

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM₁₀中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM_{2.5}中硫酸盐来源 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM_{2.5}和PM_{2.5-10}中水溶性无机离子特征 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe₂O₃表面HNO₃的光解 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 李静,李文英(1385)

Fe³⁺对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N₂O释放的影响 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD₅/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钡交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响

王菲,袁婷,谷守宽,王正银*

(西南大学资源环境学院,重庆 400716)

摘要: 缓控释肥料作为一类新型肥料已成为近年来的研究热点,但对土壤微生物群落多样性影响规律的研究甚少. 研究采用磷脂脂肪酸法分析缓释复合肥(SRF)、化肥(CF)和普通复合肥(CCF)分别施入酸性土和微碱性土恒温培养 10、30、60 和 90 d 后的微生物群落结构多样性. 结果表明,缓释复合肥等肥料施入 2 种土壤恒温培养(10~90 d)后检测到多种细菌(13:0, i14:0, i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, 16:12OH, 16:1w5c, 16:0, i17:0, a17:0, cy17:0, 17:02OH, i18:0, 18:0, cy19:0w8c), 2 种放线菌(10Me17:0 和 10Me18:0)和 1 种真菌(18:1w9c). SRF 在酸性土壤培养前期(10 d 和 30 d)较 CF 显著增加真菌 PLFA 含量 8.3% 和 6.8%, 在培养后期(60 d 和 90 d)较 CCF 显著增加真菌 PLFA 含量 22.7% 和 17.1%; SRF 较 CF 和 CCF 显著增加微碱性土壤在整个恒温培养期(30 d 除外)土壤细菌、真菌和革兰氏阳性菌 PLFA 含量. 酸性土壤培养 30 d 和 90 d 时一般饱和脂肪酸/单烯不饱和脂肪酸 PLFA 值以 SRF 显著高于不施肥(CK)、CF 和 CCF,而在微碱性土壤上 SRF 仅在恒温培养 60d 时显著高于 CK、CF 和 CCF; SRF 较 CCF 显著降低酸性土壤(30~90 d)和微碱性土壤(10~60 d)异构 PLFA/反异构 PLFA 值. 从 2 种土壤 PLFA 种类、含量以及相对丰度等可知缓释复合肥较化肥和普通复合肥提高了土壤微生物 PLFA 种类和含量以及减弱对微生物生存环境的胁迫,缓释复合肥在 2 种土壤中尤其对酸性土的作用明显. 通过研究缓释复合肥对土壤微生物群落结构多样性的影响,以期为农业生产上广泛施用缓释复合肥提供科学依据.

关键词: 缓释复合肥; 磷脂脂肪酸; 微生物群落结构; 酸性土壤; 微碱性土壤

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1461-07 DOI: 10.13227/j.hjx.2015.04.045

Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure

WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, WANG Zheng-yin*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: As a new style fertilizer, slow-control release fertilizer had been an important subject in recent years, but few researches were about soil microbial community structure diversity. Phospholipid fatty acid method was used to determined the microbial community structure diversity of acid soil and slight alkaline soil applied with slow-release compound fertilizer (SRF), chemical fertilizer (CF) and common compound fertilizer (CCF) at the 10th, 30th, 60th and 90th day under the constant temperature incubation condition. Results indicated that various bacteria (i. e 13:0, i14:0, 14:0, i15:0, a15:0, i16:0, 16:12OH, 16:1w5c, 16:0, i17:0, a17:0, cy17:0, 17:02OH, i18:0, 18:0 and cy19:0w8c), two actinomycetes (10Me17:0 and 10Me18:0) and only one fungus (18:1w9c) were detected in two soils after applying slow-release compound fertilizer and other fertilizers during the whole incubation period. SRF could significantly increase the fungi PLFA content by 8.3% and 6.8% at the early stage (the 10th day and 30th day) compared with CF, as well as significantly increase by 22.7% and 17.1% at the late stage (the 60th day and 90th day) compared with CCF in acid soil. SRF significantly increased bacteria, fungi and gram positive bacteria compared with CF and CCF in incubation period (except at the 30th day) in slight alkaline soil. SRF could significantly improve the ratio of normal saturated fatty acid and monounsaturated fatty acid at the 30th day and 90th days in acid soil compared with no fertilizer(CK), CF and CCF, while as to slight alkaline soil, SRF was significantly greater than that of CK, CF and CCF only at the 60th day. SRF could significantly decrease the ratio of iso PLFA and anteiso PLFA in acid soil (in 30-90 days) and slight alkaline soil (in 10-60 days). For two soils PLFA varieties, contents and ratios of microbial community, slow-release compound fertilizer increased soil microbial PLFA varieties and contents, and decreased the influence to microbial survival environment, especially for the acid soil. Through the research of slow-release compound fertilizer on soil microbial community structure diversity, it could provide a scientific basis for widely application of slow-release compound fertilizer in agricultural production.

Key words: slow-release compound fertilizer(SRF); phospholipid fatty acid(PLFA); microbial community structure; acid soil; slight alkaline soil

收稿日期: 2014-08-19; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 科技部农业科技成果转化资金项目(2007GB2F100266); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-003)

作者简介: 王菲(1986~),女,博士研究生,主要研究方向为植物营养与品质, E-mail: scyhed@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wang_zhengyin@163.com

土壤微生物是土壤中物质循环的主要动力,在土壤肥力、植物营养和可持续性农业生产中具有重要作用. 土壤微生物对施入土壤中的肥料经过一系列分解、转变过程后,一部分作为自身的营养物质外,大部分会被留在土壤中供植物吸收利用. 但是大量肥料长期进入土壤后形成的微环境是否会短暂地使微生物不适应生存甚至导致中毒现象,或者怎样改变土壤微生物的种类和分布情况等,这不得不使较多研究者研究土壤微生物的重要功能. 目前,有关土壤微生物的研究报道较多^[1,2],尤其是研究施肥制度如不同肥料类型、化学肥料与有机肥料以及长期施肥等对土壤微生物数量、活性和群落多样性的影响^[3-6]. 缓控释肥料作为一类新型肥料已成为近年来的研究热点,然而迄今的研究集中在养分释放、作物和环境效应等方面^[7-9],缺少对这类肥料的土壤肥力质量综合效应评价,特别是当前大量施肥现象严重,肥料种类和施用量等对土壤微生物的影响较大,缓控释肥料缓慢释放养分,在不同释放期对土壤微生物群落多样性影响规律的研究较薄弱,以致在农田推广应用缓控释肥料尚缺乏强有力的理论支撑. 因此,为了弄清不同肥料类型尤其是养分释放期较长的缓控释复合肥料在不同时间对不同酸碱度条件土壤微生物群落分布和多样性的影响规律,本文采用室内恒温培养和磷脂脂肪酸法(phospholipid fatty acid, PLFA),研究化学肥料、普通复合肥料和缓释复合肥料在重庆地区酸性和微碱性土壤不同培养时段(10~90 d)对土壤微生物群落结构多样性分布的影响规律,以期为该地区农业生产中合理施用缓释复合肥料提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤:酸性土采自重庆市北碚区柳荫镇蔬菜基地,基本理化性质为 pH 5.0,有机质 15.3 g·kg⁻¹,碱解氮 130 mg·kg⁻¹,有效磷 21.6 mg·kg⁻¹,速效钾 109 mg·kg⁻¹;微碱性土采自重庆市铜梁区土桥镇蔬菜基地,基本理化性质为 pH 7.9,有机质 21.8 g·kg⁻¹,碱解氮 93.1 mg·kg⁻¹,有效磷 19.1 mg·kg⁻¹,速效钾 97.7 mg·kg⁻¹. 供试肥料:化肥为尿素(N, 46%),磷酸二氢铵(N, 11%; P₂O₅, 44%),硫酸钾(K₂O, 50%);普通复合肥料(氮磷钾质量分数为 14%,8%和 8%)由尿素、磷酸二氢铵和硫酸钾复合造粒而成;缓释复合肥料系西南大学研制的一种以快速有效化处理的优质有机肥为基础,

与经缓释技术处理的化学肥料复合而制得的养分结构型非包膜缓释复合肥料(氮磷钾质量分数为 14%、8%和 8%),该肥料含有机质为 15.7%^[10].

1.2 试验设计

室内恒温培养试验设置 4 个处理:①不施肥(no fertilization, CK);②化肥(chemical fertilizer, CF);③普通复合肥料(common compound fertilizer, CCF);④缓释复合肥料(slow-release compound fertilizer, SRF). 除 CK 外,各施肥处理 N、P₂O₅、K₂O 用量均为 200、120、120 mg·kg⁻¹,各处理均重复 3 次. 试验时称取过 1 mm 筛的风干土壤 100 g 和相应用量的供试肥料,逐次加入去离子水,使土壤和肥料充分混匀,将土壤装入玻璃培养管(长度 150 mm,直径 35 mm)内,然后用滴管加入剩余的水量使之达到土壤田间持水量的 80%左右,最后用保鲜膜封住管口,并在保鲜膜上均匀扎 20 个 0.1 mm 的小孔保证其通气条件,于恒温培养箱中 25℃ 培养 10、30、60 和 90 d. 为保证整个培养过程中作用条件(水分、通气等)的一致性,每隔 4 d 采用重量法加水. 到达预定培养时间后,每处理取 3 次重复的培养管,将其土壤全部取出充分混匀. 取一部分土壤过 2 mm 筛,用无菌塑料袋装入,冷冻干燥后 -70℃ 保存,用于 PLFA 分析;另一部分土壤风干保存用于其他指标的测定.

1.3 测定项目及方法

土壤基本理化性质包括土壤 pH 和有机质采用常规分析法测定^[11]. 土壤微生物 PLFA 按照 Bligh 等^[12]方法提取后,用 Agilent 6850 气相色谱仪(FID 检测器)分析 PLFA 的成分. 色谱条件为:HP-5 柱(25.0 m × 200 μm × 0.33 μm),进样量 1 μL,分流比 10:1,载气: H₂,尾吹气高纯 N₂,助燃气是空气,流速 0.8 mL·min⁻¹. 汽化室温度 250℃,检测器温度 300℃,柱前压 10.0psi. 升高柱温:170℃ 起始,5℃·min⁻¹ 升到 260℃,而后 40℃·min⁻¹ 升至 310℃,保持 1.5 min. 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,PLFA 用 C19:0 做内标,换算 PLFA 的绝对含量.

细菌标记性脂肪酸有 12:0,13:0,14:0,i14:0,15:0,i15:0,a15:0,16:0,i16:0,16:12OH,16:1w5c,i17:0,a17:0,cy17:0,18:0,cy19:0w8c 等,其中 i14:0,i15:0,a15:0,i16:0,i17:0,a17:0 等代表革兰氏阳性细菌,16:1w5c,cy17:0,cy19:0w8c 等代表革

兰氏阴性细菌; 真菌标记性脂肪酸有 18:1w9c; 放线菌标记性脂肪酸有 10Me17:0 和 10Me18:0. 一般饱和脂肪酸以 12:0, 13:0, 14:0, 16:0, 18:0 等之和计; 单烯不饱和脂肪酸以 16:12OH, 16:1w5c, cy17:0 等之和计. 异构 PLFA 以 i14:0, i15:0, i16:0, i17:0 等之和计; 反异构 PLFA 以 a15:0, a17:0 等之和计^[13-15].

1.4 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件处理和分析; 多重比较采用 Duncan 法计算检验差异显著性(3 次重复).

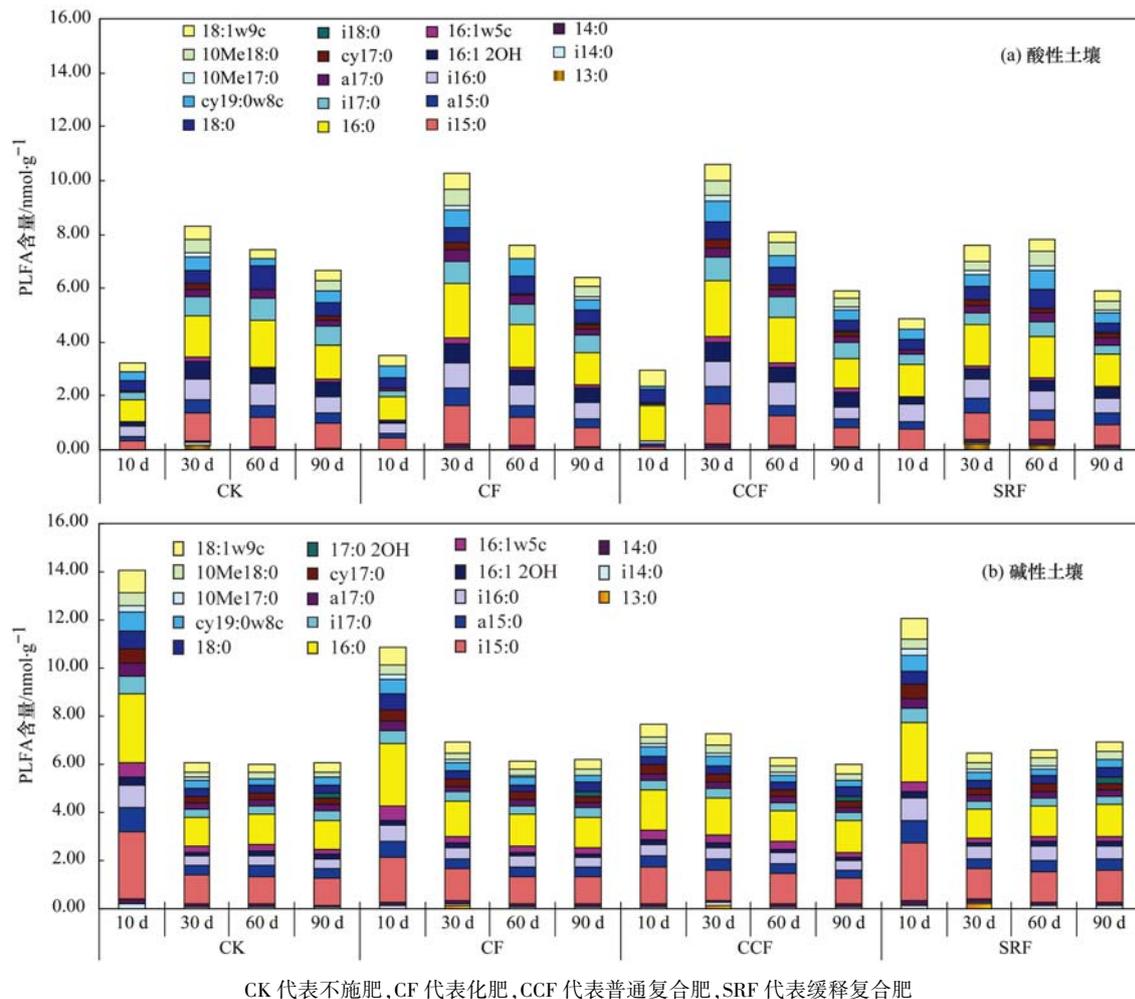
2 结果与分析

2.1 缓释复合肥对土壤微生物 PLFA 含量及组成的影响

缓释复合肥等肥料施入酸性土壤在室内恒温培养(10~90 d)后供检测出 18 种 PLFA[图 1(a)], 其中有 15 种细菌, 2 种放线菌(10Me17:0 和 10Me18:

0), 仅检测到 1 种真菌(18:1w9c), 没有检测到原生动物的其他生物. 室内恒温培养 10、30、60 和 90 d, CK(不施肥)处理检测出的 PLFA 种类分别为 10 种、17 种、12 种和 14 种, CF(化肥)是 10 种、16 种、13 种和 17 种, CCF(普通复合肥)有 9 种、16 种、15 种和 17 种, SRF(缓释复合肥)检出 10 种、17 种、17 种和 17 种. 可见缓释复合肥可能因逐步释放养分使得土壤微生物群落在不同时期的种类较稳定. 从柱形图[图 1(a)]的堆积高度中还可看出, SRF 在酸性土壤培养 10 d 时总 PLFA 含量较 CK、CF 和 CCF 高, 此后随着培养时间的增加, CK、CF 和 CCF 处理总 PLFA 含量持续降低, 而 SRF 因养分逐步释放总 PLFA 含量相对较均衡.

微碱性土壤在整个培养期尤其是培养 10 d 较酸性土壤恢复能力强, 检测到的 PLFA 种类数几乎一样. 这是因为土壤微生物适宜生活在微酸性至微碱性的土壤环境, 酸性较强不利于土壤微生物的生存. 在整个培养期, 含量相对较高的 PLFA 有 i15:



CK 代表不施肥, CF 代表化肥, CCF 代表普通复合肥, SRF 代表缓释复合肥

图 1 酸性土和微碱性土壤微生物 PLFA 含量及组成

Fig. 1 Contents and compositions of microbial PLFA in acid soil and slight alkaline soil

0, a15:0, i16:0, 16:1w5c, 16:0, i17:0, a17:0, cy17:0, 18:0, cy19:0w8c, 10Me18:0, 18:1w9c. SRF 较 CF 显著增加培养 30 d 的微碱性土壤饱和脂肪酸 13:0 和 14:0, 增幅分别为 26.1% 和 5.7%, 较 CCF 增加 9.0% 和 22.5% [图 1(b)], 同时微碱性土壤在培养 90 d 时饱和脂肪酸(14:0, 16:0 和 18:0)也以 SRF 最高. 从 PLFA 堆积高度[图 1(b)]可知, 培养 10 d 时, SRF 较 CF 和 CCF 高, 低于 CK, 随着培养时间的增加, 施肥和不施肥均影响微碱性土壤的各种 PLFA 含量, 但以缓释复合肥随着培养时间的增加总 PLFA 含量有增加趋势. 微碱性土壤适宜微生物的生存, 当加入肥料后会扰乱土壤微生物的平衡系统使得降低, 但缓释复合肥缓慢释放养分对土壤微生物的影响较小, 且缓释复合肥中的有机质带入了

大量可被微生物分解利用的碳源和氮源, 为微生物的繁殖提供了物质基础^[16,17].

2.2 缓释复合肥对土壤微生物各群落的影响

SRF 较 CF 和 CCF 显著增加酸性土壤恒温培养 10 d 时的细菌、革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌. SRF 较 CCF 显著增加培养 60 d 时放线菌 PLFA 含量 41.7% (表 1). 对于酸性土壤真菌 PLFA 含量, SRF 在培养前期(10 d 和 30 d)较 CF 显著增加 8.3% 和 6.8%; 较 CCF 显著增加培养后期(60 d 和 90 d)的真菌 PLFA 含量, 增幅分别为 22.7% 和 17.1%. 相对酸性土壤, 微碱性土壤在整个恒温培养期(30 d 除外)土壤细菌、真菌和革兰氏阳性菌以 SRF 显著高于 CF 和 CCF, 放线菌也以 SRF 最高.

表 1 土壤微生物群落¹⁾/nmol·g⁻¹

Table 1 Soil microbial communities/nmol·g⁻¹

特征脂肪酸	时间/d	酸性土壤				微碱性土壤			
		不施肥 (CK)	化肥 (CF)	普通复合肥 (CCF)	缓释复合肥 (SRF)	不施肥 (CK)	化肥 (CF)	普通复合肥 (CCF)	缓释复合肥 (SRF)
细菌	10	2.88 ± 0.00c	3.11 ± 0.03b	2.35 ± 0.02d	4.55 ± 0.02a	14.0 ± 0.06a	10.82 ± 0.01c	7.64 ± 0.00d	12.1 ± 0.10b
	30	7.16 ± 0.03c	8.97 ± 0.03b	9.23 ± 0.02a	6.51 ± 0.00d	5.39 ± 0.09d	6.09 ± 0.16b	6.33 ± 0.07a	5.76 ± 0.01c
	60	7.11 ± 0.10a	7.17 ± 0.05a	7.22 ± 0.0a	6.67 ± 0.07b	5.42 ± 0.01c	5.44 ± 0.02bc	5.54 ± 0.03b	5.93 ± 0.11a
	90	5.89 ± 0.13a	5.64 ± 0.12b	5.20 ± 0.07c	5.10 ± 0.08c	5.31 ± 0.13bc	5.44 ± 0.03b	5.23 ± 0.01c	6.10 ± 0.04a
放线菌	10	nd ²⁾	nd	nd	nd	0.781 ± 0.01a	0.560 ± 0.01c	0.418 ± 0.01d	0.627 ± 0.02b
	30	0.633 ± 0.00b	0.761 ± 0.03a	0.759 ± 0.03a	0.458 ± 0.01c	0.352 ± 0.02c	0.390 ± 0.02b	0.456 ± 0.00a	0.374 ± 0.01bc
	60	nd	nd	0.489 ± 0.00b	0.693 ± 0.00a	0.267 ± 0.01c	0.379 ± 0.02b	0.407 ± 0.02ab	0.421 ± 0.01a
	90	0.399 ± 0.00c	0.461 ± 0.03a	0.420 ± 0.00bc	0.432 ± 0.01ab	0.223 ± 0.01b	0.274 ± 0.01a	0.260 ± 0.02a	0.278 ± 0.02a
真菌	10	0.323 ± 0.00d	0.375 ± 0.01c	0.605 ± 0.00a	0.406 ± 0.00b	0.917 ± 0.01a	0.727 ± 0.01c	0.497 ± 0.01d	0.900 ± 0.00b
	30	0.512 ± 0.01c	0.605 ± 0.02b	0.602 ± 0.00b	0.646 ± 0.00a	0.402 ± 0.01c	0.438 ± 0.01b	0.476 ± 0.01a	0.427 ± 0.01b
	60	0.327 ± 0.01b	0.473 ± 0.04a	0.353 ± 0.00b	0.433 ± 0.03a	0.308 ± 0.01b	0.333 ± 0.02ab	0.318 ± 0.01b	0.359 ± 0.02a
	90	0.380 ± 0.03a	0.337 ± 0.01b	0.304 ± 0.01c	0.356 ± 0.01ab	0.343 ± 0.01c	0.375 ± 0.01b	0.391 ± 0.01b	0.446 ± 0.03a
革兰氏阳性菌	10	1.22 ± 0.00c	1.33 ± 0.03b	0.437 ± 0.00d	2.23 ± 0.01a	6.91 ± 0.06a	4.77 ± 0.02c	3.61 ± 0.03d	6.06 ± 0.01b
	30	3.96 ± 0.01b	5.11 ± 0.02a	5.23 ± 0.23a	3.46 ± 0.02c	3.01 ± 0.08c	3.30 ± 0.12ab	3.39 ± 0.06a	3.20 ± 0.03b
	60	3.48 ± 0.05b	3.36 ± 0.11b	3.95 ± 0.04a	3.48 ± 0.01b	3.02 ± 0.03c	3.06 ± 0.04c	3.21 ± 0.02b	3.45 ± 0.08a
	90	3.22 ± 0.04a	3.08 ± 0.13b	2.82 ± 0.02c	2.93 ± 0.04c	2.89 ± 0.15b	2.90 ± 0.02b	2.68 ± 0.09c	3.37 ± 0.06a
革兰氏阴性菌	10	0.463 ± 0.00c	0.553 ± 0.01b	0.124 ± 0.00d	0.629 ± 0.00a	2.43 ± 0.01a	1.87 ± 0.02b	1.38 ± 0.03c	1.92 ± 0.04b
	30	1.55 ± 0.01c	1.95 ± 0.01b	2.03 ± 0.01a	1.20 ± 0.01d	1.09 ± 0.00c	1.16 ± 0.05b	1.26 ± 0.02a	1.12 ± 0.01bc
	60	0.871 ± 0.01c	1.43 ± 0.06a	1.33 ± 0.02b	1.42 ± 0.04a	0.992 ± 0.02a	1.03 ± 0.02a	1.02 ± 0.02a	1.02 ± 0.03a
	90	1.29 ± 0.07a	1.29 ± 0.01a	1.21 ± 0.02b	0.993 ± 0.03c	1.15 ± 0.02bc	1.22 ± 0.05b	1.14 ± 0.05c	1.31 ± 0.04a

1) 同行不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同; 2) “nd”表示没有检测到

2.3 缓释复合肥对土壤微生物相对丰度的影响

细菌/真菌和革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌的比值常用来表征土壤中各菌群生物量的变化和两个种群的相对丰富程度及土壤生态系统的稳定性, 土壤细菌与真菌比值越低土壤生态系统越稳定^[18]. 一般饱和脂肪酸/单烯不饱和脂肪酸值和异构 PLFA/反异构 PLFA 值被用作反映环境胁迫或营养限制. 外界胁迫越大, 微生物就越能合成更多的单不饱和脂肪酸^[19], 而在低碳源和氧浓度, 低 pH 和高温情

况下, 异构 PLFA/反异构 PLFA 比率会增大^[19]. 表 2 可知, SRF 在酸性土壤(30 ~ 90 d)中细菌和真菌的比值显著低于 CCF, 而在微碱性土壤中仅在培养 10 d 时以 SRF 显著低于 CF 和 CCF, 其它时期表现无显著差异. 酸性土壤革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌 PLFA 值在恒温培养 30 d 和 90 d 时以 SRF 显著高于 CF 和 CCF, 而微碱性土壤在整个培养期(10 ~ 90 d)均以 SRF 显著高于 CCF. SRF 在酸性土壤培养 10 d(CCF 除外)、30 d 和 90 d 时一般饱和脂肪

酸/单烯不饱和脂肪酸 PLFA 值显著高于 CK、CF 和 CCF,而在微碱性土壤上 SRF 仅在恒温培养 60 d 时显著高于 CK、CF 和 CCF. SRF 较 CF 和 CCF 显著降低酸性土壤(30 ~ 90 d)异构 PLFA/反异构 PLFA

值,较 CCF 显著降低微碱性土壤(10 ~ 60 d)异构 PLFA/反异构 PLFA 值. 从施肥对土壤微生物群落结构的影响情况可知,缓释复合肥对 2 种土壤尤其对酸性土壤微生物的胁迫较小.

表 2 土壤微生物各类群 PLFA 比值/nmol·g⁻¹

Table 2 Ratios of different microorganism PLFA contents in soil/nmol·g⁻¹

特征脂肪酸	时间/d	酸性土壤				微碱性土壤			
		不施肥 (CK)	化肥 (CF)	普通复合肥 (CCF)	缓释复合肥 (SRF)	不施肥 (CK)	化肥 (CF)	普通复合肥 (CCF)	缓释复合肥 (SRF)
细菌/真菌	10	8.93 ± 0.05b	8.28 ± 0.20c	3.88 ± 0.05d	11.2 ± 0.07a	13.5 ± 0.04a	13.1 ± 0.12b	13.5 ± 0.15a	11.7 ± 0.11c
	30	14.0 ± 0.19b	14.8 ± 0.61a	15.3 ± 0.04a	10.1 ± 0.05c	13.4 ± 0.01ab	13.9 ± 0.35a	13.3 ± 0.22b	13.5 ± 0.41ab
	60	21.7 ± 0.65a	15.2 ± 1.53b	20.4 ± 0.21a	15.5 ± 1.07b	17.6 ± 0.57a	16.4 ± 0.87a	17.5 ± 0.57a	16.5 ± 0.55a
	90	15.5 ± 1.29ab	16.8 ± 0.91a	17.1 ± 0.20a	14.3 ± 0.62b	15.5 ± 0.60a	14.5 ± 0.34ab	13.4 ± 0.25b	13.7 ± 1.00b
革兰氏阳性菌/ 革兰氏阴性菌	10	2.64 ± 0.01b	2.41 ± 0.06c	3.53 ± 0.00a	3.55 ± 0.02a	2.43 ± 0.01a	1.87 ± 0.02b	1.38 ± 0.03c	1.92 ± 0.04b
	30	2.55 ± 0.03c	2.62 ± 0.01b	2.50 ± 0.02d	2.88 ± 0.03a	2.77 ± 0.08ab	2.85 ± 0.04a	2.69 ± 0.03b	2.86 ± 0.04a
	60	3.99 ± 0.04a	2.35 ± 0.17c	2.97 ± 0.03b	2.45 ± 0.06c	3.04 ± 0.07bc	2.96 ± 0.09c	3.14 ± 0.09b	3.39 ± 0.09a
	90	2.49 ± 0.11b	2.39 ± 0.08b	2.32 ± 0.02b	2.95 ± 0.12a	2.51 ± 0.08a	2.37 ± 0.07b	2.35 ± 0.05b	2.56 ± 0.05a
一般饱和脂肪 酸/单烯不饱和 脂肪酸	10	1.52 ± 0.00c	1.32 ± 0.02d	2.45 ± 0.04a	1.62 ± 0.00b	1.13 ± 0.04b	1.33 ± 0.01a	1.15 ± 0.02b	1.14 ± 0.02b
	30	1.10 ± 0.01b	1.04 ± 0.01c	1.09 ± 0.00b	1.25 ± 0.00a	1.11 ± 0.01c	1.26 ± 0.04a	1.23 ± 0.02a	1.17 ± 0.00b
	60	2.31 ± 0.04a	1.25 ± 0.08c	1.44 ± 0.01b	1.33 ± 0.02c	1.29 ± 0.03b	1.26 ± 0.02b	1.28 ± 0.02b	1.37 ± 0.04a
	90	1.06 ± 0.02b	1.07 ± 0.02b	1.05 ± 0.00b	1.19 ± 0.03a	1.00 ± 0.06a	0.996 ± 0.05a	1.09 ± 0.10a	0.964 ± 0.04a
异构 PLFA/ 反异构 PLFA	10	4.42 ± 0.02a	3.44 ± 0.07c	2.96 ± 0.00d	3.78 ± 0.11b	3.15 ± 0.02b	2.96 ± 0.10c	3.30 ± 0.09a	2.93 ± 0.02c
	30	3.60 ± 0.07a	3.24 ± 0.01c	3.33 ± 0.02b	2.61 ± 0.05d	3.10 ± 0.00b	3.19 ± 0.07ab	3.22 ± 0.08a	3.09 ± 0.03b
	60	3.93 ± 0.09a	3.74 ± 0.25a	3.90 ± 0.19a	2.81 ± 0.03b	3.10 ± 0.02a	3.16 ± 0.05a	3.22 ± 0.09a	2.95 ± 0.07b
	90	3.69 ± 0.23a	3.60 ± 0.05a	3.25 ± 0.12b	2.46 ± 0.04c	2.91 ± 0.20a	3.15 ± 0.05a	3.19 ± 0.21a	2.92 ± 0.05a

2.4 缓释复合肥对土壤酸碱性和有机质的影响

表 3 可知,缓释复合肥等肥料施入酸性土壤 10 d 后,SRF 较 CK 土壤 pH 值变化不大,且随着培养时间的增加,SRF 处理土壤 pH 值较稳定,而 CF 和 CCF 较 CK 降低酸性土壤 pH 值,且随着培养时间的增加而降低. SRF、CF 和 CCF 较 CK 降低微碱性土壤 pH 值,但 SRF 比 CF 和 CCF 对微碱性土壤 pH 值的影响较小,且没有随着时间的增加而降低. 从 2 种土壤中可知,缓释复合肥可能因缓慢释放养分而对土壤酸碱性的影响较小,尤其对酸性

土壤的影响作用明显. SRF 与 CF、CCF 和 CK 对培养 10d 的酸性土壤有机质含量的影响无显著差异,且随着培养时间的增加(30 ~ 90 d),SRF 较 CCF 显著增加土壤有机质含量. SRF 较 CK 对微碱性土壤有机质含量的影响无显著差异,甚至在培养 90d 时,SRF 较 CK 显著降低,缓释复合肥本身含有机质,当施入微碱性土壤后有机质含量并没有显著提高,可能是微碱性土壤较酸性土壤更适合微生物的生存,SRF 处理土壤有机质被大量微生物分解.

表 3 土壤 pH 和有机质

Table 3 The pH and organic matter in soil

测定项目	时间/d	酸性土壤				微碱性土壤			
		不施肥 (CK)	化肥 (CF)	普通复合肥 (CCF)	缓释复合肥 (SRF)	不施肥 (CK)	化肥 (CF)	普通复合肥 (CCF)	缓释复合肥 (SRF)
pH	10	5.0	4.7	4.7	5.1	7.8	7.5	7.6	7.8
	30	4.8	4.6	4.6	5.1	7.9	7.5	7.5	7.8
	60	4.6	4.3	4.2	5.1	7.9	7.6	7.6	7.8
	90	4.6	4.2	4.3	5.2	7.9	7.6	7.6	7.8
有机质 /g·kg ⁻¹	10	16.1 ± 0.15a	16.3 ± 0.13a	16.3 ± 0.76a	16.4 ± 0.38a	21.6 ± 0.15a	21.5 ± 0.33a	21.5 ± 0.31a	21.9 ± 0.00a
	30	16.5 ± 0.00a	16.4 ± 0.01a	16.1 ± 0.25b	16.4 ± 0.10a	22.0 ± 0.27a	21.5 ± 0.34b	20.7 ± 0.17c	21.7 ± 0.01ab
	60	16.1 ± 0.15b	16.3 ± 0.17ab	15.6 ± 0.01c	16.7 ± 0.38a	21.8 ± 0.70ab	22.2 ± 0.17a	20.9 ± 0.92b	22.3 ± 0.59a
	90	17.0 ± 0.27b	16.5 ± 0.27c	17.0 ± 0.28b	17.8 ± 0.21a	21.8 ± 0.36a	19.6 ± 0.22c	21.7 ± 0.24a	20.6 ± 0.50b

3 讨论

土壤微生物在土壤生态系统碳和养分循环以及

调节植物生产力和多样性中占有重要位置^[20],而土壤微生物的数量、组成与活性以及群落结构等会受土壤管理栽培模式、酸碱性和有机质、温度和化

学性质等的影响^[21]。土壤酸碱性能显著影响微生物的生长和功能,当土壤 pH 达到 4.5 时会限制微生物的恢复能力^[22]。本研究中 2 种土壤在培养 10 d 时以酸性土壤(pH 5.0)微生物 PLFA 种类和含量少于微碱性土壤(pH 7.9),可见酸性土壤微生物的恢复能力较弱。随着培养时间增加和肥料养分释放,酸性土壤微生物种类开始增加,与微碱性土壤几乎一致。缓释复合肥较化肥和普通复合肥对 2 种土壤微生物的影响较大,尤其是增加了酸性土壤微生物 PLFA 种类(可能基于酸性土壤 pH 值的提高),缓释复合肥对酸性土壤的微生物较化肥和普通复合肥有良好的改善作用,增加了土壤微生物 PLFA 种类,而化学肥料和普通复合肥降低了酸性土壤的 pH 值,使得微生物生存环境的酸碱性更加不适宜。在微碱性土壤中缓释复合肥与化肥和普通复合肥相比,对土壤酸碱性的影响差异较小。一般认为,土壤微生物生存的适宜酸碱性是在微酸性至微碱性的范围,酸性特别是强酸性土壤是不利于微生物的生存,应该与微碱性土壤微生物 PLFA 种类和含量相差较大,但总体上看 2 种土壤随着培养时间的增加微生物种类几乎一致,相比较酸性土壤,微碱性土壤微生物种类应该较多,但 2 种土壤在室内恒温培养后检测到的 PLFA 种类不是很多。可能原因是室内恒温培养的局限性导致微碱性土壤微生物生长受到一定的抑制而不能正常发展。即便如此,不同肥料处理对土壤微生物的影响是有差异的,缓释复合肥处理不仅提高了酸性土壤的 pH 值,而且较化肥和普通复合肥向 2 种土壤中提供了多种形态氮素,对 2 种土壤微生物 PLFA 种类和含量,群落分布的影响是有明显差异的。

缓释复合肥较化肥含有多种氮素形态,有可直接被利用的速效氮(铵态氮和硝态氮),还具有缓释效果的有机氮形态,需要转化才能被植物利用^[23],同时缓释复合肥还采用了缓释技术,氮素养分释放缓慢且时间较长。有研究指出不同形态的氮肥混合施用提高了土壤微生物活性,改善了土壤微生物区系,也增加了土壤中有益微生物放线菌的数量^[24]。普通复合肥和缓释复合肥均具有缓释效果,但缓释复合肥较普通复合肥还含有机质。土壤微生物是土壤有机质和土壤养分转化和循环的动力,有利于土壤肥力的提高^[25,26],而有机质分解后会有小部分供给土壤微生物的营养需求,又会影响土壤微生物的活性和多样性等^[27]。有研究指出,氮磷钾与有机肥配合施用能明显提高土壤各养分含量,增加土壤微

生物的数量,创造有利于土壤微生物生长繁育的土壤生物化学环境^[28];在秸秆还田时配施适量氮磷钾肥能更好地刺激微生物生长,原因在于这种有机和无机肥配合方式既为微生物生长和繁殖提供大量的碳源和能源,又为微生物的生长提供较多的氮源^[29]。缓释复合肥不仅含有多种形态的氮素而且富含有机质,其中以优质有机物料菜籽粕等为基础转化的有机质可能对土壤微生物具有选择和富集作用,这种作用有益于淘汰不良种群,促进优良菌株的生长繁殖^[30]。在本研究中,缓释复合肥处理较化肥和普通复合肥提高了酸性土壤 PLFA 种类和含量以及微碱性土壤各微生物群落的 PLFA 含量,在土壤微生物的环境胁迫中以缓释复合肥处理的影响较小。

4 结论

缓释复合肥、化肥和普通复合肥施入 2 种不同酸碱性土壤恒温培养后检测出的微生物群落包含细菌、放线菌和真菌,在 2 种土壤中共检测到 18 种特征脂肪酸,其中有 15 种细菌,2 种放线菌(10Me17:0 和 10Me18:0)和 1 种真菌(18:1w9c)。缓释复合肥较化肥和普通复合肥增加酸性土壤 PLFA 种类和微碱性土壤各微生物群落的 PLFA 含量。从土壤微生物相对丰度可知缓释复合肥减弱了对 2 种土壤尤其是酸性土壤微生物的胁迫。化肥和普通复合肥降低 2 种土壤的 pH 值,而缓释复合肥的影响较小。缓释复合肥中的有机质可能为微生物生长和繁殖提供大量的碳源和能源,其缓慢释放养分对土壤微生物生存环境的影响较小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 郁培义,朱凡,宿少锋,等.氮素添加对樟树林红壤微生物的影响[J].环境科学,2013,34(8):3231-3237.
- [3] Zhang Q C, Imran H S, Xu D T, *et al.* Chemical fertilizer and organic manure inputs in soil exhibit a vice versa pattern of microbial community structure[J]. Applied Soil Ecology, 2012, 57: 1-8.
- [4] Song X H, Xie K, Zhao H B, *et al.* Effects of different organic fertilizers on tree growth, yield, fruit quality, and soil microorganisms in a pear orchard [J]. European Journal of Horticultural Science, 2012, 77(5): 204-210.
- [5] Ding X L, Han X Z. Effects of long-term fertilization on contents and distribution of microbial residues within aggregate structures of a clay soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(3): 549-554.

- [6] 徐华勤, 肖润林, 邹冬生, 等. 长期施肥对茶园土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(8): 3355-3361.
- [7] Dong Y, Wang Z Y. Release characteristics of different N forms in an uncoated slow/controlled release compound fertilizer[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, **6**(3): 330-337.
- [8] Du C Y, Duan Z Y, Lu Y, *et al.* Effect of slow and controlled release fertilizers on the yield and nutrient use efficiency of hot pepper in Qiu-bei [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2011, **12**(5): 761-764.
- [9] 胡小凤, 王正银, 孙倩倩, 等. 缓释复合肥料在不同 pH 值紫色土中氨挥发特性[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(6): 100-103.
- [10] 王正银, 叶学见, 叶进, 等. 绿色控释多养分肥料生产方法[P]. 中国专利: CNC05G3/08, 2005-01-05.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 146-196, 302-473.
- [12] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, **37**(8): 911-917.
- [13] Makoto K, Susumu A. Comparison of community structures of microbiota at main habitats in rice field ecosystems based on phospholipid fatty acid analysis [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2006, **43**(1): 20-29.
- [14] Djukic I, Franz Z, Mentler A, *et al.* Microbial community composition and activity in different Alpine vegetation zones[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(2): 155-161.
- [15] Frostegård A, Bååth E, Tunlid A. Shifts in the structure of soil microbial communities in limed forests as revealed by phospholipid fatty acid analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**(6): 723-730.
- [16] 胡小凤, 李文一, 王正银. 缓释复合肥料对酸性菜园土壤微生物数量特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1594-1601.
- [17] Stark-Christine H E, Condon L M, Maureen O C, *et al.* Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and short-term nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(6): 1352-1363.
- [18] de Vries F T, Hoffland E, Eekeren N V, *et al.* Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen Management [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(8): 2092-2100.
- [19] 吴愉萍. 基于磷脂脂肪酸(PLFA)分析技术的土壤微生物群落结构多样性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. 45-81.
- [20] 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.
- [21] 曾希柏, 王亚男, 王玉忠, 等. 不同施肥模式对设施菜地细菌群落结构及丰度的影响[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(1): 69-79.
- [22] Banks M L, Kennedy A C, Kremer R J, *et al.* Soil microbial community response to surfactants and herbicides in two soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, **74**: 12-20.
- [23] 胡小凤, 苏胜齐, 王正银. 缓释复合肥料氮素养分形态初步研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, **30**(3): 90-95.
- [24] 张雪, 刘守伟, 吴凤芝, 等. 不同氮素形态对黄瓜根区土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 中国蔬菜, 2014, (3): 19-25.
- [25] 刘方春, 邢尚军, 马海林, 等. 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(3): 642-649.
- [26] Karen B, Dignac M F, Cornelia R, *et al.* Soil microbial diversity affects soil organic matter decomposition in a silty grassland soil [J]. *Biogeochemistry*, 2013, **114**(1-3): 201-212.
- [27] Kiikkilä O, Sanna K, Veikko K, *et al.* Soil microbial activity in relation to dissolved organic matter properties under different tree species[J]. *Plant and Soil*, 2014, **377**(1-2): 169-177.
- [28] 孙瑞莲, 朱鲁生, 赵秉强, 等. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(10): 1907-1910.
- [29] 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(17): 5210-5218.
- [30] 陈尧, 郑华, 石俊雄, 等. 施用化肥和菜籽粕对烤烟根际微生物的影响[J]. 土壤学报, 2012, **49**(1): 198-203.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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

国内外公开发行