ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 33 卷 第 10 期
2012 年 10 月 15 日

目 次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立 …… 李小平,陈小华,董旭辉,董志,孙敦平(3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性 …… 席北斗,张亚丽,许秋瑾(3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻荧光识别测定中的应用 …… 张翠,苏荣国,宋志杰,张珊珊,王修林(3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析 …… 张红,黄勇,李堃(3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究 …… 姜林,钟茂生,贾晓洋,夏天翔,姚珏君,樊艳玲,张丽娜,唐振强(3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价 …… 杜秀萍,孟范平,王志峰,李祥蕾,杨菲菲,程凤莲,杨跃志,李正炎(3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算 …… 吴家林,方倩,石晓勇,李克强,张传松,王修林(3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响 …… 于娟,张瑜,杨桂朋,田延旺(3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布 …… 孟佳,姚庆祯,陈洪涛,于志刚(3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究 …… 余居华,钟继承,张银龙,范成新,何伟,张雷,唐阵武(3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析 …… 杨平恒,刘子琦,贺秋芳(3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较 …… 张佳磊,郑丙辉,刘录三,王丽婧,吴光应(3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应 …… 曾立雄,黄志霖,肖文发,田耀武(3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究 …… 李立青,单保庆,赵建伟,郭树刚,高勇(3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究 …… 张秀芝,马忠社,王荫楠,王志军,谢伟民(3404)
西藏地表水中砷的分布 …… 王明国,李社红,王慧,肖唐付,郑宝山(3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布 …… 薛丽洋,吴锦奎,张明泉,丁永建,叶柏生(3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险 …… 卢晓霞,张姝,陈超琪,侯珍,杨君君(3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价 …… 聂海峰,赵传冬,刘应汉,彭敏,李括,杨柯,刘飞(3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 …… 李涛,侯立军,刘敏,赵迪,尹国宇,郑艳玲,赵慧(3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征 …… 杨玉玮,高学鲁,李培苗(3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义 …… 姚鹏,尹红珍,姚庆祯,陈洪涛,刘月良(3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究 …… 彭章娥,冯劲梅,何淑英,吴峰(3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H_2O_2 氧化橙黄Ⅳ …… 张瑛洁,徐淑芬,廖霞,曹天静,杨榕,李大鹏(3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究 …… 还中科,宗恩敏,魏丹,万海勤,郑寿荣,许昭怡(3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究 …… 李怀正,姚淑君,徐祖信,陈卫兵(3484)
以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究 …… 王玉晓,孔秀琴,冯权,卢海涛,王德源,唐黎明,邢新会(3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子质量变化特征 …… 贾陈忠,王焰新,张彩香(3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究 …… 孙迎雪,徐栋,田媛,李燕飞(3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响 …… 付昆明,张杰,曹相生,李冬,孟雪征(3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究 …… 曾薇,王向东,张立东,李博晓,彭永臻(3513)
活性污泥胞外聚合物(EPS)的分层组分及其理化性质的变化特征研究 …… 袁冬琴,王毅力(3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响 …… 刘孟媛,周丹丹,高琳琳,马德方,张予荫,李克宇(3529)
厌氧污泥降解萘动力学与生物多样性研究 …… 曹新垲,杨琦,郝春博(3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响 …… 张丰松,李艳霞,黄泽春,杨明(3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究 …… 张晓蕾,薛文平,徐恒振,马新东(3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究 …… 韩春媚,冉娟,张慧,李发生,李雁,谷庆宝(3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性 …… 王芳丽,宋宁宁,赵玉杰,张长波,沈跃,刘仲齐(3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd …… 汤民,张进忠,张丹,陈舜,张训,刘万平,余建(3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例 …… 谷蕾,仝致琦,宋博,马建华(3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险 …… 卢再亮,李九玉,姜军,徐仁扣(3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响 …… 吴艳阳,吴群河,黄珊,叶嘉欣,张恒军,张仁铎(3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究 …… 唐旖旎,吴平霄,朱能武(3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对As(Ⅲ)吸附的影响 …… 梁剑茹,李浙英,刘奋武,周立祥(3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究 …… 张玉秀,王姣,柴团耀,张倩,刘金光,李霞,白志强,苏增健(3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究 …… 王小春,陈东之,金小君,陈建孟(3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究 …… 史舜燕,冯流,龚吉(3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究 …… 彭青,谢冰,袁琦,黄智婷,崔璐璐,王文婷(3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究 …… 裴淑玮,张圆圆,刘俊锋,伦小秀,牟玉静(3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析 …… 王飞,朱彬,康汉清,高晋徽,王瑛,江琪(3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究 …… 刘泽常,张帆,侯鲁健,刘玉堂,吕波(3656)
活性炭分解臭氧机制研究 …… 刘海龙,张智烨,张忠明,焦茹媛,王瑞军(3662)
大气 O_3 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根(AM)结构及球囊霉素蛋白产生的影响 …… 王鹏腾,刁晓君,王曙光(3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响 …… 王明霞,黄建国,袁玲,周志峰(3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染 …… 郑冬梅,李昕馨,罗庆(3680)
《环境科学》征订启事(3313) 《环境科学》征稿简则(3322) 信息(3328,3512,3561,3640)

1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究

王小春,陈东之*,金小君,陈建孟
(浙江工业大学生物与环境工程学院,杭州 310032)

摘要: 从浙江某化工厂污水处理池的活性污泥中筛选分离到 1 株能以 1,2-二氯乙烷 (1,2-dichloroethane,1,2-DCA)为唯一碳源和能源生长的菌株 T-2,根据菌株的形态特征、生理生化特性及 16S rRNA 基因序列分析,该菌株被鉴定为 *Starkeya* sp. 研究表明,*Starkeya* sp. T-2 生长和降解 1,2-DCA 较适宜的温度为 30℃,较适宜的 pH 为 7.0~8.0; 菌株降解 1,2-DCA 的过程遵循 Haldane 动力学模型,其最大比生长速率 μ_{max} 为 0.065 h^{-1},最大比降解速率 v_{max} 为 0.54 h^{-1}; 菌株降解 1,2-DCA 的耐受浓度为 500 $mg\cdot L^{-1}$,细胞产率系数(以 1,2-DCA 计)为 0.191 $mg\cdot mg^{-1}$,菌株 T-2 利用 1,2-DCA 生长的过程中能同时把 1,2-DCA 最终矿化为 CO_2 和 H_2O, 矿化率为 45%.

关键词:1,2-二氯乙烷; 分离鉴定; 降解特性; 动力学; 碳平衡
中图分类号: X172 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)10-3620-07

Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain

WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, CHEN Jian-meng
(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: A 1,2-dichloroethane-degrading bacterium T-2, which was able to utilize 1,2-dichloroethane as the sole carbon and energy source, was isolated from the activated sludge of a chemical plant in Zhejiang. According to the morphological, physiological and biochemical characteristics and sequence analysis of 16S rRNA, the strain was identified as *Starkeya* sp. T-2. The optimal temperature and pH for 1,2-DCA degradation were 30℃ and 7.0-8.0, respectively. The 1,2-DCA degrading process followed the Haldane kinetic model. The maximum specific growth rate and specific degradation rate were 0.065 h^{-1} and 0.54 h^{-1}, respectively. The maximum tolerable concentration of 1,2-DCA for the strain was 500 $mg\cdot L^{-1}$, and the cell yield coefficient was 0.191 $mg\cdot mg^{-1}$. Strain T-2 could mineralize 1,2-DCA into CO_2 and H_2O, with a mineralization ratio of 45%.

Key words:1,2-dichloroethane; isolation and identification; degradation characteristics; kinetics; carbon balance

1,2-二氯乙烷(1,2-dichloroethane,1,2-DCA)属卤代烃类化合物,是工业上常用作蜡、脂肪、橡胶等的一种有机溶剂[1]. 1,2-DCA 具有较高的水溶性(8.7 $g\cdot L^{-1}$)[2~4],工业应用过程中的不正确处理常导致 1,2-DCA 通过废水的形式进入环境中,对环境造成严重的污染[5]. 此外,该物质还是一种潜在的诱变剂和致癌物质[6~9],其毒副作用的主要靶器官是中枢神经系统,还能刺激和引起肝、肾和肾上腺损害[10]. 随着工业的快速发展,1,2-DCA 的广泛应用使它带来的环境问题日益严重,因此寻找到经济又有实效的 1,2-DCA 处理方法具有十分重要的意义.

与传统的物理吸附[2]和化学裂解[11]方法相比较,生物法处理 1,2-DCA 具有处理效率高、成本低且不会产生二次污染的特点,因此被广泛关注[12]. 1983 年, 1, 2-DCA 降解模式菌 *Xanthobacter autotrophicus* GJ10 的成功分离[13~17],极大地推动了生物降解 1,2-DCA 研究的进展. 目前报道的 1,2-DCA 降解菌属有 *Ancylobacter* sp. 、*Pseudomonas* sp.[18,19]等,但这些菌株存在着亲和力低[20],以 1,2-DCA 为唯一碳源时生长缓慢,降解效率低,菌株不稳定等自身的缺陷,因此筛选出高效稳定降解 1,2-DCA 的菌株成为环境污染治理的关键因素之一. 本研究从浙江某化工厂污水处理池的活性污泥中筛选出 1 株能高效稳定降解 1,2-DCA 的菌株,并对该菌株的降解特性进行了初步的研究,以期为环境中 1,2-DCA的降解提供了理论依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 菌种来源

菌株从浙江某化工厂污水处理池的活性污泥中筛得.

1.2 培养基

无机盐培养基(MM 培养基): $Na_2HPO_4\cdot 12H_2O$ 4.5 $g\cdot L^{-1}$, KH_2PO_4 1.0 $g\cdot L^{-1}$, $(NH_4)_2SO_4$ 1.8 $g\cdot L^{-1}$, $MgSO_4\cdot 7H_2O$ 0.2 $g\cdot L^{-1}$, $CaCl_2$ 0.023 $g\cdot L^{-1}$,

收稿日期: 2011-12-18; **修订日期**: 2012-03-12
基金项目: 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: 王小春(1985~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生物技术,E-mail:xiaochwang@126.com
* 通讯联系人,E-mail:cdz@zjut.edu.cn

1.0mL·L^{-1}微量元素母液[21]；pH 7.0，110℃灭菌 40 min.

R2A 培养基：酵母粉 0.50 g·L^{-1}，胰蛋白胨 0.50 g·L^{-1}，酪蛋白酸水解物 0.50 g·L^{-1}，可溶性淀粉 0.50 g·L^{-1}，葡萄糖 0.50 g·L^{-1}，丙酮酸钠 0.30 g·L^{-1}，K_2HPO_4 0.45 g·L^{-1}，$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.05 g·L^{-1}，琼脂 15 ~ 18 g·L^{-1}；pH 7.2，121℃灭菌 20 min.

1.3　菌种的分离纯化

采集浙江某化工厂污水处理池的活性污泥，取静置后的下层污泥与营养液 1∶1 混合接至污泥罐，以 1,2-DCA 为唯一的碳源和能源对污泥进行曝气驯化，1 个月后，将有 1,2-DCA 降解效果的活性污泥接种至含 50 mL MM 培养基的 250 mL 密封盐水瓶中，在同样的条件下，每 3 d 转接 1 次，继续培养、富集.

将在盐水瓶中经过长期多次传代富集的混合菌液，在 R2A 平板上稀释涂布，挑取单菌落，接种至以 1,2-DCA 为唯一碳源和能源的 MM 培养基中，检测降解活性，将有降解效果的单菌落进行多次划线分离后，获得有 1,2-DCA 降解活性的纯菌株.

1.4　菌种的鉴定

菌株形态及主要生理生化特性的测定方法参照文献[22]. DNA 提取和纯化采用 3S 柱离心环境样品 DNA 回收试剂盒（V2.2，上海申能博彩生物科技有限公司），对菌株基因组 DNA 进行全序列 PCR 扩增，选用细菌通用引物 BSF27/20 和 BSR1492/20，序列分别为：BSF27/20 < 5′-AGAGTTTGATCATGGCTCAG-3′ >；BSR1492/20 < 5′-TACGGTTACCTTGTTACGACTT-3′ >. PCR 反应条件如下：94℃预变性 5 min，35 个循环（94℃变性 60 s，55℃退火 60 s，72℃延伸 90 s），最终 72℃延伸 10 min，4℃保温 10 min. PCR 扩增产物经 1.0% Agarose 胶检验后由杭州华大基因研发中心完成测序工作，测序结果同 GenBank 中基因序列进行同源性比较分析，选取 1 500 bp 左右的长度进行比对（Clustelx 1.81），采用邻位连接法（neighbour Joining，NJ）进行系统学分析（MEGA 3.1），确定菌株种属情况.

1.5　菌株降解 1,2-DCA 特性的考察

将分离纯化后的纯菌株接种至含 1,2-DCA 200 mg·L^{-1}的 MM 培养液中，30℃、160 r·min^{-1}振荡培养至对数生长后期，作为种子液备用. 考虑到种子液的活性，所有的实验都用较为新鲜的种子液.

将种子液直接接入至含 100 mL MM 培养液的 500 mL 密封培养瓶中，分别讨论了 1,2-DCA 初始浓度 200 mg·L^{-1}时，温度（20、25、30、35、40℃）、pH（4、5、6、7、8、9、10）对菌株生长和 1,2-DCA 降解的影响. 根据菌株对目标污染物的耐受性，配制一系列浓度梯度的 1,2-DCA，在最佳生长条件下对菌株降解 1,2-DCA 的动力学进行了研究. 所有操作均设置平行实验和空白对照.

1.6　检测与分析方法

1,2-DCA 浓度的测定：采用气相色谱仪（Agilent 6890N）进行定量分析. 色谱柱为 HP-Innowax 硅胶毛细管柱（30 m × 0.32 mm × 0.5 μm），进样口和检测器（FID）的温度分别为 250℃、300℃，柱温为 100℃，载气流速 1 mL·min^{-1}.

CO_2 浓度的测定：采用气相色谱仪（Agilent 6890N）进行定量分析. 色谱柱为 HP-Plot-Q 毛细管柱（30 m × 0.32 mm × 20 μm）. 进样口、检测器（TCD）和柱温分别为 90℃、100℃和 40℃，载气为氦气，流速 5 mL·min^{-1}.

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（HITACHI U-2910 Double Beam UV/Vis spectrophotometer，Tokyo，Japan）测定波长 600 nm 处的菌体吸光度（D_{600}），通过测定不同 D_{600} 值对应的细胞干重，绘制干重-D_{600}的标准曲线，从而分析不同 D_{600}值对应的菌株生物量浓度（mg·L^{-1}）.

总有机碳（TOC）和无机碳（IC）的测定：采用岛津 TOC-V CPN 测定仪测定.

2　结果与讨论

2.1　1,2-DCA 降解菌的鉴定

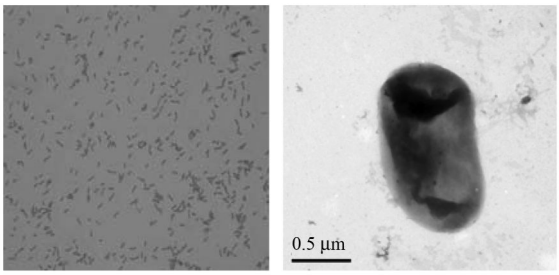
2.1.1　菌株的形态及生理生化特征

经过初筛与复筛，选育到 1 株能高效降解 1,2-DCA 的菌株 T-2. 该菌株为革兰氏阴性菌，短杆状，大小为（0.8 ~ 1.0）μm × （1.0 ~ 2.0）μm，无鞭毛；R2A 平板中菌落呈小圆状、半透明、形态饱满、光滑湿润，易挑起，菌株的革兰氏染色和透射电镜图片如图 1 所示.

对菌株 T-2 进行常规的生理生化试验，具体的生理生化特征见表 1.

2.1.2　菌株 16S rRNA 序列分析及其分子鉴定

菌株 T-2 的 DNA 在经过扩增和测序后，获得 1 355 bp 的 16S rRNA 基因序列，利用 BLAST 同 GenBank 中的序列进行同源性比对，发现菌株 T-2 与 *Starkeya novella* DSM 506（CP002026）相似度达 99%. 结合菌株的生理生化特性与 16S rRNA 序列



(a) 革兰氏染色显微镜照片 (b) 透射电镜照片

图 1 菌株 T-2 微观形态示意

Fig. 1 Microscopy images of strain T-2

系统的分析结果,菌株 T-2 确定为 *Starkeya* sp. 查阅相关文献,尚未见有利用此菌株降解 1,2-DCA 的报道,T-2 可能为降解 1,2-DCA 的新菌株,该菌株在 GenBank 中的登录号为 JN606070,CCTCC 保藏号为 M 2011263.

表 1 菌株 T-2 的生理生化特征[1)]

Table 1 Physiological and biochemical characteristics of T-2

试验项目	结果
淀粉水解试验	+
吲哚试验	+
甲基红试验	−
V-P 试验	−
接触酶试验	+
氧化酶试验	+
柠檬酸盐试验	+
糖发酵试验	
葡萄糖发酵试验	−
蔗糖发酵试验	+
麦芽糖发酵试验	−
乳糖发酵试验	−

1)“+”阳性或有反应;“−”阴性或没有反应

2.2 *Starkeya* sp. T-2 对 1,2-DCA 的降解特性研究

2.2.1 *Starkeya* sp. T-2 的生长与 1,2-DCA 降解的最佳条件

在 pH 为 7.0,1,2-DCA 浓度为 200 mg·L^{-1} 的 MM 培养基中接入种子液,培养液中初始 D_{600} 为 0.015(细胞干重为 4.3 mg·L^{-1}),放入温度分别为 20、25、30、35、40℃,转数均为 160 r·min^{-1} 的摇床中培养,定时取样.

在 1,2-DCA 浓度为 200 mg·L^{-1},初始 pH 分别为 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0 的 MM 培养基中接入种子液,培养液中初始 D_{600} 为 0.015(细胞干重为 4.3 mg·L^{-1}),放入温度为 30℃、转数为 160 r·min^{-1} 的摇床中培养,定时取样.

不同温度和 pH 对菌株生长和 1,2-DCA 降解的影响如图 2,结果表明菌株 T-2 生长和 1,2-DCA 降解最适温度 30℃,在 30℃时达到了最高的菌株生长量和 1,2-DCA 降解率,36 h 后去除率为 100%. 菌株 T-2 生长和 1,2-DCA 降解最适 pH 为 7~8,偏碱性,这是由于降解过程中会产生一些酸性中间产物,偏碱性环境正好可以中和酸性中间产物,35 h 后去除率达到 100%. 1,2-DCA 的降解主要是微生物的酶起作用,酶的活性需要适宜的温度和 pH,温度过低,酶活性降低,温度过高或 pH 过高过低都会使酶变性而失活.

2.2.2 *Starkeya* sp. T-2 的生长与 1,2-DCA 的降解

在初始 pH 为 7,1,2-DCA 浓度为 200 mg·L^{-1} 的 MM 培养基中接入种子液,培养液中初始 D_{600} 为 0.035(细胞干重为 10.45 mg·L^{-1}),放入温度 30℃、转数 160 r·min^{-1} 的摇床中培养,定时取样测定 1,2-DCA的浓度、菌体浓度 D_{600}、培养液中的 pH 值

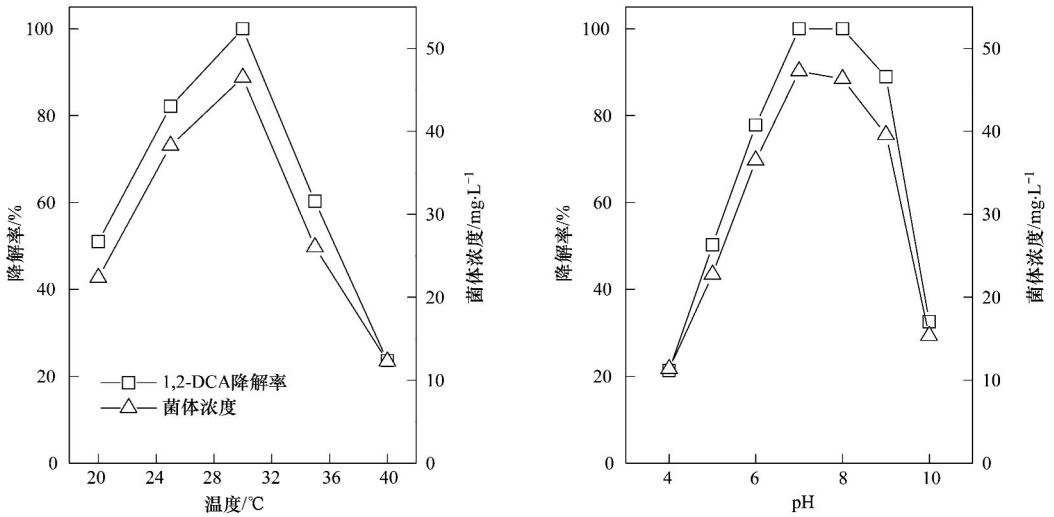


图 2 温度和 pH 对菌株 T-2 生长和降解 1,2-DCA 的影响

Fig. 2 Effects of temperature and pH on cell growth and 1,2-DCA degradation

及 CO_2 浓度，结果如图 3. 从中可见，在初始菌体浓度为 10.45 mg·L^{-1}的条件下，*Starkeya* sp. T-2 不仅能在 19 h 内将 200 mg·L^{-1}的 1,2-DCA 降解完全，而且能以 1,2-DCA 作为唯一的碳源和能源生长，菌体浓度最大值达到 47.56 mg·L^{-1}. 测定溶液中的 TOC 最终浓度达到 2 mg·L^{-1}以下，CO_2 最终浓度达到 17.9 mg·L^{-1}，pH 降至 6.6，呈弱酸性，说明 *Starkeya* sp. T-2 降解 1,2-DCA 是一个矿化的过程.

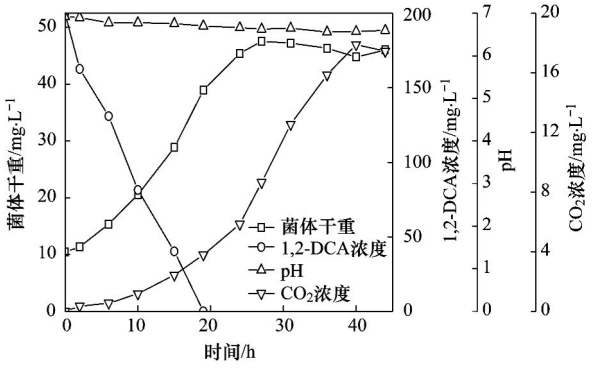


图 3　*Starkeya* sp. T-2 生长和 1,2-DCA 降解曲线

Fig. 3　Curves of cell growth and 1,2-DCA degradation

2.2.3　*Starkeya* sp. T-2 降解不同浓度的 1,2-DCA

在 MM 培养基中加入不同量的 1,2-DCA 使其形成一序列 1,2-DCA 浓度梯度，接入种子液使各梯度中的初始 D_{600} 为 0.046（细胞干重为 13.82 mg·L^{-1}），30℃、160 r·min^{-1}摇床培养，定时取样测定 1,2-DCA 的降解和菌体的生物量. 由图 4 可知，在 1,2-DCA 浓度低于 500 mg·L^{-1}时，菌株 T-2 能快速将培养液中的 1,2-DCA 降解完全，但当培养液中 1,2-DCA 浓度升高到 800 mg·L^{-1}时，菌株未能实现对此浓度的完全降解，这可能是由于反应后期培养液中虽然存在 1,2-DCA 作为碳源和能源，但其它营

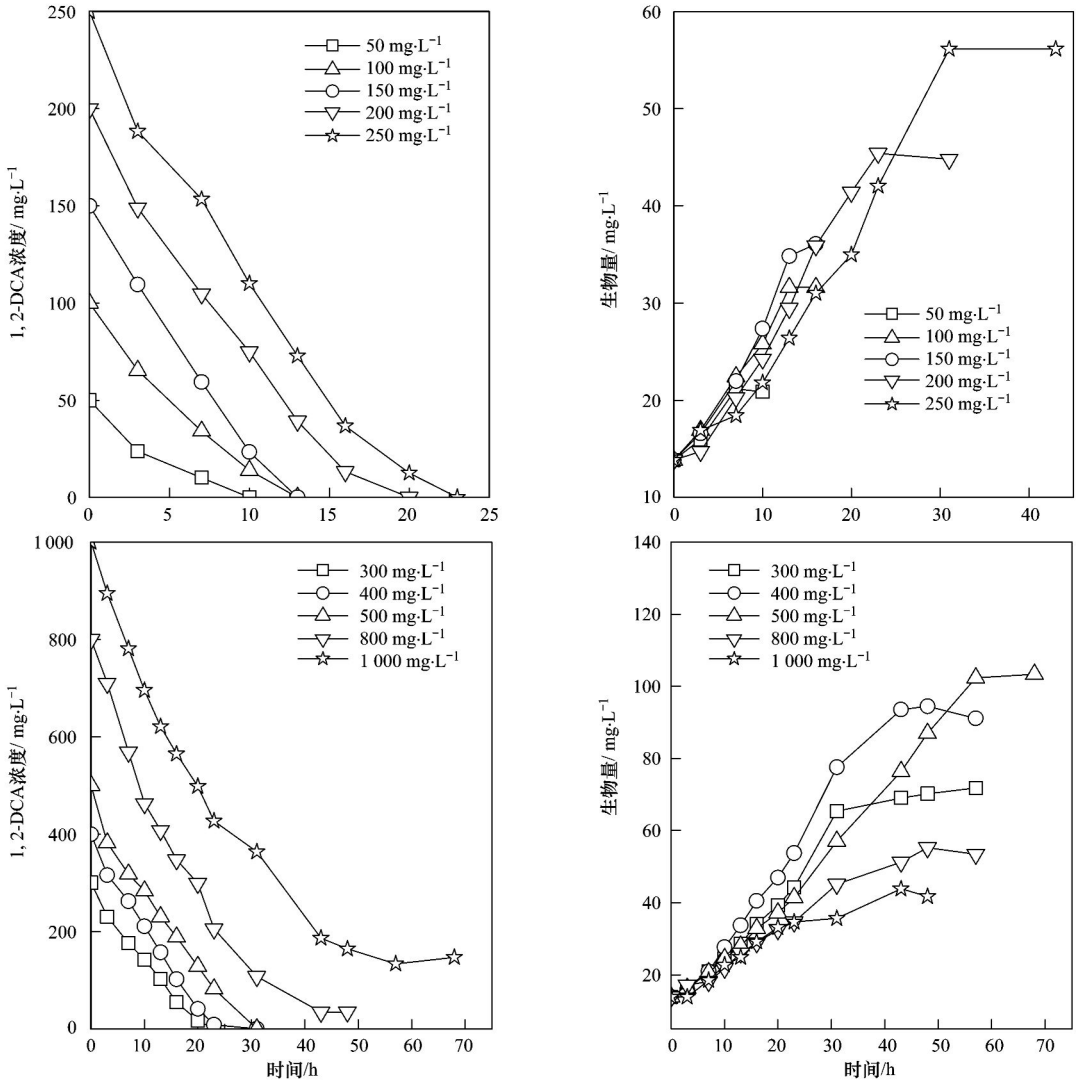


图 4　菌株对不同浓度的 1,2-DCA 降解曲线

Fig. 4　1,2-DCA degradation by strain T-2 at different initial concentrations

养物质的消耗、pH 值的降低及中间产物的积累,抑制了菌株的生长和降解活性.

2.2.4 *Starkeya* sp. T-2 降解 1,2-DCA 的动力学及细胞产率

菌株对不同初始浓度 1,2-DCA 的降解过程,采用 Haldane 模型进行拟合,其表达式如下:

$$\mu = \frac{1}{X}\frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{max} S}{K_S + S + S^2/K_I}$$

$$v = \frac{1}{X}\frac{dS}{dt} = \frac{v_{max} S}{K_S + S + S^2/K_I}$$

式中,μ 为菌株比生长速率,h^{-1}; v 为菌株比降解速率,h^{-1}; X 为菌浓度,$mg\cdot L^{-1}$; t 为时间,h; S 为底物浓度(以 1,2-DCA 计),$mg\cdot L^{-1}$; μ_{max} 为菌株最大比生长速率,h^{-1}; K_S 为半饱和系数,$mg\cdot L^{-1}$; K_I 为抑制系数,$mg\cdot L^{-1}$; v_{max} 为最大比降解速率,h^{-1}.

菌株 T-2 降解 1,2-DCA 的动力学拟合结果如图 5 所示,从中可知,菌株降解不同浓度的 1,2-DCA,最大比生长速率 μ_{max} 为 0.065 h^{-1},最大比降解速率 v_{max} 为 0.54 h^{-1}. 浓度过高,因降解过程中中间产物的抑制作用,菌株比降解和比生长速率有所下降.

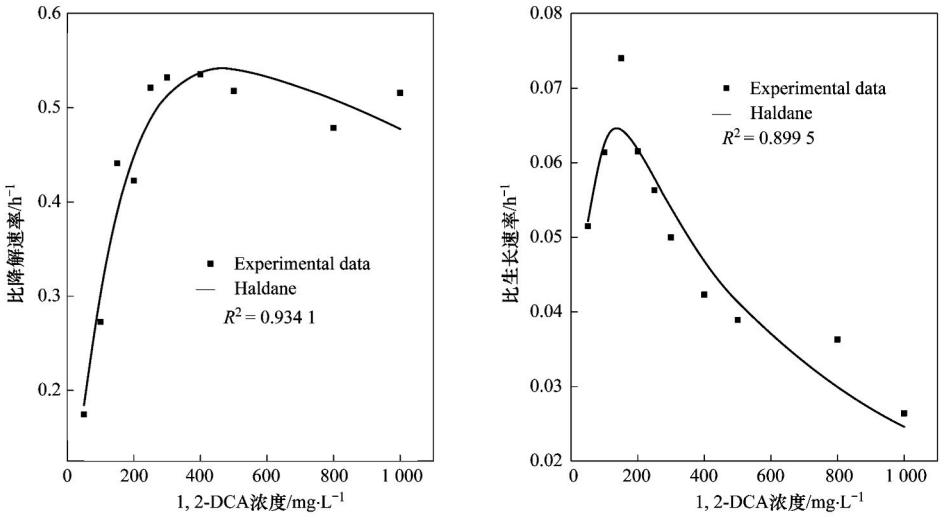


图 5 菌株 T-2 降解 1,2-DCA 的比生长和比降解速率

Fig. 5 Specific growth rate of strain T-2 and specific degradation rate of 1,2-DCA

考虑到菌株对底物浓度的耐受性,从 50、100、150、200、250、300、400 和 500 $mg\cdot L^{-1}$一系列浓度来考察菌株的产率系数,该过程符合下式:

$$X - X_0 = Y_{X/S}(S_0 - S)$$

式中,X 为菌浓度,$mg\cdot L^{-1}$; X_0 为初始菌浓度,$mg\cdot L^{-1}$; $Y_{X/S}$ 为产率系数,$mg\cdot mg^{-1}$; S_0 为初始底物浓度,$mg\cdot L^{-1}$; S 为底物浓度,$mg\cdot L^{-1}$; 菌株 T-2 降解 1,2-DCA 的细胞产率系数拟合如图 6,拟合后所得到的细胞产率系数(以 1,2-DCA 计)为 0.191 $mg\cdot mg^{-1}$.

2.2.5 *Starkeya* sp. T-2 降解 1,2-DCA 的碳平衡及矿化率情况

在 1,2-DCA 降解过程中,通过测定 1,2-DCA 降解后菌体生物量、CO_2 生成量以及 TOC 量来分析碳平衡和矿化率情况,不同 1,2-DCA 浓度的碳平衡情况结果如表 2 所示. 从中可知,1,2-DCA 降解过程伴随着菌体生物量的增加、CO_2 的释放及中间产物的积累,底物中的 C 一部分被菌体利用转化为自身生物质,一部分被矿化为 CO_2 释放出来,还有极少一部分水溶性中间产物残留在培养液中,1,2-DCA 降解后 C 的再生率为80%~85% 左右,剩余的 C 损失可能是在实验操作过程中所造成的.

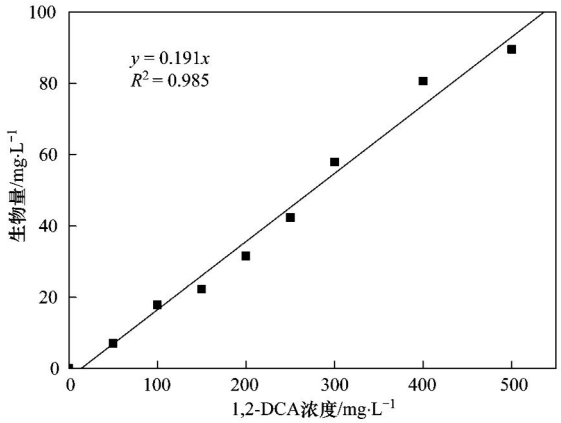


图 6 菌株降解 1,2-DCA 的细胞产率系数

Fig. 6 Cell yield coefficient of strain T-2 for 1,2-DCA degradation

表 2　菌株降解 1,2-DCA 的碳平衡

Table 2　Carbon balance of 1,2-DCA degradation

1,2-DCA /mg·L^{-1}	去除率 /%	底物含碳量 /mg	CO_2 中碳含量 /mg	TOC 量 /mg	生物质中碳含量[1)] /mg	碳总消耗量 /mg	碳再生率 /%
50	100	1.212	0.565 4	0.168 4	0.312	1.046	86.31
100	100	2.424	1.136 6	0.176 9	0.595	1.909	78.74
150	100	3.636	1.596 2	0.311 5	1.243	3.154	86.74
200	100	4.848	1.952 3	0.271 4	1.714	3.937	81.21
250	100	6.060	3.127 5	0.184 3	1.487	4.799	79.18
300	100	7.273	3.529 2	0.175 1	1.841	5.545	76.25
400	100	9.697	4.437 0	0.469 6	1.785	6.691	69.0
500	100	12.12	4.752 2	0.398 7	3.837	8.988	74.15

1)干重 26 g 的生物质大约含 1 mol 的碳

图 7 为 1,2-DCA 消耗量与 CO_2 生成量之间的关系. 生物降解过程中,1,2-DCA 在有氧条件下最终会转化为 CO_2、H_2O 及微生物细胞组成物质. 如图 7,CO_2 的生成量和 1,2-DCA 消耗量的拟合关系为 $y=0.400\,3x$,即消耗 1 mg 的 1,2-DCA 可以得到 0.400 3 mg 的 CO_2,理论上,$C_2H_4Cl_2+O_2\rightarrow 2CO_2$,当 1,2-DCA 完全降解时,1 mg 的 1,2-DCA 可以得到 0.889 mg 的 CO_2,这表明 1,2-DCA 完全降解时,C 的矿化率为 45%,剩余部分 C 被微生物生长利用转化为自身的生物质.

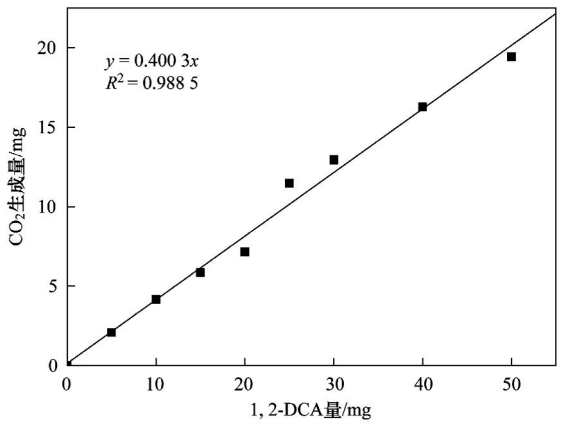


图 7　不同浓度 1,2-DCA 降解的矿化情况

Fig. 7　Mineralization of 1,2-DCA at different concentrations

3　结论

(1) 从浙江某化工厂污水处理池的活性污泥中筛选出 1 株能以 1,2-DCA 作为唯一碳源和能源生长的革兰氏阴性菌 T-2,对此菌株的形态特征、生理生化特性及16S rRNA序列系统学分析,确定该菌株为 *Starkeya* sp..

(2) 菌株 T-2 生长和降解 1,2-DCA 较适宜的条件为:温度 30℃,pH 值 7.0~8.0,在最适条件下,该菌株可完全降解浓度低于 500 mg·L^{-1} 的 1,2-DCA.

(3) 菌株 T-2 降解 1,2-DCA 的过程符合 Haldane 动力学方程,最大比生长速率 μ_{max} 为 0.065 h^{-1},最大比降解速率 v_{max} 为 0.54 h^{-1};菌株 T-2 利用 1,2-DCA 生长的细胞产率系数(以 1,2-DCA 计)为 0.191 mg·mg^{-1}.

(4) 菌株 T-2 利用 1,2-DCA 生长的过程中能同时把 1,2-DCA 最终矿化为 CO_2 和 H_2O,其矿化率为 45%.

参考文献:

[1] 吴石金, 俞翔, 吴尔苗, 等. 二氯甲烷和二氯乙烷对蛋白核小球藻的毒性影响研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1655-1661.

[2] Hirschorn S K, Joyce D M, Elsner M, *et al*. Pathway dependent isotopic fractionation during aerobic biodegradation of 1, 2-dichloroethane [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(18): 4775-4781.

[3] De Wildeman S, Nollet H, Van Langenhove H, *et al*. Reductive biodegradation of 1,2-dichloroethane by methanogenic granular sludge in lab-scale UASB reactors [J]. Advances in Environmental Research, 2001, **6**(1): 17-27.

[4] Hage J C, Van Houten R T, Tramper J, *et al*. Membrane-aerated biofilm reactor for the removal of 1,2-dichloroethane by *Pseudomonas* sp. strain DCA1 [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2004, **64**(5): 718-725.

[5] Le N B, Coleman N V. Biodegradation of vinyl chloride, *cis*-dichloroethene and 1, 2-dichloroethane in the alkene/alkane-oxidising *Mycobacterium* strain NBB4[J]. Biodegradation, 2011, **22**(6): 1095-1108.

[6] Olaniran A O, Naidoo S, Masango M G, *et al*. Aerobic biodegradation of 1,2-dichloroethane and 1,3-dichloropropene by bacteria isolated from a pulp mill wastewater effluent in South Africa[J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2007, **12**(3): 276-281.

[7] Olaniran A O, Balgobind A, Pillay B. Impacts of heavy metals on 1, 2-dichloroethane biodegradation in co-contaminated soil [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(5): 661-

666.

[8] Van der Zaan B, De Weert J, Rijnaarts H, *et al*. Degradation of 1,2-dichloroethane by microbial communities from river sediment at various redox conditions[J]. Water Research, 2009, **43**(13): 3207-3216.

[9] Hlrschorn S K, Dinglasan-Panlilio M J, Edwards E A, *et al*. Isotope analysis as a natural reaction probe to determine mechanisms of biodegradation of 1, 2-dichloroethane [J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(7): 1651-1657.

[10] 王永忠, 孙瑞清, 曹友清, 等. 1,2-二氯乙烷急性中毒迁延死亡1例[J]. 法医学杂志, 2009, **25**(6): 471-472.

[11] 刘景忠, 李红艳, 王宏宇. 二氯乙烷裂解炉对流段改造方案[J]. 聚氯乙烯, 2005, (10): 22-22.

[12] 朱顺妮, 刘冬启, 樊丽, 等. 喹啉降解菌 *Rhodococcus* sp. QL2 的分离鉴定及降解特性[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 488-493.

[13] Inguva S, Shreve G S. Biodegradation kinetics of trichloroethylene and 1, 2-dichloroethane by *Burkholderia* (*Pseudomonas*) *cepacia* PR131 and *Xanthobacter autotrophicus* GJ10[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 1999, **43**(1-2): 57-61.

[14] Torz M, Wietzes P, Beschkov V, *et al*. Metabolism of mono-and dihalogenated C1 and C2 compounds by *Xanthobacter autotrophicus* growing on 1, 2-dichloroethane [J]. Biodegradation, 2007, **18**(2): 145-157.

[15] Taylor D G, Bouwer E J. Effect of CO_2 on oxidation of 1,2-dichloroethane by *Xanthobacter autotrophicus* GJ10 [J]. Environmental Engineering Science, 2009, **26**(11): 1577-1583.

[16] Baptista I I R, Peeva L G, Zhou N Y, *et al*. Stability and performance of *Xanthobacter autotrophicus* GJ10 during 1, 2-dichloroethane biodegradation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(6): 4411-4418.

[17] Hunkeler D, Aravena R. Evidence of substantial carbon isotope fractionation among substrate, inorganic carbon, and biomass during aerobic mineralization of 1, 2-dichloroethane by *Xanthobacter autotrophicus*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(11): 4870-4876.

[18] Alpaslan K B, Çeçen F. Biodegradation of 1,2-dichloroethane (1,2-DCA) by cometabolism in a nitrifying biofilm reactor[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2009, **63**(6): 717-726.

[19] Mileva A, Sapundzhiev T, Beschkov V. Modeling 1, 2-dichloroethane biodegradation by *Klebsiella oxytoca* va 8391 immobilized on granulated activated carbon[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2008, **31**(2): 75-85.

[20] Hage J C, Hartmans S. Monooxygenase-mediated 1, 2-dichloroethane degradation by *Pseudomonas* sp. strain DCA1 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(6): 2466-2470.

[21] Bernhardt D, Diekmann H. Degradation of dioxane, tetrahydrofuran and other cyclic ethers by an environmental *Rhodococcus* strain[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1991, **36**(1): 120-123.

[22] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 116-120.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 10

Oct. 15, 2012

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake ····· LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, *et al.* (3301)

Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau ····· XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)

Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis ····· ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, *et al.* (3314)

Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data ····· ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)

Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway ····· JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, *et al.* (3329)

Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index ····· DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, *et al.* (3336)

Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea ····· WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, *et al.* (3344)

Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae ····· YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, *et al.* (3352)

Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea ····· MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, *et al.* (3361)

Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake: A Simulation Study ····· YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, *et al.* (3368)

Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event ····· YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)

Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment ····· ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, *et al.* (3382)

Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area ····· ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, *et al.* (3390)

Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring ····· LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, *et al.* (3397)

Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan ····· ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, *et al.* (3404)

Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet ····· WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, *et al.* (3411)

Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin ····· XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, *et al.* (3417)

Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area ····· LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, *et al.* (3426)

Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin ····· NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, *et al.* (3434)

Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary ····· LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, *et al.* (3443)

Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China ····· YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)

Composition of *n*-Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators ····· YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, *et al.* (3457)

Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae ····· PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, *et al.* (3466)

Degradation of Orange Ⅳ Dye Solution Catalyzed by $Fe(NO_3)_3$-$(NH_4)_2S_2O_8$ Modified GAC in the Presence of H_2O_2 ····· ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, *et al.* (3473)

Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation ····· HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, *et al.* (3479)

Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside ····· LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, *et al.* (3484)

Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers ····· WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, *et al.* (3489)

Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation ····· JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)

Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter ····· SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, *et al.* (3501)

Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact ····· FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, *et al.* (3507)

Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation ····· ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, *et al.* (3513)

Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties ····· YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)

Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor ····· LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, *et al.* (3529)

Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity ····· CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)

Sorption of 17β-estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM ····· ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, *et al.* (3542)

Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment ····· ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, *et al.* (3547)

Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvo-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model ····· HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, *et al.* (3554)

Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate ····· WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, *et al.* (3562)

In Situ Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants ····· TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, *et al.* (3569)

Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time: A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway ····· GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, *et al.* (3577)

Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk ····· LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, *et al.* (3585)

Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments ····· WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, *et al.* (3592)

Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals ····· TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)

Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption ····· LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, *et al.* (3606)

Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in *Pseudomonas aeruginosa* ZGKD2 ····· ZHANG Yu-xiu, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, *et al.* (3613)

Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain ····· WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, *et al.* (3620)

Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain ····· SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)

Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period ····· PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, *et al.* (3634)

N_2O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain ····· PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, *et al.* (3641)

Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing ····· WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, *et al.* (3647)

Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer ····· LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, *et al.* (3656)

Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon ····· LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, *et al.* (3662)

Effect of Elevated O_3 on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean ····· WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)

Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress ····· WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, *et al.* (3675)

Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting ····· ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2012 年 10 月 15 日　33 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 10　Oct. 15, 2012

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343；Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. 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：70.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行