

DOI: 10.5846/stxb201405100951

王淑彬, 徐慧芳, 宋同清, 黄国勤, 彭晚霞, 杜虎. 广西森林土壤主要养分的空间异质性. 生态学报, 2014, 34(18): 5292-5299.

Wang S B, Xu H F, Song T Q, Huang G Q, Peng W X, Du H. Spatial heterogeneity of the main nutrients in Guangxi forest soils. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5292-5299.

广西森林土壤主要养分的空间异质性

王淑彬¹, 徐慧芳^{1,2,3}, 宋同清^{2,3,*}, 黄国勤¹, 彭晚霞^{2,3}, 杜虎^{2,3}

(1. 江西农业大学作物生理生态与遗传育种江西省/教育部重点实验室, 南昌 330045;

2. 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;

3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100)

摘要:通过对广西区 7 大森林片区的 11 个主要森林类型样地土壤养分含量进行分析, 利用地统计学方法, 研究了广西区森林主要土壤养分的空间变异状况及分布格局, 探讨了其相关的生态学过程, 以期为广西区森林分区与林间采取不同措施管理提供科学依据。结果表明: 广西区森林土壤主要养分基本属于中等变异, 速效养分变异大于全量养分, 其中 AP、AK 变异程度最大; 广西森林土壤主要养分的半变异函数均表现出一定的空间结构特征, TN、TP、AP 表现为中等强度的空间自相关, TK、AN、AK 表现为强烈的空间自相关; 不同土壤养分空间结构不同, Kriging 等值线图表明广西区氮素含量比较丰富、K 含量中等、P 含量较少, 北部片区土壤养分含量普遍大于南部片区, 这可能与气候、降雨、人工种植森林树种、地形、林地管理措施等有关。

关键词:森林土壤; 主要养分; 空间变异; 地统计学; 广西

Spatial heterogeneity of the main nutrients in Guangxi forest soils

WANG Shubin¹, XU Huifang^{1,2,3}, SONG Tongqing^{2,3,*}, HUANG Guoqin¹, PENG Wanxia^{2,3}, DU Hu^{2,3}

1 Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Jiangxi Province and Ministry of Education, Nanchang 330045, China

2 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

3 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi Zhuang Autonomous Region 547100, China

Abstract: Soil is a complex natural system with strong spatial heterogeneity of its internal properties. The properties of soil are strongly varied even at the centimeter scale and the changes in soil properties on a large scale have a pivotal role in the patterns of ecosystem growth. Soil fertility is one of the most important ecological functions of soil and its spatial layout and structure directly affects the ability of plants to recover from stress as well as affecting plant height and overall ecosystem productivity. In the fragile habitats of the Guangxi area, the spatial distribution characteristics of soil nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) are strongly related to the regional distribution of shrub vegetation. Studies on the nutrient variability in forest soil of this area will help to understand the plant community structure and ecosystem energy flows. Forest resources are very rich in the Guangxi area making it one of the most important forest areas in southern China. Located in the southwest of China, Guangxi's forest is obviously geographically different to the rest of China. In recent years, the forested area of Guangxi has substantially increased through the introduction of a variety of tree species. This abundant introduced forest type is beneficial to economic development, but a lack of understanding of the nutrient

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205, XDA05070404); 国家科技支撑计划(2011BAC09B02); 国家自然科学基金项目(31370485, 31370623, U1033004)

收稿日期: 2014-05-09; 修订日期: 2014-08-11

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

distribution in forest soils in Guangxi has led to poor decisions regarding which tree species to introduce. This, in turn, has led to a decline in the quality of forest soil, has wasted resources and has limited the development of the forestry industry in Guangxi. This research investigated the main soil nutrients (N, P and K) of eleven forest types in seven forest districts in Guangxi. Geostatistics is used to study the spatial variation and pattern of the soil nutrients, and then the ecological implications of this were discussed to provide a scientific basis for forest division and management decisions in Guangxi. The results showed that the main forest soil nutrients in Guangxi had an overall medium level of variability but the variability of the soil available nutrients was larger than soil total nutrients, among which the variability of available P and K were largest. All the semi-variable functions of forest soil nutrients in Guangxi showed distinct spatial structural features. Soil total N and P and available P performed moderate spatial autocorrelation, while soil total K and available N and K performed strong spatial autocorrelation. The spatial structures of forest soil nutrients were diverse. The kriging contour maps showed that the soil N pool was abundant, the K pool was medium and the P pool was relatively low in Guangxi forest soils, and that the main soil nutrient contents in the north district of Guangxi was larger overall than in the south district. The spatial pattern of the main soil nutrients in Guangxi forests may be related to climate, precipitation, plantation forest species, topography and forest management practices and the effect of these factors on soil nutrients requires further investigation.

Key Words: forest soil; main nutrient; spatial variability; geostatistics; Guangxi

森林土壤是一个无比巨大的碳汇,也是一个天然的肥料库,能有效地协调植物生长所需的水肥气热等条件,是影响植物生存最为重要的因素之一^[1]。土壤是一个复杂的自然综合体,内部性质存在着强烈的空间异质性,即使在几厘米的空间距离上其性质也存在强烈变异^[2]。因此,土壤属性较大尺度的变化,对森林格局具有决定性作用^[3]。土壤养分的空间分布特征为精确农业及生态建模提供依据,几乎所有的分布式水文模型^[4]、气候变化模型^[5]都需要土壤养分的空间信息。土壤肥力是土壤最重要的生态功能之一,其空间布局与组成结构直接影响着土壤生产力的高低、生态系统恢复的途径与方向。在脆弱生境中,土壤 N、P、K 的空间分布特征与灌丛植被的分布区域具有高度相关性^[6-7]。因此,开展森林土壤养分空间变异的研究对探索森植物群落结构及其生态系统能量流动具有指导意义^[8-9]。

广西壮族自治区位于我国西南部,森林资源非常丰富,是中国南方重要林区之一。属于低纬度地区,地处中、南亚热带季风气候区,林种分布地域差异明显,以北回归线为界,南部为具有热带特点的森林,北部为亚热带常绿阔叶林。近年来,森林面积有了大幅度的增长,通过引入国外树种,森林类型更加丰富,但缺乏广西区森林土壤养分空间分布规律的科学认识,优势林种选择不合理导致森林质量下降、土壤资源浪费,限制了广西林业的发展。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,不仅能够有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,而且可以将空间格局与生态过程联系起来,有效解释空间格局对生态过程与功能的影响^[10-12]。国内外学者广泛应用地统计学研究了不同尺度上土壤属性的空间变异特征^[13-16],喀斯特峰丛洼地森林土壤水分、有机质、矿物质、养分的研究也不少^[17-21],但关于区域尺度森林土壤肥力空间变异的报道甚少。本文以广西区森林主要土壤养分为研究对象,用地统计学的空间特征和空间比较量化方法,分析广西区森林土壤养分的空间异质性和分布格局,初步探讨了其生态学过程和机制,为提高广西区脆弱生态系统土壤肥力、促进该区域植被迅速恢复与生态重建提供理论依据和参考。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 自然概况

广西壮族自治区位于我国西南部,东经 104°26'—112°04'之间,北纬 20°54'—26°24'之间,属热带、亚热带地区,气候温暖,日照充足,降水丰富,年降水量范围为 1080—2760 mm,降水季节分布不均,有明显的干湿季,4—9 月为雨季,总降水量可达到全年降水量的 70%以上,10 月至次年 3 月是干季。广西地势西北较高,由西北向东南倾斜。河流广布,流向多与地质构造一致,四周多被山地、高原环绕,呈

盆地状。盆地边缘多缺口,桂东北、桂东、桂南沿江一带有大片谷地。广西区内土壤类型多样,有 18 个土类,34 个亚类,109 个土属,327 个土种,主要有砖红壤、赤红壤、红壤、石灰岩土、黄壤、黄棕壤、紫色土、水稻土等^[22]。

广西地处亚热带热带地区,温度从南到北由于纬度的升高而降低,直接影响着森林植被的分布,呈现规律性的更替显现。广西南部以北热带季节性雨林为主;中部与南部分别以棒科植物的常绿阔叶林和壳斗科植物为代表的常绿叶林。广西区森林划分为 7 个片区,天然林以常绿阔叶林为主,亚热带落叶阔叶林、亚热带针叶阔叶混交林、亚热带针叶林分布面积也较大。其中,亚热带针叶阔叶混交林仅在百色地区有分布。集中连片的天然阔叶林分布在九万大山、大瑶山、海洋山、西大明山、猫儿山、富川西岭、大明山、花坪林区、姑婆山等。广西的人工林以松、杉、桉等用材林和油桐、油茶、八角、肉桂、栲胶等经济林为主。样地的森林种类在各个地区属于代表性林种,其中桉树主要分布在桂东南地区,石山林主要分布于桂西北,杉木主要样地主要分布在桂东北地区,松类样地主要分布在桂南。

1.2 土样采集方法与分析

在广西区境内设立共 115 个样点,每个样点有 3 个重复样地(20 m×50 m),共 345 个样地,其中每个样地之间直线距离>100 m,每个样地围成 10 个 10 m×10 m 的小样方,在每个样地 1、3、8 小样方用土钻取样法,去除表面枯枝落叶,取表层 0—10 cm 土壤,混合后土壤代表该样点土样,并详细记录该样点的植被类型、岩石裸露率等环境信息,坡度、坡向、土层厚度等地理信息,GPS 定位,记录样地四点经纬度及

海拔。

土壤样品指标室内分析主要包括全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)。其中 TN 采用半微量开氏法测定;TP 采用 NaOH 熔融钼锑抗显色紫外分光光度法测定;TK 采用 NaOH 熔融原子吸收法测定;AN 采用碱解扩散法测定;AP 采用 0.05 mol/L NaHCO₃ 提取钼锑抗显色紫外分光光度法测定;AK 采用 NH₄Ac 浸提原子吸收法测定。

1.3 数据处理

所用统计计算及模型的拟合在 SPSS 和专业地统计软件 GS⁺中完成。地统计学有关方法及原理限于篇幅不作详细介绍,具体参见文献^[23-25]。

2 结果与分析

2.1 经典统计描述

文中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,分别用正常的最大和最小值代替^[26],后续计算均采用处理后的原始数据。由广西森林土壤养分含量的统计特征(表 1)可看出,TN、TP、TK 的变化范围分别为 0.27—6.85、0.1—1.46、0.41—30.75 g/kg,AN、AP、AK 分别为 34.67—561.19、0.93—78.76、7.23—417 mg/kg。不同土壤养分变异幅度不同,除 AP 外变异系数均介于 10%—75%,呈中等变异,这可能与养分元素在土壤中的化学行为及肥料施用状况、林间管理措施等有关。速效成分受随机因素影响较大,所以变异程度较大,土壤全量变异系数较小,说明其在土壤中含量较稳定。土壤各养分的偏态数(Skewness)均大于零,表明均呈正偏态分布,其中TK的偏度最小,AP

表 1 广西区森林土壤养分描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of main soil nutrients in Guangxi forests

指标 Indexes	样本数 No. of samples	均值 Means	标准差 Standard variance	变异系数 Variance /%	最小值 Min.	最大值 Max.	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 值 Value of K-S test	分布类型 Distribution types
TN/(g/kg)	345	2.474	1.37802	55.69	0.27	6.85	0.886	0.444	0.215 *	N
TP/(g/kg)	345	0.506	0.29810	58.91	0.1	1.46	1.341	1.645	0.661 *	N
TK/(g/kg)	345	10.830	6.30446	58.21	0.41	30.75	0.867	0.889	0.121	N
AN/(mg/kg)	345	208.476	113.25763	54.21	34.67	561.19	1.014	0.707	0.730 *	N
AP/(mg/kg)	345	12.038	9.49778	78.90	0.93	78.76	2.426	9.482	0.055 *	N
AK/(mg/kg)	345	131.807	82.89130	62.75	7.23	417.00	1.453	2.589	0.057 *	N

* 对数转换后 Data after logarithmic transformation; N:正态分布 Normal distribution

的偏度最大。与标准正态分布相比,峰值系数(Kurtosis)大于3时样本数据为高狭峰,低于3时为低阔峰。除AP外,其他养分均为低阔峰,TP最接近正态分布,其他养分均不服从正态分布,进行对数转换后均符合正态分布。描述性统计分析能够反映样本本体的基本信息,而不能定量地刻画土壤养分的随机性、结构性、独立性和相关性^[27]。因此,需要采用地统计学分析土壤养分的空间变异特征。

2.2 空间变异特征

由图1可知,广西森林土壤AN试验半变异函数的最佳拟合模型为球状模型,其他养分均为指数模型, R^2 除TK外在0.653—0.941之间,RSS除TK外均较小,说明各变量最佳模型拟合度较高,能很好地反映各土壤养分的空间结构特征,各半变异函数模型

的结构参数见表2。TN、AN的变程相近且均较大,分别为5.304°和5.667°,TK变程最小,为0.186°,TP、AP、AK的变程介于其间。TN、TP、AP的块金值/基台值较大,介于28%—49.9%之间,为中等程度的空间自相关。TK、AN、AK的块金值/基台值相对较小,分别为10.4%、23.7%、21.8%,都小于25%,表现为强烈的空间自相关性。各土壤养分的变异系数与块金值/基台值并不对应,AN变异程度虽然较大,但块金值/基台值较小,说明人类的随机干扰对AN空间变异的贡献较小,土壤氮素的空间异质性主要来源于结构因素。除AN、AK外各土壤养分的半变异函数曲线在超过一定滞后距后不再增加,而是围绕基台值呈周期性上下波动的特征,即孔穴效应^[25,28],这种现象主要是由区域化变量周期性变化

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 nutrients and the structure parameters

土壤养分 Soil nutrients	模型类型 Model types	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)$	变程 A Range/(°)	R^2	RSS
TN	指数模型	0.1370	0.4890	0.280	5.304	0.882	0.0145
TP	指数模型	0.1263	0.3586	0.352	2.862	0.941	0.0034
TK	指数模型	4.0000	38.300	0.104	0.186	0.352	146
AN	球状模型	0.1170	0.494	0.237	5.667	0.920	0.0104
AP	指数模型	0.3460	0.693	0.499	1.596	0.720	0.0373
AK	指数模型	0.2520	1.156	0.218	2.103	0.653	0.0851

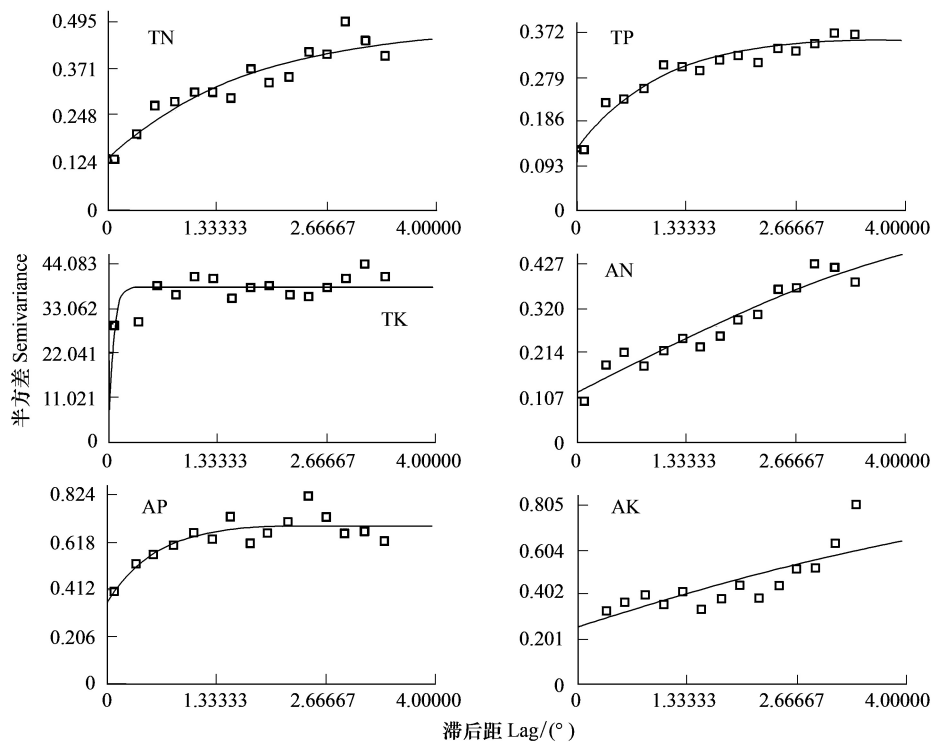


图1 广西森林土壤养分半变异函数图

Fig.1 Isotropic semivariogram of forest soil nutrients in Guangxi

引起的,说明研究区土壤养分空间异质性具有周期性变化的特征。

2.3 空间分布特征

土壤养分的空间分布格局受海拔、人为干扰、植被、地形等人为与自然因子的综合影响,不同因子的主导作用导致不同养分的空间格局。广西森林土壤

TN 含量比较丰富,高于 0.5 g/kg,空间变异规律明显,呈北部地区含量较高、向南部和西北部逐渐降低的空间格局。TN 含量高的森林土壤集中在西北部地区的河池、柳州、桂林、百色、贺州和崇左,森林类型主要为石山灌木及松杉类。AN 的空间分布格局与 TN 极为相似(图 2)。

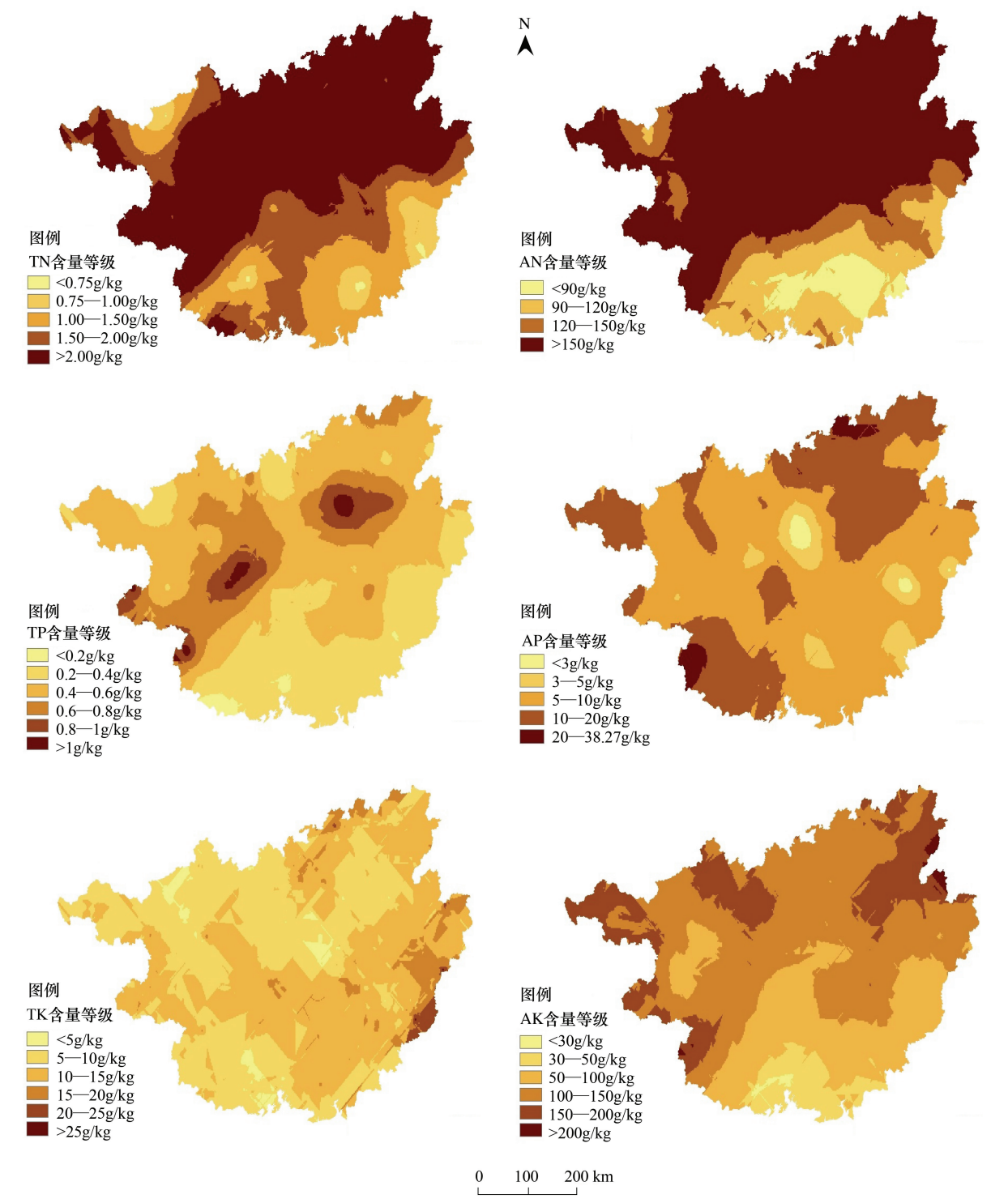


图 2 广西森林土壤养分 Kriging 等值线图

Fig.2 Kriging contouring maps of forest soil nutrients in Guangxi

<http://www.ecologica.cn>

广西森林土壤 TP 含量并不丰富,尤其广西南部森林土壤 TP 极为贫乏;有两个高峰区——桂柳和河池地区,含量大于 1 g/kg,由这两个区向四周逐渐减少,在广西西南部百色与崇左出现了次高含量区域。AP 的空间变异比较复杂,分布格局并没有明显规律,AP 高值区分布在广西区东北部与西南部边缘,中等值集中在广西西北、东北、西南 3 个边角及位于南宁与百色交接处,含量最低的区域分布在柳州与梧州,这可能与河流的分布有关。

广西森林土壤 TK 的空间分布比较均匀、平衡,高值分布在东南边缘地区,次高值主要分布在东南部和东北部,中等值 TK 含量(10—15、5—10 g/kg),占总面积的 86.2%,说明广西区森林土壤 TK 含量并不丰富。AK 的空间变异格局比较有规律,总体的分布格局是北高南低,高值区主要分布在广西东北部,次高值主要分布在东北部、西北部及中北部边缘地区,中等值主要分布在广西中部和北部大片区域,低含量区域主要分布在广西南部。

3 结论和讨论

3.1 广西森林土壤养分的总体特征

广西森林分为 7 个片区,不同片区养分含量状况不同,变异程度也不相同。总体而言,北部森林养分含量高于南部森林片区(数据未显示),其中广西南部 I A2a、II A1a 两个片区各种养分含量均很低,造成片区养分不平衡的原因有多种,这可能与森林类型有关。南部片区森林类型主要为桉树林,桉树是广西区主要人工经济林树种,生长快,养分消耗大,导致土壤养分急剧流失,北部森林以石山灌木、松、杉类为主,生长速率较慢,养分循环也较好,受人为干扰小,土壤养分含量维持较高水平。土壤养分差异除受森林类型影响外,还与地形、气候、土壤类型有密切关系。

广西区森林土壤养分基本属于中等变异,速效养分变异程度大于全量养分,其中 AP、AK 变异程度最大。进一步的地统计学分析,发现广西森林土壤养分除 TK 外拟合效果均很好,变程大小为 $AK > AN > TN > TP > AP > TK$,TN、TP、AP 的块金值/基台值较大,表现为中等程度的空间自相关,说明在当前观测尺度上,随机因素对这些养分影响较大,与林间管理施肥、砍伐及实验误差有关。TK、AN、AK 表现为强

烈的空间自相关。说明随机扰动对这些养分的影响相对较小,主要受研究区结构性影响。

3.2 广西森林土壤的空间变异和格局

广西区森林土壤养分均表现出高度的空间异质性,不同养分的空间变异特征和分布格局不同。广西区森林土壤 AN 和 TN 含量水平都很高,表明广西区氮素含量比较丰富。TN 和 AN 空间变异特征相似度很高,呈广西北部地区含量比较丰富、向南部和西北部地区逐渐降低的空间格局。TN 含量与有机质含量具有很强的相关性,有机质也是 TN 的主要来源,广西北部主要是石山林和松类,表层枯枝落叶量多,经过长期的腐殖化作用,富集了大量的腐殖质,有机质含量丰富,而且广西北部较南部寒冷,更加有利于氮素的积累^[29-30];南方主要为桉树人工林,枯枝落叶比较少,有机质含量低,同时桉树的快速生长急剧地消耗土壤养分,从而影响了土壤氮素的含量^[31]。广西区氮素在植被类型、土壤类型、地形、土壤母质、气候及人类活动等因素综合作用下形成了独特的空间格局。

广西森林土壤磷库含量较小,TP 的空间变异趋势是从桂柳和河池两个含量最高区向四周逐渐降低的趋势,AP 的空间变异比较复杂,规律不明显。气候的因素对土壤 TP 含量影响很大,在热带、亚热带地区气候高温多雨加快了土壤分化速度与磷元素的淋溶^[32-33]。Miller 等^[34]认为在热带季风区随着降水量的增加 TP 降低,相反,温度低降水较少的地区 TP 含量比较高,与本研究结论一致,广西北部气温较南部较低,降水较少,且北部喀斯特地貌广布,地下河较多,降水快速渗透到地下河,地表水蓄积量少,不能充分参与 TP 的理化反应。AP 含量最低区主要分布在柳州与梧州两个区域,这与河流的分布有关,这两个区域均位于柳江流经区域,河流汇聚细小河流,加速了速效磷的流失。不同土壤类型对 AP 的含量也有重要影响,不同地球化学类型上土壤有效磷密度的差异,反映了土壤中的物理、化学过程对土壤有效磷含量的控制^[35-36]。AP 空间格局分布复杂,与随机因素有直接关系,不同林地的施肥管理措施不同,长期使用磷肥会提高土壤中 AP 的含量。

广西森林土壤 K 含量并不丰富,TK 和 AK 均属中等水平,TK 东南部含量稍高,AK 呈北高南低。土壤 TK、AK 的变异性和其它养分一样都受结构性因

素(土壤母质、气候、土壤类型、地形等)和随机因素如不同的管理施肥措施等共同作用的结果。研究区 AK 与 TK 空间变异有一定的差异,说明两者分别有自身形成的主导因素,土壤中新鲜植物残体、根系、微生物中也含有一定量的钾,但并不组成稳定的含钾有机物,因而对植物的有效性高。有机体一旦死亡,其所含钾可被水淋洗或浸提出,也是土壤速效钾的组成部分、补充液态钾和交换性钾的重要来源。由 TK、AK 空间格局可反映出广西区钾素总体成中等水平,在农业活动中要针对钾素的含量格局,科学地使用钾肥来提高速效钾的含量。

References:

- [1] Huang C Y. Soil Science. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 221-223.
- [2] Mallarino A P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1473-1481.
- [3] Han Y Z, Wang Z Q. Spatial heterogeneity and forest regeneration. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5): 615-619.
- [4] Abbott M B, Refsgaard J C. Distributed Hydrological Modeling. Netherland: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [5] Zhao Y C, Shi X Z, Yu D S, Zhao Y F, Sun W X, Wang H J. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei Province, China. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 379-385.
- [6] Schlesinger W H, Abrahams A D, Parsons A J, Wainwright J. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in southern New Mexico: I. rainfall simulation experiments. Biogeochemistry, 1999, 45(1): 21-34.
- [7] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, Cross A F. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. Ecology, 1996, 77(2): 364-374.
- [8] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, Huenneke L F, Jarrell W M, Virginia R A, Whitford W G. Biological feedbacks in global desertification. Science, 1990, 247(4946): 1043-1048.
- [9] Tilman D. Constraints and tradeoffs: Toward a predictive theory of competition and succession. Oikos, 1990, 58: 3-15.
- [10] Guo X D, Fu B J, Ma K M, Chen L D, Yang F L. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunghua city of Hebei Province. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 557-563.
- [11] Li B H, Zhang J, Yao X L, Ye J, Wang X G, Hao Z Q. 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, 2008, 19(3): 467-473.
- [12] Ma F Y, Li X R, Zhang J G, Li A X. Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(5): 789-795.
- [13] Kužel S, Nýdl V, Kolář L, Tichý R. Spatial variability of cadmium, pH, organic matter in soil and its dependence on sampling scales. Water Air and Soil Pollution, 1994, 78(1/2): 51-59.
- [14] Mishra T K, Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under *Shorea robusta* in lateritic region. Indian Journal of Forestry, 1995, 18(2): 144-152.
- [15] Huang Y F, Zhou Z Y, Yuan X Y, Zhang H Y. Spatial variability of soil organic matter content in an arid desert area. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2776-2781.
- [16] Su Y Z, Zhao H L, Cui J Y. Spatial heterogeneity of soil properties in the desertification process of rainfed farmland in Horqin sandy land. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 210-217.
- [17] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Liu L, Du H, Lu S Y, Yin Q C. Spatial variation of soil water and the key impact factors in dry season in karst cluster-peak-depression region. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6787-6797.
- [18] 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.
- [19] Ouyang Z W, Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Guan X, Wu H Y. Spatial heterogeneity of soil organic matter and its response to disturbance in karst peak cluster depressions. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(6): 1329-1336.
- [20] Du H, Song T Q, 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.
- [21] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Su Y R, Zhang J G, Yi A J. 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.
- [22] Yu G Z. Random talk about main soils in Guangxi. Land and Resources of Southern China, 2007, (3): 39-40.
- [23] Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 651-657.
- [24] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27(4): 315-324.
- [25] Wang Z Q. Geostatistics and its application in Ecology. Beijing: Science press, 1999.

- [26] Liu F C, Shi X Z, Yu D S, Pan X Z. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 63-70.
- [27] Tsegaye T, Hill R L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements. *Soil Science*, 1998, 163(2): 155-165.
- [28] Qin Y D. Quantitative analysis for soil spatial variability study. *Advance in Earth Science*, 1992, 7(1): 44-49.
- [29] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 1996, 272(5260): 393-396.
- [30] Wang L, Ouyang H, Zhou C P, Zhang F, Bai J H, Peng K. Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen on the eastern slope of Mt. Gongga. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 1012-1018.
- [31] Zhang J J, Zhang Q, Yang Z P, Chen M C, Li Y, Chen D L. Spatial variability of topsoil organic matter and total nitrogen in Linfen Basin, Shanxi and its influencing factors. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 839-844.
- [32] Onthong J, Osaki M, Nilnond C, Tadano T. Phosphorus status of some highly weathered soils in Peninsular Thailand and availability in relation to citrate and oxalate application. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 45(3): 627-637.
- [33] Neufeldt H, da Silva J E, Ayarza M A, Zech W. Land-use Effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31(1): 30-37.
- [34] Miller A J, Schuur E A G, Chadwick O A. Redox control of phosphorus pools in Hawaiian montane forest soils. *Geoderma*, 2001, 102(3/4): 219-237.
- [35] Lajtha K, Schlesinger W H. The biogeochemistry of phosphorus cycling and phosphorus availability along a desert soil chronosequence. *Ecology*, 1988, 69(1): 24-39.
- [36] Walbridge M R, Richardson C J, Swank W T. Vertical distribution of biological and geochemical phosphorus Subcycles in two southern Appalachian forest soils. *Biogeochemistry*, 1991, 13: 61-85.
- [10] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 陈利顶, 杨福林. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 557-563.
- [11] 李步杭, 张健, 姚晓琳, 叶吉, 王绪高, 郝占庆. 长白山阔叶红松林草本植物多样性季节动态及空间分布格局. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 467-473.
- [12] 马风云, 李新荣, 张景光, 李爱霞. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 789-795.
- [15] 黄元仿, 周志宇, 苑小勇, 张红艳. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征. *生态学报*, 2004, 24(12): 2776-2781.
- [16] 苏永中, 赵哈林, 崔建垣. 农田沙漠化演变中土壤性状特征及其空间变异性分析. *土壤学报*, 2004, 41(2): 210-217.
- [17] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨, 殷庆仓. 喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因素. *生态学报*, 2010, 30(24): 6787-6797.
- [18] 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.
- [19] 欧阳资文, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 关欣, 吴海勇. 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. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1329-1336.
- [20] 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.
- [21] 张伟, 陈洪松, 王克林, 苏以荣, 张继光, 易爱军. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因素分析. *中国农业科学*, 2006, 39(9): 1828-1835.
- [22] 喻国忠. 漫谈广西主要土壤. *南方国土资源*, 2007, (3): 39-40.
- [23] 李海滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 651-657.
- [25] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [26] 刘付程, 史学正, 于东升, 潘贤章. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. *地理研究*, 2004, 23(1): 63-70.
- [28] 秦耀东. 土壤空间变异研究中的定量分析. *地球科学进展*, 1992, 7(1): 44-49.
- [30] 王琳, 欧阳华, 周才平, 张锋, 白军红, 彭奎. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征. *地理学报*, 2004, 59(6): 1012-1019.
- [31] 张建杰, 张强, 杨治平, 陈明唱, 李勇, 陈德利. 山西临汾盆地土壤有机质和全氮的空间变异特征及其影响因素. *土壤通报*, 2010, 41(4): 839-844.

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 221-223.
- [3] 韩有志, 王政权. 森林更新与空间异质性. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 615-619.
- [5] 赵永存, 史学正, 于东升, 赵彦锋, 孙维侠, 王洪杰. 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.