

基于PGIS的社区洪涝灾害概率风险评估 ——以福建省泰宁县城城区为例

李卫江, 温家洪, 吴燕娟

(上海师范大学地理系, 上海 200234)

摘要:以福建泰宁县城城区为例, 基于PGIS和概率(情景)风险分析方法, 开展社区尺度的洪涝灾害风险研究。利用1949-2011年13次历史洪灾资料, 计算了洪水的强度—超越概率, 得出大于洪峰流量 $2929.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 和洪峰水位 281.50 m 的年超越概率为 1.6% 。在此情景下, 县城淹没面积达 1.3 km^2 (占总面积 31.0%), 最大淹没深度超过 3.5 m , 最长淹没时间超过10小时, 共有1846幢建筑物(占全部建筑的 42.2%)受影响。分别针对受灾区域房屋建筑、住宅室内财产和商户室内财产, 建立灾损方程, 评估损失价值, 并绘制灾损地图。结果表明, 洪涝灾害对社区造成的影响显著, 有必要制定应急预案, 建立早期预警等进行防灾减灾。

关键词:参与式地理信息系统; 社区; 洪涝灾害; 风险评估; 福建泰宁

DOI: 10.11821/dlyj201401004

1 引言

社区是应对灾害风险的直接主体, 是防灾减灾管理的基本单元。2005年《兵庫行动框架》中强调, 需要“发展和加强基于社区的灾害风险管理”^[1], 社区灾害风险管理模式(CBDRM)日益受到重视^[2]。目前, 许多国际非政府组织(NGO)、社区组织、国际红十字会、联合国开发署等都在发展中国家积极推进CBDRM计划。

CBDRM的核心是参与原则, 它强调了地方社区自身在灾害风险评估(包括致灾因子、脆弱性和减灾能力)和灾害风险减少方面的参与性^[3]。关于社区风险的知识更多地存在于本地居民的经验和知识中。特别是在一些缺少灾害长序列记录的地区, 本地居民关于历史灾害的频率、强度、位置、影响范围等知识, 具有重要价值。

参与式地理信息系统(Participatory GIS, PGIS)是把通过参与式理念与方法获取的信息用GIS进行表达的一个交叉应用领域^[4]。利用PGIS方法, 紧密结合地方知识和需求, 标识出社区历史灾害发生的强度和范围, 勾画出社区易于致灾的和脆弱性的区域, 形成参与式的社区风险地图, 对于提升居民的风险意识、编制风险应对预案、进而有效应对、减轻灾害风险具有重要意义^[5, 6]。应用PGIS方法整合本地风险知识, 成为近年来国际社区灾害风险研究倡导的一套方法^[7]。

收稿日期: 2012-11-12; 修订日期: 2013-03-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40730526); 上海市教委重点学科项目(J50402)

作者简介: 李卫江(1976-), 男, 河南灵宝人, 副教授、博士, 主要从事自然灾害风险评估、空间信息共享、GIS开发与应用研究。E-mail: lwj@shnu.edu.cn

通讯作者: 温家洪(1966-), 男, 江西兴国人, 教授、博导、博士, 主要从事灾害风险建模、风险分析与管理、遥感与GIS应用研究。E-mail: jhwen@shnu.edu.cn

本文采用PGIS方法，以福建省泰宁县城城区为例，通过参与式的实地调研、居民访谈等，了解社区历史洪灾情况，分析社区自然和社会经济环境中的风险要素，并从致灾因子、暴露和脆弱性三方面入手，评估给定概率情景下的洪灾风险，模拟洪灾损失与风险的空间分布，为相关研究提供方法借鉴。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域与方法

本文选择福建省泰宁县城城区作为研究区域（图1），研究区域面积4.1 km²，居民5万人。该区域居于福建省西北部武夷山和杉岭山脉的溪谷盆地，北溪、朱溪、黄溪等支流在城区东部汇入主河流杉溪。杉溪自东而西穿城而过，流入闽江上游的重要分支金溪。在每年4-6月汛期，由于流域降水范围广、强度大、降雨时间相对集中、上下游地势落差大等原因，导致城区杉溪水位短时间内暴涨，并具有水量流速大、水流中携带泥沙和石块等特点，形成突发性、短历时暴雨山洪^[17]。由于沿河地势低洼，人口和经济相对聚集，是泰宁古城和老旧建筑主要分布区，受洪涝灾害影响较为频繁，并造成巨大损失。

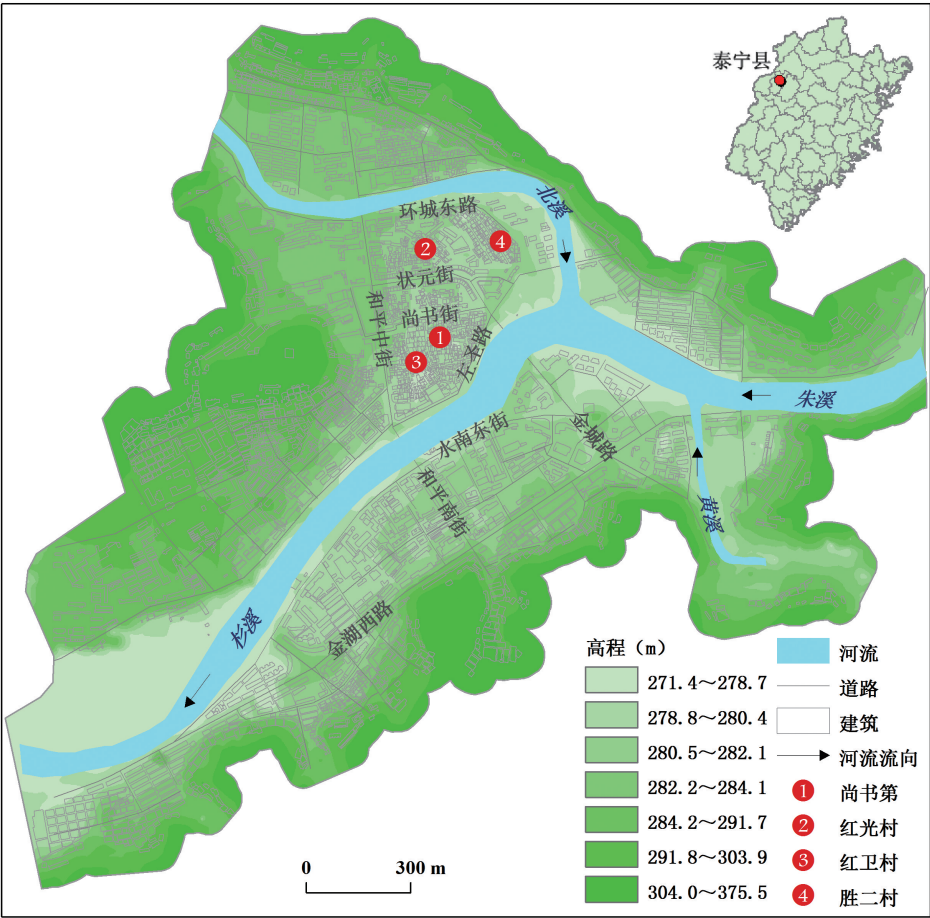


图1 区域概况及高程图

Fig. 1 A sketch map and DEM of the study area

据统计，自 1949 年以来，城区共发生致灾洪水 13 次。例如，2010 年 6、7 月份 20 天内发生 2 次洪水，“2010.6.18”洪水杉溪城区段最大洪峰流量达 2929.18 m³/s，最高水位达 281.5 m，超警戒水位 4.7 m，城区主要商业区和居住区进水，许多房屋倒塌，东洲桥、水南桥等主要桥梁被冲毁，财产损失严重，并造成人员伤亡。“2010.7.7”洪水城区短时间内最高水位达 279.57 m，超过警戒水位 2.77 m。“1968.6.18”洪水，据县志记载，城区杉溪超越警戒线 3.98 m，濒河街道水深没胸，泥墙崩塌，农田、桥梁、水利工程、民宅多处受灾，淹没国家粮库存粮 377729 kg，漂没商业与供销部门商品、物资，损失达 658362 元，溺死 6 人，压伤 4 人。

一方面，泰宁县地处中国东南沿海典型的中山、低山丘陵地区，是山地丘陵型洪水频发区。另一方面，泰宁县是世界自然遗产保护区和著名的旅游目的地，快速城市化和人口、财富聚积的同时，仍然面临自然灾害高风险的挑战。因此，选择泰宁县城作为研究区域，具有一定的典型性。

2.2 研究方法

从不同角度，对自然灾害风险的认识有所差异。如从风险自身角度，将灾害风险定义为某一灾害发生后可能造成的全部损失或部分暴露物损失^[8,9]。从致灾因子的角度，认为灾害风险是致灾因子出现的概率^[10]。而目前被学界多数所接受的，是从灾害风险系统论角度，把灾害风险看作是致灾因子、暴露和脆弱性共同作用结果，认为灾害风险是三者的函数^[11,12]，用公式可表示为^[13]：

$$R_{ie}|_t = f(A_i, V_e) \tag{1}$$

式中： A_i 是时间段 t 内，强度大于或等于 i 的事件发生的概率； V_e 是强度为 i 事件发生所导致的暴露 e 的脆弱性； R_{ie} 是强度大于或等于 i 的事件所导致的暴露的概率损失。

A_i 作为一种潜在的危险或者系统的外部风险因素，可以通过某一强度事件在特定位置和时间段内发生的概率进行计算。具体到洪水事件，其发生的概率可以用重现期（ T ）或年超越概率（ AEP ）表示。其中，年超越概率为重现期的倒数，其经验计算公式为^[14]：

$$AEP = \frac{m}{n+1} \times 100\% \tag{2}$$

式中： n 为事件记录的年数； m 为随机事件的强度排序。

V_e 作为内部风险要素，可以用暴露或者系统（如经济、社会、环境等）遭受威胁的可能性、损失程度、损失价值进行衡量。

按照该模型，自然灾害风险是在给定的时间段和区域内，危险事件可能发生概率及其所造成的暴露物预期损失，即基于概率情景的灾害风险。结合 GIS 方法，可以用不同超越概率下的损失空间分布图表达^[15]。

评估和模拟社区自然灾害风险，需要综合理解致灾因子危险性、承灾体及其脆弱性。这方面，当地社区居民有着许多知识和经验。通过 Internet 或者对社区受灾居民进行实地调研，听取他们对于历史灾害的频率、强度、位置、影响范围以及潜在风险的认识，了解房屋建筑和财产损失情况以及采取的防范措施等，有助于准确辨识自然灾害风险要素，提高风险评估精度^[16]。

3 数据获取与方法

（1）由于研究区域所处的杉溪流域缺乏系统的水文实测资料，主要通过基于 PGIS 的

方法,对受灾区域历史洪水痕迹调查、地方居民实地访谈,查阅地方志、搜集 Internet 信息资源等途径,推算和获取历史洪水的频率和强度,进而计算不同洪水的年超越概率。然后选择超越概率最小(即洪峰流量最大和洪峰水位最高)的情景下,调查和推算区域淹没范围、深度和历时等参数,进而讨论洪灾的损失与风险。

(2) 利用泰宁县城 2009 年 AutoCAD 格式 1:500 地形图,提取高程数据,经过误差检验和格式转换,在 ArcGIS 中空间插值得到 5 m 分辨率的 DEM 数据。

(3) 利用城区 2009 年 1:500 地形图数据,经过 GIS 格式转换,得到建筑物的图形信息。在此基础上,利用 PGIS 方法对受灾地区实地调查,以及 Internet 信息搜索和分析等方法进行暴露和脆弱性分析。暴露性分析以社区建筑物为对象,按照国家有关建筑标准,从用途、建筑结构、建筑年份、层数、住户数、门槛和台阶高度等方面进行属性调查。洪水致灾情况主要以泰宁“2010.6.18”洪水为例,获得淹没区域范围、淹没深度、淹没时间、家庭财产损失、以及采用的防御性措施等参数信息。

4 洪水强度与频率分析

以 1993 年《泰宁县志》^[18]中所记载自然灾异录、2002 年《三明市志》^[19]、泰宁县政府网站 2000 年以来的大事记等文献资料为依据,通过手工摘录和结构化整理,以及实地考察、社区居民访谈,获得 1949-2011 年以来的泰宁城区致灾洪水事件。根据洪灾事件中所记录的杉溪主河道最高洪峰水位信息,利用大断面资料及曼宁公式推算出其最大洪峰流量。进而利用公式(2)得到洪水一频率超越概率表(表 1)。其中,“2010.6.18”洪水的强度最大,洪峰水位达到 281.50 m,洪峰流量达到 2929.18 m³/s,相应的超越概率最小,为 1.6%。

表 1 1949–2011 年泰宁城区致灾洪水强度与超越概率
Tab. 1 Intensity and AEP of flood hazards in Taining County town during 1949–2011

时间	最大日降雨量 (mm/d)	实测洪峰水位 (m)	洪峰流量推算 (m ³ /s)	重现期 (年)	超越概率 (%)
2010.6.18	225.0	281.50	2929.18	62.5	1.6
1968.6.18	110.0	280.78	2640.18	32.3	3.1
2010.7.7	214.0	279.57	2165.34	21.3	4.7
1989.6.30	103.1	279.33	2072.79	15.9	6.3
1969.6.27	190.4	278.98	1938.82	12.8	7.8
1982.6.18	135.1	278.65	1813.57	10.6	9.4
1976.7.9	104.1	278.60	1794.68	9.2	10.9
1982.5.17	135.1	278.55	1775.82	8.0	12.5
1962.6.27	134.2	277.97	1558.81	7.1	14.1
2002.6.16	158.0	277.85	1514.32	6.4	15.6
2005.6.21	215.2	277.80	1495.82	5.8	17.2
1961.6.10	112.5	277.75	1477.35	5.3	18.8
1973.6.25	124.8	277.49	1381.70	4.9	20.3

5 地形与淹没参数获取

基于 1:500 地形图提取研究区域的高程点集。本区最高点 375.5 m，最低点 271.4 m，地形总体呈现南北两侧高，中间低，且自东向西倾斜。采用泛克里格法对高程点进行插值，获得研究区域 5 m 分辨率 DEM 栅格图（图1）。同时，根据前述方法，计算 AEP 为 1.6% 情景下的洪水淹没参数。

估算洪水淹没深度的方法是，以泰宁“2010.6.18”洪水（即 AEP 1.6% 的情景）为对象，通过分析地方社区网站上所发布的地标性建筑物洪水淹没照片，以及实地测量水淹留在建筑物墙壁上的青苔和水渍痕迹，推算其淹没水深。然后，通过地理编码和地址匹配进行地图定位，把该点的水深加上相应的 DEM 高程值得到其淹没水平面高度。最后，对实地调查的淹水深度数据进行逆距离加权插值，得到淹没深度空间分布图（图 2）。采集的样本点 203 个，并且在空间上随机分布，能够满足空间插值的需要。研究区内淹没面积达到 1.3 km²，占县城总面积 31%。淹没最深处超过 3.5 m，主要集中于杉溪沿岸、以及城中红卫村、尚书第等地势低洼的老城区。

同时，根据样本点的调查淹没时间，通过逆距离加权插值，得到淹没时间的空间分布图（图3）。研究区域内淹没时间最长超过 10.0 小时。

6 洪灾承灾体的暴露分析

暴露性是致灾因子与承灾体相互作用的结果，反映了可能暴露于自然灾害风险下的承灾体的类型和数量，如人口、房屋建筑、室内财产、生命线系统、交通设施、生活与生产构筑物、基础设施等^[20]。这里重点针

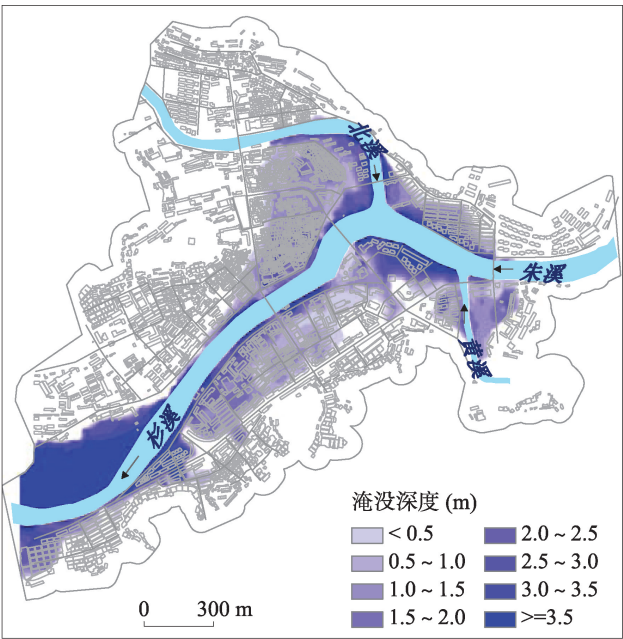


图2 1.6%AEP情景下洪水淹没深度分布图
Fig. 2 Map of flood inundation depth (m) on the scenario of 1.6%AEP

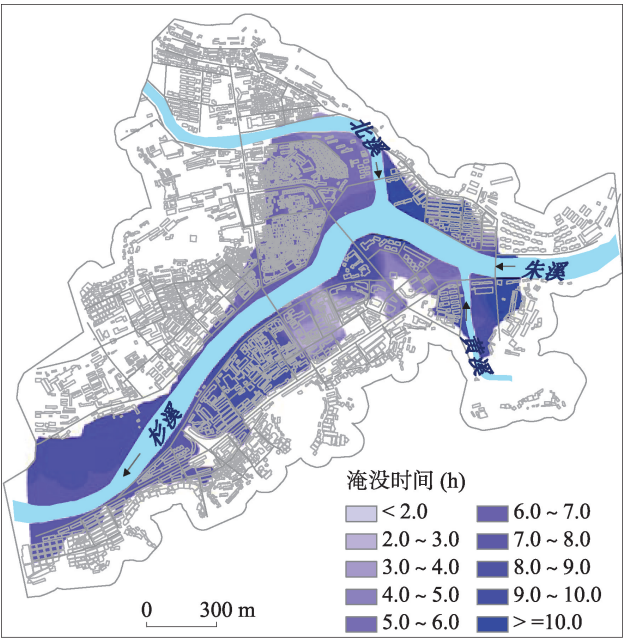


图3 1.6%AEP情景下洪水淹没时间分布图
Fig. 3 Map of flood inundation time (h) on the scenario of 1.6%AEP

对房屋建筑的洪灾暴露性进行调查和分析。以2009年泰宁县城1:500基本地形图为基础，经建筑物轮廓提取、现状调查、修正和统计，得到研究区域房屋建筑4374幢。然后从使用性质、建筑结构、建筑年份、层数、住户数、门槛和台阶高度等方面对房屋属性进行调查。

房屋使用性质不同，其遭受洪灾所造成的损失也不同。本文借鉴《城市用地分类与规划建设用地标准》(GB50137-2011)，对泰宁县城房屋的使用性质进行分类调查和统计(表2)。

房屋使用材料和结构、建筑年代等，也是影响其洪灾损失程度的重要因素。因此，按照建筑结构(钢混结构、砖混结构、砖木结构、土木结构)和建筑年代对房屋进行细分(表3)。

台阶和门槛对浅淹水具有阻挡作用，一定程度上会减小洪灾造成的房屋建筑及其室内财产损失，所以对房屋台阶和门槛高度进行统计，结果见表4。在计算房屋的室内外实际淹水深度时，需要根据台阶(门槛)高度进行修正。

表3 房屋按建筑结构和建筑年代分类统计表(%)
Tab. 3 Statistics of building based on structure and age classification

建筑结构 \ 建筑年代	2000年以后	1980-2000年	1950-1980年	1950年以前	合计
钢混结构	3.18	2.72	0.02	0.00	5.92
砖混结构	26.26	36.24	3.52	1.02	67.04
砖木结构	0.00	6.93	8.76	3.46	19.15
土木结构	0.00	0.00	6.54	1.35	7.89
合计	29.44	45.89	18.84	5.83	100

7 洪灾承灾体脆弱性分析及损失评估

承灾体脆弱性是不同承灾体受洪灾影响所表现出的易于受损性，通常需要通过建立洪灾强度参数与各类承灾体损失(率)之间的量化关系进行研究^[21]。由于承灾体种类较多，这里重点针对建房屋建筑以及室内财产的脆弱性进行分析。影响房屋建筑洪灾脆弱性的因素很多^[22]，如致灾因子洪水的水深、历时、流速等决定其承受浸泡的程度和外界冲击的大小；房屋自身的建筑结构、材料、年限、体积、室内地面高度等决定其抵抗洪灾的能力；建筑物所处社会经济环境影响其内部财产的数量、品质 and 价值的差异，并进一步导致其遭受洪灾损失不同。由于当地居民很少

表2 房屋按使用性质分类统计表
Tab. 2 Statistics of building based on use classification

用途	幢数	比率(%)
住宅	2596	59.35
商业	869	19.87
公共服务设施	335	7.66
市政公用设施	184	4.21
文物古迹	117	2.67
工业	118	2.70
仓储	55	1.26
其它	100	2.29
合计	4374	100

表4 房屋台阶和门槛高度统计表
Tab. 4 Statistics of building based on step and doorsill height classification

台阶/门槛高度(m)	数量(幢)	占总数比例(%)
0	1240	28.35
0-0.1	99	2.26
0.1-0.2	1699	38.84
0.2-0.3	197	4.50
0.3-0.4	243	5.56
0.4-0.5	280	6.40
>0.5	616	14.08

对住房和室内财产投自然灾害保险, 所以无法采用调查居民保单的做法评估灾害损失, 或从工程学角度进行实验模拟。因此, 本文采取问卷调查结合实地走访, 半定量地评估在某种洪灾情景下的损失情况及其脆弱性。

7.1 房屋脆弱性及其损失评估

针对泰宁“2010.6.18”洪水致灾情况进行调查, 得到在AEP为1.6%情景下, 受淹区域房屋1846幢。实地调查发现, 房屋承受洪灾能力与自身的建筑结构、建筑年代、组合形态、离地高度等属性密切相关, 并且受淹没深度、历时、冲击力等因素影响。因此, 综合考虑以上因素, 将受淹区域的房屋按照属性特征和损失程度, 划分为5种类型, 分类探讨其脆弱性, 并计算损失额(表5)。

2000年以来的新建钢混结构(I类)占受淹房屋总幢数的2.3%。房屋以8~11层为主, 承重结构好。虽然淹没深度在2 m左右, 但房屋结构几乎不受影响, 只有底层室内装修受损。房屋平均损坏率在1%, 洪灾脆弱性小。

1980年以来的较新砖混结构房屋(II类)占受淹房屋总幢数的49.4%, 房屋一般以联排形式出现, 2~6层, 形态较大, 承重结构较好, 其受损程度对淹水深度、历时等因素敏

表5 1.6%AEP情景下的房屋受损分类统计表
Tab. 5 Statistics of damaged building on the scenario of 1.6%AEP

类型	房屋特性	洪灾脆弱性	损坏率 (%)	幢数 (幢)	建筑面积 (m ²)	单价 (元/m ²)	主要分 布区域
I	钢混结构, 建筑年代新, 形态大, 8-11层, 承重结构好	对淹没深度、时间等因素敏感性小; 结构损失小, 底层室内装修损失较大	1.0	42	171729	1500	城南金城路沿线 宾馆、酒店
II	砖混结构, 年代较新, 2-6层, 联排, 结构较好	对淹没深度、时间等因素敏感性较小; 室内装修损失较大, 有一定结构损失	5.0	912	704855	1000	主要街道两侧商 业用房; 主要居 住小区房屋等
III	砖木和土木结构, 年代较长, 木承重, 多为1层, 独栋, 小体量	受淹深度小于1 m, 历时小于5小时, 木质承重结构受到浸泡而发生一定程度变形和结构损坏, 室内装修受损	25.0	327	33096	500	民主村、红光村 外围部分地势较 高、淹水较浅的 房屋
IV	同III	结构老化, 抗洪水冲击力差; 不耐浸泡, 受淹深度超过1 m, 历时超过5小时, 会严重损毁或坍塌	100	462	45013	500	城北红卫村、胜 二村、红星村、民 主村; 城南胜一 村; 城中古城保 护区房屋
V	建筑结构和年代不限, 离地高度较大	离地高度大于淹水高度, 在一定程度上避免淹水的影响, 室内积水较少, 并留给室内住户财产转移的缓冲时间	0	103	54796	不计	城北和平中街沿 线、城南水南东 街沿线部分房屋

感性较小。因为房屋内部一旦浸水，即造成地面木地板、墙裙角、电路等装修损坏。随着淹水深度增加，会造成内墙墙面和部分木质窗户继续受损，但损失率增加不大。此外，受淹时间过长，也会造成一定程度的地基和墙体结构损坏。该类房屋平均损失率在5%，与钢混结构相比，其洪灾脆弱性较大。

部分以木承重为主体的砖木结构和土木结构房屋，由于建造时间较长，承重结构老化，抗洪水冲击能力差，并且对淹没深度、历时等因素较为敏感。其中，327幢砖木或土木结构房屋，占17.7%，在淹没深度小于1 m，时长小于5小时的情景下（Ⅲ类），木质承重结构受到浸泡而发生一定程度变形和受损，部分土质墙体受到浸泡而局部坍塌，其平均损坏率基本在25.0%。当受淹水深度超过1 m，历时超过5小时后（Ⅳ类），房屋主体结构、室内装修已经严重损毁和完全倒塌，损坏率达到80%~100%，失去原有的使用功能，洪灾的脆弱性较大。据GIS统计和实地核实，倒塌或受损严重的房屋约462幢，占25.0%，涉及479户居民或单位，主要分布在和平中街—环城东路—左圣路围成的老城区。如北部的红光村、胜二村，中部的红卫村等老式居民区，以及古城保护区中尚书第部分砖木结构建筑。这些地区房屋多为1980年以前所建的1层独幢，小体量，砖木结构和土木结构，年久失修，所处地区地势低洼，淹水时间较长。如红光村平均淹水深度在1~1.5 m，历时达到5小时；胜二村平均淹水深度在1.3~1.8 m之间，历时达到6小时；红卫村及尚书第附近，平均淹水深度在2~3 m，历时在7小时以上。

台阶、门槛对浅淹水具有一定的阻挡作用，一定程度上会减少淹水对房屋外部的浸泡和漫入室内的程度，从而降低房屋的洪灾脆弱性。基于GIS地图和数据库，计算淹没深度小于台阶和门槛高度的房屋。分析发现，位于城北和平中街沿线、城南和平南街与水南东街附近的约103幢房屋（Ⅴ类），虽然分布在洪水影响范围内，但是由于地基较高，部分还设置了挡水门槛，相对抬高了房屋的离地高度和降低了室外淹水深度，使房屋内外免受淹水影响。该部分房屋离地高度一般在0.3~0.8 m之间，损失率忽略不计。

针对Ⅰ-Ⅴ类房屋，参照相关研究^[23]，通过实地调查和修正，在确定表5相关参数的基础上，建立房屋灾损方程：

$$BL_{total} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_i A_{ij} F_{ij} P_i \tag{3}$$

式中： BL 为房屋建筑总损失额； i 为房屋灾损类型，类型Ⅴ不计入； j 为每种类型房屋的幢数； α 为每种类型房屋的平均损坏率； A 为每幢房屋的占地面积； F 为每幢房屋的层数； P 为每种类型房屋的平均成本。

根据公式（3）计算得出，超越概率为1.6%的情景下，房屋总损失价值约为6575万元。

7.2 室内财产脆弱性及其损失评估

漫入室内的淹水对室内财产或物品具有浸泡作用。受房屋使用性质、室内家具物品价值、淹水深度、历时等因素影响，相应地其财产损失和洪灾脆弱性也不同。首先经台阶和门槛高度修正，剔除免受室内淹水影响的房屋，并获得其它房屋真实的室内淹水深度。经GIS数据库统计，受影响的居住用房781幢，占42.3%；个体工商业和超市用房749幢（其中，商住混合类475幢，一楼为商用，二楼及以上为居住），占40.6%。此外，还包括少量的市政公用设施、文物古迹、行政办公、工业、医疗卫生、教育科研用房。从房屋使用性质来看，居住和商业用房所占比重较大，可利用的样本较多，所以重点针对此二类房屋的室内财产损失展开实地调查，获取灾害损失数据，并建立灾损曲线，以更好理解室内财

产的洪灾脆弱性。

7.2.1 居民室内财产损失评估 居民家庭室内财产损失额与陈设物品价值有关,同时对室内淹水深度和淹水时间较为敏感。实地调查发现,淹水深度在0.3 m以下时,损失额一般小于800元;淹水深度达到0.3~2 m之间时,损失额急剧上升,由于电器插座插头(0.3 m)、衣柜、书桌(0.8 m)、木床(0.5 m)、冰箱(1.8 m)、洗衣机(0.8~0.9 m)、衣物等都居于这一高度范围内,受到浸泡后会不同程度损坏,损失额可达到3000元;淹水深度超过2 m以后,由于吊顶灯、空调等设施遇水受损,损失额则持续上升,达到5500元。床、椅、凳等木制家具对淹水时间因素较为敏感,浸泡超过5小时,有不同程度损坏。同时,通过抽样调查发现,受淹深度和历时接近的情形下,家庭经济条件较好的住户,由于室内家具、家电等设施品质和价格相对较高,财产损失和洪灾脆弱性就大。因此,有必要考虑家庭收入因素对居民室内损失的影响。鉴于居民家庭收入数据获取非常困难,使用家庭人均建筑面积指标(即户房屋建筑面积/户人数)代替家庭收入情况。抽样调查和计算受淹区域家庭年收入指标与人均建筑面积指标的相关系数,超过0.8。

根据对50户居民样本调查情况,拟合并建立泰宁城区居民室内财产洪灾损失方程:

$$RL=516.5B^{0.185}D^{0.734}T^{0.342} \quad R^2=0.785$$

(4)

式中: RL 表示每户居民室内财产损失额(元); B 表示家庭人均建筑面积(m^2),通过受淹家庭房屋建筑面积/户人数计算获得; D 表示淹水深度(m), T 表示淹水时间(小时)。根据公式(4)计算,约28.3%居民损失在0~1000元以下,29.0%在1000~2000元以下,31.2%在2000~3000元之间,8.7%在3000~4000元之间,2.8%在4000~5500元之间。损失较为严重的居民主要集中在沿河低洼地,淹没深度在2 m以上,淹没时间在5小时以上。特别是县城东部2000年以后新建的部分成套高档住宅小区,由于受淹深度大、时间长,室内设施新、价值大等原因,损失达到5000元左右(图4)。

根据 $RL_{total} = \sum_{i=1}^n RL_i$ 计算得出,超越概率为1.6%的情景下,受灾居民室内财产总损失额约156.74万元。其中, i 表示受灾居民户数, RL_{total} 表示居民室内财产损失总额。

7.2.2 个体商户室内财产损失评估 个体商业损失额以户为单位进行调查,由于损失额与营业面积有关,同时调查营业面积和损失额,并换算成单位营业面积损失额。根据50个商户抽样调查数据,建立泰宁城区个体商户损失额的评估方程:

$$CL=34.207D^{0.774}T^{0.568} \quad R^2=0.813$$

(5)

式中: CL 表示单位营业面积的商业财产损失额(元), D 表示淹水深度

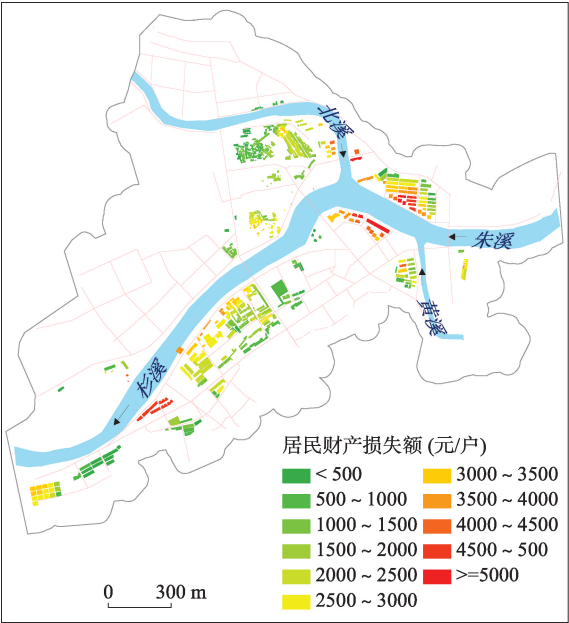


图4 1.6%AEP情景下居民室内财产损失额分布图

Fig. 4 Map of household property loss on the scenario of 1.6%AEP

(m), T 表示淹水时间(小时)。根据式(5)计算,约1250个体商户受影响,其中52.4%商户单位营业面积损失在100元以下,40.4%在100~200元之间,6.1%在200~300元之间,1%在300~400元之间,0.1%在400~500元之间。损失较为严重的商户主要集中在左圣路—状元街—尚书街—和平中街所围成的中心商业区(图5),该地区地势低洼,商业网店密集,主要以经营旅游食品、旅游纪念品和服装类商品为主,极易受到淹水浸泡而遭受损失。

根据 $CL_{total} = \sum_{i=1}^n CL_i \cdot A_i$ 计算得出,超越概率为1.6%的情景下,受灾商户总损失额约1021.8万元。其中, i 表示受灾商户数, A_i 表示营业面积, CL_{total} 表示商户损失总额。

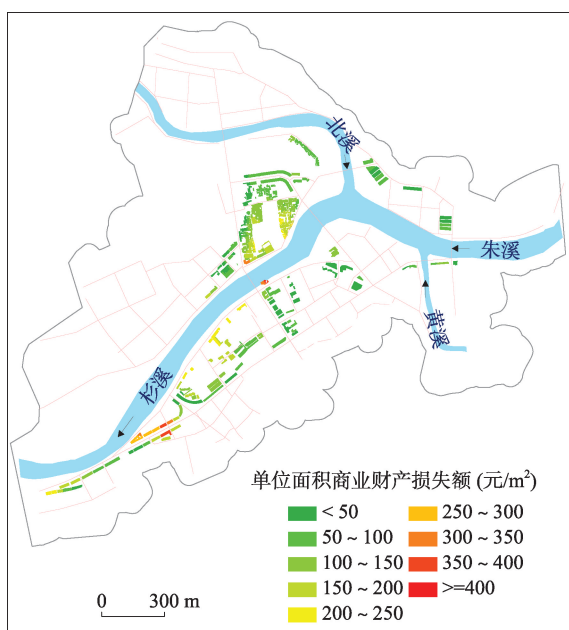


图5 1.6%AEP情景下商户室内财产损失分布图

Fig. 5 Map of retail store property loss on the scenario of 1.6%AEP

8 结论与讨论

(1) 本文尝试基于PGIS和概率(情景)风险分析方法,结合本地知识,开展社区尺度的洪涝灾害风险研究。以泰宁县城城区为例,利用1949-2011年13次历史洪水灾害事件资料,计算了洪水的强度—超越概率关系,然后基于某一概率下的洪峰水位和洪峰流量进行洪水灾害损失和风险评估,并绘制出基于情景的暴露和风险分布图。基于社区尺度的灾害风险评估是近年来国际社会和学术界关注的热点,该方法对国内开展相关研究具有借鉴意义。

(2) 本文利用PGIS方法,通过实地调研和历史资料收集,得到社区洪水致灾因子(强度与频率、淹没深度、淹没时间等)、承灾体暴露(房屋幢数、空间分布、建筑结构、年代、使用性质、层数、住户数、门槛和台阶高度等)和脆弱性(建筑物及其室内财产损失程度、影响因素)数据,并进行灾害损失和风险的空间模拟。实践证明,采用PGIS方法,能够较为便捷、准确地获取地方社区各类灾害风险数据,有效弥补小尺度区域可利用基础资料缺乏的不足。同时,通过实地调研,可以更深入理解致灾因子危险性以及各承灾体的暴露及脆弱性,使灾害风险研究结果更贴合地方社区实际情况。

(3) 本文利用概率(情景)风险分析方法,构建特定概率下的洪水灾害场景,评估和模拟承灾体的脆弱性和风险。实践证明,概率(情景)分析方法,能够借助GIS和各种模型,评估和模拟未来不同概率灾害的发生对各承灾体的影响程度、范围、及造成的损失。由于该方法需要一定的基础数据,更适合社区小尺度的灾害风险研究。

(4) 洪涝灾害对泰宁县城城区造成的损失不容忽视,是影响地方发展和安全的主要风险因素之一。有必要采取综合性的工程和非工程措施,以应对未来更严重的洪水事件。工程

措施诸如提升防洪堤标准, 充分发挥排涝站、水库等工程设施的合理蓄洪、调洪功能, 及时实施河道清障工程等。从承灾体角度, 对于城中低洼地老旧的、易受灾的建筑, 在保护其原有历史风貌的前提下, 实施加固和改造工程, 以提升抗洪能力。非工程措施诸如多部门协同建立网络监测、预报、速报、响应机制, 以提高洪灾的早期预警和应急响应能力。

(5) 本文只对房屋建筑、居民室内财产、商户室内财产等直接损失进行研究, 而洪灾所造成的社会经济系统的其它损失和影响、以及灾害影响扩散的综合研究还有待深入。此外, 本文仅选择泰宁城区进行洪涝灾害风险评估和模拟, 实际上洪灾影响的范围很大, 有必要进一步开展县域尺度和流域尺度的洪涝灾害风险研究。

参考文献(References)

- [1] 史培军, 郭卫平, 李保俊, 等. 减灾与可持续发展—从第二次世界减灾大会看中国减灾战略的调整. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 1-7. [Shi Peijun, Guo Weiping, Li Baojun et al. Disaster reduction and sustainable development: Adjustment of disaster reduction strategies of China based on "The 2nd World Conference on Disaster Reduction. 2005". Journal of Natural Disasters, 2005, 14(3): 1-7.]
- [2] Shaw R. Community-based disaster risk reduction. London: Emerald Group Publishing Limited, 2012. 1-7.
- [3] Van Aalst M K, Cannon T, Burton I. Community level adaptation to climate change: The potential role of participatory community risk assessment. Global Environmental Change, 2008, 18(1): 165-179.
- [4] Sheppard E, Couclelis H, Graham S et al. Geographies of the information society. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(8): 797-823.
- [5] Haynes K, Barclay J, Pidgeon N. Volcanic hazard communication using maps: An evaluation of their effectiveness. Bulletin of Volcanology, 2007, 70(2): 23-138.
- [6] Tran P, Shaw R, Chantry G et al. GIS and local knowledge in disaster management. Disasters. 2009, 33(1): 152-169.
- [7] White, Kingston R, Barker A. Participatory geographic information systems and public engagement within flood risk management. Journal of Flood Risk Management, 2010, 3(4): 336-347.
- [8] Maskrey A. Disaster mitigation: A Community Based Approach. Oxford: Oxfam, 1989, 1-100.
- [9] Morgan M G, Henrion M. Uncertainty: A Guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. London: Cambridge University Press, 1990: 1-10.
- [10] Smith K. Environmental Hazards- Assessing Risk and Reducing Disaster. London: Routledge, 1996: 6-7.
- [11] Crichton D. The Risk Triangle. In: Ingleton J (ed.). Natural Disaster Management. London: Tudor Rose, 1999. 102-103.
- [12] 黄大鹏, 郑伟, 张人禾, 等. 安徽淮河流域洪涝灾害防灾减灾能力评估. 地理研究, 2011, 30(3): 523-530. [Huang Dapeng, Zheng Wei, Zhang Renha et al. Assessment of capacity of flood disaster prevention and reduction of Huaihe River Basin in Anhui Province. Geographical Research, 2011, 30(3): 523-530.]
- [13] Coburn A, Spence R. Earthquake Protection. New York: John Wiley & Sons, 2002. 313-315.
- [14] ASCE. Hydrology Handbook (Second Edition). New York: ASCE Publications, 1996. 553-554.
- [15] Apel H, Thieken A H, Merz B et al. A probabilistic modeling system for assessing flood risks. Natural Disasters, 2006, 38(1-2): 79-100.
- [16] Alcantara-Ayala I. Flowing mountains in mexico-incorporating local knowledge and initiatives to confront disaster and promote prevention. Mountain Research and Development, 2004, 24(1): 10-13.
- [17] 赵士鹏. 闽江上游地区山洪灾害风险评估. 地理研究, 1997, 16(1): 98-103. [Zhao Shiping. Hazard assessment for mountain torrents on the upper reach area of Minjiang River. Geographical Research, 1997, 16(1): 98-103.]
- [18] 欧阳英. 泰宁县志. 北京: 群众出版社, 1993: 1-100. [Ou Yangying. Taining County Annals. Bei Jing: The Mass Press, 1993: 1-100.]
- [19] 丁瑜, 刘祖展, 孙海平, 等. 三明市志. 北京: 方志出版社, 2002: 350-500. [Ding Yu, Liu Zuzhan, Sun Haiping et al. Sanming City Annals. Bei Jing: Publishing House of Local Records, 2002: 350-500.]
- [20] 尹占娥. 城市自然灾害风险评估与实证研究. 上海: 华东师范大学博士论文, 2009. [Yin Zhan'e. Research of urban natural disaster risk assessment and case Study (Ph.D thesis). Shang Hai: East China Normal University, 2009.]

- [21] Colin G. The evaluation of vulnerability to flooding. *Disaster Prevention and Management*, 2004, 13(4): 323-329.
- [22] Peters Guarin G, van Westen C J, Montoya A L. Community based flood risk assessment using GIS for the town of San Sebastian, Guatemala. *Journal of Human Security and Development*, 2005, (1): 29- 49.
- [23] 朱静. 城市山洪灾害风险评价: 以云南省文山县城为例. *地理研究*, 2010, 29(4): 655-665. [Zhu Jing. Urban flash-flood risk assessment: A case study in Wenshan City, Yunnan. *Geographical Research*, 2010, 29(4): 655-665.]

PGIS-based probabilistic community flood disaster risk assessment: A case of Taining County Town, Fujian Province

LI Weijiang, WEN Jiahong, WU Yanjuan

(Department of Geography, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: We carried out a case study of community-scale flood disaster risk assessment in Taining, Fujian, China, using a PGIS method and probabilistic (scenario) risk analysis model. The relationship between flood hazard intensity and exceedance probability in the study area was calculated using historical data of 13 flood events that occurred between 1949-2011. Our analysis shows that the annual probability of exceedance (AEP) of flood is 1.6% with a peak discharge of 2929.18 m³/s and a peak water level of 281.50 m on the scenario of 1.6% AEP, the inundation area is up to 1.3 km², covering approximately 31.0% of the total area of the county town, the deepest inundation depth is over 3.5 m, and the maximum inundation time is over 10 hours. There are 1846 (42.2% of the total) buildings affected by the floods. Three disaster loss formulae were established based on loss information derived from the damaged buildings, household properties and retail store properties, respectively, and then loss estimation were conducted, and loss distribution was mapped. The results show that, the impacts of flood disaster on the community are significant, and it is necessary to make emergency planning and establish an early warning system for flood disaster prevention and reduction.

Key words: PGIS; community; flood disaster; risk assessment; Taining County of Fujian Province