

# 氮磷添加对湿地松人工林土壤有机碳组分的影响<sup>①</sup>

何徽<sup>1,2</sup>, 李威<sup>1,2</sup>, 马溯<sup>1,2</sup>, 张愁愁<sup>1,2</sup>, 刘艺<sup>1,2</sup>, 刘西军<sup>1,2\*</sup>

(1 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036; 2 安徽农业大学, 安徽省林木资源培育重点实验室, 合肥 230036)

**摘要:** 本文以安徽省宣城市宛陵林场湿地松林为研究对象, 通过设置对照(CK, N 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、低氮(LN, N 50 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、高氮(HN, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、高氮低磷(HNLP, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 50 kg/(hm<sup>2</sup>·a))和高氮高磷(HNHP, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a))5 种处理, 开展连续 5 年的野外氮磷添加控制试验, 并于 2023 年测定 0~20、20~40 cm 土层土壤基本性质、有机碳组分和水解酶活性, 探究了短期氮磷添加对森林土壤有机碳组分含量的影响及其关键因素。结果表明: ①氮磷添加下, 土壤 pH 显著降低了 3.49%~11.48%, HNLP 处理下 0~20 cm 土层土壤硝态氮、全磷含量分别显著增加了 128.10%、76.67%; ②5 年氮添加对土壤有机碳(SOC)、颗粒态有机碳(POC)、矿物结合态有机碳(MAOC)、微生物生物量碳(MBC)含量无显著影响, HN 处理下土壤可溶性有机碳(DOC)含量显著提高, HNLP 处理下 0~20 cm 土层 SOC、POC、MAOC 含量分别显著增加了 31.51%、18.01%、27.12%, 20~40 cm 土层 MBC 含量显著增加了 13.35%; ③结构方程模型表明, 氮磷添加改变了土壤中硝态氮和全磷含量, 通过直接或者间接影响土壤 β-1, 4-葡萄糖苷酶、纤维二糖苷酶、β-1, 4-N-乙酰葡萄糖苷酶活性来影响土壤碳组分含量。因此, 从长期碳固持的角度来看, 高氮低磷混合施用模式更有利于提高土壤有机碳的稳定性。该研究结果为森林“双碳”目标的实现提供了森林经营理论支持。

**关键词:** 氮磷添加; 有机碳组分; 土壤酶; 湿地松林

**中图分类号:** S714 **文献标志码:** A

## Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Organic Carbon Fraction in *Pinus elliottii* Plantation

HE Hui<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, MA Su<sup>1,2</sup>, ZHANG Chouchou<sup>1,2</sup>, LIU Yi<sup>1,2</sup>, LIU Xijun<sup>1,2\*</sup>

(1 School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2 Anhui Provincial Key Laboratory of Forest Resources and Silviculture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** In this study, the *Pinus elliottii* plantation in Wanling Forest Farm, Xuancheng City, Anhui Province was selected as the research object. A controlled field nitrogen (N) and phosphorus (P) addition experiment was conducted with five treatments, including control check (CK, N 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a)), low N (LN, N 50 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a)), high N (HN, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a)), high N and low P (HNLP, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 50 kg/(hm<sup>2</sup>·a)) and high N and high P (HNHP, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)). Based on five consecutive years of controlled experiments with N and P additions, basic soil properties, organic carbon fractions and hydrolytic enzyme activities of 0–20 cm and 20–40 cm soil layers were measured in 2023, to explore the effects of short-term N and P addition on soil organic carbon(SOC) fraction contents and their key influencing factors. The results showed that: 1) The addition of N and P significantly decreased soil pH by 3.49%–11.48%, and HNLP significantly increased the contents of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and total P respectively by 128.10% and 76.67%. 2) N addition of 5 years had no significant effect on the contents of SOC, particulate organic carbon(POC), mineral-associated organic carbon(MAOC) and microbial biomass carbon(MBC), while HN significantly increased the content of dissolved organic carbon(DOC). HNLP significantly increased the contents of SOC, POC and MAOC in 0–20 cm soil layer by 31.51%, 18.01%, and 27.12%, respectively, and significantly increased the content of MBC in 20–40 cm soil layer by 13.35%. 3) Structural equation model analysis showed that N and P addition changed the contents of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and total P in soil, affected soil carbon fractions by directly or indirectly

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0600502)和安徽省自然科学基金项目(1908085MC73)资助。

\* 通信作者(liuxj104@126.com)

作者简介: 何徽(1998—), 女, 陕西安康人, 硕士研究生, 主要研究方向为森林土壤。E-mail: hehuisx1998@163.com

affecting soil  $\beta$ -1,4-glucosidase, cellobisidase,  $\beta$ -1, 4-N-acetylglucosaminidase activities. Thus, from the perspective of long-term carbon sequestration, the mixed use of high N and low P is more beneficial to improve the stability of soil organic carbon, which provides theoretical support for forest management to realize the goals of forest carbon peaking and carbon neutrality.

**Key words:** Nitrogen and phosphorus addition; Organic carbon fraction; Soil enzyme; *Pinus elliottii* plantation

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是陆地生态系统中最大的碳库,在全球碳循环中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>。森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,全球森林碳汇量为 276~448 Tg/a,其中 40% 保存在土壤中<sup>[2]</sup>。森林土壤碳库对全球变化的响应是生物地球化学领域的研究热点。森林土壤有机碳的组分细分为半分解的、易被微生物利用的颗粒态有机碳(Particulate organic carbon, POC, >53  $\mu\text{m}$ )和小分子的、受到矿物保护并难以被微生物利用的矿物结合态有机碳(Mineral-associated organic carbon, MAOC, <53  $\mu\text{m}$ )<sup>[3]</sup>。森林土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)等是土壤养分循环的重要载体,参与森林生态系统的碳平衡。氮和磷是植物生长和生态系统生产力的两种最重要限制性养分,被普遍认为是陆地生态系统养分循环最关键的元素<sup>[4]</sup>。氮磷添加是缓解森林生态系统养分限制的有效措施,外部氮磷输入将直接或间接影响土壤理化性质<sup>[5]</sup>,改变土壤中的氮磷有效性以及生态系统中的其他养分元素的有效性,进而影响植物生长和物种相互作用<sup>[6]</sup>。研究表明,生态系统中碳、氮、磷循环存在着紧密的耦合关系,持续的氮沉降可能会加剧亚热带森林的磷限制,改变生态系统中碳循环的过程<sup>[7]</sup>。

前期研究发现,氮添加会促进植物生长,增加根系分泌物,促进 SOC 固存<sup>[8]</sup>,但也存在氮添加对 SOC 储量存在减少或无显著影响的情况。同时,磷的增减也会影响 SOC 的稳定性<sup>[9]</sup>。然而,越来越多的证据表明,由于受多种因素的影响,很难明确了解氮磷添加对 SOC 变化的影响,其原因在于氮磷添加对 SOC 组分(如 POC 和 MAOC)影响不同<sup>[10]</sup>,导致氮磷添加如何影响 SOC 组分的潜在机制仍不清楚。通常认为,由于大部分的亚热带生态系统受到氮限制,氮添加会通过增加氮的可利用性、微生物的生物量以及  $\beta$ -葡萄糖苷酶( $\beta$ -glucosidase)活性,促进土壤 POC 和 MAOC 含量的增加<sup>[3]</sup>。然而,在阳离子保护占主导作用时,氮添加可能会引起 MAOC 含量的下降,其原因可能是土壤 POC 和 MAOC 受土壤 MBC、pH、酶活性及酶化学计量比控制<sup>[11-12]</sup>,但氮磷添加对土壤 POC 和 MAOC 的关

键驱动机制尚需长期研究验证。

因此,本研究选择亚热带北缘的湿地松(*Pinus elliottii*)人工林为研究对象,开展了野外长期氮磷添加控制试验。通过室内测定分析 SOC 含量及其组分、养分含量、酶活性等变化,探讨了氮磷添加对 SOC 组分的影响及其潜在机制,对准确预测陆地生态系统碳动态循环及其对大气氮沉降的响应具有重要的意义,为湿地松人工林可持续经营及土壤生态管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于安徽省宣城市宣州区宛陵林场(118°3'39"E, 30°7'48"N),属于低山丘陵地带,境内全部为丘陵山地,为黄山山脉向北延伸的余脉。区内相对海拔 10~50 m,坡度 1°~15°,土壤类型为黄红壤,土层厚度在 60~100 cm,结构疏松,湿润肥沃,腐殖质层厚度 3~5 cm,枯枝落叶层厚度 3~7 cm。研究区气候类型为北亚热带季风气候,年均温 15.9 °C,年均降水量 1 368.6 mm,无霜期 230 d。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置与处理** 试验样地位于安徽省国有宛陵林场杨林分场(于 2011 年建立)。选择 28 年生、立地条件相似、经营措施完全一致的湿地松人工林作为研究对象,样方大小为 20 m×20 m,共设置固定样方 30 块,样方间设置 20 m 以上的隔离带。氮磷添加试验开始于 2018 年,基于前期大气氮沉降研究成果<sup>[13]</sup>,共设置 5 种氮磷添加处理,分别为对照(CK, N 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、低氮(LN, N 50 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、高氮(HN, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 0 kg/(hm<sup>2</sup>·a))、高氮低磷(HNLP, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 50 kg/(hm<sup>2</sup>·a))和高氮高磷(HNHP, N 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)+P 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a)),每种处理 6 个重复。从 2018 年 7 月开始施肥,每隔 2 个月施肥 1 次。氮磷添加种类分别为尿素(N $\geq$ 46.2%)和重过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> $\geq$ 12%, Ca $\geq$ 10%, S $\geq$ 10%)。采用固体颗粒肥撒施,肥量少的,可混合于碎土中均匀撒施于样地。

**1.2.2 土壤样品采集** 2023 年 3 月,在每块样方沿对角线方向按 0~20、20~40 cm 土层使用土壤钻(直

径 3.5 cm)采集土壤样品 3~5 个,混合均匀放入冰盒,带回实验室。去除土样中的石砾、植物残根等杂物,过 2 mm 筛,将土样使用无菌样品袋分装成三部分:一份放置于 4 °C 冰箱保存,用于铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)含量的测定;一份风干后磨碎,用于土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、POC、MAOC 含量的测定;剩余部分保存在 -20 °C 冰箱内,用于土壤水解酶活性测定。

**1.2.3 土壤基本性质、碳组分测定** 土壤 pH 采用土壤 pH 计测定(水土质量比 1 : 2.5);NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP、AP 采用 FIAstar 5000 流动注射分析仪测定<sup>[14]</sup>;DOC、MBC 含量采用总有机碳分析仪测定(Multi 3100, 德国),MBC 的转换系数为 0.45;SOC、TN 含量采用碳氮元素分析仪(EA 3000, 意大利)测定<sup>[15]</sup>。POC 和 MAOC 含量的测定<sup>[16]</sup>;称取过 50 目筛的风干土样 10 g 装入玻璃瓶内,加入 30 mL 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液,振荡 18 h 后取土壤悬浊液过 0.053 mm 钢筛,反复用超纯水冲洗,分别收集筛子上下层物质,于 60 °C 烘箱内烘干 48 h 至恒重,采用碳氮元素分析仪测定,即得 POC 和 MAOC 含量。

**1.2.4 土壤酶活性测定** 土壤水解酶活性采用微孔板荧光法分析<sup>[17]</sup>。具体操作如下:称取 1 g 鲜土,加入 125 mL 50 mmol/L 的醋酸钠缓冲溶液(pH 5),在涡旋振荡器上振荡 1 min,然后磁力搅拌 5 min 使其均匀;使用移液枪向 96 孔酶标板中加入 200 μL 土壤悬浮液和 50 μL 的相应底物,在标准物质孔中加入

50 μL 浓度为 10 μmol/L 的标准物质和 200 μL 的醋酸钠缓冲液;将微孔板置于 25 °C 黑暗条件下培养 4 h 后,加入 10 μmol/L 的 NaOH 溶液终止反应;最后用多功能酶标仪(Synergy H4, BioTek, Winooski, USA)在 365 nm 处进行荧光激发,450 nm 处进行荧光检测。每个样品测定 8 个重复。

### 1.3 数据处理与分析

利用 Excel 2021 进行数据整理,通过 SPSS 25 进行统计分析,用 Origin 2021 软件绘图。其中,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验氮磷添加处理间的差异,采用 t 检验法比较两土层间的差异;采用 Pearson 法分析土壤有机碳组分含量、酶活性和土壤基本性质间的相关性。另外,使用 R4.3.3 软件中的“lavaan”和“semPlot”包进行结构方程模型分析并绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本性质

由表 1 可知,在 0~20 cm 土层,与 CK 处理相比,HN 处理下土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分别显著增加 61.76%、272.53%(*P*<0.05),HNLP 处理下土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量显著增加 128.10%;HNLP、HNHP 处理下土壤 TP 含量分别显著增加 76.67%、51.52%;各氮磷处理土壤 pH 显著降低了 3.49%~11.48%。在 20~40 cm 土层,HN 处理下土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量分别显著增加 61.27%、320.59%;HNLP、HNHP 处理下土壤 TP 含量分别显著增加 29.49% 和 23.64%。

表 1 氮磷添加下土壤的基本性质  
Table 1 Soil basic properties under nitrogen and phosphorus addition

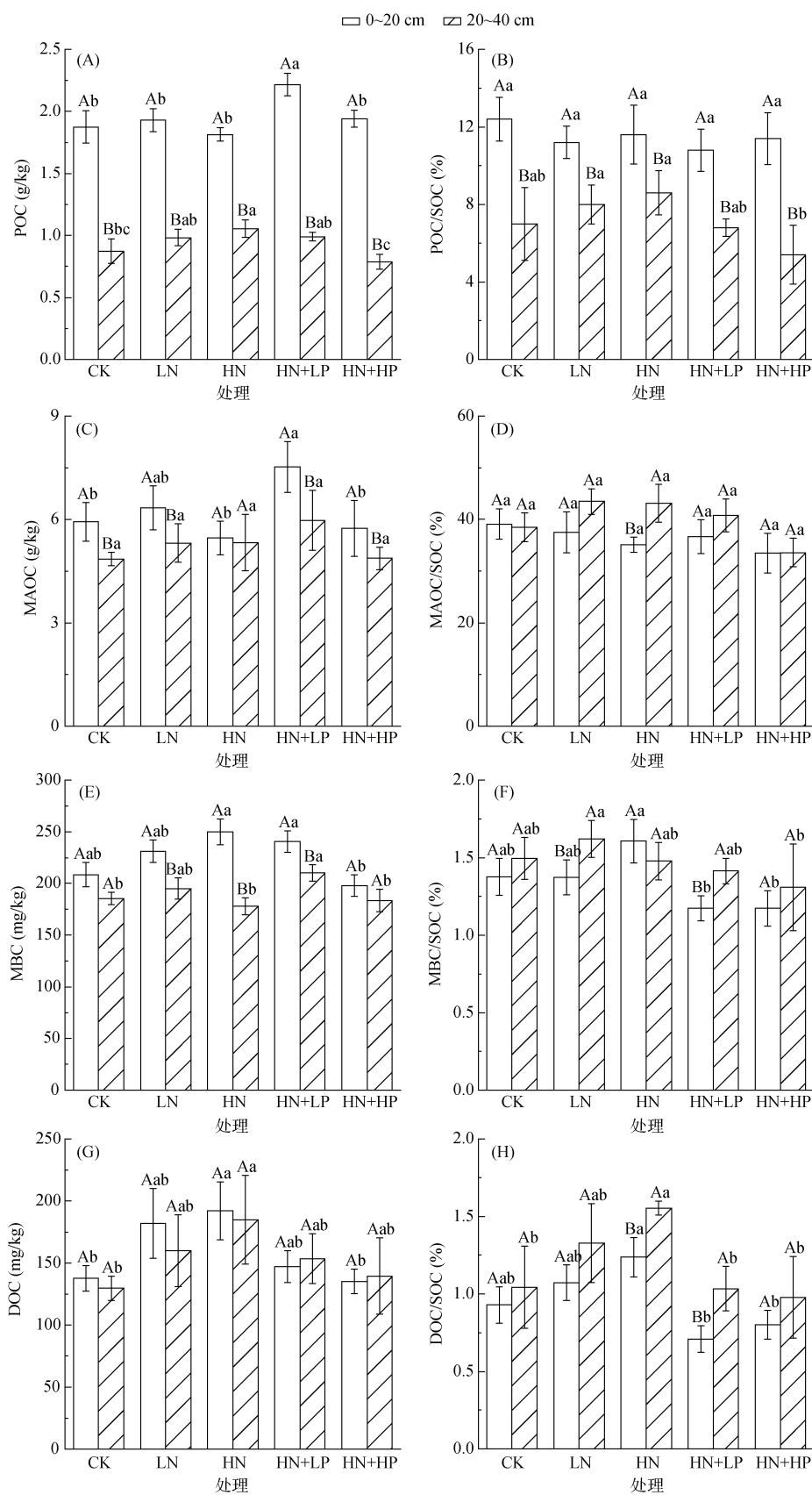
土层(cm)	处理	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(mg/kg)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(mg/kg)	TP(g/kg)	TN(g/kg)	SOC(g/kg)	pH
0~20	CK	5.24±0.9bc	1.83±0.3c	133.4±11.97c	3.3±0.34a	13.85±3.01bc	4.66±0.11a
	LN	6.42±1.56bc	2.11±0.84c	146.04±11.62c	3.63±0.31a	12.01±0.85c	4.30±0.14b
	HN	8.48±1.23a	6.81±1.22a	145.53±4.70c	3.69±0.22a	14.34±1.15bc	4.15±0.17b
	HNLP	6.60±1.51b	4.17±0.99b	235.67±10.75a	3.67±0.18a	20.84±1.27a	4.35±0.10b
	HNHP	4.11±0.51c	1.03±0.64c	202.12±17.62b	3.49±0.29a	14.67±0.99bc	4.13±0.13b
20~40	CK	4.45±0.12bc	1.47±0.18bc	125.16±8.03c	2.88±0.2a	13.11±3.68a	4.68±0.13a
	LN	6.21±0.99ab	1.97±0.46bc	120.56±15.4c	3.16±0.22a	12.09±1.12a	4.48±0.05a
	HN	7.18±1.15a	6.16±1.07a	137.48±9.52bc	3.31±0.33a	12.20±1.84a	4.60±0.29a
	HNLP	4.81±1.27bc	2.55±0.89b	162.08±6.57a	3.18±0.27a	14.90±0.73a	4.42±0.08a
	HNHP	3.91±0.20c	0.68±0.24c	154.75±8.60ab	3.13±0.36a	14.44±2.63a	4.36±0.21a

注:同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著(*P*<0.05)。

### 2.2 土壤碳组分

由图 1 可知,在 0~20 cm 土层,土壤 POC、MAOC、MBC、DOC 含量分别约占 SOC 含量的

10.80%~12.40%、33.50%~39.71%、1.17%~1.61%、0.71%~1.24%;与 CK 处理相比,HNLP 处理下土壤 POC、MAOC 含量分别显著增加 18.01% 和 27.12%,



(图中不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示同一处理不同土层间差异显著( $P < 0.05$ ))

图 1 氮磷添加下土壤 POC、MAOC、DOC、MBC 含量及其占 SOC 的百分比

Fig. 1 Contents of soil POC, MAOC, DOC, MBC as well as their ratios to SOC under nitrogen and phosphorus addition

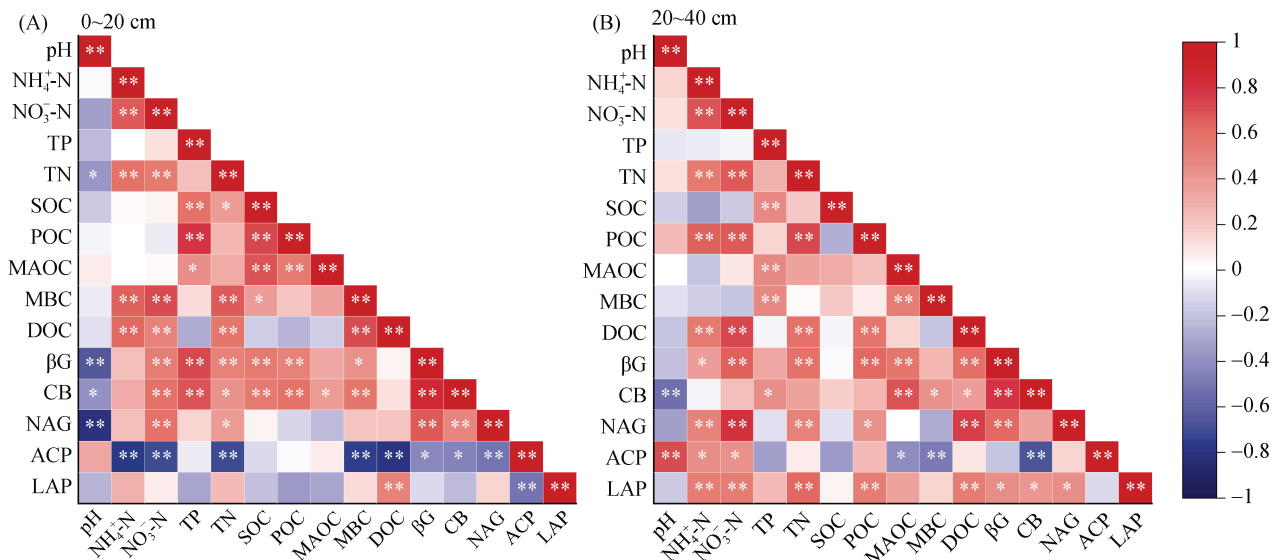
HN 处理下土壤 DOC 含量显著增加 39.60% ( $P < 0.05$ )。在 20~40 cm 土层, 土壤 POC、MAOC、MBC、DOC 含量分别约占 SOC 含量的 5.40%~8.60%、33.60%~43.46%、1.31%~1.62%、0.98%~1.55%; HN 处理下土壤 POC、DOC 含量显著提升 13.27% 和 42.60%, HNL P 处理下 MBC 含量显著提高 13.35% ( $P < 0.05$ )。各氮磷添加处理下土壤 POC、MAOC、MBC 含量均为 0~20 cm 土层高于 20~40 cm 土层。

### 2.3 土壤碳组分、酶活性及基本性质之间的相关性

相关性分析(图 2)显示, 在 0~20 cm 土层, 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N、TP、SOC、POC 含量与土壤  $\beta\text{G}$ 、CB 活性呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、TN、MBC、DOC 含量与土壤 ACP 活性呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ),  $\beta\text{G}$ 、NAG 活性与 pH 呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); 在 20~40 cm 土层, 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N、TN、DOC

含量与  $\beta\text{G}$ 、NAG、LAP 活性呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 土壤 MBC 含量与 ACP 活性呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。

结构方程模型分析表明, 在 0~20 cm 土层, NAG ( $\lambda = -0.24$ )、TP ( $\lambda = 0.61$ ) 和 SOC ( $\lambda = 0.37$ ) 共同解释了 POC 变化的 77.6%, NAG ( $\lambda = -0.26$ ) 和 SOC ( $\lambda = 0.70$ ) 共同解释了 MAOC 变化的 52.9%, ACP 和 CB 是 MBC ( $R^2 = 0.636$ ) 和 DOC ( $R^2 = 0.698$ ) 的直接影响影子(图 3)。在 20~40 cm 土层,  $\beta\text{G}$  ( $\lambda = 0.21$ )、TN ( $\lambda = 0.70$ ) 和 SOC ( $\lambda = -0.44$ ) 共同解释了 POC 变化的 73.2%,  $\beta\text{G}$  ( $\lambda = 0.57$ ) 和 SOC ( $\lambda = 0.31$ ) 共同解释了 MAOC 变化的 43.3%, TN ( $\lambda = 0.14$ )、CB ( $\lambda = 0.58$ ) 和 NAG ( $\lambda = -0.55$ ) 共同解释了 MBC 变化的 49.8%, NAG ( $\lambda = 0.43$ ) 和  $\text{NO}_3^-$ -N ( $\lambda = 0.39$ ) 共同解释了 DOC 变化的 60.2%。



( $\beta\text{G}$ :  $\beta$ -1, 4-葡萄糖苷酶; CB: 纤维二糖苷酶; NAG:  $\beta$ -1, 4-N-乙酰葡萄糖糖苷酶; ACP: 酸性磷酸酶; LAP: 亮氨酸氨基肽酶; \*, \*\* 分别表示在  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$  水平显著相关)

图 2 土壤碳组分与酶活性、基本性质之间的相关性

Fig. 2 Correlations between soil carbon fractions with enzyme activities and basic properties

## 3 讨论

本研究区 SOC 含量平均为 13.85 g/kg, 高于全国森林 SOC 含量均值(11.20 g/kg)<sup>[18]</sup>。5 年的单独氮添加对研究土壤 SOC 含量无显著影响, 这与前人的研究结果一致<sup>[19-20]</sup>, 其原因可能是亚热带地区的土壤普遍缺磷, 单纯的氮添加可能会因地上生物量的增加和根系凋落物的分解引起的激发效应导致对土壤 SOC 影响不显著。本研究发现, HN 处理下土壤 DOC 含量显著提高, 这可能是由于氮添加改变了凋落物分解和周转速率, 进而增加 DOC 含量<sup>[21]</sup>。氮添加对土壤

MAOC、MBC 含量的影响不显著, 而 HN 处理下 20~40 cm 土层土壤 POC 含量显著增加。Sun 等<sup>[22]</sup>研究表明, POC 的增加是通过养分输入促进根系生物量而显著增加的。氮添加下微生物生物量并未受到土壤酸化的抑制, 植物根系生物量持续增加, 进而更多的碳进入土壤, 导致抵消甚至超过微生物呼吸对土壤碳的消耗<sup>[23]</sup>。

本研究发现, 与 HN 处理相比, HNL P 处理下 0~20 cm 土层 SOC、POC、MAOC 含量和 20~40 cm 土层 MBC 含量显著增加, 其原因可能是外源磷输入缓解了土壤磷限制, 补足了植物生长所需有效磷, 提

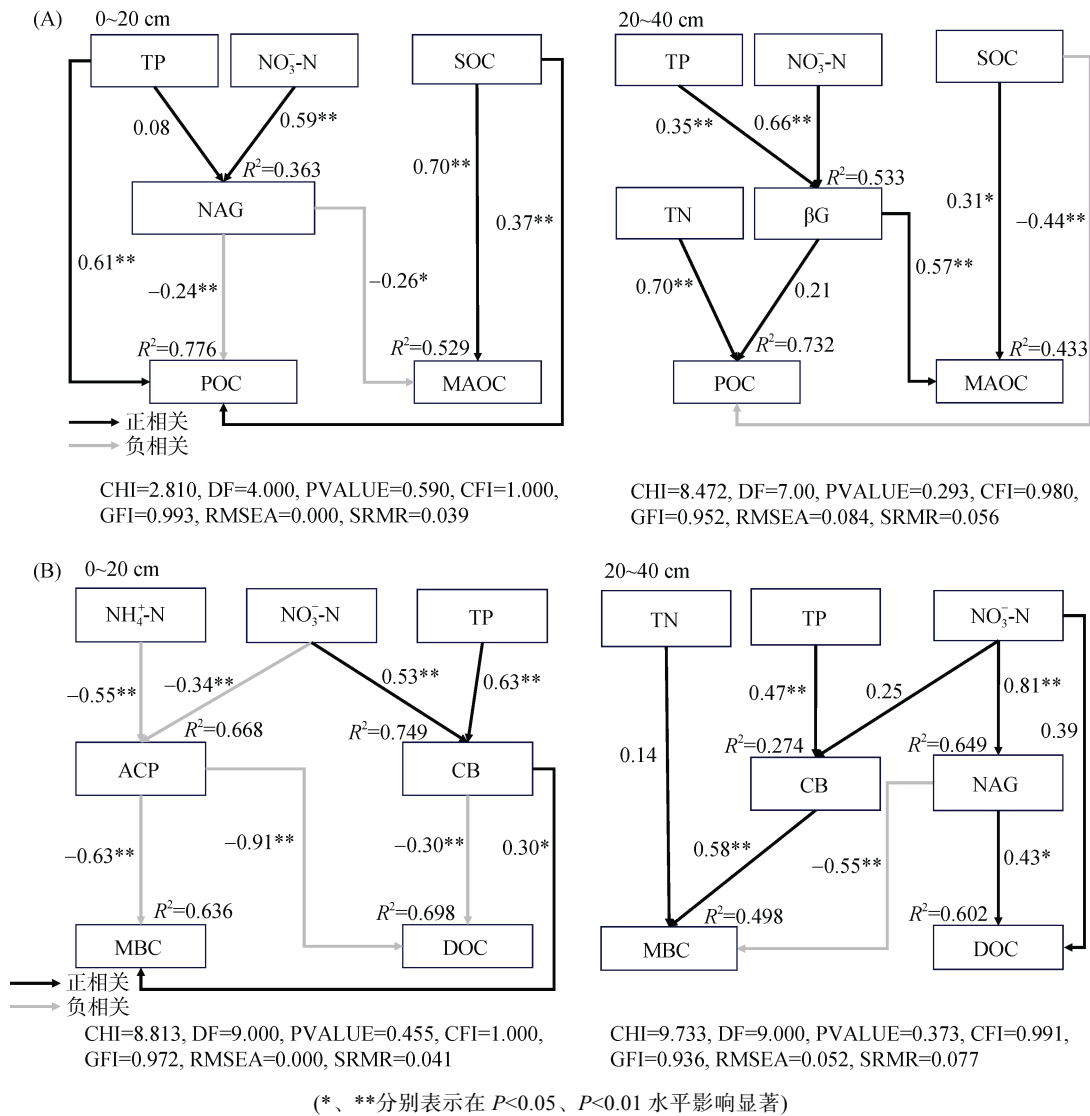


图 3 土壤 POC、MAOC、DOC 和 MBC 与潜在影响因子的结构方程模型

Fig. 3 Structural equation model of soil POC, MAOC, DOC and MBC with potential influencing factors

升了植物光合效率，进而增加了生物量，转化更多生物体内的碳水化合物为 CO<sub>2</sub><sup>[5]</sup>，减轻了微生物的养分限制，从而促进了养分的循环和有机碳的积累<sup>[24]</sup>。因此，在相对缺氮的森林土壤中，施磷会促进植物根系和菌丝的生长，从而增加有机碳的累积和地下微生物量增长<sup>[25]</sup>。然而，HNHP 处理下 0~20 cm 土层 MBC、DOC 含量显著降低，则可能是由于 HNHP 处理下土壤 pH 显著降低，抑制了土壤微生物的生长和活性所致<sup>[26]</sup>。Luo 等<sup>[27]</sup>通过 Meta 分析发现，磷添加显著增加了全球 SOC 储量，但磷添加对 SOC 的影响在很大程度上取决于土壤氮的可利用性。本研究也证明了这一点，在高氮高磷(HNHP)添加下，土壤铵态氮和硝态氮含量明显降低。因此，在高氮情况下，缺磷土壤受磷施用的影响较大，少量磷添加会增加 SOC 含量，大量磷添加反而会由于氮的可利用性降低而降低

SOC 含量。

影响土壤碳组分的因素很多，如土壤 pH、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP、TN 以及酶活性等。本研究中，土壤 TP 含量、βG 活性、CB 活性与 POC、MAOC、MBC、DOC 含量呈显著正相关，这与前人结果基本一致<sup>[28-29]</sup>，说明 SOC 组分对酶活性的变化响应敏感。酶活性的强弱与 SOC 的矿化速率密切相关<sup>[30]</sup>。不同的微生物类型对 SOC 不同组分的降解能力不同，因而 SOC 不同组分在土壤微生物降解过程中的稳定性不同。氮磷添加下，土壤 βG、CB 作为主要的碳转化酶，共同作用于来自植株凋落物和根系分泌物等的有机物质，促进了有机碳的分解和合成，增强了土壤碳循环<sup>[31]</sup>。这个过程对保持 SOC 的活性、维持土壤肥力质量具有重要意义。在结构方程模型中，TP 均直接或者通过碳氮水解酶间接影响 SOC 组分，说明在

大气氮沉降的背景下,亚热带森林土壤受到磷养分的限制, SOC、水解酶对磷的响应积极<sup>[27]</sup>。土壤 MBC 含量受 CB 活性影响, CB 活性受到土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量影响。氮磷添加下, 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量增加, 土壤硝化作用增强, 碳氮转换酶底物增多, CB 活性增加, 微生物活动增强, SOC 分解加快, MBC 含量增加<sup>[32]</sup>。总体上, 氮磷添加通过改变土壤养分条件, 影响土壤生物的生长活力和养分有效性, 使植物、微生物群落结构及数量发生变化, 进而不同程度地提高相关碳氮获取酶活性, 影响 SOC 及其组分的含量。

#### 4 结论

5 年野外氮磷添加控制试验结果表明, 氮磷添加降低了土壤 pH, 改变了土壤养分情况, 影响了土壤酶活性, 土壤有机碳组分随之变化。土壤 POC、MAOC 含量受土壤 TP、 $\text{NO}_3^-$ -N、SOC 含量及  $\beta\text{G}$ 、NAG 活性影响, 土壤 DOC、MBC 含量受土壤 TP、 $\text{NO}_3^-$ -N 含量及 CB、NAG 活性的影响。从长期碳固持的角度来看, 高氮低磷混施更有利于提高 SOC 稳定性, 该结果可为碳汇森林经营提供理论与实践支持。

#### 参考文献:

- [1] Xu C H, Xu X, Ju C H, et al. Long-term, amplified responses of soil organic carbon to nitrogen addition worldwide[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(6): 1170–1180.
- [2] de Vries W, Du E Z, Butterbach-Bahl K. Short and long-term impacts of nitrogen deposition on carbon sequestration by forest ecosystems[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, 9/10: 90–104.
- [3] Tang B, Rocci K S, Lehmann A, et al. Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(7): 1971–1983.
- [4] Du E Z, Terrer C, Pellegrini A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221–226.
- [5] 贺凌云, 陈伏生, 郑志宇, 等. 氮磷添加对常绿阔叶林土壤团聚体有机碳及其与磷组分相关的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 377–386.
- [6] Zhang J F, Zhou J G, Lambers H, et al. Nitrogen and phosphorus addition exerted different influences on litter and soil carbon release in a tropical forest[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 832: 155049.
- [7] Fan L J, Xue Y W, Wu D H, et al. Long-term nitrogen and phosphorus addition have stronger negative effects on microbial residual carbon in subsoils than topsoils in subtropical forests[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(2): e17210.
- [8] 冯继广, 张秋芳, 袁霞, 等. 氮磷添加对土壤有机碳的影响: 进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(8): 855–870.
- [9] Lu J Y, Yang J F, Keitel C, et al. Belowground carbon efficiency for nitrogen and phosphorus acquisition varies between *Lolium perenne* and *Trifolium repens* and depends on phosphorus fertilization[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 927435.
- [10] Qi P, Chen J, Wang X J, et al. Changes in soil particulate and mineral-associated organic carbon concentrations under nitrogen addition in China—a meta-analysis[J]. *Plant and Soil*, 2023, 489(1): 439–452.
- [11] 杨永超, 段文标, 陈立新, 等. 模拟氮磷沉降和凋落物处理对两种林型红松林土壤有机碳组分的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(1): 57–66.
- [12] Pérez-Guzmán L, Phillips L A, Seuradje B J, et al. An evaluation of biological soil health indicators in four long-term continuous agroecosystems in Canada[J]. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 2021, 4(2): e20164.
- [13] 鲁显楷, 莫江明, 张炜, 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.
- [14] 刘雅洁, 王亮, 樊伟, 等. 海拔对杉木人工林土壤活性有机碳组分的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(8): 59–69.
- [15] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [16] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 777–783.
- [17] German D P, Weintraub M N, Grandy A S, et al. Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(7): 1387–1397.
- [18] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139–151.
- [19] 裴志福, 红梅, 尚星玲, 等. 氮添加对土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳的影响: 基于 Meta 分析[J]. *土壤*, 2024, 56(5): 1129–1136.
- [20] 陈蕾如, 温正宇, 徐小牛, 等. 长期氮磷添加对亚热带森林土壤有机碳储量及其组分的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(5): 139–146.
- [21] 凌小莉, 史宝库, 崔海莹, 等. 氮磷添加对松嫩草地土壤团聚体结构及其碳含量的影响[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(2): 54–63.
- [22] Sun T, Mao X L, Han K F, et al. Nitrogen addition increased soil particulate organic carbon *via* plant carbon input whereas reduced mineral-associated organic carbon through attenuating mineral protection in agroecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 899: 165705.
- [23] Soong J L, Fuchslueger L, Maraño-Jimenez S, et al. Microbial carbon limitation: The need for integrating microorganisms into our understanding of ecosystem carbon cycling[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 1953–1961.

- [24] Shi J Y, Gong J R, Baoyin T T, et al. Short-term phosphorus addition increases soil respiration by promoting gross ecosystem production and litter decomposition in a typical temperate grassland in northern China[J]. *Catena*, 2021, 197: 104952.
- [25] Zhu X M, Zhang Z L, Wang Q T, et al. More soil organic carbon is sequestered through the *Mycelium* pathway than through the root pathway under nitrogen enrichment in an Alpine forest[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(16): 4947–4961.
- [26] Janssens I A, Dieleman W, Luysaert S, et al. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315–322.
- [27] Luo X Z, Zhang L L, Lin Y B, et al. Nitrogen availability mediates soil organic carbon cycling in response to phosphorus supply: A global meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 185: 109158.
- [28] Tian Q, Yang F, Wang Z H, et al. Variation of soil organic carbon components and enzyme activities during the ecological restoration in a temperate forest[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 201: 107192.
- [29] 舒业勤, 彭复细, 雷文硕, 等. 稻油复种不同措施下土壤有机碳组分积累及其稳定性特征[J]. *土壤学报*, 2025, 62(2): 495–503.
- [30] 姚易寒, 张少博, 周家树, 等. 氮磷添加对毛竹林土壤有机碳矿化及其激发效应的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1088–1100.
- [31] 蒋如, 宁诗琪, 隋宗明, 等. 长期轮作施肥处理对植烟土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. *土壤*, 2024, 56(3): 510–516.
- [32] Xu M P, Zhi R C, Jian J N, et al. Changes in soil organic C fractions and C pool stability are mediated by C-degrading enzymes in litter decomposition of *Robinia pseudoacacia* plantations[J]. *Microbial Ecology*, 2023, 86(2): 1189–1199.

(责任编辑：于 飞)