



间伐强度对华南2种近自然改造人工林土壤养分释放的影响

严朝东, 张东旭, 苏纯兰, 秦晓霖, 潘丽禅, 刘卫, 练琚愉, 曹洪麟

引用本文:

严朝东, 张东旭, 苏纯兰, 等. 间伐强度对华南2种近自然改造人工林土壤养分释放的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(3): 245–254.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

Characteristics of Soil Nutrient and Enzyme Activities in Plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and Five *Acacia* Species
热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 483–493 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4334>

不同林龄尾巨桉人工林凋落物和土壤C、N、P化学计量特征

Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Litter and Soil of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation at Different Forest Ages
热带亚热带植物学报. 2017, 25(2): 127–135 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3665>

氮磷添加对华南地区2种人工林土壤氮磷循环酶活性的影响

Effects of Long-term Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Enzyme Activities Related N and P Cycle in Two Plantations in South China
热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 244–250 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4293>

广州红锥-马占相思林物种组成与多样性研究

Studies on Species Composition and Diversity of *Castanopsis hystrix*-*Acacia mangium* Mixed Forest in Guangzhou
热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 494–502 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4361>

雷州半岛桉树人工林凋落物量和养分循环研究

Litterfall and Nutrient Cycling of *Eucalyptus* Plantation with Different Ages on Leizhou Peninsula
热带亚热带植物学报. 2019, 27(4): 359–366 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3986>

向下翻页，浏览PDF全文

间伐强度对华南 2 种近自然改造人工林土壤养分释放的影响

严朝东¹, 张东旭², 苏纯兰¹, 秦晓霖², 潘丽禅¹, 刘卫², 练琚愉^{2*}, 曹洪麟²

(1. 东莞市林业科学研究所, 广东珠江口城市群森林生态系统国家定位观测研究站, 广东 东莞 523106; 2. 中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘要: 为评估间伐强度对土壤养分释放特征的影响, 以广东省东莞市大岭山林场为研究区, 选取经 13~17 a 近自然改造(间伐+补植乡土树种)的马占相思(*Acacia mangium*)和尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)人工林, 对 3 种间伐强度下(未间伐、间伐 30% 和间伐 60%~70%)土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及与 N、P 养分获取的相关胞外酶活性进行测定。结果表明, 与未间伐相比, 马占相思间伐样地速效 N、P 的含量平均提升了 28% 和 71%, 尾叶桉间伐样地平均提升了 21% 和 33%。2 种间伐样地土壤 C、N 和 P 获取酶的活性均出现不同程度的降低。通过对比 2 种间伐强度下生态酶化学计量比值和矢量特征, 表明间伐能够有效缓解养分转化所需的 C 限制, 但过度间伐也可能进一步导致土壤 N 限制。这表明中等间伐(30%)能够兼顾 2 种人工林土壤 N、P 养分的释放和植被多样性的提高, 应为 2 种林分近自然改造中间伐强度的最优选择。

关键词: 土壤养分; 间伐强度; 近自然改造; 生态酶化学计量; 人工林

doi: 10.11926/jtsb.5012 CSTR:32235.14.jtsb.5012

Influence of Thinning Intensity on Soil Nutrient Release in Two Near-nature Plantations in South China

YAN Chaodong¹, ZHANG Dongxu², SU Chunlan¹, QIN Xiaolin², PAN Lichan¹, LIU Wei², LIAN Juyu^{2*}, CAO Honglin²

(1. Dongguan Institute of Forestry Science, Forest Ecosystem Research Station in City Cluster of the Pearl River Estuary, Dongguan 523106, Guangdong, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: To assess the impact of thinning intensity on soil nutrient release characteristics, the Daling Mountain Forest Farm in Dongguan City, Guangdong Province was selected as the study area. Soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) contents, as well as the extracellular enzyme activities related to N and P nutrient acquisition, were measured in 13- to 17-year-old *Acacia mangium* and *Eucalyptus urophylla* plantations that had undergone near-natural transformation (thinning + planting native tree species) under three thinning intensities (no thinning, 30% thinning, and 60%–70% thinning). The results showed that compared with the unthinned plots, the available N and P contents in the thinned plots of *A. mangium* increased by an average of 28% and 71%, respectively, and those in the thinned plots of *E. urophylla* increased by an average of 21% and 33%, respectively. The activities of soil C, N, and P acquisition enzymes in both thinned plots decreased to varying degrees. By comparing the stoichiometric ratios and vector characteristics of ecological enzymes under the two thinning intensities, it was

收稿日期: 2025-02-25 接受日期: 2025-05-20

基金项目: 东莞市社会发展科技项目(20231800938582); 东莞市财政预算项目(441900210000000273742)资助

This work was supported by the Project for Social Development Science and Technology in Dongguan (Grant No. 20231800938582), and the Project of Dongguan Fiscal Budget (Grant No. 441900210000000273742).

作者简介: 严朝东(1972 年生), 男, 高级工程师, 主要从事林业研究。E-mail: 747950629@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lianjy@scbg.ac.cn

indicated that thinning could effectively alleviate the C limitation required for nutrient transformation, but excessive thinning might further lead to soil N limitation. It was suggested that moderate thinning (30%) could balance the release of N and P nutrients in the soil and the improvement of vegetation diversity in both plantations, and should be the optimal choice for thinning intensity in the near-natural transformation of these two forest types.

Key words: Soil nutrient; Thinning intensity; Near-nature transformation; Ecoenzymatic stoichiometry; Plantation

桉树(*Eucalyptus* spp.)和相思(*Acacia* spp.)凭借其速生、高产和耐逆性强等特点,是我国南方速生丰产林建设的战略树种^[1-2]。然而,长期的单一化种植和集约的经营模式虽造就了显著的经济和社会效益,也诱发了一系列生态风险,包括生物多样性丧失、林下更新受阻和土壤肥力衰竭等问题^[3-5]。近年来,近自然修复理念在林业管理领域日益受到重视,即强调生态系统的自我修复功能和自然演替规律,通过科学补植乡土树种,循序渐进地将退化林分恢复到预期的群落结构状态,使其具有更高的稳定性和更强的功能服务能力^[6-7]。但实践表明,乡土树种补植往往需与间伐措施协同实施,以此调控冠层透光率与资源竞争格局,从而改善幼苗定殖成功率^[8-10]。然而,间伐强度需权衡树种生长特性、立地环境和生态恢复目标等多种因素,最优间伐强度的选择尚未形成普适性范式^[11]。此外,目前有关间伐强度的研究多聚焦于林分的地上结构变化,而土壤养分作为驱动林分演替的关键因素,其对间伐强度的响应规律以及内在的调控机制仍缺乏解析,可能制约着人工林近自然改造和适应性管理模式的优化^[12-16]。

植被通过光合作用所固定的碳(C),需要与其他营养元素结合进而构成植物生物量^[17]。由于氮(N)和磷(P)在植物生物量中的比重相对较大^[18-19],并且土壤通常是这些养分的主要甚至唯一来源,因此在人工林生态系统中,土壤对可获得 N、P 养分的供应可能是决定林分演替方向的重要因子^[20]。此外,间伐主要通过 2 个过程影响土壤养分循环。一方面,间伐通过产生凋落物向土壤返回了大量的 N、P 养分,另一方面,林窗形成导致林下的水热条件改变,这将通过影响土壤微生物活性进而影响有机态 N、P 向无机态转化的矿化过程^[16]。因此,在补植乡土树种的基础上结合科学间伐,可能是重塑土壤养分结构和优化养分供应的重要调控手段。然而,以往的研究表明,不同人工林类型(如马占相思和尾叶桉)因其建群树种生物学特性的差异,往往表现出不同的林分结构特征,如地上生物量积累、郁闭度格局

及林下光环境等^[1-2,21-22],这可能导致土壤 N、P 养分特征对间伐强度的响应存在显著林型特异性。因此,系统揭示土壤 N、P 养分随间伐强度的响应规律,并阐明其在不同人工林类型间的差异,将为人工林近自然化改造模式的优化提供关键科学依据,对推动林业可持续经营具有重要实践价值。

土壤中 N、P 养分的转化通常依赖于一系列酶的作用,尤其是胞外酶^[23]。这些酶大多由微生物产生,能够催化和解聚大分子物质,并将其转化为植物可吸收的小分子可溶性养分^[23]。然而,微生物分泌酶的类型和数量与其生长策略密切相关,例如当环境中的能量(C)供应成为限制因素时,C 获取酶(如 β -1,4-葡萄糖苷酶, BG)的分泌就会增加,而当 N 或 P 养分的可用性受到限制时,微生物则会分泌更多获取 N 养分(如 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶, NAG; 亮氨酸氨肽酶, LAP)和 P 养分(如酸性磷酸酶, AP)的胞外酶^[24]。此外,有研究表明,以上 4 种催化环境中 C、N、P 水解过程的酶(也称生态酶),其活性在几乎所有生境中都表现出相似的计量关系^[25]。鉴于生物群落的元素组成也可以用 C、N、P 等原子比例来描述,这些酶活性的计量关系被认为能够反映微生物对环境能量或 N、P 养分的获取是否平衡^[26-27]。因此,通过分析 C、N、P 获取相关的酶在不同林分改造模式下的活性差异和计量特征,能够对不同林分改造模式下土壤可获得 N、P 养分的释放和供应能力,以及可能受到的养分限制进行评估。

因此,本研究以广东省东莞市大岭山林场为研究区,选取经 13~17 a 近自然改造的马占相思(*Acacia mangium*)和尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*) 2 种华南地区典型人工林,分别对 3 种间伐强度(未间伐、间伐 30%和间伐 60%~70%)林分土壤的 N、P 养分特征,以及 C、N、P 获取相关胞外酶的活性进行测定,探究了不同间伐强度下林分土壤养分的转化与释放特征,以及在不同间伐强度间的差异,以期为桉树和马占相思人工林的林相提升提供实践依据,并为其进一步的科学经营和可持续发展提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

东莞市大岭山林场(22°39′~23°09′ N, 113°31′~114°15′ E)位于广东省东莞市西南部,属亚热带季风气候区,全年温暖多雨,年降雨量在 1 800 mm 左右,主要集中在 4 月—9 月;年平均气温 22.3 ℃,最冷月(1 月)平均气温 13.4 ℃,最热月(7 月)平均气温 28.2 ℃^[21-22,28-29]。土壤为花岗岩、页岩等发育而来的赤红壤。土层多为厚土层,部分地段为薄中层土,有机质含量较低,且石砾含量较多。地表植被以人工林为主,主要由尾叶桉、马尾松(*Pinus masso-*

niana)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和马占相思等树种组成。

本研究选取的马占相思人工林和尾叶桉人工林于 1996 年间完成造林,种植密度均为 2 500 ind./hm²。自 2004 年起,选取立地条件相同的马占相思纯林和尾叶桉纯林进行近自然化改造试验,对 2 种人工林分别进行 3 种不同强度的间伐处理,然后在林下随机补植乡土树种^[26-27]。改造模式为:无间伐+补植(T1),等距间伐 30%+补植(T2),等距间伐 60%~70%+补植(T3)。改造当年对新种的苗木进行了追肥和抚育管理,并对缺株的苗木进行了补植。3 种改造模式的基本特征见表 1。

表 1 马占相思和尾叶桉人工林改造模式

Table 1 Restoration models of *Acacia mangium* and *Eucalyptus urophylla* plantation

改造模式 Restoration model	改造年份 Restoration year	林分类型 Plantation type	间伐强度 /% Thinning intensity	补植密度 (ind./hm ²) Replanting density
T1	2004	马占相思 <i>Acacia mangium</i>	0	900
T2	2004	马占相思 <i>A. mangium</i>	30	1 215
T3	2004	马占相思 <i>A. mangium</i>	60	1 530
T1	2008	尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i>	0	600
T2	2008	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	30	1 005
T3	2008	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	70	1 410

T1: 未间伐; T2: 间伐 30%; T3: 间伐 60%~70%。下同

T1: No thinning; T2: 30% thinning; T3: 60%~70% thinning. The same below

1.2 土壤样品采集

2021 年 11 月,分别在马占相思和尾叶桉人工林 3 种改造模式的样地内各随机布设 6 个 10 m×10 m 的样方(共计 36 个样方)。在每个样方内随机布设 5 个采样点,然后采用土钻(直径 3 cm)对 0~15 cm 的表层土壤进行了采集。每个样方内的土壤样品被混合均匀后组成了一个混合土样。样品采集完毕后,在冰袋的保存下被迅速运输到实验室做后续处理。

所采集的土壤样品在除去石块、根系等杂物后,采用四分法将其分成了 2 份子样品,1 份在室温下自然风干后,研磨、过 2 mm 土壤筛,用于土壤理化性质的测定,另一份则置于 4 ℃冰箱中保存,用于土壤胞外酶活性的测定。

1.3 指标测定

土壤 pH 采用带有玻璃电极的 pH 计(PHS-3C, 上海仪电, 中国),通过测定水土比为 1:2 (干土质量:去离子水体积)的土壤悬浊液的 pH 得出;土壤总有机碳(TOC)、总氮(TN)采用 C/N 元素分析仪

(Vario MAX cube, Elemental, 德国)测定;土壤总磷(TP)采用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法测定;土壤速效磷采用 NaHCO₃ 提取-钼锑抗比色法进行测定;土壤速效氮在使用 1 mol/L 的 KCl 对硝态氮(NO₃-N)提取后使用流动分析仪(AutoAnalyzer AA3, Bran Luebbe, 德国)进行测定。 β -1,4-葡萄糖苷酶(BG)、 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)、亮氨酸氨肽酶(LAP)和酸性磷酸酶(AP)等胞外酶活性采用 Bell 等^[30]描述的微孔板荧光法测定,酶活性单位以每小时每克干物质产生底物的摩尔数[nmol/(h·g)]来表示。

1.4 数据处理与分析

本研究采用双因素方差分析探讨了不同人工林类型(马占相思和尾叶桉)和间伐强度(未间伐、间伐 30%、间伐 60%~70%)对各项土壤与酶学指标的影响,对于存在显著差异的指标,进一步采用 Tukey HSD 多重比较进行了组间差异的分析。方差分析的所有结果均对其残差的正态性(Shapiro-Wilk 检验)和齐次性进行检验(Levene 检验),对于不满足方差

分析假设前提的指标,则采用 Kruskal-Wallis 非参数检验和 Wilcoxon 秩和检验,并采用 Holm 方法对 P 值进行矫正。所有数据分析和可视化处理均在 R 4.4.2 上完成。

为了探究不同林分类型和改造模式下所受到的养分限制情况,本研究采用 Sinsabaugh 等^[31]的方法计算生态酶的化学计量比值,然后通过散点图可视化其潜在的养分限制, $E_{C:N}=\ln(BG)/\ln(LAP+NAG)$, $E_{N:P}=\ln(LAP+NAG)/\ln(AP)$, 式中, $E_{C:N}$ 和 $E_{N:P}$ 分别代表 C 获取酶与 N 获取酶和 N 获取酶与 P 获取酶的计量比; BG、NAG、LAP 和 AP 分别代表特定酶的活性。

采用 Moorhead 等^[27]的矢量方法计算生态酶的矢量特征。矢量长度 = $\sqrt{\left[\frac{\ln(BG)}{\ln(BG)+\ln(AP)}\right]^2 + \left[\frac{\ln(BG)}{\ln(BG)+\ln(LAP+NAG)}\right]^2}$, 矢量角度 = $\text{Degrees}\left\{\text{ATAN2}\left[\frac{\ln(BG)}{\ln(BG)+\ln(AP)} + \frac{\ln(BG)}{\ln(BG)+\ln(LAP+NAG)}\right]\right\}$, 式中, ATAN2 为反正切函数,用于计算二维空间中点(x, y)与坐标原点连线相对于 x 轴所形成的弧度; Degrees 表示将弧度转化为角度(°)。矢量长度越大表明微生物代谢所受 C 限制越严重; 矢量角度表明微生物代谢主要受 P 或 N 养分限制, 矢量角度小于

45°时, 值越小代表 N 限制越大, 而大于 45°时, 值越大代表 P 限制越大。

2 结果和分析

2.1 土壤理化性质和总养分含量差异

总体上, 2 种林分类型下土壤总养分含量具有显著差异($P<0.05$)。由表 2 可见, 与尾叶桉人工林相比, 马占相思人工林具有较高的 TOC 和 TN 含量, 以及较低的 TP 含量和 pH 值, 而土壤的 C/N 值在 2 种林分之间无显著差异($P>0.05$)。

2 种林分类型下土壤理化性质对间伐的响应有所不同, 与未间伐林分相比, 马占相思间伐林分土壤 TOC 含量在 30%和 60%间伐强度下分别显著降低了 10.7%和 46.2% ($P<0.05$), TN 含量虽然在 30%间伐强度时无显著变化($P>0.05$), 但在 60%间伐强度时显著降低了 25.3%, 这导致马占相思间伐林分土壤 C/N 值显著低于未间伐林分($P<0.05$)。然而, 在尾叶桉林分中, 间伐与未间伐样地土壤 TOC、TN 和 C/N 值并无显著差异。另外, 与 TOC 和 TN 不同的是, 2 种林分下土壤的 TP 含量均在间伐 30%强度时达到最高, 而土壤 pH 值在 2 种林分下的间伐与未间伐样地之间均无显著差异。

表 2 林分类型和改造模式对土壤 pH 值、总碳、全氮、全磷含量和碳氮比的影响

Table 2 Effects of plantation types and restoration models on soil pH, contents of organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus, and C/N

林分类型 Plantation type	改造模式 Restoration model	pH	TOC (g/kg)	TN (g/kg)	TP (g/kg)	C/N
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	T1	3.92±0.24Ba	51.49±10.5Aa	2.80±0.66Aa	0.29±0.04Bb	19.40±7.39Aa
马占相思 <i>A. mangium</i>	T2	3.85±0.29Ba	45.98±6.50Aa	3.14±0.16Aa	0.37±0.06Ba	14.59±1.65Ab
马占相思 <i>A. mangium</i>	T3	3.98±0.28Ba	27.69±7.16Ab	2.09±0.38Ab	0.25±0.06Bb	13.57±3.70Ab
尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i>	T1	4.28±0.14Aa	21.93±5.33Ba	1.46±0.23Ba	0.33±0.01Ab	15.07±2.96Aa
尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	T2	4.26±0.19Aa	20.79±3.74Ba	1.51±0.28Ba	0.39±0.06Aa	13.82±1.31Aa
尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	T3	4.30±0.14Aa	23.93±7.46Ba	1.57±0.27Ba	0.35±0.02Aab	15.13±3.13Aa

$n=6$; TOC: 总有机碳; TN: 总氮; TP: 总磷; 同列数据后不同小写字母和同行数据后不同大写字母均表示差异显著($P<0.05$)。下同

$n=6$; TOC: Total organic carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus. Data followed different small letters within column and different capital letters at the same line indicate significant differences at 0.05 level. The same below

2.2 土壤速效养分特征

通过对土壤速效 N 和 P 养分的测定, 对 2 种林分类型间伐后 N、P 养分的释放特征进行了探究(图 1)。马占相思人工林速效 N、P 的含量均显著高于尾叶桉人工林($P<0.01$)。而尾叶桉人工林速效氮的比例则显著高于马占相思人工林。无论对于哪

种林分类型, 间伐均能够有效促进土壤速效养分的释放。与未间伐林分相比, 马占相思林分在间伐 30%和 60%强度下速效 N 含量分别升高了 28.1% ($P<0.05$)和 10.9% ($P>0.05$), 速效磷含量分别升高了 71.7% ($P<0.05$)和 20.5% ($P>0.05$), 这导致速效 N 占 TN 的比例从未间伐林分的 6.43%分别升高到 7.36%

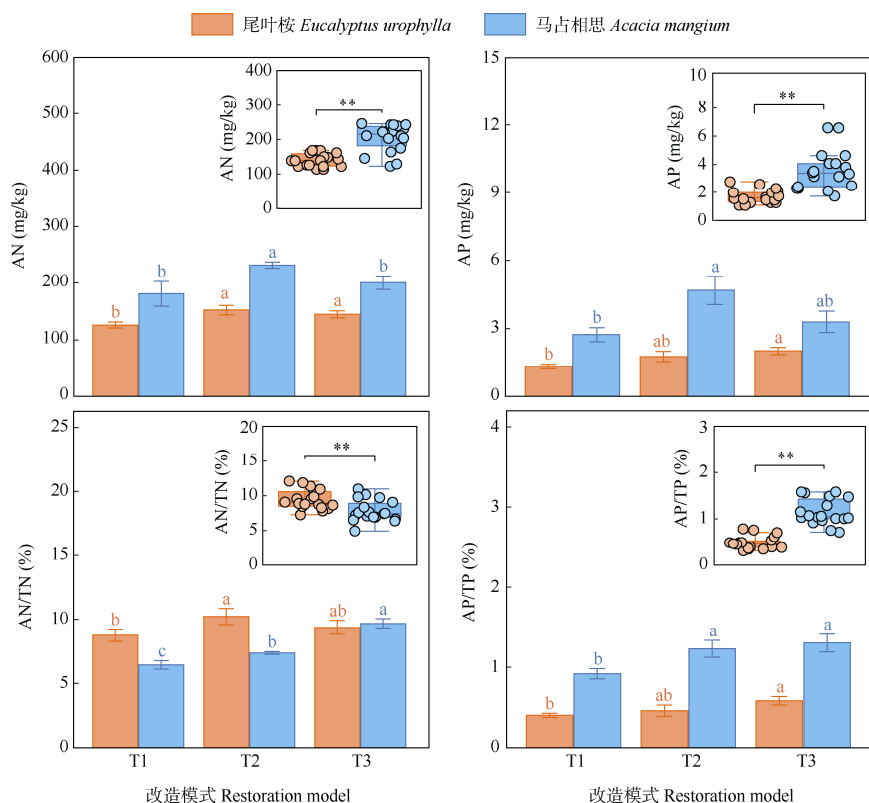


图1 林分类型和改造模式对土壤速效养分的影响。AN: 速效氮; AP: 速效磷; TN: 总氮; TP: 总磷; **: $P < 0.01$ 。下同

Fig. 1 Effects of plantation types and restoration models on soil available nutrient. AN: Available nitrogen; AP: Available phosphorus; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus. **: $P < 0.01$. The same below

和 9.68% ($P < 0.05$), 而速效 P 占 TP 的比例从未间伐林分的 0.92% 分别升高到 1.23% 和 1.30% ($P < 0.05$)。尾叶桉林分间伐后, 速效 N、P 含量和比例的变化趋势与马占相思林分基本相同, 但速效 N、P 含量升高的程度却低于马占相思(平均升高 21% 和 33%)。

2.3 土壤 C、N、P 获取酶活性特征

为探究养分的转化与释放的驱动机制, 对与 C、N 和 P 获取相关的胞外酶活性进行了测定。由图 2 可见, 马占相思人工林与 C 获取有关的 BG 活性显著高于尾叶桉人工林 ($P < 0.01$), 而与 N 获取有关的 LAP 活性却显著低于尾叶桉人工林 ($P < 0.01$)。与 N 获取有关的 NAG 和与 P 获取有关的 AP 活性在 2 种林分类型中无显著差异 ($P > 0.05$)。

与未间伐林分相比, 马占相思人工林在间伐后 BG 活性出现显著降低 ($P < 0.05$), 而尾叶桉人工林间伐后 BG 活性并无显著变化 ($P > 0.05$)。而 LAP、NAG 和 AP 在 2 种林分类型下的间伐样地中均低于未间伐样地, 特别是在间伐 30% 下均达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.4 生态酶化学计量比和矢量特征

为探究不同林分类型和间伐强度可能受到的

养分限制, 对生态酶的化学计量比值和矢量特征进行计算。由图 3 可见, 与尾叶桉人工林相比, 马占相思人工林土壤具有更高的 $E_{C:N}$ 值和更高的矢量长度, 说明马占相思人工林相比于尾叶桉人工林受到相对较强的 C 限制。与未间伐样地相比, 马占相思人工林在 30% 的间伐强度下 C 的限制得到了缓解 ($E_{C:N}$ 值有所降低), 但是在 60% 的间伐强度下却增加了 N 限制 ($E_{N:P}$ 值出现升高, 同时酶的矢量角度出现降低)。相比之下, 2 种间伐强度下 (30% 和 60%) 的尾叶桉林分都具有较高的 $E_{N:P}$ 值和更低酶矢量角度, 但相互之间却没有明显差异, 说明尾叶桉林分间伐更可能增加 N 养分的获取限制。

3 讨论和结论

3.1 间伐对土壤 N、P 养分释放特征的影响

本研究表明, 2 种华南典型人工林的近自然改造过程中, 间伐林分与未间伐林分相比具有更高的速效 N、P 养分含量和比例, 这之前的大多数研究基本一致^[29,32-33], 表明间伐措施能够有效促进林

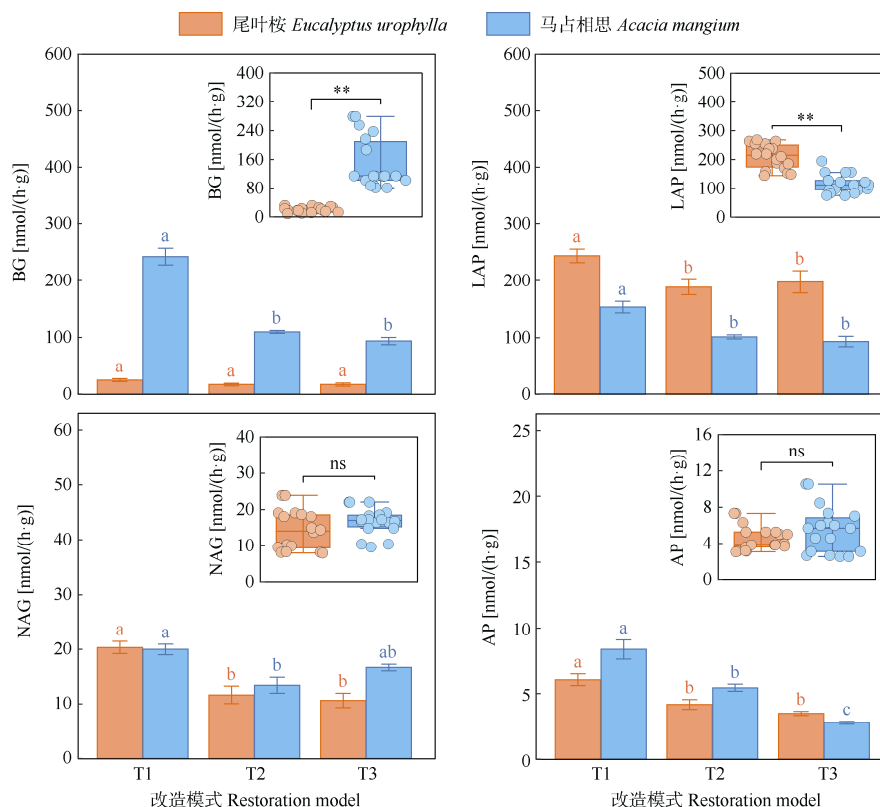


图2 土壤胞外酶活性在不同林分类型及不同改造模式下的差异。BG: β -1,4-葡萄糖苷酶; NAG: β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶; LAP: 亮氨酸氨肽酶; AP: 酸性磷酸酶; ns: 无显著差异。

Fig. 2 Differences in soil extracellular enzyme activities under different plantation types and restoration models. BG: β -1,4-glucosidase; NAG: β -1,4-N-acetylglucosaminidase; LAP: Leucine aminopeptidase; AP: Acid phosphatase; ns: No significant difference.

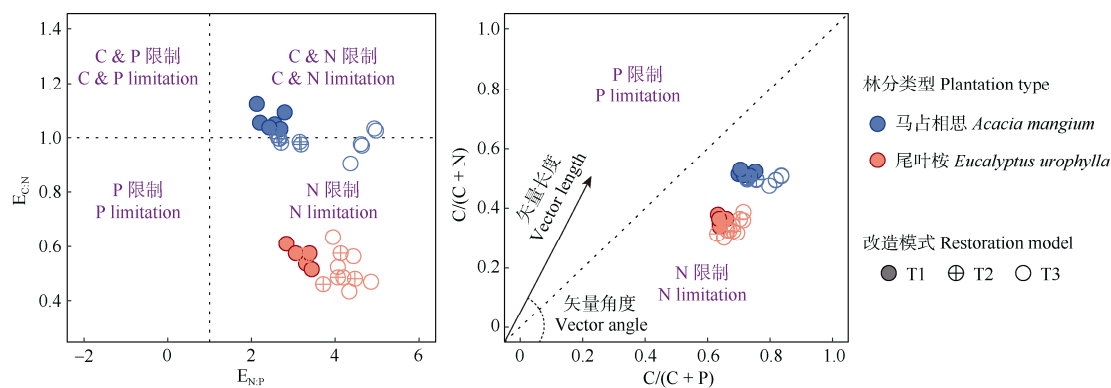


图3 林分类型和间伐强度对生态酶化学计量比值和矢量特征的影响。 $E_{C:N}$: 碳获取酶与氮获取酶的计量比; $E_{N:P}$: 氮获取酶与磷获取酶的计量比; $C/(C+N)$: 微生物在碳与氮获取过程中对碳获取酶的相对投入比例; $C/(C+P)$: 微生物在碳与磷获取过程中对碳获取酶的相对投入比例。

Fig. 3 Effects of plantation types and thinning intensities on ecoenzymatic stoichiometric ratios and vector characteristics. $E_{C:N}$: carbon- to nitrogen-acquiring enzyme; $E_{N:P}$: Stoichiometric ratios of nitrogen- to phosphorus-acquiring enzymes; $C/(C+N)$: Relative investment of carbon-acquiring enzymes in microbial acquisition of carbon versus nitrogen resources; $C/(C+P)$: Relative investment of carbon-acquiring enzymes in microbial acquisition of carbon versus phosphorus resources.

分土壤速效 N、P 养分的释放^[34]。人工林间伐后, 林窗的打开增加了林下土壤的温度, 而土壤水分蒸发促使土壤的透气性增强, 有利于土壤有机质的

矿化过程, 进而促进 N、P 等速效养分的释放^[35]。此外, 以往的研究表明间伐后土壤速效养分的释放依赖于土壤有机质的含量及其被降解的难易程

度^[32,36-37], 土壤有机质难以降解时, 间伐对养分释放的促进作用可能更强^[37]。本研究的结果支持了这一结论, 相比于尾叶桉, 马占相思产生的林下枯落物更多, 导致未间伐林分中, 马占相思土壤有机质含量更高相对更难降解(高 C/N 值)。因此, 间伐导致马占相思林分中, TOC 的降低以及速效养分的释放都强于尾叶桉人工林。

3.2 间伐对微生物能量及养分获取的影响

以往的研究表明, 土壤 C 获取酶的活性一定程度上反映了微生物群落对能量的需求, 当环境中 C 的供应受到限制时, BG 的分泌就会增加^[38]。本研究的结果支持了这一结论, 相比于尾叶桉人工林, 马占相思林分中的土壤有机质难以分解, 微生物群落对 C 的获取相对困难, 因此表现出更高的 BG 活性。相对于未间伐林分, 马占相思间伐林分 C 获取酶活性得到了显著降低, 这表明间伐使马占相思林分土壤的 C 限制得到极大缓解。而尾叶桉人工林土壤受到的 C 限制相对较弱, 因此 BG 的活性并无明显变化。N、P 获取相关胞外酶的活性(LAP、NAG、AP)在 2 种类型间伐林分中都得到了显著降低(特别在 30% 的间伐强度下), 表明林分间伐后, 土壤微生物只需投入更少的酶就能从环境中获取 N、P 养分, 即间伐能有效促进土壤速效 N、P 养分的释放。

3.3 间伐对养分获取平衡和获取限制的影响

通过生态酶的计量比值和矢量特征进一步表明马占相思人工林在间伐 30% 的强度下, 土壤 C 限制得到了缓解。这一结果与其他学者对华南地区马尾松^[39]、尾叶桉^[28]和马占相思人工林^[29,40]进行的间伐实验研究一致。这主要由于间伐对土壤有机质的分解过程具有促进作用, 能够释放结构简单的易于被微生物利用的小分子有机物, 因此随着间伐强度的增加, 微生物对 C 的需求逐步降低^[41]。然而, 微生物对 C、N、P 的获取存在平衡, 对 C 限制的缓解往往伴随对 N 和 P 需求的上升^[42]。本研究结果表明在高强度间伐下, 2 种林型均出现土壤 N 获取限制加剧的趋势, 这可能因为林分间伐后, 林下植被的生长通常会得到增强, 导致土壤中大量的可用性 N、P 被植物迅速吸收并固定在地上生物量中, 因此微生物不得不投入更多的胞外酶用于 N、P 养分的获取^[43]。但由于 N 元素在生物量中的比重远高于 P 元素, 因此更容易成为限制性养分^[44]。此外, 相比于马占相思林在 60% 间伐强度下才出现的 N 限制, 尾叶桉林在 30% 的间伐强度时已出现 N 养分的

获取压力, 可能因其缺乏固 N 能力, 较难维持土壤 N 的供需平衡。而马占相思为豆科植物, 具有一定的生物固 N 能力, 可在一定程度上缓冲 N 素不足的风险^[45]。

基于人工林的近自然改造理念, 间伐强度的选择不仅考虑目标树种的生长潜力, 同时也需关注林分群落结构与生态功能的长期稳定性^[6,8-9]。大量研究表明虽然高强度间伐能在短期内改善林下光照条件和促进树种更新, 但长期来看, 也可能引发群落结构破碎、物种多样性下降、养分循环失衡等风险^[46-47]。而本研究从土壤养分释放的角度出发, 表明中度间伐还能够实现缓解土壤 C 限制和促进 N、P 养分适度释放的双重目标, 是马占相思和尾叶桉人工林近自然改造的较优策略。

但需要指出的是, 本研究的结论仅基于林分间伐处理 13~17 a 后的单次采样, 鉴于土壤养分和酶活均具有明显的季节性变化与年际波动特征, 仅凭一次采样可能难以全面反映这种动态特征。因此, 建议未来通过多季节、多年份的连续采样与长期定位观测, 进一步检验不同间伐强度下养分循环过程的动态变化, 为人工林多功能经营提供更稳健的决策依据。

综上, 本研究结果表明在对马占相思和尾叶桉 2 种华南地区典型人工林的近自然改造过程中, 林分的间伐能够有效促进土壤有机质的降解和土壤 N、P 等速效养分的释放, 这可能由于间伐使微生物的 C 限制得到缓解驱动。另一方面, 微生物对 C、N、P 等元素的获取存在平衡, 间伐强度过高可能导致土壤对 N 养分供应无法满足林下植被的生长需求, 进而加剧植物对 N 的获取限制, 但豆科植物的补植可能在一定程度上能够使这种限制得到缓解。因此, 综合考虑不同间伐强度下 2 种人工林土壤 N、P 养分的释放特征以及近自然改造的生态目标, 中等间伐(30%)强度能够兼顾土壤 N、P 养分的释放和地上植被多样性的提高, 应为华南地区马占相思和尾叶桉人工林近自然改造的最优选择。

参考文献

- [1] XU D P, ZHANG N N. Study development of ecological effect of *Eucalyptus* plantation [J]. *Guangxi For Sci*, 2006, 35(4): 179–187. [徐大平, 张宁南. 桉树人工林生态效应研究进展 [J]. *广西林业科学*, 2006, 35(4): 179–187. doi: 10.3969/j.issn.1006-1126.2006.04.002.]
- [2] JIANG X M, YE K L, LÜ J X. Wood Properties and Processing of

- Eucalyptus* and *Acacia* Plantations in China [M]. Beijing: Science Press, 2007. [姜笑梅, 叶克林, 吕建雄. 中国桉树和相思人工林木材性质与加工利用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [3] BRIGHT R M, ZHAO K G, JACKSON R B, et al. Quantifying surface albedo and other direct biogeophysical climate forcings of forestry activities [J]. *Glob Change Biol*, 2015, 21(9): 3246–3266. doi: 10.1111/gcb.12951.
- [4] ZHANG N N, XU H, XU D P, et al. Dynamic changes of species diversity of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* and *Acacia mangium* plantations in Gaoyao, Guangdong [J]. *For Res*, 2009, 22(2): 262–268. [张宁南, 许涵, 徐大平, 等. 广东省尾巨桉和马占相思人工林林下植物多样性动态变化 [J]. 林业科学研究, 2009, 22(2): 262–268. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2009.02.019.]
- [5] LIU J G, LI S X, OUYANG Z Y, et al. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105(28): 9477–9482.
- [6] TAN G Y, PENG W H, XIANG H Y, et al. Practice and consideration of forest management near nature in Longshan County [J]. *S China Agric*, 2020, 14(29): 56–57. [谭桂英, 彭文辉, 向海英, 等. 龙山县近自然森林经营的实践与思考探究 [J]. 南方农业, 2020, 14(29): 56–57. doi: 10.19415/j.cnki.1673-890x.2020.29.028.]
- [7] YIN L, LIU Z, LIU X Z, et al. Effects of different replanting methods on growth and structure of *Pinus massoniana* plantation [J]. *For Sci Technol*, 2020(12): 29–34. [殷丽, 刘卓, 刘宪钊, 等. 不同补植方式对马尾松人工林生长和结构的影响 [J]. 林业科技通讯, 2020(12): 29–34. doi: 10.13456/j.cnki.lykt.2020.11.06.0001.]
- [8] LI T T, LU Y C, PANG L F, et al. Initial effect of close-to-nature management of Chinese fir plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, 50(5): 90–100. [李婷婷, 陆元昌, 庞丽峰, 等. 杉木人工林近自然经营的初步效果 [J]. 林业科学, 2014, 50(5): 90–100. doi: 10.11707/j.1001-7488.20140512.]
- [9] ZHOU J Y, LI R, HE J F, et al. Regeneration of the dominant arbors after close-to-natural management of *Quercus wutaishanica* forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, 49(8): 15–20. [周建云, 李荣, 何景峰, 等. 近自然经营对辽东栎林优势乔木更新的影响 [J]. 林业科学, 2013, 49(8): 15–20. doi: 10.11707/j.1001-7488.20130803.]
- [10] XIANG S F. Cultivation technology of young secondary evergreen broad-leaved forest [J]. *Modern Agric Sci Technol*, 2013(5): 182–183. [项仕法. 次生常绿阔叶林幼龄林培育技术 [J]. 现代农业科技, 2013(5): 182–183. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2013.05.122.]
- [11] SIMON D C, AMEZTEGUI A. Modelling the influence of thinning intensity and frequency on the future provision of ecosystem services in Mediterranean mountain pine forests [J]. *Eur J For Res*, 2023, 142(3): 521–535. doi: 10.1007/s10342-023-01539-y.
- [12] WANG C Y, FU X R, LI J Y, et al. Effects of thinning measures on rotation period and stock volume of *Cunninghamia lanceolata* plantations based on 3-PGmix simulations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2025, 45(6): 2780–2797. [王成雨, 扶欣然, 李佳怡, 等. 基于 3-PGmix 模拟杉木人工林轮伐期和间伐措施对蓄积量的影响 [J]. 生态学报, 2025, 45(6): 2780–2797. doi: 10.20103/j.stxb.202407021537.]
- [13] CHEN C, YANG Y C, SHEN F Y, et al. Effects of thinning on absorptive root functional traits of *Pinus koraiensis* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2025, 45(8): 3969–3977. [陈晨, 杨雨春, 申方圆, 等. 间伐对红松吸收根功能性状的影响 [J]. 生态学报, 2025, 45(8): 3969–3977. doi: 10.20103/j.stxb.202410092444.]
- [14] SHEN H, ZHENG C Z, ZHANG N J, et al. The effects of thinning on the growth of *Cunninghamia lanceolata* for large-diameter timber cultivated stands and carbon storage of arbors [J]. *J NE For Univ*, 2025, 53(4): 47–54. [沈汉, 郑成忠, 张能军, 等. 间伐对杉木大径材培育林分的生长和乔木碳储量的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2025, 53(4): 47–54. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2025.04.006.]
- [15] LI D Y, LV B L, JIANG Y, et al. Effects of tending thinning on niche characteristics and interspecific association of plantations in Saihanba Nature Reserve [J]. *J Arid Land Res Envir*, 2025, 39(1): 139–149. [李丹阳, 吕宝磊, 姜雨, 等. 抚育间伐对塞罕坝自然保护区人工林植被生态位特征和种间关联性的影响 [J]. 干旱区资源与环境, 2025, 39(1): 139–149. doi: 10.13448/j.cnki.jalre.2025.013.]
- [16] CHEN X, MA L Y, JIA Z K. Research progress on effect of intermediate cutting to forest soil [J]. *Soil Water Conserv China*, 2012(9): 60–63. [陈雪, 马履一, 贾忠奎. 间伐对森林土壤影响的研究进展 [J]. 中国水土保持, 2012(9): 60–63. doi: 10.3969/j.issn.1000-0941.2012.09.026.]
- [17] TIAN D, YAN Z B, FANG J Y, et al. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2021, 45(7): 682–713. [田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(7): 682–713. doi: 10.17521/cjpe.2020.0331.]
- [18] YAN B G, LIU G C, FAN B, et al. Relationships between plant stoichiometry and biomass in an arid-hot valley, Southwest China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, 39(8): 807–815. [闫帮国, 刘刚才, 樊博, 等. 干热河谷植物化学计量特征与生物量之间的关系 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 807–815. doi: 10.17521/cjpe.2015.0077.]
- [19] LI X Z, ZHANG S M, XING X R. Spatial variation of plant biomass and soil chemical element contents induced by *Caragana microphylla* [J]. *Acta Pratacul Sin*, 2002, 11(1): 24–30. [李香真, 张淑敏, 邢雪荣. 小叶锦鸡儿灌丛引起的植物生物量和土壤化学元素含量的空间变

- 异[J]. 草业学报, 2002, 11(1): 24–30. doi: 10.3321/j.issn:1004-5759.2002.01.005.]
- [20] LU J L. Plant Nutrition, Vol. 1 [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. [陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.]
- [21] MO L J, CHEN K X, LI W H, et al. The effect on species diversity of *Eucalyptus urophylla* plantation by thinning and interplanted with broad-leaved tree [J]. J Fujian For Sci Technol, 2017, 44(2): 24–32. [莫罗坚, 陈葵仙, 李伟豪, 等. 间伐和套种对尾叶桉人工林物种多样性的影响[J]. 福建林业科技, 2017, 44(2): 24–32. doi: 10.13428/j.cnki.fjlk.2017.02.005.]
- [22] HONG W J, MO L J, ZHANG H. Effects of different thinning on the structure of *Acacia mangium* plantation in south China [J]. Ecol Environ Sci, 2021, 30(7): 1360–1367. [洪文君, 莫罗坚, 张浩. 华南地区马占相思人工林不同改造模式对林分结构的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1360–1367. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.07.004.]
- [23] BURNS R G, DEFOREST J L, MARXSEN J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions [J]. Soil Biol Biochem, 2013, 58: 216–234. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.11.009.
- [24] SINSABAUGH R L, LAUBER C L, WEINTRAUB M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale [J]. Ecol Lett, 2008, 11(11): 1252–1264. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x.
- [25] SINSABAUGH R L, HILL B H, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment [J]. Nature, 2009, 462(7274): 795–798. doi: 10.1038/nature08632.
- [26] CUI Y X, MOORHEAD D L, GUO X B, et al. Stoichiometric models of microbial metabolic limitation in soil systems [J]. Glob Ecol Biogeogr, 2021, 30(11): 2297–2311. doi: 10.1111/geb.13378.
- [27] MOORHEAD D L, SINSABAUGH R L, HILL B H, et al. Vector analysis of ecoenzyme activities reveal constraints on coupled C, N and P dynamics [J]. Soil Biol Biochem, 2016, 93: 1–7. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.10.019.
- [28] CHEN K X, YE Y C, MO L J, et al. Effects of thinning on physical and chemical characteristics, soil microorganism and soil enzyme activities of *Eucalyptus urophylla* plantation [J]. SW China J Agric Sci, 2017, 30(10): 2277–2283. [陈葵仙, 叶永昌, 莫罗坚, 等. 间伐对尾叶桉人工林土壤理化性质、土壤微生物和土壤酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2277–2283. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2017.10.020.]
- [29] LIU S S, CHEN K X, SHEN D C, et al. Impact of thinning on physical and chemical characteristics, soil microorganism and soil enzyme activities on season of *Acacia mangium* in South China [J]. J CS Univ For Tech, 2018, 38(2): 23–29. [刘颂颂, 陈葵仙, 沈德才, 等. 间伐对华南地区相思人工林土壤理化性质、微生物及酶活性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(2): 23–29, 42. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.02.004.]
- [30] BELL C W, FRICKS B E, ROCCA J D, et al. High-throughput fluorometric measurement of potential soil extracellular enzyme activities [J]. J Vis Exp, 2013(81): e50961. doi: 10.3791/50961.
- [31] SINSABAUGH R L, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory [J]. Annu Rev Ecol Evol Syst, 2012, 43(1): 313–343. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-071112-124414.
- [32] ZHANG D H, YE Z F, FAN B Y, et al. Influence of thinning on soil fertility in artificial forests [J]. Chin J Appl Ecol, 2001, 12(5): 672–676. [张鼎华, 叶章发, 范必有, 等. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 672–676.]
- [33] FENG Q. Effect of reconstruction of low-efficiency forest of *Pinus tabulatus* on soil nutrient status in Yungang Forest Farm of Datong City [J]. Prot For Sci Technol, 2023(6): 19–21. [冯敬. 大同市云冈林场油松低效林改造对土壤养分状况的影响[J]. 防护林科技, 2023(6): 19–21. doi: 10.13601/j.issn.1005-5215.2023.06.005.]
- [34] YIN X J, HU J Y, WANG P. Effects of different thinning intensities on soil organic matter content and microbial community dynamics in *Pinus massoniana* forest [J]. Hubei For Sci Tech, 2024, 53(5): 7–10. [尹晓蛟, 胡佳阳, 汪鹏. 间伐对马尾松林土壤有机质与微生物群落动态的影响[J]. 湖北林业科技, 2024, 53(5): 7–10. doi: 10.3969/j.issn.1004-3020.2024.05.002.]
- [35] LIANG Y F, LUO H L, JIANG L, et al. Effects of different thinning intensities on soil physicochemical properties and enzyme activities in hybrid pine plantation [J]. J Beihua Univ (Nat Sci), 2022, 23(4): 521–529. [梁燕芳, 罗华龙, 蒋林, 等. 不同间伐强度对杂交松人工林土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2022, 23(4): 521–529. doi: 10.11713/j.issn.1009-4822.2022.04.019.]
- [36] CHENG X R, FENG L, YU M K, et al. Effects of thinning on canopy structure and soil nutrient in ecological plantation [J]. Ecol Environ Sci, 2010, 19(2): 355–359. [成向荣, 冯利, 虞木奎, 等. 间伐对生态公益林冠层结构及土壤养分的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 355–359. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2010.02.019.]
- [37] XU M P, LIU H Y, ZHANG Q, et al. Effect of forest thinning on soil organic carbon stocks from the perspective of carbon-degrading enzymes [J]. CATENA, 2022, 218: 106560. doi: 10.1016/j.catena.2022.106560.
- [38] ZHU Z K, FANG Y Y, LIANG Y Q, et al. Stoichiometric regulation of priming effects and soil carbon balance by microbial life strategies [J].

- Soil Biol Biochem, 2022, 169: 108669. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108669.
- [39] HAO J P, LING N, LI R X, et al. Effects of thinning on the soil enzyme activity in the *Pinus massoniana* Lamb. plantation [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2013, 37(4): 51–56. [郝俊鹏, 凌宁, 李瑞霞, 等. 间伐对马尾松人工林土壤酶活性的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 51–56. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2013.04.010.]
- [40] HE B, JIA L M, JIN D G, et al. Studies on soil fertility change in *Acacia mangium* plantation in Nanning, Guangxi [J]. Sci Silv Sin, 2007, 43(5): 10–16. [何斌, 贾黎明, 金大刚, 等. 广西南宁马占相思人工林土壤肥力变化的研究 [J]. 林业科学, 2007, 43(5): 10–16. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2007.05.002.]
- [41] HU X B, JIANG C Q, WANG H, et al. A comparison of soil C, N, and P stoichiometry characteristics under different thinning intensities in a subtropical moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest of China [J]. Forest, 2022, 13(11): 1770. doi: 10.3390/f13111770.
- [42] MOOSHAMMER M, WANEK W, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, et al. Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: Mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources [J]. Front Microbiol, 2014, 5: 22. doi: 10.3389/fmicb.2014.00022.
- [43] LI D, TIAN Q X, ZHAO X X, et al. Soil extracellular enzyme activities and their stoichiometric ratio in the alpine treeline ecotones in Gongga Mountain, China [J]. Chin J Plant Ecol, 2022, 46(2): 232–242. [李东, 田秋香, 赵小祥, 等. 贡嘎山树线过渡带土壤胞外酶活性及其化学计量比特征 [J]. 植物生态学报, 2022, 46(2): 232–242. doi: 10.17521/cjpe.2021.0215.]
- [44] ZHAO X L, CHENG H T, LÜ G H, et al. Advances in soil microbial biomass [J]. J Meteor Envir, 2006, 22(4): 68–72. [赵先丽, 程海涛, 吕国红, 等. 土壤微生物生物量研究进展 [J]. 气象与环境学报, 2006, 22(4): 68–72. doi: 10.3969/j.issn.1673-503X.2006.04.013.]
- [45] LI W N, ALI I, HAN X M, et al. Soil C, N, P, K and enzymes stoichiometry of an endangered tree species, *Parashorea chinensis* of different stand ages unveiled soil nutrient limitation factors [J]. Forests, 2023, 14(3): 624. doi: 10.3390/f14030624.
- [46] SONG C S, ZHANG L R, WANG Y L, et al. Research progress of the effects of thinning on the ecosystem of plantation [J]. Subtrop Agric Res, 2020, 16(4): 279–288. [宋重升, 张利荣, 王有良, 等. 抚育间伐对人工林生态系统影响的研究进展 [J]. 亚热带农业研究, 2020, 16(4): 279–288. doi: 10.13321/j.cnki.subtrop.agric.res. 2020.04.012.]
- [47] HUANG X L, YANG Z Y, XUE L. Research advances in effects of thinning on artificial forest [J]. For Resour Manag, 2013(1): 62–67. [黄香兰, 杨振意, 薛立. 抚育间伐对人工林影响的研究进展 [J]. 林业资源管理, 2013(1): 62–67. doi: 10.3969/j.issn.1002-6622.2013.01.013.]