

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

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

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 郭芳, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中芘解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性

焦海华^{1,2,3}, 潘建刚⁴, 徐圣君³, 白志辉^{2*}, 王栋⁵, 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; 4. 内蒙古科技大学生物工程与技术研究所, 包头 014010; 5. 无锡中科活力生物技术有限公司, 宜兴 214200)

摘要: 为了减少多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)在作物体内的富集,降低食源性 PAHs 对人类的潜在风险,提高 PAHs 污染土壤的农用安全性,在受到 PAHs 污染的麦田中施用类球红细菌(*Rhodobacter sphaeroide*)菌剂(RS)进行原位修复. 以叶面喷施(B)和根部喷施(D) 50 倍稀释的 RS 两种方式处理,以喷施等量清水的处理为对照(A),不做任何处理的麦田为空白(CK),从小麦苗期开始处理,到小麦成熟期测定了土壤和小麦籽粒中 PAHs 含量以及根际土壤微生物群落结构的变化,探讨了施用 RS 对 PAHs 污染土壤的强化修复作用. 结果表明,施加 RS 的 B 区、D 区与空白(CK)区相比,标识土壤微生物的磷脂脂肪酸(PLFAs)种类均有 29.6% 变异率;土壤 PAHs 的去除率分别提高了 1.59 倍和 1.68 倍;富集因子分别降低了 58.9% 和 62.2%;50 穗小麦籽粒的干重分别提高了 8.95% 和 12.5%. RS 的施用改变了土壤微生物群落结构,活化了土壤微生物的代谢活性,从而加快了土壤 PAHs 的降解;同时,RS 的施用也降低了 PAHs 在小麦籽粒的富集量,提高了小麦的产量,显示出 RS 在提高 PAHs 污染土壤的农用安全性方面具有应用潜力.

关键词: 类球红细菌; 微生物菌剂; 多环芳烃; 污染土壤; 原位生物修复

中图分类号: X172; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3038-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.042

Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation

JIAO Hai-hua^{1,2,3}, PAN Jian-gang⁴, XU Sheng-jun³, BAI Zhi-hui^{2*}, WANG Dong⁵, 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; 4. Institute of Bioengineering & Technology, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 5. Wuxi Zhongkehuoli Biotechnology Co., Ltd., Yixing 214200, China)

Abstract: In order to reduce the risk of enrichment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in crops, reduce the potential hazards of food-sourced PAHs to human and increase the agricultural safety of PAHs contaminated soils, the bio-augmented removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) was investigated through in situ remediation by introducing *Rhodobacter sphaeroides* (RS) into the agricultural soil contaminated by PAHs. The 50-times diluted RS was sprayed on leaf surface (in area B) or irrigated to roots (in area D). The treatment of spraying water of the equal amount was taken as the control (A) and the wheat field without any treatment as the blank (CK). Treatments were conducted since wheat seeding. Soil and wheat samples were collected in the mature period to analyze the changes of community structure of the soil microorganisms and the concentration of PAHs in soils and investigate the strengthening and restoration effects of RS on PAHs contaminated soils. Compared to the CK area, the areas B and D revealed that the variation ratio of phospholipid fatty acids (PLFAs) that were the biomarker of soil microorganisms was 29.6%, and the ratio of total PAHs removed was increased 1.59 times and 1.68 times, respectively. The dry weight of wheat grain of 50 spikes was increased by 8.95% and 12.5%, respectively, and the enrichment factor of total PAHs was decreased by 58.9% and 62.2% respectively in the wheat grains. All the results suggested that RS reduced enrichment of PAHs in wheat grains and increased wheat yield, which had great exploitation and utilization potentiality in repairing and improving the agricultural safety of the soils contaminated with PHAs.

Key words: *Rhodobacter sphaeroides*; microbial agent; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); contaminated soil; in situ bioremediation

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是人类生产活动(包括石油生产、贮运、炼

收稿日期: 2014-07-04; 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); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-09-3); 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, 主要研究方向为环境污染生物修复技术, E-mail: jiaohaihua68@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhbai@cees.ac.cn; zhhuang2003@163.com

制加工及煤、木材、石油等化石燃料不完全燃烧)等过程中产生的一类持久性有机污染物^[1]。根据国际癌症研究协会(International Agency for Research on Cancer, IARC)已公布的致癌性化学物质名单,PAHs 是种类最多的一类致癌性物质^[2]。随着经济的发展,PAHs 引起的环境污染问题日益严重。土壤中的 PAHs 主要来源于大气的干湿沉降、地表径流以及废水灌溉等。其中,约 90% 的 PAHs 滞留在土壤耕作层^[3],通过挥发、吸附、氧化等物理化学行为影响植物生长,并能通过迁移、转化、浓缩等生物行为在植物体不同组织中富集,影响农产品的品质,最终通过食物链进入人体危害人体健康^[4,5]。罗晓栋等^[6]报道了多种蔬菜体内 PAHs 含量均高于污染土壤中含量,焦杏春等^[7]报道水稻对多环芳烃具有吸附积累作用。Wang 等^[8]分析了洋葱、甜菜、西红柿及其生长土壤中 PAHs 含量,发现 PAHs 在蔬菜皮中具有较高的富集量。潘勇军等^[9]研究发现,樟树各器官中 PAHs 的含量依次为:树皮 > 籽实 > 树根 > 树枝 > 树叶 > 树干。由于土地资源的缺乏,目前,全球范围内仍有大面积受 PAHs 中、低度污染的土地用作农田栽培粮食与蔬菜作物^[10,11],因此,开展提高此类污染土壤农用安全性技术研究具有重要的应用与开发价值。

类球红细菌(*Rhodobacter sphaeroides*, RS)是一类光合细菌,有多种代谢方式,具有适应环境的不同代谢途径:如在黑暗厌氧条件下通过丙酮酸-甲酸裂解酶系实现物质代谢过程;光照条件下能利用固氮酶与脱氢酶的不同机制降解有机物;在有氧时能进行好氧生长,在无氧有光条件下,能进行缺氧光合生长;在无氧黑暗环境中,能借助替代性电子受体(如二甲亚砷)进行厌氧呼吸等^[12]。因此,RS 的应用性研究引起了人们的关注。如徐铮奎^[13]研究了有关 RS 的代谢产物在农业生产中的开发与应用;赵凯等^[14]探讨了 RS 对敌敌畏降解速率的影响,但关于 RS 在 PAHs 污染土壤修复中的应用还未见报道。

本研究采用田间试验的方式,选取全球种植与食用最广泛的粮食作物之一小麦(*Triticum aestivum* L.),以叶面喷施(B)和根部喷施(D)这 2 种方式,在 PAHs 污染土壤种植小麦过程中添加 RS,探讨 RS 施用对土壤 PAHs 的降解、小麦籽粒中 PAHs 的积累以及小麦生长等方面的影响,以期为提高 PAHs 污染土壤农用安全性和污染土壤修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验农田位于北京市西南城郊污灌区农田,曾用石油化工厂排水灌溉多年,现已改用清水污灌。年均降雨量 600 ~ 700 mm,集中 7 ~ 8 月;年均气温 12℃;机械播种与人工管理相结合的耕作方式;种植方式,一年两熟,小麦与玉米轮番种植。该区土壤类型属于褐土,其中,土壤中有机质含量为(12.8 ± 0.2) g·kg⁻¹,总氮含量为(1.56 ± 0.02) g·kg⁻¹,土壤的 pH 为 8.29 ± 0.2 、电导率(EC)为(260 ± 25) μS·cm⁻¹;土壤中检出 12 种 PAHs, $\sum$ PAHs 平均值为(790 ± 54) μg·kg⁻¹,其中,芘的含量最高[(370 ± 6) μg·kg⁻¹];其次为菲[(120 ± 5) μg·kg⁻¹]。根据 Maliszewska-Kordybach 等^[15]建立的标准,即土壤中 $\sum$ 16PAHs 的总量小于 200 μg·kg⁻¹则可认为是未被污染,200 ~ 600 μg·kg⁻¹之间为轻度污染,600 ~ 1 000 μg·kg⁻¹为中度污染,大于 1 000 μg·kg⁻¹为重污染^[15]。该农田的 PAHs 污染属于中度污染。

供试小麦品种为“麦石 12 号”的冬小麦;类球红细菌菌剂是液体菌剂,活菌数 > 1.98×10^9 个·mL⁻¹,菌剂制备参照文献[16]的方法。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计与样品采集

试验田共 1.32 hm²,分 4 个区(每区 0.33 hm²)。试验处理:秋季播种,第 2 年 6 月初收获。田间管理方式(包括浇水、施肥、除草、喷洒农药等事宜),照常进行,不受本试验影响。在此基础上设置试验区:不施用菌剂正常田间管理的空白区(CK)、喷施菌剂区(B)、根施菌剂区(D)(菌剂和水比为 1:50 稀释)和喷水对照区(A),A 区喷施水量与 B、D 区稀释菌剂用水等量。设置 A 区是为了排除因菌剂施用过程中增加水量的影响。整个生长期,每 2 周施用 1 次 RS,每次施用量为 50 L·hm⁻²,共施用 6 次。样品采集分别在播种前和小麦成熟后采用网格布点法采集耕作层土样(0 ~ 25 cm)及其对应的小麦样品(土样每区 10 个,小麦每区 500 穗),装入自封袋运回实验室,然后混合均匀,挑出土壤样品中的石子、植物碎片等杂物。小麦样品脱除外稃获取籽粒。样品置于通风橱自然干燥(土壤微生物磷脂脂肪酸测定采用鲜土);土壤样品利用瓷质研钵研磨,小麦籽粒用多功能粉碎机进行粉碎,过 100 目的金

属筛. 土壤样品全部过筛. 小麦籽粒经反复粉碎、过筛,过筛的部分约占籽粒总重量的 85%~90% 时为止,记为麦粉(或面粉),剩余的不能过筛的部分记为麸皮,约占总重量的 10%~15%.

1.2.2 土壤与植物体内 PAHs 含量的测定方法

采用 EPA 超声振荡提取方法提取土壤和植物样品中 PAHs,利用气相色谱-质谱(GC-MS,6890/5973,Agilent 公司)分析样品^[17],以 U. S. Environmental Protection Agency (U. S. EPA) 优先控制的 16 种 PAHs (U. S. 16EPA) 包括:萘(naphthalene), 苊烯(acenaphthylene), 苊(acenaphthene), 芴(flurine), 菲(phenanthrene), 蒽(anthracene), 荧蒽(fluranthene), 芘(pyrene), 苯并[a]蒽(Benz[a]anthracene), 䓛(Chrysene), 苯并[b]荧蒽(Benzo[b]fluranthene), 苯并[k]荧蒽(Benzo[k]fluranthene), 苯并[a]芘(Benzo[a]pyrene), 二苯并[a,h]蒽(Dibenz[a,h]anthracene), 苯并[g,h,i]芘(Benzo[g,h,i]perylene), 茚并[1,2,3-cd]芘(Indeno[1,2,3-cd]pyrene) 购买于 Bellefonte, PA, USA, 不同浓度的混合溶液作为标样,采用外标法分析.

1.2.3 土壤微生物的测定方法

参照 Bligh 等^[18]的方法提取土壤微生物磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acids, PLFAs), PLFAs 的分析与命名参照文献[19,20]的分析与命名方法.

1.2.4 数据处理

利用 NEST 5.0 图谱库,根据标样的保留时间和峰面积,对 PAHs 的 GC-MS 测定结果进行定性与定量分析. PAH 含量用 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 表示. 文中所列数据均为 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准误差. 利用 EXCEL、SPSS 17.0 软件对数据进行方差等处理分析.

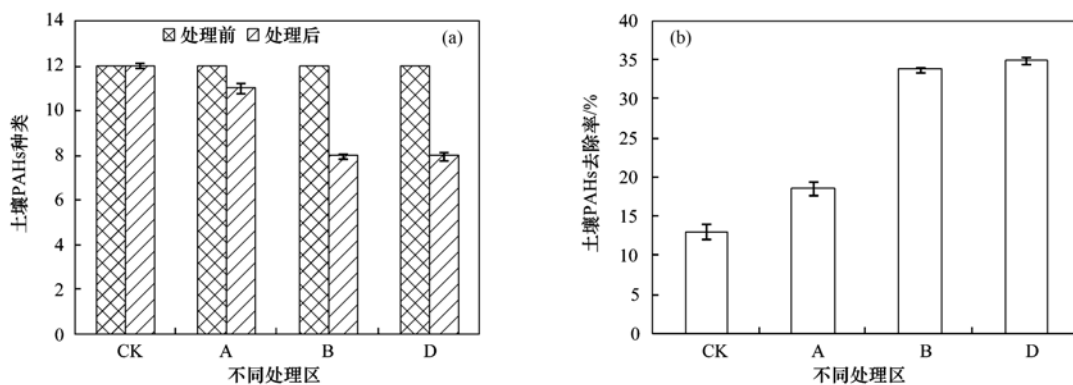
土壤中 PAHs 的去除率 = (开始浓度 - 残留浓度) / 开始浓度 $\times 100\%$

生物富集因子 = 植物体内污染物的浓度 / 土壤中污染物的浓度

2 结果与分析

2.1 RS 对土壤 PAHs 去除率的影响

初始时不同处理分区土壤中检测到相同的 12 种 EPA 优先控制的 PAHs. 在小麦成熟期,不同处理区土壤 PAHs 种类的变化情况见图 1(a). 对照区(CK)中检测到与初始土壤中相同类型的污染物 12 种、A 检测到 11 种、B 区和 D 区均检测到 8 种. 与 CK 相比施加 RS 的区域,PAHs 的类型减少了 4 种, A 区 PAHs 减少了 1 种. 小麦成熟期,不同处理区土壤 PAHs 总量的变化情况如图 1(b). CK 区和 A 区 PAHs 的去除率分别为 13.1% 和 18.6%; B 区和 D 区的去除率分别为 33.9%、35.1%. 表明施加 RS 的 B 区和 D 区土壤 PAHs 去除率明显高于对照区,而且,根施与喷施这 2 种处理方式差别不大.



(a) 土壤中 PAHs 种类的变化情况; (b) 土壤中 PAHs 的去除率

图 1 不同处理方式对土壤中 PAHs 的影响

Fig. 1 Effect of different treatments on the total PAHs in soils

2.2 RS 对土壤微生物群落结构的影响

根土壤微生物 PLFAs 的提取样品,利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析,以 B 区土壤微生物 PLFAs 图谱为例(图 2),其中,横坐标代表各 PLFAs 在气相色谱中出现特征峰的时间,纵坐标表示各种 PLFAs 的峰值.

将气相色谱图-质谱图信息进行量化,转化成数据形式. 根据文献[21,22],饱和脂肪酸(SAT)如 C14:0、C15:0、C16:0、C17:0、C18:0 标识细菌;末端支链型脂肪酸(TBSAT)如 i13:0、i15:0、i17:0、i18:0、a12:0、a14:0、a16:0、a18:0 等标识革兰氏阳性细菌(G^+);单不饱和脂肪酸(MONO)如

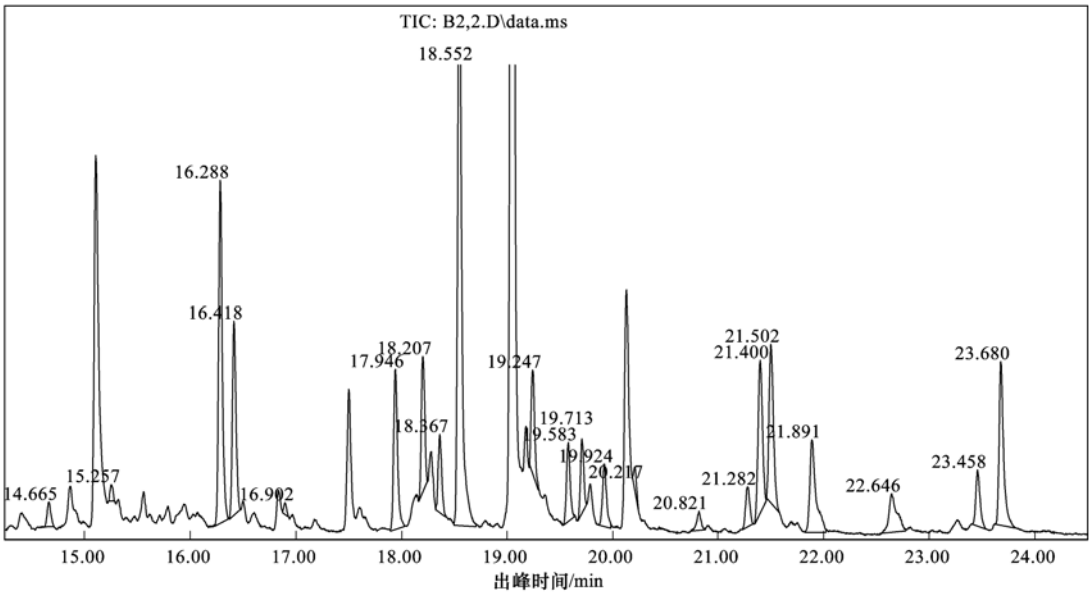


图2 小麦成熟期土壤微生物磷脂脂肪酸气相色谱图(以B区为例)

Fig. 2 Chromatogram profiles of phospholipids fatty acids of microbial community in soil samples in the mature period (area B)

16:1 ω 7t、18:1 ω 3c 和环丙基脂肪酸(CYCLO)如cy16:0、cy18:0 标识革兰氏阴性细菌(G^-),是环境胁迫存在时经常出现的菌类; MONO 如 18:1 ω 9t、18:1 ω 10c 和多不饱和脂肪酸(PUFA)如 18:2 ω 6,9、18:2 ω 3,9、18:2 ω 7,10 标识真菌; 中间支链型磷脂脂肪酸(MBSAT)如 10Me17:0、8Me18:0 等标识放线菌. 特征 PLFAs 的相对含量,以该 PLFAs 的提取量占总量的百分比(%)表示,分析结果如表 1.

由表 1 可知,在小麦成熟期,根际土壤中标识不同微生物类群的磷脂脂肪酸的相对含量具有一定的差异. 其中,PLFAs 类型相似率为 70.4%,SAT 相对含量在根施菌剂区最低(27.5%); TBSAT 在根施菌剂区最高(38.1%); MONO、CYCLO 和 PUFA 在不同处理区相似; MBSAT 在根施区最高(7.26%),在喷施区最低(2.86%). 与对照组相比,可知施加菌剂对土壤微生物群落结构产生一定的影响,施加菌剂的 B 和 D 区,标识革兰氏阳性菌的 TBSAT 相对含量增加,而标识存在环境胁迫的 CYCLO 和 16:1 ω 7tPLFA 类型相对含量降低.

2.3 RS 对植物提取与体内富集 PAHs 的影响

由图 3 可知,小麦麸皮对 PAHs 富集能力大于麦粉,不同处理区麸皮的富集因子分别为:CK 区 4.04×10^{-3} ,A 区 3.51×10^{-3} ,两者差异不大,而在施用 RS 的 B 区和 D 区,富集因子分别为 1.52×10^{-3} 和 1.54×10^{-3} ,显著低于 CK 区和 A 区($P < 0.05$); 麦粉对 PAHs 的富集能力低于麸皮,富集因子分别为:CK 区 1.64×10^{-3} ,A 区 1.99×10^{-3} ,两

表 1 不同处理区土壤中微生物 PLFAs 的特征/%

Table 1 Characteristics of the soil microbial PLFAs in different treatment areas/%

PLFAs 序号	PLFAs 标记	不同样区微生物 PLFAs 特征			
		CK 区	A 区	B 区	D 区
1	C14:0	1.34	1.33	1.72	1.62
2	C15:0	10.3	10.2	13.2	10.3
3	C16:0	15.7	15.5	11.7	11.8
4	C17:0	0.240	0.252	0	0
5	C18:0	3.25	3.26	3.92	3.77
6	i13:0	0.36	0.371	0.183	0.461
7	i15:0	12.1	12.0	17.0	18.0
8	i17:0	1.82	1.62	3.02	0.752
9	i18:0	0	0	1.12	0
10	a12:0	1.82	1.84	0	0
11	a14:0	6.39	6.33	7.63	9.85
12	a16:0	8.18	8.03	8.40	8.34
13	a18:0	0	0	0.191	0.672
14	6Me14:0	4.12	3.92	0.501	4.47
15	10Me17:0	0.78	0.791	0.773	0.981
16	8Me18:0	1.59	1.55	1.58	1.81
17	14Me17:0	0.431	0.452	0	0
18	cy16:0	3.61	3.31	1.77	2.14
19	cy18:0	1.75	1.65	2.92	1.88
20	16:1 ω 7t	12.4	12.5	10.0	11.4
21	i16:1 ω 5c	0.252	0.231	0	0
22	18:1 ω 9t	7.63	7.33	2.68	3.37
23	18:1 ω 10c	4.59	4.54	6.90	5.43
24	18:1 ω 3c	0	0	3.12	1.87
25	18:2 ω 6,9	1.11	1.12	1.09	0.763
26	18:2 ω 7,10	0.26	0.231	0.542	0.154
27	18:2 ω 3,9	0	0	0	0.2
	SAT	30.8	30.5	30.5	27.5
	TBSAT	30.7	30.2	37.6	38.1
	MBSAT	6.92	6.71	2.86	7.26
	CYCLO	5.35	4.95	4.69	4.03
	MONO	24.8	24.6	22.7	22.0
	PUFA	1.37	1.35	1.63	1.15

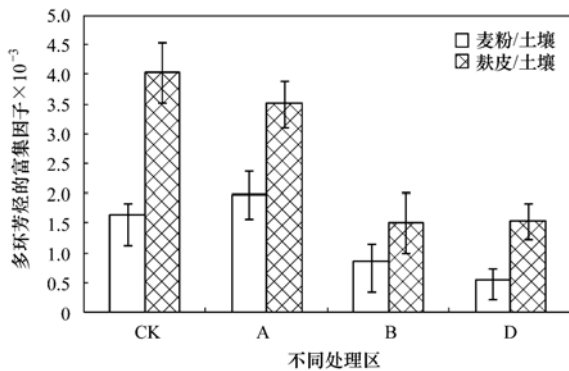


图3 不同处理区 PAHs 在小麦籽粒的富集情况

Fig. 3 Enrichment of PAHs in the wheat grain in different treatment areas

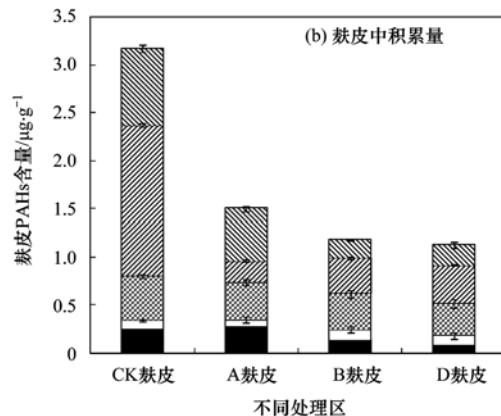
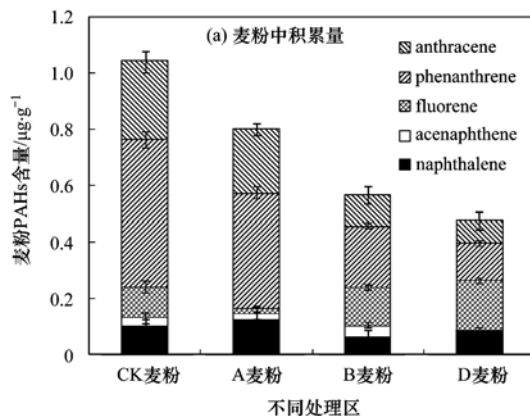


图4 不同处理方式对小麦籽粒中 PAHs 积累量的影响

Fig. 4 Effect of different treatments on the bio-accumulation of PAHs in wheat grain

的量:CK 区为 $3.16 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、A 区为 $1.50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、B 区为 $1.18 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、D 区为 $1.13 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2.4 RS 对小麦籽粒重量的影响

成熟期随机选取 50 穗小麦,脱粒干燥后称重,与对照 CK 区相比较计算其总重量增长率。

增长率 = (样本区 50 穗小麦籽粒总重量 - 对照区 50 穗小麦籽粒总重量) / 对照区 50 穗小麦籽粒总重量 $\times 100\%$

由图 5 可知,施加 RS 提高了小麦产量。与空白 CK 区相比,喷施 RS 区增加了 8.95%、根施区增加了 12.5%,喷水对照 A 区也提高了 5.71%。

3 讨论

研究结果表明,RS 显著影响了土著微生物的群落结构,提高了土壤 PAHs 的去除率。PAHs 在 CK 区的去除率为 13.1%,喷施与根施 RS 的处理区分别为 33.9%、35.1%。杨萌青等^[23] 研究报道大多数植物、微生物或多个过程联合修复效率多在 20%

者差异不显著 ($P > 0.05$),施用 RS 的 B 区和 D 区,分别为 0.871×10^{-3} 和 0.543×10^{-3} ,显著低于 CK 区和 A 区 ($P < 0.05$)。

由图 4 可知,在不同处理区,小麦面粉和麸皮中积累的 PAHs 种类和总量不同。图 4(a) 表明,小麦面粉中积累的 PAHs 种类:CK 区、A 区和 B 区中均为 5 种、D 区 4 种,主要是 < 4 个苯环的 PAHs 类型,4 环以上的 PAHs 在面粉中均没检测到; PAHs 在面粉中积累的总量分别为:CK 区 $1.04 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、A 区 $0.802 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、B 区 $0.567 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、D 区 $0.476 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由图 4(b) 可知,在不同处理区,小麦麸皮中均检测到 5 种 PAHs,其积累量均高于同区面粉中

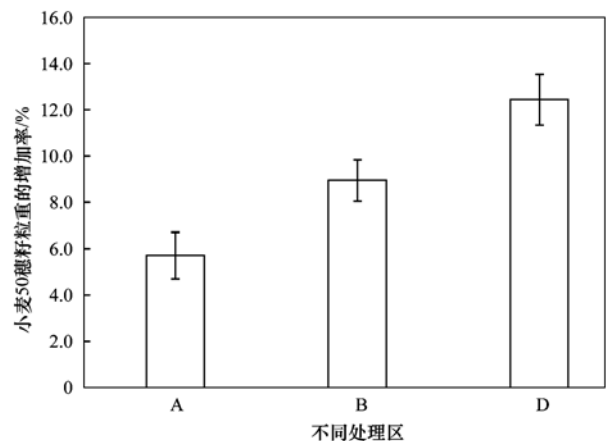


图5 不同处理方式对小麦籽粒重量的影响

Fig. 5 Effect of different treatments on the weight of wheat grain

~60% 左右,与本研究结果一致。RS 的应用主要是影响了土著微生物的代谢活性,增强了土著微生物对 PAHs 的降解。

植物提取与植物富集作用是通过植物生长去除土壤污染物的一种方式。植物提取率与富集因子的

大小是常用的植物修复能力的评价指标,在一定程度上能反映该植物对污染土壤修复作用的潜能。但是,有害物质在粮食作物内的高富集能力对人类将产生一定的潜在安全危害,因此,关于 PAHs 污染土壤农作过程中植物对该污染物的吸收与富集作用应引起人们的关注。一般认为其大小与植物种类、植物自身的生长代谢状况、土壤微生物群落结构、植物-微生物联合等因素有关^[24]。该研究结果表明,施加 RS 能降低小麦籽粒对 PAHs 的富集能力。B、D 区与 CK 区相比,小麦籽粒对 PAHs 的富集因子分别降低了 58.9% 和 62.2%。同时表明,植物对 PAHs 的富集与 PAHs 类型和植物自身组织也有一定的关系。不同组织和同一组织对不同类型的 PAHs 的富集能力也有一定的差异。其中,麸皮的积累量大于面粉;苯环数大于 4 (包括 4 个) 的 PAHs 在小麦体内均没检测到。该结果与相关报道有一致性,张晓斌等^[25]认为污染物经过土壤生态系统的一系列作用,在土壤和作物各部分都会有残留;Jánská 等^[26]报道,通过植物的吸收、沉积和富集作用,PAHs 在植物体中具有积累现象。关于 PAHs 在小麦不同组织及相同组织在不同生长时期的富集能力及其富集机制还有待进一步深入研究。

从土壤微生物 PLFAs 的分析结果可知,施加 RS 的 B、D 区与对照 CK 区相比,标识土壤微生物的 PLFA 类型均有 29.6% 差异率。其中,标识具有 PAHs 降解功能的 G^+ 菌的 PLFA 相对含量增加,而标识土壤环境受污染物、营养或盐分等胁迫的 CYCLO 和 16:1 ω 7t 等类型相对含量降低^[27]。该结果表明,RS 对土壤微生物群落结构有一定的影响,并对土壤环境具有一定的改善作用。有研究认为^[28],由于根的表面能为根际微生物的生长提供更大的生存空间,同时,根的分泌物不断刺激根际微生物的生长,微生物的种类、数量与代谢活性等逐渐发生改变,在根际周围形成特定的根际微生物群落,从而加速 PAHs 降解菌的生物代谢降解过程。添加 RS 对小麦的生长有促进作用,进而改善了小麦根际微生物的生存环境,加速了根际微生物对污染物的降解,其作用的机制还有待进一步深入探讨。

施加 RS 的 B 区、D 区与对照 CK 区相比,50 穗小麦籽粒总重量分别增加 8.0% 和 11.2%;排除水分条件带来的增加(A 区)之外,在施加 RS 的 B、D 区小麦的籽粒重量仍有 5.2%~6% 的增加。增加的可能原因可归结为两个方面:① RS 自身是一种微生物肥料,可以促进小麦的生长;② 土壤中污染

物的减少,降低了对小麦的生长毒性,从而有利于植物生长。有研究认为^[29~31],类球红细菌具有如光合代谢、无机营养代谢、好氧和厌氧等广泛的物质代谢与能量代谢方式,能够固定氮分子、合成四吡咯、维生素 B12、5-氨基乙酰丙酸(ALA)和辅酶 Q10 等重要的生物活性物质,如 ALA 能够提高植物的抗胁迫能力;辅酶 Q10 是细胞呼吸与代谢的激活剂,是重要的抗氧化剂和生物非特异性免疫增强剂,因此,RS 可以增强植物抗性,促进植物生长,提高生产量。

综上所述,RS 在 PAHs 污染土壤农作过程中具有提高小麦产量、降低 PAHs 在小麦籽粒中积累,提高污染土壤农作安全性的作用。相关机制的探讨还有待进一步深入研究。

4 结论

(1) 施用类球红细菌微生物菌剂提高小麦产量的同时,显著影响了土壤微生物群落结构,强化了土壤 PAHs 的降解。

(2) 施用类球红细菌微生物菌剂降低了小麦对 PAHs 的富集能力,减少了 PAHs 在籽粒中的积累量,改善了小麦的品质,降低 PAHs 污染土壤农作的潜在风险。

参考文献:

- [1] Brandt H C, Watson W P. Monitoring human occupational and environmental exposures to polycyclic aromatic compounds[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2003, 47(5): 349-378.
- [2] Kanaly R A, Harayama S. Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria[J]. Journal of Bacteriology, 2000, 182(8): 2059-2067.
- [3] 卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 等. 天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3426-3433.
- [4] 张旭, 李广贺, 黄巍. 包气带土层中石油污染物生物降解的温度效应[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 108-110.
- [5] 梁宵, 占新华, 周立祥. 不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究[J]. 环境科学, 2012, 7(33): 2516-2521.
- [6] 罗晓栋, 张茂生, 梁伟明, 等. 东莞市蔬菜基地多环芳烃的污染特征研究[J]. 广东农业科学, 2010, 37(6): 195-197.
- [7] 焦杏春, 陈素华, 沈伟然, 等. 水稻根系对多环芳烃的吸着与吸收[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 760-764.
- [8] Wang D T, Meresz O. Occurrence and potential uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons of highway traffic origin by proximally grown food crops[A]. In: Cooke M, Dennis A J, Fisher G L, (Eds.). Polynuclear aromatic hydrocarbons: physical and biological chemistry [C]. New York, USA: Springer, 1982. 228-234.
- [9] 潘勇军, 田大伦, 唐大武, 等. 樟树林生态系统中多环芳烃含量和分布特征[J]. 林业科学, 2004, 40(6): 2-7.

- [10] Wild S R, Jones K C. The significance of polynuclear aromatic hydrocarbons applied to agricultural soils in sewage sludge in the U. K [J]. Waste Management and Research, 1994, **12**(1): 49-59.
- [11] Gupta N, Khan D K, Santra S C. Determination of public health hazard potential of wastewater reuse in crop production [J]. World Review of Science, Technology and Sustainable Development, 2010, **184**(11): 6673-6682.
- [12] Lu H L, Zhang Y, Liu B B, *et al.* Rhizodegradation gradients of phenanthrene and pyrene in sediment of mangrove (*Kandelia candel* (L.) Druce) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **196**: 263-269.
- [13] 徐铮奎. 辅酶 Q10 开发现状与前景展望[J]. 中国制药信息, 2006, **22**(4): 15-17.
- [14] 赵凯, 于影, 姜丹, 等. 1 株类球红细菌及其降解敌敌畏的特性[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1199-1204.
- [15] Maliszewska-Kordybach B, Smreczak B, Klimowicz-Pawlas A. Effects of anthropopressure and soil properties on the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the upper layer of soils in selected regions of Poland [J]. Applied Geochemistry, 2009, **24**(10): 1918-1926.
- [16] Slater G F, Cowie B R, Harper N, *et al.* Variation in PAH inputs and microbial community in surface sediments of Hamilton Harbour: Implications to remediation and monitoring [J]. Environmental Pollution, 2008, **153**(1): 60-70.
- [17] U. S. Environmental Protection Agency (EPA) Methods 3550B, 1996a, Ultrasonic extraction standard method, Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods[S]. EPA Publication SW-846. <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/main.htm>.
- [18] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method for total lipid extraction and purification [J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 1959, **37**(8): 911-917.
- [19] Tunlid A, Hoitink H A J, Low C, *et al.* Characterization of bacteria that suppress *Rhizoctonia* damping-off in bark compost media by analysis of fatty acid biomarkers[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1989, **55**(6): 1368-1374.
- [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] 王曙光, 侯彦林. 磷脂脂肪酸方法在土壤微生物分析中的应用[J]. 微生物学通报, 2004, **31**(1): 114-117.
- [22] Huang X D, El-Alawi Y, Penrose D M, *et al.* A multi-process phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils [J]. Environmental Pollution, 2004, **130**(3): 465-476.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 张晓斌, 占新华, 周立祥, 等. 小麦-苜蓿套作条件下非污染土壤理化性质的动态变化[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1462-1470.
- [26] Jániskú M, Hajšlova J, Tomaniová M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in fruits and vegetables grown in the Czech Republic [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2006, **77**(4): 492-499.
- [27] Gao Y Z, Zhu L Z. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils [J]. Chemosphere, 2004, **55**(9): 1169-1178.
- [28] Bakker M I, Casado B, Koerselman J W, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and plant samples from the vicinity of an oil refinery[J]. Science of the Total Environment, 2000, **263**(1-3): 91-100.
- [29] 韩庆莉, 赵志瑞, 白志辉, 等. 敌敌畏对鲫鱼的急性毒性及类球红细菌的解毒作用[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(6): 847-853.
- [30] Sasaki K, Watanabe M, Nishio N. Inhibition of 5-aminolevulinic acid (ALA) dehydratase by undissociated levulinic acid during ALA extracellular formation by *Rhodobacter sphaeroides* [J]. Biotechnology Letters, 1997, **19**(5): 421-424.
- [31] Yen H W, Chiu C H. The influences of aerobic-dark and anaerobic-light cultivation on CoQ₁₀ production by *Rhodobacter sphaeroides* in the submerged fermenter [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007, **41**(5): 600-604.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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