

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.015

# 活性污泥法处理大蒜加工废水效能及菌群结构研究

李微<sup>1</sup>, 王贺<sup>1</sup>, 陈一鸣<sup>1</sup>, 曾飞<sup>2</sup>, 王宇琦<sup>1</sup>, 侯云鹤<sup>1</sup>,  
祝雷<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110015; 2. 荣盛建筑设计有限公司,  
河北 廊坊 065000; 3. 沈阳环境科学研究院, 辽宁 沈阳 110015)

**摘要:** 以UASB—SBR耦合工艺处理高浓度大蒜加工废水为目标,采用高有机负荷及接种培菌法或自然培菌法快速启动UASB和SBR反应器,考察pH、HRT、温度对高浓度大蒜加工废水中有机物去除效果及脱氮除磷性能的影响,利用高通量测序技术分析SBR污泥系统的菌群结构,并分析UASB—SBR耦合工艺对高浓度大蒜加工废水的处理效果。结果表明,通过延长HRT的方式可成功启动UASB反应器,在进水COD浓度为9 800 mg/L、温度为(35±2) °C的条件下,UASB最佳工艺参数:HRT为45 h、pH为7.5;SBR接种培菌法具有更高的耐冲击负荷能力,有效去除有机物浓度阈值为6 000 mg/L,在进水COD浓度为6 000 mg/L的条件下,SBR最佳工艺参数:循环时间为12 h、温度为25 °C;*Bauldia*和*Flavobacterium*为SBR活性污泥系统的优势菌属,具有较强的有机物降解能力和反硝化能力;UASB—SBR耦合工艺对COD、TP、NH<sub>3</sub>-N、TN的平均去除率分别高达99%、94.77%、95.44%、94.87%,对高浓度大蒜加工废水的处理效果显著。

**关键词:** 活性污泥法; 大蒜加工废水; UASB—SBR; 菌群结构

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0095-09

## Performance and Microbial Community of Activated Sludge Process for Treatment of Garlic Processing Wastewater

LI Wei<sup>1</sup>, WANG He<sup>1</sup>, CHEN Yi-ming<sup>1</sup>, ZENG Fei<sup>2</sup>, WANG Yu-qi<sup>1</sup>, HOU Yun-he<sup>1</sup>,  
ZHU Lei<sup>3</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110015, China; 2. Rongsheng Architectural Design Co. Ltd., Langfang 065000, China;  
3. Shenyang Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** UASB—SBR coupling process was applied to treat high concentration garlic processing wastewater. The UASB and SBR reactors were rapidly started by high organic load, inoculation culture or natural culture methods. The effects of pH, HRT and temperature on the removal of organic matter, nitrogen and phosphorus from high concentration garlic processing wastewater were investigated. The microbial community of sludge from SBR system was analyzed by high-throughput sequencing technology, and the performance of UASB—SBR coupling process was investigated. The UASB reactor was

基金项目: 沈阳市科技计划项目(22-322-3-10); 辽宁省应用基础研究计划项目(2023030002-JH2/1013); 辽宁省教育厅科研项目(lnqn202010); 辽宁省科技厅自然科学基金资助项目(2019ZD0671)

通信作者: 李微 E-mail: liweilengjinyue@163.com

successfully started by extending HRT. When the COD in influent was 9 800 mg/L and the temperature was  $(35\pm 2)$  °C, the optimum HRT and pH of UASB were 45 h and 7.5, respectively. The inoculation culture method in SBR had higher impact load resistance, and the threshold for effective removal of organic matter concentration was 6 000 mg/L. When the COD in influent was 6 000 mg/L, the optimal cycle time and temperature of SBR were 12 h and 25 °C, respectively. *Bauldia* and *Flavobacterium* were the dominant bacteria in SBR activated sludge system and had strong organic matter degradation and denitrification ability. The UASB-SBR coupling system had the average removal rates of COD, TP,  $\text{NH}_3\text{-N}$  and TN as high as 99%, 94.77%, 95.44% and 94.87%, respectively, and it had a remarkable treatment performance of high concentration garlic processing wastewater.

**Key words:** activated sludge process; garlic processing wastewater; UASB-SBR; microbial community composition

高浓度大蒜加工废水中含有大量有机物、氮、磷等污染物及悬浮物,此外还含有具有抗菌作用的大蒜素,采用常规处理工艺处理大蒜加工废水很难使其达标排放。现有对大蒜废水的处理方法如物理法、酶法、生物法、微电解法和膜分离法等普遍存在有机负荷低、工艺稳定性差、运行费用高等缺点。而活性污泥法具有处理量大、成本低、效率高、无二次污染等特点,是处理大蒜加工废水的理想工艺。UASB反应器有较高的耐冲击负荷能力和较长的污泥停留时间,不仅可以有效降低污染物浓度,还可提高废水的可生化性,目前已被广泛应用于高浓度有机废水的处理<sup>[1]</sup>。SBR为厌氧与好氧交替进行,不仅具有高效的有机物去除能力,还具有同步脱氮除磷功能<sup>[2]</sup>。采用UASB+SBR组合工艺处理高浓度大蒜加工废水时,UASB作为预处理单元去除废水中的有机物,可提高废水的可生化性;SBR主要去除氮、磷,并可进一步去除有机物。

笔者研究了UASB-SBR耦合工艺对高浓度大蒜加工废水的处理效果,探讨了UASB和SBR的启动方法,确定了UASB和SBR的最佳工艺参数及影响因素,并利用高通量测序技术分析了SBR污泥系统微生物多样性和菌群结构,旨在为UASB-SBR耦合工艺处理高浓度大蒜加工废水的应用奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

UASB由有机玻璃制成,包括反应区、三相分离区。反应器分内、外两部分,内径约为80 mm,外径约为120 mm。内部为反应器反应区,夹层部分为水浴保温层,反应器总高度为1 500 mm,其中反应区

高1 200 mm,三相分离区高300 mm,反应器有效容积为6.0 L,反应区外侧每隔200 mm设有一个取样口。反应器顶部设置安全瓶和集气袋,气体经过三相分离区实现固、液、气分离进入安全瓶,最后由集气袋收集,产气量通过排水法测量。通过夹层部分的水浴保温层控制反应器温度为 $(35\pm 2)$  °C。

高负荷条件下启动UASB。在进水COD浓度为9 800 mg/L、反应器内温度为 $(35\pm 2)$  °C、污泥浓度为3 000 mg/L条件下,将UASB反应器HRT从20 h增至50 h(处理水量由0.3 L/h降至0.12 L/h),在每个HRT下反应器稳定运行7 d,考察出水COD情况。

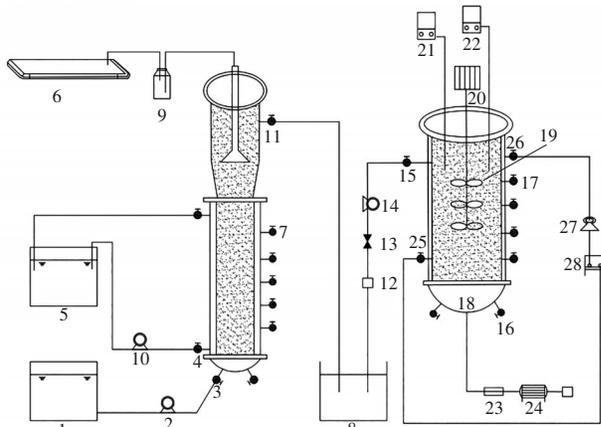
在保持进水COD浓度为9 800 mg/L、反应器温度为 $(35\pm 2)$  °C、HRT为45 h的前提下,将进水pH从6.0逐渐升高至8.0,考察进水pH对UASB反应器运行效果的影响,确定反应器运行最佳pH。UASB出水储存在储水箱中备用,待SBR反应器运行至进水阶段再以瞬时进水的方式加入SBR反应器中。

SBR为无色有机玻璃柱,内径为220 mm,高为1 000 mm,有效容积为14.4 L,反应器顶部设有电动搅拌器、pH在线监测仪和DO在线监测仪,反应器底部设有连接空气泵和气体流量计的橡胶曝气盘,通过夹层部分的水浴保温层控制反应器温度,沿反应器外侧每隔100 mm设有一个取样口,用以调整HRT和取样,同时反应器出水管接有电磁阀,以上所有设备均以时控开关控制。

采用接种培菌法和自然培菌法分别启动SBR反应器,处理水量为0.125 L/h。设置SBR的周期时长分别为8和12 h,调节进水pH为7.0~7.5,保持进水COD为6 000 mg/L,污泥浓度为3 200 mg/L。SBR

采用厌氧/好氧运行模式,微氧曝气控制溶解氧浓度为 2~3 mg/L。设定周期运行参数:周期时长为 8 h,每周期进水 10 min、搅拌 2 h、曝气 5 h、沉淀 45 min、排水 5 min;周期时长为 12 h,每周期进水 10 min、搅拌 3 h、曝气 8 h、沉淀 45 min、排水 5 min。考察不同 HRT 下 SBR 反应器对 COD 的去除效果。

在进水 COD 为 6 000 mg/L、周期时长为 12 h 条件下,通过 SBR 夹层部分的水浴保温层控制反应器温度,将温度由 10 °C 升高至 30 °C,考察温度对 COD 和 NH<sub>3</sub>-N 去除效果的影响。试验装置如图 1 所示。



1. 进水箱 2. 蠕动泵 3. UASB 进水口 4. UASB 水浴进水口 5. 水浴箱  
6. 集气袋 7. 取样口 8. 出水储存箱 9. 安全瓶 10. 水浴循环泵  
11. UASB 出水口 12. 时控开关 13. 电磁阀 14. 水泵 15. SBR 进水口  
16. 排泥口 17. 排水接接口 18. 微孔曝气盘 19. 搅拌桨 20. 电动搅拌机  
21. DO 在线监测仪 22. pH 在线监测仪 23. 气体流量计 24. 空气泵  
25. SBR 水浴出水口 26. SBR 水浴进水口 27. 潜水泵 28. 水浴锅

图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of test device

## 1.2 试验用水与污泥来源

购买市场上新鲜大蒜,剥皮后用榨汁机榨汁备用,随后用自来水将榨好的大蒜汁稀释至所需浓度。为保证废水水质稳定及结果的准确性,试验所有用水均现用现配。具体水质:COD 为 60~9 800 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 为 40~75 mg/L, TN 为 60~95 mg/L, TP 为 9~27 mg/L, pH 为 5.6~6.5。试验污泥取自辽宁省抚顺市三宝屯污水处理厂二沉池。

## 1.3 检测项目及方法

COD、TP、NH<sub>3</sub>-N、TN 分别采用快速密闭催化消解法、钼锑抗分光光度法、纳氏试剂分光光度法、碱性过硫酸钾紫外分光光度法测定, DO 采用溶氧仪测定, pH 采用酸度计测定。产气量通过排水法测定, MLSS 采用滤纸称重法测定, SV<sub>30</sub> 采用 30 min 沉降法测定。DNA 的提取、检测和高通量测序由诺禾致源科技股份有限公司完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 UASB 启动与影响因素分析

#### 2.1.1 UASB 启动分析

高有机负荷条件下快速启动 UASB 反应器, COD 进水浓度为 9 800 mg/L。为了避免系统出现酸化现象,延长 HRT,初步设定 HRT 为 50 h、温度为 (35±2) °C。图 2 为 UASB 启动过程中 COD 的变化。可知,系统启动初期, COD 去除率为 8.67%。后续运行中, COD 去除率逐渐下降,直至第 10 天, COD 去除率下降至 6.23%,这可能是由于大蒜加工废水具有高浓度的有机负荷,系统短时间内无法适应此冲击。随着 UASB 反应器的继续运行,微生物逐渐适应高浓度大蒜加工废水水质,代谢能力增强,对有机物的去除效果有所提高, COD 去除率呈现波动式上升的趋势。在第 56 天 COD 去除率为 45%,系统内可清晰见到粒径为 2~3 mm 的颗粒污泥,产气效果明显,平均每隔 2 s 就会出现粒径为 2 mm 的气泡,平均产气量为 1.6 L/d,此时 UASB 反应器内污泥浓度为 3 000 mg/L。进一步延长 UASB 的运行时间, COD 去除率无明显变化,认定反应器在第 56 天时启动成功。张立国等人<sup>[3]</sup>发现, UASB 启动成功后,系统内 MLVSS 为 9 100 mg/L,并指出 UASB 高效稳定的运行及成熟颗粒污泥的出现能够表明反应器启动成功。

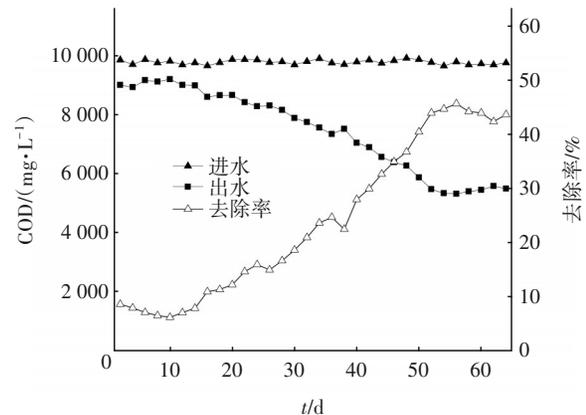


图 2 UASB 启动过程中 COD 的变化

Fig.2 Change of COD during UASB startup process

#### 2.1.2 HRT 对 UASB 反应器的影响

在进水 COD 浓度为 9 800 mg/L、反应器温度为 (35±2) °C 条件下,考察 HRT 对 UASB 反应器去除 COD 的影响,结果如图 3 所示。可知,当 HRT 为 20 h 时, COD 平均去除率仅为 6.08%。这是因为 HRT 过低引起系统内挥发性脂肪酸(VFAs)的积累,从而对系统造成冲击,此外废水中仅部分有机物因与微生

物接触而被降解,未被降解的有机物随出水排出,因此对COD的去除效果较差。班巧英等<sup>[4]</sup>通过控制HRT考察了UASB反应器的性能,认为HRT过低会增加系统的有机负荷,提高产酸发酵菌群的活性,并生成大量VFAs,但产甲烷互营菌群增殖相对缓慢,导致系统酸化,影响了COD降解。随着HRT增加,COD去除率也逐渐升高,直至将HRT增加至45 h,COD去除率趋于平稳,平均去除率达到44.16%。刘亚红<sup>[5]</sup>在UASB对高浓度有机废水降解中发现,当HRT为48 h时,COD去除率为89.3%,高于本试验结果。产生这种差别的原因可能是本试验的UASB采用了高负荷启动,进水COD浓度较高,且大蒜加工废水的特殊水质会抑制系统中污泥的活性。当HRT增加至50 h时,COD去除率变化不明显,因此确定UASB反应器的最佳HRT为45 h。

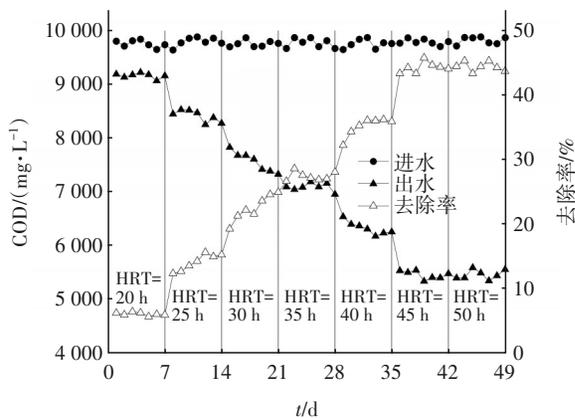


图3 HRT对UASB反应器去除COD的影响

Fig.3 Effect of HRT on COD removal by UASB reactor

### 2.1.3 pH对UASB反应器的影响

在进水COD浓度为9 800 mg/L、反应器温度为 $(35\pm 2)^\circ\text{C}$ 、HRT为45 h的条件下,考察pH对UASB反应器去除COD的影响,结果如图4所示。可以看出,当进水pH为6.0时,UASB对COD的去除效果较低,仅为25.55%,出水较浑浊。随着进水pH的升高,COD去除率明显升高,当pH提升至7.5时,COD去除率达到44.15%,出水清澈。进一步提升pH至8.0时,对COD的去除效果明显变差。分析认为,pH过高或过低都会对细胞酶活性、膜表面电荷性质及通透性产生影响,抑制细菌的降解能力。张立国等人<sup>[6]</sup>通过调节进水pH,考察了UASB的运行效能,发现pH过低会影响产甲烷互营菌群的活性,导致系统内出现丙酸和乙酸的累积,影响系统对COD的

去除效果。而闫立龙等人<sup>[7]</sup>在UASB处理猪场废水的研究中发现,当 $\text{pH}>7.5$ 时,产甲烷菌活性受到抑制,COD去除率逐渐下降,与本试验的结果相似。可见,本试验中UASB系统的最佳进水pH为7.5。

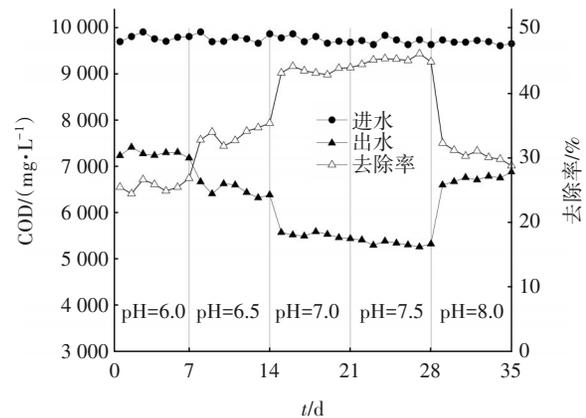


图4 pH对UASB反应器去除COD的影响

Fig.4 Effect of pH on COD removal by UASB reactor

## 2.2 SBR启动及影响因素分析

### 2.2.1 SBR启动分析

分别采用接种培菌法和自然培菌法启动SBR反应器,考察两种方法对大蒜加工废水的降解效果,结果如图5所示。系统初始进水COD浓度为59.62 mg/L,此时接种培菌、自然培菌系统对COD的平均去除率分别为70.58%和65.32%。在运行前7 d,进水COD浓度每天递增20 mg/L,第8~14天,两个SBR系统平均进水COD浓度为151.38 mg/L,该阶段两个SBR系统对COD的平均去除率分别升高至95.95%和86.37%。从第15天起,继续提高进水COD浓度,尽管进水浓度波动较大,但两个SBR系统的COD去除率均较稳定,直至进水COD浓度升高至5 000 mg/L时,自然培菌法SBR的COD去除率出现下降,且去除效果随进水COD浓度的增加开始持续下降。其原因一方面是由于大蒜加工废水浓度的增加导致大蒜素增加,从而抑制了微生物活性;另一方面,自然培菌系统无污泥基质,致使微生物易流失,处理效率降低。而当进水COD浓度为5 000 mg/L时,接种培菌SBR系统对COD的去除效果依然比较理想,COD去除率为94.74%。当进水COD提升至6 000 mg/L时,接种培菌SBR系统对COD的去除率开始出现下降,这可能是由于此时进水高有机负荷已经超过微生物新陈代谢需求,达到微生物降解能力的阈值。此外,由于高浓度大蒜加

工废水中大蒜素浓度逐渐升高,杀菌作用逐渐增强,致使微生物生命活动受到严重威胁。

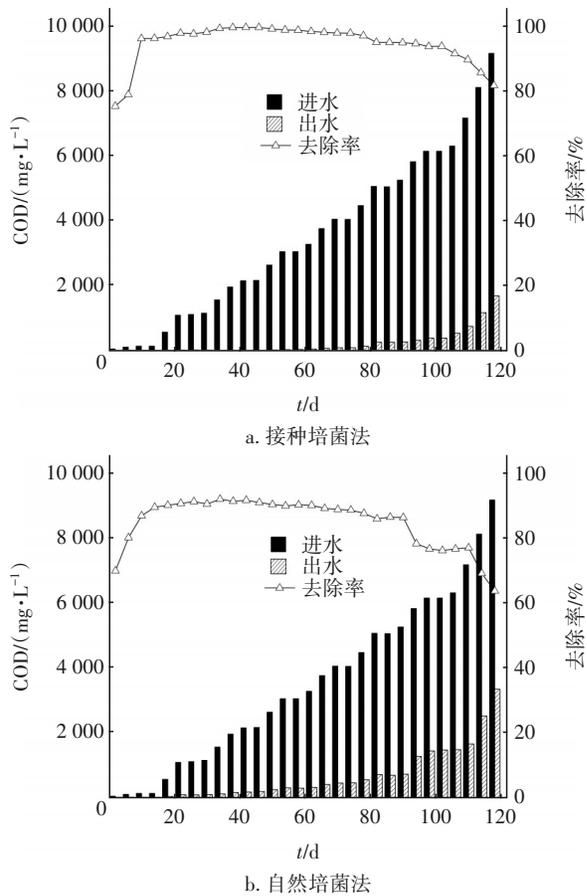


图5 不同接种法对COD去除的影响

Fig.5 Effect of different inoculation methods on COD removal

由于后续SBR系统的进水为UASB出水,其平均COD浓度为5 442.02 mg/L,而自然培菌法启动SBR系统的COD阈值为5 000 mg/L,接种培菌法为6 000 mg/L,认定接种培菌法优于自然培菌法,此时SBR污泥浓度为3 200 mg/L,污泥龄为15 d。因此本试验采用接种培菌法启动反应器。

### 2.2.2 周期时间对SBR系统的影响

当进水COD浓度为6 000 mg/L时,分析周期时间对SBR系统的影响。结果表明,在周期时间为8 h的条件下,SBR系统运行18 d以后,出水COD浓度为1 127.26 mg/L,去除率为81.76%。当周期时间为12 h时,系统运行18 d后,出水COD浓度为267.59 mg/L,去除率达到95.72%。由此可见,与周期时间为8 h相比,周期时间为12 h具有更好的COD去除效果。其主要原因是,较长时间的曝气能够促进好氧菌的增殖代谢,而废水中的有机物主要

依靠好氧菌降解。杜龔等人<sup>[8]</sup>提出,曝气时间的延长使系统内氧传质效率得以提高,微生物活性增强,有机物被微生物充分消耗降解。而傅源等人<sup>[9]</sup>在SBR处理大蒜废水的试验中发现,当曝气时间超过7 h时,继续增加曝气时间对COD的去除影响不显著。这与本试验的结果有所不同,这是由于本试验的进水COD浓度较高,为保证系统内溶解氧充足,不影响微生物代谢,确定SBR系统的曝气时间为8 h,最佳运行周期时间为12 h。

### 2.2.3 温度对SBR系统的影响

在进水COD浓度为6 000 mg/L、周期时间为12 h条件下,考察两个月内系统温度对COD和NH<sub>3</sub>-N去除效果的影响。结果表明,当温度为10 ℃时,COD去除率为34.28%,NH<sub>3</sub>-N去除率为40.58%;当温度升至25 ℃时,COD、NH<sub>3</sub>-N去除率分别达到了96%、95.27%。傅源等人<sup>[9]</sup>发现,当温度为25 ℃时,SBR系统对大蒜加工废水中COD的去除率达到94.33%,与本试验的结果类似。而随着温度的持续升高,系统对污染物的去除率却呈下降趋势。在生化反应中,温度过低会抑制微生物活性,而温度过高则微生物的成分(如蛋白质、核酸)将会受到损害。因此,在一定范围内提高温度会加快细胞内的生化反应,有利于COD的去除。

### 2.2.4 菌群结构分析

试验对SBR处理废水过程中污水厂种泥(H1)和SBR驯化第60天的污泥(H2)、自然培菌法驯化成熟污泥(H3)菌群结构进行了高通量测序,OTUs稀疏性曲线如图6所示。可知,随着序列数的增加,稀疏性曲线逐渐趋于平缓,说明扩增序列能够真实反映样品的菌群结构。

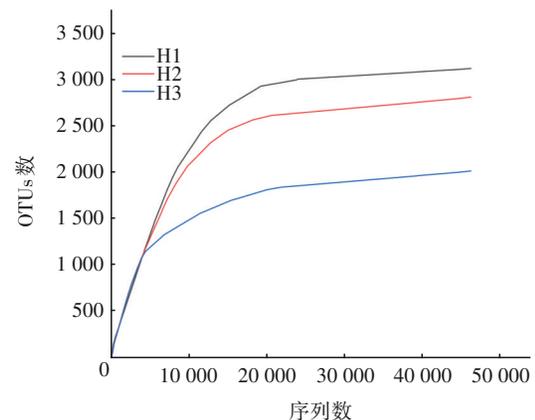


图6 OTUs稀疏性曲线

Fig.6 Sparsity curve of OTUs

门水平上,3 个样品的微生物组成和结构类似。H1 代表的污泥中, *Proteobacteria* 所占比例最高(见图 7), 达到了 45.98%, 其次为 *Bacteroidetes*、*Candidatus Saccharibacteria* 和 *Planctomycetes*, 这 4 个菌门的相对丰度达到了 84.31%。H2 中, *Proteobacteria* 所占比例仍然最高, 达到了 45.26%, 其次为 *Candidatus Saccharibacteria*、*Bacteroidetes*、*Planctomycetes*, 以上 4 个菌门的相对丰度之和达到了 88.93%。H3 中, *Proteobacteria* 所占比例最高, 达到 52.81%, 其次为 *Bacteroidetes*、*Actinobacteria*、*Firmicutes*, 这 4 个菌门的相对丰度达到了 96.14%。可见, *Proteobacteria* 始终作为优势菌种存在于 SBR 反应器内。Li 等人<sup>[10]</sup>提出, *Proteobacteria* 在反硝化及有机物降解中具有重要作用, 因此始终作为优势菌门存在于 SBR 反应器内。而随着反应器中微生物的不断驯化, *Bacteroidetes* 和 *Actinobacteria* 成为优势菌种。He 等人<sup>[11]</sup>研究 SBR 反应器中微生物群落结构时发现, *Bacteroidetes* 为活性污泥中的常见菌门, 其具有良好的有机物降解能力和脱氮性能。 *Actinobacteria* 绝大多数为异养好氧型细菌, 能分解纤维素、角蛋白等复杂有机物<sup>[12]</sup>, 而大蒜加工废水中含有高浓度的 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$ , 为 *Bacteroidetes* 和 *Actinobacteria* 的生长提供了适宜条件。

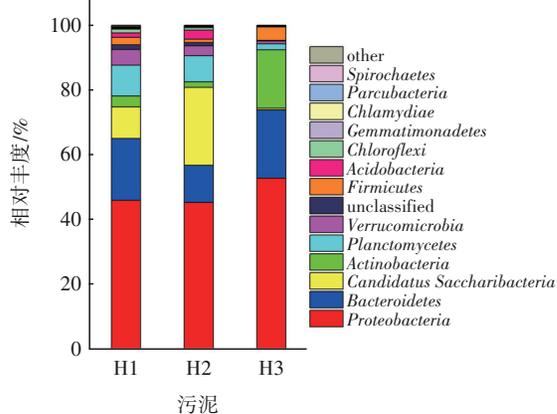


图 7 门水平相对丰度

Fig.7 Relative abundance at phylum level

纲水平上,3 个样品的主要菌纲有一定的差异(见图 8)。H1 代表的污泥中, 以 *Alphaproteobacteria* (30.05%)、*Sphingobacteriia* (9.19%)、*Planctomycetia* (8.48%) 和 *Gammaproteobacteria* (5.44%) 为主要菌纲。H2 的菌纲主要包括 *Alphaproteobacteria* (35.69%)、*Planctomycetia* (7.42%)、*Betaproteobacteria*

(4.5%)、*Cytophagia* (4.19%)。H3 主要包括 *Alphaproteobacteria* (47.57%)、*Actinobacteria* (18.04%)、*Flavobacteriia* (8.6%)、*Cytophagia* (6.89%)。 *Alphaproteobacteria* 具有良好的脱氮除磷性能, 因此其始终作为优势菌纲存在于反应器内; 而 *Actinobacteria*、*Flavobacteriia* 具有异养硝化特性, 对反应器的脱氮能力具有促进作用<sup>[13]</sup>。

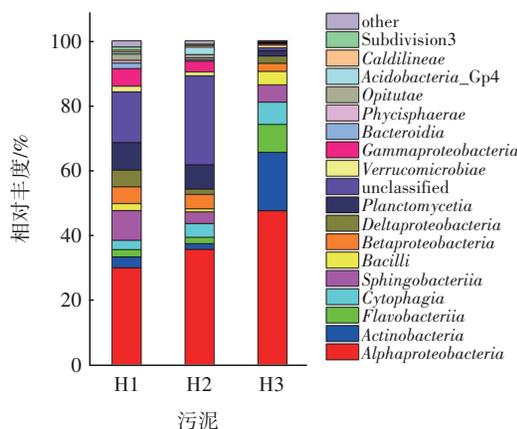


图 8 纲水平相对丰度

Fig.8 Relative abundance at class level

属水平上,3 个样品的差异较大(见图 9), H1 中优势菌属主要包括: *Defluviicoccus* (18.56%)、*Saccharibacteria\_genera\_incertae\_sedis* (9.76%)、*Kofleria* (3.53%)、*Aquisphaera* (3.01%)。

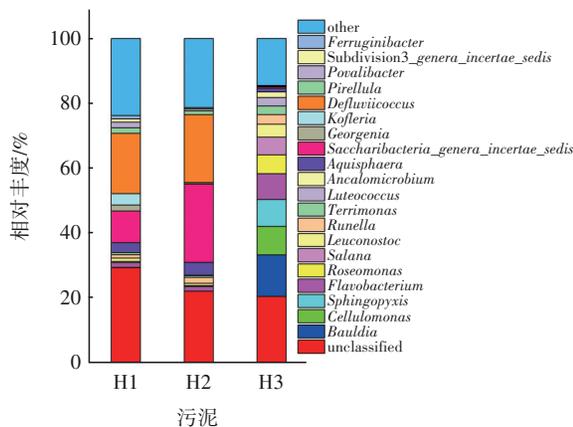


图 9 属水平相对丰度

Fig.9 Relative abundance at genera level

H2 中的优势菌属主要包括: *Saccharibacteria\_genera\_incertae\_sedis* (24.05%)、*Defluviicoccus* (20.97%)、*Aquisphaera* (4.02%)、*Aridibacter* (2.28%)。H3 中的优势菌属主要包括: *Bauldia* (12.82%)、*Cellulomonas* (8.75%)、*Sphingopyxis* (8.32%)、*Flavobacterium* (7.93%)。 *Cellulomonas*

具有良好的纤维素降解能力<sup>[14]</sup>, *Sphingopyxis* 能够分泌胞外多糖,在磷的积累和稳定颗粒结构方面具有重要作用<sup>[15]</sup>。 *Flavobacterium* 不仅具有反硝化能力,同时也是指示颗粒污泥成熟与否的重要指标之一<sup>[16]</sup>。正是由于以上细菌在系统内发挥着各自功能,因而本系统在处理过程中具有良好的去除有机物及脱氮除磷能力。

## 2.3 UASB—SBR 处理高浓度大蒜加工废水效果

### 2.3.1 对 COD 和 TP 的去除效果

图 10 为 UASB—SBR 工艺对 COD 的去除效果。可知,耦合工艺平均进水 COD 浓度为 9 616.80 mg/L,经 UASB 处理后平均出水 COD 浓度为 5 331.74 mg/L,平均去除率为 44.55%。高浓度大蒜加工废水经 UASB 厌氧处理后 COD 浓度显著降低,废水中难降解有机物被 UASB 转化为易降解有机物,废水可生化性提升,为后续 SBR 系统做出了贡献。SBR 系统平均出水 COD 浓度为 96.86 mg/L,平均去除率为 98.18%,SBR 具有高效的 COD 去除能力,在大蒜加工废水 COD 去除中起到主要作用。这是由于 SBR 是厌氧、好氧交替运行,反应器内溶解氧浓度呈周期性改变,氧浓度梯度大、转移效率高,使有机物去除率显著提升,而 *Bacteroidetes* 对有机物有高效的降解能力,其作为优势菌种存在于活性污泥中,为大蒜加工废水中高浓度有机物的去除做出了突出贡献。耦合工艺对大蒜加工废水 COD 的去除率为 99%,满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准要求。

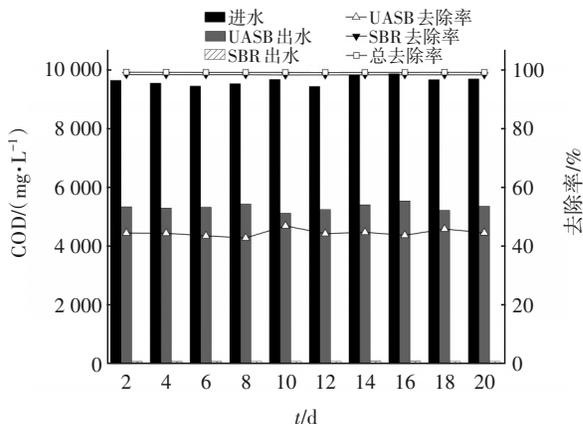


图 10 UASB—SBR 工艺对 COD 的去除效果

Fig.10 Removal effect of COD by UASB-SBR process

耦合工艺平均进水 TP 浓度为 24.09 mg/L, UASB 系统对 TP 的平均去除率为 0.81%, 可见

UASB 对 TP 几乎没有去除效果(见图 11)。分析原因, UASB 反应器内无稳定聚磷菌形成, 对 TP 的去除主要通过微生物细胞的合成作用。经 SBR 反应器处理后, 平均出水 TP 浓度为 1.25 mg/L, 平均去除率为 94.77%, 对 TP 的去除率较高是由于厌氧、好氧交替运行条件有助于聚磷菌生长, 好氧状态下聚磷菌过量吸磷并贮存在菌体内, 最终随剩余污泥排出系统, 在厌氧条件下聚磷菌将体内聚磷水解, 以正磷酸盐的形式释放到污水中。耦合工艺对大蒜加工废水中 TP 的去除率为 94.82%, 满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准要求。

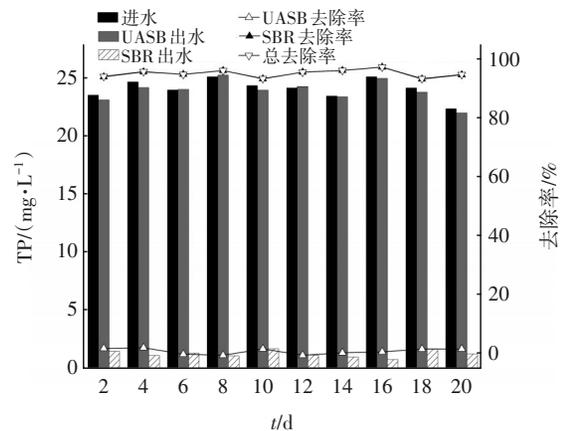


图 11 UASB—SBR 工艺对 TP 的去除效果

Fig.11 Removal effect of TP by UASB-SBR process

### 2.3.2 对 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 的去除效果

图 12 为 UASB—SBR 工艺对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果。可知, 平均进水 NH<sub>3</sub>-N 浓度为 73.81 mg/L, 经 UASB 反应器处理后, 平均出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度为 80.64 mg/L, 平均去除率为 -9.23%, 出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度增加是因为 UASB 在厌氧状态下对 NH<sub>3</sub>-N 几乎没有降解能力, 对 NH<sub>3</sub>-N 的去除主要依赖于微生物的同化作用, 而且由于高浓度大蒜加工废水中蛋白质的分解和氨化作用, 使 NH<sub>3</sub>-N 的出水浓度略高于进水浓度。经 SBR 反应器处理后, 平均出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度为 3.66 mg/L, 去除率为 95.44%, SBR 系统具有良好的厌氧、好氧条件, NH<sub>3</sub>-N 可在 SBR 好氧期被去除, 而且在长期的驯化下, 反应器中 *Flavobacterium* 成为优势菌属, 该细菌具有较强的脱氮能力, 对废水中 NH<sub>3</sub>-N 的去除起到主要作用。耦合工艺对 NH<sub>3</sub>-N 的去除率为 87.07%, 满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准要求。

当耦合工艺平均进水 TN 浓度为 94.21 mg/L

时,经UASB处理后,平均出水TN浓度为91.02 mg/L,平均去除率为3.38%(见图13)。厌氧条件下,UASB系统无法完成生物脱氮中的硝化过程,仅有一小部分氮随有机物降解,因此对TN的去除率较低。经SBR系统处理后,对TN的平均去除率为94.69%,SBR系统中好氧、厌氧交替进行,氨氮在好氧状态下被硝化菌转化为硝态氮,而在厌氧状态下,硝态氮被反硝化菌转化为氮气排出,因此SBR具有较高的TN去除能力。耦合工艺对大蒜加工废水TN的去除率为94.87%,满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准要求。

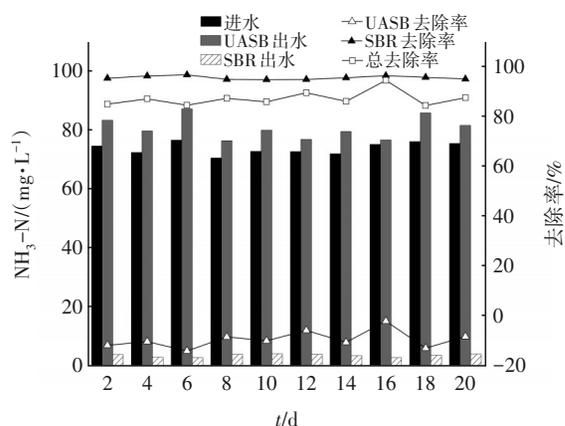


图12 UASB—SBR工艺对NH<sub>3</sub>-N的去除效果

Fig.12 Removal effect of NH<sub>3</sub>-N by UASB-SBR process

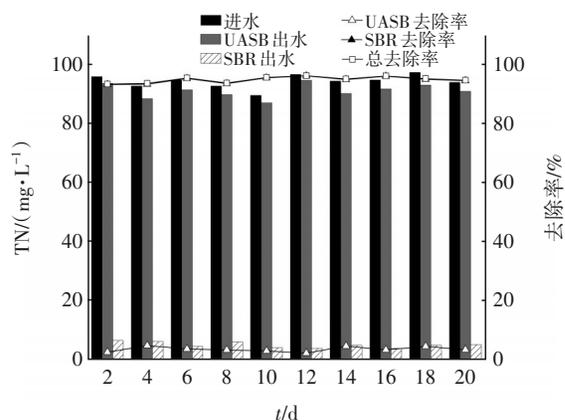


图13 UASB—SBR工艺对TN的去除效果

Fig.13 Removal effect of TN by UASB-SBR process

### 3 结论

① 高负荷条件下可快速启动UASB反应器,在进水COD浓度为9 800 mg/L、温度为(35±2) °C条件下,UASB反应器最佳HRT为45 h、最佳pH为7.5。

② 接种培菌法可有效启动SBR,在进水COD

浓度为6 000 mg/L条件下,SBR反应器最佳循环时间为12 h(瞬时进水10 min、搅拌3 h、曝气8 h、沉淀45 min、排水5 min),最佳温度为25 °C。

③ SBR中污泥具有丰富的生物多样性,但在不同运行阶段,污泥的菌群结构具有一定差异。在门水平上,*Bacteroidetes*、*Proteobacteria* 占据主导地位;在纲水平上,*Alphaproteobacteria*、*Actinobacteria*、*Flavobacteriia* 为优势菌纲;在属水平上,*Bauldia*、*Cellulomonas*、*Sphingopyxis*、*Flavobacterium* 为系统内优势菌属。正是这些菌群的共同作用,才使得高浓度的大蒜废水得到高效降解。

④ UASB—SBR工艺在最佳工况下对高浓度大蒜加工废水中COD、TP的平均去除率分别为99%、94.77%,对NH<sub>3</sub>-N、TN的平均去除率分别为95.44%、94.87%,出水水质满足《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准。

### 参考文献:

- [1] 王刚,海热提,王晓慧,等. UASB/SBBR处理禽畜养殖废水的启动和稳定运行[J]. 中国给水排水,2014,30(9):21-26.  
WANG Gang, HAI Reti, WANG Xiaohui, et al. Start-up and steady operation of UASB/SBBR for treating high strength livestock wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(9): 21-26 (in Chinese).
- [2] LI W, GAO M J, ZENG F, et al. Effect of pH and SRT on denitrifying phosphorus removal in A<sub>2</sub>N sequencing batch reactor process [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(3): 5737-5751.
- [3] 张立国,秦岩,李建政,等. UASB启动运行特征及互营丙酸氧化菌定量分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 615-622.  
ZHANG Ligu, QIN Yan, LI Jianzheng, et al. The performance of UASB at startup and the quantitative analysis of syntrophic propionate-oxidizing bacteria [J]. China Environmental Science, 2020, 40(2): 615-622 (in Chinese).
- [4] 班巧英,李建政,张立国,等. HRT对UASB运行效能及丙酸氧化菌群组成的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(11): 3673-3679.  
BAN Qiaoying, LI Jianzheng, ZHANG Ligu, et al. Impacts of HRT on UASB performance and propionate-oxidizing bacteria [J]. CIESC Journal, 2012, 63(11): 3673-3679 (in Chinese).

- [ 5 ] 刘亚红. UASB 处理高浓度有机废水的研究[J]. 化工时刊, 2014, 28(6): 7-9.  
LIU Yahong. The research on treating high concentration organic wastewater by UASB [J]. Chemical Industry Times, 2014, 28(6): 7-9(in Chinese).
- [ 6 ] 张立国, 李建政, 班巧英, 等. pH 对 UASB 运行效能及产甲烷互营菌群的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(8): 44-49.  
ZHANG Liguo, LI Jianzheng, BAN Qiaoying, *et al.* Impact of pH on performance and syntrophic community of hydrogen-producing acetogens and methanogens in a UASB [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(8): 44-49(in Chinese).
- [ 7 ] 闫立龙, 王晓辉, 梁海晶, 等. UASB 去除猪场废水有机物影响因素研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(3): 61-65.  
YAN Lilong, WANG Xiaohui, LIANG Haijing, *et al.* On the factors influencing COD removal in pigsty sewage by UASB [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(3): 61-65(in Chinese).
- [ 8 ] 杜龔, 周北海, 袁蓉芳, 等. UASB—SBR 工艺处理规模化畜禽养殖废水[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2): 497-504.  
DU Yan, ZHOU Beihai, YUAN Rongfang, *et al.* Treatment of large-scale livestock wastewater by UASB—SBR process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(2): 497-504(in Chinese).
- [ 9 ] 傅源, 李锋. 大蒜加工废水的 SBR 工艺研究[J]. 环境保护与循环经济, 2016, 36(1): 30-34.  
FU Yuan, LI Feng. Study on SBR process of garlic-processed wastewater [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2016, 36(1): 30-34(in Chinese).
- [ 10 ] LI Y, ZHANG Q, LI M, *et al.* Bioaugmentation of sequencing batch reactor for aniline treatment during start-up period: investigation of microbial community structure of activated sludge [J]. Chemosphere, 2020, 243: 125426.
- [ 11 ] HE Q L, SONG Q, ZHANG S L, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sequencing batch reactor with mixed carbon sources: reactor performance, extracellular polymeric substances and microbial successions [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 331: 841-849.
- [ 12 ] 曾涛涛, 蒋小梅, 韩科昌, 等. 生活污水处理厂微生物群落结构解析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 697-703.  
ZENG Taotao, JIANG Xiaomei, HAN Kechang, *et al.* Analysis of microbial community constituent composition of some sewage treatment and processing plant [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 697-703(in Chinese).
- [ 13 ] 李国令, 徐洪斌, 马浩亮, 等. OAO 和 AO 工艺处理城镇生活污水的微生物群落特征分析[J]. 环境工程学报, 2020, 14(3): 641-651.  
LI Guoling, XU Hongbin, MA Haoliang, *et al.* Analysis of microbial community characteristics of OAO and AO processes for domestic wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(3): 641-651(in Chinese).
- [ 14 ] 孟建宇, 陈勿力吉玛, 郭慧琴, 等. 常温 and 低温纤维素降解菌的分离及其降解特性[J]. 农业生物技术学报, 2021, 29(1): 73-84.  
MENG Jianyu, CHEN Wulijima, GUO Huiqin, *et al.* Isolation and degradation characteristics of cellulose-degradation bacteria at room and low temperature [J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2021, 29(1): 73-84(in Chinese).
- [ 15 ] WANG H Y, SONG Q, WANG J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor with high dissolved oxygen: effects of carbon to nitrogen ratios [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 1145-1152.
- [ 16 ] ZHANG X J, LI D, LIANG Y H, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from domestic sewage in MBR—CANON system and the biodiversity of functional microbes [J]. Bioresource Technology, 2013, 150: 113-120.

作者简介: 李微(1982- ), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水处理技术。

E-mail: liweilengjinyue@163.com

收稿日期: 2021-11-18

修回日期: 2022-02-08

(编辑: 任莹莹)