

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.23.015

# 盐度对剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化的影响

桑康云<sup>1</sup>, 高 猛<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 2. 山西省住房和城乡建设厅,  
山西 太原 030013)

**摘 要:** 通过连续流和序批式厌氧消化试验探究盐度对剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化性能的影响机理。连续流厌氧消化试验表明,当反应器中盐度从5 g/L提高至30 g/L时,COD去除率由94.3%降至64.5%,总挥发性脂肪酸(TVFAs)累积量(以COD计)由23.4 mg/L增长至2 261 mg/L,CH<sub>4</sub>产量降低了86.8%,污泥絮体结构逐渐被破坏,表面粗糙程度不断增大,反应器性能不断下降。序批式厌氧消化试验表明,在剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化过程中,适量的盐度促进了增溶阶段可溶性蛋白质和多糖的释放,强化了水解阶段大分子有机物向氨基酸与单糖的转化过程,TVFAs浓度升高,促进了酸化阶段,但抑制了产甲烷菌的活性,CH<sub>4</sub>产量急剧下降。

**关键词:** 厌氧共消化; 盐度; 剩余污泥; 浓缩渗滤液

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)23-0107-07

## Impact of Salinity on Anaerobic Co-digestion of Excess Sludge and Concentrated Leachate

SANG Kang-yun<sup>1</sup>, GAO Meng<sup>2</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;  
2. Department of Housing and Urban-Rural Development of Shanxi Province, Taiyuan 030013,  
China)

**Abstract:** The impact of salinity on the anaerobic co-digestion of excess sludge and concentrated leachate was examined through continuous-flow and sequencing batch anaerobic digestion experiments. The continuous-flow anaerobic digestion test demonstrated that COD removal efficiency declined from 94.3% to 64.5% as the salinity in the reactor increased from 5 g/L to 30 g/L. Concurrently, the accumulation of total volatile fatty acids (TVFAs) expressed in COD rose significantly from 23.4 mg/L to 2 261 mg/L, while methane production experienced a substantial decrease of 86.8%. Additionally, the floc structure of the sludge was progressively disrupted, leading to an increase in surface roughness and a corresponding decline in reactor performance. The sequencing batch anaerobic digestion test demonstrated that an appropriate salinity facilitated the release of soluble proteins and polysaccharides during the solubilization phase, enhanced the conversion of macromolecular organic compounds into amino acids and monosaccharides in the hydrolysis phase, increased TVFAs concentrations, promoted the acidification, while simultaneously inhibiting methanogenic activity in the anaerobic co-digestion process involving excess sludge and concentrated leachate. Consequently, methane production experienced a

significant decline.

**Key words:** anaerobic co-digestion; salinity; excess sludge; concentrated leachate

剩余污泥的处理处置一直是我国现阶段亟待解决的问题<sup>[1-4]</sup>。厌氧消化作为一种行之有效的生物处理方法,在实现剩余污泥减量化的同时,还能产生 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ 等清洁能源<sup>[5-6]</sup>。然而,含砂量高、C/N低及营养元素不均衡往往使剩余污泥厌氧消化系统运行效率处于低水平<sup>[7-8]</sup>。而在剩余污泥中加入适量浓缩渗滤液后再进行厌氧共消化可以明显改善这一情况。Gao等<sup>[9]</sup>研究发现,采用剩余污泥和适量的焚烧渗滤液进行厌氧共消化时,水解率提高5.7%~17.1%,产酸率提高13%~45%。Güven等<sup>[10]</sup>的研究表明,浓缩渗滤液、固体废弃物及污泥厌氧共消化时的累积 $\text{CH}_4$ 产量较污泥单独进行厌氧消化时提高14%。汪雪等<sup>[11]</sup>提出,剩余污泥与渗滤液协同处理在降本增效的同时,也促进了废物处理向着综合性与集成性方向发展。

尽管剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化在有机物降解方面性能优越,但浓缩渗滤液作为高浓度有机废水,不仅含有高浓度的有机物、氨氮及腐殖质,还存在高浓度的无机盐离子(钠、钾、氯等一价离子和钙、镁、硫酸根等二价离子)。消化液中的污泥微生物因高盐度产生的渗透压而降低活性<sup>[12]</sup>,从而对厌氧消化过程产生负面影响<sup>[4,13]</sup>。因此,探究盐度对二者厌氧共消化性能的影响十分必要,可为今后剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化的实际应用提供一定的理论基础。

笔者采用连续搅拌反应器(CSTR)进行剩余污泥与浓缩渗滤液的厌氧共消化试验,分析不同盐度条件下消化液中COD、总挥发性脂肪酸(TVFAs)、 $\text{CH}_4$ 产量的变化规律及污泥微生物的微观形貌演化情况;并通过序批式厌氧消化试验,评估盐度对增溶、水解、酸化及产甲烷阶段的影响,探究盐度对厌氧共消化的影响机理,旨在为剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化的规模化推广应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用剩余污泥与接种污泥分别取自重庆市某污水处理厂的二沉池与厌氧消化罐。将剩余污泥取出并静置24 h后,去除上清液,过20目筛后

将其置于4℃的厌氧环境中储存备用;取出接种污泥后,在厌氧条件下自然沉降24 h并去除上清液,将其存储于(37±1)℃厌氧环境中备用。浓缩渗滤液取自重庆市某垃圾填埋场的浓缩液罐,试验之前将其储存于4℃的厌氧环境中。经检测,浓缩渗滤液中的主要无机盐离子含量如下: $\text{Na}^+$ 为13 295 mg/L、 $\text{K}^+$ 为6 588 mg/L、 $\text{Cl}^-$ 为14 915 mg/L。将浓缩渗滤液置于马福炉中,调节温度为550℃,烘干至恒质量,得到无机盐,用于调节反应器内的盐度。剩余污泥、接种污泥及浓缩渗滤液性质见表1。

表1 剩余污泥、接种污泥及浓缩渗滤液性质

Tab.1 Properties of excess sludge, inoculated sludge and concentrated leachate

项目	剩余污泥	接种污泥	浓缩渗滤液	混合液
pH	7.2±0.1	7.2±0.1	6.2±0.1	6.7±0.1
电导率/( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	0.9±0.1	1.0±0.1	65.8±0.4	12.3±0.1
盐度/%	0.03±0.01	0.04±0.01	4.83±0.08	0.78±0.03
挥发性固体VS/( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	16.7±0.8	20.8±0.2	48.6±2.4	19.4±0.4
TCOD/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	10 796±539	18 198±425	25 698±895	23 000±525
SCOD/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	486±24	1 991±112	22 853±769	4 922±246
可溶性蛋白质/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	12±0.6		4 310±216	626±28
可溶性多糖/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	17±0.8		511±25	221±4
注: 混合液由剩余污泥与浓缩渗滤液按2:1(以VS比计)组成。				

### 1.2 试验方法

试验I:本试验在有效容积为1.0 L的CSTR反应器中进行。试验开始前,向CSTR反应器中投加约60%(体积比)的接种污泥及混合液,并向其中添加10 mL微量元素,之后采用去离子水将反应器内溶液定容至1.0 L。试验材料添加完毕后,向反应器中持续充入10 min氮气,以排出反应器内氧气并维持厌氧环境。试验过程中,每天向反应器中添加1.3 g/( $\text{L}\cdot\text{d}$ )的混合液(以VS计),并通过添加无机盐来提升反应器中的盐度,根据反应器内盐度的不同将试验划分为6个阶段,每个阶段的盐度分别为5、

10、15、20、25、30 g/L。试验过程中,每隔 1 d 测定一次样品的基本指标(COD、TVFAs、CH<sub>4</sub>),每个阶段进入稳定期后,收集污泥样品进行场发射扫描电子显微镜(FESEM)分析。

试验Ⅱ:为进一步探究盐度对剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化过程中增溶、水解、酸化及产甲烷阶段的影响机理,进行 4 组序批式厌氧消化试验。序批式厌氧消化反应器在有效容积为 600 mL 的血清瓶中进行,试验编号分别为 HA、HB、HC 及 HD,方案设计见表 2。

表 2 试验Ⅱ方案设计  
Tab.2 Plan design of experiment Ⅱ

项目		盐度/ (g·L <sup>-1</sup> )	试验材料
增溶阶段	HA1	0	接种污泥 200 mL,混合液 400 mL,甲烷生成抑制剂(SBES)50 mmol/L
	HA2	5	
	HA3	15	
	HA4	30	
水解阶段	HB1	0	接种污泥 200 mL,合成废水 400 mL,SBES 50 mmol/L;合成废水由 5.1 g/L 的牛血清白蛋白和 1.6 g/L 的葡聚糖组成
	HB2	5	
	HB3	15	
	HB4	30	
酸化阶段	HC1	0	接种污泥 200 mL,合成废水 400 mL,SBES 50 mmol/L;合成废水由 5.1 g/L 的 L-丙氨酸和 1.6 g/L 的葡萄糖组成
	HC2	5	
	HC3	15	
	HC4	30	
产甲烷阶段	HD1	0	接种污泥 200 mL,合成废水 400 mL;合成废水由 1.5 g/L 的乙酸钠组成
	HD2	5	
	HD3	15	
	HD4	30	

按照表 2 添加完底物后,向反应器内连续充入 10 min 氮气,以保证厌氧环境,然后将其置于(37±1)℃的恒温水浴中,并以 150 r/min 的转速摇动反应器使底物均匀化。每个试验组均设置 4 种不同的盐度梯度,分别为 0、5、15、30 g/L。此外,考虑到浓缩渗滤液中提取的无机盐离子杂质较多,且前期试验表明,浓缩渗滤液中的无机盐离子以 Na<sup>+</sup>和 Cl<sup>-</sup>为主,因此采用 NaCl 调节反应器中的盐度。

1.3 检测项目及方法

厌氧消化系统中的盐度采用盐度计测定;COD 采用标准重铬酸钾法测定;VS 采用 550℃重量法测定;CH<sub>4</sub>及 TVFAs 浓度采用气相色谱仪测定;剩余污泥的微观结构通过场发射扫描电镜(FESEM)进行

表征;消化液中 EPS 含量采用温热法提取并测定;三维荧光光谱(3D-EEM)采用稳态荧光光谱仪进行分析;可溶性蛋白质与多糖分别以 Folin-酚试剂法和硫酸-蒽酮比色法进行测定;pH 采用雷磁 pH 计测定;电导率采用电导率仪测定。

2 结果与讨论

2.1 反应器运行性能

剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化系统中 TVFAs 浓度、CH<sub>4</sub>产量及 COD 去除率的变化如图 1 所示。在第Ⅰ、Ⅱ阶段,COD 去除率始终稳定在 90% 以上,说明厌氧消化系统对有机物的降解能力较强,反应器运行情况良好。当反应器中的盐度增加至 15 g/L 时,COD 去除率下降至(85.7±1.8)%,随着盐度的进一步升高,COD 去除率下降明显,当反应器盐度提升至 30 g/L 时,COD 去除率由(94.3±0.26)%降至(64.5±1.6)%,较第Ⅰ阶段降低了约 30%。可见,盐度增加使反应器性能下降,厌氧消化系统对有机物的降解能力受到抑制。当反应器中的盐度从 5 g/L 增加至 30 g/L 时,CH<sub>4</sub>产量从(130.3±0.4) mL 下降至(17.2±0.8) mL,降低了 86.8%,CH<sub>4</sub>产量的大幅下降直接证实了盐度增加对反应器性能的抑制作用,这与 Jin 等人的研究结果一致<sup>[14]</sup>。

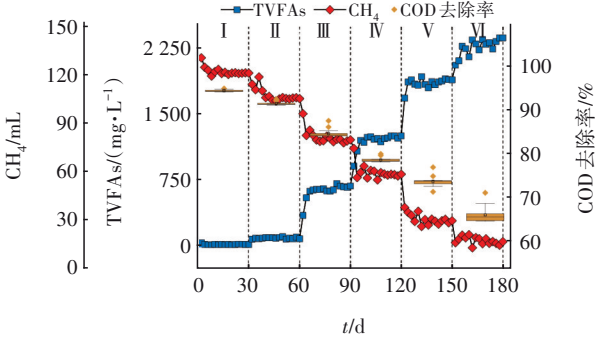


图 1 厌氧消化过程中 TVFAs 浓度、CH<sub>4</sub>产量及 COD 去除率的变化

Fig.1 Change in TVFAs concentration, methane production and COD removal efficiency during anaerobic digestion process

TVFAs 是厌氧消化过程的中间产物,对厌氧消化系统的稳定性与产甲烷菌的活性有重要影响<sup>[15]</sup>。从图 1 可以看出,当盐度小于 10 g/L 时,反应器中 TVFAs 浓度极低(<100 mg/L),说明厌氧消化产生的 TVFAs 几乎被完全降解,反应器性能较好;当盐度提升至 15 g/L 时,反应器中的 TVFAs 浓度开始增加,随着厌氧消化系统中的盐度不断提高,TVFAs 也逐



渐增大,当盐度增加到30 g/L时,厌氧消化系统中的TVFAs浓度接近2 300 mg/L,表明高盐度会导致厌氧消化系统中TVFAs不断累积,这可能与高盐度抑制产甲烷菌的活性有关<sup>[16]</sup>。连续流试验表明,当盐度小于10 g/L时,盐度对厌氧共消化体系的抑制作用较小,反应器能够良好运行。

## 2.2 盐度对污泥微生物理化性质的影响

胞外聚合物(EPS)是由微生物分泌并包裹在其外表面的高分子聚合物,对污泥絮体的稳定性具有重要作用。连续流试验结果显示,当盐度为5 g/L时,消化液中EPS浓度为 $(1\,297.7 \pm 35.9)$  mg/L,随着盐度的增加,消化液中EPS浓度逐渐升高;当盐度增加至30 g/L时,消化液中EPS浓度增至 $(5\,760.1 \pm 135.9)$  mg/L,增长了4 462.4 mg/L。这是由于高盐度导致微生物细胞内外渗透压差不断增大,从而产生更多的EPS来抵抗外部恶劣环境(高渗透压差)以保护微生物细胞。因此,反应器内的盐度越高,微生物则需要分泌更多的EPS来抵御外界环境对细胞的毒害作用,污泥絮体结构不断被破坏,厌氧消化系统的运行性能不断降低。

采用FESEM观察不同盐度条件下剩余污泥的表面形貌,结果如图2所示。

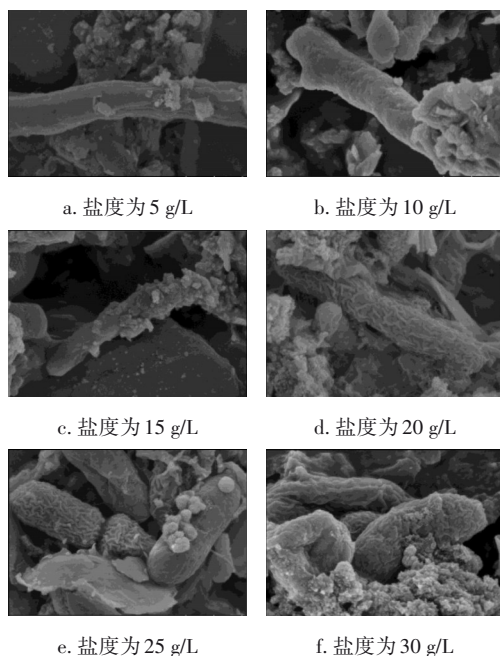


图2 不同盐度条件下剩余污泥的表面形貌

Fig.2 Apparent morphology of excess sludge under different salinity conditions

从图2可知,当反应器中的盐度为5 g/L时,污

泥表面形貌较光滑,结构相对完整,仅有少量的EPS附着于污泥絮体表面。随着厌氧消化系统内盐度的升高,微生物细胞内、外渗透压差逐渐增大,分泌的胞外聚合物逐渐增多并在污泥絮体表面逐渐累积,使得污泥表面形貌由光滑逐渐变得粗糙,污泥絮体结构损伤程度增大。当盐度为30 g/L时,污泥絮体被胞外聚合物紧密包裹,结构破坏严重,微生物活性大幅度降低,厌氧消化系统的性能和稳定性急剧下降。

## 2.3 盐度对厌氧共消化过程的影响机理分析

### 2.3.1 盐度对增溶阶段的影响

盐度对剩余污泥和浓缩渗滤液厌氧共消化过程增溶阶段的影响可以通过反应器中可溶性蛋白质和多糖的浓度变化进行评估。图3反映了在反应器中添加SBES,剩余污泥和浓缩渗滤液厌氧共消化4 d后消化罐中可溶性蛋白质和多糖浓度的变化。可知,对照组中(盐度为0)可溶性蛋白质和多糖的浓度分别为 $(570.8 \pm 20.3)$ 和 $(66.3 \pm 2.3)$  mg/L,随着盐度的增加,厌氧共消化体系中的可溶性蛋白质与多糖浓度逐渐增大。当盐度为30 g/L时,厌氧共消化体系中的可溶性蛋白质与多糖浓度分别为 $(1\,338.7 \pm 46.9)$ 和 $(103.1 \pm 3.6)$  mg/L。试验结果表明,盐度的提高在一定程度上加速了微生物絮体结构的破坏,使厌氧消化体系中可溶性蛋白质与多糖浓度明显增高,从而促进了厌氧共消化增溶阶段。

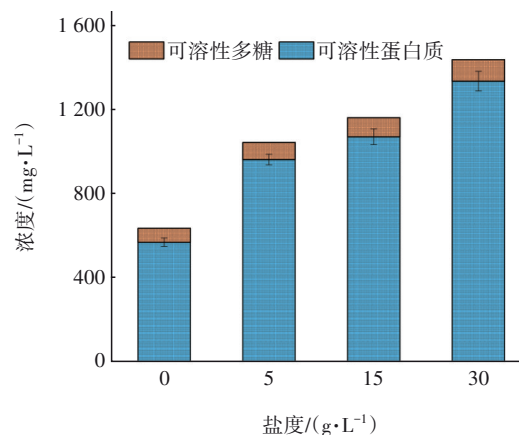


图3 增溶阶段可溶性蛋白质与多糖浓度的变化

Fig.3 Change in soluble proteins and polysaccharides concentration in solubilization phase

### 2.3.2 盐度对水解阶段的影响

水解阶段,大分子有机物(可溶性蛋白质与多糖)通过胞外酶被分解为小分子有机物(氨基酸与

单糖)。通过3D-EEM光谱表征消化液中可溶性有机物浓度的特征,结果如图4所示。在 $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为250~300/250~400 nm区间,为酪氨酸类蛋白区与色氨酸类蛋白区。随着联合厌氧消化体系中盐度的升高,荧光光谱强度呈现先减弱后增强的变化规律,HB3组反应器(盐度为15 g/L)中消化液的荧光光谱强度最弱,HB4组反应器(盐度为30 g/L)中的荧光光谱强度略强于HB3组。可见,低盐度条件下(盐度 $\leq 15$  g/L),盐度可以有效促进水解阶段;高盐度条件下,盐度对水解阶段具有抑制作用。相关研究表明<sup>[17]</sup>,蛋白酶与 $\alpha$ -淀粉酶在水解阶段具有重要作用,盐度的升高(<20 g/L时)有利于提高蛋白酶和 $\alpha$ -淀粉酶的活性,但是高盐度( $\geq 20$  g/L)时,胞外酶的活性呈现下降趋势,从而降低水解效率,这与本次研究结果相吻合。

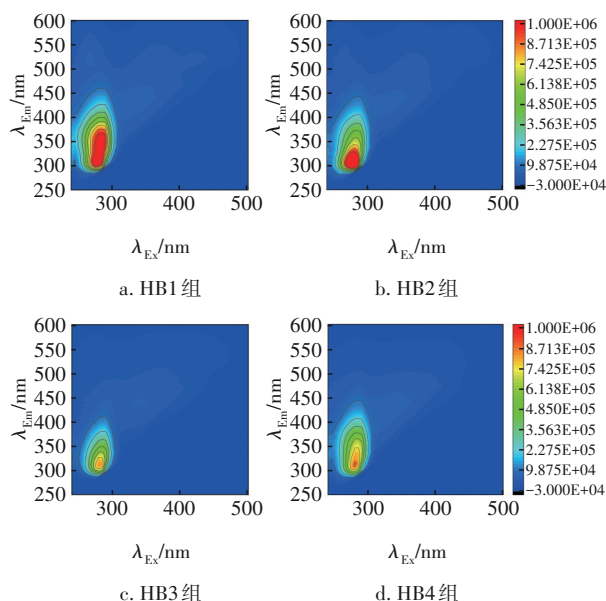


图4 HB组反应8 d后的三维荧光光谱

Fig.4 Three-dimensional fluorescence spectrum of HB group after 8 days

### 2.3.3 盐度对酸化阶段的影响

不同盐度条件下,以L-丙氨酸和葡萄糖作为底物时,厌氧共消化第1天和第8天反应器中TVFAs的浓度变化如图5所示。可以看出,HC1组(盐度为0)反应1 d后消化液中的TVFAs为351.6 mg/L,反应8 d后,TVFAs达到4 431.7 mg/L,增长了4 080.1 mg/L;当盐度为30 g/L(HC4组)时,反应1 d后消化液中的TVFAs为718.4 mg/L,反应8 d后,TVFAs达到6 256.5 mg/L,增长了5 538.1 mg/L。相较于HC1

组,随着盐度的升高,消化液内累积的TVFAs浓度与TVFAs增长量明显增加,表明盐度对厌氧共消化的酸化阶段具有促进作用。此外,添加SBES导致酸化阶段生成的VFAs无法转化为 $\text{CH}_4$ ,从而造成消化液中TVFAs的不断累积。通过TVFAs成分分析发现,其主要成分为乙酸(总含量的70%以上)和丙酸,还包括少量的丁酸、异戊酸等短链脂肪酸,最终在酸化菌的作用下,丙酸和丁酸逐渐转化为乙酸,为后续产甲烷菌提供充足的营养基质。

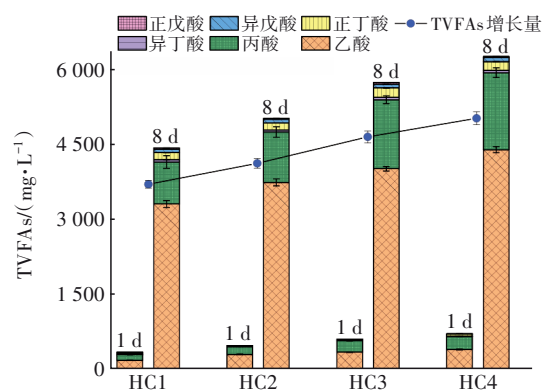


图5 HC组TVFAs浓度的变化

Fig.5 Change in TVFAs concentration in HC group

### 2.3.4 盐度对产甲烷阶段的影响

采用乙酸钠配制合成废水以探究盐度对厌氧共消化过程中产甲烷阶段的影响,结果如图6所示。

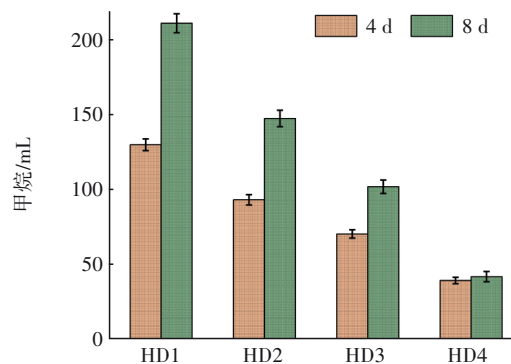


图6 HD组 $\text{CH}_4$ 产量的变化

Fig.6 Change in methane production in HD group

从图6可以看出,HD1组反应4 d后的 $\text{CH}_4$ 产量为130.5 mL,反应8 d后达到211.7 mL。随着盐度的增加,厌氧共消化过程的 $\text{CH}_4$ 产量逐渐降低。当盐度为30 g/L时,厌氧共消化系统中反应4 d后的 $\text{CH}_4$ 产量为39.8 mL,相比HD1组下降了69.5%,反应8 d后 $\text{CH}_4$ 产量为42.4 mL,相比于HD1组下降了80%。可见,盐度的升高对产甲烷阶段有较强的抑制作用,这是因为高盐度能够显著降低产甲烷菌的

活性。已有研究表明<sup>[18]</sup>,当厌氧消化体系中的NaCl浓度增加至10 g/L时,产甲烷菌的活性降低50%。

### 2.3.5 潜在机理分析

基于以上分析,总结盐度对剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化的影响机理,结果如图7所示。

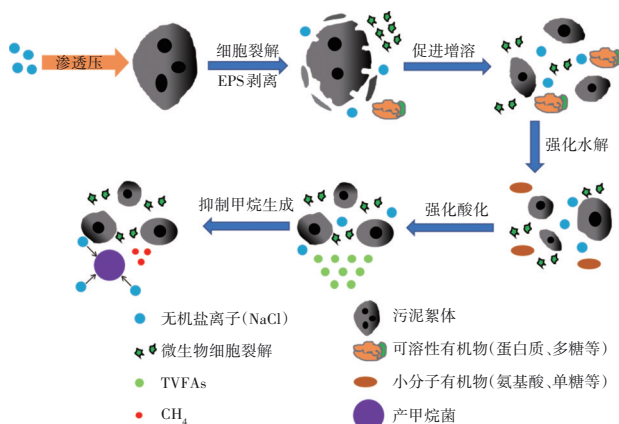


图7 盐度对剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化的影响机理

Fig.7 Influence mechanism of salinity on anaerobic co-digestion of excess sludge and concentrated leachate

适量的无机盐离子浓度促进了厌氧共消化过程的增溶、水解及酸化阶段,而对产甲烷阶段有明显的抑制作用。无机盐离子加入厌氧共消化系统后,使污泥絮体结构稳定性失衡,盐度的进一步升高导致污泥絮体的结构稳定性逐渐失衡,污泥絮体结构被进一步破坏。盐度升高使污泥微生物细胞和外界环境之间形成的渗透压差逐渐增大,耐盐微生物会分泌EPS来抵御外界环境的变化,与此同时,不耐盐微生物细胞外渗透压不断升高,导致细胞脱水,甚至死亡,从而致使细胞中的可溶性蛋白质和多糖等大分子有机物溶解于消化液中,反应器中的蛋白质和多糖浓度增加。水解阶段,大分子有机物(可溶性蛋白质和多糖)在胞外酶(蛋白酶与 $\alpha$ -淀粉酶)的作用下,形成小分子氨基酸与单糖,为酸化阶段提供充足的物质基础。在酸化菌的作用下,实现小分子有机物向短链脂肪酸的转化(主要转化为乙酸)。同时,盐度的升高(0~20 g/L)可以明显提高消化液中胞外酶与酸化菌的活性,从而强化了水解与酸化阶段。在产甲烷菌的作用下,酸化阶段的产物(以乙酸、丙酸等短链脂肪酸为主)转化为CH<sub>4</sub>,而产甲烷菌对生存环境要求极为严苛,由于盐度升高导致的微生物细胞内、外渗透压差逐渐增大,使产甲

烷菌的活性受到抑制,最终使CH<sub>4</sub>产量下降。

### 3 结论

① 当盐度低于10 g/L时,反应器中COD去除率维持在90%以上,TVFAs浓度较低,有机物几乎完全降解。当盐度逐渐升高至30 g/L时,COD去除率降至65%左右,TVFAs不断累积,甲烷产量急剧下降,反应器性能较差。在实际工程中进行剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化时,可将混合液盐度提高至10 g/L,此时厌氧消化效率较高,也能够给实际工程带来一定的经济和环境效益。

② 盐度的升高使微生物细胞内、外的渗透压差不断增大,污泥微生物通过分泌EPS以抵御外界环境变化,污泥表面由光滑变得粗糙,微生物活性大幅降低,厌氧消化系统的性能不断下降。

③ 在剩余污泥与浓缩渗滤液厌氧共消化过程中,适量的盐度促进了增溶阶段可溶性蛋白质和多糖的释放,强化了水解阶段大分子有机物向氨基酸与单糖的转化,促进酸化阶段TVFAs的合成,但显著抑制了产甲烷阶段产甲烷菌的活性,导致CH<sub>4</sub>产量下降。

### 参考文献:

- [1] FENG Y H, ZHANG Y B, CHEN S, *et al.* Enhanced production of methane from waste activated sludge by the combination of high-solid anaerobic digestion and microbial electrolysis cell with iron-graphite electrode [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 259: 787-794.
  - [2] SUN R, ZHOU A J, JIA J N, *et al.* Characterization of methane production and microbial community shifts during waste activated sludge degradation in microbial electrolysis cells [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 175: 68-74.
  - [3] XU Y, GONG H, DAI X H. High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: achievements and perspectives [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, 15(4): 1-18.
  - [4] 肖雨, 徐辉, 刘方剑, 等. 剩余污泥厌氧消化抑制产甲烷代谢研究进展 [J]. *应用化工*, 2024, 53(2): 443-446.
- XIAO Yu, XU Hui, LIU Fangjian, *et al.* Recent advances in inhibition of methanogenesis for anaerobic digestion of waste-activated sludge [J]. *Applied*



- Chemical Industry, 2024, 53 (2): 443-446 (in Chinese).
- [5] 杨杨阳, 朱震霆, 杨翠萍, 等. 基于文献计量学分析的剩余污泥厌氧消化预处理研究进展[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(2): 16-29.
- YANG Yangyang, ZHU Zhenting, YANG Cuiping, *et al.* Research progress of anaerobic digestion pretreatment of excess activated sludge based on bibliometric analysis [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2024, 42 (2): 16-29(in Chinese).
- [6] 龙於洋, 肖立群, 沈东升, 等. 基于文献计量学的剩余污泥高值化利用研究趋势分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(2): 233-238.
- LONG Yuyang, XIAO Liqun, SHEN Dongsheng, *et al.* Future research trends of high-value utilization of excess sludge based on bibliometrics [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45 (2): 233-238 (in Chinese).
- [7] 张星星, 焦彭博, 杨汇莹, 等. 剩余污泥与餐厨垃圾协同厌氧消化研究进展[J]. 中国环境科学, 2022, 42 (5): 2179-2194.
- ZHANG Xingxing, JIAO Pengbo, YANG Huiying, *et al.* Recent advances in anaerobic co-digestion of excess sludge and food waste [J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2179-2194(in Chinese).
- [8] 刘京, 刘頔, 韩丽, 等. 北方地区污泥厌氧消化工艺应用现状分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(22): 46-49.
- LIU Jing, LIU Di, HAN Li, *et al.* Application status analysis of anaerobic sludge digestion process in northern China[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(22): 46-49(in Chinese).
- [9] GAO M, YANG J H, LI S Q, *et al.* Effects of incineration leachate on anaerobic digestion of excess sludge and the related mechanisms [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 311: 114831.
- [10] GUVEN H, AKCA M S, IREN E, *et al.* Co-digestion performance of organic fraction of municipal solid waste with leachate: preliminary studies[J]. Waste Management, 2018, 71: 775-784.
- [11] 汪雪, 黄川, 曾韵敏, 等. 零价铁强化城市污泥与垃圾焚烧厂渗滤液协同厌氧消化[J]. 环境工程学报, 2020, 14(7): 1924-1933.
- WANG Xue, HUANG Chuan, ZENG Yunmin, *et al.* Enhancement for anaerobic co-digestion of municipal sludge and leachate from waste incineration plant with zero valent iron [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(7): 1924-1933(in Chinese).
- [12] SARKAR O, KATARI J K, CHATTERJEE S, *et al.* Salinity induced acidogenic fermentation of food waste regulates biohydrogen production and volatile fatty acids profile[J]. Fuel, 2020, 276: 117794.
- [13] GUAN Q Y, QU Y H, ZHAI Y J, *et al.* Enhancement of methane production in anaerobic digestion of high salinity organic wastewater: the synergistic effect of nano-magnetite and potassium ions [J]. Chemosphere, 2023, 318: 137974.
- [14] JIN B D, WANG S Y, XING L Q, *et al.* The effect of salinity on waste activated sludge alkaline fermentation and kinetic analysis [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 43: 80-90.
- [15] LIN L, WAN C L, LIU X, *et al.* Anaerobic digestion of swine manure under natural zeolite addition: VFA evolution, cation variation, and related microbial diversity [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(24): 10575-10583.
- [16] 高猛. 剩余污泥与垃圾渗滤液厌氧共消化性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- GAO Meng. Study on Anaerobic Co-digestion Performance of Waste Activated Sludge and Landfill Leachate [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022 (in Chinese).
- [17] LIU N, WANG Q, JIANG J G, *et al.* Effects of salt and oil concentrations on volatile fatty acid generation in food waste fermentation [J]. Renewable Energy, 2017, 113: 1523-1528.
- [18] ZHAO J W, LIU Y W, WANG D B, *et al.* Potential impact of salinity on methane production from food waste anaerobic digestion [J]. Waste Management, 2017, 67: 308-314.

作者简介: 桑康云(1997- ), 男, 安徽宿州人, 博士研究生, 主要研究方向为环境岩土与污染场地修复技术。

E-mail: sangkangyun2020@163.com

收稿日期: 2024-03-23

修回日期: 2024-06-06

(编辑: 任莹莹)