

马耀宗, 武海霞, 孟庆宇, 等. 更严格排放标准下我国城市污水处理厂提标改造进展[J]. 净水技术, 2023, 42(11):37-48, 126.

MA Y Z, WU H X, MENG Q Y, et al. Progress of upgrading and reconstruction for urban WWTPs under stricter discharge standards at home[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(11):37-48, 126.

更严格排放标准下我国城市污水处理厂提标改造进展

马耀宗, 武海霞*, 孟庆宇, 李 硕, 卢 忆

(南京工业大学城市建设学院, 江苏南京 211816)

摘 要 为提升水环境质量,我国各地陆续出台了当地污水处理排放标准,主要污染物的排放限值接近《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类甚至Ⅲ类标准,使得现有城市污水处理厂在“碳中和”“碳达峰”背景下的提标改造面临巨大的挑战。文中统计分析了近40年我国城市污水年排放量、污水年处理量与城市污水处理厂的发展,通过国家和地方排放标准的对比,提出污水处理厂需要选择合适的工艺路线减少有机污染物、氮和磷排放量。通过研究重点流域污水处理厂的提标改造实例,得出以下结论:减少COD排放工艺改造包括增加预处理、调整生化处理和增加深度处理;减少氮排放以改造生化处理为主;减少磷排放可通过改造生化处理与增设深度处理工艺来实现。污水处理厂应从节能降耗角度来进行工艺改造,为新一轮的提标改造提供了借鉴与参考。

关键词 污水排放标准 提标改造 城市污水处理厂 污水处理工艺 有机污染物 氮磷

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)11-0037-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.11.005

Progress of Upgrading and Reconstruction for Urban WWTPs under Stricter Discharge Standards at Home

MA Yaozong, WU Haixia*, MENG Qingyu, LI Shuo, LU Yi

(College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract To improve the quality of water environment, some cities have developed and implemented the new wastewater discharge standards for the local urban wastewater treatment plants (WWTPs). The discharge limits of major pollutants are close to the class IV or even class III standards in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). Therefore, under the target background of the "carbon neutralization" and "carbon peak", there are great challenges of the upgrading and reconstruction which the urban WWTPs will be faced. The annual discharge of urban wastewater, the annual capacity of wastewater treatment and the development of urban WWTPs at home are statistically analyzed in recent forty years. Through the comparison of national and local discharge standards, the urban WWTPs need to choose appropriate processes to reduce the discharge of organic pollutants, nitrogen and phosphorus. By studying the upgrading and reconstruction projects of some WWTPs in the key river basins, it is proposed that the reconstruction of COD reduction processes includes increasing pretreatment, adjusting biochemical treatment and increasing advanced treatments. The reduction of nitrogen discharge is mainly based on the reconstruction of biochemical treatment, and the reduction of phosphorus discharge is by the reforming biochemical treatment and adding advanced treatment process. Saving energy and reducing energy consumption is an important development direction in the reconstruction of the WWTPs. This paper provides a reference for the new round of upgrading and reconstruction.

Keywords wastewater discharge standard upgrading and reconstruction urban WWTP wastewater treatment process organic pollutant nitrogen and phosphorus

[收稿日期] 2022-05-31

[基金项目] 大学生创新创业训练计划项目(2022DC0280)

[作者简介] 马耀宗(2001—),男,E-mail:1961137840@qq.com。

[通信作者] 武海霞(1980—),女,博士,研究方向为水处理高级氧化技术、工业废水深度处理、市政供水和排水工程,E-mail:vividhaixia@163.com。

改革开放以来,我国经济的高速发展使得城市污水排放量也随之增加。截至2020年年底,我国城市污水年排放量达5 713 633万m³,城市污水处理厂数量为2 618座,污水处理率达97.53%^[1]。2015

年,国务院印发《水污染防治行动计划》^[2],对污水中污染物的排放浓度提出了更高要求。重点地区和重点流域的污水处理厂已进行了提标改造,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)(下文简称“国标”)中的一级 A 排放标准^[3],2019 年达到此标准的污水处理厂数量占总体的 53.2%^[4]。《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)》等文件的颁布,标志着我国的污水处理进入新阶段。北京、天津、河北、昆明等省市制定了地方城镇污水处理厂出水指标,江苏太湖流域、安徽巢湖流域、四川岷沱江流域等陆续发布排放标准,对部分指标提出了更高的去除要求,以满足水环境整体质量的要求。

为达到地方更严格的排放标准,原执行国标一级 A 或一级 B 标准的城市污水处理厂必须进行提标改造,从运行管理或技术改造方面寻求有效的工艺或措施。陈秀成^[5]对长三角三省一市污染物排放标准进行对比和解析,提出从管网源头和污水处理厂工程措施两方面来应对提标改造。张鹤清

等^[6]分析了部分代表性污水处理厂的运行效果,提出适用于“准Ⅳ类”(除 TN 外,其余主要水质指标达到地表Ⅳ类水标准)污水排放标准的技术工艺。杨晨宵等^[7]提出 TN 是“准Ⅳ类”标准下污水处理厂提标改造的主要难点,关键要解决进水碳源不足的问题。各地城市污水处理厂采用的处理工艺不同,排放标准也各不相同,最终的解决方案也会有所差别。本文列举了近几年各地的排放标准以及代表性提标改造工程,厘清污水处理厂提标改造的实施现状,提出存在的问题和建议,为污水处理厂的新一轮出水水质提升提供参考。

1 城市污水处理厂概况

图 1 为 1978 年—2020 年我国城市年污水排放量、处理量与污水处理厂增长情况。可以看出,年污水排放量呈逐年增长趋势,从 1978 年的 $1.49 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增长到 2020 年的 $5.71 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。可以推测,随着城市化进程的不断推进,城市污水排放量将持续增长,城市污水处理厂将面临污水量增长带来的挑战。

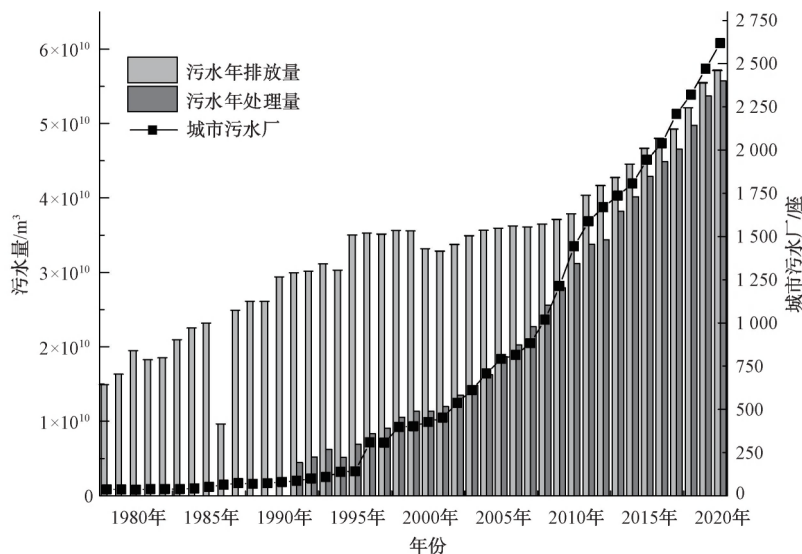


图 1 我国城市年污水排放量、年污水处理量与污水处理厂数量变化

Fig. 1 Changes of Annual Urban Wastewater Discharge Capacity, Annual Urban Wastewater Treatment Capacity and the Number of Urban WWTPs at Home

由于我国各省市城市发展、产业结构、人口数量等各不相同,其污水收集处理状况也有所不同。图 2 为我国城市污水处理厂地域分布。污水处理厂数量最多的省份是广东省,其次是山东省和江苏省,华东地区污水处理能力高。单个污水处理厂平均服务人口数最多的是上海市,达 57.81 万人,说明该地区

的人口聚集程度高,产业聚集程度高。有 13 个省市的单个污水处理厂平均服务人口数在 30 万~40 万人,有 10 个省市平均服务人口数在 20 万~30 万人。区域设施的建设情况与经济状况发展情况和人口数量有极大关系^[8]。

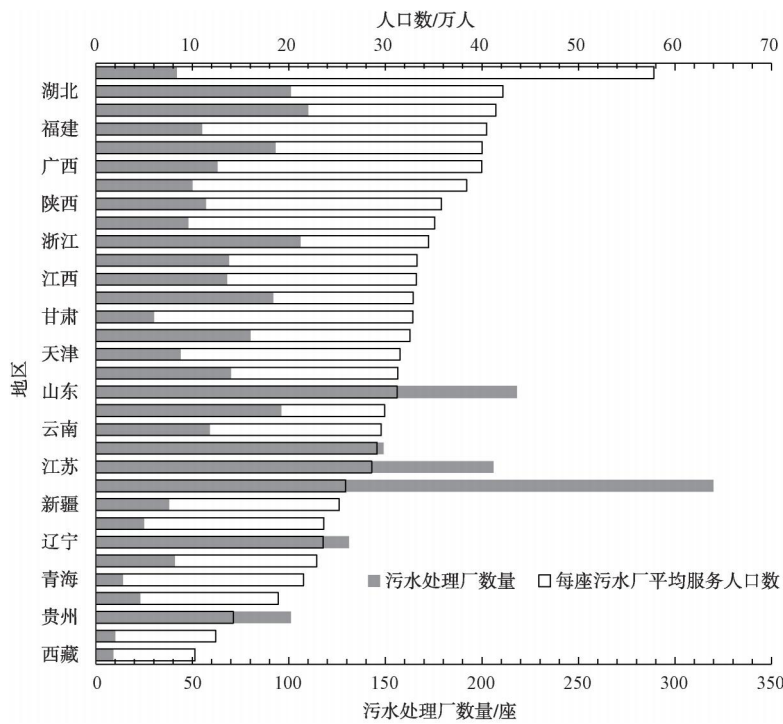


图 2 2020 年我国城市污水处理厂数量与平均服务人口数统计

Fig. 2 Statistics of the Number of Urban WWTPs and Average Service Population Per Plant at Home in 2020

2 排放标准及指标变化

《水污染防治行动计划》^[2]指出,到 2030 年,全国七大重点流域水质优良比例总体达到 75% 以上。由于国标一级 A 排放标准与《地表水环境质量标准》之间存在一定的差距,污水处理厂排放的

尾水仍会对水环境产生污染。因此,各流域所在地区的解决措施是制定当地排放标准,降低污水处理厂主要污染物的排放限值,减少尾水污染物的排放。部分城市污水处理厂主要污染指标的排放标准如表 1 所示。

表 1 部分地区城市污水处理厂主要排放标准和地表水质量标准

Tab. 1 Major Water Pollution's Discharge Limits of Some Urban WWTPs and Quality Standard for Surface Water

标准名称	标准	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	备注
《城镇污水处理厂污染物排放标准》 (GB 18918—2002)	一级 A	50	10	5(8)	15	0.5	/
	一级 B	60	20	8(15)	20	1	/
《地表水环境质量标准》(GB 3838— 2002)	Ⅲ类	20	4	1.0	1.0	0.2	/
	Ⅳ类	30	6	1.5	1.5	0.3	/
	Ⅴ类	40	10	2.0	2.0	0.4	/
北京市《城镇污水处理厂水污染物排 放标准》(DB 11/890—2012)	A 标准	20	4	1.0(1.5)	10	0.2	排入Ⅱ、Ⅲ类水体
	B 标准	30	6	1.5(2.5)	15	0.3	排入Ⅳ、Ⅴ类水体
	C 标准	50	10	5(8)	15	0.5	规模<1 000 m ³ /d
天津市《城镇污水处理厂污染物排 放标准》(DB 12/599—2015)	A 标准	30	6	1.5(3.0)	10	0.3	规模≥10 000 m ³ /d
	B 标准	40	10	2.0(3.5)	15	0.4	1 000 m ³ /d≤规模<10 000 m ³ /d
	C 标准	50	10	5(8)	15	0.5	规模<1 000 m ³ /d
《湖南省城镇污水处理厂主要水污染 物排放标准》(DB 43/T 1546—2018)	一级	30	/	1.5(3.0)	10	0.3	生态环境敏感区
	二级	40	/	3.0(5.0)	15	0.5	其他区域
浙江省《城镇污水处理厂主要水污染 物排放标准》(DB 33/2169—2018)	现有	40	/	2(4)	12(15)	0.3	/
	新建	30	/	1.5(3.0)	10(12)	0.3	/

(续表1)

标准名称	标准	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	备注
昆明市《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)	A级	20	4	1.0(15.0)	5(10)	0.05	生态环境敏感区
	B级	30	6	1.5(3.0)	10(15)	0.3	滇池流域
	C级	40	10	3(5)	15	0.4	螳螂川-普渡河
	D级	40	10	5(8)	15	0.5	其他
	E级	70	30	/	/	2	雨季溢流污水
《宁夏回族自治区污水处理厂主要水污染物排放标准》(征求意见稿)	城镇	40	/	2.0(3.5)	15	0.3	/
江苏省《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018)	一、二级保护区	40	/	3(5)	10(12)	0.3	/
	其他	50	/	4(6)	12(15)	0.5	/
广东省《淡水河、石马河流域水污染物排放标准》(DB 44/2050—2017)	/	40	/	2.0(4.0)	/	0.4	/
广东省《汾江河流域水污染物排放标准》(DB 44/1366—2014)	/	40	10	5.0	/	0.5	/
广东省《练江流域水污染物排放标准》(DB 44/2051—2017)	/	40	/	5.0(2.0)	/	0.5(0.4)	①
广东省《茅洲河流域水污染物排放标准》(DB 44/2130—2018)	/	30	/	1.5	/	0.3	/
安徽省《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016)	I类	40	/	2.0(3.0)	10(12)	0.3	工业废水<50%
	II类	50	/	5.0	15	0.5	工业废水≥50%
《河南省黄河流域水污染物排放标准》(DB 41/2087—2021)	一级	40	6	3.0(5.0)	12	0.4	入黄河干流、黄河一级支流和III类水体
	二级	50	10	5.0	15	0.5	其他
河南省《贾鲁河流域水污染物排放标准》(DB 41/908—2014)	郑州市区	40	10	3	15	0.5	/
	其他地区	50	10	5	15	0.5	/
河北省《大清河流域水污染物排放标准》(DB 13/2795—2018)	核心	20	4	1.0(1.5)	10	0.2	/
	重点	30	6	1.5(2.5)	15	0.3	/
	一般	40	10	2.0(3.5)	15	0.4	/
河北省《子牙河流域水污染物排放标准》(DB 13/2796—2018)	重点	40	10	2.0(3.5)	15	0.4	②
	一般	50	10	5(8)	15	0.5	/
《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)	城镇	30	6	1.5(3)	10	0.3	/
	工业园区集中	40	10	3(5)	15	0.5	/
重庆《梁滩河流域城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 50/963—2020)	重点	30	/	1.5(3)	15	0.3	规模≥10 000 m ³ /d
	一般	50	/	5(8)	15	0.5	规模≥10 000 m ³ /d

注:TN和氨氮括号内排放限值为水温≤12℃时的排放限值;广东省《小东江流域水污染物排放标准》(DB 44/2155—2019)同①;河北省《黑龙港及运东流域水污染物排放标准》(DB 13/2797—2018)同②。

北京是最早执行高标准地标的城市,后天津、太湖、巢湖等重点地区也制定了相应的标准。目前,昆明标准中A级特别排放限值指除TN外达到地表Ⅲ类水标准,是现阶段全国范围内最严的排放标准。

从排放标准的具体数值来看,各地主要针对

COD、氨氮和TP指标提出了更高的要求。例如,在所统计的地方排放标准中,约77%的COD指标高于一级A标准。在这77%中,有60%达到了地表水V类标准,约30%达到了IV类标准,另有其他特殊要求的区域指标不再赘述。对于BOD₅指标,约

38%的排放标准达到了地表水Ⅳ类及以上标准。对于氨氮指标,约74%的排放标准高于一级A标准,达到了地表水Ⅴ、Ⅳ、Ⅲ类标准。对于TN,大约58%的排放标准与一级A标准一致,其余排放标准中的TN指标介于一级A与地表水Ⅴ类标准之间。对于TP指标,约36%的排放标准与一级A标准相同,其余分别达到了地表水Ⅴ、Ⅳ、Ⅲ类标准,达到地表水Ⅳ类的居多。

3 提标改造工艺分析

由上文分析可知,虽然各地区排放标准各不相同,但与一级A对比后可发现提标改造的目标总体为三大类:第一类是降低COD排放限制,出水 COD_{Cr} 质量浓度从50 mg/L降至20~40 mg/L;第二类是降低氮污染物排放,出水氨氮质量浓度从5 mg/L降至1.5~3 mg/L,出水TN质量浓度从15 mg/L降至5~12 mg/L;第三类是降低磷污染物排放,出水TP质量浓度从0.5 mg/L降至0.2~0.4 mg/L。下面从这3个方面讨论国内已进行提标改造的污水处理厂所采取的措施。

3.1 降低COD排放

目前城镇污水处理主要以二级生物处理为主,厌氧-缺氧-好氧(AAO)、氧化沟与序列间歇式活性污泥法(SBR)(含相对应的改良工艺)是主要的处理方法,占我国污水处理厂总体工艺的85.6%^[9]。进一步降低污水中的COD,可通过优化生化系统运行方式或进行工艺改造,在二级处理阶段有效降低污染物浓度。太原市城南污水处理厂采用改良AAO工艺,在好氧反应区投加悬浮填料以增大生物池的污泥浓度,出水 COD_{Cr} 平均质量浓度达20.60 mg/L^[10]。长三角地区某污水处理厂在原有改良式序列间歇反应器(MSBR)的主曝气区投加悬浮填料,形成改良式序列间歇反应器-移动床生物膜反应器(MSBR-MBBR)工艺,出水 COD_{Cr} 平均质量浓度稳定在(18.40±3.07)mg/L,可达到地表“准Ⅳ类水”的要求^[11]。盱眙县某工业园区污水处理厂通过调整设备、反应流程等条件进而实现改良AAO工艺,采用臭氧(O_3)接触氧化池+曝气生物滤池的深度处理工艺保证难降解有机物的去除^[12]。天津某污水处理厂生物处理单元由原来的改良AAO改为分段进水二级AO,一级AO池中投加生物菌剂与碳源,二级AO池中投加活性炭,出水达天津市A标

准^[13]。

由于生化处理降低COD效果有限,目前还会采用深度处理来进一步减少污水中COD, O_3 氧化是常用的深度处理工艺之一。天津市张贵庄污水处理厂采用降低深度处理负荷+新增 O_3 催化氧化工艺, O_3 工艺可实现出水 COD_{Cr} 质量浓度达20 mg/L^[14]。孙高等^[15]在针对淮河流域城镇污水处理厂的升级改造过程中开发了AAO+膜生物反应器(MBR)+曝气生物滤池(BAF)+ O_3 组合工艺,确保难降解有机物的去除。北方某再生水厂除改建多段多级AAO工艺外,还新建了 O_3 接触池,出水提升至北京市地标一级B标准^[16]。浙江某污水处理厂采用 O_3 接触氧化和生物滤池来强化对二级出水中难降解COD的去除,出水达到“准Ⅳ类”标准^[17]。当进水工业废水比重较高时,部分改造工程采用Fenton高级氧化技术,如浙江某污水处理厂工业废水占比为60%,提标工程除了将MSBR改造为AAO工艺,还增设了Fenton处理工艺,出水 COD_{Cr} 平均质量浓度为28.82 mg/L^[18]。天津某开发区工业污水处理厂采用“反硝化滤池+Fenton高级氧化法”深度处理工艺,将 COD_{Cr} 质量浓度从60 mg/L处理至30 mg/L以下^[19]。此外,还有活性炭加磁高效沉淀^[20]、高效混凝沉淀+深床砂滤^[21]、生物活性炭池(BAC)等^[22]。

当污水处理厂进水中含有大量难降解有机物时,水解酸化等预处理也可为COD的去除起到促进作用。如义乌市佛堂污水处理厂采用水解酸化+AAO+反硝化深床滤池+多级流动床吸附塔(ACCA)+除磷一体机的工艺技术组合进行提标改造,出水 COD_{Cr} 质量浓度稳定在20 mg/L以下^[23]。

由此可见,根据进水水量与水质以及实际运行效果,增加预处理、优化生化处理运行条件或进行改造、增加高级氧化与活性炭等深度处理均可有效降低出水COD浓度,具体工艺及组合还需根据污水处理厂实际运行情况进行优选。

3.2 降低氮排放

TN的去除依赖进水有机物浓度、可生化性和碳氮比(C/N)^[24],而我国城镇生活污水中的C/N普遍较低,碳源的不足严重制约了生物脱氮能力^[6]。因此,TN一直是污水处理厂设计、运行中的难点^[24]。提升生化处理脱氮效果,可通过调整生化部

分运行参数、投加外部碳源、改造生物处理增大污泥量等来实现,不少污水处理厂已经进行了实践。例如北京市门头沟第二再生水厂采用 AAO+AO+MBR 工艺,两级缺氧多点投加碳源,出水 TN 平均质量浓度为 7.5 mg/L,冬季也能维持较好的 TN 去除率^[25]。呼和浩特市班定营污水处理厂将氧化沟改为多级 AO 联合 MBR 工艺,出水 TN 质量浓度低于 10 mg/L^[26]。

除充分利用二级生化处理除氮外,生物膜法等深度处理也是常用的提标改造方法。苏州市胥口污水处理厂除了在 AAO 池中增加生物填料外,还新建反硝化深床滤池,出水 TN 质量浓度为 (8.0±0.9) mg/L,达苏州市地标^[27]。深圳横岭污水处理厂改造工程采用新建两级曝气滤池+反硝化滤池+高负荷混凝沉淀池工艺,出水 TN<15 mg/L^[28]。成都某污水处理厂采用改良 AAO+MBR+高效沉淀工艺对污水处理厂进行提标改造,出水 TN 质量浓度可低于 8.6 mg/L^[29]。浙江某污水处理厂采用多段强化脱氮改良型 AAO 工艺,通过生物滤池和深床反硝化滤池并投加碳源来强化 TN 去除,出水 TN 质量浓度小于 12 mg/L^[17]。河南省三门峡市某县城污水处理厂将循环式活性污泥法 (CAST) 工艺改造成 Bardenpho (AAO+AO) 工艺,增加反硝化滤池和 BAF,出水 TN 质量浓度由 14.85 mg/L 降至 10.53 mg/L^[30]。

可以看出,反硝化滤池是常用的深度处理工艺,但去除效果在各污水处理厂中各不相同,如天津津沽污水处理厂深床滤池仅对部分颗粒态氮起截留作用,96.9%的 TN 由多点进水多点回流改进型多级 AAO 去除,生化处理增加了内回流点和最大回流量,提高内外碳源的利用效率^[31];而巢湖流域某污水处理厂将 V 型滤池改造为混凝反应池+斜板沉淀池+反硝化深床滤池,反硝化深床滤池 TN 平均去除率为 61.7%^[32]。说明同一种工艺在不同的污水处理厂去除污染物效率有所不同。氨氮的去除主要靠硝化过程来完成,低水温导致的硝化能力下降是达标难点^[33],通过前述生化工艺的调整和改造都能使氨氮达到各类排放标准。

此外,还有生物倍增+赛莱默深床反硝化滤池工艺^[34]、高浓度复合粉末载体生物流化床^[35]等新工艺的探索。总体而言,减少氮排放可通过深挖生化处理来实现,如强化反硝化反应、采用多点进水的

方式分配碳源、延长缺氧段水力停留时间,充分开发内部碳源的利用效率,间接减少投药成本^[7]。当生物处理无法保障出水氮达标时,反硝化深床滤池等生物膜法深度处理工艺能进一步增加氮的去除,起到辅助达标的保障作用。

3.3 降低磷排放

城镇污水处理厂采用生物除磷工艺可以将出水 TP 质量浓度控制在 0.5~1.0 mg/L^[24],要满足出水低于 0.3 mg/L 的难度较大。必须在充分利用生物除磷的前提下,增加深度化学除磷。目前常用的深度处理工艺有多种,效果亦有所差别,且深度处理效果易受二级出水水质的影响。

湖南省某污水处理厂采用 AAO 工艺结合高浓度复合粉末载体生物流化床工艺进行生产性试验,强化脱氮除磷效果,出水 TP 质量浓度 < 0.3 mg/L^[35]。长春市宽城区某污水处理厂采用固定生物膜活性污泥工艺 (IFAS) 工艺 (原生化池改造)+浸没式超滤+O₃ 接触氧化的工艺,实际运行均满足 TP 质量浓度 < 0.3 mg/L^[36]。深圳市某污水处理厂通过增设磁混凝沉淀池+超滤膜的组合深度处理工艺进一步去除 TP,改造后 TP 质量浓度为 (0.07±0.02) mg/L^[37]。义乌佛堂污水处理厂探索出 TP 达Ⅲ类水标准的处理工艺,即 AAO 生化除磷+高效沉淀+活性焦动态连续多级吸附^[23]。聊城市某污水处理厂将一组高效沉淀池改造为 SediMag 磁絮凝沉淀系统,出水可以稳定达到地表“准Ⅳ类”水中对 TP 质量浓度 ≤ 0.3 mg/L 的要求^[38]。无锡某工业园区污水处理厂采用水解酸化+AO 池+高效沉淀池+滤布滤池+O₃ 催化氧化系统+超滤的工艺对园区污水处理厂进行提标改造,出水 TP 质量浓度 < 0.2 mg/L,符合Ⅳ类要求^[39]。

由此可见,单一的深度处理工艺并不能决定除磷效果,很多污水处理厂在提标改造时都是进行系统改造,即二级处理工艺与深度处理工艺同步改造,研究最佳组合方式及参数,这样才能保障出水 TP 达到排放标准。

3.4 部分改造工程对比

提标改造不应单纯考虑工艺的升级,还应探讨相关的投资与成本。通过对比各工艺及其达到的指标、工程投资及运行成本,可为其他污水处理厂改造时工艺的选用和成本预估提供借鉴。表 2 列举了部分污水处理厂提标改造的工程概况。

表2 部分城市污水处理厂提标改造工程

Tab. 2 Upgrading and Reconstruction Projects of Part Urban WWTPs

名称[处理规模/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)]	原工艺	原标准	改造后工艺	改造后 排放标准	工程总投资	总计或新增运行 成本/($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$)
长春市宽城区某污水处理厂 ^[36] (68万)	改良 AAO+高密度沉淀+滤布滤池	一级 A	IFAS 工艺(原生化池改造)+浸没式超滤+O ₃ 氧化	北京市地标 B 标准	浸没式超滤系统投资约 48 000 万元	新增 0.709
长沙某污水处理厂 ^[40] (45万)	一期为 MSBR, 二期为 BAF	一级 A	一期 AAO-MBBR+澄清池, 二期双填料滤池, 三期 MBR+紫外消毒	湖南省地标一级标准	一期 20 952.01 万元; 二期 3 363.68 万元; 三期扩建工程 32 348.72 万元, 共 56 664.41 万元	/
某污水处理厂 ^[41] (24万)	AAO	一级 B	新建 BAF+高效沉淀+反硝化深床滤池	地表水“准 IV 类”	约 21 900 万元	新增 0.576
天津市张贵庄污水处理厂 ^[14] (20万)	多级 AO+反硝化深床滤池工艺	一级 A	水解酸化+AO 生物处理+絮凝沉淀+反硝化深床滤池工艺+O ₃ 催化氧化	天津市地标 A 标准	约 24 000 万元	经营成本增加约 0.48
深圳市某污水处理厂 ^[42] (16万)	CAST+化学除磷	一级 B	多段 AO 生物反应+磁混凝沉淀	地表水“准 IV 类”, TN ≤ 10 mg/L	约 52 165 万元	单位处理成本 1.49
广东省某污水处理厂 ^[43] (15万)	CAST 工艺	国标一级 B 和广东省水污染物排放限值一级标准较严值	淹没式生物滤池(SAF)+淹没式曝气滤池(SDF)+高效沉淀	地表水“准 IV 类”	/	提标工程直接生产成本 0.12
广东省某水质净化厂 ^[44] (10万)	SBR+纤维转盘滤池	一级 A (TN 除外)	SBR 后端新增上向流反硝化深床滤池	地表水“准 IV 类”	约 5 500 万元	新增直接运行费用 0.227
内蒙古鄂尔多斯市某水质净化厂 ^[45] (6万)	改良型氧化沟+絮凝沉淀池+V 型滤池	一级 A	多段多级 AO 工艺+磁混凝高效沉淀+生物焦吸附再生工艺	地表水“准 IV 类”	/	约 2.31
无锡市某工业污水处理厂 ^[46] (6万)	厌氧水解+多级 AO+MBR	一级 A	浅层气浮+厌氧水解+多级 AO+MBR+BAF+反硝化滤池+均相 O ₃ 催化氧化	地表水“准 IV 类”	约 29 800 万元	/
陕西省西咸新区某污水处理厂 ^[47] (5万)	改良 AAO+周进周出二沉池+高效沉淀	一级 A	新增改良 AAO+矩形周进周出二次沉淀一体式组合池+O ₃ 接触及 V 型滤池	地表水“准 IV 类”	约 8 058.93 万元	成品水处理成本 1.275
河北某污水处理厂 ^[48] (5万)	恒水位 SBR (CWSBR) 工艺	一级 A	改良 AAO+高效沉淀+反硝化深床滤池+高级氧化	地表水“准 IV 类”, TN ≤ 15 mg/L	/	污水处理成本 2.42
延安市某污水处理厂 ^[49] (5万)	厌氧+氧化沟	一级 A	改造原工艺形成 MBR; 重构生化池分区, 形成 AAOAO 运行方式	陕西省地标 A 标准	约 13 667.78 万元	水处理成本 0.696
北京某污水处理厂 ^[50] (5万)	CAST	一级 B	CAST+BAF+混凝沉淀砂滤+滤布滤池	北京市地标 B 级标准	/	/
雄安新区某污水处理厂 ^[51] (5万)	AAO	一级 A	BioDopp 生化	地表水“准 IV 类”, TN ≤ 10 mg/L	约 3 493.20 万元	1.75
浙江某污水处理厂 ^[52] (4万)	改良式 SBR 工艺	一级 B	AAO+MBBR+DBDF (反硝化深床滤池) 组合工艺	地表水“准 IV 类”	约 2 178 万元	新增运行费用 0.24
天津某工业园区污水处理厂 ^[53] (1万)	缺氧+接触氧化+沉淀	一级 A	水解酸化+AAO+MBR+O ₃ 氧化	天津市地标 A 标准	约 9 889 万元	经营成本 4.03
湖南省某污水处理厂 ^[22] (1万)	水解酸化+AAO+高效沉淀+纤维转盘滤布滤池	一级 A	新增 O ₃ -BAC	湖南省地标二级标准	约 1 051.4 万元	新增系统的运行成本 0.67

可以看出,污水处理厂原工艺多为二级生化处理,部分有深度处理工艺,执行一级 A 标准。改造后多数污水处理厂升级为组合工艺,优化了深度处理工艺,达到了更严格的地方标准或地表水“准 IV 类”标准。值得一提的是,反硝化深床滤池工艺在提标改造工程中得到了较广泛的应用。

出水水质标准越严格,所需的运行成本和占地面积越高。研究者^[54]推测,一级 B 标准单位污水处理成本为 0.45~1.40 元/m³,一级 A 标准根据处理设施设备的不同会比一级 B 增加 50% 以上。吴斯文等^[55]以徐州市某污水处理厂提标改造为例,采用“准 IV 类”和“准 III 类”标准相比于一级 A 标准,工程占地面积分别增加了 10% 和 53%,工程费用分别提高了 35% 和 73%,水处理成本分别提高了 54% 和 118%。本表列举的污水处理厂规模在 1×10⁴~6.8×10⁵ m³/d,经营成本最高达 4.03 元/m³,新增运行费用最高为 0.709 元/m³。投资较高的工程多涉及高级氧化系统相关的投资、模块化装备的增设,而投资较少的工程多是在原构筑物基础上进行改造,深度处理多选用的是传统工艺,其增加的费用也较少。运行成本较高的原因多是新增了 O₃ 等高级氧化工艺、药剂等的费用,其中高级氧化工艺对运行成本的影响较为明显。

3.5 存在问题与建议

3.5.1 存在问题

通过对目前污水处理厂的提标改造实例的分析,可以看出存在以下几方面问题。

(1) 虽目前近半数地方标准中的 COD 指标已经优于一级 A,达到了地表水 V 类,但与 IV 类标准还有距离,COD_{Cr} 质量浓度降至 20~40 mg/L 是目前多数污水处理厂升级改造的目标。进水水质对 COD 的去除效果有着较大的影响,若进水中工业废水比例较高,后续难以通过生化处理进行削减^[46]。

(2) 国内提标改造重点在于脱氮和除磷^[56]。杜林竹等^[57]指出,现有城镇污水处理厂的主要矛盾已从有机物的去除转到氮磷的去除。脱氮除磷是各大污水处理厂改造时所应针对的一大重点。TN 质量浓度若要稳定控制在 10~12 mg/L 以下,仅靠二级生物处理有一定难度。目前工程中多在深度处理段增加反硝化深床滤池作为最后的把关,但实际运行中的效果还要取决于碳源的精准控制^[5]。

(3) 在前期污水处理厂提标至国标一级 A 标准

的改造中,普遍采用二级生物改良处理单元扩容、增加深度处理单元^[58],已使污水处理厂流程增大,电耗、药耗等水处理成本增加。要从一级 A 标准提升到新的地方标准,将进一步增加处理流程,工程用地、工程投资、运营成本都将相应提高。如表 2 列举的部分工程实例,其运行成本均有不同程度的提高。而且工艺的复杂程度和设备的维护检修量都将明显提高,对污水处理厂经营提出了新的挑战。

(4) 2020 年市政污水处理行业耗电约 184 亿 kW·h,为我国的耗能大户^[59]。污水处理行业碳排放水平占全社会碳排放水平的 1%~2%^[60],污水处理厂的“碳中和”势在必行^[61-62]。在我国目前“双碳”目标背景下,多数污水处理厂提标改造工程增加了电耗和药耗,增加了 N₂O、CH₄ 等温室气体的排放,碳源、除磷药剂等生产与运输间接产生了 CO₂ 等温室气体,这些均与“双碳”可持续发展相违背。

3.5.2 建议

(1) 二级生物处理是污水处理系统的核心单元,其处理效果对污水处理厂出水水质和运行能耗有直接影响^[63]。生化系统的挖潜能提高生物段处理效果,例如碳源的精准投加可高效生物脱氮。因此,在提标改造中,通过全面分析水质、复核并充分利用生物处理能力,是城市污水处理厂提标和降低后续处理运行成本的最经济、最有效措施。

(2) 提标改造的投资费用与水质提升标准、主体工艺改造密切相关。因此,在进行提标改造时尽量不通过增加深度处理来使得出水达标,要综合投资、运行管理及处理成本等多方面因素来选择方案。

(3) 城市污水处理厂排放的污水是水污染物减排和水环境治理改善的重点,排放标准只会越来越严格。经过多轮提标改造后,再采取常用的处理技术不一定能满足发展的需要,须加大新技术的开发和应用研究。

(4) “碳中和”和“可持续污水处理”是行业今后的发展方向,污水处理厂提标改造应多从节能降碳的角度出发,通过采用低能耗污水处理工艺、减少高能耗设备、药剂精细化投加等,探索出符合我国国情的污水处理新模式。

4 结语

近 40 年来,我国排水工程快速发展,2020 年年底城镇污水处理率达到 97.53%。目前,我国污水

处理进入新阶段,在经济较发达地区与水环境敏感的重要流域提出了更为严格的排放限值,与地表水Ⅳ类甚至Ⅲ类接近。城市污水处理厂需要通过调整工艺的运行管理或选择合适的技术措施进行提标改造。可结合当地排放标准与现有工艺运行效果,综合考虑进水水质与水量变化,通过二级生化处理改良、增设深度处理等减少污染物排放量。城市污水处理厂提标改造与水环境质量需求和技术发展水平紧密联系,对水污染防治与水生态保护具有重要意义。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. 2020 年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2021-10-12) [2022-05-31]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>, 2021-10-12.
Ministry of Housing and Urban Rural Development. 2020 statistical yearbook of urban and rural construction [EB/OL]. (2021-10-12) [2022-05-31]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgnr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>, 2021-10-12.
- [2] 国务院. 水污染防治行动计划; 国发[2015]17号[EB/OL]. (2015-04-02) [2019-04-25]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm.
The State Council. Action plan for water pollution prevention; State issue[2015]No. 17 [EB/OL]. (2015-04-02) [2019-04-25]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm.
- [3] 宋旭, 孙士宇, 张伟, 等. "水污染防治行动计划"实施背景下我国水环境管理优化对策研究[J]. 环境保护科学, 2017, 43(2): 51-57.
SONG X, SUN S Y, ZHANG W, et al. Study of the optimization of water environment management in China under the background of water pollution prevention and control action plan [J]. Environmental Protection Science, 2017, 43(2): 51-57.
- [4] 李激, 王燕, 罗国兵, 等. 城镇污水处理厂一级 A 标准运行评估与再提标重难点分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 1-12.
LI J, WANG Y, LUO G B, et al. Operation evaluation of urban sewage treatment plants implementing grade I-A standard and analysis on emphasis and difficulties in upgrading the standard [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 1-12.
- [5] 陈秀成. 长三角地区污水处理厂排放标准解析及提标改造对策思考[J]. 给水排水, 2019, 55(11): 29-32.
CHEN X C. Analysis of discharge standards of wastewater treatment plants in Yangtze River delta region and consideration of the measures for upgrading [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(11): 29-32.
- [6] 张鹤清, 朱帅, 吴振军, 等. 城镇污水处理厂“准Ⅳ类”标准提标改造技术简析[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 26-30, 36.
ZHANG H Q, ZHU S, WU Z J, et al. Analysis of "quasi-category IV" standard upgrading and reconstruction technology for municipal wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(6): 26-30, 36.
- [7] 杨晨宵, 盛铭军, 黄继会, 等. “准Ⅳ类”标准下城镇污水厂提标改造的难点与举措[J]. 工业水处理, 2020, 40(11): 15-21.
YANG C X, SHENG M J, HUANG J H, et al. Difficulties and measures for upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants under quasi-IV standard [J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(11): 15-21.
- [8] 邓义寰, 吴坤, 阳平坚, 等. 我国城镇污水处理厂发展历程及技术建议[J]. 工业用水与废水, 2021, 52(4): 1-5.
DENG Y H, WU K, YANG P J, et al. Development history and technical suggestions of urban sewage treatment plants in China [J]. Industrial Water & Wastewater, 2021, 52(4): 1-5.
- [9] 艾胜书, 张焕楠, 王帆, 等. 城镇污水厂提标改造中生物处理工艺的研究与应用[J]. 环境生态学, 2019, 1(8): 53-55, 59.
AI S S, ZHANG H N, WANG F, et al. Research and application of biological treatment process for upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plant [J]. Environmental Ecology, 2019, 1(8): 53-55, 59.
- [10] 黎俊伟, 岳秀萍. 太原市城南污水处理厂提标改造设计及运行效果分析[J]. 山西建筑, 2020, 46(18): 119-121.
LI J W, YUE X P. Upgrading and renovation design of Taiyuan Chengnan wastewater treatment plant and analysis on operation effect [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(18): 119-121.
- [11] 方土, 周家中, 吴迪, 等. 长三角地区某污水处理厂准Ⅳ类水提标改造分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(17): 94-99.
FANG T, ZHOU J Z, WU D, et al. Analysis on upgrading and reconstruction of class IV surface water in a wastewater treatment plant in Yangtze River delta region [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(17): 94-99.
- [12] 姜鸣, 石芳永, 顾雪峰, 等. 工业园区污水厂准Ⅳ类水质提标改造工程设计[J]. 中国给水排水, 2022, 38(2): 59-63.
JIANG M, SHI F Y, GU X F, et al. Design of a wastewater treatment plant upgrading project in an industry park to meet quasi-IV surface water standard [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(2): 59-63.
- [13] 徐斌, 吴子秋. 天津某污水厂地方标准 A 提标改造建设[J]. 供水技术, 2018, 12(4): 25-27.
XU B, WU Z Q. Upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant in Tianjin up to level A of the local standard [J].

- Water Technology, 2018, 12(4): 25-27.
- [14] 王舜和, 郭淑琴, 李滕. 降低负荷+臭氧催化氧化用于张贵庄污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(6): 56-58, 61.
WANG S H, GUO S Q, LI M. Renovation upgrading project of Zhangguizhuang wastewater treatment plant via reduction pollutants load + ozone catalytic oxidation process[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 56-58, 61.
- [15] 孙高升, 王东东, 弋凡, 等. 淮河流域地表水类IV类标准污水深度处理工艺研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 16-23.
SUN G S, WANG D D, YI F, et al. Advanced wastewater treatment process with effluent quality meeting level quasi IV criteria of surface water in Huai River basin[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(19): 16-23.
- [16] 高伟楠. A²O + MBR 工艺用于北方某再生水厂提标扩建工程[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 91-95.
GAO W N. Application of A²O + MBR process in the upgrading and expansion project of a water reclamation plant in north China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 91-95.
- [17] 周文明, 周华, 黄荣敏, 等. 浙江某污水处理厂提标改造和扩建工程设计实例[J]. 给水排水, 2019, 55(12): 24-28.
ZHOU W M, ZHOU H, HUANG R M, et al. WWTP upgrading and expansion example in Zhejiang Province [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(12): 24-28.
- [18] 许晓明, 刘宇心, 闫萍, 等. 以工业废水为主的污水厂准IV类水质提标扩建工程设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18): 60-65.
XU X M, LIU Y X, YAN P, et al. A design case of upgrading and expansion project to meet the quasi-IV class standard in a WWTP with industrial wastewater as its major influent[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 60-65.
- [19] 郭庆英, 刘晓茜, 李晶. 芬顿高级氧化用于工业污水厂深度处理提标改造[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 64-67.
GUO Q Y, LIU X Q, LI J. Application of Fenton advanced oxidation process for upgrading and reconstruction project of an industrial wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10): 64-67.
- [20] 杜蓉, 林虹, 卢伟, 等. 江口污水处理厂一期工程提标改造工艺设计[J]. 工业用水与废水, 2020, 51(1): 74-78.
DU R, LIN H, LU W, et al. Technological design of upgrading and reconstruction project for first-stage construction of Jiangkou sewage treatment plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(1): 74-78.
- [21] 白海梅, 李明杰. 上海市竹园第一、第二污水处理厂提标改造工程案例[J]. 净水技术, 2019, 38(6): 41-45, 50.
BAI H M, LI M J. Case of upgrading and reconstruction project of Shanghai Zhuyuan No. 1 and No. 2 wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(6): 41-45, 50.
- [22] 王瑞霖, 张洪良, 张功良, 等. 基于污水处理厂提标改造需求的难降解工业废水处理工艺改进——以湖南省某城镇污水处理厂为例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(11): 3781-3788.
WANG R L, ZHANG H L, ZHANG G L, et al. Improved process for refractory industrial wastewater treatment to fulfill the upgrading and reconstruction requirements of municipal wastewater treatment plants (WWTPs): A case study of a municipal WWTP in Hunan Province [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(11): 3781-3788.
- [23] 傅信党, 龚向红. 污水处理厂排放标准执行地表水准III类标准的探索[J]. 净水技术, 2018, 37(5): 67-74.
FU X D, GONG X H. Exploration of implementation of surface water quality standard at quasi-class III for discharge standard of wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(5): 67-74.
- [24] 叶心彤. 严格总氮出水标准下的污水厂提标改造——以娄江污水厂为例[J]. 净水技术, 2020, 39(11): 44-48, 116.
YE X T. Upgrading and reconstruction of WWTP under stricter TN standard of effluent——A case study of Loujiang WWTP [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(11): 44-48, 116.
- [25] 吴念鹏, 贾芳芳, 王国华, 等. 高出水标准地式再生水厂运行难点探讨[J]. 给水排水, 2019, 55(10): 42-46.
WU N P, JIA F F, WANG G H, et al. Discussion on difficulties in operation of underground reclaimed water treatment plant with high discharge standard [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(10): 42-46.
- [26] 马宏伟, 陈雅琼, 陈阳. 多级AO-MBR工艺用于污水处理厂提标扩建工程设计[J]. 给水排水, 2017, 53(6): 30-34.
MA H W, CHEN Y Q, CHEN Y. Design of multistage AO-MBR process for upgrading and expansion of wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(6): 30-34.
- [27] 吕顺. 苏州市胥口污水处理厂提标改造工程设计方案[J]. 中国市政工程, 2021, 215(2): 50-53, 125.
LÜ S. Design scheme of Suzhou Xukou sewage treatment plant upgrading project [J]. China Municipal Engineering, 2021, 215(2): 50-53, 125.
- [28] 石兰兰, 张宝林, 吴云生, 等. 深圳横岭污水厂提标中曝气生物滤池的升级及应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 104-108.
SHI L L, ZHANG B L, WU Y S, et al. Upgrading and application of biological aerated filter in upgrading of Shenzhen Hengling wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 104-108.
- [29] 于骏, 肖国仕, 陈爱宁, 等. 某污水处理厂提标改造工程设计[J]. 工业用水与废水, 2020, 51(2): 73-76, 80.
YU T, XIAO G S, CHEN A N, et al. Upgrading and reconstruction project design of a wastewater treatment plant [J].

- Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(2): 73-76, 80.
- [30] 宋田翼. Bardenpho + 生物滤池(DN + CN)用于污水厂准IV类出水提标[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 106-109.
- SONG T Y. Bardenpho + biofiltration(DN + CN) process used in wastewater treatment plant with effluent of quasi-IV water standard[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 106-109.
- [31] 张玲玲, 尚巍, 孙永利, 等. 高标准下天津市津沽污水处理厂提标改造效果分析[J]. 给水排水, 2019, 55(10): 37-41.
- ZHANG L L, SHANG W, SUN Y L, et al. Analysis of the upgrading effect of Tianjin Jingu wastewater treatment plant under high discharge standard[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(10): 37-41.
- [32] 马玉萍, 胡香, 刘怡心, 等. 某污水处理厂类IV类标准提标前后的运行效能对比[J]. 中国给水排水, 2019, 35(3): 96-100.
- MA Y P, HU X, LIU Y X, et al. Comparison of operation efficiency before and after upgrading to meet quasi class IV standard of surface water in a WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(3): 96-100.
- [33] 李鹏峰, 郑兴灿, 李激, 等. 城镇污水处理厂提标改造工作流程探讨[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 14-19.
- LI P F, ZHENG X C, LI J, et al. Discussion on workflow of upgrading and reconstruction in municipal WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 14-19.
- [34] 胡秀云, 陈威, 王家乐, 等. BDP 工艺应用于华中某污水厂厂体改造中试实验[J]. 水处理技术, 2021, 47(2): 87-89.
- HU X Y, CHEN W, WANG J L, et al. Pilot-scale study on a wastewater treatment plant in central China using BDP process [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(2): 87-89.
- [35] 柴晓利, 韩红波, 张宏亮, 等. HPB 工艺用于污水厂提标扩容改造的生产性试验研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 9-15.
- CHAI X L, HAN H B, ZHANG H L, et al. Full-scale test of HPB process applied in upgrading and capacity expansion of a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 9-15.
- [36] 张丹丹, 牛和昕, 俞开昌, 等. 浸没式超滤 + 臭氧氧化用于某污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2021, 37(16): 119-123.
- ZHANG D D, NIU H X, YU K C, et al. Application of submerged ultrafiltration membrane and ozone contact oxidation process in a WWTP upgrading and reconstruction project [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(16): 119-123.
- [37] 沙超. 污水处理厂优于一级 A 提标改造工程设计案例—以深圳某污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2021, 40(4): 127-132.
- SHA C. Engineering design and discussion of a WWTP better than first grade A standard upgrading and reconstruction project in Shenzhen [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(4): 127-132.
- [38] 霍槐槐. SediMag^R 磁絮凝技术用于污水厂高效沉淀池改造[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 122-126.
- HUO H H. Application of SediMag^R magnetic sedimentation technique in renovation of high-efficiency sedimentation tank in WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 122-126.
- [39] 张万里, 冯仕训, 程明涛. 太湖流域某工业园区污水厂高排放标准提标改造工程设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 83-87.
- ZHANG W L, FENG S X, CHENG M T. Design of a wastewater treatment plant upgraded to higher discharge standard in an industrial park in Taihu area [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 83-87.
- [40] 刘影. MBBR、双填料滤池、MBR 用于污水厂多期同步扩容提标[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 63-69.
- LIU Y. Applications of MBBR, double packing media filter and MBR in multi-phase synchronous expansion and upgrading of sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18): 63-69.
- [41] 严潇南. 城镇污水处理厂类IV类水标准提标改造工程实例[J]. 工业用水与废水, 2020, 51(4): 74-76.
- YAN X N. An upgrading and reconstruction project of urban sewage treatment plant to meet seemingly class IV standard [J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(4): 74-76.
- [42] 沙超, 张瀚中. 深圳市某污水处理厂提标扩容工程节地工艺设计方案[J]. 城市道桥与防洪, 2021, 267(7): 162-165.
- SHA C, ZHANG H Z. Land-saving technological design scheme for upgrading and expansion of a wastewater treatment plant in Shenzhen [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021, 267(7): 162-165.
- [43] 王莎, 张锦辉. 广东某大型污水厂提标工程设计实例[J]. 水处理技术, 2022, 48(3): 153-156.
- WANG S, ZHANG J H. An upgrading design example of a large wastewater treatment plant in Guangdong Province [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(3): 153-156.
- [44] 伍波, 叶昌明, 王小林, 等. 上向流反硝化深床滤池用于污水厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2022, 38(4): 103-108.
- WU B, YE C M, WANG X L, et al. Application of upflow DDBF in upgrading and reconstruction of a WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(4): 103-108.
- [45] 李乐卓, 潘亮. 鄂尔多斯市某水质净化厂提标改造工程实践[J]. 中国给水排水, 2022, 38(4): 93-97.
- LI L Z, PAN L. Upgrading and retrofitting project of a water purification plant in Ordos [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(4): 93-97.

- [46] 张万里, 陈晓光, 程文, 等. 无锡市某工业污水处理厂准IV类提标改造工程设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 70-75.
ZHANG W L, CHEN X G, CHENG W, et al. Design of an industrial wastewater treatment plant quasi-IV standard upgrading and reconstruction project in Wuxi [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 70-75.
- [47] 付尧, 张丽婷. 一体式组合池及臭氧氧化用于污水厂准IV类提标扩建[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 141-144.
FU Y, ZHANG L T. Application of integrated secondary treatment and ozonation in WWTP upgrading and expansion to meet quasi-IV standards[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 141-144.
- [48] 李士松, 朱春风, 温汝青, 等. 改良A²O+深度处理工艺用于污水厂类IV类标准提标[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 63-67.
LI S S, ZHU C F, WEN R Q, et al. Application of modified A²O and advanced treatment process in a wastewater treatment plant upgraded to quasi-IV surface water standards[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 63-67.
- [49] 王勇, 欧阳兵, 徐军礼, 等. 延安市污水处理厂提标改造工程设计方案与实施效果[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3410-3417.
WANG Y, OUYANG B, XU J L, et al. Design scheme and implementation effect of upgrading project for Yan'an sewage treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3410-3417.
- [50] 张子潇, 魏屹, 顾鑫, 等. BAF工艺在污水厂提标改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 124-127.
ZHANG Z X, WEI Y, GU X, et al. Application of BAF process in upgrading and reconstruction of a WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 124-127.
- [51] 刘平波, 张俊, 王家乐, 等. BioDopp工艺应用于污水厂提标改造工程实例探讨[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 163-166.
LIU P B, ZHANG J, WANG J L, et al. Case analysis on the application of BioDopp technology in upgrading of sewage treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1): 163-166.
- [52] 王正法, 申屠俊杰, 蔡鹏翔. 浙江某污水厂准IV类提标改造MBBR+DBDF工艺设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 61-65.
WANG Z F, SHENTU J J, CAI P X. Design of MBBR/DBDF process for quasi-IV upgrading and reconstruction of a wastewater treatment plant in Zhejiang [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 61-65.
- [53] 刘兴静, 玄鹤林, 杨迪, 等. 天津某工业园区污水厂扩容与提标改造工程实例[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2): 103-108.
LIU X J, XUAN H L, YANG D, et al. Case of expansion and upgrading project of wastewater treatment plant in an industrial park in Tianjin [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 103-108.
- [54] 刘向荣, 简德武, 简爽. 高排放标准下城镇污水处理厂的提标改造探讨[J]. 中国给水排水, 2019, 35(20): 19-25.
LIU X R, JIAN D W, JIAN S. Discussion on the upgrading of municipal wastewater treatment plant under high emission standard [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(20): 19-25.
- [55] 吴斯文, 高雪, 黄志华, 等. 不同排放标准下污水厂提标改造工艺设计对比[J]. 工业用水与废水, 2020, 51(2): 45-48.
WU S W, GAO X, HUANG Z H, et al. Comparison of upgrading and reconstruction processes for sewage treatment plant under different discharge standards [J]. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(2): 45-48.
- [56] 吕开雷. 准IV类排放标准污水处理工艺应用进展[J]. 四川建筑, 2020, 40(2): 318-320.
LÜ K L. Progress in application of sewage treatment process in quasi class IV discharge standard [J]. Sichuan Architecture, 2020, 40(2): 318-320.
- [57] 杜林竹, 艾胜书, 刘轩彤, 等. 城市污水处理新型生物脱氮除磷技术研究进展[J]. 净水技术, 2021, 40(11): 28-34.
DU L Z, AI S S, LIU X T, et al. Research progress on novel biological denitrification and dephosphorization technology for urban wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 28-34.
- [58] 孙晓杰, 王嘉捷, 赵孝芹, 等. 我国城市污水厂推行一级A标提标改造探讨[J]. 环境工程, 2013, 31(6): 12-15.
SUN X J, WANG J J, ZHAO X Q, et al. Discussion on upgrading reconstruction of municipal wastewater treatment plant in China [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(6): 12-15.
- [59] 常纪文, 井媛媛, 耿瑜, 等. 推进市政污水处理行业低碳转型, 助力碳达峰、碳中和[J]. 中国环保产业, 2021(6): 9-17.
CHANG J W, JING Y Y, GENG Y, et al. Promote the low-carbon transformation of municipal sewage treatment industry and facilitate the realization of emission peak and carbon neutrality [J]. China Environmental Protection Industry, 2021(6): 9-17.
- [60] 宋新新, 林甲, 刘杰, 等. 碳中和视野下面向未来污水处理厂关键技术研发与工程实践——“面向未来污水处理厂关键技术研发与工程示范”专栏序言[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 1-6.
SONG X X, LIN J, LIU J, et al. The R&D and practice of key technologies for sewage treatment plants facing the future under carbon neutral perspective [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 1-6.

(下转第126页)

- municipal wastewater with low carbon to nitrogen ratio[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(7): 69-74.
- [2] 吴宇行, 王晓东, 陈宁, 等. 典型城镇污水处理厂碳源智能投加控制生产性试验[J]. *环境工程*, 2022, 40(6): 212-218.
WU Y H, WANG X D, CHEN N, et al. Full-scale study of an intelligent carbon dosing control system in a typical urban wastewater treatment plant [J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(6): 212-218.
- [3] 周乙新, 李激, 王燕, 等. 城镇污水处理厂低浓度进水原因分析及提升措施[J]. *环境工程*, 2021, 39(12): 25-30.
ZHOU Y X, LI J, WANG Y, et al. Reason analysis and improvement measures for low pollutants concentration of influent water of urban sewage treatment plants [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(12): 25-30.
- [4] 高富丽. 污水处理行业实现“双碳”目标技术措施探讨[J]. *智能建筑与智慧城市*, 2022(8): 118-121.
GAO F L. Discussion on technical measures to achieve "double carbon" target in sewage treatment industry [J]. *Intelligent Building and Smart City*, 2022(8): 118-121.
- [5] 鞠晨曦, 李建军. 4种重金属对活性污泥的呼吸抑制作用[J]. *工业水处理*, 2018, 38(10): 17-20.
JU C X, LI J J. Respiratory Inhibition of four heavy metals on activated sludge [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(10): 17-20.
- [6] 王程, 张念慈, 肖娟, 等. 硝化污泥低温冲击强化试验[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(4): 68-71.
WANG C, ZHANG N C, XIAO X, et al. Enhancement test of low temperature impact on nitrifying sludge [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2021, 33(4): 68-71.
- [7] 慈晓琳. 污水处理工艺反硝化过程的不同碳源研究[J]. *广州化工*, 2022, 50(10): 100-102.
CI X L. Study on different carbon sources of denitrification in wastewater treatment process [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2022, 50(10): 100-102.
- [8] 陈明飞, 许海琴, 蒋秋明, 等. 改性凝胶球包埋活性污泥对污水中重金属的响应[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(3): 8-15.
CHEN M F, XU H Q, JIANG Q M, et al. Response of modified gel sphere embedded activated sludge to heavy metals in sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(3): 8-15.
- [9] 李激, 王燕, 罗国兵, 等. 城镇污水处理厂一级 A 标准运行评估与再提标重难点分析[J]. *环境工程*, 2020, 38(7): 1-12.
LI J, WANG Y, LUO G B, et al. Operation evaluation of urban sewage treatment plants implementing grade I-A standard and analysis on empassis and difficulties in upgrading the standard [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(7): 1-12.
- [10] 王凯军, 官徽, 金正宇. 未来污水处理技术发展方向的思考与探索[J]. *建设科技*, 2013(2): 36-38.
WANG K J, GONG H, JIN Z Y. Thinking and exploration on the development direction of sewage treatment technology in the future [J]. *Construction Technology*, 2013(2): 36-38.
- [11] 周曼. 某污水处理厂碳排放核算研究[J]. *广东化工*, 2022, 49(5): 132-134.
ZHOU M. Study on carbon emission accounting of a sewage treatment plant [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(5): 132-134.
- [12] 马放, 杨基先, 魏利, 等. *环境微生物图谱*[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
MA F, YANG J X, WEI L, et al. *Environmental microbiological map* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.

(上接第 48 页)

- [61] 郝晓地, 张益宁, 李季, 等. 污水处理能源中和与碳中和案例分析[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(20): 1-8.
HAO X D, ZHANG Y N, LI J, et al. Case analysis of energy neutrality and carbon neutrality for wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(20): 1-8.
- [62] 蒋彬, 刘中亚, 陈垚, 等. 碳中和视角下污水处理现状与展望[J]. *工业水处理*, 2022, 42(6): 51-58.
JIANG B, LIU Z Y, CHEN Y, et al. Current situation and prospect of wastewater treatment under the perspective of carbon neutralization [J]. *Industrial Water Treatment*, 2022, 42(6): 51-58.
- [63] 黄志心. 城镇污水处理厂提标改造实践与思考[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(22): 48-53, 60.
HUANG Z X. Practice and thinking of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(22): 48-53, 60.