

吴伟, 郝学凯, 杨晓波, 等. 河流污染源调查结果分析与治理措施——以武汉市马影河为例[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 159-170.

WU W, HAO X K, YANG X B, et al. Investigation and analysis methods of river pollution sources and treatment measures: Case of Maying River in Wuhan City [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 159-170.

河流污染源调查结果分析与治理措施——以武汉市马影河为例

吴伟¹, 郝学凯¹, 杨晓波¹, 孙浩铭^{2,*}

(1. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北武汉 430000; 2. 华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北武汉 430070)

摘要 【目的】城市的快速高质量发展对水环境的要求越来越高, 河流污染治理是水环境全面提升的一项重要内容。污染源调查与分析是河流治理对策的数据基础, 如何更加精准地计算评估污染源现状是河流治理的重要工作。【方法】以武汉市经济开发区马影河为例, 探究河流中点源、面源和内源的污染现状, 对污染源调查数据进行分析, 利用化学需氧量(COD_{Cr})水质模型、狄龙模型等科学的模型进行污染源及环境容量评估, 为治理不同污染源提出针对性治理措施。【结果】调查结果表明, 点源污染中 COD_{Cr}、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮负荷为 836.3、501.6、21.08、281.13 t/a; 面源污染中 COD_{Cr}、TN、TP 负荷为 8 102.74、837、68.42 t/a; 内源污染中 COD_{Cr}、TN、TP 负荷为 127.02、15.88、1.06 t/a, 污染主要贡献来源为面源污染; 马影河农田片区中 COD_{Cr}、TN、TP 的环境容量为 2 959.70、63.86、6.66 t/a; 城镇片区中 COD_{Cr}、TN、TP 的环境容量为 3 512.73、185.99、12.11 t/a。【结论】通过沿河截污、市政管网建设、雨污分流改造、初雨调蓄、人工湿地工程和农田片区污染管控等一系列措施的实施, 取得了有效的治理, 成功将马影河从治理前的劣 V 类水体提升至 IV 类水体, 同时也验证了污染源调查方法与模型的科学性及有效性。

关键词 马影河 污染负荷 环境容量 污染源调查 分析方法 治理措施 科学模型

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)03-0159-12

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.03.019

Investigation and Analysis Methods of River Pollution Sources and Treatment Measures: Case of Maying River in Wuhan City

WU Wei¹, HAO Xuekai¹, YANG Xiaobo¹, SUN Haoming^{2,*}

(1. Wuhan Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract [Objective] The rapid and high-quality development of cities has higher and higher requirements for water environment, and river pollution control is an important part of the overall improvement of water environment. Investigation and analysis of pollution sources is the data basis of river governance countermeasures, and how to calculate and evaluate the current situation of pollution sources more accurately is an important task of river governance. [Methods] Taking the Maying River in Wuhan Economic Development Zone as an example, this paper explored the current status of point, non-point and endogenous pollution in the river, analyzed the investigation data of pollution sources, and used scientific models such as total phosphorus (COD_{Cr}) water quality model and Dillon model to evaluate pollution sources and environmental capacity, and put forward targeted treatment measures for the treatment of different pollution sources. [Results] The result showed that the loads of COD_{Cr}, total nitrogen(TN), total phosphorus (TP) and ammonia nitrogen in point source pollution were 836.3, 501.6, 21.08 t/a and 281.13 t/a. The loads of COD_{Cr}, TN and TP in non-point source pollution were 8 102.74, 837 t/a and 68.42 t/a. The loads of COD_{Cr}, TN and TP in endogenous pollution were 127.02, 15.88 t/a and 1.06 t/a, and the main sources of pollution were non-point source pollution. The environmental capacities of

[收稿日期] 2023-03-31

[作者简介] 吴伟(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事市政给排水和环境治理规划设计工作, E-mail: hustww@163.com。

[通信作者] 孙浩铭, 男, 硕士, 主要从事海绵城市建设工程, E-mail: 983289994@qq.com。

COD_{Cr}, TN and TP in the Mayinghe farmland area were 2 959.70, 63.86 t/a and 6.66 t/a. The environmental capacities of COD_{Cr}, TN and TP in urban areas were 3 512.73, 185.99 t/a and 12.11 t/a. [Conclusion] Through the implementation of a series of measures such as sewage interception along the river, construction of municipal pipe network, transformation of rain and sewage diversion, early rainfall diversion and storage, constructed wetland project and pollution control in farmland area, effective governance has been achieved, and the Maying River has been successfully upgraded from the inferior class V water body before the treatment to the class IV water body, and the scientificity and effectiveness of the pollution source investigation method and model have also been verified.

Keywords Maying River pollution load environmental capacity pollution source investigation analysis method control measures scientific model

河流污染治理是有效全面提升水环境质量的一项重要工作。全面调查污染源,摸清污染源的类型、数量和时空分布是河流污染治理的关键基础工作。针对污染源调查的工作,点源、面源和内源污染的调查方法有多种。檀雅琴^[1]对九江市中心城区的入河污染负荷及削减量进行了分析,但未具体说明污染源的调查方法。罗晓华等^[2]利用现场调查、GSSI探地雷达探测和水样分析等方法对福州市某内河进行了污染源调查。刘园^[3]则对合肥市兆河流域进行了污染源调查分析,提出应该以行政区划为单位进行调查。马影河是武汉市汉南区的“母亲河”,但由于长期以来对湖泊、河流、港渠纳污、养殖功能的滥用,加上缺乏有效管理,造成马影河水环境逐步恶化^[4],亟须开展水体治理,科学有效地开展对马影河流域的污染源调查与分析十分重要。

为提升马影河流域水环境质量,须对马影河流域的污染源调查结果进行科学合理分析,并针对存在的问题采取科学有效的措施,对比治理前后的水环境质量变化,判断污染源调查结果分析与治理措施的科学有效性。

1 马影河概况

马影河位于汉南区东北,是流经汉南区全境的唯一的一条内河水系,西起东城垸农场 18 家,东至乌金农场东城闸入长江,全长为 27.4 km,马影河现状水体质量为劣 V 类水体,治理目标为近期 2025 年前达地表Ⅳ类水体,远期 2030 年达地表Ⅲ类水体。马影河水系由马影河主河道、8 条较大的连河沟渠和 14 个小湖泊构成(图 1)。主要承担水系范围内的农业灌溉、排涝及纱帽城区排渍的任务。非汛期流域范围内的雨水、渍水、生活污水及工农业生产废水均流入马影河,通过马影闸排入通顺河经由黄陵闸排入长江,汛期由大军山泵站抽排入长江。

2 污染源调查内容及方法

2.1 点源污染

主要针对河流周边各类排口进行调查,通过现场踏勘及资料分析的方法,对观测期间无水流的排口不取样作数据分析,对正在排水或能明显判断为间歇排水的排口,记录排口的形状、位置、水量,并采集水样进行检测,检测指标包括化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮。马影河流域周边共发现 227 个排口,其中监测时存在排水情况的排口共 43 个。可根据排口的流量以及水质数据,计算出排入马影河的点源污染负荷。

2.2 面源污染

主要包括农业面源、城市面源、畜禽养殖、水产养殖、农村生活等。根据城市发展程度、产业类型分布、居住人口等,利用现场调查、遥感分析、资料收集等相结合的手段,将马影河流域分为农田片区(7 333 hm², 1hm² = 10 000 m²)和城镇片区(7 913 hm²),对面源污染进行系统的调查。

2.2.1 农业面源污染

①农业面源污染总负荷计算如式(1)。

$$L_a = L_s + L_d \quad (1)$$

其中: L_a ——农业面源污染总负荷,kg/(hm²·a);

L_s ——颗粒态污染负荷,kg/(hm²·a);

L_d ——径流中溶解态污染负荷,kg/(hm²·a)。

②颗粒态污染负荷计算如式(2)。

$$L_s = \alpha S_d \eta C_s A \quad (2)$$

其中: α ——换算系数,为 1 000;

S_d ——泥沙输移比;

η ——土壤污染物富集比;

C_s ——颗粒态污染物质量分数;



图 1 马影河河道分区

Fig. 1 Maying River Zoning

A ——土壤流失量, $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

③溶解态污染负荷计算如式(3)。

$$L_d = \beta C_d Q \quad (3)$$

其中: β ——换算系数,为 0.01;

C_d ——径流中某种土地利用类型的污染物质质量浓度, mg/L ;

Q ——年径流深, mm 。

2.2.2 城市面源污染

根据有无城市管网,将城市面源污染分为管网面源和非管网面源。

①管网面源

对于雨水排放口收集到的雨水,参照文献^[5-7],确定初期雨水和后期雨水的设计水质;根据武汉市气象局提供的多年平均日降雨强度数据,由经验设定初期雨水为 8 mm。

②非管网面源

城市非管网面源模型选择 L-THIA 模型(Long-Term Hydrologic Impact Assessment Model)。L-THIA 模型是基于 SCS 水文模型(Soil Conservation Service Hydrologic Model)发展而来的,利用某区域长期的气候、土壤和土地利用等数据进行模拟计算,得到该区域的多年平均径流深度、径流量分布和面源污染

负荷。

2.2.3 农村生活污染

农村生活污水污染负荷计算如式(4)。

$$W_{li} = \alpha_1 P L_{li} \times 365 \times 10^{-6} \quad (4)$$

其中: i ——污染物种类;

W_{li} ——农村居民生活污染负荷, t/a ;

P ——农村居住区人口数,人;

L_{li} ——农村人均污染物排放定额, $g/(人 \cdot d)$;

α_1 ——农村居民生活污染物入河系数。

2.2.4 散养畜禽养殖污染

畜禽养殖污染负荷计算如式(5)。

$$W_{2i} = \alpha_2 N L_{2i} \times 10^{-3} \quad (5)$$

其中: W_{2i} ——畜禽养殖污染负荷, t/a ;

N ——畜禽存栏数,头或只;

L_{2i} ——单位畜禽的污染物排放量, $kg/(头 \cdot a)$;

α_2 ——畜禽养殖污染物入河系数。

2.2.5 水产养殖

水产养殖污染负荷计算如式(6):

$$W_{3i} = B \times L_{3i} \div 1\,000 \quad (6)$$

其中: W_{3i} ——水产养殖污染负荷, t/a;

B ——水产养殖产量, t/a;

L_{3i} ——水产养殖单位产量污染物排放量或产生量, g/(kg·a)。

2.3 内源污染

采用重力柱状底泥采样器(型号: CORER-60)对研究区域水体的底泥进行采集, 采集后尽快用卷尺测量污染层、过渡层和本底层厚度, 取各层底泥 200 g 以上, 用封口袋密封保存, 尽快送样检测。

本次调查马影河共设置底泥监测位点 19 处, 分别测量污染层、过渡层和正常层厚度。对样品的含有的有机质、TN、TP、镉、汞、铅、砷、铜、锌、铬、镍等参数进行分析, 并通过内梅罗污染指数和重金属污染指数^[8]对污染程度进行评价。

2.3.1 底泥污染指数

底泥污染指数计算如式(7)。

$$I_i = C_i / L_i \quad (7)$$

其中: I_i ——某元素污染指数;

C_i ——元素实测值;

L_i ——元素评价参考标准值。

2.3.2 内梅罗污染指数

内梅罗污染指数法计算如式(8)。

$$N = \sqrt{\frac{P_i^2 + I_{\max}^2}{2}} \quad (8)$$

其中: $I_{\max}$ ——污染指数中的最大值;

P_i ——所有元素污染指数的平均值;

N ——内梅罗污染指数。

2.3.3 平均污染指数

平均污染指数计算如式(9)。

$$Z_i = \frac{1}{8} \times \frac{\sum_{i=1}^8 C_i}{Z_i} \quad (9)$$

其中: Z_i ——8 种金属污染指数的平均值;

C_i ——第 i 种金属含量的检测值;

Z_i ——第 i 种金属含量的标准值。

另外淤泥中污染物的富集与释放已成为河湖水体污染的重要来源, 也是河湖净化与修复的重要阻碍。参考文献^[9]中的相关结论, 调查期间马影河底泥污染物释放负荷分别按照 TN、TP、COD_{Cr} 为 15、

1、120 mg/(m²·d) 的释放速率进行氮磷污染负荷分析。

2.4 水环境容量

水域环境容量是指在给定水域范围和水文条件, 规定排污方式和水质目标的前提下, 单位时间内水体最大允许纳污量, 反映流域水环境系统功能可持续正常发挥前提下水域接纳污染物的能力。本次调查采用水环境模型, 分析马影河的水环境容量。

马影河为武汉经开区(汉南区)的内河, 枯水期受降雨影响, 天然径流量较小甚至为 0, 且河道进出口皆有闸门, 枯水期形成封闭水体, 采用湖泊水环境容量计算方法计算马影河的水环境容量。

2.4.1 COD_{Cr} 水质模型

湖泊作为封闭型水体, 水质模型一般以“混合反应器”为假设而建立。据湖泊物质平衡方程, 小型湖泊采用 COD_{Cr} 水质模型, 计算方式如式(10)。

$$W = B_s(KV + Q_{\text{出}}) \quad (10)$$

其中: W ——水域纳污量, kg/a;

$Q_{\text{出}}$ ——年出湖水量, m³/a;

B_s ——规划目标质量浓度, mg/L;

K ——降解速率, d⁻¹;

V ——湖泊容积, m³。

马影河为季节性城市雨源型河流, 参考《全国地表水水环境容量核定技术复核要点》有关成果的水质降解系数参考值(水质为 V 类或劣 V 类的湖泊, COD_{Cr} 降解系数为 0.01~0.03 d⁻¹), 本次调查湖泊 COD_{Cr} 降解系数取 0.025 d⁻¹。

2.4.2 TN、TP 水质模型

对于湖泊营养盐允许负荷模型, 常见的有沃伦德尔、狄龙及合田健模型^[10]; 其中狄龙模型主要适用于富营养化湖(库), 合田健模型适用于水流交换能力弱的湖库湾等。由于马影河区域大部分湖泊富营养化程度较高, 因此本研究采用狄龙模型计算 TN、TP 环境容量。狄龙模型如式(11)~式(12)。

$$\theta = Q_A / V \quad (11)$$

$$P = \frac{L_p(1 - R_p)}{\theta \times h_p} \quad (12)$$

其中: P ——湖中氮磷的平均质量浓度, g/L;

L_p ——年湖氮磷单位面积负荷, g/(m²·a);

h_p ——湖泊平均水深, m;
 R_p ——氮、磷在湖(库)中的滞留系数;
 θ ——水力冲刷系数, 1/a;
 Q_A ——每年流入湖泊的水量, m^3/a 。
湖中氮磷的纳污能力按照式(13)~式(14)计算。

$$N_s = \frac{P_s h_p Q_A}{(1 - R_p) V} \quad (13)$$

$$M_N = N_s \times M \quad (14)$$

其中: M_N ——氮磷的水域纳污能力, t/a;
 N_s ——湖泊单位面积氮磷的纳污能力, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;
 M ——湖泊水面面积, m^2 ;
 P_s ——湖泊中氮磷的年控制目标, mg/L 。

3 污染源及水环境分析评估

3.1 点源污染分析评估

在马影河周边发现的 227 个排口当中, 共有 43 个排口采集并分析了水质(表 1)。对城镇片区通过排口汇入马影河的污水量达 3 188 万 m^3/a , 其中 COD_{Cr} 负荷为 760 t/a, TN 的负荷为 485 t/a, TP 的负荷为 19.5 t/a, 氨氮的负荷为 274 t/a。农田片区通过排口汇入马影河的污水量达 543 万 m^3/a , 其中 COD_{Cr} 负荷为 76.3 t/a, TN 的负荷为 16.6 t/a, TP 的负荷为 1.58 t/a, 氨氮的负荷为 7.13 t/a(表 2)。城镇片区点源贡献的 COD_{Cr} 、TN、TP 和氨氮污染负荷占比均在 90%以上, 可见城镇片区通过排口排入马影河的污染物浓度要远高于农田片区, 所以如何减少城镇片区污水排入马影河是削减污染物、提高水质指标的关键问题。

表 1 马影河排口水质和水量检测结果
Tab. 1 Monitoring Results of Water Quality and Quantity of Outfall along Maying River

序号	区域	排口名称	排口类型	排口尺寸/ mm	水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Cr}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	城镇片区	马影河 25#	管涵	1 500	62 844.00	8.53	8.57	0.270	1.04
2		马影河 27#	箱涵	3 000×1 500	12 244.00	91.20	48.20	1.540	43.20
3		马影河 28#	管涵	800	308.00	282.00	11.10	4.630	1.97
4		马影河 30#	管涵	600	34.60	7.65	2.31	0.210	0.34
5		马影河 32#	管涵	1 800	34.60	38.20	10.20	1.320	6.98
6		马影河 33#	管涵	1 000	8.64	5.88	1.60	0.120	1.43
7		马影河 34#	管涵	1 000	8.64	7.06	0.78	0.070	0.59
8		马影河 42#	管涵	1 200	69.10	11.80	1.81	0.130	1.03
9		马影河 53#	箱涵	2 200×1 700	2 859.00	70.60	4.35	0.280	2.83
10		马影河 190#	管涵	1 000	95.90	165.00	40.50	4.130	38.10
11		马影河 194#	管涵	1 800	25.90	132.00	39.50	4.040	37.10
12		马影河 203#	管涵	1 200	8.64	7.35	7.32	0.560	6.31
13		马影河 214#	管涵	1 200	34.60	16.50	8.19	0.860	6.94
14		马影河 216#	管涵	3 500×3 000	910.00	16.50	2.80	0.280	1.01
15		马影河 218#	管涵	800	7 131.00	11.80	24.40	2.000	19.70
16		马影河 220#	管涵	500	138.00	3.82	2.69	0.220	0.37
17		马影河 223#	管涵	600	17.30	8.53	3.99	0.560	1.46
18		马影河 224#	管涵	600	18.10	150.00	29.80	3.120	24.30
19		马影河 226#	明渠	—	346.00	27.19	2.44	0.104	0.53
20		马影河 227#	明渠	—	216.00	23.96	1.68	0.672	0.88
21	农田片区	马影河 79#	明渠	—	17.30	22.40	9.01	0.980	7.01
22		马影河 81#	管涵	200	1.73	26.50	2.31	0.460	1.85
23		马影河 83#	明渠	宽 6 000	104.00	57.40	27.00	3.970	19.00
24		马影河 84#	明渠	宽 1 000	5 486.00	6.84	0.14	0.001	0.08
25		马影河 86#	明渠	—	691.00	22.67	8.72	1.181	3.40

(续表1)

序号	区域	排口名称	排口类型	排口尺寸/ mm	水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Cr}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
26	农田片区	马影河 87#	明渠	—	432.00	16.21	9.63	0.879	2.87
27		马影河 88#	明渠	2 500×2 700	51.80	26.50	20.40	2.900	16.50
28		马影河 89#	管涵	1 800	8.64	36.80	18.70	1.420	9.98
29		马影河 90#	管涵	600	69.10	20.00	1.87	0.270	0.54
30		马影河 94#	明渠	—	389.00	27.19	8.72	1.599	2.42
31		马影河 97#	明渠	—	114.00	19.44	10.18	1.191	3.46
32		马影河 106#	明渠	—	864.00	31.71	2.35	0.265	2.07
33		马影河 111#	支流	—	691.00	15.56	4.15	0.265	2.91
34		马影河 122#	箱涵	1 000×700	173.00	16.21	3.06	0.102	1.39
35		马影河 128#	管涵	800	28.60	20.40	4.52	1.114	2.41
36		马影河 129#	箱涵	1 200×1 500	39.70	39.79	12.36	2.061	7.74
37		马影河 134#	管涵	800	346.00	24.28	4.33	0.571	2.95
38		马影河 138#	管涵	800	302.00	34.30	1.65	0.339	1.07
39		马影河 140#	明渠	9 000	4 666.00	12.49	3.54	0.175	1.10
40		马影河 171#	明渠	—	51.80	23.64	0.98	0.104	0.52
41		马影河 176#	明渠	—	259.00	14.70	3.07	0.190	0.54
42		马影河 183#	明渠	—	43.20	16.21	2.34	1.061	0.72
43		马影河 184#	明渠	—	69.10	11.68	0.50	0.023	0.20

表 2 马影河排口污染负荷
Tab. 2 Pollution Load of Outfall along Maying River

序号	区域	排口名称	水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	TN/($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	TP/($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	氨氮/($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)
1	城镇片区	马影河 25#	22 938 025	196.000	197.000	6.190	23.900
2		马影河 27#	4 468 967	408.000	215.000	6.880	193.000
3		马影河 28#	112 584	31.700	1.250	0.521	0.222
4		马影河 30#	12 614	0.097	0.029	0.003	0.004
5		马影河 32#	12 614	0.482	0.129	0.017	0.088
6		马影河 33#	3 154	0.019	0.005	0	0.005
7		马影河 34#	3 154	0.022	0.002	0	0.002
8		马影河 42#	25 229	0.298	0.046	0.003	0.026
9		马影河 53#	1 043 526	73.700	4.540	0.292	2.950
10		马影河 190#	35 005	5.780	1.420	0.145	1.330
11		马影河 194#	9 461	1.250	0.374	0.038	0.351
12		马影河 203#	3 154	0.023	0.023	0.002	0.020
13		马影河 214#	12 614	0.208	0.103	0.011	0.088
14		马影河 216#	332 074	5.480	0.930	0.093	0.335
15		马影河 218#	2 602 981	30.700	63.500	5.210	51.300
16		马影河 220#	50 458	0.193	0.136	0.011	0.019
17		马影河 223#	6 307	0.054	0.025	0.004	0.009

(续表2)

序号	区域	排口名称	水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	$\text{TN}/(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$	氨氮/ $(\text{t} \cdot \text{a}^{-1})$
18	农田片区	马影河 224#	6 623	0.993	0.197	0.021	0.161
19		马影河 226#	126 144	3.430	0.308	0.013	0.067
20		马影河 227#	78 840	1.890	0.132	0.053	0.069
21		马影河 79#	6 307	0.141	0.057	0.006	0.044
22		马影河 81#	631	0.017	0.001	0	0.001
23		马影河 83#	37 843	2.170	1.020	0.150	0.719
24		马影河 84#	2 002 536	13.700	0.280	0.002 003	0.160
25		马影河 86#	252 288	5.720	2.200	0.298	0.858
26		马影河 87#	157 680	2.560	1.520	0.139	0.453
27		马影河 88#	18 922	0.501	0.386	0.055	0.312
28		马影河 89#	3 154	0.116	0.059	0.004	0.031
29		马影河 90#	25 229	0.505	0.047	0.007	0.014
30		马影河 94#	141 912	3.860	1.240	0.227	0.343
31		马影河 97#	41 628	0.809	0.424	0.050	0.144
32		马影河 106#	315 360	10.000	0.741	0.084	0.653
33		马影河 111#	252 288	3.930	1.050	0.067	0.734
34		马影河 122#	63 072	1.020	0.193	0.006	0.088
35		马影河 128#	10 438	0.213	0.047	0.012	0.025
36		马影河 129#	14 507	0.577	0.179	0.030	0.112
37		马影河 134#	126 144	3.060	0.546	0.072	0.372
38		马影河 138#	110 376	3.790	0.182	0.037	0.118
39		马影河 140#	1 702 944	21.300	6.030	0.298	1.870
40		马影河 171#	18 922	0.447	0.019	0.002	0.010
41		马影河 176#	94 608	1.390	0.290	0.018	0.051
42		马影河 183#	15 768	0.256	0.037	0.017	0.011
43		马影河 184#	25 229	0.295	0.013	0.001	0.005

3.2 面源污染分析评估

根据 2.2 小节中的计算方法,针对马影河农田片区和城镇片区的农业面源、城镇面源、畜禽养殖、水产养殖、农村生活等面源污染开展分析。

马影河集水区约为 15 246 hm^2 ,其中农村面积为 9 042 hm^2 ,城市面积为 6 204 hm^2 ;集水区内畜禽养殖约 30 841 头(有污水处理措施),25 691 头(无污水处理措施);集水区内农村人口约 64 382 人,年污水排水量约为 211.5 t/a ;集水区内水产养殖面积约为 17 068 亩(1 亩 $\approx$ 666.67 m^2),产量约为 14 566 t/a 。马影河面源污染中,生活、畜禽养殖、水产养殖、农业面源和城市面源贡献的 COD_{Cr} 污染负荷分别占比为 3.5%、16.6%、3.5%、26.3%和 50.1%,TN

污染负荷分别占比为 6.2%、20.0%、3.2%、37.1%和 33.5%,TP 污染负荷分别占比为 5.5%、32.9%、7.6%、32.0%和 22.0%; COD_{Cr} 污染负荷贡献较大的是农业面源和城市面源,总量为 6 187.79 t/a ,占比为 76.4%;TN 污染负荷贡献较大的是畜禽养殖、农业面源和城市面源,总量为 758.64 t/a ,占比为 90.6%;TP 污染负荷贡献较大的是畜禽养殖、农业面源和城市面源,总量为 59.43 t/a ,占比为 86.9%。马影河面源污染负荷如表 3 所示。

3.3 内源污染分析评估

各采样位置上、中、下各层平均污染指数如图 2 所示。各采样位置上、中、下各层内梅罗污染指数如图 3 所示。

表 3 马影河面源污染负荷

Tab. 3 Non-Point Source Pollution Load of Maying River

污染物	面源污染负荷/(t·a ⁻¹)				
	生活	畜禽养殖	水产养殖	农业面源	城市面源径流
COD _{Cr}	285.75	1 347.48	281.72	2 127.14	4 060.65
TN	52.09	167.95	26.27	310.60	280.09
TP	3.76	22.49	5.20	21.88	15.09

对调查期间马影河底泥释放负荷进行核算,马影河长度为 25 km,宽度按照 116 m 计算。据本次调查,马影河底泥氮磷污染程度为清洁至中度污染等级,重金属污染程度为轻度污染至重污染等级,底泥综合污染程度为轻度至重度污染。马影河底泥内源 COD_{Cr}、TN 释放量和 TP 释放量分别为 127.02、15.88 t/a 和 1.06 t/a。

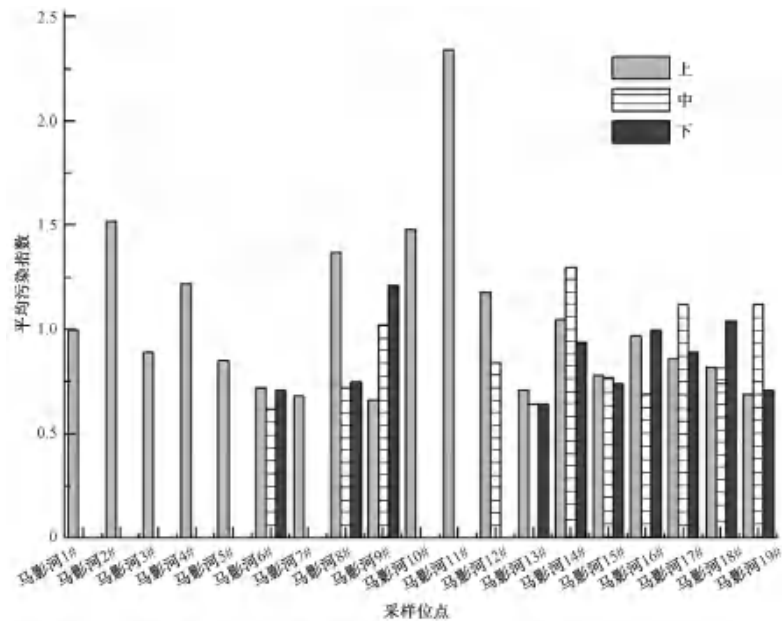


图 2 底质平均污染指数

Fig. 2 Average Pollution Index of River Sediments

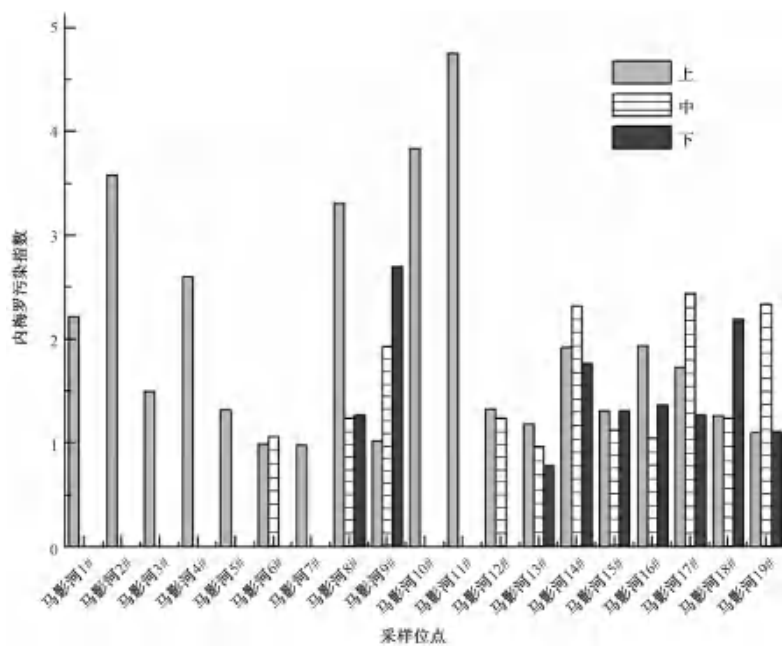


图 3 底质内梅罗污染指数

Fig. 3 Nemero Pollution Index of River Sediments

3.4 环境容量分析评估

根据本方案设定的治理目标,依照 2.4 小节中的计算模型,得出马影河农田、城镇片区水环境容量,如表 4~表 5 所示。主要污染物削减量计算方式为总污染物负荷与水环境容量之差如表 6 所示。

表 4 马影河水质模型参数估值
Tab. 4 Parameter Estimation of Water Quality Model of Maying River

参数	参数含义	农田片区估值	城镇片区估值
$Q_{入}/(m^3 \cdot a^{-1})$	年入河水量	8 135.79 万	8 559.19 万
$Q_{出}/(m^3 \cdot a^{-1})$	年出河水量	7 973.31 万	8 263.32 万
T/m^3	体积	207.38 万	377.62 万
J/hm^2	面积	102.80	187.20
h_p/m	平均深度	2.01	2.02
$K_c/(d^{-1})$	COD _{Cr} 综合衰减系数	0.025	0.025

表 5 马影河水体环境容量
Tab. 5 Environment Capacity of Maying River Water Body

类型	COD _{Cr}	TN	TP
水质目标/(mg·L ⁻¹)	30.00	1.50	0.10
IV类 农田片区环境容量/(t·a ⁻¹)	2 959.70	63.86	6.66
城镇片区环境容量/(t·a ⁻¹)	3 512.73	185.99	12.11

表 7 马影河农田片区主要污染物削减量(单位:t/a)
Tab. 7 Reduction Capacity of Major Pollutants in Agricultural Area of Maying River(Unit: t/a)

项目	COD _{Cr} /(t·a ⁻¹)	TN/(t·a ⁻¹)	TP/(t·a ⁻¹)
总体目标削减量	0	282.32	25.45
点源污染削减措施	周边地块污水收集处理	4.30	1.20
	退养还湖、畜禽禁养	513	95
面源污染削减措施/目标削减量	水网修复、设置节制闸	769.5	142.5
	生态截流带	67.5	12.5
内源污染削减措施/目标削减量	清淤疏浚	40.20	5.90
水生态系统构建/目标削减量		147.25	26.64
设计削减量	1 541.7	283.74	24.76

4.2 方案措施

4.2.1 点源污染治理措施

沿河截污工程:针对现状污水排口(13处)情况,分别采取封堵、企业整改、改接市政污水管网、污水处理厂尾水改造等措施。针对现状混流排口(23处)情况,采取上游排查整改、排口生态化、设置智

表 6 马影河主要污染物削减量(单位:t/a)

Tab. 6 Reduction Capacity of Main Pollutants in Maying River(Unit: t/a)

项目	COD _{Cr}	TN	TP
农田片区总污染物负荷(城镇片区)	2 827.70 (6 238.36)	346.18 (1 008.29)	32.12 (58.44)
农田片区水环境容量(城镇片区)	2 959.70 (3 512.73)	63.86 (185.99)	6.66 (12.11)
农田片区目标削减量(城镇片区)	0 (2 725.63)	282.32 (822.30)	25.46 (46.33)

马影河流域城镇片区的环境容量要高于农田片区,是由于城镇片区的年入河水量体积较大,纳污能力更强。农田片区的 COD_{Cr}、TN 和 TP 的削减量分别为 0、282.32 t/a 和 25.46 t/a,城镇片区的 COD_{Cr}、TN 和 TP 的削减量分别为 2 725.63、822.30 t/a 和 46.33 t/a;由此可见,城镇片区 COD_{Cr} 和 TN 的总污染负荷较高,故对城镇片区采取措施是削减 COD_{Cr} 和 TN 主要手段;而 TP 的削减需要针对农田和城镇 2 个片区。

4 治理措施

4.1 目标分解

为达到目标水质标准,对总体目标削减量进行分解,分别对农田片区和城镇片区的点源、面源和内源污染实施削减措施,如表 7~表 8 所示。

能分流井等措施。

市政管网建设工程:利用纱帽污水处理厂收集干管系统,完善沿河截污管道系统,收集两岸污水至纱帽污水处理厂集中处理达标后排放。

雨污分流改造工程:沿程家山区域周边雨水管网设置旱流污水截流设施,并选取较高的截流倍数

表 8 马影河城镇片区主要污染物削减量(单位:t/a)
Tab. 8 Reduction Capacity of Major Pollutants in Urban Area of Maying River(Unit: t/a)

项目	COD _{Cr}	TN	TP
总体目标削减量	2 725. 63	822. 30	46. 33
点源污染削减措施			
截污、雨污分流改造	1 800. 00	500. 00	29. 00
退养还湖、畜禽禁养	1 064. 00	152. 00	12. 16
面源污染削减措施/目标削减量			
水网修复、设置节制闸	1 596. 00	228. 00	18. 24
生态岸坡、海绵改造	140. 00	20. 00	1. 60
内源污染削减措施/目标削减量			
岸线整治局部挖土挖泥	20. 00	1. 00	0. 05
水生态系统构建/目标削减量	184. 74	33. 42	2. 96
设计削减量	4 804. 74	934. 42	64. 01

以控制合流污染,同时应加快推进旧城改造及整体搬迁计划。

4.2.2 面源污染治理措施

初雨调蓄工程:建设两座调蓄池,总汇水面积为 6.35 km²,总调蓄容积可达 40 000 m³,每座调蓄池出水均进入人工湿地进一步处理,以削减入河污染量。

人工湿地工程:主要针对提高解放河、幸福河、农区排渠、调蓄池以及排口入河水质和马影河自身水质污染,减少马影河的外源污染进行设计。共设计 3 座人工湿地,总处理量为 23 000 m³/d。

农田片区污染管控:进一步实施村湾环境整治工程,完善农村集镇污水处理系统。由开发区农业局、环保局、街道等部门负责控制农业用水总量,减少化肥和农药使用量,实现畜禽粪便、废旧农膜、秸秆等得到的基本处理,主要是资源化利用。

4.2.3 内源污染治理措施

由于马影河近年进行过清淤,而现状检测污染层较薄(平均值约为 8 cm),污染程度较轻,考虑马影河河面开阔,水深较深,现有清淤工艺均不太适用,故不再进行清淤。

5 治理前后水质变化情况

通过 2017 年 12 月对马影河水 11 处监测点开展水质监测,结果表明马影河整体水质较差,为劣 V 类,TP 和氨氮超标严重,其中,TP 超标 3.83 倍,氨氮超标 2.0 倍;其中浓度最高点位于城区,汇入的生活污水是造成 TP 浓度升高的原因;COD_{Cr}、BOD₅ 和 COD_{Mn} 略有超标(参照地表Ⅳ类标准);DO 和粪大肠杆菌群满足地表水Ⅳ类标准。治理前马影河水质情况如表 9 所示,综合评价为劣 V 类。

马影河综合治理项目施工结束后,在 2022 年 12 月对马影河水质情况再次进行调查监测,针对其中 3 个控制点位进行取样检测,结果表明 COD_{Mn}、COD_{Cr}、BOD₅、氨氮、TP 和 DO 均达到地表水Ⅳ类标准,其中根据《地表水环境质量评价办法(试行)》(环办[2011]22 号)的规定,TN 作为地表水参考指标,不作为地表水评价指标。通过对马影河污染源调查分析并采取对应的治理措施发现,可以有效提升马影河流域水环境质量,其治理后水质情况如表 10 所示。

6 结论

(1)河流治理污染治理是有效全面提升水环境质量的一项重要工作,全面调查污染源,摸清污染源的类型、数量和时空分布是治理河流污染的关键基础工作。

(2)在马影河污染源调查与分析过程中,利用颗粒态与溶解态污染负荷计算、L-THIA 模型、农业畜牧水产污染负荷计算、内梅罗污染指数计算、重金属平均污染指数计算、COD_{Cr} 水质模型和狄龙模型来计算和评估污染源是科学有效的。

(3)马影河污染源中点源、面源和内源贡献的 COD_{Cr} 污染负荷分别为 836.3、8 102.74 t/a 和 127.02 t/a,占比分别为 9.2%、89.4%和 1.4%;TN 污染负荷分别为 501.6、837.0 t/a 和 15.88 t/a,占比分别为 37.0%、61.8%和 1.2%;TP 污染负荷分别为 21.08、68.45 t/a 和 1.06 t/a,占比分别为 23.3%、75.5%和 1.2%;COD_{Cr}、TN 和 TP 的排放来源主要是点源和面源污染,因此,也是本次治理的重点内容。

(4)通过对马影河污染源进行详细调查分析,

表 9 马影河治理前水质
Tab. 9 Water Quality of Maying River before Remediation

采样点	项目	水温/ ℃	pH 值	DO/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	粪大肠菌群/ (个·L ⁻¹)	透明度/m
	标准值 (Ⅳ)	—	6~9	3.0	10.00	30	6.0	0.10	1.5	1.5	20 000	—
1#	监测值	10.1	9	11.1	6.04	23.2	7.1	0.314	10.8	4.57	1 600	0.3
	标准指数		1.00	0.01	0.60	0.77	1.18	3.14	7.20	3.05	0.08	
	水质类别			Ⅰ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅲ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅱ	
2#	监测值	10.8	8.8	10.5	4.73	17.6	4.6	0.741	12.2	4.82	2 500	0.3
	标准指数		0.90	0.01	0.47	0.59	0.77	7.41	8.13	3.21	0.13	
	水质类别			Ⅰ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅲ	
3#	监测值	10.1	9.5	13.4	5.88	28.5	9.5	0.292	6.38	3.49	<200	0.3
	标准指数		1.25	0.01	0.59	0.95	1.58	2.92	4.25	2.33	<1	
	水质类别			Ⅰ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅰ	
4#	监测值	9.8	9.1	9.5	5.71	24.7	5.5	0.412	6.47	3.64	900	0.2
	标准指数		1.05	0.01	0.57	0.82	0.92	4.12	4.31	2.43	0.05	
	水质类别			Ⅰ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅱ	
5#	监测值	9.8	8.9	5.1	5.55	22.9	3.3	0.297	6.55	4.01	<200	0.2
	标准指数		0.95	0.35	0.56	0.76	0.55	2.97	4.37	2.67	<1	
	水质类别			Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅰ	
6#	监测值	9.8	9.7	5.7	5.71	22.9	3.1	0.489	7.07	4.49	1 900	0.3
	标准指数		1.35	0.31	0.57	0.76	0.52	4.89	4.71	2.99	0.10	
	水质类别			Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅱ	
7#	监测值	10	9.5	5.5	6.69	37.1	6.6	1.511	10.4	5.64	2 400	0.3
	标准指数		1.25	0.33	0.67	1.24	1.10	15.11	6.93	3.76	0.12	
	水质类别			Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅲ	
8#	监测值	9.8	9.3	6.2	6.53	30.3	10	0.357	6.58	1.85	200	0.3
	标准指数		1.15	0.30	0.65	1.01	1.67	3.57	4.39	1.23	0.01	
	水质类别			Ⅱ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅴ	Ⅱ	
9#	监测值	10.7	9.9	7.0	6.37	25.4	6	0.288	6.57	2.67	1 400	0.4
	标准指数		1.45	0.23	0.64	0.85	1.00	2.88	4.38	1.78	0.07	
	水质类别			Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	劣Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅱ	
10#	监测值	10.2	9.5	8.6	6.2	28.2	6.6	0.314	4.72	1.67	<200	0.3
	标准指数		1.25	0.22	0.62	0.94	1.10	3.14	3.15	1.11	<1	
	水质类别			Ⅰ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅴ	劣Ⅴ	Ⅴ	Ⅰ	
11#	监测值	9.9	9.7	18.3	5.88	29.7	6.9	0.292	11.7	1.95	<200	0.3
	标准指数		1.35	0.01	0.59	0.99	1.15	2.92	7.80	1.30	<1	
	水质类别			Ⅰ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅳ	劣Ⅴ	Ⅴ	Ⅰ	
	平均值	10.1	9.4	9.2	5.9	26	6.28	0.483	8.13	3.53	1 050	0.3

表 10 马影河治理后水质
Tab. 10 Water Quality of Maying River after Remediation

采样点	项目	DO	COD _{Mn}	COD _{Cr}	BOD ₅	TP	TN	氨氮
	标准值(Ⅳ)/(mg·L ⁻¹)	3.00	10.0	30	6.0	0.100	1.50	1.500
1#	监测值/(mg·L ⁻¹)	9.85	4.9	16	3.2	0.112	3.90	1.345
	达标评价	达标	达标	达标	达标	达标	/	达标
2#	监测值/(mg·L ⁻¹)	9.28	5.0	13	3.7	0.293	5.06	1.469
	达标评价	达标	达标	达标	达标	达标	/	达标
3#	监测值/(mg·L ⁻¹)	10.19	6.1	19	4.2	0.067	2.40	0.875
	达标评价	达标	达标	达标	达标	达标	/	达标

针对性地采取截污纳管、雨污分流、初雨调蓄、生态处理及科学管控等治理措施,成功将治理前的劣Ⅴ类水体提升至 2022 年的Ⅳ类水体,治理效果显著,可作为典型的城市河流综合治理的成功案例。

参考文献

[1] 檀雅琴. 九江市中心城区入河污染负荷现状及削减量分析[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 220-225, 350.
TAN Y Q. Analysis of the current situation and reduction of pollution load in central Jiujiang City[J]. Water Purification Technology. 2022, 41(s1): 220-225, 350.

[2] 罗晓华, 陈龙照, 詹勇, 等. 福州市某内河黑臭水体污染源调查及治理建议[J]. 能源与环保, 2021, 43(10): 61-67, 74.
LUO X H, CHEN L Z, ZHAN Y, et al. Investigation on pollution sources of black and odorous water- body and treatment suggestion for an inland river in Fuzhou City[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(10): 61-67, 74.

[3] 刘园. 流域水环境的污染源调查[J]. 水力发电, 2020, 46(9): 23-27, 36.
LIU Y. Investigation of pollution sources for water environment in a river basin[J]. Water Power 2020, 46(9): 23-27, 36.

[4] 王砚琳. 城市水域环境治理方案研究——以武汉市汉南区水域为例[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2018.
WANG X L. City water environment treatment program study: A case study of Hannan district in Wuhan[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2018.

[5] 杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 基于文献数据再分析的中国城市面源污染规律研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1634-1644.
YANG M Y, PAN X Y, LIU H L, et al. Urban non-point

pollution characteristics in China: A meta-analysis[J]. Ecology and Environmental Sciences. 2020, 29(8): 1634-1644.

[6] 张立, 许航. 武汉市降雨径流污染特征分析[J]. 市政技术, 2014, 32(5): 90-93.
ZHANG L, XU H. Analysis of pollution characteristics of rainfall runoff in Wuhan[J]. Journal of Municipal Technology, 2014, 32(5): 90-93.

[7] 王海邻, 曹雪莹, 任玉芬, 等. 北京城市主干道降雨径流污染负荷分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(6): 1860-1867.
WANG H L, CAO X Y, REN Y F, et al. Analysis on pollution load of rainfall runoff in Beijing urban arterial roads[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(6): 1860-1867.

[8] 陆宝, 朱伟伟, 施钦, 等. 天等县典型地表水水源 2018 年—2019 年水质分析与评价[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 78-83, 96.
LU B, ZHU W W, SHI Q, et al. Water quality analysis and evaluation of typical surface water sources in Tiandeng County from 2018 to 2019[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 78-83, 96.

[9] 郑培佳, 施泽明, 王建明, 等. 成都市三岔湖表层沉积物重金属地球化学特征及生态风险评价[J]. 地球与环境, 2023, 51(3): 318-329.
ZHENG P J, SHI Z M, WANG J M, et al. Geochemical distribution and ecological risk evaluation of heavy metal in surface sediments of Sancha Lake in Chengdu City[J]. Earth and Environment, 2023, 51(3): 318-329.

[10] 蒋婷, 姜丽萍, 张艳军, 等. 蔡贤水库水域纳污能力模型比选及应用[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(s2): 75-79.
JIANG T, JIANG L P, ZHANG Y J, et al. Model comparison and application for calculating pollution carrying capacity of Caixian Reservoir[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(s2): 75-79.