

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽峰,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青宪,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究

周娜娜^{1,2}, 柏耀辉^{2*}, 梁金松², 罗金明², 刘锐平², 胡承志², 袁林江¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 从锰矿土壤样品中分离、纯化出 1 株高效锰氧化细菌(QJX-1), 经 16S rDNA 序列鉴定为 *Pseudomonas* sp. QJX-1. 研究表明, *Pseudomonas* sp. QJX-1 含有锰氧化的必需成分多铜氧化酶基因 *CumA*, 当初始 Mn^{2+} 为 $5.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 菌密度 D_{600} 为 0.020 时, 该菌可在 48 h 内将 Mn^{2+} 转化, 且转化率达 99.4%. 在寡营养条件下该菌锰氧化速率较富营养条件下有显著提高; 添加石英砂滤料促使生物膜的快速形成, 进而促进 Mn^{2+} 的生物转化. 根据研究结果推测地下水处理过程中生物锰氧化速率较快.

关键词: *Pseudomonas* sp. QJX-1; 生物锰氧化; 寡营养; 石英砂; 生物膜

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0740-06

Characterization of Manganese Oxidation by *Pseudomonas* sp. QJX-1

ZHOU Na-na^{1,2}, BAI Yao-hui², LIANG Jin-song², LUO Jin-ming², LIU Rui-ping², HU Cheng-zhi², YUAN Lin-jiang¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: A manganese-oxidizing bacteria (QJX-1) was isolated from the soil of a manganese mine. It was identified as *Pseudomonas* sp. QJX-1 by 16S rDNA sequencing. Experimental results showed that the *Pseudomonas* sp. QJX-1 has a multi-copper oxidase gene *CumA*, which is an essential component for manganese oxidation by *Pseudomonas* sp. Under the condition of low initial inoculum level (D_{600} , 0.020), $5.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Mn}^{2+}$ could be oxidized by QJX-1 within 48 h with a conversion rate of as high as 99.4%. In comparison with the eutrophic conditions, the oligotrophic condition dramatically increased the biological manganese oxidation rate. Biofilm formation by employing the quartz sand could further improve the oxidation rate of Mn^{2+} . Based on these results, it is speculated that biological manganese oxidation in underground water treatment is comparatively high.

Key words: *Pseudomonas* sp. QJX-1; biological manganese oxidation; oligotrophic; quartz sand; biofilm

锰(Mn)是地壳中含量第十的元素,也是人体必需的微量元素之一. 而作为饮用水主要来源的地下水中常含有过量的锰,但是长期摄入过量锰会对人体造成危害^[1]. 鉴于高浓度含锰水的危害性,从保障饮用水卫生、安全,提高生活质量出发,研究饮用水除锰技术是必要的. 地下水中的锰主要以可溶性的 Mn^{2+} 形式存在; Diem 等^[2] 的研究表明,在仅有 O_2 存在而没有锰氧化菌或者某些特殊矿物存在时, Mn^{2+} 很难被氧化. 同时相关研究表明, Mn^{2+} 的生物锰氧化速率比化学氧化高几个数量级^[3],故 Mn^{2+} 的生物氧化在地下水环境中起着至关重要的作用^[4-6]. 自然界中的锰氧化菌分布十分广泛,包括许多细菌、真菌、藻类和一些真核细胞^[7]. 锰氧化菌可以利用酶促反应催化氧化 Mn^{2+} ,生成不溶于水的 Mn^{4+} 锰氧化物^[8-10];而生成的生物氧化锰具有高的催化氧化能力和比表面积,进而通过吸附氧化作用去除水体其它污染物.

目前研究最多的锰氧化菌主要包括 3 种模式

菌:分别是生盘纤发菌 SS-1 (*Leptothrix discophora*),它是鞘状结构的淡水异养菌株,产生的锰氧化物沉积在胞外菌鞘^[11, 12];芽胞杆菌 SG-1 (*Bacillus*),从海边含锰的沉积物中分离出来,主要通过产生的芽胞来氧化 Mn^{2+} ^[10, 13, 14];假单胞菌 MnB1 和 GB-1 (*Pseudomonas putida*),它们在淡水和土壤环境中普遍存在,并在细胞表面形成生物氧化锰^[15-17]. 从 20 世纪 60 年代起,研究人员陆续对假单胞菌氧化锰进行了相关研究^[18]. Francis 等^[9] 和 Tebo 等^[19] 对假单胞菌的氧化机制进行了研究,发现锰氧化过程与多铜氧化酶 *CumA* 有关. Okazaki 等^[20] 对假单胞菌氧化锰的基本性质进行了研究,发现 $NaNO_3$ 、KCN、EDTA、Tris 或邻二氮杂菲(o-phenanthroline)会抑制

收稿日期: 2013-06-07; 修订日期: 2013-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171377); 中国科学院知识创新工程重要项目(KZCX2-EW-410)

作者简介: 周娜娜(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为生物锰氧化物的生成及应用, E-mail: zhounana1020@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yhbai@cees.ac.cn

假单胞菌的氧化活性. De Vrind 等^[21]研究了恶臭假单胞菌 GB-1 中细胞色素 c 参与锰氧化的机制.

本研究从锰矿土壤样品中分离出高效的锰氧化菌 *Pseudomonas* sp. QJX-1, 分析该菌生物锰氧化的过程与机制, 探讨其在寡营养水体和添加石英砂滤料的培养基中的锰氧化效率, 以期对地下水的锰氧化机理探讨及该菌株的工程应用研究提供支持.

1 材料与方法

1.1 培养基

细菌的富集培养采用 PYG^[22] 培养基 (peptone-yeast extract-glucose), PYG 成分: 蛋白胨、葡萄糖、酵母膏各 $0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; pH 值为 $7.0 \sim 7.5$, 采用缓冲液终浓度为 $10 \sim 20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HEPES (*N*-2-Hydroxyethylpiperazine-*N'*-2-ethanesulfonic acid, 4-羟乙基哌嗪乙磺酸) 调节.

1.2 细菌的分离、纯化与鉴定

取 2 g 湖南湘潭锰矿区域的土壤, 加到高温灭菌 (115°C , 25 min) 稀释为 100 倍的 PYG 培养基中, 并加入 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($100 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的 MnCl_2 , 其中 MnCl_2 溶液和 HEPES 缓冲液均采用 $0.22 \text{ } \mu\text{m}$ 滤膜过滤灭菌, 在 30°C , $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床中驯化培养. 每次培养 7 d 后, 取 5 mL 的菌液添加到新制备的 45 mL PYG 培养基中继续驯化, 共驯化培养 4 次. 驯化结束后, 利用涂布分离及平板划线法分离纯化锰氧化菌株, 将分离的纯菌株保存在 -70°C 冰箱中备用.

菌种鉴定采用 16S rDNA 序列比对法, 即以 TIANGEN 基因组 DNA 试剂盒提取该菌株的基因组 DNA, 作为 PCR 反应的模板, 利用 16S rDNA 的通用引物 27F 和 1492R 进行 PCR 片断基因扩增^[23]. PCR 产物经纯化回收后送至上海美吉生物公司测序. 将测得的 16S rDNA 测序结果导入 NCBI 中的 GenBank 数据库中进行同源性比对.

1.3 细菌生物锰氧化过程与机制

1.3.1 细菌生物锰氧化过程

取 4°C 冰箱中 *Pseudomonas* sp. QJX-1 的菌液进行活化; 将其接种到装有 100 mL 不含 Mn^{2+} 的 PYG 培养基中, 30°C , $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 48 h.

取 10 mL 上述活化后的菌液, 加入到 250 mL 的三角瓶中, 并加入 90 mL 的新鲜 PYG 培养基, 将 HEPES 缓冲液和 Mn^{2+} 母液一起用高温灭菌的 $0.22 \text{ } \mu\text{m}$ 滤膜过滤后添加到培养基中, 使得 HEPES 的终浓度为 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, Mn^{2+} 终浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (100

$\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 30°C , $170 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 72 h. 在培养过程中, 间隔特定时间取样测定其菌密度 (D_{600}) 及 Mn^{2+} 浓度; 在相同条件下, 以不添加菌的培养基作为对照, 试验设 3 组重复.

1.3.2 细菌生物锰氧化的机制

采用对多铜氧化酶基因 *CumA* 的扩增和锰氧化物的 X 射线晶体衍射 (XRD) 分析, 研究潜在的锰氧化机制. *Pseudomonas* sp. QJX-1 的 *CumA* 扩增方法参照文献^[23], 以总 DNA 为模板进行 PCR 扩增. 引物^[9] 为: CumAIdg2B, $5'$ -GAYGCCGGYAGCTACTGGTAYCACCC- $3'$; CumAIdgR, $5'$ -ACYTTGAARS YCATGCCRTGTCARRTG- $3'$.

PCR 反应程序为: 94°C 预变性 3 min ; 94°C 变性 30 s , 45°C 退火 30 s , 60°C 延伸 1 min , 共 30 个循环, 最后 72°C 延伸 2 min , 4°C 保存. 将 PCR 产物送至上海美吉生物公司测序, 测得的 16S rDNA 测序结果导入 NCBI 中的 GenBank 数据库中进行同源性比对.

XRD 步骤: 将 *Pseudomonas* sp. QJX-1 接种到含 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn^{2+} 的 PYG 培养基中, 培养一周后, 取 500 mL 锰氧化物的混合液离心分离 ($12000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 5 min) 并用去离子水清洗 3 次, 将得到的生物氧化锰样品在 -40°C 冷冻干燥 72 h 后; 采用电流为 20 mA , 扫描范围 $10^\circ \sim 80^\circ$, 扫描速度为 $2(^\circ) \cdot \text{min}^{-1}$, 对样品进行 XRD (PAN X Pert PRO, 荷兰) 图谱分析.

1.4 营养条件对 *Pseudomonas* sp. QJX-1 锰氧化的影响

采用 PYG 液体培养基作为富营养培养基, 稀释 50 倍的 PYG 作为寡营养培养基; 将 *Pseudomonas* sp. QJX-1 接种到 250 mL 的三角瓶中, 再加入 90 mL 含 Mn^{2+} 的新鲜 PYG 液体培养基 (同 1.3.1 节), 室温静置培养 9 d. 在培养过程中, 间隔特定时间取样测定其 Mn^{2+} 浓度; 试验设不加菌的空白对照及 3 组重复.

1.5 石英砂滤料对寡营养条件下 *Pseudomonas* sp. QJX-1 锰氧化的影响

在 250 mL 的三角瓶中加入 2 cm 厚度的粒径大小为 $0.8 \sim 1.0 \text{ mm}$ 的石英砂, 加入 150 mL 的寡营养培养基, 将 *Pseudomonas* sp. QJX-1 接种到含 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Mn^{2+} 的培养基中 (同 1.3.1 节), 室温静置培养 3 d, 间隔特定时间取样测定其 Mn^{2+} 浓度. 然后每隔 3 d 采用相同含 Mn^{2+} 的寡营养培养基替换原有的培养基, 室温静置培养 3 d, 间隔特定时间取

样测定其 Mn^{2+} 浓度. 在相同条件下, 以不添加石英砂滤料的培养基作为对照, 试验设 3 组重复, 实验结束后, 取石英砂滤料用 SEM 做形态观察.

1.6 分析方法

Mn^{2+} 浓度: 培养液样品经 $0.22\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后, 通过电感耦合等离子体原子发射光谱法 (700 series ICP-OES) 测定 Mn^{2+} 的浓度.

菌密度 (D_{600}): 用紫外-可见分光光度计 (U-3010), 在波长为 600 nm 处检测菌液吸光度.

2 结果与讨论

2.1 *Pseudomonas* sp. QJX-1 的分离、纯化与鉴定

通过驯化, 分离及纯化获得 1 株能在固体培养基下高效转化 Mn^{2+} 的菌株 QJX-1; 将其 16S rDNA 基因导入到 NCBI 中的 GenBank 中进行同源性比对, 结果表明, 最大相似菌株为假单胞菌 (*Pseudomonas putida*, JF825523), 相似度为 99%. 综合 QJX-1 的菌体形态特征和生理生化特征, 确定该菌株属于假单胞菌, 并命名为 *Pseudomonas* sp. QJX-1, 系统发育树见图 1.

Pseudomonas sp. QJX-1 为革兰氏阴性好氧无芽胞菌, 呈杆状或略弯, 长为 $1 \sim 2.1\ \mu\text{m}$, 宽为 $0.5 \sim 0.9\ \mu\text{m}$, 细胞两端圆钝. 锰氧化最适温度为 30°C , 最佳 pH 值为 7.5. Okazaki 等^[20] 对 *Pseudomonas fluorescens* GB-1 的研究表明, 锰氧化活性出现在生长曲线的稳定期初期, 最适 pH 和温度分别为 7.0 和 35°C , 其锰氧化过程最佳条件与本试验结果相近. 说明假单胞菌适合在中性和偏高于常温的条件下进行锰氧化.

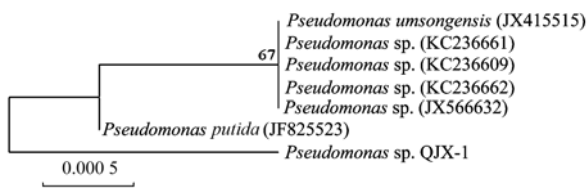


图 1 *Pseudomonas* sp. QJX-1 的 16S rDNA 序列系统发育树

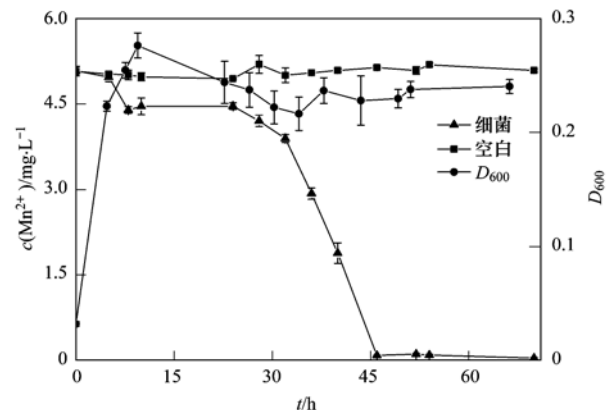
Fig. 1 Phylogenetic tree based on the 16S rDNA sequence of strain *Pseudomonas* sp. QJX-1

2.2 *Pseudomonas* sp. QJX-1 生物锰氧化的过程与机制

2.2.1 锰氧化过程

由图 2 可以看出, 空白试验中锰含量没有明显变化, 说明 Mn^{2+} 的转化是 *Pseudomonas* sp. QJX-1 作用的结果. 菌 *Pseudomonas* sp. QJX-1 在 PYG 培养基中生长, D_{600} 值在 10 h 内从 0.020 ± 0.02 升高

到 0.268 ± 0.03 , 经历了 10 h 的对数生长期, 60 h 的稳定期; 随着 *Pseudomonas* sp. QJX-1 的生长, 培养基中 Mn^{2+} 的含量逐渐降低, 24 h 之前 Mn^{2+} 转化率较低, 此时菌体适应培养基需要一个过程, 之后菌体生长旺盛, 对 Mn^{2+} 的吸附和氧化作用增强, 在 48 h 后将 $(5.05 \pm 0.06)\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Mn^{2+} 转化, 且转化率高达 99.4%, 溶液中 Mn^{2+} 的终浓度为 $(0.03 \pm 0.01)\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.



误差线代表 3 个平行样品的标准偏差

图 2 *Pseudomonas* sp. QJX-1 生长曲线及对 Mn^{2+} 的转化

Fig. 2 Growth curve and Mn^{2+} oxidation of *Pseudomonas* sp. QJX-1

2.2.2 锰氧化机制

近年来许多学者用分子生物学方法对锰氧化菌进行了研究, 发现许多基因参与锰氧化过程中, 比如 *MnxG*、*CumA*、*mofA*、与细胞色素 C、醌类有关的基因等^[24]. 由图 3 可以看出, 本试验用 *CumA* 的简并引物扩增出一段 800 bp 的基因. 该基因与 Francis 等^[9] 报道的 *Pseudomonas* sp. ISO6 (AF326402) 的 *CumA* 有 99% 的氨基酸同源性. 研究表明, *CumA* 被认为是假单胞菌锰氧化活性的必需成分^[25, 26], 因为编码多铜氧化酶的基因受损时, 其锰氧化活性会失去, 因此 *CumA* 在假单胞菌锰氧化过程中是必不可少的基因.

图 4 为生物氧化锰的 XRD 图谱, 从中可以看出, 生物氧化锰无明显峰, 只有个别的馒头峰, 表明菌 *Pseudomonas* sp. QJX-1 氧化生成的氧化锰是无定形态或短程有序的物质. 这与以往研究结果类似, 如 Villalobos 等^[16] 发现 *Pseudomonas putida* MnB1 形成的生物氧化锰是弱结晶的层状结构; Kim 等^[27] 的研究也表明, 生物氧化锰一般是结晶弱或短程有序的纳米级矿物, 具有较高的比表面积和反应活性.

2.3 营养条件对 *Pseudomonas* sp. QJX-1 锰氧化的影响

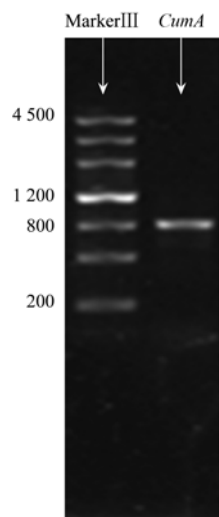
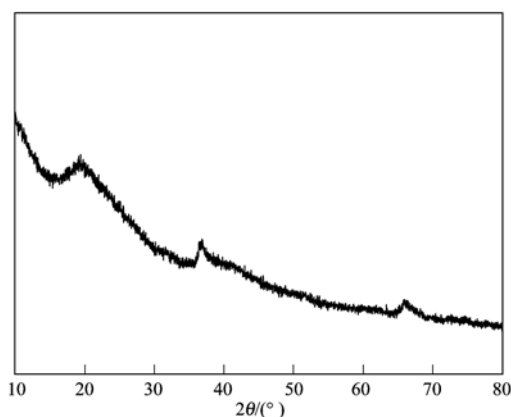
图3 *CumA* 的 PCR 扩增产物的琼脂糖凝胶电泳图Fig. 3 Agarose gel electrophoresis of PCR product of *CumA*

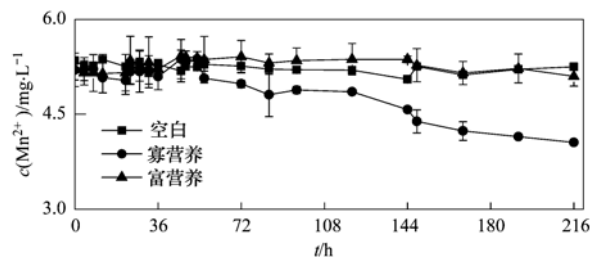
图4 生物氧化锰的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of biogenic Mn oxides

为更接近模拟地下水中的缺氧状态,本试验采用静置培养. 由图 5 可以看出,当初始 Mn^{2+} 为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, D_{600} 为 0.020,静置培养 9 d 时,富营养培养基中 Mn^{2+} 的含量没有变化,一直保持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右;而在寡营养培养基中,经过 4.5 d 后 Mn^{2+} 的含量从 $(5.20 \pm 0.16) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $(4.06 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,转化率为 21.92%. 说明 *Pseudomonas* sp. QJX-1 在寡营养条件下的锰氧化效果较富营养条件下好. 类似研究表明^[28],锰氧化细菌属贫营养微生物,这种微生物比表面积很大、比增长速率很小、内源呼吸速率常数(b)较低、饱和常数(K_s)较小,其在寡营养中生长良好.

2.4 石英砂滤料对寡营养条件下 *Pseudomonas* sp. QJX-1 锰氧化的影响

选用石英砂作为滤料,因为石英砂取材容易,且

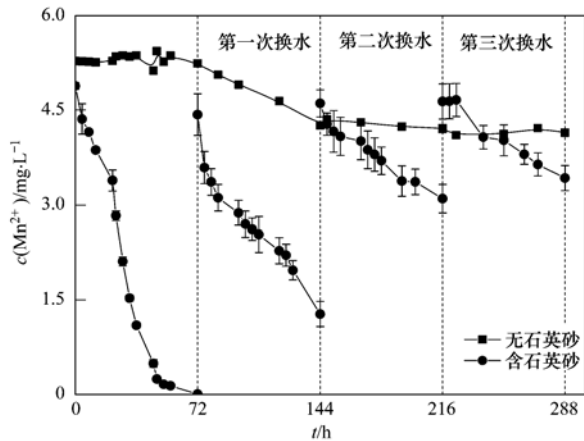


误差线代表 3 个平行样品的标准偏差

图5 *Pseudomonas* sp. QJX-1 在不同营养条件下的锰氧化Fig. 5 Mn Oxidation by *Pseudomonas* sp. QJX-1 under different nutritional conditions

在饮用水水厂运行中具有成熟的经验. 由图 6 可以看出,寡营养条件下,当初始 Mn^{2+} 为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, D_{600} 为 0.020,静置培养时,*Pseudomonas* sp. QJX-1 在不含有石英砂滤料的培养基中氧化速率缓慢,在 12 d 中 Mn^{2+} 从 $5.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $4.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率仅为 21.47%;相比之下,含石英砂滤料的 *Pseudomonas* sp. QJX-1 在 3 d 就将 Mn^{2+} 彻底氧化. 在第一次换取寡营养培养基的条件下,且继续投加相同浓度的 Mn^{2+} ,试验发现 Mn^{2+} 从 $(4.43 \pm 0.32) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $(1.27 \pm 0.20) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Mn^{2+} 的去除率也高达 71.27%;第二次换取培养基并且继续投加相同浓度的 Mn^{2+} , Mn^{2+} 从 $(4.61 \pm 0.21) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $(3.10 \pm 0.22) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Mn^{2+} 的去除率为 32.81%;第三次换取后, Mn^{2+} 的去除率仍为 26.28%,与不加石英砂滤料的培养基在 12 d 中的去除率相比也高出 4.81%. 说明添加滤料的培养基对 *Pseudomonas* sp. QJX-1 去除 Mn^{2+} 有明显的促进作用. 随着 *Pseudomonas* sp. QJX-1 的生长,其在石英砂表面形成一层生物膜. Ahmad 等^[29]研究表明,由于细菌为疏水性胶体,可以牢固地通过水合作用力黏附在滤料上,且在静置时不易从滤料表面脱落. 锰氧化细菌为提高在寡营养环境中存活潜能,细菌细胞和锰氧化物形成丝状体,并且附着于石英砂表面伸展,使细胞能最大限度地相互依赖,且在更大的范围内共享营养,以最小的代价维持生存和稳定,形成生物膜;其比表面积很大,内源呼吸速率常数较低;所以生物膜的形成能促进对 Mn^{2+} 的氧化与吸附.

研究表明,锰氧化细菌在去除饮用水中锰的同时,生成的锰氧化物对多种重金属离子有很高的吸附能力和很强的氧化能力^[30~34],如 Ni、Cr、Co、Pb、U 和 Zn;还对环境中难降解物质和新型污染物有氧化作用^[35~39],如腐殖质、环境激素[17 α -炔雌



误差线代表 3 个平行样品的标准偏差

图 6 *Pseudomonas* sp. QJX-1 与石英砂滤料结合对 Mn^{2+} 的氧化

Fig. 6 Oxidation of Mn^{2+} by *Pseudomonas* sp. QJX-1 combined with quartz sand filter

醇(EE2)]、类固醇雌性激素、灭草剂(草甘膦、氨基甲酸酯)、抗生素及药物。因此,锰氧化物可以控制重金属离子和有机物在环境中的迁移转化,进而在水处理中发挥作用。对于 *Pseudomonas* sp. QJX-1 锰氧化的研究不仅有助于认识自然界重金属离子和有机物形态的转化和迁移规律,同时有助于挖掘 *Pseudomonas* sp. QJX-1 的工程应用潜力。

3 结论

(1)从锰矿土壤样品中分离纯化到 1 株高效锰氧化细菌 QJX-1,经 16S rDNA 序列鉴定为假单胞菌,故命名为 *Pseudomonas* sp. QJX-1。且锰氧化最适温度为 30℃,最佳 pH 值为 7.5。

(2)*Pseudomonas* sp. QJX-1 含有锰氧化过程中的必需成分多铜氧化酶基因 *CumA*。当 Mn^{2+} 为 5 $mg \cdot L^{-1}$, D_{600} 为 0.020, 30℃, 170 $r \cdot min^{-1}$ 培养 3 d 时,该菌在 48 h 时将 Mn^{2+} 转化,转化率为 99.4%。

(3)*Pseudomonas* sp. QJX-1 在贫营养条件下能更好地进行锰氧化,且在石英砂表面形成的生物膜促进了 Mn^{2+} 的氧化和吸附。当 Mn^{2+} 为 5 $mg \cdot L^{-1}$, D_{600} 为 0.020,静置培养时,去除率高达 99.9%;培养基经过 3 次换取后,去除率分别为 71.27%、32.81%、26.28%;且其都明显高于不加石英砂滤料的培养基。试验结果表明地下水处理过程中生物锰氧化速率较快;同时 *Pseudomonas* sp. QJX-1 具有应用于水处理工程的潜力。

参考文献:

[1] 叶伟. 环境中锰污染对居民健康的影响[J]. 环境与健康杂

志, 1989, 6(4): 43-46.

- [2] Diem D, Stumm W. Is dissolved Mn^{2+} being oxidized by O_2 in absence of Mn bacteria or surface catalysts[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1571-1573.
- [3] Hastings D, Emerson S. Oxidation of manganese by spores of a marine *Bacillus*: kinetic and thermodynamic considerations[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(8): 1819-1824.
- [4] Kay J T, Conklin M H, Fuller C C, et al. Processes of nickel and cobalt uptake by a manganese oxide forming sediment in Pinal Creek, globe mining district, arizona[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(24): 4719-4725.
- [5] Emerson S, Kalhorn S, Jacobs L, et al. Environmental oxidation rate of manganese (II): bacterial catalysis[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(6): 1073-1079.
- [6] Fuller C C, Harvey J W. Reactive uptake of trace metals in the hyporheic zone of a mining-contaminated stream, Pinal Creek, Arizona[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(7): 1150-1155.
- [7] Ghiorse W C. Biology of iron-depositing and manganese-depositing bacteria[J]. *Annual Review of Microbiology*, 1984, 38(1): 515-550.
- [8] Adams L F, Ghiorse W C. Oxidation-state of Mn in the Mn oxide produced by *Leptothrix discophora* SS-1[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(8): 2073-2076.
- [9] Francis C A, Tebo B M. *CumA* multicopper oxidase genes from diverse Mn(II)-oxidizing and non-Mn(II)-oxidizing *Pseudomonas* strains[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(9): 4272-4278.
- [10] Francis C A, Tebo B M. Enzymatic manganese(II) oxidation by metabolically dormant spores of diverse *Bacillus* species[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(2): 874-880.
- [11] Brouwers G, Corstjens P, De Vrind J, et al. Stimulation of Mn^{2+} oxidation in *Leptothrix discophora* SS-1 by Cu^{2+} and sequence analysis of the region flanking the gene encoding putative multicopper oxidase MofA[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2000, 17(1): 25-33.
- [12] El Gheriany I A, Bocioaga D, Hay A G, et al. Iron requirement for Mn(II) oxidation by *Leptothrix discophora* SS-1[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(5): 1229-1235.
- [13] Van Waasbergen L G, Hildebrand M, Tebo B M. Identification and characterization of a gene cluster involved in manganese oxidation by spores of the marine *Bacillus* sp. strain SG-1[J]. *Journal of Bacteriology*, 1996, 178(12): 3517-3530.
- [14] Webb S, Tebo B, Bargar J. Structural characterization of biogenic Mn oxides produced in seawater by the marine *Bacillus* sp. strain SG-1[J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(8-9): 1342-1357.
- [15] Caspi R, Tebo B M, Haygood M. C-type cytochromes and manganese oxidation in *Pseudomonas putida* MnB1[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(10): 3549-3555.
- [16] Villalobos M, Toner B, Bargar J, et al. Characterization of the

- manganese oxide produced by *Pseudomonas putida* strain MnB1 [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2003, **67**(14): 2649-2662.
- [17] Parker D L, Morita T, Mozafarzadeh M L, *et al.* Interrelationships of MnO_2 precipitation siderophore-Mn(III) complex formation siderophore degradation and iron limitation in Mn(II)-oxidizing bacterial cultures [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2007, **71**(23): 5672-5683.
- [18] Jung W, Schweisfurth R. Manganese oxidation by an intracellular protein of a *Pseudomonas* species [J]. *Zeitschrift Fur Allgemeine Mikrobiologie*, 1979, **19**(2): 107-115.
- [19] Tebo B M, Bargar J R, Clement B G, *et al.* Biogenic manganese oxides: properties and mechanisms of formation [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, **32**: 287-328.
- [20] Okazaki M, Sugita T, Shimizu M, *et al.* Partial purification and characterization of manganese-oxidizing factors of *Pseudomonas fluorescens* GB-1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(12): 4793-4799.
- [21] De Vrind J, Brouwers G, Corstjens P, *et al.* The cytochrome maturation operon is involved in manganese oxidation in *Pseudomonas putida* GB-1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **64**(10): 3556-3562.
- [22] Adams L F, Ghiorse W C. Influence of manganese on growth of a sheathless strain of *Leptothrix discophora* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1985, **49**(3): 556-562.
- [23] Sambrook J, Russell D W. *Molecular cloning: a laboratory manual* (Vol. 1-3.) [M]. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2001.
- [24] Solomon E I, Sundaram U M, Machonkin T E. Multicopper oxidases and oxygenases [J]. *Chemical Reviews*, 1996, **96**(7): 2563-2606.
- [25] Brouwers G J, De Vrind J P, Corstjens P L, *et al.* *CumA*, a gene encoding a multicopper oxidase is involved in Mn^{2+} oxidation in *Pseudomonas putida* GB-1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(4): 1762-1768.
- [26] Brouwers G, Vijgenboom E, Corstjens P, *et al.* Bacterial Mn^{2+} oxidizing systems and multicopper oxidases: an overview of mechanisms and functions [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2000, **17**(1): 1-24.
- [27] Kim H S, Pastén P A, Gaillard J F, *et al.* Nanocrystalline todorokite-like manganese oxide produced by bacterial catalysis [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, **125**(47): 14284-14285.
- [28] Gouzinis A, Kosmidis N, Vayenas D, *et al.* Removal of Mn and simultaneous removal of NH_3 , Fe and Mn from potable water using a trickling filter [J]. *Water Research*, 1998, **32**(8): 2442-2450.
- [29] Ahmad R, Amirtharajah A, Al Shawwa, *et al.* Effects of backwashing on biological filters [J]. *American Water Works Association Journal*, 1998, **90**(12): 62-73.
- [30] Villalobos M, Bargar J, Sposito G. Mechanisms of Pb(II) sorption on a biogenic manganese oxide [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(2): 569-576.
- [31] Tani Y, Ohashi M, Miyata N, *et al.* Sorption of Co(II), Ni(II), and Zn(II) on biogenic manganese oxides produced by a Mn-oxidizing fungus, strain KR21-2 [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2004, **39**(10): 2641-2660.
- [32] Webb S M, Fuller C C, Tebo B M, *et al.* Determination of uranyl incorporation into biogenic manganese oxides using X-ray absorption spectroscopy and scattering [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(3): 771-777.
- [33] Wu Y X, Deng B L, Xu H F, *et al.* Chromium(III) oxidation coupled with microbially mediated Mn(II) oxidation [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2005, **22**(3-4): 161-170.
- [34] Tournassat C, Charlet L, Bosbach D, *et al.* Arsenic(III) oxidation by birnessite and precipitation of manganese(II) arsenate [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(3): 493-500.
- [35] Sunda W G, Kieber D J. Oxidation of humic substances by manganese oxides yields low-molecular-weight organic substrates [J]. *Nature*, 1994, **367**(6458): 62-64.
- [36] Rudder J d, Wiele T, Dhooge W, *et al.* Advanced water treatment with manganese oxide for the removal of 17 α -ethynylestradiol (EE2) [J]. *Water Research*, 2004, **38**(1): 184-192.
- [37] Xu L, Xu C, Zhao M, *et al.* Oxidative removal of aqueous steroid estrogens by manganese oxides [J]. *Water Research*, 2008, **42**(20): 5038-5044.
- [38] Barrett K A, McBride M B. Oxidative degradation of glyphosate and aminomethyl phosphonate by manganese oxide [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(23): 9223-9228.
- [39] Zhang H, Huang C H. Reactivity and transformation of antibacterial N-oxides in the presence of manganese oxide [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(2): 593-601.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammopolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行