

山核桃林地土壤肥力状况及其空间分布特征

张红桔^{1,2}, 马闪闪^{1,2}, 赵科理^{1,2,3}, 叶正钱^{1,2}, 汪智勇⁴, 白 珊^{1,2}

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 杭州 311300; 3. 浙江大学 浙江省亚热带土壤与植物营养重点研究实验室, 浙江 杭州 310058; 4. 浙江省杭州市临安区农林技术推广中心, 浙江 杭州 311300)

摘要: 为探明山核桃 *Carya cathayensis* 产地土壤肥力质量状况和空间分布特征, 指导林农合理施肥, 选取杭州市临安区山核桃产区为研究区域, 以土壤 pH 值、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾为研究对象, 开展了该区土壤养分状况等级评价, 并采用地统计学等空间分析方法对土壤养分空间分布特征进行研究。结果表明: 研究区土壤 pH 值平均为 pH 5.23, 87% 土壤 pH 值为 pH 4 ~ 6, 研究区土壤酸化严重。土壤有机质平均为 31.6 g·kg⁻¹, 土壤碱解氮、有效磷、速效钾平均分别为 155.40, 14.04, 85.73 mg·kg⁻¹。根据《浙江土壤》肥力等级划分标准(1 级土壤成分质量分数低, 4 级土壤成分质量分数高)可知: 土壤有机质质量分数主要处于第 3 等级和第 4 等级, 比例为 54%。土壤碱解氮质量分数处在分级标准的第 3 等级且所占比例为 76%。土壤速效钾大于 50 mg·kg⁻¹ 的区域占 80%。相反, 土壤有效磷不足, 63% 的土壤有效磷不足 10 mg·kg⁻¹, 处在第 1 等级和第 2 等级标准, 难以满足山核桃生长。土壤各养分变异系数为 27.15% ~ 141.03%, 表明研究区林地土壤养分具有不同程度的变异性。空间分析结果显示: 研究区土壤 pH 值和养分均具有明显的空间分布格局。山核桃产量高低不一, 与土壤养分具有一定的空间对应关系。山核桃林地土壤严重酸化, 土壤有机质、碱解氮和速效钾都比较充足, 而大部分地区有效磷不足。图 2 表 4 参 35

关键词: 土壤学; 山核桃产区; 土壤养分; 土壤酸化; 空间分布; 产量

中图分类号: S714.8 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2018)04-0664-10

Soil fertility and its spatial distribution for *Carya cathayensis* stands in Lin'an, Zhejiang Province

ZHANG Hongju^{1,2}, MA Shanshan^{1,2}, ZHAO Keli^{1,2,3}, YE Zhengqian^{1,2}, WANG Zhiyong⁴, BAI Shan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Bioremediation of Soil Contamination, School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China; 4. Agriculture and Forestry Technology Extension Center in Lin'an District, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To identify soil fertility quality and its spatial distribution differences in *Carya cathayensis* stands and to guide farmers with fertilizer application, the main plantation area in Lin'an was selected for this study. In this study, differential GPS was used to locate and navigate in the field and a soil sample was collected within a radius of 10 m and a total of 189 soil samples were collected from 7 townships in Lin'an. Soil pH and status of nutrients (organic matter, available N, available P, and available K) were evaluated and their spatial distribution characteristics were revealed by geostatistics and Kriging interpolation. Results indicated that the

收稿日期: 2017-06-07; 修回日期: 2017-09-29

基金项目: 浙江省科技计划公益技术研究项目(2015C33051); 国家自然科学基金资助项目(41201323); 浙江农林大学大学生科研训练项目(2013200020)

作者简介: 张红桔, 从事环境质量与农产品安全研究。E-mail: zhanghongju1022@163.com。通信作者: 赵科理, 副教授, 博士, 从事土壤环境质量和环境资源信息技术应用等研究。E-mail: kelizhao@zafu.edu.cn

average soil pH was 5.23 with 87% of the soil pH values in the range of 4–6 meaning soil was seriously acidic. The average organic matter content in the soil was $31.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ with average available N of $155.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, available P of $14.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and available K of $85.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Soil organic matter, available N, and available K were abundant. According to the standard fertility grading for *Zhejiang Soil* (with first representing low content and fourth representing high content), soil organic matter was mainly in the third or fourth grades accounting for 54% of the soils and soil available N was in the third grade for 76% of the soils. Soil available K was more than $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for 80% of the soils. Soil available P, however, was insufficient for 63% of the soils at less than $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ which meant the first or second grades. Coefficients of variation for soil nutrients were between 27.15% and 141.03% indicating that soil nutrients in the study area had different degrees of variability. Yield of *C. cathayensis* varied from town to town and had a spatial correspondence to soil nutrients. This study showed that stands were seriously acidic with soil organic matter, available N, and available K sufficient, but in most areas available P was insufficient to meet the growing needs of *C. cathayensis*. [Ch, 2 fig. 4 tab. 35 ref.]

Key words: soil science; region of *Carya cathayensis* stands; soil nutrients; soil acidification; spatial distribution; yield

山核桃 *Carya cathayensis* 是中国特有的高档干果和木本油料植物，主要分布在浙皖交界的天目山地区，包括浙江临安、淳安、桐庐以及安徽宁国等地区。山核桃产品因其独特的口味和较高的营养价值，越来越受到人们的青睐^[1]。随着山核桃产业的迅猛发展，栽植规模的不断扩大，山核桃产业已成为山核桃产区林农主要经济来源。为了提高收入，林农施肥水平不断提高，以提高林地土壤肥力。由于缺乏对山核桃产区立地环境的具体研究以及技术指导，林农长期施用单一化学肥料，导致了土壤养分不平衡，引起土壤酸化等问题^[2]，降低了山核桃产区土壤肥力，甚至导致山核桃病虫害加剧。例如现在盛行的干腐病，是由于长期施用氮肥所致^[3-4]。这严重破坏了山核桃的适生土壤环境，从而影响了山核桃的产量与品质。目前，已对山核桃土壤性质、叶片、果仁^[5-7]以及影响山核桃产量的环境因子进行了研究^[8-10]，并相继对山核桃林地土壤肥力状况进行了调研^[11-12]，而对于山核桃主产区林地土壤肥力水平分级研究较少，且对于山核桃产地土壤肥力状况的空间异质性研究并未涉及。由于地理位置、林农经营方式以及施肥水平的不一致性，可能导致山核桃产区土壤肥力存在区域性差异。鉴于此，本研究以杭州市临安区山核桃主产区为研究对象，通过科学合理的采样策略研究和样品分析测定，研究了山核桃林地土壤的 pH 值、有效磷、速效钾、碱解氮、有机质质量分数现状和空间分布特征，及其与山核桃产量的关系，并对土壤肥力水平进行分级，以期明确临安主产区山核桃林地土壤肥力水平状况，并更直观地了解山核桃产区土壤养分以及土壤 pH 值的空间变化，为山核桃林地土壤养分管理和山核桃安全生产合理布局提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

浙江省杭州市临安区(30°14'N, 119°42'E)被誉为“山核桃之乡”。山核桃是临安的主要经济作物，其面积和产量分别占全国 60%和 70%以上，主要分布在西部山区的 7 个镇，包括湍口镇、清凉峰镇、河桥镇、昌化镇、龙岗镇、岛石镇和太阳镇。临安属季风型气候，温暖湿润，光照充足，雨水充沛，四季分明。临安年平均气温为 16.4 °C，7 月平均气温为 29.1 °C，极端最高气温为 41.7 °C，1 月平均最低气温为 4.1 °C，极端最低气温为 -13.0 °C，年平均降水量为 1 628.6 mm，降水集中在 4–9 月，年平均日照时数为 1 847.3 h，无霜期为 235 d。山核桃林地多分布在海拔 50 ~ 1 200 m 的丘陵山地，土壤类型主要为油黄泥、黄红泥、钙质页岩土、黄泥土^[13]。

1.2 样品采集与制备

本研究根据临安区山核桃栽植面积和分布区域等信息，选取山核桃栽植面积较广、分布较为集中的湍口镇、清凉峰镇、河桥镇、昌化镇、龙岗镇、岛石镇、太阳镇为山核桃土壤主要采集区域。根据以往采样策略研究的基础和经验，考虑不同的母岩、土壤类型、地形地貌、样点分布的均匀度以及样点对整

个连续分布面的可代表性等多种因素,利用 Arc GIS 地理信息系统软件,以研究区行政区划图、土壤类型图、山核桃空间分布现状图等为底图,进行了实验室室内布点,按照 1 km² 山核桃林地布设 1 个样点,形成了研究区山核桃林地采样布点图。

2013 年 3 月和 4 月,山核桃林地施肥前,进行了山核桃林地土壤样品采集。以研究区行政区划图、交通图和采样布点图为基础,采用差分全球定位系统(GPS)野外采样导航和定位,结合山核桃实际分布和种植情况,采用混合法,在 7 个镇共采集土壤样品 189 个(图 1)。在 10 m 半径范围内,按“梅花”型布点,采集 5 个子样点表层 0~20 cm 的土壤样品,混合均匀后组成 1 个混合土样,样品质量约 1 kg·份⁻¹,捡去树根、草皮和石子等杂物,装于塑料袋中,带回实验室。同时,记录采样点山核桃的立地条件、土壤情况、农户施肥管理和山核桃产量情况等。

土壤样品在室内常温晾晒自然风干,捡除石块、根系等异物,用木棒磨碎,过 2 mm 尼龙筛,再从 2 mm 土壤样品中取出一部分,用陶瓷研钵研磨过 100 目筛子,2 mm 和 100 目的土样分别装于封口袋中,编号保存备用。

1.3 样品测定方法

土壤理化性状的测定均采用常规分析方法,土壤 pH 值采用 $m(\text{土}):m(\text{水})$ 为 1.0:2.5 的悬浊液测定;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤氮采用碱解扩散法测定;土壤磷采用盐酸-氟化铵(HCl-NH₄F)浸提,钼锑抗比色法测定;土壤钾采用醋酸铵浸提,火焰光度计测定^[14]。

1.4 数据分析与处理

本研究中,采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 统计分析软件进行数据的描述统计分析、正态分布检验;利用 GS+ 7.0 地统计软件完成地统计分析,半方差模型拟合,以及空间相关性分析;用 Arc GIS 10.2 地理信息系统软件进行 Kriging 空间最优无偏插值和空间分析成果图的制作。

首先,对研究区的数据进行预处理,以保证分析结果的准确性。异常值出现概率低,但是异常值的存在会造成研究数据的偏态分布,进而影响分析结果的准确性。由于本研究的样本容量为 189 个,样本容量偏大,因此采用阈值法对数据进行异常值检验,检验结果发现研究区土壤 pH 值及养分数据异常值均在 4 个以下,甚至没有异常值,证明本研究采样合理。

地统计学中,半方差分析和 Kriging 插值都要求数据符合正态分布,否则可能产生比例效应,会影响基台值和块金值,降低估计精度^[15]。正态检验的方法主要有直方图法、 $P-P$ 和 $Q-Q$ 正态概率图检验、偏度峰度联合检验法、夏皮洛-威尔克检验、 χ^2 法检验、科尔莫戈洛夫-斯米尔洛夫检验法^[16]。由于本研究的样本容量为 189 个,属于大样本,因此使用峰度偏度联合检验法对异常值处理后的数据进行检验。检验结果发现有机质、碱解氮、速效钾的偏度和峰度不同程度降低,并符合正态分布,而土壤有效磷和 pH 值的偏度和峰度值仍然偏大,不符合正态分布,为此需对这两者进行数据转换。对不符合正态分布的数据进行对数转换后发现,两者的偏度和峰度明显降低,并且能较好地符合正态分布或者近似正态分布。结果见表 1。

2 结果与讨论

2.1 研究区土壤养分及 pH 值描述统计分析

由表 2 可知:研究区山核桃林地土壤 pH 值平均为 pH 5.23,范围为 pH 4.19~7.52,且仅有 4 个样品 pH 值超过 pH 7.0,故土壤属于酸性土壤。然而研究区位于天目山系石灰岩母岩的土壤上,土壤应该偏碱性,这说明研究区土壤酸化严重。土壤有机质为 9.7~67.7 g·kg⁻¹,平均值为 31.6 g·kg⁻¹。土壤碱解氮为 56.61~268.97 mg·kg⁻¹,平均为 155.40 mg·kg⁻¹。土壤有效磷为 1.37~143.28 mg·kg⁻¹,平均为 14.04 mg·kg⁻¹。土壤速效钾为 18.92~255.74 mg·kg⁻¹,平均为 85.73 mg·kg⁻¹。

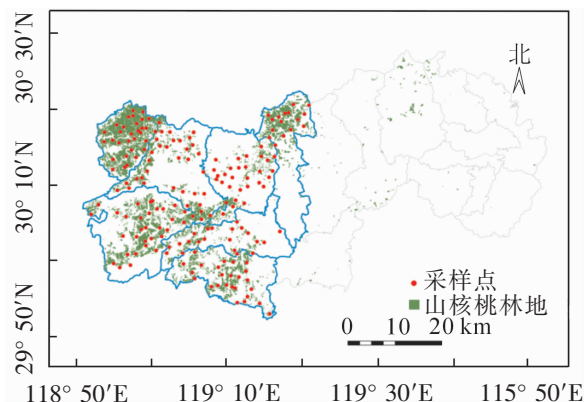


图 1 采样点分布图

Figure 1 Sampling point distribution map

表 1 处理前后土壤养分及 pH 值的偏度和峰度

Table 1 Skewness and kurtosis of soil nutrients and pH before and after treatment

项目	原始数据		异常值处理后		对数转换后	
	偏度	峰度	偏度	峰度	偏度	峰度
pH	1.40	2.03			0.88	0.25
有机质	0.63	0.36	0.48	-0.18		
碱解氮	0.29	-0.08	0.29	-0.08		
有效磷	3.48	16.09			0.46	-0.76
速效钾	1.19	2.00	0.89	0.50		

表 2 土壤养分的描述统计分析

Table 2 Statistical analysis of soil nutrient contents

项目	pH	$w_{\text{有机质}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{碱解氮}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{有效磷}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	$w_{\text{有效钾}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
平均值	5.23	31.60	155.40	14.04	85.73
标准差	0.64	10.90	42.19	19.80	39.32
最大值	7.52	67.70	268.97	143.28	255.74
最小值	4.19	9.70	56.61	1.37	18.92
变异系数/%	12.24	34.49	27.15	141.03	45.86

2.2 研究区土壤肥力基本状况

土壤的肥力状况需要借助土壤肥力水平分级标准来进行评价。由于对山核桃林地土壤的研究较少，迄今还没有相应的肥力分级标准来衡量山核桃土壤的肥力状况。本研究以农业上采用的常规农作物肥力等级划分标准为参考，如表 3 所示。

由表 3 可知：土壤 pH 值大部分为 pH 4~6，其中有 87% 的土壤 pH 值在 pH 6 以下，仅有 13% 的土壤属于碱性和微酸性。土壤有机质质量分数主要分布在第 3 等级和第 4 等级，所占比例为 54%，小于 $10.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的仅有 0.5%，说明有机质比较丰富。土壤碱解氮质量分数普遍较高，主要处在分级标准的第 3 等级，且所占比例为 76%。碱解氮大于 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域占 15%，小于 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域仅有 8%。与碱解氮相反，土壤有效磷普遍不足，63% 的土壤有效磷不足 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中不足 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域占 40%，超过 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的占 37%。土壤速效钾较丰富，其中大于 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域占 80%，即大部分区域都处在第 2 等级及以上，而低于 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的只占 20%。

根据 ZHANG 等^[17]对变异系数的划分，当变异系数小于 10% 时属于弱变异，10%~90% 为中等变异，大于 90% 则为高度变异。由表 2 可知：研究区土壤 pH 值、有机质、碱解氮、速效钾均属于中等程度变异，其质量分数差异较小。其中土壤 pH 值变异系数仅为 12.24%，说明研究区土壤 pH 值较为接近，最大值只是属于个别现象，绝大多数采样点土壤都呈酸性。在上述养分指标中，有效磷变异系数最大，达到了 141.03%，属于高度变异。结合前面的土壤养分等级评价结果，表明研究区土壤有效磷质量分数具有明显的变异性，质量分数高低差异较大。

土壤酸碱度是土壤养分的重要特征之一，不仅影响土壤微生物活性，而且与土壤养分的形成、转化以及有效性有密切关系，也是影响土壤肥力的主要因素之一^[18]。山核桃适宜生长在微酸性及以上的土壤

表 3 土壤肥力水平分级标准及各等级所占比例

Table 3 Classification standard of soil fertility and its proportion

肥力水平	pH		有机质		碱解氮		有效磷		速效钾	
	数值	百分比/%	$w/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	百分比/%	$w/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	百分比/%	$w/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	百分比/%	$w/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	百分比/%
第 1 等级	≤ 5.0	47	≤ 1.0	0.5	≤ 80.0	2	≤ 5.0	40	≤ 50.0	20
第 2 等级	$5.0\sim<6.0$	40	$1.0\sim<3.0$	46.0	$80.0\sim<100.0$	6	$5.0\sim<10.0$	23	$50.0\sim<80.0$	31
第 3 等级	$6.0\sim<7.0$	11	$3.0\sim<4.0$	33.0	$100.0\sim<200.0$	76	$10.0\sim<20.0$	15	$80.0\sim<120.0$	34
第 4 等级	≥ 7.0	2	≥ 4.0	21.0	≥ 200.0	15	≥ 20.0	22	≥ 120.0	15

说明：土壤肥力等级参照《浙江土壤》。第 1 等级低，第 4 等级高

中。调查显示山核桃出现连片的叶片黄化,枯萎,根系死亡严重现象时,林地土壤 pH 值均小于 pH 5.0。洪游游等^[11]的研究结果表明:土壤 pH 值在 20 世纪末为 pH 6.0 ~ 7.0,然而本研究土壤 pH 值仅为 pH 5.23,在山核桃生育期 pH 值可能更低。由此可知:山核桃林地土壤严重酸化。随着山核桃市场需求量的增加,林农为了提高山核桃产量,大量施肥,以提高山核桃生长所需的养分。已有研究发现:施肥是导致土壤酸化的主要因素^[19]。研究区大量施用的氮肥,仅一部分被植物所吸收,大部分氮经过硝化作用产生酸,造成土壤酸化^[12]。土壤酸化又会影响到山核桃对营养元素的吸收,从而导致山核桃产量和品质下降^[20]。

土壤有机质是土壤肥力的物质基础,影响作物对微量元素的吸收,从而影响农作物的产量和品质^[21]。有研究表明^[22]:土壤有机质与其他速效养分不同,它在植物生长期间变化较小,并保持相对稳定。这是研究区土壤有机质变异系数偏小,质量分数差异不明显的主要原因。研究区土壤有机质平均值达 $31.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处在分级标准的第 3 等级。林地土壤有机质丰富。调查发现^[23]:土壤有机质与土壤碱解氮呈极显著正相关,研究区大量氮肥的施用,不仅使土壤碱解氮普遍较高,还提高了有机质质量分数。同时,山核桃树木常年枯枝落叶堆积,无人清扫,也是导致林区土壤有机质丰富的原因之一。

氮素是植物所必需的营养元素之一。研究区氮素水平高低能有效反映林农施肥状况。调查发现:林农大多施用氮磷钾复合肥,研究区土壤碱解氮普遍较高,平均值达 $155.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而且质量分数处在第 3 等级和第 4 等级的区域占 91%。显然,这与研究区大量施肥有关。化肥在分解过程中会产生二氧化碳以及各种有机酸,二氧化碳除被植物吸收外,溶解在土壤水分中形成碳酸以及各种有机酸、无机酸,一方面加剧了土壤酸化,另一方面则促进土壤中难溶性矿质养分的溶解,从而增加土壤中的有效养分^[24]。

缺磷是植物生长的主要限制因素之一^[25]。初步调查发现:品质好的山核桃大部分都生长于石灰性母质发育的土壤上,而这种类型的土壤磷养分一般都比较贫瘠^[26]。石灰岩土壤含有大量可交换性钙,磷易与钙形成磷酸二钙、磷酸八钙、羟基磷灰石以及难溶的磷灰石等磷酸钙盐沉淀,是降低磷的有效性的主要途径^[27]。有研究表明^[28]:土壤有效磷达 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的时候才能满足山核桃的生长。研究区 63% 的土壤有效磷不足 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,所以研究区土壤有效磷质量分数亟待提高。施肥特别是酸性肥料和氮肥的施用有助于提高土壤磷的有效性^[29],因此,为了提高磷质量分数,林农不同程度施用氮肥,而研究区有效磷变异系数达 141.03%,其质量分数高低差异显然与林农施肥管理水平不同密切相关。

由于施入土壤中的氮容易转化,随雨水淋失,磷易于被土壤固定,而钾不会发生形态的转化,因此研究区土壤速效钾质量分数高低能够很好地反映林农施肥状况。高产山核桃林的最低肥力要求中土壤速效钾不得低于 $55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。肥力等级评价结果显示:土壤速效钾大于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域占 80%。可见,研究区山核桃土壤速效钾绝大部分能满足山核桃生长且质量分数相对较高,从而也反映出林农施肥量较大。

2.3 研究区土壤养分及 pH 值的空间变异结构

变异系数仅仅反映了样本的总体特征,并不能准确反映空间的变化规律,即不能反映土壤养分的结构性和随机性、相关性和独立性。地统计学能够很好地反映研究区土壤养分含量的空间变异结构。因此,本研究采用地统计学方法对土壤养分数据进行了半方差函数变异性分析,使用 GS+ 7.0 软件对土壤养分及 pH 值数据进行了半方差模型拟合,得到各养分及 pH 值的半方差函数理论模型及相关参数(表 4)。由表 4 可知:土壤 pH 值较好地符合高斯模型,土壤有机质和碱解氮符合指数模型,土壤有效磷和速效钾较好地符合球状模型。

土壤养分异质性是随机因素与结构因素共同作用的结果。在半方差函数模型中,块金值(C_0)表示由人为活动等非自然因素引起的变异,属于随机变异;基台值(C)表示系统内的总变异;块基比 $C_0/(C_0+C)$ 表示随机因素引起的空间变异在系统变异中所占的比例,是反映区域化变量空间相关性程度的重要指标。当 $C_0/(C_0+C) < 25\%$ 时,表明变量具有强烈的空间自相关,即主要受到结构性变异的影响;当 $C_0/(C_0+C)$ 为 $25\% \sim 75\%$ 时,变量属于中等程度空间自相关;当 $C_0/(C_0+C) > 75\%$,变量空间自相关程度较弱,即主要受随机因素影响^[30]。变程表示在一定尺度下变量空间相关性的作用范围,在变程范围内变量存在空间相关性,超过变程则不存在。由表 4 可见:pH 值、有机质、碱解氮块基比均小于 25%,表明这三者的变异主要是由土壤母质、类型等结构性因素引起。但是由于三者变程较小,尤其是碱解氮,变程仅为 0.81 km,这主要是由于受到人为施肥的广泛影响,从而削弱了三者各自的相关性。有效磷、速

效钾块基比为 25%~75%，属于中等程度空间自相关，说明有效磷和速效钾受到结构性和随机性因素的双重作用。

表 4 研究区土壤养分及 pH 值的变异函数理论模型及其相关参数

Table 4 Theoretical model of variability function and and its related parameters of soil nutrients and pH in the study area							
项目	分布类型	理论模型	块金值	基台值	变程/km	块基比/%	决定系数(R ²)
pH	对数正态	高斯模型	0.000 3	0.002 3	3.34	13	0.816
有机质	正态	指数模型	0.166 0	1.163 0	6.50	14	0.796
碱解氮	正态	指数模型	177.000 0	1 742.000 0	0.81	10	0.703
有效磷	对数正态	球状模型	0.093 0	0.195 0	5.98	48	0.878
速效钾	正态	球状模型	584.000 0	1 433.000 0	6.56	41	0.869

2.4 土壤养分及 pH 值空间分布特征

为了直观描述土壤养分及 pH 值在空间上的分布特征，了解研究区内各个乡镇的土壤养分状况，本研究在半方差函数分析的基础上，利用拟合得到的理论模型及其相关参数，结合土壤肥力等级评价标准，应用普通克里格方法进行了最优无偏插值，绘制了土壤养分及 pH 值的空间分布图(图 2)。

由图 2 可见：土壤 pH 值呈近似“U”型分布格局，除了几个高值斑块区土壤偏碱性外，其余大部分区域土壤呈酸性，并由南向北酸化程度逐渐增强。土壤有机质质量分数由东北向西南逐渐递减，东部有机质质量分数相对较高。土壤碱解氮质量分数无明显空间分布特征，区域内有机质质量分数差异不明显且相当丰富。土壤有效磷质量分数由西向东逐渐递减，并在西北部出现相对高值区。土壤速效钾质量分数由中部向东西两边递增，然而土壤有效磷和速效钾呈斑块状的空间分布特征。

从土壤 pH 值和养分的空间分布情况来看，龙岗、昌化中北部，太阳西南以及清凉峰西部土壤酸化严重，属于一级，pH 值低于 pH 5，其余地区 pH 值为 pH 5~6，pH 值处于 3 级和 4 级的土壤几乎没有。研究区土壤有机质质量分数都极其丰富，其中岛石、龙岗、昌化、太阳、湍口镇以及河桥东部有机质质量分数都处于 3 级，且太阳以及太阳和昌化交界处出现了 2 个高值区，有机质质量分数处于 4 级，大于 40 g·kg⁻¹。清凉峰、河桥中西部以及湍口部分地区有机质处于 2 级，质量分数也较丰富。与有机质相同，研究区土壤碱解氮质量分数也很丰富，几乎所有镇都处在 3 级，太阳镇北部碱解氮达到了 4 级。由前面分析可知，研究区土壤有效磷质量分数变异较大，在各级均有分布，63%的土壤有效磷不能满足山核桃正常生长，主要分布在太阳、昌化、龙岗、清凉峰大部分地区以及河桥、湍口部分地区，其质量分数低于 10 mg·kg⁻¹，其中龙岗北部、清凉峰西南、太阳和昌化交接地带有效磷严重不足，低于 5 mg·kg⁻¹。其余地区有效磷能够很好满足山核桃生长，尤其是岛石、清凉峰和河桥部分地区有效磷质量分数极高，处于 4 级。然而高磷容易造成磷的淋失，因此需要注意磷淋失风险。土壤速效钾质量分数变异性也相对较大，各级均有分布，主要分布在 2 级以上，且岛石南部、昌化中部、河桥中部的高值区有效钾大于 80 mg·kg⁻¹。研究区土壤速效钾均能够满足山核桃正常生长。

自然和人为的双重作用导致土壤养分及 pH 值空间分布具有较大的变异性，尤其是人为施肥的影响。其次，土壤理化性质之间的相互作用不可忽视。由于受到成土母岩、海拔以及人为施肥等因素的影响，导致研究区不同乡镇土壤 pH 值差异明显，但是同一乡镇 pH 值变化程度不同，显然是人为干扰的结果，尤其是长期施用大量化学肥料所致。研究区内有机质质量分数丰富，但空间分布格局显示不同镇之间土壤有机质仍然存在差异。有机质质量分数较高的太阳以及昌化，海拔较高，石灰岩面积分布广，有利于土壤有机质的积累。而海拔较低的河桥、清凉峰以及湍口，石灰岩分布面积小，导致其有机质质量分数相对较低^[31]。研究区内有效氮差异不明显，显然这与研究区氮肥施入量相当有关。土壤有效磷与速效钾质量分数高低差异大，空间分布极为不均。土壤有机磷的矿化和无机磷的溶解很大程度上取决于土壤酸度，酸性土壤速效磷质量分数随 pH 值的升高而增加^[32]。由空间分布图可知土壤 pH 值较低的区域其有效磷质量分数相对较低，而 pH 值较高的区域有效磷质量分数较高。速效钾主要来源于成土母质与人为施肥，研究区施肥水平不同加剧了有效磷与速效钾的空间分布不均。

2.5 土壤养分对山核桃产量的影响

产量是最直接反映山核桃林地经济效益的指标，更是林农密切相关心的问题。尽管山核桃产量会受到

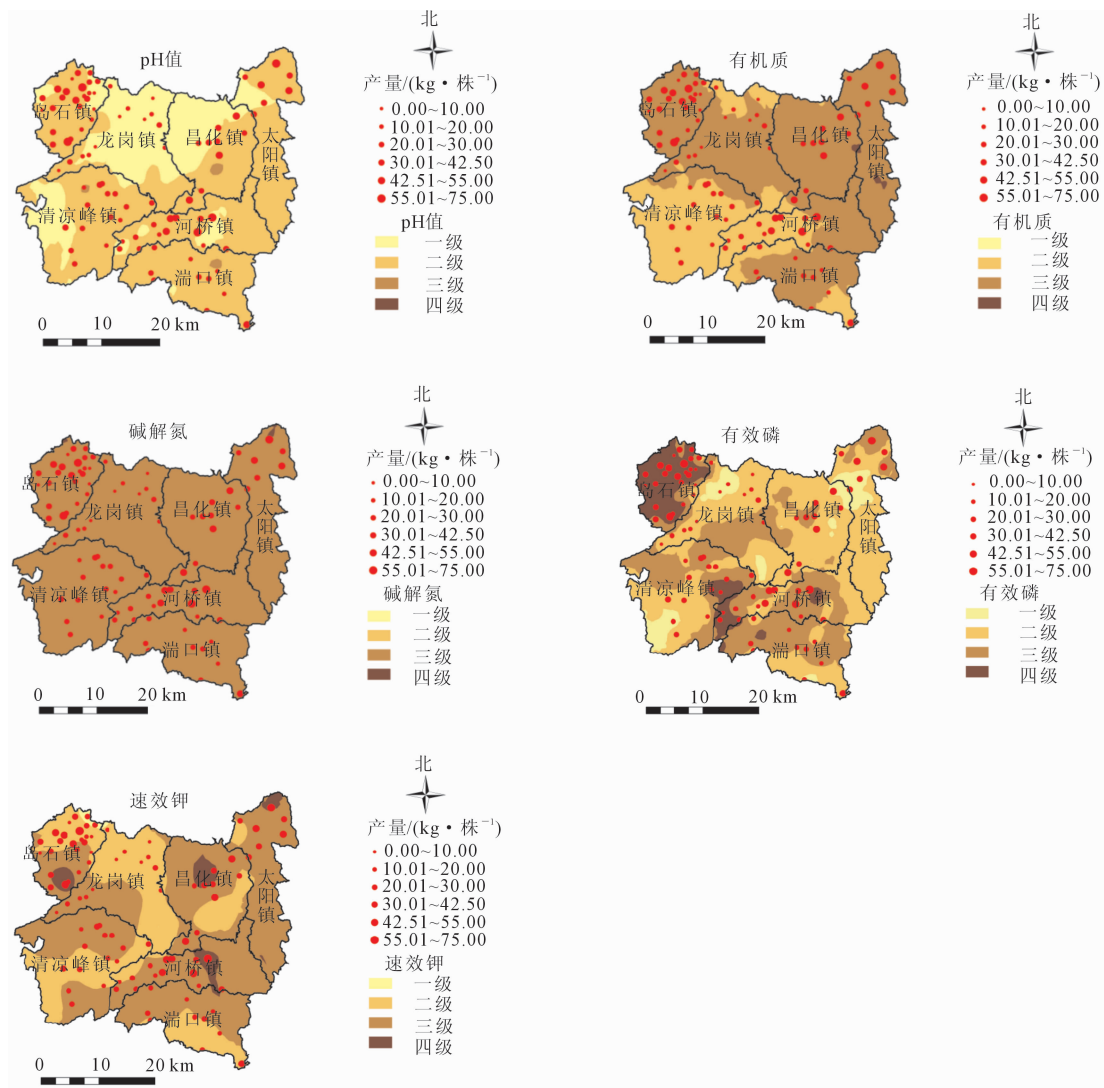


图 2 研究区土壤理化性质及产量空间分布图

Figure 2 Spatial distribution of soil physical and chemical properties and yield in the study area

气象等多种因素的影响,但从以往的调查和果实分析来看,营养条件是造成山核桃果实产量大小年的主导因子^[33]。

由图 2 可知:岛石、昌化、太阳等 3 个镇山核桃产量较高,河桥西部产量低,而东部地区产量高。其余镇山核桃产量较低,尤其是龙岗镇,产量偏低。

结合研究区土壤养分及 pH 值分布图可知:产量较高的岛石、昌化、太阳、河桥 4 个镇土壤 pH 值相对较高,产量偏低的龙岗镇土壤 pH 值极低。山核桃产量高低与土壤有机质质量分数高低具有较好的对应关系,然而也存在部分区域不一致现象,产量较低的湍口和龙岗其有机质质量分数反而较高。由于研究区碱解氮相当丰富,因此山核桃产量高低已不受土壤碱解氮限制。山核桃产量较高的岛石、昌化、太阳、河桥其土壤有效磷质量分数较高,产量偏低的龙岗其土壤有效磷质量分数也较低,而湍口和清凉峰山核桃产量与土壤有效磷水平并不一致。与有效磷相似,太阳、昌化、河桥、龙岗的山核桃产量与土壤速效钾质量分数较为一致,而清凉峰、湍口、岛石的山核桃产量与土壤速效钾质量分数却并不一致。综上所述,山核桃产量受土壤 pH 值及有机质、速效钾的影响较大,同时可能还受到地质、气象等其他多种因素的影响。

3 结论

研究区土壤严重酸化,pH 值的平均值仅为 pH 5.23,不适宜山核桃的生长。从山核桃养分需求来

看, 土壤有机质、碱解氮和速效钾都比较充足, 而有效磷处于低水平, 大部分地区有效磷不足。

从空间分布情况来看, 研究区 7 个镇土壤都应注重酸化改良, 其中龙岗、昌化、清凉峰西部以及河桥中部酸化严重, 应引起足够重视。土壤有机质、碱解氮、速效钾均能较好满足山核桃正常生长, 但岛石北部小部分地区速效钾质量分数略显不足, 应合理补充钾肥, 岛石、昌化、河桥中部以及太阳北部小范围需要控制钾肥的施入。研究区碱解氮相当丰富, 应适当减少氮肥施用。昌化、太阳全镇, 龙岗南部、北部, 清凉峰南部, 湍口南部急需补充施入磷肥, 而岛石全镇、清凉峰与河桥交界区有效磷极其丰富, 必须严格控制磷肥的施用, 以防止磷淋失对土壤造成污染。此外, 研究区山核桃产量高低不一, 其产量受土壤酸碱度、有机质、速效钾影响较大。因此, 研究区山核桃林地土壤一方面要注重酸化的改良, 另一方面要因地制宜控制或施用化学肥料, 保持土壤养分平衡, 促进山核桃产业健康稳定发展。

4 参考文献

- [1] 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 等. 自然地理学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [2] 张春苗, 张有珍, 姚芳, 等. 临安山核桃主产区土壤 pH 值和有效养分的时空变化[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(6): 845 – 849.
ZHANG Chunmiao, ZHANG Youzhen, YAO Fang, *et al.* Temporal and spatial variation of soil pH and nutrient availability for *Carya cathayensis* orchards in Lin'an [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(6): 845 – 849.
- [3] 高宇列, 沈月琴, 黄坚钦, 等. 中国山核桃产业成长阶段分析[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2010, **9**(2): 136 – 140.
GAO Yulie, SHEN Yueqin, HUANG Jianqin, *et al.* Growth stages of hickory industry in China [J]. *J Beijing For Univ Soc Sci Ed*, 2010, **9**(2): 136 – 140.
- [4] 张璐璐, 贾桂民, 叶建丰, 等. 浙江临安山核桃干腐病发生发展规律[J]. 浙江农林大学学报, 2013, **30**(1): 148 – 152.
ZHANG Lulu, JIA Guimin, YE Jianfeng, *et al.* Frequency of *Carya cathayensis* canker disease in Lin'an City, Zhejiang Province [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2013, **30**(1): 148 – 152.
- [5] 宋明义, 陈文光, 斯小君, 等. 安吉县山核桃立地环境条件分析[J]. 浙江林业科技, 2008, **28**(6): 11 – 15.
SONG Mingyi, CHEN Wenguang, SI Xiaojun, *et al.* Study on site conditions of *Carya cathayensis* stand in Anji County [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2008, **28**(6): 11 – 15.
- [6] 殷舒, 毛胜凤, 杨琼霞, 等. 山核桃叶片提取物的抑菌作用[J]. 浙江林学院学报, 2007, **24**(5): 604 – 607.
YIN Shu, MAO Shengfeng, YANG Qionxia, *et al.* Bacteriostasis and fungistasis with extracts from *Carya cathayensis* leaves [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2007, **24**(5): 604 – 607.
- [7] 钱新标, 徐温新, 张圆圆, 等. 山核桃果仁微量元素含量分析初报[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(4): 511 – 515.
QIAN Xinbiao, XU Wenxin, ZHANG Yuanyuan, *et al.* Trace elements in kernels of Chinese hickory (*Carya cathayensis*) grown in limestone and non-limestone soils [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(4): 511 – 515.
- [8] 侯红波, 颜正良, 潘晓杰, 等. 立地条件对湖南山核桃产量与胸径的影响[J]. 经济林研究, 2004, **22**(2): 49 – 50.
HOU Hongbo, YAN Zhengliang, PAN Xiaojie, *et al.* Effect of site condition on yield and breast diameter of *Carya hunanensis* [J]. *Nonwood For Res*, 2004, **22**(2): 49 – 50.
- [9] 骆咏, 傅松玲, 张良富, 等. 海拔高度对山核桃生长与产量的影响[J]. 经济林研究, 2008, **26**(1): 71 – 73.
LUO Yong, FU Songling, ZHANG Liangfu, *et al.* Effects of altitude on growth and yield in *Carya cathayensis* [J]. *Nonwood For Res*, 2008, **26**(1): 71 – 73.
- [10] 陈国瑞, 黄必恒. 影响山核桃产量的主导气象因子分析[J]. 浙江林学院学报, 1992, **9**(2): 144 – 150.
CHEN Guorui, HUANG Biheng. Main meteorological factors effecting the fruit yield of cathay hickory [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1992, **9**(2): 144 – 150.
- [11] 洪游游, 唐小华, 王慧. 山核桃林土壤肥力的研究[J]. 浙江林业科技, 1997, **17**(6): 1 – 8.
HONG Youyou, TANG Xiaohua, WANG Hui. Study on soil fertility of *Carya cathayensis* forests [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 1997, **17**(6): 1 – 8.
- [12] 陈卫新, 邬奇峰, 黄仁仁, 等. 临安市山核桃林地土壤肥力状况及存在问题[J]. 中国农技推广, 2013, **29**

- (6): 45 – 46.
- CHEN Weixin, WU Qifeng, HUANG Sansan, *et al.* Soil fertility status and existing problems of pecan forest land in Lin'an [J]. *China Agric Technol Ext*, 2013, **29**(6): 45 – 46.
- [13] 钱孝炎, 黄坚钦, 帅小白, 等. 临安市不同乡镇山核桃林地土壤理化性质比较[J]. 浙江林业科技, 2013, **33**(1): 7 – 11.
- QIAN Xiaoyan, HUANG Jianqin, SHUAI Xiaobai, *et al.* Comparison of soil physiochemical properties at *Carya cathayensis* stands in Lin'an [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2013, **33**(1): 7 – 11.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 高玉蓉, 许红卫, 周斌. 稻田土壤养分的空间变异性研究[J]. 土壤通报, 2005, **36**(6): 822 – 825.
- GAO Yurong, XU Hongwei, ZHOU Bin. Investigation on spatial variability of soil nutrients in paddy field [J]. *Chin J Soil Sci*, 2005, **36**(6): 822 – 825.
- [16] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [17] ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, ZHANG Xudong, *et al.* Spatial variability of nutrient properties in black soil of North-east China[J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(1): 19 – 29.
- [18] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. 生态环境, 2004, **13**(4): 656 – 660.
- HUANG Guoqin, WANG Xingxiang, QIAN Haiyan, *et al.* Negative impact of inorganic fertilizes application on agricultural environment and its countermeasures [J]. *Ecol Environ*, 2004, **13**(4): 656 – 660.
- [19] 张圆圆, 张春苗, 窦春英, 等. 施肥对山核桃土壤的酸化作用[J]. 农家之友, 2009(12): 1 – 4.
- ZHANG Yuanyuan, ZHANG Chunmiao, DOU Chunying, *et al.* Effect of fertilization on acidification of pecan soil [J]. *Nong Jia Zhi You*, 2009(12): 1 – 4.
- [20] 陈世权, 黄坚钦, 黄兴召, 等. 不同母岩发育山核桃林地土壤性质及叶片营养元素分析[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27**(4): 572 – 578.
- CHEN Shiquan, HUANG Jianqin, HUANG Xingzhao, *et al.* Nutrient elements in soil and *Carya cathayensis* leaves from four parent rock materials [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(4): 572 – 578.
- [21] 王晖, 邢小军, 许自成. 攀西烟区紫色土 pH 值与土壤养分的相关分析[J]. 中国土壤与肥料, 2007(6): 19 – 22, 49.
- WANG Hui, XING Xiaojun, XU Zicheng. Relationship between pH value and available nutrients of purple soil in Panxi tobacco-growing areas [J]. *China Soil Fert Sci*, 2007(6): 19 – 22, 49.
- [22] 童根平, 王卫国, 张圆圆, 等. 大田条件下山核桃林地土壤和叶片养分变化规律[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26**(4): 516 – 521.
- TONG Genping, WANG Weiguo, ZHANG Yuanyuan, *et al.* Seasonal changes of soil and leaf nutrient levels in a *Carya cathayensis* orchard [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26**(4): 516 – 521.
- [23] 马闪闪, 赵科理, 丁立忠, 等. 临安市不同山核桃产区土壤肥力状况的差异性研究[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(6): 953 – 960.
- MA Shanshan, ZHAO Keli, DING Lizhong, *et al.* Soil fertility in *Carya cathayensis* orchards for major towns of Lin'an City, China [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(6): 953 – 960.
- [24] 丁守成. 谈施肥对土壤的影响[J]. 科技创新导报, 2008(29): 123.
- DING Shoucheng. Effect of fertilization on soil [J]. *Sci Technol Innov Herald*, 2008(29): 123.
- [25] HINSINGER P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review [J]. *Plant Soil*, 2001, **237**(2): 173 – 195.
- [26] 李永夫, 金松恒, 叶正钱, 等. 低磷胁迫对山核桃幼苗根系形态和生理特征的影响[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27**(2): 239 – 245.
- LI Yongfu, JIN Songheng, YE Zhengqian, *et al.* Root morphology and physiological characteristics in *Carya cathayensis* seedlings with low phosphorus stress [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(2): 239 – 245.
- [27] BRASCHI I, CIAVATTA C, GIOVANNINI C, *et al.* Combined effect of water and organic matter on phosphorus availability in calcareous soils [J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2003, **67**(1): 67 – 74.
- [28] 赵伟明, 王艳艳, 马嘉伟, 等. 临安山核桃林地土壤磷素状况及其淋失风险分析[J]. 浙江农业学报,

2014, **26**(1): 154 – 158.

ZHAO Weiming, WANG Yanyan, MA Jiawei, *et al.* Phosphorus status and its leaching loss risks in the soils of Chinese hickory orchards in Lin'an City, Zhejiang Province [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2014, **26**(1): 154 – 158.

- [29] 杨珊, 何寻阳, 苏以荣, 等. 岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(6): 1596 – 1602.

YANG Shan, HE Xunyang, SU Yirong, *et al.* Effects of parent rock and land use pattern on soil fertility in Karst region of Northwest Guangxi [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(6): 1596 – 1602.

- [30] CAMBARDLLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, **58**(5): 1501 – 1511.

- [31] 杭州市土壤普查办公室. 杭州土壤[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1991.

- [32] 高丽丽. 西藏土壤有机质和氮磷钾状况及其影响因素分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2004.

GAO Lili. *Soil Organic Matter, Nitrogen, Phosphorus and Potassium Status and Its Influencing Factors in Xizang* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2004.

- [33] 黎章矩. 关于山核桃大小年问题的探讨[J]. 浙江农业科学, 1964(8): 415 – 420.

LI Zhangju. Discussion on the year of pecan [J]. *J Zhejiang Agric Sci*, 1964(8): 415 – 420.