

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 19. 006

HEC-RAS在江津区流域水环境治理中的应用

罗波¹, 段庭恒², 周敏³, 张磊¹, 封威⁴

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 3. 中国三峡建工<集团>有限公司, 四川 成都 610000; 4. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为探讨重庆市江津区水环境治理措施的有效性,应用HEC-RAS软件建立一维水动力水质模型,分别在实施一期、近期和远期项目三种情景下对江津区境内8条典型水质超标河流丰、枯水期的水质(COD、NH₃-N、TP)进行模拟测评。结果表明,治理方案对污染物的削减效果较好,一期、远期各河流水质均能达到预期治理目标;近期8条河流中李市小溪水质不能达到预期治理目标,尤其在枯水期水质超标严重,分析后恢复李市小溪生态补水,并再次进行水质模拟,结果表明方案有效,水质达到了地表Ⅳ类水标准。

关键词: HEC-RAS; 水环境治理; 水质评估; 方案优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0035-08

Application of HEC-RAS in Water Environment Management in Watershed of Jiangjin District

LUO Bo¹, DUAN Ting-heng², ZHOU Min³, ZHANG Lei¹, FENG Wei⁴

(1. Yangtze River Survey, Planning, Design and Research Co. Ltd., Wuhan 430010, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China; 3. China Three Gorges Construction Engineering <Group> Co. Ltd., Chengdu 610000, China; 4. Central and Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: To evaluate the efficiency of water environment management measures in watershed of Jiangjin District, Chongqing, a one-dimensional hydrodynamic and water quality model was established with the application of HEC-RAS software. The model was employed to simulate and investigate the water quality parameters including COD, NH₃-N, and TP of 8 typical rivers in Jiangjin District during wet and dry seasons after the implementation of phase I, short-term and long-term treatment projects. The results showed that the management plans exhibited good performance in pollutants reduction. The water quality of each river after the conduction of the phase I and the long-term projects could reach the expected targets. However, among the selected 8 rivers, the water quality of Lishi Creek could not achieve the desired standards after carrying out the short-term project, especially in the dry season. Therefore, the water diversion project for Lishi Creek was going to be conducted after analyzing the reasons. The

simulation results demonstrated that the project would be effective, with the water quality reaching the class IV standard for surface water.

Key words: HEC-RAS; water environment management; water quality assessment; scheme optimization

长江是我国重要的生态屏障,也是我国发展的重要支撑,但近年来长江流域内水污染不断加重,生态环境受到严重破坏,水环境治理迫在眉睫^[1]。水质的提升变化是水体治理成效的重要评估量,目前可以用于水质模拟的主流软件包括 HEC-RAS、MIKE、InfoWorks 和 SWMM 等。其中 InfoWorks 和 MIKE 属于付费商业软件,不易获取,操作复杂;SWMM 为开源软件,使用方便,但目前主要用于降雨径流的水质模拟;HEC-RAS 是由美国陆军工程兵团水文工程中心开发的一款水面线计算软件包,具有功能强大、免费使用、操作简单等优点,在一维河道水质模拟中得到广泛应用,包括对河流水质治理效果的研究^[2]、平原河网区水环境容量的计算^[3]、突发水污染事故模拟预测^[4]等。

重庆市江津区位于长江流域上游,为应对境内大多数河流受污染较严重的情况,江津区系统化地开展了流域水环境治理工作,分阶段逐步推进工程项目实施,同时采用 HEC-RAS 软件建立了一维水质模型对流域内典型超标河流的水质进行模拟预测,量化分析不同治理阶段的水质达标情况,在此基础上优化治理方案,提高对污染物的削减效果,确保水质达到预期目标,为治理方案提供坚强的技术支撑,也为其他类似流域水环境治理效果的评估提供了借鉴。

1 研究区概况

1.1 现状水量与水质

根据河长办监测结果,江津区水质超标河流共 19 条,其中有 8 条的污染问题较为典型,包括临江河、石板溪、梅江河、璧南河、桥溪河、李市小溪、笋溪河和綦江河,其境内长度分别为 15.5、36.0、20.2、19.3、26.0、16.0、153.8、75.9 km,10% 最丰月均流量依次为 16.28、1.58、10.42、24.00、1.18、1.24、40.20、252.00 m³/s,90% 最枯月均流量分别为 2.44、0.24、1.56、3.60、0.18、0.19、6.03、14.13 m³/s;在 2019 年,除梅江河的水质为Ⅳ类外,其他均为劣Ⅴ类。

受到污染的主要原因为:由于城镇化的快速发展,生活污染源贡献突出,污水治理设施建设不够完善,城镇排污水管网覆盖率低且存在雨污分流不充分等问题。除生活污染源外,城镇面源、农田面源、养殖污染源、工业污染也是主要的污染来源。

1.2 治理目标及措施

立足于流域基础设施和现状,江津区以 2019 年为基准年,分三个阶段实施工程项目,各典型水质超标河流各个阶段的治理目标见表 1。

表 1 各典型水质超标河流各阶段水质治理目标
Tab.1 Water quality control goals of each typical polluted river at each stage

河流	一期	近期	远期	水质超标因子
临江河	Ⅴ类	Ⅲ类	Ⅲ类	COD、NH ₃ -N、TP
石板溪	Ⅴ类	Ⅲ类	Ⅲ类	COD、NH ₃ -N、TP
梅江河	Ⅲ类	Ⅲ类	Ⅲ类	TP
璧南河	Ⅴ类	Ⅲ类	Ⅲ类	COD、TP
桥溪河	Ⅴ类	Ⅳ类	Ⅲ类	COD、NH ₃ -N、TP
李市小溪	Ⅴ类	Ⅳ类	Ⅲ类	COD、TP
笋溪河	Ⅴ类	Ⅲ类	Ⅱ类	COD、TP
綦江河	Ⅴ类	Ⅲ类	Ⅲ类	COD、TP

一期工程(到 2022 年)主要为了应对当下水环境污染的严峻形势,完善污水系统,消除劣Ⅴ类水而实施的污水厂网应急项目,包括李市小溪、白沙滩盘段管网建设工程以及桥溪河沿线截污干管敷设等。

近期工程(到 2025 年)以主要国控、市控和区控断面稳定达标为目的,重点治理河流流域,包括德感、几江、珞璜工业园污水处理厂改扩建工程,石板溪、桥溪河河道重点治理等。

远期工程(到 2035 年)以水生态、水景观、水管理全面提升为总体目标,包括璧南河、桥溪河等水生态修复和岸线景观建设等。

在各典型河流中,桥溪河受污染状况最为突出,既有城镇生活和工业污染,又有农业面源污染,因此以桥溪河各阶段具体项目实施情况为代表介绍各河流治理方案,见图 1。

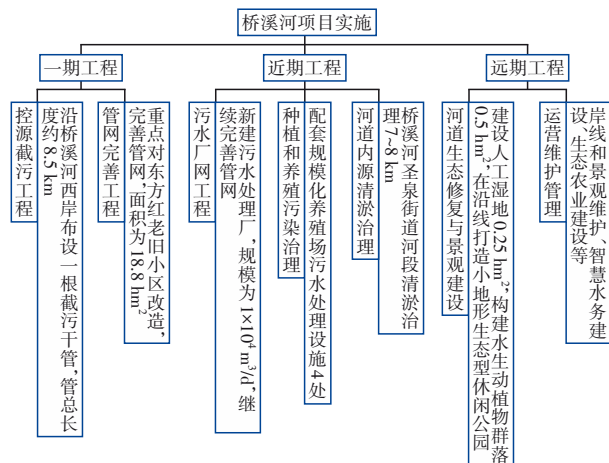


图1 桥溪河各阶段项目实施情况

Fig.1 Project implementation of Qiaoxi River at each stage

2 水质模拟评估方法

2.1 控制方程和模型构建思路

水动力模拟采用一维明渠非恒定流圣维南方程组;根据质量守恒定律,考虑污染物运移过程中的对流、扩散和降解等因素,污染物的运移方程采用一维对流扩散方程。结合水动力、水质控制方程可知,水质模型构建需要先通过一维圣维南方程组求解出一维对流扩散方程需要的水动力数据,将其和入河污染物数据等一起代入到扩散方程中才能得到水体浓度随时间、空间的变化情况,模型构建思路见图2。

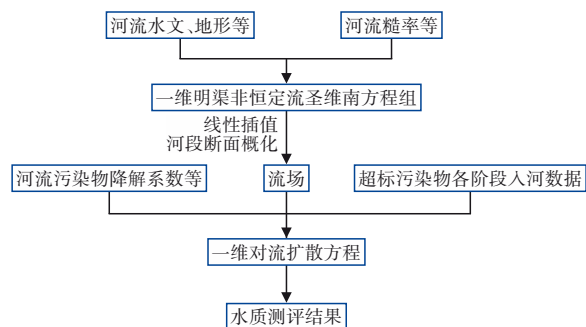


图2 水质模型构建思路

Fig.2 Idea of water quality model construction

模型模拟需要的河流水文、地形等实际数据根据江津区水系“一河一策”方案等前期资料及现场调研实测数据得到,主要包括流量、河长、水位、水深、坡降、河宽等;河流糙率根据具体河床粗糙程度情况确定,污染物降解系数在现场调研资料及江津区当地河流断面水质研究报告数据的基础上,采用

二断面法^[5]率定得到,根据计算结果设定为: $k_{\text{COD}}=0.03 \text{ d}^{-1}$ 、 $k_{\text{NH}_3\text{-N}}=0.06 \text{ d}^{-1}$ 、 $k_{\text{TP}}=0.05 \text{ d}^{-1}$ 。各河流需要模拟测评的水质超标因子见表1,现状入河浓度结合相关资料实际测量得到,不同治理阶段的入河浓度通过计算得出预测值。

2.2 模拟河段和考核断面

选择各河流重要治理河段进行模拟,再在这些河段上选择国控、市控或者区控级断面作为考核断面,其位置分布如图3所示。



图3 模拟河段及考核断面分布

Fig.3 Distribution of simulated river reach and assessment section

2.3 边界条件设置

模型中各支流采取10%最丰月均流量和90%最枯月均流量分别作为丰水期和枯水期的来流流量,数据根据各河流“一河一策”及监测站监测得到。将2019年—2020年模拟范围内排查的现状污水、雨水和混流排口的流量和浓度作为点源输入边界条件,主要由实测得到。但由于模拟河流范围较广,排污口众多且分布散乱,不利于模型搭建,故在模型计算中将每条河流沿线的排口进行概化处理,各支流概化排口空间位置见图3。其中,污水排口流量及污染物浓度全年较为稳定;径流及面源污染物通过雨水口或者混流口排入河道,排口流量和污染物浓度受面源污染物种类及雨旱天情况影响变化较大。以璧南河为例进行分析,其入河污染物除上游梅江河带入外,主要为概化后的流域内两个混流、一个雨水排口的排入量,污染物来源主要为生活污水溢流、农田面源、畜禽养殖和雨水径流污染,在11月—次年2月雨水较少的季节,入河污染少,河流污染物浓度相对较低;3月—5月雨季渐至,旱季沉积的污染物被冲刷带入河流,污染物浓度提升明显;6月—10月雨量充沛,入河污染物与水量皆很大,污染物浓度相对平稳。

将各概化后排口的流量、COD 浓度、NH₃-N 浓度和 TP 浓度作为模型点源输入项。由于排口数量较多,故统筹各河流模拟河段排口的入河总流量和总污染负荷进行分析。根据《江津区第二次全国污染源普查技术报告》,结合实地勘测情况,各河流域现状所接收的点源总流量和入河总污染负荷见表 2。

表 2 现状各典型河流的入河总污染负荷
Tab.2 Current total pollution load of each typical tributary entering the river

汇水单元	点源总流量/ (10 ⁴ m ³ ·a ⁻¹)	排入量/(t·a ⁻¹)		
		COD	NH ₃ -N	TP
綦江河	526.77	1 970.56	185.147	29.236
璧南河	8.73	1 061.43	76.490	16.375
筲溪河	567.12	2 073.32	192.415	32.560
临江河	6.09	238.64	15.714	3.396
梅江河	109.86	711.69	60.148	10.687
石板溪	17.16	255.78	33.384	8.103
桥溪河	8.90	299.05	27.547	12.489
李市小溪	220.86	836.57	84.793	12.229

2.4 模型验证

选择模拟河段上、下游两个断面(见图 3),将其在 2020 年 3 月实测的 COD、NH₃-N、TP 浓度用来验证模型,计算值与实测值的对比见表 3。结果显示计算值与实测值吻合较好,各模拟河段上、下游断面 COD 浓度实测值与计算值的平均误差分别为 14.53% 和 13.76%, NH₃-N 的分别为 10.09% 和 12.87%,TP 的分别为 17.00% 和 17.86%。

表 3 各河流水质实测值与计算值对比
Tab.3 Measured and calculated values of water quality in various rivers

项 目		上游断面			下游断面		
		COD	氨氮	TP	COD	氨氮	TP
临江河	实测值	16.00	0.36	0.07	18.00	0.24	0.09
	计算值	18.30	0.38	0.06	15.80	0.28	0.11
石板溪	实测值	18.00	0.24	0.21	17.00	0.80	0.08
	计算值	16.60	0.20	0.17	14.80	0.88	0.09
梅江河	实测值	—	—	0.05	—	—	0.06
	计算值	—	—	0.06	—	—	0.07
璧南河	实测值	11.00	—	0.08	14.00	—	0.07
	计算值	12.80	—	0.07	13.10	—	0.09
桥溪河	实测值	22.00	1.20	0.08	46.00	0.15	0.14
	计算值	19.40	1.33	0.07	51.00	0.13	0.12
李市小溪	实测值	50.00	—	0.33	20.00	—	0.49
	计算值	42.30	—	0.26	26.10	—	0.39
筲溪河	实测值	10.00	—	0.08	16.00	—	0.06
	计算值	12.30	—	0.09	17.80	—	0.05
綦江河	实测值	10.00	—	0.09	15.00	—	0.08
	计算值	8.70	—	0.10	16.82	—	0.06

选择璧南河下游油溪断面 2019 年 1 月—12 月 COD 和 TP 浓度的 12 次监测结果进行浓度随时间变化的对比分析,结果如图 4 所示。可见,计算值与实测值随时间的变化趋势基本一致,模型可以较好地反映各河流的水质情况,适用于本次河流水质的模拟测评。

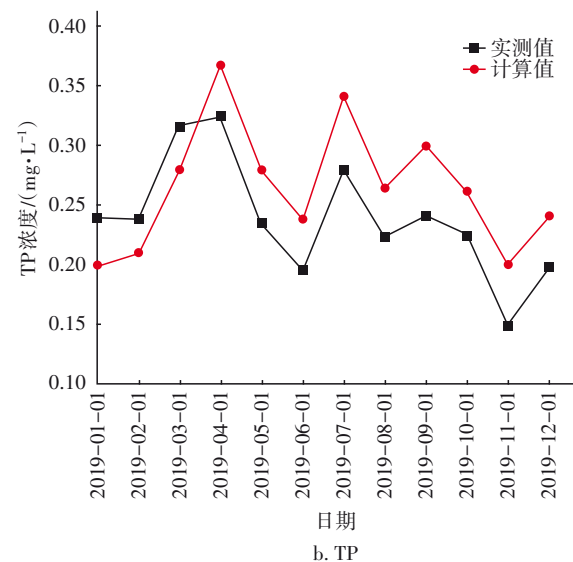
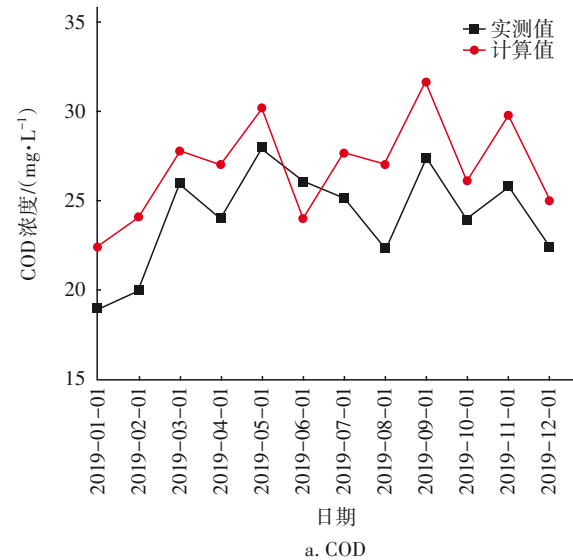


图 4 璧南河油溪断面 2019 年 COD、TP 实测值与计算值对比
Fig.4 Comparison of measured and calculated values of COD and TP in Youxi section of Binan River in 2019

2.5 入河污染负荷产生量及削减量的计算分析

对各污染负荷采用以下方法计算:工业污染负荷根据工业发展趋势及万元工业增加值用水量进行预测;城镇和农村生活污水污染负荷根据《第二次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册(试用版)》进行预测;畜禽养殖污染负荷根据《第一次

全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》进行预测;地表径流污染负荷在建设用地面积统计的基础上结合建设用地源强系数进行预测^[6];农田径流污染负荷根据邢宝秀等^[7]对农业面源污染的研究方法进行预测。

关于各治理措施对污染负荷的削减效果,改扩建污水厂削减量为新增规模乘以设计进出水浓度之差;管网完善的削减量为收集污水量与对应污水

厂设计进出水浓度之差的乘积;清淤的削减量为底泥释放速率与清淤规模的乘积;场镇面源治理、农业面源治理、畜禽养殖污染治理、水产养殖污染治理措施的污染负荷削减比例根据翟俊等^[8]的研究确定,分别为40%、50%、60%、15%;水生态修复措施对河道自净能力的提升根据袁博宇等^[9]的研究确定,取值为30%。各河流超标污染物的污染负荷计算结果见表4。

表 4 各河流超标污染物入河污染负荷预测计算结果

Tab.4 Prediction and calculation results of the pollution load of each river exceeding the standard pollutants entering the river

t·a⁻¹

河流	阶段	COD			NH ₃ -N			TP		
		产生量	削减量	入河量	产生量	削减量	入河量	产生量	削减量	入河量
临江河	一期	322.59	75.47	247.12	26.06	7.02	19.04	4.59	0.30	4.29
	近期	319.89	123.99	195.90	24.85	9.45	15.40	4.82	1.69	3.13
	远期	403.24	264.71	138.53	32.58	23.54	9.04	5.74	3.33	2.41
石板溪	一期	532.98	186.98	346.00	51.75	11.83	39.92	9.36	0.58	8.78
	近期	498.06	274.65	223.41	49.69	32.62	17.07	9.82	6.63	3.19
	远期	666.23	533.23	133.00	64.69	51.99	12.70	11.70	9.50	2.20
梅江河	一期	达标			达标			7.17	1.14	6.03
	近期							7.09	1.89	5.20
	远期							8.25	5.04	3.21
璧南河	一期	415.55	111.15	304.40	达标			6.60	1.06	5.54
	近期	423.61	113.71	309.90				6.82	3.30	3.52
	远期	519.44	343.24	176.20				8.25	5.04	3.21
桥溪河	一期	1 625.75	1 423.27	202.48	162.23	140.15	22.08	15.46	6.18	9.28
	近期	1 244.68	1 116.28	128.40	124.45	111.19	13.26	13.65	10.44	3.21
	远期	2 032.19	1 924.89	107.30	202.79	194.69	8.10	20.03	18.94	1.09
李市小溪	一期	853.50	461.26	392.24	达标			10.67	6.51	4.16
	近期	672.07	338.69	333.38				10.85	7.29	3.56
	远期	1 066.88	894.08	172.80				13.46	10.46	3.00
笋溪河	一期	2 907.42	1 435.98	1 471.44	达标			39.31	12.16	27.15
	近期	2 628.01	1 901.55	726.46				38.21	19.56	18.65
	远期	3 634.27	2 973.67	660.60				49.14	40.54	8.60
綦江河	一期	2 558.54	1 242.02	1 316.51	达标			40.13	16.99	23.14
	近期	2 514.73	1 732.81	781.92				38.99	26.31	12.68
	远期	3 198.17	2 431.65	766.52				50.16	38.59	11.57

由表4可知,在实施水环境综合治理措施后,各河流最终入河污染负荷都得到了大幅度削减。到远期(2035年),COD、NH₃-N和TP的平均削减率都大于70%;近期(2025年),COD、NH₃-N和TP的平均削减率基本都超过了60%;实施一期工程,COD、NH₃-N和TP的平均削减率在40%左右。

3 模拟结果及分析

选择各河流重要考核断面(见图3),在软件模

型中输入边界条件与各排口污染负荷等数据,在一期、近期和远期工程条件下分别进行丰水期和枯水期超标水质的模拟。

3.1 一期工程

在仅实施一期工程条件下各河流考核断面超标污染物浓度的模拟结果如图5所示。可以看出各河流水质都达到了地表Ⅴ类水标准,梅江河达到了地表Ⅲ类水标准,满足预期治理目标。

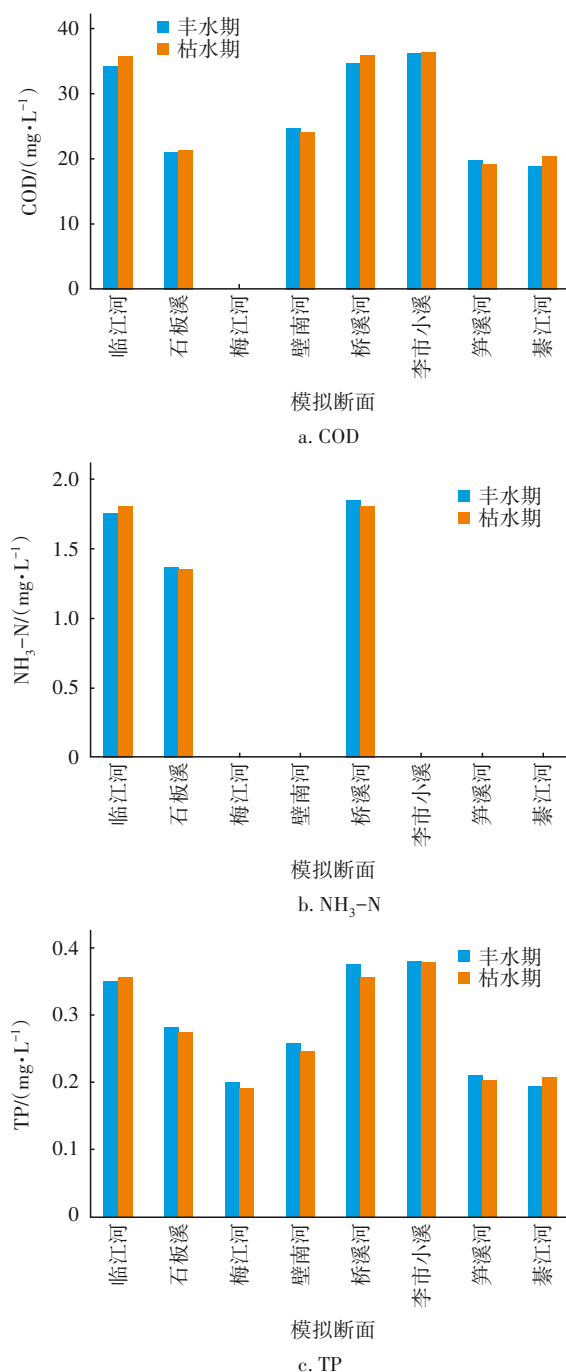


图5 一期工程条件下各河流考核断面水质情况

Fig.5 Water quality of assessment sections of each river under implementing the first-stage treatment project

3.2 近期工程

近期工程实施后,到2025年各河流考核断面的超标污染物浓度模拟结果如图6所示。可以看出除李市小溪外,其余河流水质均达到地表Ⅳ类水标准,满足预期治理目标;李市小溪的COD、TP均未达到地表Ⅳ类水标准,尤其枯水期水质超标较为严重,不满足预期治理目标。

重,不满足预期治理目标。

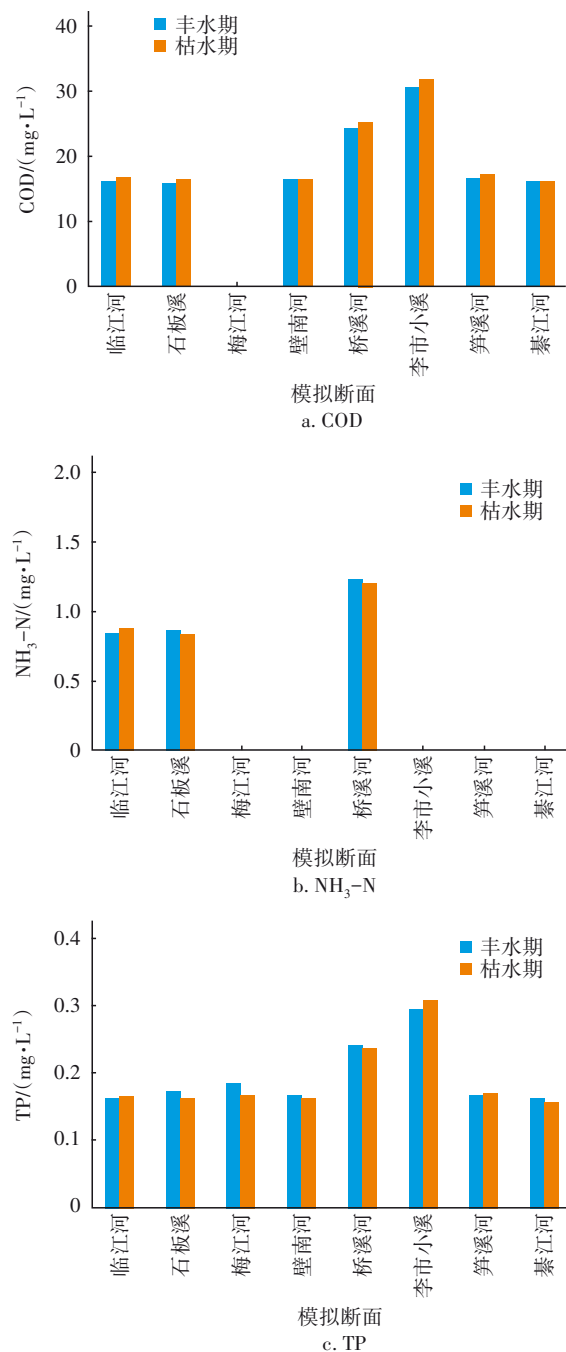


图6 近期各河流考核断面水质情况

Fig.6 Water quality of assessment sections of each river in the near-term

3.3 远期工程

远期工程实施后,到2035年各河流考核断面的超标污染物浓度模拟结果如图7所示。可以看出各条河流水质都达到了地表Ⅲ类水标准,笋溪河达到了Ⅱ类水标准,满足预期治理目标。

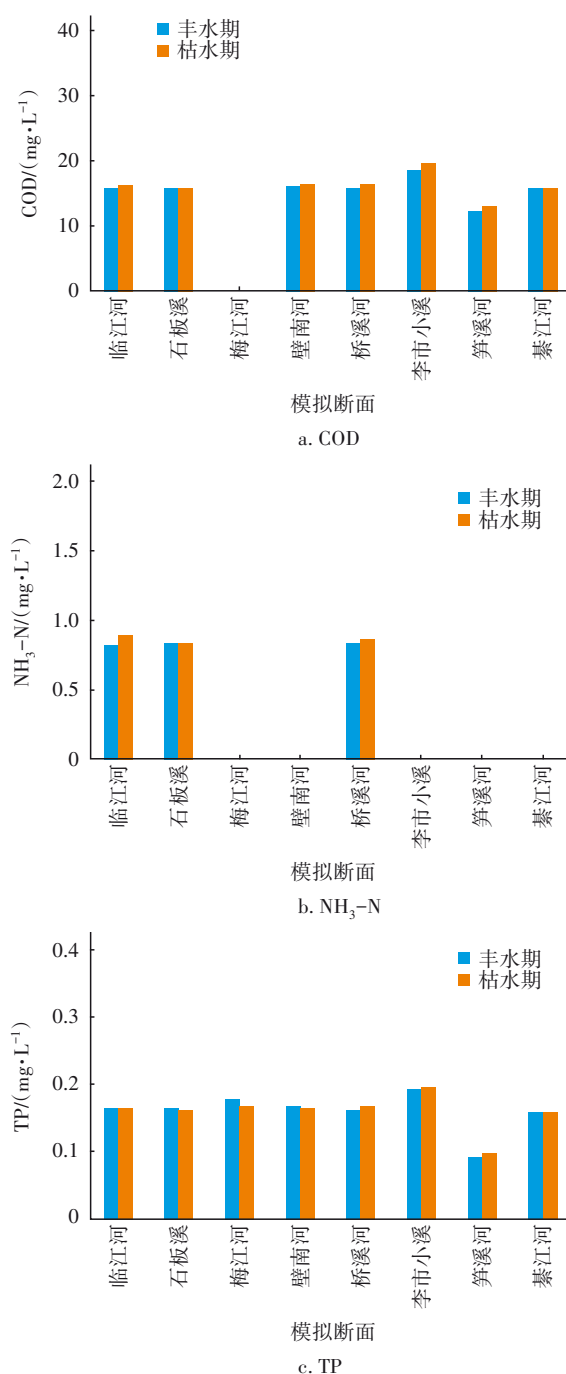


图7 远期各河流考核断面水质情况

Fig.7 Water quality of assessment sections of each river in the long-term

3.4 总体分析和方案优化

由于每个阶段实施工程类型不同,对污染物的去除效果存在差异,最终各河流考核断面水质提升不同。一期工程主要为应急污水厂网建设,对入河污染物的削减见效快,各超标水质指标可在短期内达到地表Ⅴ类水标准,但主要针对突出的点源污

染,对于面源等污染控制效果较差,因此河流污染物浓度仍然较高。近期工程全面开展点源治理,同时通过海绵城市建设等措施有效控制面源污染,开展河道综合治理等措施,较为全面地控制住了各种入河污染,污染物浓度显著降低,很多超标污染物浓度达到了地表Ⅲ类水标准,但李市小溪未达到近期水质目标。远期工程的实施主要包括各项目的继续完成以及维护管理,包括生态修复、智慧水务建设、生态农业建设等,可进一步削减污染物、持续优化水环境,河流的自净能力得到很大提升,各河流水质全面达到了地表Ⅲ类水标准。

从以上模拟结果可以看出,近期李市小溪不能达到预期治理的目标(地表Ⅳ类水标准),尤其枯水期水质较差。分析发现李市小溪自身流量较小,枯水期仅为0.19 m³/s,因此恢复上游七一水库生态补水功能,补水规模为2 000 m³/d。恢复补水措施后,对近期李市小溪再进行水质模拟,结果显示,丰水期的COD和TP分别为28.32、0.271 mg/L,枯水期的COD和TP分别为28.13、0.268 mg/L,均达到了地表Ⅳ类水标准,满足预期治理目标。

4 结论

① 模拟结果显示各污染物浓度计算值与实测值吻合较好,计算值与实测值随时间变化趋势也一致,说明模型能够较好地反映各河流的水质情况,可以为江津区的水环境治理效果评估提供技术支撑。

② 江津区的水环境综合治理方案对污染物的削减效果显著,到远期(2035年),各河流入河COD、NH₃-N和TP负荷的平均削减率分别达到了76.27%、76.37%和75.39%。

③ 通过对各河流水质的模拟测评,可以对水质治理目标进行可达性分析,并且对不达标水体进行治理方案优化,确保水质达到预期治理目标。一期和远期工程的实施可以让各河流均达到相应的预期治理目标;近期工程的实施不能保障李市小溪达到预期治理目标,分析后恢复生态补水措施,保障了所有河流在近期均能达到预期治理目标。

参考文献:

- [1] 杨万航,王丰,张超,等. PPP模式下的长江大保护工程质量创新管理实践[J]. 中国给水排水, 2022, 38(4): 1-5.

- YANG Wanhong, WANG Feng, ZHANG Chao, *et al.* Quality innovation management practice of Yangtze River protection project based on PPP mode[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(4): 1-5 (in Chinese).
- [2] 张世宝, 李胜东, 冯健, 等. 基于HEC-RAS的鹿溪河流域水质治理效果研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 67-73.
- ZHANG Shibao, LI Shengdong, FENG Jian, *et al.* Research on water quality control effect of Luxi River basin based on HEC-RAS[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, 41(4): 67-73 (in Chinese).
- [3] 陈振宇, 周刚, 白静, 等. 基于HEC-RAS模型的平原河网区水环境容量研究[J]. 环境保护科学, 2021, 47(4): 30-37.
- CHEN Zhenyu, ZHOU Gang, BAI Jing, *et al.* Research on water environment capacity of plain river network based on HEC-RAS model[J]. *Environmental Protection Science*, 2021, 47(4): 30-37 (in Chinese).
- [4] 陈鼎豪, 郑文丽, 王骥, 等. 简化一维水质模型在突发水污染事故模拟预测中的应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3199-3203.
- CHEN Dinghao, ZHENG Wenli, WANG Ji, *et al.* Application of simplified one-dimensional water quality model in simulation and prediction of sudden water pollution accidents[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(10): 3199-3203 (in Chinese).
- [5] 石维, 刘德文, 郭丽峰. 海河流域河流污染物综合降解系数研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 47-52.
- SHI Wei, LIU Dewen, GUO Lifeng. Study on the comprehensive degradation coefficient of river pollutants in the Haihe River basin[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, 42(1): 47-52 (in Chinese).
- [6] 张善发, 李田, 高廷耀. 上海市地表径流污染负荷研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21): 57-60, 63.
- ZHANG Shanfa, LI Tian, GAO Tingyao. Study on the pollution load of surface runoff in Shanghai[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(21): 57-60, 63 (in Chinese).
- [7] 邢宝秀, 陈贺. 北京市农业面源污染负荷及入河系数估算[J]. 中国水土保持, 2016(5): 34-37, 77.
- XING Baoxiu, CHEN He. Estimation of agricultural non-point source pollution load and river entry coefficient in Beijing[J]. *China Soil and Water Conservation*, 2016(5): 34-37, 77 (in Chinese).
- [8] 翟俊, 黄晓斌, 何强, 等. 重庆市跳蹬河流域水污染综合治理工程规划[J]. 中国给水排水, 2007, 23(6): 45-49.
- ZHAI Jun, HUANG Xiaobin, HE Qiang, *et al.* Planning of comprehensive water pollution control project in the Tiaodeng River basin in Chongqing[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(6): 45-49 (in Chinese).
- [9] 袁博宇, 柳海涛, 任廷鸿, 等. 一种考虑水生态修复措施对污染物降解影响的水质模型[J]. 环境科学学报, 2018, 38(10): 4057-4062.
- YUAN Boyu, LIU Haitao, REN Tinghong, *et al.* A water quality model considering the influence of ecological restoration on pollutants degradation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(10): 4057-4062 (in Chinese).

作者简介: 罗波(1988-), 男, 重庆人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为城镇水系统与水环境综合治理。

E-mail: luobo@cjwsjy.com.cn

收稿日期: 2022-03-09

修回日期: 2022-07-19

(编辑: 李德强)