

周紫蕊, 廖卫红, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市河网调控与分析: 以福州市仓山区龙津阳岐片区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 770-779. ZHOU Z R, LIAO W H, LEI X H, et al. InfoWorks ICM-based urban river network regulation and analysis: A case study of Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 770-779. (in Chinese)

基于 InfoWorks ICM 的城市河网调控与分析

——以福州市仓山区龙津阳岐片区为例

周紫蕊¹, 廖卫红², 雷晓辉², 梁永帅²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 针对典型感潮河网地区水环境污染日趋严重与洪涝灾害频发的问题, 为优化河网水动力和降低河道漫溢风险, 基于 InfoWorks ICM(integrated catchment management)模型建立福州市仓山区龙津阳岐片区城市水文模型与一维河网水动力耦合模型, 以 2022 年 6 月 14 日实测降雨及河道水位数据对模型参数进行校准, 平均纳什效率系数为 0.78, 平均洪峰误差为 1.5%。设计并模拟 3 种晴天工况和 3 种“卢碧”台风雨天工况, 结果表明: 晴天从无调控到工况 3, 随着引水量的增加, 河网平均流速逐步增加, 总体增加 66.4%, 河道水动力提升显著; 雨天从原有调控工况到工况 3, 随着河道预降水位值增大, 关键断面平均超警历时逐步减少, 总体下降 73%, 河道漫溢风险明显降低。构建河网水文水动力耦合模型和工况优选, 可为仓山区进一步提升河网水动力与城市汛期洪涝灾害防治能力的方案制定提供决策依据, 也可为其他同类研究提供借鉴。

关键词: 南台岛; 双向感潮河网; 水文水动力耦合; 情景调控; 河网平均流速; 超警历时

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0075

随着城市化的不断发展, 城市原有的下垫面状况被人为改变, 不透水面积增加, 造成了一系列的城市化水文效应, 影响了自然水文循环。城市河网作为水文循环的重要一环, 承担着景观、行洪排涝等多项功能, 与城市化相伴生的是河流数量和面积的持续减少, 城市河网的自然调蓄能力被不断削弱^[1-3], 从而导致水环境污染日趋严重, 城市洪涝灾害频发^[4-6]。

以福州市仓山区为代表的平原感潮河网地区不同于单向汇流的山区, 其水流状态异常复杂, 既受浅海潮汐的影响, 又受上游河川入流的作用, 是一种周期性的非恒定往复流。晴天时, 水体始终在河道中振荡, 河网整体流速偏低, 水体中的大量污染物始终留在河道内不断分解并恶化水体环境; 暴雨频发时, 受到下游外江潮位的顶托, 内河水位排水不畅, 河道水位超警历时较长, 是极易发生洪涝灾

害的地区^[7-12]。针对福州市水环境污染与城市洪涝灾害问题, 高学珑^[13]构建福州市江北城区河网一维水动力水质耦合模型, 分析区域了内河网水动力和水质特点。何黎艳^[14]基于河道水动力水质模型以福州市金山片区为例模拟了截污补水方案效果, 并提出闸泵优化调度方案。张现国等^[15]基于 EFDC 模型构建福州水动力水质模型, 模拟研究了不同水质目标和引水条件下闸泵调度对河道水质变化研究。叶陈雷等^[16]基于 SWMM 模型以福州市晋安区某小区为例, 利用遗传算法对模型进行参数率定并利用 Morris 法对参数进行敏感性分析, 模拟分析不同重现期降雨下管网排水能力。陈安丽等^[17]以福州市内涝问题为例, 通过耦合协调度模型分析了福州市的城市化与水环境耦合关系, 并运用综合风险指数评估了福州市内涝风险情况。

综上, 目前福州市水环境污染与城市洪涝灾害

收稿日期: 2023-02-05 修回日期: 2023-07-14 网络出版时间: 2023-07-20

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230719.1632.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179027)

作者简介: 周紫蕊(1999—), 女, 江西赣州人, 主要从事水环境与生态水利等研究。E-mail: 1064703702@qq.com

通信作者: 廖卫红(1986—), 女, 湖北荆州人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文模型预报等研究。E-mail: liaowh@iwhr.com

问题已有的研究主要集中于福州市主城区,对于福州市仓山区龙津阳岐片区典型感潮河网地区的相关研究较少。由此,本文基于 InfoWorks ICM (integrated catchment management) 模型建立仓山区龙津阳岐片区城市水文模型和一维河网水动力模型,并将其耦合,以参数率定后的模型模拟分析晴天情景 3 种工况下城市河网流速的空间分布规律,模拟分析 2021 年“卢碧”台风情景设计 3 种工况下城市河网水位与超警历时的时空分布特征。模拟结果可为仓山区进一步提升河网水动力与城市汛期洪涝灾害防治能力的方案制定提供决策依据,也可为其他感潮河网地区调控闸泵防洪排涝与引调清水工程的实施提供借鉴与理论支撑。

1 研究区概况域及数据资料

1.1 研究区概况

研究区域位于福州市仓山区中部,被闽江分支包围。仓山区面积 142 km²,地势北陡、中高、南缓,地表起伏大。沿江地带沙洲发育,河段易受潮水顶

托,坡降平缓,南北侧均受潮汐影响,属典型双向感潮河网地区。仓山区属亚热带海洋性季风气候,境内年平均降水量为 1 395.6 mm。降水季变化明显,主要集中在夏半年(4—9 月),6 个月的总降水量达 1 026.6 mm,占全年降水量的 73.6%,夏季洪涝灾害频发,冬季水质恶劣。近年来,仓山区因其独特地理位置,为实现福州市政府提出的建设现代水城要求,地位极其重要。本文以仓山区龙津、阳岐片区作为研究区,河道范围北至闽江大道,南抵三环路,西至福湾路,东至林浦大桥、连江南路延伸段,河网总长 30.79 km,总集水面积 24.5 km²。研究区域包含 13 条河道,共涉及水闸 7 座(北侧闽江沿线 3 座、南侧乌龙江沿线 4 座),现状两岸水闸基本除了挡潮以外保持常开状态,涨潮落潮时区域水系处于来回振荡的状态,水动力效果较差。涉及泵站 3 座:现状阳岐泵站和义序泵站位于南侧乌龙江处,为排涝引水双向泵站;菖蒲泵站位于北侧闽江,为排涝泵站。研究区域总体概况见图 1。

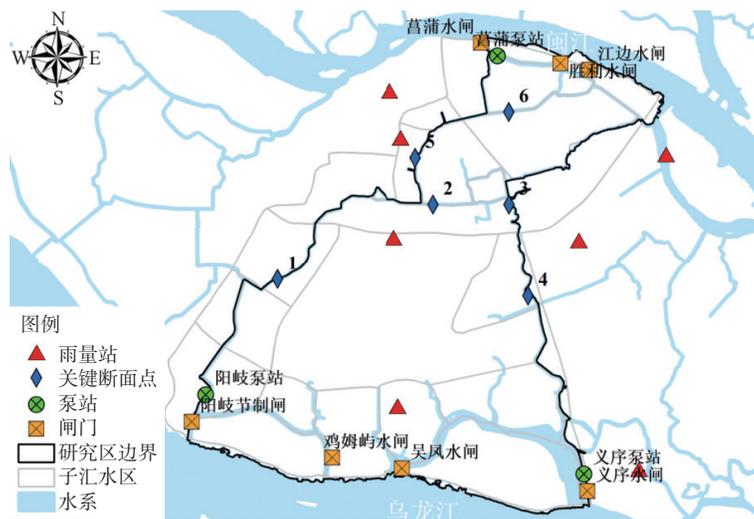


图 1 研究区域概况
Fig. 1 Map of study area

1.2 数据资料

研究区域边界共包括仓山区 2 个片区 13 条河道,河道断面数量共 563 个,断面间隔为 50 m;闸门泵站数据包含闸泵的设计参数及分布位置。除建模基础数据外,还包括模型边界数据、实测降雨数据与典型潮位数据。模型计算边界为收集到的内河入外江口的外江潮位过程,时间间隔为 10 min,为验证精度,收集了 6 个水位测站的水位观测数据,时间间隔为 10 min,站点分布见图 1。实测降雨数

据使用研究区域内的 7 个雨量站资料作为降雨数据导入模型进行计算,实测降雨数据的时间间隔为 1 h。

研究区域双侧均为感潮河段,内河水位受闽江和乌龙江涨落潮影响,晴天情景的潮位采用典型潮位特征线方法^[18-19]选取,由于晴天情景多为枯水期,因此只分析每年枯水期(11 月至次年 3 月)的潮位特征,北侧闽江选取龙津河测站,南侧乌龙江选取阳岐河测站为潮位测站,利用 MATLAB 对

近 10 年潮汐进行统计分析,提取潮位特征值,见表 1。

闽江潮位采用 2021 年 3 月 18 日作为晴天情景典型潮位,潮位过程见图 2(a);乌龙江潮位采用 2021 年 1 月 27 日作为晴天情景典型潮位,潮位过程见图 2(d)。

雨天情景均采用 2021 年 8 月 5 日潮位,潮位过程见图 2(b)和 2(e)。模型率定选取 2022 年 6 月 14 日潮位,潮位过程见图 2(c)和 2(f)。

表 1 潮位特征值信息
Tab. 1 Tide level characteristic value information table 单位: m

潮位特征值	龙津河测站	阳歧河测站
多年平均大潮高潮位	5.68	5.83
高潮位		
多年平均小潮高潮位	3.81	2.28
多年平均高潮位	4.73	4.91
多年平均大潮低潮位	1.93	1.66
低潮位		
多年平均小潮低潮位	1.02	1.73
多年平均低潮位	1.15	1.75

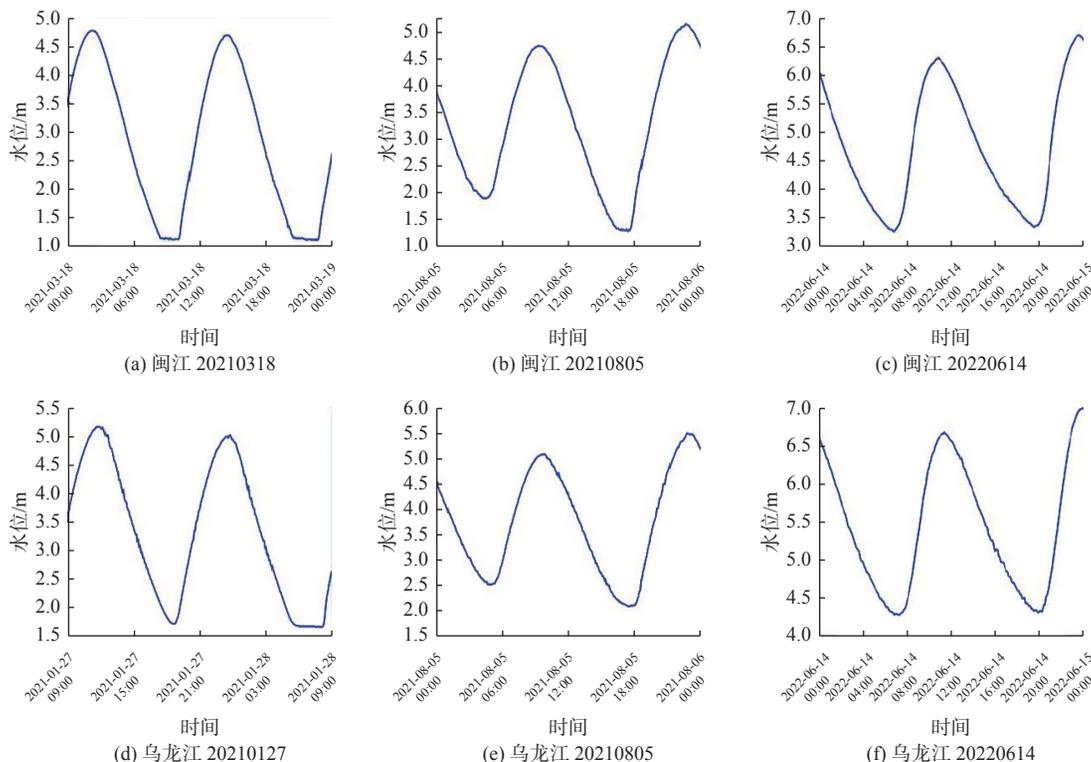


图 2 潮位过程线

Fig. 2 Tide level hydrograph

2 研究方法

2.1 InfoWork ICM 模型

InfoWorks ICM 模型,即城市综合流域排水模型,是一个高集成性模型,可以较好地模拟各类城市排水系统,具有水文、水动力、水质等多个计算模块,实现了水文系统模型与水动力模型等多模块之间的动态耦合计算。城市尺度与流域尺度水文过程不同,本文对蒸散发、截留等水文过程的计算进行了适当忽略^[20-21]。根据河流边界、主干道路以及高程数据将流域划分成若干个子汇水区,再利用研究区域影像图修正,将每个子汇水区作为集总式产汇流模块,各自相对独立地完成下渗与坡面汇流计算^[22]。采用 InfoWorks ICM 中 SWMM 模块提供的 Horton 模型计算陆面下渗过程,陆面汇流过程采用

非线性水库模型计算,将各汇水单元的积雨汇流到相应节点的控制断面或直接排入河网。InfoWorks ICM 通过完全求解的圣维南方程组解决一维河道的水动力计算^[23],在 InfoWorks ICM 中,利用 Preissmann 隐式差分法求解圣维南方程组,通过 Preissmann 格式对圣维南方程组进行离散求解,得到以增量表达的非线性方程组,忽略二阶微量,简化线性代数方程组直接求解。在建模时,河道模型利用该方法求解,河道类型为明渠流。

2.2 情景调控分析方法

晴天情景下,考虑河网平均流速^[24-25]。河网平均流速是反映河网流速空间与时间分布的变量,指河道断面流速总和与断面数量比值,该值越大表示河网水动力越大。为有效改善区域水动力条件与水

环境质量,从抑制藻类发生角度,通过研究区域实地考察、现场监测、文献调研^[26-28]等方式,本研究认为仓山区河道较为适宜生态流速范围为0.5~1.5 m/s。

由于研究区域为双向感潮河网,流向不单一,因此采用断面流速为绝对流速。河网平均流速具体计算公式为

$$V_A = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{N} \quad (1)$$

式中: V_A 为河网平均流速, m/s; V_i 为第 i 个断面绝对流速平均值, m/s; N 为断面数。

雨天情景下,考虑河道关键断面平均超警历时。河道关键断面平均超警历时是指一次降雨过程中,河道关键断面水位超过警戒水位的时间总和与断面数量比值,该值越大表示河道满溢风险越大。河道关键断面平均超警历时计算公式为

$$T_A = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{N} \quad (2)$$

式中: T_A 为河道关键断面平均超警历时, h; T_i 为第 i 个关键断面超警历时, h; N 为关键断面数。

3 情景调控模拟结果与分析

3.1 模型构建

本文综合考虑城区河道范围、路面,路面具有典型的都市下垫面特征,在模型中概化为平原汇水

区,根据河流边界、主干道路以及高程数据划分为26个子汇水区。根据河道断面数据和闸门泵站建立一维河网模型,并与子汇水区耦合。InfoWorks ICM模型中的各模块的参数按照不同的分类标准可分为确定性参数和经验性参数。确定性参数通过查询收集已有的实测资料获得,经验性参数通过查阅相关文献^[29]设定初始值。以河道实测水位值与模型模拟水位值对比,采用纳什效率系数^[30]为精度目标对参数取值反复试算调整,确保模拟值与实测值的纳什效率系数达到0.7以上。

模型率定采用20220614场次降雨,降雨量42.9 mm,降雨历时1 440 min;采用20220614场次潮位,潮位历时1 440 min;闸泵边界条件设置依据值班人员当天的闸泵操作记录。通过对该场次降雨模拟,得到6个关键断面水位模拟结果的纳什效率依次为0.69、0.76、0.89、0.80、0.83、0.71,平均纳什效率为0.78,关键断面水位的洪峰误差依次为2.04%、2.01%、1.28%、2.57%、0.44%、0.40%,平均洪峰误差为1.46%,模拟水位和实测水位的平均洪峰误差约在1.50%,依据洪水风险图编制导则(SL 483—2010),所有误差值均在可接受的误差范围内($\pm 20\%$),表明该模型的模拟效果较好,可以用于河网情景调控计算与分析。关键断面模拟水位过程与实测水位过程的对比见图3。率定后最终参数取值见表2。

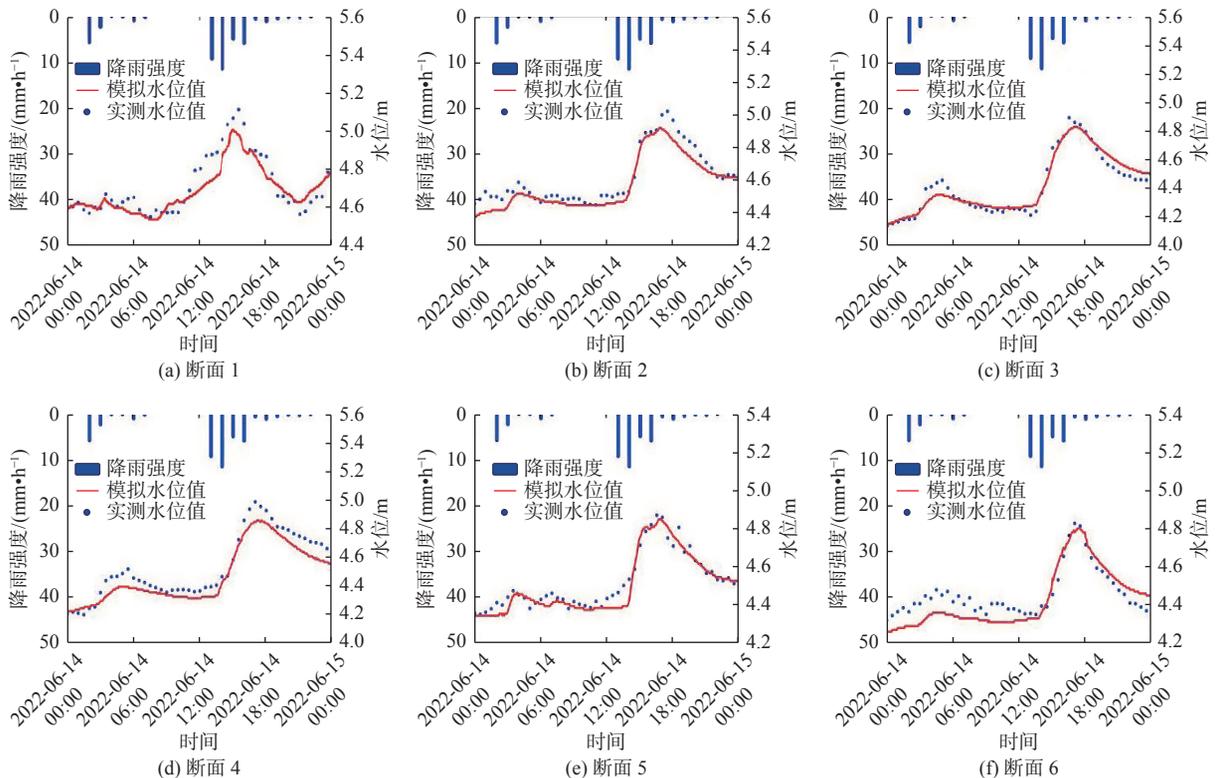


图3 关键断面模拟水位与实测水位对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured water levels at the section

表 2 模型参数校验取值

Tab. 2 Model parameter verification value table

对象	参数类型	取值范围
子汇水区	固定径流系数	0 ~ 1
	初损值/mm	1.5 ~ 6.0
	Horton初始入渗率/(mm·h ⁻¹)	30 ~ 80
	Horton稳定入渗率/(mm·h ⁻¹)	6 ~ 20
	Horton衰减系数	2 ~ 7
地表曼宁N值	不透水区	0.005 ~ 0.050
	透水区	0.05 ~ 0.50
河道	糙率系数	0.01 ~ 0.02
	扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)	10

3.2 晴天工况模拟分析

研究区域日常河网整体流速和水位较低, 根据区域周边闽江及乌龙江特征, 日常情况下采取利用潮汐——“南引北排”补水方针。研究区域内南侧可引水的闸门有阳岐节制闸、鸡姆屿水闸、义序水闸、吴风水闸。考虑到研究区域河网关键断面水位不超警戒水位, 因此在引水过程中河网水位须控制在南部最高水位为 4.7 m、北部最高水位为 4.6 m。

考虑经济成本最低的情况下引水效果要最好, 依据外江潮位与引水量的关系, 设计 3 种不同工况对比无调控模拟结果, 其中为保证水自南向北排, 北侧闽江沿线菖蒲水闸、胜利水闸、江边水闸水位>4.6 m 时关闸, 其余时间开启。无调控工况为闸门全部开启, 河道水体自然出流。具体信息见表 3。

表 3 乌龙江沿线各闸开启水位

Tab. 3 The water lever of sluices opening along

Wulong River				单位: m
工况	阳岐节制闸	鸡姆屿水闸	义序水闸	吴风水闸
工况1	涨潮时2.0~4.7, 落潮时关闸	涨潮时2.5~4.7, 落潮时关闸	涨潮时2.0~4.7, 落潮时关闸	3.0~4.5
工况2	涨潮时3.0~4.7, 落潮时关闸	涨潮时3.5~4.7, 落潮时关闸	涨潮时3.0~4.7, 落潮时关闸	3.5~4.5
工况3	涨潮时4.0~4.7, 落潮时关闸	涨潮时4.5~4.7, 落潮时关闸	涨潮时4.0~4.7, 落潮时关闸	4.0~4.5

通过模拟得到无调控与 3 种工况下 563 个河网断面 1 天内的平均流速分布, 见图 4。计算晴天情景无调控、工况 1、工况 2、工况 3 的河网平均流速依次为 0.751、0.963、1.159 和 1.250 m/s。

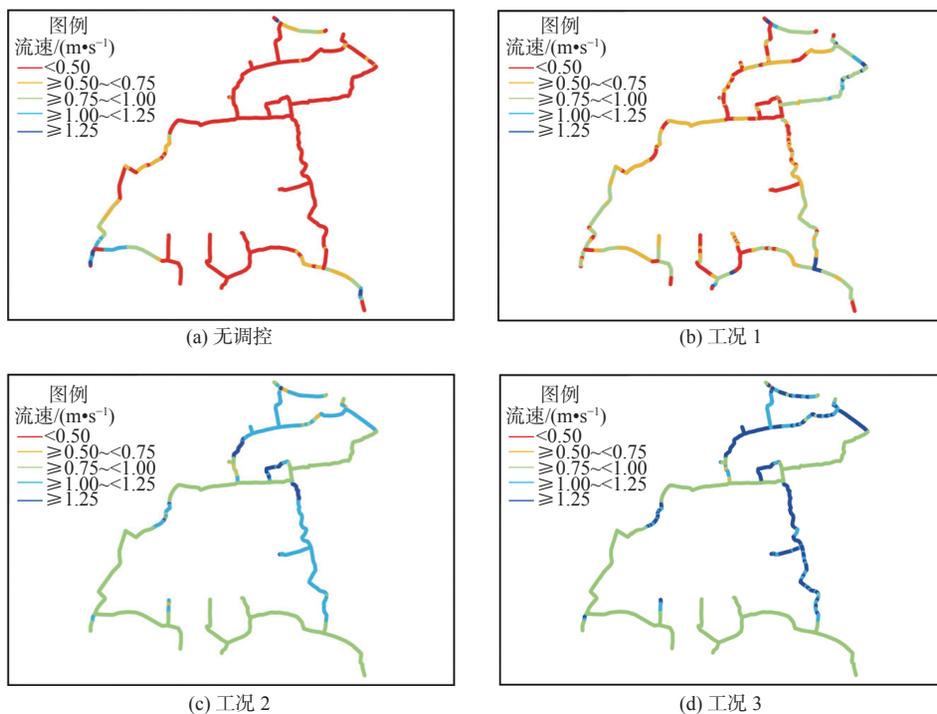


图 4 各工况下河网流速空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of river network velocity under various working conditions

结果表明, 随着引水量的增大, 研究区域河网平均流速由无调控工况的 0.751 m/s 提升至工况 3 的 1.250 m/s, 总共增加了 0.499 m/s, 提升了 66.4% 的河网平均流速, 河网水动力情况从无调控工况至工况

3 有明显改善。

从流速的空间分布(图 4)来看: 无调控工况时全区河道水动力总体较差, 尤其内河河网平均流速大多都低于 0.5 m/s; 而在工况 3 条件下, 全区水动

力均得到较好改善,其中右侧中段内河(白湖亭河)改善效果最为明显,且全区流速普遍大于 0.75 m/s,河网水动力情况均表现良好,说明通过引水闸门和泵站对河网进行自然潮汐补水的情景调控手段能够有效改善河网水动力条件。

3.3 雨天工况模拟分析

研究区域遭遇极端降雨时,可在降雨前调度区域内排涝闸门和泵站对河道水位进行预排预降,以最大程度减轻洪涝灾害的影响。

由此,雨天情景采用 2021 年“卢碧”台风降雨数据,选取 8 月 5 日 0 时起始,总历时 1 440 min,降雨量为 98.1 mm。降雨过程见图 5。

研究区域内可排涝闸门泵站有阳岐节制闸、鸡姆屿水闸、义序水闸、吴凤水闸、菖蒲水闸、胜利水闸、江边水闸,排涝泵站有、阳岐排涝泵站、义序排涝泵站、菖蒲排涝泵站。

因原有工况闸泵调控方案为单一的涨潮时关闸、落潮时开闸,没有考虑实际潮位和降雨情况,降雨开始时刻为涨潮最高潮,内外水位差大,水动力大,

此时开闸水体会迅速涌入河道,河道同时承受降雨和外江引水,排涝压力增加。所以本研究依据实际情况重新调整闸泵方案,考虑地区特点、最低生态水位、经济成本以及内河与外江水位高低等因素,基于“低水闸排,高水泵排”原则,设计 3 种不同工况,与原有情景闸泵调控工况下进行对比,具体方案见表 4。

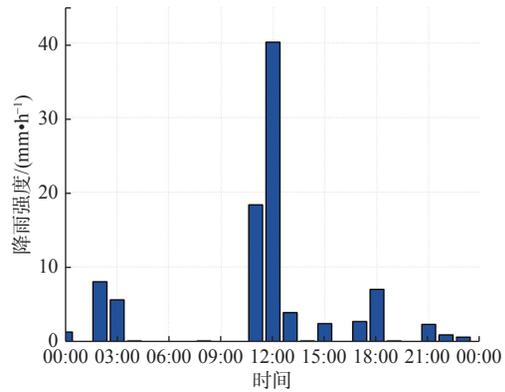


图 5 “卢碧”台风降雨过程
Fig. 5 The “Lupui” typhoon rainfall process

表 4 雨天工况信息

Tab. 4 Rainy conditions information table

工况	乌龙江沿线各闸/泵开启水位/m						闽江沿线各闸/泵开启水位/m			
	阳岐节制闸	鸡姆屿水闸	义序水闸	吴凤水闸	阳岐排涝泵站	义序排涝泵站	菖蒲水闸	胜利水闸	江边水闸	菖蒲排涝泵站
原有工况	—	—	—	—	—	—	涨潮关,落潮开	涨潮关,落潮开	—	—
工况1	<4.7	<4.5	<4.7	<4.5	—	—	<4.6	<4.6	<4.6	—
工况2	<4.2	<4.0	<4.2	<4.0	—	—	<4.1	<4.1	<4.1	—
工况3	<3.7	<3.5	<3.7	<3.5	<3.0	<3.0	<3.6	<3.6	<3.6	<2.5

通过模拟得到 3 种工况下 6 个关键断面超警历时,见表 5。计算“卢碧”台风原有工况和 3 种工况

下的 6 个关键断面点的平均超警历时依次分别为 327、198、141 和 89 min。

表 5 关键断面最高水位和超警时长信息

Tab. 5 Calculation results of key sections under different working conditions

断面编号	警戒水位/m	模拟类别	最高水位/m	超警时长/min
1	5.00	原有调控	5.26	180
		工况1	5.08	125
		工况2	5.03	85
		工况3	4.98	0
2	4.90	原有调控	5.30	290
		工况1	5.14	205
		工况2	5.04	145
		工况3	4.99	120
3	4.80	原有调控	5.31	505
		工况1	5.09	270
		工况2	4.98	195
		工况3	4.93	160

表 5(续)

Tab. 5 (Continued)

断面编号	警戒水位/m	模拟类别	最高水位/m	超警时长/min
4	5.00	原有调控	5.37	385
		工况1	5.33	270
		工况2	5.25	230
		工况3	5.17	175
5	4.80	原有调控	5.32	505
		工况1	5.04	230
		工况2	4.95	145
		工况3	4.87	80
6	4.50	原有调控	4.67	100
		工况1	4.61	90
		工况2	4.53	45
		工况3	4.48	0

结果表明,随着河道预降水位的增大,关键断面的平均超警历时时长由原有调控工况的 327 min 减少至工况 3 的 89 min,总体减少了 238 min,下降了 73%,河道漫溢风险降低明显。

从不同工况关键断面模拟水位过程(图 6)与不同工况关键断面模拟最高水位与超警历时对比(图 7)来看:不同断面的河道在超警历时减少的同时,最高水位也在下降,原有调控全区断面最高水位均超

警戒水位,断面 6 甚至超警戒水位 0.52 m,河道漫溢风险程度高;而在工况 3 条件下,河道断面最高水位均有不同程度的下降,其中,断面 6 的最高水位下降了 0.45 m,河道水位预降效果最为显著,断面 3 和断面 5 均下降至警戒水位以下,说明通过闸泵对河道提前预排预降的调控手段能够有效降低河道满溢而导致的洪涝风险。

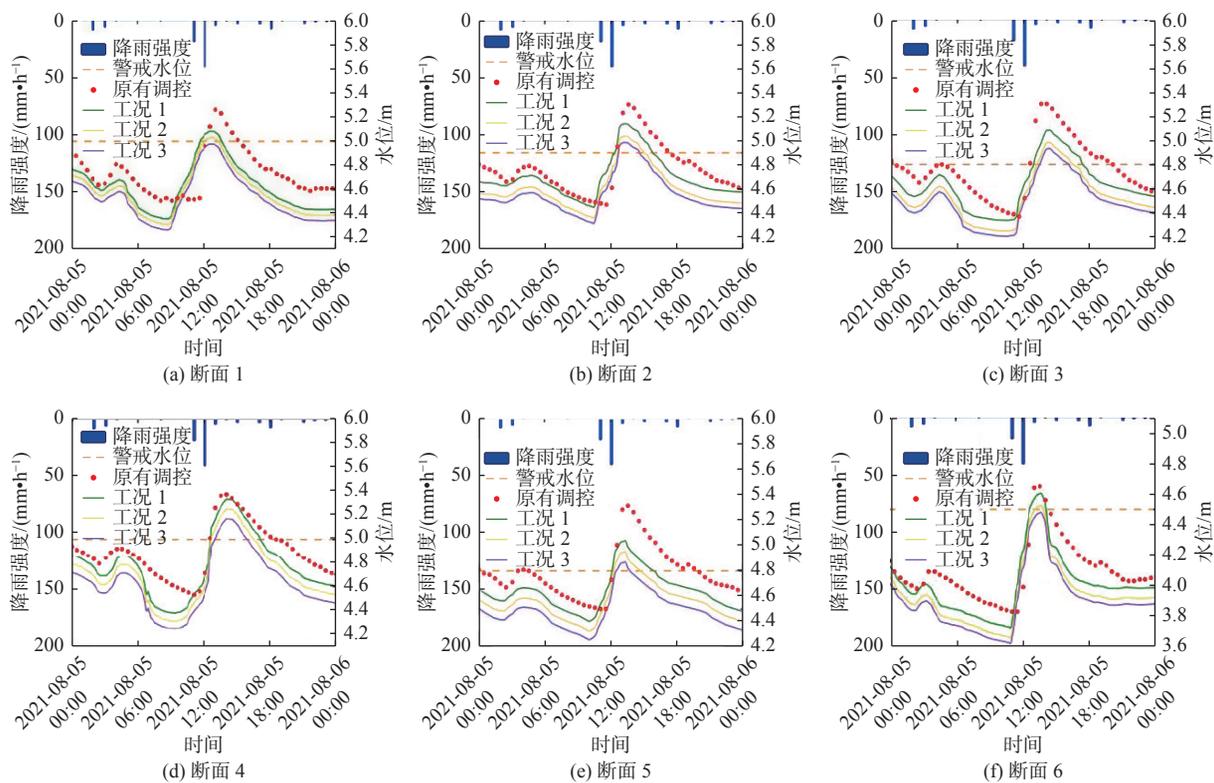


图 6 不同工况关键断面模拟水位过程

Fig. 6 Simulation of water level processes at key sections for different working conditions

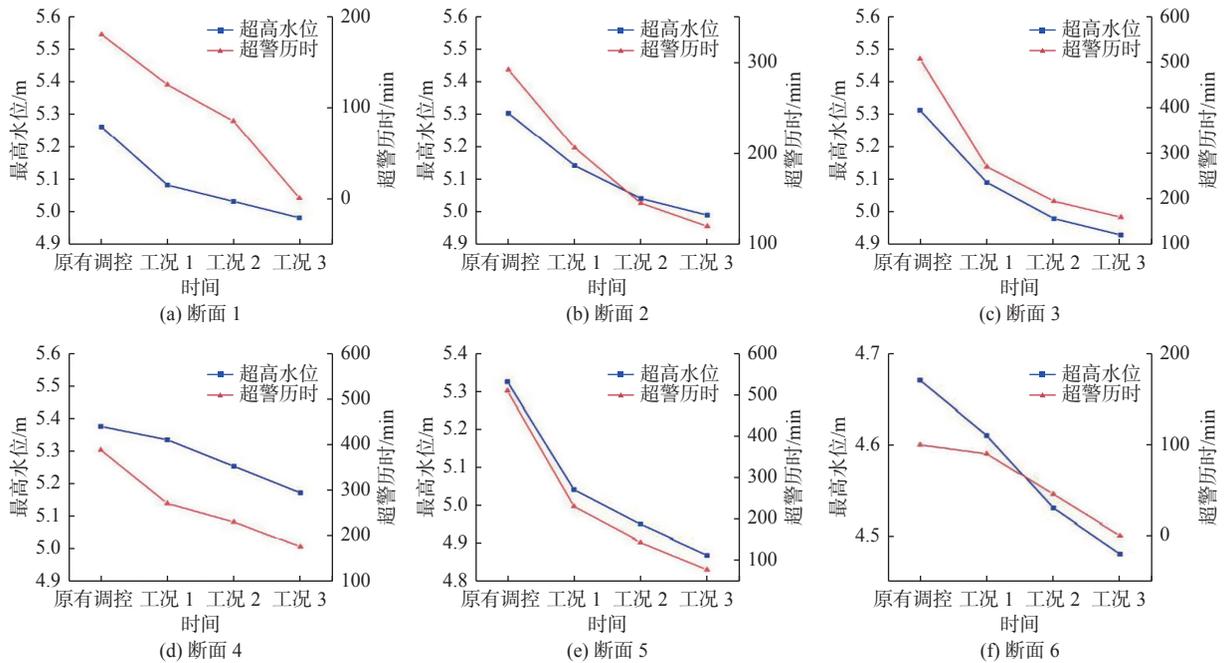


图 7 不同工况关键断面模拟最高水位与超警历时对比

Fig. 7 Comparison of simulated maximum water level and over-alarm time at key cross-sections for different working conditions

4 结论

基于 InfoWorks ICM 构建城市片区河网水文水动力模型, 实现城市水文过程与河网汇流过程的耦合, 并以 2022 年 6 月 14 日实测降雨及河网水位数据对模型效果进行评估。6 个关键断面模拟水位过程与实测水位过程较为吻合, 平均纳什效率系数达 0.78, 洪峰相对误差约 1%, 说明该模型适用于片区河网情景模拟调控与分析。

在晴天无调控、工况 1、工况 2、工况 3 模拟调控下, 河网平均流速分别达到 0.751、0.963、1.159、1.250 m/s。从无调控到工况 3, 河网平均流速逐步增加, 总共增加 0.499 m/s, 结果均满足仓山区适宜生态流速, 河道水动力提升显著。

在雨天原有调控、工况 1、工况 2、工况 3 模拟调控下, 关键断面的平均超警时长依次分别为 327、198、141、89 min。从原有调控工况到工况 3, 关键断面平均超警时长逐步减少, 共减少 238 min, 总体下降 73%, 改进方案比原有方案河道漫溢风险程度明显降低。

本次研究存在不足之处: 由于研究区域“卢碧”台风期间原有闸泵调度方案不完整, 在此基础上改进的工况调度方案模拟结果偏于理想化; 仅针对河网平均流域进行评价, 并未开展水质影响研究; 模型输入降雨数据时间步长大于模拟设置时间步长, 导致模型验证时模拟水位的峰值均小于实测水位值; 在构建城市水文与河网水动力耦合模型中, 由

于数据质量问题, 模型缺失验证步骤, 并忽略管网模型做了一定程度的概化。因此, 开展水质水量模拟, 提高降雨数据精度, 补充模型验证与管网模型部分, 以此提高模拟结果准确性, 是后续研究需重点关注和解决的问题。

参考文献:

- [1] 孙蓝心, 夏军, 余敦先等. 九江市中心城区下垫面变化及其径流响应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 625-635. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0066.
- [2] ZHANG W, VILLARINI G, VECCHI G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. *Nature*, 2018, 563(7731): 384-388. DOI: 10.1038/s41586-018-0676-z.
- [3] KALANTARI, Z, FERREIRA, CSS, PAGE, J, et al. Meeting sustainable development challenges in growing cities: Coupled social-ecological systems modeling of land use and water changes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 245: 470-481. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.086.
- [4] 徐宗学, 李鹏. 城市化水文效应研究进展: 机理、方法与应对措施[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 7-17. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.002.
- [5] 史书华, 陈星. 基于调蓄能力与水系结构关系分析的

- 城市合理水面率研究:以常熟市为例[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(2): 1-6. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2020.02.001.
- [6] 叶陈雷, 徐宗学. 城市洪涝数字孪生系统构建与应用:以福州市为例[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(7): 5-11, 29. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2022160.
- [7] 梁永帅. 福州市南台岛内涝模拟与预测研究[D]. 济南: 山东大学, 2020. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2020.001270.
- [8] YANG L, XU Y P, HAN L F, et al. River networks system changes and its impact on storage and flood control capacity under rapid urbanization[J]. *Hydrological Processes*, 2016(13): 2401-2412. DOI: 10.1002/hyp.10819.
- [9] 戴文鸿, 胡涛, 丁梦娇, 等. 感潮河段交汇区水流特性数值模拟:以宁波三江口为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 171-177. DOI: 10.13476/j.cnki.ns-bdqk.2018.0168.
- [10] 陈文龙, 马志鹏, 袁菲, 等. 粤港澳大湾区水安全协同调控理论框架研究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 22-31. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.004.
- [11] 李昌文, 黄艳. 湄公河-洞里萨湖湖关系与水文情势驱动响应研究:关键科学问题与技术实现路径[J]. *人民长江*, 2022, 53(6): 1-13. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.06.001.
- [12] 徐张帆, 王先伟. 平原联围感潮河网暴雨洪涝灾害风险分析:以珠江三角洲中顺大围为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(8): 51-65. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.08.006.
- [13] 高学珑. 福州市感潮河网水动力水质耦合模型研究[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(13): 88-91. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2014.13.024.
- [14] 何黎艳. 基于河道水动力水质模型的福州南台岛补水优化调度研究[J]. *中国高新科技*, 2021(12): 135-136. DOI: 10.13535/j.cnki.10-1507/n.2021.12.58.
- [15] 张现国, 王慧鹏, 黄绵松, 等. 基于EFDC模型的感潮河网地区闸门调度研究[J]. *人民珠江*, 2022, 43(7): 96-102. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2022.07.011.
- [16] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于SWMM的城市社区尺度管网排水模拟:以福州市某排水小区为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 271-280. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0029.
- [17] 陈安丽, 陈琳, 吴建芳, 等. 基于耦合模型的福州市暴雨内涝研究[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(2): 1-4, 30.
- [18] 李炎. 潮间浅滩特征潮位线的遥感成图[J]. *东海海洋*, 1989(2): 13-23.
- [19] 陈倩, 黄大吉, 章本照, 等. 浙江近海潮汐的特征[J]. *东海海洋*, 2003(2): 1-12. DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2003.02.001.
- [20] INNOVYZE. InfoWorks ICM Help v3.0[Z]. Seattle: Wallingford, 2012.
- [21] 黄俊. InfoWorks CS和ICM软件详细介绍[R]. 上海: 同济大学, 2011.
- [22] 马旭. 基于InfoWorks ICM模型的典型城市内涝模拟及海绵减控效果研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [23] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于InfoWorks的城市水系水文水动力过程耦合模拟:以福州市江北城区及东北部山区为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5): 609-616. DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.05.009.
- [24] 陈俪丹, 高成, 陈妍清, 等. 考虑水质及水动力条件的滨江圩区最优活水方案[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(3): 16-19, 57.
- [25] 丁一, 贾海峰, 丁永伟, 等. 基于EFDC模型的水乡城镇水网水动力优化调控研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(4): 1440-1446. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0472.
- [26] 王思如, 顾一成, 杨大文, 等. 长江下游典型平原城市感潮河网水动力提升分析[J]. *水科学进展*, 2022, 33(1): 91-101. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.01.009.
- [27] 王昌杰. 河流动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [28] 凌穆峰, 谢慧姣, 章笑. 长兴岛引清调水与不冲流速关系研究[J]. *净水技术*, 2017, 36(S1): 166-170. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2017.s1.038.
- [29] 常青, 李江云, 周毅. InfoWorks水文模型参数灵敏度分析及其随区域尺度的变化[J]. *中国农村水利水电*, 2016(7): 75-78. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2016.07.018.
- [30] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1-A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

InfoWorks ICM-based urban river network regulation and analysis: A case study of Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City

ZHOU Zirui¹, LIAO Weihong², LEI Xiaohui², LIANG Yongshuai²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: With the development of urbanization, the natural hydrological cycle has been affected and the natural storage capacity of the urban river network has been weakened, making the city more prone to flooding.

For the typical tide-sensitive river network area with frequent flooding and increasingly serious water environment pollution, an urban hydrological model and a one-dimensional river network hydrodynamic model were developed and coupled based on InfoWorks ICM for the Longjin Yangqi area in Cangshan District, Fuzhou City. The model parameters were calibrated using the measured rainfall and river level data on June 14, 2022, with a Nash efficiency coefficient of 0.78 and a flood error of about 1.5%. Designed and simulated 3 types of sunny working conditions and 3 kinds of "Lupi" typhoon rainy day working conditions. The tide level of the sunny day scenario was selected by the tide level eigenvalue method, with March 18, 2021, as the typical tide level of the Min River and January 27, 2021, as the typical tide level of the Wulong River for the sunny day scenario. The rain scenario used the rainfall and tide level of typhoon "Lupi" on August 5, 2021. The average flow velocity of river network V_A was considered in the sunny day scenario, and the average over-alarm time T_A was considered in the rainy day scenario, and the simulation results of different conditions were analyzed in different scenarios.

The results show that the flow velocity of the river network in the whole area reached 0.751, 0.96, 1.159, and 1.250 m/s under no regulation and 3 working conditions, respectively, and the average flow velocity of the river network increased gradually from no regulation to working condition 3, with a total increase of 0.499 m/s. The results meet the suitable ecological flow velocity in the hamlet area, and the river hydrodynamics improved significantly. Under 3 kinds of rainy day working condition regulation, the average over-warning time at the key section of the river network was reduced by 31.19%, 54.13%, and 73.09%, respectively, compared with the original condition.

The hydrodynamic model of the river network in the urban area was constructed based on InfoWorks ICM, and the coupling between the urban hydrological process and the river network confluence process was realized. The average Nash efficiency coefficient was 0.78, indicating that the model is suitable for simulating and analyzing the river network scenarios in the area. The average flow velocity of the river network increased gradually from no regulation to working condition 3 on sunny days, with a total increase of 0.499 m/s. The results met the suitable ecological flow velocity in Kurama District, and the river hydrodynamics improved significantly. Rainy day "Lupi" typhoon scenario from the original regulation of working conditions to working conditions 3, the average over-alarm time of key sections gradually reduced a total reduction of 238 min, an overall decrease of 73%. The improvement program to the original program of river flood control and drainage effect is obvious. Constructing the coupled hydrological-hydraulic model of the river network and the preferred working conditions can provide a decision basis for the formulation of the plan to further improve the hydrodynamics of the river network and urban flooding prevention and control capacity in the Cangshan district, and can also provide a reference for other similar studies.

Key words: Nantai Island; bi-directional tide-sensing river network; hydro-hydrodynamic coupling; scenario regulation; mean flow velocity of river network; exceeding alarm time