

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第8期

Vol.34 No.8

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

2006~2009年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析 戴永立,陶俊,林泽健,谢绍东,曹军骥,张仁健(2925)
南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究 李用宇,朱彬,安俊琳,高晋徽,夏丽,张祥志,秦玮,汤莉莉(2933)
大气 PM_{2.5} 中水溶性离子在线观测技术的应用研究 程萌田,潘月鹏,王辉,刘全,王跃思(2943)
一种纳米气溶胶发生系统的设计及性能测试 麦华俊,蒋靖坤,何正旭,郝吉明(2950)
焦炉顶和厂区环境中有机碳和元素碳的粒径分布 刘效峰,彭林,白慧玲,牟玲,宋耕芳(2955)
昼夜增温对大豆田土壤 N₂O 排放的影响 胡正华,周迎平,崔海玲,陈书涛,肖启涛,刘艳(2961)
不同土地利用方式下冬季 N₂O 排放及其影响因素 伍延正,张苗苗,秦红灵,侯海军,陈春兰,魏文学(2968)
基于支持向量回归模型的水稻田甲烷排放通量预测研究 陈强,蒋卫国,陈曦,袁丽华,王文杰,潘英姿,王维,刘孝富,刘海江(2975)
夏季黄海和渤海微表层和次表层海水中营养盐的分布特征 王文涛,杨桂朋,于娟,吴冠伟(2983)
氮磷浓度对东海原甲藻优势种群吸附 BDE28 和 BDE47 的影响 汪芳,葛蔚,柴超,孟祥霞(2992)
基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感 孙德勇,周晓宇,李云梅,陈晓玲,黄昌春,龚绍琦(3002)
基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价——以滇池流域为例 黄艺,舒中亚(3010)
珠江三角洲城市非点源 COD 影响因素分析及其负荷估算 廖义善,卓慕宁,李定强,郭太龙(3019)
珠江流域河流碳输出通量及变化特征 张连凯,覃小群,杨慧,黄奇波,刘朋雨(3025)
三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征 曾立雄,肖文发,黄志霖,王佐庆(3035)
三峡库区消落带典型草本植物淹水浸泡后可溶性有机碳的释放特征 谭秋霞,朱波,花可可(3043)
混合层深度对藻类生长的影响研究 陈洋,杨正健,黄钰铃,张平,刘德富(3049)
伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究 赵琳,李正魁,周涛,吴宁梅,叶忠香,刘丹丹(3057)
组合型生态浮床对上覆水和沉积物之间氮磷的影响 郑立国,杨仁斌,王海萍,宋建军(3064)
生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响 李扬,李锋民,张修稳,吴召富,于辉(3071)
东莞石马河流域重金属污染及生态毒性的时空差异 高磊,陈建耀,柯志庭,王江,杨雪韵,清水裕太(3079)
连环湖牙门气泡沉积物重金属演化 and 污染研究 肖海丰,臧淑英,关莹,刘少军,徐海凤,孙清展,王京京,李苗(3088)
人工湿地净化工业区含非污染降雨径流的效果研究 敬丹丹,王金泉,马邕文,李东亚,王艳,黄明智(3095)
四环素抗性基因在人工湿地中的去除及累积 郑加玉,刘琳,高大文,刘超翔(3102)
不确定节点水量下水质监测点优化选址方法 刘书明,吴雪,欧阳乐岩(3108)
饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素 丁春生,邹邦文,缪佳,傅洋平,沈嘉辰(3113)
漆酶催化氧化水中雌激素的研究 夏青,谢卫平,刘国强,廖云燕,王斌楠,孔德洋,陆隽鹤(3119)
碳纳米管电极电还原降解水中头孢他啶 朱宏,胡翔,李俊峰(3125)
UV-vis 光照下唑类抗菌药氟康唑的光化学反应类型 葛林科,李凯,杨凯,那广水,于春艳,张蓬,姚子伟(3132)
氙灯/TiO₂ 体系下敌草隆光催化降解动力学的研究 阳海,曾健,黎源,阳立平,易兵(3137)
羟基磷灰石对水中刚果红的吸附作用研究 詹艳慧,林建伟(3143)
乙醇处理对树脂基纳米水合氧化铁结构及其除砷性能的影响 万琪,李旭春,潘丙才(3151)
污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能 刘冰,于鑫,余国忠,古励,赵承美,翟慧敏,李清飞(3156)
短程深度脱氮中试工艺的低温启动和维持 顾升波,王淑莹,彭永臻(3164)
生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究 赖玮毅,周伟丽,何圣兵(3171)
东北三省畜禽养殖类固醇激素排放及其潜在污染风险 刘妹芳,李艳霞,张雪莲,冯成洪,鲁肖飞,杨明,李帷,朱铁群,黄泽春(3180)
淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征 孟晶,王铁宇,王佩,吕永龙(3188)
华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征 易春瑶,汪丙国,靳孟贵(3195)
长期施磷的产量效应及其环境风险评价 颜晓,王德建,张刚,冉景,郑继成(3205)
污灌渠中有机氯农药对沿渠土壤的影响 徐亮,张彩香,刘敏,廖小平,姚林林,李佳乐,向青清(3211)
表面活性剂及其组合洗脱污染土壤中的硫丹 熊佰炼,郑国灿,张进忠,邢曠,徐卫红(3216)
黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响 赵彤,蒋跃利,闫浩,黄懿梅,安韶山(3223)
氮素添加对樟树林红壤微生物的影响 郁培义,朱凡,宿少锋,王志勇,闫文德(3231)
医疗废物焚烧炉周边环境介质中二噁英的浓度、同系物分布与来源分析 黄文,张素坤,杜国勇,张漫雯,冯桂贤,任明忠(3238)
固相萃取和固相萃取评价多环芳烃降解过程中的生物有效性变化 郭美霞,巩宗强,李晓军,刘丹,王悦(3244)
改良型固定化 *Pseudomonas oleovorans* DT4 降解四氢呋喃的研究 邵钱,叶杰旭,欧阳杜娟,陈建孟,陈东之(3251)
PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构 徐影,仇天雷,韩梅琳,李军,王旭明(3257)
温度对嗜酸性硫杆菌活性和生物成因次生铁矿物形成的影响 宋永伟,赵博文,霍敏波,崔春红,周立祥(3264)
小白菜对外源硝酸盐和亚硝酸盐动态吸收的差异及其机制研究 郭璐,满楠,梁东丽,谢钧宇,刘娟娟(3272)
预处理对打捆麦秸贮存和厌氧生物产沼气的的影响 马慧娟,陈广银,杜静,常志州,叶小梅(3280)
硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导 张铃松,王业耀,孟凡生,周岳溪,于海斌(3286)
生物毒性测试微孔板 MTOXPlate 的分析性能研究 林奕云,张国霞,贺丽苹,孙国萍,许玫英(3294)
两种实验设计研究 DES 和 EV 对 MCF-7 细胞增殖的联合作用 刘倩,雷炳莉,安静,尚羽,钟玉芳,康佳,文育(3303)
中国近海海洋环境多氯联苯(PCBs)污染现状及影响因素 刘敏霞,杨玉义,李庆孝,王俊(3309)
城市污水处理厂出水中的药品和个人护理品 郑少奎,李晓峰(3316)
生物炭封存技术的研究进展 姜志翔,郑浩,李锋民,王震宇(3327)
饮用水水源地严格管理水质的对策分析——对实行严格水资源管理问题上的看法和建议 傅国伟(3334)
《环境科学》征稿简则(2967) 《环境科学》征订启事(3034) 信息(3063,3136,3194,3302)

改良型固定化 *Pseudomonas oleovorans* DT4 降解四氢呋喃的研究

邵钱, 叶杰旭, 欧阳杜娟, 陈建孟, 陈东之*

(浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310014)

摘要: 成功构建出了新型的海藻酸钠-活性炭纤维复合固定化 *Pseudomonas oleovorans* DT4 来去除四氢呋喃, 并优化了该复合固定化载体组分的含量, 发现在海藻酸钠含量为 3%, 活性炭纤维含量为 1.5% 条件下, 制备成细胞浓度为 $6 \times 10^9 \text{ g}^{-1}$ 的协同固定化细胞在初始 THF 浓度为 $360 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的降解速率达到最大为 $24.0 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 同时其机械强度也得到了显著的提升. 此外与游离菌体相比, 该固定化细胞在不同温度和 pH 条件下的降解速率表现得更加稳定, 且去除效果均能稳定在 80% 以上. 在改进的反应体系中, 协同固定化小球高效降解 THF 的重复利用次数达到 80 批以上, 显示出该载体良好的可行性.

关键词: 四氢呋喃; 固定化; 海藻酸钠; 活性炭纤维; 生物降解

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)08-3251-06

Biodegradation of Tetrahydrofuran by Combined Immobilized of *Pseudomonas oleovorans* DT4

SHAO Qian, YE Jie-xu, OUYANG Du-juan, CHEN Jian-meng, CHEN Dong-zhi

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A new composite matrix, calcium alginate (CA) coupled with activated carbon fiber (ACF) was designed to immobilize the cells of *Pseudomonas oleovorans* DT4 for tetrahydrofuran (THF) degradation. The average removal rate of the CA-ACF immobilized cells reached $24.0 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ with an initial THF concentration of $360 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ when the concentration of CA and ACF was 3% and 1.5% respectively. The mechanical strength of the mobilized cells was also significantly improved with the addition of ACF. Compared to the free suspended cells, higher stable removal efficiency (more than 80%) of CA-ACF cells was detected under different conditions of temperature and pH. The feasibility of the newly designed matrix was also reflected by the repeated batch degradation which showed that the removal activity decreased insignificantly after 80 cycles with the modified reaction system (PNS).

Key words: tetrahydrofuran; immobilization; sodium alginate; activated carbon fibre; biodegradation

四氢呋喃(tetrahydrofuran, THF)是一种常见的环醚类物质,作为一种良好的溶剂被广泛应用于工业生产中.由于其可通过呼吸道、消化道、皮肤进入动物机体从而造成毒害和致癌作用^[1,2],因此美国国家毒理项目于1998年正式将THF列为考察对象^[3].

由于THF的结构中存在C—O键而使其很难降解,目前能生物降解该污染物的菌体报道较少. Bernhardt等^[4]于1991年首次分离到1株能以THF为唯一碳源生长的红球菌属(*Rhodococcus* sp.)菌株219, THF的生物降解成为研究热点.目前能降解THF菌株还有*P. tetrahydrofuranoxydans* strain K1^[5]、*Pseudonocardia* sp. M1^[6]和*Rhodococcus* sp. YYL^[7]等.本实验室从浙江某医药厂废水池的活性污泥中筛选到了1株能高效降解THF的菌株*P. oleovorans* DT4^[8],在最适条件下其最大降解速率达到了 $317.2 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$,为目前世界上降解THF最快的菌株,以期的高效降解THF提供了微生物

基础.

然而,由于游离菌体在重复利用方面的不足以及在生物反应器中极易被冲刷流失而影响降解效果,限制了该菌体在实际生产中的利用.细胞固定化技术尤其是包埋固定法由于其能提供较高的菌体密度,拥有良好的重复利用性和环境适应性而使其成为弥补游离菌体不足的选择^[9~15],但是固定化载体普遍存在的传质问题在很大程度上影响了其对特殊污染物的去除能力,因此构建一种新型的固定化载体成为了目前工作的重点.

本研究在以*P. oleovorans* DT4为目标菌株,筛选出了一种适合包埋该菌株的固定化材料,并在此基础上构建一种新型的协同固定化载体,显著改善

收稿日期: 2012-11-28; 修订日期: 2013-01-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(20907043); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063102); 浙江省科技厅创新团队项目(20110150)

作者简介: 邵钱(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境生物技术, E-mail: shaoqian19@126.com

* 通讯联系人, E-mail: cdz@zjut.edu.cn

了固定化颗粒的传质效果和机械强度, 以期为该菌在连续高效降解 THF 的工程应用作出指导。

1 材料与方 法

1.1 菌种来源

菌种 *Pseudomonas oleovorans* DT4 (CCTCC M 209151) 为本实验室前期筛选获得。

1.2 实验材料

活性炭纤维购自 Actitex 公司, 比表面积为 $1\,500\text{ cm}^{-2}\cdot\text{g}^{-1}$, 孔隙容积为 $0.9\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其余试剂均为市售分析纯。

1.3 培养基组成

无机盐培养基 (MSM): $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 4.50 g; KH_2PO_4 1.0 g; NH_4Cl 1.5 g; $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g; $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.023 g; 微量元素^[4] 1 mL。蒸馏水定容至 1 L。

贫瘠培养基 (PNS): $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 0.45 g; KH_2PO_4 0.1 g; NH_4Cl 0.3 g; $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.04 g; $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.006 g; 微量元素 1 mL。蒸馏水定容至 1 L。

1.4 固定化细胞的制备

1.4.1 *P. oleovorans* DT4 菌体的富集

将活化后的 *P. oleovorans* DT4 接种于 100 mL 含初始 THF 浓度为 $360\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 MSM 培养基中, 于 30°C , $160\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的摇床上培养至对数期, 然后在 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ (4°C) 条件下离心 10 min, 用生理盐水冲洗菌体 3 次后备用。

1.4.2 固定化小球的制作

海藻酸钙固定化: 将 0.16 g 菌体悬浮于 100 mL 生理盐水中 (NaCl , 0.85%), 然后与一定浓度的海藻酸钠溶液等体积混合均匀。通过蠕动泵将混合物缓慢滴加到质量分数为 4% 的氯化钙溶液中, 轻微搅拌固化 2~10 h, 获得大小为 3 mm 左右的海藻酸钙小球, 用生理盐水冲洗后, 4°C 下储存备用。琼脂、聚丙烯酰胺、聚乙烯醇固定化小球的制备方法参照文献[16]。

1.4.3 协同固定化小球的制备

将质量分数为 1% 的粉末活性炭、活性炭纤维和硅藻土分别加入 100 mL 一定浓度的海藻酸钠溶液中混合均匀后其余操作步骤与上述小球制作方法相同。

1.5 批次降解实验

取制备好的固定化小球 6.0 g, 加入到盛有 50 mL MSM 的 250 mL 密封生理盐水瓶中 (含 360

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ THF), 置于 30°C , $160\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 摇床中的培养, 定期取样, 在 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 5 min (4°C), 取上清测定残留 THF 的含量。所有实验菌设 3 个平行, 并作空白对照 (下同)。有效系数 (η) 定义为实际反应速率与无扩散限制时 (游离细胞) 的反应速率之比。

1.6 不同环境条件的降解考察

由于微生物生长对环境条件变化敏感, 因此对比不同环境条件下游离菌体和固定化菌体的降解情况来考察固定化菌体的降解特性。不同温度的条件的影响: 设置了 27、32、37、42 和 50°C 这 5 个不同的摇床温度, 其余培养、检测条件均与批次降解实验一致。不同初始 pH 的影响: 用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 或 HCl 溶液调节 MSM 来设置不同的初始 pH 值 (3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0), 其余培养、检测条件均与批次降解实验一致。

1.7 固定化小球的重复利用

将 6.0 g 固定化小球分别加入到盛有 50 mL MSM 和 PNS 的 250 mL 密封生理盐水瓶中 (含 $360\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ THF) 于 30°C , $160\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 摇床振荡培养, 以考察固定化细胞的重复使用情况。在一批次 THF 降解完全后, 将固定化颗粒用生理盐水冲洗 3 遍, 然后转入到新鲜的 MSM 和 PNS 溶液中继续降解, THF 的重复降解条件与第一批次的条件相同。

1.8 固定化小球中蛋白含量的测定

将已知重量的固定化颗粒悬浮于 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲溶液 (pH 7.0) 中, 置于摇床上 (30°C , $160\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 振荡至小球完全破碎溶解, 取上清, 用超声波细胞破碎仪破碎细胞, 然后用 Lowry 等^[17] 的方法测定溶液中蛋白含量。

1.9 分析方法

菌体浓度和 THF 的浓度测定参照文献[18]。固定化小球机械强度的测定: 取 100 颗固定化小球悬浮于 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲溶液 (pH 7.0) 中, 置于摇床上 (30°C , $160\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 振荡一段时间, 计算小球的破碎颗粒, 得出破碎率来表征机械强度。

2 结果与分析

2.1 4 种不同载体的降解能力考察

固定化载体的选择对其内部细胞降解污染物的效果至关重要。由图 1 中可知, 海藻酸钙和琼脂固定化细胞的降解速率较快, 分别达到了 $14.4\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $12\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。而聚乙烯醇 (PVA) 和聚丙烯酰胺固定化小球对 THF 的降解速

率却不如前两者, 分别只有 $9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $7.5 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 出现这一结果的原因可能是海藻酸钠和琼脂是属于天然材料, 本身并没有毒性, 因而在固定化的过程中对细胞的损害较小, 且包埋完成后小球内部的微环境比较温和, 有助于细胞保持良好的代谢活性^[19]. 反观聚丙烯酰胺和聚乙烯醇, 虽然这两种小球的机械强度要好于海藻酸钙和琼脂小球, 但过高的球体紧密度影响了氧气和底物在其内部的传质效果而不利于生物降解, 同时由于 PVA 凝胶小球发生结块以及饱和硼酸的毒性使得该载体内部的菌体活性受到了严重的抑制^[20]. 此外 Cheetham 等^[21]发现在聚丙烯酰胺包埋过程中, 除了聚丙烯酰胺自身的毒性外, 被包埋的细胞还会受到丙烯酰胺单体更剧烈的毒性影响, 以致细胞的完整性和活性会因为聚合过程中产生的热量和自由基的作用下被破坏而失去降解活性. 因此用这两种材料作为固定化载体的降解速率远不如海藻酸钙和琼脂, 综上所述, 选择海藻酸钙固定 *P. oleovorans* DT4 的基本载体.

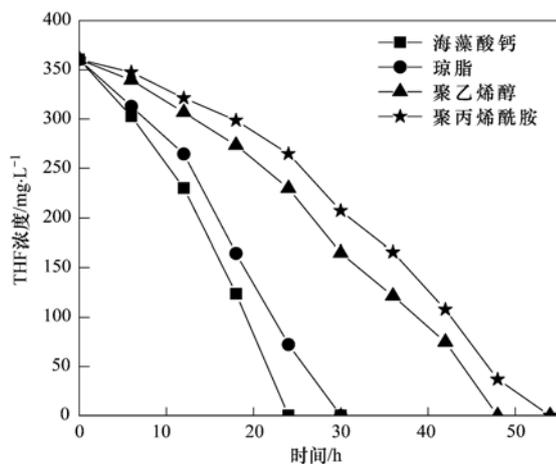


图1 4种不同载体包埋 DT4 菌体对 THF 的降解情况

Fig. 1 Effect of four different immobilization methods on THF removal

2.2 3种不同新型协同固定化载体的构建

虽然海藻酸钙是一种适宜的固定化载体, 但是其有效系数只有相同条件下游离细菌的 50%, 表明传质阻碍始终是限制其降解速率的关键因素. 因此在海藻酸钙基质中分别加入适量的活性炭纤维 (ACF)、粉末活性炭 (PAC) 和硅藻土来构建新型固定化载体, 改善小球内部的传质阻力. 其降解 THF 的情况如图 2 所示: 3 种协同固定化细胞在 THF 的降解速率上均优于海藻酸钙固定化细胞 (CA-cells), 其中海藻酸钙-活性炭纤维固定化细胞 (CA-

ACF-cells) 的降解速率最大达到了 $24.0 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 这是由于相比硅藻土, ACF 有着巨大的表面积以及良好的吸附能力^[22], 使得 CA-ACF 小球在降解 THF 的过程中不只依靠生物降解作用, ACF 的吸附作用同样也为 THF 的去除作出了一定贡献. 同时和 PAC (孔隙宽度 $> 2 \text{ nm}$) 相比, ACF 均一的微孔 (孔隙宽度 $< 2 \text{ nm}$) 直接分布于材质表面^[23], 使得 THF 能够更加容易地进入到固定化小球的内部, 提高底物和氧气在 CA-ACF 小球中的传递, 从而提高其降解效果. 小球机械强度实验也证明, 在海藻酸钠含量为 3%, 3 种添加剂含量均为 1.5% 的条件下, CA-ACF 小球、CA-PAC 小球、CA-硅藻土小球和 CA 小球的破碎率分别为 37%、57%、100% 及 100%. CA-ACF 小球的机械强度要明显高于另外 3 种固定化载体. 因此选择活性炭纤维作为构建协同固定化载体的最适添加剂.

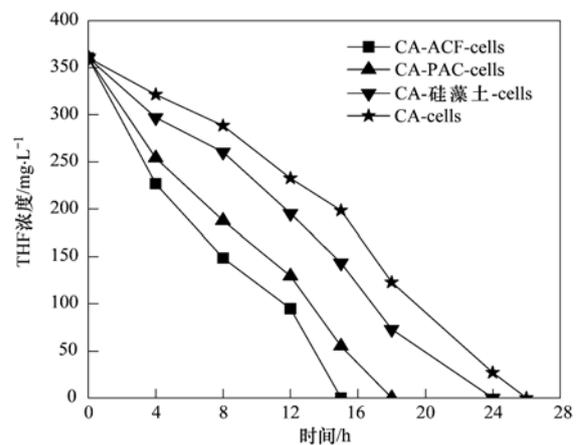


图2 3种不同的协同固定化载体包埋 DT4 菌体对 THF 的降解情况

Fig. 2 THF removal by three different composite immobilized cells

2.3 不同海藻酸钠含量的影响

海藻酸钠含量影响着固定化颗粒的机械强度和传质性能. 由表 1 可知, 在初始 THF 浓度为 $360 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 初期协同固定化细胞的降解速率随海藻酸钠含量的增加而增大. 在海藻酸钠含量为 3% 时, 其降解速率达到最大值 $24.0 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 然而随着海藻酸钠的含量继续增加, 其降解速率却开始急剧地降低, 当海藻酸钠含量达到 5% 时, 其降解速率仅为 $18.64 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 造成这一结果的原因是由于当海藻酸钠处于较低的含量时 (1% ~ 2%), 制备成的固定化小球机械强度不足, 在培养的过程中容易膨胀甚至破碎 (表 1), 从而导致菌体的泄漏而影响降解效果. 但过高的海藻酸钠含量 (5%) 同样不利于固定化小球的降解效率, 尽管小球的机械

强度得到极大的提高,但此时小球变得过于致密而使传递问题迅速显现,影响内部菌体的生物降解能力.因此综合固定化颗粒的降解速率和机械强度,选择3%的海藻酸钠作为构建协同固定化载体的最适宜含量.

表1 不同海藻酸钠含量对协同固定化小球的降解速率和机械强度的影响

海藻酸钠含量/%	降解速率/ $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$	破碎率/%
1	22.25 ± 0.2	100
2	23.36 ± 0.3	100
3	24.01 ± 0.2	37
4	21.78 ± 0.4	20
5	18.64 ± 0.2	0

2.4 不同活性炭纤维含量的影响

考察了 ACF 的含量对协同固定化小球的降解性能的影响,由图3可知,在 ACF 由 0.5% 上升至 1.5% 的过程中,协同固定化细胞的降解速率上升较快,在 ACF 含量为 1.5% 时达到最大值 $24.0 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 而继续增大 ACF 的含量,其降解速率不再增加,甚至有降低的趋势. 表明在 ACF 含量增加的前期,协同固定化小球降解活性增加的原因主要是 ACF 的吸附作用,其含量越高,吸附作用对 THF 的去除贡献越大. 但是到后期(2% ~ 2.5%), 吸附作用对降解速率的贡献变得不占主要. 相反,由于加入了过多的 ACF 而使制备出的小球变得过于致密(图3)而使传质的不利因素慢慢显现^[24]. 值得一提的是,当 ACF 含量达到 2.5% 时,通过前述方法制备出的协同固定化小球出现了拖尾现象,难以呈现球形,使得小球有效接触面积减少. 这也许是导致协同固定化细胞降解速率降低的另一个原因. 因此确定含量 1.5% 为最佳的 ACF 添加量.

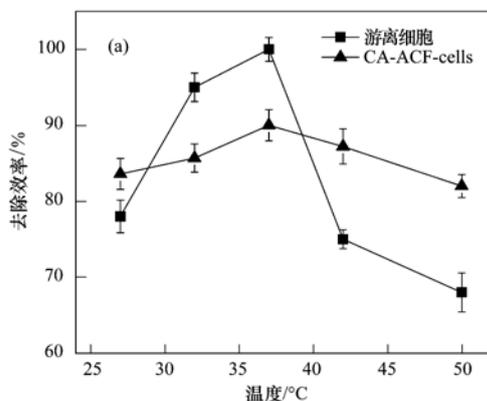


图4 不同温度和初始 pH 条件对协同固定化细胞和游离菌体降解 THF 的影响

Fig. 4 Effect of temperature and initial pH on THF removal by composite immobilized cells and free suspended cells

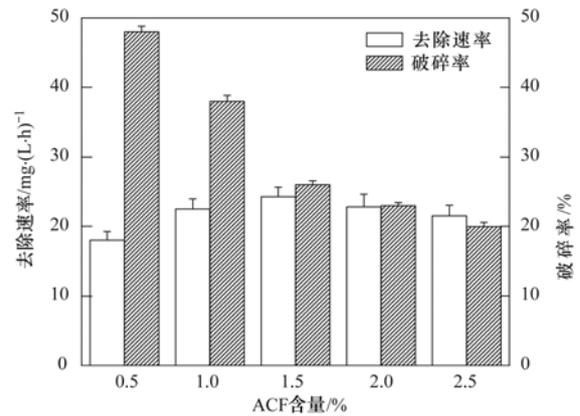
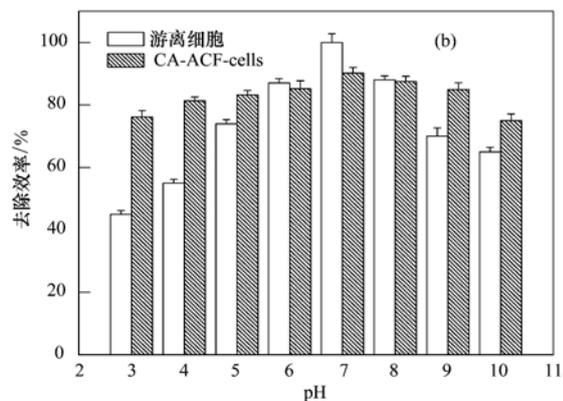


图3 不同 ACF 含量对协同固定化细胞的去除速率和机械强度的影响

Fig. 3 Effect of ACF concentration on removal efficiency and mechanical strength of CA-ACF-cells

2.5 不同环境条件的影响

温度影响: 由图4(a)可以得出,游离细胞和协同固定化细胞在 37°C 时均表现出了各自最高的 THF 降解活性,去除效率分别达到了 100% 和 90%. 然而,随着温度的上升或是下降,游离细胞的降解活性都受到了较大的影响,在温度为 27°C 和 50°C 时,游离细胞的降解效果分别只有 78% 和 68%,说明游离 DT4 细胞对温度的波动比较敏感. 而协同固定化细胞在整个环境温度变化的过程中降解效率均维持在 80% 以上,体现出了相对稳定的降解活性. 同样的现象在图4(b)中被再次观察到,游离细胞和协同固定化细胞在 pH 为 7.0 时两者的降解效率均达到最大. 但在整个 pH 变化的过程中,游离 DT4 细胞的降解效率随 pH 的变化波动较大,尤其是在 pH 小于 5 后其降解效率急剧下降,到 pH 为 3 时只剩下 43%. 而协同固定化细胞在相同条件下其降解效率均维持在 80% 左右. 造成上述现象的原因是由于经细胞的固定化后,载体对细胞起到了



一定的保护作用,从而增加了细胞的热稳定性.同时固定化载体为细胞提供了一个稳定的独立微环境,酶的活性位点有了更宽的适应范围,使得固定化细胞对外界的 pH 变化不敏感^[25].因此与游离细胞相比,协同固定化细胞更能适应外界环境的变化,体现其广泛的应用性.

2.6 协同固定化细胞的重复利用

固定化菌体的突出特点之一就是能够重复利用,因此考察了协同固定化细胞的重复利用能力.结果如图 5 所示,尽管 MSM 是培养 DT4 菌体较适宜的无机盐培养基,但当适量的 CA-ACF-cells 在 MSM 培养基中连续培养时,THF 的降解只能维持 5 批,随后固定化颗粒就开始膨胀和破裂,其内部的菌体出现了渗漏,以至在生理盐水的冲洗过程中造成菌体大量流失.使得其在第 6 批次 THF 的降解效果急剧下降.这一结果的主要原因是 MSM 中存在的磷酸根离子及特定的阳离子如 K^+ 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 与固定化颗粒的 Ca^{2+} 发生螯合作用,从而使固定化小球变得容易破碎^[14].因此随后采用改进的 PNS 培养基作为协同固定化颗粒连续降解的培养基.结果表明,在 PNS 培养基中其降解速率基本没有退化,即使连续降解 80 批次后,协同固定化细胞的降解效率仍维持在 80% 左右,而且该过程固定化颗粒保持完整,并未发现破损粘连现象.这说明新型构建的协同固定化细胞要实现多批次连续高效降解 THF 前提是需要一个合适的反应体系,而改进的 PNS 培养基符合这一要求.上述结果为新型固定化载体的工程应用提供了一定指导.

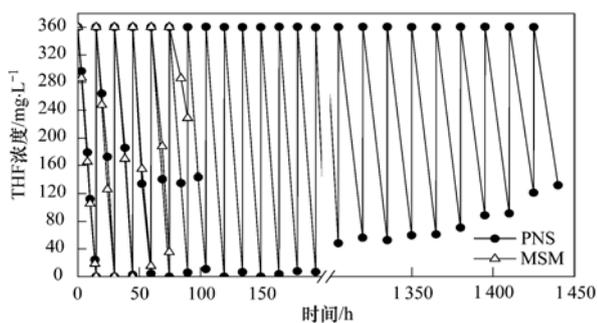


图 5 固定化细胞在不同培养基中的重复批次降解情况

Fig. 5 Repetitive batch degradation of THF in MSM and PNS

3 结论

(1) 以四氢呋喃降解能力为标准考察了海藻酸钙、琼脂、聚乙烯醇和聚丙烯酰胺这 4 种常见的固定化载体,确定了以海藻酸钙为最适宜包埋 *P. oleovorans* DT4 的固定化基质.

(2) 在海藻酸钙固定化载体的基础上添加了 3 种吸附剂:活性炭纤维、粉末活性炭和硅藻土来构成新型复合的固定化载体.优选海藻酸钙-活性炭纤维组合为最适固定化体系,同时确立了两者的最佳含量:海藻酸钠 3%,活性炭纤维 1.5%.该组成体系使得协同固定化细胞对 THF 的最大降解速率达到 $24.0 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,且机械强度显著增强.

(3) 通过不同环境条件下协同固定化细胞和游离细胞之间的降解效果对比,表明协同固定化小球在不同的环境条件下能保持稳定的降解速率,并对其重复利用能力进行考察,结果显示在适宜的反应体系下协同固定化小球的重复利用批次达到 80 次以上,同时该阶段 THF 降解效率保持 80% 左右,体现了构建的新型固定化体系有良好的可行性.

参考文献:

- [1] Hermida S A S, Possari E P M, Souza D B, et al. 2-Deoxyguanosine, 2-deoxycytidine, and 2'-deoxyadenosine adducts resulting from the reaction of tetrahydrofuran with DNA bases[J]. Chemical Research in Toxicology, 2006, **19**(7): 927-936.
- [2] Yao Y L, Guan J, Tang P, et al. Assessment of toxicity of tetrahydrofuran on the microbial community in activated sludge[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(14): 5213-5221.
- [3] National Toxicology Program. NTP toxicology and carcinogenesis studies of tetrahydrofuran (CAS No. 109-99-9) in F344/N rats and B6C3F1 mice (inhalation studies)[J]. National Toxicology Program Technical Report Series, 1998, **475**: 1-244.
- [4] 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.
- [5] Kohlweyer U, Thieme B, Schröder T, et al. Tetrahydrofuran degradation by a newly isolated culture of *Pseudonocardia* sp. strain K1[J]. FEMS Microbiology Letters, 2000, **186**(2): 301-306.
- [6] Daye K J, Groff J C, Kirpekar A C, et al. High efficiency degradation of tetrahydrofuran (THF) using a membrane bioreactor: identification of THF-degrading cultures of *Pseudonocardia* sp. strain M1 and *Rhodococcus ruber* isolate M2[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2003, **30**(12): 705-714.
- [7] Yao Y L, Lv Z M, Jiao H P. Isolation, identification and characterization of a novel *Rhodococcus* sp. strain in biodegradation of tetrahydrofuran and its medium optimization using sequential statistics-based experimental designs[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(11): 2762-2769.
- [8] Chen J M, Zhou Y Y, Chen D Z, et al. A newly isolated strain capable of effectively degrading tetrahydrofuran and its performance in a continuous flow system[J]. Bioresource

- Technology, 2010, **101**(16): 6461-6167.
- [9] Mohammad B T, Bustard M T. Fed batch bioconversion of 2-propanol by a solvent tolerant strain of *Alcaligenes faecalis* entrapped in Ca-alginate gel [J]. Journal of Industrial Microbiology Biotechnology, 2008, **35**(7): 677-684.
- [10] Akhtar K, Khalid A M, Akhtar M W, *et al.* Removal and recovery of uranium from aqueous solutions by Ca-alginate immobilized *Trichoderma harzianum* [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(20): 4551-4558.
- [11] Ha J, Engler C R, Wild J R. Biodegradation of coumaphos, chlorferon, and diethylthiophosphate using bacteria immobilized in Ca-alginate gel beads [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(3): 1138-1142.
- [12] Aneez Ahamad P Y, Mohanmad Kunhi A A. Enhanced degradation of phenol by *Pseudomonas* sp. CP4 entrapped in agar and calcium alginate beads in batch and continuous processes [J]. Biodegradation, 2011, **22**(2): 253-256.
- [13] Sarma S J, Pakshirajan K. Surfactant aided biodegradation of pyrene using immobilized cells of *Mycobacterium frederiksbergense* [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2011, **65**(1): 73-77.
- [14] Cheng Z W, Chen J M, Chen D Z, *et al.* Biodegradation of methyl *Tert*-butyl ether in a bioreactor using immobilized *Methylibium petroleiphilum* PM₁ cells [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2011, **214**(1-4): 59-72.
- [15] 钱林波, 元妙新, 陈宝梁. 固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展 [J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1767-1776.
- [16] Chen D Z, Chen J M, Zhong W H, *et al.* Degradation of methyl *tert*-butyl ether by gel immobilized *Methylibium petroleiphilum* PM₁ [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(11): 4702-4708.
- [17] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the folin phenol reagent [J]. Journal of Biological Chemistry, 1951, **193**(1): 265-275.
- [18] 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.
- [19] Patil N K, Veeranagouda Y, Vijaykumar M H, *et al.* Enhanced and potential degradation of *o*-phthalate by *Bacillus* sp. immobilized cells in alginate and polyurethane [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2006, **57**(2): 82-87.
- [20] Lozinsky V I, Plieva F M. Poly (vinyl alcohol) cryogels employed as matrices for cell immobilization. 3. Overview of recent research and developments [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1998, **23**(3-4): 227-242.
- [21] Cheetham P S J, Blunt K W, Bucke C. Physical studies on cell immobilization using calcium alginate gels [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1979, **21**(12): 2155-2168.
- [22] Cassidy M B, Lee H, Trevors J T. Environmental applications of immobilized microbial cells; a review [J]. Journal of Industrial Microbiology, 1996, **16**(2): 79-101.
- [23] Nabais J M, Carrott P J M. Chemical characterization of activated carbon fibers and activated carbons [J]. Journal of Chemical Education, 2006, **83**(3): 436-438.
- [24] Devesa-Rey R, Bustos G, Cruz J M, *et al.* Optimisation of entrapped activated carbon conditions to remove coloured compounds from winery wastewaters [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(11): 6437-6442.
- [25] Birnbaum S, Pendleton R, Larsson P O, *et al.* Covalent stabilization of alginate gel for the entrapment of living whole cells [J]. Biotechnology Letters, 1981, **3**(8): 393-400.

CONTENTS

Characteristics of Haze and Its Impact Factors in Four Megacities in China During 2006-2009	DAI Yong-li, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2925)
Characteristics of VOCs and Their Photochemical Reactivity in Autumn in Nanjing Northern Suburb	LI Yong-yu, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2933)
On-Line Measurement of Water-Soluble Composition of Particulate Matter in Beijing	CHENG Meng-tian, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2943)
Design and Evaluation of an Aerosol Nanoparticle Generation System	MAI Hua-jun, JIANG Jing-kun, HE Zheng-xu, <i>et al.</i> (2950)
Aerosol Size Distribution of Organic Carbon and Elemental Carbon on the Top of Coke Oven and in the Plant Area	LIU Xiao-feng, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (2955)
Effects of Diurnal Warming on Soil N ₂ O Emission in Soybean Field	HU Zheng-hua, ZHOU Ying-ping, CUI Hai-ling, <i>et al.</i> (2961)
N ₂ O Flux in Winter and Its Affecting Factors Under Different Land Use Patterns	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2968)
Prediction of Methane Emission of Paddy Field Based on the Support Vector Regression Model	CHEN Qiang, JIANG Wei-guo, CHEN Xi, <i>et al.</i> (2975)
Distributional Characteristics of Nutrients in the Sea-surface Microlayer and Subsurface Water of the Bohai and Yellow Sea in Summer	WANG Wen-tao, YANG Gui-peng, YU Juan, <i>et al.</i> (2983)
Effect of Nitrogen and Phosphorus Concentrations on the Adsorption of BDE28 and BDE47 by <i>Prorocentrum donghaiense</i> Dominant Population WANG Fang, GE Wei, CHAI Chao, <i>et al.</i> (2992)
Hyperspectral Remote Sensing of Chlorophyll a Concentrations in the Lake Taihu, Based on Water Optical Classification	SUN De-yong, ZHOU Xiao-yu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (3002)
Bacterioplankton Index of Biotic Integrity (BP-IBI): An Approach for Assessing River Ecosystem Health in Dianchi Watershed	HUANG Yi, SHU Zhong-ya (3010)
Estimation of Urban Non-Point Source Pollution Loading and Its Factor Analysis in the Pearl River Delta	LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, <i>et al.</i> (3019)
Transported Fluxes of the Riverine Carbon and Seasonal Variation in Pearl River Basin	ZHANG Lian-kai, QIN Xiao-qun, YANG Hui, <i>et al.</i> (3025)
Characteristics of Nutrient Loss of Lanlingxi Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, <i>et al.</i> (3035)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Release Under Inundation from Typical Grass Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area TAN Qiu-xia, ZHU Bo, HUA Ke-ke (3043)
Research on the Influence of Mixing Layer Depth on Algal Growth	CHEN Yang, YANG Zheng-jian, HUANG Yu-ling, <i>et al.</i> (3049)
Denitrification Study of <i>Elodea nuttallii</i> -Nitrogen Cycling Bacteria Restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake	ZHAO Lin, LI Zheng-kui, ZHOU Tao, <i>et al.</i> (3057)
Influence of Combined Ecological Floating Bed on Nitrogen and Phosphorus Between Overlying Water and Sediment	ZHENG Li-guo, YANG Ren-bin, WANG Hai-ping, <i>et al.</i> (3064)
Effects of Biochar Covering on the Release of Pollutants from Sediment	LI Yang, LI Feng-min, ZHANG Xiu-wen, <i>et al.</i> (3071)
Temporal-spatial Difference of Ecotoxicity and Heavy Metals Pollution in Shima Catchment, Dongguan	GAO Lei, CHEN Jian-yao, KE Zhi-ting, <i>et al.</i> (3079)
Evolution and Pollution of Heavy Metals in Core Sediments from Yamenqi Lake in Lianhuan Lake, China	XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying, GUAN Yung, <i>et al.</i> (3088)
Effect of Constructed Wetland on the Purification of Industrial Zone Rainfall Runoff Contaminated with Phenanthrene	JING Dan-dan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3095)
Removal and Accumulation of the Tetracycline Resistance Gene in Vertical Flow Constructed Wetland	ZHENG Jia-yu, LIU Lin, GAO Da-wen, <i>et al.</i> (3102)
Method for Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems with Nodal Demand Uncertainties	LIU Shu-ming, WU Xue, OUYANG Le-yan (3108)
Formation Process of Nitrogenous Disinfection Byproduct Trichloronitromethane in Drinking Water and Its Influencing Factors	DING Chun-sheng, ZOU Bang-wen, MIAO Jia, <i>et al.</i> (3113)
Removal of Estrogens in Laccase Catalyzed Oxidative Processes	XIA Qing, XIE Wei-ping, LIU Guo-qiang, <i>et al.</i> (3119)
Study on Electrochemical Degradation of Cefazidime by Carbon Nanotubes Electrode	ZHU Hong, HU Xiang, LI Jun-feng (3125)
Photochemical Reaction Types of the Azole Fungicide Fluconazole Under UV-vis Irradiation	GE Lin-ke, LI Kai, YANG Kai, <i>et al.</i> (3132)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Diuron by TiO ₂ and Simulated Sunlight	YANG Hai, ZENG Jian, LI Yuan, <i>et al.</i> (3137)
Adsorption of Congo Red from Aqueous Solution on Hydroxyapatite	ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei (3143)
Ethanol-Induced Influence on the Structure and Arsenate Adsorption of Resin-based Nano-hydrated Ferric Oxide	WAN Qi, LI Xu-chun, PAN Bing-cai (3151)
Chlorination Characteristic and Disinfection By-product Formation Potential of Dissolved Organic Nitrogen Compounds in Municipal Wastewater	LIU Bing, YU Xin, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (3156)
Start-up and Maintenance Method for Short-Cut Advanced Nitrogen Removal Process in a Pilot-Scale Reactor at Low Temperature	GU Sheng-bo, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen (3164)
Study on the Start-Up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process in Biological Activated Carbon Reactor	LAI Wei-yi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing (3171)
Excretion of Manure-Borne Steroid Hormones and Their Potential Risk in the Three Northeast Provinces of China	LIU Shu-fang, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, <i>et al.</i> (3180)
Spatial Distribution and Composition of Perfluorinated Compounds in Soils Around the Huaihe River	MENG Jing, WANG Tie-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (3188)
Fluorine Speciation and Its Distribution Characteristics in Selected Agricultural Soils of North China Plain	YI Chun-yao, WANG Bing-guo, JIN Meng-gui (3195)
Effects of Long-Term Manure and Crop Residues Incorporation on Yield and Phosphorus Saturation in a Paddy Soil	YAN Xiao, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (3205)
Influence of Organochlorine Pesticides in Wastewater on the Soil Along the Channel	XU Liang, ZHANG Cai-xiang, LIU Min, <i>et al.</i> (3211)
Elution of Endosulfan from Contaminated Soil by Surfactants and Their Combination	XIONG Bai-lian, ZHENG Guo-can, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Different Aspects on Soil Microbial Biomass and Dissolved Organic Carbon of the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, JIANG Yue-li, YAN Hao, <i>et al.</i> (3223)
Effects of Nitrogen Addition on Red Soil Microbes in the <i>Cinnamomum camphora</i> Plantation	YU Pei-yi, ZHU Fan, SU Shao-feng, <i>et al.</i> (3231)
Concentration, Profile Distribution and Source Identification of PCDD/Fs in Environmental Medium Around a HSWI	HUANG Wen, ZHANG Su-kun, DU Guo-yong, <i>et al.</i> (3238)
Assessment of Bioaccessibility of PAHs in Microbial Degradation Process Using Solid Phase Micro Extraction and Solid Phase Extraction GUO Mei-xia, GONG Zong-qiang, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3244)
Biodegradation of Tetrahydrofuran by Combined Immobilized of <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4	SHAO Qian, YE Jie-xu, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3251)
Analysis on Microbial Community in Biofilm Coating onto Solid Carbon Source Using the PCR-DGGE Technique	XU Ying, QIU Tian-lei, HAN Mei-lin, <i>et al.</i> (3257)
Effect of Temperature on Activity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> and Formation of Biogenic Secondary Iron Minerals	SONG Yong-wei, ZHAO Bo-wen, HUO Min-bo, <i>et al.</i> (3264)
Differences of Selenium Uptake Pattern of Pakchoi and the Possible Mechanism When Amended with Selenate and Selenite	GUO Lu, MAN Nan, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (3272)
Effect of Pretreatment on Storage and Biogas Production of Baling Wheat Straw	MA Hui-juan, CHEN Guang-yin, DU Jing, <i>et al.</i> (3280)
Toxicity of Nitrate-N to Freshwater Aquatic Life and Its Water Quality Criteria	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3286)
Analysis Performance of Biological Toxicity Testing MTOXPlate Using Microplate	LIN Yi-yun, ZHANG Guo-xia, HE Li-ping, <i>et al.</i> (3294)
Study of Combined Effects of DES and EV on the Proliferation of MCF-7 Cells by Two Experimental Designs	LIU Qian, LEI Bing-li, AN Jing, <i>et al.</i> (3303)
Status and Influencing Factors of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Coastal Areas in China	LIU Min-xia, YANG Yu-yi, LI Qing-xiao, <i>et al.</i> (3309)
Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Effluent of Sewage Treatment Plants	ZHENG Shao-kui, LI Xiao-feng (3316)
Research Progress on Biochar Carbon Sequestration Technology	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (3327)
Countermeasures for Strict Water Quality Management of Drinking Water Sources: Some Thoughts and Suggestions on Implementing Strict Water Resources Management	FU Guo-wei (3334)

《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8月15日 34卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 8 Aug. 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