

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM₁₀、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物 PLFA 沿海拔梯度的变化

曾清苹, 何丙辉*, 毛巧芝, 吴耀鹏, 黄祺, 李源

(西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 土壤微生物群落是土壤生态系统的重要组成部分, 对环境变化敏感. 本文运用磷脂脂肪酸法 (PLFA) 研究缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物群落结构沿海拔梯度的变化特征. 结果表明, 从 6 个海拔土壤中共检测到 48 种 PLFA, 其中 i16:0、10Me17:0、10Me18:0 TBSA 在 6 个海拔中含量均最高, 且柑橘林土壤 PLFA 种类和含量明显高于马尾松林. 随着海拔升高马尾松林土壤微生物种类和含量逐渐增加, 柑橘林则逐渐降低, 各海拔间细菌、真菌、放线菌、革兰氏阴性菌 (G^-) 及革兰氏阳性菌 (G^+) 含量差异显著. 土壤微生物群落多样性研究结果表明, 马尾松林低海拔丰富度指数 (R), 多样性指数 (H')、均匀度指数 (J) 均显著高于高海拔, 而柑橘林 R 在低海拔最高, H' 、 J 则在高海拔最高. 不同海拔土壤细菌、放线菌、 G^- 及 G^+ 与土壤酶和环境因子之间存在相关性, 细菌、放线菌、 G^- 及 G^+ 与脲酶 (Ure)、转化酶 (Ive)、过氧化氢酶 (CAT)、林分类型均呈极显著正相关, 真菌与 Ure、Ive、CAT 呈显著正相关; 而细菌、真菌、放线菌、 G^- 及 G^+ 与海拔呈极显著或显著负相关. Ure、Ive、CAT、林分及海拔是影响土壤微生物 PLFA 变化的重要因子.

关键词: 马尾松林; 柑橘林; PLFA; 土壤酶; 海拔

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4667-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.12.044

Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests

ZENG Qing-ping, HE Bing-hui*, MAO Qiao-zhi, WU Yao-peng, HUANG Qi, LI Yuan

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The soil microbial community is an important part in soil ecosystem, and it is sensitive to the ecological environment. Phospholipid-derived fatty acids (PLFA) analysis was used to examine variations in soil microbial community diversity and its influencing factors. The results showed that: there existed 48 PLFAs that were significant in the soil samples from six altitudes. The PLFAs of six altitudes with the highest contents were i16:0, 10Me17:0, 10Me18:0 TBSA. The citrus forest exhibited richer soil PLFAs distribution both in type and amount than those in masson pine. The microbial activity and functional diversity of masson pine were increased with increasing altitudes, and citrus forest gradually decreased, the PLFA content of different microbial groups in each altitude were significantly different. The richness index, Shannon-Wiener index and Pielou evenness index of masson pine in low elevation were holistically higher than those in high elevation. However, the highest richness index of citrus forest was in low altitude, the highest Shannon-Wiener index and Pielou evenness index were in high altitude. The PLFAs content of different microbial groups were closely correlated to the soil enzyme activities and environmental factors. The PLFAs of bacteria, actinomycetes, G^- (Gram-positive), G^+ (Gram-negative) were positively correlated with Ure (urease), Ive (invertase), CAT (catalase activity) and forest type, the PLFAs of fungi was significantly correlated with Ure, Ive, CAT, the PLFAs of bacteria, fungi, actinomycetes, G^- , G^+ were significantly negatively or less correlated with elevation. Ure, Ive, CAT, forest type and elevation are the pivotal factors controlling the soil microbial biomass and activities.

Key words: masson pine; citrus forest; PLFA; soil enzyme activity; altitude

森林是陆地生态系统的主体之一, 具有最高生物生产力, 维持着地球上的生命活动. 目前, 森林健康问题引起了世界各国的广泛关注. 土壤作为森林生长必不可少的介质, 其健康一定程度上决定了森林健康^[1], 加之, 土壤微生物、土壤酶是土壤生态系统的重要部分, 共同推动着物质转化和养分循环, 是土壤健康或土壤质量的评价指标^[2, 3]. 然而大部分土壤微生物是进行分离培养, 研究其群落结构较困

难, 近年来磷脂脂肪酸 (phospholipid-derived fatty acids, PLFA) 作为微生物的生物标记用于鉴定微生物种类和识别微生物类群^[4, 5], 被广泛应用于土壤

收稿日期: 2015-03-21; 修订日期: 2015-07-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA10Z427); 国家林业局“948”项目; 重庆市林业重点科技攻关项目; 重庆市应用开发计划重点项目 (CSTC2014yykfB80015)

作者简介: 曾清苹 (1988 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为经济林培育与林业生物技术, E-mail: 709904956@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

微生物生态学和地理学等研究领域^[6], PLFA 是所有活体细胞膜的主要成分^[7], 占微生物膜的 50% ~ 98%, 不同的土壤微生物有不同的 PLFA 特征^[8~10]. 在同一林分中, 海拔增加能改变林下植被组成、结构、土壤温度、水分、养分及微生物活性等众多因素, 从而影响土壤微生物 PLFA 多样性^[11]. 关于土壤微生物 PLFA 结构及多样性随海拔梯度的变化在其他地区已有较多研究, 如张于光等^[12]、Wang 等^[13]、吴则焰等^[14]、张地等^[15] 分别研究了神农架、云南老君山、武夷山及北京东灵山等地不同海拔土壤微生物群落结构变化规律, 但不同研究区域差异较大, 且涉及耐瘠薄、涵养水源为主的马尾松林与以采果为主的柑橘林土壤微生物 PLFA 沿海拔变化的相关研究报道较少, 特别是利用生态学分析方法研究两种林分随海拔增加土壤微生物 PLFA 变化的报道鲜见.

因此, 本文以亚热带缙云山为研究基地, 选择马尾松林 (masson pine) 和柑橘林 (citrus forest) 土壤为研究对象, 探讨海拔增加土壤微生物 PLFA 的变化及其对不同林分的响应, 以期评价森林生态安全、

保护生物多样性和可持续发展林业提供科学依据.

1 研究区概况

缙云山自然保护区 (106°22'E、29°45'N) 位于重庆市北碚区境内. 属典型的亚热带季风性气候, 平均气温 13.6℃, 年平均相对湿度 87%, 年平均降雨量 1 161.8 mm, 干湿季分明, 雨季是 4~9 月 (降雨量 1 243.8 mm), 7~8 月是伏旱期 (蒸发量 255.4 mm), 土壤为酸性黄壤.

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

2014 年 11 月, 在确定的马尾松林和柑橘林每个海拔上随机选择 3 块面积为 20 m × 20 m 的标准样地, 在标准样地中按照“W”字型各设置 5 个 1 m × 1 m 的小样地, 每个小样地中随机选择 1 个采样点, 采集 0~20 cm 深度的土样, 混匀 5 个小样地土样. 当天带回实验室, 除去动植物残体, 过 2 mm 筛, 储存在 4℃ 用于测定 PLFA. 两林分基本情况见表 1.

表 1 马尾松林、柑橘林在不同海拔高度的林分特征¹⁾

Table 1 Stand characteristics of masson pine and citrus forest under different altitudes

林型	海拔/m	优势种	林龄/a	平均胸径(地径)/cm	平均树高/m	乔木郁闭度/%	草本郁闭度/%
马尾松林	432	马尾松	45	Φ19.1	13.8	80	40
	467	马尾松	45	Φ18.6	14.5	80	45
	491	马尾松	45	Φ18.9	14.1	80	50
柑橘林	315	柑橘	43	D14.2	4.3	65	90
	362	柑橘	43	D14.2	4.3	65	96
	405	柑橘	43	D14.2	4.3	65	96

1) Φ 表示胸径, D 表示地径

2.2 样品测定方法

磷脂脂肪酸采用修正的 Bligh-Dyer 方法^[8], 称取相当于 8 g 干土的新鲜土样, 用混合浸提液 (氯仿: 甲醇: 缓冲液 = 2: 1: 0.8) 提取脂类, 用柱层析法分离得到磷脂脂肪酸, 然后经甲酯化后用 Agilent 6850 气相色谱仪分析各种脂肪酸 (C5 ~ C20) 的含量, 以正十九烷脂肪酸甲酯内标物进行定量计算. 各成分脂肪酸通过 MIDI Sherlock 微生物鉴定系统 (Version 6.1, MIDI, Inc., Newark, DE) 进行, 标准品购于美国 MIDI 公司的 C9 ~ C20 的脂肪酸甲酯.

脲酶 (Ure) 测定用靛酚比色法; 转化酶 (Ive) 测定用 3, 5-二硝基水杨酸比色法; H₂O₂ 酶 (CAT) 测定用 KMnO₄ 滴定法; 酸性磷酸酶 (ACP) 测定用磷酸苯二钠法^[16]. 采用紫外可见分光光度计进行测

定 (仪器型号: UV-5200).

2.3 数据处理与统计分析

数据分析使用 SPSS 18.0、Origin 9.2、Microsoft Excel 2003 等软件, 采用单因素方差分析法 (LSD) 比较不同数据组间的差异 ($P < 0.05$), 用主成分分析法 (PCA) 来综合评价两林分土壤 PLFA.

磷脂脂肪酸含量计算公式:

$$PLFA(\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{A \times S_1 \times V}{SA \times D \times R \times W}$$

式中, A 和 SA 分别为样品和标准物质的峰面积, S₁ 为标准物质的浓度 (ng · μL⁻¹), D 为稀释倍数, R 为分取倍数, V 为样品的测定体积 (μL), W 为烘干土壤质量 (g).

根据脂肪酸含量和种类计算丰富度指数

(R)^[17, 18]、Shannon 多样性指数(H')^[18, 19]、Pielou 均匀度(J)^[17, 18]来评价微生物多样性,公式如下:

$$R = S$$

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

$$J = H' / \ln S$$

式中, $P_i = N_i/N$, N_i 为*i*类脂肪酸个数, N 为该实验中总脂肪酸个数, S 为微生物群落中总脂肪酸种类,即丰富度。

脂肪酸采用 Frostegard^[20]方法命名:分子式用“X:Y ω Z(c/t)”表示,“X”表示脂肪酸分子的碳原子总数,“Y”表示不饱和烯键的数目,“ ω ”代表双键的位置(从羧基端算起),“Z”为烯键或环丙烷链的位置,“c”和“t”分别表示顺式和反式同分异构体。“i”(iso)表示顺式甲基支链,“a”(anteiso)表示反式甲基支链,Me表示甲基位置,cy表示环丙基支链,“OH”前的数字表示羟基位置。

3 结果与分析

3.1 两种林分土壤 PLFA 组成和微生物群落组成随海拔梯度的变化

表 2 马尾松林、柑橘林在不同海拔上土壤 PLFA 类型及其含量(平均值 \pm SD)/nmol \cdot g⁻¹

Table 2 Types and content of soil microbial PLFA of masson pine and citrus forest under different altitudes(mean \pm SD)/nmol \cdot g⁻¹

PLFA /nmol \cdot g ⁻¹	马尾松林			柑橘林		
	432	467	491	315	362	405
直链饱和 PLFA	2.913 \pm 0.184	2.968 \pm 0.120	3.027 \pm 0.153	5.205 \pm 0.806	3.950 \pm 0.219	4.200 \pm 0.544
直链单不饱和 PLFA	0.813 \pm 0.064	0.900 \pm 0.091	0.857 \pm 0.090	2.018 \pm 0.216	1.503 \pm 0.494	1.550 \pm 0.353
支链饱和 PLFA	0.815 \pm 0.071	0.978 \pm 0.049	0.853 \pm 0.068	1.943 \pm 0.081	1.560 \pm 0.007	1.550 \pm 0.155
多不饱和 PLFA	0.813 \pm 0.053	0.900 \pm 0.082	0.857 \pm 0.035	1.990 \pm 0.075	1.503 \pm 0.494	1.518 \pm 0.350
环丙烷 PLFA	0.808 \pm 0.092	0.900 \pm 0.021	0.897 \pm 0.012	1.433 \pm 0.028	1.273 \pm 0.494	1.433 \pm 0.190

表 3 马尾松林、柑橘林在不同海拔上的土壤特征磷脂脂肪酸含量(平均值 \pm SD)/nmol \cdot g⁻¹

Table 3 Soil microbial PLFA of masson pine and citrus forest under different altitudes(mean \pm SD)/nmol \cdot g⁻¹

类型	马尾松林			柑橘林		
	432	467	491	315	362	405
细菌	3.213 \pm 0.014	3.753 \pm 0.205	3.560 \pm 0.141	7.748 \pm 0.197	6.530 \pm 0.014	6.503 \pm 0.325
真菌	0.730 \pm 0.120	0.763 \pm 0.014	0.727 \pm 0.089	1.355 \pm 0.048	0.875 \pm 0.066	0.973 \pm 0.067
放线菌	0.168 \pm 0.035	0.198 \pm 0.126	0.130 \pm 0.007	0.668 \pm 0.021	0.543 \pm 0.014	0.540 \pm 0.002
G ⁻	2.118 \pm 0.311	2.383 \pm 0.049	2.360 \pm 0.042	4.838 \pm 0.071	3.795 \pm 0.585	4.160 \pm 0.022
G ⁺	1.870 \pm 0.120	2.250 \pm 0.155	2.113 \pm 0.238	4.933 \pm 0.077	4.005 \pm 0.098	3.823 \pm 0.025
总 PLFA	8.903 \pm 0.453	9.338 \pm 0.219	9.427 \pm 0.605	18.230 \pm 0.537	14.328 \pm 0.615	14.800 \pm 0.077

3.2 两种林分土壤微生物群落多样性随海拔的变化

总体上,两林分土壤微生物群落多样性随海拔的增加变化不一(表 4)。马尾松林低海拔丰富度指数(S)显著高于高海拔,多样性指数(H')、均匀度指数(J)则随海拔升高先减小后增加;柑橘林丰富度指数、多样性指数随海拔升高而先减小后增加,均匀度指数随海拔升高而升高。柑橘林土壤微生物

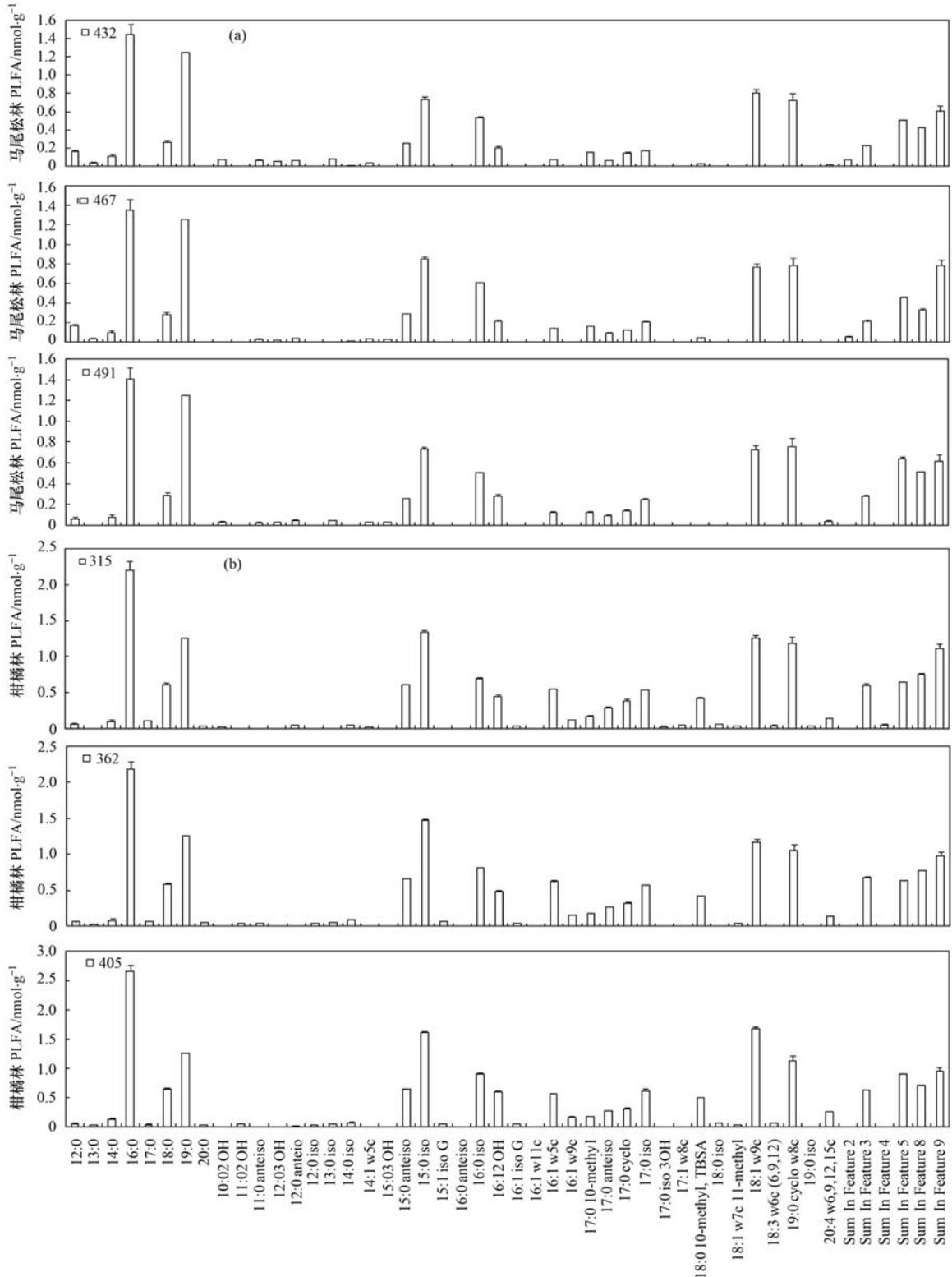
6个海拔土壤共检测出 48 种磷脂脂肪酸(图 1),马尾松林和柑橘林土壤 PLFA 种类差异较大,分别为 34 种和 45 种,各海拔均以 16:0 含量最高,16:0、i15:0、i16:0、18:1 ω 9c 和 cy19:0 ω 8c 的总和占总脂肪酸的 40% 以上。由表 2 可知,两种土壤中直链饱和 PLFA 占总 PLFA 的 40%~48%,而其余 PLFA 类型仅占总 PLFA 的 11% 左右,其中海拔 432m 的环丙烷 PLFA 含量最低,仅占 11.38%,且与其他海拔差异显著。

不同林分土壤 PLFA 含量随海拔的增加变化趋势不同,两林分总 PLFA 含量在不同海拔间差异均显著,马尾松林总 PLFA 含量随海拔升高而增加,而柑橘林总 PLFA 随海拔则表现出先减后增的趋势。由表 3 可知,各海拔细菌分布量最大,其次是真菌,放线菌分布量最低。马尾松林土壤细菌、真菌、放线菌、G⁻和 G⁺随海拔均表现出先增后减的规律;柑橘林土壤细菌、放线菌和 G⁺随海拔升高而减小,真菌和 G⁻随海拔则先减小后增加,且柑橘林各类型土壤微生物 PLFA 含量均比马尾松林高出 2 倍以上。

群落的丰富度、多样性、均匀度等指标均显著高于马尾松林。

3.3 马尾松林和柑橘林土壤微生物 PLFA 的主成分分析

两林分供试土壤磷脂脂肪酸均仅由 PC1 和 PC2 两个类型组成(图 2)。马尾松林中 PC1 主要由直链饱和脂肪酸、直链单不饱和脂肪酸、支链饱和脂肪



Sum In Feature 2 代表 12:0 aldehyde 或 unknown 10.928; Sum In Feature 3 代表 16:1ω7c/16:1ω6c 或 16:1ω6c/16:1ω7c; Sum In Feature 4 代表 17:1 iso I/anteiso B 或 17:1 anteiso B/iso I; Sum In Feature 5 代表 18:2ω6,9c/18:0 ante 或 18:0 ante/18:2ω6,9c; Sum In Feature 8 代表 18:1ω7c 或 18:1ω6c; Sum In Feature 9 代表 17:1 isoω9c 或 16:0 10-methyl

图 1 马尾松林、柑橘林在不同海拔上的土壤微生物 PLFA 的图谱

Fig. 1 Soil microbial PLFA profiles of masson pine and citrus forest under different altitudes

酸以及多不饱和脂肪酸组成,占微生物群落结构变异的 53.61%,其中 13:0、i14:0、14:1ω5c、i16:0、

10 Me17:0、10Me18:0 TBSA、18:1ω9c 含量较高,总和占 PC1 的 58.34%;PC2 中较高的脂肪酸为

表 4 马尾松林、柑橘林在不同海拔上的土壤微生物多样性指数比较¹⁾ (平均值 ± SD)

Table 4 Soil microbial diversity indices of masson pine and citrus forest under different altitudes (mean ± SD)

林型	海拔/m	丰富度指数(S)	Shannon 多样性指数(H')	Pielou 均匀度(J)
马尾松林	432	34	3.059 ± 0.012 (a)	0.867 ± 0.003 (a)
	467	31	2.791 ± 0.031 (c)	0.813 ± 0.009 (c)
	491	31	2.803 ± 0.010 (b)	0.816 ± 0.003 (b)
柑橘林	315	45	3.351 ± 0.019 (b)	0.880 ± 0.005 (a)
	362	38	3.294 ± 0.044 (a)	0.906 ± 0.120 (b)
	405	41	3.378 ± 0.021 (c)	0.910 ± 0.006 (c)

1) 小写字母不同表示差异显著

18:0、a17:0、i17:0 等 3 种, 总和占 PC2 的 38.20%。柑橘林中 PC1 主要由直链饱和脂肪酸、支链饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸以及环丙烷脂肪酸组成, 总量占微生物群落结构组成变异的 32%, 其中 16:0、18:0、a15:0、i15:0、a16:0、i16:0、16:12OH、16:1ω5c、16:1ω7c/16:1ω6c 或 16:1ω6c/16:1ω7c、10Me17:0、i17:0、10Me18:0 TBSA、20:4ω6、9、12、15c、18:2ω6、9c/18:0ante 或 18:0ante/18:2ω6、9c 含量较高, 总和占 PC1 的 69.77%; PC2 含量较高的为 17:0、10:0 2OH、a12:0、cy19:0ω8c、17:1ω8c、11Me18:1ω7c、i17:1ω9c 或 10Me16:0, 占 PC2 的 51.67%。

3.4 两林分在不同海拔上的土壤酶活性的差异性分析

柑橘林土壤 Ure、Ive、CAT 及 ACP 酶活性显著高于马尾松林(图 3)。马尾松林土壤 CAT 酶活性随海拔升高而降低, 土壤 Ure 和 Ive 酶活性最高均在海拔 467 m, 最低则在海拔 491 m; 而土壤 ACP 酶活性随海拔变化依次为 467 m [(3.767 ± 0.224)

mg·g⁻¹] < 432 m [(4.226 ± 0.307) mg·g⁻¹] < 491 m [(4.898 ± 0.507) mg·g⁻¹]。柑橘林土壤 Ive、CAT 和 ACP 酶活性均随海拔升高而降低, Ive、CAT 和 ACP 酶活性在海拔 315 m 时最高, 值分别为 (12.364 ± 0.308)、(41.197 ± 1.308)、(6.022 ± 0.129) mg·g⁻¹, 其次是海拔 362 m, 为 (10.824 ± 0.459)、(38.455 ± 1.459)、(5.668 ± 0.267) mg·g⁻¹, 酶活性最低的是海拔 405 m, 为 (9.561 ± 0.708)、(38.381 ± 0.708)、(5.151 ± 0.112) mg·g⁻¹。Ure 酶活性在海拔 315 m 和海拔 362 m 均为 1.685 mg·g⁻¹, 在海拔 405 为 (1.629 ± 0.070) mg·g⁻¹。

3.5 土壤磷脂脂肪酸与酶活性、环境因子的相关性分析

由表 5 可知, 细菌、放线菌、G⁻ 及 G⁺ 与 Ure、Ive、CAT、林分均呈极显著正相关, 真菌与 Ure、Ive、CAT 呈显著正相关; 而海拔与放线菌呈极显著负相关, 与细菌、真菌、G⁻ 及 G⁺ 呈显著负相关; CAP 与土壤微生物 PLFA 无显著性相关关系。

表 5 马尾松林、柑橘林土壤微生物 PLFA 特性与土壤酶活性、环境因子的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficients among soil microbial, soil enzyme activity and environment factors of masson pine and citrus forest

	Ure	Ive	CAT	ACP	海拔	林分
细菌	0.975 **	0.958 **	0.991 **	0.522	-0.899 *	0.968 **
真菌	0.857 *	0.813 *	0.835 *	0.505	-0.858 *	0.745
放线菌	0.985 **	0.967 **	0.997 **	0.551	-0.923 **	0.976 **
G ⁻	0.956 **	0.936 **	0.977 **	0.548	-0.880 *	0.955 **
G ⁺	0.978 **	0.960 **	0.985 **	0.524	-0.914 *	0.949 **

1) 显著性水平: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ (Person); Ure: urease, 脲酶; Ive: invertase, 转化酶(蔗糖酶); CAT: catalase activity, 过氧化氢酶; ACP: acid phosphatase, 酸性磷酸酶

4 讨论

4.1 两种林分土壤微生物 PLFA 及其功能多样性对海拔的响应

土壤微生物在土壤中所占比例小却十分活跃, 它在土壤生态系统碳氮循环、养分循环及调节植物

生产力和多样性中起重要作用^[21, 22]。而土壤微生物种类、数量及群落结构易受土壤成分、土壤质地、水分和气候等^[23, 24]诸多环境因素影响。植被类型显著影响微生物生长和功能^[25, 26], 植被不同其根际分泌物不同亦可造成土壤微生物 PLFA 含量和多样性的差异^[14]。本实验中柑橘林土壤各类型微生

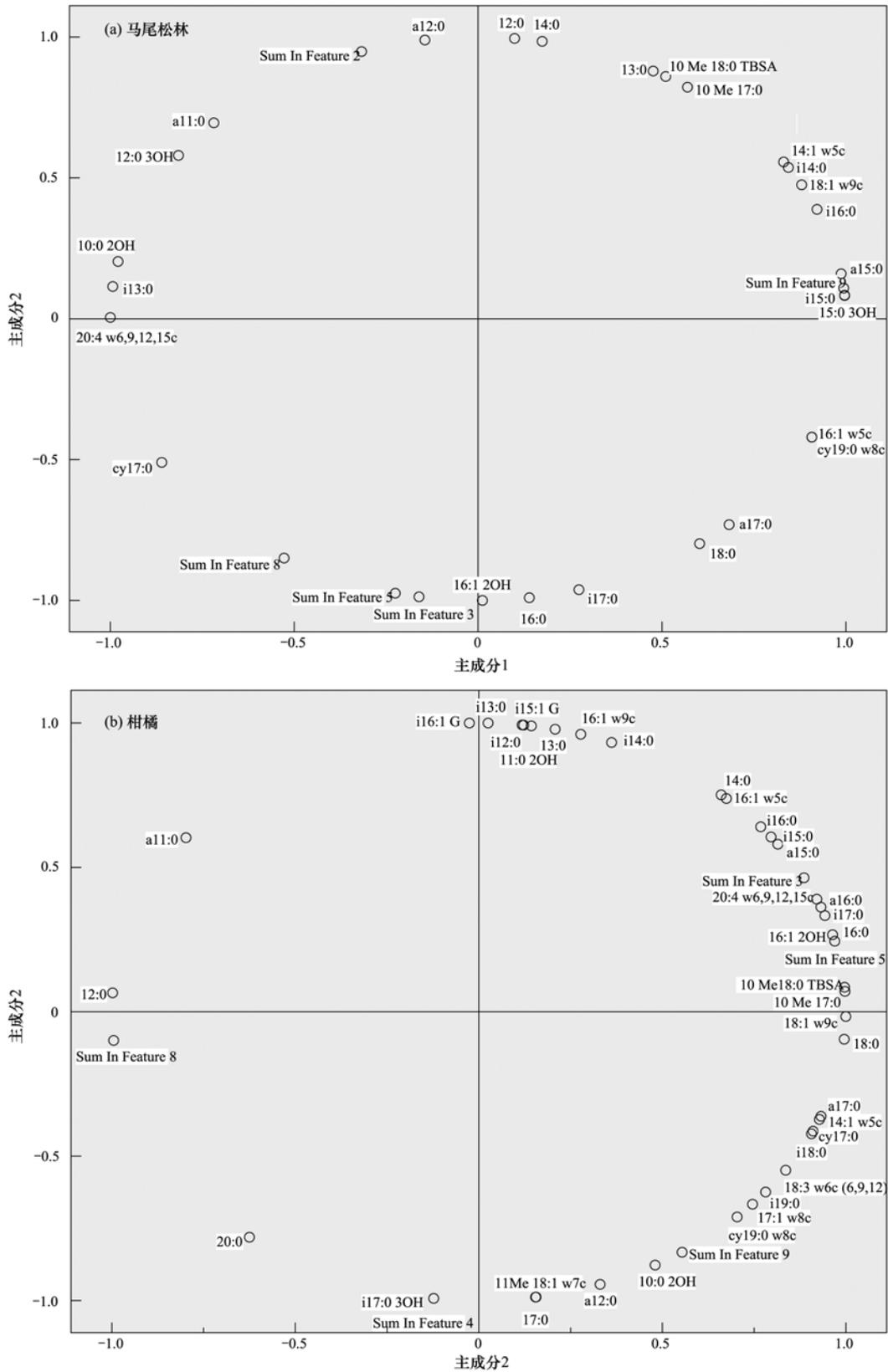
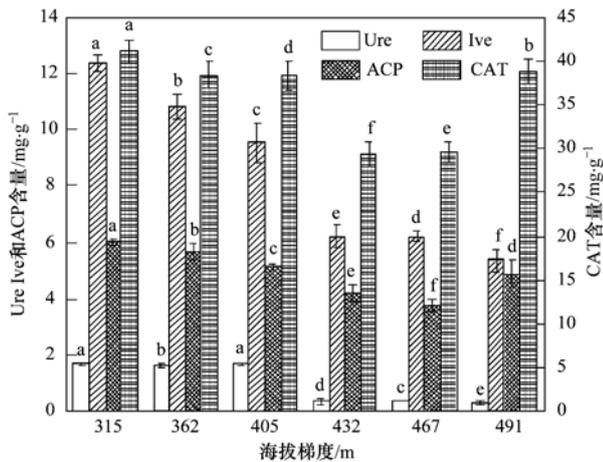


图 2 马尾松林、柑橘林土壤 PLFA 的主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of PLFA in the soil of masson pine and citrus forest

物 PLFA 含量均高于马尾松林,多样性亦优于马尾松林. 由于植物群落的种类和结构不同,改变了有

机质输入量,明显影响了土壤质量^[6]. 在柑橘林地中,柑橘树普遍低矮,树种间良好的光、水、热、风



不同小写字母表示同一种酶在不同海拔间在 0.05 水平上差异性; 脲酶(Ure)以 24 h 后 1 g 土壤中生成 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的毫克数表示; 转化酶(Ive)以 24 h 后 1 g 土壤生成葡萄糖的毫克数表示; H_2O_2 酶(CAT)以 20 min 后 1 g 土壤消耗的 $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 的毫升数表示; 酸性磷酸酶(ACP)以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚的毫克数表示

图3 马尾松林、柑橘林在不同海拔上的土壤 Ure、Ive、CAT 及 ACP 酶活性

Fig. 3 Comparisons of Ure, Ive, CAT and ACP of masson pine and citrus forest under different altitudes

等环境条件促进了土壤微生物生长,加快了表层土有机质分解速度,因此使柑橘林土壤 PLFA 含量及多样性优于马尾松林. 王卫霞等^[27]在研究南亚热带格木、红椎和马尾松人工林时也得出了相似的结论. 由此可见,植物组成显著影响土壤微生物群落和结构.

此外,海拔梯度改变了土壤理化性质、植被组成及结构和环境条件等诸多自然因子,这些因子显著影响土壤微生物群落结构^[28]. 随海拔高度的升高,土壤微生物 PLFA 表现出不同的分布格局,有的随海拔增加呈“单峰”现象^[12],有的单调递增^[13]或递减^[14],有的则无明显规律^[15]. 研究区域不同得到的结果不一致. 本实验马尾松林真菌、细菌、放线菌、 G^- 及 G^+ 随海拔先升高后降低呈“单峰”现象,最大值均出现在海拔 467 m,而微生物多样性指数则在海拔 432 m 时种类最多分布最均匀,这可能与采样点的空间异质性较大有关,高海拔与低海拔间土壤 PLFA 差异显著,本研究结果与 Wang 等^[13]的研究结果相一致,但与张于光等^[12]、吴则焰等^[14]的研究结果相异,可能与地理位置有关;柑橘林土壤中总 PLFA、真菌及 G^- 随海拔先下降后上升呈“单峰”模式,而细菌、放线菌、 G^+ 随海拔单调递减,前一点与张于光等^[12]的研究结果一致而后一点与其

相悖,这可能与研究区域有关,研究对象不同,有机质输入量、环境温度等不同导致研究结果不一致. 柑橘树较矮,较大的林下空隙利于雨水和风等自然力的流动,这使低海拔聚集较多的枯落物,同时光、热、水、通气条件较好,促进了微生物生长与代谢,增加了微生物活性与数量. 由此可见,缙云山土壤微生物群落含量及功能多样性在一定程度上受海拔梯度的影响.

4.2 两种林分土壤酶活性对不同海拔的响应

土壤酶参与并影响土壤中一系列生化反应,且在物质循环和能量流动等过程中最为活跃,其活性高低反映了土壤生物活性和土壤生化反应强度,因此常被用作土壤质量的评价指标^[29]. 总体上,两林分随海拔增加变化明显,柑橘林土壤酶活性随海拔升高而降低,与陈双林等^[30]在研究毛竹林土壤中的研究结论不一致,可能与植被类型有关,柑橘林较毛竹林郁闭度低,光照和空气等更充足,优良的环境条件使微生物大量繁殖,代谢旺盛,分解速度和呼吸速度加快而聚集了较高的土壤酶活性,使得土壤 CAT、Ure、Ive 和 ACP 活性随海拔升高表现出显著差异. 马尾松林中土壤 CAT、Ure、Ive 和 ACP 活性变化规律不一致,CAT 随海拔升高而升高,ACP 则随海拔升高而降低,高海拔 CAT 和 ACP 活性显著高于低海拔,而低海拔的 Ure 和 Ive 活性却显著高于高海拔,后一点与 Kautz 等^[31]不一致,这可能与海拔、植被、土壤质地等因子有关.

4.3 土壤微生物 PLFA 与土壤酶活性的相关性

土壤微生物与土壤酶活性有着复杂的联系,不能简单地以任何土壤微生物数量与土壤酶都呈正相关或者负相关,研究结果会随着植被、气候和研究区域等不同而不同^[31-34]. 文都日乐等^[35]在研究呼伦贝尔不同草地类型时发现土壤真菌与 ACP 和 Ive 呈极显著正相关,细菌 PLFA、放线菌 PLFA 与 CAT 呈极显著正相关;放线菌 PLFA 与 Ure 呈显著正相关. 陈汝等^[36]在研究苹果砧木根际土壤时发现细菌 PLFA 与 Ure 呈极显著正相关,而与 Ive 和 ACP 呈显著正相关. 龙妍^[37]在研究葡萄园土壤时发现土壤细菌 PLFA、真菌 PLFA 和放线菌 PLFA 均与 Ure、Ive 及 ACP 呈极显著正相关,与 CAT 负相关但未达到显著水平. 本研究中,细菌、放线菌、 G^- 及 G^+ 与 Ure、Ive、CAT、林分均呈极显著正相关,真菌与 Ure、Ive、CAT 呈显著正相关;而细菌、真菌、放线菌、 G^- 及 G^+ 与海拔呈极显著或显著负相关. 表明 Ure、Ive、CAT、林分及海拔是驱动微生物群落差

异的主要因子. 由此说明影响土壤微生物群落功能多样性的主要因素可能与 Ure、Ive、CAT、林分及海拔等因素密切相关.

5 结论

(1) 柑橘林土壤 PLFA 含量及功能多样性显著高于马尾松林, 且两林分各海拔间细菌、真菌、放线菌、G⁻ 及 G⁺ 含量差异显著, 其中 i16:0、10Me17:0、10Me18:0 TBSA 是两林分含量最高且共有的脂肪酸且 i16:0 高达 15.26%.

(2) 柑橘林土壤中, 低海拔 CAT、Ure、Ive 和 ACP 活性显著高于高海拔土壤酶活性; 马尾松林土壤 CAT 随海拔升高而升高, Ure、Ive 和 ACP 无明显变化规律, 但高海拔 CAT 和 ACP 活性显著高于低海拔, 而高海拔的 Ure 和 Ive 活性显著低于低海拔.

(3) 柑橘林与马尾松林细菌、放线菌、G⁻ 及 G⁺ 与 Ure、Ive、CAT、林分均呈极显著正相关, 真菌与 Ure、Ive、CAT 呈显著正相关; 而细菌、真菌、放线菌、G⁻ 及 G⁺ 与海拔呈极显著或显著负相关.

参考文献:

- [1] 杨晓娟, 王海燕, 任丽娜, 等. 我国森林土壤健康评价研究进展[J]. 土壤通报, 2012, **43**(4): 972-978.
- [2] Powlson D S, Prookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, **19**(2): 159-164.
- [3] 潘能, 侯振安, 陈卫平, 等. 绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4081-4087.
- [4] 王菲, 袁婷, 谷守宽, 等. 有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1461-1467.
- [5] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, *et al.* The variations in soil microbial communities, enzyme activities and their relationships with soil organic matter decomposition along the northern slope of Changbai Mountain[J]. Applied Soil Ecology, 2015, **86**: 19-29.
- [6] 白震, 何红波, 解宏图, 等. 施肥与季节更替对黑土微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3230-3239.
- [7] 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 等. 不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2375-2382.
- [8] Zelles L, Bai Q Y, Beck T, *et al.* Signature fatty acids in phospholipids and lipopolysaccharides as indicators of microbial biomass and community structure in agricultural soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, **24**(4): 317-323.
- [9] 王芸, 韩宾, 史忠强, 等. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(4): 120-122, 142.
- [10] Vestal J R, White D C. Lipid analysis in microbial ecology: Quantitative approaches to the study of microbial communities [J]. Bioscience, 1989, **39**(8): 535-541.
- [11] 陈鸿洋, 尚振艳, 傅华, 等. 荒漠区不同大小灌丛周围土壤微生物生物量及活性特征[J]. 草业学报, 2015, **24**(2): 70-76.
- [12] 张于光, 宿秀江, 丛静, 等. 神农架土壤微生物群落的海拔梯度变化[J]. 林业科学, 2014, **50**(9): 161-166.
- [13] Wang J J, Soininen J, Zhang Y, *et al.* Contrasting patterns in elevational diversity between microorganisms and macroorganisms [J]. Journal of Biogeography, 2010, **38**(3): 595-603.
- [14] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等. 武夷山不同海拔植被带土壤微生物 PLFA 分析[J]. 林业科学, 2014, **50**(7): 105-112.
- [15] 张地, 张育新, 曲来叶, 等. 海拔对辽东栎林地土壤微生物群落的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2041-2048.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 27-30.
- [17] 戈峰. 现代生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 252-254.
- [18] Magurran A E. Ecological diversity and its measurement [M]. Princeton: Princeton University Press, 1988. 141-162.
- [19] 孙海新, 刘训理. 茶树根际微生物研究 [J]. 生态学报, 2004, **24**(7): 1353-1357.
- [20] Frostegård A, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, **22**(1-2): 59-65.
- [21] Warder D A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil [J]. Biological Reviews, 1992, **67**(3): 321-358.
- [22] Cutler N A, Chaput D L, van der Gast C J. Long-term changes in soil microbial communities during primary succession [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **69**: 359-370.
- [23] Wang Q K, Wang Y P, Wang S L, *et al.* Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **72**: 145-151.
- [24] Muhammad N, Dai Z M, Xiao K C, *et al.* Changes in microbial community structure due to biochars generated from different feedstocks and their relationships with soil chemical properties [J]. Geoderma, 2014, **226-227**: 270-278.
- [25] 何容, 汪家社, 施政, 等. 武夷山植被带土壤微生物量海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2009, **29**(9): 5138-5144.
- [26] Breulmann M, Schulz E, Weißhuhn K, *et al.* Impact of the plant community composition on labile soil organic carbon, soil microbial activity and community structure in semi-natural grassland ecosystems of different productivity [J]. Plant and Soil, 2012, **352**(1-2): 253-265.
- [27] 王卫霞, 史作民, 罗达, 等. 南亚热带 3 种人工林土壤微生物生物量和微生物群落结构特征 [J]. 应用生态学报, 2013, **24**(7): 1784-1792.
- [28] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 等. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系

- [J]. 草业学报, 2005, **14**(4): 15-20.
- [29] von Mersi W, Schinner F. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodinitrotetrazolium chloride[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, **11**(3): 216-220.
- [30] 陈双林, 郭子武, 杨清平. 毛竹林土壤酶活性变化的海拔效应[J]. *生态学杂志*, 2010, **29**(3): 529-533.
- [31] Kautz T, López-Fando C, Ellmer F. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long-term field experiment in Central Spain[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, **33**(3): 278-285.
- [32] 张广帅, 林勇明, 马瑞丰, 等. 汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 669-677.
- [33] Saetre P, Bååth E. Spatial variation and patterns of soil microbial community structure in a mixed spruce-birch stand[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(7): 909-917.
- [34] DeForest J L, Zak D R, Pregitzer K S, *et al.* Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in Northern Hardwood Forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**(1): 132-138.
- [35] 文都日乐, 李刚, 张静妮, 等. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J]. *草业学报*, 2010, **19**(5): 94-102.
- [36] 陈汝, 王海宁, 姜远茂, 等. 不同苹果砧木的根际土壤微生物数量及酶活性[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(10): 2099-2106.
- [37] 龙妍. 行间生草条件下葡萄园土壤微生物、酶活性、养分的动态变化及相关性分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. 32.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发售