ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 36 卷 第 9 期
2015 年 9 月 15 日

目 次

长江三角洲 $PM_{2.5}$ 质量浓度遥感估算与时空分布特征 …… 徐建辉,江洪(3119)
宁波市 $PM_{2.5}$ 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 …… 杜博涵,黄晓锋,何凌燕,胡敏,王川,任宇超,应红梅,周军,汪伟峰,许丹丹(3128)
青岛大气中酸碱气体及 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 …… 周佳佳,石金辉,李丽平,姚小红,高会旺(3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 …… 胡凌飞,张柯,王洪宝,李娜,王洁,杨文慧,殷喆,焦周光,温占波,李劲松(3144)
2015 年春节北京市空气质量分析 …… 程念亮,陈添,张大伟,李云婷,孙峰,魏强,刘嘉林,刘保献,孙瑞雯(3150)
上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系 …… 王红丽(3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 …… 陈东之,缪孝平,欧阳杜娟,叶杰旭,陈建孟(3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 …… 郭宇龙,李云梅,李渊,吕恒,刘阁,王旭东,张思敏(3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 …… 叶琳琳,吴晓东,刘波,闫德智,张玫琪,周阳(3186)
河北洨河溶解性有机物光谱学特性 …… 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰(3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征 …… 吴海燕,傅世锋,蔡晓琼,汤坤贤,曹超,陈庆辉,梁修雨(3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 …… 梁作兵,孙玉川,王尊波,师阳,江泽利,张媚,谢正兰,廖昱(3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}C_{DIC}$ 的影响 …… 黄奇波,覃小群,刘朋雨,张连凯,苏春田(3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 …… 张艳,吴勇,杨军,孙厚云(3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 …… 陈聪聪,饶拉,黄金良,白敏冬(3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 …… 胡珍珍,崔益斌,李梅,余静(3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 …… 杨秋婵,赵玲,尹平河,谭烁,舒万姣,侯少玲(3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 …… 李怀正,陈珂莉,危忠,王卫刚(3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 …… 李敦柱,管运涛, 刘安, 李思远(3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 …… 张民盛,徐斌,张天阳,程拓,夏圣骥,楚文海(3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 …… 刘海龙,郭雪峰,王敏慧,焦茹媛,石健(3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 …… 吴悦,吴纯德,刘吕刚,袁博杰(3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 …… 王莹,许丽英,王少锋,肖翻,贾永锋(3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 …… 申洋洋,刘锐,徐灿灿,舒小铭,许江军,兰亚琼,陈吕军(3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 …… 覃彩霞,佟娟,申佩弘,魏源送(3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 …… 税勇,川岸朋树,宋小燕,刘锐,陈吕军(3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 …… 孔晓,崔丙健,金德才,吴尚华,杨波,邓晔,庄国强,庄绪亮(3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 …… 张岩,孙凤侠,谢杭冀,陈敬,眭稀,甘志明,王修平,史扬(3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 …… 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶(3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 …… 刘小朋,王建芳,钱飞跃,王琰,陈重军,沈耀良(3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究:以长江中下游地区夏玉米季为例 …… 桑蒙蒙,范会,姜珊珊,蒋静艳(3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 …… 傅志强,龙攀,刘依依,钟娟,龙文飞(3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N_2、N_2O、NO、CO_2 和 CH_4 排放特征 …… 曹娜,王睿,廖婷婷,陈诺,郑循华,姚志生,张海,Klaus Butterbach-Bahl(3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 …… 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪(3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 …… 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,赵世伟,张兴昌(3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 …… 倪银霞,黄懿梅,牛丹,赵彤,闫浩,蒋跃利(3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 …… 胡宁, 马志敏,蓝家程,伍宇春,陈高起, 傅瓦利,文志林,王文净(3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点:以潜江市为例 …… 王玉竹,肖和艾,周萍,童成立,葛体达,曾冠军,吴金水(3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 …… 李睿,江长胜,郝庆菊(3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 …… 聂燕,王新,王博,许淑婧,高福元, 余晔,夏敦胜,夏昕鸣(3438)
电镀厂周边环境中重金属分布特征及人体健康暴露风险评价 …… 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钏(3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 …… 刘洁,李晓东,赵中华,祁志福,陈彤,严建华(3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 …… 赵炎,郑国灿,朱恒,张进忠,朱秀英,胡淑春,吴娅林(3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 …… 焦海华,崔丙健,吴尚华,白志辉,黄占斌(3471)
4 株外生菌根真菌对 Al^{3+} 吸收与吸附的研究 …… 王明霞,袁玲,黄建国,周志峰(3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 …… 于锐,刘景双,王其存,刘强,王洋(3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 …… 宋立娜,王磊,夏孟婧,苏月,李振山(3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 …… 吕文洲,乔宇祥,余宁,史荣华,王光明(3501)
V_2O_5-WO_3/TiO_2 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 …… 任咏,纪莎莎,俞明锋,李晓东,严建华(3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 …… 林晓丹,田良,吕彬,杨建新(3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 …… 江梅,邹兰,李晓倩,车飞,赵国华,李刚,张国宁(3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 …… 司友斌,王娟(3533)
《环境科学》征订启事(3297) 《环境科学》征稿简则(3303) 信息(3127, 3202, 3277, 3318)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响

焦海华[1,2],崔丙健[2],吴尚华[2],白志辉[2*],黄占斌[3*]

(1. 长治学院生物科学与技术系,长治 046011; 2. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085; 3. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)

摘要: 以石油污染盐碱土壤为研究对象,利用磷脂脂肪酸(PLFAs)活性微生物标记法,分析紫茉莉(*Mirabilis jalapa* Linn.)根际土壤微生物群落结构的动态变化,探讨紫茉莉生长对根际土壤微生物与石油烃(TPH)降解的影响. 结果表明,供试土壤中先后出现了 22 种微生物 PLFAs,包括标识细菌的饱和脂肪酸(SAT)、标识革兰氏阳性菌(G^+)的末端支链型饱和脂肪酸(TBSAT)、标识革兰氏阴性菌(G^-)的单不饱和脂肪酸(MONO)和环丙脂肪酸(CYCLO)、标识真菌的多不饱和脂肪酸(PUFA)和标识放线菌的中间型支链型饱和脂肪酸(MBSAT)等六大类型. 与未种紫茉莉土壤(CK)相比,根际土壤微生物 PLFAs 种类变异率在春、夏、秋季分别为 71.4%、69.2% 和 33.3%; TPH 降解率在春、夏、秋季分别提高了 47.6%、28.3%、18.9%. 相关性分析表明,石油烃的降解在 CK 土壤中与 77.8% 的 PLFAs 具有正相关关系($r>0$),55.6% 的种类具有高度正相关关系($r\geq 0.8$),其中,与 SAT 和 MONO 类群的相对含量正相关,相关系数分别为 0.92、0.60; 根际土壤中仅与 42.1% 的 PLFAs 正相关,21.1% 的种类高度正相关,与 TBSAT、MONO 和 CYCLO 类群的相对含量正相关,相关系数分别为 0.56、0.50、0.07. 说明紫茉莉生长对根际土壤微生物群落结构及 TPH 降解速率均具有较大影响,且随生长季节的不同而有很大差异. 该结果将为开展石油污染盐碱土壤的植物修复技术研究提供理论依据.

关键词:石油污染盐碱土壤; 石油烃; 微生物群落; 磷脂脂肪酸; 紫茉莉

中图分类号: X172; X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)09-3471-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.09.044

Influence of *Mirabilis jalapa* Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil

JIAO Hai-hua[1,2], CUI Bing-jian[2], WU Shang-hua[2], BAI Zhi-hui[2*], HUANG Zhan-bin[3*]

(1. Department of Biological Sciences and Technology, Changzhi University, Changzhi 046011, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the effect of *Mirabilis jalapa* Linn. growth on the structure characteristics of the microbial community and the degradation of petroleum hydrocarbon (TPH) in the petroleum-contaminated saline-alkali soil, Microbial biomass and species in the rhizosphere soils of *Mirabilis jalapa* Linn. in the contaminated saline soil were studied with the technology of phospholipid fatty acids (PLFAs) analysis. The results showed that comparing to CK soils without *Mirabilis jalapa* Linn., the ratio of PLFAs species varied were 71.4%, 69.2% and 33.3% in the spring, summer and autumn season, respectively. In addition, there was distinct difference of the biomasses of the microbial community between the CK and rhizosphere soils and among the difference seasons of growth of *Mirabilis jalapa* Linn.. Compare to CK soil, the degradation rates of total petroleum hydrocarbon (TPH) was increased by 47.6%, 28.3%, and 18.9% in spring, summer, and autumn rhizosphere soils, respectively. Correlation analysis was used to determine the correlation between TPH degradation and the soil microbial community. 77.8% of the total soil microbial PLFAs species showed positive correlation to the TPH degradation (the correlation coefficient $r > 0$), among which, 55.6% of PLFAs species showed high positive correlation (the correlation coefficient was $r\geq 0.8$). In addition, the relative content of SAT and MONO had high correlation with TPH degradation in the CK sample soils, the correlation coefficient were 0.92 and 0.60 respectively; However, the percent of positive correlation was 42.1% in the rhizosphere soils with 21.1% of them had high positive correlation. The relative content of TBSAT, MONO and CYCLO had moderate or low correlation in rhizosphere soils, and the correlation coefficient were 0.56, 0.50, and 0.07 respectively. Our study showed that the growth of mirabilis *Mirabilis jalapa* Linn. had a higher influence on the species and biomass of

收稿日期: 2015-03-23; **修订日期**: 2015-05-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA06A205); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07204-005); 中国科学院环境生物技术重点实验室开放基金项目(EBT2013A001)

作者简介: 焦海华(1968~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为污染土壤生物修复技术, E-mail:jiaohaihua68@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhbai@rcees.ac.cn; zhanbinhuang2003@163.com

microbial community in the rhizosphere soils, and the results will provide a basis theory for the research of phytoremediation petroleum contaminated saline soil.

Key words: petroleum-contaminated saline-alkali soil; petroleum hydrocarbon; microbial communities; phospholipid fatty acids (PLFAs); *Mirabilis jalapa* Linn.

土壤微生物常被比拟为土壤养分循环的“转化器”、污染物的“净化器”和生态系统稳定的“调节器”. 在维持生态系统的稳定以及受损生态系统的恢复与重建过程中发挥重要作用. 研究报道的土壤中能降解烃类污染物的微生物有 70 个属,200 多个种[1]. 同时,许多研究表明[2,3],植物生长可以增加根际土壤微生物的密度、提高其对污染物的降解作用,且根际土壤微生物群落结构及其降解功能受植物类型的影响.

紫茉莉(*Mirabilis jalapa* Linn.)是紫茉莉科(Nyctaginaceae)紫茉莉属(*Mirabilis* Linn.)一年生草本植物[4]. 生态适应性广,生长快速,对不良环境具有较强的耐受性,如抗氯气[5]、耐盐性[6]和富集镉[7]. 近年来,有许多关于其在金属污染土壤修复中的应用报道[8,9],但在石油污染盐碱土壤修复中的应用研究还较少.

磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acid, PLFA)分析方法是基于 PLFAs 发展起来的现代生物化学技术,已被广泛应用于探讨时空变化、污染物对土壤微生物群落结构的影响[10]. 本研究采用 PLFAs 分析方法,解析紫茉莉生长对石油污染盐碱土壤微生态环境的影响,揭示根际土壤微生物的变化对石油烃降解作用的影响,以期为石油污染土壤的生物修复技术研究和植物资源的开发利用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验设计与土壤样品采集

实验土壤类型为取自油田区典型的盐碱性土壤. 土壤石油烃含量为(6.3 ±0.3) g·kg^{-1}、总碳为(3.5 ±0.5) g·kg^{-1}、总氮为(0.5 ±0.2) g·kg^{-1}、有效磷(26.9 ±0.6) g·kg^{-1}、有效钾(8.2 ±0.3) g·kg^{-1}、pH 为 8.8 ±0.7、电导率(EC)为 1 387 μS·cm^{-1}. 本实验通过盆栽紫茉莉完成,盆径 20 cm ×25 cm,共 30 盆,其中 10 盆为未种植紫茉莉的对照(CK). 2013 年 3 月移栽具有 1 ~2 片真叶的种苗,每盆栽种 2 株. 整个实验期,采用自然光源,温度模拟自然温度在 15 ~38℃之间,湿度保持 50% ~60%. 于 2013 年 3 ~11 月在紫茉莉根区周围(0 ~20) cm 用打孔器采集土样,每月中旬取样、每次取 40 个(每盆 2 个)根际土样,然后去除石块、动植物残体等杂质混合成一个样品,用四分法取需用量的土样,装入密封袋运回实验室,置于 -20℃冰箱保存并尽快进行微生物 PLFAs 提取与 TPH 含量分析. PLFAs 分析采用鲜土,TPH 分析采用冷冻干燥后研磨过 100 目金属筛的干燥土壤. 3 ~5 月采样记为春季样品,6 ~8 月记为夏季样品,9 ~11 月记为秋季样品.

1.2 土壤理化性质与石油烃含量测定

土壤中总碳、总氮含量采用元素分析仪(Vario Toc, Germany)测定; pH 采用水土比 5∶1的混合液,pH 计(pHs-3C)测定; 采用电导仪(DDS-11A)测定电导率; 采用钼锑抗比色法测定有效磷[11]. 根据文献[12]方法测定土壤总石油烃含量.

1.3 土壤微生物 PLFAs 测定

参照 Bligh 等[13]的方法提取 PLFAs,采用内标法,以十九烷酸甲酯(C19:0)作为内标物,用气相色谱-质谱分析(GC-MS)测定土壤微生物 PLFAs 的含量. 定性分析用计算机自动检索质谱图库的方法; 定量分析采用总离子流各峰面积归一化,各种脂肪酸甲酯的含量采用不同脂肪酸峰面积/内标物(C19:0)峰面积的比值计算.

1.4 磷脂脂肪酸的命名原则

磷脂脂肪酸的命名采用“ω”系统,分子通式记为:(i/a/me/cy)X:YωZ(c/t),其中,前缀“i”/“a”/“me”代表甲基支链的位置. “i”代表在距离分子链末端第二个碳原子上; “a”代表甲基在距离分子链末端第 3 个碳原子上; “me”代表甲基支链的位置在脂肪酸分子链中间的碳原子上,其前面的数字如“10 me”代表甲基在距离始端第 10 个碳原子上; “cy”代表分子中的环丙基结构; X 代表脂肪酸碳原子的个数; Y 代表分子中双键的个数; ω 代表双键; Z 代表双键的位置(距离分子末端碳原子的个数); 后缀“c”或“t”分别代表分子的顺、反式结构[14~16].

1.5 数据分析

PLFAs 种类变异率(%)计算公式:

$$\text{PLFAs 种类变异率} = \frac{\text{不相同的 PLFAs 种类个数}}{\text{PLFAs 种类总数}}$$

PLFAs 的测定结果利用 NEST 5.0 图谱库进行分析; 利用 SPSS 17.0 软件进行相关数据处理与分析.

2　结果与分析

2.1　土壤微生物 PLFAs 指纹图谱

将提取的土壤微生物 PLFAs 样品用 GC-MS 分析. 以紫茉莉秋季根际土壤样品所提取的微生物 PFLAs 分析得到的气相色谱-质谱图为例(图 1),其中,纵坐标表示各种 PLFAs 的峰值,横坐标代表特征峰出现的时间.

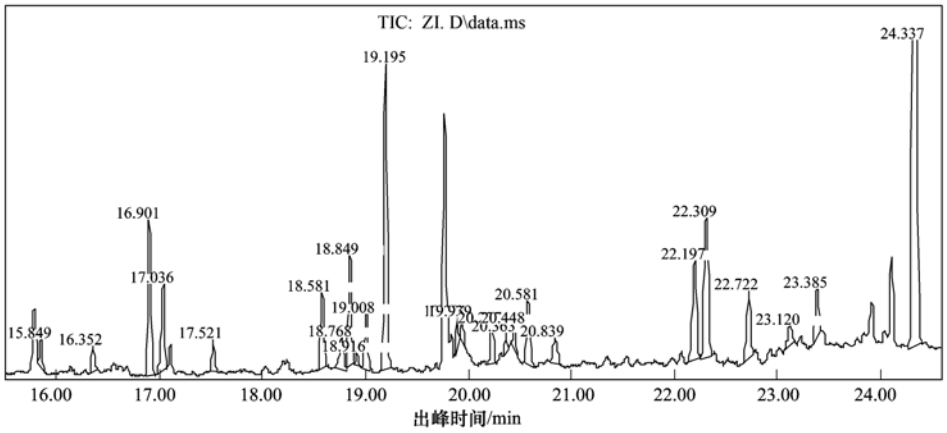


图 1　紫茉莉秋季根际土壤样品微生物磷脂脂肪酸气相色谱图

Fig. 1　Chromatogram profiles of phospholipids fatty acids of microbial community in *Mirabilis jalapa* soil sample in autumn

将谱图信息转化成数据形式(表 1). 根据分子结构可分为 6 种类型. 第 1 类,饱和脂肪酸类型(SAT)如 C14:0、C15:0、C16:0、C17:0、C18:0 标识细菌[17]; 第 2 类,甲基支链在分子末端的饱和脂肪酸类型(TBSAT)如 i13:0、i15:0、i16:0、a14:0、a16:0 等标识革兰氏阳性细菌(G^+)[18]; 第 3 类,甲基支链在中间碳原子位置的饱和脂肪酸类型(MBSAT),如 9Me14:0、9Me16:0、10Me18:0 等,如 10Me18:0 是典型的放线菌标识 PLFAs[19]. 第 4 类,单不饱和脂肪酸类型(MONO)如 16:1ω5、16:1ω7t、18:1ω7c、18:1ω9c、18:1ω9t 标识革兰氏阴性细菌(G^-)[20]; 第 5 类,具有环丙基的脂肪酸类型(CYCLO),如 cy16:0、cy18:0 标识存在环境营养或污染胁迫; 第 6 类,多不饱和脂肪酸(PUFA), 如 18:2ω6,9 典型真菌标识类型[21,22].

2.2　紫茉莉根际土壤微生物群落结构的变化

2.2.1　微生物 PLFAs 类型与分布特征

从表 1 可知,整个生长期,土壤中共检测到 22 种 PLFAs,其中,紫茉莉根际土壤中共检测到 19 种,没植物的 CK 土壤 17 种,相比较微生物 PLFAs 总的种类数增加 11.8%. 紫茉莉根际土壤在春、夏、秋季分别检测到 12 种、9 种和 15 种,CK 土壤分别为 6 种、8 种和 16 种. 相比较,春季根际土壤微生物 PLFAs 种类数增加 50%,夏季和秋季没有明显($P > 0.5$)增加,但根际土壤微生物 PLFAs 种类的变异率在春、夏、秋季分别为 71.4%、69.2% 和 33.3%.

春季 CK 土壤的优势类群为 TBSAT(58.0%)和 MBSAT(21.4%),而根际土壤的优势类群为 TBSAT(48.5%)和 MONO(38.3%); 夏季 CK 土壤中 MONO(37.1%)和 TBSAT(32.4%)是典型的优势类群, 而根际土壤中 SAT(45.9%)和 MBSAT(21.8%)是优势类群,第一、第二优势类群均不相同; 秋季 CK 土壤的优势类群分别为 SAT(38.4%)、MONO(32.5%),根际土壤的优势类群分别为 TBSAT(37.4%)、MONO(30.0%)第一优势类群发生了改变. 真菌和细菌的相对多度比在春、秋季节根际大于对照, 这表明,紫茉莉根际土壤微生物群落结构与 CK 有较大的差异.

2.2.2　土壤微生物 PLFAs 的主成分分析

对不同生长期土壤微生物 PLFAs 的生物量进行主成分分析(PCA). 提取 PLFAs 主成分的特征根及方差贡献率,以方差贡献率最高的主成分 1(PC1, 40.9%) 和主成分 2(PC2,26.1%)作图(图 2),进行微生物群落多样性分析.

图 2 表明,对 PC1 贡献率较大的 PLFAs 类型主要有 a14:0、a16:0、cy18:0、cy16:0、18:1ω9c、i16:1ω5、16:1ω7t、i15:0、i16:0、i13:0、C14:0、C18:0、C15:0、9me14:0 解释变量的 40.9%; 对第 2 主成分贡献率比较大的 PLFAs 类型有 18:1ω9t、18:1ω7c、10me18:0、9me16:0、C16:0、C17:0、n16:0 解释变量的 26.1%. 其中,春季 CK 与根际微生物群落种类的差异主要表现在 PC1,如 cy18:0、cy16:0 和 a14:0、a16:0、i16:0、i16:0、i15:0、18:1ω9c; 夏、秋季,CK 与根际土壤微生物群落种

表 1 紫茉莉不同生长期土壤微生物 PLFA 的动态变化/nmol·g^{-1}

Table 1 Dynamic changes of the concentration of the PLFAs in soils during in the *Mirabilis jalapa* growth/nmol·g^{-1}

序号	PLFAs 类型	春季		夏季		秋季	
		CK	根际	CK	根际	CK	根际
1	c14:0	0	0	0	0	0.469	2.59
2	c15:0	0	0	0.603	0	0.371	0.525
3	c16:0	0.0643	0.457	0	2.05	4.94	0
4	c17:0	0	0	0	0	0.533	0.469
5	c18:0	0	1.24	0	0.136	1.89	1.09
6	n16:0	0	0	0	0	0.400	0.423
7	i13:0	0	0.661	0	0	1.28	2.05
9	i15:0	0.237	5.81	4.12	0.0749	0.711	1.13
9	i16:0	0	0	0	0	0	0.322
10	a14:0	0	3.74	0	0.412	0	0.438
11	a16:0	0.250	1.46	1.29	0.350	1.17	5.45
12	i16:1ω5	0	0.275	0	0	0	0
13	16:1ω7t	0.0936	5.34	0	0.341	3.55	2.98
14	18:1ω7c	0	0	0	0	2.25	0
15	18:1ω9c	0	3.79	2.63	0.185	1.48	4.55
16	18:1ω9t	0.0153	0	3.58	0	0	0
17	18:2ω6,9	0	0.158	1.34	0	0.725	0.994
18	cy16:0	0	0	0.488	0.182	0	1.38
19	cy18:0	0	1.28	0	0	0	0
20	9me14:0	0	0.393	0	1.04	0.20	0
21	9me16:0	0.180	0	0	0	1.91	0
22	10me18:0	0	0	2.67	0	0.551	0.678
磷脂脂肪酸总量 ($\sum$PLFAs)/nmol·g^{-1}		0.840	24.6	16.7	4.77	22.4	25.1
磷脂脂肪酸种类(种)		6	12	8	9	16	15
饱和脂肪酸 SAT/%		7.65	6.88	3.60	45.9	38.4	20.3
末端支链型饱和脂肪酸 TBSAT/%		58.0	48.5	32.4	17.5	14.1	37.5
单不饱和脂肪酸 MONO/%		13.0	38.3	37.1	11.0	32.5	30.1
多不饱和脂肪酸 PUFA/%		0	0.642	8.02	0	3.23	3.97
环丙脂肪酸 CYCLO/%		0	5.20	2.92	3.81	0	5.49
中间支链型饱和脂肪酸 MBSAT/%		21.4	1.60	16.0	21.8	11.9	2.71
CYCLO/MONO		0	0.135	0.078 5	0.347	0	0.183
真菌/细菌		0.024	0.208	1.26	0.054 8	0.125	0.317

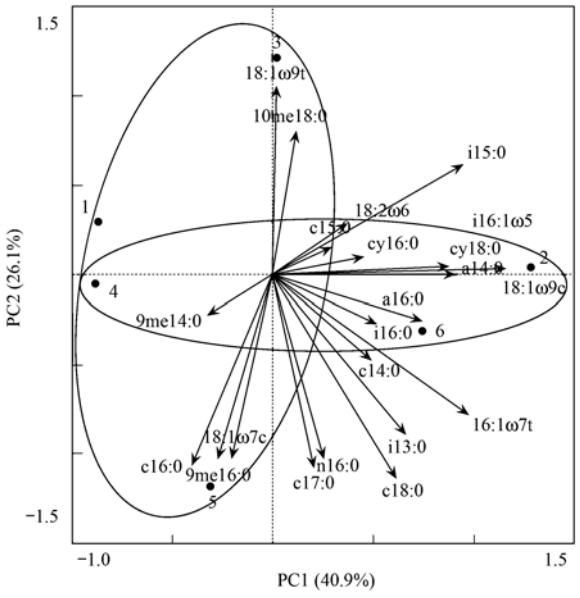
类的差异在 PC1、PC2 上均有体现. 表明紫茉莉生长对根际土壤微生物群落结构有较大的影响.

2.2.3 土壤微生物量动态变化

以所有类型 PLFAs 的总和计算土壤微生物群落中活性微生物总的生物量; 以 SAT、TBSAT、MONO 和 CYCLO 的总量计算细菌的生物量; 以 PUFA 的量计算真菌生物量,以 MBSAT 的量计算放线菌生物量,结果可知:春、夏、秋季根际土壤活性微生物总的生物量分别为: 24.6、4.77、25.1 nmol·g^{-1}; CK 土壤总的生物量分别为: 0.840、16.7、22.3 nmol·g^{-1}. 不同微生物类群的生物量(如图 3),在根际土壤与 CK 土壤表现为不同的动态变化趋势. 根际土壤中,细菌表现为春季(20.3 nmol·g^{-1}) > 秋季(18.9 nmol·g^{-1}) > 夏季(3.55 nmol·g^{-1}); 真菌表现为秋季(5.55 nmol·g^{-1}) > 春季(3.95 nmol·g^{-1}) > 夏季(0.185 nmol·g^{-1}); 放线菌表现为夏季(1.04 nmol·g^{-1}) > 秋季(0.678 nmol·g^{-1}) > 春季(0.394 nmol·g^{-1}). CK 土壤中,细菌呈现秋季(17.6 nmol·g^{-1}) > 夏季(6.51 nmol·g^{-1}) > 春季(0.65 nmol·g^{-1}); 真菌表现为夏季(7.55 nmol·g^{-1}) > 秋季(2.21 nmol·g^{-1}) > 春季(0.015 3 nmol·g^{-1}); 放线菌呈现夏季(2.67 nmol·g^{-1}) > 秋季(2.66 nmol·g^{-1}) > 春季(0.180 nmol·g^{-1}). 与 CK 相比细菌、真菌表现为春季升高,夏季降低,秋季升高的波动趋势; 放线菌表现为春季增加,夏、秋季减少.

2.3 紫茉莉根际土壤 pH 和电导率(EC)的变化

紫茉莉根际土壤 pH 值与 CK 相比表现为较小差异($P > 0.05$)[图 4(a)]. 根际土壤分别为 8.63、9.15、8.02,表现为先升高后降低; CK 土



●1、3、5 分别表示春季、夏季、秋季没种植紫茉莉的对照组土壤样品，●2、4、6 表示该季节紫茉莉根际土壤样品

图 2　土壤微生物 PLFAs 的主成分分析(PCA)及因子分析

Fig. 2　PCA analysis of soil PLFAs and factors

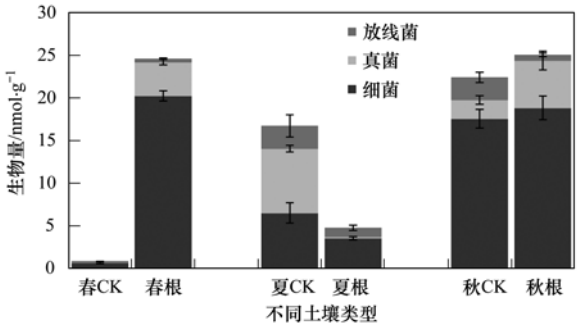


图 3　磷脂脂肪酸标识的活性土壤微生物量变化趋势

Fig. 3　Changes trend of activity microorganism biomass in sample soil

壤在春、夏和秋季分别为 9.43、9.49、8.46. 根际土壤 EC 值与 CK 相比表现为显著降低($P<0.05$)[图 4(b)]. 根际土壤 EC 值在春、夏、秋季分别为 796、187、133 $\mu S\cdot cm^{-1}$；CK 土壤分别为 1 387、1 361、925 $\mu S\cdot cm^{-1}$.

2.4　紫茉莉根际土壤石油烃降解率的变化

紫茉莉的生长对土壤石油烃的降解具有显著($P<0.05$)的促进作用(如图 5). CK 土壤石油烃的

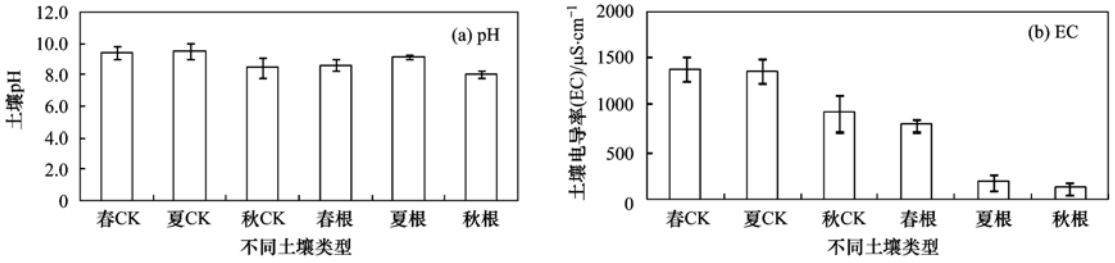


图 4　土壤中酸碱度(pH)和电导率(EC)的变化情况

Fig. 4　Change of pH and EC in sample soils

总降解率为 28.3%，其中，春季为 9.6%，夏季为 10.2%，秋季为 11.6%；紫茉莉根际土壤石油烃的总降解率为 81.7%，其中，春季、夏季、秋季的降解率分别为 57.2%、38.5%、30.6%.

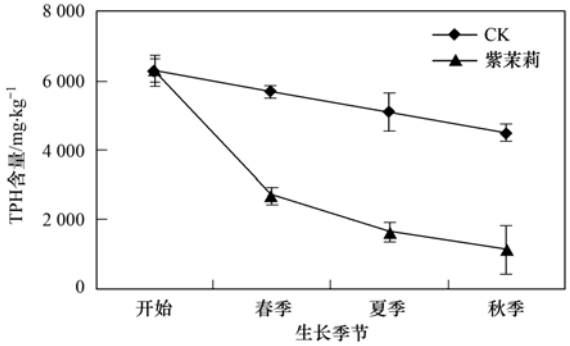


图 5　不同季节土壤中石油烃含量的变化情况

Fig. 5　Change of concentration of total petroleum Hydrocarbons (TPH) in soils during the different seasons

2.5　土壤微生物与石油烃降解的相关性分析

2.5.1　土壤石油烃降解与特征 PLFAs 的相关性分析

对土壤微生物 22 种特征 PLFAs 的相对含量与石油烃的降解率进行 Spearman 相关性分析(图 6). 当相关系数 $r>0$，表明特征 PLFAs 与 TPH 降解具有正相关关系，$r<0$ 表明具有负相关关系；$|r|\geq 0.8$ 表明具有高度相关性；$0.6\leq|r|<0.8$ 表明具有中等程度的相关性；$0.3\leq|r|<0.6$ 表明具有低度相关性；$|r|<0.3$ 表明几乎没有相关性. 由图 6 可知，CK 土壤中石油烃的降解与 77.8% 的 PLFAs 类型有正相关关系，其中有高度正相关关系(相关系 $|r|\geq 0.8$)的 PLFAs，包括 C14:0、C16:0、C17:0、C18:0、n16:0、i13:0、16:1ω7t、18:1ω7c、9me14:0、9me16:0；有中、低度正相关关系(相关系数 $0.3<|r|<0.8$)的特征 PLFAs，包括 c15:0、a16:0、18:1ω9c、18:2ω6,9；根际土壤中，

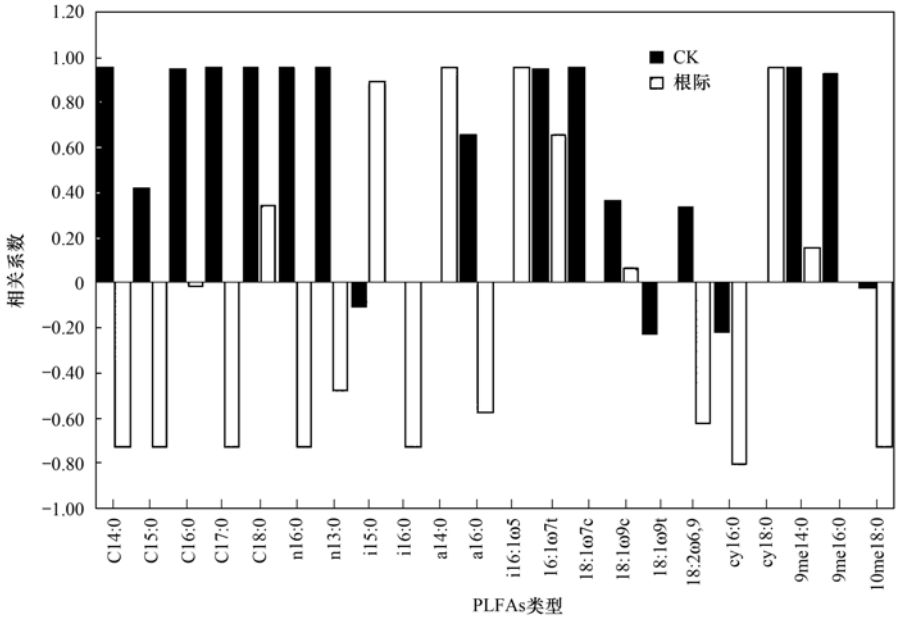


图 6 石油烃降解与土壤微生物特征性 PLFAs 相对含量的相关系数

Fig. 6 Spearman correlation coefficient of the ratio of total petroleum hydrocarbons(TPH) degradation to the relative content of microbial PLFAs

石油烃降解与 31.6% 的特征 PLFAs 有正相关关系，与 CK 相比减少了 46.1%. 正相关的 PLFAs 类型包括 i15:0、a14:0、cy18:0、i16:1ω5、16:1ω7t、C18:0，相关系数分别为 0.89、0.96、0.96、0.96、0.67、0.35. 结果表明 CK 土壤中石油烃的降解是多数土著微生物共同作用的结果，而根际土壤中石油烃降解是少数特征菌的作用.

2.5.2 土壤中石油烃降解与微生物生物量的相关性分析

对土壤石油烃降解和不同微生物类群 PLFAs 总生物量进行 Spearman 相关性分析，结果如图 7.

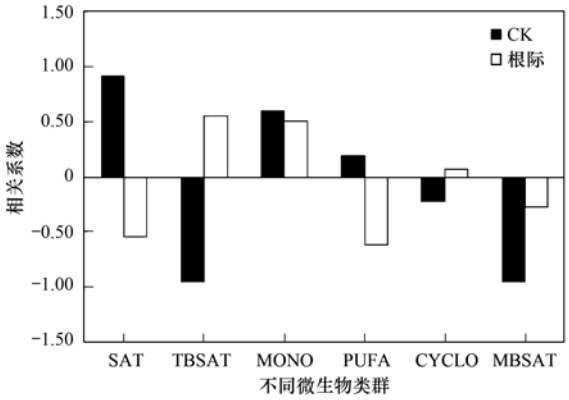


图 7 石油烃降解与不同土壤微生物类群生物量相对含量的相关性

Fig. 7 Spearman correlation coefficient of the degradation ratio of total petroleum hydrocarbons (TPH) to the biomass of different microorganism in the sample soils

由图 7 可知，CK 土壤中石油烃的降解与 SAT 标识的细菌生物量具有高度正相关关系，相关系数为 $r = 0.92$；与 MONO 标识的 G^- 菌生物量有中度正相关关系($r = 0.60$)；与 PUFA 标识的真菌生物量有低度正相关关系($r = 0.19$). 根际土壤中，只有中、低度正相关($0 < |r| < 0.8$)的微生物类群. 其中，与 TBSAT 标识的 G^+ ($r = 0.56$)、MONO($r = 0.50$)和 CYCLO 标识的 G^- ($r = 0.07$).

3 讨论

3.1 紫茉莉种植对石油污染盐碱土壤微生物群落结构的影响

紫茉莉根际土壤与 CK 相比较，微生物 PLFAs 种类变异率在 33.3% ~71.4% 之间，尤其是在春、夏生长旺盛季节，变异率均超过 60%. 根际土壤微生物生物量在 3 个生长季节表现为“升降波动”式变化，而 CK 土壤微生物生物量表现为逐渐增加的趋势. 根际土壤微生物生物量与 CK 相比，春季增加 28.3 倍，夏季降低 71.5%，秋季增加 10.8%. CYCLO/MONO 的比值均有所增大，尤其是夏季增加 77.1%. 土壤微生物的环丙磷脂脂肪酸(CYCLO)与其前体类型单不饱和磷脂酸(MONO)的比值(CYCLO/MONO)往往随着环境营养、污染等胁迫作用的大小而发生改变. 真菌/细菌的比值标识微生物群落中两种群的相对多度[23]. 真菌/细菌的比值在根际土壤中，春季和秋季均高于对照组，

但夏季没有检测到真菌 PLFAs，而 CK 土壤在春季没有检测到真菌 PLFAs. 真菌更易受到轻微改变的环境因子的影响[24]，因此，使其在不同生长期和根际土壤微生物群落中的变化较为复杂. 由于紫茉莉根系分泌物对根际微生物具有一定的积累性化感胁迫作用，同时，又由于微生物具有对环境变化的诱变适应能力. 因此，紫茉莉生长初期，根的分泌活动增加了土壤有机质含量，根际土壤微生物群落的种类和生物量均发生较大变化. 随着植物生长期的延长，分泌物在根际土壤中的积累量逐渐增加，根际分泌物的化感作用增强，引起敏感微生物类群的死亡，微生物种类与生物量均减少，表现为夏季明显降低. 由于微生物对环境具有适应性[25]，秋季土壤微生物群落种类和生物量均有所增加. 有研究认为植物根系分泌物[26]，一方面能为根际微生物提供养分，另一方面，某些成分能够作为信号分子调控根际微生物的行为，从而对根际土壤微生物群落结构与功能产生影响. 赵金莉等[27]研究发现，紫茉莉根际分泌物不断改变土壤养分的供求平衡，影响某些代谢酶的活性，从而影响到土壤养分的转化和根际土壤微生态的平衡. 同时，由于紫茉莉根系分泌物的化感作用，能够引起土壤细菌和放线菌数量明显减少. 其中，中等浓度的分泌物能促进真菌数量增加，低浓度和高浓度下均导致真菌量减少. 刘明久等[28]用生长速率法证明了紫茉莉浸提液能抑制桃软腐病菌菌丝生长. 王永飞[29]通过体外实验证明，紫茉莉根含有的蛋白成分，对金黄色葡萄球菌、痢疾杆菌和大肠杆菌具有抑制作用.

3.2　土壤微生物与石油烃降解的相关性

研究表明，紫茉莉根际土壤 TPH 降解率显著($P<0.05$)提高，且随生长期的不同而不同. 与 CK 相比，在春、夏、秋季分别提高 47.6%、28.3%、18.9%. 土壤石油烃降解与 21.1% 的根际土壤微生物 PLFAs 类型有高度正相关关系($r\geq0.8$)，与 CK 土壤相比减少 41.6%. 根际土壤与 TPH 降解正相关的微生物类群主要是 TBSAT 标识的 G^+ 和 MONO 标识的 G^-，而 CK 土壤主要是 SAT 标识的细菌和 PUFA 标识的真菌. Joynt 等[30]发现根际土壤 G^+ 菌增加，土壤中有机污染物转化速度明显加快. Liste 等[31]研究发现种植植物的土壤中，芘的移除率比对照组土壤提高 34%；Sicilian 等[32]经通过连续两年的植物修复作用研究发现，种植植物的污染土壤中 TPH 去除量是未种植植物的两倍. 随着紫茉莉生长期的延长，TPH 降解率降低的主要原因可归结为：①紫茉莉生长加速了土壤微生物对石油烃的代谢作用，土壤中容易降解的石油烃组分减少，而难降解组分的相对增多，增大了土壤微生物对 TPH 的代谢分解难度；②根际分泌物化感作用的增强，杀死或降低了敏感微生物类群的生长代谢活性；③根的呼吸、代谢与分泌活动对土壤微环境的影响，如根系分泌物能够提高土壤有机质含量，而降低土壤碱解氮、有效磷和钾的含量. 同时，根系代谢活动能够提高土壤蛋白酶活性，而降低土壤脲酶、碱性磷酸酶和纤维素酶活性[33]. 不同酶活性的变化，影响植物、土壤微生物对有机物或无机离子的代谢吸收或络合等生物和化学过程，使土壤环境 pH、EC 发生改变，从而影响微生物的代谢活动. 该结果与紫茉莉根际土壤微生物群落结构的变化具有一致性.

有研究认为紫茉莉对环境污染表现出一定的抗性[34~36]，能吸收土壤中的重金属离子，可作为污染土壤修复植物，但关于紫茉莉对盐碱土壤石油烃污染物作用的报道较少. 石油烃的降解是否与紫茉莉自身吸收、降解或富集等作用有关还有待今后进一步深入研究.

4　结论

（1）紫茉莉种植对根际土壤微生物群落种群和生物量均有较大影响. 与对照组土壤相比，紫茉莉生长的 3 个生长季节里 PLFAs 标识的微生物种类变异率均超过 30%；微生物生物量在不同生长季节有较大波动，春季增加 28.3 倍，夏季减少 71.5%，秋季增加 10.8%.

（2）紫茉莉种植能够加速根际土壤石油烃的降解，且在不同生长季节有显著差异($P<0.5$). 根际土壤石油烃的降解率，在春季为 57.2%，夏季为 38.5%，秋季为 30.6%；与 CK 相比，春季提高 47.6%，夏季提高 28.3%，秋季提高 18.9%.

参考文献：

[1] 丁克强，孙铁珩，李培军. 石油污染土壤的生物修复技术[J]. 生态学杂志，2000，**19**(2)：50-55.

[2] Feng Y，Motta A C，Reeves D W，*et al*. Soil microbial communities under conventional-till and no-tillcontinuous cotton systems[J]. Soil Biology & Biochemistry，2003，**35**(12)：1693-1703.

[3] Miya R K，Firestone M K. Phenanthrene degrader community dynamics in rhizosphere soil from a common annual grass[J]. Journal of Environmental Quality，2000，**29**(2)：584-592.

[4] 徐海根，强胜. 中国外来入侵物种编目[M]. 北京：中国环境科学出版社，2004. 126-128.

[5] 夏宗凤，董宝贤，龙爱敏. 园林植物对氯气污染的净化效应

[J]. 环境科学, 1985, **6**(4): 18-22.
[6] 许桂芳, 刘明久, 李雨雷. 紫茉莉入侵特性及其入侵风险评估[J]. 西北植物学报, 2008, **28**(4): 765-770.
[7] 吴双桃. 紫茉莉修复镉污染土壤的研究[J]. 污染防治技术, 2006, **19**(4): 17-18.
[8] 吴芸, 马加芳, 曹艳蓉, 等. 紫茉莉胚乳粉底的研制[J]. 大理学院学报, 2014, **13**(6): 99-100.
[9] 杨萌青, 李立明, 李川, 等. 石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 789-794.
[10] Kennedy A C, Smith K L. Soilmicrobial diversity index and the sustainability of agricultural soils [J]. Plant and Soil, 1995, l**70**(1): 75-86.
[11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学与技术出版社, 2000. 216-218.
[12] Riser-Roberts E. Remediation of petroleum contaminated soils: biological, physical, and chemical processes[M]. Boca Raton, London, New York, Washington, D C: Lewis Publishers, 1998. 212-216.
[13] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipids extraction and purification [J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 1959, **37**(8): 911-917.
[14] 焦海华, 刘颖, 金德才, 等. 牵牛花对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(12): 3350-3358.
[15] 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 MicroResp™ 方法[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 246-249.
[16] Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. Phospholipid fatty acid composition, biomass and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, **59**(11): 3605-3617.
[17] Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. Use and misuse of PLFA measurements in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(8): 1621-1625.
[18] Zogg G P, Zak D R, Ringelberg D B, *et al*. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, **61**(2): 475-481.
[19] Joergensen R G, Wichern F. Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, **40**(12): 2977-2991.
[20] Frostegård Å, 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] Guckert J B, Antworth C P, Nichols P D, *et al*. Phospholipid ester-linked fatty acid profiles as reproducible assays for changes in prokaryotic community structure of estuarine sediments [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1985, **31**(3): 147-158.
[22] Hamel C, Hanson K, Selles F, *et al*. Seasonal and long-term resource-related variations in soil microbial communities in wheat-based rotations of the Canadian prairie [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(8): 2104-2116.
[23] Meriles J M, Gil S V, Conforto C, *et al*. Soil microbial communities under different soybean cropping systems: Characterization of microbial population dynamics, soil microbial activity, microbial biomass, and fatty acid profiles[J]. Soil & Tillage Research, 2009, **103**(2): 271-281.
[24] Högberg M N. Discrepancies between ergosterol and the phospholipid fatty acid 18:2ω6,9 as biomarkers for fungi in boreal forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(12): 3431-3435.
[25] Kasel S, Bennett L T, Tibbits J. Land use influences soil fungal community composition across central Victoria, south-eastern Australia[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(7): 1724-1732.
[26] Carrera L M, Buyer J S, Vinyard B, *et al*. Effects of cover crops, compost, and manure amendments on soil microbial community structure in tomato production systems[J]. Applied Soil Ecology, 2007, **37**(3): 247-255.
[27] 赵金莉, 程春泉, 顾晓阳, 等. 入侵植物紫茉莉根系分泌物对土壤微生态环境的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2014, **42**(3): 95-99.
[28] 刘明久, 许桂芳. 三种入侵植物浸提液对桃软腐病菌菌丝生长的抑制作用[J]. 氨基酸和生物资源, 2008, **30**(2): 9-11.
[29] 王永飞. 紫茉莉的种植和利用[J]. 农业与技术, 2005, **25**(5): 83, 101.
[30] Joynt J, Bischoff M, Turco R, *et al*. Microbial community analysis of soils contaminated with lead, chromium and petroleum hydrocarbons[J]. Microbial Ecology, 2006, **51**(2): 209-219.
[31] Liste H H, Alexander M. Plant-promoted pyrene degradation in soil[J]. Chemosphere, 2000, **40**(1): 7-10.
[32] Sicilian S D, Germida J J, Banks K, *et al*. Changes in microbial community composition and function during a polyaromatic hydrocarbon phytoremediation field trial [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(1): 483-489.
[33] Strickland M S, Rousk J. Considering fungal: bacterial dominance in soils-methods, controls, and ecosystem implications [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(9): 1385-1395.
[34] 周启星, 刘家女. 一种利用紫茉莉花卉植物修复重金属污染土壤的方法[P]. 中国专利: CN 101049603, 2007-10-10.
[35] 陈杰. 2 种强化措施辅助紫茉莉修复镉污染土壤研究[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(24): 13205-13206.
[36] 薛生国, 朱锋, 叶晟, 等. 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究[J]. 生态学报, 2011, **31**(20): 6143-6148.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 9

Sep. 15, 2015

CONTENTS

Estimation of $PM_{2.5}$ Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations ····· XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)

Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in $PM_{2.5}$ in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon ····· DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, *et al.* (3128)

Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in $PM_{2.5}$ and Gas-Particle Partitioning in Qingdao ····· ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, *et al.* (3135)

Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing ····· HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, *et al.* (3144)

Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015 ····· CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, *et al.* (3150)

Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai ····· WANG Hong-li (3159)

Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter ····· CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, *et al.* (3168)

A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery ····· GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, *et al.* (3175)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu ····· YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, *et al.* (3186)

Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei ····· YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, *et al.* (3194)

Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island ····· WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, *et al.* (3203)

Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area ····· LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, *et al.* (3212)

Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}C_{DIC}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River ····· HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, *et al.* (3220)

Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City ····· ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, *et al.* (3230)

Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China ····· CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, *et al.* (3238)

Physiological Effect of *Vallisneria natans* Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol ····· HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, *et al.* (3248)

Effects of Algicidal Substance on *Phaeocystis globosa* and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment ····· YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, *et al.* (3255)

Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions ····· LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, *et al.* (3262)

Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts ····· LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, *et al.* (3269)

Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes ····· ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, *et al.* (3278)

Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results ····· LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, *et al.* (3285)

Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water ····· WU Yue, WU Chun-de, LIU Lü-gang, *et al.* (3292)

XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment ····· WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, *et al.* (3298)

AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries ····· SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, *et al.* (3304)

Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production ····· QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, *et al.* (3311)

A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater ····· SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, *et al.* (3319)

Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System ····· KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, *et al.* (3329)

Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community ····· ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, *et al.* (3339)

Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducting Anaerobic Ammonium Oxidation ····· LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, *et al.* (3345)

Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge ····· LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (3352)

Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An *In-situ* Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River ····· SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, *et al.* (3358)

Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH_4 and N_2O Emission from Double-Season Rice Paddy Field ····· FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, *et al.* (3365)

Characteristics of N_2, N_2O, NO, CO_2 and CH_4 Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil ····· CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, *et al.* (3373)

Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau ····· CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, *et al.* (3383)

Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region ····· GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, *et al.* (3393)

Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During *In-situ* Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia ····· NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, *et al.* (3401)

Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification ····· HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, *et al.* (3411)

Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jianghan Plain: A Case Study of Qianjiang City ····· WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, *et al.* (3422)

Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain ····· LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)

Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China ····· NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, *et al.* (3438)

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment ····· GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, *et al.* (3447)

Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil ····· LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, *et al.* (3457)

Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil ····· ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, *et al.* (3464)

Influence of *Mirabilis jalapa* Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil ····· JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, *et al.* (3471)

Al^{3+} Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi ····· WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, *et al.* (3479)

Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China ····· YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, *et al.* (3486)

Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing ····· SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, *et al.* (3493)

Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables ····· LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, *et al.* (3501)

Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V_2O_5-WO_3/TiO_2 Catalyst and Activated Carbon ····· REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, *et al.* (3508)

Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services ····· LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, *et al.* (3515)

Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China ····· JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, *et al.* (3522)

Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil ····· SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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 9 月 15 日　第 36 卷　第 9 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 9　Sep. 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