

 方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张健峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何睿, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺曝气量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评估 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程

刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊

(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: 微气泡曝气生物膜反应器是微气泡曝气技术与好氧生物处理相结合的新型处理工艺. 本研究采用微气泡曝气生物膜反应器在低气水比下处理低 C/N 比废水, 考察了生物脱氮过程和性能, 并分析了脱氮功能菌群变化. 结果表明, 通过低气水比(小于 1:2)控制 DO 浓度并降低进水 C/N 比, 可以实现生物脱氮过程从同步硝化-反硝化向同步短程硝化-厌氧氨氧化-反硝化(SNAD)过程转变, 并可获得较高的低 C/N 比废水生物脱氮性能. DO 浓度低于 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、进水 C/N 比为 1:2.8 时, SNAD 过程成为生物脱氮的主要途径, TN 平均去除率可达到 76.3%, TN 平均去除负荷为 $1.42 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 厌氧氨氧化过程对 TN 去除的贡献率为 86.0%. 随着进水 C/N 比降低, 生物膜中亚硝化菌群和厌氧氨氧化菌群的相对丰度逐渐增加, 而硝化菌群和反硝化菌群的相对丰度逐渐降低. 生物脱氮功能菌群变化与脱氮过程转变为 SNAD 过程相一致.

关键词: 生物脱氮; 微气泡曝气; 生物膜反应器; 厌氧氨氧化; 功能菌群

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0754-07 DOI: 10.13227/j.hjxk.201807085

Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater

LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, ZHANG Jing, ZHANG Rui-na, ZHANG Lei

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

Abstract: The microbubble-aerated biofilm reactor as a new treatment process combines microbubble aeration technology with aerobic biological treatment. A microbubble aerated biofilm reactor was used in this study to treat low C/N ratio wastewater at a low air/water ratio. The process and performance of biological nitrogen removal were investigated, and the functional bacterial populations for nitrogen removal in the biofilm were analyzed. The results showed that the biological nitrogen removal process was converted from simultaneous nitrification-denitrification to simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) processes when DO concentration was controlled by an air/water ratio of lower than 1:2 and the influent C/N ratio was reduced. As a result, the efficient biological nitrogen removal performance was achieved when treating low C/N ratio wastewater. When the DO concentration was lower than $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and the influent C/N ratio was 1:2.8, the SNAD process became dominant for biological nitrogen removal. In this case, the average total nitrogen (TN) removal efficiency was 76.3%, and the average TN loading rate removed was $1.42 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. In addition, it was estimated that 86.0% of TN removal was attributed to the ANAMMOX process. The relative abundances of ammonia-oxidizing bacteria populations and ANAMMOX bacteria populations in the biofilm increased gradually, while the relative abundances of nitrite-oxidizing bacteria populations and denitrifying bacteria populations decreased gradually, with a decrease in influent C/N ratio. The variation of functional bacterial populations for nitrogen removal was consistent with the conversion of nitrogen removal process to SNAD process.

Key words: biological nitrogen removal; microbubble aeration; biofilm reactor; ANAMMOX; functional bacterial population

随着水体氮素污染问题的日趋严重, 生物脱氮已经成为废水处理研究领域的热点^[1]. 传统的生物脱氮过程包括硝化和反硝化^[2], 其存在过程相对复杂、耗能高、碳源需求量大等缺点, 不适用于低氮碳比(C/N)废水的脱氮处理^[3].

同步短程硝化-厌氧氨氧化-反硝化(SNAD)过程是一种新型生物脱氮工艺^[4-6]. 短程硝化可为厌氧氨氧化过程创造条件, 厌氧氨氧化过程可将 NH_4^+ 和 NO_2^- 转化为 N_2 , 反硝化过程可利用有机物进一步去除 NO_2^- 和 NO_3^- ^[7, 8]. 在适宜条件下, SNAD 过程可实现 COD 和总氮(TN)的同步去除^[9], 为高氨氮浓度、低 C/N 比废水的生物脱氮提供了高效低耗的新途径^[10].

微气泡曝气生物膜反应器是微气泡曝气技术在废水生物处理中的可行应用, 能够实现连续稳定运行和高效处理性能以及接近 100% 的氧利用率^[11-14]. 同时, 微气泡曝气生物膜反应器亦可以实现同步硝化-反硝化生物脱氮^[15]. 同样, 生物膜内氧浓度梯度可以为亚硝化细菌、厌氧氨氧化细菌和反硝化细菌的生长提供适宜的生长环境, 具有实现 SNAD 过程的可行性, 从而有效处理低 C/N 比废水.

本研究利用微气泡曝气生物膜反应器极高的氧

收稿日期: 2018-07-12; 修订日期: 2018-08-13

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

利用率, 在低气水比和低 C/N 比条件下, 实现 SNAD 生物脱氮过程, 并获得较高的生物脱氮效率. 同时, 通过高通量测序分析反应器内生物膜脱氮功能菌群变化, 探究 SNAD 生物脱氮过程的微生物学机制, 为 SNAD 生物脱氮过程的应用提供理论和技术支持.

1 材料与方 法

1.1 实验装置

本研究采用的微气泡曝气生物膜反应器如图 1 所示. 微气泡发生装置为 OHR 混合管式微气泡发生器(北京晟峰恒泰科技有限公司), 实验条件下产生空气微气泡平均直径范围为 30 ~ 40 μm . 生物膜反应器为有机玻璃柱体, 直径为 240 mm, 有效容积为 60 L. 反应器内悬挂 5 根直径 40 mm、长 1 200 mm 的辫带式生物填料(河北益生环保科技有限公司), 作为生物膜生长载体. 微气泡曝气生物膜反应器采用底部连续进水、顶部溢流出水的方式运行.

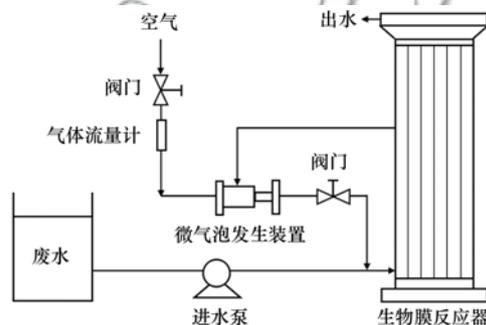


图 1 微气泡曝气生物膜反应器实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of microbubble aerated biofilm reactor

1.2 实验过程

微气泡曝气生物膜反应器的连续运行过程可分为启动(挂膜)阶段和稳定运行阶段(Phase 1 ~ Phase 3). 运行过程中, 逐步降低有机负荷并提高 TN 负荷以降低 C/N 比, 同时控制运行气水比小于 1:2, 通过降低空气流量使得反应器内溶解氧(DO)浓度逐渐低于 1.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 各阶段运行条件见表 1.

启动(挂膜)阶段前, 向反应器内接种某城镇污水处理厂二沉池回流污泥, 初始接种污泥浓度(MLSS)约为 0.8 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 闷曝 48 h 后将悬浮污泥排出, 然后投加人工模拟生活污水, 以葡萄糖为碳源, 以 NH_4Cl 为氮源, 调节葡萄糖和 NH_4Cl 投加量以控制 C/N, 同时添加 P、Ca、Mg、Fe、Mn 等微量元素, 以及添加 NaHCO_3 调节 pH 并提供无机碳源^[16, 17]. 按照设定条件连续运行. 运行温度为 30 $^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, 进出水 pH 范围为 7.4 ~ 8.2.

表 1 运行条件

Table 1 Running conditions

项目	启动阶段	稳定运行阶段		
		Phase1	Phase2	Phase3
运行时间/d	0 ~ 45	46 ~ 109	110 ~ 175	176 ~ 233
HRT/h	2			
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.31	1.06	1.02	0.88
进水 COD 负荷/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	2.44	1.30	0.69	0.66
进水总氮负荷/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	1.24	1.30	1.16	1.86
C: N	2.0:1	1:1	1:1.7	1:2.8

运行过程中, 测定进出水 COD、氨氮、TN、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮浓度及 DO 浓度和生物膜生物量变化, 并在各阶段结束时检测分析生物膜细菌群落结构和脱氮功能菌群变化.

1.3 分析方法

水质指标 COD、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、TN 等, 均采用国标方法测定. DO 浓度采用溶解氧测定仪(Cell Oxi330, 德国 WTW)测定.

反应器运行过程中, 每 7 d 取生物膜样品, 测定并核算反应器内生物膜生物量(以 SS 和 VSS 浓度计)^[18, 19]. 同时在各个运行阶段结束时, 收集生物膜样品, 进行高通量测序(上海派森诺生物科技股份有限公司), 分析生物膜样品细菌种群结构和功能菌群丰度变化^[20].

2 结果与讨论

2.1 污染物去除性能

2.1.1 COD 去除性能

微气泡曝气生物膜反应器各阶段 COD 进出水浓度及去除率变化如图 2 所示. 可以看到, 启动阶段完成后, 稳定运行的 Phase 1 ~ Phase 3 阶段进水 COD 平均浓度分别为 109.1、57.9 和 55.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 COD 平均浓度分别为 19.1、13.3 和 12.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 平均去除率分别为 82.5%、77.1% 和 77.0%, COD 平均去除负荷分别为 1.08、0.54 和 0.51 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

可见, 启动阶段完成后, Phase 1 ~ Phase 3 阶段 COD 去除率基本保持稳定, 且随着进水 COD 负荷降低, COD 去除负荷随之下降. 微气泡曝气生物膜反应器可以获得稳定的 COD 去除性能.

2.1.2 氨氮去除性能

微气泡曝气生物膜反应器各阶段氨氮进出水浓度及去除率变化如图 3 所示. 可以看到, 启动阶段完成后, 稳定运行的 Phase 1 ~ Phase 3 阶段进水氨氮平均浓度分别为 108.1、96.8 和 154.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水氨氮平均浓度分别为 31.9、27.9 和 35.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均氨氮去除率分别为 70.5%、71.2% 和

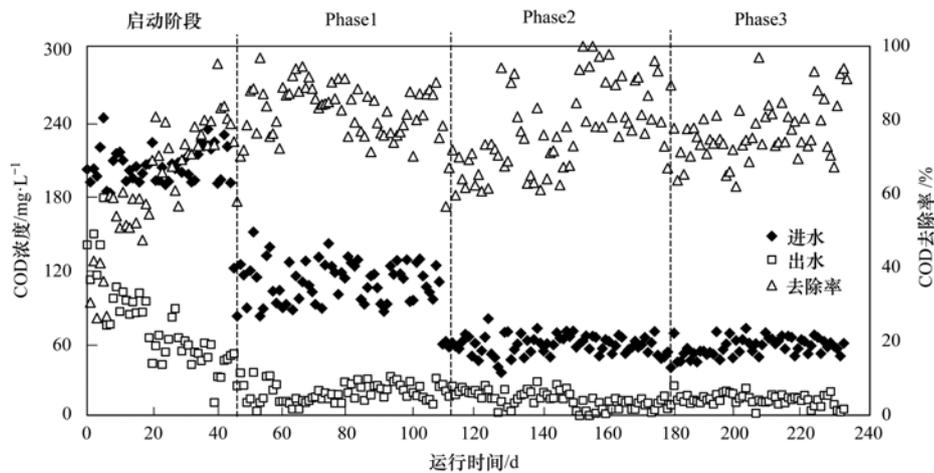


图2 微气泡曝气生物膜反应器 COD 去除性能

Fig. 2 COD removal performance in the microbubble aerated biofilm reactor

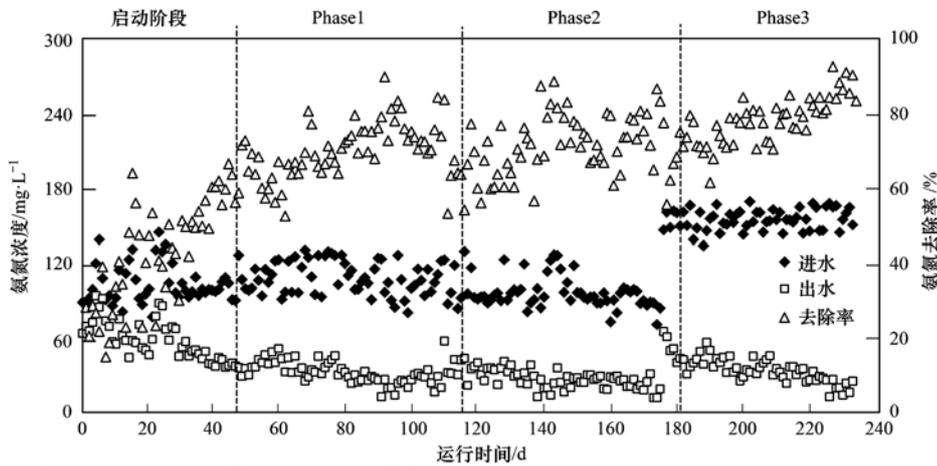


图3 微气泡曝气生物膜反应器氨氮去除性能

Fig. 3 Ammonia nitrogen removal performance in the microbubble aerated biofilm reactor

77.2%，氨氮平均去除负荷分别为 0.91、0.83 和 1.43 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

可见，启动阶段氨氮去除率逐渐升高。启动阶段完成后，Phase1 ~ Phase2 阶段氨氮去除率和去除负荷基本保持稳定。Phase3 阶段尽管进水氨氮负荷升高，但氨氮去除率又有所提高，氨氮去除负荷亦随之升高，其氨氮去除性能明显优于其它阶段。

2.1.3 TN 去除性能

微气泡曝气生物膜反应器各阶段 TN 进出水浓度及去除率变化如图 4 所示。可以看到，启动阶段完成后，稳定运行的 Phase1 ~ Phase3 阶段出水 TN 平均浓度分别为 32.8、28.7 和 36.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，TN 平均去除率分别为 69.7%、70.4% 和 76.3%，总氮平均去除负荷分别为 0.90、0.82 和 1.42 $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

TN 去除过程与氨氮去除过程类似，启动阶段 TN 去除率逐渐升高。启动阶段完成后，Phase1 ~ Phase2 阶段 TN 去除率基本保持稳定。Phase3 阶段尽管进水 TN 负荷升高，TN 去除率同样有所升高，

TN 去除负荷亦随之升高，其 TN 去除性能明显优于其它阶段。

运行各阶段进水中氮的存在形式仅有氨氮，TN 去除依赖于硝化-反硝化过程和 SNAD 过程以及同化作用。随着进水 COD 负荷降低及 TN 负荷提高，进水 C/N 比亦随之降低，从而导致各阶段 TN 去除过程发生变化。因此，需要对运行各阶段生物脱氮过程进行进一步分析。

2.2 生物脱氮过程分析

如上所述，微气泡曝气生物膜反应器进水中氮的存在形式仅有氨氮，TN 去除依赖于硝化-反硝化过程和 SNAD 过程及同化作用。在同化作用中，假设典型的微生物细胞分子式为 $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ ，则 N 在微生物细胞（以 VSS 计）中所占质量比约为 12.4%（干重）；由此，根据各阶段 VSS 增长量（见图 7）可粗略估算同化作用对 TN 的去除量及其占 TN 去除总量的比例，经计算得启动阶段和 Phase1 ~ Phase3 阶段同化作用去除 TN 贡献率分别为：0.20%、0.36%、0% 和 0.04%。可见，启动阶段和 Phase1

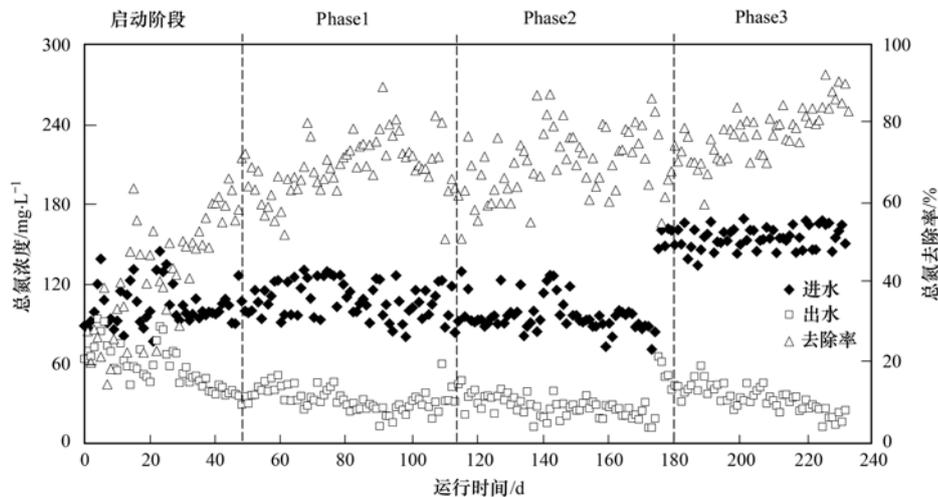
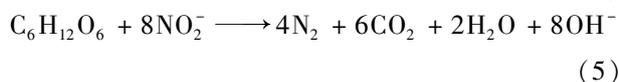
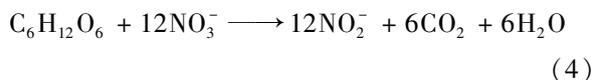
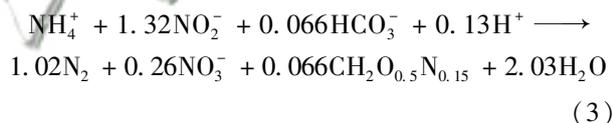
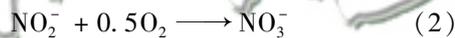


图4 微气泡曝气生物膜反应器总氮(TN)去除性能

Fig. 4 Total nitrogen (TN) removal performance in the microbubble aerated biofilm reactor

阶段, 生物膜 VSS 增长较快, 同化作用对去除 TN 稍有贡献; Phase2 ~ Phase3 阶段生物膜 VSS 略有波动但总体稳定, 因而同化作用对 TN 去除贡献率几乎为 0. 因此, 微生物增殖的同化作用对 TN 去除量相对于反应器内 TN 的去除总量而言可以忽略.

不考虑同化作用, 硝化-反硝化过程和 SNAD 过程主要脱氮反应方程式如式(1)~(5)所示. 其中, 硝化-反硝化过程包括反应方程式(1)、(2)、(4)和(5), SNAD 过程包括反应方程式(1)、(3)、(4)和(5).



由以上方程式可知, 进水中氮的存在形式仅有氨氮, 运行各阶段亚硝酸盐氮和硝酸盐氮出水浓度(即累积程度, 见图5), 亦可以反映生物脱氮过程的变化. 在启动阶段, 系统中几乎没有亚硝酸盐氮和硝酸盐氮累积, TN 去除主要依靠硝化-反硝化过程; Phase1 ~ Phase2 阶段亚硝酸盐氮和硝酸盐氮累积增加, 表明系统中短程硝化和厌氧氨氧化过程逐渐占优; Phase3 阶段, 前期亚硝酸盐氮累积明显, 后期亚硝酸盐氮累积消失, 表明此时 SNAD 过程为 TN 去除的主要途径.

依据脱氮反应方程式(1)~(5)所反映的化学计量关系, 同时根据微气泡曝气生物膜反应器运行各阶段进水和出水 COD、氨氮、TN、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮浓度变化, 在已报道氮平衡模型^[21]基础上考虑硝化过程, 计算厌氧氨氧化过程和反硝化过程对 TN 去除的贡献率, 结果如图 6 所示(以 Phase 3 阶段为例). 可以看到, Phase 3 阶段厌氧氨氧化过程对 TN 去除的贡献率为 86.0%, 反硝化过程对 TN 去除的贡献率为 14.0%, 亦证实此时 SNAD 过

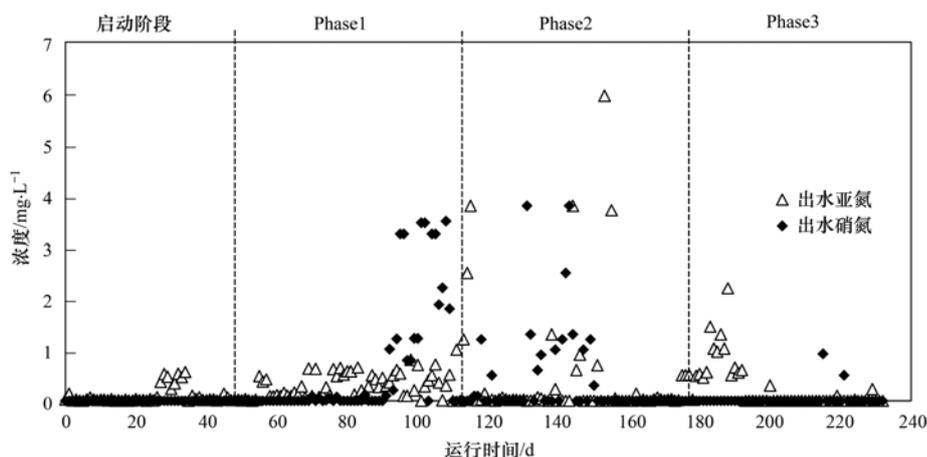


图5 微气泡生物膜反应器出水亚硝酸盐和硝酸盐浓度变化

Fig. 5 Variations of nitrite and nitrate concentration in the effluent of the microbubble aerated biofilm reactor

程为 TN 去除的主要途径。

微气泡曝气生物膜反应器运行各阶段厌氧氨氧化过程和反硝化过程对 TN 去除的贡献率如表 2 所示。可以看到, 厌氧氨氧化过程对 TN 去除的贡献率由启动阶段的 29.4% 提高至 Phase3 阶段的 86.0%; 反硝化过程对 TN 去除的贡献率由启动阶段的 70.6% 下降至 Phase3 阶段的 14.0%。厌氧氨氧化过程在 TN 去除作用逐渐提高并占据优势, 是实现 SNAD 过程的关键环节, 同时也是 Phase3 阶段低 C/N 下获得较高 TN 去除性能的主要原因。

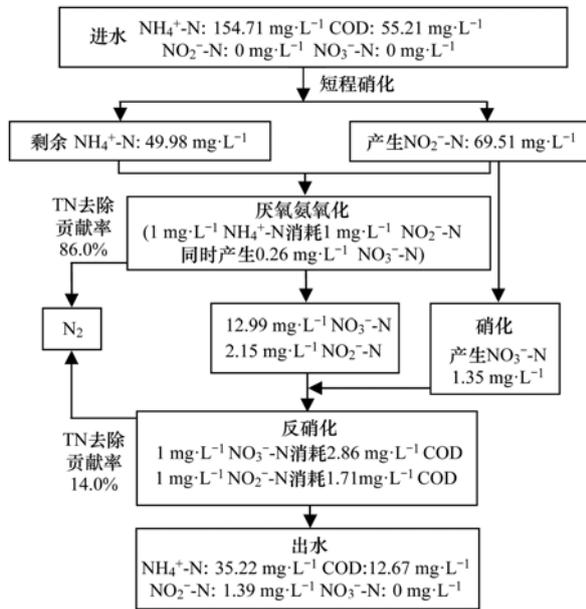


图 6 生物脱氮过程氮平衡估算模型 (Phase 3)

Fig. 6 Evaluation model of nitrogen balance in nitrogen removal processes (Phase 3)

2.3 生物膜菌群分析

2.3.1 生物膜生物量变化

微气泡曝气生物膜反应器运行各阶段生物膜生物量变化如图 7 所示。可以看到, 启动阶段生物膜生物量逐渐升高, 完成挂膜。启动阶段完成后,

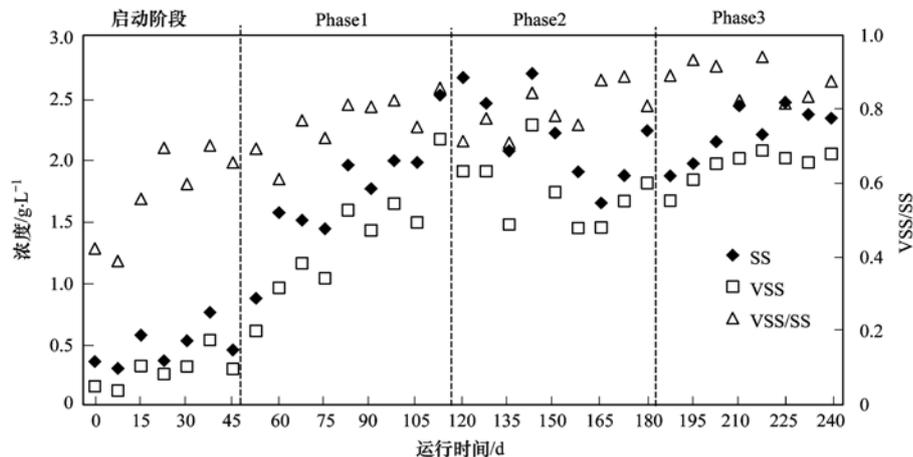


图 7 微气泡曝气生物膜反应器生物膜生物量变化

Fig. 7 Variations of biofilm biomass in the microbubble aerated biofilm reactor

Phase1 阶段生物膜生物量继续升高; Phase2 和 Phase3 阶段生物膜生物量出现波动, 先有所下降, 而后升高并趋于稳定。Phase1 ~ Phase3 阶段平均 SS 浓度分别为 1.42、2.22 和 2.21 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均 VSS 浓度分别为 1.06、1.77 和 1.92 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均 VSS/SS 分别为 0.73、0.80 和 0.87。Phase2 和 Phase3 阶段降低进水 COD 负荷并提高 TN 负荷, 可能造成异养菌数量下降而自养菌数量提高, 使得生物膜生物量先下降后升高。

表 2 厌氧氨氧化和反硝化过程对 TN 去除的贡献率/%

TN 去除贡献率	启动阶段	稳定运行阶段		
		Phase1	Phase2	Phase3
厌氧氨氧化	29.4	49.9	66.1	86.0
反硝化	70.6	50.1	33.9	14.0

2.3.2 生物膜门水平细菌种群变化

微气泡曝气生物膜反应器运行各阶段生物膜样品中检测得到门水平细菌种群如图 8 所示。可以看到, 各阶段门水平细菌种群相对丰度有所变化, 其中的优势类群包括 Proteobacteria (变形菌门)、Planctomycetes (浮霉菌门)、Bacteroidetes (拟杆菌门)、Chloroflexi (绿弯菌门)、Chlorobi (绿菌门)、Nitrospirae (硝化螺旋菌门) 等。

变形菌门中包括与硝化作用、亚硝化作用和反硝化作用相关的菌群; 硝化螺旋菌门亦包含硝化作用相关菌群; 浮霉菌门包含厌氧氨氧化过程相关菌群; 拟杆菌门包含与有机碳降解相关菌群; 绿弯菌门和绿菌门均属于光合细菌, 包含异养脱氮和自养脱氮作用相关菌群, 同时其往往在厌氧氨氧化过程中伴生出现, 对厌氧氨氧化菌群的形成有一定促进作用^[22]。

2.3.3 生物脱氮功能菌群分析

微气泡曝气生物膜反应器运行各阶段生物膜样

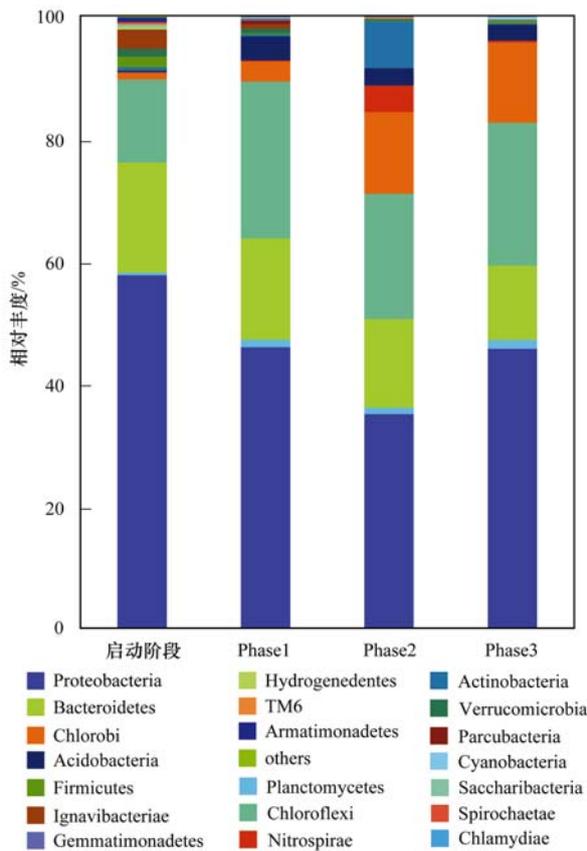


图 8 微气泡曝气生物膜反应器生物膜门水平细菌丰度

Fig. 8 Phylum abundances of bacterial population in the microbubble aerated biofilm reactor

品中检测所得与生物脱氮过程相关功能菌群如表 3 所示, 包括: 亚硝化菌群为 *Nitrosomonas* (亚硝化单胞菌属) 和 *Nitrosolobus* (亚硝化叶菌属); 硝化菌群为 *Nitrobacter* (硝化杆菌属) 和 *Nitrospira* (硝化螺旋菌属); 厌氧氨氧化菌群为 *Candidatus Brocadia* 和 *Candidatus Kueneria*; 反硝化菌群为 *Denitratisoma*、*Pseudomonas* (假单胞菌属)、*Dechloromonas* (脱氮单胞菌属)、*Thauera* (索氏菌属) 以及 *Flavobacterium* (黄杆菌属) [23~25]。

计算微气泡曝气生物膜反应器运行各阶段生物脱氮过程相关功能菌群的相对丰度变化, 结果如图 9 所示。可以看到, 启动阶段至 Phase3 阶段亚硝化菌群平均相对丰度分别为 3.2%、6.0%、21.4% 和 21.7%; 硝化菌群平均相对丰度分别为 14.4%、23.8%、21.4% 和 12.6%; 厌氧氨氧化菌群平均相对丰度分别为 6.3%、11.6%、22.1% 和 39.9%; 反硝化菌群平均相对丰度分别为 49.7%、31.9%、16.1% 和 15.4%。

可见, 微气泡曝气生物膜反应器运行各阶段, 亚硝化菌群和厌氧氨氧化菌群的相对丰度逐渐增加, 而硝化菌群和反硝化菌群的相对丰度逐渐降低。生物脱氮过程相关功能菌群的相对丰度变化与

脱氮过程从硝化-反硝化向 SNAD 过程转变相一致。因此, 在微气泡曝气生物膜反应器中, 控制 DO 浓度并逐渐降低 C/N 比, 是实现 SNAD 过程的可行策略, 并可获得对低 C/N 比废水较高的生物脱氮性能。

表 3 微气泡曝气生物膜反应器生物膜脱氮功能菌群

Table 3 Functional bacterial populations for nitrogen removal in the microbubble aerated biofilm reactor

项目	属	门
亚硝化菌群	<i>Nitrosomonas</i> (亚硝化单胞菌属)	Proteobacteria (变形菌门)
	<i>Nitrosolobus</i> (亚硝化叶菌属)	
硝化菌群	<i>Nitrobacter</i> (硝化杆菌属)	Nitrospirae (硝化螺旋菌门)
	<i>Nitrospira</i> (硝化螺旋菌属)	
厌氧氨氧化菌群	<i>Candidatus Brocadia</i> <i>Candidatus Kueneria</i>	Planctomycetes (浮霉菌门)
	<i>Denitratisoma</i> <i>Thauera</i> (索氏菌属)	Proteobacteria (变形菌门)
反硝化菌群	<i>Dechloromonas</i> (脱氮单胞菌属)	Bacteroidetes (拟杆菌门)
	<i>Pseudomonas</i> (假单胞菌属)	
	<i>Flavobacterium</i> (黄杆菌属)	

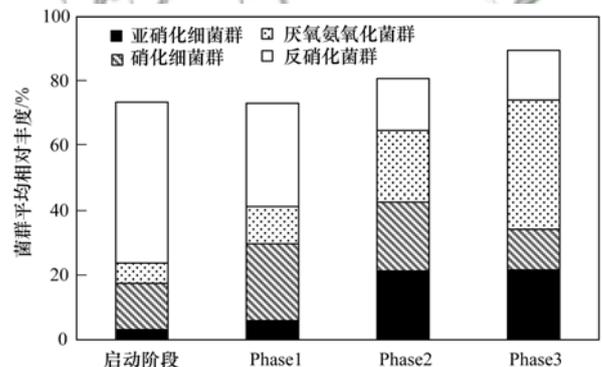


图 9 微气泡曝气生物膜反应器生物膜脱氮功能菌群平均相对丰度

Fig. 9 Relative abundances of functional bacterial populations for nitrogen removal in the microbubble aerated biofilm reactor

3 结论

(1) 微气泡曝气生物膜反应器在低气水比下控制 DO 浓度并降低进水 C/N 比, 可以实现脱氮过程从硝化-反硝化向 SNAD 过程转变, 并可获得对低 C/N 比废水较高的生物脱氮性能。

(2) 控制 DO 浓度低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、进水 C/N 比为 1:2.8 时, SNAD 过程成为生物脱氮的主要途径, TN 平均去除率可达到 76.3%, TN 平均去除负荷为 $1.42 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 厌氧氨氧化过程对 TN 去除的贡献率为 86.0%。

(3)随着进水 C/N 比降低,生物膜中亚硝化菌群和厌氧氨氧化菌群的相对丰度逐渐增加,而硝化菌群和反硝化菌群的相对丰度逐渐降低,与脱氮过程从硝化-反硝化向 SNAD 过程转变相一致。

参考文献:

- [1] San-Martín M I, Mateos R, Carracedo B, *et al.* Pilot-scale bioelectrochemical system for simultaneous nitrogen and carbon removal in urban wastewater treatment plants [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2018, doi: 10.1016/j.jbiosc.2018.06.008.
- [2] 高廷耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程 [M]. (第四版). 北京: 高等教育出版社, 2014. 1-92.
- [3] Bagchi S, Biswas R, Nandy T. Autotrophic ammonia removal processes: ecology to technology [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, **42**(13): 1353-1418.
- [4] 陈家琪. SNAD-MBBR 一体式生物脱氮技术研究 [J]. *中国高新科技*, 2018, (5): 53-56.
- [5] Shalini S S, Joseph K. Start-up of the SHARON and ANAMMOX process in landfill bioreactors using aerobic and anaerobic ammonium oxidising biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **149**: 474-485.
- [6] 王欢, 裴伟征, 李旭东, 等. 低碳氮比猪场废水短程硝化反硝化-厌氧氨氧化脱氮 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 815-821. Wang H, Pei W Z, Li X D, *et al.* Removing nitrogen from low-C/N-piggery-wastewater using shortcut nitrification/denitrification-ANAMMOX [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 815-821.
- [7] Ding S Z, Bao P, Wang B, *et al.* Long-term stable simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process treating real domestic sewage using suspended activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **339**: 180-188.
- [8] Zhao J, Zuo J N, Lin J, *et al.* The performance of a combined nitrification-anammox reactor treating anaerobic digestion supernatant under various C/N ratios [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **30**: 207-214.
- [9] 郑照明, 李军, 侯爱月, 等. 城市生活污水 SNAD 生物膜脱氮特性 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1322-1330. Zheng Z M, Li J, Hou A Y, *et al.* Nitrogen removal performance of SNAD biofilm cultured by domestic wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1322-1330.
- [10] Langone M, Ferrentino R, Cadonna M, *et al.* Stoichiometric evaluation of partial nitrification, anammox and denitrification processes in a sequencing batch reactor and interpretation of online monitoring parameters [J]. *Chemosphere*, 2016, **164**: 488-498.
- [11] 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. Zhang L, Liu P, Ma J, *et al.* Wastewater treatment using a microbubble aerated biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(6): 2277-2282.
- [12] 张明, 刘春, 张磊, 等. SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能——空气通量的影响 [J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(10): 4067-4073. Zhang M, Liu C, Zhang L, *et al.* Performance of a microbubble-aerated biofilm reactor using SPG membrane system: effect of air flux [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(10): 4067-4073.
- [13] 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.
- [14] Zhang L, Liu J L, Liu C, *et al.* Performance of a fixed-bed biofilm reactor with microbubble aeration in aerobic wastewater treatment [J]. *Water Science & Technology*, 2016, **74**(1): 138-146.
- [15] 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. Liu C, Nian Y J, Zhang J, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification in a microbubble-aerated biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2230-2235.
- [16] Huang X, Liu R, Qian Y. Behaviour of soluble microbial products in a membrane bioreactor [J]. *Process Biochemistry*, 2000, **36**(5): 401-406.
- [17] 周正, 王凡, 林兴, 等. 中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1301-1308. Zhou Z, Wang F, Lin X, *et al.* Start-up and regional characteristics of a pilot-scale integrated PN-ANAMMOX reactor [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1301-1308.
- [18] 赵庆良, 刘淑彦, 王琨. 复合式生物膜反应器中生物膜量、厚度及活性 [J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, **32**(6): 39-43. Zhao Q L, Liu S Y, Wang K. Biomass, thickness and activity of biofilm in hybrid biofilm reactors [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1999, **32**(6): 39-43.
- [19] 崔玉雪, 袁琦, 唐媛, 等. 水源水生物预处理中填料生物量的测定方法探讨 [J]. *给水排水*, 2009, **35**(11): 29-31. Cui Y X, Yuan Q, Tang Y, *et al.* A study on measurement of biomass in the biological pretreatment process of source water [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, **35**(11): 29-31.
- [20] Chu Z R, Wang K, Li X K, *et al.* Microbial characterization of aggregates within a one-stage nitrification-anammox system using high-throughput amplicon sequencing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **262**: 41-48.
- [21] Lan C J, Kumar M, Wang C C, *et al.* Development of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in a sequential batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(9): 5514-5519.
- [22] 李滨, 赵志瑞, 马斌, 等. 克隆文库方法分析厌氧氨氧化反应器中细菌群落结构 [J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(12): 159-164, 179. Li B, Zhao Z R, Ma B, *et al.* Analysis on bacterial diversity of an anaerobic Ammonium-oxidizing reactor by use of 16S rDNA clone library [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **35**(12): 159-164, 179.
- [23] 郑林雪, 李军, 胡家玮, 等. 同步硝化反硝化系统中反硝化细菌多样性研究 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 116-121. Zheng L X, Li J, Hu J W, *et al.* Analysis of denitrifying bacteria community composition in simultaneous nitrification and denitrification systems [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 116-121.
- [24] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Mechanisms and microbial structure of partial denitrification with high nitrite accumulation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(4): 2011-2021.
- [25] Ye Z F, Wang F, Bi H T, *et al.* Denitrification of nitrate-contaminated groundwater using a simple immobilized activated sludge bioreactor [J]. *Water Science & Technology*, 2012, **66**(3): 517-524.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	(532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	(540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	(548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	(558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	(567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	(590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	(603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	(614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	(625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	(633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	(640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	(658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	(669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	(677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	(701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	(708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	(724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	(730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	(738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	(747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	(754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	(761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	(774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	(783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	(791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	(799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	(816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	(823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	(845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	(853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	(859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	(869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	(876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	(885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	(893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	(904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	(915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	(924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	(934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	(945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	(953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	(961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	(978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	(987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	(994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	(1003)