

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.011

文春玉, 徐明, 聂坤, 等. 亚热带山地马尾松-甜槠针阔混交林土壤养分空间分布特征与合理取样. 土壤, 2023, 55(6): 1244–1250.

亚热带山地马尾松-甜槠针阔混交林土壤养分空间分布特征与合理取样^①

文春玉, 徐明, 聂坤, 杨雪, 唐雪娅, 魏珊, 张健*

(贵州大学生命科学学院, 贵阳 550025)

摘要: 为了掌握亚热带山地针阔混交林土壤养分空间分布特征, 选取黔中地区的马尾松-甜槠针阔混交林(PCF)和马尾松纯林(PF, 对照)为研究对象, 采用相邻网格法调查并采集土壤样品, 结合经典统计学和地统计学方法, 分析了土壤养分指标的空间分布特征。结果表明: ①PF与PCF土壤pH、有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、速效氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)均存在显著性差异($P<0.05$); ②相较于PF, PCF土壤pH、SOC、TN、AN、AP和AK的空间异质性分布特征更为明显; ③交叉验证分析结果表明, PCF和PF的合理采样数与采样面积分别为24个、600 m²和17个、425 m²。克里格插值结果表明, 亚热带山地针阔混交林土壤养分表现出片状或斑块状空间分布特征, 均一性较差。

关键词: 针阔混交林; 森林土壤; 异质性; 空间分布

中图分类号: S714.8 文献标志码: A

Spatial Distribution Characteristics of Soil Nutrients and Reasonable Soil Sampling in Subtropical *Pinus massoniana*-*Castanopsis eyrei* Mixed Forest

WEN Chunyu, XU Ming, NIE Kun, YANG Xue, TANG Xueya, WEI Shan, ZHANG Jian*

(College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to master the spatial distribution characteristics of soil nutrients and reasonable soil sampling in coniferous and broad-leaved mixed forests of subtropical mountains, in this study, *Pinus massoniana*-*Castanopsis eyrei* mixed forest (PCF), *Pinus massoniana* pure forest (PF, control) in central Guizhou were selected as research objects, the adjacent grid method was used to investigate and collect soil samples, and the spatial distribution characteristics of soil nutrients were analyzed by using classical statistics and geostatistical analysis methods. The results showed as follows: 1) Significant differences were found in soil pH, organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) between PF and PCF ($P<0.05$). 2) Compared with PF, the spatial heterogeneity of all soil nutrients in PCF was more obvious. 3) Cross-validation analysis showed that the appropriate sampling number and sampling area of PCF and PF were 24, 600 m² and 17, 425 m². The results of kriging interpolation showed that soil nutrients of subtropical mountainous coniferous and broad mixed forests were characterized by flaky or patchy distribution with a poor uniformity.

Key words: Coniferous and broad-leaved mixed forest; Forest soil; Heterogeneity; Spatial distribution

生境异质性作为许多物种共存理论模型的基础, 是生态系统功能的关键驱动因素。森林土壤养分的空间异质性作为生境异质性的重要组分, 在调节生态系统植物多样性和植物多样性-生产力关系上发挥重要作用^[1], 是调节森林生态过程并最终决定森林结构最基本的因素^[2], 与植被群落空间格局关联密切^[3-4],

随着植被群落组成差异表现出高度的时空异质性^[5]。同一地区不同植被类型下各土壤养分的差异较为明显, 这也体现了不同植被类型对土壤养分资源利用的生态位分化^[6]。确定高异质性生境下有效的土壤样本量是保证客观反映研究区域土壤质量的重要前提, 而相对于草原和农田土壤, 森林土壤具有高度的异质性

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31960234, 31660150)资助。

* 通讯作者(zhangjian12102@163.com)

作者简介: 文春玉(1995—), 女, 贵州毕节人, 硕士研究生, 主要从事生态学研究。E-mail: wenchunyu1221@163.com

特征,这使得森林土壤采样设计与管理要求更为复杂。因此,明确不同典型植被类型生境下森林土壤的空间异质性特征对于制定科学经营和管理森林的方法,实现森林资源的可持续发展与利用具有重要意义;也为森林土壤调查制定合理的采样数量和取样面积提供科学依据。

已有土壤养分空间异质性研究报道多集中于探讨区域尺度上土壤养分特征^[7-8],对典型森林群落生境水平上(小尺度)土壤空间异质性分布特征的调查研究则相对不足,这可能影响大尺度调查研究的采样策略和调查结果偏差^[9]。

马尾松(*Pinus massoniana*)作为我国南方广泛分布的当家树种,在保持水土、涵养水源和维持区域生态平衡等方面发挥重要作用^[10]。本研究基于亚热带黔中山地天然次生马尾松-甜槠针阔混交林(树种组成相对复杂)和人工马尾松纯林(树种组成相对单一)的土壤养分含量测定,结合经典统计学和地统计学分析方法,探讨了2种典型植被类型生境下土壤养分的空间分布特征,采用交叉验证对土壤样品合理采样数量与有效调查面积进行了分析,以期为区域山地马尾松林的科学与可持续经营提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵阳市开阳县,属亚热带季风湿润气候,全年平均气温 15 ℃,年平均降水量 1 100 mm。土壤类型以石灰土、黄壤和水稻土等为主。区域主要乔木树种为马尾松、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、杨梅(*Morella rubra*)、山樱(*Cerasus serrulata*)和酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)等。

1.2 样地设置与样品采集

在贵阳市开阳县选取典型的马尾松-甜槠针阔混交林(PCF)和马尾松纯林(PF,对照)群落样地(表1),采用RTK(Real-time Kinematic)载波相差分技术实地探测设置了50 m×50 m大样方,相邻网格法进一步划分为100个5 m×5 m群落调查小样方,去除5 m的植被过渡带后(共36个5 m×5 m的小样方),将中间的40 m×40 m的样方面积(共64个5 m×5 m的小样方)作为采样区域,在每个5 m×5 m小样方内,采用五点取样法,采集0~20 cm土壤样品,每个样地采集64个土壤样品,共采集128个土壤样品。

表1 样地基本概况

样地	经纬度	海拔(m)	坡度(°)	坡向	坡位
马尾松-甜槠针阔混交林(PCF)	106°54'10"E, 26°58'3"N	1 190	5	西南	坡上
马尾松纯林(PF)	106°54'18"E, 26°57'56"N	1 220	12	西南	坡上

1.3 土壤养分指标测定

土壤pH采用酸度计法测定(水土质量比为2.5:1);土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法测定;速效氮(AN)采用碱解扩散法测定;有效磷(AP)采用盐酸-硫酸浸提法测定;速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰分光光度法测定(日本岛津AA-7000原子吸收分光光度计)。

1.4 数据统计与分析

采用SPSS 26.0统计软件进行土壤养分各指标正态性检验和描述性统计分析,描述性统计分析中用变异系数(CV)表示土壤养分的空间变异程度,其中当 $CV \leq 10\%$ 时为弱变异, $10\% < CV < 90\%$ 时为中等变异, $CV \geq 90\%$ 时为强变异^[11]。对不符合正态分布的指标数据进行转换使其符合正态分布后,用GS⁺ 10.0分析土壤养分各指标的半变异函数,遵循模型拟合的决定系数 R^2 越大和残差平方和RSS越小原则拟合出最佳理论函数模型。块金系数 $C_0/(C_0+C)$ 用于反映随机性因素引起的空间变异占系统总变异的比值,当 $C_0/(C_0+C) < 0.25$ 表示存在强空间自相关性,当 $0.25 < C_0/(C_0+C) < 0.75$ 表示中等程度空间自相关性, $C_0/(C_0+C) > 0.75$ 则表示弱空间自相关^[12]。采用分形维数(D)反映森林土壤指标空间格局的尺度、层次性及空间异质性在不同尺度间的相互关系,其中D值越小反映空间变异程度越大^[13]。采用ArcGIS 10.8进行普通Kriging插值,绘制土壤养分空间分布图,交叉验证分析确定研究区最佳采样数量,采用均方根误差RMSE和相关系数 r 进行精度评价^[14-16]。

2 结果与分析

2.1 土壤养分描述性统计特征

PCF和PF样地中土壤各养分指标除pH表现为低变异外,其余指标均表现出中等变异,PF样地整体变异程度低于PCF样地。PCF与PF样地土壤养分指标间均存在显著性差异($P < 0.05$),PCF样地中SOC、TN、AN和AP显著高于PF($P < 0.05$),TP和AK含量则显著低于PF($P < 0.05$)(表2)。

表 2 马尾松-甜槠针阔混交林(PCF)和马尾松纯林(PF)土壤理化指标描述性统计特征
Table 2 Descriptive statistics of soil physiochemical indexes in PCF and PF

样地	指标	最小值	最大值	平均值 ± 标准差	变异系数(%)	偏度	峰度
PCF	pH	3.88	5.38	4.48 ± 0.32 a	7.03	0.759	0.304
	SOC(g/kg)	30.70	74.50	51.01 ± 8.17 a	16.67	0.499	0.109
	TN(g/kg)	1.71	3.80	2.74 ± 0.44 a	15.95	0.400	-0.285
	TP(g/kg)	0.05	0.38	0.16 ± 0.07 b	43.75	0.793	0.325
	AN(mg/kg)	74.67	298.67	153.01 ± 34.78 a	22.73	1.197	3.017
	AP(mg/kg)	1.09	12.45	5.73 ± 2.30 a	40.16	0.639	0.408
	AK(mg/kg)	19.67	64.43	41.83 ± 8.86 b	21.18	-0.138	-0.455
PF	pH	4.31	5.12	4.66 ± 0.14 b	3.00	0.151	0.887
	SOC(g/kg)	32.41	68.65	49.02 ± 6.95 b	14.18	0.243	0.178
	TN(g/kg)	1.46	3.20	2.44 ± 0.31 b	12.83	-0.059	0.470
	TP(g/kg)	0.15	0.91	0.51 ± 0.16 a	30.59	-0.345	-0.287
	AN(mg/kg)	88.67	182.93	133.87 ± 17.27 b	12.90	0.440	0.117
	AP(mg/kg)	0.68	23.09	3.84 ± 3.59 b	93.50	3.487	14.023
	AK(mg/kg)	23.28	94.74	48.19 ± 13.47 a	27.95	1.078	1.845

注：同列小写字母不同表示两个样地间同一指标差异显著($P < 0.05$)。

2.2 土壤养分空间分布特征

PCF 样地土壤养分表现出片状或斑块状空间分布,不同指标表现出不同的空间分布规律。整体上,各土壤养分指标含量自南向北升高,pH、TP、AN和AP均在样地北部边缘出现一个高值区,其中,pH和TP呈现较大区域的片状分布,空间连续性较好(图 1A, 1D)。AK 出现两个高值区,分别位于样地北部和西部边缘,同时分别由北部和南部边缘分别向中部延伸出两个低值区,呈现斑块状分布(图 1K)。SOC和TN空间分布规律较为相似(图 1B, 1C)。AN和AP表现出明显的斑块分布,在一定程度上呈现高低值交错的空间分布规律,空间连续性较差,离散程度高,均一性较差(图 1I, 1J)。相比PCF,PF样地中各土壤养分指标空间连续性整体较强,均一性良好。TP呈现明显的单峰条带状分布(图 1H);AK呈现明显的斑块分布(图 1N);其余养分指标呈现大面积的片状分布且梯度较明显。pH、TN和AP含量自西向东呈逐渐降低的分布规律(图 1E, 1G, 1M);TP和AK整体上呈现出单峰分布,由边缘向中部逐渐升高(图 1H, 1N);SOC的分布规律与PCF样地较为相似,TN和AN表现出小区域上高低值交错分布的空间分布特征(图 1G, 1L)。

2.3 土壤养分半变异函数分析

PCF和PF样地土壤pH、SOC、TN、TP、AN、AP和AK等指标半方差函数模型拟合的决定系数(R^2)和残差平方和(RSS)的变化范围分别为0.430 ~ 0.993

和 $5.514 \times 10^{-8} \sim 4.661 \times 10^{-4}$ (表 3),表明土壤各养分指标的半方差函数模型拟合效果较好。在PCF中,拟合效果达到最佳时土壤pH、SOC、TN、TP和AN均为指数模型,土壤AP和AK则为球面模型。在PF中,拟合效果达到最佳时,土壤pH、SOC和TN为指数模型,土壤TP和AP为高斯模型,土壤AN和AK则为球面模型。

PCF和PF样地中土壤pH块金系数分别为0.5和0.545,表现出中等程度的空间自相关,其余指标均表现出较强的空间自相关性(表 3)。PCF中各土壤指标的变程范围在6.96 ~ 37.41 m,其中TN的变程(37.41 m)最大;PF中各土壤指标的变程范围在7.97 ~ 28.16 m,其中AP的变程(28.16 m)最大。PCF土壤pH(10.91 m)、SOC(31.05 m)和TN(37.41 m)的变程大于PF,而PCF土壤TP、AN、AP和AK的变程则略小于PF,表明PF的空间自相关范围和连续性整体上大于PCF,进行土壤样品采集时可适当增加采样间距。分形维数分析也进一步表明PCF土壤TN(1.286)和SOC(1.600)的空间异质性最明显(表 3)。

2.4 合理取样数量的确定

不同取样数量下交叉验证预测精度结果(图 2)表明:PCF样地中,当取样数量为9时,pH实测值和预测值的相关系数 r 接近于0且均方根误差RMSE较大,故pH的取样数应不低于10个;当SOC、TN、TP和AN的取样数为12时,实测值和预测值的相关系数骤减且均方根误差RMSE较大,故取样数量应

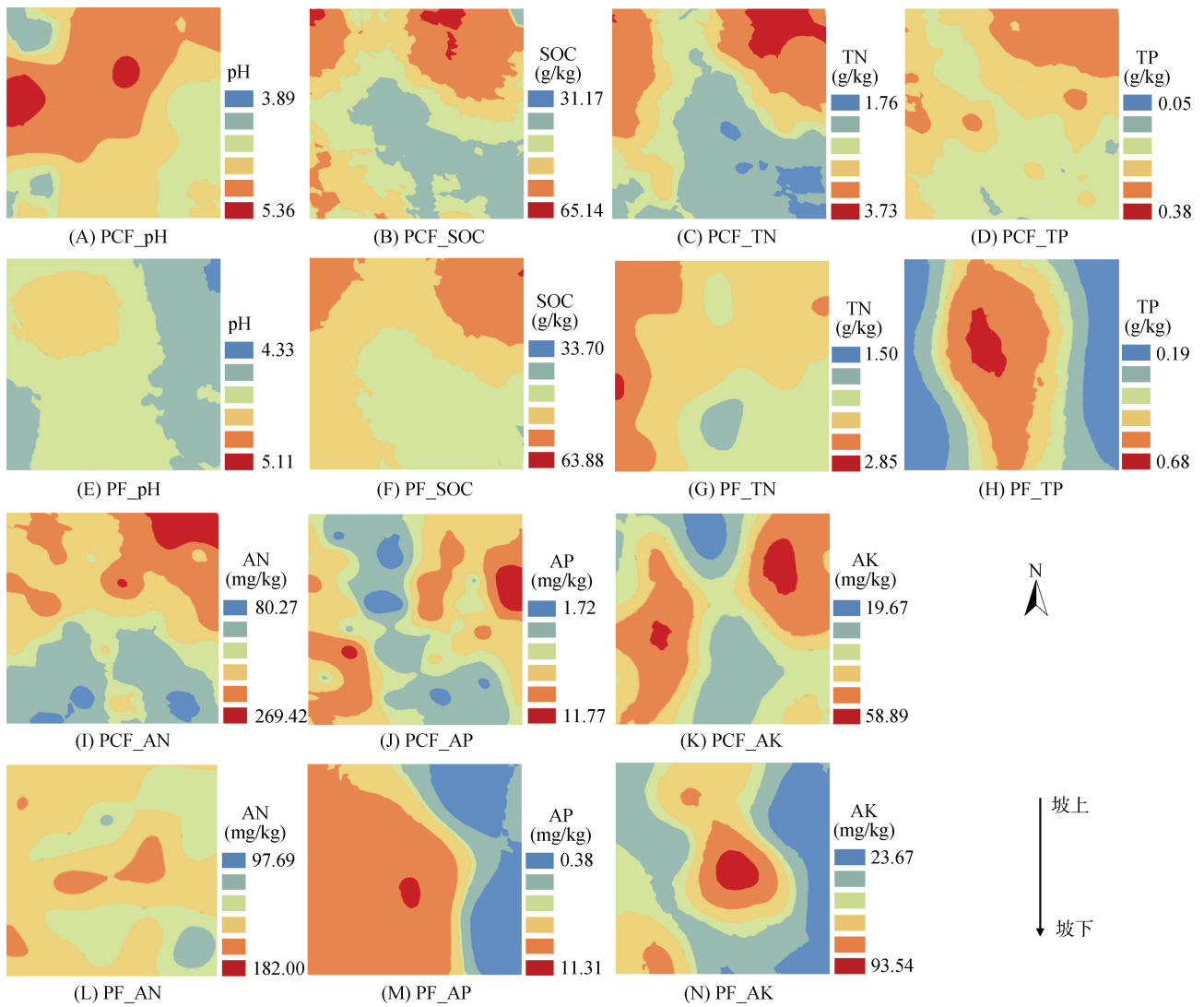


图 1 马尾松-甜槠针阔混交林(PCF)和马尾松纯林(PF)土壤养分含量空间分布图
Fig.1 Spatial distribution of soil nutrients in PCF and PF

表 3 土壤理化指标半变异函数模型拟合及参数

Table 3 Fitting semi-variance models and parameters of soil physiochemical indexes

样地	指标	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金系数 $C_0/(C_0+C)$	变程 (m)	决定系数 R^2	残差 RSS	分形维数 D
PCF	pH	指数	0.002 7	0.005 4	0.500 0	10.91	0.722	4.751×10^{-7}	1.934
	SOC	指数	0.022 2	0.057 4	0.386 8	31.05	0.892	4.179×10^{-5}	1.600
	TN	指数	0.001 3	0.056 1	0.023 2	37.41	0.938	5.530×10^{-5}	1.286
	TP	指数	0.005 5	0.047 0	0.117 0	6.96	0.652	3.495×10^{-5}	1.960
	AN	指数	0.000 01	0.026 62	0.000 4	17.91	0.894	1.352×10^{-5}	1.649
	AP	球面	0.026 77	0.053 64	0.499 1	23.47	0.957	1.539×10^{-5}	1.863
	AK	球面	0.006 1	0.051 8	0.117 8	13.62	0.913	5.770×10^{-5}	1.721
PF	pH	指数	0.000 6	0.001 1	0.545 4	10.49	0.653	2.790×10^{-8}	1.881
	SOC	指数	0.000 22	0.017 74	0.012 4	25.58	0.430	2.629×10^{-6}	1.872
	TN	指数	0.003 1	0.036 1	0.085 9	13.41	0.813	9.936×10^{-6}	1.901
	TP	高斯	0.003 8	0.016 9	0.224 9	7.97	0.983	1.059×10^{-6}	1.910
	AN	球面	0.000 95	0.017 4	0.054 6	19.17	0.619	3.247×10^{-6}	1.960
	AP	高斯	0.233 2	0.490 4	0.475 5	28.16	0.980	4.661×10^{-4}	1.797
	AK	球面	0.000 2	0.006 4	0.031 3	18.06	0.993	5.514×10^{-8}	1.726

不小于 14 个；AP 和 AK 的取样数为 20 个时，均方根误差 RMSE 较大，此时实测值预测误差较大，故取样数量应不低于 24 个。PCF 样地的土壤样品最低取样数量 24 个(图 2)，最低取样面积为 600 m²(24 个 5 m×5 m 的单元格)，即 25 m×25 m 的取样范围。同理，PF 样地中 pH、SOC、TN、TP、AN、AP 和 AK 的合理取样数量分别为 10、12、17、12、12、17 和

14 个，故 PF 中土壤样品最低取样数量 17 个(图 2)，最低取样面积为 425 m²(17 个 5 m×5 m 的单元格)，即 21 m×21 m 的取样范围。不同取样数量下精度图整体上表现为：随着取样数量的减少，相关性系数 *r* 逐渐降低，均方根误差逐渐增大；取样数量整体表现出土壤养分全量指标合理取样数量低于速效指标(图 2)。

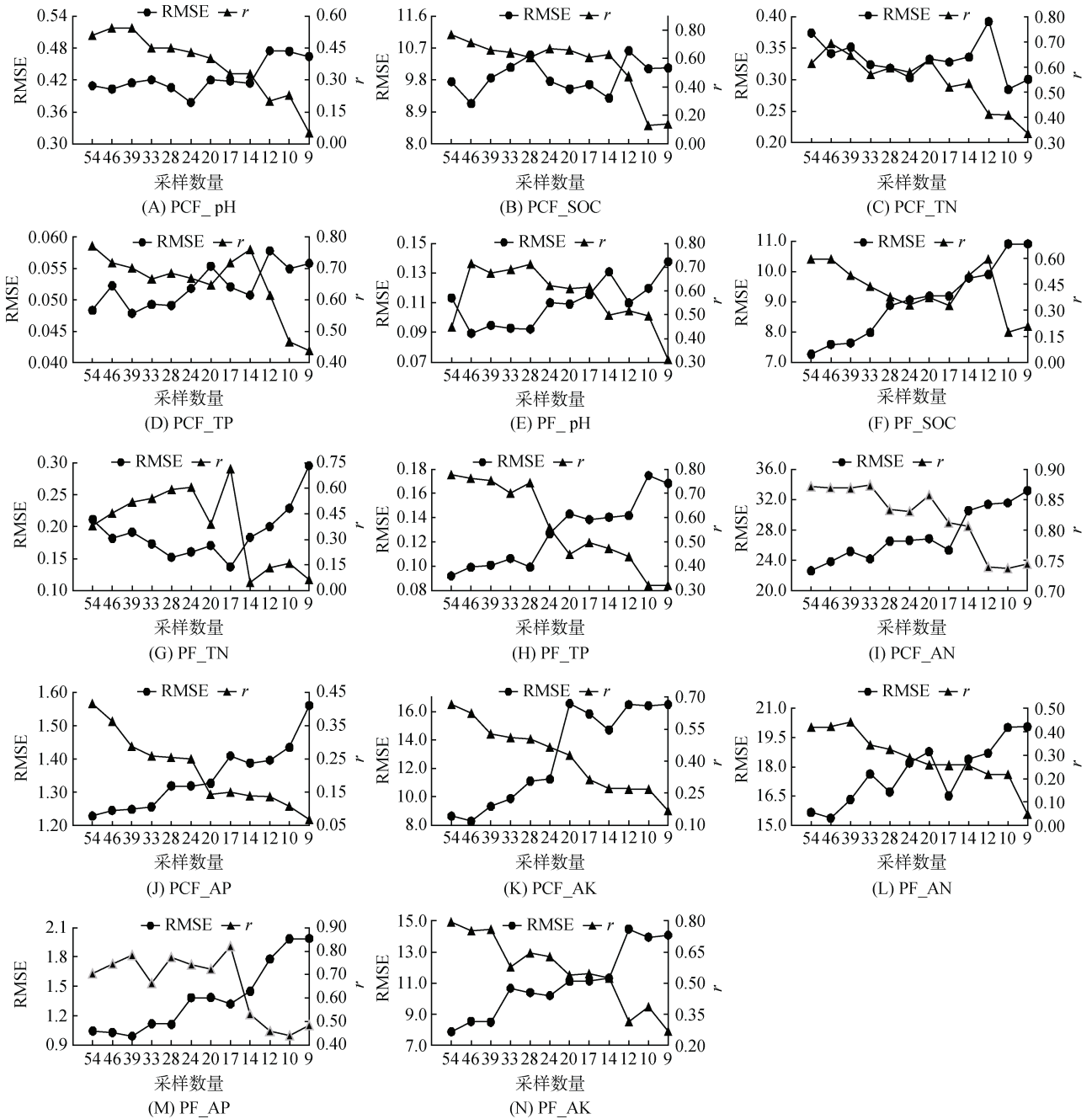


图 2 马尾松-甜槠针阔混交林(PCF)和马尾松纯林(PF)土壤养分各指标样本预测精度图

Fig.3 Prediction accuracies of soil nutrients in PCF and PF

3 讨论

3.1 亚热带山地针阔混交林土壤养分含量特征

PCF 和 PF 样地间土壤 pH、SOC、TN、TP、AN、AP 和 AK 均存在显著性差异,这主要是因为植被类型与空间分布特征、凋落物质量与分解速率、冠层结构及微生物群落结构影响小尺度上不同林型的土壤异质性^[17],这与研究区已报道不同林型下土壤养分差异相一致^[18]。两种林分类型土壤除 pH 属于低变异外,其他土壤养分各指标均存在中等程度变异。这可能是因为土壤 pH 的空间分布主要由土壤母质决定,而受植被群落组成等因素的影响较小^[19]。PCF 样地的 SOC、TN、AN 和 AP 含量均显著高于 PF 样地,一方面可能是因为 PCF 样地通过有效降低林地土壤容重,改善土壤通气及土壤理化性质^[20]。另一方面,森林凋落物作为影响土壤有机质和土壤养分的重要来源,凋落物输入量的变化影响土壤有机质和养分含量^[21],PF 样地凋落物主要以马尾松针叶为主,含单宁类物质较多,结构紧密,分解较阔叶树缓慢^[22];PCF 样地的凋落物除针叶外还含有大量常绿阔叶如甜槠的凋落物以及枫香、麻栎等落叶阔叶树种的凋落物,不同生物学特性树种凋落物的搭配组合为地下微生物提供了不同的生态位,促进土壤养分循环,从而 PCF 比 PF 具有更高的森林生产力和良好的结构稳定性。PF 样地的土壤 AK 含量高于 PCF 样地,一是因为 PF 样地浅层土较利于有效钾的释放,另外一个原因可能是因为 PCF 样地对有效钾的消耗比 PF 样地快。PCF 样地 pH、SOC、TN、TP 和 AN 的变异系数均高于 PF 样地,两种林分类型下土壤有效指标变异系数整体上大于全量指标,这与已有报道结果相一致^[23-24]。

3.2 亚热带山地针阔混交林土壤养分空间分布特征

PCF 样地中土壤养分各指标的空间异质性分布整体表现为高低值交错斑块分布的特点,且高值区主要集中在样地北部边缘(坡上)。这可能是因为 PCF 样地北部地势相对平缓,有浅洼地,植被类型比较丰富且镶嵌分布,这种微地形对温度、水分、养分与光照等生态因子有再分配的作用^[25],微地形在小尺度范围内可能是驱动土壤养分空间分布的主要因子^[26-27]。两种林分类型土壤各养分指标含量多表现出坡上大于坡下的分布特点,与已有研究结果相反^[9],这可能是由于坡下受人为干扰较为严重,表面覆盖物被清除,加速了土壤养分的流失^[28]。

3.3 亚热带山地针阔混交林土壤养分空间变异特征

森林土壤空间异质性影响着植物群落空间格局

形成,而植物群落组成结构变化也影响着土壤空间分布特征。本研究中两种林分类型土壤养分各指标表现出不同程度的空间变异,这可能是因为坡度、高程等地形差异造成土壤侵蚀与运移^[4]。两种林分类型下土壤养分各指标的变程范围均大于取样距离(5 m),表明 5 m 的取样距离在小尺度样地范围内可以更加客观地反映调查森林生境土壤养分指标的空间异质性^[29]。PCF 样地中土壤 SOC 和 TN 的变程大于 PF 样地,AP 和 AK 变程略小于 PF 样地,pH、TP 和 AN 变程与 PF 样地较为接近。除 pH 和 AP 外,两种林分类型样地中土壤养分各指标在较小尺度内存在较大的空间自相关性,表明亚热带山地微生境复杂,土壤养分破碎化分布。因此,在进行土壤养分调查时,应适当增加小尺度上土壤的采样数量,增加土壤样品的混合点,或适当缩小采样间距^[30]。由于样地设置存在尺度效应,取样尺度设置过大会导致土壤养分各指标的差异性消失,反之取样尺度过小则不能反映样地土壤养分各指标整体的空间异质性的全部信息,因此取样点间的最小距离应小于最小空间自相关距离^[31]。

4 结论

1)描述统计结果表明,除 AP 和 AK 外,其余指标 PCF 样地的变异系数均大于 PF 样地,表现出中等程度变异(pH 除外)。可见 PCF 样地的土壤养分在水平方向的异质性较 PF 样地高。

2)地统计分析结果表明,PCF 和 PF 样地土壤养分各指标在小尺度上整体表现出较强空间自相关性(pH 除外)。

3)克里格插值结果表明,PCF 样地土壤养分各指标空间分布斑块化较 PF 样地明显(TP 除外)。因此在进行土壤养分调查时,需要更大的调查样方,交叉性验证结果也表明了这一点。由于森林土壤养分各指标含量受生境影响较大,具体采样时需结合微生境的复杂程度和调查指标进一步确定采样间距。

参考文献:

- [1] Xi N X, Zhang C H, Bloor J M G. Species richness alters spatial nutrient heterogeneity effects on above-ground plant biomass[J]. *Biology Letters*, 2017, 13(12): 510-517.
- [2] Han L L, Lu Y C, Ma W, et al. Spatial patterns of soil organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium in a subtropical forest and its implication for forest management[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(3): 417-427.
- [3] 时雷雷, 骆土寿, 许涵, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(3): 285-293.

- [4] 赵洛琪, 付登高, 吴晓妮, 等. 滇中不同植物群落土壤养分及其计量比的变化特征[J]. 土壤, 2020, 52(6): 1248–1255.
- [5] Tang X L, Xia M P, Guan F Y, et al. Spatial distribution of soil nitrogen, phosphorus and potassium stocks in moso bamboo forests in subtropical China[J]. Forests, 2016, 7(11): 267–276.
- [6] 宋敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6259–6269.
- [7] 郭琦, 卜崇峰, 李宜坪, 等. 区域尺度生物结皮下伏土壤养分的空间分布特征——以毛乌素沙地为例[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 699–707.
- [8] 杨洪涛, 王志春, 杨帆, 等. 松嫩平原盐碱化人工草地土壤与植被群落空间变异特征研究[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1025–1035.
- [9] 张志华, 张锦豪, 桑玉强, 等. 太行山南麓坡面土壤碳氮空间变异性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2829–2838.
- [10] 简尊吉, 倪妍妍, 徐瑾, 等. 中国马尾松林土壤肥力特征[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5279–5288.
- [11] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[M]. Pudoc: Wageningen, 1985: 166–194.
- [12] Robertson G P. GS⁺: Geostatistics for the environmental sciences[M]. Plainwell: Gamma Design software, 2008.
- [13] 邹佳何, 王海燕, 张美娜, 等. 温带云冷杉针阔混交林土壤养分的空间分布特征及影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(6): 1554–1562.
- [14] 田鸽. 秦岭火地塘土壤养分空间分布特征及其影响因素[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [15] 巫振富, 赵彦锋, 程道全, 等. 样点数量与空间分布对县域尺度土壤属性空间预测效果的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1321–1335.
- [16] Bae J, Ryu Y. Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 136: 57–67.
- [17] 张广杰, 巢林, 张伟东, 等. 亚热带森林土壤理化性质的异质性和最佳取样量[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2139–2148.
- [18] 黄志宏, 田大伦, 周光益, 等. 广东南岭不同林分类型土壤养分状况比较分析[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(9): 63–67.
- [19] 赵义博, 雷少刚, 刘英. 胜利矿区土壤养分空间变异特征与影响因素[J]. 土壤, 2020, 52(2): 356–364.
- [20] 李明军, 杜明凤, 聂朝俊. 马尾松人工林地力维护研究进展[J]. 世界林业研究, 2014, 27(5): 31–36.
- [21] 王利彦, 周国娜, 朱新玉, 等. 凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2709–2718.
- [22] 林德喜, 樊后保. 马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化[J]. 林业科学, 2005, 41(6): 7–15.
- [23] Xia S W, Chen J, Schaefer D, et al. Scale-dependent soil macronutrient heterogeneity reveals effects of litterfall in a tropical rainforest[J]. Plant and Soil, 2015, 391(1): 51–61.
- [24] Yavitt J B, Harms K E, Garcia M N, et al. Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a lowland tropical moist forest, Panama[J]. Soil Research, 2009, 47(7): 674–678.
- [25] Forrester D, Bauhus J, Connell M. Competition in thinned Silvertop Ash (*Eucalyptus sieberi* L. Johnson) stands from early coppice growth[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 174(1/2/3): 459–475.
- [26] 袁振, 魏松坡, 贾黎明, 等. 河北平山片麻岩山区微地形表层土壤养分异质性分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 84–90.
- [27] 杨鹏, 赵锦梅, 雷隆举, 等. 微地形对高寒草地土壤有机碳及氮含量的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 94–98.
- [28] 李胜平, 王克林. 人为干扰对桂西北喀斯特山地植被多样性及土壤养分分布的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 20–27.
- [29] 连玉珍, 曹丽花, 刘合满, 等. 色季拉山西坡表层土壤有机碳的小尺度空间分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(9): 70–79.
- [30] 刘少冲, 段文标. 红松阔叶混交林林隙土壤养分的空间异质性[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 142–146.
- [31] 张宇, 黄琛, 赵萌莉. 取样尺度对荒漠草原土壤水分空间异质性的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(11): 1698–1703.