



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第7卷 第4期

Vol.7 No.4

中国科学院 主办
生态环境研究中心
科学出版社 出版

4
2013

目 次

水 污 染 防 治

SBR 单级自养脱氮系统氮素转化途径	吕永涛	王 磊	孙 婷	王旭东	王志盈 (1201)
基于 SIMULINK 的硝化反应动力学模型的仿真	罗飞杭	杨朝晖	卢 慧	罗远玲	战 琪 (1206)
不同来源高浓度有机废水的集中处理	张伟军	高 雅	马士龙	张 明	王东升 徐岳阳 (1213)
纯种氢氧化菌短程反硝化特性	周 莉	李正魁	王易超	范念文	(1219)
常温 CSTR 部分亚硝化影响因素及工况优化研究	仲 航	李 冬	吴 迪	曾涛涛	刘丽倩 苏东霞 张 杰 (1225)
温度和污泥浓度对碱性条件下剩余污泥水解酸化的影响	苏高强	王淑莹	郑冰玉	彭永臻	(1231)
双向旋流污水净化器处理溢流污水	臧宝凤	黄勇强	徐明力	史 凯	朱 艳 (1237)
铁碳布空气阴极微生物燃料电池的产电性能	唐玉兰	何亚婷	于鹏飞	孙 红	于 燕 彭 漫 (1241)
十溴联苯醚共存条件下水中 Zn(II) 的生物吸附	白洁琼	尹 华	叶锦韶	彭 辉	叶 芊 何宝燕 李跃鹏 张 娜 彭素芬 (1245)
微波辅助疏水膜的清洗	尹子飞	王 军	纪仲光	侯得印	(1251)
厌氧反应器废水资源化过程在线监测系统	王顺利	尚丽平	李占锋	邓 琥	刘先勇 (1256)
不同因素对人工湿地基质脱氮除磷效果的影响	陈丽丽	赵同科	张成军	李 鹏	李新荣 董若征 (1261)
新型化粪池处理生活污水启动阶段的实验	陈志强	关华滨			(1267)
pH 值对“Fe ⁰ -厌氧微生物”体系去除 2,4,6-三氯酚过程的影响	吴金钢	戴友芝	郭丽丽	汪桂芝	李小娜 (1273)
二氧化钛颗粒制备及其对水中三价砷的去除	谢冬梅	曹林洪	崔金立		(1279)
氨基化凹凸土对水中焦化没食子酸的吸附	王春香	张 艳	薛爱莲	周守勇	赵宜江 陈智栋 (1285)
吸附氧化/纳滤/吸附组合工艺处理丙烯腈工业废水	李 薇	展 侠	李继定	郑冬菊	(1290)
不同水生植物去除水体氮磷的效果	何 娜	孙占祥	张玉龙	刘鸣达	(1295)
增溶剂停留时间及对水质和浮游植物影响分析	李 岩	张饮江	刘晓培	吴 昊	张乐婷 段 婷 黎 臻 张曼曼 (1301)
温度对亚硝化及氧化亚氮释放的影响	郭 宁	张 建	孔 强	苗明升	田 琳 (1308)
超滤膜深度处理染整废水的膜污染机理	付乐乐	李 方	吴 亮	王 歌	(1313)
混凝沉淀去除丙烯酸丁酯废水浊度物质	谷小凤	宋玉栋	周岳溪	马力强	李 军 王 俊 (1319)
连片生态浮床对微污染河水的净化效果	段金程	张毅敏	张红卫	高月香	晁建颖 (1324)
循环式活性污泥工艺协同处理榨菜废水与城镇污水脱氮效果	何 强	丁文静	司马卫平		(1331)
微孔曝气变速氧化沟循环特性的中试研究	杨亚红	彭党聪	李 磊	郑阳光	韩 芸 (1336)
不同类型潜流湿地处理养猪废水的对比	李鹏宇	王 振	袁林江	董 健	刘 琳 朱葛夫 刘超翔 (1341)
粉煤灰制备混凝剂及其对黄河水的处理效果	李玉梅	陈莉荣	杜明展		(1346)
利用沉水植物生长期收割进行富营养化水体生态管理的实地研究	姜义帅	陈 灏	马作敏	李 静	(1351)
浊度仪法快速测定水体中硫酸盐含量	薛秀玲	李孟迪			(1359)
MBR 净化受污染地表水的自然启动及稳定运行除污染特性	杨 威	赵秋静	韩正双	李 凯	梁 恒 李圭白 (1363)
RBF 与 Elman 神经网络在人工湿地复合基质去污效果预测中的应用	梁启斌	刘云根	田 昆	王万宾	(1368)
稳定表流湿地中污泥的形成及除污效果	张龙飞	王成端	王志帅		(1373)
新型多功能螯合树脂的合成及对水中 Cd(II) 离子的吸附特征	王佳佳	马慧敏	张田林		(1378)
多孔镁铝复合氧化物对水溶液中 Cr(VI) 的吸附性能	王秀娟	王海增			(1383)
啤酒废水常温厌氧消化启动及运行实验	林长松	徐龙飞	谈林友		(1389)
硫化物沉淀法处理含铅废水	何绪文	胡建龙	李静文	张晶晶	王建兵 葛 鹏 (1394)
无机陶瓷膜处理油田采出水	丁 慧	彭兆洋	李 毅	温沁雪	陈志强 (1399)
减压蒸馏耦合微电解处理六硝基萘二段洗水	车 冉	郝 志	叶正芳		(1405)
水解-复合生物滤池工艺处理盐化工工业废水	管 硕	张鸿涛	吴春旭	程林波	宁 涛 (1411)

响应面法优化聚丙烯酸/腐殖酸/累托石吸附剂的制备条件	陈芳艳	叶伟	孙怡涵	贾丽萍	唐玉斌(1417)		
生物制剂法治理藻类水华	周晓云	黄瑞敏	刘欣	文淦斌	(1425)		
不同流量分配比对多级 A/O 工艺去除有机物及脱氮的影响	王敏	张智	陈杰云	范功端	金可	梁鹏	胡玲(1430)
光催化氧化-Fenton 组合方法降解高浓度正丙醇废水	曾惠明	程慎玉	沈晓莉	马欢林	(1435)		
纳滤膜在垃圾渗滤液深度处理中应用	宁桂兴	张忻	王凯	姜安平	汪桂林(1440)		

大气污染防治

Fenton 试剂法降解餐厨垃圾异味	狄彦强	刘杰民	刘思园	颜鲁春	冯振华(1445)	
特殊植物类群空气凤梨对大气污染物甲醛的净化	李俊霖	李鹏	王恒蓉	郑桂灵	(1451)	
天津市纪庄子污水处理厂恶臭气体排放研究	王钊	王秀艳	高爽	白志鹏	(1459)	
碳纳米管/二氧化钛/壳聚糖催化薄膜光催化活性及苯降解机理	曾丽萍	张泉	张国强	(1465)		
不锈钢烧结纤维毡外加粉体助剂过滤烟尘微粒	包力	杨国华	李邯鹏	王炳辉	杜珂	黄三(1472)
西安市冬、夏两季 PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征分析	张承中	丁超	周变红	陶李	刘立忠(1477)	

固体废物处置

一株氧化亚铁硫杆菌的分离及其浸出废旧线路板中铜的效果	张婷	朱能武	许治国	石超宏(1482)						
玉米秸与鸡粪混合厌氧消化产气性能与协同作用	冯亚君	袁海荣	张良	李超	高健	李秀金(1489)				
不同存放时间太湖蓝藻产沼气潜力	赵明星	阮文权	(1495)							
磁化焙烧-磁选法回收循环流化床固硫灰中铁	巫侯琴	李军	卢忠远	徐龙华	管波	韦燕飞(1500)				
掺固硫灰 AC-13 型沥青混合料配合比设计	侯莉	赵智	卢忠远	宋丽贤	彭洪	陈培军	李军(1505)			
鸡毛不溶解蛋白海绵膜的制备与表征	庄媛	吴小倩	曹张军	赵晓祥	周美华(1510)					
利用废弃物衍生燃料的热化学处理法制富含氢气合成气	吴畏	(1515)								
两相厌氧消化工艺处理鸡粪	倪哲	潘朝智	牛冬杰	陈玲(1522)						
添加氮损失抑制剂对蓝藻泥堆肥质量的影响	任云	崔春红	刘奋武	占新华	周立祥(1527)					
臭氧氧化法深度处理生活垃圾焚烧厂沥滤液	穆永杰	叶杰旭	孙德智(1535)							
液晶显示器玻璃基板回收工艺	孙媛媛	李龙珠	唐惠东(1541)							
废旧线路板真空热解油合成热固性酚醛树脂	朱灶	蔡思涵	孙水裕	刘敬勇	张荣学	徐东军	钟胜	杨帆	李神勇	许婷婷(1545)

土壤污染防治

均匀电场下多环芳烃在土壤中的迁移	王翠苹	许伟	孙红文(1550)				
堆肥污泥重金属在黄土中的淋滤特征	马可婧	张明泉	蔡圃(1557)				
Fenton 氧化技术处理稠油污染土壤	刘其友	李琳	张云波	赵东风	赵朝成(1563)		
汞、铅、铬污染土壤的微生物修复	李梦杰	王翠玲	李荣春	洪俊彦	严亮	刘丽	庄立(1568)
生物强化修复石油污染土壤	张秀霞	滕芝	吴佳东(1573)				
石油烃对翅碱蓬生理特性的影响及植物-微生物联合降解	高乃媛	刘宪斌	赵兴茹(1578)				

噪声污染防治

高速列车纵向对称面气动噪声计算及外形优化	肖友刚	张平(1583)
----------------------------	-----	----------

环境生物技术

润滑油高效降解菌的筛选及降解性能	郭晓燕	张志红	沈齐英	李翠清(1589)
------------------------	-----	-----	-----	-----------

相关研究

侧入式搅拌槽中多相流场特性的数值模拟	张林进	陈功国	柏杨	叶旭初(1594)
--------------------------	-----	-----	----	-----------

CONTENTS

Nitrogen conversion pathway of autotrophic nitrogen removal process in single SBR	Lü Yongtao Wang Lei Sun Ting Wang Xudong Wang Zhiying(1201)
Stimulation based on SIMULINK for nitrification reaction kinetics model	Luo Feihang Yang Zhaohui Lu Hui Luo Yuanling Zhan Qi(1206)
Central treatment of wastewater with high organic content from different industrial sources	Zhang Weijun Gao Ya Ma Shilong Zhang Ming Wang Dongsheng Xu Yueyang(1213)
Shortcut denitrification characterization of immobilized AOB	Zhou Li Li Zhengkui Wang Yichao Fan Nianwen(1219)
Research on influencing factors and operation optimization for CSTR partial nitrification at normal temperature	Zhong Hang Li Dong Wu Di Zeng Taotao Liu Liqian Su Dongxia Zhang Jie(1225)
Effect of temperature and sludge concentration on hydrolysis and acidification of waste activated sludge under alkaline condition	Su Gaoqiang Wang Shuying Zheng Bingyu Peng Yongzhen(1231)
Treatment of overflow using two-way cyclone flocculation hydrocyclone	Zang Baofeng Huang Yongqiang Xu Mingli Shi Kai Zhu Yan(1237)
Electricity generation performance of microbial fuel cells with carbon cloth as air-cathode and iron as cathode catalyst	Tang Yulan He Yating Yu Pengfei Sun Hong Yu Yan Peng Man(1241)
Biosorption of zinc (II) in water with decabromodiphenyl ethers	Bai Jieqiong Yin Hua Ye Jinshao Peng Hui Ye Qian He Baoyan Li Yuepeng Zhang Na Peng Sufen(1245)
Microwave assisted cleaning of hydrophobic membrane	Yin Zifei Wang Jun Ji Zhongguang Hou Deyin(1251)
Online monitoring system of anaerobic reactor in processes of transforming wastewater into resources	Wang Shunli Shang Liping Li Zhanfeng Deng Hu Liu Xianyong(1256)
Influences of different factors on effect of matrix nitrogen and phosphorus removal in substrates of constructed wetland	Chen Lili Zhao Tongke Zhang Chengjun Li Peng Li Xinrong Dong Ruozheng(1261)
Experiment on start-up phase of new modified septic tanks treating domestic sewage	Chen Zhiqiang Guan Huabin(1267)
Effect of pH values on process for removal of 2,4,6-trichlorophenol by Fe ⁰ -anaerobic microbe system	Wu Jingang Dai Youzhi Guo Lili Wang Guizhi Li Xiaona(1273)
Preparation and evaluation of TiO ₂ granule for As(III) removal from water	Xie Dongmei Cao Linhong Cui Jinli(1279)
Adsorption of pyrogallol from aqueous solution by amine modified attapulgite	Wang Chunxiang Zhang Yan Xue Ailian Zhou Shouyong Zhao Yijiang Chen Zhidong(1285)
Treatment of wastewater from acrylonitrile industries with combined processes of adsorption oxidation, nanofiltration and adsorption	Li Wei Zhan Xia Li Jiding Zheng Dongju(1290)
Efficiency of removing nitrogen and phosphorus from simulated wastewater using hydrophytes	He Na Sun Zhanxiang Zhang Yulong Liu Mingda(1295)
Retention time and effects on water quality and phytoplankton of water shade agent-True Blue	Li Yan Zhang Yinjiang Liu Xiaopei Wu Hao Zhang Leting Duan Ting Li Zhen Zhang Manman(1301)
Effect of temperature on ammonification and nitrous oxide emission in partial nitrification	Guo Ning Zhang Jian Kong Qiang Miao Mingsheng Tian Lin(1308)
Fouling mechanism in advanced treatment of dyeing wastewater by ultrafiltration membrane	Fu Lele Li Fang Wu Liang Wang Ge(1313)
Removal of turbidity from butyl-acrylate wastewater by coagulation-sedimentation	Gu Xiaofeng Song Yudong Zhou Yuexi Ma Liqiang Li Jun Wang Jun(1319)
Purification effect of ecological floating beds of flakiness connection in slightly polluted river water	Duan Jincheng Zhang Yimin Zhang Hongwei Gao Yuexiang Chao Jianying(1324)
Nitrogen removal efficiency of co-processing pickle wastewater and municipal sewage by cyclic activated sludge system(CASS) process	He Qiang Ding Wenjing Sima Weiping(1331)
Pilot study on flow characteristics of a variable-velocity oxidation ditch with fine bubble	Yang Yahong Peng Dangeong Li Lei Zheng Yangguang Han Yun(1336)
Comparison of two different constructed wetland systems to treat swine wastewater	Li Pengyu Wang Zhen Yuan Linjiang Dong Jian Liu Lin Zhu Gefu Liu Chaoliang(1341)
Preparation of coagulant from fly ash and its application in Yellow River water treatment	Li Yumei Chen Lirong Du Mingzhan(1346)
Field study on effect of harvesting submerged plant during growing season for ecological management of eutrophicated water	Jiang Yishuai Chen Hao Ma Zuomin Li Jing(1351)
Rapid determination of sulfate in water by turbidimetry	Xue Xiuling Li Mengdi(1359)
Pollutants removal characteristics of natural start-up and steady operation of membrane bioreactor (MBR) for treating polluted surface water	Yang Wei Zhao Qiujing Han Zhengshuang Li Kai Liang Heng Li Guibai(1363)
Application of RBF and Elman neural network in prediction on pollutant removal efficiency of constructed wetland with different compound substrates	Liang Qibin Liu Yungen Tian Kun Wang Wanbin(1368)
Sludge formation and decontamination effect of stable surface flow wetland systems	Zhang Longfei Wang Chengduan Wang Zhishuai(1373)
Synthesis of multifunctional chelating resin and its adsorption properties for Cd(II) in water	Wang Jiajia Ma Huimin Zhang Tianlin(1378)

- Adsorption behavior of Cr(VI) from aqueous solution on porous Mg/Al mixed oxides** Wang Xiujuan Wang Haizeng(1383)
- Start-up and operation of anaerobic digestion of brewery wastewater at ambient temperature** ... Lin Changsong Xu Longfei Tan Linyou(1389)
- Treatment of wastewater containing lead by sodium sulfide precipitation** He Xuwen Hu Jianlong Li Jingwen Zhang Jingjing Wang Jianbing Ge Peng(1394)
- Treatment of oilfield produced water by inorganic ceramic membrane** Ding Hui Peng Zhaoyang Li Yi Wen Qinxue Chen Zhiqiang(1399)
- Treatment of hexanitrostilbene wastewater by vacuum distillation coupling in micro-electrolysis** Che Ran Hao Zhi Ye Zhengfang(1405)
- Salt chemical industrial wastewater treatment using hydrolysis-combined biological filter process** Guan Shuo Zhang Hongtao Wu Chunxu Cheng Linbo Ning Tao(1411)
- Optimization of preparation conditions of polyacrylic acid/humic acid/rectorite adsorbent based on response surface methodology** Chen Fangyan Ye Wei Sun Yihan Jia Liping Tang Yubin(1417)
- Control of algal bloom with immobilized biological catalyst** Zhou Xiaoyun Huang Ruimin Liu Xin Wen Ganbin(1425)
- Influence of different influent flow distribution ratios on biological nitrogen and carbon removal by multi-stages A/O process** Wang Min Zhang Zhi Chen Jieyun Fan Gongduan Jin Ke Liang Peng Hu Ling(1430)
- Treatment of wastewater containing high concentration of 1-propanol with UV photocatalysis/Fenton reagent** Zeng Huiming Cheng Shenyu Shen Xiaoli Ma Huanlin(1435)
- Application of nanofiltration technology in treatment of urban solid composting leachate** Ning Guixiang Zhang Xin Wang Kai Jiang Anping Wang Guilin(1440)
- Treating food waste odor by Fenton reagent method** Di Yanqiang Liu Jiemin Liu Siyuan Yan Luchun Feng Zhenhua(1445)
- Purification of air pollutant—formaldehyde with special plant group—epiphytic *Tillandsia*** Li Junlin Li Peng Wang Hengrong Zheng Guiling(1451)
- Research of odor emission in Jizhuangzi Sewage Treatment Plant in Tianjin** Wang Zhao Wang Xiuyan Gao Shuang Bai Zhipeng(1459)
- Photocatalytic degradation activity and mechanism of CNTs/TiO₂/CS Film of gas phase benzene** Zeng Liping Zhang Quan Zhang Guoqiang(1465)
- Filtering soot particles by stainless steel sintered fiber felt combining with powder** Bao Li Yang Guohua Li Hanpeng Wang Binghui Du Ke Huang San(1472)
- Pollution characteristics of carbon aerosol in PM_{2.5} of Xi'an during winter and summer** Zhang Chengzhong Ding Chao Zhou Bianhong Tao Li Liu Lizhong(1477)
- Isolation of an *Acidithiobacillus ferrooxidans* strain and its performance in bioleaching of copper from waste printed circuit boards** Zhang Ting Zhu Nengwu Xu Zhiguo Shi Chaohong(1482)
- Performance and synergistic effect of anaerobic co-digestion of corn stover and chicken manure** Feng Yajun Yuan Hairong Zhang Liang Li Chao Gao Jian Li Xiujin(1489)
- Biogas production potential of Taihu cyanobacteria at different storage times** Zhao Mingxing Ruan Wenquan(1495)
- Recycling of the iron resources of CFBC fly ash by magnetizing roasting-magnetic separation** Wu Houqin Li Jun Lu Zhongyuan Xu Longhua Guan Bo Wei Yanfei(1500)
- Mix design of AC-13 asphalt concrete with circulating fluidized bed combustion ash** Hou Li Zhao Zhi Lu Zhongyuan Song Lixian Peng Hong Chen Peijun Li Jun(1505)
- Preparation and characterization of sponge film based on feather reduction residue** Zhuang Yuan Wu Xiaoqian Cao Zhangjun Zhao Xiaoxiang Zhou Meihua(1510)
- Hydrogen-rich synthesis gas production via thermochemical of refuse derived fuel** Wu Wei(1515)
- Treatment of chicken manure by two-phase anaerobic digestion reactor** Ni Zhe Pan Chaozhi Niu Dongjie Chen Ling(1522)
- Effect of adding nitrogen loss inhibitor on quality of dehydrated blue-green algae compost** Ren Yun Cui Chunhong Liu Fenwu Zhan Xinhua Zhou Lixiang(1527)
- Advanced treatment of leachate from MSW incineration by ozonation** Mu Yongjie Ye Jiexu Sun Dezhi(1535)
- Recovery process of glass substrate from liquid crystal display** Sun Yuanyuan Li Longzhu Tang Huidong(1541)
- Synthesis of thermosetting PR with WPCB vacuum pyrolysis oils** Zhu Zao Cai Sihan Sun Shuiyu Liu Jingyong Zhang Rongxue Xu Dongjun Zhong Sheng Yang Fan Li Shenyong Xu Pingting(1545)
- Migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils under uniform electric field** Wang Cuiping Xu Wei Sun Hongwen(1550)
- Leaching characteristics of heavy metals in compost sludge in loess** Ma Kejing Zhang Mingquan Cai Pu(1557)
- Heavy oil-contaminated soils remediation by Fenton oxidation** Liu Qiyou Li Lin Zhang Yunbo Zhao Dongfeng Zhao Chaocheng(1563)
- Microorganism remediation of Hg, Pb and Cr contaminated soil** Li Mengjie Wang Cuiling Li Rongchun Hong Junyan Yan Liang Liu Li Zhuang Li(1568)
- Bioaugmentation remediation of petroleum contaminated soil** Zhang Xiuxia Teng Zhi Wu Jiadong(1573)
- Influence of oil in soil on growth and physiological indexes of *suaeda heteroptera* and plant-microbial remediation** Gao Naiyuan Liu Xianbin Zhao Xingru(1578)
- Numerical prediction of aerodynamic noise radiated from longitudinal symmetric plane of high-speed train and shape optimization** Xiao Yougang Zhang Ping(1583)
- Screening of lube oil biodegradation strain and degrading characteristics** Guo Xiaoyan Zhang Zhihong Shen Qiying Li Cuiqing(1589)
- Numerical simulation on field characteristics of multiphase flow in side-entering stirred tank** Zhang Linjin Chen Gongguo Bai Yang Ye Xuchu(1594)

啤酒废水常温厌氧消化启动及运行实验

林长松 徐龙飞 谈林友

(六盘水师范学院生命科学系,六盘水 553004)

摘要 采用自行设计的复合式厌氧反应器在常温下对啤酒废水进行了厌氧发酵产沼气的实验研究,将进水 COD 控制在 5 000 mg/L 左右,采取逐步缩短 HRT 的方法来提高进水有机负荷,结果表明,启动运行 41 d 之后,产气量上升速度加快,反应器成功启动运行;在稳定运行过程中,随着负荷的升高,产气量呈阶梯式渐次上升,COD 去除率保持在 90% 以上,出水 pH 值维持在 7.0 左右,TSS 去除率达到 60% 以上,出水水质较好,说明该反应器具有较好的厌氧消化处理有机废水的能力。

关键词 常温厌氧消化 复合式厌氧反应器 啤酒废水

中图分类号 X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2013)04-1389-05

Start-up and operation of anaerobic digestion of brewery wastewater at ambient temperature

Lin Changsong Xu Longfei Tan Linyou

(Department of Life Science, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China)

Abstract At normal temperature, the experiment of biogas anaerobic fermentation was conducted while a self-designed hybrid anaerobic baffled reactor was adopted to treat brewery wastewater. The inlet COD limit was around 5 000 mg/L, the organic load was improved by gradually shortened HRT (hydraulic retention time). The result indicated that after 41 d started-up and operation, the gas production rate increased rapidly, the reactor started up successfully. During the stable operation process, with the increase of the organic load, gas output was step up gradually while the COD removal rate remained over 90%. Meanwhile, the effluent pH kept around at 7.0, TSS removal rate reached to 60% and good effluent quality. From the above results, it can be concluded that the hybrid anaerobic reactor may play an important role in anaerobic digestion.

Key words anaerobic digestion at ambient temperature; hybrid anaerobic reactor; brewery wastewater

啤酒工业是酿酒业中废水和污染物排放大户。啤酒废水中主要含酵母菌残体、麦糟、酒花残渣、粗蛋白、糖类、氨基酸及少量洗涤用碱等污染物,废水中 COD 含量,对水体污染危害大^[1-3],但其可生化性较好^[4,5]。随着我国啤酒工业的快速发展以及啤酒企业规模化、集团化发展的趋势,同时也向环境中排放了大量高浓度有机废水,啤酒废水对环境的污染已成为突出问题。近年,随着节能减排和循环经济理念的深入人心,对于啤酒工业废水达标排放并从废水中回收生物能源越来越受到各界人士的关注^[6-8]。利用企业排放的废水厌氧消化处理产生的沼气实现节能减排,为企业带来经济效益和环境效益的双丰收,也是企业实施可持续发展和实现社会责任的需要。

目前国内处理啤酒废水的主要方法有好氧法、厌氧生物法、厌氧-好氧结合处理法、生物膜法^[2,8,9]

等。其中,厌氧消化技术是啤酒废水处理最常用,也是最有效的方法之一,不仅能耗低,而且能回收大量沼气^[8,10]。在能源紧缺与环境污染的双重压力下,利用厌氧消化技术处理啤酒废水既净化了环境,还能并回收清洁能源。近年,国内外研究温度对啤酒废水厌氧消化影响的报道不多^[11-13]。本研究从经济和便于推广的角度考虑,采用自行设计的复合式产沼气厌氧反应器(专利号:ZL200920125862.1)在

基金项目:贵州省教育厅自然科学研究项目(黔教科 2008094);六盘水市科技人才培养及创新团队建设计划项目(52020-2012-04-01-01);贵州省高层次人才科研条件特助经费项目资助(TZJF-2010年-017号)

收稿日期:2012-02-03; **修订日期:**2012-05-08

作者简介:林长松(1969~),男,博士,教授,主要从事沼气和有机废弃物资源化利用研究工作。

E-mail:changsonglin@126.com

常温下对啤酒废水进行厌氧消化处理实验研究,该反应器集上流式厌氧污泥床(UASB)、折流板厌氧反应器(ABR)和固定床厌氧反应器的特点于一体,使大量厌氧微生物附着固定在载体上,增加反应器内污泥浓度,有效延长废液处理流程,使水力停留时间和污泥停留时间有效分离,从而提高废水处理效率和沼气产量,可为规模化大中型啤酒工业和相关行业废水厌氧消化产沼气机理研究提供参考。

1 实验部分

1.1 实验装置

本研究采用自行设计的复合式厌氧反应装置,反应器长40 cm,宽20 cm,高33 cm,材料为有机玻璃。每一反应室宽10 cm,中间2个下流隔室宽各为5 cm;反应室内采用比表面积为 $1\ 100\ \text{m}^2/\text{g}$ 的活性炭纤维(江苏,南通永通环保科技有限公司)作为微生物载体。采用 20°C 左右的室温发酵,实验系统及流程如图1所示。

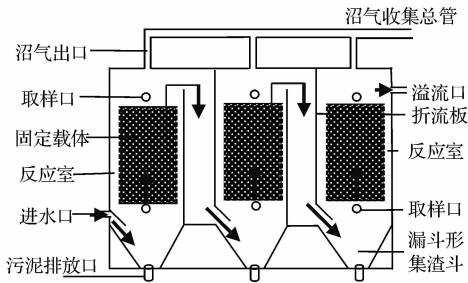


图1 复合式沼气厌氧反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid biogas anaerobic reactors

1.2 实验材料

为便于控制进水浓度的相对一致性,实验用废啤酒(COD在 $100\ 000\sim 120\ 000\ \text{mg}/\text{L}$)稀释20倍左右配制成模拟啤酒废水(实测COD在 $5\ 000\ \text{mg}/\text{L}$ 左右)。接种污泥取自广西某酒精厂废水处理池池底污泥,总固体(TS)含量为9.26%。

1.3 测定项目与分析方法

温度:温湿度计记录每天早晚的环境温度。

pH值:用pH计(PHS-25CW)测定了每天的进、出水pH值。

COD:用台式COD测定仪(CM-02型,北京双晖京承电子产品有限公司)按照说明书的方法进行测定。

产气:用湿式气体流量计(LML-1型,长春汽车

滤清器有限责任公司)记录产气量。

总固体(TS)含量:重量法^[14]。

2 结果与讨论

2.1 进水容积负荷率(OLR)和日产气量

将进水COD控制在 $5\ 000\ \text{mg}/\text{L}$ 左右,采取逐步缩短HRT的方法来提高进水有机负荷,初始有机容积负荷(OLR)为 $0.25\ \text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右,运行稳定后通过缩短HRT逐步将OLR提高为 0.4 、 0.7 、 0.8 、 1.0 和 $1.2\ \text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 左右(如图2所示),实验共历时88 d。

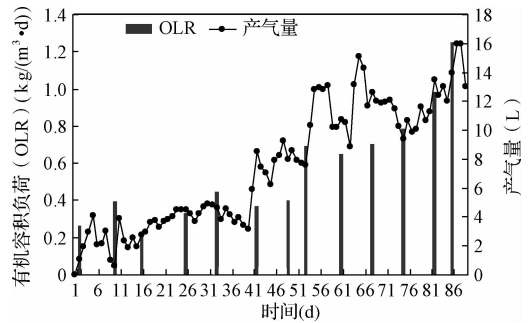


图2 运行过程中容积负荷率(OLR)和日产气量的变化

Fig. 2 Variations of organic loading rate and daily biogas production during operation process

由图2可看出,运行过程中随HRT的缩短,进水的OLR不断升高,产气量也逐渐升高。启动运行41 d之后,产气量上升速度加快,表明反应器启动成功。在稳定运行过程中,随着负荷的提高,产气量呈阶梯式渐次上升,最高日产气量达到16 L。产气量可以作为指示器,能够获得启动期反应器内微生物的动力学特征以及反应器的OLR过高时引起微生物生理活性紊乱的信息^[15]。从图2可见,每次进水负荷的提高,都会使产气量出现先升高,后降低,然后再回升的这样一个过程。这是由于底物浓度升高后使产气反应增加,但由于进水负荷变化太快,反应器内厌氧微生物对其会有一个缓冲和适应的过程。产气量的多少与进水COD浓度有关,同时还与反应器内具有较强生理活性功能的厌氧微生物同消化底物的接触程度密切相关^[16]。本实验采用的复合式沼气厌氧反应器内由于碳纤维载体对微生物的固着作用,使HRT与污泥停留时间(SRT)有效分离,延长了SRT;同时,厌氧折流板反应器(ABR)的构造使废水以上向流和下向流的方式流经整个反应器,延长了反应流程,使微生物与啤酒废水在反应器内具有充足的接触时间,因而表现了较强的消化降

解有机物转化为 CH_4 和 CO_2 的能力。可见,该复合式沼气厌氧反应器截留产甲烷微生物的能力很强,使得污泥龄(SRT)较长,反应器内微生物种群丰富,这也是本实验 COD 去除率高、产气能力强的内在原因。

2.2 进出水 COD 及 COD 去除率的变化

图 3 为反应器运行过程中进出水 COD 及 COD 去除率随运行时间变化的情况。在为期 88 d 的运行过程中,进水 COD 为 5 000 mg/L 左右,随着运行进程延长,出水 COD 呈逐渐降低的趋势,即 COD 去除率逐步升高。运行到第 41 天之后,尽管通过 HRT 的不断缩短使 OLR 不断增高至 0.70 ~ 1.25 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,COD 去除率依然稳定在 90% 之上,可见,反应器已成功启动并稳定运行。

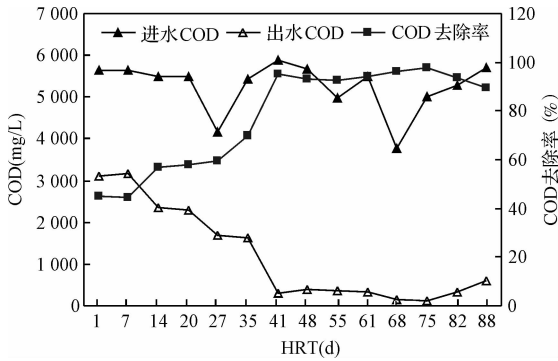


图 3 运行过程中进、出水 COD 及 COD 去除率的变化
Fig. 3 Variations of influent and effluent COD and COD removal rates

2.3 系统温度和 pH 值的变化

温度是影响有机废水厌氧消化最重要的因素之一,根据产甲烷菌适宜温度条件的不同,厌氧消化可分为常温消化、中温消化和高温消化 3 种类型^[17]。在设计和运行反应器时,温度的选择至关重要,选择厌氧反应温度主要考虑处理效果和能源的消耗这两方面的因素。常温厌氧消化是指在自然气温或水温下进行厌氧处理的工艺,适宜的温度范围为 10 ~ 30℃。研究表明,厌氧反应过程在 10℃ 甚至更低的温度下仍能稳定的运行^[18,19]。啤酒厂每年产生的废水量通常较大,采用中温厌氧消化需要加热必然会浪费大量能源,从经济和便于推广应用的角度考虑,本实验采用常温厌氧消化处理方法。由于温度的急剧变化和上下波动不利于厌氧消化处理,在 88 d 的运行过程中,系统反应温度控制在 20℃ 上下波动(图 4),从而保障了运行过程较为稳定。

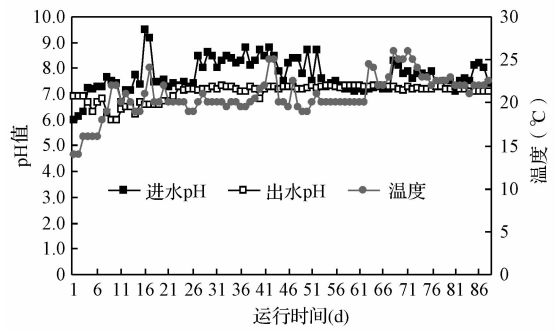


图 4 反应器系统温度及进、出水 pH 的变化
Fig. 4 Reaction temperature and variation of influent and effluent pH in different operation stages

另一方面,pH 值对于废水的厌氧消化处理也极其重要,是甲烷化厌氧消化是否正常的标志之一。通常,厌氧消化最适宜的 pH 值在 6.0 ~ 8.0 之间^[20,21]。产酸菌对 pH 值不及产甲烷菌敏感,其适宜的 pH 值可在 4.5 ~ 8.0 的较广的范围。而产甲烷菌对 pH 值的变化极其敏感,其最适 pH 值为 6.8 ~ 7.2。因此,在反应系统内,为维持平衡,避免过多的酸积累,反应器内的 pH 值需尽可能保持在 6.8 ~ 7.2 的范围内。从图 4 可看出,反应器在 88 d 的运行过程中进水和出水的 pH 值变化情况。本实验在调节进水 pH 值为中性至弱碱性(pH 值 7 ~ 9)的情况下,出水 pH 值始终保持在 7.0 左右,保障了厌氧消化系统正常运转,取得了较好的运行效果。

2.4 进、出水总固体 (TSS)

在为期 88 d 的运行过程中,由于进水主要是通过缩短 HRT 来使 OLR 升高,进水 TSS 浓度保持在 5.5 ~ 8.0 g/L 之间这样一个相对稳定的水平上(图 5)。而出水 TSS 浓度随着反应器运行呈先升高然后逐渐下降的趋势。开始阶段的升高主要是由于接种污泥还不稳定,被水流冲刷出来的缘故,随着系统微生物群落固定和附着并分解啤酒废水中的有机

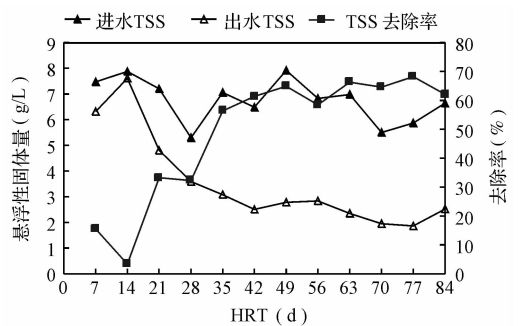


图 5 运行过程中 TSS 及其去除率
Fig. 5 TSS and their removal efficiency in operation process

物,出水中 TSS 浓度逐渐下降,在反应器成功启动并稳定运行后,TSS 去除率达到 60% 以上,出水水质较好。可见,该复合式沼气厌氧反应器对啤酒废水的 TSS 去除能力较强,反应系统厌氧消化产物的生物污泥量形成少。运行过程中没有出现反应器堵塞现象。

3 结 论

(1) 采用自行设计的复合式沼气厌氧反应器在常温(20℃左右)下能有效处理啤酒废水,将进水 COD 控制在 5 000 mg/L 左右,调节进水 pH 值为中性至弱碱性(pH 值 7~9)的条件下,采取逐步缩短 HRT 的方法来提高进水有机负荷,启动运行 41 d 之后,产气量上升速度加快,反应器成功启动运行。

(2) 该反应器有效延长了废液处理流程,使大量厌氧微生物附着固定在载体上,增加反应器内污泥浓度;水力停留时间和污泥停留时间有效分离,从而提高废水处理效率和沼气产量。在稳定运行过程中,随着负荷的提高,产气量呈阶梯式渐次上升,最高日产气量达到 16 L, COD 去除率保持在 90% 以上;运行过程中出水 pH 值维持在 7.0 左右, TSS 去除率达到 60% 以上,出水水质较好。

参 考 文 献

[1] 李智超,姜海萍,郭军,等. UASB + SBR 工艺处理啤酒废水的研究. 安全与环境工程, **2009**, 16(1): 41-43
Li Zhichao, Jiang Haiping, Guo Jun, et al. Engineering practice of UASB + SBR process to the brewery. Wastewater Treatment Safety and Environmental Engineering, **2009**, 16(1): 41-43 (in Chinese)

[2] 方中刚,黄晨,王世强. 啤酒废水处理中活性污泥生物相变化研究. 水资源与水工程学报, **2011**, 22(3): 141-143
Fang Zhonggang, Huang Chen, Wang Shiqiang. Research on biofacies change of active sludge in treatment of beer wastewater. Journal of Water Resources & Water Engineering, **2011**, 22(3): 141-143 (in Chinese)

[3] 沈淞涛,杨顺生,方发龙,等. 啤酒工业废水的来源与水质特点. 工业安全与环保, **2003**, 29(12): 3-5
Shen Songtao, Yang Shunsheng, Fang Falong, et al. The source and character of brewery wastewater. Industrial Safety and Environmental Protection, **2003**, 29(12): 3-5 (in Chinese)

[4] 左永泉. 啤酒废水处理技术的应用. 环境工程, **2000**, 18(1): 34-36
Zuo Yongquan. Treatment technique of oil field produced

water and its progress. Environmental Engineering, **2000**, 18(1): 34-36 (in Chinese)

[5] 王克浩,李东伟,周载江. 两相厌氧-SBR 法处理啤酒废水工程实践. 水处理技术, **2007**, 33(4): 78-80
Wang Kehao, Li Dongwei, Zhou Zaijiang. Treatment of beer wastewater by two phase anaerobic-SBR process. Technology of Water Treatment, **2007**, 33(4): 78-80 (in Chinese)

[6] 宋建华. 啤酒废水中生物质能回用的意义. 啤酒科技, **2011**, (1): 19-20, 23
Song Jianhua. The significance of biomass energy reusing in beer wastewater. Beer Science and Technology, **2011**, (1): 19-20, 23 (in Chinese)

[7] Yan Yuegen, Tay JooHwa. Brewery wastewater treatment in UASB reactor at ambient temperature. Journal of Environmental Engineering, **1996**, 122(6): 550-553

[8] 方春玉,周健,张会展. 啤酒废水厌氧生物处理技术研究进展. 四川理工学院学报(自然科学版), **2006**, 19(1): 88-92
Fang Chunyu, Zhou Jian, Zhang Huizhan. Research progress of anaerobic biological treatment technology for brewery wastewater. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), **2006**, 19(1): 88-92 (in Chinese)

[9] 石锦慎. 啤酒工业废水的处理与利用. 中国资源综合利用, **2009**, 27(4): 39-40
Shi Jinshen. The treatment and recycling technology of the beer industry wastewater. China Resources Comprehensive Utilization, **2009**, 27(4): 39-40 (in Chinese)

[10] 张传兵,李东艳,王慧芳. UASB 反应器处理啤酒废水启动运行研究. 水处理技术, **2010**, 36(7): 43-45
Zhang Chuanbing, Li Dongyan, Wang Huifang. Study on the start-up operation of UASB reactor for treatment brewery wastewater. Technology of Water Treatment, **2010**, 36(7): 43-45 (in Chinese)

[11] Kettunen R. H., Rintala J. A. The effect of low temperature(5~20℃) and adaptation on the methanogenic activity of biomass. Appl. Microbiol. Biotechnol., **1997**, 48(4): 570-576

[12] 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. Water Research, **2001**, 35(10): 2446-2452

[13] 聂洪文. UAMR 中温处理高浓度啤酒废水研究. 重庆环境科学, **1999**, 21(5): 36-39
Nie Hongwen. Study of the high concentration brewery

- wastewater UPF low anaerobic multi-bed reactor with recycle. *Chongqing Environmental Science*, **1999**, 21(5):36-39(in Chinese)
- [14] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理. 北京: 中国轻工业出版社, **1998**
- [15] Michaud S., Bernet N., Buffiere P., et al. Methane yield as a monitoring parameter for the start-up of anaerobic fixed film reactors. *Water Research*, **2002**, 36(5):1385-1391
- [16] Karim K., Hoffmann R., Klasson T., et al. Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing. *Bioresource Technology*, **2005**, 96(16):1771-1781
- [17] 买文宁, 邢传宏, 徐洪斌. 有机废水生物处理技术及工程设计. 北京: 化学工业出版社, **2008**
- [18] 陈学民, 王利杰, 伏小勇. UASB 反应器常温处理生活污水中试的启动研究. *给水排水*, **2002**, 28(3):15-18
Chen Xuemin, Wang Lijie, Xu Hongbin. Pilot scale study on domestic sewage treated by UASB reactor at normal temperature. *Water & Wastewater Engineering*, **2002**, 28(3):15-18(in Chinese)
- [19] Shigeki Uemura, Hideki Harada. Treatment of sewage by a UASB reactor under moderate to low temperature conditions. *Bioresource Technology*, **2000**, 72(3):275-282
- [20] Ramakrishna C., Desai J. D. High rate anaerobic digestion of a petrochemical wastewater using biomass support particles. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **1997**, 13(3):329-334
- [21] 白玉华, 张代钧, 祖波, 等. 低 COD 浓度废水启动 EGSB 反应器. *环境工程学报*, **2007**, 1(4):29-33
Bai Yuhua, Zhang Daijun, Zu Bo, et al. The start-up of expanded granular sludge bed reactor with low strength COD. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2007**, 1(4):29-33(in Chinese)