一体化厌氧氨氧化反应器的优化及其稳定性研究

程 军¹,张 亮²,杨延栋³,张树军²,彭永臻^{1*} (1.北京工业大学,北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验 室,北京市污水脱氮除磷处理与过程控制工程技术研究中心,北京 100124;2.北京城市排水集团有限责任公司科技 研发中心,北京污水资源化工程技术研究中心,北京 100022;3.哈尔滨工业大学,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:采用一体化厌氧氨氧化 SBR 反应器(120L)处理高氨氮废水,研究系统总氮去除负荷提高和稳定性的影响因素.长期试验结果表明:该 一体化厌氧氨氧化 SBR 反应器的最大总氮去除负荷为 1.1kg/(m³·d),影响反应器运行稳定性的主要因素有:游离氨浓度、溶解氧浓度、絮体 污泥和颗粒污泥相对比例等.在一体化厌氧氨氧化反应器中保持 AOB 和 Anammox 活性的相互匹配是维持系统稳定运行的关键因素.大量 淘洗絮体污泥会造成氨氧化活性降低和溶解氧升高,从而引起总氮去除负荷下降.限制反应器负荷增加的主要因素有:(1)污泥随出水流失, 体系污泥浓度保持恒定;(2)受溶解氧影响 AOB 和 Anammox 活性不能同时提高;(3)传质效率难以进一步提高.试验中发现总氮去除负荷和 曝气量之间具有很好的相关性.反应器负荷波动时通过调整曝气量来调控反应状态.有利于一体化工艺的稳定运行.

关键词:一体化厌氧氨氧化;絮体污泥;总氮去除负荷;曝气量

中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:1000-6923(2016)04-1027-06

Optimization and stability of single-stage anammox reactor. CHENG Jun¹, ZHANG Liang², YANG Yan-dong³, ZHANG Shu-jun², PENG Yong-zhen^{1*} (1.Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Engineering Research Center of Beijing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China ; 2.Research and Development Center of Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing Wastewater Recycling Engineering Technology Research Center, Beijing 100022, China ; 3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China). *China Environmental science*, 2016,36(4) : 1027~1032

Abstract : Key operational parameters of single-stage partial nitritation/anammox (PN/A) process was investigated to achieve higher nitrogen removal rate (NRR) and robustness by using a sequencing batch reactor (SBR) (120L) treating ammonia-rich wastewater. Long-term operation demonstrated that the maximum NRR of the reactor was 1.1kgN/(m³·d). The main parameters influenced the stability of the reactor were: free ammonia concentration, dissolved oxygen (DO) concentration and the relative proportions of the granules and flocs. The balance of AOB and anammox activity was the key to a robust single-stage PN/A operation. Excess discharge of floc sludge led to a decrease of ammonia oxidation rate and a high and inhibitory DO level to anammox bacteria, which eventually triggered the dramatic drop of NRR. The limiting factors of further improvement of NRR were: (1) sludge concentration stabilized due to biomass washout; (2) anammox and AOB activity could not be promoted simultaneously when further increasing DO levels; (3) mass transfer could not be further enhanced. Furthermore, NRR showed strong correlation with aeration rate in this study. Therefore, aeration rate could be an alternative regulating parameter under fluctuating influent load.

Key words : single-stage anammox ; flocs ; total nitrogen removal rate ; aeration rate

厌氧氨氧化工艺是一种高效、节能的新型脱 氮工艺^[1].相比传统硝化-反硝化脱氮工艺它具有 节省能量、无需外加碳源、能量回收率高、污泥 产量少等显著优势^[2].基于厌氧氨氧化的一体化 工艺是反应器中同时存在氨氧化菌(AOB)和厌 氧氨氧化菌(Anammox),低氧条件下AOB消耗溶 解氧产生 NO_2 为 Anammox 提供底物并创造缺 氧环境, Anammox 将 NO_2 和 NH_4 ⁺转化为 N_2 ^[3-4].

基金项目:国家自然科学基金(51478013),城市水资源与水环境国家 重点实验室开放基金项目(哈尔滨工业大学,项目号 QAK201502)

* 责任作者, 教授, pyz@bjut.edu.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期:2015-09-29

一体化工艺具有工艺流程简单、运行管理方便、 亚硝冲击负荷小等特点.经过长期的试验研究和 工程实践,厌氧氨氧化工艺在处理污泥消化液、 垃圾渗滤液、味精废水、制药废水、养殖废水等 高氨氮废水方面已经取得了显著的成果^[5-6].目 前,城市生活污水的厌氧氨氧化处理技术已经成 为研究热点,它将最大限度地提高污水的能量回 收率,实现污水处理厂能量自给甚至产能^[7].

根据调查、截止到 2014 年、全世界用于处理 高温、高氨氮、低 C/N 的短程硝化-厌氧氨氧化 污水处理工程已达到 100 座,其中 88%采用一体 化工艺且 SBR 反应器占到 50%,而 DEMON 工 艺占到所有 SBR 工艺形式的 80%^[8].在实际运行 中大多采用在线监测控制策略,其中 DO 和 pH 值是应用最广泛的控制参数,适宜的 DO 可以避 免厌氧氨氧化菌受抑制并控制硝化细菌(NOB) 的增长,适宜的 pH 值则可以避免过高的游离氨 (FA)或游离亚硝酸(FNA)对厌氧氨氧化菌的抑 制^[9].然而,由于一体化厌氧氨氧化工艺运行精 细化程度高、操作困难、受外界环境影响大等 因素的影响,仅仅依靠 DO 和 pH 值的控制策略 往往不能实现一体化工艺的长期稳定运行,目 前,虽然关于一体化厌氧氨氧化 SBR 反应器的 研究较多,且在实际工程中得到较为广泛的应 用。但是有关絮体污泥和颗粒污泥的关系以及 比例对系统稳定性和反应负荷的影响研究不够 全面.而且由于厌氧氨氧化菌生长速率缓慢[10]、 普遍存在反应器接种污泥缺乏现象、尤其对于 城市生活污水处理厂,接种污泥的来源将是污 水处理厂主流区实现厌氧氨氧化工艺的主要问 题之一[11].因此进一步优化一体化厌氧氨氧化 工艺,提高系统稳定性和总氮去除负荷,实现 Anammox 菌快速大量富集对厌氧氨氧化工艺 的推广应用有重要意义.本论文以 SBR 反应器 为研究对象,考察了一体化工艺总氮去除负荷 的变化及其限制因素;并研究了反应负荷提高 过程中游离氨、絮体污泥浓度、溶解氧等因素 对系统稳定性的影响以及曝气量与 DO、总氮 去除负荷(NRR)之间的关系,并且提出了以曝气 量作为控制反应状态的控制策略.

1 材料与方法

1.1 反应器形式及运行条件

本试验采用 SBR 反应器,如图1所示.反应器 内径380mm,高1100mm,有效容积120L,曝气设 备采用微孔曝气盘和空压机.曝气量通过转子流 量计控制.反应器接种污泥来自一中试规模的 SBR 反应器^[12],污泥形态为絮体污泥和颗粒污泥, 接种污泥浓度为4000mg/L,其中絮体污泥(粒径 <200μm,下同)占60%.颗粒平均粒径309μm.

反应器稳定期间运行周期为 12h,负荷降低 调整为 24h.其中进水 10min,连续曝气 11~23h,沉 淀 30min,排水 20min,排水比为 1/4.试验控制反应 器温度为 30 ,后一阶段调整为 34 ,pH 值控制 在 6.9~7.8 之间.反应过程中监测 NO₂ 浓度,通过 调整曝气量控制 NO₂ 浓度在 5~20mg/L 之间.



Fig.1 Schematic diagram of the SBR reactor

1.2 试验用水

进水采用北京高碑店污水处理厂初沉池出 水加入 NH₄HCO₃ 模拟高氨氮、低 C/N 废水.进水 水 质 为 :NH₄⁺-N:550~2800mg/L 、 NO₂⁻-N: 0~ 10mg/L、COD:150~300mg/L、TP:5~8mg/L.

1.3 分析方法

试验过程中利用在线设备监测反应器内 NH₄⁺、NO₂⁻和 NO₃⁻浓度,pH 值、温度和 DO 采用 WTW 便携式检测仪(340i)检测;试验末取出水检 测,其中 NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法测定; 亚硝酸盐和硝酸盐采用离子色谱检测;污泥浓度

1028

采用滤纸过滤称重法:粒径分析采用马尔文激光 粒度仪测定.

2 结果与分析

试验共进行了 118d,整体表现为随着曝气量 的提高总氮去除负荷逐渐增加并最终稳定在 1.1kg/(m³·d)左右,平均总氮去除率为87%.随着反 应进行、污泥粒径逐渐增加、最终颗粒污泥平均粒 径维持在 500~600µm.污泥粒径的增加是在水力 剪切力和水力筛分双重作用下产生的、颗粒粒径 增大一方面可以增加颗粒内部缺氧区的范围,避 免溶解氧对厌氧氨氧化菌的影响有利于反应负 荷提高、但同时又会降低传质效率使反应速率降 低;另一方面,颗粒粒径过大颗粒内部产生的 N₂ 不能迅速排出、形成空腔使颗粒漂浮在水面上、容 易随出水流失^[13].所以随着反应负荷的增加、颗 粒污泥粒径最终维持在 500~600μm.

2.1 反应器运行稳定性影响因素分析

试验期间,出现了3次明显的负荷波动现象 (图 2).结合不同的运行条件、重点分析了一体化 反应器稳定运行的影响因素.

2.1.1 游离氨浓度对系统稳定性的影响 第 阶段为反应器接种和活性恢复阶段.反应前 10d 污泥活性逐渐恢复.由于进水 pH 值升高,在 10~16d 出现了第一次负荷降低,表现为 NO2-积 累明显,溶解氧升高,总氮去除率下降.试验结果 表明系统内氨氧化活性并没有发生变化、而厌氧 氨氧化活性明显降低.游离氨(FA)浓度过高是厌 氧氨氧化菌受抑制的主要原因.根据 NH_4^+ 和 NH_3 的解离平衡,FA 浓度随着 NH_4^+ -N 浓度和 pH 的 增加而增加^[14].而在此阶段进水混合液 NH4⁺-N 浓度为 450mg/L, pH=8.3~8.5,对应的 FA 浓度则 为 68.11~99.16mg/L.

根据已有报道,当水中 FA 浓度大于 70mg/L 时就会对厌氧氨氧化菌造成抑制^[15],长期的运行 结果也表明、当进水 NH4+-N 浓度高于 700mg/L 时就会引起厌氧氨氧化活性的抑制、随着氨氮浓 度逐渐降低厌氧氨氧化反应速率提高.通过降低 进水pH值,在7个周期内反应器总氮去除负荷从 0.2kg/(m³·d)提高到 0.6kg/(m³·d),并且维持在稳定

水平、同时曝气量 30L/h 提高到 60L/h,平均总氮 去除负荷高于接种污泥反应器.从图 3 可以看出 该阶段反应器内污泥浓度增加并逐渐维持稳定、 这是反应负荷增加的主要原因.另外,小试反应器 良好的混合状态提高了传质效率,其总氮去除能 力高于中试反应器.



Variations of total nitrogen removal rate and Fig.2 efficiency



concentration

2.1.2 絮体污泥所占比例对系统稳定性的影响 第 阶段反应温度从30 提高到34 、反应器总 氮去除负荷迅速提高到 0.8kg/(m^{3.}d).为了促进系 统内污泥颗粒化形成,从第38d开始,每天排出8L 混合液,用 200µm 孔径筛子筛分,颗粒污泥返回 到反应器中,絮体污泥直接排放.初始反应器混合 液污泥浓度为 5252mg/L,其中絮体污泥占到 ?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

55.9%.随着絮体污泥排出、反应器总氮去除负荷 呈现下降趋势,排泥初期反应负荷下降缓慢,而从 第 55d 开始发生突降,第 57d 总氮去除负荷降低 到 0.35kg/(m³·d),占最高总氮去除负荷的 31.3%, 此时体系中絮体污泥比例下降到 27.8%.分子生 物学试验表明:AOB 主要存在于絮体污泥中而 Anammox 则主要存在于颗粒污泥中^[16],大量排 出絮体导致体系内微生物结构发生较大变化.排 泥初期体系中 AOB 是过量的、增加曝气量溶解 氧浓度升高、使得体系仍能维持较高的氨氧化活 性,从而弥补了 AOB 流失引起的氨氧化活性下 降.然而随着排泥继续进行,体系中 AOB 进一步 流失,相反 Anammox 主要存在于颗粒中,丰度基 本保持不变.絮体污泥排放导致了反应器氨氧化 活性下降,引起亚硝浓度受限,反应负荷迅速下降. 试验结果表明一体化厌氧氨氧化反应器中保持 微生物之间的协调关系是至关重要的[17].为了保 证体系正常运行,停止排泥并逐渐增加曝气量,经 过5个周期恢复,系统达到较高的总氮去除负荷, 并稳定维持在 0.85kg/(m³·d),以上结果说明 AOB 增长速率较快^[18],系统氨氧化活性在较短时间内 得到恢复进而与厌氧氨氧化活性相匹配.

2.1.3 溶解氧对系统稳定性的影响 随着曝气 量逐渐提高,溶解氧升高反应负荷逐渐增加.在反 应第 76d 反应器总氮去除负荷再一次出现了明 显的下降.表现出氨氧化和厌氧氨氧化活性迅速 降低,溶解氧、pH 值升高现象.图 3 表明,尽管第

阶段末停止排泥,但是由于出水中絮体流失较 多,经过 18d 运行絮体污泥浓度仍维持在 1500mg/L以下,占混合液污泥总量的32.2%.在絮 体浓度较低的情况下,氨氧化活性较低,反应器内 微生物耗氧速率下降,同样的曝气量下体系溶解 氧明显升高,尤其在第 76d 和 80d 溶解氧浓度提 高到 0.8mg/L.溶解氧的升高造成了 Anammox 严 重抑制,引起总氮去除率下降. Joss 等^[19]使用 ATU 对 AOB 进行抑制后同样引起氨氧化活性降 低、溶解氧升高,在很短的时间内厌氧氨氧化活 性完全受到抑制.Hubaux 等^[17]也指出少量絮体 污泥可以显著影响反应效果和体系对溶解氧的 适应能力.在第 81d,对厌氧氨氧化菌活性做了测 试,进水 NH4⁺-N 和 NO2⁻-N 浓度分别为 386, 77.75mg/L,缺氧搅拌 3h,出水 NH4⁺-N 和 NO2⁻-N 浓度分别为 324,0.75mg/L,对应厌氧氨氧化活性 为 1.11kg/(m³·d),这进一步表明高 DO 抑制了厌 氧氨氧化菌活性,在厌氧条件下厌氧氨氧化活性 可以较快恢复.

长期的试验结果表明,在絮体污泥和颗粒污 泥混合的一体化反应器中游离氨浓度、亚硝酸盐 浓度、絮体污泥与颗粒污泥的相对比例以及溶解 氧浓度等是影响反应器稳定运行的关键因素.稳 定的进水水质、适宜的曝气量以及合理的微生物 结构组成有利于一体化厌氧氨氧化反应器去除 负荷快速提高,并促进系统运行的稳定性.

2.2 反应器总氮去除负荷限制性因素

图 2 表明,反应器总氮去除负荷随试验运行 逐渐增加.试验进行 100d 以后,反应器总氮去除 负荷基本保持稳定.为了探究一体化厌氧氨氧化 反应器的最大总氮去除负荷,通过提高曝气量使 系统中存在一定的 NO₂ 积累,平均 NO₂ -N 浓度 约为 15mg/L,考察在 NO₂ 浓度不受限的情况下 反应去除负荷能否进一步提高.试验结果表明:该 系统的最大总氮去除负荷为 1.1kg/ (m^{3.}d).进一 步提高曝气量会造成系统 NO₂ 的迅速积累和溶 解氧升高,而试验中发现当 NO₂ -N 浓度大于 80mg/L、溶解氧大于 0.8mg/L 时就会引起厌氧 氨氧化菌的抑制.

为了验证增加厌氧氨氧化菌是否能够进一步提高总氮去除负荷,反应第119d 从反应器中排出10L 混合液,并用500μm 筛网筛分另外10L 混合液中的颗粒污泥混合后投入到一个11.5L 的SBR 反应器中,反应器污泥浓度为7293mg/L,其中絮体污泥占到39.3%.在相同的反应条件下运行15d 后发现该小试反应器的总氮去除负荷并没有提高,平均为1.067kg/(m³·d).说明原一体化反应器中厌氧氨氧化菌是过量的,在氨氧化不受限的情况下,基质的传递效率成为了限制反应负荷进一步提高的主要因素.

性完全受到抑制.Hubaux 等^[17]也指出少量絮体 根据已有报道,SBR 一体化厌氧氨氧化反应 污泥可以显著影响反应效果和体系对溶解氧的 器的总氮去除负荷均在 1.0kg/(m³·d)以下,如表 1 适应能力.在第 81d,对厌氧氨氧化菌活性做了测 所示.综合分析本试验和已有的文献报道,限制一?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

体化厌氧氨氧化 SBR 反应器负荷提高的原因主 要有:(1)污泥随出水流失导致体系中污泥浓度基 本保持恒定(MLSS=6000mg/L)不再增加,而在 MBBR 或 MBR 反应器中可以有效持留污泥从而 达到更高的总氮去除负荷^[24-25]:(2)本系统是絮体 污泥和颗粒污泥的混合体系,AOB 和 Anammox 分别主要分布在絮体污泥和颗粒污泥中^[17]、反 应器溶解氧控制较低,限制了氨氧化速率,然而进 一步提高溶解氧会造成厌氧氨氧化菌的抑制.已 有的报道表明,在纯颗粒污泥与生物膜一体化厌 氧氨氧化系统中 AOB 主要附着在颗粒表面、可 以消耗溶解氧避免颗粒内部的 Anammox 受到抑 制^[26],从而可以在较高的溶解氧(0.8~1.5mg/L)条 件下运行并达到更高的总氮去除负荷[1.5kg/ (m³·d)]^[27].因此合理的微生物分布结构有利于不 同菌群之间的协同发展;(3)低曝气量条件下很难 保证颗粒的混合状态,从而影响传质效率,限制氮 去除负荷的提高,所以在 SBR 反应器中如何促进 传质也是研究重点之一.

表 1 一体化厌氧氨氧化 SBR 反应器总氮去除负荷

 Table 1
 Summary of total nitrogen removal rate of various single-stage anammox reactors

-1v+± ⁴		小安谈	HKI	NRR	늇찲	
小叶 () (1	mg/L)	(h)	$[kgN/(m^3 \cdot d)]$	又臥	
配水 18	±0.3	190	8	0.9	[20]	
消化液 33	3 ± 1	400	24	0.5	[4]	
垃圾渗	8+1 20	0. 600	24	0.6	[21]	
滤液	o±1 20	10~000	24		[21]	
消化液 3	2±1 8	13±59	17.5	0.49	[22]	
消化液	30	800	48	0.4	[23]	
配水	- 78	0~1168 67	.2~108	0.3~0.57	[24]	
配水 30)~34 55	0~2800	48	0.8~1.1	本文	

注:-表示未给出.

2.3 曝气量与总氮去除负荷之间的关系

在厌氧氨氧化工艺的实际应用中,通常溶解 氧的调控被认为是反应器稳定运行的关键因素. 然而由于受到检测设备的准确程度、反应器混合 的均匀程度以及调控的滞后性等因素的影响,溶 解氧往往不能及时、准确地反映系统真实的运行 状态.试验发现曝气量与总氮去除负荷之间存在 很好的相关性,如图 4 所示.



Fig.4 The correlation between aeration rate and total nitrogen removal rate

随曝气量的增加,总氮去除负荷逐渐提高 (NRR=0.3~1.0kgN/(m³·d),Q=60~150L/h);在反应 稳定阶段曝气量基本保持恒定(NRR=1.0kgN/ (m³·d),Q=160L/h).而在整个反应过程中溶解氧基 本保持恒定(0.1~0.3mg/L,图 2).很显然,当反应负 荷发生变化时曝气量更能准确地反映反应器状 态.在反应器启动和稳定运行过程中,可以通过调 节曝气量来调控和维持反应器处于最佳的运行 状态.当反应器进水负荷发生波动时能够及时、 准确地通过调整曝气量避免发生过曝气,有利于 实际工程的稳定运行.

3 结论

3.1 在絮体污泥与颗粒污泥混合的一体化厌氧 氨氧化系统中,絮体污泥的作用非常重要.絮体污 泥所占比例不宜小于混合液总量的 30%.

3.2 絮体和颗粒混合的一体化厌氧氨氧化 SBR 反应器的最大总氮去除负荷约为 1.1kg/(m³·d).限 制负荷进一步提高的因素有生物量、传质效率和 微生物分布结构,合理的微生物分布结构有利于 一体化厌氧氨氧化反应器总氮去除负荷的提高.3.3 在一定的反应器形式下,曝气量和总氮去 除负荷具有很好的相关性,可以通过调整曝气量 调控反应器运行状态.

参考文献:

[1] Ni S Q, Zhang J. Anaerobic ammonium oxidation: From

1031

laboratory to full-scale application [J]. Biomed Research International, 2013.

- [2] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application [J]. Nature Reviews Microbiology, 2008,6(4):320-326.
- [3] 郑冰玉,张树军,张 亮,等.一体化厌氧氨氧化工艺处理垃圾渗 滤液的性能研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(7):1728-1733.
- [4] Chu Z-r, Wang K, Li X-k, et al. Microbial characterization of aggregates within a one-stage nitritation–anammox system using high-throughput amplicon sequencing [J]. Chemical Engineering Journal, 2015,262:41-48.
- [5] 曹天昊,王淑莹,苗 蕾,等.不同基质浓度下 SBR 进水方式对厌 氧氨氧化的影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(8):2334-2341.
- [6] 杨延栋,黄 京,韩晓宇,等.一体式厌氧氨氧化工艺处理高氨氮 污泥消化液的启动 [J]. 中国环境科学, 2015,35(4):1082-1087.
- [7] Kartal B, Kuenen J G, van Loosdrecht M C M. Sewage Treatment with Anammox [J]. Science, 2010,328(5979):702-703.
- [8] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial nitritation/anammox experiences an application survey [J]. Water Research, 2014,55:292-303.
- [9] Jin R C, Yang G F, Yu J J, et al. The inhibition of the Anammox process: A review [J]. Chemical Engineering Journal, 2012,197: 67-79.
- [10] Strous M, Heijnen J, Kuenen J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998,50(5):589-596.
- Xu G J, Zhou Y, Yang Q, et al. The challenges of mainstream deammonification process for municipal used water treatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015,99(6):2485-2490.
- [12] 韩晓宇,常 江,孟春霖,等.短程硝化/厌氧氨氧化一步法自养脱 氮中试研究 [J]. 中国给水排水,2014,(19):1-5+10.
- [13] Ali M, Chai L Y, Tang C J, et al. The increasing interest of ANAMMOX research in China: Bacteria, process development, and application [J]. Biomed Research International, 2013.
- [14] 张 亮,张树军,彭永臻.污水处理中游离氨对硝化作用抑制影 响研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012,(2):75-79.
- [15] Tang C J, Zheng P, Mahmood Q, et al. Start-up and inhibition analysis of the Anammox process seeded with anaerobic granular sludge [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2009,36(8):1093-1100.
- [16] Zhang L, Liu M M, Zhang S J, et al. Integrated fixed-biofilm activated sludge reactor as a powerful tool to enrich anammox biofilm and granular sludge [J]. Chemosphere, 2015,140:114-118.
- [17] Hubaux N, Wells G, Morgenroth E. Impact of coexistence of flocs and biofilm on performance of combined nitritation- anammox

granular sludge reactors [J]. Water Research, 2015,68:127-139.

- [18] 张 亮.高氨氮污泥消化液生物脱氮工艺与优化控制 [D]. 哈 尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [19] Joss A, Derlon N, Cyprien C, et al. Combined nitritationanammox: Advances in understanding process stability [J]. Environmental Science & Technology, 2011,45(22):9735-9742.
- [20] Winkler M K H, Kleerebezem R, van Loosdrecht M C M. Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures [J]. Water Research, 2012,46(1):136-144.
- [21] Gao J L, Chys M, Audenaert W, et al. Performance and kinetic process analysis of an Anammox reactor in view of application for landfill leachate treatment [J]. Environmental Technology, 2014,35(10):1226-1233.
- [22] Zhao J, Zuo J N, Wang X L, et al. GeoChip-based analysis of microbial community of a combined nitritation-anammox reactor treating anaerobic digestion supernatant [J]. Water Research, 2014,67:345-354.
- [23] Gilbert E M, Muller E, Horn H, et al. Microbial activity of suspended biomass from a nitritation-anammox SBR in dependence of operational condition and size fraction [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013,97(19):8795-8804.
- [24] Lackner S, Horn H. Comparing the performance and operation stability of an SBR and MBBR for single-stage nitritationanammox treating wastewater with high organic load [J]. Environmental Technology, 2013,34(10):1319-1328.
- [25] Liang Y H, Li D, Zhang X J, et al. Performance and influence factors of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process in a biofilter packed with volcanic rocks [J]. Environmental Technology, 2015,36(8):946-952.
- [26] Morales N, Val Del Rio A, Vazquez-Padin J R, et al. Integration of the Anammox process to the rejection water and main stream lines of WWTPs [J]. Chemosphere, 2015,140:99-105.
- [27] 王元月,魏源送,张树军,厌氧氨氧化技术处理高浓度氨氮工业 废水的可行性分析 [J]. 环境科学学报, 2013,33(9):2359-2368.

作者简介:程 军(1991-),男,陕西咸阳人,北京工业大学硕士研究 生,主要从事污水生物处理理论与应用研究.