

# 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征\*

张 川<sup>1,2,3</sup> 陈洪松<sup>1,2,\*</sup> 张 伟<sup>1,2</sup> 聂云鹏<sup>1,2</sup> 叶莹莹<sup>1,2,3</sup> 王克林<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; <sup>2</sup>中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要** 表层土壤水分物理性质对深层土壤水分的动态变化具有重要的作用, 研究其空间变化特征有助于深入理解坡地降雨入渗及产流规律, 实现土壤水资源的合理利用. 基于网格(10 m×10 m)取样, 用地统计学方法研究了桂西北喀斯特地区典型灌丛坡地 90 m×120 m(投影长)表层(0~10 cm)土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征. 结果表明: 研究区土壤含水量、容重和饱和导水率均具有明显的空间依赖性和空间结构. 土壤水分含量半变异函数用高斯模型模拟较好, 土壤容重与饱和导水率用指数模型拟合较好. 土壤含水量表现为强烈的空间自相关性, 土壤容重和导水率表现为中等的空间自相关性. 土壤含水量与饱和导水率空间连续性的尺度范围较小, 而土壤容重空间连续性的尺度范围较大. 总体上土壤含水量沿坡向下呈递增趋势, 土壤容重呈递减趋势, 而土壤饱和导水率沿坡面没有明显变化规律, 斑块小而多, 表现为高异质性. 土壤含水量与土壤容重、饱和导水率均呈极显著负相关, 而土壤容重与饱和导水率之间没有明显的相关性.

**关键词** 土壤水分 土壤容重 饱和导水率 空间变异 喀斯特

**文章编号** 1001-9332(2014)06-1585-07 **中图分类号** S152.5, S152.7 **文献标识码** A

**Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on Karst slopes.** ZHANG Chuan<sup>1,2,3</sup>, CHEN Hong-song<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, NIE Yun-peng<sup>1,2</sup>, YE Ying-ying<sup>1,2,3</sup>, WANG Ke-lin<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; <sup>2</sup>Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, Guangxi, China; <sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(6): 1585–1591.

**Abstract:** Surface soil water-physical properties play a decisive role in the dynamics of deep soil water. Knowledge of their spatial variation is helpful in understanding the processes of rainfall infiltration and runoff generation, which will contribute to the reasonable utilization of soil water resources in mountainous areas. Based on a grid sampling scheme (10 m×10 m) and geostatistical methods, this paper aimed to study the spatial variability of surface (0–10 cm) soil water content, soil bulk density and saturated hydraulic conductivity on a typical shrub slope (90 m×120 m, projected length) in Karst area of northwest Guangxi, southwest China. The results showed that the surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity had different spatial dependence and spatial structure. Sample variogram of the soil water content was fitted well by Gaussian models with the nugget effect, while soil bulk density and saturated hydraulic conductivity were fitted well by exponential models with the nugget effect. Variability of soil water content showed strong spatial dependence, while the soil bulk density and saturated hydraulic conductivity showed moderate spatial dependence. The spatial ranges of the soil water content and saturated hydraulic conductivity were small, while that of the soil bulk density was much bigger. In general, the soil water content increased with the increase of altitude while it was opposite for the soil bulk density.

\* 国家自然科学基金项目(41171187)、中国科学院“西部行动”计划项目(KZCX2-XB3-10)和国家科技支撑计划项目(2010BAE00739-02)资助.

\* \* 通讯作者. E-mail: hhchs@isa.ac.cn

2013-11-15 收稿, 2014-03-28 接受.

ty. However, the soil saturated hydraulic conductivity had a random distribution of large amounts of small patches, showing high spatial heterogeneity. Soil water content negatively ( $P < 0.01$ ) correlated with the bulk density and saturated hydraulic conductivity, while there was no significant correlation between the soil bulk density and saturated hydraulic conductivity.

**Key words:** soil water content; soil bulk density; saturated hydraulic conductivity; spatial variation; Karst.

坡面近地表土壤水分条件对径流形成和侵蚀发生有重要影响,其空间格局由不同尺度上的自然作用和过程控制,包括降水、径流、蒸发蒸腾等,其变化尺度从几厘米到上百米<sup>[1]</sup>. 土壤容重是土壤的基本物理性质之一,对土壤的透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤的抗侵蚀能力都有重要影响,自然条件下土壤容重受成土母质、成土过程、气候、生物作用及耕作的综合影响而具有高度空间异质性. 土壤饱和导水率反映了水分的入渗和渗漏特性,是研究水分、溶质在土壤中运动规律的重要水力参数,饱和导水率由于土壤质地、容重、孔隙分布以及有机质含量等变量的影响而空间变异强烈<sup>[1-3]</sup>.

我国西南喀斯特地区是全球三大喀斯特集中分布区(欧洲地中海沿岸、美国东部、中国西南部)中连片裸露碳酸盐岩面积最大的地区,总面积约 54 万  $\text{km}^2$ <sup>[4]</sup>. 该地区可溶岩造壤能力低,长期强烈的岩溶作用产生了水土资源不协调的双层空间结构,导致地表水易流失、地下水深埋,加上土层浅薄、土壤持水性能差,又因缺乏植被系统的调节,致使旱涝灾害频发,区域生态十分脆弱<sup>[5]</sup>. 在喀斯特地区,土壤侵蚀规律是倍受关注的研究领域. 西南喀斯特山区土壤侵蚀机制复杂,同时存在自然环境下地表流水侵蚀、重力侵蚀、地下流失与人为加速侵蚀等多种侵蚀方式<sup>[6-7]</sup>. 在影响坡地产流、产沙规律的众多因素中,坡面表层土壤含水量、容重和土壤导水能力都是比较重要的因素,对坡地土壤的入渗特性和抗侵蚀能力的深入认识具有重要意义. 另外,土壤饱和导水率作为水文模型的重要参数,对土壤水分的分布具有重要影响<sup>[3,8]</sup>.

空间异质性是土壤的基本属性,即使在几厘米的距离上土壤性质也可能存在强烈变异<sup>[9]</sup>. 土壤性质在空间上的变异产生了其结构功能上的差异<sup>[10]</sup>. 地统计学是在传统统计学基础上发展起来的空间分析方法. 它不仅能有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,还能将空间格局与生态过程联系起来,可有效地解释空间格局对生态过程和功

能的影响<sup>[11-13]</sup>. 国内外学者应用地统计方法对土壤性质的空间变异特征进行了大量研究<sup>[1-3,14-17]</sup>,对喀斯特地区土壤养分、水分与环境因素的关系也进行了多方面探讨<sup>[18-21]</sup>,但目前,对直接影响水分运动的土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异研究较少<sup>[22]</sup>. 为此,本文基于中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站,结合经典统计学和地统计学方法分析典型坡地土壤含水量、容重和饱和导水率的空间异质性和分布格局,以期促进坡地产流产沙和土壤侵蚀规律研究的深入开展,为该地区深层土壤水分动态模拟与预测提供理论依据,并实现土壤水资源的合理利用,为西南喀斯特地区石漠化综合治理和植被恢复重建提供参考.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于桂西北中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站( $24^{\circ}43'58.9''$ — $24^{\circ}44'48.8''$  N,  $108^{\circ}18'56.9''$ — $108^{\circ}19'58.4''$  E)内. 研究区为低山丘陵地貌,地势四周高、中间低,海拔最高为 647 m,最低为 272 m,最大相对高差 375 m,地形破碎,坡度较陡,  $\geq 25^{\circ}$  的坡面占 62%. 土壤为深色或棕色石灰土,洼地基岩裸露面积占 15%,土壤厚度 20 ~ 160 cm,坡地基岩裸露面积  $\geq 30\%$ ,土层较薄,一般为 10 ~ 50 cm. 该区属于中亚热带季风气候区<sup>[23]</sup>,多年平均气温为  $19.9^{\circ}\text{C}$ ,7 月平均气温为  $27.9^{\circ}\text{C}$ ,1 月平均气温为  $10.1^{\circ}\text{C}$ ,极端温度分别为  $38.7^{\circ}\text{C}$  和  $-5.2^{\circ}\text{C}$ ,年均  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温为  $6300^{\circ}\text{C}$ ,年无霜期 329 d. 多年平均降水量 1389 mm,4—8 月为雨季,降水量占全年的 74%,9 月至次年 3 月为旱季. 年平均日照 1451 h,年平均太阳总辐射量  $4138 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其中,有效辐射量为  $2119 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ .

### 1.2 采样与测定方法

2012 年 4 月 23 日,在坡地十几年未经人为干扰的灌丛典型区域  $90 \text{ m} \times 120 \text{ m}$  (投影长)范围内以网格法( $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ )采样,共设置样点 130 个,用全站仪(南方,NTS-302R)确定各采样点位置,用手持式 GPS(etrex2000)记录每个采样点地理信息,采样

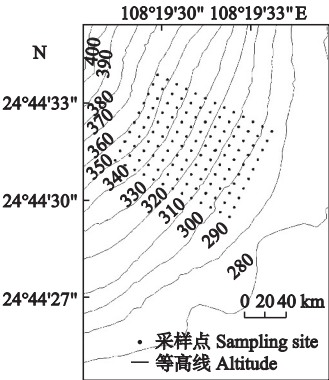


图1 采样区位置及样点分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of the sampling sites.

区位置及采样点布设如图1所示。用容积100 cm<sup>3</sup>环刀在每个样点采原状土(为了减少表层枯枝落叶等杂物的影响,采样在表层1 cm以下),带回室内称鲜质量,用定水头法(在原环刀上再对接一个空环刀,中间固定密封,然后放在水桶中从下倒上排气饱和一夜,第二天早上用马氏瓶控制固定水头连续测定24 h左右,判断饱和导水率达到稳定的标准是连续几次测定的数据基本不变)测定饱和导水率。试验结束后,土样在105℃下烘干16 h,测定土壤含水量与容重。所选样地为白云岩石山典型灌木维管植物群落,山底土壤肥沃,密生灌丛;山腰岩石较多,植物以灌丛为主,间生草本和藤蔓植物;山顶部岩石裸露较大,在积土厚处偶见耐干旱的乔木,间生藤蔓植物和竹类。

1.3 数据处理

用经典统计学方法和地统计学方法对样本数据进行分析处理。土壤含水量、容重和饱和导水率的描述性统计分析在SPSS 18.0统计软件中进行,半变异函数的计算和模型的拟合及Kriging等值线图的描绘在专业地统计软件GS<sup>+</sup> 7.0中完成。地统计学有关方法及原理<sup>[19-21,24]</sup>简介如下:

1.3.1 经典统计学空间变异分析理论 经典(传统)统计学进行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,对变异特征的分析主要以变异函数(Cv)进行。变异函数可定义为:

$$Cv = S/\bar{x}$$

式中:S为标准方差; $\bar{x}$ 为变量均值。

根据变异程度分级:Cv≤0.1属于弱变异,0.1<Cv<1属于中等变异,Cv≥1属于强变异。

1.3.2 半方差计算与模型 半方差函数是应用广泛的空间格局描述工具,其公式为:

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

式中:γ(h)为半方差函数值;N(h)为间距为向量h的点总数;Z(x<sub>i</sub>)为区域化变量Z在x<sub>i</sub>处的实测值;Z(x<sub>i</sub>+h)为与x<sub>i</sub>距离为向量h处样点的值。一般认为,半方差函数只有在最大间隔的1/2内才有意义。本研究中半方差函数的有效滞后距均设为最大采样间隔的1/2。对半变异函数的拟合主要采用高斯模型(Gaussian),其公式为:

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-h^2/a^2})$$

式中:C<sub>0</sub>为块金值(nugget);C<sub>0</sub>+C为基台值(sill);a为变程(range);h为滞后距离。一般用决定系数(R<sup>2</sup>)判断模型拟合的好坏。C<sub>0</sub>表示随机变异的大小,主要有2个来源:最小取样间隔内自然过程造成的变异;试验误差。C为结构方差,表示由土壤母质、地形、气候等非人为因素引起的变异。(C<sub>0</sub>+C)是半变异函数达到的极限值,在该值附近的半变异函数值不再单调递增,而是围绕该值上下波动。如果变异函数的基台值存在则说明该空间变量平稳,可以认为基台值是该变量在研究区域的总变差。块金值/基台值[C<sub>0</sub>/(C<sub>0</sub>+C)]表示空间异质性程度,其值<25%时,表示变量具有强烈的空间自相关性;在25%~75%时,变量具有中等的空间自相关性;>75%时,变量的空间自相关性很弱;当该值接近100%时,说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。变程表示具有相似性质的斑块的空间连续性的范围,变程以内的空间变量具有空间自相关性,变程以外则不存在空间自相关。当某观察值之间的距离大于变程值时,说明它们之间相互独立;若小于变程值时,则说明它们之间存在一定的空间相关性。

2 结果与分析

2.1 坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的统计特征

由表1可知,坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的变异系数分别为0.44、0.18和0.95,都属于中等程度的变异,但其变化范围有所差异。土壤含水量的变化范围居中,为6.7%~71.1%;土壤容重的变化范围比较小,为0.68~1.51 g·cm<sup>3</sup>;土壤饱和导水率的变化范围最大,为0.04~64.40 m·d<sup>-1</sup>。土壤含水量最小值为6.7%,发生于上坡位置;土壤容重最小值为0.68 g·cm<sup>-3</sup>,发生于中下坡位置;土壤饱和导水率最大值为64.40 m·d<sup>-1</sup>,发生于中上坡位置。坡面表层土壤容重普遍偏小(均值为0.99

表 1 土壤含水量、容重和饱和导水率的描述性统计特征  
Table 1 Descriptive statistics characteristics of soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity ( $n = 130$ )

土壤性质 Soil property	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	标准差 SD	变异系数 CV	K-S 值 K-S value
含水量 Water content (%)	33.0	6.7	71.1	14.5	0.4	0.6
容重 Bulk density ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	0.99	0.68	1.51	0.18	0.18	0.01
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	13.18	0.04	64.40	12.53	0.95	0

$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), 土壤饱和导水率普遍偏高(均值为  $13.18 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ ). 进一步对土壤含水量、容重和饱和导水率数据进行单样本 K-S 检验, 检验结果分别为 0.58、0.01 和 0. 其中, 只有土壤含水量符合正态分布规律, 土壤容重与饱和导水率需要进行数据转换才能进行地统计学分析.

2.2 坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征

如果变量在采样尺度上具有空间依赖性(或者空间相关性), 半方差函数会随着滞后距的增加而增大, 并且在超过一定距离(变程)后逐渐趋近于基台值或围绕基台值波动<sup>[20-21]</sup>. 由图 2 可知, 坡面表层土壤含水量和自然对数化  $\ln K_s$  的土壤容重与饱和导水率均具有较明显的基台值. 由表 2 可知, 坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率最佳拟合模型的决定系数均很高, 土壤含水量的最佳拟合模型为高

斯模型, 土壤容重与饱和导水率的最佳拟合模型为指数模型; 土壤含水量、容重和饱和导水率的块金效应均为正值; 土壤含水量的块金值/基台值较小, 为 18.5%, 表现为强烈的空间自相关性; 土壤容重与饱和导水率的块金值/基台值较大, 分别为 25.7% 和 50.0%, 表现为中等的空间自相关性; 坡面土壤含水量与饱和导水率变程较小, 分别为 75.3 和 73.2 m, 土壤容重变程较大, 为 162.3 m, 超过网格范围.

2.3 坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间分布格局

为了更深刻、全面、直观地反映坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的分布特征, 基于半方差函数的建立, 利用 Kriging 插值方法绘制了坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的等值线图(基于坡地投影长  $90 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ ). 由图 3 并结合样地的高程图可知, 坡面表层土壤含水量沿坡面自上而下呈递

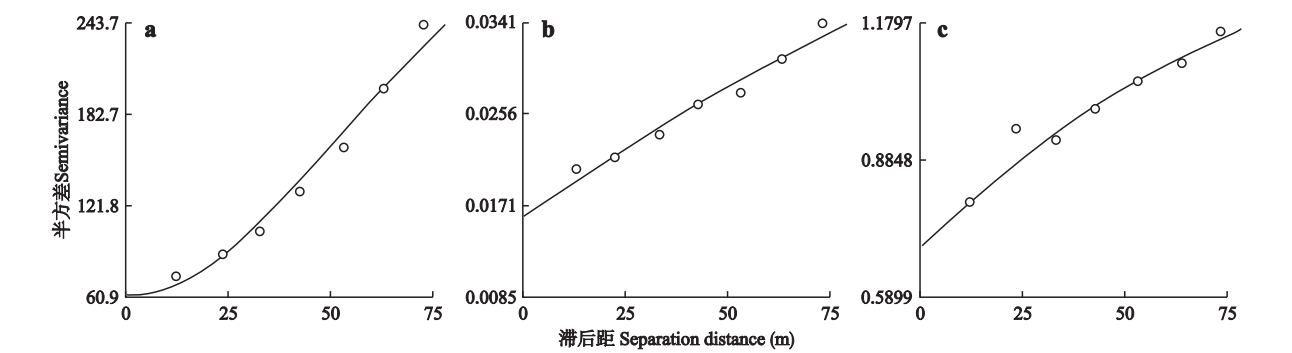


图 2 土壤含水量(a)、容重(b)和饱和导水率(c)的半变异函数图  
Fig. 2 Semivariograms of soil water content (a) and bulk density (b) and saturated hydraulic conductivity (c).

表 2 土壤含水量、容重和饱和导水率的半变异函数理论模型及其结构参数  
Table 2 Best-fitted semivariogram model and structure parameters of soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity

土壤性质 Soil properties	均值 Mean	块金值 Nugget	基台值 Sill	块基比 Nugget/sill (%)	变程 Range (m)	模型类型 Model type	决定系数 $R^2$
含水量 Water content (%)	33.0	61.8	334.5	18.5	75.3	高斯模型 Gaussian model	0.977
容重 Bulk density ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	0.99	0.016	0.062	25.7	162.3	指数模型 Exponential model	0.946
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	13.18	0.704	1.409	50.0	73.2	指数模型 Exponential model	0.915



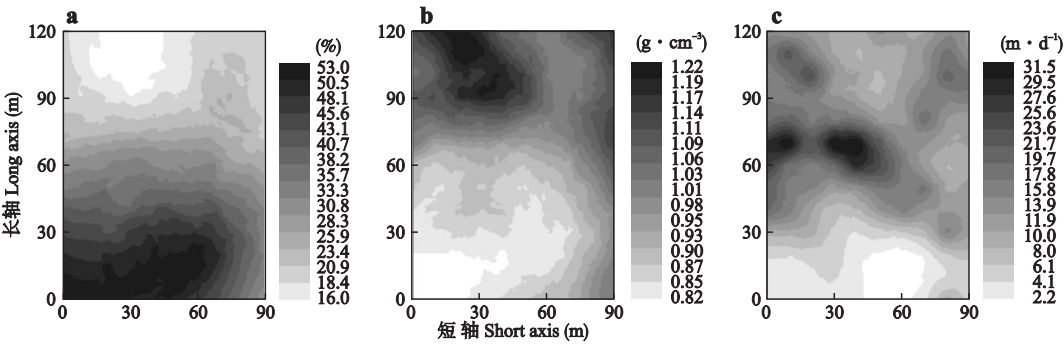


图3 土壤含水量(a)、容重(b)和饱和导水率(c)的空间分布  
Fig. 3 Spatial distributions of soil water content (a), bulk density (b) and saturated hydraulic conductivity (c).

增趋势,在坡脚处最大;土壤容重总体沿坡面自上而下呈递减趋势,在坡脚处最小,上坡位和样地右侧土壤容重较大;土壤饱和导水率在上坡位、中坡位变化非常强烈,斑块小而多,相近区域表层土壤饱和导水率大小差异明显,规律性不强,表现为高异质性,坡中位的平均导水率高于坡上和坡下位。

2.4 坡面表层土壤含水量、容重、饱和导水率的相关性分析

为了更深入地了解坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率之间的关系,利用 SPSS 18.0 对三者进行 Pearson 相关性分析。由表 3 可知,土壤含水量与容重和饱和导水率均呈极显著负相关( $P<0.01$ ),土壤容重与饱和导水率之间没有明显的相关性。

表3 土壤含水量、容重和饱和导水率的相关系数  
Table 3 Correlation coefficients of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity ( $n=130$ )

	容重 Bulk density	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity
含水量 Water content	-0.788 **	-0.250 **
容重 Bulk density		-0.035

\*\*  $P<0.01$ .

3 讨论

研究区坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的变化范围都较大,均属于中等程度的变异,这可能与研究区域的土壤质地较粗,为白云岩有关。土壤含水量最小值发生于上坡位置,可能是由于上坡碎石含量较高所致;土壤容重最小值发生于中下坡位置,可能是由于环刀所取土样比较松散、孔隙较大或者含有枯枝落叶的腐殖质所致;土壤饱和导水率最大值发生于中上坡位置,可能是由于土样有零星小石头或者发达根系影响所致。坡面表层土壤容重普

遍偏小(均值为  $0.99\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),明显低于黄土区坡面表层土壤容重(均值为  $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),土壤饱和导水率普遍偏高(均值为  $13.18\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ),明显高于黄土区坡面表层土壤饱和导水率(均值为  $0.66\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ ),具备良好的导水能力。其原因可能与研究区域的土壤为白云岩发育,质地较粗、大孔隙比较多、碎石含量较高有关<sup>[3]</sup>。坡面表层土壤容重与饱和导水率均不符合正态分布,本文采用自然对数函数对数据进行了转化,得到土壤容重和饱和导水率的 K-S 概率检验结果分别为 0.122 和 0.487,此时数据符合正态分布,可以进行地统计分析。

坡面表层土壤含水量和自然对数化的土壤容重与饱和导水率均具有较明显的基台值,说明坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率均具有明显的空间依赖性和空间结构。坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率最佳拟合模型的决定系数均很高,说明拟合模型能很好地反映土壤含水量、容重和饱和导水率的空间特征。块金值表示随机变异的大小,主要有两个来源:一是来源于最小取样间隔内的自然过程造成的变异,二是来源于实验误差<sup>[19,25-26]</sup>。土壤含水量、容重和饱和导水率的块金效应均为正值,说明存在一定的采样、试验误差。土壤含水量的块金值/基台值较小,表现为强烈的空间自相关性,说明在当前观测尺度上,随机因素对土壤含水量分布的贡献较小,其空间变异主要由土壤母质、地形、气候等自然因素(结构性变异)引起<sup>[21]</sup>;土壤容重与饱和导水率的块金值/基台值较大,表现为中等的空间自相关性,说明在当前观测尺度上,随机因素对土壤容重与饱和导水率的影响较大,可能与干扰、试验误差有关。变程反映了土壤性质在空间上的平均变异尺度,坡面土壤含水量与饱和导水率变程较小,其空间连续性的尺度范围较小;土壤容重变程较大,其空间连续性的尺度范围超过了采样范围,采样范围需要

进一步扩大。

研究区坡面表层土壤含水量沿坡面自上而下呈递增趋势,与以往对坡面土壤水分分布的结果一致<sup>[18,27]</sup>。土壤容重总体上沿坡面自上而下呈递减趋势,上坡位土壤容重较大可能是由于地质背景为白云岩风化的小碎石较多,而样地右侧土壤容重较大可能是由于有一条较大的侵蚀沟导致碎石较大。这与黄土高原表层土壤容重在坡面呈波状变化且无明显规律差别较大<sup>[3]</sup>,其原因可能与研究区坡面碎石含量较多有关。土壤饱和导水率表现为高异质性,坡中位的平均导水率高于坡上和坡下位,与黄土区坡面饱和导水率结论相反<sup>[3]</sup>。这可能是由于饱和导水率受地质背景、地形条件、植被类型等环境因子的综合影响,其在样地的空间分布特征复杂多变,而在下坡位沿坡向下逐渐降低,可能是由于碎石含量逐渐减少,且土壤淤积所致。

土壤含水量与容重呈极显著负相关,单位体积下含水越多,容重就越小,这与以往对土壤含水量与容重的研究结果一致<sup>[2,28]</sup>。土壤含水量与饱和导水率呈极显著负相关,说明土壤饱和导水率大,则土壤保持水分的能力就弱;相反,土壤则具有强的保水能力。这与黄土高原坡面表层土壤饱和导水率的波峰刚好对应土壤含水量的波谷的结论类似<sup>[27]</sup>。土壤容重与饱和导水率之间没有明显的相关性。这与黄土高原坡面表层土壤饱和导水率随容重的增加而减小的结论不相符<sup>[28]</sup>,可能是各种环境因子的综合作用,使研究区土壤水分物理性质的空间分布特征复杂多变。今后应加强对土壤水分物理性质空间格局机理的研究。

本研究利用经典统计及地统计方法较好地揭示了喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的基本空间分布格局,能有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响,所获得的数据可为该地区深层土壤水分动态模拟与预测提供理论依据,也可促进坡地产流、产沙和土壤侵蚀规律研究的深入开展,实现土壤水资源的合理利用。

## 参考文献

- [1] Western AW, Bloschl G, Grayson RB, *et al.* Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 1998, **205**: 20–37
- [2] Warrick AW, Nielsen DR. Spatial variability of soil physical properties in the field// Hillel D, ed. *Applications of Soil Physics*. New York: Academic Press, 1980: 319–344
- [3] Zheng J-Y (郑纪勇), Shao M-A (邵明安), Zhang X-C (张兴昌). Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in Loess Region. *Journal of Soil Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(3): 53–56 (in Chinese)
- [4] Cai Y-L (蔡运龙). Preliminary research on ecological reconstruction in Karst mountain poverty areas of southwest China. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 1996, **11**(6): 602–606 (in Chinese)
- [5] Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林). Soil water research in Karst areas of southwest China. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 2008, **29**(6): 734–738 (in Chinese)
- [6] Lü M-H (吕明辉), Wang H-Y (王红亚), Cai Y-L (蔡运龙). General review of soil erosion in the Karst area of southwest China. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2007, **26**(2): 87–96 (in Chinese)
- [7] Feng T (冯 腾), Chen H-S (陈洪松), Zhang W (张 伟), *et al.* <sup>137</sup>Cs profile distribution character and its implication for soil erosion on Karst slopes of southwest Guangxi. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(3): 593–599 (in Chinese)
- [8] Hao Z-C (郝振纯). A study of infiltration model for Loess Region. *Advances in Water Science* (水科学进展), 1994, **5**(3): 186–193 (in Chinese)
- [9] Mallarino AP. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**: 1473–1481
- [10] Zhang W (张 伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), *et al.* Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a typical Karst depression, northwest of Guangxi. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 1–8 (in Chinese)
- [11] Lian G (连 纲), Guo X-D (郭旭东), Fu B-J (傅伯杰), *et al.* Prediction of the spatial distribution of soil properties based on environmental correlation and geostatistics. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(7): 237–242 (in Chinese)
- [12] Ma F-Y (马风云), Li X-R (李新荣), Zhang J-G (张景光), *et al.* Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(5): 789–795 (in Chinese)
- [13] Wu J-G (邬建国). *Landscape Ecology: Pattern Process Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2007 (in Chinese)
- [14] Juran L, Okin GS, Alvarez L. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. *Biogeochemistry*, 2008, **88**: 73–88
- [15] Western AW, Zhou SL, Grayson RB, *et al.* Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrology processes. *Journal of Hydrology*, 2004, **286**: 113–134

[16] Wang S-Y (王淑英), Lu P (路 苹), Wang J-L (王建立), *et al.* Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: A case study in Pinggu County, Beijing. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(10): 4957–4964 (in Chinese)

[17] Sui P-F (隋鹏飞), Hao J-M (郝晋珉), Li S-Y (李双异), *et al.* The spatio-temporal variability of soil nutrients in Gongzhuling of Jilin Province. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(1): 7–12 (in Chinese)

[18] Zhang J-G (张继光), Chen H-S (陈洪松), Su Y-R (苏以荣), *et al.* Spatial variability of soil moisture on hillslope in cluster-peak depression areas in Karst region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(8): 54–58 (in Chinese)

[19] Zhang J-G (张继光), Chen H-S (陈洪松), Su Y-R (苏以荣), *et al.* Spatial variability of soil moisture content and reasonable sampling number in cluster-peak depression areas of Karst region. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20**(2): 114–117 (in Chinese)

[20] Zhang W (张 伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), *et al.* Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in Karst region in dry season. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(4): 554–562 (in Chinese)

[21] Liu L (刘 璐), Song T-Q (宋同清), Zeng F-P (曾馥平), *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrients in Karst area's Mulun National Nature Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1667–1673 (in Chinese)

[22] Liu S-J (刘淑娟), Zhang W (张 伟), Wang K-L (王克林), *et al.* Spatiotemporal heterogeneity and its formation causes of soil physical properties in Karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(9): 2249–2256 (in Chinese)

[23] Song T-Q (宋同清), Peng W-X (彭晚霞), Zeng F-P (曾馥平), *et al.* Vegetation succession rule and regeneration strategies in disturbed Karst area, northwest Guangxi. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 2008, **9**(5): 597–604 (in Chinese)

[24] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27**: 315–334

[25] Wang J (王 军), Fu B-J (傅伯杰), Qiu Y (邱扬), *et al.* Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchment on Loess Plateau: Semivariograms. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2000, **55**(4): 428–438 (in Chinese)

[26] Wang Z-Q (王政权). *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)

[27] Liu C-L (刘春利), Shao M-A (邵明安). Spatial variation of saturated hydraulic conductivity and soil water of the surface layer of a slope on the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2009, **7**(1): 13–18 (in Chinese)

[28] Lü D-Q (吕殿青), Shao M-A (邵明安), Liu C-P (刘春平). Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20**(3): 154–157 (in Chinese)

作者简介 张 川,男,1987 年生,硕士研究生.主要从事土壤物理研究,发表论文 1 篇. E-mail: deardi@163.com

责任编辑 杨 弘