

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.004

基于“七段式”生化组合工艺的城镇污水厂提标改造技术

吴云生^{1,2}

(1. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100102; 2. 北京市再生水水质安全保障工程技术研究中心, 北京 100102)

摘要: 根据进水情况复杂、提标改造用地受限等问题, 制定了污水厂提标改造技术决策路线图, 其核心为生化处理单元, 可优先采用“七段式”生化组合工艺。“七段式”生化组合工艺是在传统 Bardenpho 工艺上, 增加预缺氧池和脱气池, 改善脱氮除磷效果, 同时在池型布置上进行改进, 可实现传统 A^2O 和两级 AO 之间灵活切换, 实现多模式运行, 能够灵活解决进水水质波动大、出水标准高、进水污染物浓度高等问题。工程案例表明, 其脱氮率可达到 74%, 与传统 A^2O 相比, 节省碳源药剂费用 0.06 元/ m^3 , 节省除磷药剂费用 0.02 元/ m^3 。

关键词: 提标改造; 技术决策; 生化处理; “七段式”生化组合工艺

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0020-05

Upgrading and Reconstruction Technology of WWTPs Based on “Seven-segment” Biochemical Combined Process

WU Yun-sheng^{1,2}

(1. Beijing Enterprises Water <China> Investment Co. Ltd., Beijing 100102, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Reclaimed Water Quality Security Guarantee, Beijing 100102, China)

Abstract: According to the complicated situation of water inflow and limited land for upgrading, the technical decision-making roadmap for upgrading of WWTPs is made. Its core is the biochemical treatment unit, which is “seven-segment” biochemical combined process in this work. Based on the traditional Bardenpho process, pre-anoxic tank and deoxygenation tank are added to improve the removal efficiency of nitrogen and phosphorus. Meanwhile, the layout of tank type is improved to realize the switch between traditional A^2O and two-stage AO to perform multi-mode operation. Thus, we could solve the problems such as remarkable fluctuation of influent quality, high standard of effluent quality and high concentration of influent pollutant. The engineering case shows that the denitrification rate can reach 74%. Compared with the traditional A^2O , the cost of carbon source agent is saved by 0.06 yuan/ m^3 , and the cost of phosphorus removal agent is saved by 0.02 yuan/ m^3 .

Key words: upgrading and reconstruction; technical decision; biochemical treatment; “seven-segment” biochemical combined process

《2018 中国生态环境状况公报》显示, 我国地表水环境在 1 935 个水质断面(点位)中, IV ~ V 类、劣 V 类占比分别为 22.3% 和 6.7%; 在 111 个重要湖泊(水库)中, IV ~ V 类、劣 V 类占比分别为 25.2% 和 8.1%; 地下水环境在 10 168 个水质监测点中, 水

质较差级和极差级为 86.2%。与 2017 年相比, 我国河流水质和湖泊水质基本稳定但总体仍呈现一定程度的污染, 地下水质量与 2017 年相比呈现恶化趋势, 水环境污染形势依然严峻。近年来我国部分地区制定了严格的水污染物排放标准, 其中北京、天

津、浙江、河北、巢湖流域、太湖流域、岷江及沱江等地区的污水厂出水排放标准,除 TN、SS 等指标外,其他指标已达到或优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类水体水质指标。因此面对日益严格的污水排放标准,选用经济合理、安全可靠的技术路线将是污水处理厂提标改造的重点。

1 提标改造面临的问题及技术路线决策

1.1 进水复杂且与设计水质差异大

由于部分污水处理厂实际污水处理规模、进水污染物浓度与设计要求存在差距,导致污水处理厂无法正常运行,污水处理效率较低。郭泓利等^[1]选取了北控水务在全国 19 个省市自治区 127 座污水处理厂作为研究对象,分析 2016 年全年实际进厂原水水质数据,发现进水水质与原设计进水水质差异较大,存在 BOD_5/COD 比值和 BOD_5/TN 比值偏低、 SS/BOD_5 比值偏高等特点。 BOD_5/COD 平均值为 0.37, BOD_5/TN 平均值为 2.69, 现有污水厂反硝化碳源不足,需要额外添加碳源,但现状生化池多为 AO 或 A^2O 工艺,只能在缺氧(厌氧)池投加,造成碳源利用率低,同时受限于内回流比例,脱氮率较低,既增加了污水处理厂运营成本,又不能保证满足出水标准。 SS/BOD_5 平均值为 1.82, 由于大部分污水厂未设置初沉池,导致无机物大量进入生化池,活性污泥有效成分降低,生化池曝气能耗升高,进水 SS 浓度较高导致好氧段曝气量增大,造成内回流至缺氧池的溶解氧浓度偏高而消耗碳源,致使 TN 去除效果差^[2]。

1.2 用地受限

污水处理厂规划时只考虑近期占地或远期扩建用地,很少规划提标改造用地。目前很多污水厂已被城市中各种建筑包围,提标改造工程一般只能在原厂红线范围内进行建设,同时需要考虑新增构筑物对周围环境造成的噪声和臭气污染,因此给工程设计和施工都增加了难度。特别是对于原设计就很紧凑的污水处理厂,如何选择合适的提标工艺路线显得尤为重要。

1.3 提标改造技术决策的必要性

根据实际情况,选择一条边界合理、工艺可行、经济适用的工艺技术路线,总结过往技改工作经验,形成提标改造技术决策路线图(见图 1),在现状问题诊断与评估的基础上,最终完成工艺路线的制定,其中技术决策的核心为生化处理单元。

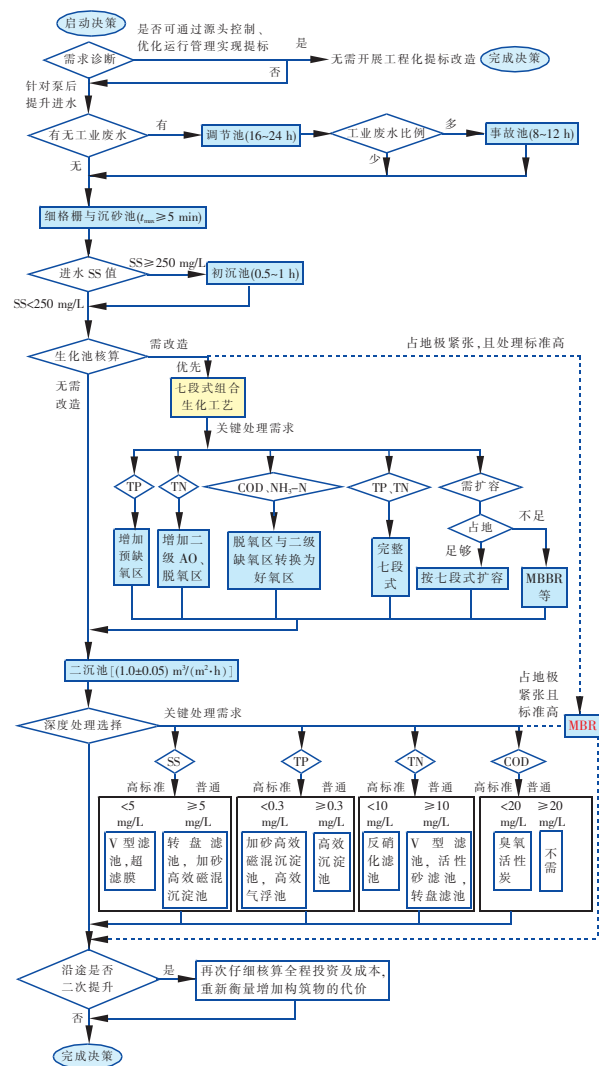


图1 基于“七段式”生化组合工艺的提标改造技术决策路线

Fig. 1 Decision-making roadmap for upgrading technology based on “seven-segment” biochemical combined process

由于部分污水厂存在进水水质的复杂性、提标及扩建工程占地局限性等问题,在制定提标改造工艺路线时必须进行整体技术策划,不能以原设计进水水质或现状设计出水水质作为设计依据,需要对污水厂近 3~5 年进出水水质进行梳理,如与设计水质偏差较大,首先要判断是否能够通过源头控制、现状处理设施优化及设备改造等方式实现提标。如经过现场诊断后必须进行大规模改造,应从预处理开始,如有工业废水混入,则需设置调节池或水解池;核查曝气沉砂池设计参数是否合理、运行是否正常、能否有效排砂;如果进水悬浮物较高,应考虑以快沉为主的初沉池,避免损失过多碳源。其次为生化处理段的分区调整或扩建,应根据提标改造进出水水

质、水量边界条件对现状生化池设计参数进行重新核算,从高效利用原水碳源、节省占地、提高污染物去除率及有效应对进水冲击负荷等角度出发,并结合厂区占地面积决定生化池改造或扩建方案。最后再考虑深度处理设施,深度处理应以去除 SS、TP 为主,采用混凝沉淀和过滤为核心单元,当生化处理段不能满足 TN 去除要求时,再考虑反硝化生物滤池等深度处理设施。

2 提标改造中“七段式”生化组合工艺

2.1 工艺流程

生化处理单元是提标改造的重点和关键单元,关系到提标改造的投资、运行成本及出水达标的稳定性,尤其是 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 及 TN 应尽量在生化单元去除。为降低污泥产量,节省后续深度处理加药量,也应在生化单元最大限度地去除 TP。基于“七段式”生化组合工艺的提标改造,同时结合预处理改造和深度处理设施,能够高效解决目前提标改造中面临的问题。

“七段式”生化组合工艺,即一种基于多点进水和多模式运行的可强化反硝化脱氮除磷系统^[3],一共由七部分生化工艺段组成,是在五段 Bardenpho 工艺上增加了预缺氧池和脱气池。一般在池型设计上,第一缺氧池为环沟式,第一好氧池、第二好氧池为推流式,预缺氧池、厌氧池、脱气池、第二缺氧池为完全混合式。图 2 是基于“七段式”生化组合工艺的提标工艺流程,结合图 1 所示的技术决策路线,工艺流程中虚线框功能分区可根据进水水质进行灵活调整,实线框功能分区是必须要设置的单元。

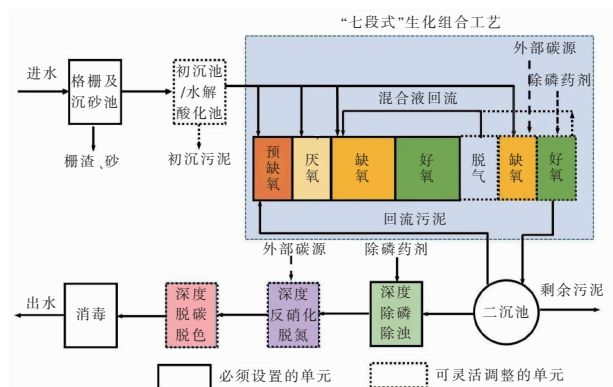


图 2 城镇污水处理厂提标工艺流程

Fig. 2 Flow chart of the upgrading and reconstruction process of WWTPs

当现状厂区占地面积有限或可利用区域距离生

化池较远,新增生化池需要二次提升时,可选择在好氧池中投加悬浮填料的 MBBR 或 MBR 工艺,将生物膜技术与活性污泥工艺结合,提高污泥浓度,减少水力停留时间,优化系统内微生物的组成和数量,提高系统的硝化稳定性和反硝化能力。

2.2 工艺优势

“七段式”生化组合工艺典型布置形式见图 3,其工艺及池型布置主要有如下优势:①在传统 Bardenpho 工艺厌氧池前设置预缺氧池,有利于消除回流污泥中硝态氮对后续厌氧释磷的不利影响,保证厌氧池的厌氧效果。②在传统 Bardenpho 工艺第一好氧池之后设置脱气池,能够解决内回流混合液溶解氧浓度过高造成缺氧池缺氧条件不佳的问题,提高 TN 去除效果。③脱气池和第二缺氧池可设置搅拌和曝气双系统,内回流堰门可调整内回流位置,处理不同进水浓度、不同碳氮比的污水,可在传统 A^2O 和两级 AO 之间灵活切换,实现多模式运行。④可实现预缺氧池、厌氧池、第一缺氧池、第二缺氧池多点同时进水,有效应对进水水质变化,实现内部碳源的高效利用,从根本上降低后续深度处理负荷与加药量。⑤改造工程中可有效利用现有池体容积,降低工程投资和运行成本。⑥依托大数据,对关键环节参数进行优化比对、迭代升级,提出基于优化算法的量化参数和最优池型布置方式,可实现标准化、精细化设计。

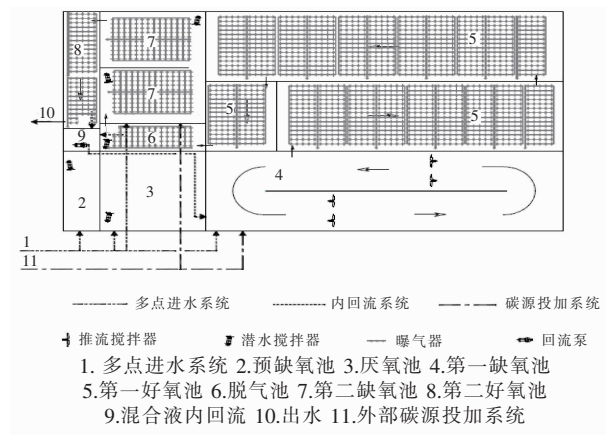


图 3 “七段式”生化组合工艺典型布置形式

Fig. 3 Typical layout of “seven-segment” biochemical combined process

3 “七段式”生化组合工艺工程案例

3.1 内蒙古某市污水处理厂

内蒙古某市污水处理厂一期工程设计规模 $4 \times$

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用 A^2O 工艺,现状出水水质执行一级 A 标准。扩建工程设计规模 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,污水厂进水水质浓度高且上游有化工及电厂工业废水排入,因此一期工程提标改造过程中在预处理阶段增加了水解酸化池,同时与扩建工程一并增加深度处理设施。二期工程采用水解酸化 + “七段式”生化组合池 + 两级曝气生物滤池 + 高效沉淀池 + 超滤膜 + 臭氧脱

色工艺,最终出水水质达到准 V 类水体要求(其中 $\text{SS} \leq 5 \text{ mg/L}$, $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$),改造流程如图 4 所示。“七段式”生化组合工艺的预缺氧池停留时间约 0.5 h,厌氧池停留时间约 1.5 h,第一缺氧池停留时间约 4.7 h,第一好氧池停留时间约 14 h,脱气池约 0.2 h,第二缺氧池停留时间约 2.5 h,第二好氧池停留时间约 1.5 h,总停留时间 24.9 h。

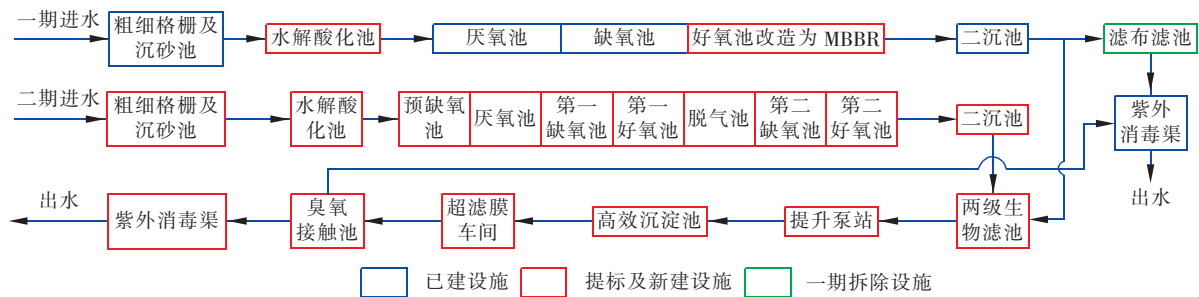


图 4 内蒙古某污水处理厂提标工艺流程

Fig. 4 Flow chart of the upgrading and reconstruction of a WWTP in Inner Mongolia

该厂改造后进、出水水质见表 1,污水厂实际进水水质严重超出设计进水水质。一期生化池将好氧池改造成 MBBR 池,改造后出水指标均有降低,其中 TN 去除率提高了 7%,二期新建生化池采用“七

段式”生化组合工艺,出水指标较改造后一期 MBBR 池更优,其中总氮去除率达到了 74%。通过后续在生物滤池中投加碳源,出水 TN 能够满足 10 mg/L 的严格要求。

表 1 内蒙古某污水处理厂提标改造进、出水水质

Tab. 1 Influent and effluent quality of the upgrading and reconstruction of a WWTP in Inner Mongolia $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ - N	TN	TP	备注
设计进水值	500.00	300.00	400.00	40.00	60.00	8.00	
2018 年进水最大值	1 515.00	690.75	1 450.00	60.74	120.38	14.82	
2018 年进水平均值	476.17	213.16	388.06	39.93	64.88	5.22	
设计出水值	40.00	10.00	5.00	2.00	10.00	0.40	
2018 年出水平均值	27.41	6.31	4.53	0.86	8.25	0.18	
2018 年 8 月一期生化池进水均值	308.00			37.90	60.80	4.04	
2018 年 8 月一期生化池出水均值	38.98			1.34	23.34	0.46	一期生化池改造前
2019 年 8 月生化池进水均值	324.50			33.24	55.45	2.80	
2019 年 8 月一期生化池出水均值	18.13			0.49	17.46	0.17	一期生化池改造后
2019 年 8 月二期生化池出水均值	22.40			0.48	14.24	0.13	二期生化池
2019 年全年出水均值	24.02	5.69	4.23	0.71	8.06	0.16	

3.2 山东某市污水处理厂三期扩建工程

山东某市污水处理厂三期扩建工程设计规模 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用“七段式”生化组合池 + 高效沉淀池 + V 型滤池工艺,最终出水水质指标执行准 IV 类水标准(除 $\text{SS} \leq 10 \text{ mg/L}$, $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ 外),工艺流程见图 5。预缺氧池停留时间为 0.5 h,厌氧池停留时间为 1.5 h,第一缺氧池停留时间为 6.3 h,第一好氧池停留时间为 14 h,脱气池停留时间为 0.5 h,第二缺氧池停留时间为 2.6 h,第二好氧池停留时间

为 0.8 h,总停留时间 26.2 h。

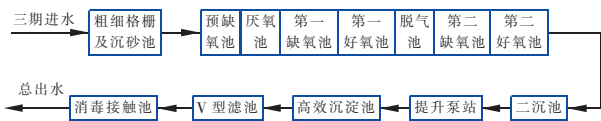


图 5 山东某污水处理厂扩建工程工艺流程

Fig. 5 Flow chart of expansion project of a WWTP in Shandong

该厂改造后进、出水水质如表 2 所示。由表 2

可知,污水厂进水水质严重超出设计进水水质,“七段式”生化组合池能够较好地适应高浓度污水,保证出水水质稳定达标。“七段式”生化组合池出水

COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 和 TN 的平均值分别达到 30.81、0.50 和 11.90 mg/L,再经过深度处理后出水水质稳定达标。

表2 山东某污水处理厂扩建工程进、出水水质

Tab.2 Influent and effluent quality of a WWTP expansion project in Shandong

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD ₅	SS	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TN	TP
设计进水值	700.00	250.00	450.00	60.00	80.00	15.00
进水最大值	1 157.20	382.10	926.00	77.90	107.10	33.00
2019 年进水平均值	486.21	156.50	479.27	44.44	60.33	12.03
2019 年出水最大值	29.70	4.50	9.10	1.50	14.90	0.30
2019 年出水平均值	23.01	1.63	7.34	0.47	11.67	0.12
“七段式”生化组合池出水平均值	30.81	1.90		0.50	11.90	

4 技术经济分析

内蒙古某污水处理厂扩建工程采用的“七段式”生化组合池,脱氮率由一期工程改造前的 62% 提高到 74%,多去除 3.75 mg/L 的 TN,考虑到一期工程改造后进水 COD 浓度略高,按照多去除 2 mg/L 的 TN 计算,投加碳源采用 25% 乙酸钠溶液,单价为 1 500 元/t,则节省碳源费用 0.06 元/ m^3 。总磷比一期工程改造前多去除 0.33 mg/L,考虑到一期工程改造 COD/TP 比较高,按照多去除 0.2 mg/L 的 TP 计算,除磷药剂采用 10% PAC 溶液,单价为 800 元/t,则节省药剂费用 0.02 元/ m^3 。

5 结语

因涉及工艺、技术、设备、运行、投资等诸多环节,城镇污水处理厂的提标改造是一项技术复杂和任务艰巨的基础设施工程。基于“七段式”生化组合工艺的提标改造在实际工程案例中取得了良好的效果,可以实现多点进水、多模式运行,其吸收了传统 Bardenpho 工艺的优点,且更灵活和普适。工程案例表明,与常规 A^2O 工艺相比,该工艺按照多去除 2 mg/L 的 TN 计算,可节约碳源药剂成本 0.06 元/ m^3 ;按照多去除 0.2 mg/L 的 TP 计算,可节约除磷药剂成本 0.02 元/ m^3 。如后续取消反硝化滤池,则可节约建设投资 200 ~ 500 元/ m^3 。该工艺目前在北控水务应用的污水处理厂设计规模已超过 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,应用效果良好,值得在全国城镇污水处理厂提标改造工程中进行推广。

参考文献:

- [1] 郭泓利,李鑫伟,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,2018,44(6): 12-15.
GUO Hongli, LI Xinwei, REN Qinyi, *et al.* Analysis on characteristics of influent water quality of typical municipal sewage treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(6): 12-15 (in Chinese).
- [2] 王阿华. 城镇污水处理厂提标改造的若干问题探讨[J]. 中国给水排水,2010,26(2): 20-22.
WANG Ahua. Discussion on some problems in upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2): 20-22 (in Chinese).
- [3] 吴云生,张宝林,刘冰玉,等. 一种基于多点进水和多模式运行的可强化反硝化脱氮除磷系统: 201920286906.2[P]. 2020-01-10.
WU Yunsheng, ZHANG Baolin, LIU Bingyu, *et al.* An Enhanced Denitrification and Phosphorus Removal System Based on Multi-point Inflow and Multi-mode Operation: 201920286906.2[P]. 2020-01-10 (in Chinese).

作者简介: 吴云生(1981-),男,黑龙江大庆人,硕士,高级工程师,北控水务集团产品中心副总工程师,主要从事污水处理、污水资源化和污泥处理处置设计和技术管理工作。

E-mail: wuyunsheng@bewg.net.cn

收稿日期: 2020-05-16

修回日期: 2020-05-28

(编辑:丁彩娟)