DOI: 10.20103/j.stxb.202208062243

孝惠爽,赵杰,傅声雷.华南典型尾叶桉纯林经营对土壤理化性质、微生物和线虫群落的影响.生态学报,2023,43(19):7963-7973.

Xiao H S, Zhao J, Fu S L.Effects of Eucalyptus plantations and management on soil physico-chemical properties, microbial and nematode communities in South China.Acta Ecologica Sinica,2023,43(19):7963-7973.

华南典型尾叶桉纯林经营对土壤理化性质、微生物和线虫群落的影响

孝惠爽[1],赵 杰[2,*],傅声雷[3]

1 聊城大学生命科学学院,聊城 252059

2 中国科学院亚热带农业生态研究所,长沙 410125

3 河南大学,开封 475001

摘要:桉树是我国华南地区的重要速生营林树种,具备极高的经济价值,然而我国桉树人工林的发展还存在巨大争议,桉树营林的生态环境效应还有待进一步考究。针对我国华南地区典型尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)纯林经营的潜在生态问题,选取广东鹤山森林生态系统国家野外研究站的 10 树种混交林(10 species mixed forest plantation,10S)、30 树种混交林(30 species mixed forest plantation,30S)和桉树纯林(Eucalyptus monoculture, E)三种林型,另外设置桉树砍伐(Eucalyptus cutting, EC)和桉树砍伐清除林下灌草(Eucalyptus cutting and understory removal, ECUr)这两种常见经营措施的处理,通过比较不同林型和管理措施下土壤理化性质和生物指标的差异,解析了桉树营林对土壤理化特性、土壤微生物以及线虫群落的影响。本结果表明:三种林型间的土壤理化特性没有显著差异,但桉树纯林的土壤真菌生物量、真菌细菌比、食细菌线虫多度显著高于 10 和 30 树种混交林,桉树纯林的食真菌线虫多度和线虫群落多样性显著高于 10 树种的混交林。不同桉林管理措施下,桉树砍伐对土壤理化性质和土壤生物的影响不显著,但是桉树砍伐同时清除林下灌草显著降低了土壤含水率、真菌细菌比、线虫总多度、食细菌线虫多度、食真菌线虫多度以及杂食捕食性线虫多度。以上结果说明,桉树纯林的生物群落总体上优于相同林龄的多物种混交人工林,因此桉林的土壤质量状况并不比混交林低。另外,砍伐导致了桉林土壤质量下降,在砍伐过程中破坏灌草会对土壤质量造成更严重的负面影响。总体来看,桉林本身具有良好的生态功能,但作为一个具有生态和经济双重效益的物种,桉林长期经营可能会导致土壤退化等一系列生态问题。因此未来桉树人工林生态和经济效益权衡可能需要重点关注营林措施。

关键词:桉树;人工林;营林措施;微生物;线虫;土壤退化

Effects of Eucalyptus plantations and management on soil physico-chemical properties, microbial and nematode communities in South China

XIAO Huishuang[1], ZHAO Jie[2,*], FU Shenglei[3]

1 *Faculty of Life Science, Liaocheng University, Liaocheng* 252059, *China*

2 *Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*

3 *Henan University, Kaifeng* 475001, *China*

Abstract: Eucalyptus is one of the world's most widely planted tropical and sub-tropical fast-growing hardwoods, which has extremely high economic value. Plantations of eucalyptus have been extensively established in South China during the past decades. However, there is an ongoing debate concerning the environmental effects and the development of eucalyptus plantations in South China. The ecological/environmental effects of eucalyptus plantations need to be further studied. This

基金项目:国家自然科学基金联合基金(U21A20189);湖南省自然科学基金(2021JJ10042)

收稿日期:2022-08-06; **网络出版日期**:2023-05-15

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jzhao@ isa.ac.cn

study contraposed the potentially ecological problems of typical eucalyptus in South China, selected three types of plantations including 10 species mixed plantation (10S), 30 species mixed plantation (30S), and eucalyptus monoculture (E), and established two treatments of eucalyptus cutting (EC) and eucalyptus cutting with understory removal (ECUr) in the eucalyptus monocultures. The influences of eucalyptus management on soil physical and chemical characteristics, soil microorganisms and nematode communities were analyzed by comparing the differences in soil physical and chemical properties and biological indicators under different forest types and management measures. The results showed that there was no significant difference in soil physico-chemical properties among the three plantation types. However, the soil fungal biomass, the ratio of fungal biomass to bacterial biomass, and the bacterivorous nematode abundance of the eucalyptus monoculture were significantly higher than those of the 10 and 30 species mixed plantations. Besides, the nematode diversity and fungivorous nematode abundance of the eucalyptus monoculture were apparently higher than those of 10 species mixed plantation. Under different eucalyptus forest management measures, the eucalyptus cutting treatment did not significantly affect the soil physico-chemical and biological properties. But the eucalyptus cutting with understory removal treatment remarkably reduced the soil water content, the ratio of fungal biomass to bacterial biomass, the abundances of total nematodes, bacterivorous nematodes, fungivorous nematodes and omnivorous-carnivorous nematodes. The results indicated that the eucalyptus monoculture had generally better soil physico-chemical and biological characteristics than the mixed plantations of native species at the same age. In other words, the soil quality of the eucalyptus plantation was not lower than the mixed plantations. Our results also indicated that eucalyptus cutting decreased the soil quality, particularly when the understory was removed. Overall, the eucalyptus plantations could be beneficial to the environment when used as a measure of ecosystem restoration. As an economic tree species, however, unreasonable management practices of eucalyptus plantations may induce severe soil degradation, such as soil erosion, nutrient depletion, biodiversity loss, and production decline. Therefore, the trade-off between ecological and economic benefits of the eucalyptus plantations may need to focus on forest management measures in the future.

Key Words: eucalyptus; plantation; forest management practice; microbe; nematode; soil degradation

中国是世界上人工林面积最大的国家,2019 年森林资源清查结果显示,中国人工林面积已达 7954.28 万 hm^2,总蓄积量 338759.96 万 m^3[1]。人工林具有水土保持、固碳增汇、生物多样性保育、供应木材、景观美化和文化教育等生态系统服务功能[2—4]。但是,不合理的经营措施导致很多地区的人工林经营的可持续性面临巨大挑战,如:长期轮伐导致地力衰退和树木生长缓慢、营造纯林导致生物多样性降低和病虫害风险增加等[5—7]。因此,人工林的经营措施的可持续性需要进一步探究。

桉树属于桃金娘科,是世界三大速生人工林树种之一,也是我国华南地区的重要营林树种,该区种植面积已超过 2.0×10^6 hm^2[8—9],主要分布在广西、广东、海南、四川、福建等省份[10],具有速生丰产、轮伐周期短、适应性强、用途广泛等优点,具备一定的经济效益和社会效益[11]。但我国桉树人工林经营面临巨大的争议,很多学者认为桉树营林的负面环境效应过高,主要表现在:1)桉树营林导致生物多样性下降。一方面因为桉树的化感效应对很多其它植物物种的定植和生长具有抑制作用。比如,巨桉根际土壤中酚类化感物质直接或间接影响其林下植物多样性[12];尾叶桉的叶提取液很大程度抑制绿豆和豌豆插条的生根,因而推断其体内含有抑制生根的物质[13]。另一方面,桉树生长迅速,轮伐期一般为 4—6 年甚至更短[14],砍伐对植被的破坏性比较大,从而导致生物多样性低。其他不合理人为因素也影响着桉林生物多样性,如纯林结构单一导致的生境异质性下降和种植密度过大导致的透光性下降等[15]。2)长期桉树营林导致土壤退化。首先,长期轮伐在加快水土流失的同时带走了大量土壤养分,造成林地肥力下降[16];其次,传统的人工林营林措施目的多在于木材产量及经济效益,往往树种单一、结构简单,土壤微生物往往受单一地被物(覆盖地表的植物及枯枝落叶等)抑制,导致人工林系统土壤养分循环变慢、养分归还速率低[17]。3)桉树生长快、耗水多,其“抽水机”效

应[15]和“蒸发机”效应[18—19]造成土壤含水量和地下水位下降。4)桉树还会导致水质下降,如叶片溶解的有机质如单宁酸通过径流进入水体,导致水体变色,水质恶化[20]。但是,也有学者认为桉树营林对地下水位与生物多样性未造成显著的负面影响[21],甚至有研究发现桉树具有促进生态系统恢复重建和应对气候变化的正面效应[22—23]。因此,桉树营林的生态环境效应还有待进一步研究。

营林过程中使用乡土树种进行多物种混交是提高人工林生态服务功能的重要手段。有研究发现,与速生纯林相比,乡土树种造林与多物种混交可显著改善土壤养分状况,提高林分生产力和物种多样性。比如,桉树与乡土阔叶树混交比桉树纯林具有更高的土壤有机质、全磷、全氮水平[24];人工林引入本地树种可增加其多功能性[25];马尾松-阔叶树混交林在林木生产力、维持地力等方面相比马尾松纯林效果显著[26];尼泊尔桤木-云南松混交林、麻栎-云南松混交林比云南纯松林的土壤质量更高[27]。但也有研究表明,橡胶-火力楠混交林和橡胶-米老排混交林使橡胶林土壤微生物量碳含量下降[28];就土壤有效氮的储存和供应而言,乡土阔叶人工林不一定优于桉树人工林[29]。因此,乡土树种和混交林经营模式提升生态系统服务功能的机制仍需进一步研究,从而提出针对不同地区、不同气候下的人工林生态系统的经营对策。

土壤健康对人工林长期经营至关重要。生物、化学和物理属性的相互作用共同影响了土壤环境变化与发展,土壤的生物群落组成及多样性、化学养分状况和物理结构状况等指标都被广泛地用于指示土壤质量状况[30]。土壤生物作为指示生物的优点在于其直接参与土壤养分循环,对生态系统经营管理等干扰十分敏感;它是一个综合性的指标,土壤生物的活性、生理、行为、多样性和群落结构的特征和变化均可能反映土壤的健康状况[31—32]。土壤微生物是被研究最多的土壤生物,它们直接参与了土壤碳氮磷循环过程,是养分生物地球化学循环的重要驱动者,也常被用作土壤质量指示生物[33—35]。土壤线虫是地球上数量最多的后生动物,具有分布广泛、迁移能力相对较弱、世代周期较短、功能类群丰富、占据食物网关键链接、身体透明且结构简单易观察、对环境变化较为敏感等特点,是最常用的土壤指示生物之一[36—37]。国内外很多研究将土壤微生物和线虫等作为指示生物来探索森林经营管理措施对土壤健康状况的影响[38—41]。

本研究针对我国华南地区典型桉树纯林经营的潜在生态问题,通过比较 10 树种乡土混交林、30 树种乡土混交林、桉树纯林 3 种林型以及桉树林砍伐和清理林下灌草这两种常见经营措施下的土壤理化特性、土壤微生物以及线虫群落指标,评价乡土混交林、桉树纯林及相关经营措施之下的土壤健康状况。我们假设:1)多物种混交的乡土树种混交林比桉树纯林的土壤理化和生物状况更好,2)桉树砍伐和清理灌草的营林措施对土壤理化和生物状况具有负面影响。预期研究结果将可以为我国华南地区人工林可持续经营以及政府的林业管理政策、法规的制定提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究在隶属于中国科学院华南植物园的鹤山森林生态系统国家野外科学观测研究站(22°34′N,112°50′E)开展,地处广东省鹤山市,属于亚热带季风气候,干湿季分明,湿季从每年 4 月持续到 9 月,干季从 10 月持续到次年 3 月,年均温为 21.7℃,年均降雨量为 1700 mm。此地处于长期高温潮湿的物候条件下,流水侵蚀作用显著,地带性土壤为赤红壤,丘陵地貌形态较为普遍。区域顶级群落是亚热带季风常绿阔叶林[42]。

1.2　实验设计

本实验基于广东省鹤山市共和镇退化荒坡实验平台开展,该平台于 2005 年建立,按照完全随机试验设计,共包含 11 个人工林植被类型,每个类型 3 个重复,面积均为 1 hm^2[43]。我们在其中选取了 3 个植被类型,即 10 树种的混交林、30 树种的混交林和桉树纯林,每个林型 3 个重复。2009 年 7 月,在每个 1 hm^2的样地内设置 1 个 20 m×20 m 的样方,用于进行 10 树种的混交林(10 species mixed forest plantation,10S)、30 树种的混交林(30 species mixed forest plantation,30S)和桉树纯林(*Eucalyptus* monoculture,E)的土壤取样和对比分析;除此之外,在每个桉树纯林中增设 2 个 20 m×20 m 的样方,随机安排桉树砍伐(*Eucalyptus* cutting,EC)和桉树

砍伐清理灌草(*Eucalyptus* cutting and understory removal,ECUr)处理,7 月底前完成所有样方设置和桉树砍伐清理灌草的处理。桉树砍伐是用电锯在距离地面 5 cm 的地方锯断,砍伐桉树的茎干和枝条均从样方中移出。灌草清理是利用柴刀通过人工将地表的所有植被清除并移出样方。

鹤山各林型的所有的树都是栽种的树苗,由当地林科所育苗,人工林植株种植株行距为 2 m×3 m,种植密度约为 1667 株/hm^2,种植时间为 2005 年 4—6 月。10 树种的混交林种植的植物主要以枫香(*Liquidambar formosana*)、灰木莲(*Mangleitia glauca*)、观光木(*Tsoongiodendron odorum*)、厚荚相思(*Acacia crassicarpa*)、秋枫(*Bischofia javanica*)为主。30 树种的混交林种植的植物主要以枫香(*L.formosana*)、灰木莲(*M. glauca*)、观光木(*T. odorum*)、厚荚相思(*A. crassicarpa*)、秋枫(*B. javanica*)、火力楠(*Michelia macclurei*)、尖叶杜英(*Elaeocarpus apiculatus*)、深山含笑(*Michelia maudiae*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)、凤凰木(*Delonix regia*)、假苹婆(*Sterculia lanceolata*)、印度紫檀(*Pterocarpus indicus*)、岭南山竹子(*Garcinia oblongifolia*)为主。桉树纯林种植的是尾叶桉(*E. urophylla*)。林下灌草以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为优势种,常见的其他植物种类还有芒(*Miscanthus sinensis*)、山黄麻(*Trema orientalis*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)、梅叶冬青(*Ilex asprella*)、桃金娘(*Rhodomvrtus tomentosa*)等。

1.3 土壤取样与分析

2010 年 8 月初进行土壤采样,取样采用直径为 2.5 cm 的土钻,在 20 m×20 m 的样方中随机选择 10 个点进行取样,取样深度为 0—10 cm,混合样,过 2 mm 筛后,分成 3 份,1 份风干用于土壤 pH、有机碳(SOC)和全氮含量(TN)的分析,一份 4℃冰箱保存不超过 5 天,进行土壤含水量(SWC)分析和土壤线虫的提取分析,一份-20℃冰箱保存不超过 1 个月用于土壤 PLFA 的提取分析。

土壤含水量采用烘干法测定,土壤 pH 采用电位法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,土壤全氮采用半微量凯氏法测定。土壤微生物群落组成采用磷脂脂肪酸 PLFA 法测定[44],通过 PLFA 生物标记的土壤微生物生物量(Soil microbial biomass)、土壤细菌生物量(Soil bacteria biomass)、土壤真菌生物量(Soil fungi biomass)和香农-威纳多样性指数(Shannon-Wiener Index)来评估 3 种林型以及不同经营措施下的人工林土壤微生物群落多样性结构状况。

土壤线虫提取采用贝尔曼漏斗法[45],土壤用量为 50 克新鲜土壤,提取的线虫热杀死后固定于 4%的甲醛溶液中[46]。利用倒置显微镜进行线虫计数,利用微分干涉显微镜(ECLIPSE 80i, Nikon)将线虫鉴定到属水平,线虫数量超过 100 条的样品仅鉴定 100 条线虫,不足 100 条的样品全部鉴定。将线虫各属划分到以下4 个食性类群:食细菌线虫、食真菌线虫、植食性线虫、杂食-捕食性线虫[47];并赋予线虫各属相应的 cp 值[48]。计算土壤线虫的香农-威纳多样性指数(Shannon-Wiener index, H')[49—50]、自由生活线虫成熟指数(Maturity Index, MI)[51]、结构指数(Structure Index, SI)、富集指数(Enrichment Index, EI)[52]、植物寄生线虫指数(Plant Parasites Index, PPI)、食细菌线虫指数(Bacterivores Index, BaI)、食细菌线虫与食微生物线虫之比(Bacterivore to Microbivore Ratio, BMR)、食微生物线虫与植食性线虫之比(Microbivore to Herbivore Ratio, MHR)。

1.4 统计分析

在数据统计前,对所有数据进行了正态性和方差齐性检验,对不符合条件的数据进行了自然对数、平方根或秩转换。不同林型和桉树管理措施对土壤理化性质、微生物和线虫群落影响的分析采用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行,采用 LSD 法进行多重比较,数据转换后仍无法满足正态性和方差齐性的数据采用 Tamhane′s T2 进行多重比较,所有统计均利用 SPSS 20.0 软件(SPSS Inc.,Chicago, IL)进行,统计显著性为 $P=0.05$。

2 结果分析

2.1 土壤理化性质

不同林型和桉树管理措施下土壤理化性质分析结果见图 1。结果显示,桉树纯林土壤含水率显著高于桉

树砍伐清理灌草样地,略高于桉树砍伐样地与 30 树种的混交林。除桉树纯林外,10 树种混交林、30 树种混交林和桉树砍伐样地的土壤 pH 均显著高于桉树砍伐清理灌草样地;且 3 种桉树林土壤 pH 均低于乡土树种混交林,土壤有机碳含量、全氮含量略高于 2 种乡土树种混交林,但是各处理间均没有显著差异。

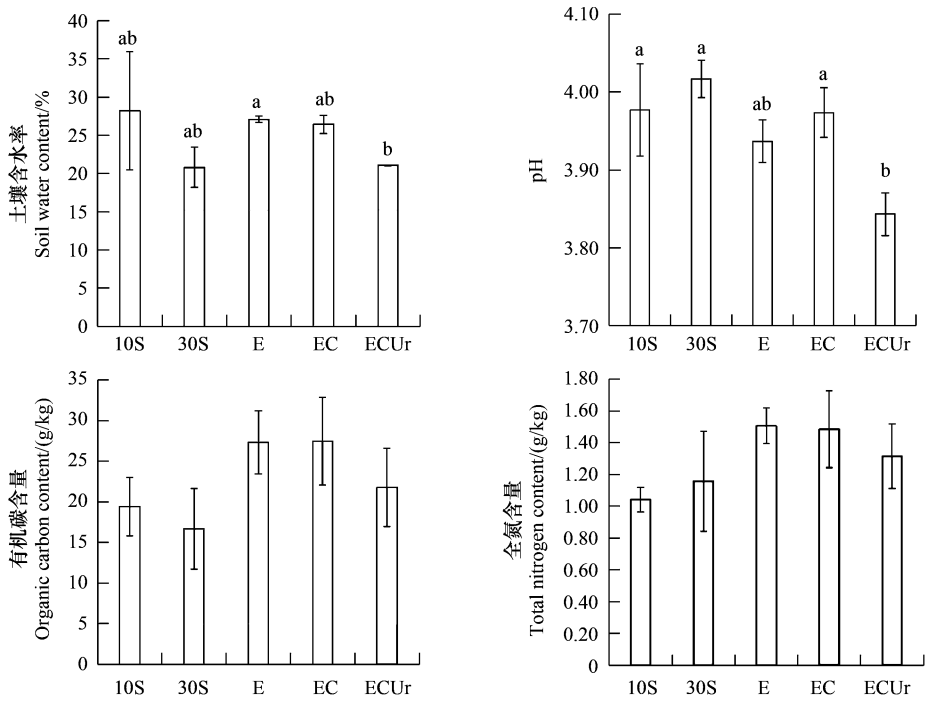

图 1　不同林型和桉树管理措施下的土壤理化性质

Fig.1　Soil physico-chemical properties as affected by forest type and eucalyptus management practice

10S:10 树种混交林;30S:30 树种混交林;E:桉树纯林;EC:桉树砍伐;ECUr:桉树砍伐清理灌草; 不同小写字母表示差异显著($P=0.05$);图中数据为平均值±标准误

2.2　土壤微生物群落

不同林型和桉树管理措施下土壤微生物 PLFA 分析结果见图 2。结果显示,桉树纯林的土壤真菌生物量显著高于 10 树种混交林和 30 树种混交林,桉树纯林和桉树砍伐样地的真菌细菌比显著高于 10 树种混交林、30 树种混交林和桉树砍伐清理灌草样地,且桉树砍伐清理灌草样地真菌细菌比显著高于 10 树种混交林和 30 树种混交林,土壤微生物生物量、土壤真菌生物量与真菌细菌比的变化趋势均为:桉树纯林>桉树砍伐样地>桉树砍伐清理灌草样地>10 树种混交林>30 树种混交林。3 种桉树林的土壤细菌生物量和香农-威纳多样性指数均高于 2 种乡土树种混交林。

2.3　土壤线虫群落

不同林型和桉树管理措施下的土壤线虫属的多度分析结果见图 3。结果显示,桉树纯林的线虫总多度、食细菌线虫多度、食真菌线虫多度均显著高于 10 树种混交林和桉树砍伐清理灌草样地;桉树砍伐样地线虫总多度、食细菌线虫多度和食真菌线虫多度均显著高于 10 树种混交林、30 树种混交林和桉树砍伐清理灌草样地;线虫总多度和食细菌线虫多度的变化趋势均为:桉树砍伐样地>桉树纯林>30 树种混交林>桉树砍伐清理灌草样地>10 树种混交林。桉树砍伐样地的植食性线虫多度显著高于 10 树种混交林,且桉树纯林的植食性线虫多度高于桉树砍伐样地和桉树砍伐清理灌草样地。10 树种混交林、30 树种混交林、桉树纯林和桉树砍伐样地的捕食/杂食性线虫多度均显著高于桉树砍伐清理灌草样地,且桉树砍伐样地的多度最高。

不同林型和桉树管理措施下的土壤线虫群落生态指数值分析结果见表 1。结果显示,线虫成熟指数大小依次为:10 树种混交林>桉树砍伐样地>桉树纯林>30 树种混交林>桉树砍伐清理灌草样地,说明桉树砍伐清

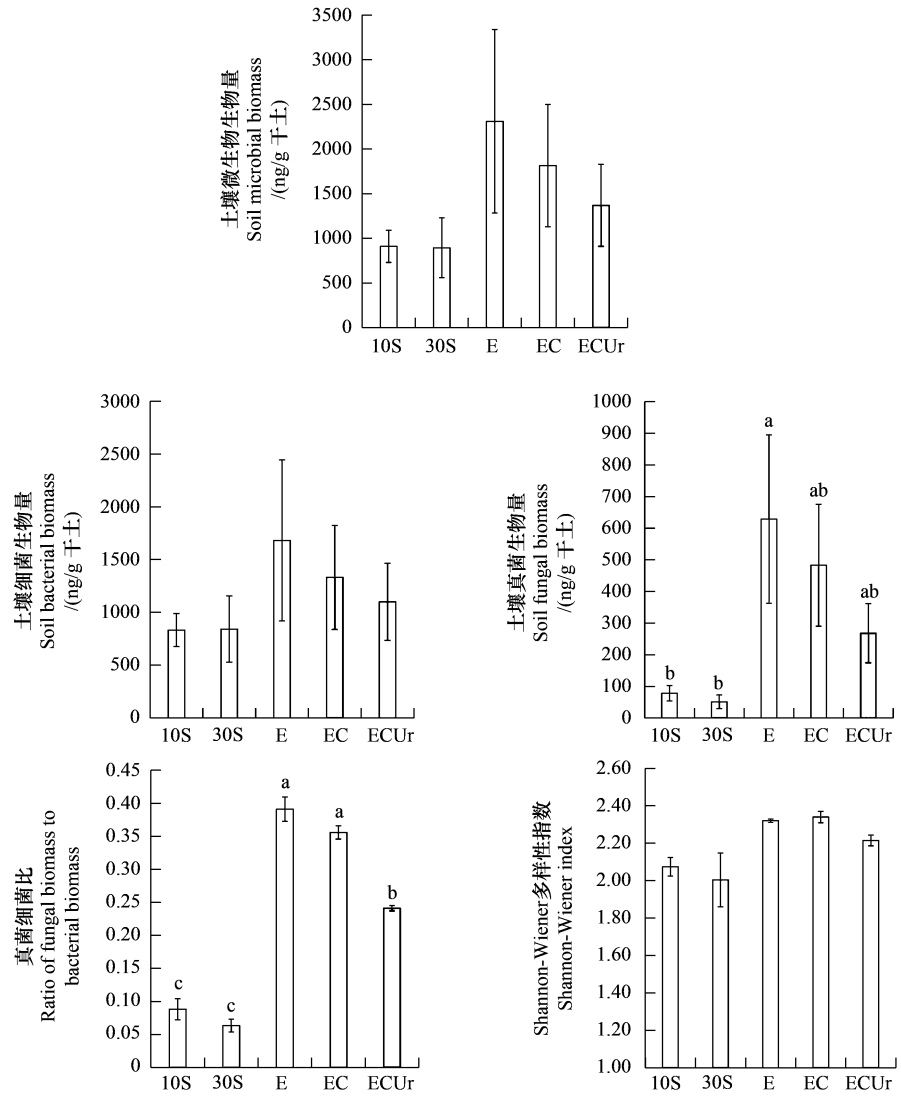

图 2 不同林型和桉树管理措施下的土壤微生物群落特征

Fig.2 Soil microbial communities as affected by forest type and eucalyptus management practice

理灌草样地土壤受到高度干扰。植物寄生线虫指数大小依次为:30 树种混交林>桉树纯林>桉树砍伐样地>桉树砍伐清理灌草样地>10 树种混交林,说明 30 树种混交林地上植被生长状况较优。食细菌线虫指数中桉树砍伐清理灌草样地显著高于桉树纯林和桉树砍伐样地,说明其细菌及食细菌线虫群落组成出现差异。食细菌线虫与食微线虫比在所有 5 个处理间没有显著差异,但是该指标在桉树砍伐和桉树砍伐清理灌草样地接近 0.5,说明其细菌分解者通道和真菌分解者通道均十分重要。5 种样地的食微生物线虫与植食性线虫之比均大于 1,但处理间没有显著差异,10 树种混交林最高,说明其土壤健康状况良好,桉树砍伐样地最低,说明其土壤健康养分状况最差。富集指数大小依次为:30 树种混交林>桉树砍伐样地>桉树纯林>10 树种混交林>桉树砍伐清理灌草样地,其中 30 树种混交林显著高于桉树砍伐清理灌草样地,说明桉树砍伐清理灌草样地土壤环境较差。结构指数:桉树砍伐样地>桉树纯林>30 树种混交林>10 树种混交林>桉树砍伐清理灌草样地,由此可以看出桉树砍伐处理下的食物网结构化程度可能更高,食物网结构可能更复杂。5 个处理间桉树纯林和桉树砍伐样地香农-威纳多样性指数显著高于 10 树种混交林。

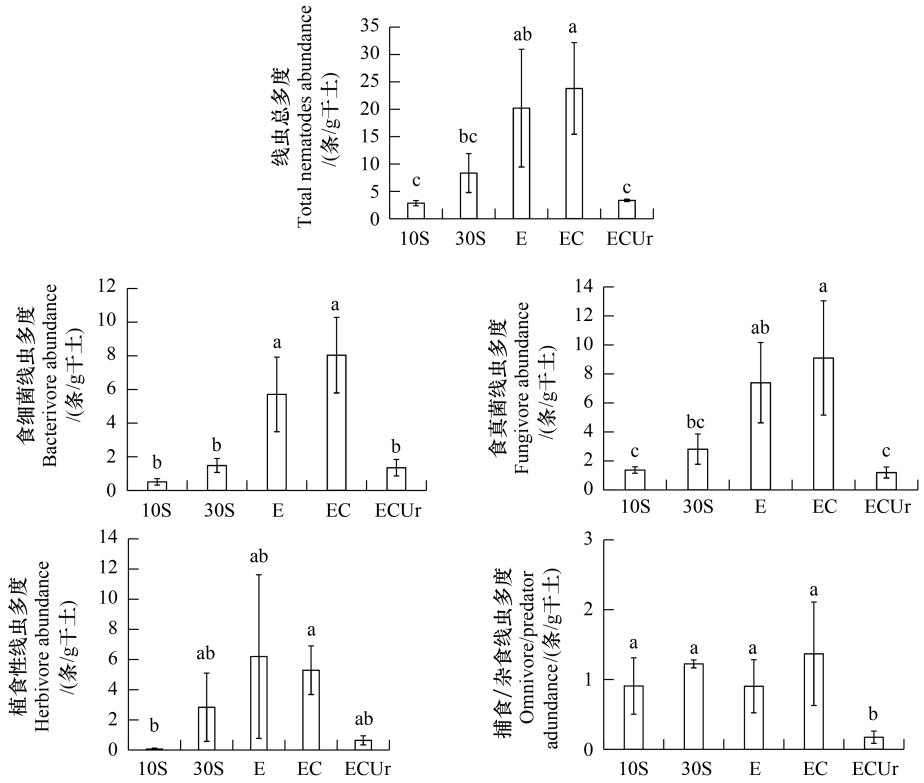

图 3　不同林型和桉树管理措施下的土壤线虫总多度及各食性类群的多度

Fig.3　Abundances of total nematodes and different nematode trophic groups under different forest types and eucalyptus management practices

表 1　不同林型和桉树管理措施下的土壤线虫群落生态指数

Table 1　Ecological indices of soil nematodes under different forest types and eucalyptus management practices

处理 Treatment	自由生活线虫成熟指数 MI	植物寄生线虫指数 PPI	食细菌线虫指数 BaI	食细菌线虫与食微生物线虫之比 BMR	食微生物线虫与植食性线虫之比 MHR	富集指数 EI	结构指数 SI	香农-威纳多样性指数 H'
10S	2.88±0.44	2.53±1.35	57.47±25.73ab	0.26±0.09	33.07±28.12	47.82±3.2ab	63.59±16.21	1.84±0.22b
30S	2.44±0.17	3.77±0.62	67.11±9.36ab	0.38±0.10	3.79±1.70	55.78±7.78a	63.97±5.81	2.18±0.13ab
E	2.45±0.06	3.16±0.17	37.74±9.28b	0.43±0.02	17.78±13.71	53.54±2.31ab	64.40±2.82	2.49±0.05a
EC	2.55±0.05	3.12±0.12	44.55±11.91b	0.49±0.05	3.22±0.52	54.01±5.44ab	71.88±2.78	2.52±0.06a
ECUr	2.43±0.20	2.62±0.31	95.24±4.76a	0.51±0.17	16.32±13.6	38.64±4.57b	52.15±16.2	2.18±0.14ab

MI: Maturity Index; PPI: Plant Parasites Index; BaI: Bacterivores Index; BMR: Bacterivore to Microbivor Ratio; MHR: Microbivore to Herbivore Ratio; EI: Enrichment Index; SI: Structure Index; H': Shannon-Wiener diversity Index; λ: Dominance. 10S:10 树种混交林 10 species mixed plantation;30S:30 树种混交林 30 species mixed plantation;E:桉树纯林 Eucalyptus monoculture;EC:桉树砍伐 Eucalyptus cutting;ECUr:桉树砍伐清理灌草 Eucalyptus cutting and understory remova. 不同小写字母表示差异显著(P=0.05);图中数据为平均值±标准误

3　讨论

3.1　不同林型对土壤理化性质、土壤微生物特征与土壤线虫群落特征的影响

土壤有机碳和全氮含量是评价土壤肥力状况的一个重要指标[53]。本研究结果表明桉树林的土壤有机碳和全氮含量均高于乡土树种混交林,这说明桉树林土壤有机碳和养分积累速率更高,这一结果与我们的假设 1 不相符。尾叶桉生长迅速,其生物量增长较快,一般 5—6 年即可采伐[54],而华南地区常见的营林树种如马尾松、杉木、湿地松最适采伐期需要 20—30 年[55—57],本研究中的乡土树种采伐期可能比马尾松、杉木、湿地松

更长,需要 30 年以上才可采伐。因此,桉树林凋落物积累较快,这可能是其土壤有机碳和全氮含量较高的主要原因,这与周笛轩[58]、李忠伟[59]、姜仲翔[60]等发现的桉树林土壤固碳作用和积累营养物质能力较强的结论相一致。

此外,桉树林的土壤微生物生物量、土壤线虫多度、微生物 PLFA 多样性以及线虫群落多样性均高于 2 种乡土树种混交林,这一结果表明桉树林具有比乡土树种混交林更高的土壤生物数量,并可维持更高的土壤生物多样性。土壤微生物和线虫均主要受到上行效应驱动(即底物资源数量和质量控制)[61—63],如前所述,桉林输入更多凋落物资源到土壤,这也可能是造成土壤生物数量和多样性较高的主要原因;同时,土壤生物对凋落物的分解作用驱动了桉树林土壤有机碳和氮快速积累。与我们的研究结果类似,谭宏伟等人[64]在研究广西红壤区桉树人工林与其他林分土壤微生物活性及细菌多样性时,发现土壤剖面桉树林可培养真菌和放线菌数量显著高于乡土树种马尾松,说明其降解难分解物质的能力较高,并推测原因很可能是这两种人工林地土壤中养分的含量有所不同。

本研究未发现桉树林的土壤含水率明显低于乡土树种混交林,这与桉树“抽水机”的理论不相符,可能因为中国南方地区降水较为丰富,可以及时补充土壤水分[65]。另外,各林型土壤均呈酸性,3 种桉树林土壤 pH 均低于乡土树种混交林,桉林土壤酸性更强,可能由于桉树对部分土壤元素的吸收利用加剧了土壤的酸化[66],也不排除所在样地本身的小区域地理位置和土壤原本的 pH 差异所致。

3.2 桉林管理措施对土壤理化性质、土壤微生物特征与土壤线虫群落特征的影响

轮伐是我国人工林经营导致生态系统破坏和生态系统服务功能下降的主因[67—68]。本研究中桉树砍伐和林下灌草剔除(除杂)对土壤理化性质和土壤生物群落组成均主要呈现负面效应,这符合假设 2 的预期。桉树营林措施导致的土壤退化,可能是由以下几方面的原因造成的。一是,砍伐和剔除灌草的营林活动对土壤造成了直接的干扰破坏,如踩踏和木材倒地等对土壤的直接干扰[69—71];二是,桉树砍伐和剔除灌草的营林措施,将大量生物量移走,同时附带大量养分的移出,这导致了土壤养分的下降[72—73],凋落物等资源输入减少等原因也导致了土壤生物群落多度和多样性的下降[74—76];三是,桉树砍伐和剔除灌草影响了土壤微环境,如太阳辐射直达地面造成的土壤温度升高和土壤水分下降[77—79],雨滴和径流对土壤的直接冲刷造成的水土流失等[80—81]。此外,在本研究中,桉树砍伐和清理灌草对土壤理化性质和土壤生物群落组成的负面效应均高于桉树砍伐,说明管理措施的强度也是影响桉树土壤质量的重要因素,林下灌草的维持对桉树林砍伐可能有一定的缓冲作用。

4 结论

本研究通过土壤理化性质、土壤微生物和线虫群落组成的系统分析,对华南地区桉树营林和主要管理措施下的土壤质量状况进行了研究,结果表明:第一,桉树纯林和乡土多物种混交林相比,土壤质量状况更高。第二,砍伐导致了桉林土壤质量下降,在砍伐过程中破坏灌草会对土壤质量造成更严重的负面影响。因此,我们认为桉树本身具有较高的生态效益,如果作为一个生态恢复的树种,可以快速提高土壤质量促进土壤生态恢复。然而,桉树如果作为一种速生经济树种,其营林目的是木材产出和经济效益,桉树长期轮伐会造成土壤质量的快速下降,对土壤质量退化的影响可能比其他经济树种更加严重。因此,桉树是一个具有生态和经济双重效益的物种,其对土壤质量的影响可能取决于桉树营林的目的。本研究中选择的乡土多物种混交林处于其发展的幼龄期或初期,乡土树种混交林长期来看能提供的生态系统服务功能应该是高于桉树的,但是限于长期观测研究的缺失,这部分研究有待开展。

致谢:本研究是在中国科学院华南植物园的鹤山森林生态系统国家野外科学观测研究站开展,感谢王晓玲、万松泽、林永标等在实验设计、样品采集等方面给予的帮助。

参考文献(References):

[1] 杜志, 胡觉, 肖前辉, 冯强, 贺鹏, 李锐. 中国人工林特点及发展对策探析. 中南林业调查规划, 2020, 39(1): 5-10.

[2] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.

[3] Zhu J J, Dai E F, Zheng D, Wang X L. Characteristic of tradeoffs between timber production and carbon storage for plantation under harvesting impact: a case study of Huitong National Research Station of Forest Ecosystem. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(8): 1085-1098.

[4] 陈超然, 王刊. 世界森林面积正日益缩减. 生态经济, 2018, 34(9): 2-5.

[5] 刘庆, 尹华军, 程新颖, 林波, 胡蓉, 赵春章, 尹春英. 中国人工林生态系统的可持续更新问题与对策. 世界林业研究, 2010, 23(1): 71-75.

[6] 陈幸良, 巨茜, 林昆仑. 中国人工林发展现状、问题与对策. 世界林业研究, 2014, 27(6): 54-59.

[7] 杨静学, 黄本胜, 洪昌红, 熊志杰. 水库库区桉树轮伐对水土流失的影响研究——以广州水库库区为例. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 47(3): 120-126.

[8] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciais P, Rudbeck Jepsen M, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in Southern China generates short term extensive carbon sequestration. Nature Communications, 2020, 11: 129.

[9] 马倩, 周晓果, 梁宏温, 温远光, 郭晋川, 杨健基. 不同经营措施对桉树人工林植物多样性的影响. 广西科学, 2017, 24(2): 182-187, 195.

[10] 黄国勤, 赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略. 生态学报, 2014, 34(18): 5142-5152.

[11] 王继华, 李义纯, 梅瑜, 杨少海. 桉树造林影响土壤物理性状、养分和微生物群落的研究进展. 广东农业科学, 2021, 48(5): 102-109.

[12] 李金金, 张健, 张阿娟, 吴娇, 张丹桔. 不同密度巨桉人工林林下植物多样性及根际土壤化感物质. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2175-2184.

[13] 黄卓烈, 林韶湘, 谭绍满, 林松煜, 杨国清, 莫晓勇. 尾叶桉等植物叶提取液对几种植物插条生根和种子萌发的影响. 林业科学研究, 1997, 10(5): 546-550.

[14] Xu Y X, Du A P, Wang Z C, Zhu W K, Li C, Wu L C. Effects of different rotation periods of *Eucalyptus* plantations on soil physiochemical properties, enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure and diversity. Forest Ecology and Management, 2020, 456: 117683.

[15] 平亮, 谢宗强. 引种桉树对本地生物多样性的影响. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1765-1774.

[16] 韦昌鹏. 桉树人工林经营措施对生态环境的影响及对策. 现代农业科技, 2020(13): 130-132.

[17] 朱教君, 张金鑫. 关于人工林可持续经营的思考. 科学, 2016, 68(4): 37-40, 63.

[18] Yang G R, Deng Y S, Lan P Y, Xie L J, He T G, Su X L, Shi X H, Chen G J. Estimation of evapotranspiration in Eucalyptus plantation and mixed forests based on air temperature and humidity. Forest Ecology and Management, 2022, 504: 119862.

[19] 侯宁宁, 苏晓琳, 杨钙仁, 于婧睿, 王玮. 桉树造林的土壤物理性质及其水文效应. 水土保持学报, 2019, 33(3): 101-108.

[20] Luo F, Li Y P, Norgbey E, Li R H, Ya Z, Nwankwegu A S, Lie H, Sarpong L. A study on the occurrence of black water in reservoirs in *Eucalyptus* Plantation region. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(28): 34927-34940.

[21] 陈少雄. 桉树生态问题的来源与对策. 热带林业, 2005, 33(4): 26-30.

[22] Turnbull J W. Eucalypt plantations. New Forests, 1999, 17(1-3): 37-52.

[23] 曾觉民. 滇中高原桉树人工林植被恢复功能的探讨. 云南林业科技, 2001, 30(1): 1-10.

[24] 黄木易, 梁燕芳, 苏福聪, 朱原立, 李志辉, 刘立玲, 赵苏亚, 龚映匀. 桉树不同间伐强度下套种乡土树种对林分生长和土壤理化性质的影响. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(6): 81-90.

[25] Wang J, Hui D F, Liu Z F, Lin Y B, Wang F M, Long J, Mou Z J, Lu H F, Ren H. Leaf nutrient resorption differs among canopy and understory plant species in subtropical Eucalyptus and Acacia plantations. Land Degradation & Development, 2022, 33(10): 1662-1676.

[26] 樊后保, 刘文飞, 李燕燕, 廖迎春, 苏兵强. 应用层次分析法评价闽西北山地马尾松-阔叶树混交林的综合效益. 山地学报, 2009, 27(3): 257-264.

[27] Liang C, Liu L, Zhang Z X, Ze S Z, Ji M, Li Z B, Yu J D, Yang B, Zhao N. Do mixed Pinus yunnanensis plantations improve soil′s physicochemical properties and enzyme activities? Diversity, 2022, 14(3): 214.

[28] 陈莉, 兰国玉, 谭正洪, 吴志祥, 祁栋灵, 杨川. 橡胶树与其他乡土树种混交对土壤微生物生物量碳的影响. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 26-30.

[29] 覃林, 马雪珍, 吴水荣, 谭玲, 范垚城, 郭文福. 南亚热带典型乡土阔叶人工林与桉树人工林土壤微生物量氮及可溶性氮特征. 应用与环

境生物学报, 2017, 23(4): 678-684.
[30] 贺纪正, 陆雅海, 傅伯杰. 土壤生物学前沿. 北京: 科学出版社, 2015.
[31] 张俊伶, 张江周, 申建波, 田静, 金可默, 张福锁. 土壤健康与农业绿色发展:机遇与对策. 土壤学报, 2020, 57(4): 783-796.
[32] Creamer R E, Barel J M, Bongiorno G, Zwetsloot M J. The life of soils: integration the who and how of multifunctionality. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 66: 108561.
[33] 朱永官, 彭静静, 韦中, 沈其荣, 张福锁. 土壤微生物组与土壤健康. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(1): 1-11.
[34] Chaparro J M, Sheflin A M, Manter D K, Vivanco J M. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(5): 489-499.
[35] Arago O O D S, Oliveira-Longatti S M D, Caputo P S D C, Rufinia M, Carvalhob G R, Carvalhoa T S D, Moreiraa F M D S. Microbiological indicators of soil quality are related to greater coffee yield in the Brazilian Cerrado region. Ecological Indicators, 2020, 113: 106205.
[36] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(6): 224-228.
[37] 邵元虎, 傅声雷. 试论土壤线虫多样性在生态系统中的作用. 生物多样性, 2007, 15(2): 116-123.
[38] Tu C W, Lu Q Q, Zhang Y, Tian J J, Gao Y R, Liu Y, Yang H B, Chen L H, Zhang J, Wang J, Xiao J J. The soil nematode community indicates the soil ecological restoration of the *Pinus massoniana* plantation gap replanted with *Cinnamomum longipaniculatum*. Ecological Indicators, 2022, 136: 108678.
[39] Zhao C C, Zhao J, Wu J P, Classen A T, Li Y X, Lou Y P, Zhang W X, Jing X, Shao Y H, Fu S L. Bamboo forest management leads to a shift in the soil energy channel. Geoderma, 2019, 353: 201-203.
[40] Ngosong C, Buse T, Ewald M, Richter A, Glaser K, Schöning I, Ruess L. Influence of management intensity and environmental conditions on microbiota in biological soil crust and crust-free soil habitats of temperate forests. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 144: 107761.
[41] Zhao J, Wan S Z, Li Z A, Shao Y H, Xu G L, Liu Z F, Zhou L X, Fu S L. *Dicranopteris*-dominated understory as major driver of intensive forest ecosystem in humid subtropical and tropical region. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49: 78-87.
[42] 李跃林, 彭少麟, 赵平, 任海, 李志安. 鹤山几种不同土地利用方式的土壤碳储量研究. 山地学报, 2002, 20(5): 548-552.
[43] 汪雁佳, 陆宏芳, 林永标, 周丽霞, 蔡洪月, 周笛轩. 粤港澳大湾区不同恢复模式植物群落结构与生态系统健康的动态变化. 生态学报, 2021, 41(9): 3669-3688.
[44] Tunlid A, Hoitink H A, Low C, White D C. Characterization of bacteria that suppress rhizoctonia damping-off in bark compost media by analysis of Fatty Acid biomarkers. Applied and Environmental Microbiology, 1989, 55(6): 1368-1374.
[45] 毛小芳, 李辉信, 陈小云, 胡锋. 土壤线虫三种分离方法效率比较. 生态学杂志, 2004, 23(3): 149-151.
[46] Zhao J, Wang K L. Methods for cleaning turbid nematode suspensions collected from different land-use types and soil types. Soil Ecology Letters, 2022, 4(4): 429-434.
[47] Yeates G W, Bongers T, De Goede R G, Freckman D W, Georgieva S S. Feeding habits in soil nematode families and Genera-an outline for soil ecologists. Journal of Nematology, 1993, 25(3): 315-331.
[48] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. Applied Soil Ecology, 1998, 10(3): 239-251.
[49] Zhao J, Wan S Z, Zhang C L, Liu Z F, Zhou L X, Fu S L. Contributions of understory and/or overstory vegetations to soil microbial PLFA and nematode diversities in Eucalyptus monocultures. PLoS One, 2014, 9(1): e85513.
[50] Li J N, Peng P Q, Zhao J. Assessment of soil nematode diversity based on different taxonomic levels and functional groups. Soil Ecology Letters, 2020, 2(1): 33-39.
[51] Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. Oecologia, 1990, 83(1): 14-19.
[52] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. Applied Soil Ecology, 2001, 18(1): 13-29.
[53] 裴小龙, 韩小龙, 钱建利, 陈文, 秦天, 李翾. 自然资源综合观测视角下的土壤肥力评价指标. 资源科学, 2020, 42(10): 1953-1964.
[54] 覃超和. 尾叶桉种植技术探讨. 吉林农业, 2009(14): 64.
[55] 陈学群. 闽北马尾松造纸原料林适宜密度及轮伐期的探讨. 福建林业科技, 1997, 24(2): 32-34.
[56] 周国模, 郭仁鉴, 韦新良, 王雪军. 浙江省杉木人工林生长模型及主伐年龄的确定. 浙江林学院学报, 2001, 18(3): 219-222.
[57] Wang Q C, Sun H F, Wu C J, Peng Q Y. Cutting technic forPinus elliottii plantation of the multi-benefit management pattern. Journal of Forestry Research, 2004, 15(1): 69-72.
[58] 周笛轩, 林永标, 汪雁佳, 刘占锋, 周丽霞. 南亚热带不同人工林生态系统服务功能评估. 生态环境学报, 2021, 30(5): 907-919.
[59] 李忠伟, 陈少雄, 吴志华, 黄树才. 桉树人工林的固碳放氧功能和价值分析——以樟木头林场为例. 桉树科技, 2008, 25(1): 11-14.

[60] 姜仲翔, 任世奇, 杜阿朋. 广西桉树人工林固碳释氧总量核算. 桉树科技, 2021, 38(2): 45-47.

[61] Leloup J, Baude M, Nunan N, Meriguet J, Dajoz I, Le Roux X, Raynaud X. Unravelling the effects of plant species diversity and aboveground litter input on soil bacterial communities. Geoderma, 2018, 317: 1-7.

[62] 于彬彬. 不同气候带下的植物资源输入方式改变对土壤线虫和微生物群落的影响[D]. 开封: 河南大学, 2019.

[63] Zhang X K, Guan P T, Wang Y L, Li Q, Zhang S X, Zhang Z Y, Bezemer T M, Liang W J. Community composition, diversity and metabolic footprints of soil nematodes in differently-aged temperate forests. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 80: 118-126.

[64] 谭宏伟, 杨尚东, 吴俊, 刘永贤, 熊柳梅, 周柳强, 谢如林, 黄国勤, 赵其国. 红壤区桉树人工林与不同林分土壤微生物活性及细菌多样性的比较. 土壤学报, 2014, 51(3): 575-584.

[65] 王志超, 许宇星, 竹万宽, 杜阿朋. 雷州半岛粗皮桉蒸腾耗水特征及其与土壤水吸力的关系. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(6): 14-22.

[66] 周润惠, 唐永彬, 王敏, 董洪君, 余飞燕, 陈聪琳, 郝建锋. 威远不同年龄桉树人工林林下物种多样性和土壤理化性质. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 742-748.

[67] 苏文会, 朱晓武, 范少辉, 曾宪礼, 刘广路. 采伐对森林生态系统的影响综述. 林业资源管理, 2017(3): 35-40.

[68] 安静, 王文杰, 王洪岩, 苏冬雪, 邱岭, 祖元刚. 人工林皆伐对土壤碳及相关理化性质的影响. 东北林业大学学报, 2012, 40(9): 57-62, 66.

[69] 刘艳梅, 杨航宇, 贾荣亮, 李宜轩. 人为踩踏生物土壤结皮对土壤酶活性的影响. 中国沙漠, 2019, 39(4): 54-63.

[70] 李瑶, 刘冬冬, 车陆禄. 喀斯特山地森林土壤入渗特征对人为踩踏的响应规律. 水土保持学报, 2021, 35(4): 96-105.

[71] 邱仁辉, 周新年, 杨玉盛. 森林采伐作业的环境影响及其保护对策. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 130-132.

[72] 周晓果. 林下植物功能群丧失对桉树人工林土壤生态系统多功能性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2016.

[73] Wan S Z, Zhang C L, Chen Y Q, Zhao J, Wang X L, Wu J P, Zhou L X, Lin Y B, Liu Z F, Fu S L. The understory fern *Dicranopteris dichotoma* facilitates the overstory *Eucalyptus* trees in subtropical plantations. Ecosphere, 2014, 5(5):art 51.

[74] Zhao J, Wan S Z, Fu S L, Wang X L, Wang M, Liang C F, Chen Y Q, Zhu X L. Effects of understory removal and nitrogen fertilization on soil microbial communities in *Eucalyptus* plantations. Forest Ecology and Management, 2013, 310: 80-86.

[75] 陈法霖, 张凯, 向丹, 吴爱平, 李有志, 邹冬生, 郑华. 桉树凋落物对土壤微生物群落的影响: 基于控制实验研究. 土壤学报, 2019, 56(2): 432-442.

[76] Wu J P, Liu Z F, Wang X L, Sun Y X, Zhou L X, Lin Y B, Fu S L. Effects of understory removal and tree girdling on soil microbial community composition and litter decomposition in two Eucalyptus plantations in South China. Functional Ecology, 2011, 25(4): 921-931.

[77] Li H F, Fu S L, Zhao H T, Xia H P. Effects of understory removal and N-fixing species seeding on soil N_2O fluxes in four forest plantations in Southern China. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(4): 541-551.

[78] Wang X L, Zhao J, Wu J P, Chen H, Lin Y B, Zhou L X, Fu S L. Impacts of understory species removal and/or addition on soil respiration in a mixed forest plantation with native species in Southern China. Forest Ecology and Management, 2011, 261(6): 1053-1060.

[79] Liu Z F, Wu J P, Zhou L X, Lin Y B, Fu S L. Effect of understory fern (*Dicranopteris dichotoma*) removal on substrate utilization patterns of culturable soil bacterial communities in subtropical *Eucalyptus* plantations. Pedobiologia, 2012, 55(1): 7-13.

[80] 胡静, 覃光华, 王瑞滢, 王帅人, 肖鸿. 不同坡度及植被覆盖度下的坡面流特性数值模拟. 水土保持学报, 2022, 36(3): 37-43.

[81] 李鹏, 杨章旗, 颜培栋, 吴东山. 不同混交比例马尾松和红锥人工混交林水土流失特征和土壤理化性质. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(4): 104-116.