

城镇给排水工程设计案例专栏

罗宏伟, 熊顺华, 汪勇, 等. 基于低总氮控制要求的改良 AAO 工艺在太湖地区污水处理厂中的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(10): 155-165.
LUO H W, XIONG S H, WANG Y, et al. Application of improved AAO process based on low TN control requirements in WWTP in Taihu Region[J].
Water Purification Technology, 2023, 42(10): 155-165.

基于低总氮控制要求的改良 AAO 工艺在太湖地区污水处理厂中的应用

罗宏伟^{1,*}, 熊顺华¹, 汪勇¹, 陆琳², 袁克诚², 张力桢³, 董伟⁴

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 江苏南京 210000; 2. 溧阳市水利局, 江苏溧阳 213300; 3. 中建生态环境集团有限公司, 北京 100044; 4. 溧阳中建水务有限公司, 江苏溧阳 213300)

摘要 溧阳市花园污水处理厂主要收集和处理溧阳主城区南部及部分乡镇的生活污水, 设计出水标准执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准。随着脱氮除磷要求的不断提高, 为更好地适应太湖地区城镇污水处理厂新的排放标准, 避免造成刚建成投产即面临提标的被动局面, 花园污水处理厂设计适度超前, 常规处理工艺采用改良厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺, 深度处理采用“微絮凝+反硝化深床滤池”工艺, 深挖常规处理单元脱氮除磷的潜力, 同时预留深度处理单元进一步脱氮除磷空间。建成后, 花园污水处理厂运行效果良好, 2021年1月—2022年9月, 实际出水主要污染物指标优于《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)排放标准, 其中, 氨氮、COD_{Cr}、TP 达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV类水标准的达标率分别为 96.9%、99.5%、100%, TN 质量浓度稳定在 10.0 mg/L 以下。

关键词 生活污水 改良 AAO 工艺 脱氮除磷 反硝化深床滤池 IV类水标准

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2023)10-0155-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.10.020

Application of Improved AAO Process Based on Low TN Control Requirements in WWTP of Taihu Region

LUO Hongwei^{1,*}, XIONG Shunhua¹, WANG Yong¹, LU Lin², YUAN Kecheng², ZHANG Lizhen³, DONG Wei⁴

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. Liyang Water Resources Bureau, Liyang 213300, China;

3. China Construction ECO-Environmental Group Co., Ltd., Beijing 100044, China;

4. Liyang China Construction Water Protection Co., Ltd., Liyang 213300, China)

Abstract Liyang Huayuan wastewater treatment plant (WWTP) mainly collects and treats domestic wastewater of the southern part of Liyang main urban area and some towns. The design effluent standard implements *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002) first class A criteria. With the continuous improvement of nitrogen and phosphorus removal requirements, in order to better adapt to the new discharge standard for municipal WWTP of Taihu Region, and avoid facing the passive situation of upgrading when it is just completed and put into operation, Huayuan WWTP is moderately advanced in design, and the conventional treatment process adopts improved anaerobic-anoxic-aerobic (AAO) process. The advanced treatment adopts "micro-flocculation+denitrification deep-bed filter" process to deeply explore the potential of nitrogen and phosphorus removal in conventional treatment units, while reserving space for further nitrogen and phosphorus removal in advanced treatment units. After

[收稿日期] 2022-12-13

[通信作者] 罗宏伟(1980—),男,主要从事市政给水排水工程设计和咨询工作,E-mail:22122987@qq.com。

completion, Huayuan WWTP has a good operation effect. From January 2021 to September 2022, the main pollutant index of the actual effluent is better than requirement of *Discharge Standard of Main Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant & Key Industries of Taihu Area* (DB 32/1072—2018). The compliance rates of ammonia nitrogen, COD_{Cr} and TP to class IV water standard of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002) are 96.9%, 99.5% and 100%, respectively, and TN mass concentration is stable below 10.0 mg/L.

Keywords domestic wastewater improved AAO process nitrogen and phosphorus removal denitrification deep bed filter class IV water standard

在脱氮除磷要求不断提高的大背景下,全国各地的城镇污水处理厂排放标准也在不断更新。溧阳市花园污水处理厂设计的时间节点正处在江苏省地方标准《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)发布前不久,该标准中主要污染物(COD_{Cr} 、氨氮、TN、TP)排放标准严于国家标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准,尤其是 TN 排放标准提升幅度较大(排放限值由 15 mg/L 调整为 10 mg/L)。此时,该项目的前期立项工作已经完成,批复文件中明确了项目规模、用地、设计进出水水质、处理工艺、投资等。其中,出水执行 GB 18918—2002 中一级 A 排放标准,但根据环保部门的意见和建议,设计须充分考虑江苏省地方标准。在各设计条件基本确定的情况下,设计出水标准的大幅提高,再加上乡镇污水水量和水质的不确定性,这些都给设计和运行带来很大的挑战。本项目从实际需求出发,合理优化设计和运行,深挖改良厌氧-缺氧-好氧(AAO)处理工艺潜力,并通过大量运行数据分析结果,呈现污水处理厂在应对进水水量及水质波动大、低 TN 控制要求下的实际处理效果,为广大设计和运营管理人员提供借鉴和参考。

1 项目概况

全面推进区域污水治理,是太湖流域水环境综合治理的一部分,也是溧阳市进一步实现节能减排的重要举措,可有效改善城市水体水环境质量,提高人民生活水平。2017 年,溧阳市人民政府启动了溧阳市区域治污工程 PPP 项目,而花园污水处理厂一期工程是该项目的重要组成部分。

根据《溧阳市市域污水工程规划》(修编)(2015—2030),花园污水处理厂位于溧阳市东郊,老罗庄河以东,永平大道(G104)以北,平陵东路以南,厂区总占地面积约为 $7.34 \times 10^4 \text{ m}^2$,主要收集和

处理溧阳主城区南部、燕山片区、城南片区、天目湖镇和戴埠镇镇区(含撤并乡镇)的生活污水。污水处理厂总规模为 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分 3 期建成,其中一期工程为 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,二期工程为 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,三期工程为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。根据 PPP 项目设计任务书要求,花园污水处理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)中一级 A 标准,污水处理厂出水进入人工湿地(不在本工程范围内)进一步净化后排放至南河,南河与芜太运河、溧戴河交汇,最终往东汇流,至宜兴南溪河。南河、南溪河的 2020 年水质保护目标均为 III 类,而花园污水处理厂的南河排口距南溪河潘家坝考核断面距离较近,仅为 4 700 m。因此,为减少花园污水处理厂尾水排放对潘家坝考核断面的影响,环保部门要求花园污水处理厂的出水标准应充分考虑即将发布的太湖地区城镇污水处理厂污染物排放新标准。

在上述背景下,花园污水处理厂一期工程于 2017 年底完成设计工作,2018 年 4 月开工建设,2019 年 12 月建成投产,2020 年进入试运行阶段。项目总投资约为 1.806 亿元,其中,第一部分工程费约为 1.303 亿元。污水处理工艺采用“常规处理+深度处理”工艺,其中,常规处理采用改良 AAO 工艺,深度处理采用“微絮凝+反硝化深床滤池”工艺;污泥处理采用“重力浓缩+板框压滤脱水”工艺;消毒采用次氯酸钠消毒工艺;除臭采用生物土壤除臭工艺。

2 工程设计

2.1 设计进出水水质

参照溧阳市类似污水处理厂的进水水质,结合本工程实际情况,确定花园污水处理厂设计进水水质如表 1 所示。

根据设计任务书要求,花园污水处理厂设计出水应执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。考虑到当时《太湖地区

表 1 设计进水水质

Tab. 1 Designed Influent Water Quality

项目	进水质量浓度/(mg·L ⁻¹)
BOD ₅	≤160
COD _{Cr}	≤320
SS	≤240
氨氮	≤35
TN	≤45
TP	≤5.5

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)即将发布,结合环保部门要求,最终确定花园污水处理厂实际设计出水水质执行《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、二级保护区范围内的污染物排放限值。各标准中主要污染物限值如表 2 所示。

2.2 设计重难点分析及对策

根据表 2 中数据,相比《城镇污水处理厂污染

表 2 各标准主要污染物限值

Tab. 2 Limits of Major Pollutants in Each Standard

标准	BOD ₅	COD _{Cr}	SS	氨氮	TN	TP
GB 18918—2002 中一级 A 标准排放限值/(mg·L ⁻¹)	10	50	10	5(8)	15	0.5
DB 32/1072—2018 中太湖地区一、二级保护区内排放限值/(mg·L ⁻¹)	10	40	10	3(5)	10(12)	0.3
GB 3838—2002 中Ⅳ类水标准限值/(mg·L ⁻¹)	6	30	/	1.5	1.5	0.3

注:括号外数值为水温>12℃时的控制指标,括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。

物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,《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)中一、二级保护区范围内主要污染物(氨氮、COD_{Cr}、TP、TN)排放标准有大幅提升,这也就对处理工艺选择、设计参数选取、运行控制等方面都提出了更高的要求。污水处理采用生化处理工艺时,特别是生物除磷脱氮工艺,对进水中污染物的配比和平衡有一定的要求,具体如下。

(1)BOD₅/COD_{Cr} 是鉴定污水是否适宜采用生化处理的衡量指标,也是一种最简单易行和最常用的方法,一般认为 BOD₅/COD_{Cr}>0.3 的污水才适于采用生化处理。该比值越大,可生化性越好。

(2)BOD₅/TN 是鉴别能否采用生物脱氮的主要指标。由于反硝化细菌是在分解有机物的过程中进行反硝化脱氮的,在不投加外来碳源的条件下,污水中必须有足够的有机物(碳源),才能保证反硝化的顺利进行。一般认为 BOD₅/TN>4.0 时,满足生物脱氮需求。

(3)BOD₅/TP 是评价采用生物除磷工艺是否可行的主要指标。一般认为 BOD₅/TP>17 时,满足生物除磷需求。

如根据表 1 中设计进水水质进行测算,花园污水处理厂进水的 BOD₅/COD_{Cr}、BOD₅/TN、BOD₅/TP 分别约为 0.5、3.6、29.1,可认为进水可生化较好,

生物除磷条件较好,生物脱氮条件则稍差,表明碳源不足。但根据溧阳市及周边其他类似城市污水处理厂的实际情况来看,由于受排水体制、地下水入渗、雨污分流改造、居民用水习惯等诸多因素影响,污水处理厂实际进水的主要污染物浓度普遍低于设计进水浓度,尤其是 BOD₅ 浓度偏低,造成进水碳源不足。这就给生物脱氮除磷(尤其是脱氮)造成了非常不利的影响,故许多污水处理厂往往采用外加碳源(工程上一般采用乙酸钠或甲醇)的方式来保证脱氮除磷效果。针对上述问题,本工程对主要污染物去除影响因素分析及对策如下。

(1)BOD₅ 的去除

污水中的 BOD₅ 主要在工艺流程中的曝气池即生化反应池内去除,对于要求除磷脱氮的污水处理工艺,曝气池内还要完成硝化作用。硝化菌为自养菌,比增长速率比异养菌小一个数量级,因此,需要更长的泥龄或更低的污泥负荷。出水氨氮达标条件下,BOD₅ 的去除率很高,出水 BOD₅ 质量浓度完全能够控制在 10 mg/L 以下。

(2)COD_{Cr} 的去除

污水中 COD_{Cr} 的去除原理和 BOD₅ 基本相同,即通过微生物的代谢作用达到去除 COD_{Cr} 的目的。去除率取决于原水中有机的可生化性,生活污水的可生化性较好,去除率较高,但仅通过生物降解达到 40 mg/L 的排放标准,有一定难度,须采用化学法

或物理化学法加以去除。本工程采用的措施有:1) 生化反应池出水端投加混凝剂,提高生化污泥沉降性能,降低二沉池表面负荷,以达到更好的 SS 和 COD_{Cr} 去除率;2) 为节约投资,本工程未设置混凝沉淀池,而是仅通过微絮凝+过滤(反硝化深床滤池)进一步去除 SS 和 COD_{Cr} 。

(3) 氨氮、TN 的去除

氨氮的去除主要通过硝化作用来实现,氨氮的硝化过程将成为控制生化处理好氧单元设计的主要因素。影响硝化反应效果最主要的因素是溶解氧、污泥龄和温度。只要保证充足的供氧和足够长的污泥龄,就容易实现氨氮的完全硝化,将出水氨氮质量浓度控制在 3 mg/L 以下。

要使出水中 TN 质量浓度控制在 10 mg/L 以下,必须提高反硝化脱氮的效率。影响反硝化效率的主要因素:1) pH,反硝化反应最适宜的 pH 值为 $7.0 \sim 7.5$;2) 溶解氧,反硝化过程的溶解氧应保持在 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg/L}$;3) 温度,反硝化反应的适宜温度为 $15 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$;4) 碳源,当污水中 $\text{BOD}_5/\text{TN} < 4$ 时,应补充外来碳源;5) 回流比,理论上越高的回流比, TN 的去除率越高,但过高的回流比会导致过高的能耗,故工程上一般根据 TN 的去除要求将回流比设置在 $200\% \sim 300\%$ 。

为实现氨氮、TN 的去除要求,本工程采取的措施:1) 运行中严格控制生化反应池好氧区溶解氧浓度,避免硝化液回流溶解氧过高而消耗大量的碳源;2) 选取合适的污泥负荷,优化好氧区和缺氧区池容占比,在满足硝化需求的前提下,适当增加缺氧区容积,以提高 TN 去除效率;3) 优化回流比,设置多套内回流泵,根据进出水 TN 指标灵活调整开启数量,以节约能耗;4) 在生化反应池缺氧区设置碳源投加点,为减少硝化液回流中的溶解氧对碳源的消耗,投加点设置在硝化液回流点下游适当位置;5) 在深度处理反硝化深床滤池进水端设置碳源投加点,在常规处理单元 TN 去除仍不能满足要求的情况下投加碳源,开启反硝化功能^[2]。

(4) TP 的去除

国内外经验表明,仅通过生物除磷很难使出水中的 TP 质量浓度控制在 0.3 mg/L 以下,往往须辅以化学除磷工艺^[3]。生物除磷的影响因素:1) 碳源,一般认为当进水 $\text{BOD}_5/\text{TP} > 17$ 时,碳源充足;2) 污泥龄,生物除磷的污泥龄为 $3.5 \sim 7.0 \text{ d}$;3) 系统

中硝酸盐的回流干扰。

为提高除磷效果,本工程采取的措施:1) 强化生物除磷,采用改良 AAO 工艺;2) 辅以化学除磷,分别在改良 AAO 生化反应池出水端和微絮凝池进水端设置混凝剂投加点,2 个投加点互为备用,视现场情况灵活调整,通过剩余污泥的排放和深度处理单元的微絮凝过滤来达到除磷的目的。

(5) SS 的去除

常规污水处理工艺出水 SS 质量浓度能够达到 20 mg/L 的排放标准,要达到 10 mg/L 的排放标准,需通过深度处理进一步去除。SS 的主要成分是活性污泥絮体,絮体中含有有机物和磷,所以较高的出水 SS 含量将会导致出水的 BOD_5 、 COD_{Cr} 和 TP 含量增加。因此,控制出水中 SS 指标是最基本的,也是最重要的。本工程采取的措施:1) 常规处理单元选用较低的污泥负荷,生化反应池出水端增加混凝剂以保持活性污泥的凝聚及沉降性能;2) 选用高效的周进周出辐流式二沉池型,提高沉淀效果;3) 深度处理单元采用微絮凝过滤进一步去除 SS。

2.3 改良 AAO 工艺简介

传统意义上的 AAO 工艺即厌氧-缺氧-好氧活性污泥法,即通过厌氧和好氧、缺氧和好氧交替变化的环境完成除磷脱氮反应。在这个工艺中,厌氧区用于生物除磷,缺氧区用于生物脱氮。原污水中的碳源物质先进入厌氧池,聚磷菌优先利用污水中的易生物降解物质成为优势菌种,为除磷创造了条件。污水然后进入缺氧池,反硝化菌结合其他可能利用的碳源将回流到缺氧池的硝态氮还原成氮气,达到脱氮的目的。传统 AAO 工艺进水点及内外回流点均已固定,运行调节不灵活,在进水碳源不足的情况下,反硝化细菌和聚磷菌之间存在对优质碳源的竞争,导致除磷和脱氮效果均会下降^[1]。传统 AAO 工艺流程如图 1 所示。



图 1 传统 AAO 工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Traditional AAO

为充分利用进水中的碳源,演化出改良 AAO 工艺,即预缺氧-厌氧-缺氧-好氧活性污泥法。为了

克服回流污泥中硝酸盐对除磷效果的影响,在厌氧区前段设一个预缺氧区,全部回流污泥及进水量的10%~30%(根据实际情况进行调节)进入预缺氧区,进水量的90%~70%进入厌氧区。在预缺氧区去除回流污泥中富含的硝酸盐,以降低或消除硝酸盐对厌氧区释磷的影响。同时,保证厌氧区充分利用原污水中的碳源物质,为厌氧区聚磷菌的释磷创造良好的环境。经充分释磷反应后进入缺氧区,利用污水中碳源(原水碳源不足时须外加碳源)对内回流混合液中的硝基氮进行反硝化。然后,再进入好氧区进行有机物降解、硝化反应和磷的吸收,通过合理排泥控制找到硝化反应所需长泥龄和除磷所需短泥龄的平衡点,从而保证较好的生物脱氮除磷效果,提高了系统的生物除磷能力。改良 AAO 工艺

流程如图 2 所示。

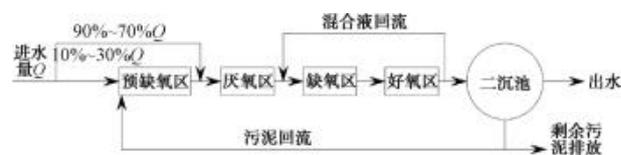
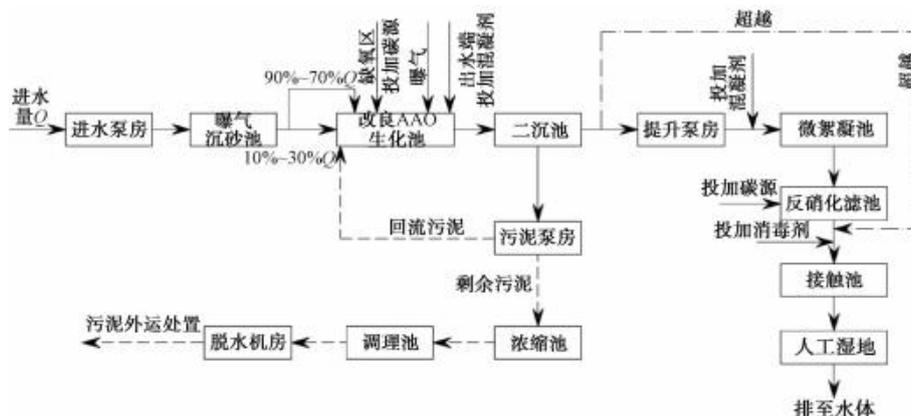


图 2 改良 AAO 工艺流程

Fig. 2 Process Flow of Improved AAO

2.4 污水、污泥处理工艺

花园污水处理厂污水处理工艺采用“常规处理+深度处理”工艺,其中,常规处理工艺采用改良 AAO 工艺,深度处理采用“微絮凝+反硝化深床滤池”工艺,污泥处理采用“重力浓缩+板框压滤脱水”工艺,消毒采用次氯酸钠消毒工艺。污水、污泥处理工艺流程如图 3 所示。



注:人工湿地不在本工程设计范围内。

图 3 污水、污泥处理工艺流程

Fig. 3 Process Flow of Wastewater and Sludge Treatment

2.5 主要建(构)筑物设计参数

花园污水处理厂总规模为 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分 3 期建成,其中一期工程规模为 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。污水

总变化系数取 1.31。一期工程主要建(构)筑物设计规模如表 3 所示。

表 3 一期工程主要建(构)筑物
Tab. 3 Main Structures of First Phase Project

建(构)筑物名称	土建规模/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	设备安装规模/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	备注
进水泵房	8.0×10^4	4.0×10^4	1 座
曝气沉砂池	8.0×10^4	4.0×10^4	1 座
生化反应池及污泥泵房	3.0×10^4	3.0×10^4	1 座
二沉池	1.5×10^4 (单座)	1.5×10^4 (单座)	2 座
提升泵房、微絮凝池	4.0×10^4	4.0×10^4	1 座
滤池	8.0×10^4	4.0×10^4	1 座
反冲洗泵房	8.0×10^4	8.0×10^4	1 座

(续表3)

建(构)筑物名称	土建规模/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	设备安装规模/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	备注
接触池	4.0×10^4	4.0×10^4	1座
浓缩池	4.0×10^4	4.0×10^4	1座
调理池	8.0×10^4	8.0×10^4	1座
脱水机房	8.0×10^4	8.0×10^4	1座
储液池	8.0×10^4	8.0×10^4	1座
加药间	8.0×10^4	3.0×10^4	1座
鼓风机房	8.0×10^4	3.0×10^4	1座

(1) 进水泵房

进水泵房共1座,粗格栅间和进水泵房合建,土建规模为 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设备安装规模为 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。粗格栅间设粗格栅渠道2个,每个渠道宽度为2.70 m,内设粗格栅1套,栅条间距为20 mm。进水泵房下部深度为10.4 m,上部建筑梁底净高为6.0 m,共设5个泵位,一期工程安装3套,2用1备,均设置变频,单套水泵性能参数:流量 $Q=1092 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=14.5 \text{ m}$,功率 $N=75 \text{ kW}$ 。

(2) 曝气沉砂池

曝气沉砂池共1座,细格栅间和曝气沉砂池合建,土建规模为 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设备安装规模为 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。细格栅间设置渠道2个,单渠宽度为2.60 m,内设细格栅1套,栅条间距为5 mm;曝气沉砂池水力停留时间为3.5 min,设桥式吸砂机1套,轨距为8.3 m。

(3) 改良 AAO 生化反应池及污泥泵房

改良 AAO 生化反应池与污泥泵房合建。改良 AAO 生化反应池共3座,分3期建成。其中,一期工程1座,分2组,每组土建及设备安装规模均为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用强化脱氮除磷改良 AAO 生化反应池,分为预缺氧池、厌氧区、缺氧区、好氧区,总水力停留时间为15.4 h,其中,预缺氧区为0.5 h,厌氧区为1.5 h,缺氧区为6.0 h,好氧区为7.4 h。设计水温为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,污泥负荷为 $0.07 \text{ kg BOD}_5/(\text{kg MLSS} \cdot \text{d})$,污泥质量浓度为 3.6 g/L ,内回流比为200%,污泥外回流比为25%~100%,有效水深为6.0 m,供氧方式为鼓风机曝气,综合污泥产率为 $0.6 \text{ kg VSS}/(\text{kg BOD}_5)$,总供气量为 $163 \text{ m}^3/\text{min}$,设计气水比为7.8:1.0。单组生化反应池主要设备:潜水搅拌机共13套,单套功率为5.5 kW,其中预缺氧区1套,厌氧区3套,缺氧区9套。混合液回流泵

3套,2用1备,单套性能参数为 $Q=625 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=0.7 \sim 1.5 \text{ m}$, $N=4.0 \text{ kW}$ 。

污泥泵房共3座,分3期建成。其中,一期工程1座,土建及设备安装规模为 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。污泥泵房分2组,单组主要设备:潜水搅拌机1套, $N=5.5 \text{ kW}$;污泥回流泵3套,2用1备,单套性能参数为 $Q=625 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=3.5 \text{ m}$, $N=11 \text{ kW}$;剩余污泥泵2套,1用1备,单套性能参数为 $Q=55 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=15.0 \text{ m}$, $N=5.5 \text{ kW}$ 。

(4) 二沉池

二沉池共5座,其中一期工程建2座,单座规模为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,周边进水、周边出水,单池直径为34 m,池深为4.5 m,最高日最高时表面负荷为 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均时表面负荷为 $0.69 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,堰口负荷为 $1.63 \text{ L}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。进水污泥质量浓度为 3.6 g/L ,回流污泥质量浓度为 8 g/L 。每座二沉池设中心传动单管吸泥机1套, $N=0.37 \text{ kW}$ 。

(5) 提升泵房、微絮凝池、滤池、反冲洗泵房

提升泵房、微絮凝池、滤池、反冲洗泵房合建。

提升泵房共2座,其中一期工程建1座,单座规模为 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,共设置4套潜水轴流泵,3用1备,单套性能参数为 $Q=906 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=6.0 \text{ m}$, $N=30 \text{ kW}$ 。

微絮凝池共2座,其中一期工程建1座,单座规模为 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,絮凝时间约为5.4 min,内设絮凝搅拌机1套,双层桨式,搅拌速度梯度为 $30 \sim 60 \text{ s}^{-1}$, $N=15 \text{ kW}$,变频调速。

滤池共1座,土建规模为 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设备安装规模为 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。考虑到后期可能对出水 TN 指标采用更严的标准,本工程设计留有适当余地,滤池采用纳污能力强,同时具备反硝化功能的反硝化深床滤池。滤池共8格,单格过滤面积为

70.92 m², 尺寸为 19.92 m×3.56 m×6.10 m, 正常运行滤速为 5.87 m/h(平均时), 强制滤速为 7.83 m/h(平均时)。滤池反冲洗方式:a)气冲 2~5 min, 气冲强度为 91 m³/(m²·h);b)气水共冲, 气冲强度为 92 m³/(m²·h), 水冲洗强度为 14.7 m³/(m²·h), 时间 10~15 min;c)最后水冲, 水冲洗强度为 14.7 m³/(m²·h), 冲洗时间为 5~10 min。滤池总水头损失≤2.44 m, 采用恒液位控制, 反冲洗周期为 24~48 h, 反冲洗水量≤3%。滤料规格为 2~3 mm 石英砂, 厚度为 1.83 m, 均匀系数 $K_{60} \leq 1.40$ 。承托层采用鹅卵石, 厚度为 450 mm。滤池进水渠前设置混合池, 内设搅拌器 1 套, 双层桨式, 搅拌速度梯度为 500~1 000 s⁻¹, $N=15$ kW。

反冲洗泵房共 1 座, 与反硝化深床滤池配套, 规模为 8.0×10⁴ m³/d, 一次性建成。上部为反冲洗鼓风机房和空压机系统, 下部为反冲洗废水池和反冲洗清水池。清水池和废水池设计池容均≥480 m³。主要设备:反冲洗风机 2 套, 1 用 1 备, 单套性能参数为 $Q=54$ m³/min, 风压为 70 kPa, $N=120$ kW;反冲洗水泵 2 套, 1 用 1 备, 单套性能参数为 $Q=518$ m³/h, $H=10.0$ m, $N=37$ kW;反冲洗排水泵 2 套, 1 用 1 备, 单套性能参数为 $Q=173$ m³/h, $H=7.6$ m, $N=11$ kW。

(6)接触池

接触池共 2 座, 一期工程建 1 座, 规模为 4.0×10⁴ m³/d, 水力停留时间约为 38 min(最高日最高时), 有效水深为 3.5 m。

(7)浓缩池

浓缩池共 2 座, 单座规模为 4.0×10⁴ m³/d, 直径为 12.0 m, 水深为 4.6 m。

(8)调理池

调理池共 1 座, 规模为 8.0×10⁴ m³/d, 一次性建成。调理池分为 2 格, 单格有效池容约为 200 m³。每格调理池设搅拌机 1 套, $N=11$ kW, 变频调速。

(9)脱水机房

脱水机房共 1 座, 规模为 8.0×10⁴ m³/d, 一次性建成。远期绝干污泥量约为 13.6 t/d, 其中一期工程绝干污泥量约为 5.1 t/d。脱水机远期进泥量约为 680 m³/d, 进泥含水率为 97%~98%, 出泥含水率≤60%。脱水机采用高压隔膜压滤机 2 套, 单套过滤面积为 500 m²。污泥最终出路为制砖、堆肥、综合利用。

(10)储液池

储液池共 1 座, 规模为 8.0×10⁴ m³/d, 一次性建成。储液池共分为 3 格, 每格有效池容约为 90 m³, 分别储存成品的混凝剂、消毒剂和碳源溶液。每格内设耐腐蚀液下立式泵 2 套, 1 用 1 备, 单套性能参数为 $Q=10$ m³/h, $H=10.0$ m, $N=3.0$ kW。

(11)加药间

加药间共 1 座, 土建规模为 8.0×10⁴ m³/d, 设备安装规模为 3.0×10⁴ m³/d。

混凝剂采用成品聚合氯化铝溶液, 设计最大投加量为 40 mg/L, 质量分数为 10%, 投加点在生化反应池出水端或微絮凝池进水端, 每个投加点对应 1 套计量泵, 一期共配备计量泵 3 套, 2 用 1 备, 单套性能参数为 $Q=800$ L/h, $H=30.0$ m。

消毒剂采用成品次氯酸钠溶液, 设计最大投加量为 25 mg/L, 质量分数为 5%, 投加点在接触池进水管路上, 一期配备计量泵 2 套, 1 用 1 备, 单套 $Q=800$ L/h, $H=30.0$ m。

碳源采用成品乙酸钠溶液, 设计最大投加量为 40 mg/L, 质量分数为 20%, 投加点在生化反应池缺氧区或反硝化深床滤池的混合池。一期生化反应池缺氧区投加点对应 3 套, 2 用 1 备, 每个投加点对应 1 套计量泵, 单套性能参数为 $Q=800$ L/h, $H=30.0$ m;反硝化深床滤池混合池投加点对应 2 套, 1 用 1 备, 单套性能参数为 $Q=800$ L/h, $H=30.0$ m。

(12)鼓风机房

鼓风机房共 1 座, 土建规模为 8.0×10⁴ m³/d, 设备安装规模为 3.0×10⁴ m³/d。一期配备高速磁悬浮离心鼓风机 3 套, 2 用 1 备。单套性能参数为 $Q=81.7$ m³/min, $H=7.0$ m, $N=132$ kW。

(13)除臭系统

一期工程设置 3 套生物土壤滤池除臭系统, 相对集中布置, 分别处理预处理单元(进水泵房、曝气沉砂池)、常规处理单元(生化反应池厌氧区、污泥泵房)、污泥脱水系统(浓缩池、调理池和脱水机房)的臭气, 处理规模分别为 12 500、6 500、9 500 m³/h。

3 项目运行情况

3.1 项目运行的水量、水质

本文收集并整理了花园污水处理厂 2021 年 1 月—2022 年 9 月(统计天数为 638 d)的运行数

据,从实际进水量数据来看,部分时间(占比约为 24.5%)实际进水量已经超出设计规模;从实际进水水质来看,大部分时间实际进水指标未超出

设计进水水质,小部分时间由于受工业废水冲击,实际进水水质超出设计进水水质,如表 4 所示。

表 4 部分超标进水水质

Tab. 4 Some Influent Water Quality of Standard-Exceeding

日期	水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	COD_{Cr} / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD_5 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
2021年9月13日	28 093	514	229	820	25.7	45.6	17.5
2021年10月2日	25 085	511	220	540	32.8	50.2	14.1
2022年6月8日	34 181	480	242	328	13.8	17.5	9.3

总体来说,进水 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 多在 0.4~0.6,可生化性较好; BOD_5/TN 多在 2~4,表明碳源不足,需要外加适量碳源以保证生物脱氮效果; BOD_5/TP 多在 17~30,满足生物除磷需求。虽然花园污水处理厂在某些时间受工业污水冲击,部分进水指标超出设计进水水质,但工业废水可生化性相对较好,与生活污水混合后的水中各污染物指标呈现一定的相关性。 $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 BOD_5/TN 、 BOD_5/TP 基本满足生物脱氮除磷的条件,故并未对实际出水产生太多不利影响。

根据现场运行反馈,在脱氮方面,花园污水处理厂仅在生化反应池缺氧区投加碳源,碳源采用乙酸钠,平均投加量为 14~18 mg/L。深度处理单元反硝化深床滤池进水端堰后有一定的跌水,在跌水过程中有一定的充氧作用,故在出水 TN 达标的情况下,为减少碳源投加量,污水处理厂并未开启该滤池的反硝化功能,仅作为砂滤池使用。在除磷方面,为节约能耗,花园污水处理厂未在微絮凝池投加混凝剂,仅在生化反应池好氧区出水端投加混凝剂,混凝剂采用聚合氯化铝,平均投加量为 7~9 mg/L,通过出水堰跌水及管道的水力混合作用,可达到较好的化学除磷效果。

从 2021 年 1 月—2022 年 9 月的实际出水数据来看,花园污水处理厂整体运行情况良好。实际运行的进水量、进出水 BOD_5 、进出水 COD_{Cr} 、进出水氨氮、进出水 TN、进出水 TP 指标分析如下。

(1) 实际进水量数据分析

实际进水量基本在 25 000~35 000 m^3/d ,最高日进水量为 36 992 m^3/d ,2022 年进水量普遍高于 2021 年进水量,并有逐渐升高的趋势,超出设计水量的天数有 156 d,占比约为 24.5%。实际进水量数据如图 4 所示。

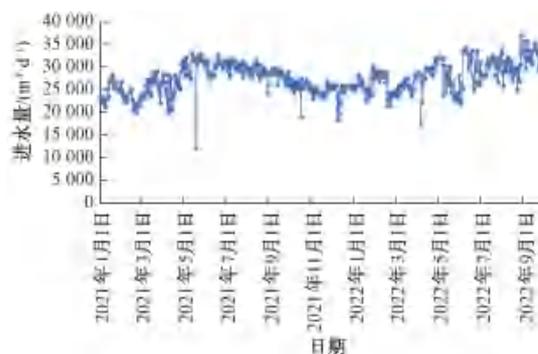
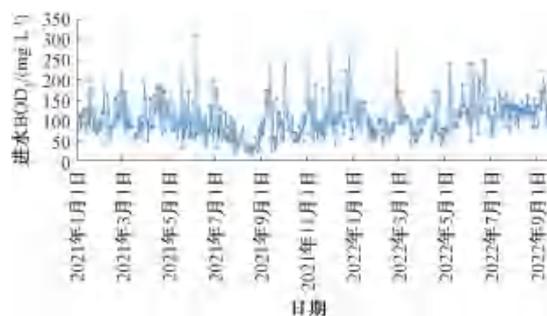


图 4 实际进水量数据

Fig. 4 Actual Influent Flow Data

(2) 实际进出水 BOD_5 数据分析

实际进水 BOD_5 质量浓度最低为 28 mg/L,最高为 308 mg/L,大多在 80~150 mg/L,超出设计进水水质的天数有 76 d,占比约为 11.9%;实际出水 BOD_5 质量浓度基本稳定在 6 mg/L 以下,最高为 5.6 mg/L,最低为 0.9 mg/L。实际进出水 BOD_5 指标如图 5、图 6 所示。

图 5 实际进水 BOD_5 质量浓度Fig. 5 BOD_5 Mass Concentration of Actual Influent

(3) 实际进出水 COD_{Cr} 数据分析

实际进水 COD_{Cr} 质量浓度最低为 55 mg/L,最高为 749 mg/L,大多在 150~300 mg/L,超出设计进水水质的天数有 62 d,占比约为 9.7%;实际出水

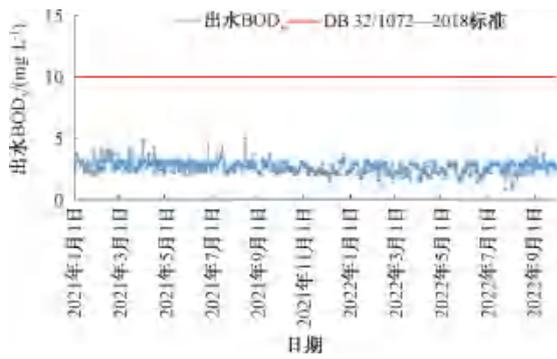


图6 实际出水 BOD₅ 质量浓度

Fig. 6 BOD₅ Mass Concentration of Actual Effluent

COD_{Cr} 质量浓度最高为 34 mg/L,最低为 6 mg/L,绝大多数稳定在 30 mg/L 以下,仅有 3 d 超过 30 mg/L,Ⅳ类水标准达标率为 99.5%;出水 COD_{Cr} 超标的主要原因是受工业废水冲击,进水量满负荷或超负荷,进水浓度超出设计进水水质,其中,最高的 1 d 实际进水量为 33 664 m³/d,进水 COD_{Cr} 为 418 mg/L。实际进出水 COD_{Cr} 指标如图 7、图 8 所示。

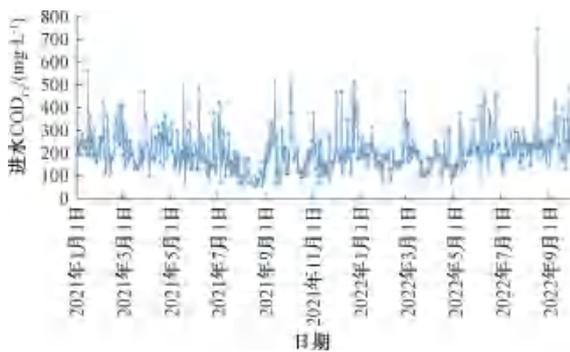


图7 实际进水 COD_{Cr} 质量浓度

Fig. 7 COD_{Cr} Mass Concentration of Actual Influent

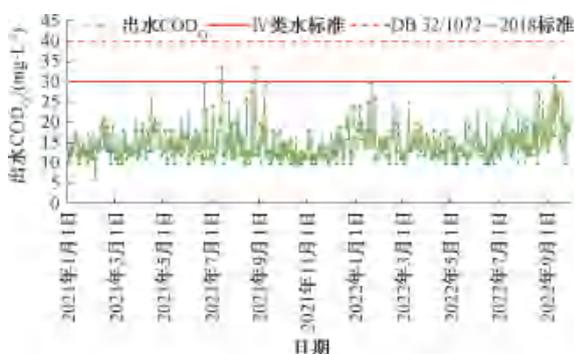


图8 实际出水 COD_{Cr} 质量浓度

Fig. 8 COD_{Cr} Mass Concentration of Actual Effluent

(4)实际进出水氨氮数据分析

实际进水氨氮质量浓度最低为 3.5 mg/L,最高

为 47.3 mg/L,大多在 20~35 mg/L,超出设计进水水质的天数有 56 d,占比约为 8.8%;实际出水氨氮质量浓度除个别日期超过 1.5 mg/L 外(多发生在 12 月一次年 3 月),绝大多数稳定在 1.5 mg/L 以下,最高为 2.9 mg/L,最低为 0.02 mg/L,Ⅳ类水标准达标率为 96.9%。出水氨氮超标的主要原因为冬季气温低,再加上其配套的厂外收集系统线路长,导致污水处理厂进水的温度较低,最低水温达到 8℃。当水温在 12℃ 以下时,硝化速率急剧下降,从而导致少数出水氨氮指标偏高。同时,本文所采用的数据均为瞬时样化验数据,取样时段的水质波动也存在一定概率。实际进出水氨氮指标如图 9、图 10 所示。

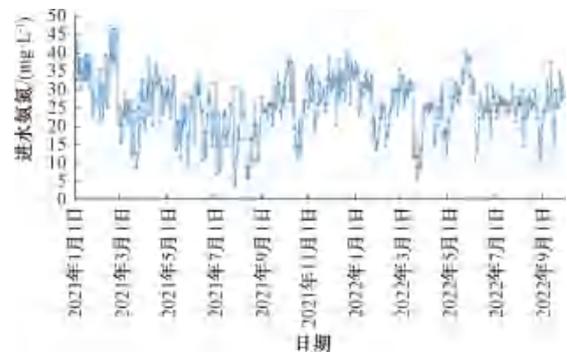


图9 实际进水氨氮质量浓度

Fig. 9 Ammonia Nitrogen Mass Concentration of Actual Influent

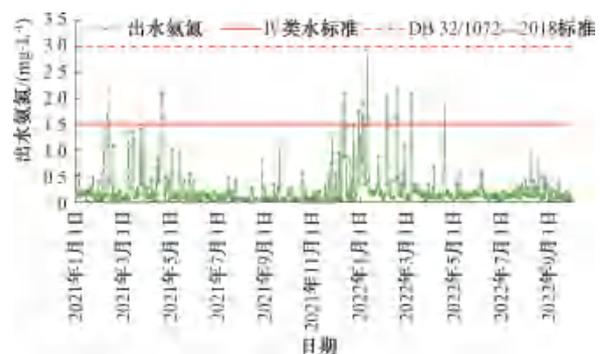


图10 实际出水氨氮质量浓度

Fig. 10 Ammonia Nitrogen Mass Concentration of Actual Effluent

(5)实际进出水 TN 数据分析

实际进水 TN 最低值为 8.3 mg/L,最高值为 62.7 mg/L,大多在 25~45 mg/L,超出设计进水水质的天数有 53 d,占比约为 8.3%。根据进水的 BOD₅/TN 分析,进水中存在碳源不足的问题,当在

生化反应池缺氧区投加碳源约 14~18 mg/L 的情况下,实际出水 TN 质量浓度稳定在 10 mg/L 以下,最高为 9.9 mg/L,最低为 1.9 mg/L。实际进出水 TN 指标如图 11、图 12 所示。

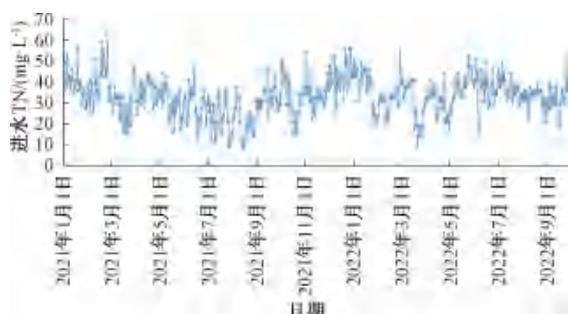


图 11 实际进水 TN 质量浓度

Fig. 11 TN Mass Concentration of Actual Influent

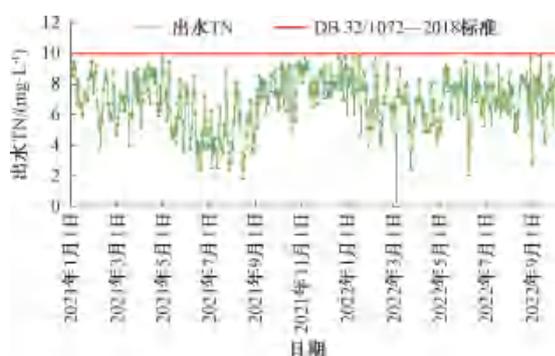


图 12 实际出水 TN 质量浓度

Fig. 12 TN Mass Concentration of Actual Effluent

(6) 实际进出水 TP 数据分析

实际进水 TP 质量浓度最低为 0.8 mg/L,最高为 17.5 mg/L,大多在 3.0~6.0 mg/L,超出设计进水水质的天数有 99 d,占比约为 15.5%。根据进水的 BOD₅/TP 分析,具备生物除磷条件,结合改良 AAO 工艺预缺氧池的设置,避免了硝酸盐回流对厌氧释磷的影响,再辅以较低的混凝剂投加(平均投加量为 7~9 mg/L),可达到较好的除磷效果。实际出水 TP 质量浓度稳定在 0.3 mg/L 以下,最高为 0.29 mg/L,最低为 0.02 mg/L。实际进出水 TP 指标如图 13、图 14 所示。

3.2 项目运行成本及能耗

对比周边类似水质和工艺的污水处理厂,花园污水处理厂的运行成本适中,吨水运行成本约为 0.996 元,具体组成如表 5 所示。花园污水处理厂吨水平均运行电耗约为 0.47 kW·h。

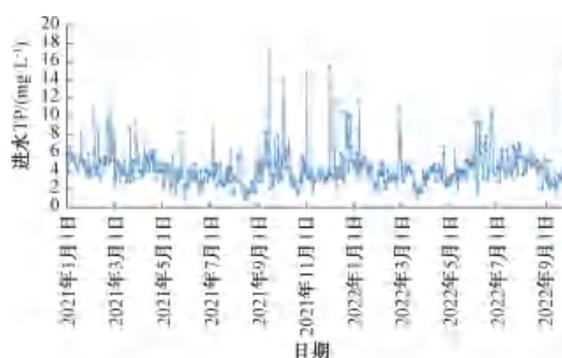


图 13 实际进水 TP 质量浓度

Fig. 13 TP Mass Concentration of Actual Influent

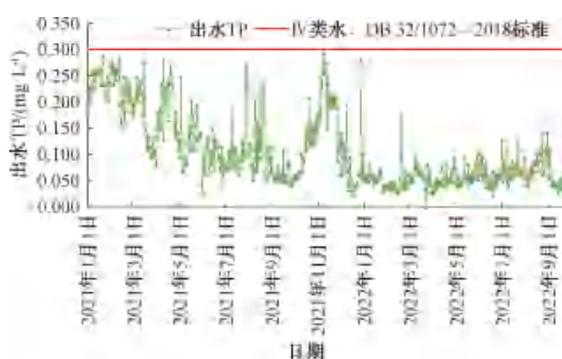


图 14 实际出水 TP 质量浓度

Fig. 14 TP Mass Concentration of Actual Effluent

表 5 运行成本分析

Tab. 5 Analysis of Operating Cost

运行成本组成	吨水运行成本/元	占比
电费	0.325	32.6%
药剂费	0.154	15.5%
污泥处置费	0.132	13.3%
大修及维修	0.123	12.3%
人工工资	0.176	17.7%
其他	0.086	8.6%

4 总结

(1) 综上,花园污水处理厂采用“改良 AAO”常规处理工艺+“微絮凝+反硝化深床滤池”深度处理工艺典型生活污水,通过合理功能分区设计和参数选取、优化加药点设置(如生化出水端设置混凝剂投加点、缺氧区起端内回流点后设置碳源投加点)、合理控制加药量(如控制碳源投加量为 14~18 mg/L,混凝剂投加量为 7~9 mg/L)等措施,在微絮凝未使用和反硝化深床滤池的反硝化功能未开启的情况下,也能够达到较好的脱氮除磷及 COD_{Cr} 去除效果,且系统具备一定的抗冲击能力。出水水质优于《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、二级保护区范围内的污染物排放标准,主要污染物指标(氨氮、COD_{Cr}、TP)达《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准的达标率分别为96.9%、99.5%、100%,出水TN质量浓度可稳定在10 mg/L以下,可为出水主要污染指标(TN指标除外)执行Ⅳ类水标准的污水处理厂的工程设计和运行提供借鉴。

(2)根据进水水质优化缺氧区和好氧区比例,适当扩大缺氧区容积,有条件时可设置机动区域(可作为缺氧或好氧模式运行),碳源不足时,在缺氧区适当投加碳源,可提高系统的脱氮效率。

(3)当出水有较高的脱氮要求时,宜根据进水水质特点及出水水质要求在常规处理单元实现,以减小后续深度处理单元的压力。当常规处理单元无法达到脱氮要求时,可通过深度处理单元进一步去除TN,但需注意深度处理脱氮单元的进水溶解氧指标,设计中应进行精细化设计,尽量减少上游流程中由于跌水、水泵提升等产生的充氧作用,以减少碳源的消耗。

(4)生物除磷辅以化学除磷能够起到较好的除磷效果。在厌氧区前端设置预缺氧区,可有效减小硝化液对厌氧释磷的影响。同时,通过进水流量合理分配,即小流量(10%~30%)进入预缺氧区、大流

量(90%~70%)进入厌氧区,满足释磷对碳源的需求,为好氧吸磷提供了良好的基础条件。在好氧区出水端投加混凝剂,通过好氧区出水堰跌水的水力混合效果,可有效提高化学除磷的效率,同时节约深度处理单元机械絮凝的能耗。

参考文献

- [1] 周伟,陈轩,周娟,等. 城镇污水改良A²/O工艺调试与脱氮除磷优化研究[J]. 贵州科学, 2022, 40(4): 56-59.
ZHOU W, CHEN X, ZHOU J, et al. Application of modified A²/O technology in nitrogen and phosphorus removal for municipal wastewater treatment[J]. Guizhou Science, 2022, 40(4): 56-59.
- [2] 张辉,桂丽娟,王伟伟. 某改良A²/O及深床滤池工艺地下净水厂的运营与管理[J]. 化工安全与环境, 2022, 35(31): 11-14.
ZHANG H, GUI L J, WANG W W. Operation and management of an underground water purification plant with improved A²/O and deep bed filter process[J]. Chemical Safety & Environment, 2022, 35(31): 11-14.
- [3] 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.
- [18] 王佳乐. 高盐废水强化多路径耦合脱氮技术及机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
WANG J L. The multi-path coupled technologies and mechanisms in nitrogen removal process treating saline wastewater [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [19] 于德爽,冷栋栋,吴祥芬. 海水盐度对A/O生物系统处理效果的影响[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(3): 94-99.
YU D S, LENG D D, WU X F. Influence of seawater salinity on processing effect of A/O biology system[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2009, 30(3): 94-99.
- [20] MOUSSA M S, UMANASEKERA D U, IBRAHIM S H, et al. Long term effects of salt on activity, population structure and flock characteristics in enriched bacterial cultures of nitrifiers [J]. Water Research, 2006, 31(12): 2203-2211.
- [21] 王晓艳,买文宁,唐启. 好氧颗粒污泥的培养及其对污染物去除特性研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1064-1069.
WANG X Y, MAI W N, TANG Q. Cultivation of aerobic granular sludge and its pollutant removal characteristic [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(9): 1064-1069.
- [22] 宋慧贇. 菌株LV2在高盐废水中的脱氮性能及其强化应用[D]. 太原:太原理工大学, 2021.
SONG H Y. Denitrification performance of strain LV2 in high-salt wastewater and its strengthen the application [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [23] 李明智,谭映宇,张宇,等. 混合型污水处理厂原位生物强化脱氮中试及微生物群落结构分析研究[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(2): 230-233, 243.
LI M Z, TANG Y Y, ZHANG Y, et al. Pilot scale study and microbial community structure analysis on in-situ bioaugmentation denitrification of mixed municipal wastewater treatment plant [J]. Environmental Pollution & Control, 2022, 44(2): 230-233, 243.
- [24] 吕金,张丹. 皮革废水生物处理过程中细菌多样性及生物强化脱氮研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2021, 2(10): 10-11.
LÜ J, ZHANG D. Study on bacterial diversity and bio-enhanced nitrogen removal in the biological treatment of leather wastewater [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2021, 2(10): 10-11.

(上接第123页)