

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.013

# 温度对厌氧氨氧化生物滤柱处理低氮废水的影响

柴宝华<sup>1</sup>, 王玥凝<sup>2</sup>, 黄小钟<sup>2</sup>, 高丽娟<sup>1</sup>, 庄鹏宇<sup>1</sup>, 寇晓梅<sup>1</sup>,  
李文涛<sup>1</sup>, 王 怡<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 分析了厌氧氨氧化生物滤柱反应器(ABFR)在温度梯度下降过程的脱氮性能,研究了温度对沿程水质变化及厌氧氨氧化活性的影响,最后探讨了在(22±1)℃下ABFR中功能微生物的群落分布。结果表明,在进水 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度为(47±3) mg/L、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 浓度为(53±4) mg/L、水力停留时间(HRT)为1.5 h、氮负荷率为1.62 kg/(m<sup>3</sup>·d)的条件下,当ABFR从(31±1)℃梯度下降至(22±1)℃时,总氮去除率能够稳定在86%以上,出水氨氮和总氮浓度可达到排放标准。尽管如此,不同温度时反应器的适应期和厌氧氨氧化比活性(SAA)相差较大,温度越低则SAA越小,因而适应期越长。在(22±1)℃时SAA约为0.84 mg/(gVSS·h)(以N计),而适应期为36 d,此时对温度适应性较强的*Candidatus Brocadia*和*Candidatus Jettenia*属于主导厌氧氨氧化菌。总之,ABFR具有缓解降温对系统冲击的能力,在温度为(22±1)℃时能够获得稳定而良好的总氮去除效果,是一种颇有前景的低氮废水厌氧氨氧化处理装置。

**关键词:** 厌氧氨氧化生物滤柱反应器; 温度; 适应期; 厌氧氨氧化菌活性; 低氮废水  
**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0089-06

## Impact of Temperature on Treatment of Low Nitrogen Concentration Wastewater Using an Anammox Biofilter

CHAI Bao-hua<sup>1</sup>, WANG Yue-ning<sup>2</sup>, HUANG Xiao-zhong<sup>2</sup>, GAO Li-juan<sup>1</sup>,  
ZHUANG Peng-yu<sup>1</sup>, KOU Xiao-mei<sup>1</sup>, LI Wen-tao<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>

(1. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The nitrogen removal performance of an Anammox biofilter reactor(ABFR) during a temperature gradient decrease was evaluated. The impact of varying temperatures on water quality and activity of Anammox along the flow path was investigated. Additionally, the microbial community of functional microorganisms within the ABFR at a stable temperature of (22±1)℃ was analyzed. Under the conditions of influent  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  of (47±3) mg/L,  $\text{NO}_2^--\text{N}$  of (53±4) mg/L, hydraulic retention time (HRT) of 1.5 hours, and nitrogen loading rate of 1.62 kg/(m<sup>3</sup>·d), the total nitrogen removal efficiency stabilized at

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52170172); 陕西省重点产业创新链(群)项目(2021ZDLSF05-04); 西安市科技局社会发展科技创新示范项目(20SFSF0011)

通信作者: 王怡 E-mail: wangyi1003@sina.com

over 86%, and the ammonia nitrogen and total nitrogen in the effluent complied with the limits specified in the discharge standard when the temperature was stepwise dropped from  $(31\pm 1)^\circ\text{C}$  to  $(22\pm 1)^\circ\text{C}$  in the ABFR. However, the adaptation period and specific Anammox activity (SAA) of the reactor exhibited significant variations at different temperatures. Specifically, as the temperature decreased, the SAA also diminished, consequently prolonging the adaptation period. At a temperature of  $(22\pm 1)^\circ\text{C}$ , the SAA (calculated by N) was approximately  $0.84\text{ mg}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$ , with an adaptation period of 36 days. The dominant Anammox bacteria were *Candidatus Brocadia* and *Candidatus Jettenia*, which exhibited strong adaptability to temperature variations. In conclusion, the ABFR demonstrated the capability to mitigate the adverse effects of temperature drop on the system and achieved a stable and high total nitrogen removal efficiency at temperature of  $(22\pm 1)^\circ\text{C}$ . This makes it a promising Anammox treatment device for low nitrogen concentration wastewater.

**Key words:** Anammox biofilter reactor; temperature; adaptation period; Anammox activity; low nitrogen concentration wastewater

为追求污水处理的低能耗和低碳耗,厌氧氨氧化工艺因其具有无需曝气、污泥产量少、脱氮效率高且无需额外投加碳源等优点而受到广泛关注。在走向工程化的道路上,高氮废水的厌氧氨氧化得到广泛研究甚至大量应用<sup>[1]</sup>,而低氮废水如市政污水的厌氧氨氧化仍面临着诸多挑战<sup>[2]</sup>。除了高有机物浓度外,阻碍厌氧氨氧化在市政污水主流工艺应用的最重要限制因素还包括<sup>[3]</sup>:①市政污水氮浓度较低,导致厌氧氨氧化菌(AnAOB)生物量富集和滞留困难;②市政污水水温变化幅度大,温度降低会直接影响 AnAOB 胞内酶合成和代谢活性<sup>[4]</sup>。因此,如何在温度降低条件下实现低氮废水厌氧氨氧化的稳定运行是该技术在市政污水主流工艺应用和推广的瓶颈之一。

已有研究表明,生物膜途径可以实现厌氧氨氧化菌的有效积累,生物滤柱反应器(BFR)是用于厌氧氨氧化脱氮的高效反应器之一<sup>[5]</sup>,但厌氧氨氧化 BFR(ABFR)在温度降低过程中的运行特征目前研究较少。鉴于此,笔者分析了 ABFR 从  $(31\pm 1)^\circ\text{C}$  梯度下降至  $(22\pm 1)^\circ\text{C}$  时脱氮性能、沿程水质、沿程厌氧氨氧化比活性(SAA)的变化,旨在为 ABFR 的工程应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

ABFR 装置由有机玻璃制成,上部为内径 10 cm、高 115 cm 的圆柱体,下部为内径 10 cm、高 10 cm 的锥体,总有效体积为 6.3 L。锥体内填充直径为

25 mm、高为 10 mm 的有机悬浮填料 K3,柱体内装填相同材质但直径为 10 mm、高为 10 mm 的有机悬浮填料 K1。ABFR 进水口设置于 107.5 cm 高度处,出水口位于反应器锥体底部,通过 U 型管出水。在反应器 12.5、32.5、57.5 及 82.5 cm 处分别设置水样采集口及填料取样口各 4 个。ABFR 柱体采用铝箔纸包裹以保护厌氧氨氧化菌免受光照刺激;采用可调节功率加热丝均匀缠绕以控制反应器内水温在一定范围。

### 1.2 进水水质

试验进水为模拟含氮废水,采用氯化铵与亚硝酸钠提供氮源,使废水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度为  $(47\pm 3)\text{ mg/L}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$  浓度为  $(53\pm 4)\text{ mg/L}$ 。通过投加一定量的  $\text{KHCO}_3$  维持 pH 在 7.5~8.5 范围内。模拟废水不添加碳源,但按以下投量添加常量元素:  $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  为 0.01 g/L、 $\text{K}_2\text{HPO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  为 0.01 g/L、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为 0.1 g/L。此外,每升模拟废水添加 1 mL 微量元素 I 及微量元素 II 溶液。微量元素 I 溶液组成: EDTA 为 5 g/L、 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为 5 g/L;微量元素 II 溶液组成: EDTA-2Na 为 15 g/L、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  为 0.25 g/L、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为 0.43 g/L、 $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  为 0.22 g/L、 $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  为 0.99 g/L、 $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  为 0.19 g/L、 $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  为 0.24 g/L、 $\text{Na}_2\text{SeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$  为 0.21 g/L、 $\text{H}_3\text{BO}_3$  为 0.014 g/L。

### 1.3 运行工况

试验在  $31^\circ\text{C}$  下通过缩短水力停留时间(HRT)的方式成功启动 ABFR,在保持 HRT 和氮负荷率

(NLR)不变的条件下,ABFR从31℃梯度下降至22℃,具体运行条件见表1。

表1 ABFR的运行条件

Tab.1 Operating conditions of ABFR

运行时间/d	HRT/h	温度/℃	NLR/(kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
1~18	1.5	31±1	1.62
19~42	1.5	28±1	1.62
43~69	1.5	25±1	1.62
70~121	1.5	22±1	1.62

## 1.4 采样分析

### 1.4.1 水样的采集与测定

对于ABFR装置,每3 d采集水样1次,每个工况运行稳定时沿水力流程分别在进水口、4个采样口和出水口采集水样。所有采集的水样经0.45 μm滤膜过滤后按照《水和废水监测分析方法》(第4版)测定相关水质指标。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均采用分光光度计测定,pH采用pH计测定,温度采用温度计测定,悬浮固体(SS)和挥发性悬浮固体(VSS)采用重量法测定。

### 1.4.2 微生物的采集与测定

ABFR在不同温度下稳定运行后,采集0~25、25~50、50~75、75~107.5 cm区段的生物膜进行厌氧氨氧化比活性(SAA)测定,具体方法如下:将采集的生物膜样品置于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均为50 mg/L的血清瓶中,通入 $\text{N}_2$ 使DO低于0.2 mg/L并快速密封,然后用铝箔纸包裹血清瓶并将其置于(31±1)℃的恒温振荡器中,每隔2 h采集1次水样并测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,试验结束后根据Zhang等<sup>[6]</sup>的方法测定SS、VSS及相关氮浓度以计算SAA。试验结束时分别采集0~25、25~50、50~75、75~107.5 cm区段生物膜样品,对不同区段生物膜上的微生物进行高通量测序。

## 2 结果与讨论

### 2.1 ABFR的脱氮性能及沿程水质变化

#### 2.1.1 降温运行下ABFR的脱氮性能

启动完成后的ABFR在(31±1)℃及NLR为1.62 kg/(m<sup>3</sup>·d)条件下对TN的去除率可达86%以上,然后进入降温运行阶段,图1为降温运行期间氮浓度和氮去除率的变化。可知,ABFR在(31±1)℃下稳定保持着高效的氮去除率,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及TN的去除率分别为97.10%、97.60%和86.88%,平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及TN浓度分别为1.31、

1.20和9.97 mg/L,表明在该温度下厌氧氨氧化菌群活性较好。与此同时, $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 约为1.13, $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 约为0.23,均低于理论值1.32与0.26,表明ABFR中除了厌氧氨氧化菌群主导外,其他菌群也协同发挥作用。

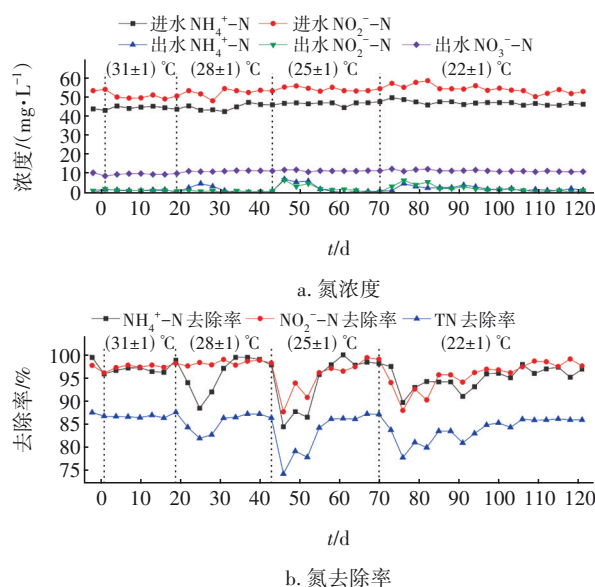


图1 降温阶段ABFR脱氮性能的变化

Fig.1 Change in nitrogen removal performance of ABFR during temperature reduction stage

当温度在第19天降低至(28±1)℃时,TN去除率持续下降6 d后降低至82.11%,又经过6 d恢复后,ABFR对TN的去除率达到86%且能稳定运行,此时 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 接近0.26,表明(28±1)℃条件下厌氧氨氧化菌群在ABFR内保持优势生长,该温度对反应器的影响较小。当温度在第43天继续降低至(25±1)℃时,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别为7.25和6.78 mg/L,TN去除率降至74.5%。经15 d恢复后TN去除率达到86%并稳定运行,此时 $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1.14, $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为0.25,均略低于相应理论值。当温度在第70天降低至(22±1)℃时,TN去除率持续6 d缓慢下降至78.01%,此时出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别为5.01和6.61 mg/L。经过30 d适应期后,ABFR对TN的去除率达到86.20%,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别降低至0.96和1.39 mg/L。可见,ABFR对温度的适应性较好,在温度梯度降低后其仍能恢复高效稳定的脱氮性能。尽管在温度梯度降低的条件下ABFR对TN的去除均可达到86%以上,但是温度越低反应器的适应期越长。

### 2.1.2 温度对ABFR沿程水质的影响

图2为不同温度稳定期ABFR的沿程水质变化。可以看出,不同温度下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均在距进水口25和50 cm处大幅降低,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在这两处明显增加。经核算,不同温度下0~25 cm区段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的平均去除率分别为61.6%和61.7%,0~50 cm区段相应的去除率分别为85.6%和87.5%,因此,0~50 cm区段为ABFR的主要厌氧氨氧化区域,其中0~25 cm区段贡献最大。

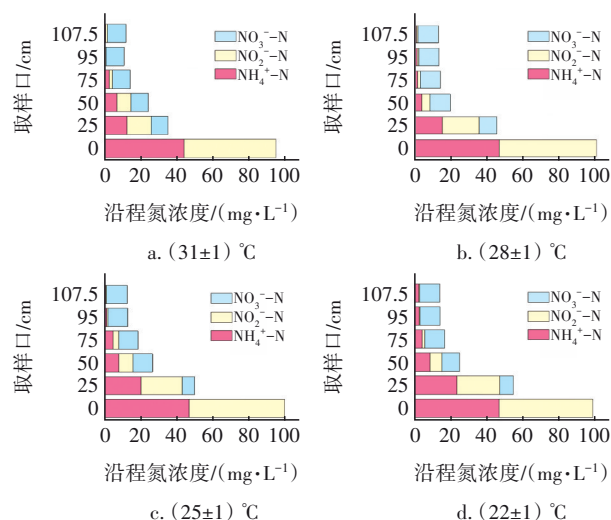


图2 不同温度稳定期ABFR的沿程水质变化

Fig.2 Change in water quality along the ABFR at different temperature steady stage

随着温度的降低,25 cm处的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度显著上升,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率由(31±1) °C时的71.94%分别降低到(28±1) °C的67.91%、(25±1) °C的56.66%和(22±1) °C的49.89%, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率由(31±1) °C时的73.62%分别降低到(28±1) °C的62.11%、(25±1) °C的56.84%和(22±1) °C的54.29%,表明0~25 cm区段微生物菌群受温度影响显著,降低温度导致该区段脱氮效率明显降低。

然而,25~50 cm区段的脱氮贡献率随着温度的降低反而升高,当温度由(31±1) °C降低至(22±1) °C时,TN去除率由11.33%升高至30.23%,且50~75 cm区段的TN去除率也升高了8.13%,表明温度降低激活了ABFR中25~75 cm区段的脱氮效能,弥补了0~25 cm区段微生物菌群受低温影响造成的脱氮效率下降。但是,在温度降低过程中,75~107.5 cm区段脱氮贡献率无明显变化,表明ABFR尚有1/3空

间因降温而未被激活。因此,ABFR主功能区虽然在距离进水口最近的0~25 cm区段,但是随着温度的下降,该区段对TN的去除率降低,而距离进水口较远区域的脱氮能力反而被激活。

### 2.1.3 温度对ABFR沿程SAA的影响

不同温度下稳定运行的ABFR各区段生物膜SAA如图3所示。

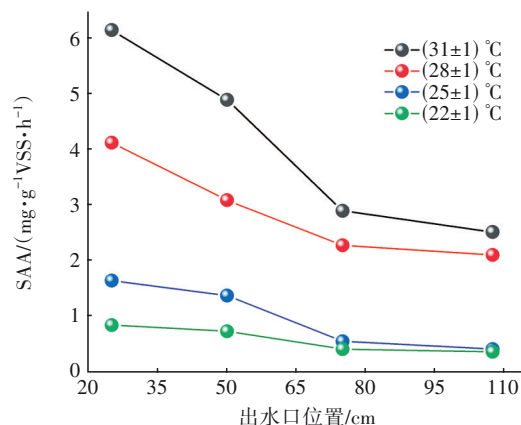


图3 ABFR反应器距离进水口不同位置SAA的变化

Fig.3 Change in SAA at different positions of ABFR from the inlet

由图3可以看出,同一位置温度越高,SAA越大,如在25 cm处(31±1) °C时SAA高达6.13 mg/(gVSS·h),而(22±1) °C时仅为0.84 mg/(gVSS·h),前者为后者的7.30倍;在107.5 cm处(31±1) °C时的SAA为2.51 mg/(gVSS·h),而(22±1) °C时为0.36 mg/(gVSS·h),前者为后者的6.97倍。毋庸置疑,不同温度下ABFR中微生物最高SAA均在前25 cm处取得,随着距离的增加,SAA均明显降低。为了分析基质浓度与温度对厌氧氨氧化生物活性的影响,比较不同区域SAA在温度降低下的变化情况发现,不同区段的活性下降幅度较为一致。随着温度由(31±1) °C下降到(22±1) °C,0~25、25~50、50~75和75~107.5 cm区段SAA沿程分别下降了86.30%、85.04%、85.81%和85.66%,平均为85.71%,表明温度对厌氧氨氧化活性衰减的影响与距离无关,基质浓度是制约反应器中微生物SAA的重要因素。然而,温度对ABFR同一位置处SAA的影响也是非线性的,例如在25、50、75和107.5 cm处,在温度从28 °C下降到25 °C的条件下,SAA分别下降了60.10%、55.52%、75.77%和80.48%,表明28 °C降至25 °C时对SAA的影响较大,这与图1中降低温度到25 °C时TN去除率降幅最大相一致。总之,温度



和位置对ABFR中生物膜SAA均有明显影响,离进水口近的位置生物膜SAA更高,因而在厌氧氨氧化脱氮过程中发挥着重要作用。随着温度的降低,离进水口远的位置生物膜在厌氧氨氧化脱氮中的作用有望提高。

## 2.2 AFBR中生物量及微生物群落分布

### 2.2.1 生物量的分布

在 $(22\pm 1)$  °C下对稳定运行的ABFR不同区段生物量分布进行测定。其中,不同区段的生物量分布并不均匀,反应器各区段的生物量沿高度逐级递减,如0~25 cm区段生物量达到11.28 g/L,25~50 cm区段的生物量为6.18 g/L,50~75 cm区段的生物量为4.25 g/L,而75~107.5 cm区段生物量仅为3.05 g/L。其中,0~25 cm区段是75~107.5 cm区段生物量的3.70倍。如前所述,尽管 $(22\pm 1)$  °C条件下运行的ABFR生物膜SAA较低,但是距离进水口0~25 cm区段充足的生物量与后续区段低基质下稳定维持的生物量共同成为保障该反应器高效稳定脱氮的重要因素。因此,高生物量浓度是ABFR在较低温度下应对SAA降低的关键。

### 2.2.2 ABFR高通量测序分析

ABFR历经120 d降温运行后,对脱氮贡献较大的0~25、25~50和50~75 cm区段生物膜进行高通量测序, $(22\pm 1)$  °C下ABFR不同脱氮区的微生物在属水平上的群落分布如图4所示(相对丰度小于1%的菌种定义为“others”)。

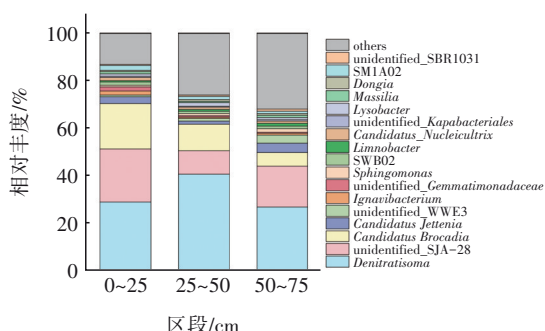


图4 ABFR不同区段微生物在属水平上的群落分布

Fig.4 Microbial community distribution at genus level in different zones of ABFR

从图4可以看出,ABFR不同区段的微生物在属水平上的相对丰度有所差异,但是菌群结构相似。*Candidatus Brocadia* 是三个区段丰度最大的优势厌氧氨氧化菌,其在0~25 cm区段的相对丰度为19.25%。

随着水力沿程的增加,其在25~50和50~75 cm区段的占比逐渐降低至11.23%和5.72%。Laureni等<sup>[7]</sup>在MBBR中进行PN/A脱氮过程中发现,A段的优势厌氧氨氧化菌属为*Candidatus Brocadia*;Reino等<sup>[8]</sup>在22 °C条件下采用UASB处理实际城市污水时发现,厌氧氨氧化优势菌属为*Candidatus Brocadia*;Nejdat等<sup>[9]</sup>报道了在13~17 °C的条件下*Candidatus Brocadia* 为实际污水处理厂中厌氧氨氧化优势菌属。以上结果与本研究一致。此外,从沿程丰度变化可以看出,*Candidatus Brocadia* 具有一定的基质浓度响应,较高浓度的基质似乎更加有利于其增长累积。

厌氧氨氧化菌*Candidatus Jettenia* 在三个区段的占比分别为2.78%、1.20%和4.07%。具有厌氧氨氧化能力的SM1A02在三个区段的占比分别为2.00%、1.33%和0.89%。Liu等<sup>[10]</sup>在低温下使用UASB反应器培养的厌氧氨氧化优势菌属为*Candidatus Jettenia*,表明其具备低温适应特征。与*Candidatus Brocadia* 相比,*Candidatus Jettenia* 的沿程变化规律并不明显,表明其在低氮的条件下对基质浓度并不敏感,这与SM1A02和*Candidatus Brocadia* 表现出的基质浓度响应完全不同。此外,在进行本试验前课题组于同一反应器在31 °C时多次检测到*Candidatus Kuenenia*<sup>[5]</sup>,而在 $(22\pm 1)$  °C时ABFR的三个区段均未检测到,这表明*Candidatus Kuenenia* 菌群对低温适应性差,而*Candidatus Brocadia* 及*Candidatus Jettenia* 对温度的适应性更强。分子从常态转变为容易发生反应的活跃状态所需的能量被称为活化能,活化能越小,生化反应越容易进行<sup>[11]</sup>。在废水生物处理过程中,通常生化反应的活化能范围为8.37~83.68 kJ/mol<sup>[12]</sup>。有研究表明<sup>[13]</sup>,不同温度下不同厌氧氨氧化菌群的活化能各不相同,10~20 °C下*Candidatus Kuenenia* 的活化能为152.9 kJ/mol,远大于5~17 °C下*Candidatus Brocadia* 的活化能66 kJ/mol,进一步证实了*Candidatus Kuenenia* 菌群对于低温的适应性较差。

## 3 结论

① ABFR对温度的适应性较好,历经温度从 $(31\pm 1)$  °C梯度降低至 $(28\pm 1)$ 、 $(25\pm 1)$ 和 $(22\pm 1)$  °C后反应器仍能恢复其高效稳定的脱氮性能。在HRT为1.5 h、NLR为1.62 kg/(m<sup>3</sup>·d)条件下,所有温度

下ABFR对总氮的去除率均可达到86%以上,出水总氮和氨氮均可达到城市污水处理厂排放标准,但是温度越低反应器的适应期越长。

② 温度和位置对ABFR中生物膜SAA均有明显影响,较高温度时离进水口近的位置其生物膜拥有更高的SAA,随着温度的降低,距离进水口较远处的贡献明显提高。因此,随着温度的下降,ABFR主功能区对TN的去除贡献降低,而距离进水口较远区域的脱氮能力反而被激活。

③ 高生物量浓度是ABFR在较低温度条件下应对SAA降低的关键,其中 *Candidatus Brocadia*、*Candidatus Jettenia* 及 SM1A02 是ABFR中对温度适应性较强的厌氧氨氧化菌属。

### 参考文献:

- [1] LACKNER S, GILBERT E M, VLAEMINCK S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences: an application survey [J]. *Water Research*, 2014, 55: 292–303.
- [2] 杜睿, 彭永臻. 城市污水生物脱氮技术变革: 厌氧氨氧化的研究与实践新进展[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(3): 389–402.
- DU Rui, PENG Yongzhen. Technical revolution of biological nitrogen removal from municipal wastewater: recent advances in Anammox research and application [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(3): 389–402 (in Chinese).
- [3] KUMWIMB M N, LOTTI T, ŞENEL E, *et al.* Anammox-based processes: how far have we come and what work remains? A review by bibliometric analysis [J]. *Chemosphere*, 2020, 238: 124627.
- [4] GUO Q, XING B S, LI P, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation (anammox) under realistic seasonal temperature variations: characteristics of biogranules and process performance [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 765–773.
- [5] LU X X, WANG Y, WANG W H, *et al.* Characteristics of rapid-biofiltering anammox reactor (RBAR) for low nitrogen wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 318: 124066.
- [6] ZHANG T Q, WEI N, WU G X. Autotrophic nitrogen removal and potential microbial interactions in anammox systems with different ammonia and organic carbon concentrations [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37: 101493.
- [7] LAURENI M, FALAS P, ROBIN O, *et al.* Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures [J]. *Water Research*, 2016, 101: 628–639.
- [8] REINO C, SUÁREZ-OJEDA M E, PÉREZ J, *et al.* Stable long-term operation of an upflow anammox sludge bed reactor at mainstream conditions [J]. *Water Research*, 2018, 128: 331–340.
- [9] NEJIDAT A, DAMIANA D R, NEDAL M, *et al.* Abundance and diversity of anammox bacteria in a mainstream municipal wastewater treatment plant [J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2018, 102(15): 6713–6723.
- [10] LIU W R, YANG D H, CHEN W J, *et al.* High-throughput sequencing-based microbial characterization of size fractionated biomass in an anoxic anammox reactor for low-strength wastewater at low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 231: 45–52.
- [11] 刘煜, 吕萍, 徐慧, 等. 低温条件下厌氧氨氧化技术的研究进展[J]. *环境保护科学*, 2022, 48(5): 85–94.
- LIU Yu, LÜ Ping, XU Hui, *et al.* A review of anaerobic ammonia oxidation technology at low temperature [J]. *Environmental Protection Science*, 2022, 48(5): 85–94 (in Chinese).
- [12] 胡宝兰, 郑平, 冯孝善. 新型生物脱氮技术的工艺研究[J]. *应用与环境生物学报*, 1999, 5(S1): 68–73.
- HU Baolan, ZHENG Ping, FENG Xiaoshan. Study on novel biological nitrogen removal process [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1999, 5(S1): 68–73 (in Chinese).
- [13] WILEN B M, LUMLEY D, MATTSSON A, *et al.* Relationship between floc composition and flocculation and settling properties studied at a full scale activated sludge plant [J]. *Water Research*, 2008, 42(16): 4404–4418.

作者简介: 柴宝华(1994–), 男, 陕西铜川人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为固体废弃物资源化利用。

E-mail: 172970664@qq.com

收稿日期: 2024-04-10

修回日期: 2024-06-15

(编辑: 任莹莹)