

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.24.022

武汉万家湖汇水区径流污染治理技术研究

谢小龙, 胡晓彬, 刘瑞琦, 肖敦宇, 王振
(武汉市工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

摘要: 地表径流污染具有典型的非点源性, 现已成为水体黑臭的主要外因之一和污染防治的关键。以武汉万家湖水环境综合整治工程为例, 结合污染源本底调查, 介绍了万家湖汇水区径流污染治理方案。为治理点源污染, 采用初雨调蓄和应急处理的方案, 将旱季混流污水和雨季初期雨水截流、转输、储存在调蓄池中, 并经水泵提升至市政污水处理系统。为控制沿湖面源污染, 采用浅滩湿地植物带+生态缓冲消纳区的方式对污染物进行生物滞留, 以减少排入主湖区的污染负荷。万家湖水环境综合整治工程现已通过当地环保验收, 目前水质由稳定地表水Ⅴ类逐步向Ⅳ类靠近。

关键词: 径流污染; 初雨调蓄; 应急处理; 生物滞留

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)24-0120-05

Control of Runoff Pollution in Wanjia Lake Catchment in Wuhan

XIE Xiao-long, HU Xiao-bin, LIU Rui-qi, XIAO Dun-yu, WANG Zhen
(Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: Surface runoff pollution, as a typical non-point source, has become one of the dominating external causes of black and odorous water and the key to pollution control now. In combination with the comprehensive environment improvement project of Wanjia Lake in Wuhan, runoff pollution control scheme is introduced based on the thorough background investigation. First-flush storage and emergency treatment are adopted to control the point pollution. The mixed sewage in the dry season and the first-flush runoff are stored in the storage tank, and lifted to the municipal sewage treatment system by pump. In order to control the non-point pollution along the lake, shallow wetland plant belt and ecological buffer zone are used for bioretention against pollutants, which could reduce the pollution load discharged into the core lake. The comprehensive environment improvement project of Wanjiahu lake has passed the inspection of local environmental protection department, and the water quality has gradually moved from stable level V to level IV.

Key words: runoff pollution control; first-flush storage; emergency treatment; bioretention

1 项目概况

根据《武汉市水资源公报》, 2013年—2017年万家湖呈现中度富营养化状态, 连续5年水质评价为地表水劣Ⅴ类。由于万家湖服务范围内未经处理的污水排放和农业、渔业活动, 造成湖泊底泥污染严重, 水环境和生态持续恶化, 同时旱涝发生几率增加, 制约了区域可持续发展。根据武汉市“四水共

治”工作领导小组办公室《关于印发武汉市全面开展水质提升的工作意见》的要求: 到2021年, 要基本消除劣Ⅴ类水体, 重点水体的水质达标率达到85%以上; 到2030年, 全面消除劣Ⅴ类水体, 全市水功能区的水质达标率达到90%以上。2017年经开区(汉南区)对域内部分重点湖泊、港渠进行综合整治, 万家湖综合整治工程位列其中。

万家湖位于武汉经济开发区(汉南区)东南部,属汉阳东湖水系,湖泊规划蓝线控制面积 105.3 hm²,蓝线控制长度约 8.1 km;规划常水位 19.15 m,规划最高水位 19.65 m。湖泊平均水深 1.80 m,总容积 91.2×10⁴m³,现状主要功能为排涝、调蓄,兼有渔业养殖;远期规划主要功能为景观娱乐、调蓄和生态。万家湖汇水区由车城东路、沌口路及沌阳大道合围而成,面积约 6.0 km²,属沌口污水处理厂服务范围。区域规划排水体制为雨污分流制,综合径流系数为 0.65。

2 污染源调查

根据调查结果,万家湖周边区域市政管道混/错接现象较为严重,混/错接多达 53 处。检测结果表明,雨污混接点以市政道路为主,为此,本工程对混/错接严重的雨水排口先进行末端截污,同步将源头的混/错接改造纳入“四水共治”工程进行专项整治、系统改造,改造完毕后该截污管将用于截流服务范围内的初期雨水,继续发挥工程效益。

结合万家湖水环境目前存在的问题,2017 年 12

月—2018 年 6 月经开区(汉南区)水务和湖泊局开展了万家湖汇水区入湖污染源及水质的调查和评估工作。

排口探查和水质取样点设置见图 1。



图 1 排口及水质取样点分布

Fig.1 Distribution of outlets and sampling points

2.1 水质检测

前期取样点共设置 17 处,检测结果见表 1。其中,总氮、COD、氨氮、总磷均超标严重,COD_{Mn}略超过地表Ⅳ类水标准,石油类满足Ⅳ类水标准,粪大肠菌群满足Ⅱ类水标准,总体评价为劣Ⅴ类水质。

表 1 万家湖水水质检测结果

Tab.1 Test results of Wanjia Lake water quality

项目	DO/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	总磷/ (mg·L ⁻¹)	总氮/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	pH	粪大肠菌群/ (个·L ⁻¹)	石油类/ (mg·L ⁻¹)	TDS/ (mg·L ⁻¹)	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	ORP/ mV	透明度/ 度/m
标准值 (Ⅳ类)	3	10	30	6	0.1	1.5	1.5	6~9	20 000	0.5				
最小值	0.5	4.04	24	4.3	0.17	2.4	1.88	8.5	<200	0.07	357	409	90	0.4
最大值	10.4	11.4	53	7.1	2.02	16.2	11.6	9.6	1 200	0.22	771	1 027	601	0.6
平均值	7.36	8	37	5.63	0.96	9.8	6.99	9.1	500	0.14	569	672	205	0.45

2.2 点源污染

根据物探及现场勘察结果,万家湖各类排口共计 76 个,其中集中式雨污混合排口 23 处,其对应的水量连续监测数据见表 2。

万家湖雨污水混合排口污染物排放负荷见表 3,可以看出:通过混合排口汇入万家湖的污水量为 1 955×10⁴m³/a,其中 COD、TN、TP、氨氮负荷分别为 1 780、275、34.3、210 t/a。

表 2 混合排口流量连续监测结果(旱季)

Tab.2 Continuous monitoring results of mixed discharge (dry season)

物探 编号	日流量(瞬时流量计算结果)/(m ³ ·d ⁻¹)								平均值/ (m ³ ·d ⁻¹)	标准偏差/ (m ³ ·d ⁻¹)	相对标准 偏差/%
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次			
PFK01	0	0	0	5 243	0	14 810	0	4 793	3 106	5 113	138
PFK02	19 331	0	0	0	9 012	18 369	18 873	9 425	9 376	8 734	93.2
PFK09	8.27	8.18	8.11	6.24	7.31	7.44	6.57	7.52	7.45	0.7	10
PFK26	561	547	559	233	246	214	237	467	383	164	42.7
PFK28	2 465	2 465	2 465	1 800	1 800	2 465	2465	1 800	2 215	344	15.5
PFK29	658	524	360	375	313	372	512	514	454	117	25.7
PFK30-32	4 045	4 512	3 777	4 020	3 680	3 938	4 700	3 891	4 070	355	8.7

续表2 (Continued)

物探 编号	日流量(瞬时流量计算结果)/(m ³ ·d ⁻¹)								平均值/ (m ³ ·d ⁻¹)	标准偏差/ (m ³ ·d ⁻¹)	相对标准 偏差/%
	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	第八次			
PFK35	42.2	37.3	43.7	44.1	55.1	63.1	60.8	53.5	50	9.5	18.9
PFK36	138	123	71.9	132	132	290	290	204	173	81	46.8
PFK38	352	249	221	108	108	221	108	234	200	87	43.6
PFK39	20.9	34.5	1.73	26.4	26.4	8.64	8.64	20.6	18.5	11	60.2
PFK40	12.6	15	8.88	13	13	4.32	4.32	8.14	9.9	4.1	41.6
PFK45	94.5	87.9	61	123	168	95	59.4	101	98.7	35	35.2
PFK49	392	123	111	170	216	245	225	257	217	89	40.9
PFK60	37.9	37.9	41.4	37.9	42.3	39.7	38	39.1	39	1.7	4.4
PFK68	232	213	203	173	157	227	208	206.2	202	25	12.6
PFK69	74.2	71.6	86.4	70.4	67.3	109.1	172	117.2	96	36	37.5

注：现场监测持续 48 h,每隔 4 h 测一次。

表 3 混合排口污染负荷调查(旱季)

Tab.3 Investigation of the pollution load of mixed discharge (dry season)

物探 编号	水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	物探 编号	水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)
PK01	5 530	78.2	19.6	2.64	13.5	PK45	98.7	108	29.2	2.18	25.4
PK02	9 376	137	25.1	2.29	20.1	PK47	1 040	110.9	15.9	1.534	10.6
PK26	383	22~1 376	12.7~133	0.92~10.6	9.96~121	PK48	800	37.5	12.7	0.92	10.7
PK30- PK32	7 367	58.6	12.5	1.08	9.96	PK49	217	11.9	5.83	0.28	4.66
						PK52	125	15.9	3.77	0.104	2
PK34	1 177	17.2	5.9	0.56	3.62	PK53	139	13	3.4	0.265	2.29
PK35	87	24.3	2	0.134	1.31	PK54	154	30.7	5.2	1.438	1.91
PK36	173	130	30.7	2.69	28.1	PK55	218	21.7	3.69	0.618	2.65
PK38	378	430	52.2	5.74	46.1	PK56	86	21.4	7.11	0.336	5.44
PK39	18.5	456	80.1	7.34	70.4	PK60	39.3	5.88	2.29	0.093	1.57
PK40	9.9	424	57	6.8	46.1	PK70	22 944	91.2	8.22	1.68	6.08

2.3 面源污染

根据武汉市多年平均降雨资料、初期雨水与后期雨水浓度以及汇水区下垫面组成,各排口初期雨水与后期雨水污染负荷见表4。

其中,初期和后期雨水量合计分别为 106.74×10⁴、177.43×10⁴ m³/a;初期和后期雨水 COD 合计分别为 192.21、150.84 t/a;初期和后期雨水 TN 合计分别为 12.816、12.43 t/a;初期和后期 TP 合计分别为 0.855、0.444 t/a;初期和后期雨水氨氮合计分别为 8.55、6.209 t/a。

表 4 面源污染负荷调查

Tab.4 Investigation of non-point pollution load

日雨量段/ mm	年均次数/ 次	日均雨量/ mm	水量/(10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹)		COD/(t·a ⁻¹)		TN/(t·a ⁻¹)		TP/(t·a ⁻¹)		氨氮/(t·a ⁻¹)	
			初期	后期	初期	后期	初期	后期	初期	后期	初期	后期
2~10	39.7	4.9	43	0	77.4	0	5.16	0	0.344	0	3.44	0
10~14.9	9.79	12.2	17.3	9.09	31.2	7.73	2.08	0.64	0.139	0.023	1.39	0.318
14.9~17.6	4.27	16.2	7.55	7.74	13.6	6.58	0.906	0.54	0.06	0.019	0.604	0.271
17.6~20.8	3.5	19.5	6.19	8.9	11.1	7.57	0.743	0.62	0.05	0.022	0.495	0.312
20.8~24.5	3.5	22.4	6.19	11.1	11.1	9.47	0.743	0.78	0.05	0.028	0.495	0.39
24.5~29.2	2.8	26.6	4.95	11.5	8.92	9.79	0.594	0.81	0.04	0.029	0.396	0.403
29.2~35.2	3	32	5.31	15.9	9.55	13.5	0.64	1.11	0.042	0.04	0.43	0.557
35.2~43.3	2.4	39.1	4.25	16.5	7.64	14	0.51	1.16	0.034	0.041	0.34	0.578
≥43.3	6.8	72.3	12	96.7	21.7	82.2	1.44	6.77	0.096	0.242	0.96	3.38

2.4 调查分析及结论

根据万家湖污染源调查,万家湖水质总体为劣V类,水质恶化非常严重,参考万家湖的治理目标(达到地表水Ⅳ类标准),总磷超标8.60倍,总氮超标5.53倍,氨氮超标3.66倍,COD超标0.23倍;万家湖入湖点源和面源污染负荷均较高,其中面源污染中城市径流污染占比最高,万家湖集水区约632 hm²,其中农村面积约63.18 hm²,城市面积为568.82 hm²。万家湖汇水区城市面源COD、TN和TP的污染负荷占比分别为97.7%、95.3%、94.5%。因此,亟需对万家湖实施控源截污工程,同时辅以湖泊岸线整治,减少入湖点源和面源污染负荷,逐步恢复湖泊的生态功能,提高水生生态系统的稳定性。

3 治理方案

根据湖泊点源、面源、内源污染负荷以及污染物目标削减量(见表5),万家湖综合整治工程技术路线如下:对入湖雨污水排口分类截流,确保周边村湾、社区组团生活、生产污(废)水得到有效收集;削减内源污染,清除污染底泥、垃圾等;应用海绵城市理念设置湖滨带生态过渡带,发挥拦截、过滤、净化径流污染的功能;取缔湖泊水产养殖。

表 5 万家湖主要污染物削减量

Tab.5 Reduction of major pollutants in Wanjia

Lake				t·a ⁻¹
项 目	COD	TN	TP	
总污染物负荷	2 470.22	326.06	37.41	
水环境容量	1 027.27	49.96	3.90	
目标削减量	1 442.96	276.10	33.51	

3.1 初雨调蓄

万家湖汇水区雨水经管道收集后,主要通过几处d1 000~1 800 mm大型排口以及众多d200~800 mm小型排口排入湖中。为避免初期雨水直接排湖,根据万家湖混接排口上游服务区的实际情况和排口所处的区域,拟在明珠驾校、周公社区、纸成苑小区三处雨水管涵末端设置3座初雨调蓄池,见图2。根据《武汉溢流污染及面源污染治理系统建设规划》中“面源污染治理标准”,水质管理目标为Ⅳ类的湖泊汇水区,其面源污染物削减率应达到60%,雨水调蓄池的调蓄量可取5~10 mm^[1-2]。根据《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017),用于分流制排水系统径流污染控制时,雨水调蓄池单位面积调蓄深度可取4~8 mm,安全系数

可取1.1~1.5。

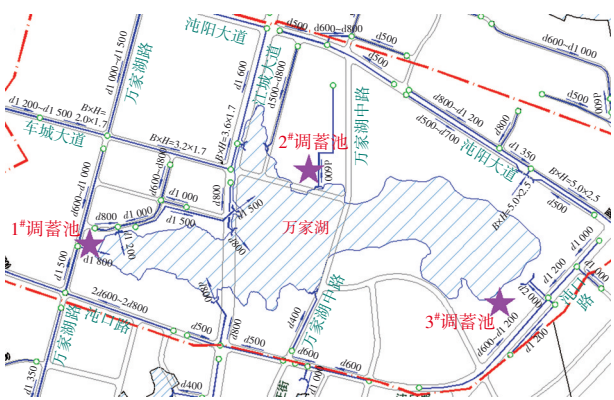


图 2 调蓄池选址分布

Fig.2 Location of storage tanks

综合上述分析及污染负荷随降雨历时的变化,本工程单位面积调蓄深度取7.0 mm,安全系数取1.2。为有效应对中后期雨水溢流污染,在排口附近设置应急处理及生态强化处理等措施,经工况复核其实际调蓄深度>7.0 mm降雨。明珠驾校处调蓄池汇水面积约89.03 hm²,周公社区处调蓄池汇水面积约54.15 hm²,纸成苑小区处调蓄池汇水面积约72.77 hm²。据此计算,1#调蓄池4 861 m³,取值5 000 m³;2#调蓄池2 956 m³,取值3 000 m³;3#调蓄池3 973 m³,取值4 000 m³。

3.2 应急处理

由于现状沌口污水处理厂处理能力不足,调蓄池内贮存的初期雨水无法集中排入污水处理厂处理。为最大程度削减入湖污染负荷,本工程设置应急处理设施,将部分截流初期雨水处理后再排入自然水体,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。进、出水水质见表6,远期结合区域污水处理发展统筹考虑。

表 6 应急处理设施设计进、出水水质

Tab.6 Design influent and effluent quality for emergency processing

项 目	COD	TP	SS
进水水质/(mg·L ⁻¹)	240	3	150
出水水质/(mg·L ⁻¹)	50	0.5	10
污染物去除率/%	79	84	93

目前,初期雨水常用处理方法主要有生化法、混凝沉淀(澄清)、气浮、过滤、活性炭吸附、高级氧化、超磁分离、膜分离等。因初期雨水水质、水量变

化大,有机物浓度较低、不利于微生物培养,结合进、出水水质情况,应急处理可采用混凝沉淀(澄清)、气浮、过滤、膜分离等工艺。但是,混凝沉淀(澄清)工艺产泥量大,污泥处理费用高;过滤工艺需要反冲洗,耗水量较大,反冲洗水会引发二次污染;膜分离技术出水水质较好,但需要较严格的预处理工艺,且需要定期更换滤膜,处理成本高。超磁分离一体化处理工艺和气浮+活性炭吸附一体化工艺比较见表7。

表7 超磁分离和气浮+活性炭吸附工艺比较

Tab.7 Comparison of super magnetic separation and floatation activated carbon adsorption process

项 目	超磁分离	气浮+活性炭滤膜
出泥含水率/%	≤82	≤60
主要装置、设备	混凝反应箱、超磁集装、污泥脱水集装、污泥池、渣箱	气浮反应箱及浮渣池、降碳除磷机、滤膜机、板框、废炭罐、配炭罐
占地/(m×m)	14×22	18×22
一次性投资/万元	500	580
人工费/(元·m ⁻³)	0.06	0.092
电费/(元·m ⁻³)	0.10	0.12
药剂费/(元·m ⁻³)	0.12	0.35
设备维护费/(元·m ⁻³)	0.02	0.027
浮渣运输费/(元·m ⁻³)	0.15	0.08
运行成本/(元·m ⁻³)	0.45	0.669

由表7可知,超磁分离一体化处理工艺在一次性投资及后期运行等方面均具备一定优势,因此初期雨水应急处理采用超磁分离一体化处理工艺。

3.3 生物滞留

由调查结果可知,万家湖周边存在大量雨水排口、污水排口及混流排口,在水生态系统完成构建之前需削减排口入湖污染负荷。根据海绵城市建设要求,结合万家湖综合整治工程湖泊微地貌地形再造和排口分布,将近岸浅滩按湖泊高程梯度分设为三段式湖沼区,形成仿生自然湖沼的浅滩湿地植物带+生态缓冲消纳区。雨水径流通过前端一级湖沼地带汇入,并通过基质渗流、表面溢流、沟洼洩流等形式汇流入二级湖沼及主湖。结合湖泊常水位,

一、二级湖沼可在丰水季、枯水季形成间歇性干涸和淹水区,达到动态式的湖泊自然景观,也可作为水禽保育的栖息地。在浅滩湿地地带选用多年生挺水植物作为生态栅栏,后期结合植物生长对生态栅栏进行定期收割,以维持其吸收及过滤作用。

4 工程治理效果

万家湖水环境综合整治工程总投资为48 887.77万元,工程费用为34 282.17万元,其中控源截污17 406.86万元(含3座调蓄池、应急处理工程等),清淤工程9 557.80万元,水生态修复工程7 317.51万元。该工程已于2020年底交付建设单位,根据当地环保部门检测结果,湖泊水质正在向好发展。

5 结论

地表径流污染具有典型的非点源性,现已成为水体黑臭的主要外因之一和污染防治的关键。为治理入湖径流污染,武汉万家湖综合整治工程采取了截污纳管、初雨调蓄、生物滞留等一揽子措施。万家湖水环境综合整治工程现已通过当地环保验收,根据近两年的跟踪调查,目前水质稳定在地表水V类并逐步向IV类靠近,该工程的治理方案可为湖泊径流污染治理提供参考。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 史昊然. 合流制溢流调蓄处理工艺效果评估及优化对策[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5): 106-110.
SHI Haoran. Performance evaluation and optimization solutions of combined sewer overflow storage and treatment process[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5): 106-110(in Chinese).

作者简介:谢小龙(1982—),男,江西临川人,博士,高级工程师,主要研究方向为给排水、生态工程及黑臭水体治理。

E-mail:xxl594518@163.com

收稿日期:2021-09-26

修回日期:2021-10-19

(编辑:衣春敏)