

陈业超,刘珊霞,李晓坤,等.基于MIKE-NAM耦合模型的感潮河网区泵站联合调度模拟分析[J].人民珠江,2026,47(3):21-31.

基于MIKE-NAM耦合模型的感潮河网区泵站联合调度模拟分析

陈业超¹,刘珊霞^{2*},李晓坤³,熊佳²

(1. 中山市堤围管理中心,广东 中山 528499;2. 珠江水文水资源勘测中心,广东 广州 510060;3. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司,江苏 淮安 223001)

摘要:针对河涌未执行水位预降措施时遭遇突发降雨的非常规防汛场景,开展多泵站联合调度方案的模拟优化研究。鉴于感潮河段普遍存在实测径流数据缺失问题,基于MIKE11-NAM模型构建中顺大围降雨径流-水动力模型,模拟多种降雨情境下泵站联合调度方案下水位控制效果,并结合泵站运行耗能分析,确定最优泵站调度方案。研究结果显示:当遭遇橙色暴雨时,应至少开启泵站2台机组;当遭遇红色暴雨时,应至少开启4台机组;当降雨呈现集中态势或瞬时雨强较大时(红色暴雨以上级别),则需开启全部机组,将河道水位降至最低水平,为后续涨水过程预留充足的涌容,以保障防汛安全。计算成果可为同类感潮河段泵站工程的实际调度运行提供科学参考与实践借鉴。

关键词:MIKE-NAM模型;泵站;调度方案;水位预降;岐江河

中图分类号:TV675 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2026)03-0021-11

珠江三角洲河网密布,为有效抵御咸潮洪水等影响,当地通过修建水闸、泵站、水库等水利工程,依托“蓄、排、截、挡、泄”等综合措施,构建起“以排为主、防排结合、泄蓄兼施、截洪优先”的防洪减灾体系,形成了“外水防、内水排”的高效防御系统。区域排涝体系采用“就近外排、分区排涝、自排为主、抽排为辅”的布局方案。汛期排涝方式一般以利用每日两次低潮位的自然潮差自排为主,在遭遇外江高潮位顶托无法自排时则启用泵站抽排。近年来,在气候变化、区域经济发展及人口增长等多重因素的交织影响下,区域水文情势与用水需求均发生显著改变,对水利枢纽工程安全运行和调度管理提出了更严苛要求。

MIKE一维水动力模型以其计算稳定性强、模拟精度高的特性,在平原河网区排涝模拟分析中得到广泛应用。高华勇等^[1-4]基于MIKE11模型构建

区域一维排涝水动力模型,开展了闸泵规模模拟及联合调度等相关研究。由于平原河网区尤其是感潮河段普遍存在实测径流资料短缺的问题,导致上述闸泵规模调度模拟研究多采用设计暴雨推求设计径流。NAM(Nedbør-Afstrømnings-Model)模型作为集总式概念模型,具有结构简洁、所需水文参数少、参数率定简便且精度可靠等优势,在流域径流模拟中应用广泛。MIKE11模型自带的水动力模块与NAM模块耦合后,能够有效模拟流域降雨径流过程及河网水动力过程,已被诸多学者应用于小流域、无资料流域的降雨径流模拟、洪水模拟、水动力水质模拟及排涝模拟等领域^[5-16]。

尽管MIKE11-NAM模型应用前景广阔,但目前将其应用于无径流资料流域闸泵调度模拟的研究仍较为匮乏,应用范围及模拟情景均存在明显局限。在实际防洪除涝工作中,为提升防洪除涝效

收稿日期:2025-09-02 修回日期:2025-10-27 网络首发日期:2025-12-23

作者简介:陈业超(1977—),男,高级工程师,从事水利水电工程及防洪减灾研究。

通信作者:刘珊霞(1994—),女,从事水文水资源分析计算工作。

联系作者:致信 rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

果, 闸泵调度通常会在降雨前对河道实施水位预降措施, 以预留河道容积容纳后续涝水。然而, 近年来极端天气事件频发, 天气预报存在不确定性, 突发降雨事件屡有发生。在此背景下, 探究河道在未采取水位预降措施时, 遭遇不同量级降雨仅依靠泵站排涝能否满足应急防汛排涝需求, 具有重要的现实意义。针对无径流资料流域多降雨情景下的闸泵调度模拟研究, 本文以中顺大围的东河泵站、西河泵站为研究对象, 构建 MIKE 一维水动力模型耦合 NAM 模型, 重点分析岐江河在未采取水位预排措施且突发降雨时, 仅依靠东河泵站、西河泵站的调度方案(不启用水闸排涝)对河涌排涝效果的影响, 同时纳入泵站运行耗能指标, 通过水位控制效果、经济性双维度权衡确定最优调度方案, 旨在为水利枢纽的实际调度运行提供科学参考, 以充分发挥泵站的防洪排涝效益。

1 研究区域与工程概况

a) 水系概况。中顺大围地处广东省中山市西北部和佛山市顺德区的南部, 跨中山市、佛山市两个行政区, 总集雨面积为 779.21 km², 是广东省十大重要堤围之一。整个联围位于珠江流域的西北江三角洲水系东南边珠江出海口横门和磨刀门之间, 大围东侧自上而下紧邻东海水道、小榄水道和横门水道; 西侧濒临西江主流西海水道、海洲水道和磨刀门水道。中顺大围共有岐江河、凫洲河、拱北河、浅水湖等主干河道、河涌支流及排水(洪)渠道等 298 条。其中岐江河自西南向东北穿过中山市城区, 是城区最主要的一条集排洪、景观、农灌、通航等多功能的河涌。岐江河全长 40.30 km, 西端与西江干流磨刀门水道相连, 东端接入横门水道。为阻拦洪潮影响, 岐江河西端已建西河水闸同时在建西河泵站, 东端建有东河水利枢纽工程, 从而实现对岐江河的统一调度。

b) 工程概况。西河水利枢纽工程位于中顺大围西干堤岐江河出口, 外接磨刀门水道, 属大(1)型水利工程, 包含水闸、船闸、泵站。工程任务为防洪潮和排洪涝, 兼顾引水灌溉、航运等。其中西河水

闸由原西河水闸(建于 1970 年)重建, 按 100 年一遇标准建设, 包括船闸、水闸。西河泵站为新建泵站, 于 2023 年开工建设, 预计 2025 年底建成试运行。西河水闸按 100 年一遇洪(潮)水标准设计, 设计过闸流量 1 414 m³/s; 西河泵站按 200 年一遇洪(潮)水标准设计, 设计排涝规模为 400 m³/s, 设计引水规模为 145 m³/s, 总装机规模为 18 400 kW, 安装了 8 台变频调节竖井贯流泵, 中间 4 台为双向泵, 其他 4 台为单向泵, 单机设计抽排流量为 50 m³/s。东河水利枢纽工程布置在中顺大围(中山段)东干堤, 位于岐江河东河口, 外接横门水道, 属大(2)型水利工程, 按 100 年一遇洪(潮)水标准设计。东河水闸设计过闸流量 1 020 m³/s; 东河泵站设计排涝规模 273 m³/s, 总装机容量 10 800 kW, 安装了 6 台叶轮直径 3.24 m 立式轴流泵, 单机设计抽排流量为 45.5 m³/s。东西河水利枢纽工程总体调度方式为: 依据天气预报, 在暴雨来临之前, 借助水闸和泵站对岐江河进行水位预降措施, 将河涌水位提前降至 -0.5~0.6 m, 腾出涌容以承接即将到来的雨水。在主雨峰来临后, 当外江水位高于内河水位, 关闸挡潮, 视情况开泵排涝; 当外江水位低于内河水位时, 开闸排水。根据中山市市政府批复的相关文件, 中顺大围内河涌的最高控制水位为 1.6 m。由于岐江河地形具有中间高, 两边低的特点, 在日常调度过程中, 需尽可能控制岐江河中部员峰桥断面水位不超过安全管控水位 1.3 m。

2 模型构建

2.1 模型原理

考虑研究对象岐江河(图 1)为感潮河段, 缺乏实测流量资料, 本文基于 MIKE-NAM 模型对岐江河所在中顺大围的暴雨径流过程及河道水动力过程进行模拟。MIKE11 模型的 SO 模块可对水工建筑物进行概化并设置复杂的调度规则, 借助该模块可模拟不同初始水位、东西河泵站机组运行台数对岐江河水位的控制效果。NAM 模型将流域分成积雪储水层、地表储水层、土壤或植物根区储水层和地下水储水层 4 个储水层^[17], 通过输入降雨、蒸发、气温

等数据,连续计算这 4 个不同且相互作用的储水层的含水量,进行产流计算,再采用线性水库法进行汇流计算,从而实现从降雨到形成径流的模拟^[6]。在 MIKE11 模型中,NAM 模型计算的径流成果作为旁侧入流耦合到 HD 模块河网中,作为 HD 模型河网水位和流量的边界条件,根据水系、汇流节点等自动分配流量。HD 模型采用一维非恒定流圣维南方程进行河流水动力计算,质量和动量守恒方程式(1)、(2)。



图 1 岐江河位置示意

Fig. 1 Location of the Qijiang River

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + g + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |Q|}{AR^{\frac{4}{3}}} = q \tag{2}$$

式中: A 为过水断面面积, m^2 ; Q 为过流流量, m^3/s ; x 为计算点空间坐标; t 为计算点时间坐标; q 为旁侧入流流量, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; n 为曼宁阻力; h 为水位, m ; R 为水力半径, m ; α 为动量校正系数。

2.2 模型概化

a)模拟范围。岐江河所在中顺大围水系密集,

考虑其水系联通,概化范围为与岐江河具有明显水动力联通的中顺大围整体片区、横栏主片区、板芙河西片区,共概化水系 129 条,总集雨面积为 743.27 km^2 ,其中员峰桥断面位于岐江河中部位置,概化范围见图 2。

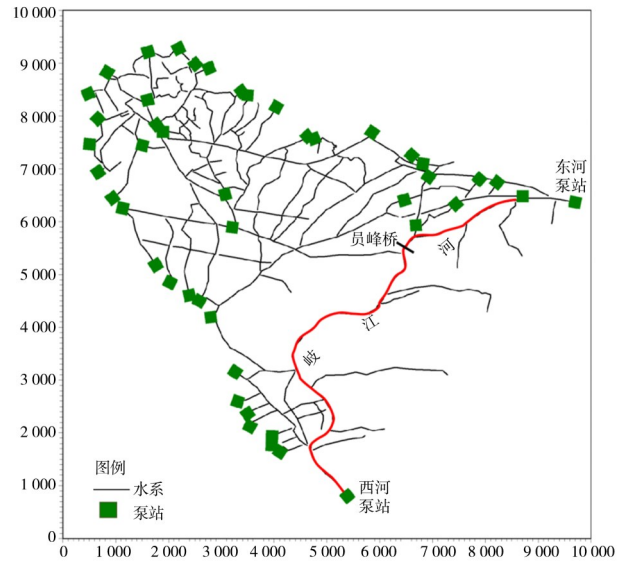


图 2 模型概化范围

Fig. 2 Model generalization scope

b)排涝建筑物。按照模拟范围现状已有水闸泵站规模进行设置,共概化水闸 41 处,泵站 37 处。MIKE 模型 SO 模块水闸泵站调度可通过控制策略来确定其排涝量。在 SO 模块中输入水闸泵站位置、闸门高度、最大排涝规模等基本信息,设置通过判断水位、上下游水位差、流量、流量差等控制策略来进行水闸泵站调度并控制排涝量。本次通过内江水位、上下游水位差来进行水闸泵站调度,调度方式为:当内江水位大于起排水位时,若内江水位大于外江水位,开闸排涝;若内江水位小于外江水位,开泵排涝。闸泵调度方式见图 3。

2.3 模型率定验证

a)水动力模型。采用 2020 年 8 月、2020 年 11 月实测东河水闸、岐江河员峰桥、西河水闸内水位过程作为率定验证数据。模型各边界潮位采用同时段实测潮位过程,三处河涌边界无实测水位数据,则根据处于同一外江水道的上下游河涌实测水面

线比降进行内插,断面相距不超过 3 km,误差较小。经率定验证,断面糙率为 0.025~0.030。本文采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、绝对系数(R^2)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)、水位最大误差分析模型拟合度。根据统计结果(表 1),率定验证期(图 4、5)最大均方根误差为 0.08,最小绝对系数为 0.92,最大平均绝对误差 0.08,最大误差 0.12。模型误差较小,拟合度高,满足实际工程应用要求。

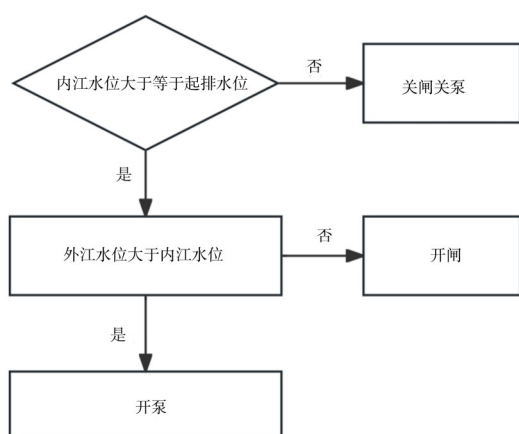


图 3 闸泵调度方式示意

Fig. 3 Gate-pumping station dispatching method

表 1 模型拟合度统计结果

Tab. 1 Statistical results of model fit

统计指标	率定期			验证期		
	岐江河	东河内	西河内	岐江河	东河内	西河内
RMSE	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
R^2	0.94	0.96	0.94	0.92	0.97	0.92
MAE	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
水位最大误差	0.13	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11

b) NAM 模型。NAM 模型的主要参数包括:地表储水层最大含水量 U_{\max} 、根区储水层最大含水量 L_{\max} 、坡面流汇流系数 C_{QOF} 、壤中流汇流时间 C_{KIF} 、坡面流汇流时间 CK_{12} 、坡面流产流临界值、壤中流产流临界值 TIF、根区地下水补给临界值 TG 和基流汇流时间 CK_{BF} 。模型的初始条件包括开始时刻流域地表储水层和根区储水层的土壤相对含水量以及坡

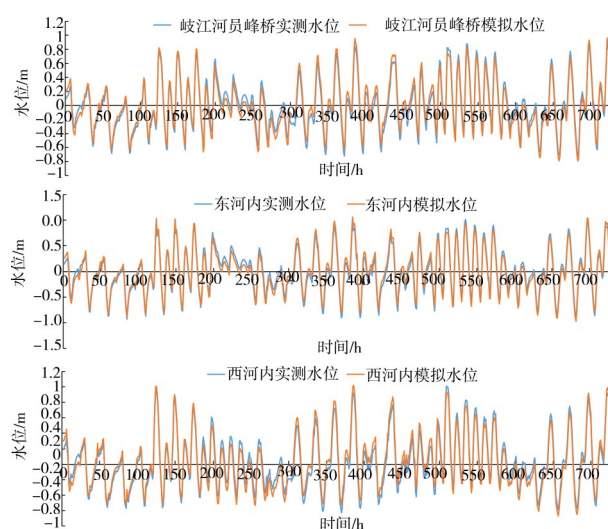


图 4 各断面水位率定结果

Fig. 4 Water level calibration results of each section

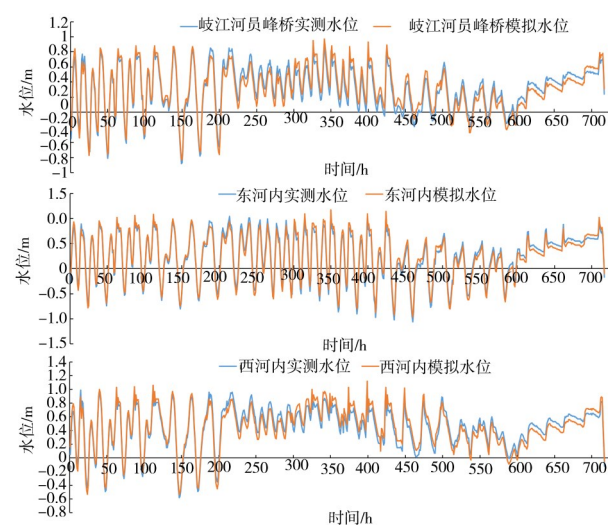


图 5 各断面水位验证结果

Fig. 5 Water level verification results of each section

面流、壤中流和基流的初始值。NAM 模型自带参数自动率定功能,在率定过程可通过人工调整得到最优参数。NAM 模型通过总水量平衡、最小流量、最大流量、洪水过程线等方面来进行自动率定。本文 NAM 模型参数通过模型自动率定以及手动调整来确定。由于缺乏实测径流资料,模型通过 20 年一遇设计暴雨条件下设计径流量与 NAM 模型模拟径流产水量进行分析率定确定参数。经率定,2 种方法径流量误差为 2.32%,模型参数取值见表 2。已有学者对 NAM 模型参数敏感性进行了大量研究,总体

来看, U_{\max} 、 L_{\max} 、 C_{QOF} 、 CK_{12} 敏感性较强, 主要率定这 4 个参数。对比同为感潮水系的中珠联围^[19]、太湖流域杭嘉湖的研究成果^[20], 由于 U_{\max} 、 L_{\max} 、 C_{QOF} 、 CK_{12} 一

般取值范围较大, 本次取值亦在合理范围内, 偏差

不大。

表2 NAM 模块主要率定参数

Tab. 2 Main calibration parameters of NAM module

参数	描述	一般取值范围	本次模型率定取值	中珠联围	太湖流域杭嘉湖
U_{\max}	地表储水层最大含水量	10~25 mm	10.084	10	15
L_{\max}	土壤层/根区最大含水层	50~250 mm	100.215	240	150
C_{QOF}	坡面流系数	0~1	0.978	0.72	0.5
C_{KIF}	壤中流排水常数	500~1 000 h	681.376	1 000	500
TOF	坡面流临界值	0~1	0	0.928	0.4
TIF	壤中流临界值	0~1	0.169	0.422	0
TG	地下水补给临界值	0~1	0.919	0.369	—
CK_{12}	坡面流和壤中流时间常量	3~48 h	10.034	8.35	10
CK_{BF}	基流时间常量	500~5 000 h	1 977.349	500	—

3 调度方案模拟及分析

3.1 模拟工况

西河泵站、东河泵站排涝标准均为 20 年一遇。根据西河泵站初步设计报告, 当遭遇 20 年一遇设计暴雨 (24 h 降雨量 284.28 mm, 最大 1 h 63.28 mm) 时, 雨前岐江河需实施水位预降至 -0.5 m, 西河泵站、东河泵站与中顺大围其他规划水闸泵站均按设计排涝规模协同排涝, 岐江河水位方可控制在 1.3 m 以下。根据本次试算结果, 当遭遇 10 年一遇设计暴雨 (24 h 降雨量 235.35 mm, 最大 1 h 55.16 mm) 时, 岐江河若不实施水位预降措施, 岐江河水位难以控制在 1.3 m 以下。同时, 根据中顺大围现状闸泵调度方式, 在接到相关强降雨预报 (暴雨橙色预警信号及以上) 通知时, 根据气象部门预测, 一般提前进行预排。结合本文研究目的, 本次降雨模拟情景主要考虑红色暴雨等以下等级降雨。

考虑中顺大围水利防汛应急响应制度, 基于中顺大围 MIKE11-NAM 模型, 模拟岐江河在未采取水位预降措施、初始水位分别为 0.5、0.8 m 的情况下, 突然遭遇不同暴雨条件时, 东河泵站、西河泵站不同开泵运行台数方案对岐江河的协同排涝效果。东河泵站共有 6 台排涝泵, 单泵排涝能力为 45.5 m³/

s; 西河泵站共有 8 台排涝泵, 单泵排涝能力为 50 m³/s。东河泵站、西河泵站宜按对称偶数台机组排涝, 因此东河泵站、西河泵站联合调度方案拟定为方案一 (西河泵站 2 台排涝 100 m³/s、东河泵站 2 台排涝 91 m³/s)、方案二 (西河泵站 4 台排涝 200 m³/s、东河泵站 4 台排涝 182 m³/s)、方案三 (西河泵站 6 台排涝 300 m³/s、东河泵站 6 台排涝 273 m³/s)、方案四 (西河泵站 8 台排涝 400 m³/s、东河泵站 6 台排涝 273 m³/s)。暴雨条件参照气象暴雨预警信号设置为 4 类工况: 3 h 橙色暴雨 (50 mm)、3 h 红色暴雨 (100 mm) 及 2024 年中顺大围 2 场实测暴雨过程 (2024 年 5 月 4 日实测橙色暴雨, 24 h 累计降雨量 64 mm, 最大 3 h 累计降雨量 22 mm; 2024 年 6 月 3 日实测红色暴雨 24 h 累计降雨量 108 mm, 最大 3 h 81 mm)。相关降雨过程见图 6, 模拟工况见表 3。

3.2 闸泵运行方式

从防汛偏不利角度, 模拟期间设置外江水位较高, 不具备开闸自排条件, 全程采用泵站排涝, 泵站排涝规模按现有规模设置, 其中东河泵站、西河泵站排涝规模按调度方案设置, 其余泵站按现有最大排涝规模设置。当内江水位大于起泵水位 0.3 m 时起排, 水位下降至 0.3 m 时停泵。

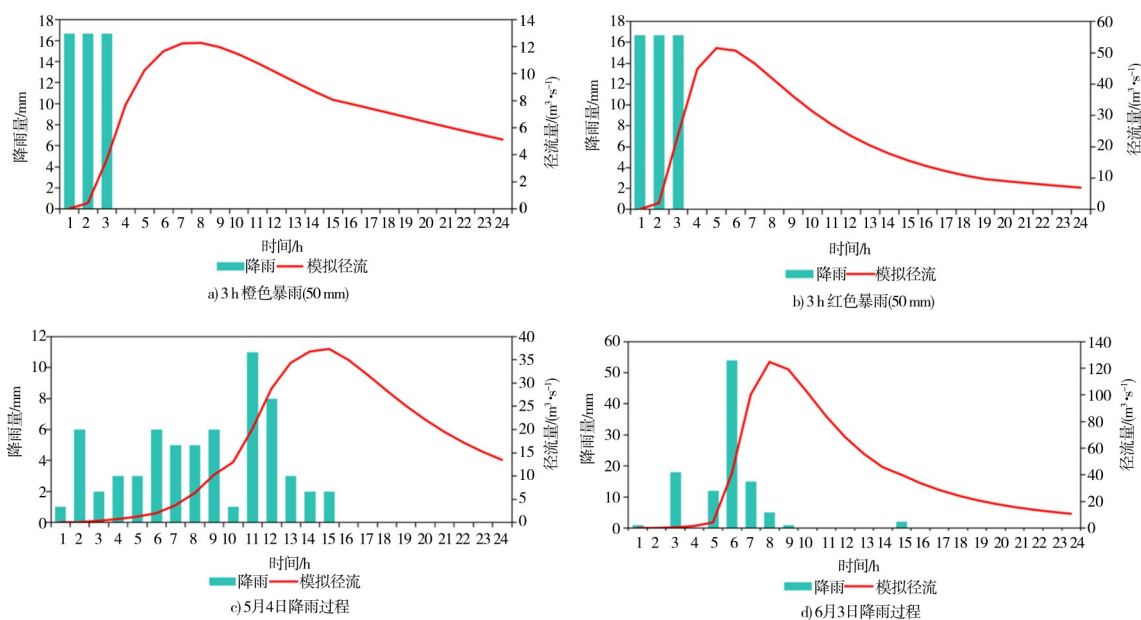


图6 降雨模拟工况

Fig. 6 Rainfall simulation scenarios

表3 暴雨模拟工况

Tab. 3 Rainstorm simulation scenarios

暴雨条件	内河初始水位/m	东(西)河泵站机组调度方案
3 h 橙色暴雨	0.5	
	0.8	方案一:东河泵站2台(91 m ³ /s)、西河泵站2台(100 m ³ /s);
3 h 红色暴雨	0.5	方案二:东河泵站4台(182 m ³ /s)、西河泵站2台(200 m ³ /s);
	0.8	方案三:东河泵站6台(273 m ³ /s)、西河泵站6台(300 m ³ /s);
实测橙色暴雨 (2024年5月4日)	0.5	方案四:东河泵站6台(273 m ³ /s)、西河泵站8台(400 m ³ /s)
	0.8	
实测红色暴雨 (2024年6月3日)	0.5	
	0.8	

3.3 能耗计算公式

西河泵站8台泵总装机规模为18 400 kW,单台泵功率为2 300 kW;东河泵站6台总装机规模为10 800 kW,单台泵功率为18 000 kW。本次采用简易泵站运行耗电量计算公式计算不同调度方案泵站运行的耗电量,见式(3)。

$$W = P \times T \quad (3)$$

式中: W 为耗电量, kW; P 为泵站功率, kW·h; T 为运行时间, h。

3.4 调度结果分析与讨论

3.4.1 调度结果分析

模拟结果(图7、8)显示,在3 h 橙色暴雨(50 mm)工况下,岐江河未采取水位预降措施时,西河泵站、东河泵站同时开启2~6/8台机组(方案一至四),均能快速将岐江水位降至停泵水位0.3 m,且期间岐江河员峰桥断面水位均未超过1.3 m的安全管控水位。当岐江河初始水位为0.5 m时,西河泵站、东河泵站分别开启4~6/8机组(方案二至四)时,岐江河员峰桥断面水位可在3 h内降至起泵水位0.3 m,而当两泵站仅开启2台机组(方案一)时,则需要延长5~6 h才能将员峰桥断面水位降至停泵水位。与初始水位0.5 m的情况相比,当岐江河初始水位为0.8 m时,西河泵站、东河泵站分别开启4~6/8机组(方案二至四),将岐江河水位降至停泵水位则所需时间延长3~4 h;仅开启2台机组(方案一)时,降至停泵水位的时间则延长至8 h。

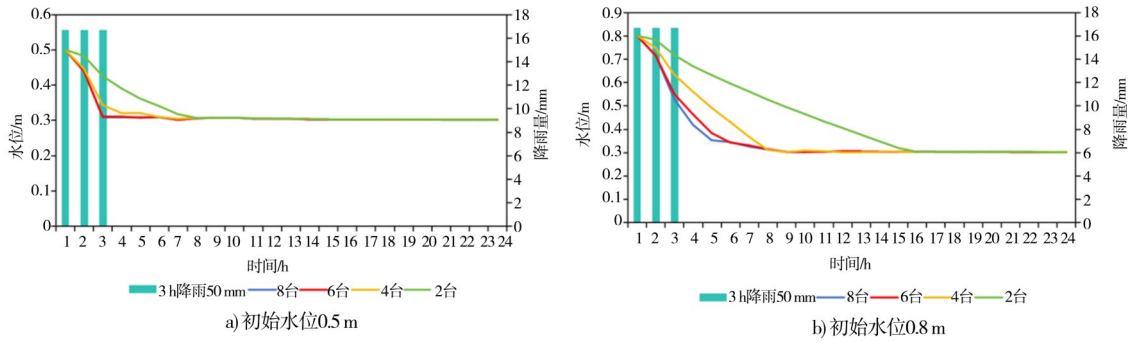


图 7 3 h 橙色暴雨员峰桥断面水位过程

Fig. 7 Water level process of the Yuanfeng Bridge section during orange rainstorm lasting for 3 h

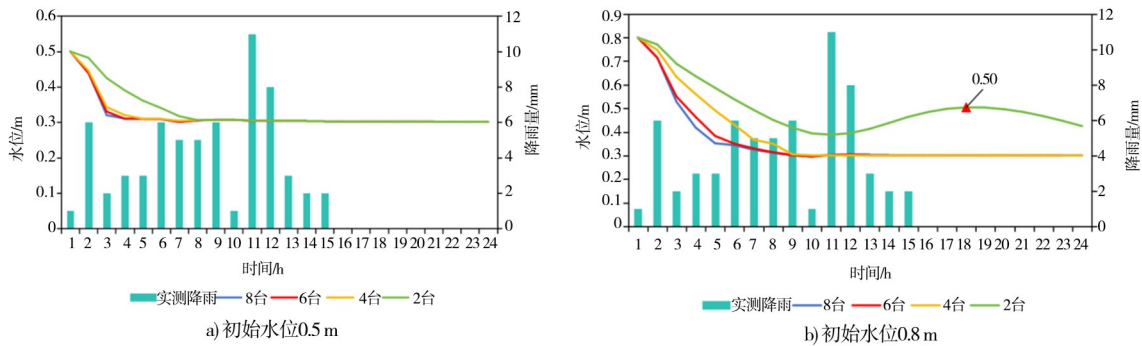


图 8 5月4日橙色暴雨员峰桥断面水位过程

Fig. 8 Water level process of the Yuanfeng Bridge section during orange rainstorm on May 4

在 2024 年 5 月 4 日这场实测橙色暴雨(最大 3 h22 mm,24 h 累计降雨量 64 mm)工况下,当岐江河未采取水位预降措施时,西河泵站、东河泵站同时开启 2~6/8 台机组(方案一至四),均能将岐江水位降至停泵水位 0.3 m,且期间岐江河员峰桥断面水位始终未均未超过 1.3 m 的安全管控水位。值得注意的是,该场降雨虽雨强较小,但降雨历时长,导致产流过程较为缓慢,因此在降雨结束后 2~3 h 内仍存在涨水过程,但水位涨幅较小。

根据模拟结果(图 9、10)可知,当西河泵站、东河泵站同时开启 2~6/8 台机组(方案一至四)时,受径流产汇流滞后性的影响,在 3 h 红色暴雨(100 mm)降雨过程中,岐江河员峰桥断面水位可控制不超过初始水位;之后,随着径流产流逐渐增加,排涝期间岐江河水位逐渐上升,但最高水位仅为 0.9 m(方案一),未超过 1.3 m。当岐江河初始水位为 0.5 m,东河泵站、西河泵站开启 4~6/8 台机组(方案二至四)时,在降雨结束 10 h 后,可将岐江河员峰桥断面

水位降至 0.3 m;而当岐江河初始水位为 0.8 m 时,需要延长 4 h 才能使员峰桥断面水位降至 0.3 m。

在 2024 年 6 月 3 日这场实测红色暴雨(最大 3 h81 mm,24 h 累计降雨量 108 mm)工况下,排涝效果类似,在降雨过程中通过泵站排涝,岐江河员峰桥断面水位可控制不超过初始水位,但随着径流产流逐渐增大,排涝期间岐江河水位逐渐上升。由于该场降雨最大 1 h 降雨量达到 54 mm 接近 10 年一遇频率,且占最大 3 h 雨量的 67% 降雨较为集中,雨强大且集中,涨水快且急,当初始水位为 0.8 m,东河泵站、西河泵站分别仅开启 2 台机组(方案一)时,最大 1 h54 mm 降雨后约 5 h 员峰桥断面达到 1.3 m,8 h 后达到 1.4 m,随后水位逐渐下降;若分别开启 4 台机组(方案二),则员峰桥断面最高水位为 1.1 m。当初始水位为 0.5 m,仅东河泵站、西河泵站分别开启 2 台机组(方案一)时,员峰桥断面最高水位为 1.2 m。

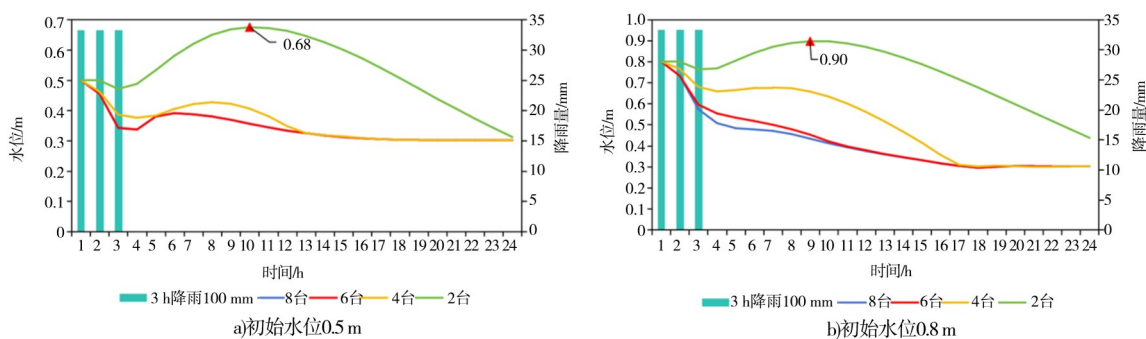


图9 3 h红色暴雨员峰桥断面水位过程

Fig. 9 Water level process of the Yuanfeng Bridge section during red rainstorm lasting for 3 h

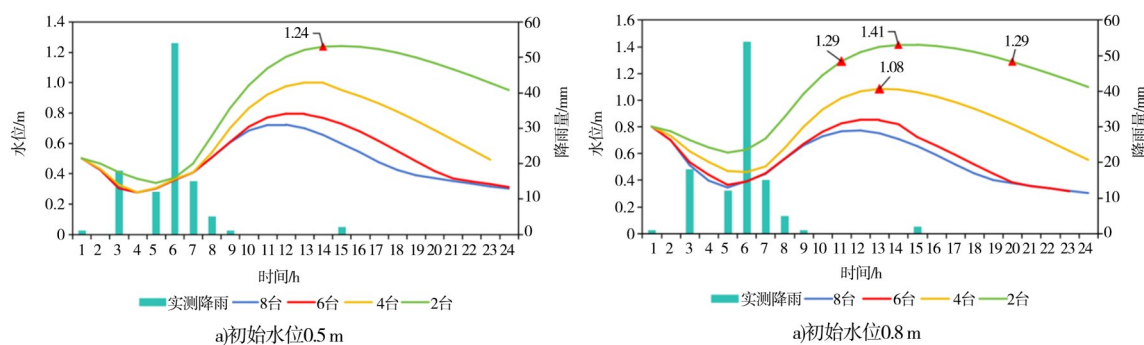


图10 6月3日红色暴雨员峰桥断面水位过程

Fig. 10 Water level process of the Yuanfeng Bridge section during red rainstorm on June 3

结合不同调度方案下泵站耗电量计算成果(表4),当河涌未采取水位预降措施,突遭橙色暴雨时,东河泵站、西河泵站分别开启2台机组(方案一)为最节能方案;突遭红色暴雨时,在满足防汛需求的

情况下,东河泵站、西河泵站分别开启4台机组(方案二)为最节能方案。方案三、四在不同降雨情境下能耗接近。

表4 不同调度方案下泵站能耗

Tab. 4 Energy consumption of pumping station under different scheduling schemes

降雨	河道初始水位/m	方案一/kW	方案二/kW	方案三/kW	方案四/kW
3 h 橙色暴雨	0.5	115 010	114 153	117 523	134 214
	0.8	142 496	174 081	177 817	204 773
5月4日 橙色暴雨	0.5	163 519	207 104	200 015	196 630
	0.8	187 888	259 298	265 530	298 670
3 h 红色暴雨	0.5	186 504	248 881	257 928	255 293
	0.8	188 600	284 152	315 181	305 571
6月3日 红色暴雨	0.5	188 600	345 321	435 975	451 796
	0.8	188 600	377 200	480 525	498 023

由此可见,当河涌未采取水位预降措施(河涌水位0.5~0.8 m),突遭橙色暴雨、红色暴雨等降雨时,开启东河泵站、西河泵站排涝可在降雨过程中

控制岐江河水位不超过初始水位,满足防汛应急响应需求。结合水位控制效果与运行耗能分析,通过多组模拟对比,遭遇橙色暴雨时,东河泵站与西河

泵站需至少开启2台机组(方案一),可实现水位有效控制与运行耗能的最优平衡;遭遇红色暴雨时,东河泵站与西河泵站需至少开启4台机组((方案二),方能应对强降雨引发的快速产流,避免河道水位超警戒上涨。基于6月3日红色暴雨实测降雨模拟(最大1h降雨量达54mm,接近10年一遇频率),瞬时雨强超过泵站排涝能力与径流产汇流滞后性,是导致泵站排涝不及时、水位骤升的核心原因。这一结果验证了实际闸泵调度过程中固定调度方案难以适配极端降雨的问题。因此,本文虽未模拟红色暴雨以上强度降雨或瞬时雨强大于10年一遇等降雨,为防止排涝不及时,当遭遇红色暴雨以上强度的降雨时,建议开启全部机组(方案四),尽量将岐江水位降至最低水平。总体而言,在泵站调度运行过程中,机组运行台数需依据水情、雨情确定,以保证水位得到有效控制且不再上涨为原则。当累计降雨量较小且未来雨势平缓时,可开启部分机组以兼顾节能;当累计降雨量大、瞬时雨强突出或未来雨势无减弱趋势时,需开启全部机组将岐江河水水位控制在1.3m以下;若水位持续下降且雨势减弱,则可逐步减少机组运行数量,实现动态调度。

3.4.2 讨论

现有关于河道闸泵调度的研究多以雨前水位预降为基础前提,对未预降这一非常规场景的关注不足,导致在突发降雨、预降措施未落实等实际应急场景下的调度指导性有限。本研究将未实施雨前水位预降作为核心研究场景进行泵站调度模拟,更贴合实际防汛中可能出现的应急情况;另一方面,现有研究多单一关注水位控制效果,本研究同步纳入泵站运行耗能指标,通过效果-成本双维度权衡确定最优方案,使研究结论更具工程实践的经济性与可操作性。此外,现有研究多采用单一模型或简化模型开展模拟,本研究构建的MIKE-NAM耦合模型,可更精准地刻画降雨—产流—河道水位响应的全过程,提升了调度模拟的科学性与可靠性。

尽管本研究已形成具有实践价值的调度方案,但仍存在三方面局限,需在后续深化研究。一是本研究仅设置橙色、红色两类典型暴雨情景,未考虑

降雨在时间分配(如雨峰出现时段、降雨强度变化梯度)与空间分布(如流域内不同子区域的降雨差异)上的不均衡性,导致模型在复杂降雨条件与极端水文事件下的调度适应性无法得到充分验证,难以全面支撑极端防汛场景的决策需求。二是径流模拟环节未采用岐江河流域的实测径流数据进行参数率定,可能影响泵站调度模拟结果的精度。三是未将本研究构建的MIKE-NAM耦合模型与传统调度模型(如SWAT模型、HEC-HMS模型等)在相同降雨情景与调度任务下开展对比分析,无法从泄流过程拟合度、水位控制误差、调度响应时效等维度量化本模型的优势,也难以明确其不同流域特征、不同调度需求下的适用性边界,限制了模型的推广应用范围。

4 结论

本文采用MIKE-NAM模型构建中顺大围降雨径流模型耦合一维水动力模型,经率定验证,该模型在实测径流资料匮乏的复杂河网感潮河段区域进行泵站排涝方案模拟效果较好,率定验证期最大均方根误差为0.08,最小绝对系数为0.92,最大平均绝对误差0.08,最大误差0.12,模型模拟精度高。基于该模型模拟橙色暴雨、红色暴雨两类降雨情景下不同泵站调度方案,通过多组模拟对比,从水位控制效果与运行耗能双维度开展量化分析,明确不同降雨强度下的泵站最优运行方案。考虑产汇流滞后性及极端降雨,当岐江河未采取水位预降措施,遭遇橙色暴雨时,东河泵站、西河泵站至少开启2台机组可满足排涝需求;遭遇红色暴雨时,则东河泵站、西河泵站至少开启4台机组可满足排涝需求;当遭遇红色暴雨以上级别或瞬时雨强大时,则应开启全部机组使岐江河水水位降至最低水平。

参考文献:

- [1] 高华勇,赵璧奎,郭晓娟,等. 基于MIKE 11的粤港澳大湾区河涌生态补水调度方案评估[J]. 人民珠江, 2024, 45(7): 48-57.
GAO H Y, ZHAO B K, GUO X J, et al. Evaluation of scheduling schemes for ecological water supplement of rivers in Guangdong Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on MIKE

- 11 [J]. Pearl River, 2024, 45(7): 48-57. (in Chinese)
- [2] 陈小凤,李洋,章启兵,等. 平原区暴雨内涝风险数值模拟研究[J]. 人民珠江,2018,39(9):51-55.
CHEN X F, LI Y, ZHANG Q B, et al. Numerical simulation study on rainstorm waterlogging risk in plain area [J]. Pearl River, 2018, 39(9): 51-55. (in Chinese)
- [3] 古苏浪. Mike11在平原感潮河网区闸泵群联合调度的排涝计算应用[J]. 广东水利水电,2022(2):28-32.
GU S L. Application of MIKE11 in drainage calculation of joint dispatching of sluice pumps in tidal river network area of plain [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2022 (2) : 28-32. (in Chinese)
- [4] 仲华. 基于MIKE11的河东泵站引排规模论证及排涝调度方案优选[D]. 扬州:扬州大学,2022.
ZHONG H. Demonstration of diversion and drainage scale and optimization of waterlogging drainage dispatching scheme of Hedong pump station based on MIKE11 [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022. (in Chinese)
- [5] 林波,刘琪璟,尚鹤,等. MIKE 11/NAM模型在挠力河流域的应用[J]. 北京林业大学学报,2014,36(5):99-108.
LIN B, LIU Q J, SHANG H, et al. Application of coupled MIKE 11/NAM model in Naoli River Basin, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36 (5) : 99-108. (in Chinese)
- [6] 牛亚男. MIKE 11-NAM耦合模型在小流域洪水模拟中的应用[J]. 浙江水利水电学院学报,2021,33(3):22-30.
NIU Y N. Application of MIKE 11-Nam coupling model of flood simulation in small watershed [J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2021, 33 (3) : 22-30. (in Chinese)
- [7] 高良敏,杜惠敏. MIKE11 NAM模块在入库径流模拟中的应用[J]. 陕西水利,2020(3):48-50,53.
GAO L M, DU H M. Application of MIKE11 NAM module in storage runoff simulation [J]. Shaanxi Water Resources,2020(3): 48-50, 53. (in Chinese)
- [8] 刘强,陈琳,周霄. MIKE11HD和NAM耦合模型在浑河流域沈抚段区域的应用[J]. 科技展望,2015,25(31):62-63.
LIU Q, CHEN L, ZHOU X. Application of MIKE11HD and NAM coupling model in the Shenfu section of the Hun River Basin [J]. Technology Outlook, 2015, 25(31): 62-63. (in Chinese)
- [9] 孙嘉辉,梁藉,曾志强,等. 耦合水动力模型的NAM模型在青狮潭流域的应用[J]. 中国农村水利水电,2018(10):161-164.
SUN J H, LIANG J, ZENG Z Q. The application of NAM model coupled with hydrodynamic model in Qingshitian Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(10): 161-164. (in Chinese)
- [10] 肖扬帆,周曼,胡挺,等. 基于MIKE11的三峡库区洪水演进模拟及洪水传播规律研究[J]. 水电能源科学,2022,40(10):74-77,194.
XIAO Y F, ZHOU M, HU T, et al. Research on flood routing modeling and flood propagation law for the Three Gorges Reservoir based on MIKE11[J]. Water Resources and Power,2022,40(10): 74-77, 194. (in Chinese)
- [11] 董坤明,韩庆港,高远. 基于MIKE11模型的南谏河初汛期水质水量调度研究[J]. 科技创新与应用,2023,13(32):112-115.
DONG K M, HAN Q G, GAO Y. Research on water quality and quantity scheduling in the early flood season of Nanshu River based on MIKE11 model [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(32): 112-115. (in Chinese)
- [12] 赵柯,康瑞鹏,王琪,等. 基于MIKE11模型的南方典型雨源型河流水质模拟[J]. 净水技术,2024,43(12):148-159.
ZHAO K, KANG R P, WANG Q, et al. Water quality simulation for southern typical rain-source rivers based on MIKE11 model [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(12): 148-159. (in Chinese)
- [13] 洪志贤. 基于MIKE11的小流域动态水环境容量研究[D]. 无锡:江南大学,2024.
HONG Z X. Study on dynamic water environment capacity of small watershed based on MKE11 [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024. (in Chinese)
- [14] 孟淇博,陶园,管孝艳,等. 闸泵调度对洛塘河圩区河道水位和流量的影响[J]. 水电能源科学,2025(7):36-40.
MENG Z B, TAO Y, GUAN X Y, et al. Influence of gate and pump dispatching on water level and discharge in polder area of Luotang River [J]. Water Resources and Power, 2025, 43(7) : 36-40. (in Chinese)
- [15] 周宏,刘俊,刘鑫,等. MIKE 11模型在望虞河西控工程排涝计算中的应用[J]. 中国农村水利水电,2016(1):39-43.
ZHOU H, LIU J, LIU X, et al. The application of MIKE11 model to drainage calculation in West Bank Control Project of Wangyu River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(1): 39-43. (in Chinese)
- [16] 尤李俊. 黑龙江省绥滨县蜿蜒河涝区农田排涝模数与排水过程模拟研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2024.
YOU L J. Farmland drainage modulus and drainage processes simulation in the Wanyan River Surface Waterlogged Area in Suibin County of the Heilongjiang Province [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024. (in Chinese)
- [17] 马海波,董增川,张文明,等. SCE-UA算法在TOPMODEL参数优化中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006(4):361-365.
MA H B, DONG Z C, ZHANG W M, et al. Application of SCE-UA algorithm to optimization of TOPMODEL parameters [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(4) :

- 361-365. (in Chinese)
- [18] 刘晋,陈业超,丁武,等. 中顺大围河网水动力水质调度模拟系统研究[J]. 人民珠江,2024,45(6):1-9.
- LIU J, CHEN Y C, DING W, et al. Hydrodynamic and water quality dispatching simulation system in Zhongshun Dawei River Network [J]. Pearl River, 2024, 45(6): 1-9. (in Chinese)
- [19] 王尚伟. 中珠联围雨潮遭遇风险概率及内涝灾害危险性分析[D]. 广州:华南理工大学,2021.
- WANG S W. Encounter risk of rainstorm and tide level and waterlogging hazard analysis in Zhong-Zhu Catchment Area [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [20] 钱海平,张海平,于敏,等. 平原感潮河网水环境模型研究[J]. 中国给水排水,2013,29(3):61-65.
- QIAN H P, ZHANG H P, YU M, et al. Water environment model for plain tidal river network [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(3): 61-65. (in Chinese)
- [21] 张丽娟,沈优,闫辉雪,等. 平原河网地区感潮河段排涝泵站规模论证研究[J]. 东北水利水电,2023,41(10):8-11,50,71.
- ZHANG L J, SHEN Y, YANG H X, et al. Demonstration and research on scale of flood drainage pump station in tidal reach of plain river network area [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2023, 41(10): 8-11,50,71. (in Chinese)

Simulation and Analysis of Joint Dispatching of Pumping Stations in Tidal River Network Area Based on MIKE-NAM Coupling Model

CHEN Yechao¹, LIU Shanxia^{2*}, LI Xiaokun³, XIONG Jia²

(1. Zhongshan City Dike Management Center, Zhongshan 528499, China; 2. Pearl River Hydrology and Water Resources Survey Center, Guangzhou 510060, China; 3. Huai'an Water Conservancy Survey and Design, Huai'an 223001, China)

Abstract: Against the backdrop of global climate change, extreme rainfall events have become increasingly frequent, posing significant challenges to the flood control management of urban river networks. This paper focused on the atypical flood control scenario where sudden rainfall occurs in river channels without the implementation of water level pre-lowering measures and conducted in-depth simulation and optimization research on the joint dispatching scheme of multiple pumping stations. Given the widespread lack of measured runoff data in tidal reaches, this paper constructed a rainfall runoff and hydrodynamic model for the Zhongshun Embankment based on the MIKE11-NAM model. In the model, pump stations were set through the MIKE11 SO module to schedule the pump station and control the drainage volume. According to the current gate-pumping station dispatching method of Zhongshun Embankment, water level pre-lowering measures were generally carried out in advance upon receiving notifications of severe rainfall forecasts (orange rainstorm warning signal or above). By taking into account the water conservancy and flood control emergency response system of Zhongshun Embankment and combining with the research objectives of this paper, the rainfall simulation scenarios in this paper mainly focused on rainfall with grades below the red rainstorm level. This paper used the established model to simulate different pumping station dispatching schemes under two rainfall scenarios: orange rainstorm and red rainstorm. Through the comparison of multiple simulation groups, quantitative analysis was conducted from two dimensions: water level control effect and operation energy consumption, so as to identify the optimal dispatching scheme of pumping stations under different rainfall intensities. The research results show that, in view of the lag of runoff generation and confluence, as well as extreme rainfall, when no water level pre-lowering measure is adopted for the Qijiang River: ① In the case of an orange rainstorm, at least two units of both the East River Pumping Station and the West River Pumping Station need to be activated to meet the flood drainage demand. ② In the case of a red rainstorm, at least four units of each of the two pumping stations must be turned on to satisfy the flood drainage requirement. ③ When encountering rainfall above the red rainstorm level or extremely high instantaneous rainfall intensity, all units should be activated to lower the water level of the Qijiang River to the minimum, so as to reserve sufficient channel capacity for subsequent water rise processes and ensure flood control safety. The calculation results of this paper can provide scientific references and practical insights for the actual dispatching and operation of pumping station projects in similar tidal reaches.

Keywords: MIKE-NAM model; pumping station; dispatching scheme; water level pre-lowering; Qijiang River

(责任编辑:程 茜)