

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

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

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铈在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究

叶运弟¹, 孙水裕^{1*}, 郑莉¹, 刘宝建², 许燕滨¹, 占星星¹, 刘敬勇¹

(1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 广州市沥滘污水处理厂, 广州 510290)

摘要: 为评价超声波促进污泥好氧/缺氧消化的作用, 采用频率 28 kHz, 声能密度为 $0.15 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$ 和超声时间 10 min 的超声参数与好氧/缺氧消化衔接, 研究了污泥的 SS、VSS 及水解酶活性(淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶、蛋白酶、磷酸酶)在消化过程中的变化趋势, 同时以未经超声处理的消化污泥作为对照。结果表明, 经过超声波-好氧/缺氧消化 13 d, VSS 去除率为 44.3%, 高出对照污泥 14.9%。污泥中水解酶活性随消化天数增加呈先增加后减少的变化趋势, 其中超声污泥的淀粉酶和葡萄糖苷酶活性在第 5 d 达到峰值, 此时 VSS 淀粉酶活性为 $0.104 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 葡萄糖苷酶活性为 $0.637 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。超声污泥中胞内蛋白酶和胞外蛋白酶在第 7 d 达到峰值, 胞内蛋白酶活性为 $23.68 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 远远大于胞外蛋白酶, 在污泥消化过程中起主导作用。超声污泥中酸性磷酸酶活性高于对照污泥, 而碱性磷酸酶对环境改变较为敏感, 超声波预处理改变污泥内部性质, 导致碱性磷酸酶活性减少。

关键词: 超声波预处理; 好氧/缺氧; 污泥; 淀粉酶; 葡萄糖苷酶; 蛋白酶; 磷酸酶

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2780-06

Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment

YE Yun-di¹, SUN Shui-yu¹, ZHENG Li¹, LIU Bao-jian², XU Yan-bin¹, ZHAN Xing-xing¹, LIU Jing-yong¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangzhou Lijiao Sewage Treatment Plant, Guangzhou 510290, China)

Abstract: In order to evaluate the function of sludge aerobic/anoxic digestibility by ultrasonic pretreatment. The SS, VSS and hydrolytic enzyme activities (amylase, glucosidase, protease, phosphatase) were measured before and after ultrasonic pretreatment (28 kHz, $0.15 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$, 10 min). The results showed that the performances of aerobic/anoxic were greatly improved after ultrasonic pretreatment, the removal efficiency of VSS went to 44.3%, 7.8% better than of traditional aerobic/anoxic digestion. The variational trend of sludge hydrolytic enzyme activities increased firstly and then fell off during 13d digestion, the maximum of amylase activity and glucosidase activity in ultrasonic sludge, appeared in the 5 d, amylase activity was $0.104 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ and glucosidase activity was $0.637 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$. The maximum of intracellular protease activity and extracellular proteases activity in ultrasonic sludge, appeared in the 7 d, intracellular protease activity was $23.68 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, higher than extracellular proteases activity, and it was playing a leading role in sludge digestion. The acid phosphatase activity of ultrasonic sludge was higher than the control sludge, and the alkaline phosphatase was sensitive to environment. So the alkaline phosphatase activity reduced when the internal properties of sludge was changed.

Key words: ultrasonic pretreatment; aerobic/anoxic; sludge; amylase; glucosidase; protease; phosphatase

好氧/缺氧污泥消化工艺是污泥减量化生物处理方法之一。污泥消化系统中大部分有机物不能被微生物利用, 须被微生物胞外水解酶催化水解成小分子有机物才能吸收^[1]。而活性污泥中的水解酶, 主要有蛋白酶、淀粉酶、葡萄糖苷酶等。在这些酶的作用下, 蛋白质、碳水化合物、脂肪等有机物水解成氨基酸、单糖及挥发性脂肪酸等。然而, 大分子有机物的水解速率较慢是制约污泥消化的主要因素之一^[2,3]。超声波预处理能促进各种受絮体束缚的胞外酶的释放, 有助于污泥中大分子有机物的生物代谢^[4]。因此, 引入超声波预处理可提高污泥的生物活性和可降解性能, 缩短污泥消化时间^[5~8]。大

量的研究表明, 超声波对酶起激活或钝化的作用, 这取决于酶本身的性质以及超声处理条件^[9~12]。

本研究在前期实验基础得出最佳超声条件(超声频率 28 kHz, 声能密度 $0.15 \text{ kW} \cdot \text{L}^{-1}$, 超声时间 10 min), 为探讨超声波促进好氧/缺氧污泥消化的机制, 实验以污泥中水解酶(包括淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶、蛋白酶、磷酸酶)为研究对象, 通过分析上述待测酶的活性大小, 探讨超声波对好氧/缺氧污泥消化

收稿日期: 2011-10-28; 修订日期: 2012-03-11

基金项目: 广东省教育部产学研合作专项(2008B0905200253)

作者简介: 叶运弟(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥减量化的机制, E-mail: 513870370@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: sysun@gdut.edu.cn

系统水解酶的影响,以期为提高处理效率和缩短污泥消化时间提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

超声波仪器:超声波清洗器(SK2200LHC型,上海科导超声仪器有限公司)频率28 kHz,有效容量3 L,超声功率从0~99 W共有10个调节档,每档间隔10 W.

好氧/缺氧装置:好氧曝气所用的气泵为超静强力气泵(V-20型,广东海利集团).缺氧搅拌所用的搅拌器为JB-1A搅拌器(JB-1A型,上海精密科学仪器有限公司).

1.2 实验方法

根据前期超声波预处理实验结果,采用最佳参数,即超声频率28 kHz,声能密度 $0.15\text{ kW}\cdot\text{L}^{-1}$ 和超声时间10 min,消化污泥的生物消化效率最高^[13].对污泥进行预处理(超声污泥),然后与未处理污泥(对照污泥)同时进行实验.

污泥取自广州市某污水处理厂二沉池集泥井中,实验采用的2个反应器记为A和B:A为超声波-好氧/缺氧消化反应器,B为好氧/缺氧消化反应器.好氧和缺氧期各12 h,交替运行.每个反应器污

泥体积为1 600 mL,反应器每天进泥和排泥各140 mL.污泥在进入A反应器前进行超声处理,污泥的停留时间为13 d.每2 d定时取样测试,当消化污泥达到稳定状态即为一个消化周期.温度保持在20~25℃.具体取样条件可见表1.

表1 取样时间和工艺条件

Table 1 Characteristics of aerobic/anoxic digestion of municipal sewage sludge at the sampling times				
取样时间/d	运行条件			
	好氧期 DO /mg·L ⁻¹	缺氧期 DO /mg·L ⁻¹	pH	氨氮 /mg·L ⁻¹
0	5.30	0.50	6.98	5.15
1	5.40	0.60	6.82	4.63
3	5.60	0.50	6.68	5.52
5	5.40	0.70	6.86	4.39
7	5.30	0.50	6.84	4.54
9	5.50	0.50	6.97	4.96
13	5.40	0.40	6.88	4.43

1.3 测试方法

反应器运行0、1、3、5、7、9、11和13 d时分别在消化罐中取样,具体取样条件可见表1.样品在超声波破碎机上超声10 min,然后在20~25℃、 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心30 min,取上清液进行实验.

测定方法:淀粉酶参照3,5-二硝基水杨酸还原法^[14],其它水解酶(包括 α -葡萄糖苷酶、蛋白酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶)的测定方法见表2.

表2 水解酶活力的测定方法^[15]

Table 2 Assay methods of hydrolytic enzyme activities				
水解酶	底物	培养条件	混合液	反应终止剂
α -葡萄糖苷酶	对硝基苯- α -D-吡喃葡萄糖苷(0.1%)	将混合液在37℃下培养60 min,终止反应,离心取上清液于410 nm波长处比色	pH 7.6 的 Tris-HCl 缓冲溶液($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)2 mL,底物1 mL,剩余污泥1 mL	沸水浴中加热3 min
蛋白酶	偶氮酪蛋白(0.5%)	将混合液在37℃下培养90 min,终止反应,离心取上清液2 mL,加入 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ (2 mL),于440 nm波长处比色	底物1 mL,剩余污泥3 mL	10% 三氯乙酸
酸性磷酸酶	对硝基苯磷酸二钠(0.1%)	将混合液在37℃下培养30 min,终止反应,离心取上清液于410 nm波长片比色	pH 4.8 的 HAc-NaAc 缓冲液($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)2 mL,底物1 mL,剩余污泥1 mL	$0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ (2 mL)
碱性磷酸酶	对硝基苯磷酸二钠(0.1%)	将混合液在37℃下培养30 min,终止反应,离心取上清液于410 nm波长片比色	pH 9.6 的 Na_2CO_3 - NaHCO_3 缓冲液($0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)2 mL,底物1 mL,剩余污泥1 mL	$0.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ (2 mL)

2 结果与讨论

2.1 超声波对污泥缺氧/好氧消化效果的影响

如图1所示,超声污泥和对照污泥SS和VSS浓度呈逐渐减少趋势,污泥VSS去除率呈逐渐增大的变化趋势.经过13 d好氧/缺氧消化后,污泥SS、VSS浓度以及VSS去除率基本到达稳定.稳定后超

声污泥的SS、VSS浓度分别为 $8.239\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.395\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,VSS去除率为44.3%,高出对照污泥14.9%.可见,超声波预处理对污泥生物消化效率有明显的促进作用.这主要是超声波预处理促进胞内物质释放,可作为微生物生长的底物,提高其对有机物的分解吸收能力,从而促进好氧/缺氧污泥消化^[16].

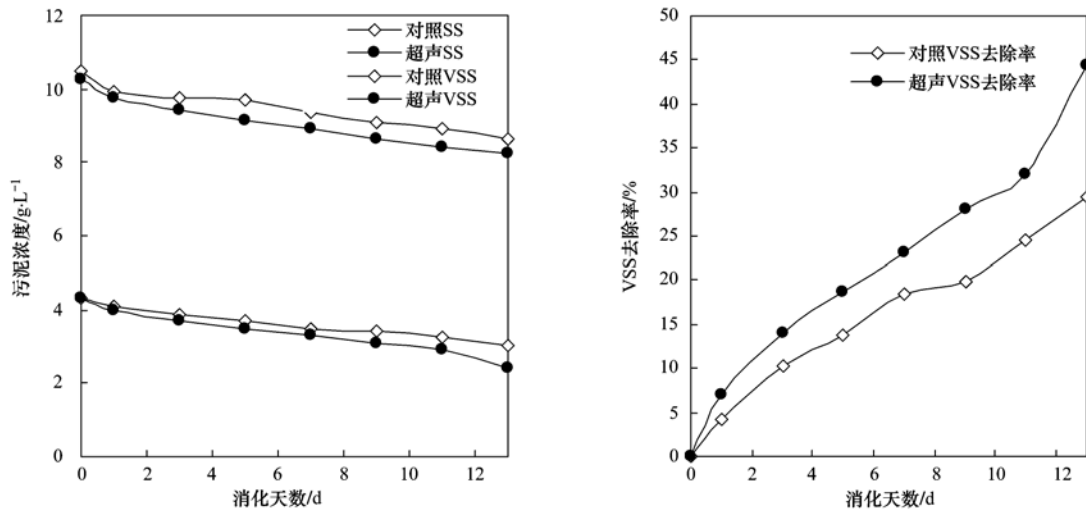


图1 超声污泥和对照污泥的污泥浓度及 VSS 去除率在消化过程中的变化

Fig. 1 Variation of VSS and their removal rate between ultrasonic pretreatment and control during the digestion

2.2 超声波促进污泥好氧/缺氧消化过程中微生物水解酶的变化

2.2.1 淀粉酶活性的变化

由图2可以看出,超声污泥和对照污泥的淀粉酶活性变化呈先增大后减少的趋势,超声污泥消化0~1 d,淀粉酶含量增加缓慢,从0.038 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到0.04 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$;消化1~7 d,淀粉酶含量快速增加,从0.04 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到0.104 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,第5 d达到峰值;最后7~13 d,淀粉酶含量从0.104 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 减少到0.049 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$.对照污泥淀粉酶含量变化趋势与超声污泥相似,但变化特点不同:消化0~9 d,超声污泥淀粉酶含量大于对照污泥,由于超声波改变了污泥细胞膜的通透性,加快了溶解氧的吸收,从而提高了淀粉酶活性;随后9~13 d,对照污泥的淀粉酶含量大于超声污泥.即从第9 d开始对照污泥淀粉酶活性高于超声污泥,其原因在于超声污泥经过多次超声波辐射后,形成温度效应,温度发生变化,而酶对温度较为敏感,导致超声污泥的淀粉酶活性低于对照污泥.

α -淀粉酶是一种内切酶,该酶专一地从内部切入水解直链淀粉1,4-糖苷键,并跳过相邻糖苷键,继续切断1,4-糖苷键,直达长链非还原末端剩留5个糖苷键时,酶作用即被阻抑. α -淀粉酶对支链淀粉的直链段同样具有水解活性^[17].在其适宜温度下, α -淀粉酶可将其中的淀粉及其他含有1,4-糖苷键的碳水化合物水解,破坏污泥胶团的网络结构,从而达到破解污泥的效果.然而淀粉酶只能水解含有1,4-糖苷键的物质,对污泥中的其它有机物作用较差,但是如果同时存在蛋白酶或其他水解酶类,可促进污

泥水解^[18].

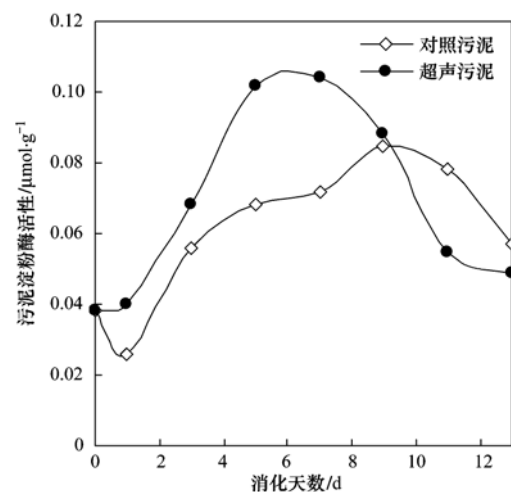


图2 超声污泥和对照污泥淀粉酶活性的变化

Fig. 2 Variation of amylase activity between ultrasonic pretreatment and control during the digestion

2.2.2 葡萄糖苷酶活性的变化

从图3可知,污泥中葡萄糖苷酶含量总体呈先增大后减少的趋势,其变化特点呈3个阶段:超声污泥消化初期0~3 d为缓冲适应期,葡萄糖苷酶含量从0.221 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到0.319 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$;接着3~5 d,葡萄糖苷酶含量快速增长,从0.319 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到0.637 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,第5 d达到峰值.这是由于超声辐射能量得到一定积累,导致超声污泥中葡萄糖苷酶快速释放;接着5~9 d,其含量从0.637 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 快速下降到0.034 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,原因在于超声波产生的空化作用对细胞造成一定的伤害,并且葡萄糖苷酶的不断消耗,导致酶活性下降;最后9~13 d,葡萄糖苷酶含量从0.034 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 上

升到 $0.219 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$. 对照污泥葡萄糖苷酶含量变化趋势与超声污泥相似, 但其含量远远少于超声污泥.

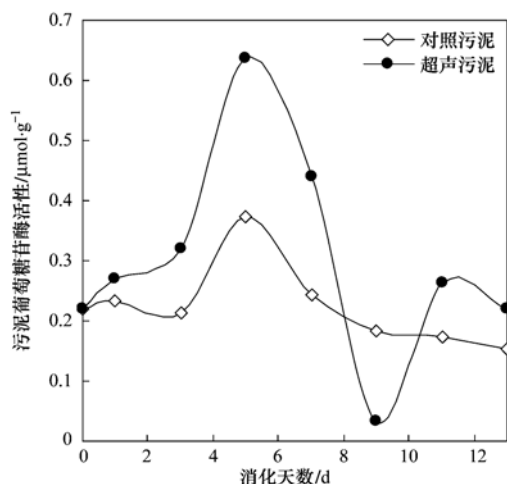


图3 超声污泥和对照污泥葡萄糖苷酶活性的变化

Fig. 3 Variation of Glucosidases activity between ultrasonic pretreatment and control during the digestion

2.2.3 污泥胞内和胞外蛋白酶活性的变化

蛋白质是污泥中含量最多的有机组分, 必须通过蛋白酶水解后才能为微生物所利用, 因此污泥蛋

白酶活性直接影响有机物的去除和污泥的减量^[19].

由图4可以看出, 超声污泥和对照污泥的胞内和胞外蛋白酶活性变化均呈先增后减的趋势, 而且超声污泥胞内蛋白酶活性远远大于胞外蛋白酶活性, 可见污泥消化过程中起主导作用的是胞内蛋白酶. 由图4(b)可得, 经超声波预处理后, 污泥中胞内蛋白酶活性提高了32.9%. 其变化特点呈3个阶段: 消化初期0~3 d为缓慢上升期, 含量从 $17.82 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到 $19.39 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; 接着3~9 d为迅速上升期, 含量从 $19.39 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到 $23.68 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 第7 d达到峰值; 最后9~13 d为减少期, 其含量从 $23.68 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 减少到 $20.11 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$. 超声污泥蛋白酶活性高于对照污泥, 这与污泥中VSS的降解效率相对应(图1). 超声波辐射提高污泥蛋白酶活性机制体现在2个方面: 一是超声波的机械效应增大了微生物细胞与溶液的接触面积, 提高蛋白质的转化率. 二是超声波刺激微生物细胞对蛋白酶的分泌, 提高了污泥内蛋白酶的含量. 但是长时间超声辐射对污泥蛋白酶活性的提高却不^[20]. 长时间地辐照对污泥蛋白酶活性没有强化效果^[21].

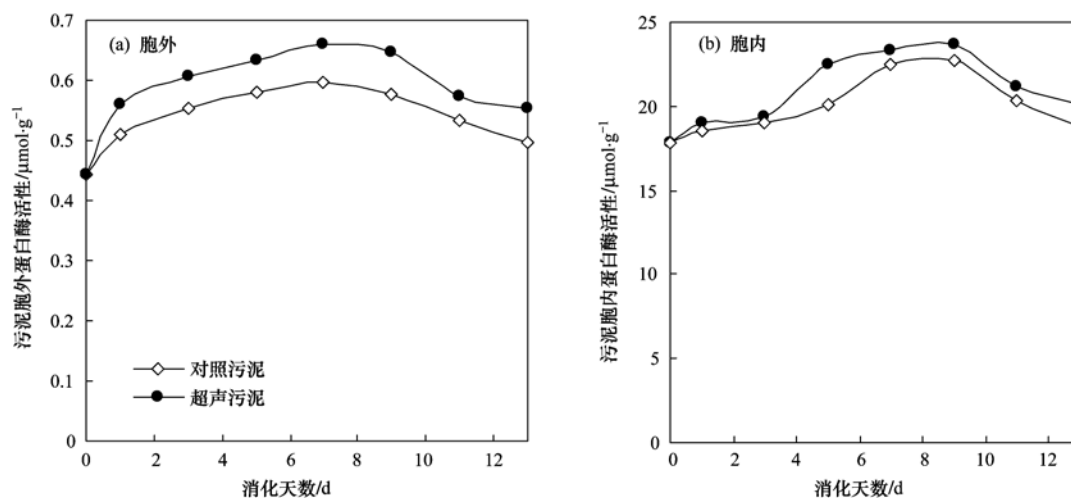


图4 超声污泥和对照污泥蛋白酶活性的变化

Fig. 4 Variation of protease activity between ultrasonic pretreatment and control during the digestion

2.2.4 污泥酸性和碱性磷酸酶活性的变化

磷酸酶是一种能够将底物去磷酸化的酶, 即通过水解磷酸单酯将底物分子上的磷酸基团除去, 并生成磷酸根离子和自由的羟基. 磷酸酶可以有效地将污泥中的有机磷水解为无机磷^[22].

由图5(a)可知, 酸性磷酸酶活性变化呈先增大后减少的趋势, 实验初期0~3 d, 超声污泥的酸性磷酸酶活性从 $0.236 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 缓慢上升到 0.387

$\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; 接着消化3~7 d, 酸性磷酸酶活性快速增加, 从 $0.387 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升到 $0.512 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 达到峰值; 最后7~13 d, 酶活性缓慢下降至 $0.388 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$. 其中超声污泥中酸性磷酸酶活性远远大于对照污泥, 并且比对照污泥峰值相对提前了2 d. 从图5(b)中可知, 碱性磷酸酶对污泥内部环境较为敏感, 超声预处理对碱性磷酸酶活性没有起增强的作用. 国内外研究发现, 缺氧和好氧条件有利于提高

聚磷菌的活性从而增加除磷效果^[23]. 在缺氧条件下,聚磷菌可从降解多聚磷酸盐中获取能量用于吸收可溶性有机物. 吸收的物质随即以多羟基链烷酸

盐的形式储存在细胞内,在好氧条件下被细胞吸收和利用,在这一系列过程中,有助于提高污泥除磷效率.

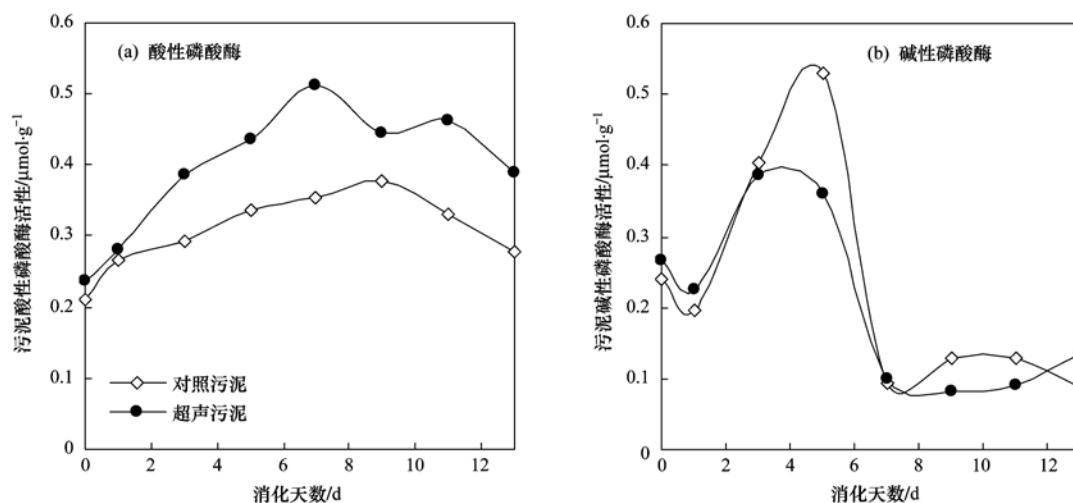


图5 超声污泥和对照污泥磷酸酶活性的变化

Fig. 5 Variation of phosphatase activity between ultrasonic pretreatment and control during the digestion

由图2~5可得知,超声波作用直接影响生物中水解酶活性、细胞组成以及营养需求,间接影响了分子的溶解性、细胞的通透性. 在超声波机械效应和空化效应的作用下,引起底物和产物分子的高频振动,促使细胞膜通透性增加,并且使溶质粒子加速运动,增加酶的活性,使酶的催化作用提高,增强污泥消化效率,缩短消化时间^[24,25]. 刘红等^[26]研究了超声波对污泥生物活性以及有机物去除效果的改善,结果表明超声处理后污泥活性提高了30%. 闰怡新等^[25]认为适宜强度的超声波能够强化反应物进入及生成物离开酶活性中心的过程,激励了微生物的新陈代谢活性,提高酶活力促进酶催化. 因此超声波能提高好氧/缺氧污泥消化效率,缩短消化时间.

3 结论

(1) 超声污泥和对照污泥 SS、VSS 浓度呈逐渐减少趋势, VSS 去除率呈逐渐增大的变化趋势. 经过 13 d 好氧/缺氧消化后, 污泥 SS、VSS 浓度以及 VSS 去除率基本到达稳定. 稳定后超声污泥的 VSS 去除率为 44.3%, 高出对照污泥 14.9%.

(2) 超声波-好氧/缺氧污泥消化过程中, 淀粉酶、葡萄糖苷酶活性随消化天数的增加呈先增后减的变化趋势, 其中超声污泥的淀粉酶和葡萄糖苷酶活性在第 5 d 达到峰值, 分别是 $0.104 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.637 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; 对照污泥淀粉酶活性第 9 d 达到峰值, 对照污泥葡萄糖苷酶活性第 5 d 达到峰值, 超

声污泥酶的活性远远大于对照污泥.

(3) 超声污泥中的蛋白酶、磷酸酶活性随消化天数的增加同样呈先增后减的变化趋势. 其中胞内蛋白酶活性远远大于胞外蛋白酶, 在污泥消化过程中起主导作用. 超声污泥中酸性磷酸酶活性高于对照污泥, 而碱性磷酸酶对环境改变较为敏感, 超声波预处理改变污泥性质, 导致碱性磷酸酶活性减少.

参考文献:

- [1] Nabarlaz D, Vondrysova J, Jenicek P, *et al.* Hydrolytic enzymes in activated sludge: Extraction of protease and lipase by stirring and ultrasonication [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, **17** (5): 923-931.
- [2] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Extracellular enzymes in sludge flocs collected at 14 full-scale wastewater treatment plants [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2008, **83**(12): 1717-1725.
- [3] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Enzyme activities in activated sludge flocs [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **77**(3): 605-612.
- [4] 诸一殊, 余光辉, 何晶晶, 等. 超声波预处理提高污泥好氧消化性能研究 [J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(5): 690-693.
- [5] Salsabil M R, Prorot A, Casellas M, *et al.* Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **148** (2-3): 327-335.
- [6] 王晓霞, 邱兆富, 范吉, 等. 超声波处理剩余污泥有机物、氮和磷的释放特性研究 [J]. *环境污染与防治*, 2009, **31** (3): 66-69.

- [7] Mason T J. Sonochemistry and the environment-Providing a “green” link between chemistry, physics and engineering[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, **14**(4): 476-483.
- [8] Nickel K, Neis U. Ultrasonic disintegration of biosolids for improved biodegradation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, **14**(4): 450-455.
- [9] Nabarlaz D, Vondrysova J, Jenicek P, *et al.* Hydrolytic enzymes in activated sludge: Extraction of protease and lipase by stirring and ultrasonication [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, **17**(5): 923-931.
- [10] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Extracellular proteins, polysaccharides and enzymes impact on sludge aerobic digestion after ultrasonic pretreatment[J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 1925-1934.
- [11] Ayol A, Filibeli A, Sir D, *et al.* Aerobic and anaerobic bioprocessing of activated sludge: Floc disintegration by enzymes [J]. *Journal of Environmental Science and Health-Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2008, **43**(13): 1528-1535.
- [12] Yan S T, Miyanaga K, Xing X H, *et al.* Succession of bacterial community and enzymatic activities of activated sludge by heat-treatment for reduction of excess sludge [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, **39**(3): 598-603.
- [13] 童文锦, 孙水裕, 郑莉, 等. 城市污水污泥超声波预处理的研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(5): 133-135.
- [14] 黄学林, 陈润政. 种子生理实验手册[M]. 北京: 农业出版社, 1990. 110-112.
- [15] Goel R, Mino T, Satoh H, *et al.* Enzyme activities under anaerobic and aerobic conditions in activated sludge sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1998, **32**(7): 2081-2088.
- [16] 王永霞, 樊建军, 莫卫松. 超声波技术在污泥处理中的应用[J]. *重庆建筑大学学报*, 2009, **29**(3): 91-94.
- [17] 王绍义, 罗志腾, 钱雷. 高浓度有机废水处理技术与工程应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003. 57-59.
- [18] Yang Q, Luo K, Li X M, *et al.* Enhanced efficiency of biological excess sludge hydrolysis under anaerobic digestion by additional enzymes[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(9): 2924-2930.
- [19] 曾晓岚, 龙腾锐, 丁文川, 等. 低能量超声波辐射提高好氧污泥活性研究[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(5): 88-91.
- [20] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Enzyme activities in activated sludge flocs[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **77**(3): 605-612.
- [21] 诸一殊, 余光辉, 何晶晶, 等. 超声波预处理提高污泥好氧消化性能研究[J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(5): 690-693.
- [22] Li Y, Chróst R J. Microbial enzymatic activities in aerobic activated sludge model reactors [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, **39**(4): 568-572.
- [23] You S J, Ouyang C F. Simultaneous wastewater nutrient removal by a novel hybrid bioprocess [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(6): 883-891.
- [24] Pitt W G, Ross S A. Ultrasound increases the rate of bacterial cell growth[J]. *Biotechnology Progress*, 2003, **19**(3): 1038-1044.
- [25] 闫怡新, 刘红. 低强度超声波强化污水生物处理机制[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 647-650.
- [26] 刘红, 闫怡新. 低强度超声波对低温下污水生物处理的强化效果及工艺设计[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 721-725.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 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