



钮劲涛,邓伟玲,杜静雨,等.含盐食品工业废水脱氮除磷性能研究[J].轻工学报,2024,39(1):118-126.  
NIU J T, DENG W L, DU J Y, et al. Denitrification and phosphorus removal performance of salt-containing food industry wastewater[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(1): 118-126.  
DOI: 10.12187/2024.01.015

# 含盐食品工业废水脱氮除磷性能研究

钮劲涛<sup>1</sup>, 邓伟玲<sup>2</sup>, 杜静雨<sup>2</sup>, 古家宇<sup>2</sup>, 周贤明<sup>2</sup>, 陈鑫<sup>2</sup>, 吉建涛<sup>3</sup>, 金宝丹<sup>2</sup>

1. 河南恒安环保科技有限公司, 河南 郑州 450001;
2. 郑州轻工业大学 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001

**摘要:**为研究含盐食品工业废水脱氮除磷的性能,将不同盐度(NaCl)引入实验室模拟食品工业废水处理系统中,选择厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)的运行方式,考查处理系统中化学需氧量(COD)、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 等理化指标的变化情况,并结合污泥性质和功能微生物菌群结构揭示不同盐度对食品工业废水脱氮除磷性能的影响机理。结果表明,引入盐度既能提高系统中有机物的去除效果,COD去除率从84.08%增大至90.33%,还能促进厌氧阶段除磷菌释磷及硝化作用, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率从95.79%增大至98.85%,但会抑制除磷菌好氧吸磷性能;低盐度(0.5 g/L)能够促进系统反硝化性能,但当盐度升高至3.0 g/L时,会降低系统反硝化性能;随着盐度的升高,微生物胞外聚合物(EPS)含量增大,当盐度为3.0 g/L时,EPS含量为38.81 mg/g VSS;引入盐度还会增加微生物菌群的相对丰度,改变微生物菌群结构,促进Chloroflexi、Actinobacteriota和Planctomycetota等反硝化菌门富集,同时随着盐度的升高,Caldilineaceae、Feruginibacter、Kouleothrix等功能微生物的相对丰度增大,而Candidatus\_Compitibacter的相对丰度降低,这保证了含盐系统稳定的脱氮除磷效果。

**关键词:**盐度;食品工业废水;脱氮除磷;胞外聚合物;功能微生物

**中图分类号:**X703;TS201.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2024)01-0118-09

## 0 引言

随着我国居民生活水平的提高,食品加工业迅速发展。食品加工过程中往往需要投加大量盐类物质来增加食品的口感,因此食品工业废水通常盐度较高<sup>[1]</sup>,导致其处理难度较大<sup>[2]</sup>。目前,活性污泥法是食品工业废水的主要处理工艺<sup>[3]</sup>,具有运行简

单、成本低、效果好等特点。然而,盐度的引入会影响活性污泥性质,改变微生物菌群结构<sup>[4]</sup>,影响污水处理效果。因此,考查不同盐度食品工业废水处理系统的脱氮除磷效果、微生物菌群变化和污泥性质具有重要意义。

传统城市污水处理工艺中,有机物降解菌、氨氧化菌、亚硝酸菌、硝化菌、反硝化菌和聚磷菌(PAOs)

收稿日期:2023-06-18;修回日期:2023-09-07;出版日期:2024-02-15

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(42007340)

作者简介:钮劲涛(1982—),男,河南省漯河市人,河南恒安环保科技有限公司高级工程师,主要研究方向为工业污水及污泥处理。E-mail:niuajt07@sina.cn

通信作者:金宝丹(1985—),女,吉林省长春市人,郑州轻工业大学副教授,博士,主要研究方向为污水及污泥处理。E-mail:2016024@zzuli.edu.cn

是主要的污染物去除功能菌。无机盐作为微生物新陈代谢不可缺少的元素之一,不仅能维持微生物细胞的渗透压,还为微生物提供无机盐离子,确保其正常生长。但对于传统活性污泥,盐度冲击会改变微生物细胞的渗透压,造成细胞膜内外压差过大,从而导致细胞脱水,甚至发生质膜分离,破坏细胞结构<sup>[5]</sup>。张兰河等<sup>[6]</sup>研究发现,高盐度会严重影响厌氧/缺氧/好氧(A/A/O)工艺污染物去除效率,当盐度增加至40 g/L时,微生物多样性减少,脱氮效果降低。王淑莹等<sup>[7]</sup>采用序批式活性污泥反应器(SBR)处理含盐废水,发现盐度对硝化菌的抑制作用远大于反硝化菌,且对亚硝酸菌的抑制作用大于氨氧化菌。巩有奎等<sup>[8]</sup>研究发现,盐度对亚硝酸菌的抑制作用最强,其次是有机物降解菌。可见,盐度对污水脱氮除磷系统具有显著影响,但学者研究过程中的盐度跨度较大,且多集中于脱氮性能研究,对于盐度对微生物菌群结构、活性污泥性质及除磷效果尚未进行系统研究。

基于此,本研究拟以含盐食品工业废水为处理对象,以A/A/O为运行方式,考查不同盐度对系统脱氮除磷性能的影响,通过分析不同盐度系统中COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等理化指标的变化情况,结合功能微生物菌群结构和活性污泥性质的变化,探索盐度对生物脱氮除磷的影响机理,以期为解决含盐食品工业废水脱氮除磷不能兼容的问题提供可行性方案。

## 1 材料与方 法

### 1.1 主要材料、试剂与仪器

污泥来源:活性污泥,郑州市某市政污水处理厂剩余污泥。使用前,采用纯水清洗活性污泥3次,除去污泥表面残留的有机物及无机盐;控制混合液悬浮固体(MLSS)质量浓度为(3000±500) mg/L,可挥发性悬浮固体(MLVSS)质量浓度为(2100±500) mg/L,化学需氧量(COD)质量浓度为(15±5) mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度忽略不计。

主要试剂:乙酸钠、NaCl、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,均为化学纯,国药集团化学试剂有限公司;超纯水,英国ELGA超纯水机(包含水柱)制取。其他化学试剂均

为分析纯或优级纯。

主要仪器:5B-1F型COD快速消解仪,北京连华永兴科技发展有限公司;UV2400型紫外-可见分光光度计,上海舜宇恒平科学仪器有限公司

实验装置:实验反应器为有机玻璃,总体积12 L,有效体积10 L,采用悬臂式机械搅拌器进行搅拌,反应温度为25~30℃。

### 1.2 实验水质及运行方式

实验水质:含盐食品工业废水为人工模拟废水,采用乙酸钠、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 进行污染物投加,其中COD质量浓度为(300±50) mg/L、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为(35±5) mg/L、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度为(10±0.5) mg/L;处理系统盐度采用NaCl投加形式控制,按照不同阶段逐渐增加NaCl质量浓度(0 g/L、0.5 g/L、1.0 g/L、2.0 g/L、3.0 g/L);投加微量元素以维持处理系统内微生物的正常新陈代谢,控制系统内微量元素质量浓度分别为 $\text{CaCl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$  7.6 mg/L、 $\text{FeCl}_3\cdot6\text{H}_2\text{O}$  7.0 mg/L、 $\text{CuSO}_4\cdot5\text{H}_2\text{O}$  0.047 mg/L、 $\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$  0.06 mg/L、 $\text{ZnCl}_2$  0.09 mg/L、 $\text{CoSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$  0.20 mg/L、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot2\text{H}_2\text{O}$  0.05 mg/L。

运行方式:处理系统为SBR;运行条件为厌氧搅拌1 h、缺氧搅拌2 h、曝气4 h、沉淀30 min、排水10 min、静沉20 min;反应器排水比为50%。实验处理系统及运行方式见图1。

### 1.3 小试实验

取NaCl质量浓度为3.0 g/L阶段的驯化污泥,采用纯水清洗去除残余的NaCl,控制污泥质量浓度为(3000±500) mg/L,检测经盐度长期驯化后污泥的脱氮除磷性能,通过周期性实验分析 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等理化指标,研究盐度对处理系统硝化、反硝化、释磷、吸磷性能的影响。批次实验运行方式与长期运行系统相同,即厌氧1 h、缺氧2 h、好氧4 h。

反应装置为1000 mL的烧杯,分别取1000 mL实验污泥投加至1#—5#反应器(见图1c)中,并向各反应器中投加一定量的NaCl,控制NaCl质量浓度分别为0 g/L、0.5 g/L、1.0 g/L、2.0 g/L、3.0 g/L。厌氧阶段投加乙酸钠、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,控制系统COD质量浓度为(300±50) mg/L、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量

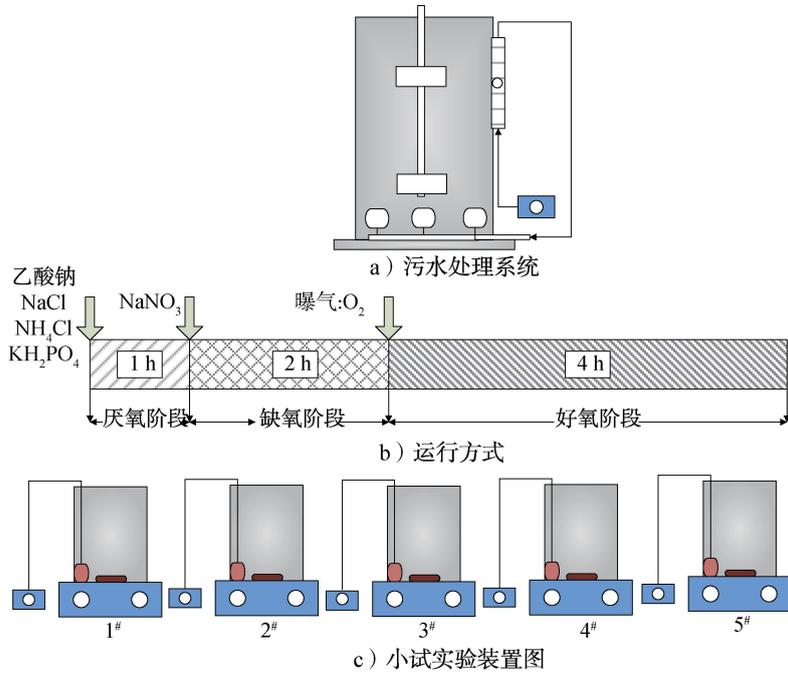


图1 实验处理系统及运行方式

Fig. 1 Experimental processing system and operation mode

浓度为 $(10 \pm 0.5)$  mg/L及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $(35 \pm 5)$  mg/L,反应至第1 h(缺氧阶段)时投加一定量的 $\text{NaNO}_3$ ,控制系统 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度为 $(20 \pm 5)$  mg/L,反应至第3 h(好氧阶段)时开启曝气装置,控制溶解氧质量浓度为 $(2.0 \pm 0.5)$  mg/L。每20 min取一次样品,检测其化学指标。

#### 1.4 检测方法

参考文献[9]的方法测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、MLSS及MLVSS质量浓度;参考文献[10]的方法,采用lower-follin法测定蛋白质含量,利用蒽酮-硫酸法测定多糖含量;分别取S0(盐度为0 g/L)和S1(盐度为3 g/L)阶段的污泥样品进行微生物菌群检测,通过上海美吉生物医药科技有限公司的Illumina Miseq测序平台进行微生物高通量测序,引物为341F/805R(341F:CCTACGGGNG-GCWGCAG,805R:GACTACHVGGGTATCTAATCC);参考文献[11]的方法提取胞外聚合物(EPS),参考文献[10]的方法检测EPS中蛋白质(PN)和多糖(PS)的含量;采用快速消解法测定COD质量浓度,具体方法如下:根据需求进行水样稀释,取水样2.5 mL,加入0.7 mL D试剂( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ )和4.8 mL E试剂( $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-Ag}_2\text{SO}_4$ ),于165 °C恒温条件下消解

10 min,空气冷却2 min,加入2.5 mL蒸馏水,冷却2 min,利用紫外-可见分光光度计检测水样中的COD质量浓度。

污染物去除率的计算公式如下:

$$R = \frac{C_{\text{进}} - C_{\text{出}}}{C_{\text{进}}} \times 100\%$$

其中, $R$ 表示污染物的去除率/%; $C_{\text{进}}$ 表示进水中污染物的质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ ; $C_{\text{出}}$ 表示出水中污染物的质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 。

#### 1.5 数据处理

采用单因素方差分析(ANOVA)检验COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、蛋白质、多糖等指标,所有指标均分析3次, $P < 0.05$ 表示有统计学意义。

## 2 结果与讨论

### 2.1 盐度对系统污染物去除的影响

不同盐度对系统污染物去除和周期表现的影响分别见图2和图3。由图2a)可知,COD去除率随盐度增大而增大,当盐度为3.0 g/L时,COD去除率增大至90.33%,此时出水COD质量浓度为39.57 mg/L,由此可知,适当盐度不仅没有抑制微生

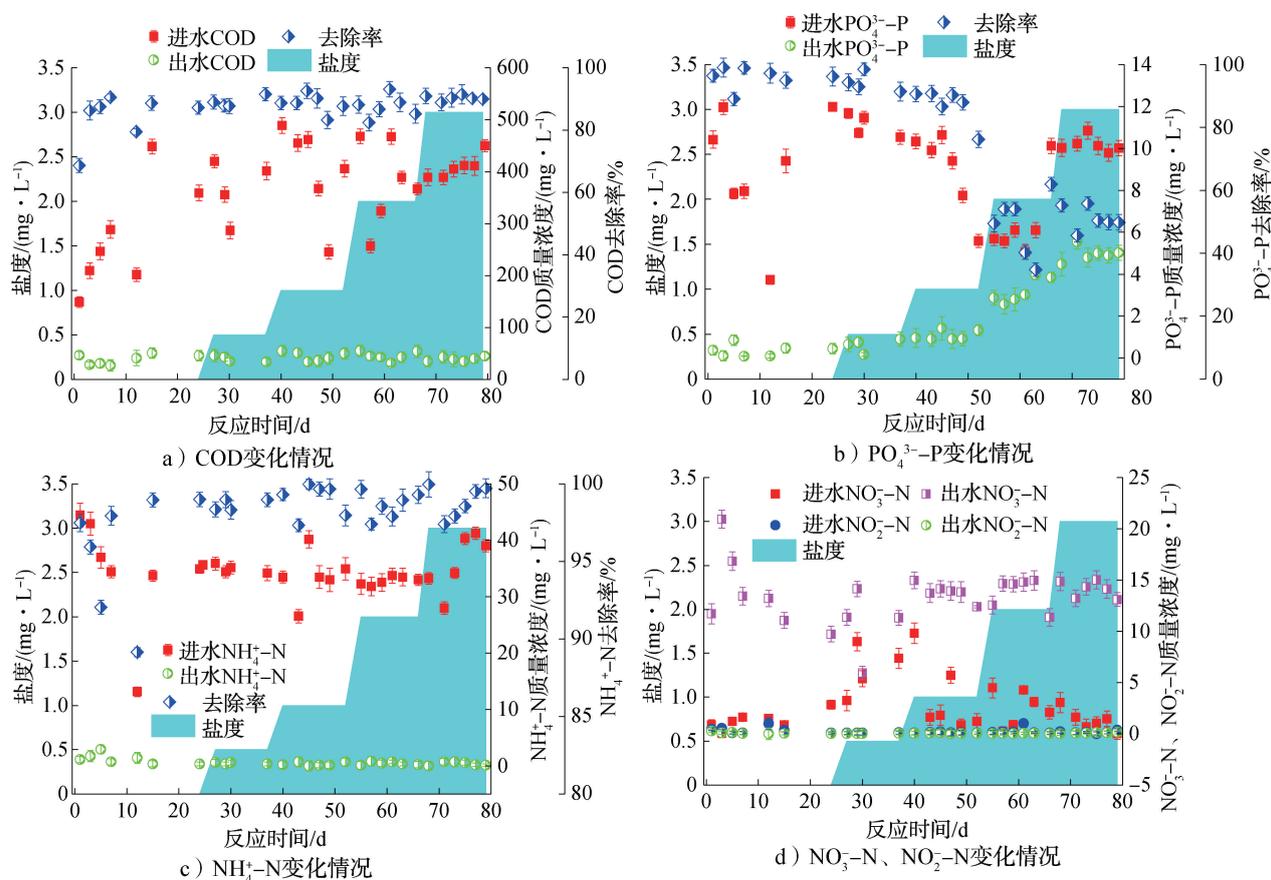


图2 不同盐度对系统污染物去除的影响

Fig. 2 The effect of different salinity on the pollutant removal

物的增长,反而增强了异养微生物的活性,提高了有机物的利用率。

由图 2b)可知,盐度对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除影响较明显, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率随盐度的增加而降低,当盐度为 3.0 g/L 时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  去除率降低至 51.15%,此时出水  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度为 4.96 mg/L,说明高盐度对除磷菌具有一定的抑制作用,与 A. Uygun 等<sup>[12]</sup> 的研究结果基本一致。

由图 2c)可知,盐度对系统硝化性能具有一定的促进作用, $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率从 95.79% 增大至 98.85%,当盐度为 3.0 g/L 时,出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度为 0.11 mg/L。可见,盐度对系统硝化性能基本没有影响。如 L. Quartaroli 等<sup>[13]</sup> 研究发现,盐度对颗粒污泥氨氮去除效果的影响较小。

由图 2d)可知,当盐度从 0 g/L 增加至 3.0 g/L 时,出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度分别为 13.85 mg/L、10.69 mg/L、13.83 mg/L、13.83 mg/L、14.11 mg/L,

可见低盐度(0.5 g/L)能够促进系统反硝化性能,当盐度升高至 3.0 g/L 时,系统反硝化性能下降。A. Uygun 等<sup>[12]</sup> 研究发现,当盐度升高至 30 g/L 时,系统反硝化作用下降。R. Wang 等<sup>[14]</sup> 研究发现,反硝化颗粒污泥的 NaCl 半抑制浓度为 12 g/L,说明驯化后的反硝化菌具有处理含盐食品工业废水的潜力。而食品工业废水盐度远低于 A. Uygun 等<sup>[12]</sup> 和 R. Wang 等<sup>[14]</sup> 的研究对象,可见,经过长时间驯化后,食品工业废水处理系统可以适应盐度变化,具有较强的反硝化作用。同时发现,在整个运行过程中均无  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  积累,这可能是因为在缺氧阶段后期仍存有碳源, $\text{NO}_2^-\text{-N}$  被还原成  $\text{N}_2$ ,且在曝气阶段残余的  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  会被氧化成  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。

由图 3a)可知, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (曝气阶段)在硝化菌的作用下迅速转化为  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,导致  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  质量浓度快速升高,再次证实了盐度对系统硝化性能基本无影响。

由图 3b)可知,反应 1~4 h 时,各个反应器中

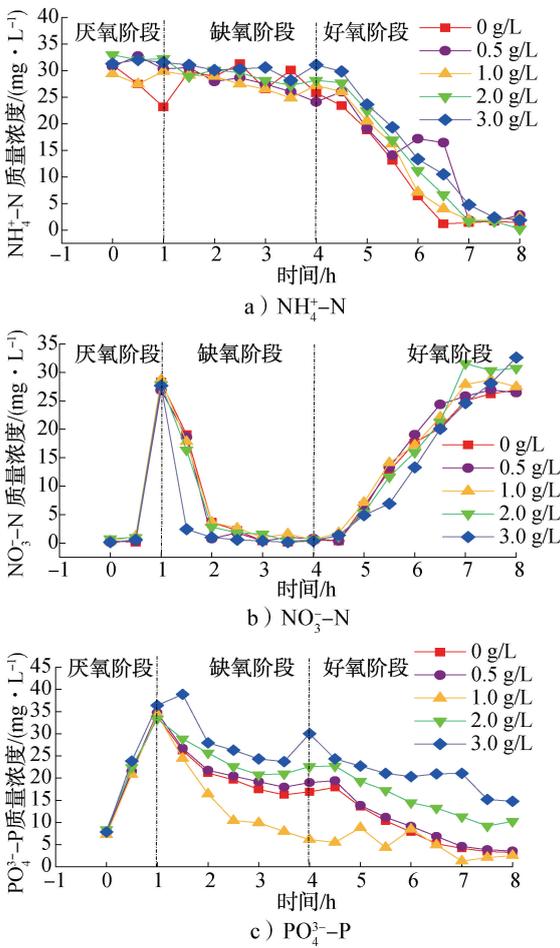


图3 不同盐度对系统污染物周期表现的影响  
Fig. 3 The effect of different salinities on the periodic performance of system pollutants

$\text{NO}_3^- - \text{N}$  质量浓度均有明显的下降直至稳定,结合图3c)可知, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  质量浓度在1~4 h时下降也很明显,可见,该条件下系统可能存在反硝化除磷现象,即反硝化除磷菌(DPAOs)在缺氧条件下以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为电子受体,将厌氧阶段合成的聚 $\beta$ -羟基链烷酸脂氧化,产生的能量用于磷的过量吸收,从而实现同步脱氮除磷的目的<sup>[9]</sup>。

由图3c)可知,不同盐度条件下除磷菌均有较高的释磷现象,与进水中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  质量浓度相比,厌氧阶段末期系统中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  分别提高了4.62倍、4.48倍、4.75倍、3.99倍及4.63倍,实验结束时各反应器中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  质量浓度分别为3.21 mg/L、3.53 mg/L、2.50 mg/L、10.23 mg/L和12.75 mg/L。其中,盐度为1.0 g/L条件下的释磷效果最好,是0 g/L盐度条件下的1.03倍。可见,高盐度并未降

低PAOs对外碳源的利用效率,且PAOs会在厌氧阶段将外碳源转化成内碳源并进行释磷反应。当反应至4~8 h时,各条件下的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  质量浓度均呈现明显的下降趋势,说明该阶段的PAOs利用厌氧阶段存储的内碳源,在好氧阶段以 $\text{O}_2$ 为电子受体进行过量吸磷,进而实现高效除磷<sup>[9]</sup>。但当盐度大于1.0 g/L后,DPAOs和PAOs的活性均受到抑制,进而控制DPAOs和PAOs过量吸磷,导致除磷效果随着盐度的升高而降低。同时,当系统缺乏无机盐时也不利于吸磷,因此0 g/L和0.5 g/L盐度条件下系统的除磷效果低于1.0 g/L盐度条件。朱卫强等<sup>[15]</sup>研究发现,在2 g/L盐度条件下,驯化的DPAOs除磷率超过80%。李玲玲<sup>[16]</sup>也发现,经长期驯化后的微生物会产生较强的耐盐性能。当盐度大于1 g/L时,缺氧阶段和好氧阶段除磷效果均下降,这可能是由于较高的盐度会造成环境渗透压增大,致使菌体细胞脱水甚至原生质分离,从而严重影响菌体的生长,造成除磷性能降低。如M. Pronk等<sup>[17]</sup>也发现,0.2~20.0 g/L的盐度条件对PAOs活性具有抑制作用,从而降低其吸磷速率。

## 2.2 盐度对活性污泥性质的影响

EPS是活性污泥的重要组成部分,对活性污泥的沉降性、微生物活性、有机物降解、抵抗有毒物质冲击等具有重要作用<sup>[18]</sup>,其中,PN和PS是EPS的主要成分。图4为不同盐度对污泥性质的影响。由图4可知,微生物EPS含量随着盐度的增加而增

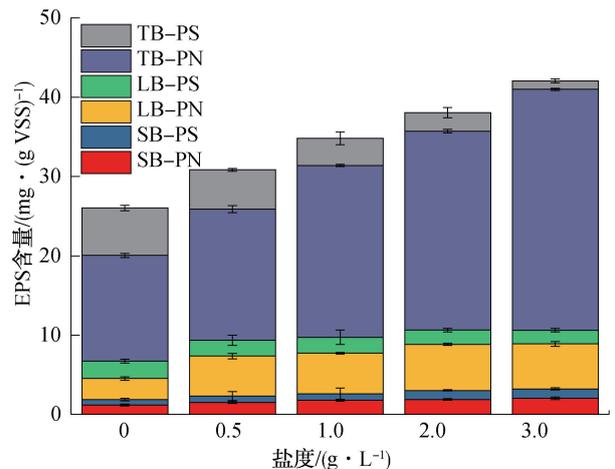


图4 不同盐度对污泥性质的影响  
Fig. 4 The effect of different salinities on sludge property

大,当盐度升高至 3.0 g/L 时, EPS 含量从 24.15 mg/g VSS 增大至 38.81 mg/g VSS。同时,盐度对黏液层(SB)、疏松层(LB)和紧致层(TB)中的 PN 和 PS 均具有显著影响,其中 SB-PN、LB-PN 和 TB-PN 含量均随着盐度的增加而升高,当盐度为 3.0 g/L 时,分别升高至 2.04 mg/g VSS、5.66 mg/g VSS 和 30.37 mg/g VSS; SB-PS 含量随着盐度的增加而增大,但 LB-PS 和 TB-PS 含量随着盐度的增加而降低,当盐度为 3.0 g/L 时,SB-PS 含量增大至 1.19 mg/g VSS, LB-PS 和 TB-PS 含量分别降低至 1.72 mg/g VSS 和 1.06 mg/g VSS。这可能是由于当微生物的生存环境发生改变时,其自身会进行应急保护,即通过调节 EPS 内各成分的含量形成保护层,减轻恶劣环境的影响。I. Vyrides 等<sup>[19]</sup>研究证明,在含盐环境下, EPS 可形成细胞壁与外部极端环境之间的屏障,进而对微生物起到隔离保护作用。其他学者<sup>[20-21]</sup>研究表明, EPS 在活性污泥系统中发挥着重要作用,细菌可利用 EPS 与 Na<sup>+</sup>结合,减少盐度对其造成的毒性影响,有助于系统稳定运行。还有研究<sup>[22]</sup>发现,当盐度增加至 2.0% (约 20 g/L) 时,胞外离子的积累会引起较大的静电力,使细菌的细胞结构发生变化,同时 PN 与离子之间可能发生盐析作用,导致酶活性下降<sup>[23]</sup>,这也是造成除磷性能下降的原因之一。可见,即使盐度较低,微生物也会通过调节自身特性以适应外界环境的变化。

## 2.3 盐度对活性污泥系统功能微生物菌群的影响

### 2.3.1 微生物多样性

为了更好地分析盐度对 SBR 脱氮除磷系统中微生物的影响,运行末期分别对 S0 和 S1 阶段的污泥样品进行高通量测序分析,得到菌株操作分类单元 (Operational Taxonomic Unit, OUT) 分别为 969 和 1345,同时测序片段 (Massively Sequencing MiSeq) 分别为 49 948 和 66 323,菌群丰度 (Abundance-based Coverage Estimator metric, ACE) 分别为 1 623.452 和 1 199.453,基于 OUT 数目计算的 Chao 指数分别为 1 586.788 和 1 216.05。可见,盐度的引入增加了微生物菌群的相对丰度,改变了微生物菌群结构。

### 2.3.2 功能微生物菌群结构

图 5 为不同盐度对

微生物菌群结构的影响。由图 5a) 可知, S0 和 S1 阶段的污泥样品中均检测到 8 个门类, 分别为 Proteobacteria (38.37% 和 31.29%)、Chloroflexi (16.19% 和 35.36%)、Bacteroidota (24.28% 和 13.96%)、Actinobacteriota (5.30% 和 9.97%)、Patescibacteria (5.76% 和 2.24%)、Acidobacteriota (2.49% 和 2.76%)、Myxococcota (1.47% 和 0.35%) 和 Planctomycetota (0.57% 和 1.39%), S1 阶段的污泥样品中 Chloroflexi、Actinobacteriota 和 Planctomycetota 的相对丰度明显高于 S0 阶段的污泥样品,但 Proteobacteria 和 Bacteroidota 的相对丰度明显低于 S0 阶段的污泥样品。研究<sup>[24-25]</sup>表明, Proteobacteria 是污水处理厂常见的功能微生物,在高硝氮废水处理系统脱氮过程中具有重要作用。J. Zhao 等<sup>[26]</sup>研究发现,在短程硝化和内源短程反硝化除磷系统中含有丰富的 Chloroflexi 和 Actinobacteriota 菌群,因此含盐系统具有较好的脱氮效果和一定的除磷性能。正如图 5b) 所示, S1 阶段的污泥样品中含有丰富的 Anaerolineae (25.72%)、Alphaproteobacteria (13.16%) 和 Chloroflexia (8.73%), 且有研究<sup>[27-28]</sup>表明,这 3 个菌群均具有反硝化功能,因此,系统引入盐度后仍具有较高的脱氮性能和较好的除磷效果。

*Hydrogenophilaceae* 是传统的脱氮功能菌<sup>[29]</sup>,且相对丰度随着盐度增加而降低 (1.05% ~ 0.95%) (见图 5c))。 *Caldilineaceae* 具有较强的脱氮功能<sup>[30]</sup>,随着盐度的增加,其相对丰度由 2.73% 增加至 5.91%。Z. C. Wang 等<sup>[31]</sup>研究发现, *Ferruginibacter* 为硝酸盐降解菌,具有较好的反硝化能力,其相对丰度随着盐度的增加而增大,分别为 1.03% (S0) 和 2.88% (S1),说明盐度能够促进其富集和驯化。然而,引入盐度后, *Candidatus \_Competibacter* (GAO) 的相对丰度下降至 8.29%,说明盐度能够抑制其富集,提高碳源利用率,进而促进 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除。同时,盐度增大了 *Kouleothrix* 的相对丰度,分别为 2.24% (S0) 和 3.73% (S1),而 *Kouleothrix* 对有毒有害物质具有较强的降解功能<sup>[32]</sup>,确保了含盐脱氮除磷系统中有机物的去除效果。

## 3 结论

本文系统研究了不同盐度食品工业废水脱氮除

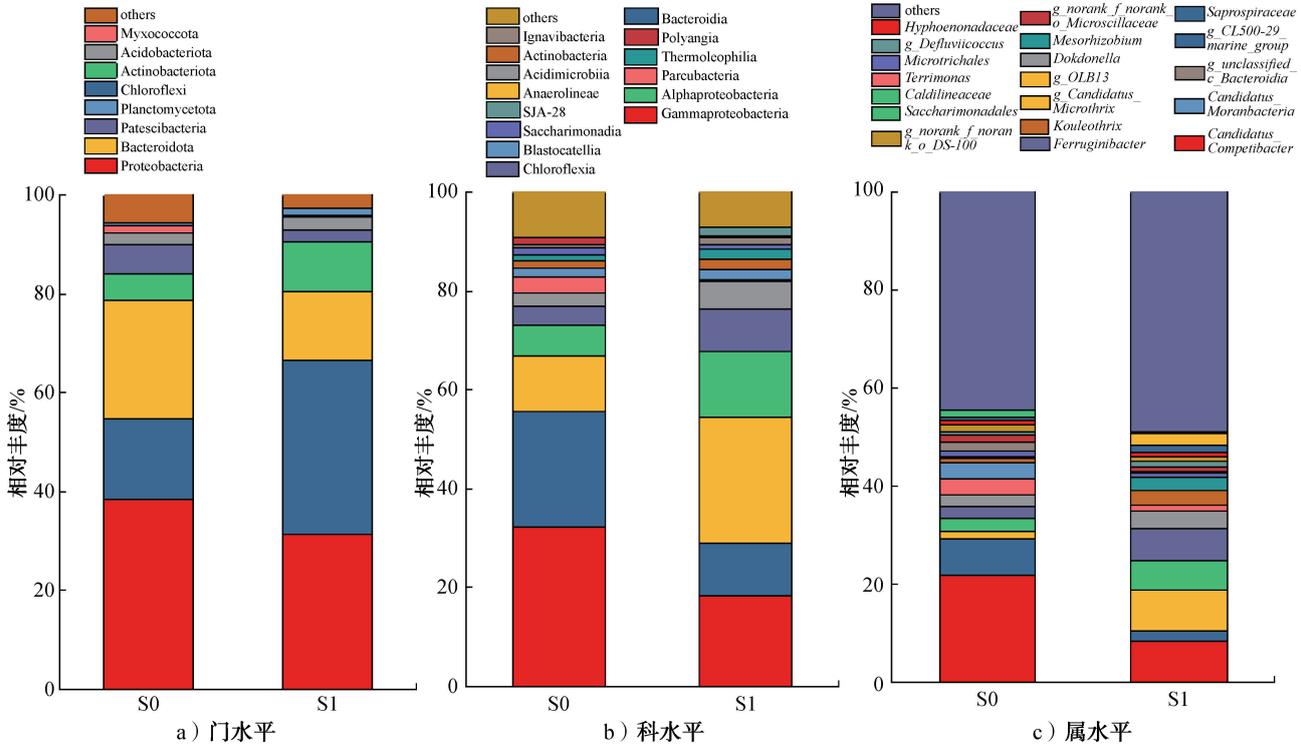


图5 不同反应阶段微生物菌群结构的变化

Fig. 5 The change of microbial community structure in different reaction stages

磷系统运行性能,通过考查不同盐度对污水脱氮除磷性能的影响,分析其影响机理,得到主要结论如下:

1)适当盐度能够提高有机物的去除效果,当盐度为0.5~3.0 g/L时,对系统厌氧释磷性能影响较小,但当盐度大于1.0 g/L时,反硝化除磷和好氧吸磷性能均随着盐度的增加而降低,除磷效果减弱;同时盐度能强化系统的反硝化性能,但当盐度高于3.0 g/L时,反硝化性能有所下降。

2)微生物EPS含量随着盐度的升高而增大,当盐度为3.0 g/L时,EPS含量为38.81 mg/g VSS,且SB-EPS、LB-EPS和TB-EPS中PN含量的变化趋势与此基本相同;SB-EPS中PS含量随着盐度的升高而增大,而LB-EPS和TB-EPS中PS含量的变化趋势与此相反。

3)系统中引入盐度会增加微生物菌群的相对丰度,改变其结构,具体表现为盐度显著促进了Chloroflexi、Actinobacteriota和Planctomycetota等反硝化菌门富集,且随着盐度的升高,Caldilineaceae、Ferruginibacter、Kouleothrix等功能微生物的相对丰度增大,而Candidatus\_Competibacter的相对丰度降

低。因此,系统引入盐度后仍具有较高的脱氮和有机物去除性能,但高盐度条件下除磷效果较差。

参考文献:

[1] 彭玲玲. 红绶曲霉 *Aspergillus nomius* SGFA1 降解苯酚和甲醛的特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2014.

[2] 刘文伟. 高盐度蜜饯加工废水处理技术的实验研究 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 87-91.

[3] 李凌云, 周利, 彭永臻, 等. SBR法在难降解废水处理中的研究及应用 [J]. 工业水处理, 2007(2): 1-5.

[4] ZHANG L F, HUANG X D, CHEN W T, et al. Microalgae-assisted heterotrophic nitrification-aerobic denitrification process for cost-effective nitrogen and phosphorus removal from high-salinity wastewater: Performance, mechanism, and bacterial community [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 390: 129901.

[5] FERRER-POLONIO E, GARCÍA-QUIJANO, MENDOZA-ROCA J A, et al. Effect of alternating anaerobic and aerobic phases on the performance of a SBR treating effluents with high salinity and phenols concentration [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 113: 57-65.

[6] 张兰河, 田蕊, 陈子成, 等. NaCl 盐度对 A2/O 工艺去

- 除废水污染物和系统微生物的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 231-237.
- [7] 王淑莹, 唐冰, 叶柳, 等. NaCl 盐度对活性污泥系统脱氮性能的影响[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(6): 631-635.
- [8] 巩有奎, 岳英龙, 彭永臻. 盐度对缺氧-好氧 SBBR 微生物活性及  $N_2O$  释放的影响[J]. 过程工程学报, 2020, 20(8): 970-978.
- [9] ASSOCIATION C, WASHINGTON D A P H A. Standard methods for the examination of water and wastewater[J]. American Physical Education Review, 1995(24): 481-486.
- [10] YUAN H Y, CHEN Y G, ZHANG H X, et al. Improved bioproduction of short-chain fatty acids (SCFAs) from excess sludge under alkaline conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 6(40): 2025-2029.
- [11] LI X L, PENG Y Z, REN N Q, et al. Effect of temperature on short chain fatty acids (SCFAs) accumulation and microbiological transformation in sludge alkaline fermentation with  $Ca(OH)_2$  adjustment[J]. Water Research, 2014, 61: 34-45.
- [12] UYGUR A, KARGI F. Salt inhibition on biological nutrient removal from saline wastewater in a sequencing batch reactor[J]. Enzyme & Microbial Technology, 2004, 34(3/4): 313-318.
- [13] QUARTAROLI L, SILVA C. M, CARNEIRO L, et al. Effect of the gradual increase of salt on stability and microbial diversity of granular sludge and ammonia removal[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 248(15): 109273.
- [14] WANG R, ZHENG P, DING A Q, et al. Effects of inorganic salts on denitrifying granular sludge: The acute toxicity and working mechanisms[J]. Bioresource Technology, 2016, 204: 65-70.
- [15] 朱卫强, 陈舒, 张培玉. 2 株反硝化聚磷菌的筛选及其影响因素[J]. 环境工程学报, 2016, 10(6): 3295-3302.
- [16] 李玲玲. 高盐度废水生物处理特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [17] PRONK M, BASSIN J P, KREUK M, et al. Evaluating the main and side effects of high salinity on aerobic granular sludge[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2014, 98(3): 1339-1348.
- [18] WANG J, FU Z Z, LIU G F, et al. Mediators-assisted reductive biotransformation of tetrabromobisphenol-A by *Shewanella* sp. XB[J]. Bioresource Technology, 2013, 142: 192-197.
- [19] VYRIDES I, STUCKEY D C. Adaptation of anaerobic biomass to saline conditions: Role of compatible solutes and extracellular polysaccharides[J]. Enzyme & Microbial Technology, 2009, 44(1): 46-51.
- [20] WANG Y Y, QIN J, ZHOU S, et al. Identification of the function of extracellular polymeric substances (EPS) in denitrifying phosphorus removal sludge in the presence of copper ion[J]. Water Research, 2015, 73: 252-264.
- [21] KIM L H, CHONG T H. Physiological responses of salinity-stressed *Vibrio* sp. and the effect on the biofilm formation on a nanofiltration membrane[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(3): 1249-1258.
- [22] ZHAO Y Y, PARK H D, PARK J H, et al. Effect of different salinity adaptation on the performance and microbial community in a sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2016, 216(1): 808-816.
- [23] ZHAO H. Effect of ions and other compatible solutes on enzyme activity, and its implication for biocatalysis using ionic liquids[J]. Journal of Molecular Catalysis B(Enzymatic), 2005, 37(1): 16-25.
- [24] MIAO Y, LIAO R H, ZHANG X X, et al. Metagenomic insights into salinity effect on diversity and abundance of denitrifying bacteria and genes in an expanded granular sludge bed reactor treating high-nitrate wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 277: 116-123.
- [25] LIAO R H, SHEN, LI A M, et al. High-nitrate wastewater treatment in an expanded granular sludge bed reactor and microbial diversity using 454 pyrosequencing analysis[J]. Bioresource Technology, 2013, 134: 190-197.
- [26] ZHAO J, WANG X X, LI X Y, et al. Improvement of partial nitrification endogenous denitrification and phosphorus removal system; Balancing competition between phosphorus and glycogen accumulating organisms to enhance nitrogen removal without initiating phosphorus removal deterioration[J]. Bioresource Technology, 2019, 281: 382-391.
- [27] LIM Y W, LEE S A, KIM S B, et al. Diversity of denitrifying bacteria isolated from daejeon sewage treatment plant[J]. Journal of Microbiology, 2005, 43(5): 383-390.
- [28] LIU S L, DAIGGER G T, LIU B T, et al. Enhanced performance of simultaneous carbon, nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in an anaerobic-aerobic-anoxic sequencing batch reactor (AOA-SBR) system by alternating the cycle times[J]. Bioresource Technology, 2020, 301: 122750.
- [29] ZHANG T, WANG B, LI X Y, et al. Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 35(1): 330-337.
- [30] 仇天雷. 循环水养殖废水生物脱氮技术及其影响因素研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- [31] WANG Z C, YUAN S Y, DENG Z W, et al. Evaluating responses of nitrification and denitrification to the co-selective pressure of divalent zinc and tetracycline based on resistance genes changes[J]. Bioresource Technology, 2020, 314: 123769.

[32] LI J B, LUO C L, SONG M K, et al. Biodegradation of phenanthrene in polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated wastewater revealed by coupling cultivation-depend-

ent and-independent approaches[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(6):3391-3401.

## Denitrification and phosphorus removal performance of salt-containing food industry wastewater

NIU Jintao<sup>1</sup>, DENG Weiling<sup>2</sup>, DU Jingyu<sup>2</sup>, GU Jiayu<sup>2</sup>, ZHOU Xianming<sup>2</sup>,  
CHEN Xin<sup>2</sup>, JI Jiantao<sup>3</sup>, JIN Baodan<sup>2</sup>

1. Henan Heng'an Environmental Protection Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;

3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** In order to study the nitrogen and phosphorus removal performance of salt-containing food industry wastewater, the different doses of salinity were introduced into the food industry wastewater treatment system and the mode of operation was selected as anaerobic/anoxic/aerobic (A/A/O). The variation of different indicators including chemical oxygen demand (COD),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  were analyzed, and the influence mechanism about different concentrations of salinity on the nitrogen and phosphorus removal performance for the food industry wastewater was revealed combining with sludge properties and functional microorganisms. The results showed that the introduced salinity not only improved the COD degradation with the value increasing from 84.08% to 90.33%, but also improved phosphorus release of phosphorus removing bacteria and nitrification. The efficiency of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  increased from 95.79% to 98.85%. However, it restrained the absorption phosphorus of phosphorus removing bacteria in aerobic phase. The denitrification performance was enhanced under low salinity (0.5 g/L) condition, but was decreased when the salinity increased to 3.0 g/L. The extracellular polymeric substance (EPS) increased with salinity and the EPS was 38.81 mg/g volatile suspended solid (VSS) under the 3.0 g/L salinity condition. The introduced salinity increased the relative abundance of microbial community and changed its structure, which enhanced denitrifying bacteria enrichment including Chloroflexi, Actinobacteriota and Planctomycetota. It was also found that salinity increased the abundance of *Caldilineaceae*, *Ferruginibacter* and *Kouleothrix* but restrained the abundance of *Candidatus\_Cometibacter*. All of them guaranteed the stable nitrogen and phosphorus removal of treatment system.

**Key words:** salinity; food industry wastewater; denitrification and phosphorus removal; extracellular polymeric substance; function microbial

[责任编辑: 王晓波]