

喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征*

刘璐^{1,2} 曾馥平^{1,2} 宋同清^{1,2} 彭晚霞^{1,2} 王克林^{1,2,*} 覃文更³ 谭卫宁³

(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 547200; 3 木论国家级自然保护区管理局, 广西环江 547100)

摘要 基于网格(20 m×20 m)采样法采集土壤样品,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(200 m×100 m)土壤养分的空间变异特征。结果表明:研究区土壤 pH 值表现为弱变异,其他各养分指标均为中等程度变异,大小顺序为速效磷(AP)>速效钾(AK)>碱解氮(AN)>土壤有机质(SOM)>全钾(TK)>全磷(TP)>全氮(TN);pH 半变异函数的最佳拟合模型为球状模型,TK 和 AK 的最佳拟合模型为指数模型,其他养分指标的最佳拟合模型均为高斯模型;pH、AK 的变异尺度(变程)较小,分别为 58.1 和 41.1 m,SOM、TN、TP、AN、AP 的变异尺度相近,在 100~150 m,TK 的变异尺度最大(463.5 m);除研究区土壤 TK、TN 表现为中等的空间自相关性外,其他土壤养分指标均表现为强烈的空间自相关性。pH、AK 呈零星斑块状分布,表现为高异质性;SOM、TP、TK 的变化趋势较平缓,呈中间高、两边低的分布格局;AN、AP 的空间分布具有显著的相似性,均随坡度的增加而呈片状上升趋势;TN 的分布较特殊,呈中间低、两边高的趋势。植被、地形和高异质性的微生境是造成喀斯特木论自然保护区土壤养分格局差异的主要因素。

关键词 喀斯特 土壤养分 空间变异 地统计学

文章编号 1001-9332(2010)07-1667-07 中图分类号 S153.6 文献标识码 A

Spatial heterogeneity of soil nutrients in Karst area's Mulun National Nature Reserve. LIU Lu^{1,2}, ZENG Fu-ping^{1,2}, SONG Tong-qing^{1,2}, PENG Wan-xia^{1,2}, WANG Ke-lin^{1,2}, QIN Wen-geng³, TAN Wei-ning³ (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, Huanjiang 547200, Guangxi, China; ³Management Bureau of Mulun National Nature Reserve, Huanjiang 547100, Guangxi, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(7): 1667-1673.

Abstract: Soil samples were collected from the depression (200 m×100 m) in Karst area's Mulun National Nature Reserve by grid sampling method (20 m×20 m), with the spatial heterogeneity of soil nutrients analyzed by the methods of classic statistics and geo-statistics. The soil pH showed small variation, while the soil nutrients showed moderate variation, being in the order of available phosphorus (AP) > available potassium (AK) > available nitrogen (AN) > organic matter (OM) > total potassium (TK) > total phosphorus (TP) > total nitrogen (TN). Spherical model fitted best for soil pH, exponential model fitted best for soil TK and AK, and Gaussian model fitted best for other variables. The variation range of soil pH and AK was smaller, being 58.1 m and 41.1 m, respectively, that of soil OM, TN, TP, AN, and AP was from 100 m to 150 m, and that of soil TK was the largest (463.5 m). Soil TK and TN showed moderate spatial autocorrelation, while other soil nutrients showed strong spatial autocorrelation. Soil pH and AK presented fragmented patch distribution, showing high heterogeneity, while soil OM, TP, and TK changed gently, high in the middle and low in two sides. The spatial patterns of soil AN and AP were similar, *i. e.*, increased with landform slope. Soil TN had a distribution pattern of low in the middle and high in two sides. Vegetation, topography, and high heterogeneity of micro-habitat were the main factors caused the differences of the spatial distribution patterns of soil nutrients in the Reserve.

Key words: Karst; soil nutrient; spatial heterogeneity; geo-statistics.

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-08)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX-2-YW-436)、国家自然科学基金项目(30970508)和国家科技支撑计划项目(2006BAC01A10, 2009BAD6B008)资助。

* * 通讯作者。E-mail: kelin@isa.ac.cn

2009-12-16 收稿, 2010-04-01 接受。

土壤是一个时空连续的变体,具有高度的空间异质性,不论在大尺度还是小尺度上,土壤的空间异质性均存在^[1-2]。喀斯特峰丛洼地广泛分布于我国西南部,该地区人地矛盾突出、生态系统脆弱,由于其特殊的二元水文结构以及复杂的地貌形态,土壤养分变异呈现出多来源且高变异的特征^[3-4]。土壤肥力是土壤最重要的生态功能之一,对土壤养分空间变异的充分了解,是土壤养分管理和合理施肥的基础,对推动土壤科学定量化研究与精准农业的实施也具有重要意义^[5-6]。在生态脆弱地区,土壤养分的空间分布特征直接影响该地区土壤生产力的高低和生态恢复的途径和方向,因而探明土壤养分空间变异是合理指导喀斯特地区生态重建和农业生产的关键^[7]。

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,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^[8-11]。国内外学者应用地统计方法对土壤性质的空间变异特征进行了大量研究^[12-15],对喀斯特地区土壤养分与环境因素的关系也进行了多方面探讨,如许联芳等^[16]利用地统计方法探讨了不同土地利用方式下土壤养分含量的差异;龙健等^[17]研究发现,植被演替及不同退耕模式对喀斯特地区土壤养分具有重要影响。目前对喀斯特地区峰丛洼地土壤养分的空间变异研究较少^[18]。为此,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,结合经典统计学和地统计学方法分析了土壤养分的空间异质性和分布格局,初步探讨了其生态过程,以期为区域土壤养分的调控和生态恢复与重建提供理论依据和参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

木论自然保护区(25°07′01″—25°12′22″ N, 107°54′01″—108°05′51″ E)位于广西环江毛南族自治县西北部,东西 19.80 km、南北 10.75 km,林区总面积 89.69 km²,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的连片面积最大、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。该区属中亚热带季风气候,年均日照时数 1451.1 h,占全年可照时数(4422 h)的 32.8%,月平均日照时数以 7 月最多(190.7 h)、2 月最少

(61.5 h);平均气温 19.3 °C,极端最低气温 -5.0 °C,极端最高气温 36 °C,≥10 °C 年活动积温 6260 °C,无霜期 310 d;年均降水量 1529.2 mm(海拔 420 m),4—8 月降水量占全年降水量的 73.7%,年均相对湿度 79%,干燥度 0.69,湿润度 1.46。

本研究区域为典型的峰丛洼地,面积 190.2 hm²,其中,洼地面积 11.8 hm²,海拔 413.6 ~ 637.8 m。山坡的裸岩率高达 90%,只有零星分布的土壤,平均坡度约 35°,凹凸不平。

1.2 样品采集与分析

通过勘查,2007 年 11 月在保护区沿东南-西北方向按照 CTFS 标准^[19]设置一块 200 m×100 m 的动态监测样地,划分为 50 个 20 m×20 m 的方格(图 1)。采用规则网格取样,采样时在 20 m×20 m 范围内随机采取 5 个样本(每个样本取 0~15 cm 的表层土壤),混合后代表该样点土样,同时记录每个取样点的立地因子、植被、人为干扰等信息,并用手持 GPS 定位。土壤风干过筛备用。

pH 值采用电极电位法测定;土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾-外加热法测定;全氮(TN)采用半微量开氏法测定;全磷(TP)采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定;全钾(TK)采用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定;碱解氮(AN)采用碱解-扩散法测定;速效磷(AP)采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提法测定;速效钾(AK)采用 NH₄OAc 浸提法测定^[20]。

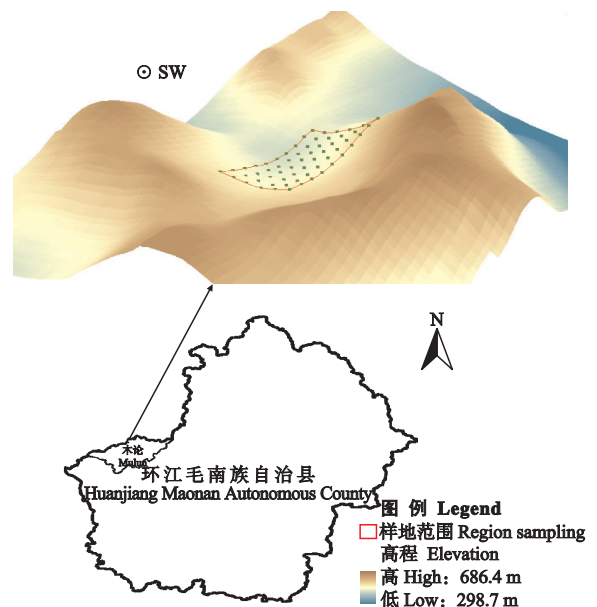


图 1 研究区样地的位置

Fig. 1 Location of the sample plots in the study area.

1.3 研究方法

半方差函数是应用广泛的空间格局描述工具^[21-23],其公式为:

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

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数值; $N(h)$ 为间距为向量 h 的点对总数; $Z(x_i)$ 为区域化变量 Z 在 x_i 处的实测值; $Z(x_i + h)$ 为与 x_i 距离为向量 h 处样点的值. 一般认为半方差函数只有在最大间隔的 1/2 内才有意义,本研究中半方差函数的有效滞后距均设为最大采样间隔的 1/2. 对半变异函数的拟合主要采用高斯模型(Gaussian),其公式为:

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}})$$

式中: C_0 为块金值(nugget); C_0+C 为基台值(sill); a 为变程(range); h 为滞后距离. 一般用决定系数(R^2)判断模型拟合的好坏. C_0 表示随机变异的大小,主要有 2 个来源:最小取样间隔内自然过程所造成的变异;试验误差. C 为结构方差,表示由土壤母质、地形、气候等非人为因素引起的变异. (C_0+C) 是半变异函数达到的极限值,在该值附近的半变异函数值不再单调递增,而是围绕该值上下波动. 如果变异函数的基台值存在则说明该空间变量平稳,可以认为基台值是该变量在研究区域的总变差. 块金值/基台值 [$C_0/(C_0+C)$] 表示空间异质性程度,其值 $<25\%$ 时,表示变量具有强烈的空间自相关性;在 $25\% \sim 75\%$ 时,变量具有中等的空间自相关性; $>75\%$ 时,变量的空间自相关性很弱;当该值接近 1 时,说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异. 变程表示具有相似性质的斑块的空间连续性的范围,变程以内的空间变量具有空间自相关性,变程以外则不存在空间自相关. 当某土壤养分观察值之间的距

离大于变程值时,说明它们之间相互独立;若小于变程值时,则说明它们之间存在一定的空间相关性.

1.4 数据处理

土壤养分的描述性统计分析在统计软件 SPSS 16.0 中完成. 在 GS+ 软件中用理论模型对各土壤养分指标的半变异函数进行拟合. Kriging 等值线图在 ArcGIS 9.2 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 喀斯特木论自然保护区土壤养分的描述性统计分析

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,分别用最大值和最小值代替. 经检验,只有研究区土壤的 AP 存在特异值,采用上述方法替换掉特异值后,对数据进行单样本 K-S 检验的结果表明,均符合正态分布. 然后对研究区土壤养分的各项指标进行地统计学分析,由表 1 可以看出,研究区土壤 pH 值的变异程度很小,变异系数仅为 6.9%,其他各指标的变异系数较接近,均在 39%~49%,属中等程度变异;各项土壤养分指标的变异程度依次为 AP>AK>AN>SOM>TK>TP>TN. 总体来看,研究区土壤速效养分的变异程度大于全量养分,土壤有机质的变异程度位于两者之间.

2.2 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间结构

如果变量在采样尺度上具有空间依赖性(或者空间相关性),半方差函数会随着滞后距的增加而增大,并且在超过一定距离(变程)后逐渐趋近于基台值或围绕基台值波动^[7]. 由图 2 可以看出,研究区各土壤养分指标均具有较明显的基台值,说明土壤养分具有明显的空间依赖性和空间结构.

表 1 研究区土壤养分的描述性统计特征

Tab.1 Descriptive statistics characteristics of the soil nutrients in the study area ($n=50$)

土壤养分 Soil nutrient	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard derivation	变异系数 Variance coefficient (%)	偏度 Skew	峰度 Kurtosis
SOM($g \cdot kg^{-1}$)	32.383	213.166	108.397	49.176	45.4	0.687	-0.437
TN($g \cdot kg^{-1}$)	2.830	11.159	5.526	2.194	39.7	0.834	-0.272
TP($g \cdot kg^{-1}$)	0.379	2.266	1.173	0.502	42.8	0.239	-0.956
TK($g \cdot kg^{-1}$)	2.000	11.664	5.386	2.335	43.4	0.685	-0.044
AN($mg \cdot kg^{-1}$)	206.979	1139.654	491.838	235.398	47.9	0.834	0.049
AP($mg \cdot kg^{-1}$)	1.962	34.517	11.444	7.586	66.3	0.948	0.436
AK($mg \cdot kg^{-1}$)	45.067	268.122	122.774	60.151	49.0	0.552	-0.873
pH	5.760	7.680	6.960	0.483	6.9	-0.665	-0.388

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; AN: 碱解氮 Available nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium. 下同 The same below.

喀斯特木论自然保护区各土壤养分指标最佳拟合模型的决定系数均很高,说明拟合模型能很好地反映土壤养分的空间特征(表2). 土壤 pH 的最佳拟合模型为球状模型,TK、AK 的最佳拟合模型为指数模型,其他指标的最佳拟合模型均为高斯模型(表2). 研究区各土壤养分指标的块金效应均为正值,说明存在一定的采样、试验误差. 各养分指标的块金值/基台值依次为 $TN > TK > AP > SOM > pH > AN > AK > TP$, 其中, TN、TK 的块金值/基台值分别为 0.451、0.340, 表现为中等空间自相关性; pH、SOM、TP、AN、AP、AK 的块金值/基台值均较小, 在 0.091 ~ 0.236, 表现为强烈的空间自相关性, 说明随机因素对这几项土壤养分指标空间分布的贡献较小, 其空间变异主要由土壤母质、地形、气候等自然因素(结构性变异)引起^[15]. 该区土壤 pH、AK 的变

程较小, 为 41.1 m, 其空间连续性较差; TK 的变程(463.5 m)较大, 其空间连续性很好, 有待更小尺度的研究; SOM、TN、TP、AN、AP 的变程接近, 在 100 ~ 150 m, 该范围与研究区典型景观单元的大小较接近.

2.3 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间格局
土壤是形态和演化过程都十分复杂的自然综合体, 受成土母质、地形、气候、植被等成土因素及人为干扰活动的影响, 具有复杂性和空间变异性^[24-27]. 基于半方差函数的建立, 应用 ArcGIS 软件中 Kriging 插值法绘制空间等值分布图, 能够更深刻、全面和直观地反映土壤养分在空间上的分布特征. 结合样地高程图, 由图 3 可以看出, 研究区土壤 pH 呈零星斑块状分布, 其值在洼地较低, 与土壤养分的空间分布具有一定的相似性; SOM、TP 呈凸型分布, 表现为中

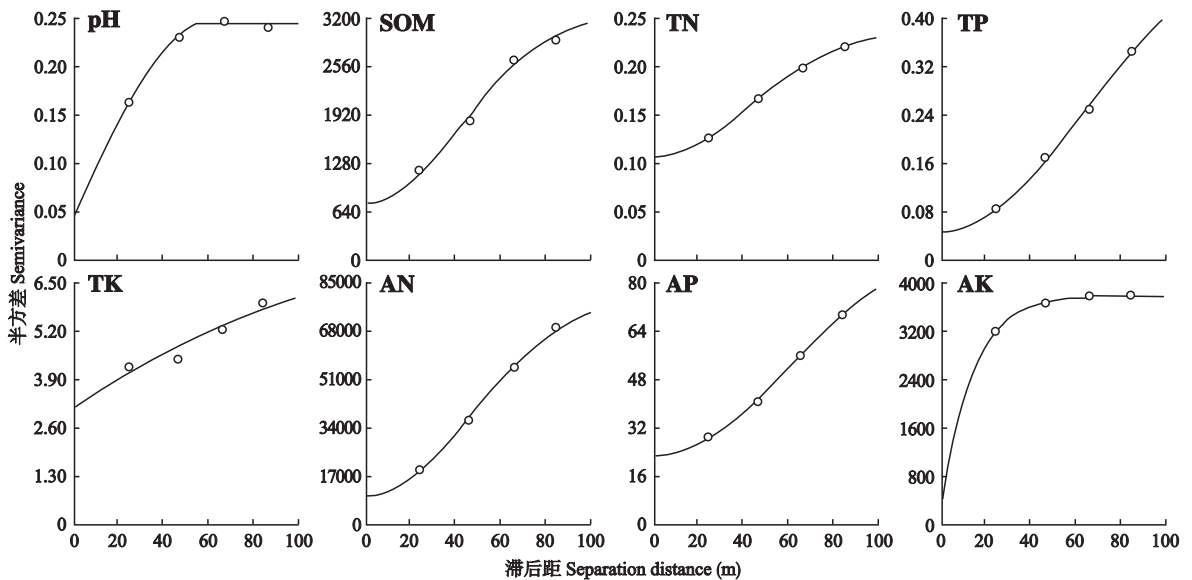


图2 研究区土壤养分的半方差函数图

Fig. 2 Semivariograms map of the soil nutrients in the study area.

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; AN: 碱解氮 Available nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium. 下同 The same below.

表2 研究区土壤养分半方差函数的模型类型及参数

Tab. 2 Semivariogram theoretical models and parameters for the soil nutrients in the study area

土壤养分 Soil nutrient	模型类型 Model type	C_0	C_0+C	a (m)	$C_0/(C_0+C)$	R^2
SOM ($g \cdot kg^{-1}$)	高斯模型 Gaussian model	760.00	3275.00	100.30	0.23	0.989
TN ($g \cdot kg^{-1}$)	高斯模型 Gaussian model	2.59	5.74	103.70	0.45	1.000
TP ($g \cdot kg^{-1}$)	高斯模型 Gaussian model	0.05	0.54	151.70	0.09	0.998
TK ($g \cdot kg^{-1}$)	指数模型 Exponential model	3.19	9.39	463.50	0.34	0.874
AN ($mg \cdot kg^{-1}$)	高斯模型 Gaussian model	10300.00	81700.00	113.30	0.13	0.996
AP ($mg \cdot kg^{-1}$)	高斯模型 Gaussian model	22.80	96.60	146.20	0.24	0.998
AK ($mg \cdot kg^{-1}$)	指数模型 Exponential model	350.00	3787.00	41.10	0.09	0.988
pH	球状模型 Spherical model	0.04	0.25	58.10	0.18	0.994

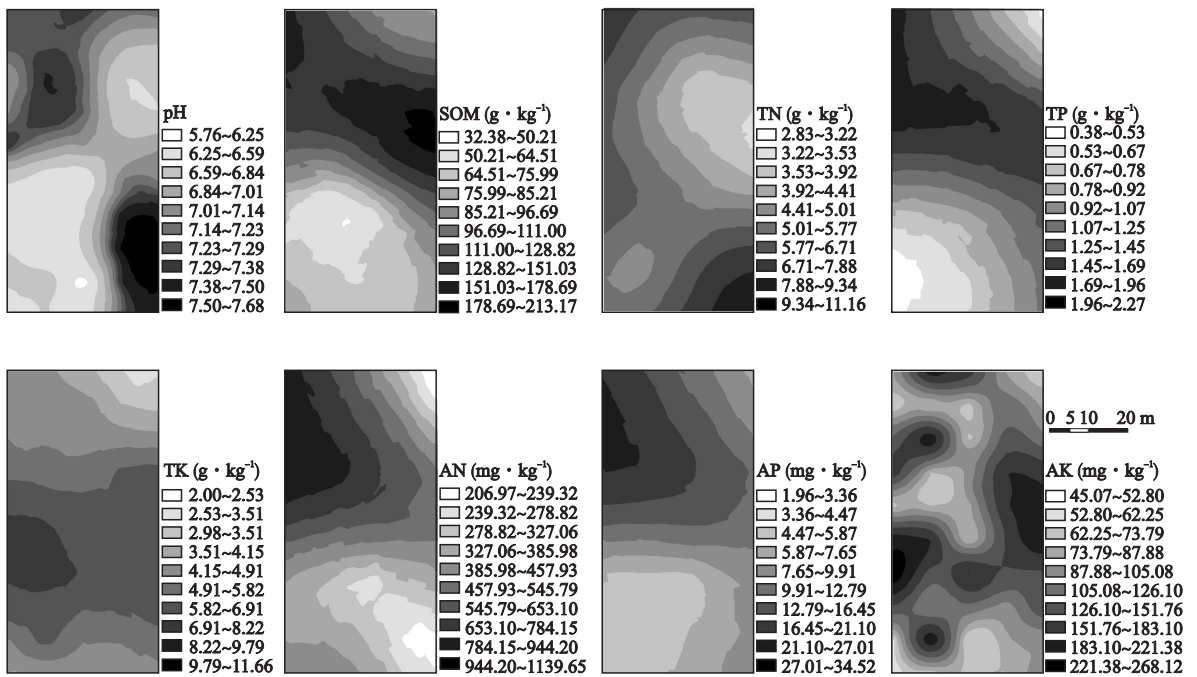


图 3 研究区土壤养分的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the soil nutrients in the study area.

间高、两头低,其含量由中间向两边呈片状下降趋势;AN 和 AP 呈单峰分布,且随着坡度的增加而呈片状上升趋势,在坡顶的含量最高;TN 在坡中含量最低,呈中间低、两头高的分布格局;TK 的变化趋势较规则、平缓,小区域内的差异不大;AK 的变化非常强烈,斑块小而多,相近区域土壤中的 AK 含量差异明显,规律性不强。

3 讨 论

本研究样地位于木论自然保护区内,为一典型的峰丛洼地单元,森林保存完好、人为干扰少、植被多样性高、地形地貌复杂多变、微生境丰富^[25]。经典描述性统计分析发现,研究区各土壤养分含量均为中等程度变异,速效养分的变异程度大于全量养分,这与喀斯特地区土壤的高异质性和营养元素的淋溶特征有关。结合张伟等^[7]的研究结果发现,在受到人为干扰后,SOM、土壤速效养分含量均显著下降,SOM 含量由 $108.397 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $30.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;而土壤全量养分的变化则相对不明显,TP 基本保持不变,TN 由 $5.526 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降至 $3.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 TK 反而有所增加 ($5.386 \sim 10.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由此可以看出,在强烈的人为干扰下,尽管施肥能补给部分营养元素,但土壤肥力仍急剧下降。因此,在喀斯特地区应尽量避免人为干扰,并确保植被的顺向演替和土壤养分的合理利用。

研究区土壤养分具有良好的空间结构,其半方差拟合模型能很好地反映土壤养分空间特征。该区土壤 SOM、TP、AN、AP、AK 的块金值/基台值均较小,表现为强烈的空间自相关性,说明随机因素对这几项土壤养分指标空间分布的贡献较小,其空间变异主要由土壤母质、地形、气候等自然因素(结构性变异)引起;TN、TK 表现为中等的空间自相关性,说明在当前观测尺度上,随机因素对这些养分的影响较大,可能与干扰、试验误差有关。喀斯特峰丛洼地土壤造壤能力差,土层浅薄且不连续,岩石裸露率高,使区域内很小的范围内就可能形成大量不同的微生境^[28-30]。张伟等^[18]认为,立地因子较高(裸岩率大、坡度较陡、土被较薄)处的土壤养分含量较高,这与研究区土壤 AN、AP 的分布特征基本一致。研究区 SOM、TP 的分布与研究区地形及植被覆盖度相关,呈凸型分布。研究区土壤 TN 的含量在坡中很低,可能与植被及建立保护区前的少量干扰有关;TK 的变化趋势较规则、平缓,呈中间高、两头低的分布格局,样地中间区域的坡度较平缓,土壤中的 TK 随水土迁移在此累积;且此部位大石块多而密集,石缝中土壤的 TK 高度富集,故坡中间处的土壤 TK 含量较高。研究区土壤 TK 的变程很大,反映其空间连续性较好,在现有研究尺度下的变化规律不明显,有待更小尺度上的研究。该区 AK 呈零星斑块状分布,且变化非常强烈,斑块小而多,规律性不强,表现为

高异质性;其变程较小,空间连续性较差,AK 的分布特征可能与土壤的淋溶特征有关.由于各种环境因子的综合作用,使研究区土壤养分的空间分布特征复杂多变,今后应加强对土壤养分空间格局机理的合理解释.

4 结 论

喀斯特峰丛洼地土壤养分具有不同的变异特征.除 pH 为弱变异外,本研究区其他土壤养分指标的变异程度较接近,在 39% ~ 49%,变异程度大小依次为 AP>AK>AN>SOM>TK>TP>TN.而各养分指标的块金值/基台值大小顺序为 TN>TK>AP>SOM>pH>AN>AK>TP.

研究区土壤养分指标的半变异函数均表现出一定的空间结构特征,其变程在 41.1 ~ 463.5 m.其中,pH、AK 的变程较小,分别为 58.1 和 41.1 m, SOM、TN、TP、AN、AP 的变程接近,在 100 ~ 150 m, TK 的变程很大,为 463.5 m.该区土壤 TK、TN 表现为中等的空间自相关,其他土壤养分指标均表现为强烈的空间自相关,说明影响研究区土壤养分的因素复杂.

研究区土壤 pH、AK 的分布呈零星斑块状分布,AK 的空间变异性尤为强烈,且规律性不强,可能与淋溶有关;SOM、TP 呈凸型分布,主要受地形与植被覆盖度的影响;AN、AP 的空间分布具有显著的相似性,两者均随坡度的增加呈片状上升趋势,在坡顶出现峰值,其分布主要受立地因子的影响;TN 含量在坡中最小,呈中间低、两头高的分布格局,这可能与少量干扰有关;TK 的变化趋势较规则、平缓,呈中间高、两头低的分布格局,尚有待更小尺度的研究.

结合前人的研究发现,在受到强烈的人为干扰后,研究区土壤养分含量显著降低,其空间分布发生明显变化.土壤性质空间分布的变化可能加剧生态系统的脆弱化,导致生态系统加速退化.因而,在地形破碎、土层浅薄的喀斯特地区进行农业生产时,应强调保护和适度开发.

参考文献

- [1] Xiong H-F (熊汉锋), Wang Y-H (王运华). Spatial variability of soil nutrients in wetland of Liangzi Lake. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(5): 584-589 (in Chinese)
- [2] Wang J (王 军), Fu B-J (傅伯杰), Qiu Y (邱扬), et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(8): 1173-1178 (in Chinese)
- [3] Peng W-X (彭晚霞), Wang K-L (王克林), Song T-Q (宋同清), et al. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(2): 811-820 (in Chinese)
- [4] Zhang W (张 伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), et al. Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a typical Karst depression, northwest of Guangxi. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 5168-5175 (in Chinese)
- [5] Gao Y-R (高玉蓉), Xu H-W (许红卫), Zhou B (周斌). Investigation on spatial variability of soil nutrients in paddy field. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2005, **36**(6): 822-825 (in Chinese)
- [6] Zhang Y-M (张玉铭), Mao R-Z (毛任钊), Hu C-S (胡春胜), et al. Spatial variability of farmland soil nutrients at Taihang piedmont. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(11): 2049-2054 (in Chinese)
- [7] Zhang W (张 伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), et al. Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical Karst peak-cluster depression areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(1): 68-73 (in Chinese)
- [8] Guo X-D (郭旭东), Fu B-J (傅伯杰), Ma K-P (马克平), et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS: A case study in Zunhua City of Hebei Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(4): 557-563 (in Chinese)
- [9] Li B-H (李步杭), Zhang J (张 健), Yao X-L (姚晓琳), et al. Seasonal dynamics and spatial distribution patterns of herbs diversity in broadleaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 467-473 (in Chinese)
- [10] Ma F-Y (马风云), Li X-R (李新荣), Zhang J-G (张景光), et al. Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(5): 789-795 (in Chinese)
- [11] Wu J-G (邬建国). *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese)
- [12] Juran L, Okin GS, Alvarez L. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. *Biogeochemistry*, 2008, **88**: 73-88
- [13] Wang S-Y (王淑英), Lu P (路 苹), Wang J-L (王建立), et al. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales: A case study in Pinggu County, Beijing. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(10): 4957-4964 (in Chinese)
- [14] Sui P-F (隋鹏飞), Hao J-M (郝晋珉), Li S-Y (李双

- 异), *et al.* The spatio-temporal variability of soil nutrients in Gongzhuling of Jilin Province. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(1): 7-12 (in Chinese)
- [15] Liang Z-L (梁中龙), Yuan Z-Y (袁中友), Lin X-T (林兴通), *et al.* Spatial variability of soil nutrients in Guangzhou suburb. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(3): 417-421 (in Chinese)
- [16] Xu L-F (许联芳), Wang K-L (王克林), Zhu H-H (朱捍华), *et al.* Effects of different land use types on soil nutrients in Karst region of Northwest Guangxi. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(5): 1013-1018 (in Chinese)
- [17] Long J (龙健), Deng Q-Q (邓启琼), Wang X-R (汪新荣), *et al.* Effects of different de-farming and re-forestation patterns on changes of soil fertility quality in Karst region of southwestern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(7): 1279-1284 (in Chinese)
- [18] Zhang W (张伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), *et al.* The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of Karst region. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(9): 1828-1835 (in Chinese)
- [19] Condit R. Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, **10**: 18-22
- [20] Bao S-D (鲍士旦). Soil Agricultural and Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [21] Wang Z-Q (王政权). Geostatistics and Its Application to Ecology. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [22] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27**: 315-334
- [23] Zhang W (张伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), *et al.* Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in Karst region in dry season. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(4): 554-562 (in Chinese)
- [24] Zhang S-L (张少良), Zhang X-Y (张兴义), Cui Z-L (崔战利). The spatial variability of organic matter and total nitrogen contents in black soil region of Harbin. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture* (农业系统科学与综合研究), 2007, **23**(3): 333-337 (in Chinese)
- [25] Li S-Y (李双异), Liu H-Y (刘慧屿), Zhang X-D (张旭东), *et al.* Spatial variability of soil fertility quality indices in northeast China. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(2): 220-225 (in Chinese)
- [26] Wang J-K (汪景宽), Li S-Y (李双异), Zhang X-D (张旭东), *et al.* Spatial and temporal variability of soil quality in typical black soil area in northeast China in 20 years. *Chinese Journal of Eco-agriculture* (中国生态农业学报), 2007, **15**(1): 19-24 (in Chinese)
- [27] Xin G (辛刚), Yan L (颜丽), Wang J-K (汪景宽). Changes of organic carbon in black soils with the different reclamation years. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2002, **33**(5): 332-335 (in Chinese)
- [28] Wu H-Y (吴海勇), Zeng F-P (曾馥平), Song T-Q (宋同清), *et al.* Spatial variations of soil organic carbon and nitrogen in peak-cluster depression areas of Karst region. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(5): 1029-1036 (in Chinese)
- [29] Zhang J-G (张继光), Su Y-R (苏以荣), Chen H-S (陈洪松), *et al.* Spatial and temporal dynamics of soil moisture in the peak-cluster depression area in Karst Region. *Journal of Agro-environment Science* (农业环境科学学报), 2007, **26**(4): 1432-1436 (in Chinese)
- [30] Wang K-L (王克林), Su Y-R (苏以荣), Zeng F-P (曾馥平), *et al.* Ecological process and vegetation restoration in Karst Region of southwest China. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 2008, **29**(6): 641-645 (in Chinese)

作者简介 刘璐,女,1987年生,硕士研究生.主要从事土壤微生物研究. E-mail: liu_lu0826@163.com

责任编辑 杨弘
