

网络出版时间:2022-05-27 12:05 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.12.007
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220525.1552.006.html

不同桉树混交林土壤理化性质、 酚酸含量与酶活性的差异

罗华龙¹, 刘文祥², 杨 梅¹, 叶绍明¹, 程 飞¹
(1 广西大学 林学院, 广西 南宁 530004; 2 广西国有七坡林场, 广西 南宁 530225)

【摘 要】 【目的】研究桉树与不同阔叶树种混交对土壤理化性质、酚酸含量和酶活性的影响,分析酚酸物质与酶活性的关系,为改善桉树纯林的土壤质量、合理经营桉树人工林及适宜混交树种的选择提供参考。【方法】在广西凭祥市选择 6 年生桉树纯林以及桉树与豆科树种(降香黄檀、格木)、非豆科树种(红锥)的混交林作为研究对象,测定不同林分类型桉树根际与非根际土壤的理化性质(铵态氮、有机碳、全氮、硝态氮含量、pH、自然含水率)、酚酸类物质含量及酶(多酚氧化酶、脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、蛋白酶)活性,并采用相关性和冗余分析方法揭示酚酸含量和酶活性的相关关系。【结果】(1)桉树混交林根际与非根际土壤的 pH、自然含水率、有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮含量均总体高于桉树纯林。(2)与桉树纯林相比,混交林桉树根际土壤酚酸物质含量升高,表现为桉树×红锥混交林(50.01 μg/g)>桉树×格木混交林(38.39 μg/g)>桉树×降香黄檀混交林(36.94 μg/g)>桉树纯林(27.76 μg/g);非根际土壤的酚酸类物质含量降低,表现为桉树纯林(21.45 μg/g)>桉树×降香黄檀混交林(16.35 μg/g)>桉树×格木混交林(15.50 μg/g)>桉树×红锥混交林(13.52 μg/g)。(3)桉树混交林根际与非根际土壤的蛋白酶、蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性均高于桉树纯林;桉树混交林根际土壤的多酚氧化酶活性总体低于纯林,而非根际土壤的多酚氧化酶活性显著高于纯林。(4)相关性和冗余分析结果表明,土壤酚酸类物质含量与酶活性具有较高的相关性,阿魏酸、对羟基苯甲酸、香草酸含量在一定程度上能够解释根际与非根际土壤间酶活性的差异。【结论】混交造林对桉树根际与非根际土壤理化性质、酚酸类物质含量和酶活性影响显著,能够增加桉树根际土壤酚酸积累,减缓非根际土壤酚酸富集,提高土壤养分和酶活性,其中红锥与桉树混交更有利于维持土壤肥力。

【关键词】 桉树混交林;土壤酚酸类物质;土壤酶活性;土壤理化性质
【中图分类号】 S725.2;S714.2 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2022)12-0054-10

Differences of soil physicochemical property, phenolic acid and enzyme activities in different *Eucalyptus* mixed plantations

LUO Hualong¹, LIU Wenxiang², YANG Mei¹, YE Shaoming¹, CHENG Fei¹
(1 College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;
2 Guangxi State-owned Qipo Forest Farm, Nanning, Guangxi 530225, China)

Abstract: 【Objective】The effects of mixed *Eucalyptus* and different broad-leaved species on soil physicochemical properties, phenolic acid content and enzyme activities were studied and the relationship between phenolic acid and enzyme activities was analyzed to provide referable evidence for improving soil quality, rational management and selection of suitable mixed tree species for *Eucalyptus* plantations. 【Method】Six-year-old pure and mixed plantations of *Eucalyptus* with *Castanopsis hystrix*, *Dalbergia*

【收稿日期】 2021-12-15
【基金项目】 广西自然科学基金重点项目“豆科树种与桉树混交根系分泌物与根际解磷菌对土壤磷素转化的复合增效机制”(2021GXNSFDA196003);广西林业科技推广示范项目“优良阔叶树种混交人工林全周期经营模式研究与示范”(gl2020kt01)
【作者简介】 罗华龙(1998—),男,广西百色人,硕士,主要从事森林培育研究。E-mail:1336035702@qq.com
【通信作者】 杨 梅(1970—),女,吉林长春人,教授,博士,博士生导师,主要从事森林培育研究。E-mail:fjyangmei@126.com

odorifera and *Erythrophleum fordii* were selected in Pingxiang, Guangxi. Physical and chemical properties, phenolic acids content and enzyme activities of rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Eucalyptus* in different stands were determined. Correlation and redundancy analysis were used to reveal the correlations between phenolic acids and enzyme activities. 【Result】 (1) The pH, natural water, total organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen and ammoniacal nitrogen contents in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Eucalyptus* mixed plantations were higher than that of pure plantation. (2) Compared with pure forest, mixed plantations of *Eucalyptus* increased contents of phenolic acids in rhizosphere soil, and the contents were in the order of mixed plantation of *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* ($50.01 \mu\text{g/g}$) > mixed plantation of *Eucalyptus* and *Erythrophleum fordii* ($38.39 \mu\text{g/g}$) > mixed plantation of *Eucalyptus* and *Dalbergia odorifera* ($36.94 \mu\text{g/g}$) > pure plantation of *Eucalyptus* ($27.76 \mu\text{g/g}$). In addition, mixed plantations of *Eucalyptus* reduced contents of phenolic acids in non-rhizosphere soil and the contents were in the order of pure plantation of *Eucalyptus* ($21.45 \mu\text{g/g}$) > mixed plantation of *Eucalyptus* and *Dalbergia odorifera* ($16.35 \mu\text{g/g}$) > mixed plantation of *Eucalyptus* and *Erythrophleum fordii* ($15.50 \mu\text{g/g}$) > mixed plantation of *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* ($13.52 \mu\text{g/g}$). (3) The activities of protease, invertase, urease and catalase in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Eucalyptus* mixed plantations were higher than those in pure forest. The activity of polyphenol oxidase in rhizosphere soil of *Eucalyptus* mixed plantations was lower than that of pure forest, while the activity of polyphenol oxidase in non-rhizosphere soil was significantly higher than that of pure forest. (4) Correlation and redundancy analysis showed that there were high correlations between soil phenolic acids and soil enzyme activities, and contents of ferulic acid, p-hydroxybenzoic acid and vanillic acid could explain the differences in enzyme activities between rhizosphere and non-rhizosphere soils. 【Conclusion】 Mixed afforestation had significant effects on phenolic acids contents and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Eucalyptus* plantations. Mixed afforestation could increase the accumulation of phenolic acid in rhizosphere soil, decrease the accumulation of phenolic acid in non-rhizosphere soil, and improve soil nutrients and enzyme activities. The mixed plantations of *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix* had more advantages in maintaining soil fertility.

Key words: *Eucalyptus* mixed plantations; phenolic acids in soil; soil enzyme activity; soil physicochemical property

土壤酚酸类物质是一类含有酚环的有机酸,是植物体内重要的次生代谢产物,主要由胁迫状态下植物的根系分泌。一定量的酚酸物质可以活化根际土壤中的难溶性养分,提高养分元素的有效性,从而促进植物对养分的吸收和利用,但酚酸也是一类化感物质,过度积累则会对种子的萌发和植物的生长产生抑制作用^[1]。研究表明,土壤中酚酸的积累量与土地利用方式、作物种类等因素密切相关,这些因素对土壤中酶活性的强弱和酚酸物质的含量及其分布特征具有重要影响^[2-3]。作物连作或纯林连栽通常会引起土壤酚酸类物质的富集,影响根际土壤的微生态环境,进而导致土壤微生物数量和酶活性发生变化^[4-6]。

土壤酶是具有催化能力的生物活性物质,能够较为全面地反映土壤质量、肥力和环境变化^[7]。有研究发现,土壤酶与酚酸类物质会相互影响,二者之间既有促进作用,也有抑制作用。土壤酶会受到植

物根系分泌物和动植物残体等分解产生的酚酸类化感物质的影响,而肉桂酸、阔马酸和对羟基苯甲酸等酚酸物质也会受到土壤酶活性的影响^[8-9]。土壤酶与酚酸之间复杂的生化作用,会对植物的生长、生理以及土壤环境产生多方面的影响。因此,深入了解不同树种混交后对土壤酚酸物质含量的空间分布特征和酶活性强弱的影响规律,对调控土壤生态系统的养分循环、改善土壤微生态环境具有重要意义。

桉树(*Eucalyptus*)是桃金娘科(Myrtaceae)植物,具有速生丰产、经营周期短和经济效益高的优点,是我国南方主要的造林更新树种之一,全国桉树人工林的面积已达 546 万 hm^2 ,且还在持续扩大^[10]。然而,由于桉树人工纯林长期的经营管理方式不合理,导致林地土壤酸化、生态稳定性变差及林地生产力下降等问题^[11],不利于桉树人工林的可持续发展。营造桉树混交林可以提高森林生物多样性

性,改善桉树林分结构和树种组成,增加林地凋落物,促进养分循环,从而能够提高土壤肥力。有学者研究发现,桉树分别与厚荚相思(*Acacia crassicaarpa*)、马占相思(*Acacia mangium*)混交能提高土壤微生物多样性和土壤脲酶、 β -葡萄糖苷酶等的活性,改善土壤质量,有利于桉树大径材的培育^[12-13];桉树与降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)、格木(*Erythrophleum fordii*)等豆科树种混交能够有效降低林间土壤表层酚酸类物质含量,提高土壤肥力^[14]。可见,混交会引起桉树林地土壤化学生态发生变化,但对土壤酶活性与酚酸物质含量之间相互关系的探讨较为缺乏。本研究以桉树纯林作为对照,分析桉树与豆科树种(降香黄檀、格木)、非豆科树种红锥(*Castanopsis hystrix*)混交对土壤理化性质、酚酸类物质含量和酶活性的影响,以期为揭示酚酸对土壤性质的影响机制及桉树混交树种的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于广西壮族自治区凭祥市中国林科院热带林业实验中心(21°57′—22°19′N, 106°39′—

106°59′E),地处低山丘陵区,属亚热带季风性半湿润-湿润气候,长夏无冬,雨量充沛,干湿季节分明。试验区年均气温 20.5~21.7℃,年均降雨量 1 200~1 500 mm;年均相对湿度 80%~84%;土壤类型属于酸性红壤和砖红壤,质地疏松,且铝、铁元素含量丰富,土层深 100 cm,腐殖质厚 1 cm,土壤湿润、肥沃,适宜林木生长。前作林分为马尾松人工林。试验地于 2013 年营造巨尾桉(*Eucalyptus grandis*×*E. urophylla*)纯林及其与红锥、降香黄檀、格木的混交林,株行距为 2 m×4 m,混交林中采用垂直等高线混交,其中 2 列种植桉树,1 列种植混交树种,桉树为半年生容器苗,混交树种为 1 年生容器苗,苗高≥20 cm,地径≥0.3 cm。林地于 2013—2015 年连续施肥 3 年,其中 2013 年施用有机基肥 1 次(2 kg/株),之后于 2014 和 2015 年的 3~5 月追施氮磷钾复合肥 1 次(0.5 kg/株)。

1.2 调查及采样方法

(1)试验设置。在野外调查的基础上,根据立地条件基本一致的原则,在桉树纯林(对照)及桉树与红锥、降香黄檀、格木组成混交林(分别命名为 PE、MEC、MED、MEE)中各设 3 个 20 m×20 m 样地,样地之间距离相隔 10 m。样地基本情况见表 1。

表 1 不同林分类型桉树样地的基本情况

Table 1 Basic information of sample plots in different *Eucalyptus* stand types

林型 Stand type	代次 Generation	林分起源 Stand origin	林龄/a Age	造林 面积/hm ² Afforestation area	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	坡位 Slope positions	坡度/(°) Slope
PE	1	植苗 Stock planting	6	7.60	1 250	210	西北 North-West	中 Midslope	25
MEC	1	植苗 Stock planting	6	14.70	833/417	220	西北 North-West	中 Midslope	25
MED	1	植苗 Stock planting	6	16.10	833/417	220	西北 North-West	中 Midslope	25
MEE	1	植苗 Stock planting	6	12.30	833/417	220	西北 North-West	中 Midslope	25

注:PE. 桉树纯林;MEC. 桉树×红锥;MED. 桉树×降香黄檀;MEE. 桉树×格木。/前数据为桉树密度,/后数据为混交树种密度。

Note:PE. Pure plantation of *Eucalyptus*;MEC. Mixed plantation of *Eucalyptus* and *Castanopsis hystrix*;MED. Mixed plantation of *Eucalyptus* and *Dalbergia odorifera*;MEE. Mixed plantation of *Eucalyptus* and *Erythrophleum fordii*. /the previous data is *Eucalyptus* density,/the latter data is mixed species density.

(2)土壤采集。于 2019 年 12 月在每个标准样地中分别选取 5 株巨尾桉标准木,采集其四周 0~20 cm 土层中的细根后,采用抖落法收集附着于根系上的土壤作为根际土壤样品,最后将同一林分类内所有标准木根际土壤充分混合后,采取四分法分为 3 份,作为 3 个重复。另外,在每个林分类型的每个标准样地内,沿“S”型路线尽量避开树木根系选择 5 个采样点,采集 0~20 cm 土层的土壤作为非根际土壤样品,最后将同一林分类型内所有非根际土样充分混合后,采取四分法分为 3 份,作为 3 个重复。所有土样均装于塑封袋做好信息标记,当日带

回实验室进行下一步处理。

1.3 测定项目与方法

(1)土壤理化性质。参考文献[15-16],土壤自然含水率采用烘干法测定,pH 值采用电位法测定,有机碳含量采用外热重铬酸钾氧化-容量法测定,全氮含量采用硫酸消煮-扩散法测定,硝态氮含量采用酚二磺酸比色法测定,铵态氮含量采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定。

(2)土壤酚酸含量。酚酸含量采用碱液浸提 HPLC 法^[17]测定,使用美国 Water 高效液相质谱仪和 Water 2487 紫外检测器,N2000 数据工作站数据

处理系统,流动相为乙腈(A)和超纯水(B),检测波长为 280 nm,柱温 30 ℃,流速为 1.1 mL/min。

(3)土壤酶活性。土壤蛋白酶活性使用茆三酮比色法^[18]测定,脲酶活性使用苯酚钠-次氯酸钠比色法^[19]测定,蔗糖酶活性使用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[20]测定,过氧化氢酶活性使用 0.1 mol/mL 高锰酸钾滴定法^[21]测定,多酚氧化酶活性采用邻苯三酚显色法^[22]测定。

1.4 数据处理与分析

数据经 Microsoft Excel 2010 软件处理后,使用 SPSS 26.0 软件进行分析,所有数据均为“平均值±标准差”。通过单因素方差分析和独立样本 *t* 检验分析不同林型根际与非根际土壤理化性质、酚酸类物质含量和土壤酶活性的差异显著性,并用 Pearson 相关分析法分析土壤理化性质、酚酸类物质含

量与土壤酶活性的相关性。使用 Canoco5.0 软件对土壤酚酸类物质含量和土壤酶活性的关系进行冗余分析。用 Origin 2021b 制图。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型桉树土壤理化性质的变化

由表 2 可知,除了 MEE 外,其他林分类型桉树根际土壤的 pH 显著低于非根际土壤;4 种林分类型根际和非根际土壤的 pH 均表现为 MEE>MED>MEC>PE,可见桉树混交林土壤的 pH 都高于纯林。4 种林分类型桉树根际土壤的自然含水率、有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮含量均高于非根际土壤,其中有机碳含量差异均达显著水平。不论是根际土壤还是非根际土壤,桉树混交林的养分含量总体高于纯林。

表 2 不同林分类型桉树根际与非根际土壤的基本理化性质

Table 2 Rhizosphere and non-rhizosphere soil physicochemical properties in different <i>Eucalyptus</i> stand types							
林分类型 Stand type	土壤位置 Soil location	pH	自然含水率/% Natural water content	有机碳/ (g·kg ⁻¹) Total organic carbon	全氮/ (g·kg ⁻¹) Total N	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹) Ammoniacal nitrogen
PE	R	4.72±0.10 B*	34.35±1.53 B*	11.38±0.70 C*	1.02±0.16 B	21.56±0.64 C*	26.05±0.92 B*
	S	5.21±0.18 b	30.18±1.27 b	8.96±1.28 c	0.84±0.04 b	20.22±0.26 ab	22.30±1.23 b
MEC	R	4.98±0.18 AB*	39.26±2.22 A*	19.45±2.38 A*	1.56±0.29 A	26.45±2.12 A*	32.11±1.44 A
	S	5.56±0.23 ab	33.16±0.77 a	15.57±1.08 a	1.21±0.15 a	18.20±0.70 b	28.34±2.89 a
MED	R	5.18±0.17 A*	29.06±1.79 C	15.54±2.16 B*	1.35±0.10 AB*	22.55±0.53 BC	26.98±1.65 B
	S	5.64±0.20 a	25.97±1.67 c	13.64±1.32 b	1.01±0.19 ab	20.50±1.82 ab	24.40±1.39 ab
MEE	R	5.31±0.26 A	34.61±1.87 B*	16.29±1.54 AB*	1.47±0.20 A	24.66±1.51 AB	30.43±2.14 A
	S	5.75±0.20 a	31.41±0.69 b	12.81±1.02 b	1.13±0.16 a	22.03±1.70 a	26.95±2.51 b

注:R 表示根际土壤;S 表示非根际土壤。同列数据后标不同小写字母表示不同林分非根际土壤间差异显著(*P*<0.05),标不同大写字母表示不同林分根际土壤间差异显著(*P*<0.05)。* 表示同一林分根际与非根际土壤之间差异显著(*P*<0.05)。下同。

Notes:R stands for rhizosphere; S stands for non-rhizosphere. Different small letters mean significant difference among non-rhizosphere soils in different stands (*P*<0.05),while different capital letters mean significant difference among rhizosphere soils in different stands (*P*<0.05). * represents significant difference between rhizosphere soil and non-rhizosphere soil in same stands (*P*<0.05). The same below.

2.2 不同林分类型桉树土壤酚酸物质的变化

由表 3 可知,4 种桉树林分类型的土壤均检测出对羟基苯甲酸、香草酸、阿魏酸、香豆酸、苯甲酸、水杨酸 6 种酚酸。但不同林分的土壤中,6 种酚酸含量差异明显,其中对羟基苯甲酸含量最高,其次是香草酸、阿魏酸、香豆酸,苯甲酸和水杨酸含量最低。各林分的根际土壤酚酸总量均显著高于非根际酚酸总量。

由表 3 可知,在根际土壤中,4 种桉树林分的酚酸总量由大到小表现为 MEC>MEE>MED>PE,MEC、MED、MEE 的酚酸总量分别是 PE 的 1.80,1.33 和 1.38 倍;4 种林分类型中,MEC 的对羟基苯

甲酸、阿魏酸和苯甲酸含量最高,MED 的水杨酸含量最高,MEE 的香豆酸含量最高,PE 的香草酸含量最高。

由表 3 可知,在非根际土壤中,4 种桉树林分的酚酸总量由大到小表现为 PE>MED>MEE>MEC,MEC、MED、MEE 酚酸总量较 PE 分别显著降低了 36.97%,23.78%和 27.74%。4 种林分类型中,PE 的对羟基苯甲酸、香草酸、阿魏酸含量最高,MED 的香豆酸、苯甲酸、水杨酸含量最高。

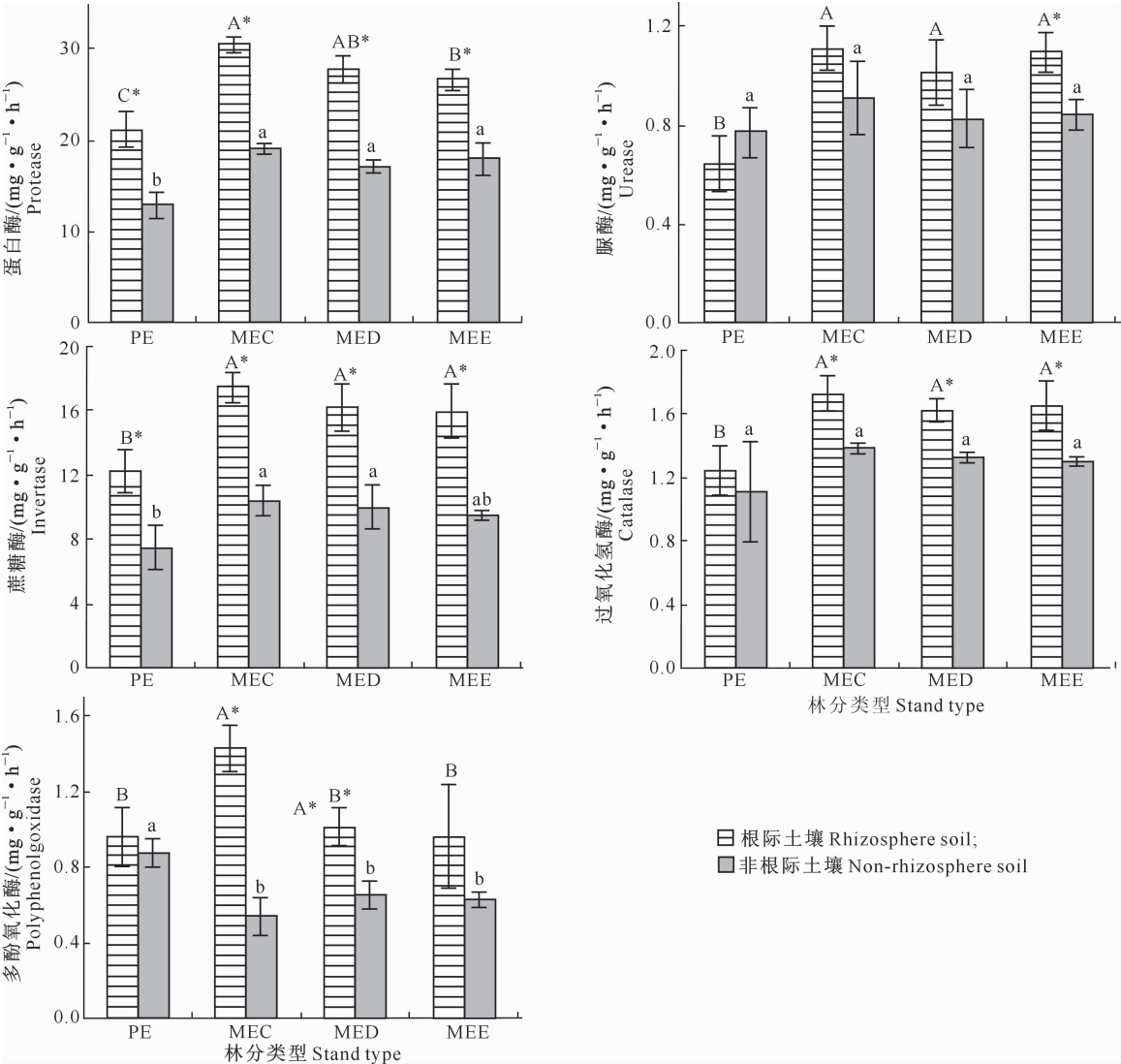
2.3 不同林分类型桉树土壤酶活性的变化

不同林分类型桉树根际与非根际土壤的酶活性如图 1 所示。

表 3 不同林分类型桉树根际与非根际土壤的酚酸含量

Table 3 Change of soil phenolic acids in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil under different stand types of *Eucalyptus*

林分类型 Stand type	土壤位置 Soil location	对羟基苯甲酸 p-hydroxy benzoic acid	香草酸 Vanillic acid	阿魏酸 Ferulic acid	香豆酸 Coumaric acid	苯甲酸 Benzoic acid	水杨酸 Salicylic acid	总量 Total
PE	R	18.76±2.64 C	3.99±0.40 A	2.28±0.15 B*	1.54±0.20 C*	0.98±0.04 C*	0.22±0.03 B	27.76±2.60 C*
	S	15.07±1.44 b	3.28±0.31 b	1.49±0.11 b	0.88±0.02 a	0.55±0.02 b	0.18±0.01 a	21.45±1.33 a
MEC	R	38.84±1.35 A*	3.48±0.07 B*	3.09±0.16 A*	2.73±0.30 B*	1.61±0.11 A*	0.26±0.03 AB*	50.01±1.52 A*
	S	9.46±1.17 a	1.96±0.08 a	0.79±0.14 a	0.78±0.06 b	0.35±0.03 d	0.17±0.01 a	13.52±1.21 c
MED	R	26.40±2.89 B*	3.37±0.22 B*	1.89±0.08 C*	3.43±0.24 A*	1.56±0.15 A*	0.30±0.02 A*	36.94±3.04 B*
	S	11.19±0.28 a	2.36±0.24 a	0.96±0.17 a	0.96±0.05 a	0.70±0.01 a	0.19±0.02 a	16.35±0.49 b
MEE	R	29.43±3.01 B*	2.28±0.08 C	1.66±0.20 C*	3.52±0.57 A*	1.23±0.12 B*	0.28±0.02 A*	38.39±2.46 B*
	S	10.90±0.41 a	2.14±0.11 a	0.90±0.22 a	0.94±0.04 a	0.45±0.04 c	0.18±0.01 a	15.50±0.62 b



图柱上标不同小写字母表示不同林分非根际土壤差异显著($P<0.05$),标不同大写字母表示不同林分根际土壤间差异显著($P<0.05$)。*表示同一林分根际与非根际土壤间差异显著($P<0.05$)

Different small letters mean significant difference among non-rhizosphere soils in different stands ($P<0.05$), while different capital letters mean significant difference among rhizosphere soils in different stands ($P<0.05$). * represents significant difference between rhizosphere soil and non-rhizosphere soil in same stands ($P<0.05$)

图 1 不同林分类型桉树根际与非根际土壤的酶活性

Fig. 1 Change of enzymatic activities in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil under different stand types of *Eucalyptus*

从图 1 可以看出,4 种林分类型中,蛋白酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶的活性均表现为桉树混交林高于纯林,且根际土壤中这一差异均达显著水平;而非根际土壤中蛋白酶活性差异均达显著水平,蔗糖酶活性 MEC 和 MED 显著高于 PE,其余酶活性差异不显著。根际土壤多酚氧化酶仅 MEC 显著高于 PE,非根际土壤多酚氧化酶活性混交林显著低于纯林。除纯林的脲酶外,4 种林分根际土壤酶活性都高于非根际土壤,其中 4 种林分的蛋白酶和蔗糖酶,MEE 的脲酶,MEC、MED、MEE 的过氧化氢酶,MEC、MED 的多酚氧化酶的活性根际土显著高于非根际土。由此可知,桉树混交林的土壤酶活性总体高于纯林,且根际土壤的酶活性总体高于非根际土壤。

从图 1 可以看出,与 PE 相比,MEC、MED、MEE 根际和非根际土壤蛋白酶活性分别增加了 43.29%,30.68%,25.58% 和 46.80%,31.00%,39.59%,蔗糖酶活性分别增加了 42.30%,32.16%,30.12% 和 38.29%,32.62%,26.70%,2

种酶均以 MEC 的增幅最大;MEC、MED、MEE 根际土壤的过氧化氢酶活性较 PE 增加了 30.53%~38.69%,其中以 MEC 的增幅最大。MEC、MED、MEE 根际土壤脲酶活性分别是非根际土壤的 1.22,1.23 和 1.30 倍,多酚氧化酶活性分别是非根际土壤的 2.62,1.55 和 1.53 倍。桉树混交林非根际土壤多酚氧化酶活性较纯林降低了 25.43%~37.86%。可见,4 种林分类型中,MEC 的土壤酶活性总体较高。

2.4 不同林分类型桉树土壤理化性质、酚酸含量与土壤酶活性的相关性

表 4 表明,在根际土壤中,土壤酶活性与理化性质总体上呈正相关,其中有机碳、全氮含量与土壤酶的相关系数相对较大,说明土壤养分对土壤酶活性的贡献率较大。在非根际土壤中,蛋白酶活性与 pH、全氮、硝态氮含量呈显著正相关关系,与有机碳含量呈极显著正相关关系;而多酚氧化酶活性与土壤理化性质总体上存在负相关关系,其中与 pH 值、有机碳含量的相关性达显著或极显著水平。

表 4 桉树根际与非根际土壤理化性质与酶活性的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients of soil enzyme activities and physicochemical properties

土壤位置 Soil location	土壤理化性质 soil physicochemical property	蛋白酶活性 Protease activity	脲酶活性 Urease activity	蔗糖酶活性 Invertase activity	过氧化氢酶 活性 Catalase activity	多酚氧 化酶活性 Polyphenol oxidase activity
R	pH	0.442	0.535	0.658*	0.390	-0.128
	自然含水率 Natural water content	0.269	0.137	0.251	0.114	0.542
	有机碳含量 Total organic carbon content	0.873**	0.792**	0.854**	0.808**	0.641*
	全氮含量 Total N content	0.624*	0.824**	0.629*	0.721**	0.393
	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	0.732**	0.702*	0.581*	0.522	0.488
	铵态氮含量 Ammoniacal nitrogen content	0.608*	0.667*	0.455	0.623*	0.330
S	pH	0.577*	0.298	0.397	0.410	-0.637*
	自然含水率 Natural water content	0.261	0.123	-0.006	0.084	-0.244
	有机碳含量 Total organic carbon content	0.878**	0.371	0.574	0.711**	-0.806**
	全氮含量 Total N content	0.698*	0.009	0.530	0.537	-0.596
	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	-0.125	-0.286	-0.149	-0.082	0.144
	铵态氮含量 Ammoniacal nitrogen content	0.617*	0.449	0.548	0.586*	-0.628*

注: * 表示显著相关($P<0.05$); ** 表示极显著相关($P<0.01$)。下同。
Notes: * Represents significant correlation($P<0.05$); ** Represents extremely significant correlation($P<0.01$). The same below.

表 5 表明,在根际土壤中,除了香草酸、阿魏酸外,其他 4 种酚酸类物质含量与土壤酶活性存在正相关关系;除了多酚氧化酶之外,其余 4 种酶活性均与对羟基苯甲酸、香豆酸、苯甲酸、水杨酸含量总体上呈显著或极显著正相关关系;脲酶、过氧化氢酶活性与香草酸含量呈显著负相关关系,多酚氧化酶与阿魏酸呈极显著正相关关系。在非根际土壤中,多酚氧化酶活性与对羟基苯甲酸、香草酸、阿魏酸含量呈极显著正相关关系,蛋白酶则与上述 3 种酚酸存

在极显著负相关关系,脲酶、过氧化氢酶活性与对羟基苯甲酸含量分别呈显著和极显著负相关关系,蔗糖酶活性与对羟基苯甲酸、阿魏酸含量呈极显著负相关关系。

以土壤酶活性作为响应变量,土壤酚酸含量作为解释变量进行冗余分析(RDA),结果如图 2 所示。由图 2 可知,根际土壤中,酚酸对土壤酶活性总的贡献率为 80.7%,其中第一轴解释了变量的 66.49%,第二轴解释了变量的 14.21%;对羟基苯

甲酸、阿魏酸是影响根际土壤酶活性的主要因子,其贡献率分别为 54.4%和 9.5%。非根际土壤中,酚酸对土壤酶活性总的贡献率为 75.25%,其中第一轴解释了变量的 63.22%,第二轴解释了变量的 12.03%;对羟基苯甲酸、香草酸、阿魏酸是影响非根际土壤酶活性的主要因子,其贡献率分别为61.4%,9.7%和7.3%。

表 5 桉树根际与非根际土壤中酚酸含量与酶活性的 Pearson 相关系数

土壤位置 Soil location	土壤酚酸 Soil phenolic acids	蛋白酶活性 Protease activity	脲酶活性 Urease activity	蔗糖酶活性 Invertase activity	过氧化氢酶活性 Catalase activity	多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity
R	对羟基苯甲酸含量 p-hydroxy benzoic acid	0.887 **	0.736 **	0.729 **	0.716 **	0.587 *
	香草酸含量 Vanillic acid content	−0.349	−0.578 *	−0.356	−0.583 *	0.116
	阿魏酸含量 Ferulic acid content	0.321	−0.013	0.152	0.18	0.796 **
	香豆酸含量 Coumaric acid content	0.607 *	0.730 **	0.576 *	0.648 *	0.108
	苯甲酸含量 Benzoic acid content	0.894 **	0.651 *	0.701 *	0.777 **	0.527
	水杨酸含量 Salicylic acid content	0.483	0.666 *	0.543	0.589 *	0.147
S	对羟基苯甲酸含量 p-hydroxy benzoic acid	−0.831 **	−0.650 *	−0.767 **	−0.722 **	0.919 **
	香草酸含量 Vanillic acid content	−0.917 **	−0.441	−0.571	−0.425	0.888 **
	阿魏酸含量 Ferulic acid content	−0.903 **	−0.393	−0.837 **	−0.466	0.886 **
	香豆酸含量 Coumaric acid content	−0.172	0.042	0.028	−0.058	0.11
	苯甲酸含量 Benzoic acid content	−0.374	−0.339	−0.125	−0.174	0.379
	水杨酸含量 Salicylic acid content	−0.176	−0.315	0.027	−0.292	0.07

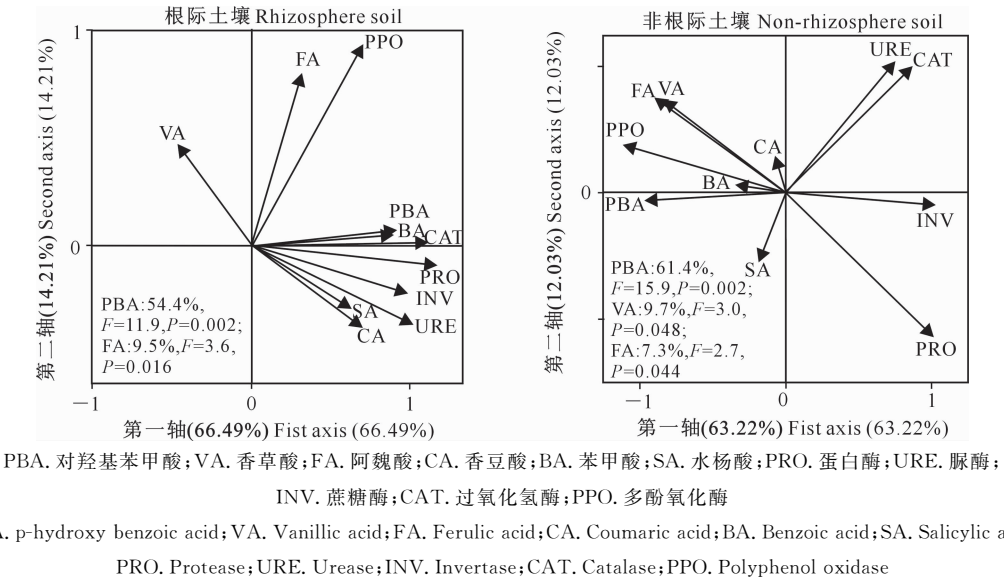


图 2 不同林分类型桉树根际和非根际土壤中酚酸与酶活性的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis of soil phenolic acids and soil enzyme activities across different stand types of *Eucalyptus* within rhizosphere soil and non-rhizosphere soil

3 讨论

3.1 林分类型对土壤理化性质及酶活性的影响

与桉树纯林相比,桉树与红锥、降香黄檀和格木 3 种阔叶树种混交后其根际与非根际土壤的 pH、自然含水率都有所升高,表明桉树混交林有助于缓解土壤酸化,能有效提高林分涵养水源的能力,这与前人的研究结果^[23-24]一致。3 种混交林的桉树根际和非根际土壤有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮含量均较

桉树纯林明显提高,这与红锥、降香黄檀和格木等阔叶树种的冠幅相对较大,凋落物量更多且容易腐烂分解有关^[23,25]。在植物-土壤的循环系统中,土壤养分含量通常与树种组成密切相关,桉树纯林由于林分结构简单、凋落物量少,且分解缓慢,不利于养分在土壤中的积累^[26-27]。红锥、降香黄檀和格木 3 种阔叶树种能产生大量的凋落物,将养分归还土壤,而且红锥与桉树混交林具有较强的氮素养分循环机制。有研究显示,降香黄檀与格木根部的根瘤菌可

固定空气中的氮气,增加土壤氮的有效性^[28-29],这也是本研究中桉树与降香黄檀、格木混交能够提高林地土壤氮含量和增加氮有效性的重要原因。

酶是土壤生态系统的组分之一,参与土壤各种元素的循环和迁移,其活性在一定程度上反映了土壤质量的优劣,也能反映土壤生理生化反应进行的程度。本研究中,3种桉树混交林根际和非根际土壤的过氧化氢酶、蛋白酶、蔗糖酶活性总体上显著高于桉树纯林,这与桉树混交林土壤有机质含量高于纯林有关。土壤有机质是过氧化氢酶和部分蔗糖酶的重要底物^[23,30],其含量与过氧化氢酶和蔗糖酶活性正相关^[31],因此本研究中桉树混交林有机质含量的增加在一定程度上提高了过氧化氢酶和蔗糖酶的活性。桉树混交林的土壤脲酶活性均高于纯林,根际土壤的脲酶活性均高于非根际土壤,这是因为桉树与红锥、降香黄檀和格木混交后,增加了混交林土壤氮素含量,另外混交林土壤蛋白酶活性的提高使有机氮矿化为无机氮的速率增大,为脲酶提供了丰富的底物,从而刺激脲酶活性提高^[32]。脲酶能促进土壤中有机物酰胺肽水解生成植物可吸收利用的氨,提高土壤中氮素的有效性^[33]。大量研究表明,土壤中的酚酸类物质含量与多酚氧化物正相关^[6,34-35],本研究中混交林桉树根际土壤酚酸含量均大于纯林土壤,这可能是混交林中桉树根际土壤多酚氧化酶活性更高的重要原因。

3.2 林分类型对土壤酚酸含量的影响

酚酸类物质可通过根系分泌、微生物腐解、淋溶等多种途径进入土壤,改变土壤环境,进而影响植物的生长。有研究表明,与受干扰程度较小的天然林相比,人工纯林的连代栽培会导致森林生物多样性骤减,林下植被数量少,凋落物单一,土壤生态化学循环失衡,非根际土壤酚酸类物质含量增加^[36-37]。本研究中,与桉树纯林相比,桉树与红锥、降香黄檀和格木混交之后,其非根际土壤酚酸类物质总量下降,原因可能是混交之后林地内凋落物种类及林下植被多样性增加,土壤生态化学循环相对稳定,使酚酸类物质含量减少。有研究表明,桉树与豆科树种混交之后能显著提高桉树根际土壤的酚酸含量^[15,36],本研究中,混交林桉树根际土壤的酚酸物质总量明显高于桉树纯林,这与桉树同3种混交树种根际之间的相互作用有关。无论是桉树纯林还是混交林,根际土壤都是植物根系分泌酚酸物质的第一储存库,生物活性较高,代谢旺盛,且有机质含量高,因此根际土壤的酚酸含量高于非根际土壤^[38-40]。

在桉树纯林和混交林土壤的酚酸类物质中,对羟基苯甲酸含量最高,其次是香草酸、阿魏酸、香豆酸,苯甲酸与水杨酸含量较低。研究表明,香草醛、阿魏酸的吸附能力高于对羟基苯甲酸和苯甲酸,并且阿魏酸属于易降解酚酸,对羟基苯甲酸和苯甲酸属于难降解酚酸,而香草酸、苯甲酸、水杨酸一旦被吸附之后则很难解吸附,只能以束缚态的形式存在^[41-42],这在一定程度上可以解释林分土壤中酚酸类物质含量的差异。

3.3 不同林分类型桉树根际和非根际土壤酚酸与酶活性的相关性

土壤酚酸能够刺激植物及微生物将酶分泌到土壤中,而一些土壤酶也能影响酚酸的形成与转化^[34,43],如高浓度肉桂酸和邻苯二甲酸会抑制土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶的活性,从而对土壤碳、氮、磷循环产生影响^[21];阿魏酸对反硝化酶有显著的影响,抑制硝态氮转化为铵态氮^[44];对羟基苯甲酸和阔马酸含量受土壤酶活性的显著影响^[43]。本研究表明,对羟基苯甲酸、香草酸、阿魏酸是影响桉树土壤酶活性的重要因子。桉树混交林根际土壤酚酸含量与酶活性的关系与非根际土壤有所差别,在根际土壤中,酚酸含量较高,其主要作为碳源被微生物利用,从而增强了土壤酶活性,在一定程度上增加了有机碳、全氮等土壤养分的含量^[45-46];而非根际土壤酚酸含量减少,导致土壤 pH 提高,为酶参与养分循环提供良好的环境,改善了土壤质量^[47]。因此,酚酸类物质能通过影响土壤酶活性来调控土壤养分循环和代谢^[48],改变土壤有效养分的含量,从而影响植物的生长,间接对森林生产力产生影响。

4 结 论

桉树与红锥、降香黄檀、格木混交均能提高根际土壤的碳含量,减缓非根际土壤酚酸的富集,提高土壤酶的活性,增加土壤养分含量,从而改善土壤的生态功能。从土壤生态恢复的角度考虑,在幼林阶段,桉树与红锥混交更有利于维持土壤肥力,混交效果比其他2种树种更为理想。

【参考文献】

- [1] Holzapfel C, Shahrokh P, Kafkewitz D. Polyphenol oxidase activity in the roots of seedlings of *Bromus* (Poaceae) and other grass genera [J]. American Journal of Botany, 2010, 97(7): 1195-1199.
- [2] 及利, 杨雨春, 王君, 等. 不同土地利用方式下酚酸物质与土壤微生物群落的关系 [J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6710-

- 6720.
- Ji L, Yang Y C, Wang J, et al. Relationship between soil phenolic acids and the soil microbial community under different land uses [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6710-6720.
- [3] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1464-1471.
- Xu H Q, Zhang J E, Feng L F, et al. Effects of typical soil types and land use patterns on soil enzyme activities in Guangdong Province [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1464-1471.
- [4] Chen P, Wang Y Z, Liu Q Z, et al. Phase changes of continuous cropping obstacles in strawberry (*Fragaria* $\times$ *ananassa* Duch.) production [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103626.
- [5] Tian Y Q, Liu J, Zhang X Y, et al. Effects of summer catch crop, residue management, soil temperature and water on the succeeding cucumber rhizosphere nitrogen mineralization in intensive production systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 88(3): 429-446.
- [6] 罗红艳, 陈潇潇, 曹光球, 等. 连栽杉木林地土壤对其无性系幼苗土壤酶活性和酚酸类物质含量的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 11-18.
- Luo H Y, Chen X X, Cao G Q, et al. Effects of continuous planting on soil enzyme activities and phenolic acid contents in soil and root tips of *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 11-18.
- [7] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展 [J]. *土壤*, 2016, 48(1): 12-21.
- Wang L D, Wang F L, Guo C X, et al. Review: progress of soil enzymology [J]. *Soils*, 2016, 48(1): 12-21.
- [8] Hall S J, Treffkorn J, Silver W L. Breaking the enzymatic latch: impacts of reducing conditions on hydrolytic enzyme activity in tropical forest soils [J]. *Ecology*, 2014, 95(10): 2964-2973.
- [9] 白羽祥, 杨焕文, 徐照丽, 等. 连作植烟土壤中酚酸物质与土壤因子的关系分析 [J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(11): 1907-1914.
- Bai Y X, Yang H W, Xu Z L, et al. Relationship within phenolic acids and soil properties in continuous cropping tobacco soil [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(11): 1907-1914.
- [10] 刘涛, 谢耀坚. 中国桉树人工林快速发展动因分析与展望 [J]. *桉树科技*, 2020, 37(4): 38-47.
- Liu T, Xie Y J. Studies on the causes of rapid development of *Eucalyptus* plantations in China [J]. *Eucalypt Science and Technology*, 2020, 37(4): 38-47.
- [11] 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 [J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5142-5152.
- Huang G Q, Zhao Q G. The history, status quo, ecological problems and countermeasures of *Eucalyptus* plantations in Guangxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5142-5152.
- [12] 杨曾奖, 徐大平, 陈文平, 等. 华南地区桉树/相思混交种植的林木生长效应 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2339-2344.
- Yang Z J, Xu D P, Chen W P, et al. Growth effect of *Eucalyptus*-*Acacia* mixed plantation in South China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2339-2344.
- [13] 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]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 332-342.
- [14] 黄晓露. 桉树纯林及其混交林土壤酚类物质的环境效应与生物评价 [D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- Huang X L. Environmental effect and assessments of soil phenols in the pure *Eucalyptus* plantations and the mixed forest [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. Agrochemical analysis of soil [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000.
- [16] 查同刚. 土壤理化分析 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2017.
- Zha T G. Soil physicochemical analysis [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017.
- [17] 谭秀梅, 王华田, 孔令刚, 等. 杨树人工林连作土壤中酚酸积累规律及对土壤微生物的影响 [J]. *山东大学学报(理学版)*, 2008, 43(1): 14-19.
- Tan X M, Wang H T, Kong L G, et al. Accumulation of phenolic acids in soil of a continuous cropping Poplar plantation and their effects on soil microbes [J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2008, 43(1): 14-19.
- [18] 蔡红, 沈仁芳. 改良茚三酮比色法测定土壤蛋白酶活性的研究 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(2): 306-313.
- Cai H, Shen R F. Determination of soil protease activity with modified ninhydrin colorimetry [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2): 306-313.
- [19] 韩国君, 何明珠, 黄海霞, 等. 黄土高原种植不同人工牧草对土壤酶活性的影响 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3): 19-24.
- Han G J, He M Z, Huang H X, et al. Effects of different forage varieties on soil enzyme activities in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3): 19-24.
- [20] 赵仁竹, 汤洁, 梁爽, 等. 吉林西部盐碱田土壤蔗糖酶活性和有机碳分布特征及其相关关系 [J]. *生态环境学报*, 2015, 24(2): 244-249.
- Zhao R Z, Tang J, Liang S, et al. Distribution of soil organic carbon and invertase activity and its correlation in saline-alkali paddy field in west Jilin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(2): 244-249.
- [21] Song H, Gao X L, Wang X M, et al. Effects of exogenous phthalic and cinnamic acids on enzyme activities and microbial community structures in rhizosphere soil of adzuki bean [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(10): 1935-1940, 1954.
- [22] 杨梅, 谭玲, 叶绍明, 等. 桉树连作对土壤多酚氧化酶活性及酚类物质含量的影响 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 165-169, 174.
- Yang M, Tan L, Ye S M, et al. Effects of continuous *Eucalyptus* plantation on activity of polyphenol oxidase and phenol

- contents in soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 165-169, 174.
- [23] 张 培, 庞圣江, 杨保国, 等. 不同混交模式对桉树林分生长、凋落物量和土壤养分的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 31-37.
- Zhang P, Pang S J, Yang B G, et al. Effects of different mixing patterns on growth, litter production and soil nutrients in *Eucalyptus* plantations [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(2): 31-37.
- [24] 林祖荣, 桉树与米老排混交林的水源涵养功能. [J]. 亚热带农业研究, 2019, 15(4): 229-233.
- Lin Z R. Water conservation function in a mixed *Eucalyptus* sp. and *Mytilaria laosensis* plantation [J]. Subtropical Agriculture Research, 2019, 15(4): 229-233.
- [25] 张 培, 庞圣江, 杨保国, 等. 广西西南地区巨尾桉与红椎混交造林试验研究 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 150-155.
- Zhang P, Pang S J, Yang B G, et al. Mixed afforestation experiment of *Eucalyptus grandis* $\times$ *E. urophylla* and *Castanopsis hystrix* in the Southwest Region of Guangxi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(1): 150-155.
- [26] 杨钙仁, 张秀清, 蔡德所, 等. 广西主要人工林凋落物分解过程及其对淋溶水质的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 9-16.
- Yang G R, Zhang X Q, Cai D S, et al. Litter decomposition of dominant plantations in Guangxi and its effects on leachate quality [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 9-16.
- [27] 邓海燕, 莫晓勇, 梅嘉仪, 等. 桉树人工混交林林分生长与土壤养分研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 95-102.
- Deng H Y, Mo X Y, Mei J Y, et al. Growth and soil nutrient of *Eucalyptus* mixed plantations [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 95-102.
- [28] Sierra J, Daudin D, Domenach A M, et al. Nitrogen transfer from a legume tree to the associated grass estimated by the isotopic signature of tree root exudates: a comparison of the ^{15}N leaf feeding and natural ^{15}N abundance methods [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 27(2/3/4): 178-186.
- [29] Wang X, Gao Y. Advances in the mechanism of cereal/legume intercropping promotion of symbiotic nitrogen fixation [J]. Chinese Journal, 2020, 65(2/3): 142-149.
- [30] 王国兵, 徐 瑾, 徐 晓, 等. 蚯蚓与凋落物对杨树人工林土壤酶活性的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 8-14.
- Wang G B, Xu J, Xu X, et al. Effects of earthworms and litter-falls on the soil enzyme activities of poplar plantations [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(3): 8-14.
- [31] 马书琴, 汪子微, 陈有超, 等. 藏北高寒草地土壤有机质化学组成对土壤蛋白酶和脲酶活性的影响 [J]. 植物生态学报, 2021, 45(5): 516-527.
- Ma S Q, Wang Z W, Chen Y C, et al. Effect of soil organic matter chemical compositions on soil protease and urease activity in alpine grassland soils in Northern Xizang, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(5): 516-527.
- [32] 边雪廉, 赵文磊, 岳中辉, 等. 土壤酶在农业生态系统碳、氮循环中的作用研究进展 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(4): 171-178.
- Bian X L, Zhao W L, Yue Z H, et al. Research process of soil enzymes effect on carbon and nitrogen cycle in agricultural ecosystem [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(4): 171-178.
- [33] Gong S W, Zhang T, Guo R, et al. Response of soil enzyme activity to warming and nitrogen addition in a meadow steppe [J]. Soil Research, 2015, 53(3): 242.
- [34] 马云华, 王秀峰, 魏 珉, 等. 黄瓜连作土壤酚酸类物质积累对土壤微生物和酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2149-2153.
- Ma Y H, Wang X F, Wei M, et al. Accumulation of phenolic acids in continuously cropped cucumber soil and their effects on soil microbes and enzyme activities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2149-2153.
- [35] Zhang Q X, Chen X T, Wang Y C, et al. Autotoxicity of continuously cropped passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) soil [J]. Allelopathy Journal, 2021, 53(1): 101-110.
- [36] 叶发茂. 土壤酚类物质对森林生态系统转换的响应及其机制研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- Ye F M. Study on the effect of forest ecosystem conversion on soil phenols and its functional mechanism [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- [37] Marshall C B, McLaren J R, Turkington R. Soil microbial communities resistant to changes in plant functional group composition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(1): 78-85.
- [38] 林开敏, 叶发茂, 林 艳, 等. 酚类物质对土壤和植物的作用机制研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1130-1137.
- Lin K M, Ye F M, Lin Y, et al. Research advances of phenolic functional mechanisms in soils and plants [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 1130-1137.
- [39] Vives-Peris V, de Ollas C, Gómez-Cadenas A, et al. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond [J]. Plant Cell Reports, 2020, 39(1): 3-17.
- [40] 母 媛, 袁大刚, 兰永生, 等. 植茶年限对土壤 pH 值、有机质与酚酸含量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2016(4): 44-48.
- Mu Y, Yuan D G, Lan Y S, et al. Effects of tea planting age on soil pH value, contents of organic matter and phenolic acids [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(4): 44-48.
- [41] 张艳玲, 覃天联, 杨 梅, 等. 桉树降香黄檀混交林土壤的酚酸吸附特征 [J]. 森林与环境学报, 2021, 41(4): 343-350.
- Zhang Y L, Qin T L, Yang M, et al. Adsorption characteristics of phenolic acid in the soils of a *Eucalyptus* monoculture plantation and *Eucalyptus* $\times$ *Dalbergia odorifera* mixed plantation [J]. Journal of Forest and Environment, 2021, 41(4): 343-350.

- mountains [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2018, 29(5): 619-629.
- [34] 冯长根, 胡秀峰. 2002 年我国事故与灾害状况综述 [J]. 安全与环境学报, 2003, 3(3): 68-73.
Feng C G, Hu X F. Review of accidents and disasters in China in the year 2002 [J]. Journal of Safety and Environment, 2003, 3(3): 68-73.
- [35] 张 恒, 张 鑫, 赵鹏武, 等. 内蒙古森林草原雷击火灾时空分布特征 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(12): 46-51.
Zhang H, Zhang X, Zhao P W, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of lightning fires in forests and grasslands in Inner Mongolia [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(12): 46-51.
- [36] 杜春英, 李 帅, 刘 丹, 等. 大兴安岭地区森林雷击火发生的时空分布 [J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 72-76.
Du C Y, Li S, Liu D, et al. Spatiotemporal distribution of lightning-caused forest fires in Daxing'anling area [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(3): 72-76.
- [37] 刘柯珍, 赵凤君, 王明玉, 等. 我国大兴安岭地区夏季林火的火环境研究 [J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(7): 24-29, 33.
Liu K Z, Zhao F J, Wang M Y, et al. Research on fire environment of summer forest fires in Daxing'anling region in China [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(7): 24-29, 33.
- [38] 张吉利, 毕 武, 王晓红, 等. 雷击火发生的影响因子与预测研究进展 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2674-2684.
Zhang J L, Bi W, Wang X H, et al. Lightning-caused fire, its affecting factors and prediction [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2674-2684.
- [39] 张 骞, 肖稳安, 庞文静, 等. 2000-2008 年大兴安岭森林雷击火特征分析与研究 [J]. 农技服务, 2009, 26(10): 106-107, 136.
Zhang Q, Xiao W A, Pang W J, et al. Analysis and research on the characteristics of lightning fires in Daxing'anling mountains during 2000-2008 [J]. Agricultural Technology Service, 2009, 26(10): 106-107, 136.
- [40] 田 超, 苏漳文, 杨夏捷, 等. 福建西部地区林火发生格局及驱动因子分析 [J]. 森林与环境学报, 2017, 37(1): 88-94.
Tian C, Su Z W, Yang X J, et al. Investigations on spatial distribution and driving factors of forest fire in western Fujian [J]. Journal of Forest and Environment, 2017, 37(1): 88-94.
- (上接第 63 页)
- [42] Wang Y P, Li C R, Wang Q K, et al. Environmental behaviors of phenolic acids dominated their rhizodeposition in boreal poplar plantation forest soils [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(7): 1858-1870.
- [43] 白羽祥, 杨成翠, 史普西, 等. 连作植烟土壤酚酸类物质变化特征及其与主要环境因子的 Mantel Test 分析 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 369-379.
Bai Y X, Yang C C, Shi P Y, et al. Correlation analysis of main environmental factors and phenolic acids in continuous tobacco cropping soils using Mantel Test [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 369-379.
- [44] 李春龙, 韩春梅, 叶少平, 等. 外源化感物质阿魏酸对紫云英幼苗生长、根际土壤酶活性、微生物数量及土壤养分的影响 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(4): 134-137.
Li C L, Han C M, Ye S P, et al. Effects of exogenous allelochemicals ferulic acid on seedling growth, rhizosphere soil enzyme activities, microbial population and soil nutrients of *As-tragalus sinicus* L. [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(4): 134-137.
- [45] 徐龙晓, 苟 咪, 宋建飞, 等. 土壤质地和砧木对苹果根际微生物功能多样性及其碳源利用的影响 [J]. 园艺学报, 2020, 47(8): 1530-1540.
Xu L X, Xun M, Song J F, et al. Effect of soil textures and rootstock on rhizosphere microorganism and carbon source utilization of apple roots [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(8): 1530-1540.
- [46] 李传涵, 李明鹤, 何绍江, 等. 杉木林和阔叶林土壤酚含量及其变化的研究 [J]. 林业科学, 2002, 38(2): 9-14.
Li C H, Li M H, He S J, et al. Studies on phenolic content and variation in soils of Chinese-fir and broad-leaved stands [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(2): 9-14.
- [47] 李培栋, 王兴祥, 李奕林, 等. 连作花生土壤中酚酸类物质的检测及其对花生的化感作用 [J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2128-2134.
Li P D, Wang X X, Li Y L, et al. The contents of phenolic acids in continuous cropping peanut and their allelopathy [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 2128-2134.
- [48] 王延平, 王华田, 许 坛, 等. 酚酸对杨树人工林土壤养分有效性及酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 667-674.
Wang Y P, Wang H T, Xu T, et al. Effects of exogenous phenolic acid on soil nutrient availability and enzyme activities in a poplar plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 667-674.