

基于 Delft3D 的苏州市渭塘镇河道水动力水质模拟

张 炜¹, 胡 乐², 钱启蒙³, 刘 钰¹

(1. 河海大学设计研究院有限公司, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省农村水利科技发展中心, 江苏 南京 210029;
3. 江苏省苏州市相城区渭塘镇农村工作局, 江苏 苏州 215134)

摘要:为探究苏州市渭塘镇平原河道水质提升的可行方案,基于 Delft3D 构建了该镇区河道的水动力水质耦合模型,采用 Delft3D-FLOW 模块对镇区河道 2021 年 10 月的水动力时空特征进行模拟,确定了镇区活水泵站与活水推流器的流量;采用 Delft3D-WAQ 模块,以 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 为主要评价指标,论证了旁路净化设施规模的合理性。结果表明:模型水动力模拟结果较为理想,活水效果好;确定老镇片 1 号活水泵站流量为 1.0 m³/s,确定珍珠湖片每组活水推流器感应流量为 0.4 m³/s;水质模拟结果较为理想,镇区河道水体通过规模为 2 万 m³/d 的旁路净化设施处理后,水质能达到 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的Ⅳ类水标准,水质提升效果明显。

关键词:Delft3D;水动力;水质;耦合模型;水生态修复;净化设施

中图分类号:TV131.2 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2023)06-0096-07

Simulation of hydrodynamics and water quality for Weitang Town river network in Suzhou based on Delft3D//
ZHANG Wei¹, HU Le², QIAN Qimeng³, LIU Yu¹ (1. Hohai University Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing 210029, China; 3. Rural Work Bureau of Weitang Town in Jiangsu Suzhou Xiangcheng District, Suzhou 215134, China)

Abstract: In order to explore a feasible scheme for improving the water quality of a plain river network in Weitang Town of Suzhou, a hydrodynamic and water quality coupling model of the river network was constructed based on Delft3D. Using Delft3D-FLOW, the spatiotemporal characteristics of the hydrodynamics in the river channels of the town during October of 2021 were simulated, and the discharges of the water pump stations and water thrusters were demonstrated. Using the Delft3D-WAQ module and tanking COD_{Mn}, NH₃-N, and TP as the main evaluation indicators, the rationality of the scale of bypass purification facilities was demonstrated. The simulation results show that the hydrodynamic results of the model are relatively ideal and the live water effect is good. The discharge of the No. 1 Pump Station in the Laozhen section is determined to be 1.0 m³/s, and the induced discharge of the live water thrusters in the Pearl Lake section is 0.4 m³/s in each group. The water quality simulation results are relatively ideal. After being treated with Pearl Lake and Diamond Bypass purification facilities with a scale of 20000 m³/d, the water quality of the rivers in the town can reach to Level IV of the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB3838—2002), with significant improvement effect.

Key words: Delft3D; hydrodynamics; water quality; coupling model; water environment restoration; purification facilities

污染物在自然水体的迁移转化过程中会受到水文、流场、风场等各种因素的影响。近年来,随着计算机技术在水利水电领域的应用,利用数学模型对自然水体输移、稀释和降解等过程进行模拟研究愈发成为热点,为水利水电设计和管理工作的顺利开展提供了技术支持^[1-5]。目前,国际上应用较多的水动力水质耦合模拟软件有 EFDC^[6]、MIKE^[7]、FVCOM^[8]和 Delft3D^[9-10]等。

水动力水质耦合模拟软件优缺点各异,其中 Delft3D 编程较为简便,使用灵活性高,符合研究区

域水环境模拟精度的要求,Delft3D 从 20 世纪 80 年代中期就在水环境研究与工程中得到应用。廖庚强^[10]通过应用 Delft3D 建立通化市柳河的水动力模型,精准模拟了橡胶坝运行对河道水动力和泥沙输运的影响;陈庆江等^[11]通过构建上海市青松片区河道水动力数值模型,模拟了现状调度方案与活水畅流优化方案的水动力结果,模拟结果表明活水后片区水动力明显提升;吴凡杰等^[12]通过构建宁波市象山港的水动力水质耦合模型,完善了象山港的排污策略;张立杰^[13]应用 Delft3D 构建了呼伦贝尔市呼

呼伦湖的水动力水质耦合模型,模拟结果为呼伦湖及其周边地区水生态环境治理提供了依据;柯庆等^[14]在 Delft3D 软件基础上建立了东营市 L 河的水动力水质模拟,为 L 河流域黑臭水体的科学治理提供了理论依据;毕潇伟等^[15]基于 Delft3D 水动力模型的建立和实测数据分析,对上海市长兴岛青草沙水库水温对环境的影响进行了较为准确的预测。Delft3D 水动力水质模块综合考虑了流域存在的物理过程、化学过程、生物过程相互间的耦合影响,可用于水环境、水污染、水生态的水动力特性和水质变化状态分析。

本文基于 Delft3D 构建了苏州市渭塘镇平原河道的水动力水质耦合模型,在既定的活水泵站、水质净化设施选址方案下,论证了部分设施规模的合理性,为南方多河流域水环境综合整治提供理论依据。

1 研究区概况

研究区涉及苏州市渭塘镇 19 条河(湖),以丽致星河为界分为老镇片和珍珠湖片,现状水体流动缓慢,日常内河无补水来源,大部分河道淤积严重,丽致星河闸、黄家浜闸、乌土泾闸、周家浜闸常年开启,除外河引水期间外河道水体与圩外河道无水体交换,两片区河道因丽致星河闸常年关闭与圩外河道也无水体交换。

丽致星河以西为老镇片,面积 2.36 km²,圩内治理河道有 10 条,总长 8.09 km。1 号河、2 号河、3 号河、4 号河均为断头浜。丽致星河以东为珍珠湖片,面积 2.61 km²,主要为住宅和商业区,圩内治理河道有 9 条,河道总长 9.33 km。秧河、河西浜等河道均为断头浜。根据 2021 年 2 月、5 月和 10 月共 3 次水质检测数据分析,研究区域河道大多为 V 类或劣 V 类,治理目标为 IV 类,主要超标因子是 NH₃-N、TP,少部分河道超标因子为 COD_{Mn}。圩外河道水质较优,大部分能达到 IV 类水标准。

为提升镇区河道水质,活水畅流,新建 1~7 号活水泵站、活水推流器和旁路净化设施。因镇区用地紧张,各新建泵(闸)站选址已定,不再论证。本文主要论证 1 号活水泵站、活水推流器、水质净化设施规模的合理性。

2 模型构建

Delft3D-FLOW 水动力模块是 Delft3D 的核心模块,可对污染物存在的平流扩散等过程进行动态模拟^[13]。同时,水动力模拟结果的准确性和实效性也决定了水质模型的精度。在水动力模型构建前,需

完成实测数据收集、网格绘制和条件输入等前期工作。

2.1 模拟区域网格化

模型网格如图 1 所示,网格节点夹角余弦值在 0~0.02 范围内,正交性好。网格划分情况与镇区河道实际地形较为贴近,符合计算要求。模型覆盖镇区 19 条河(湖),东西跨度 3 km,南北跨度 2 km,矩形网格尺寸为 10 m×10 m,x 方向网格数 299 个,y 方向网格数 209 个。镇区水动力模型水下地形见图 2,河道地形数据根据实测水下地形数据离散差值得到,率定和验证的实测资料与地形资料的时间同步。

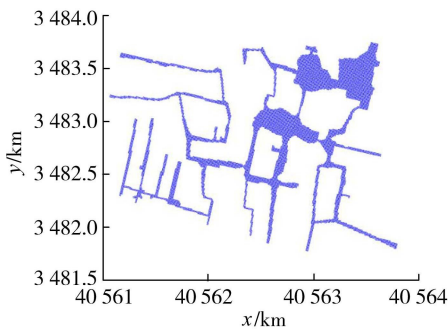


图1 镇区河道网格划分

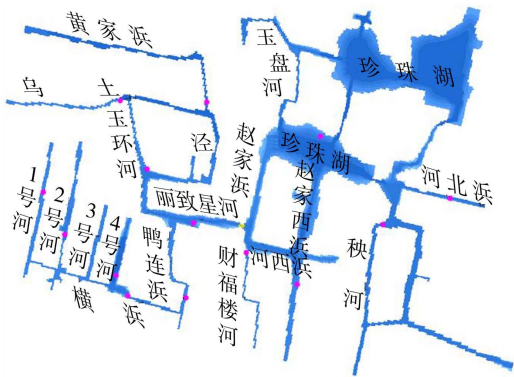


图2 镇区河道水动力模型水下地形

2.2 水动力模型设置

2.2.1 边界条件

镇区河道分为老镇片、珍珠湖片两大片区。老镇片边界设置于黄家浜,从外河经补水泵站引水入老镇片,引水泵站流量为 0.25 m³/s,从 1 号河排水至渭泾塘,排水泵站流量为 0.25 m³/s;珍珠湖片边界设置于珍珠湖北端,从南雪泾经补水泵站引水入珍珠湖,引水泵站流量为 0.25 m³/s,从赵家浜出水至渭泾塘,排水泵站流量为 0.25 m³/s。

2.2.2 设施概化

计算时圩区内分布的泵站均处于运行状态,与圩外河道仅在边界引排水处有水体交换,两片区河道间因丽致星河上的薄坝常年关闭,仅通过 4 号活水泵站产生水体交换。将泵站概化为模型的源汇

项,老镇片拟于1号河北端设置1号活水泵站,抽水至乌土泾,1号活水泵站流量待定。根据研究区域河道区域水量,可以估算得出1号活水泵站流量低于1.0 m³/s时,区域水体难以流动,从流量分别为1.00、1.50、2.00 m³/s这3种工况中择优选用。珍珠湖片于赵家西浜、赵家浜分别设置2、3组活水推流器,将推流器概化为源汇项,从流量分别为0.2、0.4 m³/s这2种工况中择优选用。净化设施净化出水分别经1号、2号提升泵站出水。在模型中丽致星河处设置1道无限高的薄坝将2个片区隔开。模型边界条件、源汇项概化见图3与表1。

2.2.3 参数设置

模型垂向分层为1,计算步长为1 min,输出间隔时间为60 min,重力加速度为9.81 m/s²,水体密度为1000 kg/m³,曼宁系数为0.024,水平紊动黏性系

数为5 m²/s,河流进出口边界均为流量边界,干湿判定的位置为在网格的中心和边界同时判定。

2.3 水质模型

在水动力模型的基础上,利用 Delft3D-WAQ 水质模块构建了镇区河道水质模型,对镇区河道污染物的扩散消减过程进行分析。模型中各项物质随水流迁移扩散,完成生物和化学循环。主要模拟指标为 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP。水质过程包括氧气-可生化需氧量、氮和磷循环,其中 NH3-N 是水环境系统中重要的水质变量之一,是判断流域内水体污染情况的重要指标,也是研究论证重点关注的指标。

水质模型将旁路净化设施概化为源汇项输入模型,其中老镇片的建新旁路净化设施连通1号提升泵站,珍珠湖片的钻石旁路净化设施连通2号提升泵站,其对水动力的影响不再论证,仅论证对水质的影响。



图3 模型边界条件、源汇项与测点设置

表1 模型源汇项设置

片区	源汇项	源汇项类型	插值方式	流量/(m ³ /s)	流速/(m/s)	角度/(°)	对应出流
老镇片泵站	1号入流	常规	线性	1.00、1.50、2.00			1号出流
	2号入流	常规	线性	0.20			2号出流
	3号入流	常规	线性	0.50			3号出流
	4号入流	常规	线性	0.25			4号出流
	5号入流	常规	线性	0.10			5号出流
珍珠湖片泵站	6号入流	常规	线性	0.35			6号出流
	7号入流	常规	线性	0.35			7号出流
提升泵站	1号提升泵站入流	常规	线性	0.25			1号提升泵站出流
	2号提升泵站入流	常规	线性	0.35			2号提升泵站出流
活水推流器	1号推流器入流	动量	线性	0.20、0.40	0.01	75	1号推流器出流
	2号推流器入流	动量	线性	0.20、0.40	0.01	75	2号推流器出流
	3号推流器入流	动量	线性	0.20、0.40	0.01	255	3号推流器出流
	4号推流器入流	动量	线性	0.20、0.40	0.01	255	4号推流器出流
	5号推流器入流	动量	线性	0.20、0.40	0.01	175	5号推流器出流

3 模型验证

为验证模型计算结果的准确性、可靠性和稳定性,采用 2021 年的水位数据进行验证,计算时间为 2021 年 10 月 1—30 日,计算步长为 1 min,输出间隔时间为 60 min。水位模拟误差在 4.2 ~8.3 cm 之间,15 个站点平均水位误差为 6.8 cm。

水质验证资料测量时间为 2021 年 10 月,测点分布见图 3,测点覆盖了研究区域内 15 条河道。大部分河道的率定结果较好,实测值与计算值比较吻合,能反映镇区水体的大概情况。采用相对误差、均方根误差验证模型计算值和实测值的吻合程度(表 2),通过均方根误差能够较为直观地反映模型精度,均方根误差值越小,模型精度越高。由水质模型得出 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 质量浓度的平均均方根误差分别为 0.8893、0.3104、0.0409,各指标均方根误差的标准差分别为 0.28、0.16、0.02。镇区 15 条河道水质数据与实测数据的相对误差、均方根误差均在合理范围内,数据模拟的结果吻合度较高,具有较高的水质模拟精度。

此外,根据水质数据分析,老镇片区加权平均水体的 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 质量浓度分别为 6.50、0.32、0.5 mg/L,钻石旁路净化设施出水的 COD_{Mn}、NH₃-N、TP 质量浓度分别为 25.0、1.0、0.2 mg/L。

4 结果与分析

4.1 水动力模拟

通过 Delft3D-FLOW 水动力模块计算老镇片水动力情况,利用 QuickPlot、Matlab 出图并统计流速数据。对不同工况下的水动力数据进行分析,以确定 1 号活水泵站、活水推流器的规模。

4.1.1 老镇片 1 号活水泵站流量分析

考虑到老镇片河道断面尺寸和区域水量,老镇片区选择了工程前和 1 号活水泵站流量 1.0、1.5、2.0 m³/s 这 4 种工况进行模拟,各工况下水动力结果见图 4 和图 5。通过对比分析发现,4 种工况下的水深几乎不变。老镇片水深为 2.5 ~4.0 m,珍珠湖水深为 1.5 ~2.5 m。

流场变化较为明显,工程前由于镇区河道与外界无水体交换,断头浜较多,河道流速极为缓慢;工程后老镇片 1 号活水泵站流量为 1.0 m³/s 时,流速控制在 0.01 ~0.06 m/s,最大值控制在 0.22 m/s,对河道的冲刷较小,乌土泾、1 号河的流速稳定在 0.005 ~0.045 m/s,水动力模拟结果较为理想,活水效果均衡。随着 1 号活水泵站流量的加大,工况 2 老镇片会在横浜产生 0.06 m/s 的大流速;当 1 号活水泵站流量增加至 2.0 m³/s 时,乌土泾西段由于补水流量大,导致流速较高,1 号河流速达 0.45 m/s,横浜流速达 0.09 m/s,流速分布不均衡对横浜冲刷较强,影响边坡稳定。经模拟分析,老镇片工况 1 的动力结果较为理想,确定 1 号活水泵站流量为 1.0 m³/s。

4.1.2 珍珠湖活水推流器感应流量分析

确定 1 号活水泵站流量为 1.0 m³/s 后,在珍珠湖片选取 2 种工况:工况 1 每组活水推流器流量为 0.2 m³/s,工况 2 每组活水推流器流量为 0.4 m³/s。2 种工况下水深结果几乎一致。流场方面,由于湖面较大,工况 1 每组 0.2 m³/s 的流量不足以推动珍珠湖南赵家浜与赵家西浜的水体循环,赵家西浜的最大流速仅有 0.005 m/s;工况 2 活水推流器每组感应流量增加至 0.4 m³/s,此时湖面流速仍然较低,但赵家西浜、财富楼河、赵家浜等已有较为明显的流速,赵家西浜最大流速达 0.02 m/s,财富楼河最大流

表 2 水质模型误差分析

序号	河道名称	相对误差/%			均方根误差/(mg/L)		
		COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP
1	1 号河	5.4	5.7	10.8	0.6545	0.1776	0.0864
2	2 号河	5.9	5.9	8.7	0.8976	0.2635	0.0253
3	3 号河	15.8	12.1	9.3	1.3831	0.4301	0.0296
4	4 号河	15.1	17.9	12.0	1.5623	0.5479	0.0458
5	黄家浜	18.9	14.3	9.4	0.7984	0.5173	0.0601
6	乌土泾	17.3	5.7	2.1	0.9143	0.4691	0.0376
7	玉环河	5.7	6.0	1.7	1.3628	0.1376	0.0276
8	丽致星河	6.0	4.7	7.4	0.5491	0.139	0.0241
9	鸭连浜	4.7	7.3	9.2	0.8854	0.1062	0.0297
10	横浜	7.3	6.4	17.8	0.7539	0.2932	0.0368
11	赵家浜	6.4	16.9	3.7	0.6978	0.1596	0.0475
12	珍珠湖	16.9	17.5	13.1	0.9548	0.5398	0.0370
13	河北浜	17.5	13.6	5.7	0.7452	0.1175	0.0456
14	财富楼河	13.6	8.0	6.4	0.7158	0.3406	0.0227
15	秧河	8.0	5.7	10.8	0.4649	0.4175	0.0572

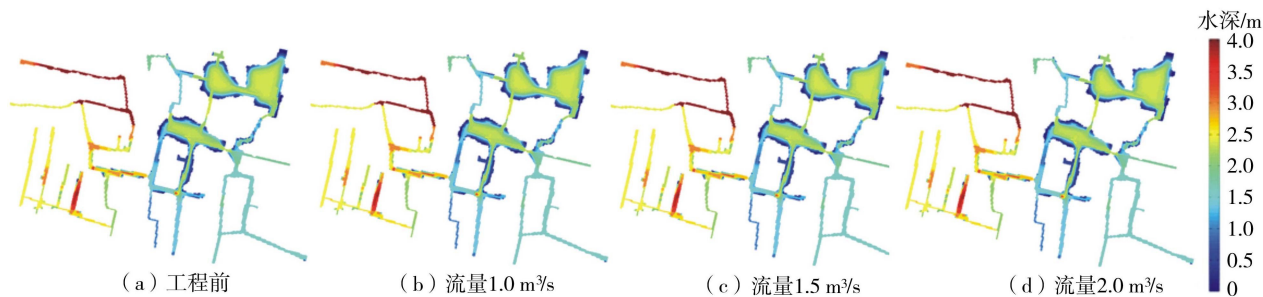


图4 老镇片区1号活水泵站不同工况下的水深模拟结果

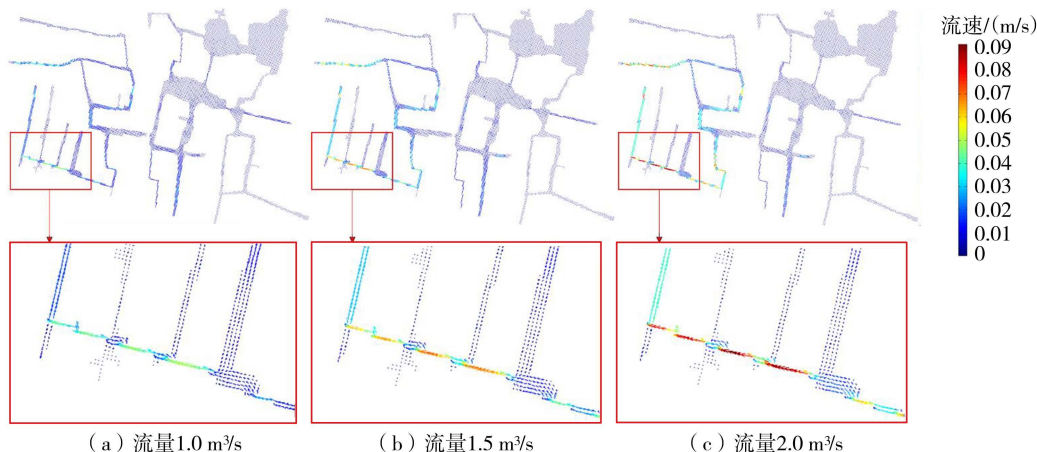


图5 老镇片区1号活水泵站不同工况下的流场模拟结果

速达 0.018 m/s , 赵家浜最大流速达 0.03 m/s 。因此, 珍珠湖片工况2的水动力模拟结果较为理想, 活水效果好, 如图6、图7所示。最终经过模拟分析确定每组活水推流器感应流量为 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.2 水质模拟

设计2种水质模型工况, 分别为旁路净化设施规模 $1 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 和 $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。根据模拟结果, 河道 COD_{Mn} 质量浓度稳定在 30 mg/L 以下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 稳定在 1.5 mg/L 以下, TP 稳定在 0.3 mg/L 以下, 达到准IV地表水的要求。各指标质量浓度场变化分布见图8~10, 不同工况下河道水质情况见表3。

旁路净化设施规模在 $1 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 时, 老镇片原 COD_{Mn} 质量浓度超标严重的1号河、2号河、3号河、4号河、鸭连浜和横浜 COD_{Mn} 质量浓度均有所降低, 但仍然不能全部降低到 30 mg/L 以下, 其中3号河超标仍然严重。原 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度超标严重的老

镇片水域, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度超标仍然严重, 老镇片大部分河道仍为劣V类。原TP超标的1号河, TP指标有所下降, 但仍达不到准IV类水标准。由此得出, 工况1的模拟结果不能达到预期的水质目标。

旁路净化设施规模为 $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 时, 老镇片原 COD_{Mn} 质量浓度超标严重的1号河、2号河、3号河、4号河、鸭连浜和横浜通过1号、2号、3号泵站的活水输送, 提升了水体流动速度, 同时建新旁路控制输出的优质水质也在不断改善河道水质。黄家浜从外河的元和塘引水, 污染物被降解和稀释, 水质较好, 几乎能达到III类水标准。乌土泾西段由于1号泵站的活水输送, 动力较好, 主要水质指标优于东段。老镇片由于控源截污不彻底, 原 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度超标严重, 水体富营养化污染, 自净能力差, 植物营养物质过剩, 易暴发蓝藻等。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染得到有效控制。老镇片原1号河和丽致星河TP质量浓度超标严重,

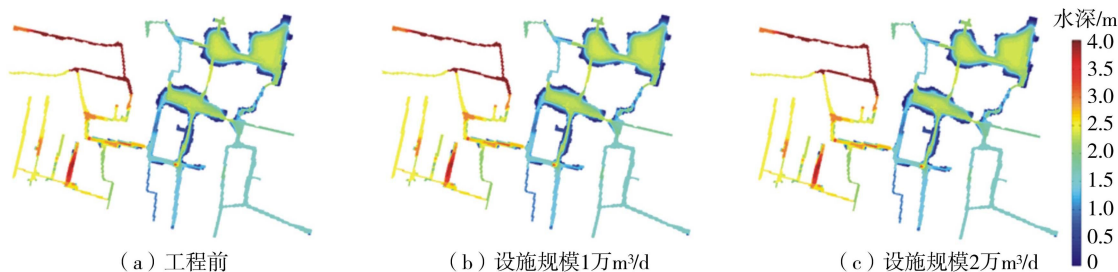
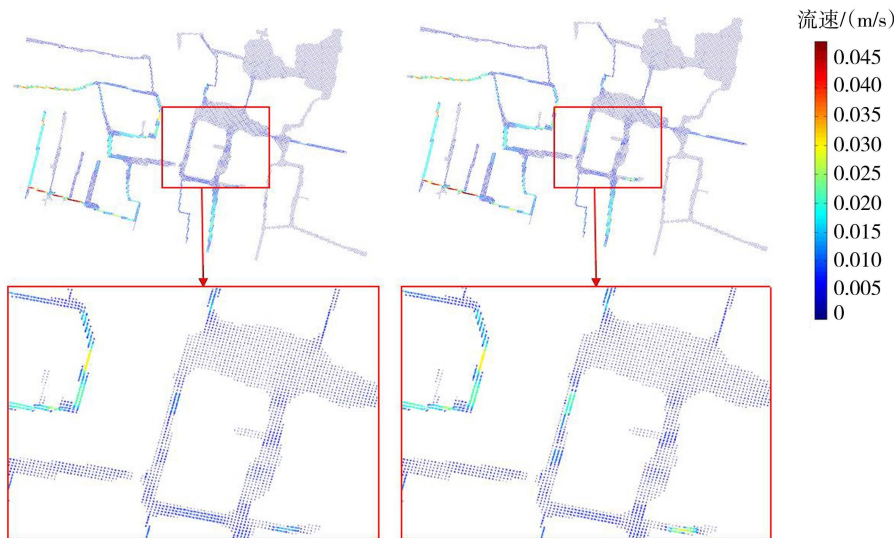


图6 珍珠湖片活水推流器不同工况下的水深模拟结果



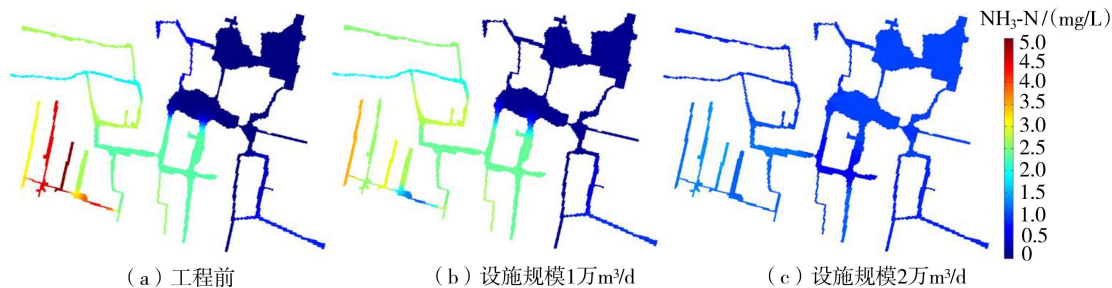
(a) 设施规模1万m³/d

(b) 设施规模2万m³/d

图7 珍珠湖片区活水推流器不同工况下的流场模拟结果



图8 COD_{Mn}质量浓度场变化分布

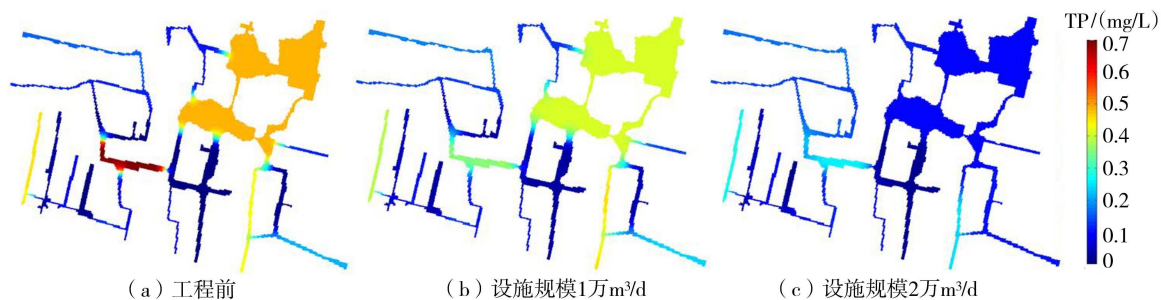


(a) 工程前

(b) 设施规模1万m³/d

(c) 设施规模2万m³/d

图9 NH₃-N 质量浓度场变化分布



(a) 工程前

(b) 设施规模1万m³/d

(c) 设施规模2万m³/d

图10 TP 质量浓度场变化分布

通过活水输送与旁路控制,1 号河与丽致星河的 TP 污染得到有效控制,能达到准Ⅳ类水标准。

珍珠湖片整体水质优于老镇片。方案实施后,原 COD_{Mn} 污染严重的财富楼河,通过 6 号泵站的活

水输送得到有效控制;原 COD_{Mn} 污染严重的河北浜,通过钻石旁路净化设施的清水输送,COD_{Mn} 污染得到有效缓解;珍珠湖片 85% 的水域 COD_{Mn} 质量浓度在 25 mg/L 以下。原 COD_{Mn} 质量浓度超标的周家浜,

表3 不同工况下的河道水质单位:mg/L

河道名称	COD _{Mn} 质量浓度			NH ₃ -N 质量浓度			TP 质量浓度		
	工程前	设施规模 1 万 m ³ /d	设施规模 2 万 m ³ /d	工程前	设施规模 1 万 m ³ /d	设施规模 2 万 m ³ /d	工程前	设施规模 1 万 m ³ /d	设施规模 2 万 m ³ /d
1 号河	35.1	30.1	23.7	3.3	3.2	1.2	0.48	0.34	0.26
2 号河	42.2	32.5	22.6	4.5	2.5	1.4	0.10	0.06	0.05
3 号河	52.1	40.6	28.5	4.8	3.1	1.4	0.21	0.17	0.12
4 号河	37.1	27.4	26.2	2.5	2.5	1.2	0.05	0.03	0.02
黄家浜	22.4	21.3	20.4	2.6	2.5	0.8	0.26	0.23	0.16
乌土泾	30.2	28.6	23.1	2.0	2.1	0.9	0.20	0.18	0.15
玉环河	26.3	24.8	23.0	2.9	2.7	1.1	0.65	0.33	0.22
丽致星河	27.3	24.9	23.8	2.4	2.3	1.2	0.70	0.42	0.24
鸭连浜	32.5	27.7	24.3	2.8	2.5	1.3	0.20	0.16	0.13
横浜	40.8	37.6	25.9	4.0	1.5	1.3	0.20	0.17	0.14
赵家浜	27.4	27.1	26.3	2.5	2.4	1.1	0.10	0.05	0.02
珍珠湖	26.8	24.3	23.2	0.5	0.4	0.2	0.50	0.38	0.10
河北浜	31.0	26.4	22.8	0.5	0.4	0.2	0.12	0.11	0.10
财福楼河	43.1	35.2	26.7	2.5	2.4	1.0	0.20	0.15	0.14
秧河	30.3	27.6	25.4	1.0	0.9	0.8	0.45	0.41	0.25

通过活水输送与旁路控制,污染得到有效控制,COD_{Mn}质量浓度稳定在 10 mg/L 以下,达到准Ⅳ类水标准。

综上所述,旁路净化设施规模为 1 万 m³/d 时未能达到Ⅳ类水标准,而规模为 2 万 m³/d 时的水质模拟结果更好,水质全面达标,故两处水污染旁路控制设施规模选用 2 万 m³/d。

5 结 论

a. 本文建立了苏州市渭塘镇河道的水动力水质耦合模型,该模型计算值与实测值吻合良好,模型在该地区适用。

b. 根据既定的活水引水选址方案,论证了设施规模的合理性,分析评估了方案的活水畅流、水质提升效果,老镇片工况 1 即 1 号活水泵站流量为 1.0 m³/s 时的水动力模拟结果较为理想,珍珠湖片每组活水推流器感应流量为 0.4 m³/s 时的水动力模拟结果较为理想,活水效果好。经过规模为 2 万 m³/d 的旁路净化设施处理后,各测点水质有明显的改善,河道水质可以达到 GB3838—2002《地表水环境质量标准》的Ⅳ类水标准。

c. 本文分析了既定活水引水选址方案下不同活水规模对研究区域水动力的影响,可为区域河道活水畅流提供参考;分析了不同净化规模对研究区域水质的影响,表明活水泵站与旁路净化设施是改善研究区域水质的有效途径。

参考文献:

[1] 王宏利,李捷,隋军. 城市排水系统水质模型研究与应用[J]. 中国给水排水,2016,32(23):147-150. (WANG Hongli,LI Jie,SUI Jun. Research and application of water quality model for urban drainage system[J]. China Water

& Wastewater,2016,32(23):147-150. (in Chinese))

[2] 嵇晓燕,杨凯,陈亚男,等. 基于 ARIMA 和 Prophet 的水质预测集成学习模型[J]. 水资源保护,2022,38(6):111-115. (JI Xiaoyan, YANG Kai, CHEN Ya' nan, et al. An ensemble learning model for water quality forecast based on ARIMA and Prophet [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):111-115. (in Chinese))

[3] 王伟,王晓青. 水质耦合模型分类及应用进展[J]. 人民珠江,2020,41(7):79-84. (WANG Wei, WANG Xiaoqing. Water quality coupling model classifications and their applications [J]. Pearl River,2020,41(7):79-84. (in Chinese))

[4] 孙文字,姚成,刘志雨,等. 秦淮河水文水动力模型及实时校正[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):26-33. (SUN Wenyu, YAO Cheng, LIU Zhiyu, et al. Hydrological and hydrodynamic model of Qinhuai River and real-time correction [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):26-33. (in Chinese))

[5] 张婷,徐彬鑫,康爱卿,等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展,2021,41(3):11-19. (ZHANG Ting, XU Binxin, KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(3):11-19. (in Chinese))

[6] 王亦斌,孙涛,徐希涛. 基于 EFDC 模型的水质在线模拟系统[J]. 江苏水利,2020(10):41-44. (WANG Yibin,SUN Tao, XU Xitao. Research on water quality online simulation system based on EFDC model [J]. Jiangsu Water Resources, 2020 (10): 41-44. (in Chinese))

(下转第 119 页)

[17] 陆晓,吴云,杨侃,等.基于改进多目标布谷鸟算法的水资源配置研究[J].中国农村水利水电,2020(4):56-60. (LU Xiao, WU Yun, YANG Kan, et al. Water resources allocation based on improved multi-objective cuckoo search[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(4):56-60. (in Chinese))

[18] 王一杰,王发信,王振龙,等.基于NSGA-III的水资源多目标优化配置研究:以安徽省泗县为例[J].人民长江,2021,52(5):73-77. (WANG Yijie, WANG Faxin, WANG Zhenlong, et al. Multi-objective optimal allocation of water resources based on NSGA-III algorithm in Sixian County, Anhui Province[J]. Yangtze River, 2021, 52(5):73-77. (in Chinese))

[19] CHENG Qian, DU Bo, ZHANG Liangpei, et al. ANSGA-III: a multiobjective endmember extraction algorithm for hyperspectral images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(2):700-721.

[20] 李建美,田军仓.NSGA-III算法在水资源多目标优化配置中的应用[J].水电能源科学,2021,39(2):22-26. (LI Jianmei, TIAN Juncang. Application of NSGA-III algorithm in multi-objective optimization allocation of

[7] 傅春,付耀宗,肖存艳,等.基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):33-39. (FU Chun,FU Yaozong,XIAO Cunyan,et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan city[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(1):33-39. (in Chinese))

[8] 扶磊. 基于 FVCOM 模型模拟巢湖的水动力和水质过程[D]. 大连:大连理工大学,2019.

[9] 陈珺,于明田,邓丽华,等.感潮河道桥梁和码头工程群对行洪累积影响[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):49-56. (CHEN Jun, YU Mingtian, DENG Lihua, et al. Cumulative influence of bridge and wharf engineering groups on flood propagation in tidal rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):49-56. (in Chinese))

[10] 廖康强. 基于 Delft3D 的柳河水动力与泥沙数值模拟研究[D]. 北京:清华大学,2013.

[11] 陈庆江,丁瑞,赵海.平原河道区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40

[21] JAIN H, DEB K. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, Part II: handling constraints and extending to an adaptive approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18 (4): 602-622.

[22] 姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析: 兼论三系统耦合公式及其扩展形式 [J]. 自然资源学报, 2017, 32 (5): 788-799. (JIANG Lei, BAI Ling, WU Yuming. Coupling and coordinating degrees of provincial economy, resources and environment in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 (5): 788-799. (in Chinese))

[23] 赵晨光, 马军霞, 左其亭, 等. 黄河河南段资源-生态-经济和谐发展水平及耦合协调分析 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2022, 20 (4): 660-669. (ZHAO Chenguang, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Resource-ecology-economy harmonious development and coupling coordination analysis of the Henan section of the Yellow River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20 (4): 660-669. (in Chinese))

[12] 吴凡杰,吴钢锋,董平,等.基于三维水动力水质数值模型的象山港排污策略研究[J].海洋环境科学,2021,40(1):24-33. (WU Fanjie, WU Gangfeng, DONG Ping, et al. An investigation of the pollutants discharge control strategies in Xiangshan bay based on 3D hydrodynamic and water quality numerical modelling [J]. Marine Environmental Science, 2021, 40 (1): 24-33. (in Chinese))

[13] 张立杰.基于Delft3D模型的呼伦湖水质水动力数值模拟[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.

[14] 柯庆,王林森,陶涛.基于Delft3D模拟的城市黑臭水体治理方案评估[J].灌溉排水学报,2017,36(1):79-84. (KE Qing, WANG Linsen, TAO Tao. Assessment of malodorous black water treatment based on Delft3D simulation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36 (1): 79-84. (in Chinese))

[15] 毕潇伟,徐聪,何义亮.基于Delft3D水动力模型对青草沙水库水温变化的模拟和预测[J].净水技术,2018,37(1):14-21. (BI Xiaowei, XU Cong, HE Yiliang. Simulation and prediction of water temperature variation in Qingcaosha reservoir based on Delft3D hydrodynamic model[J]. Water Purification Technology, 2018, 37 (1): 14-21. (in Chinese))

• 119 •