

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

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

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊, 周颖, 程水源, 杨孝文, 王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶, 王浙明, 何志桥, 徐志荣, 顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙, 彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 高爽, 田新愿, 方方, 衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 秦建平, 胡玮, 刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤, 李金香, 杨妍研, 程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航, 闫东杰, 黄学敏, 宋文斌, 王惠琴, 宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明, 项萍, 段菁春, 贺克斌, 马永亮, 邓思欣, 司徒淑婷, 谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 杨志文, 李凤华, 毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚, 孙丽娜, 徐慧, 李久海, 李中平, 李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成, 吕新彪, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 李迎晨, 王圣瑞, 张文丽, 肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜, 江韬, 卢松, 白薇扬, 张成, 王定勇, 魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文, 袁旭音, 金晶, 李正阳, 许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华, 黄廷林, 方开凯, 周石磊, 夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 王巧云, 李德芳, 王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟, 于兴修, 汉强, 刘航, 徐苗苗, 任瑞, 张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅, 李洁, 肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚, 朱红, 黄廷林, 赵建超, 任巍, 徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳, 陆洋, 王钰, 侯誉, 白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮, 李豪杰, 刘文君, 余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方, 邓思萍, 杜嘉雯, 马晓雁, 卢遇安, 高乃云, 邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅, 郝瑞霞, 徐鹏程, 徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 朱晚霞, 万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 吴鹏, 沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚, 朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 王琦, 吴青, 孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健, 完颜德卿, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 姚鹏程, 杨朋兵, 薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 川岸朋树, 张永明, 陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶, 王颖, 胡洁, 吕凡, 邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬, 陈宣宇, 杨兵, 秦普丰, 龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎, 孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤, 滕丹丹, 郑艳霞, 胡张璇, 沈学优, 金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡, 毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 雷茵茹, 于菁菁, 秦鹏, 穆泳林, 梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪, 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 沈健林, 秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅, 黄雅丹, 张莹, 靳振江, 梁月明, 宋昂, 王腾, 郭佳怡, 李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰, 向玉萍, 王定勇, 黄曼琳, 申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 邱孟超, 高敏, 仇天雷, 王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义, 安新丽, 陈青林, 任红云, 苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷, 董发勤, 邓建军, 张青碧, 贺小春, 孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌, 孟昭福, 吴琼, 许绍娥, 刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国, 蒋煜峰, 慕仲锋, 孙航, 周琦, 展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 王伟, 廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161) 《环境科学》征订启事 (4365) 信息 (4123, 4132, 4409)	

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定

陶兰兰¹, 向玉萍¹, 王定勇^{1,2*}, 黄曼琳¹, 申鸿^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716)

摘要: 从三峡水库重庆段忠县石宝寨消落带土壤中, 分离纯化后获得 1 株在好氧和厌氧条件下均能将 Hg^{2+} 转化成甲基汞的细菌, 经过对该菌株的形态特征、理化特征检测及 16S rDNA 序列分析, 初步鉴定其为 γ -变形菌纲的荧光假单胞菌, 并命名为 *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂ (GenBank 登录号: KU954349)。通过汞敏感性试验发现该菌对 Hg^{2+} 极敏感, 汞甲基化试验表明, 在初始 Hg^{2+} 浓度为 $200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PBS 缓冲液中, 接种 XD-MeHg-B₂ 对数生长期菌悬液, 有氧条件下, 30°C 孵育 60 min 后, 溶液中甲基汞浓度呈指数增高, 并在 160 min 时达到最大, 约为 $3.85 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.33 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大汞甲基化率为 1.93%; 而在厌氧条件下, XD-MeHg-B₂ 同样表现出汞甲基化能力, 但其甲基汞的生成较好氧处理显著滞后, 且汞甲基化转化率较低, 在 180 min 左右甲基汞浓度达到最大, 为 $2.86 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.73 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大汞甲基化率为 1.43%。综上所述, *P. fluorescens* XD-MeHg-B₂ 是 1 株对 Hg^{2+} 极敏感, 兼具好、厌氧汞甲基化能力的细菌, 可望为消落带土壤汞生物甲基化的机制研究提供候选菌株, 从而为深入研究汞生物地球化学循环、以及正确评价三峡水库蓄水运行后可能带来的汞生态风险评价提供理论依据。

关键词: 荧光假单胞菌; 分离; 鉴定; 汞甲基化; 三峡库区; 土壤; 消落带

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4389-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201603198

Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions

TAO Lan-lan¹, XIANG Yu-ping¹, WANG Ding-yong^{1,2*}, HUANG Man-lin¹, SHEN Hong^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Region, Chongqing 400716, China)

Abstract: A strain with the ability to methylate mercury under both the aerobic and anaerobic conditions was isolated from soil of the water-level-fluctuation-zone in the Three Gorge Reservoir in Shibaozhai Village, Zhongxian County, Chongqing, China ($\text{E}108^\circ12'3''$ and $\text{N}30^\circ24'36''$). The soil was classified as Purple soil with a pH of 7.97 (0-20 cm depth). The isolation was performed under $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HgCl}_2$ conditions. After its morphological and physiological characterization, and its phylogenetic analysis using 16S rDNA gene sequence, the strain was identified as *Pseudomonas fluorescens* sp., and named as *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂ (GenBank accession number: KU954349). On one hand, at 30°C under aerobic condition, the concentration of methylmercury (MeHg) in the PBS (phosphate buffer saline) solution, which was inoculated with $1 \times 10^{11} \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ suspension of *P. fluorescens* XD-MeHg-B₂ and an initial Hg^{2+} of $200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, was exponentially increased to $1.22 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.15 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ after 60 min incubation and then approached to the maximum of $3.85 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.33 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 160 min after incubation. The largest mercury methylation rate was 1.93%. On the other hand, at 30°C under anaerobic condition, the concentration of MeHg in the PBS solution, which was also inoculated with $1 \times 10^{11} \text{ cfu} \cdot \text{mL}^{-1}$ suspension of *P. fluorescens* XD-MeHg-B₂ and an initial Hg^{2+} of $200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, was $2.86 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.73 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ and the largest mercury methylation rate was 1.43% 180 min after incubation. As a result, *P. fluorescens* XD-MeHg-B₂ showed its ability to methylate mercury under both aerobic and anaerobic conditions while with a comparatively hysteric and lower ability of mercury methylation. These results demonstrated that *P. fluorescens* XD-MeHg-B₂ could be a promising candidate for further studies on mercury biogeochemical cycle, particularly under dry-wet alternative conditions.

Key words: *Pseudomonas fluorescens*; isolation; identification; mercury methylation; Three Gorge Reservoir; soil; water-level-fluctuation-zone

汞是环境中毒性最强的重金属元素之一^[1], 主要以元素汞 (Hg^0)、无机汞 (Hg^{2+}) 和有机汞 (CH_3Hg^+) 的形式广泛存在于自然界中^[2]。汞的所有形态都具有毒性, 其中以甲基汞的为最^[3]。甲基汞具有强亲脂性和极易与蛋白结合的特性, 在水生环境中, 容易通过食物链的富集积累和生物放大作用, 进而对人类形成健康风险, 特别是对孕妇、哺乳期妇女和儿童^[4]。

有研究表明, 汞甲基化主要是一个微生物参与的过程^[5]。众多国内外学者相继开展了大量关于微生物汞甲基化的研究, 发现许多严格厌氧

收稿日期: 2016-03-26; 修订日期: 2016-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41573104, 41373113); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201310635056)

作者简介: 陶兰兰 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物化学, E-mail: lanlantao2011@sina.cn

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn; shenhong@swu.edu.cn

菌,以及部分兼性厌氧菌和好氧菌,都具有使无机汞甲基化的能力^[6~9]. 然而,目前对汞生物甲基化的研究尚不够全面和深入:其一,主要集中于 δ -变形菌纲中的硫酸盐还原菌和铁还原菌等厌氧微生物;其二,大多数试验都是在设定较高汞浓度水平下进行的,与实际环境不符^[10]. 虽然对厌氧微生物的汞甲基化作用和好氧抗汞细菌的去甲基化作用进行了广泛的研究^[11],但迄今为止,对细菌在好、厌氧条件下汞甲基化能力和作用机制研究则鲜见报道.

三峡水库消落带是库区径流的汇集地带,成为库区水体土壤间物质交流、能量交换及各污染物迁移转化的活跃地带^[12]. 三峡库区蓄水后,形成了典型的消落带环境,汞活化效应增强,甲基汞的产生增加了鱼体汞含量超标的风险. 因此三峡库区汞污染及甲基化问题引起了全国的关注.

在本项目组前期的研究中发现^[13],三峡水库消落带土壤中好氧性可培养细菌与甲基汞(MeHg)含

量存在显著正相关关系,并推测在长期处于干-湿交替条件下,土壤中可能存在某些好氧微生物参与汞的甲基化. 因而本文以三峡水库消落区土壤为研究对象,从中分离、纯化出在不同氧分压条件下具有汞甲基化能力的细菌菌株,通过对菌株汞敏感性和汞甲基化能力分析,初步探讨其在不同氧含量条件下的汞甲基化能力,以期为三峡库区水陆交错环境中微生物的汞甲基化机制提供依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

根据三峡水库上游水位变化情况(<http://www.ctg.com.cn/inc/sqsk.php>),选取位于三峡水库腹心地带的忠县石宝寨莲花乡新政村土壤(E108°12'3"; N30°24'36")为研究对象(表1),按S形随机多点混合采样法,于2013年4月采集海拔160~165 m处消落带土壤(0~20 cm),混匀后置于自封袋中于4℃冷藏保存.

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH 值	有机质 /g·kg ⁻¹	THg /μg·kg ⁻¹	MeHg /ng·kg ⁻¹	机械组成/%		
				>0.25 mm	<0.02 mm	<0.002 mm
7.97	12.43	80.39 ± 7.39	489.82 ± 34.39	1.44	75.38	23.18

1.2 分离纯化

称取10.0 g土样于含1.0 mg·L⁻¹ HgCl₂的LB培养基(胰蛋白胨10.0 g·L⁻¹,酵母浸粉5.0 g·L⁻¹, NaCl 10.0 g·L⁻¹,琼脂15.0 g·L⁻¹, pH 7.0)中,30℃、100 r·min⁻¹摇床培养48 h后,自然沉淀,取上清液转接,如此反复3次,同时检测有无甲基汞的生成. 选取有甲基汞生成的菌液稀释涂布于LB培养基上,于30℃培养48 h. 然后从平板上挑取形态不同的单菌落反复划线纯化,获得多株供试验备选菌株,于-80℃保存.

1.3 菌种鉴定

1.3.1 形态学及生理生化鉴定

将所纯化菌株经LB培养基活化后,观察其菌落形态特征;然后再挑取菌株进行革兰氏染色后于显微镜下观察菌体形态. 并参照文献[14],对菌株进行生理生化鉴定.

细胞形态鉴定:菌体经0.9%生理盐水清洗2次,乙醇低浓度至高浓度脱水各一次,100%乙醇脱水2次,叔丁醇低浓度至高浓度置换各一次,100%叔丁醇置换2次,样品经脱水置换后,粘于样品托上,采用Hitachi S-3400N II型扫描电子显微镜观察

菌株的细胞形态.

1.3.2 16S rDNA分子生物学鉴定

菌种活化后,接种于LB液体培养基(30℃,100 r·min⁻¹)振荡培养24 h,采用TAKARA MiniBEST Bacteria Genomic DNA Extraction Kit Ver. 3.0试剂盒提取菌体的全基因组DNA,以此为模板,选用细菌通用引物(27F: 5'-AGAGTTTGATCATGGCTCAG-3', 1492R: 5'-TACGGTTACCTTGTTACGACTF-3'),进行16S rDNA扩增,PCR扩增体系(25 μL)为:模板DNA 1 μL,2 × Taq MasterMix(天根生化科技有限公司)12.5 μL;引物27F(10 μmol·L⁻¹)1 μL,引物1492R(10 μmol·L⁻¹)1 μL;加灭菌超纯水定容至25 μL. PCR反应条件:94℃预变性5 min,94℃变性30 s,50℃退火30 s,72℃延伸2 min,35个循环,72℃延伸10 min,PCR产物经2%琼脂糖凝胶电泳验证为单一条带,将此PCR扩增产物送由上海英潍捷基贸易有限公司测序. 测得的16S rDNA序列通过美国生物技术信息中心(NCBI)核酸数据库中的BLAST与GenBank中的16S rDNA序列进行同源性比对,并采用MEGA6.06软件中的Neighbor-joining法构建系统发育树.

1.4 菌株汞敏感性检测

菌株汞敏感性检测采用滤纸片法^[15]. 将荧光假单胞菌用无菌水配置成 1×10^8 cfu·mL⁻¹ 的细菌混悬液, 将 100 μ L 菌液在 LB 培养基上涂布均匀, 取无菌滤纸片贴在平板表面, 将 10、30、50、100、150、200 μ g 的汞标准液滴在滤纸片上, 每个处理 6 个重复, 以汞标准液溶剂超纯水为空白对照. 置于 30℃ 好氧条件下培养. 24 h 后观察抑菌情况, 以十字交叉法测量抑菌圈直径.

1.5 菌株的汞甲基化能力鉴定

1.5.1 供试菌悬液的制备

取保存于 -80℃ 的供试菌种, 接种于 LB 液体培养基活化 (30℃, 100 r·min⁻¹), 收集对数生长后期菌悬液, 离心 (5 000 r·min⁻¹, 5 min)、菌体用 PBS 缓冲液 (磷酸二氢钾 0.272 g·L⁻¹, 氯化钠 8.19 g·L⁻¹, 磷酸氢二钠 1.42 g·L⁻¹, 氯化钾 0.223 g·L⁻¹, pH 7.4) 洗涤 3 次后, 再悬浮于 PBS 缓冲液中. 采用血球计数法测定菌体细胞数量.

1.5.2 菌体细胞反应体系的建立

配制初始 Hg²⁺ 浓度为 200 ng·L⁻¹ 的 PBS 缓冲液: ① 无菌滤膜过滤后, 备菌株好氧汞甲基化试验用; ② 无菌滤膜过滤后, 采用 Hungate 铜柱除氧系统对溶液进行厌氧处理, 菌株厌氧汞甲基化试验备用.

按无菌操作接入菌体细胞 (1.5.1 节), 并控制其终浓度为 1×10^{11} cfu·mL⁻¹, 在 30℃ $\pm$ 1℃ 条件下避光静置培养, 分别于第 0、1、2、2.3、2.6、3、4、5 和 6 h 取样, 分析其甲基汞浓度. 试验以不接菌体的处理为对照, 每个处理重复 3 次.

1.6 分析方法与质量控制

MeHg 采用蒸馏-乙基化结合 GC-CVAFS 法^[16]测定, 检出限为 0.02 ng·L⁻¹. 试验所使用的玻璃器皿在使用前均在硝酸 (25%, 体积比) 溶液中浸泡 24 h 以上, 然后经超纯水清洗后, 用 500℃ 灼烧 30 min 后, 在洁净无汞的环境下冷却后使用. 分析过程中采用空白试验、平行试验和标准样品的测定来进行质量控制, 试验药品均为优级纯或色谱纯. 氯化甲基汞标准溶液来自 Brooks Rand Ltd. (USA), 加标回收率为 80% ~ 120%, 平行样变异系数 < 10%.

1.7 数据分析

数据采用 Excel 进行基本计算, 使用 SPSS 19.0 进行显著性分析, 采用 Origin 8.0 拟合绘制汞甲基化特征曲线.

2 结果与讨论

2.1 菌株形态及生理生化特征

通过对甲基化细菌的筛选, 分离纯化得到 1 株在有氧和厌氧条件下均能使无机汞 (Hg²⁺) 转化为甲基汞的菌株, 命名为 *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂. 该菌株属于革兰氏阴性菌, 电镜观察其菌体呈杆状, 单个或短链状排列, 不形成芽孢 (图 1), 长约为 2 μ m, 宽约 0.5 μ m. 在 LB 培养基上培养 24 h 后, 菌落扁平, 表面粗糙不透明, 边缘呈波浪花纹, 形状不规则, 易用接种针挑起, 在紫外光照射下产生黄绿色荧光 (图 1). XD-MeHg-B₂ 生理生化特征表明菌株接触酶、氧化酶、吲哚等试验呈现阳性, 能液化明胶 (表 2).

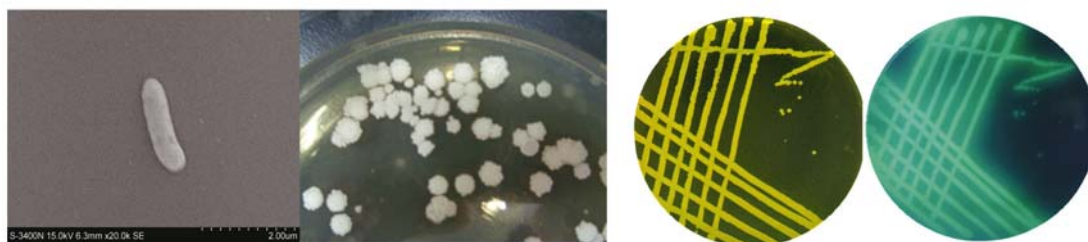


图 1 菌株 XD-MeHg-B₂ 扫描电镜图 (20 000 $\times$) 及在普通光学和紫外光照射下的菌落形态

Fig. 1 SEM image (20 000 $\times$) and colony morphology of *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂ under the general optical and UV light

2.2 菌株 16S rDNA 系统发育分析

对所分离出菌株 XD-MeHg-B₂ 进行 16S rDNA 测序, 菌株的 16S rDNA 序列长度为 1358 bp, GenBank 登录号为 KU954349, 通过 Blast 比对, 选取具代表性菌株, 构建系统发育树 (图 2). 结果表明, XD-MeHg-B₂ 菌株与登录号为 DQ279321 的假单胞菌 (*Pseudomonas* sp. TM4_4) 同源性最高, 处于同一最

小分枝. 结合形态学及生理生化分析, 判断 XD-MeHg-B₂ 属于荧光假单胞菌属.

2.3 菌株汞敏感性分析

抑菌圈的大小可以反映测试菌对 HgCl₂ 的敏感程度^[17], 大于 20 mm 处于极敏感水平. 试验中随着滤纸片上汞含量的增加, 抑菌圈直径显著增大: 当单个滤纸片上 HgCl₂ 含量为 10 μ g 时, 抑菌圈直径

为 15.7 mm; 30 μg 时, 抑菌圈直径为 19.8 mm; 200 μg 时, HgCl_2 对荧光假单胞菌产生的抑菌圈最大为 33.7 mm (图 3). 陈宏伟^[18]从污染物中分离的 1 株假单胞菌和徐辉^[19]从长期受到汞污染的土壤中分离的两株恶臭假单胞菌进行了耐汞水平鉴定, 可耐受最大 Hg^{2+} 浓度分别为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与这些耐汞菌株不同的是, 该菌在大于含 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ HgCl_2 的 LB 液体培养基中不能生存, 且对环境中的汞表现出极敏感水平. 这可能与菌株的生长环境有很大关系. 上述试验结果表明, 菌株 XD-MeHg-B₂ 对环境中的 Hg^{2+} 的耐受性不强, 不属于

强抗汞菌株.

表 2 菌株 XD-MeHg-B₂ 的生理生化特征¹⁾
Table 2 Physiological and biochemical characteristics of *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂

特征	XD-MeHg-B ₂	特征	XD-MeHg-B ₂
革兰氏染色	-	丙二酸钠	-
甲基红试验	-	淀粉水解	-
V. P 试验	+	明胶	+
接触酶	+	吡啶	+
柠檬酸盐利用	-	氧化酶	+

1) “+”表示反应为阳性, “-”表示反应为阴性

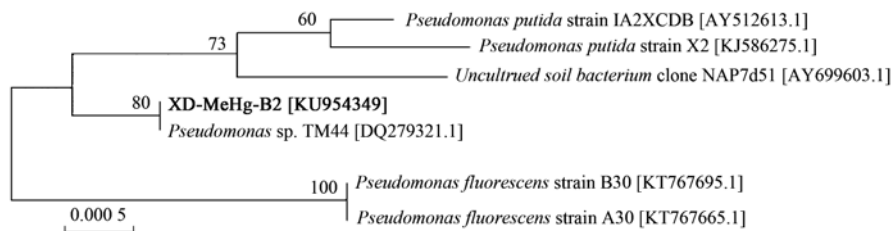
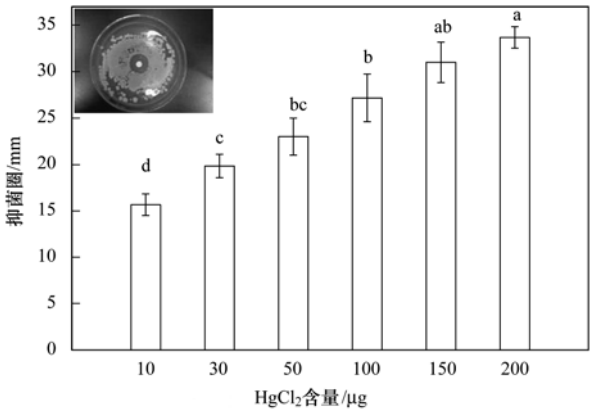


图 2 基于 16S rDNA 序列同源性的 *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂ 的系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree based on 16S rDNA sequence of *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂



横坐标表示单个滤纸片中 HgCl_2 的含量

图 3 不同汞含量对 *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂ 菌株产生的抑菌圈大小

Fig. 3 Inhibition of *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂ by different Hg concentrations as measured by the disk sensitivity procedure

2.4 菌株汞甲基化能力分析

Hamdy 等^[15]从乔治亚州 Savannah 河的底泥中分离出的 1 株产气肠杆菌 *Enterobacter aerogenes*, 在恒定的曝气条件下, 研究了甲基汞的产生及其对汞的敏感程度, 同样发现对汞处于敏感水平的 *E. aerogenes* 可以产生甲基汞, 并证实该菌在恒定曝气条件下产生的甲基汞高于厌氧条件. 图 4 结果表明, 菌株 XD-MeHg-B₂ 在有氧和厌氧条件下均

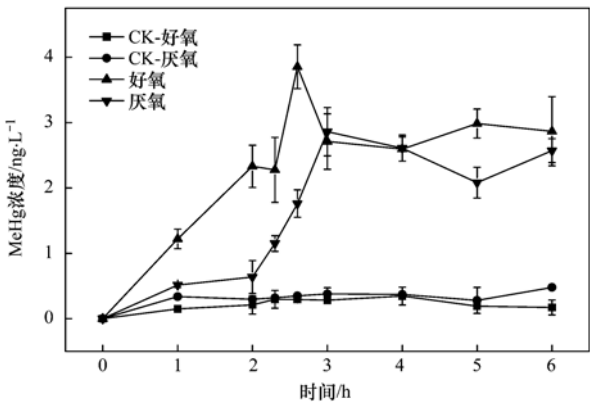


图 4 荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂) 在有氧和厌氧条件下的汞甲基化能力

Fig. 4 Methylation capacity of *P. fluorescens* sp. XD-MeHg-B₂ under aerobic and anaerobic conditions

具汞甲基化能力. 有氧条件下 XD-MeHg-B₂ 在含汞 PBS 缓冲液中迅速表现出汞甲基化能力: 孵育 60 min 后, 溶液中 MeHg 浓度呈指数增高, 并在 160 min 时达到最大, 约为 $3.85 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.33 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 在 180 min 之后, 溶液 MeHg 浓度稍下降并趋于稳定 ($2.86 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.53 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$). 在有氧条件下的甲基汞转化率达到 1.927%, 远高于其他好氧菌 (表 3).

目前绝大多数汞微生物甲基化的研究主要在厌氧条件下进行, 且 MeHg 在厌氧条件下更加稳

定^[20~22], 厌氧条件下 XD-MeHg-B₂ 同样表现出汞甲基化能力, 但 XD-MeHg-B₂ 甲基汞生成较好氧条件显著滞后, 且汞甲基化转化率较低: 孵育 120 min 后, 溶液 MeHg 浓度开始呈指数增长, 在 180 min 左右达到最大, 为 $2.86 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.73 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后开始下降, 并趋于稳定, 平均为 $2.57 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.83 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。

表 3 有氧条件下菌株的汞甲基化能力比较¹⁾

Table 3 Comparison of strains' methylation capacity under aerobic conditions

菌株	HgCl ₂ /ng·L ⁻¹	MeHg/ng·L ⁻¹	
		好氧	厌氧
<i>Pseudomonas fluorescens</i> ^[8]	5×10^6	340	—
<i>Mycobacterium phlei</i> ^[8]	20×10^6	345	—
<i>Bacillus megaterium</i> ^[8]	20×10^6	830	—
<i>Escherichia coli</i> ^[8]	20×10^6	865	<450
<i>Aerobacter aerogenes</i> ^[8]	20×10^6	<290	—
<i>Enterobacter aerogenes</i> ^[15]	50×10^6	431.9×10^3	372×10^3
DT (<i>Enterobacter</i>) ^[23]	10×10^6	12.29	—
<i>P. fluorescens</i> XD-MeHg-B ₂	200	3.854	2.862

1) “—”表示文章中没有相关数据

众多学者在汞浓度较高的条件下, 对菌株的汞甲基化能力进行了研究(表 3), 对比可知, 在低汞浓度下, XD-MeHg-B₂ 的最大甲基化率显著高于其他。尽管国内外学者普遍认为厌氧微生物, 如硫酸盐还原菌(SRB)和铁还原菌(FeRB)是导致汞甲基化的主要微生物^[24~26], 但早期有研究发现, 大量好氧细菌如荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)、产气气杆菌(*Aerobacter aerogenes*)、草分枝杆菌(*Mycobacterium phlei*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)、巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)等在有氧纯培养条件下能够将无机汞转化为甲基汞, 且大肠杆菌和产气气杆菌的汞甲基化率在好氧条件下比无氧条件下高。

荧光假单胞菌是一类广泛存在于土壤中的植物根际促生优势细菌种群, 可产生铁载体等 10 多种有抗菌作用的次生代谢产物^[27]。荧光假单胞菌向环境中分泌铁载体, 不仅给自身提供充裕的可吸收铁源, 同时还可以促生其他利用同源铁载体的细菌或动植物的生长, 过量分泌的铁载体结合的 Fe³⁺ 会给环境中带来过高的铁氧化还原压力, 这也可能与其在好氧条件下可以使汞甲基化有一定的关系。

本试验用菌株分离自三峡库区消落带土壤, 消落带地区长期的全淹-半淹-落干的自然环境导致了好厌氧环境的交替, 使得该菌在好厌氧条件下均可发生汞的甲基化过程, 且好氧条件下甲基汞的产生

量在初始显著高于厌氧。Jara-Marini 等^[28]和 Bouchet 等^[29]研究发现由于好厌氧环境的交替会导致甲基化过程最为活跃, MeHg 含量很高。Canário 等^[30]认为这主要是由于氧化还原条件的交替变化可以提高微生物的活性。但 Delaune 等^[31]对比研究了沉积物在厌氧和好氧条件下 MeHg 的产生量, 发现去甲基化过程在好氧条件下更容易被加强, Hollweg 等^[32]研究表明, 汞的甲基化作用在厌氧条件下更强; 在厌氧条件下, 溶解态的无机汞几乎完全能被甲基化^[33]。综上所述, 好氧条件下微生物的甲基化过程有待于更深入地研究。

然而, 上述这些研究都是在初始汞浓度很高的条件下进行的(大于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 而实际环境中, 特别是三峡库区消落带土壤中汞含量的本底浓度较低^[34], 释放到水体中的汞浓度更少^[35]。本试验中, 投加的初始 Hg²⁺ 是基于三峡水库实际水体环境中的汞浓度, 进行适当放大, 对于三峡库区自然条件下汞的潜在变化, 更能体现消落带土壤中菌群汞甲基化的能力。

3 结论

(1) 从典型周期性好氧-厌氧交替的三峡库区消落带土壤中分离、筛选出 1 株非抗汞、且在好氧、厌氧条件下均具有汞甲基化能力的菌株, 经形态学、生理生化与 16S rDNA 分子生物学分析, 鉴定该菌株为 γ-变形菌纲荧光假单胞菌, 并将其命名为 *Pseudomonas fluorescens* XD-MeHg-B₂, GenBank 登录号为 KU954349。该菌对环境 Hg²⁺ 极敏感, 且在大于含 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ HgCl₂ 的 LB 液体培养基中不能生存。

(2) *P. fluorescens* XD-MeHg-B₂ 在初始 Hg²⁺ 浓度为 $200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 PBS 缓冲液, 好氧条件下 2.6 h 达到最高甲基汞水平 ($[\text{MeHg}] = 3.85 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.33 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$); 而厌氧条件下, 3.5 h 达到最高甲基汞水平 ($[\text{MeHg}] = 2.86 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.73 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$)。

(3) 本研究结果证明, 受三峡水库干-湿交替环境的影响, 消落带土壤表现为非严格厌氧环境, 荧光假单胞菌(*P. fluorescens* XD-MeHg-B₂) 是其中具汞生物甲基化能力微生物种群之一, 对消落带土壤汞的甲基化可能起到重要的作用。本试验结果有望为深入研究消落带土壤汞生物甲基化机制、正确评价三峡水库蓄水运行后可能带来的汞生态风险评价提供理论依据。

参考文献:

[1] Haris H, Aris A Z, The geoaccumulation index and enrichment

- factor of mercury in mangrove sediment of Port Klang, Selangor, Malaysia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, **6**(11): 4119-4128.
- [2] Looi L J, Aris A Z, Yusoff F M, *et al.* Mercury contamination in the estuaries and coastal sediments of the Strait of Malacca[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**: 4099.
- [3] Al-Mughairi S, Yesudhasan P, Al-Busaidi M, *et al.* Concentration and exposure assessment of mercury in commercial fish and other seafood marketed in Oman[J]. *Journal of Food Science*, 2013, **78**(7): T1082-T1090.
- [4] Burger J, Jeitner C, Donio M, *et al.* Mercury and selenium levels, and selenium: mercury molar ratios of brain, muscle and other tissues in bluefish (*Pomatomus saltatrix*) from New Jersey, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **443**: 278-286.
- [5] 王保军, 杨惠芳. 微生物与重金属的相互作用[J]. *重庆环境科学*, 1996, **18**(1): 35-38.
- [6] Wood J M, Kennedy F S, Rosen C G. Synthesis of methylmercury compounds by extracts of a methanogenic bacterium[J]. *Nature*, 1968, **220**(5163): 173-174.
- [7] Yamada M, Tonomura K. Formation of methylmercury compounds from inorganic mercury by clostridium cochlearium [J]. *Journal of Fermentation Technology*, 1972, **50**(3): 159-166.
- [8] Vonk J W, Sijpesteijn A K. Studies on the methylation of mercuric chloride by pure cultures of bacteria and fungi [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1973, **39**(1): 505-513.
- [9] Robinson J B, Tuovinen O H. Mechanisms of microbial resistance and detoxification of mercury and organomercury compounds: physiological, biochemical, and genetic analyses [J]. *Microbiological Reviews*, 1984, **48**(2): 95-124.
- [10] Fitzgerald W F, Engstrom D R, Lamborg C H, *et al.* Modern and historic atmospheric mercury fluxes in northern Alaska: global sources and Arctic depletion[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(2): 557-568.
- [11] Lu X, Liu Y R, Johs A, *et al.* Anaerobic Mercury methylation and demethylation by *Geobacter bemidjensis* bem [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(8): 4366-4373.
- [12] 何熙. 三峡库区消落带土壤(沉积物)总汞及甲基汞变化特征[D]. 重庆: 西南大学, 2013. 15-26.
- [13] Xiang Y P, Du H X, Shen H, *et al.* Dynamics of total culturable bacteria and its relationship with methylmercury in the soils of the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(24): 2966-2972.
- [14] Dong X Z, Cai M Y. Common bacteria system identification manual[M]. Beijing: Science Press, 2001. 364-398.
- [15] Hamdy M K, Noyes O R. Formation of methyl mercury by bacteria[J]. *Applied Microbiology*, 1975, **30**(3): 424-432.
- [16] 蒋红梅, 冯新斌, 梁琰, 等. 蒸馏-乙基化 GC-CVAFS 法测定天然水体中的甲基汞[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 568-571.
- [17] Cox SC, Jamshidi P, Eisenstein NM, *et al.* Adding functionality with additive manufacturing: Fabrication of titanium-based antibiotic eluting implants [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, **64**: 407-415.
- [18] 陈宏伟. 抗汞菌株的分离鉴定及特性[J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2000, **17**(3): 86-88.
- [19] 徐辉. 抗汞细菌的筛选、鉴定及其特性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012. 20-30.
- [20] 胡海燕, 冯新斌, 曾永平, 等. 汞的微生物甲基化研究进展[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(5): 874-882.
- [21] Matilainen T, Verta M, Korhonen H, *et al.* Behavior of mercury in soil profiles: Impact of increased precipitation, acidity, and fertilization on mercury methylation[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **125**(1): 105-120.
- [22] Callister S M, Winfrey M R. Microbial methylation of mercury in upper Wisconsin river sediments [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1986, **29**(4): 453-465.
- [23] 田雪珊. 甲基汞转化细菌的分离和鉴定[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007. 47-53.
- [24] Gilmour C C, Henry E A, Mitchell R. Sulfate stimulation of mercury methylation in freshwater sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(11): 2281-2287.
- [25] Kerin E J, Gilmour C C, Roden E, *et al.* Mercury methylation by dissimilatory iron-reducing bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(12): 7919-7921.
- [26] Warner K A, Roden E E, Bonzongo J C. Microbial mercury transformation in anoxic freshwater sediments under iron-reducing and other electron-accepting conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(10): 2159-2165.
- [27] 王平, 李慧, 邱译萱, 等. 荧光假单胞菌株 P13 分泌铁载体抑制油菜菌核病菌[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2010, **39**(2): 200-203.
- [28] Jara-Marini M E, Soto-Jiménez M F, Pérez-Osuna F. Mercury transfer in a subtropical coastal lagoon food web (SE Gulf of California) under two contrasting climatic conditions [J]. *Environmental Toxicology*, 2012, **27**(9): 526-536.
- [29] Bouchet S, Bridou R, Tessier E, *et al.* An experimental approach to investigate mercury species transformations under redox oscillations in coastal sediments[J]. *Marine Environmental Research*, 2011, **71**(1): 1-9.
- [30] Canário J, Caetano C, Vale C, *et al.* Evidence for elevated production of methylmercury in salt marshes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(21): 7376-7382.
- [31] Delaune R D, Jugsujinda A, Devai I, *et al.* Relationship of sediment redox conditions to methyl mercury in surface sediment of Louisiana Lakes[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A: Toxic/hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2004, **39**(8): 1925-1933.
- [32] Hollweg T A, Gilmour C C, Mason R P. Methylmercury production in sediments of Chesapeake Bay and the mid-Atlantic continental margin[J]. *Marine Chemistry*, 2009, **114**(3-4): 86-101.
- [33] Covelli S, Faganeli J, De Vittor C, *et al.* Benthic fluxes of mercury species in a lagoon environment (Grado Lagoon, Northern Adriatic Sea, Italy)[J]. *Applied Geochemistry*, 2008, **23**(3): 529-546.
- [34] 陈宏. 三峡库区消落带土壤汞库及其风险评价[D]. 重庆: 西南大学, 2009. 45-77.
- [35] 李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 等. 三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2721-2727.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行