

## 污水处理与回用

尤俊豪, 郭明哲, 宗永臣, 等. 高原环境下 AAO 工艺水力停留时间对脱氮除磷的影响[J]. 净水技术, 2022, 41(10):56-60, 91.  
 YOU J H, GUO M Z, ZONG Y C, et al. Effect of HRT of AAO process on nitrogen and phosphorus removal under plateau environment [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10): 56-60, 91.



扫我试试?

## 高原环境下 AAO 工艺水力停留时间对脱氮除磷的影响

尤俊豪<sup>1,2</sup>, 郭明哲<sup>1,2</sup>, 宗永臣<sup>1,2,\*</sup>, 郝凯越<sup>1,2</sup>, 黄德才<sup>1,2</sup>

(1. 西藏农牧学院水利土木工程学院, 西藏林芝 860000; 2. 西藏土木水利电力工程技术研究中心, 西藏林芝 860000)

**摘要** 基于高原环境下的 AAO 工艺, 研究水力停留时间 (HRT) 对 AAO 工艺脱氮除磷的影响, 根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 对化学需氧量 (COD<sub>Cr</sub>)、氨氮、总氮 (TN)、总磷 (TP) 4 个水质指标进行分析。结果表明: 最佳 HRT 为 15.00 h, 出水 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN 浓度均满足一级 A 排放标准, 出水 TP 浓度满足二级排放标准; HRT 对 COD<sub>Cr</sub>、氨氮的去除率影响小, 对 TN、TP 的去除率影响大, TN 的去除率随 HRT 的增加呈先增后减趋势, 而 TP 的去除率随 HRT 的增加呈先减后增的趋势。同时, 温度、紫外线等对 AAO 工艺脱氮除磷有重要影响。

**关键词** 高原环境 污水处理 AAO 工艺 脱氮除磷 水力停留时间 (HRT)

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)10-0056-06

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.10.009

## Effect of HRT of AAO Process on Nitrogen and Phosphorus Removal under Plateau Environment

YOU Junhao<sup>1,2</sup>, GUO Mingzhe<sup>1,2</sup>, ZONG Yongchen<sup>1,2,\*</sup>, HAO Kaiyue<sup>1,2</sup>, HUANG Decai<sup>1,2</sup>

(1. Water Conservancy Project & Civil Engineering College, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China;  
 2. Civil, Hydraulic and Electric Engineering Technology Research Center of Tibet, Linzhi 860000, China)

**Abstract** Based on the AAO process under plateau environment, the effect of hydraulic retention time (HRT) on nitrogen and phosphorus removal by AAO process was studied. Four water quality indices, including chemical oxygen demand (COD<sub>Cr</sub>), ammonia nitrogen, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP), were analyzed according to *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002). Results showed that the optimal HRT was 15.00 h, and the effluent COD<sub>Cr</sub>, ammonia nitrogen and TN mass concentrations all meet first class A discharge standard, and the effluent TP mass concentration meet second-level discharge standard. HRT had little effect on removal rate of COD<sub>Cr</sub> and ammonia nitrogen, but had great effect on removal rate of TN and TP. The removal rate of TN first increased and then decreases with increase of HRT, while removal rate of TP first decreased and then increased with increase of HRT. At the same time, temperature, ultraviolet light, etc. had an important influence on nitrogen and phosphorus removal of AAO process.

**Keywords** plateau environment sewage treatment AAO process nitrogen and phosphorus removal hydraulic retention time (HRT)

[收稿日期] 2021-06-14

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51868069); 西藏地区自然基金项目(XZ2018ZRG-20); 西藏自治区高等学校科研创新团队“高原水环境保护与水生态安全”; 西藏农牧学院研究生教育创新计划项目(YJS2021-26)

[作者简介] 尤俊豪(1994—), 男, 硕士, 研究方向为水利工程对水生态环境的影响, E-mail: 991874823@qq.com。

[通信作者] 宗永臣(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为市政工程和环境科学研究, E-mail: zyc\_2001@sohu.com。

随着西藏自治区城镇化的快速发展,生活污水和工业污水的排放量在不断增加。目前主要的污水处理工艺有 AAO、SBBR、氧化沟等<sup>[1]</sup>。其中 AAO 工艺因具有同步脱氮除磷、结构简单、不易产生污泥膨胀等优点被污水处理厂广泛应用,据不完全统计,在我国城镇污水处理厂中 AAO 工艺占据约 50%<sup>[2-3]</sup>,同时也是青藏高原地区主要的污水处理工艺之一<sup>[4]</sup>。

由于 AAO 工艺受多方面因素的影响,脱氮除磷的效果并不稳定<sup>[5]</sup>。水力停留时间(HRT)作为 AAO 工艺重要的参数,对脱氮除磷的效果有重要的影响。欧阳海等<sup>[6]</sup>研究表明 HRT 对  $COD_{Cr}$  去除率的影响小,对总氮(TN)、总磷(TP)的去除率影响大,并随 HRT 的增加呈先增后减的趋势,当 HRT 为 8 h 处理效果最佳。潘欣语等<sup>[7]</sup>研究表明 HRT 对 TN、TP、氨氮去除率的影响大,TN、氨氮的去除率随 HRT 的增加而增加,TP 的去除率随 HRT 的增加呈先增后减趋势,此时最佳 HRT 为 5~8 h。HRT 的过长过短都会对脱氮除磷造成影响。HRT 过长会影响污泥龄(sludge retention time, SRT),进而影响释磷作用,同时会增加剩余污泥的排放量,造成经济负担的增加。HRT 过短,反应池中各微生物种群没有充分的时间生长,污泥流失过快,硝化反应和反硝化反应都没有得到充分的进行。本试验以高原地区为背景,研究了 HRT 对 AAO 工艺脱氮除磷的影响,为高原地区 AAO 工艺在不同 HRT 工况下的运行提供相关数据基础。

## 1 试验与方法

### 1.1 试验装置

如图 1 所示,利用传统 AAO 工艺城市污水处理模拟装置<sup>[4]</sup>,在厌氧池与缺氧池中都设有搅拌装置,设定搅拌速度为 110 r/min,在好氧池底部设有膜片式微孔曝气头为其供氧。试验进水和污泥回流均采用磁力驱动循环泵,并借助浮子流量计及球阀进行流量控制,硝化液回流采用蠕动泵控制。用恒温循环器控制试验用水温度,硝化液回流比、污泥回流比分别控制为 150%、100%。用好氧池进行 35 d 的污泥培养,控制温度为  $(20.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ ,溶解氧(DO)质量浓度为 2~3 mg/L, pH 值为 6~8。当测得污泥沉降比( $SV_{30}$ )为 28% 和活性污泥质量浓度(MLSS)为 3 716 mg/L 时,正式开展试验。

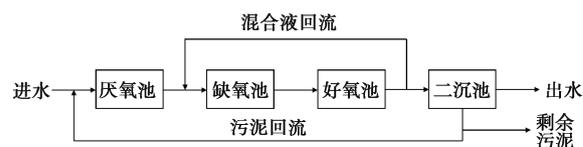


图 1 AAO 工艺流程

Fig. 1 Process Flow of AAO

本试验直接采用西藏农牧学院办公楼区生活污水为试验用水,主要进水水质指标如下。pH 值为 8.25~8.51,  $COD_{Cr}$  质量浓度为 102.82~464.06 mg/L, TN 质量浓度为 37.70~121.50 mg/L, TP 质量浓度为 1.58~31.45 mg/L, 氨氮质量浓度为 32.93~162.93 mg/L。

### 1.2 试验操作

研究不同 HRT 下 AAO 工艺对各污染物去除的相关性,保持培养阶段控制指标不变,调节进水流量分别为 8、12、14、16 L/h,即 HRT 为 26.25、21.00、17.50、15.00 h。各工况条件下运行 72 h 后开展正式试验,分别取水样和污泥样品进行检测。

### 1.3 水质指标测定

采用连续性进水模式,各工况下间隔 24 h 取各反应池中水样,持续 9 d。所有水样经静置沉淀后取上清液,进行  $COD_{Cr}$ 、氨氮、TN、TP 等污染物指标检测,检测方法参照水和废水检测分析方法<sup>[8]</sup>进行。

### 1.4 数据处理与分析方法

试验数据在 Excel 处理后,使用主成分分析法<sup>[9]</sup>,利用 SPSS 对提取的数据进行主成分分析。首先对原始数据进行标准化,以公共因子解释的累计方差不小于 85%,提取公共因子,并通过因子得分矩阵和旋转后的公共因子的方差贡献率进行计算,算出每组的综合评价得分,最后使用 Origin 2018 作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同 HRT 对 $COD_{Cr}$ 的影响

不同 HRT 对  $COD_{Cr}$  去除率的影响如图 2 所示。 $COD_{Cr}$  平均进水质量浓度为 130~330 mg/L,波动较大。进水浓度与去除率的趋势大致相同,表明  $COD_{Cr}$  进水浓度与去除率之间有正相关性。在 HRT 为 15.00、17.50 h 时,  $COD_{Cr}$  的出水平均质量浓度为 20~50 mg/L,满足一级 A 排放标准,波动也较稳定。由图 2 可知,随 HRT 的增加,出水  $COD_{Cr}$  的浓度整

体呈上升趋势。COD<sub>Cr</sub> 的平均去除率随 HRT 从 15.00 h 时的 85.50% 降为 26.25 h 时的 76.53%, 可见 COD<sub>Cr</sub> 去除率变化不大, 不同 HRT 条件下的 COD<sub>Cr</sub> 平均去除率整体在 70%~90%。

由上述分析可知, 不同 HRT 条件下的 COD<sub>Cr</sub> 去除率都较高且稳定, 这说明 HRT 在 15.00~26.25 h 的变化对 COD<sub>Cr</sub> 的去除率几乎没影响, 这与潘欣语等<sup>[7]</sup> 研究结果表明 HRT 的变化对 COD<sub>Cr</sub> 的去除率影响小相同。COD<sub>Cr</sub> 在 HRT 为 17.0 h 时的出水浓度低于 HRT 为 15.0 h 时, 两者都满足一级 A 排放标准, 同时 HRT 的增加会导致运行成本增加, 当去除效果一定时, HRT 越小, 单位时间内处理的污水量越多, 处理效率越高<sup>[10]</sup>。因此, 综合考虑最佳 HRT 为 15.00 h。

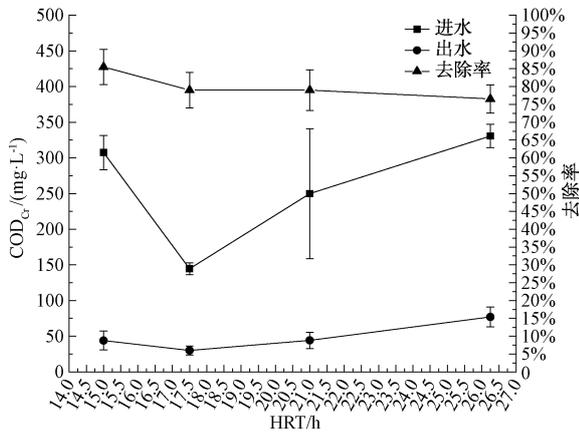


图2 不同 HRT 条件下 COD<sub>Cr</sub> 的去除效果  
Fig. 2 Effect of COD<sub>Cr</sub> Removal under Different HRT Conditions

## 2.2 不同 HRT 对氨氮的影响

由图 3 可知, 氨氮的进水平均质量浓度为 10~38 mg/L, 变化幅度大。随 HRT 的变化, 氨氮的出水质量浓度变化较稳定, 且小于 5.00 mg/L。虽进水浓度波动大, 但出水浓度稳定, 去除率达到 93%。这说明试验装置对氨氮有较好去除效果, 具有较强的抗冲击能力。当 HRT 为 17.50、21.00、26.25 h 时, 进水平均质量浓度从 10 mg/L 增至 38 mg/L, 出水平均质量浓度是 1.20、2.86、3.36 mg/L, 此时平均去除率由 89.49% 升至 91.11%。表明较长的 HRT 对氨氮的出水浓度与去除率有一定的影响。较长的 HRT 会导致出水浓度上升, 并且对氨氮的去除率有小幅提高, 同时也表明进水浓度与出水浓

度和去除率呈正相关。随 HRT 的上升, 氨氮平均去除率由 92.94% 降至 91.11%, 下降幅度较小。这说明 HRT 为 15.00 h 时, 可以使各反应池进行充分反应, 此时氨氮的去除率已达到最佳状态。

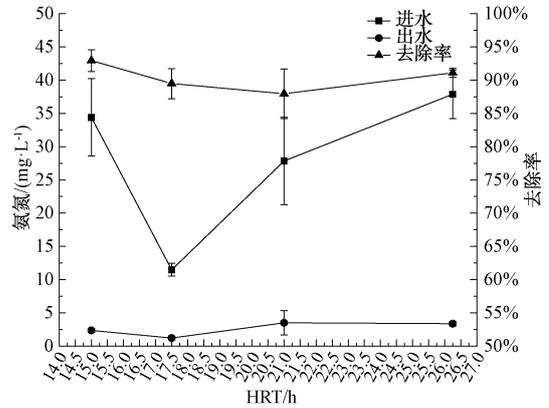


图3 不同 HRT 条件下氨氮的去除效果  
Fig. 3 Effect of Ammonia Nitrogen Removal under Different HRT Conditions

## 2.3 不同 HRT 对 TN 的影响

氨氮进水质量浓度在 10~38 mg/L, TN 进水质量浓度在 24~40 mg/L, 氨氮进水浓度约占 TN 进水浓度的 90%, 说明污水中 TN 的主要组成部分是氨氮<sup>[10]</sup>。在 HRT 为 15.00~21.00 h 时, 氨氮与 TN 的进水浓度变化趋势较相似。

由图 4 可知, TN 的出水质量浓度为 5~15 mg/L, 满足一级 A 排放标准。在不同 HRT 下, TN 的平均去除率为 58.00%~80.00%, 其波动幅度较大。当 HRT 为 15.00、17.50、21.00、26.25 h 时, TN 平均去除率分别为 69.70%、79.20%、76.30%、58.81%, 可

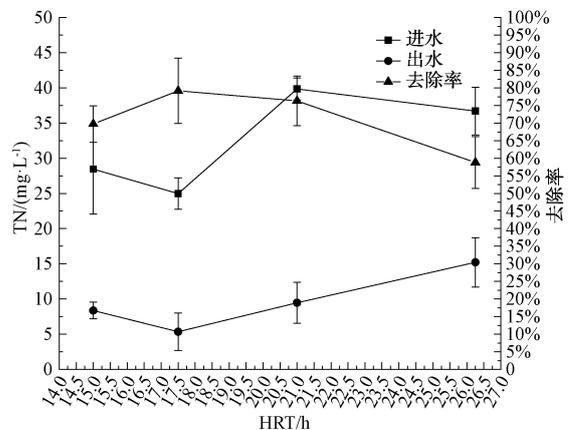


图4 不同 HRT 条件下 TN 的去除效果  
Fig. 4 Effect of TN Removal under Different HRT Conditions

看出 15.00、26.25 h 的 TN 平均去除率均小于 17.50、21.00 h。说明 HRT 过长或过短都不利于 TN 的去除, HRT 过短, 水流较快, 不利于好氧池中的硝化反应, 进而使缺氧池硝态氮浓度过低, 无法进行反硝化反应, 影响脱氮去除率<sup>[10]</sup>; HRT 过长, 系统的有机负荷率降低, 会使生物的内源呼吸加剧, 影响污泥的活性, 最终降低系统对污染物去除效果。4 组 HRT 对 TN 的去除率整体并未达到预期效果, 分析可能是高原地区海拔高、温度低、紫外线强所导致。由于处在高原地区, 本次试验温度在  $(20.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$ , 王荣昌等<sup>[11]</sup>研究表明当系统温度在  $20\sim 30^\circ\text{C}$ , TN 的去除率在 90% 左右, 同样罗忆涵等<sup>[12]</sup>在采用 AAO 模式运行下, 表明温度在  $30^\circ\text{C}$  时, TN 的平均去除率在 90% 以上。温度的升高, 微生物生长繁殖速率加快, 同化作用效率提高, 使更多的氮转化为微生物体内的氮化合物, 同时温度升高也加快硝化反硝化速率, 促进微生物代谢能力, 增加脱氮效率<sup>[13]</sup>。研究表明硝化细菌最适生长温度在  $25\sim 30^\circ\text{C}$ <sup>[14]</sup>, 而低温将会影响硝化反硝化菌的活性, 进而影响脱氮性能。而本次试验有模拟高原紫外线照射工况, 方德新等<sup>[15]</sup>在对比高原与非高原污水处理系统研究发现, 受紫外线照射, 高原污水处理系统微生物多样性显著低于非高原, 而较低微生物多样性又是脱氮效果不佳的重要原因。因此, TN 的去除率不仅受 HRT 的影响, 还受温度和紫外线的影响。TN 的去除率随 HRT 的增加, 整体呈先增后减的趋势。单考虑 TN 去除效果, 当 HRT 为 17.50 h 时最佳。

## 2.4 不同 HRT 对 TP 的影响

由图 5 可知, TP 的进水质量浓度为  $3\sim 8\text{ mg/L}$ , 在 HRT 为 26.25 h 最高。在不同 HRT 条件下, 出水 TP 质量浓度在  $0\sim 2\text{ mg/L}$ , 但 4 组 TP 的出水浓度均未达到一级 A 排放标准。一方面因为高原地区海拔高、气压低, 大气中氧浓度较低, 使污水处理系统中的 DO 含量低<sup>[16]</sup>, 实际在试验中, 好氧池 DO 质量浓度多数在  $2.4\text{ mg/L}$  左右, 低 DO 会抑制聚磷菌的活性, 影响聚磷菌好氧吸磷。另一方面原因是碳源, 反硝化菌与聚磷菌存在碳源竞争, 在 AAO 工艺中进水碳源不足时, 会造成 3 个池子形成营养递减区, 好氧池聚磷菌因缺少碳源而影响吸磷。

当 HRT 为 15.00、17.50、21.00、26.25 h 时, TP 的平均去除率分别是 80.92%、77.62%、64.04%、

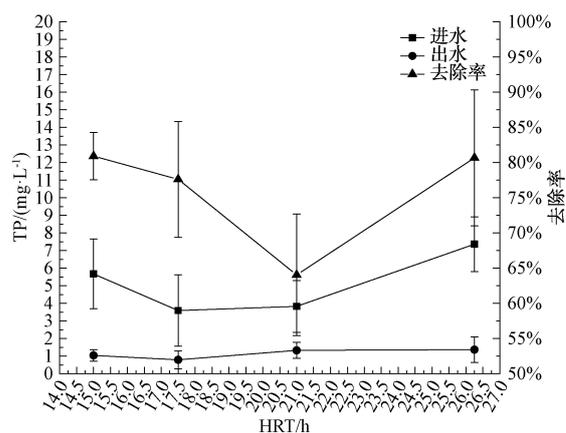


图5 不同 HRT 条件下 TP 的去除效果

Fig. 5 Effect of TP Removal under Different HRT Conditions

80.67%。随 HRT 的增加, TP 的去除率呈先减后增趋势, 并与出水浓度趋势相同, 表明 TP 去除率和出水浓度同时受 HRT 的影响。其中最佳 HRT 为 15.00 h, 说明较长的 HRT 不利于 TP 的去除。一方面因为此时 HRT 较长, 硝化细菌与聚磷菌之间存在激烈竞争, 而聚磷菌的生存能力低于硝化细菌, 会导致聚磷菌的死亡, 不利于吸磷的进行, 影响 TP 的去除效果<sup>[11]</sup>。另一个原因可能是 SRT, 本次 4 组 HRT 对应的 SRT 是 8、12、16、20 d。SRT 过长, 会造成在消化过程中活性污泥的活性下降, 而且会影响聚磷菌对磷的吸收, 从而导致活性污泥中糖类物质的累积及非聚磷菌的增长, 使除磷效果降低, 同时有研究表明最佳 SRT 处于  $3.5\sim 7\text{ d}$ <sup>[17-18]</sup>。

## 2.5 不同 HRT 对系统脱氮除磷的影响

在 AAO 工艺中脱氮主要通过硝化反硝化, 除磷主要通过聚磷菌的厌氧释磷和好氧吸磷, 都需要一定的 HRT。首先是聚磷菌的释磷, 如果 HRT 不能满足, 将会影响后续的吸磷; 在反硝化脱氮(硝酸盐转化为氮气)时, 需要的 HRT 较短, 一般反硝化与硝化的 HRT 之比为  $1:3$ <sup>[19]</sup>; 而在硝化阶段需要较长的 HRT 来满足硝化反应(有机氮转化为硝酸盐)和满足聚磷菌有充分的时间吸磷, 提高除磷效果。由表 1 可知, 当 HRT 在 15.00~26.25 h, 氨氮的平均去除率均高于其他 3 个指标,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TP 的平均去除率相对高于 TN。说明 AAO 工艺对氨氮的去除具有良好的效果, 且处理效果稳定, 同时也表明 AAO 工艺在运行良好时, 可以实现脱氮与除磷同时超过 60%, 但不能同时实现高效率的脱氮与除磷。例如当

表 1 不同 HRT 下各污染物的平均去除率和 MLSS  
Tab. 1 Average Removal Rates of Pollutants and MLSS under Different HRTs

项目	HRT=15.00 h	HRT=17.50 h	HRT=21.00 h	HRT=26.25 h
COD <sub>Cr</sub> 平均去除率	85.50%	78.98%	79.00%	76.53%
氨氮平均去除率	92.94%	89.49%	88.85%	91.11%
TN 平均去除率	69.70%	79.20%	76.31%	58.81%
TP 平均去除率	80.92%	77.62%	64.04%	80.67%
MLSS/(mg·L <sup>-1</sup> )	493	698	534	761

HRT 为 26.25 h 时,TP 的平均去除率达到 80.67%,而 TN 的平均去除率只有 58.81%。在综合对比不同 HRT 下,当 HRT 为 15.00 h 时,系统中 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN、TP 的平均去除率效果最好,但是此时系统平均 MLSS 只有 493 mg/L,并低于其他 3 组 HRT 下的污泥浓度,这与污泥浓度低、微生物数量少,从而影响系统功能发挥<sup>[20-21]</sup>的理论相反,可能是高原地区特殊的环境所造成,但具体原因有待研究。

为了更科学、更准确地得出 4 组 HRT 在综合 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN、TP 的平均去除率条件下的最佳 HRT,由图 6 可知,当 HRT 为 15.00 h 时的综合评价得分最高,这也验证了上述分析的最佳 HRT 是正确的,其次是 26.25、17.50、21.00 h。这表明 HRT 对系统脱氮除磷的发挥有很大的影响。

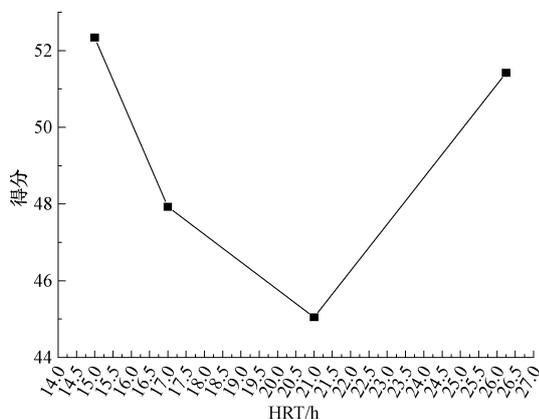


图 6 PCA 分析不同 HRT 条件下的综合评价得分  
Fig. 6 PCA Analysis of Comprehensive Evaluation Scores under Different HRT Conditions

### 3 结论与建议

本次试验结果表明 HRT 对 COD<sub>Cr</sub>、氨氮的去除影响小,对 TN、TP 的影响大。随 HRT 的增加,TN 的去除率先增后减,TP 的去除率先减后增。综合考虑各污染物的去除效果,最佳 HRT 是 15.00 h,此时

COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN、TP 的平均去除率分别为 85.50%、92.94%、69.70%、80.92%,其中 COD<sub>Cr</sub>、氨氮、TN 出水浓度满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 排放标准,TP 出水浓度满足二级排放标准。

本次试验以高原地区为背景,讨论了海拔高、气压低、温度低、紫外线强等原因对 AAO 工艺脱氮除磷效果的影响,因此,这些因素可作为提高高原地区 AAO 工艺脱氮除磷效率的研究方向。同时,本次试验结果显示脱氮效率不高,建议通过调整合适的 DO、pH、回流比等工况来提高脱氮效率。

### 参考文献

- [1] 刘映东. 城市污水处理现状及其发展趋势分析[J]. 资源节约与环保, 2015(2): 161-161.
- [2] 武克亮. 城市污水处理 AAO 工艺节能降耗控制技术分析[J]. 质量与市场, 2020(2): 74-75.
- [3] 田敏, 崔涛, 吕恺, 等. 西安市第四污水处理厂 AAO 工艺的脱氮性能评价[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 1-6.
- [4] 陈相宇, 郝凯越, 苏东, 等. AAO 法处理高海拔地区污水的特性研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(2): 93-96.
- [5] ERSU C B, ONG S K, ARSLANKAYA E, et al. Comparison of recirculation configurations for biological nutrient removal in a membrane bioreactor[J]. Water Research, 2008, 42(6/7): 1651-1663. DOI: 10.1016/j.watres.2007.10.022.
- [6] 欧阳海, 赵静, 杨胤, 等. 改良 A/A/O 工艺脱氮除磷中试运行效果分析[J]. 水处理技术, 2015, 41(4): 112-115.
- [7] 潘欣语, 杨建宇, 李永峰. 水力停留时间对 A<sup>2</sup>/O 工艺脱氮除磷率的作用[J]. 黑龙江科学, 2011, 2(4): 1-4, 24.
- [8] 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]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [9] 宗永臣, 张永恒, 陆光华, 等. 基于主成分分析法的高海拔 A<sup>2</sup>/O 工艺特性研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(9): 116-119.
- [10] 王辰辰. A<sup>2</sup>/O 工艺处理城镇污水的脱氮除磷性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.

(下转第 91 页)

的荧光物质组分相同,与类腐植酸和类可溶性微生物副产物有关。但两种耦合方式对类腐殖质物质的降解规律不同,尤其是组分4,导致了污染物去除效果的差异。

(3)在相同臭氧处理时间下,相比于预臭氧-混凝工艺,混凝-臭氧工艺能有效矿化类腐植酸物质,使其芳香性大大降低。

(4)预臭氧氧化影响后续混凝过程产生的絮体形态,随着预臭氧时间增加,混凝后的絮体粒径与分形维数均呈现出先增加后下降的趋势。

### 参考文献

- [1] 王仲旭, 应淮. 污水治理技术与运行管理[M]. 北京: 中国环境出版社, 2015: 323-326.
- [2] 国家环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 制浆造纸工业水污染物排放标准: GB 3544—2008[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [3] 苟玺莹. 混凝耦合 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 深度处理制药园区尾水的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [4] 洪添, 胡勇有, 陈元彩, 等. 臭氧氧化深度处理某工业园的印染废水尾水[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6217-6221.
- [5] 陈雷, 朱四琛, 徐炎华, 等. 混凝法联合 Fenton 或 O<sub>3</sub> 氧化法深度处理焦化废水生化尾水[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 62-66.
- [6] 张小伟, 王文龙, 蔡亦忠, 等. 臭氧强化混凝对印染废水的深度处理研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(9): 30-35.
- [7] BU F, GAO B, SHEN X, et al. The combination of coagulation and ozonation as a pre-treatment of ultrafiltration in water treatment[J]. Chemosphere, 2019, 231: 349-356. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.154.
- [8] JIN X, WANG Y, ZHANG W, et al. Mechanism of the hybrid ozonation-coagulation (HOC) process: Comparison of preformed Al<sub>13</sub> polymer and in situ formed Al species[J]. Chemosphere, 2019, 229: 262-272. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.225.
- [9] XIE P, CHEN Y, MA J, et al. A mini review of preoxidation to improve coagulation[J]. Chemosphere, 2016, 155: 550-563. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.04.003.
- [10] JIN X, JIN P, HOU R, et al. Enhanced WWTP effluent organic matter removal in hybrid ozonation-coagulation (HOC) process catalyzed by Al-based coagulant[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 327: 216-224. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.12.043.
- [11] JIN X, SHI Y, HOU R, et al. Role of Al-based coagulants on hybrid ozonation-coagulation (HOC) process for WWTP effluent organic matter and ibuprofen removal[J]. Water Research & Technology, 2019, 5(3): 599-608.
- [12] 王敏慧, 张忠民, 曹莉, 等. 臭氧对混凝剂形态及功能的影响[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(7): 27-30.
- [13] CHEN W, YU H Q. Advances in the characterization and monitoring of natural organic matter using spectroscopic approaches[J]. Water Research, 2021, 190: 116759. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116759.
- [14] JIN P, SONG J, YANG L, et al. Selective binding behavior of humic acid removal by aluminum coagulation[J]. Environmental Pollution, 2017, 233: 290-298. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.10.058.
- [15] TIZAOUI C, BOUSELMI L, MANSOURI L, et al. Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(1/2): 316-324. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.09.023.
- [16] 陈炜鸣. 臭氧高级氧化法处理垃圾渗滤液中难降解有机物的效能与机理[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [17] 文欣, 赵越, 时俭红, 等. 多元统计分析研究不同物料堆肥富里酸紫外吸收光谱特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1814-1818.
- [18] 刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 等. 臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 1918-1927.
- [19] 吴春笃, 段明飞, 解清杰. 预臭氧氧化对聚硅酸铝铁絮凝效果及絮体形态影响研究[J]. 工业水处理, 2011, 31(6): 21-23.
- [11] 王荣昌, 司书鹏, 杨殿海, 等. 温度对生物强化除磷工艺反硝化除磷效果的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(6): 1535-1544.
- [12] 罗忆涵, 陈莹, 解舒婷, 等. 温度、DO 及 C/N 值对 SBBR 工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9): 82-89.
- [13] 张兰河, 李巍巍, 庞香蕊, 等. 温度对 A<sup>2</sup>O 工艺脱氮速率及胞外聚合物影响[J]. 化学工程, 2014, 42(3): 1-5.
- [14] 魏小涵. 不同反应模式移动床生物膜反应器(MBBR)技术优化研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- [15] 方德新, 吉芳英, 许晓毅, 等. 高原高寒污水处理系统的微生物群落特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1081-1088.
- [16] 张培胜, 李轶, 王龙飞. 我国高原污水处理厂现存问题及其展望[J]. 环境工程, 2019, 37(5): 82-86, 91.
- [17] 杨方灿, 郭飞宇, 王若飞. AAO 处理小城镇污水的工艺优化措施[J]. 工程建设与设计, 2020(19): 151-154.
- [18] 杜丽飞, 陈礼, 任慧波, 等. 废水生物脱氮除磷工艺研究进展[J]. 湖南畜牧兽医, 2019(1): 7-9.
- [19] 柳利魁, 张萌, 刘俊良, 等. A<sup>2</sup>O 工艺处理高氨氮城市污水调试运行[J]. 水处理技术, 2017, 43(5): 123-125.
- [20] ZYKOVA I, MAKSIMUK N, REBEZOV M, et al. Interaction between heavy metals and microorganisms during wastewater treatment by activated sludge[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, 14(11): 2139-2144.
- [21] WANG J, CHON K, REN X, et al. Effects of beneficial microorganisms on nutrient removal and excess sludge production in an anaerobic-anoxic/oxic (A<sup>2</sup>O) process for municipal wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2019, 281: 90-98. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.02.047.

(上接第 60 页)