

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.005

盐度和辣椒素对厌氧氨氧化活性的短期冲击影响

鲁波¹, 崔荣荣^{2,3}, 宫徽³, 况前¹, 陶本森¹, 陈冶钢¹,
卢丹丹^{2,3}, 刁思圆^{2,3}, 石文静^{2,3}, 尹瑞红^{2,3}, 戴晓虎³

(1. 重庆市环卫集团有限公司, 重庆 400000; 2. 上海电力大学 环境与化学工程学院,
上海 200090; 3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 厌氧氨氧化作为一种低能耗、低药耗的高效脱氮工艺,在废水处理领域备受关注。餐厨垃圾厌氧发酵所产沼液的传统处理工艺能耗高、碳源消耗量大,选择厌氧氨氧化工艺有望显著降低处理成本。考虑到餐厨垃圾往往盐分含量高,且在部分地区如重庆、四川等由于饮食习惯导致餐厨垃圾中常含有大量辣椒,通过设置批次试验,分别探究了不同浓度水平的辣椒素和盐度短期冲击对厌氧氨氧化活性的单独影响以及两者协同影响。结果表明,盐度和辣椒素均会对厌氧氨氧化活性产生抑制作用。Hill抑制模型拟合结果显示,NaCl的半抑制浓度为15.4 g/L;辣椒素由于受自身溶解度的影响,对厌氧氨氧化活性的抑制作用有限,高浓度辣椒素(20 mg/L)可使厌氧氨氧化活性下降约20%。盐度和辣椒素同时存在时会对厌氧氨氧化活性产生协同抑制作用,NaCl半抑制浓度下降为14.6 g/L。

关键词: 厌氧氨氧化; 盐度; 辣椒素; 餐厨垃圾; 抑制模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)01-0032-07

Short-term Impact of Salinity and N-Vanillylnonanamide on Activity of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria

LU Bo¹, CUI Rong-rong^{2,3}, GONG Hui³, KUANG Qian¹, TAO Ben-sen¹,
CHEN Zhi-gang¹, LU Dan-dan^{2,3}, DIAO Si-yuan^{2,3}, SHI Wen-jing^{2,3},
YIN Rui-hong^{2,3}, DAI Xiao-hu³

(1. Chongqing Environment & Sanitation Group, Chongqing 400000, China; 2. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. College of Environmental Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Anaerobic ammonium oxidation (Anammox), an efficient nitrogen removal process with low energy and chemical consumption, has attracted much attention in the field of wastewater treatment. The traditional treatment process of liquid digestate from anaerobic fermentation of kitchen waste has high energy input and large carbon source consumption, and the selection of Anammox is expected to significantly reduce the treatment cost. Kitchen waste often has high salinity, and in some areas such as Chongqing and Sichuan, there often contains a large amount of chili peppers in kitchen waste due to

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52000140)

通信作者: 宫徽 E-mail: gonghui001@tongji.edu.cn; 戴晓虎 E-mail: daixiaohu@tongji.edu.cn

dietary habits. This paper investigated the effects of salinity and N-vanillylnonanamide on the activity of Anammox bacteria. The separate and synergistic effects of N-vanillylnonanamide concentration and salinity shocks on nitrogen removal performance were investigated by setting up batch experiments for detection of Anammox activity. Both salinity and N-vanillylnonanamide inhibited the Anammox activity. The fitting results of Hill inhibition model showed that the 50% inhibitory concentration of NaCl was 15.4 g/L. The inhibition of N-vanillylnonanamide on Anammox activity was limited due to its solubility, and high concentration of N-vanillylnonanamide (20 mg/L) reduced the Anammox activity by approximately 20%. The simultaneous presence of salinity and N-vanillylnonanamide had a synergistic inhibitory effect on Anammox activity, resulting in the 50% inhibitory concentration of NaCl decreased to 14.6 g/L.

Key words: Anammox; salinity; N-vanillylnonanamide; kitchen waste; inhibition model

厌氧消化工艺是餐厨垃圾处理的主流工艺之一,但产生的沼液处理存在较大挑战。餐厨垃圾往往盐分含量高,且在部分地区如重庆、四川等由于饮食习惯常含有大量辣椒,导致沼液除了氨氮浓度高外,还具有盐度和辣度的特征。例如,重庆环卫集团某餐厨垃圾厌氧消化工程中沼液的氨氮含量高达 $(1\ 900\pm 275)$ mg/L、电导率达到 (23.65 ± 1.1) mS/cm(相当于12 g/L的NaCl),同时观察到厌氧消化物料中存在大量辣椒成分。除了餐厨垃圾及与其他固体废弃物共同消化产生的厌氧消化液^[1],其他行业废水如酱卤鸭制品卤水^[2]、牛油火锅底料废水^[3]等水质也具有高氨氮、高盐和辣椒素的特征。

基于厌氧氨氧化的自养脱氮过程,不需要添加碳源、污泥产量少,且工艺的运行成本低、占地面积小^[4],理论上可以节约62.5%的曝气能耗和100%的碳源^[5]。因此,基于厌氧氨氧化的自养脱氮技术有望成为节能、低耗的厌氧消化沼液处理工艺。目前在污泥厌氧消化沼液处理领域,全球已有120余座厌氧氨氧化工程^[6]。然而厌氧氨氧化技术在实际应用中面对诸多挑战,例如,由于菌种生长速度缓慢,往往面临污泥易流失、启动时间长等问题。在菌种生长过程中,对温度、pH、溶解氧(DO)、无机碳、游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)以及有机物的影响非常敏感,也受到盐度和辣椒素的潜在影响。针对餐厨垃圾厌氧沼液的应用场景,分析盐度和辣椒素对厌氧氨氧化菌活性(SAA)的影响,对开发针对性的厌氧氨氧化工艺具有重要意义。

研究表明,适量的盐度可以增强亚硝化菌和厌氧氨氧化菌的活性,但当盐度超过一定阈值后,会对菌活性产生抑制进而影响脱氮,当盐度再次降低

时,其活性又可恢复^[7-8]。不同水质的盐度抑制阈值不同,有研究表明,经过长期驯化后厌氧氨氧化系统可耐受30 g/L的NaCl阈值。不同种类的盐对厌氧氨氧化的抑制作用不同,按其影响程度排序如下:Na₂SO₄>KCl>NaCl^[5]。有研究表明,少量的辣椒素会刺激微生物活性,如可以增加厌氧消化过程的甲烷产量。但当辣椒素超过一定阈值后,会破坏微生物的结构致使甲烷产量降低^[9]。盐度对厌氧氨氧化菌的影响研究已经有了一些成果,但辣椒素对厌氧氨氧化活性的影响,以及盐度和辣椒素对厌氧氨氧化的协同影响,目前尚未见报道。鉴于此,笔者通过批次试验考察了盐度、辣椒素短期冲击以及两者的协同作用对厌氧氨氧化活性的影响,并进行了机理分析,以期为推动厌氧氨氧化技术在餐厨垃圾厌氧消化沼液处理中的应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验采用人工配水,采用的药剂包括合成辣椒素(N-4-羟基-3-甲氧基苄基-壬酰)、氯化钠、氯化铵、亚硝酸钠、碳酸氢钾,均为分析纯。合成辣椒素的分子式为C₁₇H₂₇NO₃,摩尔质量为293.40 g/mol,试验前置于2~8℃的黑暗环境中保存。

1.2 试验设计

批次试验在500 mL血清瓶中进行。取一定量的厌氧氨氧化颗粒污泥,清水冲洗3遍以去除残留的基质。每个血清瓶接种40 mL左右的厌氧氨氧化颗粒污泥,人工配水提供NH₄⁺-N(70 mg/L)、NO₂⁻-N(70 mg/L)、HCO₃⁻(1.25 g/L)反应基质,并配制一定浓度盐度、辣椒素。菌种和配水混合液体积约为500 mL,用盐酸调整pH至7.2。用带有橡胶塞的铝

盖封闭瓶口,再用封口膜缠绕瓶盖。瓶盖配置两根伸到空气中的管路,氮气吹脱时分别实现进气、出气,同时方便取样。反应前氮气吹脱 30 min 提供厌氧环境,使溶液 $DO < 0.01 \text{ mg/L}$ 。随后,将反应瓶置于水浴恒温振荡器中,在 34°C 、 170 r/min 条件下反应。每 30 min 停止振荡,待厌氧氨氧化颗粒污泥沉降后取样,经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜处理后测定 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 浓度,3 h 取样结束时测定反应瓶内 pH。

为了探究盐度、辣椒素单独作用以及两者协同作用下对厌氧氨氧化活性的影响,设置 3 个批次试验:盐度影响试验、辣椒素影响试验、盐度和辣椒素共同影响试验。在盐度影响试验中,NaCl 浓度分别为 0、3、6、9、12、15、18、21 g/L;在辣椒素影响试验中,辣椒素浓度分别为 0、10、20、30 和 40 mg/L(辣椒素难溶于水,常温下在水中的溶解度仅为 $2.7 \times 10^{-3} \text{ g}$,受辣椒素溶解度限制,最高探究 40 mg/L 辣椒素浓度,需要注意的是,辣椒素浓度达到 30 mg/L 时,实验操作过程中部分辣椒素固体容易析出,导致实际溶解量存在误差,相应的试验数据也存在较大波动);在盐度和辣椒素共同影响试验中,NaCl 浓度分别为 0、3、6、9、12、15、18、21 g/L,辣椒素浓度恒定为 20 mg/L。各批次试验设置 3 组平行。

1.3 接种污泥来源

试验接种的厌氧氨氧化颗粒污泥来自实验室已稳定运行 180 d 的全混流厌氧反应器(CSTR)。该反应器由无机玻璃制成,有效容积为 4.5 L(圆柱形,高为 28 cm、直径为 15 cm)。进水通过蠕动泵从反应器顶部流入,在搅拌机 50 r/min 转速下实现泥水充分混合。为减少污泥流失,反应器一侧设沉淀区(0.5 L),出水从沉淀区顶部溢流排出。通过在线 pH 监测仪控制反应器的 pH 为 7.2~8.2。高通量测序结果表明,该接种污泥中的厌氧氨氧化菌主要为 *Candidatus Kuenenia*,相对丰度为 14.14%。

1.4 分析指标与计算方法

过膜水样的氨氮、亚硝态氮浓度分别采用纳氏试剂分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定。MLSS、MLVSS 采用重量法测定。厌氧氨氧化活性(SAA)的计算方法如式(1)和式(2)所示^[10]。

$$\text{SAA} = \frac{\Delta c_{\text{NH}_4^+-\text{N}}}{\text{MLVSS} \times \Delta t \times 1000} \times 24 \quad (1)$$

$$\eta(\text{SAA}) = \frac{\text{SAA}_i}{\text{SAA}_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\Delta c_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 为取样间隔时间内氨氮的消耗量,即氨氮浓度随时间的变化量,mg/L; Δt 为取样间隔时间,本试验中为 30 min; $\eta(\text{SAA})$ 为厌氧氨氧化相对活性,%; SAA_i 为各批次试验第 i 个反应瓶的厌氧氨氧化活性, $\text{gNH}_4^+-\text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{d})$; SAA_0 为空白对照组的厌氧氨氧化活性, $\text{gNH}_4^+-\text{N}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{d})$ 。不同盐度对应的渗透压基于 Lenntech 网站计算。

本研究采用 Hill 抑制模型分析盐度和辣椒素对厌氧氨氧化活性的影响。拟合模型见式(3)。

$$\eta(\text{SAA}) = \frac{\eta(\text{SAA}_0) \times K^n}{K^n + I^n} \quad (3)$$

式中: I 为盐的浓度,mol/L; K 为抑制常数,即反应活性被抑制到 50% 时的基质浓度,mol/L; n 为模型拟合获得的数值。

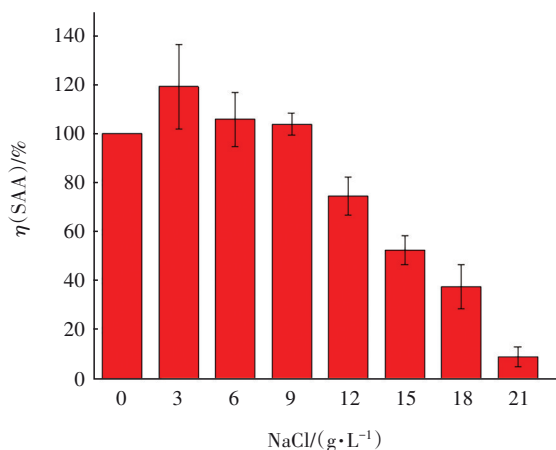
2 结果与讨论

2.1 盐度对厌氧氨氧化活性的影响

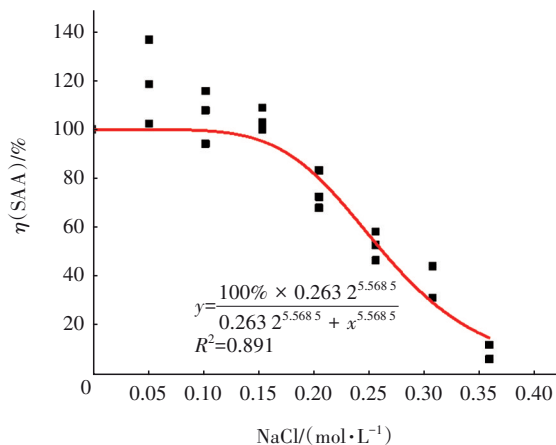
盐度对厌氧氨氧化活性的影响见图 1(a)。当 NaCl 浓度为 3、6、9 g/L 时, $\eta(\text{SAA})$ 分别为 $(119.11 \pm 13.93)\%$ 、 $(105.85 \pm 8.90)\%$ 和 $(103.91 \pm 3.71)\%$,均高于 100%,表明低盐度条件可能会刺激厌氧氨氧化活性。厌氧氨氧化活性在 NaCl 浓度为 3 g/L 时最大,随着盐度继续提升,厌氧氨氧化活性开始降低;当 NaCl 浓度 $> 9 \text{ g/L}$ 时,厌氧氨氧化活性受到明显抑制;当 NaCl 浓度为 21 g/L 时, $\eta(\text{SAA})$ 仅为 $(9.31 \pm 2.87)\%$,厌氧氨氧化活性受到严重抑制。

采用 Hill 抑制模型分析盐度对厌氧氨氧化活性的抑制规律,结果如图 1(b)所示。可知,盐度抑制数据拟合效果良好($R^2=0.891$),厌氧氨氧化活性曲线呈现近似 S 型。NaCl 的半抑制摩尔浓度为 0.26 mol/L,对应的质量浓度为 15.4 g/L,此时渗透压为 1.4 MPa。本研究得到的盐度半抑制浓度与 Chen 等人^[11]的研究结果比较一致,半抑制浓度对应的渗透压均为 1.4 MPa。Lin 等人^[10]基于 Hill 抑制模型拟合得到的 NaCl、KCl、 Na_2SO_4 半抑制浓度分别为 (0.106 ± 0.007) 、 (0.096 ± 0.004) 、 (0.063 ± 0.006) mol/L,均低于本研究的 NaCl 半抑制浓度。还有研究指出,某些情况下盐度可能产生更严重的抑制,例如,Jeong 等人^[12]发现,5 g/L NaCl 环境下 $\eta(\text{SAA})$ 仅为 2.3%。由于接种的厌氧氨氧化污泥形态(颗粒污泥或絮状混合污泥)、污泥接种量以及接种污泥初始活性不同,这些因素均有可能影响盐度的半

抑制浓度结果。尽管不同文献报道的盐度半抑制浓度结果存在差异,但是一般认为高盐度($\text{NaCl} > 15 \text{ g/L}$)会对厌氧氨氧化系统带来明显的冲击。



a. 不同盐度下的 $\eta(\text{SAA})$



b. 不同盐度下 Hill 抑制模型的拟合结果

图1 盐度对厌氧氨氧化活性的影响

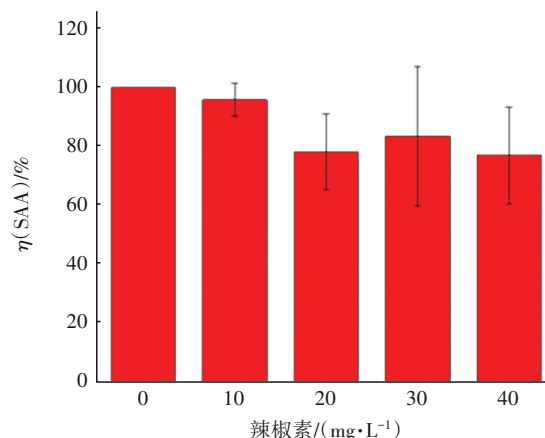
Fig.1 Effect of salinity on Anammox activity

当 NaCl 浓度在 $0 \sim 15 \text{ g/L}$ 范围内时,氨氮和亚硝态氮消耗量的比值($\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$)在 $1.41 \sim 1.48$ 之间,略高于理论值 1.32 ,说明反应以厌氧氨氧化为主。由于厌氧环境下少量亚硝态氮以微生物代谢产物为碳源,可以通过反硝化过程去除,从而导致化学计量比略高于理论值。当 NaCl 浓度提升至 18 g/L 时, $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值下降为 1.20 ;当 NaCl 浓度继续提升至 21 g/L 时, $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值继续下降为 0.68 ,严重偏离理论值,说明此时厌氧氨氧化菌的活性受到严重影响。

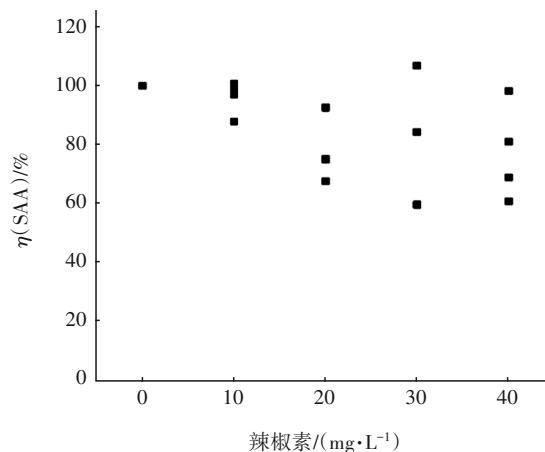
2.2 辣椒素对厌氧氨氧化活性的影响

辣椒素对厌氧氨氧化活性的影响如图2(a)所示。可以看出,辣椒素会对厌氧氨氧化活性产生轻

度抑制,且辣椒素浓度越高,抑制程度相对越明显。 20 mg/L 的辣椒素使厌氧氨氧化活性下降约 20% 。不同辣椒素浓度下 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值在 $1.41 \sim 1.65$ 之间,略高于理论值。另外,采用 Hill 抑制模型拟合辣椒素对厌氧氨氧化的抑制影响时,数据拟合不收敛,如图2(b)所示,表明 Hill 抑制模型无法描述辣椒素的抑制效应。



a. 不同辣椒素浓度下的 $\eta(\text{SAA})$



b. 不同辣椒素浓度下 Hill 抑制模型的拟合结果

图2 辣椒素对厌氧氨氧化活性的影响

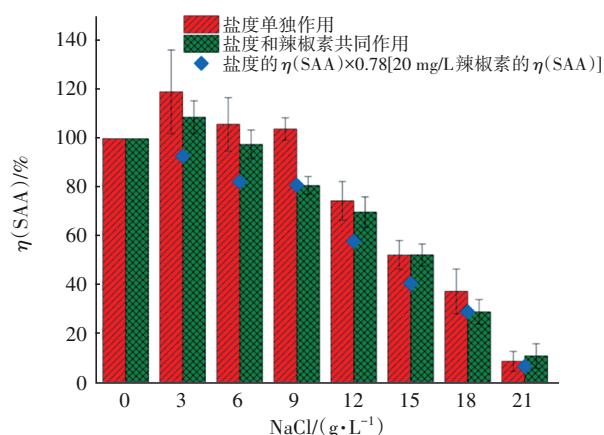
Fig.2 Effect of N-vanillylnonanamide on Anammox activity

值得注意的是,辣椒素具有脂溶性。虽然辣椒素在水中溶解度较低,但对于餐厨垃圾厌氧消化沼液等废水,因脂类等有机物的存在,可以提升辣椒素的溶解度。溶液中氢键数量和碱度对辣椒素的溶解度会产生影响,如常温下辣椒素在二甲基亚砜、甲醇、丙酮、乙酸乙酯、甲基叔丁基醚、乙腈等有机溶剂中的溶解度均大于 $20 \text{ g}^{[13]}$ 。对于本研究,考虑到醇类、脂类等物质本身也会对厌氧氨氧化菌产生毒害作用,因此依然采用水溶液来模拟辣椒素废

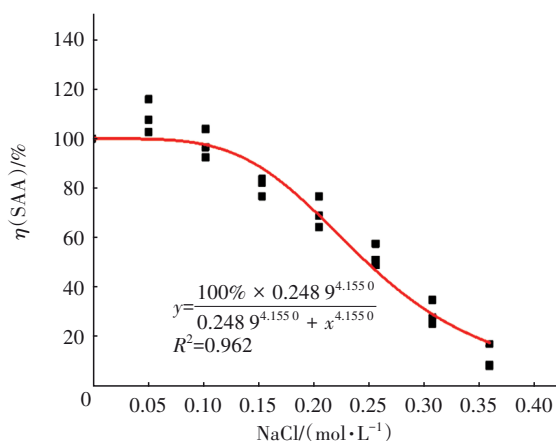
水,而未添加有机溶剂。

2.3 盐度和辣椒素对厌氧氨氧化活性的协同影响

盐度和辣椒素共同作用下对厌氧氨氧化活性的影响如图3(a)所示。可以看出,在两种物质共同作用下SAA的变化趋势与盐度单独作用时一致。



a. 盐度与辣椒素共同作用下的 $\eta(\text{SAA})$



b. Hill抑制模型的拟合结果

图3 盐度与辣椒素协同作用对厌氧氨氧化活性的影响

Fig.3 Synergistic effect of of salinity and N-vanillylnonanamide on Anammox activity

在辣椒素为20 mg/L的条件下,低浓度的NaCl仍旧可以促进厌氧氨氧化活性。在本试验条件下,当NaCl浓度为3 g/L时, $\eta(\text{SAA})$ 为(108.73±5.44)%;当NaCl浓度升至6 g/L时, $\eta(\text{SAA})$ 降至(97.69±4.74)%;随着盐度继续提升, $\eta(\text{SAA})$ 呈持续下降趋势;当NaCl浓度升至21 g/L时, $\eta(\text{SAA})$ 仅为(11.55±4.08)%。与盐度单独作用时相比,盐度与辣椒素共同作用时厌氧氨氧化活性略有下降,约下降4%~10%。根据Hill抑制模型的拟合结果[见图3(b)],辣椒素共存时盐度的半抑制摩尔浓度为0.25 mol/L,对应的质量浓度为14.6 g/L,渗透压为

1.3 MPa。此外,盐度和辣椒素共同作用下,抑制效果产生了叠加,叠加效果为“1+1<2”。

2.4 盐度和辣椒素对厌氧氨氧化活性的抑制机理

已发现的厌氧氨氧化菌均属于浮霉菌门(*Planctomycetales*),分为6个属,分别为*Candidatus Brocadia*、*Candidatus Kuenenia*、*Candidatus Jettenia*、*Candidatus Anammoxoglobus*、*Candidatus Scalindua*及*Candidatus Anammoximicrobium moscowii*。其中,*Candidatus Scalindua*因在海洋中发现而被称为海洋厌氧氨氧化菌,其余5个属均为淡水厌氧氨氧化菌。海洋厌氧氨氧化菌耐盐性最强,可以适应30 g/L的NaCl。同时研究发现,淡水厌氧氨氧化菌经过驯化后,可以提升耐盐性。经过逐步提升盐度的驯化过程,*Candidatus Kuenenia*也可适应30 g/L的NaCl^[14]。不同属的菌种耐盐性能有差异,*Candidatus Brocadia*经过驯化后能适应10 g/L的NaCl^[15],而*Candidatus Jettenia*仅能适应5 g/L的NaCl^[16]。有研究表明,随着盐度的增加,异养菌在系统中逐渐占据优势地位,这可能是高盐环境抑制了厌氧氨氧化微生物某些代谢过程所致^[12]。研究发现,高浓度钠离子可使微生物的生长受到胁迫,导致颗粒污泥生长缓慢^[8]。而厌氧氨氧化菌的活性和丰度常与粒径大小成正比^[17],因此高盐环境下污泥粒径变大受阻,从而会降低厌氧氨氧化活性。随着盐度的升高,厌氧氨氧化菌会分泌更多的胞外聚合物(EPS)以抵抗渗透压,同时使污泥颗粒结构更加紧凑^[18]。

本研究初步探讨盐度对厌氧氨氧化活性产生抑制的潜在机理。高盐度会导致细菌细胞渗透压升高,甚至发生质壁分离分解、细菌休眠乃至死亡^[11]。厌氧氨氧化等微生物应对高盐环境的潜在适应机制如图4所示(NirS、Hzs、Hdh分别为亚硝酸盐还原酶、联氨合成酶、联氨脱氢酶;trkA、trkB、trkG、trkH、krtA、kup为钾离子转运蛋白;proA、proB、proC为参与脯氨酸生物合成的相关酶;glgA、glgB、glgC、glgY、glgZ、treX为海藻糖合成过程的相关酶;nhaA、nhaB、nhaC、chaA为钠离子转运蛋白)。微生物抵抗高盐渗透压的方式包括:①无机渗透机制,微生物通过K⁺转运蛋白提升胞内K⁺积累量,以维持渗透平衡;②有机渗透机制,通过在细胞内积累有机溶质(甜菜碱^[19]、脯氨酸、四氢嘧啶、海藻糖等),以平衡渗透压;③Na⁺输出机制,通过Na⁺/H⁺逆转运蛋白(nhaA、nhaB、nhaC、nhaP、chaA、mdfA等),将

Na⁺输出胞外,该过程与H⁺的输入相偶联。从反应器运行及工艺调控角度,处理高盐废水时的人工调控措施包括:①增加厌氧氨氧化污泥浓度^[11],高污泥浓度有助于提升系统耐受性^[20];②通过逐步提升盐度的驯化方式,可以使厌氧氨氧化菌种逐步适应盐度胁迫,获得更高的耐盐阈值^[11]。

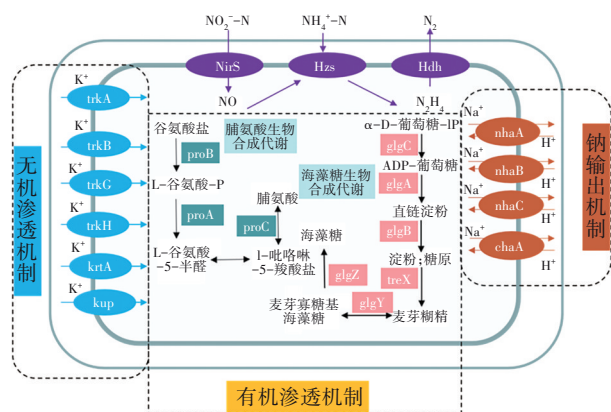


图4 微生物针对高盐环境潜在的适应机制

Fig.4 Mechanism of microbial acclimation under salinity condition

本研究同时探讨辣椒素对厌氧氨氧化活性产生抑制的潜在机理。有研究发现,辣椒素可以改变关键激酶或NADH脱氢酶(NDH-1)与醌的结合点位,从而降低细胞内NAD⁺/NADH的比例,最终诱导细胞凋亡^[1,21]。此外,辣椒素分子还可以与细胞膜建立分子相互作用^[22],其中辣椒素的烷基链与磷脂酰基链作用,会扰乱磷脂的协同行为并诱导细胞凋亡。在厌氧消化系统中,辣椒素可能与厌氧微生物细胞膜和关键酶接触,甚至进入细胞内,从而导致功能性酶失活、NAD⁺和NADH转化减少甚至细胞裂解。而针对厌氧氨氧化菌,辣椒素的抑制机理目前尚无报道。本研究推测,辣椒素作为一种有机小分子物质,可能会与厌氧氨氧化菌细胞膜上的氨氮转运蛋白产生结合作用,从而影响基质转运,进而影响微生物脱氮性能和活性。

3 结论

① 批次试验表明,盐度和辣椒素均会对厌氧氨氧化污泥脱氮活性产生抑制作用。两者单独作用时,盐度抑制可用Hill模型进行描述,NaCl半抑制浓度为15.4 g/L,低浓度时(<9 g/L)抑制不明显,高浓度时(21 g/L)抑制严重, η (SAA)仅为(9.31±2.87)%;辣椒素受自身溶解度影响,其抑制作用无

法用Hill模型进行描述,且抑制作用有限,高浓度时(20 mg/L) η (SAA)下降约20%。

② 在盐度和辣椒素共存环境下,两者共同对厌氧氨氧化活性产生抑制作用。在高浓度辣椒素(20 mg/L)条件下,不同盐度下的 η (SAA)变化趋势与盐度单独作用时一致,NaCl半抑制浓度为14.6 g/L,略低于盐度单独作用时。盐度和辣椒素共存时的抑制效果产生了叠加,叠加效果为“1+1<2”。

③ 展望未来厌氧氨氧化工艺在餐厨垃圾厌氧消化沼液处理等领域的应用,关于盐度和辣椒素对厌氧氨氧化污泥活性的长期影响和内在机制需要进行深入研究。高盐环境下微生物潜在适应机制包括无机渗透、有机渗透、Na⁺输出等。辣椒素潜在抑制机制包括影响胞内NAD⁺/NADH比例、氨氮等基质转运蛋白的结构。

参考文献:

- [1] DU M T, LIU X R, WANG D B, *et al.* Understanding the fate and impact of capsaicin in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2021, 188: 116539.
- [2] 黄迪, 陈季旺, 王茹, 等. HPLC法测定酱卤鸭制品卤水辣度前处理条件优化[J]. *武汉轻工大学学报*, 2016, 35(4): 10-16, 21.
HUANG Di, CHEN Jiawang, WANG Ru, *et al.* Optimization of pretreatment conditions for analysis of brine pungency of pot-stewed duck products using HPLC methods [J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2016, 35(4): 10-16, 21 (in Chinese).
- [3] 钟伟. 某牛油火锅底料废水处理工程设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
ZHONG Wei. Engineering Design of Bottom Water Treatment for a Chafing Dish [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017 (in Chinese).
- [4] CAO S, DU R, ZHOU Y. Coupling anammox with heterotrophic denitrification for enhanced nitrogen removal: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, 51(19): 2260-2293.
- [5] DAPENA-MORAA, FERNÁNDEZI, CAMPOS JL, *et al.* Evaluation of activity and inhibition effects on Anammox process by batch tests based on the nitrogen gas production [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, 40(4): 859-865.

- [6] SHENG L, LEI Z, DZAKPASU M, *et al.* Application of the anammox-based process for nitrogen removal from anaerobic digestion effluent: a review of treatment performance, biochemical reactions, and impact factors [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 38: 101595.
- [7] MOSQUERA-CORRAL A, GONZÁLEZ F, CAMPOS J L, *et al.* Partial nitrification in a SHARON reactor in the presence of salts and organic carbon compounds [J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(9): 3109–3118.
- [8] 王晗. NaCl盐度对ANAMMOX-EGSB反应器性能及AnAOB的影响机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2019.
WANG Han. Impacts and Mechanisms of Sodium Chloride Salinity on Performance and AnAOB in ANAMMOX-EGSB Reactor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019 (in Chinese).
- [9] LI Y Y, JIN Y Y, LI J H. Effects of pungency degree on mesophilic anaerobic digestion of kitchen waste [J]. *Applied Energy*, 2016, 181: 171–178.
- [10] LIN L M, PRATT S, CRICK O, *et al.* Salinity effect on freshwater Anammox bacteria: ionic stress and ion composition[J]. *Water Research*, 2021, 188: 116432.
- [11] CHEN H, MA C, JI Y X, *et al.* Evaluation of the efficacy and regulation measures of the anammox process under salty conditions [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 132: 584–592.
- [12] JEONG D, KIM W, LIM H, *et al.* Shift in bacterial community structure in response to salinity in a continuous anaerobic ammonium oxidation (anammox) reactor [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 147: 104873.
- [13] CAO Y, YANG Q, XING H, *et al.* Determination and correlation of solubility of nonivamide in different solvents [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2014, 22(10): 1141–1144.
- [14] KARTAL B, KOLEVA M, ARSOV R, *et al.* Adaptation of a freshwater anammox population to high salinity wastewater[J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, 126(4): 546–553.
- [15] ZHANG Z, CHEN S, WU P, *et al.* Start-up of the Canon process from activated sludge under salt stress in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR) [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(16): 6309–6314.
- [16] WANG Y, CHEN J, ZHOU S, *et al.* 16S rRNA gene high-throughput sequencing reveals shift in nitrogen conversion related microorganisms in a CANON system in response to salt stress [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 317: 512–521.
- [17] VLAEMINCK S E, TERADA A, SMETS B F, *et al.* Aggregate size and architecture determine microbial activity balance for one-stage partial nitrification and Anammox [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(3): 900–909.
- [18] 张倩, 刘晓朋, 张旭, 等. 盐胁迫对厌氧氨氧化污泥脱氮性能及其胞外聚合物特性的影响[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(7): 117–126.
ZHANG Qian, LIU Xiaopeng, ZHANG Xu, *et al.* Effects of salinity on nitrogen removal performance and extracellular polymer substances of ANAMMOX sludge [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(7): 117–126 (in Chinese).
- [19] VYRIDES I, SANTOS H, MINGOTE A, *et al.* Are compatible solutes compatible with biological treatment of saline wastewater? Batch and continuous studies using submerged anaerobic membrane bioreactors (SAMBRs) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(19): 7437–7442.
- [20] TANG C J, ZHENG P, CHEN T T, *et al.* Enhanced nitrogen removal from pharmaceutical wastewater using SBA-ANAMMOX process [J]. *Water Research*, 2011, 45(1): 201–210.
- [21] BARBERO G, LIAZID A, PALMA M, *et al.* Ultrasound-assisted extraction of capsaicinoids from peppers[J]. *Talanta*, 2008, 75(5): 1332–1337.
- [22] BARBERO G, LIAZID A, PALMA M, *et al.* Fast determination of capsaicinoids from peppers by high-performance liquid chromatography using a reversed phase monolithic column [J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(3): 1276–1282.

作者简介:鲁波(1989–),男,甘肃酒泉人,学士,高级工程师,研究方向为环境工程。

E-mail:695925808@qq.com

收稿日期:2022-04-21

修回日期:2022-06-15

(编辑:刘贵春)