

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响

熊士昌^{1,2}, 尹华^{1,2*}, 彭辉^{1,2}, 何宝燕^{1,2}, 龙焰^{1,2}, 叶锦韶^{1,2}, 张娜^{1,2}, 彭素芬^{1,2}

(1. 暨南大学环境工程系, 广州 510632; 2. 广东省高校水土环境毒害性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632)

摘要: 考察了重金属(Cu、Cd、Pb)对白腐菌生长及其降解十溴联苯醚(BDE-209)的影响及其机制。结果表明, 低浓度重金属($\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)可促进白腐菌的生长, 高浓度则表现为抑制作用, $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时促进作用大小为: $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu}$; 白腐菌可高效降解BDE-209, 7 d内对BDE-209($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)降解率可达69.7%; 重金属可显著影响白腐菌对BDE-209的降解($P < 0.05$), 低浓度的Cu($\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和Cd($\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对BDE-209的降解表现为促进作用, 其中Cu为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时促进作用最明显, 降解率为84.4%, 而Pb则为抑制作用; 高浓度($> 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的重金属均会抑制BDE-209的降解, 抑制作用大小为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu}$, 且随浓度增大抑制作用增强; 降解率与生物量变化不完全正相关。白腐菌对BDE-209的降解过程符合一级反应动力学方程, Cu、Cd存在条件下, 随着其浓度的增加, 降解速率常数 k 表现为先增加后减少, Cu为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 k 值达到最大, 为0.3212; Pb存在条件下, k 值表现为逐渐减小。进一步研究了重金属对白腐菌胞外酶降解BDE-209的影响, 并运用SPSS 17.0对胞外酶降解与菌体降解进行距离相关性分析, 结果表明, 未添加重金属时胞外酶降解与菌体降解差异不大, 其降解率分别为63.7%、69.7%; 3种重金属存在条件下其相关系数 R 值均大于0.9, 由此推断胞外酶是起降解作用的主要部分, 重金属主要通过影响白腐菌胞外酶的方式作用于BDE-209的降解。

关键词: 白腐菌; 重金属; 十溴联苯醚; 影响; 降解

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-1008-07

Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus

XIONG Shi-chang^{1,2}, YIN Hua^{1,2}, PENG Hui^{1,2}, HE Bao-yan^{1,2}, LONG Yan^{1,2}, YE Jin-shao^{1,2}, ZHANG Na^{1,2}, PENG Su-feng^{1,2}

(1. Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Effects and mechanisms of heavy metals Cu, Cd and Pb on the growth of white-rot fungus *P. chrysosporium* and its ability of BDE-209 degradation were studied. The results showed that low concentrations of heavy metals ($\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) stimulated the growth of *P. chrysosporium* with the order of $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu}$ when $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of each heavy metal was concerned, while high concentrations ($> 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) depressed it. *P. chrysosporium* degraded BDE-209 efficiently with degradation efficiency reaching 69.7% after 7 days. The presence of heavy metals significantly influenced the capability of *P. chrysosporium* to decompose BDE-209 ($P < 0.05$). Low concentrations of Cu ($\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and Cd ($\leq 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) accelerated the degradation of BDE-209 and the degradation efficiency was enhanced from 69.7% to 84.4% when $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu was present, while Pb had negative effect. On the other hand, all three metals under high concentrations ($> 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) showed depressed effects on the degradation in the order of $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu}$. The growth of *P. chrysosporium* did not completely positively correlate with the degradation capability of BDE-209. The degradation of BDE-209 by *P. chrysosporium* conformed to the first-order kinetic model. The reaction rate constant k raised firstly and then declined with increasing concentrations of Cu and Cd, and the highest k of 0.3212 achieved in the presence of $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu. By contrast, the constant k declined all the way when Pb existed. A further investigation into the effects of heavy metals on degradation of BDE-209 by extracellular enzymes derived from *P. chrysosporium* was conducted, and the distance correlation analysis of the degradation by extracellular enzymes and the whole cell was carried out. The results demonstrated that the degradation by extracellular enzymes and the whole cell was 63.7%, 69.7% separately, showing no significant difference of degradation capability between them, which proved that the extracellular enzymes played dominating role in the degradation of BDE-209. Furthermore, the distance correlation coefficient R were all greater than 0.9 when three heavy metals existed, certifying that heavy metals affected the degradation of BDE-209 through the interaction between extracellular enzymes and heavy metals.

Key words: *P. chrysosporium*; heavy metals; BDE-209; effect; degradation

多溴联苯醚(polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)是世界第二大溴代阻燃剂^[1], 因其高效的阻燃性而常被加入到树脂、聚苯乙烯和聚氨酯泡沫等高分子合成材料中, 在塑料制品、纺织品、电路板以及建筑材料等领域都有广泛的应用^[2, 3], 其中十溴

收稿日期: 2011-04-20; 修订日期: 2011-06-20

基金项目: 国家自然科学基金委-广东省联合基金项目(U0933002); 国家自然科学基金项目(50978122); 中央高校基本科研业务费专项(21611343)

作者简介: 熊士昌(1985~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: 47444082@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: thyin@jnu.edu.cn

联苯醚(BDE-209)的产量最大,应用最广^[4]。由于缺乏化学键的束缚,PBDEs易于释放出来,进入环境^[5],通过生物富集^[6]、呼吸吸入^[7]等方式影响人类健康。研究调查显示,我国广东省贵屿电子垃圾拆卸地土壤中PBDEs含量(干重)高达2 720~4 250 ng·g⁻¹,其中BDE-209占到了35%~82%^[8]。重金属污染亦是当前国际上普遍关注的一类公害问题,研究表明,在贵屿,环境重金属Cu等含量为对照区域的2.4~131倍^[9],对人类健康造成严重危害。目前关于PBDEs降解方面的研究,主要集中在光降解^[10]、高压热液处理^[11]、零价铁还原^[12]、厌氧微生物还原^[13]等方面,而好氧生物降解开展较少。基于好氧生物降解在处理有机污染物方面所表现出的高效、快速的优点^[14, 15],开展PBDEs的好氧降解研究具有重要意义。微生物对污染物的降解作用可受多种因素影响,如共代谢底物,有毒物质等,其中,重金属由于具有生物毒性,可影响微生物菌株生长繁殖能力,进而影响污染物的降解作用^[16]。目前,已有学者开展了重金属对有机污染物生物降解影响的研究^[17, 18],而关于重金属对PBDEs生物降解影响的研究报道还较少。本研究采用对有机污染物有广谱降解作用的白腐菌(*Phanerochaete chrysosporium*)为实验菌株,以BDE-209为PBDEs代表物,考察重金属Cd、Cu、Pb对白腐菌降解BDE-209性能的影响,并对其影响途径进行初步探究,以期对重金属与PBDEs复合污染的微生物修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 试剂

BDE-209(纯度99%)、HPLC级正己烷购于Sigma Aldrich公司;无水Na₂SO₄、CH₂Cl₂、葡萄糖、酒石酸铵、KH₂PO₄、MgSO₄·7H₂O、CaCl₂、MnSO₄、NaCl、FeSO₄·7H₂O、ZnSO₄·7H₂O、AlK(SO₄)₂·12H₂O、Na₂MoO₄等购自广州化学试剂厂,均为AR级。

1.1.2 菌株培养

PDA培养基组成为:马铃薯汁20%,葡萄糖20 g·L⁻¹,KH₂PO₄3 g·L⁻¹,MgSO₄1.5 g·L⁻¹,硫酸素8 mg·L⁻¹,琼脂20 g·L⁻¹,pH 6.0。

液体培养基:葡萄糖5 g·L⁻¹,酒石酸铵0.2 g·L⁻¹,KH₂PO₄2.0 g·L⁻¹,MgSO₄·7H₂O0.5 g·L⁻¹,CaCl₂0.1 g·L⁻¹,BI微量元素溶液70 mL(1 L培养基用量),VB10.1 mol·L⁻¹。BI微量元素溶液:

MgSO₄·7H₂O3.0 g·L⁻¹,MnSO₄0.5 g·L⁻¹,NaCl1.0 g·L⁻¹,FeSO₄·7H₂O0.1 g·L⁻¹,ZnSO₄·7H₂O0.1 g·L⁻¹,AlK(SO₄)₂·12H₂O0.01 g·L⁻¹,H₃BO₃0.1 mg·L⁻¹,Na₂MoO₄·2H₂O0.01 mg·L⁻¹,氨基乙酸1.5 g·L⁻¹。

白腐真菌(黄孢原毛平革菌)由本课题组保存。使用前,接种白腐真菌于PDA培养基,35℃生化培养箱培养5 d后,用灭菌的生理盐水将孢子液洗入三角瓶中,用玻璃纤维滤去菌丝体,于650 nm处测其吸光度[吸光度A(1.0)=5×10⁶个·mL⁻¹],调节孢子液浓度至吸光度为0.6,即为接种用菌悬液。4℃保存备用。

1.2 实验方法

1.2.1 BDE-209 浓度测定

BDE-209萃取:由于BDE-209水溶性很低,因此必须整瓶样品全部萃取。采用超声波辅助萃取法。步骤如下:调节培养液pH为2,加入等体积的萃取剂(二氯甲烷:正己烷=1:1),超声萃取2次,移出有机相,过无水硫酸钠脱水,后经旋转蒸发器40℃蒸发至干,用HPLC级正己烷洗涤瓶壁,将BDE-209洗下后转至色谱进样瓶,尽快分析。

BDE-209检测采用GC-MS(Shimadzu, Japan),分析条件为:色谱柱为DB-5MS石英毛细管柱(15 m×0.25 mm×0.25 μm),载气为氦气。质谱条件为:EI源,离子源温度250℃,检测器电压1.1 kV,全扫描m/z范围为50~1 000,接口温度280℃。仪器采用选择离子模式,通过外标法对BDE-209进行定量分析。分析条件为:进样口温度290℃,初始温度110℃保持2 min,以40℃·min⁻¹的速率升至250℃,以10℃·min⁻¹升至300℃,保持2 min,以40℃·min⁻¹升至325℃保持8 min。

1.2.2 重金属对白腐菌生物量及其降解BDE-209的影响

实验于100 mL锥形瓶中进行,实际处理体系为30 mL液体培养基。培养基灭菌后加入一定量重金属储备液,使Cu、Cd、Pb浓度分别为0.5、1、2、3、5 mg·L⁻¹,并加入30 μL BDE-209储备液(溶剂为甲苯),使得体系BDE-209浓度为1 mg·L⁻¹,调节pH为5.0。待甲苯挥发后,接入1 mL白腐菌孢子液,以3层纱布封口,于30℃、150 r·min⁻¹条件下培养,每间隔24 h补充一次无菌去离子水至30 mL,7 d后测定处理体系中的菌体生物量(80℃烘干),同时分析BDE-209残留量,计算其降解率;以上实验均设空白对照,每一处理设3个平行,重复2次。

1.2.3 不同重金属浓度下 BDE-209 降解动力学研究

实验条件同 1.2.2 节. 分别于 1、2、3、4、5、6、7 d 取样分析 BDE-209 残留量. 均设空白对照, 每一处理设 2 个平行, 重复 2 次.

1.2.4 白腐菌生物量及培养液葡萄糖浓度变化考察

不加重金属, 其它条件同 1.2.2 节. 分别于 0、1、2、3、4、5、6、7 d 测定培养液葡萄糖浓度, 同时测定白腐菌生物量. 葡萄糖浓度测定采用比色法^[19], 在 0~8 g·L⁻¹ 范围内与 D_{460} 线性关系良好 ($R^2 = 0.998$), 满足测定要求. 生物量测定同 1.2.2 节.

1.2.5 不同培养时间下胞外酶降解性能考察

白腐菌胞外酶的提取: 接种白腐菌孢子液于液体培养基, 调节 pH 为 5.0, 于 30℃、150 r·min⁻¹ 条件下培养一定时间后, 将培养基离心 (6 000 r·min⁻¹) 处理 20 min, 收集上清液, 即为胞外粗酶液.

分别提取培养 1、2、3、4、5、6、7 d 后的胞外酶, 于 100 mL 锥形瓶中加入 30 mL 胞外粗酶液, 调节使 BDE-209 浓度为 1 mg·L⁻¹, 培养条件同 1.2.2 节, 7 d 后测定 BDE-209 残留量, 计算降解率, 每一处理设 3 个平行, 重复 2 次.

1.2.6 重金属对白腐菌胞外酶降解 BDE-209 的影响

提取培养 6 d 后的胞外酶, 考察重金属对其降解 BDE-209 的影响, 其它条件同 1.2.2 节, 7 d 后分析 BDE-209 残留量. 均设空白对照, 每一处理设 3 个平行, 重复 2 次.

1.2.7 白腐菌胞外酶对重金属吸附作用考察

胞外酶提取方法同 1.2.5 节, 于 100 mL 锥形瓶中加入 30 mL 胞外粗酶液, 调节使 BDE-209 浓度为 1 mg·L⁻¹, Cu、Pb、Cd 各重金属浓度分别为 0.5、1、2、3、5 mg·L⁻¹, 于 30℃、150 r·min⁻¹ 条件下处理 5 h 后离心 (8 000 r·min⁻¹, 30 min), 取上清液, 过 0.22 μm 滤膜后用电感耦合等离子发射光谱仪测定其中重金属残留浓度, 并计算吸附量. 设空白对照, 每一处理设 3 个平行, 重复 2 次.

2 结果与讨论

2.1 重金属对白腐菌生物量及其降解 BDE-209 的影响

图 1 表示了不同浓度重金属对白腐菌生物量及其降解 BDE-209 的影响. 结果表明, 低浓度的重金

属对白腐菌生长均有促进作用. 1 mg·L⁻¹ Cu、Cd、Pb 作用下菌丝体干重分别为 0.049 2、0.052 7、0.051 7 g, 均大于空白时的菌丝体重量 (0.039 g), 促进作用为 Cd > Pb > Cu. Cu 为菌体生长的必需元素, 适量添加可促进菌体生长. 而 Cd、Pb 促进原因可考虑为低剂量的有毒物的“毒物兴奋效应”, 即由生物体对胁迫响应的“过度补偿”引起的. 研究表明, 低剂量有毒物对细胞分裂与增殖有促进作用^[20, 21]. 而随着 3 种重金属浓度的增加, 其对菌体生长表现为抑制作用并逐渐增强, 其中 Cd 的抑制作用最明显, Pb 次之, Cu 最不明显.

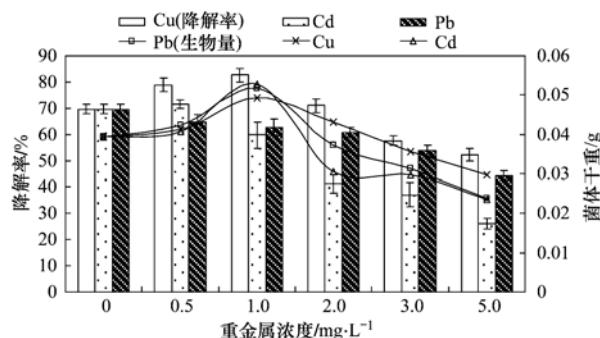


图 1 重金属对白腐菌生物量及其降解 BDE-209 的影响

Fig. 1 Effects of heavy metals on biomass of *P. chrysosporium* and the degradation of BDE-209

白腐菌是一种高效的 BDE-209 降解菌. 未添加重金属时降解率高达 69.7%. 以不同种类及浓度重金属为因素, 对其存在下白腐菌对 BDE-209 的降解进行方差分析, 结果表明各重金属的存在均对 BDE-209 的降解产生显著影响 ($P < 0.05$). Cu 浓度为 1 mg·L⁻¹ 时, 表现为促进降解的作用, 此时降解率达 84.4%. Cd 浓度为 0.5 mg·L⁻¹ 时, 亦有微弱促进, 降解率为 73.4%. 而对于重金属 Pb, 未表现出促进作用, 整体为降解率下降趋势. 而随着 3 种重金属浓度的进一步增加, 降解率均表现为下降趋势.

二者对比可发现, Cu 存在时, 生物量与降解率存在较好的正相关, Cu 作为生长必需元素, 一定浓度可促进菌体生长, 亦可作为菌体酶的辅助因子而发挥作用; 而 Cd 及 Pb 为 1 mg·L⁻¹ 时虽然白腐菌生物量表现为增加, 但 BDE-209 降解率却有所下降, 说明这 2 种重金属存在时白腐菌对 BDE-209 的降解与菌体本身生长并不完全呈正相关, 虽然菌体生长并未受到太大的影响, 但相关酶的活性可能受到了抑制, 因此降解作用减弱. 研究表明, 某些真菌具有自我保护系统, 其分泌物可与重金属结合, 从而可降低重金属对菌体的毒害作用^[22]. Baldrian 认

为^[23],黄孢原毛平革菌的胞外分泌物可螯合重金属.这与本研究的实验结果有相似之处.

2.2 重金属对白腐菌降解 BDE-209 动力学的影响

为了进一步考察重金属对白腐菌降解 BDE-209 过程的影响,进行了降解动力学实验研究,结果见图 2.由图 2 可知,白腐菌降解 BDE-209 具有明显的延迟期,2 d 后 BDE-209 进入了一个快速降解阶段,6~7 d 趋于平稳.由图 2(b)可知,前 3 d 各浓度 Cd 的存在对 BDE-209 降解速率影响不大,3 d 后降解速率出现明显差异,其中 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 表现出明显抑制降解的作用,降解速率趋于 0, BDE-209 残留量基本未变;而 Cd 浓度为 2、3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时于第 4 d 开始 BDE-209 残留量趋于稳定.图 2(a)与图 2(c)表现出相似的规律,3 d 后表现出较明显的降解速率差异,其中重金属浓度为 3、5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降解速率较小,4 d 后 BDE-209 残留量变化不大;其它浓度于 5 d 后降解速率开始降低,6~7 d BDE-209 残留量趋于稳定.

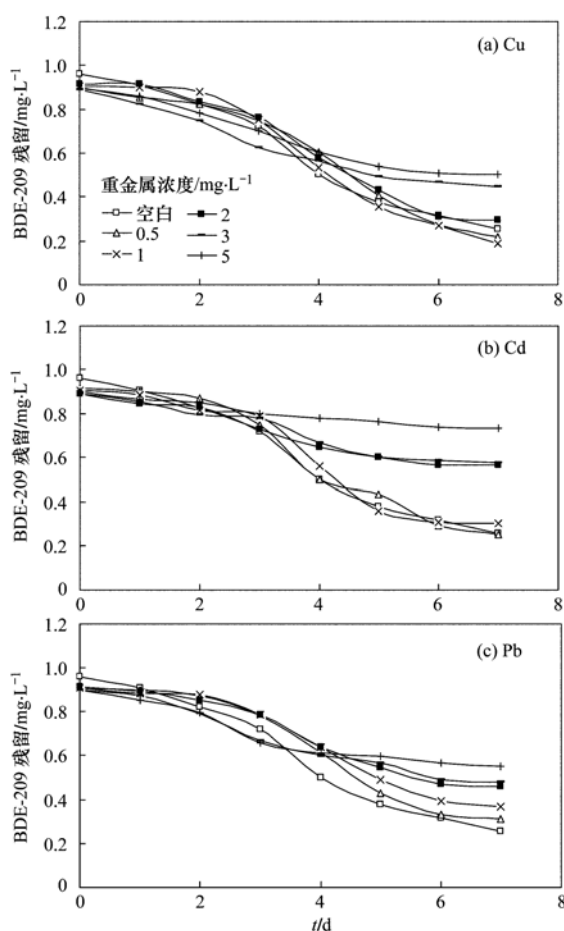


图 2 重金属存在时白腐菌对 BDE-209 的降解动力学

Fig. 2 Dynamic curves of BDE-209 degradation by *P. chrysosporium* in the presence of heavy metals

对于降解反应前期的延迟期,由于本实验添加了供孢子萌发的葡萄糖,因此前期菌体主要消耗易于利用的葡萄糖而非 BDE-209 用于自身繁殖,从而导致了延迟期的产生.培养液 0~2 d 时葡萄糖浓度的急剧下降与生物量的快速上升(图 3)也证明了这一点.

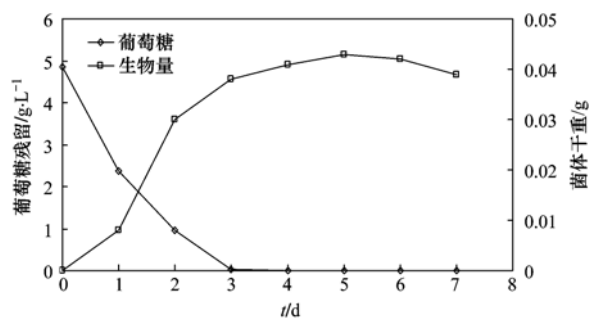


图 3 降解体系葡萄糖浓度及生物量的变化

Fig. 3 Variations of biomass and glucose concentration in the degradation system

在排除降解延迟期(0~2 d)的影响下,对降解过程用以下一级动力学方程进行分析.

$$\ln c = a + kt$$

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{a}{a-x}$$

式中, c 为 BDE-209 浓度, t 为降解时间, k 为一级反应速率常数, a 为 $t=0$ 时反应物浓度,以 x 表示 t 时刻已去除的反应物浓度,则尚未反应的反应物浓度为 $a-x$.由动力学拟合结果(表 1)可知,白腐菌降解 BDE-209 能较好地符合一级反应动力学, R 值为 0.9863. Cu 存在条件下,随着其浓度的增加,降解速率常数 k 表现为先增加后减少;1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 k 值达到最大,为 0.3212,较空白时($k=0.2453$)有明显提高,这与前述 1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cu 可较明显促进白腐菌降解 BDE-209 的实验结果相吻合. Cd 存在条件下,随着其浓度的增加, k 值表现为逐渐减小,当浓度为 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, k 值最大($k=0.2617$),相比空白($k=0.2453$)有微弱提高,表明 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 对白腐菌降解 BDE-209 有微弱促进作用. Pb 存在条件下, k 值亦表现为逐渐减小,当浓度为 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, k 值最大($k=0.2312$),但较空白时($k=0.2453$)有所减少,表明不同浓度的 Pb 均可对白腐菌降解 BDE-209 产生抑制作用.而随着 3 种重金属浓度的进一步提高, k 值均呈减小趋势,表明重金属对降解的抑制作用随着重金属浓度的增加而增大.通过不同重金属间 k 值的比较可知,低浓度($\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,Cu 对白腐菌降解 BDE-209 的促进作用

表 1 降解动力学计算值

Table 1 Kinetic equation of BDE-209 degradation

重金属种类	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	拟合公式	速率常数 k/d^{-1}	R 值
空白	—	$\ln c = -0.2453t - 0.1699$	0.2453	0.9863
Cu	0.5	$\ln c = -0.2853t - 0.0676$	0.2853	0.9842
	1	$\ln c = -0.3212t - 0.0413$	0.3212	0.9944
	2	$\ln c = -0.2324t - 0.1221$	0.2324	0.9848
	3	$\ln c = -0.1017t - 0.3460$	0.1017	0.9730
	5	$\ln c = -0.0948t - 0.2782$	0.0948	0.9670
Cd	0.5	$\ln c = -0.2617t - 0.0890$	0.2617	0.9759
	1	$\ln c = -0.2336t - 0.1497$	0.2336	0.9578
	2	$\ln c = -0.0781t - 0.2337$	0.0781	0.9550
	3	$\ln c = -0.0741t - 0.2280$	0.0741	0.9558
	5	$\ln c = -0.0282t - 0.1818$	0.0282	0.9615
Pb	0.5	$\ln c = -0.2312t - 0.0880$	0.2312	0.9836
	1	$\ln c = -0.1921t - 0.0974$	0.1921	0.9894
	2	$\ln c = -0.1371t - 0.1545$	0.1371	0.9830
	3	$\ln c = -0.0998t - 0.2765$	0.0998	0.9815
	5	$\ln c = -0.0664t - 0.3039$	0.0664	0.9311

最明显. 而高浓度 ($>1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时各重金属对白腐菌降解 BDE-209 均表现为抑制作用, 其中 Cd 的抑制作用最强, $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时速率常数为 $k=0.0282$, 较空白时 ($k=0.2453$) 明显减小, Pb 次之, Cu 的抑制作用最小.

2.3 重金属存在下胞外酶降解性能研究

2.3.1 不同培养时间胞外酶降解性能考察

本实验考察了不同培养时间下白腐菌所产胞外酶的降解性能, 结果见图 4. 培养时间较短时 ($0\sim2\text{ d}$) 胞外酶活性较弱, 降解率较低 ($<10\%$), 培养时间 $>3\text{ d}$ 后, 胞外酶活性显著上升, 培养 $6\sim7\text{ d}$ 时达到最大, 因此, 提取培养 6 d 后的胞外酶进行后续实验.

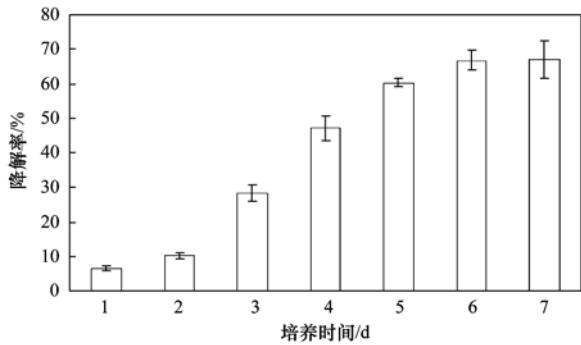


图 4 白腐菌不同生长阶段所产胞外酶降解性能考察

Fig. 4 Degradation of BDE-209 by extracellular enzymes from *P. chrysosporium* produced in different growing periods

2.3.2 重金属对白腐菌胞外酶降解 BDE-209 的影响

本实验考察了重金属存在下白腐菌胞外酶对 BDE-209 的降解性能, 结果见图 5. 由图 5 可知, 当

重金属浓度为 0 时, 胞外酶降解与菌体降解性能差异不大, 降解率分别为 63.7% 和 69.7% . 由此可知, 白腐菌对 BDE-209 降解主要依靠胞外酶进行. 低浓度的 Cd ($0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 及 Cu ($1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 可促进胞外酶的活性, 从而促进了 BDE-209 的降解, 而 Pb 的存在一直表现为对胞外酶活性的抑制, 导致降解率的持续降低. 研究表明, 适当添加 Cu 和 Cd 可使白腐菌所产 Lac 酶的活性增加, 而 Ag、Hg 和 Pb 的加入降低了 Lac 酶的活性^[23]. 这与本研究有相似之处. Cu 为生物必需元素, 亦是多种酶的激活剂, 适量添加可促进相关酶的活性. 低剂量的 Cd^{2+} 可能部分代替 Zn^{2+} 功能, 介导多个转录因子结合到基因的调控区域上, 并且还作为转录和复制过程中的关键酶的辅助因子发挥作用^[24], 研究表明, 低浓度的 Cd 可促进相关酶的活性^[25]. 对比图 1 和图 5 可知, 胞外酶降解与白腐菌降解表现出一定的相似性. 运用统计分析软件 SPSS 17.0 对二者数据进行距离相关分析 (distance correlation), 结果见表 2. 结果表明, 白腐菌降解与胞外酶降解 BDE-209 有较好的相关性, 3 种重金属存在条件下的相关分析 R 值均大于 0.9. 因此可以认为, 重金属主要通过影响胞外酶的方式来影响 BDE-209 的降解.

这一实验结果能更好地解释 2.1 节中降解率与生物量趋势不符的情况. 由于胞外酶是起降解作用的主要部分, 当 Cd 及 Pb 浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 胞外酶的活性受到了不同程度的抑制, 因此降解作用受到抑制. 而由于胞外酶与重金属的结合可为菌体脱毒, 因此菌体生长并未受到明显影响.

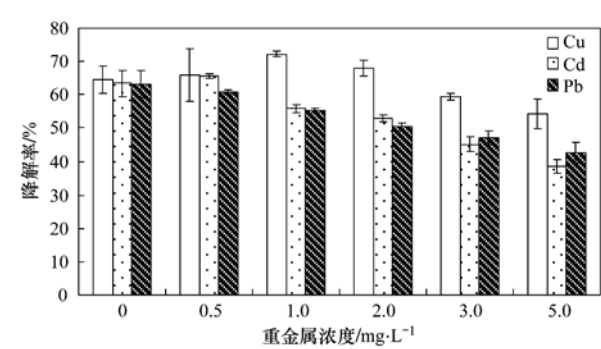


图5 重金属对白腐菌胞外酶降解 BDE-209 的影响
Fig.5 Effects of heavy metals on the degradation of BDE-209
by extracellular enzymes from *P. chrysosporium*

表2 SPSS 17.0 距离相关性分析结果
Table 2 Results of distance correlation analysis by SPSS 17.0

重金属种类	R 值	结论
Cu	0.939	这是相似矩阵
Cd	0.960	这是相似矩阵
Pb	0.923	这是相似矩阵

本实验结果也进一步解释了降解延迟期的产生,由 2.2 节及 2.3.1 节可知 0~2 d 时体系养分充足,菌体利用葡萄糖用于自身快速繁殖;此时胞外酶降解性能较弱,而胞外酶是起降解作用的主要部分,因而导致了延迟期的产生.研究表明,白腐菌对木质素的降解发生在次生代谢阶段,只有在营养缺失的情况下有关降解的酶才会产生^[26].这与本研究有相似之处.

2.3.3 胞外酶对重金属的吸附作用

为了进一步探讨重金属影响 BDE-209 降解的机制,考察了白腐菌胞外酶对各重金属的吸附作用.由图 6 可知,胞外酶对重金属有吸附作用,且随着重金属浓度的增加,其吸附量呈上升趋势.由于重金属与酶结合可能改变酶的性质,且前面实验已经证实

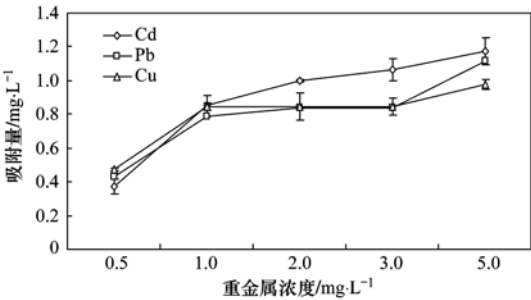


图6 白腐菌胞外酶对重金属的吸附作用
Fig.6 Adsorption of heavy metals by the extracellular
enzymes from *P. chrysosporium*

白腐菌对 BDE-209 的降解主要由胞外酶完成,因此,重金属对 BDE-209 降解有直接的影响.对比可发现,低浓度($\leq 1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时,胞外酶对各重金属吸附量差异不大,但由于各重金属的毒性不同,从而产生如图 1 的降解率差异现象.由图 1 可知,高浓度($>1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时 Cd 对降解率影响最大,Pb 次之,Cu 最小.由图 6 可知,Cd 浓度高时胞外酶对其吸附最为明显,因此酶活性的抑制作用最强,从而对降解的抑制亦最强,Pb 次之,Cu 的吸附作用最小.

3 结论

(1) 一定浓度($\leq 1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的重金属可促进白腐菌的生长, $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时促进作用为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu}$.生物量变化与降解率不完全正相关.

(2) 白腐菌对 BDE-209 的降解较好地符合一级反应动力学,重金属的种类和浓度均可影响 BDE-209 的降解,低浓度 Cu ($1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、Cd ($0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)可促进白腐菌对 BDE-209 的降解,其中 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu 表现出最明显的促进作用,降解率为 84.4%,较空白提高 14.7%,速率常数 $k = 0.32$;高浓度($>1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的重金属对白腐菌降解 BDE-209 皆表现为抑制作用,抑制作用为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu}$,其中 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 抑制作用最明显,降解率为 26.3%,速率常数 $k = 0.03$.

(3) 白腐菌对 BDE-209 的降解主要依靠胞外酶进行.重金属主要通过影响胞外酶的方式来影响 BDE-209 的降解.

参考文献:

[1] Zhang X L, Luo X J, Liu H Y, *et al.* Bioaccumulation of several brominated flame retardants and dechlorane plus in waterbirds from an E-waste recycling region in South China; associated with trophic level and diet sources [J]. Environmental Science and Technology, 2011, 45(2): 400-405.

[2] Xia C H, Lam J C W, Wu X G, *et al.* Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in marine fishes from Chinese coastal waters [J]. Chemosphere, 2011, 82(1): 18-24.

[3] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment [J]. Chemosphere, 2002, 46(5): 583-624.

[4] 高世珍,赵兴茹,崔世茂,等. 典型持久性有机污染物在翅碱蓬中的分布特征 [J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2456-2461.

[5] Muir D C G, Backus S, Derocher A E, *et al.* Brominated flame retardants in polar bears (*Ursus maritimus*) from Alaska, the Canadian Arctic, East Greenland, and Svalbard [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 40(2): 449-455.

- [6] Schecter A, Pöpke O, Harris T R, *et al.* Polybrominated diphenyl ether (PBDE) levels in an expanded market basket survey of US food and estimated PBDE dietary intake by age and sex [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, **114**(10): 1515-1520.
- [7] Stuart H, Ibarra C, Abdallah M A E, *et al.* Concentrations of brominated flame retardants in dust from United Kingdom cars, homes, and offices: Causes of variability and implications for human exposure [J]. *Environment International*, 2008, **34**(8): 1170-1175.
- [8] Leung A O W, Luksemburg W J, Wong A S, *et al.* Spatial distribution of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in soil and combusted residue at Guiyu, an electronic waste recycling site in southeast China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(8): 2730-2737.
- [9] Guo Y, Huang C J, Zhang H, *et al.* Heavy Metal Contamination from Electronic Waste Recycling at Guiyu, Southeastern China [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, **38**(4): 1617-1626.
- [10] Rayne S, Wan P, Ikononou M. Photochemistry of a major commercial polybrominated diphenyl ether flame retardant congener: 2, 2', 4, 4', 5, 5'- Hexabromodiphenyl ether (BDE153) [J]. *Environment International*, 2006, **32**(5): 575-585.
- [11] Nose K, Hashimoto S, Takahashi S, *et al.* Degradation pathways of decabromodiphenyl ether during hydrothermal treatment [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(1): 120-125.
- [12] Keum Y S, Li Q X. Reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers by zerovalent iron [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(7): 2280-2286.
- [13] He J Z, Robrock K R, Alvarez-Cohen L. Microbial reductive debromination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(14): 4429-4434.
- [14] Cho H S, Moon H S, Kim M, *et al.* Biodegradability and biodegradation rate of poly(*ε*-caprolactone)-starch blend and poly(*n*-butylene succinate) biodegradable polymer under aerobic and anaerobic environment [J]. *Waste Management*, 2011, **31**(3): 475-480.
- [15] Du L N, Wang S, Li G, *et al.* Biodegradation of malachite green by *Pseudomonas* sp. strain DY1 under aerobic condition: characteristics, degradation products, enzyme analysis and phytotoxicity [J]. *Ecotoxicology*, 2011, **20**(2): 438-446.
- [16] Lin C W, Chen S Y, Cheng Y W. Effect of metals on biodegradation kinetics for methyl *tert*-butyl ether [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **32**(1): 25-32.
- [17] Pérez R M, Cabrera G, Gómez J M, *et al.* Combined strategy for the precipitation of heavy metals and biodegradation of petroleum in industrial wastewaters [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **182**(1-3): 896-902.
- [18] 邓军, 尹华, 叶锦韶, 等. 氧化节杆菌与苯并[a]芘-镉交互作用机理 [J]. *化工学报*, 2010, **61**(3): 747-753.
- [19] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 129-131.
- [20] Bärlocher F, Guenzel K, Sridhar K R, *et al.* Effects of 4-*n*-nonylphenol on aquatic hyphomycetes [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(9): 1651-1657.
- [21] Giddabasappa A, Hamilton W R, Chaney S, *et al.* Low-level gestational lead exposure increases retinal progenitor cell proliferation and rod photoreceptor and bipolar cell neurogenesis in mice [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, **119**(1): 71-77.
- [22] Göehre V, Paszkowski U. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation [J]. *Planta*, 2006, **223**(6): 1115-1122.
- [23] Baldrian P. Interactions of heavy metals with white-rot fungi [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2003, **32**(1): 78-91.
- [24] Sobkowiak R, Deckert J. Cadmium-induced changes in growth and cell cycle gene expression in suspension-culture cells of soybean [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2003, **41**(8): 767-772.
- [25] Zhang Y, Shen G Q, Yu Y S, *et al.* The hormetic effect of cadmium on the activity of antioxidant enzymes in the earthworm *Eisenia fetida* [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(11): 3064-3068.
- [26] 江凌, 吴海珍, 韦朝海, 等. 白腐菌降解木质素酶系的特征及其应用 [J]. *化工进展*, 2007, **26**(2): 198-203.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-pei, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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