

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.013

丁苏雅, 段敏, 朱瀚卿, 等. 竹生物质炭和竹凋落物对毛竹林土壤营养元素和酶活性的影响. 土壤, 2023, 55(4): 795–803.

竹生物质炭和竹凋落物对毛竹林土壤营养元素和酶活性的影响^①

丁苏雅^{1,2,3,4,5}, 段敏^{1,2,3,4,5*}, 朱瀚卿^{4,5}, 陈宇^{4,5}, 谭一波^{1,2,3}, 马姜明^{4,5}, 田红灯^{1,2,3}, 申文辉^{1,2,3}

(1 广西优良用材林资源培育重点实验室, 南宁 530002; 2 广西漓江源森林生态系统国家定位观测研究站, 广西桂林 541316; 3 桂林兴安漓江源森林生态系统广西野外科学观测研究站, 广西桂林 541316; 4 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西桂林 541006; 5 广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室, 广西师范大学, 广西桂林 541006)

摘要: 以广西壮族自治区桂林市华江乡内广泛分布的毛竹林土壤为研究对象, 以竹生物质炭和竹凋落物作为外源碳, 设置对照(CK)、低添加量生物质炭(1%BC)、高添加量生物质炭(2%BC)、低添加量凋落物(1%L)、高添加量凋落物(2%L)5个处理, 进行为期两个月的室内培养试验, 研究不同外源碳添加对毛竹林土壤营养元素和酶活性的影响。结果表明: 与对照相比, 竹生物质炭和竹凋落物添加均显著提高了土壤 pH; 竹生物质炭添加显著降低了而竹凋落物添加显著提高了土壤铵态氮(NH₄⁺-N)含量($P < 0.05$), 且高添加量(2%BC 和 2%L)的降低或提高作用更明显; 不同外源碳添加均显著提高了土壤硝态氮(NO₃⁻-N)含量, 且凋落物添加的提高作用更明显; 不同外源碳添加均显著提高了土壤有效磷(AP)含量, 且高添加量的提高作用更明显; 竹生物质炭添加对土壤可溶性有机碳(DOC)含量没有显著影响, 但降低了土壤可溶性氮(DN)含量, 而竹凋落物添加显著提高了土壤 DOC 和 DN 含量; 不同外源碳添加对土壤微生物生物量碳(MBC)和氮含量(MBN)均没有显著影响, 但降低了土壤蔗糖酶和脲酶活性。相关性分析表明, 土壤 pH、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DOC 和 DN 是影响竹林土壤酶活性的关键性因子。

关键词: 竹生物质炭; 竹凋落物; 土壤营养元素; 土壤酶活性

中图分类号: S714.5 **文献标志码:** A

Effects of Bamboo Biochar and Bamboo Litter on Soil Nutrients and Enzyme Activities in a Moso Bamboo Forest

DING Suya^{1,2,3,4,5}, DUAN Min^{1,2,3,4,5*}, ZHU Hanqing^{4,5}, CHEN Yu^{4,5}, TAN Yibo^{1,2,3}, MA Jiangming^{4,5}, TIAN Hongdeng^{1,2,3}, SHEN Wenhui^{1,2,3}

(1 Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning 530002, China; 2 Guangxi Lijiangyuan Forest Ecosystem Research Station, Guilin, Guangxi 541316, China; 3 Guilin Xing'an Lijiangyuan Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Guilin, Guangxi 541316, China; 4 Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection (Guangxi Normal University), Ministry of Education, Guilin, Guangxi 541006, China; 5 Guangxi Key Laboratory of Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract: A two-month laboratory incubation experiment was conducted to explore effects of different exogenous carbon input on soil nutrients and enzyme activities with soil collected from Moso bamboo forest in Huajiang Township of Guilin City, Guangxi Province. Five treatments were setup, which included the control (CK), addition of bamboo biochar with a low rate (1%BC), addition of bamboo biochar with a high rate (2%BC), addition of bamboo litter with a low rate (1%L), and addition of bamboo litter with a high rate (2%L). The results showed that the addition of biochar and litter significantly increased soil pH compared with CK. The addition of biochar significantly decreased while the addition of litter significantly increased soil NH₄⁺-N concentration ($P < 0.05$), and the effects were more significant in the high addition rates (2%BC and 2%L) than in the low addition rates (1%BC and 1%L). The addition of different exogenous carbon significantly increased soil NO₃⁻-N concentration, and the effect was more significant in litter addition than in biochar addition. Soil available phosphorus (AP) concentration was also

①基金项目: 广西优良用材林资源培育重点实验室开放课题项目(2020-B-04-02)和广西创新驱动发展专项(桂科 AA20161002-1)资助。

* 通讯作者(duanmin0517@163.com)

作者简介: 丁苏雅(1995—), 女, 河北承德人, 硕士研究生, 主要从事生态恢复方面的研究。E-mail: dsylucky85@163.com

significantly increased by different exogenous carbon additions, and the effect was more significant in the high addition rates than in the low addition rates. Biochar addition had no significant effect on soil dissolved organic carbon (DOC) concentration, but decreased soil dissolved nitrogen (DN) concentration, while litter addition significantly increased soil DOC and DN concentrations. The concentrations of soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) were not significantly affected by different exogenous carbon additions, but the activities of both sucrose and urease were decreased. Correlation analysis showed that soil pH, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, DOC and DN were the key factors affecting soil enzyme activities in Moso bamboo forest soil.

Key words: Bamboo biochar; Bamboo litter; Soil nutrients; Soil enzyme activity

毛竹是我国重要的森林类型和经济作物,总面积达 467.75 万 hm^2 , 占全国竹林面积的 72.96%^[1]。毛竹具有分布广、生长快、可持续经营等特点,蕴藏着强大的固碳能力,在减缓全球气候变化方面具有巨大的潜力^[2]。但长期的集约经营导致毛竹林土壤酸化、结构破坏、肥力下降、温室气体排放量增加等问题,急需寻找常规肥料以外的外源物质来提高毛竹林土壤质量。

生物质炭是由生物质在无氧或者缺氧状态下经高温热解产生的一类富碳的固态物质^[3],具有孔隙多、比表面积大、吸附性强、稳定性高等特点^[4],是近年来土壤学和环境科学领域的研究热点。大量研究表明,生物质炭在改善土壤理化性质、提高土壤肥力、增加土壤碳库及减缓气候变化方面有重要作用^[5-8]。生物质炭在农田生态系统的应用较为广泛,如杨彩迪等^[9]研究发现不同原料生物质炭对水稻、玉米和油菜 3 种农田作物产量及土壤性质有不同影响,其中稻壳生物质炭在改良酸性土壤和提高作物产量方面效果较好;卢晋晶等^[10]研究发现秸秆生物质炭能有效提高黄土区农田土壤养分含量,且生物质炭最佳施用量一定程度上依赖于氮肥的投入情况。然而生物质炭在森林生态系统中的应用研究较少^[11],在竹林生态系统中的作用更是鲜有报道,并且现有研究多为单独添加生物质炭对土壤性质的影响,对比不同外源碳添加对土壤养分和酶活性影响的研究相对较少^[12-13]。研究表明,凋落物可为微生物提供丰富的有效养分^[14],进而可能影响土壤肥力和土壤酶活性。

因此,本研究以广西壮族自治区桂林市华江乡内广泛分布的毛竹林土壤为研究对象,以难分解的竹生物质炭及易分解的竹凋落物作为外源碳,研究不同添加量的竹生物质炭和竹凋落物对土壤营养元素和酶活性的影响,以为提高毛竹林土壤质量提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验样地位于广西壮族自治区桂林市华江乡同

仁村(110°45' E, 25°80' N),该地区海拔 359 m,为中亚热带湿润山地季风气候,四季分明,温和湿润,年平均气温 16.4 °C,年平均降水量 2 515 mm,主要集中在 2—6 月,相对湿度常在 80% 以上。试验样地土壤类型为山地棕黄壤,土壤含水率 32.3%,田间持水量 74.4%,土壤容重 1.25 g/cm^3 , pH 4.4,全碳(TC) 27.7 g/kg ,全氮(TN) 2.3 g/kg ,全磷(TP) 296.1 mg/kg ,铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 8.7 mg/kg ,硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 31.3 mg/kg ,有效磷(AP) 14.9 mg/kg 。

1.2 土壤样品采集和预处理

2020 年 10 月 14 日在试验样地选择坡度较小、生境一致和生长状况基本相同的毛竹林采集土壤样品。采样时,清除土壤表面凋落物,采用五点取样法采集 0~20 cm 土层样品,剔除可见的碎石及动植物残体,过 2 mm 筛,混合均匀后,放入塑封袋,装入放有冰块保温箱尽快运回实验室。取部分新鲜土壤样品,剔除根系和杂物,自然风干,分析部分土壤基本理化性质,其余新鲜土壤样品放入 4 °C 的冰箱保存备用。同时收集样地土壤表层竹凋落物带回实验室,用蒸馏水洗净,置于 70 °C 烘箱中烘干至恒重,冷却后剪成 1 cm 左右小段备用。竹凋落物 pH 6.5, TC 415.6 g/kg , TN 18.6 g/kg 。竹生物质炭购于北京立泽环保科技有限公司,是由毛竹废弃物在 750 °C 高温限氧条件下裂解而成,购买的竹生物质炭过 2 mm 筛备用。竹生物质炭 pH 8.5, TC 783.70 g/kg , TN 15.2 g/kg 。

1.3 试验设计

本试验共设置 5 个处理:①对照(CK);②低添加量竹生物质炭(添加量为土壤干重的 1%,记作 1%BC);③高添加量竹生物质炭(添加量为土壤干重的 2%,记作 2%BC);④低添加量竹凋落物(添加量与处理②的含碳量相同,记作 1%L);⑤高添加量竹凋落物(添加量与处理③的含碳量相同,记作 2%L)。每个处理每个培养时期设置 3 个重复。试验中,首先称取 140 g 鲜土置于 250 mL 三角瓶中,用蒸馏水调节土壤含水率为田间持水量的 60%,在 25 °C 的培养箱中预培养 1 周;然后按照试验处理添加不同量的竹

生物质炭和竹凋落物,使之与土壤充分混匀,在 25℃ 的培养箱中培养 60 d,其间定期添加蒸馏水,使土壤含水率保持在田间持水量的 60%。在培养的 0、1、3、7、14、30 和 60 d 后进行破坏性取样,测定土壤理化性质和酶活性。由于在培养过程中,竹生物质炭和竹凋落物也是培养土壤的一部分,并且添加的竹生物质炭粒径和培养土壤的粒径相同,很难通过物理方法将其与土壤分离,所以取样后未将未分解和半分解的竹生物质炭和竹凋落物从土壤中分离。

1.4 样品测定

土壤 pH 采用电位法测定(水土比为 2.5:1, V/m), TC 和 TN 含量采用元素分析仪测定, TP 含量采用 $H_2SO_4-HClO_4$ 消煮-钼锑抗比色法测定, NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 含量采用 2 mol/L KCl 溶液浸提-连续流动分析仪测定^[15], AP 含量采用 $NaHCO_3$ 溶液浸提-钼锑抗比色法测定,可溶性有机碳(DOC)和可溶性氮(DN)含量采用 TOC 仪测定,微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量采用氯仿熏蒸硫酸钾溶液浸提-TOC 仪测定,土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,土壤脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定。

1.5 数据处理与分析

采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析,利用单因素方差分析及多重比较法(LSD)分析不同量竹生物质炭和竹凋落物添加处理对毛竹林土壤营养元素和酶活性的影响,利用 Pearson 相关性分析探究毛竹林土壤营养元素和酶活性的关系,所有统计分析显著水平为 $P < 0.05$; 使用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤 pH 的影响

由图 1 可知,竹生物质炭和竹凋落物添加后土壤 pH 均显著增加($P < 0.05$)。与 CK 处理相比,各处理土壤 pH 在培养前 7 d 增加幅度较大,在培养后期变化幅度较小,在培养 60 d 后 1%BC、2%BC、1%L 和 2%L 处理土壤 pH 均达到最高,分别为 4.72、5.06、4.68 及 5.01。高添加量处理对土壤 pH 的影响显著高于低添加量处理,并且添加量相同时,竹生物质炭对土壤 pH 的提高作用高于竹凋落物。

2.2 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤全碳、全氮和全磷含量的影响

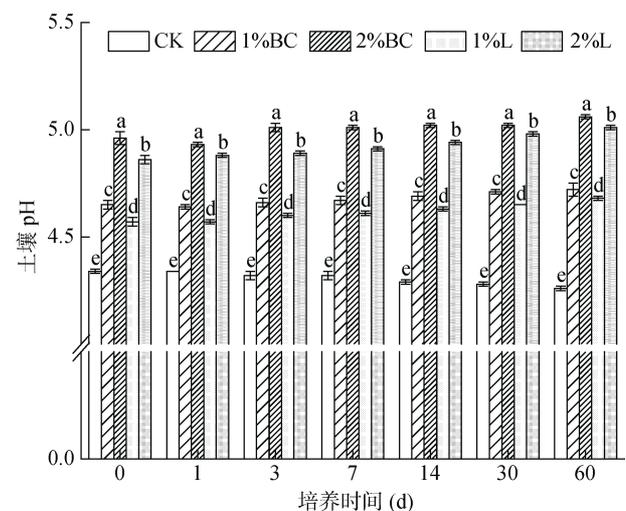
由图 2A 可知,培养 60 d 后 2%BC 处理与 CK 处理相比土壤 TC 含量提高了 9.75%($P < 0.05$),也显著高于其余 3 个处理,并且其余 3 个处理与 CK 处理

相比没有显著差异。由图 2B 可知,与 CK 处理相比,培养 60 d 后竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤 TN 含量没有显著影响,但高添加量竹凋落物处理(2%L)土壤 TN 含量显著高于竹生物质炭添加处理(1%BC 和 2%BC)($P < 0.05$)。由图 2C 可知,培养 60 d 后竹生物质炭和竹凋落物添加均显著提高了土壤 TP 含量($P < 0.05$),2%BC 处理土壤 TP 含量最高(423.3 mg/kg),与 CK 处理相比提高了 23.3%,但竹生物质炭和竹凋落物两种不同外源碳添加对土壤 TP 含量的影响没有显著差异。

2.3 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤铵态氮、硝态氮和速效磷含量的影响

由图 3A 可知,竹生物质炭和竹凋落物添加后土壤 NH_4^+-N 含量在培养前期随着培养时间而降低,在培养 30 d 后趋于平稳,但竹生物质炭添加后土壤 NH_4^+-N 含量均显著低于 CK 处理($P < 0.05$),而竹凋落物添加后土壤 NH_4^+-N 含量均显著高于 CK 处理($P < 0.05$)。竹生物质炭添加量的高低除在培养的 30 d 对土壤 NH_4^+-N 含量的影响存在显著差异外($P < 0.05$),其余培养时间均不存在显著差异,而竹凋落物添加量的高低对土壤 NH_4^+-N 含量的影响在培养的前 30 d 大多存在显著差异($P < 0.05$),2%L 处理土壤 NH_4^+-N 含量显著高于 1%L 处理。

由图 3B 可知,竹生物质炭和竹凋落物添加后土壤 $NO_3^- -N$ 含量在培养的前 7 d 呈先上升后下降趋势,之后均呈逐渐上升趋势,在培养 60 d 后达到最高,并且竹凋落物添加对土壤 $NO_3^- -N$ 含量的促进作用高



(图中不同小写字母代表相同培养时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同)

图 1 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤 pH 的影响
Fig. 1 Effects of bamboo biochar and bamboo litter addition on soil pH

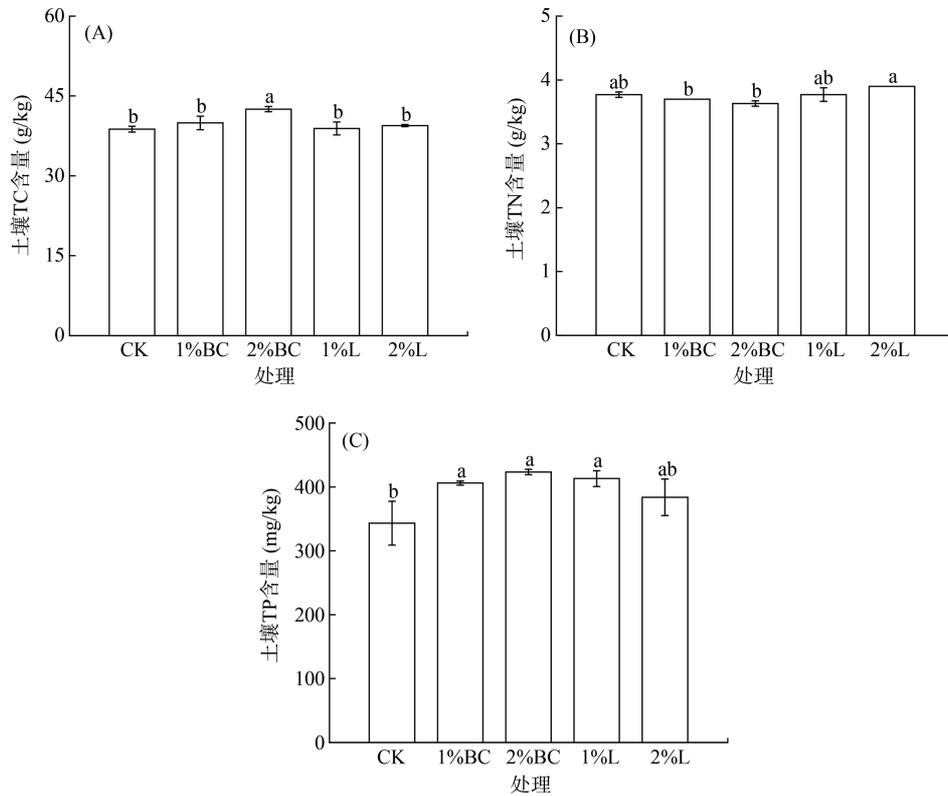


图 2 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤 TC(A)、TN(B)和 TP(C)含量的影响

Fig. 2 Effects of bamboo biochar and bamboo litter addition on concentrations of soil TC (A), TN (B) and TP (C)

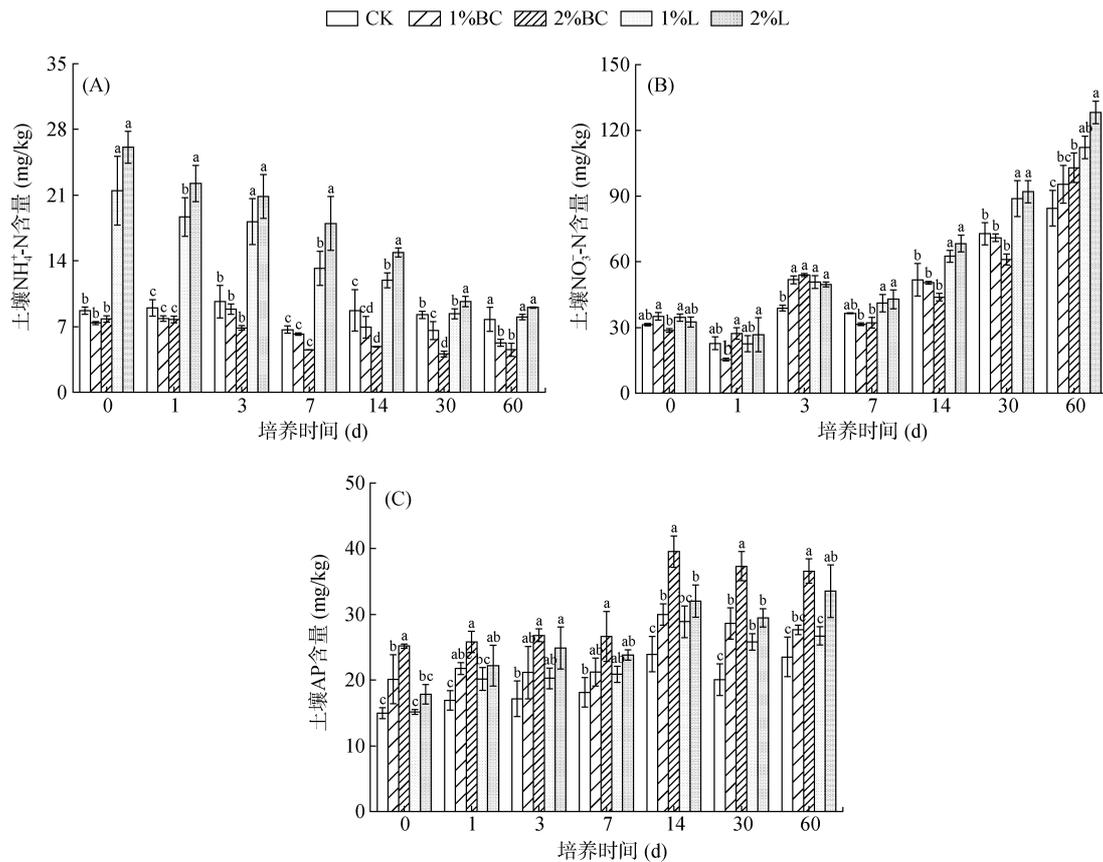


图 3 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (A)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (B)和 AP(C)含量的影响

Fig. 3 Effects of bamboo biochar and bamboo litter addition on concentrations of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (A), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (B) and AP (C)

于竹生物质炭添加。在培养 0、14 和 30 d 1%BC 处理土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量高于 2%BC 处理,而只有在培养的前期 1%L 处理土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量高于 2%L 处理,其余培养时间均是 2%L 处理土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量较高。

由图 3C 可知,竹生物质炭和竹凋落物添加后土壤 AP 含量随着培养时间呈上升的趋势,竹生物质炭和竹凋落物添加处理土壤 AP 含量均高于 CK 处理,除培养 0 d 外,各处理土壤 AP 含量由高到低依次为 2%BC>2%L>1%BC>1%L>CK。在培养的前 7 d 1%BC 和 2%BC 处理土壤 AP 含量不存在显著差异,在培养后期 2%BC 处理土壤 AP 含量显著高于 1%BC 处理($P<0.05$)。除在培养 60 d 2%L 处理土壤 AP 含量显著高于 1%L 处理外,其余各培养时期两者之间无显著差异。

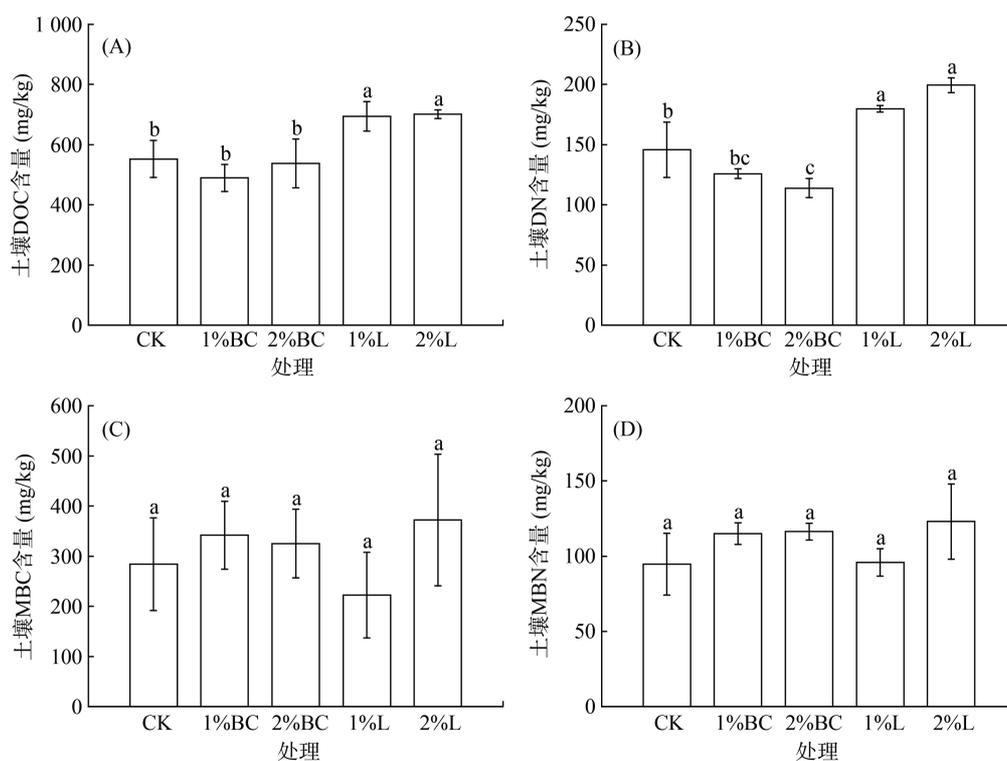


图 4 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤 DOC(A)、DN(B)、MBC(C)和 MBN(D)含量的影响

Fig. 4 Effects of bamboo biochar and bamboo litter addition on concentrations of soil DOC (A), DN (B), MBC (C) and MBN (D)

2.5 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响

由图 5A 可知,竹生物质炭和竹凋落物添加后土壤蔗糖酶活性显著降低,并且竹凋落物添加对土壤蔗糖酶活性的抑制作用高于竹生物质炭添加。在培养的 1、60 d 竹生物质炭添加量的高低对土壤蔗糖酶活性的影响存在显著差异($P<0.05$),土壤蔗糖酶活性随着添加量的增加而降低,而在整个培养阶段竹凋落物添加量的高低对土壤蔗糖酶活性的影

2.4 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤可溶性有机碳、可溶性氮及微生物生物量碳氮含量的影响

由图 4A 和图 4B 可知,培养 60 d 后,竹生物质炭添加对土壤 DOC 含量没有显著影响,对土壤 DN 含量有一定影响,而竹凋落物添加对土壤 DOC 和 DN 含量均有显著影响($P<0.05$)。与 CK 处理相比,2%BC 处理显著降低了土壤 DN 含量($P<0.05$),而 1%BC 处理对土壤 DN 没有显著影响。与 CK 处理相比,竹凋落物添加显著提高了土壤 DOC 和 DN 含量($P<0.05$),但添加量的高低之间没有显著差异。由图 4C 和图 4D 可知,培养 60 d 后,竹生物质炭和竹凋落物添加均对土壤 MBC 和 MBN 含量没有显著影响,并且添加量的高低之间也不存在显著差异($P>0.05$)。

响没有显著差异。

由图 5B 可知,竹生物质炭和竹凋落物添加后土壤脲酶活性显著降低($P<0.05$),且竹凋落物添加对土壤脲酶活性的抑制作用高于竹生物质炭添加。土壤脲酶活性随着竹生物质炭添加量的增加而降低,在培养的 14 和 30 d 高添加量和低添加量处理之间差异显著($P<0.05$);土壤脲酶活性也随着竹凋落物添加量的增加而降低,除在培养的 7、14 和 30 d 外,其余培养时间高添加量和低添加量处理之间差异显著($P<0.05$)。

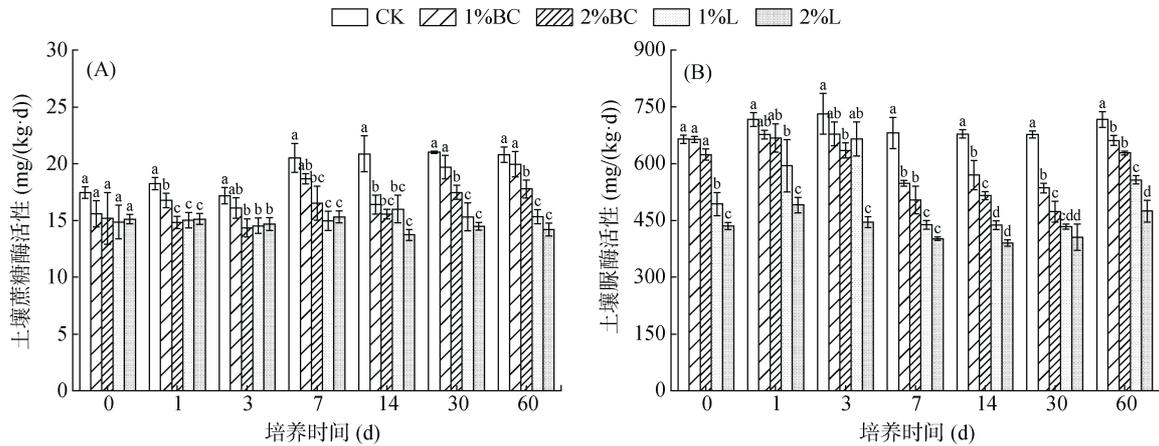


图 5 竹生物质炭和竹凋落物添加对土壤蔗糖酶(A)和脲酶(B)活性的影响

Fig. 5 Effects of bamboo biochar and bamboo litter addition on activities of soil sucrase (A) and soil urease (B)

2.6 毛竹林土壤理化性质和酶活性的相关性

相关分析表明(表 1), 土壤 pH 与土壤 TP、AP 和 NO_3^- -N 含量呈显著或极显著正相关关系, 与土壤脲酶活性呈极显著负相关关系, 与蔗糖酶活性呈显著负相关关系; 土壤 TN 与土壤 NH_4^+ -N 和 DN 含量呈显著正相关关系; 土壤 TP 与 NH_4^+ -N 含量呈显著负相关关系; 土壤 AP 与 MBN 含量呈显著正相关关系; 土壤 NH_4^+ -N 与 NO_3^- -N、DOC 和 DN 含量呈显著或极显著正相关关系, 与蔗糖酶活性呈显著负相关关系; 土壤 NO_3^- -N 与 DOC 和 DN 含量呈极显著正相关关系, 与土壤脲酶和蔗糖酶活性呈极显著负相关关系; 土壤 DOC 和 DN 含量与土壤脲酶和蔗糖酶活性均呈极显著负相关关系; 土壤 MBC 与 MBN 含量呈极显著正相关关系; 土壤脲酶与蔗糖酶活性呈极显著正相关关系。

3 讨论

3.1 竹生物质炭和竹凋落物添加对毛竹林土壤营养元素的影响

土壤 pH 对土壤养分存在形态和有效性、土壤结构、微生物活动以及植物生长发育起着十分重要的作用。本研究中, 竹生物质炭和竹凋落物添加后土壤 pH 均显著提高, 且随着添加量的增加而增加(图 1)。这可能是由于生物质炭中含有的无机组分以及生物质炭表面丰富的碱性基团能中和土壤酸度所致^[16-18]。而王越等^[19]研究也发现毛竹和阔叶林凋落物添加显著提高了土壤 pH, 凋落物能够缓解土壤酸化可能是由于凋落物中含有一定的盐基离子, 有利于中和土壤酸度。

表 1 毛竹林土壤理化性质和酶活性之间的 Pearson 相关性系数
Table 1 Pearson correlation coefficients of soil physicochemical properties and enzyme activities

	pH	TC	TN	TP	AP	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	DOC	DN	MBC	MBN	脲酶	蔗糖酶
pH	1.00												
TC	-0.07	1.00											
TN	-0.03	-0.08	1.00										
TP	0.55*	-0.35	-0.27	1.00									
AP	0.82**	-0.05	-0.10	0.35	1.00								
NH_4^+ -N	-0.23	-0.21	0.63*	-0.52*	0.38	1.00							
NO_3^- -N	0.64*	0.21	0.38	0.15	0.28	0.53*	1.00						
DOC	0.17	-0.09	0.50	-0.12	-0.10	0.76**	0.79**	1.00					
DN	0.04	-0.27	0.69*	-0.28	-0.20	0.92**	0.70**	0.86**	1.00				
MBC	0.23	-0.25	0.16	0.12	0.49	-0.28	-0.24	-0.43	-0.14	1.00			
MBN	0.46	-0.16	0.19	0.32	0.62*	-0.34	-0.04	-0.30	-0.16	0.89**	1.00		
脲酶	-0.64**	0.27	-0.51	-0.14	-0.44	-0.49	-0.88**	-0.68**	-0.71**	0.00	-0.17	1.00	
蔗糖酶	-0.60*	0.25	-0.44	-0.24	-0.30	-0.52*	-0.91**	-0.76**	-0.70**	0.16	-0.05	0.93**	1.00

注: *和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上显著和极显著相关。

碳元素是土壤中重要的大量元素,对土壤中微生物活动和酶活性至关重要。本研究发现,高添加量竹生物质炭能显著提高土壤 TC 含量(图 2A),这主要是因为生物质炭是富碳物质,进入土壤后能提高土壤中有机碳库,从而增加土壤 TC 含量^[20]。本研究还发现,培养 60 d 后竹生物质炭添加处理土壤 DOC 和 MBC 含量与对照无显著差异(图 4A 和图 4C),而 Dempster 等^[21]的研究结果表明,在砂质土壤中添加桉树生物质炭显著降低了土壤 MBC 含量,本研究结果与该结果不一致可能是由于生物质炭的类型、土壤类型以及试验方法不同导致的^[22]。本研究中,竹凋落物添加 60 d 后土壤 DOC 含量显著提高,而 MBC 含量变化不大,这可能是因为培养时间较短,凋落物分解程度不高,从而对土壤微生物的影响较小。

氮元素是植物生长发育过程中不可缺少的元素之一,土壤中氮有效性的高低往往决定着土壤肥力的大小。本研究中,竹生物质炭和竹凋落物添加 60 d 后土壤 TN 含量没有显著改变(图 2B),而雷海迪^[8]等在研究杉木凋落物及其生物质炭对土壤微生物群落结构的影响中发现,生物质炭和凋落物添加均显著提高了土壤 TN 含量,不同的研究结果可能与添加的生物质炭和凋落物含氮量高低以及培养时间长短有关。本研究发现,竹生物质炭和竹凋落物添加降低了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,提高了土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量(图 3A 和 3B),这与胡华英等^[7]研究结果一致,他们发现土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量随生物质炭施用量的增加而显著降低,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈相反的趋势,表明生物质炭和凋落物能够显著提高土壤硝化速率,促进土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化,并且生物质炭表面的官能团带负电,可以通过静电作用吸附土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,而对土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附作用相对较弱^[23]。

磷元素对植物生长有着重要作用,而土壤中的磷主要以有机磷存在,必须转化为有效磷才能被植物吸收利用。本研究中,竹生物质炭和竹凋落物添加后土壤 TP 和 AP 含量均显著提高(图 2C 和 3C)。张朴等^[24]研究表明,施加入到土壤中的水稻秸秆生物质炭抑制了土壤对磷的吸附,且随着施用量的增加抑制作用更明显。同时生物质炭本身含有一定的磷元素,随着生物质炭添加输入到土壤中的磷相应增加^[25]。凋落物中的磷元素,可通过矿化作用在土壤中分解释放^[26],从而增加土壤 TP 和 AP 的含量。

3.2 竹生物质炭和竹凋落物添加对毛竹林土壤酶活性的影响

土壤酶是植物根系、微生物以及动植物残体腐解

等产生的一类能够参与有机质分解和养分循环等过程的生物催化剂,其活性可以反映土壤中生物化学反应的活跃程度、微生物的活性以及养分循环的状况,因此土壤酶是土壤质量的重要指标^[27]。土壤营养元素可通过影响微生物的生长而间接作用于土壤酶,因此土壤环境因子和土壤酶活性之间存在着不同程度的相关性^[28]。本研究的相关性分析(表 1)发现,土壤 pH、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC 和 DN 与土壤脲酶活性呈极显著负相关关系,而土壤 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC 和 DN 与土壤蔗糖酶活性呈显著负相关关系,表明土壤酸碱度以及碳和氮的有效性是调控毛竹林土壤蔗糖酶和脲酶活性的主要因素。

蔗糖酶调控土壤中碳元素的转化和积累,它的活性与土壤质量和碳汇关系非常紧密。本研究表明,竹生物质炭和竹凋落物添加均显著抑制了毛竹林土壤蔗糖酶活性,竹凋落物的抑制作用更显著,随着添加量的增加抑制作用也随之增强(图 5A)。Chen 等^[29]通过室内培养试验发现,生物质炭添加降低了土壤中与碳循环相关的酶活性,并且随着添加量的增加土壤蔗糖酶活性降低,与本研究结果基本一致。而王国兵等^[30]在研究凋落物对杨树人工林土壤酶活性的影响中发现,凋落物混施比表施更能促进土壤蔗糖酶活性,王俊龙等^[31]研究也发现凋落物提高了土壤蔗糖酶活性。不同的研究结果可能是由于凋落物不同导致土壤微生物量和区系组成以及代谢过程不同,从而使得土壤酶活性存在差异。但刑学霞等^[32]研究发现,凋落物添加降低了土壤蔗糖酶活性,与本研究结果相似,这可能是由于凋落物添加的激发效应增加了土壤微生物数量,加速了有机质矿化,提高了土壤碳的有效性和土壤微生物对碳的利用,从而限制了碳循环相关的酶活性。

脲酶是一种参与土壤氮循环的酶,其活性往往与土壤肥力和氮的有效性密切相关。本研究表明,竹生物质炭和竹凋落物添加显著抑制了毛竹林土壤脲酶活性(图 5B),并且凋落物的抑制作用更显著,随着添加量的增加抑制作用也随之增强。Huang 等^[33]研究也发现,生物质炭添加后土壤脲酶活性显著降低。然而也有结果表明,土壤脲酶活性随着生物质炭的输入而提高,如蒋容等^[34]在增温条件下施用生物质炭显著提高了土壤脲酶活性,且随着生物质炭施用量的增加而增加。不同的研究结果可能与土壤类型、生物质炭的种类和用量以及气候因素的差异有关^[35]。胡亚林等^[36]研究发现杉木桉木混合凋落物显著提高了土壤脲酶活性,陈晓丽等^[37]研究表明在自然条件下土

壤脲酶活性随着凋落物中针叶比例的升高而降低,本研究发现竹凋落物添加显著降低了毛竹林土壤脲酶活性,不同的研究结果表明凋落物种类不同,土壤脲酶活性存在较大差异。

4 结论

竹生物质炭和竹凋落物两种不同类型的外源碳添加对毛竹林土壤基本性质和酶活性的影响存在差异。与竹凋落物相比,竹生物质炭更好地提高了毛竹林土壤 pH、TP 和 AP 含量、脲酶和蔗糖酶活性,且高添加量对土壤 pH、TP 和 AP 含量的提高作用更明显,表明竹生物质炭可在一定程度上缓解毛竹林土壤酸化,并且增加土壤磷的有效性,对竹林生态系统磷缺乏状况的改善具有积极作用。与竹生物质炭相比,竹凋落物显著提高了毛竹林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC 和 DN 含量,表明竹凋落物可促进毛竹林土壤氮素累积,提升土壤营养元素含量,改善土壤质量。相关性分析表明,土壤 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、DOC 和 DN 是影响毛竹林土壤蔗糖酶和脲酶活性的主要因素。

参考文献:

- [1] 李玉敏,冯鹏飞. 基于第九次全国森林资源清查的中国竹资源分析[J]. 世界竹藤通讯, 2019, 17(6): 45–48.
- [2] Song Y Z, Li Y F, Cai Y J, et al. Biochar decreases soil N_2O emissions in Moso bamboo plantations through decreasing labile N concentrations, N-cycling enzyme activities and nitrification/denitrification rates[J]. *Geoderma*, 2019, 348: 135–145.
- [3] Jung K W, Jeong T U, Hwang M J, et al. Phosphate adsorption ability of biochar/Mg-Al assembled nanocomposites prepared by aluminum-electrode based electro-assisted modification method with MgCl_2 as electrolyte[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 198: 603–610.
- [4] Li H B, Dong X L, da Silva E B, et al. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications[J]. *Chemosphere*, 2017, 178: 466–478.
- [5] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota - A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 1812–1836.
- [6] Zhang Z K, Zhu Z Y, Shen B X, et al. Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review[J]. *Energy*, 2019, 171: 581–598.
- [7] 胡华英,殷丹阳,曹升,等. 生物炭对杉木人工林土壤养分、酶活性及细菌性质的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4138–4148.
- [8] 雷海迪,尹云锋,刘岩,等. 杉木凋落物及其生物炭对土壤微生物群落结构的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(3): 790–799.
- [9] 杨彩迪,宗玉统,卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1914–1920.
- [10] 卢晋晶,郜春花,李建华,等. 秸秆生物炭对黄土区农田土壤养分和玉米生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(33): 92–99.
- [11] Mitchell P J, Simpson A J, Soong R, et al. Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 244–254.
- [12] 张晗芝,黄云,刘钢,等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11): 2713–2717.
- [13] 王妙芬,梁美美,杨庆,等. 秸秆及其生物炭添加对土壤酶活性的影响[J]. *福建农业科技*, 2021, 52(7): 10–17.
- [14] Sun H, Wang Q X, Liu N, et al. Effects of different leaf litters on the physicochemical properties and bacterial communities in *Panax ginseng*-growing soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111: 17–24.
- [15] 雍太文,杨文钰,向达兵,等. 不同种植模式对土壤氮素转化及酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3227–3235.
- [16] Lu H L, Li K W, Nkoh J N, et al. Effects of the increases in soil pH and pH buffering capacity induced by crop residue biochars on available Cd contents in acidic paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2022, 301: 134674.
- [17] 王瑞峰,赵立欣,沈玉君,等. 生物炭制备及其对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(2): 126–133.
- [18] Mehmood K, Li J Y, Jiang J, et al. Effect of low energy-consuming biochars in combination with nitrate fertilizer on soil acidity amelioration and maize growth[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17: 790–799.
- [19] 王越,罗雪媛,李永春,等. 毛竹与阔叶林凋落物添加对土壤细菌群落的影响[J]. *农业生物技术学报*, 2020, 28(6): 951–962.
- [20] 孙娇,周涛,郭鑫年,等. 添加秸秆及生物炭对风沙土有机碳及其活性组分的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 802–808.
- [21] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralization with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354: 311–324.
- [22] Liu S W, Zhang Y J, Zong Y J, et al. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: A meta-analysis[J]. *GCB Bioenergy*, 2016, 8: 392–406.
- [23] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of*

- Environmental Quality, 2010, 39: 1224–1235.
- [24] 张朴, 李仁英, 吴洪生, 等. 水稻秸秆生物质炭对土壤磷吸附影响的研究[J]. 土壤, 2018, 50(2): 264–269.
- [25] Hossain M K, Strezov V, Chan K Y, et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92: 223–228.
- [26] 邬石根. 秸秆还田对酸性水稻土培肥增产、土壤微生物生物量及酶活性的影响研究[J]. 土壤与作物, 2017, 6(4): 270–276.
- [27] 李博文, 刘洋, 李宗霖, 等. 生物炭对土壤酶活性影响的机理研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(7): 163–168.
- [28] 姚志霞, 周怀平, 解文艳, 等. 黄土旱塬 24a 不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2746–2755.
- [29] Chen J H, Li S H, Liang C F, et al. Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: Effect of particle size and addition rate[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 24–33.
- [30] 王国兵, 徐瑾, 徐晓, 等. 蚯蚓与凋落物对杨树人工林土壤酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 8–14.
- [31] 王俊龙, 王丹, 俞飞, 等. 模拟酸雨与凋落物对柳杉幼苗根际土壤酶活性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(3): 373–379.
- [32] 邢学霞, 付迪, 黎建强, 等. 凋落物输入变化对云南松林土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 62–70.
- [33] Huang M, Zhou X F, Chen J N, et al. Interaction of changes in pH and urease activity induced by biochar addition affects ammonia volatilization on an acid paddy soil following application of urea[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(1): 107–112.
- [34] 蒋容, 余一, 唐玉蓉, 等. 增温和生物炭添加对农田土壤酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(1): 72–77, 85.
- [35] Zhang Y, Tan Q L, Hu C X, et al. Differences in responses of soil microbial properties and trifoliate orange seedling to biochar derived from three feedstocks[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(3): 541–551.
- [36] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 等. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2662–2668.
- [37] 陈晓丽, 王根绪, 杨燕, 等. 山地森林表层土壤酶活性对短期增温及凋落物分解的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7071–7079.