

## 喀斯特峰丛洼地人工林土壤矿质成分的空间变异特征

欧阳资文<sup>1,2,3</sup>, 宋同清<sup>1,3</sup>, 彭晚霞<sup>1,3</sup>, 杜虎<sup>1,3</sup>, 曾馥平<sup>1,3\*</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,湖南 长沙 410125; 2.湖南农业大学 生物科学技术学院,湖南 长沙 410128; 3.中国科学院 环江喀斯特生态系统观测研究站,广西 环江 547100)

**摘要:** 基于动态监测样地(200 m×40 m)的网格取样分析,采用经典统计学和地统计学方法研究喀斯特峰丛洼地人工林地表层土壤(0~20 cm)主要矿质成分(SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO)的空间变异特征。结果表明:喀斯特峰丛洼地人工林地表层土壤6种主要矿质成分含量从大到小依次为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、MnO,变异系数为6.90%~28.89%;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO的半变异函数最佳拟合模型为球状模型,SiO<sub>2</sub>和MnO的为高斯模型,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的为指数模型;MgO和CaO呈中等空间自相关,其他成分空间自相关强烈;SiO<sub>2</sub>与MnO及MgO与CaO Kriging的等值线图相似,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的均呈零星斑块分布。

**关键词:** 喀斯特峰丛洼地;人工林;土壤矿质成分;空间变异

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2011)03-0325-04

## Spatial heterogeneity of soil main mineral composition in manmade forest in karst peak-cluster-depression region

OUYANG Zi-wen<sup>1,2,3</sup>, SONG Tong-qing<sup>1,3</sup>, PENG Wan-xia<sup>1,3</sup>, DU Hu<sup>1,3</sup>, ZENG Fu-ping<sup>1,3\*</sup>

(1.Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

**Abstract:** The soil samples were collected with gridding method based on a dynamic monitoring plot (200 m × 40 m) in manmade forest of karst peak-cluster-depression region. By the methods of classical statistics and geostatistics, spatial heterogeneity of main mineral composition (SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO) in surface soil (0–20 cm) was studied. The differences of the six mineral compositions were large with SiO<sub>2</sub> having the highest contents followed by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, and MnO and the variance coefficients ranged from 6.90% to 28.89%. Spherical model fitted best for Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, and MgO, Gaussian model best for SiO<sub>2</sub> and MnO, and Exponential model best for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. MgO and CaO had medium spatial autocorrelation, while the others were characterized by strong spatial autocorrelation. The Kriging contour map of CaO was similar with that of MgO. The Kriging contour maps of SiO<sub>2</sub> and MnO were similar. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presented spatial distribution of fragmented patches.

**Key words:** karst peak-cluster-depression region; manmade forest; soil mineral composition; spatial heterogeneity

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、强烈的碳酸盐岩溶蚀、  
明显的水文二维结构以及其适生植物具有嗜钙性、

收稿日期: 2010-11-24

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX-2-YW-436); 国家科技支撑计划项目(2009BAD6C6B008, 2010BAE00739); 国家自然科学基金项目(31070425, 31000224, 30970508); 中国科学院“西部之光”人才培养计划

作者简介: 欧阳资文(1970—), 男, 湖南郴州人, 博士, 主要从事农业生态学和恢复生态学研究, ouyang.ziwen@163.com; \*通信作者, fpzeng@163.com

耐旱性和石生性等限制特点的综合影响,土壤和植被性状均具有较高的异质性<sup>[1]</sup>。土壤矿质成分可在一定程度上反映土地荒漠化的类型和退化强度<sup>[2-3]</sup>,也可能是西南岩溶区植被生产力低和植被修复困难的限制因子<sup>[4]</sup>。

土壤属性变量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>[5]</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>[6-8]</sup>,但关于土壤矿质成分空间异质性与分布格局的研究甚少。笔者对广西喀斯特峰丛洼地石漠化治理后人工林区土壤主要矿质成分( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ )的变异特征和分布规律进行分析,旨在为西南喀斯特峰丛洼地土壤矿物质资源的有效利用、石漠化治理和生态恢复重建提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域为广西环江毛南族自治县下南乡古周村( $24^{\circ}50'N, 107^{\circ}55'E$ )的石漠化综合治理人工林。此区域为封闭的峰丛洼地,最低点海拔376 m,与最高点海拔相差440 m,属亚热带季风气候,多年平均气温为 $16.5\sim 20.5^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量为1 389.1 mm。雨季平均持续130~140 d,主要集中在4—9月,以6月中旬至7月中旬降水最多,达350~460 mm,常出现涝灾;10月至次年3月为旱季,各月平均降水量在90 mm以下。一年内日照时数以2月最低,7月最高;日照率以3月最低,9月最高。土壤主要由碳酸盐岩发育的钙质石灰土。土地总面积 $186.7\text{ hm}^2$ ,其中耕地 $17.4\text{ hm}^2$ ,主要作物为玉米和大豆。耕地平均土层深度约100 cm,部分地段土深仅10 cm左右,石芽广泛露出。以山地为主,25°以上坡地占总面积的80%以上,平均土层深度20~40 cm。

### 1.2 土样采集与分析

通过勘测,在研究区设置1块投影 $200\text{ m}\times 40\text{ m}$ 的样地,其坡面为 $120\text{ m}\times 40\text{ m}$ ,洼地为 $80\text{ m}\times 40\text{ m}$ (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)。样本点的布设采用规则网格的方法。以 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 为取样尺度进行土壤取样,共获得样点80个。于2007年11月10—16日采样,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,并用手持GPS定位。土样风干、过筛后,测定土壤硅( $\text{SiO}_2$ )、铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、钙( $\text{CaO}$ )、镁( $\text{MgO}$ )、铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、锰( $\text{MnO}$ )的含量<sup>[9]</sup>。

### 1.3 数据处理

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,分别用最大值和最小值代替<sup>[10]</sup>,后续计算均采用处理后的原始数据。采用地统计学方法中的半变异函数分析及普通克里格法(Kriging)<sup>[11]</sup>进行空间分析。半变异函数中基台值( $C_0+C$ )通常表示系统内的总变异(包括结构性变异和随机性变异)。块金值和基台值受自身因素和测量单位的影响较大,不能用于比较不同变量间的随机变异,但块金值与基台值之比反映了块金方差占总变异的大小和土壤属性的空间依赖性,一般认为比值 $<25\%$ 时,表示变量具有强烈的空间自相关性;比值为 $25\%\sim 75\%$ 时,变量具有中等的空间自相关性;比值 $>75\%$ 时,变量的空间自相关性很弱<sup>[12]</sup>。

土壤矿质成分的描述性统计分析采用SPSS 16.0软件。在GS+7.0中用理论模型对土壤矿质成分指标的半变异函数进行拟合。Kriging等值线图采用ArcGIS9.2制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤矿质成分描述性统计

土壤矿质成分描述性统计分析(表1)表明,土壤中 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 的矿质成分含量差异很大, $\text{SiO}_2$ 占绝对优势,其含量高达48.62%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 次之,二者构成了土壤的主要矿质成分,约占土壤矿质成分总含量的66.85%。土壤矿质成分含量从大到小依次为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$ ,这与龙健等<sup>[13]</sup>在贵州喀斯特地区研究得出的结论基本一致。因人为干扰比较均衡,研究区土壤生态系统处于一种相对均匀状态,6种矿质成

分的变异比较平缓, 变异系数为6.90%~28.89%, 其中钙的含量出现了较高的变异(28.89%), 分析其原因, 可能与母质、土壤的形成过程、土壤中有有机质的丰度及风化程度、淋溶作用等因素相关<sup>[14]</sup>。钙和镁受水分流失和土壤侵蚀的影响很大, 其含量分别

只有0.45%和0.87%。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MgO需要进行对数转化外, 其余5种矿质成分均呈正态分布, 满足地统计学分析的要求。

表1 研究区土壤矿质成分含量的描述性统计分析及正态分布检验

Table 1 Descriptive statistics and K-S test for soil mineral nutrients in the studied area

矿质成分	样本数/个	最小值/%	最大值/%	平均值/%	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S值
SiO <sub>2</sub>	80	42.92	59.48	48.62	3.48	7.16	1.138	1.173	0.132
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80	5.74	8.88	7.32	0.59	8.06	0.016	0.973	0.313
CaO	80	0.18	0.84	0.45	0.13	28.89	0.337	0.799	0.495
MgO	80	0.79	1.08	0.87	0.06	6.90	1.311	1.433	0.037
MgO*	80	-0.11	0.03	-0.06	0.03	-50.00	1.141	0.903	0.069*
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	80	10.30	26.17	18.23	2.59	14.21	-0.626	2.074	0.334
MnO	80	0.25	0.60	0.37	0.08	21.62	20.473	0.808	0.086

\* 对数据进行log转换达到正态分布。

## 2.2 土壤矿质成分含量半变异函数分析

由表2可以看出, 研究区土壤矿质成分Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO的半变异函数值的最佳拟合模型为球状模型, SiO<sub>2</sub>和MnO的最佳拟合模型为高斯模型, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的最佳拟合模型为指数模型。除Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>决定系数为0.105外, 其余5种矿质成分的决定系数为0.659~0.988, 说明模型能很好地反映土壤矿质成分的空间结构特征。

研究区Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、MnO块金值与基

台值的比值为0.3%~23.9%, 空间自相关性强烈<sup>[15]</sup>, MgO和CaO的块金值/基台值分别为34.8%和49.8%, 空间自相关中等<sup>[15]</sup>。6种矿质成分主要受结构性因子的影响, 其中Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>受结构因子影响最大, 其次为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO受结构因子影响最小。变程反映土壤性状的有效空间相关距离, 研究区MnO和SiO<sub>2</sub>的变程较大, 分别为223.6、204.9 m, 空间连续性较好, 其他4种矿质成分含量的变程为20.1~83.0 m。SiO<sub>2</sub>、CaO、MgO、MnO的分维数较小, 空间依赖性较强。

表2 研究区土壤矿质成分的半变异函数模型类型及参数

Table 2 Theoretical models and parameters for semivariogram of soil mineral nutrients in the studied area

矿质成分	函数模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程	决定系数	分维数
SiO <sub>2</sub>	高斯	4.450	26.670	0.167	204.9	0.988	1.703
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	球状	0.001	0.320	0.003	23.0	0.659	1.963
CaO	球状	0.010	0.021	0.498	83.0	0.835	1.875
MgO	球状	0.001	0.004	0.348	46.3	0.914	1.882
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	指数	0.870	7.038	0.124	20.1	0.105	1.966
MnO	高斯	0.003	0.014	0.239	223.6	0.935	1.787

## 2.3 土壤矿质成分空间分布格局

利用ArcGIS9.2软件地统计分析模块中的Kriging插值分析制作土壤CaO、MgO、SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO 6种矿质成分的空间分布格局图(图略)。SiO<sub>2</sub>和MnO呈相似的凹形分布, CaO和MgO也具有相似的空间分布。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的变化强烈, 斑块较分散, 规

律性不强, 与石漠化治理前受到强烈的人为干扰和严重的土壤侵蚀有关。

## 3 结论与讨论

土壤矿质成分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,其中母质和地形受影响较大。喀斯特峰丛洼地石漠化治理区人工林土壤矿质成分中 $\text{SiO}_2$ 含量占绝对优势, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 次之,三者是土壤的主要矿质成分。本研究中6种矿质成分含量从高到低依次为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MnO}$ 。一般石漠化严重的土壤, $\text{SiO}_2$ 含量大于70.0%, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量小于4.0%, $\text{MgO}$ 含量小于0.9%;石漠化较弱或尚未发生石漠化的土壤, $\text{SiO}_2$ 含量小于65.0%, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量大于7.0%, $\text{MgO}$ 含量大于1.0%<sup>[13]</sup>。从本研究中土壤矿质成分含量可以看出,研究区石漠化现象得到了缓解。

通过空间结构分析可以看出, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 的半变异函数最佳拟合模型为球状模型, $\text{SiO}_2$ 和 $\text{MnO}$ 的为高斯模型, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的为指数模型;结构因子是影响喀斯特峰丛洼地人工林土壤矿质成分空间分布的主要因子,其中 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 受结构因子影响最大,其次为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{CaO}$ 受结构因子影响最小。除 $\text{MgO}$ 和 $\text{CaO}$ 呈中等空间自相关外,其他矿质成分空间自相关强烈。 $\text{MnO}$ 和 $\text{SiO}_2$ 的空间连续性较好,其他矿质成分的变程较小且相近。 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 的分维数较小,空间依赖性较强。通过Kriging插值分析制图,将土壤矿质成分的点数据转化为面数据,直观地反映了研究区6种土壤矿质成分在空间上的分布特征, $\text{SiO}_2$ 与 $\text{MnO}$ 及 $\text{CaO}$ 与 $\text{MgO}$ 的空间分布相似,而 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的呈零星的斑块状分布。喀斯特峰丛洼地人工林土壤矿质成分空间分布格局主要受成土母质、地形、人为干扰和植被等因素的影响。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郑顺安,常庆瑞,齐雁冰.黄土高原不同林龄土壤质地和矿质元素差异研究[J].干旱地区农业研究,2006,

- 24(6): 94-97.
- [3] 龙健,黄昌勇,李娟.喀斯特山区土地利用方式对土壤质量演变的影响[J].水土保持学报,2002,16(1): 76-79.
- [4] 张信宝,王克林.西南碳酸盐岩石质山地土壤-植被系统中矿质养分不足问题的思考[J].地球与环境,2009,37(4): 337-341.
- [5] Huggett R J. Soil chronosequences soil development and soil evolution: A critical review[J]. Catena, 1998, 32: 155-172.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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: 239-245.
- [9] 刘光崧.中国生态系统研究网络观测与分析标准方法——土壤理化分析与剖面描述[M].北京:中国标准出版社,1996: 218-234.
- [10] 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.
- [11] 王政权.地统计学及其在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999: 65-132.
- [12] 刘璐,曾馥平,宋同清,等.喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J].应用生态学报,2010,21(7): 1667-1673.
- [13] 龙健,江新荣,邓启琼,等.贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J].土壤学报,2005,42(3): 419-427.
- [14] 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.
- [15] 欧阳资文,彭晚霞,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地土壤有机质的空间变化及其对干扰的响应[J].应用生态学报,2009,20(6): 1329-1336.

责任编辑: 杨盛强