



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

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 <sup>0</sup> -anaerobic microbe system .....	Wu Jingang Dai Youzhi Guo Lili Wang Guizhi Li Xiaona(1273)
Preparation and evaluation of TiO <sub>2</sub> 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 Chaoxiang(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/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)

# 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<sup>1</sup> 刘云根<sup>1</sup> 田 昆<sup>1,2</sup> 王万宾<sup>1</sup>

(1. 西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2. 国家高原湿地研究中心, 昆明 650224)

**摘 要** 人工湿地的去污机理复杂、呈高度非线性, 故利用神经网络技术构建模型预测其长期运行效果。通过构建人工湿地复合基质模拟槽系统进行为期 4 个月的实验, 监测得到 56 组 COD 去除率数据样本, 经 Matlab 小波去噪后分别利用 RBF 和 Elman 网络构建动态神经网络模型, 预测该系统对生活污水中 COD 去除效果。结果表明, RBF 和 Elman 神经网络预测值的均方根误差分别为 0.0186 和 0.0163, 精度较高, 该系统后期的 COD 去除率在 49.4% ~ 59.0% 之间。

**关键词** 人工湿地基质 Elman 网络 RBF 网络 预测

中图分类号 X820 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)04-1368-05

## Application of RBF and Elman neural network in prediction on pollutant removal efficiency of constructed wetland with different compound substrates

Liang Qibin<sup>1</sup> Liu Yungen<sup>1</sup> Tian Kun<sup>1,2</sup> Wang Wanbin<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;  
2. National Plateau Wetlands Research Center, Kunming 650224, China)

**Abstract** The neural network model was build to predict treatment efficiency of the constructed wetland because of the complex decontamination mechanism and nonlinear. In 4 month experiment, 56 groups of COD removal rate were obtained from constructed wetland with different compound substrates. To predict the COD removal rate, the models based on the radial basis function(RBF) and Elman neural network were presented after wavelet de-noising under the environment of Matlab. The results showed that the RMS error of RBF and Elman neural network are 0.0186 and 0.0163, respectively, which means that the precision of the model is high. The COD removal rates are 49.4% ~ 59.0% .

**Key words** constructed wetland substrate; Elman neural network; RBF neural network; prediction

人工湿地是 20 世纪 70 年代蓬勃兴起的一种污水处理技术, 不仅建造、运行和日常管理费用低廉, 而且处理效果稳定、改善和美化生态环境, 因而被广泛应用于农村面源污染控制。然而, 人工湿地系统的去污机理复杂, 影响因子众多, 呈高度非线性与不稳定性, 目前人工湿地的设计和运行大都建立在经验基础上, 缺乏对人工湿地内在净化机制量化研究及长期运行效果准确可靠的预测手段。此外, 尽管随时间顺序而变化的污染物去除效率与时间序列之间具有某种统计意义上的关系, 但这种关系很难用确定的函数或方程组来描述。而人工神经网络能在样本数据较大的条件下, 很好地逼近复杂的非线性函数, 因而在环境领域被广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

在人工湿地去污效果预测方面的研究较少, 黄娟等<sup>[5,6]</sup>利用 GA-BP 神经网络对人工湿地污水处理

效果影响因子进行探讨与分类预测, 确定系统最佳运行状况。韩耀宗等<sup>[7]</sup>利用小波神经网络对芦苇潜流人工湿地的水温等 5 个指标进行预测研究。黄瑶等<sup>[8]</sup>利用 BP 神经网络模拟人工沉床系统, 与多元非线性回归方法相比, 平均相对误差更小。本研究利用 Elman 神经网络和径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络对人工湿地复合基质系统去污效果进行预测, 比较二者的预测结果, 验证结果的一致性, 为研究人工湿地净化效果提供一条思路。

基金项目: 云南省应用基础研究面上项目(2010CD066)

收稿日期: 2012-04-21; 修订日期: 2012-06-04

作者简介: 梁启斌(1979~), 男, 硕士, 讲师, 主要从事高原湖泊生态修复技术研究。E-mail: qb\_liang@126.com

# 1 实验装置及数据

实验以校园生活污水作为处理对象,经水泵流到尺寸为 1.0 m × 0.5 m × 1.0 m 的人工湿地复合基质模拟槽,由上至下分别填充 20 cm 厚的红壤、20 cm 厚的蛭石、20 cm 厚的煤渣及 10 cm 厚的碎石,剖面如图 1 所示,建立 3 套模拟槽进行平行实验。系统采用连续进出水的方式,每隔 1 d 取样分析进出水的 COD 等指标,自 2011 年 8 月 24 日开始进行为期 4 个月的监测,计算其去除率(共 56 个数据样本)

如表 1 所示。

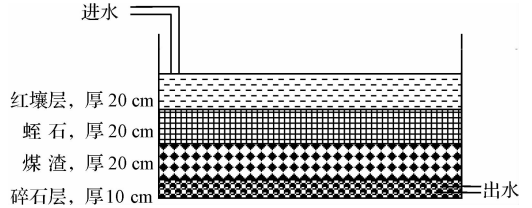


图 1 人工湿地复合基质模拟槽结构图

Fig. 1 Structure of groove simulated constructed wetland with different compound substrates

表 1 人工湿地复合基质对生活污水 COD 去除率

Table 1 COD removal rate of constructed wetland with different compound substrates

序号	日期	去除率 (%)	序号	日期	去除率 (%)	序号	日期	去除率 (%)	序号	日期	去除率 (%)
1	8月24日	70.1	15	9月21日	52.9	29	10月28日	82.5	43	11月25日	45.9
2	8月26日	69.7	16	9月23日	44.4	30	10月30日	71.3	44	11月27日	52.2
3	8月28日	69.2	17	9月25日	75.2	31	11月1日	55.1	45	11月29日	50.2
4	8月30日	68.7	18	9月27日	37.5	32	11月3日	56.1	46	12月4日	49.8
5	9月1日	83.7	19	9月29日	34.2	33	11月5日	52.2	47	12月6日	32.5
6	9月3日	89.5	20	10月10日	76.4	34	11月7日	54.5	48	12月8日	46.6
7	9月5日	69.4	21	10月12日	47.2	35	11月9日	54.1	49	12月10日	48.4
8	9月7日	89.2	22	10月14日	33.7	36	11月11日	66.8	50	12月12日	59.0
9	9月9日	66.8	23	10月16日	57.7	37	11月13日	53.8	51	12月14日	47.5
10	9月11日	81.2	24	10月18日	68.2	38	11月15日	53.4	52	12月16日	70.2
11	9月13日	60.5	25	10月20日	75.1	39	11月17日	48.8	53	12月18日	41.0
12	9月15日	65.1	26	10月22日	64.0	40	11月19日	44.0	54	12月20日	48.7
13	9月17日	42.2	27	10月24日	67.4	41	11月21日	52.0	55	12月22日	43.8
14	9月19日	31.7	28	10月26日	63.2	42	11月23日	67.9	56	12月24日	51.2

# 2 构建 RBF 和 Elman 神经网络预测模型

## 2.1 COD 去除率的去噪

由于实验过程存在随机误差,为更好建立预测模型,利用小波去噪技术处理实测数据,消除一些奇异点,使数据趋于平滑,能更好的描述 COD 去除率的变化趋势。小波去噪技术是对经过预处理的含噪信号进行多尺度小波变换,然后在各尺度下尽可能提取出信号的小波系数而去除属噪声的小波系数,最后用逆小波变换重构信号达到去噪的目的,其实是抑制信号中的无用部分,恢复信号中有用部分的过程,对上一层的低频部分和低频部分同时进行分解,具有更加精确的局部分析能力<sup>[9,10]</sup>。小波降噪通过以下 3 个步骤实现:(1)信号的小波分解。选择一个小波并确定分解的层次,然后进行分解计算;(2)小波分解高频系数的阈值量化。对各个分解尺度下的高频系数选择一个阈值进行软阈值量化处理;(3)一维小波重构。根据小波分解的底层低

频系数和各层高频系数进行一维小波重构。利用 Matlab 中的 dencmp 函数产生信号默认阈值,然后利用 wdenmp 函数进行消噪处理。实测数据经小波去噪后结果如图 2 所示,去噪后的数据趋于平滑。

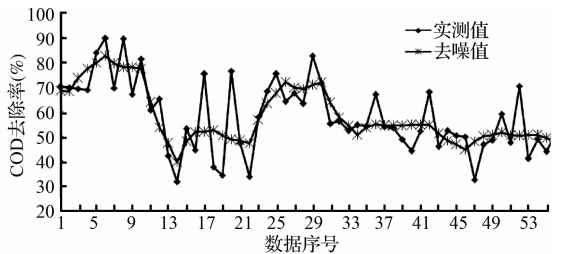


图 2 COD 去除率的实测值与去噪值对比

Fig. 2 Comparison between measured value and de-noising value of COD removal rate

## 2.2 RBF 神经网络预测模型

### 2.2.1 RBF 神经网络的结构

RBF 神经元网络是 Powell 于 1985 年提出的一种以函数逼近理论为基础构建的一类前向网络,具

有结构自适应确定、输出不依赖于初始权值和全局最优特性,且结构简单,训练速度快<sup>[11]</sup>。

RBF网络的产生具有很强的生物学背景,在人的大脑皮层区域中,局部调节及交叠的感受野(receptive field)是人脑反应的特点,RBF网络基于此提出的神经元网络,其结构与多层前向网络类似,如图3所示,它由3层组成<sup>[12]</sup>:第1层为输入层,由信号源节点构成,接受输入信号并只将其传递到隐含层;第2层为隐含层,是RBF网络中最重要的一层,隐含层节点由像高斯函数(径向基函数)那样的辐射状作用函数构成;第3层为输出层,它对输入模式的作用做出响应,输出层节点通常是简单的线性函数。

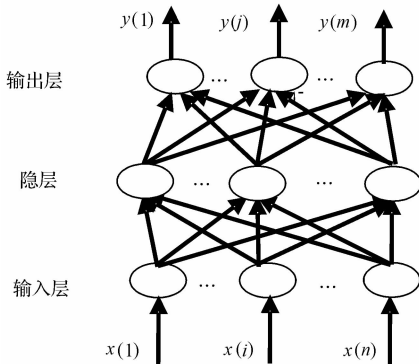


图3 RBF神经网络模型

Fig.3 Structure of RBF neural network

图3中隐含层节点中的基函数对输入信号在局部产生响应,当输入信号靠近径向基函数的中央范围时,隐含层节点将产生较大输出,因此RBF网络具有局部逼近能力。常用的近径向基函数是高斯函数:

$$R_i(x) = \exp\left[-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right], i = 1, 2, 3, \dots, m$$

式中: $x$ 是 $n$ 维输入向量; $c_i$ 是第 $i$ 个基函数的中心,与 $x$ 具有相同维数的向量; $\sigma_i$ 是第 $i$ 个感知的变量,它决定了该基函数围绕中心点的宽度; $m$ 是感知单元的个数(隐含层节点数); $\|x - c_i\|$ 是 $x$ 与 $c_i$ 之间的欧式距离。

### 2.2.2 预测网络构建

(1)确定RBF网络参数。确定计算输入层、隐含层及输出层单元数目,以及初始权值,利用自相关法求得时间延迟为2,利用假近邻法求得嵌入维数为3,选取经小波去噪后的44组COD去除率作为样本对网络进行训练,6组测试样本。

(2)选取传递函数。隐含层的传递函数为高斯函

数,输出层的传递函数为线性函数。

(3)基于Matlab平台,利用newbebe函数构建模型。

(4)利用训练样本及train函数训练模型,验证测试样本,设 $\hat{y}(t)$ ( $t = 1, \dots, s$ )为期望输出信号, $y(t)$ ( $t = 1, \dots, s$ )为模型预测输出信号, $s$ 为样本个数,则用均方跟误差来评价预测模型的预测性能。

$$\text{均方根误差 } E_{\text{RMSE}} = \left\{ \frac{1}{s-1} \sum_{t=1}^s [\hat{y}(t) - y(t)]^2 \right\}^{1/2}$$

反映预测值对观测值的平均偏离程度,取值大于或等于零,预测无误差时等于零。

## 2.3 Elman神经网络预测模型

### 2.3.1 Elman神经网络的结构

Elman神经网络是Elman于1990年提出的一种典型的局部回归网络,是在BP(back propagation)神经网络基本结构的基础上,通过存储内部状态使其具备映射动态特征的功能,使系统具有局部记忆单元和局部反馈连接的前向动态神经网络,具有适应时变特性的能力<sup>[13-15]</sup>。

Elman网络具有与多层前向网络相似的多层结构,其主要结构是前馈连接,包括输入层、隐含层、承接层、输出层,其连接可以进行学习修正;反馈连接由一组“结构”单元构成,用来记忆前一时刻的输出值,其连接权值是固定的。在这种网络中,除了普通的隐含层外,还有一个特别的隐含层,称为关联层;该层从隐含层接收反馈信号,每一个隐含层节点都有一个与之对应的关联层节点连接。关联层的作用是通过联接记忆将上一个时刻的隐层状态连同当前时刻的网络输入一起作为隐层的输入,相当于状态反馈。隐含层的传递函数为某种非线性函数,输出层为线性函数,关联层也为线性函数<sup>[15]</sup>。其基本模型如图4所示,其中, $u(n)$ 、 $y(m)$ 为网络的输入和输出, $N(k)$ 、 $M(k)$ 为隐层和承接层的输出, $W^1$ 、 $W^2$ 、 $W^3$ 为承接层到隐层、输入层到隐层、隐层到输出层的连接权矩阵, $\alpha$ 为承接层的固定增益, $f(\cdot)$ 、 $g(\cdot)$ 为隐层和输出层的激励函数。Elman网络描述的非线性状态空间表达式如下:

$$N(k) = f[W^1 M(k) + W^2 u(k)]$$

$$M(k) = N(k-1) + \alpha M(k-1)$$

$$y(k) = g[W^3 N(k)]$$

### 2.3.2 预测网络构建

(1)消噪后数据序列的前 $n$ 个时刻的值作为神经网络模型的输入值,经模型函数训练后预测输出



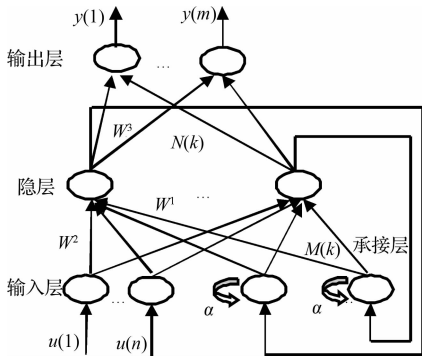


图 4 Elman 神经网络结构

Fig. 4 Structure of Elman neural network

后  $m$  个值,即进行  $m$  步预测,取序列  $n$  个相邻的样本为滑动窗,并将它们映射为  $m$  个值,代表在该窗之后的  $m$  个时刻上的样本的预测值,如表 2 进行数据训练分段。在构建人工湿地复合基质预测网络时, $n$  取 3, $m$  取 1,即选取 3 个经小波去噪后的实测去除率值作为输入层数据,依据时间序列预测下一个数据,最终得到 44 组训练样本和 6 组测试样本。

表 2 训练数据分段方式

Table 2 Piecewise method of training data

$n$ 个输入	$m$ 个输出
$u_1, \dots, u_n$	$y_{n+1}, \dots, y_{n+m}$
$u_2, \dots, u_{n+1}$	$y_{n+2}, \dots, y_{n+m+1}$
$u_3, \dots, u_{n+2}$	$y_{n+3}, \dots, y_{n+m+2}$
.....	.....
$u_k, \dots, u_{n+k-1}$	$y_{n+k}, \dots, y_{n+m+k-1}$

(2) 基于 Matlab 平台,利用 newelm 函数构建模型。

(3) 利用训练样本及 train 函数训练模型。

(4) 验证测试样本,计算均方根误差。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模型误差

利用训练样本及 train 函数训练 RBF 和 Elman 神经网络模型,对测试样本进行验证,结果如图 5 所示。从图中可看到 3 条曲线的变化趋势相近,预测值与实测的 COD 去除率基本能够吻合,且误差相对较小,详见表 3。RBF 和 Elman 神经网络预测值的均方根误差分别为 0.0186 和 0.0163,预测精度较高,拟合结果比较好,能够准确地进行预测。

从图 5 还可看出,Elman 网络预测曲线较 RBF 网络预测曲线更接近实测的 COD 去除率值,Elman

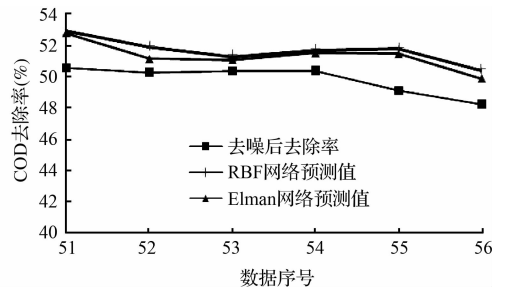


图 5 RBF 和 Elman 网络预测值与去噪值对比

Fig. 5 Comparison between de-noising value of COD removal rate and prediction value by RBF and Elman neural network

神经网络模型的预测结果略优。在 Elman 神经网络模型中增加了隐层及输出层节点的反馈,因而更进一步地增强了网络学习的精确性和容错性,对具有非线性时间序列特征的污染物去除率而言,具有良好的泛化能力、较强的通用性和客观性。

表 3 RBF 和 Elman 神经网络模型的预测误差

Table 3 Errors of the prediction model based on RBF and Elman neural network

序号	51	52	53	54	55	56
RBF 网络	0.0233	0.0167	0.0092	0.0132	0.0267	0.0216
Elman 网络	0.0221	0.0090	0.0072	0.0117	0.0236	0.0167

#### 3.2 预测结果

利用 RBF 和 Elman 网络模型预测人工湿地复合基质系统后续时间序列的 COD 去除率,结果如图 6 所示,该系统后期运行过程中,Elman 网络模型预测 COD 去除率在 49.5% ~ 56.4% 之间,RBF 网络模型预测 COD 去除率在 49.4% ~ 59.0% 之间。

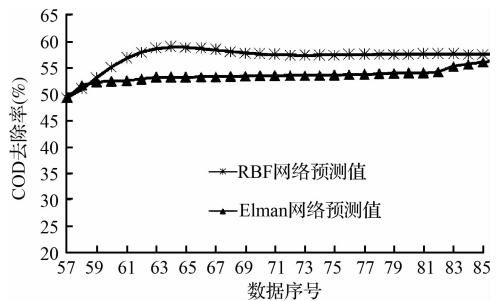


图 6 COD 去除率的预测值

Fig. 6 Prediction values of COD removal rate

### 4 结论

(1) RBF 和 Elman 2 种网络模型预测结果基本一致,均可反映出人工湿地复合基质对生活污水中

COD 的去除状况。

(2) RBF 和 Elman 神经网络预测值的均方根误差分别为 0.0186 和 0.0163, 精度较高, 能够准确地进行预测, 可为人工湿地系统长期运行效果的预测提供一条新途径。

(3) 预测结果显示该系统后期运行过程中, COD 去除率在 49.4% ~ 59.0% 之间。

## 参考文献

- [1] 郭飞宏, 张继彪, 郑正. BP 神经网络对蚯蚓滤池处理 COD 的模拟预测. 环境工程学报, **2012**, 6(4):1197-1201  
Guo Feihong, Zhang Jibiao, Zheng Zheng. Simulation and prediction based on BP neural network for COD treatment by earthworm filter. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2012**, 6(4):1197-1201 (in Chinese)
- [2] 苏彩红, 向娜, 陈广义, 等. 基于人工蜂群算法与 BP 神经网络的水质评价模型. 环境工程学报, **2012**, 6(2):609-704  
Su Caihong, Xiang Na, Chen Guangyi, et al. Water quality evaluation model based on artificial bee colony algorithm and BP neural network. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2012**, 6(2):609-704 (in Chinese)
- [3] 周荣敏, 雷延峰. 基于 BP 模型的磷酸铵镁法除磷模拟研究. 环境工程学报, **2009**, 3(9):1692-1696  
Zhou Rongmin, Lei Yanfen. Simulations of phosphorus removal by magnesium ammonium phosphate process based on BP neural network model. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2009**, 3(9):1692-1696 (in Chinese)
- [4] 曹刚, 李明玉, 王君, 等. T-S 模糊神经网络在厌氧反应器预测中的应用. 环境工程学报, **2007**, 1(11):119-123  
Cao Gang, Li Mingyu, Wang Jun, et al. Application of T-S neural network in prediction for anaerobic bioreactors. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2007**, 1(11):119-123 (in Chinese)
- [5] 黄娟, 王世和, 雒维国, 等. 基于遗传神经网络的人工湿地脱氮效果影响因素研究. 中国给水排水, **2007**, 23(9):10-14  
Huang Juan, Wang Shihe, Luo Weiguo, et al. Study on influencing factors of nitrogen removal effect in constructed wetland based on genetic neural network. China Water & Wastewater, **2007**, 23(9):10-14 (in Chinese)
- [6] 黄娟, 王世和, 雒维国, 等. 基于 GA-BP 网络的人工湿地污水净化效果研究. 中国工程科学, **2007**, 9(2):79-83  
Huang Juan, Wang Shihe, Luo Weiguo, et al. Study on the purification of wastewater in the constructed wetland based on GA-BP network. Engineering Science, **2007**, 9(2):79-83 (in Chinese)
- [7] 韩耀宗, 黄亮亮, 宋新山, 等. 基于小波神经网络的芦苇潜流人工湿地水质预测. 环境科学研究, **2009**, 22(12):1460-1465  
Han Yaozong, Huang Liangliang, Song Yinshan, et al. Water quality prediction using wavelet neural networks in phragmites australis subsurface flow constructed wetlands. Research of Environmental Sciences, **2009**, 22(12):1460-1465 (in Chinese)
- [8] 黄瑶, 黄岁霖. 基于 BP 网络的人工沉床系统水质净化效果研究. 水资源与水工程学报, **2011**, 22(6):24-29  
Huang Yao, Huang Suiliang. Research on the water purification effectiveness based on modularized aero-adjustable submerged plant bed system of BP neural network. Journal of Water Resources & Water Engineering, **2011**, 22(6):24-29 (in Chinese)
- [9] 杜浩藩, 丛爽. 基于 MATLAB 小波去噪方法的研究. 计算机仿真, **2003**, 20(7):119-122  
Du Haofan, Cong Shuang. The study on wavelet de-noising under the environment of MATLAB. Computer Simulation, **2003**, 20(7):119-122 (in Chinese)
- [10] 冯华丽, 刘渊. 基于小波包消噪和 Elman 的网络流量预测. 微计算机信息, **2010**, 26(30):116-118  
Feng Huali, Liu Yuan. Network Traffic prediction based on wavelet packet de-noising and Elman neural network. Microcomputer Information, **2010**, 26(30):116-118 (in Chinese)
- [11] 周俊武, 孙传尧, 王福利. 径向基函数 (RBF) 网络的研究及实现. 矿冶, **2001**, 10(4):72-75  
Zhou Junwu, Sun Chuanyao, Wang Fuli. Study and implement of radial basis function neural network. Mining and Metallurgy, **2001**, 10(4):72-75 (in Chinese)
- [12] 张玉瑞, 陈剑波. 基于神经网络的时间序列预测. 计算机工程与应用, **2005**, (11):74-76  
Zhang Yurui, Chen Jianbo. Time series prediction based on RBF neural network. Computer Engineering and Applications, **2005**, (11):74-76 (in Chinese)
- [13] 林春燕, 朱东华. 基于 Elman 神经网络的股票价格预测研究. 计算机应用, **2006**, 26(2):476-477, 484  
Lin Chunyan, Zhu Donghua. Stock market forecasting research based on Elman neural network. Journal of Computer Applications, **2006**, 26(2):476-477, 484 (in Chinese)
- [14] 吴昌友, 王福林. 基于 Elman 小波神经网络的垦区地下水水位预测模型研究. 中国农村水利水电, **2010**, (1):30-33  
Wu Changyou, Wang Fulin. Research on groundwater level prediction of reclamation areas based on elman wavelet neural networks. China Rural Water and Hydropower, **2010**, (1):30-33 (in Chinese)
- [15] 韩旭明. Elman 神经网络的应用研究. 天津: 天津大学硕士学位论文, **2006**  
Han Xuming. A study on application of Elman neural network. Tianjin: Master's Degree Thesis of Tianjin University, **2006** (in Chinese)