

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筶笠湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al₂O₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)₂ 中的氰污染物 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A²/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤微生物可给性的影响 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式

完颜德卿^{1,2}, 袁怡^{1,2*}, 李祥^{1,2}, 毕贞^{1,2}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215009)

摘要: 利用上流式污泥床反应器, 以出水复氧回流的方式快速启动 CANON 工艺, 并研究了启动及运行过程特征. 结果表明, 以出水复氧进行回流的方式可以快速启动并稳定运行 CANON 工艺; 在污泥体积分数为 25%, 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $157 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 为 2 h 的条件下, 经过 50 d 的稳定运行, 总氮去除速率 NRR 从 $1.31 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 逐渐升高到 $1.47 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 复氧回流的方式有效地控制了反应器内溶解氧的量, 使得 $\text{DO} < 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对系统中的 NOB 起到了良好的抑制效果, 同时也为 AnAOB 提供了一个良好的生长环境; 通过控制回流量的大小可以精确地控制 NO_2^- 的产生速率, 使得与 NO_2^- 消耗速率达到一个良好的平衡状态, 避免了 NO_2^- 的积累及其硝化反应的发生. 因此, 复氧回流 CANON 工艺在运行的稳定性方面表现出了很大的优势, 为 CANON 工艺处理低氨氮废水提供了一个新模式.

关键词: 厌氧氨氧化; 全程自养脱氮工艺 (CANON); 复氧回流; NOB 的抑制

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1122-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201609203

A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process

WANYAN De-qing^{1,2}, YUAN Yi^{1,2*}, LI Xiang^{1,2}, BI Zhen^{1,2}

(1. School of Environment Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Automatic aeration and recirculation of effluent were used to start CANON process with up flow sludge bed reactor, and the start-up and operation characteristics of the process were studied. The results showed that the CANON process could be started quickly and stably by the method of reoxygenation reflux under the conditions of sludge volume fraction 25%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ $157 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 2 h. After 50 days of operation, the total nitrogen removal rate increased from $1.31 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ to $1.47 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; the reoxygenation reflux manner could effectively control the amount of dissolved oxygen in the reactor, resulting in $\text{DO} < 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which had a good inhibitory effect on the NOB in the system, and meanwhile provided a good growth environment for AnAOB; By controlling the reflux flow, the production rate of NO_2^- could be precisely controlled, reaching a good balance with NO_2^- consumption rates, and thus avoiding the accumulation of NO_2^- and occurrence of nitrification reactions. Therefore, reoxygenation reflux CANON process showed a great advantage in the operation stability, which provided a new model for the start-up and stable operation of CANON process.

Key words: ANAMMOX; completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON); reoxygenation reflux; NOB inhibition

相对于传统的硝化反硝化脱氮技术, 全程自养脱氮工艺 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON)^[1,2] 以其无添加碳源、脱氮速率高、污泥产率低、节约能源等优点^[3,4] 越来越受到人们的关注. CANON 工艺是在同一反应器中通过好氧氨氧化菌 (AOB) 和厌氧氨氧化菌 (AnAOB) 的协同作用达到自养脱氮的目的, AOB 利用溶解氧把部分 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- , AnAOB 利用剩余的 NH_4^+ 和生成的 NO_2^- 通过厌氧氨氧化技术进行脱氮^[5]. 在这个过程中, 提供溶解氧是实现亚硝化产生 NO_2^- 的前提, 但是溶解氧同时也会对 AnAOB 产生抑制作用^[6,7], 并且有很多研究者报道由于溶解氧的原因造成硝化菌 (NOB) 快速增值, 使得出水 NO_3^- 过高^[8,9].

另外, 不同的研究者^[10,11] 对 CANON 工艺的研究发现反应器所需要控制的 DO 大小存在非常大的差别 ($0.1 \sim 2.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 即使在同样的 DO 条件下, 脱氮效果也会由于 AOB 活性、污泥颗粒大小、 NH_4^+ 浓度大小等因素而出现明显的波动^[9]. 所以, 对 DO 的有效控制, 尤其是低氨氮废水, 是实现 CANON 工艺稳定运行的关键因素.

收稿日期: 2016-09-26; 修订日期: 2016-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401108); 国家自然科学基金项目 (51478284, 51408387); 江苏省特色优势学科二期立项项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 苏州科技学院科研基金项目青年项目 (341410031); 苏州科技学院人才引进科研项目 (331411202)

作者简介: 完颜德卿 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向是废水生物脱氮处理理论及工艺, E-mail: 1152155484@qq.com

* 通信作者, E-mail: yiyuansuzhou@163.com

目前的 CANON 工艺主要是以压缩空气曝气形式提供溶解氧^[12,13],但是这种供气方式受曝气设备、曝气管深度、反应器类型、填料种类、污泥形态等因素影响^[14],不容易控制溶解氧浓度,易造成 NOB 的增殖以及 AnAOB 的抑制,在反应器稳定运行方面存在着一定的欠缺. 本实验的目的是研究利用 CANON 工艺以出水复氧回流的方式处理低氨氮废水的可行性,并对启动及运行过程特性进行分析,以为 CANON 工艺处理低氨氮废水提供一个新的运行模式.

1 材料与方法

1.1 接种污泥及配水

接种污泥为本课题组培养的成熟的亚硝酸盐型厌氧氨氧化颗粒污泥(粒径 1.0 ~ 1.5 mm)和部分取自运行稳定的亚硝化反应器中成熟的絮体亚硝化污泥(粒径 0.3 ~ 0.6 mm),原厌氧氨氧化反应器中脱氮速率为 $3.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,原亚硝化反应器 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 转化速率为 $2.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 进水采用人工配水, NO_2^- 按需投加, NH_4^+ 以 NH_4HCO_3 形式提供,另外添加 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 维持合适的 pH 值. 基本培养液成分 KH_2PO_4 为 $27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CaCl_2 为 $138 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 微量元素 I 为 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, 微量元素 II 为 $1.25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$. 微量元素 I 组成: EDTA $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 微量元素 II 的组成如表 1 所示.

表 1 微量元素 II 的组成

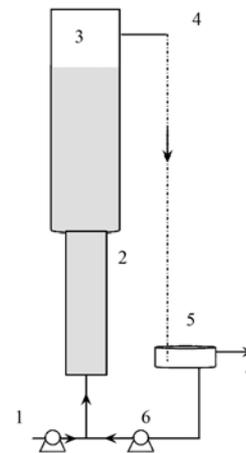
Table 1 Composition of trace element II

组成成分	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
EDTA	5000
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	430
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	240
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	990
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	250
$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	220

1.2 连续流实验装置

采用上流式污泥床反应器,如图 1.

总体积 V 为 0.2 L ,下段直径为 $\varphi 16 \text{ mm}$,上段直径为 $\varphi 20 \text{ mm}$,总高度 80 cm ,出水口距底部 76 cm . 由蠕动泵从底部进水,上清液的出水溢流跌入复氧池,在溢流下跌以及复氧池表面扰动过程达到出水复氧的效果,复氧池内的溶解氧基本处于饱和状态,然后经蠕动泵回流至反应器,向反应器内提供



1. 进水泵;2. 污泥层;3. 固液分离区;
4. 溢流口;5. 复氧池;6. 回流泵;7. 出水管
图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

溶解氧,反应器的最终出水通过复氧池自然溢出.

1.3 条件控制

分别接种成熟的亚硝化污泥 20 mL 、厌氧氨氧化污泥 30 mL ,污泥体积分数 25% . 原位测定接种污泥的 AOB 和 AnAOB 活性. 反应器外部用遮光布遮盖避光,避免光照对 AnAOB 活性的抑制. 反应器温度为 32°C ,进水 pH 为 $7.80 \sim 8.20$,复氧池中 DO 为 $6.50 \sim 7.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

实验过程中 HRT 为 2 h ,运行分为 3 个阶段. 第一个是接种污泥活性探究阶段,此阶段进水基质为氨氮和一定量的亚硝酸盐,分别原位考察 AOB 活性与 AnAOB 活性. 第二个是复氧回流自养脱氮工艺的启动阶段,启动阶段进水基质只有氨氮,通过逐步调节回流量,考察 AOB 活性与 AnAOB 活性动态平衡特征. 第三个阶段为反应器的稳定阶段,此阶段进水只有氨氮,考察复氧回流模式的 CANON 工艺处理低氨氮废水的可行性.

1.4 分析监测指标及数据处理方法

分析测定项目参照文献^[15]: $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 采用 N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 采用紫外分光光度法. pH 采用 pHS-3TC 型酸度计测定,DO 采用便携式溶氧仪 Multi 3410.

计算公式(1)为 AOB 活性产生 NO_2^- 的能力(nitrite production rate, NiPR),计算公式(2)为 AnAOB 活性消耗 NO_2^- 的能力(nitrite consumption rate, NiCR),计算公式(3)为 NOB 活性产生 NO_3^- 的能力(nitrate production rate, NaPR),计算公式(4)

为 AOB 与 AnAOB 活性平衡指标的积累速率 (nitrite accumulation rate, NAR), 公式 (5) 为总氮去除率 (nitrogen removal rate, NRR), 进出水总氮为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的总和, 假设损失的总氮都通过 ANAMMOX 过程产生 N_2 的形式排出.

$$\text{NiPR} = \frac{1.32 \times (\text{TN}_{\text{进}} - \text{TN}_{\text{出}}) \times \frac{14}{28}}{\text{HRT}} + \frac{(\text{NO}_2^-\text{-N})_{\text{出}} - (\text{NO}_2^-\text{-N})_{\text{进}}}{\text{HRT}} + \text{NaPR} \quad (1)$$

$$\text{NiCR} = \frac{1.32 \times (\text{TN}_{\text{进}} - \text{TN}_{\text{出}}) \times \frac{14}{28}}{\text{HRT}} \quad (2)$$

$$\text{NaPR} = \frac{(\text{NO}_3^-\text{-N})_{\text{出}} - (\text{NO}_3^-\text{-N})_{\text{进}}}{\text{HRT}} -$$

$$\frac{0.26 \times (\text{TN}_{\text{进}} - \text{TN}_{\text{出}}) \times \frac{14}{28}}{\text{HRT}} \quad (3)$$

$$\text{NAR} = \text{NiPR} - \text{NiCR} \quad (4)$$

$$\text{NRR} = \frac{\text{TN}_{\text{进}} - \text{TN}_{\text{出}}}{\text{HRT}} \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 接种污泥的活性检测

在第一阶段, 首先接种本课题组培养好的成熟

絮体亚硝化污泥 20 mL, 通入压缩空气, 维持 DO 为 $0.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 进出水 pH 分别为 8.08 ~ 8.20、8.00 ~ 8.10, 在 HRT 为 2 h 的情况下稳定运行 1 d, 其进出水氮浓度见表 2. AOB 氧化 NH_4^+ 产生 NO_2^- 的能力 NiPR 为 $1.01 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

在 2 ~ 4 d, 另外接种成熟的厌氧氨氧化颗粒污泥 30 mL, HRT 为 2 h, 设定回流流量为 $0.42 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$, 反应器内部 $\text{DO} < 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 进出水 pH 分别为 7.95 ~ 8.05、8.08 ~ 8.20. 其进出水氮浓度见表 2, 接种污泥的 AnAOB 最大脱氮速率 NRR 和 NO_2^- 消耗速率 NiCR 分别为 $1.31 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $0.86 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

2.2 启动阶段特性分析

第二阶段中进水只有 $157 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 进出水 pH 为 8.08 ~ 8.20, HRT 为 2 h. 结果见图 2, 在 5 ~ 9 d, 回流量从 $0.42 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐提高到 $0.83 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 也从 $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 过程中出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 小于 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 仅有少量积累, 出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 从 $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在第 9 d 的时候 AnAOB 脱氮速率 NRR 从最初的 $0.68 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 升高到 $1.29 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 基本达到了接种时的水平.

表 2 接种污泥活性检测

Table 2 Activity detection of inoculated sludge

测定项目	时间/d	$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
		进水	出水	进水	出水	进水	出水	
AOB 活性	0.3	155.34	65.30	0	56.56	0	20.35	0.53
	0.6	157.13	67.10	0	55.82	0	23.47	0.51
	0.9	156.41	66.18	0	56.18	0	22.65	0.54
	平均值	156.29	66.20	0	56.32	0	22.16	0.52
AnAOB 活性	2	158.63	67.91	47.27	13.36	0	14.89	
	3	155.15	66.48	45.56	12.67	0	13.92	
	4	157.60	68.37	47.76	14.75	0	14.86	<0.01
	平均值	157.13	67.59	46.86	13.59	0	14.56	

这个过程中没有 NO_2^- 的积累, 并且没有观察到明显的 NOB 活性, 这主要是由于 AnAOB 消耗 NO_2^- 的速率 NiCR 比 AOB 产生 NO_2^- 速率 NiPR 大. 另外, 复氧回流的方式向反应器提供的溶解氧是有限的, 这就有效控制了 AOB 产生 NO_2^- 的速率 NiPR, 在 AOB 产生 NO_2^- 速率低于 AnAOB 最大消耗 NO_2^- 速率 [$0.86 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$] 之前, NO_2^- 也就无法得到积累. 说明这种复氧回流的方式稳定的控制了 AOB 的活性, 使得 NO_2^- 的产生速率 NiPR 与消耗速率 NiCR 达到一个平衡状态, 同时由于极低的 DO 有效

的抑制了 NOB 的活性, 避免的 NO_2^- 的硝化反应.

2.3 复氧回流 CANON 工艺处理低氨氮废水的可行性分析

在 AnAOB 脱氮速率 NRR 达到接种时的水平之后, 系统没有出现 NO_2^- 积累和 NO_3^- 的过量产生, 表明系统中 NiPR 和 NiCR 达到一个良好的平衡状态. 第三阶段 (10 ~ 55 d) 把回流量提高到 $0.97 \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1}$, 考察复氧回流运行过程特性. 从图 2 可以看出, 当回流量提高之后, 出水 NH_4^+ 基本呈现稳定下降的趋势, 在进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $157 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 情况下, 出水浓度

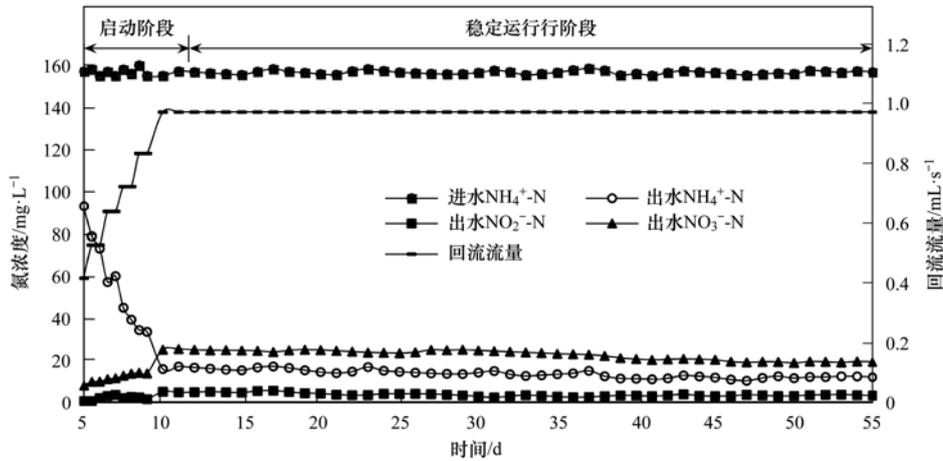


图2 实验期间氮浓度变化

Fig. 2 Change of nitrogen concentration during the experiment

从 $17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而出水 NO_3^- -N 从 $13.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 直接升高到 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之后也开始逐渐减小,但是对于出水的 NO_2^- -N 浓度变化不大,从 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后降低到 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右

并保持不变。另外,从图 3 可以看出在第三阶段的前期 NAR 最高达到 $0.19 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, NaPR 最大也达到了 $0.13 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 这说明前期 NiPR 明显比 NiCR 大。

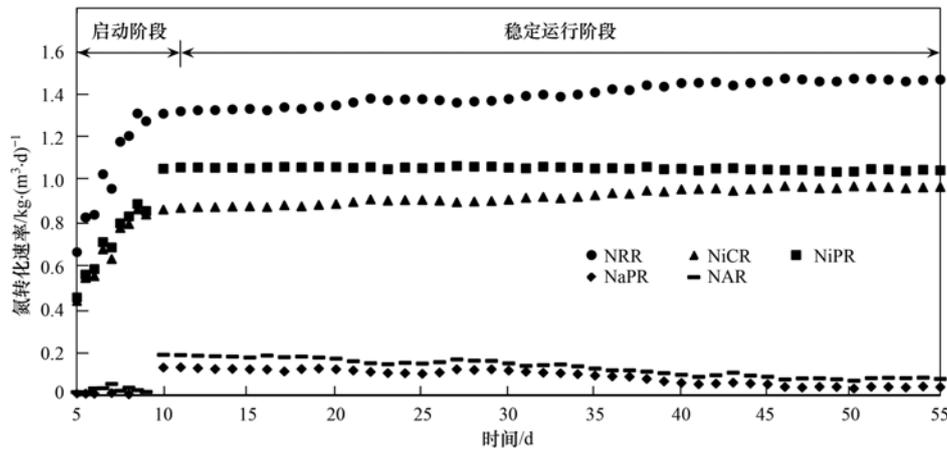


图3 实验期间氮转化速率

Fig. 3 Nitrogen conversion rate during the experiment

在 $10 \sim 55 \text{ d}$ 之间, NiPR 基本保持着一个恒定值 $1.06 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 但是 NaPR 呈现出逐步降低的趋势, 从 $0.13 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 降低到 $0.04 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。这主要是和 NO_2^- 转化途径的变化有关。从图 3 可以得知 AnAOB 的 NiCR 在 $10 \sim 55 \text{ d}$ 之间从 $0.87 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 升高到 $0.98 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, NRR 从 $1.31 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 升高到 $1.47 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。但是在这个过程中 NO_2^- 的浓度基本上没有什么变化, 同时 NiPR 也保持着一个恒定值, 这说明由于 NiCR 逐渐提高, AOB 产生的 NO_2^- 从被 NOB 利用氧化成 NO_3^- 的途径(图 4 中 ① 过程)逐渐地转变为被 AnAOB 以 ANAMMOX 的方式氧化 NH_4^+ 还原成 N_2 的途径

(图 4 中 ② 过程)。

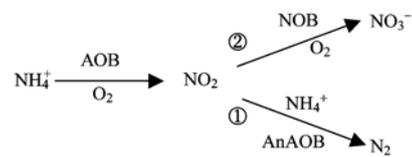


图4 NO_2^- 的转化途径

Fig. 4 Transformation pathway of NO_2^-

3 讨论

3.1 复氧回流方式对 NOB 的有效抑制

CANON 工艺成功运行的重要前提是 NO_2^- 的积累, 而使得 NO_2^- 得到积累的关键因素是抑制 NOB 活性^[16]。从接种污泥的活性可以看出, AOB 产生

NO_2^- 的速率大于 AnAOB 消耗 NO_2^- 的速率,并且接种污泥中有明显的 NOB 存在,在 DO 为 $0.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其转化 NO_2^- -N 的能力达到 $0.24 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 所以抑制 NOB 对 NO_2^- 的转化是反应器稳定运行的重要前提.

在高温条件下 ($30 \sim 35^\circ\text{C}$), NOB 的倍增时间比 AOB 长,通过控制 SRT 可以达到抑制 NOB 活性的目的,但是一般 CANON 工艺中污泥并不外排,所以以 SRT 的方式抑制 NOB 活性是不可取的. 另外,有报道指出高浓度的 FA (游离氨) 可以抑制 NOB 的活性,以启动 CANON 工艺^[13,17],但是 Hawkins 等^[18] 的研究表明 FA 对 NOB 产生抑制作用的主要是 pH 而不是 FA,在同样的 FA ($2.1 \sim 2.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 水平下, pH 从 7.1 升高到 8.0 时,NOB 的抑制作用从 18% 升高到 60%; 而在同样的 pH (pH = 8.0) 水平下,FA 从 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 $181 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,NOB 的抑制作用从 69% 仅仅升高到 73%, 这表明 FA 对 NOB 的抑制作用不大,并且 Liang 等^[19] 研究表明在 CANON 工艺中无法通过 FA 达到抑制 NOB 的目的. 所以,在 CANON 工艺运行过程中通过 DO 来抑制 NOB 活性是最常用的手段,因为 AOB 对 O_2 的亲合力比 NOB 高^[20],两者的溶解氧半饱和常数分别为 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[21],同时也有研究表明低的 DO 值 ($0.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 可以抑制 NOB 活性^[22]. 但是低的 DO 并不是都能抑制 NOB 的活性,这还和 AOB 的活性有关^[18],Joss 等^[9] 的研究发现,在同样的 DO 条件下 ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),当 AOB 活性被部分抑制时,AnAOB 活性却被完全抑制,导致 NO_2^- 的积累,进而引起 NOB 的快速增长. 这是由于在相同的 DO 环境下,当污泥外层的 AOB 消耗氧的速率减少后,一方面溶解氧对颗粒污泥的渗透深度会增加,导致内部的 AnAOB 被抑制,另一方面 NOB 可以利用

积累的 NO_2^- 和多余的溶解氧进行增长,导致 NO_3^- 浓度升高. 这说明低 DO 值与对 NOB 活性抑制之间并不是绝对的关系,这还与 AOB 活性、污泥粒径大小等因素有关. 而本实验中接种污泥含有相对比较多的 NOB,更难通过低的 DO 值 ($0.2 \sim 0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 来达到抑制 NOB 活性的目的,而这种情况在一般接种来自污水处理厂的硝化污泥是普遍存在的. 复氧回流方式运行 CANON 工艺可以把系统内的 DO 控制在一个极小的值 ($< 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),一方面可以避免对 AnAOB 的抑制而导致 NO_2^- 的积累;另一方面总溶解氧量的控制使 NH_4^+ 的好氧化仅停留在 NO_2^- 阶段. 所以,这种 CANON 工艺的运行模式可以对 NOB 活性的抑制提供一个良好的条件.

对于 CANON 工艺, NO_2^- 的转化途径决定了反应器的脱氮效果, NO_2^- 越是趋于图 4 中的硝化反应 (①过程),那么脱氮效果就会越差,而 NO_2^- 越趋于 ANAMMOX 反应 (②过程) 脱氮效果越好. 从图 5 可以看出,在反应器稳定运行阶段 NO_2^- 被 NOB 利用进行硝化反应的比例处于一个稳定下降的趋势,说明复氧回流的方式有效地抑制了 NOB 的活性. 在 NiPR 基本不变的情况下, NO_2^- 的硝化反应比例从 12.0% 降低到 3.8%, ANAMMOX 反应比例从 82.3% 升高到 92.2%,总氮去除率也同步增加. 这可以看出,CANON 工艺中对 NOB 活性抑制程度决定了反应器的脱氮效果.

3.2 CANON 工艺稳定运行的条件控制

Jetten 等^[3] 认为 CANON 工艺稳定运行最重要的前提就是保持目标微生物菌群的稳定,一个是防止 AnAOB 的恶化,另一个就是防止 NOB 的积累,有研究表明 DO 是实现这一目标的主要控制参数^[8,23].

从表 3 可以看出,在不同的反应器中成功运行

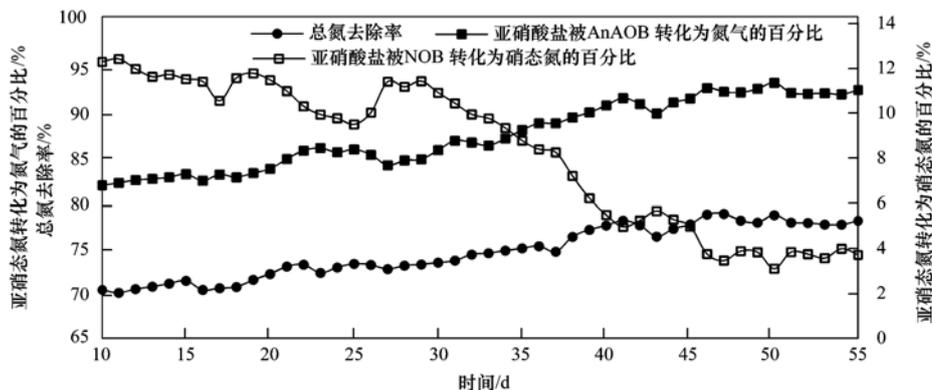


图 5 亚硝态氮转化途径的变化

Fig. 5 Change of NO_2^- transformation pathway

时所要控制的 DO 大小存在着很大的差异性(0.1 ~ 2.53 mg·L⁻¹),这主要与污泥颗粒大小或生物膜厚度有关^[27]. 另外,王毅等^[28]利用海绵填料对半亚硝化的影响因素的研究中发现,DO 低于 0.6 mg·L⁻¹ 时已经对 AOB 产生了抑制作用,导致出水 NO₂⁻ 降低,DO 控制在 0.95 ~ 1.3 mg·L⁻¹ 时 NH₄⁺ 转化率约 50%. 并且,Humik 等^[29]研究发现 AOB、NOB 的溶解氧半饱和速率为 0.16 mg·L⁻¹、0.54 mg·L⁻¹,这说明在一般的 CANON 工艺研究中的 AOB、NOB 处于一定的抑制状态,如果 DO 出现异常(偏高)就会使得 AOB、NOB 潜在的活性激发出来,继而导致出水 NO₂⁻、NO₃⁻ 升高,同时 DO 长期过高也会对 AnAOB 产生不可逆的抑制作用^[7],最终使 CANON 工艺反应器崩溃^[8,9,23]. 所以,对于曝气形式供氧的 CANON,稳定的曝气速率是其实现稳定运行的前提,尤其在处理低氨氮废水时. 但是曝气速率受曝气设备的老化、污泥覆盖等因素影响,Joss 等^[9]在对德国苏黎世的一个 WWTP 中运行的 CANON 反应器研究发现,对曝气设备进行清理会导致曝气量明显增加,使得氧气供应速率超过 AOB 的耗氧速率,进而对 AnAOB 产生抑制,NO₂⁻ 得到积累,而此时也达到了 NOB 合适的生长环境,在近 4 个月的运行中 NO₃⁻-N 从 15 mg·L⁻¹ 升高到 200 mg·L⁻¹,最终导致了反应器的崩溃. 本研究采用出水复氧回流向反应器提供溶解氧,这种方法可以通过控制回流量来有效控制溶解氧的绝对量,当 NH₄⁺ 氧化为 NO₂⁻ 之后,没有多余的溶解氧被 NOB 利用进行硝化反应,达到完全抑制 NOB 的作用,同时 AnAOB 也不会因为 DO 而受到影响,可以发挥到最大的厌氧氨氧化活性达到一个良好的氮去除速率. 所以,这种复氧回流的方式可以把 DO 稳定地控制在一个非常小的值 (<0.01 mg·L⁻¹). 另外,复氧回流可以使得反应器内 NiPR 与 NiCR 稳定地处于一个良好的平衡状态,

表 3 CANON 工艺在不同研究中所控制的 DO 值

Table 3 DO values controlled by CANON process in different researches

反应器类型	成功运行时的 DO 值/mg·L ⁻¹	文献
移动床(填料:片状海绵)	2.01 ~ 2.53	[10]
上流式污泥床	1.0	[24]
生物转盘	0.7	[25]
SBR(填料:中空圆柱体塑料)	0.5 ~ 0.7	[12]
SBR(无填料)	0.31	[23]
SBR(无填料)	0.3	[26]
MBR(填料:中空纤维膜)	<0.1	[11]
SBR(无填料)	0.05 ~ 0.1	[8]

使得反应器中不同菌落之间有一个很好的协同作用,这种 CANON 工艺的运行模式很好地抑制了 NOB 活性,为反应器的稳定运行创造了良好的基础.

另外,有报道指出 CANON 工艺还受进水 NH₄⁺ 浓度等的条件影响^[11],但是 NH₄⁺ 浓度与 DO 之间存在着一定的关联性. 张肖静等^[11]发现,当 ALR(氨氮负荷)从 0.5 kg·(m³·d)⁻¹ 升高到 0.7 kg·(m³·d)⁻¹ 以上后,NAR 也从 60% 升高到 99%. Third 等^[2]对 CANON 反应器的进水氨氮浓度从 12 mmol·L⁻¹ 降为 5.2 mmol·L⁻¹ 后,其脱氮效率也从 92% 下降到 57%. 所以,ALR(通过改变 HRT 或进水 NH₄⁺ 浓度)的变化(在游离氨产生抑制作用范围内)本身并不会影响 NAR 或 NRR,而是由于 ALR 减少引起基质限制使得氨氧化速率降低,继而导致反应器内的溶解氧过剩,DO 升高,然后对 AnAOB 产生了抑制,影响 NRR; 同样,在相同的曝气条件下 ALR 增加会加快氨氧化速率,降低 DO,进而抑制了 NOB 活性使得 NAR 增加,所以仅仅通过 DO 的大小并不是都能达到抑制 NOB 活性的效果. 在本研究中发现,反应器稳定运行过程中其上部沉淀区 DO <0.01 mg·L⁻¹,这说明系统内 AOB 的耗氧速率与溶解氧的供给速率基本保持一致,同时,出水 NO₂⁻ <5 mg·L⁻¹,在此条件下有效地抑制了 NOB 活性,使得反应器在运行稳定性方面表现了很好的优势.

3.3 复氧回流 CANON 工艺的经济性分析

相对于硝化-反硝化脱氮技术,CANON 工艺减少了 60% 左右的曝气量,在节约能耗方面表现了显著的优势. 而本文研究过程中采用溢流出水复氧回流的方式节约了 100% 的曝气能耗,使得对低氨氮废水处理的运行成本方面更加经济. 另外,对于利用上流式污泥床反应器处理低水量废水时一般需要内回流增加水力搅动,而复氧回流过程在提供溶解氧的同时也为反应器提供了一定的水力搅动,这使得在不额外增加回流的情况下达到脱氮的目的. 所以,利用 CANON 工艺以复氧回流的方式处理低氨氮废水是一种经济可靠的运行模式.

4 结论

(1) 出水复氧回流可以快速启动并稳定运行 CANON 工艺,在污泥体积分数为 25%,进水 NH₄⁺-N 为 157 mg·L⁻¹,HRT 为 2 h 的条件下,经过 50 d 的运行,总氮去除速率 NRR 从 1.31 增加到 1.47 kg·(m³·d)⁻¹. 反应器内部 DO 在 0.01 mg·L⁻¹ 以下.

(2)对于 CANON 工艺,复氧回流的方式有效地控制了反应器内溶解氧的量,对系统中的 NOB 起到了很好的抑制效果,在稳定运行阶段 NaPR 只有 $0.04 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,占 NRR 的 2.7%,表明系统中的 NOB 活性被有效抑制.另外,由于反应器内的 $\text{DO} < 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,AnAOB 活性没有受到溶解氧的影响,启动过程中 NiCR 可以快速恢复,并在其后运行中有稳定增加的趋势.

(3)复氧回流 CANON 工艺运行模式在稳定性方面表现出了很大的优势,在反应器运行 50 d 中,仅仅通过控制回流量既可以使得 NiPR 一直维持在 $1.06 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 附近,其浮动范围在 $0.01 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 内.表明回流量精确的控制了系统中溶解氧的量,使得 NO_2^- 产生速率处于一个稳定的值.并且有效地避免了 DO 对 AnAOB 可能产生的抑制,NiCR 有条件稳定增加,使得所积累的 NO_2^- 逐步从硝化反应转移到 ANAMMOX 反应,达到一个更好的脱氮效果.

(4)相对于常用的上流式污泥床反应器运行的 CANON 工艺,复氧回流节约了 100% 的曝气能耗;同时,回流过程也为反应器提供了一定的水力搅动,在低水量的情况下节约了内回流的水力能耗.所以,复氧回流 CANON 工艺运行模式在低氨氮废水处理方面表现了更加节能、经济的优点.

(5)复氧回流 CANON 工艺为 ANAMMOX 脱氮技术的应用以及 CANON 工艺启动并稳定运行提供了一个新模式;为 CANON 工艺中 NOB 活性的抑制提供了一个新方法.

参考文献:

- [1] Sliemers A O, Derwort N, Gomez J L, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [2] Third K A, Sliemers A O, Kuenen J G, *et al.* The CANON system (Completely Autotrophic Nitrogen-removal Over Nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, **24**(4): 588-596.
- [3] Jetten M S M, Wagner M, Fuerst J, *et al.* Microbiology and application of the anaerobic ammonium oxidation ('anammox') process[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2001, **12**(3): 283-288.
- [4] Mulder A. The quest for sustainable nitrogen removal technologies[J]. *Water Science and Technology*, 2003, **48**(1): 67-75.
- [5] 王亚宜,黎力,马骁,等.厌氧氨氧化菌的生物特性及 CANON 厌氧氨氧化工艺[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(6): 1362-1374.
Wang Y Y, Li L, Ma X, *et al.* Bio-characteristics of anammox bacteria and CANON anammox process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(6): 1362-1374.
- [6] Egli K, Fanger U, Alvarez P J J, *et al.* Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate [J]. *Archives of Microbiology*, 2001, **175**(3): 198-207.
- [7] Strous M, Van Gerven E, Kuenen J G, *et al.* Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (Anammox) sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(6): 2446-2448.
- [8] 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.
- [9] Joss A, Derlon N, Cyprien C, *et al.* Combined Nitrification-Anammox: advances in understanding process stability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(22): 9735-9742.
- [10] 付昆明,周厚田,左早荣,等.水力停留时间对海绵填料 CANON 反应器性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(7): 1-5.
Fu K M, Zhou H T, Zuo Z R, *et al.* Effect of hydraulic retention time on performance of CANON reactor with sponge as carrier [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(7): 1-5.
- [11] 张肖静,李冬,梁瑜海,等.氨氮浓度对 CANON 工艺性能及微生物特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1715-1721.
Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Effect of ammonia concentration on the performance and microbial characteristics of CANON process [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(7): 1715-1721.
- [12] 廖德祥,李小明,曾光明,等.单级 SBR 生物膜中全程自养脱氮的研究[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(2): 222-225.
Liao D X, Li X M, Zeng G M, *et al.* Studies on deammonification process in single SBR biofilm [J]. *China Environmental Science*, 2005, **25**(2): 222-225.
- [13] Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Performance and microbial community of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process in two membrane bioreactors (MBR) fed with different substrate levels [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **152**: 185-191.
- [14] 羊寿生.曝气的理论与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,1982.
- [15] 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.
- [16] Liu T, Li D, Zeng H P, *et al.* Biodiversity and quantification of functional bacteria in completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite (CANON) process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **118**: 399-406.
- [17] Van Hulle S W H, Vandeweyer H J P, Meesschaert B D, *et al.* Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **162**(1): 1-20.
- [18] Hawkins S, Robinson K, Layton A, *et al.* Limited impact of free ammonia on *Nitrobacter* spp. inhibition assessed by chemical and

- molecular techniques [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101** (12): 4513-4519.
- [19] Liang Y H, Li D, Zhang X J, *et al.* Stability and nitrite-oxidizing bacteria community structure in different high-rate CANON reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **175**: 189-194.
- [20] Laanbroek H J, Gerards S. Competition for limiting amounts of oxygen between *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter winogradskyi* grown in mixed continuous cultures[J]. *Archives of Microbiology*, 1993, **159**(5): 453-459.
- [21] Wiesmann U. Biological nitrogen removal from wastewater[A]. In: Wiesmann U (Ed.). *Biotechnics/Wastewater* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1994. 113-154.
- [22] Wyffels S, Boeckx P, Pynaert K, *et al.* Nitrogen removal from sludge reject water by a two-stage oxygen-limited autotrophic nitrification denitrification process [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(5-6): 57-64.
- [23] 操家顺, 漆磊, 薛朝霞, 等. 水动力条件对全程自养脱氮工艺启动研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, **42**(3): 57-61.
Cao J S, Qi L, Xue Z X, *et al.* Study on hydrodynamic conditions on start-up of CANON process[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, **42**(3): 57-61.
- [24] Gonzalez-Martinez A, Rodriguez-Sanchez A, Garcia-Ruiz M J, *et al.* Performance and bacterial community dynamics of a CANON bioreactor acclimated from high to low operational temperatures [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **287**: 557-567.
- [25] Helmer-Madhok C, Schmid M, Filipov E, *et al.* Deammonification in biofilm systems: population structure and function[J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(1-2): 223-231.
- [26] 蔡庆, 张代钧, 肖芑颖, 等. 完全自营养脱氮过程中的影响因素[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(10): 3895-3900.
Cai Q, Zhang D J, Xiao P Y, *et al.* Influencing factors in completely autotrophic nitrogen removal process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(10): 3895-3900.
- [27] Vlaeminck S E, Terada A, Smets B F, *et al.* Aggregate size and architecture determine microbial activity balance for one-stage partial nitritation and anammox[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(3): 900-909.
- [28] 王毅, 金腊华, 朱波, 等. 全程自养脱氮反应器条件下半亚硝化影响因素的探究[J]. *安徽农业科学*, 2013, **41**(24): 10095-10097, 10100.
Wang Y, Jin L H, Zhu B, *et al.* Research on influencing factors of half-nitrosation in CANON reactor [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(24): 10095-10097, 10100.
- [29] Hunik J H, Tramper J, Wijffels R H. A strategy to scale up nitrification processes with immobilized cells of *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter agilis* [J]. *Bioprocess Engineering*, 1994, **11**(2): 73-82.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)