

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

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

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征订简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

HRT对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响

安芳娇¹, 赵智超¹, 黄利², 黄剑明¹, 邵兆伟¹, 陈永志^{1*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州铁道设计院有限公司, 兰州 730000)

摘要: 采用SBR处理实际生活污水, 在实现半亚硝化时, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及COD平均浓度分别为37.27、39.97和120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 将其作为厌氧氨氧化反应器(ASBR)的进水. 控制温度为24℃, pH为7.2±0.2, 考察HRT分别为36、33、30和27 h时对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响. 结果表明: ① HRT为33 h时系统脱氮效能最佳, 总氮容积负荷(TNLR)和总氮去除负荷(TNRR)平均值分别为0.056 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和0.050 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和COD平均出水浓度分别为1.36、0.47和49.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 三者去除率分别为96.30%、98.83%和56.17%; $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别为1.17和0.15, 比厌氧氨氧化反应的理论值(1.32, 0.26)小0.15和0.11, 造成此偏差的原因是由于系统中存在异养反硝化. ② 随着HRT的逐渐减小, 厌氧氨氧化对脱氮的贡献率逐渐减小, 异养反硝化对脱氮的贡献率逐渐增加. 本研究结果可为厌氧氨氧化技术在实际工程中的应用提供参考.

关键词: 厌氧氨氧化(ANAMMOX); 厌氧氨氧化反应器(ASBR); 水力停留时间(HRT); 生活污水; 脱氮性能; 贡献率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4302-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201802033

Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification

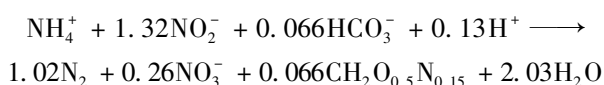
AN Fang-jiao¹, ZHAO Zhi-chao¹, HUANG Li², HUANG Jian-ming¹, SHAO Zhao-wei¹, CHEN Yong-zhi^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Railway Design Institute Company Limited, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Real domestic sewage was first treated in SBR and partial nitrification was achieved. When average concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, and COD were 37.27, 39.97, and 120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, the effluent was delivered as influent of an anaerobic ammonia oxidation reactor (ASBR). The effect of different HRTs (36 h, 33 h, 30 h, 27 h) on nitrogen removal of ANAMMOX and heterotrophic denitrification were investigated under conditions of temperature of 24℃ and pH of 7.2±0.2. Results showed that ① nitrogen removal efficiency was optimum with HRT of 33 h. The average total nitrogen load rate (TNLR) and total nitrogen removal rate (TNRR) were 0.056 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ and 0.050 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, respectively. The average effluent concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, and COD were 1.36, 0.47, and 49.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and removal rates were 96.30%, 98.83%, and 56.17%, respectively. $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 1.17 and 0.15, 0.15 and 0.11 less than theoretical ANAMMOX values (1.32, 0.26) due to heterotrophic denitrification. ② The contribution of ANAMMOX to nitrogen removal decreased; however, the contribution of heterotrophic denitrification to nitrogen removal gradually increased with decreasing HRT. This provides a point of reference for ANAMMOX in engineering applications.

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); ASBR; HRT; domestic sewage; nitrogen removal performance; contribution rate

与传统的硝化-反硝化工艺相比, 厌氧氨氧化(ANAMMOX)工艺具有能耗低、脱氮效率高及污泥产量低等优点, 成为最有前景的工艺之一^[1~4]. ANAMMOX工艺是指以 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为电子受体, 以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为电子供体直接反应生成氮气, 其化学计量式如下^[5~7]:



在生物处理工艺中, 水力停留时间(HRT)是个非常重要的参数, 不仅影响整个系统的处理效能, 还直接决定反应器的大小, 从而影响整个系统的基建费用^[8~10]. 因此, 为了保证系统的处理

效能及节省工程投资, 需确定合理的HRT. 马朝阳等^[11]研究发现HRT为6 h时厌氧氨氧化系统效果最佳. 祁迪等^[12]发现HRT为12 h时, 能较好地发挥厌氧氨氧化的活性. 魏琛等^[13]考察了HRT对厌氧氨氧化系统处理效果的影响, 发现HRT为10 d系统脱氮性能最佳. 但上述研究主要是在高温条件下, 考察以人工配水为研究对象时HRT对

收稿日期: 2018-02-04; 修订日期: 2018-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668033); 甘肃省高等学校特色专业项目(101004)

作者简介: 安芳娇(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: 1171405081@qq.com

* 通信作者, E-mail: 476411589@qq.com

厌氧氨氧化脱氮的影响,而对于常温下以实际生活污水为研究对象,考察 HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化的影响研究鲜见报道.

针对以上问题,本研究采用 SBR 处理实际生活污水,在实现半亚硝化时,以其出水作为厌氧氨氧化的进水,控制温度为 24℃,考察了 HRT 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及 COD 去除效果的影响,以期为厌氧氨氧化工艺在实际工程中的应用提供一定的借鉴和指导.

1 材料与方法

1.1 试验装置

ASBR 反应器采用圆柱形有机玻璃制成(图 1),直径 14 cm,高 45 cm,有效容积 5 L.在其侧壁的垂直方向设置取样口,底部设有排泥口,上部设有通气口,反应产生的气体经水封瓶排出,为防止光对厌氧氨氧化菌活性的影响,反应器外侧用黑色塑料布覆盖.

1.2 接种污泥

试验污泥取自成功启动的厌氧氨氧化中的活性污泥,具有良好的脱氮性能,其 MLSS 为 3 380 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,VSS 为 2 530 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 试验用水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Quality of raw wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				
项目	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	COD
范围	85.55 ~ 100.82	0.02 ~ 0.57	0.23 ~ 1.35	200.12 ~ 400.41
均值	93.71	0.19	0.6	355.25

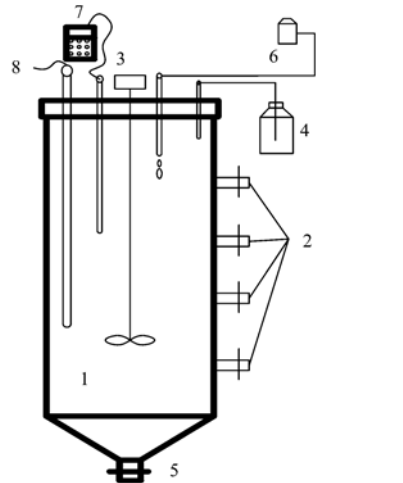
≈ 1 , $\text{NO}_3^-\text{-N} < 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 为 7.2 ± 0.2 .

从反应器中取 100 mL 水样,用定量滤纸过滤,滤纸残余物在 105℃ 的烘箱内烘至恒重,冷却后测量 MLSS,然后在 600℃ 的马弗炉内烘至恒重,冷却后测量 MLVSS.水样经过 0.45 μm 滤纸过滤后根据国家标准方法^[14]测定:COD,快速消解分光光度法; $\text{NH}_4^+\text{-N}$,纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$, N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$,麝香草酚法;pH 和 DO 采用 Multi3420 仪测定.

1.4 计算方法

厌氧氨氧化在系统中对脱氮的贡献率 A 及反硝化在系统中对脱氮的贡献率 D 的计算,参考魏思佳等^[15]的公式;总氮容积负荷(TNLR)及总氮去除负荷(TNRR)的计算参考周同等^[16]的公式:

$$A = \frac{1.32\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{rem}}}{\text{NO}_2^-\text{-N}_{\text{rem}} - \Delta\text{NO}_3^-\text{-N} + 0.26\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{rem}}}$$
$$D = 1 - A$$



1. ASBR 反应器; 2. 排水口; 3. 搅拌器; 4. 水封瓶; 5. 排泥口; 6. 缓冲瓶; 7. pH、ORP 检测仪; 8. 温控仪

图 1 ASBR 反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of ASBR reactor

1.3 试验用水水质及检测方法

实际生活污水取自兰州交通大学家属区,其水质见表 1.试验采用 SBR(处理实际生活污水)半亚硝化出水作为厌氧氨氧化进水:COD 为 120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度为 37.27 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均浓度为 39.97 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,即进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$

$$\text{TNLR} = \frac{c_{\text{inf}} \times 24}{1\,000 \times \text{HRT}}$$

$$\text{TNRR} = \frac{(c_{\text{inf}} - c_{\text{eff}}) \times 24}{1\,000 \times \text{HRT}}$$

式中, $\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{rem}}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}_{\text{rem}}$ 分别为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), c_{inf} 表示进水总氮浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), c_{eff} 表示出水总氮浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), HRT 表示水力停留时间(HRT 分别为 36、33、30 及 27 h).

2 结果与讨论

2.1 不同 HRT 下氮素的变化特性

图 2 表示不同 HRT 条件下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化.从中可知,在整个试验过程中,进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度有一定的波动,但系统对其去除效果良好, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均出水浓度均低于 0.70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这是由于发生厌氧氨氧化后剩余的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 发生了异

养反硝化.

然而在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均进水浓度为 $37.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,当HRT由36 h缩短至27 h的过程中,每次缩短HRT后,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均增大,随着运行周期数的增加,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 逐渐减小,发现HRT越短,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 达到稳定所需时间越长.其中当HRT为33 h时,前9周期出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在 $1.57\sim 8.98\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动,运行至第10周期之后平均出水浓度及去除率分别为 $1.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和96.30%.当HRT为30 h和27 h时,系统出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度分别为 $4.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7.99\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.综合考虑,HRT为33 h时,系统脱氮效果最佳.李宁宁等^[17]在较短的HRT下,也获得了较好的脱氮的效果,但是其控制的温度较高(35 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,而本试验是在接近室温的条件下进行的.

厌氧氨氧化反应过程中生成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,导致出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度高于其进水浓度,但是由于本试验采用实际生活污水,其中含有一定量的有机物,所以在

异养反硝化的作用下,生成的部分 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 还原为 N_2 ,故出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的平均浓度始终低于 $5.80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.然而胡永春等^[18]采用人工配水,研究表明HRT越短, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 日生成量越多,其原因是当HRT减小时水力负荷增大,进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 消耗后能得到快速补充,导致生成物 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度提高;另一方面,人工配水中不含COD,故不能发生异养反硝化,最终使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度积累.

马朝阳等^[11]利用UAFB反应器富集培养厌氧氨氧化细菌,控制温度为 31°C ,发现HRT为6 h效果最佳.祁迪等^[12]采用UASB反应器以模拟亚硝化进水,控制温度为 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$,当HRT为12 h时,能较好地发挥厌氧氨氧化菌的活性,得到较好的污水处理效果.本试验最佳HRT为33 h,比上述研究者所得HRT都长,分析原因:①本试验中以SBR半亚硝化处理过的实际生活污水为研究对象,实际生活污水中所含成分比人工配水复杂;②本试验是在接近常温(24°C)的条件下进行的,比厌氧氨氧化菌最适温度($32\sim 37^{\circ}\text{C}$ ^[9,19])低,故本试验中厌氧氨

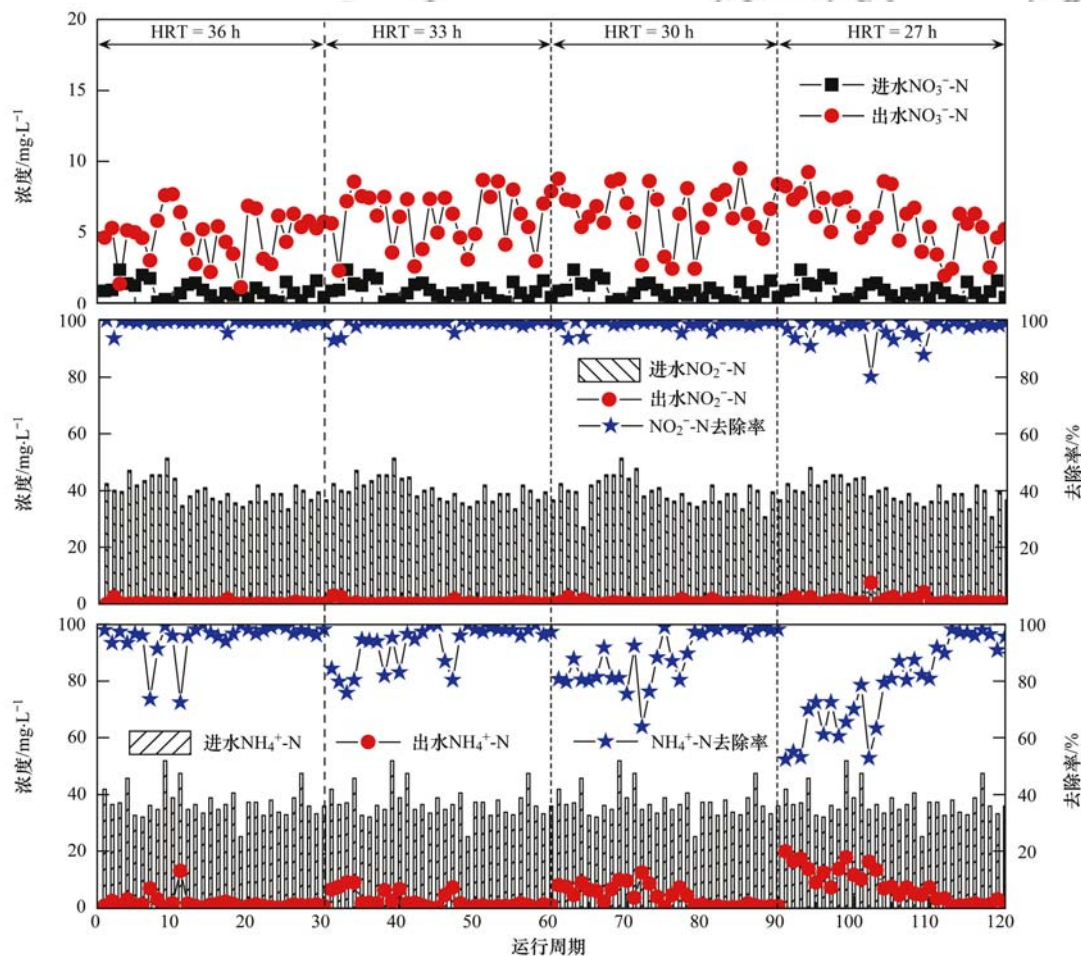


图2 不同HRT下ANAMMOX系统中氮素的去除特征

Fig. 2 Nitrogen removal characteristics of ANAMMOX system under different HRTs

氧化菌活性可能受到一定的抑制,但是本试验对于实际工程的应用更有借鉴意义.然而魏琛等^[13]采用模拟亚硝化出水,研究表明 HRT 为 10 d 最宜,系统 HRT 过短会导致含氮污染物去除不完全,HRT 过长则污泥可能已经解体,与本试验相比 HRT 更长,可能是由于本试验进水基质浓度较低,且进水中含有 COD,导致系统中发生厌氧氨氧化的同时存在异养反硝化.

2.2 不同 HRT 下化学计量关系

图 3 表示不同 HRT 条件下 ANAMMOX 系统中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 去除量和 NO_3^--N 生成量之比的变化.从中可知,HRT 为 36 h 时, $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的平均值为 1.13,较其理论值 1.32 小,主要是因为反应器中存在 AOB,AOB 率先将进水中的 NH_4^+-N 氧化为 NO_2^--N ,再发生厌氧氨氧化反应,导

致其值降低.HRT 为 33 h 时, $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的平均值为 1.17,该值较接近理论值,说明此时系统内厌氧氨氧化脱氮效果较好.当 HRT 分别缩短至 30 h 和 27 h 时,前几周期内, $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 分别为 1.48 和 1.87,都大于其理论值,这是由于 HRT 过短,总氮负荷提高,导致 NH_4^+-N 无法完全去除,同时系统内 NO_2^--N 发生了异养反硝化.随着运行周期的增加, $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 逐渐地小于理论值,这可能是因为系统中部分 NH_4^+-N 被氧化为 NO_3^--N .当 HRT 为 36、33 和 30 h 时, $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的值都小于其理论值 0.26.当 HRT 为 27 h 时, $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 突然增大至 0.34,是因为 NH_4^+-N 无法在该 HRT 下完全去除,部分 NO_2^--N 被氧化为 NO_3^--N ,随后 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 逐渐降低.

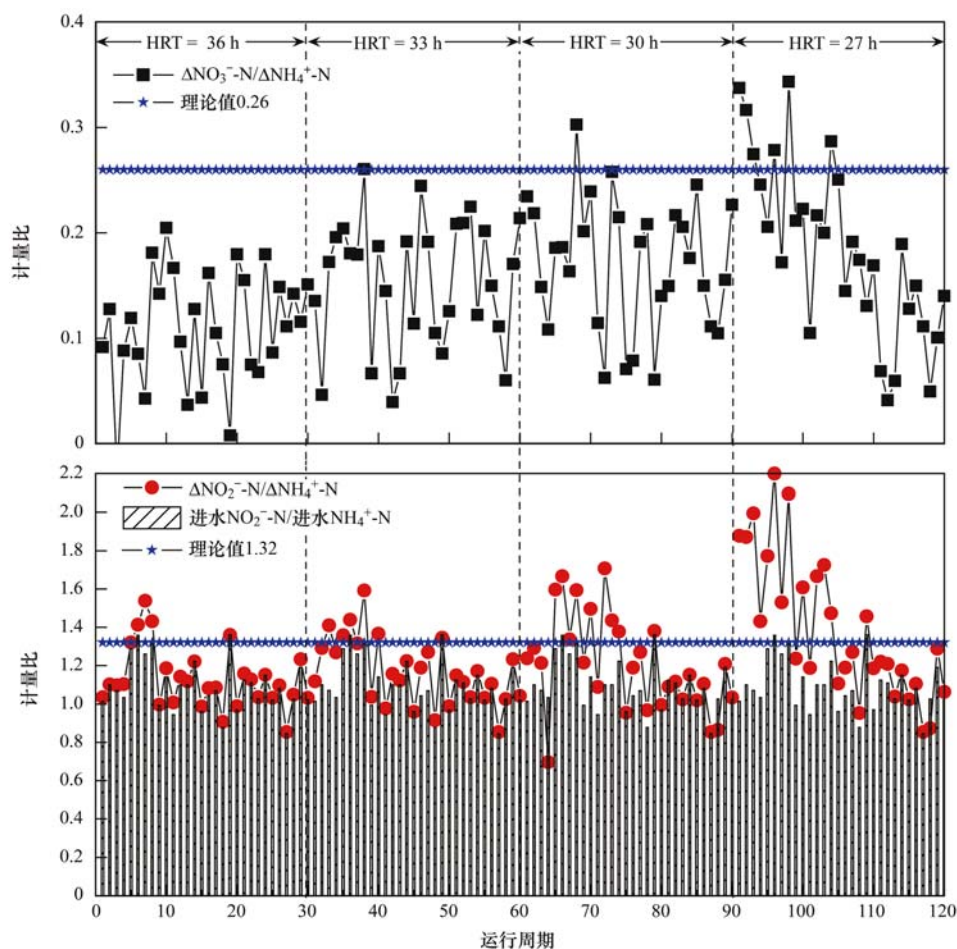


图 3 不同 HRT 下 ANAMMOX 系统中化学计量比关系

Fig. 3 Stoichiometric ratio relationship of ANAMMOX system under different HRTs

有研究发现^[11,20,21],当采用人工配水时, $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 都小于其理论值(1.32),分析原因,进水中存在少量的 DO,将部分 NH_4^+-N 氧化为 NO_2^--N ;但是 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的值与理论值

(0.26) 也不符,这可能是因为厌氧氨氧化菌自身繁殖及内源反硝化所致.而本试验的 $\Delta\text{NO}_2^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^--\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 分别为 1.17 和 0.15,主要是因为:①进水中存在少量的 DO,将部分

NH_4^+-N 氧化为 NO_2^--N ; ②实际生活污水中存在 COD, 发生了异养反硝化, 将 NO_3^--N 还原为 N_2 , 这与孙艳波等^[22]的研究结果一致。

2.3 不同 HRT 下总氮容积负荷及其去除负荷的变化特征

图 4 表示不同 HRT 下 ANAMMOX 系统中总氮容积负荷 (TNLR) 及总氮去除负荷 (TNRR) 的变化特征。当 HRT 为 36 h 时, TNLR 的范围为 $0.040 \sim 0.069 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, TNRR 在 $0.039 \sim 0.064 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间波动, 反应运行前 12 周期内, TNRR 与 TNLR 相差较大, 主要是由于厌氧氨氧化反应器处于运行初期, 需要适应一段时间。之后随着运行周期的增加及厌氧氨氧化的稳定, TNRR 逐渐接近 TNLR, 说明 HRT 为 36 h 时厌氧氨氧化反应协同反硝化去除系统中的 TN 效果良好。HRT 减小

至 33 h 时, TNLR 平均值为 $0.056 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, TNRR 平均值为 $0.050 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 说明在该 HRT 下系统脱氮效果良好。HRT 为 30 h 时, TNLR 在 $0.048 \sim 0.083 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间波动, 前 20 周期内 TNRR 波动较大, 因为: ①厌氧氨氧化菌生长代谢缓慢, 厌氧氨氧化菌没有足够的时间对剩余的 NH_4^+-N 去除; ②HRT 减小系统出水中伴随厌氧氨氧化菌流失的现象, 厌氧氨氧化菌的繁殖速度无法及时补充其流失量。随着周期数的增加, TNRR 逐渐接近 TNLR。HRT 缩短至为 27 h 时, TNLR 在 $0.054 \sim 0.092 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 波动, 前 22 周期内, TNRR 在 $0.040 \sim 0.069 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间波动, 运行至 25 周期时, TNRR 接近 TNLR, 脱氮效果较好。说明 HRT 越短, 系统脱氮性能达到稳定所需时间越长。

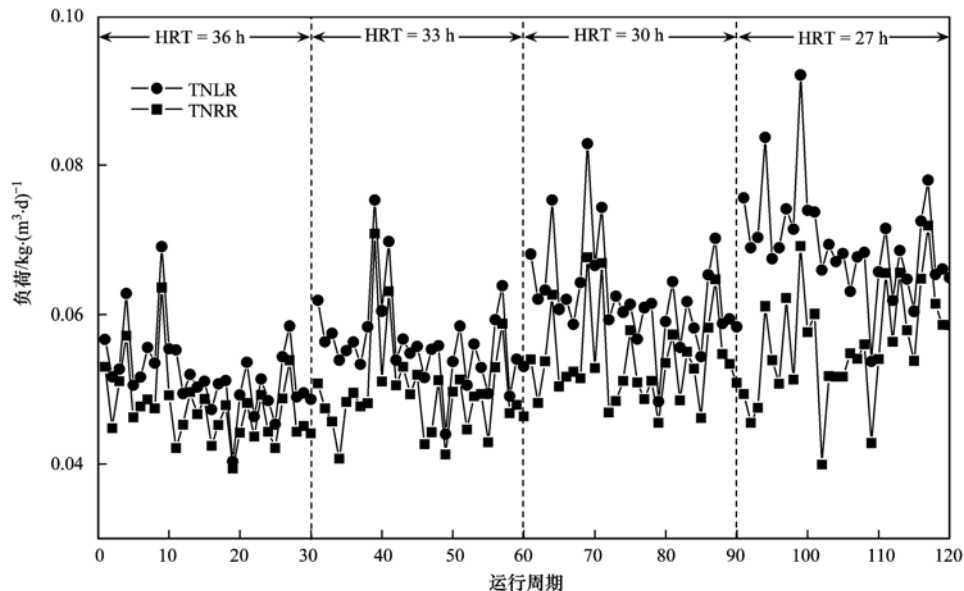


图 4 不同 HRT 下 ANAMMOX 系统中总氮负荷的变化特征

Fig. 4 Characteristics of total nitrogen load of ANAMMOX system under different HRTs

蒋军等^[23]采用人工配水, 当 HRT 为 24 h 时, TNLR 为 $0.140 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, TNRR 为 $0.120 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。李宁宁等^[17]控制温度为 36°C , 发现厌氧氨氧化反应达到稳定运行时最佳 HRT 为 24 h, TNLR 平均为 $0.179 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, TNRR 为 $0.125 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。而本试验中, 当 HRT 为 33 h 时, TNLR 及 TNRR 较上述研究低, 这是因为: ①本试验采用 SBR 处理实际生活污水, 在实现半亚硝化时, 以其出水作为厌氧氨氧化的进水, 故厌氧氨氧化系统中含有一定量的 AOB 及 DO, 且在有机物的冲击负荷下, 厌氧氨氧化反应协同反硝化去除系统中的 TN; ②由于控制温度为 24°C , 可能抑制了厌

氧氨氧化菌的活性, 但是该温度下对实际工程有较大的指导意义。

2.4 不同 HRT 下厌氧氨氧化和异养反硝化对脱氮的贡献率

图 5 表示不同 HRT 下 ANAMMOX 系统中 COD 变化特征, 图 6 表示不同 HRT 下系统中厌氧氨氧化和异养反硝化对脱氮的贡献率特征。

由图 5 可知, 整个反应运行过程中, COD 平均进水浓度为 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 出水浓度随着 HRT 的缩短逐渐减小, 分析其原因, 反应器运行初期主要是由于厌氧氨氧化反应占据优势, 异养反硝化较弱, 反应前期 COD 降解速率较慢, 随着异养反硝化

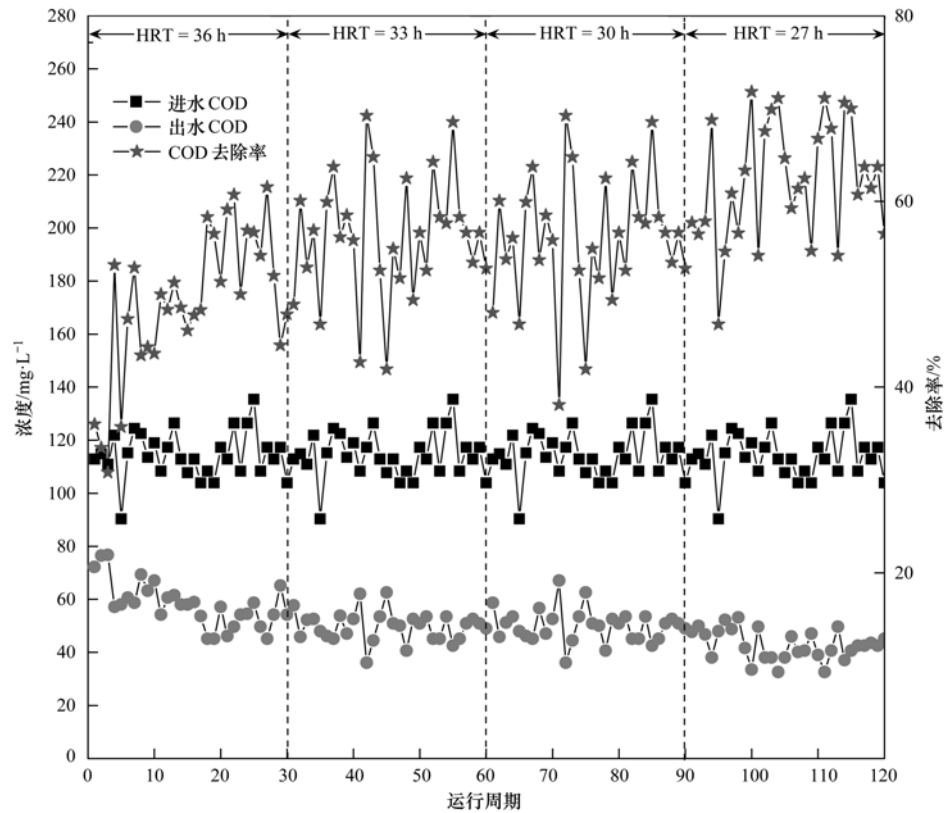


图5 不同 HRT 下 ANAMMOX 系统中 COD 变化特征

Fig. 5 Characteristics of COD of ANAMMOX system under different HRTs

缓慢地增加，COD 降解速率逐渐加快。

由图6可知，HRT 为 36 h 时，厌氧氨氧化在系统
中对脱氮的平均贡献率为 79.36%，异养反硝化
在系统
中对脱氮平均贡献率为 20.64%，此时厌氧
氨氧化占据优势地位。当 HRT 缩短至 27 h 时，厌
氧氨氧化在系统
中对脱氮的平均贡献率降至

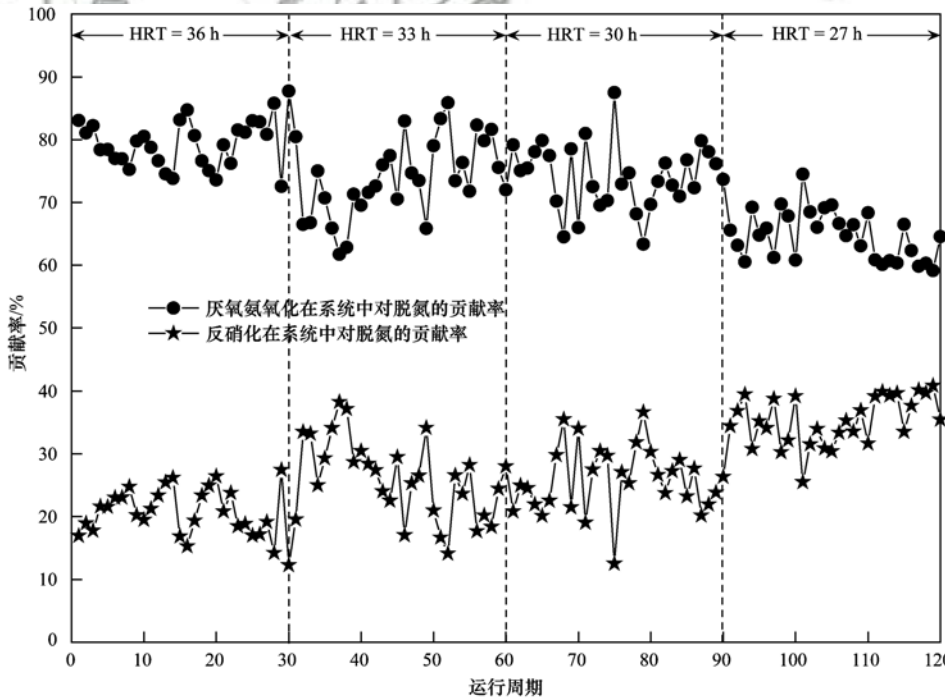


图6 不同 HRT 下系统中贡献率的特征

Fig. 6 Characteristics of contribution rates of system under different HRTs

67.12%，反硝化在系统中的脱氮平均贡献率升至32.88%。随着HRT的逐渐缩短，厌氧氨氧化对脱氮贡献率缓慢降低，反硝化在系统中对脱氮贡献率逐渐增加，主要是因为，试验污泥取自成功启动的厌氧氨氧化中的活性污泥，故刚开始反应以厌氧氨氧化为主，随着系统的逐渐运行，反硝化菌利用进水中的COD发生异养反硝化脱氮，研究结果与李媛^[21]的研究结果一致。还有研究证明^[24-27]，厌氧氨氧化菌与反硝化菌能在同一个反应器内共存，反硝化菌利用有机物将反应器内的 NO_3^- -N转化为 N_2 ，可解除有机物对厌氧氨氧化的抑制作用；同时反硝化产生的 CO_2 还可为厌氧氨氧化提供无机碳源，两者可实现协同作用。

3 结论

(1)采用SBR处理实际生活污水，在实现半亚硝化时，其出水作为ASBR厌氧氨氧化反应器的进水，当HRT为33 h时其脱氮性能最佳，出水 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N平均浓度分别为 $1.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，去除率均值分别为96.30%和98.24%，出水 NO_3^- -N平均值为 $5.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总氮容积负荷和总氮去除负荷分别为 $0.056 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.050 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

(2)由于进水中存在少量的DO和COD，HRT会影响 ΔNO_2^- -N/ ΔNH_4^+ -N和 ΔNO_3^- -N/ ΔNH_4^+ -N的值，当HRT为33 h时，二者比值分别为1.17和0.15，均小于厌氧氨氧化的理论值。

(3)在整个运行过程中，COD出水浓度随着HRT的缩短逐渐降低，厌氧氨氧化反应与异养反硝化协同除氮，随着HRT的逐渐缩短，厌氧氨氧化对脱氮的贡献率逐渐减小，而异养反硝化对脱氮的贡献率逐渐增加。

参考文献:

- [1] Van De Graaf A A, Mulder A, De Bruijn P, *et al.* Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**(4): 1246-1251.
- [2] Van Der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [3] 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 等. 不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2770-2777.
An F J, Peng Y Z, Dong Z L, *et al.* Performance of the removal of nitrogen of anaerobic ammonia oxidation under different running strategy [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2770-2777.
- [4] 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 等. 快速启动厌氧氨氧化工艺[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1116-1121.
Lü G, Xu L Z, Shen Y L, *et al.* Quick start-up of anaerobic ammonium oxidation process[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1116-1121.
- [5] 姚俊芹, 周少奇. 厌氧氨氧化生物脱氮研究进展[J]. *化工学报*, 2005, **56**(10): 1826-1831.
Yao J Q, Zhou S Q. Progress of biological nitrogen removal by anaerobic ammonium oxidation[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2005, **56**(10): 1826-1831.
- [6] Van De Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Metabolic pathway of anaerobic ammonium oxidation on the basis of¹⁵N studies in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology*, 1997, **143**(7): 2415-2421.
- [7] Schmidt I, Sliekers O, Schmid M, *et al.* New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, **27**(4): 481-492.
- [8] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The Sharon process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [9] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [10] Gut L, Plaza E, Trella J, *et al.* Combined partial nitrification/Anammox system for treatment of digester supernatant[J]. *Water Science & Technology*, 2006, **53**(12): 149-159.
- [11] 马朝阳, 门高闪, 昌文龙, 等. HRT对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S1): 31-34.
Ma C Y, Men G S, Chang W L, *et al.* HRT of anaerobic ammonia oxidation effect of biological denitrification efficiency [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S1): 31-34.
- [12] 祁迪, 张文文, 张驰. 水力停留时间对厌氧氨氧化脱氮性能的影响[J]. *辽宁化工*, 2016, **45**(9): 1164-1167.
Qi D, Zhang W W, Zhang C. Impact of HRT on ANAMMOX nitrogen removal rate[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2016, **45**(9): 1164-1167.
- [13] 魏琛, 陆天友, 钟仁超, 等. HRT及氮素负荷对厌氧氨氧化系统的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 749-755.
Wei C, Lu T Y, Zhong R C, *et al.* Influence of HRT and nitrogen load on an ANAMMOX system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(4): 749-755.
- [14] APHA. Standard methods for the Examination of water and wastewater[M]. 21st ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- [15] 魏思佳, 于德爽, 李津, 等. 厌氧氨氧化与反硝化耦合脱氮除碳研究 I: COD/ NH_4^+ -N对耦合反应的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 759-767.
Wei S J, Yu D S, Li J, *et al.* Simultaneous carbon and nitrogen removal by anaerobic ammonium oxidation and denitrification I: effect of COD/ NH_4^+ -N on coupled reaction [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 759-767.
- [16] 周同, 于德爽, 李津, 等. 温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 2044-2051.
Zhou T, Yu D S, Li J, *et al.* Effect of temperature on nitrogen

- removal performance of marine anaerobic ammonium oxidizing bacteria[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 2044-2051.
- [17] 李宁宁, 于德爽, 李津, 等. 城市污水条件下 ASBR 厌氧氨氧化的启动与脱氮性能[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(5): 1689-1694.
- Li N N, Yu D S, Li J, *et al.* Start up of anaerobic ammonium oxidation process and nitrogen removal performance in anaerobic sequencing batch reactor for municipal sewage[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(5): 1689-1694.
- [18] 胡永春, 周少奇, 钟红春. 水力负荷对厌氧氨氧化反应器运行影响的研究[J]. *环境污染与防治*, 2008, **30**(1): 37-40.
- Hu Y C, Zhou S Q, Zhong H C. Study on influence of hydraulic loading for running of ANAMMOX reactor[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, **30**(1): 37-40.
- [19] 赵志宏, 李小明, 廖德祥, 等. ANAMMOX 菌的微生物学研究进展[J]. *微生物学通报*, 2007, **34**(1): 138-142.
- Zhao Z H, Li X M, Liao D X, *et al.* The microbiology research progress of ANAMMOX bacteria[J]. *Microbiology*, 2007, **34**(1): 138-142.
- [20] 张海芹. ABR 反应器厌氧氨氧化启动及其脱氮效能的研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- Zhang H Q. Study on start-up and nitrogen removal efficiency of ANAMMOX in ABR[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [21] 李媛. 厌氧氨氧化工艺启动和运行特性及其受抑机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- Li Y. Start-up and performance characteristics of anaerobic ammonium oxidation process and its repressed mechanisms[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [22] 孙艳波, 周少奇, 李伙生, 等. ANAMMOX 与反硝化协同脱氮反应器启动及有机负荷对其运行性能的影响[J]. *化工学报*, 2009, **60**(10): 2596-2602.
- Sun Y B, Zhou S Q, Li H S, *et al.* Start-up of ANAMMOX-denitrification reactor and effect of organic loading on its performance of synergistic interaction[J]. *CIESC Journal*, 2009, **60**(10): 2596-2602.
- [23] 蒋军, 吴立波, 付丽霞, 等. 容积负荷对厌氧氨氧化反应器运行影响的研究[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(2): 283-287.
- Jiang J, Wu L B, Fu L X, *et al.* Study on influence of volume loading on running of ANAMMOX reactor[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(2): 283-287.
- [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] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 691-695.
- Yang Y, Zuo J E, Shen P, *et al.* Influence of temperature, pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [26] Pathak B K, Kazama F, Saiki Y, *et al.* Presence and activity of anammox and denitrification process in low ammonium-fed bioreactors[J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(11): 2201-2206.
- [27] Chen H H, Liu S T, Yang F L, *et al.* The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(4): 1548-1554.

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	 XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	 LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	 WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	 XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	 HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	 LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	 NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	 CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	 WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	 HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	 HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	 ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	 YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	 WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	 HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	 WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	 YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	 ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	 CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	 SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	 AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	 LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	 SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	 LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	 LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	 ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	 HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	 JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)