

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.013

景观人工湿地处理初期污染雨水工程案例分析

何磊, 吴克祥, 邹伟国

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 近年来,茅洲河流域水污染治理工作得到大力推进,水环境质量逐步改善,但初期污染雨水问题严重制约其水环境质量进一步提升。深圳市光明区楼村湿地公园工程(设计规模3 000 m³/d)将初期污染雨水引入人工湿地进行处理,高效完成了初期污染雨水的就地收集、调蓄、处理和回用,既解决了当前的黑臭问题,又巧妙地打造了兼具污水处理功能和景观特色的海绵主题湿地公园。详细介绍了该工程截流系统、污水处理系统、海绵系统、湿地景观系统的设计方法。

关键词: 初期污染雨水处理; 人工湿地; 景观

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0077-07

Case Study of Landscape Constructed Wetland for Treatment of Initial Polluted Rainwater

HE Lei, WU Ke-xiang, ZOU Wei-guo

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In recent years, the water pollution control in Maozhou River basin has been vigorously promoted, and the water environment quality has been gradually improved. However, the problem of initial polluted rainwater seriously restricts the further improvement of the water environment quality. The Loucun wetland park project in Guangming District, Shenzhen (design scale of 3 000 m³/d) introduces the initial polluted rainwater into the constructed wetland for treatment, and effectively completes the on-site collection, storage, treatment and reuse of the initial polluted rainwater, which not only solves the current black and odorous problem, but also cleverly creates a sponge theme wetland park with sewage treatment function and landscape characteristics. This paper introduced the design methods of intercepting system, wastewater treatment system, sponge system and wetland landscape system of the project in detail.

Key words: initial polluted rainwater treatment; constructed wetland; landscape

光明区位于深圳市西北部,属亚热带海洋性气候,茅洲河穿流而过。近些年深圳市持续地高强度推进治水工作,2019年底茅洲河水质已经实现历史性突破,19条支流稳定消除黑臭,茅洲河共和村国考断面连续达到地表水Ⅴ类标准,2022年更是稳定达到地表水Ⅳ类标准,氨氮从2015年的23.3 mg/L降至2 mg/L以下,茅洲河水环境达到1992年以来最好水平。光明区所处流域内多年平均降雨量1 594 mm,降雨年际变化大,汛期(4月—9月)降雨量大且

集中,约占全年降雨总量的73%。目前,初期污染雨水面源污染^[1]成为制约光明区水环境质量进一步提升的重要因素。

目前,初期污染雨水大多通过污水厂内的一级强化或常规混凝沉淀物化处理后直接排放水体,这种处理工艺药耗能耗高、处理不彻底。人工湿地是一种低碳、生态友好的污水深度处理技术,在城市污水厂尾水处理中有一定应用^[2-4]。

基于光明区水环境提升的迫切需求和周边居

民对公共休闲绿地空间的现实需要,确定利用景观人工湿地处理初期污染雨水,并巧妙地通过景观造型设计和植物品种优选,打造“初雨处理+海绵城市+景观亮点”的多功能人工湿地,实现水质净化和景观展示的双重目标。

1 项目背景

楼村湿地公园原称茅洲河人工湿地公园,位于深圳市光明区西北部,新陂头河和茅洲河干流交汇处(见图1)。由于年久失修、功能丧失,楼村湿地公园人工湿地沉积污泥 $31\,993\text{ m}^3$,污染物中有机质最高达到 28.5 g/kg ,总磷达到 769 mg/L ,总氮达到 590 mg/L ,总磷、总氮指标分别超地表水V类标准1923倍和295倍,成为黑臭水体,雨天成为茅洲河干流的重大污染源。同时,楼村湿地公园紧邻茅洲河干流碧道示范段,区域景观要求高,因此,其黑臭水体消除势在必行且亟需进行景观提升。



图1 楼村湿地公园区位图

Fig.1 Location map of Loucun wetland park

在实现雨污分流的基础上,为进一步高效控制初期污染雨水,决定采用“三水分离”的高标准治水模式(见图2),分别建设封闭的污水系统、开放的雨水系统和高效的初期污染雨水系统,全面减少污染物入河,确保河道水质不断提升。

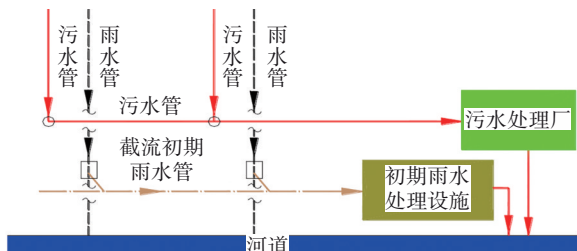


图2 截流初期污染雨水的完全分流制排水系统(三水分离)

Fig.2 Complete diversion drainage system for intercepting the initial polluted rainwater

经过大量前期研究,茅洲河流域总体规划截流标准为 $7\text{ mm}/1.5\text{ h}$ 。本工程作为茅洲河流域支流,其截流标准为 $7\text{ mm}/1.5\text{ h}$,河道水质保障率 $>80\%$ 。

2 方案设计

2.1 服务范围

楼村湿地初期污染雨水处理设施主要服务范围(见图3)为楼村社区排洪渠初期污染雨水系统(楼村社区排洪渠ML-21支渠和楼村社区排洪渠XZ-13支渠)。初期污染雨水截流管总汇水面积为 73 km^2 ,初期污染雨水截流标准为 $7\text{ mm}/1.5\text{ h}$,综合径流系数0.5,计算初期污染雨水规模为 $2\,846\text{ m}^3$,本次设计初期污染雨水收集水量取 $3\,000\text{ m}^3$,按1d处理完成设计,设计处理规模 $3\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。楼村社区排洪渠ML-21支渠建设初期污染雨水截流管长 $2\,340\text{ m}$,管径DN400~DN800;楼村社区排洪渠XZ-13支渠建设初期污染雨水截流管长 606 m ,管径DN400~DN600。

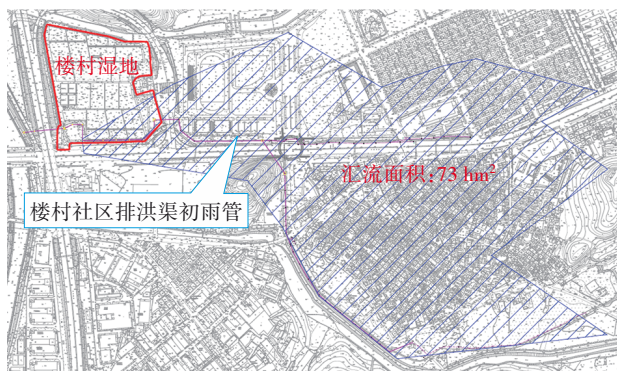


图3 楼村湿地公园初期污染雨水处理系统服务范围

Fig.3 Service scope of the initial rainwater treatment system of Loucun wetland park

2.2 处理标准

雨季时,人工湿地处理楼村排洪渠范围内初期污染雨水;旱季时,人工湿地处理楼村社区排洪渠河道水,必要时补充市政污水作为营养物质。本工程进水水质依据实际水质监测结果确定,出水水质参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中IV类水标准,设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	BOD ₅	COD	NH ₃ -N	TP
设计进水	20	100	25	2.5
设计出水	6	30	1.5	0.3

由于现场用地条件受限且污泥处理及运输容易引发次生臭气问题,因此本工程剩余污泥经重力浓缩后由槽罐车外运至光明水质净化厂进行处理。

本工程采用生物滤池除臭工艺,确保处理后的臭气浓度达到《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)的一级排放标准。

2.3 处理工艺

初期污染雨水系统只有在降雨时才会产生,具有间歇性,而生化系统和人工湿地系统均需要连续的来水来维持基本的新陈代谢。因此,本工程处理工艺分为雨季和旱季两种模式。

雨季模式时,处理设施收集和处理 $3\,000\text{ m}^3$ 初期污染雨水,由于雨水瞬时流量大,超量雨水优先进入调蓄池储存,待降雨结束后,调蓄池存水放空至提升泵房,经提升泵提升后进入后续设施进行处理,具体工艺流程见图4。

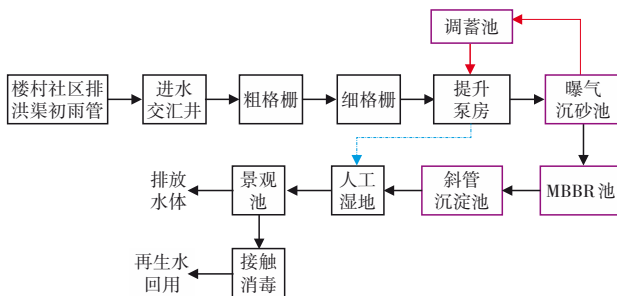


图4 雨季处理工艺流程

Fig.4 Flow chart of rainy season treatment process

在雨季进水水质条件较好的情况下,可考虑将人工湿地的处理规模从 $3\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 提高至 $10\,000\text{ m}^3/\text{d}$,通过水泵单独提升 $7\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 后期污染较轻的雨水超越生化处理构筑物直接进入人工湿地进行处理。

旱季模式下,本系统主要用于处理微污染污水,以河道水为主,但为保证微生物系统的增殖需要,必要时引入市政污水,旱季具体工艺流程如图5所示。

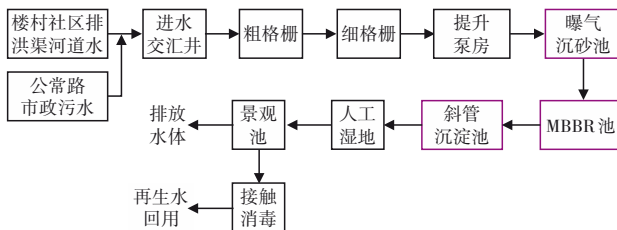


图5 旱季处理工艺流程

Fig.5 Flow chart of dry season treatment process

2.4 运行工况

① 旱季工况

当调蓄池内无存水时,打开楼村社区排洪渠河水引水管处闸门,河水通过进水交汇井进入提升泵房(近期含少量初期污染雨水管中兜底旱季污水),由B组提升泵提升进入后续生化系统进行处理,同时在公常路污水管道设置引水管道及闸门,必要时引入污水补充碳源。

当降雨刚结束,调蓄池内有存水时,打开调蓄池放空管,调整楼村社区排洪渠河水引水管处闸门开度,调蓄池内初期污染雨水(近期含少量初期污染雨水管中兜底旱季污水)及楼村社区排洪渠河水进入提升泵站,由B组提升泵提升进入后续生化段进行处理。旱季运行工况见图6。

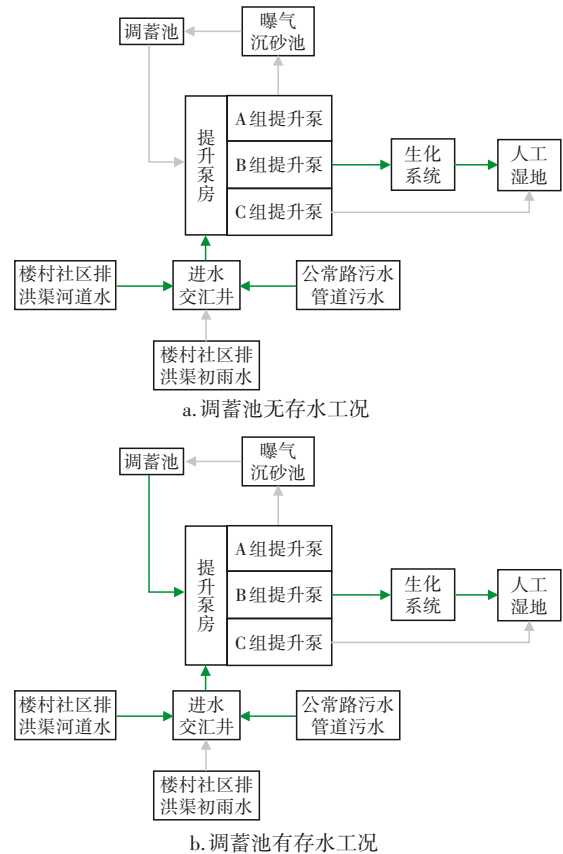


图6 旱季运行工况

Fig.6 Dry season operating conditions

② 雨季工况

雨季工况下,楼村社区排洪渠初期污染雨水进入提升泵站,B组提升泵常开,维持后续生化段运行,同时A组提升泵提升大量瞬时初期污染雨水进入调蓄池储存。当调蓄池存满后,关闭A组提升泵,

超量雨水继续由下游管道进入茅洲河箱涵。必要时开启C组提升泵,提升7 000 m³/d降雨后期的雨水直接进入人工湿地。雨季运行工况见图7。

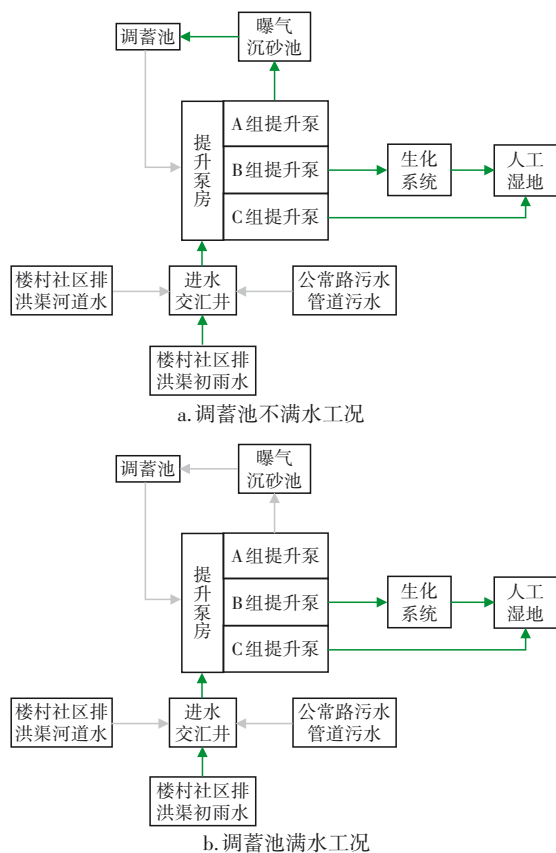


图7 雨季运行工况

Fig.7 Rainy season operating conditions

3 设计参数

原人工湿地系统污水处理流程:进水渠→粗格栅→细格栅→提升泵房→接触氧化池→沉淀池→人工湿地,污泥处理流程:污泥浓缩池→污泥干化。综合本次改造方案,配电间、接触氧化池、沉淀池和污泥浓缩池利旧改造,其余拆除。

初期污染雨水处理系统主要构筑物规模3 000 m³/d,人工湿地设计3 000 m³/d和10 000 m³/d两种运行规模。当河道因生态流量或水动力需求而需要大量补水时,人工湿地采用高负荷运行模式,处理能力提升至10 000 m³/d。

① 粗格栅(提篮格栅,新建)

栅条间隙25 mm,渠深6.60 m,尺寸1 200 mm×1 200 mm×600 mm,安装在集水井内。主要用于拦截来水中的大型杂物。

② 细格栅(回转式格栅除污机,新建)

倾斜角度75°,渠道宽度1 000 mm,长度4 600 mm,栅条间隙6 mm,渠道深6.60 m, $P=1.5$ kW,共2台。配套螺旋输送压榨一体机, $D=300$ mm,有效长度3.0 m, $P=2.2$ kW。

③ 提升泵(新建)

A型潜污泵3台(2用1备),其中1台变频。单台 $Q=300$ L/s, $H=93$ kPa, $P=50$ kW。主要用于将3 000 m³初期污染雨水在1.5 h内提升转输至初期污染雨水调蓄池,起到缓冲、调蓄的作用。

B型潜污泵2台(1用1备),变频。单台 $Q=35$ L/s, $H=105$ kPa, $P=5.5$ kW。主要用于将3 000 m³初期污染雨水在24 h内平均提升至后续生化处理构筑物单元,实现污水处理系统的稳定进水运行。

C型潜污泵1台,变频。 $Q=81$ L/s, $H=780$ kPa, $P=10$ kW。在雨季,需要时开启此泵提升7 000 m³/d后期污染较轻的雨水超越生化处理系统直接进入人工湿地,将人工湿地处理规模提至10 000 m³/d。

考虑到部分后期污染较轻的雨水在必要时需要超越生化处理构筑物直接进入人工湿地进行处理,因此将提升泵设置在细格栅后,以避免大量垃圾等进入湿地,影响其正常运行。

④ 沉砂池+调蓄池+MBBR池+沉淀池(改造)

本工程采用移动床生物膜工艺(MBBR工艺)对初期污染雨水进行生物处理。调蓄池规模为3 000 m³,前端为曝气沉砂池,对初期污染雨水中的泥沙等进行沉淀处理。生物处理区域改造见图8。

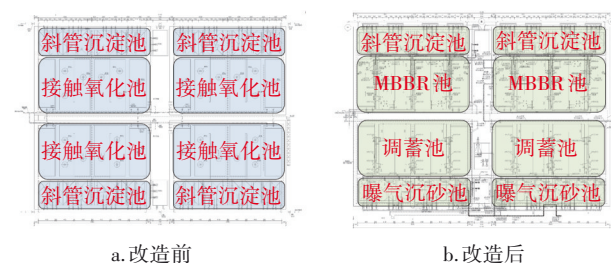


图8 生物处理区域改造

Fig.8 Biological treatment area reconstruction

原设计4座接触氧化池,每座2组,共8组,每组尺寸为13 m×13 m×5.0 m,有效水深4.60 m。结合工程需要,将现状2座接触氧化池改造为调蓄池,将另外2座接触氧化池改造为MBBR生物反应池。MBBR池内投加HDPE悬浮载体填料,规格为 $\varnothing 25$ mm×10 mm,要求有效比表面积大于450 m²/m³,投加量622 m³。将现状2座斜管沉淀池改造为曝气沉砂池,用

于去除初期污染雨水或微污染水中的重介质杂质,配套增加砂水分离器1套, $Q=15\text{ m}^3/\text{h}$, $P=0.37\text{ kW}$,排砂 $2\text{ m}^3/\text{h}$;同时,对另外2座斜管沉淀池进行设备更新改造。

⑤ 人工湿地系统(拆除后重建)

水平潜流人工湿地位于公园南部,湿地面积 1.25 hm^2 ,分为5个处理区并联运行。为保证布水、集水系统的效果,在子区内设置间隔隔墙导水。

规范要求人工湿地水力负荷一般不超过 $0.5\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ^[5]。结合初期污染雨水低污染负荷的特性,本工程探索提高人工湿地运行负荷,运行工况分为两种:a.低表面负荷工况。处理对象为初期污染雨水或河道水,湿地进水为生反池出水,处理规模 $3\,000\text{ m}^3/\text{d}$,水力负荷 $0.24\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,水力停留时间约30 h。b.高表面负荷工况。处理对象为初期污染雨水,湿地进水为降雨后期微污染雨水,处理规模 $10\,000\text{ m}^3/\text{d}$,水力负荷 $0.80\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,水力停留时间约9 h。

水平潜流湿地单元面积一般不超过 800 m^2 ,本次最大子单元面积 339 m^2 。填料粒径自进水至出水由粗渐细,自上而下均匀布置。进出水区填料厚度 $1\,000\text{ mm}$,处理区填料厚度 700 mm ,上覆 300 mm 种植土,种植景观植物。湿地采用砾石、碎石和沸石组合填料,粒径 $10\sim 80\text{ mm}$ 。自进水侧依次为 $25\sim 80\text{ mm}$ 砾石、 $10\sim 25\text{ mm}$ 碎石和 $10\sim 25\text{ mm}$ 沸石填料。其中碎石填料为原有湿地填料筛分冲洗后利用。

潜流湿地采用水平流布水方式,设布水系统5套。湿地配水采用渠道与管道相结合的方式,采用穿孔管多点配水,穿孔管位于湿地床面以下,穿孔管相邻孔径 1 m 。湿地填料经筛选、清水冲洗后含泥量 $\leq 1\%$ 。粒径控制范围如下:大于级配范围的 $\leq 3\%$,级配范围 $\geq 94\%$,小于级配范围的 $\leq 3\%$ 。密度均匀,填料孔隙率控制在 $35\%\sim 40\%$ 。

⑥ 加氯接触池(新建)

投加次氯酸钠药剂,杀灭水中细菌,满足回用水标准后用于园区景观补水和绿化浇灌。加氯接触池1座,尺寸 $7.7\text{ m}\times 5.5\text{ m}\times 2.4\text{ m}$,设计规模 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$,设计停留时间 30 min 。设回用水泵2台(1用1备),变频,单台 $Q=41.7\text{ m}^3/\text{h}$, $H=350\text{ kPa}$, $P=11\text{ kW}$ 。

⑦ 储泥池(利旧改造)

浓缩池1座,分4格,单格尺寸 $3.0\text{ m}\times 3.0\text{ m}\times 5.0\text{ m}$,用于浓缩和储存处理系统排放的剩余污泥,

浓缩污泥由吸污车运至光明水质净化厂处理处置。

⑧ 鼓风机房(新建)

鼓风机房内设置2套风机系统,一套(罗茨鼓风机,1用1备,单台 $Q=12.5\text{ m}^3/\text{min}$, $H=60\text{ kPa}$, $P=22\text{ kW}$)用于生物反应池曝气;另一套(罗茨鼓风机,1用1备,单台 $Q=6.67\text{ m}^3/\text{min}$, $H=50\text{ kPa}$, $P=11\text{ kW}$)用于调蓄池前端的曝气沉砂池曝气。

⑨ 加药间(新建)

药剂包括聚合氯化铝(PAC)和次氯酸钠。PAC投加至生物反应池,辅助化学除磷;次氯酸钠投加至加氯接触池,用于再生水消毒。

配PAC制备装置1套,容积 2 m^3 , $P=0.75\text{ kW}$;PAC加药泵2台(变频,1用1备),单台 $Q=0\sim 100\text{ L/h}$, $H=300\text{ kPa}$, $P=1.5\text{ kW}$;配套在线稀释装置2套。

次氯酸钠储存和投加系统配次氯酸钠PE储罐1套,有效容积 0.7 m^3 ,直径 0.9 m ;次氯酸钠加药泵2台(变频,1用1备),单台 $Q=0\sim 10\text{ L/h}$, $H=200\text{ kPa}$, $P=0.37\text{ kW}$ 。

⑩ 除臭系统(新建)

对提升泵房、调蓄池、MBBR池、储泥池进行除臭。调蓄池设置1套除臭装置,采用两级活性炭工艺,除臭规模为 $21\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。活性炭塔2座,规格 $\varnothing 4.0\text{ m}\times 4.6\text{ m}$ 。配套除臭风机1套, $Q=21\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $P=4\text{ kPa}$, $N=45\text{ kW}$ 。提升泵房、生物反应池和储泥池设置1套除臭装置,采用生物除臭+活性炭工艺,除臭规模为 $9\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。设生物除臭塔1座($7\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3.3\text{ m}$),停留时间 27.72 s 。活性炭塔1座,规格 $\varnothing 3.0\text{ m}\times 4.6\text{ m}$,配套除臭风机1套, $Q=9\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $P=3.5\text{ kPa}$, $N=15\text{ kW}$ 。

风管采用玻璃钢+不锈钢304材质,除臭风机采用玻璃钢离心风机。

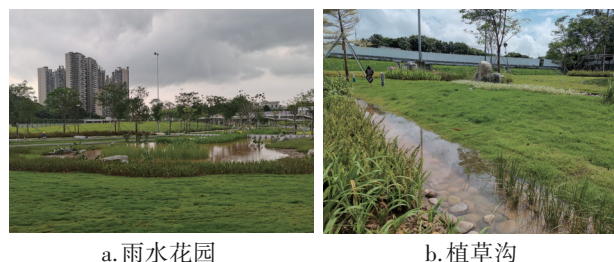
4 海绵和景观设计

4.1 海绵设计

设计中采用“雨水花园+植草沟+透水铺装+绿色屋顶+生态停车场+调蓄池”等多种海绵设施。工程实施后,楼村湿地公园园区年径流总量控制率可达83%(降雨量 45.4 mm),超过年径流总量控制率76%(降雨量 34.5 mm)的要求,污染物削减率72%。海绵设施实景见图9。

“渗”——从源头减少径流,净化初期污染雨水。绿色屋顶 241 m^2 、透水铺装 $14\,401\text{ m}^2$ 、生态停

车场915 m²。“滞”——削减降雨径流,延缓洪峰。雨水花园1 955 m²、植草沟1 528 m²、人工湿地12 500 m²、湿塘2 894 m²、绿地44 902 m²。“蓄”——降低径流峰值流量,并为雨水利用创造条件。初期污染雨水调蓄池3 000 m³,其余海绵设施总调蓄容积1 296.4 m³。“净”——通过初期污染雨水处理设施及海绵设施的净化,减少径流污染、改善水环境。“用”——雨水收集处理后回用于绿化浇洒、景观溪流及河道补水。“排”——设置雨水溢流设施,经径流控制后的雨水排入楼村社区排洪渠/新陂头河。



a. 雨水花园

b. 植草沟

图9 海绵设施实景

Fig.9 Pictures of sponge facilities

4.2 景观设计

楼村湿地公园以“生态之水——泛起悦动的涟漪”为设计概念,将“水流形态”这一设计元素提炼并应用于园区景观,构建起了“泛水涟漪”“水之行廊”“泉之广场”等多种景观亮点。楼村湿地公园结合茅洲河碧道、新陂头河碧道的蓝绿系统,构建集“山-水-田-园-城”于一体的绿色生态网络,景观设计理念见图10。

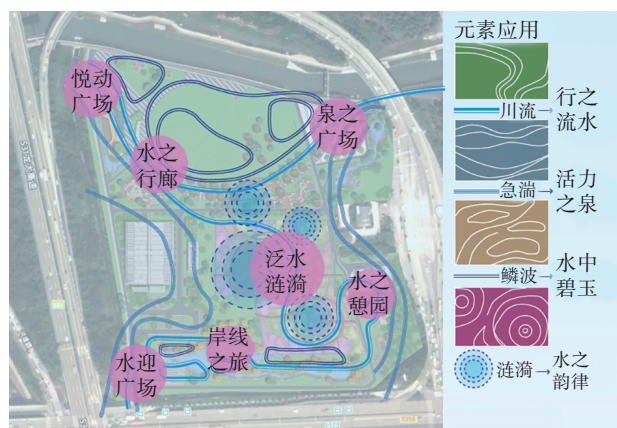
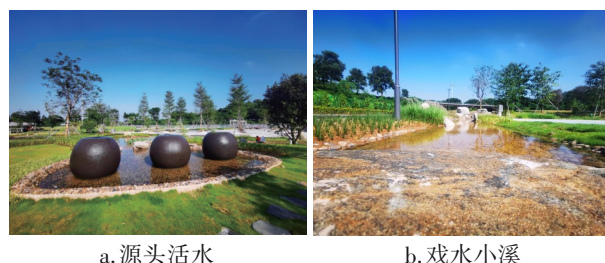


图10 景观设计概念

Fig.10 Landscape design concept

楼村湿地公园内部划分为南部水景展示区、中部湿地功能区、东部科普教育区和北部休憩放松区。中部湿地功能区布置在核心位置,在水平潜流

湿地上部种植美人蕉、梭鱼草、千屈菜等耐污本土景观植物,湿地处理功能和上部景观造型融为一体,并通过3个环形栈桥连通和穿越湿地景观核心区,描绘“人在景中走、清水脚下流”的和谐画卷。北部休憩放松区以水滴状造型的阳光大草坪为核心,为游客提供休憩放松的绿色空间。水景展示区结合湿地公园的总体布局,利用尾水作为补水,融入海绵设计的要求,打造集“渗、蓄、滞、净、用、排”于一体的水景展示区,景观设计小品见图11。东部科普教育区开展人水和谐通识教育,寓教于乐。



a. 源头活水

b. 戏水小溪

图11 景观设计小品

Fig.11 Landscape design sketch

5 工程效果及分析

本工程总投资10 047.55万元,其中景观工程4 984.10万元、土建工程424.07万元、工艺设备及安装工程4 286.19万元、道路工程110.70万元。

工程自2020年12月投运以来,运行稳定可靠,出水水质全面优于设计出水要求,2021年1月—2022年6月出水主要指标见表2。可见,出水水质达到地表水Ⅲ类标准。运行期间,常态平均处理水量约3 000 m³/d,单位电耗0.36 kW·h/m³,与设计值基本吻合。短时间(半个月)内高负荷运行到10 000 m³/d时,出水水质仍能稳定达标。

表2 实际进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality mg·L⁻¹

项目	BOD ₅	COD	NH ₃ -N	TP
进水	13	68	19	1.12
出水	4.1	12	0.72	0.15

相比同类工程^[6-7],楼村湿地公园工程具有以下优势:充分利用现状构筑物,打造污染雨水净化体系,实现初期污染雨水的就地处理和回用,解决了现状大多数错峰调蓄处理体系中存在的下游输送管网和处理厂站的运行调度压力问题;利用人工湿地生态化处理系统实现初期污染雨水中污染物的去除,避免了大量化学药剂的投加,更加绿色低碳;

探索了一套完整的初期污染雨水处理系统,处理效率更高;人工湿地污水处理功能与景观效果结合,打造绿色生态示范处理系统,生态环境和社会效益好。本工程主要劣势及改进建议如下:前端处理构筑物利旧,一定程度上限制了设计方案,后续改造可将调蓄池设计为全地下式,集约化布置以节省用地,并集成过滤、物化沉淀功能系统,强化水质净化功能;本工程带有一定的科研探索功能,处理工艺和运行工况较为复杂,建议后期通过试验确定最佳工况,打造更为简洁、高效的处理系统。随着本工程的成功实施,在国内“地下式污水厂+上盖公园”日益增多的背景下,可将人工湿地与上盖公园融合,实现污水厂尾水处理回用;也可以将景观带(区)与人工湿地融合,用于处理达到纳管标准的工业废水处理系统出水以及其他低污染负荷的污(废)水,实现水质净化、回用目标。同时,本工程探索了一条技术可行、绿色低碳、景观优美、海绵理念的初雨处理回用路线,应用前景广阔。

6 结论

楼村湿地公园创造性地将景观人工湿地用于初期污染雨水的处理,出水主要指标达到地表水Ⅲ类标准。景观人工湿地用于初期污染雨水处理的技术路线是可行的,既解决了初期污染雨水的出路问题,也较好地提升了周边水体的环境质量。同时,海绵元素融入、景观方案设计进一步提升了楼村湿地公园的品质,成为多功能湿地公园和光明区科学治水的工程典范。

参考文献:

- [1] 王健,王福连. 初(小)雨水截流及在深圳市的实践[J]. 中国给水排水, 2016, 32(5):116-118.
WANG Jian, WANG Fulian. Practice of initial (light) rainfall interception in Shenzhen City [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(5): 116-118(in Chinese).
- [2] 魏俊,赵梦飞,韩万玉,等. 东阳市江滨景观带湿地公园人工湿地填料的设计与施工[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4):12-15.
WEI Jun, ZHAO Mengfei, HAN Wanyu, et al. Design and construction of filler in constructed wetland park in Jiangbin landscape belt of Dongyang [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4):12-15(in Chinese).
- [3] 杜曼曼,张琼华,连斌,等. 城市污水处理厂尾水人工湿地净化工程调试与运行[J]. 中国给水排水, 2020, 36(9):94-100,104.
DU Manman, ZHANG Qionghua, LIAN Bin, et al. Commissioning and operation of constructed wetland project for purification of tail water from municipal wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(9): 94-100,104(in Chinese).
- [4] 葛铜岗,孙永利,黄鹏,等. 高水力负荷潜流湿地快速净化低污染水体运行研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(9):75-81.
GE Tonggang, SUN Yongli, HUANG Peng, et al. Research on rapid purification of low-polluted water body by high hydraulic load subsurface flow wetland [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(9): 75-81(in Chinese).
- [5] 张翔,李子富,周晓琴,等. 我国人工湿地标准中潜流湿地设计分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(18):24-31.
ZHANG Xiang, LI Zifu, ZHOU Xiaoqin, et al. Design analysis of subsurface flow wetland in constructed wetland standards in China [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(18): 24-31(in Chinese).
- [6] 曾木海,谢小龙. 初雨调蓄池在武汉市某湖泊综合整治工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12):93-97.
ZENG Muhai, XIE Xiaolong. Application of initial rainwater storage tank in a lake comprehensive treatment project in Wuhan [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12):93-97(in Chinese).
- [7] 徐志强,秦忠强,杜浩为,等. 人工湿地处理滨海盐碱地区初期雨水和微污染河水[J]. 中国给水排水, 2016,32(13):6-9.
XU Zhiqiang, QIN Zhongqiang, DU Haowei, et al. Integrated constructed wetland for treatment of initial rainwater and micro-polluted river water in coastal saline-alkali area [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(13):6-9(in Chinese).

作者简介:何磊(1985-),男,河南平顶山人,硕士,高级工程师,主要研究方向为市政给排水和水环境综合治理。

E-mail:helei@smedi.com

收稿日期:2022-08-07

修回日期:2022-09-29

(编辑:孔红春)