

任豆凋落物理化特性对土壤微生物多样性的影响研究综述

苏黎颖, 高秀丽, 马秋妮, 陈业佳, 覃勇荣*

河池学院化学与生物工程学院, 广西 宜州

收稿日期: 2024年3月20日; 录用日期: 2024年4月18日; 发布日期: 2024年4月26日

摘要

喀斯特地貌是地下水与地表水对可溶性岩石溶蚀与沉淀, 侵蚀与沉积, 以及重力崩塌、坍塌、堆积等作用形成的地貌, 为中国五大造型地貌之一。土壤微生物是土壤生态系统中重要的组成部分, 对于土壤生物学功能和生态系统稳定具有重要作用。植物凋落物是生态系统中重要的碳源, 对土壤微生物多样性具有潜在的影响。植物凋落物的种类、数量和分解状态与土壤微生物的群落结构和多样性密切相关。此外, 土壤环境因素如土壤pH、含水量等也对植物凋落物分解及土壤微生物多样性具有重要的影响。任豆是中国特有的单种属植物, 也是南方地区石山造林的优良先锋树种。目前, 关于任豆凋落物对土壤微生物多样性的影响鲜有文献报道。本研究通过查阅相关文献资料及实地调查, 拟在参考前人研究方法的基础上, 采集不同调查样地任豆和对照植物的凋落物及相应的土壤样品, 利用高通量测序技术和同质园试验, 分析土壤微生物群落结构及多样性的变化, 通过相关性分析, 说明其与任豆凋落物理化特性的关系。同时, 通过对不同植物凋落物及土壤理化性质分析, 说明任豆凋落物对土壤微生物多样性的影响及其作用机制, 以便为喀斯特地区石漠化治理和植被恢复重建, 促进土壤生态系统的健康发展提供理论支持。

关键词

喀斯特地区, 中国特有植物, 任豆, 凋落物理化特性, 土壤微生物多样性

Review of the Impact of Physicochemical Properties of *Zenia insignis* Litter on Soil Microbial Diversity

Liyong Su, Xiuli Gao, Qiuni Ma, Yeji Chen, Yongrong Qin*

School of Chemistry and Bio-Engineering, Hechi University, Yizhou Guangxi

Received: Mar. 20th, 2024; accepted: Apr. 18th, 2024; published: Apr. 26th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 苏黎颖, 高秀丽, 马秋妮, 陈业佳, 覃勇荣. 任豆凋落物理化特性对土壤微生物多样性的影响研究综述[J]. 农业科学, 2024, 14(4): 481-488. DOI: 10.12677/hjas.2024.144061

Abstract

Karst topography is a type of landscape formed by the dissolution and precipitation of soluble rocks through the action of groundwater and surface water, as well as by erosion and deposition, and the effects of gravity including collapse, subsidence, and accumulation. It is one of the five major types of geomorphic landscapes in China. Soil microorganisms are an important component of soil ecosystems and play a significant role in soil biological functions and ecosystem stability. Plant litter is an important carbon source in ecosystems and has potential impacts on soil microbial diversity. The types, quantities, and decomposition status of plant litter are closely related to the community structure and diversity of soil microorganisms. In addition, soil environmental factors such as soil pH and moisture content also have important impacts on plant litter decomposition and soil microbial diversity. *Zenia insignis* is a unique single species plant species in China, and also an excellent pioneer tree species for afforestation on stone mountains in the southern region. At present, there are few literature reports on the impact of *Zenia insignis* litter on soil microbial diversity. In this study, the litter fall and soil samples of *Zenia insignis* and control plants in different plots were collected on the basis of previous research methods, the structure and diversity of soil microbial community were analyzed by using high-throughput sequencing technology and homogenous garden experiment, and the relationship between soil microbial community structure and physical and chemical characteristics of *Zenia insignis* litters was explained by correlation analysis. At the same time, through the analysis of different plant litter and soil physicochemical properties, the impact and mechanism of *Zenia insignis* litter on soil microbial diversity are explained, in order to provide theoretical support for rocky desertification control and vegetation restoration and reconstruction in Karst areas, and to promote the healthy development of soil ecosystems.

Keywords

Karst Areas, Chinese Endemic Plants, *Zenia insignis* Chun, Physical and Chemical Characteristics of Litter, Soil Microbial Diversity

Copyright © 2024 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

广西为我国喀斯特地貌分布的主要省区，其中，桂西北峰丛洼地是中国乃至全世界最典型、最集中的峰林峰丛岩溶地貌，被列为全国石漠化综合治理的八大区之一。喀斯特地区土壤微生物多样性的研究是近年来生态学和土壤科学领域的热点之一，喀斯特地区的特殊地质背景和水文条件，使其土壤微生物群落具有独特的组成和功能。任豆(*Zenia insignis* Chun)又名翅荚木、翅荚豆、任木、砍头树等，属于苏木科任豆属落叶乔木，主要分布在湖北、广西、湖南、贵州、云南、四川等省区的岩溶地区，现已濒临灭绝，属于国家二级重点保护植物[1]。因为任豆具有特殊的花形态结构，所以任木属对研究含羞草科和蝶形花科之间的演化关系具有较重要的科研价值。喀斯特地区植被恢复尤其要注重对乔木树种的种植及抚育[2]，任豆是我国的特有树种，根系发达，对岩溶地区特殊生境具有极强的适应能力，因其生长速度快，生物量大，经济价值高，常被用作我国南方地区植被恢复和石漠化治理的先锋树种。相关研究结果表明，任豆在土壤重金属污染的植物修复中具有较大的潜力[3]，因此，该树种在生态环境保护中应用前

景广阔。

植物和土壤微生物之间有着极为复杂的联系,土壤微生物参与土壤生态系统的物质转化和养分循环,是影响植物生长发育及其物种多样性的重要因素。一方面,因环境条件和物种的差异,植物和土壤微生物或形成竞争关系,或表现出互利共生的关系[4];另一方面,土壤微生物多样性受土壤理化性质的影响,土壤有机质会影响土壤微生物的生长代谢,继而影响土壤中有机质养分的归还和转换[5]。国内外对凋落物在森林生态系统物质循环及能量流动中的作用、影响凋落物自然分解的主要因素、添加氮磷等营养物质对凋落物分解的影响开展了广泛的研究,并取得了不少的理论研究成果[6] [7] [8] [9] [10],部分学者对喀斯特地区凋落物的时空分布及分解动态、营养物质添加对土壤微生物生长及碳利用效率的影响、不同林木凋落物的分解特性及其对土壤肥力的影响等相关问题也进行了大量的研究[11] [12] [13],而关于森林植物凋落物对土壤微生物群落结构及生物多样性影响的研究较少[14]。任豆主要分布在我国西南和中南石灰岩地区,因为其对生境要求的特殊性,所以其野生种群数量不多,人们关注也相应较少。笔者及团队成员对任豆在岩溶地区生态修复中的作用开展了多年的调查研究,对任豆凋落物的理化特性进行了分析,对任豆根内生细菌对土壤肥力的影响进行了探讨,取得了一些初步研究成果[15] [16],但是,目前,关于任豆凋落物理化特性对喀斯特地区土壤微生物多样性影响的相关研究报道甚少,因此,通过研究任豆人工林调查样地土壤微生物的组成和功能及其影响因素,探究将任豆作为喀斯特岩溶地区土壤生态系统质量退化的植物修复材料,深入了解其凋落物对土壤微生物群落结构和多样性的影响,揭示喀斯特岩溶地区土壤质量变化的规律及作用机制,对岩溶地区生态环境保护和生态修复具有重要意义。

2. 研究现状

目前,与珍稀保护植物任豆相关的学术探讨及应用研究,主要集中在种子发芽、苗木快繁、幼苗培育、栽培管理、野生种群分布、群落结构特征、种质资源调查、生理生态特性、土壤理化特性、凋落物水分涵养功能、优质木本饲料开发、生态经济效益、林产化工、造林技术、植物对喀斯特地区特殊生境的适应及生态效应、土壤重金属污染植物修复等方面,而关于任豆凋落物理化特性对喀斯特地区土壤微生物多样性的影响鲜有报道[17] [18],通过深入研究土壤微生物与任豆凋落物之间的相互作用,旨在揭示微生物参与任豆凋落物分解的作用机制,可以为林业生产和土壤生态环境保护提供科学依据。

2.1. 丛枝菌根真菌对任豆抗逆性的影响

李霞[19]等人采用温室盆栽试验的方法,以湖南某铅锌矿区的污染土壤为栽培基质,以翅荚木为宿主植物,研究了两种丛枝菌根真菌摩西球囊霉和根内球囊霉对翅荚木生长和吸收累积重金属的影响。结果表明:两种丛枝菌根真菌在增强翅荚木对重金属胁迫抗性方面均具有重要的作用,因而在重金属污染土壤的植物修复中具有极大的潜在应用价值。

Zhang 等[20]人工模拟干旱胁迫条件在温室内进行盆栽试验,分别给任豆幼苗接种三种不同的 AMF 及其混合物。结果表明,在干旱胁迫下,AMF 对任豆幼苗的生物量、渗透压和抗氧化酶活性均有积极的影响;接种 AMF 后,任豆幼苗地上部分和根系的生物量增加了 12.5%~33.8%,株高增加了 13.6%~32.1%,地上部分的磷含量明显增加;与对照相比,接种 AMF 的任豆幼苗,其 SOD、CAT、POD、MDA 等其他生理指标也有明显的差异。

宋凤鸣等人[21]选用摩西球囊霉、幼套球囊霉、根内球囊霉 3 种丛枝菌根真菌,通过接种丛枝菌根和盆栽控水模拟自然干旱的方法,研究其对任豆生长和抗旱性的影响。实验结果表明:接种丛枝菌根真菌能提高植物的光合同化能力和水分利用效率,减轻光合反应中心的伤害程度,增强光能利用率,提高苗

的抗旱性, 其中接种摩西球囊霉的菌根苗抗旱效果最佳。

2.2. 凋落物组成对土壤微生物群落结构及多样性的影响

凋落物的添加可以提高土壤微生物的多样性和生物量, 凋落物的不同化学成分可以影响土壤微生物群落结构和多样性, 凋落物中的营养物质及其分解产物, 如碳、氮、磷等对土壤微生物群落结构及多样性也具有重要的影响。

王小平[22]通过嵌套实验设计来研究凋落物多样性及凋落物组成对凋落物质量、C、N 残余率和残余 C/N 的影响, 结果表明, 凋落物多样性及组成对凋落物残余量(凋落物分解)、C、N 残余率以及残余 C/N 均具有显著影响, 凋落物组成对 G^+ PLFAs 含量具有显著影响。

为了揭示凋落物和植物根系输入对亚热带米槠天然林土壤微生物群落组成和多样性的影响, 张磊[23] 2019 年在设置 7 年的米槠天然林残体添加和去除试验样地, 采集不同处理(对照、去除地上凋落物、去除地下根系、无凋落物输入、添加双倍地上凋落物)的 2 个土层土壤测定微生物磷脂脂肪酸含量, 计算各微生物群落比值以及多样性。结果表明, 0~10 cm 土层微生物群落结构和丰度与分布状况受凋落物输入变化影响较大, 地上凋落物输入可改变细菌丰度以及群落结构。

土壤微生物直接或间接参与土壤生态系统的物质转化和循环过程, 并在其中发挥重要的作用。为了说明不同植物凋落物的数量及质量对土壤微生物群落结构的影响, 王利彦[24]等人采用室内培养结合 Biolog-ECO 方法, 测定了培养第 21 d 的土壤有机碳含量及微生物群落的 AWCD 值、多样性指数、优势度指数、均匀度指数、丰富度指数, 结果发现, 不同凋落物处理(添加或去除)对土壤有机碳、土壤微生物群落多样性具有显著的影响。

卢凤来[25]通过高通量测序比较巨尾桉叶片分解对桉树林、杉树林、乡土植物混交林、荒地四种土壤细菌微生物的影响。结果发现: 桉树林、乡土植物混交林及荒地土壤细菌微生物相似度比较高, 与杉树林的相差较远, 巨尾桉叶片凋落物及其分解产物对土壤微生物群落结构及功能多样性具有重要的影响。

凋落物的组成和质量是影响土壤微生物群落结构的重要因素, 凋落物中含有丰富的营养物质, 可以为土壤微生物提供丰富的能量和营养输入, 是土壤微生物生命活动的物质基础。不同数量和质量的凋落物添加, 会对土壤微生物群落结构产生不一样的影响。

2.3. 任豆生物学特性及其对生态系统的影响

国内学者的相关研究, 主要集中在任豆种子萌发、引种栽培和育苗、不同种源任豆生长性质等生物学特性[26], 以及任豆对土壤肥力和生态系统的影响。

任豆是一种适应能力强、生命力旺盛的植物, 其种子发芽的水势范围比其他石山树种(如银合欢、构树等)更宽, 能够适应较为干旱的生存环境[27]。覃勇荣[28]对任豆种子的萌发方法进行了研究, 并发现了一些具有推广价值的方法, 采用石英砂研磨、砂纸摩擦、恒温水浴和不同温度的热水浸种等方法, 能够提高任豆种子的萌发率和萌发速度, 在实际生产中具有较大的应用价值, 提高经济效益。

植物的生长和生存不仅取决于自身的生理特性, 还与种源地的地理环境因素密切相关。何小勇[29]等人研究发现, 同一块圃地上管理措施完全相同的情况下, 由北往南种源的抗冻性迅速递减, 在引种栽培时需要考虑耐寒种源的筛选。不同种源地种子萌发特征存在显著的种源差异[30], 且任豆苗期叶片的大小与种子大小存在差异, 任豆苗期叶片与种子的大小可以作为区分任豆种源的重要特征[31]。国内一些学者对不同种源任豆种子的萌发特性及其幼苗对重金属的耐性进行了研究, 结果表明, 虽然不同种源任豆种子对金属的耐性不同, 但在一定重金属含量范围内, 任豆种子仍然能够正常萌发, 显示出一定的重金

属耐性[32]。因此,任豆在重金属污染土壤修复中具有潜在的应用价值。

2.4. 石漠化地区生态修复

喀斯特地区生态环境十分脆弱,由于人口的急剧增长、资源的不合理利用及过度的人为干扰,使喀斯特地区生态系统长期处于亚健康及不健康状态,植被遭受严重破坏,基岩大面积裸露,土壤侵蚀,土地生产力下降,从而造成严重的石漠化问题[33]。石漠化地区水土流失问题严重,林草植被成活率低,生长速度慢,因此生态修复难度大,治理成果难巩固,石漠化治理具有长期性、艰巨性和复杂性等特点。

赵文君[34]等人以黔中喀斯特区杠寨小流域为研究对象,对不同程度石漠化下的土壤养分含量进行了动态监测,并研究了化学计量特征的变化规律。结果表明,随着石漠化治理年限的增加,土壤 TN 和 TP 含量在治理后期得到了有效积累,整体上提升了土壤质量。

温远光等人[35]通过对溶岩地区石漠化问题的深入调查研究和讨论分析,提出了一系列石漠化修复建议,认为岩溶石漠化地区不能照搬国内外已有的近自然森林经营方法,可采用任豆、降香黄檀、顶果木、柚木、铁刀木、铁力木等珍贵优良树种,开展近自然森林经营的作业设计。因为不同等级石漠化环境下,物种的适应能力存在显著差异[36],所以在选择植被恢复过程中,不仅要选择能够在石漠化环境下大量存活的物种,还要选择能适应不同程度石漠化的先锋物种,由于人为破坏,现存植被以耐旱的次生先锋树种为主[37]。

此外,还有一些学者以花椒、金银花、核桃和撂荒地 4 种石漠化地区不同生态恢复模式为主要研究对象,通过土壤质量综合指数评价方法,研究不同生态恢复模式下,不同土层的物理、化学和生物指标分布状况,探讨不同生态恢复模式土壤养分分布的特点及各养分指标的相关性特点[38],为石漠化生态修复和土地资源的合理利用提供理论支持。任豆作为石山造林的先锋树种,在我国西南地区石漠化治理中发挥了重要的作用。因此,优化石漠化地区的植被恢复模式和选择适应性强的树种,对石漠化的生态修复和土地资源的合理利用具有重要意义。

3. 存在的主要问题

虽然人们对任豆的相关研究做了大量的工作,并取得不少的理论成果和实践经验,但仍有一些问题值得关注,或者已开展的部分研究工作不够深入,值得继续进行探讨。

(1) 研究的视角有待拓宽。以往人们对任豆的相关研究大多集中在常规的土壤理化分析,植物化学分析、种子发芽试验、苗木栽培管理、石山造林绿化、水土保持、木本饲料开发利用、种质资源调查、植物逆境生理及生态适应方面[39] [40] [41] [42],而对喀斯特地区先锋树种任豆凋落物在土壤生态系统养分循环中的作用关注不够,关于任豆凋落物与土壤肥力变化的关系、作用机制,以及任豆凋落物理化特性对土壤微生物多样性的影响,目前开展的工作不多,研究还不够深入,许多问题仍然不清楚。

(2) 研究的手段有待完善。过去的许多研究,由于技术手段的局限及诸多其他原因,往往只能停留在常规的理化分析及微生物培养层面,因为可人工培养的微生物数量不到其总数的 1%,所以难以得到比较完整的实验数据及相关信息。如今,随着科学技术的发展进步,可利用的研究方法和手段更加先进和完善,因此,给广大研究者带来了更多的希望和选择。在本课题的研究中,除了使用常规的研究方法和手段之外,我们可以借助基因测序等现代分子生物学的技术手段,对任豆凋落物分解及土壤养分变化过程中微生物群落结构及多样性的变化进行深入探讨,以便说明任豆凋落物理化特性对土壤微生物多样性的影响。

(3) 研究的思路需要调整。以往的相关研究,除了野外调研采样及实验室样品处理分析之外,大多侧重于室内人工模拟试验。因为喀斯特地区的空间异质性比较大,再加上野外研究工作的特殊性,室内人

工模拟试验很难真实模拟野外环境, 所以, 得到的实验结果与实际情况可能存在较大的差异。因此, 在可能的情况下, 将室内人工模拟试验与野外试验结合, 两者相互验证, 可能会得到更真实可信的结果。

4. 小结

凋落物在生态系统物质循环和能量流动中具有重要的作用。因为岩溶地区生态环境脆弱, 特殊的地质背景, 叠加过度的人为干扰, 使地表植被破坏, 水土流失, 基岩裸露, 土地生产力严重下降, 因而出现类似荒漠化景观的石漠化现象, 导致自然灾害频发, 造成严重的生态地质灾害。石漠化治理的首要任务是恢复植被和保持水土, 任豆是岩溶地区的优良先锋树种, 具有良好的生态效益和经济效益, 因此, 深入研究任豆凋落物理化特性对岩溶地区土壤肥力变化的影响, 尤其是探讨任豆凋落物理化特性对土壤微生物多样性的影响, 可以进一步揭示岩溶地区土壤质量变化的作用机制, 为岩溶地区生态环境保护及石漠化治理, 提供理论参考和科学依据, 实现生态与经济的双赢。

5. 建议

任豆是中国特有的二级保护珍稀植物, 是我国南方的乡土树种, 是桂西北岩溶地区植被恢复重建和石漠化治理的优良先锋树种。因为任豆根系发达且具有根瘤, 可固定大气中的氮, 耐干旱贫瘠, 生长速度快, 生物量大, 在石漠化地区生长状况良好, 所以, 在石漠化治理及土壤微生物多样性保护方面具有良好作用。因此, 深入了解任豆凋落物理化特性与土壤微生物多样性的关系, 对揭示石漠化地区土壤生态修复的作用机制及石漠化治理具有重要的指导意义。

基于以上所述的各种理由, 为了更加全面深入了解喀斯特地区任豆凋落物在土壤生态修复及石漠化治理中的作用, 一是加强多学科交叉研究, 尽量减少和排除环境因子对试验的干扰和影响, 将不同调查样地采集的任豆凋落物样品和对照植物凋落物样品进行同质园试验, 结合土壤理化性质、土壤微生物群落组成、凋落物微生物群落组成、凋落物分解速率、养分归还等多个方面的数据, 深入探究喀斯特地区任豆凋落物对土壤微生物的综合影响机制; 二是依托先进的测序技术、生物信息学工具和高效的实验手段, 提高样本采集和数据分析的准确性和效率; 三是关注资源利用和环境保护, 将研究成果应用到喀斯特地区的资源管理和生态环境保护中, 促进喀斯特地区的经济可持续发展。

基金项目

桂西北地方资源保护与利用工程中心(桂教科研[2012] 9 号), 河池学院高层次人才科研启动费项目(XJ2018GKQ016), 广西高校大学生创新创业计划训练项目(202310605036)。

参考文献

- [1] 林玮, 周鹏, 周祥斌, 等. 任豆种源种子性状地理变异研究[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(4): 69-74.
- [2] 李建明, 王志刚, 王爱娟, 等. 退耕还林恢复年限对岩溶槽谷区石漠化土壤物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 99-108.
- [3] Zhao, X.L., Liu, J.F., Xia, X.L., Chu, J.M., Wei, Y., Shi, S.Q., Chang, E.M., Yin, W.L. and Jiang, Z.P. (2014) The Evaluation of Heavy Metal Accumulation and Application of a Comprehensive Bio-Concentration Index for Woody Species on Contaminated Sites in Hunan, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, **21**, 5076-5085. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2393-3>
- [4] 韩佳欣, 王汝振, 张玉革, 等. 森林-草原生态系统交错带植物与微生物多样性研究进展[J/OL]. 生态学杂, 2023: 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230712.1520.014.html>
- [5] 刘丽, 徐明恺, 汪思龙, 等. 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4692-4706.
- [6] 刘平, 杨章旗, 颜培栋, 等. 马尾松林下植被和凋落物的碳氮磷化学计量特征[J]. 森林与环境学报, 2023, 43(5):

473-480.

- [7] 张悦, 张艺凡, 马怡波, 等. 森林生态系统凋落物分解影响因素研究进展[J]. 环境生态学, 2023, 5(4): 45-56.
- [8] 朱玲, 魏文涛, 吴若冰, 等. 马尾松和杉木人工林凋落叶水溶性碳氮磷的季节动态[J]. 亚热带资源与环境学报, 2021, 16(4): 7-14.
- [9] 杨关吕. 森林枯落物分解研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2021, 33(3): 30-35.
- [10] 王玉鑫, 付晓莉, 王辉民, 等. 氮磷添加对杉木根叶分解残余物微生物群落结构及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5408-5416.
- [11] 蔡肖凌, 杨光蓉冯, 莹沈, 等. 食碎屑动物通过摄食更多高质量的凋落物促进混合分解效应[J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 501-506.
- [12] 淦江. 喀斯特森林凋落物时空分布及分解动态[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西农业大学, 2024.
- [13] 张燕, 强薇, 罗如熠, 等. 氮磷添加对土壤微生物生长、周转及碳利用效率的影响研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 526-534.
- [14] 程基恒. 四种林木凋落物在三种林分内的分解特征及其对土壤性质的影响[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
- [15] 骆娟. 森林凋落物分解过程对土壤微生物影响研究综述[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(5): 25-27+31.
- [16] 蒋银妹, 张燕植, 覃勇荣, 等. 中国特有植物青檀和任豆根际土壤微生物多样性的比较[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(3): 693-710.
- [17] 邓慧莲, 陈乐, 黄必乐, 等. 任豆根际土壤微生物群落结构及多样性的季节变化. 农业科学, 2022, 12(3): 196-213.
- [18] 黄必乐, 邓慧莲, 解文惠, 等. 不同植被对桂西北岩溶地区土壤微生物多样性的影响[J]. 农业科学, 2021, 11(7): 658-677.
- [19] 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 等. 丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3142-3148.
- [20] Zhang, Z.F., Zhang, J.C., Xu, G.P., Zhou, L.W. and Li, Y.Q. (2019) Arbuscular Mycorrhizal Fungi Improve the Growth and Drought Tolerance of *Zenia insignis* Seedlings under Drought Stress. *New Forests*, **50**, 593-604. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9681-1>
- [21] 宋凤鸣, 刘建华, 刘登彪, 等. 3种丛枝菌根真菌对任豆生长和抗旱性的影响研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2018, 38(6): 97-105.
- [22] 王小平, 杨雪, 杨楠, 等. 凋落物多样性及组成对凋落物分解及土壤微生物群落的影响——二氧化碳倍增条件下[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6171-6178.
- [23] 张磊, 贾淑娴, 李啸灵, 等. 改变凋落物和根系输入对米槠天然林土壤微生物群落的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 270-277.
- [24] 王利彦, 周国娜, 朱新玉, 等. 凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2709-2718.
- [25] 卢凤来. 巨尾桉叶化感作用及其与土壤微生物的关系[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2020.
- [26] 潘月芳, 曹艳云, 郝海坤. 任豆容器苗培育技术[J]. 林业科技开发, 2001(2): 32-33.
- [27] 韦娇媚, 唐玉贵, 黄志娟. 任豆种子发芽对干旱胁迫的响应[J]. 广西林业科学, 2010, 39(2): 73-77.
- [28] 覃勇荣, 蒋光敏, 岑忠用, 等. 喀斯特地区造林先锋树种任豆种子萌发特性研究[J]. 种子, 2008, 27(12): 15-21.
- [29] 何小勇, 赵思东, 柳新红, 等. 翅荚木的天然分布与引种栽培[J]. 浙江林业科技, 2006(5): 61-65.
- [30] 唐文秀, 盘波, 隗红燕, 等. 广西不同种源任豆种子萌发和幼苗生长特性的对比研究[J]. 种子, 2019, 38(12): 93-98.
- [31] 柳新红, 何小勇, 袁德义, 等. 翅荚木地理种源苗期遗传性状变异[J]. 林业科学研究, 2007(6): 814-819.
- [32] 覃勇荣, 汤丰瑜, 严海杰, 等. 重金属胁迫对任豆种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 种子, 2017, 36(10): 31-36.
- [33] 陈红莲, 李瑞, 张玉珊, 等. 赤水河流域不同地貌区生态系统健康对比[J]. 应用生态学报, 2023, 34(7): 1912-1922.
- [34] 赵文君, 李倩, 崔迎春, 等. 喀斯特区石漠化治理对土壤养分含量及化学计量特征的影响——以黔中杠寨小流

- 域为例[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(8): 76-86.
- [35] 温远光, 周晓果, 王磊, 等. 中国岩溶森林生态保护修复的理论与技术[J]. 广西科学, 2022, 29(1): 61-70.
- [36] 陈双双, 朱宁华, 周光益, 等. 不同等级石漠化环境下人工乔木林的植被与土壤物理特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(1): 52-61.
- [37] 崔高仰, 容丽, 李晓东, 等. 喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中土壤理化性质的变化[J]. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1188-1197.
- [38] 孙建, 刘子琦, 朱大运, 等. 石漠化治理区不同生态恢复模式土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 222-228.
- [39] Lai, Q., Tu, T. and Zhang, D.X. (2019) The Complete Plastid Genome of *Zenia insignis* Chun (Leguminosae). *Mitochondrial DNA Part B*, **4**, 2926-2927. <https://doi.org/10.1080/23802359.2019.1660266>
- [40] Li, H.X., Zhou, H.Y., Wei, X.H., *et al.* (2019) Variations in Sap Flow of *Zenia insignis* under Different Rock Bareness Rate in North Guangdong, China. *Journal of Mountain Science*, **16**, 2320-2334. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5511-y>
- [41] Zhou, Y.Q., Zhang, M.J., Zhang, D., *et al.* (2018) *In Vitro* Plant Regeneration of *Zenia insignis* Chun. *Open Life Sciences*, **13**, 34-41. <https://doi.org/10.1515/biol-2018-0005>
- [42] 王楚楚, 钟全林, 程栋梁, 等. 引种期同质园翅荚木主要叶功能性状与种源地环境关系[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4892-4899.