

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骜鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH₄⁺/NO₃⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

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 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响

李冬¹, 王艳菊¹, 吕育锋¹, 曹瑞华¹, 李帅², 张杰^{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: 采用两组平行的 SBR 反应器 R1 和 R2, 通过分别添加有机碳源和不添加有机碳源对比实验, 研究有机碳源对全程自养脱氮 (CANON) 颗粒污泥工艺启动的影响, 通过改变有机碳源浓度对比实验, 研究有机碳源对 CANON 工艺运行的影响. 结果表明, 50 mg·L⁻¹ 有机物的存在可以加快 CANON 颗粒污泥工艺的启动, R1 和 R2 分别于 23 d 和 32 d 成功启动 CANON 颗粒污泥工艺. 适量有机物 (不超过 150 mg·L⁻¹) 的存在会通过增强亚硝化菌 (AOB) 及厌氧氨氧化菌 (AnAOB) 的活性和促进反硝化作用来提高氨氮及总氮去除率, R1 和 R2 的最高氨氮和总氮去除率分别为 92%、88% 和 89%、80%. 进一步实验表明, 过量的有机碳源 (超过 200 mg·L⁻¹) 会抑制 AOB 及 AnAOB 的活性, 从而降低氨氮及总氮去除率, 但是会促进反硝化反应并提高其对系统脱氮的贡献率.

关键词: SBR; 有机碳源; 全程自养脱氮; 颗粒污泥; 低氨氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1294-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201707133

Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process

LI Dong¹, WANG Yan-ju¹, LÜ Yu-feng¹, CAO Rui-hua¹, LI Shuai², ZHANG Jie^{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 organic carbon on the start-up and operation of the CANON granular sludge process was investigated in two SBR reactors with different strategies: gradually increased organic carbon concentration (R1) and without organic carbon (R2). The results showed that adding 50 mg·L⁻¹ organic carbon accelerated the start-up of the CANON granular sludge process. R1 and R2 were started up in 23 d and 32 d, respectively. Moreover, the appropriate organic carbon enhanced the activity of AOB, AnAOB, and denitrification, increasing the ammonia removal rates and total nitrogen (TN) removal rates. The maximum ammonia removal rates and total nitrogen removal rates of R1 were 92% and 88%, respectively. The maximum ammonia removal rates and total nitrogen removal rates of R2 were 89% and 80%, respectively. Further tests showed that excessive organic carbon concentration decreased the activity of AOB and AnAOB and reduced the removal efficiency of ammonia and total nitrogen. Adding organic carbon promoted denitrification activity and increased nitrogen removal efficiency.

Key words: SBR; organic carbon source; CANON; granular sludge; low ammonia concentration

全程自养脱氮工艺 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON), 以其耗氧量低、无需外加有机碳源、污泥产量低及运行费用低等优点^[1,2] 成为污水生物脱氮的研究热点. 在进水中无有机碳源条件下, CANON 工艺理论上可达到 89% 的总氮去除率, 产生 11% 左右的 NO₃⁻-N. 然而, 当前的城镇污水多是氨氮和有机物同时存在, 因此研究有机碳源的存在对 CANON 工艺启动及稳定性的影响有着重要的意义^[3]. 有研究发现低浓度有机物存在时 AnAOB 和反硝化菌能够共存并互相促进^[4-6], 而高浓度有机物存在时会使 AnAOB 活性大大降低, 使得系统中 ANAMMOX 的竞争优势逐渐被反硝化取代直至系统崩溃. 而且低浓度有

有机物可以提高氨氮转化率而有机物浓度过高时氨氮转化率则会受到抑制^[7]. 颗粒污泥^[8] 自身结构紧凑, 单位体积生物量高, 沉降性能好, 抗冲击能力强, 能够承受较高的有机负荷. 所以如果在 CANON 系统中采用颗粒污泥法, 既可以防止自养菌的流失, 保持系统中自养脱氮的优势地位, 又可以提高系统对有机负荷的承受能力, 加强 CANON 系统的稳定性能. 但是, 已有的研究中^[3,8-10], 多为高氨氮下, 有机碳源对 CANON 工艺的影响, 在低氨氮

收稿日期: 2017-07-17; 修订日期: 2017-08-28

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, 博士生导师, 主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

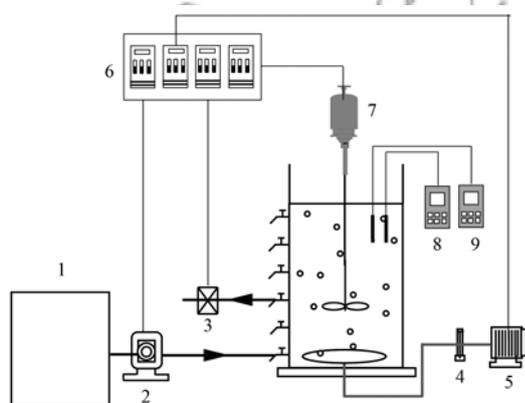
浓度下有机碳源对 CANON 颗粒污泥工艺的启动、运行及恢复研究还很少, 而城镇污水多为低氨氮污水, 故对此研究很有必要。

本实验在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下, 采用 2 个 SBR 反应器 R1 和 R2, 以厌氧氨氧化颗粒污泥为接种污泥, 以投加有机碳源和不投加有机碳源做对比, 研究有机碳源对 CANON 颗粒污泥工艺的启动及运行的影响, 并提供了高浓度有机碳源条件下 CANON 颗粒工艺崩溃后的恢复策略。

1 材料与方 法

1.1 实验装置

本实验采用两个相同的 SBR 反应器 R1、R2, 有效容积均为 4 L, 高 35 cm, 内径 13 cm. 在反应器壁垂直方向设置一排间距为 5 cm 的取样口, 用以排水和取样(图 1). 反应器底部安装曝气环进行微孔曝气, 由气泵与气体流量计控制曝气强度, 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. 进水箱; 2. 蠕动泵; 3. 出水; 4. 气体流量计; 5. 空压泵;
6. 时间控制器; 7. 搅拌机; 8. pH、温度测定仪; 9. DO 测定仪

图 1 SBR 反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of the SBR reactor

1.2 接种污泥与实验水质

R1 和 R2 均接种实验室稳定运行的厌氧氨氧化颗粒污泥, 其平均粒径为 $600 \mu\text{m}$ 左右, 初始污泥浓度为 $1500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 实验采用人工配水作为进水, 其中 R1 添加葡萄糖作为有机碳源, 分别以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NaHCO_3 作为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和碱度的来源, 营养液 I、II 作为营养物质^[11]. 实验水质见表 1.

1.3 实验方法

本实验共分为 2 个阶段, 分别为 CANON 启动阶段、有机碳源对 CANON 工艺运行的影响及恢复

阶段. 反应器运行包括进水阶段(15 min)、反应阶段(反应时间根据周期实验结果确定)、沉淀时间(5 min)、排水(3 min). 温度控制在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$, pH 为 7.6 左右, 换水比 2/3. 反应器曝气方式均采用间歇曝气(曝气/停曝时间为 30 min/30 min), R1 内部 DO 随反应阶段不同, R2 内部 DO 为 $0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. R1 添加有机碳源, 初始有机物浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CANON 工艺启动成功后, COD 浓度变化为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \rightarrow 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \rightarrow 200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \rightarrow 250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 实验水质情况

水质指标	单位	数值
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	80
碱度(以 CaCO_3 计)	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1 000
$\text{MgSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	80
CaCl_2	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	40
KH_2PO_4	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	40
营养液 I	$\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	1
营养液 II	$\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	1

1.4 分析项目与方法

DO、 T (温度)、pH 值均采用 WTW 在线测定仪测定, MLSS 采用标准方法测定, 粒径采用 Mastersize2000 型激光粒度仪测定, 水样分析中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测定采用纳氏试剂光度法, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用 N -(1-萘基)-乙二胺光度法, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 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].

反应速率的测定: 在实验稳定运行阶段, 从 R1 和 R2 中各取出 1 L 泥水混合液, 放入 2 个相同的烧杯内, 底部放置曝气环, 设机械搅拌. 分别测定 CANON 反应速率、厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 反应速率及反硝化反应速率, 用来表征好氧氨氧化菌 (AOB) 和厌氧氨氧化菌 (AnAOB) 的协同性、AnAOB 的活性以及反硝化菌的活性. 测定 3 种速率时, 烧杯内温度均为 25°C , pH 为 7.6 左右. 测定 CANON 反应速率时, 进水只配氨氮 ($80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 曝气量 $0.25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 每隔 1 h 取出水测定氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮, 待出水中三氮浓度不再发生变化时停止反应. 测定 ANAMMOX 速率时, 进水配亚硝酸盐氮 ($45.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 与氨氮 ($34.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 不曝气, 每隔 1 h 取出水测定氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮, 待出水中三氮浓度不再发生变化时停止反应. 测定反硝化反应速率时, 进水只配硝酸盐氮 ($80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 COD (随反应阶段不同),

每隔 1 h 取出水测定硝酸盐氮、亚硝酸盐氮, 待出水中氮素浓度不再发生变化时停止反应. CANON 和 ANAMMOX 反应速率按式(1)计算, 反硝化反应速率按式(2)计算:

$$V_{\text{CANON, ANAMMOX}} = \frac{[\text{TN}]_{\text{始}} - [\text{TN}]_{\text{末}}}{t \cdot \text{MLSS}} \quad (1)$$

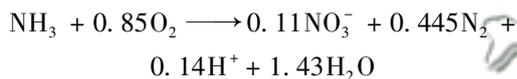
$$V_{\text{反硝化}} = \frac{[\text{NO}_x^- - \text{N}] - [\text{NO}_x^- - \text{N}]}{t \cdot \text{MLSS}} \quad (2)$$

式中, TN 为总氮: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为硝酸盐氮: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为亚硝酸盐氮: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; t : h; MLSS 为混合液悬浮固体浓度: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_{ANAMMOX} 以 MLSS 计: $\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$; $V_{\text{反硝化}}$ 以 MLSS 计: $\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 有机碳源对 CANON 工艺启动的影响

根据 CANON 工艺反应式:



说明总氮 (ΔTN) 的去除量和硝酸盐氮的产生量 ($\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$) 理论比值为 8, 反映了 NOB 有活性, $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 越小, 说明 NOB 活性越高^[15].

如图 2 所示, R1 和 R2 在经过 3 d 的适应期后, AOB 活性开始提升, 反应器有 14.3% 的总氮去除. 前 5 d, 由于生物菌群尚处于适应期, 且有机碳源尚未对 AOB、AnAOB 造成影响, 所以 R1 和 R2 的

反应器性能相似, 特征比均在 3.9 左右. 在 6 ~ 25 d, R1 的 $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 上升较快, 相比之下 R2 上升较平缓. 在第 23 d 之后, R1 的 $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均在 8 左右, CANON 工艺启动成功^[13]. 而 R2 在 32 d 的 $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 达到 8, 也成功启动 CANON. 值得注意的是, 反应器运行到第 4 d 后, R1 和 R2 的氨氮、总氮去除率及污泥负荷均呈上升趋势, 且没有出现亚硝酸盐氮积累, 说明此时反应器脱氮性能主要取决于亚硝化率. 在第 15 d 时, R1 的氨氮去除率和总氮去除率为 56.2%、45.9%, R2 的分别为 52.2%、43.1%, R1 都略微高于 R2, 到第 23 d 时, R1 的氨氮去除率和总氮去除率分别为 91.7%、85.1%, R2 为 80.7%、71.2%, R1 明显高于 R2. 分析认为, R1 中加入了 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD, 少量的有机物可以促进 AOB 及 AnAOB 的活性^[7,14,15], 使得氨氮去除率提升, 无亚硝酸盐氮积累, 并可以通过反硝化作用去除 CANON 过程产生的硝酸盐氮, 使得总氮去除率提升. 由于反硝化的存在, 也提升了 $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的比值^[13], R1 的特征比最终为 9.1. 有研究表明^[16-19], 可以通过反应前后的 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{TN}$ 是否接近 0.127 来同时判定短程硝化是否良好. 由于本实验是培养 ANAMMOX 污泥逐渐到 CANON 污泥, 故过程中需要表征短程硝化的稳定性. 由图 2 知, R1 在第 23 d 时, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{TN}$ 为 0.125, 极接近 0.127, 说明此时 CANON 反应器的脱氮效果良好, 短程硝化稳定.

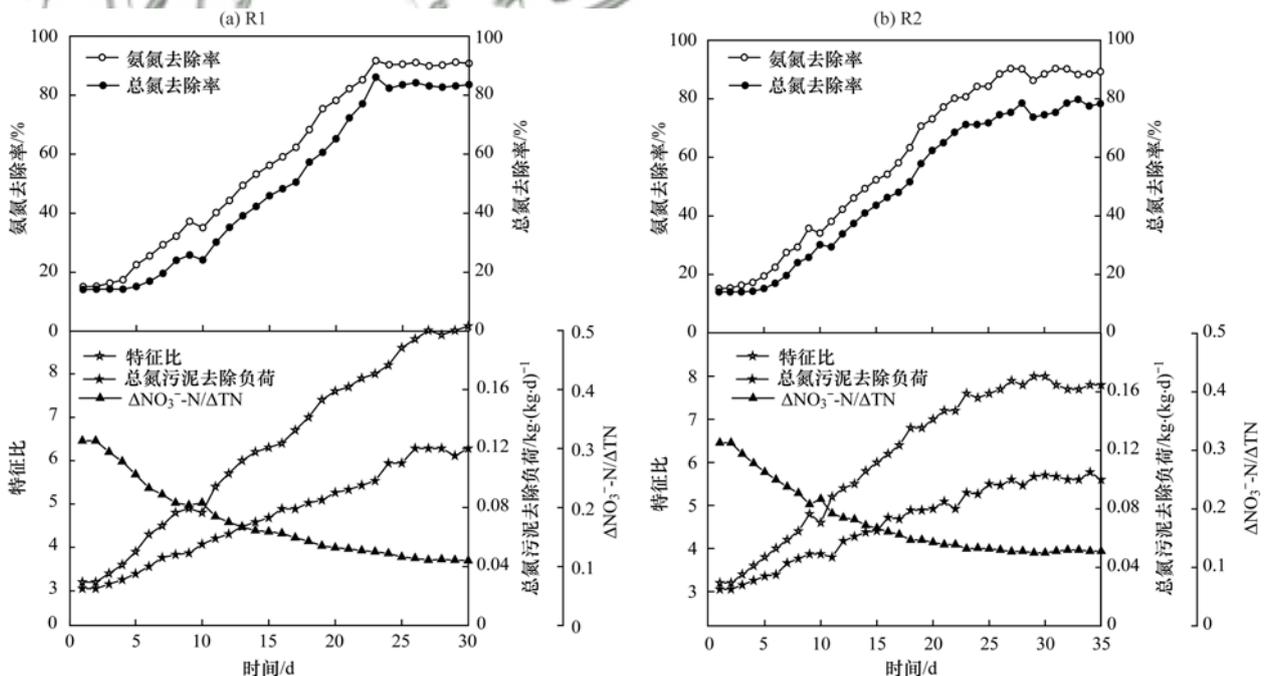


图 2 有机碳源对 CANON 启动的影响

Fig. 2 Effect of organic carbon sources on CANON priming

而 R2 在 32 d 时, $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta\text{TN}$ 为 0.13, 说明此时 R2 内的短程硝化效果也比较稳定. R1 较 R2 更快地达到稳定状态.

基于以上分析, 在实际运行中, 可以通过添加少量有机物来实现 CANON 工艺的快速启动.

2.2 有机碳源对 CANON 工艺运行的影响及恢复

有机碳源对 CANON 工艺运行的影响如图 3 所示. R2 稳定运行时间为 75 d, 在整个运行期间, 氨氮去除率及总氮去除率都处于较稳定状态, 氨氮及总氮去除率分别保持在 89% 及 80% 左右, 几乎没有亚硝酸盐氮积累.

对于 R1, 运行分为 4 个阶段.

阶段一(31 ~ 50 d), COD 浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 由于添加有机物会消耗更多的溶解氧, DO 浓度调整为 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 如图 3 所示, R1 由于第 31 d 提升了 COD 浓度, 氨氮去除率、总氮去除率分别由 90.5%、84.7% 下降到第 38 d 的 85%、79%, 此时出水氨氮为 $7.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 由于存在反硝化作用, 出水硝酸盐氮浓度很低为 $2.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器里积累了少量亚硝酸盐氮为 $4.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是由于提高有机物浓度, 对 AnAOB 菌群产生微弱的抑制作用. 经过几天的运行, 微生物菌群逐渐适应环境, 氨氮及总氮去除率升高, 出水氨氮浓度降低, 积累的亚硝酸盐氮被逐渐消耗, 这可能是由于 AnAOB 活性的恢复^[20]. 并最终在本阶段末, 氨氮及总氮去除率分别达到 92% 及 88%, 出水氨氮、亚硝酸盐氮及硝酸盐氮为 6.4 、 2 、 $2.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 这表明 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的有机物对 CANON 系统脱氮有促进作用.

阶段二(51 ~ 70 d), COD 浓度为 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DO 浓度为 $1.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 亚硝酸盐氮再次积累, 并在 57 d 时达到 $7.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 并且出水氨氮浓度也升高. 研究表明^[14], COD 浓度超过 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时

会抑制 AnAOB 的活性, 而可生物降解的有机碳源可以促进异养菌的生长, 与 AOB 竞争溶解氧^[21], 从而抑制了 AOB 的活性. 另一方面, 本阶段的 DO 浓度比较高, 也会抑制 AnAOB 的活性. 随着异养菌的增殖, COD 的去除增加, 可利用的 DO 由于异养菌的存在而逐渐降低. 因此, DO 对 AnAOB 的抑制就会解除. 并且也由于 AnAOB 及 AOB 菌群逐渐适应了环境. 运行 10 d 后, 亚硝酸盐氮积累减少, 出水氨氮减少, TN 去除上升. 氨氮, 总氮去除率分别达到 82%、78%. 出水氨氮、亚硝酸盐氮及硝酸盐氮分别为 10.4 、 0.9 、 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 这表明 $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的有机物对 CANON 系统 AOB 及 AnAOB 有轻微的抑制作用, 但是总氮去除率仍保持较高的水平.

阶段三(71 ~ 90 d), COD 浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DO 浓度为 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮、总氮去除率整体呈下降趋势, 并且出水氨氮, 亚硝酸盐氮积累严重. 运行 10 d 后, 氨氮及总氮去除性能开始逐渐恢复. 本阶段末期, 尽管反应器内没有亚硝酸盐氮积累, 但系统的氨氮、总氮去除率没有恢复到阶段二的脱氮效果, 最终氨氮, 总氮去除率分别达到 69%、67%. 这些结果说明, COD 浓度 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 对 AOB 和 AnAOB 有明显的抑制, 并且生物菌群的活性不容易恢复. 此时 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的有机物已经对系统造成了明显的抑制.

阶段四(91 ~ 110 d), COD 浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时系统脱氮效果虽然显著下降, 但也有 67% 的总氮去除, 故又将 COD 浓度提升到 $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 研究其脱氮性能变化. 此时, DO 浓度为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 发生亚硝酸盐氮积累并在整个阶段持续. 而且, 出水氨氮比之前 3 个阶段都高, 总氮去除污泥负荷也在逐步降低. 这些结果表明, 此时 COD 浓度对 AOB 和 AnAOB 都有强烈的抑制. 然而硝酸盐氮产

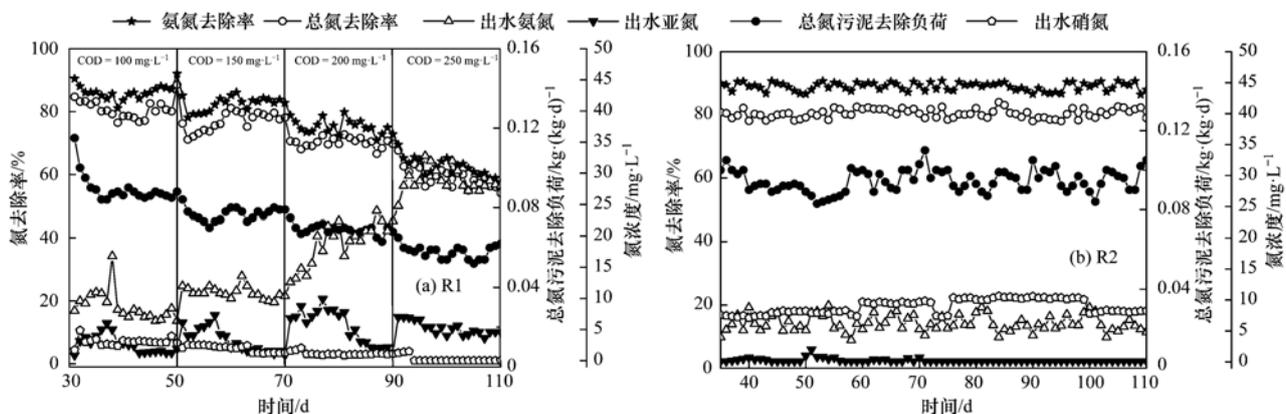


图 3 有机碳源对 CANON 工艺运行的影响

Fig. 3 Effect of organic carbon source on CANON process operation

生量为 0, 表明通过 CANON 产生的硝酸盐氮已经完全被反硝化去除. 氨氮及总氮去除率最终分别为 60% 和 59%. 总氮去除污泥负荷为 $0.06 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 系统性能急剧恶化.

上述结果表明, 当低氨氮污水中有少量有机物存在时, 可以实现 CANON 与反硝化的耦合机制实现高效脱氮, 但是当进水有机物浓度高于 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 脱氮性能会下降.

R1 在运行 110 d 后, 系统性能急剧恶化, 氨氮及总氮去除率分别为 60%, 59%. 总氮污泥去除负荷为 $0.06 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 故在 111 d, 对系统进行恢复. R1 由于加入过多 COD, 异养菌和反硝化菌生长很快, 较多的异养菌的生长会导致污泥增加^[21]. 恢复策略为直接降低 COD 浓度到 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO 浓度降为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时排出絮状污泥, 洗脱出 NOB 和异养菌, 系统内保留 AOB 和 AnAOB^[22]. 为了尽快恢复 R1 的系统性能, 本实验同时采取加入部分 R2 颗粒污泥的方法^[10].

R1 排出部分污泥后加入 1.5 L R2 中泥水混合液, 其污泥浓度为 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其系统性能如图 4 所示. 氨氮, 总氮去除率持续稳定上升, 出水氨氮及亚硝酸盐氮持续降低, 由于 R1 前期运行中几乎没有硝酸盐氮积累, 在恢复过程中, 由于依然存在反硝化, 出水硝酸盐氮始终保持较低的浓度. R1 经过 30 d 的恢复, 总氮污泥去除负荷达到 $0.110 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 氨氮及总氮去除率分别达到 89.7% 和 83.6%. 与第 30 d 同样进水条件下氨氮及总氮去除率 91.7% 和 85.1% 略低, 特征值为 8.8, 出水氨氮、亚硝酸盐氮及硝酸盐氮分别为 8.2 、 1.3 及 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 系统性能得到较好地恢复.

2.3 有机碳源下脱氮路径及功能菌活性分析

本实验一共有 6 个 COD 浓度, 分别为 0、50、

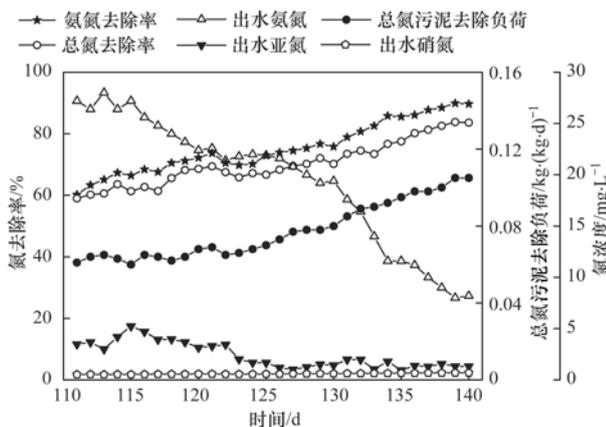


图 4 CANON 工艺的恢复

Fig. 4 Recovery of the CANON process

100、150、200、250 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, C/N 比分别为 0、0.63、1.25、1.88、2.5、3.1. 其稳定后的各自总氮去除率分别为 80%、86.7%、88%、78%、67%、59%. 当 COD 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 去除效果最佳. R1 中总氮去除率是由全程自养脱氮和反硝化共同作用的结果. 通过系统脱氮计算模型, 分析了在 6 个 COD 浓度下, CANON 及反硝化脱氮途径各自对反应器内总氮去除率的贡献量. 模型假设^[23]为: ① 亚硝化反应计量比为 $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_2^- - \text{N} = 1 : 1$; ② 厌氧氨氧化反应计量比为 $\text{NH}_4^+ - \text{N} : \text{NO}_2^- - \text{N} = 1 : 1.32$, 同时 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 生成 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_3^- - \text{N}$; ③ 反硝化反应消耗 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{NO}_3^- - \text{N}$ 需要消耗 $2.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD. 计算结果如表 2 所示, 其中进出水基质浓度为该阶段平均浓度.

如表 2 所示, 随着 COD 浓度由 0 增加到 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反硝化的贡献率越来越大. 自养脱氮的贡献在逐渐减小, 二者在 COD 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 总氮去除率达到最大, 实现了反硝化和自养脱氮的较好的耦合. 这是由于 ANAMMOX 过程需要消耗无机碳, 而少量有机物的存在会刺激反硝化菌的生长, 并通过反硝化作用产生无机碳, 从而促进 ANAMMOX 反应的进行^[24], 并且少量有机物的存在也会促进亚硝化反应的进行^[22], 故在本实验中 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 有机物的存在提升了总氮去除率, 并且全程自养脱氮处于优势地位.

然而有机物浓度超过 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时却使得系统的脱氮性能下降, 并降低了自养脱氮对总氮去除的贡献率. 分析认为, 在过量的有机物的刺激下, 反硝化菌会抑制自养的 AnAOB 生长^[14], 并且由于异养菌的繁殖, 消耗了 DO, 使得 AOB 生长受到抑制, 故总氮去除率下降, 系统脱氮性能恶化.

但是, 当有 C/N 比不超过 1.88 时, 可以建立一个稳定高效的 CANON 和反硝化共存的系统从而加强生物脱氮.

为了研究有机碳源对功能菌活性的影响, 分析了 R1 在不同 COD 浓度下及 R2 系统中的 CANON 反应速率、ANAMMOX 反应速率及反硝化反应速率. 研究指出^[25], 即使没有添加有机物, 系统中依然存在着反硝化菌等异养菌, 故对 R2 也测定了反硝化反应速率. 对 R1 系统中采用每一阶段运行稳定的时期.

由图 5 知, 当 COD 浓度逐步提升时, ANAMMOX 反应速率变化为逐渐增大, 当 COD 浓

度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其反应速率(以 MLSS 计, 下同)最大为 $10.35 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$. 这表明 AnAOB 的活性逐渐提升, 在 COD 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其活性最高. 随着有机物浓度的继续提升,

ANAMMOX 反应速率逐渐降低, 并当 COD 浓度为 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其反应速率最小为 $4.93 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$. 刘金苓等^[14]的研究发现, 高浓度的有机物使得 AnAOB 的活性受到抑制.

表 2 不同 COD 浓度下总氮去除路径分析

Table 2 Pathway analysis of total nitrogen removal for different COD

C/N	进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	出水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				总氮去除率/%	
		$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	COD	反硝化	自养脱氮
0	80	6.4	1	6.2	—	16.2	66.8
0.63	80	5.2	1.3	5	3	19.3	67.4
1.25	80	4.8	2	2.8	15	22.3	65.7
1.88	80	10.4	0.9	1.3	18	24.1	53.8
2.5	80	24.8	1.28	1.12	25	24	43
3.1	80	32	4.6	0.8	30	24.3	34.7

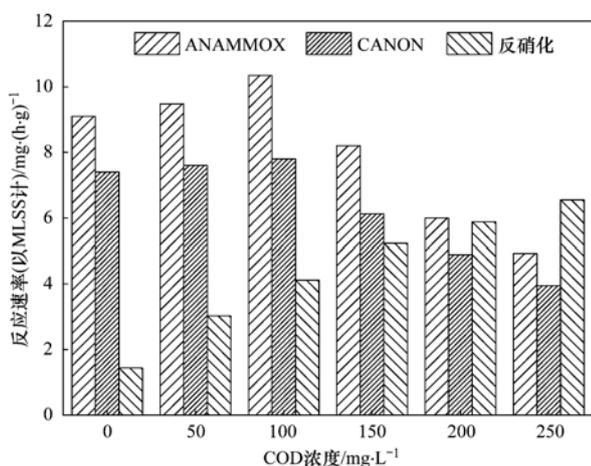


图 5 有机碳源对系统反应速率的影响

Fig. 5 Effect of organic carbon source on reaction rate

CANON 的反应速率的变化趋势与 ANAMMOX 的相同, 当 COD 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应速率达到最大为 $7.8 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$. 然而当 COD 浓度为 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应速率最小为 $3.95 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$. 有研究表明^[7,21], 少量的有机物会促进 AOB 活性的上升, 但是有机物浓度过高, AOB 的活性会降低. 本实验亚硝化与厌氧氨氧化的协同作用下, C/N 比为 1.25 时使得 CANON 的反应速率达到最大.

反硝化的反应速率随着 COD 浓度的增加而逐渐增强, 反硝化的反应速率当不添加有机碳时为 $1.44 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$, 当 COD 浓度为 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其反应速率为 $6.55 \text{ mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{g})^{-1}$. 这是由于有机物的存在促进了反硝化菌的生长并表现出逐渐增强的反硝化活性从而反硝化反应速率逐渐增强.

基于以上分析, C/N 比为 1.25 时可以增强 AOB 和 AnAOB 的活性, 并使得 AOB、AnAOB 和反硝化菌产生协同作用, 而 C/N 比超过 1.88 时则会抑制 AOB 及 AnAOB 活性, 极大地增强反硝化菌的活性, 使得

反硝化反应成为主导反应, 不利于系统稳定.

3 结论

(1) 添加适量有机碳源会加速 CANON 工艺的启动. 添加有机碳源的反应器 23 d 成功启动 CANON 工艺, 而不添加有机碳源的反应器 32 d 方成功启动.

(2) 系统脱氮性能受有机碳源的影响较大. 当 C/N 不超过 1.25 时, 氨氮及总氮去除率分别可达到 92%、88%. 不添加有机碳源的反应器, 氨氮及总氮去除率稳定在 89%、80%. 当 C/N 比超过 1.88 时, 系统脱氮性能逐渐降低; 当 C/N 比为 3.1 时, 氨氮及总氮去除率分别为 60%、59%.

(3) 适量有机碳源可以实现 AOB、AnAOB 和反硝化菌的耦合, 提升 AOB 及 AnAOB 的活性. 当有机碳源浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 三者的耦合达到最佳, 且 CANON 及 ANAMMOX 的反应速率达到最大. 但是随着有机碳源浓度的提高, 反硝化菌的活性大大增强, 而 AOB 和 AnAOB 的活性会受到抑制, CANON 及 ANAMMOX 的反应速率下降, 反硝化的反应速率上升.

参考文献:

- [1] Pollice A, Tandoi V, Lestingi C. Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate [J]. Water Research, 2002, 36(10): 2541-2546.
- [2] 马富国, 张树军, 曹相生, 等. 部分亚硝化-厌氧氨氧化耦合工艺处理污泥脱水液[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2): 219-224.
- [3] Ma F G, Zhang S J, Cao X S, et al. Coupling process of partial nitrification and anammox for treatment of sludge liquor [J]. China Environmental Science, 2009, 29(2): 219-224.
- [4] 李冬, 何永平, 张肖静, 等. 有机碳源对 SNAD 工艺脱氮性能及微生物种群结构的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(2): 68-75.

- Li D, He Y P, Zhang X J, *et al.* Effect of organic carbon on nitrogen removal and the microbial communities in SNAD process [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, **48**(2): 68-75.
- [4] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Advanced nitrogen removal with simultaneous Anammox and denitrification in sequencing batch reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 316-322.
- [5] 胡勇有, 梁辉强, 朱静平, 等. 有机碳源环境下的厌氧氨氧化批式实验[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(6): 116-119, 142.
Hu Y Y, Liang H Q, Zhu J P, *et al.* Batch experiments of anaerobic ammonium oxidation process with organic carbon[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, **35**(6): 116-119, 142.
- [6] 朱静平, 胡勇有, 闫佳. 有机碳源条件下厌氧氨氧化 ASBR 反应器中的主要反应[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1353-1357.
Zhu J P, Hu Y Y, Yan J. Main reactions in anaerobic ammonium oxidation reactor under organic carbon condition[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(7): 1353-1357.
- [7] Mosquera-Corral A, González F, Campos J L, *et al.* Partial nitrification in a SHARON reactor in the presence of salts and organic carbon compounds[J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(9): 3109-3118.
- [8] 范丹, 李冬, 梁瑜海, 等. 生活污水 SNAD 颗粒污泥快速启动及脱氮性能研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(11): 3321-3328.
Fan D, Li D, Liang Y H, *et al.* Fast startup and nitrogen removal performance of SNAD granular sludge for treating domestic sewage[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3321-3328.
- [9] 贾丽, 郭劲松, 方芳, 等. 有机碳源对单级自养脱氮系统脱氮性能及微生物群落结构的影响[J]. *重庆大学学报*, 2013, **36**(3): 96-103.
Jia L, Guo J S, Fang F, *et al.* Effect of organic carbon on nitrogen removal and microbial community in the completely autotrophic nitrogen removal process[J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, **36**(3): 96-103.
- [10] 李冬, 苏庆岭, 梁瑜海, 等. CANON 颗粒污泥高效脱氮及处理生活污水实验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, **47**(8): 79-86.
Li D, Su Q L, Liang Y H, *et al.* Efficient nitrogen removal from domestic wastewater by CANON granular sludge[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, **47**(8): 79-86.
- [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]. *Environmental Microbiology*, 1996, **142**: 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] 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.
- [14] 刘金苓, 钟玉鸣, 谢志儒, 等. 厌氧氨氧化微生物在有机碳源条件下的代谢特性[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(10): 2041-2047.
- Liu J L, Zhong Y M, Xie Z R, *et al.* Metabolism of anaerobic ammonium oxidizing (anammox) bacteria with organic carbon addition [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(10): 2041-2047.
- [15] Li Y, Hang Z X, Ruan W Q, *et al.* ANAMMOX performance, granulation, and microbial response under COD disturbance [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2015, **90**(1): 139-148.
- [16] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 改性聚乙烯填料 CANON 反应器的启动与运行[J]. *化工学报*, 2014, **65**(11): 4406-4412.
Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Start-up of CANON reactor with modified polyethylene carrier and its performance [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(11): 4406-4412.
- [17] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3507-3512.
Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Performance stability of CANON reactor and temperature impact [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3507-3512.
- [18] 付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 等. 生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1536-1543.
Fu K M, Zhou H T, Su X Y, *et al.* Short-cut nitrification recovery and its transformation into CANON Process in a biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1536-1543.
- [19] 付昆明, 左早荣, 仇付国. 陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 995-1001.
Fu K M, Zuo Z R, Qiu F G. Start-up by inoculation and operation of a CANON reactor with haydite as the carrier [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 995-1001.
- [20] Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Reactor performance and microbial characteristics of CANON process with step-wise increasing of C/N ratio [J]. *Environmental Technology*, 2016, **37**(3): 407-414.
- [21] Sarina J, Siegfried E V, Eberhard M, *et al.* Successful application of nitritation/anammox to wastewater with elevated organic carbon to ammonia ratios [J]. *Water Research*, 2014, **49**: 316-326.
- [22] Morales N, Val Del Río á, Vázquez-Padín J R, *et al.* The granular biomass properties and the acclimation period affect the partial nitritation/anammox process stability at a low temperature and ammonium concentration [J]. *Process Biochemistry*, 2016, **51**(12): 2134-2142.
- [23] 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.
- [24] 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(5): 1-4.
Zhou S Q. Stoichiometric analysis of combined reaction of anaerobic ammonia oxidation with denitrification [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, **34**(5): 1-4.
- [25] Mozumder M S I, Picioreanu C, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Effect of heterotrophic growth on autotrophic nitrogen removal in a granular sludge reactor [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(8): 1027-1037.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)