

## 杉木纯林转变为杉木和闽楠复层异龄混交林 对土壤剖面氮磷组分的影响

杨颖<sup>1,2</sup>, 王国忠<sup>3</sup>, 郑文华<sup>4</sup>, 谷加存<sup>1</sup>, 成向荣<sup>2\*</sup>

(1. 东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400; 3. 开化县池淮镇, 浙江 衢州 324300; 4. 开化县林场, 浙江 衢州 324300)

**摘 要:** 土壤氮磷对林木生长至关重要, 研究纯林转变为复层异龄混交林后土壤剖面氮磷组分变异特征及其主要影响因素, 有助于阐明纯林林分结构调控对土壤质量影响的机制。以杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 纯林和杉木及闽楠 (*Phoebe bournei*) 复层异龄混交林 (以下简称杉闽混交林) 为研究对象, 探讨 2 种林分在不同土层 (0~10、>10~30、>30~50 cm) 中氮磷组分、其他土壤性质和根系性状的变异特征及其相互关系。结果表明, 杉木纯林转变为杉闽混交林后, 0~10 cm 土层土壤多数氮磷组分质量分数显著增加, 活性、中等活性、稳定性磷组分及总磷质量分数分别比杉木纯林增加 38.2%、31.6%、15.4% 和 25.1%, 土壤无机氮、有机氮和总氮质量分数分别比杉木纯林增加 42.1%、35.8%、35.9%。在 >10~30 cm 土层杉闽混交林中活性有机磷、无机氮、酸解有机氮及总氮和总磷含量均显著高于杉木纯林。>30~50 cm 土壤两种林分土壤氮磷组分质量分数没有显著差异。2 种林分氮磷组分质量分数均随土壤深度增加而降低。此外, 林分结构转变影响林木根系分布及性状, 杉闽混交林根系生物量、根长密度和比根长均高于杉木纯林; 0~10 cm 根系生物量和根长密度分别比杉木纯林增加 124.66% 和 269.23%。杉木纯林根系生物量和根长密度等随土壤深度增加先增大后降低, 而杉闽混交林中闽楠根系的表聚性, 导致杉木根系生物量和根长密度随土壤深度增加逐渐增加。土壤氮磷组分随林分与土壤深度的变异主要与根系分布、土壤有机碳及土壤微生物性状有关。研究结果揭示亚热带地区杉木人工林结构优化对土壤肥力具有重要影响。

**关键词:** 氮磷组分; 混交林; 根系分布; 杉木; 闽楠

**中图分类号:** S791.22; S792.41

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.013

## Effects of Transforming Pure *Cunninghamia lanceolata* Plantations into Multi-layered, Uneven-aged Mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe bournei* Plantations on Soil Profile Nitrogen and Phosphorus Fractions

YANG Ying<sup>1,2</sup>, WANG Guozhong<sup>3</sup>, ZHENG Wenhua<sup>4</sup>, GU Jiacun<sup>1</sup>, CHENG Xiangrong<sup>2\*</sup>

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 3. Chihuai Town, Kaihua County, Quzhou 324300, China; 4. Kaihua Forest Farm, Quzhou 324300, China)

**Abstract:** Soil nitrogen (N) and phosphorus (P) are critical for tree growth. Investigating the variation characteristics of N and P fractions across soil profiles and their primary influencing factors following the transformation from pure plantations to multi-layered, uneven-aged plantations provides insights into the mechanisms by which structural regulation of pure forest stands impacts soil quality. This study focused on pure *Cunninghamia lanceolata* plantations and multi-layered, uneven-aged mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe bournei* plantations.

**收稿日期:** 2025-05-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (32271855); 浙江省中国林科院合作重大项目 (2025SY05)。

**第一作者简介:** 杨颖, 硕士研究生。研究方向为森林培育。E-mail: 2904769390@qq.com

**\*通信作者:** 成向荣, 博士, 研究员。研究方向为森林生态系统结构与功能。E-mail: chxr@caf.ac.cn

**引文格式:** 杨颖, 王国忠, 郑文华, 等. 杉木纯林转变为杉木和闽楠复层异龄混交林对土壤剖面氮磷组分的影响[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1230-1241.

YANG Y, WANG G Z, ZHENG W H, et al. Effects of transforming pure *Cunninghamia lanceolata* plantations into multi-layered, uneven-aged mixed *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe bournei* plantations on soil profile nitrogen and phosphorus fractions[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1230-1241.

ered uneven-aged mixed *C. lanceolata* and *Phoebe bournei* plantations (hereafter referred to as mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations). We examined the variations in N and P fractions, other soil properties, and root traits across different soil layers (0–10 cm, >10–30 cm, >30–50 cm) in these two stands, as well as their interrelationships. The results revealed that after the transition from pure *C. lanceolata* plantations to mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations, the contents of most N and P fractions in the 0–10 cm soil layer significantly increased. Specifically, labile, moderately labile, and stable P fractions, along with total P contents, increased by 38.2%, 31.6%, 15.4%, and 25.1%, respectively, compared to the pure *C. lanceolata* plantations, and inorganic, organic, and total N contents increased by 42.1%, 35.8%, and 35.9%, respectively. In the >10–30 cm soil layer, the contents of moderately labile organic P, inorganic N, acid-hydrolysable organic N, total N, and total P were significantly higher in the mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations than pure *C. lanceolata* plantations. However, no significant differences in N and P fractions contents were observed between the two stands in the >30–50 cm soil layer. The contents of N and P fractions of the two stands decreased with increasing soil depth. Furthermore, the transformation of stand structure affects root distribution and traits. The mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations exhibited higher root biomass, root length density, and specific root length compared to pure *C. lanceolata* plantations. The root biomass and root length density at 0–10 cm increased by 124.66% and 269.23%, respectively, compared to the pure *C. lanceolata* plantations. In pure *C. lanceolata* plantations, root biomass and root length density initially increased and then decreased with soil depth. In contrast, due to the surface aggregation of *P. bournei* roots in the mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantation, the root biomass and root length density of *C. lanceolata* gradually increased with soil depth. The variations in soil nitrogen and phosphorus components across different stand types and soil depths were primarily associated with root distribution, soil organic carbon, and soil microbial characteristics. The findings highlight that structural optimization of *C. lanceolata* plantations in subtropical regions significantly influences soil fertility.

**Keywords:** Nitrogen and phosphorus fractions; mixed forest; root distribution; *Cunninghamia lanceolata*; *Phoebe bournei*

## 0 引言

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方地区特有的速生用材树种,在保障木材供给和改善区域生态环境方面发挥了重要作用。长期以纯林和连栽为主的经营模式,导致土壤肥力和生产力逐渐下降,严重影响了杉木人工林的可持续经营<sup>[1]</sup>。营建同龄或异龄杉阔混交林对优化林分结构,提高林分生产力具有重要意义<sup>[2]</sup>。近年来,在杉木大径材培育过程中适度间伐林木,通过杉木林下引入耐阴的珍贵树种,构建杉木珍贵树种复层异龄混交林的经营模式得到快速发展。这种杉木纯林林分结构的改变,优化了林分树种组成,有助于改善土壤肥力<sup>[3]</sup>。

氮和磷是影响林木生长的重要营养元素,在维持生态系统生产力和功能等方面发挥着至关重要的作用。亚热带地区集约化经营的人工林普遍存在缺氮少磷的问题,尤其是有效磷质量分数极其缺乏。2、3代杉木林土壤速效磷和碱解氮质量分数比1代林平均降幅达20%~30%<sup>[4]</sup>。多数研究表明,混交林能够显著提高土壤氮磷有效性<sup>[5]</sup>。例如,杉木+闽楠(*Phoebe bournei*)混交林土壤无机氮和有效磷质量分数比杉木纯林增加10%以上<sup>[3]</sup>。5年生杉木+马褂木混交林的土壤水解氮、有效磷较纯林相比增加了12.9%和6.6%<sup>[6]</sup>。以往关于混交林土壤氮磷养分的研究主要关注总氮和总磷及碱解氮和有效磷的变化特征,而土壤氮磷以多

种形态存在<sup>[7]</sup>,混交林下土壤不同形态氮磷养分变异特征还有待深入了解。此外,少数关注林地土壤不同氮磷组分的研究集中在表层土壤<sup>[8]</sup>,缺乏对混交林土壤剖面氮磷组分空间分异特征研究,而这对于深入理解混交林土壤养分循环过程具有重要意义。

树种混交改变了凋落物数量和质量,同时引起林木根系生物量和根系功能性状发生改变,进而影响土壤有机质、微生物群落性状和养分有效性<sup>[9]</sup>。根系周转改变了土壤物理结构,促进土壤养分流动,增加土壤养分质量分数<sup>[10]</sup>。此外,根系与植物氮素吸收密切相关<sup>[11]</sup>。较大根系生物量的根系获取土壤氮素的能力较强<sup>[12]</sup>。根长密度的增大既有利于改良土壤结构,也有利于土壤有机碳和总氮质量分数的积累<sup>[13]</sup>。较小的细根直径能够增大周转速率,从而提高对土壤磷的获取<sup>[14]</sup>。以往研究表明,树种混交通过促进微生物活动和有机质分解影响土壤氮磷组分质量分数<sup>[3]</sup>,然而根系性状及其空间分布与土壤氮磷组分之间的关系仍缺乏了解。

为此,本研究以亚热带地区分布面积较大的杉木和闽楠复层异龄混交林(以下简称杉闽混交林)为对象,分析杉木纯林和杉闽混交林土壤剖面上不同形态氮磷组分变异和根系性状特征,明确土壤有机碳组分、微生物量碳氮磷质量分数、根系特征及其与土壤氮磷有效性的关系,揭示杉木纯林转变为杉闽混交林对土壤肥力的影响规律,为杉木人工林可持续经营管理提

供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验地位于浙江省衢州市开化县林场(118°01′—118°37′ E, 28°54′—29°30′ N)。该地区为亚热带季风气候,年平均气温 18.1 °C,年平均降水量为 1 814 mm,无霜期为 252 d,年日照时数为 1 334.1 h。试验地的平均坡度为 15°,平均海拔为 234 m,土壤为红黄壤,质地

是粉质壤土。供试杉木纯林营造于 1996 年,采用 1 年生无性系容器苗造林,初始造林密度为 2 500 株/hm<sup>2</sup>。分别在 2006 年和 2011 年进行 2 次间伐(间伐强度分别为 35% 和 20%)。2015 年春季在间伐后的杉木林下栽植闽楠,构建杉闽混交林,采用 2 年生闽楠容器苗造林,闽楠造林密度 2 500 株/hm<sup>2</sup>。2023 年 8 月,在杉闽混交林(CP)及邻近的杉木纯林(C)内分别建立 5 个 20 m×20 m 样地,样地位于相同坡向和坡位,用于林分生长状况调查,样地概况见表 1。

表 1 杉木纯林和杉闽混交林林分特征

Tab. 1 Stand characteristics of pure *C. lanceolata* plantations and mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations

| 林分<br>Stands  | 林龄 /a<br>Stand age | 郁闭度<br>Canopy coverage | 平均树高 /m<br>Mean tree height   | 平均胸径 /cm<br>Mean diameter at breast height | 林分密度 /<br>(株·hm <sup>-2</sup> )<br>Stand density | 年凋落物量 /<br>(kg·hm <sup>-2</sup> )<br>Litter fall |
|---|--------------------|------------------------|-------------------------------|--|--|--|
| 杉木纯林<br>Pure <i>C. lanceolata</i> plantations                         | 28                 | 0.86 ± 0.06            | 17.25 ± 0.81                  | 20.12 ± 0.51                               | 1 233 ± 103                                      | 559.68 ± 35.45                                   |
| 杉闽混交林<br>Mixed <i>C. lanceolata</i> and <i>P. bournei</i> plantations | 28<br>(8)          | 0.87 ± 0.05            | 17.28 ± 0.93<br>(5.31 ± 0.58) | 21.18 ± 0.34<br>(4.09 ± 0.27)              | 1 126 ± 114<br>(2 236 ± 136)                     | 684.88 ± 47.34                                   |

注:表格中括号内数据为杉闽混交林中的闽楠生长数据。

Note: The data in parentheses in the table represent the growth data of *P. bournei* in the mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations.

### 1.2 植物和土壤样品采集

采用挖剖面的方法收集林木根系样品。在每个样地内,杉木纯林或杉闽混交林内随机挖 6 个剖面(长×宽×深度为 30 cm×20 cm×50 cm),分层(0~10、>10~30、>30~50 cm)收集林木根系,简单清理附着于根系表面的泥土后放入编号后的自封袋。

在收集根系的土壤剖面上分层(0~10、>10~30、>30~50 cm)采集土壤样品,并用环刀采样。同一样地相同土层土样混合为一个混合样品,共采集 30 个土壤样品。采集的土样带回实验室部分在 4 °C 保存,用于土壤微生物量碳氮磷测定;其余土样自然风干后磨碎,分别过 2 mm 和 0.15 mm 筛,用于测定其他土壤性质。

### 1.3 土壤氮磷组分测定

土壤无机氮分为铵态氮(ammonium nitrogen, ammonium)和硝态氮(nitrate nitrogen, nitrate)。铵态氮采用氧化镁浸提—扩散法测定,硝态氮采用酚二磺酸比色法测定<sup>[15]</sup>。根据 Bremner<sup>[16]</sup>提出的分类,土壤有机氮分为:酸水解总氮(acidolizable hydrolyzable organic nitrogen, AHON),采用 6 mol/L HCl 酸解—凯氏定氮法测定;酸解铵态氮(acidolysable hydrolyzable amino nitrogen, AON),采用 3.5% 氧化镁—蒸馏法测定;酸解铵态氮+氨基糖态氮(aminosugar nitrogen, ASN),采用磷酸—硼砂(pH 为 11.2)缓冲液蒸馏法测定;氨基酸态氮(amino acid nitrogen, AAN),采用茚三酮氧化、磷酸盐—硼酸盐缓冲液蒸馏法测定;非酸解性氮(non-hydrolyz-

able N, NHN)和氨基糖态氮,采用差减法求得, NHN= TN-AHON-AAN-ASN; ASN=(AHON+ASN)-AHON; 土壤总氮(TN)采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮,全自动凯氏定氮仪测定<sup>[17]</sup>。上述指标测定均设置 5 个重复。

土壤磷组分参考徐光荣等<sup>[7]</sup>修正的 Tiessen 连续浸提分级法,将不同磷组分按其在土壤中的活性分为活性磷、中等活性磷和稳定态磷。活性磷包括水溶性无机磷(H<sub>2</sub>O-Pi)和有机磷(H<sub>2</sub>O-Po)、碳酸氢钠态无机磷(NaHCO<sub>3</sub>-Pi)和有机磷(NaHCO<sub>3</sub>-Po);中等活性磷包括氢氧化钠态无机磷(NaOH-Pi)和有机磷(NaOH-Po)、稀盐酸态无机磷(HCl-Pi)和有机磷(HCl-Po);稳定态磷包括浓盐酸态无机磷(Ref-Pi)和有机磷(Ref-Po)、闭蓄态磷(Residual-P)。其中 NaHCO<sub>3</sub> 态磷、NaOH 态磷、稀 HCl 态磷和浓 HCl 态磷分别使用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>(pH=8.5)溶液、0.1 mol/L NaOH 溶液、1 mol/L HCl 溶液、12 mol/L HCl 溶液进行提取;闭蓄态磷(Residual-P)使用 12 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>进行高温消解。每组样品设置 5 个重复。提取液采用钼酸铵分光光度法,使用 UV-5100B 紫外可见分光光度计进行测定并计算含磷量。总磷(TP)为磷组分之和。上述指标测定均设置 5 个重复。

### 1.4 根系性状测定

本研究测定 5 种细根(直径≤2 mm)性状,包括根系生物量(RWD)、比根长(SRL)、根平均直径(RAD)、根长密度(RLD)。基于根系直径区分出活细根并清洗干净,获得的根系样品使用根系分析软件(WinRHIZO

2014b, Canada)测定根长和根直径等指标。将扫描后的细根于 60 °C 烘箱中烘至恒质量,称取细根干质量,计算比根长(根长与根干质量的比值)、根长密度(根长与土壤体积的比值)等指标。上述指标测定均设置 5 个重复。

### 1.5 土壤性质测定

采用湿筛法获得 ≥53 μm 和 <53 μm 的土壤组分,然后用 TOC 分析仪 (Multi N/C2100, Analytik Jena, Germany) 分别测定土壤颗粒态有机碳 (POC, ≥53 μm 组分) 和矿物结合态有机碳质量分数 (MOC, <53 μm 组分),土壤总有机碳 (SOC) 为二者之和<sup>[18]</sup>。可溶性有机碳 (DOC) 使用 50 mL 去离子水浸提 10 g 土壤样品,浸提液中的可溶性碳用 TOC 分析仪测定<sup>[19]</sup>。微生物生物量碳氮磷采用氯仿熏蒸法测定<sup>[20]</sup>。上述指标测定均设置 5 个重复。

### 1.6 数据处理

使用 Microsoft Excel 2021 和 Origin 2022 进行数据整理和作图。采用 SPSS 22.0 软件双因素方差分析

(two-way ANOVA) 检验林分类型和土层及其交互效应,及对土壤氮磷组分和其他指标的影响。在此基础上,进一步采用 *T* 检验分析这些土壤性质和根系性状在 2 种林分类型之间的差异,采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan 多重比较检验这些指标在不同土层深度之间的差异 ( $P < 0.05$ )。采用 R 4.3.1 中“Vegan”包进行冗余分析、相关性分析及随机森林模型,探究杉木纯林和杉闽混交林土壤微生物量、有机碳和植物根系性状与土壤氮磷组分之间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同深度土壤氮磷组分变化特征

双因素方差分析结果如图 1 所示,林分类型和土层深度对土壤氮组分质量分数均具有显著影响 ( $P < 0.05$ );林分类型和土层深度的交互作用对土壤硝态氮、酸水解总氮、酸解铵态氮、非酸解性氮和总氮质量分数具有显著影响 ( $P < 0.05$ )。

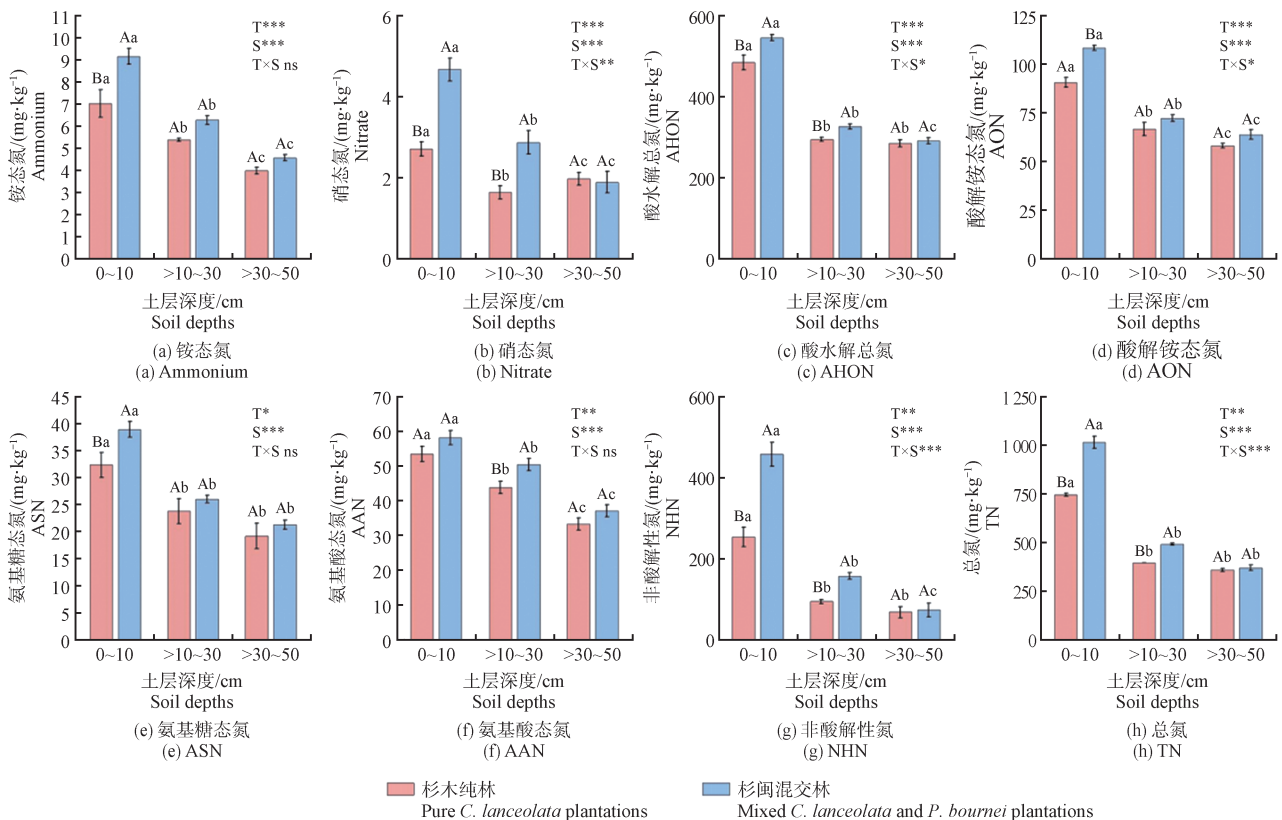


图 1 杉木纯林与杉闽混交林不同深度土壤氮组分质量分数

Fig. 1 Changes of nitrogen fractions of different soil depth in pure *C. lanceolata* plantations and mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations

T 表示林分类型;S 表示土层深度;T×S 表示林分类型和土层深度交互效应。不同大写字母表示指标在同一土层深度不同林分类型间差异显著 ( $P < 0.05$ );不同小写字母表示指标在同一林分类型不同土层深度间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

T is represents the stand type, S is represents the soil depth, and T×S is indicates the interaction effect between stand type and soil depth. Different uppercase letters indicate significant differences in the indicator among different stand types at the same soil depth ( $P < 0.05$ ), while different lowercase letters indicate significant differences in the indicator among different soil depths within the same stand type ( $P < 0.05$ ). The same as blow.

在0~10 cm 土层,杉阔混交林土壤铵态氮、硝态氮、酸水解总氮、酸解铵态氮、氨基糖态氮、非酸解性氮和总氮质量分数均显著高于杉木纯林。相对于杉木纯林,杉阔混交林土壤无机氮、有机氮和总氮质量分数分别显著增加42.1%、35.8%、35.9%,无机氮组分中硝态氮和铵态氮质量分数分别显著增加71.9%和30.4%,有机氮组分中酸解和非酸解性氮质量分数分别显著增加12.5%和80.3%,酸解性有机氮组分中酸解铵态氮、酸解氨基糖态氮分别增加19.7%、20.2%。在>10~30 cm 土层,杉阔混交林土壤硝态氮、酸解和非酸解性有

机氮及总氮质量分数均显著高于杉木纯林。在>30~50 cm 土层,土壤总氮及其组分质量分数在2种林分之间没有显著差异。2种林分土壤氮组分均随土壤深度增加呈减小趋势。

双因素方差分析结果如图2所示,林分类型和土层对土壤磷组分质量分数均具有显著影响( $P<0.05$ ),林分类型和土层深度的交互作用对土壤氢氧化钠态有机磷、氢氧化钠态无机磷、稀盐酸态有机磷、浓盐酸态无机磷、闭蓄态磷和总磷质量分数具有显著影响( $P<0.05$ )。

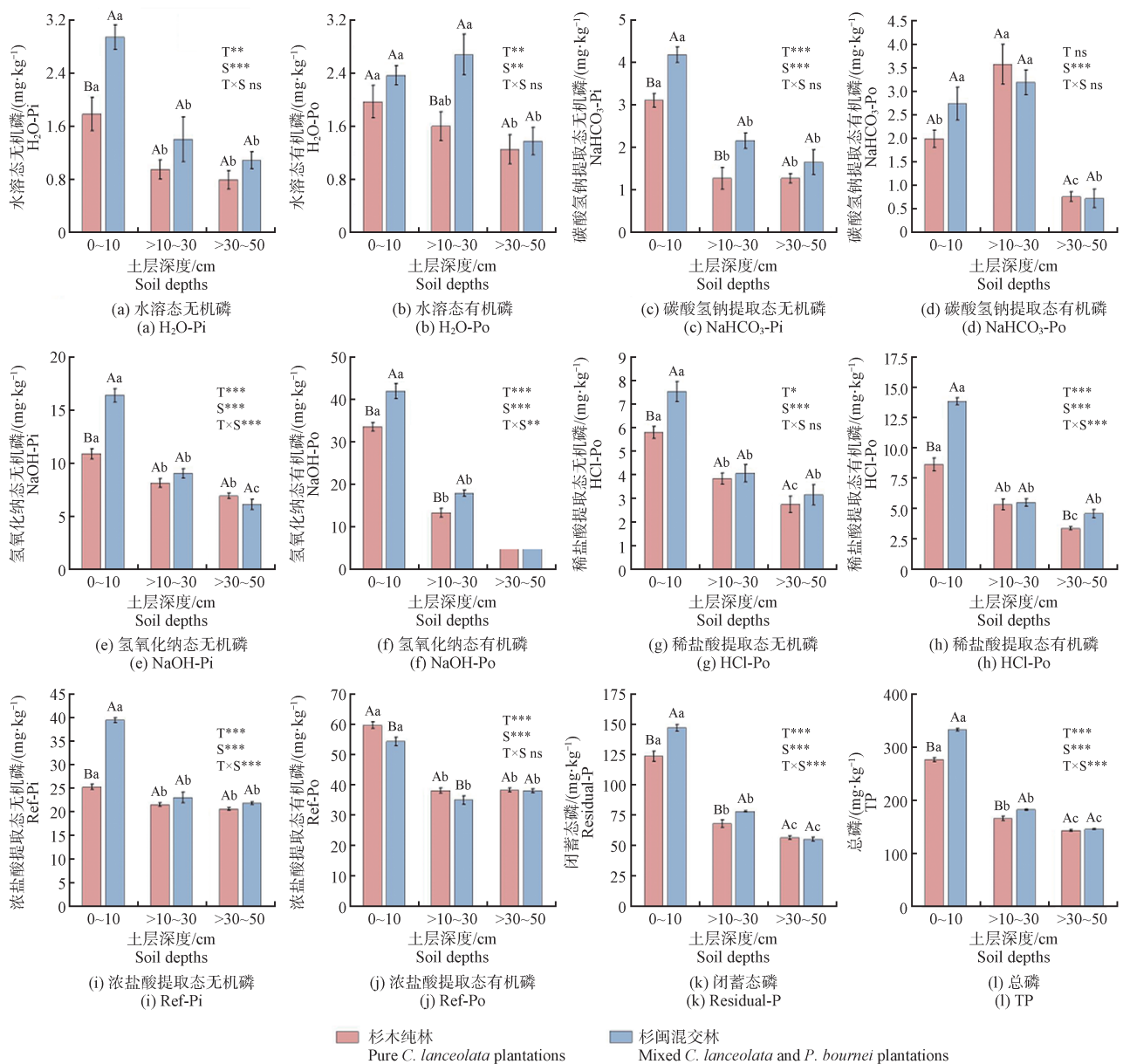


图2 杉木纯林与杉阔混交林不同深度土壤磷组分质量分数

Fig. 2 Changes of phosphorus fractions of different soil depth in pure *C. lanceolata* plantations and mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations

在0~10 cm土层,杉木混交林土壤多数磷组分质量分数均显著高于杉木纯林。活性、中等活性、稳定性和总磷质量分数分别比杉木纯林增加38.2%、31.6%、15.4%和25.1%。活性和中等活性磷组分中无机磷(45.5%和43.2%)增幅均高于有机磷(33.9%和32.1%)。活性磷组分中水溶态磷和碳酸氢钠态磷均显著增加,其中水溶态无机磷(65.7%)增幅较大;中等活性磷组分中稀盐酸态有机磷(60.2%)和氢氧化钠态有机磷(30.9%)增幅最大;稳定性磷组分中浓盐酸态无机磷含量增幅较大(56.1%)。

总体上,相对于杉木纯林,杉木混交林土壤活性、中等活性和稳定态磷组分中均为无机磷增幅较大。在>10~30 cm土层,杉木混交林土壤水溶态无机磷和有机磷、碳酸氢钠态无机磷和有机磷以及闭蓄态磷质量分数显著高于杉木纯林,活性磷组分中水溶态无机磷(67.5%)增幅最大,中等活性磷组分中有机磷(70.8%)增幅较大。在>30~50 cm土层,杉木混交林土壤稀盐酸态有机磷质量分数显著高于杉木纯林,2种林分间其余磷组分质量分数均无显著性差异。随土层深度增加,2种林分磷组分质量分数均呈递减趋势。

## 2.2 不同土层细根性状特征

双因素方差分析结果见表2,林分类型对根系生物量、根长密度和平均直径具有显著影响( $P<0.05$ );不同土层深度对根系生物量、根长密度和比根长具有显著影响( $P<0.05$ );林分类型和土层深度的交互作用对根系生物量和根长密度均具有显著影响( $P<0.05$ )。在0~10 cm土层中,杉木混交林根系生物量、根长密度和比根长均显著高于杉木纯林,其中根系生物量和根长密度分别比杉木纯林增加124.66%和269.23%。此外,杉木混交林中闽楠根系生物量、根长密度和比根长显著高于杉木,但杉木混交林中杉木这些指标显著低于杉木纯林。在>10~30 cm土层中,杉木混交林根系生物量显著高于杉木纯林,而根平均直径均显著小于杉木纯林,根长密度与杉木纯林没有显著差异;杉木混交林中杉木根系生物量、根长密度、根系直径和比根长均低于杉木纯林。在>30~50 cm土层中,杉木混交林根系生物量显著大于杉木纯林,根平均直径和比根长均显著低于杉木纯林;杉木混交林中杉木根系性状数值与杉木纯林接近。

随土层深度增加,杉木混交林中闽楠根系生物量、根长密度和比根长显著降低,根平均直径呈减小趋势,但无显著差异。杉木混交林中杉木根系生物量、根长密度和比根长随土层深度增加呈增加趋势,根平均直径无显著变化。杉木纯林根系生物量、根长密度随土

层深度增加先增加后减小,在>10~30 cm土层根系生物量显著高于0~10 cm和>30~50 cm土层,比根长逐渐减小,根平均直径无显著变化。

## 2.3 不同土层土壤有机碳和微生物性质

双因素方差分析结果见表3,林分类型对土壤微生物量碳氮磷、总有机碳、颗粒有机碳均具有显著影响( $P<0.05$ );不同土层深度土壤微生物量碳氮磷、总有机碳、矿物结合态有机碳、颗粒有机碳和可溶性有机碳均具有显著影响( $P<0.05$ );林分类型和土层深度的交互作用对微生物量氮磷、总有机碳和矿物结合态有机碳均具有显著影响( $P<0.05$ )。在0~10 cm和>10~30 cm土层中,杉木混交林的土壤微生物量碳氮磷质量分数显著高于杉木纯林。在0~10 cm、>10~30 cm和>30~50 cm土层杉木混交林的微生物量碳分别比杉木纯林增加6.1%、23.6%和42.8%;微生物量氮分别增加22.8%、12.6%和13.2%;微生物量磷分别增加26.9%、101.5%和106.4%。2种林分土壤微生物量碳氮磷均随土层深度的增加而显著降低。杉木混交林0~10 cm土层土壤总有机碳、颗粒有机碳、可溶性有机碳和矿物结合态有机碳均显著高于杉木纯林。在>10~30 cm土层中,杉木混交林总有机碳显著高于杉木纯林。在>30~50 cm土层土壤有机碳及其组分质量分数在2种林分之间没有显著差异。

## 2.4 土壤氮磷活性组分与细根性状及微生物量和有机碳相关性分析

相关性分析表明,氮磷组分均与微生物量氮、颗粒有机碳、矿物结合态有机碳、总有机碳、可溶性有机碳、根系生物量、根长密度和比根长呈显著正相关见表4。除氨基酸态氮和中等活性无机磷外,其余氮磷组分均与根平均直径显著负相关。

RDA分析表明,前两轴解释了土壤氮组分总变异率的96.4%,如图3(a)所示;解释了土壤磷组分总变异率的97.9%,如图3(b)所示。微生物量碳氮磷和土壤有机碳组分(SOC)是影响土壤氮磷组分变异的关键因子,总体上土壤性质解释了氮组分80.7%的变异率,根系性状解释了氮组分19.3%的变异率,如图4(a)所示;土壤性质解释了磷组分77.4%的变异率,根系性状解释了磷组分22.6%的变异率,如图4(b)所示。

## 3 讨论

### 3.1 土壤氮组分变异特征

杉木纯林转变为杉木混交林后,表层(0~10 cm)土壤总氮及有机和无机氮组分质量分数显著增加,表明杉木纯林引入闽楠后提高了土壤氮有效性。最近的相

表 2 杉木纯林与杉阔混交林细根性状  
Tab. 2 Fine root traits in pure *C. lanceolata* plantations and mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations

| 细根性状<br>Fine root trait | 0-10 cm 土层<br>Soil layer at 0-10 cm depth |                                  |                 |                                  | 10-20 cm 土层<br>Soil layer at 10-20 cm depth |                                  |                 |                                  | 20-30 cm 土层<br>Soil layer at 20-30 cm depth |                                  |                 |                                  |
|-------------------------|---|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|---|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|---|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
|                         | RWD                                       | 根长密度/(m·m <sup>-3</sup> )<br>RLD | 根平均直径/mm<br>RAD | SRL<br>比根长/(cm·g <sup>-1</sup> ) | RWD   | 根长密度/(m·m <sup>-3</sup> )<br>RLD | 根平均直径/mm<br>RAD | SRL<br>比根长/(cm·g <sup>-1</sup> ) | RWD   | 根长密度/(m·m <sup>-3</sup> )<br>RLD | 根平均直径/mm<br>RAD | SRL<br>比根长/(cm·g <sup>-1</sup> ) |
| CP-P                    | 467.83 ± 74.87Ab                          | 158.07 ± 21.94Aa                 | 0.59 ± 0.01Aa   | 333.11 ± 76.69Aa                 | 212 ± 37.91Bc                               | 30.19 ± 9.58Bb                   | 0.57 ± 0.06Ab   | 148.9 ± 27.12Ba                  | 70.50 ± 6.84Cc                              | 11.8 ± 4.24Bb                    | 0.56 ± 0.08Ac   | 162.54 ± 18.66Ba                 |
| CP-C                    | 138.75 ± 11.06Cd                          | 18.9 ± 3.85Bb                    | 0.66 ± 0.04ABa  | 133.2 ± 24.04Ab                  | 250.96 ± 31.65Bb                            | 20.51 ± 3.31ABb                  | 0.61 ± 0.04Bb   | 86.19 ± 24.38Ab                  | 313.42 ± 27Ab                               | 29.62 ± 7.05Aa                   | 0.72 ± 0.06Aab  | 95.43 ± 12.11Ab                  |
| CP                      | 606.58 ± 70.16Aa                          | 176.97 ± 17.92Aa                 | 0.61 ± 0Aa      | 288.32 ± 51.99Aa                 | 462.96 ± 68.24Ba                            | 50.7 ± 9.04Ba                    | 0.6 ± 0.05Ab    | 130.72 ± 35.61Bab                | 383.92 ± 24.98Ba                            | 39.10 ± 13.26Ba                  | 0.66 ± 0.07bAc  | 102.25 ± 15.96Bb                 |
| C                       | 270 ± 31.5Ac                              | 47.93 ± 2.98Bc                   | 0.66 ± 0.09Ba   | 190.66 ± 52.16Ab                 | 363.08 ± 24.04Ab                            | 49.45 ± 5.34ABa                  | 0.75 ± 0.08ABa  | 136.41 ± 32.14ABab               | 276.25 ± 29.90Bb                            | 27.67 ± 8.36Aa                   | 0.77 ± 0.05Aa   | 101.97 ± 14.98Bb                 |

注: CP-P. 杉阔混交林中阔楠根系; CP-C. 杉阔混交林中杉木根系; CP. 杉木纯林根系。同列大写字母表示同一土层间不同林分细根系间差异显著 ( $P < 0.05$ )。同列小写字母表示同一林分不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: CP-P. *P. bournei* roots in mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations; CP-C. *C. lanceolata* roots in mixed *C. lanceolata* and *P. bournei* plantations; CP. the sum of the root systems of *C. lanceolata* and *P. bournei*, C. root systems in pure *C. lanceolata* plantations. Capital letters in the same column indicate significant differences among different stand types in the same soil layer ( $P < 0.05$ ). Lowercase letters in the same column indicate significant differences among different soil layers in the same stand type ( $P < 0.05$ ). The same as blow.

表 3 不同林分土壤微生物量和有机碳含量  
Tab. 3 Soil microbial biomass and organic carbon content under different forest stand types

| 林分类型<br>Forest stand type   | 0-10 cm 土层<br>Soil layer at 0-10 cm depth |                                |                                |                                |                               |                               | >10-30 cm 土层<br>Soil layer at >10-30 cm depth |                                |                                |                                |                               |                               | >30-50 cm 土层<br>Soil layer at >30-50 cm depth |                                |                                |                                |                               |                               |                               |
|---|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|   | MBC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )            | MBN/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | MBP/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | DOC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | MOC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | POC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | MBC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )                | MBN/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | MBP/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | DOC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | MOC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | POC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | MBC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> )                | MBN/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | MBP/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | DOC/<br>(mg·kg <sup>-1</sup> ) | MOC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | POC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | SOC/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |
| 杉木纯林<br>Pure <i>C. lanceolata</i> plantations                         | 151.14 ± 9.11Ba                           | 44.39 ± 2.56Ba                 | 12.62 ± 0.54Ba                 | 148.61 ± 1.59Ba                | 16.94 ± 0.57Ba                | 4.01 ± 0.38Ba                 | 20.94 ± 0.51Ba                                | 84.46 ± 6.05Bb                 | 35.42 ± 0.36Ab                 | 6.03 ± 0.47Bb                  | 132.61 ± 1.35Ab               | 13.44 ± 0.16Bb                | 13.44 ± 0.16Bb                                | 39.71 ± 2.88Bc                 | 4.06 ± 0.12Bc                  | 115.9 ± 2.52Ac                 | 10.43 ± 0.25Ac                | 1.45 ± 0.11Ab                 | 11.89 ± 0.23Ac                |
| 杉阔混交林<br>Mixed <i>C. lanceolata</i> and <i>P. bournei</i> plantations | 185.63 ± 5.72Aa                           | 59.46 ± 4.15Aa                 | 16.01 ± 1.17Aa                 | 154.55 ± 1.44Aa                | 21.14 ± 0.64Aa                | 6.03 ± 0.7Aa                  | 27.18 ± 0.19Aa                                | 104.38 ± 3.05Ab                | 39.87 ± 1.79Ab                 | 12.15 ± 0.58Ab                 | 134.35 ± 1.73Ab               | 2.05 ± 0.02Ab                 | 14.96 ± 0.77Ab                                | 56.71 ± 5.59Ac                 | 8.38 ± 0.46Ac                  | 119.46 ± 1.74Ac                | 9.1 ± 0.16Ac                  | 1.71 ± 0.12Ab                 | 10.81 ± 0.27Ac                |

注: MBC: 微生物量碳; MBN: 微生物量氮; MBP: 微生物量磷; DOC: 可溶性有机碳; MOC: 矿物结合态有机碳; SOC: 总有机碳。下同。

Note: MBC: microbial biomass carbon; MBN: microbial biomass nitrogen; MBP: microbial biomass phosphorus; DOC: dissolved organic carbon; MOC: mineral-associated organic carbon; POC: particulate organic carbon; SOC: soil organic carbon. The same as blow.

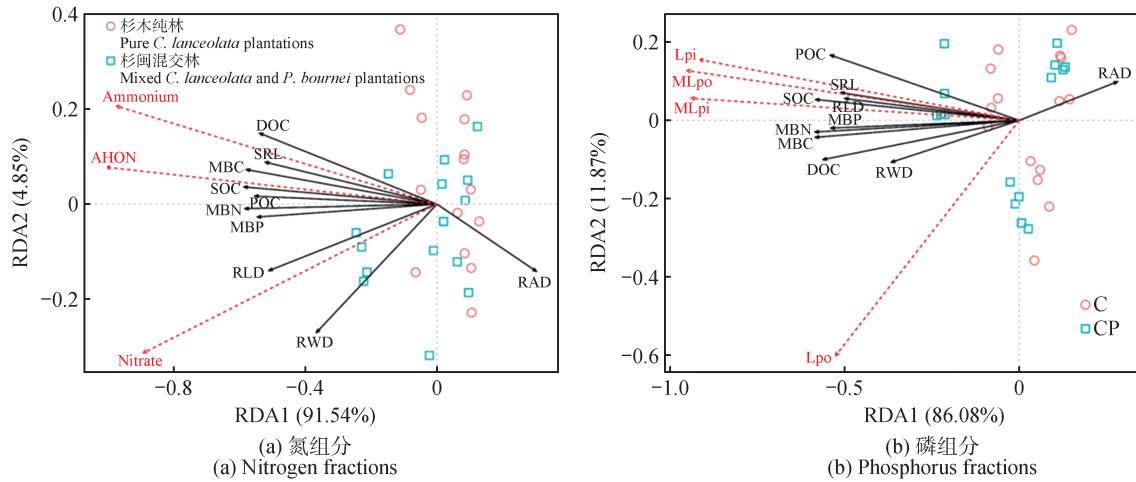


图 3 土壤氮磷活性组分与土壤性质和根系性状的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil nitrogen and phosphorus activity fractions with soil properties and root traits

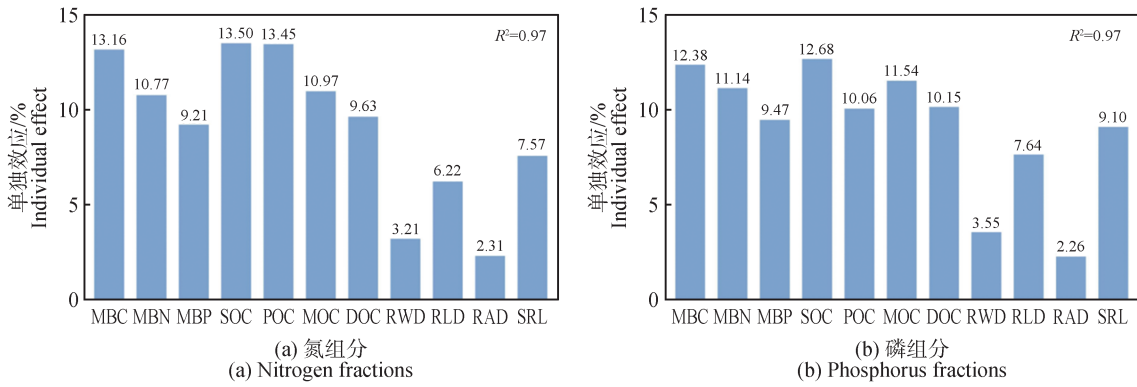


图 4 土壤氮磷活性组分与土壤性质和根系性状的方差分解

Fig. 4 Variance partitioning of soil nitrogen and phosphorus activity fractions with soil properties and root traits

表 4 土壤氮磷活性组分与微生物量、土壤有机碳质量分数及细根性状的相关性

Tab. 4 Correlation of soil nitrogen and phosphorus activity fractions with microbial biomass, soil organic carbon content and fine root traits

| 项目<br>Item | Ammonium | Nitrate | AHON   | Lpi    | Lpo    | MLpi   | MLpo   |
|------------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MBC        | 0.96**   | 0.78**  | 0.90** | 0.84** | 0.61** | 0.92** | 0.95** |
| MBN        | 0.96**   | 0.78**  | 0.90** | 0.84** | 0.61** | 0.92** | 0.95** |
| MBP        | 0.90**   | 0.82**  | 0.89** | 0.87** | 0.44*  | 0.82** | 0.92** |
| POC        | 0.65**   | 0.73**  | 0.75** | 0.78** | 0.03   | 0.60** | 0.73** |
| MOC        | 0.91**   | 0.76**  | 0.88** | 0.80** | 0.60** | 0.94** | 0.91** |
| SOC        | 0.96**   | 0.78**  | 0.90** | 0.84** | 0.61** | 0.92** | 0.95** |
| DOC        | 0.96**   | 0.78**  | 0.90** | 0.84** | 0.61** | 0.92** | 0.95** |
| RWD        | 0.59**   | 0.60**  | 0.55** | 0.60** | 0.25   | 0.41*  | 0.59** |
| RLD        | 0.69**   | 0.56**  | 0.50** | 0.48** | 0.73** | 0.54*  | 0.60** |
| RAD        | -0.37*   | -0.40*  | -0.34  | -0.40* | -0.08  | -0.15  | -0.37* |
| SRL        | 0.69**   | 0.52**  | 0.51** | 0.48** | 0.73** | 0.54** | 0.60** |

注: \*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ 。

Note: \* denotes  $P < 0.05$ , \*\* denotes  $P < 0.01$ .

关研究分析发现,相对于杉木纯林,杉木混交林显著增加了土壤硝态氮质量分数,但轻微降低了铵态氮质量分数<sup>[21]</sup>。然而也有研究表明,杉木混交林土壤硝态氮和铵态氮质量分数高于杉木纯林<sup>[22]</sup>。这些不同的研究结果可能与杉木混交林树种组成、立地条件等差异有关。本研究中杉木混交林土壤有机氮组分中酸解氮质量分数的增加,表明其提高了土壤供氮潜力。酸解氮被认为是影响土壤氮素矿化潜势,提供活性氮的重要来源<sup>[23]</sup>。酸解氨态氮是林木可以直接吸收利用的有效氮,大部分来自土壤中的固定态铵<sup>[24]</sup>。本研究杉木混交林土壤无机氮和酸解氮质量分数显著高于杉木纯林,可能与杉木混交林中凋落物质量分数较高有关。杉木混交林表层土壤非酸解性氮质量分数也大幅增加。非酸解性氮通常不易被简单酸解,需要复杂的微生物群落来分解。这可能是由于杉木混交林中不同树种的根系分泌物和凋落物分解可能产生更多的有机氮化合物<sup>[25]</sup>,部分有机化合物不易被分解,从而增加了

非酸解性氮的质量分数。

此外,冗余分析证实,微生物生物量碳氮磷和有机碳组分是影响活性氮组分变化的关键因子,这些因子均与活性氮组分显著正相关。微生物底物的供给(如有机碳源)影响微生物群落的结构和功能,丰富的底物多样性可以促进微生物的生长和代谢活动<sup>[26]</sup>。树种混交有利于土壤固氮微生物生长,从而增加了土壤生物固氮功能,促进了土壤氮的固持<sup>[3]</sup>。此外,杉木纯林转变为杉阔混交林后表层土壤根系生物量和根长密度显著增加,增加了养分利用和固持,同时根系周转也导致养分归还增大<sup>[27]</sup>。因此,在杉木纯林中引入阔叶木有助于提高土壤的氮素保持能力和促进土壤长期的氮素循环。

### 3.2 土壤磷组分变异特征

杉木纯林转变为杉阔混交林后,土壤活性、中等活性、稳定性磷组分和总磷质量分数在0~10 cm土层显著增加,表明杉木纯林引入阔叶木后提高了土壤磷有效性和供应能力。活性磷组分是植物直接吸收利用的主要磷源<sup>[28]</sup>,杉阔混交林土壤活性无机磷增幅高于有机磷,可能与杉阔混交林根系生物量增加有关,其通过促进根系分泌有机酸的输入活化土壤磷素。中等活性磷组分是土壤潜在活性磷库的重要来源,在酸性土壤中主要由磷酸铁及铝盐组成<sup>[29]</sup>。前期的研究发现,随着杉阔混交林林龄增加,土壤微生物对羧酸和酚酸等有机酸的利用强度较大,这些有机酸组分与土壤有效磷、铝结合态磷和铁结合态磷质量分数显著正相关<sup>[30]</sup>。此外,土壤磷溶解和矿化相关的功能基因随杉阔混交林林龄增加而增大<sup>[3]</sup>。因此,杉阔混交林可能促进了土壤溶磷微生物生长,进而提高了土壤活性和中等活性磷组分有效性。

本研究中微生物生物量碳氮磷和有机碳组分是影响土壤活性和中等活性磷组分变化的关键因子,二者显著正相关。杉木纯林转变为杉阔混交林后,凋落物输入增大可以直接增加土壤有效磷供应,同时,增加的土壤有机碳通过吸附作用可以减少磷酸盐流失。此外,凋落物输入增加提高了土壤微生物活性和生长,能够通过快速周转释放土壤无机磷<sup>[31]</sup>。稳定态磷虽不能在较短的时间被林木利用,但可以随环境变化转化为林木可利用的形态<sup>[32]</sup>。稳定态磷的增加可能与有机质输入增加从而促进磷的固定有关,树种混交虽增加了土壤中总磷质量分数,但南方红壤有效磷容易被活性的铁、铝及土壤黏粒吸附固定、沉淀而转化为难溶性磷,难以被植物直接吸收利用<sup>[33]</sup>。此外,凋落物增加可能促进了木质素、纤维素和单宁等难分解有机物积累,这些物质与磷结合形成有机矿物复合体,导致稳

定态磷增加<sup>[34]</sup>。在>10~30 cm土层中,土壤总磷质量分数显著增加,可能与磷在不同土壤深度之间的重新分配有关,深层土壤磷被植物吸收后运至地上部分,以凋落物形式归还至土壤表层,从而增加土壤表层磷质量分数<sup>[35]</sup>。树种混交的促进作用和资源分配可能增加根际中的磷吸收,进而通过减少磷流失增加磷的保持<sup>[36]</sup>。因此,杉木纯林转变为杉阔混交林有助于提高土壤磷有效性,并促进磷素循环。

### 3.3 土壤剖面氮磷组分变异的影响因素

本研究发现,杉木林分结构改变对0~10 cm土层土壤氮磷组分变化的影响较大。随土壤深度的增加,林分结构对氮磷组分的影响逐渐减小,在>10~30 cm土层杉木纯林和杉阔混交林之间土壤氮磷组分质量分数没有差异。根系在土壤剖面的分布状况关系到作物对养分的吸收利用、干物质积累和产量形成<sup>[37]</sup>。本研究中,杉木纯林转变为杉阔混交林后表层土壤根系生物量和根长密度显著增加,二者均随土壤深度增加而减小。这可能与杉阔混交林树种和林龄差异导致的根系分布和资源利用有关。

根系的分布特征反映了林木对生长环境的适应和对资源的获取能力,与植物的养分吸收效率密切相关<sup>[38]</sup>。土壤磷有效性增加,兴安落叶松(*Larix gmelinii*)根长增大,以促进林木对磷素的吸收<sup>[37]</sup>。马尾松(*Pinus massoniana*)细根的体积和侧根数在土壤磷质量分数增加时会产生变化以适应环境<sup>[39]</sup>。冗余分析显示,土壤氮磷组分与根系性状呈显著正相关,其中根长密度和比根长是影响氮磷组分质量分数变化的关键因子。需要指出的是,虽然根系空间分布及其性状在土壤剖面氮磷组分有效性和存储方面发挥了重要作用,但是土壤性质仍然是影响土壤剖面氮磷组分变异的主要因素(解释总变异率>77%)。因此,土壤氮磷组分与其他土壤性质间存在协同变异,这意味着可以通过这些常规土壤性质来估计分析流程繁琐的土壤氮磷组分。不过,这种紧密联系是否在不同的树种、生态系统中普遍存在还有待更多的研究来检验。

## 4 结论

通过对杉木纯林和杉阔混交林不同深度土壤氮磷组分、理化性质和根系性状变化特征及其相互关系的研究发现,相对于杉木纯林,杉阔混交林表层土壤多数氮磷组分含量显著增加,土壤活性、中等活性和稳定性磷组分均以无机磷增幅较大,无机氮组分中硝态氮增幅较大,有机氮组分中酸解氨基糖态氮增幅较大;纯林和杉阔混交林土壤氮磷质量分数随土壤深度增加均呈

下降趋势。杉木纯林转变为杉木混交林后改变了林木根系垂直分布及根系性状。综合来看,土壤剖面氮磷组分变异受土壤性质、根系分布等因素的共同调控。

### 参 考 文 献

- [1] 魏书蒙,陈详腾,赵光宇,等. 杉木人工林近自然改造对土壤化学性质及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(10): 4277-4287.  
WEI S M, CHEN X T, ZHAO G Y, et al. Effects of close-to-nature transformation of Chinese fir plantation on soil chemical properties and enzyme activities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4277-4287.
- [2] 李语晨,程金花,李明峰,等. 湖北省九华山山林场不同树种配置杉阔混交林分空间结构特征分析[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 1908-1916.  
LI Y C, CHENG J H, LI M F, et al. Analysis of the stand spatial structure of *Cunninghamia lanceolata*-broadleaved mixed plantation on a Jiuhua Mountain Farm, Hubei Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 1908-1916.
- [3] 洪宣生,王宗星,徐清福,等. 杉木+闽楠复层林土壤氮磷组分及微生物性状随林龄变化特征[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 622-630.  
HONG X S, WANG Z X, XU Q F, et al. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus fractions and microbial traits with increasing stand age in two-layered *Cunninghamia lanceolata*+*Phoebe bournei* plantations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 622-630.
- [4] 郭佳欢,孙杰杰,冯会丽,等. 杉木人工林土壤肥力质量的演变趋势及维持措施的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(4): 801-809.  
GUO J H, SUN J J, FENG H L, et al. Research progress on evolution trends and maintenance measures of soil fertility quality in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(4): 801-809.
- [5] 严明明,高洪娣,刘美华,等. 混交改造杉木纯林对林下土壤肥力影响的研究进展[J]. 生态科学, 2024, 43(2): 253.  
YAN M M, GAO H D, LIU M H, et al. Research progress on the effect of mixed plantation on the soil fertility in the forests between *Cunninghamia lanceolata* and other tree species [J]. Ecological Science, 2024, 43(2): 253.
- [6] 何贵平,陈益泰,胡炳堂. 杉木与马褂木、樟树混交林及其纯林生物量和土壤肥力研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(5): 540-547.  
HE G P, CHEN Y T, HU B T, et al. Study on the biomass and soil fertility of pure and mixed stands of *Cunninghamia lanceolata*, *Liriodendron chinense* and *Sassafras tsumu* [J]. Forest Research, 2001, 14(5): 540-547.
- [7] 徐光荣,张世熔,钟钦梅,等. 基于Tiessen方法的土壤磷分级浸提过程的改进研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 134-140.  
XU G R, ZHANG S R, ZHONG Q M, et al. Comparison study on extraction methods of phosphorus fraction in four typical soils of Sichuan Basin, China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(1): 134-140.
- [8] 李昌航,高冠女,黄海梅,等. 复层异龄混交改造对杉木人工林土壤磷组分和转化的影响[J]. 广西科学, 2024, 31(3): 416-426.  
LI C H, GAO G N, HUANG H M, et al. Effects of multi-layer mixed-age modification on soil phosphorus components and transformation in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(3): 416-426.
- [9] 刘旭军,程小琴,田慧霞,等. 间伐和凋落物处理对华北落叶松人工林土壤磷形态的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7686-7696.  
LIU X J, CHENG X Q, TIAN H X, et al. Effects of thinning and litter manipulation on soil phosphorus dynamics in a *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7686-7696.
- [10] 邹佳何,王海燕,李成铭,等. 长白山北坡不同林分类型细根-土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2024, 43(1): 170-177.  
ZOU J H, WANG H Y, LI C M, et al. C, N, and P stoichiometric characteristics of fine root and soil in different stand types on the north slope of Changbai Mountain [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(1): 170-177.
- [11] WANG B, LAI T, HUANG Q, et al. Effect of N fertilizers on root growth and endogenous hormones in strawberry [J]. Pedosphere, 2009, 19(1): 86-95.
- [12] 秦洁,鲍雅静,李政海,等. 退化草地大针茅根系特征对氮素添加的响应[J]. 草业学报, 2014, 23(5): 40-48.  
QIN J, BAO Y J, LI Z H, et al. The response of root characteristics of *Stipa grandis* to nitrogen addition in degraded grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(5): 40-48.
- [13] 黄林,王峰,周立江,等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6110-6119.  
HUANG L, WANG F, ZHOU L J, et al. Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6110-6119.
- [14] WANG W, MO Q, HAN X, et al. Fine root dynamics responses to nitrogen addition depend on root order, soil layer, and experimental duration in a subtropical forest [J]. Biology and Fertility of Soils, 2019, 55: 723-736.
- [15] 陈书信,王国兵,阮宏华,等. 苏北沿海不同土地利用

- 方式冬季土壤氮矿化速率比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 41-46.
- CHEN S X, WANG G B, RUAN H H, et al. Effect of different land uses on soil nitrogen mineralization in a coastal area of Northern Jiangsu Province, China, in winter [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 38(1): 41-46.
- [16] BREMNER J M. Inorganic forms of nitrogen [C]//Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties, 9. 2. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, 1965: 1179-1237.
- [17] 鲍士旦. 土壤农业化学分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] CARTER M R, PARTON W J, ROWLAND I C, et al. Simulation of soil organic carbon and nitrogen changes in cereal and pasture systems of southern Australia [J]. Soil Research, 1993, 31(4): 481-491.
- [19] BROOKES P C, KRAGT J F, POWLSON D S, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: The effects of fumigation time and temperature [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17(6): 831-835.
- [20] 司马鑫琪, 李彦生, 于镇华, 等. 大气CO<sub>2</sub>浓度和温度升高对玉米农田黑土碳库及细菌群落的影响[J]. 土壤与作物, 2024, 13(4): 428-438.
- SIMA X Q, LI Y S, YU Z H, et al. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and warming on soil carbon pool and microbial community composition in a maize-grown mollisol [J]. Soils and Crops, 2024, 13(4): 428-438.
- [21] GUO J, FENG H, MCNIE P, et al. Species mixing improves soil properties and enzymatic activities in Chinese fir plantations: A meta-analysis [J]. Catena, 2023, 220(3): 106723.
- [22] XU H D, ZHU B, WEI X M, et al. Root functional traits mediate rhizosphere soil carbon stability in a subtropical forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 162(13): 108431.
- [23] 吴汉卿, 张玉龙, 张玉玲, 等. 土壤有机氮组分研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1240-1246.
- WU H Q, ZHANG Y L, ZHANG Y L, et al. Soil organic nitrogen fractions: A review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(5): 1240-1246.
- [24] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(1): 37-43.
- WANG S R, JIAO L X, JIN X C, et al. Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(1): 37-43.
- [25] NARDI S, RENIERO F, CONCHERI G. Soil organic matter mobilization by root exudates of three maize hybrids [J]. Chemosphere, 1997, 35(10): 2237-2244.
- [26] 王锐, 陈士勇, 陈志青, 等. 根系分泌物对根际土壤关键氮转化过程的影响[J]. 作物杂志, 2021, 37(6): 1-8.
- WANG R, CHEN S Y, CHEN Z Q, et al. Effects of root exudates on key processes of soil nitrogen cycling: A review [J]. Crops, 2021, 37(6): 1-8.
- [27] 韦莉莉, 卢昌熠, 丁晶, 等. 丛枝菌根真菌参与下植物-土壤系统的养分交流及调控[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4233-4243.
- WEI L L, LU C Y, DING J, et al. Functional relationships between arbuscular mycorrhizal symbionts and nutrient dynamics in plant-soil-microbe system [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): 4233-4243.
- [28] 张卓婷, 陶然, 罗如烟, 等. 次生演替过程中土壤磷组分及有效性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(1): 176-185.
- ZHANG Z T, TAO R, LUO R Y, et al. Changes in soil phosphorus fractions and its availability during secondary succession: A review [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30(1): 176-185.
- [29] 魏丹, 杨华薇, 陈延华, 等. 有机酸对土壤磷的活化利用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1391-1399.
- WEI D, YANG H W, CHEN Y H, et al. Research on the activation and regulation of soil phosphorus by organic acids [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(7): 1391-1399.
- [30] 查美琴, 徐海东, 成向荣, 等. 不同林龄杉木+闽楠复层林土壤磷形态及微生物功能多样性变化[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6938-6947.
- ZHA M Q, XU H D, CHENG X R, et al. Variations of soil phosphorus form and microbial functional diversity in *Cunninghamia lanceolata*+*Phoebe bournei* multi-layered mixed plantations of different ages [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6938-6947.
- [31] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同不同年龄杉木人工林土壤磷素特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6519-6527.
- CAO J, YAN W D, XIANG W H, et al. Characteristics of soil phosphorus in different aged stands of Chinese fir plantations in Huitong, Hunan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6519-6527.
- [32] 崔瑶, 辜夕容, 严宁珍, 等. 缙云山4种林分土壤无机磷

- 与活性铝的含量及分布[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1727-1738.
- CUI Y, GU X R, YAN N Z, et al. Content and distribution of inorganic phosphorus and labile aluminum in soil of four forest types in Jinyun Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1727-1738.
- [33] 陈冉红, 周梦岩, 李娇阳, 等. 蔗糖添加对杉木低磷胁迫响应和蔗糖代谢的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6588-6599.
- CHEN R H, ZHOU M Y, LI J Y, et al. Effects of sucrose addition on response of Chinese fir to low phosphorus stress and sucrose metabolism [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6588-6599.
- [34] 周佳宇, 林雨辰, 付佳睿, 等. 亚热带典型人工林土壤磷组分特征及其影响因素研究[J]. 生态学报, 2025(15): 1-13.
- ZHOU J Y, LIN Y C, FU J R, et al. Characteristics of soil phosphorus fractions and their influencing factors in typical subtropical plantations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025(15): 1-13.
- [35] 杨建华, 王芳, 张军辉, 等. 长期施氮与减水处理对红松和蒙古栎根际磷浓度的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2699-2704.
- YANG J H, WANG F, ZHANG J H, et al. Influence of long-term nitrogen fertilization and precipitation reduction on rhizospheric phosphorus concentration of *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(10): 2699-2704.
- [36] 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.
- [37] LYNCH J P. Steep, cheap and deep: An ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems [J]. Annals of Botany, 2013, 112(2): 347-357.
- [38] 高艳如, 王军辉, 麻文俊, 等. 不同种源和家系红皮云杉细根形态与生物量垂直分布特征[J]. 植物研究, 2024, 44(3): 380-388.
- GAO Y R, WANG J H, MA W J, et al. Characteristics of fine root morphology and biomass vertical distribution from different provenances and families of *Picea koraiensis* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2024, 44(3): 380-388.
- [39] 王瑜, 车凤仙, 方芳, 等. 氮、磷叶面施肥对云南松苗木萌蘖的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 41-48.
- WANG Y, CHE F X, FANG F, et al. Response of sprouting ability of *Pinus yunnanensis* seedlings to different rates of nitrogen and phosphorus foliar fertilizer [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 41(6): 41-48.