

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体漫衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洵, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447)	
《环境科学》征稿简则 (475)	
信息 (524, 586, 605, 624)	

不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究

尹春芹^{1,2}, 蒋新^{1*}, 王芳¹, 王聪颖^{1,3}

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 黄石理工学院环境科学与工程学院, 黄石 435003; 3. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

摘要: 采用室内模拟试验, 研究追加葡萄糖、DL-苹果酸、柠檬酸三钠、脲和乙酸铵碳源刺激下对老化污染土壤中 PAHs 的降解规律。结果表明, 培养第 1 周内, 添加碳源处理土壤 CO₂ 的释放量显著大于对照, 其中外加 DL-苹果酸处理土壤所释放的 CO₂ 量最大。各处理 CO₂ 的平均释放量顺序为脲 > 葡萄糖 ≈ 柠檬酸三钠 ≈ DL-苹果酸 ≈ 乙酸铵 > 对照。添加碳源处理土壤所挥发的 PAHs 要显著小于对照, 且 3 种 PAHs 的挥发量大小顺序为菲 > 荧蒹 > 苯并(b)荧蒹。添加碳源处理土壤中菲、荧蒹及苯并(b)荧蒹的平均降解速度均大于对照, 其中添加 DL-苹果酸和脲处理土壤中菲、荧蒹及苯并(b)荧蒹的降解较快。3 种 PAHs 化合物之间相比较, 苯并(b)荧蒹的残留比例最大, 在 72% ~ 81% 之间; 其次为荧蒹, 在 53% ~ 70% 之间; 菲最少, 在 27% ~ 44% 之间。

关键词: 多环芳烃; 土壤污染; 生物刺激; 外加碳源; 降解

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0633-07

Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil

YIN Chun-qin^{1,2}, JIANG Xin¹, WANG Fang¹, WANG Cong-ying^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Environmental Science and Engineering College, Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China; 3. School of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: This study was conducted with different additional carbon sources (such as: glucose, DL-malic acid, citrate, urea and ammonium acetate) to elucidate the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in aged contaminated soil under an indoor simulation experiment. The results showed that the quantity of CO₂ emission in different additional carbon sources treatments was obviously much more than that of check treatment in the first week, and the quantity of CO₂ emission in DL-malic acid treatment was the largest. The average CO₂ production decreased in an order urea > glucose ≈ citrate ≈ DL-malic acid ≈ ammonium acetate > check. Meanwhile, the amount of volatilized PAHs in applied carbon sources treatments was significantly less than that in check treatment. The amount of three volatilized PAHs decreased in an order phenanthrene > fluoranthene > benzo(b)fluoranthene. Compared with the check treatment, the average degradation rates of the three PAHs were significantly augmented in the supplied carbon sources treatments, in which rates of the three PAHs were much higher in DL-malic acid and urea treatments than those in other treatments. The largest proportion of residual was benzo(b)fluoranthene (from 72% to 81%) among three PAHs compounds, followed by fluoranthene (from 53% to 70%) and phenanthrene (from 27% to 44%).

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; soil contamination; biostimulation; additional carbon sources; degradation

PAHs 是由 C、H 原子组成的化合物, 由 2 个或多个苯环组成。这些化合物是脂溶性的, 容易被动物吸收, 其代谢产物多具有致癌和致突变的特征^[1]。在过去的 20 年里, 物理、化学及生物学的方法都曾用来修复土壤 PAHs 的污染, 例如表面活性剂、生物刺激及生物放大修复技术等。表面活性剂修复技术主要是提高了 PAHs 化合物的解吸附作用, 从而使 PAHs 的溶解性增加^[2~5]。而生物放大技术主要是添加高效 PAHs 降解菌来降解土壤中的 PAHs。此外, 有研究表明, 添加 PAHs 降解菌后, 化合物芘和蒽的降解产物分别增加了 6 和 10 倍^[6]。也有研究者认为, 生物刺激(为原位修复技术)作为一种既简单又

低消耗的修复技术具有更大的发展潜力^[7,8]。例如通过添加有机物料或者营养元素来刺激 PAHs 污染土壤的生物修复^[9~11]。Phillips 等^[12]报道, 大量元素尤其是 N 和 P 的施用可提高 PAHs 的降解。还有研究者用淤泥^[13]或者堆肥^[14,15]来刺激土壤 PAHs 的生物降解。Kästner 等^[16]报道施用堆肥后 PAHs 的降

收稿日期: 2011-04-11; 修订日期: 2011-07-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030531); 国家自然科学基金创新研究群体项目(40921061); 湖北省教育厅科学技术研究计划优秀中青年人才项目(Q20093001); 湖北省教育厅科学技术研究计划指导性项目(B20093003); 黄石理工学院引进人才项目(10yjj04R)

作者简介: 尹春芹(1978~), 女, 博士, 主要研究方向为环境化学与污染控制, E-mail: yinchunqin@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jiangxin@issas.ac.cn

解不是由于有机物与有机污染物之间的吸附作用引起的,而是归因于堆肥中的微生物和微小动物对 PAHs 的生物降解作用. 另外,有研究者认为,添加外源碳会抑制碳氢污染物的降解,使微生物出现二次生长^[8]. 也有人认为,当使用硫酸铵(氮源)和丙酮酸盐(为碳源)时,萘的降解没有受到抑制^[17]. 添加外源碳是否使 PAHs 的降解受到抑制,尚未定论. 因此,本试验在前人研究的基础上,选取 PAHs 污染的土壤为对象,在添加不同碳源条件下,探索它们对老化污染土壤中 CO₂ 的释放量、污染后的 PAHs 挥发量以及降解作用的规律,以期为生物刺激老化污染土壤中 PAHs 的降解提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 土壤采集和处理

供试土壤为南京市郊某工业区周边长期受 PAHs 污染的农田土壤,采集 0~15 cm 表层土壤,在阴凉通风处风干,剔除样品中植物根系、有机残渣和砾石后,磨碎,分别过 5 目、10 目和 60 目筛. 充分混匀后将过 5 目筛的土壤放置在阴凉处,平衡 120 d

后做生物刺激老化污染土壤中 PAHs 的降解试验. 供试土壤的理化性质见表 1. 为了避免外界因素及试验操作误差所带来的干扰,本试验仅对含量较大的 PAHs 进行分析,包括菲、荧蒹和苯并(b)荧蒹,其含量分别为(272.43±2.07)、(637.66±0.22)和(499.95±3.52) μg·kg⁻¹.

试验共设置 6 个处理,每个处理重复 3 次,具体如下:①对照、②葡萄糖(C₆H₁₂O₆)(以每 kg 风干土壤施用纯量 C 0.4 g 计算,下同)、③DL-苹果酸(C₄H₆O₅)、④柠檬酸三钠(C₆H₅Na₃O₇)、⑤脲[CO(NH₂)₂]和⑥乙酸铵(CH₃COONH₄). 将与养充分混合的风干老化污染土壤 0.5 kg 装入容积为 1 L 的玻璃广口瓶中,缓慢加入无菌水至土壤含水的质量分数为 30%,置于培养箱在 25℃ 黑暗处静置 1 夜后,加塞(塞上有 2 个接有橡胶管的玻璃弯管,见图 1),并将玻璃弯管外侧的橡胶管用铁夹夹紧,保证瓶中的空气与外界隔离. 将密封的广口瓶放置在 25℃ 培养箱中无光培养 8 周,期间测定 CO₂ 的释放量、PAHs 的挥发量及土壤中 PAHs 的浓度.

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the tested soils

全氮 /%	全磷 /%	全钾 /%	有机质 /g·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	黏粒 (<2 μm) /%	粉粒 (2~20 μm) /%	砂粒 (>20 μm) /%	阳离子交换量 /mol·kg ⁻¹	pH 值
0.13	0.15	1.9	26	14.5	112	14.2	65.9	19.9	13.4	7.1

1.2 试验试剂和仪器

石油醚、丙酮、二氯甲烷、无水硫酸钠和层析硅胶均为分析纯,浓硫酸为优级纯,乙腈为色谱纯,水为超纯水. SPE 柱(填充物:1 g 无水硫酸钠+2 g 硫酸硅胶+1 g 无水硫酸钠),硫酸硅胶的制备参见文献[18],所用的无水硫酸钠和硫酸硅胶均在 130℃ 烘 16~17 h. 所用的仪器有:D-78224 Singen/Htw 超声波清洗器(德国),RE-3000 旋转蒸发仪,Shimadzu 高效液相色谱(日本),Supelco PAHs 专用柱(25 cm×4.6 mm, 5 μm 直径,美国).

1.3 污染土壤 CO₂ 释放量的测定

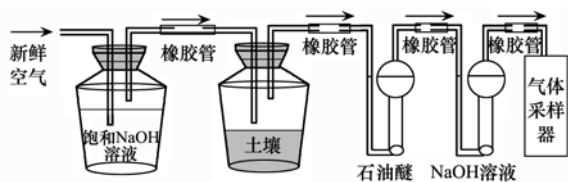
CO₂ 的释放量采用 NaOH 吸收法测定. CO₂ 的吸收装置示意图见图 1. 每个玻璃广口瓶污染土壤上方空气体积约为 0.8 L. 玻璃广口瓶内的 CO₂ 在流动气体(无 CO₂ 的空气)的作用下逐渐被 20 mL NaOH 溶液(浓度为 1 mol·L⁻¹)吸收. 大气采样器流速 0.4 L·min⁻¹,采气时间 20 min. 吸收后的 NaOH 溶液用标定过的浓度为 1 mol·L⁻¹的 HCl 滴定,并记录消耗 HCl 的毫升数. CO₂ 的释放量用如下公式计算:

$$\text{CO}_2 \text{ 的释放量} = \frac{(\text{消耗盐酸的毫升数} \times \text{盐酸的浓度}) \times \frac{1}{2} \times \text{CO}_2 \text{ 的摩尔质量}}{\text{土壤干重}}$$

1.4 污染土壤 PAHs 挥发量的测定

PAHs 的挥发量采用石油醚吸收法,吸收装置示意图见图 1. 污染土壤上方挥发的 PAHs 在流动气体(无 CO₂ 的空气)的作用下逐渐被 20 mL 的石油醚溶液吸收. 大气采样器流速 0.4 L·min⁻¹,采气时间

20 min. 同时测定空气作为对照. 吸收后的石油醚在旋转蒸发仪上 40℃ 浓缩至近干,用 5 mL 石油醚和二氯甲烷混合液(体积比 9:1)分 3 次溶解并转移至 SPE 柱(先用 5 mL 石油醚淋洗,弃去淋洗液)后,用 20 mL 石油醚和二氯甲烷混合液(体积比 9:1)淋

图1 CO₂ 及 PAHs 的吸收装置示意Fig. 1 Sketch map of CO₂ and PAHs absorption device

洗,净化样品.淋洗液再用旋转蒸发仪在 40℃ 浓缩至近干后,经 N₂ 吹干,用乙腈溶解定容至 1.5 mL,待测.

1.5 土壤样品的提取和净化

用直径为 0.8 cm 的小土钻取土,每瓶每次均匀取土 3 钻,在铝箔上混匀后取 2 g 土壤样品测定 PAHs 的含量,剩余土壤还原.将玻璃广口瓶敞口放置在空气清新处通风 1 h.换入新鲜氧气后,加塞并夹紧橡胶管,将密封后的广口瓶放回培养箱中继续培养.

土壤样品的提取和净化方法参见文献[19].

1.6 色谱条件及质量控制

具体色谱条件及质量控制参见文献[19].

1.7 数据分析

用 SPSS 13.0 软件对试验数据做统计分析. $P < 0.05$ 表示在 95% 的置信范围内显著.

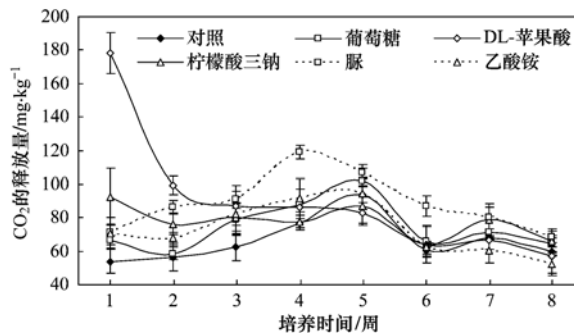
2 结果与讨论

2.1 污染土壤 CO₂ 的释放量

土壤中的微生物可以分解所含的化合物,并使其最终降解成为 CO₂ 和水.土壤微生物的活性在某种程度上可以用其释放的 CO₂ 的量来表征,微生物活性越高其释放的 CO₂ 量也就越大(图 2).由图 2 可知,在培养最初的 1 周内,各处理土壤所释放的 CO₂ 量均显著大于对照 ($P < 0.05$),说明添加营养能够有效促进微生物的活性.其中,经 DL-苹果酸的处理,其土壤所释放的 CO₂ 量最大,为 178 mg·kg⁻¹ (以土壤干重计,下同),其次为柠檬酸三钠处理(93 mg·kg⁻¹),而葡萄糖、脲和乙酸铵处理次之,在 70 mg·kg⁻¹ 左右.随后,各处理呈现不同的变化趋势.各处理 CO₂ 的平均释放量顺序为:脲 > 葡萄糖 ≈ 柠檬酸三钠 ≈ DL-苹果酸 ≈ 乙酸铵 > 对照.

在本试验中,第 1 周 CO₂ 的释放量显著大于对照 ($P < 0.05$),此时容易被微生物利用的物质首先发生强烈降解的过程,随着这些容易利用的物质被消耗,微生物的活性也开始迅速降低;之后,CO₂ 的

释放量又有所增加,说明了微生物在利用土壤中一些难降解的营养物质,此时微生物活性出现增高现象.有研究表明,生物强化处理后的第 1 周,土壤 CO₂ 的释放量增加最快,此时低环 PAHs (主要是 2 环和 3 环的 PAHs) 强烈降解,随后微生物活性迅速降低,至第 4 周时,CO₂ 的释放量增加,微生物活性再一次增高,促使 4 环和 5 环 PAHs 在第 6 周时获得较高的降解率^[20].

图2 污染土壤 CO₂ 的释放量Fig. 2 Quantity of CO₂ emissions from contaminated soil

2.2 污染土壤中菲、荧蒽和苯并(b)荧蒽的挥发量

图 3 是培养 5 周内各处理土壤中菲、荧蒽和苯并(b)荧蒽的挥发量.由图 3 可以看出,在培养的第 1 周内对照处理土壤中菲、荧蒽和苯并(b)荧蒽的挥发量显著高于添加营养的处理 ($P < 0.05$).这可能是由于添加营养后改变了土壤的理化性质,加强了 PAHs 的吸附或结合.另外,PAHs 的挥发量在第一个周后迅速下降,至第 5 周,各处理土壤中菲、荧蒽和苯并(b)荧蒽的挥发量(以土壤干重计,下同)分别在 4 ~ 10、7 ~ 14 和 2 ~ 3 ng·kg⁻¹ 之间.

3 种 PAHs 的挥发量相比较,第 1 周菲的挥发量最大 ($P < 0.05$),平均值为 140 ng·kg⁻¹.其次为荧蒽 ($P < 0.05$),平均值为 58 ng·kg⁻¹.苯并(b)荧蒽最少 ($P < 0.05$),平均值为 21 ng·kg⁻¹.有研究表明,高浓度的 2 ~ 3 个苯环的 PAHs 与 HMW-PAHs 相比更易发生大气-地表面交换^[21,22],这也可能是本试验菲挥发量较高的原因之一.另外,也可能是由于 PAHs 的物理化学性质和结构特性的差异,而导致 PAHs 不同的挥发量. Yang 等^[23]研究表明,萘、菲和芘与有机碳吸附力的顺序为萘 < 菲 < 芘,与它们的 K_{ow} 值的大小顺序相一致.本试验中 3 种 PAHs 的挥发量顺序为菲 > 荧蒽 > 苯并(b)荧蒽,而它们的 lg K_{ow} 顺序为,菲(4.5) < 荧蒽(5.0) < 苯并(b)荧蒽(6.2)^[24],即 PAHs 的挥发量与它们 lg K_{ow} 的大小顺

序相反,也就是说 $\lg K_{ow}$ 越大的化合物其挥发量越小.因此,在本试验条件下,辛醇-水分配系数(K_{ow})可以用来预测 PAHs 在老化污染土壤中的挥发性.

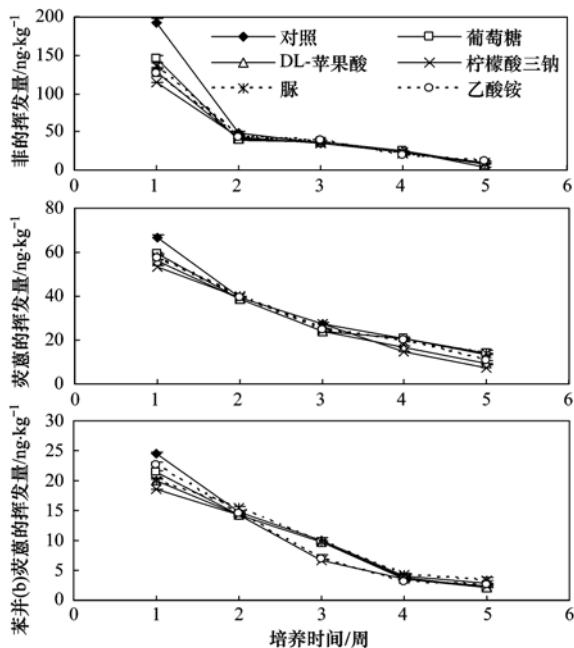


图3 不同处理下 PAHs 的挥发浓度

Fig. 3 Concentrations of volatile PAHs with different treatments

2.3 污染土壤中菲、荧蒽和苯并(b)荧蒽的降解

图4是培养8周内各处理土壤中菲、荧蒽和苯并(b)荧蒽的残留量.从中可知,随着培养时间的延长,土壤中菲的残留量逐渐降低.添加营养的处理在最初的1周内,其土壤中所残留的菲的量均显著小于对照($P < 0.05$).对照处理,在最初的1~2周内,土壤中菲的含量快速下降,残留含量为 $158 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,随后下降趋势逐渐缓慢,培养结束后,土壤中残留菲含量为 $120 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.与对照相比,葡萄糖处理在第1~2周菲的下降速率较慢;第2周,其土壤中菲的残留含量显著大于对照($P < 0.05$),但是到第5周后,其菲的残留含量要显著小于对照($P < 0.05$).DL-苹果酸处理在第1~2周土壤中菲的含量快速下降,后呈缓慢下降趋势;在培养的8周内,其土壤中所残留的菲的含量显著小于对照($P < 0.05$).柠檬酸三钠处理在第2周,其土壤菲的残留量显著大于对照($P < 0.05$),而第4周其土壤中菲的残留量显著小于对照,至培养结束后,其土壤中菲的残留含量为 $89 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.脲处理的变化趋势与DL-苹果酸处理相似,在第1~2周土壤中菲的含量快速下降,后呈缓慢下降趋势,在培养的8周内,其土壤中所残留的菲的含量显著小于对照($P <$

0.05).乙酸铵处理在第1周内呈现迅速下降,而后趋于缓慢,在2~4周内,其土壤中菲的含量与对照相比不显著,但第5周之后,其土壤中菲的残留含量要显著小于对照($P < 0.05$).在培养的1~8周内,各处理土壤中菲的平均残留含量百分比顺序为,对照(56.12%) > 柠檬酸三钠(51.1%) > 葡萄糖(50.1%) > 乙酸铵(46.1%) > DL-苹果酸(45.2%) > 脲(43.6%).

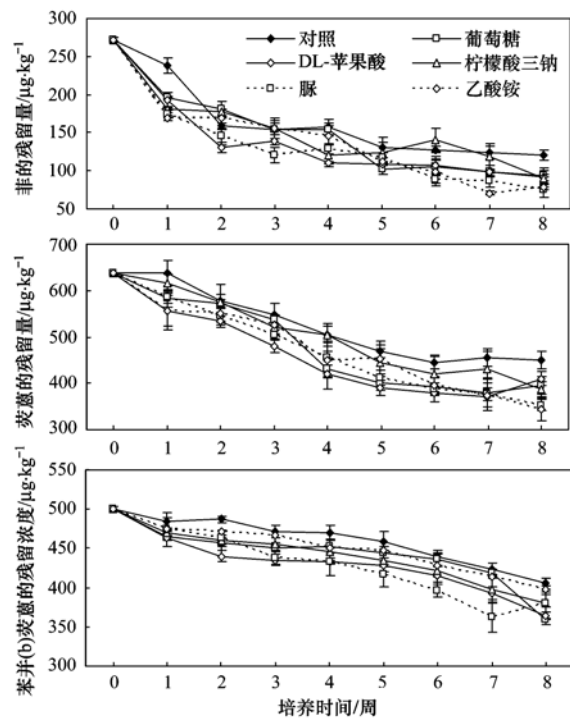


图4 污染土壤中菲、荧蒽和苯并(b)荧蒽的残留量

Fig. 4 Contents of phenanthrene, fluoranthene and benzo(b) fluoranthene in contaminated soil

由图4荧蒽的残留量可知,随着培养时间的延长,土壤中荧蒽的浓度呈下降趋势.除柠檬酸三钠处理外,其余添加营养的处理在最初的1周内,土壤中所残留的荧蒽的浓度均显著小于对照($P < 0.05$).葡萄糖处理在第2~3周内,其土壤荧蒽的残留含量与对照处理相比无显著差别;但是到第4周后,其土壤荧蒽的残留含量要显著小于对照($P < 0.05$).DL-苹果酸处理,在培养的8周内,其土壤中所残留的荧蒽的含量显著小于对照($P < 0.05$).柠檬酸三钠处理,在培养的1~7周内,其土壤中荧蒽的残留含量与对照相比无显著差别,但在第8周,其土壤中荧蒽的残留含量要显著小于对照($P < 0.05$).而脲处理,在培养的8周内,其土壤中所残留的荧蒽的含量均显著小于对照($P < 0.05$).乙酸铵处理在第2~

5 周内,其土壤荧蒽的残留含量与对照处理相比无显著差别,但是到第 6 周后,其土壤荧蒽的残留含量要显著小于对照($P < 0.05$). 在培养的 1~8 周内,各处理土壤中荧蒽的平均残留含量百分比顺序为,对照(80.1%) > 柠檬酸三钠(76.4%) > 葡萄糖(72.3%) > 乙酸铵(71.4%) > 脲(70.9%) > DL-苹果酸(69.3%).

由图 4 苯并(b)荧蒽的残留量可知,随着培养时间的延长,土壤中苯并(b)荧蒽的含量也是呈下降趋势. 葡萄糖处理在第 2~3 周内,其土壤苯并(b)荧蒽的残留含量要显著小于对照($P < 0.05$),在第 4~7 周,其土壤荧蒽的残留含量与对照相比无显著差别($P < 0.05$),但到第 8 周,其土壤苯并(b)荧蒽的残留含量要显著小于对照($P < 0.05$). DL-苹果酸处理和脲处理,在培养的 2~8 周内,其土壤中所残留的苯并(b)荧蒽的含量均显著小于对照($P < 0.05$). 柠檬酸三钠处理,在第 2 周和第 8 周,土壤中苯并(b)荧蒽的残留含量要显著小于对照($P < 0.05$). 但在其余的培养时间里,其土壤中苯并(b)荧蒽的残留含量与对照相比无显著差别. 乙酸铵处理在第 2 和第 4 周,其土壤苯并(b)荧蒽的残留含量显著小于对照($P < 0.05$),但在其余的培养时间里,其土壤中苯并(b)荧蒽的残留含量与对照相比无显著差别. 在培养的 1~8 周内,各处理土壤中苯并(b)荧蒽的平均残留含量百分比顺序为,对照(91.0%) > 乙酸铵(88.8%) > 葡萄糖(87.2%) > 柠檬酸三钠(86.6%) > DL-苹果酸(84.3%) > 脲(84.1%).

综上所述,添加营养各处理土壤中菲、荧蒽及苯并(b)荧蒽的平均残留含量均小于对照,说明增加碳源均能提高 PAHs 的降解. Yuan 等^[25] 提出添加葡萄糖可以提高菲的降解. Walworth^[26] 和 Braddock^[27] 等研究表明,增加氮元素也可提高污染土壤中 PAHs 的降解. 本试验中,脲和乙酸铵(碳氮混合源)处理均提高了 PAHs 的降解. 其中,脲处理其土壤 3 种 PAHs 的降解率显著小于葡萄糖和柠檬酸钠处理;乙酸铵处理其土壤菲和荧蒽的残留量要显著小于葡萄糖和柠檬酸钠处理. 这可能是因为土壤添加单一碳营养与添加碳氮混合营养相比较,更能弥补氮营养的相对不足,所以添加脲和乙酸铵之后,优化了微生物的营养条件,激活了土著微生物的活性,从而促进了 PAHs 的降解. 虽然很多学者表明,与对照相比,添加营养的处理污染土壤中 PAHs 的降解显著提高^[25~28]. 但是也有研究者指出,外加碳源会抑制碳氢污染物的降解^[8]. 在本试验中,DL-苹果酸处理

在培养期间其土壤 3 种 PAHs 的降解率均显著大于对照,也就是说它并没有抑制 PAHs 的降解,即在本试验条件下,添加 DL-苹果酸(碳源)会显著刺激老化污染土壤中菲、荧蒽及苯并(b)荧蒽的降解.

另外,在最初的 1~2 周内,土壤中菲的含量快速下降,处于强烈降解过程;而荧蒽在培养的 3~5 周,苯并(b)荧蒽在培养的 5~7 周分别出现强烈降解过程,这与 CO_2 释放量有较好的对应关系. 添加营养各处理 PAHs 的总挥发量在 $(4.1 \sim 5.3) \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,要远远小于土壤 3 种 PAHs 的总含量 $(1.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 和总降解量 $(0.53 \sim 0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$. 而土壤所释放的 CO_2 总量(按纯量碳计算为 $0.15 \sim 0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)要显著小于所添加的碳(按纯量碳计算为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 在整个培养期内,只有添加 DL-苹果酸和脲处理会显著刺激老化污染土壤中菲、荧蒽及苯并(b)荧蒽的降解(土壤 PAHs 含量显著小于对照). Yuan 等^[25] 也表明,添加不同的营养物质对菲残留量存在显著差异,与添加醋酸盐、葡萄糖和丙酮酸盐相比较,添加酵母提取液更有利于刺激微生物的生长及 PAHs 的降解. 分析各处理土壤 TOC 含量也表明,培养结束后,添加营养处理土壤 TOC 含量($15.06 \sim 15.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)均显著大于对照($14.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);且在培养 4~8 周,添加 DL-苹果酸 TOC 含量($15.34 \sim 15.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和脲处理 TOC 含量($15.38 \sim 15.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)要显著小于其它营养处理($15.22 \sim 15.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 而土壤 TOC 与土壤微生物数量存在显著正相关关系^[29]. 土壤 PAHs 的吸附量与 TOC 呈显著正相关^[30],它们与 PAHs 的吸附或结合作用也可导致添加 DL-苹果酸和脲处理土壤 3 种 PAHs 可提取态含量降低.

3 种 PAHs 化合物之间相比较,苯并(b)荧蒽的残留比例最大,其次为荧蒽,菲最少,这与化合物的物理化学性质的复杂性密切相关^[31],低分子量的 PAHs 降解速率要高于高分子量的 PAHs^[32~34]. Sabaté 等^[28] 在生物刺激污染土壤中 PAHs 的降解试验中证明,200 d 后,3 个苯环 PAHs 的浓度降低得很快,例如化合物菲,从最初的 $496 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降低到 $16 \sim 19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 而 4 个苯环 PAHs 的残留含量较高,并随着时间的延长有减少的趋势. 在试验 90 d 后,苯并(a)蒽和䓑的生物降解作用几乎停止. 然而土壤类型、温度、微生物活性等外界因素都会对 PAHs 的降解有着不同程度的影响. 因此,针对不同条件下 PAHs 的降解变化规律有必要进一步开展深入研究.

3 结论

(1) 添加碳源处理在最初的 1 周内其 CO₂ 的释放量显著大于对照, 其中 DL-苹果酸的处理, 其土壤所释放的 CO₂ 量最大. 各处理 CO₂ 的平均释放量顺序为脲 > 葡萄糖 ≈ 柠檬酸三钠 ≈ DL-苹果酸 ≈ 乙酸铵 > 对照.

(2) 培养第 1 周内, 添加营养各处理其土壤所挥发的 PAHs 要显著小于对照, 且 3 种 PAHs 的挥发量大小顺序为, 菲 > 荧蒹 > 苯并(b)荧蒹.

(3) 添加营养的处理土壤中菲、荧蒹及苯并(b)荧蒹的平均降解速度均大于对照. 其中添加 DL-苹果酸和脲处理土壤中菲、荧蒹及苯并(b)荧蒹的降解较快.

(4) 3 种 PAHs 化合物之间相比较, 苯并(b)荧蒹的残留比例最大, 在 72% ~ 81% 之间; 其次为荧蒹, 在 53% ~ 70% 之间; 菲最少, 在 27% ~ 44% 之间.

参考文献:

- [1] Jacques R J S, Okeke B C, Bento F M, *et al.* Microbial consortium bioaugmentation of a polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(7): 2637-2643.
- [2] Zhang X, Oakes K D, Luong D, *et al.* Kinetically-calibrated solid-phase microextraction using label-free standards and its application for pharmaceutical analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 2011, **83**(6): 2371-2377.
- [3] Maier R M, Palmer M W, Andersen G L, *et al.* Environmental determinants of and impact on childhood asthma by the bacterial community in household dust [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(8): 2663-2667.
- [4] Doong R A, Lei W G, Chen T F, *et al.* Effect of anionic and nonionic surfactants on sorption and micellar solubilization of monocyclic aromatic compounds [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(7-8): 327-334.
- [5] Kim I S, Park J S, Kim K W. Enhanced biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons using nonionic surfactants in soil slurry [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1419-1428.
- [6] Kästner M, Breuer-Jammali M, Mahro B. Impact of inoculation protocols, salinity, and pH on the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and survival of PAH-degrading bacteria introduced into soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **64**(1): 359-362.
- [7] Masters G M. Introduction to environmental engineering and science [M]. (2nd ed.). London: Prentice-Hall, 1998. 249-254.
- [8] Alexander M. Biodegradation and bioremediation [M]. (2nd ed.). New York: Academic Press, 1999. 325-353.
- [9] Joung H T, Cho S J, Seo Y C, *et al.* Concentration of dioxin congeners in different phase products from a thermal process of end of life automobile shredder dusts [J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, **26**(4): 721-729.
- [10] Stegman R, Lotter S, Heerenklage J. Biological treatment of oilcontaminated soils in bioreactors [A]. In: Hinchey R E, Offenberg R F, (eds.). *On site bioreclamation* [M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. 188-208.
- [11] Martínez-Lavanchy P M, Müller C, Nijenhuis I, *et al.* High stability and fast recovery of expression of the TOL plasmid-carried toluene catabolism genes of *Pseudomonas putida* mt-2 under conditions of oxygen limitation and oscillation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(20): 6715-6723.
- [12] Phillips T M, Seech A G, Liu D, *et al.* Monitoring biodegradation of creosote in soils using radiolabels, toxicity tests, and chemical analysis [J]. *Environmental Toxicology*, 2000, **15**(2): 99-106.
- [13] Benton M W, Wester D B. Biosolids effects on tobosograss and alkali sacaton in a chihuahuan desert grassland [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**: 199-208.
- [14] Sinha R K, Heart S, Agarwal S, *et al.* Vermiculture and waste management: study of action of earthworms *Eisenia foetida*, *Eudrilus euginae* and *Perionyx excavatus* on biodegradation of some community waste in India and Australia [J]. *Environment*, 2002, **22**: 261-268.
- [15] Field S G, Kurtz J, Cooper E L, *et al.* Evaluation of an innate immune reaction to parasites in earthworms [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2004, **86**(1-2): 45-49.
- [16] Kästner M, Mahro B. Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils affected by the organic matrix of compost [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1996, **44**(5): 668-675.
- [17] Lee K, Park J W, Ahn I S. Effect of additional carbon source on naphthalene biodegradation by *Pseudomonas putida* G7 [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **105**(1-3): 157-167.
- [18] 赵荣飏, 秦占芬, 赵汝松, 等. 水和生物样品中痕量多氯联苯的分析方法研究 [J]. *分析化学*, 2005, **33**(10): 1361-1365.
- [19] 尹春芹, 孙清斌, 王芳, 等. 施肥对老化污染土壤中 PAHs 可提取态浓度的影响 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3710-3717.
- [20] 王聪颖, 王芳, 王涛, 等. 生物强化和生物刺激对土壤中 PAHs 降解的影响 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(1): 121-127.
- [21] Meijer S N, Steinnes E, Ockenden W A, *et al.* Influence of environmental variables on the spatial distribution of PCBs in Norwegian and U. K. soils; implications for global cycling [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(10): 2146-2153.
- [22] Sweetman A J, Valle M D, Prevedouros K, *et al.* The role of soil

- organic carbon in the global cycling of persistent organic pollutants (POPs): interpreting and modeling field data [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(7): 959-972.
- [23] Yang K, Zhu L Z, Xing B S. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by carbon nanomaterials [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(6): 1855-1861.
- [24] <http://www.epa.gov/superfund/sites/npl/hrsres/tools/scdm.htm>.
- [25] Yuan S Y, Wei S H, Chang B V. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by a mixed culture [J]. *Chemosphere*, 2000, **41**(9): 1463-1468.
- [26] Walworth J L, Reynolds C M. Bioremediation of a petroleum-contaminated cryic soil: effects of phosphorous, nitrogen, and temperature [J]. *Journal of Soil Contamination*, 1995, **4**(3): 299-310.
- [27] Braddock J F, Ruth M L, Catterall P H, *et al.* Enhancement and inhibition of microbial activity in hydrocarbon contaminated Arctic soils: implications for nutrient-amended bioremediation [J]. *Environmental Science & Technology*, 1997, **31**(7): 2078-2084.
- [28] Sabaté J, Viñas M, Solanas A M. Bioavailability assessment and environmental fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in biostimulated creosote-contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1648-1659.
- [29] 杨桂生, 宋长春, 万忠梅, 等. 三江平原小叶章湿地土壤微生物活性特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(8): 1715-1721.
- [30] Means J C, Wood S G, Hassett J J, *et al.* Sorption of polynuclear aromatic hydrocarbons by sediments and soils [J]. *Environmental Science and Technology*, 1980, **14**(12): 1524-1528.
- [31] Walton B T, Anderson T A. Structural properties of organic chemicals as predictors of biodegradation and microbial toxicity in soils [J]. *Chemosphere*, 1988, **17**(8): 1501-1507.
- [32] Li X J, Lin X, Li P J, *et al.* Biodegradation of the low concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by microbial consortium during incubation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(2-3): 601-605.
- [33] Leblond J D, Schultz T W, Sayler G S. Observations on the preferential biodegradation of selected components of polyaromatic hydrocarbon mixtures [J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(4): 333-343.
- [34] Coulon F, Pelletier E, Gourhant L, *et al.* Effects of nutrient and temperature on degradation of petroleum hydrocarbons in contaminated sub-Antarctic soil [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(10): 1439-1448.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《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)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行