

面向区划的台风灾害综合风险评价 ——以广东省台风灾害人口与经济风险为例*

余瀚^{1,2}, 郭浩^{2,3}, 王静爱^{2,4}

1. 兰州财经大学农林经济管理学院, 甘肃 兰州 730101
2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875
3. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004
4. 青海师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008

摘要: 中国是世界上受台风影响最严重的区域之一, 开展系统的台风灾害风险评估及区域规律总结与区划研究, 对分区灾害风险防范理论与实践均具有重要意义。本文分析了自然灾害风险综合区划的需求, 并以广东省为例, 在区域灾害系统理论指导下综合评价了广东省台风灾害人口与经济风险。评价模型包括台风综合致灾因子强度、人口与经济承灾体社会脆弱性、暴露度3个要素。风险评价结果利用多重现期情景下的地学图谱方法表达, 包括5、10、20、50和100年一遇的情景。研究表明: ① 多个情景下台风综合致灾因子强度从沿海-内陆逐级递减, 高强度区域主要集中于沿海部分以及内陆沿河流区域; ② 人口与经济承灾体高脆弱区域主要分布于珠三角地区, 粤东城市群区域, 粤北和粤西的城镇区; ③ 人口与经济高暴露区域集中在珠三角、粤东、粤西城市城镇区; ④ 台风灾害风险等级从沿海到内陆逐渐降低, 5个现期下中高风险等级区均集中于珠三角一带、次高级中心在粤东潮州-汕头城区一带、粤西的湛江-茂名城区一带。本文的台风灾害风险评价结果具有多情景、系统性的特点, 可为广东区域台风灾害人口与经济风险的综合区划提供科学依据。

关键词: 台风灾害; 风险评价; 人口与经济风险; 风险区划; 广东省

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)01-0086-10

Comprehensive risk assessment of typhoon for regionalization —A case of population and economic risk in Guangdong Province

YU Han^{1,2}, GUO Hao^{2,3}, WANG Jing'ai^{2,4}

1. School of Agriculture & Forestry Economics and Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730101, China
2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
3. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China
4. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China

Abstract: China is the most seriously affected area by typhoons. It is of great significance for the theory and practice of zonal disaster risk prevention to carry out a systematic risk assessment of typhoon disasters and regional law summary and regionalization research. Based on the regional disaster system theory, we systematically evaluate the population and economic risk of typhoon disasters in Guangdong

* 收稿日期: 2021-11-10

录用日期: 2022-02-19

网络首发日期: 2022-06-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0602402); 国家自然科学基金(41621061)

作者简介: 余瀚(1983年生), 男; 研究方向: 自然灾害风险建模与应用; E-mail: m05yuh@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 王静爱(1955年生), 女; 研究方向: 自然灾害风险综合研究; E-mail: jwang@bnu.edu.cn

Province and express the results using a geo-graph method of the return period, to support the future work of typhoon disaster risk regionalization. In the model, typhoon hazards include wind, heavy rain, and flood. The evaluation model includes three factors: typhoon hazard intensity, the social vulnerability of the population and economic victims, and the extent of exposure. The scenarios include 5-year, 10-year, 20-year, 50-year, and 100-year return periods. The results show: 1) the hazard intensity decreases gradually from coastal to inland for each scenario, i.e., intensive hazards mainly concentrate in coastal areas and inland areas along rivers. 2) the high vulnerability is mainly distributed in urban areas of the Pearl River Delta, East, North, and West Guangdong. 3) the high exposure is mainly concentrated in the Pearl River Delta, East, and West Guangdong cities. 4) the risk gradually decreases from coastal to inland, in five scenarios high-risk areas are concentrated in the Pearl River Delta, and the secondary high-level centers are in the Chaozhou, Shantou urban area in eastern Guangdong, and the Zhanjiang, Maoming urban area in western Guangdong. These multi-scenario and systematic results could be the basis of the following research on the regionalization of natural disaster risk.

Key words: typhoon disaster; risk assessment; population and economic risk; risk regionalization; Guangdong province

台风是对人类社会造成损失与伤亡最大的灾害之一。全球每年约有台风80~100个, 主要发生于西北太平洋、加勒比海、印度洋、东太平洋、大洋洲北部海域等洋面。其中西北太平洋的台风发生频率是最高的, 约占全球总数的1/3以上。台风引发一系列次生灾害与事故, 造成巨大经济损失及人员伤亡^[1-5]。

中国地处西北太平洋沿岸, 台风带来的威胁非常严重。随着台风预警以及社会进步, 台风灾害造成的人员伤亡显著下降, 但受淹农田面积、倒塌房屋数以及直接经济损失等台风灾情仍然呈上升趋势^[6]。广东是我国台风登陆最多且受台风影响最严重的省份, 其沿海地区人口与社会经济高度集中, 台风灾害带来的损失约占广东省自然灾害造成损失的60%。随着国民经济的进一步发展和气候变化影响, 广东省在未来遭遇台风灾害的风险可能还将进一步增大^[7]。

自然灾害风险区划是对风险空间分异规律的系统性划分与总结^[8]。从理论研究到实践应用中, 从科学研究到国家需求, 都对自然灾害风险区域分异规律系统性总结有极大需求^[9-14]。自然灾害风险区划是当前自然灾害风险研究的热点与难点问题, 但目前自然灾害风险区域规律研究基本集中于风险等级高低的分异, 系统性与综合性不足; 适应系统性综合区划的自然灾害风险评估工作还有待深入^[13]。

因此, 如何使区域自然灾害风险评估方法适应自然灾害风险综合区划要求, 成为目前迫切需

要研究与探讨的科学问题。本文从区域灾害系统理论出发, 深入分析区域台风灾害风险区划的需求, 以广东省为例从台风致灾因子强度、人口与经济社会脆弱性、暴露度, 系统性地综合评价了台风灾害风险, 为广东省台风灾害风险防范提供科学依据, 也为后续广东省台风灾害风险综合区划开展提供基础。

1 数据与方法

1.1 数据

本研究对获取的相关研究数据, 从区域灾害系统理论角度, 进行了分类整理(表1)。

致灾因子主要选取台风灾害中影响较大的大风、暴雨、洪涝为3种致灾因子。考虑到需要较高空间分辨率数据, 大风与暴雨致灾数据直接引用了北京师范大学台风巨灾模型组的研究成果^[15-19]: ①大风致灾因子, 由于在风荷载下的致损过程主要由瞬时的极大风速决定, 是决定台风灾害风灾损失的关键, 通常选择3 s极大风速值, 它与承灾体损失的关系更好, 可由参数化台风风场模型计算获得^[15-17]; ②暴雨致灾因子选择台风过程降雨量, 它是由《热带气旋年鉴》中历史台风灾害过程降水等值线数据, 通过数字化后进行空间插值方法, 并结合距离平方反比与极端降水观测值重建得到^[18-19]; ③洪涝灾害致灾因子选取洪涝灾害等级, 由中国洪涝灾害综合危险性等级数据中提取得到^[20]。该数据包括山洪灾害危险性与淹没型洪水危险性两部分, 综合考虑了致灾因子(降水

表1 研究基本数据
Table 1 Basic data

类别	数据名称	数据内容	时空精度
孕灾环境	广东省基础地理信息数据	广东省市、县、乡行政区划	矢量
	ASTGTM2 数字高程	广东省数字高程	30 m×30 m
	SRTM 坡度	广东省坡向	90 m×90 m
	1:25 万全国基础地理数据	广东水系	矢量
	1:100 万中国地貌类型	广东地貌类型	矢量
致灾因子	3 s 极大风速	台风过程 3 s 风速极大值	1949—2016 年, 1 km×1 km
	台风过程降水总量	重建台风整场过程降水量	1951—2014 年, 1 km×1 km
	洪涝等级	河流淹没与山洪洪水的危险性等级	1 km×1 km
承灾体	人口	人口空间分布	2010 年, 1 km×1 km
	GDP	GDP 空间分布	2010 年, 1 km×1 km
	人口普查数据	第六次人口普查数据	矢量, 县区
	人口、经济统计	人口、经济统计年鉴数据	统计, 县区
	土地利用	30 m 全球地表覆盖数据	2010 年, 30 m×30 m

量、降水分布的强度与时间特征)与孕灾环境(山洪灾害相关的地形、地表类型等数据)两个要素。

人口与经济承灾体数据为 2010 年千米网格人口与 GDP 数据、第六次人口普查数据、统计年鉴数据, 数据来源为中国科学院资源环境科学与数据中心。以 2010 年千米网格人口与 GDP 数据为基底, 计算县区级行政区总值, 与第六次人口普查、统计年鉴数据对比计算比率为校正系数, 对千米网格上的人口与 GDP 数据进行校正得到。

1.2 评估方法

1.2.1 自然灾害风险综合区划的需求

风险综合区划是对风险评价结果的再综合, 风险评价是开展风险综合区划的基础。分析后续风险区划的需求, 台风灾害评价应解决 3 个问题: ① 综合表达风险的未来不确定性。风险是对未来不利情景的表达^[21], 未来性意味着不确定性; ② 风险评价的系统性与综合性。以利于风险综合区划的多级分区; ③ 提高风险评价基本单元的空间分辨率。以利于提高区划界线的定量程度。

针对上述问题, ① 风险分析过程与结果的表达采用多情景下风险等级图谱的形式, 采用一致的制图分级标准, 确保多个情景下的可比性; ② 在区域灾害系统理论指导下, 从风险构成要素综合、系统地评价广东省台风灾害人口与经济风险; ③ 选择较高空间分辨率的数据。

1.2.2 风险评估模型

依据前述分析, 本研究中台风灾害风险分析模型可表达为^[22-23]:

$$R = H \times V \times E, \quad (1)$$

其中 R 为台风灾害风险, H 为台风灾害多致灾因子综合强度, V 为承灾体脆弱性, E 为承灾体暴露度。分析框架如图 1 所示。

1.2.3 综合致灾因子强度

台风灾害致灾因子多样, 是典型的灾害链, 除大风、暴雨外, 在不同下垫面的孕灾环境下, 可能引发洪涝、风暴潮、滑坡、泥石流等次生灾害^[24]。台风灾害最终造成的损失应当为多种致灾因子共同作用的综合结果^[4, 24-25]。由于当前灾害链风险评估从理论到方法的研究还有待进一步深入, 以及数据资料所限, 本文中台风多致因子强度仍采用多灾种综合的方法: 选择台风灾害中影响较大的大风、暴雨评价其致灾强度, 同时考虑洪涝危险性等级进行修正。针对多个重现期情景, 首先进行单致灾因子强度-概率分析, 然后对单致灾因子的强度进行综合。

单致灾因子强度-概率分析中, ① 利用模拟最大风速、降雨量数据, 以年为单位分别构建栅格单元台风年最大风速、台风年降雨量的极大值样本序列; ② 拟合样本序列累积概率分布函数, 利用 Gumbel 经典极值分布函数

$$F(x) = \exp(-e^{-\alpha(x-\mu)}), \quad -\infty < x < +\infty, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6} \sigma_m}, \\ \mu = \mu_m - c \frac{\pi}{\sqrt{6}} \sigma_m, \end{cases}$$

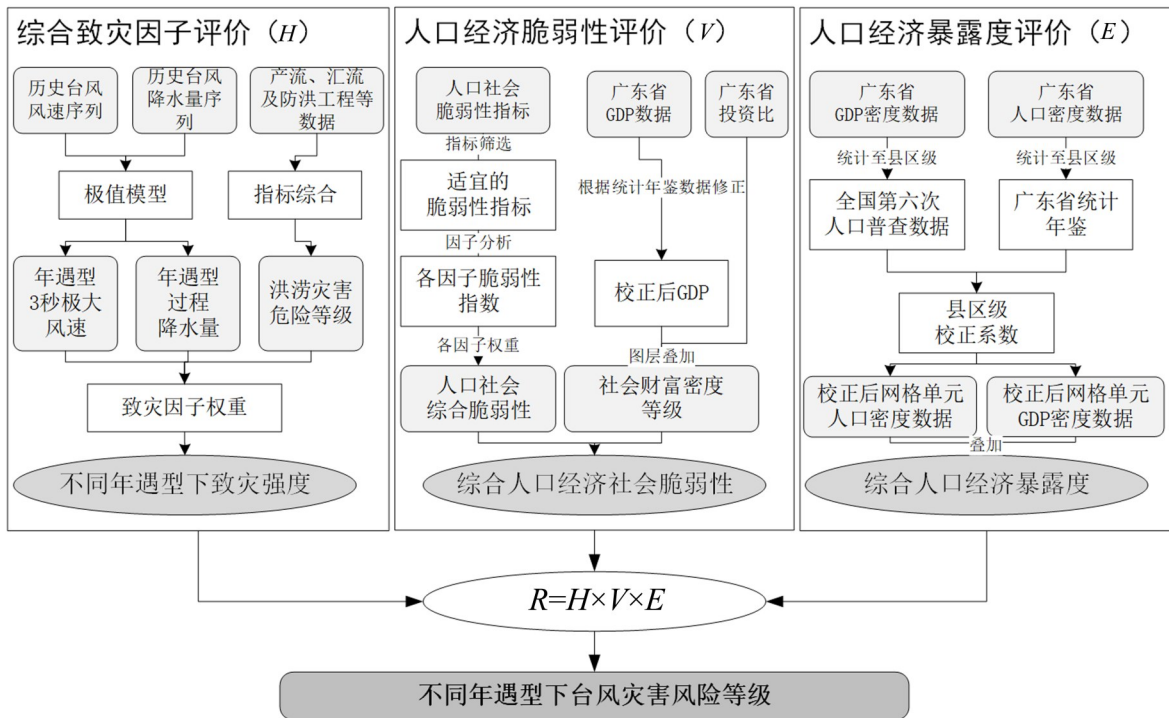


图 1 广东省台风灾害人口与经济风险分析框架

Fig. 1 Framework of typhoon disaster risk analysis for Guangdong province

式中 μ_m , σ_m , c 分别是年极大值样本的数学期望、标准差和欧拉常数; ③ 基于致灾因子数据序列长度和风险概率统计可靠性, 计算得到 5、10、20、50 和 100 年一遇重现期下的综合致灾因子强度指数 [18-19]

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} = \frac{1}{1 - F(x)}, \quad (3)$$

式中 T , $p(X \geq x)$, $F(x)$ 分别为重现期、超越概率、累积分布概率, 并利用 K-S 检验 (Kolmogorov-Smirnov test) 进行拟合度检验。

综合致灾因子强度计算中, 参考实地调研中走访当地财产保险公司所获取的台风灾害保险业务的理赔案例及经验, 结合历史灾情数据分析设

定台风大风、降雨综合权重分别为 0.2 和 0.8, 而暴雨主要的成害原因就是洪涝, 利用洪涝危险性等级对暴雨强度进行修正

$$H = 0.2 \times H_{wind} + 0.8 \times H_{rain} \times H_{flood}, \quad (4)$$

式中 H , H_{wind} , H_{rain} , H_{flood} 分别为台风致灾因子综合强度指数、归一化的大风、降水、洪涝灾害强度指数。

1.2.4 人口经济承灾体脆弱性与暴露度 本文中人口经济承灾体脆弱性是指区域社会脆弱性, 是区域内人口经济系统的固有属性 [26-27]。

人口社会脆弱性评价通过构建指标体系并进行因子分析计算得到 [27]。广东省人口社会脆弱性评价指标体系 (见表 2), 该指标体系参考了原指标体

表 2 广东省人口社会脆弱性评价指标体系

Table 2 Indicators of Guangdong population social vulnerability evaluation

指标类别	具体指标	指标类别	具体指标
社会经济	城镇居民人均可支配收入	城镇/乡村	常住人口密度、城镇居民人口比例
性别	女性常住人口比例	家庭结构	家庭规模平均值
年龄	年龄中位数	租房者	租房户数比例
失业	15岁及以上人口失业率	人口变化	常住人口增长率
就职行业	第一产业及采矿业人口比例、第二产业人口比例、第三产业人口比例	教育	25岁以下大学本科比例、20岁以上高中比例、15岁以上文盲比例
居住条件	房屋中没有管道供水的住户比例	社会依赖	5岁以下, 65岁以上、总人口负担

系,也考虑了数据可获取性与区域适宜性等,对 19 个指标进行因子分析后,信息量较大的公因子等权重求和得到的社会脆弱性指数。

经济社会脆弱性用社会财富值的高低代表^[28]。社会财富

$$SW = GDP/Inv_t, \quad (5)$$

式中 GDP 为国内生产总值, Inv_t 为区域内投资比。

综合社会脆弱性指数

$$V = 0.306 \times V_{pop} + 0.694 \times V_{eco}, \quad (6)$$

式中 V , V_{pop} , V_{eco} 分别代表综合、人口、经济承灾体的社会脆弱性指数。参考对广东省台风灾害风险评估研究中利用人口、经济发展、农业承灾体分别与损失的偏相关系数计算权重^[29], 农业归于经济承灾体, 可得的人口、经济脆弱性的系数分别为 0.306、0.694。

暴露度指标选取人口与 GDP 数量, 受数据资料不完备所限, 暂无法考虑防护措施。人口经济承灾体综合暴露度

$$E = 0.2 \times E_{pop} + 0.8 \times E_{eco}, \quad (7)$$

式中 E , E_{pop} , E_{eco} 分别为综合、人口、经济承灾体的暴露度指数。根据实地调研获取的保险公司的实际业务经验, 系数设定为 0.2 与 0.8。

2 结果分析

2.1 台风综合致灾因子强度

2.1.1 大风致灾强度等级 大风致灾因子强度以风力等级表达, 99.31% 的网格通过 K-S 检验。参考热带气旋等级划分的国家标准^[30], 制图共划分为 7 个等级, 分别为 <7, 7~9, 9~11, 11~13, 13~15, 15~17, >17 级 (表 3, 图 2)。

表 3 不同重现期情景下广东 3 s 年极大风速强度分级面积占比

风速强度等级	5 年一遇	10 年一遇	20 年一遇	50 年一遇	100 年一遇
<7					
7~9	28.21	7.39	0.05		
9~11	47.28	41.72	29.06	6.85	0.39
11~13	24.28	38.24	40.02	38.28	29.01
13~15	0.24	12.59	28.2	33.38	35.29
15~17		0.07	2.65	20.87	24.52
>17			0.02	0.61	10.8

大风致灾因子强度具有明显的地带规律性: 距海岸线距离的远近形成了 NE-SW 的带状分异, 越深入内陆, 风速极大值越小。大风高危险性区域集中于沿海的深圳-汕头、阳江-湛江一带。由于地形起伏与地表粗糙度, 局地特征较明显。从 5 年到 100 年一遇情景, 高等级大风强度区域占比不断增加。

2.1.2 暴雨致灾强度等级 降水强度等级划分以 24 h 降水量为指标, 95.82% 的网格通过 K-S 检验。参考中国气象局关于降水强度等级的划分标准^[31], 将过程降水量分布集中的区间适当细化, 突显等级差异 (图 2, 表 4)。

暴雨致灾因子强度高值区分布具有较明显地带规律性: 随着距海岸线距离远近形成了 NE-SW 的带状分异, 越深入内陆, 过程降水量越小。在粤北山地区由地形起伏造成地带性规律较差。暴雨高危险性区域集中于珠海-江门、惠州-揭阳一带。从 5 年一遇到 100 年一遇情景, 高等级降水强度区

域占比不断增加。

2.1.3 洪涝致灾强度等级 洪涝灾害危险性等级呈现南北分异的宏观格局 (图 2, 表 5)。北部山区内呈树枝状分布, 由珠江水系, 以及粤东、粤西主要河流水系的分布走向形成, 易形成山洪型洪水灾害。南部沿海平原区域地势平坦, 易形成河流淹没型洪水灾害。高危险性等级区域面积占比约为 1/3。

2.1.4 综合致灾强度等级 台风综合致灾因子强度呈现出较明显的地带规律性 (图 2), 高危险区域均集中于沿海。局地尺度上呈现出明显的高值集中区: 沿海地带主要集中于粤东汕尾市区域内沿海地带、粤西江门-阳江沿海一带、湛江东部-茂名的沿海地带, 内陆地区主要分布于沿主要河流水系走向的区域。多重重现期情景下随着超越概率逐渐变小, 高等级致灾强度指数区域占比逐步增多 (表 6)。

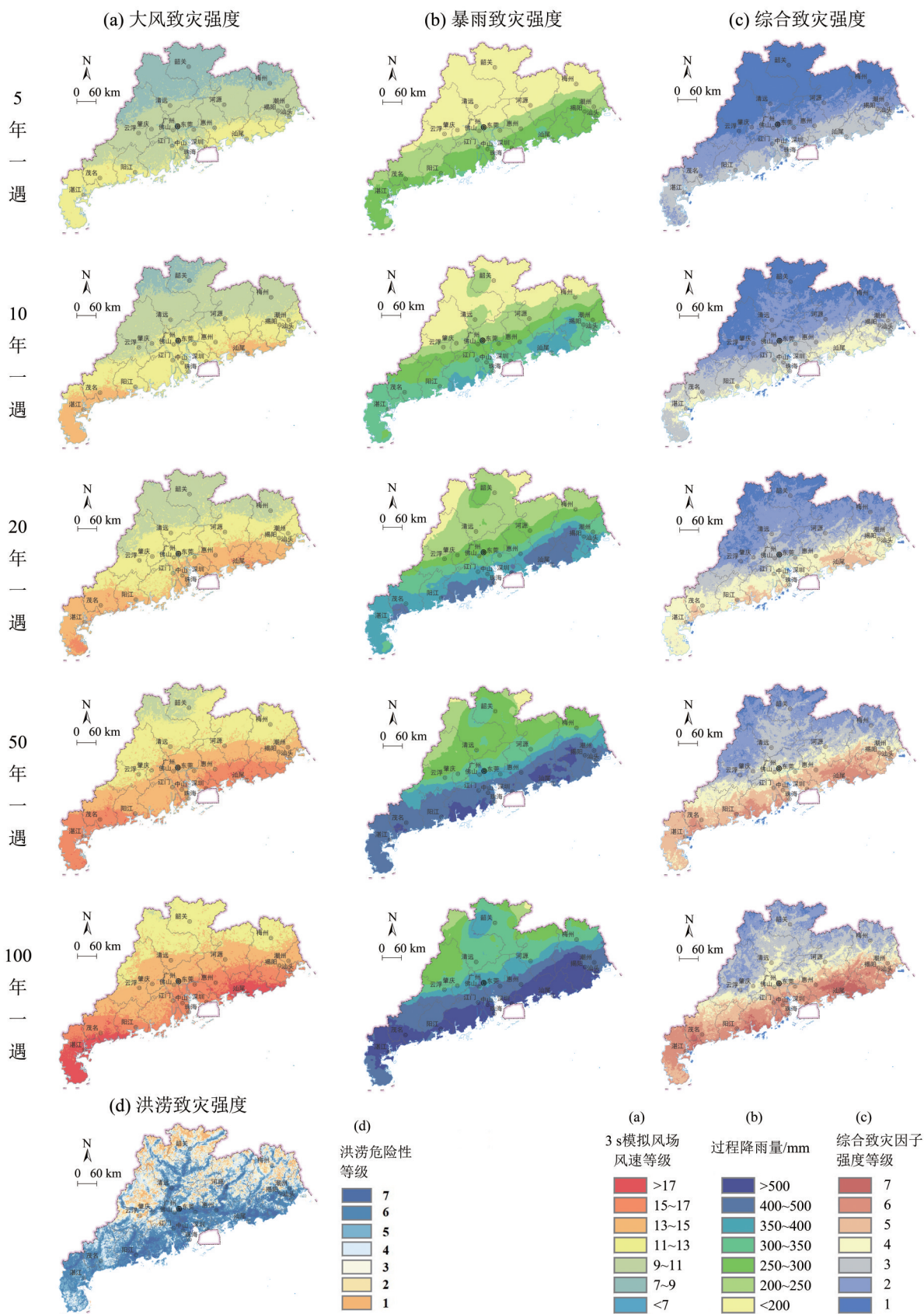


图 2 不同重现期情景下广东省台风灾害大风、暴雨、洪涝及综合致灾因子强度以及广东 3 s 年极大风速强度分级面积占比

Fig. 2 Wind, rainstorm, flood, comprehensive typhoon intensity grades and the percentage of annual maximum 3 s gust wind speed grades in Guangdong under different return period

表 4 不同重现期情景下广东省过程降水量强度分级面积占比

降水等级/mm	5年一遇	10年一遇	20年一遇	50年一遇	100年一遇
<200	50.2	29.88	7.44	2.01	0.87
200~250	22.78	21.46	28.77	7.34	2.56
250~300	26.30	16.72	16.65	26.08	12.72
300~350	0.72	24.84	13.61	15.08	22.71
350~400		7.10	21.52	10.61	13.24
400~500			12.02	32.60	22.07
>500			0.00	6.28	25.84

表 5 广东省洪涝灾害危险性分级面积占比

Table 5 Percentage of flood hazard grade in Guangdong

危险性等级	面积占比/%	危险性等级	面积占比/%
1	6.37	5	16.67
2	8.06	6	28.43
3	13.25	7	8.27
4	18.96		

表 6 不同重现期情景下广东省台风综合致灾因子归一化强度分级面积占比

Table 6 Percentage of normalized comprehensive typhoon intensity under different return periods %

致灾强度指数等级	5年一遇	10年一遇	20年一遇	50年一遇	100年一遇
1	47.93	30.1	13.97	4.32	1.93
2	29.72	28.41	33.07	25.66	15.92
3	22.33	28.2	19.26	23.28	26.32
4		13.28	26.9	15.81	15.25
5			6.81	23.16	15.86
6				7.73	20.24
7				0.03	4.48

2.2 广东人口经济社会脆弱性与暴露度

人口社会脆弱性呈现从内陆到沿海逐渐降低的分异规律(图3),高脆弱性区域主要集中于粤西、粤西北和粤东北部地区,低脆弱性区域集中于珠三角及其周边县市。经济社会脆弱性呈现明显地域分异,高脆弱性地区主要集中于珠三角城市群区域、粤东城市群区域,广州、深圳两个超大城市尤为突出,其余区域内的高值区与城镇的空间位置分布一致;低脆弱性等级区主要位于北部-东北部。

广东人口与经济承灾体综合社会脆弱性等级分异表现为,珠三角城市群区域、粤东城市群区

域的高脆弱区由经济高脆弱性造成;粤北、粤西区域内部分地区集中分布的高脆弱区由人口与经济共同产生。

人口承灾体暴露度(图4):高暴露区集中于珠三角地区、粤东潮汕地区以及粤西湛江和茂名城镇区域。经济承灾体暴露度与人口相似性且更加集中(图3),珠三角地区明显高于其他地区。

综合暴露度呈现沿海高于内陆的分布格局(图3),3个高值区分别是珠三角周边地区、粤东潮汕地区、粤西湛江和茂名地区。低值区分布于粤北与粤东北部分地区,但城镇区域均处于高暴露等级。

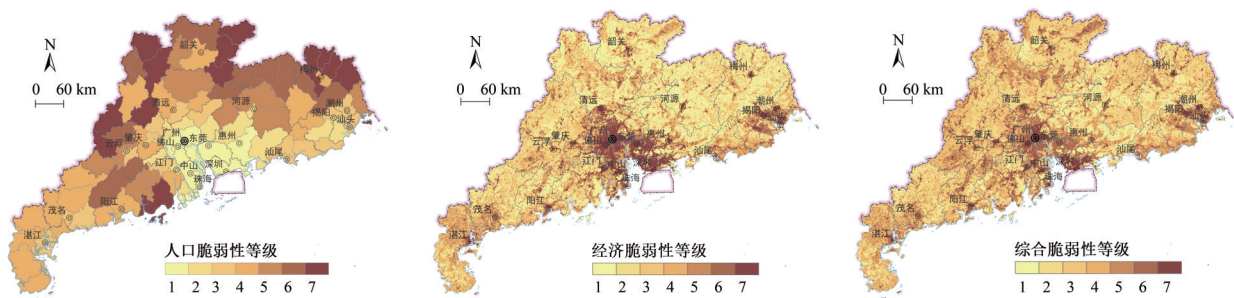


图 3 广东人口、经济与综合社会脆弱性指数等级

Fig. 3 Regional population, economic, comprehensive social vulnerability grades

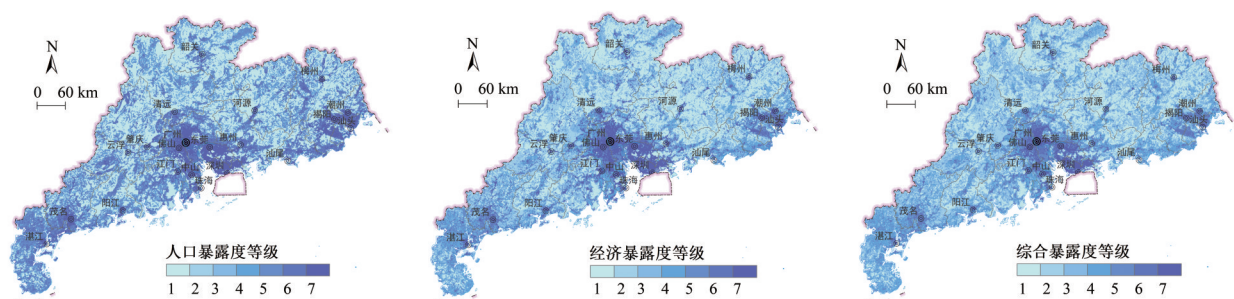


图 4 广东人口、经济与综合暴露度指数等级

Fig. 4 Regional population, economic, comprehensive exposure grades

2.3 综合风险评价结果

综合风险指数评价结果以 20 年一遇情景为基础进行分级标准设定, 其他年遇型使用同一分级标准。使 5 个重现期情景下的结果中的等级具有可比性 (图 5, 表 7)。

广东省台风灾害风险空间分异显著: ① 沿海地

区风险高于内陆地区, 越深入内陆风险等级越小; ② 风险最高等级区集中于珠三角区域, 每个年遇型情景下均为最高等级。次高等级区主要位于粤东潮汕地区、粤西湛江-茂名地区; ③ 风险等级低值区主要集中于内陆丘陵区域; ④ 内陆丘陵区域内沿河流、交通路线以及城镇分布有部分高、中值区; ④ 从 5 年

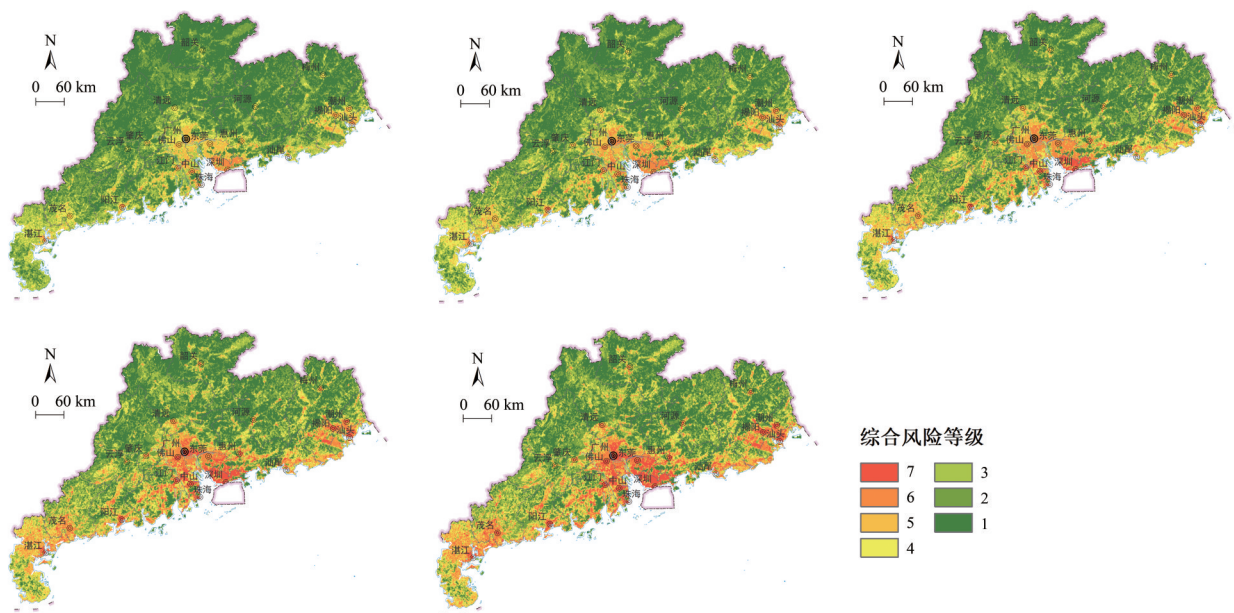


图 5 不同重现期情景下广东省台风综合风险等级

Fig. 5 Comprehensive typhoon risk grade distribution under different return period in Guangdong

表 7 不同重现期情景下广东省台风人口与经济风险等级分级面积占比

风险等级	5年一遇	10年一遇	20年一遇	50年一遇	100年一遇
1	55.41	48.41	43.29	37.84	34.57
2	23.87	24.64	24.13	23.82	23.17
3	12.66	14.32	15.88	15.58	15.98
4	6.51	7.91	8.74	10.79	11.6
5	1.53	4.09	5.8	6.71	7.01
6		0.64	2.07	4.11	5.25
7			0.1	1.15	2.42

一遇到100年一遇情景,随着超越概率逐渐变小,高等级风险区域范围明显增加。在5、10、20年一遇情景下,超过50%的面积处于较低等级的1级风险区,5级以上较高等级风险区所占面积大多在10%以下。100年一遇情景下,风险处于较高-高等级的面积增加到约15%(表7),北部风险较低的地区变化不明显。

3 结论与建议

本文根据区域灾害系统理论,面向台风灾害风险综合区划需求,系统地从事要素到综合分析了广东省台风灾害风险,获得风险及形成要素空间分异规律:

1) 多个情景下台风综合致灾因子强度从沿海-内陆逐级递减,高强度区域主要集中于沿海部分以及内陆沿河流域。

2) 人口经济承灾体高脆弱区域主要分布于珠三角、粤东城市群区域,粤北粤西的城镇区。

3) 人口与经济高暴露区域集中于珠三角、粤东、粤西城市城镇区。

4) 台风灾害风险等级从沿海到内陆逐渐降低,5个重现期下中高风险等级区均集中于珠三角一带、次高级中心在粤东潮州-汕头城区一带、粤西的湛江-茂名城区一带。

本研究从表达方法、系统性与综合性、数据

分辨率等3个方面进行了探索,希望为进一步开展广东省台风灾害风险综合区划提供了科学依据与支持。在后续研究中可从以下3个方面进一步深入:① 台风灾害链效应。台风灾害是一种典型的灾害链,多种灾害之间相互作用使得灾情远远超过几个单灾种简单线性叠加。由于当前灾害链损失与风险评估基本处于概念模型阶段,本文采用多灾种叠加来计算综合致灾因子强度可能会低估其影响。未来基于灾害链内多种灾害之间影响过程建模,从灾害链系统的致灾因子危险性、承灾体脆弱性与暴露度在灾害链过程中变化机制入手,是提高准确度的方向;② 未来气候变化导致情景假设可能不成立。气候变化可能导致未来台风灾害致灾因子强度-概率关系变化,同时人口经济情景变化可能带来脆弱性与暴露度的变化。将气候变化情景下台风灾害风险系统变化要素纳入研究,才能使本文台风灾害风险评估在指导风险区划时提供更科学的依据;③ 面向风险区划,多情景风险评价结果的再综合。自然地理区划通常用一张区划图表达,本文多情景风险评价结果的表达方法,会增加风险区划中的复杂度以及影响区划结果表达与应用,因此进行多情景风险评价结果的再综合是后续研究可深入的方向。

参考文献:

- [1] CHEN L S, LI Y, CHENG Z Q. An overview of research and forecasting on rainfall associated with land-falling tropical cyclones [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(5): 967-976.
- [2] MUNICH RE. Annual review: Natural catastrophes 2012 [R/OL]. [2021-11-10]. <https://www.munichre.com/topics-online/en/climate-change-and-natural-disasters.html>.
- [3] 史培军,王静爱,方修琦,等.综合风险防范:长江三角洲地区综合自然灾害风险评估与制图[M].北京:科学出版社,2014.
- [4] KAPPES M S, KEILER M, von ELVERFELDT K, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review [J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(2): 1925-1958.

- [5] EM-DAT. The OFDA/CRED international disaster database[EB/OL].[2021-01-15].<https://public.emdat.be/>.
- [6] 丑洁明,班靖晗,董文杰,等.影响广东省的热带气旋特征分析及灾害损失研究[J].大气科学,2018,42(2):357-366.
- [7] 王桂娟.广东省热带气旋灾害分析与风险区划[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [8] 郑度,欧阳,周成虎.对自然地理区划方法的认识与思考[J].地理学报,2008(6):563-573.
- [9] 尚志海,周铭毅,梁其胜,等.广东省湛江市水稻台风灾害风险评估[J].灾害学,2021,36(3):85-90.
- [10] ZHU J, LU Y, REN F M, et al. Typhoon disaster risk zoning for China's coastal area[J/OL]. *Frontiers of Earth Science*. [2021-11-10]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11707-020-0858-5>.
- [11] 刘桂林,李元新,李笑,等.基于信息扩散技术的广东省台风灾害风险分析[J].安全与环境学报,2021,21(4):1684-1692.
- [12] 周小梅,杜清运,彭瑞.浙江省台风灾害风险区划研究[J].地理空间信息,2018,16(8):12-14+27+7.
- [13] 史培军,王季薇,张钢锋,等.透视中国自然灾害区域分异规律与区划研究[J].地理研究,2017,36(8):1401-1414.
- [14] 国务院办公厅.国务院办公厅关于开展第一次全国自然灾害综合风险普查的通知(国办发〔2020〕12号)[EB/OL].[2021-11-10].http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-06/08/content_5518034.htm.
- [15] 方伟华,林伟.面向灾害风险评估的台风风场模型研究综述[J].地理科学进展,2013,32(6):852-867.
- [16] 钟兴春,方伟华,曹诗嘉.基于构件损毁模拟仿真的沿海农村典型低矮房屋台风风灾易损性研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(1):51-59.
- [17] 林伟.海南岛台风大风危险性分析[D].北京:北京师范大学,2014.
- [18] 李颖,方伟华.热带气旋降水重现期估算研究[J].自然灾害学报,2014,23(6):58-69.
- [19] 李颖.热带气旋降水结构分析及参数模型构建研究:以中国近海地区为例[D].北京:北京师范大学,2014.
- [20] 赵刚,庞博,徐宗学,等.中国山洪灾害危险性评价[J].水利学报,2016,47(9):1133-1142+1152.
- [21] 黄崇福,刘安林,王野.灾害风险基本定义的探讨[J].自然灾害学报,2010,19(6):8-16.
- [22] 史培军.四论灾害系统研究的理论与实践[J].自然灾害学报,2005,14(6):1-7.
- [23] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2012.
- [24] 王然,连芳,余瀚,等.基于孕灾环境的全球台风灾害链分类与区域特征分析[J].地理研究,2016,35(5):836-850.
- [25] 史培军,吕丽莉,汪明,等.灾害系统:灾害群、灾害链、灾害遭遇[J].自然灾害学报,2014,23(6):1-12.
- [26] CUTTER S L, MITCHELL J K, SCOTT M S. Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown county, South Carolina[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2000,90(4):713-737.
- [27] 陈文方.区域多灾种风险评估研究——以长三角地区多灾种受灾人口风险为例[D].北京:北京师范大学,2014.
- [28] 李曼,邹振华,史培军,等.世界地震灾害风险评估[J].自然灾害学报,2015,24(5):1-11.
- [29] 丁燕,史培军.台风灾害的模糊风险评估模型[J].自然灾害学报,2002(1):34-43.
- [30] 国家信息与文献标准化管理委员会.热带气旋等级:GB/T 19201—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [31] 国家信息与文献标准化管理委员会.降水强度等级划分标准(内陆部分):GB/T 28592—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.

(责任编辑 秦社彩)