



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202101059 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

王启镛, 李浩, 董旭, 等. 改良型 A²/O 污水处理厂的工艺优化调控方案及其对同步脱氮除磷效率的提升[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 659-665. [WANG Qibin, LI Hao, DONG Xu, et al. Process optimization regulation scheme of a full-scale modified A²/O wastewater treatment plant and its improvement of simultaneous nitrogen and phosphorus removal efficiency[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 659-665.]

改良型 A²/O 污水处理厂的工艺优化调控方案及其对同步脱氮除磷效率的提升

王启镛, 李浩, 董旭, 卢伟, 汪力[✉], 杜建丽, 李建伟, 陈磊

北控水务(中国)投资有限公司, 北京 100102

摘要 以一座处理规模为 10×10⁴ m³·d⁻¹ 的市政污水处理厂为研究对象, 分析了优化调控参数对系统污水处理效果的影响, 并探讨了各构筑物对脱氮除磷的贡献。结果表明: 在改变曝气及回流方式后, 出水 TN 和 TP 同步下降; 厌氧池为氮磷去除的主要场所, TN、TP 在厌氧池中的削减量分别占其总削减量的 70.8% 和 89.5%; 在生物除磷实验中, 厌氧段平均释磷速率(以每克 VSS 计)为 3.35 mg·h⁻¹; 好氧吸磷和缺氧吸磷实验证实, 反硝化除磷菌(DPAO)占生物聚磷菌(PAO)的 90% 以上, 且 DPAO 可在好氧段吸磷。在对工艺进行优化调控后, 系统出水水质均可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准, 同时还可实现节能降耗、降低污水处理成本。本研究结果可为同类市政污水处理厂的性能提升提供参考。

关键词 改良型 A²/O 工艺; 市政污水; 反硝化除磷; 运行成本

为防止自然水体出现富营养化现象, 我国提高了污水处理厂氮磷排放标准^[1-2]。排放标准的提高即对传统脱氮除磷工艺的处理效率提出了更高要求。生物脱氮工艺包括硝化和反硝化 2 个阶段: 氨氧化菌和亚硝酸菌先后将氨氮氧化为亚硝态氮及硝态氮; 反硝化细菌利用有机碳提供电子供体将硝态氮还原为氮气, 从水中溢出以实现脱氮^[3]。污水中的磷则通过消化污泥和水两条路线实现去除或回收, 而从水线中去除或回收磷更为稳定, 也更为经济^[4-5]。

在传统活性污泥法系统中, 生物脱氮和生物除磷在污泥龄、碳源、硝酸盐的存在与转化等方面存在一定矛盾^[6], 且实现生物脱氮除磷的效率普遍较低。在常规 A²/O 工艺中, 污水依次通过厌氧池、缺氧池和好氧池, 而回流污泥会将一部分硝酸盐带回厌氧区, 硝酸盐的存在使得反硝化菌优先争夺了进水的碳源, 因而严重影响了聚磷菌(phosphorus accumulating bacteria, PAO)的释磷效率, 进而影响系统除磷效率^[7-8]。我国污水处理厂的进水普遍呈现 C/N、C/P 均较低的状态, 80% 以上的进水 BOD₅/TN 小于 3.6, BOD₅/TP 平均为 27, 生物脱氮除磷的效果不甚理想^[9]。因此, 为提高脱氮除磷效率, 确保出水氮磷指标达标, 往往需要投加药剂^[10], 这使得污水处理厂处理成本增加。

污水处理厂是个复杂系统, 涉及诸多影响污水处理效率及运行成本的不可控因素(如水质、水温等), 以及可控因素(曝气量、加药量、污泥浓度等)。在污水处理厂运行中, 应充分发挥可控因素的主导作用, 挖掘工艺潜力, 促进优势菌种代谢活力, 以提升污染物去除效率并降低处理成

收稿日期: 2021-01-09; 录用日期: 2021-07-07

第一作者: 王启镛(1983—), 男, 博士, 高级工程师, wangqibin188@163.com; ✉通信作者: 汪力(1977—), 男, 博士, 高级工程师, wangli@bewg.net.cn

本。反硝化除磷菌 (denitrifying phosphorus accumulating bacteria, DPAO) 具有“一碳两用”的“技能”，能节省碳源、减少污泥产量，因而一直是研究热点^[11-13]。在实际运行中，应注重工艺优化调控对 DPAO 的影响，发挥其重要作用，进而促进活性污泥系统同步脱氮除磷效率的提升及系统运行管理的优化。

本研究以我国西南地区某污水处理厂 (处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) 为例，对污水处理工艺进行优化调控，考察调控措施对系统运行性能的影响，解析优化后系统同步脱氮除磷的过程，并探讨工艺优化后的运行特点，以期为提高同类污水处理厂的运行效率提供参考。

1 案例概况与分析方法

1.1 污水处理厂工艺流程

本案例位于我国西南地区某市，该污水处理厂的设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ，主要处理生活污水及少量工业废水，采用改良型 A^2/O 微孔曝气 Carrousel 氧化沟工艺。工程分 2 期建设，每期的处理规模均为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。一期工程的生化池分 2 组，分别为 1[#]池和 2[#]池；二期工程的生化池分 2 组，分别为 3[#]池和 4[#]池。这两期工程的构筑物参数基本一致，生化池的布置如图 1 所示。

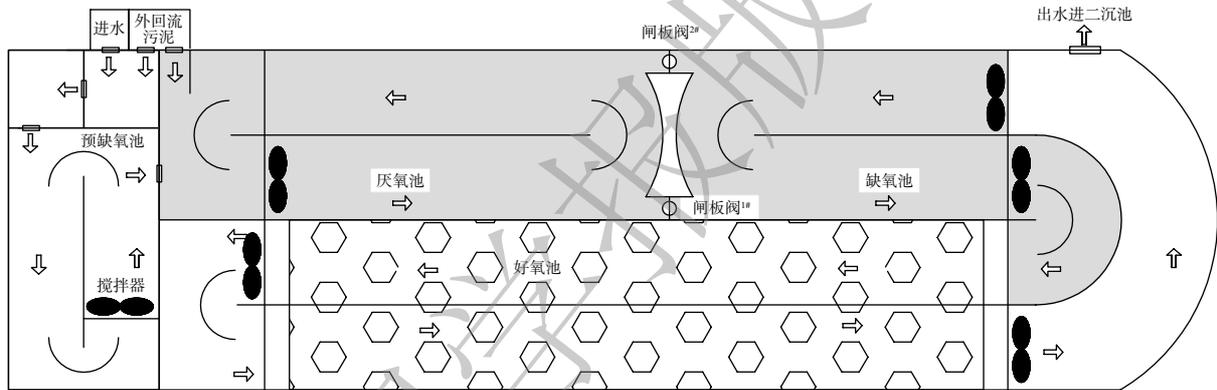


图 1 生化池平面布置图

Fig. 1 Schematic diagram of the biochemical tanks

1.2 工艺优化调控的内容

该污水处理厂的工艺优化调控内容主要体现在生化池运行方式方面。生化池的池型具有完全混合及推流模式的特点，活性污泥浓度变化系数小，进水迅速被稀释，系统的抗冲击负荷能力强。预缺氧、厌氧、缺氧、好氧段的水力停留时间 (HRT) 分别为 0.5、1.3、1.8 和 5.6 h。设计污泥龄为 10~15 d，污泥外回流比为 100%。通过闸板阀可调节进入预缺氧池和厌氧池的污泥量；混合液回流量采用闸板控制，利用好氧区已有水下推流器将混合液送至缺氧区或厌氧区，可省去常规的内回流泵，起到节省电耗的作用。

优化调控包括 2 个方面：1) 通过关闭部分曝气立管阀门，减少曝气量，调节系统供氧量；2) 通过调整闸板开合，改变回流方式，充分发挥反硝化除磷菌的作用。

1.3 污水特性

该污水处理厂设计进出水水质如表 1 所示。各项出水指标均达到 GB18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标排放标准。该污水处理厂的实际进水水质如表 2 所示。进水水质各指标的波动较大，COD、TP、TN 等指标最大值远超设计进水指标，某些指标最大值甚至超过平均值的 2 倍。

表 1 设计进出水水质

Table 1 Design values of influent and effluent qualities

取样点	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	NH ₄ ⁺ -N/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH
进水	≤250	≤150	≤250	≤30	≤4	≤40	6~9
出水	≤50	≤10	≤10	≤5	≤0.5	≤15	6~9

1.4 除磷过程分析方法

1) 生物释磷过程。取外回流污泥淘洗3遍, 稀释3倍后取均匀混合污泥检测混合液悬浮固体浓度 (MLSS)、污泥挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 等指标; 再投加乙酸钠 (以COD计, 质量浓度约为 200 mg·L⁻¹) 并对污泥进行搅拌; 分别在反应时间为 15、30、60、90 和 120 min 时进行取样; 过滤样品并测定其中的正磷酸盐质量浓度和 COD。实验温度控制在 (25±1)°C

2) 好氧吸磷和缺氧吸磷过程。参照上述步骤使污泥保持在厌氧条件; 为去除 PO₄³⁻-P 和剩余部分碳源, 再将释磷后的污泥淘洗 2 遍; 加入磷酸二氢钠, 控制磷酸盐质量浓度为 20 mg·L⁻¹; 将污泥分为 2 份, 对其中 1 个容器进行曝气 (溶解氧的质量浓度大于 3 mg·L⁻¹), 在另一容器中加入过量硝酸盐 (硝态氮的质量分数约 7 mg·g⁻¹, 以每克 MLSS 计) 并搅拌; 在反应时间分别为 15、30、60 和 120 min 时, 过滤 2 个容器中的样品并测定滤液中的正磷酸盐质量浓度。实验温度控制在 (25±1)°C。

1.5 水质分析方法

COD、PO₄³⁻-P、TP、NH₄⁺-N 和 TN 等水质指标, 以及 MLSS、MLVSS 等污泥指标均按《水和废水检测分析方法》(第4版)测定。采用质量平衡分析法分析构筑物对污染物去除的贡献^[14]。基于物料守恒原理, 根据每组池中流入/流出的水量及相应污染物质量浓度, 算出污染物的削减量, 即可计算该构筑物对去除某污染物的贡献率。以缺氧池为例, 具体计算方程如式 (1) 所示。

$$Q_0 \cdot C_{\text{inf.C,N,P}} + Q_r \cdot C_{r.C,N,P} = (Q_0 + Q_r) \cdot C_{\text{eff.C,N,P}} + \Delta A_{\text{an.C,N,P}} \quad (1)$$

式中: $\Delta A_{\text{an.C,N,P}}$ 指缺氧池内污染物的削减容量, kg·d⁻¹; Q_0 与 Q_r 分别指进水流量及内回流量, m³·d⁻¹; C_r 指内回流硝化液中污染物的浓度, g·m⁻³; C_{inf} 、 C_{eff} 分别指构筑物进水及出水的污染物浓度, g·m⁻³; C、N、P 分别指 COD、TN 及 TP。预缺氧池、厌氧池及好氧池对污染物的削减量亦可参照式 (1) 计算。

2 结果分析与讨论

2.1 优化曝气方式前后的效果对比

每组生化池好氧区均设有 16 根曝气管, 每根曝气管通过阀门调整开度。对好氧区曝气系统进行优化, 关闭好氧区后端 5 根曝气管的阀门, 平均曝气量由 8 800 m³·h⁻¹ 降至 7 000 m³·h⁻¹, 好氧区末端的平均 DO 从 2.5 mg·L⁻¹ 降至低于 1.0 mg·L⁻¹。在搅拌器及水流的推动下, 混合液中的溶解氧继续往好氧区后端较快流动。尽管部分曝气管被关闭, 但从溶解氧数值上来看, 系统仍处于好氧状态, 故好氧段的 HRT 并未缩短。虽然进水 COD 波动较大 (80 ~ 526 mg·L⁻¹), 但是出水 COD 十分稳定, 始终低于 30 mg·L⁻¹ (见图 2(a)), 说明进水 COD 的波动对出水影响很小。如图 2(b) 所示, 系统对 NH₄⁺-N 的处理较稳定, 出水 NH₄⁺-N 始终低于 5 mg·L⁻¹, 大多数情况 NH₄⁺-N 均小于 1 mg·L⁻¹。上述结果表明, 尽管曝气量的下降抑制了系统的硝化效果, 使得出水 NH₄⁺-N 时有上升, 但是系统的硝化效果仍能使出水 NH₄⁺-N 达标, 说明调控前系统存在过曝情况。进水 TN (见图 2(c)) 及 TP (见图 2(d)) 波动较大, 而出水 TN 和 TP 在调控前后变化较明显。调控前, 污水处理厂出水平均 TN 为 9.1 mg·L⁻¹。经过优化曝气系统后, 出水 TN 平均值降至 7.0 mg·L⁻¹, 出水 TP 平均值为 0.21 mg·L⁻¹, 2 种指标均更稳定。

以上数据表明, 该污水处理厂的出水 COD、NH₄⁺-N、TN、TP 指标均可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 一级 A 标准 (COD < 50 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N < 5 mg·L⁻¹, TN < 15 mg·L⁻¹,

表 2 污水处理厂进水水质

Table 2 Influent quality of the WWTP

统计值	COD/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	C/N	C/P	pH
最小值	74	0.5	11.8	9.7	2.5	12.6	7
最大值	679	14.3	88.9	43.2	15	128.3	8.4
平均值	281	5	33.9	26.1	8.6	67.6	7.5

注: C/N为COD/TN; C/P为COD/TP。

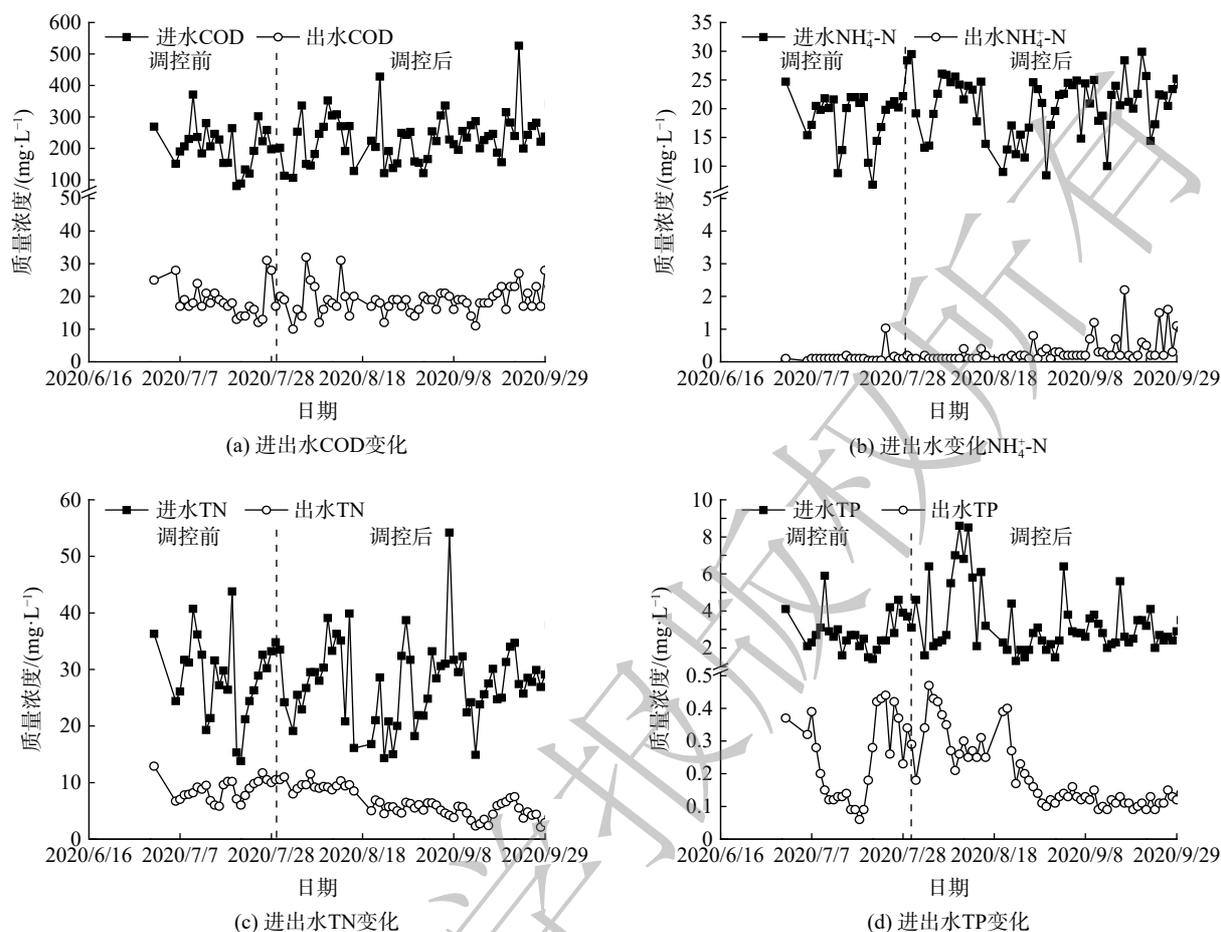


图2 污水处理厂优化曝气方式前后对污染物去除情况

Fig. 2 Removal of pollutants before and after optimization of aeration in the WWTP

TP $<0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。优化曝气系统后,曝气量减少了20%,在出水水质指标达标的前提下,节能效果显著。随着缺氧区溶解氧由 $0.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,厌氧区溶解氧由 $0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,故在好氧池能与进水耗氧污染物(以COD计)反应的溶解氧大量减少,进而可提高进水碳源利用率。在PAO的代谢过程中,有3种起重要作用的化合物:聚磷酸盐、糖元质、聚- β -羟丁酸(PHB)。过量曝气发生时,PAO在快速氧化完PHB之后会氧化糖元质,使得PAO在厌氧条件下吸收易降解有机物的能力降低,因而会对生物吸磷产生不利影响^[15]。另外,内源聚合物的积累对反硝化脱氮有重要作用,过量曝气会使PAO快速氧化完并会消耗内源聚合物^[16],进而影响脱氮效率。因此,控制适宜的曝气量除了可促进生物脱氮除磷,还可降低曝气能耗。

2.2 改变回流方式后各工艺段对污染物去除的贡献对比

采用质量守恒分析方法研究不同生化池对污染物去除量的贡献,可为污水处理过程的控制提供参考。如图3所示,COD的去除主要发生在预缺氧池,占总去除量的68.9%,其主要作用为异养菌对有机物的吸收、活性污泥对有机物的吸附等;而23.0%的COD在厌氧池被去除。在预缺氧池中,有明显的释磷现象发生。预缺氧池出水磷含量为进水的3.7倍,表明生物释磷效果良好。在HRT为0.5 h时,预缺氧段不仅能去除外回流液中的硝态氮,其生物释磷作用也很明显,说明反硝化菌和PAO在该池段内具有较高的反应速率。在厌氧池中,89.5%的TP被去除,70.8%的TN被去除。开启闸板阀2[#](见图1)后,污泥通过内回流进入厌氧区,带入大量的硝酸盐,产生了明显的反硝化现象。

综上所述,厌氧池为脱氮除磷的主要场所,对氮磷的去除贡献均超过70%。同时,这表明在

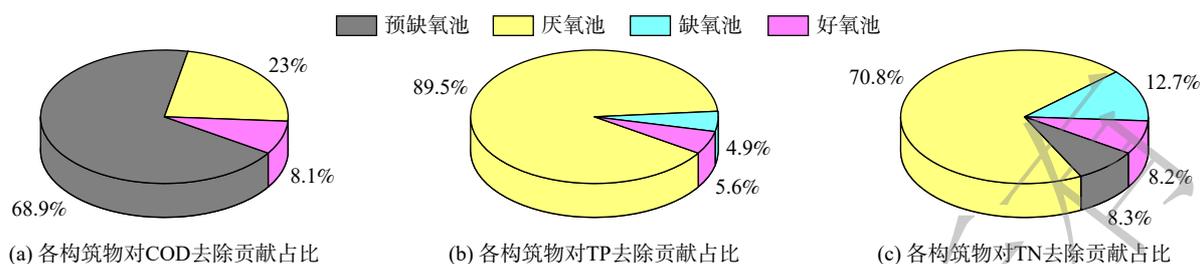


图3 生化池不同构筑物对各类污染物的去除贡献

Fig. 3 Contribution of different structures in biochemical pond to removal of various pollutants

厌氧池内发生了明显的反硝化除磷现象, 实现了“一碳两用”, 节约了碳源, 也节约了好氧吸磷所需要的曝气量。

2.3 优化调控后系统的生物除磷过程

取外回流污泥, 分析了厌氧状态下其释磷情况及释磷速率, 结果如图4所示。投加过量乙酸钠后, 反应进行至15 min时, 水中磷的质量浓度快速升至 $6.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 相应的释磷速率(以每克VSS降解的磷质量浓度计, 下同)达到 $8.7 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$ 。随后, 尽管释放的磷酸根不断增多, 但是释磷速率呈下降趋势。反应进行至120 min时, 污泥中磷酸根达到 $18.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均释磷速率为 $3.35 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$ 。此时的释磷速率较快, 表明活性污泥中PAO量多。

将释磷后的污泥清洗2遍, 再进行吸磷实验, 结果如图5所示。吸磷在2种状态下进行: 曝气状态(好氧)和硝酸盐状态(缺氧)。最初的15 min, 好氧和缺氧状态的吸磷速率(以每克VSS吸收的磷质量浓度计, 下同)分别达到 6.9 和 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$, 好氧吸磷速率明显快于缺氧吸磷速率。这是由于在吸磷过程中, 起始阶段的PAO体内有充足聚羟基脂肪酸酯(polyhydroxyalkanoates, PHAs), 分子氧更易被PAO利用, 故吸磷速率较高。在没有分子氧的环境中, DPAO迫切需要利用硝酸盐氧化细胞内贮存的PHAs, 进行呼吸作用实现能量储存, 并从环境中实现对磷的吸收, 从而达到同步反硝化和超量吸磷的效果, 最终达到提升脱氮除磷效率的目的。反应进行至120 min时, 活性污泥在好氧及缺氧状态下的吸磷速率相差不大, 此时磷的削减量分别为 11.51 mg 、 10.75 mg 。该结果表明, PAO可在好氧或缺氧状态下吸磷, 且在好氧状态下吸磷效果更佳, 证实PAO中90%以上为DPAO。这2种吸磷过程均存在过量吸磷和微生物合成作用消耗磷的情况, 但由于停留时间较短, 污泥产量较少, 可忽略微生物合成作用, 所以可推断大多数磷酸盐是被PAO所吸收去除。因此, 可利用该方法来估算微生物菌DPAO在PAO中的占比。

反应进行至120 min时, 缺氧状态下微生物吸收的磷酸盐及去除的硝酸盐分别为 10.75 mg 、

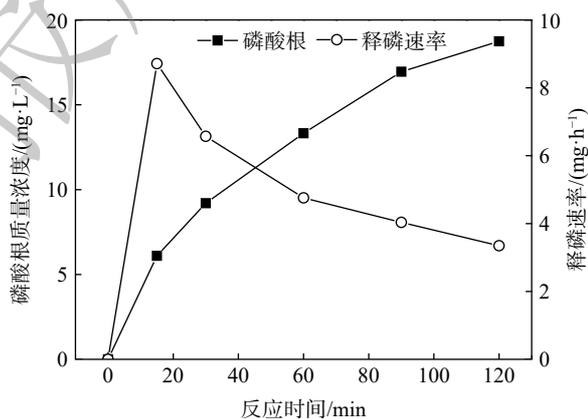


图4 厌氧状态下活性污泥释磷情况及释磷速率

Fig. 4 Phosphorus release and release rate of activated sludge under anaerobic condition

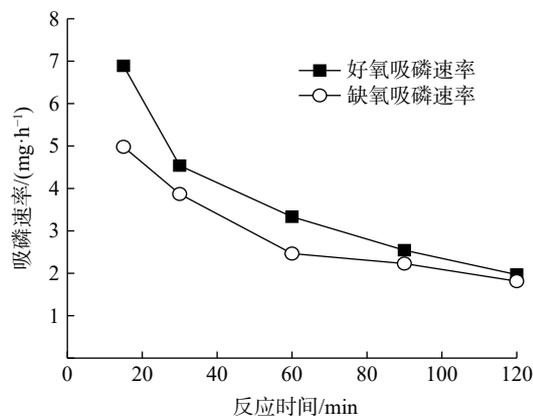


图5 活性污泥在好氧及缺氧状态下的吸磷速率

Fig. 5 Phosphorus uptake rate of activated sludge under aerobic and anoxic conditions

7.92 mg, 其比例 ($\Delta\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\Delta\text{NO}_3\text{-N}$) 为 1.36。刘建广等^[17]的研究表明, 缺氧阶段每消耗 1 mg $\text{NO}_3\text{-N}$ 吸收约 1 mg $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 故系统中足量的硝酸盐可促进缺氧吸磷的发生。在实验过程中, 若混合液中残留氧气较多, 将导致 $\Delta\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\Delta\text{NO}_3\text{-N}$ 大于 1。这是由于氧气的存在会促进磷的吸收。HU 等^[18]研究了厌氧/缺氧 (A/A) 条件下驯化污泥中微生物以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 O_2 3 种物质为电子受体的反硝化除磷作用, 发现只有少数微生物仅以 O_2 为电子受体, 大部分 PAO 能以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 O_2 为电子受体, 超过 PAO 总量的 50%, 故可充分利用 PAO 进行反硝化除磷。RONG 等^[19]发现, 当 SBR 反应器在低溶解氧 (1 ± 0.3) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的短好氧阶段, 系统可实现硝化、内源反硝化、反硝化除磷和好氧吸磷的同步进行, 从而可节省约 65% 的曝气能耗。微生物群落分析还表明, DPAO 能同时参与脱氮除磷过程^[20]。综上所述, 精确管控溶解氧浓度对实现反硝化除磷十分重要。

2.4 优化调控后的系统特点

1) 减少曝气量实现节能降耗并提高反硝化除磷效率。生化池为完全混合式池型, 泥水混合液在厌氧池、缺氧池、好氧池内可形成大循环。其中, 好氧池末端的混合液部分流入二沉池, 其余进入缺氧池; 缺氧池的混合液部分进入好氧池, 其余进入厌氧池。当好氧池后端的曝气阀门关闭后, 系统供氧量减少, 使得好氧池末端的溶解氧较低 (低于 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 而进入缺氧池和厌氧池的溶解氧大大减少为反硝化除磷过程提供了更适宜的环境。根据沿程数据, 缺氧池出水 COD 已达排放标准, 故好氧段主要任务是削减氨氮。因此, 精确管控溶解氧指标可在实现节能降耗的同时, 提高系统的反硝化除磷效率。

2) 改变回流方式提升了系统生化处理效率。约 50% 的外回流污泥进入预缺氧池中, 利用进水中的有机质作为电子供体将外回流液中的硝态氮经反硝化去除, 进水中多余的碳源则用于生物释磷, 含有磷酸根的混合液进入厌氧池; 同时, 厌氧池和缺氧池间的闸板阀打开后, 在水流的作用下含有硝酸盐的混合液进入厌氧池。此时, 厌氧池中的硝酸盐、磷酸根及 DPAO 为反硝化除磷反应提供了有利条件, 并强化了生物脱氮除磷效果。与传统的厌氧池生物释磷作用不同, 由于进水中易降解的有机质已被 PAO 利用, 故无法继续释磷, 因此, 本案例中厌氧池成为脱氮除磷的主要场所。

3) 完全混合式池型内部的混合结构可保证系统的抗负荷冲击能力。完全混合式池型能保持池内各点水质和微生物均匀混合, 且当污水与回流污泥进入生化池后, 立即同池内原有混合液充分混合。整个系统的循环比约为 50~70 倍, 这意味着系统进水水质、水量出现波动, 甚至水质超标时, 污染物被快速稀释或降解, 出水水质依然稳定达标, 整体抗负荷冲击能力极强。

3 结论

1) 预缺氧段反硝化菌和 PAO 具有较高的反应速率, 能去除外回流液中的硝态氮, 生物释磷作用也很明显。厌氧池是氮磷去除的主要场所, 反硝化除磷效果显著, 总氮、总磷在厌氧池的削减量分别占其总削减量的 70.8% 和 89.5%。

2) 系统中存在反硝化除磷现象。好氧吸磷和缺氧吸磷实验证实, PAO 中 90% 以上为 DPAO。DPAO 亦可在好氧段吸磷。

3) 完全混合式池型系统具有很强的缓冲能力和污染物处理能力, 即使偶尔进水超标, 系统对污染物的去除效果仍较理想, 出水水质能稳定达标。

4) 改良型 A^2/O 工艺曝气系统优化后有利于 PAO、DPAO 和反硝化菌的生长, 提高了上述优势菌的生存竞争能力和协同效应, 强化了生物脱氮除磷效果, 适合直接应用于低 C/N 污水的处理。

参考文献

- [1] TANG J, WANG X C, HU Y, et al. Nutrients removal performance and sludge properties using anaerobic fermentation slurry from food waste as an external carbon source for wastewater treatment[J]. *Bioresour Technol*, 2019, 271: 125-135.
- [2] 王佳, 荣宏伟, 肖冠勋, 等. 深圳某水质净化厂 A^2/O 微曝氧化沟深度脱氮除磷工艺效果分析[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2837-2842.

- [3] CAO G., WANG S, PENG Y, et al. Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 128: 604-611.
- [4] ZHU Z, CHEN W, TAO T, et al. A novel AAO-SBSPR process based on phosphorus mass balance for nutrient removal and phosphorus recovery from municipal wastewater[J]. *Water Research*, 2018, 144: 763-773.
- [5] 王启镛, 宫徽, 朱越, 等. SBR运行模式对市政污水脱氮除磷性能的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(04): 1167-1173.
- [6] 华光辉, 张波. 城市污水生物除磷脱氮工艺中的矛盾关系及对策[J]. *给水排水*, 2000, 26(12): 1-4.
- [7] 冯云刚, 刘新安, 高荣宁, 等. UCT工艺在西安鱼化污水处理厂的设计应用与调试[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(24): 66-69.
- [8] 王攀, 彭党聪. 预缺氧池配水比对Johannesburg工艺脱氮除磷效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(4): 1645-1650.
- [9] 郭泓利, 李鑫玮, 任钦毅, 等. 全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J]. *给水排水*, 2018, 54(6): 12-15.
- [10] WANG Q, CHEN Q, CHEN J. Optimizing external carbon source addition in domestic wastewater treatment based on online sensing data and a numerical model[J]. *Water Science and Technology*, 2017, 75(11): 2716-2725.
- [11] 赵伟华, 郑姝卉, 王凯. 污水反硝化除磷技术的机理与工艺研究进展[J]. *水处理技术*, 2020, 46(7): 1-5.
- [12] 潘婷, 张森, 范亚骏, 等. 基于碳源优化的反硝化除磷及微生物特性[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(7): 2901-2908.
- [13] 李微, 高明杰, 曾飞, 等. 温度和碳源对短程反硝化除磷效果的影响[J]. *水处理技术*, 2020, 46(8): 55-59.
- [14] WANG Q, CHEN Q. Simultaneous denitrification and denitrifying phosphorus removal in a full-scale anoxic-oxic process without internal recycle treating low strength wastewater[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 39: 175-183.
- [15] HENZE M, van LOOSDRECHT M, EKAMA G A et al. *Biological wastewater treatment: principles, modelling and design*[M]. London: IWA publishing, 2008.
- [16] 崔有为, 金常林, 王好韩, 等. 碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(1): 336-342.
- [17] 刘建广, 付昆明, 杨义飞, 等. 不同电子受体对反硝化除磷菌缺氧磷的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1472-1476.
- [18] HU J Y, ONG S L, NG W J, et al. A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors[J]. *Water Research*, 2003, 37(14): 3463-3471.
- [19] RONG Y, LIU X, WEN L, et al. Advanced nutrient removal in a continuous A²/O process based on partial nitrification-anammox and denitrifying phosphorus removal[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 36: 101245.
- [20] 王启镛, 苑泉, 宫徽, 等. SBR系统在低浓度污水条件下培养好氧颗粒污泥的特性及微生物分析[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(11): 3043-3052.

(责任编辑: 靳炜)

Process optimization regulation scheme of a full-scale modified A²/O wastewater treatment plant and its improvement of simultaneous nitrogen and phosphorus removal efficiency

WANG Qibin, LI Hao, DONG Xu, LU Wei, WANG Li*, DU Jianli, LI Jianwei, CHEN Lei

Beijing Enterprises Water Group (China) Investment Limited, Beijing 100102, China

*Corresponding author, E-mail: wangli@bewg.net.cn

Abstract The influence of optimal control parameters on processing effect and the contribution of main structures to nitrogen and phosphorus removal were analyzed by taking a municipal wastewater treatment plant (WWTP) with a treatment capacity of $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ as the research object. The results showed that the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the effluent decreased simultaneously after changing the aeration and reflux modes. Anaerobic tank was the main place for nitrogen and phosphorus removal since the reduction of TN and TP in anaerobic tank accounted for 70.8% and 89.5% respectively. The biological phosphorus removal experiments showed that the anaerobic phosphorus release rate (measured by VSS) was $3.35 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ on average. Aerobic and anoxic phosphorus uptake experiments confirmed that denitrifying phosphate accumulating organisms (DPAO) accounted for over 90% of phosphate accumulating organisms (PAO), and DPAO could also absorb phosphorus in the aerobic stage. After optimizing and regulating the process, the effluent quality of treatment system could meet the class 1A standard of the Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB18918-2002), and at the same time, energy saving and consumption reduction can be realized to reduce the cost of wastewater treatment. The result of this study can provide a reference for the performance improvement of similar municipal WWTPs.

Keywords modified A²/O process; municipal wastewater; denitrifying phosphorus removal; operating cost