

刘佩青,姚青,沈华,等. 水厂臭氧发生器的经济运行分析[J]. 净水技术, 2021, 40(4):85-89.

LIU P Q, YAO Q, SHEN H, et al. Economic operation analysis of ozone generator in water treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(4):85-89.



扫我试试?

## 水厂臭氧发生器的经济运行分析

刘佩青,姚青,沈华,皇甫新星

(苏州工业园区清源华衍水务有限公司,江苏苏州 215000)

**摘要** 水厂深度处理精细化管理有待提升,能耗和运行成本可进一步降低。结合某水厂深度处理工艺,投加的臭氧发生浓度为6%~12%,预臭氧投加量为0.6 mg/L,后臭氧投加量为0.8 mg/L,水体余臭氧浓度小于0.2 mg/L,分析臭氧发生器的最佳经济运行工况点。结果表明,不同臭氧发生浓度,臭氧-生物活性炭滤池深度处理工艺对高锰酸盐指数的去除率在64%~70%。当臭氧发生浓度为9%时,液氧消耗和电能消耗之和最低,运行成本为 $11.31 \times 10^{-3}$ 元/m<sup>3</sup>。对比最低臭氧浓度6%投加,运行年费用可节约29.89万元。对比实际生产投加臭氧浓度7%,运行年费可节约5.85万元。

**关键词** 水厂 臭氧发生器 高锰酸盐指数 2-甲基异莰醇(2-MIB) 能耗

**中图分类号:** TU991.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2021)04-0085-05

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2021.04.016

## Economic Operation Analysis of Ozone Generator in Water Treatment Plant

LIU Peiqing, YAO Qing, SHEN Hua, HUANGFU Xinxing

(Suzhou Industrial Park Qingyuan & Hongkong China Water Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract** Delicacy management in advanced WTP needs to be promoted, energy consumption and operation cost can be further reduced. Combined with advanced treatment process, the best working condition of ozone generator was analyzed. The ozone generation concentration was 6%~12%, the pre-ozone dosage was 0.6 mg/L, the main ozone dosage was 0.8 mg/L, and the residual ozone concentration in the water was less than 0.2 mg/L. The results showed that the removal rate of COD<sub>Mn</sub> by ozone-biological activated carbon filter process was controlled in 64%~70% at different ozone generation concentrations. When added up to 9% of ozone concentration, the sum of oxygen consumption and energy consumption was the lowest, the operating cost was  $11.31 \times 10^{-3}$  yuan/m<sup>3</sup>, and the annual operation fee could be saved by 298.9 thousand yuan. Compared with the actual ozone concentration of 7%, the annual operation fee could be saved by 58.5 thousand yuan.

**Keywords** water treatment plant(WTP) ozone generator COD<sub>Mn</sub> index 2-MIB energy consumption

目前,很多水厂的水源污染较严重,原水中有机物浓度和藻类密度较高。常规的混凝-沉淀-砂滤-加氯消毒工艺不能满足出厂水水质安全,因此,臭氧-生物活性炭深度处理工艺开始广泛应用到水厂。

水厂运行水质安全是第一要素,其次,能耗和运行成本控制也很关键,深度处理工艺在运行过程中

实现精细化管理有待提升<sup>[1]</sup>。在制水过程中,臭氧投加不足,会导致出厂水高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)和嗅味物质(2-甲基异莰醇)超标,水质有异味,影响感官。投加过量易产生溴酸盐等致癌性消毒副产物,还会导致能耗和运行成本的增加<sup>[2]</sup>。以苏州某水厂的臭氧发生器为例,研究其经济运行,进一步降低深度处理工艺能耗。

### 1 臭氧发生系统

#### 1.1 臭氧系统组成

该试验研究时间为2019年5月—10月,预臭

[收稿日期] 2020-02-16

[作者简介] 刘佩青(1985—),女,给排水工程师,研究方向为给水工艺运行。电话:13957238664;E-mail:286280093@qq.com。

氧投加量为 0.6 mg/L,后臭氧投加量为 0.8 mg/L, 试验期间日均供水量变化平稳。本文考察内容包括:①不同臭氧发生浓度下,  $COD_{Mn}$  的去除率;②确定不同臭氧发生浓度下臭氧发生器的能耗,即电能消耗和液氧消耗之和。

该水厂设计规模为 20 万  $m^3/d$ ,于 2014 年 7 月投产运行。工艺为混凝沉淀、过滤、臭氧-生物活性炭滤池、消毒。深度处理工艺具有物理化学吸附、臭氧化学氧化、生物氧化降解和臭氧灭菌消毒的功能,其中,臭氧化水中 2-甲基异莰醇(2-MIB)的效果明显优于  $KMnO_4$ 、 $NaClO$  等氧化剂<sup>[3]</sup>。同时,臭氧还能氧化水中的铁、锰等无机物,使用臭氧消毒产生的化学物质污染较少,不会产生三卤甲烷等消毒副产物<sup>[4]</sup>。

生物活性炭滤池采用向下流工艺,预臭氧接触池臭氧曝气采用射流扩散器,不易堵塞,预臭

氧设计投加量为 0.5 mg/L,最大投加能力为 1.0 mg/L。后臭氧投加采用微孔曝气器投加,设计投加量为 1.5 mg/L,最大投加能力为 2.0 mg/L,接触时间 13 min,后臭氧为 3 点投加,各级投加比例为 2:1:1。

臭氧发生系统由气源系统、冷却系统、补氮系统、臭氧发生器、扩散系统以及尾气破坏系统装置组成<sup>[5]</sup>,工艺流程如图 1 所示。气源系统主要由液氧储罐和气化器组成,液氧储罐和气化器采用租赁方式。补氮系统由空压机、冷干机等组成,臭氧发生器进气时会投加 0.1%~1%浓度的空气,空气中的氮气能起到催化反应的作用,可降低电耗<sup>[6]</sup>。冷却水系统主要是带走臭氧发生器高压放电产生的热量,要求冷却水温控制在 35℃以下。尾气破坏装置采用加热触媒催化分解法,经尾气破坏器分解后的气体其臭氧浓度应该小于 0.1 mg/L。

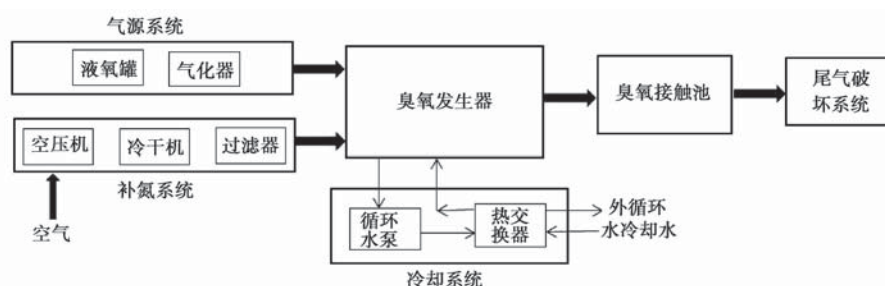


图 1 臭氧发生系统工艺流程图

Fig. 1 Process Flow Diagram of Ozone Generation System

## 1.2 臭氧发生器工作原理

该水厂臭氧发生器选用某进口品牌 CFV20 型号,放电室装有 288 个电介质单元,制备臭氧质量浓度可达 6%~12%,额定臭氧产量 15.8 kg/h,额定进气压力 0.12 MPa,装机功率 151 kW。臭氧发生器的工作原理基于无声放电,当高压电极上带有变化的高电压时,电极之间的放电间隙处会产生微放电,氧气分子被分解为自由态的氧原子,部分自由态的氧原子与未分解的氧气分子重新结合生产臭氧<sup>[7-8]</sup>,即  $O + O_2 = O_3$ 。

## 2 臭氧发生器能耗分析

### 2.1 水量概况

图 2 为 2017 年—2019 年水厂供水量的年日均值变化情况,2018 年和 2019 年 2 月为春节假期,供水量较低,7 月—9 月为夏季高峰供水,日均供水量为 18 万  $m^3$  左右。由图 2 可知,2019 年 5 月—9 月

日均供水量在 17.75 万~18.07 万  $m^3$ ,水量较平稳。

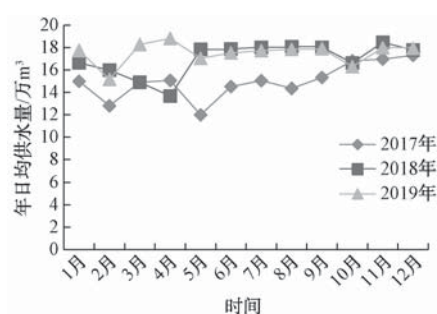


图 2 2017 年—2019 年水厂日均供水量变化情况

Fig. 2 Variation of Average Daily Water Supply Capacity in WTP during 2017—2019

### 2.2 冷却水系统

冷却水系统是臭氧发生系统的辅助系统,它在提高臭氧的产量及节省电耗方面起到至关重要的作用<sup>[9]</sup>。该冷却水系统内循环采用纯水,在臭氧发生

器、循环水泵及热交换器之间流动,外循环采用自来水,通过热交换器带走内循环水产生的热量,使臭氧发生器在一个恒定的温度范围内工作。有研究表明,16℃为最佳冷却水进口温度,进口温度在8~16℃时,电耗随冷却水进口温度升高而降低<sup>[10]</sup>。该水厂臭氧发生器间安装了两台功率为5 kW的空调,夏季室内温度保持在26℃,试验期间冷却水进口温度为12.2~16.5℃。

### 2.3 原水水质概况

结合臭氧-活性炭滤池深度处理工艺实际运行功能,选择原水 COD<sub>Mn</sub>、藻类、2-MIB 3项水质指标作为研究对象。图3(a)为2017年—2019年原水 COD<sub>Mn</sub> 月均值的变化,由图3(a)可知,2019年原水 COD<sub>Mn</sub> 平均浓度低于前两年,逐年呈递减趋势。2017年—2019年原水 COD<sub>Mn</sub> 最低值为3.81 mg/L,最高值为7.22 mg/L,每年 COD<sub>Mn</sub> 的月均值变化趋势具有相似性,从每年5月开始浓度逐渐升高,8月达到最高。

由图3(b)可知,2019年原水藻类数量比前两年有大幅上升,2019年最高值1790万个/L比2018年最高值1064万个/L上涨68.2%,比2017年最高值3367万个/L下降46.8%。藻类月均值变化趋势跟 COD<sub>Mn</sub> 具有相似性,从每年5月开始藻类数量逐渐明显升高,夏季高峰供水期间,藻类数量明显大幅升高,8月、9月达到最高值。

由图3(c)可知,2-MIB峰值的时间与 COD<sub>Mn</sub>、藻类并不同步,每年4月—6月2-MIB浓度明显升高,6月开始下降。根据数据记录,2017年5月原水2-MIB全年最高为0.711 μg/L,2018年5月原水2-MIB最高为0.160 μg/L,2019年4月原水2-MIB最高为0.330 μg/L,原水2-MIB峰值呈提前趋势。

### 2.4 COD<sub>Mn</sub> 去除率

研究表明,水厂常规工艺对 COD<sub>Mn</sub> 的去除率平均值为20%~38.13%<sup>[11-12]</sup>。由图4(a)可知,2017年—2019年 COD<sub>Mn</sub> 的月平均去除率为62%~77%,出厂水 COD<sub>Mn</sub> 控制在1.31~1.82 mg/L,远低于内控的3 mg/L限值,深度处理工艺对水体中的有机物去除效果远优于常规工艺。

2019年该水厂出厂水 COD<sub>Mn</sub> 比2017年、2018年低,可能跟原水 COD<sub>Mn</sub> 逐年降低有关。COD<sub>Mn</sub> 的去除率还跟原水的 COD<sub>Mn</sub> 有关,原水 COD<sub>Mn</sub> 高,去

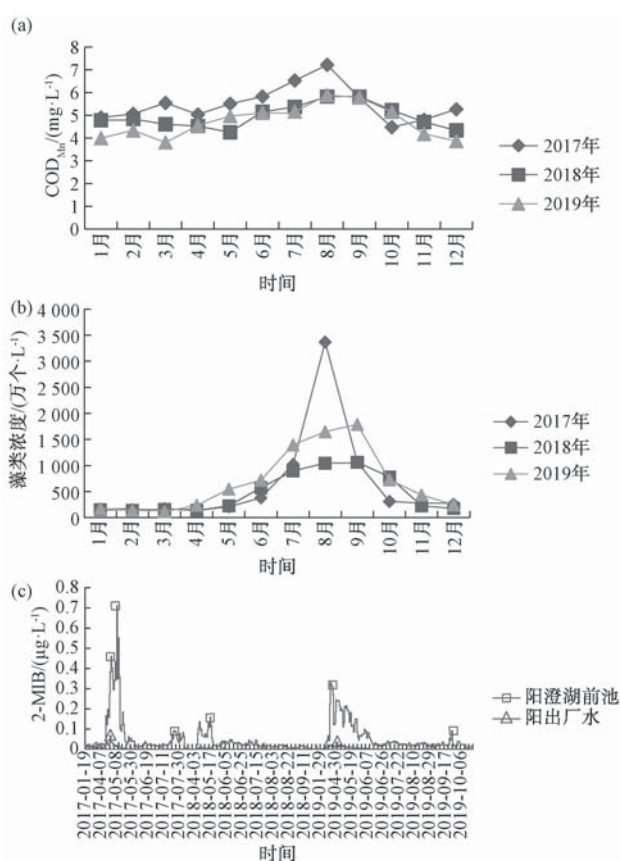


图3 2017年—2019年原水中3项水质指标变化  
(a) COD<sub>Mn</sub>; (b) 藻类; (c) 2-MIB

Fig. 3 Variation of Three Water Quality Indexes of Raw Water during 2017—2019 (a) COD<sub>Mn</sub>; (b) Algae; (c) 2-MIB

除率也高,并呈现每年5月去除率逐渐升高,9月逐渐下降的规律。

由图4(b)可知,试验期间,投加不同发生浓度臭氧情况下,原水 COD<sub>Mn</sub> 经过臭氧-生物活性炭滤池工艺去除率在64%~70%,比较稳定。

### 2.5 电耗与氧耗

试验期间该水厂供水量稳定,后臭氧接触池中余臭氧的浓度控制在0.2 mg/L以内。臭氧发生器的臭氧产率从6%调到12%,臭氧投加量不变,预臭氧投加量为0.6 mg/L,后臭氧投加量为0.8 mg/L。液氧费用为900元/t,电费为0.6358元/(kW·h)。一般情况下,适当提高臭氧发生浓度可降低氧耗,降低臭氧发生浓度可降低电耗,因此,以电能消耗和液氧消耗之和最小为目标。试验结果表明,臭氧发生浓度<10 wt%时,液氧消耗占生产成本的比重更大。随着臭氧发生浓度的上升,液氧消耗与电能消耗的差值逐渐缩小,到12 wt%时,差值基本持平。



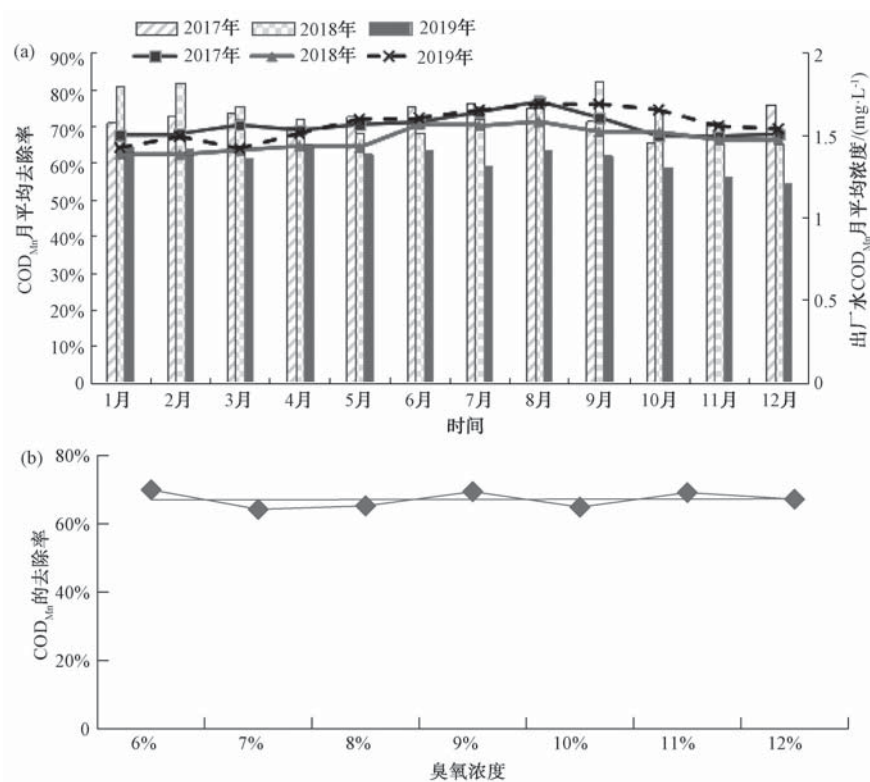


图4 (a) 2017年—2019年出厂水 COD<sub>Mn</sub> 月平均值及其去除率; (b) COD<sub>Mn</sub> 的去除率随不同臭氧投加浓度的变化  
Fig. 4 (a) Monthly Average Values and Removal Efficiency of COD<sub>Mn</sub> in Finished Water during 2017—2019;  
(b) Variation of COD<sub>Mn</sub> Removal Efficiency with Different Ozone Dosages

研究表明,臭氧发生器设备的电气运行工况点,臭氧浓度应 $\leq 10\%$ 。由图5可知,供水量变化趋势比较平稳的情况下,9%臭氧发生浓度下液氧消耗和电能消耗之和最小,运行成本最低为 $11.3 \times 10^{-3}$ 元/ $m^3$ ,此时氧耗为 $7.44 \text{ g}/m^3$ ,电耗为 $7.26 \times 10^{-3} \text{ kW}\cdot\text{h}/m^3$ ,因此,臭氧发生浓度9%是臭氧发生器的能耗最低点。

### 3 结论

在供水量较平稳状态下,臭氧投加量恒定,预臭氧投加 $0.6 \text{ mg}/\text{L}$ ,后臭氧投加 $0.8 \text{ mg}/\text{L}$ 的情况下,水厂的臭氧发生器的臭氧发生浓度依次调整为6%、7%、8%、9%、10%、11%、12%,后臭氧接触池内余臭氧浓度小于 $0.2 \text{ mg}/\text{L}$ 。试验表明,不同臭氧发生浓度,臭氧-生物活性炭滤池工艺对COD<sub>Mn</sub>的去除率较稳定,控制在64%~70%,深度处理工艺对水体中有机物的去除效果远优于常规工艺。

根据试验结果,臭氧发生浓度9%是水厂臭氧发生器液氧消耗与电能消耗之和的最低点,氧耗为 $7.44 \text{ g}/m^3$ ,电耗为 $7.26 \times 10^{-3} \text{ kW}\cdot\text{h}/m^3$ ,运行成本

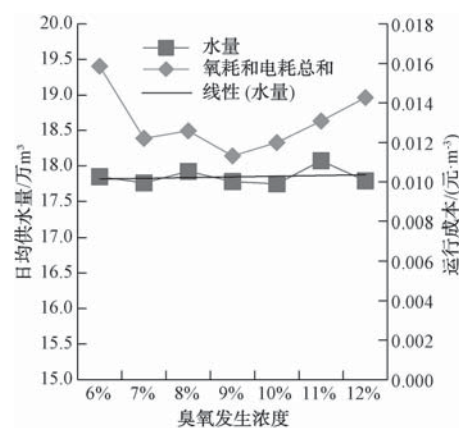


图5 不同臭氧发生浓度与氧耗和电耗的变化关系  
Fig. 5 Relationship between Different Ozone Concentrations and Oxygen and Electricity Consumption in Generator

最低为 $11.3 \times 10^{-3}$ 元/ $m^3$ 。发生浓度为6%时,成本单价最高为 $15.86 \times 10^{-3}$ 元/ $m^3$ ,以该水厂供水量18万 $m^3/\text{d}$ 运行为例,运行年费可节约29.89万元。该水厂实际生产中以臭氧发生浓度7%进行投加,若调整为臭氧发生浓度9%,则运行年费可节约5.85万元。

参考文献

[ 1 ] 江文华. 水厂臭氧投加精确控制的问题与思考[J]. 净水技术, 2017, 36(7): 1-4.  
 [ 2 ] 陈谷, 方芳, 高乃云, 等. 原水中溴酸盐的产生与控制技术[J]. 净水技术, 2013, 32(1): 10-14.  
 [ 3 ] 马军, 李学艳, 陈忠林, 等. 臭氧氧化分解饮用水中嗅味物质 2-甲基异茨醇[J]. 环境科学, 2006(12): 2483-2487.  
 [ 4 ] 叶恒朋, 陆少鸣, 杜冬云, 等. 臭氧-生物活性炭深度处理工艺对微污染原水中营养物的去除研究[J]. 水处理技术, 2010, 36(2): 88-91.  
 [ 5 ] 朱海涛. 臭氧系统在净水处理中的应用[J]. 给水排水, 2007(7):102-105.  
 [ 6 ] 邹琳, 陈睿敏, 王志源. 水厂臭氧发生与投加系统运行维护

分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 116-122.  
 [ 7 ] 李铁锚, 朱天宇. 无声放电臭氧发生器的特点分析[J]. 淮海大学常州分校学报, 2003(4): 76-80.  
 [ 8 ] 周迅, 杨学昌. 臭氧发生器中放电形式的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999(9): 26-28, 36.  
 [ 9 ] 马芳. 浅谈臭氧冷却水系统的选用与安装调试[J]. 城镇供水, 2011(1): 36-38.  
 [10] 刘庆君, 朱天宇, 辛力锋. 大型高频臭氧发生器的冷却特性分析[J]. 淮海大学常州分校学报, 2007(4), 69-71.  
 [11] 韩晓刚, 黄廷林. 水厂常规工艺去除有机物和总磷[J]. 环境工程学报, 2013, 7(5): 1616-1620.  
 [12] 巢猛, 叶淦球, 陈卓华, 等. 南方某水厂臭氧-生物活性炭工艺去除有机物的效果评价[J]. 城镇供水, 2015(5): 71-73.

(上接第 35 页)

曝气生物滤池-超滤组合工艺对 COD<sub>Mn</sub> 和氨氮的去除率较高,出水 COD<sub>Mn</sub> 和氨氮均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中的相关要求。

3 结论

曝气生物滤池装置采用自然挂膜,滤池水温在 27.1~30.2 ℃时,持续运行约 21 d 后,COD<sub>Mn</sub> 及氨氮的去除率分别稳定在 20%和 70%以上,即标示着曝气生物滤池挂膜成功。曝气生物滤池运行参数:气水比为 1:1,水力停留时间为 30 min。曝气生物滤池-超滤组合工艺对 COD<sub>Mn</sub> 和氨氮的平均去除率分别为 50.0%和 81.5%,较曝气生物滤池试验分别提高了 26.9%和 11.4%,较常规工艺分别提高了 20.0%和 58.5%。原水在经过曝气生物滤池-超滤工艺处理后,其出水的氨氮、COD<sub>Mn</sub> 均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中的相关要求。

参考文献

[ 1 ] 雷晓玲,陈麟,杨程,等.直接超滤在重庆村镇安全供水中的工程实践[J]. 中国给水排水,2019,35(22):76-82.  
 [ 2 ] 笪跃武,殷之雄,李廷英,等.超滤技术在无锡中桥水厂深度处理工程中的应用[J]. 中国给水排水,2012,28(8):79-83.  
 [ 3 ] 李圭白,田家宇,齐鲁.第三代城市饮用水净化工艺及超滤的零污染通量[J]. 给水排水,2010(8):13-17.  
 [ 4 ] 董晓清,张真江,吕小梅.拉西环/陶粒双层填料 BAF 运行

效果及反冲洗研究[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8):3785-3789.  
 [ 5 ] WU S, YUE Q, QI Y, et al. Preparation of ultra-lightweight sludge ceramics (ULSC) and application for pharmaceutical advanced wastewater treatment in a biological aerobic filter (BAF) [J]. Bioresource Technology, 2011(3):2296-2300.  
 [ 6 ] 徐波,周正兵,甘雁飞,等.不同填料曝气生物滤池处理生活污水效能研究[J]. 水处理技术,2020,46(6):126-129,140.  
 [ 7 ] 雷晓玲,罗棉心,魏泽军,等.山地城市生物滞留带改良填料除氮效果研究[J]. 环境科技,2020,33(1):13-16,22.  
 [ 8 ] 陆少鸣,方平,杜敬,等.曝气生物滤池挂膜的中试实验[J]. 水处理技术,2006(8):67-69.  
 [ 9 ] 端艳,陆少鸣,江荻.悬浮陶粒曝气生物滤池在城镇污水处理中的挂膜启动[J]. 水处理技术,2018,44(2):88-92.  
 [10] 李斌,杨继富,赵翠,等.曝气生物滤池处理农村生活污水效率与微生物群落分析[J]. 水利学报,2017,48(12):1419-1428.  
 [11] 孔宇,沈巍,王郑,等.凹凸棒曝气生物滤池预处理微污染原水研究[J]. 水处理技术,2011(8):91-94.  
 [12] 易彪.曝气生物滤池脱氮除磷性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2008.  
 [13] 武福平,齐海英,丁俊宏,等.活性炭-石英砂生物过滤处理微污染客水的挂膜试验研究[J]. 水处理技术,2011(7):78-80,94.  
 [14] 丁绍兰,封香香,谢林花.沸石-核桃壳曝气生物滤池去除废水中氨氮的研究[J]. 工业水处理,2017,37(5):45-49.  
 [15] 窦娜莎.曝气生物滤池处理城市污水的效能与微生物特性研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.