

氮添加对毛竹林土壤磷组分的影响

王艺雄¹, 张华锋², 李 全¹, 张君波¹, 王绍良¹, 宋新章¹

(1. 浙江农林大学 省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 杭州市临安区农林技术推广中心, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】了解氮输入对毛竹 *Phyllostachys edulis* 林土壤磷组分的影响及其转化机制, 为实现毛竹林土壤磷的高效利用提供参考。【方法】以毛竹林为研究对象, 设置 4 个氮添加梯度: 0(对照)、30、60、90 kg·hm⁻²·a⁻¹, 利用生物有效磷分级方法测定表层土壤 (0~20 cm) 和深层土壤 (20~40 cm) 中的磷组分包括可溶性无机磷 (CaCl₂-P)、活性无机磷 (Citrate-P)、酶水解有机磷 (Enzyme-P) 和可溶性活性无机磷质子 (HCl-P) 质量分数, 探讨氮添加对毛竹林土壤磷组分的影响及其与土壤有效磷和理化性质的关系。【结果】与对照相比, 氮添加显著 ($P<0.05$) 增加了所有土层土壤中的 CaCl₂-P 质量分数 (28.5%~63.3%) 和深层土壤中 Enzyme-P 质量分数 (16.3%~33.6%), 而对深层土壤中 HCl-P 质量分数无显著影响 ($P>0.05$)。低氮处理显著 ($P<0.05$) 增加了表层土壤中 Citrate-P 质量分数 (43.5%), 中高氮处理显著 ($P<0.05$) 增加了表层土壤中 HCl-P 质量分数 (101.0%~155.2%)。在对照和氮添加处理中, 表层土壤中的不同磷组分质量分数均显著 ($P<0.05$) 高于深层土壤。表层土壤中不同磷组分均与有效磷呈显著正相关 ($P<0.05$), 而深层土壤中仅 Enzyme-P 与有效磷呈显著正相关 ($P<0.01$)。氮添加通过降低土壤 pH, 增加土壤有机碳、微生物生物量磷和酸性磷酸酶活性, 促进了土壤不同磷组分向土壤有效磷的转化。【结论】氮添加提高了毛竹林土壤磷的生物有效性, 为全球变化背景下毛竹林高效经营提供了科学参考。图 5 表 3 参 43

关键词: 氮添加; 生物有效性磷; 毛竹; 土壤微生物; 酸性磷酸酶

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)04-0695-10

Effect of nitrogen addition on soil phosphorus fractions in the *Phyllostachys edulis* plantation

WANG Yixiong¹, ZHANG Huafeng², LI Quan¹, ZHANG Junbo¹, WANG Shaoliang¹, SONG Xinzhong¹

(1. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

2. Agroforestry Technology Extension Center in Lin'an District, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to understand the effect of nitrogen (N) input on soil phosphorus (P) fraction and its transformation mechanism in moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantation, so as to provide a reference for achieving efficient use of soil phosphorus in moso bamboo plantation. [Method] Moso bamboo plantation were used as research subjects, four N addition gradients (0, 30, 60, 90 kg·hm⁻²·a⁻¹) were set and the bioavailable P method was used to determine P fractions (CaCl₂-P, Citrate-P, Enzyme-P and HCl-P) in the topsoil (0–20 cm) and subsoil (20–40 cm). The effect of N input on P fraction of moso bamboo plantation and its relationship with available P and soil physicochemical properties were explored. [Result] Compared to the control group, nitrogen addition significantly increased CaCl₂-P content (28.5%–63.3%) in all soil layers and Enzyme-P content (16.3%–33.6%) in the subsoil, and had no significant effect on the HCl-P content in the

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2022-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31930075, 32125027)

作者简介: 王艺雄 (ORCID: 0000-0001-7097-3973), 从事土壤生态研究。E-mail: 1255547117@qq.com。通信作者: 宋新章 (ORCID: 0000-0003-2434-7466), 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林碳氮循环与全球变化研究。E-mail: xzsong@126.com

subsoil. Low N treatment significantly increased the Citrate-P content (43.5%) in the topsoil and the medium to high N treatment significantly increased the HCl-P content in the topsoil (101.0%–155.2%). In both the control and N addition treatments, the different phosphorus fractions were significantly higher in the topsoil than in the subsoil. Each soil P fractions in the topsoil were significantly and positively correlated with available P ($P < 0.05$). Enzyme-P in the subsoil was only significantly and positively correlated with available P ($P < 0.01$). N addition accelerated the conversion of soil bioavailable P to available P by decreasing soil pH, increasing soil organic carbon, microbial biomass phosphorus, acid phosphatase activity. [Conclusion] The input of N increased the bioavailability of soil phosphorus in moso bamboo plantation, which could provide scientific reference for efficient management of moso bamboo plantation in the context of global change. [Ch, 5 fig. 3 tab. 43 ref.]

Key words: nitrogen input; bioavailable phosphorus; *Phyllostachys edulis*; soil microorganisms; acid phosphatase

磷是森林生态系统中重要的限制营养元素,参与生物体的各种代谢,其有效性在植物净初级生产力和微生物活性中起着重要作用^[1]。为研究土壤磷的有效性,一般将磷分为无机磷和有机磷两大类,利用不同的化学提取液对土壤磷进行分级^[2]。植物根系结合微生物利用一系列机制增加土壤磷的有效性^[3],传统的化学分级方法没有充分反映植物根系和微生物介导磷转化过程。基于此,DELUCA等^[4]提出了基于生物有效性的磷分级方法(biologically based phosphorus method, BBP法),定义了4种形式的生物可利用土壤磷组分,分别为用氯化钙提取的根系拦截和扩散的可溶性无机磷($\text{CaCl}_2\text{-P}$),用柠檬酸盐提取的吸附在黏土颗粒上或弱结合在无机沉淀物上的活性无机磷(Citrate-P),用酶提取被酸性磷酸酶和植酸酶水解的有机磷(Enzyme-P),用盐酸提取被植物和微生物产生的具有可溶性的活性无机磷质子(HCl-P)。该方法考虑到土壤根际与微生物分泌活化的磷表征磷组分^[5],有助于深入理解生态系统内驱动磷转化的生物学机制。

由于人为排放的活性氮含量增加,大气氮沉降加剧^[6]。中国亚热带地区是氮沉降最严重的地区之一,在过去30 a里氮沉降量的增幅约60%^[7-8]。相关研究表明:长期高强度氮输入会改变土壤微生物生物量和活性,增加土壤酸性磷酸酶活性,从而影响土壤磷循环过程^[9-11]。因此,在氮沉降背景下维持有效磷的供应来满足较高森林生产力已成为重要问题。毛竹 *Phyllostachys edulis* 是东亚和东南亚地区广泛栽植的竹种^[12],在中国面积为467.78万 hm^2 ,占全国竹林面积的72.96%,是重要的森林资源,在缓解气候变化方面具有重要的潜力^[7, 13-14]。毛竹是无性繁殖植物,由复杂的地下根鞭上的笋芽发育而成^[15],地下根系生物量占地上生物量的30%~50%,远高于其他类型森林生态系统^[7, 16]。因此,毛竹林土壤磷循环尤其是生物有效磷组分极有可能与其他森林不同。毛竹主要分布在中国亚热带地区,其氮沉降量已经达 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[17]。LI等^[11]研究发现:氮添加增加了毛竹林凋落物量、磷归还量、土壤酸化、土壤微生物生物量磷和有效磷,但降低了叶片磷养分吸收率和丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)侵染率^[18],而氮沉降对毛竹土壤磷组分的研究还未见报道,制约了对大气氮沉降增强背景下毛竹林生产力响应机制的认识。本研究拟在不同氮添加强度处理下,分析毛竹林土壤不同深度磷组分的含量及其影响因素,量化各组分对土壤有效磷的贡献程度,为改进毛竹林经营管理措施、提升毛竹林生产力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

样地位于浙江省杭州市临安区青山湖街道。该地区属于亚热带季风气候,年均气温为 15.6°C ,年均降水量为1420 mm,年均日照时数为1847 h,年均无霜期约230 d,地形地貌为低山丘陵,海拔为100~300 m,土壤类型属于黄土壤^[19]。

1.2 试验设计

2012年11月在样地内设立了12个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的典型样地,并在样地间设置了20 m的缓冲隔离区以

避免附近地块的干扰。以当地平均大气氮沉降速率约 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$ 和年平均铵态氮/硝态氮比值 ($\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$) 1.28 为依据, 以硝酸铵 (NH_4NO_3) 为氮源^[17], 设置了 4 个氮沉降处理水平, 分别为对照 ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, N_0)、低氮 ($30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, N_{30})、中氮 ($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, N_{60}) 和高氮 ($90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, N_{90}), 每个处理重复 3 次。从 2013 年 1 月开始每月初配置对应样地所需质量的 NH_4NO_3 溶于 10 L 水中, 使用电动喷雾器将配好的溶液均匀地喷洒在每个样地上, 1 a 进行 12 次等量的喷洒, 同时在对照组内采用同样的方法喷洒 10 L 水, 避免加水对试验的影响。受新冠病毒疫情影响, 样地从 2020 年 1 月起停止喷氮。

1.3 样品采集与测定

2020 年 8 月, 在每个样地内随机选取 5 个点, 去除土壤上层凋落物, 使用土钻对各处理样地的土壤分为表层 (0~20 cm) 和深层 (20~40 cm) 进行采样, 将各土层的土样均匀混合, 装入无菌袋后放入 4°C 便携式恒温箱中带回实验室。带回后立即对土壤进行预处理, 剔除其中的石块、根系等杂物后, 过 2 mm 土筛, 将土样分为 3 份, 分别作自然风干及储存于 4°C 和 -20°C 冰箱内低温保存处理。

土壤 pH 采用 PHS-3C 酸度计测定, 土壤有机碳和土壤全氮通过碳氮元素分析仪测定, 土壤全磷采用高氯酸-硫酸 ($\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$) 法测定, 土壤有效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠 (NaHCO_3) 浸提, 钼蓝比色法测定。土壤微生物生物量磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 作为土壤浸提剂的氯仿熏蒸浸提法^[20]。土壤酸性磷酸酶活性采用对硝基苯磷酸二钠比色法测定^[21]。

基于生物有效性的土壤磷分级测定采用 DELUCA 等^[4]提出的 BBP 方法。分别称取 0.5 g 土壤加入 4 个 15 mL 离心管, 分别平行加 10 mL 提取液, 其中 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 提取液用于提取 $\text{CaCl}_2\text{-P}$, $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸提取液用于提取 Citrate-P, $0.02 \times 16.67 \mu\text{kat} \cdot \text{L}^{-1}$ 酶提取液用于提取 Enzyme-P, $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸提取液用于提取 HCl-P , 震荡 3 h, 离心提取上清液。所有提取液稀释并采用孔雀石绿法测定磷质量分数^[22]。

1.4 数据处理

采用可重复双因素方差分析 (two-way ANOVA) 探讨氮添加和土壤深度及两者的交互作用对磷组分和土壤理化性质的影响。采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 探讨不同氮添加处理间土壤理化性质和磷组分差异, 利用 Pearson 相关系数分析土壤磷组分与土壤理化性质的相关性。采用 SPSS 25.0 软件完成数据分析, 所有数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 氮添加对不同深度土壤理化性质的影响

可重复双因素方差分析 (表 1) 表明: 除总磷外, 氮添加、土壤深度及两者复合作用均显著影响了土

表 1 氮添加和土壤深度及其交互作用对土壤磷组分质量分数和理化性质的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA about the effects of N addition, soil depth and their interactions on the concentrations of P fraction content and soil physicochemical properties

项目	氮添加		土壤深度		氮添加 $\times$ 土壤深度	
	<i>F</i>	η^2	<i>F</i>	η^2	<i>F</i>	η^2
pH	79.76**	0.93	253.45**	0.94	12.09**	0.69
SOC	82.37**	0.94	603.42**	0.99	41.48**	0.89
TN	105.50**	0.95	213.81**	0.99	7.46*	0.58
TP	81.43**	0.94	68.09**	0.81	0.38	0.07
AP	87.08**	0.94	101.26**	0.95	82.86**	0.94
MBP	452.98**	0.98	60.66**	0.79	182.38**	0.97
ACP	512.74**	0.99	124.97**	0.94	22.77**	0.63
$\text{CaCl}_2\text{-P}$	24.50**	0.82	8.26*	0.34	1.59	0.23
Citrate-P	118.65**	0.93	65.89**	0.92	39.42**	0.84
Enzyme-P	30.23**	0.65	8.13*	0.60	9.02*	0.63
HCl-P	574.53**	0.99	86.86**	0.94	81.68**	0.94

说明: pH指酸碱度; SOC指有机碳; TN指总氮; TP指总磷; AP指有效磷; MBP指土壤微生物生物量磷; ACP指酸性磷酸酶活性; η^2 指方差分析中的效应量。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

壤理化性质 ($P<0.05$)。由表2可知:与对照组相比,表层土壤中,氮添加显著降低了 pH ($P<0.05$), 降幅为 5.2%~6.2%, 显著增加了表层土壤中的全磷、有效磷和微生物生物量磷质量分数及酸性磷酸酶活性 ($P<0.05$), 增幅分别为 14.3%~23.8%、62.4%~197.8%、100.1%~229.1% 和 47.9%~79.2%; 添加低氮和高氮显著增加了表层土壤有机碳质量分数 ($P<0.05$), 增幅分别为 27.2% 和 4.7%; 添加中氮显著降低了表层土壤有机碳质量分数 ($P<0.05$), 降幅为 3.9%。在深层土壤中, 氮添加显著降低了土壤 pH 和有机碳质量分数 ($P<0.05$), 降幅分别为 6.2%~11.6% 和 9.3%~33.3%; 显著增加了土壤全磷、有效磷和微生物生物量磷质量分数及酸性磷酸酶活性 ($P<0.05$), 增幅分别为 26.5%~40.8%、36.4%~175.5%、34.3%~59.3%、23.7%~76.3%。在对照组和氮添加处理下, 深层土壤中的 pH 显著高于表层土壤 ($P<0.05$), 高 3.5%~10.7%, 而有机碳质量分数、有效磷质量分数和酸性磷酸酶活性显著低于表层土壤 ($P<0.05$), 分别低 49.6%~185.3%、320.9%~819.3%、26.3%~46.8%。深层土壤全磷质量分数在低氮和中氮添加下分别显著提高了 32.7% 和 29.2% ($P<0.05$), 微生物生物量磷质量分数在中氮添加下显著增加了 20.2% ($P<0.05$), 在高氮添加下显著降低了 23.7% ($P<0.05$)。

表2 氮添加对表层和深层土壤理化性质的影响

Table 2 Soil physical and chemical properties of topsoil and subsoil under N addition treatments

土壤深度/cm	处理	pH	SOC/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)	MBP/(mg·kg ⁻¹)	ACP/(μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
0~20	N ₀	4.20±0.07 aB	24.31±0.29 cA	2.29±0.09 aA	0.42±0.01 cA	4.63±0.09 dA	7.26±0.31 cB	0.48±0.02 dA
	N ₃₀	3.98±0.03 bB	30.93±0.16 aA	1.80±0.04 cA	0.52±0.01 aB	13.79±0.04 aA	14.53±0.16 bA	0.71±0.02 cA
	N ₆₀	3.97±0.06 bA	23.35±0.08 dA	2.10±0.01 bA	0.48±0.02 bB	7.52±0.03 cA	14.52±0.17 bB	0.79±0.01 bA
	N ₉₀	3.94±0.03 bB	25.45±0.50 bA	2.08±0.08 bA	0.52±0.01 aA	8.87±0.09 bA	23.89±0.67 aA	0.86±0.02 aA
20~40	N ₀	4.65±0.03 aA	16.25±0.05 aB	1.42±0.02 aB	0.49±0.02 cA	1.10±0.05 dB	11.44±0.34 dA	0.38±0.01 dB
	N ₃₀	4.36±0.05 bA	10.84±0.08 dB	0.96±0.01 dB	0.69±0.01 aA	1.50±0.05 cB	15.36±0.30 cA	0.47±0.04 cB
	N ₆₀	4.11±0.06 cA	14.74±0.31 bB	1.25±0.03 bB	0.62±0.01 bA	1.93±0.01 bB	17.45±0.50 bA	0.55±0.01 bB
	N ₉₀	4.21±0.03 cA	12.33±0.10 cB	1.01±0.01 cB	0.48±0.01 cA	3.03±0.04 aB	18.22±0.25 aB	0.67±0.11 aB

说明:不同小写字母表示在同一土壤深度处理下不同氮添加处理间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一氮添加处理下不同土壤深度间差异显著($P<0.05$)

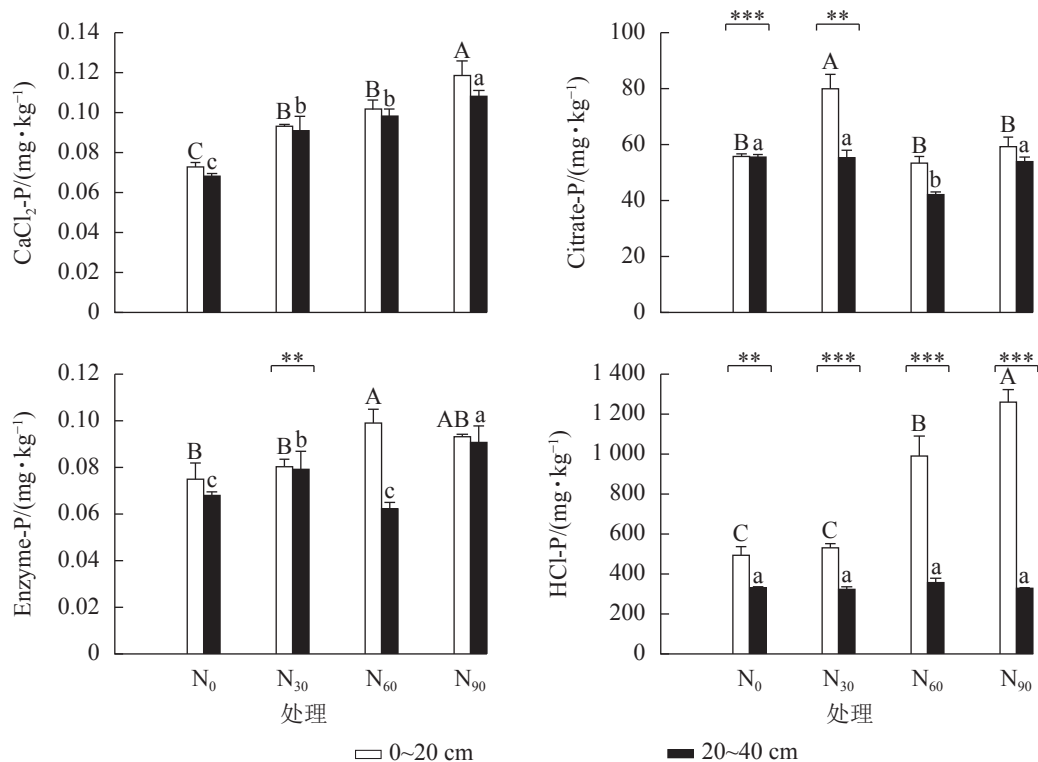
2.2 氮添加对不同深度土壤磷组分的影响

可重复双因素方差分析(表1)表明:氮添加和土壤深度及其复合作用,除 CaCl₂-P 外,对其他几种生物有效性磷组分质量分数均具有显著影响 ($P<0.05$)。图1显示:氮添加显著增加了基于生物有效性的土壤磷组分质量分数 ($P<0.05$)。在表层土壤中,与对照组相比,低氮显著增加了 CaCl₂-P 和 Citrate-P 质量分数 ($P<0.05$), 增幅分别为 28.5% 和 43.5%; 中氮显著增加了 CaCl₂-P、Enzyme-P 和 HCl-P 质量分数 ($P<0.05$), 增幅分别为 39.7%、32.4% 和 101.0%; 高氮显著增加了 CaCl₂-P 和 HCl-P 质量分数 ($P<0.05$), 增幅分别为 63.3% 和 155.2%。在深层土壤中,与对照组相比,低氮显著增加了 CaCl₂-P 和 Enzyme-P 质量分数 ($P<0.05$), 增幅分别为 33.6% 和 33.6%; 中氮显著增加了 CaCl₂-P 质量分数 ($P<0.05$), 增幅为 44.3%, 而显著降低了 Citrate-P 质量分数 ($P<0.05$), 降幅为 24.3%; 高氮显著增加了 CaCl₂-P 和 Enzyme-P 质量分数 ($P<0.05$), 增幅分别为 58.6% 和 33.6%; 氮添加对 HCl-P 质量分数无显著影响, HCl-P 质量分数随土壤深度的增加显著降低。在中氮处理下, Citrate-P 和 Enzyme-P 质量分数随土壤深度的增加显著降低。

2.3 磷组分与土壤理化性质的关系

相关性结果(表3)表明:表层土壤有效磷与各磷组分均呈显著正相关 ($P<0.05$), 其中有效磷质量分数与 Citrate-P 质量分数的相关性最高 ($r=0.696$), 与 Enzyme-P ($r=0.522$) 和 HCl-P ($r=0.417$) 次之, 与 CaCl₂-P 最低 ($r=0.375$); 深层土壤有效磷与 Enzyme-P 呈显著正相关 ($P<0.01$, $r=0.711$)。

由图2~5可见:土壤 pH 与 CaCl₂-P ($P<0.01$)、Enzyme-P ($P<0.05$) 和 HCl-P ($P<0.01$) 呈显著负相关, 土壤酸性磷酸酶活性与 CaCl₂-P、Enzyme-P 和 HCl-P 呈显著正相关 ($P<0.01$), 土壤微生物生物量磷与 CaCl₂-P 呈显著正相关 ($P<0.01$), 土壤有机碳与 Citrate-P ($P<0.01$) 和 HCl-P ($P<0.05$) 呈显著正相



不同大写字母表示 0~20 cm 土层不同施氮处理间差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示 20~40 cm 土层不同施氮处理间差异显著 ($P<0.05$); ** 和 *** 表示在相同施氮情况下不同深度之间差异显著, ** $P<0.01$ 、*** $P<0.001$

图 1 不同氮添加对不同深度土壤磷组分质量分数的影响

Figure 1 Soil P fraction content in different soil depth and N addition treatments

关。土壤 pH 和酸性磷酸酶活性对 CaCl₂-P ($P<0.01$) 的影响更为显著。土壤有机碳对 Citrate-P ($P<0.01$) 的影响更为显著。

3 讨论

3.1 氮添加和土壤深度对土壤磷组分的影响

本研究中,除深层土壤中 HCl-P 质量分数外,氮添加显著增加了各土层生物有效性磷质量分数。主要原因是氮添加导致了植物和土壤中氮磷摩尔比远小于陆地生态系统中的氮磷摩尔比^[23]。在表层和深层土壤中,所有水平的氮添加显著增加了 CaCl₂-P 质量分数,原因可能是氮添加增加了毛竹林根系生物量^[7],增加了根系对无机磷的拦截,从而提高了土壤中 CaCl₂-P 质量分数。在表层土壤中, Citrate-P 质量分数仅在低氮处理下显著增加,而在中氮和高氮处理下无显著变化,原因是中、高氮处理下土壤中铵态氮和硝态氮离子含量显著提高,促使土壤中离子达到饱和状态^[24],从而抑制了根系分泌的有机酸对磷的活化作用。中、高氮添加处理提高了 Enzyme-P 和 HCl-P 质量分数,这是由于中、高氮处理显著增加了酸性磷酸酶 (ACP) 活性,降低了土壤 pH。相关性分析也表明: Enzyme-P 和 HCl-P 质量分数与土壤 pH 呈显著负相关,而与 ACP 呈显著正相关,支持了上述观点。在深层土壤中,所有水平的氮添加均显著增加了 Enzyme-P 质量分数,但对 HCl-P 质量分数无显著影响,表明氮添加促进了深层土壤中的有机磷转化,而对中等无机磷转化无显著影响。在对照和氮添加处理下,表层土壤中各磷组分的质量分数高于深层土壤,尤其是 HCl-P 质量分数。这可能是由于毛竹林表层土壤中根系生物量和微生物量高于深层土壤,高的根系和微生物量和活性加剧了土壤磷的转化,从而增加了土壤生物有效磷质量分数。陈红等^[25]研究发现:毛竹表层土壤 (0~20 cm) 的根系生物量是深层土壤 (20~40 cm) 的 2.35 倍,且毛竹土壤微生物生物量随土壤深度的增加而减少^[26],支持了

表 3 不同土壤深度磷组分与有效磷之间的相关关系

Table 3 Correlation coefficients between P components and available P in different soil depth

项目	土壤深度/cm	CaCl ₂ -P	Citrate-P	Enzyme-P	HCl-P
AP	0~20	0.375*	0.696**	0.522**	0.417*
	20~40	0.286	-0.151	0.711**	-0.493

说明: * $P<0.05$; ** $P<0.01$

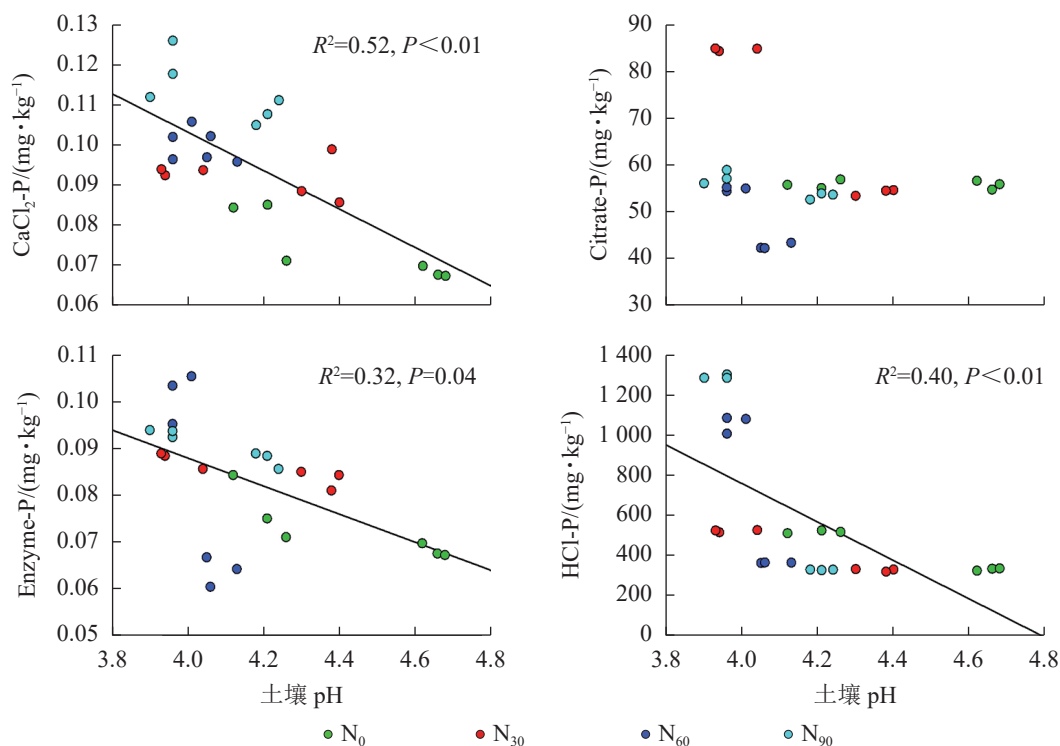


图2 不同磷组分与土壤 pH 的相关性

Figure 2 Relationship between different P fraction and soil pH

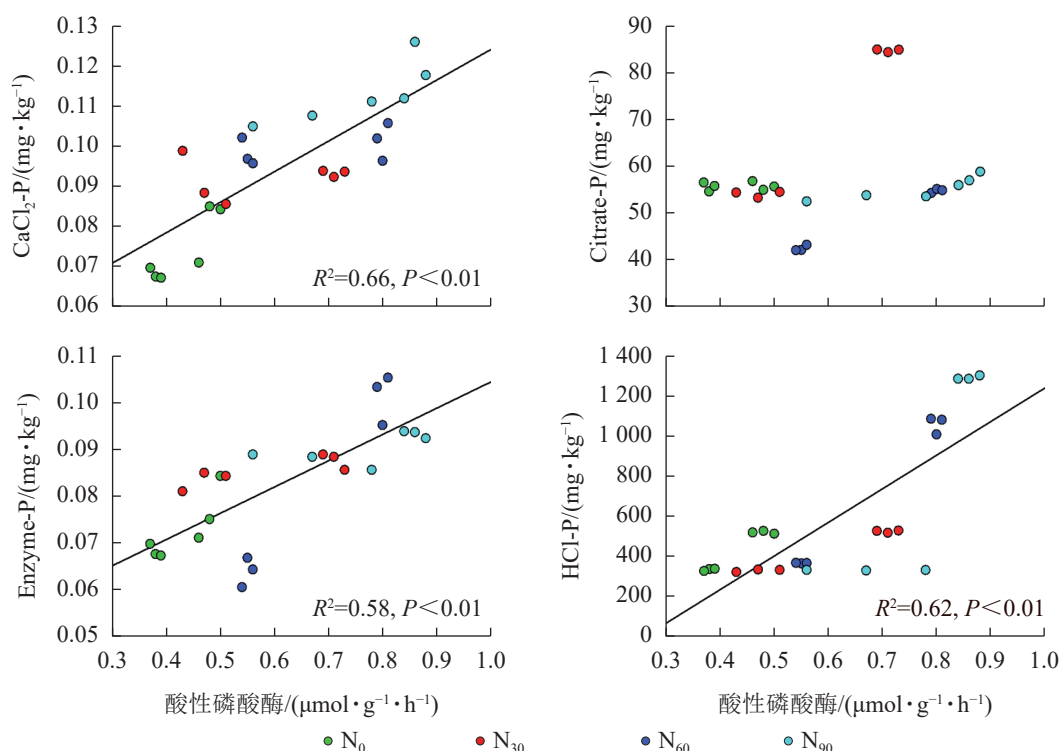


图3 不同磷组分与土壤酸性磷酸酶的相关性

Figure 3 Relationship between different P fraction and soil acid phosphate

上述观点。因此表层土壤会提供更多的生物有效磷。

对照及其氮添加处理下的 4 种磷组分质量分数由高到低依次是 HCl-P、Citrate-P、CaCl₂-P、Enzyme-P, 氮添加未改变 4 种磷组分质量分数分布模式, 表明土壤生物有效性磷主要以无机形式存在, 不会受氮添加的影响。表层土壤中有效磷与所有磷组分间均有显著的正相关关系, 与 Citrate-P 的相关系数最

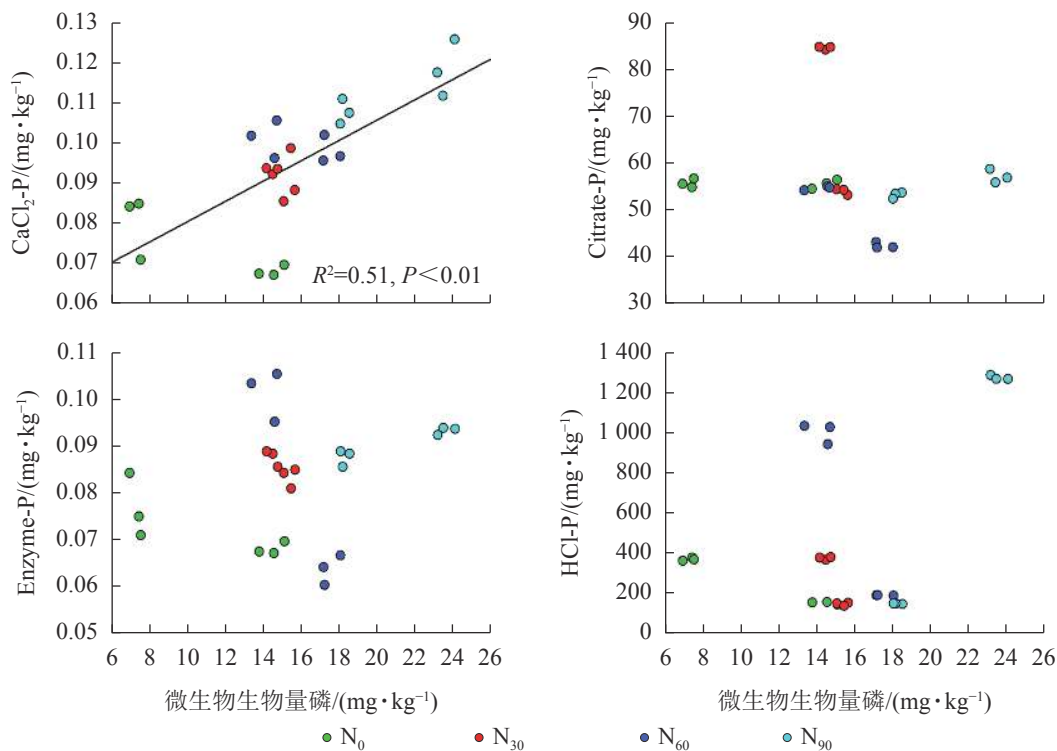


图 4 不同磷组分与土壤微生物生物量磷的相关性

Figure 4 Relationship between different P fraction and soil microbial biomass phosphorus

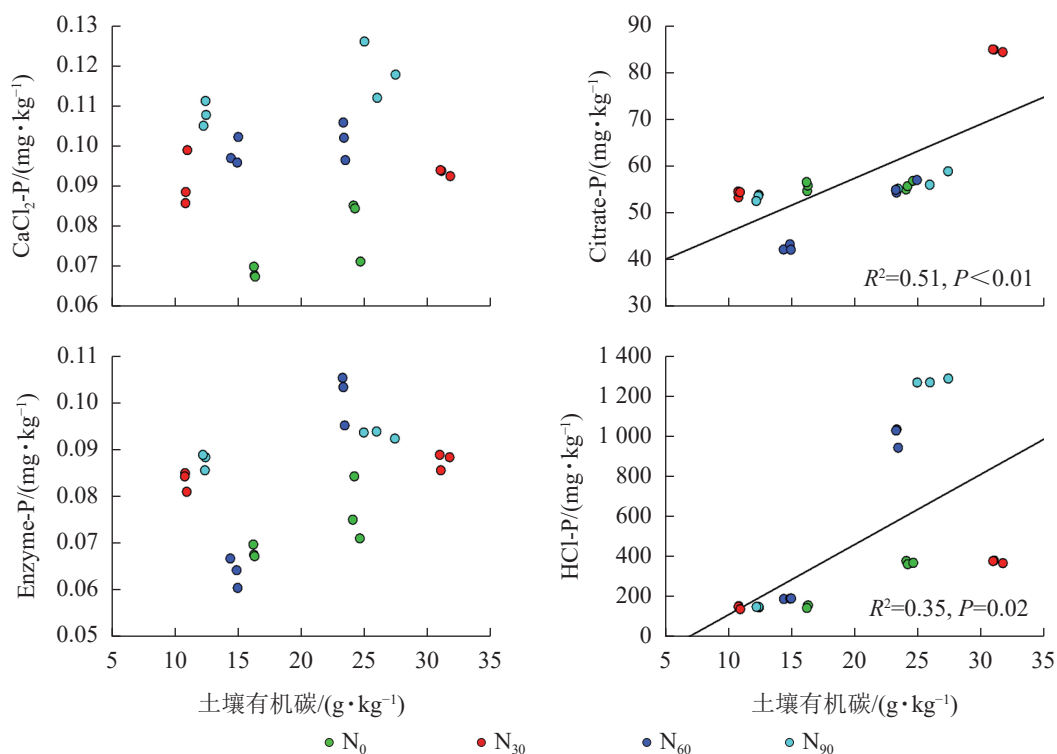


图 5 不同磷组分与土壤有机碳的相关性

Figure 5 Relationship between different P fraction and soil organic carbon

大, 与 Enzyme-P 的相关系数次之, 表明毛竹林表层土壤中的有效磷主要来自于有机酸活化释放的无机磷。在农田生态系统中也发现 Citrate-P 的贡献最大^[27]。深层土壤中有有效磷仅与 Enzyme-P 呈显著正相关, 表明毛竹林深层土壤有机磷库的酶矿化显著影响了有效磷, DODD 等^[28]研究发现: 土壤有机磷库矿化直接转化为有效磷, 影响了有效磷的水平。

3.2 土壤磷素组成的其他影响因素

土壤 pH 显著影响土壤磷组分, 但影响程度和方向有所不同^[29]。本研究发现: 土壤 pH 与土壤磷组分质量分数呈显著负相关, 这与 DELUCA 等^[4]的大尺度研究结果相反。氮添加导致土壤 pH 显著降低, 土壤 pH 降低会加速土壤有机磷的矿化, 从而增加有效磷质量分数^[30]。有研究表明: 酸性土壤中磷的有效性与铁、铝参与的化学过程密切相关, 土壤有效磷增加会和可交换铝离子 (Al^{3+}) 和铁离子 (Fe^{3+}) 结合形成稳定的磷^[31]。短时间内由于土壤磷限制, 这些可利用磷会被植物和土壤中微生物利用, 但长期的氮添加可能使土壤中的 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 吸附和固定作用降低^[32], 从而导致土壤生物有效性磷的质量分数降低。因此, 需要加强土壤 pH 与土壤磷组分关系的研究。

微生物在土壤磷的转化过程中起着重要作用^[33-34]。土壤微生物是土壤生态环境中最为重要且对环境变化极其敏感的生物活性因子^[35]。施氮会影响土壤微生物活动, DENG 等^[36]研究表明: 低水平的氮添加促进微生物生长, 而当氮添加的量超过饱和点后会抑制微生物生长表现出抑制作用。本研究发现: 氮添加显著增加了土壤微生物生物量磷, 从而增加了土壤的有效磷, 主要原因是氮肥的成分硝酸铵中存在 NH_4^+ , 且土壤 pH 降低, 都有助于微生物分解无机磷。土壤微生物生物量磷与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 质量分数呈显著正相关, 表明土壤磷与微生物显著相关。土壤微生物的代谢和活性还与土壤有机碳密切相关^[37]。氮添加加快了土壤表层凋落物分解, 叶凋落物生物量与土壤有机碳呈负相关^[38], 从而导致土壤有机碳含量增加。土壤中有机碳含量的增加有助于形成更丰富活跃的土壤微生物群落, 促进菌根的形成和无机活性质子的增加^[39], 从而增加生物有效性磷含量。土壤有机碳作为微生物活动能量的主要来源^[40], 它的增加还可以提高脲酶和磷酸酶等的活性^[41]。土壤酸性磷酸酶是酸性土壤中参加磷矿化的重要酶类。酸性磷酸酶与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Enzyme-P 和 HCl-P 呈显著正相关。磷酸酶中的氮含量相对较高, 在它们参与的反应过程中需要大量的氮, 因此氮添加可以显著增加土壤酸性磷酸酶的产量和活性, 从而提高磷的生物有效性^[42-43], 减轻磷限制, 有利于毛竹林生产力的提升^[7]。

4 参考文献

- [1] ZHOU Kaijun, LU Xiankai, MORI T, *et al.* Effects of long-term nitrogen deposition on phosphorus leaching dynamics in a mature tropical forest [J]. *Biogeochemistry*, 2018, **138**(2): 215 – 224.
- [2] HEDLEY M J, STEAWART J W B. Method to measure microbial phosphate in soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 1982, **14**(4): 377 – 385.
- [3] RICHARDSON A E, BAREA J M, MCNEILL A M, *et al.* Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms [J]. *Plant Soil*, 2009, **321**(1/2): 305 – 339.
- [4] DELUCA T H, GLANVILLE H C, HARRIS M, *et al.* A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes [J]. *Soil Biol Biochem*, 2015, **88**: 110 – 119.
- [5] 黄翊兰, 崔丽娟, 李春义, 等. 滨海滩涂湿地不同植被土壤磷的生物有效性及其影响因子分析[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(10): 1999 – 2005.
HUANG Yilan, CUI Lijuan, LI Chunyi, *et al.* Biologically-based availability and influencing factors of soil phosphorus under different vegetation in coastal beach wetlands [J]. *Ecol Environ Sci*, 2019, **28**(10): 1999 – 2005.
- [6] LIU Xuejun, ZHANG Ying, HAN Wenxuan, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459 – 462.
- [7] SONG Xinzhang, PENG Changhui, CIAIS P, *et al.* Nitrogen addition increased CO_2 uptake more than non- CO_2 greenhouse gases emissions in a Moso bamboo forest[J/OL]. *Sci Adv*, 2020, **6**(12): eaaw5790[2022-02-22]. doi: 10.1126/sciadv.aaw5790.
- [8] 姚钧能, 吕建华, 俞卫良, 等. 氮沉降和经营强度对毛竹林凋落叶生态化学计量特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(2): 467 – 473.
YAO Junneng, LÜ Jianhua, YU Weiliang, *et al.* Effects of nitrogen deposition and management intensity on stoichiometry of leaf litter in Moso bamboo forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29**(2): 467 – 473.
- [9] LI Quan, SONG Xinzhang, GU Honghao, *et al.* Nitrogen deposition and management practices increase soil microbial biomass carbon but decrease diversity in Moso bamboo plantations[J/OL]. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): 28235[2022-02-21]. doi: 10.1038/srep28235.

- [10] 田沐雨, 于春甲, 汪景宽, 等. 氮添加对草地生态系统土壤 pH、磷含量和磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(9): 2985–2992.
TIAN Muyu, YU Chunjia, WANG Jingkuan, *et al.* Effect of nitrogen additions on soil pH, phosphorus contents and phosphatase activities in grassland [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(9): 2985–2992.
- [11] LI Quan, LÜ Jianhua, PENG Changhui, *et al.* Nitrogen-addition accelerates phosphorus cycling and changes phosphorus use strategy in a subtropical moso bamboo forest[J/OL]. *Environ Res Lett*, 2021, **16**(2): 024023[2022-02-21]. doi: 10.1088/1748-9326/abd5e1.
- [12] 彭春菊, 李全, 顾鸿昊, 等. 模拟氮沉降及经营方式对毛竹林土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(2): 423–429.
PENG Chunju, LI Quan, GU Honghao, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition and management type on soil enzyme activities in moso bamboo forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28**(2): 423–429.
- [13] 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.
LI Yumin, FENG Pengfei. Bamboo resources in China based on the Ninth National Forest Inventory Data [J]. *World Bamboo Rattan*, 2019, **17**(6): 45–48.
- [14] LI Quan, SONG Xinzhang, CHANG S X, *et al.* Nitrogen depositions increase soil respiration and decrease temperature sensitivity in a moso bamboo forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2019, **268**: 48–54.
- [15] SONG Xinzhang, PENG Changhui, ZHOU Guomo, *et al.* Dynamic allocation and transfer of non-structural carbohydrates, a possible mechanism for the explosive growth of moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) [J/OL]. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): 25908[2022-02-21]. doi:10.1038/srep25908.
- [16] SUN Huanfa, LI Quan, LEI Zhaofeng, *et al.* Ecological stoichiometry of nitrogen and phosphorus in moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) during the explosive growth period of new emergent shoots [J]. *J Plant Res*, 2019, **132**(1): 107–115.
- [17] SONG Xinzhang, LI Quan, GU Honghao. Effect of nitrogen deposition and management practices on fine root decomposition in moso bamboo plantations [J]. *Plant Soil*, 2017, **410**(1/2): 207–215.
- [18] SONG Xinzhang, GU Honghao, WANG Meng, *et al.* Management practices regulate the response of moso bamboo foliar stoichiometry to nitrogen deposition[J/OL]. *Sci Rep*, 2016, **6**(1): 24107[2022-02-21]. doi: 10.1038/srep24107.
- [19] SONG Xinzhang, ZHOU Guomo, GU Honghao, *et al.* Management practices amplify the effects of N deposition on leaf litter decomposition of the moso bamboo forest [J]. *Plant Soil*, 2015, **395**(1/2): 391–400.
- [20] 李品, 木勒德尔·吐尔汗拜, 田地, 等. 全球森林土壤微生物生物量碳氮磷化学计量的季节动态[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(6): 532–542.
LI Pin, Tuerhanbai Muledeer, TIAN Di, *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across global forest ecosystems [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2019, **43**(6): 532–542.
- [21] PENG Chunju, LI Quan, ZHANG Zhiting, *et al.* Biochar amendment changes the effects of nitrogen deposition on soil enzyme activities in a moso bamboo plantation [J]. *J For Res*, 2019, **24**(5): 275–284.
- [22] 徐幸福, 郑日如, 王彩云. 孔雀石绿法测定溶液中无机磷[C]// 张启翔. 中国观赏园艺研究进展. 北京: 中国林业出版社, 2013: 529–533.
XU Xingfu, ZHENG Riru, WANG Caiyun. Determination of inorganic phosphorus using diamond green method[C]// ZHANG Qixiang. *Advance in Ornamental Horticulture of China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013: 529–533.
- [23] PEÑUELAS J, SARDANS J, RIVAS-UBACH A, *et al.* The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system [J]. *Glob Chang Biol*, 2011, **18**: 3–6.
- [24] 张晗, 李全, 郭子武, 等. 施氮对毛竹笋营养成分的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(1): 112–119.
ZHANG Han, LI Quan, GUO Ziwu, *et al.* Effects of nitrogen application on nutritional components of *Phyllostachys edulis* shoot [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2021, **38**(1): 112–119.
- [25] 陈红, 冯云, 周建梅, 等. 毛竹根系生物量分布与季节动态变化[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(10): 1678–1681.
CHEN Hong, FENG Yun, ZHOU Jianmei, *et al.* Root biomass distribution and seasonal variation of *Phyllostachys edulis* [J]. *Ecol Environ Sci*, 2013, **22**(10): 1678–1681.
- [26] 黄承才. 中亚热带东部毛竹林土壤微生物生物量的研究[J]. 浙江林业科技, 2002, **22**(4): 6–9.
HUANG Chengcai. Study on microbe biomass in *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* stand in the eastern subtropical region [J]. *J Zhejiang Sci Technol*, 2002, **22**(4): 6–9.

- [27] 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 等. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1606 – 1612.
- CAI Guan, HU Yajun, WANG Tingting, *et al.* Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farmland soil [J]. *Environ Sci*, 2017, **38**(4): 1606 – 1612.
- [28] DODD R J, SHARPLEY A N. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality [J]. *Resour Conserv Recycl*, 2015, **105**: 282 – 293.
- [29] HINSINGER P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review [J]. *Plant Soil*, 2001, **237**(2): 173 – 195.
- [30] ANDERSSON K O, TIGHE M K, GUPPY C N, *et al.* Incremental acidification reveals phosphorus release dynamics in alkaline vertic soils [J]. *Geoderma*, 2015, **259/260**: 35 – 44.
- [31] MARKLEIN A R, HOULTON B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems [J]. *New Phytol*, 2012, **193**(3): 696 – 704.
- [32] FAGERIA N K, BARBOSA F M P. Influence of pH on productivity, nutrient use efficiency by dry bean, and soil phosphorus availability in a No-Tillage System [J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2008, **39**(7/8): 1016 – 1025.
- [33] 蔡银美, 赵庆霞, 张成富. 低磷下植物根系分泌物对土壤磷转化的影响研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2021, **52**(2): 79 – 86.
- CAI Yinmei, ZHAO Qingxia, ZHANG Chengfu. Effect of plant root exudates on soil phosphorus transformation under low phosphorus: a review [J]. *J Northeast Agric Univ*, 2021, **52**(2): 79 – 86.
- [34] 曾泉鑫, 曾晓敏, 林开森, 等. 亚热带毛竹林土壤磷组分和微生物对施氮的响应[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(3): 753 – 760.
- ZENG Quanxin, ZENG Xiaomin, LIN Kaimiao, *et al.* Responses of soil phosphorus fractions and microorganisms to nitrogen application in a subtropical *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(3): 753 – 760.
- [35] 杨静怡, 王旭, 孙立飞, 等. 氮磷添加对长白山温带森林土壤微生物群落组成和氨基糖的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(6): 1948 – 1956.
- YANG Jingyi, WANG Xu, SUN Lifei, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community and amino sugar in a temperate forest on Changbai Mountain, Northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(6): 1948 – 1956.
- [36] DENG Qi, HUI Dafeng, DENNIS S, *et al.* Responses of terrestrial ecosystem phosphorus cycling to nitrogen addition: a meta-analysis [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2017, **26**(6): 713 – 728.
- [37] HACKER N, EBELING A, GESSLER A, *et al.* Plant diversity shapes microbe-rhizosphere effects on P mobilisation from organic matter in soil [J]. *Ecol Lett*, 2015, **18**(12): 1356 – 1365.
- [38] 洪小敏, 魏强, 李梦娇, 等. 亚热带典型森林地上和地下凋落物输入对土壤新老有机碳动态平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(3): 825 – 835.
- HONG Xiaomin, WEI Qiang, LI Mengjiao, *et al.* Effects of aboveground and belowground litter inputs on the balance of soil new and old organic carbon under the typical forests in subtropical region [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, **32**(3): 825 – 835.
- [39] XIAO Dan, CHE Rongxiao, LIU Xin, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi abundance was sensitive to nitrogen addition but diversity was sensitive to phosphorus addition in karst ecosystems [J]. *Biol Fertil Soils*, 2019, **55**(5): 457 – 469.
- [40] LANGE M, EISENHAEUER N, SIERRA C A, *et al.* Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage[J/OL]. *Nat Commun*, 2015, **6**(1): 6707[2022-02-21]. doi: 10.1038/ncomms7707.
- [41] 冯洁, 江聪, 税伟, 等. 喀斯特退化天坑阴坡阳坡壳斗科植物的功能性状特征[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(7): 2301 – 2308.
- FENG Jie, JIANG Cong, SHUI Wei, *et al.* Functional traits of Fagaceae plants in shady and sunny slopes in karst degraded tiankeng [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, **32**(7): 2301 – 2308.
- [42] DENG Meifeng, LIU Lingli, SUN Zhenzhong, *et al.* Increased phosphate uptake but not resorption alleviates phosphorus deficiency induced by nitrogen deposition in temperate *Larix principis-rupprechtii* plantations [J]. *New Phytol*, 2016, **212**(4): 1019 – 1029.
- [43] CHEN Ji, GROENIGEN K J, HUNGATE B A, *et al.* Long-term nitrogen loading alleviates phosphorus limitation in terrestrial ecosystems [J]. *Glob Change Biol*, 2020, **26**(9): 5077 – 5086.