

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐珺, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12)	《环境科学》征订启事 (194)
信息 (21, 51)	

镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响

史广宇, 程媛媛, 施维林*

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 探讨了镉(Cd)对铜绿假单胞菌(*P. aeruginosa*) SH1 处理壬基酚(NP)的影响. 结果表明, *P. aeruginosa* SH1 的生物量随着 Cd^{2+} 浓度的增大有明显的降低, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 存在时, 菌株在 24 h 的生物量下降 27.1%; Cd^{2+} 的加入对于菌体吸附 NP 有较大影响. 对于活菌, 低浓度 Cd^{2+} ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 能够促进 *P. aeruginosa* SH1 吸附 NP, 而高浓度 Cd^{2+} ($\geq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的加入起抑制作用. 对于失活菌体, 低浓度 Cd^{2+} 的加入对于菌体吸附 NP 无显著性影响, 而高浓度的 Cd^{2+} 能够促进吸附作用; 降解实验结果表明, 胞内酶的降解速率要远远大于菌体. 不同浓度的 Cd^{2+} 对菌体和胞内酶降解 NP 有着不同的影响. 当体系中存在高浓度 Cd^{2+} 时, 胞内酶和菌体降解 NP 均受到抑制, 胞内酶受到的抑制作用更显著. 低浓度的 Cd^{2+} 对菌体降解 NP 有促进作用, 而对胞内酶降解 NP 无显著性影响; 胞内酶对 NP 的降解过程符合一级动力学反应模型, Cd^{2+} 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降解速率最快, 半衰期为 5.5 h, 而菌体降解 NP 则不能很好地通过一级动力学模型进行拟合.

关键词: 铜绿假单胞菌; 壬基酚; 镉; 降解; 动力学

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0294-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201607107

Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by *Pseudomonas aeruginosa*

SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin*

(College of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The influence of Cd on the degradation of nonylphenol (NP) by *P. aeruginosa* SH1 was investigated in this study. The investigation revealed that biomass of the strain was significantly declined with the increase of Cd^{2+} concentration. The biomass was declined by 27.1% in the presence of $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ after 24 h. The addition of Cd^{2+} had a great influence on adsorption of NP by the strain. As for the effect of living stain, adsorption by *P. aeruginosa* SH1 cells was stimulated at low concentrations of Cd^{2+} ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), while inhibited at higher levels ($\geq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). As for inactivation of microbes, adsorption by cells was stimulated at higher concentrations, but was only slightly influenced at low levels. The results showed that the intracellular enzymes had much greater degradation rate than the living cells. Different concentrations of Cd^{2+} had different effects on bacteria and intracellular enzyme degradation of NP separately. The degradation efficiency when using intracellular enzymes and bacteria was inhibited at higher levels of Cd^{2+} and the intracellular enzyme inhibition was more significant. Degradation by cells was stimulated at low concentrations of Cd^{2+} , but no significant impact was found on that by intracellular enzymes. The degradation process of NP by intracellular enzymes of the strain conformed to the first-order kinetic model. The highest reaction rate was achieved when the concentrations of Cd^{2+} was $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and the half-life of this substrate was 5.5 h. However, the degradation process of NP by the strain did not conform to the first-order kinetic model.

Key words: *Pseudomonas aeruginosa*; nonylphenol; Cd; degradation; kinetics

壬基酚(nonylphenol, NP)是一种持久性有机污染物,属于典型的酚类内分泌干扰物,具有毒性,难降解性,生物累积性和雌激素活性^[1, 2]. NP 是壬基酚聚氧乙烯醚(NPEOs)较为稳定的降解产物之一,后者是目前全球广泛应用的一类非离子表面活性剂^[3]. 每年约有 50 万 t 的 NPEOs 通过生活与工业废水的排放、污泥处置、农田灌溉和施肥进入到环境中,它们经过微生物降解,生成了比母体毒性更大、疏水性更强、更难生物降解的 NP^[4, 5]. 因此,修复 NP 污染的环境介质已成为环境工作者关注的热点问题.

微生物降解在 NP 等毒害性有机物污染环境修复中一直扮演着重要的角色,是该类污染环境的一

个重要修复手段. Tanghe 等^[6]于 1999 年分离到 1 株可以降解具有支链烷烃结构 NP 的细菌 *Sphingomonas* sp., 此后相继有人发现能够降解 NP 的细菌^[7~9]. 董涵等^[10]从污染严重的李村河口底泥中分离到 1 株能降解 NP 的真菌菌株 *Trichoderma asperellum*, 一定环境条件下其对 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NP 的降解率达到了 71.4%; 郭玥等^[11]在活性污泥中筛选出了 1 株能降解 NP 的菌株 *Serratia* sp. LJ, 该菌株

收稿日期: 2016-07-17; 修订日期: 2016-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(3157051); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150287); 苏州科技学院青年基金项目(XKQ201415)

作者简介: 史广宇(1985~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境污染生物技术, E-mail: shigylove@126.com

* 通信作者, E-mail: weilin-shi@163.com

在以 NP 为唯一碳源的无机盐培养基中,能够使 NP 得到较为迅速的降解. 在 NP 浓度为 $10 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度为 30°C 的条件下, 菌株对 NP 的降解遵循一级动力学方程.

微生物对污染物的降解作用可受多种因素影响, 如共代谢底物、有毒物质等^[12,13]. 其中, 重金属由于具有生物毒性, 可影响微生物菌株生长繁殖能力, 进而影响污染物的降解作用^[14]. 目前, 已有学者开展了重金属对有机污染物生物降解影响的研究^[15, 16], 而关于重金属对 NP 生物降解影响的研究报道还较少. 本研究选取 1 株课题组前期工作中分离得到的 NP 好氧降解菌——铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*) 为实验菌株, 考察 Cd^{2+} 存在时菌株吸附/降解 NP 的效果. 对其胞内酶进行提取, 分析了不同浓度 Cd^{2+} 对菌和酶降解的动力学影响, 以期为重金属共存下 NP 类污染物的微生物修复提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验试剂与材料

1.1.1 实验试剂

NP (纯度 98%)、HPLC 级甲醇购于 Sigma Aldrich 公司; 储备液: 用色谱纯甲醇溶解, 配制成 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液, 4°C 保存待用. 牛肉膏、蛋白胨、NaCl、 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 等购自上海化学试剂厂, 均为 AR 级. $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 母液由 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶于高纯水得到.

1.1.2 菌株与培养基

菌株: 由本课题团队从受重金属-有机物复合污染严重的苏州市原江苏化工农药集团地块土壤中筛选得到, 经 16S rDNA 序列比对, 鉴定为铜绿假单胞菌, 菌株编号为 SH1. 预实验结果表明, 在降解 48 h, 菌浓度为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7.0 且初始 NP 浓度小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 降解率在 50% 左右, 表明其对 NP 有较好的降解效果.

营养培养基: 牛肉膏 3 g, 蛋白胨 10 g, NaCl 5 g 蒸馏水 1000 mL , pH 值为 7.2 ~ 7.4.

无机盐培养基 (MSM): $1 \text{ g NH}_4\text{NO}_3$, $1.5 \text{ g KH}_2\text{PO}_4$, $3 \text{ g K}_2\text{HPO}_4$ 溶于 1000 mL 去离子双蒸水.

所有培养基分装后在 121°C 下灭菌 30 min.

1.2 实验方法

1.2.1 菌株培养

接种 *P. aeruginosa* SH1 于培养液中, 于 30°C , $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中振荡培养 24 h. 取菌液按 1% 体

积比接种于新鲜培养液中, 在上述条件下培养 24 h, $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min 获取菌体, 用 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷酸缓冲液 (pH 7.3) 清洗菌体 3 次, 备用.

1.2.2 Cd 浓度测定

把处理体系转入离心管, 于 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 取上清液测定 Cd 含量. Cd 浓度利用火焰原子吸收分析仪进行分析.

1.2.3 NP 的萃取与检测

采用超声波辅助萃取法对体系中的 NP 进行提取. 具体步骤如下: 用 $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 调节培养液 pH 为 2.0, 加入等体积的乙酸乙酯, 超声萃取 2 次, 移出有机相, 过无水硫酸钠脱水, 后经旋转蒸发器 40°C 蒸发至干. 再加入 10 mL 色谱级乙醇, 置于漩涡振荡器上振荡 60 s, 将振荡后的溶液转移至色谱进样瓶. 样品采用 GC-MS 检测, 色谱和质谱条件参照文献[17]的方法, 由于样品浓度较低, 进样时不进行分流处理.

1.2.4 Cd^{2+} 和 NP 对 *P. aeruginosa* SH1 生长的影响

分别向含有 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 和 1、10、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NP 的 40 mL 营养液体培养基中接入 1% 处于对数生长期的菌悬液. 置于 30°C , $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床培养, 每间隔一定时间分别测定菌液的 D_{600} 浓度, 绘制生长曲线. 以不加污染物的营养液体体系作为空白对照.

1.2.5 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 吸附 NP 的影响

(1) 活菌对 NP 的吸附

于 pH 7.0 的 MSM 培养基中, 加入一定量菌悬液, 使降解体系最终体积为 20 mL , 投菌量为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 再向体系中加入一定量的 NP 和 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液, 使体系中 NP 浓度分别为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Cd^{2+} 浓度分别为 0.5、1、5、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下置于 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温摇床中, 于 8 h 取样, 置于玻璃离心管中 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心, 取上清液分析 NP 含量.

(2) 戊二醛固定后 *P. aeruginosa* SH1 对 NP 的吸附

取菌体配制成菌液, 用最终浓度为 2.5% 的戊二醛固定 24 h 后, 用双蒸水清洗至 pH 中性. 吸附实验同(1)所述.

1.2.6 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 降解 NP 的影响

向含 $10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NP、pH 值为 7.0 的 MSM 体系中, 加入一定量的菌悬液, 使降解体系最终体积为 20 mL , 投菌量为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 再向体系中加入一定量的 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液, 使体系中 Cd^{2+} 浓度分别为 0.5、

1、5、10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 于 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下反应, 测定 Cd^{2+} 浓度对降解反应速率的影响。

1.2.7 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 胞内酶降解 NP 的影响

取对数生长期的 *P. aeruginosa* SH1 用 0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 7.2 的磷酸缓冲液 (PBS) 洗涤 3 次后, 加入一定量的 PBS 重悬, 置于 0°C 的冰-水混合水浴中, 用超声波细胞粉碎机 (450 W) 破碎处理 150 次, 每次 3 s, 间隔 3 s, 4°C 下 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 取上清液, 得胞内粗酶液。粗酶液中蛋白含量以牛血清蛋白作为标准蛋白采用 Bradford 法检测^[18]。

向含 10.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NP、pH 值为 7.0 的 MSM 体系中, 加入一定量的胞内粗酶液, 使降解体系最终体积为 20 mL。再向体系中加入一定量的 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液, 使体系中 Cd^{2+} 浓度分别为 0.5、1、5、10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 于 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下反应, 测定 Cd^{2+} 浓度对降解反应速率的影响。

2 结果与讨论

2.1 Cd^{2+} 和 NP 对 *P. aeruginosa* SH1 生长的影响

P. aeruginosa SH1 在未添加污染物与 NP 和 Cd^{2+} 抑制下的生长曲线如图 1 所示。菌 SH1 在培养基中的生长曲线规律表现为: 0~6 h 为停滞期, 6~18 h 为对数生长期, 18 h 后进入稳定期, 36 h 后步入衰亡期。与正常生长曲线相比, 污染物的加入对菌株的生长有一定程度的影响。主要表现为: 当培养基中添加 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NP 时, 菌株生长的停滞期由 0~6 h 延长至 0~12 h, 对数期、稳定期顺序后延, 对数生长期为 12~36 h, 36 h 后进入稳定期, 但是总体生物量与正常生长时相比只是有较小

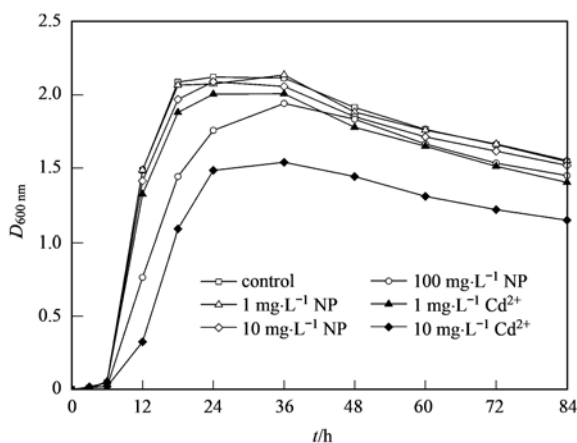


图 1 NP 和 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 生长的影响

Fig. 1 Effect of different concentrations of NP and Cd^{2+} on the growth of *P. aeruginosa* SH1

的降低 (8.2%)。当培养基中添加 Cd^{2+} 时, *P. aeruginosa* SH1 的生物量随着 Cd^{2+} 浓度的增大有明显的降低, 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 存在时 SH1 在 24 h 的生物量下降 27.1%, 但这一影响小于其它研究中 Cd^{2+} 对微生物生长的影响。Hong 等^[19]的研究结果表明, 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 对 *S. wittichii* RW1 的生长有抑制作用, 生物量下降 50% 以上。这说明 *P. aeruginosa* SH1 能在较高浓度 NP 和 Cd^{2+} 存在下生长, 主要原因是本实验使用的 SH1 来源于污染严重的化工农药生产企业搬迁地, 因此对 NP 和 Cd 有一定的耐受性。

2.2 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 吸附 NP 的影响

吸附是微生物与水体中污染物接触的第一步, 也是微生物降解有机污染物的重要过程^[20,21]。本文研究了不同浓度 Cd^{2+} 存在下活菌与失活菌对 NP 的吸附效果, 结果如图 2 所示。结果表明, *P. aeruginosa* SH1 对于 NP 有较好的吸附效果, 8 h 时吸附率达到了 69.7%。活菌的吸附效果要远远好于失活菌, 这说明菌体对于 NP 的吸附依赖于菌体活性。有研究表明, 生物吸附机制可分为代谢依赖型和非代谢依赖型^[22], *P. aeruginosa* SH1 对于 NP 的吸附属于前者。 Cd^{2+} 的加入对于菌体吸附 NP 有较大的影响。对于活菌而言, 低浓度的 Cd^{2+} (0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 能够促进 *P. aeruginosa* SH1 吸附 NP。这可能是由于 Cd^{2+} 的加入能改变细胞表面的疏水性, 从而增强菌体对于有机物的吸附^[23]。高浓度 Cd^{2+} ($\geq 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的加入抑制菌体对 NP 的吸附。主要原因是高浓度的 Cd^{2+} 对于菌体有毒性作用, 通过影响菌体的代谢而影响其对 NP 的吸附效果。对于失活菌体而言, 低浓度的 Cd^{2+} 的加入对于 *P. aeruginosa* SH1 吸附 NP 无显著性影响, 而高浓度的 Cd^{2+} 促进菌体对 NP 的吸附。这可能是因为 Cd^{2+} 在 *P. aeruginosa* SH1 和 NP 之间起到了架桥作用^[24]。本课题组前期的研究结果表明, *P. aeruginosa* SH1 对于 Cd^{2+} 有较好的吸附效果, 且失活菌体的吸附效果明显优于活菌。当体系中同时存在 Cd^{2+} 和 NP 时, 失活菌体能有效大量地吸附 Cd^{2+} , 从而改变菌体表面的化学特性, 增强其吸附 NP 的能力。高浓度 Cd^{2+} 对于活菌吸附 NP 的影响结果同样可以佐证上述结论。 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 生长的影响实验表明, 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 存在时 *P. aeruginosa* SH1 生物量下降 27.1%, 而其吸附率仅下降 17.6%。这说明 Cd^{2+} 的加入对于菌体的活性影响要大于其对吸附的影响, 原因可能是 Cd^{2+} 的加入在降低菌体活

性的同样增加了菌体对于 NP 的吸附方式,从而减轻了由于活性造成吸附效果下降的影响。

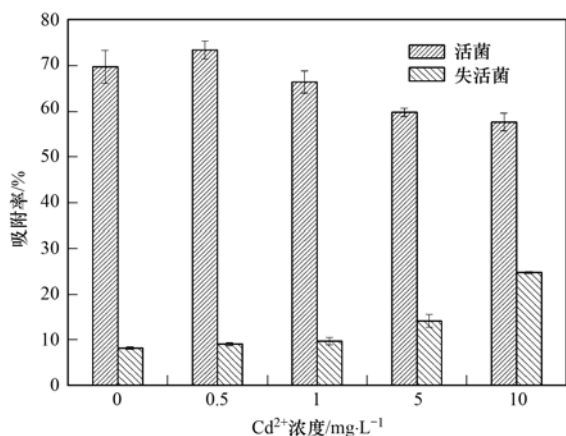


图2 Cd^{2+} 对菌体吸附 NP 的影响

Fig. 2 Adsorption of NP by *P. aeruginosa* SH1 at different concentrations of Cd^{2+}

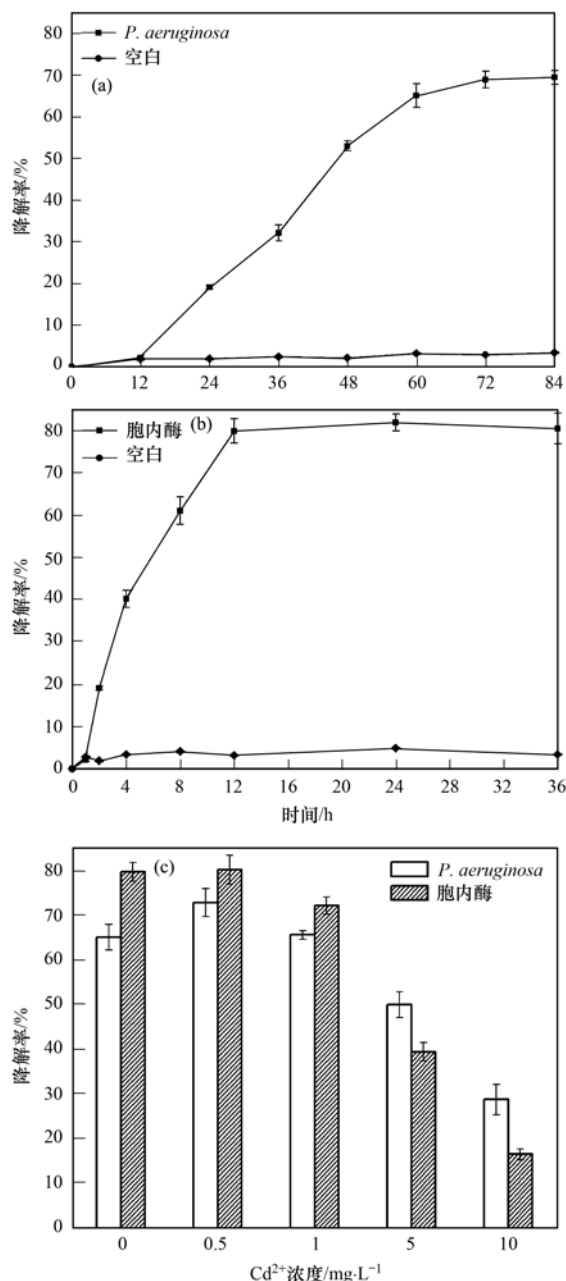
2.3 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 和胞内酶降解 NP 的影响

微生物降解有机污染物的实质是其分泌的降解酶对污染物的催化作用,根据酶分泌的部位不同,可将其分为胞内酶降解和胞外酶降解^[25,26]。本课题组前期的实验结果显示,*P. aeruginosa* SH1 对 NP 有较好的降解能力,而起主要降解作用的酶属于胞内酶。因此本实验考察 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 和胞内酶降解 NP 的影响。

图 3(a) 和 3(b) 分别表示 *P. aeruginosa* SH1 和其胞内酶对 NP 降解随时间的变化趋势。从中可以看出,胞内酶的降解速率要远远大于菌体。降解初期,*P. aeruginosa* SH1 几乎对 NP 没有降解作用,而胞内酶在 12 h 内对 NP 的降解率已经趋于稳定。此外,当降解效果趋于平稳时(菌体系 60 h,酶体系 12 h),胞内酶的降解率(79.9%)大于菌体(65.1%)。菌体降解 NP 初期,菌体将 NP 吸附在细胞表面,然后才能通过跨膜运输等过程进入到菌体内部被胞内酶降解,这一过程相较酶降解而言具有一定的阻碍作用,所以离体情况下的酶促反应速率更快、反应时间更短,最终造成菌体对污染物的降解率低于胞内酶。

图 3(c) 表示不同浓度的 Cd^{2+} 分别对菌体和胞内酶降解 NP 的影响。从中可知,不同浓度的 Cd^{2+} 对菌体和胞内酶降解 NP 有着不同的影响结果。低浓度的 Cd^{2+} ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对菌体降解 NP 有一定的促进作用($P < 0.05$)。造成这一结果可能有以下三方面的原因:① 某些重金属离子(例如 Cd^{2+}),当

其浓度较低时有利于菌体的生长活性,特别是对于那些长期生长在重金属含量较高的环境中的菌体,从而能够增强菌体降解有机污染物的能力;② 低浓度的 Cd^{2+} 有助于菌体降解 NP 功能酶的合成分泌;③ 重金属的存在改变了菌体细胞表面的某些性质,使得微生物更容易与水溶性较低的有机污染物接触从而提高有机物的利用率^[27]。当体系中存在高浓度的 Cd^{2+} ($\geq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时,菌体对 NP 的降解受到



(a) 84 h内 *P. aeruginosa* SH1 对 NP 的降解; (b) 36 h内胞内酶对 NP 的降解; (c) 不同浓度 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 和其胞内酶降解 NP 的影响

图3 不同条件下 NP 的降解

Fig. 3 Degradation efficiency of NP under different conditions

抑制. 这主要是由于高浓度的 Cd^{2+} 对菌体的毒害作用导致活性降低,进而造成对 NP 的降解能力变弱.

从图 3(c) 中还可以看出,高浓度 Cd^{2+} 对胞内酶降解 NP 的影响趋势与对菌体的相同,但胞内酶受到的抑制作用更为显著. 这主要是因为胞内酶与 Cd^{2+} 直接接触造成的. 当菌体生长在含有高浓度 Cd^{2+} 的环境中时,其可以通过自身调节而对外界污染物的毒害有一定自我保护,因此受到的危害相对较小,对 NP 降解的抑制也较小^[28]. 与菌体细胞不同,当胞内酶降解体系中存在低浓度 Cd^{2+} 时,NP 的降解率变化不显著. 原因可能是低浓度 Cd^{2+} 的加入并未改变降解 NP 功能酶的活性,而对菌体产生的促进作用仅仅是因为改变了菌体自身的性质.

2.4 Cd^{2+} 对 *P. aeruginosa* SH1 和胞内酶降解 NP 的动力学影响

分别排除 *P. aeruginosa* SH1 和其胞内酶在 5 d 和 12 h 后对 NP 降解能力稳定的情况,用一级动力学模型 $\ln c_0/c = a + kt$ 进行了降解动力学分析. 式中, c_0 为 NP 初始浓度, c 为尚未反应的 NP 浓度, t

为降解时间, k 为一级反应速率常数. a 为 $t=0$ 时刻去除的反应物浓度,半衰期 $t_{1/2} = (\ln 2 - a)/k$. 动力学分析结果如图 4 所示. 从图 4(a) 可以看出,菌体降解 NP 时,第 12 h 的降解速率几乎为零. 因此在对菌体降解 NP 进行动力学拟合时,应当排除这一延滞期,即将培养 12 h 后的降解体系看做是初始态. 表 1 显示了 *P. aeruginosa* SH1 和其胞内酶降解 NP 的动力学参数的计算结果. 从中可知,胞内酶降解 NP 较好地符合一级反应动力学 ($R^2 = 0.996$),而菌体降解 NP 则不能很好地通过一级动力学模型进行拟合. 造成这一结果的主要原因是菌体降解 NP 是一个较为复杂的过程,在降解初期,菌体将 NP 吸附在表面,然后才能通过细胞膜进入到菌体内部被胞内酶降解,因此菌体对 NP 的降解不仅仅与底物和酶浓度有关,还与其对 NP 的吸附和跨膜运输等能力有关,这就使得菌体降解 NP 不能很好地符合一级动力学模型. 从表 1 还可以看出, Cd^{2+} 的加入对 NP 的降解有一定的影响. 高浓度的 Cd^{2+} 抑制了酶的活性,从而使其降解速率下降较多. 而低浓度的 Cd^{2+} 对降解 NP 的速率影响不太显著. 对于菌降

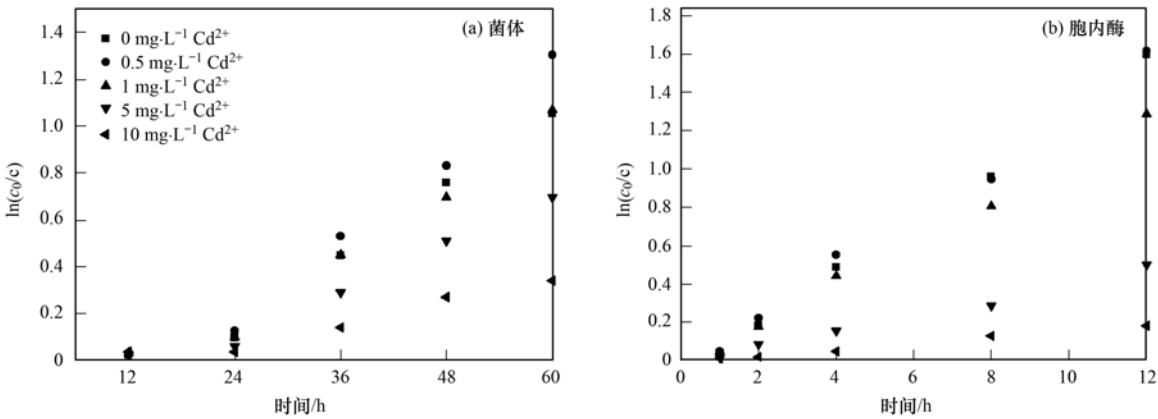


图 4 一级反应动力学线性拟合
Fig. 4 First-order rate relationship between $\ln[\text{NP}]$ and time

表 1 降解动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of NP degradation

项目	Cd^{2+} 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	动力学方程	速率常数 k/h^{-1}	半衰期/h	R^2
菌	0	$\ln(c_0/c) = 0.022t - 0.342$	0.022	47.1	0.961
	0.5	$\ln(c_0/c) = 0.027t - 0.411$	0.027	40.9	0.954
	1	$\ln(c_0/c) = 0.022t - 0.334$	0.022	46.7	0.954
	5	$\ln(c_0/c) = 0.015t - 0.224$	0.015	61.1	0.956
	10	$\ln(c_0/c) = 0.007t - 0.089$	0.007	111.7	0.927
胞内酶	0	$\ln(c_0/c) = 0.139t - 0.104$	0.139	5.7	0.996
	0.5	$\ln(c_0/c) = 0.137t - 0.063$	0.137	5.5	0.990
	1	$\ln(c_0/c) = 0.11t - 0.05$	0.11	6.8	0.995
	5	$\ln(c_0/c) = 0.041t - 0.015$	0.041	17.3	0.988
	10	$\ln(c_0/c) = 0.016t - 0.013$	0.016	44.1	0.993

解体系而言,低浓度 Cd^{2+} 的加入对降解速率有一定的促进作用,但是由于菌体降解周期较长,这一促进作用并未能在速率常数上较明显地体现,但是从半衰期上可以充分地看到低浓度 Cd^{2+} 的加入对降解速率有所提高。

3 结论

(1) *P. aeruginosa* SH1 的生物量随着 Cd^{2+} 浓度的增大有明显的降低, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 存在时菌株在 24 h 的生物量下降 27.1%。 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NP 的加入会影响菌株生长周期,使其停滞期延长,但总体生物量降低仅 8.2%。

(2) *P. aeruginosa* SH1 对于 NP 有较好的吸附效果,8 h 时吸附率达到 69.7%。 Cd^{2+} 的加入对于菌体吸附 NP 有较大影响。对于活菌,低浓度 Cd^{2+} 能够促进 NP 吸附,而高浓度 Cd^{2+} 的加入抑制菌体对 NP 吸附。对于失活菌体,低浓度的 Cd^{2+} 的加入对于吸附无显著性影响,而高浓度的 Cd^{2+} 能够促进菌体对 NP 的吸附。

(3) 胞内酶的降解速率要远远大于菌体。不同浓度的 Cd^{2+} 对菌体和胞内酶降解 NP 有着不同的影响结果。低浓度的 Cd^{2+} 对菌体降解 NP 有一定的促进作用。当体系中存在高浓度的 Cd^{2+} 时,菌体对 NP 的降解受到抑制。高浓度 Cd^{2+} 对胞内酶降解 NP 的影响趋势与对菌体的相似,但其受到的抑制作用更为显著。与菌体细胞不同,当胞内酶降解体系中存在低浓度 Cd^{2+} 时, NP 的降解率变化不显著。胞内酶对 NP 的降解过程符合一级动力学反应模型, Cd^{2+} 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降解速率最快,半衰期为 5.5 h,而菌体降解 NP 则不能很好地通过一级动力学模型进行拟合。

参考文献:

- [1] Xu J, Li J M, Feng Z, *et al.* Neurotoxic effects of nonylphenol: a review[J]. Wiener Klinische Wochenschrift, 2013, **125**(3-4): 61-70.
- [2] Osimitz T G, Droege W, Driver J H. Human risk assessment for nonylphenol[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2015, **21**(7): 1903-1919.
- [3] Jin X W, Wang Y Y, Jin W, *et al.* Ecological risk of nonylphenol in China surface waters based on reproductive fitness[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(2): 1256-1262.
- [4] Ahkola H, Herve S, Knuutinen J. Study of different chemcatcher configurations in the monitoring of nonylphenol ethoxylates and nonylphenol in aquatic environment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(15): 9182-9192.
- [5] 刘青云, 丘锦荣, 周志洪, 等. 珠三角城市污泥中壬基酚及重金属特征分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2072-2078.
- [6] Liu Q Y, Qiu J R, Zhou Z H, *et al.* Residual nonylphenol and heavy metals in sewage sludge from wastewater treatment plants in Pearl River Delta region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2072-2078.
- [7] Tanghe T, Dhooge W, Verstraete W. Isolation of a bacterial strain able to degrade branched nonylphenol[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(2): 746-751.
- [8] Bai N L, Wang S, Abuduaini R, *et al.* Isolation and characterization of *Sphingomonas* sp. Y2 capable of high-efficiency degradation of nonylphenol polyethoxylates in wastewater[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(12): 12019-12029.
- [9] Lu Z J, Gan J. Analysis, toxicity, occurrence and biodegradation of nonylphenol isomers: a review[J]. Environment International, 2014, **73**: 334-345.
- [10] 李旭春, 刘桂芳, 马军, 等. 1 株壬基酚降解菌的分离鉴定及其降解特性研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 231-236.
- [11] Li X C, Liu G F, Ma J, *et al.* Isolation, identification and biodegradation characteristics of a bacterial strain able to degrade nonylphenol[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 231-236.
- [12] 董涵, 马燕燕, 刘莹, 等. 河口底泥来源真菌 *Trichoderma asperellum* 对壬基酚的降解路径[J]. 海洋环境科学, 2015, **34**(6): 852-857.
- [13] Dong H, Ma Y Y, Liu Y, *et al.* Nonylphenol biodegradation pathway by *Trichoderma asperellum* from the estuary sediment[J]. Marine Environmental Science, 2015, **34**(6): 852-857.
- [14] 郭玥, 邓国志, 张小凡, 等. 壬基酚降解菌株的降解特性[J]. 净水技术, 2011, **30**(3): 25-29.
- [15] Guo Y, Deng G Z, Zhang X F, *et al.* Degradation characteristics of a bacterial strain for nonylphenol degradation[J]. Water Purification Technology, 2011, **30**(3): 25-29.
- [16] 任磊, 史延华, 贾阳, 等. 菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1757-1762.
- [17] Ren L, Shi Y H, Jia Y, *et al.* Biodegradation characteristics and kinetics of *p*-nitrophenol by strain *Arthrobacter* sp. CN2[J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1757-1762.
- [18] Shi G Y, Yin H, Ye J S, *et al.* Aerobic biotransformation of decabromodiphenyl ether (PBDE-209) by *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Chemosphere, 2013, **93**(8): 1487-1493.
- [19] Lin C W, Cheng Y W, Tsai S L. Influences of metals on kinetics of methyl tert-butyl ether biodegradation by *Ochrobactrum cytisi*[J]. Chemosphere, 2007, **69**(9): 1485-1491.
- [20] Wang Y K, Tao L, Chen M J, *et al.* Effects of the $\text{Fe}^{\text{II}}/\text{Cu}^{\text{II}}$ interaction on copper aging enhancement and pentachlorophenol reductive transformation in paddy soil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, **60**(2): 630-638.
- [21] 熊士昌, 尹华, 彭辉, 等. 重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 1008-1014.
- [22] Xiong S C, Yin H, Peng H, *et al.* Effect of heavy metals on degradation of BDE-209 by white-rot fungus[J]. Environmental Science, 2012, **33**(3): 1008-1014.
- [23] Krupinski M, Janicki T, Palecz B, *et al.* Biodegradation and utilization of 4-*n*-nonylphenol by *Aspergillus versicolor* as a sole

- carbon and energy source[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **280**: 678-684.
- [18] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, **72**(1-2): 248-254.
- [19] Hong H B, Nam I H, Kim Y M, *et al.* Effect of heavy metals on the biodegradation of dibenzofuran in liquid medium[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **140**(1-2): 145-148.
- [20] Cobas M, Danko A S, Pazos M, *et al.* Removal of metal and organic pollutants from wastewater by a sequential selective technique[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **213**: 2-10.
- [21] Chen B L, Wang Y S, Hu D F. Biosorption and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous solutions by a consortium of white-rot fungi [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 845-851.
- [22] Wang J L, Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future[J]. *Biotechnology Advances*, 2009, **27**(2): 195-226.
- [23] 陈烁娜, 尹华, 叶锦韶, 等. 嗜麦芽窄食单胞菌处理苯并[a]芘-铜复合污染过程中细胞表面特性的变化[J]. *化工学报*, 2012, **63**(5): 1592-1598.
- Chen S N, Yin H, Ye J S, *et al.* Change of cell surface features of *Stenotrophomonas maltophilia* in treating benzo [a] pyrene-copper combined pollution[J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(5): 1592-1598.
- [24] Mishra S, Singh S N. Microbial degradation of *n*-hexadecane in mineral salt medium as mediated by degradative enzymes[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **111**: 148-154.
- [25] 廖敏, 马爱丽, 谢晓梅. 缺陷假单胞菌 M5R14 粗酶液降解拟除虫菊酯类农药特性初探[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1793-1798.
- Liao M, Ma A L, Xie X M. Primary study on the characteristics of crude pyrethroid pesticide-degrading enzyme extracted from *Pseudomonas diminuta* strain M5R14 [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(6): 1793-1798.
- [26] Aksu Z, Balibek E. Effect of salinity on metal-complex dye biosorption by *Rhizopus arrhizus* [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, **91**(7): 1546-1555.
- [27] Shi G Y, Yin H, Ye J S, *et al.* Effect of cadmium ion on biodegradation of decabromodiphenyl ether (BDE-209) by *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **263**: 711-717.
- [28] 史广宇, 尹华, 叶锦韶, 等. 铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1517-1523.
- Shi G Y, Yin H, Ye J S, *et al.* Biodegradation of decabromodiphenyl ether by intracellular enzyme obtained from *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1517-1523.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172