



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2期

Vol.7 No.2

中国科学院 主办
生态环境研究中心
科学出版社 出版

2
2013

目次

水污染防治

颗粒活性炭深度处理抗生素废水	王健行	魏源送	成宇涛	李明月(401)
三维荧光区域积分评估城市污水中溶解性有机物去除	姚璐璐	涂响	于会彬	徐东耀
污水再生处理微滤-反渗透工艺经济分析	汤芳	孙迎雪	石晔	李旭
美国某给水厂处理工艺及净水效果	姚宏	张士超	周小轮	王春荣(422)
絮体性质对纳滤膜污染的影响	于洋	赵长伟	王艳贵	范卫红
香菇下脚料对水体中十二烷基苯磺酸钠的吸附				黄晓东
巢湖表层沉积物中重金属的分布特征及其污染评价	余秀娟	霍守亮	咎逢宇	赵广超
光催化氧化降解垃圾渗滤液中溶解性有机物	贾陈忠	刘松	张彩香	秦巧燕(451)
Cu/La 共掺杂 TiO ₂ 光催化氧化水中的氨氮	刘佳	龙天渝	陈前林	杜坤(457)
改性树脂对 β -萘磺酸的吸附性能				李跃金
厌氧序批式反应器中丝状颗粒污泥的形成				邵享文
紫外光照处理低浓度萘普生废水	陈依玲	刘国光	姚琨	吕文英(473)
新型立体浮床处理河道微污染源水的挂膜特性	陈亚男	郭宗楼	郑水生	汪开英
UASB 启动及不同 HRT 对老龄垃圾渗滤液处理效果的影响	刘子旭	孙力平	李玉友	邱春生
响应曲面法优化固相反硝化的工艺条件	徐影	仇天雷	韩梅琳	李军
不同沸石材料对沼液中磷素静态吸附去除	邢贻	陈玉成	熊佰炼	孙晓东
固态碳源去除地下水硝酸盐的模拟实验				王曼曼
旁路微氧池污泥停留时间对污泥减量化的影响	刘宇星	刘东方	张忠品	唐云鹭
工业废水中多金属离子的吸附净化	雷绍民	王欢	王恩文	李佳
改性粉煤灰吸附稀土废水中的氨氮				陈莉荣
改性玉米秸秆吸附 Cu ²⁺ 的动力学和热力学	陈钰	龚正君	杨顺生	孙彩云(523)
微生物絮凝剂的研制及其对水体叶绿素 a 的去除				陆洪省
多孔性 Mn ₃ O ₄ 的制备及其对水中镉的吸附				李长安
复合生物滤池处理城市高污染水体	张孝中	黄新	荆肇乾	曹世玮(541)
多孔孔板水力空化反应器的水力特性	朱孟府	邓橙	宿红波	游秀东
臭氧催化氧化降解苯胺的机理				宁军
改性沸石对低浓度氨氮废水的动态吸附	贾小宁	王耀龙	周林成	李彦锋(557)
电极面积对无质子交换膜微生物燃料电池协同去污能力的影响				
.....	冉春秋	李海燕	王冰	孙红杰
质子化壳聚糖的除磷性能				李隽截
固体超强酸 SO ₄ ²⁻ /TiO ₂ -SnO ₂ /Ce ⁴⁺ 光催化降解含酚废水	王九思	王宏英	赵来	吕涛涛
天然和 CPB 改性沸石对 Hg ²⁺ 的吸附特征	黄慧	郝硕硕	朱家亮	申源源
改性甘蔗渣对 Cu ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的吸附机理				齐亚凤
沼液中臭味物质的去除方法及其对营养物质的影响				何正艳
机械清洗法对 MBR 膜泥饼层的影响	尤朝阳	刘汤勤	张丹	肖晓强
生物接触氧化法处理选矿废水的影响因素	宋卫锋	唐铁柱	林梓河	严明
不同阳极微生物燃料电池产电性能的比较				尹航
活性炭吸附苯酚及其超声波再生效果				朱金凤
油田水反硝化技术抑制硫酸还原菌	邵涛	苟智	王林	(617)

大气污染防治

商业 SCR 烟气脱硝催化剂钙中毒研究	商雪松	陈进生	姚源	胡恭任(624)
膜生物反应器中生物膜的生长特性	苗峻赫	陈蓉	廖强	王永忠

湿法净化黑烟中添加剂对炭黑沉降性能的影响	战 琪 李彩亭 路 培 赵亚培 宋靖珂 方 鑫 罗飞杭 (637)
可旋转径向式微粒捕集器消声特性影响因素灰色关联分析	 龚金科 田 婵 王曙辉 陈 韬 左青松 官庆武 刘恒语 (643)
胶合竹材 GluBam 甲醛释放影响因素的气候箱实验与分析	 单 波 陈 杰 肖 岩 (649)
NiO/ γ -Al ₂ O ₃ 反应吸附苯并噻吩	 尹海燕 李春虎 周洪洋 (657)
钙基吸附剂捕集生物质燃气中的二氧化碳	 胡 辉 邹妍晖 张海旭 程 晖 李 芳 (663)
六铝酸盐催化剂的催化还原脱硫脱硝性能	 任晓光 朱旭东 李富霞 (668)
基于密相半干法脱硫工艺的生石灰消化及改性	 梁宝瑞 宋存义 赵荣志 常冠钦 刘希文 冷廷双 (673)
盆栽植物净化甲苯废气	 侯海萍 徐仲均 (679)

固 体 废 物 处 置

垃圾焚烧飞灰中不同粒径的毒性特性	李夫振 周少奇 林奕明 (684)
石灰污泥共热法在水泥煅烧中的应用	范海宏 张 鹏 李斌斌 (689)
水热炭化餐厨垃圾制备纳米铁/炭复合材料	吴倩芳 吴建芝 张付申 (695)
石灰预处理和干发酵对稻草热解特性影响	梁越敢 程备久 司友斌 曹德菊 郑 正 罗兴章 (701)
污泥膜覆盖好氧发酵通风调节方法	 盛金良 龚 莹 官 宁 施 炜 (705)
利用某尾矿制备纳米 SiO ₂	 廖茂荫 徐文彬 何舜锋 (711)
过量生石灰对污泥含水率和有机物含量的影响	周宏仓 徐 露 周云桥 何都良 章文斌 查 键 聂东阳 (717)
菇渣作为有机栽培基质好氧改性的实验	张唐娟 袁巧霞 陈 红 张利红 洪 娟 张俊峰 (722)
餐厨垃圾混菌发酵制备燃料乙醇	刘爱民 徐双锁 蔡 欣 彭 鹏 卢存龙 (727)
风淬钢渣对高炉渣基微晶玻璃性能的影响	陈左朋 申星梅 吕辉鸿 李辽沙 (732)
河湖疏浚淤泥的表征、絮凝和脱水	李 冲 吕志刚 陈洪龄 许 超 常 健 (737)
医疗废物回转窑焚烧线中二恶英的生成	 卢 青 (743)
多元回归和 BP 人工神经网络在预测混合厌氧消化产气量过程中的应用比较	张文阳 张良均 李 娜 周红艳 (747)

环 境 生 物 技 术

污泥好氧颗粒化过程中氨氧化菌群结构的演替与分析	张 斌 陈照立 陈 哲 李君文 王景峰 赵 阳 (753)
pH、接种量及固形物含量对氧化亚铁硫杆菌 LX5 煤炭生物脱硫的影响	刘玉娇 杨新萍 张德伟 王世梅 (759)
灵芝漆酶对直接蓝 86 的催化脱色性能	赵世光 刘 强 张庆庆 汤明礼 (765)
铜绿假单胞菌 NY3 所产表面活性剂对原油降解的影响	 常 虹 聂麦茜 葛碧洲 刘 超 杨 琴 周立辉 樊晓宇 孙 超 韦绒绒 蒋 欣 (771)
低温 1,2,4-TCB 降解菌的选育、降解特性及邻苯二酚 1,2-双加氧酶基因表达水平	 胡日查 孙立波 (777)
一株高效 MC-RR 降解菌的分离鉴定及其降解特性	崔亚青 俞 鲁 高雪莲 马田田 杨兴明 沈其荣 (783)
响应面法和神经网络优化 <i>Acinetobacter</i> sp. DNS32 发酵基质	 王 洋 王志刚 王 溪 郭火生 孟冬芳 张 颖 (791)

环 境 监 测 与 评 价

“7.16”大连新港石油管道爆炸事故中的热红外溢油监测	陈 澎 李 颖 余小凤 刘丙新 (796)
-----------------------------------	-----------------------

CONTENTS

Advanced treatment of antibiotic wastewater by granular activated carbon	Wang Jianxing Wei Yuansong Cheng Yutao Li Mingyue(401)
Evaluation of dissolved organic matter removal in municipal wastewater based on fluorescence regional integration	Yao Lulu Tu Xiang Yu Huibin Xu Dongyao Han Lu Song Yonghui(411)
Cost analysis for a microfiltration-reverse osmosis (MF-RO) process applied in wastewater reclamation	Tang Fang Sun Yingxue Shi Ye Li Xu Hu Hongying(417)
Process design and water purification efficiency of one water treatment plant in America	Yao Hong Zhang Shichao Zhou Xiaolun Wang Chunrong(422)
Effect of floc characteristics on nanofiltration membrane fouling	Yu Yang Zhao Changwei Wang Yangui Fan Weihong Luan Zhaokun(427)
Adsorption of sodium dodecylbenzenesulfonate from aqueous solutions by lentinus deodes residue	Huang Xiaodong Lou Benyong(433)
Distribution characteristics and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China	Yu Xiujuan Huo Shouliang Zan Fengyu Zhao Guangchao Xi Beidou Su Jing(439)
Degradation of dissolved organic matter in landfill leachate during photocatalytic treatment process	Jia Chenzhong Liu Song Zhang Caixiang Qin Qiaoyan(451)
Photocatalytic catalytic oxidation of ammonia in aqueous solutions by Cu/La-codoped TiO ₂	Liu Jia Long Tianyu Chen Qianlin Du Kun(457)
Adsorption behavior of β -naphthalenesulfonic acid by modified resin	Li Yuejin Li Ying Li Changhai(463)
Formation of granular sludge with filamentous microorganisms in anaerobic sequencing batch reactor (ASBR)	Shao Xiangwen Peng Dangeong(468)
Treatment of naproxen-containing water in low concentration by ultraviolet irradiation	Chen Yiling Liu Guoguang Yao Kun Lü Wenyong(473)
Biofilm colonization characteristics of tridimensional floating bed in treating micro-polluted river source water	Chen Yanan Guo Zonglou Zheng Shuisheng Wang Kaiying Wu Haitao Liu Lu(477)
Impact of UASB start-up and different HRT on treatment effect of old landfill leachate	Liu Zixu Sun Liping Li Yuyou Qiu Chunsheng Zhu Yongqiang(483)
Optimization of solid-phase denitrification process using response surface methodology	Xu Ying Qiu Tianlei Han Meilin Li Jun Wang Xuming(489)
Static adsorption characteristics and removal efficiency of phosphate in biogas slurry by different zeolite substrates	Xing Ze Chen Yucheng Xiong Bailian Sun Xiaodong Sun Xiaojing(494)
Simulation test of nitrate removal in groundwater with solid carbon source	Wang Manman Wang Jiaquan Chu Huanan(501)
Effect of retention time on sidestream bypass oxygen-limited sludge reduction process	Liu Yuxing Liu Dongfang Zhang Zhongpin Tang Yunlu Yu Jie Chen Ruiping Li Kexun(507)
Adsorption and purification of multiple metal ions in industrial wastewater	Lei Shaomin Wang Huan Wang Enwen Li Jia Guo Zhenhua Xu Teng(513)
Adsorption of ammonia nitrogen in rare-earth wastewater by modified fly ash	Chen Lirong Li Yumei Du Mingzhan(518)
Kinetics and thermodynamics for Cu ²⁺ adsorption by modified corn straw	Chen Yu Gong Zhengjun Yang Shunsheng Sun Caiyun(523)
Preparation of microbial flocculant and its removal of chlorophyll a in water	Lu Hongsheng Wei Wenchao Xue Tingting(530)
Preparation of porous Mn ₃ O ₄ and its adsorption for cadmium in water	Li Changan Liu Wei Chen Shang(535)
Treatment of urban highly polluted water by composite biofilter	Zhang Xiaozhong Huang Xin Jing Zhaoqian Cao Shiwei(541)
Hydraulic characteristics of hydrodynamic cavitation reactor with orifice plate	Zhu Mengfu Deng Cheng Su Hongbo You Xiudong Chen Ping Yuan Yinghai Zhu Lu(546)
Degradation mechanism of aniline by ozonation catalysis	Ning Jun Chen Liwei Cai Tianming(551)
Ammonia nitrogen dynamic adsorption from low concentration wastewater by modified zeolite	Jia Xiaoning Wang Yaolong Zhou Lincheng Li Yanfeng(557)
Effect of electrode area on collaborative removal of pollutant by membrane-less microbial fuel cells	Ran Chunqiu Li Haiyan Wang Bing Sun Hongjie Li Junjie Sun Jianan(563)
Dephosphorization effect of protonated chitosan	Zhang Chunhua Wang Wenjun An Xiaowen Hao Yannan(568)
Photocatalytic degradation of phenol solution by solid superacid catalyst SO ₄ ²⁻ /TiO ₂ -SnO ₂ /Ce ⁴⁺	Wang Jiusi Wang Hongying Zhao Lai Lü Taotao Wang Qi(573)
Adsorption characteristic of mercury (II) on natural and CPB modified zeolite	Huang Hui Hao Shuoshuo Zhu Jialiang Shen Yuanyuan Wang Zhigang Chen Hong(579)
Adsorption mechanism for Cu ²⁺ and Zn ²⁺ by modified bagasse	Qi Yafeng He Zhengyan Yu Junxia Chi Ruan(585)
Methods for bad smell materials removal and their impacts on nutrients in anaerobic fermentation liquids	Zhang Han Liu Yongjun(591)
Effect of mechanical cleaning method on MBR membrane sludge cake layer	You Chaoyang Liu Tangxun Zhang Dan Xiao Xiaoqiang Liu Zhiyin(598)

Some influencing factors of flotation wastewater treatment with bio-contact oxidation method	Song Weifeng Tang Tiezhu Lin Zihe Yan Ming Deng Qi Chen Xiaoping (603)
Comparison of power generation performance of different types of anodes in microbial fuel cells	Yin Hang Hu Xiang (608)
Phenol adsorption on activated carbons and their regeneration performance by ultrasonic	Zhu Jinfeng Wang Sanfan Lu Jiongyuan (613)
Denitrification inhibiting sulfate-reducing bacteria activity in oilfield water	Shao Tao Gou Zhi Wang Lin (617)
Study on calcium poisoning of commercial SCR de-NO _x catalyst	Shang Xuesong Chen Jinsheng Yao Yuan Hu Gongren (624)
Growth characteristics of biofilm in membrane bioreactor	Miao Junhe Chen Rong Liao Qiang Wang Yongzhong Zhu Xun (631)
Effect of additives in smoke wet purification on soot settling properties	Zhan Qi Li Caiting Lu Pei Zhao Yapei Song Jingke Fang Xin Luo Feihang (637)
Grey relational analysis on influencing factors of muffling characteristic in a radial rotatable diesel particulate filter	Gong Jinke Tian Chan Wang Shuhui Chen Tao Zuo Qingsong Guan Qingwu Liu Hengyu (643)
Influencing factors analysis of formaldehyde emission from GluBam sheet by climate chamber test	Shan Bo Chen Jie Xiao Yan (649)
Reactive adsorption of benzothiophene on NiO/ γ -Al ₂ O ₃ adsorbent	Yin Haiyan Li Chunhu Zhou Hongyang (657)
Capturing carbon dioxide in biomass gas by calcium-based sorbents	Hu Hui Zou Yanhui Zhang Haixu Cheng Hui Li Fang (663)
Properties of hexaaluminate catalysts and catalytic reduction activity for desulfurization and denitrification	Ren Xiaoguang Zhu Xudong Li Fuxia (668)
Digestion and modification of lime based on dense semi-dry desulfurization process	Liang Baorui Song Cunyi Zhao Rongzhi Chang Guanqin Liu Xiwen Leng Tingshuang (673)
Toluene purification by potted plants	Hou Haiping Xu Zhongjun (679)
Toxicity characteristics of different particle sizes of fly ash from municipal solid waste incinerators	Li Fuzhen Zhou Shaoqi Lin Yiming (684)
Application of sludge drying heat with lime in cement burning	Fan Haihong Zhang Peng Li Binbin (689)
Fe/C nano-materials development from kitchen garbage under hydrothermal condition	Wu Qianfang Wu Jianzhi Zhang Fushen (695)
Effect of lime pretreatment and dry digestion on pyrolysis characteristics of rice straw	Liang Yuegan Cheng Beijiu Si Youbin Cao Deju Zheng Zheng Luo Xingzhang (701)
Ventilation adjustment methods in sludge static aerobic fermentation with membrane covering technology	Sheng Jinliang Gong Ying Gong Ning Shi Wei (705)
Preparation of nano SiO ₂ by using tailings	Liao Maoyin Xu Wenbin He Yifeng (711)
Effect of adding excessive lime on moisture content and organic matter content in sludge	Zhou Hongcang Xu Lu Zhou Yunqiao He Duliang Zhang Wenbin Zha Jian Nie Dongyang (717)
Aerobic modified experiment of mushroom residue as organic substrate	Zhang Tangjuan Yuan Qiaoxia Chen Hong Zhang Lihong Hong Juan Zhang Junfeng (722)
Fuel ethanol production from food waste by being mixed microbial fermentation	Liu Aimin Xu Shuangshuo Cai Xin Peng Peng Lu Cunlong (727)
Effect of air quenched steel slag on properties of glass-ceramic based on blast furnace slag	Chen Zuopeng Shen Xingmei Lü Huihong Li Liaosha (732)
Characterization, flocculation and dehydration of dredged sludge	Li Chong Lü Zhigang Chen Hongling Xu Chao Chang Jian (737)
Formation of dioxin in a rotary kiln medical waste incineration line	Lu Qing (743)
Comparing multiple regression and BP artificial nerve net model used on prediction of anaerobic co-digestion gas-producing process	Zhang Wenyang Zhang Liangjun Li Na Zhou Hongyan (747)
Evolution and analysis of ammonia-oxidizing bacteria communities during aerobic sludge granulation	Zhang Bin Chen Zhaoli Chen Zhe Li Junwen Wang Jingfeng Zhao Yang (753)
Effect of pH, inoculation and coal burden on bio-desulfurization of coal by <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> LX5	Liu Yujiao Yang Xinpeng Zhang Dewei Wang Shimei (759)
Decolorization of Direct Blue 86 catalyzed by laccase from <i>Ganoderma lucidum</i>	Zhao Shiguang Liu Qiang Zhang Qingqing Tang Mingli (765)
Effects of rhamnolipid on oil degradation by <i>Pseudomonas aeruginosa</i> strain NY3	Chang Hong Nie Maiqian Ge Bizhou Liu Chao Yang Qin Zhou Lihui Fan Xiaoyu Sun Chao Wei Rongrong Jiang Xin (771)
Isolation, degradation characteristics and catechol 1,2 dioxygenase gene expression level of 1,2,4-TCB degrading bacterium under low temperature	Hu Richa Sun Libo (777)
Isolation and identification of a MC-RR degradation bacillus and its degradation characteristics	Cui Yaqing Yu Lu Gao Xuelian Ma Tianian Yang Xingming Shen Qirong (783)
Optimization of fermentation medium for <i>Acinetobacter</i> sp. DNS32 by response surface methodology and artificial neural network	Wang Yang Wang Zhigang Wang Xi Guo Huosheng Meng Dongfang Zhang Ying (791)
Thermal infrared oil spills monitoring in “7.16” Dalian Xingang oil pipeline explosion	Chen Peng Li Ying Yu Xiaofeng Liu Bingxin (796)

多元回归和 BP 人工神经网络在预测混合厌氧消化产气量过程中的应用比较

张文阳¹ 张良均² 李娜¹ 周红艳¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 610031;

2. 广州太普软件科技有限公司, 广州 510665)

摘要 对脂肪类单基质和城市污水厂剩余污泥混合厌氧消化过程的产气阶段进行基于多元回归和 BP 人工神经网络的产气量预测模型比较研究。实验数据分别取自反应过程的第 1~16 天和第 17~70 天。结果表明:多元回归模型的预测平均准确率分别为 75.69% 和 79.29%;BP 神经网络模型的预测平均准确率为 79.05%。通过对比 2 种模型的预测结果可知,两种模型都有较高的预测准确率,但 BP 模型的预测准确率更高,更适用于混合厌氧消化产气量预测。

关键词 多元回归 BP 人工神经网络 混合厌氧消化 产气预测模型

中图分类号 X712.3 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)02-0747-06

Comparing multiple regression and BP artificial nerve net model used on prediction of anaerobic co-digestion gas-producing process

Zhang Wenyang¹ Zhang Liangjun² Li Na¹ Zhou Hongyan¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Guangzhou Tipdm Software Technology Co. Ltd., Guangzhou 510665, China)

Abstract A comparative study on the forecasted gas-producing model based on the multiple regression and BP artificial nerve net of the gas-producing phase on an anaerobic co-digestion experiment with the fat biomass and sewage sludge was carried out. The data of the experiment was taken during the reaction process in 1th ~ 16th and 17th ~ 70th. The results showed that the average forecast correctness rate of multiple regression model was about 75.69% and 79.29%, respectively and that of BP neural network model was about 79.05%. The forecasted correctness rate of the both was higher by comparing the predicted results of the both models. However, the BP model was better than another one, which was more suitable for the gas prediction of the co-digestion system.

Key words multiple regression; BP artificial neural networks; anaerobic co-digestion; gas production forecast model

伴随着我国城市化进程的加快,燃气化和城市居民生活水平的提高,生物质废弃物已成为城市固体废弃物的重要组成部分。来自餐饮业的餐饮泔水、集贸市场产生的果蔬垃圾、污水处理厂剩余污泥等是典型的城市生物质废弃物^[1],生物质废弃物是可再生资源,将其再生能源化是近年来的主要发展方向。现今我国能源需求与供给的矛盾日益突出,将生物质废弃物中的生物质能转化为能源,将成为同时解决我国能源与环境问题的一个有效途径。

生物质废弃物具有高含水率和高有机物含量的特性,适宜采用厌氧消化技术将其再生能源化^[2-4]。一直以来,我国生物质废弃物厌氧消化技术研究多限于实验室研究和一般工艺条件的探讨。据报道,

在生物质废弃物中加入具有一定缓冲能力的有机废水^[5,6](通常为动物粪便废水或者市政污水)进行混合消化,可以获得更好的消化效果。付胜涛等^[7]对污水厂污泥和厨余垃圾进行中温混合厌氧消化研究,结果表明,污泥与厨余垃圾的混合厌氧消化是可行的。付云霞等^[8]对城市生活垃圾可生化单基质进行厌氧消化研究,以米饭、黄豆、芹菜和肥肉为 4 种代表物质,采用厌氧污泥进行接种,对整个厌氧消化过程 pH、挥发性脂肪酸(VFA)和产气量变化进行

收稿日期:2011-12-17; 修订日期:2012-04-08

作者简介:张文阳(1955~),男,教授,主要研究方向:固体废弃物资源化技术。E-mail: steven_wyzhang@163.com

了分析。朱亚兰等^[9]对城市可生化垃圾与厌氧剩余污泥进行混合厌氧消化研究,对不同有机负荷下,酸化过程、酸化低值点、氨氮质量浓度变化进行了分析。Gomez 等^[10]对城市生活垃圾中水果和蔬菜与污泥进行混合厌氧消化研究,研究了混合物的不同有机负荷对产甲烷的影响。

目前关于厌氧消化产气规律数学模型的研究,基本上来自国外报道。国内多限于填埋场产气规律预测模型的研究。广泛应用的模型有: IPCC 模^[11]、COD 估算模型^[11]、化学计量式模型^[12]、化学平衡模型^[13]。此外,填埋场产气预测模型还有动力学模型和生态模型等,如 Gardner 等^[14]动力学模型, Marticorena 等^[15]动力学模型和 El-Fadel 等^[16]生态模型。另外,李瑞君等^[17]建立了两阶段模型,对水葫芦厌氧发酵及其产气模型进行了相关研究。

以上模型由于我国对有机物的表达过于含糊,厌氧降解过程过于简化,且模型中含有的参数难以确定,虽可参照国外研究,但其取值的变化将导致甲烷含量的预测结果与实际产量之间产生较大的偏差。纵观国内外的研究,基于多元回归原理和 BP 神经网络原理的厌氧消化产气预测模型,目前国内外鲜有报道。本文将基于多元回归原理和 BP 神经网络原理,对单基质生物质废弃物混合厌氧消化建立产气预测模型,并对模型进行分析对比。

1 建模基本原理

1.1 BP 神经网络原理^[18,19]

BP 神经网络是一种多层前馈型神经网络,它体现了人工神经网络中最精华的部分。由于其可以实现从输入到输出的任意非线性映射,且具有良好的自组织、自适应性和容错性,故应用广泛。BP 神经网络不仅包括输入层、输出层,还包括一层或者多层的隐含层,处于同层的各节点之间无连接,其神经元之间的传递一般为 S 型函数,输出量为 0 到 1 之间的连续量。标准的 BP 算法是基于梯度下降法来学习的,通过调整权值和阈值,使实际输出值与期望输出值的均方误差趋于最小而实现的,但传统 BP 算法收敛速度较慢且易陷入局部极小,有很大的局限性,故实际应用中常常对其进行优化,常用方法有 L-M 法、拟牛顿法、动量 BP 法等。

BP 网络的训练过程分为两步,其一为网络拓扑

结构的设计,主要包括隐含层数的确定、输入层与输出层节点的选取、隐含层节点的选取、各层神经元节点间传递函数的选取等;其二为对神经网络主要参数的确定,主要包括对训练次数、动量常数、学习速率等参数的确定。本文应用太普软件公司研发的顶尖数据挖掘平台(TipDM)提供的 L-M 优化算法来构建神经网络模型。

L-M 算法,全称为 Levenberg-Marquard,是高斯-牛顿法的改进型,它既具有高斯-牛顿法的局部特征又具有梯度法的全局特性。它可用于解决非线性最小二乘问题,多用于曲线拟合等场合,具有收敛速度快等优点。

算法基本思想是使其每次迭代不再沿着单一的负梯度方向,而是允许误差沿着恶化的方向进行搜索,同时通过在最速梯度下降法和高斯-牛顿法之间自适应调整来优化网络权值,使网络能够有效收敛,大大提高了网络的收敛速度和泛化能力。

L-M 优化算法,又称为阻尼最小二乘法,其权值调整公式为:

$$\Delta w = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e \quad (1)$$

式中: e 为误差向量, J 是误差对权值微分的雅可比矩阵, μ 是一个标量,当 μ 增加时,它接近于具有较小的学习速率的最速下降法,当 μ 下降到 0 时,该算法就变成了高斯-牛顿法了,因此, L-M 算法是在最速梯度下降法和高斯-牛顿法之间的平滑调和。

L-M 算法具体的迭代步骤为:

(1) 将所有输入送到网络并计算出网络的输出,另用误差函数计算出训练集中所有目标的误差平方和。

(2) 计算出误差对权值微分的雅可比矩阵 J 。

首先,定义 Marquardt 敏感度。

$$S_i^m = \frac{\partial E}{\partial n_i^m} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,敏感度为误差函数 E 对 m 层输入的第 i 个元素变化的敏感性,其中 n 为每层网络的加权和。

敏感性的递推关系式为:

$$S_q^m = \dot{E}(n_q^m) (w^{m+1})^T S_q^{m+1} \quad (3)$$

可见敏感性可由最后一层通过网络被反向传播到第 1 层。

$$S^m \rightarrow S^{m-1} \rightarrow \dots \rightarrow S^2 \rightarrow S^1 \quad (4)$$

然后,用式(5)计算雅各比矩阵的元素。

$$\begin{aligned}[J]_{h,l} &= \frac{\partial e_{k,q}}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial e_{k,q}}{\partial n_{i,q}^m} \times \frac{\partial n_{i,q}^m}{\partial w_{i,j}^m} \\ &= S_{i,h}^m \times \frac{\partial n_{i,q}^m}{\partial w_{i,j}^m} = S_{i,h}^m \times a_{j,q}^{m-1}\end{aligned}$$

(5)

(3)用式(1)求出 Δw 。

(4)用 $w + \Delta w$ 重复计算误差的平方和如果新的和小于(1)中计算的和,则用 μ 除以 θ ($\theta > 1$),并有 $w = w + \Delta w$,转(1);否则,用 μ 乘以 θ ,转(3)。当误差平方和减小到某一目标误差时,算法即被认为收敛。

1.2 多元线性回归原理^[20]

多元线性回归分析是研究在线性相关条件下,两个和两个以上自变量对一个因变量的数量变化关系,表现这一数量关系的数学公式,称为多元线性回归模型。多元线性回归模型是一元线性回归模型的扩展,其基本原理与一元线性回归模型相似,只是在计算上较复杂。多元线性回归模型总体回归函数的一般形式为:

$$\hat{y} = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \cdots + B_pX_p + e$$

其中: B_0 是常数项, $B_1, B_2, \cdots, B_p$ 为样本偏回归系数,或称为 Y 对应于 $X_1, X_2, \cdots, X_p$ 的偏回归系数。

在正态线性回归的条件下,如果所有的因变量与自变量之间不存在线性关系,即 $b_1 = b_2 = \cdots = b_m = 0$,则统计量 $F = (u/m)/[Q/(n - m - 1)]$ 为服从自由度 $(m, n - m - 1)$ 的 F 分布,式中 n 为样本容量, m 为引进方程的因子个数, u 和 Q 分别为方程的回归平方和与残差平方和。显然, F 的值越大,回归效果越显著。本文应用 SPSS 软件构建多元回归模型。

2 多元回归模型及 BP 神经网络模型的研究

2.1 基于单基质生物物质与剩余污泥混合试验的多元回归模型

选取在中温且控制 pH 值条件下,对单基质生物物质肥肉和城市污水厂剩余污泥进行混合厌氧消化。厌氧反应容器为 500 mL 的抽滤瓶,对物料定期进行人工搅拌,产生的气体由出气孔导出,用装满饱和食盐水的集气瓶收集,对气体的体积每天记录,对气体成分定期监测。监测消化过程的方法是从取消化液分析,每 3 天对出料消化液进行一次分析,分析其碱度、VFA、氨氮等参数。以实验数据为研究基础,建立产气量预测模型。

已知实验过程中,日产气量的变化趋势是先升

后降。如果对整个产气阶段只拟合一个回归方程,则达不到好的预测效果,因此,为更好地达到预测效果,以产气量升降的节点为界限,将整个产气阶段分为两个阶段,分别建立回归模型。本实验中的第 16 天达到了产气峰值,因此以 1 ~ 16 d 的数据和 17 ~ 70 d 的数据分别建立回归方程,产气回归方程的 F 检验结果见表 1。建模过程由 SPSS 软件完成。

1 ~ 16 d 的回归方程如下:

非标准化方程: $y = - 701.072X_1 - 9.749X_2 + 0.235X_3 + 6\,558.185$

标准化方程: $y = - 0.571X_1 - 0.891X_2 + 0.400X_3$

其中: X_1 为 pH, X_2 为氨氮, X_3 为 VFA。

1 ~ 16 d 的回归方程的 F 检验结果见表 1。 $F_{0.05}$ 计算值 = 21.811 > $F_{0.05}$ 值 = 3.49,可知方程的回归效果高度显著,可以作为预报方程。Sig 代表双侧检验值, Sig < 0.05,表示明显具有统计学意义。 R 值在其取值范围 (0, 1) 内,且达到 0.919,可以得知线性回归关系密切。 R^2 为 0.845,表明所建立模型效果优良。 R^2_{adj} 为 0.806,符合小于 R^2 的原则,并且值偏大,说明模型拟合较好。

表 1 产气阶段回归方程的 F 检验表
Table 1 Regression equations of F -test table on gas-producing phase

产气阶段 (d)	自由度 ($m, n - m - 1$)	$F_{0.05}$ 值	$F_{0.05}$ 计算值	Sig	R	R^2	R^2_{adj}
1 ~ 16	(3,12)	3.49	21.811	0.000	0.919	0.845	0.806
17 ~ 70	(3,53)	2.79	24.466	0.000	0.771	0.595	0.570

通过计算得出所建立的回归模型的预测平均准确率为 75.69%,样本数据中的所有实测值与预测值的拟合曲线见图 1。

由图 1 可见,预测值与实测值拟合程度较好,总

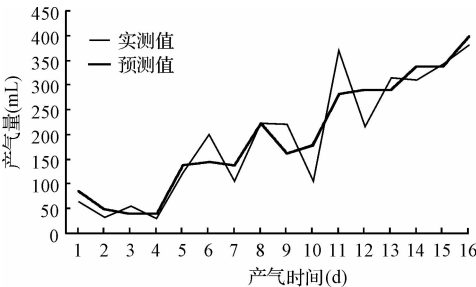


图 1 1 ~ 16 d 产气实测值与预测值拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of measured and predicted values of gas production of 16 days

体趋势的拟合是准确的,但对产气的峰值和谷值预测不好,具体表现为预测值与具体值间有一定差距。

17~70 d 的回归方程如下:

非标准化方程: $y = -21.571X_1 + 0.732X_2 + 0.395X_3 + 55.672$

标准化方程: $y = -0.079X_1 + 0.441X_2 + 0.610X_3$

其中: X_1 为 pH, X_2 为氨氮, X_3 为 VFA。

17~70 d 回归方程的 F 检验结果同样被列入表 1。 $F_{0.05}$ 计算值 = 24.466 > $F_{0.05}$ 值 = 2.79, 可知方程的回归效果高度显著, 可以作为预报方程。 Sig < 0.05 表示明显具有统计学意义。 此模型中 R 达到 0.771, 可以得知线性回归关系密切。 R^2 为 0.595, 表明所建立模型效果良好。 R^2_{adj} 为 0.570, 符合小于 R^2 的原则, 但是 R^2 和 R^2_{adj} 的数值都比 1~16 d 的回归方程数值小, 表明所建模型相比拟合度可能较差。

计算得出所建立的回归模型的预测平均准确率为 79.29%, 样本数据中的所有实测值与预测值的拟合曲线见图 2。

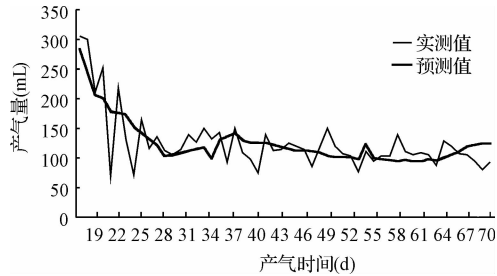


图 2 17~70 d 产气实测值与预测值拟合曲线
Fig.2 Fitting curves of 17~70 days gas production measured values and predicted values

由图 2 可见, 预测值与实测值拟合的大体趋势一致, 但明显看到对于产气值的波动拟合较差, 预测值较为平缓, 没有反映出产气的波动, 特别是在第 17 天到第 25 天, 最大值和最小值没有预测出来。

2.2 基于单基质物质与剩余污泥混合实验的 BP 神经网络模型

选取 pH、VFA、氨氮、当日产气量 4 个指标作为 L-M 神经网络的输入变量, 即网络输入层的节点数为 4, 选取模型的输出层节点数为 1, 即下一日产气量, 通过试错法选取该网络模型的隐含层节点数为 6, 这样就构造了结构为 4-6-1 的神经网络模型, 如图 3 所示。进一步对神经网络的主要参数进行确定, 选取网络模型的学习速率为 0.001, 学习动量常

数为 0.001, 目标误差为 0.02, 最大迭代次数为 100, 输入层至隐含层、隐含层至输出层的传递函数分别为线性型函数和双曲正切 S 型函数。

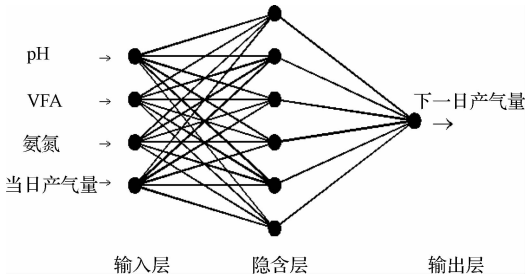


图 3 BP 神经网络结构
Fig.3 BP neural network structure

将 70 条实验数据作为样本输入, 经过网络训练, 训练过程误差如图 4 所示, 相关系数为 0.8812。 相对绝对误差为 53.659%; 相对平方根误差为 51.4808%。 由此说明 3 个输入因子和输出因子日产气量相关度很高, 选取合理, 说明所建立的模型基本成功, 所得 70 组数据的平均预报准确率为 79.05%。

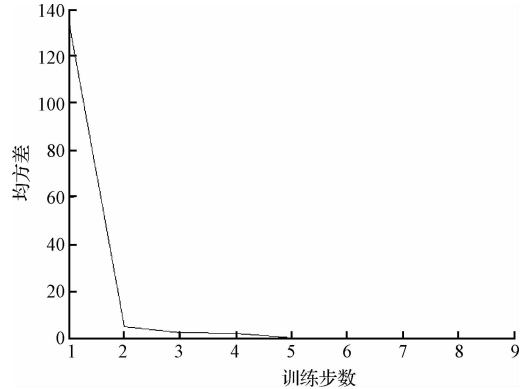


图 4 模型训练过程误差
Fig.4 Model training process error

在网络训练好之后, 将训练样本导入训练好的网络, 得到的实测值与预测值的拟合曲线如图 5 所示。

分析拟合曲线可知, 预测值很好地反映了实测产气量升降的趋势, 但对于某些产气的峰值和谷值与预测值却略有偏差, 例如第 4 天、第 13 天等。 这说明预测值总体上较好地反映了实测值的情况, 对产气量趋势的预测有一定作用。

2.3 2 种模型的比较

本文针对单基质物质与剩余污泥混合厌氧消化实验, 分别建立了多元回归模型和 BP 神经网络模型对其进行产气量预测。 比较图 2 和图 5 可见,

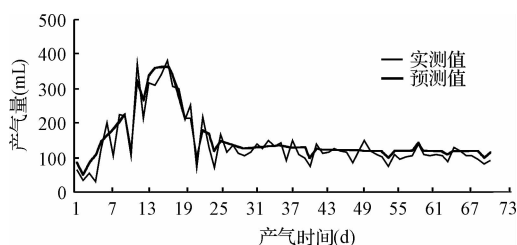


图5 BP神经网络实测值与预测值拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of BP network measured values and predicted values

两种模型都有较高的预测准确率,但多元回归模型第一阶段的预测平均准确率远低于BP网络模型的预测平均准确率。由于多元线性回归主要研究线性问题,BP人工神经网络主要解决非线性问题。而厌氧消化生化反应产气过程受诸多条件和因素影响,日产气量易波动。显然,用数学方法去预测其产气量过程,BP模型相比多元线性回归模型更易于拟合该复杂实验条件下的实验数据,更具稳定性、操作性和精确性,显示出BP人工神经网络处理非线性问题的明显优势。

3 结论

本文对单基质生物质肥肉和城市污水厂剩余污泥进行混合厌氧消化实验,以实验数据为研究基础,基于多元回归和BP人工神经网络的理论及方法的深入研究,对其分别建立了多元线性回归模型和BP人工神经网络模型,对产气量进行预测。研究结果表明:

(1)在本实验的建模中,厌氧消化生物反应产气过程在第1~16天和第17~70天的多元回归模型的预测平均准确率分别为75.69%和79.29%,预测值与实测值拟合的大体趋势一致。但明显看到对于产气值的波动拟合较差,预测值较为平缓,没有反映出应有的产气波动。

(2)BP神经网络模型的预测平均准确率为79.05%。预测值很好地反映了实测产气量升降的趋势,除对于某些产气的峰值和谷值与预测值却略有偏差,预测值总体上较好地反映了实测值的情况。

(3)由于多元线性回归主要研究线性问题,而BP人工神经网络主要解决非线性问题,相比传统的统计方法,从BP模型较高的预测率可以看出,BP模型相比多元线性回归模型具有稳定性、易操作性、精确性的特点,因此认为,BP人工神经网络模型更

适用于混合厌氧消化产气量预测,是一种操作性强,效率高的预测方法。

参考文献

- [1] 侯华华,王伟,胡颂,等.城市生物质废物热水解-ASBR厌氧消化研究.环境科学,2010,31(2):526-533
Hou H. H., Wang W., Hu S., et al. Municipal biowaste Thermal-Hydrolysis and ASBR anaerobic digestion. Environmental Science, 2010,31(2):526-533 (in Chinese)
- [2] 李俊涛,钱小青,赵由才.泔脚的厌氧消化处理可行性研究.上海环境科学,2003,22(9):646-648
Li J. T., Qian X. Q., Zhao Y. C., et al. Feasibility study on anaerobic digestive disposal of waste food. Shanghai Environmental Science, 2003,22(9):646-648 (in Chinese)
- [3] 沈伯雄,梁材,周元驰,等.生活垃圾厌氧发酵制沼气研究.环境卫生工程,2006,14(3):24-23
Shen B. X., Liang C., Zhou Y. C., et al. Study on producing methane with domestic waste anaerobic fermentation. Environmental Sanitation Engineering, 2006,14(3):24-23 (in Chinese)
- [4] Nguyen P. H. L., Ku rupan P., Visvanathan C. Anaerobic digestion of municipal solid waste as a treatment prior to landfill. Bioresource Technology, 2007,98(2):380-387
- [5] 付胜涛,于水利,严晓菊,等.剩余活性污泥和厨余垃圾的混合中温厌氧消化.环境科学,2006,27(7):1459-1463
Fu S. T., Yu S. L., Yan X. J., et al. Co-digestion of waste activated sludge and kitchen garbage. Environmental Science, 2006,27(7):1459-1463 (in Chinese)
- [6] El-mashad H. M., Zhang R. Biogas production from co-digestion of dairymanure and foodwaste. Bioresource Technology,2010,101(11):4021-4028
- [7] 付胜涛,严晓菊,付英,等.污水厂污泥和厨余垃圾的混合中温厌氧消化.哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2007,23(1):32-39
Fu S. T., Yan X. J., Fu Y., et al. Mesophilic anaerobic digestion of sewage sludge and kitchen garbage. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2007,23(1):32-39 (in Chinese)
- [8] 付云霞,张文阳,王凤,等.城市生活垃圾中可生化单基质的厌氧消化.四川环境,2008,54(2):109-112
Fu Y. X., Zhang W. Y., Wang F., et al. Anaerobic digestion of biodegradable individual substrates in municipal solid wastes. Sichuan Environment, 2008,54(2):109-112 (in Chinese)
- [9] 朱亚兰,张文阳,王凤,等.城市可生化垃圾与厌氧剩余污泥混合厌氧消化研究.工业安全与环保,2008,34(7):

- 9-11
- Zhu Y. L. , Zhang W. Y. , Wang F. , et al. Research on the anaerobic co-digestion of biodegradable municipal solid waste and waste sludge. *Industrial Safety and Environmental Protection*, **2008**,34(7):9-11(in Chinese)
- [10] Gomez X. , Cueto M. J. , Cara J. , et al. Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*, **2006**,31(12):2017-2024
- [11] 沈东升. 生活垃圾填埋生物处理技术. 北京:化学工业出版社,**2003**
- [12] 吴正. 政府助力、市场驱动、大力推进可再生能源产业化发展. *科技智囊*,**2006**, (9):68-77
- Wu Z. Government power, market-driven, vigorously advance the renewable energy Industrial development. *Developments Brain Trust* , **2006**, (9):68-77(in Chinese)
- [13] 陈泽智,刘涛,唐秋萍,等. 垃圾填埋气产量的估算与测试. *太阳能学报*,**2006**,27(3):255-258
- Chen Z. Z. , Liu T. , Tang Q. P. , et al. Evaluation and testing of landfill gas generation. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, **2006**,27(3):255-258(in Chinese)
- [14] Gardner N. ,Probert S. D. Forecasting landfill gas yield. *Applied Energy*, **1993**,44(2):131-163
- [15] Marticorena B. , Attal A. , Camacho P. , et al. Prediction rule for biogas valorisation in municipal solid waste landfill. *Water Sci. Technol.* , **1993**,27(2):235-241
- [16] El-Fadel, Findikakis A. N. , Leckie J. O. A numerical model for methane production in managed sanitary landfills. *Waste Manag. Res.* ,**1989**,7(1):31-42
- [17] 李瑞君,陈砺,严宗诚,等. 水葫芦厌氧发酵试验及其产气模型研究. *中国农学通报*, **2010**,26(24):421-425
- Li R. J. , Chen L. , Yan Z. C. , et al. Study on anaerobic fermentation and methane production model of water hyacinth. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, **2010**,26(24):421-425(in Chinese)
- [18] 韩立群. 人工神经网络理论、设计与应用(第2版). 北京:化学工业出版社, **2007**
- [19] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现. 北京:电子工业出版社, **2005**
- [20] 何晓群. 多元统计分析(第2版). 北京:中国人民大学出版社, **2008**