

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)

固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展

钱林波^{1,2}, 元妙新^{1,2}, 陈宝梁^{1,2*}

(1. 浙江大学环境科学系, 杭州 310058; 2. 浙江省有机污染过程与控制重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 多环芳烃 (PAHs) 是环境中普遍存在的一类典型有机污染物, 绿色修复 PAHs 污染土壤已成为国内外环境和土壤界共同关注的热点问题之一。作为一种新型的微生物修复技术, 固定化微生物修复有机污染土壤正受到越来越多的关注, 国内外相关研究刚刚开始。本文重点评述了近几年国内外有关固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的最新进展, 总结了固定化微生物技术的修复原理、微生物固定化载体的选择、高效降解菌的筛选、固定化方法及影响因素等方面, 并提出今后的发展方向, 为我国开展固定化微生物技术修复有机污染土壤的研究提供参考。

关键词: 土壤; 多环芳烃; 固定化微生物; 载体; 生物修复; 综述

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1767-10

Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique

QIAN Lin-bo^{1,2}, YUAN Miao-xin^{1,2}, CHEN Bao-liang^{1,2}

(1. Department of Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Organic Pollution Process and Control, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), ubiquitous in the environment, are a typical organic pollutants. Green remediation of PAHs contaminated soil has become a hot research focus. As a novel microbial remediation technique, the immobilized microorganism technology (IMT) is attracting more and more attention to restore organic contaminated soil. This paper reviewed bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil with immobilized microorganism technique. The IMT remediation principles, selection of the immobilized carriers, screening of efficient PAHs-degradation microorganism, and methods of microorganism immobilized were summarized. The research trends and currently existing problems in IMT remediation of contaminated soil were prospected.

Key words: soil; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); immobilized microorganism; carrier; bioremediation; review

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是环境中普遍存在的一类重要的持久性有机污染物, 其浓度水平与污染特征^[1-3]、环境化学行为与健康效应^[3-7]、污染控制与修复^[8-14]等方面引起了极大关注。PAHs 主要是化石燃料和生物质不完全燃烧的产物。土壤 PAHs 污染来源广泛, 包括大气干湿沉降、污水灌溉、化肥及农药施用、秸秆燃烧等。土壤是各种污染物的汇, 同时在一定条件下可转变为其它环境介质的二次污染源^[6]。PAHs 排放量大, 具有半挥发性、低溶解性、难生物降解性, 常常在土壤中长期存在、大量积累。我国 2004 年 16 种 PAHs 排放量约 11.4 万 t, 占全球总排放量的 22%, 是世界上释放 PAHs 最多的国家^[15]。排放的绝大部分 PAHs 则沉积在我国境内^[16]。自 20 世纪 70 年代以来, 我国土壤 PAHs 污染的范围不断扩大、污染日益严重^[2], 其浓度水平已从 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 量级上升到 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 量级, 其检出率从不到 20% 上升到 80% 以上。文献^[17]将土壤 PAHs 浓度水平与污染程度划

分 5 种情况: $0 \sim 200 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为无污染、 $200 \sim 600 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为轻污染、 $600 \sim 1000 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为污染、 $>1000 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为重污染。据此, 我国已报道 PAHs 浓度水平的土壤中有 78% 受到 PAHs 污染, 其中 32% 为重污染^[2]。通过土壤-植物系统迁移^[7], PAHs 对农产品安全构成严重威胁^[18]; 经食物链进入人体, 进而影响到人类健康。因此, 绿色修复土壤 PAHs 污染已成为国内外环境和土壤界共同关注的热点问题之一。

PAHs 污染土壤修复技术主要有化学修复、生物修复 (植物修复、微生物修复)、化学-生物相结合的修复等^[14,19]。微生物修复主要指采取强化措施以促进微生物对土壤中有毒有害物质的降解、转化和去除, 包括强化土著微生物降解 (生物刺激) 和投加

收稿日期: 2011-07-06; 修订日期: 2011-09-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划重点项目 (2012AA06A203); 浙江省杰出青年基金项目 (R5100105)

作者简介: 钱林波 (1982~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤污染控制与修复, E-mail: lb_qian@163.com

* 通讯联系人, E-mail: blchen@zju.edu.cn

外源高效降解微生物(生物强化)2种方式.微生物修复是研究最早、最深入、也是应用最广泛的一种生物修复技术,包括原位处理、生物接种、生物堆肥和生物反应器等.作为一种绿色高效的修复技术,固定化微生物修复有机污染土壤正受到越来越多的关注^[20~22].一方面,固定化微生物具有微生物密度大、反应速度快、耐环境冲击,显著提高修复效率的优点;另一方面固定化微生物技术具有操作简单、要求低、成本低廉的特点.该技术有望克服投加到修复现场中的游离高效降解微生物与土著菌的恶性竞争或难以适应环境的问题,实现高效降解菌有效修复 PAHs 污染土壤.固定化微生物技术是从固定化酶技术发展起来^[23],始于 20 世纪 60 年代,80 年代开始兴起发展.固定化微生物技术在废水处理中已有较多报道^[24,25],但其在土壤修复特别是 PAHs 污染土壤修复的研究则刚刚开始.在国内,2006 年苏丹等^[21]提出了用固定化微生物修复受 PAHs 污染的非流体介质(如土壤)的新技术,论述了其在非流体介质中 PAHs 污染物原位修复的可行性和需要解决的关键科学问题;也有学者概述了固定化微生物在污染土壤修复中的应用^[22].最近,国际上有关固定化微生物技术修复有机污染土壤逐渐增多.为此,本文从固定化微生物技术的修复原理、微生物固定化载体的选择、高效降解菌的筛选、固定化方法及影响因素等方面,评述了近几年国内外有关固定化微生物技术修复有机污染土壤的最新进展,并探讨了今后的发展方向,以期为我国开展固定化微生物技术修复有机污染土壤的研究提供参考.

1 固定化微生物技术的修复原理

固定化微生物技术主要是指通过物理或化学的方法将分散、游离的微生物固定在某一限定空间区域内,以提高微生物细胞的浓度,使其保持较高的生物活性并反复利用的方法^[23].固定化微生物技术最初主要应用于生物反应器中增加微生物分泌氨基酸、有机酸、抗生素等有用物质或用作生物催化剂^[23,26~29].有关固定化微生物技术在废水污染治理中应用受到越来越多的关注,一系列的细菌或真菌被固定于载体材料上用来处理废水中的重金属^[30,31]、营养物质^[32]、酚类^[33~35]等污染物.近年来,研究者开始关注应用固定化微生物技术处理海水石油污染^[24,36]、降解环境中 PAHs^[37~39]等有机污染物. Lin 等^[40]利用海藻酸钙凝胶包埋法固定 *Phanerochaete chrysosporium* 和粉末活性炭,制得的

微生物固定化材料用于降解五氯酚,该复合材料起生物催化剂、污染物吸附富集剂、微生物固态代谢底物等 3 种作用.

固定化微生物技术在 PAHs 污染土壤修复中的应用则刚刚开始,其主要的的作用原理归纳总结如下:①利用载体材料提供的有利微环境作为缓冲体系,屏蔽土著微生物的竞争作用^[41]和不利土壤条件的侵害作用^[42],从而保证接种的高效降解微生物的良好生长;②同时,固定化载体作为吸附剂还可以有效地富集土壤中的 PAHs,提高其在载体上的生物有效浓度;③此外,微生物及其分泌的胞外酶也被富集固定在载体上,增加了 PAHs 与高效降解微生物的接触效率;④富集有高浓度 PAHs 的微生物固定化材料可成为土著微生物驯化的重要场所,联合外源微生物进一步修复 PAHs 污染土壤.具体过程见图 1 所示.因此,固定化载体-微生物构建起了降解 PAHs 的土壤微环境,大大加快了 PAHs 的去除.固定化技术不仅大大增加了接种微生物的数量和活性,同时也增加了微生物细胞的稳定性,增强了其耐环境冲击的能力,加快了微生物降解 PAHs 的反应启动速度^[43],从而增强了微生物去除土壤中 PAHs 的效率.另外,固定化材料还可以起到疏松剂的作用,加快氧气的输送,因而加速有机污染物的矿化作用^[44].

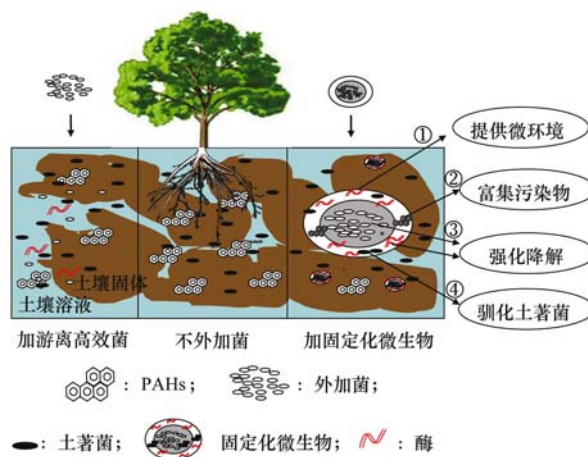


图 1 固定化微生物技术对 PAHs 污染土壤的修复原理

Fig. 1 Remediation principles of PAHs contaminated soil using immobilized microorganism technique

土壤微生物吸附在土壤有机、无机颗粒上形成生物膜是一种普遍的自然现象,堆肥处理中活性污泥等有机质都携带大量的微生物,对污染物去除有重要的作用^[45,46].研究表明,固定化技术显著增强微生物的环境适应能力和污染物去除能力,大大提

高土壤修复效果,是一项潜在的土壤修复技术^[44,46-49].以聚乙烯醇、活性炭、海藻酸钠为固定化载体,采用物理法和化学法包埋固定酵母菌,用于苯并[a]芘污染土壤的修复,结果表明,酵母菌经过混合固定化包埋后,降解效果明显好于游离菌,这是由于固定化载体内部酵母菌密度明显增加所致^[48].同时,微生物作为一种含有多种官能团的蛋白质结构,经固定化后其官能团与载体之间发生共价键或范德华力等作用,主链结构得到加固,不易流失和被破坏,能耐 pH 变化、有机污染物浓度的变化、生物毒性物质等的冲击,不易失活^[22,43,49].用固定化真菌修复芘、苯并[a]芘污染土壤的实验表明^[49],固定化技术显著增强微生物耐环境冲击性,在土壤 pH 4 或 9,温度 15℃ 或 40℃ 以及重金属 Cd 或 Pb 存在下,对固定化真菌降解芘和苯并[a]芘的影响很小,而游离菌对芘和苯并[a]芘的降解则显著降低,表明固定化对胁迫环境具有屏蔽作用.很多研究表明,微生物固定化可以提高微生物次级代谢产物酶的活性,增强对污染物的去除能力^[50,51].其主要机制是固定化载体不仅作为微生物附着基质,同时很多载体如植物残体,可以作为固定化微生物生长的介质,促进酶的产生.而在载体内产生的酶吸附在载体中,增加了其与吸附在载体表面有机污染物接触的机会,同时,载体存在的众多孔道,也为酶的传递提供了更多的可能.

目前,有关固定化微生物修复 PAHs 污染土壤的研究大多集中在灭菌土壤上,而对于非灭菌土壤中投加的外源菌和土著菌对 PAHs 降解过程中的作

用及关系的研究非常少^[52];同时,更多关注模拟 PAHs 污染土壤的修复效果,而对于实际 PAHs 污染土壤的修复效果几乎为空白.近年来,研究者对固定化真菌^[53]和细菌^[54]修复我国东北污灌区 PAHs 污染土壤进行了一些探索.研究表明,不同的固定化载体和不同的固定化菌影响土壤中 PAHs 可萃取浓度(生物有效性)和降解率,进而影响土壤中 PAHs 的修复效果.由于土壤环境本身的非均质和复杂性,固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的主要难题在于固定化载体的选择以及适合于土壤修复的优势菌种的筛选,这也成为 PAHs 污染土壤固定化微生物修复关注的焦点.

2 微生物固定化载体的选择

载体材料的性质是影响固定化微生物活性、稳定性及污染物去除效果的重要因素.虽然不同种类的细菌及同种细菌在不同环境条件下对载体材料的要求都有所区别,但应用于废水处理中的固定化载体一般都具有无毒、带表面官能团、传质效应好、有较大比表面积、具有机械刚性、性能稳定、不溶于水、抗生物分解、寿命长、可重复使用、价格低廉、易获取、易制备等共性^[41,55].目前废水处理应用中的微生物固定化载体材料主要有无机载体、天然高分子凝胶载体和有机合成高分子凝胶载体、复合载体材料及一些新型载体材料.表 1 为不同类型载体材料的代表物质以及其优缺点^[20,41,55].另外,一些新材料如纳米材料被引进固定化领域,取得不错的效果^[56],为微生物载体选择拓展了新领域.

表 1 微生物固定化载体的种类及优缺点

Table 1 Types of microorganism immobilized carriers, and their advantage and disadvantage

载体类型	代表物质	优点	缺点
无机载体	微孔玻璃、蛭石、煤渣、焦炭、氧化铝、多孔陶瓷、砖粒、高岭土、硅藻土等	无毒、机械强度高、抗微生物分解、耐酸碱、稳定性好、成本低、寿命长	无机材料表面官能团较少,与微生物亲和力有限
天然高分子凝胶载体	琼脂、琼脂糖、海藻酸盐、角叉菜胶等	对生物无毒,传质性能较好,材料易得,成本低廉	强度较低,在厌氧条件下易被生物分解
有机高分子凝胶载体	聚丙烯酰胺、聚乙烯醇(PVA)凝胶、聚苯乙烯、聚亚安酯等	可塑性较强、应用广泛、强度较大、抗微生物腐蚀	其传质性能较差,易造成细胞失活
复合材料及新型载体材料	有机材料和无机材料复合组成的新型载体材料	兼具有机载体材料和无机载体材料的优点	制备要求高,制备费用高

由于土壤体系的复杂性和独特性,土壤修复对载体材料要求的侧重点与水体不同.土壤原位修复中一般不考虑固定化微生物载体的回收,固定化微生物载体施加进入土壤后即成为土壤中的一部分,因此,土壤修复对载体材料的环境友好性的要求更加严格,尤其需要考虑载体材料对土壤污染物迁移

转化行为的影响.另外,载体材料在水体及土壤修复中所承担的功能也是有所区别的.应用于水体的载体材料主要是作为微生物的附着剂,从而提高微生物的稳定性和局部密度,要求载体具有一定的强度和抗微生物分解能力.而土壤修复中的载体材料不仅是微生物的附着剂,同时,载体提供的微环境还是

一个好的缓冲体系,可以屏蔽土壤不利条件的侵害;最重要的是,载体必须为外源微生物提供充足的营养,提高土壤微生物的密度和活性,所以,应用于土壤修复中的载体材料应具有一定的可生物降解性.因此,固定化微生物技术修复污染土壤中,选择合适的载体材料至关重要.

微生物亲和性、吸附能力、被富集污染物的生物有效性是评价固定化载体材料可行性的3个关键参数.现阶段应用于土壤中的固定化材料大多以聚乙烯醇、海藻酸钠和活性炭为主,而对于其它固定化材料的研究则很少.植物残体是一类广泛存在于环境中的天然有机质,是土壤有机质组分的主要来源,含有丰富的C、N等营养元素,对微生物和酶都具有很强的亲和性;植物残体腐殖化过程向土壤释放的各种溶解性有机质,其中很多是高环PAHs降解的共代谢底物^[57,58].向土壤添加植物残体材料等天然有机质可明显改善土壤理化性质,促进土壤微生物活性和数量,增强PAHs去除^[58],是一种潜在的固定化载体材料.用甘蔗渣、木屑、麦秆等常见的植物残体固定微生物,可实现较高的酶产量和污染物去除能力^[59,60].近年来,利用植物残体类天然有机质固定微生物去除水中PAHs等有机污染物已见报道,Gentili等^[36]用壳质角素和壳聚糖作为载体材料固定红球菌属(*Rhodococcus corynebacterioides*)修复原油污染海水,发现固定化细菌对海水污染物的去除比游离菌提高了大约30%.用甘蔗渣固定白腐真菌(*Phanerochaete chrysosporium*)大大提高了锰过氧化酶的活性和水体蒽的去除率^[50].此外,稻秆^[25,39]、松针粉^[51]等都被证明是有效的固定化载体材料.有关利用天然有机质材料固定微生物修复PAHs污染土壤的报道较少,但天然有机质的潜在优势,如可以作为PAHs的天然生物吸附剂^[13].Su等^[47]用玉米棒吸附固定真菌(*Mucor* sp.)修复苯并[a]芘污染土壤,发现固定化菌对环境适应能力更强、反应启动速度更快,苯并[a]芘去除效果更好.不同化学组成的植物材料对微生物降解PAHs有不同的影响,Dzul-Puc等^[51]分别以甘蔗渣和松针粉末作为黄孢原毛平革菌(*Phanerochaete chrysosporium*)的生长基质,并用于苯并[a]芘污染土壤的修复,结果发现,甘蔗渣组苯并[a]芘降解更快.采用植物残体固定细菌修复PAHs污染土壤,结果表明植物残体及其提取液可强化固定化菌和土著微生物去除PAHs^[54].

固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的效果取决于降解菌与污染物的可接触性.微生物固定化

技术明显提高局部土壤微生物的密度和活性,但同时限制微生物向固定化颗粒外部发展,由于土壤中PAHs等有机污染物迁移能力较弱,所以往往只有与固定化微生物接触的土壤得到有效修复.因此,为保证修复效果,必须经常翻耕土壤,并多次投加固定化微生物,造成修复成本增加、处理难度加大,严重限制其实际应用.一些高吸附性能的吸附剂可被用作固定化载体材料以解决上述缺陷.高吸附性能材料可促进PAHs由土壤有机质向固定化载体迁移,使固定化载体同时富集高浓度的微生物和土壤中的PAHs,增加PAHs与微生物的接触,实现PAHs的富集-降解一体化,从而显著促进土壤修复效果.一些研究者用活性炭固定微生物并用于环境污染修复,取得较好的效果^[48,49].但活性炭生产成本较高,其环境影响也有待进一步研究.笔者所在课题组率先利用环境友好材料生物碳作为固定化基材,开展了固定化微生物修复PAHs污染土壤^[53,54].生物碳是一类由天然生物质限氧裂解产生的富炭质材料,在自然界中广泛存在,具有很大的比表面积,对PAHs等有机污染物有很强的吸附能力^[61~63],能大量富集污染物,促使污染物由土壤向生物碳迁移^[64],从而提高微生物与污染物接触的几率.另外,生物碳是一类环境友好的材料,富含C、N等营养元素,表面携带大量官能团,能显著改善土壤理化条件,其多孔性质有利于微生物的附着生长.利用生物碳固定微生物在农业中已有广泛应用^[65],关于其在土壤修复方面的应用有待深入研究.

载体材料对PAHs的吸附作用及吸附态PAHs的生物有效性是影响固定化微生物对污染土壤修复效果的重要因素.植物残体等天然有机质对PAHs吸附主要以分配作用为主,脂肪碳和芳香碳是其吸附的主要组分^[66].相比天然有机质,生物碳对PAHs的吸附能力更强,吸附行为由表面吸附和分配作用所控制^[62].生物碳制备条件尤其是裂解温度对其吸附性能有重要的影响^[61~63].一般认为,随制备温度的增加,生物碳吸附能力逐渐增强,表面吸附作用贡献增大^[62],被吸附的PAHs生物有效性降低.吸附作用导致土壤PAHs向载体迁移、富集,明显改变其迁移、转化行为和生物有效性.传统的研究认为微生物不能直接利用颗粒吸附态的有机污染物,污染物必须首先从吸附颗粒上脱附下来进入土壤溶液才能被微生物降解^[67,68],所以,吸附作用实际上降低了土壤污染物的生物有效性,使土壤成为有机污染物重要的储存库.但也有研究认为,微生物可以直接利

用颗粒吸附态的污染物,利用效率主要与颗粒的表面结构、化学性质及碳结构与微生物亲和性有关^[69~71]. Yang 等^[70]研究了土壤有机质对菲吸附作用和降解行为的影响. 他们发现随着土壤有机碳含量的增加(0.23%→7.1%),土壤溶解性菲含量急剧下降[(28.63±2.15) μg·L⁻¹→(0.79±0.04) μg·L⁻¹]. 但接种细菌(*Mycobacterium vanbaalenii* PYR-1)培养216 h后,不同有机碳含量土壤中菲降解量并无显著变化,且土壤菲残留量都明显的低于模型预测值(模型认为微生物只能利用溶解态 PAHs),说明吸附态 PAHs 可以被微生物直接摄取利用. 有研究认为微生物主要先利用土壤溶液中的 PAHs,然后对吸附态 PAHs 进行降解,其降解效率主要与土壤有机碳含量和土壤孔隙率有关^[50]. 对木质素、蜡质、纤维素吸附态菲的细菌降解实验发现^[59],培养30 d后,蜡质吸附态菲和纤维素吸附态菲分别被降解49.6%±0.6%和54.7%±3.4%,大大高于19.7%和39.0%的模型预测效果,说明大约有30%的蜡质吸附态菲和15%的纤维素吸附态菲是通过微生物直接摄取被降解的;实验中只有1.2%±0.2%的木质素吸附态菲被降解,说明木质素的吸附作用显著的降低了 PAHs 的生物有效性. 微生物在有机质表面附着生长是其利用吸附态污染物的关键步骤,蜡质疏水表面对微生物的强亲和性是蜡质吸附态菲生物有效性较高的主要原因. 因此,在固定化微生物修复 PAHs 污染土壤时,表面蜡质含量或疏水性等参数是选择载体材料的重要依据.

3 固定化微生物及高效降解菌的筛选

固定化微生物修复技术是载体与微生物共同作用的结果,微生物性质对土壤修复效果有重要的影响^[72]. 用于 PAHs 污染土壤修复的微生物包括土著菌、外来高效菌和基因工程菌. 表2列出了固定化微生物、固定化载体、固定化方法及其对 PAHs 污染土壤的修复效果的影响. 不同的微生物固定化后对 PAHs 的降解存在很大的差异性. 从表2可见,在细菌、真菌以及它们种内和种间联合作用条件下(以 PAHs 典型代表物芘为例),单细菌对土壤中芘的去除率较差,最佳的降解菌种是动胶杆菌(*Zoogloea* sp.) 9号,去除率为52.7%^[73];单真菌对芘的去除效果普遍高于单细菌,最佳的降解菌种是镰刀菌(*Fusarium* sp.),去除率达到了69%^[49]. 单种微生物对 PAHs 表现出一定的降解能力,但众多研究表明,菌种的种内联合或种间联合降解往往优于单个

菌种的降解能力^[49,73,74]. 对2种细菌芽孢杆菌(*Bacillus* sp.) 2号和动胶杆菌(*Zoogloea* sp.) 9号联合降解芘研究表明^[73],两菌联合降解的效果好于单菌种,对芘的降解率为61.8%;而2种真菌的联合降解效果更好,黑曲霉和镰刀菌在对初始浓度为100 mg·kg⁻¹ 芘的降解率达到了81%^[49]. 由此可见,在固定化微生物修复 PAHs 污染土壤中,联合菌种降解能力高于单个菌种;而在单菌种对 PAHs 的降解中,真菌的降解能力普遍高于细菌. 然而,大部分研究结果是在土壤灭菌条件下获得的,与现实不灭菌的土壤条件有差别. 最近有学者研究了固定化微生物投加到不灭菌的 PAHs 污染土壤中的修复效果^[53,54],结果表明,加入松针生物炭固定化菌后,东北污灌区污染土壤中16种 PAHs 的可萃取浓度和可萃取率均显著降低,并且随着生物炭炭化温度升高而降低^[53];生物炭固定化菌可以降解吸附的 PAHs,筛选的高效土著菌能有效的利用生物炭固定化菌吸附的 PAHs. 由此可见,相对于外源菌,筛选的土著高效菌对 PAHs 的降解具有天然的优势. 因此,筛选具有高降解性能的土著菌用于固定化微生物修复 PAHs 污染土壤是一种环境友好的选择.

固定化微生物能否有效利用载体吸附态 PAHs 是修复成功的关键因素. 微生物在载体表面附着生长可增加微生物与吸附态 PAHs 的接触机会,从而促进微生物对 PAHs 的降解作用^[75]. 研究表明,具疏水性表面的微生物更容易附着在各类载体材料的表面,故而可能是一种更加有利的选择^[76]. 直接用吸附态 PAHs 来筛选、驯化微生物,可望得到能高效利用吸附态 PAHs 的菌种,对微生物固定化技术的成功应用有重大意义,以解决溶液驯化高效菌在固定时难以达到同样降解效果的难题. Bastiaens^[76]等将过量的 PAHs 加入无机盐培养基中筛选获得分支鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas* sp.),同时将 PAHs 吸附在一种疏水性材料膜上作为碳源筛选得到分枝杆菌属(*Mycobacterium* sp.),结果发现分枝杆菌属(*Mycobacterium* sp.)具有更强的疏水性,更易在各种不同材料表面附着生长. Vacca 等^[77]分别用溶液态菲和腐殖酸吸附态菲筛选获得菲降解菌,发现只有通过吸附态菲筛选获得的微生物具有直接矿化颗粒吸附态菲的能力. 不同材料吸附态 PAHs 作为碳源可筛选得到不同种类的微生物, Friedrich 等^[78]用聚丙烯树脂吸附态菲筛选得到分枝杆菌属(*Mycobacterium*),而用安伯来特树脂吸附态菲却得到洋葱伯克霍尔德菌(*Burkholderia* sp.),说明不同

微生物对不同载体吸附态 PAHs 有不同的生物有效性. 有关筛选、驯化高效微生物大多局限在液体环境下, 驯化的环境与吸附态 PAHs 的降解环境条件相反, 增加了微生物适应的时间, 减慢了固定化微生物的反应速度. 而采用高吸附性能材料富集 PAHs 作为碳源筛选得到菌种, 使微生物从一开始就处于“工作”的环境, 减少了微生物反应时间, 经过“热身”的微生物, 为更快地投入降解修复打下基础. 因此, 利用强吸附能力的材料富集 PAHs 作为碳源筛选菌种是固定化微生物研究的重要突破方向.

固定化微生物另一个来源是引进外来微生物, 外来微生物是强化多环芳烃污染土壤修复的重要手段, 特别是在自然条件下, 固定化外来微生物可以加快污染物的去除^[49,74]. 研究结果表明, 在自然土壤

中加入初始浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的芘、苯并[a]芘, 培养 10 d 后, 固定化单菌添加组对芘、苯并[a]芘去除率分别为 49% ~ 69%、29% ~ 37%, 明显高于游离菌添加组; 固定化混合菌添加组对芘、苯并[a]芘去除率更是高达 81% 和 43%^[49]. 作为 PAHs 的高效降解菌种, 固定化黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 修复 PAHs 污染土壤引起了研究者的广泛关注^[50,51]. 研究表明, 用甘蔗渣固定黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 大大提高了锰过氧化酶的活性和水体总氮的去除率^[50]. Dzul-Puc 等^[51] 分别以甘蔗渣和松针粉末作为黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 的生长基质, 用于苯并[a]芘污染土壤的修复, 结果发现, 加入甘蔗渣和松针粉末都可以促进土壤中苯并[a]芘的去除, 其

表 2 固定化微生物及其修复 PAHs 污染土壤

Table 2 Immobilized microorganism and its bioremediation of PAHs-contaminated soil

微生物	PAHs	载体	固定方法	研究结果	文献
动胶杆菌 (<i>Zoogloea</i> sp.) 9 号	芘、苯并(a)芘	聚乙烯醇 海藻酸钠 活性炭	化学法	在 96 h 内对芘和苯并(a)芘的降解率分别为 52.7% 和 37.5%	[73]
芽孢杆菌 (<i>Bacillus</i> sp.) 2 号				2 号和 9 号两菌联合降解的效果好于单菌种, 对芘和苯并(a)芘的降解率分别为 61.8% 和 34.9%	
动胶杆菌 (<i>Zoogloea</i> sp.) 9 号混合					
凸形假单胞菌 (<i>Pseudomonas convexa</i> chester B61)	芘、苯并[a]芘	聚乙烯醇 海藻酸钠 活性炭	物理法	固定化菌对芘和苯并(a)芘的降解率高于游离菌, 混合菌的降解效果要好于单一菌	[52]
弯曲假单胞菌 (<i>Pseudomonas geniculata</i> chester B67)				无论是单一固定还是混合固定, 土著菌(动胶杆菌和芽孢杆菌)对芘和苯并[a]芘的降解效果要好于引进菌(凸形假单胞菌, 弯曲假单胞菌, 假单胞菌-1.130)	
假单胞菌-1.130 (<i>Pseudomonas</i> sp. MB)				引进菌在对苯并[a]芘的降解中, 混合菌的降解率高于土著菌, 如 B61B67 混合后, 96 h 对芘和苯并[a]芘的降解率分别为 43.49%, 38.55%	
动胶杆菌 (<i>Zoogloea</i> sp. B09);					
芽孢杆菌 (<i>Bacillus</i> sp. B02, B07)					
恶臭假单胞菌(<i>Pseudomonas putida</i>) 土著筛选菌	16 种 PAHs	植物残体 生物碳 海藻酸钠	吸附包埋法	生物碳固定化菌可以降解吸附的 PAHs, 土著筛选菌有效的利用生物碳固定化菌吸附的 PAHs (非为 23%, 芘为 15%)	[54]
热带假丝酵母菌(<i>Candida tropicalis</i>) YM	芘	聚乙烯醇 海藻酸钠 活性炭	物理化学法	物理包埋固定化优于化学包埋; 混合固定化效果优于单一固定化, 其中 Y219 和 Y220 混合固定化效果最佳, 对初始浓度为 100 mg/kg 的芘在 96 h 内的降解率为 67%	[74]
热带假丝酵母菌(<i>Candida tropicalis</i>) 219					
热带假丝酵母菌(<i>Candida tropicalis</i>) 220					
热带假丝酵母菌(<i>Candida tropicalis</i>) 219	苯并[a]芘	聚乙烯醇 海藻酸钠 活性炭	物理法 化学法	混合菌固定化中, 物理包埋优于化学包埋, 其中 219 和 220 采用物理固定化时对苯并[a]芘的降解率最高, 达到了 40.65%, 半衰期为 5.66 d	[48]
热带假丝酵母菌(<i>Candida tropicalis</i>) 220					
热带假丝酵母菌(<i>Candida tropicalis</i>) YM					
毛霉菌属 (<i>Mucor</i> sp.)	苯并[a]芘	玉米棒子	物理法	初始浓度: 50 mg/kg , 在 42 d 内对芘和苯并[a]芘的降解率分别为 68%	[44]
木霉菌 (<i>Trichoderma</i> sp.)	芘、 苯并[a]芘	聚乙烯醇 海藻酸钠 活性炭	物理法	初始浓度: 100 mg/kg ; 在 240 h 内对芘和苯并[a]芘的降解率分别为 63% 和 34%	[49]
黑曲霉菌 (<i>Aspergillus niger</i>)				初始浓度: 100 mg/kg ; 在 240 h 内对芘和苯并[a]芘的降解率分别为 49% 和 29%	
镰刀菌 (<i>Fusarium</i> sp.)				初始浓度: 100 mg/kg ; 在 240 h 内对芘和苯并[a]芘的降解率分别为 69% 和 37%	
黑曲霉和镰刀菌				初始浓度: 100 mg/kg ; 在 240 h 内对芘和苯并[a]芘的降解率分别为 81% 和 43%	
白腐真菌 (White rot fungi)	16 种 PAHs	生物碳 海藻酸钠	包埋法	加入松针生物碳固定化菌后, 东北污灌区污染土壤中 16 种 PAHs 的可萃取性均显著降低, 归因于生物碳载体的吸附锁定作用和固定化菌的生物降解作用	[53]
联合 毛霉菌属 (<i>Mucor</i> sp. SF06) 芽孢杆菌属 (<i>Bacillus</i> sp. SB02)	苯并[a]芘	蛭石	物理法	两菌共固定化后, 在 42 d 内苯并[a]芘的最高降解率达到 95.3%	[47]

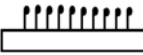
最大去除率 (BaP/干土) 分别为 50.12 mg·kg⁻¹ 和 39.94 mg·kg⁻¹.

4 微生物固定化方法及其它影响因素

固定化载体和高效降解菌是固定化微生物技术的 2 个重要支撑,而固定化方式是协调 2 个支撑的关键媒介.固定化方式可以极大地影响微生物的生长和代谢,进而影响修复效果.主要的固定化方式有吸附法、包埋法、交联法、共价结合法,微生物自身固定化以及组合固定化技术等^[54].表 3 中列出了各种

固定化方法的性能比较^[20,23].交联法虽然结合牢固,稳定性好,但操作比较复杂,反应条件激烈,容易导致微生物失活,故不常使用.吸附法和包埋法是最广泛的固定化方法^[79].吸附法操作简单,对细胞活性影响小,但固定微生物数量和强度受载体影响大,且效果不稳定.包埋法可以实现高浓度的微生物固定,且微生物与载体联结强度较高,但包埋过程剪切力会导致微生物细胞失活.在固定化微生物修复 PAHs 污染土壤中,研究者大多采用吸附法和包埋法.

表 3 微生物固定化方法比较

Table 3 Comparisons of microorganism immobilization methods				
性能	交联法	吸附法	共价结合法	包埋法
方式 ¹⁾				
制备难易	适中	易	难	适中
结合力	强	弱	强	适中
细胞活性	低	高	低	适中
稳定性	高	低	高	高
空间阻力	较大	小	较大	大
对底物专一性	可变	不变	可变	不变
土壤适宜性	低	适宜	中	适宜
成本	适中	低	高	低
联合固定效果	差	好	中	好

1) 黑点表示微生物体

有学者分别用物理法和化学法包埋固定酵母菌修复苯并[a]芘污染土壤^[48],结果表明,物理法效果普遍优于化学法,物理包埋法苯并[a]芘半衰期为 5.66 ~ 8.49 d,化学法为 6.56 ~ 9.32 d,比游离菌组有不同程度降低(7.40 ~ 12.03 d).为克服单一固定化技术的缺陷,组合固定化技术被关注.吸附-包埋联合固定化技术是一种重要的组合固定技术,首先将微生物与载体材料充分混合,使微生物尽可能的附着在载体材料上,然后用海藻酸钠等凝胶剂将混合液包埋固定.吸附-包埋联合固定化技术不仅实现高浓度的微生物固定和较高的固定化强度,同时由于吸附过程载体材料提供的微环境和营养物质,很好地解决了包埋过程微生物失活的问题.

除了固定化方法对固定化微生物性能有影响之外,固定化过程中各种条件参数也影响其环境修复效果.固定化时间^[80]和载体用量^[81]是固定化过程中 2 个重要的参数,对固定化颗粒韧性、微生物活性、微生物与载体结合强度都有显著的影响.莪荣^[80]等研究发现,固定化时间是影响固定化白腐真菌 F17 对多种染料降解效果的主要因素,菌丝与载

体结合 2 d,白腐真菌对染料金橙 G 和刚果红具有最佳脱色率.Tao 等^[39]比较了海藻酸钠浓度对包埋固定化效果的影响,发现在 3% 海藻酸钠添加浓度下得到的固定化细菌 (*Sphingomonas*) 颗粒在塑形、强度、韧性、通透性等方面均有较好的表现.

5 结论与展望

固定化微生物技术以其独特的优势和巨大的应用潜力在废水处理领域得到了广泛应用.但其在土壤修复中的研究则刚刚起步,其实用化倾向即大规模实际应用特征非常明显.要实现其规模化应用还有许多问题急需解决:① 获得适宜于土壤的固定化载体,应用于土壤修复的微生物固定化载体应具有环境友好、性能稳定、成本低廉、微生物亲和性好、污染物吸附能力强的特点;植物残体类的天然有机质、生物碳类的炭质材料以及农业有机废弃物等具有明显的优势,是潜在的载体选择.② 高效降解菌的筛选,采用疏水性表面的微生物更容易附着在各类载体材料的表面,直接用吸附态 PAHs 来筛选、驯化微生物,可望得到能高效利用吸附态 PAHs 的菌

种或菌群. 因此, 利用吸附态 PAHs 作为碳源筛选获得能直接降解吸附态 PAHs 的高效降解菌是微生物固定化技术成功应用于土壤修复的另一个突破口.

③ 采用合适的固定化方法, 固定化方法应实现固定化微生物的高浓度、高活性、与载体结合强度高、性能稳定以及增强吸附固定作用等要求. 吸附法和包埋法是应用广泛的固定化方法, 但都存在一定的缺陷, 吸附-包埋联合固定化技术可能是未来的一个重要选择. ④ 固定化微生物的稳定性、持久性、安全性还有待进一步研究, 同时, 固定化微生物施入土壤后的激活以及调控机制还需要更多的探索. ⑤ 与其他修复技术的联合使用, 如用表面活性剂促进 PAHs 从土壤有机质中解吸出来, 增加其流动性, 提高其生物可利用性.

参考文献:

- [1] Wania F, Mackay D. Tracking the distribution of persistent organic pollutants[J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**(9): 391A-396A.
- [2] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, *et al.* The status of soil contamination by semivolatile organic chemicals (SVOCs) in China: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **389**(2-3): 209-224.
- [3] Chen B L, Xuan X D, Zhu L Z, *et al.* Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediments and soils of Hangzhou city, China[J]. *Water Research*, 2004, **38**(16): 3558-3568.
- [4] Kelly B C, Ikononou M G, Blair J D, *et al.* Food web-specific biomagnification of persistent organic pollutants[J]. *Science*, 2007, **317**(5835): 236-239.
- [5] Zhang Y X, Tao S, Shen H Z, *et al.* Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, **106**(50): 21063-21067.
- [6] Nizzetto L, Macleod M, Borgå K, *et al.* Past, present, and future controls on levels of persistent organic pollutants in the global environment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(17): 6526-6531.
- [7] Fismes J, Perrin-Ganier C, Empereur-Bissonnet P, *et al.* Soil-to-root transfer and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetables grown on industrial contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(5): 1649-1656.
- [8] 宋玉芳, 孙铁珩, 许夏华. 表面活性剂 Tw-80 对土壤中多环芳烃生物降解的影响[J]. *应用生态学报*, 1999, **10**(2): 230-232.
- [9] 刘世亮, 骆永明, 曹志洪, 等. 多环芳烃污染土壤的微生物与植物联合修复研究进展[J]. *土壤*, 2002, **34**(5): 257-265.
- [10] 姜霞, 井欣, 高学晟, 等. 表面活性剂对土壤中多环芳烃生物有效性影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(9): 1179-1186.
- [11] 丁洁, 王银善, 沈学优, 等. 白腐真菌对菲和芘的吸附-脱附作用及影响因素[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 825-831.
- [12] Chen B L, Wang Y S, Hu D F. Biosorption and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous solutions by a consortium of white-rot fungi[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 845-851.
- [13] Chen B L, Yuan M X, Liu H. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous solution using plant residue materials as a biosorbent[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **188**(1-3): 436-442.
- [14] 王春霞, 朱利中, 江桂斌. 环境化学学科前沿与展望[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 372-390.
- [15] Zhang Y X, Tao S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(4): 812-819.
- [16] Lang C, Tao S, Liu W X, *et al.* Atmospheric transport and outflow of polycyclic aromatic hydrocarbons from China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(14): 5196-5201.
- [17] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, **11**(1-2): 121-127.
- [18] 崔艳红, 巨天珍, 曹军, 等. 加速溶剂提取法测定蔬菜中的多环芳烃和有机氯化物[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **23**(5): 364-367.
- [19] 朱利中. 土壤及地下水有机污染的化学与生物修复[J]. *环境科学进展*, 1999, **7**(2): 65-71.
- [20] Cassidy M B, Lee H, Trevors J T. Environmental applications of immobilized microbial cells: a review[J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 1996, **16**(2): 79-101.
- [21] 苏丹, 李培军, 鞠京丽, 等. 非流体介质中多环芳烃污染的微生物固定化修复技术[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(8): 1530-1534.
- [22] 司友斌, 彭军. 固定化微生物技术及其在污染土壤修复中的应用[J]. *土壤*, 2007, **39**(5): 673-676.
- [23] 王建龙. 生物固定化技术与水污染控制[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 1-60.
- [24] Zhao X, Wang Y M, Ye Z F, *et al.* Oil field wastewater treatment in Biological Aerated Filter by immobilized microorganisms[J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(7): 1475-1483.
- [25] Tao X Q, Liu J P, Lu G N, *et al.* Biodegradation of phenanthrene in artificial seawater by using free and immobilized strain of *Sphingomonas* sp. GY2B[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, **9**(18): 2654-2660.
- [26] Núñez M J, Lema J M. Cell immobilization: application to alcohol production[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1987, **9**(11): 642-651.
- [27] Akin C. Biocatalysis with immobilized cells[J]. *Biotechnology*

- and Genetic Engineering Review, 1987, **5**: 319-367.
- [28] Tanaka A, Nakajima H. Application of immobilized growing cells [J]. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 1990, **42**: 97-131.
- [29] Coughlan M P, Kierstan M P J. Preparation and applications of immobilized microorganisms: a survey of recent reports [J]. Journal of Microbiological Methods, 1988, **8**(1-2): 51-90.
- [30] Pons P M, Fusté M C. Uranium uptake by immobilized cells of *Pseudomonas* strain EPS 5028 [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1993, **39**(4-5): 661-665.
- [31] Wong P K, Lam K C, So C M. Removal and recovery of Cu(II) from industrial effluent by immobilized cells of *Pseudomonas putida* II-11 [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1993, **39**(1): 127-131.
- [32] Chevalier P, De la Noüe J. Wastewater nutrient removal with microalgae immobilized in carrageenan [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1985, **7**(12): 621-624.
- [33] Ambujom S. Studies on composition and stability of a large membered bacterial consortium degrading phenol [J]. Microbiological Research, 2001, **156**(4): 293-302.
- [34] O'Reilly K T, Crawford R L. Degradation of pentachlorophenol by polyurethane-immobilized *Flavobacterium* cells [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1989, **55**(9): 2113-2118.
- [35] O'Reilly K T, Crawford R L. Kinetics of p-cresol degradation by an immobilized *Pseudomonas* sp. [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1989, **55**(4): 866-870.
- [36] Gentili A R, Cubitto M A, Ferrero M A, et al. Bioremediation of crude oil polluted seawater by a hydrocarbon degrading bacterial strain immobilized on chitin and chitosan flakes [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2006, **57**(4): 222-228.
- [37] O'Reilly K T, Kadakia, R, Korus R A, et al. Utilization of immobilized-bacteria to degrade aromatic compounds common to wood-treatment wastewaters [J]. Water Science and Technology, 1988, **20**(11-12): 95-100.
- [38] Wiesel I, Wubker S M, Rehm H J. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by an immobilized mixed bacterial culture [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1993, **39**(1): 110-116.
- [39] Tao X Q, Lu G N, Liu J P, et al. Rapid degradation of phenanthrene by using *Sphingomonas* sp. GY2B immobilized in calcium alginate gel beads [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2009, **6**(9): 2470-2480.
- [40] Lin J E, Wang H Y, Hickey R F. Use of coimmobilized biological systems to degrade toxic organic compounds [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1991, **38**(3): 273-279.
- [41] Cunningham C J, Ivshina I B, Lozinsky V I, et al. Bioremediation of diesel-contaminated soil by microorganisms immobilised in polyvinyl alcohol [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2004, **54**(2-3): 167-174.
- [42] Pritchard P H. Use of inoculation in bioremediation [J]. Current Opinion Biotechnology, 1992, **3**(3): 232-243.
- [43] Wang J L, Han L P, Shi H C, et al. Biodegradation of quinoline by gel immobilized *Burkholderia* sp. [J]. Chemosphere, 2001, **44**(5): 1041-1046.
- [44] Su D, Li P J, Wang X, et al. Biodegradation of benzo[a]pyrene in soil by immobilized fungus [J]. Environmental Engineering Science, 2008, **25**(8): 1181-1188.
- [45] 王聪颖, 王芳, 王涛, 等. 生物强化和生物刺激对土壤中 PAHs 降解的影响 [J]. 中国环境科学, 2010, **30**(1): 121-127.
- [46] Karamanev D G, Chavarie C, Samson R. Soil immobilization: new concept for biotreatment of soil contaminants [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1998, **57**(4): 471-476.
- [47] Su D, Li P J, Stagnitti F, et al. Biodegradation of benzo[a]pyrene in soil by *Mucor* sp. SF06 and *Bacillus* sp. SB02 co-immobilized on vermiculite [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(6): 1204-1209.
- [48] 王新, 李培军, 巩宗强, 等. 混合固定化酵母菌对苯并(α)芘污染土壤的修复 [J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(1): 1-8.
- [49] Wang X, Gong Z Q, Li P J, et al. Degradation of pyrene and benzo(a)pyrene in contaminated soil by immobilized fungi [J]. Environmental Engineering Science, 2008, **25**(5): 677-685.
- [50] Mohammadi A, Nasernejad B. Enzymatic degradation of anthracene by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* immobilized on sugarcane bagasse [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(1): 534-537.
- [51] Dzul-Puc J D, Esparza-García F, Barajas-Aceves M, et al. benzo[a]pyrene removal from soil by *Phanerochaete chrysosporium* grown on sugarcane bagasse and pine sawdust [J]. Chemosphere, 2005, **58**(1): 1-7.
- [52] 王新, 李培军, 宋守志, 等. 固定化引进菌降解土壤中芘和苯并(a)芘的效果比较 [J]. 应用生态学报, 2006, **17**(11): 2226-2228.
- [53] 王银善. 生物碳固定化白腐真菌修复 PAHs 污染土壤及作用机理 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [54] 元妙新. 固定化细菌增强修复多环芳烃污染土壤及影响因素 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [55] 袁新跃, 江和源, 张建勇. 多酚氧化酶固定化载体研究进展 [J]. 茶叶科学, 2009, **29**(4): 319-324.
- [56] 黄俊, 周菊英, 肖海燕. CuTAPc-Fe₃O₄ 纳米复合粒子及其漆酶固定化研究 [J]. 化学学报, 2005, **63**(14): 1343-1347.
- [57] Leigh M B, Fletcher J S, Fu X, et al. Root turnover: an important source of microbial substrates in rhizosphere remediation of recalcitrant contaminants [J]. Environmental Science and Technology, 2002, **36**(7): 1579-1583.
- [58] Miya R K, Firestone M K. Enhanced phenanthrene biodegradation in soil by slender oar root exudates and root debris [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(6): 1911-1918.
- [59] Couto S R, Domínguez A, Sanromán A. Utilisation of lignocellulosic wastes for lignin peroxidase production by semi-solid-state cultures of *Phanerochaete chrysosporium* [J].

- Biodegradation, 2001, **12**(5): 283-289.
- [60] Verma P, Madamwar D. Production of ligninolytic enzymes for dye decolorization by cocultivation of white-rot fungi *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium* under solid-state fermentation[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2002, **102-103**(1-6): 109-118.
- [61] 陈宝梁, 周丹丹, 朱利中, 等. 生物碳质吸附剂对水中有机污染物的吸附作用及机理[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2008, **38**(6): 530-537.
- [62] Chen B L, Zhou D D, Zhu L Z. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(14): 5137-5143.
- [63] Chen B L, Chen Z M. Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures[J]. Chemosphere, 2009, **76**(1): 127-133.
- [64] Chen B L, Yuan M X. Enhanced sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by soil amended with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, **11**(1): 62-71.
- [65] Beck D P. Suitability of charcoal-amended mineral soil as carrier for *Rhizobium* inoculants [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991, **23**(1): 41-44.
- [66] Chefetz B, Xing B S. Relative role of aliphatic and aromatic moieties as sorption domains for organic compounds; a review [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(6): 1680-1688.
- [67] Harms H, Bosma T N P. Mass transfer limitation of microbial growth and pollutant degradation [J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 1997, **18**(2-3): 97-105.
- [68] Johnsen A R, Wick L Y, Harms H. Principles of microbial PAH-degradation in soil [J]. Environmental Pollution, 2005, **133**(1): 71-84.
- [69] Guerin W F, Boyd S A. Differential bioavailability of soil-sorbed naphthalene to 2 bacterial species[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1992, **58**(4): 1142-1152.
- [70] Yang Y, Hunter W, Tao S, *et al.* Microbial availability of different forms of phenanthrene in soils[J]. Environment Science and Technology, 2009, **43**(6): 1852-1857.
- [71] Yang Y, Shu L, Wang X L, *et al.* Effects of composition and domain arrangement of biopolymer components of soil organic matter on the bioavailability of phenanthrene [J]. Environment Science and Technology, 2010, **44**(9): 3339-3344.
- [72] Feng Y H, Boyd S A. Bioavailability of soil-sorbed pesticides and organic contaminants [A]. In: Soil mineral-microbe-organic interactions: theories and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag. 2008. 259-279.
- [73] 王新, 李培军, 宋守志, 等. 固定化微生物对土壤中多环芳烃的降解[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, **27**(10): 1154-1156.
- [74] Wang X, Gong Z Q, Li P J, *et al.* Degradation of pyrene in soils by free and immobilized yeasts, *Candida tropicalis* [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, **78**(6): 522-526.
- [75] Griffith P C, Fletcher M. Hydrolysis of protein and model dipeptide substrates by attached and nonattached marine *Pseudomonas* sp. Strain-Ncimb 2021 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, **57**(8): 2186-2191.
- [76] Bastiaens L, Springael D, Wattiau P, *et al.* Isolation of adherent polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-degrading bacteria using PAH-sorbing carriers [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(5): 1834-1843.
- [77] Vacca D J, Bleam W F, Hickey W J. Isolation of soil bacteria adapted to degrade humic acid-sorbed phenanthrene [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(7): 3797-3805.
- [78] Friedrich M, Grosser R J, Kern E A, *et al.* Effect of model sorptive phases on phenanthrene biodegradation; molecular analysis of enrichments and isolates suggests selection based on bioavailability [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(7): 2703-2710.
- [79] 曾永刚, 高大文. 白腐真菌固定化技术及其影响因素的研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, **40**(1): 142-146.
- [80] 芙蓉, 谢萍, 秦易. 固定化白腐真菌对多种染料脱色的研究[J]. 菌物系统, 2003, **22**(2): 308-313.
- [81] Liu E K, Yan C R, Mei X R, *et al.* Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China [J]. Geoderma, 2010, **158**(3-4): 173-180.

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 Qingbiantan, 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 Shiuli 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