



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8卷 第1期

Vol.8 No.1

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

1
2014

目 次

水 污 染 防 治

诱导结晶法去除地下水中氟离子	黄廷林 孙 田 邓林煜(1)
中试螺旋式自循环厌氧反应器处理安乃近制药废水的稳定性能	 陆慧锋 丁 爽 吴泽高 吴大天 张红来 厉 巍 王 茹 郑 平(6)
水源切换条件下模拟管网铁离子释放控制	唐 敏 王海波 黄显怀 唐玉朝 胡 春(13)
A ² O-MBR 工艺处理城市污水作农业灌溉用水中试研究	王素兰 于 洁 邢传宏(17)
高氨废水短程硝化特性	王 磊 段 雪 吕永涛 穆建雄 鞠 恺 王旭东 王志盈(22)
CuO/过硫酸氢钾体系催化氧化苯酚	吉 飞 李朝林 邓 磊 徐 超(27)
臭氧氧化法处理焦化废水生化出水的反应动力学	杨德敏 夏 宏 袁建梅(32)
碳纳米管电极原位产生过氧化氢及其对亚甲基蓝脱色效果	李文军 戴启洲 胡 翔 邵 磊(38)
混凝-纳滤集成工艺深度处理脱墨废水	任晓晶 刘 丹 吴 月 张忠国 张凤山 程言君 李继定(43)
碳酸根对磷酸钙沉淀反应回收磷的影响	赵亚丽 宋永会 钱 锋 程建光 梁 慧(48)
畜禽养殖废水生物处理剩余污泥臭氧减量过程中的重金属释放	何帅雄 陈梅雪 强志民(55)
蜘蛛兰去除不同程度富营养水体中氮磷及抑藻效应	黄 伟 郭沛涌 陈淑芳(62)
生物膜法处理硫化铅锌矿尾矿库外排废水	林伟雄 孙水裕 黄绍松 杜青平(67)
反冲洗周期对生物除锰滤池去除效果的影响	程庆锋 李 冬 李相昆 孟令威 张 杰(72)
印染生化尾水反渗透深度处理工艺膜污染成因分析	李 丽 杨 成 龙 超(77)
螺旋藻和菌-藻共生系统处理啤酒废水	刘玉环 史晓洁 巫小丹 阮榕生 王 辉 胡蓓娟 王允圆 万益琴(82)
利用生物柴油去除滨海构筑物上原油的模拟研究	夏文香 张丹峰 肖行川 郭 慧 于 洋 李金成(87)
磷酸微波活化多孔生物质炭对亚甲基蓝的吸附特性	贾佳祺 李坤权 张雨轩 乔小朵(92)
地下水浅埋区某加油站特征污染物空间分布	杨 青 陈小华 孙从军 康丽娟 赵 振 陈漫漫(98)
共存物质对重金属絮凝剂 MCC 除镉性能的影响	张翠玲 张明月 常 青 张家利(104)
堆肥 + 零价铁可渗透反应墙修复黄土高原地下水中铬铅复合污染	李 雅 张增强 沈 锋 汪 葵(110)
水力停留时间对反应沉淀一体化反应器中半亚硝化反应的影响	 刘月敏 焦秀梅 崖婷婷 王少坡 李玉友 孙力平(116)
气升回流一体化工艺处理生活污水	张媛媛 潘 杨 黄 勇 陈智杰(121)
EGSB 反应器处理产氢发酵液	苏彩丽 张 楠 朱灵峰 李海华(126)
Zn/Al 双金属氧化物对水中硫酸根离子的吸附性能	程璐煜 岳秀萍 曹 岳 张 悦(131)
Ni ²⁺ 对活性污泥活性及群落多样性的影响	王 伟 徐 艳 侯昭牧 江丹丹 李晓晨(138)
镁盐和炉渣对印染废水的脱色处理	李甲亮 吴利娟 单长青 王 雪(144)
银钛共负载型光催化材料降解甲基橙废水	徐 荣 葛 骁 郭海宁 束正华 封 克 王小治(150)
南京某城市污水二级处理系统中酞酸酯类的分布及去除特征	 孔祥吉 单正军 许 静 郭 敏 张雪梅 孔德洋(157)
微米级负载型 TiO ₂ 催化剂在光催化-膜分离反应器中的应用	费学宁 董业硕 陈 磊 解立平(162)
内循环厌氧反应器多相流流场的三维数值分析	雷镕甄 周冬卉 刘伟京 涂 勇 郭方峥(170)
竹制填料生物接触氧化工艺处理污染河水	蒋晓阳 熊文军 刘子正 郭一舟 黄 凯 王宗平(178)
钻井废水的生物强化处理	冯 栩 谷晋川 鲍 晋 龚志莲 江元霞 张 彬 魏春梅(184)
微波-Fenton 氧化-PAFSi 絮凝法处理含油废水	施国飞 徐晓军 贾 佳 郑 鑫 管堂珍 陈晓鸿(190)
人工湿地基质对 NH ₄ ⁺ -N 吸附性能	张 亮 邹长武 田 筱 叶骏菲(198)
2 种不同性能碳纤维载体的固定床厌氧反应器运行效果比较	林长松 袁旭峰 崔宗均 程 序 朱万斌(203)
混凝-超滤短流程工艺处理北方水库原水	曲 明 滕李军 傅金祥 杨 勇 卢善文(210)
Fenton 氧化深度处理高浓度造纸废水的中试实验	贾永强 李 伟 贾立庄 闫东杰(215)

炼化企业中水紫外线消毒及其影响因素	兰效宁	刘宏莉	卢红梅 (222)
改性矿物吸附法和 O ₃ 氧化法对维生素 B ₁₂ 废水脱色处理	单思行	范鹏飞	邢 奕 譙 耕 (230)
铁-镧系合金氧化物污水除磷及再生	杨永珠	江映翔	赵李丽 刘艳冰 (236)
微气泡曝气 O ₃ /H ₂ O ₂ 处理 RO 浓水的效能及影响因素	张培龙	于 丽	庞立飞 侯甲才 贾寿华 (242)
粉末活性炭对三烯丙基异氰脲酸酯的吸附性能	赵泽华	孙亚兵	徐建华 荣少鹏 张 艳 (249)
疏基酯化壳聚糖的合成及对 Cd ²⁺ 的去除性能研究	李 平	金兰淑	林国林 刘时光 (254)

大 气 污 染 防 治

一种包埋微生物复合填料的制备及性能评价	李顺义	朱仁成	张雅丽	王 岩 (260)
直流电晕自由基簇射处理 PCB 热解废气的动力学模拟	林 杰	温正城	刘 彦	谢晨晖 骆沁奇 (266)
生物滤池处理城市污水工艺中恶臭和微生物气溶胶的填料选择	刘建伟	吕 臣	夏雪峰	刘会平 (273)
超重力脱除模拟烟气中一氧化氮	王 芳	李小露	余国贤	晋 梅 路 平 (280)
煤化工企业火炬 NO _x 排放的模拟燃烧实验	梁俊宁	卢立栋	宋丽娜	柳 玲 (285)
锌、铁等离子对氧化锌烟气脱硫工艺中亚硫酸锌氧化的影响	刘兆斌	童 华	王京刚	(290)
膜吸收法净化低浓度甲醛和氨气	姚志良	叶 宇	曹鑫悦	刘伟伟 马永亮 (294)

固 体 废 物 处 置

污泥膜覆盖好氧发酵堆体流场模拟及应用研究	盛金良	朱金龙	胡海鹤	龚 莹 施 炜 (298)
干化床和芦苇床稳定污泥过程中的腐殖化特征	崔玉波	冉春秋	王 芳	孙红杰 高 伟 (305)
蔬菜与餐厨垃圾厌氧发酵启动阶段微生物分析	孙玉辉	刘 齐	姜 月	车振宇 张 欢 王晓明 曹炎鑫 寇 巍 (310)
超临界丙酮降解废弃线路板中的溴化环氧树脂	邢明飞	张付申	(317)	
市政污泥与生活垃圾混烧技术验证	陈兆林	温俊明	刘朝阳	张鸿涛 杨仕桥 唐 侠 陈 清 (324)
电解锰渣无害化处理技术	王积伟	周长波	杜 兵	陈 舒 裴倩倩 (329)
温度与秸秆比例对牛粪好氧堆肥的影响	赵秀玲	朱新萍	罗艳丽	余 雄 贾宏涛 李金军 刘洪蓬 (334)

土 壤 污 染 防 治

铬污染土壤对水泥熟料强度和铬浸出浓度的影响	李 静	陈胡星	(341)
氧化亚铁硫杆菌对电子垃圾焚烧迹地重金属形态的影响	赵国华	高顺芝	罗兴章 (347)

噪 声 污 染 防 治

城市天然气加气站噪声影响分析及噪声控制技术	熊鸿斌	陈新燕	姜 海 (353)
-----------------------------	-----	-----	-----------

环 境 生 物 技 术

修复 PAHs 复合污染体系的高效菌群构建及降解特性	杨 旭	陈芳艳	唐玉斌 (360)
一株反硝化细菌的分离鉴定及其反硝化特性	杨浩锋	唐佳琦	胡安辉 杨岳平 谢 柳 (366)
嗜盐菌的筛选及原油降解性能	陈梅梅	邓 皓	宋佳宇 刘光全 (372)
高效脱硫菌的筛选及其性能研究	张秀霞	孔甜甜	陈水泉 王志伟 邵 珺 刘欣梅 (378)

环 境 监 测 与 评 价

含油污泥中油含量的 3 种测定方法比较	张 珂	朱建华	周 勇 武本成 (385)
程序化的未确知测度模型用于水环境质量评价	张卫兵	姚 建	汤 乐 彭 艳 (392)

工 程 实 例

蒙自矿冶重金属冶炼废水处理工程改造与实践	马 玲	徐晓军	黄昌元	黄伟忠 陈晓鸿 韦建初 杨津津 (397)
----------------------------	-----	-----	-----	-----------------------

相 关 研 究

TiO ₂ 纳米管催化活性再生处理技术	刘翠云	傅大放	孟钦伟 (403)
--------------------------------------	-----	-----	-----------

CONTENTS

Removal of fluoride from groundwater by induced crystallization Huang Tinglin Sun Tian Deng Linyu(1)

Stability of pilot-scale spiral automatic circulation anaerobic reactor treating analgin pharmaceutical wastewater
..... Lu Huifeng Ding Shuang Wu Zegao Wu Datian Zhang Honglai Li Wei Wang Ru Zheng Ping(6)

Control iron release in model drinking water distribution system under water source switch Tang Min Wang Haibo Huang Xianhuai Tang Yuchao Hu Chun(13)

Treatment of urban wastewater for agricultural irrigation by AO-MBR Wang Sulan Yu Jie Xing Chuanhong(17)

Performance of shortcut nitrification for high ammonia wastewater treatment
..... Wang Lei Duan Xue Lyu Yongtao Mu Jianxiong Ju Kai Wang Xudong Wang Zhiying(22)

Catalytic oxidation of phenol by CuO/peroxymonosulfate system Ji Fei Li Chaolin Deng Lei Chao Xu(27)

Reaction kinetics of biological treatment of coking wastewater by ozonation Yang Demin Xia Hong Yuan Jianmei(32)

In-site generating hydrogen peroxide by carbon nanotubes electrode and application in decolorization of wastewater containing
methylene blue Li Wenjun Dai Qizhou Hu Xiang Shao Lei(38)

Advanced treatment of deinking wastewater by coagulation and nanofiltration integrated process
..... Ren Xiaojing Liu Dan Wu Yue Zhang Zhongguo Zhang Fengshan Cheng Yanjun Li Jiding(43)

Effect of carbonate on calcium phosphate precipitation for phosphorus recovery Zhao Yali Song Yonghui Qian Feng Cheng Jianguang Liang Hui(48)

Release behavior of heavy metals in the ozonation of sludge from swine wastewater biological treatment process
..... He Shuaixiong Chen Meixue Qiang Zhimin(55)

Removal of nitrogen and phosphorus from different degree eutrophic waters and restraint of algae by *Hymenocallis americana*
..... Huang Wei Guo Peiyong Chen Shufang(62)

Biofilm process for treating Pb-Zn sulfide ore tailing wastewater Lin Weixiong Sun Shuiyu Huang Shaosong Du Qingping(67)

Influence of backwashing period on removal efficiency in a biological manganese removal filter
..... Cheng Qingfeng Li Dong Li Xiangkun Meng Lingwei Zhang Jie(72)

Analysis of membrane fouling causes in RO process for advanced treatment of dyeing secondary effluent Li Li Yang Cheng Long Chao(77)

Brewery wastewater treatment by *Spirulina platensis* or fungi-algae symbiosis system
..... Liu Yuhuan Shi Xiaojie Wu Xiaodan Ruan Rongsheng Wang Hui Hu Beijuan Wang Yunpu Wan Yiqin(82)

Simulative study on removal of crude oil from coastal structures by biodiesel Xia Wenxiang Zhang Danfeng Xiao Xingchuan Guo Hui Yu Yang Li Jincheng(87)

Adsorption characteristics of methylene blue onto biomass-based porous activated carbons by microwave assisted H₃PO₄ activation
..... Jia Jiaqi Li Kunquan Zhang Yuxuan Qiao Xiaoduo(92)

Spatial distribution of typical pollutants of gas stations in shallow water-table areas Yang Qing Chen Xiaohua Sun Congjun Kang Lijuan Zhao Zhen Chen Manman(98)

Effects of coexisting substances on cadmiun removal performance by heavy metal flocculant MCC Zhang Cuiling Zhang Mingyue Chang Qing Zhang Jiali(104)

Remediation of Cr-Pb polluted groundwater using a mixed zero-valent iron compost permeable reactive barrier in Loess Plateau aera ...
..... Li Ya Zhang Zengqiang Shen Feng Wang Kui(110)

Effect of hydraulic retention time on half-nitrosofication in integrated reaction-precipitation reactor Liu Yuemin Jiao Xiumei Ya Tingting Wang Shaopo Li Yuyou Sun Liping(116)

Treatment of domestic sewage by airlift-reflux integrated reactor Zhang Yuanyuan Pan Yang Huang Yong Chen Zhijie(121)

Start-up of EGSB reactor for treatment of biohydrogen fermentative liquid Su Caili Zhang Nan Zhu Lingfeng Li Haihua(126)

Adsorptive removal of sulfate from water by Zn/Al layered double oxide Cheng Junyu Yue Xiuping Cao Yue Zhang Yue(131)

Effects of Ni(II) on activity and community diversity of activated sludge Wang Wei Xu Yan Hou Zhaomu Jiang Dandan Li Xiaochen(138)

Decoloration of dyeing wastewater by Mg²⁺ salts and slag Li Jialiang Wu Lijuan Shan Changqing Wang Xue(144)

Photocatalytic degradation of methyl orange wastewater by Co-deposited (Ag⁺ -TiO₂-EP) material
..... Xu Rong Ge Xiao Guo Haining Shu Zhenghua Feng Ke Wang Xiaozhi(150)

Distribution and removal characteristics of PAEs in secondary sewage process systems in a municipal sewage plant in Nanjing
..... Kong Xiangji Shan Zhengjun Xu Jing Guo Min Zhang Xuemei Kong Deyang(157)

Application of micron-scale supported TiO₂ catalysts in photocatalysis-membrane reactor
..... Fei Xuening Dong Yesuo Chen Lei Xie Liping(162)

Three-dimensional numerical analysis of multiphase flow field in internal circulation anaerobic reactor
..... Lei Rongzhen Zhou Donghui Liu Weijing Tu Yong Guo Fangzheng(170)

Experimental study on treatment of polluted water by a biological contact oxidation process filled with bamboo filler
..... Jiang Xiaoyang Xiong Wenjun Liu Zizheng Guo Yizhou Wang Zongping(178)

Bioaugmentation treatment of drilling wastewater Feng Xu Gu Jinchuan Bao Jin Gong Zhilian Jiang Yuanxia Zhang Bin Wei Chunmei(184)

Treatment of oily wastewater by microwave-Fenton oxidation-PAFSi flocculation
..... Shi Guofei Xu Xiaojun Jia Jia Zheng Xin Guan Tangzhen Chen Xiaohong(190)

NH ₄ ⁺ -N adsorption characteristics of substrates in constructed wetland	Zhang Liang Zou Changwu Tian Xiao Ye Junfei (198)
Comparative study on operational effect of two kinds of fixed-bed anaerobic reactor packed with different properties of carbon fiber as carrier	Lin Changsong Yuan Xufeng Cui Zongjun Cheng Xu Zhu Wanbin (203)
Treatment of raw water of northern reservoir by coagulation/ultrafiltration membrane short technological process	Qu Ming Teng Lijun Fu Jinxiang Yang Yong Lu Shanwen (210)
A pilot study on advanced treatment of high-concentration papermaking wastewater by Fenton oxidation process	Jia Yongqiang Li Wei Jia Lizhuang Yan Dongjie (215)
UV disinfection of reclaimed water from an oil refining and petrochemical enterprise and its influencing factors	Lan Xiaoning Liu Hongju Lu Hongmei (222)
Decoloration treatment of wastewater containing vitamin B ₁₂ by modified mineral adsorption and O ₃ oxidation	Shan Sihang Fan Pengfei Xing Yi Qiao Geng (230)
Phosphorous removal from wastewater by iron-lanthanum based alloy oxides and their regeneration	Yang Yongzhu Jiang Yingxiang Zhao Lili Liu Yanbing (236)
Treatment efficiency and influencing factors of RO concentrated water by microbubble ozonation with H ₂ O ₂	Zhang Peilong Yu Li Pang Lifei Hou Jiakai Jia Shouhua (242)
Adsorption property of Triallyl isocyanurate onto powdered activated carbon	Zhao Zehua Sun Yabing Xu Jianhua Rong Shaopeng Zhang Yan (249)
Synthesis of sulfhydryl esterification chitosan and research on removal performance of Cd ²⁺	Li Ping Jin Lanshu Lin Guolin Liu Shiguang (254)
Preparation and performance evaluation of a composite filler embedding microorganisms	Li Shunyi Zhu Rencheng Zhang Yali Wang Yan (260)
Dynamic simulation of PCB pyrolysis gas treatment by DC corona radical shower	Lin Jie Wen Zhengcheng Liu Yan Xie Chenhui Luo Qinqi (266)
Selection of packing materials for biofilter to treat odor and bioaerosol from municipal wastewater treatment process	Liu Jianwei Lu Chen Xia Xuefeng Liu Huiping (273)
Removal of NO from simulated flue gas under high gravity	Wang Fang Li Xiaolu Yu Guoxian Jin Mei Lu Ping (280)
Simulated combustion experiment on torch NO _x emissions from coal chemical industry	Liang Junning Lu Lidong Song Lina Liu Ling (285)
Effects of Zn and Fe ion on zinc sulfite oxidation in flue gas desulfurization with zinc oxide	Liu Zhaobin Tong Hua Wang Jinggang (290)
Purification of simulated low-concentration formaldehyde and ammonia by membrane absorption method	Yao Zhiliang Ye Yu Cao Xinyue Liu Weiwei Ma Yongliang (294)
Research on application & flow field simulation of membrane-covered compost pile in sludge aerobic fermentation	Sheng Jinliang Zhu Jinlong Hu Haihe Gong Ying Shi Wei (298)
Humification characteristics of stabilized sewage sludge in sludge drying bed and reed bed	Cui Yubo Ran Chunqiu Wang Fang Sun Hongjie Gao Wei (305)
Analysis of microorganism at starting stage of anaerobic fermentation of vegetable waste and restaurant garbage	Sun Yuhui Liu Qi Jiang Yue Che Zhenyu Zhang Huan Wang Xiaoming Cao Yanxin Kou Wei (310)
Decomposition of brominated epoxy resinsand in waste printed circuit boards by supercritical acetone	Xing Mingfei Zhang Fushen (317)
Validity study on co-incineration of municipal sewage sludge and municipal solid waste	Chen Zhaolin Wen Junming Liu Chaoyang Zhang Hongtao Yang Shiqiao Tang Xia Chen Qing (324)
Harmless treatment technology of manganese slag	Wang Jiwei Zhou Changbo Du Bing Chen Shu Pei Qianqian (329)
Impact of temperature and straw adding ratio on contents of nutrients in cow dung aerobic compost	Zhao Xiuling Zhu Xinping Luo Yanli Yu Xiong Jia Hongtao Li Jinjun Liu Hongpeng (334)
Effect of chromium-contaminated soil on strength and chromium ions leaching concentration of cement clinker	Li Jing Chen Huxing (341)
Partitioning variation of heavy metals in contaminated soil by E-waste open burning activities via <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i> bioleaching	Zhao Guohua Gao Shunzhi Luo Xingzhang (347)
Analysis of noise effect and technology of noise control in urban gas stations	Xiong Hongbin Chen Xinyan Jiang Hai (353)
Construction of high-effective microbial flora for bioremediation of system polluted by PAHs and its degradation characteristics	Yang Xu Chen Fangyan Tang Yubin (360)
Identification and denitrification characteristics of a denitrifier	Yang Haofeng Tang Jiayu Hu Anhui Yang Yueping Xie Liu (366)
Isolation and oil-degrading characteristics of halophilic bacteria	Chen Meimei Deng Hao Song Jiayu Liu Guangquan (372)
Screening of high efficient desulphurization bacteria and study on its properties	Zhang Xiuxia Kong Tiantian Chen Shuiquan Wang Zhiwei Shao Jun Liu Xinmei (378)
Comparison of three kinds of determination methods on oil and water content of oily sludge	Zhang Ke Zhu Jianhua Zhou Yong Wu Bencheng (385)
Application of programmed unascertained measure model in water environmental quality assessment	Zhang Weibing Yao Jian Tang Le Peng Yan (392)
Reconstruction and practice of treatment project of heavy metals smelting wastewater from Mengzi Mining-Metallurgy Co. Ltd	Ma Ling Xu Xiaojun Huang Changyuan Huang Weizhong Chen Xiaohong Wei Jianchu Yang Jinjin (397)
Regeneration technologies for catalytic activity of TiO ₂ nanotubes	Liu Cuiyun Fu Dafang Meng Qinwei (403)

钻井废水的生物强化处理

冯 栩¹ 谷晋川¹ 鲍 晋² 龚志莲¹ 江元霞¹ 张 彬¹ 魏春梅¹

(1. 西华大学能源与环境学院, 成都 610039; 2. 西南石油大学石油工程学院, 成都 610500)

摘 要 从受钻井废水污染的土壤样品中筛选菌株进行生物处理实验, 确定7株菌进行菌剂配伍。通过正交实验剔除可能有抑制作用的菌株, 并确定菌剂各组成菌株的最佳配比, 制成复合微生物菌剂。考察5种添加物对菌剂的影响, 结果显示, 当硫酸铵的添加量为20 mg/L时降解率为60%, 高于其他添加物。生物强化实验结果显示, 投加菌剂的反应器对钻井废水的平均降解率为42%, 比未投加菌剂的对照实验的平均降解率(16%)高, 而且耐冲击负荷性和降解性能稳定性优于对照实验。

关键词 钻井废水 菌剂配伍 正交实验 菌株相互作用 耐冲击负荷

中图分类号 X703 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2014)01-0184-06

Bioaugmentation treatment of drilling wastewater

Feng Xu¹ Gu Jinchuan¹ Bao Jin² Gong Zhilian¹ Jiang Yuanxia¹ Zhang Bin¹ Wei Chunmei¹

(1. Department of Energy and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract Some strains that were used in biological treatment experiments were isolated from soil sample which was polluted by drilling wastewater and seven strains were selected as composing strains for microorganism agents. The strains which acted inhibition to other strains were rejected through orthogonal experiments and the proportions of these strains were determined by orthogonal experiments. The five additives' effects on microorganisms agent were tested, and it showed that when the dosage of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ was 20 mg/L, the degradation was 60%, better than other additives. The bioaugmentation experiments showed that the average degradation of addition of microorganisms agent was 42%, which was higher than the control experiment (16%) without addition of microorganisms. And it also showed good resist load impact and stable biodegradation.

Key words drilling wastewater; compatibility of microorganisms agent; orthogonal experiments; interaction of strains; resistance to load impact

钻井废水主要是由废弃钻井液、钻井作业中流失的钻井液、大功率油机组燃料油及润滑油的渗漏部分、机组冷却水、冲洗设备废水以及雨水等组成^[1-3]。钻井废水的组分及浓度主要取决于钻井液的成分, 并且钻井废水的水质随钻井井深、地质条件的不同而差异很大, 主要污染物为泥浆添加剂、油类物质、有机物、悬浮物等, 是分布较广的非点源污染源, 具有复杂性、多变性、分散性的水质特征^[4-6], 其表征为: COD 浓度高, 变化大(800 ~ 40 000 mg/L)^[2], 而且大部分是生物难降解的有机物; 色度较高(>400)^[2]; 固体悬浮物含量较多^[7]。通过对钻井废水的文献资料和现场调研分析可以看出, 钻井废水作为一种油类物质、处理剂被水高倍稀释的特殊作业废水, 传统的物理化学法处理工艺已不能满足污染物治理的要求, 必须寻求经济上、技术上可行

的新的处理工艺和方法^[8-10]。随着微生物处理技术的深化研究和工程实践经验的积累, 生物处理技术在有毒、有害有机工业废水的治理中已得到了广泛的应用^[11-15]。但由于油气田勘探开发的特殊性, 在油气田特殊作业废水中, 生物处理技术的应用和研究尚处于初始阶段。为解决钻井废水的达标排放问题, 从钻井现场采集了土壤用于菌种的筛选分离, 利用获得的目的菌种开展了菌剂的组合、生物处理钻井废水的实验室小试, 并同活性污泥处理的结果进行比较。

基金项目: 西华大学重点科研项目(z1220409); 西华大学能源与环境学院预研项目

收稿日期: 2012-11-19; **修订日期:** 2013-05-14

作者简介: 冯栩(1981~), 女, 博士, 讲师, 主要从事水污染控制研究工作。E-mail: fengxu@me.com

1 实验部分

1.1 实验材料

1.1.1 菌 株

降解菌筛选自川中地区的钻探井场周围被钻井废水污染的土壤。

1.1.2 钻井废水

实验钻井废水水样为川中地区的钻探现场经简单混凝处理后的钻井废水,其进水水质: pH 为 7.5 ~ 8.5, COD 为 5 600 ~ 5 900 mg/L, 氨氮为 22 ~ 28 mg/L, Cl^- 浓度 2 000 ~ 2 100 mg/L, BOD_5 为 10 ~ 15 mg/L, 色泽为棕红色, BOD_5/COD 远小于 0.2, 营养失调, 属于难降解废水。

1.1.3 污 泥

取自成都市污水处理厂 (MLSS 4.456 g/L, SV_{30} 24.6%)。

1.1.4 培养基

牛肉膏蛋白胨培养基 (富集培养基): 牛肉膏 0.5%, 蛋白胨 1%, NaCl 0.5% (固体培养基加琼脂 1.7%)。

无机盐培养基: Na_2HPO_4 2 g, KH_2PO_4 0.5 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.5 g, MgSO_4 0.3 g, 微量元素溶液 5 mL, 蒸馏水 1 000 mL, pH 为 7.0 (固体培养基加 17 g 琼脂)。

微量元素溶液: EDTA 0.500 g, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22 g, CaCl_2 0.055 g, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.051 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.049 g, $(\text{NH}_4)_2\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.011 g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.0157 g, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.016 g, H_2O 1 000 mL, pH 为 6.0 (KOH)。

复合维生素溶液: 生物素 10 mg, 烟酸 35 mg, 盐酸硫胺素 30 mg, 氨基苯甲酸 20 mg, 盐酸吡哆胺 10 mg, 泛酸钙 10 mg, 维他命 B_{12} 5 mg, 蒸馏水 1 000 mL。

1.2 实验方法

1.2.1 降解菌的筛选

将所采集的受污染的土壤接入富集培养基, 置于 30℃ 旋转式摇床中 (转速 200 r/min) 培养 3 d 后, 移取一定量的富集培养液接入新鲜钻井培养基中, 在相同条件下培养 3 d, 共重复 3 次。将最终得到的培养物转入 1 L 的量筒中, 添加钻井废水培养基 500 mL, 间歇曝气 7 d 后, 量筒中的填料挂上膜。挑取膜上的培养物进行稀释涂布和平板划线分离, 挑取单菌落, 反复分离纯化后接种于斜面培养后 4℃ 冰箱中保存。

1.2.2 性能测定方法

最适生长温度测定: 将各菌株的 OD_{600} 调至

1.000 的菌悬液 (培养过夜的菌液离心去上清液加灭菌钻井废水悬浮) 10 mL, 分别接种至 100 mL 钻井废水培养基 (经稀释的钻井废水 $\text{COD} \approx 400$ mg/L), 置于 250 mL 三角烧瓶中, 分别在 28℃、30℃、32℃、35℃ 和 38℃ 下, 200 r/min 振荡培养 3 d, 用分光光度法测定培养液中的 OD_{600} 。

降解性能测定: 100 mL 钻井废水培养基 (经稀释的钻井废水 $\text{COD} \approx 400$ mg/L), 置于 250 mL 三角烧瓶中, 加入 OD_{600} 调至 1.000 的菌悬液 (培养过夜的菌液离心去上清液加灭菌钻井废水悬浮) 10 mL, 30℃, 200 r/min 振荡培养, 培养一定时间后, 用分光光度法测定培养液中的 OD_{600} 的变化, 同时测定培养液的 COD 变化, 以不接菌的培养液为对照, 采用下面的公式计算:

$$A = \frac{w_0 - w_x}{W_0} \times 100\%$$

式中: w_0 为对照培养液中残余 COD; w_x 为接各测试菌的培养液中残余 COD。

1.2.3 复合微生物配比实验

正交实验确定最佳配比。采用 7 因素 2 水平正交实验法, 选择降解效果较好的 7 株菌作为 7 因素, 设定加入量的 2 个水平为 1 和 2 mL。实验时向装有 100 mL 灭菌钻井废水 (经稀释的钻井废水 $\text{COD} \approx 400$ mg/L) 的三角烧瓶中加入表 3 所示数量的菌悬液, 各降解菌在配比之前都配制成 OD_{600} 为 1.000 的菌悬液 (培养过夜的菌液离心去上清液加灭菌钻井废水悬浮, 初始 $\text{COD} \approx 400$ mg/L), 平行实验 3 组, 30℃, 200 r/min 振荡反应, 3 d 后取样测定 COD。

1.2.4 最佳配比实验

通过正交实验结果, 对方案进行改变。采用 5 因素 4 水平正交实验法 (实验设计见表 4), 选择起着主要降解作用的 5 株菌作为 5 因素, 设定加入量的 4 个水平为 1、2、3 和 4 mL。实验时向装有 100 mL 灭菌钻井废水 (经稀释的钻井废水 $\text{COD} \approx 400$ mg/L) 的三角烧瓶中加入表 3 所示数量的菌悬液, 各降解菌在配比之前都配制成 OD_{600} 为 1.000 的菌悬液 (培养过夜的菌液离心去上清液加灭菌钻井废水悬浮, 初始 $\text{COD} \approx 400$ mg/L), 平行实验 3 组, 30℃, 200 r/min 振荡反应, 3 d 后取样测定 COD。

1.2.5 助剂的强化实验

向装有 100 mL 灭菌钻井废水 (经稀释的钻井废水 $\text{COD} \approx 400$ mg/L) 的三角烧瓶中加入 1.2.4 确定的最优组合配比而成的复合微生物菌悬液 10 mL, 分别加入硫酸铵、磷酸钾盐 (磷酸二氢钾: 磷酸

氢二钾 = 1:1)、酵母汁各 20 mg/L,复合维生素液的添加量为 1 mL/L,微量元素的添加量为 1 mL/L,以未添加助剂的实验(添加同样配比的复合微生物菌悬液 10 mL)作为空白实验,平行实验 3 组,30℃,200 r/min 振荡反应,3 d 后取样测定上清液的 COD。

1.2.6 菌剂对钻井废水的生物强化处理实验

在 1 L 的 SBR 反应器中加入 20% 的活性污泥 (MLSS 3.8 g/L, SV₃₀ 34%),用稀释的钻井废水 (COD≈1 500 mg/L)进行驯化,培养一段时间使污泥中的微生物在新的生活条件下得以适应,完成驯化后再向反应器中以 10% 的量投加菌剂(采用配比见 2.3 的实验结果),同时做不加菌剂的活性污泥对照实验。该 SBR 处理系统采用间歇换水的方式,每天换水 1 次,1 次 500 mL,曝气量为 5.0 L/min。运行实验时,钻井废水在加入反应器之前均加入硫酸铵使其浓度为 20 mg/L。

2 结果分析与讨论

2.1 高效降解菌株的筛选

经过富集培养后,一共从样品中筛选出 32 株菌,分别在 28、30、32、35 和 38℃ 下测定各自的

OD₆₀₀。实验中部分菌株的 OD₆₀₀ 低于 0.05,这部分菌株被淘汰去除(此部分数据未列出),从样品中筛选出的 16 株生长良好的菌株,而这 16 株菌在不同温度下的生长情况参见表 1。由表 1 可知,在 30 ~ 35℃ 内,OD₆₀₀ 的变化不是很大,而温度为 38℃ 时 OD₆₀₀ 下降明显,又由于大部分菌株的最适生长温度为 30℃,因此以 30℃ 作为后续的实验温度。这 16 株菌在钻井废水培养基中的生长情况及其条件如表 2 所示,包括 3 d 时的 OD₆₀₀、适宜生长温度以及降解率。由表 2 可知,在 3 d 内,菌株能在较短时间达到降解效果。

2.2 复合微生物菌剂配比

由于钻井废水成分复杂,浓度变化幅度极大,废水中含有的各种难降解化合物^[4],这样就需要更多的降解酶类来作用于多种底物及其代谢中间产物,因此较难按底物种类决定降解菌株的配比原则来确定复合微生物菌剂中各种菌株的配比。为了提高钻井废水的降解率,考虑根据多株菌之间可能有的协同效应,利用混合菌株作为实际处理菌剂,通过正交实验确定菌株对降解率的影响并对菌株组合加以优化,正交实验结果见表 3。

表 1 最适生长温度测定结果
Table 1 Results of optimum temperature test

	W ₁	W ₃	W ₅	W ₆	W ₇	W ₉	W ₁₁	W ₁₃
28℃	0.1	0.085	0.105	0.084	0.069	0.138	0.128	0.078
30℃	0.12	0.102	0.136	0.094	0.094	0.152	0.149	0.095
32℃	0.092	0.097	0.129	0.098	0.087	0.149	0.154	0.087
35℃	0.087	0.076	0.11	0.099	0.077	0.129	0.158	0.069
38℃	0.054	0.031	0.054	0.085	0.059	0.089	0.132	0.052
	W ₁₄	W ₁₅	W ₁₆	W ₁₇	W ₂₂	W ₂₄	W ₂₇	W ₃₀
28℃	0.185	0.142	0.174	0.125	0.089	0.121	0.089	0.11
30℃	0.197	0.152	0.178	0.146	0.12	0.136	0.11	0.126
32℃	0.196	0.159	0.182	0.149	0.108	0.14	0.097	0.124
35℃	0.168	0.169	0.186	0.154	0.1	0.147	0.087	0.12
38℃	0.136	0.128	0.154	0.121	0.066	0.119	0.054	0.087

表 2 性能测定结果
Table 2 Results of performance test

	W ₁	W ₃	W ₅	W ₆	W ₇	W ₉	W ₁₁	W ₁₃
3 d 时 OD ₆₀₀	0.122	0.099	0.134	0.102	0.087	0.145	0.163	0.097
降解率(%)	11.2	9.6	13.2	10.9	12.4	14.5	19.3	11.8
	W ₁₄	W ₁₅	W ₁₆	W ₁₇	W ₂₂	W ₂₄	W ₂₇	W ₃₀
3 d 时 OD ₆₀₀	0.187	0.177	0.182	0.155	0.118	0.144	0.1	0.124
降解率(%)	16.8	17.3	21.8	13.9	18.1	19.8	10.4	18.1

表 3 菌剂配伍正交实验设计及实验结果

Table 3 Orthogonal experimental design of microorganisms agent compatibility and results of orthogonal experiment

实验号	因 素							降解率(%)
	W ₁₄	W ₃₀	W ₁₅	W ₁₆	W ₁₁	W ₂₂	W ₂₄	
1	1	1	1	1	1	1	1	11
2	1	1	1	2	2	2	2	27
3	1	2	2	1	1	2	2	35
4	1	2	2	2	2	1	1	41
5	2	1	2	1	2	1	2	32
6	2	1	2	2	1	2	1	35
7	2	2	1	1	2	2	1	29
8	2	2	1	2	1	1	2	17
均值 I (I)	28. 5	26. 2	21	26. 8	24. 5	25. 3	29	
均值 2(II)	28. 2	30. 5	35. 8	30. 0	32. 3	31. 5	27. 7	
极差 R	0. 003	0. 043	0. 148	0. 032	0. 078	0. 062	0. 013	

从实验结果可以看出,第 4 号实验的降解率最高,而第 1 号实验的降解率最低。但进一步仔细观察可以发现,在降解率较高的 3 组实验(3 号、4 号和 6 号实验)中 W₁₅的含量都在较高水平,说明菌株 W₁₅可能对其他菌株有促进生长的作用,而其他的菌株没有如此明显的规律。通过极差的计算结果进行分析,可知 $R_{15} > R_{11} > R_{22} > R_{30} > R_{16} > R_{24} > R_{14}$, 这说明影响降解率的最主要因素是 W₁₅菌株,而 W₂₄和 W₁₄菌株对降解率的影响最小。比较不同菌株的不同菌含量的平均降解率, $\text{II}_{30} > \text{I}_{30}$, $\text{II}_{15} > \text{I}_{15}$, $\text{II}_{16} > \text{I}_{16}$, $\text{II}_{22} > \text{I}_{22}$, 说明随着 W₃₀、W₁₁、W₁₅、W₂₂和 W₁₆菌株含量的增加,降解率提高;而 $\text{I}_{14} > \text{II}_{14}$, $\text{I}_{24} > \text{II}_{24}$, 则说明随着 W₁₄和 W₂₄菌株含量的增加,降解率反而下降。根据前面的分析,可以认为,提高 W₁₄和 W₂₄菌株的含量不利于降解,这 2 株菌株和其他菌株之间可能存在拮抗作用,因此可以考虑去除这 2 株菌,并进一步提高其他菌株的含量,进行新的正交实验。

2.3 菌株的最佳配比确定

通过初次正交实验结果,确定起主要降解作用的菌株,并再次通过正交实验确定最佳的菌株组合。正交实验结果见表 4。

从实验结果可以看出,第 14 号实验的降解率最高,这说明 $W_{11}:W_{15}:W_{16}:W_{22}:W_{30}=4:2:3:1:4$ 的配比下降解率最高,而这一结果与第一次正交实验的结果不一样,这是由于 W₁₄和 W₂₄菌株的去除,影响到整个菌群的结构。进一步仔细观察可以发现,在降解率较高的 4 组实验(11 号、12 号、13 号和 14 号实验)中 W₁₁和 W₃₀的含量都在较高水平,而其他的菌株没有如此明显的规律,说明菌株之间需要保持一个特定的比例关系,对于降解效果才会起到正

效应。因此最终确定第 14 号实验的菌株配比为最佳配比。

表 4 菌剂配伍正交实验设计及实验结果

Table 4 Orthogonal experimental design of microorganisms agent compatibility and results of orthogonal experiment

实验号	因 素					降解率(%)
	W ₁₁	W ₁₅	W ₁₆	W ₂₂	W ₃₀	
1	1	1	1	1	1	37
2	1	2	2	2	2	39
3	1	3	3	3	3	42
4	1	4	4	4	4	47
5	2	1	2	3	4	49
6	2	2	1	4	3	44
7	2	3	4	1	2	40
8	2	4	3	2	1	39
9	3	1	3	4	2	51
10	3	2	4	3	1	45
11	3	3	1	2	4	57
12	3	4	2	1	3	53
13	4	1	4	2	3	49
14	4	2	3	1	4	58
15	4	3	2	4	1	51
16	4	4	1	3	2	52
均值 1	41. 2	46. 5	47. 5	47. 0	43. 0	
均值 2	43. 0	46. 5	48. 0	46. 0	45. 5	
均值 3	51. 5	47. 5	47. 5	47. 0	47. 0	
均值 4	52. 5	47. 8	45. 3	48. 2	52. 7	
极差	0. 113	0. 013	0. 027	0. 022	0. 097	

2.4 助剂的确定

钻井废水中含有大量难降解有机物、盐类、杀菌剂、某些化学添加剂等可能对废水 COD 做出巨大贡献的物质^[5],很有可能造成营养比例失衡,为了促

进菌剂的降解活力,提高菌剂的适应能力,在实验中选择硫酸铵、磷酸钾盐、酵母汁、维生素和微量元素作为助剂,考察其对微生物降解污染物的强化作用。实验结果见图 1。由图 1 可知,这几种助剂对降解率的提高作用都不太明显,只有添加硫酸铵的时候降解率提高多一点,因此在实践中可以考虑添加一定量的硫酸铵以提高降解率,别的助剂由于效果不明显不予考虑。

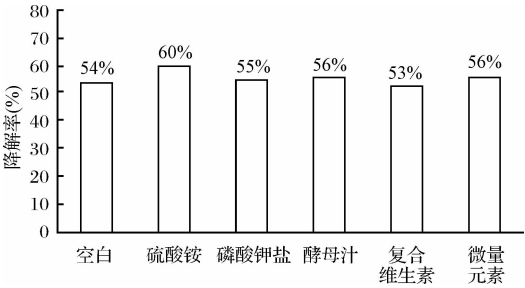


图 1 助剂对去除效果影响

Fig. 1 Influence of additives on removal efficiency

2.5 菌剂的生物强化作用分析

由于配制的菌剂是投加到废水处理反应器中而起作用的,因此设计小型 SBR 检验菌剂对钻井废水的生物强化效果,同时做不加菌剂的活性污泥对照实验,结果见图 2。

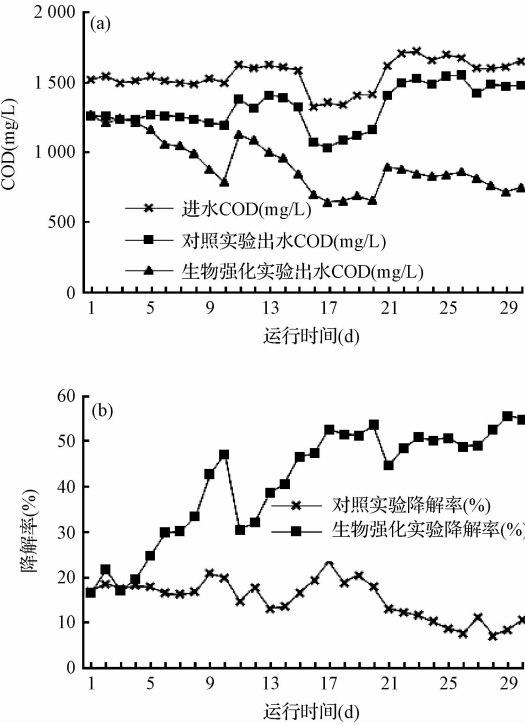


图 2 SBR 运行结果

Fig. 2 Operation results of SBR

由图 2(a)可以看出,进水 COD 呈阶梯变化,在 1 ~ 10 d,平均进水 COD 是 1 514 mg/L;在 11 ~ 15 d 内,进行第 1 次冲击实验,在此期间的平均进水 COD 是 1 609 mg/L;在 16 ~ 20 d 期间,进水 COD 略有下降,平均进水 COD 是 1 369 mg/L;在 21 ~ 30 d 期间,进行第 2 次冲击实验,平均进水 COD 是 1 655 mg/L。

从图 2(a)和(b)可以看出,不加菌剂只有活性污泥的对照实验显示:在 1 ~ 10 d,进水 COD 维持在 1 500 mg/L,平均出水 COD 是 1 242 mg/L,平均降解率为 18%;在 11 ~ 15 d 内,进水 COD 略有上升,平均出水 COD 是 1 365 mg/L,平均降解率有所下降,降至 15%,这说明没有添加菌剂的活性污泥系统对于钻井废水的稳定性不好;在 16 ~ 20 d 期间,进水 COD 下降至 1 369 mg/L,平均出水 COD 是 1 094 mg/L,平均降解率为 20%;在 21 ~ 30 d 期间,平均进水 COD 是 1 655 mg/L,平均出水 COD 是 1 487 mg/L,平均降解率为 10%,这说明活性污泥的处理效果大大降低,而且从变化趋势来看,降解率呈下降趋势,这说明反复的负荷冲击严重影响了活性污泥的活性,大量的微生物凋亡(从反应器中发现有松散的活性污泥上浮)。

添加菌剂的生物强化实验显示:在 1 ~ 10 d,平均出水 COD 是 1 085.7 mg/L,降解率从最初的 16% 上升至 47%,平均降解率为 28%;在 11 ~ 15 d 内,平均出水 COD 是 1 002.3 mg/L,而平均降解率为 38%;在 16 ~ 20 d 期间,平均出水 COD 是 666.4 mg/L,而平均降解率为 51%;在 21 ~ 30 d 期间,平均出水 COD 是 817.9 mg/L,而平均降解率为 51%。从生物强化实验出水 COD 和对应的降解率可以知道,在进水 COD 维持在 1 500 mg/L 时,强化系统的降解率从 16% 上升至 47%,这说明菌剂在逐步适应活性污泥系统;当进水 COD 上升时,强化系统的降解率在刚刚受到冲击时下降至 30%,但从其趋势来看是逐渐提高,这说明强化系统在遇到冲击负荷时,它的耐受性要优于普通活性污泥,而且适应性也优于活性污泥系统,在第一次冲击负荷结束时,降解率达到 47%;当进水 COD 再次下降至 1 094 mg/L 时,平均降解率升至 51%,这说明强化系统的适应能力很强;而当 COD 再次上升时,强化系统经过一个短暂的适应期(2 d)后,降解率迅速恢复,这说明强化系统在遇到多次冲击时,依然能够保持良好的适应性和稳定的降解能力。

3 结 论

(1)通过富集驯化,从受污染土壤中筛选出的 16 株对钻井废水具有较高降解能力的菌株。

(2)从正交实验结果可以得知, W_{14} 和 W_{24} 菌株可能对菌剂中其他菌株有抑制作用,在第二次正交实验中去除这 2 株菌,并优化菌群组成,确定理想的菌群组合为 $W_{11}:W_{15}:W_{16}:W_{22}:W_{30}=4:2:3:1:4$ 。

(3)添加一定量的硫酸铵可以提高降解率,而其他助剂磷酸钾盐、酵母汁、维生素和微量元素的效果不明显,硫酸铵的添加量为 20 mg/L。

(4)对于进水 COD 为 1 369 ~ 1 655 mg/L 的钻井废水,添加菌剂的生物强化系统平均降解率约为 42%,比未添加菌剂的对照系统的平均降解率(16%)高,并且强化系统在进水 COD 出现变化时,能够保持稳定的降解率,并且耐冲击负荷性和稳定性优于对照系统。

参 考 文 献

- [1] 张擎翰,蒋文举. 钻井废水处理技术研究进展. 四川化工, **2011**, 14(1): 45-48
Zhang Q. H., Jiang W. J. The development of drilling wastewater treatment technology. Sichuan Chemical Industry, **2011**, 14(1): 45-48 (in Chinese)
- [2] 蔡利山. 石油钻井废弃物环境污染特征的分析与评价. 西部探矿工程, **2003**, 15(2): 54-57
Cai L. S. The analysis and evaluation for the characteristics of the petroleum drilling waste. West-China Exploration Engineering, **2003**, 15(2): 54-57 (in Chinese)
- [3] 赵雄虎,王凤春. 废弃钻井液处理研究进展. 钻井液与完井液, **2004**, 21(2): 43-48
Zhao X. h., Wang F. C. Research development of waste drilling fluids disposal. Drilling Fluid & Completion Fluid, **2004**, 21(2): 43-48 (in Chinese)
- [4] 张伟,王景峰,李官年,等. 辽河油田稠油废水生物治理初步研究. 工业水处理, **2004**, 24(3): 37-39
Zhang W., Wang J. F., Li G. N., et al. Elementary study on the biological treatment of effluent from in-situ heavy oil in Liaohe oilfield. Industrial Water Treatment, **2004**, 24(3): 37-39 (in Chinese)
- [5] 雷乐成,陈琳,张端成. 油田废水的 COD 构成分析及生物可降解性研究. 给水排水, **2002**, 28(6): 44-47
Lei L. C., Chen L., Zhang R. C. On the COD constitution and biodegradation of oil field wastewater. Water & Wastewater Engineering, **2002**, 28(6): 44-47 (in Chinese)
- [6] 马雅雅,燕红,马金,等. 活性炭吸附法处理气田聚磺泥浆钻井废水研究. 石油与天然气化工, **2009**, 38(1): 81-84
Ma Y. Y., Yan H., Ma J., et al. Study on active carbon adsorption removals the COD of polymer/sulphated drilling

- wastewater in gas field. Chemical Engineering of Oil & Gas, **2009**, 38(1): 81-84 (in Chinese)
- [7] 许志斌,何昆,曾升泰,等. 石油钻井废水处理研究进展. 北方环境, **2011**, 23(11): 169-170
Xu Z. B., He K., Zeng S. T., et al. The research progress of drilling wastewater treatment technology. Northern Environment, **2011**, 23(11): 169-170 (in Chinese)
- [8] 党建新,郑李,刘剑波,等. 油田作业废水处理技术研究进展. 油气田环境保护, **2010**, 20(增刊): 66-69
Dang J. X., Zheng L., Liu J. B., et al. A study on operation wastewater treatment technology in the oilfield. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, **2010**, 20(S1): 66-69 (in Chinese)
- [9] 蒋晓江,宋保强. 油田钻井废液废水处理技术的发展. 中国石油和化工, **2007**, (18): 48-50
Jiang X. J., Song B. Q. Study of the pretreatment technology of the waste liquid from the well drilling in oilfield. China Petroleum and Chemical Industry, **2007**, (18): 48-50 (in Chinese)
- [10] 彭娟华,冯栩,李旭东. 水解酸化改善钻井废水可生化性. 钻井液与完井液, **2007**, 24(5): 68-70
Peng J. H., Feng X., Li X. D. Hydrolytic acidification improves the biodegradability of drilling wastewater. Drilling Fluid & Completion Fluid, **2007**, 24(5): 68-70 (in Chinese)
- [11] 全坤,张以河,谢加才,等. 提高稠油废水可生化性的研究进展. 化工环保, **2011**, 31(5): 423-426
Tong K., Zhang Y. H., Xie J. C., et al. Research progresses in biodegradability improvement of viscous oil wastewater. Environmental Protection of Chemical Industry, **2011**, 31(5): 423-426 (in Chinese)
- [12] 霍丹群,秦力,肖灵铃,等. 生物法处理含油钻井废水的影响因素研究. 环境工程学报, **2007**, 1(6): 56-59
Huo D. Q., Qin L., Xiao L. L., et al. Factors in the treatment of drilling wastewater by biological method. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2007**, 1(6): 56-59 (in Chinese)
- [13] 肖灵铃,霍丹群,秦力,等. 微生物法处理钻井废水中的石油污染物. 工业水处理, **2006**, 26(4): 59-65
Xiao L. L., Huo D. Q., Qin L., et al. Treatment of petroleum pollutants from drilling wastewater by microbiological method. Industrial Water Treatment, **2006**, 26(4): 59-65 (in Chinese)
- [14] 汪严明,杨敏,郑少奎,等. 用酵母菌处理油田钻井废水的研究. 环境科学, **2002**, 23(5): 72-75
Wang Y. M., Yang M., Zheng S. Q., et al. Treatment of drilling wastewater from oil field by using yeast. Environmental Science, **2002**, 23(5): 72-75 (in Chinese)
- [15] 郭振英,吕荣湖,张红岩,等. 生物法处理磺化泥浆体系钻井废水的可行性初探. 石油化工高等学校学报, **2009**, 22(1): 5-8
Guo Z. Y., Lv R. H., Zhang H. Y., et al. Preliminary study on drilling wastewater correlated with three-sulfonated mud system treatment with aerobic process. Journal of Petrochemical Universities, **2009**, 22(1): 5-8 (in Chinese)