

海岸带城市洪水淹没风险评价研究 ——以青岛市为例^{*}

廖 琪¹ 于 格^{1①} 江文胜¹ 马 艳² 林 群³
刘克修⁴ 王延平¹ 孙 雪¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院海洋环境与生态教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 青岛市气象局 青岛 266003;
3. 青岛市经济和信息化委员会 青岛 266071; 4. 国家海洋信息中心 天津 300480)

摘要 目前国内海岸带城市洪水淹没风险领域中较多关注单一灾因子(风暴潮)导致的淹没,缺乏对导致海岸带洪水发生的其他致灾因子的自然属性和社会属性的综合考量。根据风险的内涵,借鉴国外综合性风险评价理念,将洪水淹没自然机理模型与概念框架模型相结合,选取能表征风险发生概率的自然过程指标以及能表征风险危害性后果的社会经济类指标,构建具有针对性的海岸带型洪水淹没风险评价指标体系,对青岛市洪水淹没风险进行综合评估。研究得出青岛市洪水淹没风险指数值为 0.3240,根据我国主要海域自然灾害等级划分(表 3),可知其风险等级为 3,危险性属于中等水平;确定了青岛市洪水淹没风险的各类致灾体与其影响因素之间的相关性;并得出洪水淹没风险的自然因素和人为可控因素两类关键性控制指标制定短期和长期性的适应策略和行动,充分利用可调节因素,有效加强并提高防范性指标,以期到达最大程度上降低青岛市洪水淹没风险。

关键词 洪水淹没; 风险; 评价; 海岸带

中图分类号 X43 **doi:** 10.11693/hyhz20170600164

风险是一个广泛应用于自然科学和社会科学的概念,其核心集中于对事故发生概率和事故发生后损害性后果的定量描述。采取风险管理理念,对由于各种自然因素和人为因素引起的风险进行综合评估并确定风险值后,采取有效管理措施,可有效降低或消除风险事件带来的危害性后果。洪水淹没是指凡超过江河、湖泊、海洋等容水场所的承纳能力,造成水量剧增或水位急涨的水文现象,其后果是淹没堤岸滩涂,甚至漫堤泛滥成灾(李建生等,1999)。青岛市作为我国北方典型的海岸带城市,其重要的风险来源之一就是海洋洪水淹没,并且易受到台风、风暴潮等主要海洋灾害的影响。海岸带城市的洪水淹没,因产生机制复杂、影响因素众多、海岸堤坝多样等特点,因此相对于内陆城市,其风险评价具有一定

的难度。

目前,从海岸带洪水淹没自然过程的模拟研究领域来看,国外研究多以水文-水动力为核心,建立了较为成熟的数值模式及软件,如美国 SLOSH 模式(Zhang *et al*, 2016)、澳大利亚的 GCOM2D/3D 模式(McInnes *et al*, 2000)、丹麦的 MIKE12(Al-Taei *et al*, 2012)、荷兰的 DELFT3D 软件等(Wang *et al*, 2011),上述机理类的模型及软件能够充分考虑到水文及水动力条件及各类影响因素,具有准确性高、动态性强等优势;但由于需要大量的区域模型参数,具有可行性差、经济成本高等特点。国内的海岸带城市洪水淹没风险分析,在研究自然过程的机理模型方面,多采用基于 GIS 空间分析技术的模糊数学综合评判方法(王建华, 2009; 焦俊超等, 2010),其淹没的关键影响因

^{*} 中瑞国际合作项目, INTASAVE ACCC-045 号。廖 琪, 硕士研究生, E-mail: znliaoqi@163.com

① 通讯作者: 于 格, 硕士生导师, 副教授, E-mail: yuge@ouc.edu.cn

收稿日期: 2017-06-20, 收修改稿日期: 2017-10-03

素为海岸带城市的自然降水(钟晋阳, 2009)。该类方法对台风、风暴潮等成灾机理复杂、影响因素众多、突发性强的海洋气象灾害等所致的洪水淹没风险分析领域来说实用性不足, 并且缺乏对灾害后果的评估(吴玮等, 2012; 李倩等, 2013)。

现阶段, 在海岸带洪水淹没后果分析评价方面, 国外研究主要是依托各类风险评估小组对滨海海域进行综合性分析, 从洪水淹没自然过程与社会影响相结合的角度(Oyinloye *et al.*, 2011), 绘制海岸带洪水淹没风险图(Gain *et al.*, 2015), 并提出相应的风险管理措施, 如英国的《海岸带管理规划》和美国的《流域洪水管理规划》等。此外, 奥地利、荷兰、西班牙等也纷纷在风险理论的指导下评估海岸带洪水风险值, 并制定洪水淹没风险防范导则或规定, 以确定防洪减灾的最优方案(Begum *et al.*, 2011; Sayers *et al.*, 2015)。当前国内海岸带城市洪水淹没风险评估研究多以单个致灾因子的视角出发, 主要集中于风暴潮洪水淹没风险评估(张行南等, 2006; 赵昕等, 2009; 殷克东等, 2011), 也有一些关于海平面上升导致的海岸带洪水淹没风险研究(丁俊等, 2013), 由台风引发的洪水淹没研究则比较少见(史培军, 2006)。对于青岛市洪水淹没研究也是单纯的考虑风暴潮因素(殷克东等, 2011; 孙海, 2013), 而该区域内洪水淹没则是由台风、风暴潮、海平面上升等致灾因子共同所致, 因此, 单一的淹没致灾因子风险评估存在一定不足。

从总体上来看, 国外的洪水淹没风险评估能够有效的将淹没的自然过程与社会影响结合, 进行综合性的风险评价, 并提出相应的风险防范措施及适应策略, 国内的研究则在单个淹没致灾因子上较为深入。其中, 对青岛市由风暴潮洪水淹没风险评估仍是以风暴潮洪水为主, 较少将台风、海平面上升因素考虑在内, 存在一定的不足。因此, 对青岛市进行洪水淹没风险评估研究, 应当在洪水风险理念的基础上, 借鉴国外的综合性风险评价思路, 结合现有研究实际情况, 考虑多个致灾因子的共同作用。

本文以现有研究为基础, 以青岛市为例, 分析并提取青岛市洪水淹没的各类自然致灾体的自然属性, 根据风险的内涵, 将自然科学和社会科学相结合, 针对海岸带淹没的各类风险致灾体(主要针对海洋灾害)和承灾体(主要针对受灾人群、建筑物等)特点, 将其自然机理模型与概念框架模型相结合(PSR 模型), 既选取能表征风险发生概率的多种致灾体(台风、风暴潮、海平面上升等)的自然过程指标, 同时又选取能表

征风险危害性后果的各种社会经济类指标, 构建具有针对性的海岸带型洪水淹没风险评价框架和指标体系, 对青岛市洪水淹没风险进行综合评估。

1 研究区概况

青岛市地处山东半岛南部, 位于 $35^{\circ}35'—37^{\circ}09'N$, $119^{\circ}30'—121^{\circ}00'E$, 东、南濒临黄海, 地势呈现出东高西低, 北高南低的凹槽型特点, 具有明显的海洋性季风气候特征。青岛市所辖海区港湾众多, 岸线曲折延伸, 滩涂面积较大, 全市海域面积达 12200km^2 , 其中领海基线以内海域面积 8405km^2 ; 海岸线总长为 816.98km , 其中大陆岸线 710.9km (青岛市统计年鉴, 2015)。

青岛市经常受到各类海洋灾害的影响, 平均每年遭受约 1.08 个经黄海或近海北上台风的影响; 台风过境之时, 在风场和天文潮的共同作用下, 一般会产生风暴潮灾害。据专项数据统计, 在台风和风暴潮共同影响下, 青岛港历史最大潮位高达 551cm , 风暴潮增水最大达 1.43m , 导致沿岸地区淹没深度高达 80cm ; 近年来, 在气候变化背景下, 青岛沿海海平面上升的平均速度为 3.5mm/a , 且上升速度呈现逐年上涨趋势。在上述洪水淹没致灾体的影响下, 青岛市沿海地区遭受风险的几率大大增加。随着青岛市城市化进程, 海洋洪水淹没风险与经济社会发展之间的矛盾日益突出(青岛市志, 2015; 青岛市海洋环境公报, 2015)。

2 研究方法

本文提取青岛市洪水淹没风险的主要承载体, 在历史统计观测数据的基础上, 利用台风、风暴潮和海平面上升的自然机理模型, 模拟计算获得相应的致灾体趋势性变化数据, 并依据层次分析法构建具有针对性的海岸带型洪水淹没风险评价框架和指标体系, 对青岛市洪水淹没风险进行综合评估。

2.1 指标选取原则

为全面系统反应青岛市洪水淹没风险大小, 本文依据指标的代表性、独立性、客观性、典型性和易获性, 选取 31 项基本指标, 构建青岛市洪水淹没风险评价指标体系。

2.2 各指标权重值确定

为科学判定各项基本指标和各层指标的权重, 本文利用专家打分法, 征求来自于国家海洋信息中心、中国海洋大学、青岛市气象局、青岛市发展与改

革委员会等相关机构的 20 名专家意见, 其专业领域主要涉及风暴潮灾害、海平面变化、灾害损失评价、发展与改革政策制定研究等。根据以上专家给出的对各项指标和各层指标的权重分数, 构建两两判断矩阵, 并通过“和积法”计算获得各项指标和各层指标最终的权重, 见表 4。

两两判断矩阵: 假定上一层次元素 A 对下一层次元素 B_1 、 B_2 、 B_3 、 $\dots$ 、 B_n 有支配关系, 可以建立以 A 为判断准则的元素 B_1 、 B_2 、 B_3 、 $\dots$ 、 B_n 间的两两比较判断矩阵。

表 1 两两比较综合矩阵
Tab.1 Comparison in two by two comprehensive matrix

A	B_1	B_2	$\dots$	B_j	$\dots$	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	$\dots$	b_{1j}	$\dots$	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	$\dots$	b_{2j}	$\dots$	b_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
B_i	b_{i1}	b_{i2}	$\dots$	b_{ij}	$\dots$	b_{in}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
B_n	b_{n1}	b_{n2}	$\dots$	b_{nj}	$\dots$	b_{nn}

矩阵 B 为互反矩阵, 具有如下性质:

$$b_{ij} > 0; \quad b_{ij} = 1/b_{ji}; \quad b_{ii} = 1。$$

在这里采用 9 级标度法给判断矩阵的元素赋值, 9 级标度法中 b_{ij} 值与被比较元素的相对重要程度之间的对应关系如下:

B_i 与 B_j 同样重要: $b_{ij}=1, b_{ji}=1$

B_i 比 B_j 稍微重要: $b_{ij}=3, b_{ji}=1/3$

B_i 比 B_j 明显重要: $b_{ij}=5, b_{ji}=1/5$

B_i 比 B_j 非常重要: $b_{ij}=7, b_{ji}=1/7$

B_i 比 B_j 极端重要: $b_{ij}=9, b_{ji}=1/9$

如果被比较元素的相对重要程度是介于上述相邻两种判断之间, b_{ij} 可取 2、4、6、8, 相应地, b_{ji} 可取 1/2、1/4、1/6、1/8。

2.3 指标标准化

为将指标进行去量纲化处理, 本文采用极差化方法进行指标标准化, 公式如下:

$$X_i = \frac{(x_i - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})} \quad (1)$$

式中, X_i 指标标准化值; x_i 指标值; $x_{\min}$ 指标历年来最小值; $x_{\max}$ 指标历年来最大值。

2.4 洪水淹没风险综合指数(RI)的确定

根据洪水淹没对青岛市的影响和制约机制, 针对青岛市洪水淹没风险的主要致灾体和洪水淹没风险评价框架和指标体系, 本文确定的洪水淹没风险

综合指数为:

$$RI = H \cdot V \cdot (1 - R) \quad (2)$$

式中, RI 为风险指数; H 、 V 、 R 分别为致灾体危险性、承灾体脆弱性和防范能力。

RI 取值为[0,1]之间, RI 值越大, 说明该风险值越大。

2.5 洪水淹没风险评价指标体系

本文根据海岸带型洪水淹没特点, 分析并提取青岛市洪水淹没风险的主要致灾体及其表征指标(傅湘等, 2000; 颜峻等, 2010; 张韧, 2014), 利用层次分析法(AHP)构建具有针对性的青岛市洪水淹没风险评价指标体系, 见表 2。

本文所构建的指标体系中, 第一层是目标层(A), 以青岛市洪水淹没风险为评价的主要目标; 第二层是致灾体层(B), 以台风风险 B_1 、风暴潮风险 B_2 、海平面上升风险 B_3 等作为主要的致灾体; 第三层是一级指标(C), 以危险性 C_1 、 C_4 、 C_7 , 脆弱性 C_2 、 C_5 、 C_8 , 以防范能力 C_3 、 C_6 、 C_9 , 作为一级指标; 第四层是二级指标层(D), 根据一级指标层筛选出 31 项二级指标, 形成青岛市洪水淹没风险评价指标体系。

注:(1)气候变化影响下的城市风险评估与一般的灾害评估不同, 长期的气候变化会导致台风等相关风险因子强度和频度的变化相应。因此评估过程中应当将气候变化趋势的影响考虑在内, 将气候变化趋势(上升趋势或下降趋势)加入到相应的指标体系中。

(2) 指标体系中几类特殊的指标需要进行模拟计算获得趋势性变化(张韧, 2014), 如:

①台风最大风速气候趋势指数、台风风速强度气候趋势指数、台风年生成频次气候趋势指数以及台风年登陆频次气候趋势指数等 4 个指标, 在计算气候趋势需要涉及到气候趋势系数 r 。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2}} \quad (3)$$

式中, $\bar{x}$ 为 $\{x_i\}$ 的均值; $\bar{i}$ 为自然数序列 $\{x_i\}$ 的均值; n 为样本长度。若 $r > 0$ 表示序列 $\{x_i\}$ 有上升趋势, r 越大, 上升趋势越强; 若 $r < 0$ 表示序列 $\{x_i\}$ 有下降趋势, r 越小, 下降趋势越强。

②风暴潮历史最高增水指标需要获取有史以来最高增水值, 但由于历史统计数据不完善, 需用现有数据(八种类型台风及风暴潮数据)去推算历史的最高增水, 具体模拟推算方法如文中 3.2 节所示。

表 2 青岛市洪水淹没风险评价指标体系
Tab.2 Index system of flooding risk evaluation in Qingdao

目标层(A)	致灾体层(B)	权重 W	一级指标层(C)	权重 W	二级指标层(D)	权重 W
青岛市洪水淹没风险	台风风险 B ₁	0.2638	危险性 C ₁	0.66875	台风过程的最大风速	0.2125
					台风过程的风速强度	0.2375
					台风过程日最大降水量	0.14375
					台风过程影响持续时间	0.20625
					台风最大风速气候趋势指数	0.1
					台风风速强度气候趋势指数	0.1125
			脆弱性 C ₂	0.2288	台风年生成频次气候趋势指数	0.3625
					台风年登陆频次气候趋势指数	0.6375
					台风影响区域人口密度	0.51875
			防范能力 C ₃	0.10875	台风影响区域地均 GDP	0.48125
					防范能力	1
					正常潮位	0.19125
	风暴潮风险 B ₂	0.5938	危险性 C ₄	0.6225	历史最高增水	0.24
					台风(或寒潮)强度	0.34375
					地面高程	0.2375
			脆弱性 C ₅	0.26875	历史样本统计频次	1
					风暴潮影响区域人口密度	0.575
					风暴潮影响人均 GDP	0.425
			防范能力 C ₆	0.10875	经济损失率	0.59375
					潜在人口伤亡率	0.40625
					财政支持能力	0.435
	海平面上升风险 B ₃	0.105	危险性 C ₇	0.4188	防护工程基础	0.565
					海平面上升幅度	0.8025
					海平面上升概率	0.1975
			脆弱性 C ₈	0.4575	海平面上升影响区域人口密度	0.55625
					海平面上升影响人均 GDP	0.45
					海岸入侵	0.61875
			防范能力 C ₉	0.1238	咸潮入侵	0.38125
					防护工程基础	0.4125
					海堤风暴潮标准	0.41875
					财政支持能力	0.16875

地面高程指数 h' 定义及量化:

$$h' = \begin{cases} 0.9 & h \leq 0 \\ 0.8 & 0 < h \leq \Delta h \\ 0.7 & T < h \leq \Delta h + T \\ 0.6 & T_{\max} < h \leq \Delta h + T \\ 0.3 & \Delta h + T_{\max} < h \leq \Delta h + T_{\max} + 10 \\ 0.1 & h > \Delta h + T_{\max} + 10 \end{cases} \quad (4)$$

式中, h 为海拔高程; Δh 为评估时段(如未来 10 年)相对海平面上升幅度(m); T 为该区域单元常见潮位(m); $T_{\max}$ 为该评估单元历史最高潮位(m); 将 10m 设置为海拔高程脆弱性的临界值。

③海平面上升幅度指标 d 的定义及量化:

$$d = \begin{cases} 0.9 & h - \Delta h \leq -2 \\ 0.8 & h - \Delta h \leq 0 \\ 0.7 & h - \Delta h \leq T \\ 0.6 & h - \Delta h \leq T_{\max} \\ 0.3 & 5 < h - \Delta h - T_{\max} \leq 10 \\ 0.1 & h - \Delta h - T_{\max} > 10 \end{cases} \quad (5)$$

式中, h 为海拔高程(m), Δh 为评估时段(如未来 10 年)相对海平面上升幅度(m); T 为该区域单元常见潮位(m); $T_{\max}$ 为该评估单元历史最高潮位(m)。

海平面上升概率(p)表示相对海平面上升的可能性, 量化如下:

$$p = \begin{cases} 0 & R_g - R_r \leq 0 \\ 1 & R_g - R_r > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, R_g 为评估时段内全球绝对海平面上升速率; R_r 为

评估单元地面上升速率。

2.6 洪水淹没风险等级的确定

在我国主要海域自然灾害风险等级划分标准(张韧, 2014)的基础上, 根据洪水淹没风险综合指数来判定青岛市洪水淹没风险等级(表 3)。

表 3 我国主要海域自然灾害风险等级划分
Tab.3 The classification of marine natural disaster risk assessment in China

RI	<0.11	0.11—0.29	0.29—0.50	0.50—0.68	>0.68
等级	1	2	3	4	5
描述	危险性极低	危险性较低	危险性中等	危险性较高	危险性极高

2.7 洪水淹没风险关键性控制指标的确定

针对不同类别的致灾体, 将各二级基础性指标的权重与标准化值相乘的乘积与洪水淹没风险综合指数(RI)相比, 取对 RI 值贡献率(R)较高的三类基础指标, 将其确定为洪水淹没风险关键性控制指标。

$$R = \frac{E \cdot W}{RI} \cdot 100\% \quad (7)$$

式中, R 为风险贡献率; E 为二级指标标准化值; W 为二级指标权重值; RI 为洪水淹没风险综合指数。

在此基础上, 提出具有针对青岛市洪水淹没综合风险的风险防范建议和措施。

3 数据来源

3.1 各指标数据来源

本文的数据来源分为致灾体历史变化数据和趋势变化推算数据两部分, 各项指标的数据来源见表格所示(青岛市志, 2015; 青岛市海洋环境公报, 2015; 中国海洋灾害统计公报, 2015)。

表 4 数据时间段及来源
Tab.4 Data period and sources

序号	二级指标层(D)	数据时间段及类别	数据来源
1	台风过程的最大风速	2010—2015 历史数据	青岛市气象局观测统计数据
2	台风过程的风速强度	2010—2015 历史数据	青岛市气象局观测统计数据
3	台风过程日最大降水量	2010—2015 历史数据	青岛市气象局观测统计数据
4	台风过程影响持续时间	2010—2015 历史数据	青岛市气象局观测统计数据
5	台风最大风速气候趋势指数	趋势变化推算数据	ACCCII 项目组气象模拟数据
6	台风风速强度气候趋势指数	趋势变化推算数据	ACCCII 项目组气象模拟数据
7	台风年生成频次气候趋势指数	趋势变化推算数据	ACCCII 项目组气象模拟数据
8	台风年登陆频次气候趋势指数	趋势变化推算数据	ACCCII 项目组气象模拟数据
9	台风影响区域人口密度	2010—2015 历史数据	青岛市统计年鉴数据
10	台风影响区域地均 GDP	2010—2015 历史数据	青岛市统计年鉴数据
11	防范能力	2010—2015 历史数据	青岛市发展改革委员会、青岛市水利局网站
12	正常潮位	2010—2015 历史数据	青岛站潮汐表数据
13	历史最高增水	趋势变化推算数据	ACCCII 项目组风暴潮模拟数据
14	台风/寒潮强度	2010—2015 历史数据	青岛市气象局观测统计数据
15	地面高程	趋势变化推算数据	地理空间数据网站、青岛黄海高程基准面数据、ACCCII 项目组海平面上升模拟推算数据
16	历史样本统计频次	2010—2015 历史数据	青岛市海洋环境公报
17	风暴潮影响区域人口密度	2010—2015 历史数据	青岛市统计年鉴数据
18	风暴潮影响人均 GDP	2010—2015 历史数据	青岛市统计年鉴数据
19	经济损失率	2010—2015 历史数据	中国海洋灾害统计公报、青岛市海洋灾害公报、《气候变化与国家海洋战略》
20	潜在人口伤亡率	2010—2015 历史数据	中国海洋灾害统计公报、青岛市海洋灾害公报、《气候变化与国家海洋战略》

续表

序号	二级指标层(D)	数据时间段及类别	数据来源
21	财政支持能力	2010—2015 历史数据	青岛市发展改革委员会、青岛市统计年鉴数据
22	防护工程基础	2010—2015 历史数据	青岛市水利局网站
23	海平面上升幅度	趋势变化推算数据	国家海洋信息中心观测统计信息、 ACCCII 项目组海平面上升模拟数据
24	海平面上升概率	趋势变化推算数据	国家海洋信息中心观测统计信息、中国海洋灾害统计公报、 ACCCII 项目组海平面上升模拟数据
25	海平面上升影响区域人口密度	2010—2015 历史数据	青岛市统计年鉴数据
26	海平面上升影响人均 GDP	2010—2015 历史数据	青岛市统计年鉴数据
27	海岸入侵	2010—2015 历史数据	中国海洋灾害公报、青岛市海洋环境公报
28	咸潮入侵	2010—2015 历史数据	中国海洋灾害公报、青岛市海洋环境公报
29	防护工程基础	2010—2015 历史数据	青岛市水利局网站
30	海堤风暴潮标准	2010—2015 历史数据	青岛市水利局网站
31	财政支持能力	2010—2015 历史数据	青岛市发展改革委员会、青岛市统计年鉴数据

3.2 致灾体趋势变化推算数据

致灾体趋势变化推算数据由中瑞国际合作的气候变化适应策略项目(ACCCII)组专项调查及模拟研究获得。其中,台风类数据来源于青岛市气象局历年台风观测数据及模拟分析数据;风暴潮类数据由项目组根据台风等相关数据推演及部分历史数据;海平面上升数据来源于国家海洋信息中心在青岛沿海五号码头和小麦岛站点的海平面变化观测数据以及气候情景模式模拟数据。

3.2.1 台风类数据 通过对 1949—2014 年间青岛市台风历史资料进行统计分析后,可将途经青岛市的台风按照路径为八类,分别是登陆北上(16 个),登陆转向(18 个),高纬西进(9 个),黄海西折(8 个),近

海北上(5 个),登陆填塞(5 个),近海转向(7 个),远海影响(3 个)。

对逐年影响青岛的热带气旋个数序列做 Mann-Kendall(非参数秩次检验),求得 Mann-Kendall 检验数 M 后,利用最小二乘回归计算水文气象要素的年变化率或 10、20 年变化率(Ratnasooriya *et al*, 2007; 张洁祥, 2014)。而 Morlet 小波变换是通过将台风影响时间系列分解到时间频率域内,从而得出时间系列的显著的周期波动模式(Ming *et al*, 2013)。因此,选用 Mann-Kendall 和 Morlet 小波分析法研究了影响青岛的热带气旋变化率以及影响周期,根据热带气旋的年变化率和不同周期和拟合出热带气旋的变化趋势,获得台风风速、热带影响时间、气旋强度、降雨等数据,如表 5 所示。

表 5 台风推算数据
Tab.5 Simulation data of 8 typhoon types

台风类别	中心气压(hpa)	$T(d)$	强度	降水(mm)	$V_{80}(m/s)$	$V_{2050}(m/s)$
1 登陆北上	949	6	5.112421	130	33.9899	51
2 登陆转向	944	10	5.142208	254.6	35.68317	40
3 高纬西进	953.7	8	4.82837	197.9	27.9375	35
4 黄海西折	940.4	6	4.709541	185.4	24.9	32
5 近海转向	952	13	4.636247	266.4	27.96	42
6 近海北上	952	13	5.271114	390	37.064	45
7 登陆填塞	936.6	13	4.848078	234.7	34.38298	70
8 远海影响	925	16	4.556387	202.9	22.60345	45

注: V_{80} : 八类台风在影响过程中的风速大小; V_{2050} : 八类台风在 2050 年影响过程风速大小; T : 台风影响过程持续时间

在后续的数据处理中再根据所获得的数据分别进行标准化,应用到指标体系计算当中。

3.2.2 风暴潮类数据 根据影响青岛地区的八类典型台风案例具体情况,选择 ADCIRC 模型利用有

限元算法原理进行风暴潮模拟计算。

ADCIRC 潮汐模型是一个深度集成的、随长波变化的水动力循环模型,它的计算域包括深海、大陆架、沿海、小型河口,典型的 ADCIRC 应用有模拟潮

汐和风力驱动的循环; 分析台风(飓风)风暴潮和洪水(Westerink *et al*, 1993; 张乐晨, 2014)。

在风暴潮模拟之前必须进行潮位验证, 是为了验证风暴潮模拟潮位数据与潮汐表数据、模拟增水值与实测增水值之间的匹配程度, 以确定模型的精确程度, 而 C_f 底摩擦系数作为其中非常重要的一个参数, 主要由公式(8)计算来确定(Xie *et al*, 2016)。得出 C_f 底摩擦系数为 0.0015 之后, 选取四个分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 , 用 ADCIRC 模型通过潮汐调和分析对青岛港的天文潮进行了模拟验证。

$$C_f = C_{fmin} \left[1 + \left(\frac{H_{break}}{H} \right)^{\theta_f} \right]^{\gamma_f / \theta_f} \quad (8)$$

式中, C_{fmin} 为最小底摩擦系数(取 0.03); H_{break} 为差值水深(取 2.0m); θ_f 与 γ_f 都是无量纲参数(取 $\theta_f=10$, $\gamma_f=1.33$); H 为实际水深。

通过实际的验证得出, 风暴潮模拟各类数据和实测数据之间的差值较小, 模型的精确度较高。在上述基础上利用 SMS10.1 进行地形网格化, 并将选用 Mann-Kendall 和 Morlet 小波分析法所得的台风中心风速、中心气压、影响时间等作为模型输入数据, 运行 ADCIRC 模型得到青岛市在八类台风影响下的风暴潮潮汐水位及增水, 见表 6。ADCIRC 模型中所涉及的参数包括: 区域范围(126812 个节点, 249437 个网格)、时间步长(60s)、T 运行时间(5d)、网格分辨率(开边界 18.5km, 岸线边界 3.7km)(陈海军等, 2011; Xie *et al*, 2016)。

表 6 八类台风风暴潮潮汐水位及增水
Tab.6 Tidal water level and Storm Surge Elevation of the 8 types of typhoon storm surge

台风类别	时间	风暴潮编号	风暴潮潮汐水位(m)	风暴潮增水(m)
1 登陆北上	2005 年 8 月	0509	2.0119	0.69348
2 登陆转向	2005 年 9 月	0515	1.7364	0.74656
3 高纬西进	2012 年 8 月	1210	3.344	3.0825
4 黄海西折	2011 年 6 月	1105	1.3188	0.4034
5 近海转向	1981 年 8 月	8114	2.2468	0.85823
6 近海北上	2011 年 8 月	1109	1.9651	0.81238
7 登陆填塞	1977 年 8 月	7708	2.3503	1.4028
8 远海影响	1973 年 8 月	7308	1.8264	0.56526

表 7 1980 年—2014 年青岛海平面变化情况
Tab.7 Sea level change in Qingdao from 1980 to 2014

年份	1980	1982	1984	1986	1988	1990	1993	1995	1997	1999	2001	2003
海平面变化(mm)	-3.8	-3	-1	0.5	-0.3	2.3	-1.2	-1.1	2.8	5.7	5.5	4.91
年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
海平面变化(mm)	7.51	3.11	7.61	7.41	5.61	5.64	5.71	7.01	10.61	8.11	10.51	9.36

3.2.3 海平面上升相关数据 通过对青岛沿海海域五号码头和小麦岛站点的海平面观测数据统计分析可得出青岛海平面变化如表 7 所示:

首先, 在上述海平面上升变化数据的基础上, 根据 CMIP3(耦合比较模式计划三)的相关数据集, 基于 B1、A1B、A2 等三种常用的温室气体排放情景以及大气 CO_2 浓度和 CO_2 当量排放浓度, 利用海洋大气和环流耦合模式, 该模式是由海洋和大气环流模式耦合成为一个单独的模式(陈克明等, 1997), 其中海洋模式主要由表面风应力、热通量、海平面气压和淡水通量来驱动; 大气模式能重现当代气候的许多大尺度特征, 温场、气温以及地面温度; 耦合后得出全球气温变化的状况, 准确度较高, 得出上述三种温室气体

排放模式下, 全球变暖分为 $2^\circ C$ 和 $4^\circ C$ 两种情景。然后结合青岛沿海历史海平面变化趋势(1970—2015 年间青岛海平面上升速率约为 $2.0mm/a$; 1980—2015 年间青岛海平面上升速率约为 $3.6mm/a$; 1993—2015 年间青岛海平面上升速率约为 $4.0mm/a$), 利用海平面变化随机动态预测模型具体分析未来青岛近海海平面上升的周期性变化规律。

根据海平面变化的周期性和趋势性变化特征, 建立海平面变化随机动态预测模型:

$$Y(t) = T(t) + P(t) + X(t) + \alpha(t).$$

式中, $Y(t)$ 为海平面值; $T(t)$ 为确定性趋势项; $P(t)$ 为确定性周期项; $X(t)$ 为剩余随机序列; $\alpha(t)$ 为白噪声序列。

将模型简化为:

$$Y(t) = A_0 + B_0 t + \sum_{i=1}^k \left[a_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i} t\right) + b_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i} t\right) \right] \quad (9)$$

在求出线性趋势和周期后,将原始数据中的周期部分替换掉,求出剩余数据中的趋势项,将趋势项结果代入原始数据中,替换掉该趋势项从而获得更准确的周期(丁俊等, 2013)。

经计算得出得到青岛海平面变化的关键性周期有 2—3 年, 4—7 年, 9 年, 11 年以及 18.61 年, 在 2°C

与 4°C 情景下, 青岛市在 2025 年的海平面上升为 4—10cm、5—11cm。

4 评价结果分析

4.1 青岛市洪水淹没风险综合评价

本文根据构建的评价指标体系, 计算得出青岛市洪水淹没风险指数值为 0.3240, 根据我国主要海域自然灾害等级划分(表 3), 可得青岛市洪水淹没风险等级为 3, 危险性属于中等水平。

表 8 青岛市洪水淹没风险评价指数
Tab.8 The index of flooding risk assessment in Qingdao

	危险性指数	脆弱性指数	防范能力指数	风险值	贡献率
台风风险	0.4397	0.1957	0.3176	0.3822	31.83%
风暴潮风险	0.3874	0.2052	0.2512	0.3509	63.58%
海平面上升风险	0.0396	0.2985	0.3455	0.1412	4.59%
洪水淹没综合风险			0.3240		

4.1.1 各类致灾体风险分析 台风、风暴潮、海平面上升三类致灾体的共同作用下, 青岛市洪水淹没风险处于中等水平, 但三类致灾体对风险的贡献程度存在较大差异。相对于台风风险(风险值 0.3822、贡献率 31.83%)、海平面上升风险(风险值 0.1412、贡献率 4.59%)而言, 风暴潮风险对洪水淹没风险贡献率最大, 为 63.58%(风险值 0.3509)。以上风险贡献率的不同, 主要是由不同致灾体导致的成灾原因的不同而不同。

台风的个数多、影响时间集中是造成其对青岛市洪水淹没风险贡献率较大的主要原因。根据青岛市气象局的专项调查数据, 平均每年有 1.08 个台风对青岛市造成影响, 时间多集中于 7—9 月。但是, 在该阶段影响青岛市的台风以中等强度居多, 强台风与超强台风较少, 故导致台风对青岛市洪水淹没风险的贡献率小于风暴潮。

风暴潮作为青岛市洪水淹没风险贡献率最大的一类致灾体, 其影响主要表现在以下方面: 第一, 青岛地区风暴潮多数是活动频繁的台风、强热带风暴所引起的次生灾害, 伴随天文大潮发生的风暴潮, 会对青岛产生一系列灾难性的破坏; 第二, 青岛沿海一线多为开阔海岸线和半敞开式海湾, 极易受到海浪、增水等冲击; 第三, 因建设成本和资金问题, 一些地方的海堤防洪高度没有按防洪标准修建, 防范能力较差。

目前, 海平面上升在青岛市洪水淹没综合风险

中所占贡献相对较小。在该致灾体所属的二级基础指标中, 海平面上升风险与海岸线入侵、海平面上升幅度、海平面上升概率等与海平面上升风险呈正相关。但是青岛市海平面上升水平、防护工程建设率、地质结构这 3 个二级基础指标与海平面上升风险呈现明显的负相关, 是海平面上升风险的制约因素。主要表现在: 现阶段青岛市近年来的海平面上升速率较低, 仅为 0.64mm/a, 低于全国平均上升幅度(3mm/a); 此外, 青岛市海岸线一带地质结构为花岗岩, 其构造坚硬致密、抗蚀力强, 承灾体在遭受海平面上升风险侵害时, 受损程度较小。

4.1.2 各类一级指标风险分析 在洪水淹没风险一级指标层中, 台风风险、风暴潮风险、海平面上升风险均与危险性指数、脆弱性指数呈正相关, 危险性指数越大, 风险值越大; 脆弱性指数越大, 风险值越大。以上三类致灾体的风险值与其防范能力指数呈负相关, 即防范能力指数值越大, 风险指数值越小。

4.2 台风风险指数评价

在青岛市的洪水淹没风险中, 台风风险指数值为 0.3822, 属于对青岛市洪水淹没影响贡献率第二大的致灾体。在台风风险下设的 3 个一级指标中, 危险性指数值(0.4397)>防范能力指数值(0.3176)>脆弱性指数值(0.1957); 而台风过程的风速强度(17.90%)、台风过程的最大风速(12.69%)、台风过程影响持续时间(11.31%)是二级基本指标中对台风风险贡献率较大的前三项指标(见图 1)。

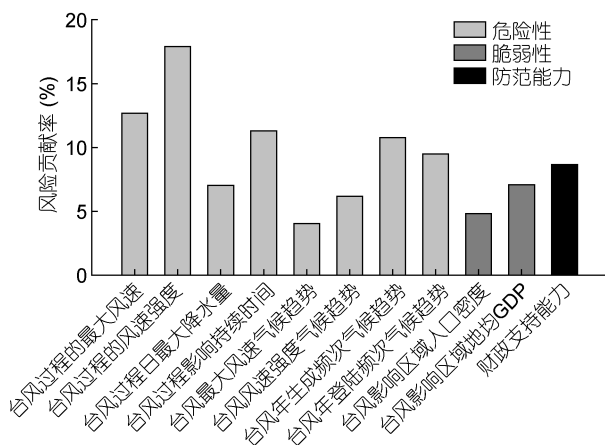


图1 台风风险二级基本指标层中各指标风险的贡献率
Fig.1 Contribution rate of each index in the second-level basic index layer of typhoon risk

从台风风险贡献率较大的3个二级基本指标的风险相关性上来看,台风风险与风速强度、最大风速指标值呈正相关。即:台风过程中的风速强度和最大风速越大,台风风险值越大;台风风险指数值随着台风过程持续时间增大,即:在台风过程中,风速和强度一定的条件下,台风致灾的风险值与台风过程持续时间指标呈正相关,承灾体暴露在风险环境下的时间越长,受到的破坏越严重。

通过对影响青岛市的8114和7708号、0509和0515号台风的数据计算分析可以看出,8114号台风过程的风速强度和最大风速分别为5.27、55m/s,大于7708号台风过程的风速强度和最大风速(4.52、40m/s),根据山东省气象灾害资料显示,8114号台风灾害损失大于7708号。0509号台风与0515号台风过程风速强度和最大风速值接近,但是0509号台风影响时间(10d)比0515号台风长(6d),二者的灾害损失也是前者较大。因此,在台风致灾风险中,二级基础指标中的台风过程的风速强度、最大风速、台风过程持续时间是台风风险关键性控制指标。

4.3 风暴潮风险指数评价

在三类致灾体中,风暴潮风险指数值为0.3509,对青岛市洪水淹没风险的贡献率是三类洪水淹没中贡献率最大(63.58%)的一类;在风暴潮风险中的二级基础指标中,对风暴潮风险贡献率最大的三个指标依次是地面高程(22.68%)、历史最高增水(21.24%)、台风或者寒潮强度(20.87%),见图2。

综合分析地面高程、历史最高增水、台风或者寒潮强度,可以看出:

(1) 风暴潮风险值与地面高程指数呈负相关。风

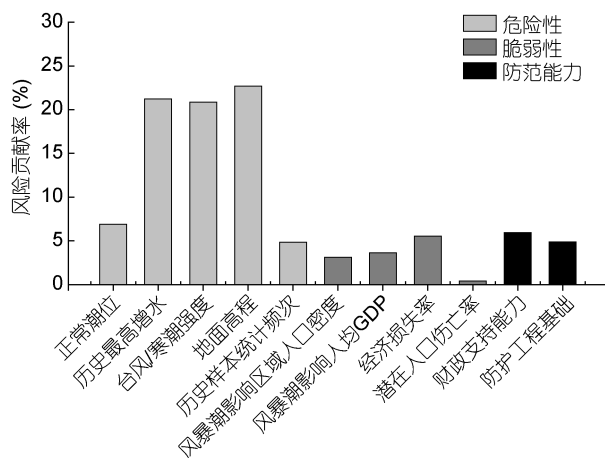


图2 风暴潮风险二级基本指标层中各指标风险贡献率
Fig.2 Contribution rate of each index in the second-level basic index layer of Storm surge risk

暴潮引起的增水、海浪冲击等对地势低洼地带影响较为严重;反之,地面高程值越大,承灾体的抗风险能力越强,风暴潮风险值越小。

(2) 风暴潮风险值与历史最高增水呈正相关。风暴潮产生的增水冲毁堤坝,诱发强降雨,引起沙滩侵蚀、洪水淹没等。一般来说,如历史最高增水值越大,风暴潮的风险值将越大。

(3) 风暴潮风险值与台风(或寒潮)强度指数呈正相关。一定条件下,台风(或寒潮)可诱导风暴潮发生,台风(或寒潮)强度指数值越大,风暴潮风险越大。

根据对青岛市风暴潮灾害统计资料的分析可以发现,历年来风暴潮灾害产生的洪水淹没均使低洼地带遭受严重的破坏,而地面高程指数值较高的地区不易受灾。例如,9216号风暴潮青岛港潮位(548cm)和增水(113cm)高于8509号风暴潮(531cm、89cm),且9216号风暴潮灾情明显重于8509号。因此,二级指标层中的地面高程、历史最高增水、台风(或寒潮)强度等指标是风暴潮风险的制约因素,风暴潮风险值随着以上指标值的增大而增大;而风暴潮风险值随着一级指标中的防范能力指标和二级指标中的地面高程指标值的增大而减小。

4.4 海平面上升风险评价

海平面上升是对青岛市洪水淹没风险的贡献率(4.59%)最小的一类致灾体,其风险指数值为0.1412。在海平面上升风险二级指标层中,海岸入侵(27.26%)、海平面上升幅度(23.12%)、海平面上升概率(22.76%)是贡献率较大的前三个指标,见图3。

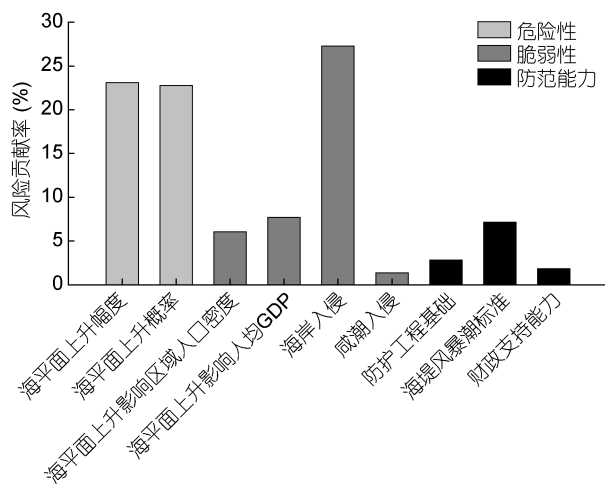


图3 海平面上升风险二级基本指标层中各指标风险贡献率

Fig.3 Contribution rate of each index in the second-level basic index layer of sea-level rise risk

在海平面上升风险二级指标中,海平面上升风

险与海岸入侵、海平面上升幅度、海平面上升概率等呈正相关,指标值越小,海平面上升风险值越小。

虽然目前以上3个二级指标指数值较小,海平面上升风险值较低,其对于海岸带城市的陆上区域造成的危害性较弱,但是在气候变化背景下,未来海平面上升幅度和概率不断增大,海岸入侵也在逐年加剧。从历年来青岛市海洋环境公报中可以看出,近年海岸入侵距离不断增大,其中2014年海岸入侵距离高达1000m,导致承灾体易损程度较大。因此海平面上升风险也是不容忽视的洪水淹没风险致灾因素,其风险值随着海岸入侵、海平面上升幅度、海平面上升概率增大,呈一定的正相关关系。

5 风险防范建议

本文通过研究分析获得青岛市洪水淹没风险中9个关键性控制指标,针对其提出相应的风险防范建议及措施,见图4。

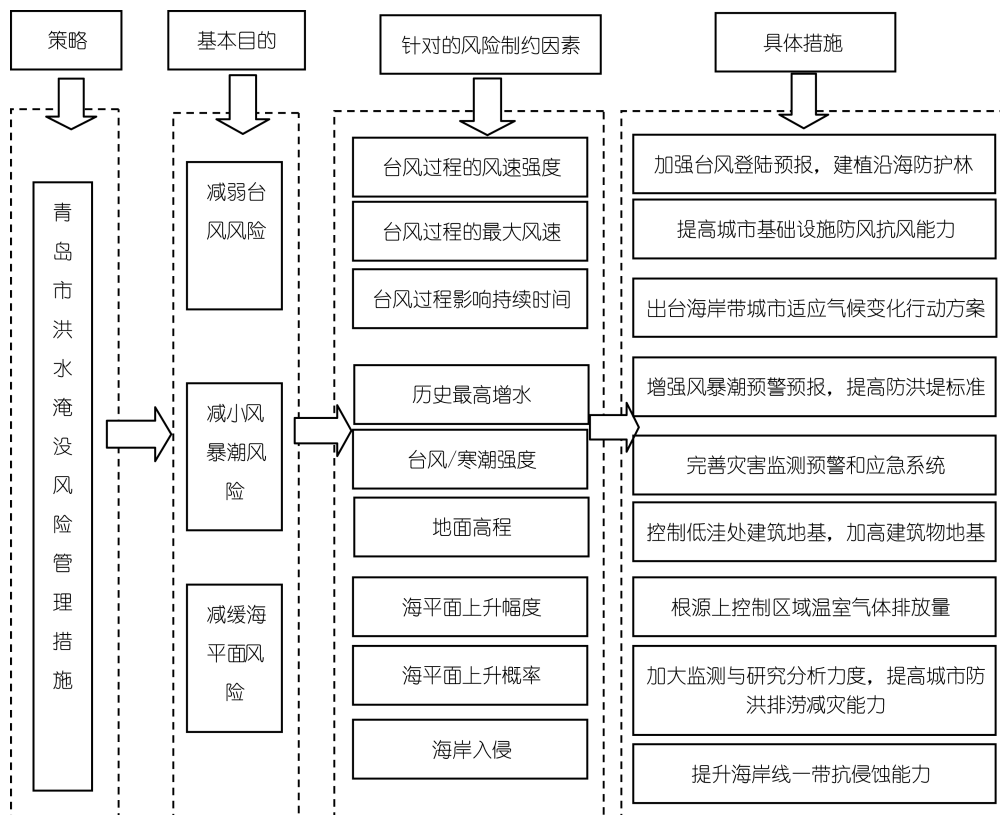


图4 针对青岛市洪水淹没风险主要制约性指标的风险防范建议及措施示意图

Fig.4 Risk prevention suggestions and measures for the major controllable indicators of flooding risks in Qingdao

针对青岛市洪水淹没中的其他非控制性指标,例如防范性指标,虽然在风险综合指数中的贡献率较低,但是因为防范性指标于风险综合指数呈现明

显的负相关关系。所以如果能有效加强并提高防范性指标,例如提高防护工程基础、提高海堤风暴潮标准、加大防灾减灾的财政支持能力等,也能起到一定

的积极作用。

此外, 由于海岸带城市洪水淹没是在受到台风、风暴潮以及海平面上升等长期性、持久性影响下产生的一种灾害现象, 因此在适应性措施上应分为短期和长期措施。

(1) 短期措施

就目前来说, 青岛市可通过建植沿海防护林, 削弱台风在登陆后的风速及强度; 提高海岸线堤坝的修建水平以及加高建筑物地势, 减弱洪水淹没风险; 积极开展海岸带城市洪水淹没防灾减灾规划研究, 提升城市风险防范能力。在此基础上, 应全面落实最严格水资源管理制度, 加强城市防洪堤建设和管理, 整体提高城市防洪排涝减灾能力。

(2) 长期措施

青岛市应当在全面评估海岸带城市洪水淹没风险的基础上, 建立灾害监测预警平台和灾害信息数据库, 以达到准确及时发布台风和风暴潮灾害预报的目的; 持续优化青岛市老城区基础设施建设, 以提升应对洪水淹没风险的能力; 严格控制区域温室气体排放, 从根源上减缓气候变化对洪水淹没的影响; 重点针对市区脆弱区域制定适应性行动方案, 提升应对极端气候事件的能力。

6 结论

本文以青岛市为例根据风险的内涵, 借鉴国外风险综合评价的理念, 将自然机理模型与概念框架模型相结合, 构建具有针对性的海岸带型洪水淹没风险评价框架和指标体系, 对青岛市洪水淹没风险进行综合评估。

从整体上来看, 青岛市洪水淹没风险值为 0.3240, 风险等级属于中等; 从致灾体的贡献率上看, 青岛市的风暴潮风险>台风风险>海平面上升风险; 从各类致灾体的影响因素上看, 各类致灾体的风险值均与危险性指数、脆弱性指数呈正相关, 与防范能力指数呈负相关。从影响各类致灾体的基础指标上来看, 台风风速强度、台风过程的最大风速、台风过程影响持续时间, 历史最高增水、台风(或寒潮)强度、地面高程, 海平面上升幅度、海平面上升概率、海岸入侵等指标对综合风险值影响较大。

虽然诸多对灾害风险的关键性控制性指标皆属于自然因素类指标, 但是如果能通过加强观测和预测工作, 提高洪水淹没的风险管理水平, 可以在一定程度上预防或降低洪水淹没风险的影响; 对于人为

可控因素类指标和防范性指标, 则应变被动应对为主动适应, 制定短期和长期性的适应策略和行动, 充分利用可调节因素, 有效加强并提高防范性指标, 以到达最大程度的趋利避害, 降低青岛市洪水淹没风险的同时, 应对极端气候事件。

致谢 感谢为本文提供各类技术支持和建议的牛津大学的 Paul Sayers 教授洪水风险分析团队; 瑞士驻华大使馆 Philippe Zahner, Laura Scaperrotta 等项目监管人员; 美国国家大气研究中心(NCAR)徐晓明教授、新西兰国际气候研究所专家李银鹏教授; 中国海洋大学边昌伟博士, 王智峰博士、孟昭苏博士、郑洋博士; 中国人民大学王克博士; 国家海洋信息中心李欢博士等。

参 考 文 献

- 丁 骏, 江海东, 应 岳, 2013. 舟山市沿海海平面上升预测和淹没分析. 杭州师范大学学报(自然科学版), 12(4): 373—378
- 国家海洋局, 2015(2016-03-24). 2015 年中国海洋灾害公报. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyzhgb/201603/t20160324_50521.html
- 王建华, 2009. 基于模糊综合评判法的洪水灾害风险评估. 水利科技与经济, 15(4): 338—340
- 史培军, 杜 鹃, 冀萌新等, 2006. 中国城市主要自然灾害风险评估研究(英文). 地球科学进展, 21(2): 170—177
- 孙 海, 2013. 滨海城市自然灾害风险评估与控制方法的基础研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- 吴 玮, 刘秋兴, 于福江等, 2012. 台州沿海地区台风风暴潮淹没风险分析. 海洋预报, 29(2): 25—31
- 张 韧, 2014. 气候变化与国家海洋战略. 北京: 气象出版社
- 张乐晨, 2014. 基于 ADCIRC 的台风风暴潮灾害影响预测技术研究. 安全, 35(12): 12—14, 17
- 张洁祥, 张雨凤, 李琼芳等, 2014. 1971—2010 年上海市降水变化特征分析. 水资源保护, (4): 47—52.
- 张行南, 张文婷, 刘永志等, 2006. 风暴潮洪水淹没计算模型研究. 系统仿真学报, 18(S2): 20—23
- 李 倩, 张 韧, 姚雪峰等, 2013. 气候变化背景下我国周边海域热带气旋灾害风险评估与区划. 热带气象学报, 29(1): 143—148
- 李建生, 1999. 中国江河防洪丛书: 总论卷. 北京: 中国水利水电出版社
- 陈克明, 张学洪, 金向泽等, 1997. 一个用于全球气候变化研究的海洋大气环流耦合模式 II. 模式气候漂移和增强温室效应的初步分析. 海洋学报, 19(3): 21—32
- 陈海军, 姜绍材, 王 飞, 2011. ADCIRC 模式在渤海 M2 分潮模拟中的应用研究. 海洋预报, 28(4): 70—75
- 青岛市志, 2015. <http://qdsq.qingdao.gov.cn/n15752132/n20546827/n20632970/index.html>
- 青岛市统计局, 2010~2015. 青岛统计年鉴. 中国统计出版社
- 青岛市海洋与渔业局, 2015. 青岛市海洋环境公报. <http://ocean.qingdao.gov.cn/n12479801/n32205288/160405093528591035.html>

- 赵 昕, 孙瑞杰, 2009. 基于因子分析的海洋灾害损失评价. 中国渔业经济, 27(5): 120—125
- 钟晋阳, 2009. 基于 GIS 的浙江省洪水灾害风险区划. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士学位论文
- 殷克东, 孙文娟, 2011. 风暴潮灾害经济损失评估指标体系研究. 中国渔业经济, 29(3): 87—90
- 傅 湘, 纪昌明, 2000. 洪灾损失评估指标的研究. 水科学进展, 11(4): 432—435
- 焦俊超, 马安青, 李福建, 2010. 基于 GIS 的崂山区洪水危险等级模糊评判研究. 水土保持通报, 30(5): 161—164
- 颜 峻, 左 哲, 2010. 自然灾害风险评估指标体系及方法研究. 中国安全科学学报, 20(11): 61—65
- Begum S, Stive M J F, Hall Jim W 编著, 叶阳, 邓伟, 付强译, 2011. 欧洲洪水风险管理. 郑州: 黄河水利出版社
- Al-Taei S A R, Subber A R H, Al-Imarah F J M, 2012. The application of two dimensional model on oil spill movement in Khor AL-Zubair, north west, Arabian Gulf. *Advances in Applied Science Research*, 3(4): 1963—1977
- Gain A K, Mojtahed V, Biscaro C *et al*, 2015. An integrated approach of flood risk assessment in the eastern part of Dhaka City. *Natural Hazards*, 79(3): 1499—1530
- McInnes K, Hubbert G, Oliver S *et al*, 2000. Storm tide return periods and 1974 floodwater modelling. New York, USA. Graeme D. Hubbert, CSIRO Atmospheric Research. 9—43 http://www.cmar.csiro.au/e-print/open/mcInnes_2000b.pdf
- Ming F C, Ibrahim C, Jolivet S *et al*, 2013. Observation and a numerical study of gravity waves during tropical cyclone Ivan. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 13(4): 10757—10807
- Oyinloye M A, Olamiju O I, 2011. Flood risk mapping and vulnerability analysis using GIS: empirical evidences from New Town area, Ondo, Ondo State, Nigeria. *International Journal of Society Systems Science*, 3(3): 291—304
- Ratnasooriya H A R, Samarawickrama S P, Imamura F, 2007. Post tsunami recovery process in sri lanka. *Journal of Natural Disaster Science*, 29(1): 21—28
- Sayers P, Galloway G, Penning-Rowsell E *et al*, 2015. Strategic flood management: ten 'golden rules' to guide a sound approach. *International Journal of River Basin Management*, 13(2): 137—151
- Wang Z B, Tse M L, Lau S C, 2011. A study on sedimentation of tidal rivers and channels flowing into deep bay with a delft3d model. In: *Proceedings of the 6th International Conference on APAC 2011*. Hong Kong: Asian and Pacific Coasts, 1444—1451
- Westerink J J, Luettich R A Jr, Blain C A *et al*, 1993. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 2: user's manual for ADCIRC—2DDI. *Journal of Geology*, 76(6): 721—723
- Xie D M, Zou Q P, Cannon J W, 2016. Application of SWAN+ADCIRC to tide-surge and wave simulation in Gulf of Maine during Patriot's Day storm. *Water Science and Engineering*, 9(1): 33—41
- Zhang K Q, Xiao C Y, Shen J, 2016. Comparison of the CEST and SLOSH models for storm surge flooding. *Journal of Coastal Research*, 24(2): 489—499

COMPREHENSIVE EVALUATION OF FLOODING RISK IN COASTAL ZONES —A CASE STUDY OF QINGDAO CITY

LIAO Qi¹, YU Ge¹, JIANG Wen-Sheng¹, MA Yan², LIN Qun³,
LIU Ke-Xiu⁴, WANG Yan-Ping¹, SUN Xue¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Qingdao Meteorological Administration, Qingdao 266003, China; 3. Qingdao economic and information technology Committee, Qingdao 266071, China; 4. National Marine Information Center, Tianjin 300480, China)

Abstract Present research and assessment on coastal flooding risk emphasize the storm surge as a single disaster factor while ignoring other factors' natural and social attributes. Taking Qingdao City as a case, we clarified the connotation of the risk, summarized successful risk assessment concept from international practices, integrated the natural mechanism model and conceptual framework model of coastal flooding, contemplated the indicators of natural processes, and characterized the probability of occurrence of the risk. By applying socioeconomic indicators, we built a robust evaluation system of the flooding risk, aiming to provide an effective technical and methodological support to the flooding risk assessment of coastal cities. Results show that the flooding risk index of Qingdao is 0.3240, and the flooding risk level is 3 under the China's national standard, which, in other words, indicates intermediate-level risk at present. In addition, the correlation between various risk factors and flooding inductive bodies was specified. At last, we established the strategy of prevention against natural disaster with human-being interferences, and formulated short-term and long-term adaptation tactics and actions, to prevent or reduce the impact of flooding risk in Qingdao City.

Key words flooding; risk assessment; coastal zones; Qingdao City