

## 山核桃蒲壳 3 种还林方式对林地土壤的改良作用

何祯<sup>1</sup>, 高佳钰<sup>1</sup>, 黄玉洁<sup>1</sup>, 蔡建武<sup>2</sup>, 梁辰飞<sup>3</sup>, 柳新红<sup>1</sup>, 张骏<sup>1</sup>, 冯博杰<sup>1</sup>,

王宗星<sup>1</sup>, 沈爱华<sup>1</sup>

(1. 浙江省林业技术推广总站, 浙江 杭州 310020; 2. 桐乡市林业工作站, 浙江 桐乡 314500; 3. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 山核桃 *Carya cathayensis* 是浙江省和安徽省重要的经济林树种, 每年都会产生大量山核桃蒲壳废弃物, 但其目前对山核桃蒲壳的利用率相对较低。同时, 林地的集约化管理导致土壤质量退化, 严重制约了山核桃产业发展。为此, 2021 年 10 月, 在浙江省杭州市临安区湍口镇的山核桃林地中, 设置了野外控制实验, 旨在评估 3 种山核桃蒲壳还林方式对土壤酸碱度、土壤养分、微生物群落及酶活性的改良效果。试验设置 4 种处理: 对照 (不施用其他物料, CK)、覆盖山核桃蒲壳生物质炭 (BC)、覆盖蒲壳 (HM)、覆盖山核桃蒲壳有机肥 (OF)。经过一年的处理, 结果表明: (1) 相对于 CK 处理, HM 和 BC 处理显著提高了土壤 pH 值 ( $P<0.05$ ), 分别提高了 0.33 和 1.71 个单位; (2) 与 CK 处理相比, 其他 3 种处理均能显著提高土壤有机碳含量 ( $P<0.05$ ); (3) 与 CK 处理相比, 其他 3 种处理的土壤微生物生物量显著增加了 22.1%~54.8% ( $P<0.05$ ), 各微生物类群均呈增加趋势, HM 处理提高了真菌/细菌比率 (F/B); (4) BC、HM 和 OF 3 种处理对土壤中与碳、氮转化相关的酶活性均有提升效果, 主要包括  $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶、 $\beta$ -木聚糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶。施用山核桃蒲壳有机肥和覆盖山核桃蒲壳处理在改善土壤质量、经济成本和操作性方面均具有优势。

**关键词:** 山核桃蒲壳; 有机肥; 生物质炭; 覆盖; 微生物群落

中图分类号: S664.9; S714.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-3776(2024)02-0050-06

## Amelioration of Forest Soil by Treatments of Chinese Hickory Hull

HE Zhen<sup>1</sup>, GAO Jiayu<sup>1</sup>, HUANG Yujie<sup>1</sup>, CAI Jianwu<sup>2</sup>, LIANG Chenfei<sup>3</sup>, LIU Xin-hong<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, FENG Bojie<sup>1</sup>, WANG Zong-xing<sup>1</sup>,

SHEN Aihua<sup>1</sup>

(1. General Station of forestry technology promotion in Zhejiang province, Hangzhou 310020, China; 2. School of Environment and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** Sample plots were established in 20-year *Carya cathayensis* stand in Lin'an, Zhejiang province. They were intensively managed for 10 years, including applying chemical fertilizer and herbicide. In October 2021, experiments were conducted by randomized blocks design on *C. cathayensis* stand treated by hickory hull biochar (BC), hickory hull mulching (HM), hickory hull organic fertilizer (OF) and CK. In October 2022,

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2024-02-03

基金项目: 中央财政林业科技推广示范资金〔2020〕TS01 号

作者简介: 何祯, 林业工程师, 从事森林培育和林业技术推广等研究; E-mail:hezhen0901@163.com。通信作者: 沈爱华, 正高级工程师, 从事森林培育和生态等研究; E-mail:mailahshen@126.com。

0-20 cm soil were sampled. The result demonstrated that soil pH elevated by 0.33-1.71 in the treatment of HM and BC treatments, compared to that in the CK. Treatments could increase evidently soil organic carbon content, except the control. Soil microbial biomass in the three treatments increased 22.1%-54.8% than that in the control, with more microbial groups. HM treatment resulted in an improved fungal-to-bacterial ratio (F/B). The tested treatments showed positive effect on enzymatic activities of soil carbon and nitrogen conversion, including  $\alpha$ -glucosidase,  $\beta$ -glucosidase, cellobiose hydrolase,  $\beta$ -xyloglucosidase, and leucine aminopeptidase.

**Key words:** *Carya cathayensis*; hull; organic fertilizer; biochar; mulching; soil microbial community

山核桃 *Carya cathayensis* 是我国特有的珍贵干果和木本油料植物, 具有很高的经济价值, 主要分布在浙皖交界地区, 包括浙江临安及安徽宁国等县(市、区)<sup>[1-3]</sup>, 2018 年, 杭州市山核桃种植面积已超过 3.07 万  $\text{hm}^2$ , 山核桃产量为 1.3 万 t。然而, 传统的山核桃林地经营管理模式正导致林地环境退化。林户为了追求利益最大化, 过度施用化肥、农药和除草剂, 导致土壤侵蚀、酸化、养分失衡<sup>[4-5]</sup>等问题, 严重制约了山核桃产业的可持续发展。

山核桃蒲壳由山核桃的中果皮和外果皮组成, 占果实总质量的 4/5 左右<sup>[6]</sup>, 每年会有大量蒲壳废弃物产生。山核桃蒲壳是一种特性优良的林业废弃物, 碳含量较高, 具有复杂的维管束结构<sup>[7]</sup>, 含有丰富的氨基酸、醌类、生物碱等化学组分。目前, 已有山核桃蒲壳被开发利用作为食用菌栽培原料、有机肥或新型的生物抑菌剂等<sup>[6,8]</sup>, 但仍有大量山核桃蒲壳被丢弃在山林中未被充分利用<sup>[9]</sup>。

大量研究表明, 农林业废弃物以不同方式(覆盖、生物炭、有机肥等)还田利用, 可有效改善土壤质量, 包括土壤水热、酸碱性、养分、微生物群落和酶活性等<sup>[10-15]</sup>。本研究的主要目的是为山核桃蒲壳找到一种经济可行还林利用方式, 一方面可减少对环境的负面影响, 另一方面可缓解山核桃林土壤面临的土壤质量退化问题。因此, 本文研究了山核桃蒲壳常见的 3 种还林方式(覆盖、制造生物炭和有机肥)对林地土壤酸化、养分失衡和微生物群落的改良效果, 以期如山核桃蒲壳的资源化利用提供理论依据, 有利于山核桃产业的可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况和试验设计

试验样地位于浙江省杭州市临安区湍口镇的山核桃林地, 海拔为 330 m, 土壤类型以黄黏土为主。该山核桃林地树龄约 20 年, 集约化经营约 10 年, 包括长期施用化肥和除草剂。每年 5 月初和 10 月初施用复合肥( $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 15 : 15 : 15$ ), 每次施肥量约  $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 分别在 4 月底、6 月底和 8 月底施用 20% 草甘膦, 施用量约为  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验于 2021 年 10 月开始, 采用随机区组设计, 共设置 4 个处理: 对照(control, CK)、覆盖蒲壳生物质炭(biochar, BC)、覆盖蒲壳(hull mulching, HM)和施蒲壳有机肥(organic fertilizer, OF)。每个处理 4 个重复样方, 共 16 个样方, 样方面积为  $4 \text{ m}^2$  ( $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ )。4 个处理日常施肥量和管理方式均一致, 对照处理不再施用其他物料, 另外 3 种处理按照相等碳输入量( $1.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ C}$ )设计物料用量。蒲壳、有机肥和生物质炭的施用量分别为  $2.92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $6.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $2.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (干物质), HM 处理将蒲壳均匀铺设在样方表面, 覆盖厚度约 5 cm; BC 和 OF 处理将有机物料和 0~10 cm 表层土壤均匀混合后均匀铺设在样方表面。试验所用的蒲壳于山核桃采摘后立即进行收集, 蒲壳的全氮含量为  $9.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷含量为  $4.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 总钾含量为  $32.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全碳含量为  $488.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。有机肥为蒲壳和羊粪按质量比 4 : 6 混合, 其全氮含量为  $13.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷含量为  $5.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾含量为  $30.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全碳含量为  $232.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。生物质炭的原料为覆盖处理中所用蒲壳, 去除杂质后, 制备条件为  $500^\circ\text{C}$  厌氧热解 4 h, 过 2 mm 筛混匀待用, 其基本理化性质为: pH 10.02、全碳含量  $648.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮量  $4.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、C/N 比 147.39、灰分 13.26%。

### 1.2 土壤样品采集与指标测定

取样时间为 2022 年 10 月, 每个样方均使用 5 点法采集土壤样品, 去除土表凋落物后, 采集 0~20 cm 土层土壤, 混合均匀。土壤样品需去除杂物、细根, 过 2 mm 筛, 并挑去残留的细根和石子。土壤理化性质分析参照《土壤农化分析》<sup>[16]</sup>。土壤 pH 值采用复合电极法; 有机质(soil organic carbon, SOC)含量用重铬酸钾容量

法;速效氮(available nitrogen, AN)含量采用扩散吸收法;速效磷(available phosphorous, AP)含量采用盐酸-氟化铵法;速效钾(available potassium, AK)含量采用醋酸铵提取-火焰光度计法。土壤微生物群落组成采用磷脂脂肪酸(PLFAs)方法测定<sup>[17]</sup>。本研究测定了与碳、氮、磷循环相关的7种土壤酶活性,包括与碳分解转化的酶:α-葡萄糖苷酶(AG)、β-葡萄糖苷酶(BG)、纤维二糖水解酶(CB)、β-木糖苷酶(XYL);与氮获取有关的酶:亮氨酸氨基肽酶(LAP)、N-乙酰-β-氨基葡萄糖苷酶(NAG);与磷获取有关的酶:酸性磷酸酶(PHOS)<sup>[18]</sup>。

1.3 数据处理

采用SPSS 25.0软件进行数据统计分析。单因素方差分析(one-way analysis of variance)用于比较不同处理间土壤理化指标、磷脂脂肪酸土壤酶活性指标的差异,显著性水平设 $P\leq 0.05$ ,采用LSD方法。

2 结果与分析

2.1 山核桃蒲壳不同还林方式对土壤理化性质的影响

山核桃蒲壳不同还林方式均对土壤理化性质产生了不同程度的影响(表1)。BC和HM处理的土壤pH值显著高于其他2种处理( $P<0.05$ ),相比CK处理分别提高0.33和1.71单位,但OF处理对土壤pH值无显著影响( $P>0.05$ )。蒲壳有机肥处理(OF)的土壤SOC、AN、AP和AK含量为4种处理中最高。其中,HM、OF、BC处理显著提高了土壤SOC含量( $P<0.05$ ),且以OF处理效果最为显著,与CK相比,SOC提高了1.66倍;HM、OF处理的土壤AN含量显著高于CK处理,分别比CK处理提高了22%和62%,但BC处理提高效果不显著( $P>0.05$ );OF处理的AP为 $63.24\pm 3.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,相比于CK处理提高了3.34倍,BC处理相比于CK处理提高了73.04%( $P<0.05$ ),HM处理与C处理K间无明显差异( $P>0.05$ );3种处理显著提高了土壤AK含量( $P<0.05$ ),提升效果表现为 $\text{OF}>\text{BC}>\text{HM}>\text{CK}$ ,且两两间均差异显著( $P<0.05$ )。

表1 不同处理土壤的理化性质  
Tab. 1 Soil physicochemical properties of different treatments

处理	pH	SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	AN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	4.72±0.06 c	30.18±2.11 c	125.18±3.34 c	14.58±0.43 c	105.88±3.69 d
HM	5.05±0.05 b	37.67±1.43 b	153.16±8.03 b	16.79±0.60 c	146.90±8.86 c
OF	4.70±0.02 c	80.19±3.52 a	203.93±5.76 a	63.24±3.06 a	265.10±14.26 a
BC	6.43±0.04 a	38.04±1.66 b	136.36±2.19 c	25.23±0.89 b	186.60±7.89 b

注:数据为平均值±标准误;同一列中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ );下同。

2.2 山核桃蒲壳不同还林方式对土壤微生物群落的影响

山核桃蒲壳不同还林方式明显改变了土壤微生物群落(表2)。BC、HM和OF处理的土壤微生物总生物量显著高于CK处理,分别比CK处理提高了54.89%、25.41%和22.13%。4种处理的土壤细菌生物量依次为 $\text{BC}>\text{OF}>\text{HM}>\text{CK}$ ,处理之间均差异显著( $P<0.05$ )。BC、OF和HM处理的土壤真菌生物量高于CK处理( $P>0.05$ )。BC处理的土壤放线菌生物量为4种处理中最高且与其他3个处理均差异显著( $P<0.05$ )。革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌,BC处理显著高于其他3种处理,HM和OF处理显著高于CK处理( $P<0.05$ )。与CK处理相比,BC和HM处理的革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌有上升趋势,OF处理降低了0.26( $P<0.05$ )。HM处理土壤真菌/细菌比为 $0.2\pm 0.04$ ,显著高于OF处理的土壤真菌/细菌比 $0.13\pm 0.02$ ( $P<0.05$ ),BC处理与CK处理土壤真菌/细菌比无显著差异( $P>0.05$ )。

结合皮尔逊相关分析发现(表3),除了真菌/细菌外,土壤pH值与土壤中的真菌、放线菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌、总生物量均呈极显著正相关( $P<0.01$ );土壤SOC、AN、AP含量与土壤放线菌生物量呈显著负相关( $P<0.05$ ),而与革兰氏阴性菌生物量呈显著正相关( $P<0.05$ );AK处理与细菌和革兰氏阴性菌生物量均呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与Gp/Gn值呈显著负相关( $P<0.05$ )。

表 2 土壤微生物类群 PLFAs 含量  
Tab. 2 Soil microbial PLFAs contents in different treatments

处理	总量 /(nmol·g <sup>-1</sup> )	细菌 /(nmol·g <sup>-1</sup> )	真菌 /(nmol·g <sup>-1</sup> )	革兰氏阴性菌 /(nmol·g <sup>-1</sup> )	革兰氏阳性菌 /(nmol·g <sup>-1</sup> )	放线菌 /(nmol·g <sup>-1</sup> )	真菌/细菌	革兰氏阳性菌/ 革兰氏阴性菌
CK	9.20±0.22 c	5.94±0.14 d	0.90±0.02 a	2.29±0.06 b	3.55±0.08 c	0.72±0.01 b	0.15±0 ab	1.55±0.02 b
HM	11.53±0.57 b	7.02±0.28 c	1.42±0.29 a	2.63±0.1 b	4.25±0.18 b	0.72±0.03 b	0.20±0.04 a	1.62±0.03 ab
OF	11.23±0.6 b	7.97±0.37 b	1.06±0.15 a	3.42±0.21 a	4.39±0.19 b	0.52±0.01 c	0.13±0.02 b	1.29±0.05 c
BC	14.24±0.35 a	8.89±0.21 a	1.27±0.07 a	3.26±0.1 a	5.50±0.11 a	0.94±0.02 a	0.14±0 ab	1.69±0.03 a

表 3 土壤理化性质和微生物 PLFAs 的相关关系  
Tab. 3 Correlation coefficients between physicochemical properties and soil microbial PLFAs

理化性质	放线菌	细菌	革兰氏阳性菌	革兰氏阴性菌	真菌	革兰氏阳性菌/革兰 氏阴性菌	真菌/细菌	总量
速效钾	-0.44	0.63**	0.41	0.83**	-0.01	-0.62*	-0.35	0.33
速效磷	-0.65**	0.38	0.13	0.67**	-0.15	-0.80**	-0.38	0.05
速效氮	-0.74**	0.24	-0.01	0.54*	-0.08	-0.80**	-0.21	-0.05
有机碳	-0.69**	0.34	0.09	0.62*	-0.11	-0.77**	-0.31	0.02
pH	0.85**	0.67**	0.84**	0.34	0.27	0.64**	-0.07	0.82**

注: 表中数据为相关系数, \*表示在  $P<0.05$  水平显著相关, \*\*表示在  $P<0.01$  水平极显著相关。

2.3 山核桃蒲壳不同还林方式对土壤酶活性的影响

由表 4 可知, BC、OF 处理中土壤  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性分别为 5.77、6.52 nmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> (干土重), 与 CK 处理相比, 分别显著提高了 24.1% ( $P>0.05$ ) 和 40.2% ( $P<0.05$ )。OF 处理中土壤  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性显著高于其他 3 种处理, 与 CK 处理相比显著提高了 35.5% ( $P<0.05$ )。土壤纤维二糖水解酶活性依次为: OF>HM>BC>CK, 两两间无显著差异, 但与 CK 处理相比均有提高 ( $P>0.05$ )。HM 处理中土壤  $\beta$ -木聚糖苷酶活性为 36.84 nmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> (干土重), 与 CK 处理相比, 显著提高了 29.6% ( $P>0.05$ )。OF、HM 处理中土壤亮氨酸氨基肽酶活性分别为 17.42 和 19.06 nmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup> (干土重), 显著高于 CK 处理 ( $P<0.05$ )。4 种处理中土壤  $\beta$ -N-乙酰基氨基葡萄糖苷酶活性为: OF>HM>BC>CK, 两两间无显著差异 ( $P>0.05$ )。

表 4 山核桃蒲壳不同还林方式对土壤酶活性的影响  
Tab. 4 Effect of different treatments on soil enzymatic activities

处理	AG/(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	BG/(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	CB/(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	XYL/(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	LAP/(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	NAG/(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	PHOS/(nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
CK	4.65±0.46 b	59.81±0.61 b	13.31±0.87 b	28.42±0.16 b	13.15±0.73 c	35.33±1.36 a	259.92±39.02 a
BC	5.77±0.3 ab	77.53±7.55 ab	16.15±1.05 a	29.90±0.45 b	14.94±1.28 bc	36.99±3.59 a	216.01±7.62 a
OF	6.52±0.12 a	81.06±9.04 a	17.64±0.4 a	32.11±2.12 ab	17.42±1.86 ab	37.96±2.38 a	243.46±21.66 a
HM	4.96±0.27 b	61.83±4.1 ab	17.55±2.48 a	36.84±3.05 a	19.06±0.65 a	37.20±2.24 a	252.45±32.83 a

注: AG,  $\alpha$ -葡萄糖苷酶; BG,  $\beta$ -葡萄糖苷酶; CB, 纤维二糖水解酶; LAP, 亮氨酸氨基肽酶; NAG, N-乙酰- $\beta$ -氨基葡萄糖苷酶; PHOS, 酸性磷酸酶; XYL,  $\beta$ -木糖苷酶。

3 讨论

3.1 山核桃蒲壳不同还林方式对土壤理化性质的影响

山核桃蒲壳覆盖及施用生物质炭处理显著改善土壤酸化现象, 山核桃蒲壳有机肥对土壤 pH 影响较小。生物质炭和山核桃蒲壳中分别含有大量交换性阳离子<sup>[17]</sup>和丰富的生物碱<sup>[19,20]</sup>, 均能显著改善土壤 pH。然而, 有机肥中的山核桃蒲壳经过高温腐熟后, 生物碱被降解<sup>[21]</sup>, 且羊粪中有机质在分解、转化过程中会产生各种有机酸<sup>[24]</sup>, 这些因素导致有机肥对土壤酸碱性影响不大。山核桃蒲壳不同还林方式对土壤有机碳均有显著提高, 相比于对照处理, 施用山核桃蒲壳有机肥使土壤有机碳提高了 165.70%, 提高幅度最大 (表 2), 有机肥中的山核桃蒲壳和羊粪经过高温腐熟更易腐解成有机质或腐殖质<sup>[22]</sup>, 从而提高土壤有机碳含量; 山核桃蒲壳制成生物质炭后具有稳定的芳香烃结构<sup>[23]</sup>, 并且生物质炭特有的微孔结构可以吸附土壤中的有机小分子<sup>[24]</sup>, 使其成为土壤有机碳提供稳定来源; 而山核桃蒲壳覆盖对土壤有机碳的提升效果和生物质炭处理接近, 山核桃蒲壳中含有

丰富的木质素、纤维素,会吸引白蚁(主要为黑翅土白蚁 *Odontotermes formosanu*)等土壤动物参与其粉碎、摄食等分解过程<sup>[25]</sup>。山核桃蒲壳有机肥能够显著提高土壤养分,由于高温堆肥后的山核桃蒲壳残体更容易分解,有利于养分释放<sup>[26]</sup>。山核桃蒲壳覆盖对土壤养分的改善效果稍弱,因为山核桃蒲壳本身氮、磷含量较低,且不易分解。值得注意的是,3种处理都显著提高了速效钾,这与山核桃蒲壳本身的高钾含量(约为3.26%)有关。

### 3.2 山核桃蒲壳不同还林方式对土壤微生物群落与酶活性的影响

生物质炭显著提高了土壤细菌生物量,生物质炭富含不稳定有机碳、盐基离子以及大量微孔结构<sup>[27,28]</sup>,可改善山核桃林地土壤酸性、养分不足的情况,从而有利于细菌群落的生长。相比于山核桃蒲壳有机肥和对照处理,生物质炭和山核桃蒲壳覆盖处理土壤中放线菌生物量显著提高,山核桃蒲壳覆盖的土壤中真菌生物量和真菌/细菌比最高,这是由于放线菌和真菌倾向于在中性或碱性的土壤中生长<sup>[29]</sup>,并且喜分解土壤中的难分解物质<sup>[30]</sup>。通过皮尔逊相关性分析还发现,放线菌生物量与土壤 pH 值呈显著正相关,真菌是分解木质素和纤维素能力最强的微生物,山核桃蒲壳中含有大量难分解物质,因此覆盖山核桃蒲壳有利于真菌定殖。山核桃蒲壳覆盖使得土壤中真菌/细菌比最高,为 0.2 ( $P<0.05$ ),表明覆盖处理能够增强土壤生态系统的缓冲能力,对于微生物群落的多样性和稳定性均有积极作用。此外,革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌的比值可反映土壤营养胁迫程度<sup>[31]</sup>,本研究发现,革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比与 pH 呈正显著相关,与养分指标呈负显著相关,说明在 4 种处理中,山核桃蒲壳有机肥对改善土壤营养状况的效果最好。

土壤 pH、养分可利用性、微生物的生物量和群落组成以及土壤含水量都会影响土壤酶活性<sup>[32]</sup>。在本研究中,由于山核桃蒲壳的高碳含量,3种蒲壳处理方式都显著提高了土壤有机碳含量,研究发现,土壤有机碳含量与土壤中酶活性存在极显著的正相关关系,可能是通过改变土壤团聚体和微生物群落来影响酶活性<sup>[33]</sup>。覆盖山核桃蒲壳后,土壤 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶、 $\beta$ -木糖苷酶活性显著提高,这是因为山核桃蒲壳还林为土壤提供了大量难分解的有机碳源,从而提高了与碳转化相关酶活性。此后,微生物分泌更多的氮以维持自身的 C/N 比稳定,因此,亮氨酸氨基肽酶(与氮转化相关)活性也得到显著提高。有机物料可以为微生物生长提供营养,而微生物数量和活性的增加则使得繁殖和代谢能力加强,进而提高酶活性<sup>[34]</sup>。

## 4 结论

在本研究中,发现山核桃蒲壳有机肥(OF)对于提高土壤有效营养的作用最为显著,且并未降低土壤的 pH。生物质炭(BC)和山核桃蒲壳覆盖(HM)处理有助于降低土壤酸度以及增加土壤微生物群落的多样性和稳定性。3种处理都能增加与土壤碳、氮转化相关的酶活性。本试验研究时间仅为 1 年,未来的研究中可增加处理年限,从而获得长期变化规律,更加准确地评估山核桃蒲壳的不同还林方式对土壤质量的影响。此外,建议在集约经营的林地中,可使用生物质炭和山核桃蒲壳覆盖处理以改善土壤酸碱性,特别是山核桃蒲壳覆盖处理更为经济且操作简便,可作为一种新型的酸化土壤改良剂,在酸化经济林土壤(例如雷竹林、茶园、果园等)中具有一定的应用潜力。总的来说,鉴于山核桃蒲壳还林利用的土壤改良效果、经济成本和易操作性,推荐使用山核桃蒲壳有机肥和山核桃蒲壳覆盖作为首选的还林方式。

## 参考文献

- [1] 黄坚钦,夏国华. 图说山核桃生态栽培技术[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2008:7-8.
- [2] 吕惠进. 浙江临安山核桃立地环境研究[J]. 森林工程,2005,21(1):1-3.
- [3] 艾呈祥,李翠学,陈相艳,等. 我国山核桃属植物资源[J]. 落叶果树,2006,38(4):23-24.
- [4] JIN J, WANG L, MULLER K, et al. A 10-year monitoring of soil properties dynamics and soil fertility evaluation in Chinese hickory plantation regions of southeastern China[J]. Sci Rep, 2021, 11: 23531.
- [5] FU W, DONG J, DING L, et al. Spatial correlation of nutrients in a typical soil-hickory system of southeastern China and its implication for site-specific fertilizer application[J]. Soil Tillage Res, 2022, 217: 105265.
- [6] 颜芳. 农林废弃物山核桃蒲壳资源化利用研究进展[J]. 安徽农业科学,2013,41(14):6329-6330.

- [7] 常海楠. 山核桃蒲壳用作铁皮石斛栽培基质的应用技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
- [8] 申秀英, 毛建卫, 蔡成岗. 山核桃外蒲壳成分与功能研究进展[J]. 食品研究与开发, 2013, 34 (21): 128–130.
- [9] 王国平, 过婉珍. 山核桃蒲壳污染综合治理及其效应[J]. 现代农业科技, 2006, 12: 72–73.
- [10] DONG Q G, YANG Y C, YU K, et al. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China[J]. *Agr Water Manag*, 2018, 201: 133–43.
- [11] ZHANG S N, WANG Y, SUN L T, et al. Organic mulching positively regulates the soil microbial communities and ecosystem functions in tea plantation[J]. *BMC Microbiol*, 2020, 20 (5): 374–382.
- [12] LOPEZ V M, GOMEZ J A, GUZMAN G, et al. The role of cover crops in the loss of protected and non-protected soil organic carbon fractions due to water erosion in a Mediterranean olive grove[J]. *Soil Tillage Res*, 2021, 213: 105119.
- [13] 周子军, 郭松, 陈琨, 等. 长期秸秆覆盖对免耕稻-麦产量、土壤氮组分及微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2021, 7: 1–13.
- [14] 顾美英, 唐光木, 刘洪亮, 等. 施用棉秆炭对新疆连作棉花根际土壤微生物群落结构和功能的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (1): 173–181.
- [15] ENWALL K, NYBERG K, BERTILSSON S, et al. Long-term impact of fertilization on activity and composition of bacterial communities and metabolic guilds in agricultural soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, 39: 106–115.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146–195.
- [17] BOSSIO D A, SCOW K M. Impacts of carbon and flooding on soil microbial communities: phospholipid fatty acid profiles and substrate utilization patterns[J]. *Microb Ecol*, 1998, 35, 265–278.
- [18] WILLIAMSON G B, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. *J Chem Ecol*, 1988, 14 (1): 181–187.
- [19] 陈向明, 俞志敏, 金杰, 等. 山核桃外蒲壳无机成分的分析研究[J]. 分析实验室, 2006, 26 (8): 45–47.
- [20] 姜著英, 宣贵达, 李林林. 山核桃蒲壳化学成分定性鉴定及总生物碱提取工艺研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2009, 36 (4): 442–449.
- [21] 望银平, 许彬彬, 李姝婉, 等. 山核桃蒲壳综合利用的研究进展[J]. 广州化工, 2013, 41 (23): 20–22.
- [22] DURING C, WEEDA W C, DOROF AEFF D F. Some effects of cattle dung on soil properties, pasture production, and nutrient uptake[J]. *N Zealand J Agr Res*, 2012, 16 (3): 431–438.
- [23] SCHMID M W I, NOACK A G. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2000, 14 (3): 777–793.
- [24] HARTER J, KRAUSE H M, SCHUETTLER S, et al. Linking N<sub>2</sub>O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community[J]. *ISME J*, 2014, 8 (3): 660–674.
- [25] SHURE D J, GOTTSCHALK M R, PARSONS K A. Litter decomposition processes in a floodplain forest[J]. *Amer Midland Nat*, 1986, 115 (2): 314–327.
- [26] 韩晓君, 张先政. 不同作物秸秆腐熟还田对土壤理化性质及作物产量的影响分析[J]. 安徽农学通报, 2013, 19 (16): 80–82.
- [27] CHEN Z, WANG Y P, XIA D, et al. Enhanced bio reduction of iron and arsenic in sediment by biochar amendment influencing microbial community composition and dissolved organic matter content and composition[J]. *J Hazard Mater*, 2016, 311, 20–29.
- [28] IPPOLITO J A, STROMBERGER M E, LENTZ R D, et al. Hardwood biochar influences calcareous soil physicochemical and microbiological status[J]. *J Environ Quality*, 2014, 43 (2): 681–689.
- [29] ZHANG Y L, LI T T, WU H H. Effect of different fertilization practices on soil microbial community in a wheat-maize rotation system, Sustainability, 2019, 11: 4088.
- [30] ASADU C O, ANEKE N G, EGBUNA S O, et al. Comparative studies on the impact of bio-fertilizer produced from agro-wastes using thermo-tolerant actinomycetes on the growth performance of Maize (*Zea mays*) and Okro (*Abelmoschus esculentus*) [J]. *Environ Technol Innov*, 2018, 12: 55–71.
- [31] GARCIA-SANCHEZ M, GARCIA-ROMERA I, CAJTHAML T, et al. Changes in soil microbial community functionality and structure in a metal-polluted site: The effect of dig estate and fly ash applications[J]. *J Environ Manag*, 2015, 162: 63–73.
- [32] SINSABAUGH R L, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry of recalcitrant organic matter decomposition: the growth rate hypothesis in reverse[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 102 (1–3): 31–43.
- [33] DEBOSZ K, RASMUSSEN P H, PEDERSEN A R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: effects of organic matter input[J]. *App Soil Ecol*, 1999, 13 (3): 209–218.
- [34] VERES Z, KOTROCZÓ Z, FEKETE I, et al. Soil extracellular enzyme activities are sensitive indicators of detrital inputs and carbon availability[J]. *App Soil Ecol*, 2015, 92: 18–23.