

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.02.018

## 云南某废弃菜叶处理厂废水处理工程实例

王远飞<sup>1</sup>, 刘雨<sup>1</sup>, 邹强<sup>1</sup>, 肖小兰<sup>2</sup>, 阮文权<sup>2</sup>

(1. 无锡马盛环境能源科技有限公司, 江苏 无锡 214000; 2. 江南大学 环境与土木工程  
学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 废弃菜叶处理(破碎+厌氧产沼气)过程中产生的废水是一种污染物浓度较高、C/N 偏低的废水。云南某废弃菜叶处理厂废水处理工程采用 A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> (二级 O 池为 MBR 膜池) 工艺, 以强化氮的脱除, 保证出水 TN 的达标。对 A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> 工艺的启动特性、运行效果及运行费用组成进行了分析。在工艺启动过程中, COD 的去除效率可以稳定在 70% 以上; 当硝化反应发生后, 对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 的去除率 > 99.5%; 投加一定量的碳源后, 对 TN 可以达到较高的去除率。稳定运行后, 出水的 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 和 TP 分别稳定在 300、10、45、5 mg/L 以下, 满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015) 的 C 级标准。经测算, 处理成本为 27.564 元/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 废弃菜叶废水; 碳源; 脱氮

**中图分类号:** TU993 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)02-0099-05

## Wastewater Treatment Project of a Waste Vegetable Disposal Plant in Yunnan

WANG Yuan-fei<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, ZOU Qiang<sup>1</sup>, XIAO Xiao-lan<sup>2</sup>, RUAN Wen-quan<sup>2</sup>

(1. Wuxi Masheng Environmental Energy Technology Co. Ltd., Wuxi 214000, China; 2. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The wastewater from waste vegetable disposal including crushing and digestion is characterized by high pollutant concentration and low C/N ratio. To enhance the removal efficiency of nitrogen and ensure the discharge standard of total nitrogen, the A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> (secondary O tank is MBR) process is adopted to treat wastewater from a waste vegetable leaf disposal plant in Yunnan Province. The start-up characteristics, operation effect and the treatment cost of the A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> process were analyzed. In the start-up stage, the COD removal efficiency was above 70%, the ammonia nitrogen removal efficiency was above 99.5% after nitrification, and TN can achieve a high removal rate after adding a certain amount of carbon sources. After stable operation, the effluent COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorous were below 300, 10, 45 and 5 mg/L respectively, which met level C criteria in *Wastewater Quality Standards for Discharge to Municipal Sewers* (GB/T 31962 - 2015). According to calculation, the wastewater treatment cost was 27.564 yuan/m<sup>3</sup>.

**Key words:** waste vegetable disposal wastewater; carbon source; denitrification

废弃菜叶是蔬菜收获、加工、销售过程中产生的废弃物, 含有丰富的有机质和 N、P、K 等多种营养元素, 具有含水率高、易腐烂等特性<sup>[1-2]</sup>, 废弃菜叶腐

烂后产生的渗滤液是一种碳、氮和磷含量都较高的废水。大量废弃菜叶如果得不到合理处理和处置, 则可能在堆放或者填埋过程中产生恶臭和高浓度的

渗滤液,对空气和地下水造成严重的污染。

目前,废弃菜叶处理厂大多采用 A/O、A/A/O 等处理工艺,这些工艺普遍存在 TN 去除率偏低、出水难以稳定达标的问题。

## 1 工程概况

云南省某废弃菜叶处理厂采用破碎+厌氧产沼气+泥水分离的模式处理废弃菜叶,处理量为 2 500 t/d,产生废水 2 000 m<sup>3</sup>/d。采用 A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> 为主体的工

艺处理厌氧出水,在保证 COD 处理效果的同时,强化对氮的脱除。污泥处理采用叠螺脱水机,出水水质满足《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015) C 级标准。该废水处理装置占地面积 6 000 m<sup>2</sup>,于 2019 年底建设完成开始投入运行,总投资为 3 800 万元。

### 1.1 设计进、出水水质

废水处理系统设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	pH 值
进水	≤6 300	≤3 000	≤1 300	≤1 800	≤50	≤8 000	7.5~9.0
出水	≤300	≤150	≤25	≤45	≤5	≤250	6.5~9.5

### 1.2 工艺流程

该废弃菜叶处理项目进水来自厌氧发酵系统经固液分离后的废水,是一种高浓度有机废水,COD、SS、氮和磷的浓度非常高,C/N 偏低,需要强化对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 的去除。本处理工艺设置混凝沉淀和气浮分离废水中的 SS,同时去除部分 TP。针对出水 TN 要求,选择 A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> 处理流程,通过两级脱氮保证出水 TN 稳定达标。该废水的水质和水量季节性波动较大,需要一套适应性较强的处理工艺。

废弃菜叶废水处理流程见图 1。

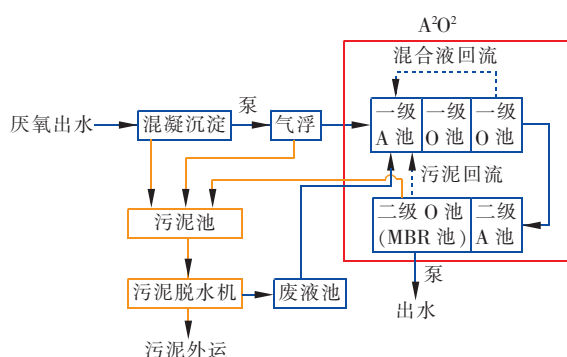


图 1 废水处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of wastewater treatment process

## 2 主要处理单元及设计参数

### 2.1 A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> + MBR 生物处理

好氧池根据已有池体改建,A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> 池体有效容积合计 14 506 m<sup>3</sup>,其中一级 A 池有效容积 2 778 m<sup>3</sup>,一级 O 池有效容积 9 878 m<sup>3</sup>,二级 A 池有效容积 1 101 m<sup>3</sup>,二级 O 池 (MBR 膜池) 有效容积 749 m<sup>3</sup>,设计污泥浓度 (MLSS) 为 8 000 mg/L,污泥负荷为

0.14 kgCOD/(kgMLSS·d)。混合液回流比为 8~10,设有混合液回流泵 2 台(1 用 1 备),单台回流泵 Q=800 m<sup>3</sup>/h、H=90 kPa、N=37 kW。

一级 A 池及二级 A 池中安装潜水搅拌机,其中一级 A 池分两格,一级 A 池 1 安装 2 台,叶轮直径 320 mm,转速 740 r/min,功率 2.2 kW;一级 A 池 2 安装 2 台,叶轮直径 620 mm,转速 480 r/min,功率 10 kW;二级 A 池安装 2 台,叶轮直径 620 mm,转速 480 r/min,功率 5 kW。

一级 O 池中安装射流曝气器,某氧转移效率约 25%,曝气量 404 m<sup>3</sup>/min,同时根据气水比 4:1 选择射流循环泵。曝气风机共 5 台,其中 1 台 Q=86 m<sup>3</sup>/min、P=58.8 kPa、N=132 kW,另外 4 台(3 用 1 备) Q=106 m<sup>3</sup>/min、P=58.8 kPa、N=160 kW,4 台中 2 台风机为变频电机,转速由变频器控制。

在二级 O 池中安装内置式 MBR 膜,膜材质为 PVDF,规格 25 m<sup>2</sup>×0.4 μm,360 片,分为 6 套,单套 60 片,膜通量最大设计值为 0.22 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d)。设置 3 台膜风机,2 用 1 备,单台 Q=27 m<sup>3</sup>/min、P=58.8 kPa、N=45 kW。2 台自吸泵(1 用 1 备)作为出水泵,单台 Q=115 m<sup>3</sup>/h、H=150 kPa、N=11 kW。2 台污泥回流泵(1 用 1 备),回流比 8~10,单台泵 Q=800 m<sup>3</sup>/h、H=90 kPa、N=37 kW。同时为膜设置独立的控制系统及加药清洗系统。

### 2.2 污泥处理

设计好氧产泥系数 0.2 kgMLSS/(kgCOD·d),预处理及好氧处理合计产泥 472 t/d(含水率为 99%),通过污泥脱水后产生含水率为 80% 的污泥

23.6 t/d,用无轴螺旋输送机输送至小车上外运。

将现有一格池体改造为污泥池,有效容积 453 m<sup>3</sup>,池内安装 2 台潜水搅拌机防止污泥沉积,叶轮直径 320 mm,转速 740 r/min,功率 0.75 kW。污泥池配 2 台螺杆泵(1 用 1 备)作为污泥进料泵,将污泥提升至污泥脱水机,单台螺杆泵  $Q=55\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=300\text{ kPa}$ 、 $N=11\text{ kW}$ ,变频控制。

污泥脱水采用 1 台叠螺脱水机,主体材质为不锈钢 304,处理量为 400~600 kgDS/h,设备总功率 9 kW,配独立控制系统,与污泥进料泵、加药装置、加药泵连锁,配独立三仓式 PAM 加药装置,制药量为 3 000 L/h,加药螺杆泵 2 台(1 用 1 备),单台  $Q=5\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=300\text{ kPa}$ 、 $N=2.2\text{ kW}$ 。

### 3 工艺运行

废水处理系统设备安装完成后进入设备调试和工艺启动阶段,接种污泥取自曲靖某城市污水处理厂的脱水剩余活性污泥,含水率约为 81.3%,MLVSS/MLSS 为 71%。接种浓度按 3 000 mg/L 计算,接种污泥量为 240 t。进水来自废弃菜叶厌氧消化后经固液分离后的废水,启动初始时 O 池 COD 控制在 1 000 mg/L 以内,采用定量间歇进水,逐步提高系统的处理负荷。

A<sup>2</sup>O<sup>2</sup> 池两个缺氧段 DO 控制在 0.5 mg/L 之内,各个好氧段控制 DO 为 1.0~2.5 mg/L。进水与一级 O 池末端的回流混合液及二级 O 池(膜池)的回流污泥混合后进入一级 A 池,根据 TN 的脱除及 A 池的 DO 进行混合液回流量的控制,回流比控制在 8~10。根据 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 的负荷调整,通过污泥回流比和排泥量控制 A 池 MLSS 为 3~8 g/L,膜池为 8~10 g/L。剩余污泥通过叠螺脱水系统脱水后外运处置,污泥含水率为 81%~83%。

## 4 结果与讨论

### 4.1 容积负荷变化及污泥浓度控制

图 2 所示为系统启动过程中容积负荷随时间的变化关系。由于启动初期出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度过高,为减少进水带入系统的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,控制进水量为 300 m<sup>3</sup>/d。当 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度降至正常范围后,随即提升系统的处理量,将污泥负荷控制在 0.05~0.15 kgCOD/(kgMLSS·d)、0.02~0.04 kgNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/(kgMLSS·d)、0.04~0.13 kgTN/(kgMLSS·d),经过 40 多天,容积负荷逐步提升到设计值。

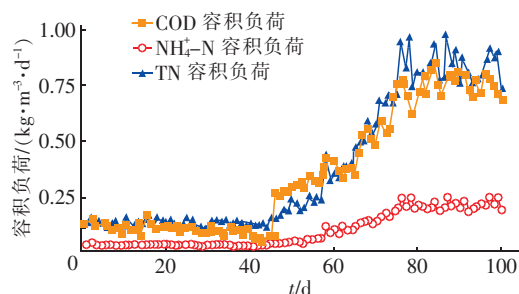


图2 系统容积负荷随运行时间的变化

Fig.2 Variation of system volume load with time

图 3 所示为各处理水量对应的 MLSS,污泥负荷的控制通过调整系统的 MLSS 实现,随着废水处理量的提升,MLSS 也相应提升。此外,由于废弃菜叶处理有明显的季节性<sup>[3]</sup>,水量随季节变化幅度较大,运行时需要根据水量调整,以满足不同处理量时的 MLSS 控制要求。

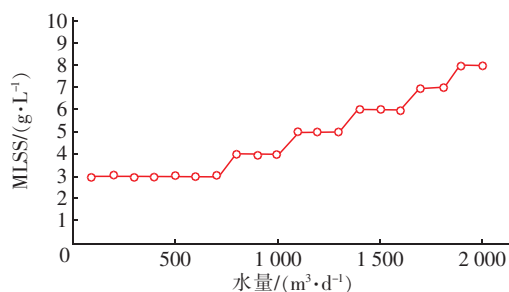


图3 不同进水量下的污泥浓度控制

Fig.3 Sludge concentration control at different inflow volume

在启动初期池内泡沫和浮渣现象较为严重,图 4 所示为 O 池的泡沫和 A 池的浮渣情况。分析原因可能与接种污泥量偏多,不适应新环境的污泥死亡较多以及进水 SS 偏高等因素相关。此外,系统长期在低负荷下运行对泡沫和浮渣的产生也有一定的贡献。因此,通过控制沉淀和气浮系统的运行效果、投加消泡剂、投加磷和调整射流曝气系统等方法消除泡沫对系统正常运行的影响。随着运行负荷的逐步上升,泡沫和浮渣现象逐步减轻并消除。

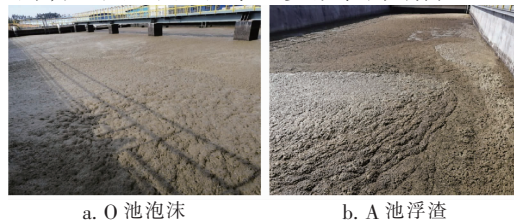


图4 运行初期的泡沫和浮渣

Fig.4 Foam and scum in the early stage of operation

## 4.2 对COD的去除效果

图5所示为系统进、出水COD及COD去除率的变化情况。

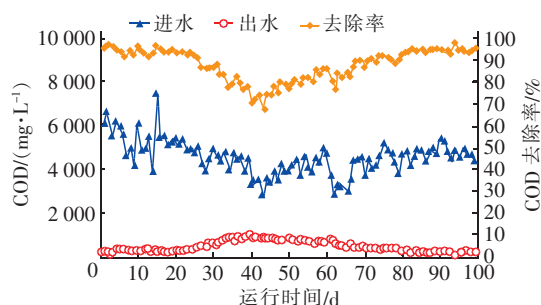


图5 系统进、出水COD浓度及去除率的变化

Fig. 5 Variation of COD concentration in influent and effluent and COD removal rate

在运行初期(第1~26天),系统进水COD为3 900~7 400 mg/L,出水COD为160~430 mg/L, COD去除率达到90%以上。从第27天开始,对COD去除率逐渐降低,出水COD逐渐升高。在第40天时,出水COD最高达到1 000 mg/L以上,COD去除率降到70%。分析认为系统运行初期COD去除率较高可能与调试时池内注入了约2/3的地下水以及新接种污泥对污染物的吸附作用<sup>[4]</sup>相关。此外,为了控制池内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度,在开始运行的前40天内系统的进水量较少,活性污泥的COD负荷平均不到0.03 kg/(kgMLSS·d),这导致微生物长期缺乏营养,开始内源呼吸,所以表现为出水COD升高,COD去除率下降。在系统的氨氮去除率升高后,第46天开始逐步提升进水量,并投加了甲醇作为碳源,污泥的COD负荷约达到0.1 kg/(kgMLSS·d)。因此从第47天开始系统对COD的去除率逐步恢复,又经过25天左右的运行(第81天),对COD的去除率达到了94%以上,出水COD降至300 mg/L以下,系统运行稳定。

## 4.3 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果

图6所示为系统进、出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度和去除率的变化情况。可以看出,系统的进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化较大(930~1 300 mg/L)。在系统运行的前15天内,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 逐步上升后趋于平稳,最高达到了740 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率较低,平均为40%左右。分析认为运行初期由于系统的污泥龄较短,而硝化菌世代时间较长,增殖较慢,影响了硝化反应的进行。此外,水温相对较低、pH值较高(约

8.3),游离氨(FA)的升高也会在一定程度上抑制硝化菌的活性<sup>[5]</sup>。第38天时,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 开始出现降低的趋势,经过7天左右的运行,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 逐步降至5 mg/L以下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率逐步上升并稳定在99%以上,最高达到99.8%,系统硝化效果良好。

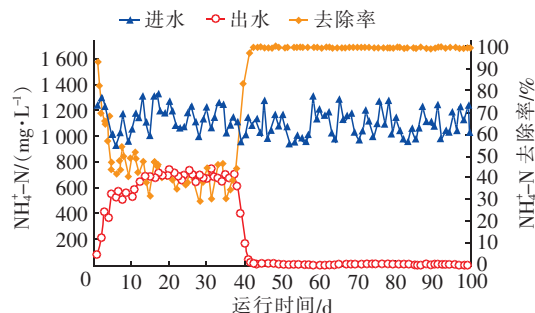


图6 系统进、出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及去除率的变化

Fig. 6 Variation of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  concentration in influent and effluent and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal rate

## 4.4 对TN的去除效果

图7所示为系统进、出水TN浓度和去除率的变化情况。

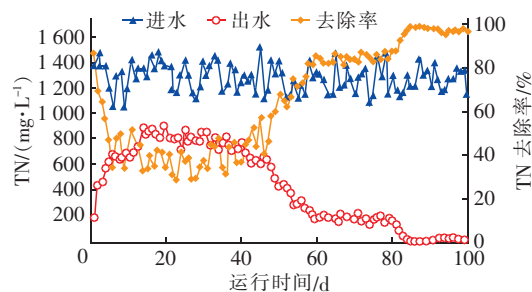


图7 系统进、出水TN及去除率的变化

Fig. 7 Variation of TN concentration in influent and effluent and TN removal rate

在系统启动初期(第5~41天),由于硝化反应微弱,所以大部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 没有转化为硝酸盐,导致反硝化效果也相对较差,表现为系统对TN的去除率较低,出水TN浓度较高。随着系统内硝化作用的加强, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 几乎全部转化为硝酸盐,为硝化反应的进行创造了条件。因此从第48~61天,出水TN开始出现缓慢下降的趋势,系统对TN的去除率也相应地逐步提高。但从第59~78天,发现出水TN稳定在200 mg/L左右,去除率没有提升。分析认为与A段DO的控制、混合液的回流比以及碳氮比有关。相应地采取控制两个A段的 $\text{DO} < 0.5$



mg/L,适当加大回流比和投加甲醇作为碳源等措施,从第78天开始,出水TN逐步从200 mg/L左右降到最低6 mg/L,去除率最高时超过99.5%。

#### 4.5 对TP的去除效果

由于混凝沉淀和气浮处理过程对TP有较高的去除效率,所以进入生物处理系统的TP浓度只有5~10 mg/L,经过生物处理后出水的TP维持在2~5 mg/L。由于进入生物处理系统COD/TP达到400,考虑碳源增加后系统的COD/TP高达600~800,所以系统表现为活性污泥增长缓慢。解决方案:投加磷酸二氢钠或少量菜叶原汁,系统缺磷的状况有所好转,经过一段时间的运行,池内的浮渣和泡沫问题基本消除。

#### 5 运行费用

废水处理系统的运行费用主要包括药剂费、电费、水费、人工费、在线监测委托费、排污费、设备维修费等。①药剂费:PAC单价为2元/kg,用量为1.94 kg/m<sup>3</sup>,费用为3.88元/m<sup>3</sup>;PAM单价为28元/kg,用量为0.06 kg/m<sup>3</sup>,费用为1.68元/m<sup>3</sup>;消泡剂单价为3元/kg,用量为0.08 kg/m<sup>3</sup>,费用为0.24元/m<sup>3</sup>;化验药剂费为4400元/月,折合0.073元/m<sup>3</sup>(处理水量按2000 m<sup>3</sup>/d计);碳源(甲醇)单价为3.5元/kg,用量为2.1 kg/m<sup>3</sup>,费用为7.35元/m<sup>3</sup>。②电费:电价为0.85元/(kW·h),用量为23500 kW·h/d,费用为9.99元/m<sup>3</sup>。③水费:单价为3.5元/m<sup>3</sup>,用量为35 m<sup>3</sup>/d,费用为0.061元/m<sup>3</sup>。④人工费:主管1人,操作工9人,化验工1人,主管8000元/月,其余人员5500元/月,折合1.11元/m<sup>3</sup>。⑤委托在线监测费:235000元/a,折合0.33元/m<sup>3</sup>。⑥排污费:2.7元/m<sup>3</sup>。⑦设备维修费:300元/d,折合0.15元/m<sup>3</sup>。以上合计为27.564元/m<sup>3</sup>。

#### 6 结论

①采用A<sup>2</sup>O<sup>2</sup>工艺处理废弃菜叶厌氧处理出水,对COD的去除率达到90%以上,出水COD<300 mg/L;对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除率达到99%以上,出水NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N<10 mg/L;对TN的去除率达到97%以上,出水TN<45 mg/L;对TP的去除率达到90%以

上,出水TP<5 mg/L,系统运行稳定。

②当废水水量和水质发生变化时,需相应调整系统内MLSS,保证微生物的负荷在合理范围内。

#### 参考文献:

- [1] 左壮. 蔬菜废弃物厌氧消化产酸特性及回流调控研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.  
ZUO Zhuang. Anaerobic Acidification of Vegetable Waste and Recirculation Control [D]. Beijing: China Agricultural University,2014(in Chinese).
- [2] 李瑞琴,徐瑞,于安芬,等. 基于微生物发酵的废弃菜叶无害化处理及腐熟安全性评价[J]. 水土保持通报,2019,39(3):163-169.  
LI Ruiqin,XU Rui,YU Anfen,et al. Harmless treatment and composting safety evaluation of discarded cabbage based on microbial fermentation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39 (3): 163 - 169 (in Chinese).
- [3] 秦渊渊,郭文忠,李静,等. 蔬菜废弃物资源化利用研究进展[J]. 中国蔬菜,2018(10):17-24.  
QIN Yuanyuan, GUO Wenzhong, LI Jing, et al. Research progress in resource utilization of vegetable waste [J]. China Vegetables, 2018 (10): 17 - 24 (in Chinese).
- [4] 程爱华,李杰,王亚娥. 活性污泥吸附预处理腈纶废水的机理研究[J]. 安全与环境学报,2017,17(5):1932-1936.  
CHENG Aihua, LI Jie, WANG Yae. On the pretreatment mechanism of acrylic fiber sewage via the activated sludge adsorption [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17 (5): 1932 - 1936 (in Chinese).
- [5] 尤永军. 游离氨(FA)对硝化菌活性的抑制影响试验研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.  
YOU Yongjun. Study on the Effect of Free Ammonia (FA) on the Inhibition of Nitrifying Bacteria Activity [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015 (in Chinese).

作者简介:王远飞(1981-),男,江苏宜兴人,硕士,工程师,主要从事从环境保护工作。

E-mail:57120928@qq.com

收稿日期:2020-03-17

修回日期:2020-03-27

(编辑:衣春敏)