

## 滨海台地土壤微生物数量及影响因子

高 刘<sup>1</sup>, 余雪标<sup>1,3\*</sup>, 薛 杨<sup>2,3</sup>, 崔喜博<sup>1</sup>, 李 然<sup>1</sup>, 杨青青<sup>1</sup>, 李思远<sup>1</sup>, 王 牌<sup>1</sup>

(1. 海南大学环境与植物保护学院, 海口 571000; 2. 海南省林业科学研究所, 海口 571000;

3. 海南文昌森林生态系统定位研究站, 文昌 571300)

**摘 要:** 根据定位观测数据, 对海南文昌滨海台地 3 种典型森林(椰子林、相思林和木麻黄林)土壤微生物的数量特征及其与土壤因子的相互关系进行研究。结果表明, 滨海台地 3 种森林类型中, 微生物总量表现为椰子林>相思林>木麻黄林; 细菌数量以椰子林土壤最高 ( $3\ 144.67 \times 10^4$  CFU·g<sup>-1</sup>), 分别为相思林、木麻黄林的 1.99 倍和 2.56 倍; 真菌数量以相思林最高 ( $46.12 \times 10^4$  CFU·g<sup>-1</sup>), 分别为椰子林、木麻黄林的 2.61 和 1.37 倍; 放线菌数量以椰子林最高 ( $413.84 \times 10^4$  CFU·g<sup>-1</sup>), 分别为相思林、木麻黄林的 3.32 和 1.42 倍。不同森林类型土壤微生物三大类群数量, 以细菌所占比例最大, 放线菌次之, 真菌最小。除椰子林真菌数量外, 3 种森林类型土壤微生物总数、细菌、真菌及放线菌数量均随土层深度的增加而减少, 与土层深度呈线性负相关。土壤微生物数量与土壤养分含量之间存在着不同程度的相关关系, 椰子林中, 土壤全氮和有机碳是影响微生物数量的主要土壤因子; 相思林中, 全氮和 pH 值是影响微生物数量的主要因子; 木麻黄林中, 全氮和全磷是影响微生物数量的主要因子。

**关键词:** 滨海台地; 土壤微生物数量; 土壤养分; 森林类型; 垂直分布

中图分类号: S718.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2017)01-0071-10

### Factors affecting the number of soil microbes in the coastal terrace

GAO Liu<sup>1</sup>, YU Xuebiao<sup>1,3</sup>, XUE Yang<sup>2,3</sup>, CUI Xibo<sup>1</sup>, LI Ran<sup>1</sup>, YANG Qingqing<sup>1</sup>, LI Siyuan<sup>1</sup>, WANG Pai<sup>1</sup>

(1. College of Environment and Plant Protection, Hainan University, Haikou 571000;

2. Laboratory of Ecological Research, Forestry Science Institute of Hainan Province, Haikou 571000;

3. Forest Ecosystem Research Station in Wenchang District of Hainan, Wenchang 571300)

**Abstract:** Using data collected from certain locations, the quantity of soil microorganisms at three typical forests (Palm forest, *Acacia auriculiformis* and Horsetail beefwood) in the coastal terrace of Wenchang, Hainan and its relationship with the soil factors were studied. The results showed as follows: the quantity of soil microorganisms was significantly different in different forests. The population of bacteria in the palm forest was the biggest ( $3\ 144.67 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup>), followed by the *Acacia auriculiformis* forest ( $1\ 817.97 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup>) and the Horsetail beefwood forest ( $1\ 503.67 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup>). The number of fungi was the biggest in the *Acacia auriculiformis* ( $46.12 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup>) and the smallest in the palm forest ( $17.70 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup>). The amount of actinomycetes was the biggest in the palm forest ( $413.84 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup>) and the smallest in the *Acacia auriculiformis* forest ( $123.30 \times 10^4$  cfu·g<sup>-1</sup>). The soil microorganism number of three major groups was as follows: bacteria> actinomycetes> fungi. Except for the quantity of fungi in palm forest, the number of soil microbes decreased with an increase of the soil depth. The relationship between soil microbial number and soil nutrients in three forests in coastal terrace was observed.

**Key words:** coastal terrace; quantity of soil microorganisms; soil nutrient; forest type; vertical distribution

森林生态系统是面积最广、生产力最高、生态效益最好的陆地生态系统<sup>[1]</sup>。土壤微生物是森林生态系统生物群落的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>, 其与地被植物

及土壤环境互相影响、相互制约<sup>[4]</sup>。植物生长所产生的根系分泌物和凋落物可以供给土壤微生物生存所需的营养物质<sup>[5]</sup>, 而微生物则是有机质代谢和植

收稿日期: 2016-07-05

基金项目: “海南岛滨海台地不同森林类型土壤碳储量研究”(KYYS-2015-21)和海南大学研究生处“海南大学林业与生态研究生实践基地项目”共同资助。

作者简介: 高 刘, 硕士研究生。E-mail: 726534529@qq.com

\* 通信作者: 余雪标, 博士, 教授。E-mail: yuxuebiao@163.com

物养分转化的驱动力,其生命过程能够改变土壤微环境和植物群落的演替方向,进而影响整个生态系统<sup>[6]</sup>。土壤作为微生物最好的生存载体<sup>[2]</sup>,各类微生物在土壤大环境中生存并不断地发展<sup>[7]</sup>,其数量和分布因地被植物<sup>[8]</sup>、土壤类型<sup>[9]</sup>、土壤中各生态因子<sup>[10]</sup>、土壤肥力水平<sup>[3]</sup>及季节<sup>[11]</sup>等因素的影响而有所差异。研究不同驱动因子对土壤微生物数量变化的相对影响力具有重要的生态学意义<sup>[12-13]</sup>,为更好地解释植被演替过程<sup>[14-15]</sup>、人为干扰后土壤微生物分布特征差异、植被组成及土壤性质之间的相互作用机制提供重要启示<sup>[6]</sup>。

森林土壤微生物是指生活在森林土壤中细菌、真菌、放线菌和藻类总称,是森林生态系统不可或缺的一部分<sup>[3]</sup>,是维持和恢复森林土壤生产力的主要因素,在林地腐殖质合成<sup>[16]</sup>、动植物残体分解<sup>[17]</sup>和能量转化<sup>[7]</sup>等过程中发挥着相当关键功能<sup>[16,18]</sup>,其数量能够影响土壤的养分含量、组成与转化<sup>[19]</sup>,同时也是森林土壤生物活性的具体体现<sup>[20-21]</sup>。土壤微生物数量的多少能够直接影响土壤碳和养分的循环速率,能够有效的反映土壤碳的组成与转化和土壤养分的动态。开展土壤微生物数量的研究能够为深入探究森林生态系统物质循环和能量流动的影响机理提供基础数据<sup>[22]</sup>。因此研究土壤微生物数量特征及其与土壤因子间的相互关系,不仅有利于最佳生态效益林的营造,也能够防止地力衰退,进而改善生态环境<sup>[16]</sup>。然而目前缺乏海南滨海台地森林生态系统土壤微生物数量分布特征及其与土壤养分和有机碳组分耦合关系的综合研究,以致对海南省滨海台地森林土壤养分循环和土壤碳源、碳汇功能变化机理认识不足。作为沿海防护林带的重要分布区域,滨海台地区域森林生态系统土壤微生物的分布规律及其与土壤因子间的相互关系能够揭示滨海防护林达到自我更新所需的土壤微环境。为此,选择海南省文昌市滨海台地椰子林、相思林和木麻黄林3种典型森林类型为研究对象。在土壤母质、土壤类型和微气候条件基本一致的情况下,研究不同森林类型、不同土层深度土壤微生物数量的分布特征及其与土壤因子的关系,旨在揭示海南滨海台地土壤微生物分布特征,分析森林土壤微生物与土壤因子之间的关系,为研究森林生态系统能量流动和物质循环奠定基础,为深入探讨滨海台地森林生态系统的结构与功能及沿海防护林的营造、经营管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地基本情况

研究区位于文昌市龙楼镇卫星发射场缓冲区,其地理位置 19°43' N, 110°57' E,地势平坦,海拔高度在 45~50 m 之间,是典型的滨海台地地貌,主要土壤类型为滨海沉积物砂壤土。该区属热带海洋性季风气候,日照充沛,年日照时间达 1 750~2 650 h,年太阳辐射总能量为 460.2~585.8 kJ·cm<sup>-2</sup>;气温高,年平均气温 23.9℃,12月至次年2月最冷,平均气温 20℃;雨量丰富,年均降雨量为 1 740 mm;干、湿季分明,5—10月多雨,占全年的 80%,11月至次年4月少雨;空气湿度大,年平均湿度 86%,最小湿度 34%。根据土壤和植被情况,选择研究区内具有典型性和代表性的3种主要森林类型:木麻黄纯林(人工林)、相思纯林(人工林)、椰子纯林(异龄林)作为调查对象,每种林地调查面积为 1 hm<sup>2</sup>。3种森林类型的基本情况如下:

椰子林:位于文昌市龙楼镇星光村,坐标 19°63'21"N, 110°96'32"E。主要植被类型为椰子纯林(*Cocos nucifera* L.),早期由人工种植后经自然生长形成的林区群落,生长历史在 20 a 以上,群落发育良好,覆盖度为 80%~85%,平均株行距为 5 m×4 m,林木胸径为 7~26 cm,平均胸径为 15 cm;树高为 7~15 m,平均树高为 11 m,平均南北冠幅 6 m,东西为 5.5 m。样地内常见植物有:假菠萝(*Pandanus tectorius*)、大泽兰(*Chromolaena odorata* L.)、草本一品红(*Euphorbia cyathophora* Murr.)、大青(*Clerodendrum cyrtophyllum* Turcz.)、燕尾草(*Verbena officinalis* L.)、肖梵天花(*Urena lobata* L.)、豆渣草(*Bidens pilosa* L.)、百日晒(*Streblus asper* Lour.)等。

相思林:试验地位于岛东林场昌洒作业区,坐标 19°41'88"N, 110°42'45"E。主要树种为大叶相思(*Acacia auriculaeformis*),树龄约 7 a,平均株行距为 3 m×1.2 m,林木胸径为 7~20 cm,平均胸径为 11 cm;树高为 4~16 m,平均树高为 11 m,平均南北冠幅 4 m,东西为 3.7 m。该植被群落发育良好,覆盖度为 55%~60%。样地内常见植物有:五色梅(*Lantana camara* L.)、萹耳(*Xanthium sibiricum* Patr. ex Widder)、燕尾草(*Verbena officinalis* L.)、鹅毛玉凤花(*Habenaria dentata* (Sw.) Schltr.)、多穗缩箬(*Armgrass*)、染色草(*Vernonia cinerea* (L.) Less.)、水秧草(*Ludwigia octovalvis* (Jacq.) Raven)等。

木麻黄林: 试验地位于岛东林场昌洒作业区, 坐标 19°57'40"N, 110°21'53"E。该地土壤类型为钛矿开采后形成的滨海沙壤地, 属细沙, 土质疏松, pH 为 5.4。主要植被类型为木麻黄纯林 (*Casuarina equisetifolia* Forst.), 无性系苗木 (A8 品系), 树龄约 5 a, 株行距为 4 m×1.2 m, 林木胸径为 4~16 cm, 平均胸径为 10 cm; 树高为 4~15 m, 平均树高为 11 m, 平均南北冠幅 4 m, 东西为 3.7 m。林地植被群落发育良好, 覆盖度为 50%~55%。样地内常见植物有: 五色梅 (*Lantana camara* L.)、燕尾草 (*Verbena officinalis* L.)、鹅毛玉凤花 (*Habenaria dentata* (Sw.) Schltr.)、红头草 (*Emilia sonchifolia* (L.) DC)、多穗缩箬 (*Armgrass*)、波利亚草 (*Borreria stricta* (L. f.) G. Mey)。

## 1.2 试验设计与方法

在研究区域内进行实地勘察, 依据文昌滨海台

地森林分布特征选定 3 种典型森林类型 (木麻黄纯林、相思纯林和椰子纯林)。土壤样品于 2013 年 12 月、2014 年 6 月采集, 每种森林类型设置 3 个典型样地, 每个样地按照地形分布随机取 3 个 1 m 深的剖面, 并将每个剖面按照 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm 自上而下划分为 5 层, 再将土壤样品分别装入灭菌土壤盒和密封袋中封存。无菌土壤样品保存于 4℃ 冰箱中, 用于进行生物性质的测定。密封袋中的土壤样品一部分用于测定土壤含水量, 另一部分常温风干, 过 2 mm 筛, 用于测理化性质。土壤中三大类群微生物数量的测定采用稀释平板分析法。细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基, 放线菌采用高氏一号培养基, 真菌采用孟加拉红-马丁氏培养基。土壤基本理化性质的测定方法采用常规分析方法<sup>[23]</sup>, 研究区域土壤理化性质概况见表 1。

表 1 3 种森林类型土壤基本概况

Table 1 The soil properties of different types of forests

森林类型 Forest type	坐标 Coordinate	土壤类型 Soil type	pH	容重 /g·cm <sup>-3</sup> Bulk density	全 N /g·kg <sup>-1</sup> Total N	有效 P /mg·kg <sup>-1</sup> Available P	速效 K /mg·kg <sup>-1</sup> Available K	硝态 N /mg·kg <sup>-1</sup> Nitrate N	铵态 N /mg·kg <sup>-1</sup> Ammonium N
椰子林 palm forest	19°63'21"N 110°96'32"E	浅海沉积砂土	6.60	0.93	0.89	25.95	10.53	1.25	1.77
相思林 <i>A.auriculiformis</i> forest	19°41'88"N 110°42'45"E	浅海沉积砂土	6.30	0.87	0.65	0.04	5.21	0.85	2.14
木麻黄林 <i>C.equisetifolia</i> forest	19°57'40"N 110°21'53"E	浅海沉积砂土	6.22	0.86	0.54	0.03	3.36	0.64	2.13

## 1.3 数据处理

应用 SAS 9.1 软件对数据进行方差分析、逐步线性回归分析和通径分析<sup>[24]</sup>。不同森林类型土壤剖面上微生物数量的差异采用 LSD 法进行差异性分析, 利用逐步回归分析和通径分析评价不同因子与微生物数量间的相关关系。文章中的图表用 Excel 生成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同森林类型土壤微生物的数量特征

**2.1.1 不同森林类型土壤微生物的数量分布及组成**  
森林土壤微生物是森林生态系统中的分解者, 它们能够将环境中植物不可用的部分物质转化为植物所需的养分供植物利用, 是森林生态系统不可或缺的一部分。通过对滨海台地 3 种森林类型土壤微生物调查, 结果 (表 2) 表明不同森林类型土壤中 3 类微生物数量的组成比例相似, 3 种森林类型土壤中不同微生物的数量均以细菌数量最多: 椰子林

3144.67×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>, 相思林 1577.38×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>, 木麻黄林 1227.96×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>, 占微生物总数的 81.66%~87.93%; 放线菌数量次之: 椰子林 413.84×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>, 相思林 123.30×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>, 木麻黄林 291.96×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>, 占总量的 6.78%~19.42%; 真菌数量最少 (椰子林 17.70×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>, 相思林 46.12×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>, 木麻黄林 33.75×10<sup>4</sup> CFU·g<sup>-1</sup>), 占总量的 0.49%~2.54%。数量结构表现为细菌>放线菌>真菌的特点。

**2.1.2 土壤微生物的水平分布特征** 对海南文昌 3 种不同森林类型土壤微生物数量分布特征的研究中发现 (图 1), 各森林类型细菌数量分布依次排列为: 椰子林>相思林>木麻黄林; 对 3 种森林类型土壤细菌数量单因素方差分析表明, 不同类型森林土壤细菌含量具有显著差异 ( $P<0.05$ )。真菌数量分布为: 相思林>木麻黄>椰子林; 3 种森林类型真菌含量具有显著差异 ( $P<0.05$ )。放线菌数量分布为: 椰子林>木麻黄>相思林; 3 种类型森林放线菌数

量差异显著 ( $P < 0.05$ )。以上结果表明, 不同森林类型对土壤微生物数量和种类影响效果是有差异的, 这可能与森林覆被类型、凋落物质量、林内微环境及人为干扰程度有一定关系。3种森林类型中椰子林更有利于细菌与放线菌的生长、繁殖, 这可能由于椰子林根系发达, 空间分布格局合理, 进而促进了细菌和放线菌活动, 加速有机物分解和养分

积累, 改善土壤理化性状; 并且椰子林受人为干扰较轻, 林中椰子少有采摘, 使得其凋落物含量增高, 促进土壤有机物的积累, 使其更有利于细菌和放线菌的生存; 而相思林的土壤微环境及其森林覆被类型更有利于真菌的增殖; 木麻黄林由于受到人为干扰较为严重, 使其林内微环境及凋落物含量受到一定影响, 限制细菌和放线菌的繁育。

表 2 不同森林类型土壤微生物的数量分布  
Table 2 Quantity distribution of soil microbe in different forest types

森林类型 Forest type	微生物总数 Total of microbe	细菌 Bacteria		真菌 Fungi		放线菌 Actinomycetes	
		A	B	A	B	A	B
椰子林 Palm forest	3 576.21 <sup>Aa</sup>	3 144.67 <sup>Ba</sup>	87.93	17.70 <sup>Ca</sup>	0.49	413.84 <sup>Da</sup>	11.57
相思林 <i>Acacia auriculiformis</i> forest	1 817.97 <sup>Ab</sup>	1 577.38 <sup>Ba</sup>	86.77	46.12 <sup>Cb</sup>	2.54	123.30 <sup>Db</sup>	6.78
木麻黄林 <i>Casuarina equisetifolia</i> forest	1 503.67 <sup>Ac</sup>	1 227.96 <sup>Bb</sup>	81.66	33.75 <sup>Cc</sup>	2.24	291.96 <sup>Dc</sup>	19.42

注: 同行不同大写字母表示细菌、真菌、放线菌数量及微生物总数间的差异性 ( $P < 0.05$ ), 同列不同小写字母表示不同森林类型土壤微生物含量的差异性 ( $P < 0.05$ )。A: 数量/ $\times 10^4$  个· $g^{-1}$  Amount; B: 占总量/% Percentage in total amount

Note: Different capital letters on the same line indicate significant difference among the amount of bacteria, fungi, actinomycetes and total of microbe at  $P < 0.05$ . Different letters in the same row indicate significant difference among different forest types at  $P < 0.05$ .

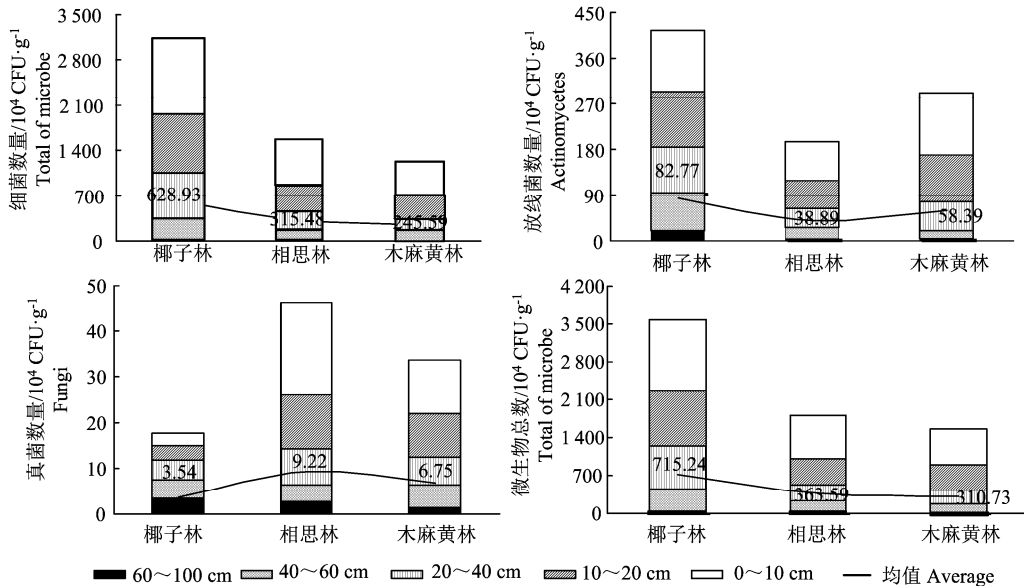


图 1 不同森林类型土壤细菌、真菌、放线菌数量及微生物总量的水平分布动态  
Figure 1 The horizontal distribution characteristics of soil culturable microbial counts

**2.1.3 土壤微生物的垂直分布特征** 土壤微生物由于受到土壤理化性质、植物根系等因素的影响, 在不同深度土层中, 土壤微生物在数量和种类上均呈现出较大的差异。经测定, 3种森林类型土壤微生物总量表层最多 ( $660.01 \times 10^4 \sim 1 302.65 \times 10^4$   $CFU \cdot g^{-1}$ ), 底层最少 ( $22.22 \times 10^4 \sim 39.69 \times 10^4$   $CFU \cdot g^{-1}$ )。本研究中3种森林类型中土壤细菌的层化比率(表层土壤与下层土壤微生物数量均值的比值)<sup>[25]</sup>最大为2.40~3.26, 真菌最小为0.77~3.10, 放线菌居中为1.63~2.87, 其中各森林类型微生物

总数的层化比率为2.29~3.17。3种森林类型土壤微生物总数垂直分布的变化趋势均随土壤深度的加深而减小, 与土壤深度呈显著线性负相关, 其中椰子林呈极显著线性负相关 ( $r_{椰子林} = -0.9853^{**}$ 、 $r_{相思林} = -0.9147^*$ 、 $r_{木麻黄林} = -0.9348^*$ )。经方差分析表明, 同种森林类型土壤中不同土层深度3类微生物数量差异显著。以上结果主要是由于3种类型森林表层土壤积累了丰富的养分、水分和有机质, 通气状况和温度条件良好, 且植物根系多分布在该层, 有利于微生物的繁殖。

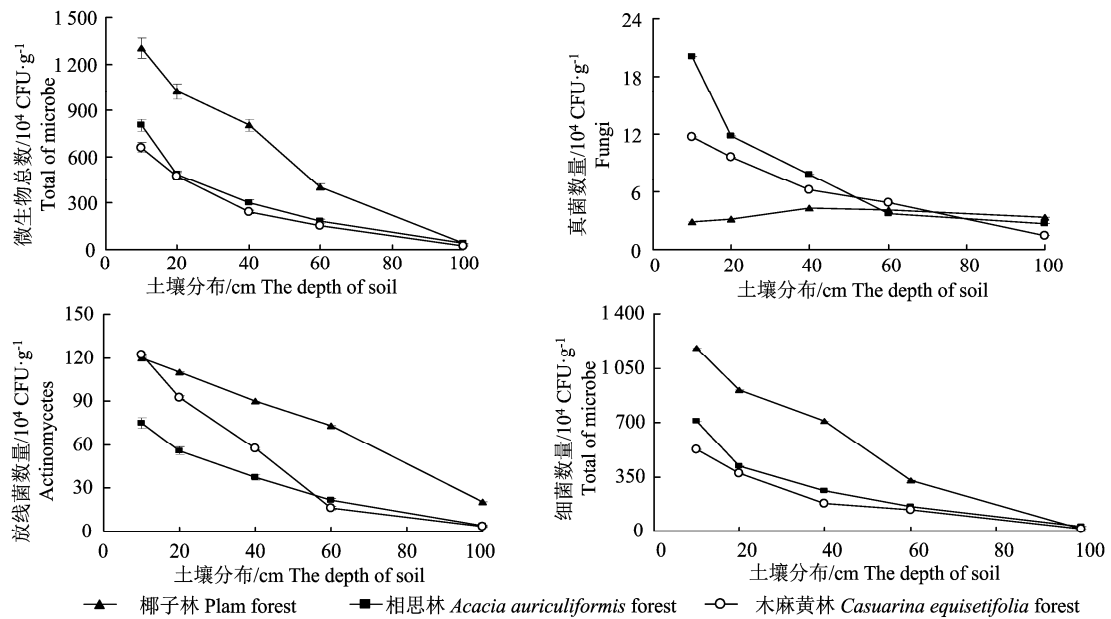


图 2 各林地土壤细菌、真菌、放线菌数量及微生物总量的垂直动态

Figure 2 Vertical distribution of soil culturable microbial counts

试验结果(图2)表明,除椰子林真菌数量外,3种森林类型土壤微生物数量均呈现出随土壤深度增加而减小的趋势。其中细菌数量与土壤深度呈显著或极显著线性负相关( $r_{\text{椰子林}} = -0.9814^{**}$ 、 $r_{\text{相思林}} = -0.9085^*$ 、 $r_{\text{木麻黄林}} = -0.9280^*$ ),表层细菌数量( $617.97 \times 10^4 \sim 1\,212.65 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )远高于底层( $5.25 \times 10^4 \sim 31.56 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ );木麻黄林真菌数量与土壤深度呈极显著线性负相关( $r_{\text{木麻黄林}} = -0.9511^{**}$ ),而椰子林各层土壤真菌数量相差较小( $2.87 \times 10^4 \sim 4.29 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ),无明显分布规律;土壤放线菌数量与土壤深度呈显著或极显著线性负相关( $r_{\text{椰子林}} = -0.9954^{**}$ 、 $r_{\text{相思林}} = -0.9675^{**}$ 、 $r_{\text{木麻黄林}} = -0.9391^*$ )。土壤表层放线菌数量最高(椰子林  $119.73 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,相思林  $75.14 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,木麻黄林  $121.90 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ),底层最低(椰子林  $20.45 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,相思林  $22.82 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,木麻黄林  $8.81 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )。由于滨海台地砂质土壤中供给微生物营养的植物残体及其根系分泌物随土壤深度增加而逐渐减少,研究区土壤中的有机质含量是随土壤深度的增加而减少的,微生物分解利用有机质产生代谢物质,容易利用的有机质越多,越利于微生物的繁育,所以微生物数量表现出明显的垂直差异。

## 2.2 土壤微生物的多样性指数

生物多样性指数常被用来描述生物资源的丰富程度,是衡量一定地区生物均匀度与类型数的一个客观指标,能够在一定程度上反映生物群落中各类

型物种间的分布比例<sup>[26]</sup>。简而言之,一个物种类型数较高的群落,且各类型物种间分布比例非常均匀,其多样性指数就会很高。研究表明土壤微生物数量与多样性指数并不呈正比<sup>[27]</sup>,因此,本研究应用 Shannon-Wiener 多样性指数对研究区 5 种森林类型土壤微生物多样性指数进行评价,公式如下:

$$SW = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

式中:SW 为土壤微生物多样性指数; $P_i$  为群落中种  $i$  的个体数在总个体数中所占比例。

根据上述公式分别算得 3 种森林类型土壤微生物的多样性指数。结果表明不同森林类型土壤微生物多样性指数存在一定差异,主要表现为:木麻黄林 > 相思林 > 椰子林。木麻黄林微生物多样性指数最高,为 0.57,土壤微生物总量最高的椰子林反而微生物指数最低,并且椰子林和相思林微生物多样性指数相近,分别为 0.39 和 0.40。以上结果与之前分析的土壤微生物总数的变化趋势并不一致,即微生物总数与土壤微生物多样性指数并不成正比。

## 2.3 土壤微生物数量与土壤因子的关系

### 2.3.1 土壤因子对微生物数量的逐步回归分析

微生物与土壤因子有密切联系,为探明不同土壤因子对 3 种森林类型土壤微生物数量的综合影响,应用逐步线性回归分析 3 类微生物数量及微生物总数与有机质、全磷、全氮、全钾、pH 值及含水量的相关性。结果表明(表 3),椰子林中,细菌数量与有机质、全氮、全磷、含水量和 pH 值有相关关系;真

菌数量与全氮、pH 值有相关关系；放线菌数量与有机质、全氮、全钾、含水量和 pH 有相关关系；微生物总数与全磷、全氮、pH 值、有机质和含水量有相关关系。相思林中，细菌数量与有机质、全氮和 pH 值有相关关系；真菌数量与有机质和全氮有相关关系；放线菌数量与有机质、全磷和 pH 有相关关系；微生物总数与全氮、pH 值和有机质有相关关系。木麻黄林中，细菌数量与全氮、全磷、含水量和 pH 值有相关关系；真菌数量与有机质和含水量有相关关系；放线菌数量与全氮、全磷、含水量和 pH 值有相关关系；微生物总数与全氮、全磷、含水量有相关关系。由于相思林与木麻黄林土壤中全钾含量较低，因此两种森林类型土壤微生物数量与全钾无相关关系，见表 3。这与赵萌等<sup>[22]</sup>、胡海波等<sup>[28]</sup>和王岳坤等<sup>[29]</sup>研究所得的方程相类似。将土壤理化性质数据代入上述方程，求出土壤微生物数量的理论

值，方程的误差可用实测值  $y$  和理论值  $\hat{y}$  平均相对误差表示，公式为：

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}$$

根据上述公式，求得椰子林的细菌  $y$ 、真菌  $y$ 、放线菌  $y$  和微生物总数  $y$  的平均相对误差分别为 12.80%、15.51%、18.61%和 14.98%；相思林中细菌  $y$ 、真菌  $y$ 、放线菌  $y$  和微生物总数  $y$  的平均相对误差分别为 14.10%、17.01%、9.67%和 12.28%；木麻黄林的细菌  $y$ 、真菌  $y$ 、放线菌  $y$  和微生物总数  $y$  的平均相对误差分别为 9.83%、10.85%、16.11%和 11.45%。都在可接受范围之内，所以得出的最优方程是可靠且有效。土壤中 3 类微生物数量及微生物总数受多种环境因子的综合作用，除以上 6 种土壤因子外，还有其他影响因子，有待深入研究。

表 3 土壤因子与 3 种森林类型土壤微生物数量的最优多元线性回归方程

Table 3 The optimal linear regression equation of soil microbial quantity and soil factors in different forest types

森林类型 Forest type	土壤微生物 Soil microbe	回归方程 Regression equation
椰子林 palm forest	细菌 Bacteria	$y=215.0612+194.5177X_1-24952X_2-651.3345X_4+459.4003X_5-492.9682X_6$
	真菌 Fungi	$y=-4.3575-1.2674X_4+1.3629X_5$
	放线菌 Actinomycetes	$y=79.1583+16.5191X_1-69.1609X_3-126.4588X_4+34.2096X_5-45.9651X_6$
	微生物总数 Total of microbe	$y=262.3136+217.0499X_1-28.554X_2-762.7946X_4+545.7097X_5-584.5618X_6$
相思林 <i>A.auriculiformis</i> forest	细菌 Bacteria	$y=-2.802.8722+114.7X_1+1.504.3684X_4+486.7794X_5$
	真菌 Fungi	$y=-3.7548+5.2542X_1+33.2658X_4$
	放线菌 Actinomycetes	$y=-359.4522+12.8306X_1+1.178.0725X_2+61.0336X_5$
	微生物总数 Total of microbe	$y=-3.300.6504+130.8884X_1-1.566.9274X_4+575.8384X_5$
木麻黄林 <i>C.equisetifolia</i> forest	细菌 Bacteria	$y=-140.3607-7.064.1509X_2+3.538.2239X_4+99.7885X_5-69.741X_6$
	真菌 Fungi	$y=6.1989+13.2081X_1-4.7596X_6$
	放线菌 Actinomycetes	$y=484.7026-3.887.1675X_2+565.1253X_4-41.3735X_5-44.8139X_6$
	微生物总数 Total of microbe	$y=693.1807-12.689X_2+4.077.5850X_4-112.4381X_6$

注：X<sub>1</sub>为有机质；X<sub>2</sub>为全磷；X<sub>3</sub>为全钾；X<sub>4</sub>为全氮；X<sub>5</sub>为 pH 值；X<sub>6</sub>为含水量。

Note: X<sub>1</sub>:organic matter;X<sub>2</sub>:total phosphorus;X<sub>3</sub>:total potassium;X<sub>4</sub>:total nitrogen;X<sub>5</sub>:pH value;X<sub>6</sub>:water content.

**2.3.2 主要土壤因子对微生物数量的通径分析**  
为进一步探究 6 种土壤因子中影响微生物数量的主要因子，对进入回归分析步骤的土壤因子分别进行了通径分析（表 4）。结果表明，椰子林中影响细菌数量和微生物总数的土壤因子直接通径系数均表现为有机碳 > 全氮 > 全磷 > 含水量 > pH 值 > 全钾，说明影响椰子林土壤细菌数量和微生物总数的主要因子是有机碳和全氮，土壤有机碳、全氮与土壤

细菌和微生物总数呈正相关；影响真菌数量的土壤因子直接通径系数表现为全氮 > pH 值，即影响土壤真菌数量的主要因子是有机碳和 pH 值，其中与 pH 值含量呈正相关，与全氮呈负相关；影响放线菌数量的土壤因子直接通径系数表现为有机碳 > 全氮 > 全磷 > 含水量 > pH 值 > 全钾，即有机碳、全氮是影响椰子林土壤放线菌数量的主要因子，其中全氮含量与放线菌数量为负相关，有机碳含量与

其呈正相关。

相思林中影响微生物总数的土壤因子直接途径系数表现为 pH 值 > 有机碳 > 全氮, 影响细菌数量的土壤因子直接途径系数表现为 pH 值 > 全氮 > 有机碳, 说明相思林土壤微生物总数、细菌数量的主要影响因子是 pH 值和全氮, 且 pH 值和全氮均与微生物总数和细菌数量呈正相关; 影响真菌数量的

土壤因子直接途径系数表现为全氮 > 含水量 > 有机碳, 影响土壤真菌数量的主要因子是全氮和含水量, 其与全氮和含水量呈正相关; 影响放线菌数量的土壤因子直接途径系数表现为 pH 值 > 有机碳 > 全磷, 即有机碳、pH 值是影响相思林土壤放线菌数量的关键因子, pH 值和有机碳含量与其呈正相关。

表 4 土壤因子对 3 种森林类型土壤微生物数量的直接途径分析  
Table 4 The direct path-coefficient analysis of soil microbial number in different forest types

森林类型 Forest type	土壤微生物 Soil microbe	有机碳 Organic matter	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	全氮 Total nitrogen	pH 值 pH value	含水量 Water content
椰子林 Palm forest	细菌 Bacteria	1.9679**	-0.5349*	-0.0299**	-0.6342**	0.2189**	-0.3296**
	真菌 Fungi				-2.0357*	1.1250*	
	放线菌 Actinomycetes	2.3982**	-0.5806	-0.2323*	-1.3195*	0.2926**	-0.5092*
	微生物总数 Total of microbe	2.0330**	-0.5676*		-0.6915**	0.2401**	-0.3589**
相思林 <i>Acacia auriculiformis</i> forest	细菌 Bacteria	0.2968			0.3115**	0.3472**	
	真菌 Fungi	-0.2348			0.4933**		0.3451*
	放线菌 Actinomycetes	0.3162	0.2565			0.3933**	
	微生物总数 Total of microbe	0.2983*			0.2865**	0.3513**	
木麻黄林 <i>Casuarina equisetifolia</i> forest	细菌 Bacteria		-0.1853		1.1387*	0.1361**	-0.1553
	真菌 Fungi	-0.0943				0.4550*	-0.4616**
	放线菌 Actinomycetes	0.0164	-0.3974**		0.6829**	-0.2144	-0.3930**
	微生物总数 Total of microbe		-0.2211**		1.0216**		-0.2049**

木麻黄林中影响微生物总数的土壤因子直接途径系数表现为全氮 > 全磷 > 含水量 > pH 值, 影响细菌数量的土壤因子直接途径系数表现为全氮 > 全磷 > 含水量, 说明影响木麻黄林土壤细菌数量和微生物总数的主要因子是全氮和全磷, 即随土壤全氮含量的升高而增加, 随土壤全磷含量的升高而减少; 影响真菌数量的土壤因子直接途径系数表现为含水量 > pH 值 > 有机碳, 即影响土壤真菌数量的主要因子是含水量和 pH 值, 与含水量和 pH 值含量呈正相关; 影响放线菌数量的土壤因子直接途径系数表现为全氮 > 全磷 > 含水量 > pH 值 > 有机碳, 即全氮、全磷是影响木麻黄林土壤放线菌数量的关键因子, 全氮含量与其呈正相关, 全磷含量与放线菌数量为负相关。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 土壤微生物数量的组成与分布

海南文昌属于热带海洋性季风气候, 具有气温高、日照长、雨量充沛、湿度大的特点, 极有利于土壤微生物的生长和繁殖, 土壤微生物的数量较高,

其土壤具有孔隙度较高、容重较低等特点, 研究区高强度的降雨使得大量地表养分向淋溶至地下, 形成了独特的土壤微环境。不同森林类型土壤 3 类微生物群落的组成比例略有不同, 但总体趋势一致, 均表现为细菌 > 放线菌 > 真菌。以上结论与一些报道相符, 但并非完全一致。何玉梅等研究表明, 不同森林类型土壤微生物数量具有一定的差异, 但数量结构均表现为细菌 > 放线菌 > 真菌的特点<sup>[30]</sup>; 周碧青等研究结果表明, 3 种林地土壤微生物的数量结构均表现为细菌 > 放线菌 > 真菌<sup>[31]</sup>; 黄志宏等调研结果表明, 4 种森林类型中微生物组成比例差异较大, 但均以细菌占绝对优势 (组成比例 74.6%)<sup>[32]</sup>。不同森林类型土壤微生物数量的差异与其生境条件、土壤覆被及人类干扰程度存在密切的关系, 其数量分布特征能够反映出不同土壤微环境的生产能力、养分转化能力及生态系统的物质循环状况<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 土壤微生物多样性指数

生物多样性指数是描述生物类型数和均匀度的一个度量指标, 它在一定程度上可反映生物群落中物种的丰富程度及其各类型间的分布比例<sup>[27]</sup>。研究

结果表明,土壤微生物多样性指数与数量的变化趋势并不相同,这主要由于某种森林类型(如椰子林)虽然土壤养分丰富,林下植被覆盖度较高,但土壤微环境并不适合真菌的生长,导致其均匀度较低,以至于椰子林微生物总数多,多样性指数低。反观木麻黄林,虽然各微生物含量均较低,但其均匀度较高,以至于其微生物多样性指数较高。不同森林类型土壤微生物多样性指数存在一定差异,主要表现为:木麻黄林>相思林>椰子林。

### 3.3 土壤微生物水平分布规律

土壤微生物总数及土壤中三大类群微生物数量与森林覆被类型具有明显的相关性,土壤微生物活性、功能类群受到覆被类型的影响<sup>[33]</sup>。谭秋锦等研究表明,峡谷型喀斯特6种生态系统土壤微生物总量表现为次生林( $75.65 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>人工林( $70.76 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>灌丛( $47.24 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>草地( $33.04 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>水田( $28.18 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>旱地( $15.56 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[34]</sup>。陈维等研究表明,安徽中南部5种主要森林类型0~20 cm土层微生物总量分布表现为苦楮林( $149.55 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>马尾松与枫香混交林( $87.74 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>杉木对照林( $70.31 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>20%间伐杉木林( $41.01 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )>马尾松纯林( $35.48 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[1]</sup>。本研究结果表明,不同森林类型细菌数量分布依次排列为:椰子林>相思林>木麻黄林;真菌数量分布为:相思林>木麻黄>椰子林;放线菌数量分布为:椰子林>木麻黄>次生林。可见土壤微生物的组成、多样性及活性与森林覆被类型和多样性间存在一定的关联<sup>[35]</sup>。

### 3.4 土壤微生物垂直分布规律

本研究3种森林类型土壤微生物总量表层最多( $660.01 \times 10^4 \sim 1302.65 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ),底层最少( $22.22 \times 10^4 \sim 39.69 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ )。除椰子林真菌数量无明显分布规律外,3种森林类型土壤三大类微生物数量均呈现出随土壤深度的加深而减小的趋势,与土壤深度呈显著的线性负相关,这与大多数学者对不同地区土壤微生物垂直分布特征的研究结果相一致<sup>[36]</sup>。土壤微生物的这种在垂直土层上的分布规律,究其原因,是土壤表面覆盖着动植物残体等,使得表层土壤有机质、养分含量充足,同时表层土壤通气状况优良、水分充足、温度适宜,从而促进微生物类群的生长和发育<sup>[37-38]</sup>。而深层土壤由于养分含量低和空气稀薄等原因,土壤微生物数量少<sup>[39-40]</sup>。即土壤表层无论是水、肥、气、热条件,

还是根系分泌物均比下层土壤优越,表层土壤能更好的刺激微生物活动、加速微生物滋长<sup>[41]</sup>。

土壤微生物由于受到土壤理化性质、覆被类型等因素的影响,在不同深度土层中,微生物的数量和种类皆呈现出较大的差异<sup>[42]</sup>,利用公式量化这种层化现象,所得比值为层化比率,其通常以2为临界值<sup>[43]</sup>。层化比率可用来评估土壤和生态系统现状,揭示其演替方向<sup>[25]</sup>。本研究中3种森林类型中土壤细菌的层化比率最大为2.40~3.26,真菌最小为0.77~3.10,放线菌居中为1.63~2.87,其中各森林类型微生物总数的层化比率为2.29~3.17。除椰子林真菌数量层化比率较小外,3种森林类型3类微生物数量层化比率均大于2或略小于2,表明3种森林类型土壤将向健康的方向演替。

### 3.5 土壤微生物数量与土壤因子的耦合关系

土壤理化性质对微生物的生长和繁殖具有很大的影响,不同理化性质的土壤中微生物的数量和种群也存在一定的差异。3种森林类型中椰子林土壤养分含量均优于其余2种森林类型(有效钾和硝态氮含量除外)。本研究采用逐步线性回归分析深入揭示了滨海台地不同森林类型中土壤微生物总数、细菌、真菌和放线菌数量与土壤因子间的相关定量关系,构建出了滨海台地3种森林类型土壤微生物的评价模型,这些模型能够准确的阐明其与主要因子间的定量关系,相信通过它们的应用能为滨海台地土壤因子对微生物数量的影响机制提供科学指导,为我国滨海台地砂壤土构建防风林的研究提供重要的理论依据。

土壤微生物在森林土壤养分循环、腐殖质合成及动植物残体分解等过程中起着重要的作用<sup>[44]</sup>,其数量不但是土壤养分的组成与转化的主要影响因素,同时也是土壤生物活性和生物化学活性的具体体现<sup>[18]</sup>,不同森林类型土壤微生物数量与各养分含量间具有一定的相关性<sup>[16]</sup>。本研究通径分析的结果表明,影响椰子林土壤微生物数量的主要因子是有机碳和全氮和pH值;影响相思林土壤微生物数量的主要因子是有机碳、含水量、pH值和全氮;影响木麻黄林土壤微生物数量的主要因子是全氮、全磷、含水量和pH值。微生物与土壤养分含量间的关系可用来衡量土壤肥力现状,也可应用于改良土壤,即通过分析微生物与土壤养分的已知关系,调节各土壤养分的含量和比例,以此促进土壤发育<sup>[42]</sup>。虽然本研究周期不长,但其结果能在一定程度上反应3种森林类型与土壤因子的相关关系,当在滨海台地构筑防风林需要种植以上树种时可以考虑各因子



含量,也可以根据土壤各理化因子含量选择较合适的树种搭配进行种植。

#### 4 研究展望

目前森林土壤微生物数量分布特征研究的报道有很多,但有关热带滨海台地土壤微生物的研究较少,且研究水平还有待提高。因此,广泛开展热带滨海台地土壤微生物的基础性研究仍需加强,尤其对于探究其土壤微生物与环境之间的相互关系和发掘土壤微生物资源应予以足够重视。土壤各类微生物生理群在土壤形成及土壤物质循环和土壤养分供给中起着重要的作用,并且是土壤熟化程度等重要指标。本研究所采用的研究方法较为传统,具有一定的局限性,还欠缺对热带滨海台地土壤微生物与土壤环境、气候特点、植被类群相关性以及对森林土壤微生物生理群方面的深入研究。在今后的研究中可利用各种分子生物学手段深入探究热带滨海台地微生物特征,与传统方法相比,它们可以揭示更多的从未检测到的微生物的多样性并为理解自然状况下土壤微生物的组成和功能提供更加客观可靠的依据。

#### 参考文献:

- [1] 陈维,刘俊龙,余诚棋,等. 安徽中南部 5 种主要森林类型土壤微生物数量分析[J]. 安徽林业科技, 2013, 39(1): 3-6.
- [2] WILLIAMSON W M, WARDLE D A, YEATES G W. Changes in soil microbial and nematode communities during ecosystem decline across a long-term, chronosequence[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37(7): 1289-1301.
- [3] HÖGBERG M N, HÖGBERG P, MYROLD D D. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three[J]. *Oecologia*, 2007, 150(4): 590-601.
- [4] BOYLE S A, YARWOOD R R, BOTTOMLEY P J, et al. Bacterial and fungal contributions to soil nitrogen cycling under Douglas fir and red alder at two sites in Oregon[J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40(2): 443-451.
- [5] ATTIWILL P M, ADAMS M A. Nutrient cycling in forests[J]. *New Phytol*, 1993, 124(4): 561-582.
- [6] 王淼,曲来叶,马克明,等. 罕山土壤微生物群落组成对植被类型的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6640-6654.
- [7] USHIO M, WAGAI R, BALSER T C, et al. Variations in the soil microbial community composition of a tropical montane forest ecosystem: Does tree species matter? [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40(10): 2699-2702.
- [8] GRAYSTON S J, PRESCOTT C E. Microbial communities in forest floors under four tree species in coastal British Columbia[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37(6): 1157-1167.
- [9] 庄铁诚,林鹏,陈仁华. 武夷山森林土壤微生物的季节动态[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1997, 36(4): 167-170.
- [10] BÅÅTH E, ANDERSON T H. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques[J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35(7): 955-963.
- [11] 孙清芳,刘延坤,邵英男,等. 中国森林土壤微生物动态变化研究进展[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(6): 117-121.
- [12] VAN DER HEIJDEN M G A, BARDGETT R D, VAN STRAALEN N M. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems[J]. *Ecol Lett*, 2008, 11(3): 296-310.
- [13] REYNOLDS H L, PACKER A, BEVER J D, et al. Grassroots ecology: Plant-microbe-soil interactions as drivers of plant community structure and dynamics[J]. *Ecology*, 2003, 84(9): 2281-2291.
- [14] MERILÄ P, MALMIVAARA-LÄMSÄ M, SPETZ P, et al. Soil organic matter quality as a link between microbial community structure and vegetation composition along a successional gradient in a boreal forest[J]. *Appl Soil Ecol*, 2010, 46(2): 259-267.
- [15] MITCHELL R J, HESTER A J, CAMPBELL C D, et al. Is vegetation composition or soil chemistry the best predictor of the soil microbial community? [J]. *Plant Soil*, 2010, 333(1/2): 417-430.
- [16] 杨敬天,胡进耀,张涛,等. 珙桐土壤微生物数量及其与土壤因子的关系[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 278-281.
- [17] BROCKETT B F T, PRESCOTT C E, GRAYSTON S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada[J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, 44(1): 9-20.
- [18] 于洋,王海燕,丁国栋,等. 华北落叶松人工林土壤微生物数量特征及其与土壤性质的关系[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 76-80.
- [19] 池振明. 现代微生物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] 魏媛,张金池,俞元春,等. 岩溶土壤 4 大微生物生理类群数量的时空动态特征—以贵州花江喀斯特峡谷地区为例[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(5): 380-384.
- [21] KIM K H, PAULEIT S. Landscape character, biodiversity and land use planning: The case of Kwangju City Region, South Korea[J]. *Land Use Policy*, 2007, 24(1): 264-274.
- [22] 赵萌,方晰,田大伦. 第 2 代杉木人工林地土壤微生物数量与土壤因子的关系[J]. 林业科学, 2007, 43(6): 7-12.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 任红松,吕新,曹连莆,等. 通径分析的 SAS 实现方法[J]. 计算机与农业, 2003(4): 17-19.
- [25] 李涛,潘志华,安萍莉,等. 北方农牧交错带(武川县)土壤微生物数量分布及层化比率研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 99-102.

- [26] 夏北成. 分子生物学方法在微生物生态学中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 37(2): 97-101.
- [27] 章家恩, 刘文高, 胡刚. 不同土地利用方式下土壤微生物数量与土壤肥力的关系[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 140-143.
- [28] 胡海波, 张金池, 高智慧, 等. 岩质海岸防护林土壤微生物数量及其与酶活性和理化性质的关系[J]. 林业科学研究, 2002, 15(1): 88-95.
- [29] 王岳坤, 洪葵. 红树林土壤因子对土壤微生物数量的影响[J]. 热带作物学报, 2005, 26(3): 109-114.
- [30] 何玉梅, 张仁陟, 蔡立群, 等. 冶力关森林公园不同林型土壤微生物区系的研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(1): 63-67.
- [31] 周碧青, 陈成裕, 张辉, 等. 不同覆被类型林地土壤微生物区系的差异性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2009, 38(5): 542-547.
- [32] 黄志宏, 田大伦, 梁瑞友, 等. 南岭不同林型土壤微生物数量特征分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(3): 1-4.
- [33] FISK M C, RUETHER K F, YAVITT J B. Microbial activity and functional composition among northern peatland ecosystems [J]. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35(4): 591-602.
- [34] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统的土壤微生物数量及生物量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3302-3310.
- [35] MATSUSHITA M, ITO S, MEGURO S, et al. Structure of soil microbial communities in sugi plantations and semi-natural broad-leaved forests with different land-use history [J]. *Can J Forest Res*, 2007, 37(2): 236-246.
- [36] 范瑞英, 杨小燕, 王恩姮, 等. 未干扰黑土土壤微生物群落垂直分布特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 389-393.
- [37] 王海英, 宫渊波, 龚伟. 不同林分土壤微生物、酶活性与土壤肥力的关系研究综述[J]. 四川林勘设计, 2005(3): 9-14.
- [38] CAVIGELLI M A, ROBERTSON G P. The functional significance of denitrifier community composition in a terrestrial ecosystem[J]. *Ecology*, 2000, 81(5): 1402-1414.
- [39] 郭银宝, 许小英, 祁连林区不同植被类型下三种土壤微生物群落数量分布[J]. 青海农林科技, 2005(3): 16-18.
- [40] WAID J S. Does soil biodiversity depend upon metabiotic activity and influences? [J]. *Appl Soil Ecol*, 1999, 13(2): 151-158.
- [41] 邵玉琴, 赵吉, 岳冰. 皇甫川流域人工油松林地土壤微生物的垂直分布[J]. 内蒙古大学学报, 2002, 33(5): 541-545.
- [42] 戴雅婷, 闫志坚, 王慧, 等. 油蒿根际土壤微生物数量及其与土壤养分的关系[J]. 中国草地学报, 2012, 34(2): 71-75.
- [43] 高婷. 宁夏荒漠草原土壤微生物多样性及其时空分布[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [44] HUANG Q Y, CHEN W L, XU L H. Adsorption of copper and cadmium by Cu- and Cd- resistant bacteria and their composites with soil colloids and kaolinite[J]. *Geomicrobiol J*, 2005, 22(5): 227-236.