

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

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

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

固定化 *Lysinibacillus cresolivorans* 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解

李婷¹, 任源^{1,2*}, 韦朝海^{1,2}

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006)

摘要: 针对生物降解过程容易受到外界不利环境影响及低浓度下动力学效率不高的问题, 制备了具有吸附功能的微生物固定化载体并研究了对间甲酚的降解。在聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 固定化载体中加入海藻酸钠 (sodium alginate, SA)、聚羟基丁酸酯 (poly-3-hydroxybutyrate, PHB) 和粉末活性炭 (activated carbon, AC), 采用循环冷冻-解冻结合硼酸法制备了具吸附功能的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体, 并用其包埋固定化 1 株间甲酚优势降解菌 *Lysinibacillus cresolivorans*, 考察了载体微观结构、稳定性及扩散性对固定化微生物降解间甲酚的影响。结果表明, PVA-SA-PHB-AC 载体比表面积和平均孔径分别为 15.30 m²·g⁻¹ 和 33.68 nm, 对间甲酚的吸附容量和扩散系数分别为 3.86 mg·g⁻¹ 和 5.62 × 10⁻⁸ m²·min⁻¹, 可稳定使用 60 d 以上; 固定化 *L. cresolivorans* 的间甲酚去除为吸附-降解的耦合, 去除速率由载体传质速率与微生物降解速率共同决定, 间甲酚浓度低于 350 mg·L⁻¹ 时, 载体传质速率小于微生物降解速率, 间甲酚去除速率由传质速率决定, 浓度高于 380 mg·L⁻¹ 时相反; 添加了吸附剂的载体扩散系数会减小, 但能耐受更高的底物浓度, 且在更宽的浓度范围可以实现高效的降解作用。间甲酚的降解规律及其差异性显示出经吸附功能改性的载体因传质作用的加强而实现反应动力学的提高, 并且存在一个合理的浓度区间。

关键词: 聚乙烯醇; 聚羟基丁酸酯; 活性炭; 固定化载体; 生物降解

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2899-07

Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and *m*-Cresol Biodegradation by Immobilized *Lysinibacillus cresolivorans*

LI Ting¹, REN Yuan^{1,2}, WEI Chao-hai^{1,2}

(1. College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. The Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Due to the effects of outer environment and concentration limit on the biodegradation of *m*-cresol, a carrier with adsorption ability was synthesized. A PVA-SA-PHB-AC composite membrane was prepared by adding SA, PHB and AC into PVA immobilization carrier using the combination of freezing-thawing and boric acid methods. A highly-effective *m*-cresol-degrading strain *Lysinibacillus cresolivorans* was entrapped in it and the effects of structural properties such as micro-structure, stability and diffusion coefficient on *m*-cresol biodegradation were investigated. The results showed that PVA-SA-PHB-AC composite membrane had uniform pore opening, of which the average pore size, specific surface area, *m*-cresol adsorption capacity and diffusion coefficient was 33.68 nm, 15.30 m²·g⁻¹, 3.86 mg·g⁻¹ and 5.62 × 10⁻⁸ m²·min⁻¹, respectively. It could be reused for more than two months. *m*-Cresol removal by immobilized *L. cresolivorans* was the coupling of adsorption and biodegradation, and the removal rate was jointly determined by mass-transfer rate and biodegradation rate. When the initial concentration of *m*-cresol was lower than 350 mg·L⁻¹, the mass-transfer rate of PVA-SA-PHB-AC was smaller than the biodegradation rate. The *m*-cresol removal rate depended on the mass-transfer rate, when the concentration was higher than 380 mg·L⁻¹, it was determined by the biodegradation rate. The addition of adsorbent could decrease the mass transfer coefficient in the carrier, while the higher concentration of substrate could be tolerated and the efficient biodegradation could be achieved in a wider range of concentrations. The biodegradation of *m*-cresol by immobilized microorganism showed that the modified carrier increased the reaction kinetics in a range of initial concentrations.

Key words: polyvinyl alcohol (PVA); poly-3-hydroxybutyrate (PHB); activated carbon (AC); immobilization carrier; biodegradation

中低浓度含酚类污染物废水的处理方法以生物法为主, 已经报道的能以酚类物质为唯一碳源和能源的高效降解菌有乙酸钙不动杆菌 (*Acinetobacter calcoaceticus*)、假单胞菌 (*Pseudomonas* sp.)、根瘤菌 (*Rhizobia*)、藻类 (*Ochromonas danica*)、真养产碱菌 (*Alcaligenes eutrophus*)、反硝化菌^[1-4]。尽管如此, 实际废水中往往含有多元酚或杂多酚, 其降解速

度远远慢于苯酚, 间甲酚是其中一种。本课题组分离得到 1 株间甲酚的高效降解菌 *Lysinibacillus*

收稿日期: 2012-11-30; 修订日期: 2013-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20977035, 51178190); 国家自然科学基金重点项目 (21037001)

作者简介: 李婷 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: liting198801@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ceyren@scut.edu.cn

cresolivorans^[5,6],在纯培养外加葡萄糖条件下能降解 1 000 mg·L⁻¹浓度的间甲酚.针对成分非常复杂的工业废水,实验室驯化分离的降解菌很可能因不适应环境而使活性受到抑制,或与系统中其他微生物、土著微生物竞争处于劣势,在应用中受到很大限制.将纯培养优势菌单独或者混合包埋在适当的载体中,可能是解决上述应用问题的一种有效方法.

包埋固定化是微生物固定化技术中的一种,用物理的方法将细胞包裹在凝胶的网络结构中或者包裹在半透性聚合薄膜内,氧气、小分子的底物和产物可以自由出入,而微生物却不会漏出.与游离态微生物相比,固定化微生物具有微生物密度高、细胞不易受有毒基质影响、易于固液分离、停滞期短、降解速率高、微生物流失少等优点. PVA 表现出化学稳定性好、抗微生物分解能力强、对微生物无毒、价格低廉、易改性的特点而成为广泛研究的有机包埋载体材料之一,目前已有一些 PVA 包埋微生物降解有机物的研究,如 PVA 包埋 *Pseudomonas putida* 降解苯酚^[7,8]、PVA 固定化微生物处理地下水中的氯苯^[9]、PVA 固定化茄镰孢菌降解菲^[10]等,但缺乏从载体结构、孔径及载体扩散速率等方面探索固定化微生物影响降解速率的报道.

实际废水中的有机物浓度范围较广,常量浓度下生物降解速率较高,当有机物浓度为微量甚至痕量时,微生物与底物的接触几率小导致反应动力学不可行,对此,笔者期望制备一种对有机物有一定的吸附能力,并有合适的基质扩散力的载体.本研究采用冷冻-解冻结合硼酸法制备 PVA-SA-PHB-AC 复合载体,以间甲酚高效降解菌 *L. cresolivorans* 为例,考察载体微观结构、稳定性、吸附性和扩散速率对固定化 *L. cresolivorans* 降解间甲酚速率的影响,以为纯种微生物处理含多元酚废水或修复水体污染提供新技术.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 试剂

聚乙烯醇,聚合度 2000,醇解度 99%,上海阿拉丁试剂有限公司;粉末活性炭,比表面积 882.67 m²·g⁻¹、孔径 3.83 nm、孔容 0.49 cm³·g⁻¹,太原新华活性炭有限公司;聚羟基丁酸酯,天津北方食品有限公司,比表面积 1.36 m²·g⁻¹;其他所用试剂均为国产分析纯.

1.1.2 仪器设备

UV-2800AH 型紫外可见分光光度计、日本岛津 LC-20AT 高效液相色谱、THZ-D 台式恒温振荡器、DF-II 集热式恒温磁力加热搅拌器、扫描电镜(Carl Zeiss EVO LS10,德国)、全自动物理吸附仪(ASAP-2020N Micromeritics,美国)等.

1.1.3 菌源及培养基

菌种来源:间甲酚优势降解菌 *L. cresolivorans* 从广东韶关钢铁集团焦化厂废水处理站好氧污泥中驯化、筛选、分离获得.培养基:(NH₄)₂SO₄ 0.8 g·L⁻¹, K₂HPO₄ 1.5 g·L⁻¹, KH₂PO₄ 1.0 g·L⁻¹, MgCl₂·2H₂O 0.2 g·L⁻¹, NaCl 0.1 g·L⁻¹, FeCl₃·6H₂O 0.02 g·L⁻¹, CaCl₂ 0.01 g·L⁻¹, MnSO₄·H₂O 0.03 g·L⁻¹, pH 值 7.0~7.2, 121℃ 高压蒸汽灭菌 20 min.

1.2 实验方法

1.2.1 PVA 固定化微生物膜的制备

制备流程如图 1 所示,PVA-SA-PHB-AC 固定化微生物膜为 2.5 mm × 2.5 mm × 2.5 mm 立方体,最终含 10% PVA、2% SA、2% 吸附剂和一定量微生物.

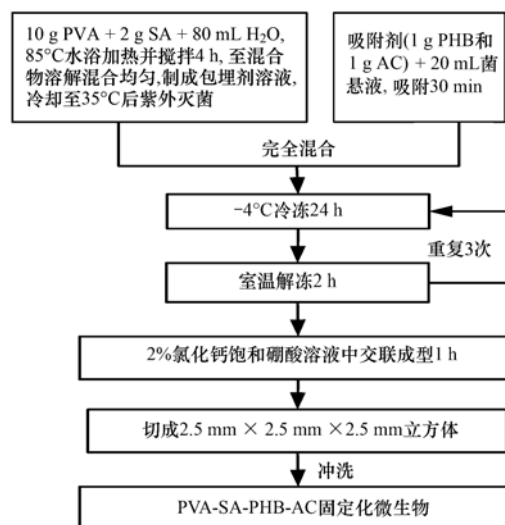


图 1 PVA 固定化微生物制备流程

Fig. 1 Flowchart of PVA membrane preparation

1.2.2 菌体浓度的测定

菌体浓度的测定采用光密度法,在 600 nm 波长下测定菌悬液的吸光值(D_{600}).

1.2.3 *L. cresolivorans* 的间甲酚降解实验

取 10 g 固定化 *L. cresolivorans*、与之相等菌量的游离 *L. cresolivorans* 和未包埋菌种的空白载体,分别投加到 100 mL 一定浓度间甲酚培养基中,于 30℃、150 r·min⁻¹ 条件下振荡培养,定时取样分析以上 3 个实验间甲酚的去除.

1.2.4 PVA 膜扩散系数的测定

图 2 是 PVA 水凝胶膜扩散系数的测定装置, 1、2 室分别为间甲酚水溶液和蒸馏水, 30℃ 恒温, 不断搅拌消除外扩散的影响, 定时取样分析 2 室中间甲酚浓度, 计算通过 PVA 膜从 1 室扩散到 2 室的总间甲酚含量 Q , Q 与时间 t 呈线性关系^[11]:

$$Q = A \times D_e \times K_p \times L^{-1} \times c_0 \times \left(t - \frac{L^2}{6D_e} \right) \quad (1)$$

直线斜率为:

$$\left(\frac{dQ}{dt} \right)_{ss} = A \times D_e \times K_p \times L^{-1} \times c_0 \quad (2)$$

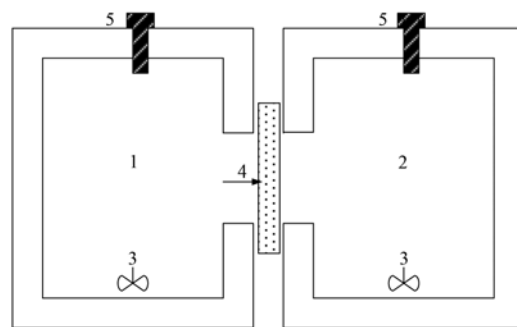
所以有:

$$D_e = A^{-1} \times K_p^{-1} \times L \times c_0^{-1} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_{ss} \quad (3)$$

式中, Q 为时间 t 内透过 PVA 膜进入 2 室的总间甲酚量; A 和 L 分别为膜的有效表面积和平均厚度; D_e 为扩散系数, K_p 为溶质的分配系数, 近似为 1; c_0 为 1 室中间甲酚初始浓度。

1.3 分析方法

间甲酚采用高效液相色谱 (HPLC) 法测定, HPLC 操作条件: Agilent C18 色谱柱, 流动相为 90:10 (体积比) 的甲醇: 超纯水体系, 流速 1.0 mL·min⁻¹, 柱温 40℃, UV 检测器波长 270 nm。



1、2. 室有效容积为 113 mL; 3. 磁力搅拌; 4. PVA 水凝胶膜, 有效膜面积 28.27 cm², 厚 (2.5 ± 0.3) mm; 5. 橡胶塞

图 2 扩散系数测定装置示意

Fig. 2 Sketch of diffusion vessel

2 结果与讨论

2.1 PVA-SA-PHB-AC 载体的形态结构

单体与交联剂用量决定了所制备载体的形态结构, 表面基团和空间尺寸与其性能有密切关系. PVA-SA-PHB-AC 水凝胶膜密度为 1.038 5 g·cm⁻³, 适合用作水处理的悬浮载体. 载体内层是以 PVA 链的微晶作为交联点形成的空间网络结构^[12], 具有高弹性和物质尺寸稳定性, 表面为 PVA 与硼酸通过氢键结合和离子作用力发生交联反应形成的不溶性凝胶聚合物, 其机制如图 3 所示。

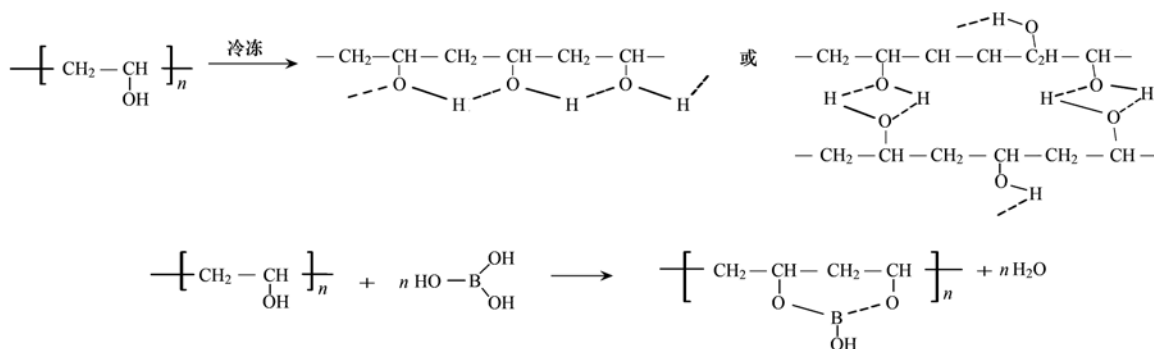


图 3 PVA-SA-PHB-AC 水凝胶聚合物合成原理

Fig. 3 Synthesis mechanism of PVA-SA-PHB-AC composite membrane

图 4 和图 5 分别为载体表面和内部扫描电镜及全孔分布图, 从中可见, PVA-SA-PHB-AC 载体空隙发达、孔径分布均匀, 表 1 的膜性能表征显示 PVA-SA-PHB-AC 载体比表面积和平均孔径分别为 15.30 m²·g⁻¹ 和 33.68 nm. 由于目标污染物、代谢产物分子直径数量级为 10⁻¹⁰ m, 细菌直径为 0.5 ~ 5.0 μm, 因此, 污染物和代谢产物可自由通过载体孔道, 而被固定的微生物不会漏出, 也不能进入载体介孔. 微生物分泌的酶和辅酶能够渗入介孔, 降解被载体

吸附的目标污染物, 载体的形态结构参数显示所制备的水凝胶聚合物, 在其内部形成载体吸附与微生物降解的协同作用。

2.2 固定化 *L. cresolivorans* 的间甲酚降解特性

2.2.1 游离态 *L. cresolivorans* 的间甲酚降解特性

为比较微生物固定化后的降解能力变化, 首先进行了游离态细菌的降解实验. 图 6 是接种量 10% 的游离 *L. cresolivorans* 降解间甲酚曲线, 间甲酚初始浓度为 47.6、149.1、189.3、286.3 和 360.7

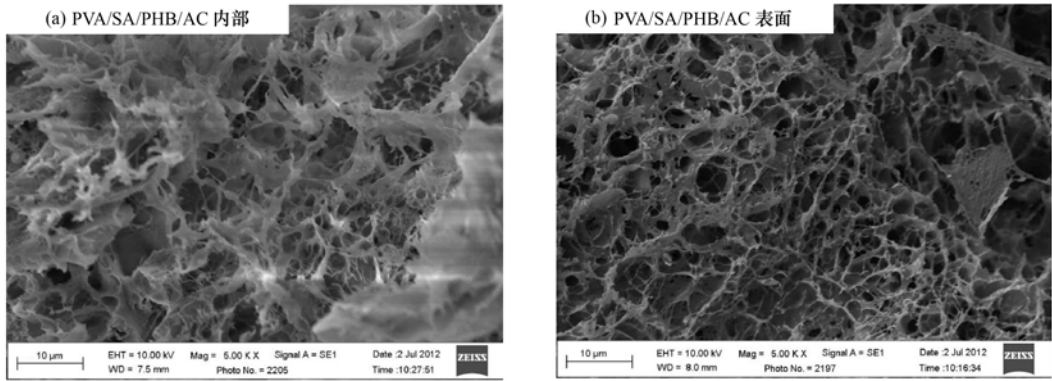


图4 PVA-SA-PHB-AC 的扫描电镜(放大5 000 倍)

Fig. 4 SEM images of PVA-SA-PHB-AC membranes at a magnification of 5 000 ×

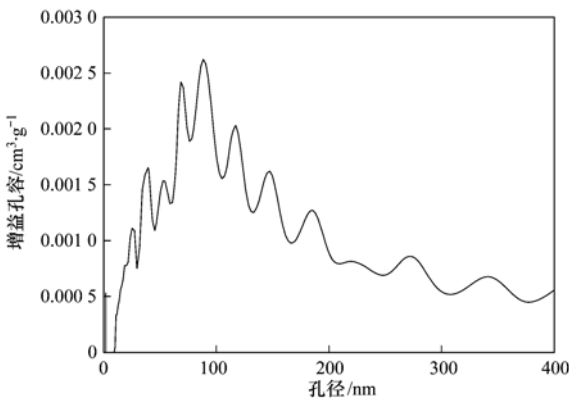


图5 PVA-SA-PHB-AC 的全孔分布

Fig. 5 Pore distribution of PVA-SA-PHB-AC membrane

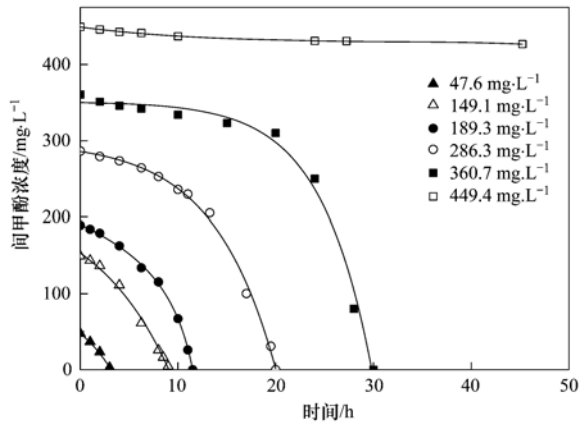


图6 *L. cresolivorans* 的间甲酚降解曲线

Fig. 6 The *m*-cresol biodegradation by *L. cresolivorans*

表1 PVA-SA-PHB-AC 膜的性能表征结果

Table 1 Properties of PVA-SA-PHB-AC membranes

性能参数	数值
BET 表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	15.299 9
Langmuir 表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	20.873 4
微孔面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	8.032 9
外表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	7.267 0
BJH 脱附累积微孔容/ $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	0.058 269
BJH 吸附平均孔径/nm	47.066 6
BJH 脱附平均孔径/nm	33.678 9

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,延滞期分别为0、4、6、12和21 h, 449.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时45 h 仍无降解,平均降解速率分别为9.02、16.04、18.05、18.70、12.33和0.50 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,说明间甲酚浓度过高或过低都会影响 *L. cresolivorans* 的降解速率,特别是浓度高时会抑制其活性. 不考虑延滞期, *L. cresolivorans* 的间甲酚降解过程遵循 Monod 方程,符合零级反应动力学^[5,6],初始浓度为220 ~ 290 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,平均降解速率最大约为18.7 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,由于基质的抑制作用, *L. cresolivorans* 不能降解浓度高于450 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的间甲酚.

2.2.2 固定化 *L. cresolivorans* 的细胞活性

采用在50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间甲酚培养基中培养4 h 的 *L. cresolivorans* (对数期至平衡期)作为PVA-SA-PHB-AC包埋固定化的菌悬液. PVA-SA-PHB-AC载体包埋过程所采用的冷冻-解冻以及与硼酸交联可能会对细胞活性造成一定的损害^[13~15],其中因冷冻造成的活性抑制可通过活化恢复. 图7为固定化 *L. cresolivorans* 的活性恢复效果,根据载体中包埋的细菌量,假设其活性和被固定化前一样,计算间甲酚降解速率,作为固定化 *L. cresolivorans* 活性恢复的判断标准. 第1 d去除速率较快是因为载体的吸附作用,11 d后速率达到稳定约为游离菌降解速率的50%. 结果显示,有些细胞在载体制备过程中活性受损无法恢复,微生物被包埋后因空间限制增殖速度减慢或PVA-SA-PHB-AC传质速率小于游离 *L. cresolivorans* 的间甲酚降解速率.

2.2.3 *L. cresolivorans* 包埋量的确定

为考察细菌包埋量对间甲酚降解速率的影响,分别将20、50、100、150和200 mL菌悬液离心

($5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 20 min) 加入到 100 mL 包埋剂中, 制成不同含菌量的固定化膜, 活化后进行间甲酚降解实验, 如图 8 所示. 随着包埋量的增加, 固定化 *L. cresolivorans* 对间甲酚的去除率增大, 随着时间的延长, 包埋 100 、 150 、 200 mL 菌悬液的固定化

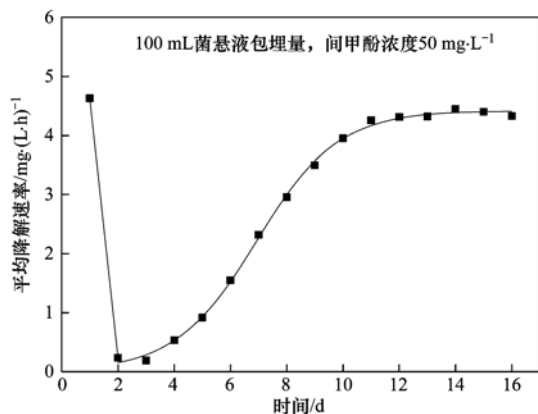


图 7 固定化 *L. cresolivorans* 活性恢复效果

Fig. 7 Activity recovery of immobilized *L. cresolivorans*

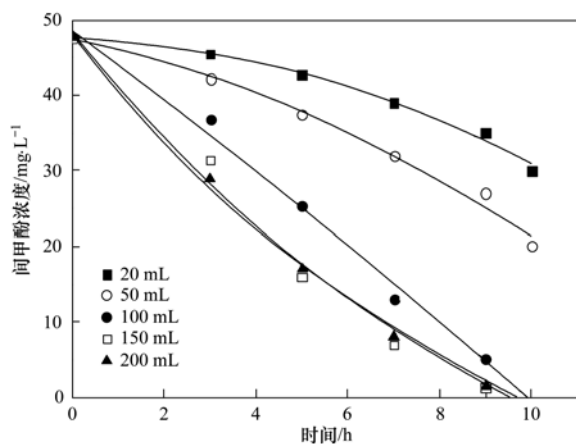
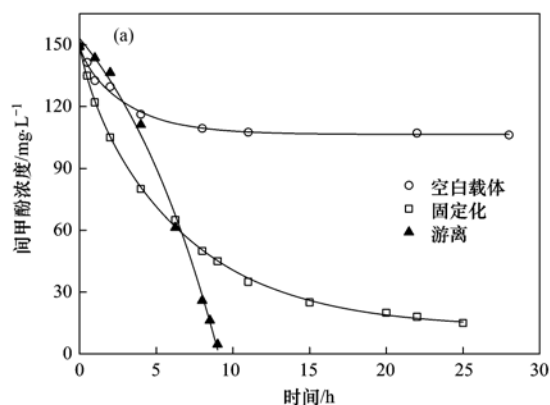


图 8 不同包埋量对间甲酚降解的影响

Fig. 8 Effect of different embedding dosages on *m*-cresol biodegradation



L. cresolivorans 的间甲酚去除速率变慢. 另外, 由于被包埋的微生物会随着间甲酚的降解而在 PVA 凝胶内的空隙里增殖, 影响载体的稳定性, 一段时间后细胞的增殖与死亡处于动态平衡状态, 且微生物数量越多占据的孔道越多, 会降低载体的传质性能. 在增殖过程中, 由于空间效应、分隔效应和传质阻力这 3 种因素的影响, 细胞在载体内往往形成不均匀分布, 这种分布会影响细胞不对称降解反应的转化速率和立体选择性^[16]. 因此, 每 100 mL 包埋剂中包埋 150 mL 菌悬液中的菌量较为适宜.

2.2.4 固定化 *L. cresolivorans* 的间甲酚降解特性

在最佳的细胞活性和包埋量下, 将空白载体、游离及固定化 *L. cresolivorans* 的间甲酚去除速率进行了对比, 结果如图 9 所示. 空白载体对间甲酚的去除主要是吸附作用, 平衡吸附容量为 $3.86\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 吸附平衡时间约 10 h ; 固定化 *L. cresolivorans* 的间甲酚去除过程包括快速吸附和吸附-降解共同作用两个阶段, 其中吸附-降解阶段以生物降解作用为主, 随着溶液中间甲酚浓度的降低, 间甲酚去除速率由快变慢[图 9(a)].

间甲酚浓度对游离、固定化 *L. cresolivorans* 的降解速率及载体的扩散速率影响很大[图 9(b)], 扩散速率随着浓度的增大而增大, 降解速率随着浓度的增大先增大后减小. 浓度小于 $350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 固定化菌降解速率小于游离菌降解速率, 与载体的扩散速率相差甚微, 浓度高于 $380\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 固定化菌降解速率大于游离菌降解速率, 小于载体的扩散速率. PVA-SA-AC-PHB 载体包埋固定化降解菌后形成了一个微环境, 对间甲酚的降解需要间甲酚、细菌分泌的酶或辅酶通过载体孔道扩散进出, 载体可通过传质阻力减缓高浓度底物对微生物的抑制作用, *L. cresolivorans* 固定化后间甲酚耐受浓度从 450

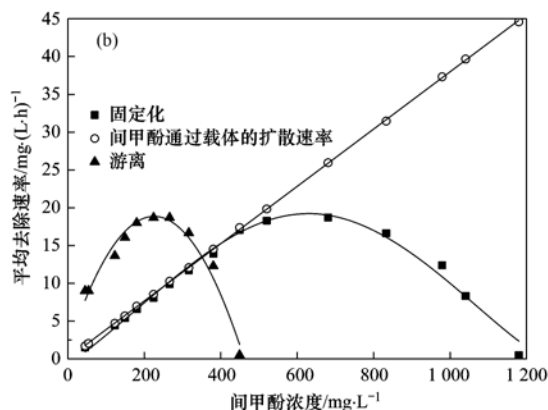


图 9 游离和固定化 *L. cresolivorans* 的间甲酚降解速率对比

Fig. 9 Comparison of biodegradation rates of free and immobilized *L. cresolivorans*

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到了 $1\,180\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到最高去除速率的浓度从游离态的 $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到 $680\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而且曲线覆盖范围变宽, 说明被包埋的微生物能在更大的浓度范围实现较高的降解效率. 以上结果证明, 固定化菌的降解速率由载体传质速率和微生物的降解速率共同决定, 浓度低时主要由载体传质速率决定, 浓度高时由微生物的降解速率控制.

2.3 不同载体固定化 *L. cresolivorans* 的间甲酚降解速率对比

制备材料和方法对载体性能有重要影响. 固定化降解菌对间甲酚的降解需其通过载体的孔道扩散到细菌细胞膜表面, 即固定化菌的间甲酚降解速率受载体传质速率的影响. 溶质的传递过程主要发生

在由聚合物链围成的含水微区里, 任何减小这一空间的都会影响溶质的扩散^[17], 如在载体中添加吸附剂 PHB 和 AC, 可提高载体的吸附性能, 但可能会增加传质阻力. 表 2 中列出了经公式 (1) ~ (3) 计算得到的间甲酚在载体 PVA-SA、PVA-SA-PHB、PVA-SA-AC 和 PVA-SA-PHB-AC 中的扩散系数, 分别为 6.18×10^{-8} 、 6.11×10^{-8} 、 4.58×10^{-8} 和 $5.62\times10^{-8}\text{ m}^2\cdot\text{min}^{-1}$. 加入吸附剂后, 粒径小的吸附剂会占据在 PVA 链围成的孔道和含水微区里, 减小载体的扩散系数, 与载体 PVA-SA 比, PVA-SA-AC 扩散系数降低了 25.89%. 因此, 吸附剂比例要根据吸附速率还是扩散速率优先来调整, 以适应不同条件下的降解需要.

表 2 间甲酚在不同 PVA 载体内的扩散系数

Table 2 Comparison of *m*-cresol diffusion coefficients in different PVA membranes

载体	$c_0/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$D_e\times10^{-8}/\text{m}^2\cdot\text{min}^{-1}$	平均 $D_e\times10^{-8}/\text{m}^2\cdot\text{min}^{-1}$
PVA-SA	321	6.29	6.18 ± 0.10
	472	6.13	
	480	6.11	
PVA-SA-PHB	428	5.98	6.11 ± 0.13
	450	6.10	
	483	6.25	
PVA-SA-AC	444	4.54	4.58 ± 0.04
	465	4.58	
	476	4.62	
PVA-SA-PHB-AC	419	5.53	5.62 ± 0.09
	431	5.71	
	469	5.63	

2.4 载体寿命

载体的使用寿命是决定其应用前景的重要依据, 对于微生物包埋载体的稳定性可通过测定它在水中溶解的总有机碳 (TOC) 浓度来表征^[18], 30°C 恒温、 $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 搅拌条件下每克载体在水中振荡 99 h 后损失 0.038 g, TOC 达到稳定状态. 为考察固定化菌的可重复利用性, 将其置于间甲酚浓度为 $450\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的新鲜培养基中, 每隔 24 h 更换一次培养基, 定时取样分析间甲酚浓度, 结果如图 10 所示. 60 d 后载体结构完好, 未出现 PHB 和 AC 的溶出, 也未出现先吸附后降解两阶段过程, 但在后期降解速率呈递降趋势, 可能是代谢产物的不断积累对细菌产生了抑制作用, 可在低浓度间甲酚培养基中培养一段时间恢复活性^[19]. 进一步的研究可考虑多种有协同降解功能的菌种的混合包埋, 减少中间产物的积累, 实现有机物的完全矿化. 从实际应用需要来看, 该载体的稳定时间基本可以满足需要.

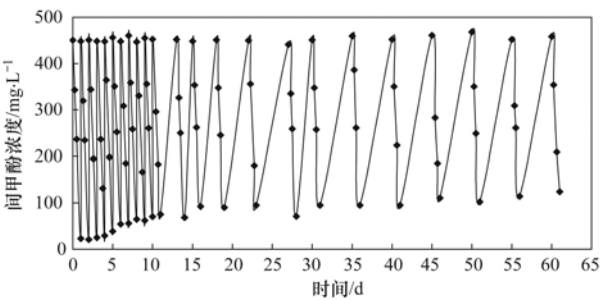


图 10 PVA-SA-PHB-AC 固定化载体的可重复利用性

Fig. 10 Reusability of PVA-SA-PHB-AC carrier for microorganism immobilization

3 结论

(1) 采用循环冷冻-解冻结结合硼酸法制备了 PVA-SA-PHB-AC 载体, 其孔隙发达、孔径分布均匀, 平均孔径为 33.68 nm , 比表面积和对间甲酚的吸附容量分别为 $15.30\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $3.86\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 间甲酚在载体内的扩散系数为 $5.62\times10^{-8}\text{ m}^2\cdot\text{min}^{-1}$, 可

稳定使用 2 个月以上, 适合用作水处理中微生物固定化的悬浮载体。

(2) PVA-SA-PHB-AC 固定化 *L. cresolivorans* 的间甲酚去除过程包括快速吸附阶段和吸附-生物降解共同作用阶段, 去除速率由载体的传质速率与微生物的降解速率共同决定, 载体扩散系数对固定化菌的降解速率和底物耐受浓度有影响, 间甲酚浓度低于 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 载体传质速率小于微生物降解速率, 间甲酚去除速率由传质速率决定, 浓度高于 $380 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时相反, 固定化后 *L. cresolivorans* 的耐受浓度可从 $450 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高到 $1180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。经包埋的微生物能在更宽的浓度范围内实现较高的降解效率。

参考文献:

- [1] Zouari H, Labat M, Sayadi S. Degradation of 4-chlorophenol by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* in free and immobilized cultures [J]. *Bioresource Technology*, 2002, **84** (2): 145-150.
- [2] Annadurai G, Juang R S, Lee D J. Microbiological degradation of phenol using mixed liquors of *Pseudomonas putida* and activated sludge [J]. *Waste Management*, 2002, **22** (7): 703-710.
- [3] Pérez R R, Benito G G, Miranda M P. Chlorophenol degradation by *Phanerochaete chrysosporium* [J]. *Bioresource Technology*, 1997, **60** (3): 207-213.
- [4] Lamar R T, Larsen M J, Kirk T K. Sensitivity to and degradation of pentachlorophenol by *Phanerochaete* spp. [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1990, **56** (11): 3519-3526.
- [5] Yao H Y, Ren Y, Deng X Q, *et al.* Dual substrates biodegradation kinetics of *m*-cresol and pyridine by *Lysinibacillus cresolivorans* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186** (2-3): 1136-1140.
- [6] Yao H Y, Ren Y, Wei C H, *et al.* Biodegradation characterisation and kinetics of *m*-cresol by *Lysinibacillus cresolivorans* [J]. *Water SA*, 2011, **37** (1): 15-20.
- [7] Al-Zuhair S, El-Naas M. Immobilization of *Pseudomonas putida* in PVA gel particles for the biodegradation of phenol at high concentrations [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **56** (1-2): 46-50.
- [8] El-Naas M H, Al-Muhtaseb S A, Makhlof S. Biodegradation of phenol by *Pseudomonas putida* immobilized in polyvinyl alcohol (PVA) gel [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164** (2-3): 720-725.
- [9] 洪梅, 毛霞飞, 王冬, 等. 固定化微生物去除地下水中氯苯研究 [J]. *科技导报*, 2011, **29** (6): 43-47.
- [10] 陈芳艳, 梁林林, 唐玉斌, 等. 聚乙烯醇/累托石复合载体固定非降解菌的研究 [J]. *工业水处理*, 2007, **27** (11): 19-23.
- [11] Mignot L, Junter G A. Diffusion in immobilized-cell agar layers: influence of microbial burden and cell morphology on the diffusion coefficients of L-malic acid and glucose [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1990, **32** (4): 418-423.
- [12] 高瀚文, 杨荣杰, 何吉宇, 等. 冷冻/解冻制备的聚乙烯醇水凝胶的结构和流变性研究 [J]. *高分子学报*, 2010, (5): 542-549.
- [13] Magrí A, Vanotti M B, Szögi A A. Anammox sludge immobilized in polyvinyl alcohol (PVA) cryogel carriers [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 231-240.
- [14] Idris A, Zain N A M, Suhaimi M S. Immobilization of Baker's yeast invertase in PVA-alginate matrix using innovative immobilization technique [J]. *Process Biochemistry*, 2008, **43** (4): 331-338.
- [15] Takei T, Ikeda K, Ijima H, *et al.* Fabrication of poly (vinyl alcohol) hydrogel beads crosslinked using sodium sulfate for microorganism immobilization [J]. *Process Biochemistry*, 2011, **46** (2): 566-571.
- [16] 肖美添, 黄雅燕, 郭养浩. 固定化细胞海藻酸钙凝胶内的扩散特性 [J]. *华侨大学学报 (自然科学版)*, 2005, **26** (4): 408-411.
- [17] 翁丽惠, 徐坚, 梁松苗, 等. 水凝胶中物质扩散过程研究进展 [J]. *高分子通报*, 2005, (5): 100-107.
- [18] Chang I S, Kim C, Nam B. The influence of poly-vinyl-alcohol (PVA) characteristics on the physical stability of encapsulated immobilization media for advanced wastewater treatment [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40** (9): 3050-3054.
- [19] 黄霞, 陈戈, 邵林广, 等. 固定化优势菌种处理焦化废水中几种难降解有机物的试验研究 [J]. *中国环境科学*, 1995, **15** (1): 1-4.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 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