

浙江四明山区花木种植经营对土壤质量的影响

李东宾¹, 何立平¹, 苗国丽², 吴家森³, 崔广元⁴, 李金朝⁴

(1. 宁波市林场, 浙江 宁波 315440; 2. 四明山镇人民政府, 浙江 宁波 315440; 3. 浙江农林大学, 浙江 杭州 311300;
4. 宁波城市职业技术学院, 浙江 宁波 315400)

摘要:【目的】探讨浙江省宁波市四明山区花木种植经营对林地土壤质量的影响,为区域内林地资源的合理利用和生态修复提供科学依据。【方法】以四明山花木集中连片种植区域内的毛竹 *Phyllostachys edulis* 林、黄山松 *Pinus taiwanensis* 林、鹅掌楸 *Liriodendron chinensis* 林、新垦樱花(日本晚樱 *Cerasus lannesiana*)林、樱花-红枫 *Acer palmatum* ‘Atropurpureum’ 林、生态修复林 6 种林分类型为研究对象,分析土壤主要理化性质与酶活性,并采用主成分分析法对不同林地利用类型的土壤质量进行综合评价。【结果】土壤容重、田间持水量、总孔隙度、pH 值、阳离子交换量、全氮含量、全磷含量、全钾含量等在不同林地利用类型间没有显著性差异;花木种植后,林地土壤碱解氮和有效磷含量显著提高,而有机质和土壤酶活性下降显著($P<0.05$);土壤质量综合指数大小排序为黄山松林>毛竹林>鹅掌楸林>新垦樱花林>生态修复林>樱花-红枫林。【结论】长期花木种植经营会导致林地土壤富营养化和综合质量退化,短期内的生态修复措施对花木林土壤质量提升效果不明显。
关键词: 花木种植经营;理化性质;酶活性;土壤质量;浙江省四明山

中图分类号: S714.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-3776(2022)06-0021-07

Soil Quality in Different Forest Plantations in Siming Mountainous Area of Zhejiang Province

LI Dong-bin¹, HE Li-ping¹, MIAO Guo-li², WU Jia-sen³, CUI Guang-yuan⁴, LI Jin-zhao⁴

(1. Ningbo Forest Farm of Zhejiang, Ningbo 315440, China; 2. Simingshan Township Government of Zhejiang, Ningbo 315440, China;
3. Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 4. Ningbo City College of Vocational Technology, Ningbo 315400, China)

Abstract: In April, 2020, soil samples were collected from plantations of *Phyllostachys edulis*, *Pinus taiwanensis*, *Liriodendron chinense*, *Cerasus lannesiana*, *Acer palmatum* ‘Atropurpureum’ + *C. lannesiana* and ecological restoration in Siming mountainous area, Yuyao city of Zhejiang province. Determinations were conducted on soil physico-chemical properties and enzyme activities. Principal component analysis was used to evaluate soil quality of different plantations. The result demonstrated that there were no significant difference of soil bulk density, field capacity, total porosity, pH, cation exchange capacity, total nitrogen content, total phosphorus content, total potassium content among different plantations. Soil available nitrogen and phosphorus content increased obviously, but soil organic matter and enzyme activities decreased significantly in plantation of *C. lannesiana* and *A. palmatum* ‘Atropurpureum’ + *C. lannesiana* ($P<0.05$). Soil quality of six plantations was comprehensively evaluated and was ordered by *P. taiwanensis* > *Ph. edulis* > *L. chinense* > *C. lannesiana* > ecological restoration > *A. palmatum* ‘Atropurpureum’ + *C. lannesiana*.

Key words: garden trees planting and management; physio-chemical properties; enzyme activity; soil quality; Siming mountainous area

土壤质量是土壤在生态系统范围内维持生物的生产力、保护环境质量以及促进动植物健康的能力^[1]。不同土地利用方式会对土壤质量产生很大的影响^[2],研究彼此之间的复杂关系,是了解生态系统结构功能及生态过程、

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-09-28

基金项目: 宁波市科学技术局公益类科技计划项目(2019C10027)

作者简介: 李东宾,林业工程师,从事森林资源与生态研究; E-mail: 472119680@qq.com。通信作者: 李金朝,硕士,讲师,从事生态学研究; E-mail: 4438596@qq.com。

评价土地利用变化对生态因子影响、实现土壤资源持续利用和防止土壤质量退化的关键^[3]。土壤理化性质和土壤酶是土壤生态系统的重要组成部分。土壤理化性质和植物的生长、发育及产量水平密切相关,土壤酶类能够促进或直接参与土壤中一系列生化反应,其活性大小是评价土壤肥力高低、健康程度和质量优劣的生物活性指标^[4-5]。土壤理化性质与酶活性结合可以较准确地反映土壤质量的变化^[6]。

四明山区是宁波市重要的水源涵养地和绿色生态屏障,也是国内有名的“樱花之乡”和“红枫之乡”。大规模的花木种植经营造成的自然景观破碎化、物种多样性丧失、水土流失和水源安全威胁引起了社会广泛关注。宁波市政府自 2013 年开始实施四明山区域生态修复工程,但花木产业退出不易,生态恢复更难。本研究选择了四明山花木集中连片种植区域内的毛竹 *Phyllostachys edulis* 林、黄山松 *Pinus taiwanensis* 林、鹅掌楸 *Liriodendron chinensis* 林、新垦樱花(日本晚樱 *Cerasus lannesiana*)林、樱花-红枫 *C. lannesiana*-*Acer palmatem* ‘Atropurpureum’ 林、生态修复林 6 种林地利用类型作为试验样地,检测土壤的理化性质和酶活性,并使用主成分分析法进行土壤质量综合评价,旨在探讨林地种植花木对土壤质量的影响,为四明山区林地资源的合理利用和生态修复工程提供科学依据。

1 研究区概况

研究区域位于浙江省宁波市余姚市四明山镇境内,地理坐标为 120°55′~122°16′ E, 28°51′~30°33′ N,为四明山脉核心区块,平均海拔在 700 m。属于典型的中亚热带季风气候,四季分明,光照充足,雨量充沛。区域内大部分母岩为砂砾岩,土壤以黄壤为主^[7]。

2 研究方法

2.1 样地设置

2020 年 4 月,在踏查的基础上,选取四明山花木集中连片种植区域内相似自然条件的典型林地:毛竹林(ZL)、黄山松林(ZY)、鹅掌楸林(KY)、新垦樱花林(XK)、樱花-红枫林(HM)、生态修复林(XF)进行土壤样品采集。不同样地基本特征如表 1。

表 1 样地概况
Table 1 Information of sample plots

林地类型	属性	林龄/a	郁闭度/%	海拔/m	坡度/(°)	植被概况
ZL	生态林	30	90	800	10	林地植被主要为毛竹、山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i> 、马银花 <i>Rhododendron ovatum</i> 幼苗等,地表灌草盖度 25%
ZY	生态林	30	80	820	10	林地乔灌层主要为黄山松、山樱花 <i>Cerasus serrulata</i> 、豹皮樟 <i>Litsea coreana</i> var. <i>sinensis</i> 、杜鹃 <i>Rhododendron simsii</i> 、山槐 <i>Albizia kalkora</i> 等,地表灌草盖度 95%
KY	生态林	30	90	820	10	林地乔灌层主要为鹅掌楸、檫木 <i>Sassafras tzumu</i> 、柏木 <i>Platycladus orientalis</i> 、杜鹃、山莓 <i>Rubus corchorifolius</i> 等,地表灌草盖度 40%
XK	花木林	10	60	850	15	林地主要种植日本晚樱,苗农定期抚育,地表 80%覆盖枯死草本,新开垦为花木地的时间为 10 a
HM	花木林	30	85	820	10	林地主要种植日本晚樱、红枫,苗农定期抚育,10%地面残留少量草本
XF	花木林	30(8)	80	800	8	林地主要种植日本晚樱、红枫,间杂少量玉兰 <i>Magnolia denudata</i> ,套种南方红豆杉 <i>Taxus wallichiana</i> var. <i>mairei</i> 、香榧 <i>Torreya grandis</i> ‘Merrillii’ 8 a。苗农定期抚育,15%地面残留少量草本

注: ZL=毛竹林, ZY=黄山松林, KY=鹅掌楸林, XK=新垦樱花林, HM=樱花-红枫林, XF=生态修复林。

2.2 样品采集与分析

2.2.1 土壤样品采集 参照《土壤环境质量监测技术规范》(HJ/T 166—2004),在每种林地利用类型的不同区域分别随机设置 3 块 20 m×20 m 样地,样地内按“S”形布点,采集耕层(0~30 cm 土层)土壤样品。样品

采集后拣出杂草和碎石, 混匀, 按照四分法取 1 kg 土壤装入采样袋, 带回实验室阴干。每个样地用环刀取 2~3 个样品, 带回实验室用以测定土壤物理性质。土样风干研磨后过筛用以分析土壤化学性质和酶活性。

2.2.1 土壤理化性质和酶活性测定 土壤 pH 值用电位法测定, 土壤容重、总孔隙度用环刀法测定, 田间持水量用烘干法测定; 土壤有机质含量用重铬酸钾容量法测定, 阳离子交换量用 EDTA-铵盐滴定法测定, 全氮含量用凯氏法测定, 碱解氮含量用扩散法测定, 全磷含量用碳酸氢钠熔融-钼锑抗比色法测定, 有效磷含量用盐酸-氟化铵浸提钼锑抗比色法测定, 全钾含量用氢氧化钠熔融-原子吸收分光光度法测定, 速效钾含量用乙酸铵-火焰光度计法测定^[8]。磷酸酯酶活性用磷酸苯二钠比色法测定, 蛋白酶活性用改良茚三酮比色法测定, 脱氢酶活性用氯化三苯基四氮唑比色法测定, 蔗糖酶活性用硫代硫酸钠滴定法测定, 过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定, 脲酶活性用靛酚蓝比色法测定^[9]。

2.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件对基础数据进行统计整理分析, 采用 SPSS 19.0 软件进行数据显著性分析和主成分分析。

2.3.1 数据标准化 由于土壤质量指标多样、指标属性和量纲各异, 不能简单的直接进行运算, 因此要对各指标的测定值标准化后才能进行综合分析评价。本研究数据采用归一法标准化处理, 将各指标测定值转变为[0,1]的无量纲数值^[10]。数据标准化处理中, 数据分正、负两种效应, 正效应的值越大越好, 负效应则值越小越好。根据全国第二次土壤普查的结果和分级标准以及参考前人研究数据, 土壤容重最佳值设为 $1.125 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pH 值最佳值设为 5.5, 总孔隙度最佳值设为 50%, 有效磷含量阈值设为 $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[11-14]。所以 $|\text{容重} - 1.125|$ 、 $|\text{pH} - 5.5|$ 、 $|\text{总孔隙度} - 50|$ 、 $|\text{有效磷} - 60|$ 为负效应指标, 其他指标均为正效应指标。正、负效应指标分别选用公式 (1) 和 (2) 进行计算。

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

$$x' = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: x' 为各土壤质量指标测定值的标准化值; x 为各指标的测定值; x_{\max} 为该指标测定值中的最大值; x_{\min} 为该指标测定值中的最小值。各类型不同指标的标准化值为该类型指标测定值标准值 x 的平均值。

2.3.2 土壤质量综合指数计算 运用 SPSS 软件对 6 种林地利用类型土壤的 18 项指标的标准化数据进行主成分分析, 计算主成分的贡献率和累积贡献率, 提取特征值大于 1 的主成分向量。将各指标在主成分向量上对应的载荷值, 除以对应特征值的平方根便得到该主成分的特征向量, 然后将得到的特征向量与标准化后的数据相乘, 就可以得出主成分表达式 $F(x_i)$ 。最后将提取主成分的 $F(x_i)$ 乘以其方差相对贡献率累加求和得到土壤质量综合指数 F ^[15-17]。

3 结果与分析

3.1 不同林地利用类型土壤理化性质的差异比较

由表 2 可以看出, 四明山区不同林地利用类型土壤的容重、总孔隙度、田间持水量等物理性质无显著差异。表明该区域范围内土壤物理性质基本一致, 林地利用类型的改变对土壤物理性质影响不大。土壤容重平均变化范围为 $0.80 \sim 1.08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 土壤总孔隙度为 $59.41\% \sim 69.81\%$, 田间持水量平均变化范围为 $22.81\% \sim 26.79\%$ 。

由表 2 可知, 土壤 pH 值、阳离子交换量、全氮、全磷、全钾含量在不同林地利用类型间无显著性差异。其中, 土壤 pH 值介于 $4.90 \sim 5.41$, 为典型的酸性土壤; 土壤阳离子交换量为 $11.71 \sim 16.53 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, 花木种植后土壤阳离子交换量有降低的趋势; 土壤全氮、全磷、全钾含量分别为 $2.14 \sim 2.78$ 、 $0.78 \sim 1.48$ 、 $31.86 \sim 39.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 整体表现为花木林类型略大于生态林类型。

土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量在不同林地利用类型间的差异较明显 (表 2)。土壤有机质含量大小顺序为 $\text{ZY} > \text{ZL} > \text{KY} > \text{XK} > \text{HM} > \text{XF}$, 其中, ZY、ZL、KY 这 3 个生态林土壤有机质含显著高于花木林类

型 HM、XF ($P<0.05$)；HM、XF 类型土壤碱解氮含量显著高于生态林类型 ZL、ZY、KY ($P<0.05$)；花木林类型土壤有效磷含量显著高于生态林的 ($P<0.05$)。速效钾含量为 109.9~191.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中 KY 显著高于其它类型 ($P<0.05$)。

表 2 不同林地类型土壤理化性质比较
Table 2 Soil physical and chemical properties of different plantations

林地类型	容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	田间持水量/%	pH 值	有机质/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	阳离子交换量/($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)
ZL	1.01±0.47 a	61.97±9.76 a	24.32±4.17 a	5.41±0.97 a	84.39±15.88 b	15.16±3.24 a
ZY	0.97±0.47 a	63.36±2.62 a	22.81±4.02 a	4.65±0.90 a	125.21±20.52 a	16.53±3.38 a
KY	0.80±0.45 a	69.81±10.61 a	23.56±4.09 a	5.18±0.95 a	80.89±15.52 b	14.64±3.19 a
XK	0.89±0.46 a	66.39±10.24 a	24.17±4.16 a	5.17±0.95 a	61.24±13.59 bc	12.17±2.96 a
HM	1.08±0.47 a	59.41±9.49 a	26.79±4.43 a	5.16±0.95 a	45.74±12.14 c	12.95±3.03 a
XF	1.03±0.47 a	61.30±9.69 a	25.64±4.31 a	4.90±0.92 a	36.32±11.30 c	11.71±2.92 a

林地类型	全氮/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
ZL	2.14±0.14 a	0.78±0.32 a	31.86±3.51 a	102±18 c	2.6±0.9 c	109.8±16.7 c
ZY	2.78±0.93 a	0.96±0.53 a	32.16±1.74 a	1 220±11 c	4.0±1.1 c	151.2±14.9 b
KY	2.26±0.29 a	0.89±0.53 a	34.57±2.63 a	118±7.6 c	2.9±1.1c	191.5±18.9 a
XK	2.51±0.44 a	1.21±0.54 a	35.43±1.70 a	127±8 bc	17.8±1.6 c	165.1±18.2 ab
HM	2.45±0.09 a	1.48±0.54 a	39.21±2.18 a	195±20 a	174.9±15.6 a	148.4±8.1 b
XF	2.40±0.48 a	1.34±0.54 a	38.64±1.87 a	180±19 ab	131.1±19.8 b	143.7±17.6 bc

注：数据为“平均值±标准差”；同一列中不同小写字母表示不同林地类型间差异显著 ($P<0.05$)；下同。

3.2 不同林地利用类型土壤酶活性的比较

由表 3 可知，土壤磷酸酯酶、蛋白酶、脱氢酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶在不同林地利用类型间活性差异显著，一致表现为生态林类型 (ZL、ZY、KY) 显著高于花木林类型 (XK、HM、XF)，说明和生态林相比，种植花木显著降低了土壤酶活性。土壤磷酸酯酶和过氧化氢酶活性大小顺序为 KY>ZY>ZL>XK>XF>HM，其中磷酸酯酶活性为 19.55~69.64 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，过氧化氢酶活性为 32.49~118.64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。土壤蛋白酶和脲酶活性都是 ZY 类型显著高于其他类型 ($P<0.05$)，其活性大小顺序为 ZY>ZL>KY>XK>HM>XF，土壤蛋白酶和脲酶活性分别为 0.06~0.16 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 0.12~0.47 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。土壤脱氢酶和蔗糖酶活性表现为生态林类型显著高于花木林类型 ($P<0.05$)，花木林类型间大小顺序略有不同，其中脱氢酶活性为 3.62~10.29 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，蔗糖酶活性为 0.57~2.52 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

表 3 不同林地类型土壤酶活性比较
Table 3 Soil enzyme activity of different plantations

林地类型	磷酸酯酶 /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	蛋白酶 /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	脱氢酶 /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	蔗糖酶 /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	过氧化氢酶 /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	脲酶 /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)
ZL	66.74±4.23 a	0.11±0.02 b	10.29±1.94 a	2.52±0.34 a	102.11±16.46 a	0.34±0.06 b
ZY	67.24±4.24 a	0.16±0.03 a	9.96±1.90 a	2.24±0.43 a	107.89±17.47 a	0.47±0.09 a
KY	69.64±4.29 a	0.10±0.02 bc	8.53±1.75 a	2.13±0.43 a	118.64±19.35 a	0.26±0.05 bc
XK	35.25±3.58 b	0.08±0.01 bcd	4.29±0.87 b	1.22±0.13 b	56.98±8.88 b	0.21±0.04 cd
HM	19.55±3.30 c	0.07±0.02 cd	5.26±0.63 b	0.57±0.14 c	32.49±5.47 b	0.18±0.03 cd
XF	26.39±3.42 c	0.06±0.01 d	3.62±0.87 b	0.79±0.16 bc	41.49±8.26 b	0.12±0.02 d

3.3 土壤质量综合评价

利用统计软件 SPSS 计算土壤理化性质和土壤酶各指标的累计贡献率和主成分的贡献率。按照特征值>1 的原则，选取了 4 个主成分，第 1 主成分的方差贡献率最大，为 61.17%，第 2、第 3、第 4 主成分的方差贡献率分别为 16.81%、14.18%和 6.26%，累计方差贡献率为 98.42%，可以充分代表原指标的信息。由表 4 可知，各指标的权重大小在 4 个主成分之间所占的比重存在差异，且在同一主成分下各指标的权重大小分布无规律。

运用软件 SPSS 对 18 个指标计算数据进行标准化，再根据主成分得分系数矩阵计算得出各个主成分的综合

得分线性表达式 $F(x_i)$ (表 5)。将各主成分的方差相对贡献率作为权重向量, 进而求得土壤质量综合指数 F 。

表 4 土壤指标主成分因子载荷矩阵、因子权重
Table 4 Principal component matrix and indicator weight of soil physio-chemical properties

土壤指标	主成分				土壤指标	主成分			
	PC1	PC2	PC3	PC4		PC1	PC2	PC3	PC4
pH 值	-0.060	-0.267	-0.907	0.110	速效钾	-0.002	-0.846	0.494	0.195
有机质	0.923	0.195	0.308	0.090	磷酸酯酶	0.972	-0.095	-0.124	0.093
容重	-0.046	0.902	-0.191	-0.364	蛋白酶	0.912	0.255	0.288	0.130
总孔隙度	-0.442	0.887	-0.120	0.039	脱氢酶	0.905	0.223	-0.162	0.323
田间持水量	-0.912	0.210	-0.230	0.264	蔗糖酶	0.974	0.025	-0.217	0.006
阳离子交换量	0.893	0.269	0.093	0.348	过氧化氢酶	0.959	-0.172	-0.079	0.131
全氮	0.040	0.255	0.939	-0.141	脲酶	0.897	0.334	0.214	0.101
全磷	-0.937	0.083	0.319	0.032	特征值	11.010	3.027	2.552	1.129
全钾	-0.965	-0.125	0.130	0.147	方差贡献率/%	61.168	16.815	14.179	6.257
碱解氮	-0.907	0.176	0.231	0.267	累计方差贡献率/%	61.168	77.983	92.162	98.419
有效磷	0.650	-0.317	0.005	-0.690					

通过计算得出的土壤质量综合指数, 见表 5。由表 5 可知, 各林地类型的土壤质量综合指数顺序为: ZY > ZL > KY > XK > XF > HM。生态林类型的土壤质量明显好于花木林类型的, 说明花木林地人为的耕作及化肥农药的过量施用导致了土壤质量的下降。3 种花木林地类型土壤质量表现为 XK > XF > HM, 表明随着花木种植时间的延长, 土壤质量下降趋势明显, 生态修复的花木林土壤质量有回升的趋势, 但效果不明显。对于综合指数产生的负值, 这是由于数据标准化的结果, 并不代表该类型土壤的质量很差^[18]。

表 5 不同林地类型土壤质量综合评价结果
Table 5 Comprehensive evaluation on soil quality of different plantations

林地类型	主成分				综合指数 F	指数排名
	$F(1)$	$F(2)$	$F(3)$	$F(4)$		
ZL	2.60	1.43	-2.68	-0.19	1.46	2
ZY	3.75	1.54	2.31	0.05	2.93	1
KY	2.14	-2.80	-0.24	0.90	0.87	3
XK	-0.92	-1.43	0.39	-1.39	-0.85	4
HM	-4.03	0.78	0.13	1.47	-2.26	6
XF	-3.54	0.47	0.09	-0.85	-2.16	5

4 讨论与结论

4.1 花木种植经营对土壤理化性质的影响

因为在区域尺度上具有相同的气候和水文条件, 四明山区域 6 种林地利用类型的土壤物理性质基本一致。说明区域范围内短时间改变土壤的利用类型不会对土壤物理性质产生特别大的影响, 这和李静鹏等^[19]、姜仕坤等^[20]对不同土壤利用类型研究的结果基本一致。花木地因人为耕作, 土壤呈现容重增加、孔隙度降低的趋势, 这与张金波等^[21]、龙健等^[22]的研究结论一致。不同林地利用类型田间持水量在 22.81%~26.79%, 花木地的田间持水量略大于黄山松林和鹅掌楸林, 这可能与农民对花木地的耕作相关。

区域内土壤 pH 值为 4.90~5.41, 为典型的酸性土壤。土壤有机质含量表现为生态林类型显著大于花木林类型, 这与马和平等^[23]的结论基本一致。其中黄山松林的土壤有机质含量最高, 毛竹林、鹅掌楸林、新垦樱花林次之, 樱花-红枫林和生态修复林含量最低, 说明林地种植花木后显著降低了土壤的有机质水平。研究表明, 在 6 种林地利用类型土壤中全氮、全磷、全钾含量及阳离子交换量无显著差异 ($P>0.05$), 而花木林类型的碱解氮和有效磷含量显著大于生态林类型 ($P<0.05$)。叶润根等^[24]对重庆山区不同土地利用下的土壤肥力质量研究也得到类似结论。土壤化学指标研究结果与刘成刚等^[16]的研究结果基本一致, 短期内林地利用类型的改变对土壤的 pH 值以及全量养分影响较小, 而速效养分之间的差异比较显著。本研究中樱花-红枫林和生态修复林由于

长期的耕作和施肥,土壤表层中积累了大量的有效磷,超过国家 I 级标准($40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的 4~5 倍。李发林等^[25]研究表明,琯溪蜜柚 *Citrus maxima* ‘Guanximiyu’ 果园土壤有效磷环境敏感临界值为 $62.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 陈闻等^[13]通过研究得出雷竹 *Phyllostachys praecox* cv. *prevernalis* 林土壤发生磷素流失的有效磷阈值为 $52.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 杨文等^[26]研究亚热带丘陵小流域林地磷的淋失风险临界值为 $69.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而本研究樱花-红枫林和生态修复林的土壤有效磷含量极大地超出了此临界值,呈现出严重的土壤富营养化,不仅浪费了肥效,更显著增加了氮磷流失和区域水体污染风险。四明山区域是宁波市重要的水源涵养地,后期花木种植经营应当严格控制速效氮磷肥的施用量,降低花木地土壤的速效养分富集程度,确保饮用水源的安全。

4.2 花木种植经营对土壤酶活性的影响

土壤酶是由微生物、动植物活体分泌及由动植物残体分解释放于土壤中的一种具有生物催化能力和蛋白质性质的高分子活性物质,在土壤养分的循环代谢过程中起着重要的作用^[27]。四明山区域内不同林地利用类型土壤磷酸酯酶、过氧化氢酶、蛋白酶、脲酶、脱氢酶、蔗糖酶活性表现基本一致,表现为生态林类型显著高于花木林类型($P<0.05$)。表明和生态林类型相比,林地种植花木后显著降低了土壤酶活性。土壤酶活性变化表现出和土壤有机质含量一致的变化趋势,说明土壤酶活性和土壤有机质含量有很强的相关性,张成君等^[28]和陈佳等^[29]的研究也得到类似结论。这可能与毛竹林、黄山松林、鹅掌楸林等生态林植被茂盛、林下灌草丰富,每年地表的枯落物相对量大,表土有机质含量高,土壤微生物也比较丰富。而花木地植被种植种类相对单一,经过人为抚育或喷洒除草剂,导致土壤获得的枯落物减少,再加上地表土壤中的高浓度速效肥,对土壤微生物的活性起到了抑制作用。

4.3 花木种植经营对土壤质量的影响

土壤质量综合评价指标的选择一直是土壤生态研究的热点,从单一的物理指标到理化特性复合指标,再到结合土壤酶活性的综合指标,使得对土壤质量的评价越来越准确^[30]。本研究利用主成分分析法计算土壤质量综合指数,发现该区域不同林地利用类型的土壤质量综合指数存在显著差异,呈现黄山松林>毛竹林>鹅掌楸林>新垦樱花林>生态修复林>樱花-红枫林的趋势。花木林类型土壤质量普遍低于生态林类型,表明长期花木种植经营不仅会造成表土的富营养化还会导致林地土壤综合质量的退化。和樱花-红枫林相比,生态修复林土壤质量有回升的趋势,但效果还不明显。因为生态修复林仍然是以花木为主,农民施肥除草等抚育措施并未改变,而且仅靠花木地套种南方红豆杉等长势比较缓慢树种作为生态修复措施,短期内很难表现出明显的修复效果。

参考文献:

- [1] 赵其国,孙波,张桃林. 土壤质量与持续环境[J]. 土壤, 1997(03): 113-120.
- [2] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2292-2296.
- [3] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报, 2006(01): 137-143.
- [4] 董莉丽,郑粉莉. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤酶活性和养分特征[J]. 生态环境, 2008, 17(05): 2050-2058.
- [5] 林娜,刘勇,李国雷,等. 森林土壤酶研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(04): 21-25.
- [6] 吕桂芬,吴永胜,李浩,等. 荒漠草原不同退化阶段土壤微生物、土壤养分及酶活性的研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(01): 104-109.
- [7] 李东宾,何立平,李修鹏,等. 四明山区域野生杜鹃资源现状与保护对策[J]. 中国野生植物资源, 2021, 40(01): 77-81.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析: 第三版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-320.
- [10] 范少辉,赵建诚,苏文会,等. 不同密度毛竹林土壤质量综合评价[J]. 林业科学, 2015, 51(10): 1-9.
- [11] 曹小玉,李际平,闫文德. 杉木林改造前后的土壤肥力对比分析及综合评价[J]. 土壤通报, 2016, 47(05): 1231-1237.
- [12] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(01): 4-8.
- [13] 陈闻,吴家森,许开平,等. 集约经营雷竹林土壤磷素状况及流失潜能[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(05): 687-693.
- [14] 刘晶晶. 苹果主产区土壤磷素状况、淋失阈值及阻遏技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [15] 赵瑞芬,程滨,滑小赞,等. 基于主成分分析的山西省核桃主产区土壤肥力评价[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2020, 40(06): 61-68.

- [16] 刘成刚, 薛建辉. 喀斯特石漠化山地不同类型人工林土壤的基本性质和综合评价[J]. 植物生态学报, 2011, 35 (10): 1050–1060.
- [17] 王晓荣, 胡文杰, 庞宏东, 等. 湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40 (11): 156–166.
- [18] 夏建国, 李廷轩, 邓良基. 主成分分析法在耕地质量评价中的应用[J]. 西南农业学报, 2000, 13 (02): 51–55.
- [19] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. 生态学报, 2014, 34 (09): 2297–2307.
- [20] 姜仕昆, 周运超, 谭伟, 等. 马尾松林近自然不同经营管理措施下土壤肥力[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37 (05): 876–882.
- [21] 张金波, 宋长春. 三江平原不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35 (03): 371–373.
- [22] 龙健, 黄昌勇, 李娟. 喀斯特山区土地利用方式对土壤质量演变的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16 (01): 76–79.
- [23] 马和平, 东主, 宋小广. 藏东南尼洋河下游流域不同土地利用方式对土壤性质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2021 (1): 133–141.
- [24] 叶润根, 陈国建, 王震, 等. 重庆山区不同土地利用下的土壤肥力质量研究[J]. 四川林业科技, 2021, 42 (1): 29–34.
- [25] 李发林, 曾瑞琴, 危天进, 等. 福建省平和县琯溪蜜柚果园土壤磷环境风险评价研究[J]. 中国农业生态学报, 2015, 23 (08): 1001–1009.
- [26] 杨文, 周脚根, 焦军霞, 等. 亚热带丘陵小流域土壤有效磷空间变异与淋失风险研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35 (02): 541–549.
- [27] 查同刚. 土壤理化分析: 第一版[M]. 北京: 中国林业出版社, 2017: 79–173.
- [28] 张成君, 师尚礼, 康文娟, 等. 不同轮作模式土壤酶活性特征及与化学性质的关系[J]. 中国草地学报, 2020, 42 (5): 92–102.
- [29] 陈佳, 姚成硕, 林勇明, 等. 武夷山林地土壤酶活性差异及土壤肥力质量评价[J]. 山地学报, 2021, 39 (2): 194–206.
- [30] 张猛, 张健. 林地土壤微生物、酶活性研究进展[J]. 四川农业大学学报, 2003 (04): 347–351.