



5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

周丽丽, 李树斌, 潘辉, 王万萍, 吴亚岚, 郑茹萍

引用本文:

周丽丽, 李树斌, 潘辉, 等. 5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(5): 483–493.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4334>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

华南地区5种人工幼林的土壤呼吸及其季节性变化

Soil Respiration and Its Seasonal Variation among Five Young Plantations in South China

热带亚热带植物学报. 2015(2): 176–182 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.02.009>

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>

雷州半岛尾巨桉人工林土壤呼吸动态变化及其对气象因子的响应

Soil Respiration of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation and Its Response to Meteorological Factors in Leizhou Peninsula

热带亚热带植物学报. 2018, 26(4): 346–354 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3833>

岩溶与非岩溶区典型植物最适光合模型和光合特征研究

Studies on Optimal Photosynthetic Biochemical Model and Photosynthetic Characteristics of Typical Plants in Karst and Non-karst Regions

热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 187–194 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4269>

向下翻页, 浏览PDF全文

5 种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

周丽丽^{1,2}, 李树斌^{2,3}, 潘辉^{1*}, 王万萍^{2,3}, 吴亚岚⁴, 郑茹萍^{2,3}

(1. 闽江学院海洋研究院, 福州 350108; 2. 国家林业和草原局杉木工程技术研究中心, 福州 350002; 3. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 4. 福州大学环境与安全工程学院, 福州 350108)

摘要: 为揭示固氮树种土壤养分转化的酶学机制, 对固氮树种[厚荚相思(*Acacia crassicarpa*)、黑木相思(*A. melanoxylon*)、卷荚相思(*A. cincinnata*)、大叶相思(*A. auriculiformis*)和马占相思(*A. mangium*)]及非固氮树种尾巨桉(*Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*)人工林的土壤养分含量、酶活性及其相关性进行研究。结果表明, 相思林 40~60 cm 土层的 pH 均高于尾巨桉林; 5 种相思林土壤各土层的 TP、TK 含量均低于尾巨桉林, 而 20~40 cm 土层的 TC、TN 含量均高于尾巨桉林, 黑木相思林和马占相思林各土层的有效养分均显著高于尾巨桉林($P<0.05$)。0~10 cm 土层中, 相思林的土壤酸性磷酸酶和纤维素酶活性均高于尾巨桉林, 大叶相思林的土壤脲酶、蔗糖酶、纤维素酶和芳基硫酸酯酶活性显著高于尾巨桉林($P<0.05$), 卷荚相思林的土壤脲酶、纤维素酶、几丁质酶和淀粉酶活性显著高于尾巨桉林($P<0.05$)。相关分析结果表明, 土壤脲酶、蔗糖酶和几丁质酶活性与 AP 显著负相关($P<0.05$), 蔗糖酶和纤维素酶活性与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著负相关($P<0.05$), 脲酶、纤维素酶、芳基硫酸酯酶与土壤 TK 显著负相关($P<0.05$), 几丁质酶活性与 TN 含量呈显著正相关($P<0.05$), 土壤淀粉酶活性与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著正相关($P<0.05$), 过氧化氢酶活性与土壤 TK 含量呈显著正相关。可见, 与尾巨桉人工林相比, 在我国南方退化山地引种相思树可提高土壤关键酶的活性, 对土壤有效养分具有明显改良作用, 有利于退化地土壤的生态修复及人工林长期生产力的维持。

关键词: 相思树; 桉树; 土壤退化; 土壤养分; 土壤酶; 冗余分析

doi: 10.11926/jtsb.4334

Characteristics of Soil Nutrient and Enzyme Activities in Plantations of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* and Five *Acacia* Species

ZHOU Lili^{1,2}, LI Shubin^{2,3}, PAN Hui^{1*}, WANG Wanping^{2,3}, WU Yalan⁴, ZHENG Ruping^{2,3}

(1. Institute of Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 2. Chinese fir Engineering Technology Research Center, State Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350002, China; 3. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 4. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to reveal the enzymatic mechanism of soil nutrient transformation, the soil nutrient contents and enzyme activities in plantations, such as nitrogen-fixing tree species (*Acacia crassicarpa*, *A. melanoxylon*, *A. cincinnata*, *A. auriculiformis*, *A. mangium*) and non-nitrogen-fixing species (*Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*) were studied, and their relationships were analyzed. The results showed that the pH in 40–60 cm soil of *Acacia* plantations were higher than that in *E. urophylla*×*E. grandis* plantation, which total P and K contents at all soil layers were lower than those in *E. urophylla*×*E. grandis* plantation, while total C and total N contents at 20–40 cm soil were high in *Acacia* plantations. Soil available nutrients contents were significantly higher in *A. melanoxylon* and *A. mangium* than those in *E. urophylla*×*E. grandis* plantation ($P<0.05$). Compared to *E.*

收稿日期: 2020-11-09 接受日期: 2021-03-22

基金项目: 福建省林业科技项目([2019]16); 福建省自然科学基金项目(2018J05059)资助

This work was supported by the Project for Forestry Science and Technology in Fujian (Grant No. [2019]16), and the Project of Natural Science in Fujian (Grant No. 2018J05059).

作者简介: 周丽丽(1982~), 女, 博士, 副教授, 主要从事森林生态及资源利用方面的研究。E-mail: fjzhoulili@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fjpanhui@126.com

urophylla × *E. grandis* plantation, the acid phosphatase and cellulase activities at 0–10 cm soil layer were high in *Acacia* plantations, which the activities of soil urease, sucrase, cellulase and aryl sulfatase were the highest in *A. auriculiformis* plantation ($P < 0.05$); the activities of soil urease, cellulose, chitinase and amylase were the highest in *A. cincinnata* plantation ($P < 0.05$). Correlation analysis revealed that the activities of soil urease, sucrase and chitinase were significantly negative to soil AP ($P < 0.05$); the activities of soil sucrase and cellulase were significantly negative to soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$; the activities of soil urease, cellulase and aryl sulfatase were significantly negative to soil TK; the activities of soil chitinase were significantly positively to soil TN; the activities of soil amylase were significantly positively to soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$; the activities of soil catalase were significantly positively to soil TK. Therefore, compared to *E. urophylla* × *E. grandis* plantation, the introduced *Acacia* species to soil degraded mountains in southern China could improve key soil enzyme activities and soil available nutrients, which was beneficial to the eco-restoration of degraded soil and the maintenance of long-term productivity of plantations.

Key words: *Acacia*; *Eucalyptus*; Soil degradation; Soil nutrient; Soil enzyme; Canonical redundancy analysis (RDA)

人工林土壤退化是全世界面临的重要环境问题之一。我国人工林面积高达 $6.933 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占世界人工林面积的 25%, 居全球之首^[1]。目前我国南方主要以营造杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等速生树种为主, 造林树种单一, 加上多代连栽、短轮伐期、不合理经营等措施导致人工林土壤退化严重^[2]。如何缓解人工林土壤的进一步退化、促进林地长期生产力的提高, 是当今林业界亟需解决的重大课题。

相思树隶属于含羞草科(Mimosaceae)金合欢属(*Acacia*)的常绿乔木, 原产于澳大利亚、巴布亚和印尼等地, 具有速生丰产、耐干旱贫瘠、富含根瘤以及材质优良等特点, 于上世纪 60 年代开始引入我国, 至今引种成功 20 多种^[3]。相思树是一种很好的固氮树种, 在改土培肥、固碳增汇、改善环境等方面具有很好的改良作用, 已成为南方荒山地区造林和生态重建的先锋树种之一。桉树为桃金娘科(Myrtaceae)桉树属(*Eucalyptus*)树种的总称, 原产于澳大利亚, 于 1890 年引入我国, 目前在广东、广西、海南、福建等省区均有种植, 栽植面积超过 $1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 居世界第 3 位^[4]。桉树是我国经济价值最大的三大树种(松、桉、杨)之一, 适合生产短纤维纸浆, 被称为纸浆工业的“绿色黄金”。其中, 尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)是我国实施速生丰产用材林建设的首选树种之一, 目前在我国南方大面积推广种植。桉树给人类带来巨大的经济效益, 也引发了一系列“生态安全”上的争议。廖观荣等^[5]对雷州半岛桉树人工林大面积土壤调查和多点田间试验表明, 桉树人工林养分的收支不平衡及本身的生态脆弱性导致地力明显退化。桉树过度消耗水

分, 其根系分泌物具有较强的化感作用, 对林下植被、其他植物及土壤中的微生物产生抑制作用, 造成生态环境的破坏^[6]。因此, 在我国南方退化山地大面积引种相思树和尾巨桉人工林的背景下, 探讨这两类树种土壤养分水平及健康状况十分必要。

土壤酶是土壤有机体的代谢动力, 在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用。参与促进土壤氮转化的脲酶(UE)、促进有机残体分解的纤维素酶(CBH)、促进糖类水解的蔗糖酶(SC)、催化有机磷水解的酸性磷酸酶(AP)等一直是生态学研究的重要内容^[7]。目前, 关于引种相思树在南方山地生态重建中的研究, 要么集中在某种相思林土壤理化性质方面^[8-9], 要么集中在某些土壤酶方面^[10], 而关于多种相思人工林土壤酶与土壤养分相关性的研究还鲜见报道, 而这些对于揭示我国亚热带人工林土壤养分转化的酶学机制具有重要意义。有鉴于此, 本研究以我国南方亚热带退化山地引种的固氮树种[厚荚相思(*Acacia crassicarpa*)、黑木相思(*A. melanoxylon*)、卷荚相思(*A. cincinnata*)、大叶相思(*A. auriculiformis*)和马占相思(*A. mangium*)]和非固氮树种尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)纯林为研究对象, 研究了退化山地引种 5 种相思林及尾巨桉人工林对土壤养分及酶活的影响, 并探讨了二者的相关关系, 为指导我国亚热带人工林树种选择及土壤生态恢复提供科学依据。

1 研究区概况和方法

1.1 研究区概况

试验地位于福建省漳州市漳浦县中西国有林场

(24°17' N, 117°33' E), 属亚热带海洋性季风气候, 年均温 20.2℃, 极端最高温 42℃, 极端最低温-2.4℃, 年有效积温为 7 200℃, 无霜期 330 d, 年平均降水量为 1 859 mm, 降水主要集中在夏季。地貌属于低山丘陵, 地势平缓, 海拔在 40~550 m 之间。

1.2 样地设置

在漳浦县中西国有林场内, 依据典型性和代表性原则, 选择海拔、坡向和坡度等立地条件基本一致的尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*, A)、厚荚相思(*Acacia crassicaarpa*, B)、黑木相思(*A. melanoxylon*, C)、卷荚相思(*A. cincinnata*, D)、大叶相思(*A. auriculiformis*, E)和马占相思(*A. mangium*, F)林(表 1), 每种林分建立 3 个 20 m × 20 m 的样方, 为减小边缘效应, 样地间距在 100 m 以上。6 种林分的前茬均为湿地松人工林采伐迹地, 土壤为沙质页岩发育的红壤, 土层中厚, 腐殖质层薄, 理化性质

较差。林下植被以铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、九节(*Psychotria rubra*)和露籽草(*Ottlochloa nodosa*)为主, 还有少量的紫竹(*Phyllostachys nigra*)、桂竹(*P. bambusoides*)等。

1.3 样品采集

2019 年 11 月, 采用土钻法随机采集不同层次土壤样品(0~10、10~20、20~40 和 40~60 cm), 每个样方选取 5 个样点, 样方内不同取样点的同层土壤样品混合, 3 个重复, 共 72 个土壤样品。将采集的土壤样品迅速装入自封袋中带回实验室, 过 2 mm 筛并去除可见根系, 一部分土壤样品置于荫蔽处自然风干, 用于土壤 pH 和基本养分的测定; 另一部分土壤置于 4℃ 冰箱, 用于铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和土壤酶活性的测定, 土壤酶活性测定仅针对 0~10 cm 土层。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots

人工林 Plantation	造林年份 Planting year	经度 (E) Latitude	纬度 (N) Longitude	海拔 (m) Elevation	造林密度 Planting density (ind./hm ²)	保留密度 Reserved density (ind./hm ²)	平均树高 Mean height (m)	平均胸径 Mean DBH (cm)
A	2001	117°33'17.0"	24°17'5.50"	58	1 800	1 650	26.2	28.4
B	2000	117°33'27.4"	24°17'42.7"	60	1 125	770	24.5	39.5
C	2005	117°33'41.3"	24°17'56.3"	65	1 125	780	28.6	27.8
D	2002	117°33'21.4"	24°17'51.8"	58	1 125	375	27.8	32.2
E	2003	117°33'37.4"	24°17'58.6"	80	1 125	870	29.8	27.4
F	2002	117°33'35.5"	24°17'32.4"	55	1 125	765	31.5	34.3

A: 尾巨桉; B: 厚荚相思; C: 黑木相思; D: 卷荚相思; E: 大叶相思; F: 马占相思。下图同。

A: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*; B: *Acacia crassicaarpa*; C: *A. melanoxylon*; D: *A. cincinnata*; E: *A. auriculiformis*; F: *A. mangium*. The same is following Figures.

1.4 方法

土壤化学性质的测定 土壤 pH 值采用水浸提电位法(水土比 2.5 : 1); 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 采用间断元素化学分析仪测定(意大利, SmartChem 200 型); 土壤速效磷(AP)、全磷(TP)、全钾(TK)采用电感耦合等离子体发射光谱仪(美国, OPTIMA 8000 型); 土壤速效氮(AN)含量的测定采用碱解扩散法; 土壤全碳(TC)与全氮(TN)采用元素分析仪测定(Elementar vario EL III)。

土壤酶活性的测定 土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定, 以 μg/(g·d)表示^[7]; 蔗糖酶、纤维素酶、淀粉酶活性采用 3,5-二硝基水杨

酸比色法测定, 以 mg/(g·d)表示^[7]; 酸性磷酸酶用对硝基苯磷酸苯二钠比色法测定, 以 nmol/(g·d)表示^[7]; 几丁质酶采用对二甲氨基苯甲醛比色法测定, 以 mg/(g·d)表示^[7]; 过氧化氢酶采用比色法测定, 以 μmol/(g·d)表示^[10]; 芳基硫酸酯酶采用对硝基酚硫酸盐比色法, 以 μmol/(g·d)表示。

1.5 数据处理

采用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析。采用双因素方差分析法研究林分类型和土层深度对土壤养分的影响, 采用单因素方差分析和 Duncan 法检验林分类型对土壤酶的影响, 采用 Pearson 相关分

析法分析土壤酶与土壤养分的相关性,以 $P < 0.05$ 表示差异显著。应用 Canoco for Windows 5.0 软件对土壤酶活性和土壤养分进行趋势对应分析(DCA),计算第一排序轴的梯度值,梯度最大值 < 3 时选择冗余分析(RDA)。

2 结果和分析

2.1 引种相思类树种对土壤养分的影响

从表 2 可知,林分类型、土层深度及其交互作用对土壤全 C、全 N 和 NO_3^- -N 含量的影响均达显著水平,且林分类型、土层深度的影响均大于两者的交互作用。林分类型、土层深度对 NH_4^+ -N、速效 N、速效 P 和全 P 含量的影响显著,且林分类型的影响大于土层深度,而两者的交互作用影响不显著。对于土壤 pH 和全 K,林分类型、林分类型 \times

土层深度的交互作用对其影响显著,而土层深度对其影响不显著。总体而言,对于有效养分而言,林分类型的影响大于土层深度的影响。

从图 1 可知,除厚荚相思林外(4.99),其余 4 种相思林(5.38~5.45)土壤的平均 pH 值均高于尾巨桉林(5.30),其中 0~10cm 土层的 pH 均低于桉树林,而 40~60 cm 土层的 pH 值均显著高于尾巨桉林($P < 0.05$)。从图 2 可知 5 种相思林 20~40 cm 土层的 TC 和 TN 含量均高于尾巨桉林,说明相思林对土壤 C、N 的改良作用主要集中在中层土壤。卷荚相思林和马占相思林各土层的 TP 含量与尾巨桉林差异不显著,其余 3 种相思林 10~20、20~40 和 40~60 cm 土层的 TP 含量均显著低于尾巨桉林($P < 0.05$); 5 种相思林各土层的 TK 含量均显著低于尾巨桉林($P < 0.05$),说明相思林对土壤 TP 和 TK 不具有改良作用。

表 2 林分类型和土壤深度对土壤养分的双因子方差分析

Table 2 Two-way ANOVA analysis of forest type and soil depth on soil nutrient contents

因子 Factor	变异来源 Variation source	平方和 Sum of square	df	均方和 Mean sum of square	F
pH	林分类型 Forest type (F)	1.78	5	0.36	8.13***
	土层深度 Soil depth (D)	0.21	3	0.07	1.60
	F \times D	2.81	15	0.19	4.27***
TC	林分类型 Forest type (F)	147.48	5	29.50	39.28***
	土层深度 Soil depth (D)	653.95	3	217.98	36.76***
	F \times D	187.68	15	12.51	2.25*
TN	林分类型 Forest type (F)	0.89	5	0.18	4.24**
	土层深度 Soil depth (D)	6.22	3	2.07	49.58***
	F \times D	1.76	15	0.12	2.81**
TP	林分类型 Forest type (F)	3 899.92	5	779.98	29.82***
	土层深度 Soil depth (D)	1 188.54	3	396.18	15.15***
	F \times D	447.50	15	29.83	1.14
TK	林分类型 Forest type (F)	248.88	5	49.78	1 651.77***
	土层深度 Soil depth (D)	0.17	3	0.06	1.83
	F \times D	1.04	15	0.07	2.30*
NH_4^+ -N	林分类型 Forest type (F)	88.50	5	17.70	102.76***
	土层深度 Soil depth (D)	52.12	3	17.37	100.87***
	F \times D	1.56	15	0.10	0.61
NO_3^- -N	林分类型 Forest type (F)	60.87	5	12.17	1 074.88***
	土层深度 Soil depth (D)	1.78	3	0.59	52.34***
	F \times D	0.40	15	0.03	2.38*
AN	林分类型 Forest type (F)	147.38	5	29.48	177.45***
	土层深度 Soil depth (D)	74.57	3	24.86	149.64***
	F \times D	1.94	15	0.13	0.78
AP	林分类型 Forest type (F)	1.24	5	0.25	619.72***
	土层深度 Soil depth (D)	0.05	3	0.02	45.29***
	F \times D	0.01	15	0.01	0.41

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

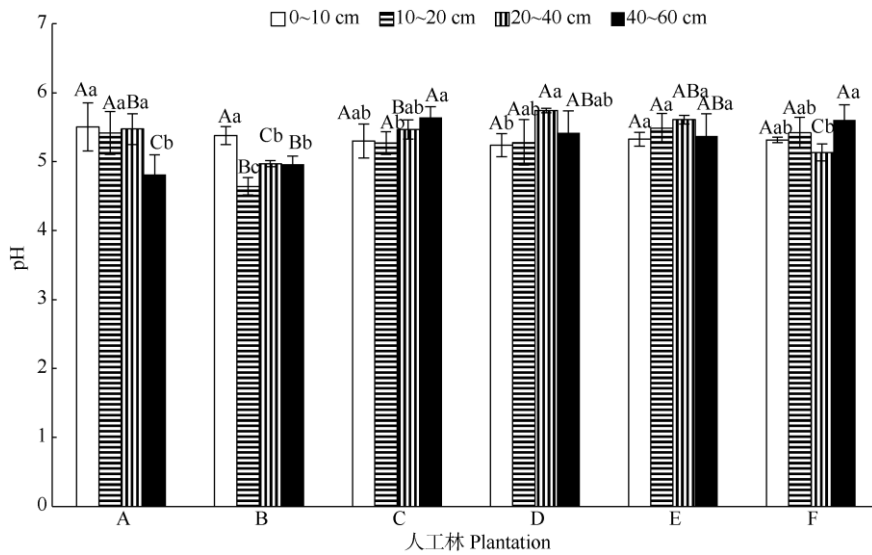


图 1 相思林和尾巨桉林的土壤 pH。柱上不同小写和大写字母分别表示同一林分类型不同土层和同一土层不同林分类型间差异显著(P<0.05)。下图同。
Fig. 1 Soil pH of *Acacia* and *E. urophylla* × *E. grandis* plantations. Different small and capital letters upon column indicated significant differences among different soil depth at the same stand type and different stand types at the same soil layer at 0.05 level, respectively. The same is following Figures.

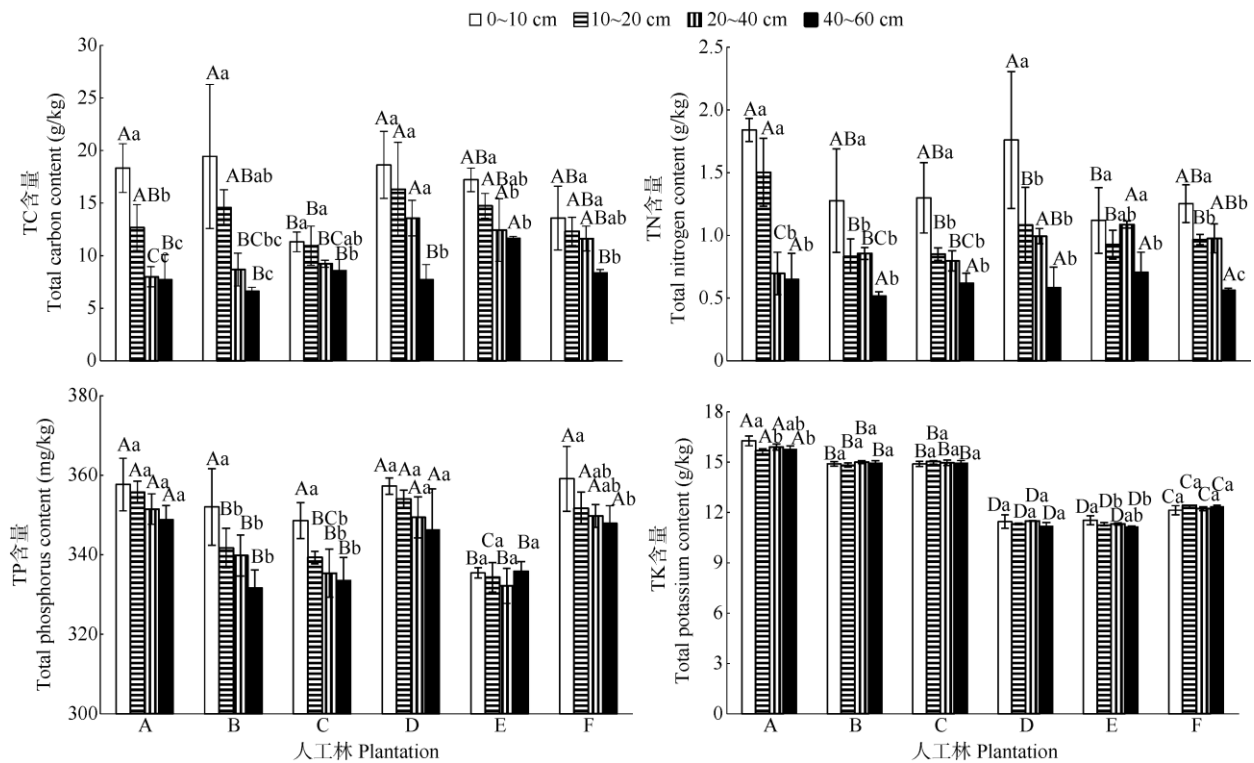


图 2 相思林和尾巨桉林土壤的全量养分含量
Fig. 2 Soil total nutrient contents of *Acacia* and *E. urophylla* × *E. grandis* plantations

由图 3 可知, 黑木相思林、卷荚相思林和马占相思林各土层的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 AN 含量显著高于尾巨桉林($P < 0.05$), 5 种相思林各土层的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均显著高于尾巨桉林($P < 0.05$), 厚荚相思林、黑木相思林和马占相思林各土层 AP 含量均显著高于尾

巨桉林($P < 0.05$), 分别高 42.0%、44.5% 和 27.6%, 说明相思林对土壤有效养分具有明显的改良作用。总体而言, 不同林分土壤的全量养分与有效养分具有明显的空间异质性, 表现为随土层深度的增加而降低。

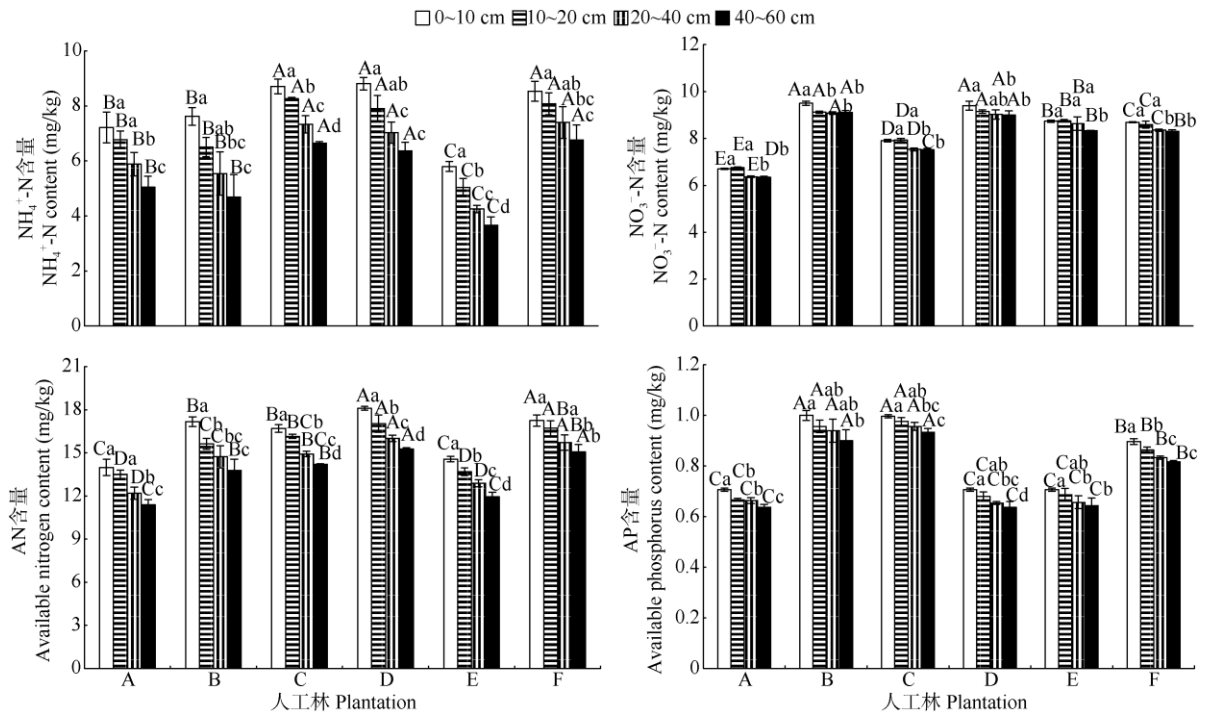


图3 相思林和尾巨桉林土壤的速效养分含量

Fig. 3 Soil available nutrient contents of *Acacia* and *E. urophylla* × *E. grandis* plantations

2.2 引种相思类树种对土壤酶活性的影响

由图4可知,厚荚相思林、黑木相思林和马占相思林的土壤脲酶和蔗糖酶活性显著低于尾巨桉林,而大叶相思林的显著高于尾巨桉林($P < 0.05$),分别提高了99.8%和6.9%。5种相思林的土壤酸性磷酸酶和纤维素酶活性均高于尾巨桉林,但相思林的土壤酸性磷酸酶活性与尾巨桉林差异不显著,而相思林土壤纤维素酶活性显著高于尾巨桉林(马占相思林除外)($P < 0.05$)。厚荚相思林、大叶相思林和马占相思林的土壤几丁质酶和淀粉酶活性均显著低于尾巨桉林,而卷荚相思林则显著高于尾巨桉林($P < 0.05$)。相思林的土壤过氧化氢酶活性均低于尾巨桉林,其中黑木相思林、卷荚相思林和大叶相思林与尾巨桉林差异显著($P < 0.05$)。黑木相思林、大叶相思林和马占相思林的土壤芳基硫酸酯酶均显著高于尾巨桉林($P < 0.05$)。可见,相思林对土壤酶活的影响不仅受土壤酶种类的影响,还与相思林的林分类型密切相关。

2.3 相关性和冗余分析

表3可知,土壤脲酶与土壤AP和TK含量呈显著负相关($P < 0.05$)。土壤蔗糖酶活性与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、AN和AP含量呈显著负相关,土壤纤维素酶活性与

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP和TK含量呈显著负相关($P < 0.05$)。几丁质酶活性与AP含量呈显著负相关,与TN含量呈显著正相关($P < 0.05$)。土壤淀粉酶活性与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著正相关($P < 0.05$)。土壤过氧化氢酶活性与土壤TK含量呈显著正相关,土壤芳基硫酸酯酶与土壤TK含量呈显著负相关($P < 0.05$)。由表4可知,各土壤酶之间存在一定的相关性,脲酶与蔗糖酶、纤维素酶显著正相关,与过氧化氢酶显著负相关($P < 0.05$)。蔗糖酶与纤维素酶和芳基硫酸酯酶显著正相关,与淀粉酶显著负相关($P < 0.05$)。纤维素酶与芳基硫酸酯酶显著正相关($P < 0.05$)。几丁质酶与淀粉酶显著正相关,与过氧化氢酶显著负相关($P < 0.05$)。

以8个酶为响应变量、以9个土壤化学性质指标为解释变量进行冗余分析(图5),结果表明,第1轴与第2轴共解释了土层酶活性变异程度的90.6%,AP($P = 0.002$)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($P = 0.002$)、AN($P = 0.004$)和TK($P = 0.014$)分别解释土壤酶变异的67.2%、19.4%、3.3%和2.3%,说明这4个指标是影响土壤酶活性的主要因子。由环境轴的长度及其与几种酶的夹角可知,土壤几丁质酶与TN、土壤淀粉酶与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、过氧化氢酶与全K呈显著正相关,这与Pearson相关分析的结果基本一致。

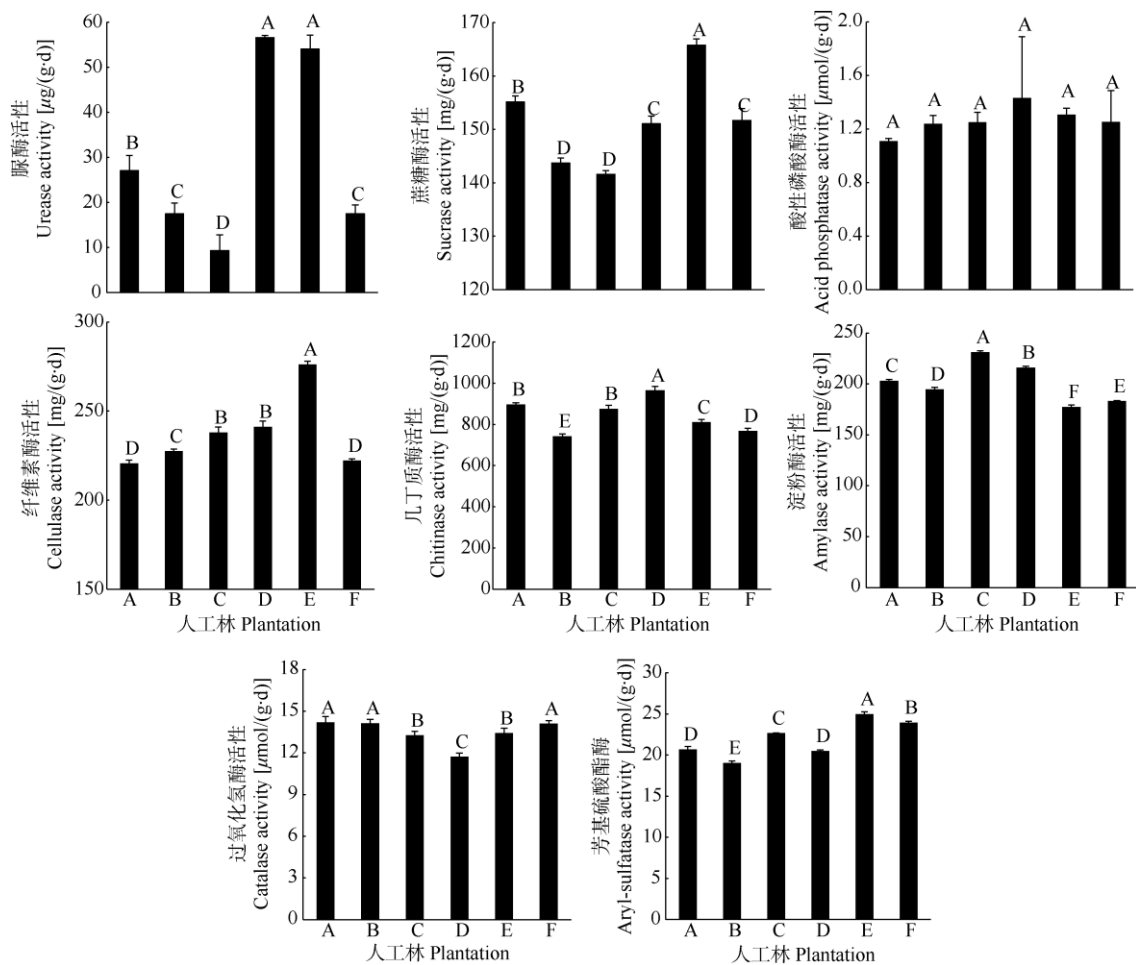


图 4 相思林和尾巨桉林 0~10 cm 的土壤酶活性

Fig. 4 Soil enzyme activities at 0–10 cm layer in *Acacia* and *E. urophylla* × *E. grandis* plantations

表 3 不同林分类型土壤养分与酶活性间的关系

Table 3 Correlation coefficients between soil nutrients and soil enzyme activities among different forest plantations

	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	纤维素酶 Cellulase	几丁质酶 Chitinase	淀粉酶 Amylase	过氧化氢酶 Catalase	芳基硫酸酯酶 Aryl-sulfatase
pH	-0.105	0.093	-0.171	-0.206	-0.087	-0.071	0.266	-0.159
NH ₄ ⁺ -N	-0.373	-0.752**	0.081	-0.588*	0.293	0.629**	-0.358	-0.316
NO ₃ ⁻ -N	0.305	-0.115	0.390	0.272	-0.288	-0.218	-0.382	-0.110
AN	-0.107	-0.621**	0.288	-0.259	0.011	0.312	-0.463	-0.288
AP	-0.828**	-0.801**	-0.085	-0.385	-0.558*	0.241	0.349	-0.171
TC	0.388	0.247	0.146	0.055	0.020	-0.241	0.022	-0.439
TN	0.166	-0.025	-0.148	-0.300	0.503*	0.306	-0.146	-0.426
TP	-0.285	-0.412	-0.205	-0.771**	0.204	0.238	0.020	-0.429
TK	-0.660**	-0.460	-0.326	-0.559*	-0.036	0.372	0.546*	-0.514*

*: P<0.05; **: P<0.01.

3 结论和讨论

本研究中 6 种人工林均在同一采伐迹地上营造, 土壤、气候、地形和林龄基本一致。其中土壤有效养

分[AN (12.76~16.60 mg/kg)、AP (0.67~0.97 mg/kg)] 及 TP (0.33~0.35 mg/kg)含量属于极度缺乏(第 6 级)水平, TN 和 TK 含量也处于最低水平^[11], 说明这些退化山地土壤十分贫瘠, 应根据适地适树原则,

表 4 不同林分类型土壤酶活性之间的关系

Table 4 Correlation coefficients between different soil enzyme activities among different forest plantations

	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	纤维素酶 Cellulase	几丁质酶 Chitinase	淀粉酶 Amylase	过氧化氢 酶 Catalase	芳基硫酸酯酶 Aryl-sulfatase
脲酶 Urease	1							
蔗糖酶 Sucrase	0.707**	1						
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.319	0.040	1					
纤维素酶 Cellulase	0.658**	0.621**	0.279	1				
几丁质酶 Chitinase	0.439	0.034	0.188	0.050	1			
淀粉酶 Amylase	-0.239	-0.662**	0.039	-0.257	0.647**	1		
过氧化氢酶 Catalase	-0.626**	-0.006	-0.325	-0.355	-0.688**	-0.464	1	
芳基硫酸酯酶 Aryl-sulfatase	0.151	0.556*	0.061	0.560*	-0.178	-0.396	0.063	1

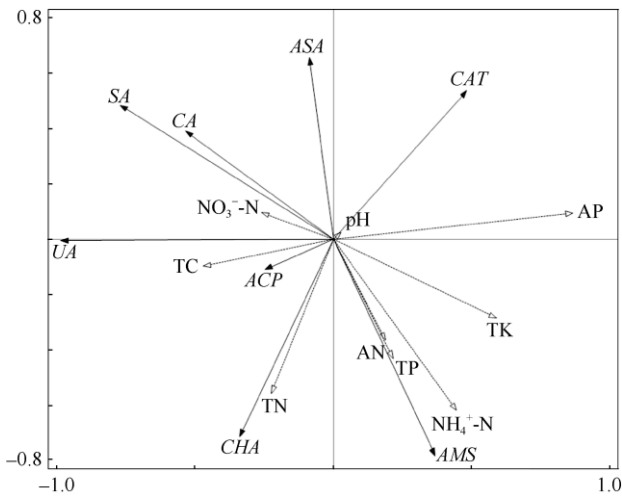
*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

图 5 土壤酶活性与土壤养分相关性的典范冗余分析(RDA)。UA: 脲酶; SA: 蔗糖酶; ACP: 酸性磷酸酶; CA: 纤维素酶; CHA: 几丁质酶; AMS: 淀粉酶; CAT: 过氧化氢酶; ASA: 芳基硫酸酯酶。

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of relationships between soil enzymatic activities and soil nutrients. UA: Urease; SA: Sucrase; ACP: Acid phosphatase; CA: Cellulase; CHA: Chitinase; AMS: Amylase; CAT: Catalase; ASA: Aryl-sulfatase.

选择既具有较高经济价值、又能有力于土壤地力恢复的“环境友好型”树种，并辅以施肥、抚育等措施，提高林地养分有效性。尾巨桉人工林速生和丰产往往导致土壤养分入不敷出，加之过度密植，林分土壤越来越贫瘠。与尾巨桉人工林相比，除厚荚相思林外，其余相思林土壤的 pH 为 5.37~5.45，平均提高了 3.1%~16.7%，对土壤酸化具有一定的缓解作用，与徐伟等^[12]对海南桉树林和马占相思林的研究结果一致。厚荚相思林对土壤 pH 的改良作用不明显，可能与其林龄偏大有关。桉树林土壤酸化明显主要与其根系分泌物含单宁及酸性物质有关^[6]。黑

木相思林、卷荚相思林和马占相思林的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 AN 含量显著高于尾巨桉林，可明显改善土壤 N 水平，这与前人^[13-14]的研究结果一致，一方面与相思类林 N 的年归还量较高有关，另一方面相思类树种(豆科)根瘤具有固氮作用，可以激发土壤 N 的释放及转化^[15]。但不同相思树种的遗传分化和生物学特性有差异，导致对土壤 N 的改良作用不同^[16]。相思林与尾巨桉林的 TP 含量差异不显著，但相思林各土层的 AP 含量普遍高于桉树林，这与薛杨等^[9]对海南北部大叶相思林与桉树林土壤 P 状况的研究结果一致。南方亚热带森林酸性红壤缺 P 现象明显，主要因为 P 来源单一，主要来源于岩石的风化和淋溶作用。

土壤酶能有效反映土壤生物化学强度，受非生物因子(土壤温度、湿度、土壤养分及气候因子)和生物因子(植物群落、土壤微生物和动物)的综合调控。本研究中，大叶相思林的土壤脲酶、蔗糖酶和纤维素酶活性均显著高于尾巨桉林，这与冯慧芳等^[10]的结论一致，说明大叶相思林土壤表层可能存在较高的酶促底物浓度和丰富的微生物类群有利于这 4 种酶活性的提高^[17]。土壤脲酶和蔗糖酶是重要的水解酶，由多种细菌和真菌共同分泌而来，脲酶可促进土壤中酰胺键的水解产生 NH_4^+ ，蔗糖酶能够促进糖类的水解，而纤维素酶与有机残体的分解及有机碳的转化密切相关，影响土壤 C 循环^[18]。潘超美等^[19]对南亚热带赤红壤地区不同人工林土壤微生物特性的研究表明，大叶相思林各季节土壤氨化作用及纤维素分解作用均高于桉树林，这与本研究中大叶相思林的脲酶和纤维素酶活性较高的结果相吻合。土壤酸性磷酸酶主要参与土壤 P 循环，可催化土壤有机磷转化为可被植物利用的无机磷，

增加土壤 P 的生物有效性。本研究区土壤全 P 及 AP 含量极低, 5 种相思林土壤酸性磷酸酶均高于尾巨桉林, 说明我国南方退化山地营造相思林有助于土壤 P 素状况的改善。土壤过氧化氢酶可分解土壤中的过氧化氢, 减少其对植物的毒害作用。本研究中, 相思林土壤过氧化氢酶活性均低于尾巨桉林, 与张浩等^[20]报道香港地区马占相思林土壤过氧化氢酶活性均低于尾叶桉林的结果一致, 但与薛立等^[18]的研究结果相悖, 这可能与土壤的采样季节和林龄不同有关。土壤几丁质酶是与有机碳转化密切相关的酶, 它能催化几丁质(土壤甲壳动物和真菌胞壁的主要成分)的水解, 并能增强植物抵御真菌感染的能力^[7]。本研究中, 卷荚相思林的土壤几丁质酶显著高于尾巨桉林, 说明卷荚相思林有助于土壤有机质的分解及退化地的恢复, 并具有较高的抵御病虫害的能力。土壤芳基硫酸酯酶可以促进有机硫化物脱硫成可被植物吸收的无机态形式^[7], 本研究中黑木相思、大叶相思和马占相思的土壤芳基硫酸酯酶显著高于尾巨桉林, 说明这 3 种相思林分对加快土壤硫元素循环、改善土壤养分具有重要作用。

相关分析及冗余分析结果表明, AP、NO₃⁻-N、AN 和 TK 含量与土壤酶活的相关性较大, 说明土壤肥力、尤其是有效养分含量对土壤酶活性的影响更强烈。本研究中, 土壤脲酶、蔗糖酶、几丁质酶活性与 AP 含量呈显著负相关, 蔗糖酶、纤维素酶与 NH₄⁺-N 呈显著负相关, 脲酶、纤维素酶和芳基硫酸酯酶活性与 TK 含量呈显著负相关。这与李茜等^[7]认为土壤酶活性与肥力呈正相关的结论不一致, 可能是因为本研究仅对 0~10 cm 土层的酶活性和养分含量进行相关分析, 土壤酶活性与土壤养分同样具有明显的空间异质性, 不同土层、不同季节土壤酶活性差异明显^[21]。土壤脲酶活性与 NH₄⁺-N 含量呈负相关、与 NO₃⁻-N 含量呈正相关, 说明土壤脲酶与土壤 NO₃⁻-N 存在协同作用, 促进了土壤中 NH₄⁺-N 向 NO₃⁻-N 的转化, 这与张闯等^[22]的研究结果不一致, 可能与不同森林类型的硝化作用、反硝化作用强度不同, 以及微生物-植物的竞争关系不同有关。Li 等^[23]报道农业生态系统植被演替过程中土壤 NO₃⁻-N 与土壤氮转化过程功能基因(如 *amoA*、*nirK* 和 *nirS* 等)的丰度呈显著相关, 表明土壤 NO₃⁻-N 含量对土壤 N 转化酶具有很好的指示作用。土壤 pH 可以影响微生物组成及活性, 也可以影响底物的构象及酶对土壤的吸附。本研究中不同

林分类型的土壤脲酶、酸性磷酸酶、纤维素酶、几丁质酶、淀粉酶和芳基硫酸酯酶与 pH 呈负相关, 与刘先等^[24]的研究结果不一致, 但与吴际友等^[25]的研究结果吻合。

综上所述, 与尾巨桉人工林相比, 在中国南方退化山地引种相思树对土壤 pH、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、AN 和 AP 具有明显的改良作用, 对土壤 TP、TK 的改良作用不明显。由于自身的生物学特性的差异, 不同相思树人工林对土壤酶活的影响存在一定差异: 大叶相思林显著提高了表层土壤脲酶、蔗糖酶、纤维素酶及芳基硫酸酯酶活性, 卷荚相思林显著提高了土壤几丁质酶和淀粉酶活性。冗余分析表明, AP、NO₃⁻-N、AN 和 TK 是驱动土壤酶活的主要因子, 但不同土壤酶对环境条件响应十分复杂, 未来可利用先进的酶谱原位监测技术开展长期的定位研究, 从不同季节、不同土层深入探讨各林型土壤退化及恢复过程中的酶学机理, 为人工林可持续经营提供依据。土壤肥力的恢复、维持与提高是森林与土壤长期相互作用的结果, 树种生物学特性和营林措施不同, 导致不同林分类型对养分吸收、利用、归还以及土壤酶活的影响差异明显^[26]。鉴于目前中国南方大规模营造杉木、桉树纯林及多代连栽的现状, 笔者认为, 在遵循适地适树原则的基础上, 通过营造杉木-相思林、桉树-相思林等混交林分, 或通过合理轮植(即栽植 1 代杉木或桉树纯林后, 接着栽植 1 代相思林)的方式, 可在一定程度上有利于退化山地土壤肥力的恢复及提高, 实现人工林经济效益和生态效益的双丰收。

参考文献

- [1] YANG Y S, WANG L X, YANG Z J, et al. Large ecosystem service benefits of assisted natural regeneration [J]. *J Geophys Res Biogeo*, 2018, 123(2): 676–687. doi: 10.1002/2017JG004267.
- [2] LIU B, LIU Q Q, DARYANTO S, et al. Responses of Chinese fir and *Schima superba* seedlings to light gradients: Implications for the restoration of mixed broadleaf-conifer forests from Chinese fir monocultures [J]. *For Ecol Manag*, 2018, 419–420: 51–57. doi: 10.1016/j.foreco.2018.03.033.
- [3] YANG L, LIU N, REN H, et al. Facilitation by two exotic *Acacia*: *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* as nurse plants in south China [J]. *For Ecol Manag*, 2009, 257(8): 1786–1793. doi: 10.1016/j.foreco.2009.01.033.
- [4] ZHAO C C, WANG W. Soil nematode community in *Acacia crassi-*

- capa* and *Eucalyptus urophylla* plantations [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23(1): 73–79. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.01.026.
- 赵灿灿, 王伟. 厚荚相思和尾叶桉人工林土壤线虫群落研究 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(1): 73–79. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.01.026.
- [5] LIAO G R, LIN S R, LI S Y, et al. Causes and control of land capacity degeneration of eucalyptus plantations in Leizhou Peninsula [J]. *Soil Environ Sci*, 2002, 11(3): 268–273. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2002.03.012.
- 廖观荣, 林书蓉, 李淑仪, 等. 雷州半岛桉树人工林地力退化的成因与防治措施 [J]. *土壤与环境*, 2002, 11(3): 268–273. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2002.03.012.
- [6] YU F K, HUANG X H, WANG K Q, et al. An overview of ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2009, 17(2): 393–398. doi: 10.3724/SP.J.1011.2009.00393.
- 于福科, 黄新会, 王克勤, 等. 桉树人工林生态退化与恢复研究进展 [J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 393–398. doi: 10.3724/SP.J.1011.2009.00393.
- [7] LI Q, SUN Y N, LIN L, et al. Changes of soil enzyme activities and nutrients across different succession stages of grazing alpine *Kobresia* grassland [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, 30(7): 2267–2274. doi: 10.13287/j.1001-9332.201907.001.
- 李茜, 孙亚男, 林丽, 等. 放牧高寒嵩草草地不同演替阶段土壤酶活性及养分演变特征 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2267–2274. doi: 10.13287/j.1001-9332.201907.001.
- [8] PENG S L, LIU J, LU H F. Characteristics and role of *Acacia auriculiformis* on vegetation restoration in lower subtropics of China [J]. *J Trop For Sci*, 2005, 17(4): 508–525.
- [9] XUE Y, CHEN Y Q, LIU X Z, et al. Comparisons of soil chemical properties under four typical forest stands in northeast Hainan [J]. *Ecol Sci*, 2014, 33(6): 1142–1146. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2014.06.017.
- 薛杨, 陈毅青, 刘宪钊, 等. 海南东北部 4 种典型人工林土壤化学性质研究 [J]. *生态科学*, 2014, 33(6): 1142–1146. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2014.06.017.
- [10] FENG H F, LIU L Y, XUE L. Effects of nitrogen and phosphorus additions and stand density on soil chemical property in *Acacia auriculiformis* stands [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2019, 43(11): 1010–1020. doi: 10.17521/cjpe.2019.0168.
- 冯慧芳, 刘落鱼, 薛立. 氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤化学性质的影响 [J]. *植物生态学报*, 43(11): 1010–1020. doi: 10.17521/cjpe.2019.0168.
- [11] ZHAO Q G. Spatiotemporal Variation, Mechanism and Regulation of Soil Degradation in Red Soil Region of Eastern China [M]. Beijing: Science Press, 2002
- 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] XU W, ZHANG Y P, YANG Z Y, et al. Study on soil properties of *Eucalyptus* plantation in Hainan [J]. *Hunan Agric Sci*, 2019, 51(11): 42–45, 51. doi: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2019.011.012.
- 徐伟, 张玉平, 杨振宇, 等. 海南不同林地土壤性状差异研究 [J]. *湖南农业科学*, 2019, 51(11): 42–45, 51. doi: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2019.011.012.
- [13] HAN J F, YAO Q D, HONG C F, et al. Study on the growth and ecological benefit of mixed stand of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* and *Acacia mangium* × *A. auriculiformis* [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2008, 25(1): 15–18. doi: 10.3969/j.issn.1674-3172.2008.01.004.
- 韩金发, 姚庆端, 洪长福, 等. 巨尾桉、马大相思混交林生长和生态效益研究 [J]. *桉树科技*, 2008, 25(1): 15–18. doi: 10.3969/j.issn.1674-3172.2008.01.004.
- [14] DENG L S, YANG X L, JIANG X, et al. Soil physical and chemical properties of six fast-growing tree species plantations after afforestation for six years [J]. *Guangxi For Sci*, 2019, 48(3): 371–376. doi: 10.3969/j.issn.1006-1126.2019.03.018.
- 邓荔生, 杨秀玲, 蒋霞, 等. 6 种速生树种人工林造林 6 年后土壤理化性质 [J]. *广西林业科技*, 2019, 48(3): 371–376. doi: 10.3969/j.issn.1006-1126.2019.03.018.
- [15] LIN W Q, GAO W, YE G F, et al. Litter nutrient return of different plantations in a coastal sand dune of southern subtropical region [J]. *J For Environ*, 2019, 39(3): 225–231. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2019.03.001.
- 林文泉, 高伟, 叶功富, 等. 南亚热带海岸沙地不同林分凋落物量及养分归还 [J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(3): 225–231. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2019.03.001.
- [16] LU D D, WU B G, WANG X Q, et al. A general review on the research development of *Acacia* spp. [J]. *J Fujian Coll For*, 2004, 24(1): 92–96. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2004.01.023.
- 陆道调, 吴保国, 王希群, 等. 相思树种研究发展综述 [J]. *福建林学院学报*, 2004, 24(1): 92–96. doi: 10.3969/j.issn.1001-389X.2004.01.023.
- [17] HE C, LI Z Y, FANG H X, et al. Dynamic of soil phenolic acids and enzyme activities in pure and mixed stands of *Eucalyptus grandis* × *Europhylla* and *Acacia mangium* plantation [J]. *J W Chin For Sci*, 2017, 46(3): 103–108, 120. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2017.03.017.
- 何春, 李祖毅, 方慧鑫, 等. 巨尾桉、马占相思纯林及混交林土壤酚酸与酶活性的差异 [J]. *西部林业科学*, 2017, 46(3): 103–108, 120. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2017.03.017.

- [18] XUE L, KUANG L G, CHEN H Y, et al. Soil nutrients, microorganisms and enzyme activities of different stands [J]. *Acta Pedol Sin*, 2003, 40(2): 280–285. doi: 10.11766/trxb200103200218.
薛立, 邝立刚, 陈红跃, 等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 280–285. doi: 10.11766/trxb200103200218.
- [19] PAN C M, YANG F, LAN P L, et al. Characteristics of soil microbes in south subtropical lateritic red earth under artificial forests [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 1998, 6(2): 158–165. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.1998.2.012.
潘超美, 杨风, 蓝佩玲, 等. 南亚热带赤红壤地区不同人工林下的土壤微生物特性 [J]. *热带亚热带植物学报*, 1998, 6(2): 158–165. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.1998.2.012.
- [20] ZHANG H, MO L J, CHEN K X, et al. Impact of thinning on physico-chemical properties, soil microorganism biomass, and soil enzyme activities on the season of Hong Kong plantation [J]. *Ecol Environ Sci*, 2016, 25(12): 1937–1944. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.12.007.
张浩, 莫罗坚, 陈葵仙, 等. 香港人工林改造对林分土壤理化性质、土壤微生物生物量及土壤酶活性的季节影响 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(12): 1937–1944. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.12.007.
- [21] LIU J B, CHEN G S, GUO J F, et al. Advances in research on the responses of forest soil enzymes to environmental change [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(1): 110–117. doi: 10.5846/stxb201608011581.
刘捷豹, 陈光水, 郭建芬, 等. 森林土壤酶对环境变化的响应研究进展 [J]. *生态学报*, 2019, 37(1): 110–117. doi: 10.5846/stxb201608011581.
- [22] ZHANG C, ZOU H T, ZHANG X Y, et al. Effects of nitrogen additions on soil hydrolase and oxidase activities in *Pinus elliottii* plantations [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27(11): 3427–3434. doi: 10.13287/j.1001-9332.201611.016.
张闯, 邹洪涛, 张心昱, 等. 氮添加对湿地松林土壤水解酶和氧化酶活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3427–3434. doi: 10.13287/j.1001-9332.201611.016.
- [23] LI D D, ZHANG X Y, GREEN S M, et al. Nitrogen functional gene activity in soil profiles under progressive vegetative recovery after abandonment of agriculture at the Puding Karst Critical Zone Observatory, SW China [J]. *Soil Biol Biochem*, 2018, 125: 93–102. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.07.004.
- [24] LIU X, SUO P H, DU D J, et al. Soil carbon and nitrogen transformed enzyme activities in continuously cultivated Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations and their correlations with soil physicochemical factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40(1): 274–256. doi: 10.5846/stxb201811252551.
刘先, 索沛衡, 杜大俊, 等. 连栽杉木人工林参与土壤碳氮转化过程酶活性及其与土壤理化因子的相关性 [J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 274–256. doi: 10.5846/stxb201811252551.
- [25] WU J Y, YE D B, WANG X J. Soil enzyme activity and its correlation with soil physical and chemical properties in suburban forests in Changsha City [J]. *J NE For Univ*, 2010, 38(3): 97–99. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2010.03.029.
吴际友, 叶道碧, 王旭军. 长沙市城郊森林土壤酶活性及其与土壤理化性质的相关性 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(3): 97–99. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2010.03.029.
- [26] PAN F J, ZHANG W, LIANG Y M, et al. Increased associated effects of topography and litter and soil nutrients on soil enzyme activities and microbial biomass along vegetation successions in karst ecosystem, southwestern China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 25: 16979–6990. doi: 10.1007/s11356-018-1673-3.