

循环交替曝气对生活污水脱氮除磷效率的影响

杨华莲*, 谢雨桐, 徐萧月, 何磊, 李强林#, 邱诚

成都工业学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年12月4日; 录用日期: 2023年1月4日; 发布日期: 2023年1月13日

摘要

为了降低能耗, 提高生活污水脱氮除磷效率, 精准曝气是最关键因素之一。本文采用活性污泥法, 通过微孔曝气, 考察了连续式曝气和间歇式曝气循环3次或4次的条件下对生活污水处理300 min后的化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)和总磷(TP)的浓度变化和去除效率。结果表明, 采用连续曝气、3次循环曝气、4次循环曝气三种曝气模式对COD的去除率分别为89.60%、79.20%、85.44%, 对NH₃-N的去除率分别为81.37%、87.83%、88.73%, 对总磷的去除率分别为59.60%、61.87%、62.24%。结果表明, 循环曝气可以提高脱氮除磷效率, 而且循环次数越多, 脱氮除磷效率越高。

关键词

生活污水, 曝气, 脱氮除磷, 活性污泥法, COD, 氨氮, 总磷

Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus Using Cyclic Alternating Aeration for Domestic Sewage

Hualian Yang*, Yutong Xie, Xiaoyue Xu, Lei He, Qianglin Li#, Cheng Qiu

Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: Dec. 4th, 2022; accepted: Jan. 4th, 2023; published: Jan. 13th, 2023

Abstract

In order to reduce energy consumption and improve removal efficiency of nitrogen and phosphorus for domestic sewage treatment, precise aeration is one of the most critical factors. In this pa-

*第一作者。

#通讯作者。

per, the concentration changes and removal efficiency of chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH₃-N) and total phosphorus (TP) after domestic sewage treatment for 300 min under the conditions that continuous aeration or cyclic alternating aeration for 3 or 4 times were investigated by activated sludge method through microporous aeration. The experiments showed that the removal rates of COD, NH₃-N and TP were 89.60%, 79.20%, 85.44%; 81.37%, 87.83%, 88.73%; and 59.60%, 61.87%, 62.24%, respectively by continuous aeration, three cycle aeration, and four cycle aeration. The results show that the cycle aeration can improve the efficiency of nitrogen and phosphorus removal, and the more cycles aeration, the higher the efficiency of nitrogen and phosphorus removal.

Keywords

Domestic Sewage, Aeration, Nitrogen and Phosphorus Removal, Activated Sludge Method, COD, Ammonia Nitrogen, Total Phosphorus

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着城镇化进程加快,我国城镇生活用水和污染物排放总量也逐年增加,为避免江河湖以及地下水等受到严重的污染[1][2],污水处理需求不断提升。同时由于双碳目标的提出,对污水处理节能降耗势在必行。根据《2020年中国生态环境统计年报》,2020年我国污水总量达322.3万吨,其中151.6万吨为生活污水,但目前我国的污水处理厂中普遍采用的很多技术都存在能耗高等问题[3]。

曝气工艺是废水生物处理技术的关键环节[4]。曝气设备主要有机械曝气、微孔曝气、射流曝气三种方式,现在常用的微纳米曝气,既适用于静止液体,也适用于低速流动液体($w < 0.1$ m/s)[5]。采用间歇式循环曝气法,可使污水处理厂节约能源18.3%[6]。目前国内外关于好氧活性污泥法处理污水方面研究大多基于人工湿地、循环式活性污泥法(CAST)、膜生物反应器(MBR)、植物浮岛等污水处理工艺,不能完全体现单独的曝气方式的处理效果[7]。本文研究了三种不同曝气方式处理生活污水,旨在提高生活污水脱氮除磷效率,同时降低能耗。

2. 实验部分

2.1. 实验试剂

重铬酸钾标准溶液($c(1/6K_2Cr_2O_7) = 0.2500$ mol/L)、试亚铁灵指示剂、硫酸亚铁铵标准溶液($c[(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O] \approx 0.1$ mol/L)、硫酸-硫酸银溶液、硫酸汞溶液($\rho = 100$ g/L)、纳氏试剂、酒石酸钾钠溶液、氮标准贮备液($c = 1000$ mg/L)、钼酸盐溶液、磷标准贮备液、磷标准使用液、浓硫酸($\rho = 1.84$ g/L)(成都市科龙化工),邻苯二甲酸氢钾溶液($c(KC_8H_5O_4) = 2.0824$ mol/L)、氮标准使用液($c = 10$ mg/L)、过硫酸钾溶液($\rho = 50$ g/L)、抗坏血酸溶液($\rho = 100$ g/L)(国药集团)。其余试剂均为成都科龙化工,分析纯。

2.2. 实验仪器

充氧泵 SB-988(中山市松宝电器),恒温干燥箱 DHG-9140A(上海-恒科科技),分析天平 AE224C(舜宇恒平),高压灭菌锅 GI54DS(致微(厦门)仪器有限公司),紫外-可见分光光度计 UV-5100B(上海元析

仪器)。

2.3. 实验步骤

培养驯化活性污泥 7 天, 分析活性污泥的活性污泥沉降比(SV_{30})、混合液悬浮固体浓度(MLSS)、污泥体积指数(SVI), 是活性污泥性能能良好地满足污水处理条件, 再采用活性污泥法微孔鼓风曝气, 在 3 种不同曝气模式下处理生活污水, 监测污水处理前后的 COD、 NH_3-N 、TP。

1) 活性污泥培养驯化: 由生活污水处理厂取 5 L 浓缩污泥, 用 30 L 的塑料桶, 加入乙酸钠、氯化铵和磷酸二氢钠, 使 COD 约 1000 mg/L, $N-NH_3$ 浓度约 60 mg/L, TP 约 8 mg/L 培养 7 天, 污泥成褐色、污泥浓度 3000~3500 mg/L。

2) 取样: 取 3 个 15 L 透明塑料桶, 分别加入 6 L 模拟生活污水, 和 6 L 活性污泥, 充分混合均匀, 做好标记。模拟污水配制: 称取 1.2755 g 邻苯二甲酸氢钾、0.3212 g 尿素、0.0659 g 磷酸二氢钾于水桶中, 加水稀释至 5 L, 混匀。则所得的污水 COD 为 300 mg/L, NH_3-N 为 30 mg/L, 总磷为 3 mg/L。

3) 好氧(曝气)与厌/缺氧(搅拌): 用充氧泵同时开始曝气处理。1 号桶曝气 60 min, 然后机械搅拌 40 min, 循环 3 次; 2 号桶曝气 45 min, 机械搅拌 30 min, 循环 4 次; 3 号桶连续曝气 3 h, 机械搅拌 2 h, 搅拌转速均为 300 r/min, 处理完毕后, 将 3 个样品静置 60 min, 分别取上清液 50 mL 于 3 个标号的棕色玻璃试剂瓶中, 存于 5℃ 的冰箱中。

4) 指标测定: 《水质化学需氧量的测定重铬酸盐法》(HJ 828-2017)测定 COD、《水质氨氮的测定纳氏试剂分光光度法》(HJ 535-2009)测定氨氮, 《水质总磷的测定钼酸铵分光光度法》(GB 11893-89)测定 TP。

3. 实验数据及结果

3.1. SV_{30}

取一百毫升的量筒, 量取液体 V_1 (本实验为 100 mL), 污泥完全沉淀后, 量筒中污泥的体积 V_2 (38 mL), 则

$$SV_{30} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{38}{100} = 38\%$$

3.2. MLSS

1) 取一张滤纸烘干后测量并记录滤纸质量为 m_1 (0.2904 g)。

2) 将 100 mL 曝气池泥水混合液进行抽滤, 取出抽滤完毕的滤纸烘干后。记录称量 m_2 (0.7088 g)。于是 MLSS 为:

$$MLSS(\text{mg/L}) = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V_1} = \frac{(0.7088 - 0.2904) \cdot 1000}{100} = 4184(\text{mg/L})$$

3.3. SVI

SVI 计算:

$$SVI = \frac{SV(\text{ml/L})}{MLSS(\text{g/L})} = \frac{38 \cdot 10}{4.184} = 90.82\%(\text{ml/g}) = 91(\text{ml/g})$$

3.4. COD

COD 浓度 ρ 计算公式:

$$\rho_{\text{COD}} = \frac{c \cdot (V_0 - V_1) \cdot 8000}{V}$$

去除率 φ 计算公式:

$$\varphi = \frac{\rho_{0-\text{COD}} - \rho_{\text{COD}}}{\rho_{0-\text{COD}}} \cdot 100\%$$

实验数据如表 1 所示。

Table 1. The experimental data of COD

表 1. COD 实验数据

水样编号	滴定水样时硫酸亚铁铵用量 V_1 (mL)	滴定空白时硫酸亚铁铵用量 V_0 (mL)	COD (mg/L)	COD 去除率(%)
1 [#]	15	16	62.40	79.20
2 [#]	15.3	16	43.68	85.44
3 [#]	15.5	16	31.20	89.60

注: 水样 10 mL, 重铬酸钾体溶液 5 mL, 硫酸 - 硫酸银溶液 15 mL, 硫酸汞溶液 1 滴, 硫酸亚铁铵溶液 0.078 mL。本实验中 $\rho_{0-\text{COD}}$ 为 300 mg/L。

3.5. 氨氮浓度

$\text{NH}_3\text{-N}$ 标准曲线如图 1 所示, $R = 0.99948$ 。

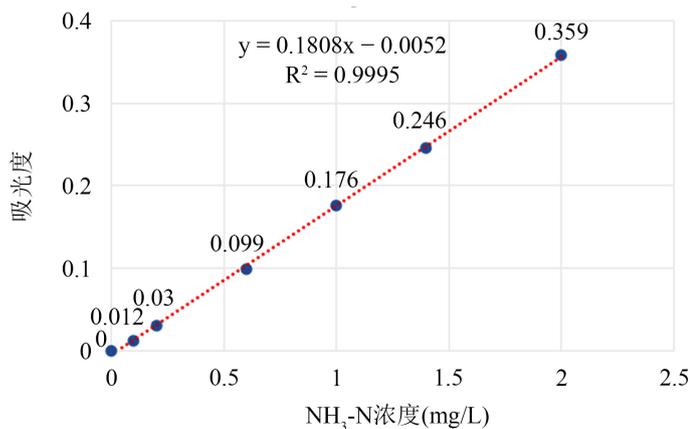


Figure 1. Absorbance standard curve of $\text{NH}_3\text{-N}$

图 1. $\text{NH}_3\text{-N}$ 测定的吸光度标准曲线

$\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度计算过程:

$$x = \frac{y + 0.0052}{0.1808}$$

由于水样测量时稀释了 50 倍, 故 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度 c 为:

$$c = 50x$$

去除率 φ 为:

$$\varphi = \frac{c_0 - c}{c_0} \cdot 100\%$$

吸光度及氨氮浓度如表 2 所示。

Table 2. The experimental data of NH₃-N
表 2. NH₃-N 实验数据

水样编号	吸光度	扣除背景值	x 值	NH ₃ -N 浓度(mg/L)	氨氮去除率 φ (%)
0 [#]	0.056	—	—	—	—
1 [#]	0.064	0.008	0.0730	3.65	87.83
2 [#]	0.063	0.007	0.0675	3.38	88.73
3 [#]	0.071	0.015	0.1117	5.59	81.37

注：本实验中 c_0 为 30 mg/L。

3.6 总磷

磷标准曲线如图 2 所示。

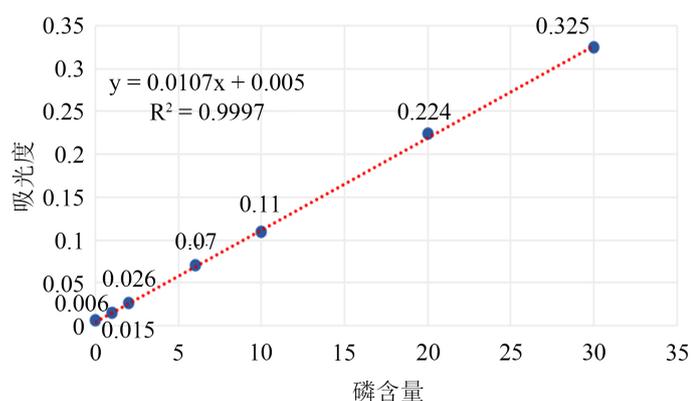


Figure 2. Absorbance standard curve of standard solution of TP
图 2. TP 测定的标准液吸光度标准曲线

总磷浓度计算，水样总磷质量 m ：

$$m = \frac{y - 0.005}{0.0107}$$

总磷浓度 c 为：

$$c = \frac{m}{V}$$

去除率 φ 为：

$$\varphi = \frac{c_0 - c}{c_0} \cdot 100\%$$

TP 测定的吸光度值及 TP 数据如表 3 所示。

Table 3. The experimental data of TP
表 3. 总磷实验数据

水样编号	吸光度	扣除参比值	总磷质量 μg	总磷浓度(mg/L)	TP 去除率
0	0.057	—	—	—	—
1 [#]	0.368	0.311	28.60	1.144	61.87
2 [#]	0.365	0.308	28.32	1.1328	62.24
3 [#]	0.391	0.334	30.75	1.23	59.00

本实验中 c_0 为 3 mg/L。

4. 结果讨论

4.1. 活性污泥相关指标

若生活污水的 SV_{30} 为 15% 到 40%，则污泥沉降性能良好[8]，该实验测得的污泥沉降比为 38%，则该活性污泥沉降性良好。

污泥体积指数(SVI)常用来判断活性污泥的沉降性能，准确度通常高于 SV_{30} 。良好的活性污泥 SVI 常在 50~120 之间。该实验测得 SVI 为 95 mL/L，故实验所培养的活性污泥沉降性能良好。

4.2. COD

该实验测得 1 号、2 号和 3 号三种待测水样的 COD 浓度分别为 62.40 mg/L、43.68 mg/L、31.20 mg/L，各自的去除率分别为 79.20%、85.44%、89.60%。

由此可知，3 号水样的 COD 去除率达到 89.6%，1 号水样的最低。因为有机物 COD 的降解是在好氧条件下进行的，故曝气时间越长、曝气量越多，COD 降解率越高。根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)规定，1 号曝气处理后的污水 COD 达到了二级标准，2 号和 3 号曝气处理达到一级 A 标。

4.3. 氨氮浓度

实验测得 1 号、2 号和 3 号的三种水样的氨氮浓度分别为 3.65 mg/L、3.38 mg/L、5.59 mg/L，去除率分别为 87.83%、88.73%、81.37%。

由此可知，间歇式曝气(1 号和 2 号)对污水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率接近 90%，高于连续曝气(3 号)的处理率。间歇式曝气，经过多次好氧和厌氧循环，污泥中反硝化菌和聚磷微生物能够保持较好的活性，而 3 号曝气由于经过了较长时间的好氧阶段，微生物活性不如 1 号与 2 号。氨氮去除率 2 号略高于 1 号，表明循环次数越多，氨氮去除率越高[9]。《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)，2 号和 1 号种曝气方式处理的生活污水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均达到了一级 A 标。

4.4. 总磷

实验测得 1 号、2 号和 3 号的三种污水水样的 TP 分别为 1.144 mg/L、1.1328 mg/L、1.23 mg/L，其去除率分别为 61.87%、62.24%、59.60%。由此可知，间歇式循环曝气(1 号和 2 号)方式的去除率相差不大，约为 62%，略高于 3 号试样，但 3 种方式对总磷的去除率均不太高。

因此采用间歇循环曝气，可更好地去除污水中的污染物，且运行更加平稳[10]。

5. 结论

该实验培养的活性污泥 SV_{30} 为 38%，MLSS 为 4184 mg/L，SVI 为 91 mL/g，活性污泥浓度较高，沉降性能良好，适合于研究不同曝气方式处理生活污水对 COD、氨氮和总磷的降解情况。

1) 对 COD 的去除，连续曝气(3 号样)去除率最高，达 89.6%，而间歇式循环曝气去除率相对偏低。在处理总时间相同的情况下，好氧与厌/缺氧交替循环次数越多，对 COD 的去除率越高。本实验交替循环 4 次的去除率高于循环 3 次。

2) 对 NH_3-N 和 TP 的去除，脱氮除磷是在缺氧或厌氧条件下进行的，本实验中采用间歇式交替曝气，循环 4 次对 NH_3-N 和 TP 的去除率最高，分别达 88.73% 和 62.24%，而连续曝气去除率最低，分别为 81.37% 和 59.60%。

因此，用活性污泥法处理生活污水，间歇式交替曝气对污水的脱氮除磷效果优于连续曝气。

基金项目

成都工业学院 2021 年青苗计划(No. QM2021051)。

参考文献

- [1] 王冠平, 许建华, 肖羽堂. 生物接触氧化池两种不同曝气方式的充氧性能的比较研究[J]. 净水技术, 1999(4): 11-14.
- [2] 赵志强, 梁波, 李苛杰. 浅谈生活污水来源以及处理方法[J]. 环境与生活, 2014, 90(8): 12-14.
- [3] Mits, M., Beloshenko, K. and Bozhkov, A. (2021) Research on Improvement of the Method of Periodic Aeration of Wastewater. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series New Solutions in Modern Technologies*, **1**, 90-95. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.01.13>
- [4] 闫飞龙, 王怡, 王文怀, 等. 曝气方式对复合人工湿地处理城镇生活污水的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 85-90.
- [5] Moga, I.C., Donu, O.G., Bran, N., et al. (2019) Aeration System to Be Used in Wastewater Treatment. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, **572**, 121-125. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012105>
- [6] 郑琬琳, 史彦伟, 高放, 等. 改良 AAO 工艺间歇曝气对微生物群落特征及运行效果影响[J]. 给水排水, 2021, 57(5): 34-39+44.
- [7] 高廷耀, 顾国维. 水污染控制工程(第四版·下册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 122+125-126+165-166+246.
- [8] 胡丽萍, 阮辰旻. 利用污泥沉降比 $SV_{(30)}$ 分析生化工艺运行状况[J]. 净水技术, 2016, 35(2): 105-108.
- [9] 郑琬琳, 史彦伟, 高放, 等. 改良 AAO 工艺间歇曝气对微生物群落特征及运行效果影响[J]. 给水排水, 2021, 57(5): 34-39+44.
- [10] 马永鹏, 何争光, 宋宏杰, 等. 不同曝气方式对 M-CASS 处理酒精废水的影响[J]. 水处理技术, 2010, 36(9): 110-113.