

设计经验

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.22.008

# 玉溪市出水口生态公园多级水系净化系统工艺设计

李亮<sup>1</sup>, 刘龙志<sup>1</sup>, 吴昊<sup>2</sup>, 王久振<sup>1</sup>, 马竞<sup>1</sup>, 杜超<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 瓦地工程设计咨询<北京>有限公司, 北京 100022)

**摘要:** 出水口生态公园是玉溪市海绵城市建设的重点项目,具有典型的高原阶梯型坡地特征。改造前公园作为天然的海绵体,未能发挥绿地水域的调蓄净化功能,且水体水质为劣Ⅴ类。改造过程中利用阶梯地形,遵循水文特性,分层级构建了“多效澄清预处理—复合潜流人工湿地—水生态系统”重力流水质净化系统,形成顺畅通达水体海绵,年径流总量控制率达93%。该净化系统具有良好的脱氮除磷效果,公园水体主要指标稳定优于地表水Ⅳ类标准, $\text{NH}_3-\text{N}$  低于0.1 mg/L, TP 低于0.05 mg/L。

**关键词:** 海绵城市; 高原阶梯型坡地; 复合垂直流人工湿地; 水生态系统

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)22-0047-07

## Process Design of Multi-stage Water Purification System in Yuxi Chushuikou Ecological Park

LI Liang<sup>1</sup>, LIU Long-zhi<sup>1</sup>, WU Hao<sup>2</sup>, WANG Jiu-zhen<sup>1</sup>, MA Jing<sup>1</sup>, DU Chao<sup>2</sup>

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China;  
2. Wadi Engineering Design Consulting <Beijing> Co. Ltd., Beijing 100022, China)

**Abstract:** Chushuikou Ecological Park is a key project of sponge city construction in Yuxi City, which has the characteristics of a typical plateau with stepped slope. Before reconstruction, the park, as a natural spongy body, failed to perform the regulation, storage and purification function of green space, and the water quality could not meet surface water level V standard. In the process of reconstruction, stepped topography was used and hydrological characteristics were followed, and a gravity flow water purification system of “multi-effect clarification pretreatment, integrated subsurface flow constructed wetland and water ecosystem” was constructed in different levels. The water sponge with smooth access was formed, and the total annual runoff control rate reached 93%. The whole purification system had a good nitrogen and phosphorus removal performance. The main indicators of the park water body were stable and better than the surface water level Ⅳ standard.  $\text{NH}_3-\text{N}$  was less than 0.1 mg/L, and TP was less than 0.05 mg/L.

**Key words:** sponge city; plateau with stepped slope; integrated vertical-flow constructed wetland(IVCW); water ecosystem

### 1 项目概况

星云湖和抚仙湖位于玉溪市境内,是云南省九

大高原湖泊中的两个湖泊,两个湖体水系连通。历史上星云湖水位较高,星云湖的劣质Ⅴ类水对抚仙

湖 I 类水体造成污染。2008 年 10 月,星云湖—抚仙湖出流改道工程自星云湖西岸向九溪方向开挖引水道,每年将  $4\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$  星云湖水补充至玉溪市东风水库和玉溪大河。该工程截断了星云湖流向抚仙湖的劣质水,保护了抚仙湖,同时合理配置和补充了玉溪市红塔区水资源<sup>[1]</sup>。

出流改道工程汇入玉溪大河的支线末端即是两湖大瀑布,位于玉溪市红塔区出水口生态公园。星云湖来水在两湖大瀑布分为两路,大部分进入玉溪大河,少量用于补充玉湖片区的生态用水。玉湖片区是由出水口生态公园、冯家冲湖、右所湖、玉湖等水体串联组成的绿地公园。出水口生态公园占地面积  $19.6 \text{ hm}^2$ ,位于玉湖片区水系的前端,是片区的补水来源,承担着重要的水质净化功能。

出水口生态公园及玉湖片区水系如图 1 所示。出水口公园内水体主要有两湖大瀑布、微缩景观水体。



图 1 玉湖片区水系

Fig. 1 Water system of Yuhu area

玉湖片区水系基础信息如表 1 所示。

表 1 片区水系基础信息统计

Tab. 1 Water system information

项 目	面积/ $\text{m}^2$	水深/m	水面高程/m
两湖大瀑布	17 000	0.6	1 674.14
微缩景观水体	8 590	1.2	1 664.56
冯家冲湖	12 553	1.0	1 636.21
右所湖	6 650	1.5	1 634.85
玉湖	129 602	1.2	1 629.50
总计	174 395		

玉湖片区地势东高西低,出水口瀑布为片区的最高点,经冯家冲湖、右所湖,水面逐级下降,最终进入玉湖,高差  $44.64 \text{ m}$ 。出水口生态公园地形也具有典型的高原阶梯型坡地特征,从两湖大瀑布到微缩景观水体,水面高差  $9.58 \text{ m}$ ,场地内部高差为  $23.50 \text{ m}$ 。

出水口生态公园改造工程以实现水质净化及径流污染控制为核心,为片区下游水体提供水量稳定及水质达标的补水水源。同时结合生态湿地打造一座功能多元化的生态休闲公园,形成参与性强的展示区和示范区。

## 2 现状问题及建设目标

### 2.1 现状问题分析

依据水利部门数据,2016 年—2017 年两年内两湖大瀑布进入玉湖片区的水量约为  $900 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。进入玉湖片区的补水闸门由人工控制,单次补水量不确定,通常补水至下游水体达高水位。在枯水年枯水期,星云湖可能有较长的连续时间不来水,为维持玉湖片区的景观水位,水利部门协调调度东风水库补水。

分别在旱季及雨季对来水进行水质监测,结果如表 2 所示。

表 2 旱季、雨季进水水质

Tab. 2 Influent quality in dry season and rainy season

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

项目	取样时间	COD	TSS	TN	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TP
旱季	2016 年 11 月 4 日	32.6	51.5	2.83	1.02	0.41
	2016 年 11 月 16 日	39.1	49.0	2.59	0.98	0.32
雨季	2017 年 7 月 2 日	42.2	67.2	3.61	1.18	0.61
	2017 年 7 月 4 日	35.4	50.2	3.68	2.42	0.54

上游来水的 COD、TN、TP 等主要水质指标均劣于 V 类。相比旱季,雨季水体水质更差,透明度更低。部分死水区域藻类滋生,导致物种单一化,生态系统结构脆弱。

### 2.2 建设目标

客水处理目标:处理上游来水  $10\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水达到地表水 IV 类标准。本地径流处理目标(即海绵城市建设目标):年径流总量控制率 90%,对应设计降雨量  $29.6 \text{ mm}$ ;SS 削减率达到 65%。

## 3 片区总体方案

### 3.1 水量平衡计算

玉湖片区总面积  $90.2 \text{ hm}^2$ ,绿地率 42.7%,水面率 30.6%。对玉湖片区内水量进行逐月平衡分析,依据本地径流量平衡分析得出片区需水量,由此制定上游来水补水策略。

降雨量、蒸发量采用玉溪市红塔区多年月平均值。径流量由降雨量与场地径流系数计算得出。绿化用水量全部采用地表水取水灌溉。生态基流量计

算分析水生植物需水量、生物栖息地需水量、净化污染物需水量等。水体下渗量以湖体黏土下渗系数取值计算。片区逐月水量平衡计算结果如表 3 所示。

玉湖片区旱季(12 月—次年 4 月)日均缺水量 5 830 m<sup>3</sup>,雨季(5 月—11 月)日均缺水量 3 550 m<sup>3</sup>。

综合考虑片区溪流的景观效果及冯家冲湖景观跌水效果,适当加大补水量。制定旱季及雨季不同的补水策略,精准控制进入片区水量。补水水量:旱季(12 月—次年 4 月)日均补水 10 000 m<sup>3</sup>,雨季(5 月—11 月)日均补水 6 000 m<sup>3</sup>。

表 3 水量平衡计算

Tab. 3 Water balance calculation

项目	月降雨量/mm	月蒸发量/mm	月径流量/m <sup>3</sup>	月总蒸发量/m <sup>3</sup>	月绿化用水量/m <sup>3</sup>	月生态基流量/m <sup>3</sup>	月水系下渗量/m <sup>3</sup>	月总需求量/m <sup>3</sup>	月缺水水量/m <sup>3</sup>	日缺水水量/m <sup>3</sup>
1 月	16.8	99.9	12 669	28 427	25 000	83 453	57 160	194 040	181 370	6 046
2 月	17.5	126.7	11 307	26 717	25 000	84 525	57 160	193 402	182 095	6 070
3 月	18.5	186.4	11 953	39 306	25 000	86 913	57 160	208 379	196 426	6 548
4 月	35.5	215.9	22 937	45 527	24 000	88 093	57 160	214 780	191 842	6 395
5 月	90.8	203.4	58 668	42 891	20 000	87 593	57 160	207 644	148 976	4 966
6 月	143.5	145.0	92 719	30 576	16 000	85 257	57 160	188 993	96 275	3 209
7 月	181.7	128.2	117 401	27 033	15 000	84 585	57 160	183 779	66 378	2 213
8 月	173.5	133.0	112 102	28 046	15 000	84 777	57 160	184 983	72 880	2 429
9 月	97.0	115.2	62 674	24 292	20 000	84 065	57 160	185 517	122 843	4 095
10 月	74.9	107.1	48 395	22 584	22 000	83 741	57 160	185 485	137 091	4 570
11 月	44.5	84.6	28 752	17 840	24 000	82 841	57 160	181 841	153 088	5 103
12 月	14.9	79.5	9 627	16 764	25 000	82 637	57 160	181 561	171 934	5 731
汇总	909.1	1 624.9	589 204	350 003	256 000	1 018 480	685 925	2 310 404	1 721 198	57 375

3.2 总体概念布局

利用玉湖片区良好的绿色基底,构建生态海绵格局,整体概念布局如图 2 所示,绿色空间即原有陆地空间的海绵化改造,蓝色空间即水系改造。出水口生态公园建设以水体净化工程和建设海绵绿地为主。

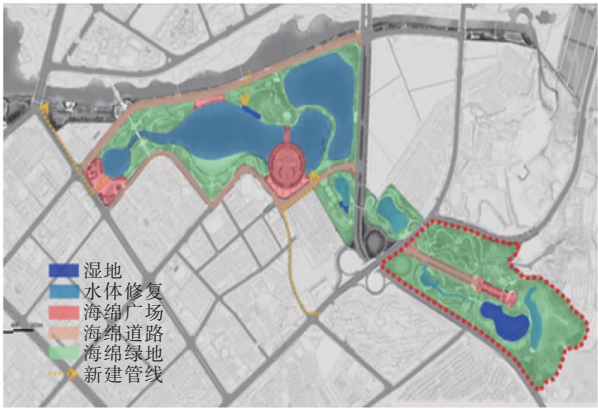


图 2 概念布局

Fig. 2 Concept layout

现状玉湖片区工艺流程如图 3 所示。

按照总体思路,改造后玉湖片区工艺流程如图 4 所示。

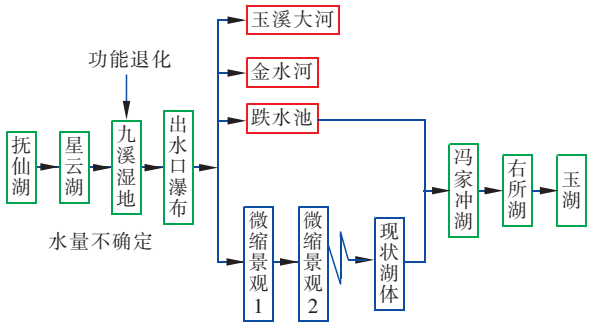


图 3 现状工艺流程

Fig. 3 Current process flow chart

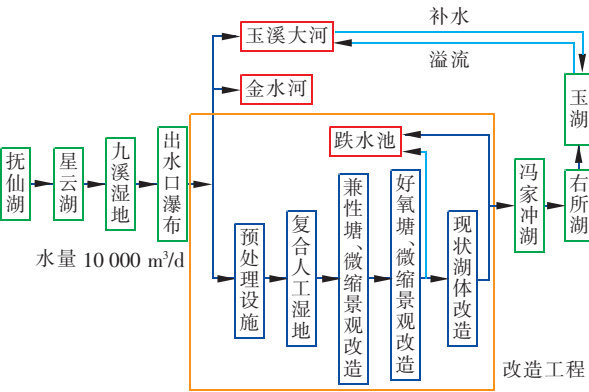


图 4 改造工艺流程

Fig. 4 Process flow chart of reconstruction



#### 4 出水口生态公园设计

对上游来水、公园及周围区域汇水进行完整系统的分析设计。针对公园内部径流主要采用海绵设施工程,通过合理的竖向地形设计,使得雨水径流有组织排放,最大程度实现雨水自然积存、自然渗透、自然净化的可持续水循环。针对上游来水,利用高原阶梯型坡地的竖向地形,分层级构建“多效澄清预处理—复合潜流人工湿地—水生态系统”净化工艺,形成顺畅通达水体海绵。

##### 4.1 海绵设施工程

出水口生态公园现状绿地率 61%,综合径流系数(不包含水面)为 0.28,现状年径流总量控制率为 67%,是条件良好的天然海绵体。然而受制于周边排水系统现状和传统理念,雨水径流无法进入绿地水体,滞蓄功能缺失。本次海绵改造工程以建设源头、小型分散的海绵设施为主,包括植草沟、下凹绿地、雨水花园、生态旱溪等。

玉溪市下垫面表层杂填土和黏土渗透系数约  $2.0 \times 10^{-7}$  m/s,渗透性较差,且地下水埋深在 0.8 ~ 2.6 m 之间,不宜直接采用渗透型低影响开发设施,设施的选择以净、滞为主。针对弱渗透性下垫面的不利条件,开发出具有良好过滤效果和种植功能的海绵设施介质土,介质土渗透系数  $5.5 \times 10^{-5}$  m/s。通过填料介质的优化组配,并结合设置透水盲管收排下渗雨水,将渗透型低影响开发设施转变为滞蓄净化型。雨水花园等生物滞留设施竖向上主要由蓄土层+覆盖层+换填层+排水层(盲管)构成,典型设施构造如图 5 所示,建成实景如图 6 所示。

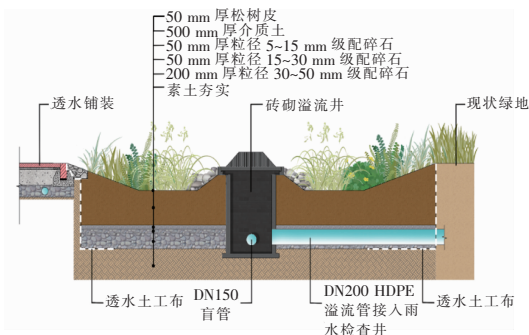


图 5 生物滞留设施大样图

Fig. 5 Detail drawing of bioretention facility

针对玉溪市的干热气候,生物滞留设施表面采用树皮进行覆盖。树皮可以减少径流雨水的侵蚀,保持土壤的湿度,在土壤界面上营造有利于微生物

生长和有机物降解的环境。工程实践证明,树皮对干热气候条件下的湿生植物生长具有重要的作用。



图 6 生物滞留设施建成实景

Fig. 6 Real scene of bioretention facility

场地内设置的海绵设施有植草沟 2 850 m<sup>2</sup>、雨水花园 1 572 m<sup>2</sup>、生物滞留带 2 167 m<sup>2</sup>、生态旱溪 370 m<sup>2</sup>。最终实现年径流总量控制率 93%,年 SS 削减率达到 72%。

##### 4.2 多效澄清预处理

本工程采用强化物化处理作为湿地前端的预处理工艺。预处理可快速去除原水中的藻类、SS 等污染物,降低湿地的处理负荷及堵塞的风险,最大限度地发挥湿地的处理效率。预处理出水水质目标为 SS < 20 mg/L。

本工程采用一体化的多效澄清技术,该技术兼有超磁分离的紧凑装备化和高效沉淀池的出水水质好、抗冲击能力强的优点。现场小试证明该工艺适用本项目,当上游来水蓝藻含量高时,辅助添加 NaClO 等氧化剂对蓝藻有较好的去除效果<sup>[2]</sup>。

多效澄清净化系统工艺流程见图 7。

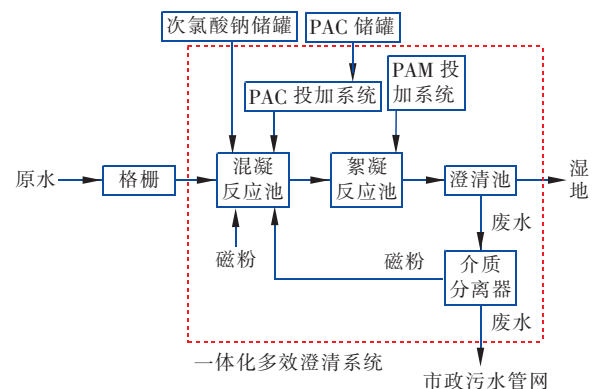


图 7 多效澄清净化系统工艺流程

Fig. 7 Process flow chart of multi-effect clarification system

一体化多效澄清系统包含两座处理规模为

5 000 m<sup>3</sup>/d 的一体化设备,单套尺寸为 12.2 m × 3.0 m × 3.0 m,功率 15 kW。设备为钢结构。系统包括进水格栅、混凝反应、絮凝反应、预沉淀、斜管分离区、介质回收、加药系统及电气自控等。

为充分利用地势高差,取水口设置在两湖大瀑布水池顶部。取水口设置间距为 5 mm 的格栅。原水利用高差重力进入一体化多效澄清系统,出水达标排入人工湿地。同时设置由格栅至湿地的超越管道,当瀑布原水水质较好时,可直接进入人工湿地,降低运行成本。

多效澄清系统水力停留时间约为 8 ~ 10 min,水头损失约 0.25 m。混凝及絮凝加药采用自动加药系统,吨水处理药剂成本 0.1 元。

### 4.3 垂直潜流人工湿地

本项目采用下行垂直流湿地 + 上行垂直流湿地组合工艺。下行 + 上行潜流湿地其内部 DO 含量可以达到 0 mg/L,有利于 TN 的去除<sup>[3]</sup>。

垂直流人工湿地中水的流态满足一级推流动力学<sup>[4]</sup>,采用一级动力学方程计算湿地所需表面积,计算结果为 9 036 m<sup>2</sup>。依据场地地形及可用面积,垂直潜流人工湿地总面积为 8 950 m<sup>2</sup>。

湿地出水进入生物塘,生物塘构建以沉水植物为主的清水型生态系统,水面面积 8 690 m<sup>2</sup>。垂直潜流湿地及生物塘共同构成湿地净化处理系统。经计算,湿地净化系统水力负荷为 0.57 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · d),水力停留时间约 46.7 h。

结合现场地形及景观布局,湿地处理单元分为并联的 3 组下行流湿地与上行流湿地单元(见图 8),湿地剖面见图 9。每个处理单元处理能力 3 000 ~ 4 000 m<sup>3</sup>/d。设计生物塘至湿地起端的循环回流,以确保连续旱天情景下,湿地维持正常生态系统。

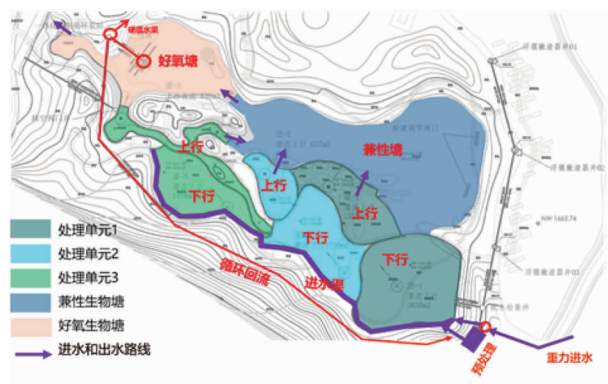


图8 复合垂直流湿地平面布局

Fig.8 Plane layout of IVCW

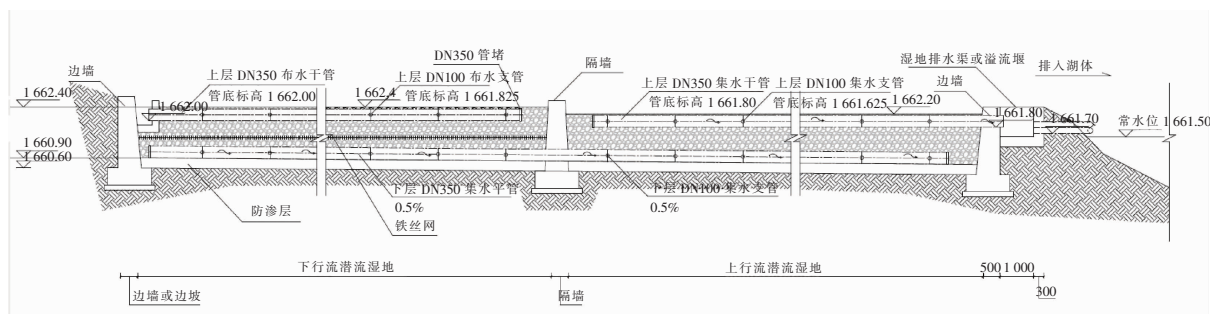


图9 复合垂直流湿地典型剖面图

Fig.9 Profile of IVCW

湿地填料剖面如图 10 所示。

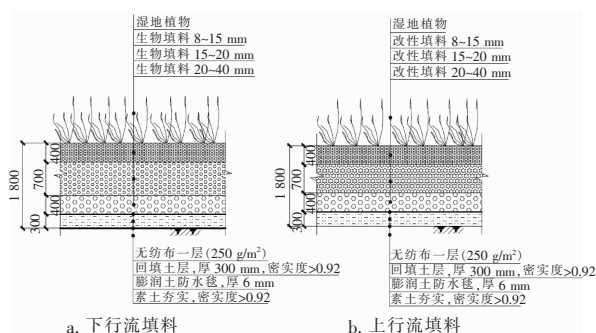


图10 湿地填料剖面图

Fig.10 Profile of wetland filler

湿地内部填充特定级配的净化填料,下行垂直流人工湿地采用生物填料,有利于好氧微生物生长及硝化反应,对总悬浮物(TSS)具有较好的去除作用。上行垂直流湿地采用强化除磷改性填料,磷吸附容量达 180 mg/kg,对磷去除效果好。湿地四周采用浆砌石挡墙围坝,防渗内衬采用天然钠基膨润土防水毯。

湿地植物选择根系发达、耐污能力强,同时具有景观效果的湿生植物,如芦苇、再力花、常绿鸢尾等。

湿地建成实景如图 11 所示。





图 11 垂直潜流湿地实景

Fig. 11 Real scene of IVCW

#### 4.4 水生态系统构建

生物塘承接湿地出水,由原场地两个景观水塘改造而来,其位置及面积与现状保持一致。1 号生物塘面积 6 300 m<sup>2</sup>,平均水深 1.8 m;2 号生物塘面积 2 390 m<sup>2</sup>,平均水深 1.2 m。水生态系统构建包含对微生物、植物、动物三方面的综合修复。

水体微生物系统构建包括底质改良及水体微生物群落构建两部分。现状景观水塘采用干式清淤清除了绝大部分内源污染,同时底质环境遭到严重扰动。底质生物改良剂可长期向泥水界面释放放线菌、芽孢杆菌等高效复合工程菌,加速有机物分解,促进底泥矿化<sup>[5]</sup>。底质改良剂投放剂量为 100 g/m<sup>2</sup>,合计投加量 800 kg。通过投放水质生物净化剂加快实现水体微生物群落构建。水质生物净化剂的主要成分为好氧和兼氧微生物,包括光合细菌、复

合酵母、硝化细菌、聚磷菌等。水质净化剂根据气温和水质情况分 2 次投放,单次投放剂量为 70 g/m<sup>3</sup>,合计投加量 1 107 kg。

在水域生态系统中,水生高等植物是水体保持良性运行的关键生态类群。沉水植物茎叶能吸附、固着水体的悬浮物,吸收营养盐,提高水体溶解氧浓度和透明度,还可显著抑制藻类的生长<sup>[6]</sup>。本工程沉水植物种植面积占总水域面积的 80%,选择种植水体净化能力强、易于维护的苦草,种植密度 180 株/m<sup>2</sup>。在靠近岸线水深超过 0.5 m 的位置种植景观效果好的黑藻和金鱼藻,种植密度 100 株/m<sup>2</sup>。

当沉水植物群落得到恢复后,引入水生动物构建控制浮游植物能力强的食物网结构,实现水体的生态平衡。水生动物包括大型溞、底栖动物(螺类、青蛙等)、肉食类生物(虾、鱼等)等。

#### 5 运行效果

公园主体工程于 2019 年 3 月完工进入调试运行期。由于生物填料及改性填料均以石灰碎石为基础材料,运行前期出水 pH 值偏高,三个湿地单位每单元每天进水 1 500 m<sup>3</sup>,对填料进行低负荷冲洗,三周后出水 pH 值稳定在 8 左右。

经过 4 个月的调试运行,2019 年 7 月出水逐渐稳定达标。2019 年 7 月、8 月、10 月水质监测数据见表 4。现场实际出水效果见图 12。

表 4 水质监测数据

Tab. 4 Monitoring data of water quality

项目	TSS/ (mg · L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TN/ (mg · L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> - N/ (mg · L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg · L <sup>-1</sup> )	Chl - a/ (μg · L <sup>-1</sup> )
瀑布原水	34 ~ 61	32 ~ 47	4.33 ~ 5.69	1.53 ~ 2.30	0.37 ~ 0.43	7 ~ 19
预处理出水	14 ~ 19	24 ~ 29	4.07 ~ 5.21	1.21 ~ 1.64	0.17 ~ 0.23	3 ~ 6
湿地出水	5 ~ 8	16 ~ 19	2.73 ~ 3.62	0.09 ~ 0.84	0.04 ~ 0.05	2 ~ 3
生物塘出水	0 ~ 4	12 ~ 17	1.69 ~ 2.10	0.08 ~ 0.51	0.02 ~ 0.04	



图 12 生物塘出水实景

Fig. 12 Engineering real scene of biological pond

由表 4 可知,水质净化系统运行良好,出水指标均达到设计标准。除 TN 外,主要水质指标甚至达到了地表Ⅲ类水标准。尤其是氨氮低于 0.1 mg/L,总磷低于 0.05 mg/L,大大降低了水体富营养化风险。“预处理—人工湿地—水生态系统”串珠式净化系统运行成本为 0.26 元/m<sup>3</sup>,具有较高的经济性。

#### 6 结语

出水口生态公园海绵建设工程是集中展现玉溪海绵城市建设“里子”和“面子”的重要窗口。改造

后年径流总量控制率达93%,利用阶梯型坡地构建了“多效澄清预处理—复合人工潜流湿地—水生态系统”重力流净化工艺。预处理系统出水悬浮物小于20 mg/L,减小了后续湿地堵塞风险。下行+上行垂直流湿地净化系统水力负荷为 $0.57 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,采用脱氮生物填料和除磷改性填料,以沉水植物为主的水生态系统可对湿地来水进行进一步净化。在上游来水为劣V类且悬浮物含量高的条件下,最终出水水质稳定优于地表IV类水,TP指标低于0.05 mg/L,净化成本0.26元/ $\text{m}^3$ 。该工程可为类似的高标准出水要求的河湖水处理工程提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 刘海洋. 星云湖、抚仙湖出流改道工程规模论证[J]. 人民珠江,2007(1):52-53,68.  
LIU Haiyang. Argumentation of the scale of the outflow route alteration project in the Xingyunhu Lake and Fuxianhu Lake[J]. Pearl River, 2007(1):52-53,68 (in Chinese).
- [2] 钱爱娟,丛海兵,鄢琪,等. 加压预处理与预氧化强化混凝处理太湖蓝藻水中试比较研究[J]. 供水技术,2016,10(3):13-20.  
QIAN Aijuan, CONG Haibing, YAN Qi, et al. Pilot scale comparative experiments on pressurization pretreatment and preoxidation to enhance coagulation for removing Cyanobacteria in Taihu Lake [J]. Water Technology, 2016,10(3):13-20 (in Chinese).
- [3] 刘婧,邢奕,金相灿,等. 复合垂直流湿地去除模拟河水中氮磷的研究[J]. 环境工程技术学报,2012,2(1):29-35.  
LIU Jing, XING Yi, JIN Xiangcan, et al. Study of nitrogen and phosphorus removal from simulated river water by integrated vertical flow wetland [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012,2(1):29-35 (in Chinese).
- [4] 厉彦妮. 垂直潜流人工湿地脱氮效果及其系统动力学模型研究[D]. 北京:中国地质大学,2020.  
LI Yanni. Study on the Effect of Nitrogen Removal in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland and Its System Dynamics Model[D]. Beijing:China University of Geosciences, 2020 (in Chinese).
- [5] 李改娟,张绍波,祖岫杰,等. 池塘底质恶化的危害及改良剂种类[J]. 现代农业科技,2020(7):215,221.  
LI Gaijuan, ZHANG Shaobo, ZU Xiujie, et al. Harm of deterioration of pond bottom sediment and types of improver [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2020(7):215,221 (in Chinese).
- [6] 姚远,贺锋,胡胜华,等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响[J]. 生态学报,2016,36(4):971-978.  
YAO Yuan, HE Feng, HU Shenghua, et al. Effects of allelopathy of submerged macrophytes on the phytoplankton community collected from the west part of the West Lake wetland in Hangzhou, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(4):971-978 (in Chinese).

作者简介:李亮(1990-),男,河南鹤壁人,硕士,工程师,从事海绵城市、水环境治理研究设计工作。

E-mail: liliangok@126.com

收稿日期:2020-09-07

修回日期:2020-12-11

(编辑:孔红春)

以水定需,量水而行,促进水资源可持续利用