

DOI: 10.20103/j.stxb.202303240570

毛忆莲, 葛晓改, 周军刚, 周本智, 高歌, 徐耀文, 邱磊. 生物质炭配施氮肥对雷竹林土壤微生物碳氮利用效率的影响. 生态学报, 2024, 44(24): 11220-11228.

Mao Y L, Ge X G, Zhou J G, Zhou B Z, Gao G, Xu Y W, Qiu L. The effect of biochar with nitrogen fertilizer on soil microbial carbon and nitrogen use efficiencies of *Phyllostachys violascens*. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11220-11228.

生物质炭配施氮肥对雷竹林土壤微生物碳氮利用效率的影响

毛忆莲^{1,2}, 葛晓改^{1,*}, 周军刚³, 周本智¹, 高 歌¹, 徐耀文¹, 邱 磊⁴

1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

3 杭州市富阳区农业农村局, 杭州 311400

4 杭州市建德新安江林场, 杭州 311600

摘要:为进一步促进雷竹林固碳培肥, 于 2019 年通过野外试验研究生物质炭配施氮肥对土壤养分含量、碳氮转化酶活性和微生物碳氮利用效率的影响。试验设置 3 个生物质炭梯度 B0、B1、B2, 分别为 0、10、30 t/hm², 3 个氮肥梯度 N0、N1、N2, 分别为 0、0.5、1 t/hm², 共计 9 种处理 (B0N0、B0N1、B0N2、B1N0、B1N1、B1N2、B2N0、B2N1、B2N2)。结果表明: 生物质炭和氮肥配施明显提升土壤有机碳、总氮、铵态氮含量, 除土壤速效磷外, 总体上 B2N1 和 B1N1 处理下土壤有机碳和土壤养分含量最高。微生物生物量碳、氮含量和 β -葡萄糖苷酶活性在 B2N1 处理达到最高, 较 B0N0 处理显著增加 65.1%、293.1% 和 59.6%。微生物生物量磷含量、N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性在 B2N2 处理最高, 较 B0N0 处理显著增加 193.3%、119.6% 和 64.0%。土壤微生物碳利用效率 (CUE) 和土壤总氮、有机碳、硝态氮、铵态氮、速效磷及微生物生物量碳氮显著正相关 ($P < 0.01$), 其中土壤有机碳、微生物生物量碳、硝态氮对 CUE 的解释率最高。土壤微生物氮利用效率 (NUE) 和土壤微生物生物量氮显著负相关 ($P < 0.01$), 其中土壤微生物生物量氮、有机碳和铵态氮对 NUE 的解释率最高。总体上, 生物质炭配施氮肥下 CUE 增加、NUE 降低, 说明雷竹林土壤微生物对碳的固存增加, 对氮的矿化增强。因此, 配施生物质炭可作为固碳培肥和地力提升的潜在措施, 但生物质炭与氮肥配施对土壤微生物群落的长期影响尚不明确, 仍需进一步研究。

关键词: 生物质炭; 土壤微生物生物量碳氮磷; 土壤酶活性; 土壤碳氮利用效率

The effect of biochar with nitrogen fertilizer on soil microbial carbon and nitrogen use efficiencies of *Phyllostachys violascens*

MAO Yilian^{1,2}, GE Xiaogai^{1,*}, ZHOU Jungang³, ZHOU Benzhi¹, GAO Ge¹, XU Yaowen¹, QIU Lei⁴

1 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

2 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 Hangzhou Fuyang District Agriculture and Rural Bureau, Hangzhou 311400, China

4 Xinjiang Forest Center of Jiande, Hangzhou 311600, China

Abstract: In order to further promote carbon sequestration and fertilization in *Phyllostachys violascens* forest, the effects of biochar with nitrogen fertilizer on soil nutrient content, carbon and nitrogen transformation-related enzyme activities, and microbial carbon and nitrogen utilization efficiencies were investigated through a field experiment in 2019. The experiment was set up with three gradients B0, B1, B2 at 0, 10, 30 t/hm², respectively, and three nitrogen fertiliser gradients N0,

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目 (LGN21C030002); 国家自然科学基金 (31600492, 31670607)

收稿日期: 2023-03-24; **网络出版日期:** 2024-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gexiaogai2006@163.com

N1, N2 at 0, 0.5, 1 t/hm², respectively, for a total of nine treatments (B0N0, B0N1, B0N2, B1N0, B1N1, B1N2, B2N0, B2N1, B2N2). The results showed that biochar and nitrogen fertilizers significantly enhanced soil organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen, and available phosphorus contents, and there was also a significant interaction effect between the two (except for soil available phosphorus), and soil organic carbon and soil nutrient contents were the highest under the B2N1 and B1N1 treatments in general. Microbial biomass carbon, nitrogen content and β -glucosidase activity were highest in the B2N1 treatment, with a significant increase by 65.1%, 293.1% and 59.6% over the B0N0 treatment. Microbial phosphorus content, N-acetyl amino glucosidase and leucine aminopeptidase activities were highest in the B2N2 treatment with a significant increase by 193.3%, 119.6% and 64.0% over the B0N0 treatment. Soil microbial carbon use efficiency (CUE) was significantly positively correlated with soil total nitrogen, soil organic carbon, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, available phosphorus and microbial carbon and nitrogen ($P < 0.01$). Soil organic carbon, microbial carbon and nitrate nitrogen had the highest explanatory rate for CUE. Soil microbial nitrogen use efficiency (NUE) was significantly negatively correlated with soil microbial biomass nitrogen ($P < 0.01$), and soil microbial biomass nitrogen, soil organic carbon and ammonium nitrogen had the highest explanatory rate for NUE. Overall, the increase of CUE and the decrease of NUE under biochar with N fertilizer indicated that soil microbial sequestration of carbon increased mineralization of nitrogen enhanced in *Phyllostachys violascens* forest. Therefore, the application of biochar can be a potential measure for carbon sequestration and fertilization and land enhancement, but the long-term effects of biochar with N fertilizer on soil microbial communities are not clear, and the further research is still needed.

Key Words: biochar; soil microbial carbon and nitrogen and phosphorus; soil enzyme activity; soil microbial carbon and nitrogen use efficiency

生物质炭作为新兴的农林废弃物资源化利用的方式之一,施入土壤可培肥固碳、提高土壤质量^[1]。生物质炭呈碱性、富含惰性碳,可改良酸性土壤,增加土壤有机质和氮磷养分的生物有效性^[2-3]。疏松多孔的结构和巨大的比表面积使生物质炭能有效提高土壤可溶性有机碳的固持能力,降低有机碳矿化速率,有助于土壤固碳减排^[4]。然而,生物质炭中有效氮含量低,常与氮肥配施,提高土壤有效氮含量及氮素利用效率,起到“减肥增效”的作用^[5]。Zhang 等^[6]开展生物炭配施氮肥对香榧(*Torreya grandis*)林土壤肥力和坚果品质的短期影响研究表明,单独施用氮肥 7 个月后,土壤 pH 值和速效养分含量下降;而配施生物炭能缓解土壤酸化现象,并提高土壤速效养分含量。Hossain 等^[7]研究表明土壤中生物质炭添加能改变养分迁移过程,包括土壤氮转化、流失和氮磷淋溶等,从而提高土壤养分利用效率。

土壤微生物碳利用效率(Microbial carbon use efficiency, CUE)和氮利用效率(Microbial nitrogen use efficiency, NUE)是指微生物将吸收的碳或氮转化为自身生物量碳、氮的效率,即用于生长的碳或氮相对于消耗的碳氮含量的比值^[8]。CUE 和 NUE 与土壤养分的固持、周转、矿化等过程密切相关,影响微生物生长及土壤碳库容量^[9-10]。研究表明土壤碳氮转化酶活性及其比值指示 CUE 和 NUE 变化^[11]。 β -葡萄糖苷酶与土壤微生物碳分解和利用相关,影响土壤有机质降解,从而影响 CUE^[12]。N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶作为土壤微生物氮获取相关酶,其活性是土壤微生物氮素获取和分配的重要指标^[13]。Tao 等^[14]发现高 CUE 可促进微生物生物量的产生,增强胞外酶的产生,并可能随着时间的推移最终引发有机碳损失(如通过激发效应)。因此,不同酶活性及其比值通常与土壤养分含量联系紧密,可用于评价微生物养分限制状况和资源需求^[15]。

雷竹(*Phyllostachys violascens*)是我国优良的笋用竹种,在浙江省广泛分布,因其营养丰富而备受关注^[16]。其抽芽至发笋到成竹对土壤养分消耗极大,导致土壤肥力降低,因此,产笋期往往需要补充养分^[17]。然而,在雷竹笋生产中竹林地因肥料投入量过大(超过 3 t/hm² a⁻¹),可能造成土壤氮磷养分等大量富余,增加环境污染风险,不利于雷竹林的长期可持续经营^[18]。通过资源化处理,将农林废弃物加工成生物质炭并适量施用于

雷竹林土壤,既经济又低碳,是一种有效处置农林废弃物的双赢策略^[19]。目前,生物质炭与氮肥配施虽在改良土壤养分和促进作物生长等方面的研究取得了一系列成果,但不同配施浓度对土壤碳氮相关酶活性及微生物 CUE 和 NUE 的影响机制的研究尚为匮乏。因此,本研究通过不同配施浓度生物质炭和氮肥对土壤养分、土壤碳氮获取酶活性及微生物量等影响,阐明生物质炭与氮肥配施比例对雷竹林土壤微生物 CUE、NUE 的影响,评价生物质炭配施氮肥对雷竹林土壤肥力的作用,为亚热带笋用竹林栽培和经营提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于浙江省富阳区新登镇里官村(119°43'9"E, 29°2'23"N),该区域海拔 131 m,属于亚热带季风气候,四季分明,年均气温 16.0 °C,年均降雨量 1458.2 mm,主要集中在每年的 4 月至 9 月;土壤为红壤。雷竹为该区域主要笋用竹种,因其出笋早、产量高、笋味鲜美在当地被广泛种植。研究区域雷竹林平均立竹密度为 2500—3500 株/hm²。近年来,为提高雷竹笋产量和竹林经营效益,每年 11 月和 5 月实行季节性施肥和结构调控。

1.2 试验设计

选取 3 个立地和土壤状况相似的雷竹林,每个林分设置 9 个 10 m×10 m 的样方,用于生物质炭和氮肥配施试验。根据国内外试验研究^[20],设置 3 个生物质炭梯度 B0、B1、B2,分别为 0、10、30 t/hm²,3 个氮肥梯度 N0、N1、N2,分别为 0、0.5、1 t/hm²,设置 9 个处理,分别为 B0N1、B0N1、B0N2、B1N1、B1N1、B1N2、B2N1、B2N1、B2N2。样方间至少间隔 5 m,防止彼此干扰。生物质炭于 2019 年 11 月初一次性均匀撒施于地表,采用翻耕法,翻耕深度 10—15 cm,使其与土壤充分混合。供试生物质炭取自竹材,在 450 °C 下炭化所得,炭粒直径 1—2 mm。氮肥采用沟施法,分 2 次平均施入,第一次于 2019 年 10 月底至 11 月初施孕笋肥,与生物质炭一并施入,第二次于 2020 年 5 月底施行鞭肥。

1.3 样品采集

于 2021 年 5 月采集土壤样品,去除土壤表面凋落物后,采用五点取样法取 0—15 cm 土壤。采集的土壤样品立即带回实验室。过 2 mm 筛后分成两份:一份新鲜土壤置于 4 °C 冰箱中,用于测定土壤酶活性、微生物生物量碳氮磷;一份土壤自然风干后,用于测定土壤理化性质。

1.4 测定方法

土壤化学性质测定参照土壤农业化学分析方法^[21]。土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾氧化法测定。总氮(TN)用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定。土壤硝态氮(Nitrate)与铵态氮(Ammonium)用 2 mol/L KCl 溶液浸提,用流动分析仪(Skalar san++, 荷兰)测定。微生物生物量碳氮(MBC、MBN)用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定^[22]。MBC 的计算公式为: $MBC = \Delta E_c / K_c$, 其中, ΔE_c 是熏蒸与未熏蒸土壤有机碳含量的差值; $K_c = 0.45$, 是 MBC 的浸提系数。MBN 的计算公式为: $MBN = \Delta E_N / K_N$, 其中, ΔE_N 是熏蒸与未熏蒸土壤有机氮含量的差值; $K_N = 0.54$, 是 MBN 的浸提系数。用氯仿熏蒸-碳酸氢钠浸提法提取微生物生物量磷(MBP),用连续流动分析仪测定浸提液中的磷酸盐含量。土壤酶活性的测定参照 Saiya-Cork 等^[23]的荧光微孔板测试方法,测定一种碳循环酶:β-葡萄糖苷酶(BG);两种氮循环酶:N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)和亮氨酸氨基肽酶(LAP)。

1.5 数据处理

基于生态化学计量计算微生物碳和氮利用效率^[24]。具体方法如下:

$$CUE = CUE_{\max} [S_{C:N} / (S_{C:N} + K_N)]$$

$$S_{C:N} = (1/EEA_{C:N}) (B_{C:N} / L_{C:N})$$

其中, $S_{C:N}$ 表示酶活性分配可抵消现有可用资源元素组成与微生物生物量组成间的差异程度^[24]。半饱和常数 K_N 为 0.5。最大碳利用效率是指微生物生长所能利用碳元素的上限,根据热力学限制设置为 0.6。用 BG/(NAG+LAP) 计算 C/N 酶(即 $EEA_{C:N}$)活性的比值。 $L_{C:N}$ 是指不稳定有机物的碳氮比。

根据 Mooshammer 等^[25]的方法计算微生物氮利用效率(NUE)。具体方程如下:

$$\text{NUE} = \text{CUE} / (B_{\text{C:N}} : R_{\text{C:N}})$$

其中 $B_{\text{C:N}}$ 是指微生物生物量碳氮比, $R_{\text{C:N}}$ 是指土壤总形态碳氮元素的比值。

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)中的 Duncan 多重比较检验处理间的差异显著性,显著性水平设为 $P=0.05$ 。基于 Spearman 相关性分析,利用 mantel 检验探究雷竹林土壤理化性质和酶活性及微生物 CUE、NUE 的关系($P=0.05$)。采用随机森林模型确定生物质炭配施氮肥下影响微生物酶活性和 CUE、NUE 的关键化学性质。所有统计分析通过 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件完成,使用 Origin 9.3 和 R 4.1.1 软件完成绘图。

2 结果与分析

2.1 生物质炭配施氮肥对土壤有机碳和土壤养分的影响

生物质炭配施氮肥增加了雷竹林土壤有机碳和氮磷养分含量(图 1),双因素方差分析结果表明,施生物质炭显著影响土壤有机碳、总氮、总磷、铵态氮、硝态氮、速效磷含量变化($P<0.01$)(图 1);除土壤总磷、速效磷外,生物质炭与氮肥配施的交互作用显著影响其它化学性质($P<0.01$)。其中土壤有机碳、总氮、硝态氮、速

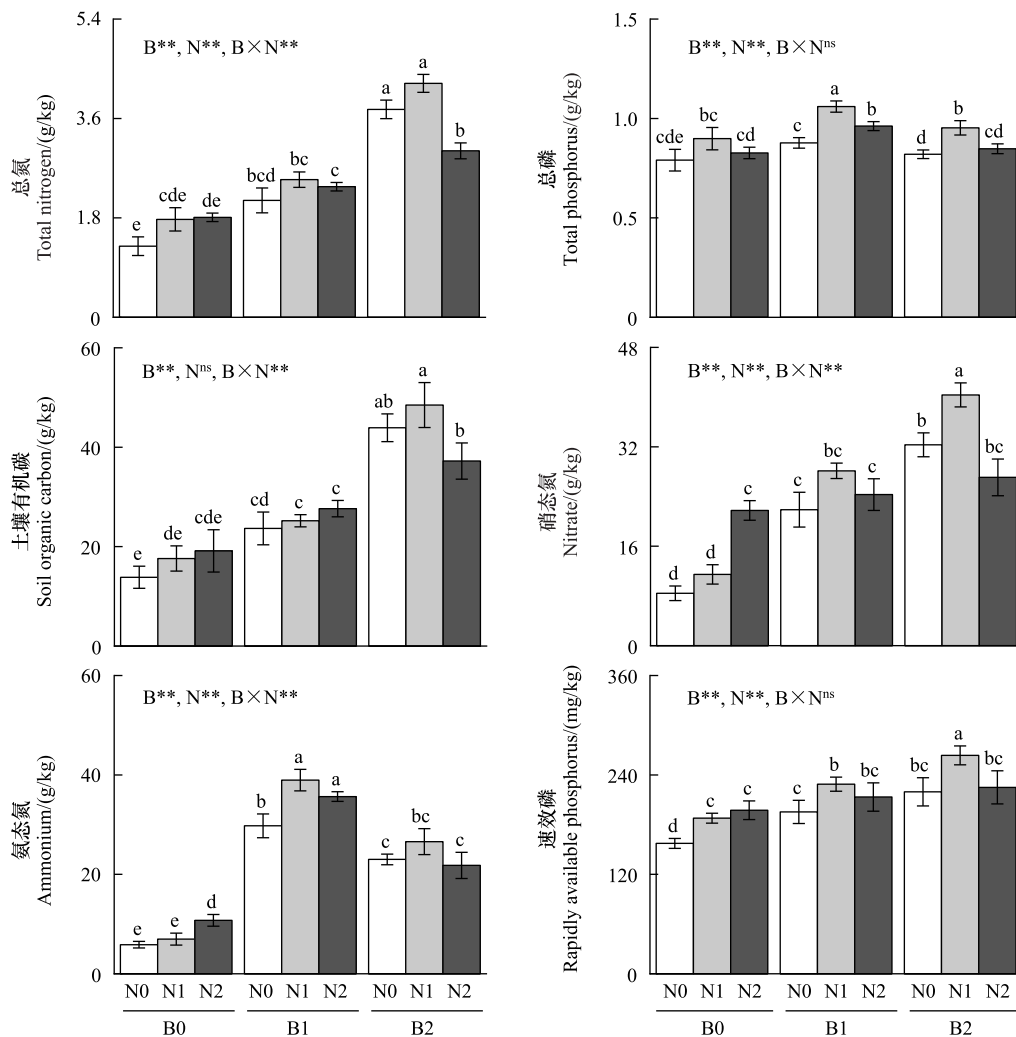


图 1 生物质炭配施氮肥对土壤养分的影响

Fig.1 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on soil nutrients

B0:0t/hm² 生物质炭;B1:10t/hm² 生物质炭;B2:30t/hm² 生物质炭;N0:0t/hm² 氮肥;N1:0.5t/hm² 氮肥;N2:1t/hm² 氮肥;小写字母表示不同处理差异显著($P<0.05$);***、** 分别表示 $P<0.001$ 、 $P<0.01$,ns 表示不显著

效磷在处理间呈“ $\nearrow$ ”形变化,在 B2N1 处理达到最高,相比 B0N0 增加 173.0%、191.5%、379.0%和 67.5%。土壤总磷和铵态氮在处理间呈“ $\wedge$ ”形变化,在 B1N1 处理达到最大,相比 B0N0 增加 34.1%和 566.7%。总体上, B2N1 和 B1N1 处理下土壤有机碳和氮磷养分含量最高。

2.2 生物质炭配施氮肥对土壤微生物量及酶活性的影响

生物质炭配施氮肥提高了雷竹林土壤微生物生物量碳氮磷含量及酶活性(图 2),双因素方差分析结果表明,配施生物质炭显著影响土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性含量变化($P<0.01$);生物质炭与氮肥配施的交互作用显著影响微生物生物量碳氮含量、亮氨酸氨基肽酶活性变化($P<0.05$)。微生物生物量碳氮含量在 B2N1 处理达到最大,较 B0N0 显著增加 65.1%和 293.1%($P<0.05$)。微生物量磷含量在 B2N2 处理达到最大,较 B0N0 显著增加 193.3%($P<0.05$)。 β -葡萄糖苷酶在 B2N1 处理下酶活性最高,较 B0N0 显著增加了 59.6%,且显著高于其它处理($P<0.05$)。N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶在 B2N2 处理,酶活性达到最高,较 B0N0 显著增加 119.6%和 64.0%,且显著高于其它处理($P<0.05$)。

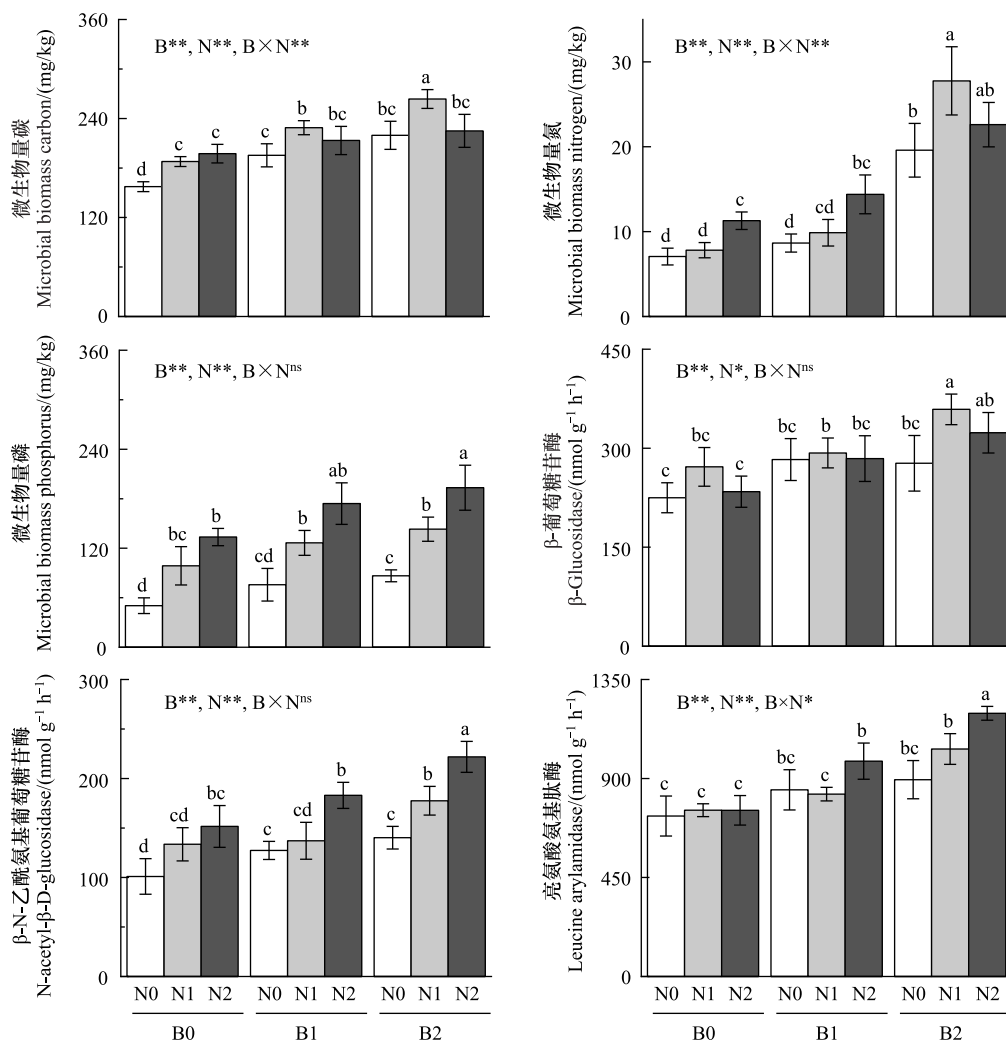


图 2 生物质炭配施氮肥对土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性的影响

Fig.2 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus and enzyme activities

2.3 生物质炭配施氮肥对土壤碳、氮利用效率的影响

生物质炭添加对 CUE、NUE 影响显著(图 3)($P<0.05$),双因素方差分析结果表明,施生物质炭显著影响 CUE、NUE 变化($P<0.01$)。CUE 呈“ $\wedge$ ”形变化,在 B1N1 处理达到最大,相比 B0N0 显著提升 7.0%($P<$

0.05), 而 NUE 呈“V”形变化, 在 B1N1 处理达到最低。

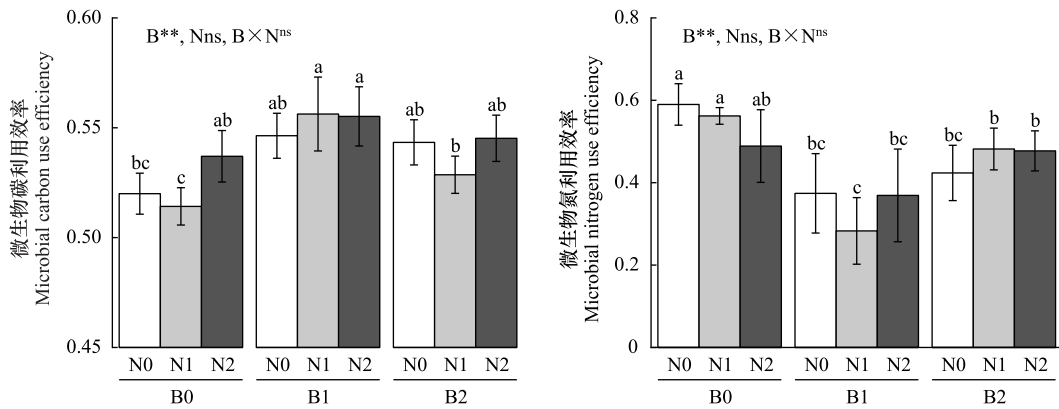


图 3 生物质炭配施氮肥对土壤微生物碳氮利用效率的影响

Fig.3 Effect of biochar with nitrogen fertilizer on soil microbial carbon and nitrogen use efficiency

2.4 土壤碳、氮利用效率与土壤因子的相关分析

Mantel 检验(图 4)和随机森林分析(图 5)如图所示,土壤有机碳、总氮、硝态氮、微生物生物量碳和三种碳氮循环酶活性均显著正相关($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。土壤微生物生物量氮和氮循环酶活性显著正相关,与 β -葡萄糖苷酶活性显著负相关($P<0.01$)。其中土壤有机碳、铵态氮和微生物生物量碳对 β -葡萄糖苷酶活性的解释率最高,土壤总磷、有机碳、硝态氮对 N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性之和的解释率最高。CUE 和土壤总氮、有机碳、硝态氮、铵态氮、速效磷及微生物生物量碳氮显著正相关($P<0.01$),其中土壤有机碳、微生物生物量碳、硝态氮对 CUE 的解释率最高;NUE 和土壤微生物生物量氮显著负相关($P<0.01$),其中土壤微生物生物量氮、有机碳和铵态氮对 NUE 的解释率最高。

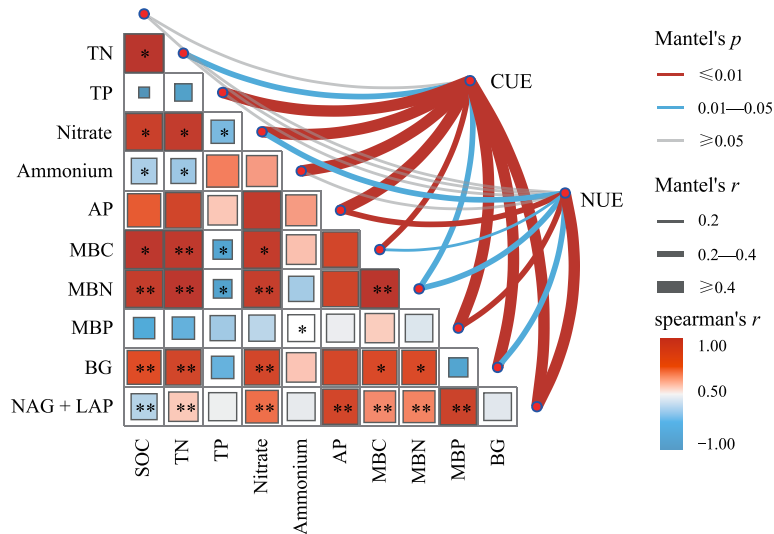


图 4 微生物碳氮利用效率和土壤养分及酶活性间的相关性分析和 Mantel 检验分析

Fig.4 Correlation analysis and mantel test analysis between microbial carbon and nitrogen utilization efficiency, soil nutrient and enzyme activities

TN: Total nitrogen 总氮; TP: Total phosphorus 总磷; AP: Rapidly available phosphorus 速效磷; MBC: Microbial biomass carbon 微生物量碳; MBN: Microbial biomass nitrogen 微生物量氮; MBP: Microbial biomass phosphorus 微生物量磷; BG: β -Glucosidase β -葡萄糖苷酶; NAG: N-acetyl- β -D-glucosidase N-乙酰氨基葡萄糖苷酶; LAP: Leucine arylamidase 亮氨酸氨基肽酶

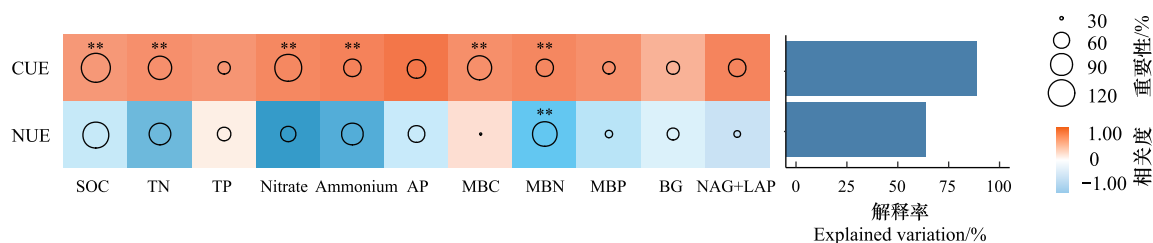


图5 土壤微生物 CUE、NUE 与土壤养分及酶活性的相关性随机森林分析

Fig.5 Correlation and random forest analysis of soil microbial CUE and NUE with soil nutrient and enzyme activities

3 讨论

3.1 生物质炭配施氮肥对土壤肥力及碳氮循环酶活性的影响

生物质炭和氮肥添加显著提升土壤养分含量(土壤总磷、速效磷除外)。现有研究表明,生物质炭与化肥结合可改良土壤质量,增加土壤团聚性,还能提高土壤 pH 值和有机质含量,增加土壤养分含量,促进微生物活动^[26]。然而,不同生物质炭和氮肥浓度对土壤养分的影响存在差异。与 B0N0 相比,土壤总氮在 B2N1 达到最大,可能是高生物炭混施,改善土壤微团聚体、提升大中团聚体中氮含量,维持了土壤氮供给^[27]。铵态氮在 B1N1 达到最大,可能是生物质炭释放硝化抑制剂,如多酚、单宁等,增加生物质炭表面对铵根离子的静电吸附作用,减少铵态氮的释放,减少氮素流失^[28]。土壤硝态氮在 B2N1 达到最大,可能是高添加量的生物质炭延缓了硝态氮的淋失^[29],在土壤硝化-反硝化反应过程中,硝酸根离子能够吸附于生物质炭阴离子交换位点,从而降低脱氮效率,提高硝态氮含量,减少氮的淋溶^[30]。土壤有机碳、速效磷在 B2N1 达到最大,土壤有机碳含量在施用生物质炭后加倍,这是因为相比氮肥,生物质炭含有丰富的惰性碳和磷等养分含量,经分解后可提高土壤有机碳^[31]和速效磷含量^[32],此外,肥沃土壤中,革兰氏阴性菌在微生物群落中占主导地位,充足的养分刺激了微生物生物量周转,伴随微生物残体的产生和积累,促进了土壤有机碳积累^[33]。

土壤微生物生物量碳氮磷与生物质炭施用量成正比(微生物量磷除外),说明生物质炭添加改变了土壤理化性质,改善了微生物生长环境及生长状况^[26]。生物质炭可以吸附土壤养分再缓慢释放于土壤中,持续为微生物生长繁殖提供养分^[34]。此外,生物质炭还能吸附大量不利于微生物生长的毒性物质,净化微生物生存环境,从而提高微生物生物量碳氮磷含量^[35]。土壤有机碳、总氮、硝态氮与微生物生物量碳氮含量显著正相关,也正说明土壤养分与微生物生长繁殖联系紧密^[36]。另外,生物质炭添加促进微生物生长繁殖,也间接影响了土壤酶活性。添加生物质炭显著增加 β -葡萄糖苷酶、N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性,与前人研究结果一致^[37]。一方面,生物质炭因其特殊的结构,能吸附酶及其底物,促进酶促反应进行^[38]。另一方面,生物质炭能有效吸附对水解酶活性具有抑制作用的酚类物质,使水解酶活性增强^[39]。随机森林分析表明, β -葡萄糖苷酶活性主要受土壤有机碳和微生物生物量碳影响, β -葡萄糖苷酶是降解纤维素的关键酶之一,施用生物质炭增加了土壤易矿化碳组分,促进土壤活性碳库的矿化,为微生物活动提供底物,促进微生物生长,从而提高了土壤质量^[40]。N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和亮氨酸氨基肽酶活性主要受土壤有机碳、总氮、硝态氮、速效磷的影响,这进一步说明生物质炭配施氮肥可通过增加土壤速效养分含量,刺激微生物生长繁殖,酶活性的升高可能与土壤微生物的数量与活性有关^[41]。

3.2 生物质炭配施氮肥对土壤微生物碳氮利用效率的影响

生物质炭改变土壤碳氮有效性,影响土壤微生物 CUE、NUE^[42]。土壤微生物 CUE 对土壤长期碳固存和土壤肥力的提升具有重要意义。生物质炭施加对 CUE 影响显著,低浓度生物质炭配施氮肥使 CUE 显著增加,可能是微生物群落受碳限制,从而分泌更多胞外酶,加速有机碳的分解、吸收和利用,使 CUE 增加,有利于碳固存。但高浓度生物质炭配施氮肥使 CUE 下降,可能是过量氮肥导致土壤酸化,迫使微生物将碳更多地分

配到能源生产,而不是繁殖生长中^[43],而生物质炭呈碱性,与氮肥配施有助于提高土壤 pH 值,在一定程度上缓解氮添加下碳或其它元素的限制^[44]。Mantel 检验表明,土壤有机碳、总氮、硝态氮、铵态氮和速效磷直接解释了 CUE,随机森林分析表明,CUE 主要受土壤有机碳、微生物生物量碳和总氮影响,进一步表明 CUE 受土壤养分有效性调控,还受微生物因素的影响,但生物质炭配施氮肥对土壤微生物的影响仍存在不确定性,有必要进一步开展相关研究。

土壤微生物 NUE 的调控是微生物群落应对资源不平衡时的一种重要策略,独立于 CUE 调控,对陆地生态系统氮循环具有重要影响^[25]。本研究中 NUE 的变化趋势与 CUE 相反,随生物质炭和氮肥浓度增加,NUE 逐渐降低。Li 等^[45]研究表明 NUE 随氮添加的增加而降低,过量的氮通过氮矿化释放,与本研究结果一致。相关性分析和 Mantel 检验表明,NUE 与微生物生物量碳氮磷及氮磷相关酶活性负相关,土壤微生物生物量氮和碳氮相关酶活性对 NUE 的解释率较高,说明微生物在酶的生产方面的投资增加,牺牲了微生物的生长^[46]。此外,随机森林分析表明土壤有机碳、硝态氮和铵态氮对 NUE 有直接影响,碳作为微生物生长和代谢的能量来源,在氮添加后微生物可能从氮限制变为碳限制,增加氮的矿化,增大土壤中无机氮含量,使 CUE 增加,而 NUE 保持不变或减少,这是资源失衡下微生物群落的应对之策^[25]。因研究区设立时间有限,生物质炭配施氮肥对土壤微生物群落的长期影响尚不明确,生物质炭的异质性特性及其在土壤中变化的不确定性,仍需进行长期监测,并结合微观机制研究阐明。

4 结论

由于生物质炭独特的结构和性质,施用生物质炭对土壤养分和微生物均有深刻的影响,生物质炭配施氮肥显著提高雷竹林土壤养分含量,二者交互效应显著,生物质炭配施氮肥对土壤养分含量的促进效应比单施氮肥更显著。总体上,生物质炭配施氮肥下 CUE 增加、NUE 降低,雷竹林土壤微生物对碳的固存增加,对氮的矿化增强,配施生物质炭可作为固碳培肥和地力提升的潜在措施。总而言之,本文探讨了生物质炭配施氮肥下,土壤养分对微生物资源获取和碳氮利用效率的影响,为生物质炭配施后土壤养分、酶活性及微生物碳氮循环间的联系提供科学参考。

参考文献 (References):

- [1] Li H B, Dong X L, Silva E B, Oliveira L M, Chen Y, Ma L Q. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 2017, 178: 466-478.
- [2] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, Masiello, C A, Hockaday W C, Crowley, D. Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812.
- [3] 胡华英,殷丹阳,曹升,胡华英,殷丹阳,曹升,张虹,周垂帆,何宗明. 生物炭对杉木人工林土壤养分、酶活性及细菌性质的影响. *生态学报*, 2019, 39(11): 4138-4148.
- [4] 张影,刘星,任秀娟,李东方,吴大付,陈锡岭. 秸秆及其生物炭对土壤碳库管理指数及有机碳矿化的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 153-159.
- [5] Backer R G M, Saeed W, Seguin P, Smith D L. Root traits and nitrogen fertilizer recovery efficiency of corn grown in biochar-amended soil under greenhouse conditions. *Plant and Soil*, 2017, 415: 1-13.
- [6] Zhang R, Zhang Y L, Song L L, Song X, Hanninen H, Wu J. Biochar enhances nut quality of *Torreya grandis* and soil fertility under simulated nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management*, 2017, 391: 321-329.
- [7] Hossain M Z, Bahar M M, Sarkar B, Donne S W, Ok Y S, Palansooriya K N, Kirkham M B, Chowdhury S, Bola N. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 2020, 2: 42.
- [8] Crowther T W, Hoogen J, Wan J, Mayes M A, Keiser A D, Mo L, Averill C, Maynard D S. The Global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science*, 2019, 365: 6455.
- [9] 陈智,于贵瑞. 土壤微生物碳素利用效率研究进展. *生态学报*, 2020, 40(3): 756-767.
- [10] 孙雪琦,戴辉,曾泉鑫,周嘉聪,彭园珍. 氮添加下土壤微生物群落结构影响微生物碳利用效率. *生态学报*, 2024, (4): 1-10.
- [11] Sun Y, Wang C T, Ruan H H. Increased microbial carbon and nitrogen use efficiencies under drought stress in a poplar plantation. *Forest Ecology and Management*, 2022, 519: 120341.
- [12] Zhu E, Cao Z, Jia J, Liu C, Feng X. Inactive and inefficient: Warming and drought effect on microbial carbon processing in alpine grassland at depth. *Global Change Biology*, 2021, 27: 2241-2253.
- [13] Chen H, Li D J, Zhao J, Xiao K, Wang K. Effects of nitrogen addition on activities of soil nitrogen acquisition enzymes: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 252: 126-131.
- [14] Tao F, Huang Y, Hungate B A, Manzoni S, Frey S D, Schmidt M W. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*, 2023: 618, 981-985.

- [15] Li J, Sang C P, Yang J Y, Qu L, Xia Z, Sun H, Jiang P, Wang X, He H, Wang C. Stoichiometric imbalance and microbial community regulate microbial elements use efficiencies under nitrogen addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108207.
- [16] 郭子武, 俞文仙, 陈双林, 李迎春, 杨清平. 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响. *生态学报*, 2013, 33(18): 5623-5630.
- [17] Li Y C, Li Y F, Scott X, Liang X, Qin H, Chen J, Xu Q. Linking soil fungal community structure and function to soil organic carbon chemical composition in intensively managed subtropical bamboo forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017; 107, 19-31.
- [18] 孟赐福, 沈菁, 姜培坤, 徐秋芳. 不同施肥处理对雷竹林土壤养分平衡和竹笋产量的影响. *竹子研究汇刊*, 2009, 28(4): 11-17.
- [19] 王湛, 李银坤, 徐志刚, 郭文忠, 马丽, 杨子强. 生物质炭对土壤理化性状及氮素转化影响的研究进展. *土壤*, 2019, 51(5): 835-842.
- [20] Song Y Z, Li Y F, Cai Y J, Fu S, Luo Y, Wang H, Liang C, Lin Z, Hu S, Li Y, Chang S X. Biochar decreases soil N_2O emissions in Moso bamboo plantations through decreasing labile N concentrations, N-cycling enzyme activities and nitrification/denitrification rates. *Geoderma*, 2019, 348: 135-145.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 中国农业科技出版社, 2000, 227-235
- [22] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, Simpson R T. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 159-171.
- [23] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1309-1315.
- [24] Sinsabaugh R L, Turner B L, Talbot J M. Stoichiometry of microbial carbon use efficiency in soils. *Ecological Monographs*, 2016, 86: 172-189.
- [25] Mooshammer M, Wanek W, Hammerle I, Fuchslueger L, Hofhansl F, Knoltsch A, Richter A. Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon: nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. *Nature Communications*, 2014, 5: 3694.
- [26] Sun J, Lu X, Chen G, Luo N, Zhang Q, Li X. Biochar promotes soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration and regulates microbial community structures in Mollisols from northeast China. *Soil*, 2023, 9: 261-275.
- [27] Ibrahim M M, Chang Z, Li Z, Joseph J, Yusuf A A, Luo X, Hou E. Biochar rate-dependent regulation of extended nitrogen supply by modifying stable aggregates-N and microbial responses. *Carbon Research*, 2023, 2: 22.
- [28] 赵泽州, 王晓玲, 李鸿博, 任树鹏, 陈静, 王琳玲. 生物质炭基肥缓释性能及对土壤改良的研究进展. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 886-897.
- [29] 樊鹏飞, 刘文, 任天宝, 陈静, 刘英杰, 王省伟, 袁晓静, 刘国顺. 滴灌减氮下生物炭基肥对植烟土壤无机氮组分含量的影响. *河南农业大学学报*, 2020, 54(5): 740-747.
- [30] Mandal S, Thangarajan R, Bolan N S, Sarkar B, Khan N, Ok Y S, Naidu R. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat. *Chemosphere*, 2016, 142: 120-127.
- [31] Chen J, Chen D, Xu Q, Fuhrmann J J, Li L, Pan G, Sun X. Organic carbon quality, composition of main microbial groups, enzyme activities, and temperature sensitivity of soil respiration of an acid paddy soil treated with biochar. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55: 185-197.
- [32] 丁苏雅, 段敏, 朱瀚卿, 陈宇, 谭一波, 马姜明, 田红灯, 申文辉. 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.
- [33] Mou Z J, Kuang L H, Zhang J, Li Y, Wu W, Liang C, Hui D, Lambers H, Sardans J, Penuelas J. Nutrient availability and stoichiometry mediate microbial effects on soil carbon sequestration in tropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 186: 109186.
- [34] Hammer E C, Balogh-Brunstad Z, Jakobsen I, Olsson P A, Stipp S L S, Rillig M C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 252-260.
- [35] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1301-1310.
- [36] 刘领, 马宜林, 悦飞雪, 等. 生物炭对褐土旱地玉米季氮转化功能基因、丛枝菌根真菌及 N_2O 释放的影响. *生态学报*, 2021, 41(7): 2803-2815.
- [37] Zhang L Y, Jing Y M, Chen C R, Xiang Y, Rezaei Rashti M, Li Y, Deng Q, Zhang R. Effects of biochar application on soil nitrogen transformation, microbial functional genes, enzyme activity, and plant nitrogen uptake: A meta-analysis of field studies. *Global Change Biology Bioenergy*, 2021, 13: 1859-1873.
- [38] 唐行灿, 陈金林. 生物炭对土壤理化和微生物性质影响研究进展. *生态科学*, 2018, 37(1): 192-199.
- [39] Xu T, Lou L, Ling L, Duan D, Chen Y. Effect of bamboo biochar on pentachlorophenol leachability and bioavailability in agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 2012, 414: 727-731.
- [40] Zhao J, Ni T, Li J, Lu Q, Fang Z Y, Huang Q W, Zhang R F, Rong L, Shen B, Shen Q R. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system. *Applied Soil Ecology*, 2016, 99: 1-12.
- [41] Nannipieri P, Trasar-Cepeda C, Dick R P. Soil enzyme activity: A brief history and biochemistry as a basis for appropriate interpretations and meta-analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54: 11-19.
- [42] Guo K Y, Zhao Y Z, Liu Y, Chen J, Wu Q, Ruan Y, Li S, Shi J, Zhao L, Sun X, Liang C, Xu Q, Qin H. Pyrolysis temperature of biochar affects ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient-use efficiency in a bamboo forest soil. *Geoderma*, 2020, 363: 114162.
- [43] Malik A A, Puissant J, Buckeridge K M, Goodall T, Jehmlich N, Chowdhury S, Gweon H S, M. Peyton J, Mason K E, Agtmaal M, Bland A, Clark I M, Whitaker J, Pywell R F, Ostle N, Gleixner G, Griffiths R I. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes. *Nature Communications*, 2018, 9: 3591.
- [44] Silva-Sanchez A, Soares M, Rousk J. Testing the dependence of microbial growth and carbon use efficiency on nitrogen availability, pH, and organic matter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 134: 25-35.
- [45] Li J, Sang C, Yang J, Qu L, Xia Z, Sun H, Jiang P, Wang X, He H, Wang C. Stoichiometric imbalance and microbial community regulate microbial elements use efficiencies under nitrogen addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108207.
- [46] Sun L F, Li J, Li Q, Wang X, Sang C, Wang J, Sun M, Wanek W, Moorhead D L, Bai E, Wang C. Phosphorus limitation reduces microbial nitrogen use efficiency by increasing extracellular enzyme investments. *Geoderma*, 2023, 432: 116416.