

陈洛渲, 潘熠祖, 李永夫, 吴家森, 刘娟. 氮磷添加对亚热带毛竹林不同土层土壤有机氮矿化的影响[J]. 土壤学报, 2027,
CHEN Luoxuan, PAN Yizu, LI Yongfu, WU Jiasen, LIU Juan. Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Organic
Nitrogen Mineralization in Different Soil Layers of Subtropical Moso Bamboo Forests[J]. Acta Pedologica Sinica, 2027,

氮磷添加对亚热带毛竹林不同土层土壤有机氮矿化的影响*

陈洛渲, 潘熠祖, 李永夫, 吴家森, 刘娟[†]

(浙江农林大学环境与资源学院、碳中和学院, 森林食物资源挖掘与利用全国重点实验室, 杭州 311300)

摘要: 氮沉降是全球变化研究领域的重点问题之一。氮和磷是影响植物生长最主要的营养元素, 氮沉降加剧了磷限制的亚热带森林土壤的氮磷失衡, 对森林生态系统土壤氮循环具有重要影响。以亚热带毛竹林 (*Phyllostachys edulis*) 土壤为对象, 设置 CK ($0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、N ($120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 N 计, 下同))、P ($120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以 P 计, 下同)) 和 NP ($120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}+120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 4 个处理, 研究了氮磷添加 3 年后对 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤有机氮矿化的影响。结果表明: (1) N 和 NP 处理整体上降低了土壤 C、N 转化相关酶活性, P 处理增加了土壤 N 转化相关酶活性。土层深度显著影响了土壤酶活性, 酶活性随着土层加深呈递减趋势; (2) 整体上, N 处理和 NP 处理显著降低 20~40 和 40~60 cm 土层的微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN) 和溶解性有机碳 (DOC)、溶解性有机氮 (DON); 除 20~40 cm 土层中 P 处理降低了 DOC 和 MBC 外, P 处理均有提高各土层 MBC、MBN、DOC 和 DON 的趋势。土层深度显著影响了土壤活性碳氮含量, 均随土层加深逐渐降低; (3) N 和 NP 处理对土壤有机氮矿化总体表现为抑制作用, P 处理表现为促进作用, CK、N、P 和 NP 处理之间的差异均未达显著水平; 土层深度显著影响了土壤有机氮矿化速率, 0~20 cm 土层净氮矿化速率显著高于 20~40 和 40~60 cm 土层, 后两者之间无显著差异; (4) 结构方程模型揭示氮添加和土层效应通过降低 β -葡萄糖苷酶 (BG) 和 DON, 间接抑制有机氮矿化; 磷添加通过提高 DON, 间接促进有机氮矿化。综上, 在氮素相对富集、磷限制的亚热带毛竹林土壤中, 短期 (3 年) 单独氮添加 (N 处理) 和氮磷同时添加 (NP 处理) 对有机氮矿化存在抑制趋势, 磷添加 (P 处理) 则呈现促进趋势, 考虑到亚热带森林土壤无机氮的垂直移动性, 需进一步关注长期氮磷添加对不同土层亚热带森林土壤氮矿化的持续影响。本文通过揭示氮磷添加和土层深度对毛竹林土壤有机氮矿化的影响特征及机制, 可为明确氮沉降背景下土壤氮转化规律提供数据支持。

关键词: 氮磷添加; 毛竹; 氮矿化; 酶活性; 土层效应

中图分类号: S714.8

文献标志码: A

Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Organic Nitrogen Mineralization in Different Soil Layers of Subtropical Moso Bamboo Forests

CHEN Luoxuan, PAN Yizu, LI Yongfu, WU Jiasen, LIU Juan[†]

(National Key Laboratory for Development and Utilization of Forest Food Resources, College of Carbon Neutrality, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China)

*国家自然科学基金项目 (31700540) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31700540)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liujuan@zafu.edu.cn

作者简介: 陈洛渲 (2000—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要研究土壤氮矿化与温室气体排放研究。E-mail: 2023603041003@stu.zafu.edu.cn

收稿日期: 2025-12-03; 收到修改稿日期: 2026-06-22; 网络首发日期 (www.cnki.net): 202 - -

Abstract: 【Objective】Anthropogenic nitrogen (N) deposition is a key issue in global-change research. As the two most critical nutrients for plant growth, nitrogen and phosphorus (P) regulate ecosystem functioning; however, elevated N deposition intensifies N-P imbalance in P-limited subtropical forest soils, strongly altering soil N cycling. 【Method】A three-year experiment was conducted in a subtropical moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantation to evaluate the effects of control (CK, $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), nitrogen addition (N, $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (in terms of N, the same below)), phosphorus addition (P, $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (in terms of P, the same below)), and combined N and P addition (NP, $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) on soil organic N mineralization across 0-20, 20-40 and 40-60 cm soil depths. 【Result】The results showed that: (1) The activities of soil enzymes responsible for C and N transformations were found to be generally reduced under N and NP treatments but increased under P treatment. A significant effect of soil depth was identified, revealing a pronounced decreasing trend in enzymatic activities with greater depth; (2) Overall, N treatment and NP treatment significantly reduced microbial biomass C and N (MBC, MBN) and dissolved organic C and N (DOC, DON) in the 20-40 cm and 40-60 cm soil layers, except for the P treatment reducing DOC and MBC in the 20-40 cm soil layer. Also, P treatment had a trend of increasing MBC, MBN, DOC, and DON in all soil layers. Soil depth significantly affected the content of soil active C and N, with both gradually decreasing as soil depth increased. (3) N and NP additions exerted an inhibitory effect on organic N mineralization, whereas P addition showed a stimulatory trend. However, CK, N, P, and NP treatment differences were not statistically significant. Soil depth strongly affected mineralization rates: net N mineralization in the 0-20 cm layer was significantly higher than in the 20-40 cm and 40-60 cm layers. No significant difference was detected between the 20-40 and 40-60 cm layers. (4) Structural equation modeling (SEM) revealed that nitrogen addition and soil layer effects indirectly inhibit organic N mineralization by reducing β -glucosidase (BG) and DON; P addition indirectly promotes organic N mineralization by increasing DON. 【Conclusion】In summary, in the N-rich and P-limited soil of a subtropical *Phyllostachys edulis* (moso bamboo) forest, short-term (three-year) N addition alone (N treatment) and combined N and P addition (NP treatment) exhibit an inhibitory trend on soil organic N mineralization, whereas P addition alone (P treatment) shows a promoting trend. Considering the vertical mobility of inorganic N in subtropical forest soils, further attention should be paid to the long-term effects of N and P additions on soil N mineralization across different soil layers. By elucidating the characteristics and underlying mechanisms of soil organic N mineralization in response to N and P additions and soil depth in a moso bamboo forest, this study provides data support for understanding soil N transformation under N deposition.

Key words: Nitrogen and phosphorus addition; Moso bamboo; Nitrogen mineralization; Enzyme activity; Soil layer effect

人为活动造成的氮沉降是影响生态系统过程的主要因素之一^[1]。持续增加的氮沉降通过影响温室气体平衡、加剧土壤酸化、改变氮素循环格局以及减少生物多样性等威胁生态系统健康^[2]。亚热带土壤因富含铁铝氧化物,对磷存在强烈吸附与固定,使磷成为该地区森林植被与微生物的限制性养分。氮沉降导致的土壤酸化进一步促进了土壤有效磷与铁、铝络合而沉淀,降低了土壤有效磷含量,加剧了土壤的氮磷失衡,使土壤磷限制更为突出^[3]。

土壤氮矿化是土壤有机态氮在微生物介导下转化为无机氮(NH_4^+ -N与 NO_3^- -N)的生化过程,是构成生态系统氮循环的关键环节。土壤氮矿化受土壤微生物群落结构^[4]、土壤养分^[5]、酶活性^[6]、微生物生物量以及土壤溶解性有机碳氮^[7]等多种因素的影响。模拟氮沉降可以增加^[8]、减少^[9]或不影响氮矿化速率^[10]。Meta分析表明,氮沉降使森林土壤总氮矿化与硝化速率分别提升15.4%与42.5%,但这种促进作用会随沉降量增加而转为抑制^[10]。高氮富集能够通过重塑微生物种群规模、群落结构、胞外酶活性及代谢策略,抑制有机质分解过程,进而削弱土壤氮矿化潜力,因此,森林氮饱和状态下,氮沉降会抑制土壤氮矿化。在贫磷生态系统中,磷的有效性成为调控氮循环过程的关键限制因子^[11]。磷添加促进了土壤有效磷

积累,提高了土壤微生物生物量、微生物活性以及 C、N 水解酶活性,加速了土壤有机质分解,使有机氮矿化速率增加^[12-13]。

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 以其高速生长与采伐后的周年更新能力,成为中国最具价值的非木质林产品^[14]。全国现有毛竹林约 $4.68 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占竹林总面积的 72.7%, 毛竹林主产区的氮沉降量高达 $30 \sim 37 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[15]。氮沉降降低了毛竹林土壤的溶解性有机碳 (DOC)^[15]、微生物生物量碳 (MBC)^[16], 改变了微生物群落多样性^[16]。亚热带森林年平均降水量高达 $1\,749 \text{ mm}$ ^[8], 本研究区域年均降水量为 $1\,614 \text{ mm}$, 丰沛降水驱动的强大淋溶效应显著加速亚热带森林土壤无机氮的垂直迁移, 使大气氮沉降的影响更易向深层土壤传递并放大。目前有关氮沉降对森林土壤氮矿化影响的研究多集中于表层土壤, 而土层深度通过对土壤矿质氮含量^[17]、酶活性^[7]和微生物生物量^[18]的影响, 使得表层土壤和深层土壤氮矿化速率对氮沉降呈现显著不同的响应特征。本文以亚热带毛竹林土壤为研究对象, 研究了氮磷添加 3 年后对 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤有机氮矿化以及微生物生物量碳氮、溶解性有机碳氮含量和碳氮转化相关酶活性的影响, 探究氮磷添加和土层深度对毛竹林土壤有机氮矿化的影响特征及机制, 为明确氮沉降背景下土壤氮转化规律提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省杭州市临安区青山镇毛竹示范基地, 地理位置为 $29^{\circ}56' - 30^{\circ}23' \text{N}$ 、 $118^{\circ}51' - 119^{\circ}52' \text{E}$, 属亚热带季风气候; 试验区年均降水 $1\,614 \text{ mm}$, 年平均温度 15.9°C 。毛竹林密度为 $3\,000 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均胸径为 9.1 cm , 土壤类型为红壤^[19]。

1.2 试验设计

2018 年 12 月, 选取坡度、坡向和土壤本底相对一致的毛竹林样地, 开展氮磷添加试验。试验共设 4 个处理: CK ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); N 处理 ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) (以 N 计, 下同); P 处理 ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) (以 P 计, 下同); NP 处理 ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} + 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 每个处理 3 次重复。以硝酸铵 (NH_4NO_3) 为氮源, 以磷酸二氢钠 (NaH_2PO_4) 为磷源, 各个处理中添加的氮、磷量分别为 NH_4NO_3 和 NaH_2PO_4 中的氮和磷的质量。试验采用完全随机设计, 共设 12 个 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的独立样方。样方间以 5 m 裸地缓冲带隔离, 防止侧向干扰。每月初将每个样方所需的 NH_4NO_3 、 NaH_2PO_4 (每月用量为全年总量的 $1/12$) 溶解在 5 L 自来水中进行喷洒, 同时在对照小区内喷洒等量自来水。

1.3 土壤样品采集与测定

2021 年 11 月 (氮磷添加试验进行 3 年后), 除去地表凋落物后, 用土钻在各样方内分别采集 0~20 (表层)、20~40 (中层) 和 40~60 cm (深层) 三层原状土芯, 混匀后装入密封袋, 编号带回。

土样分为两份: 一份拣除根系、砾石及动物残体, 过 2 mm 筛后置于 4°C 密封保存, 用于酶活性、微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN)、溶解性有机碳 (DOC)、溶解性有机氮 (DON)、无机氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 的测定及培养试验; 另一份自然风干、剔除杂物后用于测定有效磷 (AP)、pH、土壤有机碳 (SOC) 及全氮 (TN)。

1.4 测定方法

pH 仪测定土壤 pH; 重铬酸钾容量法测定 SOC; 半微量凯氏法 (LY/T 1228—1999)^[20] 测定 TN; 钼锑抗比色法测定 AP 含量^[20]。土壤无机氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 的测定^[20]: 用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 溶液浸提, 靛酚蓝比色法 (625 nm) 测定铵态氮含量; 双波长 (220 nm 和 275 nm) 紫外分光光度法测定硝态氮含量。采用氯仿熏蒸— K_2SO_4 浸提法测定 MBC、MBN^[20]。

DOC、DON 的测定采用去离子水浸提, 有机碳分析仪 (TOC-VCPH, 岛津公司, 日本) 测定^[21]。

土壤酶活性的测定: β -葡萄糖苷酶 (BG, β -glucosidase)、 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 (NAG, β -N-acetylglucosidase)、亮氨酸氨基肽酶 (LAP, Leucine aminopeptidase) 和纤维二糖水解酶 (CBH, Cellobiohydrolase) 活性测定采用 Saiya-Cork 等^[22]的方法。土壤脲酶 (Ure, Urease) 活性测定采用苯酚-次氯酸钠比色法, 蔗糖酶 (Ive, Invertase) 活性测定采用高锰酸钾滴定法^[23]。

土壤培养试验参考高畅等^[7]的方法: 称取 50 g 新鲜土样, 平铺于培养瓶底部 (500 mL), 用去离子水调节土壤含水量, 使土壤含水量保持在田间持水量 60% 左右, 用保鲜膜和橡皮筋密封, 在保鲜膜上扎小孔透气, 放置于 25 °C 恒温箱进行 7 d 的预培养试验。预培养和培养期间每隔 2 d 进行 30 min 通气, 补充因蒸发散失的水分。分别于培养后的 1、3、7、14、21、31、41、51、61 d, 用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提, 测定无机氮 (NH₄⁺-N、NO₃⁻-N) 含量。

1.5 数据处理

依照以下公式计算土壤氮素矿化速率^[7]:

净硝化速率 (N_{nit}, Net nitrification rate) = (处理后 NO₃⁻-N 含量-初始 NO₃⁻-N 含量) / 培养天数

净氨化速率 (N_{amm}, Net ammonification rate) = (处理后 NH₄⁺-N 含量-初始 NH₄⁺-N 含量) / 培养天数

净矿化速率 (N_{min}, Net mineralization rate) = ((处理后 NH₄⁺-N 含量+处理后 NO₃⁻-N 含量) - (初始 NH₄⁺-N 含量+初始 NO₃⁻-N 含量)) / 培养天数

用 SPSS 26.0 进行数据统计分析, Origin 2024 进行图表绘制。采用三因素方差分析 (Three-way ANOVA) 对氮添加效应、磷添加效应、土层效应及氮添加和磷添加交互效应对土壤理化性质、酶活性、土壤活性碳氮及净氮矿化、净氨化、净硝化速率的影响进行检验。通过皮尔逊 (Pearson) 相关性分析表征土壤环境因子与有机氮矿化的相关性。利用 R 语言 (V4.5.2) 的随机森林模型 (randmonForest) 分析影响有机氮矿化的主要环境因子。在 R 语言 (V4.5.2) 软件中构建结构方程模型 (Structural equation model, SEM), 分析氮添加、磷添加和土层对有机氮矿化的影响。统计显著水平设置为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

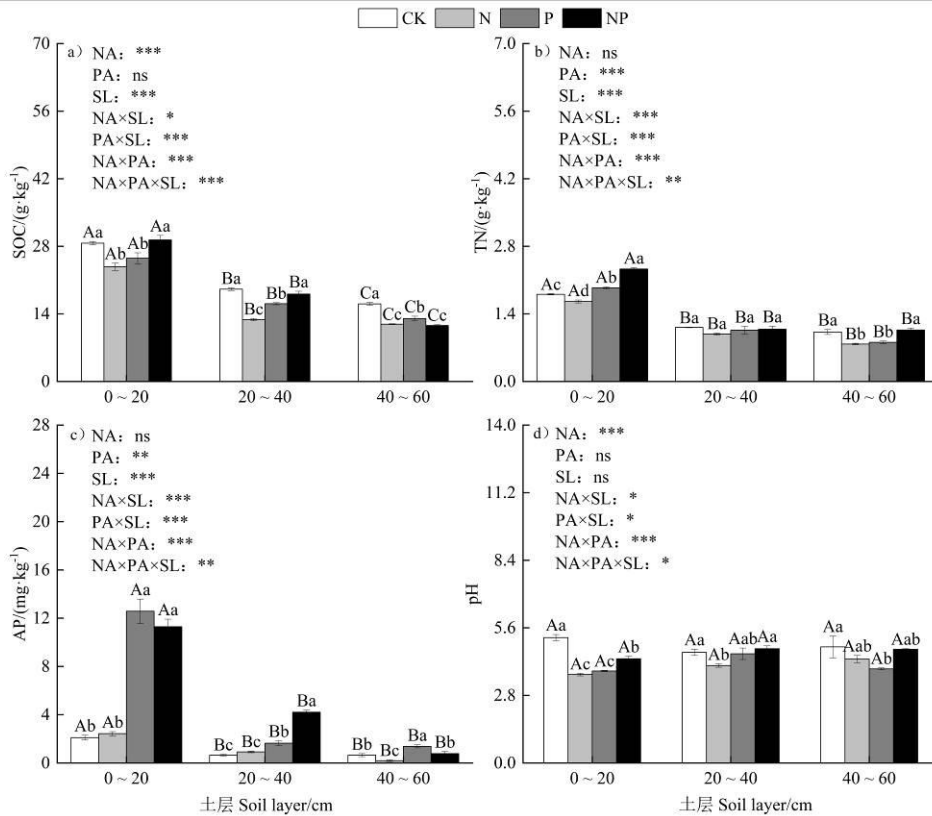
2.1 土壤基本理化性质

在 0~20 cm 土层, 与 CK 相比, N 处理显著降低 SOC、TN、pH, 对 AP 无显著影响; P 处理显著降低 SOC、pH, 显著提高 AP、TN; NP 处理显著提高 TN、AP, 显著降低了 pH, 对 SOC 无显著影响 (图 1)。

在 20~40 cm 土层, 与 CK 相比, N 处理显著降低 SOC、pH, 对 AP、TN 无显著影响; P 处理显著降低 SOC 含量, 显著提高 AP, 对 TN、pH 无显著影响; NP 处理显著提高 AP 含量, 对 SOC、TN、pH 均无显著影响 (图 1)。

在 40~60 cm 土层, 与 CK 相比, N 处理显著降低 SOC、TN、AP 的含量, 对 pH 无显著影响; P 处理显著降低 SOC、TN、pH, 显著提高 AP 含量; NP 处理显著降低 SOC 含量, 对 TN、AP、pH 均无显著影响 (图 1)。

氮添加效应显著降低 SOC、pH, 磷添加效应显著提高 TN、AP。土层效应显著影响了土壤 SOC、TN、AP, 土壤 SOC、TN、AP 均随土层加深而降低, 土层效应对 pH 无显著影响。氮添加和磷添加的交互效应、氮添加和土层交互效应、磷添加和土层交互效应及氮磷添加和土层交互效应均对 SOC、TN、AP、pH 有显著影响 (图 1)。



注：*、**和***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ ，ns 为不显著。图中不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著 ($P<0.05$, $n=3$)。图中不同大写字母表示同一处理不同土层之间差异显著 ($P<0.05$, $n=3$)。CK, 对照; N, 氮处理; P, 磷处理; NP, 氮磷处理。左上角为三因素方差分析结果, NA, 氮添加效应; PA, 磷添加效应; SL, 土层效应; NA×PA, 氮添加和磷添加交互效应; NA×SL, 氮添加和土层交互效应; PA×SL, 磷添加和土层交互效应; NA×PA×SL, 氮磷添加和土层交互效应。下同。Note: Significant results are indicated by * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, ns indicates not significant. Different lowercase letters in the figure indicate significant differences ($P<0.05$, $n=3$) between treatments within the same soil layer. Different uppercase letters in the figure indicate significant differences ($P<0.05$, $n=3$) between soil layers within the same treatment. CK, control; N, nitrogen treatment; P, phosphorus treatment; NP, nitrogen and phosphorus treatment. The upper-left corner shows the results of three-way ANOVA. NA, Nitrogen addition effect; PA, Phosphorus addition effect; SL, Soil layer effect; NA×PA, interaction between nitrogen and phosphorus addition; NA×SL, interaction between nitrogen addition and soil layer; PA×SL, interaction between phosphorus addition and soil layer; NA×PA×SL, interaction among nitrogen addition, phosphorus addition, and soil layer. The same below.

图1 氮磷添加对土壤基本理化性质的影响 (a. 土壤有机碳 (SOC), b. 全氮 (TN), c. 有效磷 (AP), d. pH)

Fig. 1 Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil basic physicochemical properties (a. Soil organic carbon (SOC), b. Total nitrogen (TN), c. Available phosphorus (AP), d. pH)

2.2 土壤酶活性

0~20 cm 土层, 与 CK 相比, N 处理显著降低 NAG、LAP 活性, 对 Ure、CBH、Ive 和 BG 活性均无显著影响; P 处理显著增加 CBH 与 NAG 活性, 对 Ure、Ive、BG 和 LAP 活性均无显著影响; NP 处理显著降低 Ive 和 BG 活性, 对 Ure、CBH、NAG 和 LAP 活性均无显著影响。在 20~40 cm 土层, N 处理显著降低 Ive、NAG 和 LAP 活性, 对 Ure、CBH 和 BG 活性无显著影响; P 处理显著提高 NAG 和 LAP 活性, 对 Ure、CBH、Ive 和 BG 活性均无显著影响; NP 处理显著降低 Ive 和 NAG 活性, 对 Ure、CBH、BG 和 LAP 活性均无显著影响。在 40~60 cm 土层, N 和 NP 处理显著降低 CBH 活性, 对 Ure、Ive、BG、NAG 和 LAP

活性均无显著影响；P 处理显著提高 CBH、BG 和 LAP 活性，对 Ure、Ive 和 NAG 活性无显著影响（图 2）。

氮添加效应显著降低了土壤 C（CBH、Ive、BG）、N（Ure、NAG、LAP）转化相关酶活性，磷添加效应显著提高了 N 转化相关酶活性，对 C 转化酶活性无显著影响；氮添加和磷添加的交互效应显著影响了 NAG 活性，对其他酶均无显著影响（图 2）。土层效应显著影响了土壤酶活性，土壤酶活性均随土层加深而降低（图 2）。氮添加和土层交互效应显著影响了 Ive、NAG、LAP 活性，磷添加和土层交互效应显著影响了 NAG 活性，氮磷添加和土层交互效应对酶活性均无显著影响（图 2）。

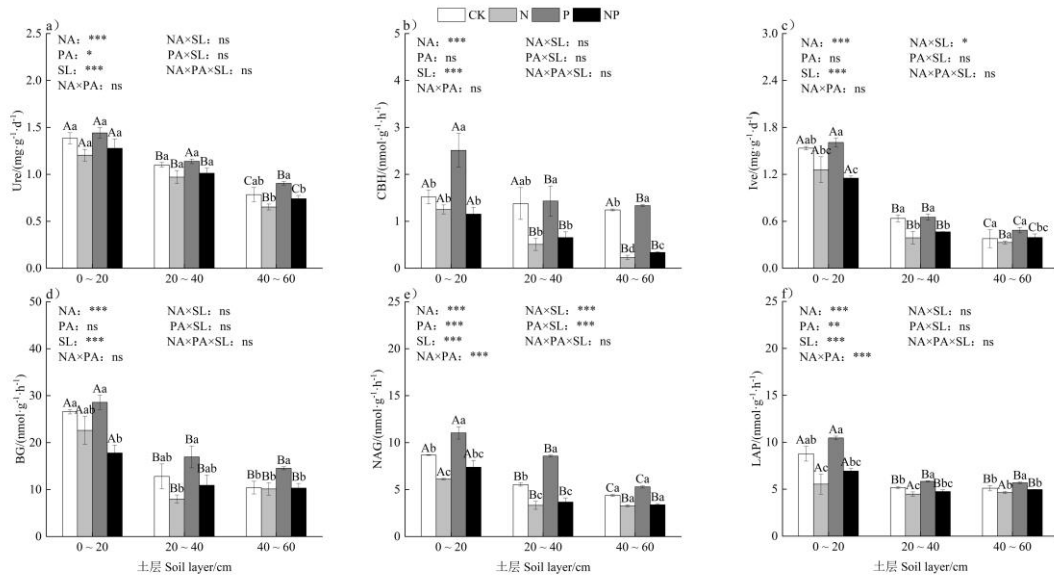


图 2 氮磷添加对土壤酶活性的影响 (a. 脲酶 (Ure), b. 纤维二糖水解酶 (CBH), c. 蔗糖酶 (Ive), d. β-葡糖苷酶 (BG), e. β-N-乙酰基葡萄糖苷酶 (NAG), f. 亮氨酸氨基肽酶 (LAP))

Fig. 2 Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil enzyme activity (a. Urease (Ure), b. Cellobiohydrolase (CBH), c. Invertase (Ive), d. β-glucosidase (BG), e. β-N-acetylglucosidase (NAG), f. Leucine aminopeptidase (LAP))

2.3 土壤活性碳氮

总体而言，N 和 NP 处理呈现降低土壤活性碳氮的趋势（图 3）。在 0~20 cm 土层，与 CK 相比，N 处理显著降低 MBC 和 DOC 含量，对 MBN 和 DON 含量无显著影响；NP 处理显著降低 DOC 含量，对 MBN、DON 和 MBC 含量无显著影响；在 20~40 cm 土层，N 处理和 NP 处理均显著降低 MBC、DOC 和 DON 含量，对 MBN 含量无显著影响。在 40~60 cm 土层，N 处理显著降低 MBC、MBN、DOC 和 DON 含量，NP 处理对 MBC、MBN、DOC 和 DON 含量均无显著影响。

整体上，P 处理呈现增加土壤活性碳氮的趋势（图 3）。在 0~20 cm 土层，P 处理显著增加 MBC、MBN 和 DON 含量，对 DOC 含量无显著影响。在 20~40 cm 土层，P 处理显著降低 MBC 和 DOC 含量，对 MBN 和 DON 含量无显著影响。在 40~60 cm 土层，P 处理显著增加 MBC 和 MBN 含量，对 DOC 和 DON 含量无显著影响。

氮添加效应显著影响了 MBC、MBN、DOC、DON 含量，磷添加效应显著影响 MBC、MBN、DON 含量，土层效应显著影响土壤活性碳氮含量，MBC、MBN、DOC 和 DON 含量均随土壤深度增加而降低。氮添加和磷添加的交互效应显著影响了 MBC、DOC，对 MBN、DON 无显著影响；氮添加和土层交互效应显著影响了 MBC、DOC，磷添加和土层交互效应、氮磷添加和土层交互效应对 MBC、DOC、DON 具有显著影响（图 3）。

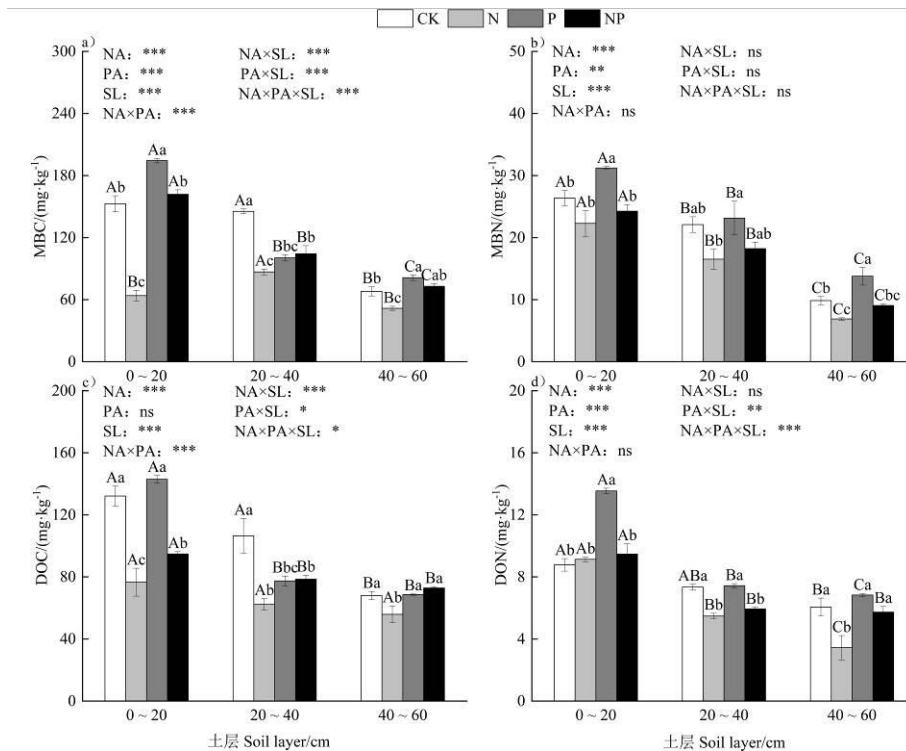


图3 氮磷添加对土壤活性碳氮的影响 (a. 微生物量碳 (MBC), b. 微生物量氮 (MBN), c. 溶解性有机碳 (DOC), d. 溶解性有机氮 (DON))

Fig. 3 Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil labile carbon and nitrogen (a. Microbial biomass carbon (MBC), b. Microbial biomass nitrogen (MBN), c. Dissolved organic carbon (DOC), d. Dissolved organic nitrogen (DON))

2.4 土壤有机氮矿化

在 0~20 和 40~60 cm 土层, N、P 和 NP 处理对土壤净硝化速率均无显著影响; 在 20~40 cm 土层, N 和 NP 处理对土壤净硝化速率无显著影响, P 处理显著增加土壤净硝化速率 (图 4)。在 0~20 和 20~40 cm 土层, N、P 和 NP 处理对土壤净氨化速率均无显著影响; 在 40~60 cm 土层, N 处理显著降低土壤净氨化速率, P 处理显著增加土壤净氨化速率, NP 处理对土壤净氨化速率无显著影响 (图 4)。在 0~20 和 20~40 cm 土层, N、P 和 NP 处理对土壤净矿化速率均无显著影响; 在 40~60 cm 土层, N 处理显著降低土壤净矿化速率, P 和 NP 处理对土壤净矿化速率无显著影响 (图 4)。

总体上 N 和 NP 处理呈现降低净矿化速率的趋势, P 处理呈现增加净矿化速率的趋势 (图 4)。土层效应显著影响净硝化速率、净矿化速率和净氨化速率 (图 4), 表层净硝化速率和净矿化速率显著高于中层和深层, 表层净氨化速率低于中层和深层, 中层和深层之间均无显著差异。氮添加效应显著影响 0~20 和 20~40 cm 土层净矿化速率和净硝化速率, 对净氨化速率无显著影响; 磷添加效应以及氮添加和磷添加的交互效应对各土层土壤净矿化速率、净硝化速率和净氨化速率均无显著影响; 单独氮、磷添加以及氮磷同时添加与土层的交互效应对净氨化速率、净硝化速率和净矿化速率均无显著影响 (图 4)。

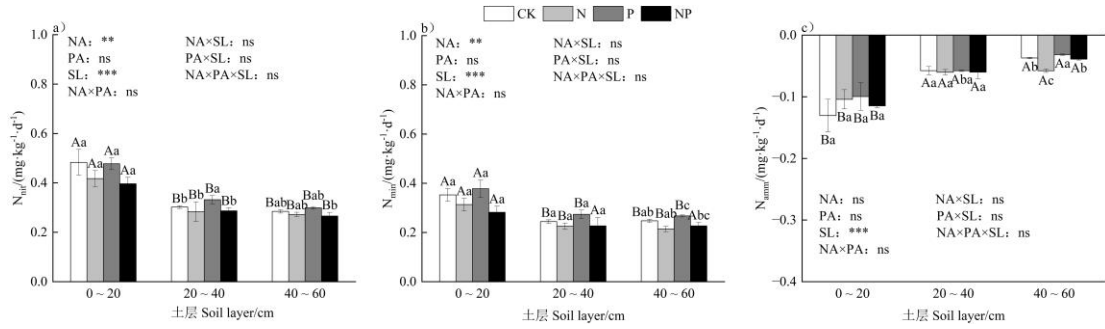
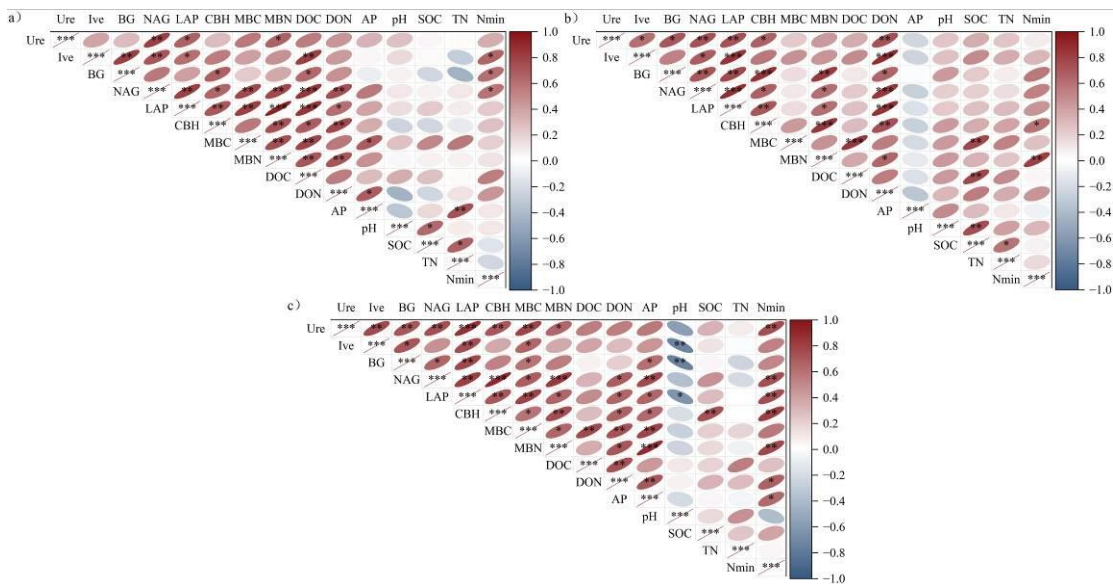


图4 氮磷添加对土壤有机氮矿化的影响 (a. 净硝化速率 (N_{nit}), b. 净矿化速率 (N_{min}), c. 净氨化速率 (N_{amm}))

Fig. 4 Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic nitrogen mineralization (a. Net nitrification rate (N_{nit}), b. Net mineralization rate (N_{min}), c. Net ammonification rate (N_{amm}))

2.5 影响土壤有机氮矿化的因素

相关性分析结果表明, 0~20 cm 土层, 土壤有机氮矿化速率与 Ive、BG 和 NAG 呈显著正相关关系; 20~40 cm 土层, 土壤有机氮矿化速率与 CBH 和 MBN 呈显著正相关关系; 40~60 cm 土层, 土壤有机氮矿化速率与 Ure、NAG、LAP、CBH、MBN、DON 以及 AP 呈显著正相关关系 (图 5)。



注: *, **, *** 分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$, 棕色和青色分别表示两个变量间负相关和正相关关系。Note: Significant results are indicated by *, **, *** $P < 0.05$, **, *** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$. The brown and cyan colors show, respectively, a negative and positive relationships between two variables.

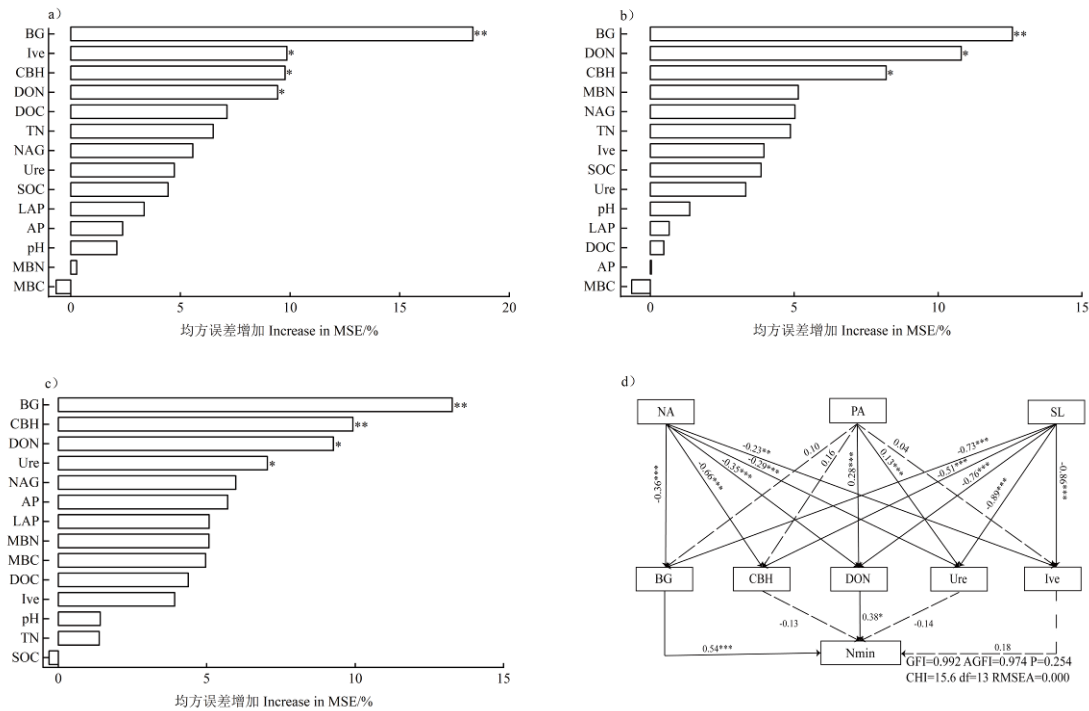
图5 土壤有机氮矿化速率与环境因子的皮尔逊相关性热图 (a. 0~20 cm 土层, b. 20~40 cm 土层, c. 40~60 cm 土层)

Fig. 5 Pearson's correlation heatmap between soil organic nitrogen mineralization rate and environmental factors (a. the 0-20 cm soil layer, b. the 20-40 cm soil layer, c. the 40-60 cm soil layer)

为进一步了解影响土壤有机氮矿化速率的重要因子, 采用随机森林模型构建了土壤环境因子对有机氮矿化影响的相对贡献度模型。结果表明, 土层对土壤有机氮矿化速率影响具有显著贡献的因子为 BG、Ive、CBH 和 DON, 解释度为 47.4% (图 6a); 氮添加对土壤有机

氮矿化速率影响具有显著贡献的因子为 BG、DON 和 CBH，解释度为 31.6%（图 6b）；磷添加对土壤有机氮矿化速率影响具有显著贡献的因子为 CBH、BG、DON 和 Ure，解释度为 39.5%（图 6c）。BG、CBH、DON、Ure 和 Ive 是对土壤有机氮矿化速率产生显著影响的重要因子。

通过结构方程模型进一步分析氮添加、磷添加和土层效应对土壤有机氮矿化速率的影响（图 6d）。氮添加和土层对 5 个重要因子（BG、CBH、DON、Ure 和 Ive）具有显著负效应，磷添加对 DON 和 Ure 具有显著正效应。BG（0.54）和 DON（0.38）对有机氮矿化速率有显著直接正效应。氮添加和土层效应通过降低 BG 和 DON，间接对有机氮矿化速率产生抑制效果；磷添加通过提高 DON，间接对有机氮矿化速率产生促进效果。



注：a)、b)、c)分别代表土层、氮添加、磷添加对有机氮矿化速率的随机森林模型，d 表示结构方程模型。NA 表示氮添加，PA 表示磷添加，SL 表示不同土层。MSE 代表均方误差增加的百分数。GFI：适配度指数；AGFI：调整后适配度指数；CHI：卡方值；df：自由度。箭头上的数据为标准路径系数。实线表示效应显著，虚线表示效应不显著。Note: a), b), and c) represent the effects of soil layer, nitrogen addition, and phosphorus addition on the organic nitrogen mineralization rate in the random forest model, respectively, and d represents the structural equation model. NA: Nitrogen addition; PA: Phosphorus addition; SL: Different soil layers. MSE represents the percentage increase in mean squared error. GFI: goodness-of-fit index; AGFI: adjusted goodness-of-fit index; CHI: chi-square value; df: degrees of freedom. The numbers on the arrows are standardized path coefficients. Solid lines indicate significant effects, while dashed lines indicate non-significant effects.

图 6 随机森林模型（a、b、c）与结构方程模型分析（d）

Fig. 6 Random forest model (a, b, c) and structural equation modeling analysis (d)

3 讨论

3.1 氮磷添加对毛竹林土壤活性碳氮的影响

微生物生物量作为土壤核心活性组分，是驱动养分周转的微观引擎。根据 Pan 等^[24]Meta 分析的研究结果，氮沉降使全球森林生态系统 MBN 下降了 8.2%。本研究中，整体上 N 和

NP 处理降低 MBC 和 MBN (图 3)。李欣冉等^[25]对亚热带米槠天然林的研究也发现, 氮添加 ($80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 显著降低了 MBC 和 MBN 含量。氮添加导致的土壤 MBC 和 MBN 降低的原因, 一方面是由于氮添加导致的土壤酸化加剧、铝毒增加以及对微生物活性的影响^[24]; 另一方面则源于外源营养元素添加引起的微生物群落的变化。研究表明, 外源营养元素的添加导致了生长效率快、生物量小的真菌占主导地位, 因此微生物生物量降低^[26]。本研究, 除 20~40 cm 土层外, P 处理总体上提高了 MBC 和 MBN (图 3), 这是因为通过磷添加改善土壤微生物群落, 提高了微生物生物量 (MBC、MBN)^[27]。这表明低磷环境中施磷可提升土壤磷有效性, 解除磷对植物生长的限制, 进而同步提高植株地上、地下生物量及微生物生物量^[28]。DOC、DON 主要由根系分泌的有机物和微生物活动产生, 可作为有效养分被直接利用。SEM 分析结果表明, 氮添加对 DON 有显著直接负效应, 磷添加对 DON 有显著直接正效应 (图 6d)。N 和 NP 处理降低了溶解性有机碳氮含量, 一方面是由于氮添加导致的土壤 pH 降低, 增强了土壤中 Fe 和 Al 氧化物的吸附能力^[14,16], 从而减少土壤中的 DOC 和 DON; 另一方面, 氮添加导致的 MBC 的降低和微生物群落组成的变化^[16], 共同削弱了微生物对有机碳和凋落物的分解能力, 导致 DOC 和 DON 的降低^[29]。P 处理增加 DOC 和 DON 的原因可能是磷添加导致的微生物生物量增加与微生物群落结构的改善^[3-4]。

本研究结果表明, 土层深度显著影响了 MBC、MBN、DOC 和 DON 的含量, 均随土层深度增加而显著递减, 呈现显著的表层富集特征 (图 3)。该结果与李欣冉等^[25]在亚热带米槠天然林研究中发现的 MBC 和 MBN 随深度显著减少的结论一致。随土层加深, 深层土壤中可供微生物活动的有机碳氮以及凋落物分解有机碳氮的输入均减少, 导致了土壤微生物生物量及 DOC 和 DON 的表聚效应^[7]。

3.2 氮磷添加对毛竹林土壤酶活性的影响

土壤酶活性作为衡量土壤酶代谢水平与生化过程强度的综合指标, 被广泛纳入土壤质量评价体系。已有研究指出, 氮沉降对土壤酶活性的影响取决于沉降通量、土壤类型、养分状况、通气水平及酶类别等多因子的耦合效应^[30]。本研究中, 氮添加对 C、N 转化相关酶 (BG、CBH、Ive、Ure) 的活性有显著负效应 (图 6d), 与曾泉鑫等^[3]进行的氮 ($80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 添加试验的结果一致, 说明氮添加后土壤酶代谢水平与生化过程强度下降。氮添加导致的酶活性下降的可能原因主要有以下几个方面: (1) 氮添加加剧土壤酸化, 使 pH 偏离胞外酶最适范围, 从而抑制酶活^[31]; (2) 氮添加降低了可利用养分库^[25], 本研究中, N 与 NP 处理均减少了 SOC、MBC、MBN 及 DOC、DON 的含量 (图 3), 表明碳氮的限制削弱了微生物合成与分泌酶的能力; (3) 氮添加通过改变凋落物产量与化学组成以及调控土壤结构、温湿度及碳源供应等, 间接降低酶活性水平^[25]。本研究中, 磷添加对土壤 N 转化相关酶 (Ure) 活性有显著正效应, 对 C 转化相关酶活性无显著影响 (图 2 和图 6d)。磷添加并未显著影响 C 转化相关酶 (图 2) 的主要原因可能为: 输入土壤的 P 容易被土壤有机质吸附沉淀, 短期内无法全部被土壤微生物利用, 且吸附沉淀过程伴随着少量活性 C 的释放^[27], 提高了活性 C 含量, 因此, 磷添加对土壤 C 转化相关酶的活性无显著影响。P 处理促进 N 转化相关酶活性的主要原因为试验区位于亚热带地区, 土壤有效磷缺乏, 外源磷添加增强了微生物活性, 进而提高了参与 N 转化相关酶的活性^[13]。与单独氮添加相比, 尽管 NP 处理的 pH 有所上升 (图 1), 仍未达到土壤微生物生长最适 pH 范围, 说明氮磷共同添加仅在一定程度上缓解了单独氮添加加剧的土壤酸化对土壤酶活性的负面影响, NP 处理中氮添加的负效应起主要作用^[6], 因此, NP 处理总体上降低了土壤酶活性。

本研究发现, 土壤酶活性均随着土层加深而降低 (图 2)。这与宋思意等^[9]和李欣冉等^[25]发现土壤酶活性随土壤深度增加而降低的结果一致, 这主要是因为森林表层土壤具有丰富的有机质, 土壤养分越丰富, 底物含量越高, 酶活性越强, 而深层则由于养分缺乏、土壤通气不良, 抑制了土壤酶活性^[17]。

3.3 氮磷添加对毛竹林土壤有机氮矿化的影响

氨化与硝化是土壤氮素转化的枢纽,其强度通常用净硝化、净氨化及净矿化速率来度量。净氮矿化速率是衡量土壤有效氮供给潜力的核心指标。本研究结果显示,毛竹林土壤净硝化速率为 $0.24\sim 0.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 净氨化速率则均小于 0, 为 $-0.13\sim -0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 净矿化速率为 $0.24\sim 0.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (图 4), 土壤氮矿化以硝化作用为主。在本研究结果中, 土壤净氮矿化速率 ($0.24\sim 0.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) 低于全球平均值 ($2.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), 与同类红壤的研究结果^[32]较为接近。这主要归因于研究区土壤类型为红壤, 养分较为贫瘠, 矿化作用比较微弱^[32]。土壤净氨化速率为负值, 表明铵态氮经历了净消耗过程, 由于净氨化量以培养末期与初期 NH_4^+-N 的差值为表征, 而 NH_4^+-N 作为微生物首选氮源, 培养期间微生物持续同化原有及新释放的 NH_4^+-N , 致其表观累积量受到显著抑制^[33]。本研究结果中土壤氮矿化过程以硝化作用为主导, 这与陈天等^[34]在三峡库区马尾松人工林中的研究结果一致。一方面, 亚热带森林生态系统普遍具有快速的氮循环速率, 其氮饱和状态促进了以硝酸盐为主导的氮循环过程, 从而显著增强了硝化作用强度^[34]; 另一方面, 亚热带酸性土壤中存在活跃的异养硝化过程, 部分微生物能直接将有机氮转化为硝态氮, 且对酸性环境具有更强的适应性, 这进一步驱动了硝化过程成为净氮矿化的主要路径^[34]。

氮沉降可以增加、减少或不影响氮矿化速率, 森林氮饱和状态下, 氮沉降会抑制土壤氮矿化^[10]。本研究发现, N 和 NP 处理对土壤有机氮矿化总体表现为抑制作用, P 处理表现为促进作用 (图 4)。本研究中 N 和 NP 处理对氮矿化速率有抑制效果的原因, 主要有以下几个方面: (1) 氮添加导致的土壤养分含量的变化。氮沉降导致全球森林生态系统 TN 和 NH_4^+ 分别下降了 7.0%和 10.9%^[24]。在氮富集、磷限制的森林生态系统中, 长期持续增长的氮沉降与氮添加影响了森林生态系统的 C、N 稳定性, 降低了 TN 和 SOC 含量, 这意味着土壤核心矿化底物的消耗直接削弱了矿化潜力。(2) 氮添加量的影响。研究表明, 与 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的 N 添加量相比, 添加量达到 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时, 氮添加对土壤氮矿化的促进作用减弱^[34]。Zhang 等^[35]的研究表明, 氮添加量由 $5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 增加为 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时, 土壤净氮累积矿化量由正值转为负值。本研究中氮添加量为 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 高氮添加抑制了土壤净矿化速率 (图 4)。Meta 分析结果表明, 当氮添加量超过 $3.23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 氮添加对土壤矿化的影响由促进转为抑制^[10]。(3) 氮添加导致的土壤 pH 降低。一方面减少了土壤溶解性有机碳氮和微生物生物量碳氮, 无法满足微生物生长必需的营养物质, 因此降低了土壤氮矿化速率^[6]。本研究 MBN、DON 与土壤有机氮矿化呈显著正相关关系 (图 5), SEM 结果进一步表明, DON 对土壤氮矿化有显著正效应 (图 6d), 因此, MBN、DON 的降低导致了土壤氮矿化受到抑制; 另一方面, 酸性环境直接影响微生物群落结构, 抑制氮获取相关酶活性, 从生化途径上阻碍有机氮的转化, 降低土壤净矿化速率^[4,36]。SEM 分析结果表明, 氮添加对 Ure 的负效应 (图 6d) 间接抑制了土壤有机氮矿化。本研究中 P 处理对土壤氮矿化呈现促进趋势 (图 4) 的原因, 主要有以下两方面: (1) 磷添加提高了土壤 AP 的含量, 本研究中 AP 与土壤有机氮矿化显著正相关 (图 5), AP 含量的增加改善了土壤氨氧化细菌和氨氧化古菌微生物群落结构, 促进了土壤有机氮矿化^[4]。(2) 磷添加通过提高酶活性来促进氮矿化。相关性结果表明, Ure、NAG、LAP 与土壤有机氮矿化呈显著正相关关系 (图 5), 结合 SEM 分析的结果, 磷添加对 Ure 有显著正效应, 通过提高 Ure 活性来间接促进土壤有机氮矿化 (图 6d), 与林秋燕等^[36]发现磷添加通过增加酶活性促进土壤氮矿化的结果一致。

值得注意的是, 尽管本研究发现 N 和 NP 处理呈现降低有机氮矿化的趋势, P 处理呈现促进有机氮矿化的趋势, 但处理之间的差异均未达显著水平 (图 4), 这可能是由于氮磷添加的时间效应所致。研究表明, 长期磷添加 (≥ 6 年), 对氮矿化速率的促进效应才会显著^[37-38]。因此, 为更加科学、全面地评估氮磷添加对土壤有机氮矿化的影响, 需进一步开展氮磷添加长期效应的研究。

3.4 土层效应对毛竹林土壤有机氮矿化的影响

土层深度显著影响了土壤氮矿化速率,随着土层加深,土壤净氮矿化速率显著降低(图4)。牟静等^[17]在青藏高原草甸的氮添加试验中发现,土壤净硝化速率随土层加深呈下降趋势。该结论与高畅等^[7](0~5、5~20、20~40和40~60 cm)和宋思意等^[9](0~15、15~30和30~45 cm)的研究结论一致。本试验结果表明,土层对土壤有机氮矿化速率影响具有显著贡献的因子为BG、Ive、CBH和DON(图5),SEM结果表明土层效应主要通过降低BG活性和DON含量间接对有机氮矿化速率产生抑制作用(图6d)。表层土壤矿化速率显著高于中层和深层(图4)的原因有以下几个方面:(1)土壤养分和酶活性均随着土层加深而显著降低(图1,图2)。随土层加深,矿化反应的底物逐渐减少,土壤酶活性逐渐降低,有机氮矿化速率下降^[9]。(2)土层加深导致透气性变差,氧气含量降低。大多数参与氮转化的酶需在有氧条件下发挥最高活性,缺氧环境致使相关酶活性受抑,从而降低了有机氮的转化效率^[25]。(3)深层土壤中微生物生物量碳氮(MBC、MBN)的降低,直接限制了驱动矿化过程的微生物功能^[25]。(4)深层土壤中溶解性有机碳氮库贫乏,微生物为维持生存,仍会继续消耗本已有限的底物,导致矿化速率维持在极低水平^[7]。

此外,本研究发现,表层土壤氮矿化速率显著高于中层与深层,中层与深层的氮矿化速率无显著差异(图4)。宋思意等^[9]研究也发现,0~15 cm土层土壤的矿化速率显著高于15~30和30~45 cm土层,15~30和30~45 cm土层的氮矿化速率无显著差异。这与研究区丰沛的降水量有关,高降水量加速了养分向深层的淋溶,缩小了深层土壤与中层土壤在土壤养分、活性碳氮、微生物数量以及酶活性方面的差异。

4 结 论

在氮素相对富集、磷限制的亚热带毛竹林土壤中,短期(3年)的氮磷添加试验结果表明:单独氮添加(N处理)以及氮磷同时添加(NP处理)均对土壤氮矿化过程产生抑制倾向,而单独磷添加(P处理)则表现出促进氮矿化的趋势,但处理之间差异均不显著;土层效应显著影响了土壤氮矿化速率,表层土壤氮矿化速率显著高于中层和深层;结构方程模型揭示氮添加和土层效应通过降低BG和DON,间接抑制有机氮矿化;磷添加能够通过提高DON,间接促进有机氮矿化。考虑到氮磷添加对土壤氮矿化影响的时间效应以及亚热带森林土壤无机氮的垂直移动性,未来研究需进一步关注长期氮磷添加对不同土层亚热带森林土壤氮矿化的持续影响。

参考文献 (References)

- [1] Hagh-Doust N, Mikryukov V, Anslan S, et al. Effects of nitrogen deposition on carbon and nutrient cycling along a natural soil acidity gradient as revealed by metagenomics[J]. *New Phytologist*, 2023, 238(6): 2607-2620.
- [2] Zhang X, Su J X, Ji Y H, et al. Nitrogen deposition affects the productivity of planted and natural forests by modulating forest climate and community functional traits[J]. *Forest Ecology and Management*, 2024, 563: 121970.
- [3] Zeng Q X, Zhang Q F, Lin K M, et al. Enzyme stoichiometry evidence revealed that five years nitrogen addition exacerbated the carbon and phosphorus limitation of soil microorganisms in a *Phyllostachys pubescens* forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 521-528. [曾泉鑫, 张秋芳, 林开森, 等. 酶化学计量揭示5年氮添加加剧毛竹林土壤微生物碳磷限制[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 521-528.]
- [4] Yuan X C, Zeng Q X, Zhou Q, et al. Differential seasonal effects of nitrogen addition on nitrification potential and ammonia-oxidizing microorganisms in soil of subtropical moso bamboo forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(23): 10734-10744. [元晓春, 曾泉鑫, 周茜, 等. 氮添加对亚热带毛竹林土壤硝化潜势和氨氧化微生物的影响季节差异[J]. *生态学报*, 2024, 44(23): 10734-10744.]
- [5] Guan P, Wang R H, Shi R Y, et al. Inhibition mechanisms of acidification induced by urea application using organic carbon sources with different availability for microorganisms in Ultisol[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(1): 81-91. [官鹏, 王如海, 时仁勇, 等. 微生物利用性不同的有机碳源阻控尿素诱导红壤酸化的作用机制[J]. *土壤学报*, 2025, 62(1): 81-91.]
- [6] Wang Y F, Zheng M H, Wang S H, et al. Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil enzyme activities related N and P cycle in two plantations in South China[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2021, 29(3): 244-250. [王玉芳, 郑棉海, 王森浩, 等. 氮磷添加对华南地区2种人工林土壤氮磷循环酶活性的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(3): 244-250.]

- [7] Gao C, Fu R X, Mu W J, et al. Effects of mixed forests of Chinese fir and broad-leaved trees and understory planting on soil nitrogen mineralization[J]. Forest Research, 2024, 37(5): 23-32. [高畅, 付若仙, 沐炜杰, 等. 杉阔混交和林下套种对土壤氮矿化的影响[J]. 林业科学研究, 2024, 37(5): 23-32.]
- [8] Zhang Y H, Mao C, Yu H, et al. Effects of warming and nitrogen addition on soil nitrogen transformations in subtropical Chinese fir plantations[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2023, 18(2): 50-55. [张宇辉, 毛超, 余恒, 等. 增温和氮添加对亚热带杉木林土壤氮转化速率的影响[J]. 亚热带资源与环境学报, 2023, 18(2): 50-55.]
- [9] Song S Y, Lü S Y, Qiu L J, et al. Responses of soil nitrogen mineralization and enzyme activities at different depths to nitrogen additions in an evergreen broad-leaved forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9045-9056. [宋思意, 吕思扬, 邱岭军, 等. 华西南屏区常绿阔叶林不同深度土壤氮矿化及酶活性对模拟氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9045-9056.]
- [10] Cheng Y, Wang J, Ge Z W, et al. Background nitrogen deposition controls the effects of experimental nitrogen addition on soil gross N transformations in forest ecosystems[J]. Biogeochemistry, 2020, 151(2): 335-341.
- [11] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. Ecological Applications, 1997, 7(3): 737-750.
- [12] Wang R Z, Bicharanloo B, Hou E Q, et al. Phosphorus supply increases nitrogen transformation rates and retention in soil: A global meta-analysis[J]. Earth's Future, 2022, 10(3): e2021EF002479.
- [13] Hu T T, Bu D, Zhang Y, et al. Linking microbial nutrient limitation and community composition to nitrogen mineralization in bamboo forest soil with phosphorus addition[J]. Soil Ecology Letters, 2025, 7(1): 240270.
- [14] Lei Z F, Sun H F, Li Q, et al. Effects of nitrogen deposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in moso bamboo plantations strongly depend on management practices[J]. Forests, 2017, 8(11): 452.
- [15] Song X Z, Peng C H, Ciais P, et al. Nitrogen addition increased CO₂ uptake more than non-CO₂ greenhouse gases emissions in a Moso bamboo forest[J]. Science Advances, 2020, 6(12): eaaw5790.
- [16] Li Q, Song X Z, Gu H H, et al. Nitrogen deposition and management practices increase soil microbial biomass carbon but decrease diversity in Moso bamboo plantations[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28235.
- [17] Mou J, Bin Z J, Li Q X, et al. Effects of nitrogen and silicon addition on soil nitrogen mineralization in alpine meadows of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(1): 77-84. [牟静, 宾振钧, 李秋霞, 等. 氮硅添加对青藏高原高寒草甸土壤氮矿化的影响[J]. 植物生态学报, 2019, 43(1): 77-84.]
- [18] Xi D, Weng H D, Hu Y L, et al. Effects of canopy nitrogen addition and understory removal on soil organic carbon fractions in a Chinese fir plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8525-8534. [习丹, 翁浩东, 胡亚林, 等. 林冠氮添加和林下植被去除对杉木林土壤有机碳组分的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8525-8534.]
- [19] Huang K P, Li Y F, Song C F, et al. Effects of nitrogen deposition and biochar application on soil N₂O fluxes in a Moso bamboo plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(9): 3079-3088. [黄凯平, 李永夫, 宋成芳, 等. 氮沉降和施生物炭对毛竹林土壤 N₂O 通量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3079-3088.]
- [20] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [21] Chen L Y, Liu L, Mao C, et al. Nitrogen availability regulates topsoil carbon dynamics after permafrost thaw by altering microbial metabolic efficiency[J]. Nature Communications, 2018, 9: 3951.
- [22] 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[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [23] Guan S Y. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986. [关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.]
- [24] Pan X Y, Jian Y, Xu Z F, et al. Contrasting effects of different acid rain types on soil nitrogen pools[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 393: 127207.
- [25] Li X R, Lin H, Cao P L, et al. Long-term nitrogen application exacerbates soil phosphorus limitation at different depths in subtropical natural *Castanopsis carlesii* forest: Based on soil extracellular enzymes and their stoichiometric ratios[J]. Soils, 2024, 56(5): 963-974. [李欣冉, 林浩, 曹平丽, 等. 长期施氮加剧亚热带米槠天然林不同深度土壤磷限制: 基于土壤胞外酶活性及其化学计量比角度[J]. 土壤, 2024, 56(5): 963-974.]
- [26] Mori T, Yokoyama D, Kitayama K. Contrasting effects of exogenous phosphorus application on N₂O emissions from two tropical forest soils with contrasting phosphorus availability[J]. SpringerPlus, 2016, 5(1): 1237.
- [27] Wu J M, Zeng Q X, Mei K C, et al. Soil phosphorus availability regulates the response of soil enzyme activity and enzymatic stoichiometry to litter addition in a subtropical forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(2): 242-253. [吴君梅, 曾泉鑫, 梅孔灿, 等. 土壤磷有效性调控亚热带森林土壤酶活性和酶化学计量对凋落叶输入的响应[J]. 植物生态学报, 2024, 48(2): 242-253.]
- [28] Feng J G, Zhu B. A global meta-analysis of soil respiration and its components in response to phosphorus addition[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2019, 135: 38-47.
- [29] Song K C, Wang X, Xu D M, et al. Effects of short-term nitrogen addition on soil biological properties in desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 303-310, 318. [宋珂辰, 王星, 许冬梅, 等. 短期氮添加对荒漠草原土壤微生物特征的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 303-310, 318.]
- [30] Lu X K, Mo J M, Zhang W, et al. Effects of simulated atmospheric nitrogen deposition on forest ecosystems in China: An overview[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 27(5): 500-522. [鲁显楷, 莫江明, 张伟, 等. 模拟大气氮沉降对中国森林生态系统影响的研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(5): 500-522.]
- [31] Kadono A, Funakawa S, Kosaki T. Factors controlling mineralization of soil organic matter in the Eurasian steppe[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(4): 947-955.
- [32] Li H X, Hu F, Liu M Q, et al. Characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in red soil[J]. Soils, 2000, 32(4): 194-197, 214. [李辉信, 胡锋, 刘满强, 等. 红壤氮素的矿化和硝化作用特征[J]. 土壤, 2000, 32(4): 194-197, 214.]
- [33] Liu J Z, Wang P, Xiao H Y, et al. Soil nitrogen mineralization rate and nitrification rate and their influencing factors in China terrestrial ecosystem—Statistical analysis based on literature data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4207-4218. [刘君政, 王鹏, 肖汉玉, 等. 中国陆地生态系统土壤氮矿化速率和硝化速率及影响因素——基于文献数据的统计分析[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4207-4218.]
- [34] Chen T, Cheng R M, Shen Y F, et al. Effects of nitrogen addition on acidolizable organic nitrogen components and nitrogen mineralization in aggregates of *Pinus massoniana* plantations in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Chinese Journal

- of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2601-2609. [陈天, 程瑞梅, 沈雅飞, 等. 氮添加对三峡库区马尾松人工林土壤团聚体有机氮组分和氮矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2601-2609.]
- [35] Zhang X W, Wang Z W, Lü X T, et al. Contrasting priming effects in soils subjected to long-term urea versus inorganic nitrogen addition[J]. Soil and Tillage Research, 2026, 256: 106918.
- [36] Lin Q Y, Zhong Q L, Zou Y X, et al. Effects of N and P addition on the conversion rate of soil N and P in *Machilus pauhoi*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2023, 50(4): 702-708. [林秋燕, 钟全林, 邹宇星, 等. 氮磷添加对刨花楠人工林土壤氮磷矿化速率的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(4): 702-708.]
- [37] Chen H, Zhang W, Gurmessa G A, et al. Phosphorus addition affects soil nitrogen dynamics in a nitrogen-saturated and two nitrogen-limited forests[J]. European Journal of Soil Science, 2017, 68(4): 472-479.
- [38] Shi W, Zhang L M, Wang J S, et al. The subsequent effects of phosphorus fertilization in upland red soils and the underlying mechanisms[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1100-1111. [石伟, 张丽梅, 王劲松, 等. 磷肥在旱地红壤上的后期效应及其作用机制[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1100-1111.]

(责任编辑: 陈荣府)