

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2023266

张小稳, 刘国庆, 陈光育, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害风险评估与对策研究[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(8): 13-18. ZHANG Xiaowen, LIU Guoqing, CHEN Guangyu, et al. Study on risk assessment and countermeasures of urban extreme rainstorm flood disaster[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(8): 13-18. (in Chinese)

城市极端暴雨洪涝灾害风险评估与对策研究

张小稳¹ 刘国庆^{2,3} 陈光育¹ 徐俊豪¹ 杨帆^{2,3} 黄玄^{2,3}

(1. 无锡市防汛防旱指挥部办公室, 无锡214021; 2. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 南京210029; 3. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 南京210029)

摘要: 受全球气候变化影响, 城市洪涝灾害频发, 郑州市“7·20”特大暴雨给城市洪涝灾害防御敲响了警钟。为全面了解无锡市遭遇类似郑州市“7·20”特大暴雨风险形势, 构建了无锡市城市一维、二维耦合极端暴雨洪涝分析模型, 综合考虑无锡市梅雨型、台风型、短历时强降雨型3种历史洪涝特征, 组合0.35倍、0.5倍、0.7倍、1.0倍郑州市“7·20”特大暴雨4种量级, 形成12组洪涝分析方案, 开展城市极端暴雨洪涝灾害风险评估, 并提出应对措施。研究成果可为极端暴雨应急联动、协同抢险救灾、城市规划等提供科学决策支持。

关键词: 极端暴雨; 洪涝分析模型; 风险评估; 对策研究; 无锡市

中图法分类号: TU998.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-9264(2023)08-13-06

1 研究背景

近年来, 受全球气候变化影响, 极端暴雨、强对流等灾害性天气频发、重发, 具有突发性强、不确定性大、叠加性强、破坏性大等特点, 严重威胁人民群众生命财产安全。2021年河南郑州市“7·20”特大暴雨造成重大人员伤亡和财产损失, 给人们敲响了警钟。

无锡市位于江苏省东南部, 地处长江三角洲江湖间走廊, 北临长江、南滨太湖, 境内地势低洼, 特定的地理位置和气候环境造成无锡市洪涝灾害频繁。长历时梅雨、短历时暴雨、强台风是造成地区洪涝灾害的主要原因, 如2015年、2016年梅雨均形成较大的洪涝灾害。

无锡市委市政府高度重视极端暴雨防范应对工作, 为应对类似郑州市“7·20”特大暴雨可能带来的灾害风险, 提前制定应对措施, 尽可能保护极端暴雨影响下的城市安全。2022年, 无锡市组织开展了城市极端暴雨洪涝灾害风

险评估及对策研究, 印发并实施《无锡市城市防范应对极端暴雨洪涝灾害工作指导意见》, 细化了161项应急性工作措施, 系统性安排了72项工程项目, 总投资399.6亿元。

2 模型构建及方案制定

2.1 模型构建

项目收集了高精度数字高程模型(DEM)、河湖水系、雨水管网及水利工程等大量基础数据, 构建考虑山区、城市产汇流等要素的水文模型及河网—管网、洪水演进水力学模型, 采用标准化接口耦合技术, 实现水文水动力一维、二维数学模型耦合。

为提高模型计算的精度, 采用多级嵌套的水文水动力耦合模型。太湖流域大模型, 按流域产汇流结果为中小模型提供计算边界条件; 武澄锡虞区中模型, 主要通过无锡市河网与沿江各枢纽工程开展区域调度模拟; 无锡市区1 294 km²河网、管网及水利工程精细化小模型, 采用降雨

收稿日期: 2023-07-07

第一作者信息: 张小稳, 男, 高级工程师, E-mail: zxwsm1@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3202604); 江苏省水利科技重大技术攻关项目(2020021、2021027); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y121012、Y123006)。

—产汇流—内涝积水多过程耦合形式,通过一维河网、管网与二维地面耦合方式模拟城市极端暴雨洪涝灾害过程,如图1所示。

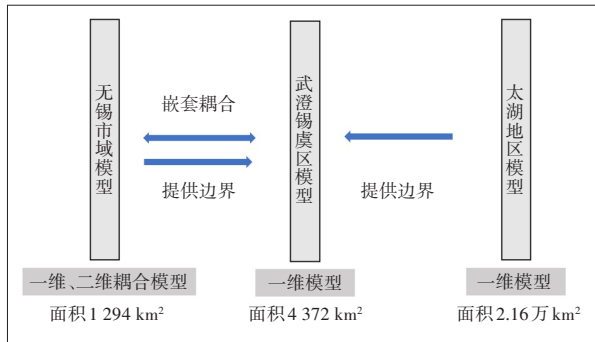


图1 多级耦合嵌套模型

本文构建流域、区域分级嵌套耦合与精细化城市河网模型至6级河道,包括3000余条1960 km河段、8125个河道断面和5000多个河网节点。管网模型包括50838个检查井、156.8 km的排水管渠。水利工程模型包括333.3 hm²以上所有圩区,共计560座排涝泵站和265座水闸工程。二维计算区域采用非结构化网格进行剖分,最大网格面积控制在0.05 km²以下。本文选择2106号台风“烟花”降雨过程进行参数率定,选择2016年梅雨过程和2017年短历时降雨过程进行验证,结果表明模型精度符合风险分析要求。

2.2 方案制定

郑州市“7·20”特大暴雨具有持续时间长、强降雨范围广、累积雨量大等特点,据统计,郑州市国家站最大1 h降雨量201.9 mm,1 d降雨量645.6 mm,3 d降雨量789.1 mm,其中1 h降雨量突破了我国大陆气象观测极值。根据无锡市历史洪水灾害资料,2016年梅雨期长达32 d,梅雨量达到常年的2.25倍,长江、太湖等外围水位偏高,属于相对不利情景;2017年9月24日全市遭受强降雨袭击,并出现历史最高水位,具备典型短历时暴雨特征;台风“烟花”带来的降雨量为近10年最大,具备典型台风雨特征。为准确模拟无锡市区遭遇郑州市“7·20”特大暴雨情景,将0.35倍、0.5倍、0.7倍、1.0倍郑州市降雨量与2016年、2017年、2021年实际水位过程组合,共制定12组分析方案,如表1所示。

表1 无锡市城市极端暴雨洪涝灾害风险评估分析方案

编号	情景	工况	降雨量/mm			水位边界
			1 h	24 h	72 h	
1		0.35倍	70.7	226.0	276.2	
2	长历时梅雨 (2016年)	0.5倍	100.8	327.8	394.5	2016年7月1—8日,长江沿程站点实测水位,运河水位和太湖水位
3		0.7倍	141.3	451.9	522.4	
4		1.0倍	201.9	645.6	789.1	
5		0.35倍	70.7	226.0	276.2	
6	短历时暴雨 (2017年)	0.5倍	100.8	327.8	394.5	2017年9月23—30日,长江沿程站点实测水位,运河水位和太湖水位
7		0.7倍	141.3	451.9	522.4	
8		1.0倍	201.9	645.6	789.1	
9		0.35倍	70.7	226.0	276.2	
10	台风雨 (2021年)	0.5倍	100.8	327.8	394.5	2021年7月25日至8月1日,长江沿程站点实测水位,运河水位和太湖水位
11		0.7倍	141.3	451.9	522.4	
12		1.0倍	201.9	645.6	789.1	

3 极端暴雨洪涝灾害风险评估

3.1 各工况对比结果分析

苏南运河无锡段为城市防洪的外围洪源,代表站为无锡(大)站,城市防洪大包围内部以无锡(南门)站为代表站。因此,选取无锡(大)站和无锡(南门)站为代表站,分析无锡市遭遇不同倍比郑州市“7·20”特大暴雨情景下的河道峰值水位,对比分析无锡市城区遭遇极端暴雨的应对能力及洪涝风险变化,结果如表2所示。

表2 各工况特征站点峰值水位

情景	工况	3 d降雨量/mm	峰值水位/m	
			无锡(大)站	无锡(南门)站
长历时梅雨 (2016年)	0.35倍	276.2	5.71	3.78
	0.5倍	394.5	6.04	4.81
	0.7倍	522.4	6.06	5.37
	1.0倍	789.1	6.10	5.70
短历时暴雨 (2017年)	0.35倍	276.2	5.73	3.89
	0.5倍	394.5	6.04	4.84
	0.7倍	522.4	6.06	5.39
	1.0倍	789.1	6.09	5.72
台风雨 (2021年)	0.35倍	276.2	5.57	3.87
	0.5倍	394.5	6.03	4.86
	0.7倍	522.4	6.05	5.39
	1.0倍	789.1	6.08	5.71

通过分析结果可以看出,在所有情景下各工况的无锡(大)水位均超过了2017年历史最高水位5.32 m,且遭遇1.0倍郑州市“7·20”特大暴雨的无锡(南门)站水位峰值达到5.70 m以上,两站的水位峰值已经超过了无锡运东大包

围内部大部分堤防的堤顶高程,河道漫溢、溃堤风险极高,人民生命财产安全受到极大威胁。

2016年发生太湖流域性特大洪水,最高洪水位达4.87 m(历史第2高),该情景为城市排水最不利的外围运行条件,从分析成果看,2016年无锡(大)站水位峰值最高,且退水过程最长,如图2所示,因此,无锡2016年遭遇1.0倍郑州市降雨量为最不利情景。

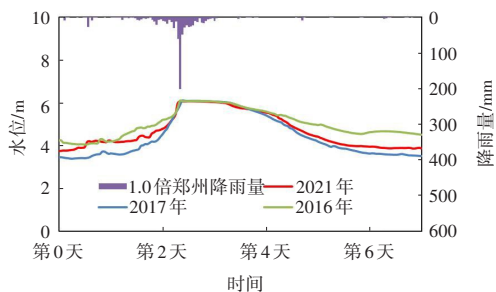


图2 1.0倍郑州雨量情景下无锡(大)站水位过程

郑州市“7·20”特大暴雨1 h降雨量最高达201.9 mm,突破我国大陆气象观测记录极值,仅凭无锡市现状工程防御能力无法应对。为进一步量化评估应对能力,假设无锡市全域堤防不出现漫溢、溃堤且所有闸泵工程稳定运行,采用一维模型计算2016年长历时梅雨情景下无锡(大)站的水位过程,如图3所示。可以看出,如果堤防不出现漫溢,无锡(大)站水位峰值高达7.80 m,但无锡市各骨干河道现状堤顶高程主要为6.00~6.50 m,无法达到这一标准,在遭遇郑州市“7·20”特大暴雨情景时必然会出现大范围的河道漫溢现象。

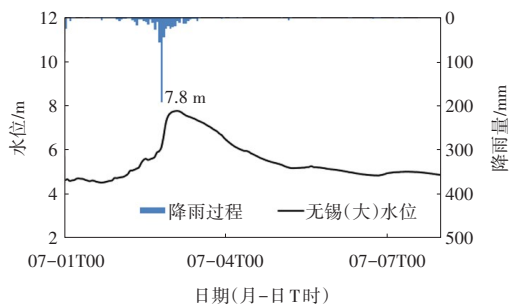


图3 2016年遭遇1.0倍郑州市“7·20”特大暴雨无锡(大)站水位过程

从工程能力来看,无锡市区洪水主要通过京杭大运河、环湖口门、望虞河西控线口门、沿江工程外排,如图4所示。通过模型分析,1.0倍郑州市“7·20”特大暴雨情况下无锡市区1 294 km²范围内总降雨量约10亿m³,在水利工程满负

荷运行的情况下,市区仍有超5亿m³涝水无法在短时间内排出,需要借助沿江枢纽工程外排。上述结果表明,现阶段水利工程能力无法应对郑州市“7·20”特大暴雨情景。

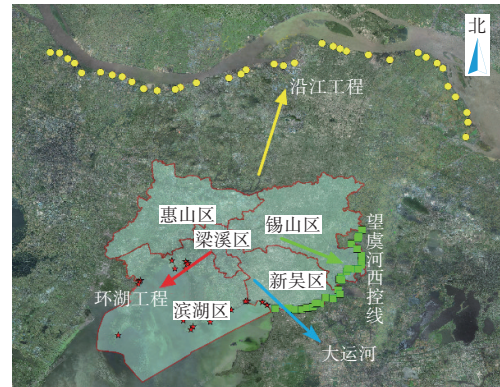


图4 无锡市区洪水出路示意图

3.2 风险等级划分标准

综合考虑现有学术研究成果、行业导则和淹没程度的直观展示,对不同淹没水深下的风险等级进行划分,充分参考淹没水深对行人安全的威胁程度及水利行业的图件编制标准,将极端暴雨淹没风险划分为5个等级(表3)。

表3 极端暴雨淹没风险等级划分标准

风险等级	淹没水深/m	风险程度
无风险	≤0.05	对生产、生活影响较小
低风险	0.05 ~ 0.30	出行受显著影响
中风险	0.30 ~ 0.60	儿童出行安全受到威胁
高风险	0.60 ~ 1.00	未成年人生命安全无法保障
极高风险	>1.00	所有人行动受到威胁

3.3 洪水风险特征分布

在2016年遭遇1.0倍郑州市“7·20”特大暴雨的最不利情景下对无锡市现状防洪排涝工程的应对能力及洪水风险特征分布特性进行重点评估,分析其洪涝风险,计算得到不同暴雨量级、各风险等级下无锡市区的淹没水深、淹没面积及其相较于市区面积占比,如表4所示。同时,从风险包络角度出发,绘制了最不利情况下无锡市遭遇1.0倍郑州市“7·20”特大暴雨市区淹没风险图,如图5所示。

结果表明,随着暴雨量级的增加,无锡市区淹没面积显著增长,在1.0倍郑州市“7·20”特大暴雨量级下,淹没面积751.71 km²,占市区面积58.09%;高风险区域面积115.28 km²,占市区面积8.91%。运东大包围内部因地势低洼,存在大面积的极高风险区;惠山区和锡山区也存在较大范围的极高风险区,主要分布在河道、湖荡周边;新吴区

表4 2016年不同倍比郑州市“7·20”特大暴雨情况下无锡市淹没风险统计

暴雨量级	风险等级	淹没面积/km ²	面积占比(%)
0.35倍	低风险	149.54	11.56
	中风险	16.94	1.31
	高风险	3.06	0.24
	极高风险	0.77	0.06
	合计	172.92	13.36
0.5倍	低风险	266.78	20.62
	中风险	105.02	8.12
	高风险	38.13	2.95
	极高风险	60.30	4.66
	合计	470.23	36.34
0.7倍	低风险	292.12	22.57
	中风险	137.07	10.59
	高风险	81.20	6.28
	极高风险	83.86	6.48
	合计	594.25	45.92
1.0倍	低风险	304.53	23.53
	中风险	173.42	13.40
	高风险	115.28	8.91
	极高风险	158.47	12.25
	合计	751.71	58.09

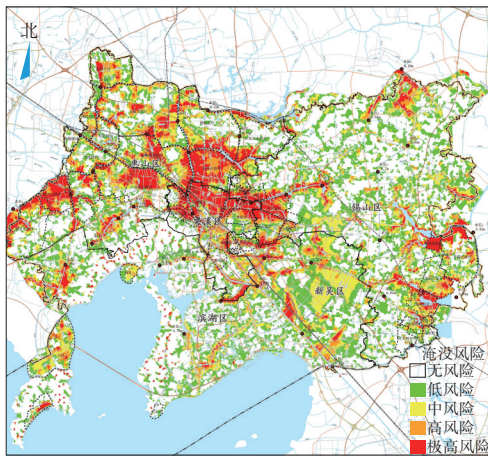


图5 无锡市2016年遭遇1.0倍郑州市“7·20”特大暴雨市区淹没风险图

以中低风险区为主,滨湖区因地势较高,风险最低,仅马山片受淹较为严重。根据统计结果,极高风险区主要分布在惠山区、梁溪区、锡山区、新吴区的21个镇(街道)。

3.4 风险隐患排查与台账建立

结合基础资料和模型计算结果,绘制了12组分析方案的淹没风险图,并根据最不利的梅雨年遭遇极端暴雨情景下的淹没风险分布,分析了城市空间对象洪涝灾害风险,并绘制了水利工程、城市生命线工程、重点保护对象3类共19张城市空间对象专题洪水风险图。

针对水利工程、城市生命线工程、重点保护对象3类18个对象,建立风险台账,包含189座水闸、235处堤防、53个地铁站和场段、640处电力设施、14处通信设施、30处燃气设施、4处自来水厂、11处隧道出入口、415个转移安置场所、10处人民防空工程、30处政府驻地、52个乙级以上医院、71所学校、4个忌水危化企业、18座污水处理厂、4座垃圾垃圾处理厂、453个重点企业。台账中包含受灾对象经纬度、周边地面平均高程、地面淹没水位、淹没水深、风险等级、风险点等风险要素信息,根据风险隐患台账,可以进一步筛选出存在风险的城市空间对象。

4 极端暴雨应对措施建议

4.1 完善极端暴雨应急预案

现阶段无锡市需要进一步修订完善极端暴雨应急预案,主要包括修订防汛防台应急预案方案、编制城市空间对象“一点一策”应急预案、制定人员转移避险方案、开展极端暴雨防御演练等方面内容。

为进一步修订完善防汛防台应急预案,需要建立健全“市一区一街道(镇)一社区(村)”4级包保责任体系,并完善预报预警机制,如将1h降雨预报纳入预警发布条件,优化预警发布与应急响应启动之间的协调性。同时,需要完善极端情况下的应急响应措施,明确停工、停业、停课、停运、停产等刚性约束条件和工作机制,完善城市严重内涝导致的“断路、断电、断网”等极端情况下的应急处置预案。

结合城市空间对象专题风险图及风险台账,明确需要编制极端暴雨应急预案的城市空间对象,包括重点水闸、泵站等水利工程,处于高风险区域的地铁、电力、通信、燃气、供水、交通路网等城市生命线工程及医院、学校、政府机关、机场、火车站等重点保护对象,“一点一策”编制一批专项应对预案,落实“挡、排、避、抢”措施。同时,根据极端暴雨洪涝淹没风险图和转移安置点分布图,制定人员转移避险方案,区、街道(镇)加强统筹协调,制定切实可行的转移安置方案,对需转移人员进行登记造册,明确包保责任,确定转移路线、交通工具、安置地点,落实保障措施,开展转移演练。

为提升极端暴雨应对能力,可采用桌面推演与现场实战相结合的方式,开展极端暴雨防御演练,细化完善不同等级应急响应各环节“防、避、抢、救”措施,增强部门地区协同作战、应急处突能力,做到全链条全要素实战化演练。

4.2 提升城市防洪排涝能力

郑州市“7·20”特大暴雨降水量相当于约1/5太湖水量,现有工程防御能力难以应对如此极端暴雨,因此,需要结合“十四五”规划和远景规划,提高流域、区域防洪标准,统筹考虑城市防洪、排涝、排水衔接,加快水利工程、排水管网工程和海绵城市建设,优化城市防洪工程与城市立体空间利用布局,全面提升市区排涝标准,增强骨干河道行洪能力,进一步提升城市应对短历时强降雨与极端暴雨的能力。

市区内涝防治设计重按50年一遇标准,地铁及地下商场相关地下通道、保障性大型基础设施(水、电、气)等内涝危害大、影响面广的重要设施适当提高内涝设计重现期。提升排水管网设计标准,逐步提升至5年一遇以上。加强管网健康状况排查,保障遭遇极端暴雨时排水畅通。大包围内中心老城、太湖新城、惠山新城、锡东新城、马圩等重点片区,提升河道排涝标准至20年一遇以上。

根据水闸工程风险清单,全面排查市区范围内闸站口门自身风险隐患,加高闸门门顶高程、提升泵房封闭挡水能力,必要时进行改建。针对重要枢纽,特别是布设在地下的工程设备,建设永久或临时围挡工程;针对中高风险闸站,开展闸顶永久或临时加高,增强口门工程自身防洪能力。

全面排查地下车库、人防设施、地下商场、文体设施、地铁站、隧道、下立交、地下管线等地下空间分布,摸清极端暴雨风险隐患,针对风险较高的地下空间,增设挡水板、临时围挡、防汛沙袋等设施,保障地下空间人员生命安全和供电、排水等重要设施稳定运行。制定人员避险撤离方案,落实组织体系和责任体系。

在城市规划方面,依法依规将水利部门划定的洪涝风险图纳入控制性总规,划定河湖蓝线,落实蓝线管理制度,保护河湖空间。对于已经圈占的河湖水面,应当在符合国土空间规划和防洪规划的前提下依法依规有序实施退地、平圩还湖(河)或合理调整利用,增加调蓄能力。因地制宜开展圩区及低洼易淹区改造,填高地面,降低防洪排涝治理成本。开展城市地下空间综合利用、排水系统改造升级、深邃工程可行性研究。

4.3 加强极端暴雨应急处置能力

为保障极端暴雨下的城市安全及人民生命财产安全,需要进一步加强极端暴雨应急处置能力,丰富防汛应急物资储备,提升应急救援救助能力。优化应急物资储备布局、

加强防汛抢险物资仓库建设、大型防汛排涝物资设备储备,强化应急资源快速调配能力。提升综合性消防救援队伍抢险施救能力,加强专业应急队伍建设,发挥基层救援队伍靠前早期处置优势,整合社会应急力量。

4.4 提高公众洪涝风险意识和避险能力

加强宣传科普教育,在人口密集区、流动区,如小区、广场、公园和地铁,增设水位标识物,宣传常水位、洪水位、历史最高水位、可能受淹水位等特征水位,发放洪涝避险自救等科普宣传海报、洪涝风险图标识提示等,增强公众应对洪涝风险的认知,提升公众防御与自救能力。

4.5 健全智慧防汛体系

加快推进防汛防台秒响应和城市内涝风险应用场景建设,加强淹没风险区易涝区域、水利闸泵站、排水主干管网、下立交、隧道涵洞、地铁等重要部位的动态监测和预警能力。落实预报、预警、预演、预案“四预”措施,强化灾害风险感知、预报预警、风险研判、调度处置、响应联动等关键环节,实现“河湖防洪和城市排涝联调联动和统筹管控”。根据洪涝风险特征与空间分布,针对水利工程、重点保护对象,考虑极端暴雨造成的洪涝巨灾,推动洪水保险整体解决方案,分担转移风险,提升城市遭遇洪涝灾害的韧性能力。

参考文献

- [1] 刘曙光,郑伟强,周正正,等.极端暴雨下城市地下空间洪涝风险及灾害防控[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(2):22-29,81.
- [2] 张金萍,张朝阳,左其亭.极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(2):30-37.
- [3] 曹雪健,戚友存,李梦迪,等.极端暴雨威胁下的城市内涝风险预警系统研究[J].大气科学,2022,46(4):953-964.
- [4] 陈文龙,杨芳,宋利祥,等.高密度城市暴雨洪涝防御对策——郑州“7·20”特大暴雨启示[J].中国水利,2021(15):18-20,23.
- [5] 徐宗学,叶陈雷.城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J].水利学报,2021,52(4):381-392.
- [6] 胡孜军,傅菁菁,袁李豪,等.基于一、二维耦合模型的某湿地公园水网规划与水力优化应用[J].水电能源科学,2020,38(4):91-94.
- [7] 易嘉伟,王楠,千家乐,等.基于大数据的极端暴雨事件下城市道路交通及人群活动时空响应[J].地理学报,2020,75(3):497-508.
- [8] 李梅英,庞国楹,夏爱生,等.极端暴雨灾害下城市内涝演化机理[J].军事交通学院学报,2014,16(3):86-89.

Study on risk assessment and countermeasures of urban extreme rainstorm flood disaster

ZHANG Xiaowen¹, LIU Guoqing^{2,3}, CHEN Guangyu¹, XU Junhao¹, YANG Fan^{2,3}, HUANG Xuan^{2,3}

(1. Wuxi Flood and Drought Control Headquarters Office, Wuxi 214021; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029;

3. Key Laboratory of Taihu Basin Water Security Management, Nanjing 210029)

Abstract: Affected by global climate change, urban flood disasters occur frequently. The "July 20" extremely heavy rainstorm in Zhengzhou has sounded the alarm bell for urban flood disaster prevention. In order to fully understand the risk situation of Wuxi city encountering rainstorm similar to Zhengzhou's "July 20", a 1D-2D coupled analysis model of extreme rainstorm and flooding in Wuxi city was constructed, and the historical flood characteristics of Meiyu(plum rains), typhoon and short-duration heavy rainfall in Wuxi City were comprehensively considered. A combination of 0.35 times, 0.5 times, 0.7 times and 1.0 times of Zhengzhou's "July 20" rainstorm magnitude was proposed. Twelve flood analysis scenarios were formulated to assess the risk of urban extreme rainstorms and floods, and to put forward countermeasures. The research results can provide scientific decision-making support for extreme rainstorm emergency response, coordinated rescue and disaster relief, urban planning and other practical work.

Keywords: extreme rainstorm; flood analysis model; risk assessment; countermeasure study; Wuxi City

责任编辑 姚力玮

(上接第6页)

Application of multi-scale hierarchical river network model in Taihu Lake area of Jiangsu Province

WU Shiqiang, LI Dongzhou, FAN Ziwu, LIU Guoqing, WU Jingxiu, YANG Fan, HUANG Xuan

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029;

2. Key Laboratory of Taihu Basin Water Resources Research and Management of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029)

Abstract: Taihu Lake area of Jiangsu Province is located in the Yangtze River Delta, with a dense river network, high urbanization rate, numerous water projects and complex regulation, obvious characteristics of river basins, regions and polder areas, and prominent problems such as regional flood, urban flood and drainage, and polder area drainage. Due to the inherent complexity of the hydrodynamic simulation model of plain river network, the hydrological-hydrodynamic joint simulation of large plain river network is usually difficult to meet the requirements of dynamic update of model data and multi-scale hierarchical simulation. This paper uses the idea of multi-scale intelligent model construction to carry out the construction and simulation of multi-scale intelligent hierarchical model for flooding in Taihu Lake area, and the results show that the multi-scale model can provide rapid simulation and accurate decision-making for flood simulation analysis in Taihu Lake area of Jiangsu Province, and strongly support flood scheduling in Taihu Lake area of Jiangsu Province.

Keywords: multi-scale classification; river network model; flood simulation; The Taihu Lake Region of Jiangsu Province

责任编辑 姚力玮