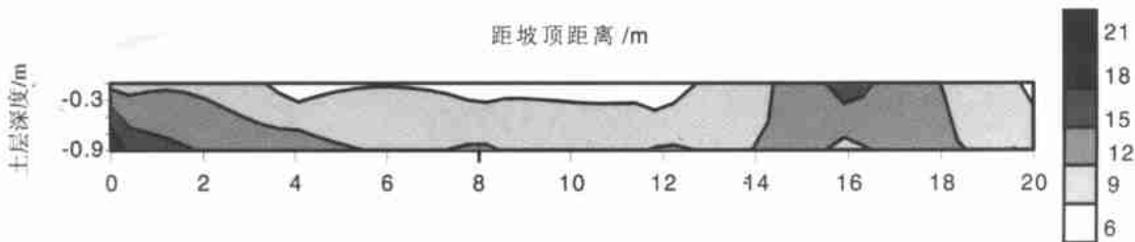


图 1 土壤干容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )的等值线图(1 区右侧坡面)

图 2 土壤干容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )等值线图(3区右侧坡面)图 3 土壤饱和导水率( $\text{cm}/\text{d}$ )等值线图(1区右侧坡面)图 4 土壤饱和导水率( $\text{cm}/\text{d}$ )等值线图(3区右侧坡面)

## 4 结 论

通过对 20 m 长坡面土壤有关特性空间变异性的经典统计学分析,结果表明:(1)在同一土壤剖面(0—200 cm)内,各级粒径含量的空间变异性较小,呈弱变异性,但有机质含量随土层深度的增大而逐渐降低,呈中等变异性;(2)土壤干容重的空间变异性较小,沿坡面呈弱变异性,在同一剖面(0—100 cm,下同)内也呈弱变异性;(3)各层土壤饱和导水率的空间变异性较大,沿坡面呈中等变异性,在同一剖面内也呈中等变异性;(4)无论是沿坡面还是在同一剖面内,由于受土壤结构、干容重、黏粒含量、有机质含量等的综合影响,水分特征曲线(以参数  $a$ 、 $b$  表示)具有一定的空间变异性,尤其是比水容量  $C(\ )$ (以  $a \times b$  及  $b + 1$  表示)空间变异性较大,呈中等变异性。坡面土壤饱和导水率和干容重的等值线图表明,土壤饱和导水率的变化趋势并不仅仅取决于土壤干容重的相对大小,可能还与有机质含量、黏粒含量以及根系分布情况等有一定的关系。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陈洪松,邵明安.黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):513—520.
- [2] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.
- [3] 王政权,王庆成.森林土壤物理性质的空间异质性研究[J].生态学报,2000,20(6):945—950.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 贾晓红,等.流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J].水土保持学报,2003,17(1):178—182.
- [7] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties[J]. Advances in Agronomy,1985,48:45—94.
- [8] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in field[J]. Advance in Soil Science,1985(3):1—70.
- [9] 薛绪掌,张仁铎,桂胜祥.测定尺度对所测土壤导水参数及其空间变异性的影响[J].水土保持通报,2001,21(3):47—51.