

石春寅,李国炜,邹浩东. 高效沉淀池及生物滤池工艺在城市污水处理厂的应用及运行效果[J]. 净水技术,2021,40(1):134-139.

SHI C Y, LI G W, ZOU H D. Application and operation effect of high-efficiency sedimentation tank and biofilter process in urban WWTP [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(1):134-139.



扫我试试?

高效沉淀池及生物滤池工艺在城市污水处理厂的应用及运行效果

石春寅,李国炜,邹浩东

(重庆市市政设计研究院,重庆 400020)

摘要 重庆市某污水厂一期工程处理能力及出水水质均不能满足需求,且该厂位于人口密集区,用地面积紧张。改扩建工程采用地下式建设型,避免对周边居民产生不利影响。根据对实际进水水质分析,通过对两级生物滤池工艺和 MBR 工艺进行技术经济综合比较,确定采用两级生物滤池工艺。为减少厌氧除磷对生物脱氮的影响,并减少滤池的堵塞风险,在生化池前采用高效沉淀池化学除磷。污水厂采用“高效沉淀池+反硝化生物滤池+曝气生物滤池”工艺,用地指标为 $0.3 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,出水水质 COD_{Cr} 为 $13 \sim 38 \text{ mg/L}$ 、 BOD_5 为 $1.6 \sim 5.4 \text{ mg/L}$ 、 SS 为 $3 \sim 4 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 $0.1 \sim 0.22 \text{ mg/L}$ 、 TN 为 $7.2 \sim 12 \text{ mg/L}$ 、 TP 为 $0.04 \sim 0.11 \text{ mg/L}$,运行成本为 0.45 元/t 。该工艺节省占地,出水水质能够稳定达到一级 A 排放标准,运行成本适中,适用于地下式生活污水处理厂。

关键词 高效沉淀池 生物滤池 地下式污水厂

中图分类号: TU992.3 文献标识码: B 文章编号: 1009-0177(2021)01-0134-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2021.01.022

Application and Operation Effect of High-Efficiency Sedimentation Tank and Biofilter Process in Urban WWTP

SHI Chunyin, LI Guowei, ZOU Haodong

(Chongqing Municipal Research Institute of Design, Chongqing 400020, China)

Abstract Treatment capacity and effluent quality of a sewage treatment plant in Chongqing can not meet demand, and plant is located in densely populated areas with a tight land area. Underground construction type is used in this renovation and expansion project to avoid adverse effects on surrounding residents. According to actual water quality analysis, two-stage biofilter process and MBR process are adopted for comprehensive technical and economic comparison, and two-stage biofilter process is determined. In order to reduce the influence of anaerobic phosphorus removal on biological nitrogen removal and reduce risk of filter clogging, chemical phosphorus removal in high-efficiency sedimentation tank is used before biochemical tank. Wastewater treatment plant adopts the process of "high-efficiency sedimentation tank + denitrification biological filter + aerated biological filter", with land index of $0.3 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$. Effluent water quality includes COD_{Cr} of $13 \sim 38 \text{ mg/L}$, BOD_5 of $1.6 \sim 5.4 \text{ mg/L}$, SS of $3 \sim 4 \text{ mg/L}$, ammonia nitrogen of $0.1 \sim 0.22 \text{ mg/L}$, total nitrogen of $7.2 \sim 12 \text{ mg/L}$, total phosphorus of $0.04 \sim 0.11 \text{ mg/L}$, and operation cost of 0.45 yuan/ton . Process covers a small area, effluent quality can reach the discharge standard of Class A steadily, and operation cost is moderate, so it is suitable for underground sewage treatment plant.

Keywords high-efficiency sedimentation tank biofilter underground WWTP

[收稿日期] 2020-07-06

[作者简介] 石春寅(1983—),男,高级工程师,研究方向为市政排水。电话: 13996092796; E-mail: 95196362@qq.com。

高效沉淀池技术属于载体絮凝快速沉淀技术,是通过使用不断循环的介质颗粒和各种化学药剂强化絮体吸附,从而改善水中悬浮物沉降性能的物化

处理工艺。载体絮凝快速沉淀技术的典型工艺主要包括 OTV-Kruger 公司开发的 Aciflo 工艺和法国 Degremont 公司开发的 DensaDeg 工艺等,已在欧美得到推广应用。本文的高效沉淀池为 DensaDeg 改进工艺,目前,在国内主要应用于污水厂深度处理系统。

曝气生物滤池(biological aerated filter,BAF)属于生物处理的生物膜法,BAF 的最初形式为 OTV 公司于 20 世纪 80 年代末开发出的 BIOCARBONE 工艺。该工艺以密度大于水的膨胀板岩作为生物填料,水流上进下出,气水逆向,主要用于城市污水有机物的降解和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除。曝气生物滤池主要有 BIOCARBONE 生物滤池、BIOSTYR 生物滤池、BIOFOR 生物滤池 3 种形式。BIOSTYR 工艺是法国 OTV 公司对 BIOCARBONE 的改进,其滤料为比重小于 1 的球形有机颗粒,漂浮在水中。BIOFOR 生物滤池由法国 Degremont 公司开发,采用密度大于水的滤料,自然堆积,滤板和专用长柄滤头在滤料层下部,以支撑滤料的重量。而 BIOSTYR 中的滤板和滤头在滤料层顶部,以抵抗滤料层的浮力。曝气生物滤池的 3 种形式在世界范围内均有应用,目前,大多采用 BIOSTYR 和 BIOFOR。在国内,BIOSTYR 和 BIOFOR 工艺均有应用,以 BIOFOR 工艺为主,本文的生物滤池为 BIOFOR 改进工艺。高效沉淀池与生物滤池组合工艺是目前欧美地区首选的污水处理核心工艺,在国内应用较少。

1 项目背景

重庆市某污水厂建成于 1997 年,一期规模为 4.8 万 t/d ,污水处理工艺采用传统生物曝气池,未考虑脱氮除磷功能,且无消毒措施,出水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 及粪大肠菌群数等指标不能满足一级 A 标准。近年来,随着城市建设的快速发展,污水量迅速增长,该污水处理厂的处理能力与排放标准不能满足需求,因此,急需实施改扩建工程。

1.1 设计概况

重庆市某污水厂改扩建工程是一座地下式城市污水处理厂,服务范围 of 江北区观音桥、华新街片区,服务面积约 5 km^2 。厂址位于重庆市繁华商业区,若采用地上式建设形式,并设置加盖除臭,污水厂仍暴露于公众面前,且存在臭气外泄的可能。为减少“邻避效应”,提高土地资源利用率,本改扩建

工程采用地下式建设形式,下层为污水处理车间,上层为市政公共设施用地,可修建城市广场、停车库和综合办公楼。污水处理厂臭气经过收集处理后,通过设于综合办公楼之内的专用烟道输送至 100 m 以上高空排放。改扩建后设计规模为 6 万 t/d ,处理出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。

1.2 设计水质

本工程 2011 年污水厂实际运行水质如表 1 所示。

表 1 2011 年污水厂平均实际运行水质
Tab. 1 Average Actual Operation Water Quality of WWTP in 2011

水质指标	进水	出水	设计标准	
			现状一级 B	改建后一级 A
$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	353	32	60	50
$\text{BOD}_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	204	11.3	20	10
$\text{SS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	198	13.6	20	10
$\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	44	—	—	15
$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	32	—	—	5(8)
$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	4.3	—	—	0.5

注:括号内数值表示水温 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水质要求

污水厂实际进水水质具有如下特点:

(1) 进水浓度波动幅度较大,进水 COD_{Cr} 浓度为 $100\sim 600\text{ mg/L}$;

(2) 进水碳氮比平均为 4.64,满足生物脱氮要求,冬季 TN 浓度较高,处理难度大;

(3) BOD_5/COD 比值大部分时间大于 0.58,污水可生化性较好。

本次改扩建工程设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。设计进、出水水质如表 2 所示。

表 2 设计进、出水水质
Tab. 2 Designed Influent and Effluent Water Quality

水质指标	进水水质	出水水质
$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	440	50
$\text{BOD}_5/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	240	10
$\text{SS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	400	10
$\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	50	15
$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	35	5(8)
$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	5	0.5

注:括号内数值表示水温 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水质要求

2 污水处理工艺方案

本工程进水水质符合一般城市生活污水水质,碳氮比大于 4,碳磷比大于 17,设计采用具有生物脱氮功能的污水处理工艺。目前,地下式污水处理厂一般采用两级生物滤池,即反硝化生物滤池+曝气生物滤池工艺^[1]或 MBR 工艺^[2]等占地面积少的污水处理工艺,本次对拟这 2 种方案进行技术经济比较。

本文的生物滤池工艺是具有反硝化功能的两级生物滤池工艺技术:前置反硝化生物滤池即缺氧区脱氮;后续曝气生物滤池去除有机物和 $\text{NH}_3\text{-N}$;曝气生物滤池设置硝化液回流至反硝化生物滤池。

经过综合比较,MBR 工艺存在清洗药剂存放、膜更换问题,而两级生物滤池工艺方案优势明显^[3-4]:脱氮负荷高,出水水质能够稳定达标,用地节省约 3 000 m^2 且满足场地要求;运行费用适中,处理成本为 0.45 元/t;污泥产生量小,降低对环境产生危害的风险;水深较深,暴露在空气中的污水面积小,基本无臭味^[5],更适合本工程的建设要求。

由于污水厂生物脱氮除磷相互制约,且生物滤池停留时间短,为减少厌氧除磷对生化脱氮的影响,并减少滤池的堵塞风险及冲洗频次,在生化池前采用高效沉淀池化学除磷。高效沉淀池由于内部污泥循环,反应池中的污泥浓度变化较小,与原水中的污泥浓度相比,循环污泥的浓度较高,进水浓度的变化不影响其处理效果。该工艺特点适合进水浓度较高,且波动幅度大的进水水质情况,工艺可靠性较高;由于内部循环使污泥和水之间的接触时间较长,从而使耗药量低于其他的沉淀装置。因此,本工程推荐高效沉淀池+两级生物滤池工艺方案,工艺流程如图 1 所示。

2.1 平面布置

原污水厂位于江北区核心区域,北邻观音桥商业中心,南临万唐路及华新分流道,西临金源路,东临嘉华路,用地面积约 0.039 km^2 ,折合 58.5 亩(1 $\text{km}^2=1\ 500$ 亩)。污水厂四周大楼密集环绕,为了减少对附近居民的影响,满足环评要求,改扩建工程在原厂区围墙内采用地下式布置方式建设。

本工程拟对现状构建筑物进行拆除后重建,厂区内南北横穿 1 条排水箱涵 3.6 m $\times$ 4.2 m,不能迁改,且厂区内需预留综合楼建设用地,实际可用地面

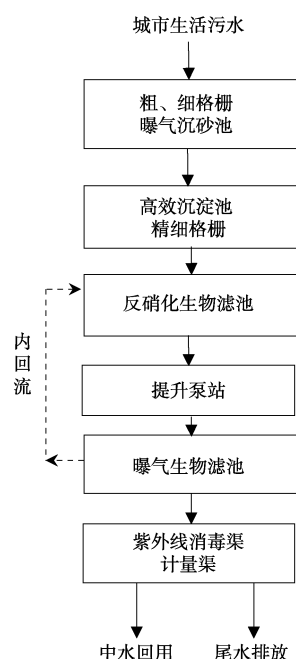


图 1 处理工艺流程图

Fig. 1 Flow Chart of Sewage Treatment Process

积仅有 0.018 km^2 ,污水处理厂现状如图 2 所示。

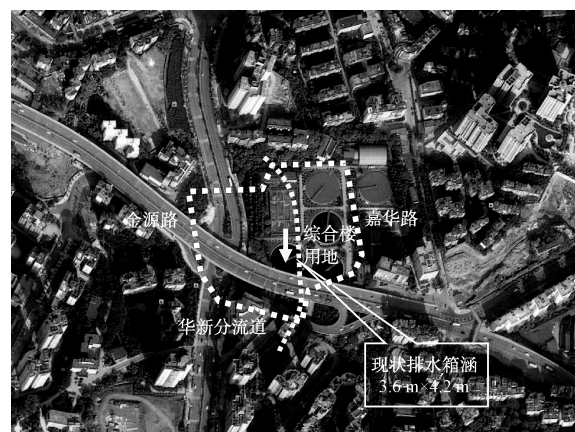


图 2 重庆市某污水厂现状周边环境图

Fig. 2 Surroundings Map of WWP

本工程平面布置拟沿污水厂工艺流程布置方向,由北向南分别布置进水井、格栅间、曝气沉砂池、高效沉淀池、生物滤池、紫外线消毒渠、回用水泵房及巴式计量槽等,工艺流程较顺畅,管线短、交叉少。厂区布置以排水箱涵为界,东侧布置格栅间、曝气沉砂池、高效沉淀池、污泥脱水车间等预处理及污泥处理设施,该单元产生的臭气浓度大,可一并收集作为高浓度臭气进行处理;西侧布置生物滤池、出水渠等污水处理设施。改扩建工程厂区平面布置如图 3 所示。

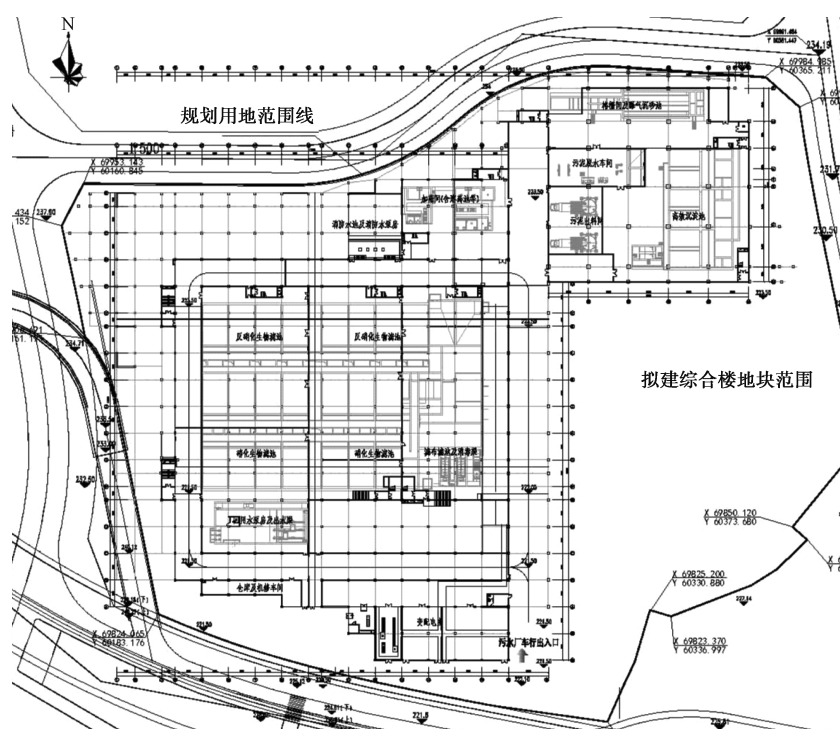


图3 改扩建工程平面布置图

Fig. 3 Layout Plan of Reconstruction and Expansion Project

本改扩建工程平面布置紧凑,实际用地面积约 0.018 km^2 ,折合 27 亩,吨水用地面积为 $0.3 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,远低于污水厂建设用地指标值 $0.85 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

2.2 工艺设计

(1) 进水溢流井

由于污水处理厂进水采用截流堰对主排水箱涵截流的方式,雨季时截流水量将超过污水厂设计规模。因此,需在污水处理构筑物前端设置溢流井,将超出设计规模的污水进行溢流,溢流污水仍回入主排水箱涵。

进水溢流井平面尺寸为 $3.5 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$,高度为 4.95 m 。上层为进水渠道,宽度为 1.8 m ,高度为 2.0 m 。下层为溢流通道,溢流管为 DN1200,与主排水箱涵连通。

(2) 粗、细格栅间

本工程粗格栅与细格栅合建,平面尺寸为 $13.3 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$,高度为 2.0 m 。

设计流量为 $1.04 \text{ m}^3/\text{s}$,过栅流速为 0.7 m/s ,粗格栅与细格栅各设 2 道回转耙齿式格栅除污机,其中,粗格栅栅条间距 8 mm ,细格栅栅条间距 3 mm 。回转式格栅除污机可人工启动、定时启动或

根据格栅前后水位差自动运行。栅渣输送至渣斗,含水率约 60%,滤水后运走。

(3) 曝气沉砂池

设曝气沉砂池 1 座,单座分 2 池,排泥区深 1.30 m ,总池深 3.70 m 。水平流速为 0.08 m/s ,水力停留时间为 3.7 min ,可去除污水中粒径 $\geq 0.2 \text{ mm}$ 的砂粒,使无机砂粒与有机物分离开,便于后续生化处理。

(4) 高效沉淀池

高效沉淀池设计水量为 $3750 \text{ m}^3/\text{h}$ 。机械搅拌池停留时间为 3.3 min ,中间反应池停留时间为 2.44 min ,快速混合反应池停留时间为 10.44 min ,推流区水力停留时间为 4.6 min ,澄清区设计上升流速为 $9.08 \sim 13.62 \text{ m/h}$,污泥回流比为 $2\% \sim 5\%$ 。

设置高效沉淀池 1 座,分 3 池,单池尺寸为 $11.5 \text{ m} \times 18.5 \text{ m}$,总池深 6.5 m 。

(5) 精细格栅间

精细格栅过栅流速为 0.7 m/s ,网板孔隙为 1.0 mm 。

设置精细格栅间 1 座,设 2 台精细格栅机,渠宽为 2.25 m ,格栅孔隙为 1.0 mm ,栅前水深为 2.3 m 。

(6) 反硝化滤池

反硝化滤池设计流量为 $3\,750\text{ m}^3/\text{h}$, 设计负荷为 $0.75\text{ kg 硝氮}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 水力负荷为 $9.3 \sim 10.4\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 空床停留时间为 $23.04 \sim 26.04\text{ min}$, 硝化液回流比为 $167\% \sim 200\%$, 反冲水洗强度为 $5\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 反冲气洗强度为 $14\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。滤池配水采用防堵长柄滤头, 单堰出水, 反冲洗形式为快速降水位+气水联合反冲洗, 滤料厚度为 4.0 m 。

设置反硝化生物滤池 1 座, 过滤总面积为 720 m^2 , 分为 8 格, 单格尺寸为 $7.5\text{ m} \times 12\text{ m}$, 池深为 10 m 。生物滤料粒径 $\Phi\ 6 \sim 9\text{ mm}$; 滤头契型缝隙宽度为 2.2 mm , 总滤缝 28 条, 滤头总长度为 405 mm , $56\text{ 个}/\text{m}^2$ 。

(7) 曝气生物滤池

曝气生物滤池设计流量为 $3\,750\text{ m}^3/\text{h}$, 设计负荷为 $0.35\text{ kg NH}_3\text{-N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 水力负荷为 $5.3 \sim 5.95\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 空床停留时间为 $40.32 \sim 45.3\text{ min}$, 曝气气水比为 $3.5:1$, 反冲水洗强度为 $5\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 反冲气洗强度为 $14\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。滤池配水采用防堵长柄滤头, 单堰出水, 反冲洗形式为快速降水位+气水联合反冲洗, 滤料厚度为 4.0 m 。

设置曝气生物滤池 1 座, 总过滤面积为 $1\,260\text{ m}^2$, 共分为 14 格, 单格尺寸为 $7.5\text{ m} \times 12\text{ m}$, 池深 7.8 m 。生物滤料粒径 $\Phi\ 3 \sim 5\text{ mm}$; 滤头契型缝隙宽度为 2.2 mm , 总滤缝 28 条, 滤头总长度为 405 mm , $49\text{ 个}/\text{m}^2$ 。

自控仪表配置: 反硝化滤池共 8 格, 每格设超声波液位计 1 套, 在线压差计 1 套, ORP 计 1 套, 在线溶解氧仪 1 套, 在线 SS 仪 1 套, 气体流量计 1 套, 在线硝氮 1 套; 曝气生物滤池共有 14 格, 每格设超声波液位计 1 套, 在线压差计 1 套, 在线溶解氧仪 2 套, 在线氨氮 1 套, 气体流量计 1 套, 在线 SS 仪 1 套, 污泥浓度计 1 套。

(8) 中间提升泵房

设计流量为 $7\,500\text{ m}^3/\text{h}$ (含污泥回流量)。设置提升泵房 1 座, 平面尺寸为 $11.5\text{ m} \times 12.0\text{ m}$, 高度为 10.05 m 。提升泵房配置轴流泵 5 台, 3 大 2 小。大泵参数: 流量为 $2\,500\text{ m}^3/\text{h}$, 扬程为 9 m , 功率为 120 kW (1 台备用); 小泵参数: 流量为 $1\,250\text{ m}^3/\text{h}$, 扬程为 9 m , 功率为 60 kW (2 台同时工作)。

(9) 鼓风机房及反冲洗设备间

本工程反冲洗时间共 23 min , 其中, 降水位时间

为 3 min 、单独气冲洗时间为 4 min , 气水联合冲洗时间为 6 min , 后单独水洗时间为 10 min 。

设置生物滤池曝气鼓风机 8 台 (1 台备用), 单台参数: 风量为 $20.83\text{ m}^3/\text{min}$, 风压为 60 kPa , 功率为 37 kW ; 反冲洗用鼓风机 4 台 (1 台备用), 单台参数: 风量为 $38\text{ m}^3/\text{min}$, 风压为 60 kPa , 功率为 75 kW ; 反冲洗用离心泵 3 台 (1 台备用), 单台: 流量为 $810\text{ m}^3/\text{h}$, 扬程为 11 m , 功率为 45 kW 。

(10) 污泥脱水车间

设计污泥干重约 $14\text{ t}/\text{d}$, 离心脱水机进泥含水率约 98% , 污泥量为 $700\text{ m}^3/\text{d}$; 脱水后污泥含水率为 $75\% \sim 80\%$, 污泥量为 $56 \sim 70\text{ m}^3/\text{d}$; 絮凝剂 (PAM) 投加量为 $4.8\text{ kg}/(\text{t 干固体})$ 。

设置离心脱水机 2 台, 单台流量为 $45\text{ m}^3/\text{h}$, 功率为 75 kW , 每天运行时间为 $8 \sim 10\text{ h}$ 。

3 运行效果

本改扩建工程项目建设总投资为 3.9 亿元 (地下式污水厂投资, 不含地面建筑), 于 2019 年完成环保验收, 目前已经正式运行。截至目前, 本污水处理厂已经正常运行 1 年, 生产负荷为 100% , 实际进、出水水质如表 3 所示, 出水各项指标均稳定达到一级 A 排放标准, 其中, BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标已经达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 规定的地表水 IV 类标准。

表 3 改扩建后实际进、出水水质
Tab. 3 Designed Influent and Effluent Water Quality

水质指标	进水水质	出水水质
$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	122~399	13~38
$\text{BOD}_5/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	72~205	1.6~5.4
$\text{SS}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	120~400	3~4
$\text{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	17~36	7.2~12
$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	11.4~16.3	0.1~0.22
$\text{TP}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.6~5.2	0.04~0.11

运行成本: 本工程厂区年耗电为 $730\text{ 万 kW} \cdot \text{h}$, 单价为 $0.80\text{ 元}/\text{kW} \cdot \text{h}$; 乙酸钠 (冬季进水总氮高、碳氮比较低时投加) 耗量 $700\text{ t}/\text{a}$, 单价为 $1\,800\text{ 元}/\text{t}$; PAC 耗量为 $846\text{ t}/\text{a}$, 单价为 $2\,400\text{ 元}/\text{t}$; PAM 耗量为 $22\text{ t}/\text{a}$, 单价为 $28\,000\text{ 元}/\text{t}$; 运行成本为 $0.45\text{ 元}/\text{t}$, 运行费用适中。

4 结论

(1) 高效沉淀池工艺具有占地面积小、抗冲击

能力强、TP 及 SS 去除效果好等优点;生物滤池工艺无需二沉池、自动化程度高、脱氮效果好,但受进水悬浮物浓度影响较大;二者工艺组合优势互补,节省占地面积和投资,出水水质较好。

(2)本污水处理厂运行结果表明:按照本文工艺设计参数,高效沉淀池及生物滤池工艺出水水质能够稳定达到一级 A 排放标准,具有占地省、投资低、抗冲击负荷能力较高、运行成本适中等优点,适用于进水水质波动幅度较高的地下式生活污水处理厂。该设计经验可供类似工程项目参考和借鉴。

参考文献

- [1] 陈谷. 小孤山再生水厂工程设计案例与探讨[J]. 净水技术, 2018(7):4-9.
- [2] 温翔. 地下式污水处理厂的设计研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2014.
- [3] 周永刚. 反硝化生物滤池在污水厂升级改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2014(24):49-52.
- [4] 李汝琪, 钱易. 曝气生物滤池去除污染物的机理研究[J]. 环境科学, 1999, 20(6):49-52.
- [5] 邱明海. 昆明市第十四污水处理厂工程设计技术方案[J]. 给水排水, 2019, 45(1):32-35.
- [23] LIU M, CHEN K N. Purification effect of submerged macrophyte system with different plants combinations and C/N ratios[J]. Huanjing Kexue, 2018, 39(6):2706-2714. DOI: 10.13227/j.hjxx.201710209.
- [24] YAO W X, CHANG G H, GAO T P, et al. Removal efficiency of ammonia nitrogen by artificial wetland and submerged plant in the Yintan Park of Yellow River from Lanzhou[J]. 2017. DOI: 10.12783/dtees/eesd2017/11977.
- [25] 樊恒亮. 沉水植物对不同营养条件和水深梯度的响应研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2017.
- [26] ZHANG Z B, LÜ Y F, ZHANG W, et al. 从四种沉水植物黑藻、菹草、苦草、金鱼藻中去除磷的研究(英文)[C]. 青岛:2014 青岛国际脱盐大会, 2014.
- [27] SMITH, SIGRID D P. The roles of nitrogen and phosphorus in regulating the dominance of floating and submerged aquatic plants in a field mesocosm experiment[J]. Aquatic Botany, 2014, 112: 1-9. DOI: 10.1016/j.aquabot.2013.07.001.
- [28] SU H, CHEN J, WU Y, et al. Morphological traits of submerged macrophytes reveal specific positive feedbacks to water clarity in freshwater ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2019, 684. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.267.
- [29] 薛艳玲. 沉水植物对河道水体氮素净化作用的影响[D]. 天津:天津大学, 2017.
- [30] LI D, LI G, LIU C Y. Interactions between a cyanobacterial bloom (Microcystis) and the submerged aquatic plant Ceratophyllum demersum Kom[J]. Chinese Journal of Oceanology & Limnology, 2009, 27(1). DOI: 10.1007/s00343-009-0038-7.
- [31] HUSSNER A, HOELKEN H P, JAHNS P. Low light acclimated submerged freshwater plants show a pronounced sensitivity to increasing irradiances[J]. Aquatic Botany, 2010(1):17-24.
- [32] WU Z, CAO Q, LÜ C, et al. Effects on the contents of dissolved oxygen in water and water quality by the photosynthesis of four submerged plants in urban polluted water[J]. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2017. DOI: 10.12783/dtetr/icaenm2017/7833.
- [33] CHENG Q, WU K, BAI Y, et al. Research on the relationship between the fractional coverage of the submerged plant Vallisneria spiralis and observed spectral parameters[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013(7):5401-5409.
- [34] SHARIP Z, SCHOOLER S S, HIPSEY M R, et al. Eutrophication, agriculture and water level control shift aquatic plant communities from floating-leaved to submerged macrophytes in Lake Chini, Malaysia[J]. Biological Invasions, 2012, 14(5):1029-1044.
- [35] XU F, YANG Z F, CHEN B, et al. Impact of submerged plants on ecosystem health of the plant-dominated Baiyangdian Lake, China[J]. Ecological Modelling, 2013: 167 - 175. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.07.013.

(上接第 22 页)

【项目团队介绍】李田教授团队长期从事城市雨水综合管理领域的科研与教学工作,承担或参加国家“十一五”、“十二五”与“十三五”水专项相关课题的研究,以及上海市科委相关课题的研究,多次获得上海市科技进步奖与华夏建设科技奖,在相关领域发表中英文论文一百余篇。