

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

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

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳 (2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁 (2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄 (2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学 (2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)
闽江河口短叶茳苳湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳 (2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军 (2528)
《环境科学》征稿简则 (2431) 《环境科学》征订启事 (2532) 信息 (2157, 2271, 2367, 2418)	

不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究

梁宵, 占新华*, 周立祥

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 为选育不/少或超量吸收多环芳烃(PAHs)的植物品种进而进行农产品的安全生产和 PAHs 污染环境的植物修复, 以菲为 PAHs 的代表物, 比较了水培条件下 3 种常见农作物(大豆、小麦、胡萝卜)根系吸收菲的动力学特征差异. 结果表明, 3 种作物根系对水培液中的菲有明显的吸收和累积作用, 且菲的吸收量随时间延长而增加, 整个吸收过程可分为快速吸收和慢速吸收 2 个阶段; 3 种作物根系菲吸收能力的大小为大豆 > 胡萝卜 > 小麦; 作物根系吸收菲量与吸收时间的关系可以用 Elovich 方程拟合, 大豆、胡萝卜和小麦根系菲吸收速率常数分别为 4.31 、 4.10 和 $2.84 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$; 作物根系菲吸收的动力学曲线可用米氏方程表征, 大豆、胡萝卜和小麦根系菲的 K_m 值分别为 0.117 、 0.124 和 $0.540 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 根系菲吸收会导致营养液 pH 升高, pH 升高的趋势和吸收速率常数 k 与 K_m 值相对应, 且与 3 种作物根系吸收能力的大小一致. 因此可用根系吸收速率常数 k 、米氏常数 K_m 值和水培液 pH 的变化表征作物根系吸收 PAHs 的能力差异, 且从受影响因素的多寡角度考虑, 吸收速率常数 k 和米氏常数 K_m 较 pH 变化更适合.

关键词: 多环芳烃; 菲; 根系吸收特征; 大豆; 小麦; 胡萝卜

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2516-06

Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops

LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang

(College of Resources and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: It is important to investigate the differences in polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) uptake by roots of different crops for selecting and breeding less or excess uptake species of PAHs by genetic engineering, and further yielding safe production and phytoremediating the soil or water contaminated with PAHs. Hydroponic experiments were performed to study characterization comparison of phenanthrene (a representative of PAHs) uptake by soybean, wheat and carrot roots. Soybean, carrot and wheat roots can take up phenanthrene from Hoagland nutrient solution and the phenanthrene absorbed by roots increases with incubation time. The uptake process consists of two sequential phases: a fast accumulation process followed by a slow one. The capability to take up phenanthrene for the three crops can be arranged as soybean > carrot > wheat. The relationship between the phenanthrene absorbed and time fits Elovich equation well. Uptake rate constants for soybean, carrot and wheat roots are 4.31 , 4.10 and $2.84 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. Concentration-dependent uptake of phenanthrene by roots of soybean, carrot and wheat can be described with Michaelis-Menten equation and the K_m values for soybean, carrot and wheat are 0.117 , 0.124 and $0.540 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Hydroponic solution pH increases due to phenanthrene uptake and the trend in pH increase significantly correlates with those in uptake rate constant and K_m value. In addition, the orders of uptake rate constant, K_m value and pH increase for soybean, carrot and wheat are the same as that of uptake capability. Therefore, it is concluded that uptake rate constant, K_m value and pH increase can be employed as indicators for the capability to take up PAHs by crop roots, and uptake rate constant and K_m value are better indicators than pH increase because of less affecting factors.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; phenanthrene; root uptake characterization; soybean; wheat; carrot

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是环境中普遍存在的一类具有强“三致”效应的有机污染物, 主要来源于焚烧、焦炭生产、炼油、制铝、有色金属冶炼等工业活动^[1]. 这类物质由于其具有高度稠合的环状结构, 水溶性差, 微生物很难降解利用, 因此在环境中呈不断积累的趋势. PAHs 已成为环境领域的研究热点.

环境中 90% 以上的 PAHs 赋存于土壤中^[2]. 由于它们的亲脂特性, 会在作物中积累并通过食物链危害人类健康, 因而植物对土壤中 PAHs 吸收及其

机制研究已受到研究者的高度重视^[3-5]. Kipopoulou 等^[1]观察到生长于 PAHs 污染土壤上的 5 种蔬菜 PAHs 含量并不相同, 其中对菲的累积差异为: 莴苣 ($58 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 菊苣 ($43 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 韭菜 ($33 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 胡萝卜 ($27 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 卷心菜

收稿日期: 2011-09-01; 修订日期: 2011-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20377024); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2009AA063103); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (KYZ201145)

作者简介: 梁宵 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境有机污染化学, E-mail: 2009103084@njau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: xhzhao@njau.edu.cn

($18 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); Fismes 等^[5]研究报道了生菜、马铃薯、胡萝卜在温室盆栽试验条件下,马铃薯对 16 种多环芳烃的富集能力都远远大于生菜和胡萝卜;尹春芹等^[6]的结果表明油麦菜对菲的积累量约为菜心菜的 3 倍.所有这些研究均表明了不同植物对同一或相同 PAHs 吸收能力不同.前期的研究表明,需载体协助和耗能的主动过程参与了根系 PAHs 的吸收过程;且此过程与 H^+ 关系密切,是通过与 H^+ 共运方式进行^[7].笔者推测不同植物根系对同一 PAHs 吸收能力的不同可能与这种共运载体特性的差异有关.是否确实如此迄今尚无报道.

尽管在植物根系吸收 PAHs 方面的研究报道较多^[8-12],并且取得了一些创新性成果,但尚无包括吸收差异与共运载体特性之间的关系等在内的系统研究,而此类研究对于确定植物根系吸收 PAHs 能力差异的关键因子,进而筛选或通过基因工程手段培育出不/少吸收或超量吸收 PAHs 的植物品种极为重要.为此,本研究以菲(PHE)为 PAHs 的代表(因其在环境中检出率和检出浓度均较高^[13-16]),通过室内水培试验研究大豆、小麦和胡萝卜吸收 PAHs 的特征差异,以期为农产品的安全生产和 PAHs 污染土壤或水体的植物修复高效能品种的选育提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试大豆(*Glycine max*)为苏豆 5 号;小麦(*Triticum aestivum* L.)为南农 9918;胡萝卜(*Daucus carota*)为兴运三红八寸参.这 3 种作物种子均购于江苏省农业科学院种子站,均是江苏地区的主要种植品种.

1.2 试验方法

1.2.1 幼苗的培养

取一定量种子用去离子水浮选去除瘪粒,然后选取比较均一的种子用 3% H_2O_2 消毒 5 min. 洗净后的种子置于底部铺有石英砂的搪瓷托盘中,在 28℃ 恒温培养箱中进行催芽. 种子出芽后转移至 25℃ 人工气候箱内,去离子水培养 7 d, 每天换水 1 次,备用.

1.2.2 水培试验

选择长势比较一致的植株幼苗移入烧杯进行培养,每杯 20 株,先后在 500 mL 1/2 浓度和全浓度的 Hoagland 营养液中各培养 3 d,再换成超纯水饥饿培养 1 d^[17],然后按以下方案进行培养:①营养液中

PHE 含量为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 5.50, 分别在 25℃ 下培养 2、4、8、16、24、36 h; ②营养液中 PHE 含量分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8 和 $1.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 5.50, 25℃ 下培养 4 h; 以上方案各处理中的 PHE 用甲醇溶解后加入,且各处理均含有等量的甲醇(控制甲醇浓度 $<0.1\%$,在此浓度范围内甲醇对植物生长无影响^[18]),每处理设置 3 次重复. 培养结束后,作物根系样品用超纯水洗净后在甲醇中浸泡 1~2 min 后用超纯水洗净,擦干后冷冻保存待分析植物体内 PHE 浓度.

1.2.3 测定方法

(1)植物体内 PHE 的提取 植物样品磨碎、混匀后称取 1g(鲜重)于离心管中,加入 10 mL 1:1(体积比)的丙酮和二氯甲烷混合液,超声萃取 30 min,萃取过程重复 2 次,将 3 次萃取液合并过无水 Na_2SO_4 柱后转移至 50 mL 圆底烧瓶,40℃ 下用真空旋转蒸发仪蒸干,用正己烷溶解后转移至装有 2 g 硅胶的玻璃柱净化,并用 25 mL 1:1(体积比)的正己烷和二氯甲烷混合液淋洗,洗脱液收集至圆底烧瓶,再次蒸干后,用 2 mL 甲醇溶解,过 0.22 μm 滤膜后用 HPLC 分析. 该方法 PHE 回收率可以达到 90.67%.

(2)HPLC 分析 采用美国 Waters 公司生产的 HPLC 进行分析测试,泵的型号为 1525,紫外检测器型号为 2487,色谱柱是 Waters 4.6 mm $\times$ 150 mm C_{18} 反向柱,柱温 30℃,流动相为甲醇/水(80/20, 体积比),流速为 $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样量为 10 μL ,菲的紫外检测波长为 254 nm.

1.3 数据统计分析

采用 Excel 及 SPSS 16.0 软件对试验结果进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 作物根系菲吸收的时间动态

2.1.1 菲吸收量、吸收速率与时间的关系

3 种作物根系菲吸收量的时间变化动态如图 1 所示. 在水溶液中菲浓度为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,36 h 内 3 种作物根系对菲的吸收量皆随时间的延长而增加,然而增加幅度却随吸收时间的延长而减弱. 作物对 PHE 的吸收过程可以分为 2 个阶段:①快速吸收阶段,此过程发生在 PHE 处理后的初期;②慢速吸收阶段,此过程发生在快速吸收阶段后. 大豆、胡萝卜和小麦快速阶段历时均为 2 h. 虽然 3 种作物根系对水培液中的菲均有一定的吸收能力,但吸收能

力的大小存在显著差异(成对数据 t -检验, $P < 0.05$), 表现为大豆 > 胡萝卜 > 小麦.

描述化学反应动力学常见的模型有零级方程、一级方程、抛物线方程、Elovich 方程、指数函数方程和权函数方程等^[19]. 以决定系数(R^2)和标准差(SD)作为评价指标, 图1结果采用 Elovich 方程 $c_t = c_0 + k \ln(t/2)$ 对3种植物根系菲吸收与吸收时间关系的拟合最佳. 大豆、小麦和胡萝卜拟合结果分别为:

$$c_t = 31.5 + 4.31 \ln(t/2) \quad (R^2 = 0.981)$$

$$c_t = 6.18 + 2.84 \ln(t/2) \quad (R^2 = 0.941)$$

$$c_t = 7.68 + 4.10 \ln(t/2) \quad (R^2 = 0.938)$$

式中, c_t 为 t 时刻作物根系(鲜重)菲的吸收量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); c_0 为初始吸收量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); t 为吸收时间(h); k 为根系菲吸收速率常数 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$].

由 k 值可知, 3 种作物根系菲吸收速率常数的大小顺序为大豆 > 胡萝卜 > 小麦. 由于吸收速率常数 k 的大小在一定的温度条件下仅取决于作物品种与 PAHs 的种类^[20,21], 因此其可以作为表征作物根系吸收 PAHs 能力的指标. 同时由上述方程可以预测任意时刻植物根系对多环芳烃的吸收量.

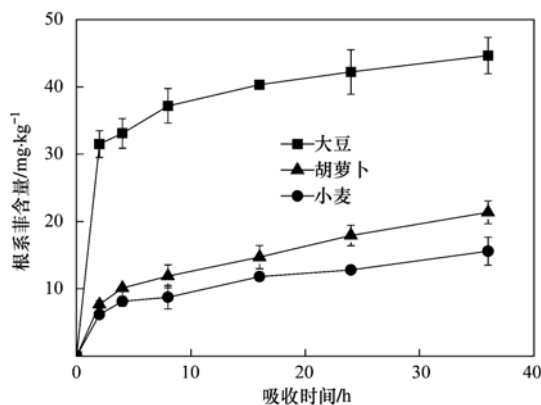


图1 3种作物根系菲含量随时间的变化

Fig. 1 Time course of phenanthrene uptake by roots of three crops

为了进一步探讨在 0~36 h 内根系对菲的吸收动力学特征差异, 用根系菲的吸收速率对吸收时间作图(图2). 3 种作物根系菲的吸收速率在 2~8 h 下降幅度较大, 第 8 h 作物根系菲吸收速率分别为第 2 h 吸收速率的 29.49%、35.39%、38.65%, 8~36 h 以后下降缓慢, 至第 36 h 三者根系菲吸收速率相当于第 2 h 吸收速率的 7.86%、14.00%、15.45%, 此时间段它们菲吸收速率的平均降低速率为 0.12、0.023 和 0.031 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h}^2)^{-1}$, 显著低于 2~8 h 时间段的平均降低速率 1.85、0.33 和 0.39

$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h}^2)^{-1}$.

经优化选取, 图2根系吸收速率与时间的关系可采用如下方程拟合:

$$v_t = v_0 e^{-kt}$$

大豆、小麦和胡萝卜拟合结果分别为:

$$v_t = 15.75 e^{-0.084 t} \quad (R^2 = 0.871)$$

$$v_t = 3.09 e^{-0.0659 t} \quad (R^2 = 0.849)$$

$$v_t = 3.84 e^{-0.078 t} \quad (R^2 = 0.943)$$

式中, v_t 为 t 时间内作物根系菲平均吸收速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$]; v_0 为初始吸收速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$]; t 为吸收时间(h); k 为根系菲吸收速率的消减速率常数(h^{-1}).

由消减速率常数的大小可知: 大豆 > 胡萝卜 > 小麦. 此类方程可提供任意时间内 3 种作物根系菲的吸收速率.

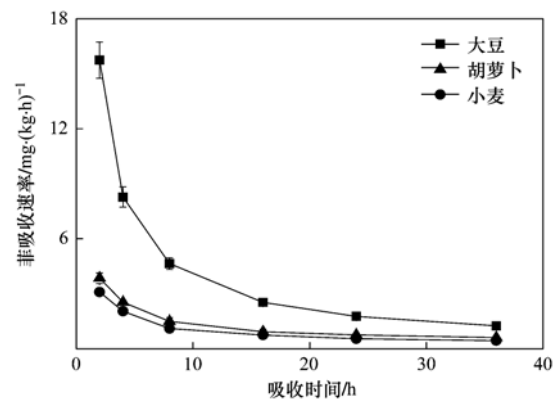


图2 3种作物根系吸收速率随时间的变化

Fig. 2 Time course of phenanthrene uptake rate in roots of three crops

2.1.2 水培液中菲浓度的时间动态

图3为溶液中菲浓度随培养时间的变化动态. 可以看出在 0~36 h 内, 水溶液中菲浓度下降明显, 大豆、小麦和胡萝卜水培营养液菲浓度分别下降到初始浓度的 14.25%、64.69%、65.01%. 笔者以前的研究已表明水培液中菲的减少主要是由于植物根系的吸收作用所致^[22], 且本试验时间短, 菲浓度在毒害阈值以内, 不会对作物根伸长产生抑制作用^[23]. 水培液中菲浓度随吸收时间的变化(图3)与根系菲吸收量随吸收时间的变化(图1)相一致.

水培液中菲浓度随时间的变化可用如下方程拟合:

$$c_t = c_0 e^{-kt}$$

式中, c_t 为不同时间溶液中菲浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_0 为水培液中菲浓度初始值($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); k 为溶液中菲的

消减速率常数(h^{-1}); t 为根系的水培时间(h). 大豆、小麦和胡萝卜的拟合结果为:

$$c_t = e^{-0.204t} \quad (R^2 = 0.815)$$
$$c_t = e^{-0.0095t} \quad (R^2 = 0.878)$$
$$c_t = e^{-0.037t} \quad (R^2 = 0.806)$$

以上这些方程可计算出任意时间点 3 种作物水培液中菲的残留浓度. 依据营养液中菲浓度消减速率常数可知, 3 种作物根系对菲的吸收能力大小为: 大豆 > 胡萝卜 > 小麦.

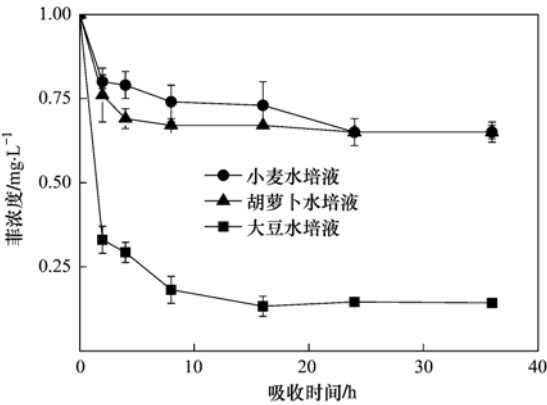


图 3 水培液中菲浓度随时间变化
Fig. 3 Time course of phenanthrene concentration in hydroponic solution

2.2 作物根系菲吸收的浓度依赖性

不同作物根系菲吸收的动力学曲线如图 4 所示. 在菲的溶解度(水溶液体系)范围内, 根系菲吸收速率的总体变化趋势是随培养液中菲浓度的增加而增大; 当营养液中菲超过某一浓度时, 根系菲吸收速率渐趋饱和. 在水培液中菲浓度为 $0 \sim 1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, 根系菲吸收速率的大小顺序为: 大豆 > 胡萝卜 > 小麦; 当菲浓度为 $0 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,

溶液中单位浓度菲所产生的根系菲吸收速率的增率较大; 当菲浓度为 $0.4 \sim 1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 溶液中单位浓度菲所产生的根系菲吸收速率的增率放缓, 即低浓度下植物根系菲吸收速率随着菲浓度升高增加较快.

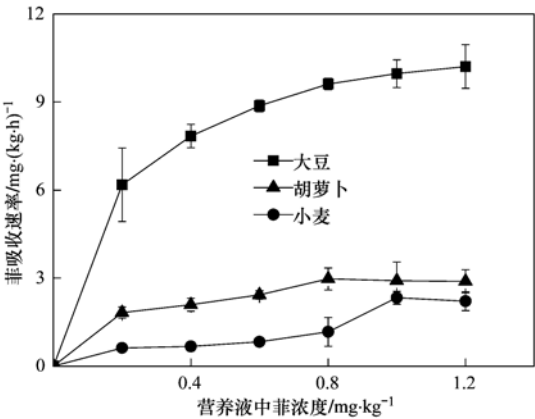


图 4 3 种作物根系菲吸收速率的浓度依赖性
Fig. 4 Concentration-dependent uptake of phenanthrene by roots of three crops

作物根系吸收菲的动力学曲线与酶促反应动力学曲线相似^[24]. 因此, 可以采用 Michaelis-Menten 方程(米氏方程)来描述. Michaelis-Menten 双倒数方程如下:

$$1/V = K_m/V_{\max} \times 1/c + 1/V_{\max}$$

式中, V 为作物根系(鲜重)的菲吸收速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$]; $V_{\max}$ 为作物根系菲最大吸收速率 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$]; c 为水溶液中菲浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, c 小于等于菲的溶解度), K_m 为米氏常数, 即为菲吸收速率达到 $1/2 V_{\max}$ 时水溶液中菲浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

由此方程可求得 3 种作物根系吸收菲的动力学方程参数如表 1 所示.

表 1 3 种作物根系菲吸收的 Michaelis-Menten 方程及参数

Table 1 Michaelis-Menten equation and parameters for phenanthrene uptake by roots of three crops			
种类	双倒数方程	米氏常数 K_m / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	最大吸收速率 $V_{\max}$ / $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$
大豆	$1/V = 0.0114/c + 0.097$ ($R^2 = 0.994$)	0.117	10.20
小麦	$1/V = 0.232/c + 0.430$ ($R^2 = 0.936$)	0.540	2.32
胡萝卜	$1/V = 0.0418/c + 0.336$ ($R^2 = 0.909$)	0.124	2.96

传统酶学研究中, K_m 值是用以表征酶与底物亲和力的参数, 只与酶和底物的种类有关, 而与底物浓度无关; 一般地, K_m 愈小, 酶与底物的亲和力愈大^[25], 在本研究中可用以表征作物根系吸收菲时细胞膜上菲的转运载体对菲的亲和力. 比较 3 种作物的 K_m 值可以得出: 小麦 > 胡萝卜 > 大豆. 因此, 大豆根系转运载体对菲的亲和力最大, 胡萝卜次之, 小

麦最小. 课题组前期的研究已证实需载体协助和耗能的主动过程参与了根系 PAHs 的吸收过程^[7], 笔者推测: 不同植物根系对同一 PAHs 吸收能力的不同可能与这种共运载体特性的差异有关. K_m 值是一个非常重要的表征共运载体特性的定量指标, 表 1 中 K_m 值的结果能很好地区分不同作物根系吸收 PHE 的差异, 且值得指出的是, 在一定温度下 K_m 值

只取决于作物和底物的种类,而不受底物浓度和环境因素的影响^[26],因此 K_m 值可用作表征作物根系吸收 PAHs 能力差异的指标。

2.3 介质 pH 变化与根系菲吸收

前期研究表明,作物根系 PAHs 吸收的主动过程是以 H^+ 共运方式进行^[27],因此不同品种作物根系 PAHs 吸收能力的差异必然会通过营养介质 pH 的变化反映出来。3 种作物根系菲吸收导致的营养介质 pH 的变化如图 5 所示。与 H^+ 共运吸收会造成营养介质 pH 升高。作物根系菲吸收 4 h 后,大豆水培液 ΔpH (菲吸收一段时间后营养液 pH 减去营养液初始 pH)可高达 0.91,而胡萝卜和小麦的 ΔpH 分别为 0.76 和 0.55,均显著低于大豆($P < 0.05$)。产生此现象的原因是由于大豆根系 PHE/ H^+ 共运活性强于其他两者,该结果与上述搬运载体对菲的亲力和常数(K_m)和吸收速率常数(k)结果相一致,因此,根系吸收 PAHs 过程中介质 pH 的变化(ΔpH)也可以作为作物根系吸收 PAHs 能力差异的表征指标。但相对于 K_m 和 k , ΔpH 的大小除了与作物品种和 PAHs 种类有关外,还依赖于营养液体系等因素。

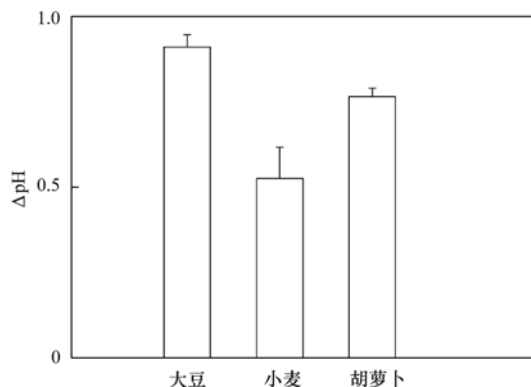


图 5 3 种作物根系吸收菲 4 h 后营养液 pH 的变化

Fig. 5 Changes in hydroponic solution pH after 4 h of phenanthrene uptake by roots of three crops

3 结论

(1)大豆、小麦和胡萝卜根系菲吸收量随时间的延长而增加,整个吸收过程可分为 2 个阶段;即快速阶段和慢速阶段。3 种作物根系菲吸收能力的大小为大豆 > 胡萝卜 > 小麦。

(2)作物根系对水培液中菲的吸收量与时间的关系符合 Elovich 方程,吸收速率常数(k)的大小顺序为大豆 > 胡萝卜 > 小麦;作物根系菲吸收速率与菲浓度之间的关系可用米氏方程拟合,米氏常数(K_m)的大小为大豆 < 胡萝卜 < 小麦,菲吸收载体

亲和力的顺序则相反(即大豆 > 胡萝卜 > 小麦);作物根系菲吸收会导致周围介质 pH 升高,3 种作物根系菲吸收介质 pH 升高(ΔpH)的幅度为大豆 > 胡萝卜 > 小麦。

(3)由于吸收速率常数、亲和力常数和 ΔpH 的变化与 3 种作物根系吸收菲的能力大小一致,因此可以用此 3 个参数表征作物根系 PAHs 吸收能力,但吸收速率常数和亲和力常数较 ΔpH 所受的影响因素少,更适于表征作物根系 PAHs 吸收能力的差异。

参考文献:

- [1] Kipopoulou A M, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area[J]. Environmental Pollution, 1999, **106**(3): 369-380.
- [2] Wild S R, Jones K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the united kingdom environment: a preliminary source inventory and budget[J]. Environmental Pollution, 1995, **88**(1): 91-108.
- [3] 占新华,周立祥,万寅婧,等. 水溶性有机物对植物吸收菲的影响及其机制研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1184-1188.
- [4] 潘声旺,魏世强,袁馨,等. 金发草对土壤中菲、芘的修复机制[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1273-1279.
- [5] Fismes J, Perrin-Ganier C, Empereur-Bissonnet P, et al. Soil-to-root transfer and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetables grown on industrial contaminated soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**(5): 1649-1656.
- [6] 尹春芹,蒋新,杨兴伦,等. 多环芳烃在土壤-蔬菜界面上的迁移与积累特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3240-3245.
- [7] Zhan X H, Ma H L, Zhou L X, et al. Accumulation of phenanthrene by roots of intact wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings: passive or active uptake? [J]. BMC Plant Biology, 2010, **10**(1): 52.
- [8] Su Y H, Zhu Y G. Transport mechanisms for the uptake of organic compounds by rice (*Oryza sativa*) roots [J]. Environmental Pollution, 2007, **148**(1): 94-100.
- [9] Tao S, Jiao X C, Chen S H, et al. Accumulation and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in rice (*Oryza sativa*) [J]. Environmental Pollution, 2006, **140**(3): 406-415.
- [10] Watts A W, Ballesteros T P, Gardner K H. Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in salt marsh plants *Spartina alterniflora* grown in contaminated sediments[J]. Chemosphere, 2006, **62**(8): 1253-1260.
- [11] Lin H, Tao S, Zuo Q, et al. Uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons by maize plants [J]. Environmental Pollution, 2007, **148**(2): 614-619.
- [12] 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.
- [13] 吴文伶,孙红文. 菲在沉积物上的吸附-解吸研究[J]. 环境

- 科学, 2009, **30**(4): 1133-1138.
- [14] 汪祖丞, 刘敏, 杨毅, 等. 菲在长江口的多介质归趋模拟[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2444-2449.
- [15] Hadibarata T, Tachibana S. Characterization of phenanthrene degradation by strain *Polyporus* sp. S133 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(1): 142-149.
- [16] Pantsyrnaya T, Blanchard F, Delaunay S, *et al.* Effect of surfactants, dispersion and temperature on solubility and biodegradation of phenanthrene in aqueous media [J]. Chemosphere, 2011, **83**(1): 29-33.
- [17] 田霄鸿, 李生秀, 王清君. 几种作物 NO_3^- 吸收动力学参数测定方法初探[J]. 土壤通报, 2001, **32**(1): 16-18.
- [18] 谢明吉, 严重玲, 叶菁. 菲对黑麦草根系几种低分子量分泌物的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(2): 576-579.
- [19] 陈苏, 孙铁珩, 孙丽娜, 等. Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 在根际和非根际土壤中的吸附-解吸行为[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 843-851.
- [20] 范淑秀, 李培军, 何娜, 等. 多环芳烃污染土壤的植物修复研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(6): 2007-2013.
- [21] Zohair A, Salim A B, Soyibo A A, *et al.* Residues of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides in organically-farmed vegetables[J]. Chemosphere, 2006, **63**(4): 541-553.
- [22] 杨静, 占新华, 周立祥. 小麦根系吸收菲的动力学机制探究[J]. 南京农业大学学报, 2009, **32**(4): 100-105.
- [23] 宋玉芳, 周启星, 宋雪英, 等. 菲和芘对土壤中植物根伸长抑制的生态毒性效应[J]. 生态学杂志, 2003, **22**(5): 6-9.
- [24] 陈思杨, 江荣风, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐/亚硒酸盐的吸收及转运机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 284-289.
- [25] 莫丹, 袁兴中, 曾光明, 等. Tween 80 和鼠李糖脂对稻草酶解的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1198-2004.
- [26] 杨春璐, 孙铁珩, 和文祥. 汞、豆磺隆复合污染对土壤脲酶活性及动力学特征的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(5): 740-744.
- [27] 张晓斌, 占新华, 周立祥, 等. 小麦/苜蓿套作条件下菲污染土壤理化性质的动态变化[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1462-1470.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 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

国内外公开发行人