

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138)	
《环境科学》征稿简则 (1155)	
信息 (824, 853, 883)	

非水溶性醌加速菌 GWF 生物还原高氯酸盐的研究

张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博*

(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要: 通过添加非水溶性醌可以大大缩短菌 GWF (KM062029) 还原高氯酸盐的停滞期. 通过批次实验研究非水溶性醌影响生物还原高氯酸盐过程中的多种因素. 结果表明, 蒽醌、1-氯蒽醌、1,5-二氯蒽醌、1,8-二氯蒽醌和 1,4,5,8-四氯蒽醌这 5 种非水溶性醌的加速顺序为 1,5-二氯蒽醌 > 1,4,5,8-四氯蒽醌 > 1,8-二氯蒽醌 > 蒽醌 > 1-氯蒽醌, 1,5-二氯蒽醌的最佳加速浓度为 $0.036 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; 生物还原的最佳温度和最佳 pH 值分别为 35°C 和 7.5; 共存阴离子 (硝酸盐、磷酸盐、硫酸盐) 对高氯酸盐生物还原都有一定的促进作用; 在固定化 1,5-二氯蒽醌加速高氯酸盐生物还原的稳定性研究中, 1,5-二氯蒽醌乙酸纤维素小球循环使用 4 次, 高氯酸盐生物还原速率仍是空白乙酸纤维素小球 2 倍以上.

关键词: 高氯酸盐; 生物还原; 非水溶性醌; 加速; 固定化

中图分类号: X131.2; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0988-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.025

Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF

ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, LIANG Xiao-hong, TIAN Xiu-lei, NIU Wen-yu, LIAN Jing, GUO Jian-bo*

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environment Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: The perchlorate reduction lag phase of the strain GWF (KM062029) was shortened by using non-dissolved quinone. Anthraquinone, 1-chloroanthraquinone, 1,5-dichloroanthraquinone, 1,8-dichloroanthraquinone and 1,4,5,8-tetrachloroanthraquinone were the five non-dissolved quinones in this study. The results showed that the accelerating order was 1,5-dichloroanthraquinone > 1,4,5,8-tetrachloroanthraquinone > 1,8-dichloroanthraquinone > Anthraquinone > 1-chloroanthraquinone. The optimal concentration of 1,5-dichloroanthraquinone, temperature and pH for perchlorate reduction were $0.036 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 35°C and 7.5, respectively. The concomitant anions (nitrate, phosphate, sulfate) were in favor of the perchlorate reduction by strain GWF. After four times of recycling experiments, the accelerating perchlorate reduction rate with the immobilized 1,5-dichloroanthraquinone maintained above 2 times.

Key words: perchlorate; biological reduction; non-dissolved quinone; acceleration; immobilization

高氯酸盐作为强氧化剂、添加剂、媒染剂被应用到军火工业、核反应器、纺织印染等不同的工业领域中^[1,2]. 一些研究表明, 高氯酸盐干扰人体甲状腺功能, 影响人体的正常新陈代谢、扰乱人体荷尔蒙分泌^[3~7]. 2005 年 8 月, 美国环保署 (EPA) 公布了高氯酸盐在饮用水中的安全标准为 $24.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8]. 在我国, 地表水和地下水均检测出较高浓度的高氯酸盐^[9~11]. 由此可见治理水体中的高氯酸盐污染刻不容缓.

由于高氯酸盐水溶性高、稳定性高、难降解^[12,13], 因此在一般自然环境条件下可长期稳定存在, 其降解过程往往需要几十年甚至更长时间. 混凝、沉淀、过滤和消毒等自来水管网的常规处理工艺很难将其有效去除^[14]. 目前高氯酸盐的主要去除方法分为物理法、化学法和生物法. 物理法的原理是将高氯酸盐进行浓缩, 无法彻底地去除高氯酸盐. 化学法主要利用一些化学还原剂将高价态的氯离子还原成氯离子, 但还原成本高一直是化学法发展的制

约因素^[15,16]. 生物法主要是在特定的环境下利用微生物新陈代谢功能, 将高氯酸盐还原成无毒的氯离子. 生物法具有安全性能好、易于管理与操作和产物无毒性等优点^[14,17]. 但是降解速率慢一直是生物法降解高氯酸盐的缺点. 如何解决降解速率低的问题成为微生物法发展的关键所在.

许多研究者指出, 醌类化合物可以加速污染物生物厌氧还原过程^[18~20]. 但目前关于醌类化合物加速高氯酸盐的生物还原过程的研究较少. 同时, 水溶性醌在实际应用中投加大, 不易分离, 易流失造成二次污染. 故本研究首次开展非水溶性醌调控菌 GWF 生物还原高氯酸盐过程分析. 向生物体系中投加用乙酸纤维素包埋法固定的非水溶性醌类小球,

收稿日期: 2015-09-23; 修订日期: 2015-11-04

基金项目: 河北省应用基础研究计划项目 (12966739D); 河北省杰出青年基金项目 (E2012208012); 河北省高校百名优秀创新人才支持计划项目 (BR2-211)

作者简介: 张媛媛 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: xiaoyuan_1116@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jianbguo@163.com

考察其在为微生物还原高氯酸盐过程中的最佳浓度、最佳条件、共存离子对微生物还原高氯酸盐过程的影响以及非水溶性醌乙酸纤维素小球的稳定性研究。

1 材料与方法

1.1 主要实验药品

$\text{NaClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NaAc , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 , NH_4Cl 等均为分析纯 (AR), 且纯度 $\geq 99.5\%$ 。5 种非水溶性醌类化合物为蒽醌、1-氯蒽醌、1,5-二氯蒽醌、1,8-二氯蒽醌和 1,4,5,8-四氯蒽醌, 均购自于上海试四赫维化工有限公司。

1.2 培养基

培养基组成: NH_4Cl $0.67 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, NaAc $2.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $0.06 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 微量元素 $1 \sim 2 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 7.0 ± 0.2 。

微量元素组成: $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $0.0020 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.004 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, CuSO_4 $0.0010 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, Na_2MoO_4 $0.0002 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 菌种来源及培养

异养菌 GWF (KM062029) 是实验室分离纯化的高效高氯酸盐还原菌。将菌 GWF 按 5% 的体积比接种到灭活的培养基中, 35°C 、 $140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 10 h。待菌液 $D_{600 \text{ nm}} = 0.3 \pm 0.02$ 时从恒温摇床中取出。利用富集菌液来研究不同种类、不同浓度的非水溶性醌条件下菌 GWF 还原高氯酸盐的能力。在 300 mL 血清瓶中依次加入富集菌液、不同种类、不同浓度非水溶性醌类乙酸纤维素小球, 高氯酸盐的初始浓度固定在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。瓶口用丁基橡胶瓶塞和铝膜密封后转移至生化培养箱中静置培养, 确保厌氧条件, 培养温度为 35°C 。每 12 h 进行取样测定。所有实验均有 3 个平行样。

1.4 非水溶性醌的乙酸纤维素包埋法

实验所用的非水溶性醌采用乙酸纤维素包埋法进行固定^[21]。

1.5 分析方法

pH 值: 使用 PHS225C 型数字酸度计。

高氯酸盐浓度: 氯酸根离子浓度采用离子色谱法进行测定。用无菌注射器取 10 mL 液体样品 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 取上清液。依次用 SC18-SPE 柱和 $0.22 \mu\text{m}$ 的尼龙滤膜二次过滤上清液。高氯酸根离子浓度采用戴安 ICS-1100 型离子色谱仪

(Dionex, Sunnyvale, CA) 进行分析。离子色谱柱为 PAC AS 20, 离子保护柱为 PAC AG 20。淋洗液为 $40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KOH, 检测限为 $0.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 高效非水溶性醌的筛选

非水溶性醌对菌 GWF 加速高氯酸盐生物还原的影响如图 1 所示。蒽醌、1-氯蒽醌、1,5-二氯蒽醌、1,8-二氯蒽醌和 1,4,5,8-四氯蒽醌这 5 种非水溶性醌的投加量均为 $0.036 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由于实验中所用非水溶性醌用乙酸纤维素包埋法进行负载, 这种球状颗粒可能会对高氯酸盐有一定的吸附作用, 从而影响实验结果的分析。为了排除这一影响, 在相同实验条件下, 增加了两组对照体系, 分别是不加小球的对照体系和添加空白乙酸纤维素小球的空白小球体系。实验结果与对照体系和中空白小球体系相比, 5 种非水溶性醌对菌 GWF 生物还原高氯酸盐均有加速作用, 其加速顺序为 1,5-二氯蒽醌 $>$ 1,4,5,8-四氯蒽醌 $>$ 1,8-二氯蒽醌 $>$ 蒽醌 $>$ 1-氯蒽醌。其中 1,5-二氯蒽醌加速效果最明显, 在培养 48 h 后, 高氯酸盐去除率达 100%。由于纤维素小球内部的多孔结构使其具有一定吸附性, 但实验结果表明其吸附量小于 2%, 故醋酸纤维素小球的吸附作用可忽略。因此, 本实验中最优非水溶性醌为 1,5-二氯蒽醌, 并在后续实验中对其展开系统研究。

Cervantes^[22] 研究表明, 醌类化合物是能加速初级电子供体的电子向最终电子受体传递的化合物, 可以使降解速率提高一到几个数量级。其机制为: ①在生物厌氧还原过程中, 需要许多辅酶参加, 而醌类化合物具有辅酶所具有的结构特征, 在还原过程中起着类似辅酶的作用; ②醌类化合物在酶的作用下会形

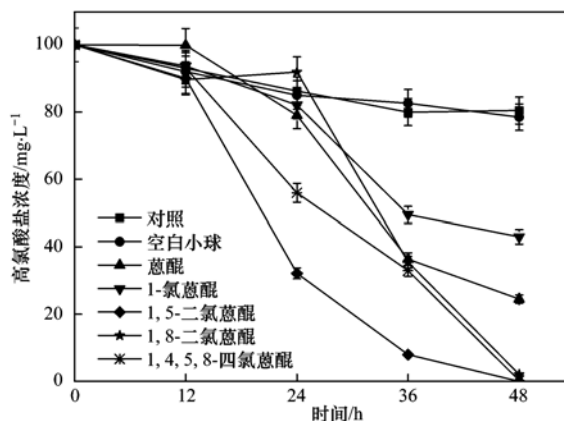


图 1 非水溶性醌对高氯酸盐生物还原的影响

Fig. 1 Effect of water-insoluble quinone on perchlorate biological reduction process

成活性高且有一定稳定性的中间体,这些活性中间体能从底物中获得氢质子或电子传递给最终电子受体,从而使其还原.故 1,5-二氯蒽醌加速的可能机制可能为二者的结合. Xi 等^[23]研究表明醌类化合物因不仅与反硝化过程中重要的辅酶甲基萘醌有着相似的结构,加速反硝化的生物还原过程,而且醌类化合物也可以作为电子载体大大缩短反硝化时间.

2.2 不同浓度的 1,5-二氯蒽醌对高氯酸盐降解的影响

为了考察不同浓度的 1,5-二氯蒽醌对菌 GWF 对高氯酸盐还原过程的影响,本组实验设置 6 种不同浓度的 1,5-二氯蒽醌,分别为 0.012、0.024、0.036、0.048 和 0.060 mmol·L⁻¹,以不加小球和添加空白乙酸纤维素小球作为对照体系,考察 1,5-二氯蒽醌浓度对菌 GWF 生物还原高氯酸盐的影响.实验结果如图 2 所示.不添加 1,5-二氯蒽醌和只添加空白乙酸纤维素小球时,高氯酸盐的还原效果并不明显.5 种醌浓度的反应体系对高氯酸盐的降解均有一定的加速作用,其加速的原因可能为 1,5-二氯蒽醌具有的醌基官能团,醌基官能团具有碳氧双键,活性极为活泼,易发生氧化还原反应.培养 48 h 后,高氯酸盐的去除率分别为 6.2% (0.012 mmol·L⁻¹ 1,5-二

氯蒽醌)、15.2% (0.024 mmol·L⁻¹ 1,5-二氯蒽醌)、99.1% (0.036 mmol·L⁻¹ 1,5-二氯蒽醌)、69.4% (0.048 mmol·L⁻¹ 1,5-二氯蒽醌) 和 43.1% (0.060 mmol·L⁻¹ 1,5-二氯蒽醌). 结果表明,在一定范围 (0.012 ~ 0.036 mmol·L⁻¹) 内增加 1,5-二氯蒽醌的浓度,能加速菌 GWF 生物还原高氯酸盐.同时,由实验可以得出速率常数 K_1 [mg·(L·h)⁻¹] 随 1,5-二氯蒽醌浓度的增加而增加,通过线性拟合可以得出高氯酸盐的生物还原速率与 1,5-二氯蒽醌浓度呈正相关:

$$K_1 = 520.7175 \cdot c_{1,5\text{-二氯蒽醌}} + 0.7842 \\ (R^2 = 0.9790)$$

当 1,5-二氯蒽醌浓度过高时 (大于 0.036 mmol·L⁻¹) 时,会抑制菌 GWF 生物还原高氯酸盐.由实验可以得出速率常数 K_2 随 1,5-二氯蒽醌浓度的增加而降低,通过线性拟合可以得出高氯酸盐的生物还原速率与 1,5-二氯蒽醌浓度呈负相关:

$$K_2 = -75.4583 \cdot c_{1,5\text{-二氯蒽醌}} + 23.8373 \\ (R^2 = 0.9974)$$

故而,1,5-二氯蒽醌投加浓度为 0.036 mmol·L⁻¹ 时对高氯酸盐降解的加速作用最明显并以此浓度展开后续的研究.

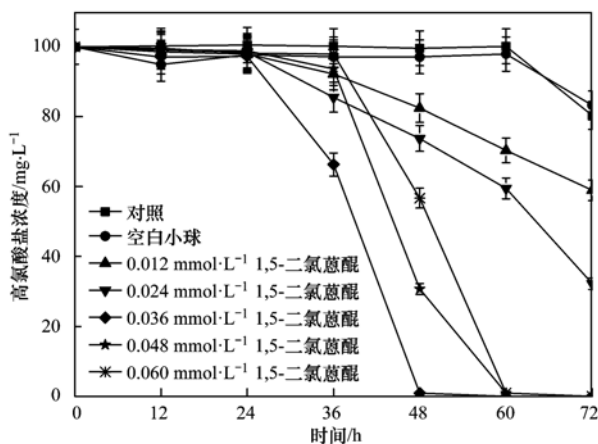
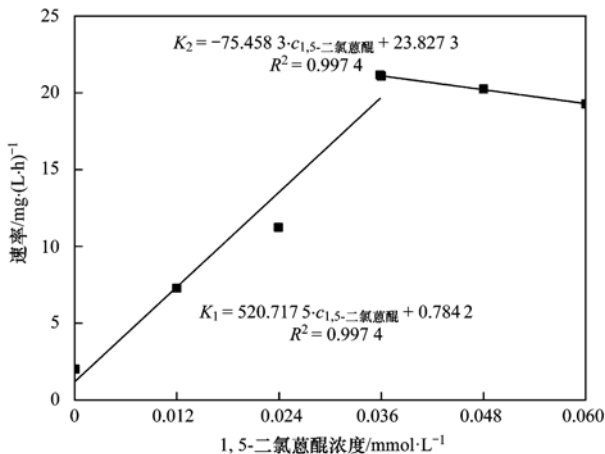


图 2 不同浓度的 1,5-二氯蒽醌对高氯酸盐生物还原的影响

Fig. 2 Effect of different concentrations of 1,5-dichloroanthraquinone on the perchlorate biological reduction process

2.3 温度、pH 值对 1,5-二氯蒽醌加速高氯酸盐还原的影响

微生物的生长繁殖都有一个适宜的温度范围,温度过高时会使得微生物体内的酶高温失活,温度过低时微生物会低温休眠^[24]. 本组实验分别考察了在 20、25、30、35 和 40℃ 这 5 种温度条件下,1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 生物还原高氯酸,35℃ 条件下添加空白乙酸纤维素小球作为对照实验.实验结果如图



3 所示.在反应第 48 h 时,20、25、30、35 和 40℃ 下高氯酸盐降解率分别为 3.7%、79.3%、94.8%、99.8%、100% 和 95.5%. 菌 GWF 在 35℃ 条件下,高氯酸盐在 48 h 内就已经降解至检测限之下.在 20 ~ 35℃ 范围内,高氯酸盐生物还原速率呈逐步上升趋势.在 40℃ 时,高氯酸盐生物还原速率有所下降.这可能由于高氯酸盐还原酶在低温条件下活性较低,进而抑制了菌 GWF 的新陈代谢;温度升高,高

氯酸盐还原酶的活性增强, 高氯酸盐还原速率也提升; 当温度升高到一定水平时(高于 35°C), 反而不适宜菌 GWF 还原高氯酸盐。所以本实验确定 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 生物还原氯酸盐的最佳温度是 35°C 。

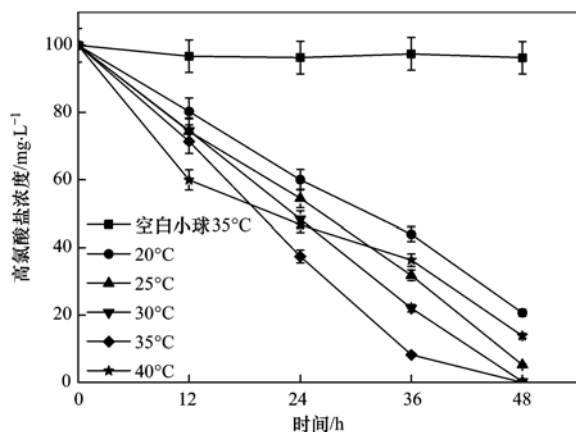


图3 不同温度对高氯酸盐生物还原的影响

Fig. 3 Effect of temperature on the perchlorate biological reduction process

微生物反应绝大多数是酶促反应, 而酶的活性受所处 pH 值影响, 不同的酶最适的 pH 值范围也不同. Coates 等^[25] 和 Wang 等^[26] 指出高氯酸盐还原菌可以在 pH 范围 5~9 的环境中生长, 而最佳生长 pH 范围为 6.8~7.5。因此, 本实验在初始 pH 值分别为 6、6.5、7、7.5、8、8.5、9 这 7 个梯度下考察了最适浓度的 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 降解高氯酸盐催化效果。实验结果如图 4 所示。与空白菌液相比, 在不同的 pH 值范围内, 1,5-二氯蒽醌对菌 GWF 降解高氯酸盐均有加速作用, 在 pH 值为 7.5 时, 加速作用最为明显, 其次为 pH 值为 7.0 时; 当 pH 值小于 6.5 或者 pH 大于 9 时加速作用明显减弱。分析这一实验结果的主要原因, 一为强酸强碱条件下, 微生物的生长受到了抑制, 同时生物活性也会相应降低; 二为极端条件下, 反应体系的传质也受到制约, 尤其是醌类化合物起到的调控作用会受到大幅度影响, 从而导致菌 GWF 生物还原高氯酸盐速率下降。

2.4 共存阴离子对 1,5-二氯蒽醌加速高氯酸盐还原的影响

在含高氯酸盐的烟花、电镀、电解抛光、军队弹药和其他工业废水中一般都会存在硝酸盐、磷酸盐、硫酸盐等共存阴离子^[27~29]。因此, 研究考察硝酸盐、磷酸盐、硫酸盐对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 生物还原高氯酸盐的影响。为其工业应用做出理论性指导。

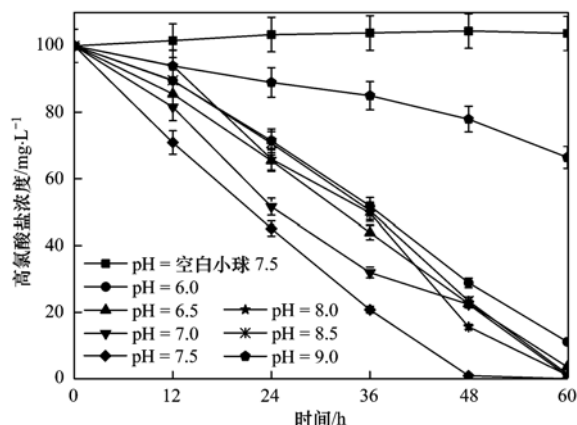


图4 pH 对 1,5-二氯蒽醌加速高氯酸盐生物还原的影响

Fig. 4 Effect of pH on the acceleration of perchlorate reduction process by 1,5-dichloroanthraquinone

硝酸盐对最适浓度的 1,5-二氯蒽醌对菌 GWF 高氯酸盐生物还原的催化加速作用的影响实验共有 6 个浓度梯度, 其分别为: 0、5、10、20、30 和 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。实验结果如图 5 所示。硝酸盐可以促进对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 高氯酸盐生物还原过程, 且加速程度与硝酸盐浓度无关, 这与 Xu 等^[30] 做的实验结果相类似。在反应 60 h 后, 高氯酸盐的生物还原率为 90% 左右, 而此时投加硝酸盐的任一体系中高氯酸盐的生物还原率为 100%。其中, 硝酸盐的浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的体系中, 高氯酸盐的生物还原速度最快。由此, 硝酸盐的投加促进了 1,5-二氯蒽醌对菌 GWF 降解高氯酸盐的催化加速作用。

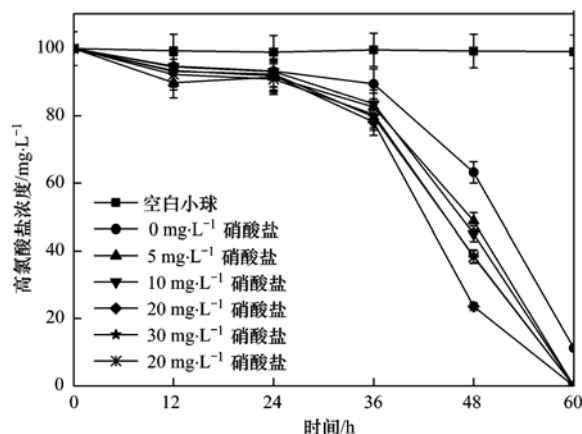


图5 硝酸盐对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 高氯酸盐生物还原过程的影响

Fig. 5 Effect of nitrate on the 1,5-dichloroanthraquinone-accelerated perchlorate reduction process by strain GWF

设置 6 种不同浓度的磷酸盐, 分别为 0、5、10、20、30 和 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 考察磷酸盐浓度对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 高氯酸盐生物还原过程的影响。实验结果如图 6 所示。在 $5\sim40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度范围

内,磷酸盐对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 高氯酸盐生物还原有微弱促进作用。

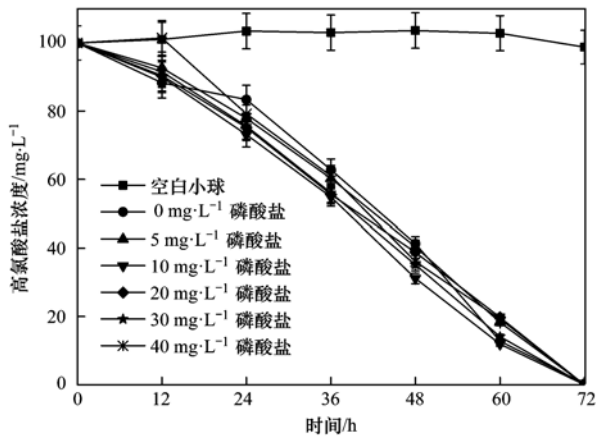


图 6 磷酸盐对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 高氯酸盐生物还原过程的影响

Fig. 6 Effect of phosphate on the 1,5-dichloroanthraquinone-accelerated perchlorate reduction process by strain GWF

为了考察硫酸盐对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 高氯酸盐生物还原过程的影响,分别投加 0、5、10、20、30 和 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硫酸盐,测试高氯酸盐还原效果.实验结果如图 7 所示,硫酸盐对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 高氯酸盐生物还原过程有一定的促进作用,且加速程度与硫酸盐浓度无关。

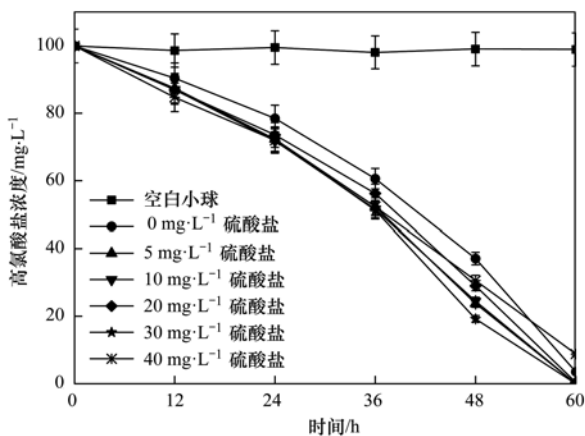


图 7 硫酸盐对 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 高氯酸盐生物还原过程的影响

Fig. 7 Effect of sulfate on the 1,5-dichloroanthraquinone-accelerated perchlorate reduction process by strain GWF

本组实验通过在 1,5-二氯蒽醌加速菌 GWF 生物还原高氯酸盐过程中添加不同浓度的硝酸盐、磷酸盐、硫酸盐,发现硝酸盐、磷酸盐、硫酸盐均有一定的促进作用,分析其促进的可能原因是,氮、磷、硫可以作为菌 GWF 的营养物质对其活性起到促进作用。

2.5 小球的重复利用稳定性实验

由于固定化负载方法一般会有机械强度低,负载物易脱落等问题,故本实验通过对比 4 次连续重复利用同一批次 1,5-二氯蒽醌的醋酸纤维素小球体系与空白小球体系相比,来判断固定后的蒽醌的生物催化稳定性.实验结果如图 8 所示.投加 1,5-二氯蒽醌的醋酸纤维素小球体系与空白小球体系相比,4 次重复利用高氯酸盐生物还原速率仍是空白乙酸纤维素小球 2 倍以上.由此可知,非水性蒽醌加速高氯酸盐生物还原是一个操作性好、整体效率高且具有实际应用价值的高氯酸盐污染生物处理方法。

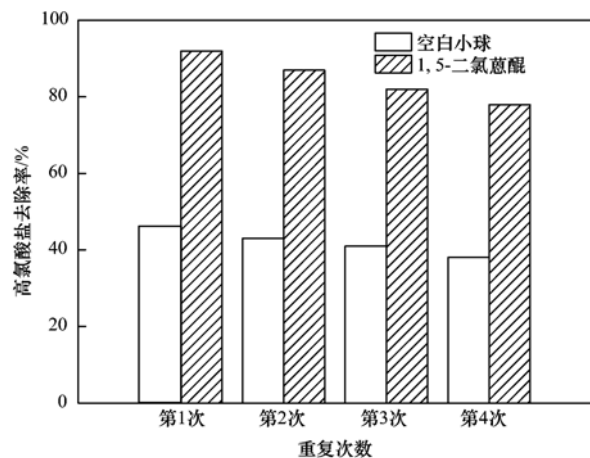


图 8 醋酸纤维素小球的重复利用

Fig. 8 Recycling of cellulose acetate balls

3 结论

(1) 5 种非水溶性蒽醌对菌 GWF 降解高氯酸盐均有加速作用,其加速顺序为 1,5-二氯蒽醌 > 1,4,5,8-四氯蒽醌 ≥ 1,8-二氯蒽醌 > 蒽醌 > 1-氯蒽醌,1,5-二氯蒽醌加速效果最明显。

(2) 当 1,5-二氯蒽醌的浓度为 $0.012 \sim 0.036 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,高氯酸盐的生物还原速率与 1,5-二氯蒽醌浓度呈正相关;当 1,5-二氯蒽醌浓度大于 $0.036 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,高氯酸盐的生物还原速率与 1,5-二氯蒽醌浓度呈负相关。

(3) 硝酸盐、磷酸盐、硫酸盐对高氯酸盐生物还原都有一定的促进作用。

(4) 1,5-二氯蒽醌乙酸纤维素小球在循环使用后仍能保持较高的高氯酸盐生物催化还原性能。

参考文献:

- [1] Ren Z G, Xu X, Gao B Y, et al. Integration of adsorption and direct bio-reduction of perchlorate on surface of cotton stalk based resin[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2015, 459 (1): 127-135.

- [2] Nor S J, Lee S H, Cho K C, *et al.* Microbial treatment of high-strength perchlorate wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 835-841.
- [3] Murray C W, Bolger P M. Environmental contaminants: perchlorate[M]. Waltham: Academic Press, 2014. 337-341.
- [4] Zhang T, Ma Y F, Wang D, *et al.* Placental transfer of and infantile exposure to perchlorate[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 948-954.
- [5] Schmidt F, Schnurr S, Wolf R, *et al.* Effects of the anti-thyroidal compound potassium-perchlorate on the thyroid system of the zebrafish[J]. *Aquatic Toxicology*, 2012, **109**: 47-58.
- [6] Evans K A, Rich D Q, Weinberger B, *et al.* Association of prenatal perchlorate, thiocyanate, and nitrate exposure with neonatal size and gestational age[J]. *Reproductive Toxicology*, 2015, **57**: 183-189.
- [7] Cang Y, Roberts D J, Clifford D A. Development of cultures capable of reducing perchlorate and nitrate in high salt solutions [J]. *Water Research*, 2004, **38**(14-15): 3322-3330.
- [8] Kucharzyk K H, Crawford R L, Cosens B, *et al.* Development of drinking water standards for perchlorate in the United States[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **91**(2): 303-310.
- [9] 刘勇建, 牟世芬, 林爱武, 等. 北京市饮用水中溴酸盐、卤代乙酸及高氯酸盐研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(2): 51-55.
- [10] Zhu Y P, Gao N Y, Wang Q F, *et al.* Adsorption of perchlorate from aqueous solutions by anion exchange resins: Effects of resin properties and solution chemistry[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, **468**: 114-121.
- [11] Gan Z W, Pi L, Li Y W, *et al.* Occurrence and exposure evaluation of perchlorate in indoor dust and diverse food from Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **536**: 288-294.
- [12] Ghosh A, Pakshirajan K, Ghosh P K, *et al.* Perchlorate degradation using an indigenous microbial consortium predominantly *Burkholderia* sp. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **187**(1-3): 133-139.
- [13] Lin S Y, Chen W F, Cheng M T, *et al.* Investigation of factors that affect cationic surfactant loading on activated carbon and perchlorate adsorption [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, **434**: 236-242.
- [14] Motzer W E. Perchlorate: Problems, detection and solutions[J]. *Environmental Forensics*, 2001, **2**(4): 301-311.
- [15] Batista J R, McGarvey F X, Vieira A R. The removal of perchlorate from waters using ion-exchange resins [A]. In: Urbansky E T (ed.). *Perchlorate in the Environment*[M]. US: Springer, 2000. 135-146.
- [16] Tripp A R, Clifford D A. The treatability of perchlorate in groundwater using ion-exchange technology[A]. In: *Perchlorate in the Environment*[M]. US: Springer, 2000. 123-134.
- [17] Song W, Gao B Y, Xu X, *et al.* Treatment of dissolved perchlorate by adsorption-microbial reduction [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **279**: 522-529.
- [18] Guo J B, Kang L, Yang J L, *et al.* Study on a novel non-dissolved redox mediator catalyzing biological denitrification (RMBDN) technology[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(11): 4238-4241.
- [19] Guo J B, Lian J, Xu Z F, *et al.* Reduction of Cr(VI) by *Escherichia coli* BL21 in the presence of redox mediators [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 713-716.
- [20] Thrash J C, Van Trump J I, Weber K A, *et al.* Electrochemical stimulation of microbial perchlorate reduction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(5): 1740-1746.
- [21] 杜海峰, 赵丽君, 郭延凯, 等. 醋酸纤维素包埋非水溶性介体催化强化生物反硝化特性[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(6): 2417-2422.
- [22] Cervantes-Carrillo F J. Quinones as electron acceptors and redox mediators for the anaerobic biotransformation of priority pollutants [M]. Wageningen: Wageningen University, 2002.
- [23] Xi Z H, Guo J B, Lian J, *et al.* Study the catalyzing mechanism of dissolved redox mediators on bio-denitrification by metabolic inhibitors[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **140**: 22-27.
- [24] Dugan N R, Williams D J, Meyer M, *et al.* The impact of temperature on the performance of anaerobic biological treatment of perchlorate in drinking water[J]. *Water Research*, 2009, **43**(7): 1867-1878.
- [25] Coates J D, Achenbach L A. Microbial perchlorate reduction: rocket-fuelled metabolism [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2004, **2**(7): 569-580.
- [26] Wang C, Lippincott L, Meng X G. Kinetics of biological perchlorate reduction and pH effect[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **153**(1-2): 663-669.
- [27] Van Ginkel S W, Ahn C H, Badruzzaman M, *et al.* Kinetics of nitrate and perchlorate reduction in ion-exchange brine using the membrane bio? lm reactor (MBIR) [J]. *Water Research*, 2008, **42**(15): 4197-4205.
- [28] Gao M C, Wang S, Ren Y, *et al.* Simultaneous removal of perchlorate and nitrate in a combined reactor of sulfur autotrophy and electrochemical hydrogen autotrophy [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **284**: 1008-1016.
- [29] Ontiveros-Valencia A, Tang Y N, Krajmalnik-Brown R, *et al.* Managing the interactions between sulfate- and perchlorate-reducing bacteria when using hydrogen-fed biofilms to treat a groundwater with a high perchlorate concentration [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 215-224.
- [30] Xu X, Gao B Y, Jin B, *et al.* Study of microbial perchlorate reduction: considering of multiple pH, electron acceptors and donors[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **285**: 228-235.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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