

地枇杷灌丛对铅锌尾矿废弃地植物群落和土壤微生物群落的促进效应

吕定红¹, 李朝阳^{1,2*}, 周影茹², 沈世彦², 田向荣^{1,2}

¹植物资源保护与利用湖南省高校重点实验室, 湖南 吉首

²吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首

收稿日期: 2022年7月12日; 录用日期: 2022年8月11日; 发布日期: 2022年8月18日

摘要

目的: 探讨地枇杷灌丛对湘西地区铅锌尾矿废弃地生态恢复过程中植物群落和土壤微生物群落的影响。方法: 采用野外调查法分析花垣县典型铅锌尾矿库生长的地枇杷灌丛对植物群落的影响, 采用传统培养法和高通量测序技术分析地枇杷灌丛对土壤微生物群落的影响。结果: 结果表明: 1) 灌丛内的植物物种数、种群丰度指数(R)、Shannon-wiener指数(H')和植物物种种群均匀度指数(J')均高于灌丛外, 分别是灌丛外的1.38、1.63、1.32和1.19倍, 其中物种多样性指数 H' 和 J' 的差异达到了显著性水平; 2) 灌丛内的细菌、放线菌和真菌的丰度与多度均高于灌丛外, H' 指数则表现为灌丛外略高于灌丛内, 但灌丛内外无显著差异; 3) 地枇杷灌丛对植物群落和土壤微生物群落均具有正促进效应, 且对植物群落的促进作用大于对土壤微生物群落的作用; 4) 地枇杷灌丛显著促进了硫杆菌属和涅斯捷连科氏菌属微生物类群的多度。结论: 地枇杷灌丛有利于花垣铅锌尾矿废弃地的植物物种补充, 细菌和放线菌在该过程中发挥了关键作用, 地枇杷具有在铅锌尾矿废弃地生态恢复过程中作为看护植物的潜力。

关键词

地枇杷灌丛, 铅锌尾矿废弃地, 植物群落, 土壤微生物群落, 看护效应

The Positive Effect of *Ficus tikoua* shrubs on Plant Communities and Soil Microbial Communities in the Waste Land of Lead and Zinc Tailings

Dinghong Lv¹, Zhaoyang Li^{1,2*}, Yingru Zhou², Shiyan Shen², Xiangrong Tian^{1,2}

¹Key Laboratory of Plant Resources Protection and Utilization, Hunan University, Jishou Hunan

*通讯作者。

文章引用: 吕定红, 李朝阳, 周影茹, 沈世彦, 田向荣. 地枇杷灌丛对铅锌尾矿废弃地植物群落和土壤微生物群落的促进效应[J]. 世界生态学, 2022, 11(3): 341-350. DOI: 10.12677/ije.2022.113040

Abstract

In order to evaluate the effects of *Ficus tikoua* shrub on plant communities and soil microbial communities in the ecological restoration of lead-zinc tailing waste land in western Hunan, field investigation methods were employed to analyze the effects of shrubs on plant communities, while also using a combination of traditional cultivation methods and high-throughput sequencing technology to evaluate the effects of shrubs on soil microbial communities in typical lead-zinc tailing waste land of Huayuan County. The findings revealed that: 1) The species number, the Margalef index (R), the Shannone-Wiener index (H'_0) and the Pielou index (J'_0) of plants under *F. tikoua* shrub canopies were 1.38, 1.63, 1.32 and 1.19 times of those in open areas, respectively, and there was a significant difference in the H'_0 and J'_0 index between shrub canopies and open areas; 2) The richness and abundance of soil culturable bacteria, actinomycetes and fungi in the shrubs were higher than those in open areas, and H'_0 index was slightly higher in open areas than that under shrub canopies, but there was no significant difference between shrub canopies and open areas; 3) *F. tikoua* shrubs had positive effects on both plant communities and soil microbial communities, and these positive effects on plant communities were greater than the positive effects on soil microbial communities; 4) The abundance of *Thiobacillus* and *Nesterenkonia* was significantly increased under shrub canopies. *F. tikoua* shrubs facilitate the recruitment of plants in Huayuan lead-zinc tailing waste land, and the bacteria and actinomycetes play a key role in this process. Thus, these results highlight the role of *F. tikoua* shrubs as nurse plants in the process of ecological restoration of Huayuan lead-zinc tailings waste land.

Keywords

Ficus tikoua shrubs, Lead-Zinc Tailing Waste Land, Plant Communities, Soil Microbial Communities, Nurse Effect

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 利用看护植物的促进作用已成为干旱半干旱退化生态系统(如草地、森林、湿地以及沙地)重要的生态修复工具[1] [2]。与传统的植物修复技术相比, 看护植物的优点表现在: 一、抗逆性强, 可以在贫瘠的土壤上快速形成植物斑块; 二、可降低树冠下的气温和水分蒸发量, 为抗逆性较弱的植物提供避难所; 三、提供凋落物和根系分泌物给分解者来改善土壤肥力, 为其它植物提供一个更合适的生态位[1] [3] [4]。灌木是目前研究中最常用的看护植物, 大量研究表明, 与开放地区相比, 灌木冠层下的植物多样性、出苗率和/或存活率更高[5] [6]。因此, 看护植物在维持生物多样性和生态系统功能过程中发挥了重要作用, 由其驱动的植物群落具有明显的演替趋势, 是一项非常有应用前景的生态修复技术[7]。

由采矿产生的尾矿废弃地具有微荒漠属性, 表现为不具备真正意义上的土壤, 重金属含量高, 养分极度匮乏以及水资源缺乏, 植物建立非常困难, 是一类极端退化的生态系统。与干旱生态系统不同, 尾

矿废弃地除了水分胁迫外,还需要克服土壤的综合胁迫(如重金属、盐分、低养分含量、土壤结构不良等),因此,尾矿废弃地的生态恢复更困难。

过去 20~30 年,国内外学者利用耐金属植物对尾矿废弃地进行植被重建的工作已经取得了很大的进展[8],人工播种禾草、豆科植物或两者兼用已成为稳定松散尾矿和提高场地肥力及保水能力的常用方法[9],先锋植物因其独特的重金属耐性特征,成为该方法的首选物种[10] [11]。而以添加有机质改良剂为主要手段的辅助植物稳定技术更是成了尾矿生态修复的主要手段[12]。尽管如此,大多数以改良剂 + 本地草本先锋植物进行修复的工作都不能保证重建植被系统的长期自我维持[13],通常添加的有机质在 30 个月后会养分耗尽,导致已恢复的植被出现退化[14]。一些学者提出生态恢复所选植物物种应该考虑物种间的生态关系,由竞争主导的修复后尾矿废弃地生态系统仍然是脆弱的,表现出非常低的植物多样性和生态系统稳定性[15]。Choi 等人[9]将看护植物技术引入到尾矿废弃地的修复取得了意想不到的效果,研究发现柳枝稷可显著增加尾矿肥力并促进了尾矿废弃地植物群落的发育。表明利用看护植物进行尾矿废弃地的生态恢复将是一个有前景的选择,是一种高效、低成本的恢复方法[13] [16]。

湘西地区花垣县浩宇铅锌尾矿库于 2010 年闭库,2014 年我们采用添加不同改良剂 + 本土先锋植物进行了生态恢复实验,实验地全部复绿[11]。但 2019 年进行野外调查时发现,恢复基地全部被芒草覆盖,尾矿基质肥力累积非常缓慢,且较少有新物种入驻。而未恢复区域的尾矿库正被来自于周围自然基质中的植物所定居,尤其是地枇杷,在尾矿库中形成了大小不一的类似促进驱动的具有一定演替趋势的植物群落斑块结构。这使得我们假设,地枇杷不仅可以承受尾矿极端条件,还可以通过生态促进来触发基本生态系统功能的恢复,我们推测地枇杷可以改善重金属和水分等非生物胁迫,促进与尾矿土壤养分循环相关的微生物群落和功能的恢复,形成资源沃岛,并推动尾矿废弃地上植物群落发育。我们认为地枇杷可以作为湘西地区尾矿废弃地生态恢复的看护植物,用于湘西矿区尾矿废弃地的生态恢复实践。

地枇杷(*Ficus tikoua* Bur.)为桑科榕属的常绿匍匐木质藤本。该物种喜温暖湿润气候,为阳性植物,自然生长于低山山坡等地,具克隆生长习性,耐贫瘠,可大面积覆盖裸露的地表,是园林植物配置中的优良地被植物。地枇杷对重金属具有一定的富集能力,是湘西矿区优势植物[17]。基于此,本研究在湘西花垣县典型铅锌尾矿废弃地,选择地枇杷灌丛斑块和无灌丛植物斑块作为研究对象,探究 1) 地枇杷灌丛是如何影响植物群落的? 2) 地枇杷灌丛对尾矿废弃地的微生物群落产生了何种影响? 3) 地枇杷灌丛对植物群落和土壤微生物群落作用的性质和强度如何? 通过研究为铅锌尾矿废弃地植被的演替和恢复重建提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

湘西地区花垣县(109°15'~109°38'E, 28°10'~28°38'N)是全国最大的铅锌矿基地(花垣县人民政府资料),境内以山原地貌为主,形成高山台地、丘陵地带和沿河平川三个台阶型地貌带。气候属于亚热带季风山地湿润气候,四季分明,春季寒潮活动较频繁,夏季降雨集中,雨热同季,夏秋季干旱发生较多,冬季比较寒冷,湿度大。年平均气温 16.0℃,年平均降雨量 1363.8 毫米,年平均蒸发量为 1031.9 毫米(2013~2020 年数据)。自上世纪 80 年代始,该区的锰矿和铅锌矿持续开采,选矿过程中排出的尾矿呈弱碱性,Cd、Pb 和 Zn 含量比较高,肥力极低,无土壤团粒结构,这阻碍了植物的重新定居和恢复[18]。

2.2. 研究方法

2.2.1. 植物群落调查

2021 年 9 月在花垣浩宇铅锌尾矿废弃地随机选择 5 个形成植物群落的地枇杷灌丛,在每个灌丛外的

2 m 外区域设置为灌丛外样地, 分别在灌丛内和灌丛外设置 50 cm × 50 cm 的小样方 5 个, 总共 50 个小样方, 调查样方内所有物种组成, 统计每个物种的多度(个体总数)。

2.2.2. 土壤微生物群落调查

从 2.2.1 所选择的 5 个地枇杷灌丛中随机选择 3 个灌丛, 按梅花点采集法采集灌丛内外 0~10 cm 表层土样, 然后将 5 个点的小样混合均匀, 组成一个复合样, 用于传统培养的土样用自封袋密封, 用于高通量测序的土样约 100 g 用灭菌的 50 mL 离心管封装, 放入冰盒中, 运回实验室。分别进行传统培养法和高通量测序分析土壤微生物群落。

i) 传统培养法: 采用细菌培养基-牛肉膏蛋白胨培养基、放线菌培养基-改良高氏 1 号培养基和真菌培养基-马丁氏培养基, 分别对细菌、放线菌和真菌进行稀释倒平板法测数, 采用每克干土所含微生物菌落数代表土壤微生物数量[19]。

ii) 高通量测序分析: 参照文献[11]方法采用 FastDNA 试剂盒进行土壤总 DNA 的提取, 采用通用引物 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 和 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') 扩增 16SV3V4 (a)区(包括细菌和放线菌), 采用通用引物 ITS2 (5'-GCTGCGTTCATCGATGC-3')和 ITS5 (5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3')对真菌 ITS1 (a)区域进行扩增。PCR 扩增产物由上海派森诺生物科技有限公司进行测序, 测序结果与 GenBank 数据库进行比对分析, 所有菌株均鉴定到属水平。

2.3. 数据处理和图表绘制

植物群落特性主要包括植物丰度(物种数)和多度(物种总个体数), 根据丰度和多度分别计算出植物群落的 Margalef 指数(R)、估计植物群落异质性的 Shannon-wiener 指数(H'_o)和估计植物物种种群均匀度的 Pielou 指数(J'_o) [13]。土壤微生物群落特性主要分析土壤微生物丰度、多度以及 H'_o , 采用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析, 利用独立样本 t 检验分析灌丛内和灌丛外的差异显著性, 利用 WPS 表格作图。

采用相对相互作用指数 RII 评估地枇杷灌丛对植物群落和土壤微生物群落的影响[20]: $RII = (B_w - B_o) / (B_w + B_o)$ 。式中 B 表示灌丛内(B_w)和灌丛外(B_o)的响应变量观测值。RII 取值范围为 $-1 < RII < 1$, 当 $RII > 0$ 时, 表示灌丛具有促进效应, 当 $RII < 0$ 时, 则表示灌丛具有竞争效应。土壤微生物群落: $RII_{微生物} = (RII_{细菌} + RII_{放线菌} + RII_{真菌})/3$ [19]。

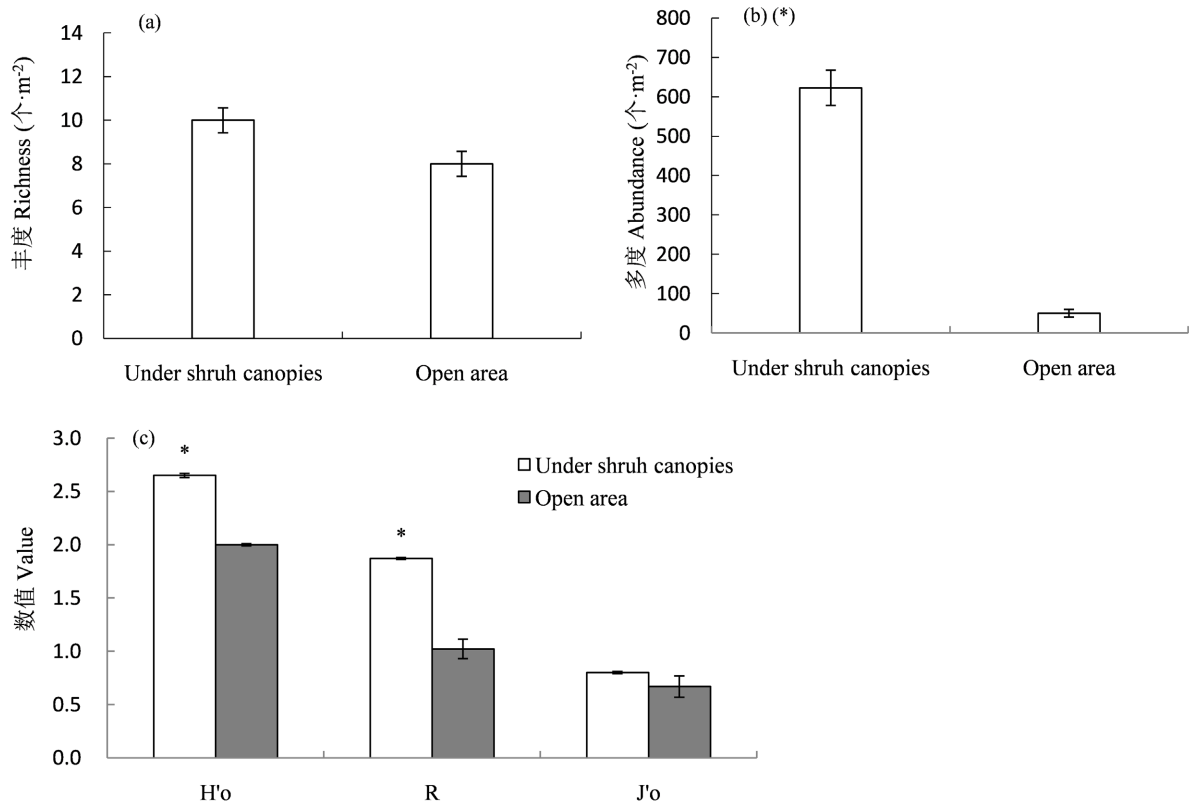
3. 结果与讨论

3.1. 地枇杷灌丛对尾矿废弃地植物群落的影响

野外调查结果表明, 地枇杷和禾本科植物为尾矿废弃地绝对优势种, 其次为唇形科和菊科。地枇杷灌丛外的植物主要以狗尾巴草(*Setaria viridis*)和风轮菜(*Clinopodium chinense*)占优势, 其物种共有 8 种; 灌丛内着生的植物虽与灌丛外相似, 但物种多达 10 种, 尽管如此, 二者的丰度无显著差异(图 1(a))。禾本科植物有 5 种: 狗牙根(*Cynodon dactylon*)和马唐(*Digitaria sanguinalis*)为灌丛外所有, 芒(*Miscanthus sinensis*)为灌丛内所有, 狗尾巴草(*Setaria viridis*)和菅(*Themeda villosa*)在灌丛内外皆有分布。唇形科和菊科皆有 2 种, 风轮菜和小飞蓬(*Conyza canadensis*)在灌丛内外均有分布, 野香草(*Elsholtzia cyprianii*)和大狼把草(*Bidens frondosa*)只分布在灌丛内。从土壤的稀缺性和先锋物种的高盖度来看, 尾矿库可视为演替的早期阶段[20]。

在干旱的地中海生态系统中, 先锋看护灌木物种可以促进其他晚演替物种在其冠层下的建立, 主要得益于看护灌木对极端温度条件的改善和植物水分状况的改善[21], 良好的微环境(水、温、肥力等)为其其它植物种子萌发和幼苗建成提供了庇护所, 使物种丰富度增加[22]。Choi 等[9]采用柳枝稷为看护植物进

行尾矿植被修复实验时发现,随着柳枝稷盖度的增加,木本幼苗和幼树的密度显著增加。本研究中,尾矿废弃地上地枇杷灌丛内的物种多度、三种生态指数均高于灌丛外(图 1),其中物种多度、Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数达到了显著性水平($P < 0.05$) (图 1(b), 图 1(c)), 跟上述结果相一致,表明尾矿废弃地的地枇杷灌丛同样具有为其它植物物种提供庇护的能力,使其灌丛内植物种群大小的异质性、物种多样性以及均匀度都明显增大。



注: *表示灌丛内和灌丛外差异显著(t -test, $P < 0.05$), 下同。

Figure 1. Plant community characteristics inside shrub and outside *Ficus tikoua* shrub canopies in tailing wasteland
图 1. 尾矿废弃地地枇杷灌丛内和灌丛外植物群落特性

3.2. 地枇杷灌丛对尾矿废弃地土壤微生物群落的影响

土壤微生物群落丰度、多样性和组成在很大程度上控制着养分循环和凋落物分解率,因此,植物冠层下的真菌和细菌的丰度通常要高于邻近无维管植被的开阔地[23]。由图 2 可见,

灌丛内的可培养细菌、放线菌和真菌多度(图 2(a), 图 2(b))和丰度(图 2(c))均高于灌丛外, Shannon-Wiener 指数则表现为灌丛外略高于灌丛内(图 2(d)),但灌丛内外无显著差异,这可能是由于土壤微生物群落的丰度和多样性通常受植物凋落物投入的数量和质量影响所致[23]。

3.3. 灌丛对尾矿废弃地土壤微生物优势属相对多度的影响

尾矿废弃地的细菌优势属主要是鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、亚硝化单胞菌科(Nitrosomonadaceae)的未知属和硫杆菌属(*Thiobacillus*),除鞘氨醇单胞菌属表现为地枇杷灌丛外相对多度高于灌丛内,灌丛内的亚硝化单胞菌未知属和硫杆菌属的相对多度均高于灌丛外,且硫杆菌属的相对多

度差异达到了显著性水平(图 3(a), $P < 0.05$), 表明地枇杷灌丛对硫杆菌属细菌影响显著。

鞘氨醇单胞菌广泛存在于自然环境中, 它能降解环境污染物、提高植物对重金属的抵抗力[24], 某些鞘氨醇单胞菌还具有固氮和脱氢功能, 在维持土壤氮素平衡过程中发挥重要作用[25]。在本研究中, 鞘氨醇单胞菌是尾矿废弃地第一优势属, 这可能与该环境存在较高重金属胁迫有关, 而灌丛内的丰度相对较低, 表明地枇杷灌丛内微环境得到了一定程度的改善。亚硝化单胞菌科是硝化功能菌, 主要起氨氧化作用[26], 此外还可促进多聚物类复杂碳源的代谢[27]。硫杆菌属中包含许多典型的解磷菌, 在土壤磷代谢中具有重要作用[28]。本研究中灌丛内亚硝化单胞菌科和硫杆菌属的相对丰度高于灌丛外的结果表明, 灌丛内有较高的 C、N 和 P 代谢水平, 这可能是地枇杷能促进植物生长和群落发育的根本原因。

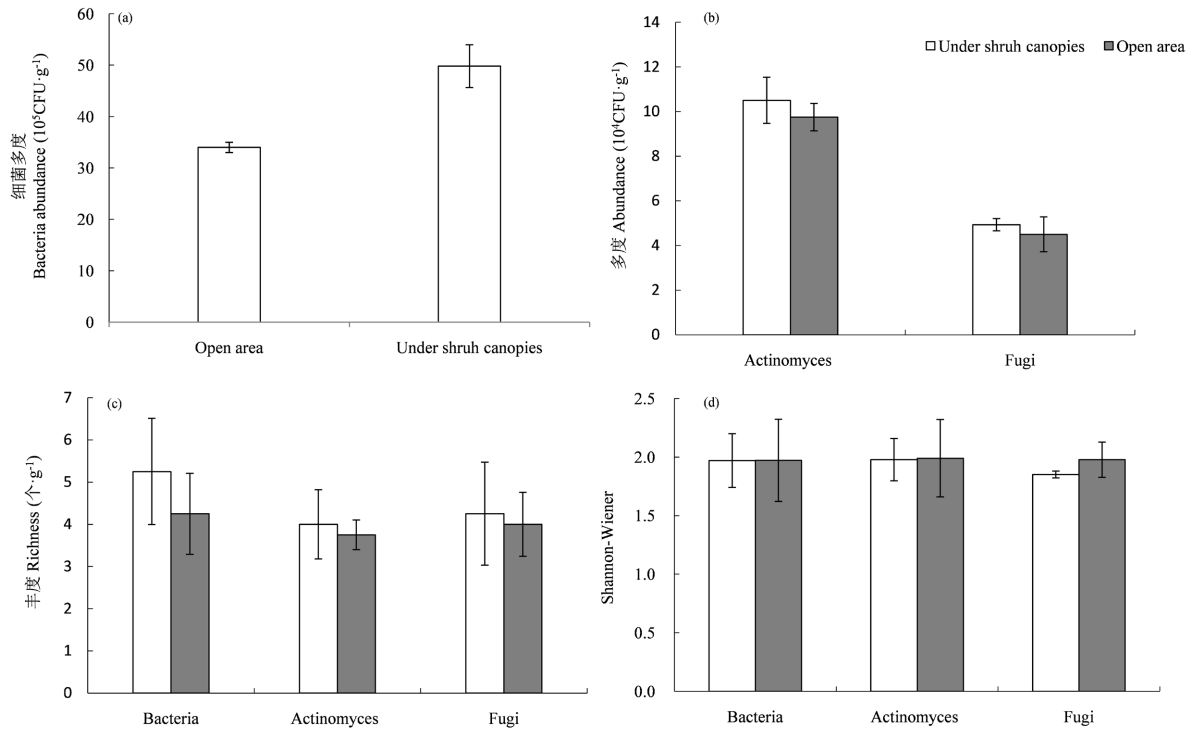
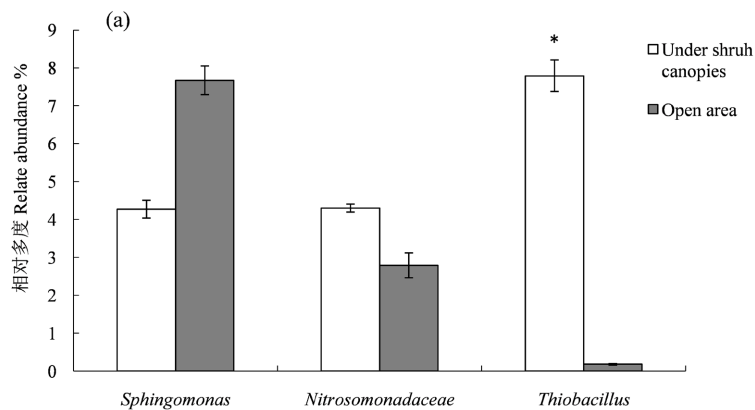


Figure 2. Soil microbial communities inside shrub and outside *Ficus tikoua* shrub canopies at surface layer in tailing wasteland

图 2. 尾矿废弃地地枇杷灌丛内外表层土壤微生物群落特性



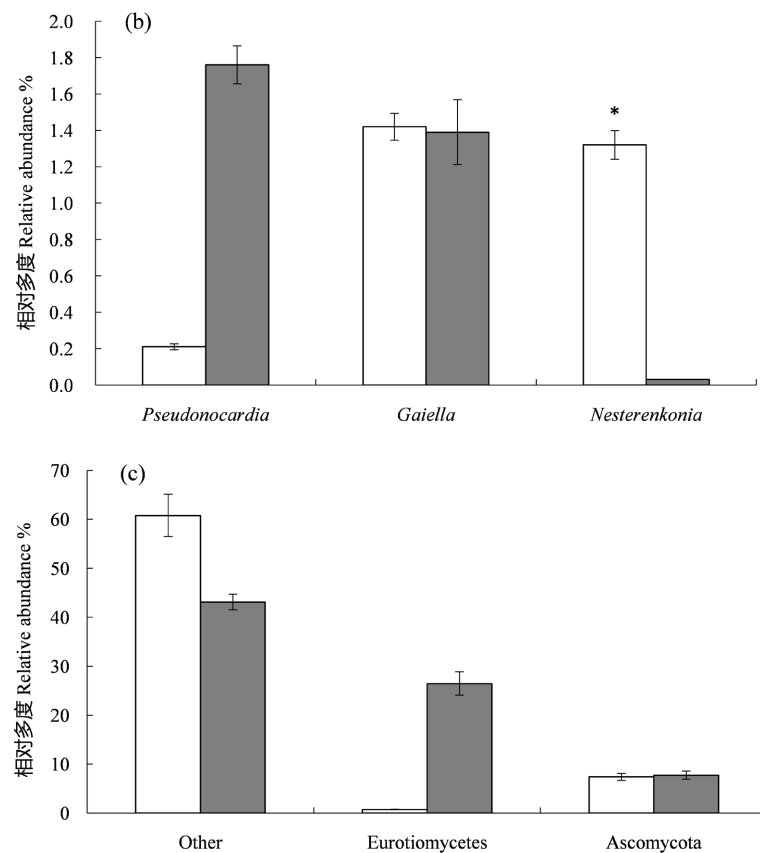


Figure 3. Relative abundance of dominant genus in soil microbial communities inside shrub and outside *Ficus tikoua* shrub canopies at surface layer in tailing wasteland
图 3. 尾矿废弃地地枇杷灌丛内外表层土壤微生物(细菌、放线菌、真菌)群落优势属相对多度

地枇杷灌丛内和灌丛外的放线菌优势属包括假诺卡氏菌属(*Pseudonocardia*)、*Gaiella* 和涅斯捷连科氏菌属(*Nesterenkonia*)。假诺卡氏菌属在沙漠藓结皮过程中的各种 C、N 和 P 元素代谢过程中具有重要作用 [29], 本研究中, 虽然地枇杷灌丛外的假诺卡氏菌属的相对多度高于灌丛内, 但二者并无显著差异(图 3(b)), *Gaiella* 和涅斯捷连科氏菌属放线菌相对多度均以灌丛内为高, 尤其是涅斯捷连科氏菌属, 在灌丛内外存在显著差异($P < 0.05$)。

尾矿废弃地的真菌多数为无法鉴定到属的物种, 相对多度最多的一类仅鉴定到真菌界, 如图 3(c)所示的 Other。其次为子囊菌门的两类未知真菌, 其中一类鉴定到散囊菌纲(Eurotiomycetes), 另一类仅鉴定到子囊菌门(Ascomycota)。尽管灌丛内外真菌相对丰度有差异, 但并无显著影响。

3.4. 尾矿废弃地地枇杷灌丛对植物群落和土壤微生物群落的互作效应

尾矿废弃地的地枇杷灌丛植物群落丰度和多度 RII 值均为正值(图 4(a)), 表明地枇杷灌丛对尾矿废弃地的植物群落具有明显的促进作用。由图 4(b)、图 4(c)可知, 地枇杷灌丛对土壤微生物群落同样具有促进作用。因此, 在我们所研究的区域内, 地枇杷灌丛似乎是在重金属胁迫环境中维持斑块和群落多样性的关键因素。比较而言, 地枇杷灌丛对尾矿废弃地的地上植物群落的影响大于其对土壤微生物群落的影响, 该结果与张鹏等的研究结果相一致 [19]。有研究认为垫层植物低矮的生长形式通常有利于在恶劣和贫瘠的环境中定居, 从而成为高山或北极苔原的潜在看护植物 [20] [30]。

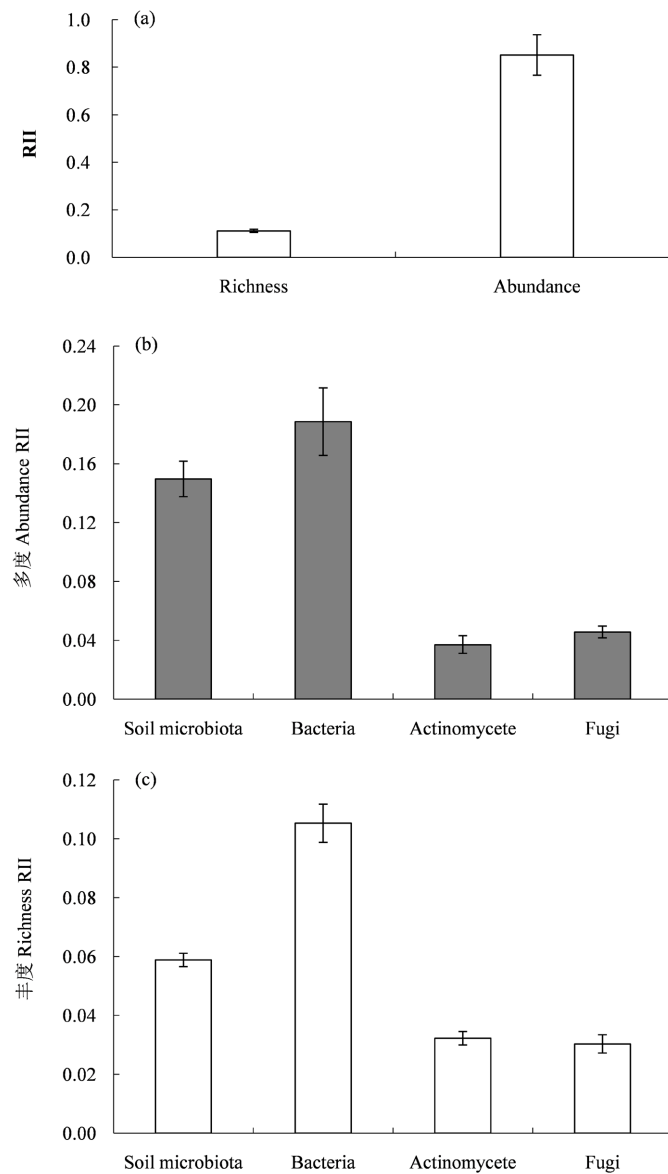


Figure 4. Relative interaction index (RII) for plant communities (a) and soil microbial communities (b, c) of *Ficus tikoua* in tailing wasteland

图 4. 尾矿废弃地地枇杷灌丛植物群落(a)和土壤微生物群落(b、c) RII 值

通常植物生长过程中, 发芽、建立和初始生长被认为是最危险的生命周期阶段[30], 事实上, 植物在地枇杷灌丛外的生长受到了很大的限制(图 2), 这表明在尾矿废弃地上, 植物生长最主要的障碍可能是缺乏安全的初步建立和幼苗存活地点。而地枇杷灌丛提供了有利的生态位, 使灌丛内的物种丰度、多度及物种多样性都出现增加(图 1), 而且, 对地上植物群落的促进作用强于对地下微生物群落的作用, 表明地枇杷在花垣铅锌尾矿废弃地的生态恢复过程中具有作为看护植物的潜力。

促进作用在早期演替阶段相当重要, 尤其是在恶劣环境中[30]。我们研究结果中一个突出的发现是, 地枇杷与其它植物以及土壤微生物之间的积极相互作用几乎完全占据主导地位, 无论是灌丛内植物的总体多样性、植物物种的补充还是土壤微生物的多度。这与在恶劣环境中促进效应多于竞争效应的结果是一致的[19] [20]。因此, 地枇杷灌丛的促进作用可能是促进花垣铅锌尾矿废弃地生态演替和维持植物多样

性的主要因素之一。

4. 结论

1) 地枇杷灌丛内的植物多样性高于灌丛外, 表明地枇杷形成了有利于一年生植物建立所需的微生境, 有利于尾矿废弃地植物物种的补充;

2) 地枇杷灌丛对植物群落和土壤微生物群落均具有促进作用, 且对植物群落的促进作用强于对土壤微生物群落的促进作用, 表明地枇杷灌丛可能是在铅锌尾矿废弃地中维持斑块和群落多样性的关键因素;

3) 地枇杷灌丛显著促进了硫杆菌属和涅斯捷连科氏菌属微生物类群的多度, 表明在地枇杷介导的植物群落构建过程中, 细菌和放线菌发挥了重要作用;

4) 地枇杷可作为花垣铅锌尾矿废弃地生态恢复的潜在看护植物, 用于尾矿废弃地的生态恢复实践。

本研究发现尾矿废弃地与荒漠的灌丛作用机制有明显的相似性, 如能在今后开展尾矿废弃地与荒漠的比较研究将对荒漠和尾矿废弃地修复生态理论与方法的提升产生重要影响。

基金项目

湖南省自然科学基金(2021JJ30553)。

参考文献

- [1] Filazzola, A. and Lortie, C.J. (2014) A Systematic Review and Conceptual Framework for the Mechanistic Pathways of Nurse Plants. *Global Ecology and Biogeography*, **23**, 1335-1345. <https://doi.org/10.1111/geb.12202>
- [2] 金钊, 齐玉春, 董云社. 干旱半干旱地区草原灌丛荒漠化及其生物地球化学循环[J]. 地理科学进展, 2007, 26(4): 23-32.
- [3] Soliveres, S., Desoto, L., Maestre, F.T., *et al.* (2010) Spatio-Temporal Heterogeneity in Abiotic Factors Modulate Multiple Ontogenetic Shifts between Competition and Facilitation. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, **12**, 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2010.02.003>
- [4] Monge, J.A. and Gornish, E.S. (2015) Positive Species Interactions as Drivers of Vegetation Change on a Barrier Island. *Journal of Coastal Research*, **299**, 17-24. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00235.1>
- [5] Sasaki, T., Yoshihara, Y., Jamsran, U. and Ohkuro, T. (2010) Ecological Stoichiometry Explains Larger-Scale Facilitation Processes by Shrubs on Species Coexistence among Understory Plants. *Ecological Engineering*, **36**, 1070-1075. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.020>
- [6] Jankju, M. (2013) Role of Nurse Shrubs in Restoration of an Arid Rangeland: Effects of Microclimate on Grass Establishment. *Journal of Arid Environments*, **89**, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.09.008>
- [7] Al-Namazi, A. (2019) Effects of Plant-Plant Interactions and Herbivory on the Plant Community Structure in an Arid Environment of Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **26**, 1513-1518. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.01.001>
- [8] Wong, M.H. (2003) Ecological Restoration Of Mine Degraded Soils, with Emphasis on Metal Contaminated Soils. *Chemosphere*, **50**, 775-780. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00232-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00232-1)
- [9] Choi, Y.D. and Wali, M.K. (1995) The Role of *Panicum virgatum* (Switch Grass) in the Revegetation of Iron-Mine Tailings in Northern New York. *Restoration Ecology*, **3**, 123-132. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1995.tb00085.x>
- [10] Shu, W.S., Ye, Z.H., Zhang, Z.Q., *et al.* (2005) Natural Colonization of Plants on Five Lead/Zinc Mine Tailings in Southern China. *Restoration Ecology*, **13**, 49-60. [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(05\)70786-4](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(05)70786-4)
- [11] Li, Z.Y., Yang, S.X., Peng, X.Z., *et al.* (2018) Field Comparison of the Effectiveness of Agricultural and Nonagricultural Organic Wastes for Aided Phytostabilization of a Pb-Zn Mine Tailings Pond in Hunan Province, China. *International Journal of Phytoremediation*, **20**, 1264-1273. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1474434>
- [12] Alvarenga, P., Gonçalves, A.P., Fernandes, R.M., *et al.* (2008) Evaluation of Composts and Liming Materials in the Phytostabilization of Mine Soil Using Perennial Ryegrass. *Science of the Total Environment*, **406**, 43-56.
- [13] Parraga-Aguado, I., Gonzalez-Alcaraz, M.N., Alvarez-Rogel, J., *et al.* (2013) The Importance of Edaphic Niches and Pioneer Plant Species Succession for the Phytomanagement of Mine Tailings. *Environmental Pollution*, **176**, 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.023>

- [14] Martínez-Martínez, S., Zornoza, R., Gabarrón, M., *et al.* (2018) Is Aided Phytostabilization a Suitable Technique for the Remediation of Tailings? *European Journal of Soil Science*, **70**, 862-875.
- [15] Rey, P.J., Siles, G. and Alcántara, J.M. (2009) Community-Level Restoration Profiles in Mediterranean Vegetation: Nurse-Based vs. Traditional Reforestation. *Journal of Applied Ecology*, **46**, 937-945. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01680.x>
- [16] Navarro-Cano, J.A., Goberna, M. and Miguel, V. (2019) Using Plant Functional Distances to Select Species for Restoration of Mining Sites. *Journal of Applied Ecology*, **56**, 1-10. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13453>
- [17] 杨胜香, 田启建, 梁士楚, 等. 湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 264-271.
- [18] 彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 等. 3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(1): 301-308.
- [19] 张鹏, 李颖, 王业林, 等. 短脚锦鸡儿灌丛对植物群落和土壤微生物群落的促进效应研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 421-428.
- [20] Oh, M. and Lee, E.J. (2021) Cushion Plant *Silene acaulis* Is a Pioneer Species at waste Coal Piles in the High Arctic, Svalbard. *Journal of Ecology and Environment*, **45**, 2-9. <https://doi.org/10.1186/s41610-020-00177-4>
- [21] Domínguez, M.T., Madejón, E., López-Garrido, R., *et al.* (2016) Shrubs for the Remediation of Contaminated Mediterranean Areas: Is the Nurse Effect Mediated by Increases in Soil Enzyme Activities? *Ecological Engineering*, **97**, 577-581. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.059>
- [22] 丁威, 王玉冰, 向官海, 等. 小叶锦鸡儿灌丛化对典型草原群落结构与生态系统功能的影响[J]. 植物生态学报, 2020, 44(1): 33-43.
- [23] OchoaHueso, R., Eldridge, D.J., DelgadoBaquerizo, M., *et al.* (2018) Soil Fungal Abundance and Plant Functional Traits Drive Fertile Island Formation in Global Drylands. *Journal of Ecology*, **106**, 242-253. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12871>
- [24] 张颖, 杨悦, 韦庆慧, 等. 鞘氨醇单胞菌的特性及应用研究进展[J]. 化学与生物工程, 2021, 38(3): 6-13.
- [25] 常安然, 李佳, 张耸, 等. 基于宏基因组学 16S rDNA 测序对烟草根际土壤细菌群落组成分析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(2): 43-50.
- [26] 李笑玥, 秦华鹏, 王凡, 等. 生物滞留池微生物种群的硝化反硝化功能研究——以深圳市为例[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2021, 38(1): 36-44.
- [27] 王晶, 马丽娟, 龙泽华, 等. 秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 420-429.
- [28] 刘赛男. 生物炭影响土壤磷素, 钾素有效性的微生态机制[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [29] 李靖宇, 张肖冲, 陈韵, 等. 腾格里沙漠东南缘藻结皮与藓结皮放线菌多样性及其潜在代谢功能[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1590-1601.
- [30] Gavini, S.S., Suárez, G.M., Ezcurra, C. and Aizen, M.A. (2019) Facilitation of Vascular Plants by Cushion Mosses in High-Andean Communities. *Alpine Botany*, **129**, 137-148. <https://doi.org/10.1007/s00035-019-00222-6>