

沿海城市风暴潮灾害风险评估研究述评^{*}

王国栋, 康建成, 闫国东

(上海师范大学 城市生态与环境研究中心, 上海 200234)

摘要: 对风暴潮灾害形成机理、风暴潮灾害风险评估方法、灾害风险区划与等级评估、灾害损失评估等方面进行了梳理和分析, 认为: ①风暴潮灾害风险评估指标体系目前多为主要社会因子和经济损失因子, 而忽视主要气象水文指标(最大增水、中心风速等)对风暴潮灾害的影响, 研究发现, 最大增水和风暴潮灾害呈正相关关系; 可通过主成分分析等相关数学模型提取指标因子, 避免指标选取主观随意性, 又能够客观的确定指标因子的权重; ②应建立统一的风暴潮灾害风险评估综合指标; 提出建立灾害熵综合风险评估方法, 定量的反映所研究区域灾害损失整体水平, 灾害熵值也可作为划分灾害等级的分级量度。

关键词: 沿海城市; 风暴潮灾害; 风险评估; 灾害风险区划; 灾害熵; 灾害等级

中图分类号: X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)03-0114-05

1 风暴潮灾害

1.1 概况

风暴潮(Storm Surge)是由于剧烈的大气扰动, 如强风和气压骤变(通常指台风和温带气旋等灾害性天气系统)导致海水异常升降, 使受其影响的海区潮位大大地超过平常潮位的现象^[1]。风暴潮灾害会导致海水漫堤和巨浪冲毁海岸, 造成海水倒灌, 河塘、油井、工厂等被淹, 对沿海城市基础设施和人们生命、财产安全造成巨大损失。全球沿海地区每年约有4 500万人受到台风风暴潮、洪水等灾害影响。1970年11月, 严重风暴潮灾害导致孟加拉国和东巴基斯坦的20万人死亡或失踪。2005年8月, 美国新奥尔良遭受卡特里娜飓风袭击, 造成特大风暴潮灾难, 导致1 069人遇难, 直接经济损失超过1 500亿美元。

全球气候变暖引起的海平面变化将加剧风暴潮对沿海城市安全的威胁^[2-3]。近年来, 联合国人居处(UNHABITAT)、美国国家海洋气象管理局(NOAA)和欧盟等机构启动了沿海城市风暴潮灾害风险分析与管理研究项目, 风暴潮灾害对沿海城市安全影响的评估研究成为国际上的热点研究

领域^[4]。

中国是全球少数几个同时受热带风暴潮和温带风暴潮危害的国家之一^[5]。据不完全统计, 仅公元前48年至公元1949年的近2 000年间, 有较详细记载的特大风暴潮灾害就有576次, 平均不到4年就有一次, 每次造成的死亡人数少则过千, 多则数万至10多万^[6]。40年来, 我国沿岸风暴潮灾害每年造成的直接经济损失已由1950年代的平均1亿元左右, 增加到1980年代后期的20亿元左右^[7]。2008年, 我国共发生风暴潮过程25次, 死亡人数56人, 直接经济损失192.24亿元。随着我国沿海地区人口密度的增加和经济的迅猛发展, 风暴潮灾害造成的损失呈上升趋势^[8](图1、图2), 已位居我国各种海洋灾害之首。

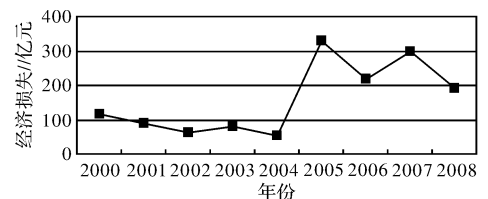


图1 2000-2008年中国风暴潮灾害直接经济损失

^{*} 收稿日期: 2010-01-29

基金项目: 上海市科委攻关课题(062412049); 上海市教委科研创新重点项目(08ZZ69); 上海市教委重点学科建设项目(J50402)

作者简介: 王国栋(1977-), 男, 山东潍坊人, 讲师, 博士研究生, 主要从事海平面变化及其影响研究。

E-mail: guodong@shnu.edu.cn

通讯作者: 康建成(1957-), 男, 甘肃武山人, 教授, 博士生导师, 主要从事全球气候环境演化过程及其影响研究。

E-mail: kangjc@126.com

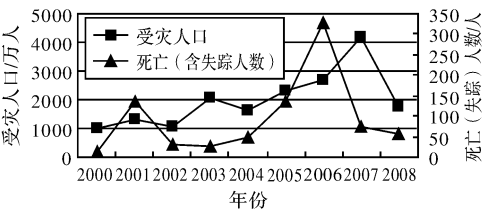


图 2 2000 - 2008 年中国风暴潮灾害人口损失
(图 1、图 2 数据来源 : 中国海洋灾害公报^[9] , 2000 - 2008 年)

1.2 形成机理

风暴潮灾害的形成与承载体的脆弱性及孕灾环境息息相关,从观测统计学、瞬变涡动能量学和中尺度数值模拟角度,可深入研究海洋风暴形成的气候特征及可能的动力学机制^[10];要在分析风暴潮自身特征的基础上,加强影响风暴潮产生因素的研究^[4],如海洋在自身不同热力结构下对热带气旋的响应研究^[11],热带气旋与风暴潮发生频次的关系研究^[12],沿岸地形和海底的深度和形状对风暴潮的高度影响研究^[2],或针对某次风暴潮灾害进行分析研究^[13-15]等,可全面了解风暴潮的形成机理。

风暴潮灾害是天文潮、台风、气象因素、寒潮大风等因素交叉作用的结果(图 3)。台风(图 4)是诱发水位异常变化的强迫力,是台风风暴潮形成的主要因素,寒潮大风也是诱因之一^[16]。持续的向岸大风是诱发风暴潮的主要气象因素。强台风风暴潮可以使海平面上升 5~6 m,使影响海区的潮位大大超过正常潮位,当风暴潮和天文大潮高潮位相遇时,会使水位暴涨、导致潮水漫溢、海堤溃决、冲毁房屋,造成严重的经济损失和人员伤亡。

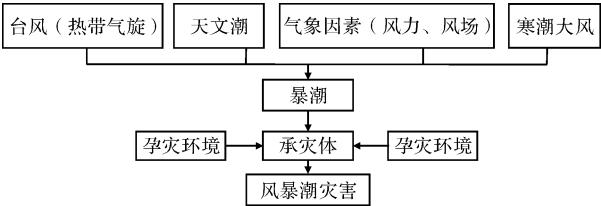


图 3 风暴潮灾害形成机理

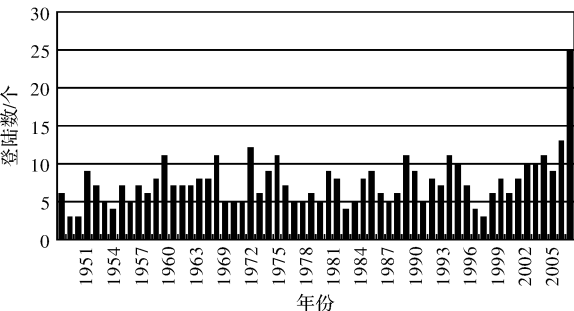


图 4 1949 - 2008 年我国东南沿海登陆台风频数分布

2 风暴潮灾害风险评估

近年来,国际社会纷纷开展对自然灾害风险研究,各类国际减灾计划(如联合国国际减灾十年行动,全球环境变化与人类安全综合研究计划(GECHS),“灾害风险指数(DRI)”计划^[17-18],亚洲城市灾害减缓计划(AUDMP)等)和各类防灾减灾组织应运而生。中国政府也高度关注,加强防灾减灾研究,对风暴潮等自然灾害风险评估进行了积极的探索。

2.1 灾害风险评估方法

灾害风险评估的方法,大致可以划分为经验评估和数值评估两大类。

经验评估是对大量历史资料的数据统计分析的基础上,建立经验统计模型,对灾害风险进行评估并对未来的灾害风险进行预测^[19-22]。但这种方法需要完备翔实的数据资料,其实效性和评估效果往往不很满意。传统的风暴潮灾害风险评估往往采用风暴潮水位和海浪波高重现期分析方法,即把水位/波高作为独立的随机变量,对相关数据统计的基础上计算它们的年极值频率,建立发生概率和给定涌潮高度之间的关系曲线,给出超过该潮位风暴潮的重现期,并与已经发生的事件建立相关关系,进行风险评估。

数值评估是在建立风暴潮风险评估指标体系(图 5)的基础上,利用气象、水文水力学机理、3S 技术等手段,整合或建立相应数学模型,选择不同的研究尺度进行风险评估和灾情损失评估。目前,大量的数学模型或理论被引入到风险评估研究中^[23-36],如人工神经网络、模糊综合评判方法、灰色系统理论、熵理论等,拓展了灾害风险评估方法体系,推动了灾害风险评估领域的研究。

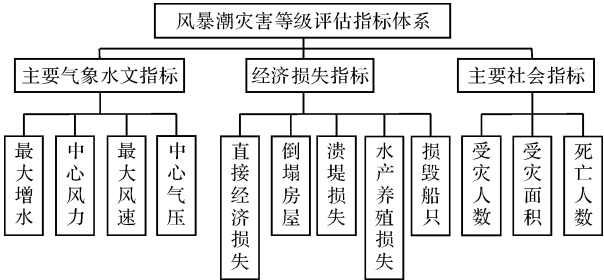


图 5 台风风暴潮灾害等级评估指标体系

目前多采用数学模型和 3S 技术相结合的方法,建立风暴潮风险预测模型进行评估,数学模型的引入可更加有效地探析风暴潮灾害自身非线性和

复杂性特征。但每类数学模型都有其内涵、外延及存在的边界条件,将其引入时要进行必要的参数修正或条件控制,否则计算结果的可信度会降低甚至出现错误。

2.2 灾害风险区划与等级研究

灾害等级的研究对于灾情发生后对灾情进行快速评估具有重要的意义,灾害风险区划是在风险分析和评价的基础上对致灾区域风险的宏观定量分区,区划的目的是为了更清晰地把握风险的空间格局及内在规律^[37]。

美国是最早开展风暴潮风险评估的国家,早在1990年代,美国海洋大气管理局(NOAA)联合联邦应急管理署(FEMA)及各州政府,对历史上的风暴潮重灾区(州)进行了风险评估,制作了本地区大比例尺的风暴潮灾害风险淹没疏散图和风险区划图^[38]。Willian^[39](1993)等对美国风暴潮灾害风险区划及评估方法作了较详细阐述,把大西洋和墨西哥湾沿岸台风按强度分为五类,对研究区域采用SLOSH模式按台风强度分类计算,并依据该模式计算并绘出每类台风最大风暴潮淹没陆地范围^[40]。

2008年初,我国首份风暴潮灾害应急疏散图 and 风险评估图问世^[41],涵盖了沧州、唐山和秦皇岛部分沿海岸段。制作灾害应急疏散图 and 风险评估图^[42]要依据地形、地表覆盖、阻水建筑物、江河道路等线状地理特征、水利区划的结果以及河网的自排能力等,将研究区域划分为不同的地理单元,利用3S技术绘制出不同强度风暴潮灾害发生时可能会遭受海水淹没的范围及其人员和经济损失的风险程度。

灾害等级评估是灾害学研究的重要内容。目前灾害等级研究中多采用灾度和灾级对灾害的强度和损失大小进行度量。灾级用来表示灾害损失的大小,灾度^[43]是指单位区域内灾害损失量。灾级的计算方法很多,主要有圆弧判别法、比率法、加权累积法、灰色关联法^[44]、模式识别思想^[45]、模糊聚类法等。

国内外对于灾级分类的研究尚未有形成统一的评估策略和方法^[46],主要有3类(重灾、中灾、轻灾)、4类(特大灾、大灾、中灾、小灾)、5类(特重灾、重灾、一般灾害、中灾、小灾)等等,尚存在着分级标准多元化的特点。等级评估指标体系的建立也未有确定的标准,前人在对台风风暴潮灾害进行等级评估时多选用直接经济损失和人员伤亡等作为评估指标^[47],往往会忽略气象指标,如最大风速、中心气压等,且在指标提取方面具有一定的人为主观性;选取的指标因子较少也可能对评估结果造成一定的影响。

2.3 灾害损失评估研究

灾害损失评估是快速准确了解灾害损失情况、建立灾情应急迅速反馈机制的前提,是在掌握历史与现实灾害数据资料的基础上,运用统计分析或数学工具,对承灾体造成的生命和财产损失进行定量评价与估算,以准确把握灾害损失现象及基本特征的一种灾害统计分析、评价方法^[48]。可将其分为直接损失和间接损失(灾害所导致的次生灾害或其他非直接作用所导致的损失)两大类^[49](图6)。

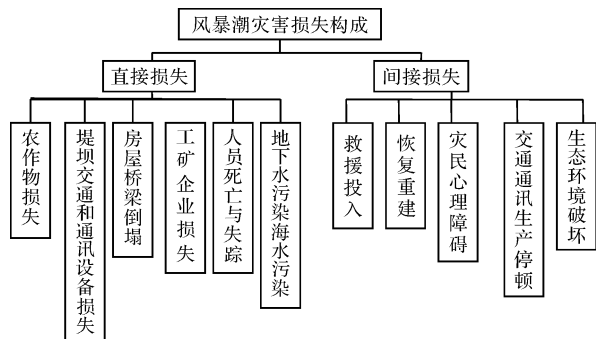


图6 风暴潮灾害损失构成要素

灾害损失评估具有模糊性、复杂性和不确定性的特点,是灾害理论研究的热点和难点之一。国内外对于直接损失评估做了大量的研究^[50-54],在分析灾害形成机制的基础上,构建灾害损失评估指标体系,通过建立损失评估模型对灾害损失进行定量评估。近年来,灾害经济损失评估受到了国内外学者的关注,大量的研究方法被引入灾害损失评估。

我国对风暴潮灾害损失评估刚刚起步,目前多采用统计模型和GIS与遥感等方法^[55-56],还没有形成广泛的被普遍认可的灾害损失评估方法,更没有形成能够反映风暴潮灾害风险水平的综合评估指标。由于其复杂性和不可确定性,灾害间接损失评估的研究尚少,方法和技术都有待于进一步提高。

3 结论

(1)目前,国内对风暴潮灾害评估很大程度上停留在方法、技术层面,虽然不断地引进新的方法和模型,评估的技术和水平不断提高,但仍缺乏比较完备的综合评估指标体系(图7)和具有普适性的综合评估指标。由于自然灾害的复杂性和不确定,风暴潮评估指标体系的选取,具有较大的主观随意性,数据处理精度不高;指标提取时应考虑气象因子及最大增水等因子对风暴潮灾害的影响(图8)。

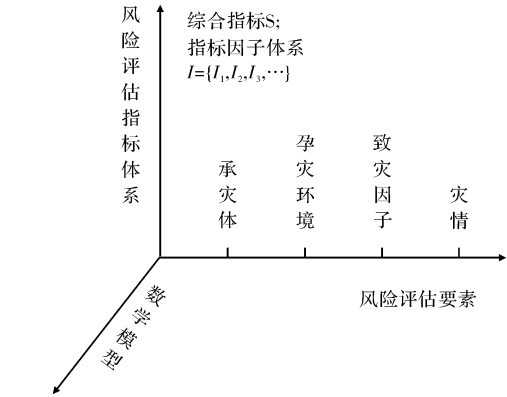
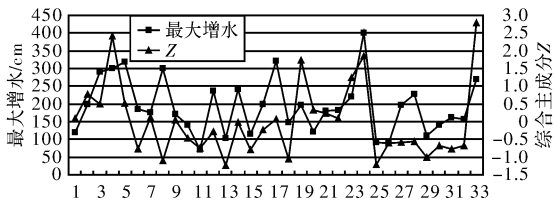


图 7 风暴潮灾害风险评估三维图示



(Z 为风暴潮灾害综合评价指标)

图 8 综合主成分(Z 值)与最大增水(相关系数 0.593)

可选用主成分分析多元统计模型对风暴潮灾害进行综合评估,该方法能够最大限度地保留原有信息,对高维变量系统进行最佳的综合与简化,并能客观地确定各个指标的权重,避免了主观随意性^[57]。

(2)风暴潮灾害等级评估研究,国内外已经做了大量的研究,但还存在着指标提取的随意性,灾害等级判定缺乏标准,等级划分方法意见分歧等问题。依据信息熵的理论,建立灾害熵灾害等级划分方法是一种新的尝试。信息熵是指随机事件的不确定性,而灾害事件本身具有复杂性和不确定性,前人往往会利用超越概率曲线来揭示灾害事件,灾害熵^[58]则可以在超越概率的基础上定量地反映所研究区域灾害损失程度的概率分布,可用式(1)表述:

$$S_w = - \sum_{i=1}^n w_i p_i \log p_i, \tag{1}$$

式中: S_w 为灾害熵; $p_i = \{p_i | i = 1, 2, 3 \cdots\}$ 为研究区域损失因子 $L = \{l_i | l = 1, 2, 3 \cdots\}$ 的超越概率; w_i 为各损失指标因子的权重值。风暴潮损失因子 L 的选取应充分考虑直接损失和间接损失指标取值,并通过聚类分析对指标因子进行筛选。灾害熵可以作为研究区域风暴潮灾害综合风险指标,灾害熵值可用来确定研究区域灾情损失等级(图 9),也可对多个研究区域灾情损失情况进行比较研究。

另外,加强对风暴潮灾害产生机理的研究;创建灾害数据管理范式和网络共享机制,建立统一的综合风暴潮灾害共享资源数据库;加强防灾

减灾的非工程设施建设及加大对风暴潮灾害风险的宣传力度等,都是风暴潮灾害风险评估研究需要加强的方面,也将为防灾减灾提供数据、技术、决策支持,提高决策的科学性和有效性。

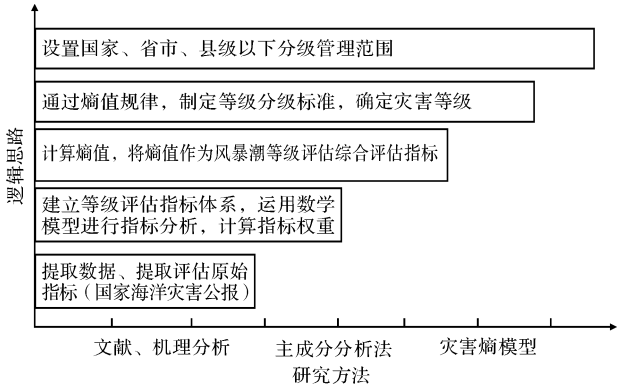


图 9 风暴潮灾害等级评估研究方法与逻辑思路

参考文献:

[1] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 157-158.

[2] Bijlsma L, Bhler C N, Klein R J T, et al. Coastal zones and small islands. IPCC WG II, Climate change 1995 - impacts, adaptations and mitigation of climate change: science - technical analysis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 289-324.

[3] Mcinnes 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: 187-207.

[4] 赵庆良, 许世远, 王军, 等. 沿海城市风暴潮灾害风险评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2007, 26(5): 32-40.

[5] 杨华庭, 田素珍. 中国海洋灾害四十年资料汇编(1949-1990)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.

[6] 陆人骥. 中国历代灾害性海潮史料[M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 295.

[7] 施雅风, 黄鼎成, 陈洋勤. 中国自然灾害灾情分析与减灾对策[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1992: 259-285.

[8] 孟菲, 康建成, 李卫江, 等. 50年来上海市台风灾害分析及预评估[J]. 灾害学, 2007, 22(4): 70-76.

[9] 中国国家海洋局. 中国海洋灾害公报[EB/OL]. [2009-12-23]. http://www.soa.gov.cn/hyjww/hygb/zghyzhgb/a020708index_1.htm.

[10] 黄立文, 吴国雄, 宇如聪, 等. 海洋风暴形成的一种动力学机制[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 674-684.

[11] 朱建荣, 沈焕庭, 秦曾源. 海洋对热带气旋响应的一种改进模式[J]. 热带海洋, 1995, 14(3): 44-50.

[12] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 23-30.

[13] 张承旺, 侯淑梅, 孙忠欣. "070304"渤海特大风暴潮的成因分析[J]. 山东气象, 2007(2): 25-27.

[14] 王欣睿, 孙波涛, 陈强, 等. 0606号台风“派比安”风暴潮特征分析与总结[J]. 海洋预报, 2008, 25(2): 99-105.

[15] 张俊香, 李平日, 黄光庆. 新奥尔良飓风灾难与华南沿海台风风暴潮[J]. 热带地理, 2006, 26(3): 218-222.

[16] 游景炎. 渤海湾风暴潮的时空分布[J]. 河北气象, 1995, 14(4): 1-6.

[17] 黄慧, 温家洪, 司瑞杰, 等. 自然灾害风险评估国际计划述评 I - 指标体系[J]. 灾害学, 2008, 23(2): 112-116.

[18] 黄慧, 温家洪, 司瑞杰, 等. 自然灾害风险评估国际计划述评 II - 评估方法[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 96-101.

[19] 胡德宝, 龚茂琦, 孔亚珍. 强风暴对上海地区影响研究[J].

- 华东师范大学学报: 自然科学版, 2005(5/6): 177-182.
- [20] 陈满荣, 王少平. 上海城市风暴潮灾害及其预测[J]. 灾害学. 2000, 15(3): 26-29.
- [21] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 23-30.
- [22] 乐肯堂. 我国风暴潮灾害及防灾减灾战略[J]. 海洋预报. 2002, 19(1): 9-15.
- [23] 胡琛, 王彬. 基于最大熵原理的分布模型[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2007, 21(6): 87-90.
- [24] 冯利华, 李凤全. 基于最大熵原理的灾害损失分析[J]. 数学的实践与认识, 2005, 35(8): 73-77.
- [25] 郭显光. 改进的熵值法及其在经济效益评价中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1998(12): 98-102.
- [26] 欧素英, 杨清书. 人工神经网络模型在航道、港口潮水位预报中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2008, 6(2): 67-70.
- [27] 王博, 崔春光, 彭涛, 等. 暴雨灾害风险评估与区划的研究现状与进展[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(3): 281-286.
- [28] 任鲁川. 灾害损失定量评估的模糊综合评判方法[J]. 灾害学, 1996, 11(4): 5-10.
- [29] 纪燕新, 熊艺媛, 麻荣永. 风暴潮灾害损失评估的模糊综合方法[J]. 广西水利水电, 2007(2): 16-28.
- [30] 孙峥, 庄丽, 冯启民. 风暴潮灾情等级识别的模糊聚类分析方法研究[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(4): 49-54.
- [31] 任鲁川. 灾害损失等级划分的模糊灾度判别法[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 13-17.
- [32] 冯利华. 基于信息扩散理论的气象要素风险分析[J]. 气象科技, 2000(1): 27-29.
- [33] 张俊香, 李平日, 黄光庆, 等. 基于信息扩散理论的中国沿海特大台风风暴潮灾害风险分析[J]. 热带地理, 2007, 27(1): 11-14.
- [34] 叶雯, 刘美南, 陈晓宏. 基于模式识别的台风风暴灾情等级评估模型研究[J]. 海洋通报, 2007, 23(4): 65-70.
- [35] 黄崇福. 自然灾害风险分析的信息矩阵方法[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(1): 1-10.
- [36] 代博洋, 李志强, 李晓丽. 基于物元理论的自然灾害损失等级划分方法[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 1-5.
- [37] 黄大鹏, 刘闯, 彭顺风. 洪灾风险评价与区划研究进展[J]. 地理科学进展, 2007, 26(4): 11-22.
- [38] 张行南, 安如, 张文婷. 上海市洪涝淹没风险图研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(3): 251-254.
- [39] Willian J P. 自然灾害风险评价与减灾政策 [M]. 向立云, 译. 北京: 地震出版社, 1993: 28-166.
- [40] 王喜年. SLOSH 模式的进一步应用——西南佛罗里达风暴潮图集[J]. 海洋预报, 1987(21): 7-10.
- [41] 戴路. 首份风暴潮风险评估图问世 [N]. 中国海洋报, 2008-12-9(2).
- [42] 张文婷, 张行南, 刘永志, 等. 风暴潮洪水风险图制作研究[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 114-118.
- [43] 马宗晋. 自然灾害与减灾 [M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [44] 吴慧, 陈德明, 吴胜安, 等. 灰色关联分析在热带气旋灾害等级评估中的应用[J]. 热带作物学报, 2009, 30(2): 244-248.
- [45] 孙峥, 庄丽, 冯启民. 风暴潮灾情等级识别的模糊聚类分析方法研究[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(4): 49-54.
- [46] 许飞琼. 灾级及其释义[J]. 灾害学, 1997, 12(1): 16-18.
- [47] 冯利华. 灾害等级研究进展[J]. 灾害学, 2000, 15(3): 72-76.
- [48] 刘高峰, 李娜. 城市水灾害损失评估指标体系的构建[J]. 现代农业科技, 2008(22): 267-269.
- [49] 冯利华, 骆高远. 洪水等级与灾情划分问题[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 89-91.
- [50] 叶雯, 刘美南. 珠海地区风暴潮灾害特点及防潮减灾措施分析[J]. 海洋预报, 2003, 20(2): 54-60.
- [51] 杨喆, 徐刚. 灾害经济损失的评估方法探讨[J]. 经济研究导刊, 2008(13): 81-82.
- [52] Sathish V Kumar, Ramesh V Babu, Babu M T, et al. Assessment of storm surge disaster potential for the andaman islands [J]. Journal of Coastal Research, 2008(3): 171-177.
- [53] Bryan J Boruff, Christopher Emrich, Susan L Cutter. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties [J]. Journal of Coastal Research, Florida September, 2005(5): 932-942.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 陈凯. 基于 GIS 的洪水淹没评估系统的研究与实现[J]. 灾害学, 2009, 24(4): 35-39.
- [57] 冯利华, 赵浩兴, 瞿有甜, 灾害等级的综合评价[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 16-20.
- [58] 任鲁川. 灾害熵: 概念引入及应用案例[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2): 26-31.

A Review on Risk Assessment of Storm Surge of Coastal Cities

Wang Guodong and Kang Jiancheng

(Urban Ecology and Environment Research Center, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Formation mechanism, risk assessment methods, disaster risk zoning and grade assessment, and disaster damage assessment of storm surge disasters are summarized and analyzed. Some opinions are given as follows: ①Most of the present risk assessment index systems of storm surge disasters use the main social factors and economic losses factor, but neglect the main indicators of meteorology and hydrology (the largest increasing water, the center wind speed, etc.) on the impact of storm surge disasters. In fact, there is a positive correlation between the largest increasing water and storm surge disaster; index factor can be extracted by principal component analysis and other related mathematical model to avoid the subjective and arbitrariness to selecting indicators, which can determine the weight of indicators of factors objectively; ②A unified assessment indicator of storm surge disaster risk should be established; Comprehensive risk assessment based on disaster entropy method is proposed, and it can reflect the overall level of disaster losses quantitatively. Value of disasters entropy can be the measurement of disasters grade classification.

Key words: coastal city; storm surge disaster; risk assessment; disaster risk zoning; disaster entropy; hazard grade