果　树　学　报　2023，40（7）：1421-1433
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20220456

杨梅主产区土壤肥力空间异质性及其影响因素——以浙江仙居和临海为例

彭健健[1]，徐　坚[2]，王晓晓[3]，傅伟军[1]，张　申[1]，
彭欣怡[1]，徐　懿[1]，姜霓雯[1]，方　嘉[1]，吴家森[1*]

（[1]浙江农林大学 环境与资源学院 浙江临安 311300；[2]仙居县农业农村局 浙江仙居 317300；
[3]台州市万丰林业有限公司 浙江仙居 317300）

摘　要：【目的】阐明杨梅主产区土壤肥力的空间异质性，探寻影响土壤肥力的主要因素。**【方法】**依据杨梅（*Myrica rubra*）产区分布情况和适宜种植区域分布状况，筛选出浙江省杨梅主产区台州市仙居县和临海市的部分区域作为研究区，利用1 km×1 km网格法布点，采集了100个杨梅表层土壤样品（0~20 cm），通过地统计学方法探究土壤肥力的空间异质性。**【结果】**研究区杨梅土壤平均pH值4.48，有机碳含量（*w*，后同）18.21 g·kg^{-1}，碱解氮含量115.01 mg·kg^{-1}，有效磷含量15.57 mg·kg^{-1}，速效钾含量239.23 mg·kg^{-1}。杨梅主产区土壤有机碳含量、碱解氮含量、有效磷含量和速效钾含量低值区主要分布在临海东部，高值区则主要分布在仙居西部；pH值高值区主要分布在仙居东部，低值区则主要分布在仙居和临海的西部。土壤综合肥力评价指数的结果表明，仙居西部和临海西部土壤较肥沃，仙居东部和临海东部土壤较贫瘠。Pearson相关性分析结果表明，树龄与土壤有机碳含量呈显著正相关（$p<0.05$），海拔与土壤碱解氮含量呈极显著正相关（$p<0.01$），而坡向与速效钾含量呈显著负相关（$p<0.05$）。结构方程模型结果表明，树龄对有机碳含量有显著正影响（$p<0.05$），海拔对碱解氮含量有显著正影响（$p<0.05$），对速效钾含量有显著负影响（$p<0.05$），坡向对速效钾含量有显著负影响（$p<0.05$）。**【结论】**杨梅主产区土壤酸化和肥力失衡问题严重，应该增加仙居东部和临海东部的肥料投入和加强日常管理，适当控制仙居西部和临海西部的肥料施用量，同时还应增加研究区磷肥的施用。为缓解仙居西部和临海西部土壤酸化问题，可利用生石灰、有机肥和生理碱性肥料进行改良。

关键词：杨梅；土壤肥力；结构方程模型；空间分布；影响因素；土壤肥力评价
中图分类号：S667.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1009-9980(2023)07-1421-13

Spatial variation of soil fertility and its influencing factors in *Myrica rubra* region: A case study in Xianju county and Linhai city

PENG Jianjian[1], XU Jian[2], WANG Xiaoxiao[3], FU Weijun[1], ZHANG Shen[1], PENG Xinyi[1], XU Yi[1], JIANG Niwen[1], FANG Jia[1], WU Jiasen[1*]

([1]School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; [2]Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Xianju, Xianju 317300, Zhejiang, China; [3]Taizhou Wanfeng Forestry Co., Ltd., Xianju 317300, Zhejiang, China)

Abstract:【Objective】Soil fertility, the key factor of fruit production, is usually influenced by diverse factors in major producing areas. The study aimed to clarify the vital factors closely associated with the spatial heterogeneity of soil fertility by different comprehensive evaluation systems. The specific goals were to alleviate the common problem of soil acidification to provide a theoretical basis for realizing the precise management of soil nutrients in the main districts of *Myrica rubra* production.【Methods】According to the distribution of *M. rubra* main production area and suitable planting area, representative producing areas of Xianju county and Linhai city, Taizhou city, Zhejiang province were selected as study sites. 100 top soil (0−20 cm) samples were collected based on an intensive grid of 1 km×1 km.

收稿日期：2022-09-05　　**接受日期：**2023-02-22
基金项目：浙江省省院合作林业科技项目（2017SY13）；浙江省公益林和国有林场管理总站项目（GYLZ202103，GYLZ202004）

作者简介：彭健健，男，在读硕士研究生，研究方向为农业资源与环境。E-mail：jianjianpeng@stu.zafu.edu.cn
*通信作者 Author for correspondence. E-mail：jswu@zafu.edu.cn

The spatial heterogeneity of soil fertility was studied by geostatistical methods. The soil fertility status of each region was evaluated by the integrated soil fertility evaluation index method, and the impact factors of soil fertility were explored by Pearson correlation analysis and Structural Equation Model (SEM). 【Results】The results of soil physicochemical experiments showed that the average pH, organic carbon (OC), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) of *M. rubra* soils in the study area were 4.48, 18.21 $g \cdot kg^{-1}$, 115.01 $mg \cdot kg^{-1}$, 15.57 $mg \cdot kg^{-1}$ and 239.23 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. Compared with the average value of soil nutrients in the main producing areas of *M. rubra* in China, the soil pH and AP were lower than the average value (4.95 and 24.65 $mg \cdot kg^{-1}$) respectively, and the OC and AK were higher than the average value (19.47 $g \cdot kg^{-1}$ and 62 $mg \cdot kg^{-1}$). The soil acidification was serious in our study sites, and the content of AP was generally lower than the average levels. The coefficients of variation of the five fertility indicators were 12.02%, 25.98%, 35.51%, 100.35%, and 53.74%, respectively. Except for the strong variation of AP, the others were all moderate, and all fertility indicators were greatly affected by fertilizer application. The nutrient-impoverished study area with low OC, AN, AP and AK were mainly distributed in the east region of Linhai City, and the nutrient-rich area with high OC, AN, AP and AK were distributed in the west region of Xianju County. The district with high pH was located in the East of Xianju county, while the district with low pH was located in the West of Xianju county and Linhai city. The convergent management of *M. rubra* forest had resulted in significant aggregation in high nutrient zones and acidification problems. The integrated soil fertility evaluation index showed that 91% of the soil samples in *M. rubra* forest reached medium and high fertility levels, only 9% of the soil samples were at low fertility level. Specifically, the Western part of Xianju county and the Western part of Linhai city were relatively fertile, while the Eastern part of Xianju county and the Eastern part of Linhai city were relatively impoverished. The results of the Pearson correlation analysis showed that the tree age was significantly positively correlated with the soil OC ($p < 0.05$), altitude was significantly and positively correlated with the soil AN ($p < 0.01$), while the correlation between slope and AK was significantly negative ($p < 0.05$). The results of the Structural Equation Model showed that the tree age had a significant positive effect on OC ($p < 0.05$), the altitude had a significant positive effect on AN ($p < 0.05$), a significant negative effect on AK ($p < 0.05$), and slope aspect had a significant negative effect on AK ($p < 0.05$). With the growth of *M. rubra* trees, the soil pH showed an overall trend of decreasing, indicating that the soil acidification caused by excessive intensive management and fertilization application was becoming increasingly serious. As the aging of *M. rubra* trees, the standing environment continued to be stable, and the carbon source was continuously replenished by anthropogenic activities. Consequently, the accumulation rate of organic matter was greater than the decomposition rate, and the soil OC showed a rising trend, so that the organic matter kept accumulating. The results of various research methods showed that the anthropogenic fertilization application was the dominant factor affecting the soil nutrients, and elevation, slope direction and tree age were also important factors affecting the soil fertility. 【Conclusion】The increase of the fertilizer input and reinforce field management in the East *M. rubra* producing areas of Xianju county and Linhai city is suggested to relieve soil acidification and fertility imbalance. While in the West of Xianju county and Linhai city, it is better to reduce the fertilizer application appropriately. Besides, in our study area, more phosphorus fertilizer is needed because the overall soil phosphorus level is lower than the average value of main *M. rubra* production areas soils in China. However, in order to alleviate the problem of soil acidification caused by the excessive fertilizer application in the Western region of Xianju county and Linhai city, application of the quicklime, organic fertilizer and physiological alkaline fertilizer is needed for soil improvement.

Key words: *Myrica rubra*; Soil fertility; Structural equation model; Spatial distribution; Influencing factors; Evaluation for soil fertility

土壤肥力的高低与农林业发展密切相关，在提升农作物的产量和品质中扮演着重要角色[1-2]。土壤的形成受到各种人为和自然因素的影响[3-4]，最终发育形成不同类型。由于影响因子的差异，土壤性质在不同地理位置上存在一定的差异[5-6]，即空间异质性。前人对土壤性质的影响因素进行了大量研究。姜霓雯等[7]在研究清凉峰自然保护区土壤肥力的空间变异时，揭示了影响土壤肥力指标关键的影响因子是海拔。Wang等[8]在研究影响青藏高原土壤肥力的生物因子（畜牧）和非生物因子（环境因子）时发现，影响土壤肥力关键的因素是过度放牧。同时，探寻土壤肥力的主要影响因子，对掌握土壤肥力变化根源和调控土壤肥力水平都有着重要的科学意义。

杨梅（*Myrica rubra*）是原产于我国亚热带的珍贵水果，主要集中在浙江、江苏、福建和湖南等地栽培，口感独特、营养价值高，有延缓衰老、抗癌和抗氧化等功效。杨梅中含有丰富的膳食纤维，后者有助于调节肠道运动，同时还有降低血脂和胆固醇的作用[9]。浙江省杨梅的产量、种植面积和产值均位列全国首位，栽培面积在2019年达到8.88万hm^2，产量多达61.84万t，产值高达46.38亿元[10]。“杨梅经济”的繁荣发展也带来了一定的环境问题，如化肥的大量施用造成了土壤酸化和养分失衡等问题[11-14]，严重影响了土壤质量、杨梅产量及品质[15]。目前，前人对于影响杨梅土壤肥力因素的研究集中在生草栽培[16]、施肥处理[17]、微生物[18]和林龄[19]等方面，缺乏对杨梅土壤肥力空间分布及受地形因子影响程度的研究。因此，掌握林地土壤肥力的分布状况及其影响因素，对促进经济林生长与经济效益增长有着不可或缺的帮助。

为探明杨梅土壤肥力的影响因素，解决杨梅主产区土壤养分不均和酸化问题，笔者在本研究中以浙江省杨梅主产区土壤为研究对象，探究杨梅主产区林地土壤养分的空间异质性和分布规律，并根据相关性分析和结构方程模型结果，探寻土壤肥力的不同影响因子。本研究为杨梅经济林土壤质量管理、精准施肥提供理论及技术基础，推进杨梅果实增产与品质升级，实现杨梅经济林科学高效的管理和经营。

1　材料和方法

1.1　研究区与采样地概况

杨梅是浙江省台州市一大农业经济亮点产业，台州市的杨梅种植面积在2019年高达2.95万hm^2，产量多达27.6万t，产值超过24.5亿元[20]。台州市杨梅产区是中国最为著名的杨梅产区之一，占据浙江省1/3以上的种植面积和果实产量。仙居县和临海市杨梅种植面积大、产量多，因此被称为“中国杨梅之乡”，笔者选取浙江省杨梅主产区仙居县和临海市为研究区。

仙居县位于浙江省东部，28°30′~29° N，120°~121° E，海拔1~1370 m，亚热带季风气候，平均降水量2000 mm，全年平均气温18.3 ℃，无霜期在240 d左右，年日照时数1 786.2 h，土壤为红壤土类[19]。2019年，仙居县的种植面积为9200 hm^2，投产面积为8330 hm^2，总产量达9.5万t，产值达7.2亿元，是浙江省台州市第一杨梅主产区[21]。

临海市位于浙江省东南沿海，28°40′~29°04′ N，120°49′~121°41′ E，海拔10~1200 m，亚热带季风气候，平均降雨量1 710.4 mm，全年平均气温17.1 ℃，无霜期241 d，平均蒸发量1 231.4 mm。2019年，临海市的种植面积8.87×10^3 hm^2，年产量8.8万t，产值6.4亿元，临海市是浙江省最大的杨梅生产基地之一。

1.2　样品采集和分析

2020年8月，采用1 km×1 km网格法布设采样点[22-23]，选取气候最适宜杨梅生长的区域为研究区，结合杨梅林地的分布情况，在台州仙居、临海分别选取了64个和36个坐标小区块，根据初步定位好的100个GPS位点，在每个杨梅经济林研究区样地附近采用5点取样法分别取每个样点位于0~20 cm土层土壤1 kg，同时调查杨梅地径、树龄、施肥及其他管理措施，将土样混合均匀后采用四分法取1 kg土样装于塑封袋中，密封保存带回实验室。土壤样品于通风干燥处风干7 d，研磨充分后分别过2 mm、0.149 mm筛，于阴凉干燥处，置于密封塑料袋中，编

号封口保存。土壤pH值以及有机碳、碱解氮、有效磷和速效钾含量根据《土壤农化分析》内的方法测定[24]。采样点杨梅在10、15、20和25 a以上4个树龄段所占比例分别为11%、41%、36%和12%，坡度范围为2°~30°，各个坡向均有分布。

1.3 地统计学

地统计学以变异函数为主要研究工具，研究土壤在空间分布上的随机性、连续性和空间相关性等自然现象[25]。普通克里格法是地统计学中最为常用的无偏最优估计的插值法[26]，本研究中，通过采用普通克里格方法来绘制土壤理化性状的空间分布图[27-28]，直观地反映出土壤理化性状的空间异质性。

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left[Z(x_i+h)-Z(x_i)\right]^2 \text{ [29]。} \qquad (1)$$

式中，$\gamma(h)$ 表示间隔为 h 时的半方差；h 表示样本间距；$Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别表示在 x_i 和 x_i+h 时变量 $Z(x)$ 的实测值；$N(h)$ 表示空间间隔为 h 时的点对数。

当半方差函数 $\gamma(h)$ 随着样本间距 h 的增加而增加，趋于一个常数后恒定不变[30]，该常数即基台值（C_0+C）；在 h =0时半方差值即为块金值（C_0），表示由于采样误差和尺度过小的采样等随机因素引起的空间异质性[31]。最常见的半方差函数理论模型有线性模型、指数模型、球状模型和高斯模型[32]。

1.4 土壤肥力评价模型的选取和计算

结合前人研究成果，本研究选取了土壤肥力质量指标中最具代表性的5个重要指标，分别是pH值及有机碳、碱解氮、有效磷和速效钾含量[33]。

由于土壤肥力评价指标实测值量纲的不同，对数据进行归一化处理，利用隶属度函数将各项指标转换为0.1~1之间的无量纲值[34]，实现土壤各肥力指标的量纲归一化。利用因子分析法确定肥力指标的权重，评价指标公因子方差所占比例即为权重值。

抛物线型：

$$W_i\begin{cases}\dfrac{0.9(x-x_3)}{x_4-x_3}+0.1 & x_3<x\leqslant x_4\\ 1.0 & x_2<x\leqslant x_3\\ \dfrac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1 & x_1<x\leqslant x_2\\ 0.1 & x<x_1\text{或}x>x_4\text{；}\end{cases} \qquad (2)$$

S型：

$$W_i\begin{cases}1.0 & x\geqslant x_2\\ \dfrac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1}+0.1 & x_1\leqslant x<x_2\\ 0.1 & x<x_1\text{。}\end{cases} \qquad (3)$$

式中，W_i 为各个肥力指标的隶属度；x 为各个肥力指标的实测值；x_1、x_2、x_3 和 x_4 为各个肥力指标的转折点（表1）。

表1 抛物线和S型函数土壤理化指标的转折点

Table 1 The turning point of soil physicochemical indexes of parabola-type and S-type membership function

转折点 Turning point	pH值 pH value	w（有机碳） Organic carbon/（g·kg^{-1}）	w（碱解氮） Alkali-hydrolyzable nitrogen/（mg·kg^{-1}）	w（有效磷） Available phosphorus/（mg·kg^{-1}）	w（速效钾） Available potassium/（mg·kg^{-1}）
x_1	4.5	10	50	2.5	50
x_2	6.5	50	150	10.0	100
x_3	7.5	—	—	—	—
x_4	8.5	—	—	—	—

注：—表示无转折点。

Note: — indicates that there is no turning point.

1.5 土壤综合肥力评价

对各项指标进行评价后，需将单因素评价结果转换为由各指标所构成的土壤综合肥力评价结果。研究对各土壤肥力指标的隶属度值进行加权求和，最终计算土壤综合肥力评价指数[35]，公式如下：

$$IFI=\sum\nolimits_{i=1}^{n}W_iN_i\text{。} \qquad (4)$$

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

1.6 结构方程模型

结构方程模型（structural equation model，SEM）是一种基于变量的协方差矩阵分析变量间关系的方法，整合了因子分析、路径分析和回归分析等多种方法，通过假设影响路径，对复杂的数据进行处理，有效地揭示了因子之间的因果关系[36-37]。进行结构方程模型拟合分析之前，需对土壤肥力及其影响因子数据的可信度进行验证[38]。相关性分析得到的相关系数不能

表明因果关系，相较于相关性分析，结构方程模型的优势在于处理多变量的同时，还能处理变量之间的间接因果关系。通过卡方（χ^2）检验对构建的模型进行拟合优度评价，当卡方检验$p>0.05$，各参数中，*CFI*（comparative fit index，比较拟合指数）和*GFI*（goodness of fit index，拟合优度指数）>0.9，*RMR*（root mean square residual，残差均方根）<0.05，*RMSEA*（root mean square error of approximation，近似误差均方根）<0.08时，SEM拟合效果较为理想[39]。

1.7　数据的软件处理与分析

采用SPSS 24.0和Excel 2016对试验数据进行整理、计算和表格的绘制；利用ArcGIS 10.7软件采用克里金插值法绘制土壤肥力指标空间分布图；利用GS+7.0进行半方差模型拟合和地统计分析；利用Pearson法研究土壤各项养分指标之间的相关性，使用R 3.3.3进行相关性图形绘制；使用Minitab 19进行Box-Cox转换。

笔者在进行数据分析之前，使用3倍标准差法（阈值法）剔除异常值，在剔除异常值时，根据实际情况判断异常值，分析异常值的原因。如果数据能够说明问题，则可选择性保留；如果是由系统误差或人为误差所导致，则可选择剔除。

在本研究中要求数据符合正态分布，避免降低研究对实际情况的估算精度。由表2可知，pH值和有机碳的原始数据服从正态分布（$p>0.05$），采用峰度、偏度和Kolmogorov-Smirnov（K-S）联合法对其余3种数据进行多种检验和处理[40]，对碱解氮含量数据进行Box-Cox转换，对速效钾和有效磷含量进行对数转换，转换后，各土壤肥力指标数据均满足正态分布（$p>0.05$）。

表2　土壤肥力指标的异常值个数、偏度和峰度

Table 2　The number of outliers, skewness and kurtosis of soil fertility indexes

指标 Index	异常值个数 Number of outliers	原始数据 Raw data			处理及对数转换后 After processing and log-transformation		
		偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S$_{(P)}$	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S$_{(P)}$
pH值 pH value	2	0.58	0.13	0.12	—	—	—
有机碳含量 Organic carbon content	1	0.76	0.40	0.07	—	—	—
碱解氮含量 Alkali-hydrolyzable nitrogen content	2	1.78	3.91	0.00	−0.16	0.33	0.20
有效磷含量 Available phosphorus content	4	1.83	3.05	0.00	−0.58	0.79	0.16
速效钾含量 Available potassium content	1	1.19	0.98	0.00	0.06	−0.42	0.20

注：—表示无对数转换值。

Notes: — indicates that there is no logarithmic conversion value.

2　结果与分析

2.1　杨梅主产区土壤肥力指标的描述性统计分析

描述性统计分析结果如表3所示。杨梅林地土壤pH值为3.71~5.55，有机碳含量10.47~32.41 g·kg^{-1}，碱解氮含量55.30~255.50 mg·kg^{-1}，有效磷含量0.19~64.99 mg·kg^{-1}，速效钾含量66.00~632.00 mg·kg^{-1}。由于适宜杨梅生长的土壤有机碳含量为11.6~29.0 g·kg^{-1}[41]，因此采样点91%的土壤有机碳含量适宜杨梅的生长。当变异系数小于10%时，属于弱变

表3　杨梅主产区土壤肥力指标的描述性统计分析

Table 3　Descriptive statistical analysis of soil fertility indexes in main plantations of *Myrica rubra*

指标 Index	范围 Range	平均值 Mean	标准误 *SE*	标准差 *SD*	变异系数 *CV*/%	分布类型 Distribution type
pH值 pH value	3.71~5.55	4.48	0.054	0.539	12.02	正态 Normal distribution
w（有机碳） Organic carbon/（g·kg^{-1}）	10.47~32.41	18.21	0.473	4.731	25.98	正态 Normal distribution
w（碱解氮） Alkali-hydrolyzable nitrogen/（mg·kg^{-1}）	55.30~255.50	115.01	4.071	40.854	35.51	Box-Cox正态 Box-Cox normal distribution
w（有效磷） Available phosphorus/（mg·kg^{-1}）	0.19~64.99	15.57	1.562	15.621	100.35	Log正态 Log-Normal distribution
w（速效钾） Available potassium/（mg·kg^{-1}）	66.00~632.00	239.23	12.855	128.553	53.74	Log正态 Log-Normal distribution

异，自然因素占主导作用；当变异系数在10%~100%，属于中等变异，自然和人为因素共同影响；当变异系数大于100%时，属于强变异，人为因素占主导作用。土壤pH值及有机碳、碱解氮、速效钾含量的变异系数均大于10%且小于100%，在空间上表现为中等变异性；有效磷含量的变异系数大于100%，在空间上表现为强变异性。

2.2 杨梅主产区土壤肥力指标的空间分布特征

研究区杨梅土壤养分的空间分布结果显示，仙居东部地区杨梅土壤pH值较高，仙居和临海西部地区土壤pH值较低，研究区大部分区域土壤pH值均小于4.5，属于强酸性土壤；整体上看，土壤酸性自仙居东部高值区域向四周逐渐增强，其中仙居西部和临海西部的土壤酸化问题最严重。杨梅土壤有机碳含量则表现为仙居整体高于临海，高值区域集中分布在仙居，表现显著的集聚效应。杨梅土壤碱解氮含量高值区域集中分布在仙居西部，由西部向东部逐渐降低，整体上呈现西高东低的分布特征，在仙居西部表现明显的集聚效应。杨梅土壤有效磷含量在仙居和临海的西部地区较高，仙居整体上较低，呈现点状分布的特征。杨梅土壤速效钾含量在仙居的含量整体大于临海，呈现斑块破碎状分布的特征。从养分的整体分布状况来看，仙居和临海的杨梅土壤高养分区域表现出明显的聚集现象。

2.3 杨梅主产区土壤综合肥力评价

土壤综合肥力评价法能够帮助当地的农林管理者、科研人员和决策人员更直观和深入地了解当地的土壤肥力状况[33]。研究选取土壤pH值、有机碳含量、碱解氮含量、有效磷含量和速效钾含量作为计算土壤综合肥力的5个指标。表4为各肥力评价指标被分配的公因子权重和方差的值，不同指标的权重值差异较大，有机碳含量、碱解氮含量和有效磷含量被分配的权重较高（0.254、0.247和0.220），pH值和速效钾含量被分配到的权重为0.105和0.174。

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

项目 Item	pH值 pH value	有机碳 Organic carbon	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
公因子方差Communality	0.329	0.797	0.774	0.689	0.544
权重 Weights	0.105	0.254	0.247	0.220	0.174

将计算的土壤肥力指数结果利用ArcGIS 7.0通过克里金插值法绘制分布图。当土壤肥力指数（integrated soil fertility evaluation index，*IFI*）＞0.47时，说明土壤肥力属于中、高质量水平[35]，在杨梅主产区仙居和临海中，有91%的土壤肥力属于中、高质量水平，仅9%的土壤肥力水平处于低质量水平。中、高肥力水平的土壤主要分布在仙居西部和临海西部，低肥力水平的土壤较少，主要分布在仙居和临海东部地区。主产区杨梅土壤肥力水平整体较高，大部分地区土壤已达到肥沃水平，仅少数地区土壤较贫瘠。

2.4 杨梅主产区土壤肥力指标相关性分析

Pearson相关性分析可以有效地反映土壤肥力指标与影响因子之间的关系。如图1所示，海拔与碱解氮含量呈极显著正相关（$p<0.01$），坡向与速效钾含量呈显著负相关（$p<0.05$），树龄、地径与土壤有机碳含量呈显著正相关（$p<0.05$）。随着树龄的增长，杨梅立地环境趋于稳定，随着杨梅周围枯枝落叶等有机物料的分解，表层土壤腐殖质不断积累，有机碳含量随着树龄的增长而增加[42]。而坡度对土壤肥力指标的影响不显著，但坡度对杨梅生长有着重要影响，因为杨梅根系不耐积水，适宜在排水效果良好的山坡上种植。

2.5 杨梅主产区土壤肥力指标和影响因素的结构方程模型路径分析

模型的适配度检验结果显示：$\chi^2=24.020$，$df=26$，$n=100$，$p=0.575$，$CFI=1.000$，$GFI=0.951$，$RMR=0.000$，$RMSEA=0.000$，表明本研究中模型和数据的适配度较高、拟合情况理想，可以满足研究和分析的要求。杨梅土壤肥力指标与影响因素的结构方程模型路径图如图2所示。影响因素中海拔、坡向和树龄均对各项肥力指标有着显著的影响，其中树龄对有机碳含量有显著正影响（$p<0.05$），路径系数为0.248；坡向对速效钾含量有显著负影响（$p<0.05$），路径系数为−0.197；海拔对碱解氮含量有显著正影响（$p<0.05$），路径系数为0.204；对速效钾含量有显著负影响（$p<0.05$），路径系数为−0.214。从路径图可以看出，各影响因素对有效磷含量的直接影响并不显著，但能通过对有机碳含量和碱解氮含量的直

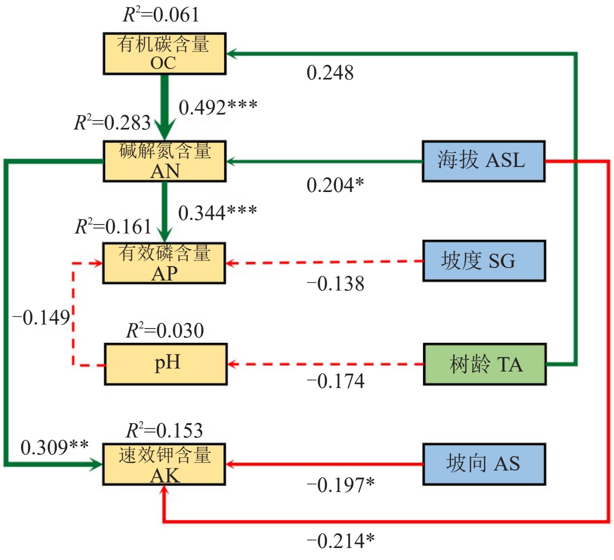
pH			*							
−0.084	有机碳 OC	**	*		*	**				
−0.156	0.509	碱解氮 AN	**	**			**			
−0.210	0.230	0.370	有效磷 AP	**						
−0.087	0.098	0.283	0.291	速效钾 AK					*	
−0.174	0.248	0.030	−0.013	−0.044	树龄 TA	**				
−0.158	0.272	0.163	0.061	0.013	0.785	地径 GD				
0.091	0.114	0.257	−0.095	−0.122	−0.164	−0.166	海拔 ASL			
0.065	0.088	−0.024	−0.155	−0.016	0.021	0.090	0.011	坡度 SG		
0.116	−0.09	−0.138	−0.108	−0.227	0.003	0.011	−0.057	0.037	坡向 AS	

*. $p<0.05$，**. $p<0.01$；OC. 有机碳含量；AN. 碱解氮含量；AP. 有效磷含量；AK. 有效钾含量；TA. 树龄；GD. 地径；ASL. 海拔；SG. 坡度；AS. 坡向。下同。

*. $p<0.05$, **. $p<0.01$; OC. Organic carbon content; AN. Alkali-hydrolyzable nitrogen content. AP. Available phosphorus content; AK. Available potassium content; TA. Tree age; GD. Ground diameter; ASL. Above sea level; SG. Slope gradient; AS. Aspect of slope. The same below.

图 1　杨梅主产区土壤肥力指标与影响因素的相关性分析

Fig. 1　Correlation analysis between soil fertility indexes and influencing factors in main plantations of *Myrica rubra*



图中箭头指向代表影响与被影响的关系，红色表示负相关，绿色表示正相关，实线表示显著路径($p<0.05$)，虚线表示不显著路径，线段粗细表示路径系数的大小，数字代表总作用效应，变量周围的 R^2 为方差解释率。*. $p<0.05$，**. $p<0.01$，***. $p<0.001$。

The arrow pointing in the figure represents the relationship between the influence and the influenced, red indicates negative correlation, green indicates positive correlation, solid line indicates significant path ($p<0.05$), dashed line indicates insignificant path, the thickness of the line segment indicates the size of the path coefficient, the number represents the total effect effect, and R^2 around the variable is the variance explained rate. *. $p<0.05$, **. $p<0.01$, ***. $p<0.001$.

图 2　杨梅主产区土壤肥力指标和影响因素的结构方程模型路径图

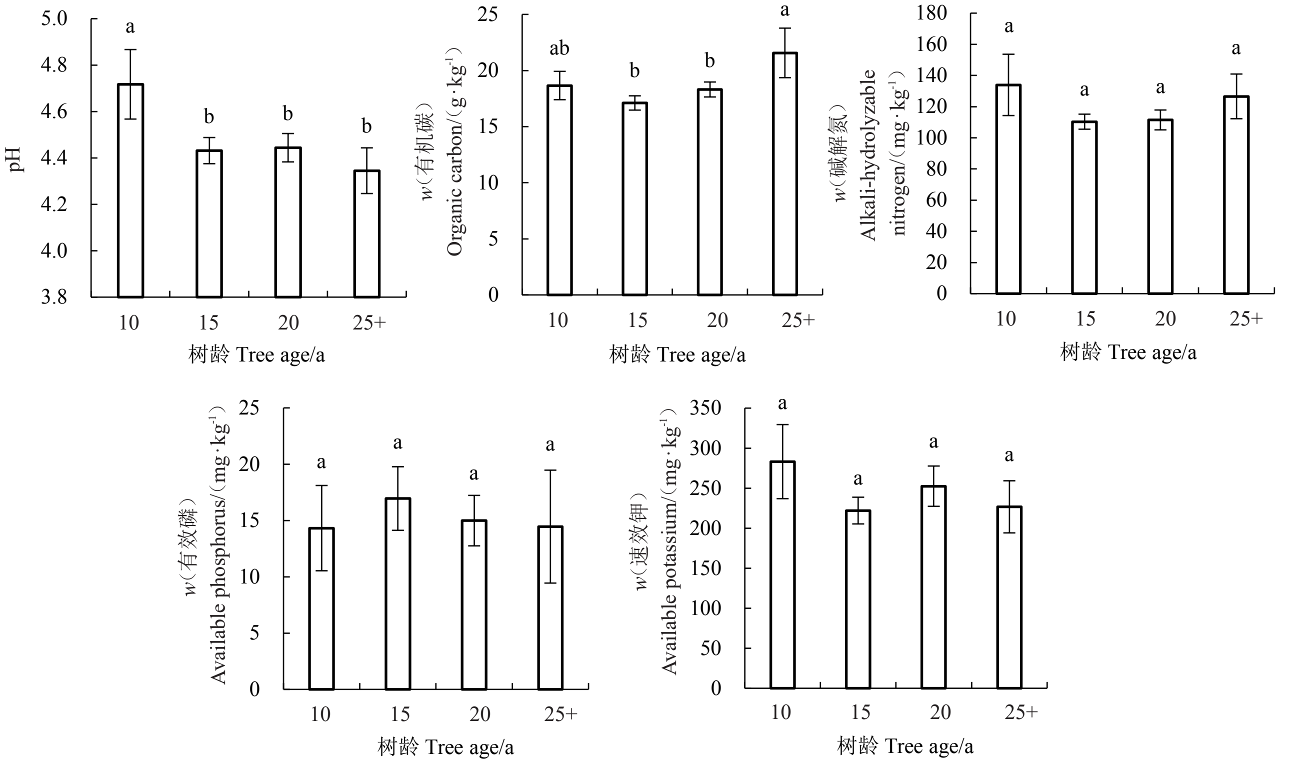
Fig. 2　Structural Equation Model path diagram of soil fertility indexes and influencing factors in main plantations of *Myrica rubra*

接影响进而间接影响有效磷含量，土壤pH值与各项影响因素之间的路径系数均较小，pH值的变化主要是严重的人为施肥管理干扰引起的。

2.6 树龄对杨梅主产区土壤肥力指标的影响

树龄和地形因子（海拔、坡度、坡向）是影响土壤肥力的因素，在对不同梯度树龄的杨梅土壤肥力指标进行单因素方差分析时，有较显著的差异和变化特征，各个梯度的海拔、坡度和坡向之间均不存在显著差异（$p>0.05$），因此对树龄进行具体分析。

不同树龄对土壤肥力指标的影响如图3所示，树龄分为10、15、20、25 a以上4个阶段。土壤pH值随着树龄的增长呈现降低的趋势，15、20、25 a以上的杨梅土壤pH值显著低于10年生杨梅土壤。随着树龄的增长，由于化肥长期过度使用，根系吸收后的酸根离子与土壤中的氢离子结合生成酸，导致土壤板结[43]，土壤呈现酸化的趋势，土壤酸化不利于土地的可持续利用，严重影响土壤肥力质量。土壤有机碳随着树龄的增长逐渐增加，25 a以上杨梅土壤有机碳与15、20年生杨梅土壤差异显著。随着经营年限增加，立地环境稳定，人为补充碳源，土壤中有机物质积累速率大于分解速率，土壤的有机碳含量逐年增加。



图中不同小写字母表示不同林龄之间的土壤肥力指标存在显著差异（$p<0.05$）。

Different lowercase letters in the graphs indicate significant differences in soil fertility indicators between different stand ages ($p<0.05$).

图3 树龄对杨梅主产区土壤pH值及有机碳、碱解氮、有效磷和速效钾含量的影响

Fig. 3 Effects of tree age on soil pH, OC, AN, AP, AK in main plantations of *Myrica rubra*

3 讨 论

3.1 杨梅主产区土壤肥力特征

本研究中的杨梅各土壤养分平均值主产区（仙居和临海）与全国杨梅主产区相比，土壤pH值低于全国杨梅主产区土壤平均值（4.95），有机碳含量高于全国杨梅主产区平均值（11.29 g·kg^{-1}），有效磷含量低于全国杨梅主产区平均值（24.65 mg·kg^{-1}），速效钾含量高于全国杨梅主产区平均值（62 mg·kg^{-1}）[41]。通过与土壤养分平均值比较，发现本研究中研究区杨梅土壤酸化问题严重。土壤酸化会降低土壤养分活性，抑制作物对养分的吸收，严重影响杨梅果实的产量和品质[44]，还会促进土壤中有害元素的释放和有害微生物的滋生，加大杨梅病害发生的概率，造成根系发育不良[45]。土壤有效磷含量整体较低，叶柳欣等[19]在研究中发现磷素是杨梅生长的限制性元

素，实地调查显示，果农在管理过程中，偏重于施用氮肥和钾肥，缺少对磷肥的施用。研究结果说明人为活动成为影响土壤肥力和分布的一大重要因素。这与孙玉冰等[46]和牛文鹏等[47]的研究结果一致。张彬等[48]在研究苹果种植区时发现，土壤速效钾含量的变异程度最大，其原因是果园人为施肥，而本研究中的杨梅林人为施肥活动较频繁，受人为施肥影响，有效磷变异程度较大，对杨梅林地土壤中有效磷含量影响较大。然而磷素对杨梅的生长同样很重要，合成蛋白质需要大量磷素[49]，磷素缺乏会限制杨梅的生长[50]。相较于茶园土壤和水稻土壤，林地土壤的磷吸附能力较差[51]，因此应加强对磷肥的搭配施用。对于过多施用化肥导致杨梅土壤酸化的问题[52-53]，可以利用生石灰、有机肥和生理碱性肥料（如草木灰）调控土壤pH值，缓解土壤酸化[54-55]。

3.2　杨梅主产区土壤肥力空间分布特征

由于研究区横跨范围较广，种植的作物种类多样，土地管理和利用方式差异大，因此相邻区域土壤肥力差异大[56]，空间分布不连续。研究区内部的地势由西南向东北降低，四周则由大山包裹形成盆地，而有机碳含量和碱解氮含量高值区大都分布在高海拔地区。相关研究表明，地形因子导致温差、日照和水分的差异是土壤肥力空间异质性的主导因素[57]。

由实地调查可知，杨梅果农在肥力管理中，为了节省成本和省时省力，过度偏施氮肥和钾肥，而磷肥的施用量较少，虽然杨梅对氮素和钾素的需求较大，但磷素也是促进植物蛋白质合成的重要元素之一。有机肥在日常施用过程中由于费时、费力和肥效慢等缺点，难以统一大量施用，化肥的滥用进而导致土壤酸化问题的形成，酸化导致肥料利用率下降，增加肥料采购成本，严重时还会导致杨梅的质量和产量下降。土壤综合肥力指数不仅取决于肥料施用量和肥料吸收效率，还受到多种影响因素的作用。杨梅果农应该根据当地土壤的实际情况，及时调整肥料施用结构，重新制定专门的改良方案，在管理中节省生产成本，提升杨梅果实品质，促进杨梅产业的健康发展。

3.3　杨梅主产区土壤肥力影响因素

本研究中，pH值与各项土壤肥力指标之间均呈负相关，但仅与有效磷含量呈显著负相关（$p<0.05$），说明土壤酸化在一定程度上影响着土壤有效养分的含量，影响植物吸收土壤中的有效养分。过量施用化肥虽然能增加土壤中的养分，但带来的土壤酸化问题也会导致肥料利用率的下降，施用生物质炭可有效缓解土壤酸化问题，还可以增加土壤有效养分[58]。除有机碳含量和速效钾含量不存在显著正相关外（$p>0.05$），有机碳含量、碱解氮含量、有效磷含量和速效钾含量两两间均存在显著正相关（$p<0.05$），其中有机碳含量和碱解氮含量之间的相关系数（0.509）最高。有机碳含量和土壤供氮有着密切的关系，充分说明土壤有机碳是碱解氮的源泉[59]。随着树龄的增长，碱解氮含量呈现先减少后增加（高-低-高）的趋势，与刘顺等[60]在研究土壤碱解氮含量随着树龄变化时有相似的结果。这是由于10~15 a阶段，杨梅进入盛产期，氮素的需求量大，树龄在15 a后随着肥料的大量施用，氮素逐渐积累。有效磷含量呈现出先增加后降低（低-高-低）的趋势，与刘顺等[61]对陈山红心杉土壤的研究结果相同，可能是由于杨梅的需磷高峰期在15 a之后。速效钾含量随着树龄的增加变化波动较大，不同树龄杨梅的土壤无显著差异和明显规律。钾元素由于其移动性强的特性，在不同年份和气候易受径流、淋溶等影响而流失[33]。通过对比结果可以发现，在经济林土壤管理中，人为施肥是影响土壤养分有效态的主导因素[31]。

杨梅生长地的海拔、坡向和坡度不同，会导致杨梅生长环境的光照、温度和湿度的差异，影响土壤中有效养分的释放[62]，最终影响到杨梅的生长发育、果实的产量、品质和成熟时间。根据杨梅喜阴耐湿的特点，在杨梅园的选址时，应根据杨梅品种的成熟时间，选取不同海拔。同时在空气湿度大、排水效果良好的阴（半阴）坡上种植杨梅，果实的品质会有显著的提升。当具备一定经济条件时，杨梅果农可以搭建设施大棚。设施栽培可以针对性地解决外界对杨梅生长的干扰问题，控制果实成熟的时间，提升果实的品质，还能起到防虫防风，提前、推迟和延长收获时间等作用[63]。

4　结　论

杨梅主产区土壤肥力主要受到人为施肥影响，土壤酸化和肥力失衡问题严重，需要在仙居和临海东部增加肥料施用量，仙居和临海西部则需要适当降低化肥的施用比例，主产区还需增加磷肥的施用，为缓解土壤酸化问题，可利用生石灰、有机肥和生理

碱性肥料（如草木灰）改良。

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[J]. 生态学报，2006，26(3)：901-913.
LIU Zhanfeng，FU Bojie，LIU Guohua，ZHU Yongguan. Soil quality：Concept，indicators and its assessment[J]. Acta Ecologica Sinica，2006，26(3)：901-913.

[2] EL-NAGGAR A，LEE S S，RINKLEBE J，FAROOQ M，SONG H，SARMAH A K，ZIMMERMAN A R，AHMAD M，SHAHEEN S M，OK Y S. Biochar application to low fertility soils：A review of current status，and future prospects[J]. Geoderma，2019，337：536-554.

[3] 朱永官，李刚，张甘霖，傅伯杰．土壤安全：从地球关键带到生态系统服务[J]. 地理学报，2015，70(12)：1859-1869.
ZHU Yongguan，LI Gang，ZHANG Ganlin，FU Bojie. Soil security：From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. Acta Geographica Sinica，2015，70(12)：1859-1869.

[4] 张甘霖，史舟，朱阿兴，王秋兵，吴克宁，史志华，赵永存，赵玉国，潘贤章，刘峰，宋效东．土壤时空变化研究的进展与未来[J]. 土壤学报，2020，57(5)：1060-1070.
ZHANG Ganlin，SHI Zhou，ZHU Axing，WANG Qiubing，WU Kening，SHI Zhihua，ZHAO Yongcun，ZHAO Yuguo，PAN Xianzhang，LIU Feng，SONG Xiaodong. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. Acta Pedologica Sinica，2020，57(5)：1060-1070.

[5] 夏子书，白一茹，王幼奇，包维斌，杨帆，钟艳霞，李鸣骥．基于GIS 和随机森林算法的宁东土壤饱和导水率分布与预测[J]. 水土保持学报，2021，35(1)：285-293.
XIA Zishu，BAI Yiru，WANG Youqi，BAO Weibin，YANG Fan，ZHONG Yanxia，LI Mingji. Distribution and prediction of soil saturated hydraulic conductivity in ningdong based on GIS and random forest algorithm[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2021，35(1)：285-293.

[6] 罗梅，郭龙，张海涛，汪善勤，梁攀．基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报，2020，57(1)：48-59.
LUO Mei，GUO Long，ZHANG Haitao，WANG Shanqin，LIANG Pan. Characterization of spatial distribution of soil organic carbon in China based on environmental variables[J]. Acta Pedologica Sinica，2020，57(1)：48-59.

[7] 姜霓雯，童根平，叶正钱，程樟峰，吕永强，傅伟军．浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素[J]. 生态学报，2022，42(6)：2430-2441.
JIANG Niwen，TONG Genping，YE Zhengqian，CHENG Zhangfeng，LÜ Yongqiang，FU Weijun. Spatial variability of soil fertility properties and its affecting factors of Qingliangfeng Nature Reserve，Zhejiang[J]. Acta Ecologica Sinica，2022，42(6)：2430-2441.

[8] WANG Y，HEBERLING G，GÖRZEN E，MIEHE G，SEEBER E，WESCHE K. Combined effects of livestock grazing and abiotic environment on vegetation and soils of grasslands across Tibet[J]. Applied Vegetation Science，2017，20(3)：327-339.

[9] 雷丹，李军胜，李书艺，祝振洲，何静仁．莲藕可溶性膳食纤维与多酚复合物的稳定性及脂肪吸附活性研究[J]. 中国食品学报，2022，22(2)：31-39.
LEI Dan，LI Junsheng，LI Shuyi，ZHU Zhenzhou，HE Jingren. Stability and fat adsorption activity of the complex of soluble dietary fiber and polyphenols from lotus root[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2022，22(2)：31-39.

[10] 柏德玟，周慧芬，姚莹．浙江水果产业发展 70 年[J]. 中国南方果树，2021，50(4)：177-183.
BAI Dewen，ZHOU Huifen，YAO Ying. 70 years of fruit industry development in Zhejiang Province[J]. South China Fruits，2021，50(4)：177-183.

[11] BONANOMI G，DE FILIPPIS F，ZOTTI M，IDBELLA M，CESARANO G，AL-ROWAILY S，ABD-ELGAWAD A. Repeated applications of organic amendments promote beneficial microbiota，improve soil fertility and increase crop yield[J]. Applied Soil Ecology，2020，156：103714.

[12] PEIGNÉ J，VIAN J F，PAYET V，SABY N P A. Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming[J]. Soil and Tillage Research，2018，175：194-204.

[13] ZHANG X F，ZHU A N，XIN X L，YANG W L，ZHANG J B，DING S J. Tillage and residue management for long-term wheat-maize cropping in the North China Plain：I. Crop yield and integrated soil fertility index[J]. Field Crops Research，2018，221：157-165.

[14] 杨东伟，章明奎，张鹏启，杨永德．水田改果园后土壤微生物学特性演变[J]. 土壤学报，2018，55(1)：182-193.
YANG Dongwei，ZHANG Mingkui，ZHANG Pengqi，YANG Yongde. Evolution of soil in microbiology after reclamation of paddy into orchard[J]. Acta Pedologica Sinica，2018，55(1)：182-193.

[15] 张思庭．杨梅林产量、果实品质及土壤对养分补偿的响应[D]. 福州：福建农林大学，2018.
ZHANG Siting. Effect of nutrient compensation on productivity，fruit and soil quality of *Myrica rubra*[D]. Fuzhou：Fujian Agriculture and Forestry University，2018.

[16] 颜晓捷，黄坚钦，邱智敏，努尔阿米娜•热合曼，朱旻华，吴家森．生草栽培对杨梅果园土壤理化性质和果实品质的影响[J]. 浙江农林大学学报，2011，28(6)：850-854.
YAN Xiaojie，HUANG Jianqin，QIU Zhimin，Nuramina · Rahman，ZHU Minhua，WU Jiasen. Soil physical and chemical properties and fruit quality with grass cover in a *Myrica rubra* orchard[J]. Journal of Zhejiang A & F University，2011，28(6)：850-854.

[17] 郭秀珠，姜武，黄品湖，梁森苗，陈魏，郑锡良，戚行江．钾镁肥配施对杨梅品质和矿质营养的影响[J]. 中国南方果树，2017，46(3)：72-75.
GUO Xiuzhu，JIANG Wu，HUANG Pinhu，LIANG Senmiao，CHEN Wei，ZHENG Xiliang，QI Xingjian. Effects of combined application of potassium and magnesium fertilizer on quality

and mineral nutrition of *Myrica rubra*[J]. South China Fruits，2017，46(3)：72-75.

[18] 任海英，徐巧，戚行江，俞浙萍，郑锡良，张淑文，王震铄 . 健康与凋萎病杨梅树体及根围菌群的差异[J]. 应用生态学报，2021，32(9)：3107-3118.

REN Haiying，XU Qiao，QI Xingjiang，YU Zheping，ZHENG Xiliang，ZHANG Shuwen，WANG Zhenshuo. Differences of bacterial and fungal communities in the tree and rhizosphere of the healthy and twig blight-diseased bayberry[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2021，32(9)：3107-3118.

[19] 叶柳欣，张勇，蒋仲龙，吕爱华，王增，周本智，王晓晓，吴家森 . 不同林龄杨梅叶片与土壤的碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 安徽农业大学学报，2019，46(3)：454-459.

YE Liuxin，ZHANG Yong，JIANG Zhonglong，LÜ Aihua，WANG Zeng，ZHOU Benzhi，WANG Xiaoxiao，WU Jiasen. The stoichiometic characteristics of carbon，nitrogen and phosphorus in soil and leaves of different ages of *Myrica rubra*[J]. Journal of Anhui Agricultural University，2019，46(3)：454-459.

[20] 何风杰，高洪勤，徐春燕 . 台州市水果产业现状、存在问题和对策建议[J]. 中国果业信息，2020，37(2)：15-17.

HE Fengjie，GAO Hongqin，XU Chunyan. Present situation，existing problems and countermeasures of fruit industry in Taizhou city[J]. China Fruit News，2020，37(2)：15-17.

[21] 张建斌，应铮峥 . 仙居县杨梅产业绿色化发展主要做法及成效[J]. 现代农业科技，2020(22)：214-216.

ZHANG Jianbin，YING Zhengzheng. Main methods and effects of green development of *Myrica rubra* industry in Xianju county[J]. Modern Agricultural Science and Technology，2020(22)：214-216.

[22] BAVEC Š，GOSAR M. Speciation，mobility and bioaccessibility of Hg in the polluted urban soil of Idrija (Slovenia)[J]. Geoderma，2016，273：115-130.

[23] FLEM B，EGGEN O A，TORGERSEN E，KONGSVIK M K，OTTESEN R T. Urban geochemistry in Kristiansand，Norway[J]. Journal of Geochemical Exploration，2018，187：21-33.

[24] 鲍士旦 . 土壤农化分析[M]. 3 版 . 北京：中国农业出版社，2000.

BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing：China Agriculture Press，2000.

[25] 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.

SHI Zhou，LI Yan. Geostatistics and its application in soil science[M]. Beijing：China Agriculture Press，2006.

[26] DIODATO N，CECCARELLI M. Multivariate indicator Kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands[J]. Ecological Indicators，2004，4(3)：177-187.

[27] MIAO Y，MULLA D J，ROBERT P C. Spatial variability of soil properties，corn quality and yield in two Illinois，USA fields：Implications for precision corn management[J]. Precision Agriculture，2006，7(1)：5-20.

[28] KRAVCHENKO A N，THELEN K D，BULLOCK D G，MILLER N R. Relationship among crop grain yield，topography，and soil electrical conductivity studied with cross-correlograms[J]. Agronomy Journal，2003，95(5)：1132-1139.

[29] 陈洋，齐雁冰，王茵茵，黄标，刘姣姣，张亮亮 . 多重密度布点对土壤有机质空间特性的解析[J]. 自然资源学报，2016，31(12)：2099-2110.

CHEN Yang，QI Yanbing，WANG Yinyin，HUANG Biao，LIU Jiaojiao，ZHANG Liangliang. Spatial characters of soil organic matter with multi-sampling density[J]. Journal of Natural Resources，2016，31(12)：2099-2110.

[30] 冯家东，吴炳孙，王晶晶 . 基于协同克里格的橡胶园土壤速效钾空间变异性[J]. 应用生态学报，2022，33(4)：915-921.

FENG Jiadong，WU Bingsun，WANG Jingjing. Spatial variability of soil available potassium in rubber plantation based on coKriging[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2022，33(4)：915-921.

[31] 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[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science，2018，181(6)：827-835.

[32] 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[J]. 生态学报，2017，37(22)：7528-7538.

DAI Wei，ZHAO Keli，GAO Zhiqun，LIU Kanghua，ZHANG Feng，FU Weijun. Spatial variation characteristics of carbon density and storage in forest ecosystems in a typical subtropical region[J]. Acta Ecologica Sinica，2017，37(22)：7528-7538.

[33] 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[J]. 生态学报，2021，41(6)：2292-2304.

DONG Jiaqi，ZHANG Yong，FU Weijun，LIU Haiying，WANG Zeng，LÜ Lianjiang，XIE Binglou，JIANG Zhonglong. Spatial variation of soil nutrients and evaluation of integrated soil fertility in *Torreya grandis* cv. Merrillii region[J]. Acta Ecologica Sinica，2021，41(6)：2292-2304.

[34] 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[J]. Geoderma，2009，149(3/4)：325-334.

[35] 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[J]. Geoderma，2020，357：113937.

[36] 李慧，汪景宽，裴久渤，李双异 . 基于结构方程模型的东北地区主要旱田土壤有机碳平衡关系研究[J]. 生态学报，2015，35(2)：517-525.

LI Hui，WANG Jingkuan，PEI Jiubo，LI Shuangyi. Equilibrium relationships of soil organic carbon in the main croplands of northeast China based on structural equation modeling[J]. Acta Ecologica Sinica，2015，35(2)：517-525.

[37] ALLAN E，MANNING P，ALT F，BINKENSTEIN J，BLASER S，BLÜTHGEN N，BÖHM S，GRASSEIN F，HÖLZEL N，KLAUS V H，KLEINEBECKER T，MORRIS E K，OELMANN

Y，PRATI D，RENNER S C，RILLIG M C，SCHAEFER M，SCHLOTER M，SCHMITT B，SCHÖNING I，SCHRUMPF M，SOLLY E，SORKAU E，STECKEL J，STEFFEN-DEWENTER I，STEMPFHUBER B，TSCHAPKA M，WEINER C N，WEISSER W W，WERNER M，WESTPHAL C，WILCKE W，FISCHER M. Land use intensification alters ecosystem multifunctionality *via* loss of biodiversity and changes to functional composition[J]. Ecology Letters，2015，18(8)：834-843.

[38] 吴明隆 . 结构方程模型：AMOS 的操作与应用[M]. 重庆：重庆大学出版社，2009.
WU Minglong. Structural equation model：Operation and application of AMOS[M]. Chongqing：Chongqing University Press，2009.

[39] 王新源，马立鹏，程小云，张琴，兰芳芳，李源，唐霞，曲浩，连杰，李玉霖 . 不同治沙措施对荒漠绿洲过渡带植物群落与土壤因子的影响[J]. 生态学报，2022，42(14)：5869-5883.
WANG Xinyuan，MA Lipeng，CHENG Xiaoyun，ZHANG Qin，LAN Fangfang，LI Yuan，TANG Xia，QU Hao，LIAN Jie，LI Yulin. Effects of different sand control measures on plant communities and soil factors in the desert- oasis ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica，2022，42(14)：5869-5883.

[40] 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[J]. 环境科学，2018，39(6)：2893-2903.
ZHANG Hongju，ZHAO Keli，YE Zhengqian，XU Bin，ZHAO Weiming，GU Xiaobo，ZHANG Huafeng. Spatial variation of heavy metals in soils and its ecological risk evaluation in a typical *Carya cathayensis* production area[J]. Environmental Science，2018，39(6)：2893-2903.

[41] 梁森苗，王耀锋，刘玉学，吕豪豪，杨生茂 . 我国杨梅主产地土壤养分状况的分析[J]. 果树学报，2015，32(4)：658-665.
LIANG Senmiao，WANG Yaofeng，LIU Yuxue，LÜ Haohao，YANG Shengmao. Present situation of soil nutrients in bayberry orchard of China[J]. Journal of Fruit Science，2015，32(4)：658-665.

[42] 李守娟，杨磊，陈利顶，赵方凯，孙龙 . 长三角典型城郊土地利用变化及其土壤碳氮响应[J]. 生态学报，2018，38(20)：7178-7188.
LI Shoujuan，YANG Lei，CHEN Liding，ZHAO Fangkai，SUN Long. Land use change and its influence on soil organic carbon and total nitrogen in a typical peri-urban watershed of the Yangtze River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica，2018，38(20)：7178-7188.

[43] 柴春燕，宋绪忠，徐绍清，郑金土 . 杨梅园土壤酸化原因及改良措施[J]. 现代园艺，2015(14)：217-219.
CHAI Chunyan，SONG Xuzhong，XU Shaoqing，ZHENG Jintu. Causes and improvement measures of soil acidification in *Myrica rubra* orchard[J]. Contemporary Horticulture，2015(14)：217-219.

[44] 朱浩宇，高明，龙翼，徐国鑫，王富华，王子芳 . 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. 环境科学，2020，41(4)：1921-1929.
ZHU Haoyu，GAO Ming，LONG Yi，XU Guoxin，WANG Fuhua，WANG Zifang. Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field[J]. Environmental Science，2020，41(4)：1921-1929.

[45] 陈娜，王秀荣，严小龙，廖红 . 酸性土壤上缺磷和铝毒对大豆生长的交互作用[J]. 应用生态学报，2010，21(5)：1301-1307.
CHEN Na，WANG Xiurong，YAN Xiaolong，LIAO Hong. Interactive effects of P deficiency and Al toxicity on soybean growth：A pot experiment with acid soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2010，21(5)：1301-1307.

[46] 孙玉冰，邓守彦，李德志，宋云，李红，周燕，王春叶，赵鲁青，李立科 . 崇明县土壤主要理化指标的空间分布与变异特征[J]. 生态与农村环境学报，2010，26(4)：306-312.
SUN Yubing，DENG Shouyan，LI Dezhi，SONG Yun，LI Hong，ZHOU Yan，WANG Chunye，ZHAO Luqing，LI Like. Spatial distribution and variability of main soil physical and chemical properties in Chongming and affecting factors[J]. Journal of Ecology and Rural Environment，2010，26(4)：306-312.

[47] 牛文鹏，李青圃，李铖，程炯，吉冬青，蒋新宇，刘通 . 珠江三角洲土壤养分多尺度空间分异及环境驱动力[J]. 生态环境学报，2021，30(4)：743-755.
NIU Wenpeng，LI Qingpu，LI Cheng，CHENG Jiong，JI Dongqing，JIANG Xinyu，LIU Tong. Multi-scale spatial variability and environmental drivers of soil nutrient distributions in the Pearl River Delta，South China[J]. Ecology and Environmental Sciences，2021，30(4)：743-755.

[48] 张彬，杨联安，杨粉莉，王辉，谢贤健，陈卫军 . 基于投影寻踪的土壤养分综合评价及影响因素研究[J]. 土壤，2020，52(6)：1239-1247.
ZHANG Bin，YANG Lian’an，YANG Fenli，WANG Hui，XIE Xianjian，CHEN Weijun. Study on comprehensive evaluation and influencing factors of soil nutrients based on projection pursuit[J]. Soils，2020，52(6)：1239-1247.

[49] 姜沛沛，曹扬，陈云明，王芳 . 不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报，2016，36(19)：6188-6197.
JIANG Peipei，CAO Yang，CHEN Yunming，WANG Fang. Variation of C，N，and P stoichiometry in plant tissue，litter，and soil during stand development in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica，2016，36(19)：6188-6197.

[50] 马亚娟，徐福利，王渭玲，陈钦程，赵海燕，赵亚芳 . 氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用[J]. 植物营养与肥料学报，2015，21(3)：664-674.
MA Yajuan，XU Fuli，WANG Weiling，CHEN Qincheng，ZHAO Haiyan，ZHAO Yafang. Increase of soil nutrients and enzymatic activity by adding nitrogen and phosphorus to *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2015，21(3)：664-674.

[51] 徐敏，宋春，毛璐，肖霞 . 不同土地利用方式下紫色土磷吸附-解吸动力学特征[J]. 水土保持通报，2015，35(5)：39-44.
XU Min，SONG Chun，MAO Lu，XIAO Xia. Dynamics of phos-

phorus adsorption-desorption in purple soil under different land use types[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2015，35(5)：39-44.

[52] JIAO X Q，LYU Y，WU X B，LI H G，CHENG L Y，ZHANG C C，YUAN L X，JIANG R F，JIANG B W，RENGEL Z，ZHANG F S，DAVIES W J，SHEN J B. Grain production versus resource and environmental costs：Towards increasing sustainability of nutrient use in China[J]. Journal of Experimental Botany，2016，67(17)：4935-4949.

[53] CUI Z L，ZHANG H Y，CHEN X P，ZHANG C C，MA W Q，HUANG C D，ZHANG W F，MI G H，MIAO Y X，LI X L，GAO Q，YANG J C，WANG Z H，YE Y L，GUO S W，LU J W，HUANG J L，LV S H，SUN Y X，LIU Y Y，PENG X L，REN J，LI S Q，DENG X P，SHI X J，ZHANG Q，YANG Z P，TANG L，WEI C Z，JIA L L，ZHANG J W，HE M R，TONG Y N，TANG Q Y，ZHONG X H，LIU Z H，CAO N，KOU C L，YING H，YIN Y L，JIAO X Q，ZHANG Q S，FAN M S，JIANG R F，ZHANG F S，DOU Z X. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature，2018，555(7696)：363-366.

[54] 李伟峰，叶英聪，朱安繁，饶磊，孙凯，袁颉，郭熙．近 30 a 江西省农田土壤 pH 时空变化及其与酸雨和施肥量间关系[J]. 自然资源学报，2017，32(11)：1942-1953.

LI Weifeng，YE Yingcong，ZHU Anfan，RAO Lei，SUN Kai，YUAN Jie，GUO Xi. Spatio-temporal variation of pH in cropland of Jiangxi Province in the past 30 years and its relationship with acid rain and fertilizer application[J]. Journal of Natural Resources，2017，32(11)：1942-1953.

[55] 高璐阳，马志明，沈彦辉，刘中良．基于模糊数学法的山东省蔬菜优势产区土壤肥力综合评价[J]. 中国瓜菜，2022，35(11)：27-33.

GAO Luyang，MA Zhiming，SHEN Yanhui，LIU Zhongliang. Comprehensive evaluation of soil fertility in dominant vegetable producing areas of Shandong Province by fuzzy number method[J]. China Cucurbits and Vegetables，2022，35(11)：27-33.

[56] 方斌，吴金凤，倪绍祥．浦江县土壤碱解氮的空间变异与农户 N 投入的关联分析[J]. 生态学报，2012，32(20)：6489-6500.

FANG Bin，WU Jinfeng，NI Shaoxiang. Correlation analysis of spatial variability of soil available nitrogen and household nitrogen inputs at Pujiang County[J]. Acta Ecologica Sinica，2012，32(20)：6489-6500.

[57] SUMFLETH K，DUTTMANN R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators[J]. Ecological Indicators，2008，8(5)：485-501.

[58] 段春燕，沈育伊，徐广平，滕秋梅，张德楠，何成新，张中峰，周龙武，孙英杰．桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果[J]. 环境科学，2020，41(9)：4234-4245.

DUAN Chunyan，SHEN Yuyi，XU Guangping，TENG Qiumei，ZHANG Denan，HE Chengxin，ZHANG Zhongfeng，ZHOU Longwu，SUN Yingjie. Effects of *Eucalyptus* branches biochar application on soil physicochemical properties of acidified soil in a *Eucalyptus* plantation in northern Guangxi[J]. Environmental Science，2020，41(9)：4234-4245.

[59] 王振，王子煜，韩清芳，李文静，韩丽娜，丁瑞霞，贾志宽，杨宝平．黄土高原苜蓿草地土壤碳、氮变化特征研究[J]. 草地学报，2013，21(6)：1073-1079.

WANG Zhen，WANG Ziyu，HAN Qingfang，LI Wenjing，HAN Lina，DING Ruixia，JIA Zhikuan，YANG Baoping. Soil carbon and nitrogen variation characteristics of alfalfa grassland in loess plateau area[J]. Acta Agrestia Sinica，2013，21(6)：1073-1079.

[60] 刘顺，盛可银，刘喜帅，吴珍花，郭晓敏，肖复明，张文元．陈山红心杉根际土壤有机碳、氮含量及根际效应[J]. 生态学杂志，2017，36(7)：1957-1964.

LIU Shun，SHENG Keyin，LIU Xishuai，WU Zhenhua，GUO Xiaomin，XIAO Fuming，ZHANG Wenyuan. Contents of soil organic carbon and nitrogen forms in rhizosphere soil of *Cunninghamia lanceolata* and the rhizopshere effect[J]. Chinese Journal of Ecology，2017，36(7)：1957-1964.

[61] 刘顺，刘喜帅，朱新传，盛可银，郭晓敏，张文元．陈山红心杉土壤养分、酶活性的根际效应及肥力评价[J]. 植物营养与肥料学报，2017，23(2)：492-501.

LIU Shun，LIU Xishuai，ZHU Xinchuan，SHENG Keyin，GUO Xiaomin，ZHANG Wenyuan. Rhizosphere effects of nutrients and enzyme activities of *Cunninghania lanceolata* and soil fertility assessment[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer，2017，23(2)：492-501.

[62] 李勋，张健，杨万勤，张艳，张明锦，刘华，刘洋．红椿凋落叶全碳释放的林窗效应[J]. 自然资源学报，2016，31(7)：1114-1126.

LI Xun，ZHANG Jian，YANG Wanqin，ZHANG Yan，ZHANG Mingjin，LIU Hua，LIU Yang. Effect of forest gap on carbon release of *Toona ciliata* leaf litter[J]. Journal of Natural Resources，2016，31(7)：1114-1126.

[63] 彭健健，王增，张勇，刘海英，顾光同，彭欣怡，吴家森，叶子豪，张申，尚世宇．杨梅人工林相容性单株生物量模型构建[J]. 浙江农林大学学报，2022，39(2)：272-279.

PENG Jianjian，WANG Zeng，ZHANG Yong，LIU Haiying，GU Guangtong，PENG Xinyi，WU Jiasen，YE Zihao，ZHANG Shen，SHANG Shiyu. Construction of compatible individual tree biomass model of *Myrica rubra* plantation[J]. Journal of Zhejiang A & F University，2022，39(2)：272-279.