

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 ..... 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM<sub>2.5</sub>中硝酸盐的定量分析 ..... 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O<sub>3</sub>、HONO、HCHO、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对·OH的贡献率研究 ..... 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 ..... 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 ..... 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 ..... 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 ..... 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 ..... 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 ..... 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 ..... 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 ..... 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 ..... 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 ..... 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 ..... 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 ..... 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 ..... 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 ..... 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 ..... 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 ..... 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 ..... 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 ..... 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 ..... 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 ..... 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 ..... 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 ..... 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 ..... 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 ..... 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 ..... 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N<sub>2</sub>O产生量的研究 ..... 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 ..... 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 ..... 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 ..... 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 ..... 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 ..... 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 ..... 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 ..... 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 ..... 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 ..... 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 ..... 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 ..... 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 ..... 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 ..... 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO<sub>2</sub>储存性能研究 ..... 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 ..... 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

**重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文**

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 ..... 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 ..... 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 ..... 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 ..... 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 ..... 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 ..... 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 ..... 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 ..... 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 ..... 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 ..... 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 ..... 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 ..... 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 ..... 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 ..... 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

# 二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究

刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之\*, 陈建孟

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032)

**摘要:** 对分离筛选到 1 株能以二氯甲烷(DCM)为唯一碳源和能源生长的菌株 *Methylobacterium rhodesianum* H13 进行降解特性研究. 在初始菌体浓度  $0.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 7.0 和温度  $30^\circ\text{C}$  的条件下, *M. rhodesianum* H13 能够于 23 h 内将  $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  DCM 完全降解, 细胞得率(细胞/DCM)为  $0.136 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ . 随着 DCM 的降解, 溶液中的  $\text{Cl}^-$  浓度逐渐升高(释放的  $\text{Cl}^-$  浓度约为 DCM 的 2 倍), 溶液 pH 值降至 6.75, 呈弱酸性. 通过摇瓶实验考察了温度、pH、DCM 浓度、 $\text{Cl}^-$  等因素对菌株 H13 降解 DCM 性能的影响, 获得其较适宜的生长和降解条件为: 温度  $30^\circ\text{C}$ 、pH 值 7.0. 研究还发现 *M. rhodesianum* H13 降解 DCM 的最适浓度为  $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 高浓度的 DCM 会抑制其降解. 研究成果对高效处理环境中的 DCM 污染具有重要的应用价值.

**关键词:** 二氯甲烷; 生物降解; 甲基杆菌; 分离鉴定; 降解性能

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3613-07

## Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by *Methylobacterium rhodesianum* H13

LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, ZHUANG Qing-feng, CHEN Dong-zhi, CHEN Jian-meng

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

**Abstract:** A dichloromethane-degrading bacterium *Methylobacterium rhodesianum* H13 which utilized the DCM as the sole carbon and energy source was isolated. According to the research, *M. rhodesianum* H13 could completely degrade  $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  DCM in 23 h with the initial cell concentration of  $0.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , pH 7.0,  $30^\circ\text{C}$ , and the cell yield rate was about  $0.136 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$  DCM. With the degradation of DCM,  $\text{Cl}^-$  concentration gradually raised (the release of  $\text{Cl}^-$  concentration was about 2 times higher as the DCM), pH value dropped to 6.75, and the solution was weakly acidic. Temperature, pH, DCM concentration,  $\text{Cl}^-$  concentration and other factors were investigated through the shake flask experiments, and the optimal conditions for DCM degradation were: temperature  $30^\circ\text{C}$ , pH 7.0. The study also indicated that  $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  of DCM was the optimum concentration for *M. rhodesianum* H13 and high levels of DCM could inhibit the degradation. The research has an important application value for the DCM environmental pollution.

**Key words:** dichloromethane; biodegradation; methylobacterium; isolation and identification; degradation characteristics

二氯甲烷(DCM)是一种使用非常广泛的化学试剂,主要在金属材料去油污、除漆行业和制药工业等方面作溶剂使用<sup>[1-5]</sup>.但是,DCM又是一种广泛分布于水体和大气中的毒性有机污染物<sup>[6-11]</sup>,在环境中具有很强的累积性和可持续性<sup>[12]</sup>.DCM已被美国环保署(EPA)列入129种优先控制的有毒污染物名单之中<sup>[13]</sup>,近年来越来越受到人们的关注.因此探索有效的DCM处理技术具有重要的环境和社会意义.

传统处理DCM的方法主要包括焚烧、吸附、湿法洗涤等技术<sup>[2,14-16]</sup>,但这些方法在处理相对较低浓度和大流量的DCM时显得不甚经济.众所周知,微生物处理有机污染物具有投资少、能量损耗小、运行费用低及管理方便等优点.然而,由于DCM为Cl化合物且含有C—Cl键,其是否具有可生物降解性颇有争议.直至1980年,Brunner等<sup>[17]</sup>

首次从工业废水中分离出了能以DCM作为唯一碳源和能源的菌株 *Pseudomonas* sp. DM1,从而开启了DCM微生物降解相关的研究进程.迄今,DCM的降解速率普遍不高,这严重影响了生物法处理DCM废水或废气的工程应用.

针对以上情况,笔者从浙江某制药厂废水处理池的活性污泥中分离筛选出1株DCM高效降解菌,并研究其降解特性,以期对DCM污染的高效去除奠定基础.

收稿日期: 2012-12-02; 修订日期: 2013-01-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063102); 国家自然科学基金项目(51178430); 浙江省创新团队项目(20110150)

作者简介: 刘洪霞(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生物技术,E-mail: liuhongxia2266@126.com

\* 通讯联系人,E-mail: cdz@zjut.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 培养基组成

无机盐培养基(MM培养基):  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  4.50 g、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  1.50 g、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.00 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.20 g、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.03 g、1.00 mL 微量元素母液<sup>[18]</sup>. 溶解于 1 L 超纯水中.

R2A 培养基: 酵母粉 0.50 g、可溶性淀粉 0.50 g、酪蛋白酸水解物 0.50 g、胰蛋白胨 0.25 g、葡萄糖 0.50 g、丙酮酸钠 0.30 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.05 g、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.30 g、琼脂粉 15.00 ~ 18.00 g. 溶解于 1 L 超纯水中.

### 1.2 二氯甲烷降解菌的分离纯化

将某制药厂废水处理池中的活性污泥放入含 DCM 的 MM 培养基中进行驯化. 数月后, 取 5 mL 活性污泥至含有 50 mL MM 培养基的 250 mL 密闭盐水瓶中, 并以浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 DCM 为唯一的碳源和能源, 于摇床  $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $30^\circ\text{C}$  培养富集.

此菌种的分离纯化用倒置平板的方法, 采用气态唯一碳源的纯化分离技术. 从盐水瓶中取经过多次培养富集的菌液 1 mL, 稀释不同的倍数均匀涂布于 R2A 培养基琼脂平板上. 倒置平板, 在皿盖上加大块无菌棉花, 棉花中定时滴加适量的 DCM 放入干燥器中, 置于  $30^\circ\text{C}$  恒温箱中培养 2 ~ 5 d. 挑选单菌落在琼脂培养基中划线分离, 得到纯培养物.

### 1.3 细菌生物学鉴定

#### 1.3.1 菌种的形态和生理生化鉴定

各项形态及生理生化指标的测定均参照文献[19~21]的方法进行.

#### 1.3.2 菌株 16S rRNA 的扩增和鉴定

DNA 的提取和扩增: 首先, 利用无菌水洗脱 R2A 斜面上分离纯化后的菌株制成菌悬液, 再将菌悬液浓缩至  $50 \mu\text{L}$  后煮沸(变性)、离心, 取上清液进行 PCR. 选用细菌的通用引物 PRBA338f 和 PRUN518r 对菌株 DNA 进行扩增. 扩增条件为:  $94^\circ\text{C}$  预变性 5 min, 35 个循环( $94^\circ\text{C}$  变性 60 s,  $53^\circ\text{C}$  退火 60 s,  $72^\circ\text{C}$  延伸 120 s), 最终  $72^\circ\text{C}$  延伸 5 min,  $4^\circ\text{C}$  保温 10 min. 扩增产物经 1.5% Agarose 胶检验后交由大连宝生物工程有限公司进行测序.

16S rRNA 序列分析: 将所测得到的测序结果利用 BLAST 与 GenBank 中的 16S rRNA 序列进行同源性对比, 选取 1500 bp 左右的长度进行比对 (Clustelx 1.81), 并采用邻位连接法 (neighbour joining, NJ) 进行系统学分析 (MEGA 4.0), 以确定

所得菌株的种属情况.

### 1.4 菌体培养与降解特性考察

从 R2A 斜面将纯化后的 DCM 降解菌接种至 MM 培养基, 培养基中加入  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  DCM, 在  $30^\circ\text{C}$ 、 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的摇床中培养直至对数生长期作为种子液, 将种子液接入新鲜的 MM 培养基中, 并加入  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  DCM, 观察菌体生长及 DCM 降解情况. 如文中无特殊说明, DCM 的降解速度均以 18 h 的 DCM 降解率表示, 并且, 所有的实验均设平行和空白对照.

### 1.5 检测和分析方法

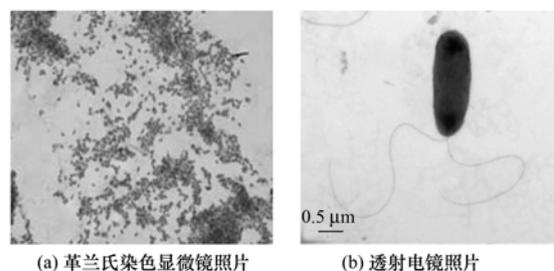
菌体浓度的测定: 采用日立 U-2910 双光速紫外/可见分光光度计于  $600 \text{ nm}$  波长下测定菌体的吸光度 ( $D_{600}$ ), 并运用已经建立好的细胞干重- $D_{600}$  的标准曲线, 将所得的吸光度转换为细胞干重 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

DCM 浓度的测定: 采用安捷伦 GC 6890 气相色谱 (GC, HP-Innowax 硅胶毛细管柱,  $30 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.5 \mu\text{m}$ , J&W Scientific, USA) 来对 DCM 进行定量分析, 检测条件为: 汽化室温度  $250^\circ\text{C}$ , 检测器 (FID) 温度  $300^\circ\text{C}$ , 柱温  $80^\circ\text{C}$ , 载气流速  $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , 分流比 5:1.

## 2 结果与讨论

### 2.1 DCM 降解菌株的鉴定

经过反复分离、纯化, 筛选到 1 株具有高效降解 DCM 能力的菌株, 命名为 H13. H13 为好氧非发酵型革兰氏阴性菌, 在 R2A 固体培养基上培养 48 h 后, 菌落呈小圆形、粉红色、形态饱满、光滑湿润, 菌苔沿划线生长. 菌苔沿划线生长, 通过电镜观察单个菌呈短杆状, 有端生鞭毛. H13 菌的革兰氏染色和透射电镜图片如图 1 所示.



(a) 革兰氏染色显微镜照片 (b) 透射电镜照片

图 1 菌株 H13 微观形态示意

Fig. 1 Microscopy images of strain H13

将该菌株的 DNA 进行 PCR 扩增所得到的 16S rRNA 扩增产物同 GenBank 中的基因序列进行同源性对比, 发现其与 *Methylobacterium rhodesianum* 基因

序列的相似度达 99%。结合菌株的生理生化实验结果(见表 1),可确定本实验获得的 DCM 降解菌为 *M. rhodesianum*。查阅相关文献,尚未见 *M. rhodesianum* 降解 DCM 的报道。因此,可确定 *M.*

*rhodesianum* H13 为降解 DCM 的新性能物种。该菌株在 GenBank 中的登录号为 HM245434,目前保藏在中国典型培养物保藏中心(CCTCC NO: M2010121)。

表 1 *M. rhodesianum* H13 的生理生化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Physiological and biochemical characters of *M. rhodesianum* H13

试验项目	结果	试验项目	结果	试验项目	结果
细胞形态	杆状	碳水化合物利用		碳水化合物产酸(续)	+
革兰氏染色	阴性	葡萄糖	-	甘油	-
氧化酶	+	阿拉伯糖	-	赤藓醇	-
接触酶	+	甘露醇	+	D-阿拉伯糖	-
形成吡啶	-	甘露糖	-	L-阿拉伯糖	-
水解七叶灵	-	葡萄糖酸盐	-	核糖	-
明胶水解	+	N-乙酰葡萄糖胺	-	L-岩藻糖	+
淀粉水解	-	麦芽糖	-	D-岩藻糖	-
硝酸盐还原	-	葵酸	-	D-木糖	+
赖氨酸脱羧酶	-	苹果酸	+	D-葡萄糖	-
$\alpha$ -葡萄糖苷酶	+	己二酸	-	D-果糖	+
$\alpha$ -甘露糖苷酶	-	柠檬酸钠	-	D-麦芽糖	+
脲酶	+	苯乙酸	-	D-蔗糖	+
$\beta$ -葡萄糖苷酶	-	碳水化合物产酸		D-来苏糖	+
碱性磷酸酯酶	+	L-天冬氨酸	-	D-塔格糖	+
精氨酸双水解酶	-	D-纤维二糖	-	苦杏仁苷	+
鸟氨酸脱羧酶	+	D-松三糖	-	L-鼠李糖	-
色氨酸脱羧酶	+	D-龙胆二糖	-	D-甘露糖	-
$\alpha$ -半乳糖苷酶	-	山梨醇	-	L-山梨糖	-
$\beta$ -半乳糖苷酶	-	肌醇	-	D-乳糖	-
		甘露糖	-	L-半乳糖	-

1) “+”阳性或有反应;“-”阴性或没有反应

## 2.2 *M. rhodesianum* H13 对 DCM 的降解特性研究

如图 2,在初始菌体浓度为  $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下,*M. rhodesianum* H13 不仅能降解 DCM,且能以 DCM 为碳源生长。至 23 h 时,  $4.9 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  DCM 被完全降解(DCM 浓度在仪器检测限以下),菌体浓度达到  $58.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,细胞得率(细胞/DCM)为  $0.136 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。随着 DCM 的降解,溶液中  $\text{Cl}^{-}$  浓度逐渐升高并累积至  $9.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。经过核算,DCM 的  $\text{Cl}^{-}$  释放率达 94.9%,因此 DCM 分子中的 Cl 元素基本上转化为  $\text{Cl}^{-}$ 。测定溶液中的 TOC 最终浓度达到  $0.29 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  最终浓度达到  $2.403 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,矿化率为 48.06%。*M. rhodesianum* H13 菌对 DCM 降解的比降解速率为  $0.1282 \text{ h}^{-1}$ 。同时,比较了相同初始  $D(0.003)$  的 H13 菌和活性污泥降解  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的二氯甲烷的效果, H13 菌约用 23 h,而活性污泥约要用 52 h。

## 2.3 不同因素对 DCM 降解的影响

### 2.3.1 初始 pH 的影响

考察不同初始 pH 对 *M. rhodesianum* H13 降解

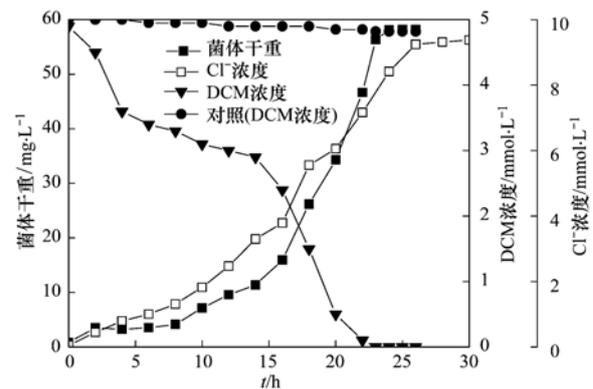


图 2 *M. rhodesianum* H13 生长和 DCM 降解曲线

Fig. 2 The *M. rhodesianum* H13 growth and DCM degradation curves

$5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  DCM 的影响(以  $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  接种量为 18 h 的 DCM 降解率为依据),结果如图 3 所示。在所选取的考察点中, pH 7.0 最适宜, 18 h 的 DCM 降解率达 75.2%。过高或过低的 pH 均不利于 *M. rhodesianum* H13 对 DCM 的降解, pH 5.5 与 pH 10.0 的 DCM 降解率仅为 16.3% 与 18.5%。上述结果表明, pH 对 DCM 降解具有显著影响,这可能是由

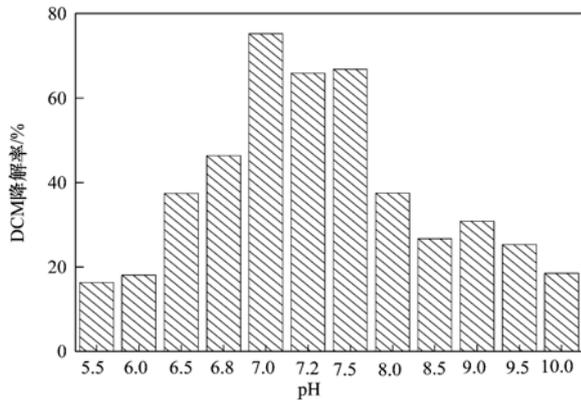


图3 不同 pH 对于 *M. rhodesianum* H13 菌的影响

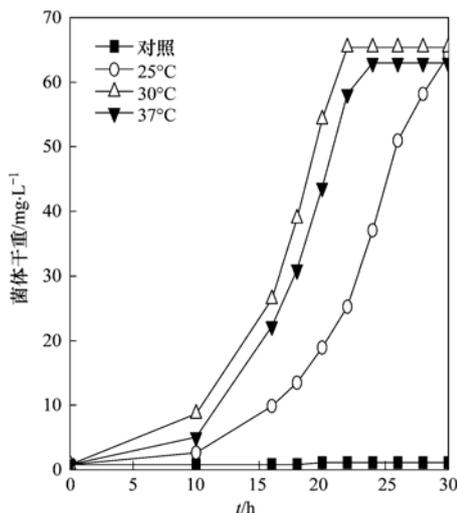
Fig. 3 Effects of pH on DCM degradation efficiency

过酸、过碱体系影响降解酶的空间结构造成的。

### 2.3.2 温度的影响

在 pH 为 7.0 的 MM 培养基 (含  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  DCM) 中, 接入菌液, 使各样品中的初始菌体浓度为  $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 分别置于不同温度的摇床中恒温振荡培养, 考察温度对降解率及该菌株生长情况的影响。由图 4 可知, 在  $25 \sim 37^\circ\text{C}$  温度范围内, H13 均能生长, 相同初始 DCM 浓度下随着温度的升高, DCM 降解率也随之增加, 但温度高至一定值后, 降解率又开始下降, 这是由于 DCM 的降解主要是由微生物的酶起作用, 而微生物的酶有最适宜温度, 低温条件下微生物生长缓慢, 代谢活性差; 过高的温度使酶逐渐变性, 失去活性, 影响降解率。在本实验条件下, 温度  $30^\circ\text{C}$  时, 细胞生长速率最快, 23 h 即达稳定期, 菌体浓度达  $58.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 体系中的 DCM 被完全降解。所以 H13 的最适温度为  $30^\circ\text{C}$  左右。

### 2.3.3 DCM 浓度的影响



配制 pH 为 7.0 的 MM 培养基分别加入不同量的 DCM, 使其浓度分别为  $1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 接入菌液, 使各样品中的初菌体浓度为  $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 于  $30^\circ\text{C}$ 、 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  恒温摇床里振荡培养, 考察 DCM 浓度对 H13 菌株降解特性的影响。如图 5 所示, 在 DCM 浓度为  $1 \sim 60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  范围内, *M. rhodesianum* H13 菌均能生长, 但高于  $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 菌株的生长明显受到抑制, 菌株生长缓慢。这可能由于高浓度 DCM 的对菌株的毒性影响了其生长及降解能力。随着 DCM 浓度的升高, *M. rhodesianum* H13 菌的延迟期也随之增加, 而在  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  左右时菌株的生长非常旺盛, 对 DCM 的降解效率也很高, 最适合菌体生长。

### 2.3.4 $\text{Cl}^-$ 浓度的影响

为了研究  $\text{Cl}^-$  浓度对 *M. rhodesianum* H13 生长及降解能力的影响, 考察了菌体在不同 NaCl 浓度下的生长情况。菌体在初始 pH 为 7.0 的无机盐培养基中调节 NaCl 初始浓度分别为  $0, 0.017, 0.17, 0.34, 0.68, 1.02, 1.36 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 分别加入  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 DCM 为唯一碳源和能源, 接入菌液, 使各样品中的初菌体浓度为  $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 置于  $30^\circ\text{C}$ 、 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的恒温摇床中进行培养, 定时取样分析。由图 6 可知, 随 NaCl 浓度的增加, *M. rhodesianum* H13 菌的延滞期也延长。但是当培养液中  $\text{Cl}^-$  浓度为  $0.17 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, *M. rhodesianum* H13 菌依然能对 DCM 降解完全, 此  $\text{Cl}^-$  浓度远远高于  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 DCM。Yu 等<sup>[22]</sup> 研究在生物滴滤塔中 NaCl 浓度对二氯甲烷降解效果的影响, 也发现当 NaCl 浓度高于  $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 才会对 DCM 的降解

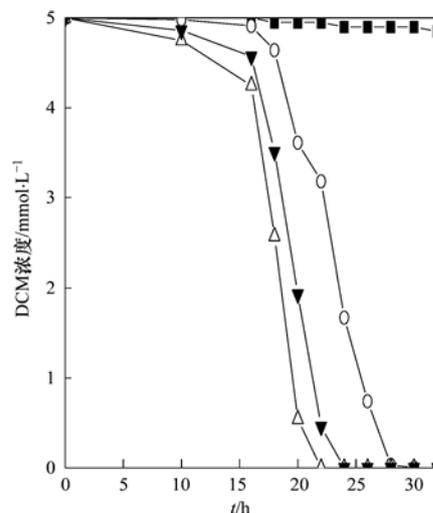


图4 不同温度下菌体浓度及 DCM 浓度随时间变化

Fig. 4 Effects of different temperatures on cell concentration and DCM concentration

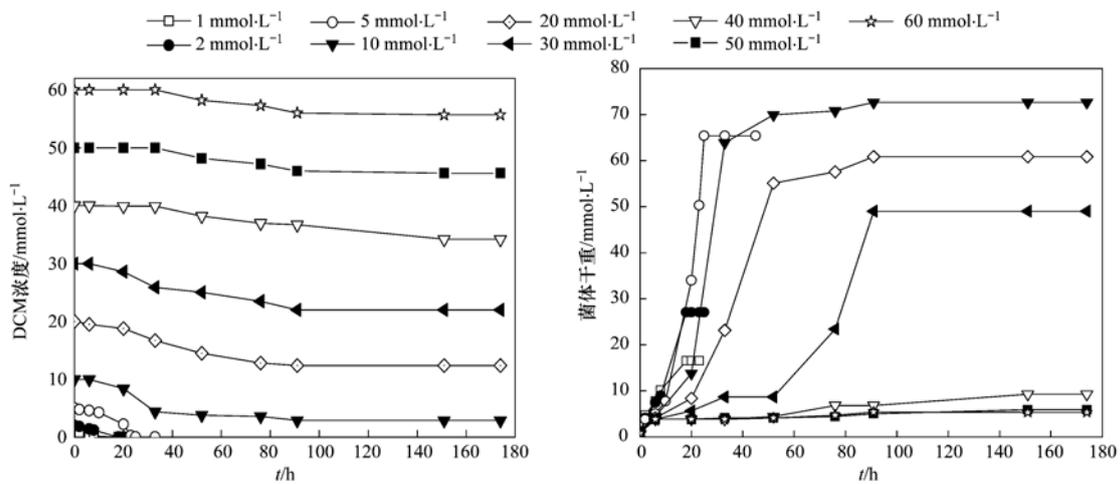


图5 不同 DCM 浓度下的菌体浓度和 DCM 浓度随时间变化

Fig. 5 Cell concentration and DCM degradation curves with different DCM initial concentrations

产生抑制作用. 因此,  $\text{Cl}^-$  浓度并不是影响菌株的降解能力的主要因素. 该图还表明过高浓度的  $\text{NaCl}$  对 *M. rhodesianum* H13 菌有明显的抑制作用, 这可

能是因为培养液中  $\text{NaCl}$  浓度过高时, 菌体细胞中的水将通过细胞质膜进入细胞周围的溶液中, 细胞脱水引起质壁分离, 导致菌体细胞不再生长甚至死亡.

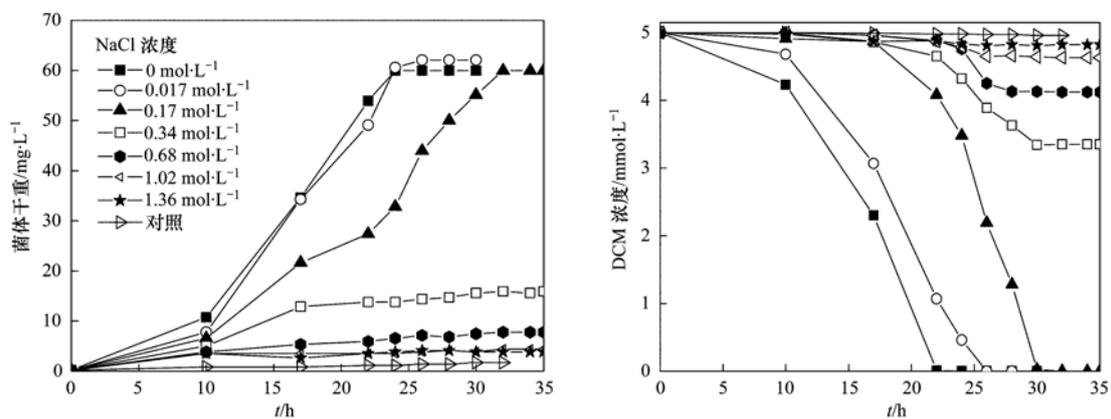


图6 不同盐度对 DCM 降解菌的影响

Fig. 6 Effects of different NaCl concentrations on DCM degradation strain

### 2.3.5 DCM 对 H13 菌抑制因素的探索

为研究图 5 中 10、20、30  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 DCM 不能完全降解, 以及实验过程中发现的连续两次降解完 5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  DCM 后, 继续加入 DCM 不再降解的原因, 将连续两次降解完 5  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  DCM 的菌液做如下处理: 调节 pH、调节 pH 的同时加入 MM 浓缩液、只加入 MM 浓缩液、细菌转接至新鲜培养基、硅油萃取培养液, 同时以不做处理和同菌体浓度的新鲜菌液转接作为对照. 由图 7 可知, 用硅油萃取培养液中的中间产物、用 MM 浓缩液补充培养液中的组分并不能从根本上解决 H13 菌受抑制的现象. 而调节 pH 7.0 后, *M. rhodesianum* H13 菌的

降解效果和同浓度新鲜菌液相似, 这是因为 DCM 的生物降解过程中可产生大量的酸性物质 (如  $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{CO}_3$ 、甲酸等), 致使反应体系的 pH 明显下降<sup>[23~26]</sup>. 因此, 控制合适的 pH 对 DCM 的高效降解尤为关键.

为验证以上结论, 重复图 5 的实验, 结果如图 8 所示, DCM 浓度小于 20  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, *M. rhodesianum* H13 菌均能将其顺利降解完全, 当 DCM 浓度大于 20  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, *M. rhodesianum* H13 菌对 DCM 的降解效果不明显, 而且, 培养 24 h 后, 菌体呈现絮状沉淀, 这可能是因为高浓度的 DCM 对菌体的毒性严重抑制了菌体生长, 甚至造成菌体死亡.

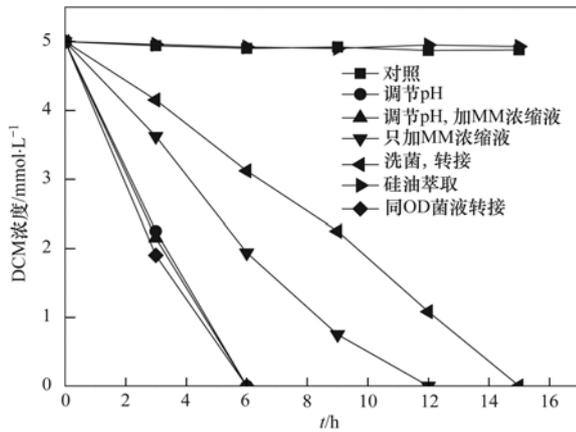


图7 DCM对 *M. rhodesianum* H13 菌抑制因素的探索

Fig. 7 Exploration of the inhibition of DCM on *M. rhodesianum* H13

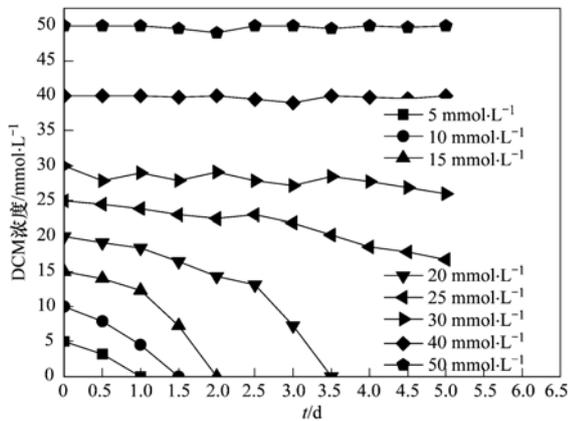


图8 不同 DCM 浓度下 DCM 浓度随时间变化图 (pH 7.0)

Fig. 8 DCM degradation curves with different DCM initial concentrations (pH 7.0)

### 3 结论

(1) 筛选到 1 株能以 DCM 为唯一碳源和能源生长的菌株 *M. rhodesianum* H13.

(2) 在初始菌体浓度为  $0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下, *M. rhodesianum* H13 能在 23 h 内将  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  DCM 完全降解.

(3) *M. rhodesianum* H13 降解 DCM 较适宜的条件为: 温度  $30^\circ\text{C}$ 、pH 值 7.0 较利于 H13 的生长.

(4) *M. rhodesianum* H13 降解 DCM 的最适浓度为  $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 高浓度的 DCM 会抑制其降解性能, 但初步分析得出并非  $\text{Cl}^-$  浓度而是 pH 是影响菌株降解能力的主要因素.

#### 参考文献:

[ 1 ] Kaefferlein H U, Ruehl R, Bruening T. Dichloromethane and paint stripping[J]. *Gefahrstoffe Reinhaltung Der Luft*, 2011, **76** (6): 255-263.  
[ 2 ] Bailón L, Nikolausz M, Kästner M, *et al.* Removal of

dichloromethane from waste gases in one- and two-liquid-phase stirred tank bioreactors and biotrickling filters [ J ]. *Water Research*, 2009, **43**(1): 11-20.

- [ 3 ] Nikolausz M, Nijenhuis I, Ziller K, *et al.* Stable carbon isotope fractionation during degradation of dichloromethane by methylotrophic bacteria[J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(1): 156-164.  
[ 4 ] Krausova V I, Robb F T, González J M. Bacterial degradation of dichloromethane in cultures and natural environments [ J ]. *Journal of Microbiological Methods*, 2003, **54**(3): 419-422.  
[ 5 ] 吴石金, 张华星, 胡志航, 等. 来自 *Bacillus circulans* WZ-12 的二氯甲烷脱卤酶基因 *dcmR* 的克隆和表达[J]. *环境科学*, 2009, **30**(8): 2479-2484.  
[ 6 ] Sarzyński D, Gola A A, Brudnik K, *et al.* Kinetic study of the reaction of chlorine atoms with dichloromethane and D-dichloromethane in the gas phase[J]. *Chemical Physics Letters*, 2011, **514**(4-6): 220-225.  
[ 7 ] Ooki A, Yokouchi Y. Dichloromethane in the Indian Ocean: evidence for *in-situ* production in seawater [ J ]. *Marine Chemistry*, 2011, **124**(1-4): 119-124.  
[ 8 ] Emanuelsson M A E, Osuna M B, Jorge R M F, *et al.* Isolation of a *Xanthobacter* sp. degrading dichloromethane and characterization of the gene involved in the degradation [ J ]. *Biodegradation*, 2009, **20**(2): 235-244.  
[ 9 ] Vuilleumier S, Ivos N, Dean M, *et al.* Sequence variation in dichloromethane dehalogenases/glutathione S-transferases [ J ]. *Microbiology*, 2001, **147**(3): 611-619.  
[ 10 ] 曹文文, 史建武, 韩斌, 等. 我国北方典型城市大气中 VOCs 的组成及分布特征[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(2): 200-206.  
[ 11 ] 黄山, 邵敏, 陆思华. 北京某小学室内外 VOC 浓度及有毒害物种识别[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3326-3330.  
[ 12 ] Line D E, Wu J, Arnold J A, *et al.* Water quality of first flush runoff from 20 industrial sites[J]. *Water Environment Research*, 1997, **69**(3): 305-310.  
[ 13 ] Brandt K R. Final report on the safety assessment of methylene chloride [ J ]. *Journal of the American College of Toxicology*, 1988, **7**(6): 741-835.  
[ 14 ] Zeinali F, Ghoreysli A A, Najafpour G. Removal of toluene and dichloromethane from aqueous phase by granular activated carbon (GAC) [ J ]. *Chemical Engineering Communications*, 2012, **199** (2): 203-220.  
[ 15 ] Carrott P J M, Ribeiro Carrott M M L, Cansado I P P, *et al.* Reference data for the adsorption of dichloromethane on carbon materials [ J ]. *Carbon*, 2001, **39**(3): 465-472.  
[ 16 ] Chetan B, Tomar D, Gumma S. Adsorption of dichloromethane on activated carbon [ J ]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2010, **55**(4): 1640-1644.  
[ 17 ] Brunner W, Staub D, Leisinger T. Bacterial degradation of dichloromethane [ J ]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1980, **40**(5): 950-958.  
[ 18 ] Bernhardt D, Die Kmamm H. Degradation of dioxane,

- tetrahydrofuran and other cyclic ethers by an environmental *Rhodococcus* strain[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1991, **36**(1): 120-123.
- [19] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 340-385.
- [20] 中国科学院微生物研究所细菌分类组. 一般细菌常用鉴定方法[M]. 北京: 科学出版社, 1978. 135-193.
- [21] 布坎南 R E, 吉本斯 N E, 等. 中国科学院微生物研究所《伯杰细菌鉴定手册》翻译组. 北京农业大学《伯杰细菌鉴定手册》审校组校. 伯杰细菌鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 349-353.
- [22] Yu J M, Wang J D, Chen J M. Effect of NaCl on the degradation of dichloromethane in a biotrickling filter[A]. In: *Progress in Environmental Science and Technology*[C]. Beijing, 2007. 13-16.
- [23] 吴石金. 二氯甲烷降解菌的分离鉴定、降解特性及关键酶基因克隆与表达研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009. 20-25.
- [24] Torgonskaya M L, Doronina N V, Hourcade E, *et al.* Chloride-associated adaptive response in aerobic methylotrophic dichloromethane-utilising bacteria [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2011, **51**(3): 296-303.
- [25] Muller E E L, Hourcade E, Louhichi-Jelail Y, *et al.* Functional genomics of dichloromethane utilization in *Methylobacterium extorquens* DM4 [J]. *Environmental Microbiology*, 2011, **13**(9): 2518-2535.
- [26] 陈建孟, 王家德, 庄利, 等. 生物滴滤池净化二氯甲烷废气的实验研究[J]. *环境科学*, 2002, **23**(4): 8-12.

## CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources .....	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM <sub>2.5</sub> with Fourier Transform Infrared Spectroscopy .....	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O <sub>3</sub> , HONO, HCHO and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province .....	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System .....	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying .....	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai .....	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay .....	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics .....	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea .....	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions .....	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas .....	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River .....	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source .....	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance .....	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake .....	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water .....	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland .....	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi .....	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase .....	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City .....	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes .....	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg( II ) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent .....	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment .....	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum( III )-magnesium( II )-sulfate .....	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO <sub>3</sub> .....	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization .....	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator .....	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material .....	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N <sub>2</sub> O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge .....	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM .....	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules .....	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia .....	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake .....	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County .....	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance .....	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil .....	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province .....	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types .....	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-wei, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i> .....	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13 .....	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge .....	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO <sub>2</sub> over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples .....	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations .....	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals .....	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities .....	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City .....	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station .....	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant .....	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery .....	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site .....	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management .....	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils .....	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory .....	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction .....	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil .....	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd <sup>2+</sup> on Biochar from Aqueous Solution .....	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils .....	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

# 《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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