

卢柏树,黄国如,欧阳明宇. 基于情景模拟的滨海平原河网区复合洪涝淹没特征分析与风险评估[J]. 人民珠江, DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

基于情景模拟的滨海平原河网区复合洪涝淹没特征分析与风险评估

卢柏树¹,黄国如^{1,2,3},欧阳明宇¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院,广东 广州 510640;2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室,广东 广州 510640;3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心,广东 广州 510640)

摘要:滨海地区洪涝致灾因素多样,形成机制复杂。以广东省前山河流域为研究对象,构建了一二维耦合水动力模型,并通过径流系数和历史涝区对模型进行验证,结果表明模型精度满足研究需求。在此基础上,针对8种典型雨潮遭遇组合情景开展数值模拟,系统分析并揭示了雨潮遭遇条件下滨海平原河网区的洪水演变特征。研究表明:随着降雨与潮位重现期的增大,前山河流域洪水淹没总面积及各水深等级淹没面积均持续增加,淹没区域主要集中于坦洲镇、三乡镇及洪湾涌出水口周边;洪水风险区以低风险和高风险等级为主,且随着雨潮强度增加,各等级风险区面积显著扩展,其中海水倒灌对高风险区的扩展有显著放大作用。

关键词:情景模拟;水动力模型;复合型洪涝;风险评估;平原河网

中图分类号:TV8 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-11

复合型洪涝通常指由2种及以上洪水驱动因素组合作用所引发的洪涝灾害^[1],其多重致灾因素之间的叠加与放大效应使灾害影响显著增强^[2-3]。三角洲地区经济活动密集、人口高度集聚,是复合型洪涝灾害的高发区域^[4]。在未来气候变化与人口流动等因素共同作用下,上海、深圳、广州等城市面临的复合型洪涝灾害风险呈现持续加剧趋势^[5-7]。此外,由于致灾因子之间普遍存在依赖关系,复合型洪水事件往往造成的灾害损失显著高于单一致灾因素主导的洪水事件^[8-9]。因此,系统研究雨潮遭遇条件下滨海地区洪水演变特征,对科学认识复合型洪涝机理及提升防洪减灾能力具有重要意义。

近年来,沿海地区复合型洪涝研究日益受到关注,数值模拟方法精度高,稳定性强,已成为当前主要的研究手段之一^[10]。Shan等^[11]基于FloodMap 2D

模型模拟了复合型洪涝淹没情景,并构建综合评估框架,系统评估了灰-绿混合防洪措施在上海市未来防洪体系中的减灾效果。Liu等^[12]以广州市为研究对象,构建了一二维耦合水动力模型,定量分析了降雨与潮位对沿海城市复合型洪涝形成的相对贡献。郝建浩等^[13]基于MIKE模型模拟了感潮河网弥河流域在风暴潮条件下洪水漫溢与溃决过程。徐奎等^[14]利用PCSWMM构建海口市主城区一二维耦合模型,分析了复合型内涝形成机制及相应的减灾措施。贺芳芳等^[15]基于InfoWorks ICM平台搭建了上海地区复合洪涝灾害模型,模拟了“海葵”和“菲特”两场台风过程下的复合型洪涝情景。尽管当前复合型洪涝的研究已有一定进展,但滨海平原河网区地理条件复杂^[16],仍需进一步深入研究。

基于上述分析,本文以广东省前山河流域为研

基金项目:国家自然科学基金项目(52279015);亚热带建筑与城市科学全国重点实验室自主研究课题(2023ZA01)

收稿日期:2026-02-11 **修回日期:**2026-03-18

作者简介:卢柏树(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文学水资源方向的研究。

通信作者:黄国如(1969—),男,教授,主要从事水文学及水资源的研究。

联系作者:致信rmzj@pearlwater.gov.cn,由期刊转接。

究对象,依托DHI MIKE软件平台构建一二维耦合水文水动力模型,对8种典型雨潮遭遇情景下的洪水演进过程进行数值模拟,并对不同情景下的淹没特征及洪水风险区变化规律开展系统分析。研究结果可为前山河流域洪水风险评估与防洪排涝规划提供科学依据,同时对其他类似滨海平原河网流域的防洪减灾研究具有一定的参考价值。

1 研究区概况和数据来源

前山河流域位于广东省东南部,横跨中山市与珠海市两市,流域范围主要包括中山市坦洲镇、三乡镇、五桂山镇及珠海市香洲区。研究区西南侧毗邻磨刀门水道,沿岸建有海堤工程,南北向长度约29 km,东西向宽度约20 km,总面积约337 km²,地处亚热带季风气候区,多年平均降雨量约2 065 mm,汛期降雨强度大、暴雨集中,且频繁受台风影响,雨潮叠加效应显著,易诱发复合型洪涝灾害。前山河流域地势总体平缓,河网密布,属于典型的滨海平原河网区,其径流最终经7个主要出水口排入外江。模型构建所需的DEM、堤防、河网及河道断面等基础数据均来源于当地水文主管部门;土地利用数据基于遥感影像,采用监督分类方法分类获取。

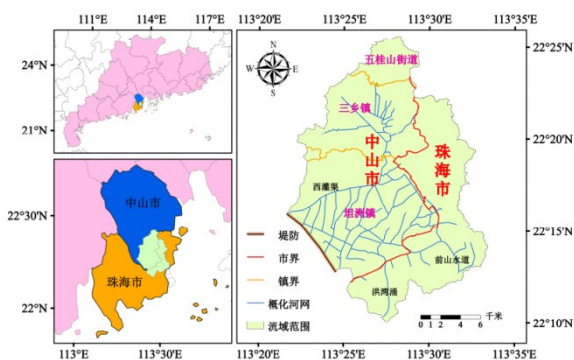


图1 前山河流域概况

Fig. 1 Overview of the Qianshan River basin

2 典型雨潮遭遇组合情景

条件风险概率^[17]是指在联合分布的基础上,给定某一变量达到或超过特定重现期阈值时,另一变量达到或超过指定重现期标准发生的概率。本文



图2 数字高程模型

Fig. 2 DEM

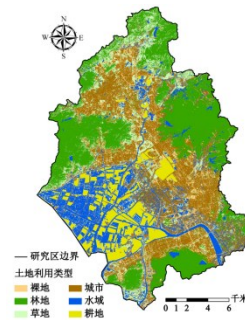


图3 土地利用分布

Fig. 3 Distribution of different land-use types

基于前山河流域长序列雨潮资料,并参照相关文献方法^[18],计算了当年最大潮位或年最大24 h降雨量达到或超过10、20、50、100 a重现期设计标准时,遭遇重现期不低于100年的相应24 h降雨或潮位的条件风险概率,结果见表1。相关计算过程不再赘述。

由表1可知,当年最大潮位或年最大24 h降雨量达到或超过10、20、50、100 a重现期标准时,遭遇重现期不低于100 a的相应24 h降雨量或潮位的条件概率均低于5%,发生概率较小。此外,基于长序列资料统计结果,当前山河流域发生10年一遇及以上年最大潮位或年最大24 h降雨时,相应24 h降雨量和潮位的平均值分别为87.0 mm和1.76 m,均低于100 a重现期对应的设计值。因此,本文选取重现期为10、20、50、100 a的年最大潮位与100 a重现期对应的24 h降雨组合作为以潮位为主导的典型雨潮遭遇情景,用于分析潮位变化对滨海平原河网区洪涝过程的影响;同时,选取重现期为10、20、50、100 a的年最大24 h降雨量与100 a重现期对应潮位

表1 条件风险概率

Tab. 1 Conditional risk probability

设计潮位/m	设计潮位与24 h降雨的组合			条件风险概 率/%	设计降雨/ mm	设计24 h降雨与潮位组合			条件风险概 率/%
	重现期/a	降雨/mm	重现期/a			重现期/a	潮位/m	重现期/a	
2.97	10	227.7	100	3.634	293.7	10	2.63	100	1.412
3.27	20	227.7	100	4.030	334.5	20	2.63	100	1.434
3.72	50	227.7	100	4.295	393.9	50	2.63	100	1.453
4.10	100	227.7	100	4.388	444.4	100	2.63	100	1.454

组合作为以降雨为主导的典型雨潮遭遇情景,用于探讨降雨变化对区域洪涝响应的影响。洪水过程

与潮位过程采取最不利的峰碰峰形式。典型雨潮遭遇组合及其参数取值见表2。

表2 典型雨潮遭遇组合情景

Tab. 2 Typical rain and tide encounter combination scenarios

类型	方案简称	情景组合	潮位/m	24 h降雨/mm
以潮位为主导	T1	10a一遇年最大潮位+100a一遇相应24h降雨	2.97	227.7
	T2	20a一遇年最大潮位+100a一遇相应24h降雨	3.27	227.7
	T3	50a一遇年最大潮位+100a一遇相应24h降雨	3.72	227.7
	T4	100a一遇年最大潮位+100a一遇相应24h降雨	4.10	227.7
以降雨为主导	R1	10a一遇年最大24h降雨+100a一遇相应潮位	2.63	293.7
	R2	20a一遇年最大24h降雨+100a一遇相应潮位	2.63	334.5
	R3	50a一遇年最大24h降雨+100a一遇相应潮位	2.63	393.9
	R4	100a一遇年最大24h降雨+100a一遇相应潮位	2.63	444.4

通过查阅《广东省暴雨径流查算图表》,获取前山河流域不同重现期的24 h典型设计雨型,并依据相应重现期的设计雨型对设计降雨量进行时段分配,从而构建各重现期条件下的24 h暴雨过程,其结果见图4。设计潮位过程线采用同倍比法进行推求^[19],以最高潮位作为控制要素,推求其余各时刻的潮位值,进而得到不同重现期条件下的设计潮位过程线,结果见图5。

3 模型构建与验证

3.1 基于MIKE的水文水动力模型构建

本文以前山河流域作为研究范围,基于MIKE软件平台构建前山河流域一二维耦合水文水动力模型,模型构建主要包括一维河道水动力模型、二维地表水动力模型以及两者的耦合。一维河道模

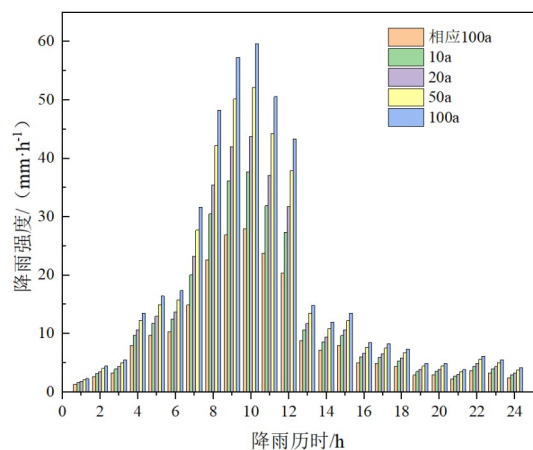


图4 不同重现期下的设计降雨过程

Fig. 4 Design rainfall hyetographs under different return periods

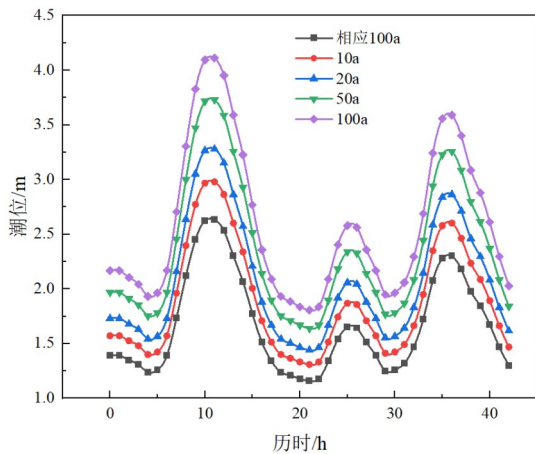


图5 不同重现期下的设计潮位过程线

Fig. 5 Design tidal level hydrographs under different return periods

型共建立河道62条,设置断面766个,并在7个河道出水口布设挡潮闸,见图6。闸门调度采用基于闸内外水位差的控制方式:当内河水位低于外江潮位时关闭闸门,反之,则打开闸门。在降雨径流模拟方面,本文采用降雨径流(Rainfall - Runoff)模块中的Urban模型,对不同雨潮遭遇组合条件下的径流过程进行模拟计算。二维地表水动力模型用于模拟流域地表水流运动过程,在建模过程中将一维河道范围设置为空白区,随后采用三角形非结构化网格对研究区进行网格划分,并在海堤位置设置相应的堤防。随后,基于MIKE FLOOD平台实现一维河道模型与二维地表模型的双向耦合,通过侧向连接方式将河道左右岸与二维地表进行耦合,实现河道与地表之间的水量交换,最终得到前山河流域一二维耦合水文水动力模型,见图7。

3.2 模型率定与验证

参考相关文献^[20]对模型参数进行初步设置,由于研究区域缺乏实测降雨及淹没观测资料,因此本文从径流系数和历史涝区对比两个方面对模型进行定性验证^[20-21]。计算结果表明,在设定的8种雨潮遭遇情景下,前山河流域综合径流系数介于0.45~0.46,且随24h降雨量增大而逐渐增大,整体处于GB50014—2021《室外排水设计标准》推荐的城镇较为密集区的取值范围在0.45~0.60,这表明模型

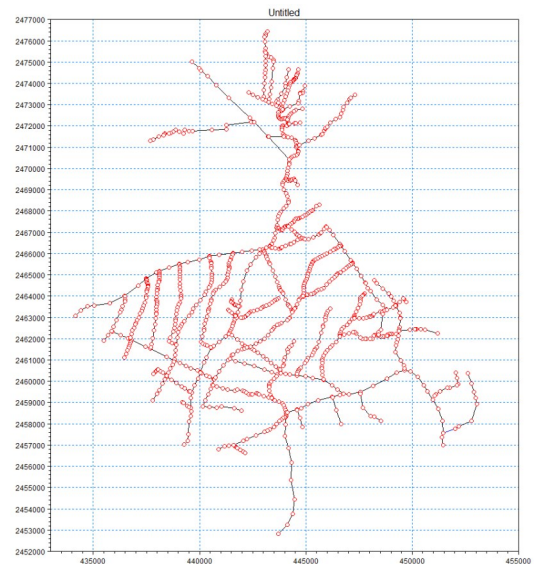


图6 MIKE 11河道概化示意

Fig. 6 Schematic diagram of the river channel generalization in the MIKE 11 model

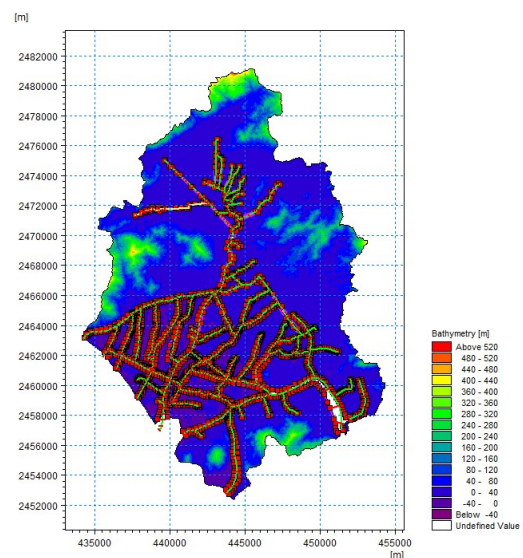


图7 一二维耦合水文水动力模型

Fig. 7 One-dimensional and two-dimensional hydrological and hydrodynamic coupling model

参数设置合理,能够较好反映流域水文特征。进一步选取潮位最大的T4情景和24h降雨量最大的R4情景,将模拟得到的最大淹没范围与历史涝区进行对比,见图8。结果显示,两者在空间分布上具有较好的一致性,说明模型精度较高,模拟结果可供参考。

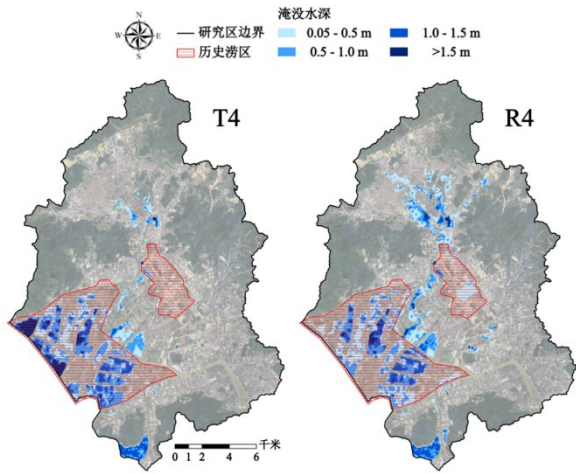


图8 模拟结果与历史涝区对比

Fig. 8 Comparison of the simulation results with historical flood-prone areas

4 结果分析

4.1 淹没范围及水深分析

基于前文构建并验证的一二维耦合水文水动力模型,本文对8种典型雨潮遭遇组合情景开展了数值模拟计算,随后对模型输出结果进行系统整理与统计分析,绘制了研究区的最大淹没水深空间分布图,见图9、10。在此基础上,为定量刻画不同雨潮遭遇条件下前山河流域最大淹没水深的变化情况,统计了不同最大淹没水深阈值区间对应的淹没面积及增长率,见表3、4。

结果表明,在4种以潮位为主导的情景下,研究区淹没区域主要分布于三乡镇、坦洲镇及洪湾涌出水口周边。随着潮位重现期的增大,淹没范围呈持续扩展趋势,新增淹没区域主要集中于靠近出水口的坦洲镇,而距出水口较远的三乡镇淹没格局变化不明显。当潮位重现期增大至50 a和100 a时,受海水倒灌影响,坦洲镇淹没范围显著扩大;在100 a情景下,磨刀门水道沿岸出现大范围深水淹没现象。从定量结果来看,随着潮位重现期从10 a增加至20、50、100 a,不同淹没水深面积及总面积均呈现明显的增加趋势,总淹没面积由15.47 km²增加至17.48、18.89、32.60 km²,对应增幅分别为12.99%、21.46%、110.73%。其中,高水深区(大于1.5 m)淹

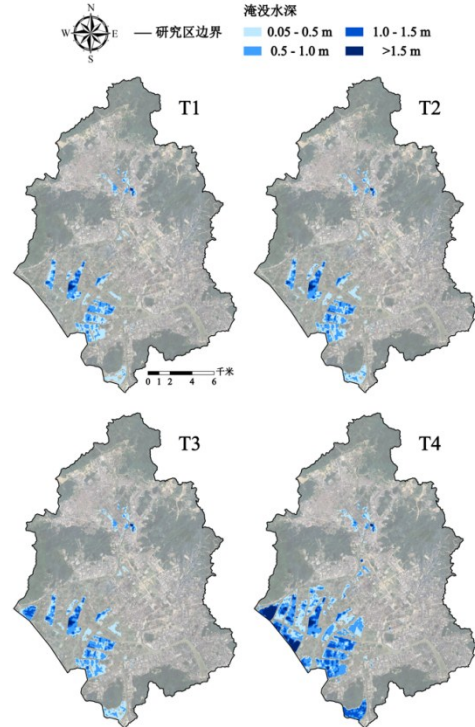


图9 以潮位为主导情景下最大淹没水深空间分布
Fig. 9 Spatial distribution of maximum inundation depth under Tide-Dominated scenarios

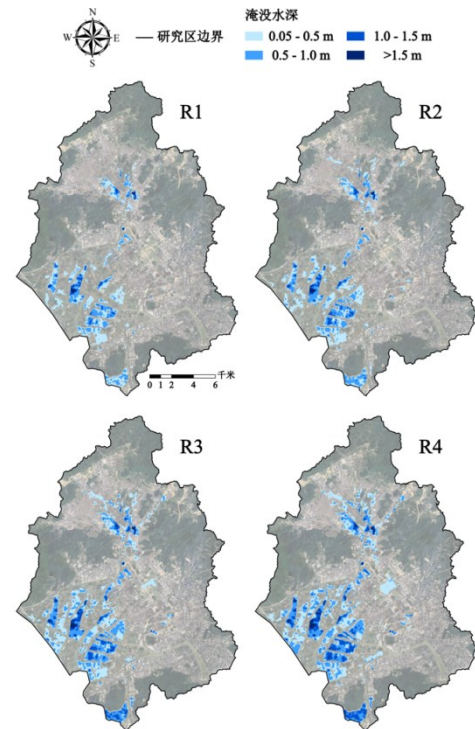


图10 以降雨为主导情景下最大淹没水深空间分布

表3 以潮位为主导情景下不同最大淹没水深等级面积统计

Tab. 3 Area statistics of different maximum inundation depth classes under Tide-Dominated scenarios

情景	面积/km ²				总和
	0.05~0.5 m	0.5~1.0 m	1.0~1.5 m	>1.5 m	
T1	8.75	5.30	1.17	0.25	15.47
T2	9.15	6.53	1.50	0.30	17.48
T3	9.42	7.08	1.98	0.31	18.79
T4	10.86	12.93	6.22	2.59	32.60
情景	增长率/%				总和
	0.05~0.5 m	0.5~1.0 m	1.0~1.5 m	>1.5 m	
T1	基准	基准	基准	基准	基准
T2	4.57	23.21	28.21	20.00	12.99
T3	7.66	33.58	69.23	24.00	21.46
T4	24.11	143.96	431.62	936.00	110.73

表4 以降雨为主导情景下不同最大淹没水深等级面积统计

Tab. 4 Area Statistics of different maximum inundation depth classes under Rainfall-Dominated scenarios

情景	面积/km ²				总和
	0.05~0.5 m	0.5~1.0 m	1.0~1.5 m	>1.5 m	
R1	12.56	6.83	1.42	0.27	21.07
R2	14.93	9.38	2.13	0.33	26.77
R3	17.38	12.41	4.03	0.61	34.43
R4	19.63	14.31	6.05	0.92	40.90
情景	增长率(%)				总和
	0.05~0.5 m	0.5~1.0 m	1.0~1.5 m	>1.5 m	
R1	基准	基准	基准	基准	基准
R2	18.87	37.35	50.22	21.99	27.01
R3	38.40	81.63	184.85	127.51	63.39
R4	56.32	109.42	327.34	240.96	94.10

没面积增长极为显著,增长率分别为20.00%、24.00%、936.00%;当潮位重现期从50 a增加至100 a时,该等级淹没面积由0.31 km²急剧增加至2.59

km²。上述结果表明,潮位顶托与海水倒灌的共同作用将显著加剧滨海地区,尤其是堤防周边及河道下游区域的淹没范围与淹没程度。

在四种以降雨为主导的情景下,研究区淹没区域主要分布于三乡镇、坦洲镇及洪湾涌出水口周边,空间格局与低重现期情景基本一致。随着降雨重现期的增大,上述区域的淹没范围均呈现不同程度的扩展,其中坦洲镇和三乡镇的扩展特征尤为显著。定量结果显示,总淹没面积随降雨重现期增加呈持续增长趋势。相较于10年一遇情景,20、50、100 a情景下总淹没面积增幅分别为27.01%、63.39%、94.10%。不同水深等级淹没面积亦同步增加,其中低水深区(0.05~0.50 m)面积在各情景下均占主导地位,是研究区淹没格局的主要组成部分;而中高水深区(1.0~1.5 m)面积对降雨增强最为敏感,其面积增幅分别达到50.22%、184.85%、327.34%,表明在强降雨条件下,流域淹没程度持续加深,洪涝风险显著加剧。

4.2 风险区域面积分析

洪水危险性分析能够有效表征洪水灾害的强度与影响程度,是降低灾害损失和减轻灾害影响的重要手段^[22]。洪水危险性评价是开展风险分析的基础^[23],因此有必要对前山河流域的洪水淹没区域开展系统的洪水危险性评价与分级,为洪水风险管理及应急避险措施的制定提供科学依据。本文依据《城市防洪应急预案编制导则》(SL754 - 2017),选取淹没水深(h)、流速(v)及其乘积(hv)作为危险性评价指标,将受淹区域的洪水危险性划分为低、中、高三个等级,以表征洪水对人群行动的影响^[24, 25],其具体分级标准见图11。

在8种典型雨潮遭遇组合情景下,依据洪水危险性分级与划分标准,对洪水淹没模拟结果进行风险等级划分,并绘制相应的洪水风险分布图,见图12、13。在此基础上,统计分析不同风险等级的区域面积及增长率,见表5、6。

结果表明,在4种以潮位为主导的情景下,前山河流域洪水风险等级整体以低风险和高风险为主,风险区主要分布于坦洲镇、三乡镇及洪湾涌出水口

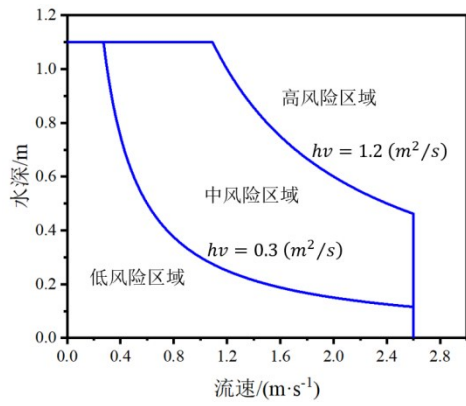


图 11 洪水危险等级划分标准

Fig. 11 Classification criteria for flood hazard levels

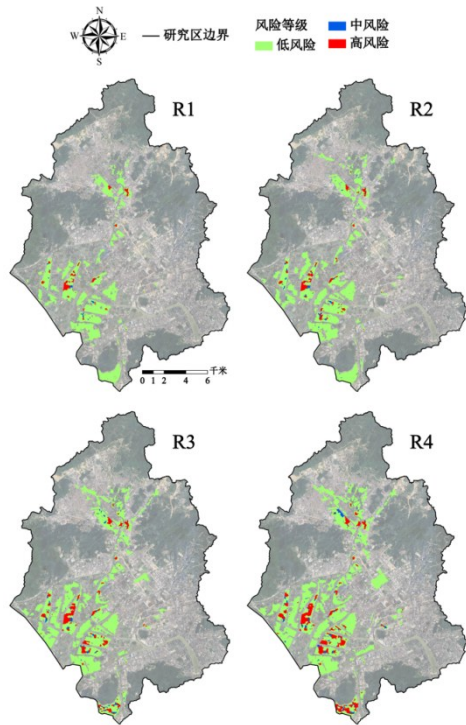


图 12 以潮位为主导情景下风险区域空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of risk areas under Tide-Dominated scenarios

周边,其中高风险区主要集中于坦洲镇。随着潮位重现期的增大,流域洪水风险区总体呈现持续扩展的趋势,新增风险区主要位于坦洲镇区域。尤其当潮位重现期由 50 a 增至 100 a 时,在海水倒灌作用增强的影响下,洪水风险区范围显著扩大,其中高风险区的扩展最为明显。定量统计结果显示,随着潮位重现期从 10 a 增加至 20、50、100 a,流域洪水风险

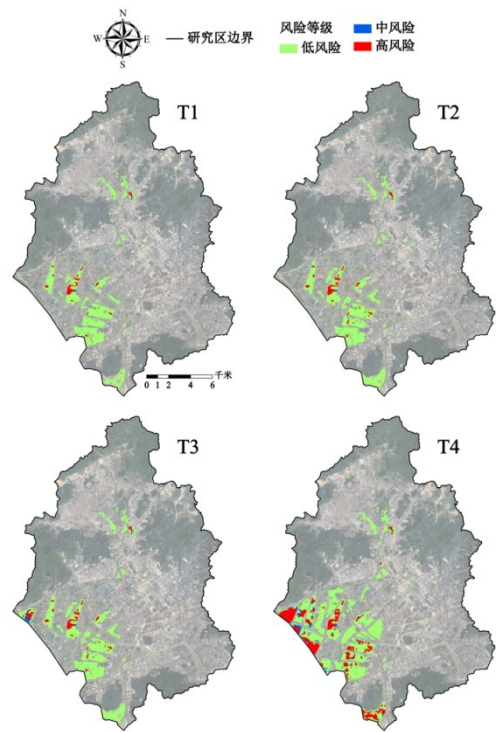


图 13 以降雨为主导情景下风险区域空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of risk areas under Rainfall-Dominated scenarios

表 5 以潮位为主导情景下不同风险等级区域面积统计
Tab. 5 Area statistics of different risk level zones under Tide-Dominated scenarios

情景	面积/km ²			总和
	低风险	中风险	高风险	
T1	15.24	0.07	0.98	16.29
T2	16.96	0.09	1.24	18.29
T3	17.69	0.33	1.55	19.57
T4	25.61	1.14	6.70	33.46
情景	增长率/%			总和
	低风险	中风险	高风险	
T1	基准	基准	基准	基准
T2	11.29	22.24	27.05	12.29
T3	16.09	371.89	58.58	20.19
T4	68.09	1513.70	585.00	105.44

区域总面积由 16.29 km²分别增加至 18.29、19.57、33.49 km²;其中,高风险区域面积由 0.98 km²增加至 1.24、1.55、6.70 km²,对应增长率分别为

表6 以降雨为主导情景下不同风险等级区域面积统计

Tab. 6 Area statistics of different risk level zones under

Rainfall-Dominated scenarios

情景	面积/km ²			总和
	低风险	中风险	高风险	
R1	20.89	0.22	1.14	22.24
R2	25.99	0.49	1.64	28.12
R3	31.97	0.82	3.22	36.00
R4	36.64	1.16	4.96	42.75
情景	增长率/%			总和
	低风险	中风险	高风险	
R1	基准	基准	基准	基准
R2	24.45	118.22	44.11	26.40
R3	53.06	265.21	183.50	61.85
R4	75.41	415.43	337.04	92.19

27.05%、58.58%、585.00%。上述结果表明,海水倒灌对滨海平原河网区洪水风险具有显著放大效应,尤其会导致高风险区域快速扩张,在未来防洪减灾与工程规划中,应充分考虑海水倒灌影响,加强堤防工程的维护与防洪标准提升。

在4种以降雨为主导的情景下,前山河流域洪水风险等级以低风险区占比最高,其次为高风险区,风险区主要分布于坦洲镇、三乡镇及洪湾涌出水口周边区域。随着降雨重现期的增大,流域洪水风险区范围持续扩展,新增风险区主要集中于坦洲镇和三乡镇,其中新增高风险区主要分布于坦洲镇。定量统计结果表明,随着降雨重现期的增加,各风险等级区域面积均呈现扩展趋势,其中高风险区域面积增长显著。当降雨重现期从10 a增加至20、50、100 a时,高风险区域面积由1.14 km²分别增加至1.64、3.22、4.96 km²,对应增长率分别为44.11%、183.50%、337.04%。上述结果表明,随着降雨强度的增强,流域整体洪水风险显著上升,洪涝影响范围不断向周边区域扩展,呈现出明显的空间扩散特征。

5 结论

本文基于研究区DEM、土地利用类型等基础数据,构建了前山河流域一二维耦合水文水动力模型。在对模型进行合理性与可靠性验证的基础上,针对8种典型雨潮遭遇情景开展数值模拟计算,系统分析了滨海平原河网区在不同雨潮组合条件下的淹没特征和风险区域变化规律,主要结论如下。

a)基于DHI MIKE软件平台构建了前山河流域一二维水文水动力模型,并从径流系数和历史涝区两个方面对模型进行验证。结果表明,该模型可以较好反映研究区的水文响应和积涝特征,具有较高的精度和可靠性。

b)基于8种典型雨潮遭遇组合情景对前山河流域洪水淹没特征进行分析,总体来看,随着降雨和潮位重现期的增大,滨海地区淹没总面积及不同等级水深区间的淹没面积均呈持续增长趋势,且淹没区域主要集中于坦洲镇、三乡镇及洪湾涌出水口周边区域。在潮位主导情景下,相较于10 a重现期,20、50、100 a情景下总淹没面积分别增长了12.99%、21.46%、110.73%。;而在降雨主导情景下,总淹没面积分别增长了27.01%、63.39%、94.10%。

c)基于数值模拟结果,对8种雨潮遭遇组合情景下前山河流域洪水风险等级进行划分。分析结果显示,在各雨潮遭遇情景中,风险区以低风险和高风险等级为主,在空间上主要分布于坦洲镇、三乡镇及洪湾涌出水口周边区域,同时随着降雨与潮位重现期的增大,各等级风险区面积均呈扩大趋势。在潮位主导情景下,相较于10 a重现期,20、50、100 a情景下高风险区域面积分别增长了27.05%、58.58%、585.00%,海水倒灌对高风险区域扩张具有显著放大效应;而在降雨主导情景下,高风险区域面积分别增长了44.11%、183.50%、337.04%。

参考文献:

- [1] Green J, Haigh I D, Quinn N, et al. Review article: A comprehensive review of compound flooding literature with a focus on coastal and estuarine regions [J]. Natural Hazards and Earth

- System Sciences, 2025, 25(2): 747-816.
- [2] 许瀚卿, 谭金凯, 李梦雅, 等. 基于Copula函数的沿海城市雨潮复合灾害风险研究 [J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 40-48.
Xun Hanqing, Qin Jinkai, Li Mengya, et al. Compound flood risk of rainfall and storm surge in coastal cities as assessed by Copula formal [J]. Journal of Nature Disasters, 2022, 31(1):40-48. (in Chinese)
- [3] 周子滢, 杨赛霓, 刘晓燕, 等. 基于C-Vine Copula函数的台风灾害链“风-雨-潮”联合概率分布研究 [J]. 热带地理, 2024, 44(6): 1036-1046.
Zhou Ziying, Yang Saini, Liu Xiaoyan, et al. Joint probability distribution of typhoon disaster chain "strong Wind-Rainstorm-Storm surge" based on C-Vine copula function [J]. Tropical Geography, 2024, 44(6): 1036-46. (in Chinese)
- [4] Wu Hanxing, Zhang Min, He Yi, et al. Scenario-based flood adaptation of a fast-developing delta city: Modeling the extreme compound flood adaptations for shanghai [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2025, 117: 105207.
- [5] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳. 变化环境下我国典型特大城市洪涝灾害成因分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 33-40,51.
Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang. Analysis on cause of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025. 41(5): 33-40,51. (in Chinese)
- [6] Long Zhiyong, Duan Huafeng. Human mobility amplifies compound flood risks in coastal urban areas under climate change [J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6(1): 413-423.
- [7] Zhang Han, Wu Chuanhao, Chen Wenjie, et al. Assessing the impact of climate change on the waterlogging risk in coastal cities: a case study of Guangzhou, South China [J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(6): 1549-1562.
- [8] Li Jiangxia, Hu Jiajun, Ren Ningdan, et al. Copula-based joint assessment of the extreme precipitation and storm surge along the coast of mainland China: impact of tropical cyclones [J]. Journal of Hydrology, 2025, 662: 134124.
- [9] ALI J, WAHL T, MORIM J, et al. Multivariate compound events drive historical floods and associated losses along the U. S. East and Gulf coasts [J]. Natural Hazards Research, 2025, 2(1): 19-26.
- [10] 曾照洋. 变化环境下“台风-暴雨-风暴潮”复合型洪涝数值模拟研究[D]. 广州:华南理工大学, 2021.
Zeng Zhaoyang. Numerical simulation of "typhoon-rainstorm-storm surge" compound coastal flood under changing environment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [11] Shan Xinmeng, Han Yu, Wen Jiahong, et al. Integrating nature-based solutions for compound flood risk mitigation in China: A case study of Shanghai [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 380: 125155.
- [12] Liu Yan, Zhang Ting, Ding Yi, et al. Exploring the driving factors of compound flood severity in coastal cities: a comprehensive analytical approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28(24): 5541-5555.
- [13] 郝建浩, 王封祚, 牛小茹. 基于MIKE耦合模型的感潮河网流域洪水风险模拟研究-以弥河流域为例 [J/OL]. 水电能源科学, 2026: 1-10.
Hao Jianhao, Wang Fengzuo, Niu Xiaoru. Study on flood risk simulation in tidal river network basin based on MIKE coupled model - a case study of the Mihe river basin [J/OL]. Water Resources and Power, 2026: 1-10. (in Chinese)
- [14] 徐奎, 鲁志伟, 宾零陵, 等. 沿海城市暴雨-高潮位复合致涝区划研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(4): 18-27.
Xu Kui, Lu Zhiwei, Bin Lingling, et al. Risk factor zoning of waterlogging in coastal cities caused by compound of rainstorms and high tides [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(4): 18-27. (in Chinese)
- [15] 贺芳芳, 胡恒智, 董广涛, 等. 上海中心城区复合洪涝淹没模拟及未来重现预估[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 93-98,134.
He Fangfang, Hu Hengzhi, Dong Guangtao, et al. Compound flooding simulation and prediction of future recurrence in Shanghai downtown area[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 93-98,134. (in Chinese)
- [16] 陈力鸿, 刘宏伟, 蔡钊. 滨海平原区可能最大洪水计算研究 [J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 18-21.
Chen Lihong, Liu Hongwei, Cai Zhao. Research on calculation of the possible maximum flood in the coastal plain area [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(1): 18-21. (in Chinese)
- [17] 任成均. 基于Copula函数的西北江洪水遭遇分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(10): 149-56.
Ren Chengjun. Analysis of flood in Xijiang River and Beijiang River based on copula function [J]. Pearl River, 2023, 44(10): 149-56. (in Chinese)
- [18] 石赞赞, 姚航斌, 万东辉, 等. 基于Copula函数的深圳市雨潮遭遇风险分析[J]. 人民珠江, 2021, 42(12): 24-29,41.
Shi Yunyun, Yao Hangbin, Wan Donghui, et al. Encounter risk analysis of rainfall and tide in Shenzhen based on copula function

- [J]. Pearl River, 2021, 42(12): 24–29,41. (in Chinese)
- [19] 陈静. 设计潮位过程线及其推求[J]. 水文, 2012, 32(3): 47–50.
Chen Jing. Design Tide Curve and Derivation Method [J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(3): 47–50. (in Chinese)
- [20] 姚芝军. 多重环境变化对沿海地区洪水特征的影响研究[D]. 广州:华南理工大学, 2024.
Yao Zhijun. Effects of multiple environmental changes on flood characteristics in coastal areas [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [21] 谢艾利,明瑞平,桂梓玲. 基于MIKE FLOOD模型的岳阳城区内涝模拟研究[J]. 水电能源科学,2026(4):6–10.
Xie Aili, Ming Ruiping, Gui Ziling. Study on urban flood simulation in Yueyang based on the MIKE flood model [J]. Water Resources and Power, 2026(4):6–10. (in Chinese)
- [22] 孙章丽,朱秀芳,潘耀忠,等. 洪水灾害风险分析进展与展望[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 125–130,36.
Sun Zhangli, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Flood risk analysis: Progress, Challenges and prospect [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 125–130,36. (in Chinese)
- [23] 侯静雯,叶爱中,甘衍军,等. 洪水灾害危险性评价方法的研究与改进[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 57–62,107.
Hou Jinwen, Ye Aizhong, Gan Yanjun, et al. Research and improvement on assessment method of flood hazard [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 57–62,107. (in Chinese)
- [24] 王静,李娜,王杉. 洪水危险性评价指标与等级划分研究综述[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(12): 21–26.
Wang Jing, Li Na, Wang Shan. Review on flood hazard assessment index and grade classification [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(12): 21–26. (in Chinese)
- [25] 城市防洪应急预案编制导则[S]. SL 483–2017
Guidelines for flood risk mapping [S]. SL 483–2017(in Chinese)

Analysis of Inundation Characteristics and Risk Assessment of Compound Flooding in Coastal Plain River Network Areas Based on Scenario Simulations

LU Baishu¹, HUANG Guoru^{1,2,3}, OUYANG Mingyu¹

(1. South China University of Technology, School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou 510640, China; 2. South China University of Technology, State Key Laboratory of Subtropical Building Science, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Coastal areas are prone to experiencing the combined effects of rainfall, tidal levels, and storm surges, which can lead to complex flood disasters with intricate mechanisms. To deeply reveal the evolutionary characteristics and driving mechanisms of complex flood disasters in coastal plain river networks, the Qianshan River Basin in Guangdong Province was selected as the research object. Based on the conditional risk probability model, eight typical combinations of rainfall and tide encounters were identified and constructed. A one-dimensional and two-dimensional hydrological and hydrodynamic coupling model was built using basic data such as DEM and land use types. The model was validated by combining runoff coefficients and historical flood area data. The results showed that the model could accurately reflect the hydrological response and waterlogging characteristics of the study area, and the overall accuracy met the research requirements. Based on this, numerical simulations were conducted for eight typical scenarios involving rain and tide encounters. Flood grade classification standards were introduced to grade flood risks, systematically analyzing and revealing the characteristics of flood inundation and the spatial distribution patterns of risks in coastal plain river networks under rain and tide encounters. The research results indicate that under different scenarios of rain and tide encounters, the inundated areas are primarily distributed in Tanzhou Town, Sanxiang Town, and the surrounding areas of the Hongwanyong water outlet. As the tide level and rainfall recurrence period increase, both the total inundated area and the inundated areas of various water depth levels in the study area show a continuous growth trend. Moreover, the newly inundated areas are mainly concentrated in Tanzhou Town, indicating that this area has a high sensitivity to changes in rain and tide. The flood risk distribution is dominated by low and high risk levels, with medium risk areas accounting for a relatively small proportion. The high-risk areas are primarily concentrated in Tanzhou Town

and significantly expand as the intensity of rain and tide increases. It is worth noting that seawater inundation will significantly expand the flood inundation range and have a pronounced amplification effect on the expansion of high-risk areas, which is one of the key factors affecting the spatial pattern of regional flood risk. In summary, this study reveals the driving mechanism of tidal level and rainfall variation on the evolution of compound floods in coastal plain river networks, and provides important scientific basis and technical support for flood disaster risk assessment and flood control and drainage engineering planning in such areas.

Keywords: scenario simulation; hydrodynamic model; compound flood; risk assessment; plain river network

(责任编辑:高天扬)