

# 木论喀斯特自然保护区表层土壤矿物质的空间异质性

杜 虎<sup>1,2,3</sup>, 宋同清<sup>1,2</sup>, 彭晚霞<sup>1,2</sup>, 王克林<sup>1,2</sup>,  
刘 璐<sup>1,2,3</sup>, 鹿士杨<sup>1,2,3</sup>, 曾馥平<sup>1,2\*</sup>

(1. 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;

2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 为了探明喀斯特峰丛洼地土壤矿物质的分布规律, 为喀斯特地区植被恢复和生态重建提供参考, 该研究基于动态监测样地 (200 m × 100 m) 的网格取样分析, 采用经典统计学和地统计学方法研究了喀斯特木论自然保护区典型峰丛洼地表层 (0~20 cm) 土壤矿物质 (SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO) 的空间异质性。结果表明, 研究区土壤 6 种矿物质含量的差异及变异系数均较大, SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 占了土壤矿物质总量的 89.53%。不同矿物质具有不同的空间结构和最佳拟合模型, SiO<sub>2</sub> 和 MnO 呈中等空间自相关, 变程长, 空间连续性较好, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO 的空间自相关强烈, 变程较短。CaO 和 MgO 的 Kriging 等值线图相似, SiO<sub>2</sub> 反之, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈相似分布, MnO 的分布均匀。地形、微地貌、降雨、人为干扰特别是植被是土壤矿物质空间异质性的主要影响因素, 增加植物多样性和覆盖度能有效改善和合理利用喀斯特土壤矿物质资源。

**关键词:** 土壤, 矿物质, 统计学方法, 地统计学, 空间异质性, 木论自然保护区, 喀斯特

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.06.014

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-06-0079-06

杜 虎, 宋同清, 彭晚霞, 等. 木论喀斯特自然保护区表层土壤矿物质的空间异质性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 79-84.

Du Hu, Song Tongqing, Peng Wanxia, et al. Spatial heterogeneity of mineral compositions in surface soil in Mulun National Natural Reserve karst areas[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 79-84. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

土壤是一形态和演化过程都十分复杂的自然综合体, 受气候、生物、母质、地形、成土时间等成土因素的影响, 具有复杂性和时空变异性<sup>[1]</sup>。土壤矿物质构成土壤的骨骼, 对土壤的结构性、交换能力、肥力状况均有很大的影响。土壤中钙与 pH 值呈良好的正相关<sup>[2]</sup>, 镁对土壤胶体上重要盐基离子有吸附作用<sup>[3]</sup>, 铝水解产物的形成和转化对土壤发生和分类、土壤酸度及改良、腐殖质的形成及其稳定和收支平衡、土壤中营养元素和有毒物质的转化、土壤团粒结构的形成等方面产生深刻的影响, 土壤交换性铝与 pH 值有一定的负相关<sup>[4]</sup>, 铁氧化物是土壤结构体的胶结物质之一, 具有较高的活性<sup>[5]</sup>。铁铝氧化物对土壤有机质的稳定具有保持作用<sup>[6]</sup>。

土壤养分的空间分布格局是土壤在不同位置上的物

理、化学和生物过程相互作用的结果, 是土壤空间异质性的具体表现<sup>[7-8]</sup>。地统计学是在传统统计学基础上发展起来的空分析分析方法, 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, 而且可有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响<sup>[9-13]</sup>。国内外学者用地统计学对土壤属性空间变异进行了大量研究<sup>[14-18]</sup>, 但缺乏对土壤矿物质的空间异质性与分布格局的探索。本文以喀斯特木论国家级自然保护区的典型景观单元—峰丛洼地为尺度, 应用半变异函数和 Kriging 插值法分析了该区域土壤主要矿物质 (SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO) 的空间异质性和分布格局, 初步探讨其生态学过程, 这对西南喀斯特峰丛洼地土壤矿物质资源的有效利用和生态恢复重建具有重要意义。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 自然概况

木论自然保护区 (107°54'01"E-108°05'51"E, 25°07'01"N-25°12'22"N) 位于广西环江毛南族自治县西北部, 东西宽 19.80 km, 南北长 10.75 km, 林区总面积 89.69 km<sup>2</sup>, 属于中亚热带石灰岩区常绿落叶阔叶混交林生态系统, 是世界上喀斯特地貌区幸存连片面积最大、完好性保存最佳、原生性最强的喀斯特森林, 森林覆盖率达 94.8%, 其典型景观单元为峰丛洼地。研究区属中亚热带季风气候, 年均日照 1 451.1 h, 占一年可照时数(4 422 h) 的 32.8%, 月平均日照以 7 月份最多(190.7 h), 2 月份最少 (61.5 h),

收稿日期: 2010-09-06 修订日期: 2011-06-15

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目; 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX-2-YW-436); 国家科技支撑计划(2010BAE00739, 2009BAD6B008); 国家自然科学基金项目(31070425, 31000224, 30970508, U1033004); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205, XDA05070404); 中国科学院“西部之光”人才培养计划

作者简介: 杜 虎 (1986-), 男, 湖南长沙人, 主要从事生态恢复研究。长沙 中国科学院亚热带农业生态研究所, 410125。Email: dhx1009@163.com  
\*通信作者: 曾馥平 (1964-), 男, 湖北天门人, 研究员, 主要从事生态学研究。长沙 中国科学院亚热带农业生态研究所, 410125。

Email: fpzeng@isa.ac.cn

年均气温 19.3℃, 极端低温-5.0℃, 极端高温 36℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  年活动积温 6 260℃, 无霜期为 310 d。年均降水量 1 529.2 mm (海拔 420 m), 降水集中在 4~8 月, 占全年降水量的 73.7%, 年均相对湿度 79%, 干燥度为 0.69, 湿润度为 1.46。

研究区域为一典型的峰丛洼地, 面积 190.2  $\text{hm}^2$ , 其中洼地面积 11.8  $\text{hm}^2$ , 海拔最高处为 637.8 m, 最低处为 413.6 m。山坡岩石裸露率高达 90%, 只有一些零星分布的土壤, 平均坡度约 35°, 凹凸不平, 人为破坏少, 森林保存完好, 层次结构分明。洼地土层  $\geq 30$  cm, 岩石裸露率 25%, 零星分布, 人为破坏严重。区域内土壤类型简单, 主要为石灰土和零星分布的硅质土, 均属非地带性土壤。

## 1.2 样品采集与分析

通过勘测, 在研究区域设置一块投影面积为 200 m  $\times$  100 m 的样地(该样地已作为中国科学院环江喀斯特生态实验站动态监测样地)。2007 年 11 月 10-16 日采用规则网格法 (20 m  $\times$  20 m) 取样, 共获样点 50 个。在每个样点 3 m 半径范围内按 5 点取样(0~20 cm), 经混合后组成待测样品。用手持 GPS 定位。将土样带回实验室风干、过筛后分析土壤硅( $\text{SiO}_2$ )、铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、钙( $\text{CaO}$ )、镁( $\text{MgO}$ )、铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、锰( $\text{MnO}$ ), 具体分析方法见文献[19]。

## 1.3 数据处理

利用经典统计学和地统计学方法对样本数据进行分析处理, 使用的软件有 SPSS、GS<sup>+</sup>和 ArcGIS9.2。

### 1.3.1 半变异函数分析

半变异函数是地统计学特有的基本工具, 用来描述属性变量在空间上的差异程度, 它是距离的函数<sup>[20]</sup>。

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

式中,  $\gamma(h)$  为半变异函数值;  $h$  为两样本点的空间距离;  $N(h)$  为间距等于  $h$  的点对数;  $Z(x_i)$  为区域化变量  $Z$  在位置  $x_i$  的实测值;  $Z(x_i+h)$  为与  $x_i$  距离为  $h$  处样点的值。一般认为半变异函数只有在最大间隔的 1/2 内才有意义。本研

究中所有半变异函数的有效滞后距均设为最大滞后距的 1/2, 采用球状模型、指数模型和高斯模型进行拟合。

### 1.3.2 普通克里格插值

普通克里格法是最简单也是应用最广泛的一种插值方法, 在普通克里格插值中, 对于任意待估点(块段)  $x_0$  的实际值  $Z(x_0)$ , 其估计值  $Z^\#(x_0)$  通过该待估点(块段)周围的  $n$  个有效样点  $Z(x_i)$  的线性组合得到。

$$Z^\#(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中,  $\lambda_i$  为权重系数。在满足无偏条件下, 要使预测值的估计方差最小, 即

$$\sigma^2 = \text{Var}[Z(x_0) - Z^\#(x_0)] = \min \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 木论喀斯特自然保护区土壤矿物质含量经典统计描述

本文采用样本均值加减 3 倍标准差来识别特异值, 在此区间外的数据均定为特异值, 分别用最大和最小值代替<sup>[21]</sup>, 后续计算均采用处理后的原始数据。由表 1 可以看出, 土壤中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$  的含量差异很大, 其中  $\text{SiO}_2$  占绝对优势, 高达 67.02%, 其次为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 二者占了土壤矿物质含量的 89.53%, 其他矿物质含量较小; 各矿物质含量的变异系数较大, 在 21.01%~97.16% 之间, 土壤中的硅绝大多数存在于硅酸盐结晶或沉淀中, 不易解离, 变异系数相对较小, 仅为 21.01%。钙镁含量与母质、土壤的形成过程、土壤中有机的丰度及风化程度、淋溶作用等因素相关, 变异系数较高, 分别为 97.16% 和 56.95%, 而钙由于受植被和水分运动的影响较镁大<sup>[22]</sup>, 其变异系数大于  $\text{MgO}$ 。通过对偏度、峰度的观测以及采用 K-S 法进行非参数检验, 在 5% 的检验水平下, 除  $\text{CaO}$  需要进行对数转化外, 其他矿物质均服从正态分布。

表 1 木论喀斯特自然保护区土壤矿物质含量的描述性统计分析及其正态分布检验

Table 1 Results of soil minerals in Mulun National Natural Reserve for descriptive statistics and K-S test

土壤指标	样本数	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 值	分布类型
$\text{SiO}_2$	50	30.88	92.58	67.02	14.08	21.01	-0.385	-0.301	0.987	N
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	50	2.18	9.70	4.65	1.81	38.86	1.045	0.455	0.327	N
$\text{CaO}$	50	0.33	11.77	2.53	2.46	97.16	2.315	6.455	0.047	*
$\text{CaO}$	50	-0.49	1.21	0.25	0.38	148.81	0.438	-0.154	0.860	LN
$\text{MgO}$	50	0.32	4.19	1.63	0.93	56.95	0.711	0.041	0.378	N
$\text{Al}_2\text{O}_3$	50	5.27	18.68	9.54	3.40	35.67	1.219	0.955	0.119	N
$\text{MnO}$	50	0.03	0.37	0.14	0.08	56.73	1.140	2.097	0.489	N

注: \*表示  $\alpha < 0.05$ , 非正态分布; N 正态分布; LN 对数正态分布

### 2.2 木论喀斯特自然保护区土壤矿物质含量半变异函数

土壤特性空间异质性的经典统计分析中将土壤特性看作随机的、彼此相互独立的。然而实际中, 在一定的空间范围内, 土壤性状存在一定的空间依赖性。由表 2 和图 1 可看出, 研究区土壤矿物质  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  变异函数值的最佳拟合模型为球状模型,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MnO}$  的半变异函数符合指数模型,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  符合高斯模型, 决定系

数均很高, 在 0.782~0.988 之间, 能很好地反映土壤矿物质含量的空间结构特征。

土壤性状的空间异质性是结构因子和随机因子共同作用的结果。结构因子是指土壤形成过程中的成土母质、地形、地下水位及形成的土壤类型等, 随机因子是指土壤管理过程的施肥、种植的作物、耕作栽培措施等。结构因子通常促使土壤养分含量具有较强的空间相关性,

而随机因子使土壤的空间相关性减弱，一般认为块金值与基台值的比值  $C_0/(C_0+C) < 25\%$  时，空间变量为强烈的空间自相关，在  $25\% \sim 75\%$  之间时，为中等空间自相关， $> 75\%$  为弱空间自相关<sup>[23]</sup>。研究区  $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $MgO$  块金值与基台值的比值  $C_0/(C_0+C)$  在  $0.1\% \sim 20.5\%$  之间，空间自相关强烈， $SiO_2$  和  $MnO$  的块金值/基台值分别

为  $40.7\%$  和  $25.0\%$ ，空间自相关中等，均主要受结构因子影响。变程反映土壤性状的有效空间自相关距离，研究区  $MnO$  和  $SiO_2$  的变程较大，分别为  $608.7$  和  $189.0$  m，空间连续性较好，其他 4 种矿物质的变程在  $62.0 \sim 80.8$  m 之间，空间依赖性较强。

表 2 研究区土壤矿物质半变异函数模型类型及参数  
Table 2 Semivariogram theoretical models and parameters for soil minerals in study area

指标	模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0+C$	块金值/基台值 $C_0/(C_0+C)$	变程 $a/m$	决定系数 $R^2$	分维数 $D$
$SiO_2$	Exponential	105.300	258.900	0.407	189.0	0.988	1.861
$Fe_2O_3$	Gaussian	0.520	4.193	0.124	62.0	0.973	1.661
$CaO$	Spherical	0.0327	0.1794	0.182	80.6	0.986	1.740
$MgO$	Spherical	0.194	0.945	0.205	75.7	0.972	1.773
$Al_2O_3$	Spherical	0.010	16.180	0.001	80.8	0.987	1.630
$MnO$	Exponential	0.003	0.012	0.250	608.7	0.782	1.853

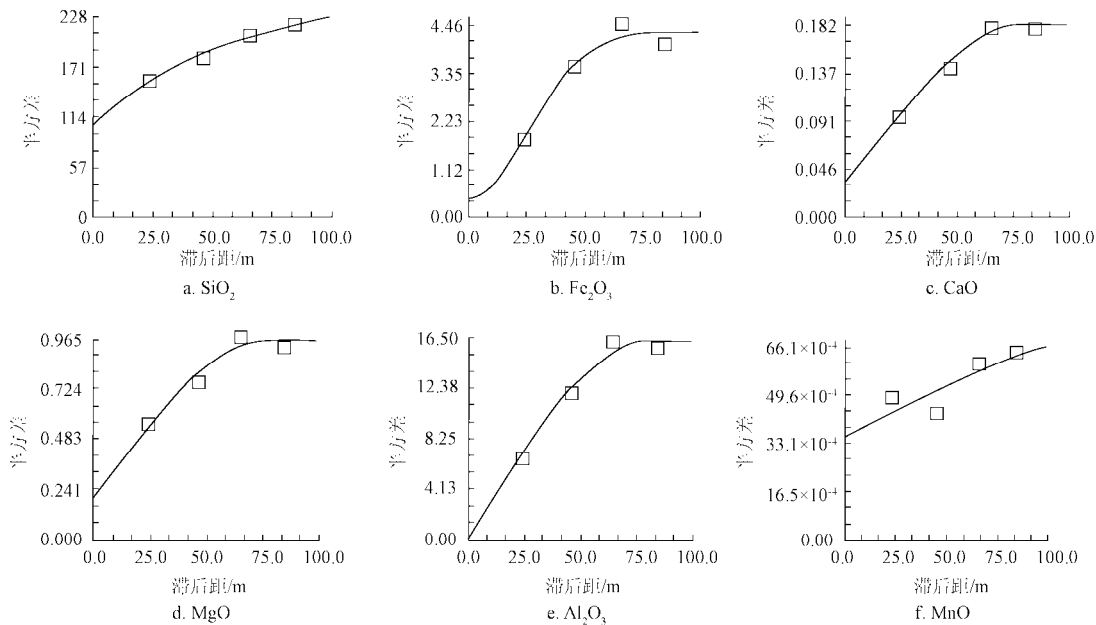


图 1 研究区土壤矿物质半变异函数

Fig.1 Semivariogram of soil minerals in study area

### 2.3 木论喀斯特自然保护区土壤矿物质空间分布格局

为了能更直观地反映研究区土壤参数的空间分布特征，根据半变异函数模型，利用 ArcGIS9.2 软件进行 Kriging 插值分析，分别绘制土壤  $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $MgO$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MnO$  等 6 种矿物质的空间分布格局图（图 2）。从中可以看出，研究区各土壤矿物质均具不同程度的空间分布格局。 $CaO$  和  $MgO$  具有相似的空间分布，受坡位和人为干扰的共同影响，西南坡和东北坡水土流失严重，含量较低。 $SiO_2$  的分布正好相反。 $Fe_2O_3$  和  $Al_2O_3$  的空间分布也相似。 $MnO$  的斑块均一，主要受地形的影响，东南方洼地的含量最低。

### 3 讨论

土壤矿物质是非常重要的土壤物质，占土壤固体部分的 95% 以上，其化学组成与成土条件和成土过程密切相

关，受成土母质、气候、地形等结构因子和生物、人为作用等随机因子的综合影响，其中母质和地形的影响较大。喀斯特木论自然保护区的主要成土母质为碳酸盐岩，岩石广泛出露的地层 95% 以上是石炭系的白云岩和石灰岩。白云岩的化学组成为  $CaMg(CO_3)_2$ ， $CaO$  和  $MgO$  的质量分数为  $31.6\%$  和  $21.9\%$ ，石灰岩为  $CaCO_3$ ， $CaO$  质量分数高达  $54.3\%$ ，2 种岩石中的  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  的质量分数均很低，仅为  $1.5\% \sim 2.0\%$ 。岩石在化学溶蚀过程中极易形成重碳酸钙、重碳酸镁而随水流失 ( $CaCO_3 + H_2CO_3 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$ ， $CaMg(CO_3)_2 + 2H_2CO_3 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2 + Mg(HCO_3)_2$ )<sup>[24]</sup>。保护区地处亚热带季风气候区，高温多雨的气候条件和“森林效应”形成的潮湿生态环境，加速了岩石溶蚀过程， $CaO$  和  $MgO$  的质量分数反而很低，仅为  $2.53\%$  和  $1.63\%$ ，变异系数很高。不过，岩石在溶蚀过程中生成的重碳酸钙、重碳酸镁源源不断的进入土体，减缓了脱硅富铝化作用，

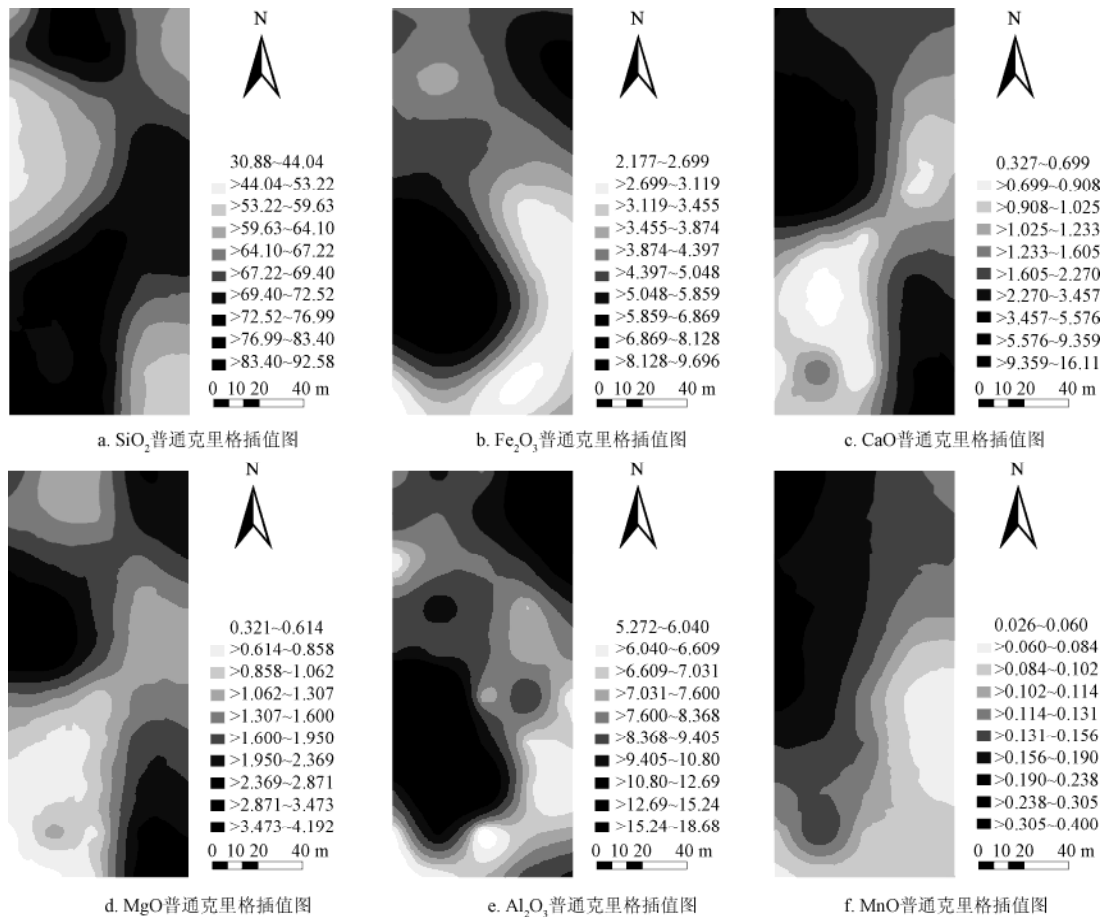


图2 研究区土壤矿物质 Kriging 等值线图

Fig.2 Kriging maps of spatial distribution of soil minerals in study area

又加上硅酸盐结晶而不易流失,  $\text{SiO}_2$  的质量分数高达 67.02%, 且变异较小,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 9.54%, 变异系数为 35.67%, 没有出现相同气候带下的地带性红壤明显的脱硅富铝化现象。

土壤矿物质可在一定程度上反映喀斯特地区土壤石漠化的类型和程度。一般来说, 产生了石漠化现象的土壤  $\text{SiO}_2 > 70\%$ 、 $\text{CaO} > 5.0\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 4.0\%$ 、 $\text{MgO} < 0.9\%$ , 尚未发生石漠化的土壤  $\text{SiO}_2 < 65\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 7.0\%$ 、 $\text{MgO} > 1.0\%$ , 且随着石漠化的加重, 土壤中  $\text{SiO}_2$  明显升高,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  等成分不断降低。石漠化导致土壤的形成速度减缓, 发育程度变弱<sup>[25]</sup>。喀斯特木论自然保护区 1996 年建立, 人为干扰停止 11 a 后, 各种矿物质含量渐趋合理, 石漠化治理的效果开始体现。

基于前期对喀斯特土壤主要养分和水分的空间异质性研究, 本文进一步对喀斯特木论自然保护区典型峰丛洼地土壤矿物质含量进行分析发现, 不同矿物质的空间异质性、半变异函数的拟合模型不同, 但决定系数均较高。 $\text{SiO}_2$  和  $\text{MnO}$  呈中等空间自相关, 变程较大, 连续性较好。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  的空间自相关强烈, 主要受结构性因子的影响, 变程在 62.0~80.8 m 之间, 不确定性或复杂性较高, 但比土壤主要养分和水分稳定。空间异质性导致空间格局的存在, Kriging 等值线图能更深刻、全面和直观地反映土壤矿物质的空间分布。研究区

$\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  的空间分布一致,  $\text{SiO}_2$  反之, 均受地形和人文干扰的共同制约,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的空间分布相似, 影响因素复杂,  $\text{MgO}$  呈较均匀的空间分布, 主要受地形的影响, 洼地含量最低。

以贵州为中心连带成片的中国西南喀斯特地区(世界三大岩溶地区之一)受地球内动力、强烈的地质运动、高温多雨且分布不均、碳酸盐岩溶蚀性强、水文二维结构明显以及其适生植物具有嗜钙性、耐旱性和石生性等限制特点的综合影响, 生境和植被具有高度异质性, 生态系统的稳定性和抗干扰性差, 退化容易恢复难<sup>[26]</sup>。土壤固体组成的主要成分即矿物质更易流失, 减少干扰、实施退耕还林还草工程、增加植被覆盖度将对土壤矿物质具有良好的保持和调控作用, 促进喀斯特脆弱生态系统植被的迅速恢复和生态重建。

#### 4 结论

1) 木论喀斯特自然保护区土壤矿物质中  $\text{SiO}_2$  含量占绝对优势,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  次之, 二者占了土壤矿物质含量的 89.53%, 矿物质含量顺序依次为  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{MnO}$ , 各矿物质含量的变异系数较大, 在 21.01%~97.16% 之间。

2) 地统计分析结果表明,  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  变异函数值的最佳拟合模型为球状模型,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MnO}$  的半变

异函数符合指数模型,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  符合高斯模型; 6 种矿物质主要受结构性因子的影响, 其中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  受结构因子影响最大, 其次为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{SiO}_2$ , 除  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MnO}$  呈中等空间自相关外, 其他矿物质空间自相关强烈;  $\text{MnO}$  和  $\text{SiO}_2$  的空间连续性较好, 其他矿物质的变程较小且相近。

3) 通过 Kriging 插值分析制图, 将土壤矿物质含量的点数据转化为面数据, 直观地反映了研究区 6 种土壤矿物质在水平空间上的分布特征, 木论喀斯特自然保护区土壤  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$  及  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的 Kriging 等值线图相似, 其分布格局主要受坡位和人为干扰共同的影响,  $\text{MnO}$  主要受地形的影响。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王炜明. 基于 GIS 的地统计学方法在土壤科学中的应用[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5):404—408.  
Wang Weiming. Utilization of geo-statistic with GIS in soil sciences[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5):404—408. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱礼学. 土壤 pH 值及  $\text{CaCO}_3$  在多目标地球化学调查中的研究意义[J]. 四川地质学报, 2001, 21(4):226—228.  
Zhu Lixue. Significance of pH value and  $\text{CaCO}_3$  of soil to multipurpose geochemical survey[J]. Acta Geologica Sichuan, 2001, 21(4):226—228. (in Chinese with English abstract)
- [3] 汪洪. 土壤镁素研究的现状和展望[J]. 土壤肥料, 1997, 34(1):9—13.  
Wang Hong. Research present state and perspectives of soil magnesium nutrition[J]. Soils and Fertilizers, 1997, 34(1):9—13. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘勋鑫, 肖润林, 王翠红, 等. 桂西北环境移民安置区果园土壤铝形态的空间变异性研究[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(3):354—356.  
Liu Xunxin, Xiao Runlin, Wang Cuihong, et al. Spatial variability of aluminum form of orchard soil in demonstration area of environmental immigrants of northwest Guangxi[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(3):354—356. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王改改, 傅瓦利, 魏朝富, 等. 消落带土壤铁的形态变化及其对有效磷的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1):66—70.  
Wang Gaigai, Fu Wali, Wei Chaofu, et al. Iron transformation and phosphorus availability in a drawdown area of three gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(1): 66—70. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郭杏妹, 吴宏海, 罗媚, 等. 红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6):515—520.  
Guo Xingmei, Wu Honghai, Luo Mei, et al. The morphological change of Fe/Al-oxide minerals in red soils in the process of acidification and its environmental significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(6):515—520. (in Chinese with English abstract)
- [7] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review[J]. Catena, 1998, 32(3/4): 155—172.
- [8] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2001, 22(1):1—5.  
Wang Guoliang, Liu Guobin, Xu Mingxiang. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of loess hilly region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 22(1): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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.
- [10] Wang H Q, Hall C A S, Cornell J D, et al. Spatial dependence and the relationship of soil organic carbon and soil moisture in the luquillo experimental forest, Puerto Rico[J]. Landscape Ecology, 2002, 17(8):671—684.
- [11] 黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展[J]. 土壤肥料, 2002, 39(1):8—14.  
Huang Shaowen, Jin Jiyun. Advance in study on spatial variability of soil properties[J]. Soils and Fertilizers, 2002, 39(1):8—14. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李海滨, 林忠辉, 刘苏峡. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用[J]. 地理研究, 2001, 20(4):446—452.  
Li Haibin, Lin Zhonghui, Liu Suxia. Application of Kriging technique in estimating soil moisture in China[J]. Geographical Research, 2001, 20(4):446—452. (in Chinese with English abstract)
- [13] 贾晓红, 李新荣, 张志山. 沙冬青群落土壤有机碳和全氮含量的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12):2266—2270.  
Jia Xiaohong, Li Xinrong, Zhang Zhishan. Spatial heterogeneity of soil organic carbon and nitrogen under *Ammopiptanthus mongolicus* community in arid desert zone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12):2266—2270. (in Chinese with English abstract)
- [14] Herbst M, Diekkruger B. Modelling the spatial variability of soil moisture in a micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(6):239—245.
- [15] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1):98—104.  
Song Tongqing, Peng Wanxia, Zeng Fuping, et al. Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in mulun national natural reserve in karst area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1):98—104. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异[J]. 生态学报, 2007, 27(12):5168—5175.  
Zhang Wei, Chen Hongsong, Wang Kelin, et al. Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a typical Karst depression, northwest of Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12):5168—5175. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘国华, 傅伯杰, 吴钢, 等. 环渤海地区土壤有机碳库及其空间分布格局的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9):1489—1493.

- Liu Guohua, Fu Bojie, Wu Gang, et al. Soil organic carbon pool and its spatial distribution pattern in the Circum Bohai Region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9):1489-1493. (in Chinese with English abstract)
- [18] 姜勇, 张玉革, 闻大中, 等. 沈阳市郊耕地土壤交换性铁含量的空间异质性[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1):119-121.  
Jia Yong, Zhang Yuge, Wen Dazhong, et al. Spatial heterogeneity of exchangeable iron content in cultivated soils of Shenyang Suburbs[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(1):119-121. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [20] 张少良, 张兴义, 崔战利. 哈尔滨市辖区黑土有机质、全氮的空间异质性分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(3):333-337.  
Zhang Shaoliang, Zhang Xingyi, Cui Zhanli. The spatial variability of organic matter and total nitrogen contents in black soil Region of Harbin[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2007, 23(3):333-337. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征[J]. 地理研究, 2004, 23(1):163-170.  
Liu Fucheng, Shi Xezheng, Yu Dongshen, et al. Characteristics of spatial variability in the typical area of Taihu of total soil nitrogen Lake basin[J]. Geographical Research, 2004, 23(1):163-170. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 等. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子即溶蚀率对比研究[J]. 生态学报, 2004, 24(6):1131-1139.  
Li Enxiang, Jiang Zhongcheng, Cao Jianhua, et al. The comparison of properties of Karst soil and Karst erosion ratio under different successional stages of Karst vegetation in Nongla, Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6):1131-1139. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张兴义, 隋跃宇, 张少良, 等. 薄层农田黑土全量碳及氮磷钾含量的空间异质性[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2):1-5.  
Zhang Xingyi, Sui Yueyu, Zhang Shaoliang, et al. Spatial heterogeneities of total carbon, nitrogen, phosphorus and potassium content in black thin-layer soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(2):1-5. (in Chinese with English abstract)
- [24] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [25] 中国科学院南京土壤研究所编. 中国土壤系统分类土壤物理和化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [26] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 等. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式[J]. 生态学报, 2008, 28(2):811-820.  
Peng Wanxia, Wang Kelin, Song Tongqing, et al. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):811-820. (in Chinese with English abstract)

## Spatial heterogeneity of mineral compositions in surface soil in Mulun National Nature Reserve karst areas

Du Hu<sup>1,2,3</sup>, Song Tongqing<sup>1,2</sup>, Peng Wanxia<sup>1,2</sup>, Wang Kelin<sup>1,2</sup>, Liu Lu<sup>1,2,3</sup>, Lu Shiyang<sup>1,2,3</sup>, Zeng Fuping<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi Zhuang Autonomous Region, 547100, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to explore the distribution pattern of the main soil mineral components in karst cluster-peak depression area and to guide vegetation restoration and ecological reconstruction in the area, the spatial heterogeneity of mineral components (SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and MnO) in surface soil (0-20cm) in Mulun National Nature Reserve was studied by the methods of classical statistics and geostatistics. The soil samples were collected with grid method based on a dynamic monitoring plot (200 m × 100 m) in Mulun National Nature Reserve karst cluster-peak depression area. The results showed that the content differences of the six mineral components were large, and the sum of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> accounted for 89.53% of the total six mineral components. The variance coefficients of all the six mineral compositions were large. The spatial patterns of the six mineral components were quite different from each other, and fit to different models of mineral components. Both SiO<sub>2</sub> and MnO had medium spatial autocorrelation with long range and well spatial continuum. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, and MgO were characterized by strong spatial autocorrelation with short ranges. The Kriging contour maps indicated that the distribution pattern of CaO and MgO were similar, but opposite to that of SiO<sub>2</sub>. And the distribution pattern of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was similar with that of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, while MnO was in a relative homogeneous distribution status. The results indicated that topography, micro-physiognomy, precipitation, the history of human disturbance, and especially vegetation were the most important factors that affecting the spatial patterns of soil mineral components in karst cluster-peak depression region. Therefore, increasing plant diversity and vegetation coverage would be of great importance for effective improvement and rational utilization of soil mineral resources.

**Key words:** soils, minerals, statistical methods, geostatistics, spatial heterogeneity, Mulun National Nature Reserve, Karst area