

升流式厌氧填充床反应器处理高硫酸盐废水的运行特性

朱逸玟, 任煜坤, 梁海, 张传义*

中国矿业大学, 环境与测绘学院, 江苏 徐州
Email: *chuanyizhang@163.com

收稿日期: 2021年5月7日; 录用日期: 2021年6月8日; 发布日期: 2021年6月15日

摘要

本文采用升流式填充床厌氧反应器, 探究了HRT (12、14、16、20 h)和COD/SO₄²⁻ (0.6、0.7、0.8、0.9、1)以及硫酸盐负荷(1.5、3、4.5、6、7.5 kg/(m³·d))对反应器长期性能的影响。当HRT从12 h延长到16 h时, 进水硫酸盐去除率从(68.53 ± 4.42)%增加到(89.90 ± 1.89)%, 并且在20 h和24 h时均保持在90%以上。当COD/SO₄²⁻为1时, 硫酸盐去除率高达(91.59 ± 3.53)%。当COD/SO₄²⁻比为0.6时, 硫酸盐去除率仅为(62.85 ± 5.47)%。当硫酸盐负荷为1.5、3 kg/(m³·d)时均有90%以上的良好的硫酸盐去除率, 当硫酸盐负荷高于4.5 kg/(m³·d)去除效果不佳。研究结果表明当HRT为16 h且在COD/SO₄²⁻为0.9时, 且硫酸盐负荷低于4.5 kg/(m³·d)时硫酸盐还原菌(SRB)具有优异的处理高硫酸盐废水的能力。

关键词

硫酸盐还原, 水力停留时间, COD/SO₄²⁻比, 电子流动

Operational Characteristics of Upflow Anaerobic Packed Bed Reactor for Treatment of High Sulfate Wastewater

Yiwen Zhu, Yukun Ren, Hai Liang, Chuanyi Zhang*

School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou
Jiangsu
Email: *chuanyizhang@163.com

Received: May 7th, 2021; accepted: Jun. 8th, 2021; published: Jun. 15th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 朱逸玟, 任煜坤, 梁海, 张传义. 升流式厌氧填充床反应器处理高硫酸盐废水的运行特性[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(3): 538-546. DOI: 10.12677/aep.2021.113060

Abstract

This article uses an upflow packed bed anaerobic reactor to explore HRT (12, 14, 16, 20 h) and COD/SO₄²⁻ (0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1) and the influence of sulfate load (1.5, 3, 4.5, 6, 7.5 kg/(m³·d)) on the long-term performance of the reactor. When HRT was extended from 12 h to 16 h, the influent sulfate removal rate increased from (68.53 ± 4.42)% to (89.90 ± 1.89)%, and remained above 90% at 20 h and 24 h. When COD/SO₄²⁻ is 1, the sulfate removal rate is as high as (91.59 ± 3.53)%. When the COD/SO₄²⁻ is 0.6, the sulfate removal rate is only (62.85 ± 5.47)%. When the sulfate load is 1.5, 3 kg/(m³·d), both have a good sulfate removal rate of more than 90%. When the sulfate load is higher than 4.5 kg/(m³·d), the removal effect is not good. The research results show that when the HRT is 16 h and the COD/SO₄²⁻ is 0.9, and the sulfate load is less than 4.5 kg/(m³·d), sulfate reducing bacteria (SRB) have excellent ability to treat high sulfate wastewater.

Keywords

Sulfate Reduction, Hydraulic Retention Time, COD/SO₄²⁻ Ratio, Electron Flow

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在废水的生物厌氧处理中，可以通过硫酸盐还原菌将硫酸盐还原成硫化物将其去除。对于高有机物硫酸盐废水，厌氧发酵去除有机物的同时可以同步去除硫酸盐，但硫酸盐的含量会影响产甲烷效能[1]。虽然大部分工业废水生产硫酸盐废水具有高硫酸盐和高有机物质，但一些工业废水如酸性矿井排水、地下水等有机物含量低，这意味着需要额外的碳源去除废水中的硫酸盐。

COD/SO₄²⁻ 比也是影响硫酸盐还原菌在厌氧环境中竞争优势的一个比较重要的因素。随着硫酸盐负荷的增加，系统中的硫化物就会增加，对 SRB、MPB 以及 AB 等都会产生抑制作用，导致硫酸盐去除率降低。赵毅等利用硫酸盐还原菌还原青霉素废水中的 SO₄²⁻ 的试验结果发现[2]，SO₄²⁻ 负荷是影响 SO₄²⁻ 还原效果的重要因素。当 SO₄²⁻ 浓度为 800~2000 mg/L，硫酸盐的负荷率(Ns)为 5、7、9 和 10 kg/(m³·d)时，SO₄²⁻ 去除率分别为 93.2%、86%、82%和 76%。LU X 等研究观察到[3]当 SLR 小于 2 g·L⁻¹·d⁻¹时保持相对稳定的硫酸盐还原率(83.0%)，而当 SLR 持续增加时硫酸盐还原率迅速下降。

水力停留时间(HRT)是一个重要的运行参数。较高的 HRT 意味着需要更大的建筑面积和更多的能源消耗。水力停留时间也会影响 SRB 和 MPB 之间的竞争。相比 MPB 来说，较短的 HRT 更加有利于 SRB 的生长。因为较长的 HRT，会降低硫酸盐负荷，影响了 SRB 的微生物优势。但是较短的 HRT 即较快的上升流速会造成系统紊乱以及硫酸盐还原菌来不及利用底物等问题。

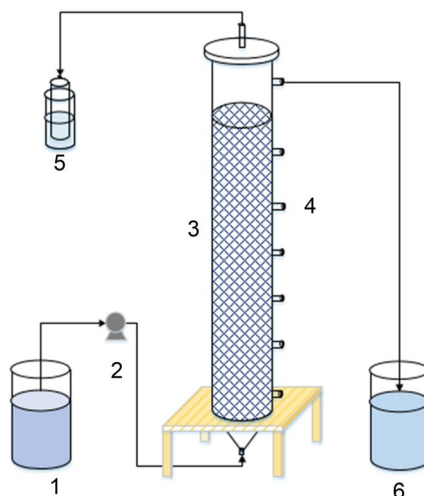
在处理含硫酸盐废水的试验研究中采用过的反应器有上流式厌氧污泥床反应器(UASB) (LU X 2016)、膨胀颗粒污泥床(CHOU, 2011)、膜反应器(VALLERO, 2005)、厌氧流化床反应器(KAKSONEN, 2003)、水平流动厌氧反应器(DAMIANOVIC, 2007)以及填充床厌氧反应器(SILVA, 2002)等。

本文采用了升流式填充床厌氧反应器来探究水力停留时间、进水 COD/SO₄²⁻ 比以及硫酸盐负荷对 SRB 细菌处理含硫酸盐废水的影响，同时对系统反应过程中电子硫和硫平衡进行了深入分析。

2. 材料与方法

2.1. 反应器与基质

本研究使用的升流式厌氧填充床反应器构成如图 1 所示。生物反应器尺寸为 $\text{Ø} 9.5 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$ ，有效容积为 4.5 L。进水采用人工配水， Na_2SO_4 和葡萄糖分别用作硫酸盐和有机碳。氮源和磷源分别采用 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 ，并保持 $\text{COD:N:P} = 200:5:1$ 。投加一定量的 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 将 pH 控制在 7。同时添加一定量的微量元素。



1 进水箱, 2 蠕动泵, 3 厌氧反应器, 4 取样口, 5 集气箱, 6 出水箱

Figure 1. Schematic diagram of the test device

图 1. 试验装置示意图

2.2. 分析方法

取样经 $0.45 \mu\text{m}$ 聚醚砜膜过滤后进行测量分析。根据 APHA 标准方法测量 COD，硫酸盐和硫化物以及挥发性悬浮固体(VSS)。为了去除水中溶解性硫化物对 COD 测量的影响，样品在测量之前需要先用 H_2SO_4 酸化，然后用氮气搅拌 5 分钟[4]。测定 pH 和 ORP 采用多参数水质测量仪测定。

高通量测序实验方法：微生物群落结构的研究对生物样品 16SrRNA 的 V4-V5 区基因进行测序。主要测序流程包括：环境样品 DNA 抽提；设计合成引物接头；PCR 扩增与产物纯化；PCR 产物定量与均一化；构建 PR 文库；Illumina 测序。

2.3. 启动与驯化

将取自中国徐州中国矿业大学南湖污水处理厂(A^2/O 工艺)的厌氧区的活性污泥加入升流式填料床厌氧反应器中。混合后的污泥的总挥发性悬浮固体(VSS)为 $9.50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在启动阶段，水力停留时间保持在 12 h。在进水 COD 为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 SO_4^{2-} 为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($\text{COD}/\text{SO}_4^{2-} = 2$)条件下进行驯化。当硫酸盐去除率达到 90%以上时，63 天驯化结束，硫酸盐还原菌富集完成。

3. 结果与讨论

3.1. HRT 对硫酸盐和 COD 去除的影响

图 2 显示了不同 HRT 下硫酸盐和 COD 去除率的变化。在 HRT 为 12 h 时，硫酸盐和 COD 的去除率分

别仅为 $(68.53 \pm 4.42)\%$ 和 $(85.09 \pm 5.21)\%$ 。当水力停留时间增加到 16 h 时, 硫酸盐和 COD 的去除率分别增加到 $(91.46 \pm 2.64)\%$ 和 $(96.64 \pm 3.00)\%$ 。当水力停留时间继续增加时, 硫酸盐和 COD 的去除率保持相对稳定。在该试验中, 当水力停留时间达到 16 h 以上时, 就可以达到优秀的硫酸盐去除效果。水力停留时间的增加, 反应器具有更高的上升流速, 硫酸盐负荷也随之降低。当水力停留时间从 12 h 增加到 24 h, 硫酸盐负荷则从 $2 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 降低到 $1 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

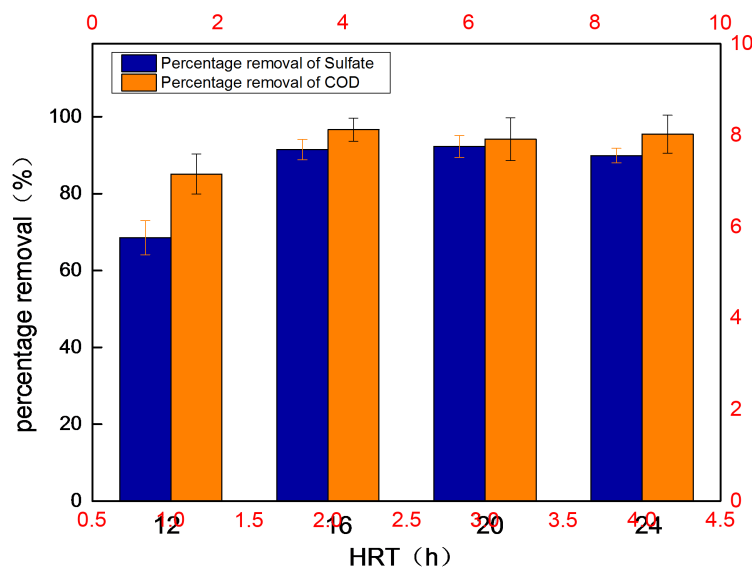


Figure 2. Sulfate and COD removal rate under different HRT

图 2. 不同 HRT 下的硫酸盐与 COD 去除率

有结果表明[5]: 只有大于 8 h 以上时才能有较好的去除效果。随着上升流速的增加, 硫酸盐去除率下降明显, COD 的去除率变化则不显著, SHAYEGAN 等认为[6]与 MPB 相比, SRB 细菌具有较低的聚集能力, 很容易地从系统中冲洗掉, 需要更低的上升流速及较高的水力停留时间。较高的流速也会造成代谢途径的变化, H_2 的产生量增加, 由于 SRB 比产甲烷菌有更好的动力学参数, 更加利于 SRB 的利用[7]。

但是在 MARTIN 等人的研究中发现[8] HRT 为 12 h 时硫酸盐去除率较高, 为 84%, 而提高到 24 和 36 h 时硫酸盐去除反而下降到 68% 左右。说明过高的 HRT 也是不利于硫酸盐还原的。有同样试验结果的研究也有, 在 CUNHA 等人的研究中[9]硫酸盐去除率在 16 h 时效果最佳, 反而在 24 h 和 14 h 时有所降低。

随着 HRT 的变化, 硫酸盐负荷也会相应的变化。LU X 研究观察到[3]当 SLR 小于 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 时保持相对稳定的硫酸盐还原率(83.0%), 而当 SLR 持续增加时硫酸盐还原率迅速下降。在本研究中, 硫酸盐负荷为 1.5 以下时硫酸盐还原率均保持在较高的水平, 当 HRT 为 12 h 时的硫酸盐负荷达到 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 硫酸盐还原率迅速下降, 与这些作者研究的结果吻合。

3.2. $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 比对硫酸盐和有机物去除的影响

从图 3 中可以看出, 随着 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 比从 1 逐渐降低到 0.6, 硫酸盐去除率从 $(91.59 \pm 3.53)\%$ 降低到 $(62.85 \pm 5.47)\%$, COD 去除率从 $(88.76 \pm 8.12)\%$ 降低到 $(80.03 \pm 10.09)\%$ 。可以看出随着 COD 的减少, 硫酸盐去除率影响较大, 当 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 比为 0.6 时, 整体去除效果不够理想。硫酸盐去除的理论 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 比为 0.67, 即 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 比大于 0.67 才可以完全去除, 该理论值就是忽略整个过程中发生的其他反应得

到的，而实际过程是同时存在产甲烷、厌氧发酵等反应。在本研究中，COD 去除率一直保持在 80.03%~88.76% 的范围内。由于 SRB 和 MPB 之间的竞争，随着 COD/SO₄²⁻ 比的变化电子给体转移可能采取不同的途径，故 COD/SO₄²⁻ 比对 COD 去除的不利影响较小。SAHINKAYA 等在试验中就是保持 OLR 不变，改变增大硫酸盐浓度来分别保持 COD/SO₄²⁻ 比分别为 4 和 1 [10]，对应的硫酸盐去除率分别为 60% 左右和 20%，而 COD 去除率差异不大。

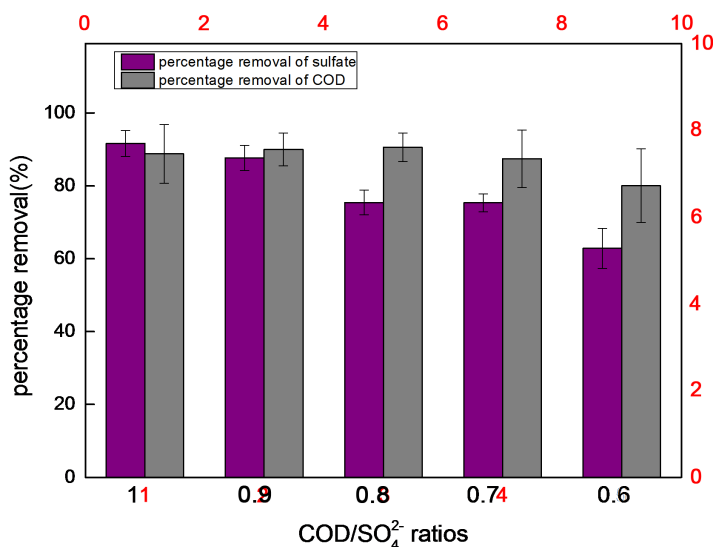


Figure 3. The effect of COD/SO₄²⁻ on the removal of sulfate and COD

图 3. COD/SO₄²⁻ 比对硫酸盐和 COD 去除效果的影响

在本试验中，COD/SO₄²⁻ 比为 1 和 0.9 时均能达到优异的硫酸盐去除效果。ERDIRENCELEBI 等就证明了在较高的 COD/SO₄²⁻ 比下，SRB 很难与 MPB 竞争来自底物氧化的电子[8]。SAHINKAYA 则发现[4]在 COD/SO₄²⁻ 比为 0.8 时观察到几乎完全的硫酸盐和 COD 去除，接近完全有机氧化 SRB (0.67) 的理论要求。SAHINKAYA 的研究中[10] COD/SO₄²⁻ 比由 0.67 提高到 0.85 时硫酸盐去除率也有小幅提高，从 85% 提高到 90%，COD 去除率也一直保持在 97% 这个较高水平上。而 LU X 研究发现[3]，随着 COD/SO₄²⁻ 比的不断降低，硫酸盐去除率下降十分明显，COD/SO₄²⁻ 比为 10 时仍有 80.9% 的硫酸盐去除率，而降低到 1 和 0.5 时仅分别只有 21.2%，15.4%。

3.3. 硫酸盐负荷对硫酸盐和有机物去除的影响

由图 4 可以发现，COD 的去除率也随着硫酸盐负荷的提高而逐渐降低，在硫酸盐负荷为 1.5、3 kg/(m³·d) 时，硫酸盐的去除率均在 90% 以上，分别为(92.64 ± 2.3621)%和(91.07 ± 1.39)%。而当硫酸盐负荷提高到 4.5 kg/(m³·d)时，硫酸盐去除率骤降到(72.58 ± 6.86)%，随着硫酸盐负荷的继续提高，硫酸盐去除率继续降低，直到 7.5 kg/(m³·d)时的(46.92 ± 2.42)%。

在 SRB 生长代谢过程中，少量的硫酸盐(或硫化物)将有益于厌氧消化过程，但当废水中含硫酸盐过高时，会对厌氧生物处理产生严重的抑制作用。主要原因在于：① 由于 SRB 与 MPB 争夺 H₂ 和乙酸而导致的初级抑制；② 由于高浓度溶解性硫化物直接破坏 MPB 的细胞功能，从而引起 MPB 数量减少而导致次级抑制。王爱杰等在关于处理硫酸盐废水的研究中得出[11]当硫酸盐负荷低于 7.5 kg/(m³·d) 时硫酸盐还原菌才能有较高的活性。Arnaldo 等采用厌氧序批式反应器处理含硫酸盐废水，得出了在硫酸盐浓度为 1.0 g/L 时，硫酸盐去除率可以达到 99%，当硫酸盐浓度提升到 2.0~3.0 g/L 时，硫酸盐还原

率只有 71%~95% [12]。要想获得理想的运行效果, 负荷率必须控制在一定的限度内, 否则将会引起生物活性下降和运行恶化。

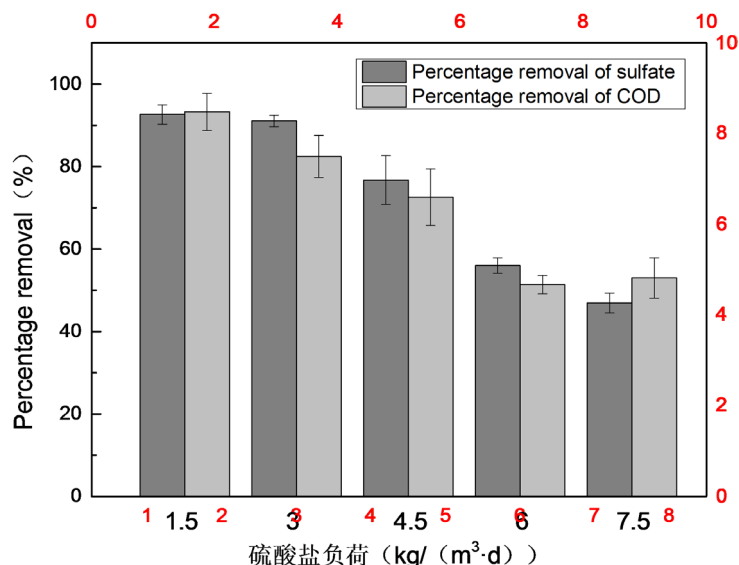


Figure 4. Changes in the removal rate of sulfate and COD under different influent sulfate loads
图 4. 不同进水硫酸盐负荷下硫酸盐和 COD 去除率的变化图

3.4. 硫平衡(S Balance)

如图 5(a)所示, 当 HRT 由 12 h 提高到 16 h 后, 硫酸盐转化为硫化物水溶液的比例急速提高, 由(23.45±4.56)% 增加到(47.20±4.21)%。相比之下出水中硫酸盐的比例则相应的急剧下降, 由 12 h 的(31.36±4.43)% 降低到 16 h 的(8.54±2.64)%。而随着水力停留时间的继续增加, 各物质所占的百分比并没有发生很明显的变化。除了出水硫酸盐硫和溶液中的硫化物外, 其余的包括气体硫化氢以及一般占很小比例的硫单质和金属硫化物沉淀所占的比例在 41.30%至 48.75%之间, 相对稳定, 受水力停留时间的影响很小。

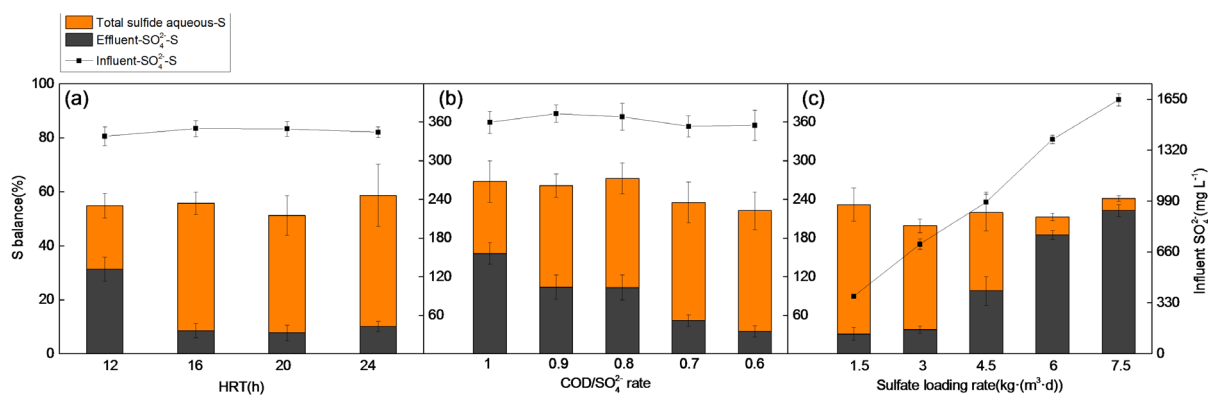


Figure 5. S balance changes under different HRT and different COD/SO₄²⁻

图 5. 不同 HRT 和不同 COD/SO₄²⁻ 比下的 S 平衡变化情况

如图 5(b)所示, 当 COD/SO₄²⁻ 比为 1 时, 硫酸盐转化为硫化物的比例达到了(44.73±6.89)%。而随着 COD/SO₄²⁻ 比的不断降低而下降, 由 0.8 时的(40.51±5.69)和 0.6 时的(26.62±7.66)%。而出水中硫酸盐随

着 COD/SO₄²⁻ 比的降低而增高。硫化氢气体随着 COD/SO₄²⁻ 比的降低有一定的减小, 从 COD/SO₄²⁻ 为 1 时的 47.01% 降低到 0.6 时的 36.22%。HU Y 等人的研究中[13]随着 COD/SO₄²⁻ 比从 20 逐渐降低到 0.5, 出水中水中硫化物比例从 69.9% 大幅度降低到 10.8%, 在 COD/SO₄²⁻ 比为 1 和 0.5 时, 出水硫酸盐比例分别达到 74.9% 和 85.3%。而硫化氢气体比例与本研究中的较为接近。

图 5(c)可以看出, 在进水硫酸盐浓度分别为 333、666、1000、1333、1666 mgS/L 下, 出水硫化物水溶液占比由(47.95 ± 6.188)% 逐渐降低到(4.44 ± 1.115)%, 相反的是出水硫酸盐的硫浓度则由(7.35 ± 2.362)% 逐渐提高到(53.08 ± 2.168)%。两者的和始终保持在 47.43%~57.52% 之间。

相比其他研究, 本研究中硫化氢气体的所占相对来说比较大。与本研究结果类似的研究有也有, 相比于本研究中的硫酸盐浓度为 333 mgS/L, KHANAL 的研究中[14], 在进水硫酸盐浓度分别为 333~1333 mgS/L 的水平下, 最终进入沼气的进水硫酸盐(作为硫)的百分在 43%~50% 范围内, 与本研究中的实验结果相近。

3.5. 各阶段电子流动的影响

定量分析电子流向 MPA 和 SRB 的比例是十分重要的, 这能够衡量 MPA 和 SRB 之间的竞争优势。ISA 对 COD 进行平衡计算[15], 进水 COD 的转化包括: 1) 出水中 COD; 2) 硫酸盐还原消耗的 COD; 3) 产甲烷菌等微生物消耗的 COD。

电子流向 SRB 的比例由(1)式计算得出,

电子流向产甲烷菌(MPA)、发酵细菌(FB)等微生物的比例由(2)式计算得出:

$$\text{COD}_{\text{SRB}} (\%) = 0.67 \times \frac{\text{SO}_4^{2-} \text{ infl} - \text{SO}_4^{2-} \text{ effl}}{\text{SO}_4^{2-} \text{ infl}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{COD}_{\text{MPA\&FB}} = \frac{\text{COD}_{\text{infl}} - \text{COD}_{\text{effl}} - 0.67 \times (\text{SO}_4^{2-} \text{ infl} - \text{SO}_4^{2-} \text{ effl})}{\text{COD}_{\text{infl}}} \times 100 \quad (2)$$

SO₄²⁻ infl: 进水 SO₄²⁻ 浓度; SO₄²⁻ effl: 出水 SO₄²⁻ 浓度;

COD_{infl}: 进水 COD 浓度; COD_{effl}: 出水 COD 浓度。

由图 6(a)可以发现, 随着 HRT 增加, 流向 SRB 的电子流量也有所增加, 当 HRT 为 20 h, 增加到(69.18 ± 6.96)%, 而继续增加到 24 h 时, 有较小的降低, 但也保持在(65.22 ± 3.48)%。有学者就分析了在 COD/SO₄²⁻ 为 20 的条件下水力停留时间对 SRB 和 MPA 竞争电子的影响。当 HRT 为 3 h 时, MPA 占 70%, HRT 为 2 h 时下降到 48.5%。

一般来说在低的 COD/SO₄²⁻ 比下, SRB 占主导作用。从图 6(b)可以看出随着 COD/SO₄²⁻ 比的降低, 流向 SRB 的电子的比例逐渐提高, 从 COD/SO₄²⁻ 比为 1 时的(74.27 ± 7.18)% 提高到 COD/SO₄²⁻ 比为 0.6 时的(95.74 ± 10.53)%, 而相应的(25.73 ± 7.18)% 降低到(4.26 ± 2.53)%。同样的趋势也出现在其他研究中, COD/SO₄²⁻ 比为 0.8 时, 电子流向 SRB 的比例为 68.2%, 而当 COD/SO₄²⁻ 为 0.67, 则增加至 74.7%。结果表明 COD 的降解途径(包括硫酸盐还原, 产甲烷过程, 发酵过程)与 COD/SO₄²⁻ 比有密切的关系。

但是也有研究显示无论是在高 COD/SO₄²⁻ (20)比或低 COD/SO₄²⁻ 比(0.5)下, 都是 MPA 利用电子占主导, 但是在低 COD/SO₄²⁻ 比下流向 SRB 的比例还是要大于高 COD/SO₄²⁻ 比下。这说明电子流动的比例不单仅受 COD/SO₄²⁻ 比的影响, 其它条件的不同造成影响还是存在的。由于硫化作用和产甲烷等过程是十分复杂的生物过程, 所以电子流动的比例不仅仅受 HRT 和 COD/SO₄²⁻ 比的影响, 也还会受底物类型、pH、温度等的影响。有学者在将硫酸盐还原流化床反应器的底物从乳酸盐改为乙醇后, SRB 利用的电子百分比就从 60%~75% 增加到 77%~95%。

图 6(c)可以看出随着硫酸盐负荷的不断提高,相应的进水 COD 负荷也不断提高,电子流向 SRB 的逐渐减小。电子流向 SRB 的占比在硫酸盐负荷为 1.5、3 kg/(m³·d)时分别为(92.65 ± 2.362)%和(91.07 ± 1.387)%,当 SLR 为 4.5 kg/(m³·d)时骤减至(76.74 ± 5.899)%,并接着降低至 6、7.5 kg/(m³·d)时的(55.99 ± 1.862)%、(46.92 ± 2.423)%。而流向 MPA 和 FB 等的则由(7.35 ± 2.362)%逐渐提高至(53.08 ± 2.423)%,竞争优势不断提高。可以得出硫酸盐负荷过大,反而会降低在与产甲烷菌等竞争电子时的竞争优势。

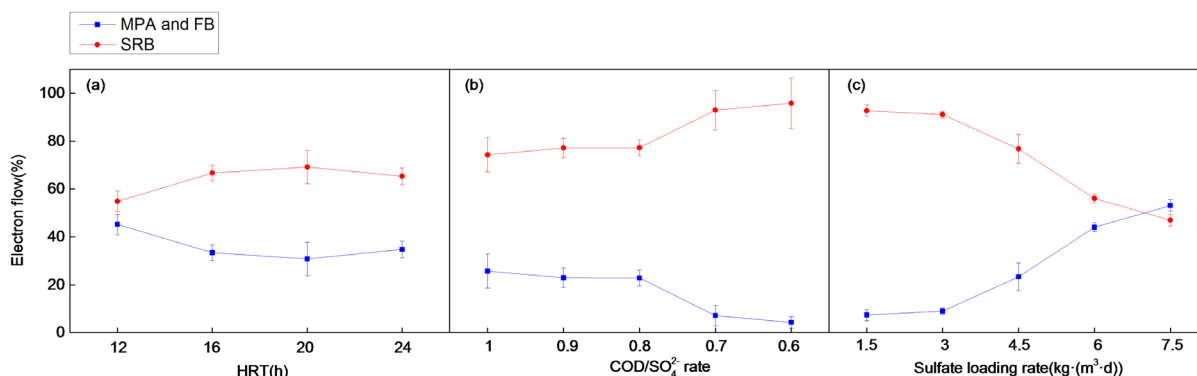


Figure 6. Changes in the proportion of electron flow under different hydraulic retention times

图 6. 不同水力停留时间下电子流动比例的变化

4. 结论

1) 在 HRT 达到 16 h 及以上时均保持在 90% 以上的硫酸盐去除率。在低 COD/SO₄²⁻ 比下,随着比值的下降硫酸盐还原率也随着不断降低,在低碳源废水中,COD/SO₄²⁻ 比为 0.9 时既能满足硫酸盐去除要求,也能尽可能地节约投加碳源的成本。

2) 硫酸盐负荷在 3 kg/(m³·d) 以下,硫酸盐去除效果良好,硫酸盐的去除率均在 90% 以上,当达到 4.5 kg/(m³·d),硫酸盐去除率仅为(72.58 ± 6.86)%。水中硫化物受 HRT、COD/SO₄²⁻ 比以及硫酸盐负荷的影响比较明显,而气态硫化氢等未测量硫化物的比例仅在 COD/SO₄²⁻ 比降低时有所降低。

3) SRB 在较高的 HRT 和较低的 COD/SO₄²⁻ 比以及硫酸盐负荷下利用电子的优势更加明显。在 HRT 为 24 h 时和 COD/SO₄²⁻ 比为 0.6 时流向 SRB 电子的比例分别为(65.22 ± 3.48)%和(95.74 ± 10.53)%,在硫酸盐负荷为 1.5、3 kg/(m³·d)时分别为(92.65 ± 2.362)%和(91.07 ± 1.387)%。

基金项目

国家级创新训练项目: 填料床生物反应器去除地下水中硫酸盐试验研究。

参考文献

- [1] Parkin, G.F., Lynch, N.A., Kuo, W.C., Keuren, E.L.V. and Bhattacharya, S.K. (1990) Interaction between Sulfate Reducers and Methanogens Fed Acetate and Propionate. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, **62**, 780-788.
- [2] Zhao, Y., Yang, J., Ren, H., Luo, R. and Liu, S. (1999) A Study on Biological Treatment Technology for High Strength Sulfate-Organic Wastewater. *China Environmental Science*, **19**, 281-284. (In Chinese)
- [3] Lu, X., Zhen, G., Ni, J., Hojo, T., Kubota, K. and Li, Y.Y. (2016) Effect of Influent COD/SO₄²⁻ Ratios on Biodegradation Behaviors of Starch Wastewater in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. *Bioresour Technol*, **214**, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.100>
- [4] Sahinkaya, E., Yurtsever, A., Toker, Y., Elcik, H., Cakmaci, M. and Kaksonen, A.H. (2015) Biotreatment of As-Containing Simulated Acid Mine Drainage Using Laboratory Scale Sulfate Reducing Upflow Anaerobic Sludge

- Blanket Reactor. *Minerals Engineering*, **75**, 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.012>
- [5] Mizuno, O., Li, Y.Y. and Noike, T. (1998) The Behavior of Sulfate-Reducing Bacteria in Acidogenic Phase of Anaerobic Digestion. *Water Research*, **32**, 1626-1634. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00372-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00372-2)
- [6] Shayegan, J. (2005) The Effect of Influent COD and Upward Flow Velocity on the Behaviour of Sulphate-Reducing Bacteria. *Process Biochemistry*, **40**, 2305-2310. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.09.005>
- [7] Leitão, R.C., van Haandel, A.C., Zeeman, G. and Lettinga, G. (2006) The Effects of Operational and Environmental Variations on Anaerobic Wastewater Treatment Systems: A Review. *Bioresource Technology*, **97**, 1105-1118. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.007>
- [8] Martin, C., Devillard, E., Fabre, M., Genestoux, L. and Michalet-Doreau, B. (2014) Effect of Sampling Site on Concentration and Fibrolytic Activity of Protozoa in Bovine Rumen Contents. *Water*, **6**, 3478-3494.
- [9] Cunha, M.P., Ferraz, R.M., Sancinetti, G.P. and Rodriguez, R.P. (2019) Long-Term Performance of a UASB Reactor Treating Acid Mine Drainage: Effects of Sulfate Loading Rate, Hydraulic Retention Time, and COD/SO₄²⁻ Ratio. *Biodegradation*, **1**, 222. <https://doi.org/10.1007/s10532-018-9863-8>
- [10] Sahinkaya, E., Gunes, F.M., Ucar, D. and Kaksonen, A.H. (2011) Sulfidogenic Fluidized Bed Treatment of Real Acid Mine Drainage Water. *Bioresource Technology*, **102**, 683-689. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.042>
- [11] Wang, A. and Liu, W. (2001) The Role of Sulfate Reducing Bacteria Population in Acidogenic-Desulfate Bioreactor. *China Environmental Science*, **21**, 119-123. (In Chinese)
- [12] Arnaldo, S. and Marcelo, Z. (2011) Anaerobic Treatment of Sulfate-Rich Wastewater in an Anaerobic Sequential Batch Reactor (AnSBR) Using Butanol as the Carbon Source. *Journal of Environmental Management*, **92**, 1537-1541. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.009>
- [13] Hu, Y., Jing, Z., Sudo, Y., Niu, Q., Du, J., Wu, J. and Li, Y.Y. (2015) Effect of Influent COD/SO₄²⁻ Ratios on UASB Treatment of a Synthetic Sulfate-Containing Wastewater. *Chemosphere*, **130**, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.019>
- [14] Khanal, S.K. and Huang, J.C. (2005) Effect of High Influent Sulfate on Anaerobic Wastewater Treatment. *Water Environment Research*, **77**, 3037-3046. <https://doi.org/10.2175/106143005X73929>
- [15] Isa, Z., Grusenmeyer, S. and Verstraete, W. (1986) Sulfate Reduction Relative to Methane Production in High-Rate Anaerobic Digestion: Technical Aspects. *Applied & Environmental Microbiology*, **51**, 580. <https://doi.org/10.1128/AEM.51.3.580-587.1986>