

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, 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价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 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)
磁性赭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)
钙预处理对磁性赭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)
NH ₄ ⁺ 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, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 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 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /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对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 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	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	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, 周伟君, 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	窦文清, 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, 甄建国, 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, 甄建国, 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, 童俊, 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 N ₂ O 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 N ₂ O 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)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晚茜, 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, 殷全玉, 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	李峰, 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中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	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禽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)	

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响

李冬¹, 高雪健¹, 张杰^{1,2}, 曹正美¹, 郭跃洲¹, 李帅^{1,2}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 在室温(25℃)下采用3组反应器 R1、R2、R3, 接种成熟厌氧氨氧化颗粒污泥, 在总曝气量一定, 曝停比为1的条件下, 研究了不同曝气密度(3、6、12)对 CANON 工艺启动的影响。结果表明, R1、R2、R3 分别经过 32、29、23 d 实现了 CANON 工艺成功的启动, 较大的曝气密度有利于 CANON 工艺的启动; R1、R2、R3 在周期实验中 pH 分别下降了 0.4、0.55、1.06, 即在总曝气量一定的情况下, R3 因其较大的曝气密度和合适的时间间隔, 更有利于抑制 NOB 活性, 使得系统对 DO 的利用率更高, 提高了系统的脱氮性能; 通过脱氮路径分析可得, 系统中存在着 ANA 和 SNA 两种脱氮路径, SNA 所占比重分别为 19.3%、24.5%、33.6%, 随着曝气密度的提高, SNA 贡献逐渐增大。

关键词: 曝停比; 曝气密度; 脱氮路径; 同时亚硝化/厌氧氨氧化(SNA); 交替亚硝化/厌氧氨氧化(ANA)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0829-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201807089

Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process

LI Dong¹, GAO Xue-jian¹, ZHANG Jie^{1,2}, CAO Zheng-mei¹, GUO Yue-zhou¹, LI Shuai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The effect of aeration densities (3, 6, 12) on the CANON process start-up were investigated in R1, R2, and R3 inoculated mature anaerobic ammonium oxide granule sludge under the same conditions of aeration and aeration/anaerobic time ratio (1:1) at 25℃. The results showed that R1, R2, and R3 of the CANON process were initiated in 32, 29, and 23 d, respectively. A greater aeration density promoted the start-up of the CANON process. In the cycle test, the pH of R1, R2, and R3 decreased by 0.4, 0.55, and 1.06, respectively. R3 exhibited excellent denitrification performance due to its large aeration density and suitable time interval, which increased system efficiency in DO and better inhibited NOB activity. According to the denitrification route analysis, there were two denitrification pathways of ANA and SNA in the system. The proportion of SNA was 19.3%, 24.5%, and 33.6%, respectively. With the increase in aeration density, the contribution of SNA increased gradually.

Key words: aeration time and anaerobic time ratio; aeration density; denitrification pathway; simultaneous nitrification/ANAMMOX (SNA); alternate nitrification-ANAMMOX (ANA)

全程自养脱氮工艺 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 是近年来受到广泛关注的一种新型脱氮工艺, 与传统工艺相比, 该工艺具有节省曝气量、无需外加碳源、污泥产量低、工艺流程简单等诸多优点, 是近年来生物脱氮研究的重点^[1,2]。

CANON 工艺是将亚硝化和厌氧氨氧化这两种完全不同的反应过程结合在一个反应器内, 在好氧条件下 AOB 以 O_2 为电子受体, 氧化 NH_4^+-N 生成 $NO_2^- -N$, 同时避免 $NO_2^- -N$ 被 NOB 进一步氧化成 $NO_3^- -N$, 在厌氧条件下 ANAMMOX 利用 $NO_2^- -N$ 作为电子受体氧化 $NH_4^+ -N$ 。CANON 工艺成功启动及高效脱氮的关键是控制反应器内合适的 DO, 创造一个 AOB 与 ANAMMOX 为优势菌种并抑制 NOB 的微环境, 从而推动反应的顺利进行^[3]。因此, 在同一反应器中提供满足好氧与厌氧功能菌不同需求的兼容环境, 是该工艺的一个难点^[4], 间歇曝气作为

调控微环境 DO 的一种重要控制因素, 受到了研究者的广泛关注^[5]。研究表明, 间歇曝气工况下, 历经“饥饿”的 AOB 可更多地利用氨氮氧化产生的能量, 较连续曝气更快实现富集, 更有利于创造 CANON 工艺的所需的反应环境, 维持 CANON 工艺的稳定运行, 达到较好的总氮去除效率^[6]。目前关于 CANON 工艺间歇曝气研究大多集中于曝停比这一参数, 李冬等^[7]在曝停比为 1(0.5 h:0.5 h) 的间歇曝气条件下, 21 d 启动 CANON 工艺, 总氮去除率达到 70.75%, 且系统更稳定; 秦宇等^[8]发现曝停比为 1(2 h:2 h) 时, 系统处于最佳工况, 各菌种互相协同代谢, 使得单级自养脱氮体系高效运行; 郑照明等^[9]发现曝停比为 1(0.33 h:0.33 h) 时, 反应器可以取得良好的脱氮性能, 反应器的 $NH_4^+ -N$ 、

收稿日期: 2018-07-12; 修订日期: 2018-07-31

基金项目: 北京市青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)

作者简介: 李冬(1976~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为污水再生利用, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

TN 平均去除率分别为 95%、89%；李亚峰等^[10]在曝停比为 1(0.75 h:0.75 h)时, 22 d 成功启动亚硝化, 并有效抑制了硝化反应. 这些研究表明, 曝停比为 1 的曝气工况为 CANON 工艺中各功能菌提供了良好的耦合条件, 但是上述曝停比为 1 的间歇曝气具体参数不同, 导致效果差别较大, 不能系统地全面地反映最佳曝气参数.

曝气参数对于 CANON 工艺的影响主要是通过两个因素体现, 即反应器内总曝气量和持续时间; 在最佳曝停比 1 的条件下, 研究者探究出了最佳曝气量和持续时间的相关参数, 因此想要进一步改善系统曝气工况, 需在该持续时间内合理分配总曝气量, 基于此笔者提出“曝气密度”这一参数, 即在反应器的一个循环周期(忽略进水、静置、排水时间)内, 曝停比 α 和总曝气量一定的情况下, 在该反应器反应过程中曝气的频率, 叫做曝停比 α 下该反应器的曝气密度. 采用不同曝气密度探究曝气密度对于 CANON 工艺的影响, 实现在有效时间内, 曝气时间的合理分配, 确定 CANON 工艺的最佳间歇曝气工况.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用 3 个相同规格的 SBR 反应器 R1、R2、R3, 有效容积 2 L. 反应器底部安装曝气盘进行微孔曝气, 由气体流量计控制曝气强度, 由时控开关与电磁阀控制曝气密度; 内置搅拌机使泥、

水、气混合均匀. 进水、曝气和排水均采用自动控制. 反应器内部装有 pH、DO 及温度在线监测探头.

1.2 接种污泥和实验水质

接种污泥采用实验室稳定运行的厌氧氨氧化颗粒污泥, 其平均粒径为 345 μm , 平均氨氮去除率为 82.7% 以上, 初始污泥质量浓度为 1 975 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 进水采用人工配水, 分别以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NaHCO_3 作为 NH_4^+-N 和碱度的来源, 营养液 I、II 作为营养物质^[11], 实验水质如表 1.

1.3 实验方法

采用 SBR 反应器, 包括进水阶段 2 min、反应阶段 12 h、沉淀时间 5 min、排水 3 min. 温度控制在 30℃ 左右. 本实验在曝停比为 1 的基础上, 探究不同曝气密度的间歇曝气对 CANON 的影响, 本实验中曝气密度定义为在反应器的一个循环周期(忽略进水、静置、排水时间)内, 曝停比 α 和总曝气量一定的情况下, 在该反应器反应过程中曝气的频率, 叫做曝停比 α 下该反应器的曝气密度. R1 曝停时间比为 2 h:2 h, 其曝气密度为 3(12 h:4 h), R2 曝停时间比为 1 h:1 h, 其曝气密度为 6(12 h:2 h), R3 曝停时间比为 0.5 h:0.5 h, 其曝气密度为 12(12 h:1 h)实验初期采用较小曝气速率, 随着系统性能提升, 逐步提高曝气速率, 按照曝气速率大小分为 3 阶段, 低曝气阶段(1~8 d)、中曝气阶段(9~20 d)、高曝气阶段(21~35 d), 不同阶段曝气速率不同, 具体参数如表 2.

表 1 实验水质情况/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Characteristics of water for the experiment/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

NH_4^+-N	碱度	$\text{MgSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	CaCl_2	KH_2PO_4	营养液 I	营养液 II
80	1 000	80	40	40	1	1

表 2 各阶段运行参数

Table 2 Operation parameters of each stage

项目	R1			R2			R3		
时间/d	1~8	9~20	21~35	1~8	9~20	21~35	1~8	9~20	21~35
曝气速率/ $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$	30	45	60	30	45	60	30	45	60
曝气密度		3			6			12	
曝气: 停曝/h: h		2:2			1:1			0.5:0.5	

1.4 分析方法

DO、温度、pH 值均采用 WTW 在线测定仪测定, 水样分析中 NH_4^+-N 的测定采用纳氏试剂光度法, NO_2^--N 采用 N -(1-萘基)-乙二胺光度法, NO_3^--N 采用紫外分光光度法, 其余水质指标的分析方法均采用国标方法^[12], CANON 速率、厌氧氨氧化反应速率、硝化速率按照李冬等^[13]的方法进行测定.

2 结果与讨论

2.1 CANON 工艺的启动

本实验接种的厌氧氨氧化颗粒污泥的性能良好, 氨氮去除率为 80% 以上. 在此基础上, 通过不同密度的间歇曝气逐步富集亚硝化细菌, 实现 CANON 颗粒污泥工艺的启动. 实验初期, 考虑到 ANAMMOX 菌从厌氧环境突然转换至好氧环境, 为

避免较高的曝气对其造成冲击, 将曝气工况下的曝气速率开始设置为 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 随着系统性能的提升, 曝气速率逐步提高至 45 、 $60 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

启动期间反应器的性能如图 1。实验初期, 污泥的性能骤降, 污泥的氨氮去除率和总氮去除率下降为 12% 、 9% 左右, 在此期间反应器性能没有提升甚至出现下降, 为适应阶段。不同曝气密度下, 反应器的适应期不同, R1、R2、R3 分别经过了 2、3、4 d 的适应期, 曝气密度越大适应期越长, 因为实验初期反应器内主导菌种为 ANAMMOX 菌, 少量的好氧菌即使在较低的曝气速率下, 不能消耗掉相对过量的氧气, 使反应器内氧气积累, 曝气工况下反应器内 DO 含量达到 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即使在停曝阶段, DO 的数值也高达 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO 在短时间内也不能降低适宜的数值, 进一步抑制了 ANAMMOX 菌^[14]。随着曝气密度的变小, 系统单个周期内停曝时间逐渐变长, 较长的停曝时间有利于系统中好氧菌及时将曝气阶段积累的氧气消耗, 为此阶段主导的厌氧氨氧化反应创造低 DO 环境, 减少 DO 对系统的冲击, 有利于反应的进行, 使得系统较快地适应, 较大的曝气密度, 使得系统单个周期内停曝时间较短, 在停曝阶段系统中好氧菌还未使 DO 降至适宜厌氧氨氧化反应的浓度, 系统又开始了下一阶段的曝气, 导致反应器内 DO 一直处于较高水平, 使得该阶段反应器内占主导地位的 ANAMMOX 菌受到抑制, 从而导致较长的适应阶段, 故适应时间更长。

在 1 ~ 8 d 内, 3 个反应器曝气速率为 $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 处于较低的水平, 在该曝气速率下经过适应期后, 反应器的性能逐渐开始提升。在低曝气阶段, R1 曝气密度的反应器性能较好, 因为此阶段反应的限制因素为厌氧氨氧化过程, 由于此时反应器内 ANAMMOX 菌还是优势菌种, 较低曝气密度的反应器, 单个停曝周期内停曝时间较长, 随着系统中 AOB 等好氧菌开始富集, 数量逐渐增多, 曝气过程中积累的过量的 DO 逐渐减少, 在停曝期间能够被 AOB 等好氧菌更快地消耗掉, 为 ANAMMOX 菌提供逐渐增多的反应时间, 使得曝气阶段产生的亚硝酸盐氮更好地去除, 反应器的总氮去除率逐渐增加; 而在较大曝气密度 R3 中, 因为停曝时间短, 除去 AOB 等好氧菌消耗掉曝气阶段产生的过量的 DO 所需时间, 为厌氧氨氧化过程留下的时间太短, 使得反应器中厌氧氨氧化过程不充分, 最终导致反应器性能提升较慢; 除此之外, 由图 1(e) 可知, 由于曝气原因使得污泥粒径较接种时厌氧氨氧化颗粒污泥产生一定的减小, 这因为在曝气工况下气体的剪

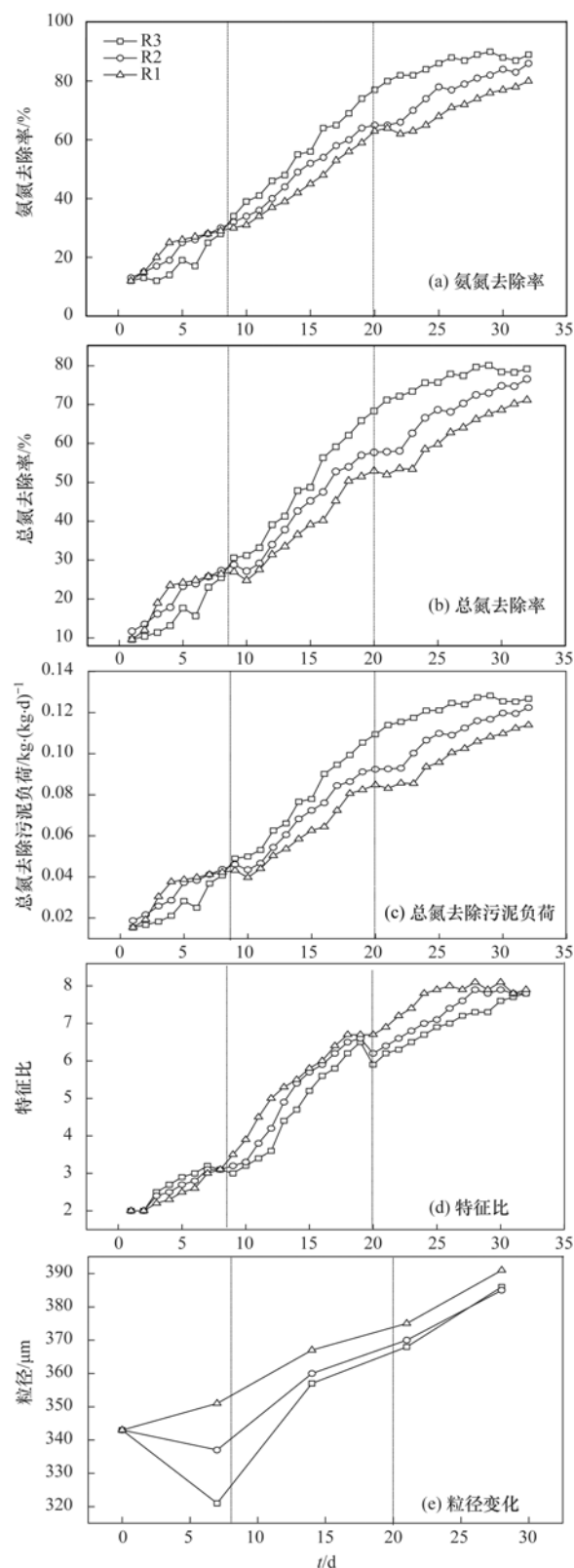


图 1 CANON 工艺启动过程

Fig. 1 Start-up diagram of the CANON process

切力等外力条件下使得颗粒污泥外部松散的部分脱落为絮状污泥, 造成颗粒污泥的粒径变化, 在此阶段, 曝气密度越小污泥粒径减小程度越小, 因为较小曝气密度使得单个曝气周期内停曝时间长。李冬等^[15]的研究表明较长的停曝时间有利于刺激微生物

物分泌 PN 与 PS, 使污泥颗粒变得紧实, 有利污泥颗粒化的维持; R1 反应器中致密的颗粒进一步促进其脱氮性能。

随着反应器性能的提升, 在 9~20 d 将曝气速率提高为 $45 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 3 个反应器的脱氮进一步提升。此时较高曝气密度的 R3 反应器提升速度最快, 因为经过上一阶段 AOB 等好氧菌的增殖, 系统内各菌群逐渐平衡。在各曝气密度下, 曝气时反应器 DO 为 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 停曝稳定后 DO 维持在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 停曝段 DO 均迅速降低至适宜厌氧氨氧化过程所需浓度, 给厌氧氨氧化过程提供了充足时间, 这时亚硝化过程成了反应的限制因素。在提升曝气速率后, 促进了亚硝化过程, 为厌氧氨氧化反应提供了充足的底物, 3 个反应器氨氮去除率、总氮去除率和总氮去除负荷均呈上升趋势, R3 反应器趋势更明显, 因为 3 个反应器虽然总曝气时间相同, 但是由于初期 AOB 等好氧菌较少的生物量, 使得反应器内 DO 在较短的停曝期间内下降较慢, 导致 R3 较 R2、R1 相比整体处于较高 DO 浓度时间较长, 为 AOB 等好氧菌的生长提供了更有利的环境, 有利于 AOB 的增殖, 增加了 AOB 生物量, 为此阶段 ANAMMOX 菌的反应提供了充足的底物。除此之外, 经过 8 d 的低曝气阶段的适应, 虽然污泥颗粒经过曝气的吹脱使得污泥粒径变小, 但是颗粒污泥更加密实, 更有利于减少较高 DO 对 ANAMMOX 菌的冲击^[16], 另外由于吹脱下来的絮状污泥的存在, 提高了系统内菌种对 DO 的利用率^[17], 有进一步促进了 AOB 和 ANAMMOX 的增殖, 有利于系统高效稳定运行。R2、R3 由于被吹脱下来的絮状污泥较少, 加上前 8 d 处于较高 DO 的相对时间较短, 使得 R2、R3 反应器中 AOB 生物量较低, 在曝气速率提升后不能充分利用 DO, 为 ANAMMOX 菌提供充足的底物, 导致系统性能增长速度相对较慢。

在 21~35 d 将曝气速率提升至 $60 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。曝气速率提升后 R3 脱氮性能进一步提升, R1、R2 反应器在曝气速率的提升后, 表现出一定的迟滞性, 反应器性能没有提升, 甚至在 R1 中表现出一定的下降, 经过 2 d 左右的适应期后反应器性能初步提升。这是因为经过前 20 d 的培养, R1、R2、R3 中的好氧菌的数量体现出一定的差异, 好氧菌的数量 R3 中最多, R2、R1 依次减少。R3 中相对较多的好氧菌能够在曝气量提升后迅速利用 DO, 维持反应器中 DO 供给与消耗的平衡, 维持系统内适宜的 DO 浓度。R1、R2 由于好氧菌量少, 在此阶段初期系统内 DO 供给大于消耗, 供给相对过剩, 使得反应器内 DO 较高, 在此浓度下, 使得 NOB 活性得到

提升, 发生了硝化反应, 减少了作为下一阶段厌氧氨氧化底物的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的产生量, 并且生成了系统无法利用的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 导致反应器脱氮性能的下降^[18], 在第 21 d 的时候 R1、R2 反应器内特征比的突降, 进一步证明了 NOB 活性的提升。

R1、R2、R3 分别在第 32、29、23 d 时, 特征比稳定在 7.7、7.8、7.9 左右, 接近理论值 8^[19], CANON 工艺启动成功。

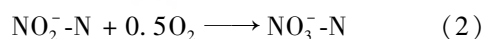
2.2 反应器典型周期内参数变化

反应器内功能菌的活性和系统的脱氮性能与反应器内 DO 和 pH 的变化有着密切联系^[20]。由亚硝化过程的反应式(1)可得, 在好氧条件下, AOB 以 O_2 为电子受体氧化 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 同时消耗碱度, 生成 H^+ , 使得系统内 pH 下降; 由硝化过程反应式(2)可得, NOB 在过量氧气的条件下将 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 氧化成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$; 在厌氧条件下, 由反应式(3)可得, ANAMMOX 以 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 为电子受体, 氧化 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 同时消耗 H^+ , 产生碱度, 使系统内 pH 上升; 由 CANON 工艺总反应式(4)可得, 该工艺是消耗碱度产生 H^+ , 反应进行程度可以由产生 H^+ 的浓度, 即 pH 的下降值进行表征。

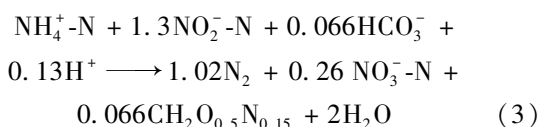
亚硝化过程:



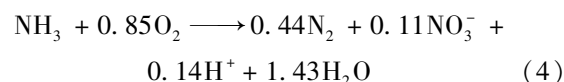
硝化过程:



厌氧氨氧化过程:



CANON 过程:



因此本实验对反应器内 DO 和 pH 的变化进行了在线监测, 间接反映底物消耗情况, 从而明确菌种活性变化^[21]。图 2 为 3 个反应器 CANON 工艺稳定运行后一个典型周期内 pH 及 DO 变化, 3 个反应器在曝气期间 DO 值在最适宜区间范围内为 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, pH 值均在曝气阶段出现下降, 停止曝气后系统内剩余的 DO 被迅速消耗, pH 值开始触底反弹, 在图像中出现“氨谷”(pH 曲线上出现由下降转为上升的拐点, 称为“氨谷”^[22])。卞伟等^[23]的研究表明, “氨谷”的相关参数可以表征 AOB 与 NOB 的竞争关系从而确定最佳曝气参数。

3 个反应器在周期实验的初期, pH 下降较大, 随着反应的进行 pH 下降趋势逐渐减缓至稳定, 当

初次曝气时间累计达到 2 h 时, R3 的 pH 降幅为 0.74 (7.95 ~ 7.21), R2 的降幅为 0.4 (7.95 ~ 7.55), R1 的降幅为 0.31 (7.95 ~ 7.64), 而在周期末期曝气累计时间 2 h 时, 这个降幅分别为 0.15、0.1、0.2, pH 降幅的大小反映了系统中 AOB 活性的变化, pH 降幅越大 AOB 活性越强, 3 个反应器在周期实验的初期, 由于基质充足, 为 AOB 提供了充足的底物, AOB 体现出较高的活性, 除此之外, 此时系统中 pH 最高. 付昆明等^[20]的研究表明, 微生物的生长、繁殖和环境中的 pH 值密切相关, pH 值影响微生物细胞膜的通透性及其表面带电性, AOB 的生长需要较高的 pH^[24], 此外, 较高的 pH 使得 FA 维持在较高水平, 此时硝化基质浓度超过 NOB 的转化利用阈值, 而低于 AOB 的转化利用阈值, 有利于抑制 NOB 的活性. 随着反应的进行, 基质和 pH 值降低, AOB 优势逐渐丧失, 所以在周期的末期, 在曝气时间、曝气量相同的情况下, pH 下降数值较一开始减少, 即 AOB 活性降低.

由 CANON 反应式可得, 反应进行得越完全, 产生的 H^+ 越多, 即 pH 越低. 经过整个周期实验后, R1、R2、R3 的 pH 的总下降值分别为, 0.4 (7.95 ~ 7.55)、0.55 (7.95 ~ 7.4)、1.06 (7.95 ~ 6.89), 3 个反应器内 pH 的下降值随着曝气密度的增大而增大, 采用较大的曝气密度, 可以提高系统中 DO 的利用率, 即反应器的性能随着曝气密度的增大而增强.

2.3 脱氮路径及功能菌活性分析

为探究不同曝气密度下系统内氮素反应路径, 对 3 个反应器典型周期内脱氮路径进行分析, 结果如表 3.

表 3 典型周期内曝气段/停曝段氮素变化

反应器	氨氮消耗/ $mg \cdot L^{-1}$		亚硝酸盐氮积累/ $mg \cdot L^{-1}$		硝酸盐氮生成/ $mg \cdot L^{-1}$		$\Delta\rho(NO_3^- - N)/\Delta\rho(NH_4^+ - N)$
	曝气	停曝	曝气	停曝	曝气	停曝	
R1	52.17	27.83	36.73		2.0	7.5	0.119
R2	53.97	26.03	34.37		2.4	6.9	0.116
R3	57.10	22.90	30.22		3.2	5.8	0.112

在停曝期间, R1、R2、R3 反应器内硝酸盐氮的生成量/氨氮的消耗量 (0.268、0.264、0.258) 的比值接近于厌氧氨氧化反应的理论值 0.26, 即此时系统内厌氧氨氧化菌在厌氧条件下, 利用上一阶段曝气产生的 $NO_2^- - N$, 发生了厌氧氨氧化反应, 即系统内存在着交替亚硝化/厌氧氨氧化 (ANA).

在曝气段, 3 个反应器积累的亚硝酸盐氮均远远小于曝气段氨氮的消耗量, 由亚硝化反应式可得, 在亚硝化过程中亚硝酸盐氮的积累量: 氨氮消耗量应为 1:1 (由于硝酸盐氮生成量相对了较

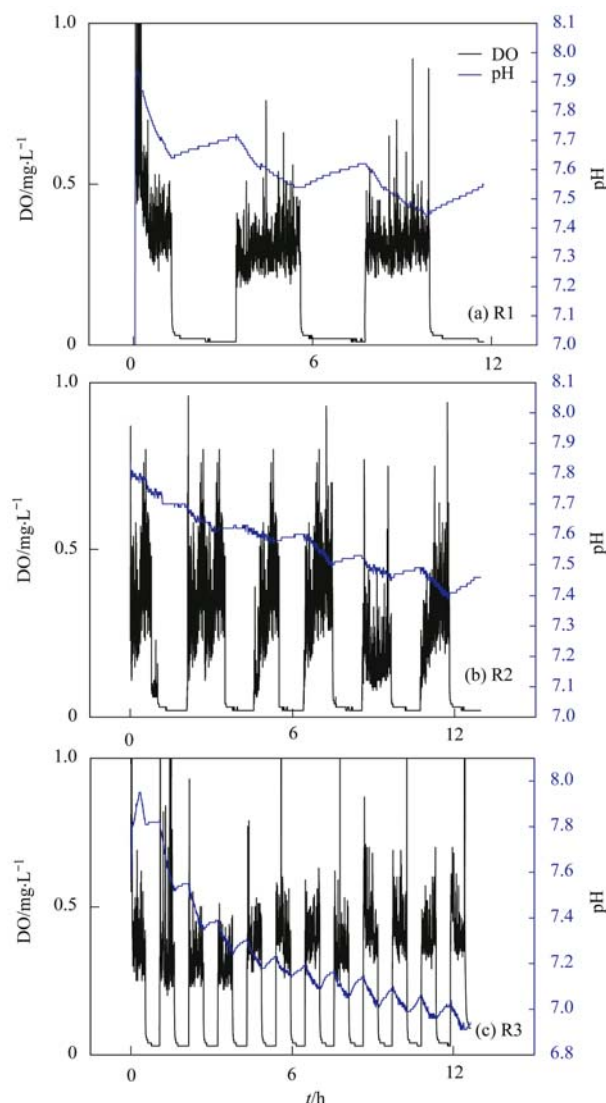


图 2 典型周期内 pH 及 DO 变化

Fig. 2 The pH and DO changes during a typical cycle

少, 故硝化反应造成的亚硝酸盐氮损失可以忽略不计), 此时 R1、R2、R3 反应器内亚硝酸盐氮积累量与氨氮的消耗量之间差值分别为 15.44、19.60、26.88 $mg \cdot L^{-1}$, 差值是由于颗粒污泥结构致密, 在其内部存在着明显的 DO 浓度梯度, 不同功能菌在颗粒污泥中呈层状分布, 使得即使在曝气阶段颗粒污泥的内部仍然可以发生厌氧氨氧化反应, 即此时系统中存在着同时亚硝化/厌氧氨氧化 (SNA) 脱氮路径, 曝气过程中亚硝酸盐氮积累量与氨氮的消耗量之间差值的大小可以间接反映

系统中 SNA 路径所占的比重多少,以 R1 为例,曝气阶段亚硝酸盐氮积累量 $36.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,由亚硝化反应式得,此时用于亚硝化的氨氮也为 $36.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时曝气段共消耗 $52.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮,多余的 $15.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮为 SNA 路径所消耗。

图 3 为不同脱氮路径所占比例,3 个反应器中主要的脱氮路径为 ANA,但是随着曝气密度的变大,ANA 路径的贡献逐渐变小 (80.7% 、 75.5% 、

66.4%),SNA 路径的贡献逐渐变大 (19.3% 、 24.5% 、 33.6%),系统性能也逐渐提高,通过合适比例的 ANA 和 SNA 双重路径,更有利于系统性能的提升,这与张杰等^[25]的研究一致,这是因为在连续曝气工况下系统中主要存在着 SNA 路径,随着曝气密度增大间歇曝气工况下,系统内参数逐渐趋同于连续曝气模式,故随着曝气密度的变大系统中 SNA 路径所占比率逐步提升,系统可以通过较高比率的 SNA 路径来提高性能。

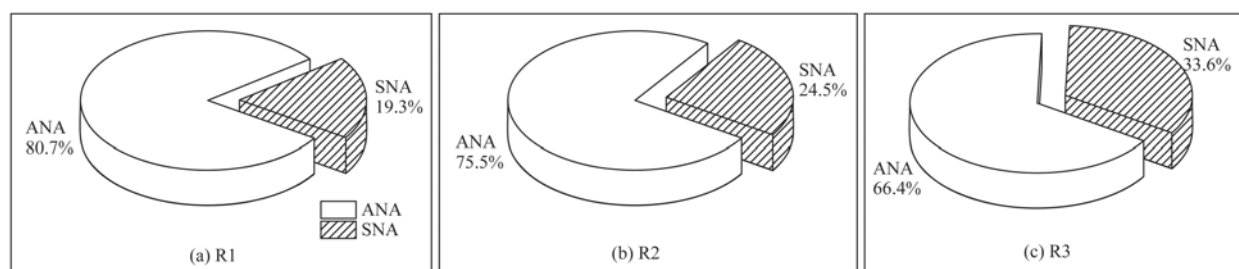


图 3 脱氮路径比例

Fig. 3 Denitrification pathway ratio

为比较不同曝气密度下反应器内功能菌活性以及 NOB 被抑制程度,分别测定了 3 个反应器的反应速率,结果如图 4. R1、R2、R3 反应器中 CANON 速率逐渐提高,但是厌氧氨氧化速率和硝化速率却逐渐降低,R3 中 CANON 速率最高为 $8.1 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$,厌氧氨氧化速率和硝化速率最低分别为 $9.6 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$ 和 $0.19 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$,因为 CANON 工艺的最终效果取决于亚硝化和厌氧氨氧化过程的配合,厌氧氨氧化过程中亚硝酸氮的消耗量:氨氮的消耗量为 1.32:1,即亚硝酸氮的产生量最终决定了氨氮的消耗量,即 CANON 工艺的总性能,亚硝化过程为此时 CANON 工艺的限制条件^[26],应将硝化反应控制在亚硝化阶段,防止亚硝酸盐氮被亚硝酸盐氧化菌(NO_B)进一步氧化为硝酸盐氮^[27,28]. R1、R2 虽然厌氧氨氧化速率较高,但是受到亚硝酸氮供给的影响,导致其

整体 CANON 工艺性能没有 R3 高,除此之外,R1、R2 较高的硝化速率说明了系统中 NOB 的活性增强,同亚硝化过程争夺底物,减少了亚硝酸盐氮供给,进一步导致 CANON 工艺的性能降低.这是因为相关研究表明^[21],曝气时间过长会使亚硝酸盐氮积累率下降,导致短程硝化向全程硝化转变,且曝气时间比越小越有利于亚硝酸盐氮积累,R3、R2、R1 中的曝气时间逐渐增加,间歇曝气工况下 AOB 的“饱食饥饿”优势逐渐减小,对 NOB 的抑制能力逐渐减小,使得系统中 NOB 活性的提升。

3 结论

(1)在 CANON 工艺的启动初期,限制因素为厌氧氨氧化过程,此时较低曝气密度有利于系统性能的提升,随着反应进行,限制因素变为亚硝化过程,较大的曝气密度可以促进亚硝化反应。

(2)R1、R2、R3 分别第 32、29、23d 特征比稳定在 7.7、7.8、7.9,总氮去除率达到 72.5% 以上,实现 CANON 工艺启动,较大的曝气密度启动更快。

(3)R1、R2、R3 在周期实验中 pH 分别下降了 0.4、0.55、1.06,即较大的曝气密度,有利于提高系统对 DO 的利用率,提高系统的总氮去除率。

(4)R1、R2、R3 中 SNA 所占比重分别为 19.3%、24.5%、33.6%,随着曝气密度的提高,脱氮路径中 SNA 所占的比例逐渐提高,NOB 的抑制更加彻底。

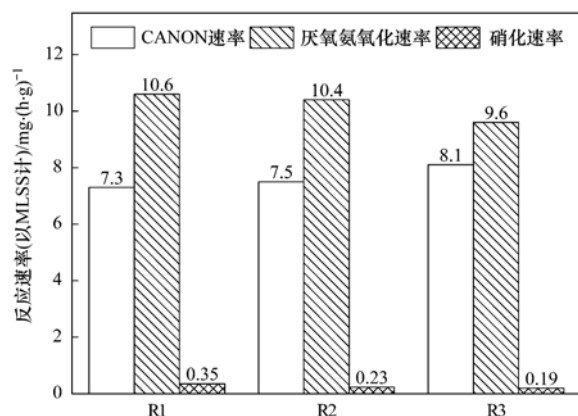


图 4 不同曝气密度下反应速率

Fig. 4 Reaction rate at different aeration densities

参考文献:

- [1] Fux C, Velten S, Carozzi V, *et al.* Efficient and stable nitrification and denitrification of ammonium-rich sludge dewatering liquor using an SBR with continuous loading[J]. *Water Research*, 2006, **40** (14): 2765-2775.
- [2] Wang Z, Peng Y Z, Miao L, *et al.* Continuous-flow combined process of nitrification and ANAMMOX for treatment of landfill leachate[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 514-519.
- [3] 张姚, 韩海成, 王伟刚, 等. 溶解氧对 CANON 颗粒污泥自养脱氮性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(12): 4501-4510.
- Zhang Y, Han H C, Wang W G, *et al.* Impact of dissolved oxygen on autotrophic nitrogen removals of the granular sludge in a CANON process[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37** (12): 4501-4510.
- [4] 左早荣, 付昆明, 仇付国, 等. CANON 工艺的研究现状及面临困难分析[J]. *水处理技术*, 2013, **39**(9): 15-19.
- Zuo Z R, Fu K M, Qiu F G, *et al.* Analysis of the research status and difficulties of CANON process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, **39**(9): 15-19.
- [5] Ma B, Bao P, Wei Y, *et al.* Suppressing nitrite-oxidizing bacteria growth to achieve nitrogen removal from domestic wastewater via anammox using intermittent aeration with low dissolved oxygen[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 13048.
- [6] Yang J J, Trela J, Zubrowska-Sudol M, *et al.* Intermittent aeration in one-stage partial nitrification/anammox process[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **75**: 413-420.
- [7] 李冬, 李晓莹, 杨杰, 等. SBR 中不同曝气方式下 CANON 工艺的启动与运行[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, **49**(9): 109-116.
- Li D, Li X Y, Yang J, *et al.* Start-up and long term operation of CANON in sequencing batch reactor with different aeration patterns[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, **49** (9): 109-116.
- [8] 秦宇, 郭劲松, 方芳, 等. 溶解氧及曝停比对单级自养脱氮系统微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 493-498.
- Qin Y, Guo J S, Fang F, *et al.* Effect of DO and aeration/non-aeration ratio on the microbial community structure in one-step SBBR completely autotrophic nitrogen removal process[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(2): 493-498.
- [9] 郑照明, 李军, 杨京月, 等. SNAD 工艺在不同间歇曝气工况下的脱氮性能[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(2): 511-519.
- Zheng Z M, Li J, Yang J Y, *et al.* Nitrogen removal performance of the SNAD process under different intermittent aerobic conditions[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 511-519.
- [10] 李亚峰, 秦亚敏, 谢新立, 等. 间歇曝气条件下短程硝化的实现及影响因素研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(7): 1518-1521.
- Li Y F, Qin Y M, Xie X L, *et al.* Study on achievement and influencing factors of shortcut nitrification in intermittent aeration[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5** (7): 1518-1521.
- [11] Van De Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [12] 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.
- [13] 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 等. 有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1294-1300.
- Li D, Wang Y J, Lü Y F, *et al.* Effect of organic carbon source on start-up and operation of the CANON granular sludge process[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1294-1300.
- [14] 李冬, 崔少明, 梁瑜海, 等. 溶解氧对序批式全程自养脱氮工艺运行的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1131-1138.
- Li D, Cui S M, Liang Y H, *et al.* The effect of dissolved oxygen on running canon process in sequencing batch reactor[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1131-1138.
- [15] 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 等. 曝停时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2289-2295.
- Li D, Guo Y Z, Cao M Z, *et al.* Effect of different ratios of anaerobic time and aeration time on the formation of partial nitrification granules[J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (5): 2289-2295.
- [16] Vázquez-Padín J, Mosquera-Corral A, Campos J L, *et al.* Microbial community distribution and activity dynamics of granular biomass in a CANON reactor[J]. *Water Research*, 2010, **44**(15): 4359-4370.
- [17] 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 等. 颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 672-678.
- Sun Y F, Han X Y, Zhang S J, *et al.* Start-up of combined flocculant CANON process and the effects of SRT on reactor Performance[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 672-678.
- [18] 王会芳, 付昆明, 左早荣, 等. 水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4161-4167.
- Wang H F, Fu K M, Zuo Z R, *et al.* Effects of hydraulic retention time and dissolved oxygen on a CANON reactor with haydite as carrier[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4161-4167.
- [19] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 好氧条件下 CANON 工艺的启动研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1689-1694.
- Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Study of CANON process start-up under aerobic conditions[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(6): 1689-1694.
- [20] 付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 等. 初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N_2O 释放的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37** (11): 4261-4267.
- Fu K M, Wang H F, Su X Y, *et al.* Effect of Initial pH on nitrogen removal performance and N_2O emission of a sequencing batch CANON reactor[J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (11): 4261-4267.
- [21] 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 等. 游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 1075-1081.
- Sun H W, Lü X T, Wei X F, *et al.* Synergetic inhibitory effect of free ammonia and aeration phase length control on the activity of nitrifying bacteria[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1075-1081.
- [22] 孙洪伟, 尤永军, 赵华南, 等. 游离氨对硝化菌活性的抑制及可逆性影响[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 95-100.
- Sun H W, You Y J, Zhao H N, *et al.* Inhibitory effect of free ammonia on the activity of nitrifying bacteria and recoverability[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 95-100.
- [23] 卞伟, 李军, 赵白航, 等. 硝化污泥中 AOB/NOB 对硝化特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2395-2401.

- Bian W, Li J, Zhao B H, *et al.* The effect of AOB/NOB in nitrifying sludge on nitrification characteristics [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2395-2401.
- [24] 王淑莹, 李论, 李凌云, 等. 快速启动短程硝化过程起始 pH 值对亚硝酸盐积累的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2011, **37**(7): 1067-1072.
- Wang S Y, Li L, Li L Y, *et al.* Effect of initiative pH value on accumulation of nitrite during the process of rapid start-up of partial nitrification [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011, **37**(7): 1067-1072.
- [25] 张杰, 成朔, 李冬, 等. AUSB 中置曝气启动连续流全程自养脱氮工艺[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, **50**(2): 1-7.
- Zhang J, Cheng S, Li D, *et al.* Development of continuous flow CANON process in the middle-setting aerated AUSB reactor[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, **50**(2): 1-7.
- [26] 苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 曝停时间比对间歇曝气 SBR 短程硝化的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1152-1158.
- Su D X, Li D, Zhang X J, *et al.* Effects of different ratios of aeration time and anaerobic time on shortcut nitrification in the intermittent aeration SBR [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1152-1158.
- [27] 彭永臻, 杨岸明, 李凌云, 等. 短程硝化最优曝气时间控制与硝化种群调控[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, **45**(2): 101-105.
- Peng Y Z, Yang A M, Li L Y, *et al.* Optimal control of aeration duration and nitrifying population regulation for partial nitrification [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, **45**(2): 101-105.
- [28] Gao D W, Peng Y Z, Li B K, *et al.* Shortcut nitrification-denitrification by real-time control strategies [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(7): 2298-2300.



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 Liaohe 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 Juan, <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 Nitrification 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)