

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐珺, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨滢, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征

李南洁^{1,2}, 曾清苹^{1,3}, 何丙辉^{1*}, 周飞⁴

(1. 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; 2. 重庆工商大学重庆市发展信息管理工程技术研究中心, 重庆 400067; 3. 四川沃尔宜环保科技有限公司, 成都 610000; 4. 重庆市林业科学研究院, 重庆 400036)

摘要: 土壤微生物和土壤酶作为土壤生态环境最重要的组成成分, 对环境变化敏感。本文以缙云山柑橘林为研究对象, 采用磷脂脂肪酸法并结合主成分分析方法, 分析季节更替对柑橘林土壤表层(0~20 cm)的土壤微生物数量、群落结构特征及酶活性等的影响。结果表明: ①季节更替对土壤微生物有显著影响($P < 0.05$), 16:0、i17:0、16:1 2OH、18:0、cy19:0 ω 8c、i17:1 ω 9c或16:0 10-methyl为4个季节共有PLFAs, 含量之和分别占PLFAs的49.57%、41.63%、35.41%和38.05%。各微生物种类中, 细菌PLFA比例最高, 其次为真菌PLFA, 放线菌PLFA比例最低, 且均具有显著的季节变化特征, 柑橘林土壤PLFAs总量变幅为6.868~24.085 nmol·g⁻¹, 大小顺序为春季>秋季>冬季>夏季, 细菌PLFAs、G⁻、G⁺及放线菌PLFAs也呈现一致的变化规律, 但真菌PLFAs则表现为秋季最高, 其次是冬季和夏季, 春季最低。季节更替对微生物群落多样性指数亦产生显著影响, 丰富度指数(R)随季节变化依次为春>冬>秋>夏, 多样性指数(H')随季节变化表现出冬>秋>春>夏, 均匀度指数(J)表现为夏>秋>冬>春, 优势度指数(D)则随季节表现为直线升高的变化趋势。②土壤脲酶随季节变化表现为夏季>春季>秋季>冬季; 土壤蔗糖酶、土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性随季节变化均表现为秋季最高, 其次是春季、夏季, 冬季最低。③主成分分析结果表明细菌PLFAs、G⁺、G⁻、放线菌PLFAs和总PLFAs对土壤肥力贡献最大, 其次是蔗糖酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶和真菌PLFAs, 贡献最小为脲酶。

关键词: 柑橘林; 微生物磷脂脂肪酸(PLFAs); 酶活性; 季节更替

中图分类号: X144; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0309-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201605017

Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing

LI Nan-jie^{1,2}, ZENG Qing-ping^{1,3}, HE Bing-hui^{1*}, ZHOU Fei⁴

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Technology Research Center for Information Management in Development, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 3. Sichuan Allvery Environmental Technology Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 4. Chongqing Key Laboratory of Forest Ecology, Chongqing 400036, China)

Abstract: The soil microbial community and soil enzyme activity are important parts of soil ecosystem, and they are sensitive to the ecological environment. In this study, citrus plantation in Mt. Jinyun was chosen as the research object. The phospholipid fatty acid (PLFAs) combined with principal component analysis method was used to study the effect of season changes on soil microbial quantity, community structure characteristics and soil enzyme activity at 0-20 cm soil layer under citrus forest. The results obtained from this study were as follows: ① The season changes had a significant impact on soil microbes ($P < 0.05$). Moreover, 16:0, i17:0, 16:1 2OH, 18:0, cy19:0 ω 8c, i17:1 ω 9c or 16:0 10-methyl were found to be common in all four seasons, and the proportion of each phospholipid fatty acid was 49.57%, 41.63%, 35.41% and 38.05%, respectively. In various microbial species, the PLFAs content of bacteria was the highest, followed by fungi, and that of actinomycetes was the lowest. Our results revealed that all kinds of microorganisms showed obvious seasonal variation characteristics. The total PLFAs quantity of citrus forest ranged from 6.868 to 24.085 nmol·g⁻¹, which had a content order of spring > autumn > winter > summer. The PLFAs content of bacteria, G⁻, G⁺ and actinomycetes also showed the same variation trend. However, the PLFAs content of fungi showed a different variation trend, i. e., autumn was the highest, followed by winter and summer, and spring was the lowest. The results suggested that season change also had a significant impact on microbial community functional diversity index. The variation trend of richness index (R) followed the order of

收稿日期: 2016-05-03; 修订日期: 2016-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271291); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA10Z427); 国家林业局“948”项目(2015-4-42); 重庆市林业重点科技攻关项目(渝林科研2015-7); 重庆市应用开发计划重点项目(CSTC2014yykfb80015); 重庆工商大学科研平台开放课题项目(1456038); 重庆工商大学重庆市发展信息管理工程技术研究中心开放基金项目(gczzk201603)

作者简介: 李南洁(1981~), 女, 博士研究生, 主要研究方向土地利用与生态过程, E-mail: 605863208@qq.com

* 通信作者, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

spring > winter > autumn > summer. Moreover, the variation trend of diversity index (H') was winter > autumn > spring > summer. Furthermore, the variation trend of evenness index (J) was summer > autumn > winter > spring. The dominance index (D) increased with the change of season. ② Urease showed a change with the seasons following summer > spring > autumn > winter; Soil invertase, soil catalase and acid phosphatase activity changed obviously in autumn, followed by spring, summer, and winter. ③ The principal component analysis demonstrated that the PLFAs content of bacteria, G^- , G^+ , actinomycetes and total PLFAs made the greatest contribution to soil fertility followed by that of invertase, catalase, acid phosphatase and fungi. Moreover, our studies showed that the PLFAs content of urease made a minimum contribution to the soil fertility.

Key words: citrus forest; soil microbial phospholipid fatty acid (PLFAs); soil enzyme activity; season changes

近年来,迅猛的工、农、畜牧业发展加剧了环境污染和植被破坏,导致了生态系统生产力降低,生物多样性降低或丧失,土壤养分维持能力和物质循环效率降低等^[1,2],生态环境退化已经成为当今世界所面临的重大问题. 土壤微生物和土壤酶是土壤生态系统的重要部分,共同推动了物质转化和养分循环,直接影响生态系统的结构和功能,左易灵等^[3]利用磷脂脂肪酸(PLFA)法研究了蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构特征,靳振江等^[4]比较了桂林会仙喀斯特溶洞湿地系统内的稻田湿地、天然湿地和旱地表层土壤微生物和土壤酶活性,土壤微生物和酶作为土壤健康或土壤质量的评价指标被广泛用于土壤微生物生态学和地理学等研究领域.

季节更替会引起土壤温度和水分改变,进而影响土壤微生物群落结构和酶活性. 白震等^[5]研究了季节更替对黑土(种植玉米)微生物群落的影响,结果显示土壤微生物 PLFA 含量呈显著的季节变化($P < 0.05$),总微生物 PLFAs、细菌 PLFAs 及真菌 PLFAs 均以夏季为最高,春秋两季较低,Spedding 等^[6]的研究也发现,真菌 PLFAs、总 PLFAs 在整个玉米生长季呈上升趋势,且真菌 PLFAs 生物量在夏季最高. 闫浩等^[7]研究了宁南山区的两种灌木林土壤矿化过程中季节更替对 PLFAs 的影响,结果发现各类型土壤 PLFAs 随矿化时间大体表现为夏季 > 春、秋季 > 冬季. 同时,罗飞等^[8]研究结果发现土壤酶活性具有明显的季节变化规律,其中 1 年生杉木人工林蔗糖酶活性表现为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季,而 5、10、15、20 年生蔗糖酶表现为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季; 5 个龄级杉木人工林土壤过氧化物酶活性随季节均表现为夏季 > 秋季 > 春、冬季; 1、5、10 年生杉木人工林土壤过氧化物酶活性表现为夏季 > 冬季 > 春季 > 秋季,20 年生则表现为冬季 > 春季 > 夏季 > 秋季. 范艳春等^[9]研究了三峡库区马尾松纯林和马尾松-杉木混交林土壤酶活性,结果发现 2 种林分土壤蔗糖酶、土壤脲酶及土壤过氧化物酶活性在秋季最大,其次是夏季和春季,冬季最低. 土壤微生物和酶活性易受地域^[10]、植被类型^[11,12]

和土壤质地^[13]等综合因素影响,研究区域和研究对象不同所得结论各异,且大多研究集中在生态林或农耕地,而以采果为主的柑橘林地土壤微生物随季节变化的相关报道鲜见,特别是利用生态学方法研究土壤微生物随季节变化的未见报道.

本文以中亚热带缙云山为研究基地,选择柑橘林(citrus forest)土壤为研究对象,探讨季节更替对土壤微生物 PLFAs 群落结构及酶活性的影响,以期为该区域经果林土壤生物多样性及土壤质量平均提供参考.

1 研究区概况

缙云山国家级自然保护区(106°22'E, 29°45'N)位于重庆市北碚区境内,距市中心 60 km. 缙云山占地面积 76 km²,海拔 350 ~ 951.5 m,属典型的北亚热带温暖湿润季风气候. 年平均温度 13.6℃,最高气温 43℃,最低气温 -1℃;年平均相对湿度 87%,年平均降雨量 1 161.8 mm;年平均日照 1 293.9 h,干湿季分明. 雨季是 4 ~ 9 月(降雨量 1 243.8 mm),其中 7 ~ 8 月是伏旱期(蒸发量 255.4 mm),降雨量小,蒸发量大. 土壤以酸性黄壤及水稻土为主,伴有少量零星分布的紫色土. 区内植物资源丰富,植被种类繁多,森林覆盖率达 96.6%.

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

2014 年 8 月、11 月及次年 2 月和 5 月,在柑橘林(无施肥)内选取 3 块面积为 20 m × 20 m 的标准样地,在标准样地中沿对角线各设置 3 个 1 m × 1 m 的小样地,每个小样地中随机选择 1 个采样点(非根际采样,采样点有少量柑橘叶凋落物),随机采集 0 ~ 20 cm 深度的土样,分别混匀同一标准样地中 3 个土样. 当天带回实验室,除去动植物残体,过 2 mm 筛,储存在 4℃ 并于 1 周内完成 PLFA 和酶活性测定. 柑橘林下无灌木层,草本层为优势群落,主要优势草本为:兔儿酸(*Polygonum amphibium* L.)、糯米团(*Gonostegia hirta* (Bl.) Miq.)、九层塔(*Ocimum*

basilicum L.)、加拿大飞蓬[*Conyza canadensis* (L.) [*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.]. 供试土壤基
Cronq.]、杠板归(*Polygonum perfoliatum* L.)、稗草 本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

林型	pH	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	速效钾 /g·kg ⁻¹	SOC /g·kg ⁻¹	砂粒 (1~0.05 mm) /%	粉粒 (0.05~0.005 mm) /%	黏粒 (<0.005 mm) /%
柑橘林	4.64±0.01	18.03±1.2	0.74±0.11	0.84±0.06	48.27±2.30	27.91±2.45	35.16±3.12	36.93±1.25

2.2 测定项目

土壤基本理化性质采用常规分析方法^[14]. 磷脂脂肪酸采用修正的 Bligh-Dyer 方法^[15],以 C19:0 做内标,用 Aligent 6850 气相色谱仪测定,用 MIDI Sherlock 微生物鉴定系统(Version6.1, MIDI, Inc., Newark, DE)分析 PLFA 图谱从而对脂肪酸成分进行鉴定.

脲酶测定用靛酚比色法,转化酶测定用 3,5-二硝基水杨酸比色法; H₂O₂ 酶测定用 KMnO₄ 滴定法; 酸性磷酸酶测定用磷酸苯二钠法^[16]. 所有测定结果均为 3 次重复的平均值,用烘干土壤质量表示. 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

夏、秋、冬、春这四季土壤微生物 PLFA 含量分别用 2014 年 8 月、11 月及次年 2 月和 5 月所测数据平均值表示. 不同数据组间的差异($P<0.05$)采用 SPSS 18.0 中的单因素方差分析法(LSD)进行比较,柑橘林地土壤肥力的主要影响因子采用 SPSS

18.0 中的主成分分析方法(PCA)进行综合评价,图 2、3 使用 Origin 9.2 软件进行制作,其余图表则均在 Microsoft Excel 2007 中完成.

根据脂肪酸含量和种类计算丰富度指数(R)^[17,18]、Shannon-Wiener 多样性指数(H')^[18,19]、Pielou 均匀度(J)^[17,18]及 Simpson 优势度(D)^[17]来评价微生物多样性,公式如下:

$$R = S$$

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

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

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

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 Frostegård 方法^[20]命名,分子式用 $X:Y\omega Z$ (c/t) 表示, X 代表脂肪酸分子的碳原子总数, Y 代表不饱和和烯键的数目, 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. 表征微生物的 PLFA^[21~25]见表 2.

表 2 表征微生物的 PLFA

Table 2 PLFA characterizing microbes

微生物类型	磷脂脂肪酸标记 ¹⁾
细菌	含有以酯链与甘油相连的饱和或单不饱和脂肪酸(如 9:0、i10:0、i11:0、12:0、i14:0、a14:0、14:0、i15:0、a15:0、16:0、i16:0、16:1 ω 5、16:1 ω 9、17:0、i17:0、a17:0、cy17:0、18:1 ω 5、18:1 ω 7、18:1 ω 7t、i19:0、a19:0 和 cy19:0 等)
革兰氏阳性细菌	含有多种分枝脂肪酸
革兰氏阴性细菌	含有多种羟基脂肪酸
真菌	含有特有的磷脂脂肪酸如 18:1 ω 9c、18:3 ω 6c (6,9,12)
放线菌	10Me17:0、10Me18:0 等

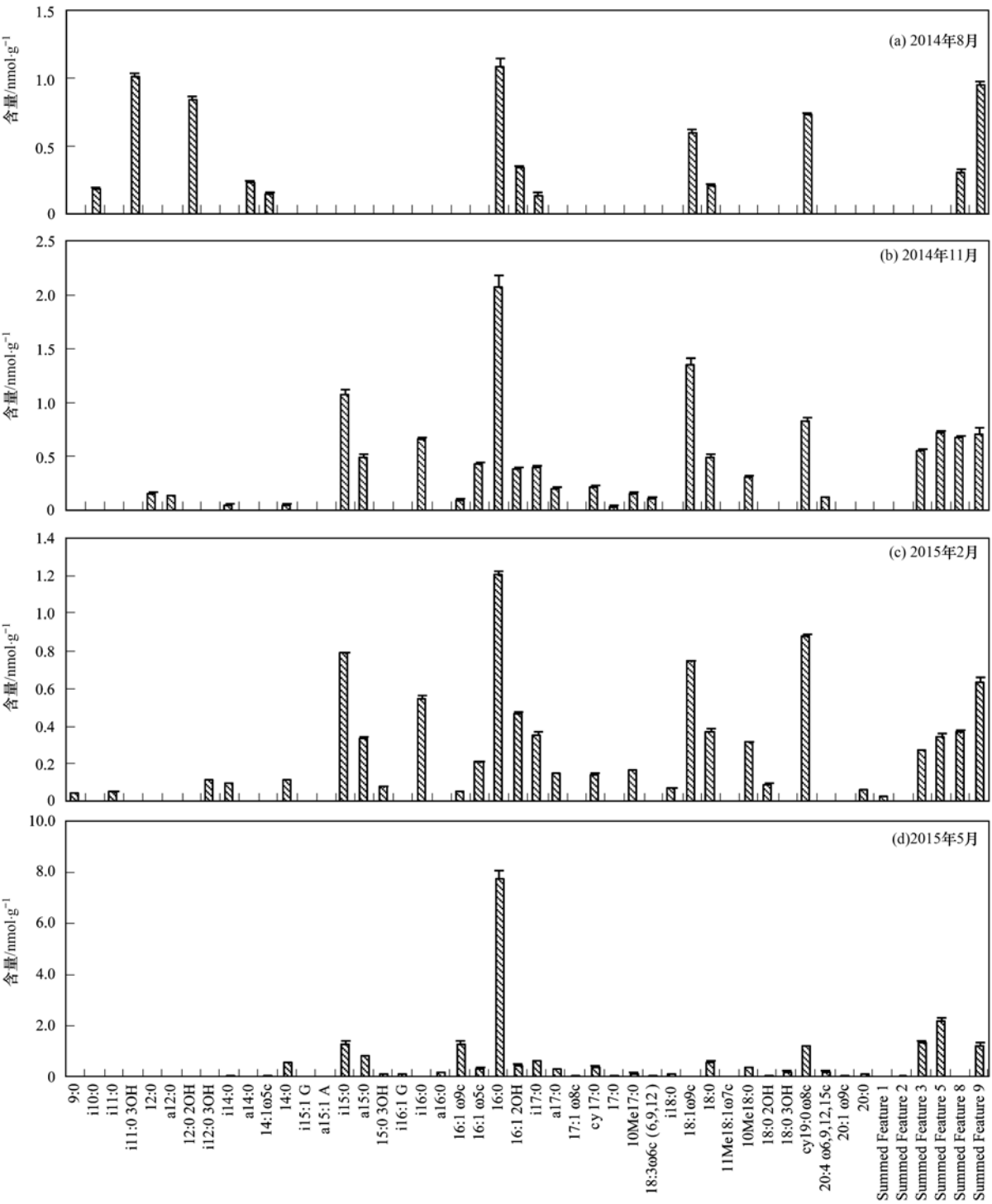
1) i、a、cy 和 Me 分别表示异、反异、环丙基和甲基分枝脂肪酸; ω 、c 和 t 分别表示脂肪端、顺式空间构造和反式空间构造

3 结果与分析

3.1 土壤微生物 PLFAs 的季节变化特征

4 个时间土壤共检测出 48 种 PLFAs(图 1),其中 8 月、11 月及次年 2 月和 5 月分别测得 PLFAs14 种、27 种、30 种和 37 种,且均以 PLFAs16:0 含量最高. 测得 4 个时间共有 PLFAs 分别为 16:0、

i17:0、16:1 2OH、18:0、cy19:0 ω 8c、i17:1 ω 9c 或 16:0 10-methyl,含量之和所占总 PLFAs 的比例分别为 49.57%、41.63%、35.41% 和 38.05%. PLFAs 按结构类型分,可分为 5 类,分别为直链饱和 PLFAs、直链单不饱和 PLFAs、支链饱和 PLFAs、环丙烷 PLFAs 和多不饱和 PLFAs,由表 3 可知,8 月、11 月及次年 2 月和 5 月直链饱和



Summed Feature 1 代表 15:1 iso H/13:0 3OH 或 13:0 3OH/i15:1 H; Summed Feature 2 代表 12:0 aldehyde 或 unknown 10.928; Summed Feature 3 代表 16:1 ω 7c/16:1 ω 6c 或 16:1 ω 6c/16:1 ω 7c; Summed Feature 5 代表 18:2 ω 6,9c/18:0 ante 或 18:0 ante/18:2 ω 6,9c; Summed Feature 8 代表 18:1 ω 7c 或 18:1 ω 6c; Summed Feature 9 代表 17:1 iso ω 9c 或 16:0 10-methyl

图 1 不同季节的土壤微生物 PLFA 图谱

Fig. 1 Soil microbial PLFA profiles in different seasons

PLFAs 分别占总 PLFAs 的 15.40%、20.50%、17.26% 和 37.73%,直链单不饱和 PLFAs 分别占总 PLFAs 的 6.04%、2.81%、4.51% 和 2.72%,支链饱和 PLFAs 分别占总 PLFAs 的 6.87%、22.01%、23.24% 和 14.24%,环丙烷 PLFAs 分别占总 PLFAs 的 8.77%、7.62%、9.91% 和 6.77%,多不饱和 PLFAs 分别占总 PLFAs 的 7.11%、14.53%、9.81% 和 7.06%。

表 3 不同季节柑橘林土壤 PLFA 类型及其含量(平均值 ± SE)¹⁾/nmol·g⁻¹
Table 3 Types and contents of soil microbial PLFA in citrus forest(mean ± SE)/nmol·g⁻¹

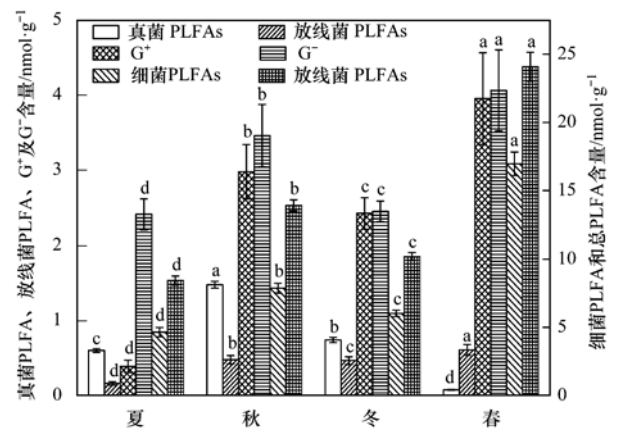
脂肪酸类型	2014 年 8 月	2014 年 11 月	2015 年 2 月	2015 年 5 月
直链饱和脂肪酸 PLFA	1.30 ± 0.15 (d)	2.85 ± 0.26 (b)	1.76 ± 0.17 (c)	9.09 ± 0.29 (a)
直链单不饱和脂肪酸 PLFA	0.51 ± 0.04 (b)	0.39 ± 0.07 (d)	0.46 ± 0.02 (c)	0.66 ± 0.01 (a)
支链饱和脂肪酸 PLFA	0.58 ± 0.01 (d)	3.06 ± 0.42 (b)	2.37 ± 0.29 (c)	3.43 ± 0.12 (a)
环丙烷脂肪酸 PLFA	0.74 ± 0.06 (d)	1.06 ± 0.03 (b)	1.01 ± 0.05 (c)	1.63 ± 0.08 (a)
多不饱和脂肪酸 PLFA	0.60 ± 0.04 (d)	2.02 ± 0.09 (a)	1.00 ± 0.02 (c)	1.70 ± 0.13 (b)

1) 小写字母表示在不同时间点在 0.05 水平上差异性

各类微生物的特征标记 PLFAs 含量随时间发生了显著变化(图 2),其中细菌 PLFAs 所占比例最高,其次是真菌 PLFAs,放线菌 PLFAs 比例最低.除真菌 PLFAs 外,细菌 PLFAs、总 PLFAs、放线菌 PLFAs、G⁻ 及 G⁺ 随时间均表现为先升高后降低再

升高的变化趋势,与含量最高的 5 月相比,8 月、11 月及 2 月细菌 PLFAs 分别降低了 72.55%、53.55%、64.44%,总 PLFAs 分别降低了 64.96%、42.28%、57.67%,放线菌 PLFAs 分别降低了 73.52%、21.55%、23.19%,G⁻ 分别降低了 40.65%、14.84%、39.74%,G⁺ 分别降低了 90.16%、24.65%、38.68%.真菌 PLFAs 随时间变化则表现为 11 月[(1.478 ± 0.044) nmol·g⁻¹] > 2 月[(0.740 ± 0.034) nmol·g⁻¹] > 8 月[(0.602 ± 0.025) nmol·g⁻¹] > 5 月[(0.076 ± 0.004) nmol·g⁻¹].说明土壤微生物 PLFAs 组成及含量因时间不同而不同.

3.2 微生物 PLFAs 群落多样性的季节变化特征
从 8 月到次年的 5 月,不同土壤微生物群落多样性指数变化趋势不同(表 4).丰富度指数(R)随时间表现为直线升高,均匀度指数(J)则随时间变化直线下降,说明土壤 PLFAs 种类渐渐增加;多样性指数(H')和优势度指数(D)随时间变化先增加后降低,均在 2 月达最大值,说明 2 月的土壤微生物 PLFA 种类繁多,优势度物种小且奇异度最高.



小写字母表示在不同时间点在 0.05 水平上差异性

图 2 土壤真菌 PLFAs、放线菌 PLFAs、G⁺、G⁻、细菌 PLFAs 及总 PLFAs 随季节的变化特征

Fig. 2 Seasonal variation of the PLFAs content of soil fungi, actinomycetes, G⁺, G⁻, bacterial and the total PLFAs

表 4 季节更替对土壤微生物 PLFA 群落多样性的影响¹⁾
Table 4 Effects of season changes on soil microbial PLFA community's diversity

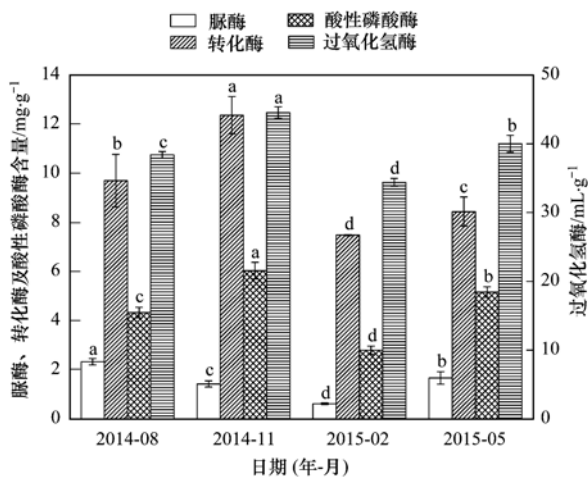
时间	丰富度指数(R)	多样性指数(H')	均匀度指数(J)	优势度指数(D)
2014 年 8 月	14 (d)	2.394 (d)	0.907 (a)	0.893 (c)
2014 年 11 月	27 (c)	2.927 (b)	0.888 (b)	0.932 (b)
2015 年 2 月	30 (b)	2.974 (a)	0.874 (c)	0.935 (a)
2015 年 5 月	37 (a)	2.665 (c)	0.738 (d)	0.867 (d)

1) 小写字母表示在不同时间点在 0.05 水平上差异性

3.3 土壤酶活性的季节变化特征

季节变化对土壤酶活性有显著影响(P < 0.05)(图 3).土壤脲酶随季节变化表现为夏季[(2.328 ± 0.132) mg·g⁻¹] > 春季[(1.667 ± 0.257) mg·g⁻¹] > 秋季[(1.424 ± 0.124) mg·g⁻¹] > 冬季[(0.619 ± 0.037) mg·g⁻¹];土壤蔗糖酶活性秋季[(12.363 ± 0.765) mg·g⁻¹] > 夏季[(9.701 ±

1.069) mg·g⁻¹] > 春季[(8.441 ± 0.591) mg·g⁻¹] > 冬季[(7.480 ± 0.026) mg·g⁻¹];土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性随季节变化均表现为秋季最高,其次是春季和夏季,冬季最低,与冬季相比,春夏秋冬四季土壤过氧化氢酶活性分别升高 16.34%、11.67%及 29.50%,酸性磷酸酶活性则分别升高 84.92%、54.91%及 161.18%.



小写字母表示同一种酶在不同季节间在 0.05 水平上差异性;脲酶以 24 h 后 1 g 土壤中生成 NH₃-N 的毫克数表示;转化酶以 24 h 后 1 g 土壤生成葡萄糖的毫克数表示;H₂O₂ 酶以 20 min 后 1 g 土壤消耗的 0.2 mol·L⁻¹ KMnO₄ 的毫升数表示;酸性磷酸酶以 24 h 后 1 g 土壤中释放出的酚的毫克数表示

图 3 土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶及过氧化氢酶随季节的变化特征

Fig. 3 Seasonal variations of soil urease, invertase, acid phosphatase and catalase

3.4 土壤微生物群落与酶活性的主成分分析
8 个指标可优化为 PC1、PC2、PC3 这 3 个主成

表 5 土壤微生物与酶活性的总方差分析

Table 5 Analysis of variance of indexes of the soil microbes and soil enzymes

主成分	未旋转平方和载入			旋转平方和载入		
	特征	贡献率/%	累积贡献率/%	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.40	42.45	42.45	3.24	40.54	40.54
2	3.11	38.86	81.31	3.19	39.84	80.38
3	1.49	18.69	100.00	1.57	19.62	100.00

表 6 土壤微生物及酶活性主成分分析旋转后的因子载荷矩阵

Table 6 Index score matrix of principal component analysis of the soil microbes and soil enzymes

指标	PC1	PC2	PC3
脲酶	-0.076	0.251	0.965
蔗糖酶	-0.125	0.988	0.092
过氧化氢酶	0.313	0.935	0.166
酸性磷酸酶	0.440	0.849	0.292
真菌 PLFAs	-0.459	0.754	-0.470
细菌 PLFAs	0.988	-0.075	0.136
G ⁺	0.893	0.107	-0.437
G ⁻	0.936	0.347	0.066
放线菌 PLFAs	0.851	0.002	-0.526
总 PLFAs	0.994	0.016	0.104

硝基,抑制除真菌标记基因外的其他所有基因的表达^[29].

本研究结果发现柑橘林土壤 PLFA 种类和组成

分,3 个主成分的方差累计贡献率为 100%,各个主成分贡献率大小依次为 F_1 (42.45%) > F_2 (38.86%) > F_3 (18.69%),且每个主成分特征根均大于 1 (表 5). 其中 PC1 主要由细菌 PLFA、G⁺、G⁻、放线菌 PLFA 和总 PLFA 组成,PC2 主要由转化酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶和真菌 PLFA 组成,PC3 则主要由脲酶组成(表 6).

4 讨论

4.1 季节更替对土壤微生物 PLFA 种类及群落结构的影响

土壤微生物是陆地生态系统中最活跃的组成部分之一,虽所占比例小,但参与并调节土壤中物质循环和各种生化反应,在改善土壤理化性质、分解植物凋落物、平衡养分循环、提高养分可用性和林地生产力等方面起着十分重要的作用^[26,27]. 土壤微生物组成和数量易受土壤温湿度的影响,土壤水分参与土壤微生物分解土壤有机质进程,加速养分形态转化,加快土壤中微生物所需养分的运输,决定土壤含氧量高低进而影响土壤微生物量^[28]. 土壤温度影响土壤水分蒸发速率及某类微生物群落对底物的利用率,在土壤湿度一定时,高温限制了氨基转化为

受季节更替的影响显著,除真菌 PLFA 外,总 PLFA、细菌 PLFA、G⁻、G⁺ 及放线菌 PLFA 均表现为春季最多,其次是秋季和冬季,夏季最低,这与白震等^[5]、Spedding 等^[6] 和闫浩等^[7] 关于夏季最高的研究结论不一致. 原因是这些研究的是玉米地和灌木林地,夏季处于玉米生长季,一定高度的玉米和灌木林所营造的特有土壤环境为地下土壤微生物生长提供了良好的生长条件,加之在种植玉米过程中化肥等的施用为土壤微生物提供了较多的营养来源,因此使夏季土壤微生物含量最高,而本研究对象柑橘树低矮且郁闭度低,林下并无灌木的遮阳作用,加之重庆夏季温度奇高,水分蒸发快,太阳暴晒地表,而阳光透过稀少的地表草本层直接进入土壤,增加了土壤温度,当此温度超过土壤微生物生长的最适温度时,土壤微生物生长受到了限制,高温导致了夏季

土壤微生物种类及数量均偏低的情况,因此造成了本研究与文献[5~7]的结果不同。

4.2 季节更替对土壤酶活性的影响

土壤酶参与土壤各类生化反应,含量小但作用大,它易受土壤质地和土壤环境等综合环境因子的影响。本实验结果表明土壤脲酶随季节变化表现为夏季>春季>秋季>冬季,土壤转化酶、土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶随季节变化均表现为秋季>春季、夏季>冬季。与罗飞等^[8]和范艳春等^[9]研究结论存在差异。原因可能是文献[8,9]分别研究的是杉木人工林、马尾松纯林和马尾松-杉木混交林,与本实验的研究对象柑橘林林分类型不同,同时研究区域和研究时间也不一样,文献[8,9]虽研究的是林地土壤酶活性,但与本实验研究的林地林分类型存在差异,不同林分所构成的林下土壤环境不同,造成了林下土壤光、热、水、气等环境不同,而土壤酶受土壤光、热、水、气等条件影响显著,因此,导致各林地土壤酶活性不一致,且随季节变化规律也不尽相同。总的说来,本实验秋季土壤酶活性最强,冬季土壤酶活性最弱,秋季土壤温度为 $(23.966 \pm 3.032)^\circ\text{C}$,刚好位于脲酶升高的温度范围,冬季土壤温度跟土壤湿度都很低,与土壤酶适宜生长的最适范围不一致。

4.3 柑橘林土壤微生物与土壤酶的综合评价

土壤中养分含量多少影响着林地植物生长,土壤微生物和土壤酶活性共同推动土壤养分循环、参与进入土壤有机质形态转化,同时又是土壤能量和土壤碳、氮、磷、硫等养分元素循环的“源”和“库”^[30],它们在土壤中的数量、分布及活动情况,反映了土壤肥力的高低,对植株生长发育起着重要的作用^[31]。唐艳等^[32]研究了银杏土壤酶活性与土壤肥力的关系,结果发现土壤脲酶、转化酶活性均与土壤有机质、全磷、全氮、速效磷、碱解氮、速效钾及银杏果实产量极显著相关。张海燕等^[33]对不同利用方式下19个黑土样品的养分和微生物量进行分析,结果表明土壤微生物与土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮和速效钾有显著或极显著的正相关关系。刘秀清等^[34]、张焱华等^[35]均发现土壤酶活性与土壤肥力显著相关,且均可作为评价土壤肥力的指标。本实验结果表明,柑橘林土壤肥力主要受细菌 PLFA、 G^+ 、 G^- 、放线菌 PLFA 和总 PLFA 等5个因子影响,且5个因子对土壤肥力的影响均表现为正向影响,即细菌 PLFA、 G^+ 、 G^- 、放线菌 PLFA 和总 PLFA 值越大,该区域土壤越肥沃。其次是转化

酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶和真菌 PLFA 等4个因子,且对肥力具有正效应,转化酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶和真菌 PLFA 值越大,土壤越肥沃。8个指标中对土壤肥力影响最低的为脲酶,但对土壤肥力同样具备正效应。诸多研究结论也表明土壤酶和土壤微生物对土壤肥力产生正效应,张海燕等^[33]和刘秀清等^[34]研究结果表明土壤酶和微生物含量均与土壤肥力有正相关的关系,这与本研究结论一致。

5 结论

(1) 季节更替对土壤微生物有显著影响($P < 0.05$),16:0、i17:0、16:1 2OH、18:0、cy19:0 ω 8c、i17:1 ω 9c 或 16:0 10-methyl 为4个季节共有脂肪酸,含量之和分别占总脂肪酸的49.57%、41.63%、35.41%和38.05%。各微生物种类中,细菌比例最高,其次为真菌,放线菌比例最低,且随季节均呈显著的季节变化特征,土壤微生物总 PLFA 随着季节变化表现为先降低后增加再降低的趋势,即春季最高,其次是秋季和冬季,夏季最低;细菌、 G^- 、 G^+ 及放线菌也呈现相同的变化,但真菌最表现为秋季最高,其次是冬季和夏季,而春季真菌含量最低。季节更替微生物群落的功能多样性指数亦产生显著影响,丰富度指数(R)随季节变化依次为春>冬>秋>夏,多样性指数(H')随季节变化表现出冬>秋>春>夏,均匀度指数(J)表现为夏>秋>冬>春,优势度指数(D)则随季节表现为直线升高的变化趋势。

(2) 季节更替对土壤酶活性具有显著影响($P < 0.05$)。土壤脲酶随季节变化表现为夏季>春季>秋季>冬季;土壤转化酶活性秋季>夏季>春季>冬季;土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性随季节变化均表现为秋季最高,其次是春季和夏季,冬季最低。

(3) 8个影响土壤肥力的因子中,细菌 PLFA、 G^+ 、 G^- 、放线菌 PLFA 和总 PLFA 对土壤肥力贡献最大,其次是转化酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶和真菌 PLFA,贡献最小的是脲酶。

参考文献:

- [1] Zhao J, Wang F M, Li J, et al. Effects of experimental nitrogen and/or phosphorus additions on soil nematode communities in a secondary tropical forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 75: 1-10.
- [2] 耿建华, 孙科, 陈辉. 我国西部地区退化生态系统的恢复与重建探讨[J]. 福建林业科技, 2010, 37(1): 115-120.
Ji J H, Sun K, Chen H. Restoration and reconstruction of degradation ecosystem in the western region of China [J]. Journal

- of Fujian Forestry Science and Technology, 2010, **37**(1): 115-120.
- [3] 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 等. 磷脂脂肪酸 (PLFA) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2705-2713.
- Zuo Y L, He X L, Wang S J, *et al.* Characteristics of soil microbial community structure in the rhizospheric soil of *Ammopiptanthus mongolicus* by phospholipid fatty acid (PLFA) [J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2705-2713.
- [4] 靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 等. 起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 335-341.
- Jin Z J, Zeng H H, Li Q, *et al.* Comparisons of microbial numbers, biomasses and soil enzyme activities between paddy field and dryland origins in Karst cave wetland [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 335-341.
- [5] 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.
- Bai Z, He H B, Xie H T, *et al.* Influences of fertilization and seasonal variation on microbial community in a Chinese mollisol [J]. Environmental science, 2008, **29**(11): 3230-3239.
- [6] Spedding T A, Hamel C, Mehuys G R, *et al.* Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**: 499-512.
- [7] 闫浩, 黄懿梅, 蒋跃利, 等. 宁南山区两种灌木林土壤矿化过程中 PLFA 指纹季节变化特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(8): 2111-2120.
- Yan H, Huang Y M, Jiang Y L, *et al.* Seasonal variation of PLFA during soil mineralization under two kinds of shrub lands in mountainous area of southern Ningxia, Northwest China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(8): 2111-2120.
- [8] 罗飞, 谢书妮, 张海燕, 等. 酸雨区不同林龄杉木林土壤酶活性季节动态[J]. 福建林学院学报, 2014, **34**(2): 131-137.
- Luo F, Xie S N, Zhang H Y, *et al.* Seasonal dynamics of the soil enzyme activities under *Cunninghamia lanceolata* plantations with different tree ages in acid rain area[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2014, **34**(2): 131-137.
- [9] 范艳春, 王鹏程, 肖文发, 等. 三峡库区 2 类典型森林 5 种土壤酶季节动态及其与养分的关系[J]. 华中农业大学学报, 2014, **33**(4): 39-44.
- Fan Y C, Wang P C, Xiao W F, *et al.* Seasonal dynamics of soil enzymes and its relationship with nutrients for two forests in Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, **33**(4): 39-44.
- [10] 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.
- Zhang Y G, Su X J, Cong J, *et al.* Variation of soil microbial community along elevation in the shennongjia mountain [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, **50**(9): 161-166.
- [11] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等. 武夷山自然保护区不同植被类型土壤微生物群落特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(8): 2301-2309.
- Wu Z Y, Lin W X, Chen Z F, *et al.* Characteristics of soil microbial community under different vegetation types in Wuyishan National Nature Reserve, East China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(8): 2301-2309.
- [12] 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.
- Wendu R L, Li G, Zhang J N, *et al.* The study of soil microbial biomass and soil enzyme activity on different grassland in Hulunbeier, Inner Mongolia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, **19**(5): 94-102.
- [13] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(8): 4112-4118.
- Xu H Q, Zhang J E, Feng L F, *et al.* Effects of different land use patterns on microbial biomass carbon and nitrogen in Guangdong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29**(8): 4112-4118.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005. 141-149.
- Bao S D. Soil Agro-Chemical Analysis [M]. (3rd ed). Beijing: China Agricultural Press, 2005. 141-149.
- [15] 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.
- [16] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- Guan S Y, Zhang D S, Zhang Z M. Methods of Soil Enzyme Activities Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [17] 戈峰. 现代生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 251-258.
- Ge F. Modern Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2002. 251-258.
- [18] Magurran A E. Ecological diversity and its measurement [M]. Princeton, NJ: 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.
- Sun H X, Liu X L. Microbes studies of tea rhizosphere [J]. Acta Ecologica Sinica, 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] 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.
- Wang F, Yuan T, Gu S K, *et al.* Effects of organic and inorganic slow-release compound fertilizer on different soils microbial community structure [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1461-1467.
- [22] 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.
- [23] 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.
- Chen X J, Wu X H, Liu S L, *et al.* Microbial activity and community structure analysis under the different land use patterns in farmland soils: based on the methods PLFA and MicroRespTM

- [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2375-2382.
- [24] 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.
- [25] 曾清苹, 何丙辉, 毛巧芝, 等. 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[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- Zeng Q P, He B H, Mao Q Z, *et al.* Effects of different altitudes on soil microbial PLFA and enzyme activity in two kinds of forests [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- [26] 朱凡, 李天平, 郁培义, 等. 施氮对樟树林土壤微生物碳源代谢的影响[J]. *林业科学*, 2014, **50**(8): 82-89.
- Zhu F, Li T P, Yu P Y, *et al.* Carbon source utilization of soil microbial communities in response to nitrogen addition in the *Cinnamomum camphora* plantation [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, **50**(8): 82-89.
- [27] Lewandowski T E, Forrester J A, Mladenoff D J, *et al.* Soil microbial community response and recovery following group selection harvest: temporal patterns from an experimental harvest in a US northern hardwood forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, **340**: 82-94.
- [28] Hedges J I, Oades J M. Comparative organic geochemistries of soils and marine sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, **27**(7-8): 319-361.
- [29] Wang H, Yang J P, Yang S H, *et al.* Effect of a 10°C-elevated temperature under different water contents on the microbial community in a tea orchard soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **62**: 113-120.
- [30] 樊军, 郝明德. 长期轮作施肥对土壤微生物碳氮的影响[J]. *水土保持研究*, 2003, **10**(1): 85-87.
- Fan J, Hao M D. Effects of long-term rotations and fertilizations on soil microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, **10**(1): 85-87.
- [31] Jenkinson D S. Soil organic matter and its dynamics [A]. In: Wild A. Russell's soil conditions and plant growth (11th ed.). Harlow: Longman, 1988. 564-607.
- [32] 唐艳, 杨林林, 叶家颖. 银杏园土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. *广西植物*, 1999, **19**(3): 277-281.
- Tang Y, Yang L L, Ye J Y. Studies on the relationship between enzyme activity and fertility of soil in Ginkgo orchard [J]. *Guihaia*, 1999, **19**(3): 277-281.
- [33] 张海燕, 肖延华, 张旭东, 等. 土壤微生物量作为土壤肥力指标的探讨[J]. *土壤通报*, 2006, **37**(3): 422-425.
- Zhang H Y, Xiao Y H, Zhang X D, *et al.* Microbial biomass as an indicator for evaluation of soil fertility properties [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, **37**(3): 422-425.
- [34] 刘秀清, 章铁, 孙晓莉. 沿江丘陵区土壤酶活性与土壤肥力的关系[J]. *中国农学通报*, 2007, **23**(7): 341-344.
- Liu X Q, Zhang T, Sun X L. The relation between soil enzyme activities and soil fertility factors in the low hill lands along Yantze River [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, **23**(7): 341-344.
- [35] 张焱华, 吴敏, 何鹏, 等. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2007, **35**(34): 11139-11142.
- Zhang Y H, Wu M, He P, *et al.* Research advance of the relationship between soil enzyme activity and soil fertility [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, **35**(34): 11139-11142.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172