

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 21. 001

COD/SO₄²⁻对厌氧处理含硫酸盐低浓度有机废水的影响

万 晓¹, 邵文歆², 郭一令³

(1. 平度市城市建设服务中心, 山东 青岛 266799; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

摘 要: 采用厌氧膨胀颗粒污泥床反应器处理含硫酸盐低浓度有机废水, 考察了进水COD/SO₄²⁻对处理效果的影响。研究显示, 进水COD/SO₄²⁻的变化会对反应器的COD去除率和SO₄²⁻还原率产生增加以及降低两个阶段的影响。当COD/SO₄²⁻为15时, COD去除率在65%左右, SO₄²⁻去除率在80%以上; 当COD/SO₄²⁻为7时, 反应器的处理效果最好, 出水COD在450 mg/L以下, COD和SO₄²⁻去除率分别在75%和85%以上; 当COD/SO₄²⁻为4时, COD和SO₄²⁻去除率分别降至65%和75%以下。可见, 在低浓度有机废水厌氧处理系统中, 适量硫酸盐的存在能够促进产甲烷菌与硫酸盐还原菌协同代谢有机物, 提高反应器对COD的去除效果。

关键词: 含硫酸盐低浓度有机废水; 厌氧消化; 厌氧膨胀颗粒污泥床反应器; COD/SO₄²⁻; 产甲烷菌; 硫酸盐还原菌

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0001-06

Effect of COD/SO₄²⁻ on Anaerobic Treatment of Low Concentration Organic Wastewater Containing Sulfate

WAN Xiao¹, SHAO Wen-xin², GUO Yi-ling³

(1. Pingdu Urban Construction Service Center, Qingdao 266799, China; 2. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: The expanded granular sludge bed (EGSB) reactor was used to treat low concentration organic wastewater containing sulfate, and the removal rule of COD and SO₄²⁻ was investigated under different influent COD/SO₄²⁻ conditions. The results showed that the influent COD/SO₄²⁻ has two stages of increasing and decreasing effect on the removal rate of COD and reduction rate of SO₄²⁻. When COD/SO₄²⁻ was 15, the COD removal rate was about 65%, and the SO₄²⁻ removal rate was above 80%. When COD/SO₄²⁻ was 7, the removal effect was the best. The effluent COD was less than 450 mg/L, and the removal rates of COD and SO₄²⁻ were more than 75% and 85% respectively. When COD/SO₄²⁻ was 4, the removal rates of COD and SO₄²⁻ decreased to below 65% and 75% respectively. This study shows that in the anaerobic treatment of low concentration organic wastewater, the presence of an appropriate amount of sulfate can make methanogens and sulfate reducing bacteria metabolize the organic matter synergistically,

so as to improve the removal effect of COD in the reactor.

Key words: low concentration organic wastewater containing sulfate; anaerobic digestion; EGSB reactor; $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$; methanogens; sulfate reducing bacteria

基于厌氧消化工艺的低能耗以及可回收沼气资源等优点,其常被用于处理工业有机废水。硫化合物作为工业生产中重要的原材料以及辅助材料被广泛使用,使得一些工业生产废水中会含有一定浓度的硫酸盐^[1]。而在水处理过程中普遍使用的是硫酸盐系絮凝剂,这将间接造成生活污水中 SO_4^{2-} 浓度的升高^[2]。虽然硫酸盐本身性质稳定且无毒无害,但其若存在于厌氧消化系统中,则能够刺激硫酸盐还原菌(SRB)的代谢活性,并对厌氧消化过程产生阻碍作用。首先,SRB与产甲烷菌(MPB)有着相同的代谢底物 H_2 和乙酸,且SRB对底物更具竞争力与亲和度,从而对MPB的生物过程造成初级抑制作用;其次,硫酸盐还原时会产生 H_2S 等硫化物,从而对MPB的生物过程造成次级抑制作用^[3-4]。另外,若所处理的工业废水中有机物浓度较低时,反应器内有机质与厌氧微生物间的传质驱动力将会有所下降,从而导致微生物代谢活性减弱,反应器的处理效能降低^[5]。

含硫酸盐有机废水的厌氧处理一直是国内外学者的研究热点之一。 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 是影响SRB与MPB之间对底物竞争能力的重要指标^[6],其能够表征进水中营养物质与硫酸盐的相对含量^[7]。有研究表明^[8], $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 不但影响产甲烷菌的代谢活性和产气性能,同时也影响 SO_4^{2-} 的去除效果。另外,根据废水水质以及反应器类型的不同,能够对厌氧消化产生影响的 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 范围也有所不同^[9]。以往的研究大多集中在反应器对含硫酸盐有机废水的极限处理能力^[10-11],而对含硫酸盐低浓度有机废水的研究较少。在采用厌氧工艺处理含硫酸盐低浓度有机废水时,若利用SRB对有机底物更具亲和性的特点,促进废水中有机物的分解,并控制适合的 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$,有可能避免硫酸盐还原反应所带来的初级和次级抑制作用,使硫酸盐还原菌与产甲烷菌之间产生协同合作、耦合处理硫酸盐与有机污染物,提升厌氧消化反应器处理效能。为此,通过改变进水 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$,比较在不同进水条件下,反应器对COD与 SO_4^{2-} 的去除效果、沼气产量、组分变化以及

反应器的运行状态,从而明晰进水 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 对处理含硫酸盐低浓度有机废水的影响规律。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置

厌氧膨胀颗粒污泥床(EGSB)反应器如图1所示。反应器采用有机玻璃制作,直径为38 cm,高度为165 cm,有效容积为181 L。试验装置由EGSB反应器主体、进水系统、处理水回流系统、温控系统以及沼气收集系统组成。进水量由进水泵控制,通过温控箱将温度控制在 $(37\pm 0.5)^\circ\text{C}$,在反应器外包裹棉布保温,在反应器上部设有出水口以及沼气出气管,沼气经出气管进入集气装置。

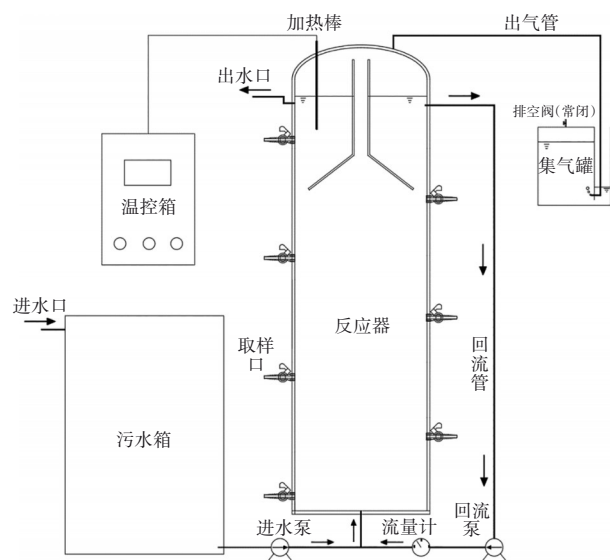


图1 EGSB试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of EGSB device

1.2 试验用水及接种污泥

试验所用废水为某果糖及淀粉生产车间产生的废水,其COD为1 400~2 000 mg/L, pH为5.0~7.3, NH_4^+-N 为70~130 mg/L。

接种污泥取自于某粮食加工企业内循环(IC)厌氧反应器底部的厌氧颗粒污泥,其MLVSS/MLSS为0.79,接种污泥浓度(以MLSS计)为 (10.5 ± 0.1) g/L,接种量约为反应器有效容积的20%。待污泥浓度稳定在 (7.0 ± 0.1) g/L后开始试验。

1.3 试验方法

EGSB反应器在适合的水力停留时间(HRT)下稳定运行后,通过投加NaOH调节进水pH为7.0±0.2,在上升流速为6 m/h、温度为(37±0.5)℃、HRT为12 h的条件下共运行了82 d,分为如表1所示的5个阶段进行。在阶段I~IV,使用某粮食加工企业废水调节池内的原水进行试验,根据进水COD浓度,投加硫酸钠调整进水COD/SO₄²⁻由15逐步下降到4,观察出水COD浓度的变化。为探究引起出水水质变化的主要因素是COD/SO₄²⁻还是进水SO₄²⁻浓度,在阶段V,向进水中添加果糖,提高进水COD至3 000 mg/L左右,进水SO₄²⁻浓度稳定在430 mg/L左右,使COD/SO₄²⁻提高至7,观察出水水质的变化。

表1 试验条件

Tab.1 Operation conditions of EGSB

| 阶段 | 时间/d | 进水COD/ (mg·L ⁻¹) | 进水SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹) | COD/ SO ₄ ²⁻ |
|-----|-------|---------------------------------|--|---------------------------------------|
| I | 1~21 | 1 400~1 800 | 105~120 | 15 |
| II | 22~37 | 1 400~1 900 | 140~190 | 10 |
| III | 38~51 | 1 550~1 900 | 220~270 | 7 |
| IV | 52~68 | 1 350~2 000 | 340~500 | 4 |
| V | 69~82 | 3 000 | 430 | 7 |

1.4 分析方法

1.4.1 常规指标测定

COD:重铬酸钾法;SO₄²⁻:铬酸钡分光光度法;挥发性脂肪酸(VFA):蒸馏滴定法;碳酸氢盐碱度:电位滴定法;pH:PB-10型酸度计;沼气产量:排水法;甲烷气体占比:Geotech Biogas 5000 便携式沼气分析仪;H₂S气体占比:H₂S快速检测管。

1.4.2 SRB电子流比重计算

Isa等提出了电子流理论^[12],将SRB对有机底物的竞争规模大小通过数字的形式表现出来,该值越大,说明其对共同底物的竞争越占优势。反应器中SRB的电子流比重计算公式如下:

$$e = \frac{\Delta\text{SO}_4^{2-} \times 0.72}{\Delta\text{COD}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: e 表示SRB的电子流比重,%; ΔSO_4^{2-} 与 ΔCOD 分别表示SO₄²⁻与COD的去除量,mg;0.72表示完全还原1 kg SO₄²⁻所需要的COD量为0.72 kg。

2 结果与讨论

2.1 不同进水条件下COD和SO₄²⁻的去除效果

阶段I~V的进出水COD、SO₄²⁻浓度及其去除

率的变化如图2所示。在阶段I~III,进水COD浓度稳定在1 400~1 900 mg/L,中值为1 680 mg/L,COD/SO₄²⁻由15逐步降低到7。在阶段I,出水COD接近600 mg/L,COD去除率在63%左右,SO₄²⁻去除率在84%左右;在阶段II,出水COD下降到530 mg/L左右;在阶段III,出水COD降至450 mg/L以下,COD去除率在75%左右,同时SO₄²⁻去除率接近90%。COD与SO₄²⁻去除率均随着进水COD/SO₄²⁻的降低而上升。一般认为,当进水COD/SO₄²⁻降低时,SRB会得到相应的刺激生长,增强对有机物的代谢速率,从而提高SRB对COD的去除率;同时SRB的丰度在厌氧体系中将不断增加,提高对SO₄²⁻的代谢速率和去除率^[13]。对于含有硫酸盐的有机废水,有机物的去除是由SRB与MPB的共同作用完成的。当硫酸盐还原反应尚未对厌氧反应产生不利影响时,两者能够协同代谢废水中的有机物,增加进水SO₄²⁻浓度将有利于提升有机物的去除效果^[14]。

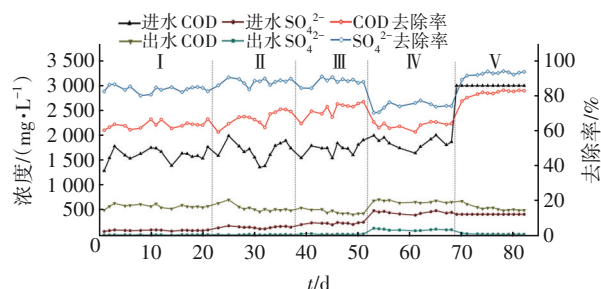


图2 不同进水条件下反应器对COD、SO₄²⁻的去除效果

Fig.2 Removal effect of COD and SO₄²⁻ at different stages

在阶段IV,当COD/SO₄²⁻进一步降至4后,出水COD和SO₄²⁻浓度分别上升到675、120 mg/L左右,去除率分别下降至65%和75%左右,说明硫酸盐还原反应对有机物降解产生了抑制作用。在阶段V,稳定进水硫酸盐浓度为430 mg/L,通过投加工业果糖提高进水COD浓度至3 000 mg/L,使得进水COD/SO₄²⁻恢复至7,发现反应器的处理效果明显提高,COD与SO₄²⁻去除率分别恢复至80%和90%以上。说明在阶段IV出现的处理效能下降现象是由可逆的基质竞争抑制造成的,而非硫化物毒害抑制。推测在阶段IV,由于进水COD/SO₄²⁻较低,使得SRB与MPB对有机底物产生竞争作用,导致两者的代谢效率都出现了不同程度的下降,出水COD与SO₄²⁻浓度有所升高,去除率分别下降了10%和15%^[7]。

综上所述,在处理有机质含量较低的工业废水

时,适量硫酸盐的存在将有助于提高反应器的处理效率。另外,从图2还可以看出,在整个试验期间,无论是否存在抑制作用, SO_4^{2-} 去除率都高于COD去除率。这是因为SRB比MPB对共同代谢底物更具有竞争力,所以硫酸盐还原反应将更容易发生。一方面,从动力学角度来看,SRB比MPB对共同代谢底物的亲和度更高^[3];另一方面,从热力学的角度,硫酸盐还原反应具有更低的吉布斯自由能,更容易发生反应^[10]。

2.2 不同进水条件下沼气产量及组分的变化

随着进水COD/ SO_4^{2-} 的降低,沼气产量和甲烷产量都呈现出逐渐下降的趋势(如图3所示)。如阶段I的沼气产量与甲烷产量分别为0.43、0.37 m^3/kg ,而在阶段IV分别下降至0.33、0.29 m^3/kg ,单位进水COD的甲烷产量下降了0.08 m^3/kg 。

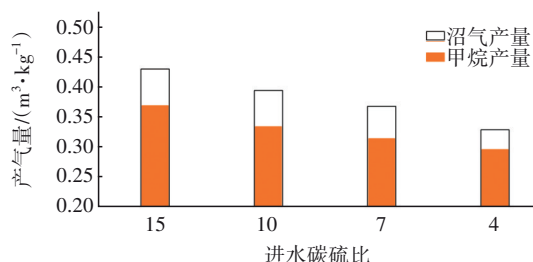


图3 不同进水条件下沼气和甲烷产量的变化

Fig.3 Changes in biogas and methane production at different stages

在阶段I~IV期间,进水 SO_4^{2-} 浓度约上升了332 mg/L 。将1 kg SO_4^{2-} 完全还原需要0.72 kg 的COD^[14],与阶段I相比,阶段IV的SRB多利用的COD量为0.239 kg/m^3 。MPB每降解1 kg COD约产生0.35 m^3 (标况)甲烷,理论上阶段IV相比阶段I,单位进水COD的甲烷产量约下降0.084 m^3/kg ,与实测数据0.08 m^3/kg 吻合。在阶段IV,由于进水COD/ SO_4^{2-} 较低,会对产甲烷作用产生较为明显的影响。在硫酸盐的刺激下,SRB的丰度不断增加,代谢活性也有所增强,使得基质分流现象变得愈加明显,越来越多的有机质通过SRB的代谢途径被降解,被MPB消化降解的有机质有所减少,从而导致甲烷产量不断下降^[15]。综上所述,硫酸盐的存在会对厌氧消化系统的沼气产量以及甲烷产量产生一定的影响,产气量与进水COD/ SO_4^{2-} 成正比。

2.3 不同运行条件下系统参数的变化

2.3.1 碱度的变化

碱度可以和厌氧反应器产生的有机酸反应,起

到缓冲pH的作用。不同条件下反应器内碱度的变化如图4所示,在阶段I~V碱度随着进水 SO_4^{2-} 浓度的增加而增加。这是因为硫酸盐被还原时会产生部分碱度,理论上每去除1 mol 硫酸盐便会产生2 mol 碱度^[16]。阶段IV与阶段V的进水 SO_4^{2-} 浓度相当,但由于在阶段IV出现了基质竞争抑制,导致其 SO_4^{2-} 去除率下降,从而使得碱度也相对较低。

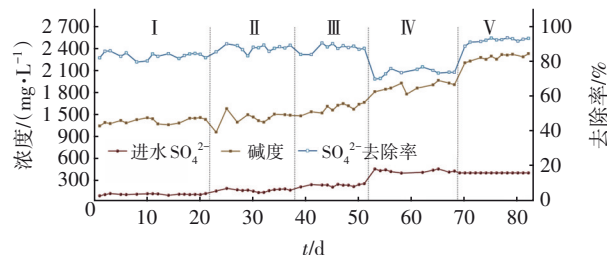


图4 不同进水条件下EGSB反应器内碱度的变化

Fig.4 Variation of alkalinity in EGSB reactor at different stages

2.3.2 VFA的变化

出水VFA的变化如图5所示。阶段I、II、III、V的进水COD/ $\text{SO}_4^{2-} \geq 7$,出水VFA一直在一个相对较低的水平,而在阶段IV的进水COD/ SO_4^{2-} 降至4后,出水VFA升高,意味着在EGSB反应器内出现了一定程度的有机酸积累。出水VFA浓度能够反映厌氧反应器内各类厌氧微生物之间的代谢平衡关系,其中产酸菌能够将有机物转化为有机酸,而有机酸又能为MPB所利用,从而在两者之间形成了一种代谢平衡。而当进水COD/ SO_4^{2-} 降至4后,MPB与SRB之间的基质竞争使得MPB的代谢效率下降,硫酸盐被还原产生的碱度减少,原有的平衡被打破,出水VFA增加。

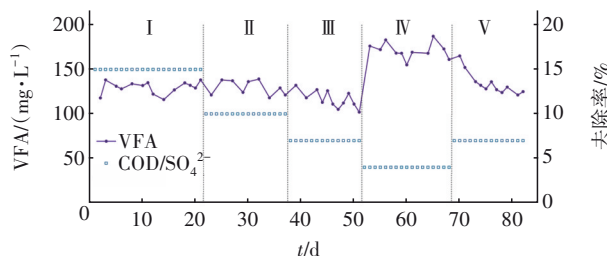


图5 不同进水条件下EGSB反应器的出水VFA浓度

Fig.5 Effluent VFA concentration of EGSB reactor at different stages

2.3.3 pH的变化

在阶段I~V出水pH都稳定在7.5以上,且缓慢增加到8.0左右,即便VFA在阶段IV有所积累,但

出水 pH 仍相对稳定。可见,在采用厌氧处理含硫酸盐低浓度有机废水时,适量硫酸盐的存在可以为厌氧反应器提供一定的碱度,增加反应器的稳定性和缓冲能力。

2.4 硫酸盐还原菌的电子流比重分析

图 6 反映了不同条件下 SRB 的电子流比重变化。在阶段 I, SRB 的电子流比重仅有 7% 左右,说明在较高的进水碳硫比下,在对基质的竞争中 MPB 更占优势,但随着进水 SO₄²⁻浓度的提升、COD/SO₄²⁻的降低,SRB 在硫酸盐的刺激下丰度与代谢活性都有所提高,对硫酸盐的还原能力以及对共同底物的竞争能力都在增强,使得 SRB 的电子流比重不断增大,逐步上升到阶段 IV 的 22% 左右。

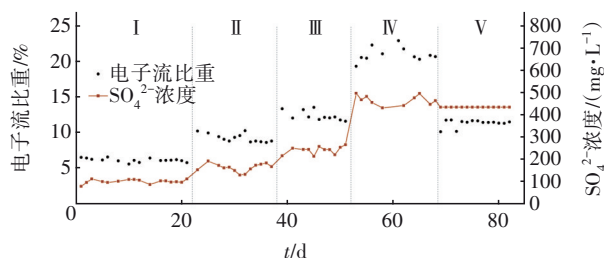


图 6 不同进水条件下 SRB 的电子流比重变化

Fig.6 Changes in the proportion of electron flow of SRB at different stages

结合 2.1 节的分析可知,此时反应器内的 SRB 与 MPB 开始出现基质竞争现象。冀滨弘等^[17]在单相升流式厌氧污泥床(UASB)反应器处理含硫酸盐葡萄糖配水的试验中发现,当 SRB 的电子流比重在 25% 左右时,COD 去除率较无硫酸盐干扰时下降了 16%,认为是硫酸盐的还原作用对厌氧消化产生了影响。陈燚^[18]在试验中发现,当进水 COD/SO₄²⁻由 8 降至 5 后,SRB 的电子流比重在 15% 左右,COD 去除率仅由 92% 降至 91%,硫酸盐还原反应并未对厌氧系统造成影响;当 COD/SO₄²⁻由 5 降至 2 后,SRB 的电子流比重上升至 25% 左右,此时 COD 去除率由 92% 下降至 84%。结合阶段 I~V 结果,可以认为当 SRB 的电子流比重接近 20%~25% 时,SRB 与 MPB 之间开始对有限的共同底物展开竞争,COD 去除率由 75% 降至 65%。

3 结论

① 适宜的进水 COD/SO₄²⁻可以实现 SRB 与 MPB 协同去除废水中的有机污染物。在进水 COD/SO₄²⁻为 7 时,反应器的处理效率最高,出水 COD 在

450 mg/L 以下,COD 去除率在 75% 左右,同时 SO₄²⁻去除率接近 90%。

② 受基质分流的影响,硫酸盐的存在会对产甲烷菌产生不利影响,使甲烷产量随着进水 COD/SO₄²⁻的降低而下降。进水 COD/SO₄²⁻为 15 时,甲烷产量为 0.37 m³/kg,而在进水 COD/SO₄²⁻下降到 4 时,甲烷产量下降至 0.29 m³/kg。

③ 当 SRB 的电子流比重在 20%~25% 时,SRB 与 MPB 之间开始出现竞争共同代谢底物的现象,导致二者的代谢效率同时下降,COD 去除率由最高时的 75% 左右下降到 65% 以下,SO₄²⁻去除率由最高时的 90% 降至 75% 以下。

参考文献:

- [1] LIN S, MACKEY H R, HAO T, *et al.* Biological sulfur oxidation in wastewater treatment: a review of emerging opportunities [J]. *Water Research*, 2018, 143: 399-415.
- [2] 何强,卢旺,洪毅怡晖,等. 铁盐在城市排水系统中的综合使用研究进展[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(10): 3167-3175.
HE Qiang, LU Wang, HONG Yiyihui, *et al.* Research progress of comprehensive use of iron salt in urban drainage system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(10): 3167-3175(in Chinese).
- [3] 李俊,李燕,罗干,等. 两相厌氧工艺处理硫酸盐有机废水研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2016, 47(3): 6-10,21.
LI Jun, LI Yan, LUO Gan, *et al.* Research progress of sulfate organic wastewater treatment by two-phase anaerobic process [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2016, 47(3): 6-10,21(in Chinese).
- [4] WANG K, SHENG Y, CAO H, *et al.* Impact of applied current on sulfate-rich wastewater treatment and microbial biodiversity in the cathode chamber of microbial electrolysis cell (MEC) reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 307: 150-158.
- [5] 吴秉奇,段美娟,周振,等. 多段内循环厌氧反应器的气液流场及处理低浓度屠宰废水的研究[J]. *工业用水与废水*, 2019, 50(1): 19-24.
WU Bingqi, DUAN Meijuan, ZHOU Zhen, *et al.* A study of gas-liquid flow field of multistage internal recycle anaerobic reactor and low concentration slaughter wastewater treatment thereof [J]. *Industrial*

- Water & Wastewater, 2019, 50 (1): 19-24 (in Chinese).
- [6] 贾雪雪. 含硫酸盐有机废水厌氧消化研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.
- JIA Xuexue. Research on Sulfate Organic Wastewater Treatment by Anaerobic Digestion [D]. Xianyang: Northwest Agricultural and Forestry University, 2017 (in Chinese).
- [7] 罗娜, 朱仲广, 秦永丽, 等. COD/SO₄²⁻对硫酸盐有机废水厌氧处理颗粒污泥活性的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 23-30.
- LUO Na, ZHU Zhongguang, QIN Yongli, *et al.* Effect of COD/SO₄²⁻ on activity of granular sludge in anaerobic treatment of organic wastewater containing sulfate [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42 (1): 23-30 (in Chinese).
- [8] LU X, ZHEN G, NI J, *et al.* Effect of influent COD/SO₄²⁻ ratios on biodegradation behaviors of starch wastewater in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor [J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 175-183.
- [9] 蔡晓阳, 张艳萍, 焦凡凡, 等. SRB的分离筛选及其去除废水中硫酸盐的响应面优化[J]. 工业水处理, 2020, 40(5): 100-105.
- CAI Xiaoyang, ZHANG Yanping, JIAO Fanfan, *et al.* The separation and screening of sulfate reducing bacteria and the optimization of sulfate removal in wastewater by response surface methodology [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(5): 100-105 (in Chinese).
- [10] 罗干. 内循环(IC)厌氧反应器处理硫酸盐有机废水研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- LUO Gan. Treatment of Sulfate-rich Organic Wastewater by Internal Circulation (IC) Anaerobic Reactor [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017 (in Chinese).
- [11] 周亚武. 生物炭强化厌氧产酸相处理高浓度硫酸盐有机废水的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- ZHOU Yawu. Enhanced Treatment of High-strength Sulfate Organic Wastewater with Biochar by Acidogenic Reactor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020 (in Chinese).
- [12] ISA Z, GRUSENMEYER S, VERSTRAETE W. Sulfate reduction relative to methane production in high-rate anaerobic digestion: technical aspects [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1986, 51: 572-579.
- [13] LU X, NI J, ZHEN G, *et al.* Response of morphology and microbial community structure of granules to influent COD/SO₄²⁻ ratios in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treating starch wastewater [J]. Bioresource Technology, 2018, 256: 456-465.
- [14] KIYUNA L S M, FUESS L T, ZAIAT M. Unraveling the influence of the COD/sulfate ratio on organic matter removal and methane production from the biodigestion of sugarcane vinasse [J]. Bioresource Technology, 2017, 232: 103-112.
- [15] BARRERA E L, SPANJERS H, ROMERO O, *et al.* Characterization of the sulfate reduction process in the anaerobic digestion of a very high strength and sulfate rich vinasse [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 248: 383-393.
- [16] 张健. 碱度和碳源对硫酸盐废水处理效能的影响及机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- ZHANG Jian. The Performance of Sulfate Wastewater Treatment and Mechanism on the Impact of Alkalinity and Carbon Source [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010 (in Chinese).
- [17] 冀滨弘, 章非娟, 史平. 硫酸盐有机废水厌氧处理工艺的试验研究[J]. 给水排水, 2003, 29(8): 5-8.
- JI Binhong, ZHANG Feijuan, SHI Ping. Experimental study on anaerobic treatment of sulfate organic wastewater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(8): 5-8 (in Chinese).
- [18] 陈懿. 高pH值对含硫酸盐有机废水厌氧处理系统的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- CHEN Yi. Effect of pH on the Anaerobic Treatment of Sulfate Organic Wastewater [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019 (in Chinese).

作者简介: 万晓(1970—), 男, 山东青岛人, 学士, 高级工程师, 主要从事市政排水、污水厂运营等方面的研究和管理工作的。

E-mail: gysyxbgs@163.com

收稿日期: 2023-04-15

修回日期: 2023-06-07

(编辑: 李德强)