

低温下微膨胀活性污泥法处理生活污水的研究

刘旭东,张跃瀚,王海曼,赵昊然

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究低温条件下微膨胀活性污泥法处理人工模拟生活污水的启动条件,以及低温成功启动微膨胀活性污泥法后活性污泥的沉降性能和污泥对污染物的去除效果。**方法** 将 20 ℃ 作为起始温度分别对 3 个 SBR 装置进行降温,记录污泥 SVI 值直至达到微膨胀状态,测定上清液 COD, $\text{NH}_4^+ - \text{H}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, TN 质量浓度。SBR2 恢复污泥正常状态后从 15 ℃ 降至 10 ℃ 与 SBR3 的 20 ℃ 降至 10 ℃ 进行比较。单独实验后进行连续实验,分析与单独降温相同条件下污泥性能。增加 SBR2, SBR3 好氧段时长及后置缺氧段时长,分析 $\text{NH}_4^+ - \text{H}$, TN 的去除效果。**结果** 由 20 ℃ 连续降温至 15 ℃, 10 ℃, 7 ℃ 后污泥的 SVI 最大值分别为 217 mL/g, 192 mL/g, 278 mL/g, 292 mL/g, 均低于分别降至 15 ℃, 10 ℃, 7 ℃ 后的污泥 SVI 最大值;降温至 7 ℃ 后 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率最高达 98.8%。增加好氧时长和缺氧段时长后, $\text{NH}_4^+ - \text{H}$ 和 TN 去除率均提升 7% 左右。**结论** 温度降幅对微膨胀活性污泥法影响较大,温度降幅越小,活性污泥膨胀越慢;极低温度下 COD、氨氮去除率大大降低。

关键词 生活污水;微膨胀;活性污泥;去除率;沉降性能

中图分类号 TU99;X703

文献标志码 A

Treatment of Domestic Sewage by Micro-expansion Activated Sludge Process at Low Temperature

LIU Xudong, ZHANG Yuehan, WANG Haiman, ZHAO Haoran

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In this paper in order to vestigate the start condition and performance of the micro-expanded activated sludge process, experiments of domestic sewage treatment by the process were carried out in three SBR units. 20 ℃ as the initial temperature, SVI value of sludge every day was record until sludge at the micro expansion state, and COD, $\text{NH}_4^+ - \text{H}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, TN of supernatant were measured. Results show that after increasing the aerobic duration and anoxic duration, the removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{H}$ and TN are both increased by about 7%. In continuous cooling tests, maximum SVI of the sludge at 20 ℃, 15 ℃, 10 ℃, and 7 ℃ is 217 mL/g, 192 mL/g, 278 mL/g,

收稿日期:2019-12-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51908377)

作者简介:刘旭东(1966—),男,副教授,博士,主要从事水污染控制技术方面研究。

and 292 mL/g, which are all lower than that of 15 ℃, 10 ℃, and 7 ℃ in separate cooling tests. After cooling to 7 ℃, the removal rate of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ is as high as 98.8%. So temperature has a greater impact on the micro-expansion activated sludge method. The smaller the temperature drop, the slower the expansion of activated sludge; the removal rate of COD, and ammonia nitrogen is greatly reduced at extremely low temperatures.

Key words: domestic sewage; micro expansion; activated sludge; removal rate; sedimentation performance

污泥微膨胀是在低溶解氧条件下处理活性污泥,使丝状菌过度繁殖,在污泥负荷与温度等条件的控制下,使 SVI 值保持在 150 ~ 250 mL/g,出水水质与节能都较正常活性污泥更有优势^[1-3]。微膨胀活性污泥法的启动受众多因素影响,其中温度、pH、溶解氧质量浓度均为重要因素。笔者在 7 ~ 20 ℃ 不同低温条件下,启动微膨胀活性污泥,分析低温下微膨胀活性污泥法对污染物的去除效果。

1 实 验

1.1 实验装置

笔者采用 4 个容积为 6L 的 SBR1, SBR2, SBR3, SBR4 装置进行实验(见图 1)。

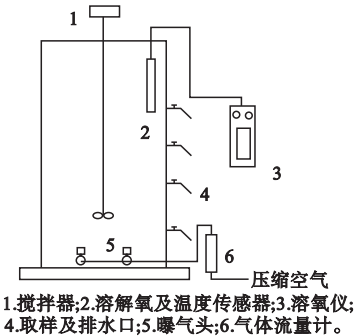


图 1 SBR 装置

Fig. 1 Single SBR device

1.2 反应器启动

采用厌氧-好氧-缺氧运行模式,反应器的运行周期为 8 h,每天运行 3 个周期,每个周期内进水、厌氧段、曝气段、缺氧段、沉淀段、出水、闲置的时间分别为 10、120、200、60、60、10、20 min。并在后置缺氧段投加甲醇作为反硝化碳源^[4-5]。初始温度分别控制在 20 ℃。

1.3 实验水质

反应器进水均采用人工模拟生活污水。配置药剂为:葡萄糖投加量为 0.2 ~ 0.4 g/L;氯化铵为 0.08 ~ 0.15 g/L;磷酸二氢钾为 0.018 ~ 0.03 g/L;碳酸氢钠为 0.4 ~ 0.6 g/L;硫酸镁为 0.08 g/L;氯化钙为 0.05 g/L。

1.4 实验污泥

SBR 反应器中使用的污泥来自沈阳北部污水处理厂的二沉池。先用人工模拟生活污水闷爆,7 d 左右活性污泥 SVI 值稳定在 95 ~ 105 mL/g,将此状态活性污泥投入实验。

1.5 分析项目和检测方法

水质分析方法:COD 采用重铬酸钾法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 采用钼锑抗分光光度法;亚硝酸盐氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;硝酸盐氮采用紫外分光光度法。

2 结果与分析

2.1 微膨胀活性污泥法的启动条件

2.1.1 20 ℃ 时的启动条件

SBR1 温度保持在 20 ℃。污泥负荷为 0.4 kg / (kg · d), DO 质量浓度控制在 0.3 mg/L,运行 6 个周期,污泥 SVI 值从 95 ~ 105 mL/g 升至 210 ~ 235 mL/g。SBR 小试对丝状细菌的生长繁殖有较大的抑制作用,故将污泥负荷调低,降至 0.24 kg / (kg · d), DO 质量浓度不变,观察 14 d, SVI 值逐渐降至 143 ~ 150 mL/g,在第 10 天稳定,成功启动微膨胀活性污泥状态。

2.1.2 15℃时的启动条件

SBR2 反应器污泥负荷为 $0.4\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 保持不变,DO 质量浓度控制在 0.3 mg/L , 温度调至 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 运行 6 个周期,污泥 SVI 值从 $95\sim105\text{ mL/g}$ 升至 $225\sim265\text{ mL/g}$ 。SBR 小试对丝状细菌的生长繁殖有较大的抑制作用,故将污泥负荷调低,降至 $0.18\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$,DO 质量浓度不变,观察 14 d,SVI 值逐渐降低,第 9 天降 172 mL/g ,在第 11 天趋于稳定,成功启动微膨胀活性污泥状态。

2.1.3 10℃时的启动条件

SBR3 反应器污泥负荷为 $0.4\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$, DO 质量浓度控制在 0.3 mg/L , 温度降至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 运行 6 个周期,污泥 SVI 值从 100 mL/g 左右迅速升至 366 mL/g ,且污泥仍继续恶化膨胀,通过改变 DO 浓度等方法无法改变污泥恶化膨胀状态。将恶化的活性污泥重新进行闷爆,DO 质量浓度为 3 mg/L , 温度调至 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 恶化膨胀状态逐渐得到恢复,闷爆第 10 天,SVI 降至 168 mL/g 。继续闷爆 36 个周期,使污泥恢复至最初状态,SVI 值非常稳定保持在 100 mL/g 左右^[6]。重新测试 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下微膨胀活性污泥法能否成功启动。分析之前污泥负荷过高导致低温条件下丝状菌过度繁殖,故将反应器温度调至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 污泥负荷降到 $0.08\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$, DO 质量浓度保持不变,调整好参数后观察污泥状态。3 d 后 SVI 值升至 180 mL/g , 继续反应 10 d, 污泥持续恶化膨胀,SVI 提升至峰值 288 mL/g , 然后缓慢下降,最终 SVI 值保持在 $185\sim195\text{ mL/g}$ 。次反应器温度降幅过大导致污泥恶化膨胀速度过快。

对 SBR2 中处于微膨胀状态的污泥进行闷爆,与之前闷爆条件一致,7 d 后污泥 SVI 稳定在 $100\sim105\text{ mL/g}$, 将 SBR2 温度降低到 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 污泥负荷不变化,DO 质量浓度降低到 0.3 mg/L , 第 6 个周期污泥 SVI 值增加到 288 mL/g , 恶化膨胀速度明显低于由 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 骤降至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过程。而且将 DO 质量

浓度提升至 3 mg/L 进行闷爆后,无需改变温度也可恢复沉降性能较好的污泥状态。因此降温幅度对微膨胀状态的影响较大,降温幅度与污泥 SVI 值成正相关,降温幅度越大,微膨胀状态污泥 SVI 值越高,且活性污泥恶化情况越严重。

2.1.4 7℃时的启动条件

由于温度降幅影响污泥活性,过大的降幅会导致污泥恶化速率提高,且 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件不适合丝状菌生长繁殖,减少温度降幅,故 SBR4 依旧保持 $20\sim10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的降幅,当温度稳定 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后降低污泥负荷至 $0.03\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$, DO 质量浓度不变。3 d 后 SVI 值升至 283 mL/g , 污泥结构松散,为防止活性污泥恶化,DO 质量浓度提升至 0.5 mg/L ; 3 d 后 SVI 升至 315 mL/g , 提升速度明显减慢; 第 8 天达到了峰值 317 mL/g , 然后开始下降,继续观察 10 d 后活性污泥 SVI 稳定在 $230\sim235\text{ mL/g}$ 。

2.2 小幅度连续降温对污泥状态的影响

为验证连续降温和温度骤降对污泥状态的影响,使用 SBR1, 采用人工配置生活污水驯化的污泥进行连续降温实验,分别由 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后成功启动微膨胀活性污泥法(见图 2)。

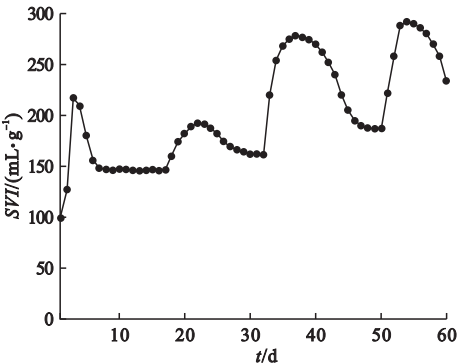


图2 连续降温污泥 SVI 值变化曲线

Fig. 2 Sludge SVI value change curve in continuous cooling test

在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,污泥负荷控制在 $0.22\text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$, 控制 DO 质量浓度 0.3 mg/L , 反应 10 d, 第 2 天 SVI 增至

212 mL/g,第3天达到峰值后开始下降,在第8天基本维持在148 mL/g左右;DO质量浓度保持不变,降温至15℃,将污泥负荷调制0.18 kg/(kg·d),SVI值不断升高,66个周期后达到了峰值192 mL/g,开始下降并在30个周期后活性污泥状态稳定,SVI稳定在161 mL/g;继续降温并调节污泥负荷值,连续降温更有利污泥达到微膨胀状态,且由于受到的温度波动幅度较小,在极低温度下可通过不采取闷爆的措施逐渐恢复微膨胀状态,但连续降温具有不可逆性,故与单独装置降温相比,单独降温更有利于对污染物去除效果的研究。污泥负荷为0.08 kg/(kg·d)时,污泥在第50天SVI稳定为187 mL/g。

2.3 微膨胀状态下温度对污染物去除率的影响

2.3.1 对COD去除率的影响

在SBR1中进行小幅连续降温试验,系统取得了较好的污染物去除效果(见表3)。COD质量浓度与去除率随时间变化如图3所示。

表3 低温条件下COD平均进水出水质量浓度
Table 3 Average concentration of COD in and out water at low temperature

温度/℃	平均进水质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	平均出水质量 浓度/(mg·L ⁻¹)
20	288	35
15	302	42
10	228	34
7	210	110

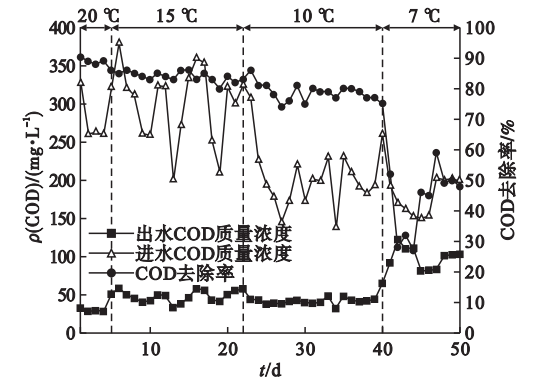


图3 COD质量浓度与去除率随时间变化
Fig. 3 COD mass concentration and removal rate changes with time under cooling conditions

在4个反应器的运行条件下,COD平均去除率分别为88%,84.3%,75%,47.8%。由此可得出结论,微膨胀状态下,SBR小试温度控制在20~10℃,温度越低COD出水质量浓度越高,去除率越低^[7-12]。温度控制在10~7℃,污泥恶化膨胀,COD出水浓度升高,去除率进一步降低。

2.3.2 对NH₄⁺-N去除的影响

在SBR1中进行小幅连续降温试验,系统取得了较好的NH₄⁺-N去除效果(见表4)。NH₄⁺-N质量浓度与去除率如图4所示。

表4 低温条件下NH₄⁺-N平均进水出水质量浓度
Table 4 Average concentration of NH₄⁺-N in and out water at low temperature

温度/℃	平均进水质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	平均出水质量 浓度/(mg·L ⁻¹)
20	62	11
15	54	10.8
10	48	22
7	45	28

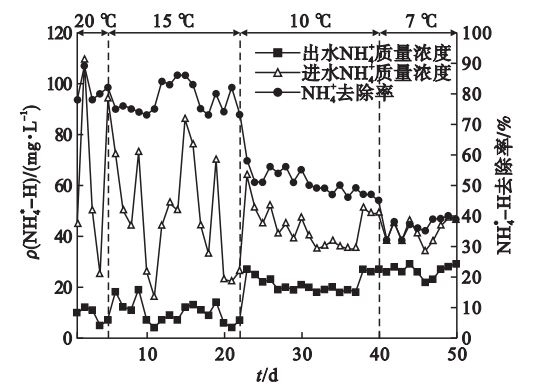


图4 降温条件下NH₄⁺-N质量浓度与去除率随时间变化情况
Fig. 4 Changes of NH₄⁺-N mass concentration and removal rate with time under cooling conditions

在4个反应器的运行条件下,氨氮平均去除率分别为82.3%,78.3%,51.9%,37.6%。由此可得出结论,微膨胀状态下,氨氮去除率受温度影响较大,温度越低,氨氮去除率越低。

2.3.3 对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率的影响

以 SBR1 的运行条件进行小试, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 进水出水质量浓度如表 5 所示。

表 5 低温条件下 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 平均进水出水质量浓度

Table 5 Average mass concentration of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ in and out water at low temperature		
温度/℃	平均进水质量 浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均出水质量 浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
20	5.2	0.26
15	4.8	0.19
10	5.6	0.17
7	6.4	0.13

温度降低, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除效果显著 (见图 5), 分析是因为微膨胀活性污泥法产生聚磷颗粒, 强化了系统的除磷能力^[13-14]。

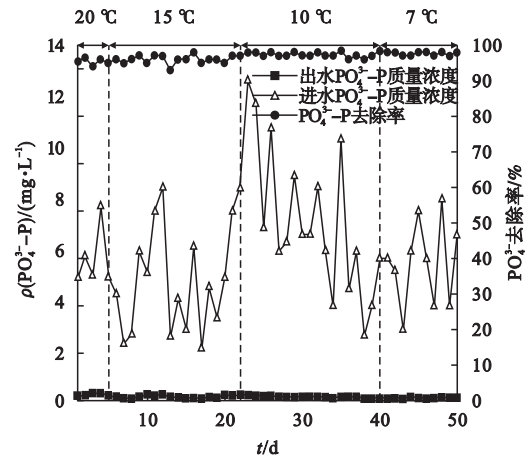


图 5 降温条件下 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 质量浓度与去除率随时间变化情况

Fig. 5 Changes in the mass concentration and removal rate of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ over time under cooling conditions

2.3.4 对 TN 去除率的影响

SBR1 的 TN 去除率为 62%; SBR2, TN 的去除率为 59%; SBR3 的 TN 的去除率为 54%; SBR4 的 TN 的去除率为 44%。温度降低, 硝化细菌生长速率变慢, 硝化反应速度变慢, TN 出水浓度变高, 去除率降低。不同温度下各污染物去除情况如图 6 所示。

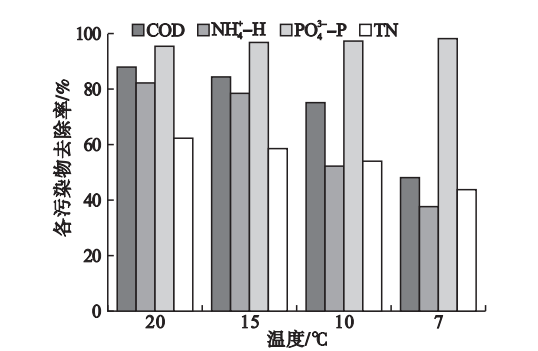


图 6 不同温度下微膨胀状态对污染物的去除情况
Fig. 6 Pollutant removal rate at a slightly expanded state at different temperatures

2.4 低温微膨胀状态下提高 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率方法

保持 SBR2, SBR3 运行, 好氧段调至 240 min, 12 d 后分别在 10 °C 和 7 °C 的条件下保持微膨胀状态稳定。氨氮出水质量浓度降低, 两个反应器平均去除率分别达到了 73% 和 58% (见图 7)。

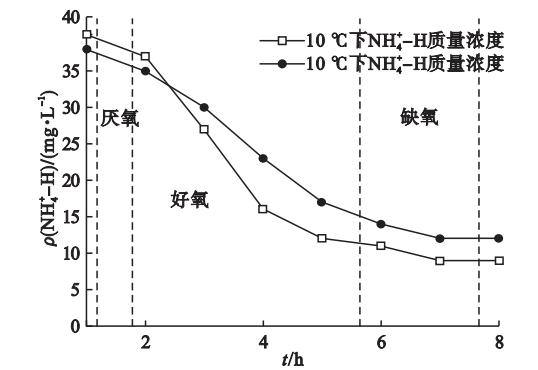


图 7 改善条件后单周期 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的质量浓度变化
Fig. 7 In single-cycle $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ mass concentration changes after improving conditions

3 结 论

(1) 降温幅度影响活性污泥膨胀, 降幅小则膨胀速度慢, 且降幅越大, 活性污泥恶化越严重。

(2) 污泥沉降状态受降温方式影响, 连续降温比温度骤降更能降低污泥恶化膨胀状态。

(3) COD 去除效率受温度影响不大, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 随温度降低去除率升高, 出水质量

浓度极低。

参考文献

- [1] 彭永臻,郭建华,王淑莹,等.低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础[J].环境科学,2008,29(12):3342-3347.
(PENG Yongzhen, GUO Jianhua, WANG Shuying, et al. Energy saving achieved by limited filamentous bulking under low dissolved oxygen; derivation, originality and theoretical basis [J]. Chinese journal of environmental science, 2008, 29(12): 3342-3347.)
- [2] 郝晓地,朱景义,曹秀芹.污泥膨胀形成机理及控制措施研究现状和进展[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(5):1-9.
(HAO Xiaodi, ZHU Jingyi, CAO Xiuqin. Situation and development of bulking sludge study: general theories and control measures [J]. Techniques and equipment for environmental pollution control, 2006, 7(5): 1-9.)
- [3] 彭赵旭.污泥微膨胀低能耗方法的基础研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
(PENG Zhaoxu. Basic research on sludge micro-expansion and low energy consumption method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.)
- [4] 周娜,袁林江.温度波动对SBR污泥沉降性的影响及其变化规律[J].中国给水排水,2011,27(7):91-94.
(ZHOU Na, YUAN Linjiang. Effects of temperature fluctuations on the sedimentation of SBR sludge and its variation law [J]. China water & wastewater, 2011, 27(7): 91-94.)
- [5] 高春娣,武联菊,郝坤,等.低溶解氧污泥微膨胀的发生及脱氮除磷效果优化[J].环境科学,2010,31(10):2385-2389.
(GAO Chundi, WU Lianju, HAO Kun, et al. Occurrence of micro-expansion of low dissolved oxygen sludge and optimization of nitrogen and phosphorus removal effects [J]. Environmental science, 2010, 31(10): 2385-2389.)
- [6] 梁雪. SBBR反硝化过程中 N_2O 和 NO 的生成机制及累积特征[D].西安:长安大学,2018.
(LIANG Xue. Formation mechanism and accumulation characteristics of N_2O and NO during SBBR denitrification [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.)
- [7] 王暄.厌氧-好氧SBR中颗粒污泥胞内储存及脱氮除磷特性[D].天津:天津大学,2005.
(WANG Xuan. Characteristics of intracellular storage and nitrogen and phosphorus removal of granular sludge in anaerobic-aerobic SBR [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.)
- [8] 左金龙,王淑莹,彭赵旭,等.低溶解氧下微膨胀污泥对污染物的去除性能[J].中国给水排水,2009,25(15):11-14.
(ZUO Jinlong, WANG Shuying, PENG Zhaoxu, et al. Pollutant removal efficiency of micro-bulking sludge under low DO [J]. China water & wastewater, 2009, 25(15): 11-14.)
- [9] 曾麒麟.倒置A~2/O工艺处理低C/N污水及外加碳源优化研究[D].合肥:安徽建筑大学,2016.
(ZENG Qifeng. Optimization of inverted A ~ 2 / O process for treatment of low C / N wastewater and additional carbon source [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2016.)
- [10] 陈静雅,王晓昌,郑于聪,等.潮汐流人工湿地对高污染河水氮磷的去除特性[J].环境科学与技术,2017,40(12):32-37.
(CHEN Jingya, WANG Xiaochang, ZHENG Yucong, et al. Characteristics of nitrogen removal in tidal flow constructed wetland for highly polluted river water treatment [J]. Environmental science & technology, 2017, 40(12): 32-37.)
- [11] 查正太,苏雷,李亚峰.不同运行方式对好氧颗粒污泥性能的影响[J].辽宁化工,2016,45(10):1264-1266.
(ZHA Zhengtai, SU Lei, LI Yafeng. Effect of different operation pattern on properties of aerobic granular sludge [J]. Liaoning chemical industry, 2016, 45(10): 1264-1266.)
- [12] 许明,操家顺,常飞,等. BCFS工艺处理低C/N比城市污水的中试研究[J].水处理技术,2007,33(10):46-48.
(XU Ming, CAO Jiaoshun, CHANG Fei, et al. A pilot test for treatment of municipal sewage by BCFS [J]. Technology of water treatment, 2007, 33(10): 46-48.)
- [13] 张兰河,周广吉,庞香蕊,等.温度对AOA-SBR工艺同步脱氮除磷的影响[J].化工进展,2013,32(12):3002-3007.
(ZHANG Lanhe, ZHOU Guangji, PANG Xiangrui, et al. Effects of temperature on simultaneous nitrogen and phosphorus removal using AOA-SBR process [J]. Chemical industry and engineering progress, 2013, 32(12): 3002-3007.)
- [14] 武联菊. SBR工艺中低溶解氧污泥微膨胀启动与维持的研究[D].北京:北京工业大学,2010.
(WU Lianju. Study on the start and maintenance of micro-expansion of low dissolved oxygen sludge in SBR process [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.)
- [15] 孙凤海,刘昱迪,方远航,等.活性污泥作用下固体碳源释碳及脱氮性能比选[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(1):111-118.
(SUN Fenghai, LIU Yudi, FANG Yuanhang, et al. Comparison and characteristic of carbon releasing of solid carbon source and nitrogen removal under the effect of activated sludge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(1): 111-118.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)