ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双效期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第7期
2016年7月15日

目 次

2015年北京市两次红色预警期间 $PM_{2.5}$ 浓度特征 …… 程念亮,张大伟,陈添,石爱军,孙峰,刘保献,邹本东,王琴,李倩,王小菊,姜磊,孟凡(2409)
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 $PM_{2.5}$ 变化特征对气象因素的响应 …… 张南,熊黑钢,葛秀秀,段鹏程,毛先如,王亚龙(2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 …… 李英红,饶志国,谭吉华,段菁春,马永亮,贺克斌(2428)
南京北郊冬季 $PM_{2.5}$ 中芳香酸的测定及来源解析 …… 张亚飞,马嫣,亓鲁,王振,王利朋,朱麟(2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 …… 孔亚文,盛立芳,刘骞,李秀镇(2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 …… 杨春,塔西甫拉提·特依拜,侯艳军,高宇潇,刘芳,夏楠(2453)
重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 …… 温艳茹,王建力(2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因子分析 …… 徐敬争,肖薇,肖启涛,王伟,温学发,胡诚,刘诚,刘寿东,李旭辉(2470)
河水-地下水侧向交互带地球化学特征:以重庆市马鞍溪为例 …… 张宇,杨平恒,王建力,谢世友,陈峰,詹兆君,任娟,张海月,刘黛薇,孟元可(2478)
亚热带典型岩溶溪流水气界面 CO_2 交换通量变化过程及其环境影响 …… 李丽,蒲俊兵,李建鸿,于奭,肖琼,张陶(2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征:紫外-可见吸收光谱 …… 梁俭,江韬,卢松,魏世强,王定勇,陈雪霜,王齐磊(2496)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征:荧光光谱 …… 梁俭,江韬,卢松,魏世强,王定勇,陈雪霜,王齐磊(2506)
华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 …… 金磊,姜蕾,韩琪,薛佳怡,叶辉,曹国民,林匡飞,崔长征(2515)
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 …… 张华方,杨军,杜鹏,王琮淙,李喜青(2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 …… 昌盛,赵兴茹,付青,郭睿,王山军(2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 …… 何明靖,李琦,赵佳渊,王登祥(2539)
岩溶地下河水中多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 …… 谢正兰,孙玉川,张媚,廖昱,江泽利,王尊波,梁作兵(2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 …… 孙夕涵,刘硕,万鲁河,王宏(2556)
降水对洋河水质和水体微生物的影响 …… 卢思丹,孙寓姣,赵轩,王蕾,郑丹阳(2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应 …… 王振红,张汉鹏,罗专溪(2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 …… 景瑞瑛,杨扬,戴玉女,万翔,邰义萍,樊静静(2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 …… 蔡广强,傅学敏,刘丽君,卢小艳,张金松,刘嘉祺,曲莹(2586)
活性炭负载 Co_3O_4 活化过一硫酸盐降解金橙 G …… 王忠明,陈家斌,张黎明,李文卫,黄天寅(2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙 G 过程及动力学 …… 张黎明,陈家斌,李文卫,王忠明,黄天寅(2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 …… 邓飞,唐柏彬,张进忠,汤民,刘江(2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中 AOX、色度和 TOC 的去除效果研究 …… 舒小铭,徐灿灿,文晓刚,朱静娜,赵远,刘锐,陈吕军(2618)
Fenton 氧化去除制药企业活性污泥中 AOX 的效果研究 …… 陈思,徐灿灿,刘锐,李国华,陈吕军,郑炜(2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 …… 刘春,张晶,张静,陈晓轩,张磊,曹丽亚(2632)
基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究 …… 鲍林林,陈婉秋(2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 …… 李祥,马航,黄勇,朱亮,杨朋兵,朱强(2646)
基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 …… 陈重军,张海芹,汪瑶琪,喻徐良,王建芳,沈耀良(2652)
NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 …… 汪龙眠,仇皓雨,车昱晓,张松贺,郭照冰,张毅敏(2659)
葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 …… 程鹏飞,王艳,杨期勇,汤明,刘天中(2666)
拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 …… 颜薇芝,郝健,孙俊松,史吉平(2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 $SLWX_2$ 的筛选及脱氮特性 …… 成钰,李秋芬,费聿涛,张艳(2681)
焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 …… 徐伟超,蒙小俊,尹莉,张玉秀,李海波,曹宏斌(2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 …… 戴文芳,阳石页,阙治家,熊金波(2696)
磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 …… 左易灵,贺学礼,王少杰,赵丽莉(2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 …… 赵慢,王蕊,李如剑,杜兰兰,吴得峰,孙棋棋,高鑫,郭胜利(2714)
三峡库区消落带 N_2O 排放及其影响因素 …… 李睿,雷利国,江长胜,柴雪思,黄哲,范志伟,郝庆菊(2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N_2O 排放研究 …… 高雪梅,佘冬立,颜晓元,夏永秋(2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 …… 易建婷,杨雨洽,张成,陈宏,赵秀兰,木志坚(2738)
藏东南色季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 …… 罗东霞,张淑娟,杨瑞强(2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 …… 宋志廷,赵玉杰,周其文,刘潇威,张铁亮(2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 …… 丁长欢,王莲阁,唐江,慈恩,谢德体(2763)
减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应 …… 韩晓飞,高明,谢德体,王子芳,陈晨(2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 …… 杜光辉,饶伟,李鑫,张亚楠,王代长,杨军,化党领,刘世亮,李培培,刘红恩(2779)
组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较 …… 吴玉俊,周航,杨文弢,邹紫今,朱维,辜娇峰,彭佩钦,张平,曾敏,廖柏寒(2791)
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 …… 商儒,朱能武,康乃馨,石超宏(2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ-Fe_2O_3 及其 NH_3-SCR 活性探究 …… 徐彬,陈天虎,刘海波,朱承驻,陈冬,邹雪华,蒋阳(2807)
《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估

刘春,张晶,张静,陈晓轩,张磊,曹丽亚
(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: 运行中试规模微气泡曝气生物膜反应器处理校园生活污水,对其运行性能进行评估,并与传统生物处理工艺比较. 结果表明,采用中试系统处理校园生活污水原水时,平均 COD 去除率和去除负荷分别为 57.0% 和 2.68 kg·(m^3·d)$^{-1}$,平均氨氮去除率和去除负荷分别为 17.4% 和 0.17 kg·(m^3·d)$^{-1}$,平均 TN 去除率和去除负荷分别为 15.8% 和 0.21 kg·(m^3·d)$^{-1}$,平均氧利用率达到 100%. 采用中试系统处理可生化性较差的生物接触氧化池出水,平均 COD 去除率和去除负荷分别为 46.0% 和 1.53 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均氨氮去除率和去除负荷分别为 17.1% 和 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均 TN 去除率和去除负荷分别为 14.1% 和 0.28 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均氧利用率高于 50%. 由于微气泡曝气能够加速氧传质过程并提高氧利用率,因此相同进水条件下,中试系统污染物去除能力显著优于传统生物接触氧化工艺和传统曝气生物滤池工艺.

关键词:微气泡曝气; 生物膜反应器; 中试规模; 性能评估; OHR 混合器
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)07-2632-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.07.028

Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor

LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, CHEN Xiao-xuan, ZHANG Lei, CAO Li-ya
(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: A pilot-scale microbubble-aerated biofilm reactor was operated to treat campus domestic wastewater and its performance was evaluated and compared with conventional biological treatment processes. The results indicated that when the raw campus domestic wastewater was treated in the pilot system, the average COD removal efficiency and loading rate removed were 57.0% and 2.68 kg·(m^3·d)$^{-1}$; the average ammonia nitrogen removal efficiency and loading rate removed were 17.4% and 0.17 kg·(m^3·d)$^{-1}$; the average total nitrogen (TN) removal efficiency and loading rate removed were 15.8% and 0.21 kg·(m^3·d)$^{-1}$; and the average oxygen utilization efficiency reached 100%. When the effluent of biological contact oxidation tank with poor biodegradability was treated in the pilot system, the average COD removal efficiency and loading rate removed were 46.0% and 1.53 kg·(m^3·d)$^{-1}$; the average ammonia nitrogen removal efficiency and loading rate removed were 17.1% and 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$; the average total nitrogen (TN) removal efficiency and loading rate removed were 14.1% and 0.28 kg·(m^3·d)$^{-1}$; and the average oxygen utilization efficiency was higher than 50%. Furthermore, the contaminant removal performance of the pilot system was much more efficient than conventional biological contact oxidation tank and biological aeration filter tank with the same influent quality, since oxygen transfer and oxygen utilization could be enhanced by microbubble aeration.

Key words: microbubble aeration; biofilm reactor; pilot scale; performance evaluation; OHR mixer

微气泡(一般直径小于 50 μm)技术具有促进气液传质和提高污染物去除性能的潜在优势,在环境污染控制领域日益受到关注[1~4],其中微气泡臭氧氧化去除难降解污染物是研究热点之一[5~8]. 微气泡曝气技术在废水生物处理中的应用亦受到重视[9, 10],基于 SPG 膜微气泡曝气的生物膜反应器能够实现连续稳定运行,并具有较好的污染物去除性能和极高的氧利用率[11~14]. 但目前微气泡曝气生物膜反应器的研究仍限于实验室规模和处理模拟生活污水,难以对其实际应用的运行性能进行有效评估,因此需构建中试规模微气泡曝气生物膜反应器并研究其处理实际生活污水的运行性能.

由于 SPG(shirasu porous glass)膜曝气量的限制和存在膜污染现象[15,16],难以应用于较大规模处理系统. OHR(original hydrodynamic reaction)混合器微气泡曝气系统具有曝气量大、不堵塞、免维护等优点,适用于规模化废水处理系统. 因此,本研究率先采用 OHR 混合器微气泡曝气系统,搭建了中试规模微气泡曝气生物膜反应器,对实际校园生活污水进行处理.

本研究采用 2 种策略运行中试规模微气泡曝气生物膜反应器,考察中试系统污染物去除性能和氧利用率,并与传统废水生物处理工艺(生物接触氧化工艺和曝气生物滤池工艺)进行比较,评估中试系统的运行性能,以期为微气泡曝气生物膜反应器

收稿日期: 2016-01-24; **修订日期**: 2016-02-29
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@hebust.edu.cn

在废水好氧生物处理中的实际应用提供参考.

1　材料与方法

1.1　实验装置

中试规模微气泡曝气生物膜反应器系统如图 1 所示. 系统采用 OHR 混合器(MX-F40, OHR Laboratory Corporation,日本)微气泡发生装置进行微气泡曝气. 中试反应器高、直径和有效容积分别为 3.15 m、1.25 m 和 4.0 m^3. 反应器内安装普通悬挂弹性纤维填料,如图 1 所示,共计 1 750 片. 反应器接种市政污水处理厂活性污泥,接种初始污泥浓度约为 0.35 $g\cdot L^{-1}$,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.

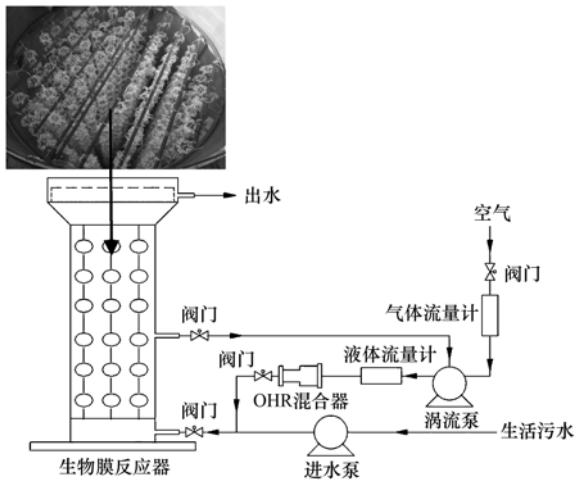

图 1　中试系统实验装置示意

Fig. 1　Pilot system with OHR microbubble aeration system

1.2　运行策略及运行条件

中试规模微气泡曝气生物膜反应器建设于校园污水处理站,处理校园生活污水. 校园污水处理站处理规模 2 800 $m^3\cdot d^{-1}$,包括 2 个传统生物处理单元,分别为:①二级生物处理——生物接触氧化池,安装与中试系统相同填料,处理校园污水原水;②深度生物处理——曝气生物滤池,铺设 2 m 陶粒滤床,进一步处理生物接触氧化池出水.

中试规模微气泡曝气生物膜反应器先后采用 2 种运行方式,分别处理校园污水原水和生物接触氧化池出水,并与校园污水处理站传统生物处理工艺进行比较,以评估其在二级生物处理和深度生物处理中的运行性能. 中试系统运行方式 1 和运行方式 2 的水质条件和运行条件如表 1 和表 2 所示. 可以看到,校园生活污水原水 COD 浓度较高,可生化性较好,BOD_5/COD 可以达到 0.455;生物接触氧化池出水 COD 浓度降低,且可生化性变差,BOD_5/COD 仅为 0.131.

表 1　中试系统运行方式 1 与生物接触氧化池运行条件

Table 1　Operating conditions of pilot plant and biological contact oxidation tank in operation strategy 1

项目	中试系统	生物接触氧化池
处理对象	校园生活污水原水	
水力停留时间(HRT)/h	2	7.2
处理能力/$m^3\cdot d^{-1}$	48	2 800
平均进水 COD 浓度/$mg\cdot L^{-1}$	382.3	
进水平均 COD 负荷/$kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$	4.58	1.27
平均进水氨氮浓度/$mg\cdot L^{-1}$	80.3	
BOD_5/COD	0.455	

表 2　中试系统运行方式 2 与曝气生物滤池的运行条件

Table 2　Operating conditions of pilot plant and biological aeration filter tank in operation strategy 2

项目	中试系统	曝气生物滤池
处理对象	生物接触氧化池出水	
水力停留时间(HRT)/h	1.0	2.0
处理能力/$m^3\cdot d^{-1}$	144	2 800
平均进水 COD 浓度/$mg\cdot L^{-1}$	138.3	
进水平均 COD 负荷/$kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$	3.32	1.66
平均进水氨氮浓度/$mg\cdot L^{-1}$	76.9	
BOD_5/COD	0.131	

1.3　指标检测方法

COD、氨氮均采用国标方法测定[17];TN 采用 TOC 分析仪(TOC-VCPN,岛津,日本)测定;溶解氧(DO)采用便携式溶解氧测定仪(WTW cellOx 325, WTW,德国)测定. 生物膜耗氧速率(OUR)测定,包括碳氧化活性和硝化活性参见文献[18,19].

2　结果与讨论

2.1　中试系统运行方式 1 的运行性能

2.1.1　DO 浓度

中试系统在运行方式 1 下反应器底部、中部和上部的日均 DO 浓度如图 2 所示. 整个运行过程中,中试系统底部、中部和上部的平均 DO 浓度分别为 5.33、3.18 和 2.94 $mg\cdot L^{-1}$. 底部进水与微气泡充分接触,DO 浓度最高;随着上升过程中 COD 和氨氮去除对 DO 的消耗,DO 浓度降低. 中部和上部 DO 浓度基本相当,表明反应器内污染物好氧降解可能主要在中下部进行.

2.1.2　COD 去除性能

运行方式 1 条件下,中试系统和生物接触氧化池进出水 COD 浓度如图 3 所示,COD 去除负荷如图 4 所示. 可以看到,进水平均 COD 浓度为 382.3

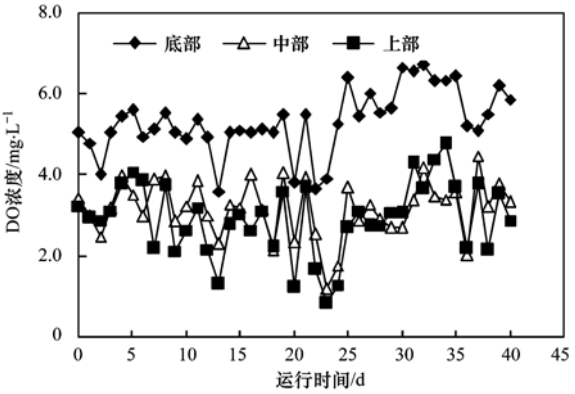

图 2 运行方式 1 下中试系统溶解氧(DO)浓度随时间的变化

Fig. 2 Variation of dissolved oxygen (DO) concentration with time in the pilot system in operation strategy 1

mg·L^{-1},中试系统出水 COD 平均浓度为 159.1 mg·L^{-1},COD 平均去除率和去除负荷分别为 57.0% 和 2.68 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 生物接触氧化池出水 COD 浓度、COD 去除率和去除负荷分别为 144.3 mg·L^{-1}、62.3% 和 0.79 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 可见,尽管中试系统 HRT 较短,进水负荷较高,但其 COD 去除效果与生物接触氧化池基本相当,而 COD 去除负荷约为生物接触氧化池的 3.4 倍,表明中试系统可以提供远高于传统生物处理工艺的 COD 去除能力.

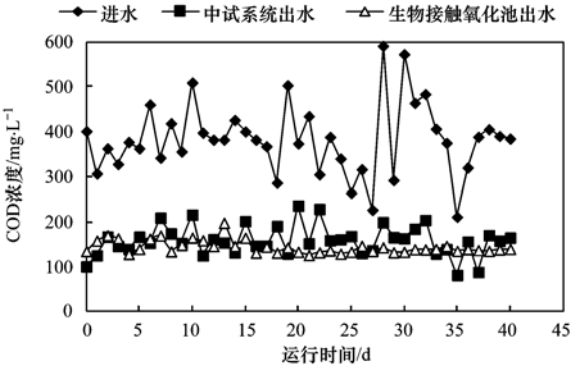

图 3 运行方式 1 条件下中试系统和生物接触氧化池进出水 COD 浓度

Fig. 3 COD concentrations in the influent and the effluent of the pilot system and biological contact oxidation tank in operation strategy 1

2.1.3 氨氮去除性能

运行方式 1 条件下,中试系统和生物接触氧化池进出水氨氮浓度如图 5 所示,氨氮去除负荷如图 6 所示. 进水氨氮平均浓度为 80.3 mg·L^{-1},中试系统出水氨氮平均浓度为 66.1 mg·L^{-1},氨氮平均去除率和去除负荷分别为 17.4% 和 0.17 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 生物接触氧化池对氨氮几乎没有去除,出水氨氮平均浓度为 81.0 mg·L^{-1}. 由于氨氮进水负荷较高,因此中试系统氨氮去除率较低,但去除负荷高于实验室规模微气泡曝气生物膜反应器[11~13].

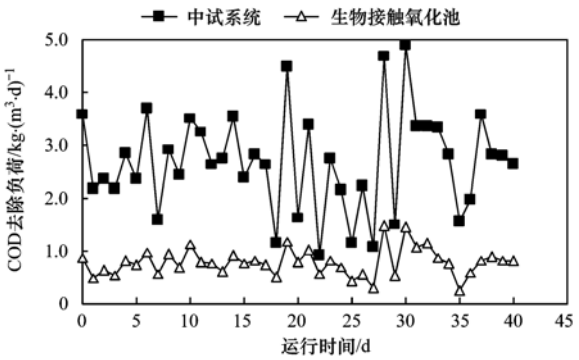

图 4 运行方式 1 条件下中试系统和生物接触氧化池 COD 去除负荷

Fig. 4 COD loading rate removed of the pilot system and biological contact oxidation tank in operation strategy 1

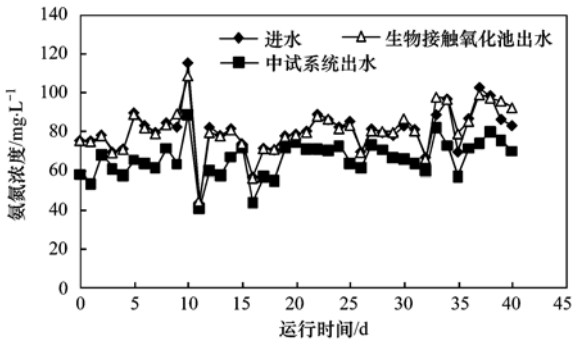

图 5 运行方式 1 条件下中试系统和生物接触氧化池进出水氨氮浓度

Fig. 5 Ammonia concentrations in the influent and the effluent of the pilot system and biological contact oxidation tank in operation strategy 1

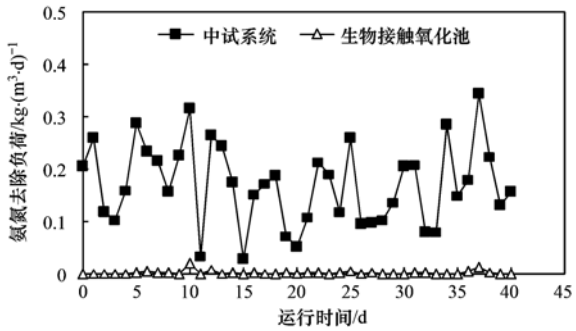

图 6 运行方式 1 条件下中试系统和生物接触氧化池氨氮去除负荷

Fig. 6 Ammonia loading rate removed of the pilot system and biological contact oxidation tank in operation strategy 1

2.1.4 总氮去除性能

运行方式 1 条件下,中试系统和生物接触氧化池进出水 TN 浓度如图 7 所示,TN 去除负荷如图 8

所示. 进水 TN 平均浓度为 110.7 mg·L^{-1},中试系统出水 TN 平均浓度为 92.8 mg·L^{-1},TN 平均去除率、去除负荷分别为 15.8% 和 0.21 kg·(m^3·d)$^{-1}$;生物接触氧化池出水 TN、TN 去除率和去除负荷分别为 86.97 mg·L^{-1}、20.7% 和 0.078 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 可见,中试系统反应器内存在同步硝化反硝化(SND)作用,实现了对 TN 的去除. 生物接触氧化池基本没有硝化作用,可能通过反硝化作用去除硝酸盐氮,实现总氮去除. 中试系统 TN 去除负荷更高,约为生物接触氧化池的 2.7 倍.

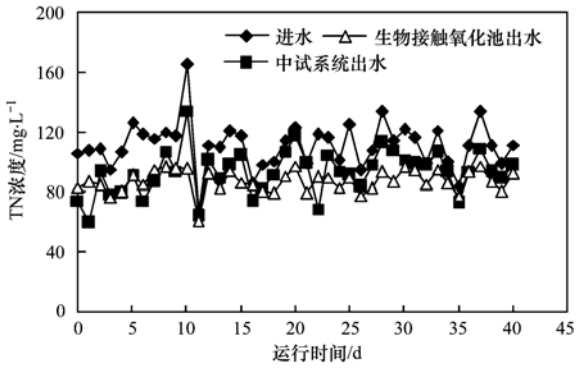

图 7　运行方式 1 条件下中试系统和生物接触氧化池进出水 TN 浓度

Fig. 7　TN concentrations in the influent and the effluent of the pilot system and biological contact oxidation tank in operation strategy 1

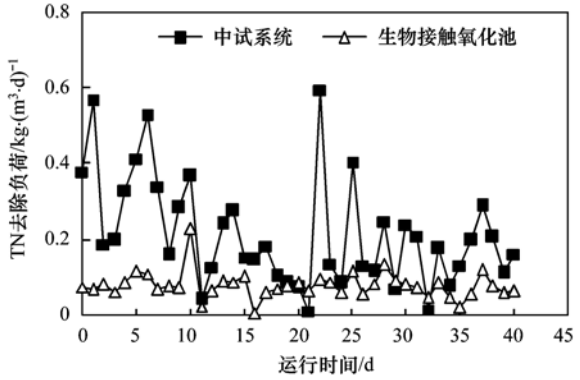

图 8　运行方式 1 条件下中试系统和生物接触氧化池 TN 去除负荷

Fig. 8　TN loading rate removed of the pilot system and biological contact oxidation tank in operation strategy 1

2.1.5　氧利用率情况

基于 COD 和氨氮的去除负荷,计算污染物去除所消耗的溶解氧量,同时计算微气泡曝气系统理论上的供氧量,在此基础上估算中试系统的氧利用率[11]. 运行方式 1 中,COD 和氨氮去除所消耗溶解氧量为 13.05 kg·d^{-1},微气泡曝气系统理论供氧量为 12.28 kg·d^{-1},以此估算中试系统氧利用率为 106.3%. 显然,基于污染物去除的氧利用率估算存在正偏差,其原因可能是除好氧代谢作用外,存在其他污染物去除过程,包括细胞同化作用、微型动物吞噬作用等. 尽管如此,中试系统氧利用率仍显著高于传统气泡曝气方式(<25%[20, 21]).

2.2　运行方式 2 的运行性能

2.2.1　DO 浓度

中试系统在运行方式 2 下反应器底部、中部和上部的日均 DO 浓度如图 9 所示. 运行过程中,中试系统底部、中部和上部的平均 DO 浓度分别为 4.54、4.39 和 4.40 mg·L^{-1}. 同样,中试系统底部 DO 浓度最高;中部和上部 DO 浓度几乎相同,且与底部 DO 浓度差异较小,整体 DO 浓度高于运行方式 1. 可见,运行方式 2 下污染物好氧降解亦主要发生在中下部,且由于进水负荷相对较低,因此反应器内 DO 浓度较高.

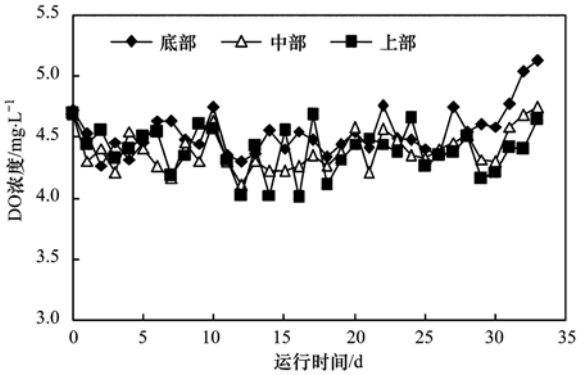

图 9　运行方式 2 下中试系统溶解氧(DO)浓度随时间的变化

Fig. 9　Variation of dissolved oxygen (DO) concentration with time in the pilot system in operation strategy 2

2.2.2　COD 去除性能

运行方式 2 条件下,中试系统和曝气生物滤池进出水 COD 浓度如图 10 所示,COD 去除负荷如图 11 所示. 进水 COD 平均浓度为 138.3 mg·L^{-1},中试系统出水 COD 平均浓度为 74.5 mg·L^{-1},COD 平均去除率、去除负荷分别为 46.0% 和 1.53 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 曝气生物滤池出水 COD、COD 去除率和去除负荷分别为 74.5 mg·L^{-1}、46.1% 和 0.77 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 可以看出,中试系统与曝气生物滤池对 COD 的去除效率几乎一致,但中试系统 HRT 较短,COD 去除负荷更高,约为曝气生物滤池的 2 倍. 中试系统在运行方式 2 中,COD 去除率和去除负荷均比运行方式 1 有明显下降,COD 处理能力降低,这主要是由于运行方式 2 进水为生物接触氧化池出水,可生化性较差.

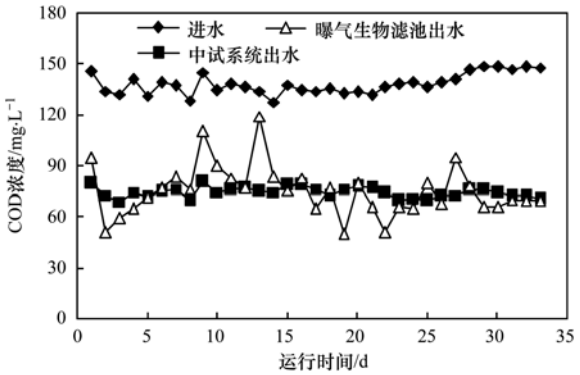

图 10 运行方式 2 条件下中试系统和曝气生物滤池进出水 COD 浓度

Fig. 10 COD concentrations in the influent and the effluent of the pilot system and biological aeration filter tank in operation strategy 2

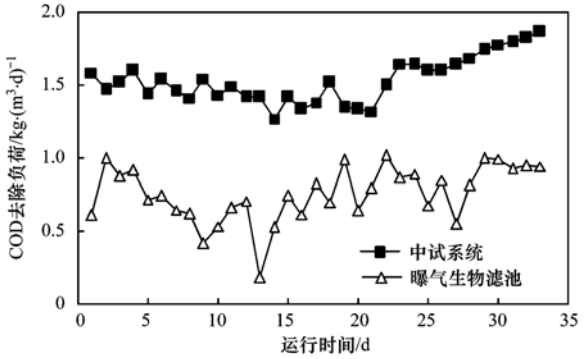

图 11 运行方式 2 条件下中试系统和曝气生物滤池 COD 去除负荷

Fig. 11 COD loading rate removed of the pilot system and biological aeration filter tank in operation strategy 2

2.2.3 氨氮去除性能

运行方式 2 条件下,中试系统和生物接触氧化池进出水氨氮浓度如图 12 所示,氨氮去除负荷如图 13 所示. 进水氨氮平均浓度为 76.9 mg·L^{-1},中试系统出水氨氮平均浓度为 63.8 mg·L^{-1},氨氮平均去除率、去除负荷分别为 17.1% 和 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 生物接触氧化池出水氨氮、氨氮去除率和去除负荷分别为 63.8 mg·L^{-1}、17.0% 和 0.16 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 和 COD 去除相似,中试系统和曝气生物滤池对氨氮的去除效果几乎一致,但中试系统氨氮去除负荷约为曝气生物滤池的 2 倍. 中试系统在运行方式 2 中,氨氮去除率与运行方式 1 相当,但氨氮去除负荷约为运行方式 1 的 1.9 倍. 这主要是由于运行方式 2 下 DO 浓度较高,且生物膜生物量较低(运行方式 2 约为 3.65 g·L^{-1},运行方式 1 下 >5.0 g·L^{-1}),有助于生物膜内 DO 扩散传质,

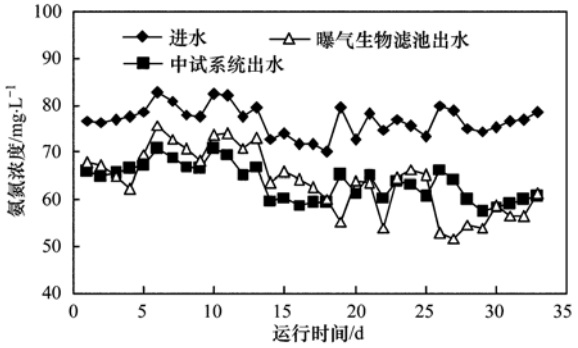

图 12 运行方式 2 条件下中试系统和曝气生物滤池进出水氨氮浓度

Fig. 12 Ammonia concentrations in the influent and the effluent of the pilot system and biological aeration filter tank in operation strategy 2

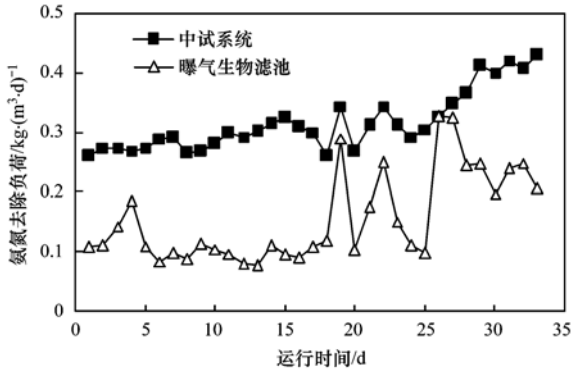

图 13 运行方式 2 条件下中试系统和曝气生物滤池氨氮去除负荷

Fig. 13 Ammonia loading rate removed of the pilot system and biological aeration filter tank in operation strategy 2

促进硝化作用进行.

2.2.4 总氮去除性能

运行方式 2 条件下,中试系统和生物接触氧化池进出水 TN 浓度如图 14 所示,TN 去除负荷如图

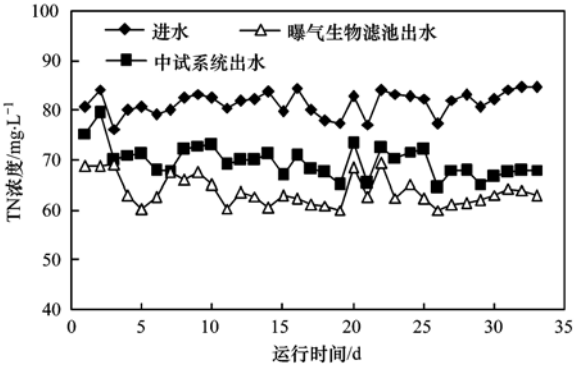

图 14 运行方式 2 条件下中试系统和曝气生物滤池进出水 TN 浓度

Fig. 14 TN concentrations in the influent and the effluent of the pilot system and biological aeration filter tank in operation strategy 2

15 所示. 进水 TN 平均浓度为 81.5 mg·L^{-1},中试系统出水 TN 平均浓度为 70.0 mg·L^{-1},TN 平均去除率、去除负荷分别为 14.1% 和 0.28 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 曝气生物滤池出水 TN、TN 去除率和去除负荷分别为 63.9 mg·L^{-1}、21.6% 和 0.21 kg·(m^3·d)$^{-1}$. 中试系统 TN 去除负荷仍高于曝气生物滤池,约为其 1.3 倍. 同时,中试系统内 DO 浓度较高且生物膜内 DO 传质较好,不利于反硝化作用进行,因此 TN 去除能力小于氨氮去除能力.

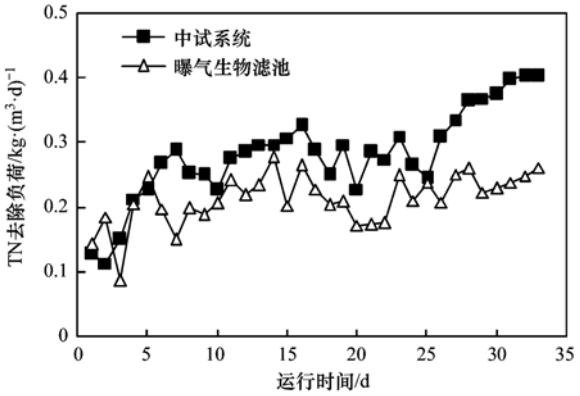

图 15　运行方式 2 条件下中试系统和曝气生物滤池 TN 去除负荷

Fig. 15　TN loading rate removed of the pilot system and biological aeration filter tank in operation strategy 2

2.2.5　生物活性

运行方式 2 中,测定中试系统运行中生物膜耗氧速率(OUR),以评价生物膜活性,结果如图 16 所示. 可以看到,运行过程中生物膜总氧化活性、碳氧化活性和硝化活性均呈现逐渐升高的趋势,运行至 28 d 以后趋于稳定,此时总氧化活性、碳氧化活性和硝化活性分别为 51.32、27.26 和 24.06 mg·(g·h)$^{-1}$. 中试系统生物膜生物活性逐渐升高的趋势与其运行过程中 COD、氨氮去除能力逐渐提高相一致.

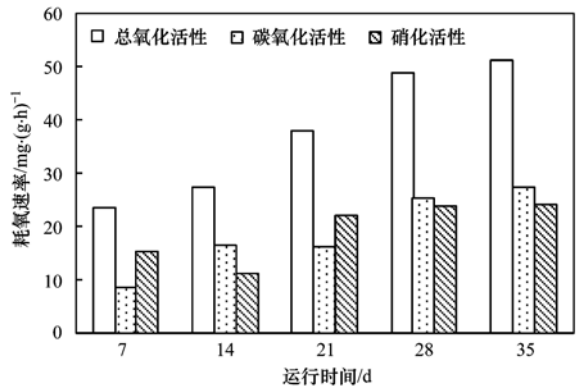

图 16　运行方式 2 下中试系统生物膜活性

Fig. 16　Development of biofilm bioactivity in the pilot system in operation strategy 2

2.2.6　氧利用率

运行方式 2 中,COD 和氨氮去除所消耗溶解氧量为 10.49 kg·d^{-1},微气泡曝气系统理论供氧量为 12.28 kg·d^{-1},以此估算中试系统氧利用率为 85.4%,低于运行方式 1. 进水的生物可降解性较差,COD 去除负荷较低,可能是运行方式 2 氧利用率较低的原因.

总体而言,微气泡曝气生物膜反应器中试系统能够加速氧传质过程并提高氧利用率,其对污染物的去除能力显著高于传统生物处理工艺.

3　结论

(1)采用中试规模微气泡曝气生物膜反应器处理校园生活污水原水,平均 COD 去除率和去除负荷分别为 57.0% 和 2.68 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均氨氮去除率和去除负荷分别为 17.4% 和 0.17 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均 TN 去除率和去除负荷分别为 15.8% 和 0.21 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均氧利用率达到 100%. 整体处理能力显著优于相同进水条件下传统生物接触氧化工艺.

(2)采用中试规模微气泡曝气生物膜反应器处理可生化性较差的生物接触氧化池出水,平均 COD 去除率和去除负荷分别为 46.0% 和 1.53 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均氨氮去除率和去除负荷分别为 17.1% 和 0.32 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均 TN 去除率和去除负荷分别为 14.1% 和 0.28 kg·(m^3·d)$^{-1}$; 平均氧利用率高于 50%. 整体处理能力显著优于相同进水条件下传统曝气生物滤池工艺.

参考文献:

[1] 张磊, 刘平, 刘春, 等. 微气泡及其在环境污染控制中的应用[J]. 河北工业科技, 2011, **28**(1): 59-63.

[2] Park J Y, Choi Y J, Moon S, *et al*. Microbubble suspension as a carrier of oxygen and acclimated bacteria for phenanthrene biodegradation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **163**(2-3): 761-767.

[3] Liu S, Wang Q H, Ma H Z, *et al*. Effect of micro-bubbles on coagulation flotation process of dyeing wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2010, **71**(3): 337-346.

[4] Agarwal A, Ng W J, Liu Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment[J]. Chemosphere, 2011, **84**(9): 1175-1180.

[5] 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.

[6] Ikeura H, Hamasaki S, Tamaki M. Effects of ozone microbubble treatment on removal of residual pesticides and quality of persimmon leaves[J]. Food Chemistry, 2013, **138**(1): 366-371.

[7] Khuntia S, Majumder S K, Ghosh P. Oxidation of As(Ⅲ) to As(Ⅴ) using ozone microbubbles[J]. Chemosphere, 2014, **97**: 120-124.

[8] 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.

[9] Rehman F, Medley G J D, Bandulasena H, *et al*. Fluidic oscillator-mediated microbubble generation to provide cost effective mass transfer and mixing efficiency to the wastewater treatment plants[J]. Environmental Research, 2015, **137**: 32-39.

[10] Terasaka K, Hirabayashi A, Nishino T, *et al*. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge[J]. Chemical Engineering Science, 2011, **66**(14): 3172-3179.

[11] Liu C, Tanaka H, Zhang J, *et al*. Successful application of Shirasu porous glass (SPG) membrane system for microbubble aeration in a biofilm reactor treating synthetic wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2013, **103**: 53-59.

[12] 张磊, 刘平, 马锦, 等. 基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2277-2282.

[13] 张明, 刘春, 张磊, 等. SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能研究——空气通量的影响[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(10): 4067-4073.

[14] 刘春, 年永嘉, 张静, 等. 微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2230-2235.

[15] Liu C, Tanaka H, Zhang L, *et al*. Fouling and structural changes of Shirasu porous glass (SPG) membrane used in aerobic wastewater treatment process for microbubble aeration[J]. Journal of Membrane Science, 2012, **421-422**: 225-231.

[16] 张静, 肖太民, 张晶, 等. SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1694-1699.

[17] 国家环境保护局. 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.

[18] 王建龙, 吴立波, 齐星, 等. 用氧吸收速率(OUR)表征活性污泥硝化活性的研究[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(3): 225-229.

[19] 刘春, 黄霞, 孙炜, 等. 基因工程菌生物强化 MBR 工艺处理阿特拉津试验研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 417-421.

[20] 何群彪, 刘坤, 屈计宁. 三种曝气器在染料化工废水中充氧能力的比较[J]. 同济大学学报, 2003, **31**(8): 982-985.

[21] 吴媛媛, 周小红, 施汉昌, 等. 污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 194-197.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 7

Jul. 15, 2016

CONTENTS

Concentration Characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing During Two Red Alert Periods ····· CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, *et al.* (2409)

Response of Human Respiratory Height $PM_{2.5}$ Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing ····· ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, *et al.* (2419)

Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City ····· LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, *et al.* (2428)

Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in $PM_{2.5}$ from the Northern Suburb of Nanjing in Winter ····· ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, *et al.* (2436)

Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea ····· KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, *et al.* (2443)

Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang ····· YANG Chun, Tashpolat Tiyip, HOU Yan-jun, *et al.* (2453)

Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing ····· WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)

Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors ····· XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, *et al.* (2470)

Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing ····· ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, *et al.* (2478)

Variations of CO_2 Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China ····· LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, *et al.* (2487)

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas: UV-Vis Spectrum ····· LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, *et al.* (2496)

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas: Fluorescence Spectra ····· LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, *et al.* (2506)

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China ····· JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, *et al.* (2515)

Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing ····· ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, *et al.* (2522)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period ····· CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, *et al.* (2530)

Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River ····· HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, *et al.* (2539)

Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River ····· XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, *et al.* (2547)

Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin ····· SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, *et al.* (2556)

Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms ····· LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, *et al.* (2563)

Response of *Microcystis aeruginosa* Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes ····· WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)

Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands ····· JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-nü, *et al.* (2577)

Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine ····· CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, *et al.* (2586)

Activated Carbon Supported Co_3O_4 Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation ····· WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, *et al.* (2591)

Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes ····· ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, *et al.* (2601)

Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode ····· DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (2610)

Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dyestuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process ····· SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, *et al.* (2618)

Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation ····· CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, *et al.* (2625)

Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor ····· LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, *et al.* (2632)

Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process ····· BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)

Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water ····· LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, *et al.* (2646)

Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing ····· CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, *et al.* (2652)

Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter ····· WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, *et al.* (2659)

Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with *Botryococcus braunii* Biofilm Attached Cultivation ····· CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, *et al.* (2666)

Isolation of *Raoultella* sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics ····· YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, *et al.* (2673)

Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria $SLWX_2$ from Sea Water ····· CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, *et al.* (2681)

Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater ····· XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, *et al.* (2689)

Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges ····· DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, *et al.* (2696)

Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of *Ammopiptanthus mongolicus* by Phospholipid Fatty Acid (PLFA) ····· ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, *et al.* (2705)

Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions ····· ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, *et al.* (2714)

Features and Influencing Factors of N_2O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir ····· LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, *et al.* (2721)

Denitrification Loss and N_2O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments ····· GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, *et al.* (2731)

Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter ····· YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, *et al.* (2738)

Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau ····· LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)

Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China ····· SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, *et al.* (2756)

Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir ····· DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, *et al.* (2763)

Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field ····· HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, *et al.* (2770)

Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil ····· DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, *et al.* (2779)

Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil ····· WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, *et al.* (2791)

Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism ····· SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, *et al.* (2799)

Preparation of γ-Fe_2O_3 Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH_3 ····· XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, *et al.* (2807)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

赵进才　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 7 月 15 日　第 37 卷　第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 7　Jul. 15, 2016

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国 内 定 价：120.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行