

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究 孙建林,常文静,陈正侠,曾辉(1513)

北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究 崔彤,程婧晨,何万清,任培芳,聂磊,徐东耀,潘涛(1523)

2006~2010年珠三角地区 SO₂ 特征分析 李菲,谭浩波,邓雪娇,邓涛,徐婉筠,冉靓,赵春生(1530)

环境空气 PM_{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试 王强,钟琪,迟颖,张杨,杨凯(1538)

燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 裴冰(1544)

南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应 方峰,王磊,席雪飞,胡佳俊,付小花,陆兵,徐殿胜(1550)

基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算 冯驰,金琦,王艳楠,赵丽娜,吕恒,李云梅(1557)

贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,罗进,蒋浩(1565)

东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析 高磊,陈建耀,王江,柯志庭,朱爱萍,许凯(1573)

河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究 刘肖,杨琰,彭涛,赵景耀,任小凤,张银环,聂旭东,李建仓,凌新有,张志钦(1582)

石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响 肖时珍,熊康宁,蓝家程,张晖,杨龙(1590)

旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异 赵瑞一,梁作兵,王尊波,于正良,江泽利(1598)

有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响 孙玉川,王永启,梁作兵,袁道先(1605)

山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究 曹霏霏,杨丽原,庞绪贵,王炳华,王云倩(1615)

摇蚊幼虫扰动下沉沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应 史晓丹,李勇,李大鹏,王忍,邓猛,黄勇(1622)

南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 郝卓,高扬,张进忠,徐亚娟,于贵瑞(1630)

不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响 黄雪娇,刘晓晨,李振轮,石纹豪,杨珊(1639)

荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响 汪小雄,姜成春,李锦卫,汪晓军(1648)

黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用 陈亚楠,袁玲(1655)

饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制 丁春生,孟壮,徐洋洋,缪佳(1662)

水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性 凌晓,胡晨燕,程明,谷建(1668)

化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响 张灿,刘文君,史文,安代志,白森,徐稳(1674)

牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 马锋锋,赵保卫,刁静茹,钟金魁,李安邦(1678)

丁二酸改性茶油树木屑吸附附的研究 张晓峰,陈迪云,彭燕,刘永胜,熊雪莹(1686)

SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响 张静,肖太民,张晶,曹丽亚,杜亚威,刘春,张磊(1694)

TiO₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制 郭宏生,刘亚楠,乔琪,魏红,董呈幸,薛洁,李克斌(1700)

新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能 王刚,杜凤龄,常青,徐敏(1707)

基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量 曾善文,王泽宇,高敬,刘东,张代钧,卢培利(1713)

分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制 黄帅,刘宏波,殷波,马惠君,符波,刘和,白洁(1720)

通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响 张喻,韩融,陆文静,王洪涛,明中远,王强,夏伟(1727)

生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究 吴青,崔延瑞,汤晓晓,杨慧娟,孙剑辉(1733)

百乐克(BIOLAK)活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析 田美,刘汉湖,申欣,赵方庆,陈帅,姚永佳(1739)

异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性 梁贤,任勇翔,杨垒,赵思琪,夏志红(1749)

菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学 任磊,史延华,贾阳,姚雪松,Ruth Nahurira,弥春霞,闫艳春(1757)

短短芽胞杆菌及其芽胞对苜蓿的降解 刘芷辰,叶锦韶,彭辉,刘则华,邓庭进,尹华,廖丽萍(1763)

垃圾填埋场抗生素抗性基因初探 李蕾,徐晶,赵由才,宋立岩(1769)

不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查 麦晓蓓,陶然,杨扬,张敏,林剑华,满滢(1776)

硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响 柳蓉,龙焰,王立立,何婷,叶锦韶(1785)

山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性 严俊霞,李洪建,李君剑,武江星(1793)

施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响 姜继韶,郭胜利,王蕊,刘庆芳,王志齐,张彦军,李娜娜,李如剑,吴得峰,孙棋棋(1802)

宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估 张文超,吕森林,刘丁或,刘品威,米持真一,王效举,王青耀(1810)

宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义 张俊辉,王瑾,张健,房妮,夏敦胜(1818)

长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征 毛霞丽,陆扣萍,孙涛,张小凯,何丽芝,王海龙(1827)

矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响 李君剑,刘峰,周小梅(1836)

三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究 肖焯,黄志刚,武海涛,吕宪国(1842)

钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应 黄昭露,陈泉源,周娟,谢墨函(1849)

石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应 杨茜,吴蔓莉,聂麦茜,王婷婷,张明辉(1856)

可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究 卫泽斌,陈晓红,吴启堂,谭蒙(1864)

绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性 金诚,赵转军,南忠仁,王胜利,武文飞,王厚成(1870)

硫酸对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响 王丹,李鑫,王代长,饶伟,杜光辉,杨军,化党领(1877)

臭氧对几种楠木气体交换参数的影响 李苗苗(1888)

某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索 蔡锋,赵士波,陈刚才,鲜思淑,杨清玲,周贤杰,余海(1902)

《环境科学》征订启事(1543) 《环境科学》征稿简则(1756) 信息(1667,1726,1809,1848)

菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学

任磊¹, 史延华¹, 贾阳¹, 姚雪松², Ruth Nahurira¹, 弥春霞², 闫艳春^{1*}

(1. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 2. 牡丹江师范学院生命科学与技术学院, 牡丹江 157000)

摘要: 为研究对硝基苯酚降解菌 *Arthrobacter* sp. CN2 在实际生产中的应用潜力, 本文分别分析了 pH、盐浓度和额外添加碳源对降解效率的影响, 同时对降解的动力学方程进行拟合分析. 菌株 CN2 在 pH 7.0 ~ 8.0, NaCl 浓度 60 g·L⁻¹ 之间能够高效降解对硝基苯酚, 72 h 内对 50 mg·L⁻¹ 对硝基苯酚的降解率均大于 90%. 同时发现适量添加葡萄糖 (0.5%) 可显著促进 CN2 降解对硝基苯酚, 与不添加葡萄糖条件下相比, 达到 90% 降解率所需时间缩短了 16 h. 当对硝基苯酚浓度低于 300 mg·L⁻¹ 时, 菌株 CN2 对对硝基苯酚的降解符合一级动力学方程, 降解速率常数在 0.021 7 ~ 0.025 0 之间. 在生物反应器中应用菌株 CN2 模拟处理工业废水, 3 L 含对硝基苯酚废水 (100 mg·L⁻¹) 在 72h 的降解率大于 90%. 研究表明, 菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 能够高效地降解对硝基苯酚, 对于环境有良好适应能力, 具有良好的应用前景.

关键词: 生物降解; 对硝基苯酚; *Arthrobacter* sp. CN2; 高盐废水; 一级动力学反应

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1757-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.05.034

Biodegradation Characteristics and Kinetics of *p*-nitrophenol by Strain *Arthrobacter* sp. CN2

REN Lei¹, SHI Yan-hua¹, JIA Yang¹, YAO Xue-song², Ruth Nahurira¹, MI Chun-xia², YAN Yan-chun^{1*}

(1. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Life Science & Technology, Mudanjiang Normal College, Mudanjiang 157000, China)

Abstract: To investigate the application potential of the *p*-nitrophenol-degrading bacterium *Arthrobacter* sp. CN2 in practice, the effects of pH, salinity and additional carbon source were determined, and the degradation kinetics of *p*-nitrophenol was analyzed. Strain CN2 could degrade *p*-nitrophenol efficiently in a wide range of pH (7.0-8.0) and elevated salinity (0-60 g·L⁻¹). Investigation of additional glucose found that 0.5% of glucose could significantly increase the degrading speed and the time to reach 90% of degradation rate was shortened by 16 hours. These results indicated that strain CN2 could degrade *p*-nitrophenol efficiently under different conditions and had a great potential for application in practice.

Key words: biodegradation; *p*-nitrophenol; *Arthrobacter* sp. CN2; wastewater with elevated salinity; first-order kinetics

硝基芳香族化合物是一类重要的化工原料, 广泛应用于染料、农药、医药、塑料及合成材料的生产^[1]. 大多数硝基芳香族化合物具有致癌、致突变、致畸的“三致”作用, 部分硝基芳香族化合物还可经过肝脏和肠道细菌的代谢生成致癌物质或致癌物质前体^[2-4]. 因此, 大多数硝基芳香族作为重要的环境污染备受关注, 严重地威胁着环境安全和人类健康. 对硝基苯酚 (*p*-nitrophenol, PNP) 作为一种重要的单硝基芳香族化合物, 大量应用于染料、医药、农药及木材防腐剂的生产^[5]. 对硝基苯酚在其生产和使用过程中被释放到环境中, 同时由于杀虫剂对硫磷和甲基对硫磷, 除草剂地乐芬与二硝基甲酚的水解而进入环境中^[6]. 对硝基苯酚在深层土壤和地下水中的残留时间较长且易在生物体内富集, 作为呼吸链氧化磷酸化过程解偶联剂, 浓度低于 10 μmol·L⁻¹ 就能改变细胞代谢过程, 因而对人体健

康、动物和植物及微生物的生长产生巨大威胁^[7]. 早在 1988 年美国环保署 (EPA) 已将对硝基苯酚列为优先控制污染物之一, 规定其在自然水体中的浓度应低于 10 ng·L⁻¹^[8], 也被列入我国 68 种水中优先控制污染物黑名单. 对此类污染物的降解研究已经成为国内外研究的热点之一.

对于污染物的降解, 常见的方法包括物理-化学结合降解和生物降解^[9-11]. 在许多报道中, 生物降解以其高效、廉价的特点作为物理-化学结合降解的替代方法而被广泛接受^[12, 13]. 芳香族化合物在其苯环上出现其他替代基团, 如硝基或卤族元素, 使

收稿日期: 2014-10-26; 修订日期: 2014-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170119); 中国农业科学院基本科研业务基金项目 (0042014006, 0042012003, 0042011006)

作者简介: 任磊 (1987 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微生物分子生物学, E-mail: lren_87@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: yanyanchun@caas.cn

得降解的难度加大^[14]。尽管如此,已有较多关于细菌利用 PNP 作为唯一碳源和能源对 PNP 进行降解的报道^[15-17]。然而,至今少有关于对硝基苯酚的降解动力学研究的报道。利用生物降解对环境污染受诸多环境因素的影响,如环境 pH、温度以及降解菌株的接入量等^[18],此外适当的补充碳源或氮源物质也可明显促进降解菌株对污染物的降解^[19, 20]。因此,深入研究降解菌株对对硝基苯酚的降解动力学对于降解菌株的实际利用和阐明降解机制都具有重要意义。本文研究了环境因素对菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的影响,并对降解动力学进行分析,以期对对硝基苯酚污染的生物修复提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 菌株与培养基

1.1.1 供试菌株

菌株为中国农业科学院研究生院生物学教研室保存菌株节杆菌属细菌(*Arthrobacter* sp. CN2),其中 16S rRNA 基因序列的 GenBank 登录号为 EU266494。

1.1.2 供试药品

对硝基苯酚,纯度大于 99.0%,购自天津市天新精细化工开发中心。对硝基苯酚用纯水溶解配制浓度为 $2 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的母液备用。高效液相色谱使用的甲醇和乙腈均为色谱纯级。其余试剂均为国产分析纯。

1.1.3 培养基

普通培养基(LB):胰蛋白胨 10 g,酵母粉 10 g, NaCl 10 g,去离子水 1 L, pH 7.2 ± 0.2。

无机盐离子培养基(MSM): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 2.0 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.001 g, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 1.5 g, KH_2PO_4 1.5 g,去离子水 1 L, pH 7.2 ± 0.2。

上述培养基中加入 1.5% 的琼脂粉即得到对应的固体培养基,所有培养基均在 121℃ 灭菌 30 min 备用。

1.2 实验方法

1.2.1 pH、NaCl 及额外添加碳源对降解率的影响

分别配制不同 pH(5.0 ~ 10.0)、NaCl 浓度(0 ~ 100 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)和葡萄糖浓度(0、5、10 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)的 MSM 液体培养基备用,并加入对硝基苯酚至浓度 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。将菌株 CN2 接种至新鲜 LB 培养基中,在恒温摇床中 30℃, 180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下预培养至 D_{600}

= 0.8。取 2 mL 预培养的菌液, 6 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min 收集菌体,用新鲜 MSM 培养基冲洗菌体并再次离心后重悬浮于 2 mL 新鲜 MSM 液体培养基中备用。pH 5.0 ~ 10.0 每个处理设 3 个重复,分别向 20 mL 不同 pH 的培养基中接入 2 mL 制备的 CN2 菌液,以不接菌的含相同浓度对硝基苯酚的 MSM 培养基为对照处理。NaCl 浓度梯度 0 ~ 100 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 每个处理设 3 个重复,分别向 20 mL 含不同 NaCl 浓度的培养基中接入 2 mL 制备的 CN2 菌液。分别向含 0、5 和 10 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖的培养基中接入 2 mL 制备的 CN2 菌液,每个处理设 3 个重复。上述所有处理中,均以同等条件下不接菌的含相同初始浓度对硝基苯酚的 MSM 培养基为对照处理。将处理组和对照组同时在恒温摇床中进行培养,培养条件 30℃, 180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 黑暗培养。每 8 h 取样一次测定对硝基苯酚浓度。

1.2.2 CN2 降解对硝基苯酚的动力学

向 20 mL 无机盐离子液体培养基中分别加入适量对硝基苯酚,使其浓度分别为 50、100、150、200 和 300 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。分别接入 2 mL 预培养的 CN2 菌体(方法同上)。于 30℃、180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、黑暗条件下培养。以相同条件不接菌的处理作为对照。每个处理设置 3 个重复。每 8 h 取样一次分别测定对硝基苯酚浓度,对降解动力学进行拟合。

1.2.3 CN2 的生物反应器放大应用

7.5 L 的生物反应器(BioFlo 115, New Brunswick Scientific Co., NJ, USA)被用于 CN2 的放大应用实验。反应体积为 3 L,模拟的 PNP 废水由含 50 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 的 MSM 构成(加入适量的对硝基苯酚至终浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并添加适量葡萄糖至浓度为 5 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$),接菌量为 10%,搅拌转速为 200 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,通气比为 0.8,培养温度为 30℃。反应液 pH 值和溶氧浓度(DO)通过反应器的操作系统监测。每 8 h 取样检测对硝基苯酚浓度和细胞干重。

1.3 分析和统计方法

样品中对硝基苯酚的浓度通过高效液相色谱法测定。样品经孔径为 0.2 μm 滤膜过滤后,通过高效液相色谱仪在 320 nm 处基于外标法进行对硝基苯酚浓度定量。高效液相色谱仪为安捷伦 1200 (Agilent, USA),色谱柱为 Zorbax Eclipse Plus C_{18} (4.6 mm × 150 mm × 5 μm),流动相为甲醇、乙腈和水的混合物(42:48:10),流速 1 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,柱温 30℃,进样量 2 μL ,二极管阵列复合波长检测器进行检测。通过对硝基苯酚标准品绘制对硝基苯酚浓

度与 320 nm 处吸收值关系的标准曲线 ($R^2 = 0.9723$).

实验数据均通过 SPSS 15.0 软件进行分析.

2 结果与分析

2.1 pH 对降解率的影响

如图 1 所示, 菌株 CN2 在 pH 5.0 ~ 7.0 范围内, 随着 pH 的升高, 降解速率逐渐升高. 当 pH 为 7.0 时, CN2 在 72 h 对对硝基苯酚的降解率达到最大为 99.2%. 当 pH > 8.0 以后, 随着 pH 升高, 降解效率逐渐下降. 且从中可以看出, 过低或过高的 pH 值 (pH < 7.0 或 pH > 8.0) 时, 降解出现延迟, 在 24 h 以后对硝基苯酚才出现显著降解. 同时, pH 8.0 条件下 72 h 的降解效率与 pH 7.0 条件下无显著差异; 在 pH 6.0、9.0 和 10.0 条件下, 对硝基苯酚 72 h 的降解率均大于 68%, 由此可判断 *Arthrobacter* sp. CN2 对环境 pH 有较宽的耐受范围, 且在 pH 7.0 ~ 8.0 之间能够高效降解对硝基苯酚.

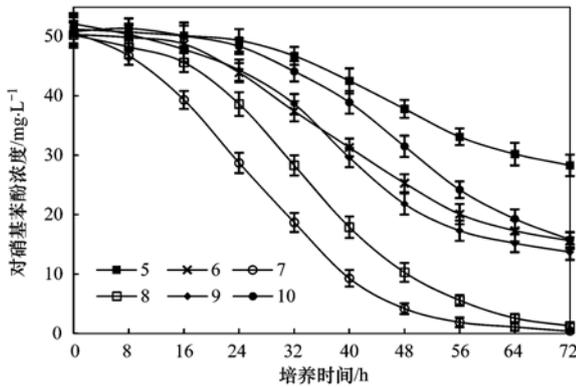


图 1 *Arthrobacter* sp. CN2 在不同 pH 条件下降解对硝基苯酚的速率

Fig. 1 Effect of pH on the PNP degradation rate of *Arthrobacter* sp. CN2

2.2 NaCl 浓度对降解率的影响

由图 2 可知, 在 NaCl 浓度为 10 ~ 60 g·L⁻¹ 时, 对硝基苯酚的降解率无显著差异 ($P > 0.05$); 当 NaCl 浓度 > 60 g·L⁻¹ 时, 随着 NaCl 浓度的提高, 对硝基苯酚的降解率逐渐降低; 当 NaCl 浓度 > 80 g·L⁻¹ 时, 对硝基苯酚基本不降解. 且当 NaCl 浓度为 70 g·L⁻¹ 和 80 g·L⁻¹ 时, 降解率分别为 55.3% 和 14.7%. 由此说明, 菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 具有较好的耐盐能力, 能在较高盐浓度 (≤ 60 g·L⁻¹) 条件下高效降解对硝基苯酚.

2.3 额外添加碳源对降解的影响

额外添加葡萄糖对 CN2 降解对硝基苯酚和

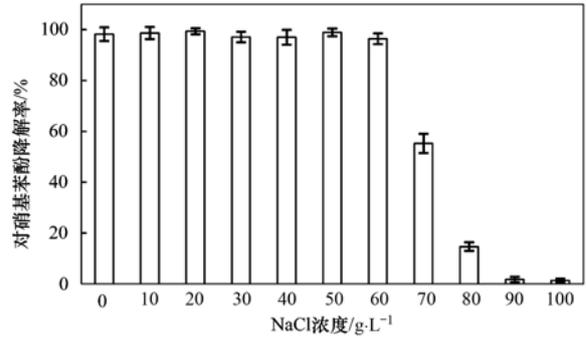


图 2 不同 NaCl 浓度对降解率的影响

Fig. 2 Effect of different salinity on the PNP degradation rate of *Arthrobacter* sp. CN2

CN2 生长的影响如图 3 所示, 额外添加碳源显著促进 CN2 的增长. 额外添加葡萄糖 5 g·L⁻¹ 和 10 g·L⁻¹ 培养 72 h 后, 菌体的浓度均大于同时期不添加葡萄糖的菌体浓度. 同时, 不添加葡萄糖时菌株的生长存在迟缓期 (0 ~ 16 h); 而随着葡萄糖的添加, 迟缓期的时间逐渐缩短至无明显的迟缓期 (5 g·L⁻¹ 时为 0 ~ 8 h, 10 g·L⁻¹ 时无迟缓期). 但额外添加碳源对降解的影响却存在不同的表现. 当葡萄糖浓度为 5 g·L⁻¹ 时, 对硝基苯酚的降解率在第 48 h 即达到最大值 95.5%, 而不添加葡萄糖的情况下则需要 64 h 才能达到同样的降解率; 但当葡萄糖浓度为 10 g·L⁻¹ 时, 对硝基苯酚的降解受到明显的抑制, 0 ~ 72 h 对硝基苯酚浓度无明显变化. 该结果说明, 额外添加的碳源, 能够显著地促进 CN2 生长并缩短迟缓期; 同时, 额外添加的碳源在一定浓度范围内能够显著促进对硝基苯酚的降解, 缩短降解周期; 但当额外碳源浓度过高时, 对硝基苯酚的降解受到

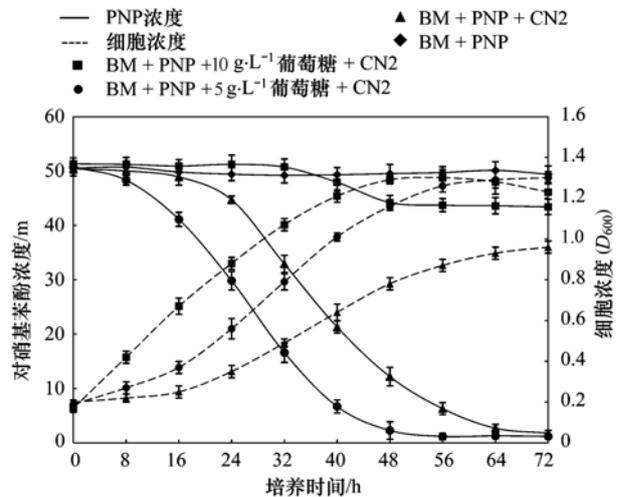


图 3 额外添加碳源对降解率与菌株生长的影响

Fig. 3 Effect of additional carbon source on the PNP degradation rate and cell growth of the strain

显著抑制,甚至完全抑制。

2.4 CN2 降解对硝基苯酚的动力学

酶促反应动力学方程被广泛应用于酶促反应分析,主要研究酶催化的反应速率及影响反应速率的各种因素。其中,一级动力学方程在污染物的生物降解研究中被广泛应用。一级动力学方程描述为:

$$c_t/c_0 = e^{-kt} \quad (1)$$

式中, c_0 为初始对硝基苯酚浓度, c_t 为 t 时刻对硝基苯酚浓度, k 代表反应速度常数, t 为降解时间。方程拟合度由 R^2 进行评估。图 4 表示 $\ln(c_0/c_t)$ 与时间的关系。当对硝基苯酚初始浓度为 50、100、150 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时降解符合一级动力学方程,当初始浓度为 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时降解不再符合一级动力学方程。

进一步根据一级动力学方程获得半衰期公式:

$$t_{1/2} = \ln 2/k \quad (\text{即 } t_{1/2} = 0.693/k) \quad (2)$$

式中, $t_{1/2}$ 为半衰期, k 为拟合获得的反应速率常数。从表 1 可见, CN2 降解对硝基苯酚的反应速率常数在 0.217 ~ 0.250 之间,对硝基苯酚的半衰期在 27.7 ~ 31.9 h 之间。

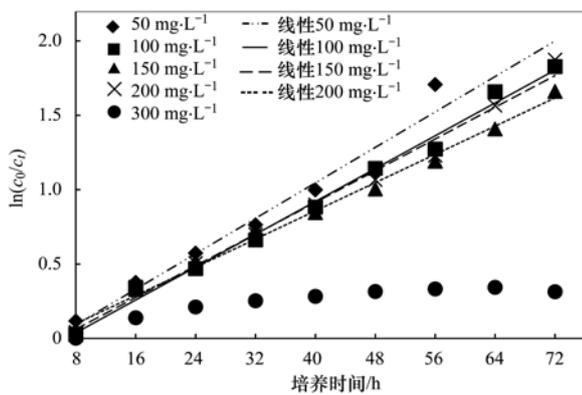


图 4 菌株 CN2 对不同浓度对硝基苯酚降解曲线的线性拟合
Fig. 4 Linear fitting of degradation curves of *Arthrobacter* sp. CN2 at different initial concentrations of *p*-nitrophenol

表 1 菌株 CN2 对不同浓度对硝基苯酚降解的动力学参数

Table 1 Parameters of the degradation kinetics of *Arthrobacter* sp. CN2 at different initial concentrations of *p*-nitrophenol

| 对硝基苯酚初始浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | R^2 | k | $t_{1/2}/\text{h}$ |
|--|-------|---------|--------------------|
| 50 | 0.958 | 0.025 0 | 27.7 |
| 100 | 0.972 | 0.022 7 | 30.5 |
| 150 | 0.961 | 0.021 7 | 31.9 |
| 200 | 0.987 | 0.022 1 | 31.4 |

2.5 CN2 的生物反应器放大应用

菌株 CN2 在生物反应器中降解对硝基苯酚的效率如图 5 所示,在反应器中处理 72 h 后,对硝基

苯酚的降解率达到 94.9%; 菌株 CN2 的细胞干重逐渐提高,在 72 h 之后细胞干重达到 $1.47 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。降解的效率与速率和实验室条件下(三角瓶小试)基本相同。由此可判断,在生物反应器中菌株 CN2 能够高效地降解对硝基苯酚,同时可耐受较高浓度的 NaCl ($\leq 50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)。

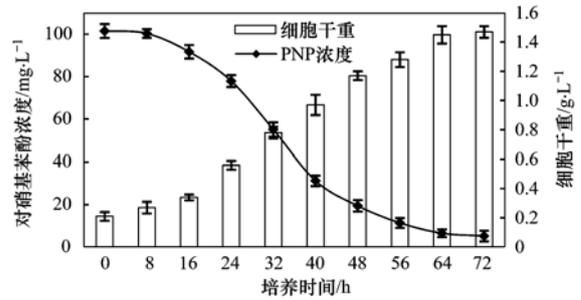


图 5 菌株 CN2 在生物反应器中的应用

Fig. 5 Application of CN2 in bioreactor

3 讨论

工业废水的生物处理所直接面对的问题是工业废水恶劣的条件,如污染物浓度较高、高盐、极端 pH、溶氧较低等^[21-23]。因此,在工业废水生物处理过程中,降解菌株对于恶劣条件的耐受能力就显得尤为重要。菌株良好的耐盐能力能够降低废水除盐的成本并提高处理的效率,因此耐盐菌株的分离受到广泛关注与研究。Jin 等^[24]分离获得的降解菌 *Dietzia natronolimnaea* JQ-AN 在盐浓度 0 ~ 60 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间能够高效地降解苯胺,降解率在 60% 以上。本研究针对性地选择了环境 pH 和盐浓度作为条件以探究对硝基苯酚降解菌 *Arthrobacter* sp. CN2 的应用潜力。降解菌株对于环境 pH 良好的耐受能力对于菌株在实际生产中的应用具有重要意义^[15]。菌株 CN2 在较宽范围的 pH(7.0 ~ 8.0) 和盐浓度(0 ~ 60 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下均能高效的降解对硝基苯酚,表现出良好的环境适应能力与应用前景。同时,适量的添加额外碳源可以显著的促进对硝基苯酚的降解和提高降解速率,当添加 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的葡萄糖时,对硝基苯酚降解率达到 90% 时所需的时间较不添加葡萄糖条件下缩短 16 h。这意味着菌株 CN2 可以以共降解的形式降解对硝基苯酚,对菌株 CN2 的实际应用具有重要意义。Cycoń 等^[25]同样发现在额外添加碳源后,菌株 *Serratia* sp. 和 *Pseudomonas* sp. 对二嗪农的降解速率显著提高。但额外添加碳源在某些情况下却会抑制微生物对污染物的降解,如 Singh 等^[20]发现毒死蜱降解菌 *Enterobacter* sp. B-14 在额外添加

碳源后降解完全受到抑制. 额外添加的碳源对于降解过程通常具有积极的效应, 在降解的初期微生物通过利用额外的碳源增加了生物量同时缩短了迟滞期, 从而促进了污染物的降解^[19]; 少数情况下, 由于额外碳源的快速利用, 导致酸性物质的产生和积累使得环境 pH 降低, 从而抑制酶活使污染物的降解受到抑制^[17]. 因此, 菌株 CN2 在额外添加 5 g·L⁻¹ 葡萄糖后降解过程受到显著促进, 这对于 CN2 的应用具有重要意义.

降解动力学的研究为实际生产过程中工业废水的处理提供了理论参考, 从而达到了减少能耗和缩短降解周期的目的^[26]. 本研究发现, 对硝基苯酚浓度低于 300 mg·L⁻¹ 时, 菌株 CN2 降解对硝基苯酚符合一级动力学方程, 降解动力常数在 0.021 7 ~ 0.025 0 之间. 当对硝基苯酚浓度 \geq 300 mg·L⁻¹ 时, 降解不再符合一级动力学方程, 且表现出较低的降解速率. 因此, 在菌株 CN2 的实际应用中可通过稀释等手段调整废水中对硝基苯酚浓度, 使其低于 300 mg·L⁻¹, 从而实现对硝基苯酚的快速高效降解.

菌株 CN2 在生物反应器中能够对模拟含对硝基苯酚工业废水进行高效降解, 这对于菌株 CN2 的中试放大与实际应用具有重要意义. 目前, 通过微生物对工业废水的处理大多处于降解机制研究阶段, 少有关于实际应用的报道. 而生物反应器作为对生产条件的模拟能够有效地反映降解菌株的实际应用潜力, 为工业废水的生物治理提供参考.

4 结论

菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 能够高效地降解对硝基苯酚, 对环境 pH 和盐离子浓度有较宽的耐受范围, 同时适量添加额外碳源可显著地促进菌株 CN2 对对硝基苯酚的降解. 对菌株 CN2 降解对硝基苯酚进行动力学分析, 当对硝基苯酚浓度低于 300 mg·L⁻¹ 时降解符合一级动力学方程. 进一步模拟废水处理, 菌株 CN2 在生物反应器中对 3 L 含对硝基苯酚废水 (100 mg·L⁻¹) 在 72 h 的降解率大于 90%. 且菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 具有良好的应用前景.

参考文献:

- [1] Zhang J S, Sun Z T, Li Y Y, *et al.* Biodegradation of *p*-nitrophenol by *Rhodococcus* sp. CN6 with high cell surface hydrophobicity [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163** (2-3): 723-728.
- [2] Walia S K, Ali-Sadat S, Brar R, *et al.* Identification and mutagenicity of dinitrotoluene metabolites produced by strain *Pseudomonas putida* OU83 [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2002, **73**(3): 131-139.
- [3] Decad G M, Graichen M E, Dent J G. Hepatic microsomal metabolism and covalent binding of 2, 4-dinitrotoluene [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1982, **62**(2): 325-334.
- [4] Rafil F, Franklin W, Heflich R H, *et al.* Reduction of nitroaromatic compounds by anaerobic-bacteria isolated from the human gastrointestinal tract [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, **57**(4): 962-968.
- [5] Shen W J, Liu W D, Zhang J, *et al.* Cloning and characterization of a gene cluster involved in the catabolism of *p*-nitrophenol from *Pseudomonas putida* DLL-E4 [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(19): 7516-7522.
- [6] Zhang S Y, Sun W, Xu L, *et al.* Identification of the para-nitrophenol catabolic pathway, and characterization of three enzymes involved in the hydroquinone pathway, in *Pseudomonas* sp. 1-7 [J]. *BMC Microbiology*, 2012, **12**: 27.
- [7] 万年升, 顾继东, 郝伏勤, 等. *Rhodococcus* sp. Ns 对硝基苯酚的好氧生物降解[J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 431-435.
- [8] Epa 440580063. Ambient Water Quality Criteria for Nitrophenols [S].
- [9] Fenner K, Canonica S, Wackett L P, *et al.* Evaluating pesticide degradation in the environment: blind spots and emerging opportunities [J]. *Science*, 2013, **341**(6147): 752-758.
- [10] 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.
- [11] 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 等. 土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2825-2831.
- [12] Pandey G, Chauhan A, Samanta S K, *et al.* Chemotaxis of a *Ralstonia* sp. SJ98 toward co-metabolizable nitroaromatic compounds [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2002, **299**(3): 404-409.
- [13] Paul D, Singh R, Jain R K. Chemotaxis of *Ralstonia* sp. SJ98 towards *p*-nitrophenol in soil [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(10): 1797-1804.
- [14] Wan N S, Gu J D, Yan Y. Degradation of *p*-nitrophenol by *Achromobacter xylosoxidans* Ns isolated from wetland sediment [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, **59**(2): 90-96.
- [15] Nielsen M B, Ingvorsen K. Biodegradation of para-nitrophenol by *Citricoccus nitrophenolicus* strain PNP1 (T) at high pH [J]. *Biodegradation*, 2013, **24**(1): 79-87.
- [16] Gemini V L, Gallego A, de Oliveira V M, *et al.* Biodegradation and detoxification of *p*-nitrophenol by *Rhodococcus wratislaviensis* [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, **55**(2): 103-108.
- [17] Zheng Y L, Liu D L, Xu H, *et al.* Biodegradation of *p*-nitrophenol by *Pseudomonas aeruginosa* HS-D38 and analysis of metabolites with HPLC-ESI/MS [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2009, **63**(8): 1125-1129.
- [18] Chen S H, Luo J J, Hu M Y, *et al.* Microbial detoxification of

- bifenthrin by a novel yeast and its potential for contaminated soils treatment [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(2): e30862.
- [19] Li K, Wang S, Shi Y, *et al.* Genome sequence of *Paracoccus* sp. Strain TRP, a Chlorpyrifos Biodegrader [J]. *Journal Bacteriology*, 2011, **193**(7): 1786-1787.
- [20] Singh B K, Walker A, Morgan J A, *et al.* Biodegradation of chlorpyrifos by *Enterobacter* strain B-14 and its use in bioremediation of contaminated soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(8): 4855-4863.
- [21] 杨燕, 奚晓瑜, 张永明. 用臭氧/超声处理含对硫磷农药废水的研究[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2010, **39**(4): 421-425.
- [22] 邵科隆, 周集体, 吕红, 等. 臭氧氧化预处理难降解农药废水的研究[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(7): 1259-1262.
- [23] Zohar S, Kviatkovski I, Masaphy S. Increasing tolerance to and degradation of high *p*-nitrophenol concentrations by inoculum size manipulations of *Arthrobacter* 4H beta isolated from agricultural soil [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **84**: 80-85.
- [24] Jin Q, Hu Z C, Jin Z F, *et al.* Biodegradation of aniline in an alkaline environment by a novel strain of the halophilic bacterium, *Dietzia natronolimnaea* JQ-AN [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **117**: 148-154.
- [25] Cycoń M, Wójcik M, Piotrowska-Seget Z. Biodegradation of the organophosphorus insecticide diazinon by *Serratia* sp. and *Pseudomonas* sp. and their use in bioremediation of contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(4): 494-501.
- [26] 洪昌红, 黄本胜, 邱静, 等. 对硝基酚在超高交联吸附树脂 NDA-701 上的脱附行为研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1388-1393.

CONTENTS

| | |
|--|---|
| Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen | SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513) |
| Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing | CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523) |
| Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010 | LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530) |
| Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air | WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538) |
| Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants | PEI Bing (1544) |
| Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors | FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550) |
| Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body | FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557) |
| Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province | LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565) |
| Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City | GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573) |
| Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China | LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582) |
| Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas | XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590) |
| Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season | ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598) |
| Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater | SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605) |
| Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province | CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615) |
| Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i> | SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622) |
| Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China | HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630) |
| Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water | HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639) |
| Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i> | WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648) |
| Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae | CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655) |
| Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water | DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662) |
| Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water | LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668) |
| Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water | ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674) |
| Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar | MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678) |
| Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid | ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686) |
| Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes | ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694) |
| TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism | GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700) |
| Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions | WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707) |
| On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements | ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713) |
| Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production | HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720) |
| Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test | ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727) |
| Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium | WU Qing, CUI Yan-ru, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733) |
| Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome | TIAN Mei, LIU Han-lu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739) |
| Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL | LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749) |
| Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 | REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757) |
| Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i> | LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763) |
| Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill | LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769) |
| Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations | MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776) |
| Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils | LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785) |
| Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau | YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793) |
| Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau | JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802) |
| Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment | ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810) |
| Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment | ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818) |
| Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China | MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827) |
| Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas | LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836) |
| Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China | XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842) |
| Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants | HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849) |
| Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil | YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856) |
| Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA | WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864) |
| Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress | JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870) |
| Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) | WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877) |
| Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants | LI Miao-miao (1888) |
| A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident | CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902) |

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

| | | | | |
|---------|--|------------------|----|---|
| 主 管 | 中国科学院 | Superintended | by | Chinese Academy of Sciences |
| 主 办 | 中国科学院生态环境研究中心 | Sponsored | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences |
| 协 办 | (以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院 | Co-Sponsored | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University |
| 主 编 | 欧阳自远 | Editor-in -Chief | | OUYANG Zi-yuan |
| 编 辑 | 《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn | Edited | by | The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版 | 科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717 | Published | by | Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂 | Printed | by | Beijing Bei Lin Printing House |
| 发 行 | 科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com | Distributed | by | Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com |
| 订 购 处 | 全国各地邮电局 | Domestic | | All Local Post Offices in China |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱) | Foreign | | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行