

王柯丹, 王保生, 蒯洪永, 等. 不同负荷梯度对污水厂活性污泥的产酸性能分析[J]. 净水技术, 2024, 43(4):95–103.

WANG K D, WANG B S, LIN H Y, et al. Analysis of different load gradients for acid production performance of activated sludge in WWTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4):95–103.

不同负荷梯度对污水厂活性污泥的产酸性能分析

王柯丹¹, 王保生², 蒯洪永³, 谢佳³, 黄龙^{2,*}, 李海松^{2,*}

(1. 知和环保科技有限公司, 河南郑州 450001; 2. 郑州大学生态与环境学院, 河南郑州 450001; 3. 中原环保股份有限公司, 河南郑州 450006)

摘要 活性污泥发酵产酸有利于实现污泥资源化利用。文中以污水厂活性污泥为研究对象, 在污水厂现场采用半连续碱性发酵方法, 探究了先低梯度再高梯度长周期提负荷过程中污泥的产酸性能。结果表明: 低梯度提负荷运行阶段, 第 112 d 污泥的酸化率达到最大值, 且乙酸占比为 71.67%, 游离氨 (FA) 质量浓度为 (208 ± 39) mg/L, 低于 250 mg/L, 对微生物无抑制性。在高梯度提负荷阶段, 第 192 d 污泥的水解率提高至 41%, 丁酸与戊酸的占比增加, FA 质量浓度逐渐升高至 450 mg/L 时产酸性能下降。低梯度的优势菌 *Guggenheimella* (24.88%) 演变为高梯度的 *unclassified_Clostridiales* (37.08%)。此外, 当负荷为 3 250 mg TSS/(L·d) 时, 挥发性脂肪酸 (VFAs) 达到最大值 (3 339 mg COD_{Cr}/L)。经过 50 d 的稳定运行, 污泥的产酸率为 (606 ± 30) mg COD_{Cr}/(g VSS)。合适的负荷梯度有助于污泥中有机物在碱性条件下 (pH 值 = 10.0 ± 0.05) 长期稳定连续生成 VFAs。

关键词 负荷梯度 污泥 碱性发酵 挥发酸组分 菌群演替 功能基因 污水厂

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)04-0095-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.04.012

Analysis of Different Load Gradients for Acid Production Performance of Activated Sludge in WWTP

WANG Kedan¹, WANG Baosheng², LIN Hongyong³, XIE Jia³, HUANG Long^{2,*}, LI Haisong^{2,*}

(1. Zhihe Environmental Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;

2. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. CPEPGC Co., Ltd., Zhengzhou 450006, China)

Abstract Activated sludge fermentation to produce acid is beneficial to sludge resource utilization. The acid production performance of activated sludge was investigated under the operation condition of first low gradient and then high gradient increasing load in WWTP by the semi-continuous alkaline fermentation method. Results showed that the sludge acidification efficiency reached the maximum on the 112th day for the low gradient increasing load stage, and acetic acid of acetic acid was 71.67%. Additionally, the concentration of free ammonia (FA) was (208 ± 39) mg/L. It was less than 250 mg/L, implying that and there was no inhibition on microorganisms. While for the high gradient increasing load stage, the hydrolysis efficiency of sludge increased to 41% on 192 d, and the proportion of butyric acid and valeric acid gradually increased. The volatile fatty acids (VFAs) concentration started to decline until the FA reaches 450 mg/L. The dominant bacterium was *Guggenheimella* (24.88%) with low gradient stage, which evolved into *unclassified_Clostridiales* (37.08%) under high gradient stage. Furthermore, when the load was 3 250 mg TSS/(L·d), the VFAs reached a maximum of 3 339 mg COD_{Cr}/L. After 50 days of stable operation, the acid production rate of the sludge was (606 ± 30) mg COD_{Cr}/(g VSS). The appropriate load gradient is conducive to the long-term stable and continuous formation of VFAs by organic matter in sludge under alkaline conditions (pH value = 10.0 ± 0.05).

[收稿日期] 2023-06-27

[基金项目] 河南省重大科技专项(201300311100)

[作者简介] 王柯丹(1990—), 女, 硕士, 研究方向为污水处理与资源化利用, E-mail: 1174639049@qq.com。

[通信作者] 黄龙(1988—), 副教授, E-mail: hl2130@zzu.edu.cn;

李海松(1980—), 教授, E-mail: lhs@zzu.edu.cn。

Keywords load gradient sludge alkaline fermentation volatile acid composition microflora succession functional gene wastewater treatment plant (WWTP)

城镇污水处理厂普遍采用活性污泥法进行污水处理,剩余污泥(以下简称“污泥”)是活性污泥法的主要副产物之一。2021 年我国生态环境统计年报数据显示,污泥产量为 4 592.1 万 t^[1]。污泥的处理与处置费用较高,一定程度上增加了污水处理厂的运营成本。污泥的资源化利用是当前的热点,相关研究聚焦于污泥中大量可利用有机物如蛋白质、多糖、纤维素、腐殖质等的高效回收^[2-3]。

污泥通过厌氧发酵产酸技术能够实现污泥碳源与能源回收,被认为是助力“碳中和”的重要技术途径之一^[4-6]。在污泥发酵产酸过程中,较多研究采取物理、化学(添加 CaO₂、NaSO₃、NaNO₂ 等化学试剂)、电解、加热等方法加强污泥的分解,提高污泥的水解产酸性能^[7-11]。碱性发酵产酸已被证明是污泥厌氧发酵积累挥发性脂肪酸(VFAs)的有效方法之一^[12-13],然而长周期的碱性发酵实践并不多见。在碱性环境中,蛋白质水解酸化释放大量的氨氮会转化为高浓度游离氨(FA)。FA 是限制污泥碱性发酵累积小分子 VFAs 的主要因素。因此,在污泥长周期碱性发酵过程中弱化 FA 影响,提高污泥产酸率仍需探讨。有机负荷是污泥碱性发酵累积 VFAs 的关键工艺因子,调控负荷是在碱性发酵系统中获得稳定产酸效能的技术路线,但如何选择合适的负荷梯度以逼近最佳且稳定的产酸效能是该系统实际运行中需要解决的问题。Xing 等^[14]在研究餐厨垃圾与剩余污泥共消化中,发现在低梯度提负荷有助于试验的长期(600 d)稳定运行。此外,缩短污泥发酵时间或提高污泥有机负荷可以快速获得高浓度 VFAs。然而高梯度提负荷面临着系统运行不稳定、周期长等缺点。因此,本研究的目的是通过控制提负荷的梯度实现污泥长期碱性发酵产酸,获得较高的污泥产酸率。

本研究在污水处理厂现场开展,构建了全程 pH 可控的半连续碱性发酵系统,通过负荷梯度的调控进行污泥产酸性能长周期研究。以先低梯度再高梯度提升有机负荷,使碱性发酵系统产生 VFAs 效能趋于最优,并实现污泥产酸系统的稳定运行,探究负荷梯度的改变对污泥产酸效能、VFAs 的组成及菌群的影响。此外,还研究了负荷提升过程中非 VFAs

产物如氮、磷、多糖、蛋白质的释放情况以及代谢基因的丰度变化。

1 材料与方法

1.1 污泥来源与试验条件

本试验在郑州市五龙口污水处理厂现场开展,污泥取自于氧化沟工艺后端的二沉池回流污泥。污泥在 4 ℃ 下进行沉淀浓缩 24 h,浓缩后的污泥在有效容积为 4.0 L 的反应器中进行发酵产酸反应。试验过程中进行在线控制,温度为(35±1) ℃,搅拌速度为(120±10) r/min,分别采用氢氧化钠和盐酸调节 pH,使 pH 值维持在 10.0±0.05。污泥的性质如表 1 所示。

表 1 浓缩污泥的基本性质
Tab. 1 Basic Properties of Thickened Sludge

指标	数值
总悬浮固体(TSS)/(g·L ⁻¹)	15~40
挥发性总悬浮固体(VSS)/(g·L ⁻¹)	8~25
总化学需氧量(TCOD _{Cr})/(g·L ⁻¹)	11~23
溶解性化学需氧量(SCOD _{Cr})/(mg·L ⁻¹)	50~270
多糖/(mg·L ⁻¹)	12~20
蛋白质/(mg·L ⁻¹)	40~60
氨氮/(mg·L ⁻¹)	25~40
磷酸盐/(mg·L ⁻¹)	40~60

1.2 试验方法

试验分为 3 个阶段:阶段 I 为低梯度提升有机负荷,其目的是增强污泥发酵体系中微生物的反应能力,以及体系运行的稳定性;阶段 II 为高梯度提升有机负荷,其目的是增加体系的生物量并富集水解酸化菌,实现 VFAs 的大量积累;阶段 III 为最佳负荷的稳定运行阶段。如图 1 所示,该试验运行 238 d,阶段 I 共运行 56 d(8 周),每周补料 3 次,负荷从 186 mg TSS/(L·d)提高至 271 mg TSS/(L·d),第 6 周因反应器运行问题使得本周运行负荷降低。阶段 II 共运行 77 d(11 周),每周补料 7 次,负荷从 625 mg TSS/(L·d)提高至 3 750 mg TSS/(L·d)。阶段 III 以最佳负荷[3 250 mg TSS/(L·d)]进行稳定运行,运行时间共 49 d(7 周)。

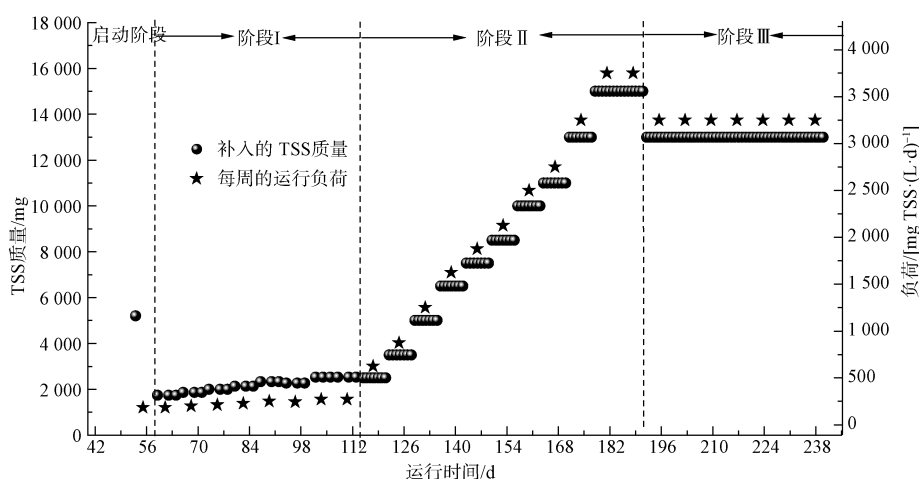


图 1 污泥碱性发酵的运行负荷

Fig. 1 Alkaline Fermentation of Sludge under Different Load Dradients

1.3 分析方法

TSS、VSS、氨氮、磷酸盐分别采用重量法、重量法、纳氏试剂光度法与钼锑抗分光光度法进行测定, TCOD_{Cr} 和 SCOD_{Cr} 采用 COD 快速检测仪[连华科技, 5B-6C(V12)]通过重铬酸钾法进行检测。VFAs 采用气相色谱法进行检测(Agilent GC7890B), 具体参数: 用 FID 检测器; 色谱柱为 HP-5MS 弹性适应毛细管柱, 柱长为 30 m, 膜厚为 0.25 μm, 内径为 320 μm; 进样口条件设置为温度 250 ℃, 分流比为 10:1; 检测器条件为温度 300 ℃, 流量为 40 mL/min, 气源是 H₂; 升温程序为在 70 ℃ 下维持 3 min, 以 30 ℃/min 升至 170 ℃^[15]。

此外, 分别计算了污泥产酸过程中污泥分解率^[6]、水解率和酸化率^[2], 以及 VFAs 的各组分占比和 FA^[16], 计算如式(1)~式(5)。

$$\eta_1 = \frac{C_{VSS(in)} - C_{VSS(out)}}{C_{VSS(in)}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{C_{SCOD_{Cr}}}{C_{TCOD_{Cr}}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_3 = \frac{C_{VFAs}}{C_{SCOD_{Cr}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta_4 = \frac{C_i}{C_{VFAs}} \times 100\% \quad (4)$$

$$C_{FA} = \frac{C_N \times 10^4}{e^{\left(\frac{6334}{273+T}\right)} + 10^4} \quad (5)$$

其中: $C_{VSS(in)}$ 和 $C_{VSS(out)}$ ——浓缩污泥和发酵污

泥的质量浓度, mg/L;

η_1 ——污泥分解率;

$C_{SCOD_{Cr}}$ ——溶解性 COD_{Cr} 质量浓度, mg/L;

$C_{TCOD_{Cr}}$ ——总 COD_{Cr} 质量浓度, mg/L;

η_2 ——水解率;

C_{VFAs} ——总 VFAs 质量浓度, 以 COD_{Cr} 计, mg COD_{Cr}/L;

η_3 ——酸化率;

C_i ——VFAs 组分如乙酸、丙酸、正丁酸、异丁酸、正戊酸和异戊酸, 以 COD_{Cr} 计的质量浓度, mg COD_{Cr}/L, 转换因子分别是 1.07、1.51、1.82、1.82、2.04 和 2.04;

η_4 ——VFAs 组分占比;

C_{FA} ——发酵液中的 FA 质量浓度, mg/L;

C_N ——发酵液中氨氮质量浓度, mg/L;

A ——反应 pH;

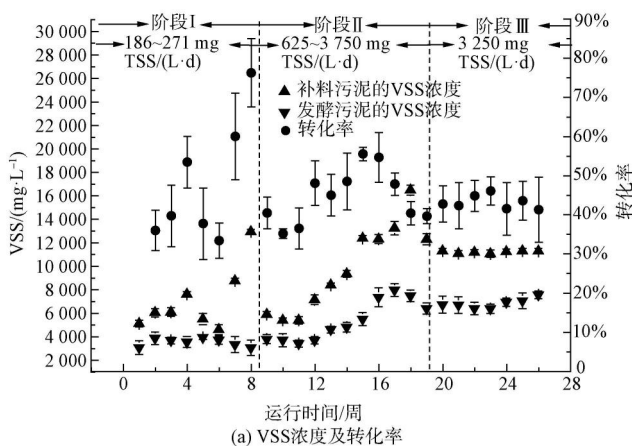
T ——反应温度, ℃。

此外, 还分别对污泥细菌和古菌的 V3~V4 区进行扩增分析, 其引物分别是 341F、805R 和 340F、1000R, 利用 Illumina MiSeq PE300 平台进行测序分析。微生物群落结构分析依照扩增子数据分析指南^[17]。基于 RDP 训练集 v16 对特征序列(OTUs)进行分类学并注释。在 R 语言环境下使用 vegan v2.5-6 包分析多样性。此外, 基于京都基因与基因组百科全书(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG)数据库对活性污泥中的微生物进行功能预测分析。

2 结果与讨论

2.1 负荷梯度变化过程中的污泥产酸性能

污泥絮体在碱性发酵产酸过程中先将有机物释放到液相中,然后水解菌将大分子有机物转化为小分子有机物,随后通过酸化菌的代谢转化为 VFAs。以污泥浓度的变化阐述污泥的分解情况,结果如图 2(a)所示。在阶段 I,污泥转化率从 40%左右逐渐增高至 76%,随着负荷提高,污泥絮体中有机物逐渐释放到液体中,污泥的“增溶性”增加。当负荷梯度陡然增加,污泥转化率急剧下降,但在阶段 II 随着反应的继续,污泥的转化率回升。试验运行至 15 周之后[负荷 $>2\,500\text{ mg TSS}/(\text{L}\cdot\text{d})$],污泥转化率开始下降,原因是环境中高 FA 浓度(质量浓度 $>300\text{ mg/L}$)对发酵体系中微生物的活性产生抑制,如图 2(b)所示。研究^[18]表明,当 FA 质量浓度 $>250\text{ mg/L}$ 时会对微生物产生抑制作用。



在图 2(c)中, SCOD_{Cr} 和 VFAs 浓度随着负荷提高而增加,且增加趋势与负荷梯度呈正相关。当负荷为 $3\,250\text{ mg TSS}/(\text{L}\cdot\text{d})$ 时, SCOD_{Cr} 与 VFAs 质量浓度分别为 $7\,631\text{ mg/L}$ 和 $3\,339\text{ mg COD}_{\text{Cr}}/\text{L}$,且随着负荷的继续提高而下降。因此,污泥碱性发酵的最佳运行负荷为 $3\,250\text{ mg TSS}/(\text{L}\cdot\text{d})$,在阶段 III 稳定运行 50 d 后,获得的污泥产酸率为 $(606\pm 30)\text{ mg COD}_{\text{Cr}}/(\text{g VSS})$ 。从图 2(d)中发现,污泥水解率与 SCOD_{Cr} 和 VFAs 浓度的变化趋势相似,随着负荷的提高而逐渐增加。但是污泥酸化率与污泥转化率的变化规律相似。在不同梯度提升负荷过程中,水解率从 28%提高至 41% (192 d),然而酸化率在阶段 I 达到最大值 73%。除了与污泥梯度变化有关,还与每天补入的浓缩污泥浓度有关,在阶段 II,每天补入的浓缩污泥的质量浓度从 10.7 g/L 逐渐增加至 30.0 g/L 。

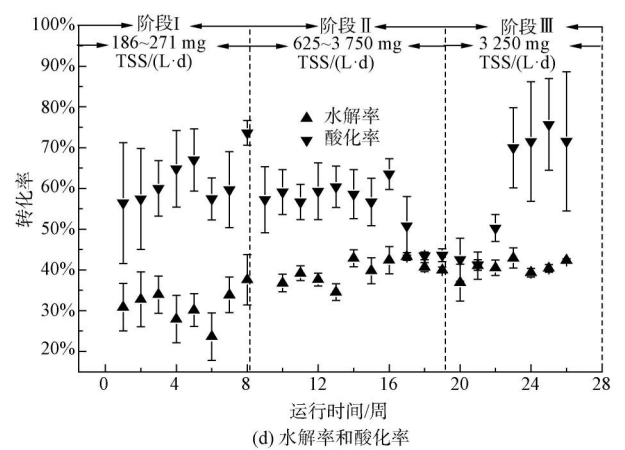
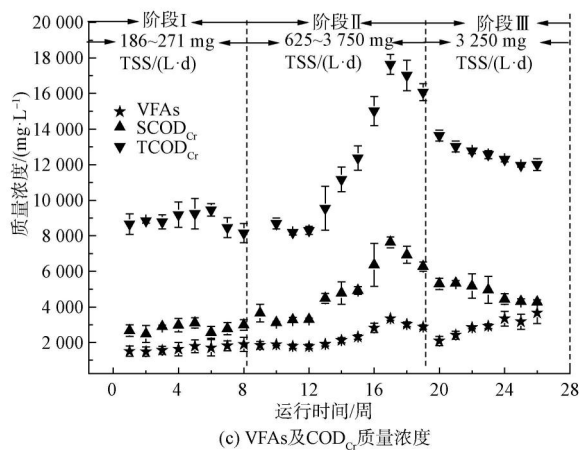
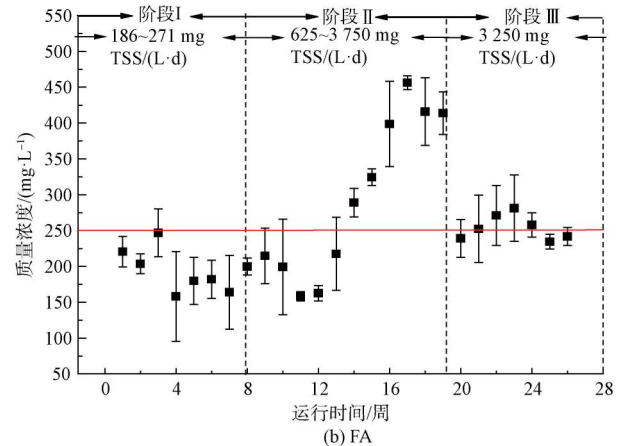


图 2 不同负荷梯度下的污泥产酸效能

Fig. 2 Acid Production Performance of Sludge under Different Load Gradients

在污泥碱性发酵产酸过程中,FA 是影响 VFAs 积累的主要限制因素。在图 2(b)中展示了不同梯

度提高有机负荷的 FA 浓度变化。在阶段 I, FA 均值为 (208 ± 39) mg/L, 低于文献中报道的抑制限值 (250 mg/L), 表明低梯度工况下污泥发酵产酸性能没有受到 FA 影响。因此, 通过低梯度提负荷对污泥产酸性能具有正向促进作用, 有利于污泥碱性发酵系统的稳定, 该结果与之前的研究结论一致^[18]。在阶段 II, 随着负荷的提高, FA 浓度逐渐增加。当运行至第 14 周, 负荷为 2 125 mg TSS/(L·d) 时, FA 质量浓度增加至 283 mg/L, 污泥的分解率、水解率、酸化率以及累积的 VFAs 浓度均没有明显下降, 反而随着反应的继续而增加。当负荷为 3 250 mg TSS/(L·d) 时, FA 质量浓度达到最大值 (456 mg/L), 之后污泥的产酸性能下降。污泥在碱性条件进行发酵产酸, 通过先低梯度再高梯度提负荷的方法可以有效提高污泥的产酸性能。此外, 通过梯度变化的选择压, 筛选出对 FA 具有一定耐受性的水解酸化菌群, 在高 FA 浓度下仍具有较高活性, 实现 VFAs 的最大积累, 以及碱性发酵的长期稳定运行。

2.2 负荷梯度变化对污泥产 VFAs 组分的影响

VFAs 作为碳源被应用过程中, 其组分是重要的考虑因素。图 3 展示了负荷梯度变化对 VFAs 组分占比的影响。VFAs 中包含了 6 种小分子酸, 乙酸占比超过 50%, 结果表明污泥碱性发酵产生的 VFAs 主要是乙酸, 该结果与其他文献报道的结果一致。但是在不同负荷梯度下, VFAs 组分的变化趋势呈现差异。在阶段 I, 乙酸占比从 64.01% 增加到 71.67% (112 d), 而丙酸、丁酸和戊酸的占比均呈现下降趋势: 丙酸占比从 20.02% 降低至 17.53%, 异丁酸占比从 5.98% 降低到 3.55%。原因可能是丙酸和丁酸在产乙酸菌的作用下转化为乙酸, 并释放 CO_2 和 H_2 。在阶段 II, 乙酸和丙酸的占比均下降, 而丁酸和戊酸的占比均上升。乙酸和丙酸的占比分别从 69.12% 和 20.50% 降低至 57.11% 和 15.65%; 异丁酸、正丁酸和异戊酸占比分别从 3.47%、1.04% 和 5.39% 升高至 7.04%、6.47% 和 12.53%。VFAs 组分发生变化是负荷梯度变化导致对微生物形成环境选择压, 促使微生物群落结构发生了变化, 富集的优势功能菌发生演替, 微生物的群落分析见 3.4 小节。

2.3 负荷梯度变化对污泥发酵产生的非 VFAs 产物的影响

污泥微生物胞内有机组分多为蛋白质和多糖,

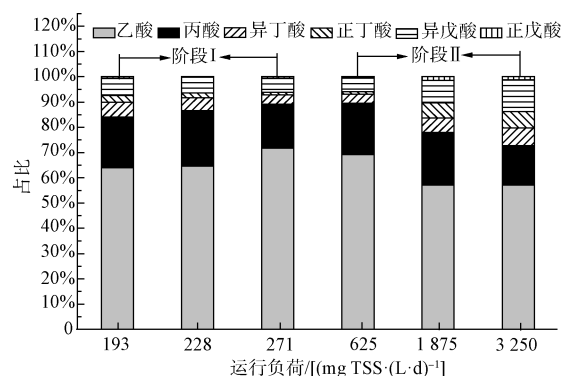


图3 不同负荷梯度下产生 VFAs 的组分占比

Fig. 3 Components Proportion of VFAs under Different Load Gradients

它们是污泥产酸的关键性物质^[19-20]。蛋白质和细胞组织等经过水解会释放氨氮和磷酸盐等物质, 这些发酵产物的结果如图 4 所示。结果发现, 阶段 II 中蛋白质和多糖浓度比阶段 I 的高, 当运行至 15 周之后 [负荷 > 2 500 mg TSS/(L·d)] 时, 蛋白质和多糖浓度明显增加 [图 4(a)]。原因是高浓度 FA 刺激微生物, 使微生物分泌更多的胞外聚合物, 从而释放更多的蛋白质和多糖进而被水解酸化转化为 VFAs, 进一步提高 VFAs 的含量^[21]。该结果与产酸效能结果一致。在图 4(b) 中发现阶段 II 中的氨氮与磷酸盐浓度均高于阶段 I, 稳定运行后它们的质量浓度分别为 (255 ± 22) mg/L 和 (153 ± 18) mg/L。结果表明, 高梯度提负荷过程中, 污泥的水解性提高。更多的污泥在细胞裂解酶、水解酶、酸化酶等作用下释放氨氮和磷酸盐。此外, 在整个发酵过程, 氨氮的浓度明显高于磷酸盐。因为释放氨氮的蛋白质等有机物的含量高于释放磷酸盐的磷脂双分子层和多磷酸颗粒的含量。

2.4 不同梯度负荷下的微生物群落分析

2.4.1 微生物多样性分析

为了进一步揭示不同负荷梯度对污泥产酸性能的影响, 对污泥进行扩增子测序分析。微生物的多样性结果如表 2 所示。S1、S2 和 S3 分别是第 62 d [第 1 周, 186 mg TSS/(L·d)]、110 d [第 8 周, 271 mg TSS/(L·d)] 和 173 d [第 17 周, 3 250 mg TSS/(L·d)] 的产酸污泥。所有污泥的微生物群落覆盖率均 > 99%, 表明本次污泥的测序结果可信。OTUs 数量、Chao 指数和 Ace 指数代表微生物的丰度, Shannon 指数代表微生物多样性。从 S1 到 S3,

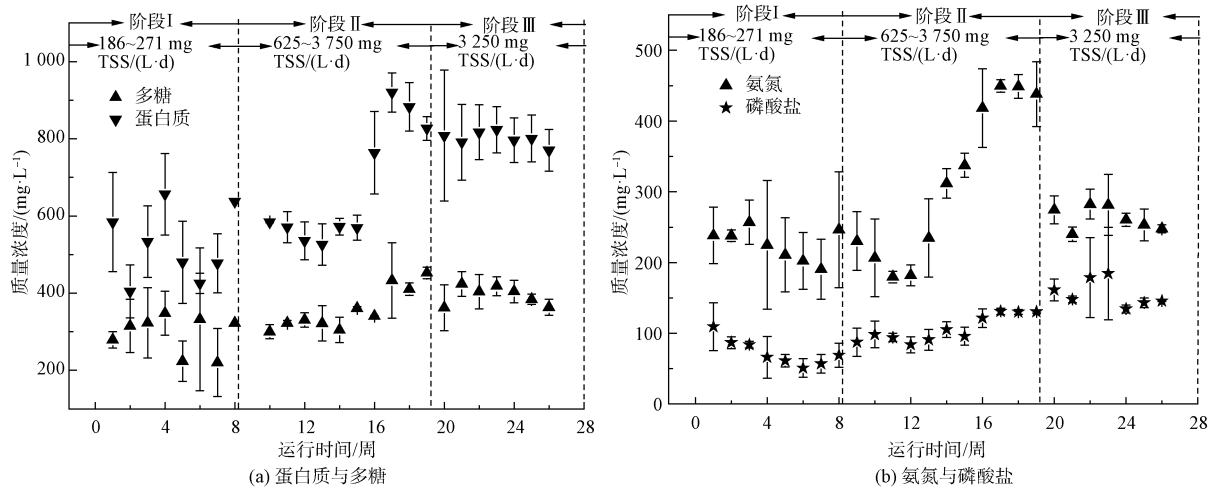


图4 不同负荷梯度下污泥发酵系统的非 VFAs 产物变化

Fig. 4 Changes of Non-VFAs Products under Different Load Gradients

Shannon 指数和 OTUs 数量分别从 3.89 和 752 逐渐升高至 4.20 和 1 099。结果表明,随着负荷的提高,微生物多样性和丰度均增加。

表2 不同负荷梯度下微生物多样性指数

Tab. 2 Microbial Community Diversity Index under Different Load Gradients

取样点	OTUs 数量	Shannon 指数	Chao 指数	Ace 指数	覆盖率
S1	752	3.89	879.87	875.06	>99%
S2	800	4.11	921.16	905.95	>99%
S3	1 099	4.20	1 187.92	1 177.65	>99%

2.4.2 微生物组成分布

图5展示了发酵污泥中的优势菌群(相对丰度>1%)。在门水平[图5(a)],S1、S2和S3共有的优势菌分别为厚壁菌门(Firmicutes)、变形菌门

(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)。这些微生物是厌氧发酵体系内常见的水解酸化菌^[22-24]。在低梯度负荷下,厚壁菌门和放线菌门的相对丰度分别从 59.23% 和 10.15% 下降到 46.35% 和 3.67%,而变形菌门的相对丰度逐渐增加至 22.89%。结果表明,厚壁菌门和放线菌门中不适应的微生物逐渐被淘汰。变形菌门是一种在各种环境中常见的微生物,包含了好氧-厌氧-兼性厌氧菌,可以降解大分子有机物,较易适应微生态环境的变化^[25-26]。因此,变形菌门逐渐富集。据报道^[24],拟杆菌门主要参与污泥中固体成分的分解,可以分泌溶细胞酶,将有机物转化为乙酸。因此,在阶段 I 中 S2 富集的拟杆菌门(6.02%)将有机物转化为乙酸,并提高了乙酸的占比。在阶段 II,拟杆菌门的相对丰度降低至 3.87%,而绿弯

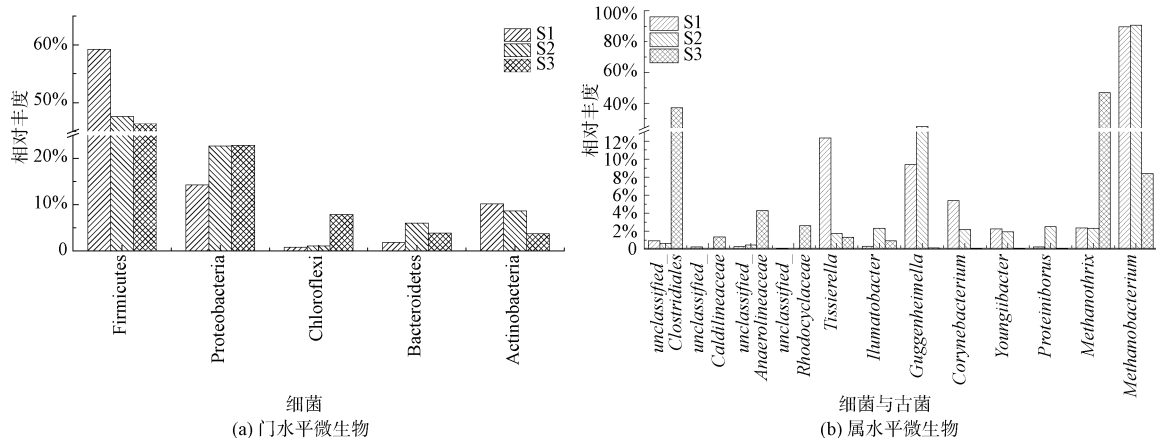


图5 不同负荷梯度的微生物组成

Fig. 5 Microorganism Composition under Different Load Gradients

菌门(*Chloroflexi*)逐渐富集(7.86%)。绿弯菌门在厌氧消化中发挥至关重要的作用,促进水解过程,破坏复杂的有机物产生 VFAs。在阶段Ⅱ中富集绿弯菌门有可能将复杂的有机物分解转化为丁酸和戊酸,提高 VFAs 中丁酸和戊酸占比。

图 5(b)展示了属水平前 10 种水解酸化菌和前 2 种产甲烷古菌。泰氏菌属(*Tissierella*)在负荷梯度变化过程中逐渐被淘汰,其相对丰度从 12.34%降至 1.31%。泰氏菌属是一种嗜碱菌,在厌氧环境中可以将蛋白质和葡萄糖转化为 VFAs。*Youngiibacter* 和产氢产乙酸菌(*Guggenheimella*)作为产乙酸菌,可以将有机物转化为乙酸并释放 H_2 和 CO_2 。在低梯度工况下,*Youngiibacter* 相对丰度从 2.34%降至 1.94%,而产氢产乙酸菌相对丰度从 9.37%升至 24.88%。结果表明,产氢产乙酸菌作为主要优势菌提高了乙酸占比。此外,棒状杆菌(*Corynebacterium*)在 S1 中相对丰度最高(5.38%),分解氨基酸转化为 VFAs,随着负荷的提高,该菌基本上被淘汰。在 S2 中演变出新的水解酸化菌,分别为微酸菌(*Ilumatobacter*)和产乙醇食蛋白质菌(*Proteiniborus*)。在高梯度工况下 S2 中富集的优势功能菌在 S3 基本上被淘汰,阶段Ⅱ富集的优势菌分别为 *unclassified_Clostridiales* (37.08%)、*unclassified_Anaerolineaceae* (4.29%)、*unclassified_Rhodocyclaceae* (2.58%) 和 *unclassified_Caldilineaceae* (1.37%)。

unclassified_Clostridiales 是典型的水解酸化菌,可以分泌水解酶,将蛋白质和多糖等大分子有机物代谢为氨基酸和葡萄糖等小分子物质,进而转化为 VFAs^[27]。此外,文献^[28]报道 *Clostridiales* 中的部分微生物是产丁酸菌,该结果解释了在阶段Ⅱ丁酸占比增加的原因。尽管碱性条件会抑制产甲烷菌的活性,但是在不同负荷梯度工况下检测到的产甲烷菌展现了差异。在阶段Ⅰ中富集的产甲烷古菌是甲烷杆菌属(*Methanobacterium*),其在 S1 和 S2 中的相对丰度分别为 89.78% 和 90.65%。甲烷杆菌属是一种氢营养型的产甲烷菌,利用 H_2 和 CO_2 转化为甲烷。然而在阶段Ⅱ中,甲烷杆菌的相对丰度降至 8.37%,甲烷丝菌(*Methanothrix*)逐渐富集(46.96%)。甲烷丝菌是一种乙酸型产甲烷菌^[29],可以消耗 VFAs 中乙酸。微生物组成的结果进一步阐释了负荷梯度变化形成的环境选择压对微生物群落进行筛选,从而影响了 VFAs 组分。

2.4.3 微生物的功能预测

图 6 展示了前 5 种氨基酸和碳水化合物代谢的基因丰度。在 5 种氨基酸代谢中,通过控制梯度提高负荷,更多的蛋白质被分解为缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸、色氨酸。在低梯度工况下更多的色氨酸和赖氨酸进一步被酸化为 VFAs。针对多糖的分解,丁酸代谢的基因丰度在高梯度工况中最高,与 VFAs 组分中丁酸占比增高的结果一致。

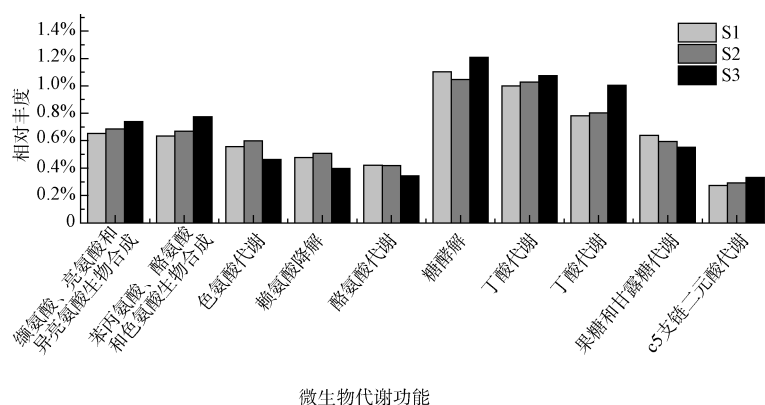


图 6 不同负荷梯度下的微生物代谢功能

Fig. 6 Metabolic Function of Microorganisms under Different Load Gradients

3 结论

(1)通过负荷梯度的调控提高了污泥中有机物的长周期碱性发酵产酸性能,碱性环境发酵 238 d, VFAs 积累量为 3 339 mg COD_{Cr}/L ,污泥的产酸率高

达 (606 ± 30) mg $COD_{Cr}/(g VSS)$ 。

(2)污泥碱性发酵产酸的主要成分为乙酸,且负荷梯度变化对 VFAs 组成产生了影响。原因是梯度变化对微生物施加环境选择压,导致微生物群落

结构发生变化。

(3)低梯度阶段富集的产乙酸菌为产氢产乙酸菌,高梯度阶段演变出新的优势水解酸化菌为 *unclassified_Clostridiales*。此外,代谢蛋白质和多糖的功能基因的丰度也发生变化。

(4)在高梯度提负荷工况下,FA 质量浓度达到 456 mg/L 后产酸性能下降,富集的功能菌对 FA 的耐受性高于其他文献中报道的限值(250 mg/L)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2021 中国生态环境统计年报 [R]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Annual statistic report on ecology and environment in China, 2021 [R]. Beijing: China Environmental Publishing Group, 2022.
- [2] HE D D, ZHENG S L, XIAO J, et al. Effect of lignin on short-chain fatty acids production from anaerobic fermentation of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2022, 212: 118082. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118082.
- [3] WU S L, WEI W, WANG Y, et al. Transforming waste activated sludge into medium chain fatty acids in continuous two-stage anaerobic fermentation: Demonstration at different pH levels [J]. *Chemosphere*, 2022, 288: 132474. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132474.
- [4] LUO K, PANG Y, YANG Q, et al. An innovative cation regulation-based anaerobic fermentation strategy for enhancing short-chain fatty acids production from waste activated sludge: Metal ion removal coupled with Na^+ -regulation [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 331: 124921. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.124921.
- [5] LIU X R, DU M T, YANG J N, et al. Sulfite serving as a pretreatment method for alkaline fermentation to enhance short-chain fatty acid production from waste activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 385: 123991. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123991.
- [6] WANG J, LOU Y, FENG K, et al. Enhancing the decomposition of extracellular polymeric substances and the recovery of short-chain fatty acids from waste activated sludge: Analysis of the performance and mechanism of co-treatment by free nitrous acid and calcium peroxide [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127022. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127022.
- [7] YU G H, HE P J, SHAO L M, et al. Extracellular proteins, polysaccharides and enzymes impact on sludge aerobic digestion after ultrasonic pretreatment [J]. *Water Research*, 2008, 42(8/9): 1925–1934. DOI: 10.1016/j.watres.2007.11.022.
- [8] PARK N D, HELLE S S, THRING R W. Combined alkaline and ultrasound pre-treatment of thickened pulp mill waste activated sludge for improved anaerobic digestion [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 46(6): 750–756.
- [9] 刘红燕, 周爱娟, 刘芝宏, 等. 硫酸根自由基预处理剩余污泥产酸效能与机理 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1594–1600.
LIU H Y, ZHOU A J, LIU Z H, et al. Performance and mechanism of short-chain fatty acids production from waste activated sludge fermentation elevating by sulfate radical pretreatment [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(4): 1594–1600.
- [10] 桂肖山, 徐闯, 王泽茜, 等. CaO_2 投加量及投加方式对剩余污泥厌氧发酵产生短链脂肪酸的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1785–1791.
GUI X S, XU C, WANG Z Q, et al. Effects of the dosage and dosing methods of CaO_2 on the production of short-chain fatty acids produced during anaerobic fermentation of waste activated sludge [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1785–1791.
- [11] WANG Y L, ZHAO J W, WANG D B, et al. Free nitrous acid promotes hydrogen production from dark fermentation of waste activated sludge [J]. *Water Research*, 2018, 145: 113–124. DOI: 10.1016/j.watres.2018.08.011.
- [12] LI X L, PENG Y Z, LI B K, et al. Effect of temperature on short chain fatty acids (SCFAs) accumulation and microbiological transformation in sludge alkaline fermentation with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ adjustment [J]. *Water Research*, 2014, 61: 34–45. DOI: 10.1016/j.watres.2014.03.030.
- [13] WANG, X, LI, Y B, ZHANG, Y, et al. Stepwise pH control to promote synergy of chemical and biological processes for augmenting short-chain fatty acid production from anaerobic sludge fermentation [J]. *Water Research*, 2019, 155: 193–203. DOI: 10.1016/j.watres.2019.02.032.
- [14] XING B S, WANG X C. High-rate mesophilic co-digestion with food waste and waste activated sludge through a low-magnitude increasing loading regime: Performance and microorganism characteristics [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777: 146210. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146210.
- [15] WEN Q Y, CHEN Z Q, WANG C Y, et al. Bulking sludge for PHA production: Energy saving and comparative storage capacity with well-settled sludge [J]. *Journal of Environmental Science*, 2012, 24(10): 1744–1752.
- [16] 刘芝宏, 魏瑶丽, 樊雅欣, 等. 游离亚硝酸预处理对剩余污泥电解及微生物群落结构的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 2953–2959.
LIU Z H, WEI Y L, FAN Y X, et al. Role of free nitrous acid on waste activated sludge bio-electrolysis and key microflora shift [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 2953–2959.
- [17] LIU Y X, QIN Y, CHEN T, et al. A practical guide to amplicon

- and metagenomic analysis of microbiome data [J]. *Protein & Cell*, 2021, 12: 315–330. DOI: 10.1007/s13238-020-00724-8.
- [18] CHEN Y, RUHYADI R, HUANG J J, et al. Comprehensive comparison of acidic and alkaline anaerobic fermentations of waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 323: 124613. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124613.
- [19] FENG L, CHEN Y, ZHENG X. Enhancement of waste activated sludge protein conversion and volatile fatty acids accumulation during waste activated sludge anaerobic fermentation by carbohydrate substrate addition: The effect of pH [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(12): 4373–4380.
- [20] 金宝丹, 王淑莹, 邢立群, 等. 不同发酵方式对污泥厌氧发酵性能的影响及其发酵液利用[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(7): 2079–2089.
JIN B D, WANG S Y, XING L Q, et al. The effect of different fermentation methods on the sludge anaerobic fermentation performance and the utilization of fermentation liquor[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(7): 2079–2089.
- [21] 蔡晨健, 吴常峰, 杨浩, 等. 游离氨对活性污泥系统中脱氮性能及胞外聚合物的影响[J]. *土木与环境工程学报*, 2021, 43(1): 184–192.
CAI C J, WU C F, YANG H, et al. Effect of free ammonia on nitrogen removal performance and extracellular polymer in activated sludge system[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(1): 184–192.
- [22] JIN B D, NIU J T, DAI J W, et al. New insights into the enhancement of biochemical degradation potential from waste activated sludge with low organic content by potassium monopersulfate treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 265: 8–16. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.05.032.
- [23] RUI S, ZHOU A, JIA J, 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. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.052.
- [24] DUAN H, YE L, LU X, et al. Self-sustained nitrite accumulation at low pH greatly enhances volatile solids destruction and nitrogen removal in aerobic sludge digestion[J]. *Environmental Science Technology*, 2018, 53(3): 1225–1234.
- [25] JIANG X P, QIN Z Y, FENG L Y, et al. Volatile fatty acids production from waste activated sludge during anaerobic fermentation: The effect of superfine sand [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 319: 124249. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124249.
- [26] WANG K D, CHEN X L, YAN D K, et al. Petrochemical and municipal wastewater treatment plants activated sludge each own distinct core bacteria driven by their specific incoming wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826: 153962. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153962.
- [27] RATTI R P, BOTTA L S, SAKAMOTO I K, et al. Microbial diversity of hydrogen-producing bacteria in batch reactors fed with cellulose using leachate as inoculum[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(23): 9707–9717.
- [28] 张艳艳, 白佳喆, 左剑恶. 己酸菌富集及其利用餐厨垃圾产己酸的研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2724–2733.
ZHANG Y Y, BAI J Z, ZUO J E. Enrichment of caproate bacteria and its application in caproic acid production from food waste[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2724–2733.
- [29] ZOU H, GAO M, YU H, et al. Methane production from food waste via mesophilic anaerobic digestion with ethanol pre-fermentation: Methanogenic pathway and microbial community analyses [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122450. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122450.

《节约用水条例》于 2024 年 5 月 1 日开始施行

《节约用水条例》由国务院常务会议审议通过,现予公布,将于 5 月 1 日起施行。
《节约用水条例》从坚持和落实节水优先方针、加强用水管理、完善节水措施、强化保障和监督、严格法律责任等五个方面进行规定,共六章五十二条,详细内容可查看全文。



扫描二维码阅读全文