

桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异

张 伟^{1,2}, 陈洪松^{1,2,*}, 王克林^{1,2}, 侯 娅^{1,2}, 张继光³

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125; 2. 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站, 环江 547100;
3. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

摘要:空间变异性的研究有助于认识土壤养分的空间分布特征与生态过程之间的关系。采用网格取样(20m×20m), 利用地统计学方法分析了典型喀斯特洼地土壤有机碳(SOC)和速效磷(AP)的空间变异特征。结果表明 SOC 和 AP 的半变异函数分别用球状模型和指数模型拟合的效果较好。块金效应对 SOC 和 AP 总变异的贡献分别为 37.9% 和 49.8%, 说明 SOC 主要受结构性因素控制, 而 AP 受结构性因素和随机因素双重控制。SOC 的分布呈明显的带状各向异性特征, 在洼地的长轴方向具有较大的变程和较小的基台值, 其全向半变异函数的相关距离为 135.5m, 与洼地不同种植类型地块的覆盖尺度基本相当。AP 的分布特征与 SOC 存在明显差异, 具有较大的漂移趋势, 其相关距离为 413.4m; 但在分离漂移趋势后, 其相关距离为 167.4m, 反映了不同地块间的施肥差异对 AP 的影响较大。喀斯特洼地 SOC 的空间分布主要受地形和土地利用结构控制, 而 AP 的分布的规律性不明显, 可能与施肥等因素的随机性较强有关。

关键词:喀斯特洼地; 土壤养分; 空间变异; 地统计学

文章编号: 1000-0933(2007)12-5168-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a typical Karst depression, northwest of Guangxi

ZHANG Wei^{1,2}, CHEN Hong-Song^{1,2,*}, WANG Ke-Lin^{1,2}, HOU Ya^{1,2}, ZHANG Ji-Guang³

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

2 Huanjiang Experimental Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China

3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5168 ~ 5175.

Abstract: Spatial variability of soil nutrients provides useful information for improving agricultural practices and ecological management. Peak-cluster depression forms a typical Karst landscape with agriculture mainly based in depressions, such as in the Karst region in south-west China. In this study, the depression area in a typical landscape unit selected from the Karst region of Guangxi province was investigated for the spatial variability of soil organic carbon (SOC) and available phosphorus (AP) in the surface soil (0–15 cm). Grid sampling method (20 m×20 m) and geological statistics were applied to analyze the spatial distribution of SOC and AP contents. Sample variograms of SOC and AP were fitted well by spherical and exponential models, respectively. Nugget effects due to random errors or variability within the distance of the sampling interval (20 m) contributed to 37.9% of the overall variation for SOC, and 49.8% for AP. This suggests that the

基金项目: 973 计划课题(2006CB403208); 国家自然科学基金项目(40501034); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目

收稿日期: 2006-10-18; **修订日期:** 2007-04-29

作者简介: 张伟(1979~), 男, 河北邯郸人, 硕士, 主要从事土壤环境和生态恢复研究. E-mail: zhangw@isa.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbchsh@isa.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2006CB403208); National Natural Science Foundation of China (No. 40501034); and Western Light Program of Talent Cultivation of the Chinese Academy of Sciences

Received date: 2006-10-18; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: ZHANG Wei, Master candidate, mainly engaged in soil environment and ecological restoration. E-mail: zhangw@isa.ac.cn

spatial variation in SOC was mainly controlled by structural factors, which mainly depended on topographic conditions and land use types in the study area, but AP rather more controlled by random factors mainly due to the variability of fertilizer application which differed widely in the depression. Correlation length of SOC was about 135.5 m, which had similar scope to the average range of difference in land use types. Based on directional semi-variogram analysis, zonal anisotropy, and lower sill and longer range in the long axis direction were found in the spatial distribution of SOC in the depression. AP also had anisotropy, but the pattern in its spatial distribution was quite different from that of SOC, as AP had much longer correlation length (413.4 m) and showed clearly a drift trend which enhanced variability in the long axis direction, presumably due to the random application of P-fertilizers. If the effects of drift trend were subtracted, the correlation length of AP decreased to 167.4 m. This study suggests that the pattern in the spatial distribution of SOC in the depression area in Karst regions was mainly controlled by structure factors (topographic conditions and land use types), but for AP rather more by random factors such as fertilizer application.

Key Words: Karst depression; soil nutrients; spatial variability; geostatistics

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存在强烈变异^[1]。土壤性质在空间上的变异产生了其结构功能上的差异。在自然资源管理、生态功能分区以及环境污染监测等领域,土壤性质的空间变化决定了管理者相应策略和政策的制定,而且土壤的空间变异特征是精确农业^[2]以及生态建模的信息基础^[3]。土壤的空间异质性是多种物理过程、化学过程和生物过程共同作用的结果。在这些过程中,有些过程仅在微小的尺度上对土壤性质具有重要影响,如土壤微生物活性,而有些过程却在尺度上决定着土壤的变异特征,如气候、母质、侵蚀和溶质迁移等^[4]。国内外对土壤性质的空间变异特征及其与环境因子的关系进行了大量研究。Jackson 和 Caldwell^[5]研究了树木周围土壤养分的空间变异特征,发现植物对养分的空间分布具有显著影响。张朝生等^[6]探讨了重金属的空间分布特征与环境地球化学过程的关系。周慧珍等^[7]研究了林牧地土壤的空间变异特征。王政权等^[8]研究了森林土壤物理性质的空间变异特征,并分析了变程范围内各物理性质之间的相关关系。孙波等^[9]研究了中亚热带低丘红壤地区土壤养分的时空变化特征,发现开垦对土壤养分的空间变异特征具有重要影响。可见空间变异性的研究是探讨土壤性质与环境因子关系的有效方法。

喀斯特峰丛洼地广泛分布于我国西南部,是长江、珠江的重要源头区。该地区的农业生产以及由此产生的侵蚀、磷、氮等富营养元素的非点源污染等环境问题不但威胁着本地区农业生产的可持续性,还维系着大江大河下游地区的生态安全。有机质是土壤的重要组成部分,其不但是氮、磷、钾等养分的直接来源,而且对于质地较粘的石灰土来说,较高的有机质水平有利于形成较好的团粒结构,反之其团粒结构就失去稳定性,使土壤有效水含量和抵御水土流失能力降低^[10]。以往的研究发现在喀斯特地区有机碳、氮、钾等养分与速效磷的空间分异具有截然不同的控制机制。有机碳等养分受人类干扰强度和地形地貌等自然环境因素综合影响,而速效磷更倾向于受施肥等人类农业实践活动控制^[11]。而且由于喀斯特地区特殊的二元水文结构以及复杂的地貌形态,土壤养分的方差来源也呈现出多来源且高变异的特征。为了进一步了解峰丛洼地系统土壤养分的空间变异结构及其与环境因素的关系,为复杂的变异性土壤探讨有效的分析评价方法。本文以有机碳和速效磷为例,利用地统计学方法,在 GIS 支持下研究了喀斯特洼地土壤养分的空间变异特征。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县下南乡古周村(24°54′42.6″~24°55′17.8″N, 107°56′48.1″~107°57′28.5″E),为典型喀斯特峰丛洼地景观,属亚热带季风气候区,多年平均气温 16.5~20.5℃,多年平均降雨量为 1389.1 mm,雨季平均持续 130~140 d,主要集中在 4~9 月份,尤以 6 月中旬至 7 月中旬最多,常出现涝灾;10 月至次年 3 月为旱季,又常受到干旱威胁。研究区地形起伏较大,最低点海拔 376 m,最高点海拔 816

m。土地总面积 186.7 hm^2 , 其中耕地 17.3 hm^2 。研究区土壤主要为碳酸盐岩发育的石灰土, 土质较粘重, 土被分布极不均匀, 基岩广泛出露, 特别是坡地平均裸岩率达 80% 以上, 植被退化较为严重, 森林覆盖率仅为 13%。研究区农业以旱作耕地为主, 有较长的耕作历史, 种植作物有玉米、牧草、大豆等, 主要分布在洼地。坡脚主要为退耕地, 种植木豆和板栗, 木豆和板栗种植时间约为 3~4a, 其中板栗尚未成林。耕地的耕作管理以农户为基本单位, 每年 11 月底普遍对玉米地和大豆地进行翻耕, 肥料主要施用农家肥、草木灰、人粪尿、尿素等, 此外还施用少量钙镁磷、过磷酸钙或氯化钾等化肥, 施用量因农户而异。牧草地施肥情况与玉米地相似, 但一般不施用草木灰和人粪尿, 每年也不进行翻耕。木豆-板栗地视农户的重视程度, 每年仅施用少量农家肥和尿素。

1.2 采样方法与样品分析

样本点的布设采用规则网格取样, 取样间隔 20 m, 共设置 528 个样点。用测绳和 GPS 测定并记录每个样点的位置, 并用长约 80 cm 宽 8 cm 的竹签标记。于 2004 年 1 月 20~25 日进行采样, 采样时在每个竹签周围 2 m 范围内随机采取 5 个样本, 混合后代表该样点土样。每个样本采取 0~15 cm 的表层土壤, 并详细记录该样点的土地利用方式、植被类型、耕作制度、裸岩率(岩石出露率)等环境信息, 其中裸岩率以样点周围 2 m 范围内岩石出露的面积估算。

考虑到土壤有机碳与氮素和钾素具有高度的相关性, 而速效磷呈现出与其他养分不一样的变异特征, 因而只探讨了有机碳和速效磷的空间变异特征。其中土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定, 速效磷(AP)采用 $0.5\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定。主要采用地统计学方法对土壤性质的空间变异特征进行分析。计算过程和模型的拟合均在专业地统计学软件包 GS+ (Version 5.3) 中实现。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

如表 1 所示, SOC 和 AP 均属于中等程度变异, SOC 的变异程度相对较小, 为 0.36, AP 为 0.61。单样本 K-S 检验表明, SOC 和 AP 不服从正态分布(表 1)。利用对数转换对原始数据进行了处理, 转换后的数呈正态或近似正态分布。对 SOC 和 AP 进行地统计学分析时均采用转换后的数据。

经过对数转换后的数据不能消除空间上的结构性异常点, 这些异常点在数据整体分布上并不异常, 却和周围的点有着强烈的差异。结构性的异常点, 会使样本数据的实验半方差值不能反映该滞后距上土壤养分的平均特征, 影响半变异函数模型的拟合和 Kriging 插值的精度。本文使用 Moran's I 系数法对各养分的异常值进行检测和剔除。关于 Moran's I 系数的计算公式和原理已有介绍^[12,13]。Moran's I 系数的计算在地理信息系统软件 Arcinfo 中实现。选取 0.05% 作为检验水平对各养分的样本数据进行检验, 检测结果如表 1 所示, SOC 有 4 个异常值, AP 有 8 个异常值。SOC 和 AP 异常点的分布如图 2 所示。当 $-1.96 < z < 1.96$ 时表示该点与周围点无显著差异, 当 $z > 1.96$ 时说明该点与周围点显著相似。在接下来的分析中, SOC 和 AP 的异常值均被去除, 以避免半变异函数出现不稳定的变化。

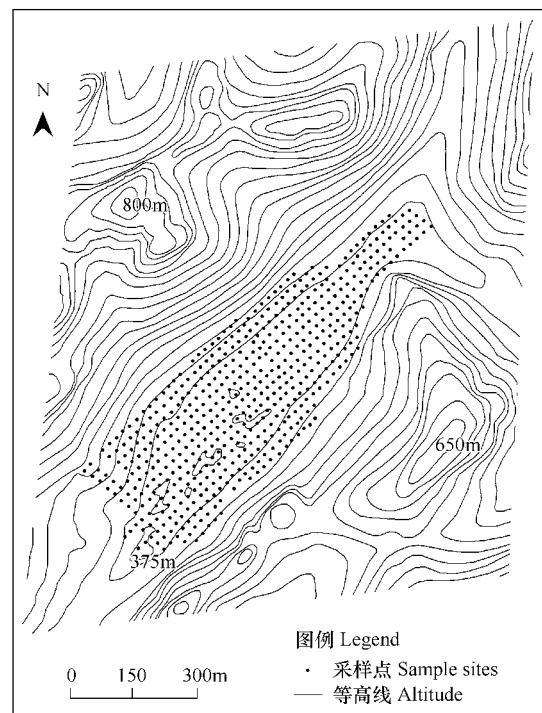


图 1 研究区土壤样点分布图

Fig. 1 Soil sampling locations in Guzhou catchment

表 1 洼地土壤养分描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of soil nutrient in Guizhou Depression									
土壤养分 Soil nutrients	样本数 Sample size	均值 Mean	标准差 S. D.	变异系数 CV (%)	最小值 Min.	最大值 Max.	K-S P (5%)	K-S P (5%) (Logarithmic transformation)	异常值个数 Number of outliers
SOC (g/kg)	528	15.50	5.61	0.36	6.00	49.38	0	0.35	4
AP (mg/kg)	526	8.93	5.45	0.61	1.37	66.32	0	0.782	8

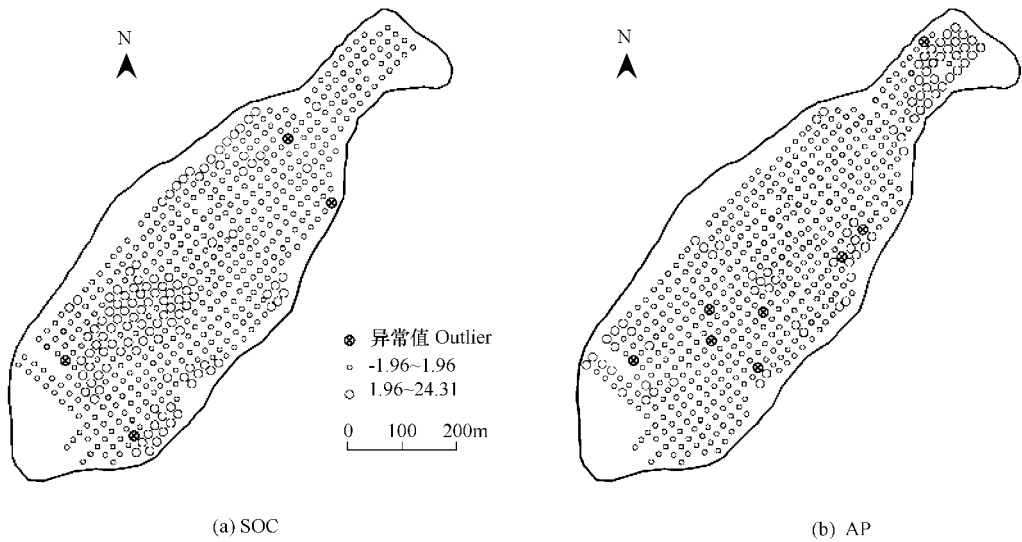


图 2 SOC 和 AP 异常值空间分布图

Fig. 2 Spatial symbol maps of SOC and AP outliers

2.2 土壤养分的空间变异特征

2.2.1 土壤养分的全向半变异函数特征

首先计算了全向条件下土壤养分的实验半变异函数(图 3)。分别用球状模型和指数模型对 SOC 和 AP 的半变异函数进行拟合,模型拟合结果如表 2 所示,拟合模型的决定系数较高,说明理论模型能较好反映土壤养分的空间结构特征。SOC 和 AP 块金值/基台值较大,分别为 37.87% 和 49.8%,表现为中等程度的空间自相关。在当前观测尺度上,随机因素对 SOC 和 AP 均有较大影响。主要与小尺度上的耕作扰动、施肥以及试验误差有关。变程反映了土壤养分在空间上的平均变异尺度,SOC 的变程为 135.5 m,与不同种植类型的地块尺度相当。AP 的变程较大,为 413.4 m。SOC 和 AP 不同的变异模式和变异尺度说明影响这两种养分的主要环境因素不同。

各土壤养分的半变异函数均表现出一定的孔穴效应。所谓的孔穴效应是指半变异函数曲线在超过一定范围(滞后距)后表现出的围绕基台值周期性上下波动的特征^[12]。孔穴效应的产生主要是由区域化变量周期性的变化引起的,说明研究区土壤性质存在周期性的变化。

表 2 土壤养分全向半变异函数理论模型及其结构参数

Table 2 The best-fitted semivariogram model of soil nutrient and it's structure parameters						
土壤养分 Soil nutrients	模型类型 Model type	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/ Sill (%)	变程 Range (m)	R ²
SOC (g/kg)	球状模型 Spherical	0.0406	0.1072	37.87	135.5	0.884
AP (mg/kg)	指数模型 Exponential	0.1256	0.2522	49.80	413.4	0.922

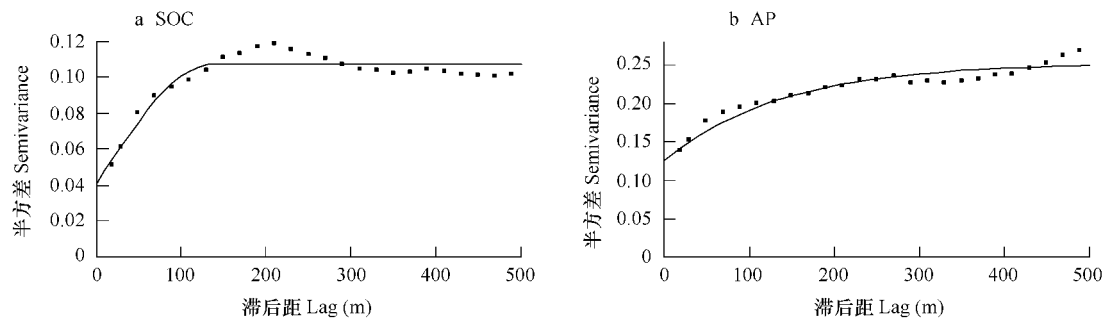


图3 研究区洼地 SOC 和 AP 全向半变异函数图

Fig. 3 Isotropic semivariogram of SOC and AP in research area

2.2.2 土壤养分的各向异性特征

利用 GIS 提供的各向异性轴向自动搜索功能,分析了土壤养分在主轴和从轴方向的空间变异特征。如表 3 所示土壤各养分的半变异函数主轴方向与洼地的延伸方向(NE 41°)大致相符,意味着土壤养分的控制因子在洼地长轴方向和短轴方向存在差异。

图 4 为主轴方向和从轴方向土壤养分的半变异函数图,表 3 为相应的半变异函数理论模型。SOC 和 AP 表现出明显的带状各向异性特征(主轴和从轴方向具有不同的基台值和变程),在洼地延伸方向均具有较大的变程,而在短轴方向变程较小,这主要与两方面的因素有关。一方面长轴方向地形相对平坦,土地利用结构也比较单一,土壤养分的变异比较和缓,变异尺度较大。而短轴方向受地形影响土地利用结构比较复杂,从坡脚到洼地出现木豆-板栗地—玉米地(大豆地)—牧草地的变化序列。土壤性质的变化很不稳定,变异连续性较差,变异尺度也较小;另一方面,短轴方向土壤养分的变程较短与采样区的形状有关。半变异函数是尺度的函数,采样范围的大小决定着半变异函数变程的大小^[14],大量研究表明,随着采样范围的增加,区域化变量的变程也相应增大^[14~16]。研究区采样点的布设为狭长的方形,长轴方向的距离约为短轴方向的 3 倍多,短轴方向狭小的采样范围也限制了半变异函数的变程。因而,不同方向观测尺度的差异也是影响土壤养分各向异性的重要因素。

长轴方向是洼地的延伸方向,水文过程在这个方向相对比较缓和,土地利用方式也主要以耕地为主,因而 SOC 在这个方向的基台值相对较小(表 3);短轴方向的基台值较大,这主要与两侧峰丛的分布有关,作为峰丛洼地正负地形交接面的垂直方向,水文过程在这一方向上变化强烈^[17],使得土壤理化性质在这一方向出现较大变化。另外土地利用结构对土壤养分的方向性分异也有很大贡献,由于研究区坡脚退耕后改种木豆和板栗,土壤理化性质显著好于洼地的耕地,使得 SOC 在这一方向的差异较为显著,土壤养分的变异程度较大,形成了如表 3 所示的带状各向异性特征。

表 3 土壤养分的方向性半变异函数模型及其结构参数

Table 3 The anisotropic semivariogram model of soil nutrients and it's structure parameters

土壤养分 Soil nutrients	轴向 Axis direction	模型类型 Model type	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill (%)	变程 Range (m)	R^2
SOC	NE 44°a	指数模型 Exponential	0.0355	0.0985	36.01	243.2	0.973
	NE 134°b	指数模型 Exponential	0.04	0.1467	27.3	237	0.964
AP	NE 41.1°a	指数模型 Exponential	0.11	0.231	47.6	345	0.808
	NE 131.1°b	球状模型 Spherical	0.0989	0.2193	45.1	112.7	0.984

a: 各向异性变异特征的主轴方向, b: 各向异性变异特征的从轴方向 a: means the long axes direction of anisotropic variogram, b: means the short axes direction of anisotropic variogram

2.2.3 土壤有机碳和速效磷的协半变异函数特征

有机质是土壤氮、磷、钾等营养元素的重要来源。研究发现 SOC 与 AP 具有显著的相关性,相关系数为

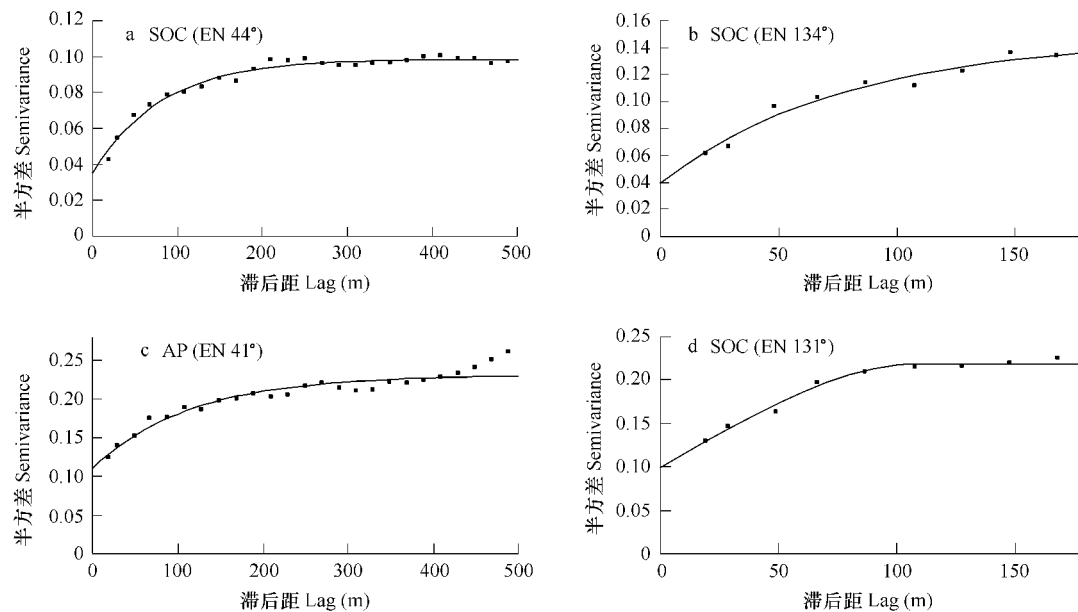


图4 土壤养分各向异性半变异函数图

Fig. 4 The anisotropic semivariogram of soil nutrients in Guzhou depression

0.116。不过有机质对 AP 的影响与氮素不同。施肥和生活废水的排放(如洗衣粉等)对土壤 AP 同样具有重要影响^[18],而且由于土壤对磷有着强大的吸持力,留存土壤中的磷几乎不能随土壤中下渗水流淋失。因而土壤磷素含量一方面依赖于土壤有机质水平,另一方面也依赖于农户化肥的施用量,以及不同植被的吸收利用率。化肥的施用对 AP 含量具有多方面的影响,有关研究表明,长期施用化肥磷(如钙镁磷、过磷酸钙等)可以显著提高土壤 AP 含量^[19],同时氮磷化肥的长期施用可以导致土壤变酸,提高石灰性土壤的 AP 水平^[20]。这也是土壤 AP 与 SOC 相关系数较小的原因之一。

协半变异函数能够描述养分在空间上的协同变化规律,尽管 SOC 和 AP 具有显著的相关性,但其协半变异函数在有效滞后距上表现为纯块金效应,没有任何空间结构特征(图 5)。这说明 SOC 与 AP 在空间没有协同变化规律,两者之间的相关性主要与全磷含量有关。

3 讨论

对土壤性质进行半变异函数结构分析有助于认识土壤性质与环境因子的复杂关系。Goovaerts^[21]认为土壤性质的半变异函数分析必须结合研究区域的具体情况和专业知识。喀斯特峰丛洼地具有地表特征破碎、基岩广泛出露、土被分布不连续等基本特点。研究发现,裸岩率和种植方式对土壤的养分含量具有重要影响^①。因而,可以推断,研究区土被连续分布区与石丛分布区间隔分布的地表特征以及种植方式交错变化的土地利用结构造成了 SOC 和 AP 空间期望的波动变化,形成了半变异函数的孔穴效应。这也提示在峰丛洼地地区进行农业生产和生态重建,不同的地表生境类型要采取不同的生态管理措施。

磷肥的施用可以显著提高土壤的 AP 水平^[19]。研究区耕地每年都要使用一定数量的钙镁磷肥,而且磷肥的施用一般以地块为管理单位。因而 AP 的变异尺度应该表现为地块尺度的变异特征(100~200 m)。但是 AP 的变异函数模型却表现出较大的变程(413.4 m)。经研究发现 AP 的全向半变异函数和主轴方向的半变异函数具有一定的趋势效应(图 3、4)。趋势效应有时是因为存在大于研究区尺度的过程对土壤性质具有重要影响,如高程对坡面土壤养分运移的影响^[4]。而在有的情况下是人为活动反复干扰的结果,如 Bocchi 等^[22]在意大利北部的一块实验田中发现土壤有机质的趋势效应,并认为有机质的这种分布特征主要与实验

① 张伟,陈洪松,王克林,等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响. 应用生态学报.

田一角反复倾倒液体粪肥有关。研究区北端居民点生活用水的排放和化肥的堆放导致研究区北段 AP 含量普遍偏高,使 AP 表现出趋势效应。趋势效应会掩盖中小尺度上的变异结构,通过构建的趋势面方程,分离 AP 的趋势效应有助于认识 AP 在中小尺度的变异特征。分离漂移趋势后 AP 的半变异函数图不再表现出趋势效应(图 6),AP 的变程也由原来的 413.4 m 变为 167.4 m(表 4),与研究区耕地的地块尺度相当,反映了不同种植方式和地块的差异性施肥对 AP 的影响。

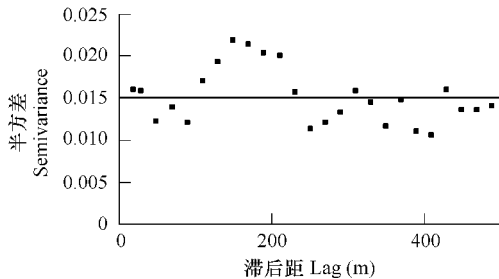


图 5 土壤养分协半变异函数图

Fig. 5 Cross semivariogram of soil nutrients in Guzhou depression

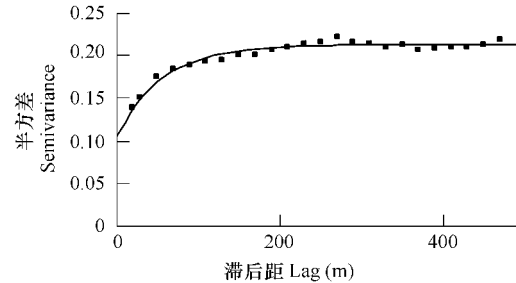


图 6 去除趋势效应后土壤养分半变异函数图

Fig. 6 Semivariogram of AP which subtracted liner trend

表 4 去除趋势效应后土壤速效磷的全向半变异函数理论模型及其结构参数

Table 4 The best-fitted semivariogram model of AP and it's structure parameters when the liner trend was subtracted

土壤养分 Soil nutrients	模型类型 Model type	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill (%)	变程 Range (m)	R^2
AP (mg/kg)	指数模型 Exponential	0.1057	0.2124	49.80	167.4	0.952

4 结论

4.1 研究区洼地 SOC 和 AP 均具有中等强度的空间自相关。小尺度上的耕作扰动、施肥以及试验误差对 SOC 和 AP 的方差贡献分别为 37.87% 和 49.8%。SOC 的变异尺度与洼地不同种植类型地块的覆盖尺度相当。

4.2 受研究区特殊的地形以及在此基础上的土地利用结构的影响, SOC 在洼地短轴方向的变异程度大于长轴方向,表现出明显的带状各向异性特征。AP 也表现出一定的带状各向异性特征,但是由于 AP 主要受施肥(钙镁磷、过磷酸钙,尿素等)和居民点生活废水排放影响, AP 的各向异性特征与 SOC 存在差异,在长轴方向的变异程度大于短轴方向。

4.3 AP 的空间变异具有明显的趋势效应,在北段居民点附近的养分含量明显偏高。分离漂移趋势后, AP 的变异尺度变小,与研究区耕地的地块尺度相当,反映了不同种植方式和地块的差异性施肥对 AP 的影响。

4.4 SOC 与 AP 具有显著相关性,但是协半变异函数分析表明 SOC 与 AP 在空间没有协同变化规律,这说明有机质与 AP 含量没有直接关系。AP 变异主要与施肥和居民点废水的排放有关。在喀斯特地区,不合理的耕作在造成有机质水平降低、土壤退化的同时,也造成了磷素非点源污染的潜在威胁。

References:

- [1] Mallarino A P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1473–1481.
- [2] Chen W H, Xie G D, Zhuo Q Q. The analysis of the spatial variability of farmland basic environment information. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 347–351.
- [3] Zhao Y C, Shi X Z, Yu D S, *et al.* Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei Province, China. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 379–385.
- [4] Dobermann A, Goovaerts P, George T. Sources of soil variation in an acid Ultisol of the Philippines. *Geoderma*, 1995, 68: 173–191.

- [5] Jackson R B, Caldwell M M. The scale of nutrient heterogeneity around individual plants and its quantification with geostatistics. *Ecology*, 1993, 74(2): 612—614.
- [6] Zhang C S, Zhang S, He J B. Spatial distribution characteristics of heavy metals in the sediments of Changjiang River system-geostatistics method. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(2): 184—182.
- [7] Zhou H Z, Gong Z T, Lamp J. Study on soil spatial variability. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(3): 232—241.
- [8] Wang Z Q, Wang Q C. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 945—950.
- [9] Sun B, Zhao Q G, Li G N. Spatio-temporal variability of red soil fertility in low hill region. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 190—198.
- [10] Cao J H, Yuan D X, Pan G X. Some soil features in karst ecosystem. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(1): 37—44.
- [11] Zhang W, Chen H S, Wang K L, *et al.* The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of karst region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(9): 1828—1835.
- [12] Wang Z Q. *Geo-statistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [13] Zhang C S, McGrath D. Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods. *Geoderma*, 2004, 119: 261—275.
- [14] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture. *Journal of Hydrology*, 1999, 217: 203—224.
- [15] Xu Y, Chen Y X, Shi H B, *et al.* Scale effect of spatial variability of soil water-salt. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(2): 1—5.
- [16] Sheng J D, Xiao H, Wu H Q, *et al.* Primary study of spatial variability of available soil nutrients in farmland with different sampling intervals. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 63—67.
- [17] Yang M D, Liang H. The processes of evolution dynamic of cone karst and the exploitation of the water resource. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 44—51.
- [18] Chen X, Yu W T, Shen S M. Changes of soil phosphorus pool under low-input phosphorus fertilization system II. soil available phosphorus and the composition of soil inorganic phosphorus. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(1): 81—88.
- [19] Guan Y, Yu W T, Li J D. Effects of long-term fertilization on soil nutrient pool. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(6): 131—137.
- [20] Liu X L, Gao Z, Liu C S, *et al.* Effect of combined application of organic manure and fertilizers on crop yield and soil fertility in a located experiment. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(2): 138—147.
- [21] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biol Fertil Soils*, 1998, 27: 315—334.
- [22] Bocchi S, Castrignanò A, Fornaro F, *et al.* Application of factorial Kriging for mapping soil variation at field scale. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13: 295—308.

参考文献:

- [2] 陈文辉, 谢高地, 卓庆卿. 农田基础环境信息空间变异行分析. *生态学报*, 2004, 24(2): 347~351.
- [3] 赵永存, 史学正, 于东升, 等. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究. *土壤学报*, 2005, 42(3): 379~385.
- [6] 张朝生, 章申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法. *地理学报*, 1997, 52(2): 184~182.
- [7] 周慧珍, 龚子同, Lamp J. 土壤空间变异性研究. *土壤学报*, 1996, 33(3): 232~241.
- [8] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. *生态学报*, 2000, 20(6): 945~950.
- [9] 孙波, 赵其国, 闫国年. 低丘红壤肥力的时空变异. *土壤学报*, 2002, 39(2): 190~198.
- [10] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 37~44.
- [11] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析. *中国农业科学*, 2006, 40(9): 1829~1835.
- [12] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [15] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 1~5.
- [16] 盛建东, 肖华, 武红旗, 等. 不同取样尺度农田土壤速效养分空间变异特征初步研究. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 63~67.
- [17] 杨明德, 梁虹. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用. *中国岩溶*, 2000, 19(1): 44~51.
- [18] 陈欣, 宇万太, 沈善敏. 磷肥低量施用制度下土壤磷库的发展变化 II. 土壤有效磷及土壤无机磷组成. *土壤学报*, 1997, 34(1): 81~88.
- [19] 关焱, 宇万太, 李建东. 长期施肥对土壤养分库的影响. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 131~137.
- [20] 刘杏兰, 高宗, 刘存寿, 等. 有机-无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究. *土壤学报*, 1996, 33(2): 138~147.