

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.12.008

两级AO与三级AO工艺比较与工程实践

高伟楠¹, 田萌^{1,2}, 程树辉¹, 纪海霞¹

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘要: 多级AO工艺可以降低内回流比,提高TN去除效果,目前已得到广泛应用。以华南某污水厂为例,同步考虑近期 5×10^4 m³/d处理规模、远期 7×10^4 m³/d处理规模、远期TN ≤ 10 mg/L需求,对两级AO和三级AO工艺进行技术经济比较。BioWin仿真模拟结果显示,两级AO的设备及分段数少,设备费用低,运行管理难度低,更适用于华南地区进水TN不高的情况;三级AO在第Ⅲ级末端设置向第Ⅰ级缺氧区的内回流,反而影响TN去除效果,增大了管理运行难度,提高了投资费用。远期 7×10^4 m³/d的处理规模可通过耦合悬浮载体实现。实际运行效果与BioWin模拟结果基本相符,出水TN均值为6.86 mg/L,满足设计要求。

关键词: 两级AO工艺; 三级AO工艺; 污水处理厂; BioWin仿真模拟; 悬浮载体

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)12-0052-06

Comparison of Two-stage AO and Three-stage AO Processes: An Engineering Perspective

GAO Wei-nan¹, TIAN Meng^{1,2}, CHENG Shu-hui¹, JI Hai-xia¹

(1. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multi-stage AO can effectively decrease the internal reflux ratio while enhancing total nitrogen (TN) removal efficiency, therefore, it has been widely applied in recent years. The short-term treatment capacity of a sewage treatment plant in South China is 50 000 m³/d, while its long-term treatment capacity is 70 000 m³/d. In this study, a comprehensive technical and economic comparison was performed between the two-stage AO and the three-stage AO to achieve the long-term effluent TN remaining no more than 10 mg/L. The simulation results obtained from BioWin indicated that the two-stage AO featured fewer equipment units and sections, resulting in lower capital costs for equipment, reduced operational complexity, and easier management. Consequently, this process is better suited to the conditions in South China, where the influent TN is relatively low. In the three-stage AO, the configuration of internal reflux to the anoxic zone I from the end of zone III not only influenced the TN removal efficiency but also increased the complexity of management and operation, while raising capital investment costs. The long-term processing capacity of 70 000 m³/d can be achieved through the integration of suspended carriers. The actual operational outcomes were largely in agreement with the simulation results obtained from BioWin. The predicted average effluent TN was 6.86 mg/L, which met

the design requirements.

Key words: two-stage AO process; three-stage AO process; sewage treatment plant; BioWin simulation; suspended carrier

目前,我国污水处理厂多采用以活性污泥法为核心的污水处理工艺,其中近半数的污水处理厂采用缺氧-好氧(AO)工艺^[1-3],AO工艺具有运行稳定、成本低等优点,但因TN去除效果受回流比的制约,TN去除率一般为60%~80%。随着国家对脱氮需求的日益提高,传统AO工艺较难满足对TN的处理要求,多级AO工艺应运而生^[4-8]。通过两个或多个AO的串联,前一级好氧产生的硝酸盐为后一级缺氧提供反硝化基质,从而达到降低内回流比并提高总氮去除效果的目的。然而,分级过多也会增加运行难度,所以目前国内应用较多的是两级AO或三级AO工艺。以华南某污水厂为例,对两级AO和三级AO工艺进行比较分析,旨在为类似工程的技术路线选择提供参考。

1 工程概况

华南某污水厂总占地8 hm²,原设计规模9×10⁴ m³/d,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、广东省《水污染物排放限值》(DB 44/26—2001)(以下简称“准V类”)。污水厂已满负荷运行,依据相关规划需进行扩建,出水标准在现况基础上,需考虑远期TN≤10 mg/L的要求。综合考虑厂区的实际情况,此次扩建土建规模为7×10⁴ m³/d,近期按5×10⁴ m³/d运行,远期达到7×10⁴ m³/d规模,全厂达到16×10⁴ m³/d处理能力。设计进、出水水质如表1所示。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

mg·L ⁻¹						
项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
进水	150	350	230	35	45	6
出水	≤10	≤40	≤10	≤2.0(4.0*)	≤15(10**)	≤0.4

注: *为低温时标准;**为远期要求,此次设计需考虑。

受厂区占地制约,初步拟定扩建采用“多级AO+周进周出矩形沉淀池+高效沉淀池+纤维板框滤池”的工艺路线;各主要建(构)筑物土建均按照7×10⁴ m³/d建设,设备按照5×10⁴ m³/d安装,生物池近期采用多级AO工艺,远期通过投加悬浮载体形

成泥膜复合工艺满足扩容40%的需求。此次设计时,水力条件按7×10⁴ m³/d规模考虑,生化处理按5×10⁴ m³/d规模考虑。该项目拟采用多级AO工艺,故进行两级AO和三级AO的比较。

2 两级AO与三级AO比较

2.1 工艺流程

多级AO工艺的核心是利用前一级好氧产生的硝酸盐在下一级进行缺氧反硝化,从而降低内回流比;理论上分级越多,TN去除效果越好,但控制越复杂。工程中以两级AO和三级AO为主,其工艺流程如图1所示。两级AO一般在第一级AO设计内回流,而三级AO一般不设内回流。北京采用两级AO的污水厂包括清河(40×10⁴ m³/d)、小红门(50×10⁴ m³/d)、高安屯(40×10⁴ m³/d)、定福庄(20×10⁴ m³/d)、槐房(60×10⁴ m³/d)等,该工艺具有设备简单,运行、维护成本低,抗冲击负荷强等优点,同时与其他工艺的契合度较高,便于后续改造,提升出水标准。理论上三级AO串联能够取消内回流设备,可以更加合理地分配碳源,降低投资和运行成本,该工艺主要应用于碳源充足、对脱氮要求较高的场合,其典型案例包括云南曲靖污水处理厂(8×10⁴ m³/d)^[9]、天津市宁河区城市污水处理厂(9×10⁴ m³/d)^[10]、天津张贵庄污水处理厂(20×10⁴ m³/d)^[11]和北京稻香湖再生水厂(8×10⁴ m³/d)等。

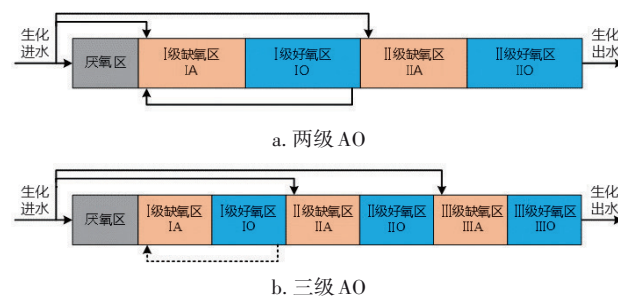


图1 两级AO与三级AO工艺流程

Fig.1 Process flow of two-stage AO and three-stage AO

2.2 工艺比较

鉴于该工程后续无提标用地,且当地部分新建工程出水已按照总氮≤10 mg/L执行,兼顾未来出水水质进一步提高的可能性,此次工艺比较的生物池

出水按照总氮 $\leq 10\text{ mg/L}$ 考虑,其余指标按设计出水水质考虑。根据平面布置推算,对于近期 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的规模,生物池 HRT 最大为 18 h。结合该工程的实际情况、BioWin 仿真模拟以及悬浮载体耦合便利性等,对两级 AO 和三级 AO 工艺进行比较。

2.2.1 BioWin 仿真模拟

初步设定 HRT=18 h,并逐步降低,能够达到出水 TN 要求的最小 HRT 为 14 h。两级 AO 进水点为

厌氧区、第 I 级缺氧区、第 II 级缺氧区;三级 AO 进水点为厌氧区、第 II 级缺氧区、第 III 级缺氧区。

① 固定进水比研究

设置进水比均为 4:3:3,模拟比较了两级 AO (回流比 200%)、三级 AO 回流比 200% (第 I 级 AO 回流比 100%、第 III 级 O 回流至第 I 级 A 为 100%)、三级 AO 回流比 100% (仅第 I 级 AO 回流) 3 组方案,模拟流程如图 2 所示。

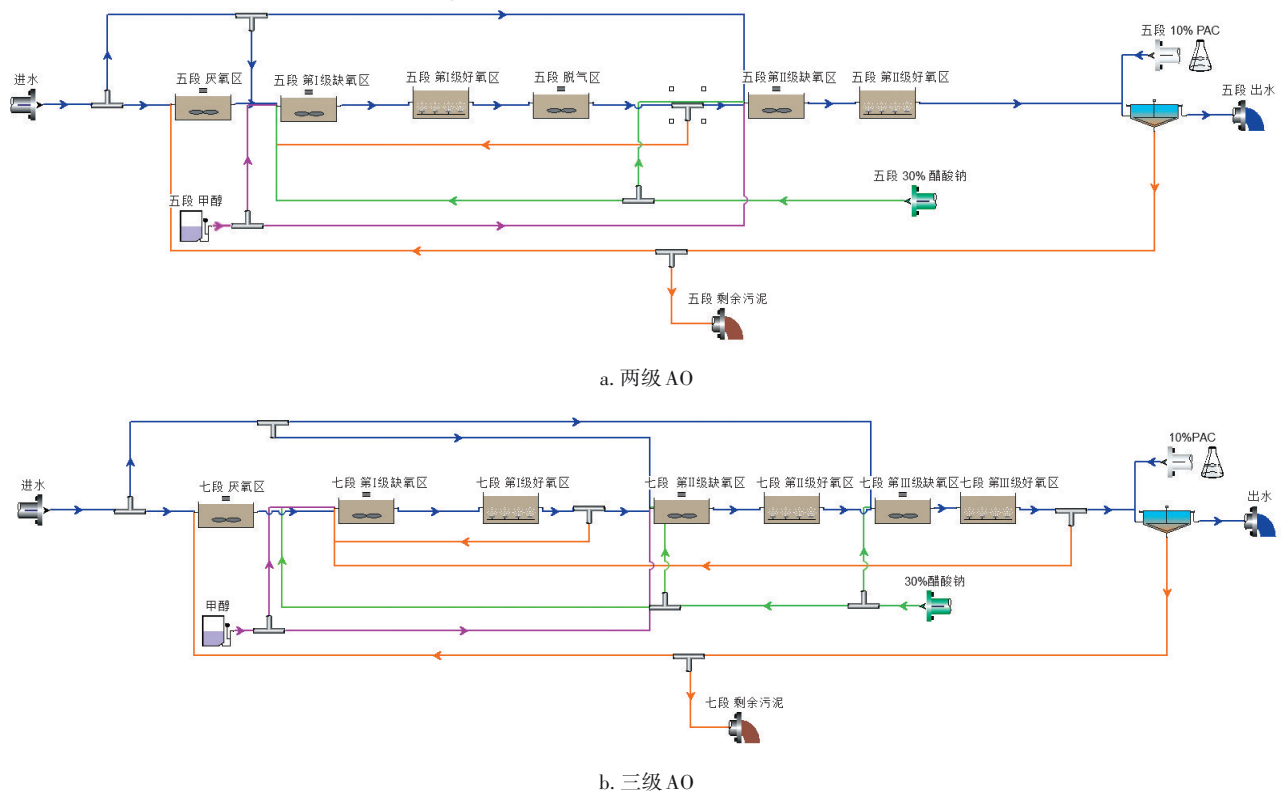


图 2 两级 AO 与三级 AO 的 BioWin 仿真模拟

Fig.2 BioWin simulation of two-stage AO and three-stage AO

表 2 为 HRT=14 h 时,固定进水比的模拟结果。

表 2 固定进水比模拟结果

Tab.2 Simulation results of fixed inlet ratio

项目	两级 AO	三级 AO	
		末端无回流	末端 100% 回流
水力停留时间/h	14(2+3+6+2+1)	14(1.5+1.7+2.5+1.7+2.5+1.7+2.4)	
曝气量/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	13 371	13 197	
出水水质/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮	1.23	2.00
	总氮	6.29	8.52
	总磷	1.83	1.28
	COD	38.46	37.44
	BOD ₅	3.08	3.00

由表 2 可知,无论是两级 AO,还是三级 AO,均建议在第 I 级 AO 设置内回流,以便在第 I 级缺氧区充分利用原水碳源最大程度进行反硝化;三级 AO 在第 III 级末端设置向第 I 级缺氧区的内回流,总氮和总磷去除量略有提高,但有机物去除效果反而降低,推测是由于设置回流后生物池内整体流量增大,携带进入缺氧区的溶解氧影响了缺氧环境,且生物池各区实际水力停留时间缩短,各区域工况转换加快造成效率降低。对于类似于该工程的进水总氮浓度不高的南方水质,两级 AO 完全能够满足出水水质要求,三级 AO 无明显优势;对于高 COD、高总氮情况,三级 AO 可能更加适合。

② 调整配水比研究

两级AO和三级AO均设置第Ⅰ级AO回流比为100%,进行多点进水配水比的研究(1:0:0、3:7:0、2:4:4)。1:0:0,即全部进水由最前端进入;3:7:0,即三级AO仅在厌氧区和第二级AO配水。调整配水比模拟结果见表3。

表3 调整配水比模拟结果

Tab.3 Simulation results of water distribution ratio adjustment

项目		两级AO			三级AO		
进水比例		1:0:0	3:7:0	2:4:4	1:0:0	3:7:0	2:4:4
气水比		6.54	6.55	6.70	6.30	6.38	6.40
出水水质/ (mg·L ⁻¹)	氨氮	1.04	1.28	5.55	0.83	0.99	3.73
	总氮	6.47	5.98	9.91	7.30	5.66	7.79
	总磷	1.72	2.04	2.81	0.77	1.31	2.32
	COD	38.27	38.08	38.43	38.25	37.80	37.73
BOD ₅		3.04	3.09	3.63	2.92	2.91	3.01

由表3可知,配水比对出水水质略有影响,总体趋势为末端配水比例增大,出水总氮、氨氮、总磷浓度升高,曝气量也逐渐增大。当进水比为3:7:0时,三级AO的TN去除效果和气水比略优于两级AO。然而,在实际运营中此差距一般可以忽略不计,而且随着末端配水比例增大,虽有利于反硝化过程中碳源的利用,但由于氨氮、有机物、总磷的输入,势必造成生化反应负荷的增加。因此,建议保留多点进水的形式,运行中根据实际水质进行阶段性调整。值得注意的是,尽管当进水比为2:4:4时,三级AO的TN去除效果优于两级AO,但随着后端进水量

的增加,出水氨氮呈上升趋势,此时氨氮已不能满足出水标准。

③ 两级AO和三级AO处理效果

按照HRT=14 h、各级池容比例1:1:1、第Ⅰ级AO设置100%内回流且进水比为4:3:3进行三级AO配置,模拟100%回流和关闭回流两种工况;按照HRT=14 h、设置100%内回流且进水比为4:3:3进行两级AO配置。结果显示,两级AO出水总氮最优,为6.29 mg/L;三级AO前端开启100%内回流工况次之,为7.51 mg/L;三级AO无内回流工况较差,为8.52 mg/L,以上3种情况均能够满足出水校核水质要求(TN≤10 mg/L)。

表4为两级AO和三级AO的设计参数对比。可知,无论是两级AO还是三级AO,TN达到出水要求所需的水力停留时间均小于18 h。对比两种工艺,主要有以下不同:

- a. 理论上,三级AO上限更高,即运行得当,投资及运行成本均较低;而两级AO的设备及分段数少,设备费用低,运行管理难度低;
- b. 针对该工程,由于兼顾远期,池容按18 h设计,无论是采用两级AO,还是三级AO,工程的土建投资均一致,三级AO设备费用更高,因此从投资角度而言,采用两级AO更加节约;
- c. 运行成本上,三级AO能够节省100%的混合液回流费用,约0.002元/m³;再考虑实际运行中三级AO交替缺氧、好氧条件造成的碳源利用率下降,其实际运行成本差别将更小。

表4 两级AO、三级AO设计参数对比

Tab.4 Comparison of design parameters between two-stage AO and three-stage AO

项目		两级AO	三级AO	项目	两级AO	三级AO
厌氧区	HRT/h	2	2	土建匡算/万元	2 072	1 964
	池容/m ³	4 167	4 167	设备匡算/万元	645	695
缺氧区	HRT/h	4.74(3+1.74)	4.47(1.49+1.49+1.49)	总投资/万元	2 717	2 659
	池容/m ³	9 875	9 313			
好氧区	HRT/h	8.03(6.5+1.53)	8.03(2.7+2.7+2.63)	碳源费用/(元·m ⁻³)	0.14	0.14
	池容/m ³	16 729	16 729	内回流电费/(元·m ⁻³)	0.002	
脱气区	HRT/h	0.5				
	池容/m ³	1 042		优点	设备相对更少,运行难度更低;更有利于后续与MBBR的耦合	理论上投资及运行成本更低;能够降低内回流量,甚至取消内回流
总计	HRT/h	15.27	14.50			
	池容/m ³	31 813	30 209	缺点	理论上投资和运行成本略高;需要内回流	设备多,运行难度大;不利于后续与悬浮载体的耦合
内回流比/%		100	0			

注:按照进水全部由厌氧区前端进入系统计算。

2.2.2 远期悬浮载体情况分析

由于该项目的特殊性,生物池需考虑远期扩容方案的可行性和便利性,即远期投加悬浮载体的影响。

MBBR工艺的核心是通过投加悬浮载体提高反应池内污泥量,可以投加在好氧池,也可以投加在缺氧或厌氧池,但考虑到悬浮载体的流化,若投加于厌、缺氧池会大幅增加搅拌功率,因此优先推荐好氧池投加,厌、缺氧区的池容可以通过切割好氧区补足,而好氧区则通过悬浮载体弥补池容的不足。即好氧区不足的池容通过增加的悬浮载体来承担,然后通过污染物负荷换算成所需的悬浮载体量,再控制一定的填充比例得到投加容积。

根据测算,若采用两级AO工艺,远期悬浮载体全部投加在第Ⅰ级好氧区,MBBR所需悬浮载体量为2 597 708 m³,费用为1 299万元,其他相应的固定设备费用(包括MBBR配套流化系统、专用推流器、拦截系统、智能控制系统)为615万元;若采用三级AO工艺,由于各区更加分散,MBBR区需分成2段(第Ⅰ级好氧区、第Ⅱ级好氧区),所以安装相应的MBBR固定设备(除悬浮载体外的其他设备)费用会略有上升,为777万元,悬浮载体投加费用相同。即采用三级AO在未来改造时会增加投资162万元,同时增大了改造难度;此外,投加悬浮载体后最容易出现问题的区域为拦截筛网,而三级AO增加了一段拦截筛网,运行难度更大。

通过以上对比可知,由于三级AO的分区过多,且每个分区容积相似,其改造难度高于两级AO,施工、运行难度以及拦截筛网设备增加,投资也高于两级AO。因此,采用两级AO更有利于未来与悬浮载体进行耦合。

2.3 比较结果

基于以上分析,无论是两级AO,还是三级AO,均能够实现出水总氮≤10 mg/L的目标,在该项目用地有限、近期池容需尽量扩大、远期投加悬浮载体的边界条件下,两级AO在近期投资、设备管理维护便利性上具有优势,同时在远期投加悬浮载体改造时耦合度更高,总体投资更省,改造、运行难度更低。因此,综合考虑后,此次设计推荐采用两级AO工艺。

3 运行效果

该工程概算总投资为30 457.21万元,工程费用为24 360.19万元,折合工程费为3 480.03元/m³,处理成本为1.95元/m³,经营成本为1.20元/m³。

该工程生物池总停留时间18 h(其中厌氧区2 h,第Ⅰ级缺氧区3.5 h,第Ⅰ级好氧区7.5 h,脱气区0.5 h,第Ⅱ级缺氧区2.5 h,第Ⅱ级好氧区2 h),有效水深8.6 m,设置可调式分段进水,以20%为一档,实现进水比例的按需调整。实际运行中生物池污泥浓度为3 500~4 000 mg/L,污泥回流比为40%~100%,混合液回流比为100%~200%。实际进、出水水质见表5,与模拟结果基本相符。

表5 实际进、出水水质

Tab.5 Actual influent and effluent quality

mg·L⁻¹

项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
进水	39-107-274	90-258-495	46-154-534	8-23-35	15-29-45	1-4-6
出水	0.5-0.81-6	4-13.91-30	4-4.4-8	0.03-0.27-1.51	1.65-6.86-10.20	0.02-0.12-0.30

注:表中数据格式为最小值-平均值-最大值。

4 结语

以华南某污水厂为例,借助BioWin仿真模拟,对两级AO和三级AO工艺进行了技术经济比较。两级AO设备及分段数少,设备费用低,运行管理难度低,更适用于华南地区进水TN不高的情况;三级AO在第Ⅲ级末端设置向第Ⅰ级缺氧区的内回流,反而影响TN去除效果,增大了管理运行难度,提高了投资费用。设计同时满足近期规模5×10⁴ m³/d以及TN≤10 mg/L的处理需求,远期7×10⁴ m³/d的处理规模可通过耦合悬浮载体实现。实际运行效果与

BioWin模拟结果基本相符,出水TN均值为6.86 mg/L,满足设计要求。

参考文献:

- [1] 胡洪营. 中国城镇污水处理与再生利用发展报告(1978—2020)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.
HU Hongying. Development Report on Municipal Wastewater Treatment and Reuse in China(1978—2020)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021 (in Chinese).

- [2] 关永年. 高排放标准下某高新园区污水处理厂工程实例[J]. 给水排水, 2022, 48(12): 89-94, 111.
GUAN Yongnian. Example of wastewater treatment plant project in a high-tech park under high discharge standard[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(12): 89-94, 111 (in Chinese).
- [3] 刘敏, 房阔, 王凯军, 等. AAO+流态化生物载体工艺的菌群结构分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(19): 11-18.
LIU Min, FANG Kuo, WANG Kaijun, *et al.* Analysis on microbial community composition of AAO+FBC/MBBR system[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(19): 11-18 (in Chinese).
- [4] 沈超, 任玉辉. 多点进水AAO-A+MBR工艺在低C/N污水处理厂的工程应用[J]. 净水技术, 2023, 42(1): 168-173.
SHEN Chao, REN Yuhui. Engineering application of multi-point influent AAO-A+MBR process in low C/N ratio WWTP[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(1): 168-173 (in Chinese).
- [5] 陈良, 莫少德, 周波, 等. 多段AO/高效沉淀/反硝化滤池用于准IV类标准污水厂[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 75-78.
CHEN Liang, MO Shaode, ZHOU Bo, *et al.* Application of multi-stage AO+high efficiency sedimentation+denitrification filter process in a WWTP with quasi class IV effluent standard[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(10): 75-78 (in Chinese).
- [6] 谢益佳, 戴仲怡, 李树苑, 等. 污水处理厂微氧曝气-多段AO工艺优化运行实践[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 45-48.
XIE Yijia, DAI Zhongyi, LI Shuyuan, *et al.* Application of micro oxygen aeration multi stage AO process in optimal operation mode of wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(8): 45-48 (in Chinese).
- [7] 叶宁. 多点进水多级AO工艺在寒冷地区大型污水处理厂的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(4): 161-168.
YE Ning. Application of step-feed multi-stage AO process in large WWTPs in cold region [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 161-168 (in Chinese).
- [8] 高术波. 多级AO+MBR工艺在污水厂提标改造中的应用——以北京某污水厂为例[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 28-31.
GAO Shubo. Application of multilevel AO+MBR process in upgrading and reconstruction project—case study of a WWTP in Beijing [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 28-31 (in Chinese).
- [9] 石凤, 刘胜军, 马炳勇, 等. 多段多级AO工艺在污水处理厂升级改造中的应用[J]. 给水排水, 2012, 37(6): 34-37.
SHI Feng, LIU Shengjun, MA Bingyong, *et al.* Application of multi-stage multi-segment AO process in upgrading and renovating wastewater treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 37(6): 34-37 (in Chinese).
- [10] 王舜和, 李朦, 郭淑琴. 多级AO与多模式AAO工艺在污水厂的应用对比[J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 48-51, 57.
WANG Shunhe, LI Meng, GUO Shuqin. Application and comparison between multistage AO and multi-mode AAO in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(10): 48-51, 57 (in Chinese).
- [11] 王舜和, 李朦, 郭淑琴. 张贵庄污水处理厂分段进水多级AO工艺的设计与运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(12): 53-56.
WANG Shunhe, LI Meng, GUO Shuqin. Design and operation for the step-feed multi-stage AO process in Tianjin Zhangguizhuang wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(12): 53-56 (in Chinese).

作者简介:高伟楠(1989-),男,内蒙古锡林浩特人,硕士,高级工程师,注册公用设备工程师(给排水),主要从事给排水工程设计及水环境恢复研究等工作。

E-mail:494780017@qq.com

收稿日期:2024-11-11

修回日期:2024-12-12

(编辑:沈靖怡)