

古创, 吴志跃, 乔玮, 等. AnMBR 工艺对高钙垃圾渗滤液处理中的污泥特性分析[J]. 净水技术, 2026, 45(1): 126–132, 149.

GU C, WU Z Y, QIAO W, et al. Analysis of sludge characteristics of AnMBR process for high-calcium landfill leachate treatment[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(1): 126–132, 149.

## AnMBR 工艺对高钙垃圾渗滤液处理中的污泥特性分析

古创<sup>1</sup>, 吴志跃<sup>2,3,\*</sup>, 乔玮<sup>3</sup>, 肖诚斌<sup>1</sup>, 张海波<sup>1</sup>, 王庆云<sup>1</sup>

(1. 光大环境科技<中国>有限公司, 江苏南京 211100; 2. 北京农学院智能科学与工程学院, 北京 102206; 3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要** 【目的】 文章为探究高钙垃圾渗滤液在厌氧膜生物反应器 (AnMBR) 处理中的污泥钙化特性、微生物群落响应及工艺效能, 为高钙废水高效处理提供理论依据。【方法】 采用连续流 AnMBR 系统 [20 L, (37±1) °C, 水力停留时间 (HRT) 为 10 d] 处理高钙渗滤液 [Ca<sup>2+</sup> 质量浓度为 (2 150±360) mg/L], 运行 61 d。监测化学需氧量 (COD) 去除率、产气性能及钙平衡; 结合激光粒度分析、X 射线衍射 (XRD)、电子显微镜扫描 (SEM) 表征污泥钙化特性; 利用高通量测序 (细菌引物为 338F-806R, 古菌引物为 524F-958R) 解析微生物群落结构。【结果】 系统 COD 去除率稳定达 90%, 容积产气率为 1.8~2.2 L/(L·d)。Ca<sup>2+</sup> 通过 CaCO<sub>3</sub> 沉淀高效截留 (截留率为 95.1%), 导致污泥无机物累积 [总固体 (TS) 质量浓度由 28.9 g/L 升至 57.0 g/L]。污泥钙化表现为混合液粒径减小 (<10 μm 颗粒占比增加), 而膜表面形成大粒径碳酸钙 (CaCO<sub>3</sub>) 沉积 (40~300 μm)。微生物群落中, 产甲烷菌以甲烷八叠球菌 (*Methanosarcina*) 为主导 (丰度 > 57.8%), 钙累积显著提升氢营养型甲烷球菌 (*Methanoculleus*) 丰度 (由 4.0% 升高到 24.9%), 强化氢营养产甲烷路径。水解菌属中的沉积物杆菌 (*Sedimentibacter*) 丰度稳定, 保障系统稳定性。【结论】 AnMBR 在高钙环境下通过钙高效截留 (95.1%) 与微生物群落适应性演替 (富集 *Methanoculleus* 至 24.9%, 强化氢营养路径), 维持了 90% COD 去除率及稳定产甲烷性能。该工艺对高钙渗滤液处理具有显著优势, 但需关注长期钙累积引发的膜污染问题。

**关键词** 厌氧膜生物反应器 (AnMBR) 钙累积 垃圾渗滤液 污泥特性 污泥钙化

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)01-0126-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.01.015

## Analysis of Sludge Characteristics of AnMBR Process for High-Calcium Landfill Leachate Treatment

GU Chuang<sup>1</sup>, WU Zhiyue<sup>2,3,\*</sup>, QIAO Wei<sup>3</sup>, XIAO Chengbin<sup>1</sup>, ZHANG Haibo<sup>1</sup>, WANG Qingyun<sup>1</sup>

(1. Everbright Environmental Protection <China> Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. College of Intelligent Science and Engineering, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China;

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** [Objective] This paper aims to elucidate sludge calcification characteristics, microbial community succession, and process performance in treating high-calcium landfill leachate using an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR), providing theoretical support for high-calcium wastewater treatment. [Methods] A continuous-flow AnMBR [20 L, (37±1) °C, hydraulic retention time (HRT) was 10 d] treated high-calcium leachate [mass concentration of Ca<sup>2+</sup> was (2 150±360) mg/L] for 61 days. Key indices [chemical oxygen demand (COD) removal, biogas production, calcium balance] were monitored. Sludge calcification was characterized by laser particle analysis, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). Microbial communities were analyzed via high-throughput sequencing (bacteria primer was 338F-806R; archaea primer was 524F-958R). [Results] The system achieved stable COD removal (~90%) and volumetric biogas production [1.8–2.2 L/(L·d)]. Calcium was efficiently retained (95.1%) as CaCO<sub>3</sub> precipitates, increasing inorganic solids [mass concentration of total solid (TS) increased from 28.9 g/L

[收稿日期] 2025-05-30

[作者简介] 古创 (1981—), 男, 主要从事垃圾渗滤液及有机固废处理等工作, E-mail: guch@cebenvironment.com.cn。

[通信作者] 吴志跃 (1990—), 男, 实验师, 主要从事有机废水厌氧生物处理等工作, E-mail: wuzhiyue@bua.edu.cn。

to 57.0 g/L]. Sludge calcification reduced mixed liquor particle size ( $<10\ \mu\text{m}$  fraction increased) while large  $\text{CaCO}_3$  deposits (40–300  $\mu\text{m}$ ) formed on membranes. Microbial analysis revealed dominance of *Methanosarcina* (abundance  $>57.8\%$ ), with calcium accumulation significantly enriching hydrogenotrophic *Methanoculleus* (increased from 4.0% to 24.9%), enhancing hydrogenotrophic methanogenesis. Hydrolytic bacteria (e. g., *Sedimentibacter*) maintained stable abundance, supporting system resilience. [ **Conclusion** ] AnMBR ensures efficient high-calcium leachate treatment via high calcium retention (95.1%) and microbial adaptation (enrichment of *Methanoculleus* to 24.9%, reinforcing hydrogenotrophic pathway), sustaining 90% COD removal and stable methanogenesis. This highlights AnMBR's advantage for high-calcium wastewater, though long-term calcium accumulation requires membrane fouling control.

**Keywords** anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) calcium accumulation landfill leachate sludge characteristic sludge calcification

根据《中国统计年鉴—2022》数据<sup>[1]</sup>,2021 年我国城市生活垃圾清运量高达 2.49 亿 t,且呈现逐年增长趋势,预计到 2030 年将逼近 3.5 亿 t。垃圾储存和处理环节会产生大量新鲜渗滤液,其产生量通常为  $0.05\sim0.28\ \text{m}^3/(\text{t}\ \text{生活垃圾})$ 。渗滤液蕴含着丰富的甲烷资源,理论上的甲烷回收潜力超过 1 亿  $\text{m}^3$ 。高效处理新鲜垃圾渗滤液并实现资源回收利用,对于环境保护和可持续发展而言,具有极为重要的战略意义。

厌氧膜生物反应器 (AnMBR) 作为厌氧生物处理技术与膜分离技术深度耦合的创新系统,凭借其高效的微生物截留性能及优异的污染物去除效率,在高浓度有机废水处理领域彰显出独特的技术优势。研究数据显示:垃圾渗滤液中钙离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ ) 质量浓度通常为  $1\ 800\sim1\ 000\ \text{mg/L}$ 。作为微生物生长代谢的必需营养元素, $\text{Ca}^{2+}$  的过量积累却会对厌氧处理系统产生复杂的负面影响。在 AnMBR 处理垃圾渗滤液的工艺过程中, $\text{Ca}^{2+}$  浓度的动态变化对系统运行效能及微生物群落结构存在潜在调控作用,该作用机制与系统长期运行稳定性及污染物去除效率密切相关。

从生化反应机理来看, $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{CO}_3^{2-}$  结合形成碳酸钙 ( $\text{CaCO}_3$ ) 沉淀的过程会引发污泥钙化现象,具体表现为挥发性悬浮固体 (VSS) 含量降低、胞外聚合物 (EPS) 结构受损以及产甲烷菌活性受到抑制<sup>[2-3]</sup>。当  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度升至  $5\ 000\ \text{mg/L}$  时,化学需氧量 (COD) 去除率趋于稳定甚至出现显著下滑<sup>[4]</sup>;而当进水质量浓度达到  $7\ 000\ \text{mg/L}$  时,古菌群落的生存环境将面临严重胁迫,多数古菌难以维持正常代谢活动<sup>[3]</sup>。已有研究成果<sup>[5]</sup>表明: $1.0\ \text{g/L}$  的  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度会通过抑制微生物酶活性、改变颗

粒污泥粒径分布等方式,对产甲烷性能产生显著的负面效应。

AnMBR 系统通过膜截留作用维持的高浓度微生物量能够有效提升污染物降解效率,并增强系统的抗酸化能力,但目前关于高  $\text{Ca}^{2+}$  浓度环境下 AnMBR 厌氧处理特性的研究较少。特别是在连续运行工况下, $\text{Ca}^{2+}$  长期输入对系统厌氧代谢途径、微生物群落演替以及膜-生物交互作用的影响机制尚未形成系统性认识。鉴于此,本研究通过构建  $\text{Ca}^{2+}$  浓度梯度的连续流试验装置,重点探究长期运行过程中  $\text{Ca}^{2+}$  负荷对 AnMBR 污染物去除效能、产甲烷动力学特性及微生物群落结构的影响规律,旨在为高钙废水处理工艺的优化设计与稳定运行提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 系统搭建

如图 1 所示,AnMBR 装置采用圆柱形反应器构型,其有效容积为 20 L。为维持中温  $[(37\pm1)\ ^\circ\text{C}]$

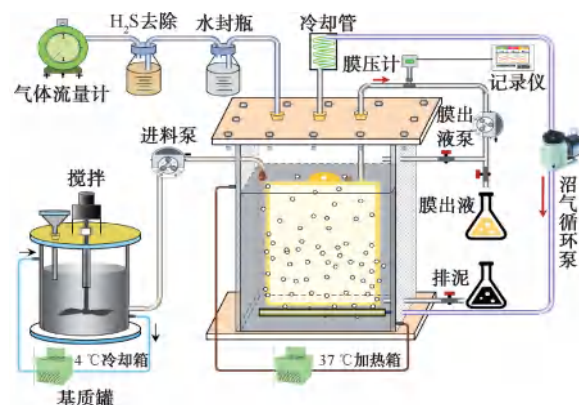


图 1 AnMBR 示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of AnMBR

操作条件,反应器外部集成水浴夹层结构。进料系统配备 20 L 连续搅拌罐式基质存储器,内置机械搅拌装置实现进水基质的均一化处理;该储存器外侧同样配置水浴夹层,并与低温循环水槽相连,将储存温度严格控制在 4 ℃,从而有效抑制底物降解反应。此外,反应器本体及水浴循环管路均包覆隔热保温材料,以降低运行过程中的热量损耗。

厌氧膜组件选用氯化聚乙烯(CPE)平板膜,其有效过滤面积为 0.116 m<sup>2</sup>,平均孔径达 0.2 μm,平均过滤通量设定为 5 L/(m<sup>2</sup>·h)。为减缓膜污染进程,膜片运行模式采用“4 min 运行/1 min 停止”的间歇式操作策略。设计水力停留时间(HRT)为 10 d,设计水力停留时间(HRT)为 10 d。整个装置的温度控制、搅拌速率调节及膜过滤周期切换均由可编程逻辑控制器(PLC)实施自动化控制,从而确保运行参数的高度稳定性与试验结果的可重复性。

## 1.2 渗滤液与接种污泥特性

试验所用垃圾渗滤液采集自某城市生活垃圾中转运渗滤液收集池。经测定,该水样呈弱酸性(平均 pH 值为 5.54),富含高浓度有机污染物(平均 COD 质量浓度为 52.7 g/L),且具有显著钙负荷特征[Ca<sup>2+</sup>质量浓度为(2 150±360) mg/L]。接种污泥来自城市污水处理厂中温厌氧消化罐排泥,经沉淀浓缩去除上清液后,于(37±1) ℃恒温条件下静置培养 2 d,以消耗污泥内残留底物并降低背景污染物干扰。使用前,采用经高纯氮气曝气除氧的蒸馏水对浓缩污泥进行稀释调配,将总固体(TS)质量浓度调节至约为 15 g/L,确保接种污泥的理化性质符合反应器启动标准。

## 1.3 分析方法

COD、TS 测定采用之前的方法<sup>[6]</sup>。采用激光粒度分析仪(Mastersizer 3000,英国)测定混合液及上清液的粒径分布特征(PSD)。测定时采用湿法测量。通过三维荧光分光光度计(Aqualog, Horiba, Japan)测定三维荧光光谱(3D-EEM)表征 EPS 组成。通过扫描电子显微镜(SEM)(SU3500,日本日立)观察膜表面形态。采用 X 射线衍射(XRD)分析(XD3,北京通用分析仪器有限公司,中国)表征无机矿物的成分和晶型。采用火焰法原子吸收分光光度法(900 T,PerkinElmer,美国)测定样品中的离子吸光度。不同运行阶段下样品微生物群落结构采用高

通量测序获得(上海美吉),细菌引物为 338F-806R,古菌引物为 524F-958R。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AnMBR 连续运行结果

如图 2 所示,对 AnMBR 开展为期 61 d 的连续动态监测分析。数据表明:系统 COD 去除率呈现典型的“启动-提升-稳定”三阶段演化特征:运行初期(0~10 d)去除率为 42%,随着微生物群落的适应性驯化,至第 26 d 提升至 91%,并在此后稳定维持在 90%±2%的高效水平,彰显出该系统对高浓度有机污染物的较好的降解能力。

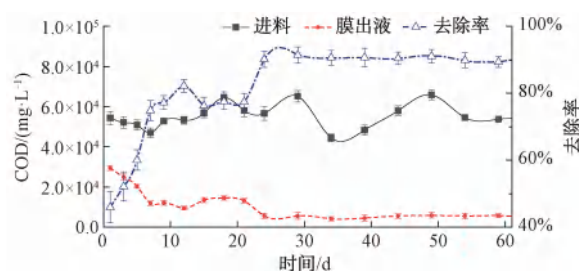


图 2 COD 浓度及去除率变化

Fig. 2 Changes of COD Concentration and Removal Rates

容积产气率(图 3)变化趋势与 COD 去除率呈现显著的同步性,启动阶段逐步攀升至 2.2 L/(L·d)的峰值,自第 26 d 起呈现轻微衰减趋势,最终稳定于 1.8~2.0 L/(L·d)。值得关注的是,反应器内混合液 TS 质量浓度由初始 28.9 g/L 持续增长至 57.0 g/L(图 4),结合挥发性固体(VS)/TS 值的变化规律,可明确推断运行过程中无机物质积累速率显著高于有机组分。尽管系统内无机物浓度呈现快速累积态势,AnMBR 仍维持了稳定的污染物去除效能,产甲烷过程未出现显著抑制现象,据报道<sup>[7]</sup>:在使用传统厌氧反应器处理合成高钙废水(钙质量浓度为 2 000 mg/L)时,导致了生物有效性迅速恶化,

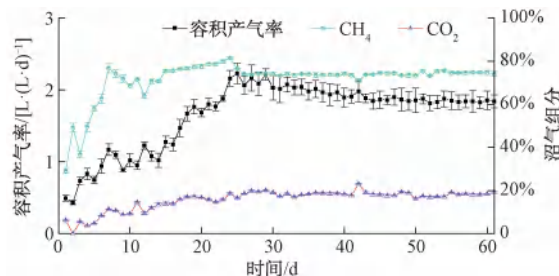


图 3 容积产气率、沼气甲烷和 CO<sub>2</sub> 浓度变化

Fig. 3 Changes of Volumetric Biogas Production Rates, Biogas Methane and CO<sub>2</sub> Concentrations



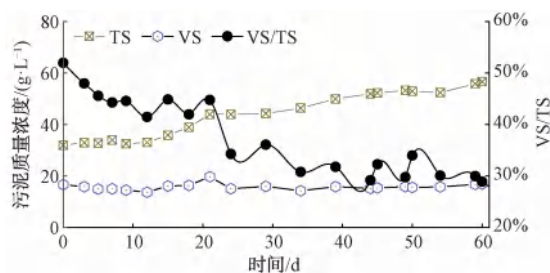


图4 混合污泥 TS、VS 及 VS/TS 随时间变化

Fig. 4 Variations of TS, VS, and VS/TS in Mixed Sludge with Time

COD 平均去除率从 98.00% 下降至 41.29%, 也充分验证了 AnMBR 工艺在高钙负荷条件下的稳定性。

## 2.2 无机物对厌氧污泥特征影响及其特性分析

研究<sup>[8]</sup>显示:无机物在反应器内累积会影响污泥粒径,如形成颗粒污泥来影响污泥的消化能力。试验测试了第 1 d 和第 55 d 的混合污泥粒径分布变化特征,如图 5 所示,混合污泥中 95% 的粒径集中在 1~100  $\mu\text{m}$ ,污泥中粒径<1  $\mu\text{m}$  的颗粒体积从启动阶段的 0.38% 增加到稳定阶段的 1.37%,10  $\mu\text{m}$  以上粒径的体积占比有所下降,10  $\mu\text{m}$  以下的占比有所增加。但膜表面因低剪切力形成大粒径沉淀(40~300  $\mu\text{m}$ )(图 6),与主体污泥(1~100  $\mu\text{m}$ )分布差异显著。

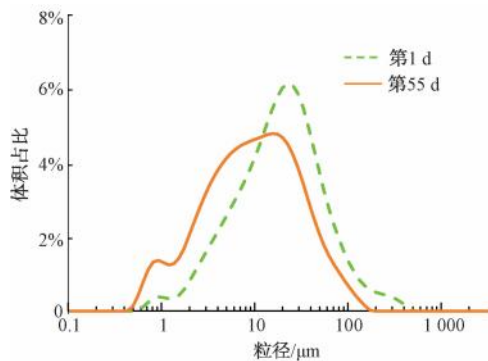
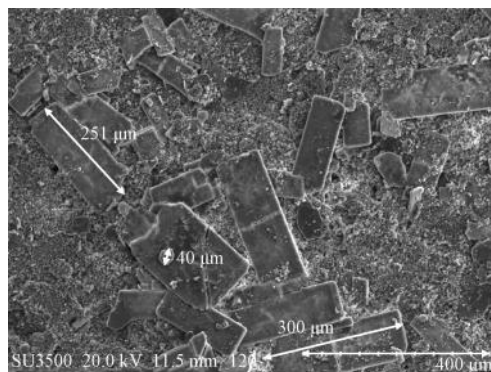


图5 混合污泥粒径分布

Fig. 5 Particle Size Distribution of Mixed Sludge

结合系统运行特征,上述现象原因:AnMBR 内持续的沼气循环扰动导致颗粒间摩擦作用增强,抑制了大粒径颗粒的聚集生长,使得主体混合液中细粒径(<10  $\mu\text{m}$ )污泥占比上升;而膜表面由于剪切力较弱且存在无机物(如  $\text{CaCO}_3$ )的选择性沉积,形成了独立于主体污泥的较大粒径颗粒。值得注意的是,这种粒径分布的变化并未导致产甲烷性能下降,推测可能是由于细粒径污泥的比表面积增大,强化了微生物与底物的接触效率,从而抵消了无机物累积可能带来的负面效应。该机制表明:AnMBR 的膜



注:图标尺寸为 400  $\mu\text{m}$ 。

图6 膜表面污泥 SEM 特征

Fig. 6 SEM Characteristics of Sludge on Membrane Surface

截留作用与气液搅拌条件共同影响着污泥颗粒的动态分布,为系统在高无机负荷下的稳定运行提供了新的微观作用视角。

通过测试不同运行时间污泥样品的 XRD 分析(图 7),无机物的累积是  $\text{CaCO}_3$  的形成所导致的,其特征峰分别位于 23.04°、29.40°、36°、39.40°、43.16°、47.48°、48.5°、56.3°、57.2°。此前的研究<sup>[4]</sup>中, $\text{CaCO}_3$  沉淀的形成也被报道过。与第 23、49、61 d XRD 峰强度对应的  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度分别达到了 4.8、8.7、10.4 g/L(图 8);此外, $\text{Ca}^{2+}$  平衡图如图 9 所示,平均  $\text{Ca}^{2+}$  输入质量浓度为 2 150 mg/L,每天输入 AnMBR 中的  $\text{Ca}^{2+}$  质量浓度为 4.3 g/d,有 4.09 g/L 的  $\text{Ca}^{2+}$  以  $\text{CaCO}_3$  沉淀的形式被截留在反应器内,膜出液中的  $\text{Ca}^{2+}$  平均质量浓度为 105 mg/L,去除率达到 95.1%。

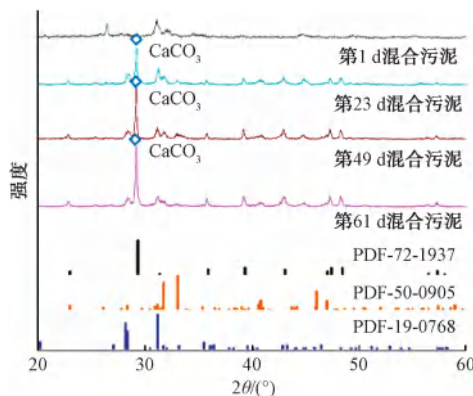


图7 混合污泥 XRD 分析

Fig. 7 XRD Analysis of Mixed Sludge

## 2.3 产甲烷微生物结构分析

图 10 展示了不同固体浓度环境下的 16 S rRNA

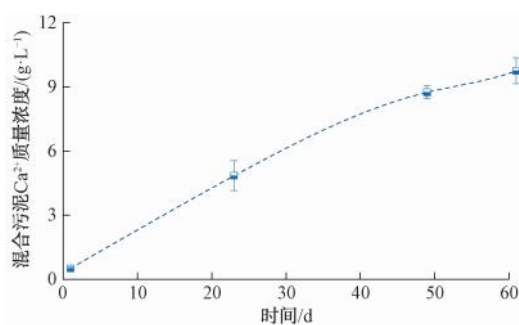


图 8  $\text{Ca}^{2+}$  浓度变化

Fig. 8 Changes of  $\text{Ca}^{2+}$  Concentration

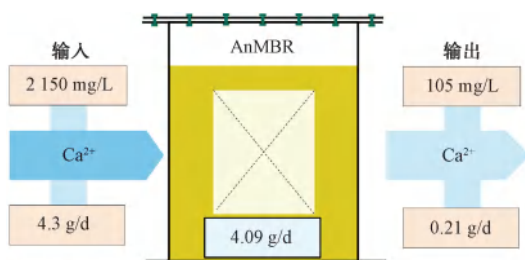


图 9  $\text{Ca}^{2+}$  平衡

Fig. 9 Balance of  $\text{Ca}^{2+}$

基因测序结果。从细菌属水平进行了测序分析。发现以碳水化合物为底物的水解酸化菌在垃圾渗滤液处理中发挥主要作用,可能是由于其主要成分为碳水化合物。沉积物杆菌(*Sedimentibacter*)作为一种产酸发酵菌,是垃圾渗滤液处理过程中重要的菌属,在不同固体浓度环境下,其丰度变化不大。研究<sup>[9]</sup>显示: $\text{Ca}^{2+}$ 是影响其作用的关键,在垃圾填埋场渗滤液中发现*Sedimentibacter*菌属,且 $\text{Ca}^{2+}$ 的添加会促进其丰度的增加<sup>[10]</sup>,其很好地保障了高钙的新鲜垃圾渗滤液产甲烷性能。据报道<sup>[11]</sup>:*Sedimentibacter*和互营单胞菌(*Syntrophomonas*)均积极参与乙酰乙酸生成和电子向产甲烷菌的转移,从而增加生物甲烷的产量。*Syntrophomonas*作为一种互营菌,底物为蛋白质,其丰度变化不大,在5%左右;反应器内还发现另一种蒂氏菌(*Tissierella*),但其丰度较低,不足1%。球线菌(*Sphaerochaeta*)广泛分布于渗滤液中,通常与纤维素物质的分解有关,通过发酵复杂或有机化合物,可以产生挥发性脂肪酸(VFAs)、乙醇、氢气和 $\text{CO}_2$ <sup>[9]</sup>,其丰度为2%~3%。

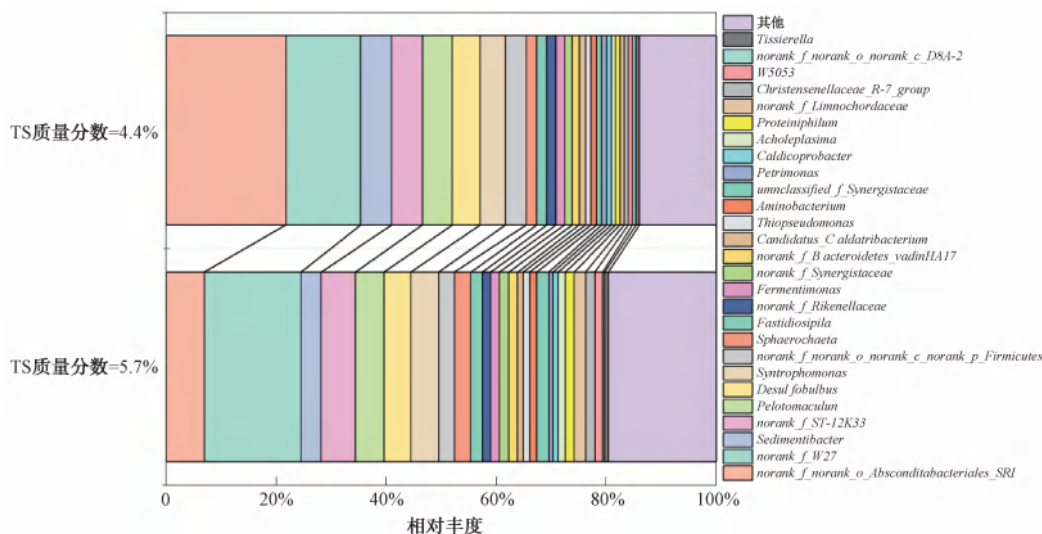


图 10 不同固体浓度环境下基因测序结果

Fig. 10 Genetic Sequencing Results under Different Solid Concentration Conditions

图 11 为不同固体浓度下的古菌群落在属水平上的分类学结果,由图 11 可知,2 个 TS 质量分数条件下的最主要的有以下 4 组:产甲烷八叠球菌(*Methanosarcina*)、产甲烷杆菌属(*Methanobacterium*)、产甲烷囊菌属(*Methanoculleus*)以及产甲烷嗜甲基菌属(*Methanomethylovarans*)。在组成上不同条件下的古菌表现出相似性。且在这 2 个条件下,

*Methanosarcina* 均是主导菌属,丰度分别占 75.1% 和 57.8%。*Methanosarcina* 属于混合营养型产甲烷菌属,既可以利用 $\text{H}_2/\text{CO}_2$ ,也可以直接利用乙酸产甲烷,较高的丰度表明系统的稳定性。但是,随着固体含量的提高,*Methanosarcina* 的丰度明显降低,而氢型产甲烷菌 *Methanoculleus* 的丰度增加明显。可能的原因是无机沉淀的不断积累使利用乙酸的甲烷菌

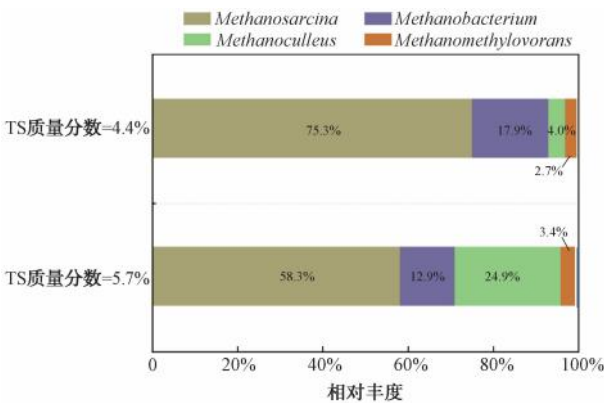


图 11 不同 TS 质量分数下污泥中属水平古菌群落变化

Fig. 11 Changes of Archaeal Community Structure at the Genus Level in Sludge under Different Mass Fraction of TS

受到一定抑制,而使得乙酸被同型产乙酸菌转化为  $H_2$  和  $CO_2$ ,为氢营养产甲烷菌提供了底物,即强化了嗜氢产甲烷路径。相近的结果也出现在采用上流式厌氧污泥床(UASB)反应器处理富钙垃圾渗滤液的报道中<sup>[12]</sup>。还可能由于合成细菌(*Syntrophomonas*)的富集加速了产氢细菌和嗜氢产甲烷菌之间的协同作用<sup>[13]</sup>。另一项报道<sup>[4]</sup>研究了不同  $Ca^{2+}$  浓度下的颗粒污泥的产甲烷菌属的变化,

结果发现,随着  $Ca^{2+}$  浓度的增加,颗粒污泥中 *Methanobacterium* 的相对丰度逐渐增加,而乙酸营养型产甲烷古菌甲烷丝菌(*Methanothrix*)产甲烷菌相对丰度逐渐降低。本研究中嗜氢产甲烷菌属的产甲烷杆菌属的丰度从 18.8%下降至 11.6%,变化不大。作为一种甲基营养型产甲烷古菌,*Methanomethylovorans* 属于 *Methanosarcinales* 目,同时具有乙酸和氢营养型产甲烷作用。通过强化氢营养型产甲烷过程提升了系统对无机沉淀累积的适应能力。该结果与报道中处理垃圾渗滤液相反,可能是因为其采用了稀释的填埋场渗滤液,进料中的  $Ca^{2+}$  质量浓度低于 100 mg/L,在反应器内并没有形成明显的无机沉淀积累的现象<sup>[14]</sup>。不过研究<sup>[13]</sup>显示:目前在已培养的产甲烷古菌菌株中有超过 75% 的为氢营养型,主要是由于该途径有更高的能量获取效率。另一项在含高钙造纸废水厌氧处理研究中发现氢营养型产甲烷古菌含量增加能有效提高厌氧颗粒污泥产甲烷能力<sup>[15]</sup>。

本研究系统总结了不同钙浓度条件下对厌氧性能及微生物群落结构的影响(表 1)。综合表 1 的文献对比可知, $Ca^{2+}$  对厌氧微生物的调控存在双重依赖性。

表 1 不同  $Ca^{2+}$  浓度及运行模式下的厌氧性能和微生物群落结构变化

Tab. 1 Changes of Anaerobic Performance and Microbial Community Structure under Different  $Ca^{2+}$  Concentrations and Operation Modes

$Ca^{2+}$ 质量浓度/ ( $mg \cdot L^{-1}$ )	运行参数	微生物群落影响	关键结论	来源
1 000.0	批次试验	<i>Methanosaeta</i> ↓	产甲烷抑制 60%以上	[5]
104.4±89.5	AnDMBR 连续运行	<i>Methanoculleus</i> (45.3%→17.6%) <i>Methanosarcina</i> (49.2%→78.4%)	低钙下乙酸营养型主导	[17]
500.0~8 000.0	批次试验	<i>Methanosaeta</i> ↓	低于 2 331.72 mg/L 促进,高于 2 331.72 mg/L 抑制	[16]
3 275.0~5 827.0	3 L UASB 反应器连续运行 170 d	<i>Methanoculleus</i> ↑	高钙促进氢营养路径(与本研究一致)	[11]
2 150.0±360.0	AnMBR 连续运行 61 d	<i>Methanoculleus</i> (4.0%→24.9%) <i>Methanosarcina</i> (75.3%→58.3%)	钙化富集氢营养菌维持稳定性	本研究

注: ↓表示减少; ↑表示增加。

浓度阈值效应:批次试验中  $> 1\,000\text{ mg/L}$  的  $Ca^{2+}$  质量浓度普遍抑制产甲烷活性(COD 去除率  $< 20\%$ )<sup>[5]</sup>,另一项批次试验中得出  $Ca^{2+} > 2\,333\text{ mg/L}$  会对厌氧性能造成抑制<sup>[16]</sup>,而连续流系统因微生物驯化与  $CaCO_3$  动态沉积,耐受阈值显著提升至  $> 5\,000\text{ mg/L}$ <sup>[11]</sup>。

运行模式的分异影响:低钙连续流系统(渗滤

液中  $Ca^{2+}$  质量浓度为  $104.4\text{ mg/L}$ )以乙酸营养型菌中的 *Methanosarcina* 为主导<sup>[17]</sup>;高钙连续流系统则通过富集氢营养菌(*Methanoculleus* ↑)重构代谢网络,抵消钙沉淀的物理抑制。

AnMBR 工艺的独特优势:膜截留作用维持高生物量,使系统在  $Ca^{2+}$  累积速率达  $4.09\text{ g/d}$  时仍保持稳定(COD 去除率为 90%),这一现象在批次试验



或普通 UASB 中均未观察到。不过,本文发现,AnMBR 虽形成了较强的高钙耐受力,但高浓度  $\text{Ca}^{2+}$  会造成膜污染、缩小反应器体积,造成颗粒污泥过度钙化<sup>[18]</sup>。因此,仍然要不断强化钙输入管理,对于优化 AnMBR 处理高钙垃圾渗滤液的效率和长期可持续性至关重要。

### 3 结论

本文通过 AnMBR 处理含高钙垃圾渗滤液的连续运行试验,揭示  $\text{Ca}^{2+}$  对污泥特性及产甲烷过程的影响机制。试验表明, $\text{Ca}^{2+}$  通过诱导  $\text{CaCO}_3$  沉淀导致无机物高效累积(截留率为 95.1%),在此过程中系统仍维持稳定高效的污染物去除与产气性能,COD 去除率稳定在 90%左右,产气速率达  $1.8 \sim 2.2 \text{ L}/(\text{L} \cdot \text{d})$ ,表明 AnMBR 工艺在高钙环境下仍保持良好运行效能。

基于高通量测序的微生物群落结构解析表明,钙累积未显著抑制产甲烷菌活性,反而通过强化氢营养型产甲烷路径,促使 *Methanosarcina* 与 *Methanoculleus* 形成协同代谢网络,保障了产甲烷过程的稳定性。功能菌群演替(*Methanoculleus* ↑ 24.9%)与钙累积的同步性表明,钙化可能通过富集氢营养菌间接维持代谢稳定性,但需长期多节点进一步研究验证归因性。

本文从污泥特性与微生物群落双视角,阐明了高钙环境下 AnMBR 工艺的适应性机制,证实钙诱导的无机物高效截留与氢营养型产甲烷路径强化的协同作用是维持系统稳定运行的关键。研究结果不仅深化了高钙废水厌氧处理中污泥钙化现象的理论认知,更为含高浓度  $\text{Ca}^{2+}$  废水的厌氧处理技术优化提供了微生物生态学依据与工程应用参考。

### 参考文献

- [1] 中国国家统计局. 中国统计年鉴—2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.  
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2022[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [2] DANG Y, ZHANG R, WU S J, et al. Calcium effect on anaerobic biological treatment of fresh leachate with extreme high calcium concentration [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 95: 76–83. DOI: 10.1016/j.ibiod.2014.05.016.
- [3] LU X, CHEN S, LUO J, et al. Application of a  $\text{CO}_2$ -stripping system for calcium removal to upgrade organic matter removal and

- sludge granulation in a leachate-fed EGSB bioreactor[J]. RSC Advances, 2016, 6: 9286–9296. DOI: 10.1039/C5RA26444H.
- [4] CHEN L, CHEN H, LU D, et al. Response of methanogens in calcified anaerobic granular sludge: Effect of different calcium levels[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 389(1): 122131.
- [5] GAGLIANO M C, SUDMALIS D, TEMMINK H, et al. Calcium effect on microbial activity and biomass aggregation during anaerobic digestion at high salinity [J]. New Biotechnology, 2020, 56: 114–122. DOI: 10.1016/j.nbt.2020.01.001.
- [6] 乔玮, 姜萌萌, Wandera S M, 等. 厌氧平板膜生物反应器连续处理猪场废水研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4502–4508.  
QIAO W, JIANG M M, WANDERA S M, et al. Continuous methane fermentation of swine wastewater using a flat sheet membrane bio-reactor[J]. China Environmental Science, 2018, 38(12): 4502–4508.
- [7] CHEN W D, TANG H M, XU D D, et al. The culprit for the declining performance of anaerobic reactors caused by calcification: Bioavailability deterioration [J]. Bioresource Technology, 2023, 386: 129514. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129514.
- [8] 张安龙, 汪琴, 侯银萍. 高钙废水颗粒污泥中古菌菌群结构变化的分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(12): 3956–3965.  
ZHANG A L, WANG Q, HOU Y P. Analysis of the shift of archaea community structure in granular sludge of high calcium wastewater[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 39(12): 3956–3965.
- [9] ZHAO R X, JIE L, FENG J, et al. Microbial community composition and metabolic functions in landfill leachate from different landfills of China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 767: 144861. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144861.
- [10] NG K K, SHI X Q, NG H Y. Evaluation of system performance and microbial communities of a bioaugmented anaerobic membrane bioreactor treating pharmaceutical wastewater [J]. Water Research, 2015, 81: 311–324. DOI: 10.1016/j.watres.2015.05.033.
- [11] FITAMO T, TREU L, BOLDRIN A. Microbial population dynamics in urban organic waste anaerobic co-digestion with mixed sludge during a change in feedstock composition and different hydraulic retention times [J]. Water Research, 2017, 118: 261–271. DOI: 10.1016/j.watres.2017.04.012.
- [12] YE J X, MU Y J, CHENG X, et al. Treatment of fresh leachate with high-strength organics and calcium from municipal solid waste incineration plant using UASB reactor [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(9): 5498–5503.

(下转第 149 页)

- [ 5 ] 戴勇华. 基于数据驱动的竹园片区排水系统一体化运行策略[J]. 净水技术, 2024, 43(9): 105-112, 150.  
DAI Y H. Integrated operation strategy of drainage system in Zhuyuan area based on data-driven [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(9): 105-112, 150.
- [ 6 ] 廖青桃, 谭琼, 时珍宝, 等. 城市污水处理厂厂网联动平稳输送运行优化研究[J]. 给水排水, 2016, 42(12): 20-24.  
LIAO Q T, TAN Q, SHI Z B, et al. Research on the optimization of smooth transportation operation of urban sewage treatment plant network linkage [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(12): 20-24.
- [ 7 ] 高雨妃, 周立典, 张雪, 等. 基于遗传算法的二次供水低位水箱调度方案优化[J]. 净水技术, 2022, 41(4): 121-125.  
GAO Y F, ZHOU L D, ZHANG X, et al. Optimization of scheduling solution for low-level water tank in secondary water supply system based on genetic algorithm[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(4): 121-125.
- [ 8 ] 陈伟. 基于负反馈的负载均衡算法实现[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2013, 25(1): 41-45.  
CHEN W. Realization of the load balancing algorithm based on negative feedback[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2013, 25(1): 41-45.
- [ 9 ] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 32-34.  
PENG D C. Basic principle and application of Kalman filter[J]. Software Guide, 2009, 8(11): 32-34.
- [ 10 ] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
LI M Q, KOU J S, LIN D, et al. The basic theory and application of genetic algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [ 11 ] 赵宜鹏, 孟磊, 彭承靖. 遗传算法原理与发展方向综述[J]. 黑龙江科技信息, 2010(13): 79-80.  
ZHAO Y P, MENG L, PENG C J. A review of the principles and development directions of genetic algorithms [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010(13): 79-80.

(上接第 132 页)

- [ 13 ] SONG Y L, MAHDY A, HOU Z, et al. Air supplement as a stimulation approach for the in situ desulfurization and methanization enhancement of anaerobic digestion of chicken manure[J]. Energy Fuels, 2020, 34(10): 12606-12615.
- [ 14 ] LEI Y Q, SUN D Z, DANG Y, et al. Metagenomic analysis reveals that activated carbon aids anaerobic digestion of raw incineration leachate by promoting direct interspecies electron transfer[J]. Water Research, 2019, 161: 570-580. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.038.
- [ 15 ] 杨振虎, 吴明, 王凯晴, 等. 高钙造纸废水中添加 FeO 提高厌氧颗粒污泥产甲烷能力的研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(1): 161-170.  
YANG Z H, WU M, WANG K Q, et al. Improving methanogenic activity of anaerobic granular sludge by adding FeO to high calcium-containing papermaking wastewater[J]. China Papermaking, 2024, 43(1): 161-170.
- [ 16 ] 方楠. 钙铁离子对垃圾渗滤液厌氧生物处理效果及微生物的影响[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2022.  
FANG N. Effects of calcium and iron ions on anaerobic biological treatment of landfill leachate and microorganism [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022.
- [ 17 ] XIE Z F, WANG Z W, WANG Q Y, et al. An anaerobic dynamic membrane bioreactor (AnDMBR) for landfill leachate treatment: Performance and microbial community identification [J]. Bioresource Technology, 2014, 161: 29-39. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.03.014.
- [ 18 ] YEPEZ-CERON O D, MCCARTHY P, PATTERSON P, et al. The role of calcium in anaerobic treatment: The good, the bad and the ugly[J]. Water Research X, 2025, 28: 100381. DOI: 10.1016/j.wroa.2025.100381.