

世界桉树林土壤微生物研究综述

韦菊娴, 王 聪, 何 斌, 尤业明, 黄雪蔓

(广西大学 林学院, 广西南宁 530004)

摘要: 土壤微生物主要通过参与养分元素循环和能量流动等过程来影响桉树生长发育, 在提高土壤肥力和生产力方面扮演着重要角色。桉树作为世界三大速生树种之一, 种类多, 抗逆性强, 适应性广。由于生态系统的复杂性和土壤微生物学研究技术手段的限制, 桉树林土壤微生物多样性和功能的研究较少, 当前对桉树林土壤微生物群落特征的研究大多处于初级阶段。本研究系统综述了不同经营方式、林分类型和林分年龄条件下桉树林土壤微生物群落特征的变化规律及研究进展。与桉树天然林相比, 桉树人工林土壤微生物数量一般较少。与桉树人工纯林相比, 桉树混交林能提高土壤微生物数量、多样性和活性。桉树林土壤微生物数量一般随林龄的增长而增加, 而外生菌根真菌与内生菌根真菌多样性随林龄的增长而下降。分析了土壤微生物参与桉树林土壤养分元素循环和重金属污染修复的作用机制, 并对桉树林土壤微生物研究和分析方法及其应用进行了展望。可为维持桉树林土壤健康、促进林业绿色可持续发展提供科学指导。表 1 参 94

关键词: 桉树; 土壤微生物; 土壤养分循环; 经营方式; 林分类型; 林分年龄

中图分类号: S714.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)05-1144-11

Research progress on soil microorganisms in eucalypt forests

WEI Juxian, WANG Cong, HE Bin, YOU Yeming, HUANG Xueman

(College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: As one of the three major fast-growing tree species in the world, eucalypt is featured with great variety, strong resistance to stress and wide adaptability. It is significant to research the diversity and functions of soil microorganisms which affect the growth of trees by participating in the processes of nutrient element cycling and energy flow and play an important role in improving soil fertility and productivity. However, with limitations in knowledge of soil microbial communities and functions due to the complexity of the eucalypt forest ecosystem and research techniques of soil microbiology, researches on the characteristics of soil microbial communities in eucalypt forests so far are still in the primary stage. This study is aimed to conduct a systematic review of the research progress on soil microbial characters in eucalypt forests with different management patterns, stand types and stand ages. Compared with natural forests of eucalypt, there was generally a lower soil microbial abundance in eucalypt plantations whereas there was an increase in the abundance, diversity, and activity of soil microorganisms in eucalypt mixed forests compared with eucalypt plantation pure forests and the abundance of soil microorganisms in eucalypt forests generally increased with the age of the forest, while the diversity of ectomycorrhizal and endomycorrhizal fungi decreased with the age of the forest. In addition, with an analysis of the mechanism of soil microorganisms involved in nutrient element cycling and remediation of heavy metal pollution in eucalypt forests and prospects of future research and

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31760201, 41807097); 广西自然科学基金资助项目(2019GXNSFBA245096); 广西科技计划项目(AD19245194)

作者简介: 韦菊娴(ORCID: 0000-0002-4645-840X), 从事森林培育与地力维持研究。E-mail: 846644767@qq.com。

通信作者: 王聪(ORCID: 0000-0002-5641-9594), 讲师, 博士, 从事土壤养分循环研究。E-mail: wangcuriel@foxmail.com

analyzing methods of soil microbiome and application of microorganisms, this study will provide scientific guidance for the maintenance of forest soil health and the promotion of green and sustainable forestry development. [Ch, 1 tab. 94 ref.]

Key words: eucalypt; soil microorganism; soil nutrient cycling; management pattern; stand type; stand age

桉树是桃金娘科 Myrtaceae 桉属 *Eucalyptus*、杯果木属 *Angophora* 和伞房属 *Corymbia* 植物的统称, 常绿乔木, 种类多、适应性广、抗逆性强, 与杨树 *Populus* 和松树 *Pinus* 一同被称为世界三大速生树种^[1]。桉树主要原生于澳大利亚(约 1.01 亿 hm^2), 极少数产于印度尼西亚、巴布亚新几内亚和菲律宾^[2]。桉树调节气候、涵养水源和保持水土作用突出, 碳汇功能相当强大, 研究^[3-4]发现: 桉树二氧化碳吸收量达 $24.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 是杉木 *Cunninghamia lanceolata* 的 2.2 倍, 马尾松 *Pinus massoniana* 的 3.0 倍, 对于实现碳中和具有重要意义。作为优质可再生生物质能源, 桉树材是纸浆、人造板、家具的主要原料, 还被广泛用于生产各种林副产品, 如桉树叶油、桉树多酚、桉树木炭等^[5-6]。目前, 全球桉树人工林面积已超过 2 257 万 hm^2 (表 1), 巴西、中国和印度是桉树人工林面积最大的 3 个国家, 提供约 $2.5 \text{ 亿m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 桉树木材, 占世界人工林木材年产量的 37%^[7-14]。

表 1 世界桉树人工林分布^[7-14]

Table 1 Distribution of global eucalypt forests^[7-14]

国家	种植面积/ hm^2	国家	种植面积/ hm^2	国家	种植面积/ hm^2	国家	种植面积/ hm^2
巴西	4 862 000	摩洛哥	215 000	玻利维亚	41 000	土耳其	20 000
中国	4 500 000	菲律宾	189 000	阿尔及利亚	40 000	卢旺达	17 000
印度	3 942 600	马达加斯加	163 000	尼日利亚	40 000	多哥	17 000
澳大利亚	926 000	印度尼西亚	128 000	孟加拉国	39 000	哥斯达黎加	17 000
乌拉圭	676 024	安哥拉	113 000	肯尼亚	39 000	新西兰	15 000
智利	652 100	埃塞俄比亚	100 000	斯威士兰	33 000	危地马拉	13 000
葡萄牙	647 000	墨西哥	100 000	美国	32 500	津巴布韦	13 000
西班牙	640 000	委内瑞拉	100 000	伊朗	31 000	所罗门群岛	12 000
越南	586 000	厄瓜多尔	81 000	哥伦比亚	27 000	尼加拉瓜	12 000
南非	568 000	意大利	72 000	乌干达	25 000	厄立特里亚	12 000
苏丹	540 400	刚果	68 000	莫桑比克	25 000	赞比亚	12 000
泰国	500 000	塞内加尔	65 000	布隆迪	25 000	尼泊尔	11 000
秘鲁	480 000	伊拉克	60 000	马拉维	25 000	法国	10 000
阿根廷	330 000	突尼斯	56 000	帕劳	21 000		
巴基斯坦	245 000	古巴	53 000	巴拉圭	21 000		

说明: 中国主要分布在广西壮族自治区、广东省、福建省、云南省和其他地区, 占比分别为45%、30%、6%、5%和14%; 巴西主要分布在米纳斯吉拉斯州、圣保罗州、巴伊亚州、南马托格罗索州和其他地区, 占比分别为29%、23%、14%、13%和21%; 印度主要分布在卡纳塔克邦、西孟加拉邦、马哈拉施特拉邦、北方邦和其他地区, 占比分别为40%、13%、10%、6%和31%

随着桉树产业的快速发展, 不合理经营管理和林木采伐(如长期施肥和缩短桉树轮伐期)问题凸显, 林地土壤肥力下降, 病虫害频发, 土壤生物多样性下降, 环境污染加剧, 严重危害了土壤健康和林业可持续发展^[15]。土壤微生物是诊断土壤健康的理想指标^[16], 通过自身代谢参与养分循环和污染物降解, 驱动元素生物地球化学循环, 在增强植物根际免疫力、提高土壤肥力等方面发挥关键作用。本研究系统综述了不同经营方式和林分因子条件下桉树林土壤微生物群落的变化规律, 分析土壤微生物和桉树林土壤健康的互作机制, 并对今后桉树林土壤微生物研究和分析方法及其应用进行了展望, 以期为维持森林土壤健康和促进林业绿色可持续发展提供指导。

1 不同经营方式和林分条件下桉树林土壤微生物群落特征

1.1 不同经营方式下桉树林土壤微生物群落特征

依据经营方式的不同, 桉树林分可分为天然林和人工林。受不同林地经营措施如施用肥料和除草

剂、连栽等影响,桉树林土壤环境条件存在差异,这会对土壤微生物活性、丰度和群落组成结构产生影响^[17]。桉树天然林土壤细菌的优势群落主要为放线菌门 Actinobacteria (15%~42%) 和变形菌门 Proteobacteria (12%~65%)^[18-22]。施用化肥改变了桉树人工林土壤养分含量和 pH,从而影响土壤微生物群落。桉树人工林中土壤细菌的优势群落^[23-26] 为绿弯菌门 Chloroflexi (10%~44%)、变形菌门 (18%~44%)、放线菌门 (14%~41%) 和酸杆菌门 Acidobacteria (9%~18%), 相较天然林,土壤中绿弯菌门和酸杆菌门相对丰度增加,可能是施用化肥导致的^[27]。李超等^[28] 采用高通量测序技术对 16S rRNA 的 V3~V4 区域进行研究,发现施用复合肥提高了桉树根系的生理活性,改变了土壤细菌群落组成;与不施肥桉树人工林相比,施肥组人工林土壤绿弯菌门和酸杆菌门群落相对丰度更高。有研究^[29] 发现:绿弯菌门为兼性厌氧细菌,通过参与氮代谢将土壤内多糖分解成氢和有机酸,加快土壤内有机物的降解^[30]。随着复合肥施用量的增加,施肥组桉树林土壤速效氮和植物根系分泌物增加,绿弯菌门群落相对丰度也随之增加^[31]。酸杆菌门细菌能够在酸性条件下降解木质素与纤维素,参与土壤有机质循环^[32]。随着复合肥施用量的增加,土壤速效氮、有效磷、速效钾含量增加,土壤 pH 下降,为酸杆菌门细菌提供了良好的生存环境,因而相对丰度增加。子囊菌门 Ascomycota 和担子菌门 Basidiomycota 是桉树林土壤真菌的优势群落^[19, 33-36], 两者比例在天然林中分别为 60%~86% 和 9%~25%, 在人工林中则分别为 19%~50% 和 47%~75%^[37-40]。担子菌门真菌可有效降解木质素。SCHMIDT-DANNERT^[41] 研究发现施用复合肥使得桉树人工林土壤中木质素含量升高,为担子菌门真菌提供足够底物,促进其生长和繁殖^[42],这可能是桉树人工林担子菌门真菌相对丰度增加的原因。

与桉树天然林相比,施用除草剂后桉树人工林林下植被多样性减少,土壤养分含量下降,可能是导致土壤微生物数量减少的原因。SILVA 等研究^[43] 发现:相比没有施用除草剂的桉树人工林,施用不同剂量和频率的除草剂后,林下植被多样性和根系生理活性降低,土壤微生物生物量碳、氮含量下降。除草剂还会促成植物体内乙烯合成、脱落酸积累和气孔缩小,使二氧化碳吸收量减少,抑制光合作用并影响植物根系的生长发育和活性,引起林下植被多样性降低,间接使土壤养分含量和微生物活性降低,从而影响土壤微生物生物量碳、氮含量^[44-45]。何伟等^[46] 采用变性梯度凝胶电泳法研究了桉树人工林表层土壤细菌群落多样性特征,发现施用除草剂的桉树人工林林下植被多样性发生改变,土壤细菌多样性先减少后增加。原因可能是施用除草剂使林下植被多样性下降,土壤凋落物输入的种类与数量减少,影响微生物基质数量和种类,或对某些土壤微生物产生抑制,导致细菌多样性减少。随着时间推移,除草剂被土壤黏粒吸附、微生物降解,随着除草剂毒性减弱,细菌多样性随之增加^[47]。

现存桉树人工林主要为 1 代幼苗林,2 代萌芽林,3 代萌芽林。魏圣钊等^[48] 采用平板菌落计数法发现:随桉树人工林连栽代次增加,土壤细菌、放线菌和真菌数量均呈减少的趋势。ZHU 等^[49] 研究发现:尾叶桉 *Eucalyptus urophylla* 连续种植后土壤微生物生物量降低,这可能是由于土壤全磷、全氮和含水率随桉树连栽代次增加而逐渐下降,微生物生长所需基质减少,生长受到限制^[50]。可见连栽会造成桉树人工林土壤养分含量下降,影响土壤微生物数量和活性。

1.2 不同树种组成下桉树林土壤微生物群落特征

林分可根据树种组成分为纯林和混交林,不同林分的凋落物数量和质量、土壤养分含量、根际土壤化感物质含量和根系活动等均有差异,这会对土壤微生物群落特征产生影响^[51-52]。

桉树人工纯林凋落物难降解化合物(如木质素等)的比例较高,这些结构复杂的化合物降解时会产生大量酚酸类小分子化合物^[53],对土壤微生物具有抑制作用^[54]。与桉树人工纯林相比,桉树混交林凋落物数量和种类增加,能为更多种类土壤微生物生长提供底物,从而使土壤微生物数量和活性提高。KOUTIKA 等^[55] 研究发现:桉树-刺槐 *Robinia pseudoacacia* 混交林中存在不同种类的凋落物,相比纯林,凋落物碳氮比较低,氮代谢强度提高,酚酸类物质减少,对微生物生长的抑制作用较低,从而使土壤微生物的生物量和多样性增加。PEREIRA 等^[56] 发现:桉树-马占相思 *Acacia mangium* 混交林中凋落物碳氮比较桉树人工纯林低,土壤细菌多样性增加。原因可能是不同种类和质地的凋落物促进了有机质积累,为更多种类的土壤微生物提供了底物。

与桉树人工纯林相比,不同树种组成的桉树混交林能提高土壤养分,降低有害化感物质,从而提高土壤微生物数量和活性。刘小香等^[57] 发现:桉树纯林根系分泌物和凋落物分解产生的化感物质会抑制土

壤微生物的生长繁殖。SANTOS 等^[58]发现：与桉树人工纯林相比，马占相思-桉树混交林根系分泌物对微生物的抑制作用较低，凋落物分解速率较高，碳代谢活性增强，土壤有机碳含量增加，土壤养分状况得到改善，土壤微生物总数比桉树人工纯林高。马占相思是一种浅根树种，根系较细，吸收根多，与桉树混交后，可提高土壤孔隙度，改善土壤空间结构和养分状况，使土壤微生物总数增加^[59]。李万年等^[60]发现：望天树 *Parashorea chinensis* 与桉树混交改善了林地土壤根系分布的空间结构。望天树幼树期根系较浅，与桉树混交后，可有效疏松土壤，改善土壤颗粒结构；混交林土壤全氮、全钾、速效磷含量增加，促进养分的合理利用。

与桉树人工纯林相比，桉树混交林不同树种组成影响根系活动，使真菌群落的生物量降低，土壤细菌和放线菌群落的生物量提高。陈永康等^[61]和黄雪蔓等^[62]采用磷脂脂肪酸法发现：桉树与降香黄檀 *Dalbergia odorifera* 混交可提高根系活性，增加根系分泌物，使土壤细菌和放线菌群落的生物量提高，真菌群落的生物量降低。这可能是由于细菌倾向于分解简单化合物(如根系分泌物中易降解可溶性有机碳等)^[63]，而真菌是有机大分子物质(如木质素等)的主要分解者^[64]。桉树-降香黄檀混交林根系分泌物中易分解活性化合物较桉树人工纯林要多，难降解化合物(如木质素等)则较少，土壤碳氮比降低，导致真菌群落生物量降低，细菌和放线菌群落生物量提高。

1.3 不同林分年龄下桉树林土壤微生物群落特征

桉树林分不同年龄阶段的土壤理化性质^[65]、细根生长状况^[66]、林下植被多样性^[67]、根际土壤化感物质含量的差异等均会导致土壤微生物群落特征发生变化。

不同年龄阶段桉树吸收土壤养分的种类和数量不同，从而影响土壤养分状况，并改变土壤微生物群落特征。张丹桔等^[68]发现：四川丹棱县巨桉 *E. grandis* 人工林轮伐期前(4 a)土壤细菌和真菌逐步减少，此后随林龄增加而逐渐增加。这可能是因为轮伐期前(4 a)为桉树人工林速生生长阶段，林木生长需要消耗大量养分，原有有机质的分解大于外界输入，土壤有机碳含量低，微生物生长基质减少，因而活性与数量下降；随着林龄增长，林木生长趋缓，对养分吸收减少；同时林下生物多样性增加，凋落物不断积累，分解产生有机碳输入土壤，使得土壤有机碳质量分数升高，为微生物生长提供足够基质，因而活性与数量均有增加^[69]。XU 等^[70]发现：雷州半岛北部尾巨桉 *E. urophylla* × *E. grandis* 人工林土壤细菌和真菌数量具有林龄效应，土壤细菌和真菌数量表现为随林龄增长而增加的趋势。

桉树人工林细根生长状况一般表现为幼龄林阶段优于成熟林，这可能是导致幼龄林阶段外生菌根真菌群落多样性指数大于成熟林的原因。江瑶等^[71]比较了不同林龄桉树人工林的土壤外生菌根真菌群落多样性，发现桉树栽植 2 a 时土壤外生菌根真菌物种丰度高于 6 a。这可能是 2 年生桉树处于速生阶段，细根较多，根系活性较高，对营养物质和水分的需求量大^[72]，桉树通过分配大量的养分物质利用外生菌根辅助养分吸收，一定程度上提升了外生菌根真菌多样性。随着林龄增长，桉树生长速度减缓，养分吸收速率降低^[73]，对外生菌根真菌的依赖性降低，细根活性下降，外生菌根真菌群落多样性减少。

土壤磷含量依赖于土壤本身的母质特征^[74]。幼龄林阶段桉树人工林土壤养分循环缓慢，土壤磷元素来源少，磷含量一般小于成熟林，这可能导致了幼龄林阶段内生菌根真菌群落多样性指数大于成熟林。李佳雨等^[75]采用湿筛倾析法研究比较不同林龄桉树人工林的土壤内生菌根真菌群落多样性的变化后发现：栽植 2 a 的桉树土壤内生菌根真菌香农指数和辛普森指数均最高，5 a 时均为最低，但组间多样性指数差异不显著。随着人工营林措施(如施磷肥)的进行，桉树人工林土壤磷含量增加，植物对内生菌根真菌的依赖性降低，分配给内生菌根真菌的养分减少，造成内生菌根真菌多样性减少^[76]。随着桉树林龄增加，内生菌根真菌群落多样性指数逐渐减少。

2 微生物对桉树林土壤养分循环和重金属污染修复的影响

2.1 土壤微生物和元素循环

土壤微生物通过自身代谢参与碳、氮、磷、铁和硫等元素循环^[77]来改善土壤养分状况，提升土壤健康。目前对桉树碳、氮和磷元素循环与土壤微生物群落间关系的研究较多^[78]。

李永双等^[79]通过盆栽实验对云南省建水地区植被根际土壤中产碳酸酐酶的微生物进行分离培养，获得 1 株具有较强溶蚀效果的沙雷氏菌属 *Serratia* 细菌。SALEEM 等^[80]研究认为沙雷氏菌菌液分泌物对碳

酸钙类岩石的溶蚀具有促进作用,根际微生物降解有机残体产生的二氧化碳可增大难溶性碳酸盐的溶解性^[81]。文晓萍等^[82]将回接相思树 *Acacia* 根瘤作用于非豆科 Leguminosea 植物巨尾桉苗木的生长,发现接种根瘤菌处理土壤含氮量显著提高。可能是根瘤菌可以将植物不能吸收的氮、土壤固定态磷、钾以及微量元素变成可吸收利用的状态^[83],接种根瘤菌后产生的胞外多糖为土壤微生物提供了更多的碳源^[84],促进了土壤可培养微生物(细菌、真菌和放线菌)的生长^[85],有利于土壤微生物固定无机态氮,因此有效地提高巨尾桉土壤氮素的积累。张辉等^[86]研究发现:接种促生菌(固氮菌、解钾菌、解磷菌)后,巨尾桉土壤有效磷质量分数提高。可能是因为这些联合固氮菌可以分泌有机酸,而有机酸可使土壤中不溶性磷素转变为可溶性磷素,使磷有效地溶解和被植物吸收^[87]。

2.2 土壤微生物和土壤重金属污染修复

当前,中国林地土壤重金属污染和土壤农药污染等问题^[88]严重,土壤健康受到威胁。目前研究主要是关于土壤微生物群落对土壤重金属污染的影响^[89]。

黄佳玉等^[90]通过盆栽实验发现:接种摩西球囊霉菌 *Glomus mosseae* 且土壤中外加铜和锌质量分数分别为 25 和 200 mg·kg⁻¹ 处理,桉树苗中铜质量分数由 26 mg·kg⁻¹ 降低为 13 mg·kg⁻¹,较未接种处理差异显著 ($P < 0.05$)。这可能是由于菌根真菌的结构阻碍金属元素向地上部分运输,降低重金属元素对植物的毒性,从而保护桉树的生长^[91]。廖好婕等^[92]采用差速离心法和化学试剂逐步提取法研究了桉树对铅的耐受机制,从铅在桉树不同部位中的亚细胞分布和化学形态来看,高质量分数(200 和 400 mg·kg⁻¹)铅处理下,接种丛枝菌根真菌(AMF)的桉树根部细胞壁组分和叶片可溶组分的分配比例增大,细胞壁滞留作用和液泡区隔化作用增强,可能是 AMF 作用下桉树耐铅的主要机制。细胞壁和以液泡为主的可溶组分是桉树储存铅的 2 个主要场所,桉树根部细胞壁对铅的滞留作用最强,叶片中可溶组分对铅的区隔化作用最强。随着铅胁迫的增加,接种 AMF 的桉树根部对铅的固持作用及细胞壁组分的滞留作用增强,同时,滞留在桉树根部的铅从活性较强的乙醇提取态向活性较弱的醋酸提取态转化,减弱了铅的活性,也减少了铅向地上部分茎和叶的迁移;此外,叶片可溶组分对铅的区隔化增强,也减轻了迁移到地上部分的铅对桉树的毒害作用。

3 展望

微生物分子生态技术的快速发展和应用,为拓宽微生物群落结构和多样性研究提供了新的途径和方法,推动了碳、氮、磷等元素生物地球化学循环机制和土壤污染的深入探索。加强对土壤微生物组成和功能的研究,强化其在桉树林生态系统中的作用,对减少化肥和农药的施用、维持森林土壤健康,进而促进桉树林绿色可持续发展具有重要意义。

当前对桉树林土壤微生物群落特征的研究大多处于初级阶段,多数通过采集少量次数的土壤样本,基于平板菌落计数法、磷脂脂肪酸法、16S rRNA 高通量测序等方法进行。与高通量测序法相比,平板菌落计数法和磷脂脂肪酸法等方法灵敏度和准确度低、检测微生物种类少、数据量少^[93],基于非功能基因的扩增子测序等方法无法准确评估微生物群落功能特征。因此,目前的研究尚未充分了解桉树林土壤微生物活性、数量、群落组成结构和功能特征,难以准确评价桉树林土壤健康状况。为实现桉树林土壤健康与可持续发展,建议从 3 个方面进一步开展相关研究:①运用多种组学方法(如宏基因组学、宏转录组学和宏代谢组学等)研究桉树林土壤微生物群落特征,探究土壤微生物的功能并使其有益功能最大化,从而提高桉树林生态系统中林木的抗病性和资源的有效利用。②集成桉树林土壤微生物和土壤健康大数据自动化分析系统,为土壤微生物作为土壤健康评估的重要指标提供有力支撑。③微生物移植工程已经成功应用于改变植物微生物菌群组成^[94],发挥了改善土壤健康和促进林业可持续发展的巨大潜力。今后可深入探究土壤微生物参与特定生物过程的功能,并将其广泛应用于治疗性微生物组工程。

4 参考文献

- [1] 祁述雄. 中国桉树[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
QI Shuxiong. *Chinese Eucalypt* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002.
- [2] Montreal Process Implementation Group For Australia And National Forest Inventory Steering Committee. *Australia's State*

- of the Forests Report 2018* [R]. Canberra: ABARES, 2018.
- [3] 杨章旗. 广西桉树人工林引种发展历程与可持续发展研究[J]. 广西科学, 2019, **26**(4): 355 – 361.
YANG Zhangqi. Development history and sustainable development of *Eucalyptus* plantations introduction in Guangxi [J]. *Guangxi Sci*, 2019, **26**(4): 355 – 361.
- [4] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, **12**(6): 58 – 64.
WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision [J]. *Chin J Environ Sci Manage*, 2020, **12**(6): 58 – 64.
- [5] ZHANG Jinbiao, AN Min, WU Hanwen, *et al.* Chemistry and bioactivity of *Eucalyptus* essential oils [J]. *Allelopathy J*, 2010, **25**(2): 313 – 330.
- [6] CHEN Xue, ZHANG Kaili, XIAO Lingping, *et al.* Total utilization of lignin and carbohydrates in *Eucalyptus grandis*: an integrated biorefinery strategy towards phenolics, levulinic acid, and furfural [J/OL]. *Biotechnol Biofuels*, 2020, **13**: 2[2021-10-10]. doi: 10.1186/s13068-019-1644-z.
- [7] JACOBS M R. *Eucalypts for Planting* [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Rome Italy, 1981.
- [8] PORTTS B M, DUNGEY H S. Interspecific hybridization of *Eucalyptus*: key issues for breeders and geneticists [J]. *New For*, 2004, **27**(2): 115 – 138.
- [9] 王豁然. 桉树生物学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
WANG Huoran. *A Chinese Appreciation of Eucalyptus* [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [10] 温远光, 周晓果, 喻素芳, 等. 全球桉树人工林发展面临的困境与对策[J]. 广西科学, 2018, **25**(2): 107 – 116.
WEN Yuanguang, ZHOU Xiaoguo, YU Sufang, *et al.* The predicament and countermeasures of development of global *Eucalyptus* plantations [J]. *Guangxi Sci*, 2018, **25**(2): 107 – 116.
- [11] 中国林学会. 桉树科学发展问题调研报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
Chinese Society of Forestry. *Anshu Kexue Fazhan Wenti Diaoyan Baogao* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016.
- [12] REIS A A D, FRANKLIN S E, JÚNIOR F W A, *et al.* Classification of *Eucalyptus* plantation site index (SI) and mean annual increment (MAI) prediction using DEM-based geomorphometric and climatic variables in Brazil [J/OL]. *Geocarto Int*, 2020[2021-10-10]. doi: 10.1080/10106049.2020.1778103.
- [13] Brazilian Association of Forest Plantation Producers. *Statistical Yearbook 2010* [R]. Brasília: ABRAF, 2010
- [14] FAO. *Reports Submitted to the Regional Expert Consultation on Eucalyptus-Volume II* [R]. Bangkok: FAO Regional Office for Asia and the Pacific, 1996.
- [15] 张樟德. 桉树人工林的发展与可持续经营[J]. 林业科学, 2008, **44**(7): 97 – 102.
ZHANG Zhangde. A review on development situation and sustainable management of eucalypt plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44**(7): 97 – 102.
- [16] 朱永官, 彭静静, 韦中, 等. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, **51**(1): 1 – 11.
ZHU Yongguan, PENG Jingjing, WEI Zhong, *et al.* Linking the soil microbiome to soil health [J]. *Sci Sin Vitae*, 2021, **51**(1): 1 – 11.
- [17] 杨远彪, 吕成群, 黄宝灵, 等. 连栽桉树人工林土壤微生物和酶活性的分析[J]. 东北林业大学学报, 2008, **36**(12): 10 – 12.
YANG Yuanbiao, LÜ Chengqun, HUANG Baoling, *et al.* Soil microbes and enzymes in *Eucalyptus* plantations under different rotations of continuously planting [J]. *J Northeast For Univ*, 2008, **36**(12): 10 – 12.
- [18] O'BRIEN F J M, ALMARAZ M, FOSTER M A, *et al.* Soil salinity and pH drive soil bacterial community composition and diversity along a lateritic slope in the avon river critical zone observatory, Western Australia [J/OL]. *Front Microbiol*, 2019, **10**: 1486[2021-10-10]. doi: 10.3389/fmicb.2019.01486.
- [19] ZHOU Xiaoqi, GUO Zhiying, CHEN Chengrong, *et al.* Soil microbial community structure and diversity are largely influenced by soil pH and nutrient quality in 78-year-old tree plantations [J]. *Biogeosciences*, 2017, **14**(8): 2101 – 2111.
- [20] SHEN Jupei, CHEN C R, LEWIS T. Long term repeated fire disturbance alters soil bacterial diversity but not the abundance in an Australian wet sclerophyll forest [J/OL]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 19639[2021-10-10]. doi: 10.1038/srep19639.
- [21] SHEN Jupei, ESFANDBOD M, WAKELIN S A, *et al.* Changes in bacterial community composition across natural

- grassland and pine forests in the Bunya Mountains in subtropical Australia [J]. *Soil Res*, 2019, **57**(8): 825 – 834.
- [22] VARELA C, SUNDTROM J, CUIJVERS K, *et al.* Discovering the indigenous microbial communities associated with the natural fermentation of sap from the cider gum *Eucalyptus gunnii* [J/OL]. *Sci Rep*, 2020, **10**: 14716[2021-10-10]. doi: 10.1038/s41598-020-71663-x.
- [23] 彭雯, 谭玲, 明安刚, 等. 南亚热带典型人工纯林土壤剖面细菌群落组成差异分析[J]. 土壤通报, 2018, **49**(6): 1361 – 1369.
PENG Wen, TAN Ling, MING Angang, *et al.* Bacterial community composition in soil profile of typical monoculture plantations in south subtropical China [J]. *Chin J Soil Sci*, 2018, **49**(6): 1361 – 1369.
- [24] QU Zhaole, LIU Bing, MA Yang, *et al.* Differences in bacterial community structure and potential functions among *Eucalyptus* plantations with different ages and species of trees [J/OL]. *Appl Soil Ecol*, 2020, **149**: 103515[2021-06-10]. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103515.
- [25] LI Jiayu, LIN Jiayi, PEI Chenyu, *et al.* Variation of soil bacterial communities along a chronosequence of *Eucalyptus* plantation [J/OL]. *Peer J*, 2018, **6**: e5648[2021-6-10]. doi: 10.7717/peerj.5648.
- [26] de ARAUJO PEREIRA A P, de ANDRADE P A, BINI D, *et al.* Shifts in the bacterial community composition along deep soil profiles in monospecific and mixed stands of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* [J/OL]. *PLoS One*, 2017, **12**(7): e0180371 [2021-6-10]. doi: 10.1371/journal.pone.0180371.
- [27] JIMENEZ-BUENO N G, VALENZUELA-ENCINAS C, MARSCH R, *et al.* Bacterial indicator taxa in soils under different long-term agricultural management [J]. *J Appl Microbiol*, 2016, **120**(4): 921 – 933.
- [28] 李超, 许宇星, 吴志华, 等. 不同施肥措施对桉树人工林土壤细菌群落结构及多样性的短期影响[J]. 桉树科技, 2020, **37**(1): 10 – 17.
LI Chao, XU Yuxing, WU Zhihua, *et al.* Short-term effects of different *Eucalyptus* plantation fertilization treatments on soil bacterial community structure and diversity [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2020, **37**(1): 10 – 17.
- [29] YAMADA T, SEKIGUCHI Y. Cultivation of uncultured *Chloroflexi* subphyla: significance and ecophysiology of formerly uncultured *Chloroflexi* ‘Subphylum I’ with natural and biotechnological relevance [J]. *Microbes Environ*, 2009, **24**(3): 205 – 216.
- [30] PODOSOKORSKAYA O A, BONCH-OSMOLOVSKAYA E A, NOVIKOV A A, *et al.* *Ornatilinea apprima* gen. nov., sp. nov., a cellulolytic representative of the class Anaerolineae [J]. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2013, **63**(1): 86 – 92.
- [31] 袁红朝, 吴昊, 葛体达, 等. 长期施肥对稻田土壤细菌、古菌多样性和群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(6): 1807 – 1813.
YUAN Hongchao, WU Hao, GE Tida, *et al.* Effects of long-term fertilization on bacterial and archaeal diversity and community structure within subtropical red paddy soils [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2015, **26**(6): 1807 – 1813.
- [32] PANKRATOV T A, KIRSANOVA L A, KAPARULLINA E N, *et al.* *Telmatobacter bradus* gen. nov., sp. nov., a cellulolytic facultative anaerobe from subdivision I of the *Acidobacteria*, and emended description of *Acidobacterium capsulatum* Kishimoto *et al.* 1991 [J]. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2012, **62**(2): 430 – 437.
- [33] ISHAQ L, BARBER P A, HARDY G E S J, *et al.* Diversity of fungi associated with roots of *Eucalyptus gomphocephala* seedlings grown in soil from healthy and declining sites [J]. *Aust Plant Path*, 2018, **47**: 155 – 162.
- [34] YOU Fang, LU Ping, HUANG Longbin. Characteristics of prokaryotic and fungal communities emerged in eco-engineered waste rock: *Eucalyptus* open woodlands at Ranger uranium mine [J/OL]. *Sci Total Environ*, 2022, **816**: 151571[2021-6-10]. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151571.
- [35] GATES G M, RATKOWSKY D A, GROVE S J. Aggregated retention and macrofungi: a case study from the Warra LTER site, Tasmania [J]. *Tasforests*, 2009, **18**(11): 33 – 54.
- [36] CURLEVSKI N J A, XU Zhihong, ANDERSON I C, *et al.* Converting Australian tropical rainforest to native Araucariaceae plantations alters soil fungal communities [J]. *Soil Biol Biochem*, 2010, **42**(1): 14 – 20.
- [37] 陈祖静, 高尚坤, 陈园, 等. 短期施肥对桉树人工林土壤真菌群落结构及功能类群的影响[J]. 生态学报, 2020, **40**(11): 3813 – 3821.
CHEN Zujing, GAO Shangkun, CHEN Yuan, *et al.* Effects of short-term fertilization on soil fungal community structure and functional group in *Eucalyptus* artificial forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(11): 3813 – 3821.

- [38] LIU Bin, QU Zhaolei, MA Yang, *et al.* *Eucalyptus* plantation age and species govern soil fungal community structure and function under a tropical monsoon climate in China [J/OL]. *Front Fungal Biol*, 2021, **2**: 703467[2021-06-10]. doi: 10.3389/ffunb.2021.703467.
- [39] RACHID C T C C, BALIEIRO F C, FONSECA E S, *et al.* Intercropped silviculture systems, a key to achieving soil fungal community management in *Eucalyptus* plantations [J/OL]. *PLoS One*, 2015, **10**(2): e0118515[2021-06-10]. doi: 10.1371/journal.pone.0118515.
- [40] JIMU L, KEMLER M, MUJURU L, *et al.* Illumina DNA metabarcoding of *Eucalyptus* plantation soil reveals the presence of mycorrhizal and pathogenic fungi [J]. *Forestry*, 2018, **91**(2): 238 – 245.
- [41] SCHMIDT-DANNERT C. Biocatalytic portfolio of Basidiomycota [J]. *Curr Opin Chem Biol*, 2016, **31**: 40 – 49.
- [42] 李宽莹, 王泽林, 徐兴有, 等. 不同施肥处理对日光温室内土壤微生物数量与酶活性的影响[J]. 西北林学院学报, 2019, **34**(2): 56 – 61.
LI Kuanying, WANG Zelin, XU Xingyou, *et al.* Effects of fertilization pattern on soil microorganism quantity and soil enzyme activity under the greenhouse grape-cultivating system [J]. *J Northwest For Univ*, 2019, **34**(2): 56 – 61.
- [43] da SILVA G S, MELO C A D, FIALHO C M T, *et al.* Impact of sulfentrazone, isoxaflutole and oxyfluorfen on the microorganisms of two forest soils [J]. *Bragantia*, 2014, **73**(3): 292 – 299.
- [44] 谢志坚, 李海蓝, 徐昌旭, 等. 2 种除草剂的土壤生态效应及其对后茬作物生长的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51**(4): 880 – 887.
XIE Zhijian, LI Hailan, XU Changxu, *et al.* Effects of two kinds of herbicides on paddy soil ecology and growth of succeeding crops [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51**(4): 880 – 887.
- [45] ROY-BOLDUC A, LALIBERTÉ E, BOUDREAU S, *et al.* Strong linkage between plant and soil fungal communities along a successional coastal dune system [J/OL]. *Fems Microbiol Ecol*, 2016, **92**(10): fiw156[2021-06-10]. doi: 10.1093/femsec/fiw156.
- [46] 何伟, 吴福忠, 杨万勤, 等. 百草枯对巨桉人工幼林土壤细菌多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(11): 2857 – 2864.
HE Wei, WU Fuzhong, YANG Wanqin, *et al.* Effect of paraquat on soil bacteria diversity in a young eucalypt plantation [J]. *Acta Sci Circumst*, 2012, **32**(11): 2857 – 2864.
- [47] 苏少泉, 耿贺利. 百草枯特性与使用[J]. *农药*, 2008, **47**(4): 244 – 247.
SU Shaoquan, GENG Heli. The properties and application of paraquat [J]. *Agrochemicals*, 2008, **47**(4): 244 – 247.
- [48] 魏圣钊, 李林, 曹芹, 等. 巨桉连栽对土壤微生物生物量和数量的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2020, **28**(1): 35 – 43.
WEI Shengzhao, LI Lin, CAO Qin, *et al.* Effect of continuous planting of *Eucalyptus grandis* on biomass and number of soil microbes [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2020, **28**(1): 35 – 43.
- [49] ZHU Lingyue, WANG Xiuhai, CHEN Fangfang, *et al.* Effects of the successive planting of *Eucalyptus urophylla* on soil bacterial and fungal community structure, diversity, microbial biomass, and enzyme activity [J]. *Land Degrad Dev*, 2019, **30**(6): 636 – 646.
- [50] 黄振格, 何斌, 谢敏洋, 等. 连栽桉树人工林土壤氮素季节动态特征[J]. *东北林业大学学报*, 2020, **48**(9): 88 – 94.
HUANG Zhenge, HE Bin, XIE Minyang, *et al.* Seasonal dynamic characteristic of soil nitrogen in *Eucalyptus* plantations under successive rotation [J]. *J Northeast For Univ*, 2020, **48**(9): 88 – 94.
- [51] ZAGATTO M R G, de ARAUJO PEREIRA A P, de SOUZA A J, *et al.* Interactions between mesofauna, microbiological and chemical soil attributes in pure and intercropped *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations [J]. *For Ecol Manage*, 2019, **433**: 240 – 247.
- [52] RACHID C, BALIEIRO F C, PEIXOTO R S, *et al.* Mixed plantations can promote microbial integration and soil nitrate increases with changes in the N cycling genes [J]. *Soil Biol Biochem*, 2013, **66**: 146 – 153.
- [53] KAMIMURA N, TAKAHASHI K, MORI K, *et al.* Bacterial catabolism of lignin-derived aromatics: new findings in a recent decade: update on bacterial lignin catabolism [J]. *Environ Microbiol Rep*, 2017, **9**(6): 679 – 705.
- [54] LI Shoutian, ZHOU Jianmin, WANG Huoyan, *et al.* Phenolic acids in plant-soil-microbe system: a review [J]. *Pedosphere*, 2002, **12**(1): 1 – 14.
- [55] KOUTIKA L S, FIORE A, TABACCHIONI S, *et al.* Influence of *Acacia mangium* on soil fertility and bacterial community

- in *Eucalyptus* plantations in the Congolese Coastal Plains [J/OL]. *Sustainability*, 2020, **12**(21): 8763 [2021-06-10]. doi: 10.3390/su12218763.
- [56] PEREIRA A P A, DURRER A, GUMIERE T, *et al.* Mixed *Eucalyptus* plantations induce changes in microbial communities and increase biological functions in the soil and litter layers [J]. *For Ecol Manage*, 2019, **433**: 332 – 342.
- [57] 刘小香, 陈秋波, 王真辉, 等. 巨尾桉挥发油对真菌和昆虫的化感作用[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(6): 835 – 839.
LIU Xiaoxiang, CHEN Qiubo, WANG Zhenhui, *et al.* Allelopathic effects of essential oil from *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* on pathogenic fungi and pest insects [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26**(6): 835 – 839.
- [58] SANTOS F M, de CARVALHO BALIEIRO F, FONTE M A, *et al.* Understanding the enhanced litter decomposition of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia mangium* [J]. *Plant Soil*, 2018, **423**: 141 – 155.
- [59] GERMON A, GUERRINI I A, BORDRON B, *et al.* Consequences of mixing *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* trees on soil exploration by fine-roots down to a depth of 17 m [J]. *Plant Soil*, 2018, **424**: 203 – 220.
- [60] 李万年, 黄则月, 赵春梅, 等. 望天树人工幼林土壤微生物量碳氮及养分特征[J]. *北京林业大学学报*, 2020, **42**(12): 51 – 62.
LI Wannian, HUANG Zeyue, ZHAO Chunmei, *et al.* Characteristics of soil microbial biomass C, N and nutrients in young plantations of *Parashorea chinensis* [J]. *J Beijing For Univ*, 2020, **42**(12): 51 – 62.
- [61] 陈永康, 谭许脉, 李萌, 等. 珍贵固氮树种降香黄檀与二代巨尾桉混交种植对土壤微生物群落结构和功能的影响[J]. *广西植物*, 2021, **41**(9): 1476 – 1485.
CHEN Yongkang, TAN Xumai, LI Meng, *et al.* Effects of mixture of nitrogen-fixing tree species *Dalbergia odorifera* and second-generation *Eucalyptus urophylla* on structure and function of soil microbial community in subtropical China [J]. *Guihaia*, 2021, **41**(9): 1476 – 1485.
- [62] 黄雪蔓, 刘世荣, 尤业明. 固氮树种对第二代桉树人工林土壤微生物生物量和结构的影响[J]. *林业科学研究*, 2014, **27**(5): 612 – 620.
HUANG Xueman, LIU Shirong, YOU Yeming. Effects of N-fixing tree species on soil microbial biomass and community structure of the second rotation *Eucalyptus* plantations [J]. *For Res*, 2014, **27**(5): 612 – 620.
- [63] QIU Huen, GE Tida, LIU Jieyun, *et al.* Effects of biotic and abiotic factors on soil organic matter mineralization: experiments and structural modeling Analysis [J]. *Eur J Soil Biol*, 2018, **84**: 27 – 34.
- [64] KABUYAH R N T M, van DONGEN B E, BEWSHER A D, *et al.* Decomposition of lignin in wheat straw in a sand-dune grassland [J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, **45**: 128 – 131.
- [65] CAO Yusong, FU Shenglei, ZOU Xiaoming, *et al.* Soil microbial community composition under *Eucalyptus* plantations of different age in subtropical China [J]. *Eur J Soil Biol*, 2010, **46**(2): 128 – 135.
- [66] MOHSIN F, SINGH R P, JATTAN S S, *et al.* Root studies in a *Eucalyptus* hybrid plantation at various ages [J]. *Indian For*, 2000, **126**(11): 1165 – 1174.
- [67] GELDENHUYS C J. Native forest regeneration in pine and eucalypt plantations in Northern Province, South Africa [J]. *For Ecol Manage*, 1997, **99**(1/2): 101 – 115.
- [68] 张丹桔, 张健, 杨万勤, 等. 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性[J]. *生态学报*, 2013, **33**(13): 3947 – 3962.
ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, *et al.* Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(13): 3947 – 3962.
- [69] 竹万宽, 许宇星, 王志超, 等. 不同生长阶段尾巨桉人工林土壤-微生物化学计量特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, **38**(4): 692 – 702.
ZHU Wankuan, XU Yuxing, WANG Zhichao, *et al.* Soil-microbial stoichiometry of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* plantation at different growth stages [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2021, **38**(4): 692 – 702.
- [70] XU Jie, LIU Bing, QU Zhaolei, *et al.* Age and species of *Eucalyptus* plantations affect soil microbial biomass and enzymatic activities [J/OL]. *Microorganisms*, 2020, **8**(6): 811 [2021-10-10]. doi: 10.3390/microorganisms8060811.
- [71] 江瑶, 莫晓勇, 邓海燕, 等. 巨桉人工林外生菌根真菌群落组成及多样性[J]. *西北林学院学报*, 2020, **35**(6): 153 – 159.
JIANG Yao, MO Xiaoyong, DENG Haiyan, *et al.* Composition and diversity of ectomycorrhizal fungal community associated with *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *J Northwest For Univ*, 2020, **35**(6): 153 – 159.
- [72] BOUILLET J P, LACLAU J P, ARNAUD M, *et al.* Changes with age in the spatial distribution of roots of *Eucalyptus*

- clone in Congo: impact on water and nutrient uptake [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **171**(1/2): 43 – 57.
- [73] 吴晓芙, 胡曰利. 刚果 12 号桉无性系人工林养分曲线[J]. *林业科学*, 2002, **38**(5): 24 – 30.
WU Xiaofu, HU Yueli. Nutrient curve of *Eucalyptus* ABL12 plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2002, **38**(5): 24 – 30.
- [74] 王艳, 胡小飞, 王方超, 等. 施氮磷肥对杉木人工林 3 种林下植物养分动态及化学计量比的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2016, **38**(2): 304 – 311.
WANG Yan, HU Xiaofei, WANG Fangchao, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on nutrient dynamics and stoichiometric ratios of three-understory plants in Chinese fir plantation [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2016, **38**(2): 304 – 311.
- [75] 李佳雨, 林家怡, 裴晨羽, 等. 桉树种植对林地土壤丛枝菌根真菌群落结构及多样性的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(8): 2723 – 2731.
LI Jiayu, LIN Jiayi, PEI Chenyu, *et al.* Diversity and structure of the soil arbuscular mycorrhizal fungal community are altered by *Eucalyptus* plantations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(8): 2723 – 2731.
- [76] SHENG Min, LALANDE R, HAMEL C, *et al.* Effect of long-term tillage and mineral phosphorus fertilization on arbuscular mycorrhizal fungi in a humid continental zone of eastern Canada [J]. *Plant Soil*, 2013, **369**(1): 599 – 613.
- [77] SPOHN M. Element cycling as driven by stoichiometric homeostasis of soil microorganisms [J]. *Basic Appl Ecol*, 2016, **17**(6): 471 – 478.
- [78] 侯俊杰, 康丽华, 陆俊锐, 等. 芽孢杆菌对桉树幼苗的促生效果及其 ACC 脱氨酶活性的研究[J]. *微生物学通报*, 2014, **41**(10): 2029 – 2034.
HOU Junjie, KANG Lihua, LU Junkun, *et al.* Growth-promoting effect of *Bacillus* strains on *Eucalyptus* seedling and their ACC deaminase activity [J]. *Microbiol China*, 2014, **41**(10): 2029 – 2034.
- [79] 李永双, 范周周, 国辉, 等. 菌剂添加对不同树种根际土壤微生物及碳酸钙溶蚀的影响[J]. *中国岩溶*, 2020, **39**(6): 854 – 862.
LI Yongshuang, FAN Zhouzhou, GUO Hui, *et al.* Effects of microorganisms agent addition on soil microbes in different rhizosphere soils and calcium carbonate dissolution [J]. *Carsol Sin*, 2020, **39**(6): 854 – 862.
- [80] SALEEM M, FETZER I, HARMS H, *et al.* Trophic complexity in aqueous systems: bacterial species richness and protistan predation regulate dissolved organic carbon and dissolved total nitrogen removal [J/OL]. *Proc Royal Soc B*, 2016, **283**(1825): 20152724[2021-10-10]. doi: 10.1098/rspb.2015.2724.
- [81] 王艳红, 于镇华, 李彦生, 等. 植物-土壤-微生物间碳流对大气 CO₂ 浓度升高的响应[J]. *土壤与作物*, 2018, **7**(1): 22 – 30.
WANG Yanhong, YU Zhenhua, LI Yansheng, *et al.* Carbon flow in the plant-soil-microbe continuum in response to atmospheric elevated CO₂ [J]. *Soils Crops*, 2018, **7**(1): 22 – 30.
- [82] 文晓萍, 黄宝灵, 吕成群, 等. 巨尾桉接种根瘤菌试验效果初探[J]. *西北林学院学报*, 2008, **23**(6): 118 – 121.
WEN Xiaoping, HUANG Baoling, LÜ Chengqun, *et al.* Research for the effect of rhizobia inoculation on the *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* [J]. *J Northwest For Univ*, 2008, **23**(6): 118 – 121.
- [83] 方丽英, 吴庆梅, 吕成群, 等. 土壤益生菌对盆栽马尾松苗生长的影响[J]. *四川林业科技*, 2007, **28**(5): 66 – 68.
FANG Liying, WU Qingmei, LÜ Chengqun, *et al.* Effect of soil probiotics on the growth of potted masson's pine seedlings [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2007, **28**(5): 66 – 68.
- [84] 陈兰周, 刘永定, 宋立荣. 微鞘藻胞外多糖在沙漠土壤成土中的作用[J]. *水生生物学报*, 2002, **26**(2): 155 – 159.
CHEN Lanzhou, LIU Yongding, SONG Lirong. The function of exopolysaccharides of *Microcoleus* in the formation of desert soil [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 2002, **26**(2): 155 – 159.
- [85] 付晓峰, 张桂萍, 张小伟, 等. 溶磷细菌和丛枝菌根真菌接种对南方红豆杉生长及根际微生物和土壤酶活性的影响[J]. *西北植物学报*, 2016, **36**(2): 353 – 360.
FU Xiaofeng, ZHANG Guiping, ZHANG Xiaowei, *et al.* Effects of PSB and AMF on growth, microorganisms and soil enzyme activities in the rhizosphere of *Taxus chinensis* var. *mairei* seedlings [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2016, **36**(2): 353 – 360.
- [86] 张辉, 黄宝灵, 吕成群, 等. 巨尾桉接种促生菌对根际土壤微生物及营养元素的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2013, **41**(3): 69 – 72.

- ZHANG Hui, HUANG Baoling, LÜ Chengqun, *et al.* Effects of *Eucalyptus grandis*×*E. urophylla* inoculated PGPR on soil rhizosphere microbe and nutrient [J]. *J Northeast For Univ*, 2013, **41**(3): 69 – 72.
- [87] 张海燕, 肖延华, 张旭东, 等. 土壤微生物量作为土壤肥力指标的探讨[J]. *土壤通报*, 2006, **37**(3): 422 – 425.
ZHANG Haiyan, XIAO Yanhua, ZHANG Xudong, *et al.* Microbial biomass as an indicator for evaluation of soil fertility properties [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, **37**(3): 422 – 425.
- [88] 黎云昆, 肖忠武. 我国林地土壤污染、退化、流失问题及对策[J]. *林业经济*, 2015, **37**(9): 3 – 15.
LI Yunkun, XIAO Zhongwu. China's forestland soil pollution, degradation, erosion problems and countermeasures [J]. *For Econ*, 2015, **37**(9): 3 – 15.
- [89] 张婧, 杜阿朋. 桉树在土壤重金属污染区土壤生物修复的应用前景[J]. *桉树科技*, 2010, **27**(2): 43 – 47.
ZHANG Jing, DU Apeng. Application prospect of *Eucalyptus* in remedying the polluted soil by heavy metal [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2010, **27**(2): 43 – 47.
- [90] 黄佳玉, 谈宇, 廖妤婕, 等. 丛枝菌根真菌对桉树吸收 Cu 和 Zn 的作用研究[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2013, **31**(2): 118 – 122.
HUANG Jiayu, TAN Yu, LIAO Yujie, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the uptake of copper and zinc by *Eucalyptus* [J]. *J Guangxi Norm Univ Nat Sci Ed*, 2013, **31**(2): 118 – 122.
- [91] 张旭红, 高艳玲, 林爱军, 等. 重金属污染土壤接种丛枝菌根真菌对蚕豆毒性的影响[J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(2): 274 – 278.
ZHANG Xuhong, GAO Yanling, LIN Aijun, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi colonization on toxicity of soil contaminated by heavy metals to *Vicia faba* [J]. *Chin J Environ Eng*, 2008, **2**(2): 274 – 278.
- [92] 廖妤婕, 谈宇, 付旺, 等. 丛枝菌根真菌作用下桉树对铅的耐受机制研究[J]. *基因组学与应用生物学*, 2014, **33**(3): 633 – 639.
LIAO Yujie, TAN Yu, FU Wang, *et al.* Study on the Pb-tolerance mechanism of *Eucalyptus* under the role of *Arbuscular mycorrhizal* fungi [J]. *Genomics Appl Biol*, 2014, **33**(3): 633 – 639.
- [93] 刘永鑫, 秦媛, 郭晓璇, 等. 微生物组数据分析方法与应用[J]. *遗传*, 2019, **41**(9): 845 – 862.
LIU Yongxin, QIN Yuan, GUO Xiaoxuan, *et al.* Methods and applications for microbiome data analysis [J]. *Hereditas*, 2019, **41**(9): 845 – 862.
- [94] 白洋, 钱景美, 周俭民, 等. 农作物微生物组: 跨越转化临界点的现代生物技术[J]. *中国科学院院刊*, 2017, **32**(3): 260 – 265.
BAI Yang, QIAN Jingmei, ZHOU Jianmin, *et al.* Crop microbiome: breakthrough technology for agriculture [J]. *Bull Chin Acad Sci*, 2017, **32**(3): 260 – 265.