

DOI: 10.5846/stxb202006051455

董佳琦, 张勇, 傅伟军, 刘海英, 王增, 吕联江, 谢秉楼, 蒋仲龙. 香榧主产区林地土壤养分空间异质性及其肥力评价. 生态学报, 2021, 41(6): 2292-2304.

Dong J Q, Zhang Y, Fu W J, Liu H Y, Wang Z, Lü L J, Xie B L, Jiang Z L. Spatial variation of soil nutrients and evaluation of integrated soil fertility in *Torreya grandis* cv. *Merrillii* region. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2292-2304.

香榧主产区林地土壤养分空间异质性及其肥力评价

董佳琦¹, 张勇², 傅伟军¹, 刘海英², 王增², 吕联江³, 谢秉楼⁴, 蒋仲龙^{2,*}

1 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 杭州 311300

2 浙江省公益林和国有林场管理总站, 杭州 310020

3 绍兴市自然资源和规划局, 绍兴 312000

4 浙江省森林资源监测中心, 杭州 310020

摘要:选取浙江省香榧 (*Torreya grandis* cv. *Merrillii*) 主产区为研究对象, 系统采集表层土壤 (0—20 cm) 样品 121 个, 基于地统计学及 Moran's *I* 等空间分析方法揭示土壤养分的空间异质性, 估算了香榧林地土壤综合肥力并分析其影响因素。结果表明: 研究区土壤 pH 较低, 有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量较高, 平均含量分别为 4.91、30.60 g/kg、136.77 mg/kg、15.02 mg/kg、153.42 mg/kg; 基于半方差函数分析得出, 土壤 pH 和养分要素属于中等空间相关性, 其中 pH 的变程最小为 3.29 km, 有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的变程分别为 8.52、5.84、8.82、6.49 km; 克里格空间插值和局部 Moran's *I* 指数结果揭示土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾均存在明显的空间分布格局和局部空间聚集现象, 土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾低值区主要分布在诸暨市和东阳市, 高值区主要分布在柯桥区 and 嵊州市, 而 pH 的空间分布格局与之相反; 诸暨市和东阳市部分地区土壤综合肥力指数较低, 而其他区域的土壤肥力水平较高。总体上, 浙江省香榧主产区土壤酸化以及养分失衡现象较为严重, 尤其是速效钾含量过高。从相关性分析结果来看, 环境变量对香榧林地土壤养分的影响较小, 而林龄对土壤 pH 和养分的影响较大。可见, 研究区土壤养分受人活动影响明显。因此, 需根据实际情况, 改善林农的施肥管理方式, 调整施肥数量和结构并开展土壤酸性改良, 因地制宜制定区域施肥规划。

关键词: 香榧; 土壤养分; 地统计学; Moran's *I*; 土壤综合评价

Spatial variation of soil nutrients and evaluation of integrated soil fertility in *Torreya grandis* cv. *Merrillii* region

DONG Jiaqi¹, ZHANG Yong², FU Weijun¹, LIU Haiyin², WANG Zeng², LÜ Lianjiang³, XIE Binglou⁴, JIANG Zhonglong^{2,*}

1 The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

2 Zhejiang Public Welfare Forest and State Forest Farm Management Station, Hangzhou 310020, China

3 Shaoxing bureau of natural resources and planning, Shaoxing 312000, China

4 Forest resources monitoring center of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China

Abstract: A total of 121 topsoil samples (0—20 cm) were systematically collected from typical producing areas of *Torreya grandis* cv. *Merrillii* in Zhejiang Province. Geostatistics and Moran's *I* were utilized to reveal the spatial heterogeneity of soil nutrients. Integrated soil fertility index (IFI) of *Torreya grandis* cv. *Merrillii* plantations were estimated and its driving factors were analyzed. The results indicated that soil pH was lower and the concentrations of organic matter (OM), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) were higher, with average concentrations of

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY20C160004)

收稿日期: 2020-06-05; 网络出版日期: 2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 3328634671@qq.com

4.91 g/kg, 30.60 g/kg, 136.77 mg/kg, 15.02 mg/kg, and 153.42 mg/kg, respectively. Soil pH and nutrient elements had moderately spatial correlation. The minimum range value of pH was 3.29 km, and the ranges of OM, AN, AP and AK were 8.52 km, 5.84 km, 8.82 km and 6.49 km, respectively. The results of Kriging and the local Moran's I showed that soil properties had the obviously spatial distribution patterns and locally spatial aggregation in the study area. The low pH values were located in the city of Keqiao and Shengzhou and high values in the city of Zhuji and Dongyang. The spatial distribution patterns of OM, AN, AP, AK were opposite. The low values were mainly in the city of Zhuji and Dongyang and high values were found in the city of Keqiao and Shengzhou. Soil pH and nutrients had moderately spatial auto-correlation. The scales of spatial variability were basically similar. The results of the integrated soil fertility evaluation indicated that the soil fertility level was higher in most areas, and the IFI was lower in Zhuji and Dongyang. In general, the soil acidification and nutrient imbalances in the producing areas of *Torreya grandis cv. Merrillii* in Zhejiang Province were serious, especially the excessively high AN concentration. The correlation analysis showed that the environmental variables had little effect on soil nutrients of *Torreya grandis cv. Merrillii*, while forest ages had the great effect on soil pH and nutrients. It can be observed that the soil nutrients in the study area were obviously affected by anthropogenic activities. Therefore, it is urgent to improve the fertilization management mode, to carry out soil acid improvement, and to make regional fertilization planning according to regional conditions.

Key Words: *Torreya grandis cv. Merrillii*; soil nutrients; Geostatistics; Moran's I ; evaluation for soil fertility

土壤是人类赖以生存的重要资源,是植物所需营养物质的重要供给源^[1]。了解土壤特性不仅能避免土壤养分失衡,还有助于保持土壤肥力水平从而提高作物品质和产量^[2]。然而近几十年来,不科学的经营管理方式导致我国许多地区的林地土壤养分失衡,土壤退化的趋势日益明显^[3-4]。而土壤养分失衡不仅会导致作物生长受阻产量下降,还会造成环境污染^[5]。因此,了解土壤养分现状及其影响因素能为科学土壤管理提供理论依据。

香榧 (*Torreya grandis cv. Merrillii*) 为榧树 (*Torreya grandis Fortune ex Lindley*) 中的人工栽植品种,是我国特有的珍贵经济树种,其果实具有较高的食用、药用和经济价值^[6]。长期食用可降低患心、脑血管疾病的风险,同时还可以明目健脑^[7]。成年香榧林每年每亩产值超过 1 万元,其栽培效益居经济林之首^[8]。由于其较高的经济价值,使得现阶段香榧产业发展迅速。然而快速的发展也带来了弊端,当前香榧林地土壤经营中存在着许多问题^[7]。储开江等^[9]发现导致香榧枝条黄化现象的原因不是病虫害,而是不适应的生长环境所产生不良反应。戴文圣等^[6]也报道了大量的施肥,导致香榧产量和质量显著下降。目前有关香榧的研究主要集中于繁殖栽培、生态习性以及病虫害防治等方面,关于区域性土壤养分状况及影响因素的研究较少^[10-12]。

地统计学和克里格插值法在土壤养分空间异质性研究中得到了广泛的应用。许多学者将 GIS 和地统计学方法相结合,系统揭示了特定区域土壤养分的空间分布特征,该领域的研究已成为土壤学和农业生态学的热点之一^[13-15],例如 Chen 等^[5]采用克里格法对亚热带平原粮食生产区土壤性状和肥力进行研究,以此进行针对性指导施肥。但大部分研究集中于农作物和蔬菜土壤,缺乏对经济林土壤的研究。

以浙江香榧主产区土壤为研究对象,采用土壤综合肥力评价法计算研究区土壤养分水平,利用地统计学结合 GIS 技术绘制研究区养分指标分布图,探明土壤养分空间分布特征及其影响因素,为香榧林地土壤可持续发展提供数据支持及对策。

1 研究区概况

本研究以浙江省香榧主产区为研究区域,选取了位于浙江会稽山区的诸暨、嵊州、柯桥及东阳四市(区)。香榧性喜温暖潮湿、山谷纵横、溪流迂回交叉的生态环境,主要分布在海拔 200—800 m 的丘陵山地^[8]。该研究区属于亚热带季风气候,年平均气温 14—17℃,年平均降水量 1100—1700 mm,年平均日照时数 1900 h,无

霜期 207—240 d^[10]。成土母岩主要包括流纹岩、凝灰岩和流纹质凝灰岩等,土壤类型以红壤、黄壤和黄红壤为主^[6]。近年来浙江省香榧种植面积约为 1.33 万 hm²,年产量 800—1500 t,占全国总产量的 94%^[16],其中研究区所在诸暨、嵊州、柯桥、东阳等会稽山脉香榧种植面积占全省的 65%,产量占全省的 80%^[17-18]。

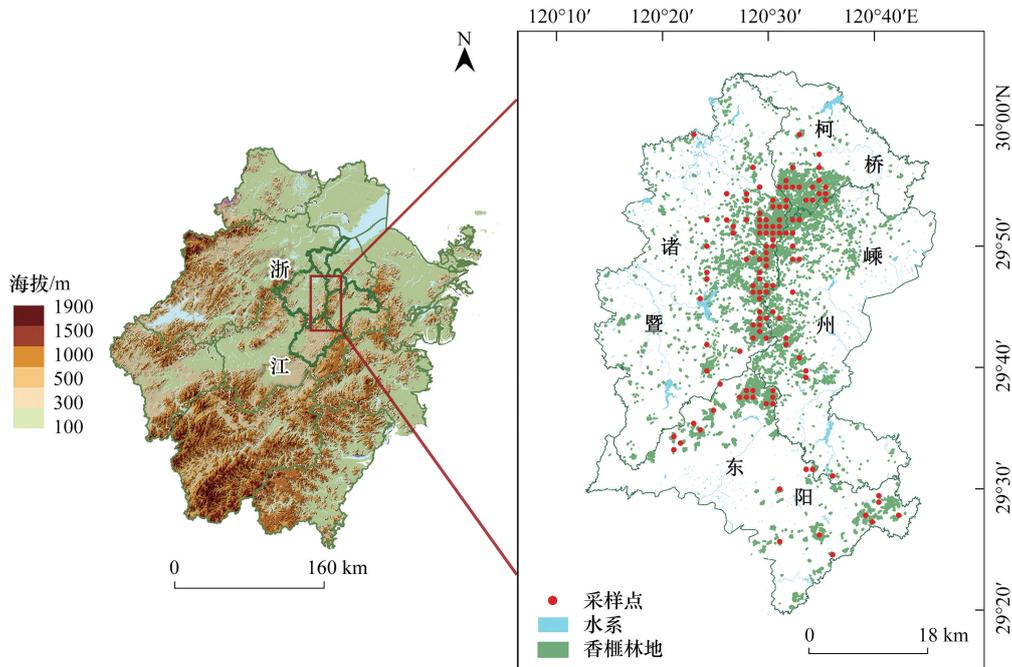


图1 采样点分布图

Fig.1 Spatial distribution map of soil sampling sites

2 研究方法

2.1 样品采集和实验分析

本研究综合考虑了样点分布的均匀性及代表性,在香榧林地主产区以 1.0 km×1.0 km 网格布设土壤采样点,并进行准确定位。结合香榧主产区实际种植和分布状况于 2019 年 5 月,共采集 121 个土壤样本。在选定的样点上,按“梅花”形状布点,在半径为 10 m 的范围内,采集 5 个子样点的表层(0—20 cm)土壤样品,混合均匀组成一个土壤样品,重量约为 1 kg。同时记录香榧林地采样点的立地条件、农户经营管理和香榧产量等信息。

将土壤样品带回实验室并进行自然风干,捡去石块和动、植物残体等,研磨并通过 2 mm 的筛子。从中取出一部分,用玛瑙研钵研磨过 0.149 mm 的筛子,并密封在聚乙烯袋中,贴好标签,保存待分析。

土壤 pH 采用土水比为 1:2.5 的悬浊液测定;土壤有机质选取重铬酸钾氧化法测定;土壤碱解氮、有效磷和速效钾分别采用碱解扩散法、Olsen 法和乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[19]。

2.2 空间自相关分析

空间自相关分析现今已被广泛的应到地理学的研究中^[20]。Moran's *I* 指数能系统的揭示研究变量的空间自相关性,通常包括全局和局部 Moran's *I*^[21]。全局 Moran's *I* 用来描述整个研究区域的空间自相关性,并通过单一值反映区域空间变量的相似性,其取值范围是-1 到 1,大于 0 表示正相关,反之则表示负相关,等于 0 则表示不相关^[22]。而局部 Moran's *I* 主要是用来计算每个特定位置的空间自相关程度,可以识别出局部空间的聚类并进行异常值的分析,弥补全局性分析的不足^[23]。全局和局部 Moran's *I* 的公式如下:

全局 Moran's *I*:

$$I_N = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (z_i - \bar{z}) (z_j - \bar{z})}{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \right) \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2} \quad (1)$$

局部 Moran's I :

$$I_i = \frac{z_i - \bar{z}}{\sigma^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n [W_{ij} (z_j - \bar{z})] \quad (2)$$

式中, \bar{z} 是变量 Z 的平均值; Z_i 和 Z_j 分别是变量在空间 i 和 j 处的数值 ($i \neq j$); σ^2 是变量 Z 的方差; W_{ij} 是采样点间的距离权重。当局部 Moran's $I > 0$ 时表示研究区的目标采样点与其附近的观测值具有一定的相似性, 即空间集聚区, 主要包括高值集聚区和低值集聚区两部分; 当局部 Moran's $I < 0$ 时表示空间区域异常, 主要包括高-低值异常和低-高值异常。本研究用全局 Moran's I 值来呈现研究区土壤养分的空间自相关水平, 并采用 LISA (Local indicators of spatial association) 局部自相关分布图来揭示局部 Moran's I 的自相关水平^[24]。

2.3 地统计分析

地统计学是一种基于区域化变量理论, 以半变异函数为研究工具的空间分析方法, 是一门研究空间变异与结构的自然现象的方法^[22]。

克里格插值法是通过区域化变量的原始数据和半方差函数的结构性, 对未采样点区域化变量值进行的无偏最佳估算的一种广义线性回归的方法^[5]。半方差函数 (semi-variance) 是地统计学的基础, 被广泛的应用于定量描述土壤变量空间结构的变异性^[24]。其公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (3)$$

式中: $\gamma(h)$ 为样点空间间隔距离为 h 时的半方差函数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是变量 $Z(x)$ 在 x_i 和 $x_i + h$ 位置的实测值; $N(h)$ 是样点空间间隔距离为 h 时的所有观测样点的成对数目。在实际应用中, 当半方差函数 $\gamma(h)$ 随着空间间隔距离 h 的增加而增加时, 从非零值达到基本稳定的常数, 这个常数被称为基台值 ($C_0 + C$); 在 $h = 0$ 时的半方差函数值称为块金值 (C_0), 这可能是因采样误差和小于采样尺度的随机因素引起的^[15]。指数模型、球状模型、高斯模型和线性模型是常用的变异函数理论模型^[22]。

2.4 土壤肥力评价方法

土壤肥力一词由来已久, 几个世纪以来一直被用来指土壤支持作物生长的能力。建立完整的土壤评价结构有以下三个步骤: (1) 评价指标选择; (2) 计算指标隶属度值和权重; (3) 计算综合肥力。

2.4.1 评价指标选择

基于前人的研究成果, 本研究选取了能够最大限度代表土壤肥力质量的重要指标, 包括 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾。

2.4.2 指标隶属度值和权重

不同肥力指标实测值的量纲各异, 为消除其影响需将各肥力指标标准化, 本研究采用隶属度函数方法对指标进行归一化处理, 将每个指标转化为 0.1 到 1 的无量纲值^[25]。因植物的效应曲线不同, 将隶属度函数分成 S 型和抛物线型两种, 并将曲线型函数转换成折线型函数。结合前人研究以及林地土壤的肥力特征^[26], 各指标在折线型函数中折线点的取值见表 1。

本研究中仅有 pH 一种指标属于抛物线型, 其余四种指标均属于 S 型函数, 其公式如下:

$$\text{抛物线型: } W_i \begin{cases} 0.9(x - x_3)/(x_4 - x_3) + 0.1 & x_3 < x \leq x_4 \\ 1.0 & x_2 < x \leq x_3 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x \leq x_2 \\ 0.1 & x < x_1 \text{ 或 } x > x_4 \end{cases} \quad (4)$$

$$S \text{ 型: } W_i \begin{cases} 1.0 & x \geq x_2 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 \leq x < x_2 \\ 0.1 & x < x_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: W_i 是指标隶属度; x 是指标的测量值; x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 是指标的转折点。

表 1 抛物线和 S 型函数各指标的转折点

Table 1 Value of turning point of soil indicators in parabola- and S-type membership function

转折点 Turning point	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	碱解氮 (mg/kg) Available nitrogen	有效磷 (mg/kg) Available phosphorus	速效钾 (mg/kg) Available potassium
x_1	4.5	10	50	2.5	50
x_2	6.5	50	150	10	100
x_3	7.5	-	-	-	-
x_4	8.5	-	-	-	-

土壤评价指标的权重通过因子分析法确定。各评价指标的公因子方差所占的比例为权重值^[26]。

2.4.3 土壤综合肥力评价指数

在对各指标进行评价后,需将单因素评价结果转换为由各指标所构成的综合土壤肥力评价结果。本文采用加法合成的方法,将各指标的隶属度值进行加权求和,以计算土壤综合肥力评价指数^[5],其公式如下:

$$IFI = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (6)$$

式中:IFI 为土壤综合肥力评价指数; W_i 为第 i 项土壤肥力指标的隶属度值; N_i 为第 i 项土壤肥力指标的权重值。

2.5 数据处理

本文采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验数据集的正态性, $K-S_p > 0.05$ 表示该数据符合正态分布,需对不符合正态的数据进行对数转换。采用 Pearson 相关分析法研究土壤各项养分指标间的相关性。

采用 SPSS 20.0 对数据进行描述性统计、正态分布检验和多元统计分析。利用 Geoda 软件来分析和识别空间聚类和异常值以及计算空间自相关系数;采用 GS+ 9.0 软件进行半方差分析;采用 R3.3.3 进行相关分析;所有土壤理化指标空间分布图均使用 ArcGIS 10.2 软件绘制。

3 结果与讨论

3.1 香榧林地土壤养分的描述性分析

如表 2 所示,浙江香榧主产区土壤 pH 值的范围为 3.58—6.81,平均值为 4.91。戴文圣等^[27]研究表明 pH 值会影响香榧的生长发育,过度酸黏的土壤会导致产量降低,品质变差,pH 值为 5.2 时最佳。本研究区土壤酸度的变幅虽较小,但过度酸化不利于提升香榧的产量和品质,应及时引起当地林农和有关部门的重视^[7]。研究区土壤有机质平均值为 30.60 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾的平均值分别为 136.77、15.02、153.42 mg/kg,参照《浙江林业土壤》土壤养分分级标准,研究区土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量偏高^[28]。根据实地调查显示,大多数地区林农大量施用复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15/17:17:17)和除草剂。大量施肥虽使土壤养分含量总体提高,但过高的氮和磷会影响香榧产量和质量,导致落叶落果^[28]。土壤钾含量过高对植物生长虽影响较小,但会造成资源浪费和环境污染等一系列问题。在浙江省其他经济林种植园(山核桃、竹子和茶叶)中,不科学的肥料配比也导致了土壤养分失衡^[29-31]。

变异系数(CV)值可以用来描述研究变量的变异度,能更好的反映离散程度。根据王政权等^[32]的研究报道,当变异系数<10%时,为弱变异;当 10%≤变异系数≤30%时,为中度变异;变异系数>30%时,为高度变异。如表 2 所示,仅 pH 属于中度变异,其余 4 种养分元素均表现为高度变异,表明香榧林地土壤肥力之间的差异较大。

表 2 香榧主产区土壤养分描述性统计分析

Table 2 Descriptive statistical analysis for soil nutrients in main plantations of *Torreya grandis* cv. *Merrillii*

	最小值 Min	25%	中位数 Median	75%	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD	变异系 数/% CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S _p
pH	3.58	4.53	4.84	5.21	6.81	4.91	0.61	12.42	0.67	1.08	0.496
有机质 (g/kg) Organic matter	1.56	13.58	26.18	43.01	93.06	27.62	21.49	77.80	0.92	0.41	0.149
碱解氮 (mg/kg) Available nitrogen	24.50	68.25	115.50	163.63	470.75	136.77	95.23	69.63	1.48 (0.009)	2.01 (-0.477)	0.003 (0.977)
有效磷 (mg/kg) Available phosphorus	0.90	2.15	5.93	21.22	62.38	15.02	17.89	119.11	1.34 (0.243)	0.43 (-1.252)	0.000 (0.086)
速效钾 (mg/kg) Available potassium	12.00	63.50	106.00	213.00	509.00	153.42	116.50	75.93	1.13 (-0.070)	0.42 (-0.521)	0.001 (0.054)

括号内为进行对数转换后的偏度、峰度和 K-S 检验的显著性水平

3.2 空间聚类 and 空间异常值分析

土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的全局 Moran's I 值均大于 0, 分别为 0.14、0.24、0.20、0.29、0.23, 呈现了显著正的空间自相关性 ($P < 0.05$), 说明在整个研究区域土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的目标值和它们临近的采样点具有一定的相似性。

局部 Moran's I 的空间分布特征表明了土壤 pH 的高值集聚区主要分布在诸暨市, 低值集聚区主要分布在柯桥区 (图 2)。土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的空间自相关分布较为相似, 高值集聚区主要分布在柯

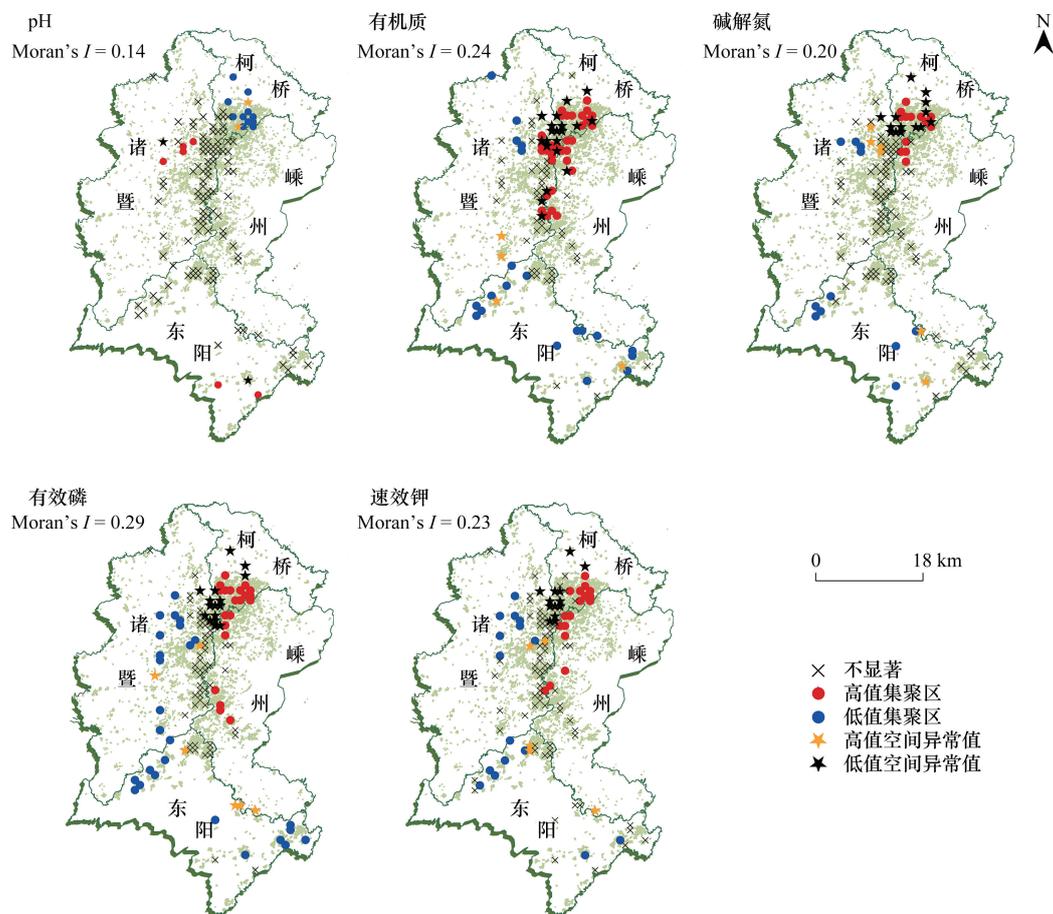


图 2 香榧主产区土壤养分的 LISA 局部空间自相关类型

Fig.2 Local indicators of spatial association for soil nutrients in main plantations of *Torreya grandis* cv. *Merrillii*

桥区 and 嵊州市, 低值集聚区主要分布在诸暨市和东阳市。不同地区的施肥方式存在差异且没有规范统一的科学管理措施, 是产生空间格局异质性的主要原因^[33-35]。而大多数高-低空间异常值主要分布在低值集聚区的附近区域, 与之相反, 低-高空间异常值主要分布在高值集聚区的附近地区。

3.3 香榧林地土壤养分的空间变异结构特征

采用地统计学方法对浙江香榧主产区土壤养分进行空间结构和变异特征分析, 进行半方差函数拟合, 并根据最大 R^2 选取最佳拟合模型^[15]。如图 3 和表 3 可知, 土壤 pH 符合高斯模型; 土壤有机质和碱解氮符合指数模型; 土壤有效磷和速效钾符合球状模型。

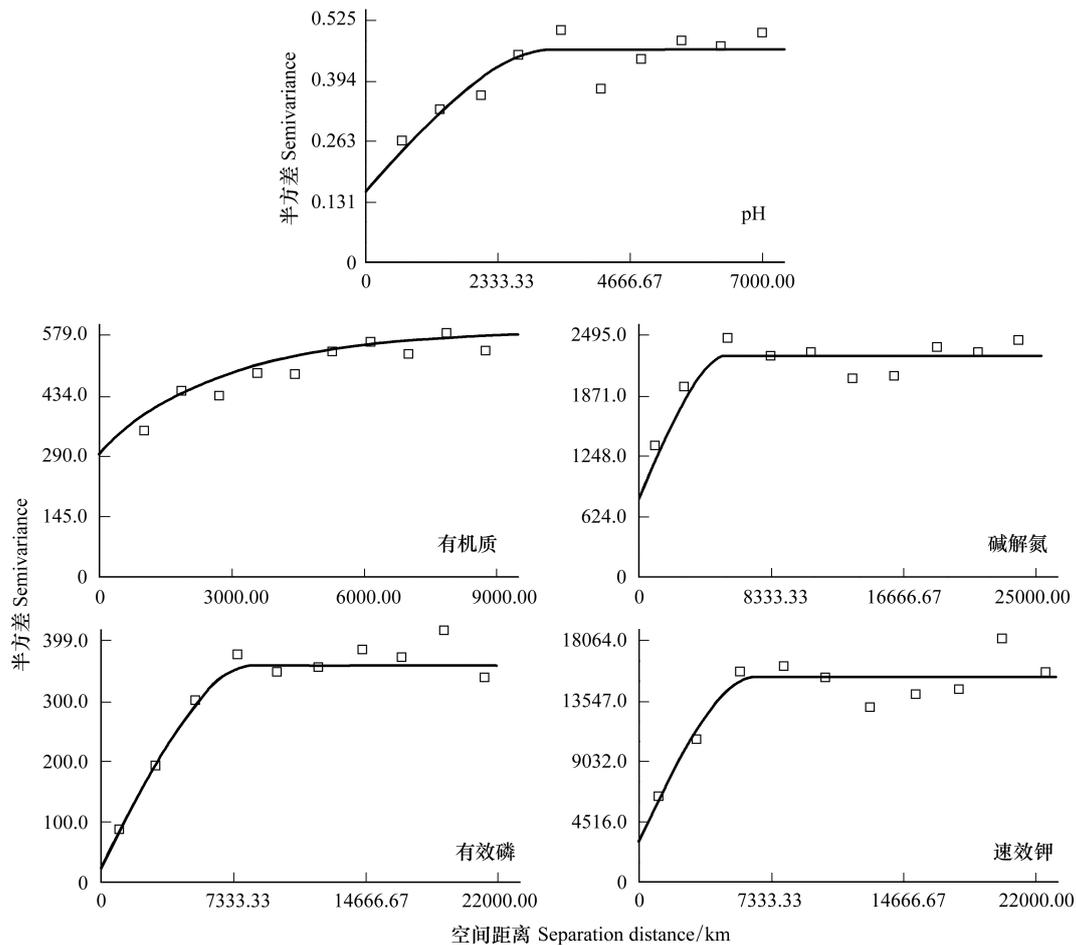


图 3 香榧主产区土壤养分的半方差分析图

Fig.3 The semivariograms for soil nutrients in main plantations of *Torreya grandis* cv. *Merrillii*

块基比又称为基台效应, 即块金值与基台值的比值, 可以衡量空间依赖的程度。Cambardella 等^[36]将块基比比值分类为 25%、25%—75% 和 75%, 分别表示强、中、弱的空间相关性。变程也是半方差函数中的一个重要的指标, 它主要反映了在一定区域尺度下空间自相关性的作用 and 影响范围^[20]。从表 3 可知, 土壤 pH、有机碳、碱解氮、有效磷和速效钾的块基比均在 25%—75% 之间, 表示中等变异程度的空间相关性。土壤养分的分布是自然因素和人为活动共同作用的结果。自然因素会增强土壤养分变量的空间相关性, 而人为活动将削弱其空间相关性并向均质化方向发展^[34,37]。根据块基比(表 3)可知, 这些变量受到自然因素(地形、土壤类型、母质、气候等)和人为经营(施肥、除草等)的共同影响。五种变量的变程均较小, 其中 pH 的变程最小为 3.29 km, 有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的变程较为相似, 分别为 8.52、5.84、8.82、6.49 km, 表明各变量与人类活动密切相关^[22]。

表 3 香榧主产区土壤养分变异函数理论模型及其相关参数

	理论模型 Theoretical type	块金值 Nugget(C_0)	基台值 Still(C_0+C)	变程/km Range	块基比/% Nugget/Still [$C_0/(C_0+C)$]	R^2
pH	高斯模型	0.151	0.464	3.29	32.54	0.617
有机质 (g/kg) Organic matter	指数模型	295.4	590.90	8.52	49.99	0.764
碱解氮 (mg/kg) Available nitrogen	指数模型	1 464.05	2 299.00	5.84	63.68	0.793
有效磷 (mg/kg) Available phosphorus	球状模型	1 948.52	2 978.58	8.82	65.42	0.955
速效钾 (mg/kg) Available potassium	球状模型	2903.50	4 270.71	6.49	67.99	0.822

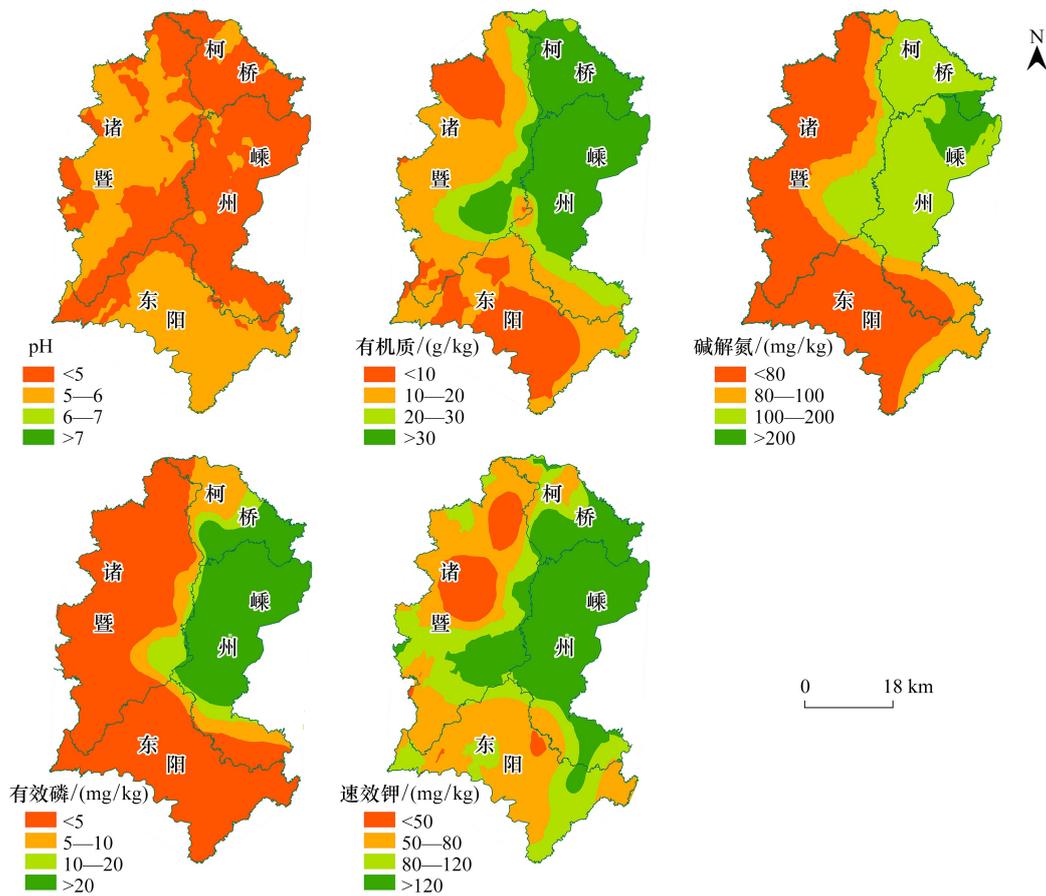


图 4 香榧主产区土壤养分的空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of soil nutrients in main plantations of *Torreya grandis* cv. *Merrillii*

3.4 香榧林地土壤养分的空间分布格局

土壤养分状况需要借助土壤养分水平分级标准来进行评价。目前对香榧林地土壤的研究较少,迄今还没有相应的土壤养分分级标准来衡量香榧土壤养分状况。本研究基于浙江林业常用的养分等级划分标准将土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾划分为四级^[28]。通过普通克里格插值法,绘制香榧主产区土壤养分的空间分布图。如图 4 所示,土壤 pH 低值区主要分布在柯桥区 and 嵊州市,高值区主要分布在诸暨市和东阳市。总体来说,大部分地区的土壤 pH 值较低,柯桥区 and 嵊州市的土壤酸化情况尤为严重。香榧林地土壤 pH

值会受到成土母岩以及人为施肥等因素的共同影响,尤其是长期滥用化学肥料会导致土壤酸化日趋严重^[7]。马闪闪等^[31]报道了采用生石灰、土壤调理剂有利于改良临安山核桃土壤酸化。研究区土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的空间分布格局具有一定的相似性,高值区主要分布在柯桥区和嵊州市,少数分布在诸暨市东部,低值区主要分布在诸暨市和东阳市。诸暨东部为早期的香榧种植区,长期集约经营造成了土壤养分的富集^[38]。土壤养分受气候和地形等自然条件以及人为因素的共同作用^[34]。本研究中4个区域的自然气候和地理条件相似,地形均以丘陵为主,因此经营管理措施的不同是导致本研究区土壤养分差异的主要因素。研究区土壤养分空间分布特征与上述局部 Moran's *I* 所揭示的空间分布特征一致。

3.5 香榧主产区土壤肥力指标相关性分析

相关性分析是揭示土壤养分元素和环境变量关系的有效方法。如图5所示,海拔仅与土壤有机质呈显著的正相关($P < 0.01$),而其他地形变量(坡度和坡向)与土壤养分元素的相关性较弱。这一结果表明,地形变量不是影响土壤 pH 和养分的主要因素,这与 Dai 等^[15]的研究结果一致。从图5可知,林龄与土壤 pH 呈显著负相关,与有效磷呈极显著正相关($P < 0.01$),与有机质、碱解氮和速效钾呈显著正相关($P < 0.05$)。表明林龄对土壤 pH、有机质和碱解氮含量具有显著影响。

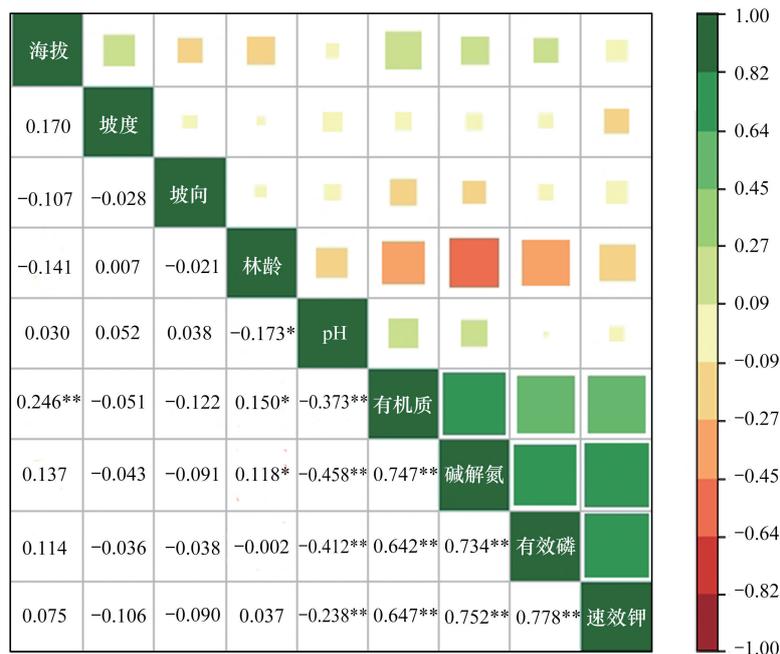


图5 香榧主产区土壤养分的相关分析

Fig.5 Correlation analysis of soil nutrients in main plantations of *Torreya grandis* cv. *Merrillii*

本研究区所有的土壤养分元素两两间均呈现出显著的相关性($P < 0.01$)。其中土壤 pH 与有机质、碱解氮、有效磷和速效钾均呈现显著的负相关关系,说明在一定程度上,土壤酸化会影响土壤养分的供给,过量施肥使林地土壤养分含量提高的同时也会导致土壤酸化^[8]。土壤有机质与 pH、碱解氮、有效磷和速效钾均呈现显著的正相关关系,其中与碱解氮的相关系数(0.747)最高,表明土壤有机质含量与土壤的供氮能力密切相关。张建杰等^[39]进一步研究了土壤氮素和有机质的空间变异规律,表明土壤氮素绝大部分来自于有机质。而土壤碱解氮、有效磷和速效钾的分析结果具有相似性,与 pH 的相关系数相对较低,与其余元素的相关系数较高且差异不大。这一结果可能是由于在人为经营条件下,肥料是调控土壤氮磷钾三要素有效态水平的主要因素^[15]。

3.5.1 林龄的影响

不同林龄条件下各地区香榧林地土壤养分含量的差异性如图6所示。根据各地区林龄实际情况,将林龄

分为<10年、10—30年、30—100年和>100年。由图6可知,土壤pH随着林龄的增长有降低的趋势,且<10年和>100年的土壤pH差异显著。表明随着香榧林地种植年限的增长,土壤呈现出酸化的趋势^[8]。对于土壤肥力质量而言,土壤的进一步酸化不利于实现可持续发展的目标。随着林龄的增长土壤有机质、碱解氮和有效磷含量也在逐渐增加,且幼林(<10年)均与古榧林(>100年)差异显著。林地经营年限的增长,立地环境基本稳定,有机质的积累速率逐渐大于分解速率,再加上有机肥的施用等经营措施,使土壤有机质和碱解氮含量逐渐增长^[7];磷素在土壤中移动性较弱,所以随着林地经营年限的增长有效磷在土壤中得到了富集^[40]。土壤速效钾含量与其他养分含量变化规律不同,没有随经营年限的增长得到明显的累积。钾素在土壤中的移动性较强,易受水土流失、淋溶流失、径流流失的影响^[7]。不同年份气候状况的差异导致不同的径流和淋溶效应,使各林龄下土壤速效钾含量具有差异。

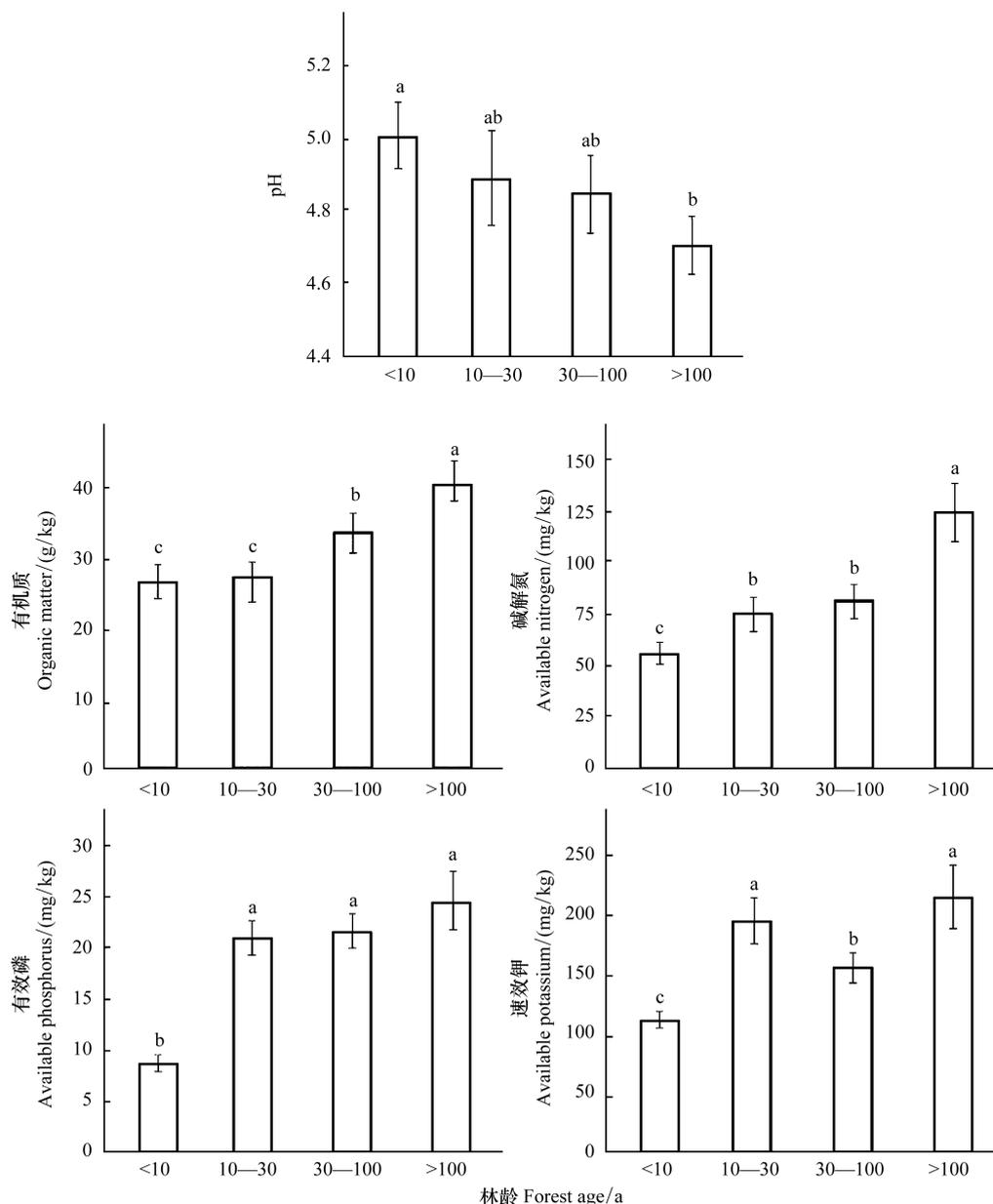


图6 林龄对香榧林地土壤pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的影响

Fig.6 Effects of forest ages on soil pH, organic matter, available nitrogen, available phosphorus and available potassium in *Torreya grandis* cv. *Merrillii*

3.6 香榧主产区土壤综合肥力评价

土壤综合肥力评价法有助于各地区农业管理者、相关研究人员和决策者更加深入的了解区域农业生产管理系统的土壤质量状况。本研究选取 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾 5 个指标,通过土壤综合肥力指数法 (IFI) 计算土壤肥力。采用隶属度函数并根据每个评价指标的阈值将变量转化为 0.1—1.0 之间的值 (表 1)。通过因子分析法得出各评价指标的公因子方差值和权重值 (表 4)。各变量被分配到的权重值差异不大, pH 和有机质分配到的权重较高 (0.215 和 0.209), 碱解氮、有效磷和速效钾的权重分别是 0.185、0.194 和 0.197。

表 4 各项肥力指标的公因子方差和权重

Table 4 Estimated communality and weight value of indexes of soil fertility

	pH	有机质/(g/kg) Organic matter	碱解氮/(mg/kg) Available nitrogen	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium
公因子方差 Communality	0.990	0.961	0.848	0.892	0.903
权重 Weights	0.215	0.209	0.185	0.194	0.197

根据土壤综合肥力评价方法 (IFI) 计算研究区土壤肥力指数,并通过克里格插值法绘制出土壤肥力空间分布图 (图 7)。土壤肥力指数 (IFI) > 0.47 属于中、高质量^[5],本研究区有 61% 地区的土壤肥力属于中、高质量,有 39% 地区的土壤肥力水平相对较低。如图 7 所示,高肥力土壤主要分布在柯桥区 and 嵊州市,少数分布在诸暨市东部,低肥力土壤主要分布在诸暨市和东阳市。表明研究区香榧林地土壤肥力水平总体较高,大多数已达到肥沃水平,少数地区土壤综合肥力指数较低。根据实地调查,近年来各地区林农大量施用复合肥 ($N:P_2O_5:K_2O=15:15:15/17:17:17$) 以达到提高产量的目的。虽使香榧林地土壤养分得到了明显提升,但一味的追求高产量,而不注重成本和肥效不仅会使肥料浪费环境污染,还会导致果实质量和产量下降^[34,41-42]。土壤肥力水平不仅取决于土壤养分和作物吸收能力,还受各因子协调程度的影响。因此,应根据香榧林地土壤肥力的实际状况,采用测土配方施肥制定施肥结构和用量,以满足实际生产需要,又不污染环境,最终实现香榧产业的可持续发展。

4 结论

香榧林地土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾低值区主要分布在诸暨市和东阳市,高值区主要分布在柯桥区 and 嵊州市,而 pH 的空间分布格局则与之相反。土壤综合肥力指数表明柯桥区 and 嵊州市土壤较为肥沃,诸暨市 and 东阳市土壤综合肥力指数较低。香榧主产区土壤酸化以及养分失衡现象较为严重,建议采用生石灰、土壤调理剂等进行酸化土壤改良,在施肥过程中采用“稳氮降磷控钾”等方式,以调节香榧林地土壤养分,满足香榧不同生长阶段的养分需求。

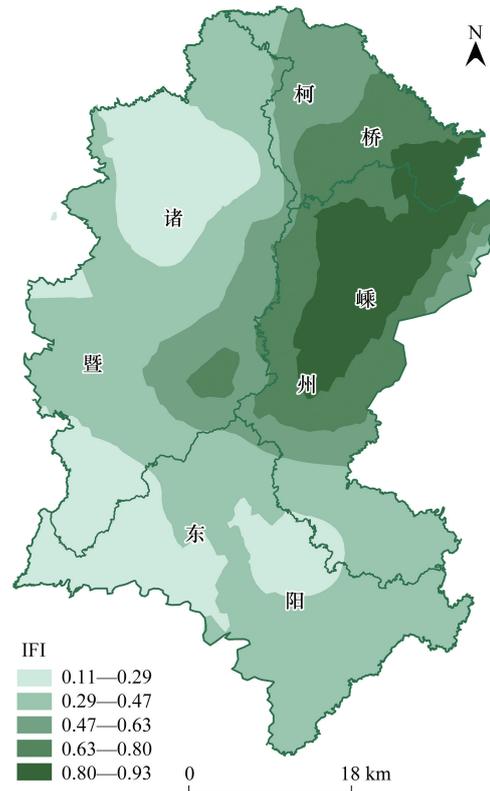


图 7 香榧主产区土壤肥力等级空间分布图

Fig. 7 Soil fertility level distribution map of *Torreya grandis* cv. *Merrillii*

IFI: 土壤综合肥力评价指数 Integrated soil fertility index

参考文献 (References):

- [1] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
- [2] 董悦, 张永清, 刘彩彩. 晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性. 生态学报, 2018, 38(23): 8621-8629.
- [3] Song X D, Liu F, Wu H Y, Cao Q, Zhong C, Yang J L, Li D C, Zhao Y G, Zhang G L. Effects of long-term K fertilization on soil available potassium in East China. *Catena*, 2020, 188: 104412.
- [4] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 徐晶, 张夫道. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 406-410.
- [5] Chen S, Lin B W, Li Y Q, Zhou S N. Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, China. *Geoderma*, 2020, 357: 113937.
- [6] 戴文圣, 黎章矩, 程晓建, 喻卫武, 符庆功. 香榧林地土壤养分、重金属及对香榧子成分的影响. 浙江林学院学报, 2006, 23(4): 393-399.
- [7] 王丹丹. 林地管理对香榧生长及土壤肥力的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 71-71.
- [8] 李麟杰. 不同立地与经营措施对香榧林地土壤肥力的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2016.
- [9] 储开江, 马全福, 周绍仲, 黄志汉, 孔兴华. 香榧枝条黄化原因探析. 浙江林业科技, 2010, 30(2): 49-52.
- [10] 童品璋, 陈力耕, 王辉. 香榧的主要品种及其开发价值. 中国南方果树, 2005, 34(5): 33-34.
- [11] 吾中良, 徐志宏, 陈秀龙, 金国龙, 李苏萍, 沈毓玲, 郎学军, 胡中成, 陈李红. 香榧病虫害种类及主要病虫害综合控制技术. 浙江林学院学报, 2005, 22(5): 545-552.
- [12] 谭晓风, 胡芳名, 张党权, 周煦惠, 杨伟. 香榧主要栽培品种的 RAPD 分析. 园艺学报, 2002, 29(1): 69-71.
- [13] 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.
- [14] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河, 孙飞翔, 郭秀江. 基于 GIS 和统计模型的黄土丘陵沟壑区土壤水分插值方法. 水土保持学报, 2013, 27(6): 93-96, 102-102.
- [15] Dai W, Li Y H, Fu W J, Jiang P K, Zhao K L, Li Y F, Penttinen P. Spatial variability of soil nutrients in forest areas: A case study from subtropical China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181(6): 827-835.
- [16] 程晓建, 黎章矩, 戴文圣. 浙江省经济林产业现状与发展对策. 福建林业科技, 2009, 36(3): 207-210.
- [17] 徐翠霞. 浙江省香榧产业发展及其对策研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019: 49-49.
- [18] 方萌. 诸暨市现代农业产业园区发展研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [20] Fu W J, Zhao K L, Zhang C S, Tunney H. Using Moran's *I* and geostatistics to identify spatial patterns of soil nutrients in two different long-term phosphorus-application plots. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, 174(5): 785-798.
- [21] 陶吉兴, 傅伟军, 姜培坤, 杜群, 徐军. 基于 Moran's *I* 和地统计学的浙江森林土壤有机碳空间分布研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(5): 97-101.
- [22] 戴巍, 赵科理, 高智群, 刘康华, 张峰, 傅伟军. 典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征. 生态学报, 2017, 37(22): 7528-7538.
- [23] Zhao K L, Zhang L Y, Dong J Q, Wu J S, Ye Z Q, Zhao W M, Ding L Z, Fu W J. Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of southeastern China. *Geoderma*, 2020, 360: 114011.
- [24] Dai W, Zhao K L, Fu W J, Jiang P K, Li Y F, Zhang C S, Gielen G, Gong X, Li Y H, Wang H L, Wu J S. Spatial variation of organic carbon density in topsoils of a typical subtropical forest, southeastern China. *Catena*, 2018, 167: 181-189.
- [25] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, Zhao Y C, Sun W X, Gu Z Q. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 325-334.
- [26] 齐雁冰, 黄标, 赵永存, 孙维侠. 经济高速发展区土壤肥力质量演变的系统评价. 土壤通报, 2010, 41(1): 76-80.
- [27] 戴文圣, 黎章矩, 程晓建, 喻卫武, 符庆功. 香榧林地土壤养分状况的调查分析. 浙江林学院学报, 2006, 23(2): 140-144.
- [28] 叶仲节, 柴锡周. 浙江林业土壤. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1986.
- [29] 邬奇峰, 陈英霞, 王力, 王华, 俞光荣. 临安市茶园土壤肥力质量综合评价及改良建议. 中国农技推广, 2012, 28(10): 41-43.
- [30] 王雷. 安徽毛竹林土壤养分及其生产力格局特点[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [31] 马闪闪, 赵科理, 丁立忠, 黄莎, 蔡铃, 赵伟明, 叶正钱. 临安市不同山核桃产区土壤肥力状况的差异性研究. 浙江农林大学学报, 2016, 33(6): 953-960.

- [32] 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.
- [33] 张红桔, 马闪闪, 赵科理, 叶正钱, 汪智勇, 白珊. 山核桃林地土壤肥力状况及其空间分布特征. 浙江农林大学学报, 2018, 35(4): 664-673.
- [34] 刘军, 徐旻昱, 吴家森. 雷竹林地土壤肥力统计特征与空间分布. 浙江林业科技, 2016, 36(5): 25-30.
- [35] 钱进芳, 吴家森, 黄坚钦. 生草栽培对山核桃林地土壤养分及微生物多样性的影响. 生态学报, 2014, 34(15): 4324-4332.
- [36] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, Parkin T B, Karlen D L, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [37] 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 冯舒, 熊小波, 梁国付. 基于 GIS 和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异——以周口为例. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1211-1220.
- [38] 黎章矩, 程晓建, 戴文圣, 金保华, 王安国. 浙江香榧生产历史、现状与发展. 浙江林学院学报, 2004, 21(4): 471-474.
- [39] 张建杰, 李富忠, 胡克林, 张强, 郭彩霞, 黄元仿. 太原市农业土壤全氮和有机质的空间分布特征及其影响因素. 生态学报, 2009, 29(6): 3163-3172.
- [40] 黄媛媛. 黎川县香榧栽培区土壤养分现状调查及限制因子研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016: 40-40.
- [41] 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋. 典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价. 环境科学, 2018, 39(6): 2893-2903.
- [42] 计小江, 吴晓燕, 李珊, 王芸, 陈义, 吴春艳, 李艳, 马婧好, 唐旭. 东阳市耕地土壤有效磷养分状况分析. 浙江农业科学, 2015, 56(1): 121-122, 126-126.