

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 07. 001

AOA与多段AO工艺生物脱氮除磷性能的比较

古凌艳¹, 黄文章², 王维康¹, 渠艳飞¹, 王未君², 彭永臻³

(1. 深圳市利源水务设计咨询有限公司, 广东 深圳 518030; 2. 深圳市环境水务集团有限公司, 广东 深圳 518030; 3. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用国家工程实验室 北京市污水脱氮除磷处理与过程控制工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 在深圳市福田水质净化厂构建了规模为100 m³/d的AOA工艺中试系统,详细分析了运行约6个月的生物脱氮除磷效果,并与采用多段AO工艺的该厂一期工程进行对比。结果显示,中试系统出水总氮浓度可稳定低于2 mg/L,硝酸盐氮几乎被完全脱除。相对于福田水质净化厂一期工程出水硝酸盐氮浓度约为6~8 mg/L,在总氮中的占比达80%~90%,该工艺显示出了极限脱氮能力。另外,中试在未投加除磷药剂和未配置深度处理设施的情况下,还实现了较好的生物除磷效果,出水总磷浓度稳定在0.3 mg/L以下。相对于多段AO工艺,在相同进水水质和温度条件下AOA工艺实现了优异的同步脱氮除磷效果。该中试为AOA工艺的工程化应用提供了坚实的数据支撑。

关键词: AOA工艺; 多段AO工艺; 极限脱氮; 同步生物脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0001-05

Comparison on the Simultaneous Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Performance between Pilot-scale Plant with AOA Process and Full-scale Plant with Multi-stage AO Process

GU Ling-yan¹, HUANG Wen-zhang², WANG Wei-kang¹, QU Yan-fei¹,
WANG Wei-jun², PENG Yong-zhen³

(1. Shenzhen Liyuan Water Design & Consulting Co. Ltd., Shenzhen 518030, China; 2. Shenzhen Water and Environment Group Co. Ltd., Shenzhen 518030, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Nitrogen and Phosphorus Removal with Process Control in Wastewater, National Engineering Laboratory of Urban Sewage Advanced Treatment and Resource Utilization Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A pilot system of anaerobic/oxic/anoxic (AOA) process with a treatment capacity of 100 m³/d was constructed and operated for 6 months in Futian Wastewater Treatment Plant (WWTP) in Shenzhen. The biological nitrogen and phosphorus removal efficiency was analyzed, and compared with the first phase project of the Futian WWTP that used multi-stage AO process. The effluent total nitrogen (TN) of pilot plant was as low as 2 mg/L, and nitrate (NO₃⁻-N) was almost completely removed. Comparatively, the NO₃⁻-N reached 6~8 mg/L, accounted for 80%~90% of the TN in effluent of the full-scale plant. Besides, the pilot plant achieved high biological phosphorus removal performance with

the TP concentration less than 0.3 mg/L in the effluent, without any chemical agent and advanced treatment facility. With the same influent and temperature, higher TN and TP removal performance of the AOA process was achieved than the multi-stage AO process. This pilot plant provides data support for the engineering application of AOA process.

Key words: AOA process; multi-stage AO process; ultimate denitrification; simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal

为深入贯彻《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》,实施珠江口邻近海域污染防治行动,生态环境部等六部委于2022年1月29日联合印发实施《重点海域综合治理攻坚战行动方案》。该方案的重点任务之一是实施入海河流水质改善行动,即加强沿海城市重污染海湾入海河流整治,组织制定“一河一策”入海河流治理方案,因地制宜加强总氮排放控制,实施入海河流总氮削减工程。据此,深圳市率先提出《深圳湾水环境提质攻坚行动方案(2023—2025)》,要求深圳河湾流域的水质净化厂出水总氮浓度年均值需控制在5 mg/L以下,对深圳市水质净化厂脱氮提出了更高的要求。

由于缺氧反硝化区前置并配置了硝化液回流,目前广泛应用的AAO工艺及其变种工艺存在以下问题^[1-2]:内回流携带的溶解氧破坏了前置缺氧区的缺氧环境,并消耗了部分进水碳源,导致实际反硝化反应时间缩短和碳源利用效率降低;总氮去除率上限受制于回流比,且高总氮去除率要求高回流比,从而增加了能耗。因此,研发经济合理、具有深度脱氮功能的市政污水处理工艺非常有必要。

Gao 等人^[3]研发了厌氧/好氧/缺氧污泥双回流(SDR-AOA)工艺,成功实现了低碳氮比污水的深度脱氮。AOA工艺为后置反硝化工艺,其原理类似于反硝化生物除磷过程,即在厌氧阶段,微生物将进水中的有机物转化为糖原(Gly)和聚羟基脂肪酸酯(PHAs)等形式贮存起来,并在好氧阶段保护好,在后置缺氧阶段作为反硝化碳源加以利用^[4-5],其中PHAs作为电子受体进行反硝化,Gly用以维持生长代谢^[6]。有研究表明^[7],反硝化聚糖菌(DGAOs)可在无外部碳源时利用贮存的碳源进行反硝化。理论上,AOA工艺将反硝化后置决定了其在碳源充足且停留时间足够长的条件下,能够实现近100%的反硝化率^[8]。

在福田水质净化厂构建了规模为100 m³/d的

AOA工艺中试系统,并与该厂一期工程多段AO工艺的运行效果进行比较,结果显示AOA工艺在同步生物脱氮除磷效果,尤其是深度脱氮方面,优于多段AO工艺,可以作为AOA工艺大规模工程化应用的决策和设计参考。

1 试验装置与方法

1.1 福田水质净化厂一期工程

于2016年建成通水的福田水质净化厂一期工程设计规模为40×10⁴ m³/d,总变化系数K_t=1.30,生化段采用三段式AO工艺。生化段总停留时间(HRT)为14.8 h,厌氧区、缺氧Ⅰ区、好氧Ⅰ区、缺氧Ⅱ区、好氧Ⅱ区、缺氧Ⅲ区和好氧Ⅲ区的HRT分别为1、1.8、1.8、2.3、2.3、2.8和2.8 h。具体工艺流程如图1所示。

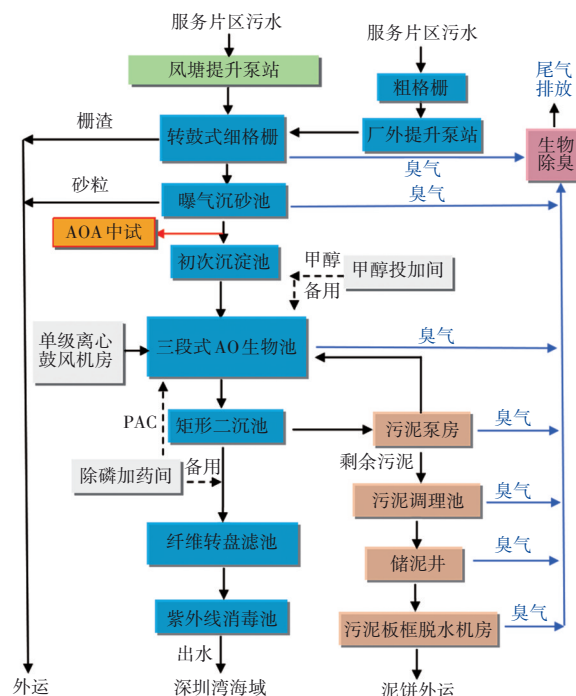


图1 福田水质净化厂一期工艺流程

Fig.1 Schematic diagram of first phase project of Futian WWTP

该厂设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,排放水体为深圳湾。其2022年的进出水水质见表1。

表1 福田水质净化厂一期工程2022年的进出水水质

Tab.1 Average concentration of influent and effluent of first phase project of Futian WWTP in 2022						
mg·L ⁻¹						
项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N	TP	TN
进水	141	276	204	21.99	3.47	28.94
出水	1.3	11.6	5	0.26	0.11	6.93

根据深圳市提出的《深圳湾水环境提质攻坚行动方案(2023—2025)》要求,该厂出水总氮浓度年均值需控制在5 mg/L以下。故以此为目标设计了AOA中试装置,并与福田水质净化厂一期工程同步运行,以比较其处理效果。

1.2 AOA中试装置

为研究AOA工艺在福田水质净化厂一期工程进水水质条件下的脱氮效果,搭建了一套处理规模为100 m³/d的AOA中试装置,总HRT为15 h,厌氧、好氧和缺氧区的HRT比例为2:2:4。采用污泥双回流系统,二沉池污泥分别回流至厌氧区和缺氧区的首端,单个回流比为75%~100%。中试装置的工艺流程如图2所示。

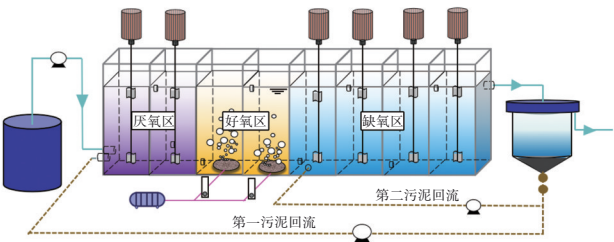


图2 福田水质净化厂AOA中试装置工艺流程
Fig.2 Schematic diagram of AOA pilot plant in Futian WWTP

中试装置配备了进出水水质在线监测系统,每2 h检测一次进出水的COD、氨氮、总磷和总氮浓度,同时为生化池配备了过程仪表——安装于厌氧区的ORP仪,安装于好氧区的氨氮检测仪、污泥浓度计和溶解氧仪,安装于缺氧区的硝酸盐氮仪、亚硝酸盐氮仪和污泥浓度计。同时,为中试装置开发了自控平台,用于收集展示过程仪表和进出水在线监测系统以及关键设备状态数据,并配置了基于溶解氧和氨氮的双参数工艺自控系统。

2 结果与讨论

2.1 污泥接种及培养

接种污泥取自福田水质净化厂一期工程生化池,MLSS约为5 600 mg/L,结合此前于深圳滨河和福永两座水质净化厂开展的类似中试积累的经验,控制接种污泥浓度在4 000~5 000 mg/L,培养期间好氧区溶解氧控制在2~3 mg/L,总回流比控制在100%~200%。中试装置于2023年4月1日通水,在4月11日开始取样分析,出水总氮就已达4 mg/L以下,仅用了不到2周时间就顺利完成了污泥培养。

2.2 进出水水质及工艺运行参数

自2023年4月中旬污泥培养完成后中试装置已稳定运行6个月,期间中试装置及净化厂一期工程(含化学除磷及滤布滤池)的进出水水质见表2。

表2 中试与福田水质净化厂一期工程除污效果对比

Tab.2 Comparison of pollutants removal between AOA pilot plant and Futian WWTP						
项目		BOD ₅	COD	NH ₃ -N	TP	TN
进水范围/(mg·L ⁻¹)		56.6~246	78~702	12~28.7	1~7.7	16~43.6
进水均值/(mg·L ⁻¹)		123	235	20.84	3.57	28.50
AOA中试	出水范围/(mg·L ⁻¹)	1~3.8	3~29	0.12~1.33	0.09~0.8	0.38~3.31
	出水均值/(mg·L ⁻¹)	2.2	14.2	0.34	0.27	1.26
	去除率/%	98.3	93.3	98.4	92.0	95.5
多段AO污水厂	出水范围/(mg·L ⁻¹)	0.5~2.4	5~17	0.02~1.61	0.02~0.3	3.24~9.80
	出水均值/(mg·L ⁻¹)	2	13	0.41	0.10	7.66
	去除率/%	98.6	95.5	98.2	97.1	74.6

在未投加外部碳源的情况下,中试装置的出水总氮浓度已稳定在3.5 mg/L以下,最后一个月稳定达到2 mg/L以下,均值仅为1.26 mg/L(其中硝酸盐氮约为0.5 mg/L),去除率达95%以上。同时,未投加化学除磷药剂且未经深度处理的二沉池出水总磷浓度均值达到0.3 mg/L以下,实现了较好的同步生物脱氮除磷效果。而在同期福田水质净化厂一期工程的出水总氮和总磷平均浓度分别为7.66、0.10 mg/L,去除率分别为74.6%和97.1%,但这是在投加了约20 mg/L化学除磷药剂(PAC),并经滤布滤池处理的情况下达成的。统计分析该厂多年来的出水TN组成,发现其硝酸盐氮约占80%~90%,浓

度达6~8 mg/L,可见其反硝化进行得不够彻底。

中试装置和福田水质净化厂一期工程的运行参数对比如表3所示。两种工艺厌氧区的DO<0.2 mg/L,缺氧区DO<0.5 mg/L,好氧区DO分别控制在1~2.5、>2 mg/L。

表3 中试与福田水质净化厂一期工程工艺参数对比

Tab.3 Comparison of design parameters between AOA pilot plant and Futian WWTP

工艺参数	AOA中试	多段AO污水厂
水温/℃	25~30	25~30
进水水量负荷/%	50~130	85~120
总HRT/h	15	14.8
厌氧、好氧、缺氧容积比	1:2:4	1:6.9:6.9
污泥浓度/(mg·L ⁻¹)	3 500~6 000	4 500~6 000
外回流比/%	100~200	80~100
内回流比/%		100~130
污泥负荷/(kgBOD ₅ ·kg ⁻¹ MLSS·d ⁻¹)	0.04~0.05	0.04~0.05

2.3 过程变化分析

在中试装置稳定运行期间,多次采样检测分析得到如图3所示的沿程COD、TP和氮浓度,以及考虑污泥回流稀释作用后的去除率均值。

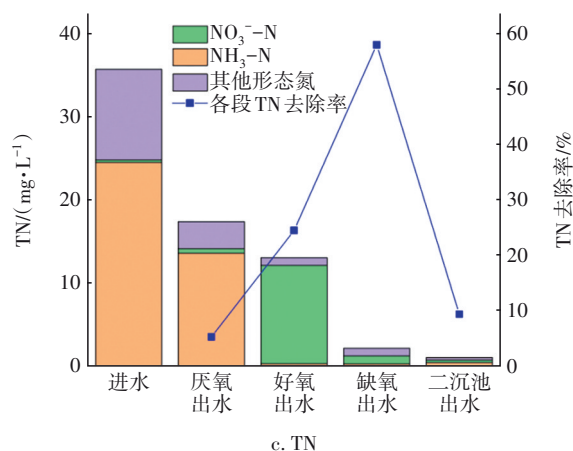
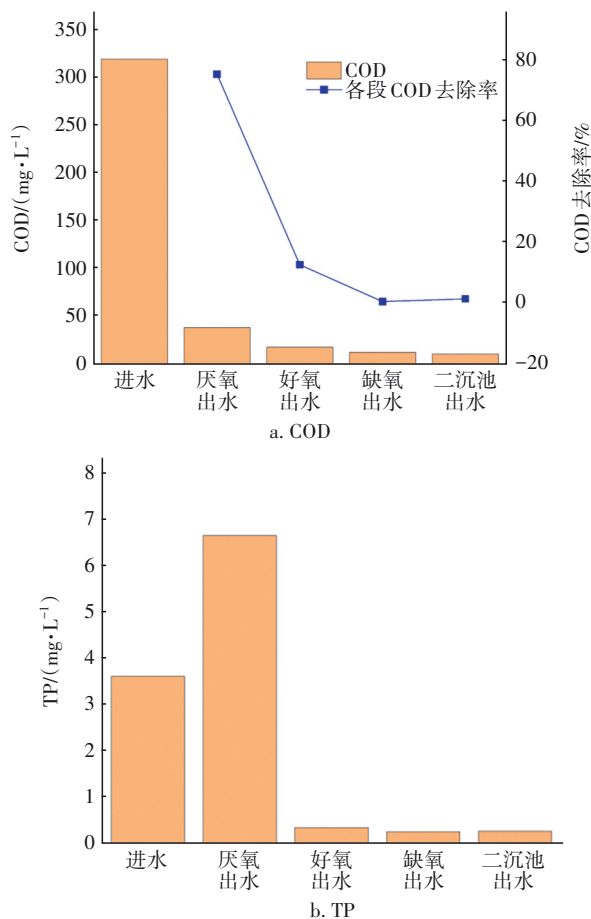


图3 中试沿程各段水质变化及去除率

Fig.3 Fate and transport of COD, nitrogen and phosphorus along the process of AOA pilot plant

由图3可知,厌氧区出现了COD大幅削减(约75%)和释磷现象(考虑回流量后,厌氧出水TP总量为进水TP总量的3.67倍),与生物除磷现象非常吻合,实现了大部分进水碳源的胞内转化贮存。经物料衡算,厌氧区仅去除约5%的总氮,进水和回流污泥中所含的硝酸盐氮几乎被完全去除,但并未对厌氧释磷造成明显负面影响,推测对进水碳源向胞内转化的影响也较小。同时,有机氮等其他形态氮也有较大幅度的削减,高于氨氮上升幅度,推测是活性污泥同化吸收和吸附共同作用所致。

厌氧区将进水COD大量转化至活性污泥胞内贮存后,在较短的好氧区停留时间和较低的溶解氧水平下,其末端上清液氨氮浓度已低至0.30 mg/L,氨氮转化率达98%,几乎完全被硝化。同时总氮也被削减了25%左右,推测部分被活性污泥吸附的有机物在较低的溶解氧水平下作为反硝化电子供体发生了同步硝化反硝化,也可能是在过量吸磷过程中释放的内碳源同时作为电子供体促发了反硝化,即通过反硝化除磷现象实现了一碳两用。好氧区的过量吸磷现象非常明显,好氧出水相比厌氧出水减少的TP总量是进水TP总量的3.48倍,其末端上清液TP浓度已低至0.36 mg/L。

后置缺氧区去除了58%的总氮,与硝酸盐氮削减量基本一致,末端上清液的总氮浓度已低至2.15 mg/L,主要为硝酸盐氮和有机氮等其他形态氮,占比分别为44%和43%。考虑第二污泥回流影响后,缺氧区几乎未发现有COD被削减,可见反硝化过程主要利用了活性污泥胞内碳源作为电子供体^[3,5]。

此外,二沉池也还出现了近10%总氮去除,主要是硝酸盐氮被进一步削减,推测是内碳源反硝化仍在进行,有机氮等其他形态氮也有较大幅度下降,这可能是污泥絮体沉降过程的网捕作用等将其一并吸附去除的结果。

3 结论

① AOA工艺通过在厌氧段将进水碳源转移到活性污泥胞内贮存,在好氧区不被过度消耗,从而为后置缺氧区提供足够反硝化电子供体,有效解决了AAO及其变种工艺碳源利用率低且总氮去除率受制于回流比的问题,实现了对进水碳源的极致利用和极限脱氮,其总氮去除率达到95%以上,浓度稳定在2 mg/L以下,硝酸盐氮几乎被完全去除。

② AOA工艺脱氮主要发生在后置缺氧段,其次是好氧段。其中缺氧段主要通过内碳源反硝化,好氧段则可能是较低的DO水平导致了同步硝化反硝化,还可能是发生了反硝化除磷实现了一碳两用,有待进一步研究确认。

③ AOA工艺的池型、污泥回流设计、主要设备选型和运行调控方式等与AAO及其变种工艺相近,通过内部功能分区调整和工艺调控即可实现工艺转换,无需新增占地和额外增设中间提升泵房、反硝化滤池等设施,既适用于新建污水处理厂建设,也适用于现状AAO及其变种工艺的升级改造。

参考文献:

- [1] 赵伟华,王梅香,李健伟,等. A^2O 工艺和 A^2O+BCO 工艺的脱氮除磷性能比较[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 994-999.
ZHAO Weihua, WANG Meixiang, LI Jianwei, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance comparison between A^2O and A^2O+BCO system [J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 994-999 (in Chinese).
- [2] ZHAO W, HUANG Y, WANG M, *et al.* Post-endogenous denitrification and phosphorus removal in an alternating anaerobic/oxic/anoxic (AOA) system treating low carbon/nitrogen (C/N) domestic wastewater [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 339: 450-458.
- [3] GAO X J, ZHANG T, WANG B, *et al.* Advanced

nitrogen removal of low C/N ratio sewage in an anaerobic/aerobic/anoxic process through enhanced post-endogenous denitrification [J]. Chemosphere, 2020, 252: 162264.

- [4] ZHANG H M, DONG F, TAO J, *et al.* Aerobic granulation with low strength wastewater at low aeration rate in A/O/A SBR reactor [J]. Enzyme & Microbial Technology, 2011, 49(2): 215-222.
- [5] GAO X J, XU Z Z, PENG Y Z, *et al.* The nitrification recovery capacity is the key to enhancing nitrogen removal in the AOA system at low temperatures [J]. Science of the Total Environment, 2022, 818: 151674.
- [6] WANG X, WANG S, ZHAO J, *et al.* Combining simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorus removal with post-denitrification for low carbon/nitrogen wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2016, 220: 17-25.
- [7] 王晓霞,王淑莹,赵骥,等. 厌氧/好氧SNEDPR系统处理低C/N污水的优化运行[J]. 中国环境科学, 2016, 36(9): 2672-2680.
WANG Xiaoxia, WANG Shuying, ZHAO Ji, *et al.* Optimization for low C/N sewage treatment in an anaerobic/aerobic simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorous removal system [J]. China Environmental Science, 2016, 36(9): 2672-2680 (in Chinese).
- [8] 姚晓琰,李凌云,薛晓飞,等. 污泥双回流-AOA中试系统处理低C/N城镇污水的脱氮除磷性能[J]. 环境工程学报, 2023, 17(8): 2524-2533.
YAO Xiaoyan, LI Lingyun, XUE Xiaofei, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance on pilot-scale sludge double recirculation AOA system in treating low C/N municipal wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(8): 2524-2533 (in Chinese).

作者简介:古凌艳(1981-),女,广东梅州人,环境工程硕士,高级工程师,注册环保工程师,咨询工程师(投资),主要从事污水处理厂站技术研究、运营及成本分析工作。

E-mail: 4452488@qq.com

收稿日期: 2023-12-08

修回日期: 2024-02-22

(编辑:李德强)