

城市气候适应针对性研究 ——以青岛市风暴潮淹没风险为例*

郑渝莹¹, 于格^{1,2**}, 江文胜^{1,2}

(1.中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2.中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 本文以青岛市风暴潮淹没风险为例,以针对性为重点,开展城市适应策略的制定研究。首先,将未来气候变化背景下 8 种台风路径影响下的风暴潮淹没情况进行科学评估和量化。在此基础上,提出综合性指标“沿海岸线淹没风险危险等级”,将气候变化及其不确定性影响下的沿海岸线受风暴潮淹没影响的危险程度,以简单直观的形式表征出来。通过研究发现,对于所有情景而言,大沽河口及其附近岸线、黄岛东北端辛安南河入海口和小叉湾一带、城阳墨水河入海口处是青岛市淹没风险危险等级较高的岸线,其中大沽河口附近岸线风险值最高可达 0.98,其余高风险岸线的风险值在 0.509、1.210 等影响较明显的台风下多在 0.6~0.9 之间;此外,为了使适应策略的提出具有针对性,并符合城市的自然地理和社会经济发展特点,本文将风险评估得到的量化结果逐级定性化,并依据陆地淹没水深与海水淹没陆地的纵深距离进行淹没归因分类和科学分区,划分为地势低洼型淹没岸段和河流入海口溢流型淹没岸段。根据国内外海岸带城市在适应风暴潮淹没风险的先进经验,构建具有可操作性的青岛市适应建议策略集。通过该制定方法获取的建议策略集,可以将以风暴潮淹没为代表的气候变化风险逐级转化为具有针对性的适应策略,使之成为连接气候变化风险、适应气候策略和未来城市发展之间的一座桥梁。

关键词: 适应气候变化; 风暴潮淹没; 针对性

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2022)07-030-09

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20210138

引用格式: 郑渝莹, 于格, 江文胜. 城市气候适应针对性研究——以青岛市风暴潮淹没风险为例[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(7): 30-38.

Zheng Yuying, Yu Ge, Jiang Wensheng. Targeted research on urban climate adaptation: Taking the risk of storm surge inundation in Qingdao as an example[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(7): 30-38.

适应气候变化是指通过调整自然系统和人类系统,以应对实际发生的或预估的气候变化或影响^[1]。郑大玮认为,适应气候变化的本质是通过调整受体系统类型的选择与内部结构、功能的调整,使之与变化了的气候环境相协调,达到既趋利又避害的效果^[2]。作为一个受气候变化影响的受体系统,城市呈现出典型的人口和经济聚集度高、区域特征显著的特点。为达到适应的核心目标——趋利避害,城市适应策略承担着将国家和省级的适应策略设计细化到中观尺度,并根据城市特点制定具有针对性的适应策略的重要任务。现阶段在城市尺度上的适应策略制定多集中于政府部门制定和发布的城市适应规划或是行动方案。譬如纽约、波士顿、萨利纳斯等西方发达国家的部分城市已研究出针对城市特点的适应气候变化规划或指南^[3-5],

中国在适应气候变化领域虽接触较晚,但自 2013 年《国家适应气候变化战略》和 2016 年《城市适应气候变化行动方案》提出后,城市层面的适应气候变化行动方案或规划逐渐从第一批 28 个试点城市^[6-8]及其他发达城市(上海^[9]、重庆^[10]、青岛^[11]等)中推行起来。这个领域适应策略的特点在于政策性较强,涵盖社会经济领域广泛。与此同时,虽然国外某些发达城市可以达到部分量化的程度^[12-13],由于国情、数据可获取性等方面差异,目前国内的适应策略研究仍存在较多偏向于定性描述的问题;此外,也有部分学者开展了关于城市或是区域尺度上的适应理论和方法论研究^[14-17],这将对增强适应政策制定的科学性提供较好的理论支持。

由气候变化引起的极端天气气候事件频发,这些

* 基金项目:青岛市科技咨询项目(20180239,20200258);瑞士发展合作署资助国际合作项目(INTASAVE ACCC-045)资助

Supported by the Qingdao Science and Technology Advisory Project(20180239,20200258);the International Cooperation Project of Swiss Agency for Development and Cooperation(INTASAVE ACCC-045)

收稿日期:2021-04-01; 修订日期:2021-05-07

作者简介:郑渝莹(1997—),女,硕士生,主要研究方向为适应气候变化。E-mail: 343365218@qq.com

** 通讯作者: E-mail: yuge@ouc.edu.cn

事件是目前适应气候变化和灾害风险管理领域中的关注重点。风暴潮是影响沿海城市的一种重要海洋灾害,是指由于强烈大气扰动,如强风或气压骤变导致的海面异常升高或降低的现象^[18]。气候变化背景下风暴潮发生的频率和破坏程度均有所增加,再加之海平面上升的长期影响,沿海城市发生风暴潮淹没,乃至风暴潮灾害的可能性也随之增加。对风暴潮淹没进行有效量化,评估沿海城市气候变化风险和制定具有针对性适应策略的重要内容和基础之一。目前,关于风暴潮淹没风险研究多偏向于风暴潮增水海洋过程的模拟^[19-22],和灾害损失评估^[23-26]等,相比较而言,以适应策略制定为目的风暴潮研究开展的则相对较少。

青岛市位于山东半岛南部(119°30'E—121°00'E, 35°35'N—37°09'N),地处黄海之滨,海岸线漫长,是中国北方典型海岸带城市的代表之一。青岛市经常遭遇各种海洋灾害,其中影响最为严重的当属台风和风暴潮,平均每年遭受约 1.08 个经黄海或近海北上台风的影响^[27]。仅以 2019 年“利奇马”台风登陆青岛为例,山东省沿海地区直接经济损失 21.63 亿元,位列全国第二^[28]。本文以青岛市风暴潮淹没风险为例,以针对性为重点,开展城市适应策略的制定研究:首先,基于 GIS 平台,将未来气候变化背景下 8 种台风路径影响下的风暴潮淹没情况进行科学评估和量化,提出综合性指标“沿海岸线淹没风险危险等级”,将气候变化及其不确定性影响下的沿海岸线受风暴潮淹没影响的危险程度以简单直观的形式表征出来。在此基础上,根据国内外海岸带城市在适应风暴潮淹没风险的先进经验,构建可操作性的青岛市适应建议策略集,为构建海岸带风暴潮淹没灾害风险管理和城市适应针对性研究奠

定一定的基础。

1 研究方法

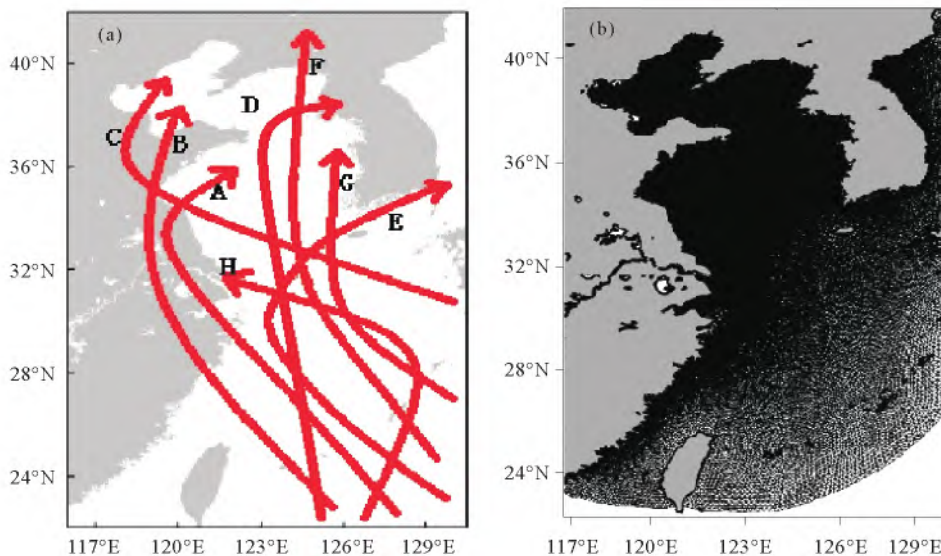
在城市适应策略制定过程中,需要根据区域气候变化及影响特点,并结合城市自然地理特征和社会经济发展水平,制定具有针对性的适应策略,使其政策效果既能承上启下又能因地制宜。为达到以上目的,本文将城市适应策略制定的针对性具体细化为三个方面:评估过程具备科学性、评估指标的选择具备合理性、适应政策具备可操作性。在此基础上,根据区域特点,将青岛市风暴潮淹没量化及其适应策略的制定划分为以下几个步骤:

1.1 风暴潮增水过程描述

从影响风暴潮淹没风险内在因素角度来看,可将其划分为两个过程:风暴潮的增水过程(海洋过程)和风暴潮的淹没过程(陆地过程)。风暴潮的增水过程主要是描述从风暴潮起源的大气对海洋的强迫作用,到风暴潮在海上的成长和发展过程,针对青岛市而言,风暴潮的增水过程主要影响因素为台风和海平面上升。

本文利用的主要源数据涉及台风、海平面上升、海浪和风暴潮增水过程产生的综合水位等,以上数据均来自于中瑞合作项目“中国适应气候变化项目二期(ACCC II)”青岛案例中的部分数据结果。

(1) 台风路径数据结果:根据对影响青岛市台风类型的观测资料进行综合分析,筛出影响青岛及近海的 8 种台风路径,分别为:登陆转向型(0515)(A)、登陆北上型(0509)(B)、高纬西进型(1210)(C)、黄海西折型(1105)(D)、近海转向型(8114)(E)、近海北上型(1109)(F)、登陆阻塞型(7708)(G)、远海影响型(7308)(H),示意图见图 1(a)。



((a)为青岛近海 8 种常见台风路径;(b)为青岛市风暴潮模拟模型格网图。(a)Eight common typhoon paths in Qingdao coastal waters;(b)The grid diagram of Qingdao storm surge simulation model.)

图 1 青岛市风暴潮淹没模拟数据及模型^[29]

Fig.1 Simulation data and model of storm surge inundation in Qingdao^[29]

(2) 海平面上升数据结果:参考政府间气候变化专门委员会(IPCC)AR4 报告中利用 CMIP3 模拟出的不同情景,以 A1B 情景下 CO₂ 浓度和排放强度为基础,建立随机动态预测模型,再结合青岛沿海海平面历史趋势和周期性变化,对青岛沿海海平面上升率预测如下:在全球变暖 2℃ 情景下,青岛沿海海平面上升率为 30 mm/a,在 4℃ 全球变暖情景下,青岛沿海海平面上升速率为 65 mm/a。

(3) 风暴潮增水数据结果:采用变分辨率的非结构化三角形网格,利用 Adcirc 模型(模型示意图见 1(b)),以影响青岛及近海的 8 场典型台风为动力,考虑不同温度变化以及海平面上升影响,对风暴潮增水过程进行模拟,并获得不同强度和不同路径的台风造成的风暴潮增水水位情况。

1.2 风暴潮的淹没过程描述及其影响因素确定

从适应方法学角度上来看,由于气候变化本身的复杂性和预测方法的局限性,如何将淹没风险的针对性及精确化预估与科学的不确定性分析结合,以使其成为真正指导制定具有针对性的适应策略的科学工具,也是本文期望解决的问题之一。

本文所指的风暴潮淹没过程主要是描述以风暴潮增水为主要来源的洪水淹没陆地的过程。一般来说,陆地高程是决定淹没的首要因素,即:地势低的地方淹没面积大,但同时,对于青岛市而言,存在海岸线漫长且有多条独立入海河流的特点,风暴潮发生时伴有暴雨等极端天气事件发生,因此河流的入海口及感潮段经常会发生河流溢流现象,这样由风暴潮增水及暴雨共同产生的洪

水随着河道流向陆域腹地。因此从地形、地势和河流水系条件来看,青岛沿海地区易发生淹没的区域一般可以分为两类:沿海岸线地势低洼类和河口区地势低洼类。

因此,从针对性角度来探讨青岛市风暴潮的淹没过程,有以下两个因素对评估风暴潮淹没风险而言具有重要意义,分别是:陆地淹没水深和海水淹没陆地的纵深距离。其中,陆地淹没水深是指风暴潮经过海上增水过程后涌上陆地,在一定陆地高程基础上体现出来的实际淹没水深,也就是风暴潮增水过程生成的综合水位与陆地淹没区的高程之差,该因素可以体现陆地高程对风暴潮淹没的影响;海水淹没陆地的纵深距离,是指风暴潮淹没在陆地上能达到的最远距离,即:与淹没岸线垂直的最远淹没距离,该因素可以体现风暴潮增水是否由海岸线沿河流水系流向陆域腹地。

1.3 沿海岸线淹没风险危险等级的提出

1.3.1 沿海岸线淹没风险危险等级计算流程 针对风暴潮淹没的陆地过程,本文提出一个综合性指标“沿海岸线淹没风险危险等级”,该综合性指标主要包含陆地淹没水深和海水淹没陆地的纵深距离两个指标,借助于地理信息系统(GIS)平台的缓冲区空间分析法,将陆地淹没水深与海水淹没陆地的纵深距离投影到对应的沿海岸线(这里的岸线是指青岛市陆地边界岸线,忽略了周围岛屿);在经过标准化处理后,形成无量纲的综合性指标“沿海岸线淹没风险危险等级”,并以该指标表征气候变化及其不确定性影响下的沿海岸线受风暴潮淹没风险影响的危险程度。计算的主要流程图见图 2。

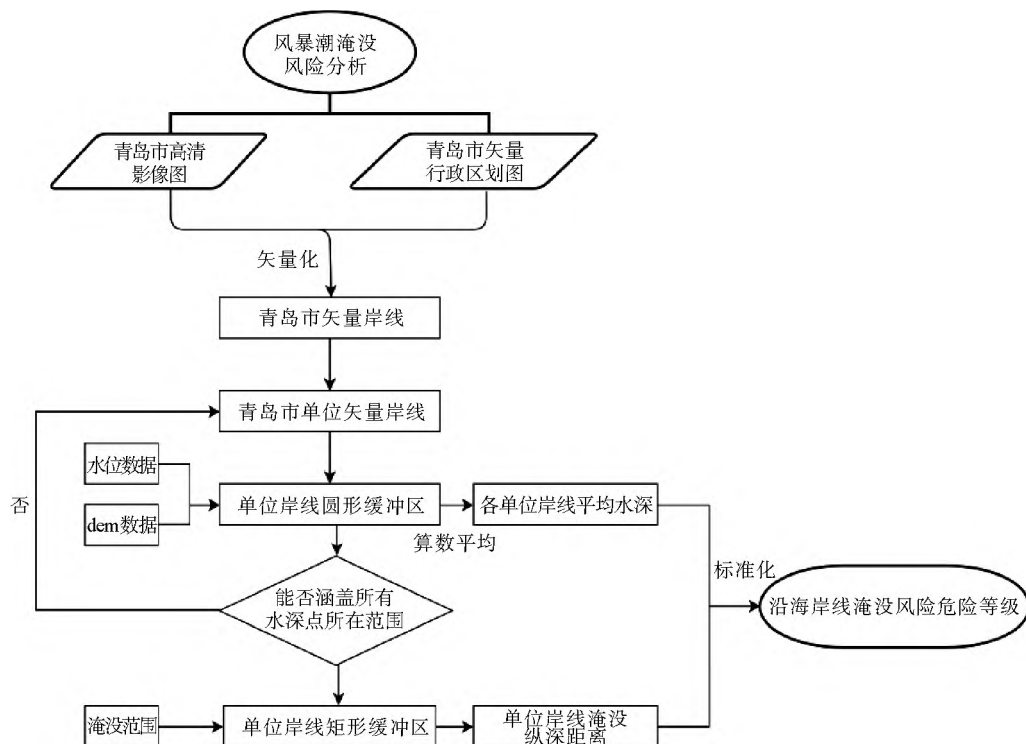


图 2 沿海岸线淹没风险危险等级计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart of risk level of inundation along coastline

1.3.2 陆地淹没水深计算流程 如 1.2 部分所示, 陆地淹没水深是本文提出的一个代表实际淹没水深的一个指标, 这是表征风暴潮淹没风险危险性的一个重要指标。针对城市而言, 在计算过程中需要注意两点: 一是如何在一定地理空间范围内将隶属于不同数据类型的风暴潮增水综合水位与陆地高程一一对应, 计算获得相应点位的差值, 也就是陆地淹没水深值; 二是如何将陆地淹没水深值与城市实际情况相对应, 以获取对水深危险等级的分类。因此, 本文设计的计算原理和流程如图 3 所示。

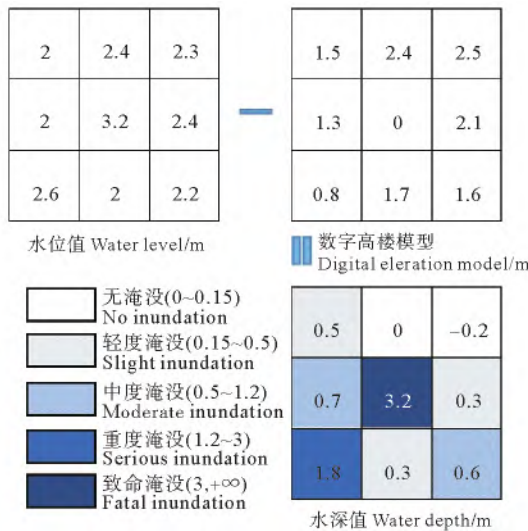


图 3 淹没水深计算原理示意图
Fig.3 Schematic diagram of submerged depth calculation principle

在 ArcGIS 平台上, 首先将 DEM 图像和水位点矢量数据图像的经纬度和坐标系进行统一(本文统一成 WGS 1984 坐标系), 以保证栅格数据和点矢量数据在空间位置上的统一; 其次, 为解决不同类型数据间不能进行直接计算的问题, 基于栅格数据任意一个栅格内具有唯一数据值的原理, 本文利用水位点矢量数据识别其对应的栅格空间位置, 将该栅格内所有的点进行重采样并赋予该栅格唯一所属 DEM 值, 并与水位点矢量一一对应, 由此完成利用水位点矢量数据提取该点所在 DEM 栅格数据值的操作步骤; 第三步, 将重采样后的各水位点的矢量数据与 DEM 值相减获得陆地淹没水深值; 最后, 参考国家《风暴潮灾害风险评估和区划技术导则》, 并根据青岛市实际情况, 将陆地淹没水深危险程度分为: 无淹没、轻度淹没、中度淹没、重度淹没以及致命淹没 5 级, 当水深值大于 1.2 m(大约成年人胸部位置)即视为重度淹没, 可能会对人民生命财产安全造成巨大威胁。

1.3.3 海水淹没陆地的纵深距离计算流程 海水淹没

陆地的纵深距离是指风暴潮淹没在陆地上能达到的最远距离, 该指标可以较好的区分出风暴潮增水是只停留在海岸线附近还是由海岸线沿河流水系流向陆域腹地的不同情况, 尤其是当洪水流向陆域腹地后, 会产生河流溢流型淹没, 甚至成为二次潜在淹没区, 这将对离海岸线较远但是处于这种二次潜在淹没区中的建筑物和人群产生深刻的影响。

为了准确反映河流溢流型淹没的影响, 本文在计算海水淹没陆地的纵深距离时, 考虑到部分岸段对应海水淹没的纵深距离远大于单位岸段长度(本文根据青岛市特点, 选取的单位岸段长度 1 km), 而此时进行空间影响分析时所常用的圆形缓冲区不能较好的体现该特征, 因此本文参考微积分理论, 并基于陆地淹没分析中经典方法——种子蔓延算法的基本原理, 以淹没岸线为地理实体, 自动建立具有一定宽度的矩形缓冲区, 数学表达式为:

$$B_i = \{x; x_i \in (a, b), d(x_i, O_i) \leq L\}$$

式中: B_i 代表的是最终所求得缓冲区范围; x_i 是研究区范围内的任意一点; (a, b) 是研究区总的范围; $d(x_i, O_i)$ 是研究区内任意点 x_i 与所求数据点 O_i 之间的距离; L 是自行设置的缓冲区范围参数)的临近度影响范围, 将陆地淹没水深与海水淹没陆地的纵深距离投影到对应的沿海岸线上。

具体步骤如下: ①根据城市具体情况, 按照所需精度将岸线划分为单位长度的近似直线岸段(如上所述, 本文所取单位长度为 1 km); ②判断岸线左右两侧的海陆相对位置关系, 并对各直线岸段沿向陆方向构建矩形缓冲区; ③将各矩形缓冲区与淹没面积相交取得缓冲区内对应的淹没面积; ④计算各缓冲区淹没面积与缓冲区对应岸段长度之比, 将其视作海水淹没陆地的纵深距离。

1.3.4 沿海岸线淹没风险危险等级的聚类 根据计算获得的沿海岸线淹没风险危险等级的空间数据, 计算获取青岛市沿海岸线淹没风险危险等级的平均值; 根据优先适应原则, 筛选沿海岸线淹没风险危险等级大于 0.5 的岸线, 根据其所处地理位置, 将相对集中在一起的沿海岸线淹没风险危险等级为中等以上的岸线集合起来, 确定高风险岸段; 在此基础上, 按照其所在的主要地理位置对该高风险岸段进行命名。

1.4 适应策略的逐级定性化

为了使适应策略的提出具有针对性, 符合城市的自然地理和社会经济发展特点, 从适应方法学的角度来看, 应将风险评估得到的定量化结果, 逐级定性化, 并转成具有可操作性的适应策略及措施。

为了达到上述目的, 本文根据沿海岸线淹没风险危险等级的空间分布特点, 并依据陆地淹没水深与海

水淹没陆地的纵深距离进行淹没归因分类和科学分区,并根据淹没区的不同特点和需求,合理制定具有针对性的适应策略及措施。具体步骤如下:

(1) 淹没归因分类:根据沿海岸线淹没风险危险等级的空间数据,并结合陆地淹没水深和海水淹没陆地的纵深距离两个指标对该值的贡献率,分析导致该岸线淹没的主要原因;在此基础上,细化并归纳导致高风险岸段淹没的主要原因。

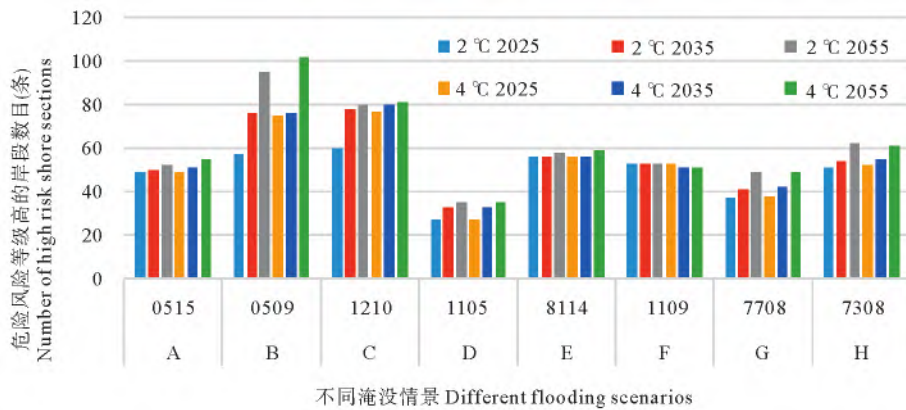
(2) 科学分区:根据以上步骤确定的高风险岸段并获得的淹没归因,对青岛市沿海岸线淹没风险危险等级,进行科学分区。

(3) 适应策略及措施的提出:根据国内海岸带城市在适应风暴潮淹没风险的先进经验,在此基础上,根据

步骤(2)科学分区中得到的基于不同淹没原因的高风险岸段,构建可操作性的青岛市适应建议策略集。

2 青岛市风暴潮淹没风险等级的预估

为了研究青岛市沿海风暴潮淹没风险大小,本文利用沿海岸线淹没风险危险等级,对8种台风在2025、2035和2055年3个时间段以及2和4℃增温情景下可能对青岛沿海风暴潮淹没风险的影响范围及岸线进行预估,共得到48副沿海岸线淹没危险等级分布图(见图4)。但考虑到篇幅问题,这里仅以淹没风险最大的登陆北上型(0509)2055年4℃增温情景为例进行展示(见图5)。



(图中所示较高风险岸段即为淹没危险风险等级大于0.5的岸段。Moderate high risk is shown in the figure that the coastal flood risk level is greater than 0.5.)

图4 未来情景不同增温情况下8种台风较高风险岸段情况

Fig.4 The higher risk coastal sections of 8 typhoons under different warming scenarios in the future

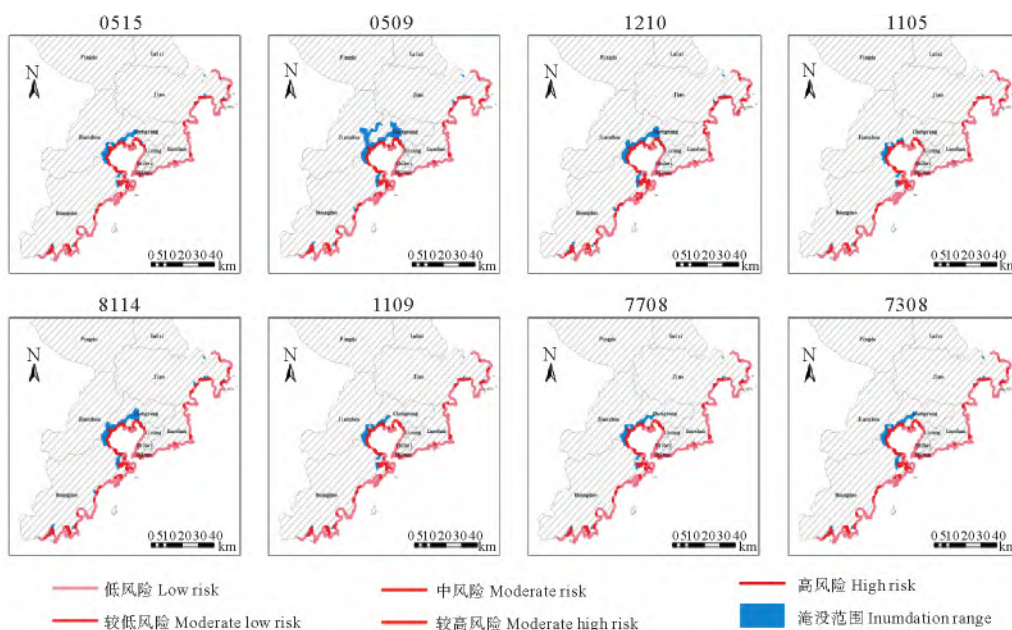


图5 青岛市岸线淹没危险风险等级分布图(4℃增温、2055年)

Fig.5 Distribution map of risk level of coastline inundation in Qingdao City (4 °C warming, 2055)

通过图 4 和 5 可以看出:

(1) 针对 8 种台风类型:通过对比相同情景下 8 种台风对青岛市沿海岸线淹没风险危险等级的影响可知,登录北上型(0509)和高纬西进型(1210)台风对沿海岸线淹没风险危险等级的影响更为强烈;黄海西折型(1105)的影响相对最小,但在胶州湾沿岸也存在风险值大于 0.8 的岸段;与此同时,各种台风类型影响下的沿海岸线淹没风险危险等级的空间分布规律具有高度一致性。

(2) 针对 2 和 4 °C 增温情景:除近海北上型(1109)台风外,随着温度的增加,各种台风造成的沿海岸线淹没风险危险程度在等级上和范围上均有较大程度的增加,而近海北上型(1109)台风变化不明显甚至略有下降。

(3) 针对不同时间尺度:随着时间尺度的加大,各种类型台风的沿海岸线淹没风险危险程度在等级和范围上均有一定的增加。其中,淹没风险增加的岸线主要涉及:黄家塘湾岸段东侧岸线、鳌山湾、国际博览中心附近岸线、大沽河与墨水河入海口之间部分岸线等。0509 号台风造成风险受时间尺度变化影响的增幅最大,中高风险岸段数目增幅近 50%。

(4) 针对高风险岸段:对于所有情景而言,大沽河

口及其附近岸线是青岛市淹没风险危险等级最高的岸线,大部分岸线都处于较高风险或高风险等级,风险值最高可达 0.98;此外,对于除黄海西折型(1105)以外的大部分台风类型而言,在黄岛东北端辛安南河入海口和小叉湾一带、城阳墨水河入海口处也存在沿海岸线淹没风险危险等级相对较高的岸段,风险值在 0.6~0.9 左右徘徊。

3 基于风暴潮淹没风险的青岛市适应策略建议

3.1 淹没归因分类及科学分区

为提高适应策略的针对性和高效性,根据优先适应原则,依据青岛市沿海岸线淹没风险危险等级的预估结果,本文重点关注在未来气候变化情境下青岛市具有潜在高风险的岸段。具体岸段如下:选择淹没风险最大的时段情景(即:2055 年 4 °C 增温情景)下,8 种台风类型淹没岸线淹没风险等级大于 0.5 的所有岸段;根据陆地淹没水深和海水淹没陆地的纵深距离两个指标对淹没风险等级的贡献率,进行淹没原因归因。当陆地淹没水深指标贡献率大于海水淹没陆地的纵深距离指标时,视作地势低洼型淹没岸段,陆地淹没水深指标贡献率小于海水淹没陆地的纵深距离指标时,则视为河流入海口溢流型淹没岸段(见图 6)。

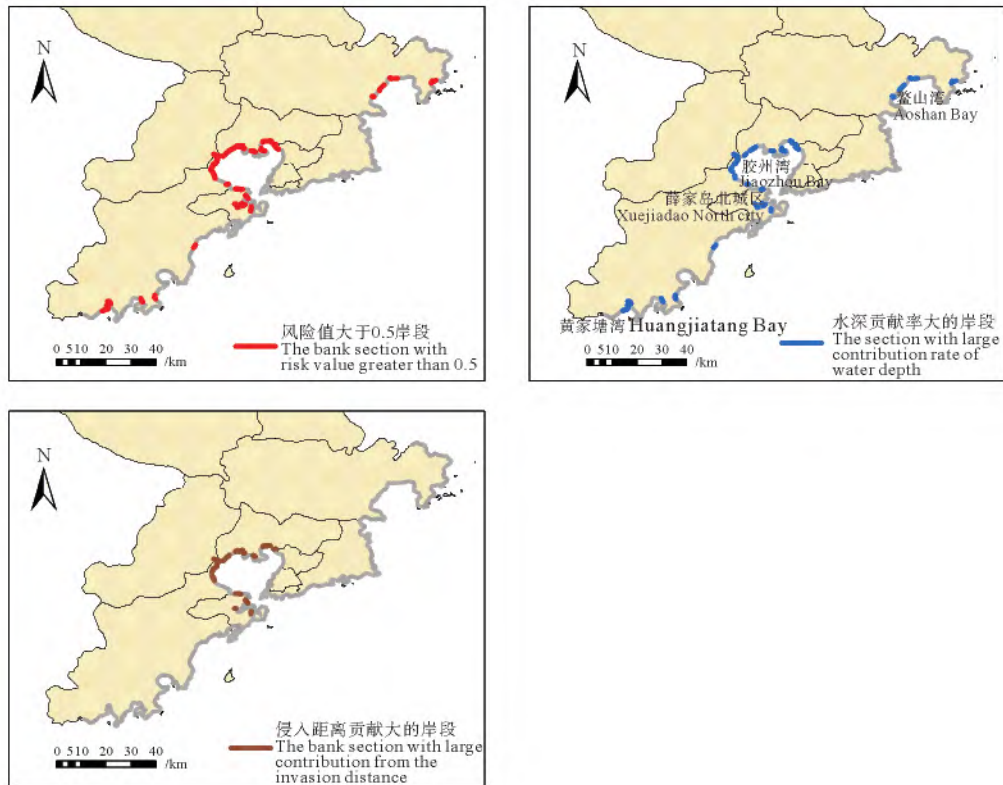


图 6 青岛市高淹没风险岸线分布及成因分析图

Fig.6 Distribution and cause analysis of high submergence risk shoreline in Qingdao

其中,地势低洼型淹没岸段主要分布在黄家塘湾沿岸、薛家岛北城区沿岸、胶州湾西北侧沿岸以及鳌山湾沿岸较零散区域,河流入海口溢流型淹没岸段主要分布在薛家岛湾沿岸、大沽河入海口沿岸、风河入海口沿岸、墨水河入海口沿岸。

3.2 淹没策略建议

本着针对性原则,不同淹没岸段的淹没成因和强度不完全一致,因此应根据淹没岸段的不同特点和需求,合理制定具有针对性的适应策略及措施(见表1)。

表1 不同类型淹没危险风险等级较高岸段适应策略及措施

Table 1 Adaptive strategies and measures for different types of high risk bank sections

淹没类型 Type	主要涉及的淹没岸段 Main inundation shore	适应策略及措施 Adaptive strategies	淹没情况示意图 Inundation sketch map
综合性适应策略及措施 Comprehensive adaptation strategies	全部高风险岸段。	①完善海洋灾害监测及预警系统;②构建完善的应急响应 ^[30] ;③合理规划应急避难场所及路径;④组建应急救援队伍,提升救援力量;⑤完善灾害政策性保险 ^[30] ,降低灾害损失⑥科学管理与规划海岸带的开发利用;⑦开展危机风险教育培训,提高公众防灾意识;⑧加大力度开展灾害相关科学研究;⑨提高城市下渗率,采用透水性强的路面 ^[8] ;⑩加大城市绿化,构建绿色屋顶等。	
地势低洼型淹没岸段 Low elevation inundation	黄家塘湾北侧,小滩村、沙岭子村以南岸段;尹家山村沿岸;滨海大道与登台路交叉口沿岸;灵山湾西侧会展公园沿岸;疏港路以东,薛家岛北城区沿岸;龙湾崖村以东岸段;交大大道与红柳河路交叉口沿岸;淮海路与生态大道交叉路口沿岸;龙海路与前海路交叉口沿岸;沟角村以南岸段;大洋一路与华中南路交叉路口沿岸;星河湾以西岸段;环湾路以西、星河湾酒店以南岸段;鳌山湾中环卢卡多堡东南沿岸;钱谷山地铁站以南岸段等。	①加固并提升重点堤防;②排水管网改造;③加固易沉降地面 ^[26] ;④建设湿地公园等蓄水工程。	
河流入海口溢流型淹没岸段 Inundation of river estuary	薛家岛湾西侧岸段;青岛航空学院以东岸段;北海公园以北沿岸岸段;洋河入海口沿岸;湘江路与交大大道交叉口沿岸;大沽河入海口沿岸;红岛绿洲湿地公园以南部分岸段;红岛火车站以南沿岸;墨水河入海口岸段;星河湾酒店沿岸。	①易淹河口的河流上中游地带设置蓄水等工程 ^[10] ;②及时清淤,整治河道 ^[7] ;③在濒海河口处合理修建洪沟等紧急应对淹没工程;④设置装备沙袋等防洪物资的工作站。	

4 结语

对于城市适应策略的制定而言,一定要考虑针对性问题,这样才能使适应策略达到因地制宜的效果;但与此同时,为达到针对性效果,也可以参考一定的制定方法和步骤,这也是本文希望通过基于风暴潮的青岛案例研究而进行适应方法学理论探索的目的所在。

基于青岛市风暴潮淹没特点,本文以城市适应策略制定的针对性为核心原则,通过选择淹没岸线风险

危险等级这个综合性指标,科学量化气候变化对青岛市风暴潮淹没风险的影响,筛选导致淹没的原因,并以此为基础将定量化指标逐级定性化,最终形成基于未来气候变化情景下青岛市风暴潮淹没风险的建议策略集。

通过该制定方法获取的建议策略集,可以将以风暴潮淹没为代表的气候变化风险逐级转化为具有针对性的适应策略,使之成为连接气候变化风险、适应气候策略和未来城市发展之间的一座桥梁。

参考文献:

- [1] IPCC. The Synthesis Report (SYR) of the IPCC Fifth Assessment Report (AR5)[R]. [s. l.]: IPCC, 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- [2] 郑大玮, 潘学标, 潘志华, 等. 气候变化适应 200 问[M]. 北京: 气象出版社, 2016.
Zheng D W, Pan X B, Pan Z H, et al. 200 Questions on Climate Change Adaptation[M]. Beijing: Meteorological Press, 2016.
- [3] Boston Government. Climate Ready Boston Final Report[R]. Boston: Boston Government, 2016. <https://www.sasaki.com/projects/climate-ready-boston/>.
- [4] Salinas City Council. Climate Adaptation Planning[R]. Salinas City: Salinas City Council, 2020. <https://www.cityofsalinas.org/our-city-services/public-works/water-waste-energy/climate-adaptation-planning>.
- [5] New York Government. The New York City Waterfront Revitalization Program. Climate Change Adaptation Guidance[R]. New York: New York City Government, 2018.
- [6] 白银市人民政府办公室. 白银市城市适应气候变化行动方案[R]. 白银: 白银市人民政府办公室, 2017. http://m.law-lib.com/law/law_view.asp?id=581959&page=1.
Office of Baiyin Municipal People's Government. Action Plan of Baiyin City to Adapt to Climate Change[R]. Baiyin: Office of Baiyin Municipal People's Government, 2017. http://m.law-lib.com/law/law_view.asp?id=581959&page=1.
- [7] 广元市人民政府办公室. 广元市气候适应型试点城市建设实施方案[R]. 广元: 广元市人民政府办公室, 2017. <http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/110338/3223669.shtml>.
Guangyuan Municipal People's Government Office. Implementation Plan of Climate Adaptation Pilot City Construction in Guangyuan City[R]. Guangyuan: Guangyuan Municipal People's Government Office, 2017. <http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/110338/3223669.shtml>.
- [8] 合肥市人民政府办公厅. 合肥市气候适应型城市建设试点工作实施方案[R]. 合肥: 合肥市人民政府办公厅, 2018. <https://www.hefei.gov.cn/xxgk/szfgb/2018/dwh/szfbgtwj/56310541.html>.
General Office of Hefei Municipal People's Government. The Implementation Plan of Hefei City Construction Pilot Project[R]. Hefei: General Office of Hefei Municipal People's Government, 2018. <https://www.hefei.gov.cn/xxgk/szfgb/2018/dwh/szfbgtwj/56310541.html>.
- [9] 上海市发展改革委员会信息公开. 上海市节能和应对气候变化“十三五”规划[R]. 上海: 上海市发展改革委员会, 2017. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20170717/837349.html>.
Information disclosure of Shanghai Development and Reform Commission. Shanghai's 13th Five Year Plan for Energy Conservation and Climate Change[R]. Shanghai: Shanghai Development and Reform Commission, 2017. <https://huanbao.bjx.com.cn/news/20170717/837349.html>.
- [10] 重庆市应对气候变化方案[R]. 重庆: 重庆市发展改革委员会, 2017.
Chongqing's Plan to Deal with Climate Change[R]. Chongqing: Chongqing development and Reform Commission, 2017.
- [11] 青岛市发展和改革委员会. 青岛市适应气候变化规划[R]. 青岛: 青岛市发展和改革委员会, 2019.
Qingdao Development and Reform Commission. Climate Change Adaptation Planning of Qingdao[R]. 青岛: 青岛市发展和改革委员会, 2019.
- [12] Santa Cruz City Council. Climate Adaptation Plan Update 2018-2023[R]. Santa Cruz City: Santa Cruz City Council, 2018. <https://www.cityofsantacruz.com/home/showpublisheddocument?id=82484>.
- [13] The California Governor's Office of Emergency Services. California Adaptation Planning Guide[R]. California: The California Governor's Office of Emergency Services, 2020. http://www.ca-ilg.org/sites/main/files/file-attachments/1apg_planning_for_adaptive_communities_1.
- [14] Zagaria C, Schulp C J E, Zavalloni M, et al. Modelling transformational adaptation to climate change among crop farming systems in Romagna, Italy[J]. Agricultural Systems, 2021, 188: 103024.
- [15] 赵学青. 内蒙古城市气候脆弱性评价及其适应性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020.
Zhao X Q. Study of the City's Climate Vulnerability Assessment and Adaptability in Inner Mongolia[D]. Huhehaote: Inner Mongolia University, 2020.
- [16] 李阔, 何霄嘉, 许吟隆, 等. 中国适应气候变化技术分类研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016(2): 18-26.
Li K, He X J, Xu Y L, et al. Study on classification of adaptation technologies to climate change in China[J]. China Population Resources and Environment, 2016(2): 18-26.
- [17] 何霄嘉, 许吟隆, 郑大玮. 中国适应气候变化科技发展路径探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2017(8): 7-12.
He X J, Xu Y L, Zheng D W, et al. The pathway of science and technology development in climate change adaptation of China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017(8): 7-12.
- [18] 冯士祚. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
Feng S Z. Introduction to Storm Surge[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [19] 曹雪峰, 李庆杰, 邢传玺, 等. 不同风应力拖曳系数对南海北部风暴潮数值模拟的适应性研究[J]. 海洋湖沼通报. 2020(1): 1-8.
Cao X F, Li Q J, Xing C X, et al. Adaptability of drag coefficient to numerical simulation of storm surge in the Northern South China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(1): 1-8.
- [20] 李欢, 周天逸, 张丽芬. 基于 ADCIRC 模式的宁波沿海风暴潮预报[J]. 人民珠江, 2020(2): 98-103.
Li H, Zhou T Y, Zhang L F, et al. Forecasting of storm surge in Ningbo coastal waters based on ADCIRC mode[J]. Pearl River, 2020(2): 98-103.
- [21] 王璐阳, 张敏, 温家洪, 等. 上海复合极值风暴洪水淹没模拟[J]. 水科学进展, 2019(4): 546-555.
Wang L Y, Zhang M, Wen J H, et al. Simulation of extreme compound coastal flooding in Shanghai[J]. Advances in Water Science, 2019(4): 546-555.
- [22] 肖梦曦, 孙丽, 潘崇伦. 上海长江口风暴潮数值预报模型实例研究[J]. 中国防汛抗旱, 2020(3): 22-26.
Xiao M J, Sun L, Pan C L, et al. A case study of the numerical model of storm surge in Shanghai coastal area[J]. China Flood & Drought Management, 2020(3): 22-26.
- [23] 刘昀, 刘敏. 风暴潮对黄河三角洲生态湿地的危害及应对措施[C]. 郑州: [s. n.], 2020.
Liu J, Liu M. The Harm and Countermeasures of Storm Surge to the Ecological Wetland in the Yellow River Delta[C]. Zhengzhou: [s. n.], 2020.
- [24] 廖茂传, 袁海燕. 历史时期广东沿海风暴潮灾害研究[J]. 防灾科技学院学报, 2020(4): 99-105.
Liao M C, Zhong H Y. Research on disasters of storm surge in

- coastal areas of Guangdong along the history[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2020(4): 99-105.
- [25] 郭豪爽, 郭伟其, 邱桔斐, 等. 上海市金山区台风风暴潮灾害风险评估研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(6): 18-26.
Guo H S, Guo W Q, Qiu J F, et al. Risk Assessment of typhoon storm surge disaster in Jinshan District, Shanghai[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(6): 18-26.
- [26] 赵为东, 张钊, 顾冬明, 等. 温州市海岸带变迁与风暴潮灾害风险评估[J]. 海洋湖沼通报, 2020(4): 53-60.
Zhao W D, Zhang D, Gu D M, et al. Coastalzone change and storm surge risk assessment in Wenzhou[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(4): 53-60.
- [27] 廖琪, 于格, 江文胜, 等. 海岸带城市洪水淹没风险评价研究——以青岛市为例[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(2): 301-312.
Liao Q, Yu G, Jiang W S, et al. Comprehensiveevaluation of flooding risk in coastal zones—A case study of Qingdao City [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2018, 49(2): 301-312.
- [28] 中华人民共和国自然资源. 2019年中国海洋灾害公报[R]. 北京: 中华人民共和国自然资源, 2020. http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510979.html.
Ministry of Natural Resources of People's Republic of China, China Marine Disaster Bulletin 2019 [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of People's Republic of China, 2020. http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510979.html.
- [29] Wang Z F, Li S T, Hao Y, et al. Kejian. Estimation and prediction of typhoons and wave overtopping in Qingdao, China[J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 19(5): 1017-1028.
- [30] 易思. 海平面上升与可能最大风暴潮复合作用的风险评估及其适应策略研究——以上海地区为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
Yi S. Risk Assessment and Adaptive Strategy of the Compound Scenarios of Sea Level Rise and the Probable Maximum Storm Surge: A Case Study of Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.

Targeted Research on Urban Climate Adaptation: Taking the Risk of Storm Surge Inundation in Qingdao As an Example

Zheng Yuying¹, Yu Ge^{1,2}, Jiang Wensheng^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. The Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Adaptation to climate change refers to the adjustment of natural and human systems to respond to actual or projected climate changes or impacts. At this stage, domestic and foreign research on adaptation to climate change is mainly concentrated at the global or national level, and the proposed adaptation policies have certain limitations due to differences in regional and cultural environments. Therefore, urban adaptation strategy undertakes the important task of refining the national and provincial adaptation strategy to the meso scale, and formulating targeted adaptation strategies according to the characteristics. This paper takes the risk of storm surge inundation in Qingdao as an example, and focuses on pertinence to develop urban adaptation strategies. Firstly, considering climate change, evaluate the storm surge inundation in eight typhoon paths. On this basis, put forward a comprehensive index “coastal inundation risk grade”, which represents the risk degree of coastal inundation affected by storm surge under the influence of climate change and its uncertainty in a simple and intuitive form. Through the study, it is found that for all scenarios, the shorelines of Dagu River estuary, Xinan River Estuary, Xiaochawan northeast area and Moshui River Estuary are with highest risk level of inundation in. In order to make the adaptation strategy targeted and in line with the characteristics of the city's physical geography and socio-economic development, this paper puts forward some suggestions according to the depth of inundation and the distance of inundation, according to the indexes' contribution rate, the inundation type can be divided into two types: low-lying inundation, river estuary overflow inundation. the inundation attribution classification and scientific division are carried out, and the inundation bank section is divided into low-lying inundation bank section and river estuary overflow inundation bank section. Refer to the advanced experience of coastal cities at home and abroad in adapting to the risk of storm surge inundation, this paper constructs an operable strategy set for Qingdao. Through the proposed strategy set, the climate change risk represented by storm surge inundation can be gradually transformed into a targeted adaptation strategy, making it a bridge between climate change risk, adaptation strategy and future urban development.

Key words: adaptation to climate change; storm surge inundation; pertinence

责任编辑 庞 旻