

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

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

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

高效降酚菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究

陈晓华^{1,2}, 魏刚^{1,2}, 刘思远^{1,2}, 孙江曼^{1,2}, 王芳芳^{1,2}, 李昊塬^{1,2}, 刘宇军^{1,2}

(1. 北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029; 2. 北京化工大学化工资源有效利用国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10 是从北京元大都城垣遗址处的人工湿地筛选到的高效苯酚降解菌。以苯酚为唯一碳源和能源对其进行了生长和苯酚降解特性的研究。该菌生长和降解苯酚的适宜条件为 30℃、初始 pH 7.0、接种量为 5%。在该条件下, 初始苯酚浓度为 400 mg·L⁻¹, 24 h 时苯酚完全被降解; 初始苯酚浓度为 900 mg·L⁻¹ 时, 44 h 的降解率为 92.3%; 初始苯酚浓度为 1 000 mg·L⁻¹, 48 h 时的降解率为 82.2%。对该菌株苯酚降解动力学过程进行模拟, 符合基质抑制型的 Haldane 模型, 各参数分别为: $v_{\max}$ (最大比降解速率) 0.126 h⁻¹, K_s (半饱和常数) 23.53 mg·L⁻¹, K_i (抑制常数) 806.1 mg·L⁻¹。该菌在苯酚中的生长动力学符合 Andrews 模型, 表现出与苯酚降解相似的趋势。该菌为目前所发现的 *Ochrobactrum* 菌属中苯酚降解能力最强的菌株。该菌株在高效处理含酚废水方面具有广阔的应用前景。

关键词: 苯酚; 生物降解; 动力学; *Ochrobactrum* sp.; 废水处理

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3956-06

Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading *Ochrobactrum* sp. CH10

CHEN Xiao-hua^{1,2}, WEI Gang^{1,2}, LIU Si-yuan^{1,2}, SUN Jiang-man^{1,2}, WANG Fang-fang^{1,2}, LI Hao-yuan^{1,2}, LIU Yu-jun^{1,2}

(1. College of Materials Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. State Key Laboratory of Chemical Resources Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The strain *Ochrobactrum* sp. CH10 was a highly efficient phenol degrading bacterial strain isolated from soil in a constructed wetland in Yuan Dynasty Capital City Wall Relics in Beijing. Growth and biodegradation were investigated in details with phenol as the sole carbon and energy source. The best growth and most efficient phenol biodegradation occurred when the strain was cultured in medium containing 400 mg·L⁻¹ phenol at initial pH of 7.0 and 30℃, with 5% inoculation volume. The phenol degradation rate was around 100%, 92.3 and 82.2% with an initial concentration of 400, 900 and 1 000 mg·L⁻¹ phenol in 24, 44 and 48 h, respectively. Phenol degradation kinetic studies indicated that the strain followed Haldane's model, and the parameters were: $v_{\max}$ (maximum specific rate) = 0.126 h⁻¹, K_s (half-saturation constant) = 23.53 mg·L⁻¹ and K_i (inhibition constant) = 806.1 mg·L⁻¹. The phenol-limited growth kinetics of CH10 by Andrews's model also followed a similar trend to that of phenol degradation. Among all the strains belonging to *Ochrobactrum* genus, this strain is the most efficient at present. The strain has a good application potential for the phenolic wastewater treatment.

Key words: phenol; biodegradation; kinetics; *Ochrobactrum* sp.; wastewater treatment

苯酚在工业上用途广泛。例如生产聚碳酸酯树脂、油漆、炸药、油墨、香料、纺织品和抗菌剂等。所有生产或使用酚的行业都会将这种污染物排放至环境中。另外, 附着藻类和浮游植物分解也会产生酚类化合物。酚类化合物具有较高的稳定性, 可经由摄入、接触或吸入造成毒性, 并具有致癌性。因此, 采取有效的方法减少苯酚的污染具有重要意义。目前, 治理含酚废水主要有物理化学法^[1] (如萃取、吸附、离子交换、化学沉淀等)、化学法^[2~5] (如氧化法、还原法和电解法等) 和生物降解法三类。生物降解法利用微生物的苯酚降解作用达到目的, 经济高效, 且不易形成二次污染, 因此受到越来越多的

关注。生物法的关键是获得具有高效苯酚降解功能的微生物。国内外学者已对多种微生物的苯酚降解特性进行了研究, 分离到有细菌如假单胞菌^[6~9]、真菌如 *Phanerochaete chrysosporium*^[10]、*Candida tropicalis*^[11] 和 *Geotrichum klebahnii*^[12], 放线菌如 *Rhodococcus* spp.^[13] 和 *Corynebacterium* sp. JY03^[14] 等。在分离到的苯酚降解菌中, 存在着多种可耐受并降解高浓度苯酚的微生物, 如 *Arutchelvan* 等^[15] 从酚醛树脂厂排水口和污泥中分离到的 *Bacillus*

收稿日期: 2012-02-18; 修订日期: 2012-05-23

作者简介: 陈晓华 (1975 ~), 女, 博士后, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: cxh01th@yahoo.com.cn

brevis 菌株可耐受并降解 $1\,750\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚; 任河山等^[9]分离到的假单胞菌 PD39 最大酚降解浓度为 $1\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Yan 等^[16]从驯化活性污泥中分离到 1 株 *Candida tropicalis* 可降解 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚; Geng 等^[17]从工业活性污泥中分离到的 *Acinetobacter* sp. 可在 25°C 下降解 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚; 姜立春等^[14]从工业废水中分离到的 *Corynebacterium* sp. JY03 可耐受 $1\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚。

在众多降解苯酚微生物中, *Ochrobactrum* 菌属细菌也能降解酚类化合物^[18-23], 但目前所报道的 *Ochrobactrum* 菌株苯酚降解能力相对较低, 其中菌株 AS1 降解 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚需要 30 h ^[19], 在另一报道中的 *Ochrobactrum* 菌株在培养 144 h 后, 初始苯酚浓度为 $102.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的降解率为 23.1% ^[20]。本实验室从北京元大都城垣遗址人工湿地分离得到的高效苯酚降解菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10, 可耐受 $1\,300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 苯酚。本研究探讨了其降解苯酚的影响因素, 并对其生长和苯酚降解过程进行了动力学模拟。本研究结果对于苯酚污染废水的生物法处理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 培养基和试剂

富集培养基 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$): Tryptone 500, Yeast extract 250, NaCl 1000, 苯酚 400。无机盐培养基 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1000, $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 200, CaCl_2 300, K_2HPO_4 500, $\text{KH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1500, NaCl 500, 苯酚根据需要添加。

1.2 菌种来源

从北京元大都城垣遗址人工湿地不同地点取距地表约 $1\sim 5\text{ cm}$ 处的土壤, 采用富集、驯化等方法分离到 1 株苍白杆菌 *Ochrobactrum* sp. CH10 (结合形态学特征和分子生物学方法进行鉴定, 结果尚未发表), 其 16S rDNA 序列提交至 GenBank, 获得登录号 HQ619225。

1.3 菌株生长和苯酚降解的测定

菌株在富集培养基中培养至 600 nm 波长下吸光度值为 $0.8\sim 1.0$ 时, 离心分离菌体, 以无机盐培养基调节其 600 nm 波长下吸光度值为 1.0 , 按接种 1 mL 为接种量 1% , 接种 3 mL 为接种量 3% , 接种 5 mL 为接种量 5% , 余此类推, 以不同接种量接种于添加指定浓度苯酚的无机盐培养基中进行培养, 间隔一定时间取培养物, 测定 600 nm 波长下培养物的吸光度值监测菌株的生长情况; 4°C $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

离心 15 min , 取上清采用 4-氨基安替比林法^[24] 监测苯酚浓度, 计算苯酚降解率。

1.4 苯酚降解实验

在 250 mL 锥形瓶中配制体积为 100 mL , 浓度为 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的苯酚无机盐培养液, 分别改变接种量、培养基 pH、培养温度, 培养至 20 h 取样测定菌株生长量和苯酚降解率。通过 3 次平行实验, 比较菌株的降解能力, 研究接种量、培养基 pH、培养温度对苯酚降解的影响。

接种量影响实验: 苯酚无机盐培养液 pH 自然, 分别接种 1% 、 3% 、 5% 和 7% 的菌液进行培养, 确定适宜的接种量。

pH 值影响实验: 调节苯酚无机盐培养基为不同的 pH 值 (5.0 、 6.0 、 7.0 、 8.0 、 9.0), 于 30°C 的恒温振荡培养箱 ($150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 中培养, 确定菌体生长适宜的 pH 范围。

温度影响实验: 结合接种量和 pH 影响实验的测定结果配制培养基和进行接种, 置于 25 、 30 、 35 和 40°C 恒温振荡培养箱 ($150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 中培养, 确定菌体生长的适宜温度范围。

菌株生长和苯酚降解动力学参数检测: 根据以上实验确定的适宜 pH、温度和接种量, 分别选择苯酚初始浓度为 100 、 200 、 300 、 400 、 500 、 600 、 700 、 800 、 900 和 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 振荡培养箱中培养, 每隔一定时间进行取样进行菌株生长和苯酚降解测定。根据文献所述方法计算苯酚比生长速率和苯酚比降解速率^[25, 26], 采用 Matlab R2010a 软件进行菌株生长动力学和苯酚降解动力学模型拟合。

2 结果与讨论

2.1 接种量对菌株生长和苯酚降解过程的影响

接种量对菌株生长和苯酚降解的影响如图 1 所示。

从图 1 中可以看出, 随着接种量增加, 20 h 时菌株生长量和苯酚降解率也增加, 接种量为 5% 时, 菌株生长量达到最高, 苯酚降解率为 87% ; 接种量为 7% 时, 菌株生长量与接种量为 5% 时基本相同, 苯酚降解率最高, 为 89% 。这说明, 适当提高接种量可以加快反应速率, 有利于快速去除水体中的苯酚, 而过多的增加投菌量并不能有效提高降解速率, 反而会增加处理成本。综合考虑, 本研究采用 5% 为最佳接种量。

2.2 培养基初始 pH 对菌株生长和苯酚降解过程的影响

培养温度为 30℃ 时,不同初始 pH 下菌株 CH10 的生长和对苯酚的降解如图 2 所示。

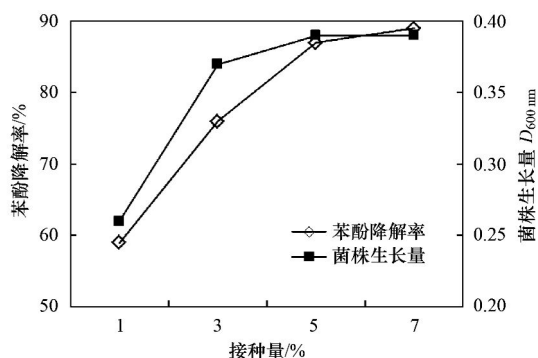


图 1 接种量对细菌生长和苯酚降解率的影响

Fig. 1 Effect of inoculation volume on bacterial cell growth and phenol degradation efficiency

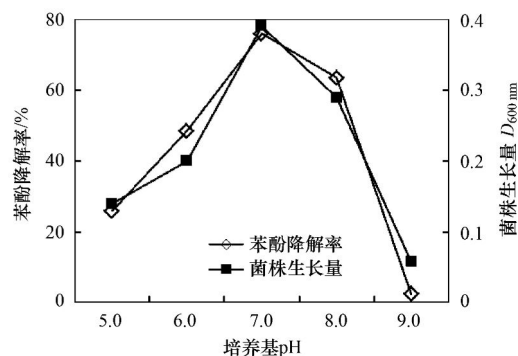


图 2 pH 对细菌生长和苯酚降解率的影响

Fig. 2 Effect of pH on bacterial cell growth and phenol degradation efficiency

当 pH 介于 6.0~8.0 之间,菌株均有较好的生长,且对苯酚都有较好的降解。其中,pH 7.0 时菌株生长情况和苯酚降解效果好于 pH 6.0 和 pH 8.0 时,菌株生长最快,苯酚降解效率最好;而 pH 8.0 时的情况要优于 pH 6.0 时;当 pH 9.0 时,菌株基本没有生长,其中的苯酚也基本未被利用。结果表明,在较酸和较碱条件下,降解能力受到抑制,这可能是由于 pH 的改变,引起微生物表面电荷改变,进而影响微生物对苯酚的吸收和利用。由于苯酚利用过程中苯酚被降解后产生酸性产物,pH 值会降低,因此推测中性和稍偏碱的环境有利于菌株降解苯酚,这与实验中 pH 为 7.0 及 8.0 的试样有较好的降解效果相一致。本研究的菌株适应 pH 值为 5.0~8.0,最适 pH 为 7.0。

2.3 温度对菌株生长和苯酚降解过程的影响

温度影响微生物体内的酶活性,在一定温度范围内,降解酶表现出最佳催化活性。图 3 反映的是

在初始 pH 值为 7,接种量 5%,不同温度下菌株培养 20 h 后的菌株生长量和苯酚降解率。从中可以看到,菌株适应的处理温度是 30℃,菌株生长良好,有较高的降解效率;其次为 35℃;25℃ 下苯酚降解效果优于 40℃ 下的苯酚降解效果。

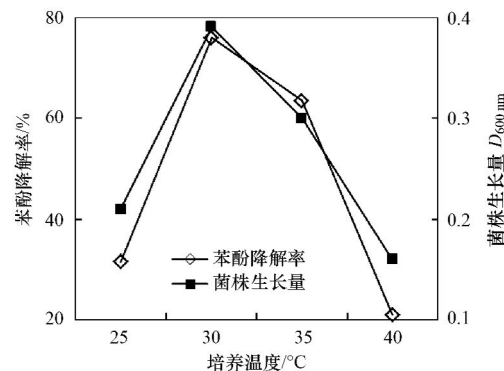


图 3 温度对细菌生长和苯酚降解率的影响

Fig. 3 Effect of temperature on bacterial cell growth and phenol degradation efficiency

2.4 菌株的生长和苯酚降解动力学模型

培养温度为 30℃,培养基 pH 为 7.0,细菌以 5% 的量接种到苯酚浓度为 100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的苯酚无机盐培养基中。不同初始苯酚浓度下细菌生长和苯酚降解的结果显示(图 4 和图 5),该菌株的生长量随着苯酚初始浓度增加而增加;生长延迟期也随着苯酚初始浓度增加而延长。初始苯酚浓度为 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,24 h 时苯酚完全被降解;初始苯酚浓度为 900 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,44 h 的降解率为 92.3%;初始苯酚浓度为 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,48 h 时的降解率为 82.2%。这可能由于高浓度苯酚对细胞的毒害作用抑制了其生长,从而影响了苯酚的降解;另外,细胞各种代谢产物的积累也影响了细胞浓度的增加。苯酚浓度

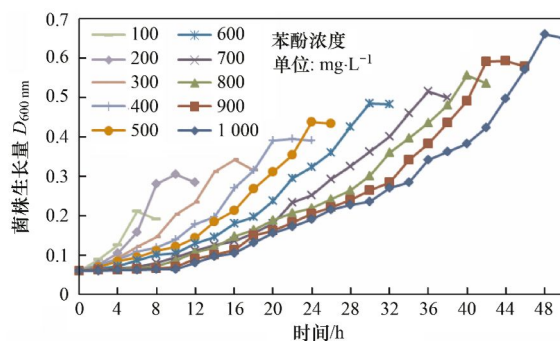


图 4 *Ochrobactrum* sp. CH10 在含不同初始苯酚浓度的无机盐培养基中的生长情况

Fig. 4 Growth of *Ochrobactrum* sp. CH10 in mineral medium containing different initial phenol concentration

越高,底物抑制作用越强,相对的细胞得率就越小,同时也导致细胞生长的延滞期越长. 因此,当处理苯酚浓度较大的废水时,应对其进行预处理或适当稀释以降低其浓度.

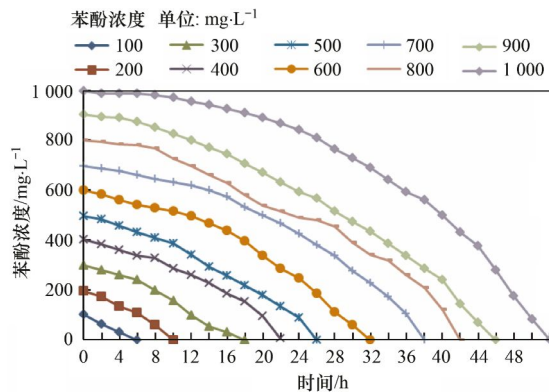


图5 *Ochrobactrum* sp. CH10 在含不同初始苯酚浓度的无机盐培养基中降解苯酚的情况

Fig. 5 Biodegradation of phenol by *Ochrobactrum* sp. CH10 in mineral medium containing different initial phenol concentration

菌株比生长速率对苯酚浓度之间的关系如图6所示,符合 Andrews 底物抑制模型^[26] [方程式(1)].

$$\mu = \frac{\mu_{\max} c_{\text{phenol}}}{K_{S,G} + c_{\text{phenol}} + c_{\text{phenol}}^2 / K_{SI,G}} \quad (1)$$

式中, μ 为该菌株在无机盐培养基中以苯酚为惟一碳源的比生长速率 (h^{-1}); $\mu_{\max}$ 为该菌株在无机盐培养基中以苯酚为惟一碳源的最大比生长速率 (h^{-1}); c_{phenol} 为苯酚初始浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $K_{S,G}$ 和 $K_{SI,G}$ 为生长动力学的半饱和常数和抑制常数. 该菌株生长动力学参数如表1所示.

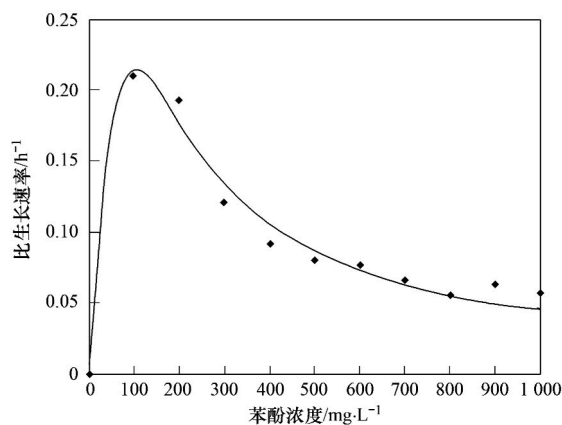


图6 *Ochrobactrum* sp. CH10 生长动力学

Fig. 6 Growth kinetics of *Ochrobactrum* sp. CH10

菌株苯酚比降解速率对苯酚浓度之间的关系如图7所示,符合 Haldane 模型^[25] [方程式(2)].

$$v_{\text{phenol}} = \frac{v_{\max, \text{phenol}} c_{\text{phenol}}}{K_S + c_{\text{phenol}} + c_{\text{phenol}}^2 / K_{SI}} \quad (2)$$

式中, v_{phenol} 为苯酚比降解速率 (h^{-1}); $v_{\max, \text{phenol}}$ 为最大苯酚比降解速率 (h^{-1}); K_S 为苯酚降解动力学的半饱和常数 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); K_{SI} 为苯酚降解动力学的抑制常数 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 该菌株苯酚降解动力学参数如表1所示.

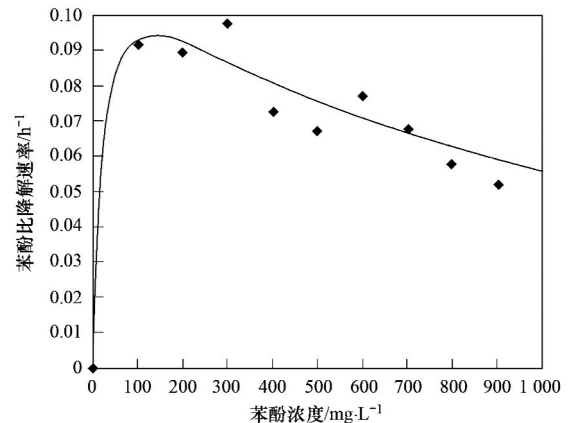


图7 *Ochrobactrum* sp. CH10 苯酚降解动力学

Fig. 7 Phenol degradation kinetics of *Ochrobactrum* sp. CH10

目前关于 *Ochrobactrum* 属菌株降解苯酚的报道不多,其中一篇报道中,*Ochrobactrum* 属菌株 AS1 可在 30 h 内完全降解 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 苯酚^[19],另一篇报道中,1 株 *Ochrobactrum* 菌株在初始苯酚浓度为 $102.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,培养 144 h 后苯酚的降解率为 23.1%^[20]. 而本研究中分离到的菌株可在 6 h 内完全降解 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 苯酚;初始苯酚浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,24 h 时苯酚完全被降解;初始苯酚浓度为 $900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,44 h 的降解率为 92.3%;初始苯酚浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,48 h 时的降解率为 82.2%. 因此, *Ochrobactrum* sp. CH10 为目前所报道的 *Ochrobactrum* 属菌株中对苯酚降解力最强的菌株.

该菌株的生长动力学和苯酚降解动力学模型分别符合 Andrew 模型和 Haldane 模型,其相关性系数 R^2 分别为 0.973 和 0.934,这表明这 2 种模型用来描述该菌株在苯酚中的生长动力学和苯酚降解动力学是有效的. Watanabe 等^[25] 采用 Haldane 模型描述了多种细菌降解苯酚的动力学,并根据 K_S 和 K_{SI} 值将这些苯酚降解菌分为 3 类. 但检测分析结果显示 *Ochrobactrum* sp. CH10 具有较低的 K_S 值 ($23.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和极高的 K_{SI} 值 ($806.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),如表1所示,并不属于 Watanabe 等^[25] 所定义的 3 种常见动力学群. 该菌株独特的动力学与文献^[26~28]

表 1 菌株生长动力学 Andrews 模型和苯酚降解动力学 Haldane 模型模拟参数

Table 1 Kinetic parameters estimated from numerical simulations with the Andrews's substrate inhibitory model and Haldane's model				
参数	生长动力学(Andrews 模型)	数值	苯酚降解动力学(Haldane 模型)	数值
最大速率	$\mu_{\max}/\text{h}^{-1}$	0.441	$v_{\max, \text{phenol}}/\text{h}^{-1}$	0.126
半饱和常数	$K_{S,G}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	77.77	K_S	23.53
抑制常数	$K_{SI,G}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	110.6	K_{SI}	806.1
相关性系数	R^2	0.973	R^2	0.934

报道的 *Ralstonia taiwanensis* TJ86 和 *Ralstonia eutropha* strain E2 相似,都具有较低的 K_S 值和极高的 K_{SI} 值.

3 结论

(1) *Ochrobactrum* sp. CH10 以苯酚为唯一碳源和能源时,其最佳生长温度是 30℃, pH 7.0 和接种量 5%.

(2) *Ochrobactrum* sp. CH10 是 1 株高效苯酚降解菌,目前为报道的 *Ochrobactrum* 属中降解苯酚能力最强的菌株.

(3) 苯酚对该菌生长具有抑制作用,符合 Andrew 模型,经拟合其生长参数为 $\mu_{\max} = 0.441 \text{ h}^{-1}$, $K_{S,G} = 77.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $K_{SI,G} = 110.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 该菌对苯酚的降解动力学符合 Haldane 模型,经拟合其参数为 $v_{\max, \text{phenol}} = 0.126 \text{ h}^{-1}$, $K_S = 23.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $K_{SI} = 806.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 动力学模型模拟具有很好的有效性,相关性系数(R^2)分别为 0.973 和 0.934.

(4) CH10 菌株能在较宽的范围内迅速、高效降解苯酚,是目前报道的 *Ochrobactrum* 属中降解苯酚能力最强的菌株. 因此,该菌株有可能成为工业含酚废水生物处理系统的强化菌株.

参考文献:

- [1] Li X Y, Cui Y H, Feng Y J, *et al.* Reaction pathways and mechanisms of the electrochemical degradation of phenol on different electrodes[J]. *Water Research*, 2005, **39**(10): 1972-1981.
- [2] 徐夫元, 李星, 陈英文, 等. 无机阴离子对 $\text{CuO-H}_2\text{O}_2$ 氧化苯酚废水的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 451-456.
- [3] 王建兵, 祝万鹏, 王伟, 等. 催化剂 $\text{Ru/ZrO}_2\text{-CeO}_2$ 催化湿式氧化苯酚[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1460-1465.
- [4] 张芳, 李光明, 盛怡, 等. 三维电解法处理苯酚废水的粒子电极研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1715-1719.
- [5] 刘森, 王丽, 刘波, 等. 不同涂层电极和抑制剂对电化学氧化降解苯酚的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2745-2749.
- [6] Yang C F, Lee C M. Enrichment, isolation, and characterization of phenol degrading *Pseudomonas resinovorans* strain P-1 and *Brevibacillus* sp. strain P-6[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, **59**(3): 206-210.
- [7] Kotresha D, Vidyasagar G M. Isolation and characterisation of phenol degrading *Pseudomonas aeruginosa* MTCC 4996 [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2008, **24**(4): 541-547.
- [8] Saravanan P, Pakshirajan K, Saha P. Biodegradation of phenol and *m*-cresol in a batch and fed batch operated internal loop airlift bioreactor by indigenous mixed microbial culture predominantly *Pseudomonas* sp. [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(18): 8553-8558.
- [9] 任河山, 王颖, 赵化冰, 等. 酚降解菌株的分离、鉴定和在含酚废水生物处理中的应用[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 482-487.
- [10] Pérez R R, Benito G G, Miranda P. Chlorophenol degradation by *Phanerochaete chrysosporium* [J]. *Bioresource Technology*, 1997, **60**(3): 207-213.
- [11] Yan J, Jianping W, Jing B, *et al.* Phenol biodegradation by the yeast *Candida tropicalis* in the presence of *m*-cresol [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **29**(3): 227-234.
- [12] 董婧, 宋玉栋, 周岳溪, 等. 曝气生物流化床中苯酚降解真菌的种群结构及分离鉴定研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(5): 997-1002.
- [13] Margesin R, Fonteyne P A, Redl B. Low-temperature biodegradation of high amounts of phenol by *Rhodococcus* spp. and basidiomycetous yeasts [J]. *Research in Microbiology*, 2005, **156**(1): 68-75.
- [14] 姜立春, 阮期平, 袁利娟, 等. 高效降酚菌株 JY03 的筛选及其降解特性研究[J]. *环境工程学报*, 2011, (8): 1912-1916.
- [15] Arutchelvan V, Kanakasabai V, Elangovan R, *et al.* Kinetics of high strength phenol degradation using *Bacillus brevis* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **129**(1-3): 216-222.
- [16] Yan J, Wen J P, Hongmei L, *et al.* The biodegradation of phenol at high initial concentration by the yeast *Candida tropicalis* [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, **24**(3): 243-247.
- [17] Geng A, Soh A E W, Lim C J, *et al.* Isolation and characterization of a phenol-degrading bacterium from an industrial activated sludge [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **71**(5): 728-735.
- [18] Lechner U, Baumbach R, Becker D, *et al.* Degradation of 4-chloro-2-methylphenol by an activated sludge isolate and its taxonomic description[J]. *Biodegradation*, 1995, **6**(2): 83-92.
- [19] El-Sayed W, Ibrahim M K, Abu-Shady M, *et al.* Isolation and identification of a novel strain of the genus *Ochrobactrum* with

- phenol-degrading activity [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2003, **96**(3): 310-312.
- [20] Kuluç N K. Enhancement of phenol biodegradation by *Ochrobactrum* sp. isolated from industrial wastewaters [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2009, **63**(6): 778-781.
- [21] Zhong Q Z, Zhang H Y, Bai W Q, *et al.* Degradation of aromatic compounds and degradative pathway of 4-nitrocatechol by *Ochrobactrum* sp. B2[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2007, **42**(14): 2111-2116.
- [22] Qiu X H, Zhong Q Z, Li M, *et al.* Biodegradation of *p*-nitrophenol by methyl parathion-degrading *Ochrobactrum* sp. B2 [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2007, **59**(4): 297-330.
- [23] Yamada T, Takahama Y, Yamada Y. Biodegradation of 2,4,6-tribromophenol by *Ochrobactrum* sp. strain TB01 [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2008, **72**(5): 1264-1271.
- [24] Lacoste R J, Venable S H, Stone J C. Modified 4-aminoantipyrene colorimetric method for phenols. Applications to an acrylic monomer[J]. Analytical Chemistry, 1959, **31**(7): 1246-1249.
- [25] Watanabe K, Hino S, Onodera K, *et al.* Diversity in kinetics of bacterial phenol-oxygenating activity[J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1996, **81**(6): 562-565.
- [26] Chen W M, Chang J S, Wu C H. Characterization of phenol and trichloroethene degradation by the rhizobium *Ralstonia taiwanensis* [J]. Research in Microbiology, 2004, **155**(8): 672-680.
- [27] Tay S T L, Moy B Y P, Maszenan A M, *et al.* Comparing activated sludge and aerobic granules as microbial inocula for phenol biodegradation [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005, **67**(5): 708-713.
- [28] Hino S, Watanabe K, Takahashi N. Phenol hydroxylase cloned from *Ralstonia eutropha* strain E2 exhibits novel kinetic properties [J]. Microbiology, 1998, **144**(7): 1765-1772.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbenazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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