

DOI: 10.5846/stxb201405100942

李莎莎, 范夫静, 宋同清, 黄国勤, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎. 西南峡谷型喀斯特区坡地土壤矿物质的空间分布特征. 生态学报, 2014, 34(18): 5320-5327.

Li S S, Fan F J, Song T Q, Huang G Q, Zeng F P, Peng W X, Du H. Spatial variation of soil minerals in the gorge Karst region, southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5320-5327.

西南峡谷型喀斯特区坡地土壤矿物质的空间分布特征

李莎莎^{1,2}, 范夫静^{1,2,3}, 宋同清^{1,2,*}, 黄国勤³, 曾馥平^{1,2}, 彭晚霞^{1,2}, 杜 虎^{1,2}

(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. 江西农业大学, 南昌 330045)

摘要: 探明峡谷型喀斯特土壤矿物质的分布规律可以为喀斯特地区植被恢复和生态重建提供参考。基于动态监测样地 (200 m × 300 m) 的网格取样, 采用经典统计分析和地统计学方法分析土壤矿物质 (SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 MnO) 的空间分布特征。结果表明, 研究区土壤矿物质含量差异较大, 但变异系数不大, SiO_2 和 Al_2O_3 占了土壤矿物质总量的 85.99%; SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 MnO 均服从正态分布, Fe_2O_3 、 CaO 分别经过平方和倒数转换后也服从正态分布。土壤各矿物质半变异函数的最佳拟合模型均为指数模型, 块金值与基台值比 $C_0/(C_0+C)$ 均较小, 具有中等或强烈的空间相关性, 表明空间变异主要由结构性因素引起; Al_2O_3 和 MnO 的变程较大, 空间连续性较好, 其它矿物质的变程较小且相近, 空间依赖性较强; Kriging 等值线图表明峡谷型喀斯特区土壤 SiO_2 和 MnO 具有相似的空间分布, 受坡位和人为干扰共同影响, 基本呈现坡顶高、坡脚低的分布格局; Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 的空间分布也相似, 斑块较破碎, 主要受地形的影响; Al_2O_3 的空间格局呈单峰分布, 沿海拔的升高而升高。因此, 减少干扰、增加植被覆盖对土壤矿物质具有良好的保持和调控作用。

关键词: 土壤矿物质; 组成特征; 空间分布; 峡谷型喀斯特

Spatial variation of soil minerals in the gorge Karst region, southwest China

LI Shasha^{1,2}, FAN Fujing^{1,2,3}, SONG Tongqing^{1,2,*}, HUANG Guoqin³, ZENG Fuping^{1,2}, PENG Wanxia^{1,2}, DU Hu^{1,2}

1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Karst Station for Ecosystem in Huanjiang, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

3 Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Nanchang 330045, China

Abstract: Spatial variation analysis of soil minerals is useful for ecological restoration and vegetation reconstruction. In this study, the spatial variation of soil minerals over a typical sloping farmland was investigated in a gorge karst region in southwestern China. The total study area (300 m × 200 m) was divided into grids of 20 m × 20 m and included 212 sample points. Soil minerals (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , and MnO), in surface soil were measured. The spatial patterns of soil minerals were analyzed with classical statistics and geostatistics methods. The differences of the content of the six minerals were large, but the variation coefficients were small. The sum of SiO_2 and Al_2O_3 accounted for 85.99% of the sum of the six mineral components. SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , and MnO , while Fe_2O_3 and CaO were normally distributed after square and reciprocal transformed, respectively. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , and MnO were best fitted by an Exponential model, with high coefficients (R^2) or low residual sum of squares (RSS) indicating that the fitted models could reflect the spatial variation of soil minerals. The nugget (C_0) was low (3.0%—43.6%), indicating that the soil minerals were strongly autocorrelated over the study region, and that their spatial patterns were influenced by structural factors. These spatial

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05070404); 国家自然科学基金项目 (31370485, U1033004)

收稿日期: 2014-05-09; 修订日期: 2014-08-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songtongq@163.com

patterns varied over a small range (25.5—210.3 m). The spatial ranges of SiO_2 and MnO were large and similar (210.3 m and 195.9 m, respectively), and other were relatively small with strong spatial dependence. On Kriging contour maps, SiO_2 and MnO had similar spatial pattern of high values on the slope top and low values on the bottom slope, and were affected by slope position and anthropogenic disturbances; the patches of the Fe_2O_3 , CaO and MnO were relatively homogeneous, and were mainly influenced by topography. Al_2O_3 posed a unimodal distribution, increasing along elevation ascending. Therefore, reducing disturbance and increasing vegetation would play good roles in protecting and regulating soil minerals.

Key Words: soil mineral; composition; spatial pattern; gorge karst region

土壤矿物质作为土壤的骨骼,占土壤固体部分的95%以上,是极其重要的组成部分^[1-2],对土壤的内部结构、交换能力和肥力状况等均有很大影响。土壤矿物质主要是受结构因子(母质、气候、地形等)和随机因子(生物、人类活动等)两种因素的综合作用,其中受结构因子中的母质和地形因素的影响最大^[3-4]。土壤中 CaCO_3 的含量在一定程度上与土壤 pH 值具有良好的正相关关系^[5]。众所周知,植物所需矿质元素对植物生长、发育有重要作用。矿质元素供应失调可引起植物生理性病害,植物体内的矿质元素变化还会引起其他生理变化,进而影响昆虫的取食,即能影响虫害的发生。此外,矿质元素与作物品质、产量有一定的关系。因此,了解和掌握土壤矿质元素的空间分布特征,有助于准确把握土壤发育程度、理化性状对植物营养成分的供应状况,以及植物生长所必需的哪些元素成为限制作物产量和质量的重要因素。

喀斯特地区生态环境脆弱、植被少,而且高温多雨、降雨季节集中,因而土壤淋溶强烈,水土流失严重,土层稀薄,土壤养分含量低^[6-7]。加上长期以来人为干扰的影响,导致植被严重破坏,水土流失加剧,土地严重退化,基岩大面积裸露,整个生态系统的功能发生改变或退化,制约了区域生态可持续发展。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^[8],不仅能有效揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,还可解释空间格局对生态过程与功能的影响^[9-12]。很多学者应用地统计学对土壤属性空间变异进行大量研究^[13-15],而对土壤矿物质的空间异质性研究较少^[16],特别是喀斯特地区。本文基于西南峡谷型喀斯特区坡地动态监测样地为研究对象,用经典统计学描述了土壤矿物质的组成特征,应用半变异函数和 Kriging 插值法分析该

区域土壤主要矿物质(SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 MnO)的空间异质性和分布格局,探讨其生态学过程,这对指导该区域乃至整个西南喀斯特地区土壤矿物质资源的有效利用、合理施用矿质养分肥料、促进土壤肥力提高和植被的快速修复具有重要的理论和实践意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区地处贵州省晴隆县孟寨河小流域,位于北纬 $25^{\circ}33'—26^{\circ}11'$ 、东经 $105^{\circ}01'—105^{\circ}25'$ 之间,最高海拔 2025 m,因受北盘江及其支流的强烈切割,切深长达 500—700 m,属深切切割岩溶侵蚀高原峡谷区。属于亚热带湿润季风气候,气候温和湿润,年平均气温 $14.0—15.9^{\circ}\text{C}$,年极端高温为 33.4°C ,最低气温为 -6.2°C ,日照时数 1453 h,无霜期 280 d 左右。年降水量 1 500—1 650 mm,集中在 6—9 月份,年蒸发量 1800 mm,空气相对湿度在 50% 以下。森林覆盖率为 25.1%,林草植被覆盖度为 27.8%,森林植被以阔叶林为主,针叶林次之。原生植被基本上被破坏,现为次生林。野生植物资源种类较多,主要有野生杨梅、花椒、百花刺、刺梨等。草地以放牧利用为主。土壤母质以碳酸盐岩为主,土壤类型主要为石灰土,地质结构复杂,地形起伏大,这为石漠化的发生提供了自然基础。该区石漠化面积 27.11km^2 ,其中轻度石漠化 12.80km^2 、中度石漠化 6.09km^2 、重度石漠化 8.21km^2 ,分布广,等级程度较高,且石漠化潜在威胁大。根据典型性、代表性原则,经反复勘查,在研究区内选取面积为 $300\text{m} \times 200\text{m}$ 的典型峡谷型喀斯特坡地,该坡地 2008 年退耕种草放羊,由于存在地表地下双层空间结构,小生境类型多样,且分布有 10%—15% 的不连续土被和部分裸岩石砾地(图 1)。

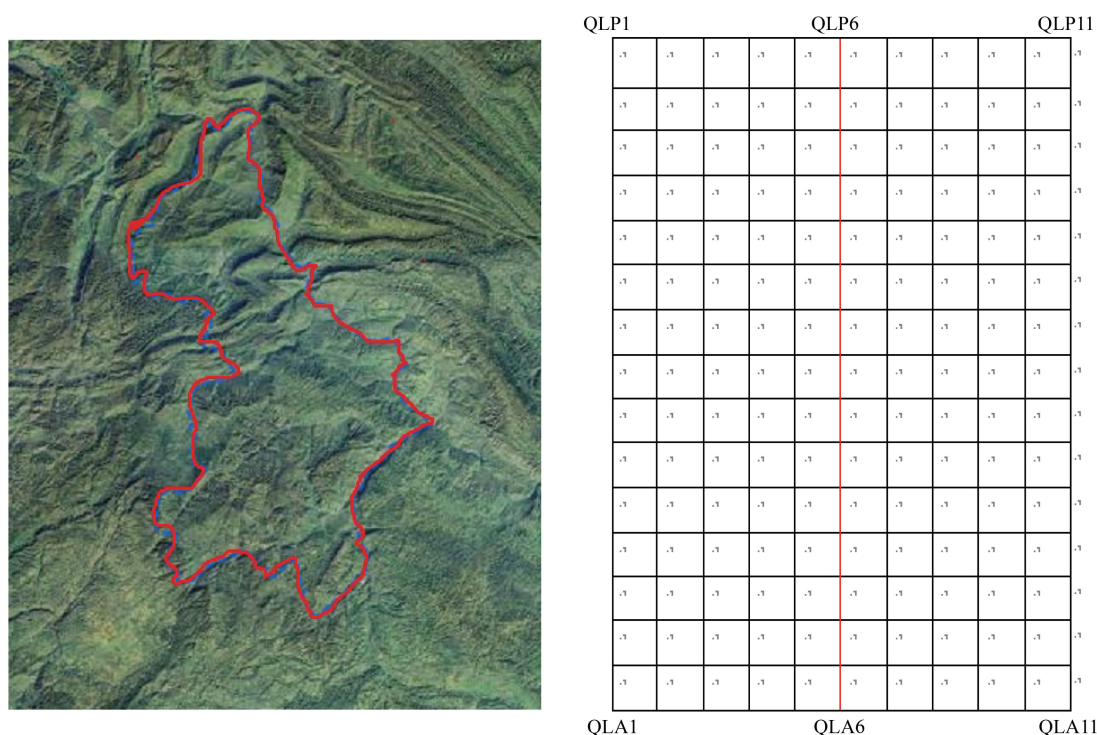


图1 研究区域和样点分布图

Fig.1 Maps of studied area and sample plots

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

2011年1月用森林罗盘仪将其划分为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的方格,进行规则网格法采样,共获得176个样点。采样时先去除地表凋落物,在每个样点周围 2 m 范围内随机采取5个 $0\text{—}20\text{ cm}$ 表层土样,采集的土样迅速带回实验室,除去土壤中可见的动植物残体,过 2 mm 筛,混匀,风干用于土壤矿质养分的测定。

1.2.2 样品分析

土壤 SiO_2 采用碳酸钠熔融-盐酸提取-质量法测定; Al_2O_3 采用碳酸钠熔融-盐酸提取-氟化钾取代EDTA容量法测定; Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 和 MnO 钙采用碳酸钠熔融-盐酸提取-原子分光光度法测定^[17]。

1.3 数据处理与统计分析

描述性统计分析在SPSS 13.0中完成。本文数据采用样本均值加减3倍标准差识别特异值,在此区间外的数据均定为特异值,分别用正常的最大值和最小值代替^[18],后续计算均采用处理后的数据。半方差函数分析在GS+中完成,地统计学有关方法及原理见文献^[19]。

2 结果与分析

2.1 峡谷型喀斯特区坡地土壤矿物质含量经典统计描述

由表1可看出,峡谷型喀斯特区坡地土壤中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 MnO 的含量差异较大,其中 SiO_2 占绝对优势,高达49.93%,其次为 Al_2O_3 ,二者占了土壤矿物质含量的85.99%,其它矿质含量较小;各矿物质含量的变异系数均不大,在10.32%—45.60%之间, SiO_2 的变异系数最小,仅为10.32%,这是由于土壤中绝大多数的硅存在于硅酸盐结晶或沉淀中,难以分解。土壤钙镁含量在温度高、较湿润且风化程度高的地区,由于土壤中可溶性钙、镁流失量大,含量较低;相反,在干燥寒冷、淋溶低的地区,土壤中钙、镁的含量相对较高。土壤钙镁受土壤母质、土壤的形成过程、土壤中有机的风化程度及淋溶作用等因素的影响^[20],变异系数较高,分别为45.60%和21.90%;而钙由于受植物和水分运动的影响较镁大^[16],其变异系数大于 MgO 。铁铝的聚集显示,在土壤的淋溶、迁移过程中,铁铝氧化物逐渐聚集。

经典统计很好地描述了土壤矿物质含量的总体

变化特征,概括了土壤矿物质变化的全貌,但无法反映其局部的变化特征,不能定量描述随距离而产生的空间变异及分布,需要进一步用地统计学方法进行分析研究。通过对偏度、峰度的观测及采用 $K-S$ 法进行非参数检验,在 5% 的水平下,峡谷型喀斯特区坡地土壤矿质养分 Fe_2O_3 和 CaO 分别需要进行平方和倒数转换后,均服从正态分布。

表 1 土壤矿物质的描述性统计分析
Table 1 Results of soil minerals for descriptive statistics and K-S tests

土壤矿物质 Soil minerals	最小值 Min. /%	最大值 Max. /%	均值 Mean /%	标准差 Standard variance	变异系数 Variance /%	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	K-S 值 Value of K-S test
SiO_2	29.85	78.90	49.93	5.15	10.32	0.359	6.937	0.091
Al_2O_3	8.35	29.20	12.99	3.12	24.03	1.733	6.636	0.123
Fe_2O_3	2.96	10.05	6.99	1.59	22.69	-0.678	0.100	0.047
Fe_2O_3^*	8.76	101.02	51.35	20.73	40.36	-0.089	-0.323	0.710
CaO	0.40	3.31	1.08	0.49	45.60	2.309	5.631	<0.01
$\text{CaO}^\#$	0.30	2.50	1.05	0.33	30.99	0.372	2.69	0.283
MgO	0.51	1.39	0.90	0.20	21.90	0.336	-0.603	0.126
MnO	0.16	2.49	1.28	0.53	41.31	0.106	-0.735	0.509

* 数据经过平方转换后服从正态分布;#数据经过倒数转换服从正态分布

2.2 峡谷型喀斯特区坡地土壤矿物质含量半变异函数
如表 2 和图 2 可看出,峡谷型喀斯特区坡地土壤矿物质 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 MnO 半变异函数的最佳拟合模型均为指数模型,决定系数 R^2 在 0.026—0.952 之间,结合残差平方和值 (RSS),说明理论模型较好地反映土壤矿物质含量的空间结构特征^[21]。

表 2 峡谷型喀斯特坡地土壤矿物质半方差函数的模型类型及参数
Table 2 Semivariogram theoretical models and parameters for soil minerals

土壤矿物质 Soil minerals	模型 models	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	拟合优度 R^2	残差平方和 RSS
SiO_2	指数	3.21	27.64	11.6	34.8	0.465	8.44
Al_2O_3	指数	4.25	9.88	43.0	210.3	0.876	1.44
Fe_2O_3	指数	1.00	354.3	3.0	68.4	0.895	1363
CaO	指数	0.0046	0.1002	3.0	25.5	0.026	0.0006
MgO	指数	0.0029	0.0389	7.5	48.9	0.630	0.00003
MnO	指数	0.137	0.314	43.6	195.9	0.952	0.00049

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%—75% 之间时,为中等空间自相关;>75% 为弱空间自相关^[15]。由表 2 可看出,矿物质元素含量的块金值与基台值比 ($C_0/(C_0+C)$) 在 3.0%—43.6% 之间,除 Al_2O_3 和 MnO 外均小于 25%,表明 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 均具有强烈的空间相关性。 Al_2O_3 和 MnO 的 $C_0/(C_0+C)$ 分别为 43.0% 和 43.6%,在 25%—75% 之间,为中等空间自相关,均主要受结构因子影响。变程 (A) 反映指标的有效自相关距离,研究区 Al_2O_3 和 MnO 的变程较大且接近,分别为 210.3 和 195.9 m,空间连续性较好,其他 4 种矿物质的变程在 25.5—68.4 m 之间,空间依赖性较强。

2.1.3 土壤矿物质的空间插值分析
为了能更直观地反映研究区土壤矿物质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 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 MnO 的空间分布格局图(图 3)。从中可以看出,研究区各土壤矿物质均具不同的空间分布格局。 SiO_2 和 MnO 具有相似的空间分布,斑块较大,受坡位和人为干扰的共同影响,坡顶含量较高,坡脚含量较低,而 MnO 在南下坡

出现高值区。 Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 的空间分布也相似,斑块较破碎,主要受地形的影响, Fe_2O_3 、 MgO 西

南方坡脚的含量最低。 Al_2O_3 的空间变化较平缓,斑块较大,呈单峰分布,沿海拔的升高而升高。

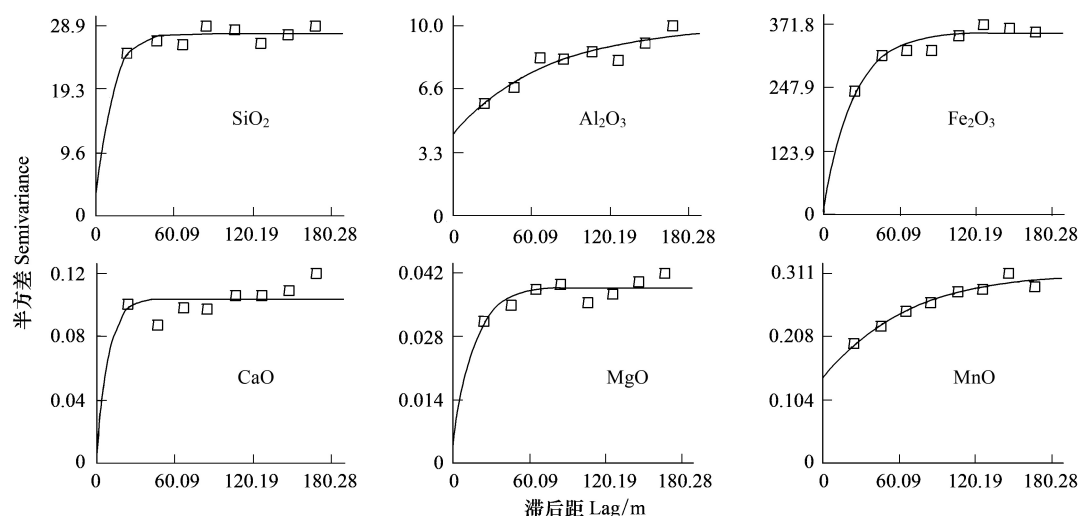


图2 土壤矿质养分的半方差函数图

Fig.2 Semivariograms of soil mineral substances

3 结论与讨论

3.1 讨论

土壤是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的特点^[22]。土壤矿物质是土壤非常重要的组成部分,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。峡谷型喀斯特区坡地土壤主要成土母质为碳酸盐岩,主要为石灰岩,岩石广泛出露的地层 95% 以上是石岩系的石灰岩。石灰岩的化学组成为 CaCO_3 , CaO 质量分数高达 54.3%, 岩石中 SiO_2 和 Al_2O_3 的质量分数很低,仅为 1.2%—2%。岩石在化学溶蚀过程中极易形成重碳酸钙、重碳酸镁并随雨水流失^[23]。研究区地处亚热带湿润季风气候区,常年高温多雨,形成了潮湿生态环境,加速了岩石的溶蚀过程, CaO 和 MgO 的质量分数反而很低,仅为 1.08% 和 0.90%,变异系数较高。 SiO_2 的质量分数达 49.93%,且变异最小 10.32%, Al_2O_3 为 12.99%,变异系数为 24.03%,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,这是由于岩石溶蚀过程中产生的重碳酸钙/镁减缓了脱硅富铝作用和硅酸盐结晶不易流失所致^[16]。

与喀斯特木论自然保护区典型峰丛洼地土壤矿

物质相比^[16],西南峡谷型喀斯特坡地土壤矿物质 SiO_2 、 CaO 、 MgO 含量较低, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 含量较高,表明喀斯特不同区域土壤矿物质含量也不相同,尽管其土壤母质一致,但因其植被类型、人为干扰强度所致。土壤矿物质的组成在一定程度上反映了土壤石漠化的类型和强度^[5, 24-25]。一般来说,土壤 $\text{SiO}_2 > 70\%$ 、 $\text{CaO} > 5.0\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 4.0\%$ 、 $\text{MgO} < 0.9\%$ 表明产生了石漠化现象,土壤 $\text{SiO}_2 < 65\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 7.0\%$ 、 $\text{MgO} > 1.0\%$ 尚未发生石漠化,且随着石漠化的加重,土壤中 SiO_2 明显升高, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等成分不断降低^[26]。研究区土壤矿物质的组成,满足 $\text{SiO}_2 < 65\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 7.0\%$,但 $\text{MgO} < 1.0$,也意味着研究区虽然尚未发生石漠化,但属于潜在石漠化阶段。研究区于 2008 年开始实施退耕还林还草养羊,人为干扰停止 3a 后,各种矿物质含量渐趋合理,石漠化治理初见成效,还应继续减少人为干扰,加强退耕还林还草工程的实施与植被的快速恢复,保障石漠化治理成果。

西南峡谷型喀斯特坡地土壤矿物质含量半变异函数的最佳拟合模型均为指数模型。决定系数 R^2 很高或 RSS 很小,说明拟合模型能较好地反映土壤矿质元素的空间结构特征。土壤矿质元素的块金值与基台值比 ($C_0/(C_0+C)$) 在 3.0%—43.6% 之间,呈中等或强烈的空间自相关,空间变异主要由结构性因素引起^[19-20]。变程 (A) 的变化很大, Al_2O_3 和 MnO 的

变程较大且接近,分别为210.3和195.9 m,空间连续性较好;其他4种矿物质的变程在25.5—68.4 m之间,空间依赖性较强。Kriging等值线图表明,研究区各土壤矿物质具有不同的空间分布格局。 SiO_2 和

MnO 具有相似的空间分布,斑块较大,坡顶含量较高,坡脚含量较低, MnO 在南下坡还出现了高值区; Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 的空间分布也相似,斑块较破碎,主要受地形的影响; Al_2O_3 斑块较大,呈单峰分布,沿

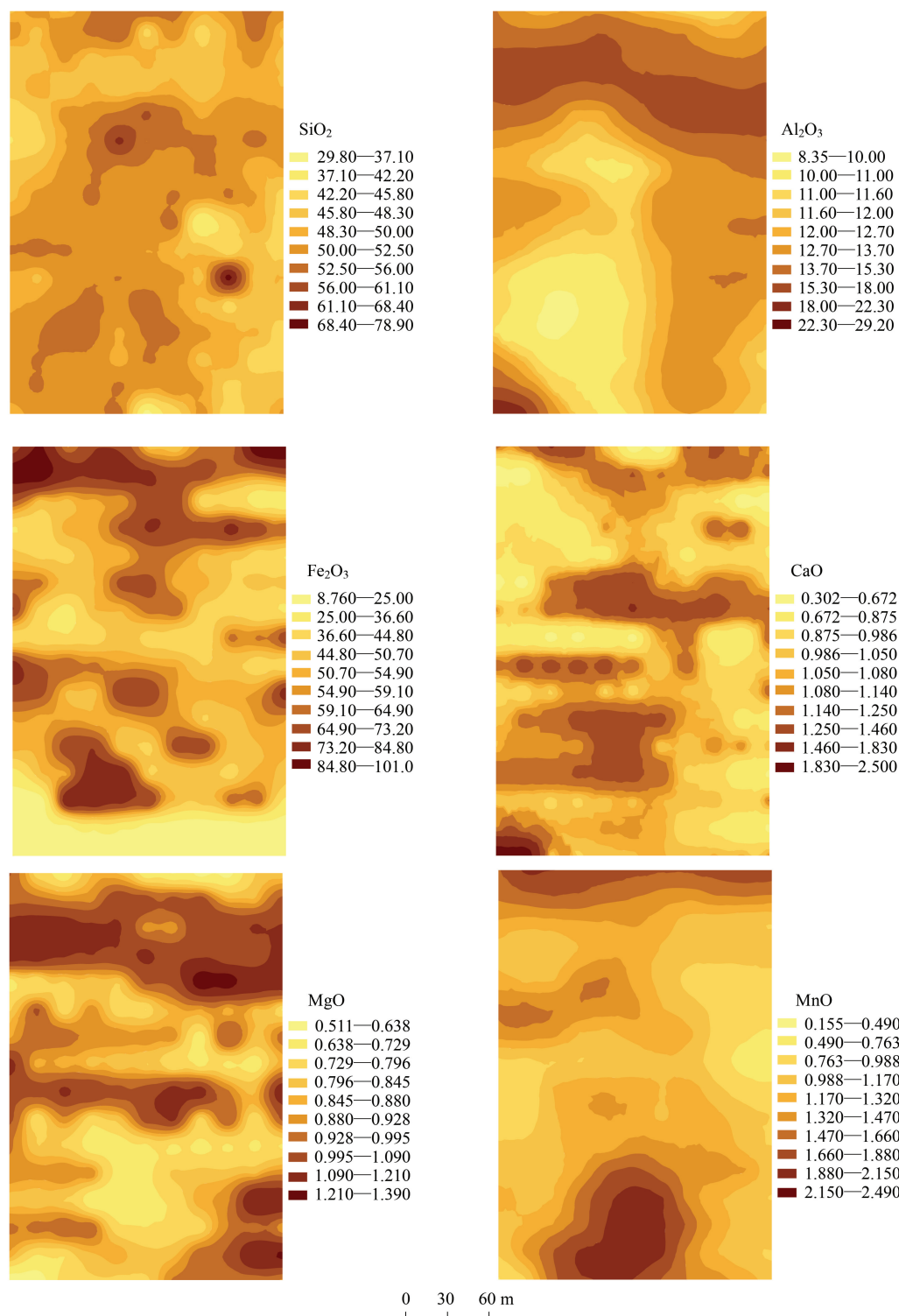


图3 土壤矿物质 Kriging 等值线图

Fig.3 Kriging maps of spatial distribution of soil minerals

海拔的升高而升高。

以贵州为中心连带成片的我国西南喀斯特地区是世界三大岩溶区域之一,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、水文二维结构明显等限制特点的影响,具有天然的高度异质性和脆弱性,环境容量小,极易退化,一旦退化难以恢复^[27-28]。近年来,在人口迅速增长和人地矛盾尖锐的影响下,形成了以强烈的人为干扰为驱动力、以植被减少为诱因、以土地生产力退化为本质的复合退化状况,大面积的森林已退化成灌丛或草丛,部分地带完全石漠化^[29-30]。土壤矿物质作为土壤固体组成的主要成分更易流失,因此,减少干扰,同时实施退耕还林还草工程、增加植被覆盖将对土壤矿物质具有良好的保持和调控作用,将促进喀斯特脆弱生态系统植被的迅速恢复和生态重建。

3.2 结论

(1)峡谷型喀斯特区坡地土壤矿物质中 SiO_2 含量占绝对优势, Al_2O_3 次之,二者占了土壤矿物质含量的 85.99%; 矿物质含量顺序依次为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MnO} > \text{CaO} > \text{MgO}$, 各矿物质含量的变异系数不大,均在 10.32%—45.60% 之间。

(2)地统计分析结果表明,峡谷型喀斯特区坡地土壤矿物质 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 MnO 半变异函数的最佳拟合模型均为指数模型,呈中等或强烈空间自相关,主要受结构性因子的影响,其中 Fe_2O_3 、 CaO 受结构因子影响最大; Al_2O_3 和 MnO 的变程较大,空间连续性较好,其它矿物质的变程较小且相近,空间依赖性较强。

(3)Kriging 等值线图更直观、深刻地反映了研究区 6 种土壤矿物质在水平空间上的分布特征,峡谷型喀斯特区土壤 SiO_2 和 MnO 具有相似的空间分布,受坡位和人为干扰共同影响,基本呈现坡顶高、坡脚低的分布格局, MnO 在南下坡还出现高值区; Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 的空间分布也相似,斑块较破碎,主要受地形的影响; Al_2O_3 的空间格局呈单峰分布,沿海拔的升高而升高。

References:

- [1] Powers J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in Northeastern Costa Rica. *Ecosystems*, 2004, 7(2): 134-146.
- [2] Dunjo G, Pardini G, Gispert M. Land use change effects on

- abandoned terraced soils in a Mediterranean catchment, NE Spain. *Catena*, 2003, 52(16): 23-37.
- [3] Descroix L, Viramontes D, Vauclin M, Gonzalez Barrios J L, Esteves M. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena*, 2001, 43(2): 115-135.
- [4] Chang Q R, Li X P, Lei M, Chi H F. Distribution law of soil mineral elements in Southern Ningxia. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1997, 17(2): 7-10, 22-22.
- [5] Wang G G, Fu W L, Wei C F, Yuan H. Iron transformation and phosphorus availability in a drawdown area of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(1): 66-70.
- [6] Jiang Y, Zhang Y G, Wen D Z, Liang W J. Spatial heterogeneity of exchangeable iron content in cultivated soils of Shenyang suburbs. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(1): 119-121.
- [7] Zeng F P, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Wu H Y, Song X J, Zeng Z X. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in Northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [8] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science press, 1999.
- [9] Wang H Q, Hall C A S, Cornell J D, Hall M H P. Spatial dependence and the relationship of soil organic carbon and soil moisture in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Landscape Ecology*, 2002, 17(8): 671-684.
- [10] Huang S W, Jin J Y. Advance in study on spatial variability of soil properties. *Soils and Fertilizers*, 2002, (1): 8-14.
- [11] Li H B, Lin Z H, Liu S X. Application of Kriging technique in estimating soil moisture in China. *Geographical Research*, 2001, 20(4): 446-452.
- [12] Jia X H, Li X R, Zhang Z S. Spatial heterogeneity of soil organic carbon and nitrogen under *Ammopiptanthus mongolicus* community in arid desert zone. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2266-2270.
- [13] Herbst M, Diekkrüger B. Modelling the spatial variability of soil moisture in a micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(6/7): 239-245.
- [14] Song M, Peng W X, Zou D S, Zeng F P, D H, Lu S Y. The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(19): 6259-6269.
- [15] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Ouyang Z W, Wu H Y. Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in Mulun National Natural Reserve in Karst area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 98-104.
- [16] Du H, Song T Q, Peng W X, Wang K L, Liu L, Lu S Y, Zeng F P. Spatial heterogeneity of mineral compositions in surface soil in Mulun National Nature reserve Karst areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(6): 79-84.
- [17] Liu G S. *Standard Methods for Observation and Analysis in Chinese Ecosystem Research Network: Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profile*. Beijing: China Standards Press, 1997.
- [18] Wang Q, Dai J L, Fu H C, Shen T L, Wu D Q, Wang R Q. The application of spatial analysis methods to microbial ecology. *Acta*

- Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 439-446.
- [19] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, Karlen D L, Novak J M, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [20] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, 1986, 38: 45-94.
- [21] Liu F C, Shi X Z, Yu D S, Zhang Q L. Spatial distribution of Soil Zn and relationship between soil Zn and soil particle composition in typical Area of Southern Jiangsu province. Soils, 2003, 35(4): 330-333.
- [22] Wang W M. Utilization of geo-statistic with GIS in soil sciences. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5): 404-408.
- [23] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang S L, Yu T Y, Cheng W. Spatial heterogeneities of total Carbon, Nitrogen, phosphorus and potassium content in black thin-layer soil. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(2): 1-5.
- [24] Jin F H, Li S Q, Lu H L, Li S X. Relationships of microbial biomass carbon and nitrogen with particle composition and nitrogen mineralization potential in calcareous soil. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2739-2746.
- [25] Guo X M, Wu H H, Luo M, He G P. The morphological change of Fe/Al-oxide minerals in red soils in the process of acidification and its environmental significance. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2007, 26(6): 515-521.
- [26] Institute of Soil Science, Chines Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis Methods of China Soil Taxonomy. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 1992.
- [27] Peng W X, Wang K L, Song T Q, Zeng F P, Wang J R. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 811-820.
- [28] Lan A J, Zhang B P, Xiong K N, An Y L. Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou province. Geographical Research, 2003, 22(6): 733-741.
- [29] Wu H Y, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Li X H, Song X J, Ouyang Z W. Changes of soil nutrients in process of natural vegetation restoration in karst disturbed area in northwest Guangxi. Journal of soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 143-147.
- [30] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Ouyang Z W. Vegetation succession rule and regeneration strategies in disturbed karst area, Northwest Guangxi. Journal of Mountain Research, 2008, 26(5): 597-604.
- [7] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 吴海勇, 宋希娟, 曾昭霞. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征. 生态学报, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [8] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] 黄绍文, 金继运. 土壤特性空间变异研究进展. 土壤肥料, 2002, (1): 8-14.
- [11] 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. 地理研究, 2001, 20(4): 446-452.
- [12] 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. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2266-2270.
- [14] 宋敏, 彭晚霞, 邹冬生, 曾馥平, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因. 生态学报, 2012, 32(19): 6259-6269.
- [15] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 欧阳资文, 吴海勇. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性. 应用生态学报, 2009, 20(1): 98-104.
- [16] 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 刘璐, 鹿士杨, 曾馥平. 木论喀斯特自然保护区表层土壤矿物质的空间异质性. 农业工程学报, 2011, 27(6): 79-84.
- [17] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [18] 王强, 戴九兰, 付合才, 申天琳, 吴大千, 王仁卿. 空间分析方法在微生物生态学研究中的应用. 生态学报, 2010, 30(2): 439-446.
- [21] 刘付程, 史学正, 王洪杰, 张庆利. 苏南典型地区土壤锌的空间分布特征及其与土壤颗粒组成的关系. 土壤, 2003, 35(4): 330-333.
- [22] 王炜明. 基于 GIS 的地统计学方法在土壤科学中的应用. 中国农学通报, 2007, 23(5): 404-408.
- [23] 张兴义, 隋跃宇, 张少良, 于同艳, 程伟. 薄层农田黑土全量碳及氮磷钾含量的空间异质性. 水土保持通报, 2008, 28(2): 1-5.
- [24] 金发会, 李世清, 卢红玲, 李生秀. 石灰性土壤微生物量碳、氮与土壤颗粒组成和氮矿化势的关系. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2739-2746.
- [25] 郭杏妹, 吴宏海, 罗媚, 何广平. 红壤酸化过程中铁铝氧化物矿物形态变化及其环境意义. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6): 515-521.
- [26] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤系统分类土壤物理和化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1992.
- [27] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 2008, 28(2): 811-820.
- [28] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 安裕伦. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析. 地理研究, 2003, 22(6): 733-741.
- [29] 吴海勇, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 黎星辉, 宋希娟, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化. 水土保持学报, 2008, 22(4): 143-147.
- [30] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被的演替规律与更新策略. 山地学报, 2008, 26(5): 597-604.

参考文献:

- [4] 常庆瑞, 李新平, 雷梅, 迟海峰. 宁南地区土壤矿质元素分布规律研究. 水土保持通报, 1997, 17(2): 7-10, 22-22.
- [5] 王改改, 傅瓦利, 魏朝富, 袁红. 消落带土壤铁的形态变化及其对有效磷的影响. 土壤通报, 2008, 39(1): 66-70.
- [6] 姜勇, 张玉革, 闻大中, 梁文举. 沈阳市郊耕地土壤交换性铁含量的空间异质性. 水土保持学报, 2003, 17(1): 119-121.