



不同植被恢复类型对土壤化学性质、酶活性以及真菌群落的影响

向旺, 韦振道, 任世奇, 伍琪, 朱慧

引用本文:

向旺, 韦振道, 任世奇, 等. 不同植被恢复类型对土壤化学性质、酶活性以及真菌群落的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(1): 45–52.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4972>

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>

地被植物对广东常绿阔叶林土壤养分的指示作用

Indicative Effect of Ground Vegetation on Soil Nutrient Status in Evergreen Broad-leaved Forest of Guangdong
热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 115–123 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4105>

金马河温江段河岸带不同生境植物物种多样性与土壤理化性质的动态变化

Dynamic Changes in Plant Diversity and Soil Physical and Chemical Properties in Different Habitats in Wenjiang Section of Jinma River
热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 1–8 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4237>

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>

西沙群岛主要岛屿不同植被类型对土壤理化性质的影响

Effect of Vegetation Types on Soil Physicochemical Property in East Island and Yongxing Island of Xisha Islands
热带亚热带植物学报. 2019, 27(4): 383–390 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4013>

向下翻页, 浏览PDF全文

不同植被恢复类型对土壤化学性质、酶活性以及真菌群落的影响

向旺, 韦振道, 任世奇*, 伍琪, 朱慧

(广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁桉树森林生态系统广西野外科学观测研究站, 南宁 530002)

摘要: 为明确不同植被恢复类型(人工恢复与自然恢复)下的土壤养分及其真菌群落特征, 揭示人工恢复与自然恢复的土壤肥力差异, 对南宁桉树野外站内初始立地条件基本一致的 9 a 生尾巨桉纯林(*Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*, EU)、格木纯林(*Erythrophleum fordii*, EF)和丢荒自然恢复灌木林(SH)的土壤化学指标、酶活性和真菌群落多样性及组成进行测定, 分析不同植被恢复类型对土壤化学指标、酶活性和真菌群落的影响, 并探究真菌群落与土壤化学性质和酶活性的相关性。结果表明, 相对于 SH, EU 和 EF 的全氮(TN)、速效氮(AN)和有机质(OM)含量显著增加, 而 EU 和 EF 的速效磷(AP)含量显著降低。此外, 与 SH 相比, EU 和 EF 的过氧化氢酶(CAT)和脲酶(UE)活性显著增加, 酸性磷酸酶活性(ACP)显著降低。EU 和 EF 的担子菌门(Basidiomycota)和球囊菌门(Glomeromycota)相对丰度显著高于 SH。然而, EU 和 EF 的这些土壤指标均没有显著差异(除球囊菌门外)。此外, 担子菌门和球囊菌门的相对丰度均与 TN、AN、CAT 和 OM 显著正相关, 而子囊菌门(Ascomycota)的相对丰度则与 AP 和 ACP 呈显著正相关。综合考虑土壤养分及真菌群落特征, 该研究区内植被恢复适合人工恢复, 但种植桉树和格木纯林之间的差异较小。

关键词: 土壤养分; 土壤酶活性; 真菌群落; 植被恢复

doi: 10.11926/jtsb.4972

CSTR: 32235.14.jtsb.4972

Effect of Different Vegetation Restoration Types on Soil Chemical Properties, Enzyme Activities and Fungal Communities

XIANG Wang, WEI Zhendao, REN Shiqi*, WU Qi, ZHU Hui

(Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Nanning Eucalypt Plantation Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi, Nanning 530002, China)

Abstract: To clarify the soil nutrient and fungal community characteristics under different vegetation restoration types (artificial restoration and natural restoration), and to reveal the differences in soil fertility between artificial and natural restoration, the soil chemical indicators, enzyme activities, and fungal community diversity and composition of 9-year-old pure stands of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* (EU), *Erythrophleum fordii* (EF), and abandoned natural restoration shrubland (SH) with basically the same initial site conditions in the Nanning Eucalyptus Field Station were measured. The effects of different vegetation restoration types on soil chemical indicators, enzyme activities, and fungal communities were analyzed, and the correlations between fungal communities and soil chemical properties and enzyme activities were explored. The results showed that compared with SH, the total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), and organic matter (OM) contents of EU and EF

收稿日期: 2024-09-28 接受日期: 2025-01-09

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划项目(2012BAD01B0401); 国家重点研发计划项目(2023YFD2201004); 广西重点研发计划项目(AB23026010); 广西科技重大专项(AA23062055)资助

This work was supported by the National Science and Technology Projects in the Rural Field during the 12th Five-Year Plan Period (Grant No. 2012BAD01B0401), the National Key Research and Development Program (Grant No. 2023YFD2201004), the Project for Key Research and Development in Guangxi (Grant No. AB23026010), and the Project for Major Science and Technology in Guangxi (Grant No. AA23062055).

作者简介: 向旺(1996 年生), 硕士, 主要从事森林生态研究。E-mail: 1797014880@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rensq_20220901@163.com

significantly increased, while the available phosphorus (AP) content of EU and EF significantly decreased. In addition, compared with SH, the catalase (CAT) and urease (UE) activities of EU and EF significantly increased, while the acid phosphatase (ACP) activity significantly decreased. The relative abundances of Basidiomycota and Glomeromycota in EU and EF were significantly higher than those in SH. However, there were no significant differences in these soil indicators between EU and EF (except for Glomeromycota). In addition, the relative abundances of Basidiomycota and Glomeromycota were significantly positively correlated with TN, AN, CAT, and OM, while the relative abundance of Ascomycota was significantly positively correlated with AP and ACP. Considering the soil nutrients and fungal community characteristics comprehensively, artificial restoration is suitable for vegetation restoration in this study area, but the differences between planting pure stands of EU and EF are relatively small.

Key words: Soil nutrient; Soil enzyme activity; Fungal community; Vegetation restoration

土壤是陆地生态系统的重要组成部分,土壤理化性质、酶活性以及微生物群落的综合表现反映了土壤的肥力状况^[1]。土壤理化性质和酶活性受到土壤微生物群落和植物的调控,与此同时,土壤理化性质和酶活性的变化反过来又直接影响微生物的群落特征和植物生长^[2]。植树造林和自然恢复模式是林地恢复更新的主要方式^[3],但土壤养分含量及其微生物群落特征对这 2 种植被恢复模式的响应不同,并且不同植被恢复模式对土壤肥力特征的影响尚未得出一致结论,因此探究土壤理化性质、酶活性以及真菌群落对不同植被恢复类型的响应具有重要意义,这将有助于明确人工林营造与自然恢复模式下的土壤肥力和微生物群落差异,以期对植被恢复策略制定提供科学参考。

植被恢复类型通过改变土壤理化性质、酶活性以及微生物群落等特征进而影响土壤肥力特性,并且不同植被恢复类型对土壤养分含量、酶活性和微生物群落特征的影响方向和程度存在差异^[4]。相当一部分研究表明^[5],相对于人工恢复,自然恢复模式由于丰富的物种组成和复杂的群落结构而具有更高的土壤养分含量和酶活性。然而,杨君珑等^[6]在植被恢复模式(6 种人工恢复模式和自然恢复模式)对弃耕地土壤养分和酶活性的影响中表明,相对于自然恢复模式,合理配置人工林恢复模式有助于提高土壤养分含量及土壤磷酸酶和脲酶活性,这是因为人工合理构建植物群落有助于改变森林生态群落结构和林内凋落物类型,从而促进土壤有机质输入增加土壤养分含量。Beland 等^[7]在黄土高原自然草地恢复和人工造林恢复的研究中指出,自然恢复和人工造林模式下土壤优势真菌种类均为子囊菌门(Ascomycota)和担子菌门(Basidiomycota),土壤

优势细菌种类均为放线菌门(Actinobacteria)、变形菌门(Proteobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteria),但人工造林模式下土壤真菌多样性指数高于自然恢复,而自然恢复模式下土壤细菌多样性指数高于人工造林模式。此外,刘亚博等^[8]的研究表明,不同小流域由于环境条件的不同导致土壤生态效益具有区域性差异,植被恢复方式的优劣受小流域区域环境条件的影响,其中含水量较高区域植被更新适合自然恢复,而干旱环境区域则更加适合人工恢复。由此可见,植被恢复类型、区域环境条件等因素的差异导致了研究结果的不确定性。因此,鉴于不同区域环境条件和自然恢复植被物种的差异性,有必要探究区域范围内植被恢复类型对土壤特征的影响,这将有助于为特定区域范围植被恢复策略制定与修订提供理论依据。

桉树(*Eucalyptus* spp.)在我国亚热带地区广泛种植,其木材是重要的工业原材料^[9]。截至 2020 年,中国桉树人工林种植面积已超过 $5.40 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[10],是亚热带地区人工林的最主要组成部分,尤其是在广西地区,据报道,广西桉树人工林已超过 $2.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$,位居全国第一。格木(*Erythrophloeum fordii*)属于苏木科(Caesalpinaceae)格木属常绿阔叶乔木树种,作为广西地区的优良珍贵乡土树种,常被用于营造混交林或纯林,具有重要的应用价值。此外,采伐迹地自然更新属广西常见植被恢复类型之一。因此,鉴于这 3 种植被恢复类型在广西地区的普遍性及其重要地位,本研究以广西南宁桉树野外站的这 3 种植被恢复类型为研究对象,探究不同植被恢复模式对土壤养分含量、酶活性以及真菌群落特征的影响,以期对植被恢复模式选择提供理论参考,这将对林地高效恢复更新具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于南宁桉树森林生态系统广西野外科学观测研究站(107°59'~108°18' E, 22°28'~22°46' N)。野外站以丘陵地貌为主, 坡度 5°~25°, 平均坡度 15°, 平均海拔 185 m。属于亚热带季风气候, 年日照时数 1 800 h 以上, 年均气温 21 °C~22 °C, 年活动积温 7 500 °C, 年降雨量 1 200~1 300 mm, 年均相对湿度 79%。土壤以砖红壤为主, 少量紫色土和棕色石灰土, 平均含沙量 23%, 砂页岩母质, 土壤酸度较高, 肥力中等。林下常见植被包括桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、越南悬钩子(*Rubus cochinchinensis*)、火炭母(*Persicaria chinensis*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、余甘子(*Phyllanthi fructus*)、毛果算盘子(*Glochidion eriocarpum*)、铁芒箕(*Gleichenia linearis*)、弓果黍(*Cynotococcum patens*)、华南鳞盖蕨(*Microlepia hancei*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、半边旗(*Pteris semipinnata*)、金茅(*Eulalia speciosa*)、野香茅(*Cymbopogon goeringii*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)等。

1.2 样地设置与土壤样品采集

2010年秋季采用皆伐处理的方式采伐桉树1代植苗林, 2011年在桉树采伐迹地的同一面坡上设计不同植被恢复模式(人工林营造和自然恢复)的对比试验。试验地采用块状布局种植尾巨桉(*Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*)、格木以及采伐迹地丢荒自然恢复的植被恢复模式, 尾巨桉和格木纯林于2012年3月造林, 株行距为2 m×3 m。2020年6月8日, 选择保存良好的尾巨桉纯林、格木纯林和丢荒自然恢复灌木林作为研究对象。在各种植被恢复类型中, 分上坡、中坡和下坡各设置1个20 m×20 m的固定样方, 每个固定样方之间相隔30~50 m, 3种植被恢复模式总计9个固定样方。在每个样方中按上坡、中坡和下坡进行采样, 在每个坡位沿等高线水平选择3个采样点, 每个样方共选择9个采样点。在每个采样点去除土壤凋落物和腐殖质后的0~20 cm土层用土钻随机钻取1个土芯, 每个样方共9个土芯, 除去粗砂、植物根系后将9个土芯混合成1个土壤样品, 每个林分共获得3个混合土壤样品。3种植被类型共计获得9个混合土壤样品。从

每个混合样品中, 将约5 g新鲜土壤置于10 mL无菌离心管中, 并立即浸入液氮中带回实验室置入-80 °C超低温冰箱中, 用于测定土壤真菌群落多样性和组成。将每个混合土样的另外约500 g新鲜土壤带回实验室储存于4 °C冰箱用以测定土壤酶活性。酶活性测定结束后将剩余的新鲜土壤风干并用于测定土壤化学性质。

1.3 方法

1.3.1 土壤理化指标

pH采用pH计(土壤水比1:2.5)测定^[11]; 土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸盐比色法测定^[12]; 总氮(TN)通过凯氏定氮法^[13]测定; 总磷(TP)通过碱熔-钼锑抗分光光度法^[14]测定; 总钾(TK)采用碱熔火焰分光光度法^[15]测定; 速效氮(AN)、速效磷(AP)和速效钾(AK)分别采用碱解扩散法、分光光度法和火焰光度法^[15]测定。

1.3.2 土壤酶活性

过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外分光光度法测定^[16]; 酸性磷酸酶(ACP)活性采用对硝基苯磷酸二钠比色法测定^[17]; 脲酶(UE)活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定^[18]; 蔗糖酶(SC)活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[19]。

1.3.3 土壤真菌DNA提取与测序

使用PowerSoil试剂盒(美国)从新鲜土壤样本中提取总基因组DNA, 并利用ITS2引物进行扩增(5'-GCATCGATGAAGAACGCAGC-3'; 5'-TCCTCCGCTTTATTGATGC-3')。测序过程参照Wu等^[20]的方法。

1.4 数据的统计分析

在进行显著性差异分析之前, 对所有的土壤指标进行正态性检验(Shapiro-Wilk test; $\alpha=0.05$)和方差齐性检验(Bartlett test; $\alpha=0.05$), 并对部分土壤指标进行了数据转换以满足残差正态性。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和Duncan检验($P<0.05$)不同植被类型之间土壤化学性质、酶活性和土壤真菌群落多样性和组成的差异。采用主坐标分析(PCoA)不同植被类型之间的真菌群落差异, 并应用置换多元方差分析(PERMANOVA)检验不同植被类型之间的真菌群落组成。采用冗余分析(RDA)不同植被类型的优势真菌门与化学性质的相关性, 为了避免多重共线性导致解释变量偏差, RDA分析中已排除方差膨胀因子(VIF)≥10的变量。本文的数据统计分析均在SPSS 22中进行。

2 结果和分析

2.1 土壤化学性质差异

不同植被恢复类型的土壤化学特征差异结果表明(图 1), pH、TP 和 TK 含量在 3 种植被恢复类型之间均没有显著差异; 而丢荒自然恢复灌木林(SH)的 AP 和 AK 含量显著高于桉树(EU)和格木纯林(EF) ($P<0.05$), SH 的 AP 较 EU 和 EF 分别增加

40.05%和 47.13%, AK 较 EU 和 EF 分别增加 66.57%和 67.58%, 但这 2 个土壤化学指标在 EU 和 EF 之间均没有显著差异。此外, SH 的 TN、AN 和 OM 含量显著低于 EU 和 EF ($P<0.05$), TN 较 EU 和 EF 分别降低 42.85%和 21.42%, AN 较 EU 和 EF 分别降低 46.78%和 35.32%, OM 较 EU 和 EF 分别降低 27.55%和 24.48%, 但 EU 和 EF 间的这 3 个土壤理化指标没有显著差异。

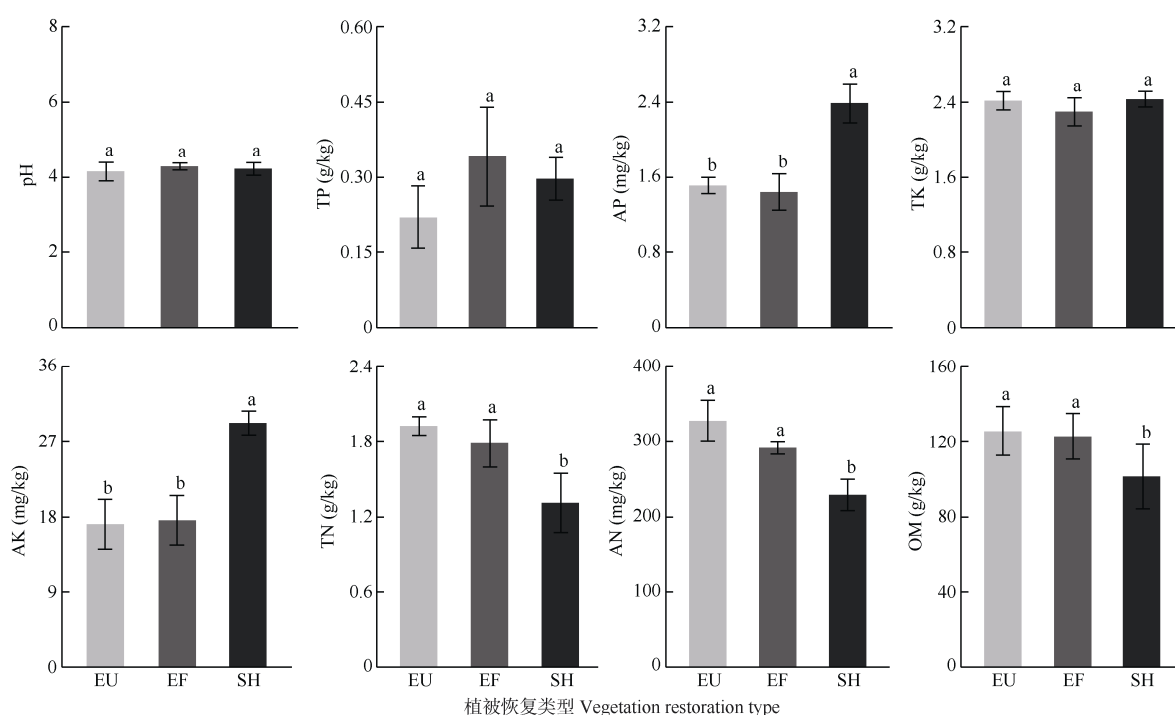


图 1 不同植被恢复类型的土壤化学性质。EU: 桉树纯林; EF: 格木纯林; SH: 丢荒自然恢复灌木林; TP: 全磷; AP: 有效磷; TK: 全钾; AK: 有效钾; TN: 全氮; AN: 有效氮; OM: 有机质。柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Fig. 1 Soil chemical properties of different vegetation restoration types. EU: *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*; EF: *Erythrophloeum fordii*; SH: Naturally restored shrubland; TP: Total phosphorus; AP: Available phosphorus; TK: Total potassium; AK: Available potassium; TN: Total nitrogen; AN: Available nitrogen; OM: Soil organic matter. Different letters upon column indicate significant differences at 0.05 level. The same below.

2.2 土壤酶活性差异

由不同植被恢复类型的土壤酶活性差异结果可见(图 2), 3 种植被恢复类型的土壤蔗糖酶(SC)活性均没有显著差异。此外, EU 和 EF 的酸性磷酸酶(ACP)活性显著低于 SH ($P<0.05$), 过氧化氢酶(CAT)和脲酶(UE)活性显著高于 SH ($P<0.05$), 但 EU 和 EF 间的这 3 种土壤酶活性均没有显著差异。这表明 EU 和 EF 间的土壤酶活性差异较小, 但二者的土壤酶活性均与 SH 差异显著。

2.3 土壤真菌群落差异

真菌群落多样性指数表明(图 3), 3 种植被恢复

模式真菌群落多样性指数均无显著性差异, 这说明 3 种植被恢复模式真菌群落差异较小。

优势真菌门相对丰度表明(表 1), 不同植被恢复类型中最丰富的门均为子囊菌门、担子菌门、球囊菌门和接合菌门(平均相对丰度 $>1\%$), 平均占总真菌群落的 95.43%。相对于 EU 和 EF, SH 的担子菌门相对丰度显著降低($P<0.05$), 但 EU 和 EF 没有显著差异。SH 的球囊菌门相对丰度显著低于 EU 和 EF ($P<0.05$), 分别低于 33.33%和 64.10%; EU 的相对丰度显著低于 EF ($P<0.05$), 低于 46.15%。其他优势真菌门在不同植被恢复类型之间均无显著差异。进

一步将真菌群落组成进行主坐标分析(PCoA), 结果表明(图 4), 前两轴解释了总方差的 57.73% (分别为 37.28%和 20.45%)。结合置换多元方差分析(PERM-ANOVA)结果表明, EU 和 EF 的真菌群落组成均与 SH 差异显著, 但 EU 和 EF 没有显著差异。这表明 EU 和 EF 的真菌群落组成差异较小, 但二者均与 SH 差异较大。

2.4 土壤化学指标与优势真菌门的相关性

冗余分析(RDA)结果表明(图 5), 前两轴总计解释总方差贡献率的 66.14% (分别为 44.99%和 21.15%)。其中, EU 和 EF 均与 SH 明显分离, 表明 EU 和 EF

均与 SH 差异明显。EU 和 EF 的担子菌门和球囊菌门相对丰度均与 TN、AN、CAT 和 OM 显著正相关, 而 SH 的子囊菌门相对丰度则与 AP 和 ACP 显著正相关。

3 讨论和结论

3.1 不同植被恢复类型土壤化学指标和酶活性变化

在本研究中, SH 的 TN、AN 和 OM 含量均显著低于 EU 和 EF, 这表明 SH 的土壤肥力低于 EU 和 EF。Peng 等^[21]研究表明, 植树造林比自然演替

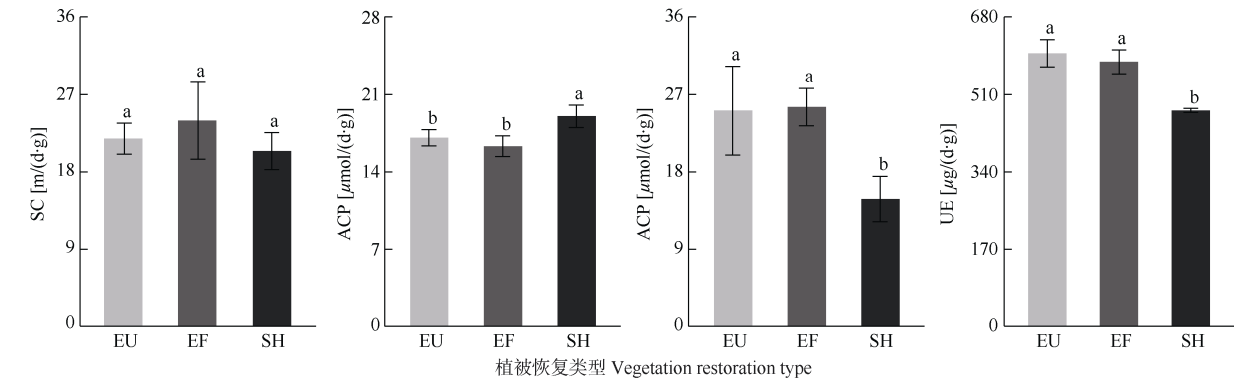


图 2 不同植被类型的土壤酶活性。SC: 土壤蔗糖酶; ACP: 土壤酸性磷酸酶; CAT: 土壤过氧化氢酶; UE: 土壤脲酶。
Fig. 2 Soil enzyme activities of different vegetation types. SC: Soil sucrose; ACP: Acid phosphatase; CAT: Soil catalase; UE: Soil urease.

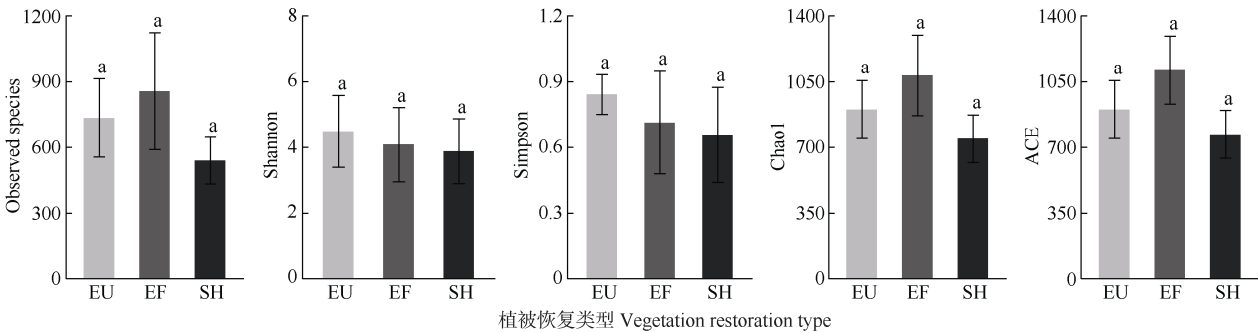


图 3 真菌群落多样性指数
Fig. 3 Diversity index of fungal community

表 1 不同植被恢复类型的相对丰度排名前 5 真菌门

林分类型 Stand type	子囊菌门 Ascomycota	担子菌门 Basidiomycota	球囊菌门 Glomeromycota	接合菌门 Zygomycota	壶菌门 Chytridiomycota
EU	0.756±0.023a	0.167±0.010a	0.021±0.005b	0.014±0.008a	0.001±0.001a
EF	0.765±0.017a	0.142±0.007a	0.039±0.009a	0.012±0.004a	0.001±0.001a
SH	0.825±0.020a	0.098±0.004b	0.014±0.001c	0.010±0.007a	0.001±0.000a

同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。
Data followed different letters indicate significant differences at 0.05 level.

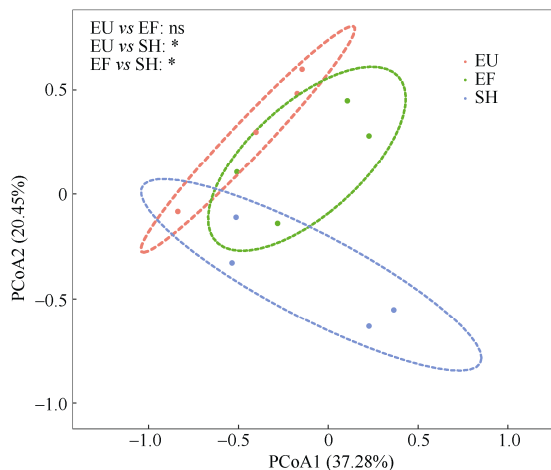


图 4 真菌群落主坐标分析。*: $P < 0.05$

Fig. 4 Principal coordinate analysis of fungal communities. *: $P < 0.05$

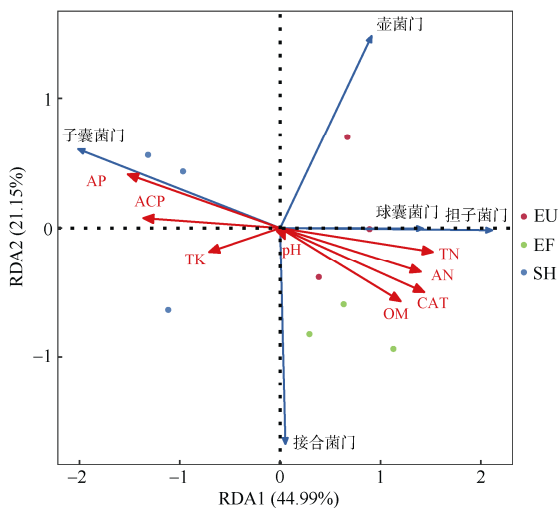


图 5 相对丰度排名前 5 真菌门与土壤化学指标的相关性

Fig. 5 Correlation of the top 5 fungal phyla and soil chemical indicators

具有更多的凋落物生物量和地下生物量输入,因此植树造林对土壤碳、氮的固存能力强于自然丢荒恢复更新杂灌林,因为地表凋落物生物量和活体生物量被认为是影响表层土壤碳、氮变化的主要因素,较高的凋落物生物量输入会使土壤产生较高的土壤有机质含量^[22-23],这些结果支撑了 SH 的上述土壤指标含量低于 EU 和 EF。SH 的 AP 和 AK 含量显著高于 EU 和 EF,但 EU 与 EF 之间的这 2 个土壤指标没有显著差异。这主要与格木和尾巨桉对速效养分的更高需求及其在植物体中的固定有关^[24]。然而,尽管桉树和格木在生物学特性上存在差异,但本研究中这 2 种植被类型的林下植被种类几乎没有差异,这可能导致了 EU 和 EF 向土壤中的养分输入与归还差异较小,有助于帮助解释 EU 与 EF 之间

AP 和 AK 含量差异较小。

土壤酶活性反映了各种生物化学过程的趋势和强度^[25]。在本研究中,EU 和 EF 的过氧化氢酶和脲酶活性显著高于 SH,但 EU 和 EF 的这 2 种酶活性没有显著差异。过氧化氢酶和脲酶活性与土壤有机质和全氮含量显著正相关^[26],这是因为脲酶能够将土壤氮水解成氨,而过氧化氢酶是一种作为好氧微生物的指标,反映土壤中的氧化还原能力,从而过氧化氢酶的活性与好氧微生物的数量和土壤肥力密切相关。因此,本研究中不同林分类型之间的 TN、AN 和 OM 含量有助于解释过氧化氢酶和脲酶活性的变化。酸性磷酸酶(ACP)活性与土壤磷含量密切相关,能够反映土壤微生物对土壤磷素的活化能力^[27]。在本研究中,SH 的 ACP 活性显著高于 EU 和 EF,这可能与 SH 的 AP 含量显著高于 EU 和 EF 有关。

3.2 不同植被恢复类型真菌群落差异

本研究表明,不同植被类型中的土壤优势真菌群落均为子囊菌门、担子菌门、球囊菌门和接合菌门。这与人^[28-30]的研究结果类似,体现了这些真菌群落在森林土壤中的优势地位。尽管本研究中不同植被恢复类型的真菌群落多样性指数均无显著差异,但 PCoA 分析结果表明,EU 和 EF 的真菌群落组成均与 SH 的真菌群落组成差异显著,这可能主要归因于担子菌门和球囊菌门相对丰度的显著性差异。在本研究中,EU 和 EF 的担子菌门相对丰度显著高于 SH,但 EU 和 EF 间的担子菌门相对丰度没有显著差异。这一结果表明,担子菌门的相对丰度与 TN、AN、OM、CAT 和 UE 活性的变化具有一致性,说明担子菌门的相对丰度变化可能由这些土壤指标介导。这可能主要与土壤养分的改善为担子菌门提供了丰富的营养和能量来源有关^[31]。RDA 分析结果表明,担子菌门的相对丰度与 TN、AN、CAT 和 OM 显著正相关,这进一步证实了这一结论的准确性。本研究表明,EF 的球囊菌门相对丰度显著高于 EU 和 SH,并且 EU 的球囊菌门相对丰度显著高于 SH。苏贝贝等^[32]在豆科植物根际真菌群落与土壤理化特征的相互关联中的结果表明,土壤 TN 和 OM 含量与球囊菌门相对丰度显著正相关,本研究 RDA 分析的结果也得出相似的结论,这说明球囊菌门相对丰度与土壤养分特征显著正相关。因此,SH 较低的土壤养分含量解释了球囊菌门相对丰度的差异。然而,尽管本研究中 EU 和 EF 的土壤化学特征和酶活性没有显著差异,但本研究中

EF 的球囊菌门相对丰度显著高于 EU。这可能与豆科植物根际沉积物促进球囊菌门富集有关^[33]。

综上, 本研究通过探究不同植被恢复类型对土壤养分含量、酶活性以及真菌群落特征的影响。结果表明, 植被恢复类型显著影响土壤养分及其真菌群落特征。相对于自然恢复模式, 人工林营造恢复模式有助于改善土壤养分特征, 但土壤养分和真菌群落特征对营造尾巨桉和格木纯林的响应差异较小。综合考虑, 本研究区域内以人工恢复更优。

参考文献

- [1] LI X M, ZUO Y L, XUE Z K, et al. Characteristics of microbial community structure in rhizosphere soil of different desert plants [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(8): 2855–2863. [李欣玫, 左易灵, 薛子可, 等. 不同荒漠植物根际土壤微生物群落结构特征 [J]. *生态学报*, 2018, 38(8): 2855–2863. doi: 10.5846/stxb201704210722.]
- [2] WANG T, GUO Y, SU J Y, et al. Effects of *Syringa pinnatifolia* var. *alanshanica* on soil physicochemical properties, enzyme activities and microbial diversity [J]. *J Beijing For Univ*, 2020, 42(4): 91–101. [王涛, 郭洋, 苏建宇, 等. 贺兰山丁香对土壤理化性质、酶活性和微生物多样性的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(4): 91–101. doi: 10.12171/j.1000-1522.20180365.]
- [3] YANG Y, CHENG H, DOU Y X, et al. Plant and soil traits driving soil fungal community due to tree plantation on the Loess Plateau [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 708: 134560. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134560.
- [4] HE F, YANG B S, WANG H, et al. Changes in composition and diversity of fungal communities along *Quercus mongolica* forests developments in Northeast China [J]. *Appl Soil Ecol*, 2016, 100: 162–171. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.12.014.
- [5] DANG H, LI J H, XU J S, et al. Differences in soil water and nutrients under catchment afforestation and natural restoration shape herbaceous communities on the Chinese Loess Plateau [J]. *For Ecol Manage*, 2022, 505: 119925. doi: 10.1016/j.foreco.2021.119925.
- [6] YANG J L, LI X W, CAO B, et al. Effects of different vegetation restoration models on soil fertility and enzyme activity in ecoemigration area of Liupanshan [J]. *J SW For Univ*, 2018, 38(5): 13–19. [杨君珑, 李小伟, 曹兵, 等. 六盘山生态移民迁出区不同植被恢复模式对土壤养分和土壤酶活性的影响 [J]. *西南林业大学学报*, 2018, 38(5): 13–19. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2018.05.003.]
- [7] BELAND M, PARKER G, SPARROW B, et al. On promoting the use of lidar systems in forest ecosystem research [J]. *For Ecol Manage*, 2019, 450: 117484. doi: 10.1016/j.foreco.2019.117484.
- [8] LIU Y B, FENG T J, WANG P, et al. Differences in soil physicochemical properties and influencing factors under different vegetation restoration methods in typical small watersheds in Loess hilly areas [J]. *Acta Ecol Sin*, 2024, 44(15): 6652–6666. [刘亚博, 冯天骄, 王平, 等. 黄土丘陵区典型小流域不同植被恢复方式土壤理化性质差异及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2024, 44(15): 6652–6666. doi: 10.20103/j.stxb.202309292115.]
- [9] XU Y X, LI C, ZHU W K, et al. Effects of enrichment planting with native tree species on bacterial community structure and potential impact on *Eucalyptus* plantations in southern China [J]. *J For Res*, 2022, 33(4): 1349–1363. doi: 10.1007/s11676-021-01433-6.
- [10] LIU T, XIE Y J. Studies on the causes of rapid development of *Eucalyptus* plantations in China [J]. *Eucal Sci Technol*, 2020, 37(4): 38–47. [刘涛, 谢耀坚. 中国桉树人工林快速发展动因分析与展望 [J]. *桉树科技*, 2020, 37(4): 38–47. doi: 10.13987/j.cnki.askj.2020.04.07.]
- [11] ZHANG B B, WAN X H, YANG J Q, et al. Effects of litters different in quality on soil microbial community structure in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Acta Pedol Sin*, 2021, 58(4): 1040–1049. [张冰冰, 万晓华, 杨军钱, 等. 不同凋落物质量对杉木人工林土壤微生物群落结构的影响 [J]. *土壤学报*, 2021, 58(4): 1040–1049. doi: 10.11766/trxb201912260562.]
- [12] QIAN B, LIU L, XIAO X. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter [J]. *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2011, 39(1): 34–38. [钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(1): 34–38. doi: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.008.]
- [13] ZHANG W, FU Y, LI J F, et al. Comparative study on Kjeldahl method and Dumas combustion method for total nitrogen measurement in soil [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, 31(35): 172–175. [张薇, 付昀, 李季芳, 等. 基于凯氏定氮法与杜马斯燃烧法测定土壤全氮的比较研究 [J]. *中国农学通报*, 2015, 31(35): 172–175. doi: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb15060137.]
- [14] CHEN Y S, HOU M T, MA D, et al. Determination of total phosphorus in soil by Alkali Fusion-Mo-Sb anti spectrophotometric method [J]. *China Standard*, 2018(S1): 193–196. [陈元松, 侯明韬, 马丹, 等. 碱熔-钼锑抗分光光度法测定土壤中总磷 [J]. *中国标准化*, 2018(S1): 193–196. doi: 10.3969/j.issn.1002-5944.2018.z1.041.]
- [15] BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [16] YANG L F, ZENG Q, LI H B, et al. Measurement of catalase activity in soil by ultraviolet spectrophotometry [J]. *Chin J Soil Sci*, 2011, 42(1): 207–210. [杨兰芳, 曾巧, 李海波, 等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性 [J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 207–210. doi: 10.19336/j.

- cnki.trtb.2011.01.043.]
- [17] LI Y F, GENG Y Q, ZHOU H J, et al. Comparison of soil acid phosphatase activity determined by different methods [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2016, 24(1): 98–104. [李莹飞, 耿玉清, 周红娟, 等. 基于不同方法测定土壤酸性磷酸酶活性的比较 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1): 98–104. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.150496.]
- [18] WANG Y G, LIU J J, LIU Y X, et al. Effective factors of urease activities in soil by using the phenol-sodium hypochlorite colorimetric method [J]. *Chin J Soil Sci*, 2019, 50(5): 1166–1170. [王玉功, 刘婧晶, 刘貽熙, 等. 苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性影响因素的研究 [J]. *土壤通报*, 2019, 50(5): 1166–1170. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2019.05.22.]
- [19] GUAN S Y. *Soil Enzymes and Their Research Method* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986. [关松荫. *土壤酶及其研究法* [M]. 北京: 农业出版社, 1986.]
- [20] WU Y T, KWAK J H, KARST J, et al. Long-term nitrogen and sulfur deposition increased root-associated pathogen diversity and changed mutualistic fungal diversity in a boreal forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 2021, 155: 108163. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108163.
- [21] PENG X D, DAI Q H, DING G J, et al. Impact of vegetation restoration on soil properties in near-surface fissures located in karst rocky desertification regions [J]. *Soil Till Res*, 2020, 200: 104620. doi: 10.1016/j.still.2020.104620.
- [22] RAIESI F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions [J]. *Ecol Indic*, 2017, 75: 307–320. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.12.049.
- [23] ANDREWS S S, CARROLL C R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management [J]. *Ecol Appl*, 2001, 11(6): 1573–1585. doi: 10.1890/1051-0761(2001)011[1573:DASQAT]2.0.CO;2.
- [24] SEGURA C, NAVARRO F B, JIMÉNEZ M N, et al. Implications of afforestation vs. secondary succession for soil properties under a semi-arid climate [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 704: 135393. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135393.
- [25] LIANG W J, DONG Y H, LI Y B, et al. Biological characterization and regulation of soil health [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, 32(2): 719–728. [梁文举, 董元华, 李英滨, 等. 土壤健康的生物学表征与调控 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 719–728. doi: 10.13287/j.1001-9332.202102.041.]
- [26] LIU J, WU L C, CHEN D, et al. Soil quality assessment of different *Camellia oleifera* stands in mid-subtropical China [J]. *Appl Soil Ecol*, 2017, 113: 29–35. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.01.010.
- [27] SHI W, ZHANG L M, WANG J S, et al. The subsequent effects of phosphorus fertilization in upland red soils and the underlying mechanisms [J]. *Acta Pedol Sin*, 2022, 59(4): 1100–1111. [石伟, 张丽梅, 王劲松, 等. 磷肥在旱地红壤上的后期效应及其作用机制 [J]. *土壤学报*, 2022, 59(4): 1100–1111. doi: 10.11766/trxb202106220680.]
- [28] YOU F, LU P, HUANG L B. Characteristics of prokaryotic and fungal communities emerged in eco-engineered waste rock-Eucalyptus open woodlands at Ranger uranium mine [J]. *Sci Total Environ*, 2022, 816: 151571. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151571.
- [29] PEREIRA A P A, CHERUBIN M R, DE ARAUJO A S F, et al. Soil quality evaluation in mono and mixed eucalypt plantation [J]. *Sustainability*, 2024, 16(6): 2534. doi: 10.3390/su16062534.
- [30] WEI J X, WANG C, HE B, et al. Research progress on soil micro-organisms in eucalypt forests [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2022, 39(5): 1144–1154. [韦菊嫻, 王聪, 何斌, 等. 世界桉树林土壤微生物研究综述 [J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(5): 1144–1154. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210701.]
- [31] LI T, ZHOU P, LI T H, et al. Community structures and influencing factors of soil fungi associated with typical vegetations in Nanling Mountains [J]. *Mycosystema*, 2023, 42(2): 456–467. [李挺, 周平, 李泰辉, 等. 南岭典型植被土壤真菌群落结构与影响因素 [J]. *菌物学报*, 2023, 42(2): 456–467. doi: 10.13346/j.mycosystema.220198.]
- [32] SU B B, ZHANG Y, DAO R N. Correlation analysis between fungal community characteristics and soil physicochemical factors in the rhizosphere of four legumes [J]. *Acta Agrest Sin*, 2021, 29(12): 2670–2677. [苏贝贝, 张英, 道日娜. 4 种豆科植物根际土壤真菌群落特征与土壤理化因子间相关性分析 [J]. *草地学报*, 2021, 29(12): 2670–2677. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2021.12.005.]
- [33] QIAO M J, SUN R B, WANG Z X, et al. Legume rhizodeposition promotes nitrogen fixation by soil microbiota under crop diversification [J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 2924. doi: 10.1038/s41467-024-47159-x.