

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

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

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析

王硕^{1, 2, 3}, 徐巧^{1, 4}, 张光生^{1, 2, 3}, 李激^{1, 2, 3*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122; 3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 4. 宁波市城市排水有限公司, 宁波 315000)

摘要: 利用某污水处理厂完全混合式曝气系统处理生活污水, 探讨了系统同步硝化反硝化脱氮过程, 解析了系统中污泥微生物群落结构。中试试验结果表明, 系统运行稳定, 且在外无加碳源的条件下, COD、氨氮和总氮平均去除率分别为 93.2%、96.9% 和 75.2%, 出水 COD、氨氮和总氮均优于一级 A 排放标准。系统污泥具有较强的反硝化能力, 其脱氮速率是污水处理厂污泥的 2.86 倍以上。通过对系统污泥周质硝酸盐还原酶聚合酶链式反应 (polymerase chain reaction, PCR) 扩增和高通量测序结果, 发现系统中存在好氧反硝化菌, 污泥中优势菌为动胶菌属 (*Zoogloea*)、陶厄氏菌属 (*Thauera*) 和 *Dechloromonas* 菌属。

关键词: 完全混合式曝气; 周质硝酸盐还原酶; 好氧反硝化; 高通量测序

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0665-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607094

Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System

WANG Shuo^{1, 2, 3}, XU Qiao^{1, 4}, ZHANG Guang-sheng^{1, 2, 3}, LI Ji^{1, 2, 3*}

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Jiangsu College of Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China; 4. Ningbo Municipal Drainage Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: A completely mixed aeration system was introduced in domestic sewage treatment, and the simultaneous nitrification and denitrification process and microbial community structure were further investigated. The pilot-scale experimental results showed that the operation of the system was stable and the average chemical oxygen demand (COD), NH_4^+ -N and total nitrogen (TN) removal were 93.2%, 96.9% and 75.2%, respectively. The effluent COD, NH_4^+ -N and TN were better than the standard of level A stipulated by Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918-2002) in the absence of external carbon source. The sludge derived from the system showed a significant denitrification capacity and the denitrification rate was 2.86 times higher than that in the wastewater treatment plant. In addition, the existence of aerobic denitrifying bacteria in the system was confirmed by the PCR amplification of genes encoding periplasmic nitrate reductases. The high-throughput sequencing results revealed that *Zoogloea*, *Thauera* and *Dechloromonas* were dominant in the completely mixed aeration system.

Key words: completely mixed aeration system; periplasmic nitrate reductases; aerobic denitrification; high-throughput sequencing

随着工业及社会经济的迅速发展, 水体富营养化污染日益严重, 水中氮素污染的去除已成为当今水污染防治领域的热点问题。近年来, 污水处理排放标准日益严格, 污水中总氮的去除难度也将逐渐提高。理论认为, 生物脱氮由硝化反应和反硝化反应协同完成^[1], 反硝化作用通过反硝化酶系在缺氧/厌氧条件下的活性表达而实现总氮的去除^[2]。传统活性污泥法、好氧颗粒污泥^[3]和人工湿地^[4]等技术都是基于硝化反硝化的脱氮技术。然而近年来涌现的厌氧氨氧化和好氧反硝化等技术则有别于传统生物脱氮理论, 其中随着 Robertson 等^[5]对好氧反硝化菌和好氧反硝化酶系的研究逐步深入, 越来越多的研究发现反硝化过程不仅可以在缺/厌氧条件下发生, 在好氧条件也能进行并具有较好的脱氮效果^[6~9]。

完全混合式曝气系统具有占地面积较小, 投资

和能耗较低^[10], 抗冲击负荷能力较强的优点, 曝气系统内各点底物浓度、污泥浓度和需氧速率相同, 为系统内同步硝化反硝化发生提供了基础。到目前为止对同步硝化反硝化作用机制存在不同认知: 微环境理论认为物质传递 (有机物、电子受体)、菌胶团结构及各类微生物分布和活动等致使菌胶团内部形成多种多样的微环境类型, 为同步硝化反硝化的存在创造可能^[11]; 而从生物学角度阐释同步硝化反硝化机制则始于对好氧反硝化菌株 *Thiosphaera pantotropha* 的研究, 好氧反硝化菌细胞内存在不受

收稿日期: 2016-07-14; 修订日期: 2016-09-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07306-001); 江苏省重点研发计划 (社会发展) 科技示范工程项目 (BE2015622); 污染控制与资源化研究国家重点实验室开放课题项目 (PCRRF13022)

作者简介: 王硕 (1984~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水处理技术, E-mail: shuowang@jiangnan.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lij@jiangnan.edu.cn

DO 抑制的反硝化酶系统,其好氧反硝化能力与胞内特殊硝酸盐还原酶——周质硝酸盐还原酶表达密切相关^[12],Huang 等^[13]对具有好氧反硝化功能的菌株 DNA 进行周质硝酸盐还原酶亚基基因 *napA* 扩增,得到了明显的 DNA 特异条带,证明了好氧反硝化菌可以表达周质硝酸盐还原酶. 但目前基于完全混合式曝气系统同步硝化反硝化的形成条件和污泥微生物菌种结构解析的研究还相对较少,从而限制了完全混合式曝气系统的发展与应用.

因此,本文以无锡市某污水处理厂 100 t·d⁻¹ 完全混合式曝气系统的运行为出发点,通过进出水质分析,研究系统对污染物的去除效能;结合反硝化速率静态试验,阐明系统污泥在好氧条件下的反硝化脱氮能力;通过周质硝酸盐还原酶 PCR 扩增和高通量测序技术,对系统污泥微生物菌群结构和多样性进行解析,并确定系统内优势菌群,以期为完全混合式曝气系统的反硝化脱氮应用提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 完全混合式曝气系统运行

完全混合式曝气系统(中试规模)在无锡某城镇污水处理厂运行,系统为钢板池体,长约为 10 m、

宽为 1.5 m、高为 3.5 m,设计处理能力为 100 t·d⁻¹,工艺流程如图 1 所示. 原水通过进水泵进入生化罐,然后依次流经生化池 1、生化池 2 和生化池 3,生化罐及各生化池底部均布置穿孔管曝气,最后进入过滤沉淀池进行泥水分离(利用沉淀池中部微孔过滤器进行泥水分离,微孔滤料孔径为 0.45 μm,对反应器内污泥进行截留),处理后出水外排. 系统包括两套回流系统,分别维持生化罐和生化池内的污泥浓度. 系统自 2011 年启动运行,效果稳定,2015 年春节前停止运行,春节后再次启动,运行参数如下:进水流量为 3 m³·h⁻¹,HRT 为 10~12 h, SRT 大于 30 d,反应器内污泥浓度为 7~10 g·L⁻¹,回流比 Q_1 为 150~200%, Q_2 为 200%,DO 设定为 1~3 mg·L⁻¹,滤料反冲洗频率为 8 h. 污泥来源于污水处理厂好氧池.

1.2 进水水质

完全混合式曝气系统进水取自污水处理厂提升泵房之前深度约 4.5 m 左右的污水,水质如表 1 所示.

1.3 试验方法

1.3.1 污染物指标测定

COD、NH₄⁺-N、TN、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 通过标准方法进行测定^[14]; DO、pH 采用 Multi3410 型溶氧仪测定.

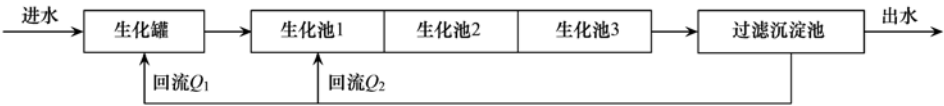


图 1 系统工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of completely mixed aeration system

表 1 污水处理厂进水水质/mg·L⁻¹

Table 1 Influent quality of wastewater treatment plant/mg·L⁻¹

项目	COD	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TN	TP
范围	65.4~666.5	1.33~57.1	0.9~1.6	0.01~0.1	7.7~58.3	0.2~6.1
均值	268.9	30.3	1.2	0.06	33.6	2.5

1.3.2 反硝化模拟试验

为了验证完全混合式曝气系统中污泥在不同 DO 梯度下的反硝化活性差异,对系统污泥进行反硝化模拟试验. 共设置 3 组试验,控制温度为 20℃,初始硝态氮浓度 45 mg·L⁻¹,以无水乙酸钠为碳源,按 C/N=7 投加,采用微曝气供氧,反应过程 DO 浓度分别控制为 0.1~0.2、1.0~2.0 和 2.0~3.0 mg·L⁻¹,污泥浓度均控制为 4 000 mg·L⁻¹ 左右 (MLVSS/MLSS=0.52). 分别在反应第 0、30、60、

90、120、150、180、210 和 240 min 取样,将取出的混合液过滤后测定其硝酸盐浓度. 最后根据不同时刻硝酸盐浓度变化与测定混合液中 MLVSS 的值,计算反硝化速率.

1.3.3 同步硝化反硝化能力测定^[15]

完全混合式曝气系统的同步硝化反硝化能力 (simultaneous nitrification and denitrification, SND) 可以通过计算同步硝化反硝化率[式(1)]和同步硝化反硝化速率[式(2)]得到:

$$\text{Efficiency}_{(\text{SND})} = \frac{\text{NH}_4^+(\text{oxidized}) - \text{NO}_x^-(\text{produced})}{\text{NH}_4^+(\text{oxidized})} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{(\text{SND})} = \frac{\text{NH}_4^+(\text{oxidized}) - \text{NO}_x^-(\text{produced})}{t} \quad (2)$$

式中, $\text{Efficiency}_{(\text{SND})}$ 为同步硝化反硝化率(%); $R_{(\text{SND})}$ 为同步硝化反硝化速率 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$; $\text{NH}_4^+(\text{oxidized})$ 为 NH_4^+ -N 的消耗量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $\text{NO}_x^-(\text{produced})$ 为 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的生成量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); t 为运行时间(h)。

1.3.4 总 DNA 提取及测序

取适量系统污泥样品放入 2 mL 离心管内,充分振荡 30 s,在 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 1 min,弃去上清液。样品经预处理后采用 MoBio PowerSoil DNA Isolation Kit 试剂盒提取污泥样品中微生物总宏基因组,然后用 NanoDrop 2000 超微量分光光度计检测 DNA 的浓度和纯度,最后置于 -20°C 下保存备用。测序工作由上海晶能生物技术有限公司完成,测序仪器(平台)为 Illumina MiSeq,采用 Trimmomatic 软件对序列进行去杂,采用 Qiime 软件进行群落丰度计算。

1.3.5 周质硝酸盐还原酶亚基基因(*napA*)的 PCR 扩增

由于污泥长期在完全混合式曝气系统中驯化,因此对系统污泥中是否存在好氧反硝化菌进行鉴定。采用周质硝酸盐还原酶亚基基因保守区的一部分序列为引物^[16],引物 NAP1 (5'-TCTGGACCATGGGCTTCAACCA-3') 和 NAP2 (5'-ACGACGACCGGCCAGCGCAG-3'),扩增产物长度为 877bp。PCR 反应体系 (50 μL): 10 $\times$ buffer 4 μL , dNTP 2 μL ,引物 NAP1 和引物 NAP2 各 1 μL ,模板

DNA 1 μL , *Taq* 酶 ($10\,000 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$) 0.8 μL ,重蒸水 38.2 μL 。PCR 程序如下: 94°C 变性 5 min; 然后进行 30 个循环: 94°C , 30 s; 59°C , 30 s; 72°C , 60 s; 最后 72°C 延伸 7 min。PCR 产物采用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳进行验证。

2 结果与讨论

2.1 COD 去除效果

完全混合式曝气系统对冲击负荷表现出较好的抵抗能力,系统稳定运行后,尽管进水 COD 浓度波动较大,但出水 COD 较稳定,基本维持在 $7.8 \sim 35.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $17.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,优于 GB 18918-2002 的一级 A 排放标准,COD 去除率为 82.4% ~ 98.3%,平均去除率为 93.2%。结果表明维持系统较高的污泥浓度 ($7 \sim 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 可以保证生物降解的稳定性,使整个工艺对 COD 的去除保持在较高水平。

图 2 显示了系统沿程 COD 变化趋势。原水 COD 浓度约 $346 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进入系统后迅速下降,经过回流稀释作用及曝气条件下异养菌对碳源的消耗,生化罐中混合液 COD 浓度已降至 $86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,系统出水 COD 浓度约为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由此可见,完全混合式曝气系统具有较强的 COD 去除能力,其原因在于:①系统采用完全混合曝气的模式,强化了异养菌对有机物的降解与消耗;②系统具有较大的回流,延长了污水实际水力停留时间,从而强化了系统对有机污染物的去除能力。完全混合式曝气系统可以为包括好氧反硝化菌在内的异养微生物提供适宜的生长环境,而大部分好氧反硝化菌同时具有异氧硝化及代谢降解有机物的能力^[7, 17, 18],可以在曝气条件下表现出对有机底物较高的去除能力。

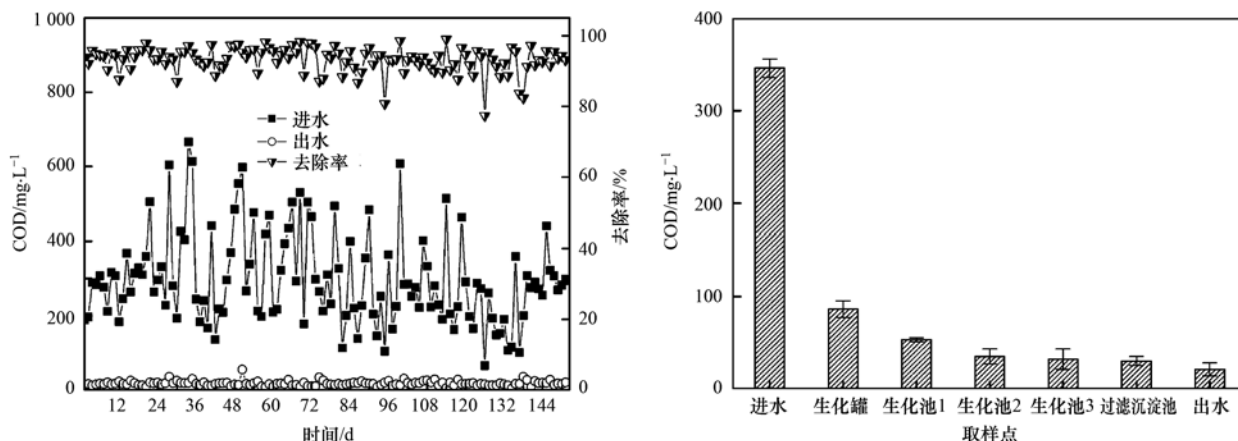


图 2 进出水 COD 浓度及沿程变化特征

Fig. 2 Variations of COD in influent and effluent along with the wastewater treatment process

2.2 氮去除效果

完全混合式曝气系统进出水 NH_4^+-N 、TN 变化曲线如图 3 所示. 系统进水 NH_4^+-N 为 $1.33 \sim 57.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $30.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 NH_4^+-N 为 $0.2 \sim 5.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $0.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均去除率达 96.9%, 出水 NH_4^+-N 超标率低于 2%. 系统进水 TN 波动较大, 在 $7.7 \sim 58.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $33.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 TN 在 $1.9 \sim 26.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围波动, 平

均去除率为 75.2%, 均值为 $7.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮和 TN 均优于 GB 18918-2002 的一级 A 排放标准, 表明系统具有较强的脱氮能力. 当系统运行至第 70 d 左右时, 出水 TN 浓度高于 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这是由于滤池内滤料出现堵塞现象, 增加系统反冲洗频率后使反冲洗过程中部分污泥颗粒随出水流出, 导致系统 TN 升高. 但在恢复反冲洗频率后, 出水水质得以改善.

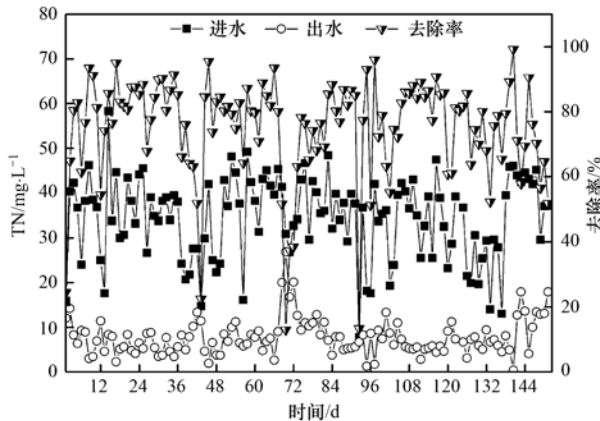


图 3 进出水 NH_4^+-N 和 TN 浓度的变化

Fig. 3 Variations of NH_4^+-N and TN in influent and effluent along with the wastewater treatment process

为了考察完全混合式曝气系统各单元对氮转化的作用和贡献, 对其各单元出水中氮组分及浓度进行测定, 结果如图 4 所示. 根据式(1)和(2)计算得生化罐的同步硝化反硝化率为 99.6%, 同步硝化反硝化速率为 $32.9 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 生化罐中具有良好的同步硝化反硝化能力, 氨氮进入生化池 1 后持续降低, 最终出水氨氮低于 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 生化池 1 的同步硝化反硝化率为 94%, 同步硝化反硝化速率为 $1.1 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 由图 4 中总氮, 硝态氮及亚硝态氮的变化可知, 系统同时具备较强的反硝化脱氮能力, 而且不存在亚硝酸盐的积累现象. 系统仅在单一曝气条件下就能实现同步硝化反硝化, 有效节省了占地面积并在系统碱度维持方面更具有经济性.

为进一步研究系统各反应单元的实际运行状态, 对每个反应单元的 DO 进行 24 h 连续监测, 结果如表 2 所示. 生化罐和生化池 1 内溶解氧较低, 其 DO 均低于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 生化池 2 和生化池 3 的 DO 浓度较高, 一般维持在 $1 \sim 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其原因在于进水有机物浓度较高, 异养菌在曝气条件下快速降解有机物并消耗大量溶解氧, 导致在系统前段(生化罐和生化池 1)溶解氧明显低于设定值. 随着有机物的消耗, 系统后段(生化池 2 和生化池 3)的 DO

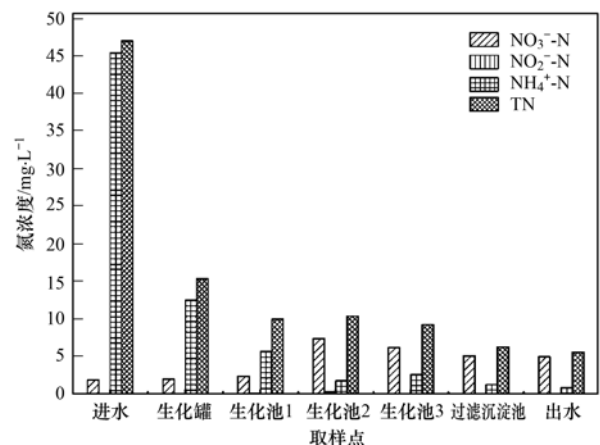
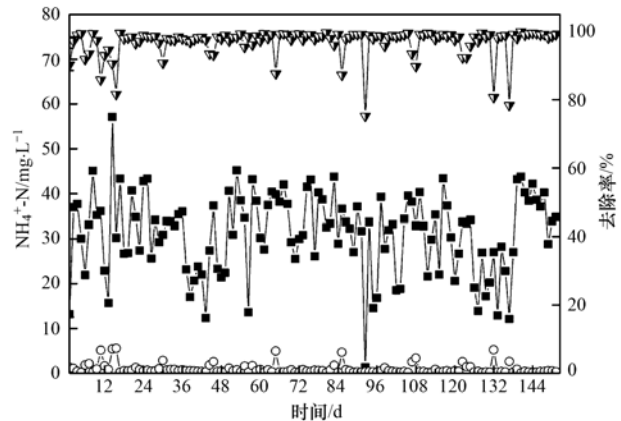


图 4 不同形态氮浓度的沿程变化

Fig. 4 Variations of Nitrogen concentrations along with the wastewater treatment process

浓度逐渐上升. 通过核算发现生化罐和生化池 1 中硝酸盐浓度分别降低 $1.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而在生化池 2 和生化池 3 中硝酸盐浓度略有上升, 但总氮呈降低趋势, 系统中可能存在好氧反硝化菌群. 研究表明不同菌属的好氧反硝化菌对 DO 的耐受能力存在显著差异, 大部分好氧反硝化菌在 DO 浓度低于 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时仍具有较高的反硝化活性^[19, 20]. 根据系统氮平衡分析, 生化罐和生化池 1

中的同步硝化反硝化现象明显强于生化池 2 和生化池 3,其原因可能基于以下两方面:第一,系统前段 C/N 明显高于后段,较高的 C/N 能保证充足的碳源,进而有利于反硝化反应顺利进行,Ahmad^[21]也在研究中发现,好氧反硝化菌的反硝化活性同样随着 C/N 的升高而增大;第二,较低的 DO 浓度有利于活性污泥絮体内部形成缺氧微环境,从而使缺氧反硝化与好氧反硝化相协同,进一步强化同步硝化反硝化效果.

表 2 系统 DO 分布/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Distribution of DO concentrations in the system/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$					
项目	生化罐	生化池 1	生化池 2	生化池 3	过滤沉淀池
DO	0.05 ~ 0.2	0.1 ~ 0.2	1.0 ~ 2.8	2.1 ~ 3.6	2.3 ~ 3.2

2.3 反硝化特性

反硝化模拟试验的硝态氮浓度随时间变化曲线如图 5 所示,在 DO 浓度为 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,完全混合式曝气系统中污泥在最初的 2 h 内硝酸盐还原效果明显,其脱氮速率(以 $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{MLVSS}$ 计,下同)为 $4.09 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. 当 DO 浓度在 $1.0 \sim 2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.0 \sim 3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,污泥脱氮速率分别为 0.73 和 $0.67 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,系统污泥在低 DO 浓度条件下的脱氮能力约为高 DO 浓度条件下的 5.8 倍. 这是因为系统污泥中的反硝化菌群适应低 DO 条件,从而表现出更高的活性;同时,DO 会优先于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 被异养微生物利用,且相对较高 DO 浓度会有利于异养菌消耗有机物,从而使反硝化菌群在高 DO 条件下的反硝化能力受到抑制^[22]. 当 DO 较高时,系统污泥仍具有较好的反硝化效果,表明系统中可能存在好氧反硝化菌群.

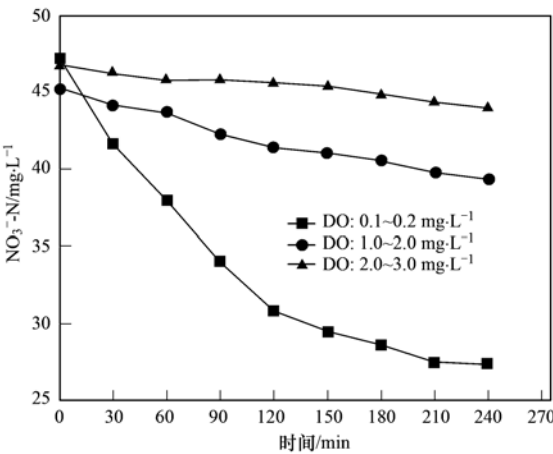


图 5 不同 DO 条件下污泥反硝化效果
Fig. 5 Denitrification capacity of sludge under different DO concentrations

取污水处理厂污泥与系统污泥反硝化能力进行对比发现,当控制 DO 浓度为 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,两座污水处理厂缺氧池污泥反硝化能力明显受到抑制,其脱氮速率仅为 0.58 和 $1.43 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,反硝化能力明显低于完全混合式曝气系统污泥.

完全混合式曝气系统一般运行约 30 d 即可实现对 COD、氨氮和总氮的稳定高效去除,随着进水冲击负荷的变化,污染物去除效果稳定. 系统运行过程中极少出现污泥上浮与污泥膨胀等不利现象,适用性较高.

2.4 微生物特性

由图 6 可知,完全混合式曝气系统在有氧条件下的反硝化能力明显优于传统活性污泥,因此对活性污泥进行周质硝酸盐还原酶亚基基因(*napA*)的 PCR 扩增.

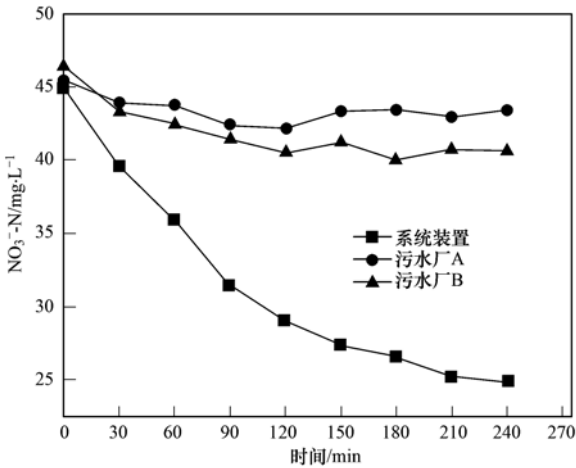


图 6 系统污泥与传统活性污泥在低 DO 条件下的反硝化效果
Fig. 6 Denitrification capacity of different sludge under low DO concentration

试验结果如图 7 所示,编号 1、2 和 3 为系统春季运行时污泥样品;4 和 5 为污水处理厂 A 缺氧池污泥样品(系统所在污水处理厂);6 和 7 为污水处理厂 B 缺氧池污泥样品;8 和 9 为系统秋季运行时污泥样品. 系统污泥得到明显清晰的 877 bp 的 DNA 特异条带,表明系统污泥存在周质硝酸盐还原酶亚基基因 *napA*,可以表达周质硝酸盐还原酶,污泥中含有典型的好氧反硝化细菌,其在好氧条件下经由周质硝酸盐还原酶的催化还原硝酸盐,产生氮气实现好氧反硝化,提高系统的总氮去除能力. 污水处理厂 A 中活性污泥显示存在特异性条带,表明污水处理厂 A 中存在少量好氧反硝化菌,但是其强度较低,未在反硝化微生物中占优势,无法显著增强污水处理厂 A 的总氮去除效果,而污水处理厂 B 几

乎不存在好氧反硝化菌.

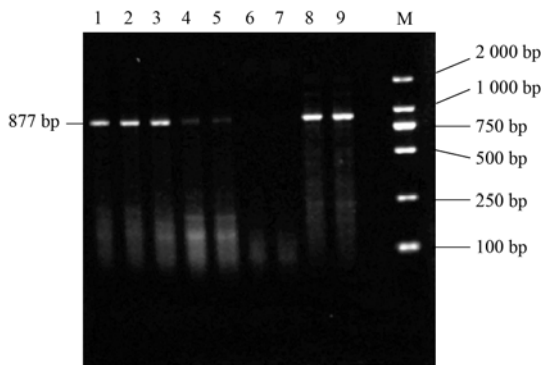


图 7 PCR 扩增产物的琼脂糖凝胶电泳图像
Fig. 7 Image of PCR agarose gel electrophoresis

为准确反映完全混合式曝气系统内的微生物群落结构,对系统稳定运行的不同时期(春季和秋季)的微生物群落结构进行解析. 通过高通量测序发现,系统污泥中微生物共有 42 个纲,污泥微生物比例分布如图 8 所示(选取比例超过 1% 的纲绘入图中). 不同时期系统污泥微生物菌群结构基本一致,以变形菌纲为主,其中 β 变形菌纲、 γ 变形菌纲、 δ 变形菌纲和 α 变形菌纲比例分别占变形菌纲 54.45%、10.60%、7.80% 和 7.85%; 鞘脂杆菌纲占 6.02%, 厌氧绳菌纲占 2.71%, 放线菌纲占 1.66%, 酸杆菌纲占 1.03%. 其中 β 变形菌纲与污水处理过程密切相关,是污水处理厂脱氮的重要菌群,可以在低溶解氧条件下利用有机物生长繁殖^[23]. 测序结果表明(表 3),系统污泥微生物中动胶菌属(*Zoogloea*),陶厄氏菌属(*Thauera*)和 *Dechloromonas* 菌属始终处于优势地位,其中 *Zoogloea* 属与菌胶团的形成有密切关系,可能会促进系统实现同步硝化反硝化作用;*Thauera* 属是 β 变形菌中的一类革兰氏阴性细菌,大部分为杆状且以反硝化菌居多^[24],如 *T. aromatica*、*T. mechernichensis* 和 *T. terpenica* 等,而其中 *T.*

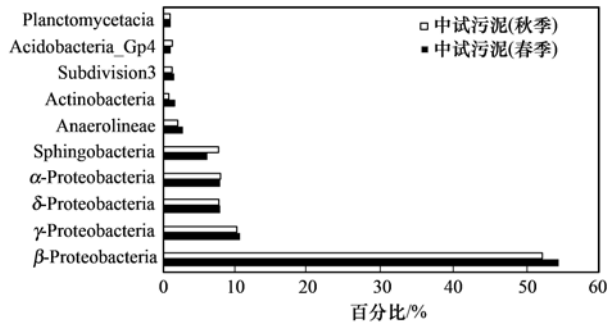


图 8 系统中污泥微生物纲的分布比例
Fig. 8 Distributions of microbial strains in the system at the level of class

mechernichensis 是一类典型的好氧反硝化菌;*Dechloromonas* 菌属具有良好的反硝化功能^[25],主要功能菌 *D. agitate* 和 *D. denitrificans* 都具有较强的硝酸盐还原能力^[23]. 随着季节的变化,仅 *Azohydromonas* 和 *Longilinea* 菌属存在较大波动,但污泥微生物群落结构整体变化较小,使完全混合式曝气系统始终保持良好的脱氮效能. 完全混合式曝气系统内污泥微生物多样性丰富,为系统的高效脱氮奠定了基础.

表 3 系统污泥微生物优势菌属及其比例/%

优势菌属	proportions in the system/%	
	比例(春季)	比例(秋季)
<i>Zoogloea</i>	52.77	46.64
<i>Thauera</i>	18.15	16.41
<i>Dechloromonas</i>	11.15	13.99
<i>Methylibium</i>	10.25	8.17
<i>Azohydromonas</i>	9.29	4.52
<i>Terrimonas</i>	6.91	7.86
<i>Subdivision3</i>	6.44	4.61
<i>Longilinea</i>	5.39	2.66
<i>Gp4</i>	4.23	5.14
<i>Gemmatimonas</i>	3.99	2.81

3 结论

(1)采用完全混合曝气系统处理污水,在无外加碳源的情况下,取得较好的有机物去除效果和脱氮效果, COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率分别为 93.2%、96.9%、75.2%,出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 均优于一级 A 排放标准.

(2)完全混合式曝气系统中污泥在低 DO 浓度 ($0.1 \sim 0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下具有较高的反硝化能力,其脱氮速率是污水处理厂污泥的 2.86 倍以上. 当 DO 浓度大于 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,系统污泥仍具有一定反硝化能力,其脱氮速率与污水处理厂污泥相当.

(3)周质硝酸盐还原酶亚基基因 *napA* 的 PCR 扩增结果表明,系统内存在一定浓度的好氧反硝化菌. 系统内污泥微生物结构稳定,以变形菌纲为主,动胶菌属(*Zoogloea*),陶厄氏菌属(*Thauera*)和 *Dechloromonas* 菌属为优势菌属.

参考文献:

[1] 丁炜,朱亮,徐京,等. 好氧反硝化菌及其在生物处理与修复中的应用研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6): 923-929.
Ding W, Zhu L, Xu J, et al. Progress of researches on aerobic denitrifiers and their application in bioremediation[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(6): 923-929.

- [2] Ahn Y H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: a review[J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(8): 1709-1721.
- [3] 王硕, 杨倩倩, 于水利, 等. 好氧颗粒污泥处理分散型农村生活污水的试验研究[J]. *中国给水排水*, 2015, **31**(19): 33-37.
- Wang S, Yang Q Q, Yu S L, *et al.* Study on rural decentralized domestic sewage treatment by aerobic granular sludge[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, **31**(19): 33-37.
- [4] Sun G Z, Zhu Y F, Saeed T, *et al.* Nitrogen removal and microbial community profiles in six wetland columns receiving high ammonia load[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **203**: 326-332.
- [5] Robertson L A, Van Niel E W J, Torremans R A M, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of *Thiosphaera pantotropha* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, **54**(11): 2812-2818.
- [6] Takaya N, Catalan-Sakairi M A B, Sakaguchi Y, *et al.* Aerobic denitrifying bacteria that produce low levels of nitrous oxide[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(6): 3152-3157.
- [7] Su J F, Shao S C, Huang T L, *et al.* Isolation, identification, and algicidal activity of aerobic denitrifying bacterium R11 and its effect on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Science and Technology*, 2016, **73**(11): 2600-2607.
- [8] Lei Y, Wang Y Q, Liu H J, *et al.* A novel heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium, *Zobellella taiwanensis* DN-7, can remove high-strength ammonium [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(9): 4219-4229.
- [9] Huang T L, Guo L, Zhang H H, *et al.* Nitrogen-removal efficiency of a novel aerobic denitrifying bacterium, *Pseudomonas stutzeri* strain ZF31, isolated from a drinking-water reservoir[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **196**: 209-216.
- [10] 张雯, 邓风, 徐华. 间歇曝气和连续曝气对完全混合式反应器系统脱氮性能的影响[J]. *环境化学*, 2013, **32**(11): 2176-2185.
- Zhang W, Deng F, Xu H. The impact of intermittent aeration and continuous aeration on CSTR system denitrification performance[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(11): 2176-2185.
- [11] Bock E, Schmidt I, Stüven R, *et al.* Nitrogen loss caused by denitrifying *Nitrosomonas* cells using ammonium or hydrogen as electron donors and nitrite as electron acceptor[J]. *Archives of Microbiology*, 1995, **163**(1): 16-20.
- [12] Kong Q X, Wang X W, Jin M, *et al.* Development and application of a novel and effective screening method for aerobic denitrifying bacteria[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2006, **260**(2): 150-155.
- [13] Huang T L, Zhou S L, Zhang H H, *et al.* Nitrogen removal characteristics of a newly isolated indigenous aerobic denitrifier from oligotrophic drinking water reservoir, *Zoogloea* sp. N299 [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, **16**(5): 10038-10060.
- [14] 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.
- [15] 王硕. 低温好氧颗粒污泥形成过程及其特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [16] 苏俊峰, 马放, 高珊珊, 等. 好氧反硝化细菌处理硝酸盐废水的研究及微生物群落结构分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, **16**(1): 29-34.
- Su J F, Ma F, Gao S S, *et al.* Aerobic denitrifiers dispose the wastewater of $\text{NO}_3\text{-N}$ and the analysis of the diversity of microbial species[J]. *Journal of Basic Science Engineering*, 2008, **16**(1): 29-34.
- [17] Kim J K, Park K J, Cho K S, *et al.* Aerobic nitrification-denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains[J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(17): 1897-1906.
- [18] Zhu L, Ding W, Feng L J, *et al.* Characteristics of an aerobic denitrifier that utilizes ammonium and nitrate simultaneously under the oligotrophic niche [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(8): 3185-3191.
- [19] 成钰, 李秋芬, 费丰涛, 等. 海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX₂ 的筛选及脱氮特性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2681-2688.
- Cheng Y, Li Q F, Fei Y T, *et al.* Screening and nitrogen removing characteristics of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria SLWX₂ from sea water[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2681-2688.
- [20] Ji B, Wang H Y, Yang K. Tolerance of an aerobic denitrifier (*Pseudomonas stutzeri*) to high O_2 concentrations [J]. *Biotechnology Letters*, 2014, **36**(4): 719-722.
- [21] Ahmad N U D, Xu H Y, Chen L P, *et al.* Enhanced biological nutrient removal by the alliance of a heterotrophic nitrifying strain with a nitrogen removing ecosystem[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(2): 216-223.
- [22] Wittorf L, Bonilla-Rosso G, Jones C M, *et al.* Habitat partitioning of marine benthic denitrifier communities in response to oxygen availability[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2016, **8**(4): 486-492.
- [23] Tan Z Y, Reinhold-Hurek B. *Dechlorosoma suillum* Achenbach *et al.* 2001 is a later subjective synonym of *Azospira oryzae* Reinhold-Hurek and Hurek 2000 [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2003, **53**(4): 1139-1142.
- [24] 王学华, 黄俊, 宋吟玲, 等. 高效水解酸化 UASB 活性污泥的菌群结构分析[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(11): 2779-2784.
- Wang X H, Huang J, Song Y L, *et al.* Analysis on bacterial community structure in UASB reactor's sludge with hydrolysis acidification capacity of a dyeing wastewater treatment process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(11): 2779-2784.
- [25] Chakraborty A, Picardal F. Induction of nitrate-dependent Fe(II) oxidation by Fe(II) in *Dechloromonas* sp. Strain UWNR4 and *Acidovorax* sp. Strain 2AN [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(2): 748-752.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172