

引用格式: 伍丽华, 康述海, 陈爱玲, 杨秋菊, 曹光球. 地形对杉木林土壤酚酸物质含量及微生物群落结构影响[J]. 山地学报, 2022, 40(2): 205-219.

WU Lihua, KANG Shuhai, CHE Ailing, YANG Qiuju, CAO Guangqiu. Effects of terrain on soil phenolic acids content and microbial community in *Cunninghamia lanceolata* forest [J]. Mountain Research, 2022, 40(2): 205-219.

## 地形对杉木林土壤酚酸物质含量及微生物群落结构影响

伍丽华<sup>1</sup>, 康述海<sup>2</sup>, 陈爱玲<sup>3,4</sup>, 杨秋菊<sup>3</sup>, 曹光球<sup>1,3\*</sup>

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 福建省王台林业站, 福建 南平 353000; 3. 国家林业和草原杉木工程技术研究中心, 福州 350002; 4. 林木逆境生理生态及分子生物学福建省高校重点实验室, 福州 350002)

**摘要:** 地形是影响土壤酚酸类物质含量及微生物结构组成的主要因子之一, 研究酚酸物质在不同地形中的变化规律及其与微生物群落结构的关系, 有助于更好地揭示不同地形下土壤微生物群落结构变化潜在调控机制。以往研究主要集中于地形对微生物群落结构影响, 而关于地形对土壤酚酸物质累积及其微生物群落结构间相互影响的研究鲜有报道。以福建省南平市 100 a 年生杉木林为研究对象, 测定西南坡地、西北坡地、山凹地和山洼地上酚酸物质含量和土壤理化性质, 并结合 16S 和 ITS 技术分析不同地形中土壤细菌和真菌群落结构的变化规律。结果表明: (1) 不同地形土壤酚酸物质含量大小规律总体表现为西北坡地 > 西南坡地 > 山凹地 > 山洼地; 随着土层深度加深, 酚酸物质含量总体呈下降趋势。(2) 西南坡地细菌放线菌纲相对丰度较高, 山凹地真菌粪壳菌纲相对丰度较高; 随土层深度加深, 微生物相对丰度总体上呈降低趋势。(3) 高浓度酚酸物质对细菌类浮霉菌纲和  $\alpha$ -变形杆菌纲相对丰度起促进作用, 而对放线菌纲和  $\beta$ -变形菌纲相对丰度起抑制作用; 低浓度酚酸物质条件下真菌类粪壳菌纲和座囊菌纲相对丰度较高, 而伞菌纲和定耳银纲相对丰度较低。(4) 不同地形条件下, 细菌群落结构表现较为分散, 而真菌群落结构表现较为集中; 土壤总孔隙度、土壤容重、水杨酸戊酯、有机质和阿魏酸对细菌群落影响显著, 而全磷对真菌群落影响显著。不同地形导致土壤酚酸物质含量和微生物群落结构发生改变, 酚酸物质对微生物具有双重作用, 高浓度酚酸物质促进细菌菌类生长, 而低浓度则会抑制真菌类生长。研究结果揭示土壤酚酸物质对微生物群落结构的影响, 可为实现杉木林的长期生产力维持提供参考。

**关键词:** 杉木林; 地形; 土壤理化性质; 酚酸物质; 微生物群落

**中图分类号:** S714.3

**文献标志码:** A

杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook] 是我国南方主要的速生用材树种之一, 其面积约为我国人工林总面积的 26.5%, 在保障我国木材安全、生态安全和国土安全中占据重要地位<sup>[1]</sup>。近年来, 随着杉木多代连栽和纯林化经营模式, 导致林分

生产力与地力下降日趋显著, 严重阻碍了杉木产业的持续健康发展<sup>[2]</sup>。因此, 如何科学维持杉木连栽林的生产力已成为当前亟待解决的重大技术难题, 而杉木林连栽障碍机理的揭示又是解决该难题的关键所在。引起杉木林连栽障碍的原因众多, 酚酸类

**收稿日期** (Received date): 2021-06-17; **改回日期** (Accepted date): 2022-04-18

**基金项目** (Foundation item): 国家重点研发计划项目 (2016YFD0600300); 福建省林业科技项目 [闽林科便函 (2019) 16 号]。[National Key R&D Program of China (2016YFD0600300); Fujian Forestry Science and Technology Project [Fujian Forestry Science (2019) 16]]

**作者简介** (Biography): 伍丽华 (1996-), 女, 江西九江人, 硕士研究生, 主要研究方向: 杉木人工林长期生产力。[WU Lihua (1996-), female, born in Jiujiang, Jiangxi province, M. Sc. candidate, research on the long-term productivity of Chinese artificial forests] E-mail: 2295202040@qq.com.

**\* 通讯作者** (Corresponding author): 曹光球 (1974-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 森林资源高效培育。[CAO Guangqiu (1974-), male, Ph. D., associate professor, research on efficient cultivation of forest resources] E-mail: cncgq@126.com

化感物质介导的杉木自毒作用被认为是造成杉木林连栽生产力下降的主要原因之一<sup>[3]</sup>。酚酸类物质是植物体内一种重要的次生代谢产物,它主要通过淋容、挥发、根系分泌和植物残体分解途径进入土壤<sup>[4]</sup>。土壤酚酸类物质在塑造微生物群落组成和功能中具有重要作用,它通过为微生物提供碳源促进微生物的生长并募集特定类型的菌种,经过繁衍形成特有的微生物群落类型,最后以共生方式对土壤养分或土壤酶活性产生影响,最终调控植物的生长和生理代谢过程<sup>[5]</sup>,而这种微生物群落结构的改变也会影响酚酸类化感物质的积累<sup>[6]</sup>。目前普遍认为,酚酸类化感物质在土壤中能否发挥作用与其在土壤中的浓度密切相关,而土壤中该物质的浓度又取决于它在土壤中的迁移、转化和积累等过程<sup>[7]</sup>。微生物在养分循环、有机物转化及土壤污染物脱毒等方面具十分重要作用,且在众多影响酚酸类物质在土壤中迁移转化与积累的因素中,微生物也扮演着重要的角色<sup>[8-10]</sup>。因此,开展土壤酚类物质的含量变化和微生物群落结构关系研究,可从化学生态学角度揭示杉木林连栽障碍形成机理提供重要理论依据。

地形是重要的环境因子,它通过对光照、风速、温度等因子的影响,使得不同地形即使在小尺度空间范围内其土壤水热条件也会发生显著改变<sup>[11]</sup>。不同地形土壤水热条件的强烈变化导致土壤养分和微生物群落结构的分布产生差异<sup>[12]</sup>,其中对细菌群落影响显著,而对真菌群落影响较小。此外,不同地形会因为水热条件的差异,对化感物质的迁移、转化和积累过程产生不同的影响<sup>[13]</sup>。因此,地形的差异不仅单纯代表着位置的不同,更重要的是它意味着土壤水热条件的差异及其引起的土壤理化性质、微生物群落结构和次生代谢产物分解速率的不同。以往,针对杉木林林地酚酸物质积累及微生物群落结构差异研究,主要集中在不同连栽代数杉木林及不同林下植被管理模式杉木林中开展,未见开展不同地形对土壤酚酸物质积累及微生物群落结构差异的相关报道,而分析土壤酚物质积累与土壤微生物群落结构关系的研究却未见相关报道<sup>[14-16]</sup>。因此,开展不同地形土壤酚类物质积累与土壤微生物群落结构关系的研究,对于揭示酚类物质在土壤中的形成机理和杉木林连栽生产力下降机制具有重要科学意义。

林分密度合理控制、混交林营建、延长轮伐期、林地施肥及林下植物保护与恢复是减缓杉木林地力下降的主要措施<sup>[17]</sup>。福建省南平市王台镇溪后村安曹下保存了一片全世界林龄最长、单位蓄积最高的杉木林,由于其具有较高的科研价值,长期以来受到杉木科技工作者的密切关注<sup>[18]</sup>。延长轮伐期后,杉木林地酚酸物质及土壤微生物结构会呈怎样的变化规律?土壤酚酸物质含量与土壤微生物的相关关系如何?基于这些问题,本文以 100 a 生杉木林为研究对象,在测定西北坡地、西南坡地、山凹地和山洼地土壤理化性质及酚酸物质含量的基础上,进一步测定不同地形土壤微生物结构差异,并分析土壤理化性质和酚酸物质含量对微生物群落结构间的相关关系,研究结果可从机理揭示土壤酚酸物质对微生物群落结构的影响机理,从而为实现杉木林的长期生产力维持提供参考。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于福建省南平市王台镇溪后村安曹下(117°50'~118°40'E,26°15'~26°51'N),该地区属于中亚热带季风气候,四季分明,夏季酷热,冬季寒冷,年均气温达 19.3℃。土壤类型为山地红壤,深度 100 cm 以上。试验林为 1919 年 3 月采用插条造林营建,插条为 2 年生嫩枝,造林地前身为天然阔叶林,炼山。初始造林密度为 3600 株·hm<sup>-2</sup>,造林后前 5 a 进行抚育管理,林分郁闭后第 8 a 与第 11 a 伐除林分中生长不良木后再进行近自然经营。西南坡地灌草层共有 49 种植物,灌木层优势种为木荷(*Schima superba*)、紫麻(*Oreocnide frutescens*)、大叶紫珠(*Callicarpa macrophylla*),草本层为毛柄短肠蕨(*Allantodia dilatata*)、赤车(*Pellionia radicans*)、三叶崖爬藤(*Tetrastigma hemsleyanum*)。西北坡地灌草层共有 46 种植物,灌木层优势种为青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、黄绒润楠(*Machilus grijsii*)、四川山矾(*Symplocos setchuensis*),草本层优势种为三叶崖爬藤、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)。山凹地灌草层共有 45 种植物,灌木层优势种为黄绒润楠、大叶白纸扇(*Mussaenda esquirolii*)、大叶紫珠,草本层优势种为赤车、毛柄短肠蕨、狗脊。山洼地灌草层共有 16 种

植物,灌木层优势种为紫麻、大叶白纸扇、粗叶榕(*Ficus hirta*),草本层优势种为赤车、毛柄短肠蕨、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)。

1.2 取样方法

2018年4月,将林分按不同地形划分为:西南坡地、西北坡地、山洼地和山凹地,如图1所示。划分之后除山洼地由于面积限制设置了3个15 m×15 m的样地外,其余地形均分别设置3个20 m×20 m的样地,并对每块样地进行每木检尺,林分生长基本情况见表1。每块样地内按照"品"字型挖3个垂直土壤剖面,用环刀取0~20 cm和20~40 cm土层样品用于测定土壤物理性质,取相同土层样品1.00 kg用于测定化学性质、酚酸物质含量及微生物群落结构,冷冻运输带回实验室。其中微生物测定样品过2 mm筛后置于-80℃的冰箱中保存,化

学性质和酚酸物质含量土风干研磨过0.149 mm的筛后常温保存。每种地形土壤各参试指标测定3个重复。

1.3 土壤酚酸物质含量测定

采用液相色谱质谱联用仪(Agilent 6460)测定土壤酚酸物质含量。称取0.2 g土壤于1.5 mL EP管中,加入800 μL甲醇和10 μL内标(2.8 mg·mL<sup>-1</sup>,2-氯苯丙氨酸)。涡旋30 s混匀后放入4℃、12 000 rpm的离心机中离心15 min,取上清液浓缩干燥后,加200 μL甲醇复溶,所得的液体转至小瓶中待测。流动相洗脱过程中,流速均控制为0.3 mL/min,当时间为0、1、15.5、20 min时流动相以95% A(A为水+0.1%甲酸)和5% B(B为乙腈+0.1%甲酸)组成;2、7 min时流动液相为60% A和40% B溶液、20% A和80% B溶液组成;11、

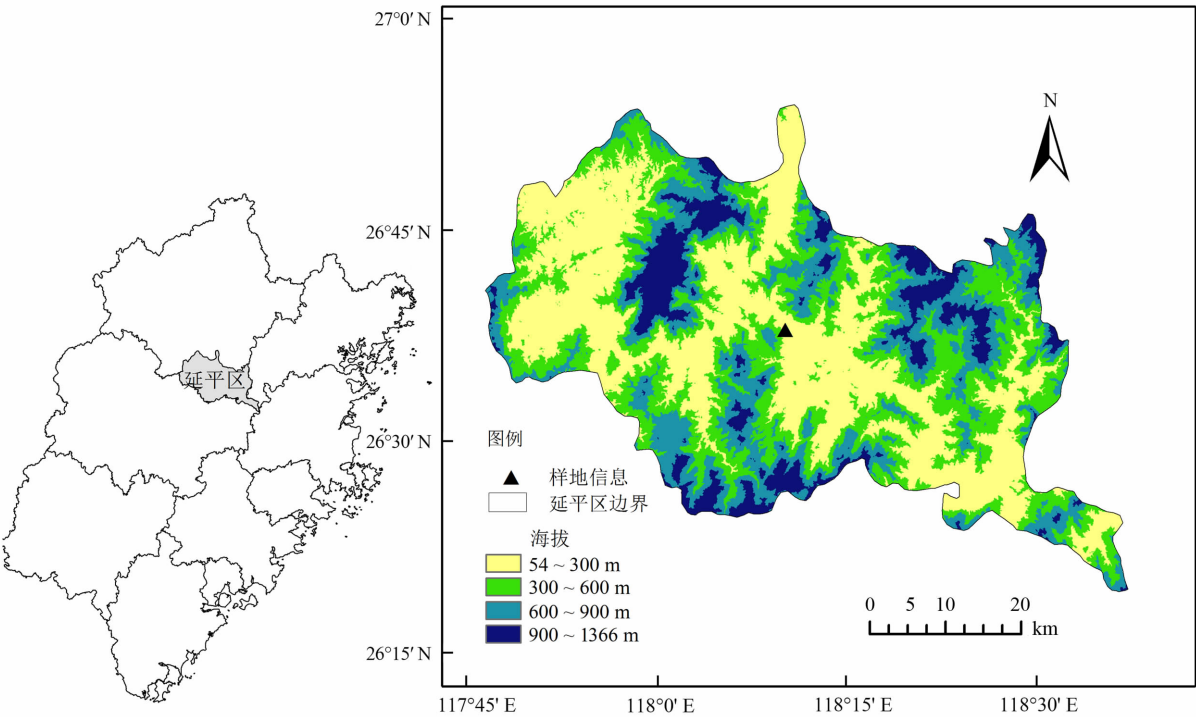


图1 研究区域地理位置

Fig. 1 Location of the study area

表1 试验林林分生长情况<sup>[18]</sup>

Tab. 1 Basic conditions of the sample plot<sup>[18]</sup>

地形因子	坡度/(°)	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径/cm	平均树高/m	平均冠幅/m
西南坡地	34.33±1.25	583.33±1.37	33.76±4.26	27.46±4.49	3.73±0.14
西北坡地	31.17±0.97	758.67±4.53	28.71±2.70	22.19±3.47	3.17±0.08
山凹地	28.33±1.69	516.67±5.28	33.59±0.50	30.23±1.13	4.83±1.38
山洼地	30.00±0.00	416.00±3.61	38.05±1.45	34.49±1.88	4.40±1.21

15.01 min 时间上流动液相组成为 5% A 和 95% B 溶液。

1.4 土壤理化性质测定

不同地形老龄杉木林土壤理化性质见表 2。碳氮元素分析仪(SBE-CNS-440)测定有机质和全氮含量,全磷含量采用碱熔钼锑比色法测定,全钾含量采用高氯酸-氢氟酸消煮液火焰光度法测定,土壤 pH 采用无 CO<sub>2</sub> 水溶液浸提法测定<sup>[19]</sup>。

1.5 土壤微生物群落结构测定

采用高通量测序分别测定土壤中的细菌和真菌结构。先用 MOBIO 公司试剂盒提取土壤中微生物总 DNA,再用琼脂糖凝胶电泳进行检测,检测合格产物于 -80 ℃ 冰箱中低温保存用来进行 PCR 扩增。所得合格产物需 2 min 95 ℃ 温度下进行预变性,再升温至 98 ℃ 变性 10 s,之后降温至 62 ℃ 进行退火 30 s 以及 68 ℃ 延伸 30 s,以此循环 27 次,最后以 68 ℃ 进行延伸 10 min 结束扩增。用 QuantiFluor TM 荧光计对扩增切胶产物进行定量化,最后将扩增产物等量混合后上机测序,以上方法参照文献<sup>[14]</sup>。

所得数据去除 reads 中质量在 20 ~ 80% 且比例大于 10% 的 N 碱基序列,得 clean 序列。再将双端的 reads 的长度大于 10 bp 且同时满足错配率小于 2% 拼接成 tags。将相似性达到 97% 的有效 tags 聚成 OUTs,并计算其中各个样品中的 Tags 的绝对丰富度和相对信息,分别在界、门、纲、目、科、属、种分类水平上注释和丰富度统计。

1.6 数据处理

使用 FLASH 软件对微生物原始数据进行质量过滤和双端序列的拼接获取有效数据<sup>[20]</sup>,用 Uparse 将相似度 ≥ 97% 序列归类到 1 个操作单元,用 Greengene 数据库对物种进行注释<sup>[21,14]</sup>,再用 Qiime 软件对 OTU 进行聚类 and 物种分类分析。采用 Microsoft Excel 2010 统计和整理数据,利用 SPSS 23.0 软件对数据进行差异性分析,用 Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同地形土壤酚酸物质变化特征

在色谱和质谱条件下,利用液相色谱质谱联用仪对 100 a 生杉木人工林土壤进行正离子检测和负

表 2 林地土壤理化性质<sup>[18]</sup>  
Tab. 2 Soil physical and chemical properties on woodland<sup>[18]</sup>

地形因子	土层厚度/cm	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含量/%				含量/(g·kg <sup>-2</sup> )			pH	
			土壤含水率	毛管孔隙度	总孔隙度	非毛管孔隙度	有机质	全氮	全磷		全钾
西南坡地	0~20	1.26±0.13Aa	19.07±0.88Aa	34.59±2.82Aa	46.07±4.43Aa	12.75±2.08Ba	28.50±5.18Ab	1.28±0.19Bb	261.93±9.92Cb	54.75±4.25Aa	4.93±0.21ABa
	20~40	1.30±0.04Aa	17.84±3.96Aa	33.66±1.72Aa	44.50±3.90Aa	11.47±1.61Ba	16.89±2.95Aa	0.78±0.11Ba	259.95±8.00Db	51.37±4.24Ba	5.06±0.27ABa
西北坡地	0~20	1.23±0.07Aa	24.43±4.79Aa	43.20±0.90Ba	50.58±1.29Aa	7.41±0.35ABa	26.86±5.50Ab	0.99±0.24ABb	197.76±2.84Ac	49.40±3.16Ab	4.72±0.17Aa
	20~40	1.32±0.09Aa	21.55±4.67Aa	39.53±2.25Aa	45.68±5.27Aa	7.39±0.95ABa	15.21±2.98Aab	0.57±0.12ABa	169.27±11.42Ab	42.34±5.20Aab	4.73±0.15Aa
山凹地	0~20	1.22±0.19Aa	29.58±2.18ABb	38.42±5.41ABa	48.02±11.57Aa	10.39±2.01Bb	21.68±7.36Aa	0.86±0.24Aa	227.58±6.52Bc	60.12±5.32ABa	4.75±0.10ABa
	20~40	1.34±0.05Aa	23.57±0.78Aa	37.62±9.57Aa	45.01±3.82Aa	6.59±1.62Ba	15.63±4.65Aa	0.58±0.18ABa	203.27±2.32Bb	60.04±3.70Ca	4.78±0.08ABa
山洼地	0~20	1.27±0.08Aa	32.78±3.39Bb	45.77±3.10Bb	52.34±5.86Ab	6.57±2.75Aa	20.14±3.26Ab	0.89±0.19ABb	335.08±4.93Db	62.89±4.20Ba	5.02±0.13Ba
	20~40	1.46±0.05Bb	24.08±5.23Aab	38.46±0.68Aa	42.50±1.32Aa	4.19±0.79Aa	11.07±1.35Aa	0.52±0.10Aa	243.35±12.55Ca	62.24±2.24Ca	5.08±0.17Ba

注:不同大写字母表示相同土层不同地形之间的差异显著,不同小写字母表示相同地形不同土层之间的差异显著(P<0.05)。

离子检测,正离子为检测时仪器只扫描正电荷离子而过滤负离子,负离子检测则只扫描负离子。

### 2.1.1 正离子检测出的酚酸物质

正离子共鉴定出 4 种酚酸物质分别为 Pimentol、阿魏酸 香草酸 Cis-2, 3-Dihydroxy-2, 3-dihydro-p-cumate(图 2)。就不同地形同一土层酚酸物质含量差异而言,在 0~20 cm 土层,正离子检测出的酚酸物质含量表现为山凹地>西南坡地>西北坡地>山洼地,其中山凹地的酚酸物质含量为山洼地的 6~8.54 倍。方差分析结果表明,不同地形 Pimentol 和 Cis-2, 3-Dihydroxy-2, 3-dihydro-p-cumate 含量达显著性差异( $P<0.05$ );除西南坡地与西北坡地阿魏酸含量和山洼地与西北坡地香草酸含量未达显著性差异外,其余坡地阿魏酸和香草酸含量均达显著性差

异( $P<0.05$ )。在 20~40 cm 土层,不同地形土壤酚酸物质含量无同一变化规律;阿魏酸含量表现为西南坡地>西北坡地>山洼地>山凹地,不同地形含量均达显著性差异( $P<0.05$ );Pimentol 含量表现为山凹地>西北坡地>山洼地>西南坡地,山凹地与其余地形含量差异相比达显著水平( $P<0.05$ );Cis-2, 3-Dihydroxy-2, 3-dihydro-p-cumate 含量表现为西北坡地>西南坡地>山洼地>山凹地,除西南坡地与西北坡地间差异不显著外,其余地形上含量均达显著性差异( $P<0.05$ );香草酸含量表现为西北坡地>山洼地>西南坡地>山凹地,除西南坡地与山洼地差异未达显著性差异外,其余地形均达显著性差异( $P<0.05$ )。就同一地形不同土层酚酸物质含量差异而言,除山凹地上表现为 20~40 cm 土层

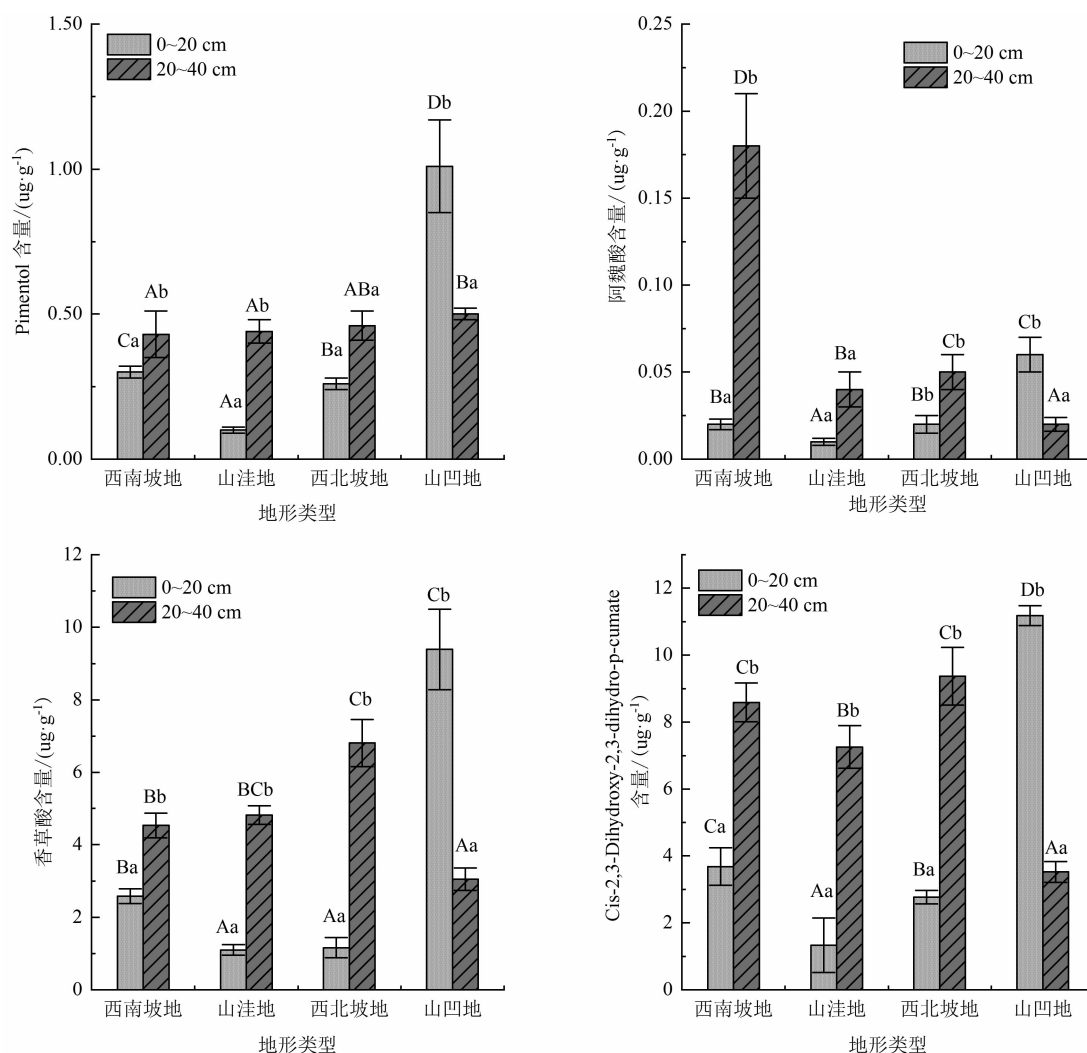


图 2 不同地形上正离子检测出的酚酸物质含量

Fig. 2 The phenolic acids content detected by positive ions on different terrains

注:不同大写字母表示相同土层不同地形之间的差异显著,不同小写字母表示相同地形下不同土层之间的差异显著( $P<0.05$ )。

酚酸物质含量高于0~20 cm外,其余地形均表现为浅层土壤酚酸物质含量高于深层。同一地形不同土层上酚酸物质含量均呈显著性差异( $P < 0.05$ )。

### 2.1.2 负离子检测出的酚酸物质

负离子共鉴定出11种酚酸物质,以含量排名前4的对羟基苯甲酸丁酯、水杨酸戊酯、邻苯二甲酸单异丁基酸和 Amurensisin 进行分析(图3)。就同一土层不同地形酚酸物质含量差异而言,在0~20 cm土层上,邻苯二甲酸单异丁基酸、对羟基苯甲酸丁酯和水杨酸戊酯含量均表现为山凹地>西南坡地>西北坡地>山洼地,而 Amurensisin 表现为山凹地>西北坡地>西南坡地>山洼地。方差分析结果表明,除山洼地与山凹地的羟基苯甲酸丁酯含量、西南坡地和山凹地邻苯二甲酸单异丁基酸和水杨酸戊酯含量差异未达显著水平外,其余地形此3种酚酸物质

含量均达显著性差异( $P < 0.05$ ),而 Amurensisin 含量在不同地形均达显著性差异( $P < 0.05$ )。20~40 cm土层,不同地形土壤酚酸物质含量无同一变化规律。邻苯二甲酸单异丁基酸含量表现为:西南坡地>西北坡地>山凹地>山洼地,Amurensisin 含量大小表现为西北坡地>西南坡地>山凹地>山洼地,对羟基苯甲酸丁酯含量表现为山洼地>西南坡地>西北坡地>山凹地,水杨酸戊酯含量表现为西南坡地>西北坡地>山洼地>山凹地。方差分析结果表明,不同地形对羟基苯甲酸丁酯、邻苯二甲酸单异丁基酸含量均存在显著性差异( $P < 0.05$ );除山洼地和西北坡地 Amurensisin、西南坡地与山凹地水杨酸戊酯含量间无显著性差异外,其余地形上两两间均存在显著性差异( $P < 0.05$ )西南坡地。就同一地形不同土层酚酸物质含量而言,西南坡地、山洼

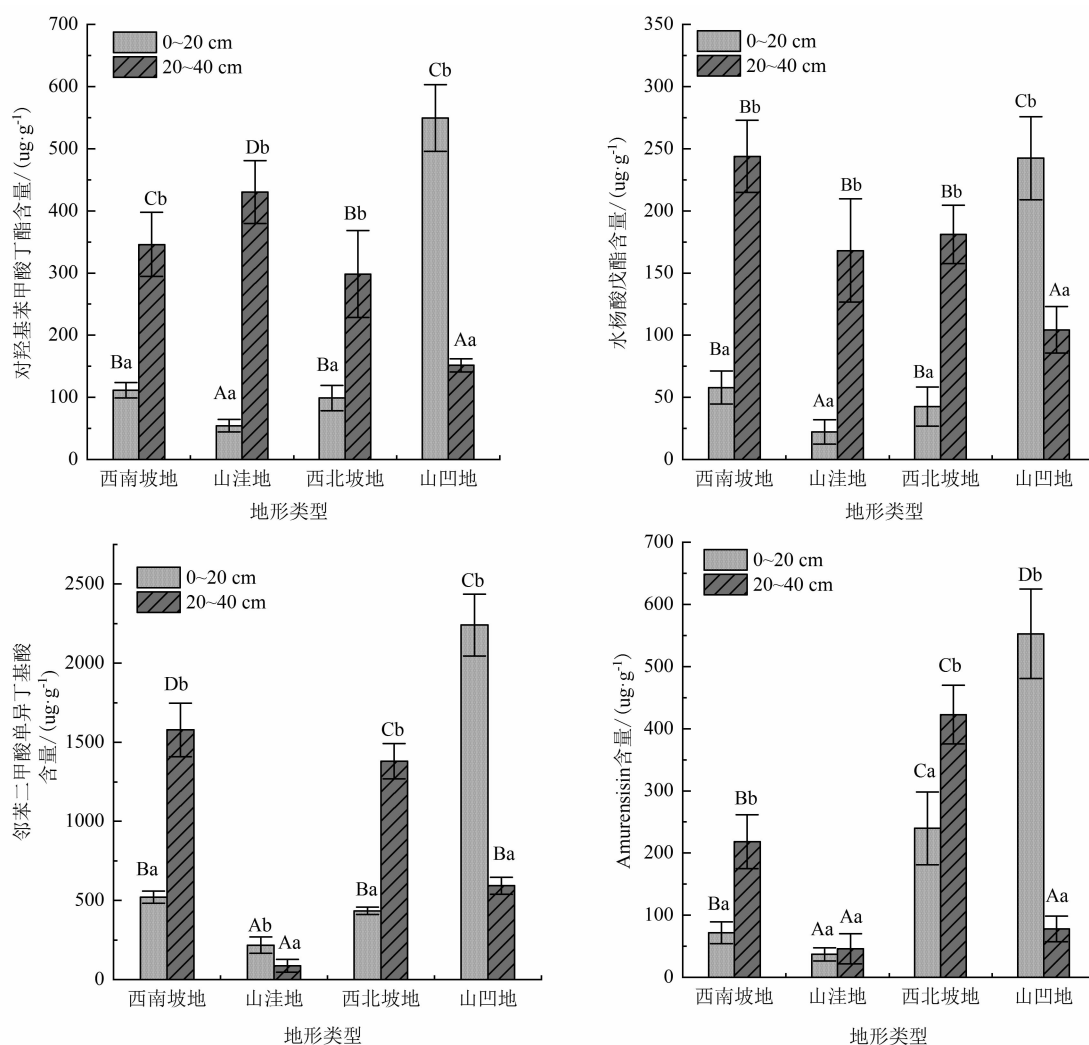


图3 不同地形上负离子检测出的酚酸物质含量

Fig. 3 The content of phenolic acids detected by negative ions on different terrains



地和山凹地在 0 ~ 20 cm 土层上的酚酸物质含量低于 20 ~ 40 cm 土层,而西北坡地表现为 0 ~ 20 cm 土层酚酸物质含量高于 20 ~ 40 cm 土层。在同一地形不同土层上酚酸物质含量均达显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 不同地形土壤微生物群落组成

### 2.2.1 不同地形土壤细菌群落水平组成

所有土壤样品 Tags 可注释到的细菌物种为:2 个界、36 个门、77 个纲、115 个目、204 个科、260 个属和 98 个种。图 4(a)是不同地形土壤样品细菌在纲水平上群落分布堆叠图,主要种群分别为放线菌纲、浮霉菌纲、 $\alpha$ -变形杆菌纲、 $\beta$ -变形杆菌纲、芽孢杆菌纲、酸杆菌纲、丙型变形杆菌纲。放线菌纲和浮霉菌纲相对丰度均大于 10%,为研究区域的优势细菌群类。0 ~ 20 cm 土层,放线菌纲相对丰度表现为:西南坡地 > 山洼地 > 山凹地 > 西北坡地,浮霉菌纲相对丰度表现为:西北坡地 > 山凹地 > 山洼地 > 西南坡地, $\alpha$ -变形杆菌纲相对丰度为:西北坡地 > 西南坡地 > 山洼地 > 山凹地, $\beta$ -变形杆菌纲相对丰度表现为:山凹地 > 西南坡地 > 山洼地 > 西北坡地。20 ~ 40 cm 土层,放线菌纲相对丰度为:山洼地 > 山凹地 > 西南坡地 > 西北坡地,浮霉菌纲相对丰度表现为:西北坡地 > 西南坡地 > 山洼地 > 山凹地, $\alpha$ -变形杆菌纲相对丰度为:西北坡地 > 山洼地 > 西南坡地 >

山凹地, $\beta$ -变形杆菌纲相对丰度表现为:山凹地 > 山洼地 > 西北坡地 > 西南坡地。

### 2.2.2 不同地形土壤真菌群落纲水平组成

所有土壤样品 Tags 中可注释到的真菌物种包括:1 个界、9 个门、26 个纲、67 个目、137 个科、223 个属和 193 个种。图 4(b)为不同地形上土壤样品中真菌在纲水平上群落分布堆叠图。真菌检测出的主要种群为:粪壳菌纲、伞菌纲、座囊菌纲、定银耳纲、盘菌亚纲、圆盘菌纲、锤舌菌纲、古根菌纲等。粪壳菌纲和伞菌纲相对丰度均大于 20%,为研究区域的优势真菌群类。0 ~ 20 cm 土层,粪壳菌纲相对丰度表现为:山凹地 > 山洼地 > 西南坡地 > 西北坡地,伞菌纲相对丰度为:西北坡地 > 西南坡地 > 山凹地 > 山洼地,座囊菌纲相对丰度为:山洼地 > 西南坡地 > 西北坡地 > 山凹地,定银耳纲相对丰度为:西南坡地 > 西北坡地 > 山凹地 > 山洼地。20 ~ 40 cm 土层,粪壳菌纲相对丰度为:山洼地 > 西南坡地 > 山凹地 > 西北坡地,伞菌纲相对丰度为:山凹地 > 西南坡地 > 西北坡地 > 山洼地,座囊菌纲相对丰度为:西南坡地 > 西北坡地 > 山洼地 > 山凹地,定银耳纲相对丰度为:山凹地 > 西北坡地 > 山洼地 > 西南坡地。

### 2.2.3 不同地形土壤微生物聚类分析

细菌群落中主成分 1 与主成分 2 分别解释变异的 44.66% 和 19.15% (图 5a),两者共同解释了

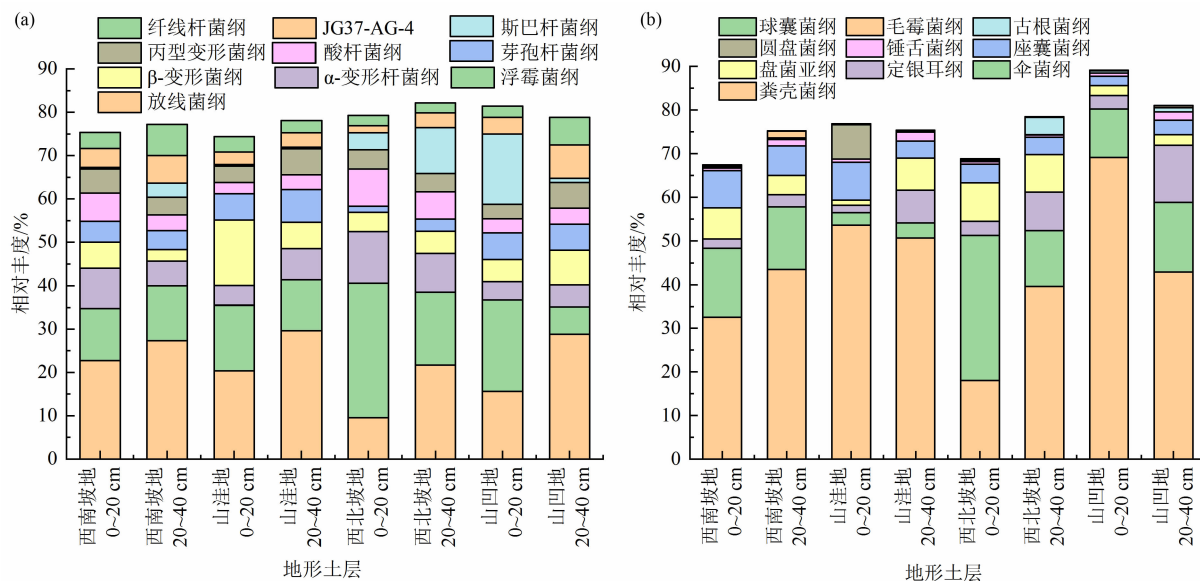


图 4 不同地形土壤微生物群落相对丰度(纲):(a)细菌堆叠图;(b)真菌堆叠图

Fig. 4 Relative richness of soil fungal community on different terrains (class):

(a) Bacterial stacking diagram; (b) Fungal stacking diagram

63.81%,不同地形上土壤细菌群落分布较为分散。其中,山洼地、西南坡地和西北坡地间细菌群落互相独立分开,表明这三者间群落结构有显著性差异。真菌群落中主成分1与主成分2分别解释变异的31.31%和19.37%(图5b),两者共同解释了50.68%,西北坡地、西南坡地、山洼地三种地形上真菌群落结构分布较为集中。

2.3 土壤微生物群落结构与土壤理化性质、酚酸物质

表3为细菌群落与土壤理化性质、酚酸物质含

量的相关关系。结果显示, $\beta$ -变形菌纲与全磷、土壤总孔隙度达极显著正相关,而与阿魏酸、水杨酸戊酯间达极显著负相关。浮霉菌纲、酸杆菌纲和 $\alpha$ -变形杆菌纲均表现与Pimentol、Cis-2,3-Dihydroxy-2,3-dihydro-p-cumate、香草酸之间达极显著正相关,浮霉菌纲还与Amurensisin之间达极显著正相关, $\beta$ -变形菌纲与Cis-2,3-Dihydroxy-2,3-dihydro-p-cumate达极显著负相关,芽孢杆菌纲与对羟基苯甲酸丁酯达极显著正相关。

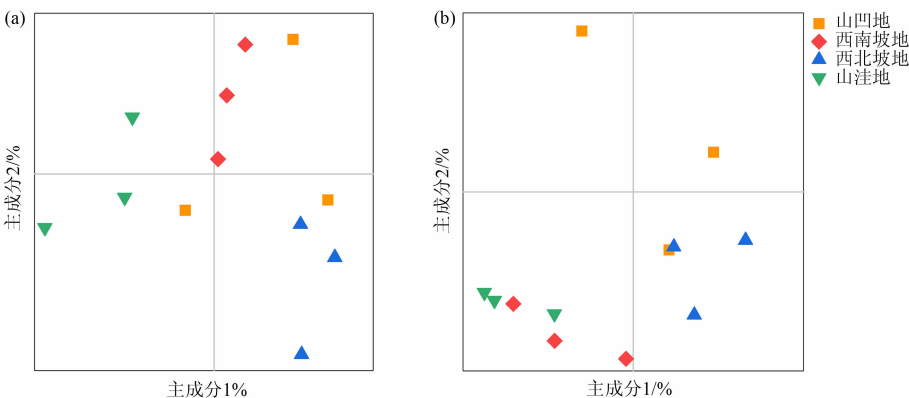


图5 不同地形土壤微生物群落聚类分析(纲): (a)细菌聚类; (b)真菌聚类

Fig.5 Soil microorganisms community clustering on different terrains (class):  
(a) Bacterial community clustering; (b) Fungal community clustering

表3 不同地形土壤细菌落结构与酚酸物质和土壤理化性质相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of soil bacterial structure, phenolic acids and soil physical and chemical properties on different terrains

土壤指标	细菌纲水平菌类						
	放线菌纲	浮霉菌纲	$\alpha$ -变形杆菌纲	$\beta$ -变形菌纲	芽孢杆菌纲	酸杆菌纲	丙型变形菌纲
土壤容重	0.620 **	-0.150	0.258	-0.075	0.566 **	0.127	0.711 *
土壤含水率	-0.234	0.413 *	-0.006	0.484 *	0.066	0.024	-0.177
总孔隙度	0.003	0.432 **	0.130	0.461 **	0.078	0.479 *	-0.135
非毛管孔隙度	0.058	0.194	0.482 *	-0.327	-0.123	0.348	-0.093
有机质	-0.276	0.455 *	0.792 **	0.022	0.040	0.528 *	-0.180
全氮	-0.054	0.087	0.270	-0.026	0.155	0.244	0.003
全磷	0.029	-0.238	-0.109	0.564 **	-0.109	-0.064	-0.244
全钾	0.051	0.007	0.089	0.038	0.104	0.043	0.108
pH	0.458 *	-0.660	0.234	0.251	0.182	0.147	0.200
阿魏酸	0.827 **	-0.262	0.792 **	-0.897 **	-0.173	0.310	-0.024
Pimentol	-0.670 *	0.758 **	0.840 **	-0.506	-0.604 *	0.815 **	-0.281
Cis-2,3-Dihydroxy-2,3-dihydro-p-cumate	-0.521	0.741 **	0.804 **	-0.783 **	-0.389	0.742 **	-0.104
香草酸	-0.653 *	0.843 **	0.788 **	-0.534	-0.519	0.747 **	-0.253
对羟基苯甲酸丁酯	0.317	0.084	-0.623 *	0.128	0.749 **	-0.615 *	0.442
水杨酸戊酯	0.824 **	0.156	-0.131	-0.678 **	0.458	-0.181	0.755 *
邻苯二甲酸单异丁基酸	-0.082	0.484	0.221	-0.667 *	0.203	0.173	0.247
Amurensisin	-0.481	0.863 **	0.481	-0.552	-0.089	0.468	0.069

注: \* 表示指标间达显著相关关系, \*\* 表示达极显著相关关系。



表 4 为真菌群落与土壤理化性质、酚酸物质含量的相关关系。结果显示,定银耳纲与有机质间存在极显著负相关,而与 Pimentol、香草酸、Amurensisin 间存在极显著正相关,座囊菌纲与全磷含量呈极显著正相关,而与对羟基苯甲酸丁酯和 Amurensisin 呈极显著负相关,伞菌纲与水杨酸戊酯、邻苯二甲酸单异丁基酸和 Amurensisin 间达极显著正相关,粪壳菌纲表现与水杨酸戊酯、邻苯二甲酸

单异丁基酸和 Amurensisin 呈极显著负相关。

2.4 土壤微生物群落影响因子分析

为了进一步探究土壤理化性质、酚酸物质对不同地形微生物群落结构变化的影响机制,确定引起差异变化的主要土壤理化性质、酚酸物质因子。以土壤理化性质、酚酸物质含量作为解释变量,微生物作为响应变量,对不同地形细菌和真菌群落与土壤酚酸物质分别进行冗余分析(RDA)。结果如表6

表 4 不同地形土壤真菌落结构与酚酸物质和土壤理化性质相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of soil fungal structure, phenolic acids and soil physical and chemical properties on different terrains

土壤指标	真菌纲水平菌类			
	粪壳菌纲	伞菌纲	座囊菌纲	定银耳纲
土壤容重	0.016	-0.135	0.135	0.580
土壤含水率	0.121	0.051	0.054	-0.314
总孔隙度	0.153	0.101	0.208	-0.246
非毛管孔隙度	-0.421 *	0.038	0.436 *	-0.346
有机质	-0.058	0.323	0.325	-0.580 **
全氮	-0.008	0.143	0.387	-0.491 *
全磷	0.083	-0.381	0.667 **	-0.500 *
全钾	0.052	0.124	0.048	0.159
pH	0.057	-0.285	0.309	-0.19
阿魏酸	-0.287	0.105	0.556	-0.465
Pimentol	0.432	0.319	-0.683 *	0.736 **
Cis-2,3-Dihydroxy-2,3-dihydro-p-cumate	-0.045	0.660 *	-0.548	0.562
香草酸	0.338	0.429	-0.760 **	0.771 **
对羟基苯甲酸丁酯	-0.772 **	0.519	-0.119	-0.058
水杨酸戊酯	-0.936 **	0.776 **	0.036	-0.128
邻苯二甲酸单异丁基酸	-0.756 **	0.926 **	-0.284	0.220
Amurensisin	-0.261	0.848 **	-0.780 **	0.735 **

注: \* 表示指标间达显著相关关系, \*\* 表示达极显著相关关系。

表 5 不同地形酚酸物质和土壤理化性质相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of phenolic acids and soil physical and chemical properties on different terrains

土壤指标	酚酸物质							
	阿魏酸	Pimentol	Cis-2,3-Dihydroxy-2,3-dihydro-p-cumate	香草酸	对羟基苯甲酸丁酯	水杨酸戊酯	邻苯二甲酸单异丁基酸	Amurensisin
土壤容重	0.050	-0.047	0.085	0.064	0.225	0.186	-0.221	-0.226
土壤含水率	-0.383	0.099	-0.149	0.031	-0.276	-0.453 *	-0.308	-0.039
毛管孔隙度	-0.450 *	-0.245	-0.331	-0.234	-0.003	-0.170	-0.033	0.080
总孔隙度	-0.218	-0.147	-0.262	-0.174	-0.129	-0.189	0.080	0.123
非毛管孔隙度	0.374	0.208	0.201	0.169	-0.312	-0.134	0.134	-0.024
有机质	-0.251	-0.121	-0.316	-0.257	-0.107	-0.172	0.252	0.243
全氮	-0.168	-0.188	-0.318	-0.286	-0.197	-0.246	0.104	0.035
全磷	0.003	-0.396	-0.393	-0.381	-0.380	-0.409 *	-0.399	-0.481 *
全钾	-0.224	0.111	-0.218	-0.075	-0.143	-0.287	-0.394	-0.140
pH	0.286	-0.241	-0.063	-0.155	0.013	0.021	-0.267	-0.421 *

注: \* 表示指标间达显著相关关系。

表 6 微生物群落典范对应分析(纲)  
Tab.6 Canonical correspondence analysis of microbial community structure (Class)

土壤指标	细菌			真菌		
	贡献度/%	F	P	贡献度/%	F	P
总孔隙度	21.70	5.20	0.002	2.80	0.70	0.572
土壤容重	21.30	6.30	0.002	9.80	2.20	0.070
对羟基苯甲酸丁酯	6.20	1.90	0.106	2.80	0.70	0.572
pH	5.20	1.70	0.144	3.20	0.80	0.472
全磷	5.50	1.80	0.140	24.50	5.10	0.006
水杨酸戊酯	7.40	2.70	0.032	1.80	0.40	0.714
毛管孔隙度	4.00	1.50	0.194	1.50	0.40	0.806
邻苯二甲酸单异丁基酸	4.10	1.60	0.144	2.90	0.80	0.486
非毛管孔隙度	3.40	1.40	0.236	9.00	2.40	0.076
非毛管孔隙度	6.80	3.20	0.018	3.60	0.90	0.460
全钾	4.30	2.20	0.078	9.40	2.00	0.096
阿魏酸	4.40	2.50	0.046	7.30	1.80	0.130
Amurensisin	2.10	1.20	0.288	2.20	0.50	0.634
Cis-2,3-Dihydroxy-2,3-dihydro-p-cumate	1.60	1.00	0.446	5.70	1.40	0.292
Pimentol	1.20	0.70	0.604	2.50	0.60	0.636
土壤含水率	0.70	0.40	0.788	9.20	2.30	0.078
第一轴贡献率	37.51%			35.17%		
第二轴贡献率	26.58%			18.79%		

所示,第一轴解释了 37.51% 的变异,第二轴解释了 26.58% 的变异,共同解释了细菌纲水平上 64.09% 的变异。降维后信息保留相对较完整,且总孔隙度(贡献度为 21.70%, $F=5.20$ , $P=0.002$ ),土壤容重(贡献度为 21.30%, $F=6.30$ , $P=0.002$ ),水杨酸戊酯(贡献度为 7.40%, $F=2.70$ , $P=0.032$ ),有机质(贡献度为 6.80%, $F=3.20$ , $P=0.018$ ),阿魏酸(贡献度为 4.40%, $F=2.50$ , $P=0.046$ )是影响土壤细菌群落的主要因子。第一轴解释了 35.17% 的变异,第二轴解释了 18.79% 的变异,共同解释了真菌纲水平上 53.96% 的变异。降维后信息保留相对较高,且全磷(贡献度为 24.50%, $F=5.10$ , $P=0.006$ )是影响土壤真菌群落的主要因子。

3 讨论

3.1 不同地形对土壤酚酸物质的影响

杉木人工林自毒作用产生的最直接原因是酚酸

物质在林地积累,当林地酚酸物质积累到一定程度后,会对杉木林生长起阻碍效应<sup>[22]</sup>。从林分生长上看,树高表现为:西北坡地<西南坡地<山凹地<山洼地,这与不同地形土壤酚酸物质呈相反趋势,这说明酚酸物质积累会限制林分树高生长;林分胸径生长表现为西北坡地<山凹地<西南坡地<山洼地,这应与林分保留密度有一定关联,是林分立地因子与环境因子综合作用的结果。诸多研究结果表明,邻羟基苯甲酸<sup>[23]</sup>、肉桂酸<sup>[24]</sup>、阿魏酸<sup>[25]</sup>、香草醛<sup>[26]</sup>等酚酸物质会抑制杉木种子发芽及幼苗生长。至于本试验地鉴定出的酚酸物质中,哪类酚酸物质对杉木生长起主要抑制作用,有待于今后进一步研究。

土壤酚酸物质积累的速度,不仅与林分经营措施有关,而且还与林分主要植被组成、植被多样性及林分环境因子有关。不同地形,由于林内光照时间、光照强度、土壤温度差异较大,在一定程度上也影响了酚酸物质的积累速度<sup>[27-28]</sup>。本试验林中,土壤酚

酸物质含量表现为西北坡地上最高,西南坡地和山凹地次之,山洼地上含量最低,且不同地形上酚酸物质含量存在显著性差异,这与上述原因密切相关。随着土层加深,正离子检测出的酚酸物质在西南坡地、山洼地和西北坡地形上均表现含量降低的规律,而在山凹地上呈相反的趋势。这种现象应与地形密切相关。山凹地属于半封闭地形,接受太阳辐射时间短和温度低等特性,导致土壤中水分含量较高,使得山凹地的土壤透气性差而其黏性强<sup>[29-31]</sup>。相关性结果表明,土壤毛管空隙度与阿魏酸存在显著负相关,故山凹地上酚酸物质随土层加深其含量增加符合研究结果。负离子检测出的酚酸物质在西南坡地、山洼地和山凹地上随土层加深含量降低,而西北坡地则表现相反的趋势,这与土壤全磷含量有关。本试验林西北坡地全磷含量较低,而全磷含量与酚酸物质呈负相关。总体而言,酚酸物质含量普遍表现为浅层土高于深层土。

### 3.2 不同地形对土壤微生物群落结构的影响

土壤质地、土壤结构、土壤化学性质、经营措施、林分环境及土壤环境是影响土壤微生物组成的主要影响因子<sup>[32]</sup>。不同地形由于林内环境因子及土壤环境因子差异较大,导致不同地形土壤微生物结构存在差异<sup>[33]</sup>。从本文研究结果可知,土壤容重、含水量、总孔隙度是影响土壤微生物组成的主要影响因子;坡地土壤物理性质较相近,而山洼地与山凹地土壤物理性质较相近,故真菌群落在西北坡地和西南坡地上较为相似,山洼地与山凹地群落结构类似。不同地形细菌群落结构较为分散,且山洼地、西南坡地和西北坡地3种不同地形上的细菌群落结构存在显著性差异,而西北坡地、西南坡地、山洼地三种地形上真群落结构分布较为集中,这说明细菌群落对土壤环境变化敏感性强于真菌。冗余分析结果显示,土壤总孔隙度、容重、有机质含量对细菌群落结构起着关键作用,其中土壤总孔隙度贡献度高达21.30%,说明对细菌群落结构的影响最大;土壤pH、全磷、全钾含量对真菌群落结构有显著影响,全磷含量的贡献度高达24.50%,可见,对真菌群落结构影响最大。这是由于土壤养分是真菌和细菌生长繁殖的营养来源,土壤pH大小对菌类的生化作用过程有显著影响,间接对菌类产生影响<sup>[34]</sup>。本研究结果表明,除细菌中的放线菌纲以及真菌中的粪壳

菌纲外,其余优势菌纲均表现为随土层加深相对丰度呈下降的趋势。表层土壤有机质、养分含量较高且受凋落物分解会产生菌类所需的碳氮磷元素,有利于土壤菌类生长繁殖,而随着土层加深,其土壤容重增大,孔隙度减小加之养分含量降低,不足满足菌类生长所需条件,故在深层土中菌类相对丰度下降。放线菌为慢生型细菌,具有降解顽固化合物的作用,在养分贫乏的土壤中也具有较高耐受性,对干燥高温的土壤环境有较高抗性,该细菌往往在土壤含水量较低、木质素较顽固的深层土壤的重要的微生物群落,故本试验中该菌类随土层加深相对丰度降低符合其生长习性<sup>[35]</sup>。

### 3.3 不同地形下土壤酚酸物质对微生物群落结构的影响

酚酸物质对微生物的促进和抑制作用具选择性,即会抑制某些菌类的生长繁殖,但也会选择性促进个别菌类生长繁殖<sup>[36-37]</sup>。本试验结果显示,细菌类中浮霉菌纲、 $\alpha$ -变形杆菌纲在西北坡地上相对丰度最高,这是由于西北坡地上的酚酸物质含量较高,这两种菌类相对丰度与酚酸物质含量存在显著的正相关性,加之西北坡地上水热条件良好,促进菌类生长繁殖。有研究表明,酚酸物质会促进细菌酸杆菌纲的生长发育<sup>[32]</sup>,但本研究显示,西北坡地酚酸物质含量最高,而西南坡地酸杆菌相对丰度最高,这与西南坡地土壤有机质含量较高,对该菌生长促进效果更好有关。真菌类中粪壳菌纲表现在山凹地上相对丰度最高,这菌类自身特性有关,粪壳菌纲对酚酸物质有一定的降解作用,使得高含量的酚酸物质失去化感活性,且所讲解的物质可用于自身生长繁殖<sup>[38]</sup>。真菌类定银耳纲在山凹地相对丰度最大,而在西南坡地上相对丰度最小,相关性分析显示,在山凹地正电荷检测出的酚酸物质含量均最少,表明在低含量的酚酸物质是对定银耳纲的生长繁殖有促进作用。该地形上真菌类座囊菌纲相对丰度显著低于其他地形,猜测与正电荷检测出的酚酸物质在该地形上含量最高,对菌类的生长发育存在抑制作用。冗余分析表明,酚酸物质含量对细菌群落结构间起着关键作用,其中水杨酸戊酯和阿魏酸对细菌群落结构起着极显著影响,贡献度分别为7.40%和4.40%,细菌 $\beta$ -变形菌纲与阿魏酸、水杨酸戊酯间达极显著负相关,这与对不同施肥措施下番茄连栽

微生物与阿魏酸等酚酸物质含量间为负相关关系结果一致<sup>[39]</sup>。真菌粪壳菌纲与酚酸物质有极显著负相关关系,而定银耳纲与香草酸和 Pimentol 均有极显著正相关关系。

## 4 结论

(1)不同地形上酚酸物质含量存在显著性差异,正电荷检测出的酚酸物质含量在山凹地上最高。随着土层加深,西南坡地、西北坡地和山洼地酚酸物质含量均增加,而山凹则减小。

(2)负电荷检测出的酚酸物质含量在西北坡地上最高,而山洼地上最低。随着土层的加深,西南坡地、山洼地和山凹地均表现增加趋势,而西北坡地上减小。

(3)酚酸物质含量与微生物群落结构存在显著相关关系。不同地形上,山洼地、西南坡地和西北坡地间细菌群落结构显著性差异;西北坡地和西南坡地、山洼地和山凹地真菌群落结构类似。

(4)细菌群落结构中,浮霉菌纲、 $\alpha$ -变形杆菌纲均表现在西北坡地上相对丰度最高,而山凹地上最低。真菌群落结构中伞菌纲在西北坡地上最高,座囊菌纲相对丰度在山凹地最低。说明酚酸物质对菌类的生长繁殖选择性的促进和抑制作用。

## 参考文献 (References)

- [1] 叶义全,洪凯,张家君,等. 铝胁迫对杉木幼苗生长、叶片光合特性和叶绿体超微结构的影响[J]. 东北林业大学学报,2020,48(2):7-11+16. [YE Yiquan, HONG Kai, ZHANG Jiajun, et al. Effects of aluminum stress on growth, photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure in leaves of *Cunninghamia lanceolata* Seedlings [J]. Journal of Northeast Forestry University,2020,48(2):7-11+16] DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2020.02.002
- [2] 伍丽华,代林利,叶义全,等. 不同密度杉木林乔木层垂直空间及生态系统能量积累与分配[J]. 生态学杂志,2021,40(8):2366-2377. [WU Lihua, DAI Linli, YE Yiquan, et al. Energy accumulation and distribution among vertical space of tree layer and at the ecosystem level of Chinese fir forests with different stand densities [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(8):2366-2377] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202108.021
- [3] 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 Kaimin, YE Famao, LIN Yan, et al. Research advances of phenolic functional mechanisms in soils and plants [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010,18(5):1130-1137] DOI: 10.3724/SP.J.1011.2010.01130
- [4] 林思祖,黄世国,曹光球,等. 杉木自毒作用的研究[J]. 应用生态学报,1999,10(6):661-664. [LIN Sizu, HUANG Shiguo, CAO Guangqiu, et al. Autointoxication of Chinese fir [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999,10(6):661-664] DOI: 10.13287/j.1001-9332.1999.0171
- [5] 蔡立佳,徐永刚,宇万太,等. 下辽河平原杨树连栽对土壤养分、微生物生物量和酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2013,32(2):337-343. [CAI Lijia, XU Yonggang, YU Wantai, et al. Effects of continuous planting poplar on the soil nutrient contents, microbial biomass, and enzyme activities in lower reaches of Liaohe River Plain, northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(2):337-343] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0120
- [6] 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 Xiumei, WANG Huatian, KONG Linggang, 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]
- [7] 及利,杨立学. 采煤沉陷区不同造林树种恢复土壤酚酸物质对土壤微生物的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(12):4017-4024. [JI Li, YANG Lixue. Effect of soil phenolic acids on soil microbe of coal-mining depressed land after afforestation restoration by different tree species [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(12):4017-4024] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201712.019
- [8] SPARLIN G P, ORD B G, VAUGHAN D. Changes in microbial biomass and activity in soils amended with phenolic acids [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1981, 13(6):455-460. DOI: 10.1016/0038-0717(81)90034-1
- [9] LIN M, LYB D, WEI L, et al. Effects of root exudates on rhizosphere bacteria and nutrient removal in pond-ditch circulation systems (PDCSs) for rural wastewater treatment [J]. Science of the Total Environment,2021,785:147282. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147282
- [10] MUNOZ P B, RODRIGUEZ S A, HURTADO M M, et al. Performance and microbial community structure of an aerobic granular sludge system at different phenolic acid concentrations [J]. Journal of Hazardous Materials,2019,376(AUG.15):58-67. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.05.015
- [11] 孙莉英,栗清亚,裴亮,等. 地形因子对土壤理化性质和植物种类的影响[J]. 灌溉排水学报,2020,39(7):120-127. [SUN Liying, LI Qingya, PEI Liang, et al. Effects of topographic factors on soil physical and chemical properties and plant species

- [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, **39**(7):120–127] DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2020119
- [12] BARDELLI T, GOMEZ – BRANDON M, ASCHER – JENULL J, et al. Effects of slope exposure on soil physic – chemical and microbiological properties along an altitudinal climosequence in the Italian Alps [J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 1041 – 1055. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.176
- [13] 李 瑞, 刘旻霞, 张 灿, 等. 甘南亚高寒草甸不同坡向土壤微生物群落分布特征[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(11):1884 – 1891. [LI Rui, LIU Minxia, ZHANG Can, et al. Distribution characteristics of soil microbial communities along different slope direction of Gannan sub – alpine meadows [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(11):1884 – 1891] DOI: 10.16258/j.cnki.1674 – 5906.2017.11.009
- [14] 费裕舫, 吴庆锥, 路 锦, 等. 林下植被管理措施对杉木大径材林土壤细菌群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(2): 407 – 416. [FEI Yuchong, WU Qingzhui, LU Jin, et al. Effects of undergrowth vegetation management measures on the soil bacterial community structure of large diameter timber plantation of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(2): 407 – 416] DOI: 10.13287/j.1001 – 9332.202002.035
- [15] 李延茂, 胡江春, 张 晶, 等. 杉木连栽土壤微生物多样性的比较研究[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(7):1275 – 1278. [LI Yanmao, HU Jiangchun, ZHANG Jing, et al. Microbial diversity in continuously planted Chinese fir soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(7):1275 – 1278] DOI: 10.13287/j.1001 – 9332.2005.0139
- [16] 魏晓骁, 陈爱玲, 王士亚, 等. 杉木连栽林土壤微生物碳源利用比较[J]. 应用与环境生物学报, 2016, **22**(3):518 – 523. [WEI Xiaoxiao, CHEN Ailing, WANG Shiya, et al. A comparative study of soil microbial carbon source utilization in different successive rotation plantations of Chinese fir [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2016, **22**(3):518 – 523] DOI: 10.3724/SP.J.1145.2015.09010
- [17] 马祥庆, 叶世坚, 陈绍桢. 轮伐期对杉木人工林地力维护的影响[J]. 林业科学, 2000, **36**(6):47 – 52. [MA Xiangqing, YE Shijian, CHEN Shaoshuan. Effect of rotation on site productivity maintenance of Chinese fir plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, **36**(6):47 – 52] DOI: 10.3321/j.issn:1001 – 7488.2000.06.007
- [18] 费裕舫, 王 妍, 陈义堂, 等. 杉木老龄林不同地形土壤活性铝形态特征[J]. 四川农业大学学报, 2021, **39**(3):362 – 369. [FEI Yuchong, WANG Yan, CHEN Yitang, et al. Characteristics of soil active aluminum forms in different terrains of old – growth plantation of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, **39**(3):362 – 369] DOI: 10.16036/j.issn.1000 – 2650.2021.03.012
- [19] 费裕舫, 黄 樱, 刘 丽, 等. 中亚热带紫色丘陵区几种典型人工林土壤质量评价[J]. 东北林业大学学报, 2020, **48**(9):80 – 87. [FEI Yuchong, HUANG Ying, LIU Li, et al. Evaluation on soil quality of several typical plantations in purple soil hilly region of subtropical zone [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, **48**(9):80 – 87] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 5382.2020.09.016
- [20] MAGOC T, SALZBERG S L. FLASH: Fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies [J]. Bioinformatics, 2011, **27**(21):2957 – 2963. DOI: 10.1093/bioinformatics/btr507
- [21] HASS B J, GEVERS D, EARL A M, et al. Chimeric 16S rRNA sequence formation and detection in Sanger and 454 – pyrosequenced PCR amplicons [J]. Genome Research, 2011, **21**(3):494 – 504. DOI: 10.1101/gr.112730.110
- [22] 杨梅, 曹光球, 黄燕华, 等. 邻羟基苯甲酸对不同化感型杉木无性系内源激素含量的化感效应[J]. 中国生态农业学报, 2011, **19**(1):124 – 129. [YANG Mei, CAO Guangqiu, HUANG Yanhua, et al. Allelopathic effect of salicylic acid on endogenous hormone content in Chinese fir clone [J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture, 2011, **19**(1):124 – 129] DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.00124
- [23] 丁国昌, 林思祖, 王爱萍, 等. 邻羟基苯甲酸对干旱胁迫下杉木幼苗保护酶的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(5):1183 – 1187. [DING Guochang, LIN Sizhu, WANG Aiping, et al. Effect of salicylic acid on antioxidant enzymes of Chinese fir seedling under drought – stress [J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture, 2008, **16**(5):1183 – 1187] DOI: 10.3724/SP.J.1011.2008.01183
- [24] 王娜, 马绍英, 马蕾, 等. 肉桂酸和棕榈酸对豌豆种子萌发和幼苗生长的化感效应[J]. 植物生理学报, 2021, **57**(8):1657 – 1667. [WANG Na, MA Shaoying, MA Lei, et al. Allelopathy effects of cinnamic acid and palmitic acid on seed germination and seedling growth of pea [J]. Plant Physiology Journal, 2021, **57**(8):1657 – 1667] DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2020.0611
- [25] 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 Hongyan, CHEN Xiaoxiao, CAO Guangqiu, 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] DOI: 10.3969/j.issn.1001 – 7461.2019.01.02
- [26] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙. 香草醛对杉木幼苗养分吸收的影响[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(1):41 – 46. [CHEN Longchi, LIAO Liping, WANG Silong. Effect of vanillin on nutrient absorbency of Chinese fir seedlings [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, **27**(1):41 – 46]

- [27] 杨 鹏,赵锦梅,雷隆举,等. 微地形对高寒草地土壤有机碳及氮含量的影响[J]. 水土保持通报,2018,**38**(3):94-98. [YANG Peng, ZHAO Jinmei, LEI Longju, et al. Effects of micro topography on soil organic carbon and nitrogen content in alpine grassland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(3): 94-98] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.015
- [28] 张 倩,姚宝辉,王 缠,等. 不同坡向高寒草甸土壤理化特性和微生物数量特征[J]. 生态学报, 2019,**39**(9):3167-3174. [ZHANG Qian, YAO Baohui, WANG Chan, et al. Soil physical and chemical characteristics and microbial proportions in an alpine meadow with different slopes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(9): 3167-3174] DOI: 10.5846/stxb201806291433
- [29] JILANI G, MAHMOOD S, CHAUDHRY A N, et al. Allelochemicals: Sources, toxicity and microbial transformation in soil - a review [J]. Annals of Microbiology, 2008,**58**(3):351-357. DOI: 10.1007/bf03175528
- [30] 张文旭,李建红,郭灵辉,等. 太行山油松人工林土壤微团聚体变化特征及其影响因素[J]. 山地学报, 2019,**37**(6):797-807. [ZHANG Wenxu, LI Jianhong, GUO Linghui, et al. Change features of soil micro-aggregates of pinus tabulaeformis plantation at different developmental stages in the southern Taihang Mountain and its relationship with soil nutrients [J] Mountain Research, 2019, **37**(6):797-807] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000470
- [31] 陈 佳,姚成硕,林勇明,等. 武夷山林地土壤酶活性差异及土壤肥力质量评价[J]. 山地学报, 2021,**39**(2):194-206. [CHEN Jia, YAO Chengshuo, LIN Yongming, et al. Soil enzyme activity difference in woodlands and soil fertility quality evaluation in Mount Wuyi, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(2): 194-206] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000587
- [32] 刘艳霞,李 雨,李 想,等. 烤烟根际土壤微生物对根系酚酸类物质的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2019,**25**(8):1373-1382. [LIU Yanxia, LI Yu, LI Xiang, et al. Responses of soil microbiome to phenolic acid secreted from tobacco rhizosphere [J] Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(8):1373-1382] DOI: 10.11674/zwf.18280
- [33] SEAL A N, PRATLEY J E, HAIG T, et al. Identification and quantitation of compounds in a series of allelopathic and non-allelopathic rice root exudates [J]. Journal of Chemical Ecology, 2004,**30**(8):1647-1662. DOI: 10.1023/B:joec.0000042074.96036.14
- [34] ALBAREDA M, DARDANELLI M S, SOUSA C, et al. Factors affecting the attachment of rhizospheric bacteria to bean and soybean roots [J]. FEMS Microbiol Lett, 2006, **259**: 67-73. DOI: 10.1139/b57-045
- [35] SCHNEIDER T, KEIBLINGER K M, SCHMID E, et al. Who is who in litter decomposition? Metaproteomics reveals major microbial players and their biogeochemical functions [J]. The ISME Journal, 2012,**6**:1749-1762. DOI: 10.1038/ismej.2012.11
- [36] STRINGLIS I A, YU K, FEUSSNER K, et al. MYB72-dependent coumarin exudation shapes root microbiome assembly to promote plant health [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,**115**(22):5213-5222. DOI: 10.1073/pnas.1722335115
- [37] 齐虹凌,贺国强,李恒全,等. 轮作与连作对烤烟不同生育期根际土壤细菌群落结构的影响[J]. 中国烟草学报, 2015,**21**(5):42-48. [QI Hongling, HE Guoqiang, LI Hengquan, et al. Effects of rotational and continuous cropping on bacterial community structures in rhizospheric soil at different growth stages of flue-cured tobacco [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2015, **21**(5): 42-48] DOI: 10.16472/j.chinatobacco.2015.103
- [38] 路 锦,伍丽华,郑 宏,等. 不同林下植被管理措施对杉木大径材林分土壤真菌群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021,**27**(4):938-948. [LU Jin, WU Lihua, ZHENG Hong, et al. Effects of different undergrowth vegetation management measures on the soil fungi community structure of large diameter timber plantation of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, **27**(4): 938-948] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.03043
- [39] 张玥琦,刘 慧,赵凤艳,等. 不同施肥措施对番茄连作土壤酚酸含量和微生物功能多样性的调节[J]. 土壤通报, 2017,**48**(4):887-894. [ZHANG Yueqi, LIU Hui, ZHAO Fengyan, et al. Regulation of various fertilization measures on soil microbial functional diversity and phenolic acid contents under tomato continuous cropping in greenhouse [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(4):887-894] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2017.04.17



## Effects of Terrain on Soil Phenolic Acids Content and Microbial Community in *Cunninghamia Lanceolata* Forest

WU Lihua<sup>1</sup>, KANG Shuhai<sup>2</sup>, CHE Ailing<sup>3,4</sup>, YANG Qiuju<sup>3</sup>, CAO Guangqiu<sup>3,4\*</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Wangtai Forestry Station, Nanping 353000, Fujian, China; 3. Chinese Fire Engineering and Technology

Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350002, China;

4. University Key Laboratory of Forest Stress Physiology, Ecology and Molecular Biology of Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Terrain influences soil phenolic acids and microbial community. Investigation on the changes in phenolic acids compositions and their relationship with soil microbial community structures under different terrains can contribute to a fine understanding of mechanisms of resulting microbial community changes. Previous studies mainly concerned about the effects of terrains on microbial community structures, but no related work had been performed on the interaction between soil phenolic acids accumulation and microbial community structures in varied terrains. In this study, a hundred years of *Cunninghamia lanceolata* forest in Nanping, Fujian province, China, was targeted as case study. The phenolic acids and chemical properties were analyzed; 16s and ITS were used to determine the community structures of bacteria and fungus in four types of terrain soils, including southwest slope, northwest slope, corrie and valley. Results show that: (1) Phenolic acids content showed a trend of northwest slope > southwest slope > corrie > valley, and acids content decreased with the increase of soil depth; (2) The relative abundance of bacteria *Actinomycetes* was highest in southwest slope, and that of fungi *Sordariomycetes* was highest in corrie; The relative abundance of microorganisms decreased with the increase of soil depth. (3) In bacteria, the relative abundance of *Planctomycetacia* and  $\alpha$ -*Proteobacteria* were the highest at high phenolic acids content, whereas the relative abundance of *Actinobacteria* and  $\beta$ -*Proteobacteria* were the lowest; In fungus, the relative abundance of *Sordariomycete* and *Dothideomycetes* were higher at lower phenolic acids content, whereas the relative abundance of *Agaricomycetes* and *Tremellomycetes* were lowest. (4) The bacterial community structure was scattered in different terrains, whereas the fungal community structure was more concentrated. Total soil porosity, soil bulk density, amyl salicylate, soil organic matter and ferulic acid had significant effect on bacterial community, and total phosphorus had significant effect on fungal community. Different terrains lead to the change of phenolic acids content and microbial community structures. Phenolic acids had a dual function on microorganisms, including the promotion of bacteria growth caused by high content, and the inhibit of fungi growth caused by low content. The results revealed that the effects of soil phenolic acids on the microbial community structures, which could provide reference for the long-term productivity of *Cunninghamia lanceolata* forest.

**Key words:** *Cunninghamia lanceolata* forest; terrain; soil physical and chemical properties; phenolic acids; microbial community