

低温及运行参数对低碳磷比生活污水的影响研究

苏 畅, 李雨霏*, 陈可心, 孙更新, 姚 伟

东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年5月6日; 录用日期: 2022年6月9日; 发布日期: 2022年6月20日

摘 要

AAO工艺广泛被用于处理生活污水, 温度和碳源是影响微生物代谢过程的两个重要因素。低温会使微生物活性和底物利用率下降, 有机碳源的缺乏会导致系统中的释磷与反硝化之间存在因碳源不足的竞争性矛盾。在我国北方地区, 冬天水温一般在5℃~10℃, 且我国生活污水普遍具有低C/P的特点。因此实验室模拟了北方生活污水的特点, 更改实验参数, 为低温低C/P条件下反硝化除磷工艺的实际推广应用提供了技术参考。

关键词

低温, 低碳磷比, AAO工艺, 脱氮除磷

Effect of Low Temperature and Operating Parameter on Low Carbon-Phosphorus Ratio Domestic Wastewater

Chang Su, Yufei Li*, Kexin Chen, Gengxin Sun, Wei Yao

College of Forestry, Northeast Forestry University (NEFU), Harbin Heilongjiang

Received: May 6th, 2022; accepted: Jun. 9th, 2022; published: Jun. 20th, 2022

Abstract

The AAO process is widely used to treat domestic wastewater, and temperature and carbon source are two important factors affecting microbial metabolic processes. Low temperature will reduce

*通讯作者。

文章引用: 苏畅, 李雨霏, 陈可心, 孙更新, 姚伟. 低温及运行参数对低碳磷比生活污水的影响研究[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(3): 449-456. DOI: 10.12677/aep.2022.123060

microbial activity and substrate utilization, and the lack of organic carbon source will lead to competitive conflicts between phosphorus release and denitrification in the system due to insufficient carbon source. In the northern region of China, the water temperature in winter is usually 5°C~10°C, and domestic wastewater in China is generally characterized by low C/P. Therefore, the laboratory simulated the characteristics of northern domestic wastewater and changed the experimental parameters to provide a technical reference for the practical application of denitrification and phosphorus removal process under low temperature and low C/P conditions.

Keywords

Low Temperature, Low Carbon to Phosphorus Ratio, AAO Process, Nitrogen Removal and Phosphorus Removal

Copyright © 2022 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. 引言

众所周知, 温度和碳源是影响生活污水处理的两个重要因素。

在生物脱氮除磷过程中, 需要消耗易降解有机物作为碳源, 根据常规脱氮除磷机理, 为了保证脱氮除磷效果, BOD_5/TKN 至少要大于 4~6 [1], 厌氧段污水 BOD_5/TP 应大于 32 [2]。而实际生活污水普遍具有低 C/P 的特点, 一般情况需要大量的外加碳源[3], 使得污水处理的成本提高。在此基础上部分城镇污水厂选用改进 AAO、UCT、氧化沟等工艺, 采用分段进水, 取消了消化液回流, 使得碳源可以充分地脱氮和除磷利用[4]。但是这仍然基于常规反应途径, 当进水碳源有限时难以满足反应过程的需求。新型反硝化除磷技术利用反硝化聚磷菌(DNPAOs), NO_x-N 为电子受体, 分解胞内储存的聚羟基链烷酸(PHAs), 利用产生的能量吸磷, 以一种机制同时进行脱氮和除磷, 实现了“一碳两用”[5], TP 的去除率高达 90%、TN 去除率为 70% [6]。

但在高寒地区, 反硝化除磷工艺的效果受到了限制。一方面低温会降低污水处理系统的效能, 污水生化处理系统一般发生在 20°C~30°C 范围内, 在低于 15°C 的环境下硝化与反硝化作用的速率明显下降, 4°C 以下大部分微生物进入休眠期甚至死亡, 此时污水处理系统的硝化作用几乎停止[7]。另一方面延长了启动过程, 系统一般需要 28 d 才能达到稳定运行的状态, 且出水氨氮指标不能满足标准[8]。因此, 有学者在 SBR 反应器中, 通过两阶段的性能(厌氧-厌氧-缺氧(A-O-A)和厌氧-缺氧(AeA)), 从 PAOs 中富集 DNPAOs, 使在 15°C 环境下, 对 COD、TP、TN 的去除率分别为 93.31%、83.59%、89.79%, 但低于 15°C 时, 菌群活性任然受到限制[9]。

我国北方生活污水恰好具有低 C/P 和低温这两个特点, C/P 一般在 28~100, 冬季污水处理温度为 5°C~10°C。本研究将综合这两个因素, 模拟北方生活污水, 从混合液悬浮固体浓度(MLSS)、污泥负荷和污泥龄三个方面入手, 改变 AAO 工艺反硝化处理生活污水运行参数, 探究出水效果。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验装置

本实验采用自制有机玻璃反应器, 采用 AAO 方式运行。反应区的有效水深为 220 mm, 有效容积为

63.4 L, 依次为厌氧区域、缺氧区域和好氧区域, 体积比近似为 1:2:3, 厌氧区和缺氧区各设置一个搅拌器。厌氧区底部置进水管, 以蠕动泵控制进水量, 后部置污泥回流管连接沉淀池的排泥管, 通过蠕动泵进行控制污泥回流量, 缺氧区与好氧区后部置硝化液管, 好氧区后部设置曝气管, 外部与曝气装置相连, 内部连接曝气条, 尾部设置出水管与沉淀池的进水管相连。沉淀池的有效水深为 400 mm, 半径为 300 mm, 有效容积为 21.1 L。

2.2. 实验用水水质

原水采用主要试剂为乙酸钠、氯化铵、磷酸二氢钾, 微量元素为氯化铁、硫酸亚铁、氯化钴等, 表 1 为具体配比。

Table 1. Experimental water quality

表 1. 实验用水水质

水质指标	COD (mg/L)	氨氮(mg/L)	总磷(mg/L)	pH (mg/L)	微量元素
含量及 pH	300~350	40~55	1.5~5	7~8	——

2.3. 水质指标分析方法

Table 2. Analysis method of each index

表 2. 各指标分析方法

指标	分析方法	仪器(型号)
COD	重铬酸钾法	连华 COD 测定仪 5B-3ACOD
PO43-P	钼锑抗分光光度法	紫外可见分光光度计 UV-5200
NH4+-N	纳氏试剂分光光度法	紫外可见分光光度计 UV-5200
NO2-N	N-(1-萘基)-乙二胺光度法	紫外可见分光光度计 UV-5200
NO3-N	酚二磺酸分光光度法	紫外可见分光光度计 UV-5200
pH	pH 计	雷磁 pH 计 PHB-3C
DO/温度	DO 仪	雷磁 DO 仪 JPB-607
MLSS	重量法	数显鼓风干燥箱 GZX-9030
MLVSS	马弗炉燃烧减重法	智能数显马弗炉 SX2-10-13
生物相	光学显微镜	显微镜 XSP-2CA

2.4. 实验方法

活性污泥取自哈尔滨文昌污水处理厂, 经过 1 个月的驯化培养, 反应器初期污泥浓度稳定在 3500 mg/L 左右, BOD 负荷在 0.141 [kgBOD/(kgMLSS*d)] 左右, 将其投入反应器进行实验, 共分为五个部分。第一部分, 配置 112.7、56.35、28.18、18.87 四种不同浓度梯度的 C/P 的污水, 运行 10 d 后检测出水水质 TP, 得到最适的 C/P 范围; 第二部分, 通过冰袋对污泥设置 8℃~11℃、5℃~8℃两点系列梯度浓度的低温, 对污泥进行低温驯化, 并对出水水质的 COD 氨氮、TP 进行测定记录, 并在温度达到 5℃~8℃污泥性能稳定后进行下一步; 第三部分, 通过提高污泥浓度改善污水水质, 将污泥浓度提高到 7000 mg/l

记录出水水质;第四部分,在上一阶段条件不变的情况下同时提高其污泥负荷到 0.201 [kgBOD/(kgMLSS*d)] 记录其出水指标;第五部分,进一步提高其污泥龄到 17 d,根据表 2 各指标分析方法,检测其出水水质,与低温下的出水水质进行对比,探究工艺改造的方向。

实验参数:进水流速为 200 mL/min,消化液回流流速 17%,硝化混合液(内循环)回流比为 100%~200%,污泥回流比为 100%,AAO 系统污泥龄为 16 d,MLSS 为 5000~7500 mg/L,MLVSS 为 3500~5500 mg/L,曝气量为 4*3 L/min。

3. 结果与讨论

3.1. 进水 C/P 影响

当进水 COD 浓度稳定在 300 mg/L 时,增大 TP 浓度即大 C/P,以此改变进水条件,探究污水中的 TP 去除率的变化。实验分别把 C/P 分为 I、II、III、IV 4 个区间,分别为 112.70、56.35、28.18、18.78。(见图 1)

污水中的 C/P 为 112.70 时,进水 TP 为 1 mg/L 时,运行 10 d 后最大的 TP 去除率可以达到 51%,平均去除率达到约 26%。出水中 TP 的浓度为 0.49 mg/L。C/P 为 56.35 时,进水中的 TP 浓度为 2 mg/L 时,运行 10 d 后其 TP 最大去除率可以达到约 61%,出水中 TP 浓度为 0.78 mg/L,平均去除率达到约 40%。C/P 为 28.18 时,TP 浓度为 4 mg/L 时,运行 10 d 后其 TP 的最大去除率达到约 74%,平均去除率约为 49%。C/P 为 18.78 时,TP 的浓度为 6 mg/L 时,运行 10 d 后其 TP 的最大去除率约为 62.3%,平均出去率约为 46%。可以看出,C/P 比是影响除磷系统能否正常运行的决定性因素之一,但 C/P 比太低小于 20 mg/L,进水碳源难以满足聚磷菌的营养需求而导致释磷不充分,影响好氧阶段磷的吸收,CP 比增大在一定程度上会提高除磷效果,但 C/P 比过高(超过 50)会导致进入好氧段的 COD 太高而使聚磷菌被聚糖菌淘汰掉 [10],导致其去除效果不理想。所以,该工艺的最适碳磷比在 30 左右。

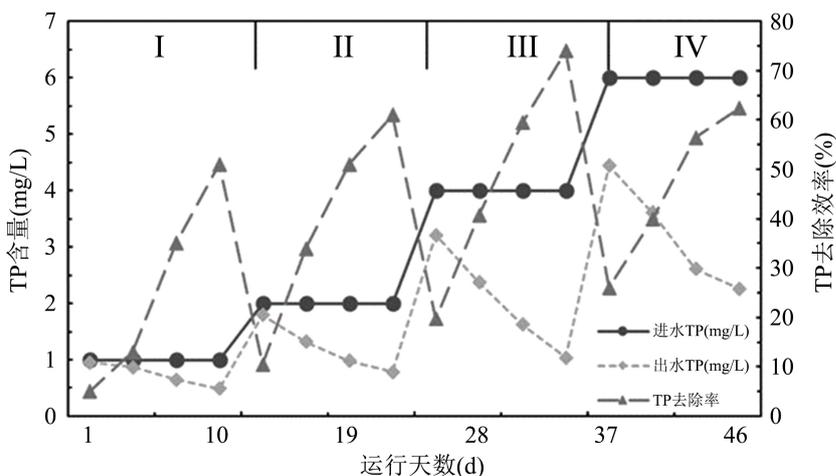


Figure 1. TP removal efficiency under different C/P conditions

图 1. 不同 C/P 条件下 TP 去除效率

3.2. 低温影响

第一阶段前半部分为活性污泥的适应期。此时 MLSS 稳定在 5000 mg/L, BOD 负荷为 0.141 [kgBOD/(kgMLSS*d)], 污泥龄为 12 d。使反应池内温度控制在 8℃~11℃。其他条件不变。在此阶段活性污泥中的异养微生物的生长代谢受到低温影响,由图 2、图 3 和图 4 可知,运行初期测得的 COD 去除率

仅有 12%，氨氮为 36.25%，TP 为 5.83%。这是由于温度突然的下降，活性污泥内的异养微生物活性大幅降低，导致处理效率极低。运行 3 d 之后去除率有了一定程度的提升，随着时间的增加上升幅度也加大。该阶段的最后一天，各参数达到了此阶段最高的去除率，COD 46.67%，氨氮为 42.25%，TP 为 15%。该阶段说明低温对微生物处理污水有个关键性影响，温度越低，微生物活性越低，活性污泥内细菌的驯化适应的时间更长，活性污泥中的异养微生物的生长周期变长，反应器内需要适应新温度的时间也就越长，对污水处理有不小的影响。尤其是对除 P 的影响，低温影响了聚磷菌的生长代谢[11]，使得反应器厌氧释磷，好氧吸磷的过程受到了抑制，使得总磷的初始去除率极低。

第一阶段后半部分为活性污泥的逐渐稳定期。在污泥适应预低温的条件下，进一步降低温度到 5℃~8℃。由图 2、图 3 和图 4 可知，该阶段前 3 d 的各参数去除率比适应期的还要低，之后，COD 和氨氮去除率开始进行缓慢增长，但 TP 的去除率却持续下降，这是因为低温严重影响了活性污泥中聚磷菌的低的总活性，一周之后才有所增长。该稳定阶段后期 COD 去除率变化幅度较小，在 30% 上下小幅度波动，证明已达到极限，最高去除率为 33%，比第一阶段的最大去除率低了将近 13%。该阶段表明微生物适应低温条件后，处理效率陆续有所起色。但与水质标准相比依旧相差甚远，因此需要改变其他条件来达到预期处理效果。

3.3. 污泥浓度影响

第二阶段，反应器内污水水温与上一阶段保持一致仍为 5℃~8℃，其他条件不变，MLSS 提高到 7000 mg/L。由图 2、图 3 和图 4 可知，此阶段反应器 COD、氨氮去除率呈线性增长趋势，COD 的平均去除率为 40.07%，比上一阶段 COD 平均去除率 23.67% 高出了 16.4%，且在最后一天达到了该阶段最高去除率 49.33%；氨氮的平均去除率为 50.25%，比第二阶段平均去除率 41.67% 高 8.58%，最高去除率为 52.44% 也比上一阶段最高去除率高了约 7%。TP 去除率前期上升，中后期逐渐平稳，虽然污泥浓度提高，菌群增多，但相应的污泥负荷降低，污泥内源呼吸减少，导致活性污泥处理污水的效能受限。第三阶段的 TP 平均去除率为 37.43%，比上一阶段 TP 平均去除率 14.24% 高出 23.19%，且本阶段最高去除率为 40.17%，出水水质均 < 5 mg/L，达到了 TP 的三级排放标准。

3.4. 污泥负荷影响

第三阶段，其他条件与第二阶段保持不变，污泥负荷提高 0.201 [kgBOD/(kgMLSS*d)]。随着污泥浓度的提高和活性污泥中的微生物的长期适应，微生物生物量以及单元去除能力逐渐提高，单位质量的活性污泥在单位时间内所去除的污染物的量有所提高，所需要的对碳源的需求也增多。因此第四阶段，通过增加进水量，相应的来提升污泥负荷。此时的 COD、氨氮、TP 去除率之间的增长趋势无太大差别，均呈缓慢增长且增幅较低。由图 3-2、图 3-3 和图 3-4 可知，该阶段 COD 去除率平均值为 52.27%，比上一阶段平均去除率 40.07% 高了 12.2%，最高去除率 57.68% 比第三阶段高了 8.35%；平均氨氮去除率为 58.85%，比第四阶段平均去除率 50.25% 高了 8.6%，最高去除率 60.75% 比上一阶段高了 8.31%；平均 TP 去除率为 46.13%，比第三阶段 TP 平均去除率 37.43% 高了 8.7%，最高去除率 47.33%，较上一阶段上升了 7.16%，三项指标去除率增幅明显较上一阶段小，且此阶段依旧只有 TP 达到了三级排放标准。

3.5. 污泥龄影响

第四阶段，其他条件与第三阶段保持不变，污泥龄更改为 16 d。污泥龄直接关系着污泥活性和微生物菌群的特性，由于低温使得微生物运行周期延长，原先 12 d 的污泥龄使得反硝化聚磷菌和异养菌未完成消化与反硝化作用而被逐步排出[12]，菌群的减少导致污水的处理效果变差，因此选择提高污泥龄至 16 d 来进一步提高处理效率。各参数去除效率波动中逐步提高，由图 2、图 3 和图 4 可知最终运行结果。

该阶段 COD 去除率平均值为 65.13%比第二阶段 COD 去除率平均值 52.27%高出 13.14%，COD 最终去除率达 69%，最终出水 COD 为 93 mg/L，达到生活污水二级排放标准；TP 去除率平均值 47.50%比第三阶段高了 2.37%，TP 最终去除率达 50.33%，最终 TP 出水为 2.98 mg/L，达到生活污水二级排放标准；平均氨氮去除率为 62.75%，比上一阶段升高了约 4%，氨氮最终去除率达 63.50%，最终氨氮出水为 14.6 mg/L，达到生活污水一级排放标准中的 B 标准。

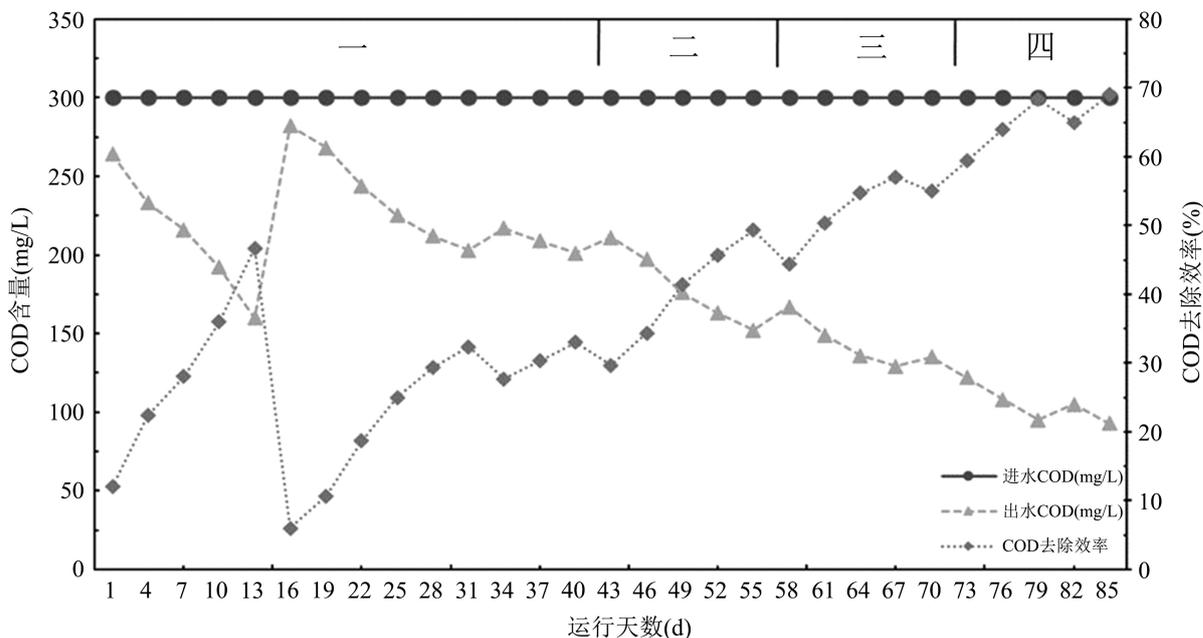


Figure 2. Reactor influent and effluent COD and COD removal efficiency
图 2. 反应器进、出水 COD 和 COD 去除效率

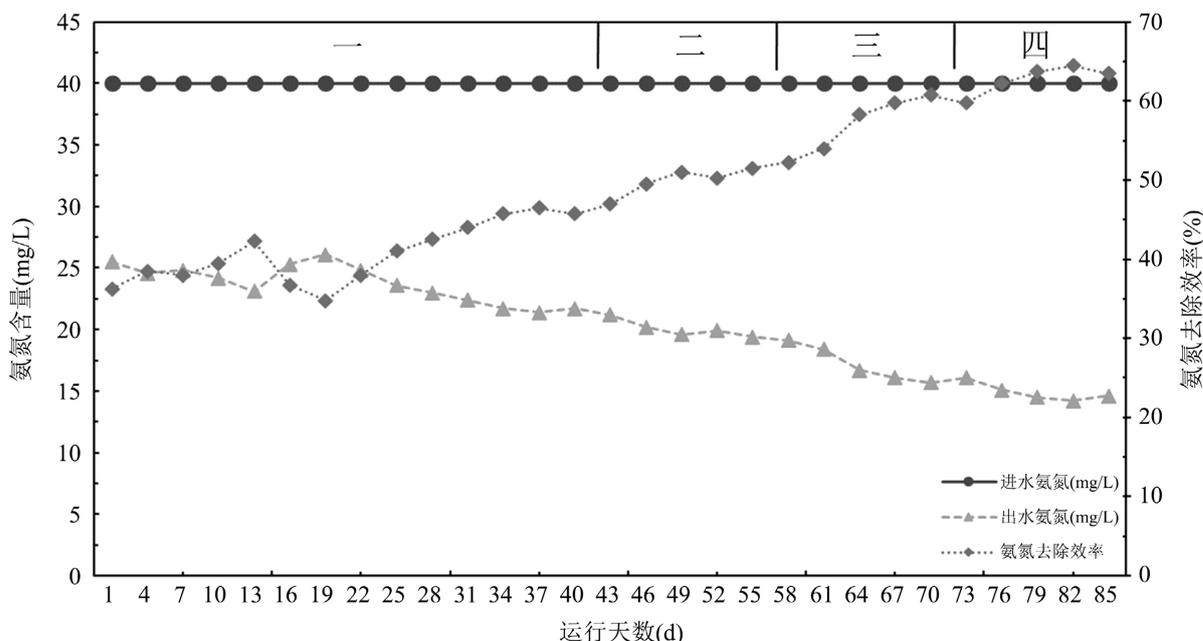


Figure 3. Reactor influent and effluent ammonia nitrogen and ammonia nitrogen removal efficiency
图 3. 反应器进、出水氨氮和氨氮去除效率

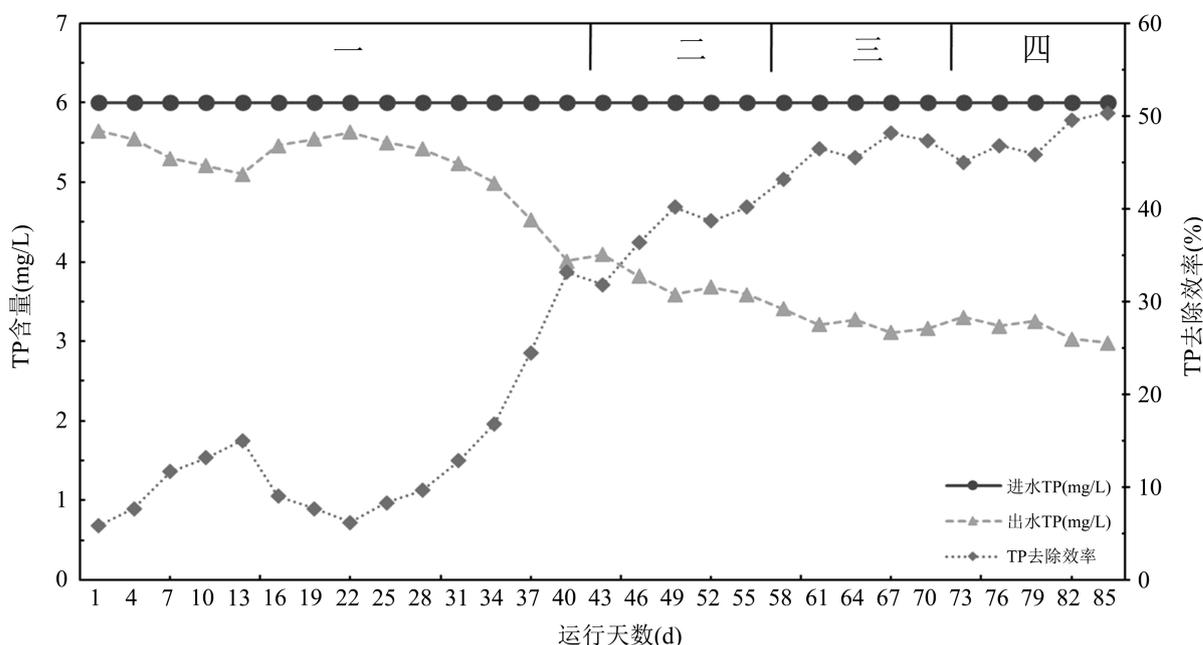


Figure 4. Reactor influent and effluent TP and TP removal efficiency

图 4. 反应器进、出水 TP 和 TP 去除效率

4. 结论

本研究与前人不同之处在于,其他相关研究采用工艺大多与本实验不同,如 AO、SBR 等传统工艺,本实验采用了改进的 AAO 工艺,其已被广泛用于处理生活污水;其次,目前国内对于低温(10℃)、低 C/P 条件下处理生活污水的相关研究较少,改变反硝化处理生活污水运行参数来提高污水处理效率的实验大多都针对的是常温条件下的生活污水,而对北方生活污水的冬季低温污水处理的指导性和针对性不强。尽管其他研究的出水 COD 及氮、磷等指标一般可稳定于一级 A 标准,但其实验数据及结果对北方生活污水尤其是冬季污水处理的参考价值有限。

本实验得出的结果是,进水 C/P 影响 AAO 除磷效果,最适碳磷比在 30 左右。提高污泥浓度和污泥龄,可以抵消低温对除磷效果的影响。在低温(5℃~8℃)、低 C/P (50)的条件下,采用 AAO 反硝化除磷工艺,将污泥浓度提高到 7000 mg/L 左右,污泥龄提高到 17 d,在污泥负荷为 0.201 [kgBOD/(kgMLSS*d)] 时,处理实验室自配污水(COD:TN:TP = 300:30:6)。出水水质中 COD 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》GB18918-2002 中的二级标准,氨氮达到一级排放 B 标准,TP 达到三级标准。

参考文献

- [1] 侯红娟,王洪洋,周琪. 进水 COD 浓度及 C/N 值对脱氮效果的影响[J]. 中国给水排水, 2005(12): 19-23.
- [2] 王晓莲,王淑莹,彭永臻. 进水 C/P 比对 A²/O 工艺性能的影响[J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1765-1770.
- [3] Zhang, Y.P., Peng, Y.Z., Wang, S.Y. and Wang, S.P. (2005) Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Denitrifying Dephosphatation in a (AO)₂ Sequencing Batch Reactor. *Journal of Beijing Institute of Technology (English Edition)*, **14**, 104-108.
- [4] 王晓莲,王淑莹,王亚宜,彭永臻. 强化 A²/O 工艺反硝化除磷性能的运行控制策略[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 722-727. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2006.05.004>
- [5] 李金页,郑平,梅玲玲. 反硝化除磷工艺及其特点[J]. 科技通报, 2006, 22(6): 882-886.
- [6] 刘钢,谌建宇,黄荣新,王振兴,陈泽涛,朱亮,徐向阳. 新型后置反硝化工艺处理低 C/N(C/P)比污水脱氮除磷性能研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 2979-2986.

-
- [7] Zhou, H.X., Li, X., Xu, G., *et al.* (2018) Overview of Strategies for Enhanced Treatment of Municipal/Domestic Wastewater at Low Temperature. *Science of the Total Environment*, **643**, 225-237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.100>
- [8] 金羽, 李建政, 马放, 赫俊国. A²/O 系统在低温和中温条件下的启动运行特征[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1): 61-65. <https://doi.org/10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2014.01.018>
- [9] Liu, S. and Li, J. (2015) Accumulation and Isolation of Simultaneous Denitrifying Polyphosphate-Accumulating Organisms in an Improved Sequencing Batch Reactor System at Low Temperature. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **100**, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.02.003>
- [10] 申沛, 陈银广, 张超. 影响聚磷菌与聚糖菌竞争的关键因素研究进展[J]. 四川环境, 2008, 27(1): 73-75+86.
- [11] 王亚宜, 王淑莹, 彭永臻, 祝贵兵, 令云芳. 污水有机碳源特征及温度对反硝化聚磷的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(2): 186-192.
- [12] 黄健平, 闫阁, 卞晓崢, 程鹏. 反硝化除磷污水处理工艺影响因素分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 100-106.