

华南沿海地区林地土壤养分空间异质性研究*

郑妍¹ 江瑶² 孙冬晓²
齐也² 张中瑞²

(1. 广东省岭南综合勘察设计院, 广东 广州 510663; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 我国华南沿海地区土壤具有高度空间异质性, 应用地统计学分析方法, 探索该地区林地土壤养分空间分布特征。结果表明: 研究区土壤全磷含量缺乏, 属于强变异程度, 具有较强的空间自相关性, 主要受到地形、土壤母质、气候等结构性因素影响; 土壤全钾含量丰富, 属于中等变异, 空间自相关性弱, 其变异主要是由随机因素如人为干扰或测定误差引起的; 全氮和有机碳含量处于中等水平, 两者的空间变异特征比较相似, 均具有中等程度的空间自相关性, 随机因素对这些养分的影响较大。

关键词 林地土壤; 养分; 空间异质性; 地统计学

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2020) 06-0110-05

Spatial Heterogeneity Study of Soil Nutrients in Forestland in Coastal Areas of South China

ZHENG Yan¹ JIANG Yao² SUN Dongxiao²
QI Ye² ZHANG Zhongrui²

(1. Lingnan Integrated Exploration and Design Institute of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510663, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/ Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract The spatial heterogeneity of soil in the coastal areas of South China is high, and the spatial distribution characteristics of soil nutrients in the forestland of this area were explored by geostatistical analysis, so as to provide reference for the improvement of soil fertility and sustainable forest management. The results showed that the total phosphorus content in the soil of the study area was deficient, which belonged to the degree of strong variation and had strong spatial autocorrelation, and was mainly affected by structural factors such as topography, soil parent material and climate. The soil was rich in total potassium, which was a medium variation with weak spatial autocorrelation. The variation was mainly caused by random factors such as human interference or measurement error. The contents of total nitrogen and organic carbon were at the medium level. The spatial variation characteristics of the two were similar, and both had moderate spatial autocorrelation. The random factors had a greater influence on these two nutrients.

Key words forestland soil; nutrient; spatial heterogeneity; geostatistics

* 基金项目: 广东省省级财政专项资金“林地土壤调查”; 广东省林业科技计划项目(2019-07); 广东省生态公益林效益补偿专项“广东省生态公益林可持续经营研究与示范”。

第一作者: 郑妍(1982—), 女, 工程师, 主要从事森林资源调查、林业规划设计, E-mail: 1250189552@qq.com。

通信作者: 张中瑞(1987—), 男, 工程师, 主要从事林业经济研究, E-mail: zhangzhongrui126@126.com。

森林土壤是维持林木生长发育的基质，土壤养分状况反映了林地供应林木生长所需营养物质的能力^[1]。但土壤养分受到成土母质、气候条件、地形因素、植被类型、人为干扰等影响，往往具有高度的空间异质性^[2]。土壤养分的空间分布通常直接关系到森林的生长与健康，是森林生态系统恢复、可持续经营的重要影响因素^[3-4]。因此，开展森林土壤养分空间异质性的研究不仅对了解影响土壤变异的因素有重要参考价值，还对于合理利用土壤资源、建立良性循环的森林生态系统具有重要意义。

华南沿海地区是我国砖红壤、赤红壤集中分布区域，自然地理条件优越，森林资源丰富。近年来，由于经济社会飞速发展，人口密度不断增大，人类经济活动对林地的干扰问题越来越严重，改变了土壤养分空间分布，影响了土壤资源的利用和森林质量的提升。系统研究区域森林土壤空间异质性，探究其养分丰缺状态及其分布规律，对有效利用土壤养分和提高林地生产力具有重要意义^[5]。因此，本研究以华南沿海地区林地土壤为对象，通过野外调查采样和室内实验对其土壤养分进行测定与分析，运用地统计学方法研究林地土壤养分空间异质性，以期为林地土壤肥力的提高和森林可持续经营提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于华南沿海地区珠海市南部的横琴岛，是珠海 146 个海岛中最大的一个，面积为 106.46 km²，南面濒临南海，西面与珠海西区一衣带水，东面与澳门一桥相通。该研究区属南亚热带季风区，气候温和湿润，年平均气温 22-23 °C，年平均降水量 2 015.9 mm。地貌类型主要有低山、丘陵、滩涂。土壤类型包括红壤、赤红壤、石质土、海滨沙土、盐渍沼泽土、冲积土等。

1.2 调查及采样方法

采用典型抽样法布设样点，根据研究区森林植被、地形、气候特征、前期调查属性变异性，设定显著性水平 $P < 0.05$ ，确定样本基本数量（本研究 $n=30$ ），通过无人机踏查及各调查专题点的高分辨率 DEM 衍生数据提取，确定土壤样点布设位置及调查线路。

对研究区林地土壤进行样点调查、样品采集、

编码及初步制备等。将布设样点的地理坐标定位到林相图上的地籍小班，根据样点布设要求信息，在误差允许范围内（所在小班距离样点坐标半径 100 m 以内）选择符合样点布设要求信息并具有代表性的区域挖掘 3 个剖面，剖面水平间距不小于 10 m。剖面坑长 1.2~1.5 m，宽 0.8~1.0 m，剖面深度到母质或母岩或地下水，土层较厚时应深达 1.0 m。每个剖面分 5 层取样，由下至上依次为 80~100 cm，60~80 cm，40~60 cm，20~40 cm 和 0~20 cm，混合均匀，每个样品不少于 500 g，每个样点 3 个剖面共采集样品 5 层 / 个 \times 3 个（剖面）=15 份。土壤样品及时带回实验室，风干、过筛、分析土壤样品的化学性质。

1.3 指标测定方法

土壤样品理化性质分析与测定方法为：土样的有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定；全氮含量采用碱解扩散法测定；全磷含量采用钼锑抗比色法测定；全钾含量采用火焰光度法测定^[6]。

1.4 数据处理

用 K-S 检验法检验（显著水平 $\alpha=0.05$ ）数据是否符合正态分布。采用 SPSS 18.0 对土壤养分的均值、标准差及变异系数等描述性统计特征进行分析。依据全国第二次土壤普查规定的土壤养分分级标准^[7]，对研究区林地土壤养分的空间分布状况进行评价。采用地统计学工具 GS+ 9.0 分析对土壤养分数据做半变异函数分析^[8]，再利用 Arc-Gis10.7 软件进行克里金空间插值^[9]得到土壤养分空间分布特征图，可直观地展现土壤养分空间异质性规律。

2 结果与分析

2.1 描述性统计特征分析

研究区林地土壤养分的描述统计结果见表 1。参照全国第二次土壤普查养分的分级标准，可知土壤有机碳含量处于中等水平，全钾含量极高，全氮含量中等偏高，全磷的含量极低。有机碳、全氮、全钾的变异系数（CV）均表现为中等程度变异（ $0.1 \leq CV \leq 1.0$ ），全磷含量表现为强变异程度。变异系数依次为全磷 > 全氮 > 全钾 > 有机碳。在显著水平 $\alpha=0.05$ 的单样本 K-S 检验水平下，均符合正态分布。

2.2 空间变异特征

研究区林地土壤养分半变异函数理论模型拟

表 1 华南沿海地区林地土壤养分描述性统计特征

Tab.1 Descriptive statistical characteristics of soil nutrients in forestland in coastal areas of South China

统计量 Statistics	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
最大值 / (g · kg ⁻¹) Max	34.37	2.63	0.66	45.00
最小值 / (g · kg ⁻¹) Min	4.29	0.40	0.05	4.62
平均值 / (g · kg ⁻¹) Mean	12.38	0.92	0.15	27.86
标准差 / (g · kg ⁻¹) Standard deviation	8.09	0.64	0.18	14.10
变异系数 Coefficient of variation	0.65	0.70	1.19	0.51
K-S 值 Value of K-S test	0.81	0.87	1.22	0.83
显著性 Significance	0.53	0.43	0.10	0.49

表 2 华南沿海地区林地土壤养分半变异函数模型结构参数

Tab.2 Structural parameters of the semivariogram model of soil nutrients in forestland in coastal areas of South China

土壤养分 Soil nutrients	模型类型 Model types	块金值 C ₀	基台值 C ₀ +C	块金比 C ₀ /C ₀ +C	变程 Range	决定系数 R ²	残差平方和 RSS
有机碳 Organic carbon	指数模型	0.042	0.135	0.311	0.314	0.36	2.08e-04
全氮 Total nitrogen	高斯模型	0.309	0.990	0.312	0.117	0.89	1.81e-03
全磷 Total phosphorus	球状模型	0.011	0.096	0.118	0.030	0.99	4.00e-06
全钾 Total potassium	线性模型	0.140	0.140	1.000	0.036	0.99	4.20e-03

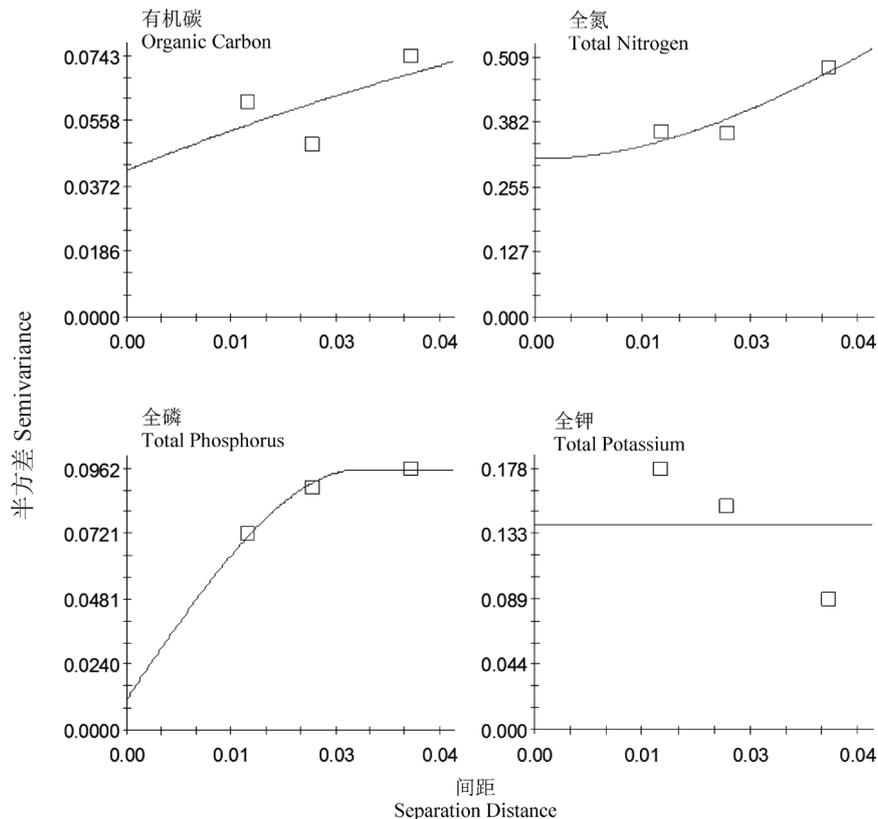


图 1 华南沿海地区林地土壤养分半变异函数

Fig.1 Semivariogram of soil nutrients in forestland in coastal areas of South China

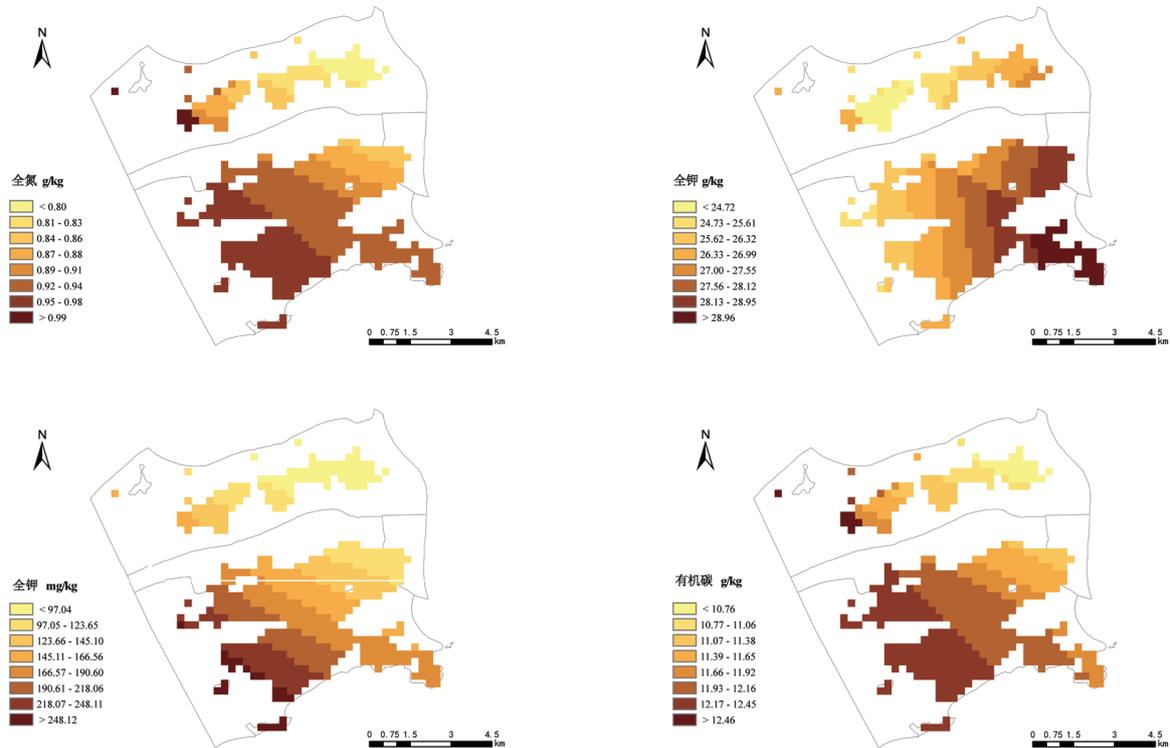


图2 华南沿海地区林地土壤养分空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of soil nutrients in forestland in coastal areas of South China

合结果及结构参数见表2。除有机碳外，其他元素 R^2 均在0.89-0.99之间，RSS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。其中，有机碳的半变异函数最优拟合模型为指数模型，全氮为高斯模型，全磷为球状模型，全钾为线性模型。研究区林地土壤全磷空间异质性中随机变异占系统总变异的比例为11.8%，表明土壤全磷含量在研究区内具有较强的空间自相关性。由随机变异引起的土壤有机碳和全氮空间异质性比例为35.4%、31.2%，表明具有中等的空间自相关性。全钾的块金比为1，说明空间自相关性极弱。有机碳、全氮、全磷、全钾的变程相近且均较小，其中全磷变程最小，有机碳变程最大，说明全磷的自相关范围最小，有机碳的自相关范围最大。

2.3 空间分布特征

研究区土壤养分含量的空间分布见如图2。林地土壤有机碳含量基本高于10 g/kg，处于中等水平。其中，西北局部区域土壤有机碳含量相对较高，东北部分区域有机碳含量相对较低。研究区林地土壤有机碳含量空间变异规律明显，呈现自

西向东呈逐渐降低的趋势。依据土壤养分分级标准，研究区林地土壤全氮含量中等偏高，整体处于0.75~1.0 g/kg的中等水平，西北局部区域含量高达1.0~1.5 g/kg，东北部分区域全氮含量相对较低。整体来看，研究区林地土壤全氮含量自西向东呈逐渐降低的空间格局。全磷的含量较为贫乏，西南部分区域全磷含量略超过0.20 g/kg，其它区域均在0.20 g/kg以下的极低水平。空间变异规律明显，整体呈现自西南向东北逐渐降低的趋势。全钾含量丰富，西部区域全钾含量处于20~25 g/kg的含量较高水平，其它区域均处于高于25 g/kg的含量极高水平。总体分布格局是西北低东南高，高值区主要分布在东南角，次高值主要分布在东南部分及东部部分区域，中等值主要分布在中部绝大部分区域，低含量区域主要分布在西北局部区域及西部部分区域。

3 结论与讨论

研究区土壤全磷空间异质性明显，整体呈现自西南向东北逐渐降低的趋势。全磷属于强变异程度，半变异函数分析结果发现，研究区林地土

壤全磷空间异质性中随机变异占系统总变异的比率为 11.8%，表明土壤全磷含量在研究区内具有较强的空间自相关性，且全磷的自相关范围最小，说明在土壤全磷空间异质性中，随机因素的影响很小，占据主要作用的是地形、土壤母质、气候等结构性因素^[10]。磷素南方地区影响林业生产力的常见限制因子^[11]，本研究中磷素含量也处于极其缺乏状态。因此，在后续的森林经营中应加强施肥管理，尤其要施加磷肥。相关研究发现土壤磷素含量受到土壤有机质含量的影响^[12]，因此也可以通过增施有机肥，改善土壤中可被植物利用的磷素。

土壤全钾含量丰富，空间变异规律明显，总体分布格局是西北低东南高。从变异系数来看，全钾含量属于中等变异，块金比较大，说明空间自相关性弱，其变异主要是由随机因素如人为干扰或测定误差引起的。曹以群^[13]对土壤养分空间变异的研究也发现土壤全钾的空间自相关性很弱，有朝着均一化方向发展的趋势，且主要受人为因素影响。不同林地的施肥管理措施不同，土壤养分的空间分布亦不同，在林业经营管理中要针对钾素的含量格局，科学地使用钾肥来提高其利用效率。

全氮和有机碳含量处于中等水平，两者的空间变异特征比较相似，均呈现自西向东呈逐渐降低的趋势。两者变异系数均处中等水平，这种变异可能是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。其中，由随机变异引起的土壤有机碳和全氮空间异质性比例接近，分别为 35.4%、31.2%，均具有中等程度的空间自相关性，说明随机因素如管理施肥措施、采伐、实验误差等对这些养分的影响较大。这与已有研究对全氮含量空间分布特征的研究结果一致^[14]，张文敏等^[15]学者也发现不同土地利用方式和不同围垦时期等随机因素会增加土壤有机碳的空间变异性。全氮和有机碳空间变异的相似性在其他研究中也有提及，如张燕江等^[16]研究表明土壤全氮空间分布特征主要受有机碳的影响，王淑彬等^[17]认为全氮含量与有机质含量具有很强的相关性，有机质是全氮的主要来源。土壤碳氮是土壤肥力的核心，与林地生产力密切相关，研究区的土壤施肥管理应注意维持稳

定的碳氮水平。

参考文献

- [1] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京山地森林的土壤养分状况[J]. 林业科学, 2010, 46(5): 169-175.
- [2] 孙冬晓, 杨旗, 赵正勇, 等. 云浮市森林土壤养分垂直分布模型的构建[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(1): 1-8.
- [3] 张祥宇. 基于BP神经网络的森林土壤养分空间分布预测[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [4] 曾美玲, 张中瑞, 李小川, 等. 云浮市油茶适生区土壤中微量元素分析[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(6): 98-103.
- [5] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 等. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J]. 土壤, 2004(4): 376-381; 391.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [7] 田雨, 庄莹, 曹义, 等. 雾灵山低山区土地利用类型对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 41-44.
- [8] 陈利娜, 李小川, 丁晓纲, 等. 基于地统计学与GIS技术的森林土壤养分空间变异性研究[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(5): 14-21.
- [9] 杨子清, 陈平留, 刘健, 等. 基于Kriging法的森林土壤养分空间插值[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2012, 41(3): 296-300.
- [10] 莫其锋, 陈瑶, 王法明, 等. 华南热带森林两种林下植物氮磷比对氮磷添加的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(5): 919-925.
- [11] 杨家慧, 谭伟, 冯艳. 马尾松人工林土壤养分空间分布特征及其与地形因子的相关性分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(4): 23-29.
- [12] 张倩, 韩贵琳, 柳满, 等. 贵州普定喀斯特关键带土壤磷分布特征及其控制因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 321-328.
- [13] 曹以群. 白水河小流域石漠化治理初期土壤养分空间变异研究[D]. 贵州大学, 2017.
- [14] 任建新, 唐亮, 何明珠, 等. 陇西县土壤氮储量的空间分布特征及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 318-324.
- [15] 张文敏, 姜小三, 吴明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1087-1095.
- [16] 孙冬晓. 模型预测高分辨率森林养分三维空间分布的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [17] 王淑彬, 徐慧芳, 宋同清, 等. 广西森林土壤主要养分的空间异质性[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5292-5299.