

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 ..... 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM<sub>2.5</sub> 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 ..... 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 ..... 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM<sub>2.5</sub> 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 ..... 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 ..... 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 ..... 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 ..... 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM<sub>10</sub> 中有机碳和元素碳污染特征分析 ..... 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 ..... 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM<sub>2.5</sub> 排放危害度评价模型建立及案例分析 ..... 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 ..... 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 ..... 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 ..... 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 ..... 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 ..... 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 ..... 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 ..... 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 ..... 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 ..... 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr<sub>2</sub> 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 ..... 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 ..... 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 ..... 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 ..... 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 ..... 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 ..... 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 ..... 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 ..... 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 ..... 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 ..... 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 ..... 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 ..... 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 ..... 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 ..... 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 ..... 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 ..... 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 ..... 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 ..... 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 ..... 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 ..... 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 ..... 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 ..... 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 ..... 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 ..... 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 ..... 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 ..... 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 ..... 尹雪,陈家军,吕策 (733)

*Pseudomonas* sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 ..... 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$  对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 ..... 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 ..... 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 ..... 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 ..... 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 ..... 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 ..... 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究 ..... 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N<sub>2</sub>O 产生的关键微生物过程及减排措施 ..... 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

# 厌氧生物法处理果胶废水的研究

陈兵兵<sup>1,3</sup>, 杨春平<sup>1,2,3\*</sup>, 黎想<sup>1,3</sup>, 代传花<sup>1,3</sup>, 彭蓝艳<sup>1,3</sup>

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 浙江省固体废物处理与资源化重点实验室, 杭州 310018; 3. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

**摘要:** 采用经果胶废水驯化的厌氧污泥处理果胶废水, 考察了果胶浓度、温度对厌氧去除果胶和 COD 的影响, 并对降解产物进行了分析. 结果表明, 与未驯化厌氧污泥处理果胶废水相比, 驯化后的污泥对果胶去除率提高了 59.2%. 果胶浓度分别为 100、2 500 和 4 500 mg·L<sup>-1</sup> 时, 果胶降解速率分别为 4.5、49.8 和 74.0 mg·(L·h)<sup>-1</sup>, 说明果胶浓度越高, 降解速率越快. 果胶浓度低于 500 mg·L<sup>-1</sup>, COD 去除率较低, 仅为 41.6%~82.0%, 果胶浓度高于 1 000 mg·L<sup>-1</sup>, COD 去除率稳定在 91% 以上. 温度越高, 降解果胶所需的时间越短. 随着温度在 5~35℃ 范围内变化, 厌氧污泥对果胶废水中 COD 的去除率从 38.6% 逐渐增加到 91.5%, 当温度高于 35℃ 时, 厌氧污泥对果胶废水中 COD 的去除率逐渐降低. 果胶降解的中间产物主要是乙酸、丙酸、低级酯、烷基醇(C<sub>12</sub>~C<sub>40</sub>).

**关键词:** 厌氧; 果胶废水; 降解速率; 去除率; 中间产物

中图分类号: X792 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0657-06

## Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process

CHEN Bing-bing<sup>1,3</sup>, YANG Chun-ping<sup>1,2,3</sup>, LI Xiang<sup>1,3</sup>, DAI Chuan-hua<sup>1,3</sup>, PENG Lan-yan<sup>1,3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Recycling, College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 3. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control(Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Anaerobic biological process was used to treat pectin wastewater with acclimated sludge. The effects of the influent pectin concentration and the degradation temperature were investigated, and the intermediate products in pectin degradation were measured. Compared with the unacclimated sludge, the results showed that using acclimated sludge, the pectin removal efficiency was increased by 59.2%. The degradation rate of pectin at influent concentrations of 100, 2 500 and 4 500 mg·L<sup>-1</sup> were 4.5, 49.8 and 74.0 mg·(L·h)<sup>-1</sup>, respectively, indicating that the degradation rate increased with the increase of the influent pectin concentration. The COD removal efficiency was relatively low (41.6%-82.0%) when the influent pectin concentration was lower than 500 mg·L<sup>-1</sup>, but it could maintain above 91% when the influent pectin concentration was beyond 1000 mg·L<sup>-1</sup>. The higher the temperature was, the shorter the time was needed for pectin degradation. The COD removal efficiency of anaerobic sludge for pectin wastewater was increased from 38.6% to 91.5% when the temperature ranged from 5°C to 35°C, but it was gradually weakened when the temperature exceeded 35°C. The main intermediate products in pectin degradation were supposed to be acetic acid, propionic acid, lower ester, and alkyl alcohols (C<sub>12</sub>-C<sub>40</sub>).

**Key words:** anaerobic; pectin wastewater; degradation rate; removal efficiency; intermediate products

果胶主要是由  $\alpha$ -1,4-糖苷键联结而成的半乳糖醛酸与鼠李糖、阿拉伯糖和其他中性糖相联结的聚合物<sup>[1]</sup>, 此外还含有一些非糖成分如甲醇、乙酸和阿魏酸. 目前, 关于果胶废水处理方法主要包括复合絮凝剂处理、混凝-吸附法处理、果胶酶处理、生物接触氧化法处理. 利用复合絮凝剂和混凝-吸附法处理果胶废水是最快捷的去除果胶的方法, 通过絮凝剂与果胶分子形成絮体而去除果胶, 但容易产生二次污染, 且后续脱色程序较繁琐. 果胶酶处理果胶废水可以达到很好的效果, 但处理费用过高. 生物接触氧化法处理果胶废水时, 由于果胶具有较强的黏附能力, 系统中的微生物会因果胶的包裹作

用而失去活性, 导致处理效率不高. 果胶相对分子质量在 1 万~40 万之间. 由于果胶具有良好的胶凝和增稠作用<sup>[2]</sup>, 在实际废水处理工程中, 果胶往往会堵塞污水管道, 影响处理设施的正常运行, 降低处理效率.

与上述处理方法相比, 厌氧生物法<sup>[3,4]</sup> 具有运营成本低<sup>[5]</sup>、产泥量少<sup>[6,7]</sup>、处理负荷高<sup>[8]</sup>、能耗

收稿日期: 2013-05-28; 修订日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278464, 50778066); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090161110010); 湖南省环保厅环保科技课题项目(GLTC-2011HN149)

作者简介: 陈兵兵(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: chenbing@hnu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: yangc@hnu.edu.cn

低<sup>[9]</sup>的优点,并可以回收甲烷能源<sup>[10]</sup>.基于此,本研究采用驯化污泥降解果胶废水,考察了果胶浓度、温度等因素对厌氧去除果胶和 COD 的影响,并利用 GC-MS 对产物进行了分析,探究了果胶的降解途径,以期对果胶废水的实际处理工程提供参考.

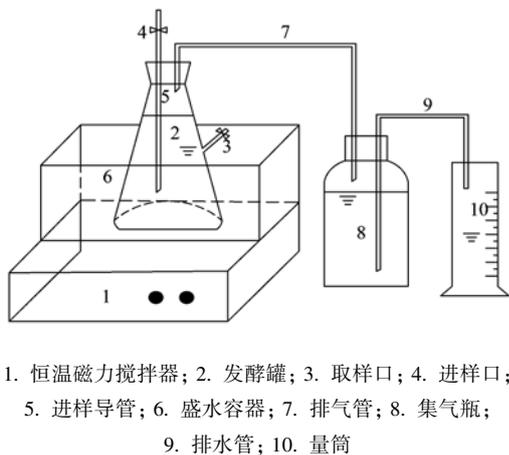
## 1 材料与方法

### 1.1 接种污泥

接种污泥取自长沙市第二污水处理厂的剩余污泥.污泥粒径为 0.2~0.8 mm,污泥的 MLSS 为 17.8~18.5 g·L<sup>-1</sup>,MLVSS 为 12.4~13.8 g·L<sup>-1</sup>.

### 1.2 实验装置

厌氧发酵罐 14 个,其中 1 个大的发酵罐用于污泥的储备与驯化,其余 13 个用于降解实验.实验工艺流程如图 1 所示.



1. 恒温磁力搅拌器; 2. 发酵罐; 3. 取样口; 4. 进样口;  
5. 进样导管; 6. 盛水容器; 7. 排气管; 8. 集气瓶;  
9. 排水管; 10. 量筒

图 1 实验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 污泥驯化

污泥的接种与驯化均在大发酵罐(2 000 mL)中进行,接种污泥先在培养基中培养 1 周,以维持良好的生物活性,此污泥作为初始污泥(即未驯化污泥).培养基成分<sup>[11]</sup>:COD(葡萄糖)2 000 mg·L<sup>-1</sup>,NH<sub>4</sub>Cl 250 mg·L<sup>-1</sup>,NaHCO<sub>3</sub> 600 mg·L<sup>-1</sup>,KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 50 mg·L<sup>-1</sup>,K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 50 mg·L<sup>-1</sup>,CaCl<sub>2</sub> 50 mg·L<sup>-1</sup>,NaCl 10 mg·L<sup>-1</sup>,CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 5 mg·L<sup>-1</sup>,FeCl<sub>3</sub> 25 mg·L<sup>-1</sup>,MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 5 mg·L<sup>-1</sup>,AlCl<sub>3</sub> 32 mg·L<sup>-1</sup>,H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub> 5 mg·L<sup>-1</sup>,ZnCl<sub>2</sub> 5 mg·L<sup>-1</sup>.

采用人工配水对上述污泥进行驯化,配水 COD 为 3 000 mg·L<sup>-1</sup>左右,接种污泥在以葡萄糖为唯一碳源的培养基中培养 13 d 后,逐步添加果胶进行驯化,添加量分别为:葡萄糖 2 500 mg·L<sup>-1</sup> + 果胶 500

mg·L<sup>-1</sup>,7 d; 葡萄糖 2 000 mg·L<sup>-1</sup> + 果胶 1 000 mg·L<sup>-1</sup>,6 d; 葡萄糖 1 500 mg·L<sup>-1</sup> + 果胶 1 500 mg·L<sup>-1</sup>,8 d; 葡萄糖 1 000 mg·L<sup>-1</sup> + 果胶 2 000 mg·L<sup>-1</sup>,7 d; 葡萄糖 500 mg·L<sup>-1</sup> + 果胶 2 500 mg·L<sup>-1</sup>,7 d; 果胶 3 000 mg·L<sup>-1</sup>,7 d; 当果胶与 COD 去除率达到 90% 以上时,说明驯化成功.

#### 1.3.2 果胶浓度对厌氧去除果胶和 COD 的影响

将 600 mL 果胶废水添加至小发酵罐(1 000 mL),接种上述驯化污泥,发酵罐中  $t = 35^{\circ}\text{C}$ 、pH 为 7.0 左右、VSS 为 10 g·L<sup>-1</sup>.接种后反应器用氮气吹 5 min,以驱除发酵罐中的空气,然后置于恒温水浴中培养.

#### 1.3.3 温度对厌氧去除果胶和 COD 的影响

将 600 mL 果胶废水添加至小发酵罐(1 000 mL),接种上述驯化污泥,发酵罐中果胶浓度为 3 500 mg·L<sup>-1</sup>、pH 为 7.0 左右、VSS 为 10 g·L<sup>-1</sup>.接种后反应器的密闭性处理如 1.3.2 节所述,然后分别置于不同温度下培养.

#### 1.3.4 厌氧中间产物分析

取 10 mL 水样在 3 000 r·min<sup>-1</sup>下离心 10 min.然后移取 2.0 mL 上清液于分液漏斗中,加 5 mL 乙醚,振荡 4 min,静置分层,取出上层有机相,同上步骤,重复 3 次,收集有机相.有机相加入无水硫酸钠脱水,然后再置于 K-D 浓缩器中浓缩至约 1.5 mL,供 GC-MS 分析进样.

### 1.4 分析项目及方法

COD:重铬酸钾滴定法;挥发性脂肪酸(VFA):滴定法;MLSS:重量法;MLVSS:重量法<sup>[12]</sup>;果胶:分光光度法;

中间产物采用日本岛津公司生产的 GCMS-QP2010SE 进行 GC-MS 分析<sup>[13]</sup>.色谱柱:HP5 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm i.d×0.25 μm);载气为高纯 He,流量为 50 mL·min<sup>-1</sup>;进样口温度为 250℃,柱温为 40℃,保持 2 min 后,以 10℃·min<sup>-1</sup>的速度升至 240℃,保持 10 min,然后以 10℃·min<sup>-1</sup>的速度升温至 280℃,保持 10 min;进样方式为自动进样,进样量为 0.2 μL;质量扫描范围:45~700 u;电子轰击能量为 70 eV,倍增电压为 2 000 V,离子源温度为 200℃.

## 2 结果与讨论

### 2.1 厌氧污泥驯化

采用人工配制的废水对厌氧污泥进行驯化<sup>[14]</sup>,驯化时间为 55 d.驯化初期,由于微生物对果胶废水

没有完全适应,导致了初期果胶和 COD 去除率分别只有 74.7% 和 39.8%。随着驯化的进行,果胶和 COD 去除率逐步提高。由图 2 可见,驯化过程中,果胶的添加量对驯化系统的稳定性有一定影响,由于污泥中的微生物对果胶存在一个适应期,当废水中果胶浓度突然变化时,系统对 COD 的去除率有不同程度的降低。例如:驯化时间为 20 d 时,果胶浓度从  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  上升到  $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , COD 去除率从 64.8% 下降到 36.4%,随着驯化时间的延长,即 21 ~ 26 d,由于微生物对果胶浓度的适应及其自身利用果胶生长繁殖, COD 去除率逐渐增加并稳定于 70%。驯化前 41 d, COD 去除率为 65% ~ 85%, 41 ~ 55 d,系统对 COD 的去除率稳定在 90% 以上,说明驯化后的污泥具有较高活性。55 d 后,系统对果胶和 COD 的去除率均趋于稳定,认为厌氧污泥驯化成功。

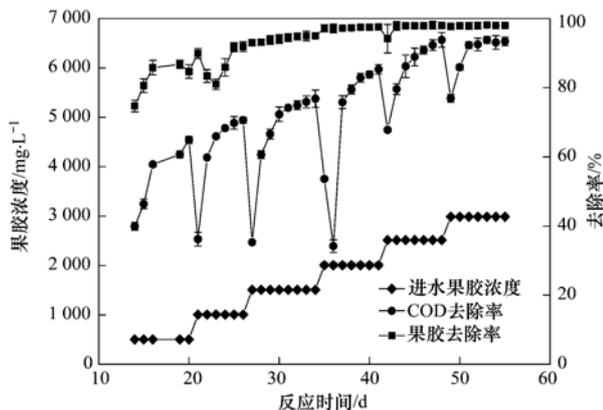


图 2 驯化期果胶浓度对系统去除率的影响

Fig. 2 Effect of pectin concentration on the removal efficiency during the acclimation

## 2.2 驯化污泥与初始污泥(未驯化污泥)对果胶降解的比较

分别选取初始浓度相同的驯化污泥和初始污泥,在相同条件下对果胶进行降解,两种污泥对果胶的降解效果见图 3。

从图 3 可以看出,驯化污泥和初始污泥对果胶降解情况不同。初始污泥在前 24 h 内对果胶降解速度较快,达到  $30.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ ,这是由于厌氧污泥多孔性的物理结构使其具有较强的吸附能力,能够吸附废水中部分有机物。这种吸附包括物理吸附和生物吸附,以物理吸附为主,并能达到吸附平衡<sup>[15]</sup>。24 ~ 144 h,果胶浓度缓慢减少,这可能是由于果胶中含有的部分半乳糖醛酸甲酯水解了<sup>[16]</sup>。驯化污泥对果胶的降解则集中在前 36 h,降解速率达到  $63.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ ,36 h 后果胶浓度基本上不发生变化。

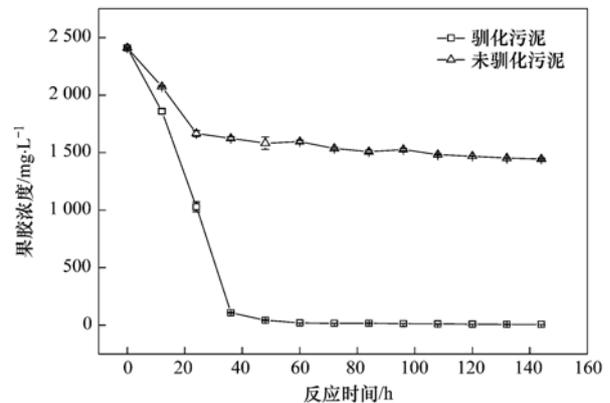


图 3 驯化污泥与未驯化污泥对果胶降解效果的比较

Fig. 3 Comparison of the performance of the acclimated and unacclimated sludge in pectin removal

从降解速率来看,驯化污泥对果胶的降解更快,这主要是由于驯化污泥中含有较多能降解果胶的微生物。从去除率来看,在 120 h 内,驯化污泥比初始污泥提高了 59.2%,可见驯化污泥对果胶的降解能力更强。

## 2.3 果胶浓度对厌氧降解果胶废水的影响

从图 4(a)可以看出,厌氧驯化污泥能够降解浓度大于  $4500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的果胶废水。反应初期,各浓度下的降解速率均较快,降解曲线斜率很大,随着降解时间的延长,降解速率逐渐下降,最终接近于 0。在果胶浓度为 100、500、1000、2500、3000、4500  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,厌氧降解果胶的平均速率分别为 4.5、23.1、29.3、49.8、64.5 和  $74.0 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。由此可见,随着进水果胶浓度的上升,厌氧降解速率逐步提高。从图 4(a)还可以看出,当进水果胶浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,厌氧降解速率缓慢,厌氧降解 24 h 后,废水中果胶残留量为  $52.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这主要是由于在低浓度碳源环境下,微生物新陈代谢活动减弱,从而影响了酸化水解菌将果胶转化为中间产物的能力。由厌氧消化四阶段理论可知,酸化水解阶段大分子的有机物在细菌胞外酶的作用下分解成小分子有机物,有机物只是在形式和质上发生了变化,而在数量上变化较小<sup>[17]</sup>。因此废水中果胶和 COD 的去除不能同时完成,为了进一步了解废水中中间产物的转化情况,实验分别考察了上述不同果胶浓度条件下,废水中 COD 的变化情况,结果见图 4(b)。

从图 4(b)可以看出,24 h 内 COD 降解速率较快,24 ~ 144 h 降解速率逐步下降,144 h 后 COD 基本上保持不变。144 h 内,在果胶浓度为 100、500、1000、2500、3000、4500  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,厌氧污泥对

COD 的去除率分别为 41.6%、82.0%、93.1%、96.1%、94.1%、91.7%。在果胶浓度为 1 000 ~ 4 500 mg·L<sup>-1</sup>时,系统对 COD 的去除率维持在 91% 以上。当果胶浓度为 100 mg·L<sup>-1</sup>、500 mg·L<sup>-1</sup>时,去

除率却相对较低。这主要是由于低浓度的果胶进水不能满足微生物对营养的需求,导致微生物繁殖和新陈代谢活动均受到抑制,因而不利于果胶废水的厌氧生物处理。

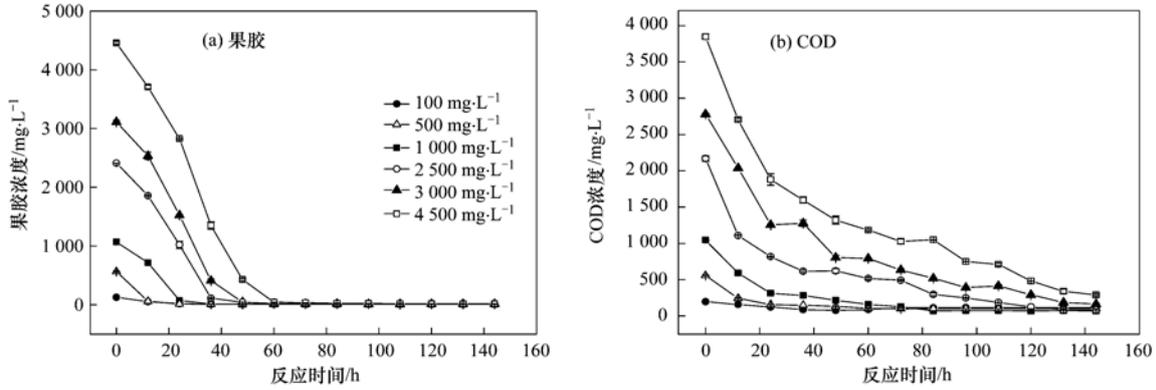


图 4 不同进水浓度下果胶和 COD 的厌氧降解曲线

Fig. 4 Pectin and COD degradation at different initial concentrations of influents in anaerobic reactor

综上所述,进水果胶浓度对厌氧降解果胶废水中的果胶和 COD 的影响大致相同。在进水果胶浓度为 100 ~ 500 mg·L<sup>-1</sup>时,厌氧系统对果胶和 COD 的去除率分别为 93.1% ~ 98.3%、41.6% ~ 82.0%。而在进水果胶浓度为 1 000 ~ 4 500 mg·L<sup>-1</sup>时,厌氧系统对果胶和 COD 的去除率分别为 98.9% ~ 99.6%、91.7% ~ 96.1%,这与前者相比,果胶和 COD 的平均去除率分别提高了 3.6%、32.0%。当进水果胶浓度从 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 提高到 4 500 mg·L<sup>-1</sup> 时,系统对果胶和 COD 的去除率影响均较小。因此,驯化污泥适宜处理果胶浓度大于 1 000 mg·L<sup>-1</sup> 的废水。

2.4 温度对厌氧降解果胶废水的影响

温度是影响厌氧消化的重要因素之一,在仅以温度为变量的条件下分别进行了厌氧污泥对果胶废

水的降解实验,降解曲线如图 5 所示。

从图 5(a) 可以看出,温度较低时,厌氧降解果胶速率较慢。温度为 5℃ 和 15℃ 时,在 144 h 内,厌氧污泥对果胶的降解不能达到稳定,出水中果胶浓度为 428.9 ~ 2 589.6 mg·L<sup>-1</sup>。温度为 25℃ 和 35℃ 时,厌氧降解果胶分别可以在 60 h 和 108 h 达到稳定,并且出水中检测到的果胶浓度在 70 mg·L<sup>-1</sup> 以下。当温度上升到 45℃ 和 55℃ 时,厌氧污泥降解果胶在开始的 36 h 内就可以达到平衡,出水果胶浓度为 65.5 ~ 73.8 mg·L<sup>-1</sup>。驯化污泥降解果胶达到稳定时,当降解温度分别为 5、15、25、35、45、55℃ 时,果胶的平均降解速度分别为 5.3、20.3、28.1、56.1、92.6 和 93.6 mg·(L·h)<sup>-1</sup>。上述结果表明,在 5 ~ 45℃ 厌氧污泥对果胶的降解能力随着温度的升高而提高,当温度高于 45℃ 时,厌氧污泥对果胶的

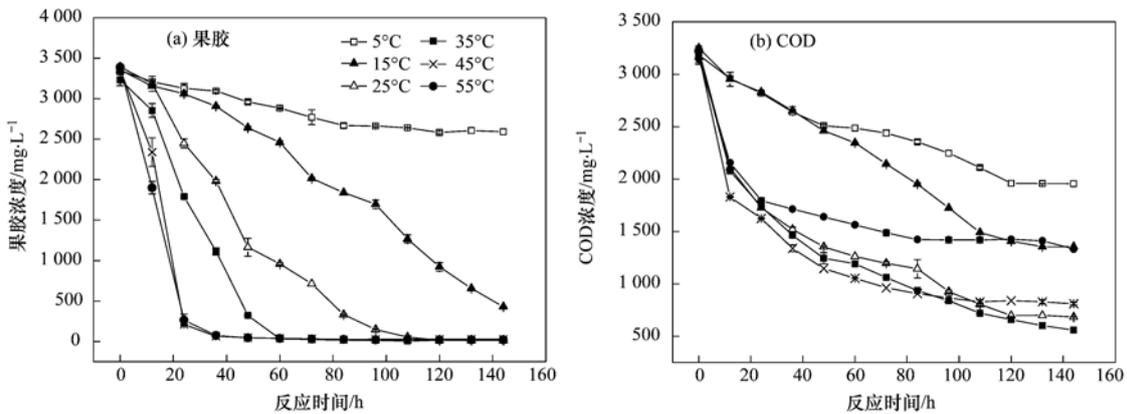


图 5 不同温度下果胶和 COD 的厌氧降解曲线

Fig. 5 Pectin and COD degradation at different temperature in anaerobic reactor

降解速率变化很小. 这与 Ahring 等<sup>[18]</sup>得出的结论相似: 不同底物的厌氧消化在其最优范围内对有机物的去除率随温度的升高而增加, 超出最适温度, 去除率不随温度升高反而下降. 这主要是由于温度升高时, 一方面厌氧污泥吸附果胶分子的速率增大, 另一方面温度较高时, 酸化水解菌中酶的活性会受到影响. 总体来说, 45 ~ 55℃ 时处理效果达到最优.

由图 5(b) 可以看出, 144 h 时, 各温度下对 COD 的去除率大小表现为: 35℃ > 25℃ > 45℃ > 15℃ > 55℃ > 5℃. 在 5 ~ 35℃, 厌氧污泥对果胶废水中 COD 的降解能力随着温度的升高而提高, 当温度高于 35℃ 时, 厌氧污泥对果胶废水中 COD 的降解能力逐渐变小. 这说明在厌氧降解果胶废水过程中, 产甲烷菌的最适温度为 35℃. 温度太低时, 抑制微生物的生

长与酶的活性, 从而影响 COD 的去除. 温度过高 (>35℃) 则会使得产甲烷菌体内酶发生不可逆转的破坏, 从而导致 COD 去除率大幅度下降.

综上所述, 厌氧污泥在不同温度下降解果胶废水时, 酸化水解菌和产甲烷菌不能同时达到最优去除效果. 综合考虑果胶和 COD 的降解情况, 当温度为 25 ~ 45℃ 时, 厌氧污泥对果胶废水具有较好处理效果.

### 3 果胶的厌氧降解方式

采用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 对果胶厌氧降解的中间产物进行了分析, 结果如表 1 所示, 检出中间产物中的主要有机物是乙酸、丙酸、低级酯、烷基醇 (C<sub>12</sub> ~ C<sub>40</sub>).

表 1 果胶厌氧降解中间产物中的主要有机物

Table 1 Main organic intermediates in anaerobic degradation of pectin

| 有机污染物       | 质量分数/% | 有机污染物       | 质量分数/% | 有机污染物         | 质量分数/% |
|-------------|--------|-------------|--------|---------------|--------|
| 乙酸乙酯        | 6.02   | 5-乙基-2-甲基庚烷 | 1.76   | 十三烷           | 1.62   |
| 丙醇          | 0.68   | 戊酸丙酯        | 2.98   | 十四烷           | 0.64   |
| 乙酸丙酯        | 5.91   | 2,4-二甲基戊酸丁酯 | 0.82   | 环氧苯乙酸         | 0.67   |
| 苯丙酸         | 1.73   | 十一烷         | 0.88   | 2,6,10-三甲基十二烷 | 0.29   |
| 乙酸          | 23.64  | 丙二酸二乙酯      | 4.05   | 十五烷           | 1.46   |
| 丙酸          | 18.96  | 草酸二丙酯       | 2.73   | 2,3-十二烷二醇     | 5.72   |
| 乙二酸         | 0.94   | 苯甲酸乙酯       | 0.96   | 十六烷           | 2.23   |
| 丁酸          | 6.46   | 2-甲基十二烷     | 0.74   | 十七烷           | 1.55   |
| 2,3,7-三甲基辛烷 | 1.02   | 丁二酸         | 1.57   | 2,4-四十烷二醇     | 3.97   |

推测果胶的厌氧降解途径<sup>[19]</sup>如图 6.

果胶分子中的单体半乳糖醛酸中的 C—O—C 键首先断裂, 果胶分子聚合度下降, 然后低聚合度的中间体进一步降解生成挥发性酸、H<sub>2</sub> 等, 最后被彻底分解成 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>.

### 4 结论

(1) 厌氧污泥经过 55 d 驯化, 对 3 000 mg·L<sup>-1</sup> 果胶废水的果胶和 COD 去除率均稳定在 90% 以上, 与未驯化厌氧污泥处理果胶废水相比, 驯化后的污泥对果胶去除率提高了 59.2%.

(2) 驯化污泥能够降解初始浓度大于 4 500

mg·L<sup>-1</sup> 的果胶废水. 果胶浓度越高, 降解速率越快. 果胶浓度为 100 和 500 mg·L<sup>-1</sup> 时, 果胶降解速率分别为 4.5 和 23.1 mg·(L·h)<sup>-1</sup>, 而浓度为 2 500 和 4 500 mg·L<sup>-1</sup> 的果胶废水, 降解速率分别为 49.8 和 74.0 mg·(L·h)<sup>-1</sup>. 果胶初始浓度低于 500 mg·L<sup>-1</sup>, COD 去除率较低, 仅为 41.6% ~ 82.0%. 果胶初始浓度高于 1 000 mg·L<sup>-1</sup>, COD 去除率稳定在 91% 以上.

(3) 温度越高, 降解果胶所需的时间越短. 5℃ 时, 降解 144 h 后, 出水果胶浓度为 2 589.6 mg·L<sup>-1</sup>, 而温度为 55℃ 时仅需 36 h, 出水果胶浓度可在 80 mg·L<sup>-1</sup> 以下. 随着温度在 5 ~ 35℃ 范围内变化, 厌

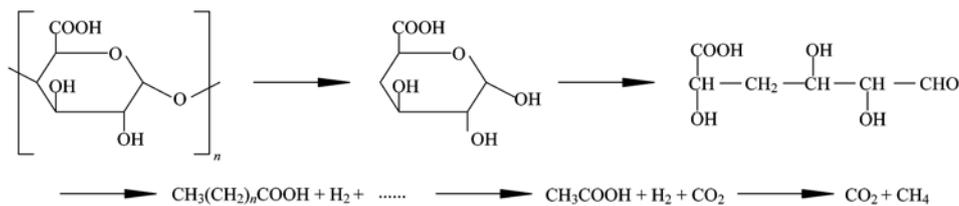


图 6 果胶的厌氧降解过程

Fig. 6 Process of anaerobic degradation of pectin

氧污泥对果胶废水中 COD 的去除率从 38.6% 逐渐增加到 91.5%, 当温度高于 35℃ 时, 厌氧污泥对果胶废水中 COD 的去除率逐渐降低。

(4) 果胶可能的厌氧降解途径为: 果胶分子中的单体半乳糖醛酸中的 C—O—C 键首先断裂, 然后低聚合度的中间体进一步降解生成挥发性酸、H<sub>2</sub> 等, 最后被彻底分解成 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Round A N, Rigby N M, MacDougall A J, *et al.* A new view of pectin structure revealed by acid hydrolysis and atomic force microscopy[J]. *Carbohydrate Research*, 2010, **345**(4): 487-497.
- [ 2 ] Mohnen D. Pectin structure and biosynthesis [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2008, **11**(3): 266-277.
- [ 3 ] Chu L B, Yang F L, Zhang X W. Anaerobic treatment of domestic wastewater in a membrane-coupled expanded granular sludge bed (EGSB) reactor under moderate to low temperature [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(3): 1063-1070.
- [ 4 ] Hu Z F, Dou J F, Liu X, *et al.* Anaerobic biodegradation of benzene series compounds by mixed cultures based on optional electronic acceptors [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(9): 1049-1054.
- [ 5 ] 任南琪, 王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 45-46.
- [ 6 ] Hamdi M. Anaerobic digestion of olive mill wastewaters [J]. *Process Biochemistry*, 1996, **31**(2): 105-110.
- [ 7 ] Van Lier J B. High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques[J]. *Water Sciences & Technology*, 2008, **57**(8): 1137-1148.
- [ 8 ] Fang H H P, Liang D W, Zhang T, *et al.* Anaerobic treatment of phenol in wastewater under thermophilic condition [J]. *Water Research*, 2006, **40**(3): 427-434.
- [ 9 ] 李斗, 李东伟, 徐中慧, 等. 环己酮生产废水厌氧生物处理实验及中试研究[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(12): 2249-2253.
- [ 10 ] 李莎, 郑盛之, 宋玉栋, 等. 多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3167-3171.
- [ 11 ] 石先阳, 孙庆业. 苯酚的厌氧生物处理[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(8): 1409-1413.
- [ 12 ] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 408-441.
- [ 13 ] Togola A, Budzinski H. Analytical development for analysis of pharmaceuticals in water samples by SPE and GC-MS [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2007, **388**(3): 627-635.
- [ 14 ] 陈皓, 陈玲, 黄爱群, 等. 降解 2-氯酚的厌氧污泥驯化及降解性能评价[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(6): 773-776.
- [ 15 ] 徐宏英, 李亚新, 岳秀萍, 等. 厌氧颗粒污泥对有机物的初期吸附[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(9): 1807-1812.
- [ 16 ] 王健, 黄国林. 果胶生产工艺研究进展[J]. *化工时刊*, 2007, **21**(2): 70-73.
- [ 17 ] 赵金辉, 赵志耀. 厌氧-水解反应器稳定运行的试验研究[J]. *环境科学*, 1999, **20**(3): 75-78.
- [ 18 ] Ahring B K, Ibrahim A A, Mladenovska Z. Effect of temperature increase from 55 to 65℃ on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure [J]. *Water Research*, 2001, **35**(10): 2446-2452.
- [ 19 ] Ridley B L, O'Neill M A, Mohnen D. Pectins: structure, biosynthesis, and oligogalacturonide-related signaling [J]. *Phytochemistry*, 2001, **57**(6): 929-967.

## CONTENTS

|  |   |
|--|---|
| Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China .....  | WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> ( 401 )         |
| Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> and Source Analysis in Beijing .....  | TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> ( 411 )        |
| Temporal and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing ..... | ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> ( 418 )         |
| Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM <sub>5.0</sub> Inhalable Particulate in Beijing .....   | WANG Yan-hui, XIAO Yao ( 428 )  |
| Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring .....   | XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun ( 436 )                          |
| Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing .....  | WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> ( 442 )           |
| Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles .....   | WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> ( 451 )     |
| Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> in Xinzhou City .....   | SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> ( 458 )          |
| Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou .....  | QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> ( 464 )                    |
| Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis .....  | SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> ( 470 )            |
| Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea .....   | XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> ( 475 )         |
| Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data .....   | LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> ( 481 )             |
| Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area .....   | HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> ( 490 )          |
| Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation .....   | JIA Long, XU Yong-fu ( 495 )  |
| Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China .....  | DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> ( 504 )             |
| Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area .....   | QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> ( 513 )          |
| Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter .....   | HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> ( 520 )     |
| Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends .....  | LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> ( 526 )              |
| Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting .....  | ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> ( 533 )     |
| Oxidation of Mercury by CuBr <sub>2</sub> Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition .....  | HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> ( 541 )             |
| Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian .....   | ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> ( 547 )   |
| Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study .....   | JIA Hai-feng, GUO Yu ( 555 )  |
| Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain .....   | GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> ( 562 )                  |
| Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary .....  | ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> ( 569 )        |
| Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary .....  | MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> ( 577 )       |
| Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area .....   | CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> ( 585 )             |
| Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....   | BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> ( 592 )       |
| Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i> .....   | ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> ( 597 )           |
| Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water .....  | TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> ( 605 )               |
| Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite .....   | LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 611 )             |
| Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride .....  | SONG Chen-yi, YIN Da-qiang ( 619 )                                    |
| Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System .....   | FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> ( 626 )          |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety .....  | YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao ( 633 )                               |
| Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment .....   | LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> ( 643 )                  |
| Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter .....   | LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> ( 651 )       |
| Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process .....   | CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> ( 657 )       |
| Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes .....  | ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe ( 663 )                          |
| Biosorption Characteristics of Cu <sup>2+</sup> by Spent Substrate of Pleurotus Oyster .....   | HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> ( 669 )      |
| Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition .....   | WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> ( 678 )                 |
| Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou .....  | GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> ( 684 )      |
| Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China .....  | ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> ( 692 ) |
| Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site .....   | ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> ( 704 )      |
| Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China .....   | ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> ( 711 )          |
| Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River .....   | TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> ( 719 )            |
| Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants .....   | ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> ( 727 )             |
| Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites .....  | YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce ( 733 )                                  |
| Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 .....  | ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 740 )        |
| Effects of the Ratio of NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N to NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture .....                                    | CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> ( 746 )        |
| Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou .....  | GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> ( 753 )          |
| Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles .....  | ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> ( 759 )    |
| Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea .....   | ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> ( 764 )           |
| Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i> .....   | WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin ( 770 )                               |
| Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System .....   | LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> ( 780 )            |
| Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary .....  | LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> ( 786 )         |
| Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies .....  | ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> ( 792 )     |

# 《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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

|         |  |                  |    |   |
|---------|--|------------------|----|---|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院  | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717  | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com   | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(北京399信箱)   | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China  |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行