

苏南运河上游河网区洪水淹涝模型建立及应用

李淮东

(江苏省太湖地区水利工程管理处,江苏 苏州 215128)

摘要:通过创建“滞涝单元”和“内涝单元”两类区域淹涝模拟方法,以苏南运河上游镇江段及其周边河网区域作为研究对象,构建了水文、水动力及洪水淹涝计算模块相互耦合的洪水淹涝模型。以2021年台风“烟花”实况雨水情、工情为基础开展代表站水位过程模拟验证,并针对台风“烟花”影响期间受淹面积及洪涝灾害成因进行分析,为苏南运河上游河网区防汛排涝联合调度及洪涝灾害预警决策提供了技术支持。

关键词:洪水淹涝;平原河网;苏南运河

中图分类号:TV125

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2022)03-0031-0005

Establishment and application of flood and waterlogging model in the river network area of upper reaches of Southern Jiangsu Canal

LI Huaidong

(Water Conservancy Engineering Management Office of Taihu Region of Jiangsu Province, Suzhou 215128, China)

Abstract: Based on the establishment of two types of regional waterlogging simulation methods, i.e., stagnant waterlogging unit and internal waterlogging unit, and taking the Zhenjiang section of the upper reaches of the Southern Jiangsu Canal and its surrounding river network as the research object, a coupling flood and waterlogging model of hydrodynamics and flood and waterlogging calculation modules was established. Based on the actual rainfall situation of Typhoon In-Fa in 2021, the simulation and verification of water level process of representative stations was carried out to prove that the model was reliable and effective. The analysis of the flooded area and the causes of flood disasters during the impact of the Typhoon In-Fa provides technical support for the joint dispatch of flood control and drainage in the river network area of upper reaches of the Southern Jiangsu Canal and the early warning decisions of flood disasters.

Key words: flood and waterlogging; river network in plain areas; Southern Jiangsu Canal

苏南运河自北向南穿越太湖流域腹地,流经区域河湖水系交汇,作为流域河网中一条横贯南北的纵向骨干泄水通道,运河水位水量时空变化直接影响沿线流域、区域及城市防洪排涝安全^[1]。运河上游区域地势三面高亢,腹部低洼,局部高地相间,山圩相连,源短流急,一旦遭遇流域性和区域性洪水,江湖水位并涨,排水十分困难,极易发生淹涝险

情。加之近年来城镇化的快速发展,下垫面变化、水利工程建设与调度对区域引排格局均产生了较大影响,对该区域落实“预报、预警、预演、预案”措施,提升水安全保障能力提出了更高的要求。

苏南运河及其周边河网作为主要输水通道,在区域防洪过程中起水量调节和转移作用,但是进入汛期,在区域河网底水偏高、受外江潮位顶托导致

收稿日期:2022-01-19

基金项目:江苏省水利科技项目(2016009)

作者简介:李淮东(1963—),男,高级工程师,硕士,主要从事工程调度与管理工作。E-mail:641431728@qq.com

沿江口门排水不畅的情况下,若遭遇梅雨或台风雨等不利因素时,苏南运河及周边河网水位易出现快速上涨,部分防洪标准较低的河段甚至会发生洪水漫堤险情。本文以苏南运河上游镇江段及其周边河网区域作为研究对象,考虑山区水库调度、圩区控制运用及骨干工程实际运行情况,构建基于4类下垫面的水文水动力地形耦合的洪水淹涝模型,选取2021年汛期开展模拟验证,并对台风“烟花”期间洪水淹涝情况进行情景模拟,旨在为该区域防洪调度及洪涝灾害风险预警提供决策支撑。

1 洪水淹涝模型原理

1.1 总体架构

苏南运河上游河网区洪水淹涝模型主要由水文模块、水动力模块及洪水淹涝计算模块耦合组成,水文模块通过接入降雨蒸发实时数据进行分区产水模拟,山丘区及平原区产水以流量边界的形式与水动力模块耦合,并关联研究区域下游水位边界及区域内部江、河、湖、库、圩实况调度信息,实现河网区水动力模拟。洪水淹涝计算模块将区域二维DEM栅格地形与水动力模块进行耦合,模拟区域破圩漫堤、洪水演进及受淹情况。最后,通过调用模型发布的Webservice接口,实现淹涝模拟成果调用与展示,为区域防洪预警决策提供技术支持,洪水淹涝模型总体架构见图1。

1.2 水文及水动力模块

苏南运河上游河网区下垫面在空间分布上差别较大,根据目前资料情况,本次苏南运河上游河网区根据四大类土地利用类型即水面、水稻田、旱

地及非耕地和建设用地分布,采用不同的产汇流机理^[1]分布式计算形成产水过程。各类下垫面产水计算模式如下:

(1)水面,水面日产流深等于降水量与蒸发量之差,即

$$R_w = P - E \quad (1)$$

式中: R_w 为水面净雨深,mm; P 为水面上日降水量,mm; E 为水面蒸发量,mm。

(2)水稻田,水稻生长期及非生长期,在非生长期采用与旱地及非耕地一致的模拟方式,生长期水稻田产水则根据作物需水过程及水稻田适宜水深、下限,耐淹水深等因素,逐日进行水量平衡计算,推求水田产水深。即

$$H_0 = H_1 + P - \alpha E - f \quad (2)$$

$$R_r = \begin{cases} P - \alpha E & H_0 \leq 0 \\ 0 & H_s < H_0 \leq H_m \\ H - H_m & H_m < H_0 \leq H_m + H_e \\ H_e & H_0 > H_m + H_e \end{cases} \quad (3)$$

式中: H_0 为田间水深,mm; H_1 时段初田间水深,mm; P 为时段内降水量,mm; E 为时段内水面蒸发量,mm; α 为水稻的需水系数; H_s 为平均适宜水深,mm; H_m 为耐淹水深,mm; H_e 为水田最大日排水深,mm; f 为田间渗漏,mm。

(3)不透水面,建设用地不透水面产水公式为

$$R_c = CP - d \quad (4)$$

式中: R_c 为不透水地表日径流深,mm; C 为径流系数; P 为日降水量,mm; d 为填洼水深,mm。

旱地及非耕地、建设绿地等透水地面,均采用蓄满产流模型进行模拟^[2],汇流过程则采用分布式

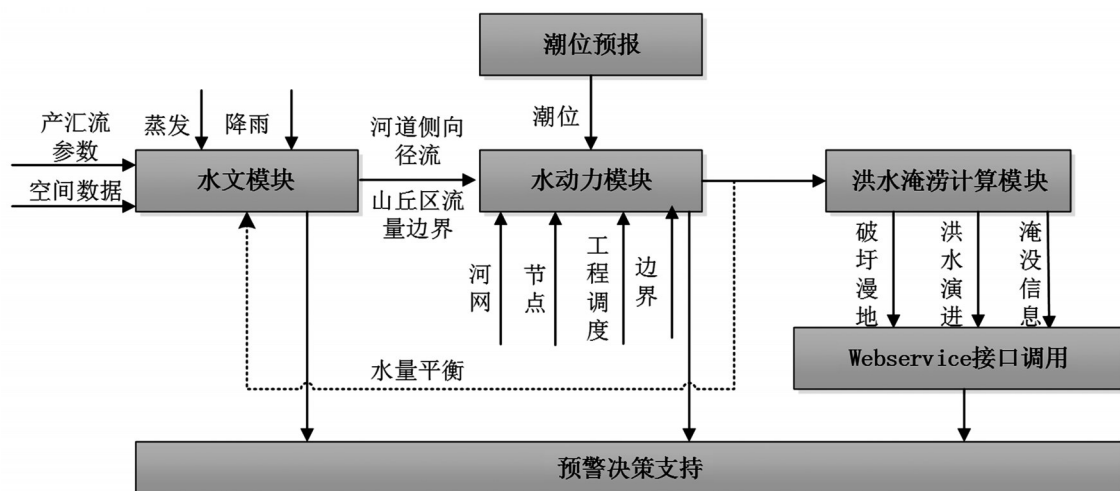


图1 洪水淹涝模型总体架构

汇流单位线法^[3-4]以河网多边形为单元综合考虑其距河道垂直距离及河道过流能力等因素,计算其产水汇入周边河道的时空过程。水动力模块以河道断面、零维湖泊、闸泵工程上下游联系等作为计算节点,以流量及水位作为边界条件,采用4点隐式差分格式求解圣维南方程组,实现了水文水动力步长级耦合。

1.3 洪水淹没计算模块

在水动力模拟中,分别建立河道外滞涝单元、圩内零维内涝单元与一维河道节点耦合关系,当河道断面节点计算水位高于堤顶高程时,对河道外滞涝及圩区内涝进行模拟。

(1)滞涝单元。针对河道外非圩区面积上洪水淹没计算分析,采用DEM数字高程数据和GIS空间分布数据生成具有栅格高程点的滞涝单元,如图2(a)所示,当遭遇强降雨时,滞涝单元根据每个栅格内4类下垫面产水扣除汇水计算本地滞水,当河道节点计算水位高于河道堤顶高程时发生洪水漫堤,采用堰流公式计算与滞涝单元的水量交换,并与当前栅格4类下垫面产水叠加计算淹涝水深变化过程。

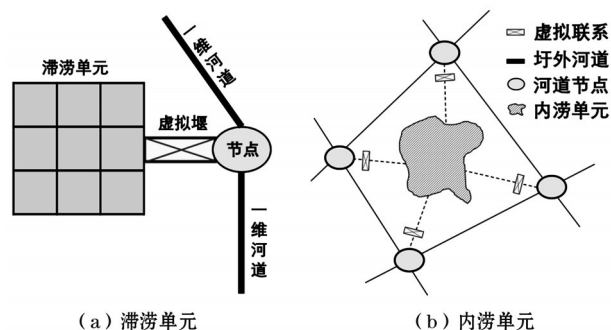


图2 洪水淹没模拟单元

(2)内涝单元。由于圩内地势平坦,圩区内涝水量主要参与水量调蓄平衡计算,假定圩区为零维,基于DEM数字高程数据生成水位-面积-库容曲线,并建立内涝单元与圩外河道节点间的水量交换关系,当河道节点计算水位高于圩区堤顶高程时,采用堰流公式计算与内涝单元的水量交换,并根据水位-面积-库容曲线统计对应淹涝面积。

2 模型构建

2.1 建模范围

本次建模范围涉及太湖流域中镇江市的面积2 142 km²,其中水面、水田、旱地及非耕地和建设用

地面积占比分别为6.7%、32.5%、33.3%和27.5%。北侧考虑沿江工程引排调度,构建一维长江模型,采用上游大通流量、下游江阴潮位作为边界,河网区上游按照分水岭划分23个山丘区子流域,采用子流域出口流量过程作为河网区上游流量边界,下游以苏南运河九里铺及丹金溧漕河水位作为边界。为反映该区域引排格局及水流动力条件,细化79条骨干河道,总长739.4 km,概化1 km²面积以上圩外湖泊3座,工程建模范围涉及中型水库、沿江引排工程及骨干河道控制工程共27座。

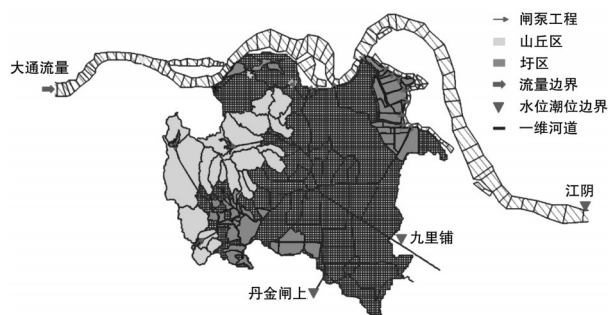


图3 洪水淹没模型构建成果

2.2 洪水淹没计算模块构建

建模范围内共涉及圩区51座,圩区面积占比12.8%,平均排涝模数1.04 m³/(s·km²),概化上述圩区并对圩区单元进行水位-面积-库容曲线插值,对平原区骨干河道外面积按照500 m×500 m网格进行栅格划分,共形成6 152个网格单元,洪水淹没模型构建成果见图3。

2.2 模型验证

对水文水动力及淹涝计算各模块模型参数进行率定,选取2021年汛期5—9月实况降雨、骨干工程引排及上下游水位流量边界数据对研究区域内重要河道代表站点及水库水位过程进行模拟,对比分析模拟结果与实测值误差,验证模型合理性。

经参数率定,苏南运河上游镇江段代表水位站点丹阳站和四明河口站水位过程如图4所示。汛期5—9月,丹阳站站和四明河口站日均计算水位和实测水位过程拟合较好,丹阳站日均最高计算水位与实测值误差2 cm,四明河口站日均最高计算水位与实测值误差1 cm。模拟成果表明,该模型能够反映汛期苏南运河上游河网区河网实际水流运动情况,在实测降雨和实测边界条件确定的情况下,按照水量平衡原理可知,模拟成果可靠性较高,可用于进一步开展区域淹涝影响分析。

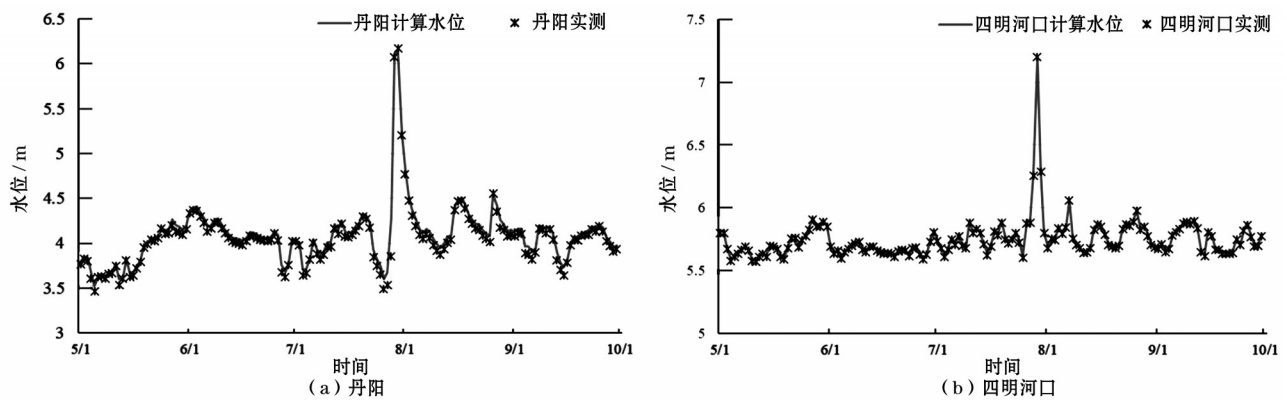


图3 丹阳、四明河口站计算与实测水位过程对比

3 淹涝分析案例

3.1 台风“烟花”实况

2021年第6号台风“烟花”于18日凌晨2时在西北太平洋洋面上生成,25日和26日在浙江2次登陆,27日上午移出太湖流域并于30日20时停止编号。台风“烟花”移动速度慢,滞留时间长,在24—29日影响期间,苏南运河上游镇江段沿线大部分地区累积降水量超300 mm,28日17—18时镇江站小时雨强达76.7 mm,达到30年一遇,镇江站、四明河口站最大90分钟降水量分别达到83 mm和94 mm,均超镇江站历史。24—31日丹阳站日降雨及每日8点时刻水位过程如图5所示,28日6时丹阳水位超警,一直持续至30日0时,水位下降至警戒水位以下。

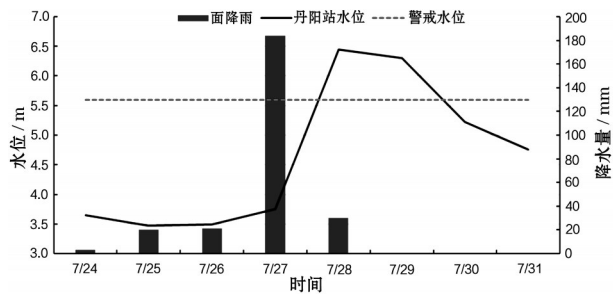


图5 丹阳站台风“烟花”场次降雨及水位过程

沿江工程调度方面,21日16时提前调度谏壁节制闸、九曲河闸关闸停引预降。7月24日15:30调度谏壁抽水站、九曲河抽水站开机抽排,进一步预降湖西区河网水位,台风影响期间全力抽排,经统计,24—31日沿江谏壁枢纽和九曲河枢纽累计排水量分别为6 627万 m^3 和6 038万 m^3 ,见图6。

3.2 淹涝模拟分析

“烟花”影响期间研究区域局部发生淹涝,受淹面积模拟成果(表1)可知,随着区域面降水量持续增强和河网底水持续抬升,受淹面积自24日起呈现逐日增加趋势,30日受淹范围最大,受淹面积达161 km^2 ,其中淹没水深>1 m的受淹面积占1.05%,31日随着降雨停止、河网水位下降及外排能力增强,区域内洪水淹涝情况得到较大缓解。

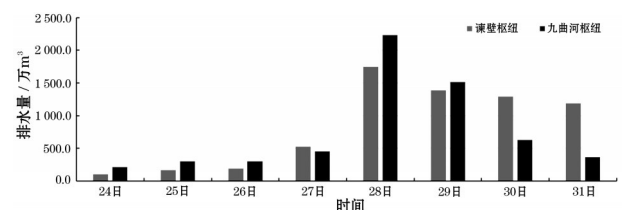


图6 台风“烟花”影响期沿江谏壁枢纽、九曲河枢纽工程日排水过程

表1 2017—2019年新疆兵团服务站服务情况统计

受淹水深/m	受淹面积/ km^2						最大受淹区域占比/%
	26日	27日	28日	29日	30日	31日	
0	1 530	1 517	1 514	1 380	1 377	1 461	
0~0.3	3	6	4	56	53	39	2.45
0.3~0.5	2	4	4	25	30	15	1.39
0.5~1	4	6	8	48	56	18	2.63
>1	0	6	9	29	23	5	1.05
受淹面积累计	9	21	24	158	161	77	7.52

26—31日研究区域受淹范围变化如图7所示,其中,26—28日主要受淹区域集中在镇江市京口区沿江局部地势低洼区域及沿江圩区,29—30日主要受淹区域集中在苏南运河镇江段下游及丹金溧漕河沿线,31日开始受淹面积逐渐减小。

针对台风“烟花”区域淹涝模拟成果,进一步分析洪涝灾情成因,26—28日沿江零星低洼区域产生积水的主要原因是受地形及圩区除涝标准偏低影响,圩区抽排能力不足。丹阳站水位28日23:55高达6.77 m,超警戒1.17 m,30日0:15回落至警戒水

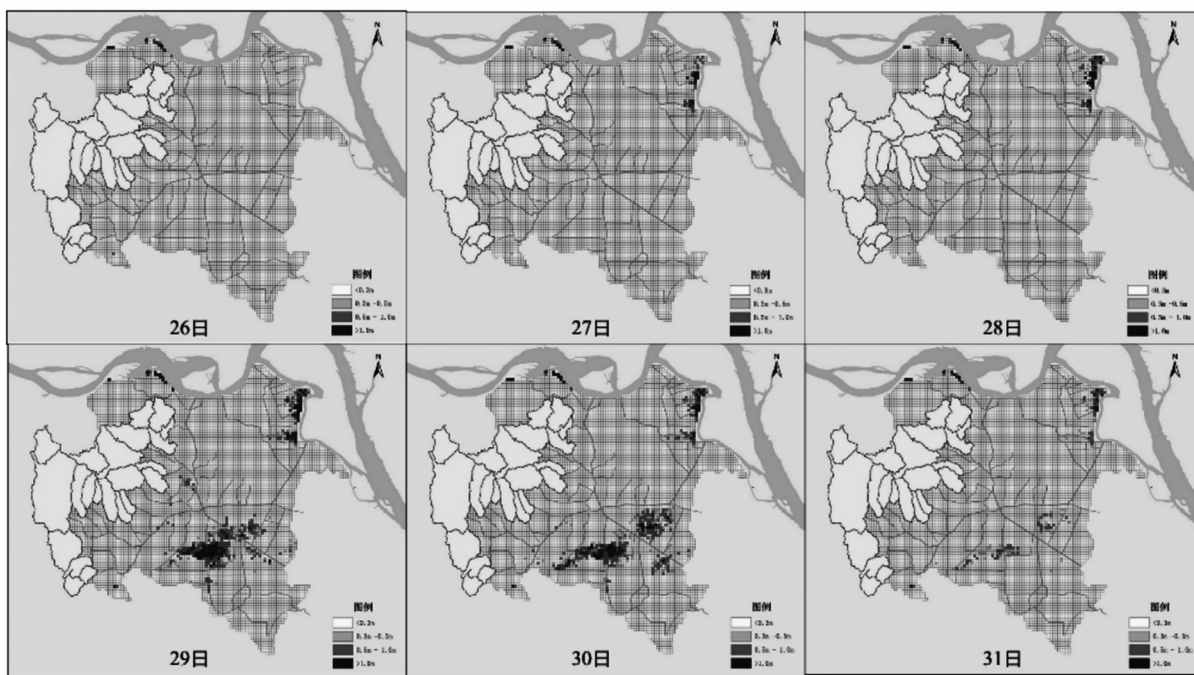


图7 26—31日受淹范围变化

位以下,29—31日苏南运河镇江段下游沿线及丹金溧漕河沿线地区受淹,主要原因是下垫面分布影响导致平原区栅格产水时空分布不均,加之区域周边河网水位超警,部分河道水位上涨发生漫堤,造成该区域较大范围淹涝,31日河网水位下落后,区域涝水外排效果明显。

4 结论与建议

本文基于水文、水动力及洪水淹涝计算模块耦合构建了苏南运河上游镇江段及其周边河网区域洪水淹涝模型,根据不同下垫面采用不同的产汇流计算模式,细化了区域内一维河道、零维湖泊、中型水库、闸泵工程及圩区调度等模型要素,创建了“滞涝单元”和“内涝单元”两类区域淹涝模拟方法,并对台风“烟花”期间区域河道代表站水位模拟精度进行分析,最后对台风“烟花”影响时段区域受淹范围进行模拟分析,为区域洪水预警及防御提供技术支撑。

研究成果表明,洪水淹涝模型能够反映汛期苏

南运河上游河网区河网实际水流运动情况,随着近年来下垫面及河湖水系变迁,区域水流运动格局产生较大变化,区域地形、圩区除涝标准、河道防洪标准及工程调度是影响区域淹涝及演进的重要因素。为加强苏南运河沿线防洪排涝及联合调度能力,建议进一步强化区域内圩区除涝标准及骨干河道防洪标准分析论证,持续开展洪水淹涝模型滚动率定,结合工程实际控制运行情况,分析优化调度可行性,为区域防洪预报、预警、预演、预案功能完善及苏南运河联合调度决策提供科学依据。

参考文献:

- [1] 朱建英,李淮东,刘国庆,等. 苏南运河沿线防汛排涝联合调度研究[J]. 江苏水利,2021(3):55-58.
- [2] 程文辉,王船海,朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京:河海大学出版社,2006.
- [3] 赵人俊. 流域水文模拟:新安江模型与陕北模型[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [4] 乐红玲,张萍霞,王船海,等. 平原河网区坡面汇流分布式单位线研究[J]. 水电能源科学,2015,33(2):25-28.