

喀斯特峰丛洼地小流域表层土壤微量元素的空间异质性*

高鹏^{1,2,3} 付同刚^{1,2,3} 王克林^{1,2,**} 陈洪松^{1,2} 曾馥平^{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,广西环江 547100; ³中国科学院大学,北京 100049)

摘要 基于网格取样(80 m × 80 m)利用经典统计学和地统计方法分析了典型喀斯特峰丛洼地小流域 163 个表层(0~20 cm)土壤样点微量元素(Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、B)的空间变异特征。结果表明:研究区土壤 6 种微量元素含量的差异及变异系数均较大,平均含量大小顺序为 Zn>Cr>Ni>Pb>B>Cu,平均变异程度依次为 Ni>Cu>Zn>Pb>B>Cr。不同微量元素具有不同的空间结构和最佳拟合模型,除 Cr 呈中等程度自相关、变程较长、空间连续性较好外,其他 5 种元素均呈强烈自相关,变程较短,空间依赖性较强。6 种微量元素的 Kriging 等值线图较为相似,表明研究区土壤微量元素含量有着相似分布趋势,表现为东部高、南北两头低、洼地高、坡地低。人为干扰和自然条件(植被、裸岩率、坡度、坡向)是土壤微量元素空间异质性的主要影响因素。

关键词 半方差; 克里格插值; 空间格局; 地统计学

中图分类号 S153.6 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)8-2133-07

Spatial heterogeneity of surface soil trace elements in a small catchment in Karst peak-cluster depression area of South China. GAO Peng^{1,2,3}, FU Tong-gang^{1,2,3}, WANG Ke-lin^{1,2,**}, CHEN Hong-song^{1,2}, ZENG Fu-ping^{1,2} (¹Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; ²Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Guangxi Zhuang Autonomous Region, Huanjiang 547100, Guangxi, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(8): 2133-2139.

Abstract: Based on grid (80 m × 80 m) sampling and by using the methods of classical statistics and geostatistics, an investigation was conducted on the spatial heterogeneity of trace elements (Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, and B) in 163 surface soil (0-20 cm) samples in a small catchment in a typical Karst cluster-peak depression area of South China. There was a great difference in the concentrations of the soil trace elements. Their average concentrations were in the order of Zn>Cr>Ni>Pb>B>Cu, and the average variation coefficients were in the sequence of Ni>Cu>Zn>Pb>B>Cr. Except that the Cr had a medium spatial autocorrelation with longer range and a better spatial continuum, the other five trace elements had a stronger spatial autocorrelation with shorter range and a stronger spatial dependence. The similar Kriging contour maps indicated that the distribution patterns of the six trace elements were almost similar, *i. e.*, higher in the east and lower in the north and south, and higher in depression and lower on slope. It was suggested that human disturbances and natural conditions (vegetation, bare rock rate, slope, and aspect) were the primary factors affecting the spatial patterns of the soil trace elements in small catchments in Karst peak-cluster depression regions.

Key words: semivariance; Kriging interpolation; spatial pattern; geostatistics.

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-40)、国家科技支撑计划项目(2010BAE00739)和国家自然科学基金项目(41071340)资助。

** 通讯作者 E-mail: kelin@isa.ac.cn

收稿日期: 2013-02-13 接受日期: 2013-04-27

土壤无论在何种尺度上,都具有高度的空间异质性,是一个时空连续的变体,是各项环境因子共同作用的结果(刘璐等 2010)。地统计学是在传统统计学基础上发展起来的分析方法,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与功能的影响(杜虎等 2011)。国内外学者应用地统计方法研究土壤性质已有很多(Ayoubi *et al.* 2007; Gallardo & Parana 2007; Zhang *et al.* 2007, 2010; Mueller *et al.* 2008),对于土壤微量元素的空间异质性也有专门研究(Cambardella *et al.* 1994; Burgos *et al.* 2006),进入20世纪90年代以后,国内以地统计学结合GIS作为研究方法对土壤微量元素的空间异质性的研究逐渐增多,研究内容可分为微量元素全量和有效态两类,研究尺度小到一块农田,大到省际区域,主要研究区域分布在东北平原(李志斌等 2007; 史文娇等 2009; 廖琴等 2012)、华北平原(张朝生等 1995; 王学军等 1997; 王淑英等 2008)、黄土丘陵(宋丰骥等 2012)、西北干旱区(马媛等 2006; 董国涛等 2010)、长江中下游(王琳 2007; 徐敬敬等 2009)、东南部地区(田宏国和陶澍 1991; 刘冬碧等 2006)地区,此外在内蒙古(徐尚平等 2000)、山东(谢骏 2005)、四川(王永东等 2008)、宁夏(尚清芳等 2010)等地也有部分研究工作开展,对于西南喀斯特区的研究也有少量报道(彭志良等 2008; 顾怀胜等 2012),但以往对于喀斯特区域的研究多以农田为主,且研究方法更侧重于进行区域尺度下的估算,缺乏对自然流域环境下景观尺度上典型喀斯特峰丛洼地地区土壤微量元素的研究。因此,本研究以环江木连典型喀斯特峰丛洼地小流域为典型的景观单元,通过对环江喀斯特农田生态试验站小流域土壤进行系统的网格取样与室内化学分析,结合应用经典描述性统计方法和地统计学中半变异函数分析和Kriging插值法分析了该区域土壤化学性质中6种微量元素(Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、B)的空间异质性和分布格局,以期阐明该区域土壤微量元素的空间分布规律,并初步探讨其生态学过程,为研究喀斯特小流域地区水土流失与养分迁移过程提供基础数据资料及理论依据并可为生态恢复建设提供理论指导。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究区位于广西环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特农业生态系统观测研究站。该站位于环江县南部与宜州市接壤的大才乡木连村境内(108°18′56.9″E—108°19′58.4″E, 24°43′58.9″N—24°44′48.8″N),试验站面积146.1 hm²,为典型的喀斯特峰丛洼地地貌类型,海拔为272.0~647.2 m,洼地面积占总面积的20%,坡地面积占77%,洼地平均土层厚度50~100 cm,坡地5~60 cm。试验站降雨充沛,年均降雨量1389.1 mm。但季节分配不均,有明显的旱、雨季之分,雨季平均持续130~140 d,主要集中在4—9月,尤以6月中旬—7月中旬最多,达350~460 mm,10月—次年3月为旱季,各月平均降水量在90 mm以下。年平均日照1451.1 h,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,平均太阳总辐射量413.8 kJ·cm⁻¹,其中有效辐射量为211.9 kJ·cm⁻¹,平均气温19.9℃。植被覆盖率和森林覆盖率较低,多为喜钙、耐干旱的物种,乔木较典型的有菜豆树(*Radermachera sinica*)、朴树(*Celtis sinensis*)、圆叶乌桕(*Sapium rotundifolium*)等,灌木较典型的有红背山麻杆(*Alchornea treuioides*)、黄荆等(*Vitex negundo*)、藤本有鹅掌藤(*Scheffera arboricola*)、铁线莲(*Clematis florida*)等,草本有五节芒(*Miscanthus floridulu*)。站内洼地均于20世纪80年代撂荒,2004年下半年开始,约一半洼地(东北部)重新开发,设有旱地、水田、果园、草地等试验样地,为中国科学院环江喀斯特生态系统研究站观测用。

1.2 样品采集

根据已有研究区的地形数据资料,在研究区域采用规则网格法(80 m×80 m)布设182个计划采样点,于2011年12月10—22日取样,除样点不可达或无表土外,实际共采样点163个,实际采样点地形位置及高程信息见图1。采样时在5 m×5 m范围内随机采取5个样本(每个样本取0~20 cm的表层土壤,不足20 cm则取完为止),混合以后代表该样点土样,同时记录每个取样点的立地因子(坡度、坡向、海拔高度)、植被、人为干扰等信息,并使用手持GPS定位。土样带回实验室经风干、过筛后备用。土壤微量元素含量测定使用刘光崧(1997)中碳酸钠碱熔-ICP发射光谱法分析。

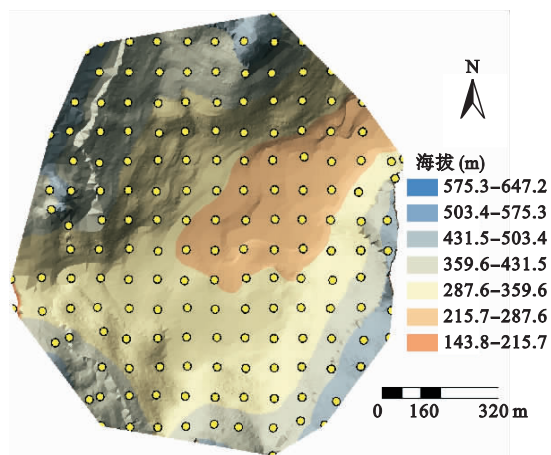


图1 研究区样点的位置示意图
Fig.1 Location of the sample plots in the study area

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 EXCEL 2010 进行数据处理分析,使用 SPSS 19.0 进行经典统计分析,使用 GS+ 9.0 和 ArcGIS 9.3 进行地统计分析。

为了保证数据精确性,使拟合函数及插值图更加真实准确,本文对实验原始数据按以下步骤进行数据处理和分析:首先在 ArcGIS 空间统计工具 Cluster and Outlier Analysis (Anselin Local Moran's I) 模块支持下,对所有原始数据采用 local Moran I 指数进行聚类 and 异常值分析,对局部空间显著无关的个别样点 ($Z < -1.96$) 进行了剔除 (Goovaerts, 1998; Zhang & McGrath 2004)。然后在经典统计分析中,对所有处理后数据进行单样本 K-S 检验以检验正态性,对不符合正态分布的数据指标进行对数转化。在地统计分析中,半变异函数分析及 Kriging 插值分析均使用经典统计分析检验处理后的数据,具体方法参见文献 (张少良等 2007; 韩美荣等 2011)。

表1 喀斯特峰丛洼地小流域土壤微量元素含量的描述性统计分析及正态分布检验

Table 1 Results of soil trace elements in small catchment in Karst peak-cluster depression for descriptive statistics and K-S test

元素	样本数	最小值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差	变异系数 (%)	偏度	峰度	K-S 值	分布类型
Pb	162	0.00	82.12	42.22	17.59	41.68	-0.124	-0.774	0.513	N
Cr	158	39.81	278.00	134.75	52.00	38.59	0.120	-0.732	0.391	N
Ni	158	0.82	150.42	61.38	33.01	53.78	0.435	-0.435	0.459	N
Cu	163	0.49	45.10	16.76	8.68	51.78	0.922	0.258	0.007	*
Zn	161	8.39	528.04	270.99	119.78	44.20	-0.007	-0.958	0.161	N
B	162	5.27	90.90	43.85	17.35	39.56	0.285	-0.243	0.660	N
Cu(log)	163	-0.713	3.809	2.679	0.570	21.27	-1.245	6.583	0.697	LN

* $P < 0.05$ 非正态分布; LN 对数正态分布。

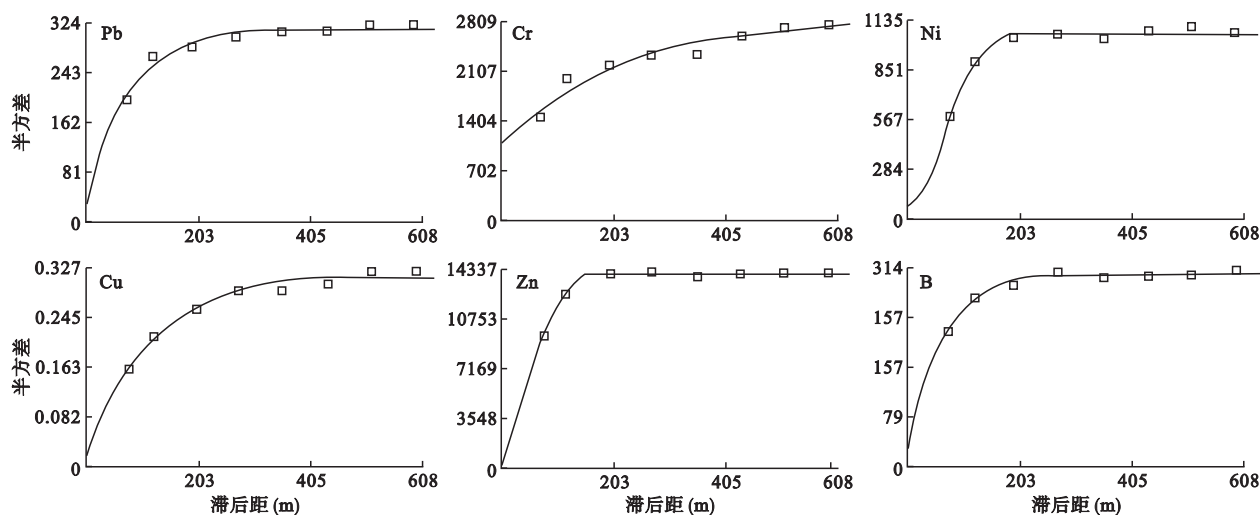


图2 研究区土壤微量元素半变异函数
Fig.2 Semivariogram of soil trace elements in study area

2 结果与分析

2.1 喀斯特峰丛洼地小流域土壤微量元素含量的经典描述性统计分析

土壤中6种微量元素的含量差异较大,其中Zn含量最高,Cu含量最低,平均含量顺序由高到低依次为Zn>Cr>Ni>Pb>B>Cu。各微量元素含量的变异系数均较大,在38.59%~53.78%,平均变异程度由高到低依次为Ni>Cu>Zn>Pb>B>Cr(表1)。单样

本K-S检验的结果表明,Pb、Cr、Ni、Zn、B符合正态分布,Cu符合对数正态分布。

2.2 喀斯特峰丛洼地小流域土壤微量元素含量的半变异函数

研究区土壤微量元素Pb、Cr、Cu、B的半变异函数值的最佳拟合模型为指数模型,Ni的半变异函数值的最佳拟合模型为高斯模型,Zn的半变异函数值的最佳拟合模型为球状模型,6种微量元素除Cr的 $C_0/(C_0+C)$ 值为0.383,其余5种微量元素指标的

表2 土壤微量元素半变异函数模型类型及参数

Table 2 Semivariogram theoretical models and parameters for trace elements

元素	样本数	模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程(m)	R ²	D
Pb	162	指数模型	26.8	313	0.086	231	0.891	1.897
Cr	158	指数模型	1097	2867	0.383	678	0.895	1.862
Ni	158	高斯模型	81	1068	0.076	154	0.958	1.874
Cu	163	指数模型	0.008	0.313	0.027	330	0.965	1.844
Zn	161	球状模型	50	14030	0.004	157	0.968	1.923
B	162	指数模型	27.3	304	0.090	189	0.929	1.927

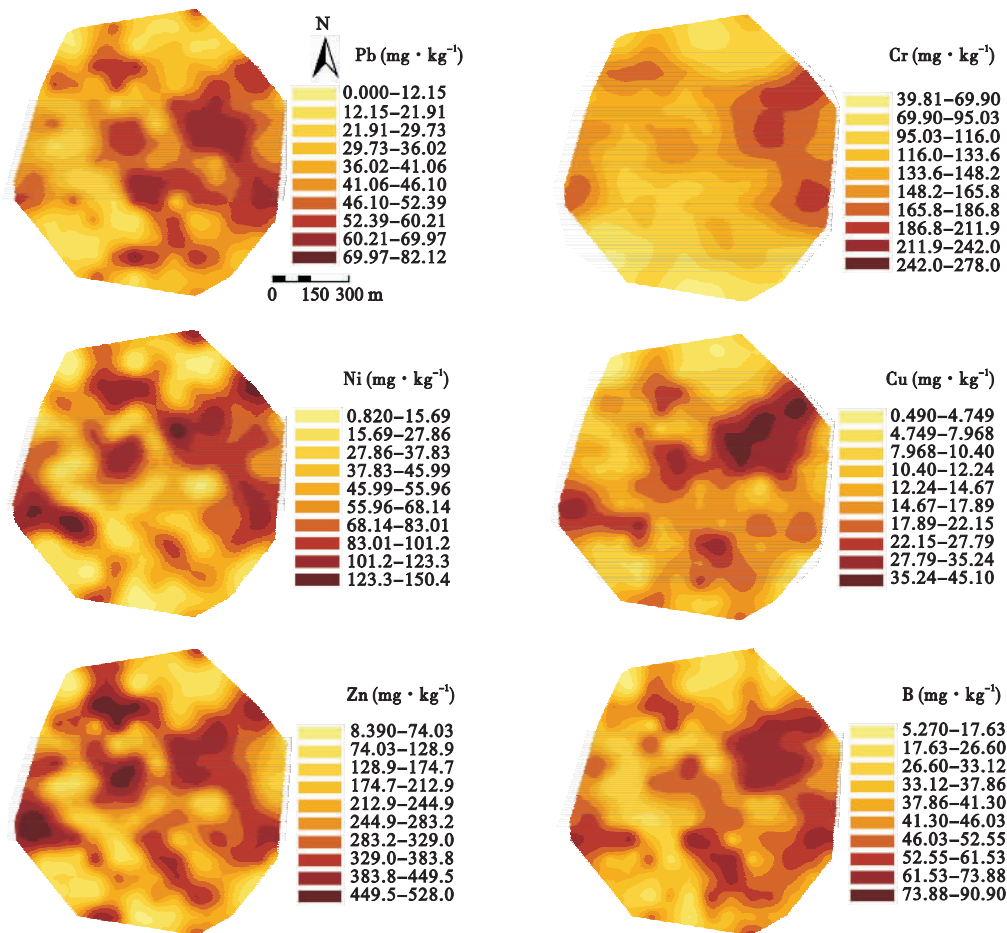


图3 土壤微量元素的Kriging等值线示意图

Fig.3 Kriging maps of spatial distribution of soil trace elements

$C_0/(C_0+C)$ 值均在 25% 以下, Cr 的变程较大, 为 678 m, 空间连续性较好, 其他 5 种微量元素的变程在 154 ~ 330 m, 研究区 6 种元素的分维数均相近, 且接近 2 (图 2 表 2)。

2.3 喀斯特峰丛洼地小流域土壤微量元素含量的空间分布格局

为了能更直观、清晰、全面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 Arc-GIS 9.3 软件进行 Kriging 插值分析, 分别绘制土壤 Pb、Cr、Ni、Cu、Zn、B 6 种微量元素的空间分布格局图(图 2)。整体来看, 6 种微量元素的空间分布格局趋势上大致相似, 细节上略有不同, 为东部高, 南北两头低; 洼地高, 坡地低。

3 讨 论

土壤中微量元素是土壤的重要组成成分, 是表征土壤质量的重要因子, 土壤微量元素的组成及其变化特征直接反映了土壤发育、成土及其演化过程, 土壤中微量元素含量的空间变化对于探讨元素在土壤中的运移和土壤的形成具有重要意义(马媛等, 2006)。基于前期对喀斯特土壤主要养分和矿物全量的空间异质性研究, 本文进一步对木连喀斯特小流域土壤微量元素进行分析, 发现土壤微量元素的空间变异性状况与二者有一定程度的类似, 不同土壤微量元素的空间异质性、半变异函数的拟合模型不同, 但决定系数均较高。土壤性状的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, 然而在实际的、一定的空间范围内, 土壤性状存在一定的空间依赖性(朱宏等, 2008)。

在半变异函数模型参数中, 通常用块金值表征实验误差和小于最小取样尺度(本研究中为 80 m)的随机因素的影响, 用块金值与基台值的比值来度量空间自相关的变异所占的比例。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, 比值在 25% ~ 75% 时, 空间变量为中等空间自相关, $> 75\%$ 时, 空间变量为弱的空间自相关(熊汉锋和王运华, 2005)。研究区土壤 6 种微量元素除 Cr 的 $C_0/(C_0+C)$ 值为 0.383, 呈现中等程度自相关, 受一定程度的随机因素影响外, 其余 5 种微量元素指标的 $C_0/(C_0+C)$ 值均在 25% 以下, 空间自相关强烈, 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, 表征空间自相关性的最大距离(臧振峰等, 2013), 在该值上, 区

域变量的空间自相关性为 0, 大于变程的区域化变量不存在空间自相关性。研究区 Cr 的变程较大, 为 678 m, 空间连续性较好, 其他 5 种微量元素的变程在 154 ~ 330 m, 空间依赖性较强。决定系数反映模型拟合优度, 6 种半变异函数拟合模型的决定系数均较高, 在 0.891 ~ 0.965, 能较好地反映土壤微量元素含量的空间结构特征。分维数反映变异函数曲线的曲率, 可作为随机变异的量度, 其值越接近 2, 表明小尺度上的变异较显著(周隽和国庆喜, 2007)。研究区 6 种元素的分维数均相近, 且接近 2, 表明其变异函数曲线曲率大致相近, 随机变异程度相当, 并且在小尺度上的变异较显著(表 2)。

通常, 土壤性状的空间异质性受结构因子和随机因子共同作用。结构因子是指土壤形成过程中的母质、地形因子、地下水影响及成土后的土壤类型等; 随机因子是指土壤在管理过程中的施肥、农作物、耕作条件以及栽培措施等(顾怀胜等, 2012)。结构因子通常使土壤性状具有比较强的空间自相关性, 随机因子常常使土壤的空间相关性减弱。研究区 6 种微量元素除 Cr 呈中等程度自相关, 变程较长, 空间连续性较好, 受随机变异影响相对较大外, 其余 5 种元素(Pb、Ni、Cu、Zn、B) 均呈强烈自相关, 变程较短, 空间依赖性较强, 主要受结构性因子影响, 受随机变异影响较小。6 微量元素在小尺度上的变异较显著, 说明其在小尺度上的生态学过程不可忽视。6 种微量元素的空间分布格局趋势上大致相似, 细节上略有不同, 可概括为东部高, 南北两头低, 洼地高, 坡地低。造成这种分布格局的原因很复杂, 初步定性分析可归为自然条件和人为干扰作用两个方面。研究表明, 土壤中绝大多数的元素含量受土壤类型及其本身的理化特征控制, 如土壤母质、物理性质、矿物组成等, 这些因素对土壤微量元素含量起内在的决定作用(徐尚平等, 2000; 王永东等, 2008)。此外, 环境因子的综合作用也对土壤微量元素含量有影响, 降雨会对易溶元素和土壤有效态的微量元素产生影响, 在地势低、坡度缓的地方, 土壤容易积累, 雨水容易汇集, 淋溶冲刷程度较轻, 相应地, 其中的微量元素不易随淋溶搬运过程流失, 而在地势高、坡度陡的地方, 淋溶冲刷作用强烈, 微量元素流失较快并且随径流及地下漏失向地势低洼处汇集, 雨水冲刷及地表、地下径流迁移也是影响微量元素分布格局的一个因素。此外, 人为干扰也是对土壤微量元素含量产生影响的一个重要因素, 洼地

东北部于2004年后重新开垦为实验用地,从Kriging插值图中可明显看出,洼地东北部各项微量元素均有较高积累,这很可能与试验样地耕作有关,其具体机制有待进一步研究证实。

研究区以岩溶地质条件为背景,与非可溶性岩区不同,此喀斯特地质背景对水土流失、石漠化发展过程存在着本底性约束,流失过程受化学、物理和生物作用控制,导致该区域可溶岩成土速率缓慢,土层薄,容许土壤流失量低,水土流失危险度高,环境容量小、抗干扰能力弱、稳定性低和自我调节能力差,是非地带性的脆弱生态带(彭晚霞等,2008),土壤中的微量元素更易流失,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营养元素产生良好的保持和调控作用,有利于喀斯特脆弱生态系统的植被恢复和生态重建。

本研究利用经典统计及地统计方法,揭示了木连小流域土壤化学性质的基本空间分布格局,人为干扰和自然条件(地形、地貌、植被、裸岩率、坡度、坡向)是土壤养分空间异质性的主要影响因素。本文仅报道实验结果并宏观定性地进行讨论其成因,关于结果形成的具体生态学过程、影响因子及其贡献作用的定量描述,还有待于进一步分析。

参考文献

- 董国涛,罗格平,许文强,等. 2010. 三工河流域下游绿洲土壤微量元素有效含量空间变异特征. 中国沙漠, 30(4): 862-869.
- 杜虎,宋同清,彭晚霞,等. 2011. 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, 27(6): 79-84.
- 顾怀胜,腊贵晓,曹廷茂,等. 2012. 喀斯特地区烟田土壤有效态微量元素的空间变异特征——以贵州省毕节地区为例. 河南农业科学, 41(10): 70-78.
- 韩美荣,彭晚霞,曾馥平,等. 2011. 喀斯特峰丛洼地次生林主要土壤矿质成分空间异质性研究. 农业现代化研究, 32(6): 748-751.
- 李志斌,陈佑启,姚艳敏,等. 2007. 吉林省中部平原区土壤有效态中微量元素的空间变异特征. 中国生态农业学报, 60(4): 30-35.
- 廖琴,南忠人,王胜利,等. 2012. 黑河流域中部土壤微量元素有效态含量的空间变异及丰缺评价. 干旱区资源与环境, 26(2): 108-113.
- 刘璐,曾馥平,宋同清,等. 2010. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 21(7): 1667-1673.
- 刘冬碧,陈防,熊桂云,等. 2006. 东南地区土壤养分的空间变异性与取样策略. II. 中微量元素. 湖北农业科学, 45(6): 730-733.
- 刘光崧. 1997. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社.
- 马媛,师庆东,杨建军,等. 2006. 干旱区典型流域土壤微量元素的空间变异特征研究. 干旱区地理, 29(5): 682-687.
- 彭晚霞,王克林,宋同清,等. 2008. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 28(2): 811-820.
- 彭志良,赵泽英,李中元,等. 2008. 喀斯特山区村级尺度下农田土壤中微量元素空间变异特性. 贵州农业科学, 36(6): 87-90.
- 尚清芳,董莉丽,张建明,等. 2010. 宁夏银北平原灌淤土耕层土壤微量元素的空间变异性研究. 安徽农业科学, 38(32): 18173-18176.
- 史文娇,汪景宽,魏丹,等. 2009. 黑龙江省南部黑土区土壤微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例. 土壤学报, 46(2): 342-347.
- 宋丰骥,常庆瑞,钟德燕,等. 2012. 黄土丘陵沟壑区土壤微量元素空间变异特征及其影响因素. 干旱地区农业研究, 30(1): 36-42.
- 田宏国,陶澍. 1991. 深圳市土壤微量元素含量空间插值方法比较. 北京: 计算机在地学中的应用国际讨论会.
- 王琳. 2007. 浙江省三个主要农业地貌区土壤与稻谷微量元素空间变异规律研究(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 王淑英,于同泉,王建立,等. 2008. 北京市平谷区土壤有效微量元素含量的空间变异特性初步研究. 中国农业科学, 41(1): 129-137.
- 王学军,邓宝山,张泽浦. 1997. 北京东郊污灌区表层土壤微量元素的小尺度空间结构特征. 环境科学学报, 17(4): 412-416.
- 王永东,廖桂堂,李廷轩,等. 2008. 四川蒙顶山低山茶园土壤主要微量元素空间变异特征及影响因素研究. 茶叶科学, 28(1): 14-21.
- 谢骏. 2005. 山东省土壤微量元素建库及空间变异分析(硕士学位论文). 济南: 山东大学.
- 熊汉锋,王运华. 2005. 梁子湖湿地土壤养分的空间异质性. 植物营养与肥料学报, 11(5): 584-589.
- 徐敬敬,申广荣,钱振华,等. 2009. 上海崇明农田土壤微量元素空间变异特征. 上海交通大学学报(农业科学版), 27(1): 13-18.
- 徐尚平,陶澍,徐福留,等. 2000. 内蒙土壤微量元素含量的空间结构特征. 地理学报, 55(3): 337-345.
- 臧振峰,南忠仁,王胜利,等. 2013. 黑河中游绿洲农田土壤微量元素含量的空间分布特征. 干旱区资源与环境, 27(5): 190-195.

- 张朝生,陶 澍,袁贵平,等. 1995. 天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关研究. *土壤学报*,**32**(1): 50-57.
- 张少良,张兴义,崔战利. 2007. 哈尔滨市辖区黑土有机质、全氮的空间异质性分析. *农业系统科学与综合研究*,**23**(3): 333-337.
- 周 隽,国庆喜. 2007. 林木竞争指数空间格局的地统计学分析. *东北林业大学学报*,**35**(9): 42-44.
- 朱 宏,赵成义,李 君,等. 2008. 柞柳林地土壤微生物量碳及相关因素的分布特征. *土壤学报*,**45**(2): 375-379.
- Ayoubi S ,Zamani SM ,Khormali F. 2007. Spatial variability of some soil properties for site specific farming in northern Iran. *International Journal of Plant Production* ,**1**: 225-236.
- Burgos P ,Madejon E ,Perez-De-Mora A ,et al. 2006. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation. *Geoderma* ,**130**: 157-175.
- Cambardella CA ,Moorman TB ,Parkin TB ,et al. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* ,**58**: 1501-1511.
- Gallardo A ,Parama R. 2007. Spatial variability of soil elements in two plant communities of NW Spain. *Geoderma* ,**139**: 199-208.
- Goovaerts P. 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils* ,**27**: 315-334.
- Mueller EN ,Wainwright J ,Parsons AJ. 2008. Spatial variability of soil and nutrient characteristics of semi-arid grasslands and shrublands ,Jornada Basin ,New Mexico. *Ecology* ,**1**: 3-12.
- Zhang C ,McGrath D. 2004. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods. *Geoderma* ,**119**: 261-275.
- Zhang Q ,Yang Z ,Li Y ,et al. 2010. Spatial variability of soil nutrients and GIS-based nutrient management in Yongji County ,China. *International Journal of Geographical Information Science* ,**24**: 965-981.
- Zhang X ,Sui Y ,Zhang X ,et al. 2007. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere* ,**17**: 19-29.

作者简介 高 鹏 男,1989 年生,硕士研究生,主要研究方向为区域与景观生态学。E-mail: sbigp@126.com
责任编辑 魏中青
