



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11期

Vol.7 No.11

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

11
2013

目次

综 述

利用污泥进行水体中重金属生物吸附研究现状及展望 任南琪 周 旭 王爱杰 陈 川 刘丽红(4149)

水 污 染 防 治

三维过电位电解处理罗丹明 B 废水的研究 房豪杰(4155)

复合人工湿地对高污染性河流营养物的去除 周志强 王晓昌 郑于聪 王凤香 熊家晴(4161)

纳米 Pd/Fe 双金属颗粒对单氯酚及二氯酚的还原脱氯 吉祖峰 蒋彩云 陈 繁 崔世海(4167)

城市给水厂常规工艺铬(VI)去除风险分析与应急处理方法研究 韩晓刚 黄廷林 陈秀珍(4173)

Fe₃O₄/Ag 磁性纳米颗粒去除水中的铅离子 蒋彩云 李亮亮 徐永才 李小华 王玉萍 彭盘英(4178)

不同类型生物活性滤床对诺氟沙星的去除 雷 圣 顾熠滨 邱江平 李旭东(4185)

Carrousel 氧化沟的三维流场模拟与分析 梁延鹏 芦晓燕 刘 杰 孙晓杰 魏建文(4190)

电化学法去除水中的硝酸根 刘 蕾 张冬梅 褚衍洋(4195)

生化-臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理制药园区综合废水 宋 鑫 任立人 田 哲 张 红 张 昱(4201)

TiO₂ 光催化复合分离膜对水中天然有机物的去除 刘 芭 宋宏臣 邵嘉慧 何义亮(4207)

深型地下土壤渗滤系统中氮的去除途径 王丽君 刘玉忠 张列宇 席北斗 夏训峰 刘亚茹 孟繁华(4214)

Fe⁰ 钝化膜的生物还原及其脱氮除磷 王亚娥 冯娟娟 李 杰(4219)

电解-水生植物-软隔离带复合技术治理重污染河流的中试研究 张光生 张 明 濮培民 卜卫志 黄浩然 成小英(4225)

基于最佳管理实践的中新生态城面源污染控制措施优选研究 袁 星 王亚炜 魏源送 孙翼飞 樊耀波(4231)

纳滤去除饮用水中的 PFOS 张 健 赵长伟 宋 娜 王 涛 栾兆坤(4236)

含松醇油实际选矿废水的 COD 生物降解 张小娟 孙水裕 杜青平 叶茂友 梁杰慧 刘敬勇(4241)

不同 C/N 下人工湿地的脱氮效果及其强化措施 张 燕 周巧红 徐 栋 贺 锋 吴振斌(4246)

曝气沉砂池除砂机理分析 周文忠 叶 勇(4251)

处理造纸废水的 EGSB 反应器内颗粒污泥特性 李 江 何 强 孙兴福 胡 澄 Tonny Schuit(4255)

Ni/Fe/Al₂O₃·PVDF 催化还原剂的表征及制备过程优化 邓慧娟 刘惠玲(4259)

羽毛不可溶蛋白海绵膜对 Cr(VI) 的吸附性能 庄 媛 吴小倩 曹张军 赵晓祥 周美华(4264)

分层填料地下渗滤系统处理农村分散生活污水 秦 伟 王志强 谢建治 魏丽晶(4269)

潜流人工湿地-生物接触氧化处理低温低浓度生活污水 梁建军 陈 莽 何 强(4275)

多元统计分析对再生水河流水质特征分析 王京萌 郭道宇 赵文吉 孟宪刚 张爱武(4281)

沸石与生物沸石薄层覆盖技术削减富营养化景观水体氮比较研究 黄廷林 路 程 周真明 辛清梅 徐金兰(4290)

高压静电场对火电厂循环冷却水阻垢效果及机理 安慧凤 刘智安 赵巨东 张 旭 龙 山 赵 婧 夏 添 张 欣(4295)

微波诱导鳞片石墨-H₂O₂ 催化氧化处理甲基紫废水 占昌朝 钟明强 陈 枫 杨晋涛 韩晓春 宋建萍(4300)

潜流人工湿地水力学特性及工程设计 黄炳彬 孟庆义 尹玉冰 何春利(4307)

不同 pH 下水葫芦与紫根水葫芦生长特性与净化效能对比研究 张迎颖 严少华 李小铭 王 岩 闻学政 王亚雷 刘海琴 张志勇(4317)

SPE 和 LC-MS/MS 联用同时检测水体中的 15 种抗生素 张兰河 丘晓春 薛 成 高如泰 许其功 席北斗(4326)

污水中溶解游离氨基酸和结合氨基酸测定方法研究 于红蕾 霍守亮 张靖天 席北斗 杨周生 咎逢宇(4333)

接种不同污泥源条件下厌氧氨氧化菌的特性 于德爽 赵 丹 李 津 汪晓晨(4339)

硝化颗粒污泥的快速培养及其硝化特性分析 刘文如 沈耀良(4346)

利用钢渣对聚驱采油废水进行深度处理 卢 磊 卢学强 赵东风 刘其友(4355)

铜离子对厌氧氨氧化脱氮效能的影响 朱 莉 李 祥 黄 勇 张 丽 周 呈 陈宗垣 刘福鑫(4361)

用于处理冲刷海水的固定化生物硅藻土小球的制备 张晓青 王文华 王 静 张雨山 张爱君(4367)

微生物制剂与玄武岩纤维联用处理城市废水 储金宇 杨秀丽 蒋素英(4372)

2种新分离微藻的生长、氮磷去除和营养特性的比较研究	马红芳	庄黎宁	李 飞	(4377)
包埋水华鱼腥藻和活性炭对污水中氮磷的净化	邹晓波	王应军	李 娟	(4383)
常温低基质下磷酸盐对厌氧氨氧化反应的影响	鲍林林	李刚强	李 冬	张 杰 (4389)
沸石负载淀粉对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附性能	刘元伟	贾冬梅	杨仲年	(4393)
铁炭微电解-Fenton 试剂法预处理半焦废水	吕任生	贾尔恒·阿哈提	文 方	阿依古丽 李 妮 (4399)
纳米 TiO_2 花式分层微球的合成及其对 $Pb(II)$ 的吸附性能	陶玉贵	徐艳秋	周 朋	葛 飞 倪 正 曹 宁 (4405)
基于烧结成型的红壤除磷填料开发	郑向勇	相 徐	叶海仁	张业建 赵 敏 王欣泽 孔海南 (4410)
一株反硝化细菌的分离鉴定及脱氮能力	张峰峰	谢凤行	赵玉洁	周 可 李亚玲 (4415)
双功能吸附剂的制备及其对水中毒死蜱的降解特性				黄德斌 夏启斌 (4421)
高酚焦化废水萃取脱酚预处理	张红涛	刘永军	张云鹏	贾建军 贾志强 刘在堂 (4427)
印刷用铝基材碱洗废液的循环利用			张富刚	申明乐 邵国安 张 刚 (4431)
纳米聚硅酸铝锌絮凝剂的制备及应用			郭雅妮	王丽贤 黄 沛 念 宁 (4435)

大 气 污 染 防 治

脱硫石膏粒径分布与脱水性能实验研究	莫建松	杨有余	盛海强	刘兴利	翟春丰	程常杰	(4440)
烟气脱硫新型催化剂水洗再生工艺研究			赵文艳	孙明超	郭家秀	尹华强	(4445)
混合胺 MEA + DETA 吸收 CO_2 的影响因素	文 娟	霍春秀	杨 剑	张 斌	王 勇	姚成林	(4451)
微波加热及真空集成再生活性炭			黄维秋	蔡道飞	王丹莉	张 琳	(4457)
110 离子交换树脂担载催化剂净化低浓度 PH_3	林奕璐	李军燕	瞿广飞	宁 平	马懿星		(4463)
重庆主城区大气重污染形势的激光雷达探测与分析			李 礼	刘芮伶	翟崇治		(4469)
超重力-磷酸钠法脱除低浓度 SO_2	袁志国	刘有智	康晓峰	宋 卫	彭 博		(4475)
文丘里对脉冲喷吹过滤系统清灰的影响	毕远霞	张明星	陈俊冬	陈海焱	钱云楼	周 仁	(4481)
免疫粒子群算法优化的环境空气质量评价方法					于宗艳	韩连涛	(4486)
2株油烟降解优势菌株的筛选及性能研究	蒙温婉	廖 雷	韦真周	赵非超	覃爱苗	农秋悦	(4491)
脱硫灰-石灰石湿法脱硫石膏中杂质悬浮分离实验	刘兴利	莫建松	程常杰	翟春丰	杨有余		(4497)

固 体 废 物 处 置

液氨预处理强化复合菌系 WSC-6 降解稻秆的性能	潘云霞	李文涛	刘 爽	李文哲 (4502)			
季节性城市生活垃圾成分分析及厌氧消化特性研究	刘 齐	孙玉辉	寇 巍	曹焱鑫	王小明	刘忠文	张 欢 (4507)
改性膨润土作为垃圾渗透液防渗层的实验研究	刘学贵	王跃冲	邵 红	宋天阳	张金路 (4513)		
混合水解对打捆麦秸水解产酸的影响	吕利利	陈广银	叶小梅	常志州	杜 静	付广青 (4519)	
底泥生长基质中重金属的迁移特征及生物有效性	张鸿龄	孙丽娜	孙铁珩 (4525)				
CaCl ₂ 高温热处理垃圾焚烧飞灰中重金属的挥发特性	韦 琳	吕晓蕾	刘阳生	曾 辉 (4533)			
自燃煤矸石山覆盖材料压缩及压实特性实验	陈胜华	焦希颖	胡振琪	高 杨	郭陶明 (4540)		
连续在线滤袋式淤泥脱水技术	王 辰	刘宏波	符 波	祖叶品	刘 和 (4547)		
泥磷中温蒸馏提取黄磷装置改进效果的研究	李志林	江映翔	李桂镇	杨永珠	陈金梦	孙文灏	李江燕 (4553)
还原焙烧电镀污泥中的金属形态和浸出性	陈 炯	陆 金	殷 燕	程洁红 (4559)			
黄粉虫处理鸡粪	熊晓莉	邵承斌	李 宁	杨红英 (4564)			
城市生活垃圾焚烧处理过程中重金属迁移规律研究	张厚坚	刘海娟	黄世清	温晓兰	李兴坛	赵付一 (4569)	
城市污泥桨叶式干化优化实验研究	申维真	张宏伟	张 羽 (4575)				
滚筒式生物反应器的设计及应力分析	马 菁	赵志顶	王奎升	李秀金	朱保宁 (4581)		

相 关 研 究

基于生物表面活性剂的柴油微乳体系构建与性能研究	段 严	袁兴中	曾光明	黄华军	冷立健	王雪丽	(4586)
嗅觉实验配气方法的改进及影响因素研究	颜鲁春	刘杰民	冯振华	伊 芹			(4593)

CONTENTS

A review of heavy metals biosorption in liquids by waste sludge Ren Nanqi Zhou Xu Wang Aijie Chen Chuan Liu Lihong(4149)

Treatment of rhodamine B wastewater by three-dimension-overpotential-electrode electrolysis technology Fang Haojie(4155)

Nutrient removal in hybrid constructed wetlands for treating highly polluted river water Zhou Zhiqiang Wang Xiaochang Zheng Yucong Wang Fengxiang Xiong Jiaqing(4161)

Degradation of chlorophenols and dichlorophenols by nanoscale Pd/Fe system Ji Zufeng Jiang Caiyun Chen Fan Cui Shihai(4167)

Studies on chromium(VI) risk of conventional water treatment process and emergency measures Han Xiaogang Huang Tinglin Chen Xiuzhen(4173)

Removal of lead ions in water by Fe₃O₄/Ag magnetic nanoparticles Jiang Caiyun Li Liangliang Xu Yongcai Li Xiaohua Wang Yuping Peng Panying(4178)

Norfloxacin removal by different types of biological active filter beds Lei Sheng Gu Yiyun Qiu Jiangping Li Xudong(4185)

Simulation and analysis on three-dimensional flow field of Carrousel oxidation ditch Liang Yanpeng Lu Xiaoyan Liu Jie Sun Xiaojie Wei Jianwen(4190)

Electrochemical removal of NO₃⁻ in water Liu Lei Zhang Dongmei Chu Yanyang(4195)

Wastewater treatment of pharmaceutical industrial park with biochemistry-ozone oxidation-biological aerated filter combined process Song Xin Ren Liren Tian Zhe Zhang Hong Zhang Yu(4201)

Removal of natural organic matter in water with TiO₂-doped photocatalytic separation membrane Liu Ba Song Hongchen Shao Jiahui He Yiliang(4207)

Nitrogen removal way in deep subsurface wastewater infiltration system Wang Lijun Liu Yuzhong Zhang Lieyu Xi Beidou Xia Xunfeng Liu Yaru Meng Fanhua(4214)

Nitrogen and phosphorus removal by biological reduction of Fe⁰ passive film Wang Yae Feng Juanjuan Li Jie(4219)

Pilot study on electrolysis-macrophyte-soft isolated belt composite technology for treatment of heavy polluted river Zhang Guangsheng Zhang Ming Pu Peimin Bu Weizhi Huang Haoran Cheng Xiaoying(4225)

Optimization of non-point source pollution control measures for Zhong-Xin eco-city in Tianjin based on best management practices Yuan Xing Wang Yawei Wei Yuansong Sun Yifei Fan Yaobo(4231)

Nanofiltration membrane process for removal of PFOS from drinking water Zhang Jian Zhao Changwei Song Na Wang Tao Luan Zhaokun(4236)

COD bio-degradation of plant flotation wastewater containing pine oil Zhang Xiaojuan Sun Shuiyu Du Qingping Ye Maoyou Liang Jiehui Liu Jingyong(4241)

Nitrogen removal and its amplifying test in constructed wetland under different C/N Zhang Yan Zhou Qiaohong Xu Dong He Feng Wu Zhenbin(4246)

Analysis of grit removal mechanism of aerated grit chamber Zhou Wenzhong Ye Yong(4251)

Granule sludge characteristics of full-scale EGSB reactor treating paper-mill effluents Li Jiang He Qiang Sun Xingfu Hu Cheng Tonny Schuit(4255)

Characterization and optimization of preparation process of Ni/Fe/Al₂O₃ · PVDF catalytic reductant Deng Huijuan Liu Huiling(4259)

Adsorption characteristics of feather insoluble keratin film for Cr(VI) Zhuang Yuan Wu Xiaoqian Cao Zhangjun Zhao Xiaoxiang Zhou Meihua(4264)

Rural decentralized sewage treatment by layered-filling SWIS Qin Wei Wang Zhiqiang Xie Jianzhi Wei Lijing(4269)

Combined process of subsurface flow constructed wetland and bio-contact for treating low temperature and low concentration domestic sewage Liang Jianjun Chen Mang He Qiang(4275)

Analysis of characteristics of reclaimed river water based on multivariate statistic method Wang Jingmeng Guo Xiaoyu Zhao Wenji Meng Xiangang Zhang Aiwu(4281)

Comparative investigation of zeolite and biozeolite thin-layer capping for nitrogen reduction from eutrophic landscape water body Huang Tinglin Lu Cheng Zhou Zhenming Xin Qingmei Xu Jinlai(4290)

Scale inhibition effects and mechanism of high voltage electrostatic fields in thermal power plant circulating cooling water system An Hui Feng Liu Zhian Zhao Judong Zhang Xu Long Shan Zhao Jing Xia Tian Zhang Xin(4295)

Microwave included catalytic oxidation process for treatment of methyl violet wastewater with flake graphite and hydrogen peroxide Zhan Changchao Zhong Mingqiang Chen Feng Yang Jintao Han Xiaochun Song Jianping(4300)

Hydraulic characteristics and engineering design of subsurface flow constructed wetland Huang Bingbin Meng Qingyi Yin Yubing He Chunli(4307)

Comparison research on growth characteristics and purification efficiency of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water hyacinth with purple root under conditions of different pH Zhang Yingying Yan Shaohua Li Xiaoming Wang Yan Wen Xuezheng Wang Yalei Liu Haiqin Zhang Zhiyong(4317)

Simultaneous detection of 15 antibiotics in water by SPE and LC-MS/MS Zhang Lanhe Qiu Xiaochun Xue Cheng Gao Rutai Xu Qigong Xi Beidou(4326)

Study on methods for determination of dissolved free and combined amino acids in unconcentrated wastewater Yu Honglei Huo Shouliang Zhang Jingtian Xi Beidou Yang Zhousheng Zan Fengyu(4333)

Characteristics of ANAMMOX bacteria of different sludge inoculations Yu Deshuang Zhao Dan Li Jin Wang Xiaochen(4339)

Rapid cultivation and nitrification characteristics analysis of nitrifying granules in sequencing batch reactor Liu Wenru Shen Yaoliang(4346)

Advanced treatment of polymer-flooding wastewater using steel slag Lu Lei Lu Xueqiang Zhao Dongfeng Liu Qiyu(4355)

Effect of Cu²⁺ on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX Zhu Li Li Xiang Huang Yong Zhang Li Zhou Cheng Chen Zongheng Liu Fuxin(4361)

Preparation of immobilized bio-diatomite for treatment of seawater toilet-flushing sewage Zhang Xiaoping Wang Wenhua Wang Jing Zhang Yushan Zhang Aijun(4367)

Treatment of city domestic sewage by combining microbial strains and basalt fiber	Chu Jinyu Yang Xiuli Jiang Suying(4372)
Comparative study on growth, removal of nitrogen and phosphorus, and nutritional property of two newly separated microalgae	Ma Hongfang Zhuang Lining Li Fei(4377)
Purification of wastewater containing nitrogen and phosphorus by embedded <i>Anabaena aquae</i> and activated carbon	Zou Xiaobo Wang Yingjun Li Juan(4383)
Effect of phosphate on Ananmmox at low substrate and normal temperature	Bao Linlin Li Gangqiang Li Dong Zhang Jie(4389)
Adsorption property of Pb ²⁺ , Cu ²⁺ and Ni ²⁺ on zeolite loads starch	Liu Yuanwei Jia Dongmei Yang Zhongnian(4393)
Pretreatment of semi-coking wastewater by iron-carbon micro-electrolysis and Fenton reagent	Lü Rensheng Jia Er Heng-ahati Wen Fang Ayiguli Li Ni(4399)
Synthesis of flower-like TiO ₂ hierarchical spheres and its adsorption properties of Pb(II)	Tao Yugui Xu Yanqiu Zhou Peng Ge Fei Ni Zheng Cao Ning(4405)
Development of phosphate removal substrate based on forming and sintering process of red soil	Zheng Xiangyong Xiang Xu Ye Hairen Zhang Yejian Zhao Min Wang Xinze Kong Hainan(4410)
Identification and denitrification efficiency of a denitrifying bacteria	Zhang Fengfeng Xie Fengxing Zhao Yujie Zhou Ke Li Yaling(4415)
Preparation of bifunctional adsorbent and its degradation properties to chlorpyrifos in water	Huang Debin Xia Qibin(4421)
Pretreatment of coking wastewater containing phenols by extraction method	Zhang Hongtao Liu Yongjun Zhang Yunpeng Jia Jianjun Jia Zhiqiang Liu Zaitang(4427)
Alkali washing waste liquid recycling of aluminum base plate used for print	Zhang Fugang Shen Mingle Shao Guoan Zhang Gang(4431)
Preparation and application of nano-poly-silicate-aluminum-zinc flocculants	Guo Yani Wang Lixian Huang Pei Nian Ning(4435)
Experimental study on particle size distribution and dewatering performance of FGD gypsum	Mo Jiansong Yang Youyu Sheng Haiqiang Liu Xingli Zhai Chunfeng Cheng Changjie(4440)
Study on washing regeneration process of a novel desulfurization catalyst for FGD	Zhao Wenyan Sun Mingchao Guo Jiaxiu Yin Huaqiang(4445)
Impacts on CO ₂ absorption process in aqueous solution of MEA + DETA	Wen Juan Huo Chunxiu Yang Jian Zhang Bin Wang Yong Yao Chenglin(4451)
Regeneration of activated carbon using integration of microwave heating and vacuum decompressing	Huang Weiqiu Cai Daofei Wang Danli Zhang Lin(4457)
Purifying the low concentration phosphine with catalyst supported on ion exchange resins 110	Lin Yilu Li Junyan Qu Guangfei Ning Ping Ma Yixing(4463)
Detection and analysis of heavy air pollution using lidar in Chongqing urban area	Li Li Liu Ruiling Zhai Chongzhi(4469)
Removal of low concentration sulfur dioxide from gas by aqueous of sodium phosphate in high gravity	Yuan Zhiguo Liu Youzhi Kang Xiaofeng Song Wei Peng Bo(4475)
Influence of venturis on bag cleaning of a pulse-jet filtration system	Bi Yuanxia Zhang Mingxing Chen Jundong Chen Haiyan Qian Yunlou Zhou Ren(4481)
Environmental air quality assessment method based on immune optimization algorithms with particle swarm	Yu Zongyan Han Liantao(4486)
Study on screening and performance of two predominant strains degrading pollutants from cooking fume	Meng Wenwan Liao Lei Wei Zhenzhou Zhao Feichao Qin Aimiao Nong Qiuyue(4491)
Experiments on impurities suspended separation from desulfurized ash-limestone wet FGD gypsum	Liu Xingli Mo Jiansong Cheng Changjie Zhai Chunfeng Yang Youyu(4497)
Biodegradability of rice straw pretreated by liquid ammonia enhanced with the composite strains WSC-6	Pan Yunxia Li Wentao Liu Shuang Li Wenzhe(4502)
Compositions analysis and anaerobic digestion characteristics on seasonal municipal solid waste	Liu Qi Sun Yuhui Kou Wei Cao Yanxin Wang Xiaoming Liu Zhongwen Zhang Huan(4507)
Experimental study on landfill liners made from modified bentonite	Liu Xuegui Wang Yuechong Shao Hong Song Tianyang Zhang Jinlu(4513)
Effect of multi-component mixing on hydrolysis and acidification of baled wheat straw	Lü Lili Chen Guangyin Ye Xiaomei Chang Zhizhou Du Jing Fu Guangqing(4519)
Transport and bioavailability of Cd, Cu, Pb, and Zn in sediment substrate	Zhang Hongling Sun Lina Sun Tieheng (4525)
Effect of CaCl ₂ addition on heat treatment of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash	Wei Lin Lü Xiaolei Liu Yangsheng Zeng Hui(4533)
Experiment on compression and compaction characteristics of materials for covering coal gangue piles	Chen Shenghua Jiao Xiyi Hu Zhenqi Gao Yang Guo Taoming(4540)
Continuous on-line operation for silt dewatering by filter bag	Wang Chen Liu Hongbo Fu Bo Zu Yepin Liu He(4547)
Study on device improvement effect of yellow phosphorus extraction from phosphorus sludge at moderate high temperature	Li Zhilin Jiang Yingxiang Li Guizhen Yang Yongzhu Chen Jinneng Sun Wenhao Li Jiangyan(4553)
Speciation and leachability of metals in reduction-roasted electroplating sludge	Chen Xian Lu Jin Yin Yan Cheng Jiehong(4559)
Poultry dung treatment by yellow mealworm	Xiong Xiaoli Shao Chengbin Li Ning Yang Hongying(4564)
Study on the migration rule of heavy metal in waste incineration	Zhang Houjian Liu Haijuan Huang Shiqing Wen Xiaolan Li Xingtan Zhao Fuyi(4569)
Experiments on optimization of sewage sludge drying by paddle dryer	Shen Weizhen Zhang Hongwei Zhang Yu(4575)
Design of rotary drum biological reactor and stress analysis	Ma Qiang Zhao Zhiding Wang Kuisheng Li Xiujin Zhu Baoning(4581)
Study on properties and construction of diesel microemulsions based on biosurfactant	Duan Yan Yuan Xingzhong Zeng Guangming Huang Huajun Leng Lijian Wang Xueli(4586)
Improvement on gas sample preparation of odor test and study on influencing factors ...	Yan Luchun Liu Jiemin Feng Zhenhua Yi Qin(4593)

免疫粒子群算法优化的环境空气质量评价方法

于宗艳¹ 韩连涛²

(1. 黑龙江科技大学电气与控制工程学院, 哈尔滨 150022; 2. 哈尔滨威帝电子股份有限公司, 哈尔滨 150036)

摘要 为了提高免疫算法的收敛速度,将粒子群优化思想引入到免疫算法中,设计了一种免疫粒子群优化算法。采用该算法对大气污染损害公式的参数进行寻优,得到了适用于臭氧、PM_{2.5}等6种大气污染物的环境空气质量评价的污染损害指数公式及环境空气质量评价模型。为了使评价结果更准确,采用了国家环保部最新发布的空气质量标准中给出的大气污染物种类、数目及各级浓度限值。将该评价方法应用于大气质量评价领域,实验结果表明,该方法评价结果准确,具有较好的灵活性、实用性和应用前景。

关键词 免疫 粒子群 污染损害指数 环境空气质量评价

中图分类号 X823 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2013)11-4486-05

Environmental air quality assessment method based on immune optimization algorithms with particle swarm

Yu Zongyan¹ Han Liantao²

(1. Faculty of Electric and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

2. Harbin VITI Electronics Stock Corporation Ltd., Harbin 150036, China)

Abstract To increase evolution speed of immune algorithm, the idea of particle swarm optimization is involved into original immune algorithm, and the immune optimization algorithm with particle swarm is proposed. The formula of pollution harm index and assessment model of environmental air quality, which are suitable to six pollutants including O₃, PM_{2.5} and etc, are derived by using the algorithm proposed in this paper to optimize the parameters in the formula. In order to obtain correct assessment result, the air pollutants kinds, number and concentration limit used in this paper are from the Ambient air quality standards issued lately by Ministry of Environmental Protection of China. The assessment method proposed in this paper is applied to the field of air quality assessment. The experimental results show that the method has correct results, good flexibility, practicability and application perspective.

Key words immune; particle swarm; index of pollution harm; assessment of environmental air quality

近年来随着汽车尾气及工业废气的排放,环境空气的污染现象越来越严重,已经对人们的身心健康造成了严重的影响^[1,2]。因此,对环境空气质量进行科学、合理的评价,给老百姓的出行、活动及自我保护提供可靠的指导和建议显得尤为重要。环境空气质量的评价方法有模糊综合评价法、灰色聚类法、人工神经网络法及污染损害率法^[3-10],其中文献[9]提出的评价方法更直观、算法更简便、物理意义更明确,但其采用的是1996年发布的《环境空气质量标准》(GB 3095-1996)。为了使评价结果更准确、更接近人们的感受,本文提出的评价方法采用了国家环保部最新发布的《环境空气质量标准》(GB

3095-2012)及环境空气指数(AQI)技术规定(试行)(HJ 633-2012)中给出的大气污染物种类、数目及各级浓度限值。

本文将免疫算法与粒子群算法相结合设计了一种全局优化性能较好的免疫粒子群优化算法,并根据国家环保部最新发布的空气质量标准中的各级浓度限值数据、本文设定的污染物天然本底浓度值、明

收稿日期:2013-06-15; 修订日期:2013-07-31

作者简介:于宗艳(1980~),女,硕士,讲师,主要从事智能控制、人工免疫研究工作。E-mail: yuer337@163.com

显危害浓度限值、空气质量分级数目及污染损害率目标值采用本文算法对大气污染损害率公式中的参数进行全局优化,进而设计了一种环境空气质量综合评价模型,并以某市 8 个监测点的数据为例,应用设计的评价方法对空气质量进行评价,验证了该方法的有效性和可行性。

1 免疫粒子群算法

人工免疫算法引入了生物免疫系统的抗体浓度调节机制,有效地增强了算法的多样性保持能力,从而提高了算法的局部搜索能力,但由于抗体的进化主要通过交叉和变异进行,具有一定的随机性,导致算法的收敛速度较慢。粒子群优化算法具有明确的方向性,在算法初期收敛速度很快,但粒子总向着自身最好位置和全局最好位置飞行^[11],种群多样性能力降低,容易陷入局部极小点。

基于以上不足提出一种免疫粒子群优化算法,即在免疫算法的基础上采用粒子群算法对抗体群体进行更新。算法采用实数编码方式^[12],抗原对应着待优化的目标函数及约束条件,抗体对应着目标函数在约束条件下的可行解。算法步骤如下:

- Step1. 初始化算法参数;
- Step 2. 初始化抗体种群 $AB = \{ab_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 和速度 $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, N\}$;
- Step 3. 计算所有抗体和抗原的亲合力 a_{xi} , 并得到全局极值 gBest 和全局目标值 objgBest;
- Step 4. 完成进化代数或满足一定精度输出最优解 gBest 和最优目标值 objgBest, 否则执行 Step 5;
- Step 5. 计算抗体 $ab_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 和抗体 $ab_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 之间的亲合力 ay_{ij} ; 抗体 $ab_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 的浓度 c_i 和生存期望值 e_i ;
- Step 6. 取出期望值较高的前 $N1 (N1 > N/2)$ 个抗体得到抗体群 $AB1$, 并对其进行交叉和变异得到子个体群 $AB2 = \{ab2_i | i = 1, 2, \dots, N1\}$, 并计算子个体与抗原的亲合力;
- Step 7. 将子个体群 $AB2$ 与父个体群 $AB1$ 合并得到 $2N1$ 个抗体; 取出亲合力较高的前 N 个抗体对其体进行粒子群更新得到下一代抗体群 AB ;
- Step 8. 计算全局极值 gBest 和全局目标值 objgBest, 并对全局极值进行更新。
- Step 9. 返回 Step4。
- 算法具体实现过程见文献[13]。

2 免疫粒子群优化的环境空气质量综合评价方法

2.1 大气污染损害率和污染损害指数公式

根据文献[9], 大气污染损害率 R_i 和污染损害指数公式 I_i 分别定义为:

$$R_i = 1 / (1 + ae^{-bx_i}) \tag{1}$$
$$I_i = 10R_i = 10 / (1 + ae^{-bx_i}) \tag{2}$$

式中: a 、 b 为与污染物特性无关的待确定参数, x_i 为第 i 种污染物的浓度相对值, $x_i = c_i / c_{i0}$, c_i 为第 i 种污染物的实测浓度值, c_{i0} 为设定的第 i 种污染物的某一确定值, 通常取第 i 种污染物的天然本底浓度值, 本文设定的 c_{i0} 见表 1, 其中 O_3 的天然本底浓度值为小时平均浓度, 除了 O_3 以外的其他 5 种污染物的天然本底浓度值为日平均浓度, 该参数是参考实际监测数据并按照如下原则设定的: 不同污染物的同级标准浓度的相对值 x_i 差异至多不应超过 1 个数量级。

表 1 中 c_{i0} 、 c_{i3} 分别为本文设定的 6 种大气污染物的天然本底浓度值和明显危害浓度限值(参考值), c_{i1} 、 c_{i2} 、 c_{i3} 为国家环境保护部发布的环境空气指数(AQI)技术规定(试行)(HJ 633-2012)中给出的 6 种大气污染物的浓度限值, x_{i0} 、 x_{i1} 、 x_{i2} 、 x_{i3} 为由浓度相对值公式计算出的 6 种污染物的各级浓度相对值。

表 1 6 种大气污染物的天然本底浓度值 c_{i0} 、明显危害浓度限值 c_{i3} 、国家环保部发布的浓度限值 c_{ik}

Table 1 Pollutant unpolluted consistency values, obvious harm consistency limit values, consistency limit data issued by Ministry of Environmental Protection for six pollutants								
污染物	0 级		1 级		2 级		3 级	
	c_{i0}	x_{i0}	c_{i1}	x_{i1}	c_{i2}	x_{i2}	c_{i3}	x_{i3}
SO ₂	0.025	1	0.05	2	0.15	6	0.3	12
NO ₂	0.015	1	0.04	2.67	0.08	5.33	0.18	12
CO	1	1	2	2	4	4	14	14
O ₃	0.05	1	0.16	3.2	0.2	4	0.55	11
PM10	0.02	1	0.05	2.5	0.15	7.5	0.25	12.5
PM2.5	0.01	1	0.035	3.5	0.075	7.5	0.115	11.5

2.2 免疫粒子群算法对参数 a 、 b 的优化

采用免疫粒子群算法优化式(1)中的参数 a 、 b , 首先要构造满足问题要求的目标函数, 即:

$$f(a,b) = \frac{1}{Km} \sum_{k=0}^K \sum_{i=0}^m (R_{ik} - R_{ke})^2 \tag{3}$$

优化问题变为求解使目标函数 $f(a,b)$ 取得最小值的参数 $a、b$ 。

式(3)中, m 为污染物种类数目,取 $m = 6$; K 为空气质量分级数目,取 $K = 4$; R_{ik} 第 i 种污染物的 k 级标准的污染损害率,可由式(1)根据表 1 中给出的 6 种污染物的各级浓度相对值 $x_{i0}、x_{i1}、x_{i2}、x_{i3}$ 求取。 R_{ke} 为与污染物种类无关的 k 级标准的污染损害率目标值。参照文献[9]将[0.01,0.99]范围内的 R_i 按照“等比赋值,等差分级”的标度指数原则,划分为 $l = 0,1,2\cdots,9$ 共 10 级,本文中 与 4 个级别相应的 l 值应分别取为 0、2、3、5,从而计算出与表 1 中 4 个级别相应的污染损害率目标值 R_{ke} 分别为 0.01、0.02776、0.0463 和 0.1284。

实验参数设置如下:待优化参数 $a、b$ 的初始范围 为 $[0,100]^{[10]}$,种群大小 $N = 200$,进化代数 $g_{\max} = 500$,每一代根据抗体生存期望值选择出来进行交叉和变异的抗体个数 $N1 = 120$,抗体相似性系数 $\eta = 0.8$,变异率 $p_m = 0.7$,粒子群算法的加权系数 $w = 0.9$,学习因子 $c = 2$,粒子每一维的最大、最小速率 $v_{\max} = 100$ 和 $v_{\min} = 0.1$,每一维的最大、最小坐标 $x_{\max} = 100$ 和 $x_{\min} = 0.01$ 。抗体 ab_i 和抗原的亲合力定义为 $ax_i = 1/e^{f(ab)}^{[13]}$ 。

采用免疫粒子群算法根据上述设置的参数按照步骤 Step1-Step9 对 $a、b$ 反复寻优,得到的最优解为 $a = 55.6997、b = 0.1682$ 。由此得到对表 1 中 6 种大气污染物均适用的大气污染损害率 R_i 和污染损害指数公式 I_i 分别为:

$$R_i = 1/(1 + 55.6997e^{-0.1682x_i}) \tag{4}$$

$$I_i = 10R_i = 10/(1 + 55.6997e^{-0.1682x_i}) \tag{5}$$

2.3 空气质量分级标准的确定

根据表 1 中给出的浓度相对值及公式(4)、(5)计算出表 1 中各级标准的 6 种大气污染物的污染损害指数平均值 I_k 作为分级标准值,并得到环境空气质量评价级别与污染损害指数 I 之间的对应关系如下:级别 0、I、II、III 所对应的 I 的范围分别是 (0, 0.2080]、(0.2080, 0.2736]、(0.2736, 0.4605]、(0.4605,1.2305]。

2.4 环境空气质量综合评价模型

受多种污染物污染的环境空气质量综合污染损害指数评价模型为:

$$I = \sum_{i=1}^m w_i I_i = \sum_{i=1}^m w_i \frac{10}{1 + 55.6997e^{-0.1682x_i}} \tag{6}$$

式中: I_i 为第 i 种污染物的损害指数; w_i 为第 i 种污染物的归一化权值,它由第 i 种污染物由实测浓度对照表 1 确定的所处标准级别的相对重要性确定。根据文献[14]提出的折衷型激励功效加权函数如公式(7)所示,得到 4 个级别的污染物的相对权值分别为 $w'_1 = 0, w'_2 = 0.3162, w'_3 = 0.3873, w'_4 = 0.5$,其中 u_i 根据分级 l 值分别取 0、0.2、0.3、0.5。

$$w'_i = \begin{cases} (u_i/2)^{1/2} & 0 \leq u_i \leq 0.5 \\ 1 - [(1 - u_i)/2]^{1/2} & 0.5 \leq u_i \leq 1 \end{cases} \tag{7}$$

实际问题中,还需要根据各污染物所处级别的相对权值 w'_i 及污染物种类数目将其归一化,得到归一化的相对权值 w_i ,并代入式(6)进行计算。

3 结果与分析

本文以东北部某城市 8 个监测点的 6 种污染物的实测浓度值为例(浓度数据来自中国环境监测总站),采用免疫粒子群优化的环境空气质量综合评价方法对这 8 个监测点的空气质量进行评价。表 2~表 4 分别列出了 6 种污染物的实测浓度值 c_i ,分损害指数 I_i 及归一化权值 w_i 。表 5 列出了各监测点的综合污染损害指数 I 及评价结果。

从表 5 给出的评价结果可以看出,本文的评价方法与 AQI(空气质量指数)法、李祚泳的 RPL 法及韩旭明的 PSO 方法评价结果基本一致,从评价数据可以看出测点 6 的空气质量是最好的,测点 8 的空气质量是最差的。对于测点 6 本文的评价结果为 II 级,AQI 法和 RPL 法的评价结果为 I 级,但进一步观察评价数据可以看出本文得出的综合污染指数 0.2744 非常接近 I 级和 II 级的分级标准值 0.2736,故评价为 I 级或 II 级都是合理的。

表 2 某市 8 个监测点的监测数据

Table 2 Detecting data for eight dots of a city (mg/m ³)						
测 点	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃ -1 h	PM10	PM2.5
1	0.14	0.041	0.18	0.011	0.06	0.034
2	0.007	0.048	0.932	0.088	0.057	0.036
3	0.012	0.075	1.137	0.083	0.061	0.039
4	0.006	0.002	0.916	0.031	0.055	0.034
5	0.024	0.076	0.111	0.082	0.067	0.036
6	0.012	0.048	0.488	0.056	0.047	0.035
7	0.01	0.056	0.479	0.003	0.056	0.033
8	0.013	0.115	0.757	0.008	0.072	0.05

表 3 某市 8 个监测点 6 种污染物的分损害指数

Table 3 Separate index of pollution harm of six pollutants for eight dots of a city

测 点	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃ -1 h	PM10	PM2. 5
1	0. 4402	0. 2765	0. 1817	0. 1829	0. 2888	0. 3083
2	0. 1847	0. 2984	0. 2057	0. 2357	0. 2818	0. 3185
3	0. 1909	0. 3996	0. 2127	0. 2319	0. 2911	0. 3344
4	0. 1835	0. 1803	0. 2051	0. 1954	0. 2772	0. 3083
5	0. 2066	0. 4040	0. 1796	0. 2311	0. 3058	0. 3185
6	0. 1909	0. 2984	0. 1912	0. 2122	0. 2596	0. 3133
7	0. 1884	0. 3255	0. 1909	0. 1781	0. 2795	0. 3033
8	0. 1922	0. 6120	0. 1998	0. 1811	0. 3185	0. 3996

表 4 某市 8 个监测点 6 种污染物的归一化权值

Table 4 Normalization weight of six pollutants for eight dots of a city

测 点	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃ -1 h	PM10	PM2. 5
1	0. 262	0. 262	0	0	0. 262	0. 2149
2	0	0. 2620	0	0. 2139	0. 2620	0. 2620
3	0	0. 2159	0. 1762	0. 1762	0. 2159	0. 2159
4	0	0	0	0	0. 5505	0. 4495
5	0	0. 2620	0	0. 2139	0. 2620	0. 2620
6	0	0. 2753	0	0. 2247	0. 2247	0. 2753
7	0	0. 3551	0	0	0. 3551	0. 2899
8	0	0. 3923	0	0	0. 3039	0. 3039

表 5 某市 8 个监测点的综合污染损害指数及评价结果

Table 5 Total index of pollution harm and assessment result for eight dots of a city

测 点	综合污染指数 <i>I</i> (本文)	评价结果 (本文)	AQI 法	RPL 法	PSO 法
1	0. 3294	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
2	0. 2859	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
3	0. 2996	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
4	0. 2912	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
5	0. 3188	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
6	0. 2744	Ⅱ	I	I	Ⅱ
7	0. 3027	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
8	0. 4583	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ

因此,本文提出的环境空气质量综合评价方法是合理、可行的,具有一定的实用性。

表 6 列出了不同进化代数 $g_{\max}$ 下参数 a 、 b 的 10 次优化结果,从表中可以看出,当进化代数 $g_{\max}=500$ 时,优化结果最稳定,故本文选取优化代数参数 $g_{\max}=500$ 。

表 6 进化代数及参数 a 、 b 值

Table 6 Optimization generation and value of a , b

进化代数		50	100	200	300	500
1	a	46. 7553	70. 5902	58. 0189	55. 3619	56. 7469
	b	0. 1487	0. 1871	0. 1687	0. 1640	0. 1709
2	a	95. 6951	53. 9622	65. 9354	56. 3742	56. 6295
	b	0. 2012	0. 1662	0. 1835	0. 1705	0. 1717
3	a	56. 1168	49. 9142	69. 9343	64. 8224	54. 6510
	b	0. 1694	0. 1600	0. 1862	0. 1811	0. 1663
4	a	55. 1142	64. 4890	54. 8877	55. 9771	60. 4363
	b	0. 1613	0. 1828	0. 1666	0. 1697	0. 1763
5	a	49. 6487	55. 6625	54. 0309	51. 0564	59. 2764
	b	0. 1474	0. 1663	0. 1647	0. 1603	0. 1755
6	a	42. 2163	43. 9767	58. 2842	61. 0890	60. 9832
	b	0. 1531	0. 1509	0. 1719	0. 1769	0. 1764
7	a	70. 7325	105. 301	50. 6306	58. 1389	56. 6262
	b	0. 1811	0. 2102	0. 1617	0. 1719	0. 1680
8	a	56. 4748	68. 1879	56. 1752	62. 7557	55. 2513
	b	0. 1678	0. 1850	0. 1691	0. 1792	0. 1675
9	a	108. 504	36. 8328	57. 2335	61. 2889	55. 6997
	b	0. 2288	0. 1256	0. 1707	0. 1763	0. 1682
10	a	70. 4732	51. 9392	51. 3946	58. 3009	53. 6979
	b	0. 1896	0. 1624	0. 1631	0. 1741	0. 1645

4 结 论

将免疫算法和粒子群算法相结合设计了一种免疫粒子群优化算法,并对大气污染损害率公式中的参数 a 、 b 进行全局优化,进而设计了一种环境空气质量综合评价模型,通过对某市 8 个监测点的空气质量进行评价,验证了该方法的有效行和可行性。通过污染物对空气的损害程度来评价环境空气质量的好坏,更直观,物理意义更明确。

设计的免疫粒子群算法优化的环境空气质量评价方法,是以 6 种污染物为例,该方法具有灵活通用性,只需改变算法中的污染物种类数目 m 及相关数据便可得出适合不同污染物种类数目的环境空气质量评价方法,另外,由于环境空气质量评价级别是以 6 种大气污染物的污染损害指数平均值作为分级标准的,所以若某监测点 6 种污染物监测数据不全,同样可以评价出针对现有污染物监测数据的环境空气质量综合评价结果。故本文设计的环境空气质量评价模型具有较好的应用前景。

参 考 文 献

[1] 郑庆子. PM2. 5 对环境空气质量评价结果的影响分析.

- 环境保护科学, **2012**, 38(5):69
- Zheng Q. Z. Analysis on effect of PM_{2.5} on environmental air quality evaluation result. Environmental Protection Science, **2012**, 38(5):69 (in Chinese)
- [2] 耿雅妮. 西安市大气环境质量现状分析与评价. 河南科学, **2013**, 31(2):197-198
- Geng Y. N. Status analysis and assessment of air environment quality in Xi'an city. He Nan Science, **2013**, 31(2):197-198 (in Chinese)
- [3] 刘永, 郭怀成. 城市大气污染物浓度预测方法研究. 安全与环境学报, **2004**, 4(4):60-62
- Liu Y., Guo H. C. Approach to more efficient forecasting of concentration of air pollutants in urban areas. Journal of Safety and Environment, **2004**, 4(4):60-62 (in Chinese)
- [4] 姜庆华. 大气污染预测的参数化组合算子方法. 山东大学学报(理学版), **2006**, 41(4):76-78
- Jiang Q. H. The method of parameterized combination operator in air pollution forecasting. Journal of Shandong University, **2006**, 41(4):76-78 (in Chinese)
- [5] 钱莲文, 吴承祯, 洪伟, 等. 大气质量评价的污染危害指数法的改进. 福建林学院学报, **2003**, 23(3):249-251
- Qian L. W., Wu C. Z., Hong W. Study on the improvement of index formula of pollution harm for atmosphere quality assessment. Journal of Fujian College of Forestry, **2003**, 23(3):249-251 (in Chinese)
- [6] 张孟, 李晶. 基于神经网络方法的城市空气质量日报技术. 环境监测管理与技术, **2010**, 22(1):67-69
- Zhang M., Li J. Technique for urban air quality daily report based on neural network method. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, **2010**, 22(1):67-69 (in Chinese)
- [7] 陈祖云, 金波. 支持向量机在环境空气质量评价中的应用. 环境科学与技术, **2012**, 35(6):395-397
- Chen Z. Y., Jin B. Application of support vector machine in evaluation of environment air quality. Environmental Science and Technology, **2012**, 35(6):395-397 (in Chinese)
- [8] 冯伟, 吕恒林, 黄建恩. 基于模糊综合评价的矿区大气环境质量评价. 山西建筑, **2010**, 36(33):346-347
- Feng W., Lv H. L., Huang J. E. Atmospheric environmental quality assessment based on fuzzy comprehensive evaluation for mining area. Shanxi Architecture, **2010**, 36(33):346-347 (in Chinese)
- [9] 李祚泳, 彭荔红. 基于遗传算法优化的大气质量评价的污染危害指数公式. 中国环境科学, **2000**, 20(4):313-317
- Li Z. Y., Peng L. H. Optimal index formula of pollution harm for atmospheric quality assessment based on genetic algorithm. China Environmental Science, **2000**, 20(4):313-317 (in Chinese)
- [10] 韩旭明, 左万利, 王丽敏, 等. 免疫算法优化的大气质量评价模型及其应用. 计算机研究与发展, **2011**, 48(7):1308-1312
- Han X. M., Zuo W. L., Wang L. M., et al. Atmospheric quality assessment model based on immune algorithm optimization and its applications. Journal of Computer Research and Development, **2011**, 48(7):1308-1312 (in Chinese)
- [11] 侯振荣, 吕振肃. 基于 MATLAB 的粒子群优化算法及其应用. 计算机仿真, **2003**, 20(10):68-70
- Hou Z. R., Lü Z. X. Particle swarm optimization with application based on matlab. Computer Simulation, **2003**, 20(10):68-70 (in Chinese)
- [12] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, **2002**. 38
- [13] 于宗艳, 韩连涛. 免疫粒子群优化算法及应用. 计算机仿真, **2008**, 25(12):208-211
- Yu Z. Y., Han L. T. Immune optimization algorithms with particle swarm and its application. Computer Simulation, **2008**, 25(12):208-211 (in Chinese)
- [14] 李祚泳, 欧阳洁. 环境空气质量评价的普适指数公式. 环境污染与防治, **2001**, 23(4):200-201
- Li Z. Y., Ou Y. J. An universal index formula suited to environmental air quality assessment. Environmental Pollution and Control, **2001**, 23(4):200-201 (in Chinese)