



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 <sup>0</sup> -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 <sub>2.5</sub> 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

<b>Nitrogen conversion pathway of autotrophic nitrogen removal process in single SBR</b> .....	Lü Yongtao Wang Lei Sun Ting Wang Xudong Wang Zhiying(1201)
<b>Stimulation based on SIMULINK for nitrification reaction kinetics model</b> .....	Luo Feihang Yang Zhaohui Lu Hui Luo Yuanling Zhan Qi(1206)
<b>Central treatment of wastewater with high organic content from different industrial sources</b> .....	Zhang Weijun Gao Ya Ma Shilong Zhang Ming Wang Dongsheng Xu Yueyang(1213)
<b>Shortcut denitrification characterization of immobilized AOB</b> .....	Zhou Li Li Zhengkui Wang Yichao Fan Nianwen(1219)
<b>Research on influencing factors and operation optimization for CSTR partial nitrification at normal temperature</b> .....	Zhong Hang Li Dong Wu Di Zeng Taotao Liu Liqian Su Dongxia Zhang Jie(1225)
<b>Effect of temperature and sludge concentration on hydrolysis and acidification of waste activated sludge under alkaline condition</b> .....	Su Gaoqiang Wang Shuying Zheng Bingyu Peng Yongzhen(1231)
<b>Treatment of overflow using two-way cyclone flocculation hydrocyclone</b> .....	Zang Baofeng Huang Yongqiang Xu Mingli Shi Kai Zhu Yan(1237)
<b>Electricity generation performance of microbial fuel cells with carbon cloth as air-cathode and iron as cathode catalyst</b> .....	Tang Yulan He Yating Yu Pengfei Sun Hong Yu Yan Peng Man(1241)
<b>Biosorption of zinc (II) in water with decabromodiphenyl ethers</b> .....	Bai Jieqiong Yin Hua Ye Jinshao Peng Hui Ye Qian He Baoyan Li Yuepeng Zhang Na Peng Sufen(1245)
<b>Microwave assisted cleaning of hydrophobic membrane</b> .....	Yin Zifei Wang Jun Ji Zhongguang Hou Deyin(1251)
<b>Online monitoring system of anaerobic reactor in processes of transforming wastewater into resources</b> .....	Wang Shunli Shang Liping Li Zhanfeng Deng Hu Liu Xianyong(1256)
<b>Influences of different factors on effect of matrix nitrogen and phosphorus removal in substrates of constructed wetland</b> .....	Chen Lili Zhao Tongke Zhang Chengjun Li Peng Li Xinrong Dong Ruozheng(1261)
<b>Experiment on start-up phase of new modified septic tanks treating domestic sewage</b> .....	Chen Zhiqiang Guan Huabin(1267)
<b>Effect of pH values on process for removal of 2,4,6-trichlorophenol by Fe<sup>0</sup>-anaerobic microbe system</b> .....	Wu Jingang Dai Youzhi Guo Lili Wang Guizhi Li Xiaona(1273)
<b>Preparation and evaluation of TiO<sub>2</sub> granule for As(III) removal from water</b> .....	Xie Dongmei Cao Linhong Cui Jinli(1279)
<b>Adsorption of pyrogallol from aqueous solution by amine modified attapulgite</b> .....	Wang Chunxiang Zhang Yan Xue Ailian Zhou Shouyong Zhao Yijiang Chen Zhidong(1285)
<b>Treatment of wastewater from acrylonitrile industries with combined processes of adsorption oxidation, nanofiltration and adsorption</b> .....	Li Wei Zhan Xia Li Jiding Zheng Dongju(1290)
<b>Efficiency of removing nitrogen and phosphorus from simulated wastewater using hydrophytes</b> .....	He Na Sun Zhanxiang Zhang Yulong Liu Mingda(1295)
<b>Retention time and effects on water quality and phytoplankton of water shade agent-True Blue</b> .....	Li Yan Zhang Yinjiang Liu Xiaopei Wu Hao Zhang Leting Duan Ting Li Zhen Zhang Manman(1301)
<b>Effect of temperature on ammonification and nitrous oxide emission in partial nitrification</b> .....	Guo Ning Zhang Jian Kong Qiang Miao Mingsheng Tian Lin(1308)
<b>Fouling mechanism in advanced treatment of dyeing wastewater by ultrafiltration membrane</b> .....	Fu Lele Li Fang Wu Liang Wang Ge(1313)
<b>Removal of turbidity from butyl-acrylate wastewater by coagulation-sedimentation</b> .....	Gu Xiaofeng Song Yudong Zhou Yuexi Ma Liqiang Li Jun Wang Jun(1319)
<b>Purification effect of ecological floating beds of flakiness connection in slightly polluted river water</b> .....	Duan Jincheng Zhang Yimin Zhang Hongwei Gao Yuexiang Chao Jianying(1324)
<b>Nitrogen removal efficiency of co-processing pickle wastewater and municipal sewage by cyclic activated sludge system(CASS) process</b> .....	He Qiang Ding Wenjing Sima Weiping(1331)
<b>Pilot study on flow characteristics of a variable-velocity oxidation ditch with fine bubble</b> .....	Yang Yahong Peng Dangeong Li Lei Zheng Yangguang Han Yun(1336)
<b>Comparison of two different constructed wetland systems to treat swine wastewater</b> .....	Li Pengyu Wang Zhen Yuan Linjiang Dong Jian Liu Lin Zhu Gefu Liu Chaoliang(1341)
<b>Preparation of coagulant from fly ash and its application in Yellow River water treatment</b> .....	Li Yumei Chen Lirong Du Mingzhan(1346)
<b>Field study on effect of harvesting submerged plant during growing season for ecological management of eutrophicated water</b> .....	Jiang Yishuai Chen Hao Ma Zuomin Li Jing(1351)
<b>Rapid determination of sulfate in water by turbidimetry</b> .....	Xue Xiuling Li Mengdi(1359)
<b>Pollutants removal characteristics of natural start-up and steady operation of membrane bioreactor (MBR) for treating polluted surface water</b> .....	Yang Wei Zhao Qiujing Han Zhengshuang Li Kai Liang Heng Li Guibai(1363)
<b>Application of RBF and Elman neural network in prediction on pollutant removal efficiency of constructed wetland with different compound substrates</b> .....	Liang Qibin Liu Yungen Tian Kun Wang Wanbin(1368)
<b>Sludge formation and decontamination effect of stable surface flow wetland systems</b> .....	Zhang Longfei Wang Chengduan Wang Zhishuai(1373)
<b>Synthesis of multifunctional chelating resin and its adsorption properties for Cd(II) in water</b> .....	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/TiO<sub>2</sub>/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<sub>2.5</sub> 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 Qiyang 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)

# 厌氧反应器废水资源化过程在线监测系统

王顺利<sup>1</sup> 尚丽平<sup>1</sup> 李占锋<sup>2</sup> 邓 琥<sup>1</sup> 刘先勇<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学信息工程学院, 绵阳 621010;

2. 西南科技大学制造科学与工程学院, 绵阳 621010)

**摘要** 为克服现行厌氧反应器状态离线分析的滞后性, 充分利用资源, 改进废水排放状态, 研究了基于荧光光谱的废水资源化处理过程在线监测系统。系统以厌氧反应器中的关键产物色氨酸、核黄素及辅酶为主要检测组分, 自动定位滤波轮并控制脉冲氙灯的闪烁次数, 使用光电倍增管采集荧光信号。针对反应产物的混合体系, 提出了将三维数据二维化的准三维荧光谱概念, 优化获得了的  $3 \times 3$  荧光强度矩阵, 采用偏最小二乘法并优化其模型参数, 实现了反应器中 3 种关键过程产物的实时在线检测、统计与分析, 使其回收率范围达到 85% 至 112%。

**关键词** 废水资源化 在线检测 PLS 厌氧反应器

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)04-1256-05

## Online monitoring system of anaerobic reactor in processes of transforming wastewater into resources

Wang Shunli<sup>1</sup> Shang Liping<sup>1</sup> Li Zhanfeng<sup>2</sup> Deng Hu<sup>1</sup> Liu Xianyong<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract** In order to overcome the hysteresis of current off-line state analysis of the anaerobic reactor, make full use of the resources and improve the status of wastewater discharge, an online monitoring system was studied in the process of transforming wastewater into resources based on fluorescence spectra. Tryptophan, riboflavin and coenzyme are taken as key monitoring components of the anaerobic reactor, the filter wheel are automatically located and flashes of the pulsed xenon lamp controlled. The fluorescence signals are collected by a photomultiplier tube. To deal with the mixed system of reaction products, the concept of quasi-three-dimensional fluorescence spectra, which transforms three-dimensional data into two-dimensional, was put forward and an optimized  $3 \times 3$  fluorescence intensity matrix was obtained by optimizing the model parameters with partial least squares method. The three key process products in the reactor were detected online in real-time, added up and analyzed with a recovery ratio ranging from 85% to 112%.

**Key words** transforming wastewater into resources; online monitoring; PLS; anaerobic reactor

厌氧废水资源化处理能够有效对废水进行降解处理并且对其中的有机物处理后能够产生甲烷等气体进行二次利用<sup>[1]</sup>, 但是, 由于离线反应器状态分析具有严重的滞后性, 不能够充分利用资源和达到更好的废水最终排放状态<sup>[2,3]</sup>。因此, 研究在线检测方法, 对环境保护、能源回收均具有重要的意义。

在废水资源化处理过程中, 由于过程产物辅酶、色氨酸及核黄素的浓度能够反映厌氧反应器的状态<sup>[4,6]</sup>。同时, 这 3 种物质比其他氨基酸等成分具有非常明显的较强荧光强度特性<sup>[7,8]</sup>, 因此, 可以使用荧光检测的方法进行检测, 最大程度降低其他成分对检测的干扰, 反映厌氧反应器状态<sup>[9,10]</sup>。

同时, 废水资源化处理现场需对现场状况进行准确检测, 三维荧光谱解析能够很好的达到这一目标<sup>[11,12]</sup>, 但信息量、快速性、低成本间的尖锐矛盾限制了其现场应用<sup>[13]</sup>。由于现场检测过程中时间等条件的限制, 测量得到的数据往往是准三维数据, 基于准三维谱的数据的解析则非常具有意义。针对上述问题, 提出基于小样本准三维谱的直接分析的思想, 基于偏最小二乘法, 提出了准三维荧光谱在线

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063002)

收稿日期: 2012-02-18; 修订日期: 2012-07-25

作者简介: 王顺利(1985~), 男, 助教, 主研方向: 光谱数据分析。

E-mail: wangshunli1985@126.com

解析方法。

本文在深入分析了过程产物色氨酸、核黄素荧光检测原理的基础上,对荧光检测数据进行了分析,综合现场在线解析的特点,选取优势波长进行小样本量数据分析尝试,提出了基于准三维荧光光谱的在线解析方法,使用 3×3 组合滤波片实现了废水资源化处理过程中荧光光谱的在线解析。

### 1 材料与方 法

使用实验室方法对色氨酸、核黄素、辅酶的荧光特性的研究,分析、讨论荧光光谱的特点及其影响因素及混合光谱特性。在研究常规荧光检测方法基础上,根据在线解析的特点,基于三维转二维的思想和偏最小二乘法提出准三维荧光光谱在线解析方法并研制在线检测系统,进行在线检测分析。

#### 1.1 在线解析算法研究

本文基于偏最小二乘法、准三维概念及三维数据二维化处理的思想提出了准三维光谱在线解析方法,构架如图 1 所示。

针对现场应用的目标,提出准三维荧光光谱的概

念,对三维荧光数据进行离散化提取,以达到压缩数据量和应用于现场检测的目标。

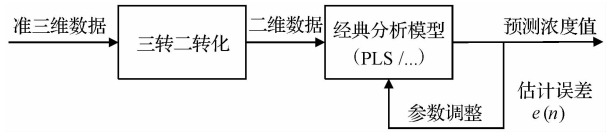


图 1 构架模型图

Fig.1 Architecture model chart

把通过激发-发射滤波片组获得的准三维荧光数据转换为激发发射波长为一个横向向量的二维数据,使用偏最小二乘法建立混合体系的相互影响模型<sup>[14,15]</sup>,对混合体系进行解析,基本流程如图 2 所示。

#### 1.2 系统整体方案

根据荧光特性的研究及提出的准三维荧光光谱在线解析方法,搭建测量系统,实现并通过现场实验改进设计系统和解析方法,总体结构图如图 3 所示。

系统采用荧光光谱分析方法结合准三维、三维转二维思路,对过程产物进行在线检测,采用高速 PCI

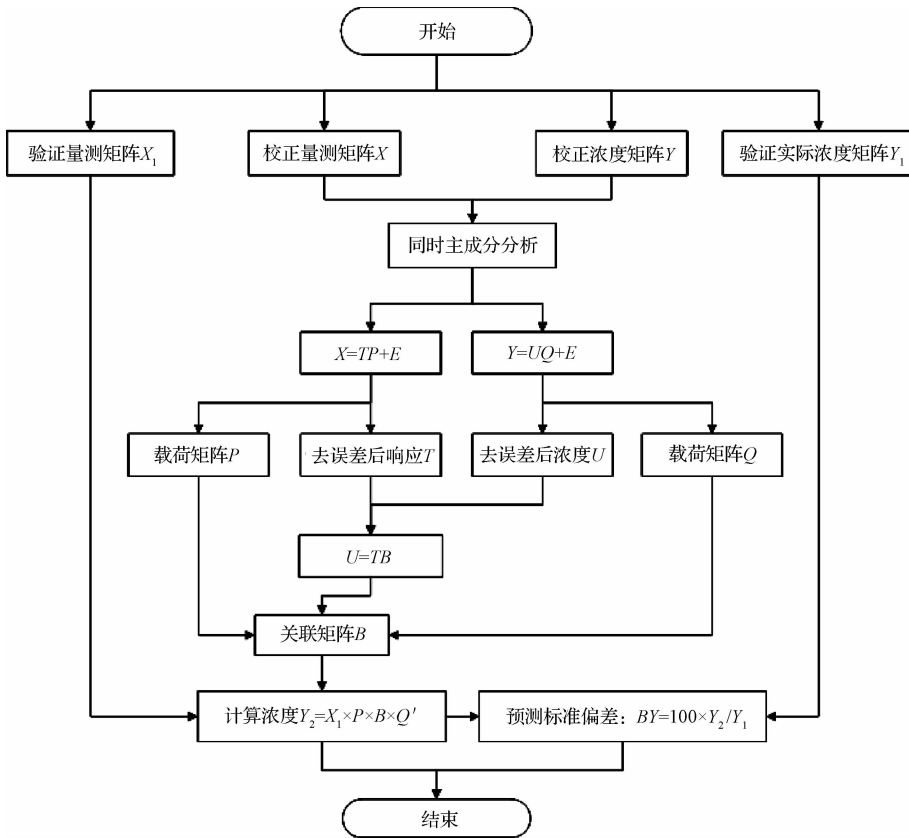


图 2 PLS 原理流程图

Fig.2 PLS principle flow chart

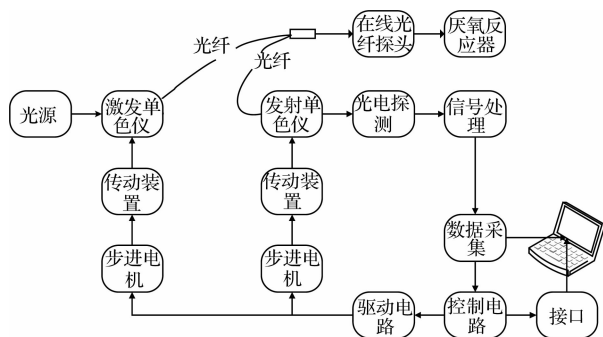


图3 系统总体结构图  
Fig.3 Whole system structure

数据采集卡实现步进电机控制滤波轮的定位,氙灯实时控制,数据实时采集等内容。整合二维定量分析偏最小二乘法,研发集系统控制、算法分析和浓度与反应器状况间关系模型的一体化软件。

1.3 在线解析的实现

数据的分析过程在基于 Matcom 的接口设计的基础上,基于 Matlab 平台建立基于 PLS 的准三维荧光数据的分析模型,进而对数据进行分析,得出相应的分析结果。标准数据来源采用独立数据表进行标准数据的存储;实测现场数据存入临时数据表中,提取分析对应的记录,对数据进行分析。

数据库中,标准数据率中 D11, D12, D13, ..., D31, D32, D33 记录相对荧光强度, C1, C2, C3 是辅酶,色氨酸,核黄素为一组的浓度值。通过表中的一一对应关系,基于 PLS 模型下建立其解析模型,然后提取后面对应的记录对数据进行分析,解析出对应的浓度,给出提示并存入数据库如图4所示。

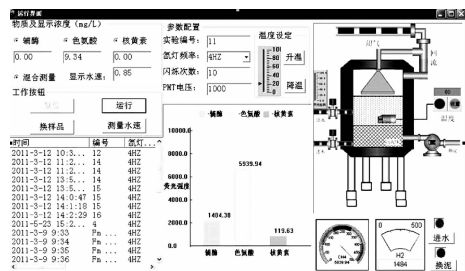


图4 数据分析功能  
Fig.4 Data analysis function

2 结果与分析

2.1 研制在线检测系统

该设备目标是使用物理方法荧光检测技术对过程产物进行在线检测,实时反映反应器状态。通

过实验调试改进,研制在线检测系统如图5所示。



图5 系统仪器图  
Fig.5 System instrument chart

系统运行过程中,稳定性良好,实现测量同时可以进行各种数据处理与分析操作,并根据结果进行相应的自动控制。

2.2 实验测试结果分析

2.2.1 实验样品

色氨酸、核黄素、辅酶、无水乙醇(分析纯 AR),由成都市科龙化工试剂厂提供。KNO<sub>3</sub>(AR 试剂);色氨酸(BR 试剂)和二次蒸馏水。

配制如表1所示的样本溶液。用二次蒸馏水溶解色氨酸、核黄素样品,配置100 mg/L的样本母液,然后逐级稀释至所需浓度。考虑到色氨酸微溶于水,进行30 min的超声波振荡。将配制好样本装入10 mm × 12.5 mm × 45 mm 的比色皿,其中ID为样本编号。

表1 实验样本浓度

Table 1 Concentrations of experimental samples

(mg/L)

ID	辅酶	色氨酸	核黄素	ID	辅酶	色氨酸	核黄素
1	1.00	0.10	0.20	5	1.00	0.20	0.20
2	2.00	0.10	0.20	6	2.00	0.20	0.20
3	1.00	0.10	0.40	7	1.00	0.20	0.40
4	2.00	0.10	0.40	8	2.00	0.20	0.40

准三维荧光光谱荧光强度矩阵中,通过把激发、发射波长统一在一个列向量中,降低为二维矩阵后的荧光强度数据表进行分析。

2.2.2 实验仪器和条件

自制在线检测仪;激发滤波轮中的滤波片激发波长分别为360、284和440 nm,发射滤波轮中的滤波片波长分别为452、360和532 nm;移液器(德国, Eppendorf 公司);酸度计(KL2602);JP-C50A 型号超声波振荡器。

①取部分储备液,用无水乙醇分别将储备液(100 mg/L)逐级稀释;将配置好的溶液分别盛于1 cm × 1 cm 石英比色皿中,密封。



②设置荧光激发-发射波长,激发波长(360、284和440 nm)和发射波长(452、360和532 nm)-辅酶、色氨酸、核黄素顺序最佳激发和发射波长。

③获得荧光强度(3×3矩阵)。

④选取单个样本分别作为校验集,其余作为校正集,进行预测和结果解析。

### 2.2.3 数据分析

系统首先对准三维数据进行降维,把激发波长(360、284和440 nm)和发射波长(452、360和532 nm)统一成一个行向量,形成二维矩阵(激发发射波长-相对荧光强度),然后使用偏最小二乘法(PLS)建立样本相对荧光强度和样本浓度之间的相关性模型。

根据偏最小二乘方法建立模型如公式(1)所示,回收率求取如公式(2)所示。

$$Y_2 = (X_1 \times P) \times B \times Q' \quad (1)$$

$$BY = 100 \times Y_2 / Y_1 \quad (2)$$

其中, $X_1$ 为待测样本激发-发射相对荧光强度矩阵, $Y_2$ 为待测样本预测浓度矩阵, $P$ 为校正样本 $X$ 的载荷矩阵, $B$ 为回归系数矩阵, $Q$ 为校正样本 $Y$ 的载荷矩阵, $Y_1$ 为待测样本实际浓度矩阵, $BY$ 为回收率。

把每个实验样本的相对荧光强度及浓度矩阵分别作为验证集,其余样本作为校正集,建立模型并进行校验,验证结果如表2所示。

表2 验证结果

Table 2 Verification results

ID	类别	辅酶	色氨酸	核黄素
1	预测浓度(mg/L)	0.86	0.12	0.22
	回收率(%)	85.62	115.40	111.90
2	预测浓度(mg/L)	1.86	0.10	0.21
	回收率(%)	92.76	97.20	106.1
3	预测浓度(mg/L)	1.08	0.12	0.44
	回收率(%)	108.12	116.70	110.95
4	预测浓度(mg/L)	1.75	0.10	0.37
	回收率(%)	87.61	98.5	93.40
5	预测浓度(mg/L)	1.00	0.24	0.19
	回收率(%)	99.10	119.95	95.50
6	预测浓度(mg/L)	1.90	0.19	0.18
	回收率(%)	94.77	94.30	90.45
7	预测浓度(mg/L)	0.94	0.21	0.42
	回收率(%)	93.78	107.25	104.50
8	预测浓度(mg/L)	1.86	0.23	0.39
	回收率(%)	92.80	117.25	96.75

由验证结果可知,建立的有限数量荧光光谱数据(3×3激发-发射最佳波长上荧光强度矩阵)的准

三维荧光光谱,经过三维转二维的数据转化后,可以实现对数据的二维矩阵化处理。进而通过偏最小二乘法建立其预测模型,可以有效对含有色氨酸、核黄素和辅酶的多组分体系待测样本进行预测,回收率范围为85.62%~111.90%,表明该思路可以用于现场荧光光谱的在线解析。

## 3 结论

提出了废水资源化处理的在线荧光检测及解析方法,并进行了系统的设计和实现,实现了废水资源化过程实时检测的需求,通过配置不同浓度混合样本体系进行实验分析,验证了解析方法的可靠性。使用所搭建的荧光检测系统对样本体系进行检测,根据荧光强度值进行浓度回归预测,调试改进仪器后,回收率达到85.62%~111.90%。实验结果表明,系统对反应器中关键过程产物混合体系能够有效地检测和定性定量区分,为反应器状态在线监测的现场应用打下了基础。

## 参考文献

- [1] Mateos-Aparicio Gregoria. Partial least squares (PLS) methods: Origins, evolution, and application to social sciences. *Communication in Statistic-Theory and Methods*, **2011**, 40(13): 2305-2317
- [2] 尚丽平,王俊波,武志翔,等. 废水处理过程中色氨酸荧光特性研究. *光谱学与光谱分析*, **2010**, 30(12): 3277-3280  
Shang Liping, Wang Junbo, Wu Zhixiang, et al. Study on the fluorescent characteristic of tryptophan in the process of the wastewater treatment. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, **2010**, 30(12): 3277-3280 (in Chinese)
- [3] 孙剑辉,冯精兰,孙瑞霞. 水体有机污染物分析的研究进展. *中国环境监测*, **2003**, 19(6): 58-61  
Sun Jianhui, Feng Jinglan, Sun Ruixia. Progress of organic pollutants analysis in water. *Environmental Monitoring in China*, **2003**, 19(6): 58-61 (in Chinese)
- [4] Ding Shuang, Zheng Ping, Lu Huifeng. Ecological characteristics of anaerobic ammonia oxidizing bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **2013**, 97(5): 1841-1849
- [5] 王军,侯石磊,杨清香,等. 外循环式UASB反应器处理高浓度酒精废水. *环境工程学报*, **2012**, 6(6): 1841-1845  
Wang Jun, Hou Shilei, Yang Qingxiang, et al. High strength alcohol wastewater treatment by outside circulation upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2012**, 6(6): 1841-1845 (in Chinese)

- [6] 李卫华,盛国平,王志刚,等. 废水生物处理反应器出水的三维荧光光谱解析. 中国科学技术大学学报, **2008**, 38(6):601-608  
Li Weihua, Sheng Guoping, Wang Zhigang, et al. Analysis of EEM fluorescence spectra of effluents from bioreactors. Journal of University of Science And Technology of China, **2008**, 38(6):601-608 (in Chinese)
- [7] 樊勋,邓琥,武志翔,等. 利用荧光法检测磷酸酯液压油的泄漏. 发光学报, **2012**, 33(6):674-677  
Fan Xun, Deng Hu, Wu Zhixiang, et al. Feasibility of using fluorescence to detect the leakage of phosphate ester hydraulic oil. Chinese Journal of Luminescence, **2012**, 33(6):674-677 (in Chinese)
- [8] 丁然,潘峰,高迎新,等. 聚合硫酸铁/高锰酸钾/二氧化氯组合工艺用于聚氯乙烯废水回收的工程化研究. 环境工程学报, **2012**, 6(5):1624-1628  
Ding Ran, Pan Feng, Gao Yingxin, et al. Pilot-scale research on reutilization of polyvinyl chloride wastewater by a combination of polyferric sulfate/potassium permanganate/chlorine dioxide. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2012**, 6(5):1624-1628 (in Chinese)
- [9] Xijing Guo, Miron S., Brie D. A CANDECOMP/PARAFAC perspective on uniqueness of DOA estimation using a vector sensor array. IEEE Transactions on Signal Processing, **2011**, 59(7):3475-3481
- [10] Du Y. P., Liang Y. Z., Jiang J. H., et al. Spectral regions selection to improve prediction ability of PLS models by changeable size moving window partial least squares and searching combination moving window partial least squares. Analytica Chimica Acta, **2004**, 501(2):183-191
- [11] 林海航,王顺利. 便携式废水降解过程在线监测系统构建. 安徽农业科学, **2011**, 39(34):21523-21528  
Lin Haihang, Wang Shunli. Construction of portable wastewater degradation process online monitoring system. Journal of Anhui Agri. Sci., **2011**, 39(34):21523-21528 (in Chinese)
- [12] Bieroza M., Baker A., Bridgeman J. Classification and calibration of organic matter fluorescence data with multi-way analysis methods and artificial neural networks: An operational tool for improved drinking water treatment. Environmetrics, **2011**, 22(3):256-270
- [13] 徐龙君,陈魏,农丽薇,等. 稀硫酸预处理对稻草厌氧消化的影响. 环境工程学报, **2012**, 6(7):2442-2446  
Xu Longjun, An Lina, Nong Liwei, et al. Effect of pretreatment of dilute hydrochloric acid on anaerobic digestion of rice straw. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2012**, 6(7):2442-2446 (in Chinese)
- [14] Li Jing, Xue Long, Liu Muhua. Study of fluorescence spectrum for measurement of soluble solids content in navel orange. Advanced Materials Research, **2011**, 186(1):126-130
- [15] Yue Z. B., Liu R. H., Yu H. Q., et al. Enhanced anaerobic ruminal degradation of bulrush through steam explosion pretreatment. Industrial and Engineering Chemistry Research, **2008**, 47(16):5899-5905