

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息	(1490,1496,1586,1743)

Xanthobacter flavus DT8 降解二噁烷的特性研究

金小君¹, 陈东之^{1*}, 朱润晔¹, 陈静², 陈建孟¹

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310014; 2. 浙江海洋学院食品与药学院、医学院, 舟山 316000)

摘要: 对上海某医药厂污水站好氧池的活性污泥进行长期驯化, 分离到1株能以二噁烷为唯一碳源和能源生长的菌株DT8. 经生理生化、脂肪酸鉴定和16S rRNA序列分析, 确定该菌株为黄黄色杆菌DT8 (*Xanthobacter flavus* DT8). 序批实验表明 *X. flavus* DT8 可于48 h内完全降解100 mg·L⁻¹二噁烷, 并可实现污染物的矿化. 随着生物量的增加, 该降解过程的细胞得率(以二噁烷计)为0.62 g·g⁻¹, 能量消耗系数(δ_e)为1.00, 表明 *X. flavus* DT8 代谢二噁烷消耗的能量较少. 研究不同温度、pH和营养条件对二噁烷降解的影响, 发现二噁烷降解较适宜的温度和初始pH分别为34℃和7.0; 在贫营养条件下, 即无机盐培养基稀释100倍时, 100 mg·L⁻¹二噁烷于48 h的降解率达到65.6%. 对 *X. flavus* DT8 降解二噁烷可能的诱导机制进行初步研究, 结果表明 *X. flavus* DT8 对二噁烷的降解不需要经历诱导的过程. 本研究揭示了 *X. flavus* DT8 直接代谢二噁烷的特性, 为生物法净化含二噁烷废水及废气的工程应用奠定了基础.

关键词: 二噁烷; 黄黄色杆菌; 生物降解; 直接代谢; 诱导机制

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1657-06

Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by *Xanthobacter flavus* DT8

JIN Xiao-jun¹, CHEN Dong-zhi¹, ZHU Run-ye¹, CHEN Jing², CHEN Jian-meng¹

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Abstract: A strain DT8 was isolated from the activated sludge using culture enrichment technique, and subsequently identified as *Xanthobacter flavus* based on the analysis of morphological and physiological characteristics as well as cellular fatty acid composition and 16S rRNA sequence. *X. flavus* DT8 could effectively utilize 1,4-dioxane as the sole carbon and energy source, and was able to completely degrade 100 mg·L⁻¹ substrate within 48 h. The values of biomass yield and energy discrepancy index were 0.62 g·g⁻¹ and 1.00, respectively, indicating that low energy share was dissipated. The optimum pH and temperature for 1,4-dioxane degradation were 7.0 and 34℃, respectively. The degradation could also be performed in poor nutrition solution, e. g. the degradation ratio reached 65.6% even though in a 100-fold diluted medium. The induction process was not required in 1,4-dioxane degradation from this investigation. The characteristics of 1,4-dioxane degradation by *X. flavus* DT8 in direct metabolic mode was therefore revealed in this paper, and it will built a solid foundation for the application of biological purification of waste water and off-gas containing 1,4-dioxane.

Key words: 1,4-dioxane; *Xanthobacter flavus*; biodegradation; direct metabolism; induction mechanism

二噁烷(1,4-dioxane)亦称1,4-二氧六环, 毒性较大, 不仅具有醚类一般的特性, 还可致肝、皮肤损害, 甚至发生尿毒症, 已被美国环保署(U. S. EPA)列为B2级致癌物^[1,2]. 二噁烷在医药、化妆品、香料等特殊精细化学品制造中作为溶剂、反应介质、萃取剂而广泛应用^[3,4], 然而近年来其对水体及大气的污染日益严重^[5]. 因此, 探索一种高效去除二噁烷的方法显得尤其重要^[6~13].

由于含有2个相对称的醚键及其环状结构, 二噁烷的可生物降解性极低. 随着Bernhardt等^[8]首次分离到1株具有降解二噁烷活性的菌株 *Rhodococcus* sp. 219, 有关二噁烷生物降解的研究才开始陆续被报道. 然而, 目前发现的二噁烷降解菌株仍寥寥无几, 且大多须通过以四氢呋喃(THF)为基质的共代谢方式才能转化二噁烷^[14~16]. 众所周知, 共代谢可

实现异生型化合物的生物降解, 但其对共基质(如THF)的需求增加了实际应用成本和二次污染的可能性, 更重要的是细胞对非生长基质(目标污染物)的氧化往往不够彻底且难以矿化. 因此, 研究选育以二噁烷为唯一碳源和能源生长的微生物已成为目前的研究热点. 迄今已报道的能直接代谢二噁烷的菌株有: 放线菌 *Mycobacterium* sp. PH-06^[9] 和 *Amycolata* sp. CB1190^[10~12], 真菌 *Cordyceps sinensis*^[13]. 然而, 上述微生物世代时间较长, 二噁烷

收稿日期: 2011-07-15; 修订日期: 2011-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(20907043); 浙江省自然科学基金项目(Y5090155); 浙江省重点创新团队项目(2011R09048-05); 浙江海洋学院中青年资助项目(11132100610)

作者简介: 金小君(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: jinxiaojun-0704@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cdz@zjut.edu.cn

降解活性偏低,难以适应大规模的工程应用.因此,选育并研究以直接代谢方式高效降解二噁烷的微生物具有重要的理论和应用价值.

本研究从长期驯化的活性污泥中分离出 1 株以二噁烷为唯一碳源和能源生长的细菌,对其降解特性和可能的诱导机制进行了分析,以期为生物法净化含二噁烷废水及废气的工程应用奠定基础.

1 材料与方法

1.1 培养基组成

无机盐培养基(BSM): $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 4.50 g; KH_2PO_4 1.00 g; NH_4Cl 1.50 g; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.20 g; CaCl_2 0.023 g; 微量元素溶液^[8] 1 mL. 蒸馏水定容至 1 L.

酵母粉无机盐培养基(MY): 在 BSM 中加入 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 酵母粉.

R2A 液体培养基: 酵母粉 0.50 g; 酪蛋白酸水解物 0.50 g; 可溶性淀粉 0.50 g; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05 g; 胰蛋白胨 0.50 g; 葡萄糖 0.50 g; 丙酮酸钠 0.30 g; KH_2PO_4 0.45 g; pH 7.2. 蒸馏水定容至 1 L.

R2A 固体培养基是在 R2A 液体培养基的基础上添加 1.5% 琼脂配制而成.

1.2 二噁烷降解菌株的选育

取上海某医药厂污水站好氧池的活性污泥,与 BSM 按 1:1 (体积比) 混合后置于广口瓶中,加入 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二噁烷作为微生物生长的唯一碳源和能源进行驯化,并定期更换 BSM. 数月后,待降解稳定,样品按 10% 的接入量接种于含 50 mL 的 BSM (含 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二噁烷) 中,于 30°C 、 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床上培养.

经多次传代富集的菌液于 R2A 固体培养基中进行稀释涂布,挑选出不同形态特征的菌落. 进行多次划线分离后,重新接种至含 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二噁烷的 BSM 中,检测其降解活性. 选择具有降解能力的菌株,进一步分离纯化,直至得到有降解能力的纯菌株.

1.3 降解菌生物学鉴定

形态学观察: 将纯化好的菌株接种于 R2A 固体培养基,培养 3 d 后观察菌落形态. 细菌样品经染色处理后通过扫描电子显微镜(SEM) 观察细胞形态与菌体大小.

生理生化试验: 革兰氏染色、氧化酶试验,接触酶试验及碳源利用等指标测定参照文献[17,18]中

的有关方法进行.

全细胞脂肪酸分析: 菌株的脂肪酸鉴定方法参照文献[19,20],脂肪酸的提取步骤按 MIDI 公司提供的标准方法进行,具体组分采用气相色谱系统(Agilent 6890N, 包括全自动进样装置、石英毛细管柱及氢火焰离子化检测器) 检测,应用美国 MIDI 公司开发的基于细菌细胞脂肪酸成分鉴定的软件 Sherlock MIS4.5 (Microbial identification system) 和 LGS4.5 (Library generation software) 分析.

菌株 16S rDNA 扩增和序列测定: 收集菌体,基因组试剂盒小量提取总 DNA 作为扩增模板,用 16S rRNA 的细菌通用引物 F8 (5'-AGAGTTTGATCTGCG-3') 和 R1541 (5'-AAAGGAGGTGATCCA-3') 进行 PCR 扩增反应. 反应体系 $50 \mu\text{L}$, 94°C 预变性 4 min, 35 个循环 (94°C 变性 60 s, 59°C 退火 60 s, 72°C 延伸 90 s), 最终 72°C 延伸 10 min, 4°C 保温 10 min^[21]. PCR 扩增产物经 1% 琼脂糖凝胶检验后交由宝生物工程(大连)有限公司测序. 测序结果在 NCBI 上进行 BLAST 比对.

1.4 二噁烷降解菌的降解实验

二噁烷降解曲线的测定: 将分离纯化后的二噁烷降解菌从斜面接种至 BSM, 并加入一定量的二噁烷使其初始底物浓度达到 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 置于 30°C 、 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床中培养, 培养至对数生长期作为种子液. 将种子液中的菌体离心富集, 以初始 D_{600} 为 0.01, 接入新鲜的 BSM 中, 并加 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二噁烷, 定时取样观察菌体生长情况和二噁烷降解情况, 以及反应体系中有有机碳和无机碳的变化. 所有实验均设 3 个平行实验, 并作空白对照(下同).

微生物的生长对环境条件的变化较敏感, 因此研究不同条件下微生物生长及二噁烷降解情况^[22,23]. 不同温度对微生物生长和二噁烷降解的影响: 在初始二噁烷浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BSM 中, 接入原菌液, 使各平行样中的初始菌体浓度为 0.01 (以 D_{600} 计). 将各个样品分别置于温度为 25°C 、 28°C 、 30°C 、 32°C 、 34°C 、 37°C 和 40°C 摇床中恒温振荡培养(摇床转数均为 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 定时取样, 测菌体及培养液中残余二噁烷的浓度.

不同初始 pH 对微生物生长和二噁烷降解的影响: 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 或 HCl 溶液调节 BSM 为不同 pH 值 (4.0 、 5.0 、 6.0 、 6.5 、 7.0 、 7.5 、 8.0 、 9.0 、 10.0), 在初始二噁烷浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 接入原菌液, 使各平行样中的初始菌体浓度(以 D 计) 为 0.01. 将样品于 30°C 、 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温摇床

里振荡培养,培养 40 h 后取样,测菌体及培养液中残余二噁烷的浓度.

贫营养对微生物生长和二噁烷降解的影响:通过将 BSM 按 0 倍、5 倍、10 倍、20 倍、50 倍、100 倍的稀释倍数配制不同体系的培养液.在该体系中接种 DT8 种子液并加入 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 二噁烷.培养 48 h 后,取样测菌体及培养液中残余二噁烷的浓度.

1.5 菌株降解二噁烷诱导机制的研究

从斜面中将二噁烷降解菌分别接种于 R2A 培养基和 BSM 培养基上培养,浓缩富集菌体,经无菌水润洗两次,分别转接于新鲜 BSM 培养基中并加入 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 二噁烷,初始 D_{600} 约为 0.01. 定时取样,测菌体生长及培养液中残余二噁烷的浓度.

菌体经过液体 R2A 培养基富集培养后,洗脱菌体并转接至 BSM 和 MY 中,初始 D_{600} 约为 0.01. 定时取样,测菌体生长及培养液中残余二噁烷的浓度.

1.6 分析方法

细菌生长以 $\lambda_{600\text{ nm}}$ 处的浊度 D_{600} 表示.即采用日立 U-2910 双光速紫外/可见分光光度计于 600 nm

波长下测定菌体的吸光度(D_{600}).

二噁烷浓度的测定:采用安捷伦 6890 气相色谱 (HP-Innowax 硅胶毛细管柱, $30\text{ m}\times0.32\text{ mm}\times0.5\text{ }\mu\text{m}$, J&W Scientific, USA) 测定,气相条件:气化室、检测器 (FID) 和柱子温度分别为 250、300 和 70℃ (以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 180℃,保持 1 min),载气流速 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,分流比为 5:1.

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

2 结果与分析

2.1 二噁烷降解菌的分离与鉴定

经过分离纯化,筛选得到 1 株革兰氏阴性的细菌,该菌株能以二噁烷为唯一碳源和能源生长,命名为 DT8. 在 R2A 固体平板上培养 48 h 后,菌落呈黄色,直径大小为 0.1~0.5 mm,圆形,低突起,边缘整齐,表面光滑,形态饱满.电子扫描显微镜观察细胞的形状无规则呈杆状或弧状(图 1).菌株 DT8 的生理生化试验以及脂肪酸鉴定结果列于表 1 中.

表 1 DT8 的生理生化性质及细胞中主要脂肪酸含量

Table 1 Physiological and biochemical characters of DT8 and the major fatty acids in cells

试验名称	结果	试验名称	结果	全细胞脂肪酸组分	含量/%
革兰氏染色	-	精氨酸双水解试验	+	16:1 ω 7c/16:1 ω 6c	0.57
吡啶试验	-	糖发酵试验	-	C16:0	4.11
M. R. 试验	-	柠檬酸盐试验	+	C16:0 3OH	0.56
V. P. 试验	-	山梨醇试验	-	C18:1	86.53
氧化酶	+	大分子水解试验	-	C18:0	5.25
过氧化氢酶	+	生物素	+	C19:0 cyclo ω 8c	1.69

1)“+”阳性或有反应;“-”阴性或没有反应

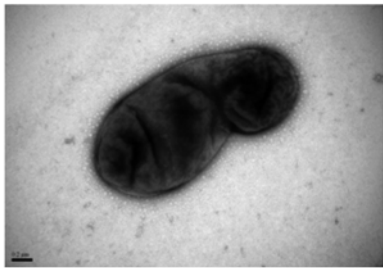


图 1 菌株 DT8 的扫描电镜 (SEM) 图片 (×50 000)

Fig. 1 Photo of strain DT8 by scanning electron microscope (×50 000)

实验展示的菌落、菌体形态特征及生理生化特征,与文献 [17, 18] 所描述的黄色杆菌属 (*Xanthobacter* sp.) 结果基本符合一致.在此基础上,结合脂肪酸鉴定,对该菌株的全细胞不同脂肪酸含量进行分析,得出结果与 TSBA6 数据库中的 *Xanthobacter flavus* 相似度达 0.783 (>0.5),细胞中

高含量的 C18:1 和特有的 C16:0 3OH 组分与文献 [18] 的结果一致.

对该菌株的 DNA 进行 PCR 扩增,获得约 1 500 bp 的 16S rRNA 扩增产物,该序列在经过测序后,同 GenBank 中的基因序列进行同源性比对,发现菌株 DT8 与黄黄色杆菌 (*Xanthobacter flavus*) 的相似度达 99%.

综合以上结果,确定所分离的二噁烷降解菌为 *Xanthobacter flavus* DT8. 查阅相关文献,尚未见黄黄色杆菌降解二噁烷的报道,确定 *X. flavus* DT8 为降解二噁烷的新性能物种.该菌株在 GenBank 登录号为 JN004054,目前已保藏于中国典型培养物保藏中心(保藏号为 CCTCC M2011148).

2.2 *X. flavus* DT8 对二噁烷的降解性能

X. flavus DT8 不仅能降解二噁烷,并且能以二噁烷为唯一碳源和能源生长[图 2(a)].在微生物接

种浓度为 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二噁烷可于 48 h 内被完全降解, 菌体生物量 (D_{600}) 达到 0.182 (细胞干重为 $70.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 由此可知, *X. flavus* DT8 降解 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二噁烷的细胞得率 (以干重/二噁烷计, 下同) 为 $61.6 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. 据文献[24]所示方法, 计算 1 mol 二噁烷有效电子数为 $20e_{av}^-$, 则由此获得细胞理论得率为 $61.4 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, 因此该菌株降解二噁烷的能量消耗系数 $\delta_e = 61.4/61.6 \approx$

1.00, 表明 *X. flavus* DT8 代谢二噁烷的过程中所消耗的能量较少. 随着二噁烷的降解, 体系中总有机碳 (TOC) 含量逐渐降低至检测值以下 (约 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 同时无机碳 (IC) 浓度也有所增加[25]. 这说明在微生物的作用下, 二噁烷一部分转化为细胞物质, 一部分被矿化为 CO_2 [图 2(b)]. 从细胞得率、能量消耗情况和 IC/TOC 值可知, 二噁烷降解后大部分形成了细胞物质.

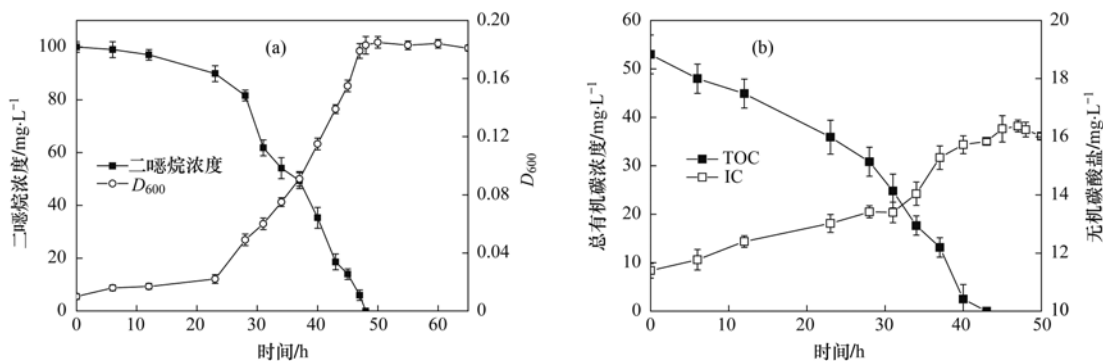


图 2 DT8 生长和二噁烷降解曲线及体系中碳源变化情况

Fig. 2 Time course of growth of DT8, 1,4-dioxane degradation by DT8 and changes of carbon in the system

2.3 环境因素对二噁烷降解的影响

2.3.1 温度的影响

由图 3 可知, 在温度为 $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 的范围内, *X. flavus* DT8 均能生长. 随着温度的升高, 二噁烷的降解速率随之增加, 但温度高于 34°C 后, 降解速率开始下降. 在本实验条件下, 温度为 34°C 时, 细胞生长最快, 45 h 内二噁烷完全降解, 菌体生物量达到稳定值. 所以 *X. flavus* DT8 生长及降解二噁烷较适宜的温度为 34°C .

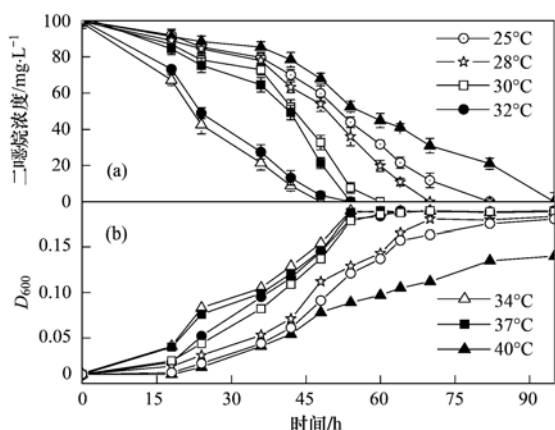


图 3 不同温度下二噁烷浓度及菌体浓度随时间变化图

Fig. 3 Effects of temperature on 1,4-dioxane degradation and cell growth

2.3.2 初始 pH 的影响

由图 4 可知, *X. flavus* DT8 在 pH 值为 4 ~ 10

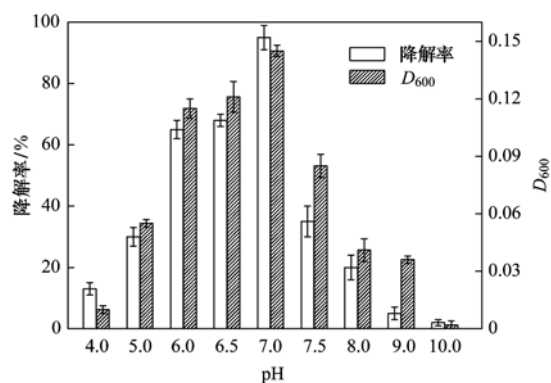


图 4 不同初始 pH 对于菌体生长和二噁烷降解率的影响

Fig. 4 Effects of initial pH on 1,4-dioxane degradation and cell growth

的范围内, 均有降解活性. 然而, pH 对于细胞生长及二噁烷降解具有显著影响, 随着 pH 从 4.0 增至 10.0, 菌体浓度及二噁烷降解率呈先增大后减小趋势. *X. flavus* DT8 于 pH 7.0 培养 40 h 后, 菌体生物量 (D_{600}) 达到 0.145, 二噁烷降解率达到 95%. 值得关注的是, 偏酸性条件比偏碱性条件更有利于该菌株的生长和二噁烷的降解, 这与大部分细菌喜偏碱环境的规律有所差异. 由于二噁烷降解后体系 pH 略有下降 (数据略), *X. flavus* DT8 在偏酸条件下较高代谢活性的保持, 有利于后续降解的顺利进行, 这对实际的工程应用具有一定的经济价值.

2.3.3 贫营养条件的影响

通常在实验研究中,无机盐培养基配方中各组分含量远高于自然环境.因此研究在极贫营养体系中菌体对二噁烷降解的影响具有重大的实践意义.实验研究发现,无机盐含量的减少对降解率和菌体生物量的影响较小,但是体系中 pH 在培养前后的变化幅度差异较大.在稀释 0~100 倍的体系中,经 48 h 培养后 DT8 对二噁烷降解率达 90.8%~65.6%,最大 pH 值变化范围为 7.0~5.6(图 5).由此推测,无机盐含量的减少,一方面可能是由于体系中某元素的限制,另一方面也可能是底物的降解导致培养体系中 pH 的降低抑制了降解酶的活性.

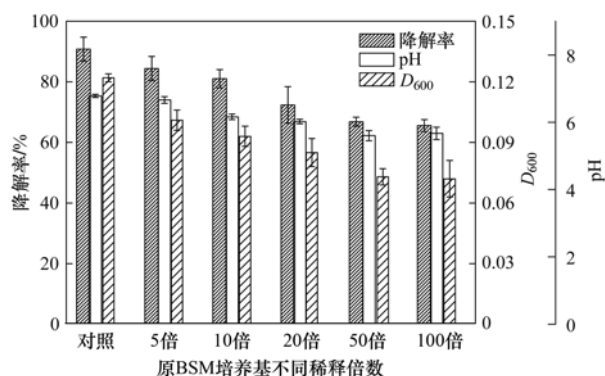
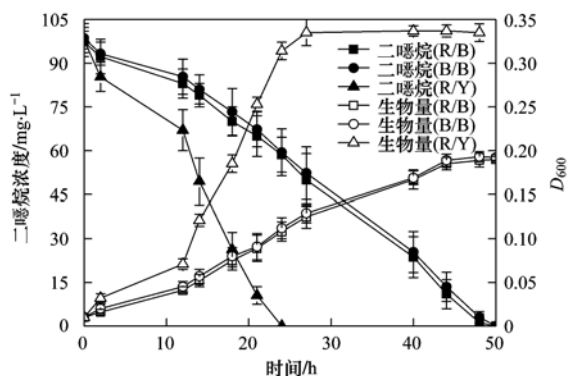


图 5 贫营养对菌株生长、降解二噁烷和 pH 变化的影响

Fig. 5 Effects of oligotrophic condition on *X. flavus* DT8 growth, 1,4-dioxane degradation and pH change

2.4 *X. flavus* DT8 降解二噁烷可能的诱导机制研究

不同微生物对污染物的降解机制不同,因此研究了在不同底物中预培养后的细胞降解二噁烷的情况(图 6).与 BSM 相比较,经 R2A 预培养后的 *X. flavus* DT8 降解二噁烷时并没有出现明显的延滞现象,说明



R/B 表示 R2A 中预培养的细胞于 BSM 中降解二噁烷的情况; B/B 表示在含二噁烷的 BSM 中预培养的细胞于 BSM 中降解二噁烷的情况; R/Y 表示 R2A 中预培养的细胞于添加酵母粉的 BSM 中降解二噁烷的情况

图 6 不同培养基对 *X. flavus* DT8 降解二噁烷的影响

Fig. 6 Effects of different media on the 1,4-dioxane degradation by *X. flavus* DT8

该菌株在不含二噁烷的富营养培养基中生长后降解二噁烷不需要经过前期的诱导.由于 *X. flavus* DT8 在 R2A 中的生长速度明显快于 BSM(数据略),因此 *X. flavus* DT8 的规模化培养可借助于使用 R2A 培养基以增加细胞量.由于酵母粉含有丰富的蛋白质、维生素、多糖和矿物质等元素,往往能促进微生物的生长,因此研究酵母粉共存条件下二噁烷的降解显然具有一定价值.另外,如图 6 所示,在酵母粉共存的体系中,二噁烷降解速率显著提高,100 mg·L⁻¹ 底物完全降解所需时间由 45 h 缩短至 24 h.

3 讨论

二噁烷的广泛应用使工业废水、生活污水及工业废气普遍存在二噁烷污染,而其较低的可生物降解性和较高的水溶性决定了其难以被常规的方法去除^[5].生物法降解有机污染物具有成本低、反应条件温和以及无二次污染等优点,因此二噁烷的生物法降解技术备受关注.目前报道的关于以直接代谢方式降解二噁烷的菌株数量有限,且以放线菌和真菌等世代时间长、降解效率低的微生物为主.本研究从活性污泥中分离到 1 株能以二噁烷为唯一碳源和能源生长的细菌 *X. flavus* DT8,迄今国内外还没有关于该种属降解二噁烷的报道.因此,本研究成果对于扩大二噁烷降解菌资源库具有较重要的意义.

本实验通过研究环境因素对降解速率的影响,确定了较适宜的温度和 pH,并结合实际应用研究贫营养体系对 *X. flavus* DT8 降解二噁烷的影响.结果表明, *X. flavus* DT8 在温度和 pH 变化范围较广的情况下均能够生长,并且在无机盐含量较低的情况下也能实现二噁烷的有效降解.因此, *X. flavus* DT8 对环境的变化具有一定的耐受能力,这为工程上净化二噁烷废水或废气奠定了基础.

通过研究 *X. flavus* DT8 降解二噁烷可能的诱导机制,发现该菌株降解二噁烷无需经历诱导过程,这无疑缩短了细胞的世代时间并加快了二噁烷的平均降解速率.更重要的是,该发现解决了工程应用中 *X. flavus* DT8 扩大培养的难题.不添加二噁烷或结构类似物的富营养培养基(如 R2A、LB 等)均可有效培养目标菌并使其达到较高的浓度,该法提高了 *X. flavus* DT8 培养效率和生物法治理二噁烷污染的可行性.

4 结论

(1) 从活性污泥中分离到 1 株能够以二噁烷为

唯一碳源和能源生长的细菌 DT8,经形态学、生理生化、全细胞脂肪酸和 16S rRNA 分析,确定该菌株为 *X. flavus* DT8.

(2) *X. flavus* DT8 在接种浓度为 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下,可于 48 h 内完全降解 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二噁烷,细胞得率为 $61.6 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. 该菌株降解二噁烷的能量消耗系数 δ_e 为 1.00,表明 *X. flavus* DT8 代谢二噁烷的过程中所消耗的能量较少,细胞得率较高.

(3) *X. flavus* DT8 降解二噁烷较适宜的温度和 pH 分别为 34°C 和 7.0. 菌株在贫营养条件下仍可实现对二噁烷的高效降解,在稀释 100 倍的 BSM 中, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 二噁烷 48 h 的降解率为 65.6%.

(4) 针对可能的诱导机制研究表明,该菌株降解二噁烷不需要经过前期的诱导,并且酵母粉的加入大大提高了降解速率,该结果对 *X. flavus* DT8 的扩大培养及其对环境中二噁烷污染的治理具有重要意义.

参考文献:

- [1] Stickney J A, Sager S L, Clarkson J R, *et al.* An updated evaluation of the carcinogenic potential of 1, 4-dioxane [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2003, **38**(2): 183-195.
- [2] Zenker M J, Borden R C, Barlaz M A. Occurrence and treatment of 1, 4-dioxane in aqueous environments [J]. Environmental Engineering Science, 2003, **20**(5): 423-431.
- [3] Kano H, Umeda Y, Kasai T, *et al.* Carcinogenicity studies of 1, 4-dioxane administered in drinking-water to rats and mice for 2 years [J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, **47**(11): 2776-2784.
- [4] Roy D, Anagnostou G, Chaphalkar P. Biodegradation of dioxane and diglyme in industrial waste [J]. Journal of Environmental Science and Health A, 1994, **29**(1): 129-147.
- [5] Isaacson C, Mohr T K, Field J A. Quantitative determination of 1, 4-dioxane and tetrahydrofuran in groundwater by solid phase extraction GC/MS/MS [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(23): 7305-7311.
- [6] Mahendra S, Petzold C J, Baidoo E E, *et al.* Identification of the intermediates of in vivo oxidation of 1, 4-dioxane by monooxygenase-containing bacteria [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(21): 7330-7336.
- [7] Kawata K, Tanabe A. Distribution and variation of 1, 4-dioxane in water from rivers in Niigata including the Shinano river [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **82**(6): 673-677.
- [8] 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.
- [9] Kim Y M, Jeon J R, Murugesan K, *et al.* Biodegradation of 1, 4-dioxane and transformation of related cyclic compounds by a newly isolated *Mycobacterium* sp. PH-06 [J]. Biodegradation, 2009, **20**(4): 511-519.
- [10] Mahendra S, Alvarez-Cohen L. Kinetics of 1, 4-dioxane biodegradation by monooxygenase-expressing bacteria [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(17): 5435-5442.
- [11] Parales R E, Adamus J E, White N, *et al.* Degradation of 1, 4-dioxane by an actinomycete in pure culture [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, **60**(12): 4527-4530.
- [12] Kelley S L, Aitchison E W, Deshpande M, *et al.* Biodegradation of 1, 4-dioxane in planted and unplanted soil: effect of bioaugmentation with *Amycolata* sp. CB1190 [J]. Water Research, 2001, **34**(16): 3791-3800.
- [13] Nakamiya K, Hashimoto S, Ito H, *et al.* Degradation of 1, 4-dioxane and cyclic ethers by an isolated fungus [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(3): 1254-1258.
- [14] Zenker M J, Borden R C, Barlaz M A. Mineralization of 1, 4-dioxane in the presence of a structural analog [J]. Biodegradation, 2000, **11**(4): 239-246.
- [15] Sun B Z, Kenton K, Ramsay J A. Biodegradation of 1, 4-dioxane by a *Flavobacterium* [J]. Biodegradation, 2011, **22**(3): 651-659.
- [16] Skinner K, Cuiffetti L, Hyman M. Metabolism and cometabolism of cyclic ethers by a filamentous fungus, a *Graphium* sp. [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, **75**(17): 5514-5522.
- [17] 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.
- [18] Boone D R, Brenner D J, Castenholz R W, *et al.* Bergey's Manual of Systematic Bacteriology [M]. Vol. 2. Springer: 2007. 555-566.
- [19] 王秋红, 陈亮, 林营志, 等. 福建省青枯雷尔氏菌脂肪酸多态性研究 [J]. 中国农业科学, 2007, **39**(8): 1675-1687.
- [20] 陈志强, 李云蓓, 温沁雪. 利用丁酸合成 PHA 高效菌株的筛选及摇瓶发酵特性研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 828-832.
- [21] Liu Z Q, Sun Z H. Cloning and expression of D-lactonohydrolase cDNA from *Fusarium moniliforme* in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Biotechnology Letters, 2004, **26**(24): 1861-1865.
- [22] 王艳青, 张劲松, 周集体, 等. 对氨基苯磺酸降解菌的分离鉴定及降解特性研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1193-1198.
- [23] 董滨, 王凤花, 林爱军, 等. 乙草胺降解菌 A-3 的筛选及其降解特性 [J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 542-547.
- [24] Fortin N Y, Morales M, Nakagawa Y, *et al.* Methyl *tert*-butyl ether (MTBE) degradation by a microbial consortium [J]. Environmental Microbiology, 2001, **3**(6): 407-416.
- [25] 周玉央, 陈东之, 金小君, 等. 食油假单胞菌 DT4 菌株对四氢呋喃 (THF) 的降解特性 [J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 266-271.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingtian, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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

国内外公开发行人