

曾鹏, 苏朝晖, 方伟华, 等. 基于高精度房屋类型数据的海口市台风次生洪涝灾害损失评估[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 155 – 165. [ZENG Peng, SU Zhaohui, FANG Weihua, et al. Typhoon Flooding Loss Assessment in Haikou City Based on High Precision Building Type Data[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 155 – 165. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.025.]

基于高精度房屋类型数据的海口市 台风次生洪涝灾害损失评估^{*}

曾 鹏^{1,2,3,4}, 苏朝晖^{1,2,3,4}, 方伟华^{1,2,3,4}, 张海霞^{1,2,3,4}, 余 璐^{1,2,3,4}

- (1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学 地理科学学部灾害风险科学研究院, 北京 100875;
3. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
4. 应急管理部—教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘 要: 采用高分辨率房屋建筑物轮廓栅格数据、城市规划以及百度 POI 等资料构建了海口市房屋建筑物的使用类型及经济价值分布; 基于实地调研的损失数据及参考现有研究, 拟合了海口市各类房屋建筑物脆弱性曲线; 结合模型模拟的海口市历史台风事件和台风暴雨-洪涝-风暴潮联合概率情景的洪涝淹没数据, 开展了海口市台风次生洪涝情景下的房屋建筑物损失评估。研究表明: ①高精度的承灾体数据可以实现对单体房屋的损失估算及空间分布规律分析。江东新区、海甸岛以及新埠岛等沿海区域的房屋洪涝灾害暴露度较高, 商业用地、工业用地及在建工程等房屋使用类型发生洪涝损失的概率较大。②相同台风暴雨-洪涝-风暴潮重现期水平下, 海口市房屋室内财产损失率呈现北高南低的分布格局, 损失率较高的区域主要分布海甸岛、新埠岛以及江东新区等南渡江入海口附近。③相同台风暴雨-洪涝-风暴潮重现期水平下, 海口市房屋建筑物洪涝损失主要集中在北部沿海及河流沿线, 空间分布与洪涝危险性空间分布趋同。

关键词: 台风; 次生灾害; 洪涝灾害; 损失评估; 室内财产价值; 海口市

中图分类号: X43; X915.5; P429; S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)04-0155-11

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.025

海南岛位于太平洋西北部, 受西北太平洋台风区偏西路径的热带气旋影响较大。热带气旋在登陆前后常伴随着暴雨以及风暴潮等原生灾害, 并引发洪涝、滑坡及泥石流等次生灾害。近年来, 热带气旋次生洪涝灾害造成的损失是中国各类海洋灾害中最高的, 且呈逐年上升趋势^[1]。特别在遭遇强台风时, 往往会形成巨灾导致更为严重的损失。如 2014 年第 9 号超强台风“威马逊”单次事件造成的直接经济损失高达 446.5 亿元。因此, 快速准确合理评估次生洪涝灾害的损失对灾害应急救援和城市风险管理至关重要。

台风次生洪涝灾害的经济损失评估依赖于洪涝危险性(淹没水深、淹没历时等指标)空间分布, 以及各类承灾体的财产脆弱性曲线^[2]。由于我国记录的历史洪涝灾害损失及社会经济数据有限且获取成本较大, 采用传统的灾后统计调查法开展洪涝灾害损失评估存在较大的不确定性。当前, 随着 GIS 技术和水文水力学模型的发展, 基于两者

结合的损失评估模型(如 MH-HAZUS、CatNet 模型等)得到了快速发展, 通过承灾体价值数据与洪水淹没信息的 GIS 分析, 能够实现对热带气旋次生洪涝灾害的快速可靠评估^[3]。洪涝损失评估面临的另一个严重挑战是承灾体数据精度欠缺, 导致现有研究通常采用土地利用类型^[4]或者研究区域的社会经济统计数据^[5]进行灾害损失估算。然而, 这类研究缺乏有效的承灾体空间分布信息和损失的空间分布特征, 得到的洪涝损失评估结果存在精度不足等问题。因此, 高精度的承灾体数据对于提高洪涝损失评估至关重要, 特别是房屋建筑物这类承灾体, 即便在相同的土地利用类型下其使用类型和室内财产价值也不尽相同。此外, 现有研究构建的洪灾脆弱性曲线也为高精度的房屋洪涝损失评估提供了基础, 但各国洪涝灾害脆弱性统计指标和房屋结构存在差异, 直接借鉴使用

* 收稿日期: 2022-06-04 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0604903; 2018YFC1508803); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)重大专项(GML2019ZD0601)

第一作者简介: 曾鹏(1995-), 男, 汉族, 湖南衡阳人, 博士研究生, 主要从事台风灾害洪涝风险评估研究。

E-mail: peng.zeng@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 方伟华(1973-), 男, 汉族, 湖北嘉鱼人, 教授, 主要从事自然灾害风险评估研究。E-mail: weihua.fang@bnu.edu.cn

承灾体对应的脆弱性曲线会带来较大误差,需要根据研究的实际情况做出相应的调整和修改。

因此,本文通过高分辨率的房屋建筑物栅格数据提取了海口市房屋轮廓数据,利用城市规划、百度 POI(Point of Interest)确定了海口市房屋建筑物的使用类型,并基于互联网上房屋造价和家庭耐消费品价格估算了各类房屋建筑物的经济价值。同时,基于实地调研的损失数据及参考现有研究,拟合了海口市各类房屋建筑物的脆弱性曲线。以模型模拟的海口市历史台风事件和台风暴雨-洪涝-风暴潮联合概率情景的洪涝淹没数据为基础,重建了影响海口市最严重的 9 场历史台风的房屋建筑物损失分布,并评估了 6 种台风暴雨-洪涝-风暴潮联合概率情景下海口市房屋建筑物的洪涝损失。研究结果可为减灾政策的制定、洪涝保险业务的开展、以及城市规划编制提供理论支撑和决策参考。

1 数据

1.1 研究区概况

海口市位处太平洋西北台风区,热带气旋次生洪涝灾害呈现出“成灾地域广、强度及发生频率高、灾害损失重”等特点^[6]。海口市常年受热带气旋侵袭,多年平均受影响的台风约为 5.5 个,热带气旋带来的强降水及风暴增水是洪涝灾害发生的主要成因。海口市热带气旋降雨具有“强度大、范围集中、持续时间长”的特点,暴雨一般持续 3~4 d,最长的达 9 d。此外,受琼州海峡东西走向地形的影响,热带气旋引发的风暴潮增水常在海峡两侧壅高。热带气旋降水引发的南渡江河道水面快速上涨,叠加南渡江入海口段的风暴潮增水,使得海口市的热带气旋洪涝灾害风险较高。



图1 海口市水文及地貌分布示意图(行政地图改自海口市地图,审图号:琼S(2021)023号)

1.2 研究数据获取

1.2.1 热带气旋次生洪涝淹没

海口市热带气旋次生洪涝淹没数据来源于华东师范大学模拟的洪涝结果^[7],模拟平台为 Delft3D 构建的海口市台风暴雨-洪涝-风暴潮复合模型。模型利用硃洲岛和秀英港潮位进行了结果验证,两个站点的均方根误差(RMSE)分别为 0.18 和 0.14,相关系数 R^2 均为 0.91,模拟结果具有较高的准确性和可靠性。次生洪涝淹没数据空间分辨率为 50 m,包含淹没水深、淹没范围以及淹没时长等指标。淹没结果数据包含影响海南省最严重的 9 场历史典型台风(台风国内编号:196309、196311、196608、197109、198007、198217、198616、199111 和 201409),以及 6 种台风暴雨-洪涝-风暴潮联合概率情景(5 年、10 年、25 年、50 年、100 年、200 年)。

1.2.2 屋建筑物使用类型分类

海口市房屋建筑物轮廓栅格数据来源于天地图(<https://map.tianditu.gov.cn/>),范围为 110.10°~110.71°E, 20.12°~19.53°N。栅格数据空间分辨率为 0.6 m,包含城市和农村房屋、道路、海岸及绿地等 5 类轮廓。

城市用地规划数据来源于《海口市城市总体规划(2011—2020)》^[8],数据内容包含海口市主城区各片区控制性详细规划用地,通过对 JPG 图像矢量化及地理配准获取海口市各片区的土地利用类型规划数据。海口市兴趣点 POI 数据来自百度地图,内容包括房屋建筑物的名称、坐标、地址、以及类别等空间属性。

1.2.3 房屋建筑物造价及室内资产价值评估

海口市房屋造价数据参考主要建筑服务商网站中各使用类型房屋建筑物的工程造价及单位面积造价预算案例,统计指标包含与造价计算相关的建筑面积、地上建筑面积、地下建筑面积等多个属性的数值。

海南省居民平均每百户年末主要耐用消费品拥有量来自国家统计局发布的《中国统计年鉴》(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>),时间跨度为 2015—2020 年。室内资产价值借鉴了家电售卖网站中各类家电的零售价格,统计对象为在中国市场销售的所有家电品牌的市场终端零售均价,时间跨度为 2015—2020 年。

此外,根据历史台风受灾情况,采用问卷方式对海口市及文昌市等 8 个城市及农村地区的房屋使用类型及室内财产进行了实地调研,获得有效样本 377 份。调查的指标包括房屋的层数、间数、建成年代、室内财产类别、室内财产各类别数量,以及室内财产总价值等。

1.2.4 房屋建筑物脆弱性曲线

房屋建筑物脆弱性曲线来源根据实地调研数据拟合,以及参照其他脆弱性曲线或灾害损失数据库构建。实地调研数据为海口市及文昌市在“威马逊”及“海鸥”台风期间次生洪水导致的淹没水深、财产价值及房屋室内财产损失等信息^[9]。其他建筑物类型的脆弱性曲线参考已有研究的脆弱性曲线函数^[10-11]。

2 研究方法

2.1 房屋建筑物次生洪涝损失评估

房屋建筑物洪涝损失分析基于研究区内受到洪涝灾害的各房屋类型资产损失率和淹没程度等指标,计算汇总各类资产损失值。步骤如下:

(1) 数据集构建。根据数据规范对收集的数据进行数据清洗及空间配准等,构建灾害损失评估数据集,包括研究区域内的承灾体类型及价值,致灾因子危险性数据以及历史灾情统计数据等。

(2) 承灾体脆弱性量化分析。基于灾后实地调研、灾情统计上报等数据,建立洪涝灾害危险性指标(淹没水深、淹没范围等)与不同承灾体损失的定量关系,构建脆弱性矩阵并通过函数拟合得到脆弱性量化结果。

(3) 热带气旋次生洪涝损失评估。通过 GIS 空间叠加分析,将网格致灾因子危险性强度和承灾体类型两种属性代入至对应承灾体脆弱性曲线中,计算网格对应的灾害损失率。再根据研究区损失率和各类房屋建筑物的价值空间分布,估算研究区域内的房屋建筑物洪涝损失:

$$L_b = \sum_i^m \sum_j^n V_{ij} \times R_{ij} \quad (1)$$

式中: L_b 为房屋建筑物的洪涝损失; V_{ij} 为 j 淹没水深下的第 i 类房屋类型的资产价值; R_{ij} 为 j 淹没水深下的第 i 类房屋类型的损失率; m 为房屋使用类型数; n 为淹没水深等级。

2.2 房屋建筑物使用类型确定及室内财产价值估算

2.2.1 房屋建筑物矢量边界提取

本研究采用监督分类从高分辨率栅格中提取建筑物轮廓,监督分类在小范围的研究区域内具有“工作量小,分类精度高,计算效率高”等优点^[12]。监督分类算法为基于 Bayes 准则构造分类函数(式 2)的最大似然法,该方法能够有效利用其他的先验知识以提高分类精度。分类后对数据中的小图斑进行剔除或重新分类,基于 Aggregation、Majority/Minority 分析、聚类处理(clump)和过滤处理(Sieve)等方法并根据实际情况选择最优的图斑处理方法,以获得较为精准的分类结果。此外,

利用 GIS 软件叠加房屋分类结果与现状遥感影像数据进行对比,手工删除和编辑如道路、水体等非房屋轮廓数据,并补充在建工程用房以及临时用房等遗漏缺失数据。

$$Y_n(X) = \ln(P_n) - 0.5 \ln \left(\sum_n \right) - 0.5 (X - U_n)^T \sum_n^{-1} (X - U_n) \quad (2)$$

式中: P_n 为第 n 个类别的先验概率,根据各类所占图幅面积确定; \sum_n 为第 n 个类别总体的协方差矩

阵; \sum_n^{-1} 为 \sum_n 的逆矩阵; U_n 为第 n 个类别总体的均值向量,通过训练区计算; X 为像元的特征向量。

2.2.2 房屋建筑物使用类型确定

房屋建筑物的分类一般考虑结构类型、使用类型及其次级指标。基于海口市房屋建筑物的实际情况,参考《城市用地分类与规划建设用地标准(GB 50137—2011)》中的城乡用地分类方法,将海口市房屋建筑物根据使用类型划分为 36 类(表 1)^[13]。通过叠加海口市各片区控制性土地利用类型详细规划图,判断相应覆盖区域房屋建筑物的使用类型。对于缺少规划图的研究区域,对照 POI 数据及遥感影像中房屋名称等关键标注信息,结合目视解译及研究人员经验,确认房屋建筑物的使用类型。

2.2.3 房屋建筑物室内财产价值估算

房屋造价 V_{CP} 通过房屋建筑物单位造价 \bar{v}_{CP} 及房屋面积 A 计算(式 3)。海口市房屋建筑物的单位造价 \bar{v}_{CP} 由实地调研、专家综合评判、以及工程预算案例等多种资料进行综合估算。实地调研数据为 2021 年海口市、文昌市等共 9 个县市 16 个乡镇的农村住房造价,包含毛坯房建设费用以及装修费用(表 4)。海口城市各类房屋建筑物工程预算案例数据收集于互联网,考虑建造年份及海口市建筑材料价格以及人工价格波动等情况,估算出海口市各类型房屋单位面积造价(表 4)。作为补充,工程造价及市政工程设计等领域专家的经验被用于对各类型房屋单位面积造价进行综合评判^[9]。此外,考虑人为因素对房屋建筑物单位面积造价评估的影响,本文采用上限、下限、均值三个指标来反映同一类房屋使用类型造价的不确定性。

表 2 海口市房屋建筑物和代码

房屋使用类型	行政办公用地	文化娱乐用地	教育科研用地	中小幼儿园	体育用地	医疗卫生用地
类别代码	A1	A2	A3	A33	A4	A5
房屋使用类型	文物古迹用地	宗教用地	办公居住混合用地	商业服务业设施用地	商业用地	市场用地
类别代码	A7	A9	A/R	B	B1	B12
房屋使用类型	旅馆业用地	加油加气站	商业办公混合用地	商业居住混合用地	码头用地	军事用地
类别代码	B14	B41	B/A	B/R	H23	H41
房屋使用类型	一类工业用地	二类工业用地	采矿用地	一类居住用地	二类居住用地	三类居住用地
类别代码	H5	M1	M2	R1	R2	R3
房屋使用类型	农村住宅用地	临时用房	服务设施用地	公共交通场站用地	社会停车场用地	其他交通设施用地
类别代码	R4	R5	R12/R22/R32	S41	S42	S9
房屋使用类型	供电用地	通信设施用地	消防用地	其他公用设施用地	在建工程用地	仓储用地
类别代码	U12	U15	U31	U9	U10	W

室内资产价值 V_{IP} 由每户各类耐用消费品保有量 N 及各类家电市场终端零售均价 \bar{v}_{CD} 计算(式3)。 N 由统计年鉴中海南省城镇家庭、农村家庭历年各类耐用消费品的每百户保有量数据推算, \bar{v}_{CD} 参考互联网上各类家电历年市场终端零售均价数据。房屋建筑物的洪涝损失主要由室内装修、家电家具以及设备仪器等室内财产损失构成, 因此, 房屋建筑物室内财产价值 V_F 定义为低楼层的房屋造价(装修、内饰) V_{CP} 与室内资产(家电家具) V_{IP} 之和(式3)。

$$\begin{cases} V_{CP} = A \times \bar{v}_{CP}; \\ V_{IP} = \sum N \times \bar{v}_{CD}; \\ V_F = V_{CP} + V_{IP}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_{CP} 为房屋的造价(元/ m^2); A 为房屋面积(m^2); \bar{v}_{CP} 为房屋单位面积造价(元/ m^2); V_{IP} 为房屋室内资产价值(元); N 为每户各类耐用消费品保有量; \bar{v}_{CD} 为终端零售均价(元); V_F 为房屋的室内财产价值(元)。

表3 海南省2021年毛坯房造价与装修造价表

(元/ m^2)			
县/市	乡/镇	毛坯房	装修
海口市	灵山镇	887	2 900
	桂林洋农村	900	3 000
文昌市	铺前镇	793	2 253
	翁田镇	780	2 160
	文城镇	807	2 346
琼海市	潭门镇	860	2 720
	博鳌镇	847	2 626
万宁市	北大镇	833	2 533
	三更罗镇	820	2 440
陵水县	本号镇	767	2 066
	群英乡	753	1 973
三亚市	天涯区	873	2 813
五指山市	南圣镇	713	1 693
	毛阳镇	700	1 600
琼中县	湾岭镇	727	1 786
屯昌县	西昌镇	740	1 880

表4 建筑服务商的海口市房屋建筑工程预算案例

序号	使用类型	单位造价/(元/ m^2)	竣工日期	装修标准
1	高层住宅	2 168	2015/6/30	简单装修
2	高层住宅	2 714	-	毛坯房
3	高层住宅	1 752	2012/7/11	简单装修
4	高层住宅	1 987	2014/12/1	简单装修
5	中高层住宅	2 077	2013/4/17	简单装修
6	独栋别墅	2 603	2013/10/1	毛坯房
7	会展中心	3 393	2014/6/8	毛坯房
8	普通办公楼	1 795	2014/5/5	简单装修
9	普通办公楼	2 735	2014/6/1	简单装修
10	高校教学楼	2 039	2013/9/1	简单装修
11	小学教学楼	1 846	2013/12/7	简单装修
12	幼儿园	2 661	2015/3/10	简单装修
13	科研楼	1 706	2014/9/8	简单装修
14	三星级酒店	1 829	2014/8/30	简单装修
15	大卖场	1 843	2014/6/11	简单装修
16	商业会所	1 637	2014/6/30	简单装修
17	商办住宅综合体	2 203	2015/6/16	简单装修
18	多层厂房	2 112	2014/6/13	简单装修
19	仓库	2 130	2014/6/25	简单装修

2.3 房屋建筑物脆弱性曲线拟合

房屋建筑物的脆弱性曲线与建筑面积、室内财产类型及财产价值、灾后应急相应能力密切相关。不同类型的房屋建筑物在相同淹没水深情况下的损毁不同, 需要建立各自的脆弱性曲线。脆弱性曲线常通过多项式、幂函数、Logistic 回归等函数表达, 或使用核密度等非参数分布平滑为曲线^[14]。

本文中商业服务业设施用地、二类居住用地、农村住宅用地等建筑物类型参照实地调研结果构建脆弱性曲线函数。其他类型房屋建筑物研究根据已有研究及 HAZUS - Flood 数据库中的承灾体分类及其对应的平均损失率, 建立海口市房屋建筑物脆弱性曲线拟合的参考值。根据室内财产损失率-水深样本的散点分布, 优选出 Lognormal 函数进行脆弱性曲线函数拟合(式4)。在构建的脆弱性曲线基础上, 利用海口市灾情统计数据对拟合参数进行优化, 从而得到海口市不同建筑物类型优化后的脆弱性曲线。

$$y = F(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{t} e^{-\frac{(\log t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt, x > 0. \quad (4)$$

式中: $F(x | \mu, \sigma)$ 为不同建筑物类型的室内财产直接经济损失率; x 为淹没水深(m); σ 、 μ 分别为自变量的对数值的标准差和平均值, 其中, $shape = \sigma$ 为函数的形状参数, $scale = e^\mu$ 为函数的尺度参数。

2 结果

3.1 洪涝危险性分布

洪涝危险性体现了灾害强度和频率在时空分布上的差异, 以及台风暴雨-洪涝-风暴潮灾害遭遇(碰头)的可能性组合。将洪水淹没深度划分为 11 个等级用以量化洪涝灾害的严重程度: ①0 ~ 0.1 m, ②0.1 ~ 0.5 m, ③0.5 ~ 1.0 m, ④1.0 ~ 1.5 m, ⑤1.5 ~ 2.0 m, ⑥2.0 ~ 2.5 m, ⑦2.5 ~ 3.0 m, ⑧3.0 ~ 3.5 m, ⑨3.5 ~ 4.0 m, ⑩4.0 ~ 4.5 m, ⑪ > 4.5 m。

图2展示了单次历史台风及台风暴雨-洪涝-风暴潮联合概率情景下的洪涝危险性分布, 图中显示的洪水深度和面积为整个台风期间每个位置的最大淹没深度和淹没范围。从图中可见, 海甸岛、新埠岛以及江东新区的洪涝危险性较高, 此外南渡江沿岸也存在部分危险性较高的点位。江东新区淹没范围较大可能是因为西北走向的台风登陆时, 风暴增水引发该区域河流入海口的水位壅高, 导致河流两岸受淹。总体而言, 海口市次生洪涝危险性呈现由新埠岛及江东新区沿岸向内陆逐渐降低的空间分布特征。

3.2 房屋建筑物使用类型分布

基于提取的海口市房屋建筑物矢量轮廓, 叠加海口市主城区各片区控制性详细规划用地类型

以及百度地图 POI 空间属性数据, 得到房屋建筑物的使用类型空间分布(图3)。从图3中可以看出, 海口市主城区房屋建筑物分布较为密集, 非主城区部分主要集中在城镇周围以及以城镇为中心向外扩散。此外, 海口市占比最大的房屋使用类型为居住用地, 包含农村住宅用地、一类居住用地、二类居住用地以及三类居住用地, 其次是商业用地和旅馆业用地。美兰区是教育科研用地占比最大的行政区, 分布有海南大学、海南师范大学等院校, 此外, 处于开发建设阶段的江东新区, 其在建工程用地占地面积最大。商业用地和旅馆业用地集中在龙华区北部等经济繁华区域, 由于秀英港航运的存在, 仓储用地多分布于秀英区北部。

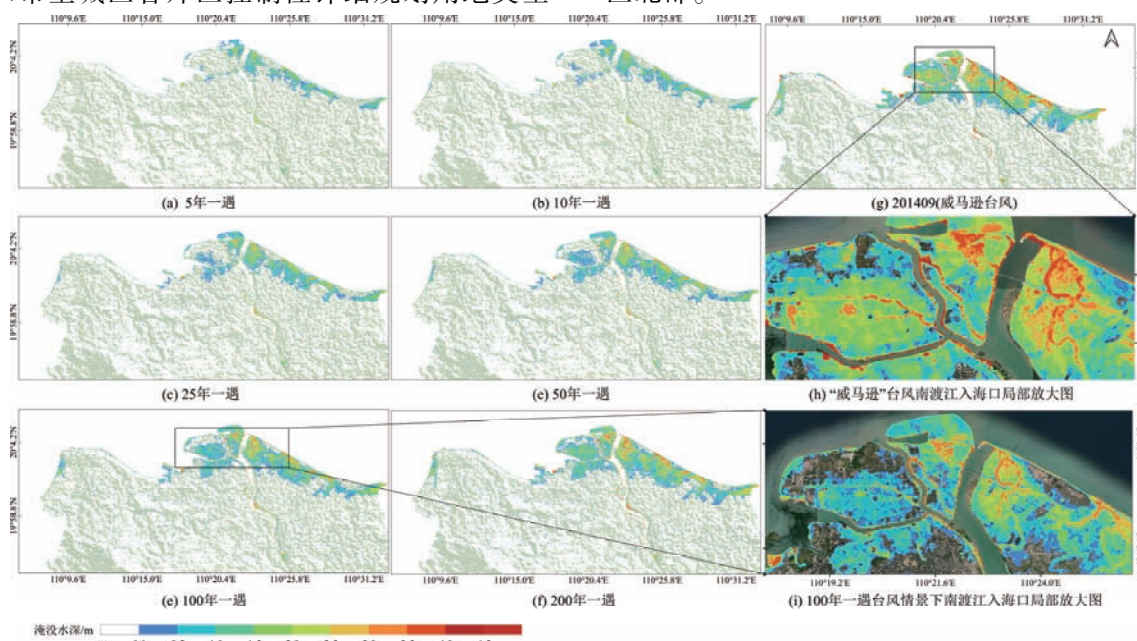


图2 海口市台风暴雨-风暴潮组合洪涝危险性分布

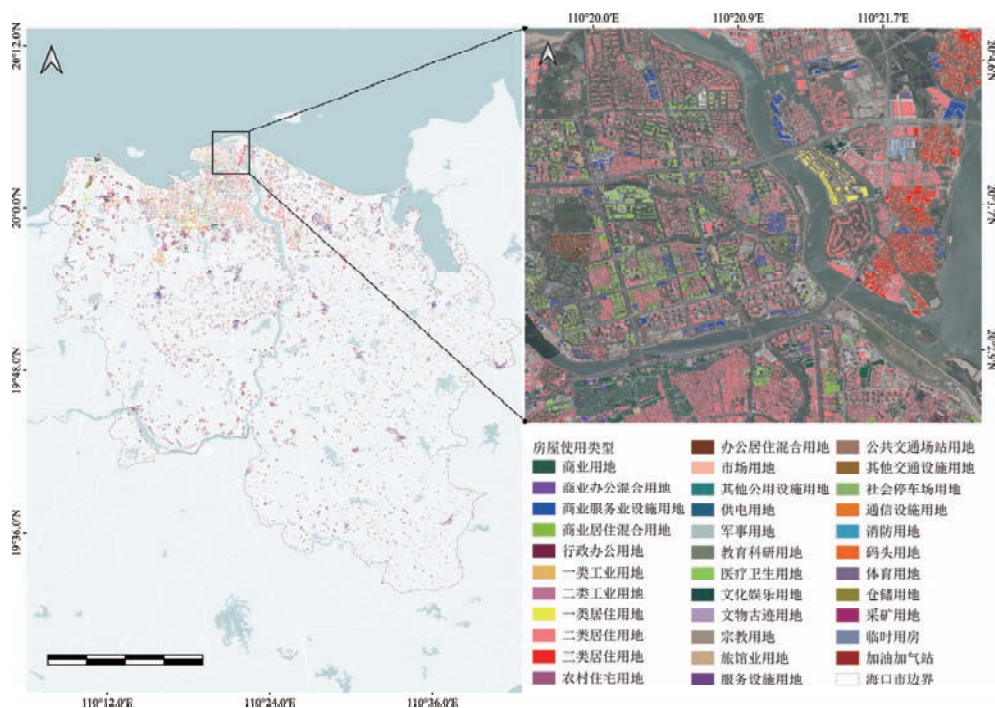


图3 海口市房屋建筑物使用类型空间分布

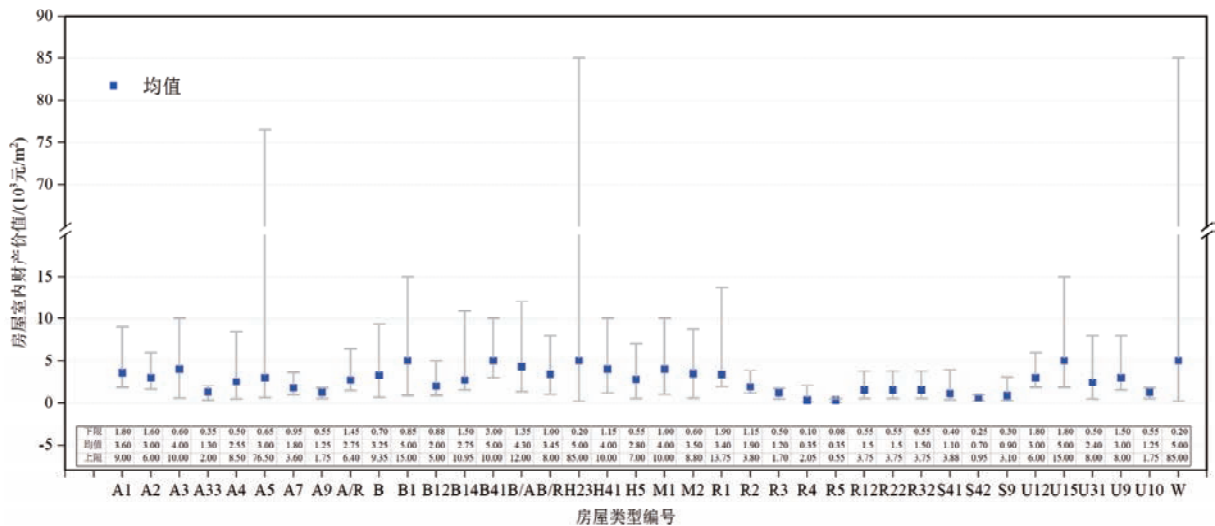


图4 海口市房屋建筑物单位面积室内财产价值(均值、极大值、极小值)估算结果

3.3 房屋建筑物室内财产估值

基于海口市房屋造价、室内耐用消费品总价值等数据,考虑室内财产价值的幂律(Power Law)分布规律^[11],估算了海口市各类房屋建筑物单位面积造价的上限、下限以及均值(图4)。由于部分使用类型房屋(如仓储用地、医疗用地等)的用途不同、低收入家庭的房屋装饰装修用料较差、以及各地区减灾能力的不同,从而导致部分类型房屋建筑物单位面积室内财产价值的上限、下限相差较大。

3.4 房屋建筑物脆弱性曲线

通过分析实地调研结果中室内财产损失率-水深样本的散点图形态,考虑损失率值域区间为^[0,1]的特点,选用 Logistic 函数拟合了商业服务业设施用地、二类居住用地、农村住宅用地等建筑物类型的脆弱性曲线函数。通过分析已有研究中的土地利用类型与建筑物类型水深-损失率对应关系表,借鉴已构建的脆弱性曲线函数参数值,选用拟合优度高的 Lognormal 累积分布函数进行海口市其他房屋建筑物类型的脆弱性曲线拟合。

此外,由于低水深时建筑物的损失基本可忽略不计,因此需要基于洪涝淹没水深对脆弱性曲线做截断处理。已有研究表明水深低于10 cm时房屋的损失基本为零^[11],此外,对城市区域而言道路洪涝灾害发生后地表的主要行洪通道,道路两边的马路牙子对洪水溢出有一定的阻碍作用,根据《室外工程(12J003)》规范我国马路牙子的高度一般为5~10 cm^[15]。因此,仓储用地、在建工程、临时用房、农村住宅用地以及采矿用地等低防护房屋类型的截断水深选择为10 cm,其他房屋类型截断水深为20 cm。

在构建的脆弱性曲线基础上,使用历史灾情统计数据对脆弱性曲线的参数进行优化,从而得到海口市不同建筑物类型优化后的脆弱性曲线(图5)。基于历史灾情统计数据优化的脆弱性曲线,

能够合理有效反映研究区域的损失率-水深关系,可为后续损失评估的精度提供了保证,可认为是海口市各类房屋建筑物损失评估的间接验证。从图5中可以看出,当淹没水深达到3 m或更高时,大部分房屋类型的损失率基本达到最大;当淹没深度再增加时,损失率增长趋势不明显。此外,居民住宅用地、工业用地、商业用地、物流仓储用地等房屋类型的损失率上升趋势明显,但洪水对公用设施用地、道路与交通设施用地等的影响相对较小,损失率普遍低于20%。

3.5 房屋建筑物损失评估

3.5.1 单次历史台风下的房屋损失评估

基于海口市房屋建筑物使用类型和室内财产价值空间分布、历史台风事件过程最大淹没水深分布,以及不同房屋使用类型室内财产洪水脆弱性曲线函数,以2014年第9号超强台风“威马逊”(Rammasun,编号:201409)为例,估算海口市历史台风事件下房屋建筑物室内财产的损失率和损失价值。台风“威马逊”期间海口市各类房屋室内财产损失率空间分布见图6,可见江东新区、海甸岛、新埠岛、琼山区、秀英区及美兰区北部等沿海区域房屋室内财产损失率较高,其中秀英区沿海低洼区域、美兰区北部以及海甸河沿岸个别地区由于洪涝危险性高,以及部分易损毁房屋使用类型分布集中,部分区域的损失率高达85%以上。此外,受南渡江河流洪水的影响,江沿岸部分地区的损失率也高于20%。

“威马逊”各类房屋室内财产损失价值空间分布见图7,室内财产损失主要集中在江东新区、海甸岛、新埠岛、琼山区、秀英区及美兰区北部等沿海区域。从图7中可见,大部分房屋室内财产损失价值低于5万元,一些低洼地区及财产聚集度高的区域室内财产损失价值较高,部分区域的洪涝损失达200万元以上。

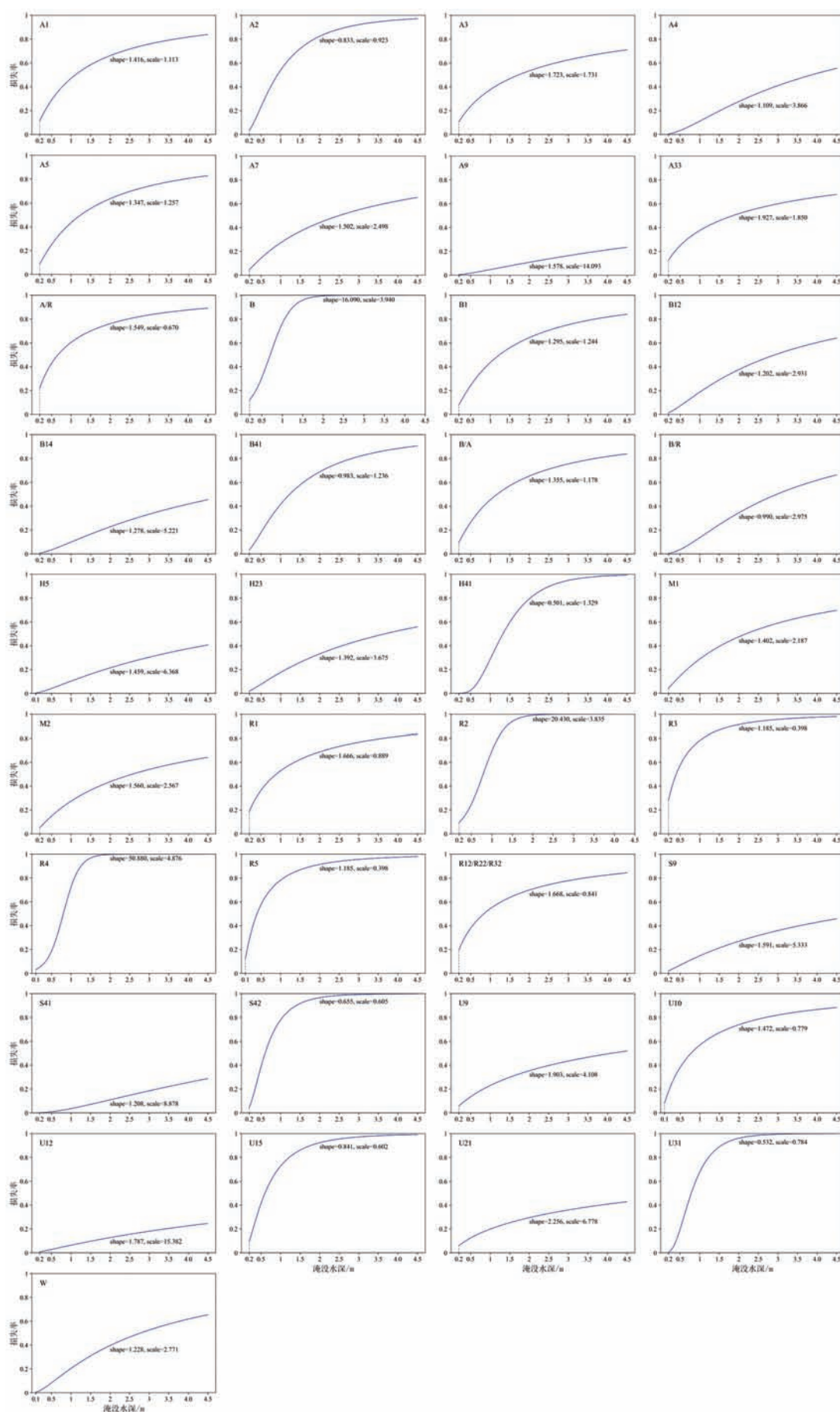


图5 海口市不同房屋建筑物类型(室内财产价值)洪涝灾害脆弱性曲线拟合图

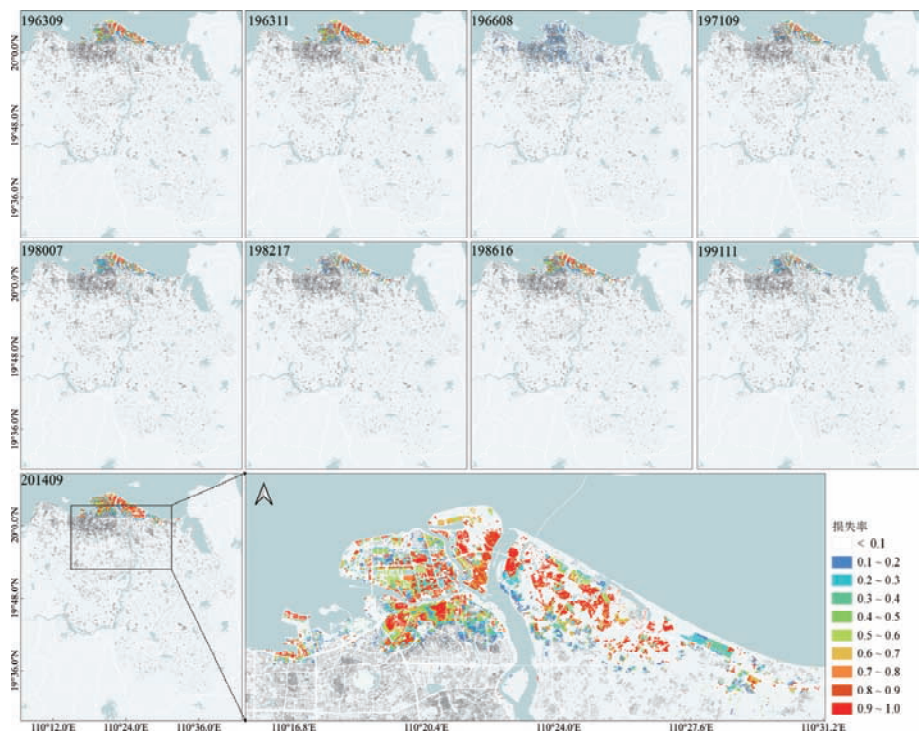


图6 海口市历史台风情景下的房屋室内财产损失率空间分布

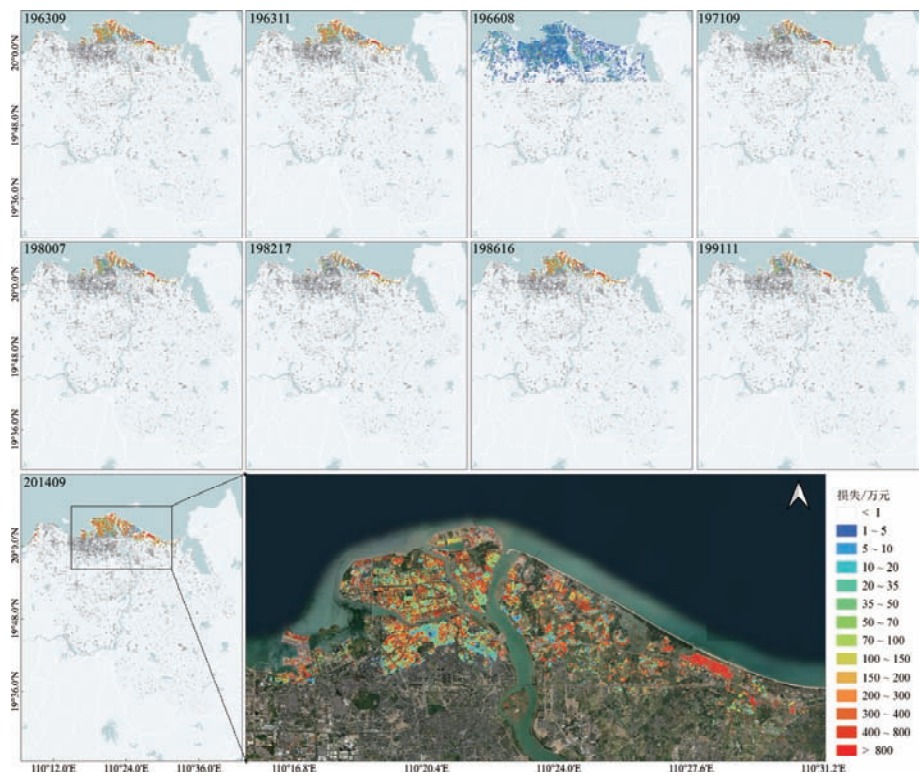


图7 海口市历史台风情景下的房屋室内财产损失价值空间分布

根据灾情统计数据, 超强台风“威马逊”对海口市造成直接经济损失达 83.86 亿元, 其中农业生产及基础设施损失 25.82 亿元, 市政园林、环卫设施损失 11.01 亿元, 民房倒塌 4 204 间, 直接经济损失 4 亿元, 旅游直接经济损失 3.12 亿元, 供水供电损失 4.2 亿元。一方面, 本文在构建脆弱性曲

线时已基于灾后统计数据对拟合参数进行校验。另一方面, 本文评估的“威马逊”台风期间海口市房屋建筑物的洪涝损失值为 47.19 亿元, 考虑到旅游、农业以及渔业占海口市经济的比重较大, 在总的直接经济损失中剔除这部分损失后, 可认为对海口市房屋建筑物的洪涝损失估计值相对合理。

3.5.2 典型重现期下的房屋损失评估

模拟了 5 年、10 年、25 年、50 年、100 年和 200 年共 6 个典型重现期水平下, 台风暴雨-洪涝-风暴潮耦合作用造成的海口市房屋建筑物室内财产损失率空间分布(图 8)。结果显示, 随着重现期水平的增加, 相同位置的房屋建筑物室内财产损失率逐渐增大, 在遭遇 200 年一遇台风的情景下, 海甸岛及新埠岛 90% 以上面积房屋室内财产损失率高于 30%, 其中部分地区损失率高达 70% 以上。从不同重现期情景来看, 随着台风暴雨-洪涝-风暴潮危险性强度增加, 江东新区、海甸

岛、新埠岛、琼山区、秀英区及美兰区北部等沿海区域房屋室内财产损失率的上升幅度明显高于其他地区, 而在此区域内高损失率覆盖范围也呈扩散态势, 其中以海甸岛损失率变化最为明显。在相同重现期水平下, 海口市房屋室内财产损失率呈现北高南低的分布格局, 江东新区、海甸岛、新埠岛、琼山区、秀英区及美兰区北部等沿海区域损失率远高于内陆地区。在遭遇 5 年一遇的台风时, 海甸岛大部分地区房屋室内财产损失率低于 10%, 新埠岛 70% 面积房屋室内财产损失率低于 30%。

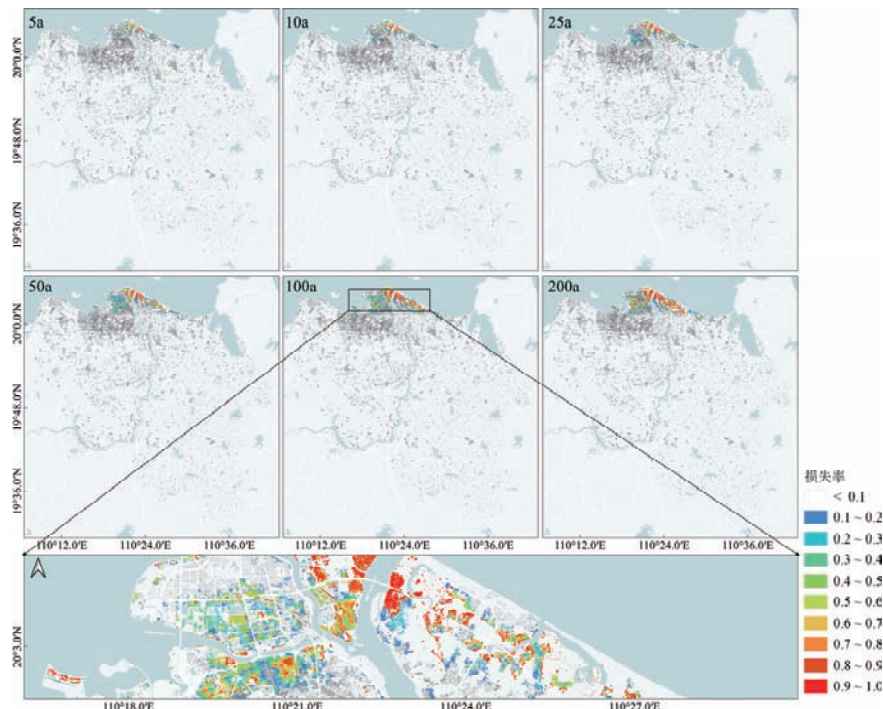


图 8 海口市台风暴雨-洪涝-风暴潮不同重现期情景下的房屋室内财产损失率空间分布

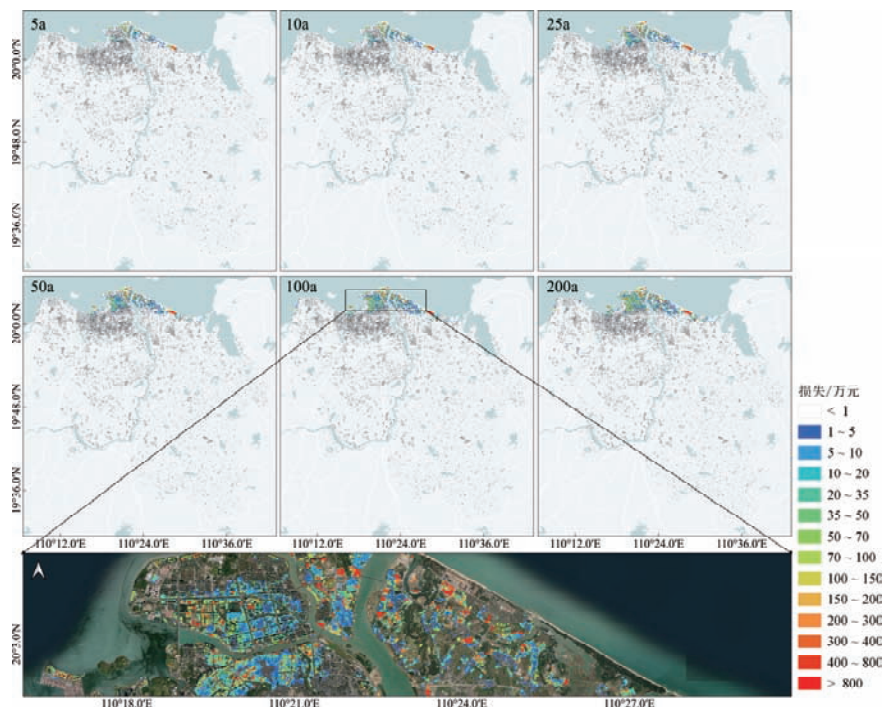


图 9 海口市台风暴雨-洪涝-风暴潮不同重现期情景下的房屋室内财产损失价值空间分布

图9展示了海口市台风暴雨-洪涝-风暴潮不同重现期情景下房屋室内财产损失价值的空间分布。对比图2和图9,发现房屋建筑物的损失分布与洪涝危险性的空间分布趋同,主要集中在海口市北部沿海及南渡江河流沿线。但也存在部分损失率较高的区域其损失值较小,如南渡江入海口新东大桥附近,这是因为该区域的房屋类型室内财产价值较低。对各类型房屋建筑物的总损失进行统计,在5年、10年一遇的重现期情景下,洪涝损失最高为二类居住用地,其次为商业用地和旅馆业用地。当重现期水平超过25年一遇时,一类居住用地的损失将超过旅馆业用地,成为洪涝损失第三高的房屋建筑物类型,这是因为一类居住用地主要以别墅为主,房屋室内价值高。当重现期水平超过200年一遇时,商业居住混合用地的损失将升至第三,这可能与该类房屋类型主要分布于海口市北部沿海区域附近有关,出现超设防洪涝时会遭受较为严重的损失。

从图9可见,在5年一遇的台风强度情景下,海口市房屋建筑物室内财产损失价值较小,大部分区域的损失在1万元以下,仅个别区域的损失较大,如江东新区海岸线附近,这可能是因为该区域的在建工程较多。随着台风强度的增加,北部沿海地区房屋室内财产价值高损失覆盖范围不断扩大,平均损失值也有所上升。在50年一遇的台风强度情景下,北部沿海地区部分地区房屋室内财产损失价值达到35万元以上,出现较多地区的损失达50万元以上。在100年一遇及200年一遇的台风强度情景下,江东新区、海甸岛、新埠岛、琼山区、秀英区及美兰区北部区域出现较大的房屋室内财产损失,较大部分可达300万元以上。

3 结论与讨论

承灾体精度是台风暴雨-洪涝-风暴潮灾害研究的核心内容之一,建立高精度的承灾体数据是开展精细化灾害损失评估及风险评估的基础。本文构建了高精度的海口市房屋建筑物承灾体数据,同时根据研究区实际情况优化了海口市各类房屋建筑物拟合的脆弱性曲线。对比以往台风次生洪涝损失研究,本研究实现了对单体房屋建筑物洪涝损失的评估,并且拥有较高精度的洪涝损失评估结果。高精度的洪涝损失结果,可以更好地了解洪涝风险的空间分布格局,以便在城市规划中采取合理的减灾措施以降低洪涝风险。

(1) 基于不同使用类型的高精度房屋建筑物数据能够在单体房屋尺度展现台风洪涝损失的空间分布特征,居住用地及商业用地是海口市洪涝损失较高的房屋类型。

(2) 海口市占比最大的房屋建筑物使用类型是居住用地,其次是商业用地和旅馆业用地。台风洪涝淹没水深对居民住宅用地、工业用地、商业

用地、物流仓储用地等类型的脆弱性影响明显,但对公用设施用地、道路与交通设施用地等则相对较弱。

(3) 海口市房屋室内财产损失率呈现北高南低的分布格局。随着台风暴雨-洪涝-风暴潮联合重现期水平的提高,相同位置的房屋建筑物室内财产损失率逐渐增大,且区域内高损失率覆盖范围也呈扩散趋势。

(4) 海口市房屋建筑物的损失分布与洪涝危险性的空间分布趋同,集中在江东新区、海甸岛、新埠岛、美兰区等北部沿海及南渡江河流沿线区域。随着台风暴雨-洪涝-风暴潮联合重现期水平的提高,一类居住用地和商业居住混合用地的洪涝损失增长较快。

由于缺乏海口市房屋建筑物历史损失数据,本文对损失评估进行验证的时候仅对历史统计总损失与评估损失的差异进行了定性描述。但应当注意的是,本文使用的危险性数据精度较好,且构建脆弱性曲线时基于实地调研数据进行了拟合验证,因此可认为脆弱性曲线的合理性在较大程度上代表了损失评估的合理性。此外,本文基于城市规划确定房屋建筑物使用类型时可能会与实际存在误差,主要是城市规划受政策影响较大,特别是海南这类改革开放试验区。

参考文献:

- [1] JI T, LI G. Contemporary monitoring of storm surge activity[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2020, 44(3): 299-314.
- [2] 李超超,田军仓,申若竹. 洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 131-136.
- [3] 王宝华,付强,谢永刚,等. 国内外洪水灾害经济损失评估方法综述[J]. 灾害学, 2007, 22(3): 95-99.
- [4] 邓金运,刘聪聪. 不同土地利用类型下城市内涝风险及损失评估[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6): 2293-2299.
- [5] 鲁佳慧,刘家宏,刘创,等. 深圳市洪涝风险量化评估与损失预测[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 73-75, 11.
- [6] 赵珊珊,任福民,高歌,等. 近十年我国热带气旋灾害的特征研究[J]. 热带气象学报, 2015, 31(3): 424-432.
- [7] LIU Q, XU H, WANG J. Assessing tropical cyclone compound flood risk using hydrodynamic modelling: A case study in Haikou City, China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2022, 22(2): 665-675.
- [8] 海南省人民政府. 海口市城市总体规划(2011—2020年)[A/OL]. 2011. <https://www.docin.com/p-1056067699.html>.
- [9] 曹诗嘉,方伟华,谭骏. 基于海南省“威马逊”及“海鸥”台风次生海岸洪水灾后果卷调查的室内财产脆弱性研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 188-195.
- [10] ZHANG H, FANG W, ZHANG H, et al. Assessment of direct economic losses of flood disasters based on spatial valuation of land use and quantification of vulnerabilities: A case study on the 2014 flood in Lishui city of China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21(10): 3161-3174.
- [11] 莫婉媚,方伟华. 浙江省余姚市室内财产洪水脆弱性曲线: 基于台风菲特(201323)灾后果卷调查[J]. 热带地理, 2016, 36(4): 633-641, 657.
- [12] 孙金彦,黄祚继,周绍光,等. 高分辨率遥感影像中建筑物

- 轮廓信息矢量化[J]. 遥感学报, 2017, 21(3): 396–405.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市用地分类与规划建设用地标准: GB 50137—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [14] 陈敏建, 周飞, 马静, 等. 水害损失函数与洪涝损失评估[J]. 水利学报, 2015, 46(8): 883–891.
- [15] 中国建筑标准设计研究院. 国家建筑标准设计图集, 室外工程: 12J003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.

Typhoon Flooding Loss Assessment in Haikou City Based on High Precision Building Type Data

ZENG Peng^{1,2,3,4}, SU Zhaohui^{1,2,3,4}, FANG Weihua^{1,2,3,4},
ZHANG Haixia^{1,2,3,4}, YU Lu^{1,2,3,4}

- (1. *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 3. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE), Beijing Normal University, Beijing 100875, China*;
4. *Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management and Ministry of Education, Beijing 100875, China*)

Abstract: In this paper, we use Basedon data on high – resolution building profile raster, city planning and Baidu POI, building types and economic value distribution in Haikou city is constructed. Based on the losses data from field research and referring to existing studies, vulnerability curves for various types of buildings in Haikou city are fitted. The buildings’ internal damage assessment of typhoon – induced floods is carried out by the model – simulated historical typhoon and typhoon rainstorm – flood – storm surge joint flood inundation data in Haikou city. The study shows that: 1) Highly precision building type data can support single house’s damage estimation and spatial distribution pattern analysis. The coastal areas such as Jiangdong district, Haidian Island and Xinbu Island have higher exposure to flooding, and the probability of high buildings’ interior damage is more significant for commercial building, industrial building, and projects under construction. At the same return period of typhoon rainstorm – flood – storm surge joint flood, 2) Haikou’s interior property loss rate presents a distribution pattern of higher in the north and lower in the south. Areas with high loss rates are mainly distributed near the estuary of the Nandu River, such as Haidian Island, Xinbu island and Jiangdong district. And 3) The interior property loss in Haikou city is mainly concentrated on the northern coast and along the Nandu rivers, and the spatial distribution tends to be the same as the flood hazards.

Keywords: typhoon; secondary hazards; flood disaster; loss assessment; interior property; Haikou city