

气候变化影响下 2050 年广东沿海地区 风暴潮风险评估

李阔¹, 李国胜²

1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081
2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要 随着气候变化的影响, 广东沿海地区台风风暴潮灾害时空分布逐渐发生变化。本文根据近 30 年来广东沿海地区 18 个验潮站的风暴潮资料以及近 60 年来西北太平洋热带气旋资料, 结合前人对西北太平洋热带气旋与海表温度关系研究以及对珠江三角洲地区海平面上升趋势的预测研究, 利用 ArcGIS 空间分析技术, 对 2050 年广东省沿海地区风暴潮淹没范围进行了预测, 并对不同区域风暴潮的危险性进行了分析评价。从社会经济、土地利用、生态环境、滨海构造物和承灾能力 5 个方面构建风暴潮承灾体脆弱性评估体系, 完善了广东省沿海地区风暴潮脆弱性指标预测模型, 通过该模型对 2050 年该地区风暴潮脆弱性进行了评估。在未来气候变化影响下风暴潮灾害危险性评价和脆弱性评估的基础上, 对 2050 年广东沿海地区风暴潮灾害风险进行了综合评估, 绘制了该地区风暴潮灾害风险评价图。

关键词 气候变化; 风暴潮; 风险评估; 广东省; 海平面上升

未来气候变化将对海平面上升、全球环流系统变化、全球环境变化、生态系统退化以及冰冻圈退缩等产生显著影响, 进而影响到人类社会生活的方方面面^[1]。风暴潮灾害是由台风等强热带天气系统或温带天气系统所引起的, 因此未来气候变化将对风暴潮灾害风险产生显著的影响。一方面, 未来气候变化将引起全球环流系统的更迭, 由此台风等天气系统也会随之变化, 随着台风等强热带天气系统以及温带天气系统发生变化, 由其引发的风暴潮灾害的地理空间分布也将发生改变^[2]; 其次全球变暖将导致海平面上升, 海平面上升将显著增加风暴潮灾害的危险程度^[3]; 另一方面全球气候变化背景下风暴潮灾害承灾体的脆弱性也会发生变化。由此可见, 气候变化将对风暴潮灾害强度与频次产生显著的影响, 风暴潮风险也将随着气候变化产生明显变化。纵观近几十年的气候变化及风暴潮研究, 直接探讨气候变化对风暴潮风险影响的研究成果非常少, 诸多研究集中于气候变化对热带气旋及海平面变化影响^[4-8], 其研究进展代表了气候变化对风暴潮风险影响研究的最新成果。

中国沿海是热带风暴潮多发的地区, 风暴潮灾害的频繁程度居世界首位, 每年近 20 个台风影响中国海域, 受灾区域

几乎遍及中国整个沿海地带, 其中尤以福建、广东、海南沿海为甚。风暴潮灾害造成的损失占海洋灾害损失的 60% 以上, 成为海洋灾害之首, 在人员伤亡方面超过地震等陆上灾害。近年来, 随着气候变化的影响以及沿海地区经济的增长, 风暴潮灾害造成的经济损失呈现出逐年加大的趋势, 每年都在百亿元左右^[9]。风暴潮灾害综合风险包含危险性与脆弱性 2 个方面, 危险性评估揭示了利用数值预报模型或经验统计模型预测不同概率水平下的风暴潮灾害事件发生的频率、强度等自然属性, 脆弱性评估从社会、经济、文化、生态环境、工程等不同角度揭示了沿海地区对风暴潮灾害的承受响应能力, 二者结合在一起构成了风暴潮灾害综合风险评估的内涵。因此, 风暴潮综合风险评估及其未来变化趋势研究越来越受到学界的重视, 并具有非常紧迫的现实意义。

本文依托近 30 年来广东沿海地区的 18 个验潮站的风暴潮资料以及近 60 年来西北太平洋热带气旋资料, 结合珠江三角洲地区海平面上升趋势预测, 计算 2050 年广东省沿海地区风暴潮重现期增水值; 根据广东沿海地形, 运用 ArcGIS 模拟未来风暴潮淹没范围, 对不同区域风暴潮危险性进行评价; 利用人口预测模型、社会经济预测模型、土地利用变化预测

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2016-08-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41571041); “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAC09B00); 农业部“中国农业适应气候变化关键技术引进”项目(2011-G9)

作者简介: 李阔, 博士研究生, 研究方向为气候变化影响与适应, 电子信箱: hqlk2000@163.com; 李国胜(通信作者), 研究员, 研究方向为海岸带气候变化影响及数值模拟, 电子信箱: ligs@igsnr.ac.cn

引用格式: 李阔, 李国胜. 气候变化影响下 2050 年广东沿海地区风暴潮风险评估[J]. 科技导报, 2017, 35(5): 89-95; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.05.011

模型及脆弱性评价模型,选取5个指标27个因子评估2050年风暴潮承灾体脆弱性;依托风险概念模型,对2050年广东沿海地区风暴潮灾害风险进行综合评估,绘制2050年广东沿海地区风暴潮灾害风险评价图,为海岸工程设计和风暴潮灾害预防提供科学依据。

1 未来风暴潮危险性评估

风暴潮危险性评估主要是对风暴潮增水规模与频次的评估^[10-11]。受气候变化影响,海平面上升将直接加剧风暴潮的增水规模;同时气候变化导致热带气旋发生频次变化,进而引起登陆热带气旋地理空间分布变化,最终影响中国沿海风暴潮灾害增水规模或频次的变化。大量研究表明,台风频次、强度及路径等特征的变化与西北太平洋海表温度确实存在密切联系,尤其当发生厄尔尼诺或南方涛动等气候异常时,两者之间的关联更趋显著^[12-15]。已有一些研究人员对西北太平洋热带气旋频数与海表温度的多年变化关系进行研究,发现随着海表温度上升热带气旋频数呈上升趋势,两者之间呈现非线性相关关系^[16-18]。

全球变暖将导致台风等强热带天气系统以及温带天气系统发生变化,虽然具体的变化程度还不清晰,但研究者普遍认为台风等局部天气系统的活动区域会随着全球气候变暖产生显著的变化,比如台风路径会随着气候变化,由集中的从某些区域登陆,转向其他的区域登陆,从而使台风系统出现新的地理空间分布^[19-20]。另一方面,诸多研究认为全球变暖会使台风频次增大^[21]。运用台风生成模型模拟台风过程,预计到21世纪中期,当大气中CO₂浓度增加1倍时,台风频次将增加40%~50%^[22]。中国学者根据这种模型,预测当温度升高1.5℃时,西北太平洋台风发生频率增大2倍,登陆中国的台风频率也将增大1.76倍^[23]。若按政府间气候变化委员会预测,100年后气温将升高3℃,则中国登陆台风频率将增加3.5倍^[24]。因此可以说,未来气候变化引起的全球变暖将导致台风等热带天气系统频次增加,随之由台风引发的风暴潮灾害的频次也将增大^[25]。同时,未来气候变化引发的海平面上升将对风暴潮产生显著的影响^[26-27]。国内外许多研究者对海平面上升的机制以及影响进行了深入细致的研究,国内研究者系统探讨了海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策,认为海平面上升将进一步加剧风暴潮灾害^[28]。许多学者对海平面上升可能带来的影响进行了深入研究^[29-31],海平面上升直接导致风暴增水的初始海面与高潮位提高,不但加剧风暴潮灾害程度,而且也可能导致灾害频率增加,造成生命财产的更大损失。

1.1 海平面上升预测

随着全球气候变化,全球各个地区面临的风暴潮灾害将发生显著的变化。一方面全球变暖将导致海平面上升,海平面上升将显著增加风暴潮灾害的危险程度;另一方面全球气候变化将引发台风路径变化,台风路径变化直接导致风暴潮的强度和频次发生变化。针对全球变暖导致海平面上升的

问题,笔者对珠江三角洲地区海平面上升趋势进行预测^[32]。

1959—2011年期间珠江三角洲区域海平面总体变化呈上升趋势,而且近10年有显著的加速上升趋势,其中极大值出现频率明显增加。IPCC第四次报告指出,1961—2003年全球平均海平面上升速率为(1.8±0.5) mm/a,其中1993—2003年速率为(3.1±0.7) mm/a^[24],显然全球平均海平面自20世纪90年代后表现出加速上升的趋势。同一时期中国平均海平面变化趋势与全球大体同步,且存在南高北低的特点,杨清书等^[33]研究认为,1959—1988年珠江三角洲区域平均海平面上升速度为3.1 mm/a。根据《2010年中国海平面公报》,近30年广东沿海海平面以2.5 mm/a速率上升^[34],且预测未来30年海平面上升速率约为2.5~4.8 mm/a^[35]。运用海平面高度距平资料,通过经验正交函数分解得到空间模态,并结合区域内18个验潮站资料的时间变化系数,重建过去53年(1959—2011年)珠江口海平面高度场;利用主成分分析方法建立统一的珠江三角洲海平面变化时间序列,结果显示珠江三角洲区域海平面平均变化速率为4.07 mm/年。

1.2 未来风暴潮危险性评估

风暴潮是由台风强烈扰动造成的潮水位急剧升降,因此台风的时空分布特征直接影响着风暴潮灾害的时空分布状态,台风发生的主路径一般情况下都是风暴潮灾害危害最严重的区域,风暴潮灾害在空间上的展布情况与台风的时空分布模式也基本保持一致,风暴潮灾害的时空分布特征也间接展示了台风的特征。台风的时空分布特征主要通过其登陆某一区域的频次进行刻画,风暴潮灾害的时空分布特点可以通过风暴潮在不同区域的最大增水值的时空展布进行刻画,而风暴潮的时空分布规律最主要的特征体现在历次风暴潮过程中的最大增水值上。只有掌握了风暴潮的时空分布规律,才能将风暴潮灾害的变化趋势与全球气候变化联系起来,对两者的相关性进行分析,建立风暴潮时空分布与全球气温变化相关模型,最终为风暴潮危险性评价提供依据。

为了对未来广东沿海地区风暴潮灾害危险性进行有效评估,本研究通过分析近30年来广东沿海地区18个验潮站风暴潮极值增水值、1949—2014年西北太平洋热带气旋频次以及西北太平洋海表温度,结合前人对西北太平洋热带气旋频次与海表温度的关系研究^[23,30],构建气候变化影响下风暴潮规模预测模型,计算未来2050年气候变化影响下广东省沿海地区风暴潮增水规模的变化趋势,同时结合前文计算的海平面上升幅度(4.07 mm/a),可以对未来气候变化影响下2050年广东省沿海地区风暴潮增水变化幅度有整体的认识。在广东省沿海地区风暴潮重现期增水值计算的基础上^[10],本研究通过分析气候变化与风暴潮灾害之间的关系,对2050年广东省沿海地区风暴潮重现期增水值进行了预测。

$$\Delta M = 1.26 \times 10^{-4} e^{0.56\Delta T} \quad (1)$$

$$M_{2050} = M + \Delta M + \Delta S \quad (2)$$

式中, M_{2050} 为2050年多年一遇风暴潮增水值; M 为现阶段多年一遇风暴潮增水值; ΔM 为2050年风暴潮增水规模的变化

幅度; ΔT 为 2050 年西北太平洋年平均海表温度相对于过去 30 年的增加幅度; ΔS 为 2050 年海平面的上升幅度。

通过对未来广东省沿海地区海平面上升幅度与风暴潮增水规模的预测, 模拟计算 2050 年广东省沿海地区风暴潮重现期增水值(表 1)。在此基础上, 结合广东沿海地形地貌, 利用 ArcGIS 计算 2050 年广东沿海地区多年一遇风暴潮淹没范

围。基于已建立的风暴潮危险性评价方法^[11], 对风暴潮淹没范围进行分等级(表 2), 由于气候变化影响下未来热带气旋风速模拟的复杂性与不确定性, 对未来风暴潮危险性评估将风暴潮淹没范围作为主要指标, 并分为极高、高、中等、低、极低 5 个等级, 绘制 2050 年气候变化影响下广东沿海地区风暴潮危险性评价图(图 1)。

表 1 2050 年广东沿海地区各潮位站风暴潮重现期增水值

Table 1 Return periods for storm surge in the coastal area of Guangdong Province in 2050

重现期/年	黄埔	南沙	横门	西炮台	灯笼山	万顷沙西	黄金	黄冲	大虎
1000	4271	4107	3730	4075	3663	3980	4250	3945	4541
500	4025	3872	3515	3831	3442	3752	3987	3722	4294
200	3699	3561	3230	3508	3150	3450	3640	3426	3963
100	3452	3326	3014	3263	2929	3221	3377	3202	3719
50	3204	3089	2798	3017	2707	2992	3112	2977	3469
20	2874	2773	2508	2688	2411	2685	2760	2676	3147
10	2618	2530	2285	2435	2182	2448	2487	2444	2906
重现期/年	冯马庙	挂定角	妈屿	北津港	赤湾	汕尾	闸坡	湛江	南渡
1000	4004	5620	3597	5241	3738	3335	4087	7070	9240
500	3819	5180	3385	4883	3522	3115	3797	6530	8530
200	3567	4603	3104	4394	3236	2825	3417	5810	7600
100	3376	4172	2891	4023	3020	2605	3127	5270	6880
50	3185	3747	2677	3652	2802	2395	2837	4720	6170
20	2930	3198	2392	3155	2512	2095	2447	4000	5220
10	2735	2797	2171	2777	2288	1865	2157	3440	4480

表 2 百年一遇风暴潮淹没范围等级划分

Table 2 Classification of submerged area of storm surges in 100a return period

等级	风暴潮淹没范围/km ²	等级/评分
极高程度	>200	1/9
高程度	80~200	2/7
中等程度	25~79	3/5
低程度	4~24	4/3
极低程度	<4	5/1

2 未来风暴潮脆弱性评估

风暴潮脆弱性评价是对承灾体面对风暴潮灾害时的易于损失程度的评估^[36]。随着全球气候的变化, 广东省沿海区县内各承灾体受到气候变暖和海平面上升的影响必将产生显著的变化, 对广东沿海区县风暴潮脆弱性评估产生巨大影响。风暴潮灾害承灾体随时间推移逐步发生变化, 为了更好地刻画风暴潮脆弱性, 本文选取 2050 年这一时间基点作为未来风暴潮脆弱性评价的基础, 对 2050 年广东沿海区县各承灾体的评估指标进行预测分析, 展开气候变化影响下广东沿海区县风暴潮脆弱性评价。

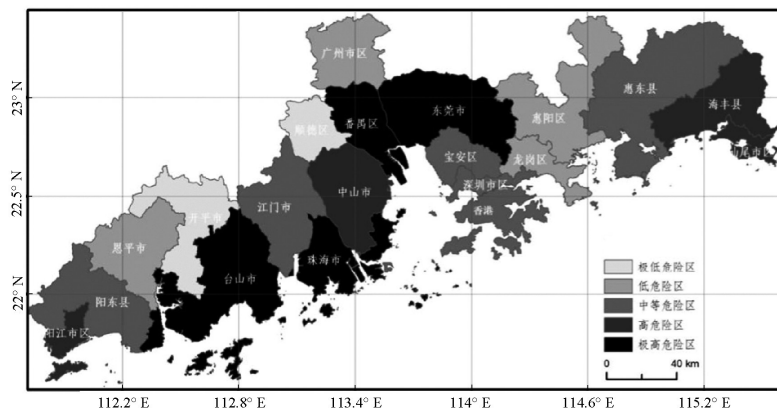


图 1 2050 年广东沿海地区各区县百年一遇风暴潮危险分区

Fig. 1 The hazard assessment of hundred-year storm surges in the coastal area of Guangdong in 2050

对于未来气候变化影响下 2050 年广东沿海区县风暴潮脆弱性评价,本质上是对广东沿海区县社会经济指标、土地利用指标、生态环境指标、滨海构造物指标和承灾能力指标在人类活动以及气候变化影响下产生变化的状况进行评估,其中社会经济指标、土地利用指标、生态环境指标、滨海构造物指标和承灾能力指标等 5 个评估指标主要受到广东省人类活动状况的制约,生态环境指标则受到气候变化和人类活动的双重影响。随着时间的推移,人类活动范围及深度的不断加大,广东省的人口、工农业生产、土地利用模式、滨海堤防设施以及财政收入等方面都将产生显著变化,其受人类活动自身影响较大,气候变化因素对以上评价指标的影响相对较小;生态环境指标受到人类活动的影响,这种影响是双向的,人类活动既可以使生态环境朝有利于人类生存的方向发展,也可以促使生态环境不断恶化,这都取决于人类的行为模式;人类活动对生态环境的影响是相对可以控制的,气候变化对生态环境的影响则比较难以预料,气候变化会导致区域生态环境的转变,这些转变有可能有利于人类的生存发展,也有可能制约人类的发展。由于气候变化对生态环境的影

响机理十分复杂,至今仍未有确切的结论,因此本研究假设 2050 年未来生态环境指标保持不变。

考虑到社会经济指标、土地利用指标、生态环境指标、滨海构造物指标和承灾能力指标等 5 个评估指标主要受到人类活动影响,综合分析已有的人口、经济、土地利用预测研究^[37-39],依托 30 年来《广东省人口年鉴》、《广东省统计年鉴》及土地利用与海岸堤防建设规划等资料,对未来气候变化影响下 2050 年广东沿海区县风暴潮脆弱性评估指标进行预测分析^[40],建立风暴潮脆弱性评价模型^[26]。

$$V = \left[\frac{A \cdot L \cdot E \cdot C}{K} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, V 为风暴潮脆弱指数, A 为社会经济脆弱指数, L 为土地脆弱指数, E 为生态环境脆弱指数, C 为滨海构造物脆弱指数, K 为承灾能力指数。

根据建立的风暴潮脆弱性评价模型,对 2050 年广东沿海各区县风暴潮脆弱性进行评估,绘制 2050 年广东沿海各区县风暴潮脆弱指数分布图(图 2)。

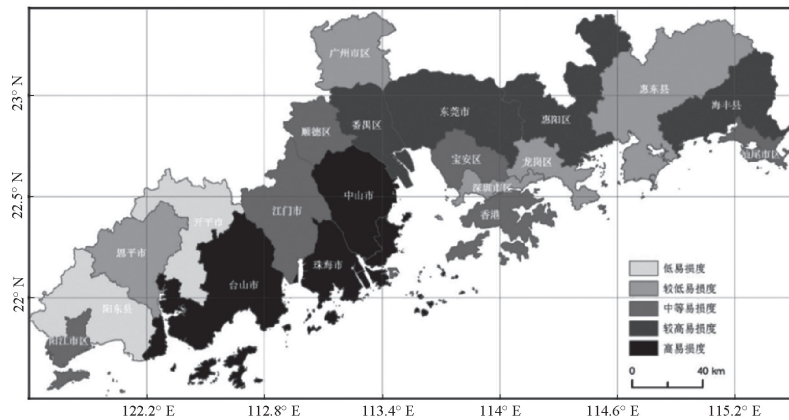


图 2 2050 年广东沿海地区各区县风暴潮脆弱指数分布

Fig. 2 Vulnerability assessment to storm surges in the coastal counties and districts of Guangdong Province in 2050

3 未来风暴潮风险评估

在未来气候变化影响下,热带气旋频次、规模、登陆路径以及海平面都将发生变化,进而由此引发的风暴潮灾害危险程度出现不同趋势;同时人类社会经济活动在空间上呈现出差异化发展趋势,受风暴潮灾害威胁的海岸带地区不同区县的脆弱性在未来也会出现不同变化,因此最终导致广东沿海地区风暴潮风险将产生显著变化。根据前文计算得到的 2050 年风暴潮危险性评价结果,结合风暴潮脆弱评估结果,运用风暴潮风险评估模型^[21],对未来气候变化影响下广东沿海地区风暴潮风险进行评估,计算 2050 年广东省沿海各区县百年一遇风暴潮风险指数,对 2050 年珠江三角洲地区各区县百年一遇风暴潮进行风险分区(图 3)。

$$R = HV \quad (4)$$

式中, R 为风暴潮风险指数, H 为风暴潮危险性指数。随着全球变暖和海平面的上升,风暴潮的危险程度与各区县承灾体脆弱程度出现显著变化,最终导致广东沿海地区各区县所面临的百年一遇风暴潮灾害风险出现了一定程度的变化。2050 年广东沿海地区面临百年一遇风暴潮灾害风险最高的区县分别是珠海市和中山市,其中中山市由低风险区上升为极高风险区,广州番禺区和台山市由极高风险区下降为高风险区,珠海市风暴潮风险始终处于极高水平。发生这种变化主要是由于中山市地势比较平坦,河道纵横,当未来海平面上升时,很容易造成大范围的淹没,导致中山市受到风暴潮的威胁直线上升,与此同时其人口以及经济以很快的速度不断发展,造成中山市的风暴潮脆弱程度也不断增大,两者相互作用导致中山市由低风险区发展为极高风险区。

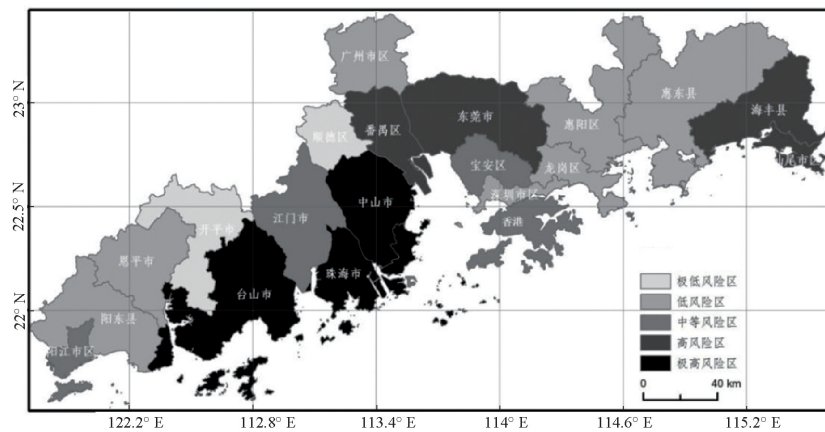


图3 2050年广东沿海地区各区县百年一遇风暴潮风险分区

Fig. 3 The risk assessment map of 100-year storm surges in the coastal area of Guangdong in 2050

2050年广东沿海地区面临百年一遇风暴潮灾害风险较高的区县分别是东莞市、广州番禺区和台山市,其中东莞市由中等风险区上升为高风险区,广州番禺区和台山市则由极高风险区下降为高风险区;由于各个区县内地势差别较大,有的地势平坦海拔较高,有的地势起伏海拔较低,因此根据风暴潮增水淹没推进原理,各个区县的风暴潮淹没范围随着海平面上升变化并不一致,有的区县随着风暴潮增水高度增加淹没范围显著增加,有的区县由于地势阻隔淹没范围增加较少,从而导致各个区县2050年遭遇百年一遇风暴潮与现在遭遇百年一遇风暴潮的危险程度出现很大不同;另一方面,随着时间推移各个区县人口社会经济都会不断发展,由于各个区县发展速度的差别,导致到2050年各个区县的社会经济人口状况将与现阶段有很大差别,同时各个区县风暴潮承体的脆弱性水平也出现显著的变化;随着风暴潮危险程度与脆弱程度的变化,2050年各个区县百年一遇风暴潮风险水平与现阶段各区县百年一遇风暴潮风险水平出现显著差别。

2050年广东沿海地区面临百年一遇风暴潮灾害风险中等的区县分别是阳江市、江门市、深圳宝安区、汕尾市和海丰县,其中江门市和深圳宝安区风险程度不变,阳江市与海丰县由较高风险区下降为中等风险区,汕尾市由较低风险区上升为中等风险区,其变动原因也如前文所述。2050年广东沿海地区面临百年一遇风暴潮灾害风险较低的区县分别是广州市区、深圳市区、深圳龙岗区、恩平市、惠州市区和惠东县,其中深圳市区、深圳龙岗区、恩平市、惠州市区风险水平保持不变,广州市区由极低风险区上升为低风险区,惠东县由中等风险区下降为低风险区。2050年广东沿海地区面临百年一遇风暴潮灾害风险最低的区县分别是佛山顺德区、开平市和阳东县,佛山顺德区、开平市风险水平比较稳定,阳东县则由高风险区下降为极低风险区;阳东县风暴潮风险水平的显著变化,主要是由于海平面上升未能显著增加其淹没范围,

而其社会经济发展远远落后于其他区县,随时间推移其脆弱水平在各县区整体升高的趋势中在相对下降,从而导致阳东县由现阶段的高风险区下降为未来的极低风险区。

4 结论

根据风暴潮风险评估结果,整个广东沿海地区面临着不同程度的风暴潮灾害威胁,因此不同区县需要根据自身情况建立防灾抗灾救灾体系,提高本身抵抗风暴潮灾害的能力,同时需要在更高层次上建立统一的风暴潮灾害风险管理系统。针对珠海市面临很大的风暴潮风险,需要采取多方面措施来抵御未来的风险;一方面根据2050年多年一遇风暴潮极值增水规模,提高现有防潮设施的工程标准,使得珠海市抵抗风暴潮灾害的能力不断提升;另一方面根据珠海市2050年社会经济发展规模,开展科学的城市规划,合理布局城市的不同功能区,有效降低风暴潮灾害对其社会经济造成的损失;最后从政府的风暴潮监测预警及应急响应能力建设入手,构建风暴潮灾害监测预警、应急响应、灾后重建一体化系统,大力提高群众的防灾抗灾意识,提高整个社会的灾害承受能力,从而达到控制风暴潮风险的目的。

现阶段广东沿海地区风暴潮监测预警系统已基本建立,但如何提高风暴潮预警空间及时间精度,还需对风暴潮发生发展机理展开进一步深入研究,建立适合广东沿海地区的高精度风暴潮数值预报模式;广东省风暴潮灾害应急预案已经建立,其中的各种措施还有待实践检验,在实践中不断完善应急预案的各种实施细节,使之面对不同规模的风暴潮灾害都能发挥巨大作用。风暴潮风险评估为沿海地区防御气候变化影响下未来风暴潮灾害提供了有力工具,但对于气候系统-热带气旋-风暴潮之间的关系研究仍有待加强,脆弱性指标仍需细化,从而推动未来风暴潮风险精准化评估向前发展,更有效地支撑中国沿海地区风暴潮防灾减灾工作。

参考文献 (References)

- [1] 政府间气候变化专门委员会. 气候变化 2007—自然科学基础[M]. 北京: 中国气象出版社, 2007: 56-59.
IPCC. Climate change 2007: The physical science base[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 56-59.
- [2] Kevin J E W, Kathleen L M, John L M. Climate change impacts on tropical cyclones and extreme sea levels in the South Pacific: A regional assessment[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80: 149-164.
- [3] Knutson T R, McBride J L, Chan J, et al. Tropical cyclones and climate change[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 157-163.
- [4] Mendelsohn R, Emanuel K, Chonabayashi S, et al. The impact of climate change on global tropical cyclone damage[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 205-209.
- [5] Peduzzi P, Chatenoux B, Dao H, et al. Global trends in tropical cyclone risk[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 289-294.
- [6] Webster P J. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 2005, 309: 1844-1846.
- [7] 田荣湘. 全球气候变暖对西北太平洋热带气旋的影响[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2003, 30(4): 466-470.
Tian Rongxiang. Influence of global warming on tropical cyclone in Northwestern Pacific[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2003, 30(4): 466-470.
- [8] 沈东芳, 陈特固, 吴晓星, 等. IPCC AR4 以来华南沿海海平面变化研究若干进展[J]. *热带地理*, 2012(3): 223-227.
Shen Dongfang, Chen Tegou, Wu Xiaoxing, et al. Progress in the research of sea-level changes along the coast of South China since IPCC AR4[J]. *Tropical Geography*, 2012(3): 223-227.
- [9] 张俊香, 李平日, 黄光庆. 新奥尔良飓风灾难与华南沿海台风暴雨[J]. *热带地理*, 2006, 26(3): 218-222.
Zhang Junxiang, Li Pingri, Huang Guangqing, et al. Hurricane disasters in New Orleans of USA and typhoon storm surge in the coastal area of South China[J]. *Tropical Geography*, 2006, 26(3): 218-222.
- [10] 李阔, 李国胜. 珠江三角洲地区风暴潮重现期及增水与环境要素的关系[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(4): 433-438.
Li Kuo, Li Guosheng. Calculation of return period of storm surge in the Pearl River delta region[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(4): 433-438.
- [11] Li Kuo, Li Guosheng. Risk assessment on storm surges in the coastal area of Guangdong Province[J]. *Natural Hazards*, 2013, 68(2): 1129-1139.
- [12] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-10.
Chen Lianshou, Ding Yihui. Outline of typhoons in West Pacific[M]. Beijing: Science Press, 1979: 1-10.
- [13] 王继志. 近百年西北太平洋台风活动[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 28-34.
Wang Jizhi. Activities of typhoons in Northwestern Pacific in the past 100 years[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991: 28-34.
- [14] Chan J C, Shi J E. Long-term trends and interannual and varannual variability in tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Geophysical Research Letter*, 1996, 23(1): 2765-2767.
- [15] 雷小途, 陈联寿. 西北太平洋热带气旋活动的纬度分布特征[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(2): 218-227.
Lei Xiaotu, Chen Lianshou. The latitudinal distribution of climatic characteristics on tropical cyclone activities in the WNP[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(2): 218-227.
- [16] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征[J]. *热带气象学报*, 2004, 20(1): 14-23.
Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2004, 20(1): 14-23.
- [17] 黄荣辉, 陈光华. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 683-694.
Huang Ronghui, Chen Guanghua. Research on interannual variations of tracks of tropical cyclones over Northwest Pacific and their physical mechanism[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(5): 683-694.
- [18] Emanuel K A. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686-688.
- [19] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 15-21.
Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu. Global changes[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 15-21.
- [20] 林而达, 吴绍洪, 戴晓苏, 等. 气候变化影响的最新认知[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 125-131.
Lin Erda, Wu Shaohong, Dai Xiaosu, et al. Updated understanding of climate change impacts[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 125-131.
- [21] 丁一汇, 孙颖. 国际气候变化研究新进展[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(4): 161-167.
Ding Yihui, Sun Ying. Recent advances in climate change science[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(4): 161-167.
- [22] Elsner J B, Kossin J P, Jagger T H. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones[J]. *Nature*, 2008, 455(7209): 92-95.
- [23] 王建, 刘泽纯. 全球变暖后西北太平洋台风频率的可能变化[J]. *第四纪研究*, 1991(3): 277-281.
Wang Jian, Liu Zechun. The possible response of hurricane frequency in Northwest Pacific to global warming[J]. *Quaternary Sciences*, 1991 (3): 277-281.
- [24] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007: 58-65.
- [25] 叶笃正, 符淙斌. 全球变化的主要科学问题[J]. *大气科学*, 1994, 18(4): 498-511.
Ye Duzheng, Fu Congbin. Major issues of global change sciences[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1994, 18(4): 498-511.
- [26] 水利部应对气候变化研究中心. 气候变化权威报告-IPCC 报告[J]. *中国水利*, 2008(2): 38-40.
Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources. Introduction of IPCC report[J]. *China Water Resources*, 2008(2): 38-40.
- [27] 赵宗慈, 江滢. 热带气旋与台风气候变化研究进展[J]. *科技导报*, 2010, 28(15): 88-96.
Zhao Zongci, Jiang Ying. Review on climate change of tropical cyclones and typhoons[J]. *Science and Technology Review*, 2010, 28 (15): 88-96.
- [28] 施雅风. 全球变暖影响下中国自然灾害的发展趋势[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(2): 102-116.
Shi Yafeng. Trends of natural disasters in China under global warming [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(2): 102-116.
- [29] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史未来趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3-8.

- Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. National assessment report of climate change(I): Climate changes in China and its trends [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8.
- [30] 杨桂山. 中国热带气旋灾害及全球变暖背景下的可能趋势[J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(2): 47-55.
- Yang Guishan. Tropical cyclones disaster in China and its possible response to global warming[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(2): 47-55.
- [31] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(9): 990-998.
- Zhang Qiang, Han Yongxiang, Song Lianchun. The summarize of development of global climate change and its effect factors[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(9): 990-998.
- [32] He Lei, Li Guosheng, Li Kuo, et al. Estimation of regional sea level change in the Pearl River Delta from tide gauge and satellite altimetry data[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014(141): 69-77.
- [33] 杨清书, 罗章仁, 张修杰. 珠江三角洲近几十年水位变化趋势研究[J]. *热带海洋学报*, 1998(2): 9-14.
- Yang Qingshu, Luo Zhangren, Zhang Xiujie. Research on trends of water level in the past decades in Pearl River Delta of China[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1998(2): 9-14.
- [34] 国家海洋局. 2011年中国海平面公报[EB/OL]. [2012-04-22]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/2010nzghpmgb/201212/t20121217_22808.html.
- State Oceanic Administration of China. The bulletin of sea-level in China in 2011 [EB/OL]. [2012-04-22]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/2010nzghpmgb/201212/t20121217_22808.html.
- [35] 国家海洋局. 2012年中国海平面公报[EB/OL]. [2013-03-22]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/2011nzghpmgb/201212/t20121217_22802.html.
- State Oceanic Administration of China. The bulletin of sea-level in China in 2011[EB/OL]. [2013-03-22]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/2011nzghpmgb/201212/t20121217_22802.html.
- [36] Li Kuo, Li Guosheng. Vulnerability assessment of storm surges in the coastal area of Guangdong Province[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11(11): 2003-2010.
- [37] 黄崇福. 自然灾害风险评估理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 100-108.
- Huang Chongfu. Theory and practice in risk assessment of natural disasters[M]. Beijing: Science Press, 2005: 100-108.
- [38] 宋健, 田雪原, 于景元, 等. 人口预测和人口控制[M]. 北京: 人民出版社, 1980: 54-63.
- Song Jian, Tian Xueyuan, Yu Jingyuan, et al. Forecast and control of population[M]. Beijing: Peoples Education Press, 1980: 54-63.
- [39] 侯文超. 经济预测-理论、方法及应用[M]. 北京: 商务印书馆, 1993: 49-56.
- Hou Wenchao. Forecast of economy-theory, methods and application [M]. Beijing: China Commerce and Trade Press, 1993: 49-56.
- [40] 李阔. 气候变化影响下风暴潮风险评估-以广东沿海为例[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2011: 124-136.
- Li Kuo. Risk assessment of storm surges under climate change-a case study of coastal area in Guangdong province[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2011: 124-136.

Risk assessment of storm surges in the coastal area of Guangdong Province in year 2050 under climate change

LI Kuo¹, LI Guosheng²

1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract With the impact of climate change, the spatial and temporal distribution of storm surges in the coastal area of Guangdong province is changing. The data of storm surges in the 18 tide stations for the past 30 years and the data of tropical cyclones for the past 60 years are collected. The research concerning the relations among temperature of sea surface, frequency of tropical cyclones landed and scale of storm surges is quoted. The prediction of sea level rise in Pearl River Delta is referenced. Using the spatial analysis technology of ArcGIS, the submerged scope for storm surge in the coastal area of Guangdong in year 2050 is determined and the hazard assessment is carried out. Five vulnerability assessment indicators of hazard-bearing bodies are proposed, which are social economic index, land use index, eco-environmental index, coastal construction index and disaster-bearing capability index. Then a storm surge vulnerability assessment index system in the Guangdong coastal area of Guangdong is established. Additionally, the international general model about coastal vulnerability assessment is improved. The vulnerability of storm surges in the coastal area of Guangdong in 2050 is calculated. Based on the hazard assessment and vulnerability assessment under climate change, the risk assessment of storm surges in the study region in 2050 is done and the a risk zoning map is drawn. This study reveals the risk of storm surges in the coastal cities in the future, and which may guide the government decision-making and land planning and provide scientific advices for the government to prevent and mitigate storm surge disasters, as well as for engineering design.

Keywords climate change; storm surges; risk assessment; Guangdong Province; sea level rising

(责任编辑 王媛媛)