



印染废水水解酸化过程中的问题诊断及解决方案

古航坤^{1,2},周超群²,徐锡言³,范远红⁴,魏春海^{2,5}

(1. 深圳市深汕海洋发展有限公司, 广东深圳 516473; 2. 广州大学土木工程学院市政工程系, 广东广州 510006; 3. 中山市高平织染水处理有限公司, 广东中山 528441; 4. 广东新大禹环境科技股份有限公司, 广东广州 510663; 5. 广东省水质安全及污染控制工程技术研究中心, 广东广州 510006)

[摘要] 针对某印染废水处理厂水解酸化段运行异常的问题, 依托水解酸化序批式反应器(SBR)开展问题诊断及解决方案研究。通过历时取样实验确认了水解酸化过程中挥发性脂肪酸(VFAs)不升反降和有机氮氨化率偏低的问题; 通过控制低 pH(pH=5)运行实验清除消耗 VFAs 的微生物, 实现 VFAs 累积; 通过非控制 pH 运行实验实现 VFAs 的累积和有机氮氨化率的提高; 通过历时取样实验确定水解酸化的最佳反应时间为 10 h。长期运行实验显示, 在平均进水 COD 为 1 085 mg/L、氨氮为 9.5 mg/L、VFAs 为 43.7 mg/L 的条件下, 水解酸化 SBR 平均出水 COD 为 736 mg/L、氨氮为 19.5 mg/L、VFAs 为 64.2 mg/L, 为后续生物除碳脱氮奠定了良好基础。基于小试研究, 该厂成功实施了水解酸化池短时酸化并适当排泥的解决方案。

[关键词] 水解酸化 SBR; 印染废水; 有机氮氨化; 挥发性脂肪酸; pH 调控

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)10-0132-07

Problem diagnosis and solution development during hydrolysis acidification of printing and dyeing wastewater

GU Hangkun^{1,2}, ZHOU Chaoqun², XU Xiyan³, FAN Yuanhong⁴, WEI Chunhai^{2,5}

(1. Shenshan Ocean Development Co., Ltd., Shenzhen 516473, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. Zhongshan Gaoping Weaving Dyeing Water Treatment Co., Ltd., Zhongshan 528441, China; 4. Guangdong Xindayu Environmental Science and Technology Joint-Stock Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 5. Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Water Quality Safety and Pollution Control, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to solve the abnormal problems of hydrolysis acidification stage in a printing and dyeing wastewater treatment plant, the problem diagnosis and solution development were conducted via a hydrolysis acidification sequencing batch reactor(SBR). Sampling tests with reaction time demonstrated that the volatile fatty acids(VFAs) did not increase but decreased and the ammonification ratio of organic nitrogen was low in hydrolysis acidification SBR. The operation with low pH(pH=5) control successfully eliminated the microorganism consuming VFAs and achieved VFAs accumulation in SBR. Then, the operation without pH control successfully achieved VFAs accumulation and improved ammonification ratio of organic nitrogen in SBR. Sampling tests with reaction time further determined the optimal reaction time of 10 h. Long term operation showed that when the average COD, ammonia nitrogen and VFAs of the influent were 1 085 mg/L, 9.5 mg/L and 43.7 mg/L respectively, the average COD, ammonia nitrogen and VFAs of the SBR effluent were 736 mg/L, 19.5 mg/L and 64.2 mg/L respectively, favoring for the subsequent biological carbon and nitrogen removal. Based on the pilot study, the solution of short-term acidification and appropriate sludge discharge from the hydrolysis acidification tank of the plant was successfully conducted.

Key words: hydrolysis acidification SBR; printing and dyeing wastewater; ammonification of organic nitrogen; VFAs; pH control

[基金项目] 广州市科技计划项目(202102010417); 广州大学“百人计划”青年杰出人才项目(RQ2020103)

偶氮染料的广泛应用使得印染废水具有高色度和高有机氮的特点^[1-2],因厌氧微生物具有破坏染料的偶氮发色基团的功能,厌氧工艺(主要是水解酸化阶段)脱色效果较好,其作为印染废水预处理工艺已经得到广泛应用^[3-4]。广东省中山市某印染产业园污水处理厂工艺流程为转鼓格栅→调节池→水解酸化池→厌氧池→缺氧池→好氧池→膜池,设计处理水量为20 000 m³/d。进水COD为800~2 000 mg/L、色度为500~1 000倍、氨氮为5~20 mg/L、总氮为30~70 mg/L,呈现高有机物、高色度、高有机氮的特点。该厂运行过程中经常遇到色度和总氮难以稳定达到现行《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)中直接排放标准要求(色度≤50倍,总氮≤15 mg/L)的问题,需经常性地采用臭氧后处理脱色和外加碳源反硝化脱氮,额外增加了运行成本。

经过多次沿程取样分析,该厂调节池因停留时间长(约1 d)、进水水温高(30~40 ℃),印染废水已发生部分水解酸化反应,出水中挥发性脂肪酸(VFAs)质量浓度为30~80 mg/L,经过水解酸化池后VFAs不升反降至<5 mg/L,水解酸化池运行异常。因此,本研究利用实验室规模的序批式反应器(SBR)模拟该厂的水解酸化过程,开展问题诊断并提出解决方案。

1 材料与方法

1.1 印染废水与接种污泥

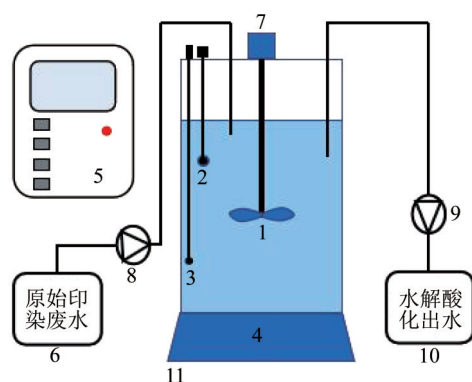
实验用水取自中山市某印染废水处理厂调节池出口,废水呈深蓝黑色,水质指标:COD为(1 100±100) mg/L、总氮为(37±2) mg/L、氨氮为(9±1) mg/L、乙酸为(30±5) mg/L、正戊酸为(15±5) mg/L、pH=9.3±0.2。由于未检出亚硝氮和硝氮,有机氮质量浓度(部分来源于含氮染料)占总氮的比例高达75%。有机氮有效转化为氨氮是其进一步通过硝化反硝化或厌氧氨氧化途径去除的前提。

水解酸化接种污泥取自该厂水解酸化池底部,呈黑色黏稠状,SS为25.3 g/L,VSS为11.8 g/L。

1.2 水解酸化SBR装置及运行方法

本研究采用的水解酸化SBR实验装置见图1。

如图1所示,SBR主要由商业化机械搅拌厌氧反应器(江苏中正)、进水泵、自动控制系统(可控制pH、温度、搅拌转速及时间)构成。反应器有效容积为4 L,



1—搅拌桨;2—pH电极;3—温度电极;4—加热层;5—自动控制柜;6—进水箱;7—电机;8—进水泵;9—出水泵;10—出水罐;11—厌氧反应器。

图1 水解酸化SBR实验装置

Fig.1 The hydrolysis acidification SBR set-up

每个运行周期内依次执行进水(2 L, 5 min)、反应(第一二阶段各22 h、第三阶段10 h)、沉淀(2 h)、排水(2 L, 10 min)、待机(15 min),反应过程中搅拌桨转速为200 r/min,初始污泥SS为6.4 g/L。

实验分3个阶段开展:第一阶段通过单因素(pH、温度)历时取样实验确认接种污泥水解酸化过程VFAs不升反降的现象;第二阶段先通过控制低pH运行实验实现VFAs的有效累积,再通过非控制pH运行实验实现有机氮的有效氨化;第三阶段先通过非控制pH历时取样实验确定最优反应时间,再通过连续运行实验验证最优条件下水解酸化SBR的污染物去除转化效果。

1.3 分析测试方法

实验过程中水质的分析均采用标准方法^[5]:COD采用重铬酸钾氧化-硫酸亚铁铵滴定法测定;总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;氨氮采用纳氏分光光度法测定;VFAs采用气相色谱法测定;SS和VSS采用灼烧称重法测定;pH采用电极法测定。

2 结果与讨论

2.1 单因素历时取样实验效果

控制反应时间为22 h、温度为室温25 ℃,水解酸化SBR依次在pH为9、8、7、6条件下运行,污染物去除转化效果见图2。

由图2(a)可知,各pH条件下,COD的降解速率均随反应时间的延长逐渐降低;反应10 h后COD降解曲线均逐渐趋向于平缓,COD均下降250~300 mg/L。由

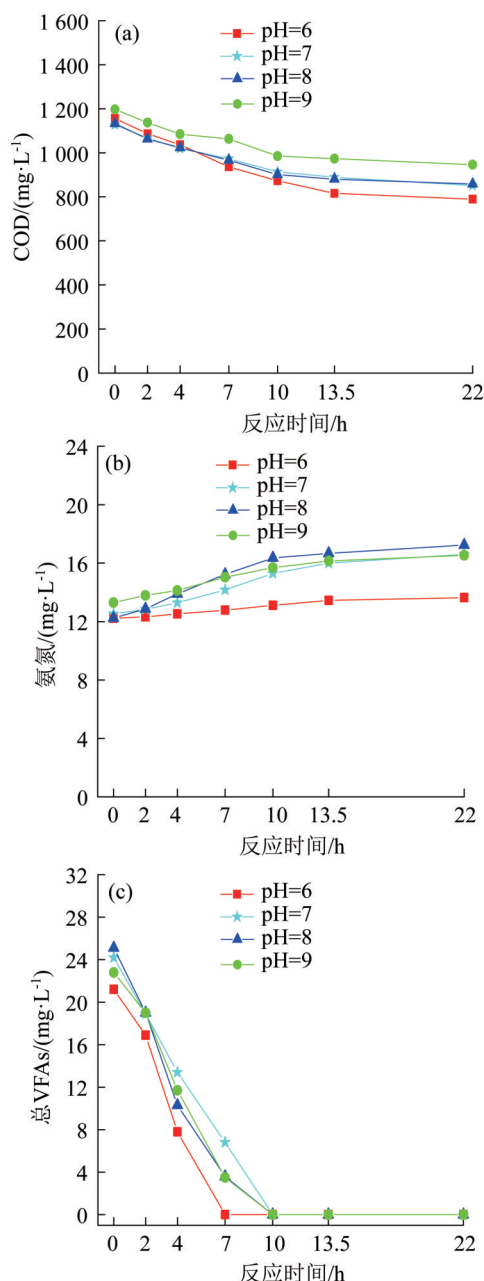


图2 不同pH条件下水解酸化SBR中污染物浓度随反应时间的变化

Fig.2 Changes of pollutants concentration with reaction time in hydrolysis acidification SBR with different pH

图2(b)可知,pH=8时,废水中有机氮的氨化效果最佳,SBR中氨氮增加了5 mg/L(12.2 mg/L→17.2 mg/L);pH=7时,氨氮增加了4.1 mg/L(12.5 mg/L→16.6 mg/L),与pH=8时较为接近;pH=9和6时,有机氮的氨化效果明显受到抑制,SBR中氨氮分别增加了3.2 mg/L(13.3 mg/L→16.5 mg/L)和1.4 mg/L(12.2 mg/L→13.6 mg/L)。顾梦琪等^[6]利用水解酸化SBR处理含偶氮染料废水的研究

中也发现了因偶氮染料脱色导致出水氨氮高于进水氨氮的现象。图2(c)中,各pH条件下,SBR进水及出水均只检测到乙酸和正戊酸2种VFAs,且未能实现VFAs的积累;总VFAs均随着反应时间的延长而逐渐下降,超过10 h后已低于检测限。

控制反应时间为22 h、pH=8,水解酸化SBR依次在温度为25、30、35、40℃条件下运行,污染物去除转化效果见图3。

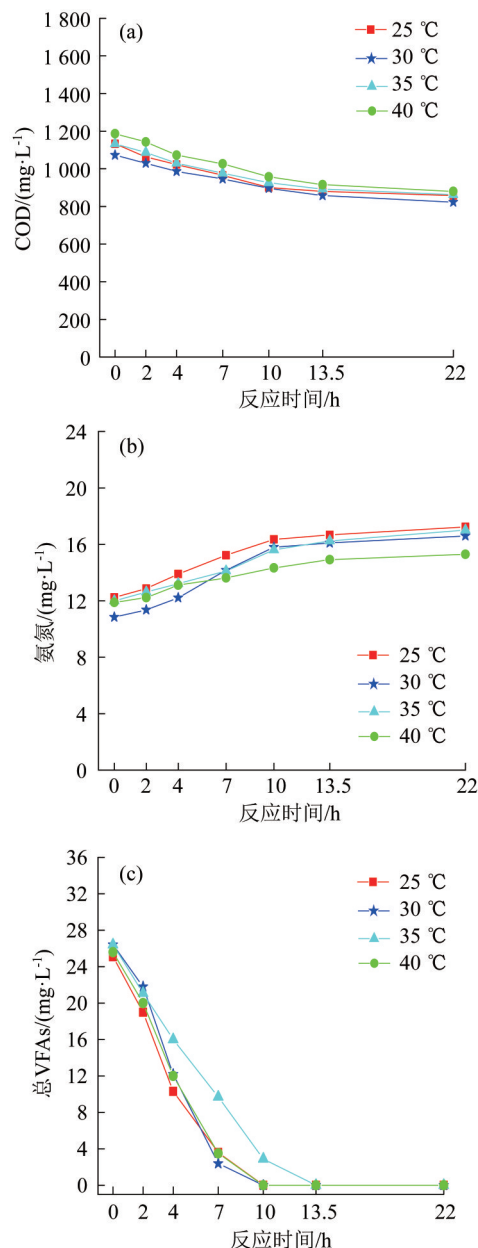


图3 不同温度条件下水解酸化SBR中污染物浓度随反应时间的变化

Fig.3 Changes of pollutants concentration with reaction time in hydrolysis acidification SBR with different temperature

由图3(a)可知,不同温度条件下SBR中COD的降解趋势均具有较好的一致性,且各温度条件下COD的降解效果基本相同。由图3(b)可知,温度由25℃上升到30℃时,废水中有机氮的氨化效果达到最佳,SBR中氨氮在反应期间增加了5.8 mg/L(10.8 mg/L→16.6 mg/L)。温度为35℃和40℃时,氨氮分别增加了5 mg/L(12 mg/L→17 mg/L)和3.4 mg/L(11.9 mg/L→15.3 mg/L),这说明温度过高会对SBR中有机氮的氨化效果产生明显抑制作用。图3(c)表明,各温度条件下,SBR中依旧均未能实现VFAs的积累,且与各pH条件下的结果基本相同。

上述结果与废水厂水解酸化池(水力停留时间为5 h)的出水VFAs远低于进水类似。根据两相厌氧理论(水解酸化→产甲烷)推知,水解酸化池污泥中含有可消耗VFAs的微生物(如产甲烷菌)。

2.2 控制低pH调试运行效果

水解酸化SBR进一步在pH=5的条件下运行了10个周期,每周期反应时间为22 h、温度为30℃,以期利用水解酸化菌(最适pH=5.0~6.5)和产甲烷菌(最适pH=6.6~7.5)对pH的耐受差异实现抑制/淘汰反应器中产甲烷菌和实现VFAs积累的目的。运行过程中水解酸化SBR的污染物去除转化效果见图4。

由图4(a)可知,在平均进水COD为1142 mg/L的条件下,SBR稳定运行时平均出水COD为722 mg/L,出水COD约下降了400 mg/L,平均COD去除率为37%。由图4(b)可知,SBR出水中总VFAs和乙酸的质量浓度随运行时间的延长先逐渐增加后趋于平稳,成功实现了VFAs的积累;SBR稳定运行时平均出水乙酸增加了33 mg/L(30.9 mg/L→63.9 mg/L),平均出水总VFAs增加了28 mg/L(46 mg/L→74 mg/L);因水解酸化作用将大分子有机酸分解成小分子有机酸,平均出水正戊酸下降了5 mg/L(15.5 mg/L→10.5 mg/L)。由图4(c)可知,SBR出水氨氮随运行时间的延长逐步降低至与进水氨氮基本相同的水平,有机氮的氨化率最低仅为0.07%,有机氮的氨化效果受到严重抑制。由于有机氮转换为氨氮是后续硝化反硝化脱氮工艺的前提,因此pH=5的条件不利于对总氮的去除。

2.3 非控制pH调试运行效果

尽管低pH运行可以实现VFAs的累积,但也严重抑制了有机氮的氨化效果,因此后续实验中水解酸化SBR在非控制pH的条件下运行,每周期反应时间为

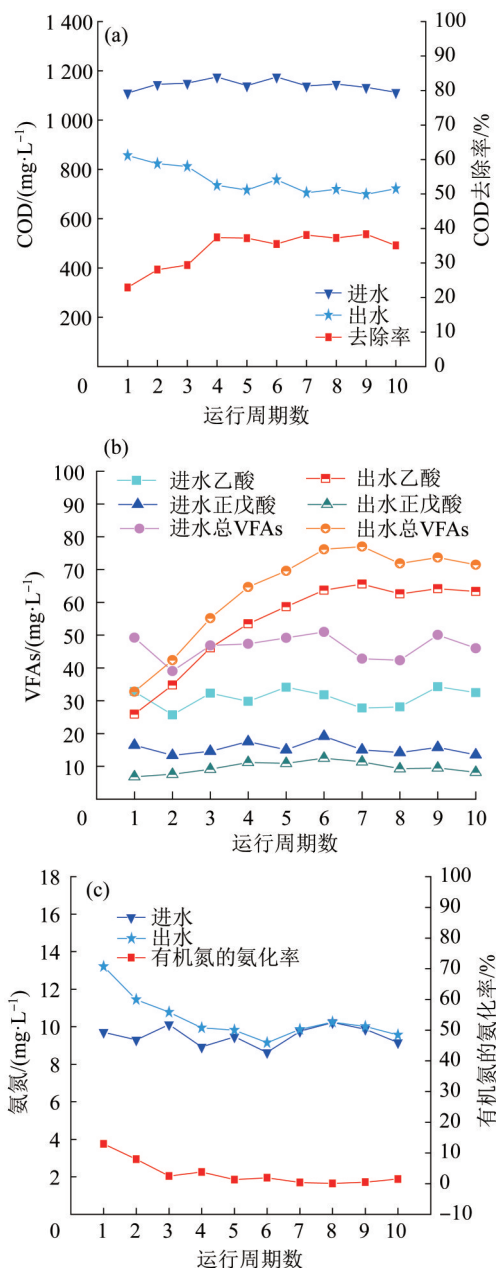


图4 控制低pH条件下水解酸化SBR的污染物去除转化效果

Fig. 4 Performance of pollutants removal and conversion in hydrolysis acidification SBR with low pH control

22 h、温度为30℃。因进水pH偏碱性(pH=9.3),随运行周期数增加,SBR中的pH逐渐上升并稳定在7~8,运行处理效果见图5。

由图5(a)可知,在平均进水COD为1156 mg/L条件下,SBR稳定运行时平均出水COD为729 mg/L,出水COD约下降400 mg/L,平均COD去除率为36%,与低pH运行条件下的效果基本相同,表明pH范围对COD去除无显著影响。由图5(b)可知,SBR稳定运行时平

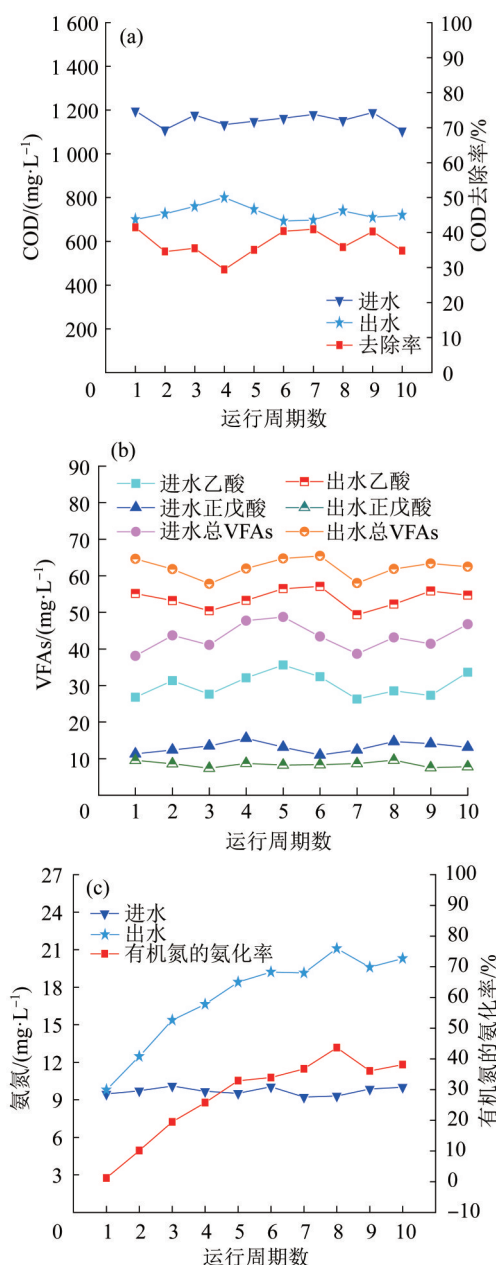


图5 非控制pH条件下水解酸化SBR的污染物去除转化效果

Fig. 5 Performance of pollutants removal and conversion in hydrolysis acidification SBR without pH control

均出水乙酸增加 23.8 mg/L (30 mg/L→53.8 mg/L), 平均出水总 VFAs 增加 19 mg/L (43.3 mg/L→62.3 mg/L), 平均出水正戊酸下降 4.8 mg/L (13.1 mg/L→8.3 mg/L)。非控制 pH 条件下, SBR 依然能够实现 VFAs 的有效积累, 表明经控制低 pH 调试运行后, 消耗 VFAs 的微生物 (如产甲烷菌) 被成功抑制/淘汰, 体现了两相厌氧理论指导实验设计、实验数据证实理论分析的辩证关系。由图 5(c) 可知, SBR 出水氨氮随运行时间的延长先升

高后趋于稳定, 表明在非控制 pH 的条件下, 废水中有机氮的氨化效果逐渐恢复。SBR 稳定运行时平均出水氨氮增加了 10.3 mg/L (9.7 mg/L→20 mg/L), 有机氮的平均氨化率为 38.7%。

2.4 优化反应时间实验效果

水解酸化 SBR 在非控制 pH、温度为 30 ℃、反应时间为 22 h 的条件下运行, 通过历时取样的方式监测 SBR 中 VFAs 以及氨氮的变化趋势, 结果见图 6。

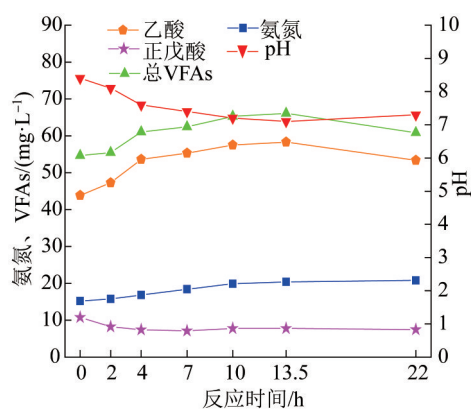


图6 水解酸化SBR运行效果随反应时间的变化

Fig. 6 Changes of performance with reaction time in hydrolysis acidification SBR

由图 6 可知, 随着反应时间的延长, SBR 中氨氮呈现先上升后趋于稳定的趋势; 在初始反应 10 h 内, 氨氮增加了 4.7 mg/L (15.2 mg/L→19.9 mg/L), 而随后 12 h 内仅增加 0.9 mg/L。SBR 中总 VFAs 随反应时间的延长呈现先上升后稳定再下降的现象; 在初始反应 13.5 h 内, 总 VFAs 增加了 11.5 mg/L (54.6 mg/L→66.1 mg/L), 而反应 10~13.5 h 内总 VFAs 仅增加了 0.8 mg/L, 随后 8.5 h 内总 VFAs 出现小幅下降 (66.1 mg/L→60.9 mg/L)。SBR 中 pH 的变化与总 VFAs 的变化直接相关, pH 随反应时间的延长呈现先下降后稳定再小幅上升的现象, 在初始反应 13.5 h 内 pH 降低了 1.3 (8.4→7.1), 反应 10~13.5 h 内 pH 仅下降了 0.1, 随后 8.5 h 内 pH 因总 VFAs 小幅下降而出现上升 (7.1→7.4)。因此, 从最大化有机氮的氨化率和 VFAs 积累率以及节省处理时间的角度考虑, 水解酸化 SBR 最优反应时间确定为 10 h。

2.5 优化运行实验效果

在最优条件 (非控制 pH、温度为 30 ℃、反应时间为 10 h) 下运行水解酸化 SBR, 污染物去除转化效果见图 7。

水解酸化 SBR 在最优条件下实现了稳定连续运行。如图 7(a) 所示, 在平均进水 COD 为 1 085 mg/L 的

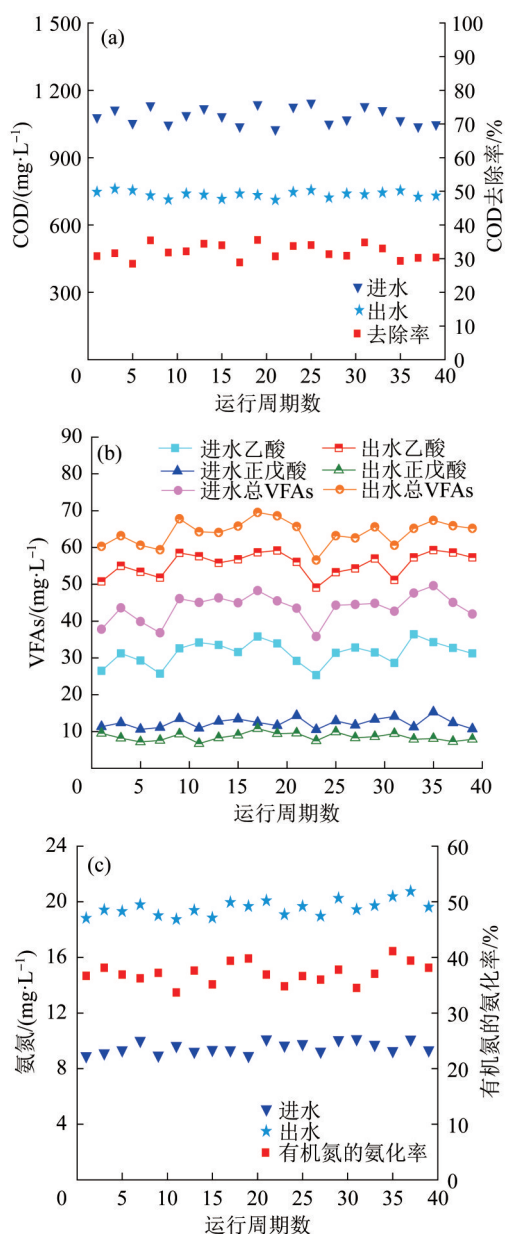


图7 最优条件下水解酸化SBR的污染物去除转化效果

Fig. 7 Performance of pollutants removal and conversion in hydrolysis acidification SBR with optimum conditions

条件下,经水解酸化处理后,SBR的平均出水COD为736 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均COD去除率为32%,与文献[7-8]中采用的水解酸化UASB工艺和文献[9]中采用的推流式活性污泥法处理印染废水的COD去除效果相当。如图7(b)所示,水解酸化处理后,SBR出水乙酸质量浓度平均增加24.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (31.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\rightarrow 55.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),出水总VFAs平均增加20.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (43.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\rightarrow 64.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),出水正戊酸平均下降3.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (12.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\rightarrow 8.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。如图7(c)所示,在平均进水氨氮为9.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,

经水解酸化处理后SBR平均出水氨氮为19.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,有机氮的平均氨化率为37.1%。水解酸化SBR对COD的有效削减、VFAs的有效累积和有机氮的有效氨化为后续生物除碳脱氮奠定了良好基础。

基于小试研究结果,该厂实施了水解酸化池短时酸化(暂停进出水,投加硫酸调节 $\text{pH}=5$,持续时间5 d)并一次性排泥50%的解决方案,恢复运行后成功实现了水解酸化池VFAs的累积(出水VFAs质量浓度高于进水15~30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和有机氮的氨化(出水氨氮高于进水8~15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),显著减小了后续工艺中反硝化外加碳源的投加量。产甲烷菌具有适宜中温且增殖慢的特点,为避免或尽量减少水解酸化池内再发生产甲烷过程,在实际运行中一方面应加强对进水温度的控制,设置冷却塔使进水温度低于产甲烷菌的最适温度(30~35 $^{\circ}\text{C}$),另一方面应适当增大排泥量,缩短污泥停留时间。

3 结论

针对印染废水处理厂水解酸化池出水VFAs显著低于进水的问题,利用水解酸化SBR小试装置依次开展不同 pH 和温度条件下的历时取样实验,确认了水解酸化池污泥中存在消耗VFAs的微生物(如产甲烷菌),控制低 pH ($\text{pH}=5$)连续运行实验可清除消耗VFAs的微生物从而实现VFAs累积,非控制 pH 连续运行实验可实现VFAs累积和有机氮转化为氨氮效果的同步提高,历时取样实验确定了水解酸化的最佳反应时间为10 h。优化条件下的长期运行实验实现了COD的有效削减(平均去除率32%)、VFAs的有效累积(总VFAs平均增加20.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和有机氮的有效氨化(有机氮的平均氨化率为37.1%),为后续生物除碳脱氮奠定良好基础。基于小试研究,该厂实施了水解酸化池短时酸化并适当排泥的解决方案,成功获得了与小试研究类似的VFAs累积和有机氮氨化效果。

参考文献

- [1] 薛罡. 印染废水治理技术进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(9): 10-17.
XUE Gang. Technology progress of dyeing wastewater treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(9): 10-17.
- [2] 古航坤, 黄斌, 罗赵青, 等. 厌氧与缺氧/好氧交替式SBR处理印染废水[J]. 工业水处理, 2021, 41(1): 83-87.
GU Hangkun, HUANG Bin, LUO Zhaoqing, et al. Anaerobic and

- anoxic/aerobic alternative SBR treatment for printing and dyeing wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(1): 83-87.
- [3] 苏大雄, 张超. 复合水解酸化-CASS工艺处理高比例印染废水的应用[J]. 工业水处理, 2020, 40(5): 126-128.
- SU Daxiong, ZHANG Chao. Application of hybrid hydrolysis acidification-CASS process treating high proportion of printing and dyeing wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(5): 126-128.
- [4] 程家迪, 黄周满. 水解酸化+A/O+UF+RO处理低浓度印染废水回用工程[J]. 工业水处理, 2017, 37(5): 98-100.
- CHENG Jiadi, HUANG Zhouman. Reuse project on the treatment of low-concentration printing and dyeing wastewater by hydrolytic acidification+A/O+UF+RO hybrid process [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(5): 98-100.
- [5] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-284.
- [6] 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 等. 水解酸化/AO组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5550-5557.
- GU Mengqi, YIN Qidong, LIU Aike, et al. Color and nitrogen removal from synthetic dye wastewater in an integrated hydrolysis/acidification and anoxic/aerobic process[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5550-5557.
- [7] 尤鑫, 万年红, 雷培树, 等. EBO™升流式水解酸化池用于印染废水处理[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 138-141.
- YOU Xin, WAN Nianhong, LEI Peishu, et al. Treatment of printing and dyeing wastewater by EBO™ up-flow hydrolytic acidification tank[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 138-141.
- [8] 王学华, 黄勇, 王浩. 印染废水水解酸化处理中填料式反应器与UASB反应器的比较[J]. 环境工程学报, 2014, 8(4): 1521-1525.
- WANG Xuehua, HUANG Yong, WNAG Hao. Comparative study between attached reactor and UASB reactor for hydrolysis and acidification of dyeing wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(4): 1521-1525.
- [9] 周华, 夏海波, 张和英. 水解酸化-MBR-臭氧工艺在印染废水处理中的应用[J]. 给水排水, 2021, 57(9): 81-84.
- ZHOU Hua, XIA Haibo, ZHANG Heying. Treatment of dyeing wastewater by combination of hydrolysis acidification-MBR-O₃[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(9): 81-84.
- 【作者简介】 古航坤(1996—), 硕士, 工程师。电话: 18124233672, E-mail: ghk455818213@163.com。通讯作者: 魏春海, 博士, 教授。E-mail: weich@gzhu.edu.cn。
- 【收稿日期】 2022-07-20(修改稿)

(上接第 131 页)

- [18] SUN Xuhui, ZU Kexin, LIANG He, et al. Electrochemical synthesis of ferrate(VI) using sponge iron anode and oxidative transformations of antibiotic and pesticide[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 344: 1155-1164.
- [19] BOUZEK K, ROUSAR I, BERGMANN H, et al. The cyclic voltammetric study of ferrate(VI) production[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 1997, 425(1/2): 125-137.
- [20] BOUZEK K, SCHMIDT M J, WRAGG A A. Influence of electrolyte composition on current yield during ferrate(VI) production by anodic iron dissolution [J]. Electrochemistry Communications, 1999, 1(9): 370-374.
- [21] BARISCI S, ULU F, SÄRKÄ H, et al. Electrosynthesis of ferrate(VI) ion using high purity iron electrodes: Optimization of influencing parameters on the process and investigating its stability [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2014, 9: 3099-3117.
- [22] HE Weichun, WANG Jianming, SHAO Haibo, et al. Novel KOH electrolyte for one-step electrochemical synthesis of high purity solid K₂FeO₄: Comparison with NaOH [J]. Electrochemistry Communications, 2005, 7(6): 607-611.
- [23] MÁCOVÁ Z, BOUZEK K. The influence of electrolyte composition on electrochemical ferrate(VI) synthesis. Part II: Anodic dissolution kinetics of a steel anode rich in silicon [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2011, 41(9): 1125-1133.
- [24] BIESINGER M C, PAYNE B P, GROSVENOR A P, et al. Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 2717-2730.
- 【作者简介】 杨雪(1995—), 硕士研究生。电话: 15732024790, E-mail: 1664604287@qq.com。通讯作者: 刘宝, 博士。E-mail: liubao0109@163.com。
- 【收稿日期】 2022-07-11(修改稿)