

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问卷调查的室内财产脆弱性研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 188–195. [Cao Shijia, Fang Weihua and Tan Jun. Vulnerability of Building Contents to Coastal Flooding Based on Questionnaire Survey in Hainan after Typhoon Rammasun and Kalmeagi[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 188–195.]

## 基于海南省“威马逊”及“海鸥”台风次生海岸洪水灾后问卷调查的室内财产脆弱性研究<sup>\*</sup>

曹诗嘉<sup>1,2</sup>, 方伟华<sup>1,2</sup>, 谭 骏<sup>3</sup>

(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 民政部教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 国家海洋局海洋减灾中心, 北京 100194)

**摘 要:** 以2014年“威马逊”及“海鸥”台风次生海岸洪水灾害为对象, 以主要受灾区海南省海口市及文昌市为研究区, 通过实地勘测调查及问卷调查获取了这两场灾害的重点淹没地区、室内财产淹没水深、财产价值及损失率等数据; 选取淹没水深作为致灾因子危险性代表性指标, 构建了居民住房室内财产脆弱性曲线及商业用房室内财产脆弱性矩阵, 从而定量地刻画了淹没水深与损失率之间的关系; 另外利用调查数据, 分析了淹没时长、减灾措施等因素对损失率大小及脆弱性曲线不确定性的影响; 最后从加强脆弱性曲线结果的区域适用性、有效降低脆弱性曲线的不确定性等方面给出了未来研究的建议。

**关键词:** 洪水脆弱性; 脆弱性曲线; 室内财产; 海岸洪水; 台风; 问卷调查; 不确定性; “威马逊”台风; “海鸥”台风; 海南

**中图分类号:** X43; P642.2   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000–811X(2016)02–0188–08

**doi:** 10.3969/j.issn.1000–811X.2016.02.036

在自然灾害研究中, 脆弱性一般是指在不同洪水危险性程度下, 洪水灾害承灾体对应的平均损失率大小及其不确定性分布。洪水脆弱性评估是洪水灾害研究的核心内容之一, 建立各类承灾体的量化洪水脆弱性曲线, 是开展精细化洪水灾害损失评估及风险评估的基础。目前, 在洪水灾害研究中洪水危险性评估较为深入系统, 而承灾体的洪水脆弱性评估, 特别是中国的洪水承灾体评估, 相对来说还比较薄弱。

除地震灾害外, 洪水灾害是较早开始发展脆弱性曲线的灾种之一。例如, 1968年美国联邦保险法案中即使用标准化的灾损曲线为泛洪区的居民房屋保险提供支持<sup>[1]</sup>。美国USACE、FEMA等机构对于洪水灾害损失数据收集及脆弱性曲线构建建立了较为完善的模型及运作机制<sup>[2–3]</sup>; 英国、澳大利亚、日本、加勒比海地区也已各自发展出包含脆弱性曲线库的评估模型<sup>[1, 4–5]</sup>。洪水脆弱性曲线中, 选择致灾因子需要考虑不同洪水类型的致灾成灾特点, 横轴中致灾因子的危险性指标可

能是一种或多种洪灾损失影响因素<sup>[6]</sup>, 最主要的是洪水水深, 此外还有淹没时长、流速、洪水携带沉积物、受灾地区应急措施等<sup>[7]</sup>。尽管多种洪灾影响因素与损失率之间都可能存在关系, 但洪灾损失评估中, 最常建立的是洪水淹没水深与洪灾损失之间的关系<sup>[8–9]</sup>。纵轴中的指标一般为承灾体损失率, 相对于绝对损失值, 损失率可以忽略通货膨胀的影响<sup>[10]</sup>, 因此在比较不同财产价值承灾体的脆弱性曲线时更为方便。计算损失率既需要获取承灾体直接经济损失, 又需要估算承灾体总经济价值。

根据构建洪水脆弱性曲线所使用的数据来源与方法, 洪水脆弱性曲线大致可分为2类, 第一类为经验数据拟合法, 即利用历史实际洪水灾害事件数据, 通过分析损失影响因子与损失(率)的关系, 构建得到脆弱性曲线<sup>[11–13]</sup>。这一方法得到的曲线与已发生的灾害损失结果较为吻合, 但在不同区域之间推广时需要注意区域差异并进行修正<sup>[10, 14]</sup>; 第二类为假设分析法, 即利用已有的承

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015–09–07    修回日期: 2015–11–20

基金项目: 国家海洋局公益性行业科研专项“海洋灾情快速评估和综合研判系统研发与应用示范”(201305020)

作者简介: 曹诗嘉(1990–), 女, 辽宁丹东人, 博士研究生, 主要从事台风损失评估研究。E-mail: shijia.cao@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 方伟华(1973–), 男, 湖北嘉鱼人, 教授, 主要从事台风风险评估研究。E-mail: weihua.fang@bnu.edu.cn

灾体类型数据、财产价值调查数据等,根据专家经验,假设分析不同等级洪水情境下的损失大小<sup>[1]</sup>。这一方法得出脆弱性曲线类型较为完备,而缺点在于主观性较强,可能无法反映脆弱性曲线中的不确定性特点<sup>[1]</sup>。除这2种方法外还有模型模拟法等,主要是模拟致灾因子及承灾体的相互作用,定量构建出脆弱性曲线<sup>[13]</sup>。

针对不同的承灾体,例如建筑物、农作物、基础设施等,需要建立各自的脆弱性曲线。其中,建筑物的分类一般会考虑结构类型、使用类型及其次级指标<sup>[1-2,5]</sup>。例如,美国 HAZUS 模型依据建筑物的建筑材料、建筑结构、楼层高度、楼层数将建筑物分为11类<sup>[2]</sup>;英国研究机构根据房屋式样、房屋建造时间、居住者的收入水平划分出84种房屋类型<sup>[5]</sup>;澳大利亚 ANUFLOOD 模型根据商业用房的占地面积及室内财产价值对商业用房进行分类<sup>[1]</sup>。从使用类型看,商业用房与居民用房是最主要的2类建筑物,前者脆弱性与建筑面积、室内财产类型及财产价值灾后应急响应能力密切相关<sup>[15]</sup>,相同水深下商业用房的损失可比居民用房大数百倍<sup>[1]</sup>,也有研究表明一个地区的商业用房及工业用房占该地区所有房屋数量的比例越大,损失评估中的不确定性越大<sup>[11]</sup>,而后的损失率分布相对前者来说比较稳定。

脆弱性曲线构建过程中,样本误差、测量误差、致灾因子指标的选择、脆弱性曲线函数形式的选择等,均可导致洪灾脆弱性曲线结果具有一定程度的不确定性<sup>[7]</sup>。为使承灾体脆弱性评估结果更为精确,并明确不确定性大小对损失评估结果的影响,经常需要对洪水脆弱性曲线的不确定性进行量化表达,常用的不确定性量化方法包括函数表征法及蒙特卡洛模拟法等。例如,中美洲地区多国共同发展的 CAPRA 模型中,假设特定水深下每一类房屋的损失满足 $\beta$ 函数分布;一些研究中利用蒙特卡洛方法,对受影响房屋数量与不确定性大小之间的关系进行了衡量<sup>[11]</sup>。

我国洪灾脆弱性曲线量化研究,大致起步于1980年代。例如,施国庆对洪灾损失率及确定方法进行探讨<sup>[14,16]</sup>;石勇等在对洪水脆弱性曲线进行综述的基础上,针对2008年深圳及东莞暴雨洪水灾害,利用问卷调查方法得到房屋及室内财产水深-灾损率曲线<sup>[14]</sup>;石勇利用假设分析法针对不同收入水平的居民住宅,构造暴雨内涝中居民住宅室内墙壁涂料及地板的水灾脆弱性曲线<sup>[17]</sup>;殷杰和尹占娥等利用遥感提取土地利用类型,结合历史灾情统计资料、多次灾后实地调查数据及保险资料,建立水深灾损率线性拟合曲线<sup>[18]</sup>;董姝娜等运用 GPS 技术开展村镇住宅洪灾损失实地调查,利用遥感及 GIS 技术提取洪水淹没水深,建

立水深灾损率曲线<sup>[19]</sup>。总的来说,我国洪水脆弱性研究还缺乏大规模实地调查资料作为参考,研究的承灾体种类少,脆弱性不确定性刻画方法研究也较为欠缺。

海南省台风登陆及影响频繁,由台风引发的增水 $\geq 30$  cm 的风暴潮每年3.8场, $\geq 100$  cm 的风暴潮平均每2年一场<sup>[20]</sup>。2014年7月18日15:30分前后,超强台风“威马逊”(台风编号:201410)在海南省文昌市翁田镇沿海登陆,是1949年以来登陆中国的最强台风之一,登陆中心最低气压910 hPa,最大风速大于70 m/s。2014年9月16日09:40分左右,台风“海鸥”(台风编号:201418)也在海南省文昌市翁田镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为13级,中心气压960 hPa,“海鸥”台风风暴潮使得海口市秀英站出现了突破历史记录的高潮位,超出当地警戒潮位147 cm。

台风次生海岸洪水主要由台风风暴潮、台风暴雨洪水二者在空间上叠加形成,不同于内陆缓发内涝洪水,其含有腐蚀性盐分且伴随海浪,故危险性程度大。“威马逊”及“海鸥”台风相隔2个月先后登陆海南,造成海南省北部海岸带大范围淹没,给海南带来了严重的经济损失,其中威马逊造成全省216个乡镇(街道)受灾,受灾人口325.8万人,直接经济损失108.28亿元;“海鸥”造成全省219个乡镇(街道、农场)受灾,受灾人口286.503万人,直接经济损失57.874亿元<sup>[21-22]</sup>。目前,台风次生海岸洪水的房屋室内财产脆弱性研究还非常少,因此对这两场台风次生海岸洪水淹没地区进行调查,获取其致灾因子危险性 & 承灾体的损失率,可为构建台风次生沿岸洪水脆弱性曲线提供宝贵的经验数据。

本研究采用实地问卷调查方法,赴受“威马逊”及“海鸥”台风影响严重的海南省海口市及文昌市,获取台风次生洪水导致的房屋室内财产淹没水深、财产价值及损失率等样本信息,从而定量构建海南省室内财产台风次生沿岸洪水脆弱性曲线。

## 1 数据

### 1.1 调查问卷设计

调查问卷的主要内容包括致灾因子、承灾体以及灾害损失3个部分。“威马逊”及“海鸥”两场台风次生洪水室内财产损失,由于其影响范围及成灾机制类似,故采用相同的问卷开展调查。考虑到财产的归属特点,调查问卷的调查单元为单个家庭或单个商户2类。

致灾因子问卷主要包括淹没深度( $d$ )及淹没时长( $t$ )2个指标。其中,淹没深度( $d$ )为房屋室内

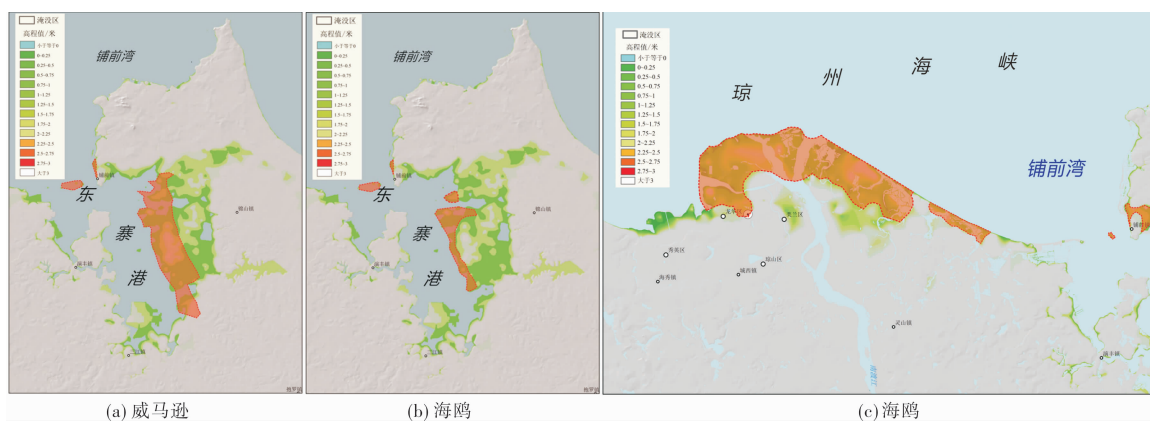


图1 “威马逊(201410)”及“海鸥(201418)”台风风暴潮部分淹没范围实地 GPS 测量图

最高淹没水位至室内一层地板的垂直距离,单位为厘米(cm),淹没深度主要依靠观察洪水淹没痕迹或询问户主来获取信息并测量;淹没时长( $t$ )为房屋一层开始进水至完全退水时的时间间隔,淹没时长信息主要依靠询问户主获取。由于入户调查的时间已经离“威马逊”及“海鸥”灾后达2个月及4个月,多数户主无法精确描述小于1h的淹没间隔,加之风暴潮含盐量高对室内财产腐蚀性较大,在较短时间内即可对室内财产造成较大损失,故将淹没时长的记录单位设为1h。

承灾体问卷主要包括受灾房屋的地理位置(经纬度)、建筑类型、使用类型、建筑年限、楼层数目、淹没层数、每层房屋面积以及单位面积房屋造价等指标,其中使用类型分为商业用房、城市居民用房、乡镇居民用房及农村居民用房4类,结构类型分为钢筋混凝土、砂石、砖混3类。

灾害损失问卷主要包括室内财产(contents)、室内装修(interior)以及房屋结构(structure)3类承灾体灾前经济价值,灾害直接经济损失值等指标。另外,由于两场台风次生洪水导致的房屋倒塌较少,而室内财产损失较为严重,故本文仅选择室内财产作为对象构建脆弱性曲线。

## 1.2 实地调查取样

本研究先后3次赴海南省开展“威马逊”及“海鸥”台风致灾及灾害损失现场调查。第1次为2014年7月20日(“威马逊”登陆2d后),前往“威马逊”台风登陆地文昌市开展灾后淹没范围勘查,实地调查至7月30日,利用空间定位精度为米级的差分GPS系统,基于风暴潮淹没勘查痕迹,并结合当地居民访谈信息,绘制了东寨港风暴潮淹没范围图(图1a)。

第2次为2014年9月15–20日(“海鸥”登陆前后),在海南省海口市,文昌市开展为期6天的现场调查工作,利用同类方法绘制了风暴潮淹没范围图(图1b,图1c)。可以看出,两场台风主要受灾地区位于海口市的龙华区、琼山区、美兰区

北部沿海地区,以及文昌市的铺前镇。

第3次为2014年11月28日–12月20日,在前2次宏观危险性范围调查的基础上,本次活动主要为详细的入户问卷调查。图2为实地调查样本空间分布,基本上覆盖了两场台风次生洪水灾害发生的主要区域,且样本点分布也较为均匀合理。



图2 “威马逊”及“海鸥”台风次生海岸洪水室内财产损失问卷调查样本分布

## 1.3 调查数据质量

共入户问卷调查了258户,剔除因信息不完整等造成的无效样本6份,最终有效样本为252户。其中,海口市171户,文昌市81户,“威马逊”样本178户,海鸥样本74户。台风“威马逊”及“海鸥”各使用类型和建筑类型房屋样本量见表1。可以看出,总体样本在各水深区间,各房屋使用类型分布较为均衡,样本量较为充足,基本可以满足脆弱性曲线构建的需要。

## 2 方法

### 2.1 室内财产洪灾损失率估计

室内财产平均损失率(Mean Damage Ratio, MDR)等于室内财产的直接经济损失值( $L$ )与其灾前经济价值( $V$ )之比,即  $MDR = L/V$ 。

其中,直接经济损失值为室内财产恢复到灾

表1 台风“威马逊”及“海鸥”灾后室内财产损失调查样本量统计表

台风	水深/m	结构类型				使用类型				
		钢筋混凝土	砂石	砖混	总计	城市住房	乡镇住房	农村住房	商业用房	总计
威马逊	<0.1	7	0	1	8	1	0	1	6	8
	0.1 ~ 0.5	38	3	9	50	15	1	7	27	50
	0.5 ~ 1.0	62	3	4	69	9	17	10	33	69
	1.0 ~ 1.5	20	6	4	30	2	10	13	5	30
	1.5 ~ 2.0	13	0	6	19	0	3	15	1	19
	>2.0	1	0	1	2	0	0	2	0	2
	合计	141	12	25	178	27	31	48	72	178
海鸥	<0.1	9	0	1	10	4	0	1	5	10
	0.1 ~ 0.5	27	1	3	31	6	0	6	19	31
	0.5 ~ 1.0	18	2	7	27	2	1	8	16	27
	1.0 ~ 1.5	2	2	2	6	1	0	4	1	6
	1.5 ~ 2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	合计	56	5	13	74	13	1	19	41	74
总计		197	17	38	252	40	32	67	113	252

前状态所需要的费用<sup>[1]</sup>。室内财产损失值及室内财产价值的确定方法,一般是基于实地价值调查,根据房屋室内财产的原购入价值及新旧程度(全新、中等新旧、需要置换)计算折旧价值,对折旧价值求和得到室内财产原始价值,再根据室内财产的位置、高度以及洪水淹没深度判断室内财产损失值<sup>[8]</sup>。

在实地调查中,对于室内财产经济价值,主要由调查人直接判断给出,难以直接判断时通过访谈户主估计得出。对于灾害损失值,针对不同损毁状态分别估算,即如果全损,则定义损失值为其经济价值减去残值,如果是维修后继续使用,则损失值定义为维修价格(重置价值)。

## 2.2 室内财产洪灾脆弱性曲线估计

作为表征致灾因子危险性强度与承灾体损失率之间关系的特征量,脆弱性曲线可以用多种形式表达,例如通过线性多边形函数、平方根函数、基于点的幂函数<sup>[23]</sup>、Logistic 函数<sup>[24]</sup>等连续函数形式表达,或者通过核密度函数<sup>[11]</sup>等非参数形式平滑为曲线表达,或者简化为脆弱性矩阵<sup>[1]</sup>等。

通过分析室内财产损失率-水深样本的散点图形态,结合损失率值域应该位于[0,1]区间单调递增等特点,本研究优选了 Logistic 函数进行脆弱性曲线拟合,函数具体形式如下:

$$f(x) = \frac{K}{1 + a \times \exp(-b \times d)} \quad (1)$$

为了比较“威马逊”及“海鸥”两场台风的损失特点,除了利用两场台风总样本数据进行拟合外,还分别用单场台风数据进行了拟合。

## 2.3 室内财产洪灾损失率不确定性

脆弱性曲线最直观的理解为,曲线上的值为损失率的期望值。其不确定性可以理解为,损失率大小会受到一系列因素的影响,对于一个灾害事件而言,某类承灾体在相同致灾因子强度作用

下,其损失率值是一个概率分布,其期望值为脆弱性曲线上对应的值。

基于历史灾害事件调查出致灾因子危险性强度数据及损失率数据,对脆弱性曲线不确定性进行定量表达,一种方法是通过估计损失值分布的区间,或给出一定致灾因子强度下损失值的分布函数来表达。例如,可以利用固定窗宽对数据进行分组,通过假定一定致灾因子强度下损失率分布满足某类函数分布(如 $\beta$ 分布、Lognormal 分布等),对每组样本进行拟合得到不确定性函数。另外,考虑到分布函数对样本点数量要求较高,如果没有达到大量样本点,也经常简化为对样本分布求脆弱性曲线及一倍标准差曲线,得到介于平均损失值两侧的上下区间。

量化脆弱性曲线不确定性对于灾害风险评估或灾后损失评估有重要的作用。例如,在风险评估时,采用蒙特卡罗方法,根据脆弱性曲线的不确定性分布函数随机产生损失率值,进而获取更加合理的随机事件损失率样本值,用于风险概率计算。

在本研究中,采用一倍标准差刻画脆弱性曲线不确定性,首先对于每一种房屋类型的样本,以0.1 m为区间求各水深范围内损失率的一倍标准差,然后采用 Logistic 函数进行拟合。

## 3 结果与讨论

### 3.1 室内财产价值特征

根据城市居民、农村居民及商业3种使用类型房屋的室内财产价值样本数据在各财产价值区间对应的样本频率,绘制了价值频率分布直方图。由于总体样本量不多,横轴室内财产总价值采用不等距分组(图3)。各使用类型房屋的室内受淹财产平均价值、标准差及平均损失统计结果见表2。

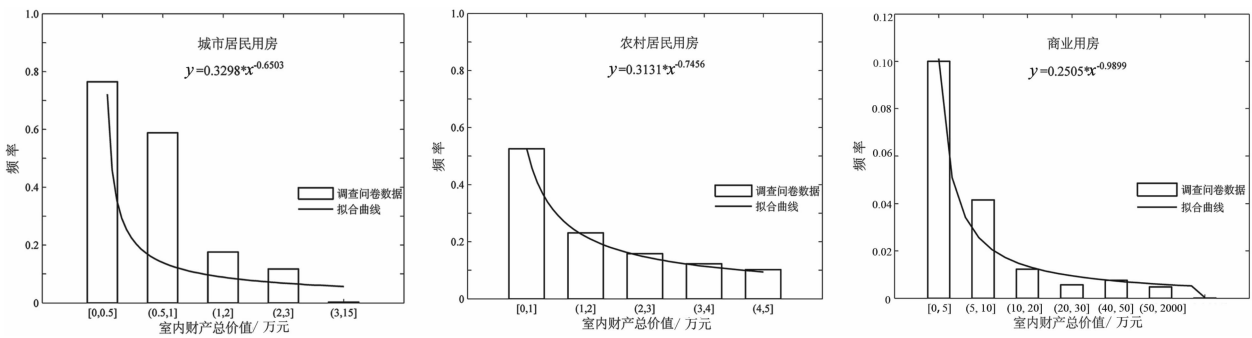


图3 城市居民、农村居民及商业三类使用类型受灾房屋的室内财产价值分布直方图

表 2 受灾房屋室内财产价值及损失特征统计

使用类型	平均价值/万元	标准差/万元	平均损失/万元	标准差/万元	平均损失率%	标准差/万元
城市居民	1.47	2.57	0.32	0.49	43.08	0.22
农村居民	2.09	1.76	0.78	0.94	63.49	0.23
商业用房	30.72	193.92	2.35	4.82	42.21	0.20

分析直方图及统计结果特征，可以看出受灾房屋室内财产价值具有四个方面的显著特点：一是较贫困的调查对象受灾比例更高，而相对富裕的受灾率更小，室内财产价值大小与受灾率之间，符合比较好的幂律关系(图3)；二是农村居民室内财产平均损失率最高，原因为农村居民用房多为一层建筑，洪水来临时因财产难以转移导致损失率高；三是商业用房平均损失率最低，主要是因为其价值较大故商户多采取了减灾措施；四是室内财产损失率组间差异，农房最小而商业用房最大，原因是受灾农户多收入低，而不同商户室内财产价值差异巨大。另外，必须注意到的是，上述统计结果仅根据受灾的样本统计得出，不能代表未受灾的房屋室内财产价值特征。灾后问卷调研获取的受灾房屋的室内财产价值分布，有助于理解哪些房屋更加容易受灾，或者说脆弱性更高。

3.2 居民住房室内财产脆弱性曲线

在绘制脆弱性曲线时，首先确定房屋结构与使用类型的组合，本文根据实际调研样本数量选择砂石结构-农村居民、砖混结构-农村居民用房、钢筋混凝土结构-农村居民用房、钢筋混凝土结构-城市居民用房进行分析；其次考虑到“威马逊”及“海鸥”两场台风致灾特点有所不同，按照两场台风各自样本及总体样本分别绘制了脆弱性曲线，共计得出8条居民用房室内财产洪灾脆弱性曲线。

基于调查问卷得到的水深及损失率数据，以损失不为零、水深最小的样本点为脆弱性曲线的起始点(图4)。图中实线为脆弱性曲线，虚线为一倍标准差曲线，一倍标准差曲线并没有对称分布在脆弱性曲线的两侧，这是由于一倍标准差曲线为拟合结果，并不是实际的标准差值。脆弱性曲线的函数形式如下，其中MDR为平均损失率，a，b为拟合参数，d为水深(m)。

$$MDR = \frac{1}{(1 + a \times \exp(-b \times d))} \circ$$

(2)

从脆弱性曲线拟合效果来看，8条曲线中，样本点分布比较离散，只有2条曲线的拟合优度值大于0.5，各类房屋一倍标准差曲线区间较大，表明脆弱性曲线中包含了较大的不确定性。原因除致灾因子指标考虑单一外，还可能包括脆弱性曲线函数形式选择、数据误差、屋主经济水平差异等。

从脆弱性曲线的形状来看，辅以对各脆弱性曲线的一阶导数、二阶导数特征分析，可知脆弱性曲线增长大致可分为3个阶段，分别为慢速增长期(0~0.36 m)、快速增长期(0.36~1.36 m)、慢速增长期(1.36 m及以上)，当水深达到0.86 m时，损失率随水深增长变化最快。

3.3 商业用房室内财产脆弱性矩阵

虽然商业用房室内财产损失率-水深样本数量较多，但按照居民用房房屋分类方法，其数据不足以支撑建立商业用房量化的脆弱性曲线并刻画其不确定性，因此本研究中将按照商业用房规模及水深等级进行分组，建立脆弱性矩阵。

商业用房规模按照占地面积大小划分为3类，即小型商业用房(<50 m<sup>2</sup>)、中型商业用房(50~100 m<sup>2</sup>)、大型商业用房(>100 m<sup>2</sup>)。水深分为四个等级，其区间分别为[0.0, 0.1]、(0.1, 0.5]、(0.5, 1.0]、(1.0, 1.8]。计算各用房规模及水深组合下室内财产的平均损失率，即为商业用房室内财产脆弱性矩阵(表3)。表中，括号内数字代表每组样本的样本量，脆弱性数据异常值以斜体表示。

表3 基于“威马逊”及“海鸥”台风灾后问卷数据的商业用房室内财产损失率矩阵

水深/m	占地面积(样本量)		
	< 50 m <sup>2</sup>	50 ~ 100 m <sup>2</sup>	> 100 m <sup>2</sup>
[0.0 , 0.1]	0.053 (7)	0.020 (1)	0.250 (2)
(0.1 , 0.5]	0.176 (36)	0.250 (5)	0.310 (3)
(0.5 , 1.0]	0.236 (33)	0.313 (9)	0.115 (4)
(1.0 , 1.8]	0.528 (4)	0.317 (2)	0.007 (1)



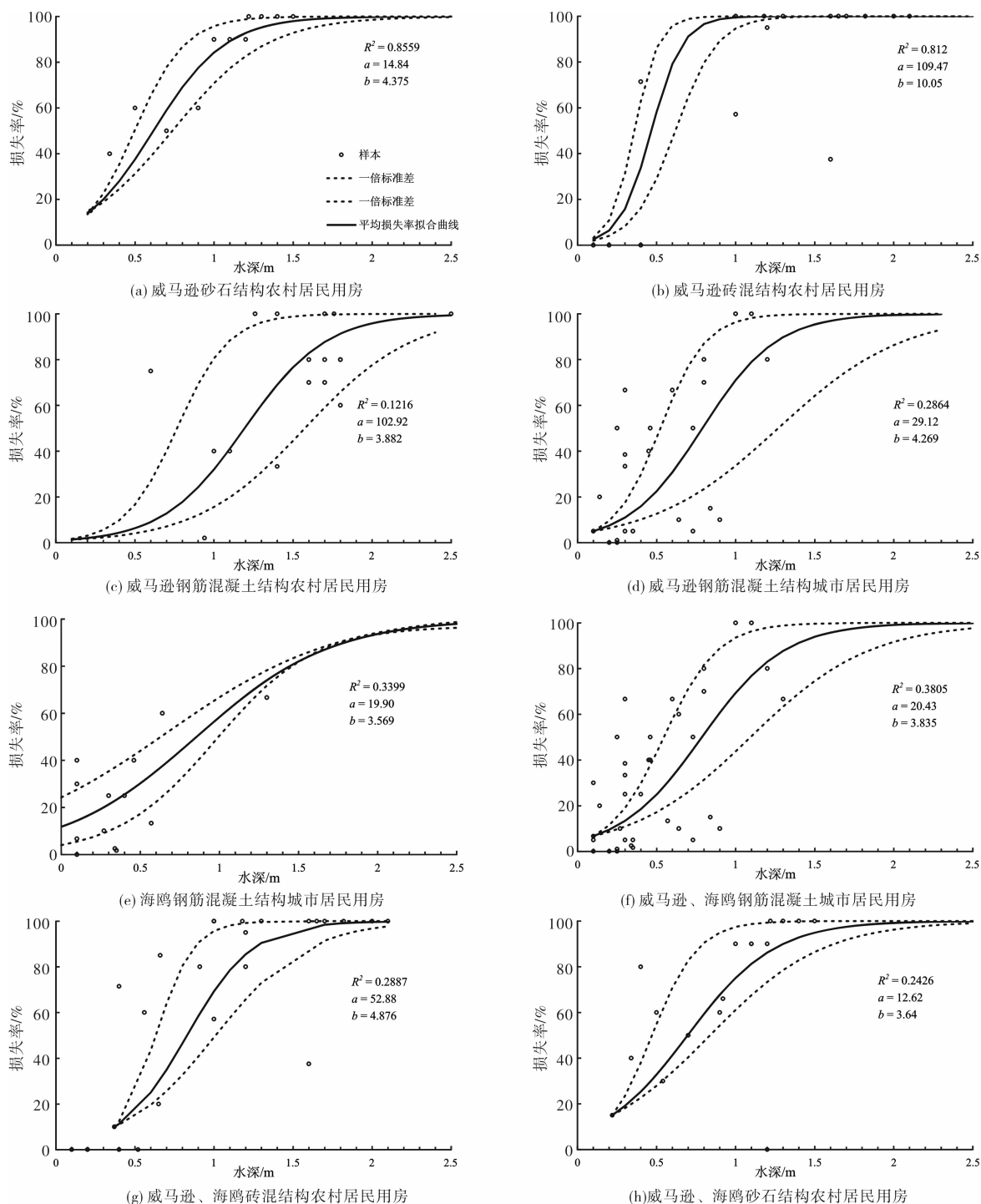


图4 基于“威马逊”及“海鸥”台风灾后调查的室内财产台风次生海岸洪水脆弱性曲线

可以看出, 商业用房室内财产的损失率随着占地面积的增加及水深的增加而增加, 矩阵中有三组损失率异常值, 分别为占地面积为  $50 \sim 100 \text{ m}^2$ 、水深为  $1.0 \sim 1.8 \text{ m}$  组, 占地面积大于  $100 \text{ m}^2$ 、水深为  $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$  组, 占地面积大于  $100 \text{ m}^2$ 、水深为  $1.0 \sim 1.8 \text{ m}$  组, 异常原因可能是数据量不足, 不同商业用房样本室内财产总值之间存在显著差异, 以及是否采取减灾措施等。

### 3.4 台风次生沿岸洪水成灾特点与损失率关系

台风风暴潮、台风暴雨洪水相互作用形成的

台风次生海岸洪水, 具有独特的致灾及成灾特点, 例如风暴潮流速高、盐分含量较大、具有腐蚀性, 沿岸地区还会伴随海浪, 所以物理外力、浸泡及腐蚀等多种因素导致成灾。因此, 相对于内涝等城市洪水类型而言, 台风次生海岸洪水的致灾危险性程度更大。此外, 虽然台风风暴潮的涨水过程往往只有短短数小时, 但由于局地地形等因素的影响会造成积水, 室内财产的淹没时长可能从数小时至数天不等。

根据“威马逊”及“海鸥”2 场台风问卷调查数

据,绘制了室内淹没时长-室内财产损失率关系散点分布图(图5)。可以看出,损失率-淹没时长散点分布离散,变化区间很大,二者缺乏显著的统计关系。一般来说,淹没时间越长,室内财产损失率越高,而基于问卷调查结果的散点图并不能很好地反映出这一点。

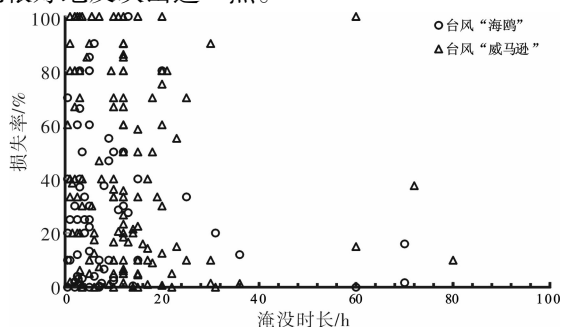


图5 基于“威马逊”及“海鸥”灾后调查数据的房屋淹没时长-室内受淹财产损失率散点图

造成这一结果的原因可能是,①绝大部分样本的淹没时长大于1 h(小于1 h的样本仅有15个),淹没时长已经远远超过了损失率对淹没时长的敏感期限;②海水含有较高盐分,家用电器等在海水中即使浸泡时间很短,也会造成很大破坏,难以维修。可见,台风次生海岸洪水的致灾因子多样,多个致灾因子联合作用成灾,而脆弱性曲线或矩阵结果中,主要选定水深作为主要致灾因子,因此脆弱性结果包含较大的不确定性。

### 3.5 灾前减灾措施与室内财产损失率关系

基于“威马逊”及“海鸥”2场台风灾害所有调查样本数据,按照是否有灾前临时减灾措施将该组合的室内财产损失率数据分为2组,提取了具有减灾措施记录的调查数据进行了分析。所有房屋类型中,商业用房的样本数量最多(113户),受调查的商业用房多分布在城市,其室内财产价值较高,台风灾害预警信息获取较为及时,特别是钢筋混凝土商业建筑物的室内财产的减灾措施比率较高,在6个水深区间,是否采取了减灾措施的比率的样本见图6,分别为6%,14%,26%,36%,75%,67%。

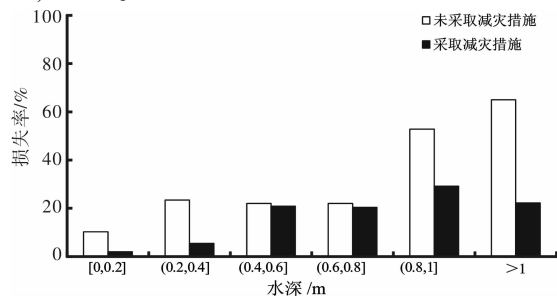


图6 在有无减灾措施下钢筋混凝土-商业用房室内财产平均损失率直方图

结构类型为钢筋混凝土及使用类型为商业的组合,在有无减灾措施两种情况下不同水深下的

室内财产平均损失率见图6。可以看出,在各种水深区间,有减灾措施情况下室内财产损失率均低于没有减灾措施的,六个水深区间的实际样本损失率的差别分别为8.3%,18.0%,1.1%,1.6%,23.6%,42.8%。

灾前临时减灾措施的实质,①将其中易受灾或者脆弱性大的物品搬离洪水淹没区,从而减小室内财产的总脆弱性(损失率),②搬离物品会减小室内财产总价值量,从而减轻经济损失的总量。“威马逊”及“海鸥”2场台风的调查结果表明,一方面,灾前防灾减灾措施可以有效地减轻灾害损失,而另一方面,如果将两类样本不加区别地同时用于构建脆弱性曲线,可能加大脆弱性曲线或者矩阵结果的不确定性。

## 4 结论与建议

本文基于台风“威马逊”与“海鸥”两场台风带来的次生海岸洪水灾害,在海南省海口市及文昌市开展了实地问卷调查,基于调查获取的危险性数据及损失数据,对沿岸室内财产开展了脆弱性评估。主要结论与建议如下所示。

(1)构建了居民住房及商业用房的室内财产量化脆弱性曲线或者矩阵,可为台风次生海岸洪水灾害损失或风险评估提供关键输入参数,而不确定性定量表达有助于提高损失或风险评估结果的可靠性。利用Logistic函数构建了8种居民住房室内财产脆弱性曲线,采用矩阵形式建立了商业用房室内财产脆弱性矩阵;相对贫困的居民及规模较小的商户更加容易受灾并且损失率更高;商业用房室内财产价值差异较大,按照规模分类可以更好刻画脆弱性大小。

(2)台风次生海岸洪水灾害复杂的致灾机制使脆弱性曲线具有较大的不确定性。在各种因素中,淹没水深是表征损失率最好的致灾因子指标。但是必须注意到,风暴潮洪水及陆地暴雨洪水的联合作用、海岸洪水的腐蚀性作用、淹没时长或淹没时长敏感期难以精确测量、“威马逊”与“海鸥”两次台风事件前后叠加等诸多因素,均给本文中的室内财产脆弱性评估结果带来不确定性。未来研究中,应该积极探索构建反映多致灾因子危险性指标的脆弱性曲线,或以水深为主要致灾因子指标,辅以其他致灾因子作为修正指标,从而有效降低脆弱性曲线的不确定性。

(3)灾前防灾减灾措施等社会因素可以有效地减少室内财产的损失率。目前绝大多数研究在构建脆弱性曲线时,一般主要考虑刻画致灾因子强度的物理指标,很少将社会因素直接作为变量修正脆弱性。未来研究中,应该细化考虑地方减灾经验、预警时间、是否采取减灾措施等社会因素,

将其作为脆弱性曲线的修正系数纳入脆弱性曲线量化之中, 从而加强脆弱性曲线结果的区域适用性。

**致谢:** 台风致灾及灾害损失现场调查的开展以及风暴潮淹没范围图的提供得到了国家海洋局海洋减灾中心的大力支持, 实地调查问卷得到了海南省受灾地区居民及商户的热心支持与配合, 莫婉媚在问卷设计等方面开展了有益的前期研究, 中国人保财险海南省分公司提供了调查协助, 在此表示衷心的感谢。

## 参考文献:

- [1] Smith D I. Flood damage estimation-a review of urban stage-damage curves and loss functions[J]. *Water Sa*, 1994, 20(3): 231-238.
- [2] Hazus-Mh F. Flood Model: Technical Manual[J]. Federal Emergency Management Agency, 2003.
- [3] USACE. Economic guidance memorandum (EGM) 04-01, Generic depth-damage relationships, US army corps of engineers memorandum, CECW-PG10 [Z]. Washington DC: VSACE 2003.
- [4] Dushmanta D, Srikantha H, Katumi M. A mathematical model for flood loss estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 277(03): 24-49.
- [5] Penning-Rowsell E C, Chatterton J B. The benefits of flood alleviation: A manual of assessment techniques[J]. *Geographical Journal*, 1977, 20: 145.
- [6] Frank M, Meyer V. Flood damage, vulnerability and risk perception: challenges for flood damage research. [D]. Netherlands, Springer, 2005.
- [7] USACE. Business depth damage analysis procedures[Z]. Washington DC: VSACE, 1985.
- [8] Mcbean E A, Gorrie J, Fortin M, et al. Flood Depth-Damage Curves by Interview Survey[J]. *American Society of Civil Engineers*, 1988, 114(6): 613-634.
- [9] Schanze J, Zeman E, Marsalek J. Flood risk management; Hazards, vulnerability and mitigation measures[M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] Pistrika A, Tsakiris G, Nalbantis I. Flood Depth-Damage Functions for Built Environment[J]. *Environmental Processes*, 2014, 1(4): 553-572.
- [11] Merz B, Kreibich H, Thieken A, et al. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2004, 4(1): 153-163.
- [12] Hsu W, Huang P, Chang C, et al. An integrated flood risk assessment model for property insurance industry in Taiwan[J]. *Natural Hazards*, 2011, 58(3): 1295-1309.
- [13] 周瑶, 王静爱. 自然灾害脆弱性曲线研究进展[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 435-442.
- [14] 石勇, 许世远, 石纯, 等. 洪水灾害脆弱性研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 41-46.
- [15] Gissing A, Blong R. Accounting for variability in commercial flood damage estimation[J]. *Australian Geographer*, 2010, 35(2): 209-222.
- [16] 施国庆. 洪灾损失率及其确定方法探讨[J]. *水利经济*, 1990, 2: 37-42.
- [17] 石勇. 城市居民住宅的暴雨内涝脆弱性评估[J]. *灾害学*, 2015, 30(3): 94-98.
- [18] 殷杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 风暴洪水主要承灾体脆弱性分析—黄浦江案例[J]. *地理科学*, 2012, 32(9): 1155-1160.
- [19] 董姝娜, 姜鑫鹏, 张继权, 等. 基于“3S”技术的村镇住宅洪灾脆弱性曲线研究[J]. *灾害学*, 2012, 27(2): 34-38.
- [20] 梁海燕. 海南岛风暴潮灾害承灾体初步分析[J]. *海洋预报*, 2007, 24(1): 9-15.
- [21] 况昌勋. “海鸥”掠走海南近 58 亿元[N]. *海南日报*, 2014-09-18(001).
- [22] 况昌勋. 救灾资金, 省政府再拨 6 亿[N]. *海南日报*, 2014-07-22(001).
- [23] Büchele B, Kreibich H, Kron A, et al. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2006, 6(4): 485-503.
- [24] Vozinaki A E K, Karatzas G P, Sibetheros I A, et al. Development of synthetic velocity-depth damage curves using a Weighted Monte Carlo method and Logistic Regression analysis: EGU General Assembly Conference Abstracts[Z]. 2014: 16, 804.

## Vulnerability of Building Contents to Coastal Flooding Based on Questionnaire Survey in Hainan after Typhoon Rammasun and Kalmeagi

Cao Shijia<sup>1, 2</sup>, Fang Weihua<sup>1, 2</sup> and Tan Jun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing, 100875; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing, 100875; 3. National Marine Hazard Mitigation Service, Beijing 100194, China)

**Abstract:** Coastal flood often causes severe damage to building contents in typhoon-prone coastal areas of China. As induced by typhoon through the interaction between storm surge and inland flood, building contents could be damaged by inundation, corrosion due to salty water, and physical pressure caused by wave. Since the damage mechanism of coastal flood is usually different from other flood types, the understanding on how the damage to building contents are developed, and quantitative assessment on building content vulnerability are of vital importance to loss and risk modeling of costal flood disasters. In this paper, the vulnerability curves of residential building contents and vulnerability matrix of commercial building contents are developed based on questionnaire survey dataset in Haikou and Wenchang city, Hainan Province of China, which suffered dramatic coastal flood disaster due to the hitting of Typhoon Rammasun and Kalmeagi in 2014. By selecting inundation water depth as hazard indicator, mean damage ratios of flooded building content and their relationship with water depth are explored and modeled with Logistic function. In addition, the effect of inundation duration and mitigation measures in helping reducing mean damage ratio, and their impact on the magnitude of secondary uncertainty are also analyzed. Finally, suggestions to future empirical vulnerability curve study; especially measures on reducing uncertainty are discussed and concluded.

**Key words:** vulnerability; building contents; costal flood; typhoon; questionnaire survey; uncertainty