

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物质碳及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水

刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯

(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术重点实验室, 石家庄 050018)

摘要: 采用微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺对煤化工废水生化出水进行深度处理, 考察耦合系统处理性能及不同臭氧投加量和进水 COD 量比值的影响。结果表明, 微气泡臭氧催化氧化处理能够有效降解废水中难降解含氮芳香族污染物, 去除部分 COD 并释放氨氮, 显著提高废水可生化性, 臭氧利用率接近 100%, 无需进行臭氧尾气处理; 同时为生化处理提供充足溶解氧(DO), 实现生化处理对 COD 和氨氮的进一步有效去除, 生化处理无需曝气。在系统出水回流比为 30%、臭氧投加量和进水 COD 量之比为 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ 的运行条件下, 耦合系统处理性能较好。微气泡臭氧催化氧化处理对 COD 去除率为 42.5%, 臭氧消耗量与 COD 去除量比值为 $1.38 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$, 臭氧利用率为 98.0%; 生化处理对 COD 去除率为 42.3%; 耦合系统整体 COD 去除率为 66.7%, 最终平均出水 COD 浓度为 $91.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 估算整体臭氧消耗量与 COD 去除量比值为 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$, 具有较优的技术经济性能。

关键词: 微气泡; 催化臭氧化; 生化处理; 煤化工废水; 深度处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3362-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201701151

Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater

LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, CHEN Xiao-xuan, ZHANG Lei, GUO Yan-kai

(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: A combination of microbubble catalytic ozonation and biological process was used for advanced treatment of biotreated coal chemical wastewater (BCCW). The performance of the combination system and the influence of the ratio of ozone dosage to influent COD were investigated. The results indicated that the refractory nitrogen-containing aromatics in the BCCW was degraded efficiently by microbubble catalytic ozonation, which resulted in some COD removal, ammonia nitrogen release, and significant improvement of biodegradability. The ozone utilization efficiency was close to 100% and the off-gas ozone did not need to be treated. Sufficient dissolved oxygen (DO) was provided by the microbubble catalytic ozonation for biological treatment without aeration. COD and ammonia nitrogen were removed further in the biological treatment efficiently. Better performance of the combination system was achieved when the system effluent reflux ratio was 30% and the ratio of ozone dosage to influent COD was $0.44 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$. In this case, for microbubble catalytic ozonation, the COD removal efficiency was 42.5%, the ratio of ozone consumed to COD removed was $1.38 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$, and the ozone utilization efficiency was 98.0%. For biological treatment, the COD removal efficiency was 42.3%. For the combination system, the total COD removal efficiency was 66.7%, the average final effluent COD concentration was $91.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the estimated total ratio of ozone consumed to COD removed was $0.68 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$, indicating better technical and economic performance.

Key words: microbubble; catalytic ozonation; biological treatment; coal chemical wastewater; advanced treatment

煤化工废水水量大、水质复杂, 含有大量酚类、含氮/氧/硫的杂环/芳香环有机物、多环芳烃、氰等有毒有害物质^[1~3]。煤化工废水经过传统物化预处理和生化处理后, 往往难以达到相应废水排放标准, 仍属于典型有毒有害生物难降解工业废水, 成为煤化工行业发展的制约性问题^[4]。因此, 对煤化工废水生化出水进行深度处理, 进一步去除难降解有毒有害污染物, 对于减轻煤化工废水的环境危害极为必要^[5, 6]。

近年来, 高级氧化技术(AOPs)在煤化工废水深

度处理中逐渐受到关注, 包括 Fenton 氧化和臭氧催化氧化^[7~10], 以破坏和去除废水中的难降解有毒有害污染物, 并提高废水的可生化性。同时, 工业废水深度处理通常考虑将臭氧氧化处理与生化处理相结合^[11~13], 以降低废水处理成本, 其中臭氧氧化处理是决定污染物去除效率的主要因素。目前, 微气泡

收稿日期: 2017-01-18; 修订日期: 2017-03-10

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2015208140)

作者简介: 刘春(1976~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为废水生物处理技术, E-mail: liuchun@hebestu.edu.cn

技术在强化臭氧气液传质和提高臭氧利用效率及氧化能力方面表现出一定优势,因此基于微气泡臭氧氧化处理难降解污染物日益受到关注^[14-18]。

本研究采用微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺对煤化工废水生化出水进行深度处理。前期实验结果表明,该废水采用传统曝气生物滤池(BAF)处理,COD 去除率仅为 6.4%,且生物膜生物量短期内即明显下降,表明其不宜直接采用生化处理工艺。本研究采用微气泡臭氧催化氧化先期去除部分 COD,并提高废水可生化性,而后采用生化处理进一步去除 COD 和氨氮。本研究考察了不同臭氧投加量和进水 COD 量比值下,微气泡臭氧催化氧化和生化处理去除污染物性能,以期为该耦合工艺应用于难降解工业废水深度处理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置流程如图 1 所示。实验系统包括不锈钢微气泡臭氧催化氧化反应器(MOR)和有机玻璃生化反应器(BR)。MOR 为密闭带压反应器,内部填充 3 层 $\Phi 5 \times 5\text{ mm}$ 煤质柱状颗粒活性炭床层作为催化剂,空床有效容积为 25 L,催化剂床层填充率为 28.0%。BR 内部同样填充 3 层 $\Phi 5 \times 5\text{ mm}$ 煤质柱状颗粒活性炭床层作为生物填料,空床有效容积为 42 L,填料床层填充率为 28.6%。本实验系统以纯氧或空气为气源,通过臭氧发生器(石家庄冠宇)产生臭氧气体,与废水和 MOR 循环水混合后,进入微气泡发生器(北京晟峰恒泰科技有限公司)产生臭氧微气泡,从底部进入 MOR 进行微气泡臭氧催化氧化反应。反应后气-水混合物在压力作用下从

底部进入 BR,进一步进行生化处理。BR 内生化的理由臭氧产生及分解过程所剩余氧气提供溶解氧(DO),无需曝气。

1.2 废水水质

本研究所处理废水为实际煤化工废水提取甲醇、乙醇等物质后,经过“UASB + 生物接触氧化”工艺处理后的出水,废水水质情况如表 1 所示。

表 1 煤化工废水生化出水水质

Table 1 Characteristics of biotreated coal chemical wastewater			
水质指标	平均值	水质指标	平均值
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	283.8	BOD ₅ /COD	0.038
TOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	99.8	pH	8.8
氨氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.8	UV ₂₅₄	0.98
总氮(TN)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	13.4		

1.3 运行条件

MOR 水力停留时间为 1h,微气泡臭氧进气流量为 $2\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,平均运行温度为 26.7°C 。BR 接种该废水处理生物接触氧化池污泥,污泥接种量(MLSS)约为 $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,采用排泥法挂膜,促进填料上生物膜的形成,而后开始连续稳定运行。BR 水力停留时间为 6 h(MOR 多余水量通过旁路排出),平均运行温度为 22.2°C 。处理系统从工业现场二沉池出水集水池进水,MOR 多余出水量通过旁路排出后每日收集,BR 出水每日收集,作为 MOR 和 BR 每日出水水样。

系统运行分为 3 个阶段,第 I 阶段臭氧浓度为 $30.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水负荷为 $4.75\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,臭氧投加量和进水 COD 量之比为 $0.73\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$;第 II 阶段臭氧浓度降至 $12.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水负荷为 $4.23\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,臭氧投加量和进水 COD 量之比为 $0.33\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$;第 III 阶段臭氧浓度保持在 $12.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时将系统处理后出水回流与系统进水混合,回流比为 30%,使得进水负荷降至 $3.16\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,臭氧投加量和进水 COD 量之比为 $0.44\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。

运行过程中,对 MOR 进出臭氧气体浓度和进出水液相臭氧浓度进行检测,同时对 MOR 和 BR 出水 COD、BOD₅、氨氮、硝酸盐氮、总氮、DO 浓度以及 UV₂₅₄ 进行检测,以评价系统处理性能。

1.4 检测方法

COD、BOD₅、氨氮、硝酸盐氮均采用国标方法测定^[19];DO 采用便携式溶解氧测定仪(WTW cellOx 325,WTW,德国)测定;液相臭氧浓度采用靛蓝法测定^[20],气相臭氧浓度采用碘量法测定^[21];以

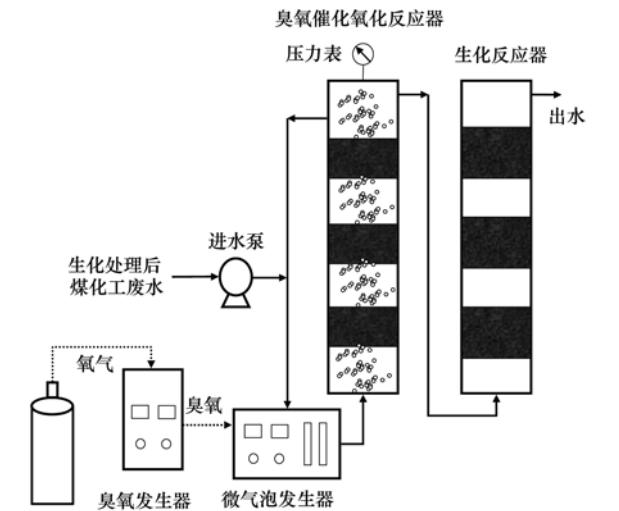


图 1 耦合工艺系统实验装置示意

Fig. 1 Experimental apparatus of the combination system

环己烷为萃取剂,采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS, Thermo DSQ II, 美国)对系统(MOR)进水进行GC-MS分析^[22]; UV_{254} 采用紫外-可见分光光度计(上海天美, U-3900)测定。

2 结果与讨论

2.1 微气泡臭氧催化氧化处理性能

2.1.1 废水 UV_{254} 变化和可生化性改善

对煤化工废水生化出水(系统进水)进行GC-MS检测分析,结果表明,苯并咪唑类、苯并噻唑类、喹啉类、吡啶类等含氮芳香族有机污染物为废水中主要难降解污染物,包括2-氢-苯并咪唑-2-酮、1-乙基-2-苯并咪唑啉酮、2-异丁氨基-苯并噻唑、8-乙基-2-甲基-4-羟基喹啉、苯基吡啶-9-羧酸。 254 nm 波长下的吸收值 UV_{254} 可以用来指示废水中难降解芳香族有机污染物^[23],其通常被认为与芳香族有机分子中的不饱和C=C键和芳香环有关^[24, 25]。微气泡臭氧催化氧化处理中,废水 UV_{254} 值变化如图2所示。可以看到,经过微气泡臭氧催化氧化处理后,MOR出水 UV_{254} 值明显降低。第I阶段进水平均 UV_{254} 值分别为0.90和0.41;第II阶段进水平均 UV_{254} 值分别为1.27和0.63;第III阶段进水平均 UV_{254} 值分别为0.80和0.41。

可见,第I、II阶段进水中含有较多芳香族污染物, UV_{254} 值较高;与系统处理出水混合后,第III阶段进水 UV_{254} 值有所降低。3个阶段 UV_{254} 值去除率平均分别为53.7%、50.3%和46.5%。此结果表明,3个阶段运行中,微气泡臭氧催化氧化均能破坏废水中芳香族污染物不饱和键和芳香环结构。

同时,废水初始 BOD_5/COD (B/C)值仅为0.038,可生化性极差,表明废水中有机污染物难以生物降解。采用第I阶段运行条件对微气泡臭氧催

氧化处理中废水B/C值进行监测,结果如图3所示。可以看到,处理60 min后,废水B/C值可提高至0.30,可生化性大大改善,使得后续生化处理成为可能。微气泡臭氧催化氧化降解废水中难降解芳香族污染物,是改善可生化性的主要原因。

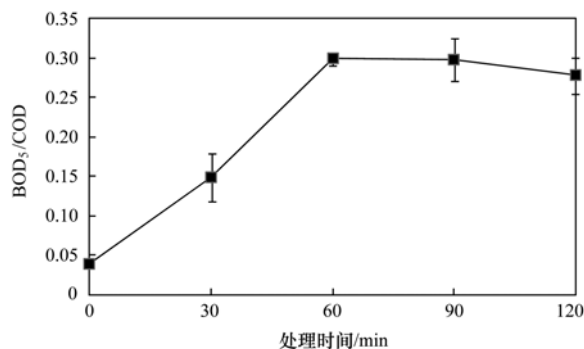


图3 微气泡臭氧催化氧化处理后废水 BOD_5/COD 值变化

Fig. 3 Variation of wastewater BOD_5/COD values after microbubble catalytic ozonation treatment

2.1.2 COD 去除性能

运行初期,MOR采用空气微气泡运行,考察活性炭床层吸附处理过程,其COD平均去除率仅为2.7%,可见活性炭床层对污染物的吸附去除效果极其有限。微气泡臭氧催化氧化处理中,MOR进出水COD浓度如图4所示。可以看到,第I阶段出水平均COD浓度为 $201.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD平均去除负荷为 $1.27\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,臭氧消耗量与COD去除量比值为 $2.72\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。第II阶段出水平均COD浓度为 $248.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD平均去除负荷为 $0.89\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,臭氧消耗量与COD去除量比值为 $1.64\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。第III阶段出水平均COD浓度为 $158.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD平均去除负荷为 $1.04\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,臭氧消耗量与COD去除量比值为 $1.38\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。

可见,第I阶段臭氧投加量和进水COD量比值较高,臭氧可能处于过量状态,因此尽管COD去除负荷较高,但臭氧反应效率较低。第II阶段大幅降低臭氧投加量和进水COD量比值后,COD去除负荷明显降低,同时臭氧反应效率提高。第III阶段臭氧投加量和进水COD量比值又有所提高,此时不仅COD去除负荷增加,且臭氧反应效率进一步提高,其原因可能是第III阶段进水中芳香族污染物减少,用于破坏不饱和结构的臭氧消耗减少,而用于矿化去除COD的臭氧消耗增加。可见,第III阶段运行既可以获得较低的出水COD浓度和较高的COD去除负荷,亦可以提高臭氧反应效率,有利于COD去除。

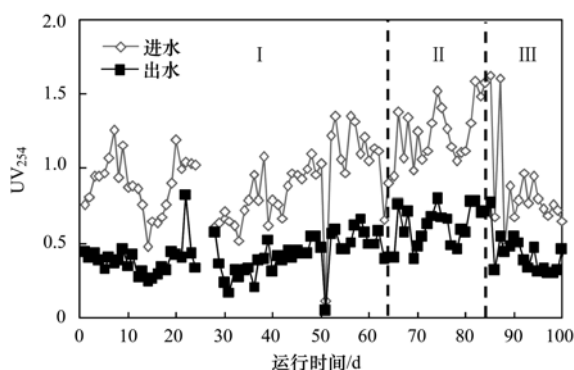


图2 微气泡臭氧催化氧化反应器(MOR)进出水 UV_{254} 值

Fig. 2 UV_{254} values of the influent and effluent of the microbubble catalytic ozonation reactor (MOR)

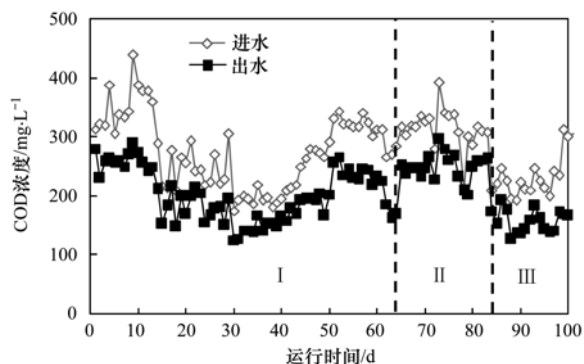


图4 微气泡臭氧催化氧化反应器 (MOR) 进出水 COD 浓度

Fig. 4 COD concentrations in the influent and effluent of the microbubble catalytic ozonation reactor (MOR)

2.1.3 氨氮和硝酸盐氮变化

微气泡臭氧催化氧化处理中,MOR 进出水氨氮浓度如图5所示. 可以看到,经过微气泡臭氧催化氧化处理后,MOR 第I阶段出水氨氮浓度显著高于进水氨氮浓度,进水氨氮平均浓度为 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水氨氮平均浓度为 $8.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;第II阶段出水氨氮平均浓度为 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,仍然高于进水氨氮平均浓度 $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;第III阶段进出水氨氮平均浓度分别为 $5.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进水浓度略高于出水浓度.

微气泡臭氧催化氧化处理中,MOR 进出水硝酸盐氮浓度如图6所示. 可以看到,经过微气泡臭氧催化氧化处理后,MOR 出水硝酸盐氮浓度均高于进水硝酸盐氮浓度. 第I阶段进出水硝酸盐氮平均浓度分别为 $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;第II阶段进出水硝酸盐氮平均浓度分别为 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;第III阶段进出水硝酸盐氮平均浓度分别为 $10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $13.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

MOR 进出水氨氮和硝酸盐氮浓度变化表明,废水中存在的含氮芳香族难降解污染物,在微气泡臭氧催化氧化处理中氧化降解,氨氮和硝酸盐氮亦随之释放,使得出水氨氮和硝酸盐氮浓度增加. 同时,部分氨氮被臭氧氧化为硝酸盐氮^[9, 13],亦使得出水硝酸盐氮浓度增量高于氨氮.

2.1.4 出水 DO 浓度

微气泡臭氧催化氧化处理后,MOR 出水 DO 浓度如图7所示. 可以看到,MOR 第I阶段出水 DO 浓度稳定保持在较高水平,出水平均 DO 浓度为 $23.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 第II、III阶段出水 DO 浓度明显下降,平均出水 DO 浓度分别为 $15.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $12.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 臭氧气体中携带的氧气向液相传质以及臭氧反应后产生的氧分子,是出水中 DO 的主要来源.

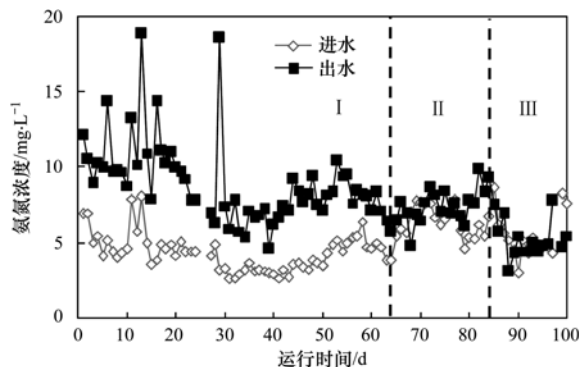


图5 微气泡臭氧催化氧化反应器 (MOR) 进出水氨氮浓度

Fig. 5 Ammonia concentrations in the influent and effluent of the microbubble catalytic ozonation reactor (MOR)

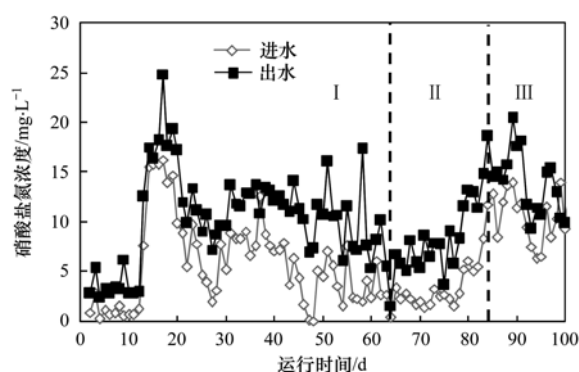


图6 微气泡臭氧催化氧化反应器 (MOR) 进出水硝酸盐氮浓度

Fig. 6 Nitrate nitrogen concentrations in the influent and effluent of the microbubble catalytic ozonation reactor (MOR)

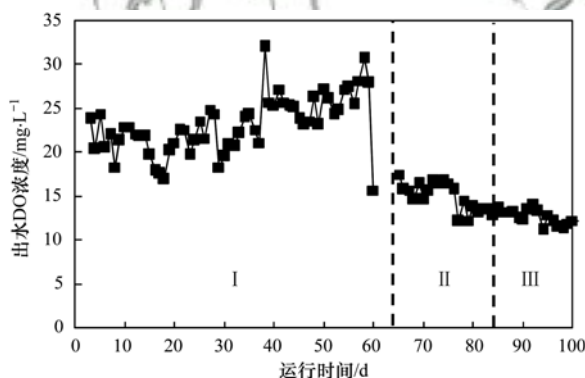


图7 微气泡臭氧催化氧化反应器 (MOR) 出水 DO 浓度

Fig. 7 DO concentrations in the effluent of the microbubble catalytic ozonation reactor (MOR)

第II、III阶段臭氧投加量降低,造成出水 DO 浓度下降. 微气泡臭氧催化氧化处理出水保持较高的 DO 浓度,有利于后续生化处理.

2.1.5 臭氧利用率

臭氧利用率是评价臭氧氧化处理性能的重要指标,可根据臭氧投加量、液相臭氧浓度和臭氧散逸量计算处理过程中臭氧利用率^[14]. 对连续稳定运行过程中 MOR 出水混合物中液相臭氧浓度和气相

散逸臭氧量进行检测,结果表明,第 I 阶段出水混合物中气相臭氧浓度为 $2.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,液相臭氧浓度为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;第 II 阶段出水混合物中气相臭氧浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,液相臭氧浓度为 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;第 III 阶段出水混合物中气相臭氧浓度为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,液相臭氧浓度为 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

根据式(1)计算臭氧利用率,第 I、II、III 阶段的臭氧利用率分别为 94.2%、99.5% 和 98.0%。可见,采用微气泡催化臭氧化可获得极高的臭氧利用率。由于第 I 阶段臭氧投加量较大,臭氧处于过量状态,出水混合物中臭氧残留较高,臭氧利用率相对较低;第 II、III 阶段降低臭氧投加量后,臭氧反应较为充分,臭氧利用率接近 100%。

$$R = \frac{Q_D - C_G V_G - C_L V_L}{Q_D} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R 为臭氧利用率; Q_D 为臭氧投加量 ($\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$); C_G 为散逸气相臭氧浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V_G 为散逸气相臭氧流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$); C_L 为出水液相臭氧浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V_L 为出水流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)。

2.2 生化处理性能

2.2.1 COD 去除性能

生化处理过程中,BR 进出水 COD 浓度如图 8 所示。由于微气泡臭氧催化氧化可显著改善废水可生化性,因此 BR 表现出良好的 COD 去除性能。第 I 阶段运行 20 d 后,随着生物膜生长成熟,COD 去除性能趋于稳定,出水平均 COD 浓度为 $103.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 COD 去除负荷为 $0.26 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。第 II 阶段出水平均 COD 浓度为 $138.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 COD 去除负荷为 $0.26 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。第 III 阶段出水平均 COD 浓度为 $91.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 COD 去除负荷为 $0.27 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。可见,3 个运行阶段 BR 对 COD 去除性能基本保持稳定,不同臭氧投加量和进水 COD 量比值条件下均可有效改善废水可生化性,同时 MOR 出水混合物中的臭氧残留不会对生化处理造成明显影响。

2.2.2 氨氮和 TN 去除性能

微气泡臭氧催化氧化处理后氨氮浓度升高,生化处理可实现对氨氮的有效去除,BR 进出水氨氮浓度如图 9 所示。第 I 阶段进水平均氨氮浓度分别为 $8.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 52.9%。第 II 阶段进水平均氨氮浓度分别为 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 47.2%。第 III 阶段进水平均氨氮浓度分别为 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率为 35.5%。可见,3 个运行阶段

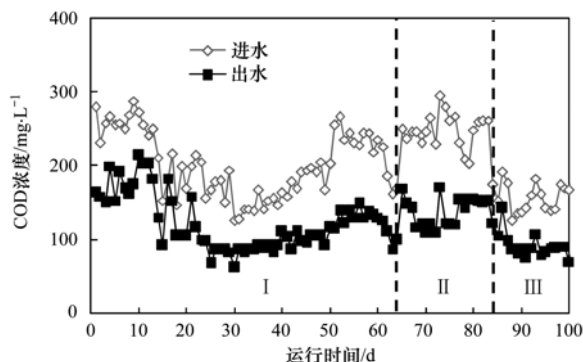


图 8 生化反应器 (BR) 进出水 COD 浓度

Fig. 8 COD concentrations in the influent and effluent of the biological reactor (BR)

进水氨氮浓度逐渐降低,BR 对氨氮去除率亦有所下降,但出水氨氮浓度基本保持稳定,氨氮在 BR 中能够得到有效去除。

3 个阶段系统进水 TN 浓度分别为 13.3 、 14.6 和 $7.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。微气泡臭氧催化氧化处理对 TN 没有去除作用,出水 TN 浓度与进水 TN 浓度基本一致。生化处理后出水 TN 浓度略有降低,3 个阶段出水平均 TN 浓度分别为 11.2 、 12.3 和 $7.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。生化处理中 TN 去除主要依靠硝化反硝化过程,考虑到 BR 中高 DO 浓度不利于形成反硝化环境,因此 TN 去除有限,细胞同化作用可能是 TN 去除的主要原因。

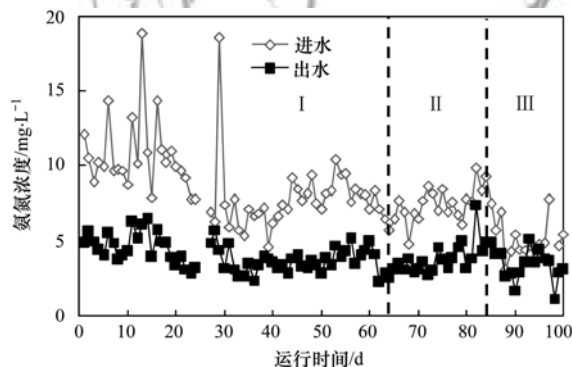


图 9 生化反应器 (BR) 进出水氨氮浓度

Fig. 9 Ammonia concentrations in the influent and effluent of the biological reactor (BR)

2.2.3 UV_{254} 去除

生化处理过程中,BR 进出水 UV_{254} 值如图 10 所示。从中可见,经过生化处理后,BR 出水 UV_{254} 值进一步降低。第 I 阶段进水平均 UV_{254} 值分别为 0.41 和 0.28;第 II 阶段进水平均 UV_{254} 值分别为 0.63 和 0.40;第 III 阶段进水平均 UV_{254} 值分别为 0.41 和 0.30。可见,生化处理能够进一步去除微气泡臭氧催化氧化处理后剩余复杂结构有机物,但去

除效率相对较低。

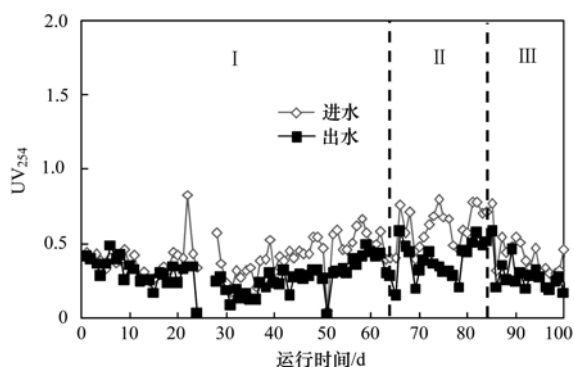


图 10 生化反应器 (BR) 进出水 UV_{254} 值

Fig. 10 UV_{254} values of the influent and effluent of the biological reactor (BR)

2.2.4 出水 DO 浓度和可生化性

生化处理过程中,对 BR 出水 DO 浓度进行检测。结果表明,第 I、II、III 阶段 BR 出水平均 DO 浓度分别为 26.5、19.1 和 14.2 $mg \cdot L^{-1}$,甚至高于 BR 进水(即 MOR 出水)平均 DO 浓度。其原因是 MOR 出水混合物中所含氧气在 BR 中继续向液相传质,使得 DO 浓度持续升高,同时 BR 中 COD 和氨氮去除负荷相对较低,DO 消耗量少,从而造成 BR 出水 DO 浓度高于进水。这一结果表明,BR 中能够保持较高 DO 浓度,满足好氧生化处理需要,无需通过曝气提供 DO。

对 MOR 进水、MOR 出水(即 BR 进水)和 BR 出水 B/C 值进行测定(以第 III 阶段运行为例),结果表明,其 B/C 值分别为 0.069、0.31 和 0.098。可见,MOR 处理后废水可生化性显著提高,而 BR 处理后废水可生化性又明显降低。同时,在第 III 阶段将 BR 进水 COD 负荷增加 1 倍,此时,BR 出水平均 COD 浓度为 98.3 $mg \cdot L^{-1}$,平均 COD 去除负荷亦基本增加 1 倍至 0.50 $kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$,而 COD 去除率与较低进水 COD 负荷时基本相当。可见,MOR 改善废水可生化性是决定 BR 中 COD 去除性能的关键因素,MOR 处理后可生物降解 COD 在 BR 中可高效去除,而 BR 处理后废水可生化性降低是影响其 COD 进一步去除的主要原因。

2.3 系统整体处理性能

总体而言,微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺能够对煤化工废水生化出水进行有效深度处理;耦合工艺臭氧利用率高,无需对臭氧尾气进行处理,生化处理阶段无需曝气,大大降低动力消耗,有利于降低处理成本。第 III 阶段系统整体处理性能较好。MOR 中 COD 去除率可以达到 42.5%,臭氧消耗量

与 COD 去除量比值为 1.38 $mg \cdot mg^{-1}$,臭氧利用率可以达到 98.0%。BR 中 COD 去除率可以达到 42.3%,同时氨氮得到有效去除。系统整体 COD 去除率为 66.7%,最终出水 COD 浓度可降至 100 $mg \cdot L^{-1}$ 以下。考虑整体进水 COD 量和 COD 去除率,可估算耦合工艺整体臭氧消耗量与 COD 去除量比值为 0.68 $mg \cdot mg^{-1}$ 。同时,第 III 阶段运行方式可以对 BR 出水中剩余难降解有机污染物进行进一步处理,从而具有进一步改善最终出水水质的潜力,但系统的处理能力亦会相应降低。

3 结论

(1)采用微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺对煤化工废水生化出水进行深度处理,微气泡臭氧催化氧化能够有效降解废水中难降解含氮芳香族污染物,去除部分 COD 并释放氨氮,显著提高废水可生化性,臭氧利用率接近 100%,无需对臭氧尾气进行处理;同时为生化处理提供充足 DO,实现生化处理对 COD 和氨氮的进一步有效去除,生化处理无需曝气。

(2)在系统出水回流比为 30%、臭氧投加量和进水 COD 量之比为 0.44 $mg \cdot mg^{-1}$ 的运行条件下,系统综合处理性能较好。MOR 中 COD 去除率为 42.5%,臭氧消耗量与 COD 去除量比值为 1.38 $mg \cdot mg^{-1}$,臭氧利用率为 98.0%;BR 中 COD 去除率为 42.3%;系统整体 COD 去除率为 66.7%,最终平均出水 COD 浓度为 91.5 $mg \cdot L^{-1}$,估算整体臭氧消耗量与 COD 去除量比值为 0.68 $mg \cdot mg^{-1}$,具有较优的技术经济性能。

参考文献:

- [1] Huang Y, Hou X L, Liu S T, *et al.* Correspondence analysis of bio-refractory compounds degradation and microbiological community distribution in anaerobic filter for coking wastewater treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **304**: 864-872.
- [2] Yu X B, Wei C H, Wu H Z, *et al.* Improvement of biodegradability for coking wastewater by selective adsorption of hydrophobic organic pollutants[J]. Separation and Purification Technology, 2015, **151**: 23-30.
- [3] Wei X X, Zhang Z Y, Fan Q L, *et al.* The effect of treatment stages on the coking wastewater hazardous compounds and their toxicity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **239-240**: 135-141.
- [4] 徐春艳, 韩洪军, 姚杰, 等. 煤化工废水处理关键问题解析及技术发展趋势[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(22): 78-80. Xu C Y, Han H J, Yao J, *et al.* Analysis on key problems in coal gasification wastewater treatment and its technology development tendency[J]. China Water & Wastewater, 2014,

- 30(22): 78-80.
- [5] Lai P, Zhao H Z, Wang C, *et al.* Advanced treatment of coking wastewater by coagulation and zero-valent iron processes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **147**(1-2): 232-239.
- [6] Yang W L, Li X C, Pan B C, *et al.* Effective removal of effluent organic matter (EfOM) from bio-treated coking wastewater by a recyclable aminated hyper-cross-linked polymer [J]. *Water Research*, 2013, **47**(13): 4730-4738.
- [7] 韩洪军, 侯保林, 贾胜勇, 等. 响应面法优化电 Fenton 深度处理煤化工废水[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, **47**(6): 45-49.
- Han H J, Hou B L, Jia S Y, *et al.* Optimization of electro-Fenton in the advanced treatment of coal chemical industry wastewater by response surface methodology [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, **47**(6): 45-49.
- [8] Zhu X B, Tian J P, Liu R, *et al.* Optimization of Fenton and electro-Fenton oxidation of biologically treated coking wastewater using response surface methodology [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, **81**(3): 444-450.
- [9] 韩洪军, 庄海峰, 赵茜, 等. 非均相催化臭氧处理煤化工生化出水[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, **46**(6): 50-54.
- Han H J, Zhuang H F, Zhao Q, *et al.* Research on heterogeneous catalytic ozonation of coal chemical industry wastewater secondary effluent[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, **46**(6): 50-54.
- [10] 李海涛, 李玉平, 张安洋, 等. 新型非均相电-Fenton 技术深度处理焦化废水[J]. *环境科学*, 2011, **32**(1): 171-178.
- Li H T, Li Y P, Zhang A Y, *et al.* Advanced treatment of coking wastewater with a novel heterogeneous electro-Fenton technology[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 171-178.
- [11] Sangave P C, Gogate P R, Pandit A B. combination of ozonation with conventional aerobic oxidation for distillery wastewater treatment[J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(1): 32-41.
- [12] Di Iaconi C, Del Moro G, De Sanctis M, *et al.* A chemically enhanced biological process for lowering operative costs and solid residues of industrial recalcitrant wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2010, **44**(12): 3635-3644.
- [13] Zhang S H, Zheng J, Chen Z Q. combination of ozonation and biological aerated filter (BAF) for bio-treated coking wastewater [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, **132**: 610-615.
- [14] Chu L B, Xing X H, Yu A F, *et al.* Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(10): 1854-1860.
- [15] Chu L B, Xing X H, Yu A F, *et al.* Enhanced treatment of practical textile wastewater by microbubble ozonation [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2008, **86**(5): 389-393.
- [16] 张静, 杜亚威, 刘晓静, 等. 臭氧微气泡处理酸性大红 3R 废水特性研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 584-589.
- Zhang J, Du Y W, Liu X J, *et al.* Characteristics of acid red 3R wastewater treatment by ozone Microbubbles[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 584-589.
- [17] Zheng T L, Wang Q H, Zhang T, *et al.* Microbubble enhanced ozonation process for advanced treatment of wastewater produced in acrylic fiber manufacturing industry[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **287**: 412-420.
- [18] 张静, 杜亚威, 茹星瑶, 等. pH 对微气泡臭氧氧化处理染料废水影响[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(2): 147-153.
- Zhang J, Du Y W, Ru X Y, *et al.* Effect of pH on microbubble ozonation treatment of dyeing wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(2): 147-153.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] Bader H, Hoigné J. Determination of ozone in water by the indigo method[J]. *Water Research*, 1981, **15**(4): 449-456.
- [21] 美国公共卫生协会, 美国自来水厂协会, 水污染控制联合会. 水和废水标准检验法[M]. (第十五版). 宋仁元, 张亚杰, 王唯一, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985. 368-370.
- [22] 任源, 韦朝海, 吴超飞, 等. 生物流化床 A/O² 工艺处理焦化废水过程中有机组分的 GC/MS 分析[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(11): 1785-1791.
- Ren Y, Wei C H, Wu C F, *et al.* Organic compounds analysis by GC/MS during the biological fluidized bed A/O² process of coking wastewater[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(11): 1785-1791.
- [23] Santos D C, Silva L, Albuquerque A, *et al.* Biodegradability enhancement and detoxification of cork processing wastewater molecular size fractions by ozone[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **147**: 143-151.
- [24] Gomes A C, Silva L, Simões R, *et al.* Toxicity reduction and biodegradability enhancement of cork processing wastewaters by ozonation[J]. *Water Science & Technology*, 2013, **68**(10): 2214-2219.
- [25] He Y Z, Wang X J, Xu J L, *et al.* Application of integrated ozone biological aerated filters and membrane filtration in water reuse of textile effluents[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **133**: 150-157.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)