



# 生物炭载体对厌氧反应器启动的影响研究

徐晓妍<sup>1</sup>,李 虹<sup>2</sup>,徐 昊<sup>1</sup>,魏 洲<sup>1</sup>,朴 哲<sup>1</sup>

(1.扬州大学环境科学与工程学院,江苏扬州 225127;

2.扬州市广陵生态环境分局,江苏扬州 225001)

**[摘要]** 以自制生物炭 YDcarrier-1 为载体,研究了其对厌氧反应器启动及颗粒污泥形成的影响,并分析了 YDcarrier-1 的不同碳组成及作用。结果表明,YDcarrier-1 可缩短厌氧反应器的启动时间,在厌氧序批式反应器(ASBR)中投加种子污泥干重 20% 的 YDcarrier-1,COD 去除率达到 80% 以上的启动时间比对照组(未投加 YDcarrier-1)和投加 10% YDcarrier-1 的反应器分别缩短 9 d 和 3 d。在上流式厌氧污泥床反应器(UASB)中,用相当于污泥干重 20% 的 YDcarrier-1 替代 50% 的种子污泥,不仅反应器的启动未受影响,还培养出沉降性和稳定性良好的颗粒污泥。反应器启动完成时,粒径>0.9 mm 的颗粒污泥占比为 29.4%,平均沉降速度为 128 m/h,均高于对照组。YDcarrier-1 中的可溶性速效碳提高了厌氧反应器的初始 COD,加快了种子污泥的活化改性,可促进厌氧反应器启动;固态缓释碳不仅提高了 YDcarrier-1 对微生物的亲合性,还为颗粒污泥的形成提供了长效稳定的碳源;难降解的木质纤维素成为颗粒污泥的骨架,提高了颗粒污泥的稳定性。

**[关键词]** 厌氧反应器;生物炭载体;厌氧颗粒污泥

**[中图分类号]** X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)10-0091-06

## Effect of biochar carrier on start-up of anaerobic reactors

XU Xiaoyan<sup>1</sup>,LI Hong<sup>2</sup>,XU Hao<sup>1</sup>,WEI Zhou<sup>1</sup>,PIAO Zhe<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. Yangzhou Guangling Ecological Environment Bureau, Yangzhou 225001, China)

**Abstract:** The effects of self-made biochar YDcarrier-1 on the start-up of anaerobic reactor and the formation of granular sludge were studied, and the different carbon compositions and its effects of YDcarrier-1 were analyzed. The results showed that YDcarrier-1 could shorten the start-up time of anaerobic reactors. When adding YDcarrier-1 with 20% dry weight of seed sludge in anaerobic sequencing batch reactor (ASBR), the start-up time with COD removal rate of more than 80% was shortened by 9 days and 3 days respectively, compared with the control group (without adding YDcarrier-1) and the reactor with 10% YDcarrier-1. In the up-flow anaerobic sludge bed reactor (UASB), Some YDcarrier-1 equivalent to 20% of the dry weight of sludge was used to replace 50% of the seed sludge, which not only did not affect the start-up of the reactor, but also cultivated granular sludge with good sedimentation and stability. When the reactors were started up, the proportion and average settling speed of granular sludge with particle size greater than 0.9 mm was 29.4% and 128 m/h respectively, which were higher than those of the control group. The soluble available carbon in YDcarrier-1 improved the initial COD of anaerobic reactor, accelerated the activation and modification of seed sludge, and promoted the start-up of anaerobic reactor. The solid slow-release carbon not only improved the affinity of YDcarrier-1 to microorganisms, but also provided a long-term and stable carbon source for the formation of granular sludge. The refractory lignocellulose became the skeleton of granular sludge and improved the stability of granular sludge.

**Key words:** anaerobic reactor; biochar carrier; anaerobic granular sludge

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(42177185)

厌氧处理工艺因具有使用范围广、能耗低、可回收沼气、产泥量少等优点<sup>[1-2]</sup>,在高浓度有机废水处理中应用广泛,但是也存在反应器启动时间长<sup>[3]</sup>、颗粒污泥形成慢等问题。充足的生物量和良好的传质是厌氧反应器高效稳定运行的关键,但高传质条件下容易引起跑泥,导致生物量下降,培养沉降性良好的颗粒污泥是解决该矛盾的有效途径<sup>[4-5]</sup>。

颗粒污泥大体上分为“凝聚型”和“载体型”2种<sup>[6]</sup>。研究者们曾围绕“凝聚型”颗粒污泥开展了广泛而深入的研究,并取得了一定成果。总体来讲,“凝聚型”颗粒污泥形成条件较为苛刻<sup>[7]</sup>,在规模化工程实践中快速培养颗粒污泥仍存在一定难度。“载体型”颗粒污泥因形成条件没那么苛刻而开始受到关注,目前“载体型”颗粒污泥的研究主要围绕惰性载体开展<sup>[8-10]</sup>。但是,惰性载体容易积累在反应器底部而造成分层现象,导致反应器的有效容积减少<sup>[11]</sup>;在水力和沼气的作用下,惰性载体之间相互碰撞、摩擦的几率增加,导致载体表面生物膜脱落、颗粒破碎。此外,惰性载体后续处理费用较高。

本研究利用可流化农副产品制备了生物炭载体 YDcarrier-1,研究了 YDcarrier-1 对厌氧反应器启动、种子污泥减量化及颗粒污泥形成的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 YDcarrier-1 的制备

YDcarrier-1 主要由麦麸和玉米芯粉按 4:1 的比例混合均匀后加工制成。YDcarrier-1 为片状结构,平均直径在 3 mm 左右,在水体中流化性好,沉降速度稍快于絮状污泥,灰分质量浓度为 7% 左右。

### 1.2 实验用水

本实验所有进水均采用人工配制的模拟废水,COD 为 2 000 mg/L。由乙酸钠和奶粉提供碳源,尿素、磷酸二氢钾提供氮、磷,C、N、P 质量比约为 300:5:1。模拟废水的 pH 用碳酸氢钠调节至 7.5~8.0。

### 1.3 种子污泥

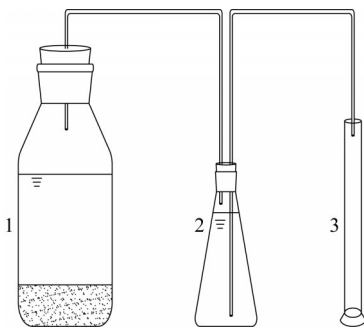
污泥取自某城市污水厂压缩污泥,含水率为 89%。用孔径为 0.58 mm 的筛子过筛淘洗,接种污泥均为粒径 < 0.58 mm 的絮状污泥。

### 1.4 实验装置

#### 1.4.1 厌氧序批式反应器(ASBR)

ASBR 反应器为实验室自制间歇进水厌氧反应器,由 2 L 有盖广口瓶、500 mL 锥形瓶和量筒构成,

结构见图 1。将 ASBR 反应器放入带有磁力搅拌的水浴锅内,水温控制在 30 ℃ 左右,间歇搅拌。工作步骤分为进水、反应、沉淀和排水,每个周期 24 h,其中进水 0.5 h、反应 22.5 h、沉淀 0.5 h、排水 0.5 h。



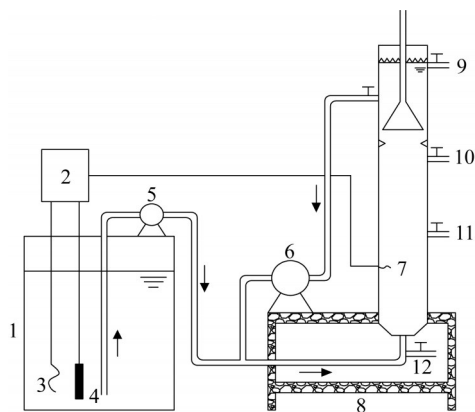
1—ASBR 反应器;2—排水集气瓶;3—量筒。

图1 ASBR 反应器装置

Fig. 1 ASBR reactor unit

#### 1.4.2 上流式厌氧污泥床反应器(UASB)

UASB 反应器为实验室自制连续流厌氧反应器,反应器主体由有机玻璃构成,整体呈圆柱形,装置高 190 cm,内径 24 cm,有效容积 62 L,设置多个取样口,结构见图 2。



1—进水桶;2—温控箱;3、7—温控探头;4—加热棒;5—进水泵;6—外循环泵;8—实验台;9—出水口;10~12—取样口。

图2 UASB 反应器装置

Fig. 2 UASB reactor unit

### 1.5 分析方法

COD 采用标准重铬酸钾法测定,碱度(ALK)采用甲基橙指示剂滴定法测定<sup>[12]</sup>,挥发性脂肪酸(VFA)采用酸碱滴定法测定<sup>[12]</sup>,pH 采用 PHS-3C 型 pH 计测定,氧化还原电位(ORP)采用在线检测仪测定,厌氧颗粒污泥粒径及分布采用湿式筛选法测定,颗粒污泥沉降速度采用重力沉降法测定,污泥形态采用光学显微镜观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 ASBR 反应器启动及污泥减量化

为探究 YDcarrier-1 对厌氧反应器启动的影响,在 ASBR 反应器中分别投加种子污泥干重 20% 和 10% 的 YDcarrier-1,并以未投加 YDcarrier-1 的反应器为对照组,每个反应器中种子污泥的质量浓度均为 15 g/L(以 TSS 计),观察反应器启动过程中 COD 去除率的动态变化,结果见图 3。

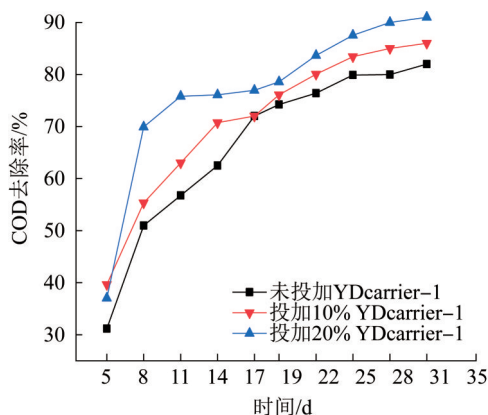


图 3 不同 YDcarrier-1 投加量反应器的 COD 去除率

Fig. 3 COD removal rate of reactors with different dosage of YDcarrier-1

如图 3 所示,在反应器启动运行的 31 d 中,3 个不同反应器的 COD 去除率均呈上升趋势,但 COD 去除率稳定达到 80% 以上的时间有差异。投加 20% YDcarrier-1 的反应器在运行第 22 天时 COD 去除率达到 84%,比投加 10% YDcarrier-1 的反应器和对照组反应器分别缩短 3 d 和 9 d。可见,YDcarrier-1 对厌氧反应器启动具有一定的促进作用。

在此基础上,为探究 YDcarrier-1 对种子污泥减量化的影响,将质量分数 20% 的种子污泥用相同质量的 YDcarrier-1 替代,对照组的种子污泥质量浓度为 15 g/L,污泥减量反应器的种子污泥质量浓度为 12 g/L,观察反应器启动过程中 COD 去除率的动态变化,结果见图 4。

由图 4 可见,随着 ASBR 反应器的启动运行,2 个不同反应器的 COD 去除率动态变化情况基本一致。反应器运行到第 30 天时,2 个反应器的 COD 去除率均达到 88% 以上。YDcarrier-1 不仅能促进厌氧反应器启动,还可减少种子污泥的投加量。

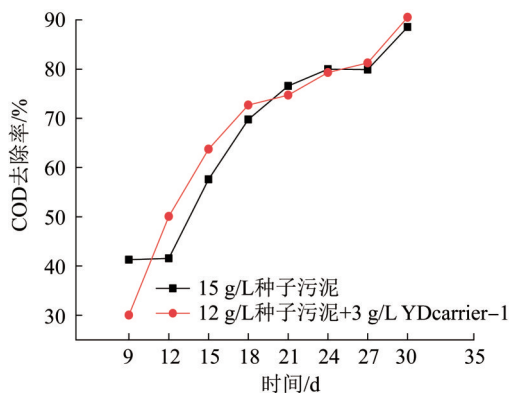


图 4 不同泥量反应器的 COD 去除率

Fig. 4 COD removal rate of reactors with different sludge volume

### 2.2 UASB 反应器的启动

为探究 YDcarrier-1 对连续进水反应器启动及污泥颗粒化的影响,对照组反应器不投加 YDcarrier-1,种子污泥质量浓度为 20 g/L;用相当于对照组反应器种子污泥总干重 20% 的 YDcarrier-1 替代 50% 的种子污泥,在相同条件下平行启动 2 个 UASB 反应器。启动初期,在停止进水条件下,用模拟废水(COD 为 2 000 mg/L)对种子污泥进行活化,期间开启外循环进行搅拌。当 COD 去除率达到 50% 以上时,认为活化结束,关闭外循环,开始连续进水,连续进水的初始 COD 容积负荷为 3 kg/(m<sup>3</sup>·d)。反应器连续运行前期,当 COD 去除率稳定达到 65% 以上时,采用逐步缩短 HRT 的方式提升进水负荷,提升幅度为 50%;到后期 COD 去除率稳定达到 80% 时,采用逐步提高进水 COD 的方式提升进水负荷,提升幅度为 50%,直至达到 15 kg/(m<sup>3</sup>·d) 的设计负荷。观察反应器启动过程中 COD 去除率和 COD 容积负荷的变化,结果见图 5。

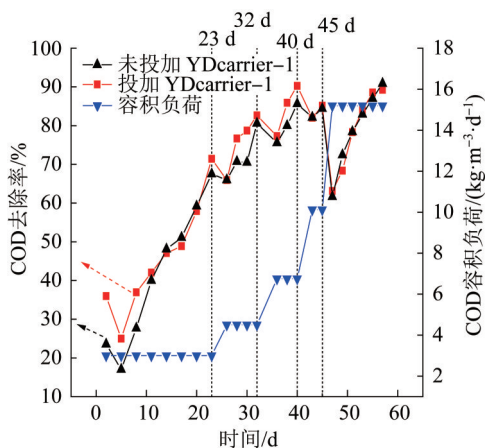


图 5 COD 去除率和容积负荷

Fig. 5 COD removal rate and volumetric loading

由图 5 可知,启动初期,在 COD 容积负荷为  $3 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  时,2 个反应器中 COD 去除率均随时间的延长逐步上升;在第 23 天时,对照组与投加了 YDcarrier-1 的反应器中 COD 去除率分别达到 67% 和 71%,此后按 50% 幅度提升 COD 负荷(第 23 天—第 32 天);启动运行后期(第 32 天—第 57 天),在较高 COD 负荷条件下继续按 50% 幅度提升水力负荷,每次提升时 COD 去除率呈现先下降后上升趋势;直至运行到第 57 天,在  $15 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  的设计负荷下,2 个反应器的 COD 去除率均达到 85% 以上。在整个启动过程中,2 个反应器的运行状况均良好,ORP 始终  $< -400 \text{ mV}$ ,VFA/ALK 始终  $< 0.4$ ,反应器内 pH 始终维持在 6.8~7.5,表明反应器的启动已完成。因此,在减少 50% 种子污泥的情况下,按对照组污泥干重 20% 的量投加 YDcarrier-1 也能成功启动 UASB 反应器。

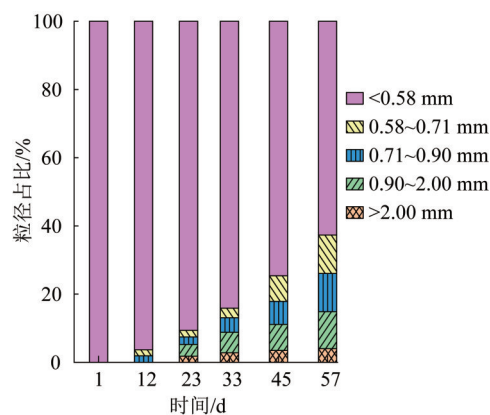
### 2.3 颗粒污泥的形成

为了区分种子污泥中原有颗粒污泥与新形成的颗粒污泥,在 UASB 反应器投加种子污泥前先用孔径 0.58 mm 的筛子进行筛分,只投加粒径  $< 0.58 \text{ mm}$  的絮状污泥。在 UASB 反应器运行进程中定期采集污泥,检测不同粒径污泥的动态变化,结果见图 6。

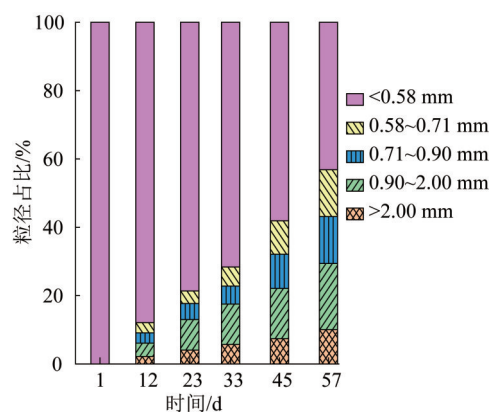
由图 6 可知,当启动完成时(第 57 天),2 个 UASB 反应器均成功培养出颗粒污泥,投加 YDcarrier-1 的反应器中,粒径  $> 0.58 \text{ mm}$  的颗粒污泥占比由对照组的 37.3% 提高到 56.8%,多出 19.5%。进一步分析发现,投加 YDcarrier-1 的反应器在运行第 12 天开始形成粒径  $> 0.9 \text{ mm}$  的颗粒污泥,并随着反应器启动进程的延长,其占比逐渐增多,到第 57 天反应器启动完成时,粒径  $> 0.9 \text{ mm}$  的颗粒污泥占比为 29.4%,是对照组(14.9%)的近 2 倍。可见,通过投加 YDcarrier-1 可提高大粒径颗粒污泥的占比。

良好的沉降性能是优质颗粒污泥的判断指标之一。在反应器运行进程中检测了不同粒径范围颗粒污泥的沉降性能,结果见图 7。

由图 7 可以看出,随着反应器的运行,2 个 UASB 反应器中颗粒污泥的沉降速度均呈上升趋势,但投加 YDcarrier-1 的反应器颗粒污泥的沉降性能明显优于对照组。投加 YDcarrier-1 的反应器运行至第 23 天时,粒径  $< 0.58 \text{ mm}$  的颗粒污泥的平均沉降速度由  $18 \text{ m/h}$ (第 1 天)上升至  $28 \text{ m/h}$ ,而对照组中粒径  $< 0.58 \text{ mm}$  的颗粒污泥耗时 57 d 平均沉降速度才达



(a) 未投加 YDcarrier-1 反应器



(b) 投加 YDcarrier-1 反应器

图 6 污泥粒径变化

Fig. 6 Changes of sludge particle size

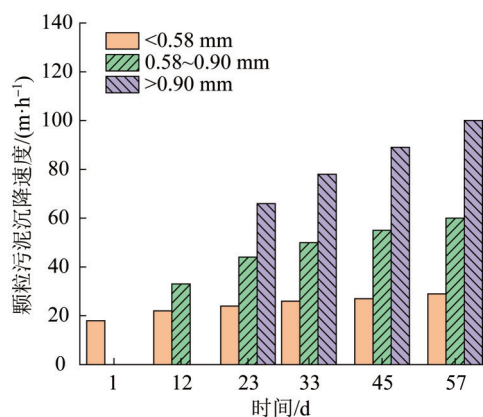
到  $29 \text{ m/h}$ 。当反应器启动完成时,投加 YDcarrier-1 的反应器中大颗粒污泥( $> 0.9 \text{ mm}$ )的平均沉降速度为  $128 \text{ m/h}$ ,高于对照组的  $100 \text{ m/h}$ ,这与投加 YDcarrier-1 反应器中粒径  $> 0.9 \text{ mm}$  颗粒污泥占比大于对照组有关(图 6)。

为了解颗粒污泥的稳定性,从已启动完成的 UASB 反应器中取污泥,用孔径 0.58 mm 的筛子反复淘洗。结果发现,对照组的“凝聚型”颗粒污泥较为松散,在淘洗过程中容易散开,重新变成絮状污泥。而投加 YDcarrier-1 的反应器中的大颗粒污泥结构较为紧实、边界清晰、表面光滑、有明显的颗粒感,在淘洗过程中也不易散开,表现出较好的稳定性。

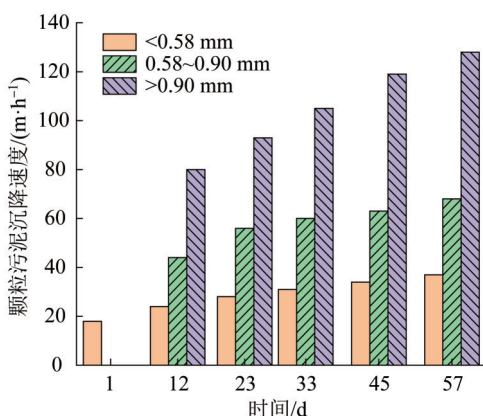
### 3 YDcarrier-1 的不同碳组成及作用

YDcarrier-1 主要由麦麸和玉米芯粉混合加工而成。为了解 YDcarrier-1 的不同碳组成及作用,在有效容积为 1 L 的 ASBR 反应器中接种  $20 \text{ mg/L}$ (以 TSS 计)的种子污泥,并用 YDcarrier-1 替代模拟废水





(a) 未投加 YDcarrier-1 反应器



(b) 投加 YDcarrier-1 反应器

图7 不同粒径颗粒污泥的沉降速度

Fig. 7 Sedimentation rate of granular sludge with different particle sizes

碳源,观察 COD 的动态变化,结果见图 8。

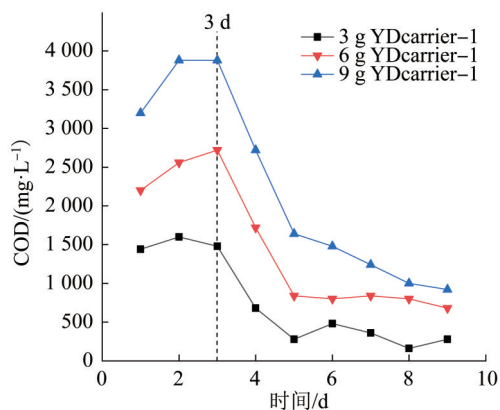


图8 YDcarrier-1 的析出碳源情况

Fig. 8 Carbon source precipitation of YDcarrier-1

由图 8 可知,第 1 天时,1 g YDcarrier-1 可释放的可溶性速效碳平均约为 400 mg/L(以 COD 计)左右。运行前 1~3 d,反应器内 COD 上升,这部分碳是

YDcarrier-1 含有的固态缓释碳,此阶段微生物活性低,释放出的缓释碳来不及被消耗,导致溶液中 COD 上升;之后,随着微生物活性提高,微生物对碳的消耗量大于缓释碳的释放量,导致第 3 天时反应器的 COD 呈下降趋势,这与彭锦玉等<sup>[13]</sup>的研究结果相似。

此外,当 UASB 反应器运行到一定阶段(第 23 天)时,反应器内生成了大量的大颗粒污泥(>0.9 mm),此时已看不到 YDcarrier-1 的原型[图 9(a)]。从反应器中取粒径>2 mm 的颗粒污泥,经捣碎淘洗后,在光学显微镜(400 倍)下观察颗粒污泥的内部结构[图 9(b)],可清晰看到其具有错综复杂的丝状物质,这些丝状物质来自 YDcarrier-1 中易分解碳降解后残留的难降解木质纤维素。因此,YDcarrier-1 由可溶性速效碳、缓释碳及难降解的木质纤维素共同组成。

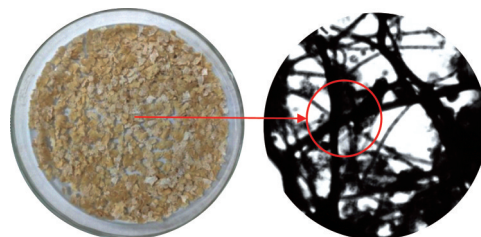


图9 YDcarrier-1 的形貌变化

Fig. 9 Morphological changes of YDcarrier-1

YDcarrier-1 的不同碳组分在厌氧反应器启动及颗粒污泥形成中所起的作用不尽相同。研究报告,在厌氧反应器启动初期,高浓度可溶性速效碳起到活化接种污泥的作用<sup>[14]</sup>;YDcarrier-1 的可溶性速效碳提高了厌氧反应器的初始 COD,可加快种子污泥的活化改性,促进厌氧反应器启动。YDcarrier-1 含有的固态缓释碳,一方面可提高 YDcarrier-1 对微生物的亲合性,使微生物在 YDcarrier-1 表面易于吸附生长,有利于生物膜的形成;另一方面则为“载体”型颗粒污泥的形成提供长效稳定的碳源。最后,难降解的木质纤维素残留在颗粒污泥的内部,成为“载体”型颗粒污泥的骨架,起到优化和改善颗粒污泥结构的作用,提高了颗粒污泥的稳定性。

#### 4 结论

(1) YDcarrier-1 可提高厌氧反应器的启动效率。在 ASBR 反应器中投加种子污泥干重 20% 的 YDcarrier-1,其对 COD 去除率达到 80% 以上的启动时间,比投加 10% YDcarrier-1 反应器 and 对照组反应器分别缩短 3 d 和 9 d。

(2)投加YDcarrier-1可减少厌氧反应器种子污泥接种量。在用相当于种子污泥干重20%的YDcarrier-1替代50%种子污泥的情况下,UASB反应器启动效率未受影响。

(3)YDcarrier-1可提高厌氧反应器内大颗粒污泥的占比及颗粒污泥的沉降速度。反应器启动完成时,投加YDcarrier-1的反应器中粒径>0.9 mm的颗粒污泥的占比为29.4%,是对照组(14.9%)的近2倍;大颗粒污泥(>0.9mm)的平均沉降速度为128 m/h,也高于对照组(100 m/h)。基于YDcarrier-1的厌氧颗粒污泥具有边界清晰、表面光滑、结构紧实、稳定性强等特点。

(4)YDcarrier-1由可溶性速效碳、固态缓释碳及木质纤维素共同组成。可溶性速效碳提高了厌氧反应器的初始COD,可加快种子污泥的活化改性,促进厌氧反应器启动;固态缓释碳不仅可以提高YDcarrier-1对微生物的亲合性、促进生物膜的形成,还可以为颗粒污泥的形成提供长效稳定的碳源;难降解的木质纤维素残留成为颗粒污泥的内部骨架,提高了颗粒污泥的稳定性。

#### 参考文献

- [1] VINARDELL S, ASTALS S, PECES M, et al. Advances in anaerobic membrane bioreactor technology for municipal wastewater treatment: A 2020 updated review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 130: 109936.
- [2] 田帅,朱易春,黄书昌,等.厌氧生物处理低浓度污水研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(4): 2338-2346.
- TIAN Shuai, ZHU Yichun, HUANG Shuchang, et al. Research progress in anaerobic biological treatment of low-strength sewage[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(4): 2338-2346.
- [3] 郑彭生. 煤化工废水厌氧生物处理技术研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(6): 24-27.
- ZHENG Pengsheng. Research progress of anaerobic biological treatment technology of coal chemical wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(6): 24-27.
- [4] FARIA C V, SOUZA D F, PONTES T M, et al. Strategies of anaerobic sludge granulation in an EGSB reactor[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 244: 69-76.
- [5] SHOW K Y, YAN Yuegen, YAO Haiyong, et al. Anaerobic granulation: A review of granulation hypotheses, bioreactor designs and emerging green applications[J]. Bioresource Technology, 2020, 300: 122751.
- [6] 梁家豪,王庆宏,傅达理,等.加速厌氧污泥颗粒化研究进展[J]. 工业水处理, 2017, 37(1): 18-22.
- LIANG Jiahao, WANG Qinghong, FU Dali, et al. Research progress in the acceleration of anaerobic sludge granulation process [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(1): 18-22.
- [7] 张善林,范骏洋,俞春华,等.利用自制内循环厌氧反应器快速培养颗粒污泥[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(12): 168-172.
- ZHANG Shanlin, FAN Junyang, YU Chunhua, et al. Using the self-developed internal circulation anaerobic reactor to cultivate granular sludge rapidly [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(12): 168-172.
- [8] 李婷,刘永红,王利娜,等.生物载体在促进厌氧污泥颗粒化过程中的应用[J]. 中国沼气, 2015, 33(2): 8-12.
- LI Ting, LIU Yonghong, WANG Lina, et al. Application of bio-carriers in accelerating the granulation of anaerobic sludge [J]. China Biogas, 2015, 33(2): 8-12.
- [9] LIANG Jiahao, WANG Qinghong, YOZA B A, et al. Rapid granulation using calcium sulfate and polymers for refractory wastewater treatment in up-flow anaerobic sludge blanket reactor [J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 123084.
- [10] 王宁,丁海川,刘永红,等. AMC厌氧颗粒污泥快速培养及对印染废水处理性能研究[J]. 应用化工, 2021, 50(9): 2406-2410.
- WANG Ning, DING Haichuan, LIU Yonghong, et al. Research on rapid cultivation of AMC anaerobic granular sludge and its performance on printing and dyeing wastewater treatment [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(9): 2406-2410.
- [11] 刘峰. 厌氧颗粒污泥的培养与性能研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- LIU Feng. Study on the development and performance of anaerobic granular sludge [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002: 121-213.
- State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and analytic methods of water and wastewater [M]. 4th edition. Beijing: Environmental Science Press of China, 2002: 121-213.
- [13] 彭锦玉,张克峰,王全勇,等.以4种天然植物材料为碳源的固相反硝化研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 104-108.
- PENG Jinyu, ZHANG Kefeng, WANG Quanyong, et al. Solid phase denitrification using four natural plant materials as carbon sources [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(10): 104-108.
- [14] 凌宇,闫国凯,王海燕,等.6种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2422-2431.
- LING Yu, YAN Guokai, WANG Haiyan, et al. Release mechanisms of carbon source and dissolved organic matter of six agricultural wastes in the initial stage [J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2422-2431.

[作者简介] 徐晓妍(1997—), 硕士。电话: 18852734273, E-mail: 271680397@qq.com。通讯作者: 朴哲, 教授。E-mail: piaozhe@yzu.edu.cn。

[收稿日期] 2022-07-28(修改稿)