

台风风暴潮灾害风险评估研究综述

张月霞^{1,2}, 王辉³

(1.浙江省海洋监测预报中心,浙江 杭州 310007; 2.中国海洋大学环境科学与工程学院,山东 青岛 266100;
3.国家海洋环境预报中心,北京 100081)

摘 要: 综合前人研究成果,认为风暴潮灾害风险系统由致灾因子危险性、承灾体脆弱性和灾害的损失组成,并从致灾因子危险性、承灾体脆弱性入手,对国内外风暴潮灾害风险评估主要研究方法进行系统梳理、总结,比较其优势及不足,对未来的研究重点进行了展望,为我国沿海地区风暴潮灾害风险评估理论的发展、完善提供参考。

关键词: 台风风暴潮;致灾因子危险性;承灾体脆弱性;风险评估

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2016)02-0081-08

1 引言

台风风暴潮(文中简称“风暴潮”)是由于台风过境所伴随的强风和气压骤变而引起的局部海面震荡或非周期性异常升高(降低)现象^[1]。我国是世界上遭受风暴潮灾害影响严重的国家之一,仅2013年因风暴潮灾害造成的直接经济损失就达到152.45亿元^[2]。为应对风暴潮灾害带来的损失,近年来我国在风暴潮灾害监测监视和预报预警方面开展了大量卓有成效的工作,在很大程度上降低了灾害造成的损失。但是,灾害预警报技术主要解决了短时期风暴潮过程的预警报,区域长期可持续发展还需要综合性的风险评估技术作为支撑。

20世纪80年代以来,国外纷纷开展风暴潮灾害风险研究,已形成较为科学有效的评估理论与方法,并在很多沿海城市得到应用。相比而言,我国风暴潮灾害风险评估研究起步较晚,主要始于国际减灾十年活动的启动。在研究过程中,由于对灾害系统构成的不同见解,不同学者的研究侧重点也不尽相同,尤其是前期的大部分研究只注重致灾机理的研究,对于风暴潮灾害承灾体甚少涉及。为规范风暴潮灾害风险评估工作,国家海

洋局于2012年颁布了《风暴潮灾害风险评估与技术导则(试行)》^[3],一定程度上为我国风暴潮灾害风险评估研究指明了方向。本文对国内外风暴潮灾害风险评估主要研究方法进行系统梳理、总结,比较其优势及不足,并提出未来研究趋势,为我国沿海地区风暴潮灾害风险评估理论的发展、完善提供参考。

2 风暴潮灾害风险系统的构成

风暴潮只是可能导致灾害发生的极端自然现象,其本身并不构成灾害,只有当风暴潮的强度超过了影响区域内的人类社会系统的脆弱性水平和应对能力,才会导致灾害的发生^[4]。对于灾害风险系统的构成,不同学者有不同的见解,如Okada等认为自然灾害风险是由危险性、暴露性和脆弱性这3个因素相互作用形成的^[5];张继权等加入了防灾减灾能力因子,提出自然灾害风险是由危险性、暴露性、脆弱性和防灾减灾能力共同构成^[6];史培军等认为自然灾害是致灾因子、孕灾环境和承灾体三者综合作用的结果^[7];联合国开发计划署则将自然灾害理解为致灾因子和人类脆弱的共同作用的结果^[8]。

收稿日期: 2015-11-05

基金项目: 浙江省海洋防灾减灾专项资金项目“台州市(椒江区、路桥区)风暴潮和海啸灾害风险评估与区划”;国家海洋局海洋公益性行业专项(201305031)

作者简介: 张月霞(1982-),女,工程师,博士,主要从事海洋环境预报、海洋防灾减灾工作。E-mail:zhangyuex@126.com

综合前人研究成果,本文比较认同联合国开发计划署对于风暴潮灾害风险系统的定义,认为其具有3个内容:(1)存在风暴潮灾害的各种诱发因素,即“致灾因子”;(2)灾害的受体是人类和人类生活环境等,包括社会、经济、环境等因素,一般称为“承灾体”;(3)灾害的损害,包括人类生命健康的危害、对人类生活和活动条件的危害、对人类各种财产的破坏、以及对资源和环境等生存发展基础条件的破坏。简单地表述为,致灾因子和承灾体两者之间相互作用的规律构成了风暴潮灾害的成灾机制,其结果形成了通常所说的风暴潮灾情。

3 致灾因子危险性分析

灾害的形成是致灾因子对承灾体作用的结果,没有致灾因子就没有灾害^[4]。风暴潮致灾因子危险性研究起步较早,研究方法早期以经验统计方法为主,目前数值模型的利用越来越普遍,研究内容包括风暴潮强度的预报、可能最大风暴潮(Probable Maximum Storm Surge, PMSS)的计算和不同重现期风暴潮的研究。

3.1 风暴潮强度的预报

对于风暴潮强度的预报,早期研究主要集中在对实际观测风暴潮与其可能影响因素进行计算分析,确定它们之间的统计关系。到了20世纪50年代,学者们从风暴潮的发生机理入手,建立风暴潮数值模拟模型,开展风暴潮危险性评估。相比早期的经验统计,研究方法逐步由定性、半定量分析转向数值模拟。经过60 a的发展,许多国家和地区都建立了各具特色的风暴潮模型^[9-13],例如美国的SPLASH模式以及在其基础上发展出的SLOSH模型、美国加勒比海灾害减轻项目建立的TAOS模型、英国的SEA模型、荷兰的DELFT3D模型以及丹麦的MIKE模型等,其中美国历时10 a建立的SLOSH风暴潮模式,在风暴潮强度预报实践中取得了良好的效果;丹麦的MIKE模型在海洋工程方面得到了广泛应用。1979年,我国学者孙文心发表了国内第一篇风暴潮数值模拟的论文,开创了国内数值风暴潮预报的先河,经过30多年的发展,我国也在风暴潮模拟技术方面取得了长足的进步,如陈长胜等^[14]

以江浙沿海为研究区域,采用二次守恒差分模型,空间与时间步长分别取30 km和200 s,对强度、移向和移速不同的各类模型台风暴潮进行了数值模拟;于福江等^[15]采用嵌套网格,建立了东海区风暴潮预报模式,该模式粗细网格的分辨率分别是6'和2';端义宏等^[16]应用一个改进的多层、自然正交坐标网格的河口海岸模式ECOM2Si建立了长江口区的风暴潮数值预报模式,该模型在长江口区有较细水平分辨率,最小格距为300 m,而在外海的最大格距为5 km,时间步长为120 s。

风暴潮的数值模拟可以对风暴潮的强度、持续时间和影响范围进行预测预报,能够为沿海地区政府部门的风暴潮灾害防灾减灾工作提供决策依据。同时,数值模拟技术不受到历史资料长度的限制,可以预测风暴潮个例的变化,实现对风暴潮灾害危险性的实时预报预警,受到了许多学者的青睐,得到了越来越多的应用,但风暴潮数值模拟准确性受制于数值模型的精度和输入条件的准确度。

3.2 不同重现期风暴潮的研究

很多研究者认为风暴潮灾害的危险程度主要取决于未来发生不同规模风暴潮的可能性大小^[17],并以不同重现期风暴潮作为判断标准,评价长时间序列下一个区域可能面临的风暴潮灾害强度^[18-19]。这是一种基于频率分析的手段,给出一个区域未来发生不同严重程度风暴潮的可能性,是风暴潮危险性长期特征的反映,如百年一遇风暴潮、五十年一遇风暴潮。迄今为止,国内外许多研究者对不同区域的不同重现期风暴潮进行了研究。如王喜年等^[20]、吴少华等^[21]利用龚贝尔方法,计算了我国沿海的不同重现期风暴潮;McInnes等^[22]计算了不同气候条件下的澳大利亚东北部沿海Cairns市的不同重现期风暴潮;方国洪等^[23]、谢翠娜等^[24]基于长期验潮站历史观测数据,分别运用不同方法计算了不同重现期风暴潮。不同重现期风暴潮的计算需要收集长时间序列的历史风暴潮资料,在一些验潮资料缺乏的区域,多是采用长短系列订正的方法,但只有在资料系列短的测站附近存在长期观测站,同时两者又有良好相关才是有效的^[20]。当然亦可采用经过检验的风暴潮数值模式,对无资料时段中的风暴潮过程进

行计算,以弥补潮位资料的缺失,从而开展不同重现期风暴潮计算,但是这类研究并不多。近几年,一些学者^[25-28]提出了采用随机模拟扩充台风样本的方法来增加样本数,弥补历史观测数据数量上和质量上的不足等问题。随机台风的数值模拟虽然在一定程度上解决了观测样本的不足问题,但是不容忽视的是随机数据集的生成、计算的工作量大,因此在实际应用中并不多。

对于不同重现期风暴潮的统计分析,主要有龚贝尔方法、皮尔逊Ⅲ型曲线法、韦伯分布、广义极值分布、帕累托分布和联合概率分布等计算方法。这些方法侧重点不同,各有优点和不足,在实际应用中应结合实际情况选择最佳方法。例如,《海堤工程设计规范》中推荐龚贝尔方法、皮尔逊Ⅲ型曲线法。不同重现期风暴潮的计算可以实现一个区域在未来长期时间里发生风暴潮灾害危险程度的预测分析,为政府规划部门制定防灾减灾规划提供科学依据,是风暴潮灾害危险性评价的主要方法之一。但是该方法并不涉及具体的风暴潮过程,对风暴潮的持续时间、影响范围等要素无法预测,因此无法预测风暴潮个例的实时危险性。此外,受全球气候变化和海平面上升的影响,不同重现期的风暴潮极值水位可能发生变化,不能客观全面反映未来风暴潮灾害的风险。

3.3 可能最大风暴潮(PMSS)的计算

20世纪60年代,工程设计领域引入了可能最大风暴潮(PMSS)概念。PMSS的计算对我国沿海正在新建和拟建的核电站高潮位的确定至关重要,已列入国家核安全局的核安全导则中,其计算方法一般可分为两种,一种是数值计算方法,即确定相关台风参数,在适当的边界条件和初始条件下,通过数值模型的计算沿岸的风暴增水分布和特定地点风暴增水随时间的变化。国内外研究学者利用数值模型针对PMSS开展了一系列的研究。其中,美国对PMSS的研究历史较长,工作也较为系统,对台风强度进行分类,利用SLOSH模式,计算不同强度台风下的最大可能淹没范围,以可能最大台风产生的风暴潮为PMSS^[29];日本以“5912”号伊势湾台风作为可能最大台风的基准参数进行路径平移,完成不同区域PMSS关键参数的设置^[30];尹庆江等利用

已确定的可能最大台风,按3种类型的13条台风路径分别进行了计算,确定了浙江镇海的PMSS值^[31];应仁方等^[32]、端义宏等^[33]等分别建立了适合上海的不同风暴潮数值模型,计算上海地区(吴淞)的PMSS;胡仁飞等^[34]考虑台风路径预测的不确定性,引入风暴潮集合预报技术,以台风“9711号”为基础,计算宁波近海的PMSS。这种方法适用性较强,易于在全国范围内推广应用,但是PMSS数值计算的准确性,很大程度上取决于数值模式的准确性。PMSS的另一种计算方法是采用数理统计方法,以区域中已有的实测水位的历史数据组的分析为依据,数据曲线的渐近线或接近于它的数值就是PMSS水位。该方法需要收集长时间序列的历史实测数据,而且需要分析筛选出有代表性的数据。在实际应用中,如果在一个研究区域内能够收集到质量可靠的、长时间序列的历史风暴潮观测数据,则可用该方法估算出这个区域的PMSS,计算的PMSS是一种有确定低超越概率的风暴潮。但是该方法更多地是应用在易受温带风暴影响的区域。

PMSS的计算方法具有较大适用性,而且易于运用,在沿海堤岸工程以及核电站设计中应用广泛,但选取的台风典型关键参数通常是“最恶劣者”的组合,计算得到的PMSS可能会过于极端,给工程设计带来巨大成本。因此,在实际工作中,应该根据沿岸工程的重要程度,经专家论证,选择合理的计算方案。

4 承灾体脆弱性评估

只有当承灾体对风暴潮灾害的承受能力超出自身水平时,才能形成灾害,因此研究致灾因子危险性的同时,亦需同步开展承灾体脆弱性分析。20世纪80年代提出了“承灾体脆弱性”概念。随着研究的深入,脆弱性逐渐演变成由自然、社会、经济和环境共同决定的多尺度的综合性概念,研究方法主要包括两种。

4.1 指标体系法

指标体系法是一种半定量的计算方法,主要是通过建立评价指标体系和计算承灾体脆弱性指数来表示评价单元脆弱性程度的相对大小,这是目前

脆弱性评估中最为常用的方法。其中,评价指标体系的建立是最为基础、关键的一步,目前多是通过承灾体脆弱性的发生原因、表现特征等方面进行指标选择,建立评价指标体系。Gornitz^[35]于1991年提出了海岸脆弱性指数和风险等级概念;1992年,IPCC提出了全球第一个脆弱性评估框架,构建了5种评价指标体系^[36],在此基础上,联合国环境规划署制定了更为具体的评价手册^[37]。随后,许多学者根据各自的专业研究方向建立了不同灾种的评价指标体系,此外,这些研究的空间尺度也趋于多样化,大到全球尺度的,精细化至社区尺度。如Davidson^[38]构建的地震灾害风险指标被全球城市地震灾害调查计划应用到全球范围的20个城市^[39];"美洲计划"研究项目构建了包括3个次级指标的脆弱性指数^[40];Bollin等^[41]综合考虑了物理、社会、经济、环境4个脆弱性方面,构建了GTZ脆弱性评估模型;Granger^[42],Kleinosky等^[43],Rao等^[44]等国外学者把研究区域尺度从大都市群逐渐缩小到城市社区,建立了基于不同场景的相关评价指标体系;石勇等^[45]、王静静等^[46]分别从不同角度入手,构建了脆弱性指标体系,开展了上海沿海6区县自然灾害脆弱性评价;李阔等^[47]从社会经济、土地利用、生态环境、滨海构造物和承灾能力5个方面,建构了广东省沿海地区风暴潮灾害易损性评价指标体系。

指标体系法是一种相对半定量化脆弱性的度量方法,原理简单,操作性强,在单个承灾体、多个承灾体以及承灾系统脆弱性评估中已有广泛应用,但是不同研究学者对灾害的发生原因、承灾体的表现特征等理解不同,建立的指标体系不同,同时在指标因子的权重方面,不同的研究学者赋重亦不尽相同。因此,运用指标体系法进行承灾体脆弱性评估的过程中人为的主观性较强。此外,承灾体脆弱性的研究具有很强的区域性,不同研究区域的承灾体类别、表现特征不同,因此需要建立适合研究区域的评价指标体系。

4.2 定量化脆弱性曲线

脆弱性曲线,又称为脆弱性函数,是基于不同致灾因子的强度参数与承灾体损失(率)之间关系的一种定量化脆弱性评估方法,这种基于强度-损失(率)的关系主要是通过实验室模拟、灾后实地调

查等方式构建^[48]。脆弱性曲线创始于1968年,美国联邦保险机构在国家洪涝灾害保险工程实施过程中,建立了一系列不同水深与不同类型建筑物的损失率变化曲线,这是最早的承灾体脆弱性曲线^[45];英国洪灾研究中心将建筑物大致分成21种类型,考虑2种洪水延时情况及4种社会条件,分别构建了168条不同建筑的淹没深度与损失曲线^[49],这是目前洪水灾害脆弱性曲线研究最为详尽的成果之一,并已用于英国居住用房的水灾脆弱性评估,取得了良好的效果;Leicester等^[50]基于台风风速与居住房屋破坏程度的关系构建了台风脆弱性曲线;美国陆军工程师兵团利用历史洪水及灾情数据,将主要建筑分为7类典型建筑物,构建了各类建筑物的淹没水深-损失率曲线^[51];Khanduri等^[52]针对不同结构房屋类型,建立了基于风速与建筑物平均损失率的脆弱性曲线;Lee等^[53]考虑房屋的屋顶形状、地理位置等因素,构建了呈对数分布房屋易损性函数。我国在这方面的研究起步较晚,大部分研究仅考虑淹没水深。王豫德等^[54]针对上海地区建立了不同淹没水深条件下灾损曲线;尹占娥等^[55]在多次上海地区台风暴雨灾情调查基础上,构建了上海城市居住房屋及其室内财产的淹没深度-灾损率曲线。

构建脆弱性曲线是被国外广泛采用的脆弱性定量化研究方法,目前大部分研究多集中在台风风速、淹没深度、地震强度等致灾因子参数与房屋、农作物等承灾体损失(率)之间的脆弱性曲线的构建。但是在我国并没有建立灾害调查与评估的制度、规范和标准,同时灾情数据共享不足,数据资料获取困难,难以构建出成熟、实用的脆弱性曲线。此外,该方法并不涉及社会、经济、环境的脆弱性水平以及应对灾害的应急响应能力等方面的评估,只代表了绝对物理参数的脆弱性度量。

5 风暴潮灾害风险评估

灾害风险评估是对研究区遭受不同强度灾害的可能性及其可能造成的后果进行的定量分析和评估,是把致灾因子的危险性与承灾体的脆弱性紧密联系起来的重要桥梁,是开展综合减灾和制定应急管理对策的基础和依据,亦是防灾减灾3大体系

优化配置的基本依据。依据对风暴潮风险认识不同,灾害风险评估主要分为两种。

5.1 灾情损失评估

该方法利用概率统计、试验模拟、空间分析等方法对计算出的灾害对承灾体可能造成的生命和财产损失进行定量评价与估算,也可以根据致灾因子的危险性与不同承灾体损失率的相关关系,开展灾情损失的初步估算,它是准确把握灾害损失及基本特征的一种灾害统计分析、评价方法,主要适用于数据齐全的中小尺度风险评估。

国内外对于风暴潮灾情损失评估做了大量的研究,通过建立损失评估模型对灾害损失进行定量评估。如Petak等^[56]详细阐述了美国风暴潮灾害风险评估方法,并以县为基本研究单元,开展风暴潮灾情损失的估算;许启望等^[57]建立了风暴潮灾害直接经济损失和灾度两个指标,并分析了其与风暴潮强度的关系,通过线性回归法等4种不同数学模型对风暴潮灾情评估进行了初步探讨;冯利华^[58]提出了风暴潮等级和灾度的概念,用于量化描述风暴潮强度以及风暴潮造成的人员伤亡和财产损失情况;梁海燕等^[18]针对小面积区域,建立了风暴潮灾害损失评估模型;2007年又采用价值分析法,建立直接经济损失与系统要素所处的高程及潮位的关系,以此开展海南岛风暴潮灾害灾情损失评估^[59]。尹占娥^[60]和谢翠娜^[61]等以上海地区为例,基于土地利用建立灾损曲线,开展了台风暴雨和风暴潮灾害的灾情损失评估。

风暴潮灾害损失评估是灾害理论研究的热点和难点之一,由于缺乏科学的灾害损失调查与评估规范,灾情损失评估的实效性和评估效果往往不是很令人满意,而且该方法具有模糊性、复杂性和不确定性的特点,需要完备翔实的数据资料,因此进一步限制了其在防灾减灾实际工作中的推广运用。

5.2 灾害风险评价

风暴潮灾害风险评价是针对一个区域发生风暴潮灾害损失水平的估算,或者未来时间尺度内发生风暴潮灾害可能性的估算,与灾情损失评估相比,该方法计算结果只代表一种相对风险的度量,而非可能灾害损失^[62]。该方法不仅是从风暴潮灾害

自然属性角度出发(如发生频率和强度),借助数值模型开展不同强度或者不同重现期下致灾因子危险性评估,而且还要从人文、社会、环境等方面综合考虑不同承灾体对灾害的承灾、应急响应水平,最终以致灾因子危险性和承灾体脆弱性为基础,通过建立的灾害风险评估模型得到风暴潮灾害风险评估图^[25]。不同学者对于灾害风险形成机理的理解不同,使得风险度表达亦不同,1989年,Maskrey综合研究灾害风险案例,提出灾害风险度是致灾因子危险性与承灾体脆弱性之代数和^[63],但是更多的学者则认为灾害风险度是两者之乘积^[64],并应用于许多风险评估研究中。20世纪90年代,美国将风暴潮防灾减灾的重点转移到了风暴潮风险评估和区划上,在全国范围内开展风暴潮灾害风险评估工作,是最早开展风暴潮灾害风险评估的国家,其评估结果在风暴潮灾害应急响应中发挥了实际作用。我国风暴潮灾害风险评估工作起步较晚,直至2008年,针对河北沧州、唐山和秦皇岛部分沿海区域的我国第一份风暴潮灾害风险评估图问世;2013年,浙江省正式启动温州苍南县、平阳县、台州玉环县等首批8个县(市、区)的风暴潮灾害风险评估工作。目前,我国沿海城市风暴潮风险评估刚刚启动,研究还不够全面和深入,难以满足沿海城市公共安全保障之需,是海洋减灾防灾的薄弱环节之一。

6 结语与展望

(1)对于风暴潮灾害危险性评估与分析,研究方法从数理统计发展到数值计算、从定性、半定量发展到定量、从静态分析发展到动态模拟,已取得了一系列成果。开展风暴潮致灾因子危险性研究除了需要进一步提高风暴潮数值模式精度之外,更重要的是利用各自的优势,将风暴潮数值模拟与PMSS的计算、不同重现期风暴潮的研究紧密联系起来,利用数值模式为PMSS的计算等研究提供基础数据,以解决历史观测数据在空间、时间和质量上不足的问题,开展风暴潮灾害实时危险性和长期危险性相结合的综合危险性研究,才能对实际的防灾减灾工作起到显著作用;

(2)国内外承灾体脆弱性研究已积累了一定的成果和经验,并在继续深入和推广,但脆弱性研究

区域性较强,且在指标选择、数据标准、曲线精度、灾损调查等方面大多缺少一定的规范和评价标准,评估过程中主观性较强。随着现代信息技术的快速发展和对灾害研究的深入,加强能反映脆弱性本质的理论研究,进一步规范灾害损失调查与评估体系,综合考虑社会、经济、应急响应能力情况,开展承灾体脆弱性定量化评估将成为未来的发展趋势;

(3) 风暴潮灾害风险评估不仅是风暴潮灾前损失预评估、救灾资源配置的理论基础,也是风暴潮灾害隐患排查、风险管理的基础和前提,该研究具有重要的理论和现实意义。但是,受全球气候变化和海平面上升影响,风暴潮灾害风险可能会加剧。因此结合全球气候变化影响,定量评估全球气候变化和海平面上升对风暴潮灾害风险的影响是风暴潮灾害风险评估研究的未来趋势。

参考文献:

- [1] 冯士筌. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [2] 国家海洋局. 2013年中国海洋灾害公报[EB/OL]. 2014-03-24, <http://www.coi.gov.cn/gongbao/>.
- [3] 国家海洋局. 风暴潮灾害风险评估与区划技术导则(试行)[Z]. 2012.
- [4] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-17.
- [5] Okada N, Tatano H, Hagihara Y, et al. Integrated Research on Methodological Development of Urban Diagnosis for Disaster Risk and its Applications[J]. Annuals of Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, 2004, 47C: 1-8.
- [6] 张继权, 李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007.
- [7] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.
- [8] UN/ISDR. Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives[C]. United Nations Publication, 2004.
- [9] Jelesnianski C P, Chen J, Shaffer W A. SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges From Hurricanes[R]. In: NOAA Technical Report NWS 48, Silver Springs, US: United States Department of Commerce, NOAA, NWS, 1992.
- [10] Wilson A S, Chen T. Storm Surge Modeling in the United States Part2: Surge form Extratropical Cyclones[M]. 1997.
- [11] DHI. User Guide and Reference Manual of MIKE21 (Coastal Hydraulics and Oceanography)[M]. 1996.
- [12] Hubbert G D, McInnes K L. Modeling storm surges and coastal ocean flooding[M]//Noye B J. Modeling Coastal Sea Processes. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1999: 159-187.
- [13] Vermeiren J C, Watson Jr C C. New Technology for Improved Storm Risk Assessment in the Caribbean[J]. Disaster Management, 1994, 6(4): 191.
- [14] 陈长胜, 秦曾灏. 江浙沿海模型台风暴雨的数值模拟[J]. 山东海洋学院学报, 1985, 15(1): 11-18.
- [15] 于福江, 张占海. 一个东海嵌套网格台风暴雨数值预报模式的研制与应用[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 23-33.
- [16] 端义宏, 朱建荣, 秦曾灏, 等. 一个高分辨率的长江口台风暴雨数值预报模式及其应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(3): 11-19.
- [17] Pirazzoli P A, Costa S, Dornbusch U. Flood Threat Anomaly for the Low Coastal Areas of the English Channel Based on Analysis of Recent Characteristic Flood Occurrences[J]. Ocean Dynamics, 2007, 57(6): 501-510.
- [18] 梁海燕, 邹欣庆. 海口湾沿岸风暴潮风险评估[J]. 海洋学报, 2005, 27(5): 22-29.
- [19] 李阔, 李国胜. 风暴潮风险研究进展[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 104-111.
- [20] 王喜年, 陈祥福. 我国部分测站台风重现期的计算[J]. 海洋预报, 1984, 1(1): 18-25.
- [21] 吴少华, 王喜年, 宋珊, 等. 天津沿海风暴潮灾害概述及统计分析[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 29-35.
- [22] McInners K L, Walsh K J E, Hubbert G D, et al. Impact of Sea-Level Rise and Storm Surges on A Coastal Community[J]. Natural Hazards, 2003, 30(2): 187-207.
- [23] 方国洪, 王骥, 贾绍德, 等. 海洋工程中极值水位估计的一种条件分布联合概率方法[J]. 海洋科学集刊, 1993, (34): 1-30.
- [24] 谢翠娜, 胡蓓蓓, 王军, 等. 天津滨海地区风暴潮极值增水漫滩情景展示及风险评估[J]. 海洋湖沼通报, 2010, (2): 130-140.
- [25] Vickery P J, Skerlj P F, Twisdale L A. Simulation of Hurricane Risk in the U.S. Using Empirical Track Model[J]. Journal of Structure Engineering, 2000, 26(10): 1222-1237.
- [26] Emanuel K, Ravela S, Vivant E, et al. A Statistical Deterministic Approach to Hurricane Risk Assessment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(3): 299-314.
- [27] Yasuda T, Mase H, Kunitomi S, et al. Stochastic Typhoon Model and Its Application to Future Typhoon Projection[J]. Coastal Engineering Proceedings, 2010, (30): 1-6.
- [28] 方伟华, 石先武. 面向灾害风险评估的热带气旋路径及强度随机模拟综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 866-875.
- [29] 王喜年. 风暴潮预报知识讲座 第七讲 风暴潮风险分析与计算[J]. 海洋预报, 2002, 19(4): 73-76.
- [30] The Cabinet Office. Tsunami • Storm Surge Research Association. Tsunami • Storm Surge Manual[R]. Tokyo: The Cabinet Office, 2003.
- [31] 尹庆江, 王喜年, 吴少华. 镇海可能最大台风增水的计算[J]. 海洋学报, 1995, 17(6): 21-27.
- [32] 应仁方, 羊天柱. 上海防洪水位研究中吴淞台风暴雨潮数值计算与可能最高潮位的分析[J]. 海洋学报, 1986, 7(4): 423-428.
- [33] 端义宏, 高泉平, 朱建荣. 长江口区可能最高潮位估算研究[J].

- 海洋学报, 2004, 26(5): 45-54.
- [34] 胡仁飞, 汪一航, 张慧, 等. 宁波近海台风风暴潮可能最大增水的数值模拟[J]. 应用海洋学报, 2013, 32(3): 340-348.
- [35] Gornitz V. Global Coastal Hazards from Future Sea Level Rise[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1991, 89(4): 379-398.
- [36] Kay R C, Eliot I, Caton B, et al. A Review of the Intergovernmental Panel on Climate Change's Common Methodology for Assessing the Vulnerability of Coastal Areas to Sea-level Rise[J]. Coastal Management, 1996, 24(2): 165-188.
- [37] Burton I, Feenstra J F, Parry M L, et al. UNEP Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Studies, Version 2.1[M]. Amsterdam: United Nations Environment Programme and Institute for Environmental Studies, Vrije University, 1998.
- [38] Davidson R A. An Urban Earthquake Disaster Risk Index[D]. Stanford, California: Stanford University, 1997.
- [39] 陈顺. 城市地震灾害及其应对: 过去、现在和将来[M]//丁石孙. 城市灾害管理. 北京: 群言出版社, 2004: 90-94.
- [40] Cardona O D, Hurtado J E, Chardon A C, et al. Indicators of disaster risk and risk management summary report for WCDR[C]//Program for Latin America and the Caribbean IADB-UNC/IDEA. IDEA, 2005: 1-47.
- [41] Bollin C, Hidajat R. Community-based disaster risk index: pilot implementation in Indonesia[C]//Birkmann J. Measuring Vulnerability to Natural Hazards-Towards Disaster Resilient Societies. New York: UNU Press, 2006.
- [42] Granger K. Quantifying Storm Tide Risk in Cairns[J]. Natural Hazards, 2003, 30(2): 165-185.
- [43] Kleinosky L R, Yarnal B, Fisher A. Vulnerability of Hampton Roads, Virginia to Storm Surge Flooding and Sea-Level Rise[J]. Natural Hazards, 2007, 40(1): 43-70.
- [44] Rao A D, Chittibabu P, Murty T S, et al. Vulnerability from Storm Surges and Cyclone Wind Fields on the Coast of Andhra Pradesh, India[J]. Natural Hazards, 2007, 41(3): 515-529.
- [45] 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.
- [46] 王静静, 刘敏, 权瑞松, 等. 上海市各区县自然灾害脆弱性评价[J]. 人民长江, 2011, 42(17): 12-15.
- [47] 李阔, 李国胜. 广东沿海地区风暴潮易损性评估[J]. 热带地理, 2011, 31(2): 153-158, 177.
- [48] 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.
- [49] Penning-Rowsell E C P, Chatterton J. The Benefits of Flood Alleviation: A Manual of Assessment Techniques[M]. Aldershot: Gower Technical Press, 1977.
- [50] Leicester R H, Bubb C T J, Dormant C, et al. An assessment of potential cyclone damage to dwellings in Australia[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering. Fort Collins: Pergamon Press, 1979: 23-26.
- [51] National Flood Proofing Committee. Flood Proofing: How to Evaluate Your Options: Decision Tree[M]. US: US Army Corps of Engineers, 1995.
- [52] Khanduri A C, Morrow G C. Vulnerability of buildings to windstorms and insurance loss estimation[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(4): 455-467.
- [53] Lee K H, Rosowsky D V. Fragility Assessment for Roof Sheathing Failure in High Wind Regions[J]. Engineering Structures, 2005, 27(6): 857-868.
- [54] 王豫德, 王世民. 灾害与灾害损失评估[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [55] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562.
- [56] Petak W J, Atkinson A A. 自然灾害风险评价与减灾政策[M]. 向立云, 程晓陶, 译. 北京: 地震出版社, 1993.
- [57] 许启望, 谭树东. 风暴潮灾害经济损失评估方法研究[J]. 海洋通报, 1998, 17(1): 1-12.
- [58] 冯利华. 风暴潮等级和灾情的定量表示法[J]. 海洋科学, 2002, 26(1): 40-42.
- [59] 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.
- [60] 尹占娥. 城市自然灾害风险评估与实证研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [61] 谢翠娜. 上海沿海地区台风风暴潮灾害情景模拟及风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [62] 王美双. 浙江省台风灾害分析与风险评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [63] Maskrey A. Disaster Mitigation: A Community Based Approach[M]. Oxford: Oxfam, 1989.
- [64] United Nations, Department of Humanitarian Affairs. Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options: A Manual for Policy Makers and Planners[M]. New York: United Nations, 1991: 1-164.

Review of risk assessment of typhoon storm surge disaster

ZHANG Yue-Xia^{1,2}, WANG Hui³

(1. Marine Monitoring and Forecasting Center of Zhejiang, Hangzhou 310007 China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100 China; 3. National Marine Environment Forecast Center, Beijing 100081 China)

Abstract: Base on the previous studies, this paper consider that the storm surge disaster risk system is composed by the storm surge hazard, the vulnerability of storm surge disaster hazard bearing bodies and disaster consequences. At the same time, the latest progress of storm surge risk assessment method are systematically reviewed, and the advantage and disadvantage are also compared, specially focusing on the storm surge hazard and vulnerability. Additionally, in this paper, a future research emphasis in storm surge risk assessment is prospected. This paper can provide reference for the development of China's coastal areas, the storm surge disaster risk assessment theory to improve.

Key words: typhoon storm surge; the storm surge hazard; the vulnerability; risk assessment