

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240322

# 马尾松人工林混交改造下根系-菌丝-微生物互作对土壤磷转化的调控机制

贺明霞<sup>1</sup> 黄雪蔓<sup>1</sup> 尤业明<sup>1</sup> 王博<sup>1</sup> 童慧<sup>1</sup> 杨欣然<sup>2,3</sup>  
明安刚<sup>4,5</sup> 招礼军<sup>1</sup> 栾军伟<sup>3</sup>

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 广西 南宁 530004; 2. 国际竹藤中心竹藤资源与环境研究所, 竹藤科学与技术国家林业和草原局重点实验室, 北京 100102; 3. 国际竹藤中心三亚研究基地, 海南 三亚 572022;  
4. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600; 5. 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学研究观测站, 广西 凭祥 532600)

**摘要:**【目的】揭示复层异龄混交改造对马尾松人工林土壤磷组分转化的调控机制, 为缓解针叶纯林连栽导致的土壤磷素限制及生态功能衰退提供理论支撑。【方法】以马尾松纯林及其与红锥、格木构建的异龄混交林为研究对象, 通过1.45 mm(根系+菌丝)、53 μm(仅菌丝)孔径根际限制装置, 解析根系-菌丝-微生物互作对磷循环的影响。【结果】(1)引入红锥和格木混交改造使马尾松人工林土壤总活性磷含量分别提升了41.34%、44.42%, 使总中等活性磷含量分别提升了36.84%、40.26%。(2)较马尾松纯林, 红锥-马尾松、格木-马尾松混交林中微生物生物量磷总含量分别显著增加91.21%、79.52%, 酸性磷酸酶总活性分别显著增加86.25%、103.46%; 土壤全氮、微生物生物量磷、亮氨酸氨基肽酶是调控土壤磷组分转化的主要环境因子。(3)仅增加菌丝参与后, 马尾松纯林、红锥-马尾松混交林、格木-马尾松混交林3种林分土壤中磷素活化系数显著升高了24.37%、20.24%、20.69%。(4)与仅增加菌丝参与相比, 根系输入导致纯林中总活性磷和总中等活性磷含量分别下降35.55%、30.25%, 导致红锥和格木混交林中活性无机磷含量分别下降28.14%和34.59%。【结论】马尾松混交林土壤磷组分的循环和转化受土壤微生物、酶活性和土壤氮素共同影响, 根系对土壤中磷的转化起主要作用, 根系和菌丝的相互作用能使其土壤中的微生物群落互作关系变得更加复杂, 影响土壤磷的转化和有效性。  
**关键词:** 马尾松人工林; 土壤磷组分; 土壤酶活性; 根际; 菌根真菌

中图分类号: S791.248 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2025)03-0083-12

引文格式: 贺明霞, 黄雪蔓, 尤业明, 等. 马尾松人工林混交改造下根系-菌丝-微生物互作对土壤磷转化的调控机制[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(3): 83-94. He Mingxia, Huang Xueman, You Yeming, et al. Regulatory mechanism of root-mycelial-microorganism interactions on soil phosphorus transformation of *Pinus massoniana* plantation under mixed renovation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 83-94.

## Regulatory mechanism of root-mycelial-microorganism interactions on soil phosphorus transformation of *Pinus massoniana* plantation under mixed renovation

He Mingxia<sup>1</sup> Huang Xueman<sup>1</sup> You Yeming<sup>1</sup> Wang Bo<sup>1</sup> Tong Hui<sup>1</sup> Yang Xinran<sup>2,3</sup>  
Ming Angang<sup>4,5</sup> Zhao Lijun<sup>1</sup> Luan Junwei<sup>3</sup>

(1. College of Forestry of Guangxi University, Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Nanning 530004, Guangxi, China;

收稿日期: 2024-09-27 修回日期: 2025-02-28

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD2200405), 国家自然科学基金项目(31930078、32171755), 国际竹藤中心基本科研业务费(1632021023), 国际竹藤中心三亚研究基地基本科研业务费(1630032024002), 国际竹藤中心三亚研究基地学科建设项目(YJPY202400103), 崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学观测研究站科研能力建设项目(桂科 2203513003)。

第一作者: 贺明霞。主要研究方向: 林业生态工程。Email: 2209392012@st.gxu.edu.cn 地址: 530004 广西壮族自治区南宁市西乡塘区大学东路广西大学林学院。

责任作者: 黄雪蔓, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林土壤养分循环的调控机制。Email: huangxm168168@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

2. Institute of Bamboo and Rattan Resources and Environment, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Bamboo & Rattan Science and Technology, Beijing 100102, China;
3. Sanya Research Base, International Center for Bamboo and Rattan, Sanya 572022, Hainan, China;
4. Experiment Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, Guangxi, China;
5. Youyiguan Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem National Research Station, Pingxiang 532600, Guangxi, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aims to reveal the regulation mechanisms of soil phosphorus fraction conversion in *Pinus massoniana* plantations under multi-layered, uneven-aged mixed transformation, providing theoretical support for alleviating soil phosphorus limitation and ecological function decline caused by continuous planting of coniferous pure forests. [Method] Using *Pinus massoniana* pure forest and its mixed plantation of different aged with *Castanopsis hystri* and *Erythrophleum fordii* as research object, the effects of root-mycelium-microbe interactions on phosphorus cycling were resolved by means of inter-root limiting devices with mesh sizes of 1.45 mm (root + mycelium) and 53  $\mu\text{m}$  (mycelium). [Result] (1) Introducing *Castanopsis hystri* and *Erythrophleum fordii* mixed transformation into the pure forest, soil total labile phosphorus content was elevated by 41.34% and 44.42%, total moderately labile phosphorus content was elevated by 36.84% and 40.26%. (2) In the mixed forest, total microbial biomass phosphorus content was significantly increased by 91.21% and 79.52%, and the total acid phosphatase activity was significantly increased by 86.25% and 103.46%. Soil total nitrogen, total microbial biomass phosphorus, and L-leucine aminopeptidase were main environmental factors regulating the transformation of soil phosphorus fractions. (3) Only after increasing the involvement of mycelium, phosphorus activation coefficients in the soil of three stands were significantly increased by 24.37%, 20.24%, 20.69%, respectively. (4) Compared with only increasing mycelium involvement, root inputs resulted in total active phosphorus and total moderately active phosphorus in pure forests to decrease by 35.55% and 30.25%, respectively, and the active inorganic phosphorus in *Castanopsis hystri* and *Erythrophleum fordii* mixed forests to drop by 28.14% and 34.59%, respectively. [Conclusion] The cycling and transformation of soil phosphorus fractions in a mixed mosaic forest are influenced by soil microorganisms, enzyme activities, and soil nitrogen. Roots play a major role in transformation of phosphorus in soil, and the interaction between root system and mycelium can complicate the interactions of microbial communities in their soils, affecting the transformation and effectiveness of soil phosphorus.

**Key words:** *Pinus massoniana* plantation; soil phosphorus fraction; soil enzyme activity; rhizosphere; mycorrhizal fungi

磷是植物生长所必须的关键营养之一,土壤是植物磷素的主要来源,其储量占陆地生态系统磷素总储量的90%以上<sup>[1]</sup>。土壤中磷素的存在形态分为无机态(Pi)和有机态(Po),其中无机磷占土壤全磷的60%~70%<sup>[2]</sup>,可被植物直接吸收利用,对植物生长至关重要。有机磷则需要通过植物根系或微生物释放的磷酸酶逐步水解和降解,转化为磷酸根离子或其他无机磷形式,才能被植物吸收利用,因此有机磷也可以被看作土壤的潜在有效磷库<sup>[3]</sup>。在我国南方酸性红壤中,磷素易与铁、铝结合形成化合物,加剧磷素固定,导致有效磷缺乏,限制树木生长和生态系统功能<sup>[4]</sup>。根据Hedley等<sup>[5]</sup>开发并由Sui等<sup>[6]</sup>和Tiessen等<sup>[7]</sup>改进的土壤磷组分连续浸提法,可以将土壤磷组分分为活性磷(labile-P,包含树脂交换态resin-P和碳酸氢钠提取态NaHCO<sub>3</sub>-P)、中等活性

磷(moderately labile-P, NaOH提取态NaOH-P)和稳定性磷(stable-P, HCl提取态HCl-P及残留态residual-P)。活性有机磷较易发生矿化,被植物吸收利用;中等活性磷是通过化学吸附紧密结合在土壤化合物表面的铁铝结合态磷,需要在一定条件下矿化后被植物分解和利用;稳定性磷包括通过化学吸附紧密结合在土壤化合物表面的钙结合态磷和高稳定态磷,难以矿化<sup>[8]</sup>。这种分级方法兼顾了有机磷和无机磷组分的分级提取,可以更全面地评估土壤中有机态磷和无机态磷的有效程度。

根际区作为植物养分获取的关键区域,是根系-土壤-微生物三者相互作用进行磷素转化的重要场所,对土壤磷循环具有重要的调控作用。一方面,根表皮细胞和根毛进入土壤招募功能性微生物帮助植物直接获取土壤磷;另一方面,菌根的外延菌丝形

成庞大的菌丝网络,有效扩展根系对磷的吸收范围,提高宿主植物获取磷的能力<sup>[9]</sup>。有研究表明,小麦(*Triticum aestivum*)<sup>[10]</sup>、柑橘(*Citrus sinensis*)<sup>[11]</sup>等植物严重依赖根毛来吸收磷,在磷缺乏的情况下,根毛可占总磷吸收量的90%。还有研究表明,许多植物物种可以通过丛枝菌根真菌的帮助获取养分,高达80%的植物氮和磷由菌根真菌提供<sup>[12]</sup>。菌根中的菌丝分泌液不仅含有富碳化合物,而且可以促进细菌生长和活动并影响微生物群落结构<sup>[13]</sup>。Zhang等<sup>[14]</sup>研究发现,在菌丝际上定殖的细菌群落与土体中的细菌群落有显著差异,位于菌丝际的细菌可以分泌大量的磷酸酶,在很大程度上能够促进土壤有机磷的矿化,弥补丛枝菌根真菌不能矿化有机磷的能力。李银等<sup>[15]</sup>研究发现,森林土壤磷的矿化作用与酸性磷酸酶活性显著相关。林分类型、土壤理化性质等是影响根际区根系分泌代谢物、微生物的相互作用以及植物对养分吸收的重要因素,乡土树种有根系发达、养分循环快的特点,但不同树种混交对土壤根际区磷有效性的影响尚不明确。

马尾松(*Pinus massoniana*)因具有适应性强、用途广、速生丰产等优点,成为我国南方主要的速生用材树种<sup>[16]</sup>。然而,长期单一造林模式导致了地力衰退,生物多样性降低等多种生态问题。为保障人工林可持续发展,在将固氮树种或非固氮树种引入马尾松纯林进行混交种植,构建高效、稳定的多功能针阔混交人工林,已成为当前的主流趋势<sup>[17]</sup>。而分析土壤磷组分,可以了解土壤的肥力状态,磷的供应情况及植物对其的可利用性。目前对于我国亚热带地区针叶纯林改造为针阔混交林后,土壤中磷的形态变化以及对磷循环的影响,尤其是不同地下生物组分(根系、菌丝和微生物)在其中所起的作用和贡献,仍缺乏深入研究。鉴于此,本研究以南亚热带马尾松人工纯林、马尾松-红锥(*Castanopsis hystrix*)混交林、马尾松-格木(*Erythrophleum fordii*)混交林为研究对象,利用不同网孔大小的微宇宙技术,探究马尾松人工林不同树种混交改造下地下生物组分对土壤磷组分及其转化的影响,旨在为马尾松人工林的合理经营和营林模式提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于广西壮族自治区凭祥市中国林业科学研究院热带实验中心(106°39'50"~106°59'30"E, 21°57'47"~22°19'27"N)。该区域属于亚热带季风半湿润湿润气候,旱季和湿季明显,年平均气温22.1~23.4℃,年平均降水量1200~1500 mm,主要集中在4—9月,平均相对湿度在80%~84%。地貌类型以低山丘陵为主,土壤类型主要为酸性红壤,研究区域植被以马尾松等针叶树种和红锥、格木等优良阔叶树种为主<sup>[18]</sup>。

### 1.2 试验设计

在立地条件、生长状况和经营历史基本一致的马尾松林上(1993年种植,初植密度为2500株/hm<sup>2</sup>),于2005年春季经间伐后,分别引入阔叶树种红锥(1年生实生苗)和格木(1年生实生苗)进行随机混株改造,其中马尾松与阔叶树种的混交比例为3:5。同时,选取邻近未改造且具有相似立地条件的马尾松纯林作为对照。每种林分类型设置4块条件相同面积为20 m×20 m的试验样地,共12块样地。具体样地情况见表1。

于2021年4月在生长季初,在每块试验样地随机布置3种孔径的微宇宙,共设置36个微宇宙(3种林分类型×4块样地重复×3种孔径)。微宇宙是由不同孔径的不锈钢网制成10 cm长、5 cm直径的圆柱体,一端开口。网孔有3种大小:1.45 mm大孔径允许根系、菌丝和土壤微生物进入;53 μm中孔径允许菌丝和土壤微生物进入,但排除根系;1 μm小孔径仅允许土壤微生物进入,排除根系和菌丝。将微宇宙安装位置的土壤进行去根处理,按沙土1:1混入石英砂,并在微宇宙内部放置用53 μm尼龙网制成的菌根生长袋<sup>[19]</sup>。2022年9月进行回收。

### 1.3 测定指标及方法

将采集回来的鲜土进行2 mm过筛,一部分进行自然风干,用于土壤基本理化性质的测定。另一部分放置冰箱4℃保存,用于微生物生物量、相关酶活、磷组分的测定。

表1 试验地林分基本情况

Tab. 1 Basic situation of stands in experimental area

林分类型	树种	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	平均树高/m	平均胸径/cm
马尾松纯林(PPM)	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	975 ± 93	18.98 ± 2.66	23.53 ± 1.37
马尾松-红锥混交林(PM-CH)	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	850 ± 88	17.48 ± 3.50	28.66 ± 1.20
	红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>		12.04 ± 2.74	15.32 ± 0.22
马尾松-格木混交林(PM-EF)	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	925 ± 94	18.20 ± 1.67	29.23 ± 1.24
	格木 <i>Erythrophleum fordii</i>		10.97 ± 1.96	12.25 ± 2.98

### 1.3.1 土壤理化性质

土壤含水量(soil water content, SWC)采用105 °C 烘干法测定。土壤全氮(total nitrogen, TN)采用硫酸-高氯酸法进行测定。称取 0.500 g 土样放入消煮管,加入 5 mL 浓硫酸,1~2 滴高氯酸催化,经过 380 °C 消煮至溶液变白,待冷却定容到 100 mL 容量瓶中再过滤,得到的滤液使用流动分析仪(SEAL auto analyzer 3)测定<sup>[20]</sup>。土壤硝态氮(nitrate nitrogen, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和铵态氮(ammonium nitrogen, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)经 0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub> 浸提后采用流动分析仪测定。土壤全磷(total phosphorus, TP)采用硫酸-高氯酸法进行测定,称取 0.200 g 土样放入消煮管,加入 3 mL 浓硫酸,5~6 滴 60%~72% 的高氯酸催化,经过 380 °C 消煮 2 h,待冷却定容到 100 mL 容量瓶中,过滤后采用钼蓝比色法进行测定<sup>[21]</sup>。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 氧化法测定<sup>[22-23]</sup>。

### 1.3.2 土壤微生物生物量磷和相关酶活测定

土壤微生物生物量磷(microbial biomass phosphorous, MBP)采用氯仿熏蒸加 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 浸提法提取<sup>[20]</sup>。采用荧光微平板法测定参与碳循环相关的 β-葡萄糖苷酶(β-1,4-glucosidase, BG)、纤维二糖水解酶(cellobiohydrolase, CB)和氮循环的 N-乙酰-葡萄糖苷酶(β-1,4-N-acetylglucosaminidase, NAG)、亮氨酸氨基肽酶(L-leucine aminopeptidase, LAP),以及参与磷循环的酸性磷酸酶(acid phosphatase, ACP)。称取 1.00 g 土壤样品,倒入 125 mL 醋酸钠缓冲液(pH = 4.9),在 4 °C 条件下将土壤样品充分均匀研磨成土壤悬浮液。在微平板上加入土壤悬浮液 200 μL,依次加入一定量底物后,在 25 °C 条件下黑暗培养 3 h,然后在样品中加入 5 μL NaOH(0.5 mol/L)终止反应,使用酶标仪(波长为 365 ~ 450 nm)进行测定<sup>[24]</sup>,具体底物及浓度见表 2。

### 1.3.3 土壤磷组分

本研究土壤磷组分含量的测定采用了 Hedley 等<sup>[5]</sup>开发并由 Sui 等<sup>[6]</sup>和 Tiessen 等<sup>[7]</sup>改进的方法进行浸提。该试验方法在已有方法的基础上做出了修

改,取 0.50 g 过 2 mm 筛后的湿土,依次提取活性态 P(resin-P、NaHCO<sub>3</sub>-Pi 和 NaHCO<sub>3</sub>-Po)、中等活性态 P(NaOH-Pi 和 NaOH-Po)、稳定态 P(HCl-Pi 和 residual-P)。其中无机态磷(Pi)的测定采用钼蓝比色法,全磷(Pt)的测定采用高温消煮-钼蓝比色法,而有机态磷(Po)等于 Pt-Pi。具体试验步骤如图 1。

### 1.4 数据分析

土壤磷素活化系数(phosphorus activation coefficient, PAC)是用来描述土壤中磷素可利用性的一个指标,衡量了土壤中磷素活性或有效性。

$$PAC = \frac{m_{AP}}{m_{TP} \times 1000} \times 100\%$$

式中:  $m_{AP}$  为速效磷(mg/kg);  $m_{TP}$  为全磷(g/kg)。

运用 Microsoft Office Excel 2021 软件对试验数据进行初步处理;用 SPSS 26.0 软件对所有变量数据进行正态分布检验及方差齐性检验,对土壤理化性质、微生物生物量磷、土壤磷组分、酶活性数据进行单因素方差分析( $\alpha = 0.05$ )以及 Pearson 相关性分析;利用 Origin 2024b 软件进行绘图处理;采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析。图表中数据为平均值 ± 标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 树种混交改造对土壤理化性质的影响

混交改造后,红锥混交林和格木混交林土壤中的全氮、全磷总含量相较于纯林显著增加( $P < 0.05$ ),但格木混交林土壤中的有机碳总含量显著减少(表 3)。此外,3 种林分中,全磷的含量随着孔径的增大而增加,1.45 mm 孔径中铵态氮的含量均显著高于 53 μm 和 1 μm,而不同孔径处理对土壤含水量、有机碳含量、全氮、硝态氮含量均无显著影响。

### 2.2 土壤磷组分含量变化

图 2 表明:与纯林相比,红锥和格木混交林的磷素活化系数显著提高( $P < 0.05$ );与 1 μm 相比,53 μm 孔径中纯林、红锥混交林、格木混交林中磷素活化系数分别显著提高 24.37%、20.24%、20.69%。

图 3 中,引入红锥和格木混交改造对土壤中的活性磷和中等活性磷含量均有影响。相比纯林,红

表 2 土壤碳、氮、磷水解酶基本信息

Tab. 2 Basic information of soil C, N and P hydrolytic enzymes

酶的种类	名称	功能	底物及浓度
碳水解酶	β-葡萄糖苷酶	降解纤维素	4-MUB-β-D-glucosaminide (200 μmol/L)
	纤维二糖水解酶	降解纤维素	4-MUB-b-D-cellobioside (200 μmol/L)
氮水解酶	N-乙酰-葡萄糖苷酶	降解几丁质	4-MUB-N-acetyl-β-D-glucosaminide (200 μmol/L)
	亮氨酸氨基肽酶	水解蛋白质	L-leucine-7-amino-4-methylcoumarin (200 μmol/L)
磷水解酶	酸性磷酸酶	分解有机磷	4-Methylumbelliferyl phosphate (200 μmol/L)

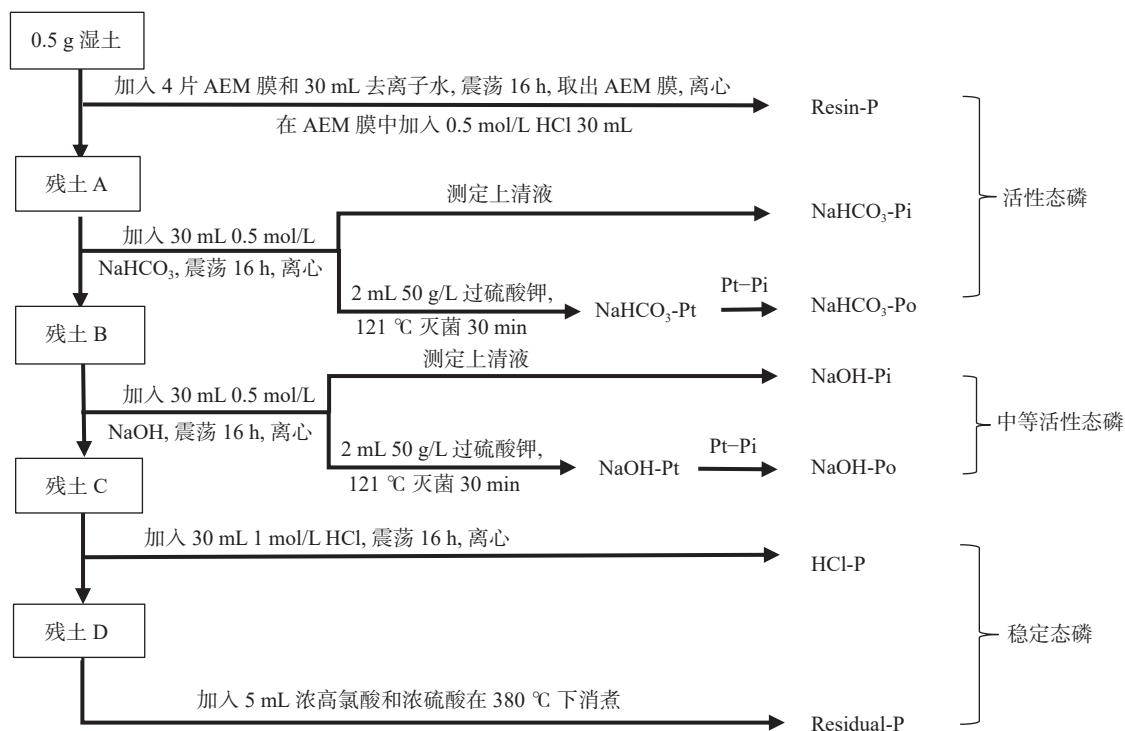


图 1 土壤磷组分分级流程图

Fig. 1 Flow chart of soil phosphorus component grading

表 3 土壤基本理化性质

Tab. 3 Basic physicochemical properties of soil

林分类型	孔径尺寸	SWC	SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	C/N	C/P	N/P
马尾松纯林	1.45 mm	0.15 ± 0.01Aa	32.78 ± 6.75Aa	1.00 ± 0.10Ac	0.16 ± 0.01Ab	2.03 ± 0.04Aa	5.99 ± 1.80Ab	2.54 ± 0.86Ab	32.62 ± 6.59Aa	205.81 ± 35.03Ba	6.31 ± 0.49Ab
	53 μm	0.16 ± 0.03Aa	32.71 ± 5.32Aa	0.91 ± 0.15Ac	0.13 ± 0.01Ab	1.58 ± 0.04Bb	2.50 ± 0.42Ba	1.97 ± 1.22Ab	36.09 ± 6.30Aa	245.73 ± 44.45Ba	6.81 ± 0.90Ab
	1 μm	0.15 ± 0.02Aa	32.13 ± 6.25Aa	1.07 ± 0.07Ab	0.08 ± 0.01Bb	0.80 ± 0.08Bb	1.71 ± 0.56Ba	2.36 ± 1.05Ab	30.10 ± 4.74Aa	392.61 ± 14.96Aa	13.04 ± 1.87Aa
马尾松-红锥	1.45 mm	0.22 ± 0.01Aa	33.91 ± 3.09Aa	1.39 ± 0.10Ab	0.20 ± 0.01Aa	1.85 ± 0.05Bb	6.61 ± 1.26Ab	1.68 ± 0.64Ab	24.38 ± 1.59Ab	173.24 ± 11.29Ca	7.11 ± 0.42Ab
	53 μm	0.21 ± 0.01Aa	35.18 ± 4.70Aa	1.29 ± 0.04Ab	0.17 ± 0.01Aa	2.53 ± 0.04Aa	2.93 ± 1.34Ba	2.30 ± 0.78Ab	27.19 ± 3.52Ab	211.18 ± 24.46Ba	7.77 ± 0.39Ab
	1 μm	0.18 ± 0.01Ba	34.24 ± 3.52Aa	1.21 ± 0.09Ab	0.13 ± 0.01Ba	2.23 ± 0.07Aa	1.89 ± 0.47Ba	2.00 ± 0.72Ab	28.32 ± 4.24Aa	258.91 ± 19.21Aa	9.14 ± 1.09Ab
马尾松-格木	1.45 mm	0.19 ± 0.06Aa	22.53 ± 4.37Ab	1.76 ± 0.24Aa	0.18 ± 0.01Aa	1.83 ± 0.02Ab	9.84 ± 0.68Aa	3.70 ± 2.06Aa	12.79 ± 2.26Ac	123.10 ± 18.60Bb	9.63 ± 1.19Aa
	53 μm	0.20 ± 0.02Aa	21.68 ± 2.64Ab	1.76 ± 0.12Aa	0.18 ± 0.01Aa	2.39 ± 0.02Aa	2.16 ± 0.23Ba	4.73 ± 1.20Aa	12.29 ± 1.50Ac	123.89 ± 11.68Bb	10.08 ± 0.81Aa
	1 μm	0.21 ± 0.06Aa	23.6 ± 1.95Ab	1.56 ± 0.19Aa	0.13 ± 0.03Ba	1.44 ± 0.03Bb	1.78 ± 0.59Ba	4.52 ± 0.44Aa	15.08 ± 1.38Ab	183.91 ± 44.47Ab	12.19 ± 3.34Aa

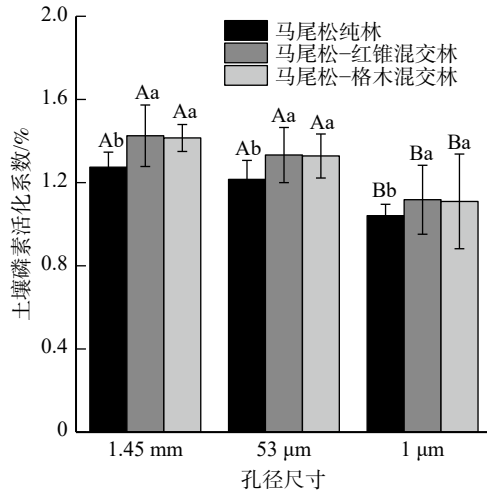
注: SWC. 土壤含水率; SOC. 土壤有机碳; TN. 土壤全氮; TP. 土壤全磷; AP. 土壤速效磷; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. 土壤铵态氮; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N. 土壤硝态氮; C/N. 土壤碳氮比; C/P. 土壤碳磷比; N/P. 氮磷比。表中同列不同大写字母表示同一林分不同孔径差异性显著(P < 0.05), 小写字母表示同一孔径不同林分差异性显著(P < 0.05)。

锥和格木混交林总活性磷分别增加了 41.34%、44.42%(图 3c), 总中等活性磷分别增加了 36.84%、40.26%(图 3f)。相比纯林, 红锥和格木混交林 LIP 含量在 1.45 mm 孔径分别显著增加了 73.62%、86.22%, 在 53 μm 孔径分别显著增加了 55.82%、58.43%(P < 0.05)(图 3a); LOP 含量在 53 μm 孔径分别显著增加了 83.79%、74.19%(P < 0.05)(图 3b); MIP 含量在 1.45 mm 孔径分别显著增加了 56.21%、62.38%, 在 53 μm 孔径分别显著增加了 28.65%、26.86%; MOP 含量仅在 1.45 mm 孔径分别显著增加了 57.27%、54.27%(P < 0.05)(图 3e); 而稳定性磷对

林分类型的改变响应不敏感(图 3g、h、i)。此外, 马尾松纯林 1.45 mm 孔径下的 LTP 和 MTP 含量比 53 μm 分别显著下降 35.55%、30.25%(图 3c、f); 红锥混交林和格木混交林 1.45 mm 孔径中的 LIP 含量比 53 μm 分别显著下降 28.14%、34.59%(图 3a)。

### 2.3 土壤微生物生物量磷和酸性磷酸酶含量变化

与纯林相比, 红锥混交林和格木混交林 3 种微宇宙孔径中的 MBP 含量和 ACP 活性都显著提高(P < 0.05), 两种混交林的 MBP 总含量比纯林分别增加了 91.21% 和 79.52%(图 4a), 两种混交林的 ACP 总活性比纯林分别增加了 86.25% 和 103.46%



不同大写字母表示同林分不同孔径之间差异性显著( $P < 0.05$ ), 小写字母表示同一孔径不同林分之间差异性显著( $P < 0.05$ ), 下同。

图2 不同孔径处理下3种马尾松人工林土壤磷活化系数

Fig. 2 Soil phosphorus activation coefficients in three types of *Pinus massoniana* plantations under different mesh size treatments

(图4b)。在3种林分中,随着微宇宙孔径的增大,MBP含量以及ACP活性均呈现出上升趋势。具体而言,相较于1 μm孔径,53 μm和1.4 mm孔径条件下,马尾松纯林中的ACP活性分别升高了31.47%、58.76%,马尾松-红锥混交林中分别升高了32.16%、11.65%,马尾松-格木混交林中分别升高了28.16%、16.29%;在MBP含量方面,同样与1 μm孔径对比,53 μm和1.45 mm孔径的马尾松纯林中分别升高了30.63%、35.95%,马尾松-红锥混交林中分别升高了9.63%、12.46%,马尾松-格木混交林中分别升高了10.79%、13.95%。

#### 2.4 土壤酶变化特征及其相关性分析

与马尾松纯林相比,红锥混交林和格木混交林中与碳代谢相关的总CB活性分别增加了68.26%、65.15%( $P < 0.05$ )(图5a);与氮代谢相关的总NAG活性分别增加了57.59%、64.18%( $P < 0.001$ )(图5b),总LAP活性分别增加了67.12%、86.08%( $P < 0.001$ )(图5b);与磷代谢相关的总ACP活性分别增加了86.28%、103.46%( $P < 0.001$ )(图5c)。在3种林分中,土壤氮代谢相关的酶活性与磷代谢相关的酶活性之间呈显著正相关( $P < 0.01$ )(图6)。

#### 2.5 不同林分类型下土壤理化性质及相关酶活性对磷组分的影响

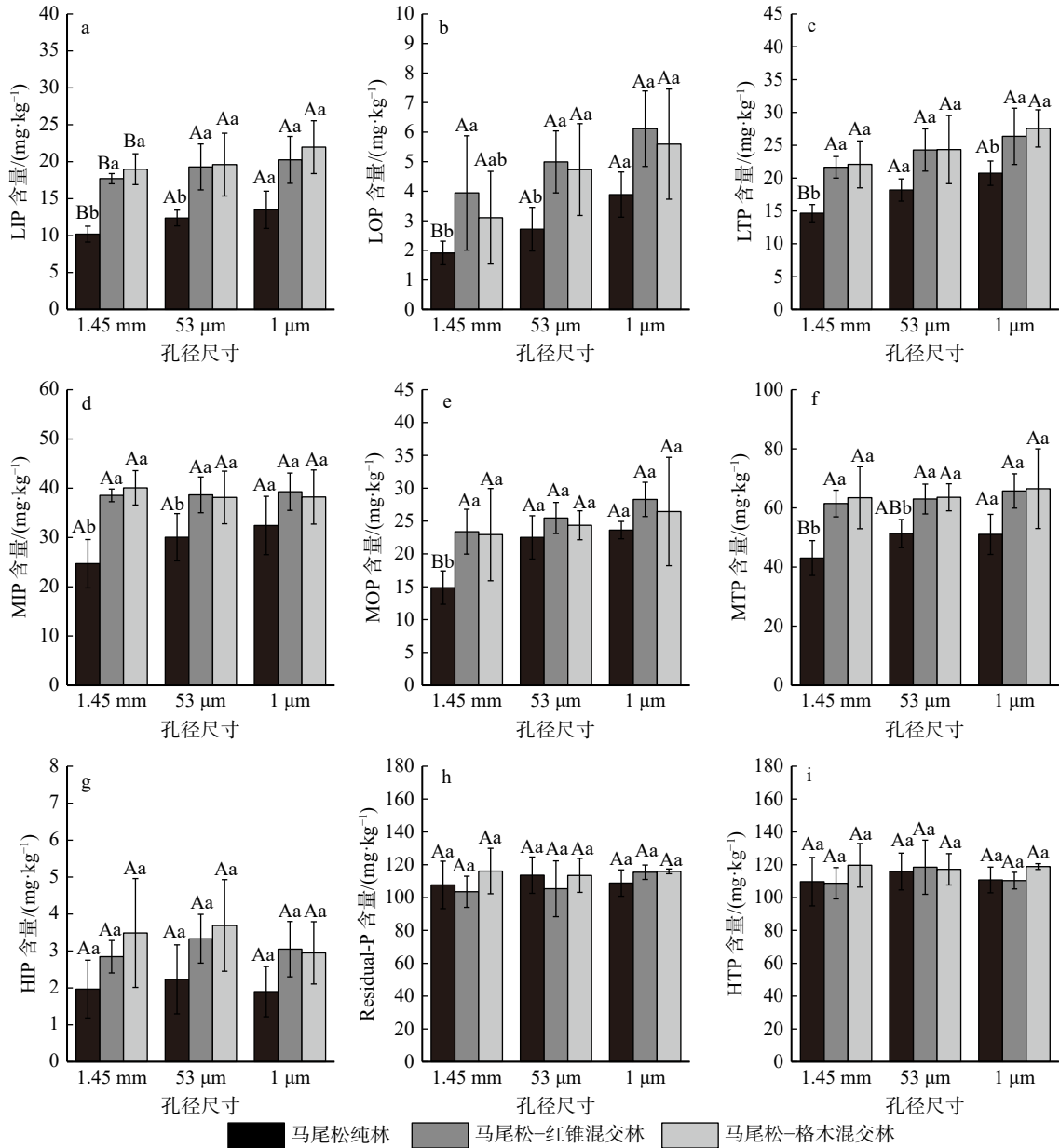
皮尔逊相关性分析表明(图7),在土壤性质中,SWC仅与Residual-P呈显著正相关( $P < 0.05$ ),SOC仅与HIP呈显著负相关( $P < 0.05$ ),TP仅与MIP呈显著正相关( $P < 0.05$ ),TN与LIP和MIP呈显著正相关( $P < 0.05$ ),AP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N与各磷组分无显著关系( $P > 0.05$ ),NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N与LOP和MOP呈显著

负相关( $P < 0.05$ ),C/P与MIP、HIP呈显著负相关( $P < 0.05$ ),C/N与LIP、MIP、MOP、HIP呈显著负相关( $P < 0.05$ ),N/P与LOP、MOP呈正相关( $P < 0.05$ )。在微生物性质中,MBP、ACP和NAG与各磷组分中的无机磷呈显著正相关( $P < 0.05$ ),BG与MIP和HIP呈显著正相关( $P < 0.05$ ),CB仅与MIP呈显著正相关( $P < 0.05$ ),LAP与除Residual-P之外的其他各磷组分均呈显著正相关( $P < 0.05$ )。对环境因子与土壤磷组分进行冗余分析,第一主轴解释了土壤磷组分变量的48.52%,第二主轴解释了土壤磷组分变量的17.14%,TN、MBP、LAP是影响磷组分变化的主要因子( $P < 0.05$ ),其中TN和MBP对土壤磷组分的影响最为显著( $P < 0.01$ ),分别解释了土壤磷组分变化的20.91%和15.44%(图8)。

### 3 讨论

#### 3.1 不同马尾松人工林土壤理化性质对磷组分含量及转化的影响

马尾松纯林经异龄混交改造后,活性磷和中等活性磷作为较易被植物吸收利用的有效磷源,含量显著增加( $P < 0.05$ )。这表明相较于马尾松纯林,混交改造后的林分土壤具有较高的磷有效性。研究<sup>[25]</sup>表明,混交改造后凋落物种类和数量的增加是土壤有机质输入的主要来源。土壤有机质的增加一方面给地下微生物提供了丰富的食物源,促进了土壤微生物的繁殖和活跃,从而加快了土壤中氮、磷矿化速率<sup>[26]</sup>;另一方面,土壤有机质中的有机碳在微生物分解过程中产生有机酸(如柠檬酸和草酸),可以与土壤中的钙、铝和铁形成可溶性络合物,减少磷的沉淀和固定,提高磷的可用性<sup>[27]</sup>。植物群落结构会引起土壤理化性质发生改变,而这些改变对植物和土壤微生物的生长发育都会产生直接的影响。同时,土壤碳、氮、磷的化学计量比也是土壤碳、氮、磷矿化和固持作用的重要指标<sup>[28]</sup>。通过冗余分析对影响土壤磷组分的环境因子进行排序后发现,全氮是驱动土壤各磷组分变化的主要因子,这与许多的研究结果<sup>[29-30]</sup>相似。本研究中,格木混交林土壤中的全磷、全氮增加,有机碳含量减少,这可能是引入固氮树种后,树种组成和林分结构发生改变,凋落物数量增多,增加了土壤中的有机质输入量。氮磷含量增加可能导致有机碳的分解加快,减少了土壤中有机碳的含量。土壤养分的化学计量比发生显著改变,C/N、C/P显著降低,N/P显著增加( $P < 0.05$ )(表3),这表明引入固氮树种后,土壤固氮、固磷的潜力增加,缓解了土壤中的氮、磷限制,提高了氮、磷的有效性。Hou等<sup>[31]</sup>研究发现,引入固氮树种营造混交



LIP. 活性无机磷; LOP. 活性有机磷; LTP. 总活性磷; MIP. 中等活性无机磷; MOP. 中等活性有机磷; MTP. 总中等活性磷; HIP. 稳定性无机磷; Residual-P. 残留磷; HTP. 稳定性总磷。

图 3 不同孔径处理下 3 种马尾松人工林土壤磷组分含量

Fig. 3 Soil phosphorus fraction contents in three types of *Pinus massoniana* plantations under different mesh size treatments

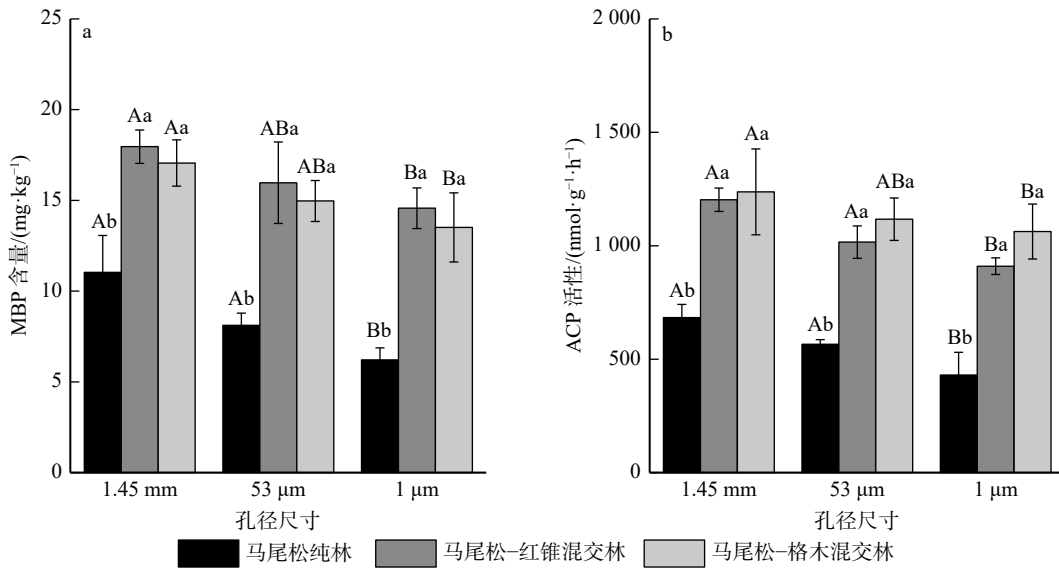
林, 可以增加土壤中氮、磷元素的储量, 有利于土壤氮、磷养分的积累和转化, 影响土壤中各磷组分含量。

土壤酶活性是土壤健康和养分循环的重要指标, 受土壤特性、环境条件和微生物活动等多种因素的影响<sup>[32]</sup>。在本研究中, 马尾松人工纯林引入红锥、格木营造异龄混交林后, 显著提高了土壤中与碳代谢相关的纤维二糖水解酶、与氮代谢相关的 N-乙酰葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶活性以及与磷相关的酸性磷酸酶活性 ( $P < 0.05$ ) (图 5), 这表明马尾松人工纯林异龄混交改造能够促进土壤的碳、氮、磷养分循环。本研究还发现, 土壤中的氮相关水解酶与磷相关水解酶活性之间具有较强的协同作用 (图 6c),

这与冯慧琳等<sup>[33]</sup>、王亚茹等<sup>[34]</sup>的研究结果相似, 均表明土壤酶活与土壤氮、有机质存在显著相关性, 土壤微生物群落具有相似的养分获取分配模式<sup>[35]</sup>。此外, 在本研究中, 土壤微生物生物量磷也是影响土壤磷组分变化的关键因子, 吴佳芯等<sup>[36]</sup>的研究表明土壤微生物体中的大量有机磷可以在微生物代谢过程中迅速矿化为无机磷, 通过增加土壤微生物生物量磷的含量积累无机磷, 提高土壤磷的有效性磷。

### 3.2 根系-菌根-土壤微生物对土壤 P 组分含量及转化的影响

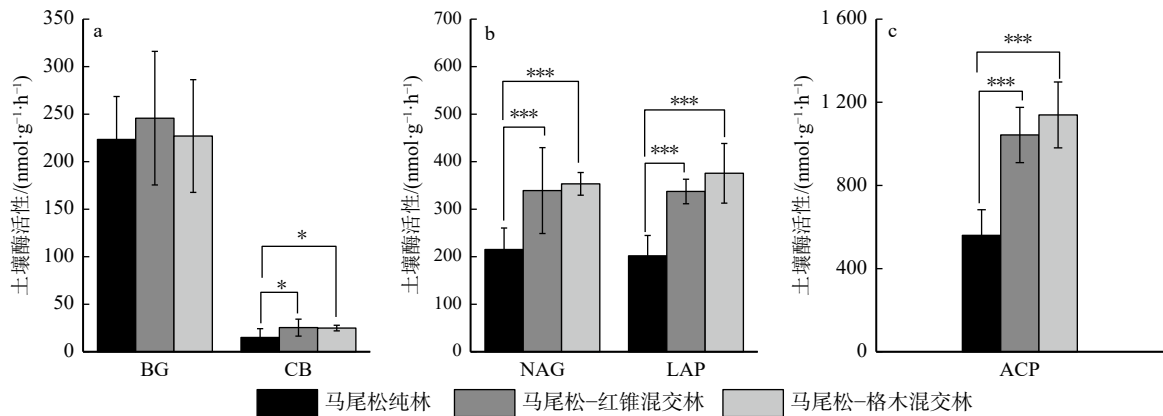
本研究发现, 根系、菌丝和土壤微生物对土壤磷组分含量及转化有不同的影响。仅有菌丝参与后,



MBP. 微生物生物量磷; ACP. 酸性磷酸酶。

图4 不同孔径处理下3种马尾松人工林土壤微生物生物量磷和酸性磷酸酶活性

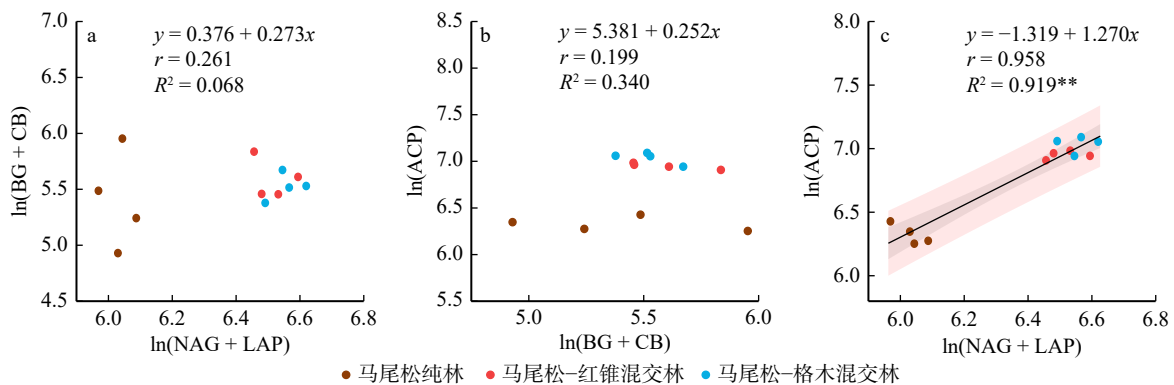
Fig. 4 Soil microbial biomass phosphorus and acid phosphatase activity in three types of *Pinus massoniana* plantations under different mesh size treatments



BG. β-葡萄糖苷酶; CB. 纤维二糖水解酶; NAG. N-乙酰-葡萄糖苷酶; LAP. 亮氨酸氨基肽酶; ACP. 酸性磷酸酶。\*和\*\*\*分别表示在0.05、0.001水平上差异显著。

图5 3种马尾松人工林土壤碳、氮、磷代谢酶活性变化

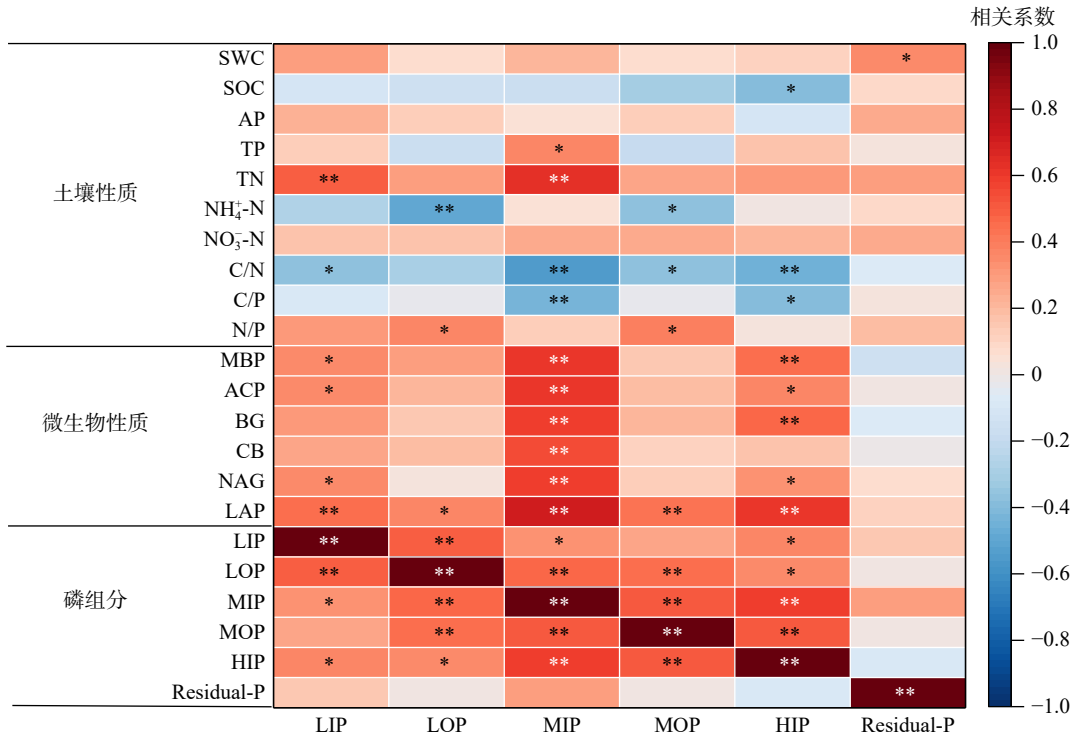
Fig. 5 Changes of soil C, N and P metabolic enzymes in three types of *Pinus massoniana* plantations



ln(BG + CB) 为 BG 和 CB 两种酶活性之和的自然对数; ln(NAG + LAP) 为 NAG 和 LAP 两种酶活性之和的自然对数; ln(ACP) 为 ACP 酶活性的自然对数。

图6 土壤碳、氮、磷水解酶相互关系

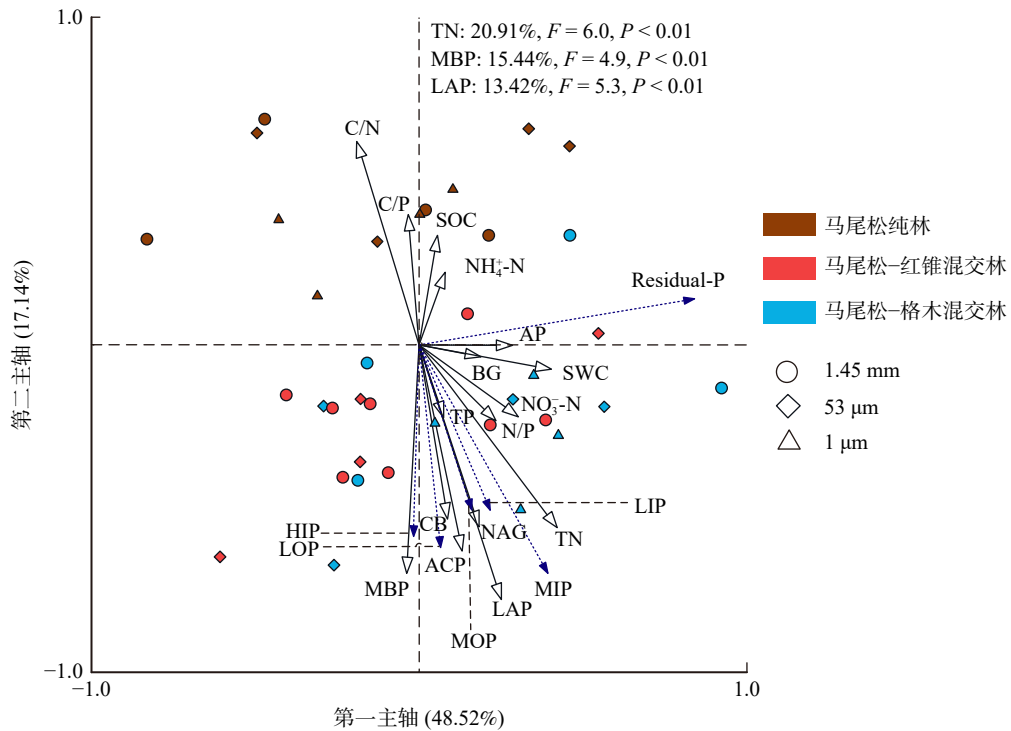
Fig. 6 Correlations between soil C, N and P hydrolytic enzymes



\*和\*\*分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

图 7 土壤磷组分与主要环境因子的相关关系

Fig. 7 Correlations between soil phosphorus fractions and major environmental factors



实线表示土壤性质指标和微生物指标; 虚线表示土壤的各种磷组分。

图 8 土壤磷组分与主要环境因子的冗余分析

Fig. 8 Redundancy analysis of soil phosphorus fractions with major environmental factors

两种混交林中磷素活化系数显著升高 ( $P < 0.05$ ) (图 2), 但根系参与后, 与仅有菌丝无显著变化。一方面, 可能是树种混交使菌丝的数量增加, 提高土壤有机质的含量, 有机质可以与磷酸根竞争固相表面

的专性吸附点位, 从而减少土壤对磷的吸附作用, 增加土壤中有效磷。另一方面, 可能是因为树种混交有助于地下形成更复杂的菌根网络, 增加了菌丝的多样性, 菌丝分泌物诱导特定微生物(如解磷菌)定

殖,促进难溶性磷的溶解,从而提高土壤中的磷素有效性<sup>[37]</sup>。Emmett等<sup>[38]</sup>对丛枝菌根真菌菌丝际细菌群落分析也发现,菌丝际富集大量具有解磷功能的细菌。在本研究中,酸性磷酸酶活性和土壤微生物生物量磷含量也随着菌丝的参与显著增加( $P < 0.05$ )。

根系参与后,3种林分土壤磷组分中的活性无机磷含量均显著降低( $P < 0.05$ ) (图3a),这说明根系参与加快了土壤中养分的获取效率,导致土壤中易被植物直接吸收利用的活性无机磷含量降低。Zhang等<sup>[39]</sup>在对植物直接吸收途径或菌根吸收途径的偏好研究结果也表明,植物在缺磷环境下,会优先选择根系途径获取磷。此外,根系参与后,两种混交林土壤中的活性有机磷和中等活性有机磷含量较纯林显著增加。混交林因为存在更多细根生物量和凋落物等有机质的输入,相较于纯林,其有机磷含量更高,且不同树种根系与土壤微生物之间的互作更加复杂<sup>[40]</sup>。本研究中,格木混交林土壤中活性无机磷的含量低于红锥混交林(图3b),一些研究<sup>[41-42]</sup>发现,在纯林中引入豆科植物混交种植可使土壤微生物生物量增加。另外,马尾松-格木混交林中的铵态氮含量高于红锥混交林(表3),且铵态氮含量与活性有机磷呈负相关,其原因可能归咎于固氮树种可以与固氮微生物(如根瘤菌)形成共生关系,固氮微生物通过固氮酶将大气中的氮气( $N_2$ )转化为氨( $NH_3$ ),生成的氨在土壤中快速与水结合形成铵离子( $NH_4^+$ ),而铵态氮可以促进微生物特别是磷矿化菌群的活动,进而增加有机磷的矿化,释放出无机磷供植物利用<sup>[43]</sup>。

## 4 结 论

马尾松人工纯林分别引入红锥和格木进行异龄混交改造后,主要增加了土壤磷组分中的活性磷和中等活性磷的含量。混交林通过改变土壤的理化性质、微生物活性以及土壤碳、氮和磷相关代谢酶活性,提高土壤各磷组分含量,从而增加林木的养分供应。土壤全氮、微生物生物量磷、亮氨酸氨基肽酶是调控土壤磷组分转化的主要环境因子。引入固氮树种格木营造混交林在缓解马尾松人工林土壤磷限制,提高土壤磷有效性方面更为显著。此外,本研究发现根系、菌丝和土壤微生物在调控土壤磷循环过程中具有差异。土壤微生物是影响土壤磷矿化作用的重要生物因子,根系参与后对土壤中磷的转化起主要作用,根系和菌丝的相互作用能使其土壤中的微生物群落互作关系变得更加复杂,酸性磷酸酶活性增强,提高土壤磷的转化和有效性。综上,本研究结果为南亚热带马尾松人工林的混种配置以及植被

对地下磷获取途径的研究提供了新的实践指导和科学依据。

## 参 考 文 献

- [1] 张亮, 杨卉芄, 冯安生, 等. 全球磷矿资源开发利用现状及市场分析[J]. 矿产保护与利用, 2017(5): 105-112.  
Zhang L, Yang H P, Feng A S, et al. Study on general situation and analysis of supply and demand of global phosphate resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(5): 105-112.
- [2] 石文静. 土壤有机磷的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11697-11701, 11703.  
Shi W J. Research advance in soil organic phosphorus[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(33): 11697-11701, 11703.
- [3] Jarosch K A, Kandeler E, Frossard E, et al. Is the enzymatic hydrolysis of soil organic phosphorus compounds limited by enzyme or substrate availability?[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 139: 107628.
- [4] 刘生忠, 王林林, 司佳昂, 等. 长期保护性耕作对陇中旱农区小麦田土壤磷组分的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(4): 82-90.  
Liu S Z, Wang L L, Si J A, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil phosphorus fraction in rainfed wheat field of Longzhong[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(4): 82-90.
- [5] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 970-976.
- [6] Sui Y, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1174-1180.
- [7] Tiessen H, Stewart J W B, Cole C V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(4): 853-858.
- [8] 谭许脉. 马尾松/格木异龄混交改造对根际和非根际土壤磷组分的影响及其潜在调控机制[D]. 南宁: 广西大学, 2023.  
Tan X M. Effects of *Pinus massoniana*/*Erythrophleum fordii* uneven-aged mixed transformation on-rhizosphere and non-rhizosphere soils phosphorus fractions and its potential regulatory mechanisms[D]. Nanning: Guangxi University, 2023.
- [9] Wang G W, Jin Z X, George, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance plant phosphorus uptake through stimulating rhizosphere soil microbiome functional profiles for phosphorus turnover[J]. The New phytologist, 2023, 238(6): 2578-2593.
- [10] Raghothama K G. Phosphorus and plant nutrition: an overview[J]. Phosphorus: Agriculture and the Environment, 2005, 46: 353-378.
- [11] Cao X, Zhao Y, Xia X R, et al. Interactions between root hair development and arbuscular mycorrhizal fungal colonization in

- trifoliolate orange seedlings in response to p levels[J]. *Agriculture*, 2024, 14(5): 763.
- [12] Yao N N, Li A, Wang X J, et al. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on root foraging and competitive ability depends on soil phosphorus distribution: evidence from two pairs of invasive and native plants[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 201: 105507.
- [13] 尹华军, 张子良, 刘庆. 森林根系分泌物生态学问题: 问题与展望[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(11): 1055-1070.
- Yin H J, Zhang Z L, Liu Q. Root exudates and their ecological consequences in forest ecosystems: problems and perspective[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(11): 1055-1070.
- [14] Zhang M Z, Li W T, Liu W J, et al. Rhizosphere microbial community construction during the latitudinal spread of the invader *Chromolaena odorata*[J]. *BMC Microbiology*, 2024, 24(1): 1-12.
- [15] 李银, 曾曙才, 黄文娟. 模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 631-636.
- Li Y, Zeng S C, Huang W J. Effects of simulated nitrogen deposition on soil acid phosphomonoesterase activity and soil available phosphorus content in subtropical forests in Dinghushan Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 631-636.
- [16] 肖指柔, 滕金倩, 秦佳琪, 等. 土壤碳氮磷生态化学计量比对针阔人工混交林及其纯林的差异响应[J]. *西部林业科学*, 2024, 53(2): 56-63.
- Xiao Z R, Teng J Q, Qin J Q, et al. Differential responses of soil carbon, nitrogen and phosphorus eco-stoichiometric ratio to monoculture and mixed coniferous-broadleaved plantations[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2024, 53(2): 56-63.
- [17] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 1-10.
- Liu S R, Yang Y J, Wang H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 1-10.
- [18] 李金凤, 王晖, 尤业明, 等. 南亚热带人工林树种配置对根际土壤生物有效磷的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(6): 1492-1500.
- Li J F, Wang H, You Y M, et al. Effects of tree species assembly on bioavailable P components in rhizosphere soil of southern subtropical plantation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(6): 1492-1500.
- [19] 包涛涛, 李丝雨, 王一, 等. 根系-菌根-土壤微生物对毛竹林土壤氮矿化过程的贡献[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(5): 1234-1242.
- Bao T T, Li S Y, Wang Y, et al. Contribution of roots-mycorrhizae-free-living microorganisms to soil nitrogen mineralization in moso bamboo forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(5): 1234-1242.
- [20] Saiya C K, Sinsabaugh R, Zak D. 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.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- Bao S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2013.
- [22] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [23] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, 14(4): 319-329.
- [24] Asadishad B, Chahal S, Akbari A, et al. Amendment of agricultural soil with metal nanoparticles: effects on soil enzyme activity and microbial community composition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4): 1908-1918.
- [25] 田野, 姜文婷, 王秀康, 等. 外源氯化钙与秸秆物料对盐碱土壤有机碳组分和酶活性的影响[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(3): 59-67.
- Tian Y, Jiang W T, Wang X K, et al. Effects of exogenous calcium chloride and straw materials on organic carbon components and enzyme activities of saline-alkali soil[J]. *Journal of Yan'an University (Natural Science Edition)*, 2024, 43(3): 59-67.
- [26] 常怡然, 史佳梅, 许冬梅, 等. 荒漠草原不同自然种群蒙古冰草生物量和养分权衡特征[J]. *草业学报*, 2024, 33(11): 186-197.
- Chang Y R, Shi J M, Xu D M, et al. Trade-off relationships between biomass and nutrient allocation in different natural populations of *Agropyron mongolicum* on the desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(11): 186-197.
- [27] 严君, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土微生物群落功能多样性的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(4): 381-388.
- Yan J, Han X Z, Lu X C, et al. Effects of different land use types on functional diversity of microbial communities in mollisols[J]. *Soil and Crops*, 2019, 8(4): 381-388.
- [28] 朱潮, 武利玉, 张崇庆, 等. 兰州市北山典型侧柏人工林分叶片与土壤生态化学计量特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 361-368.
- Zhu C, Wu L Y, Zhang C Q, et al. Ecological stoichiometric characteristics of leaves and soil in a typical *Platycladus orientalis* plantation in Beishan of Lanzhou City[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 361-368.
- [29] 谷雨晴, 袁在翔, 牛莹莹, 等. 紫金山两种典型林分土壤磷组分特征及其影响因素[J]. *森林与环境学报*, 2024, 44(2): 136-147.
- Gu Y Q, Yuan Z X, Niu Y Y, et al. Characteristics of soil phosphorus fractions of two typical stands in Zijinshan Mountain and their driving factors[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2024, 44(2): 136-147.
- [30] 阿合江·赛力克, 孙琳, 王绒, 等. 黄土丘陵恢复草地土壤团聚体组成及全氮分布特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(24):

- 10065–10080.
- Ahejiang S L K, Sun L, Wang R, et al. Restoration of grassland soil aggregate composition and total nitrogen distribution characteristics in loess hilly area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24): 10065–10080.
- [31] Hou E, Tang S, Chen C, et al. Solubility of phosphorus in subtropical forest soils as influenced by low-molecular organic acids and key soil properties[J]. *Geoderma*, 2017, 313: 172–180.
- [32] 曾宪楠, 高斯侗, 冯延江, 等. 水稻秸秆还田对土壤培肥及水稻产量的影响研究进展 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(18): 13–16.
- Zeng X N, Gao S T, Feng Y J, et al. Research progress on the effect of rice straw return on soil fertilization and rice yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(18): 13–16.
- [33] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制 [J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 422–432.
- Feng H L, Xu C S, He H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 422–432.
- [34] 王亚茹, 林鑫宇, 惠昊, 等. 杨树人工林类型对土壤磷组分的影响 [J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1549–1556.
- Wang Y R, Lin X Y, Hui H, et al. Effects of poplar plantation types on soil phosphorus fractions[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6): 1549–1556.
- [35] Moore J, Jiang J, Patterson C M, et al. Interactions among roots, mycorrhizas and free-living microbial communities differentially impact soil carbon processes[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(6): 1442–1453.
- [36] 吴佳芯, 张育涵, 李邵宇, 等. 长期放牧对内蒙古荒漠草原土壤不同组分有机磷含量的影响 [J]. *草地学报*, 2024, 32(5): 1479–1488.
- Wu J X, Zhang Y H, Li S Y, et al. Effects of long-term grazing on different fractions of organic phosphorus content in desert grassland in Inner Mongolia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1479–1488.
- [37] 段世龙, 严文辉, 冯固, 等. 植物根系/菌根途径获取养分的碳磷互惠机制 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(6): 1160–1167.
- Duan S L, Yan W H, Feng G, et al. Carbon-phosphorus reciprocal mechanism for plants to acquire nutrients through the root/mycorrhizal pathway[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(6): 1160–1167.
- [38] Emmett B D, Véronique L T, Harrison M J. Conserved and reproducible bacterial communities associate with extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *The ISME Journal*, 2021, 15(8): 2276–2288.
- [39] Zhang L, Shi N, Fan J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi stimulate organic phosphate mobilization associated with changing bacterial community structure under field conditions: AMF stimulate organic P mobilization in the field[J]. *Environmental Microbiology*, 2018, 20(7): 2639–2651.
- [40] Lin Z, Qun C, Jianwei Z, et al. Soil phosphorus availability determines the preference for direct or mycorrhizal phosphorus uptake pathway in maize[J]. *Geoderma*, 2021, 403: 115261.
- [41] Li J, Li Z, Wang F, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community in a secondary tropical forest of China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51(2): 207–215.
- [42] Huang X, Liu S, Wang H, et al. Changes of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with *Eucalyptus urophylla* in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 73: 42–48.
- [43] 王可莹. 松嫩草地土壤有机磷组分及土壤磷矿化对氮添加的响应 [D]. 长春: 东北师范大学, 2021.
- Wang K Y. Response of soil organic phosphorus fraction and soil phosphorus mineralization to nitrogen addition in Songnen grassland[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2021.

(责任编辑 孟瑶 李 契  
责任编辑委 赵秀海)