

陈崇贤, 方言, 刘京一. 海平面上升叠加风暴潮风险下城市景观系统脆弱性评估: 以广州为例[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4): 53-63.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.007

海平面上升叠加风暴潮风险下城市景观系统 脆弱性评估: 以广州为例

陈崇贤, 方言, 刘京一

华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642

摘要 为系统评估海平面上升叠加风暴潮风险对城市不同类型景观的影响, 以珠三角沿海城市广州市为研究区域, 基于该地区土地利用和社会经济等数据, 构建“敏感性-适应性”脆弱性评估框架, 针对近期(2030年)、中期(2050年)和远期(2100年)3个不同时期海平面上升叠加风暴潮风险情景下广州城市景观系统的脆弱性特征进行评估。结果显示: 从淹没范围和经济损失来看, 未来不同风险情景下受淹没面积最大的是农业景观、公园绿地与湿地景观, 而经济损失最为严重的是工业景观和商业与公共服务景观。从整体脆弱性空间分布来看, 近期景观脆弱性较高的区域主要集中在广州中部的荔湾区、白云区和黄浦区, 到中期和远期阶段, 广州中部的海珠区景观脆弱性风险逐渐加剧。从各类景观脆弱性空间分布来看, 与交通景观、居住区景观等其他各类景观相比, 近期农业景观脆弱性程度偏高的区域最多, 主要集中在广州南部的番禺区和南沙区; 到中期和远期阶段, 各类景观的脆弱性风险都有不同程度的加剧, 其中, 公园绿地与湿地景观脆弱性程度变化较为显著。研究结果表明, 未来可以根据不同景观系统的脆弱性程度和空间分布特征, 通过提升防御性设施建设、实施适应性技术以及加强合理利用土地等应对策略来降低该地区的受灾风险。

关键词 海平面上升; 风暴潮; 城市景观系统; 脆弱性评估; 气候变化; 极端气候; 珠三角
中图分类号 TU984 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0053-11

自1970年代以来, 随着世界人口的迅速增长和社会经济的快速发展, 全球气候变暖和由此引发的海平面上升成为各国政府和各国学者重点关注的问题。2021年, 联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布的第六次评估报告(the sixth assessment report, AR6)中指出, 在RCP8.5高排放情景下, 2100年全球平均海平面将上升0.3~1.6 m^[1]。同时, 海平面上升加剧了台风、风暴潮和强降雨等极端气候事件发生, 导致沿海城市因耐抗性、稳定性不足而变得更加脆弱, 使得地区社会经济的可持续发展受到严重制约^[2]。中国作为海洋大国, 沿海区域承载了70%以上的大中城市和45%的人口, 创造了约60%的GDP, 是人类活动、资源利用、基础设施投资最为密集的区域^[3]。其中, 濒临我国南海的珠江三角洲聚集众多城市, 是中国受海平面上升和风暴潮影响最严

重的区域之一。因此, 在海平面上升和风暴潮风险加剧的背景下对珠三角沿海城市的受灾风险开展评估, 对未来城市韧性建设具有重要的参考意义。

目前, 国内外学者针对未来海平面上升情况下沿海城市的受灾风险已开展大量评估研究, 主要涉及3个方面: 一是评估海平面上升和风暴潮风险情景下沿海城市的洪涝风险。该类研究大多采用指标体系法、GIS技术评估法、数值模拟情景分析法等方法, 通过收集数据和实例分析, 系统梳理城市洪涝灾害影响因素和成灾机理, 并针对沿海城市各地区的洪涝风险开展评估^[4-6]。二是评估海平面上升所造成的海岸灾害对海岸防护工程设施防御能力的影响。这类研究在现有海岸防护设施的基础上, 通过分析不同海岸防护技术的优势和限制, 并从硬质防护和生态防护等方面提出相关的防护设施优化策略^[7-9]。三是评估海平面上升和风暴潮风险情景下沿海城市

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2021A1515010924); 国家自然科学基金项目(52108051)

陈崇贤, E-mail: chongxian@scau.edu.cn

通信作者: 刘京一, E-mail: liujingyi@scau.edu.cn

的脆弱性,这类研究主要通过构建自然生态系统或社会经济评价指标体系,定量评价沿海城市自然生态系统或社会经济方面的脆弱性程度^[10-13]。其中,国内大多选取位于长三角的上海市为研究区域开展脆弱性评估,如有学者通过构建淹没深度、城市化率、人口密度、财政收入等指标评估海平面上升和风暴潮等灾害影响下上海社会经济的脆弱性^[12];也有学者通过构建土地利用强度、景观破碎度和生态保护等级等评价指标体系,评估海平面上升和风暴潮风险下上海崇明岛的生态脆弱性^[13]。

综上所述,已有相关研究主要集中于沿海城市的内涝灾害、海岸防护设施、自然生态系统或者社会经济脆弱性的评价。然而,海平面上升和风暴潮等风险对沿海城市造成的影响广泛,居住区、商业区、交通、农田等各类景观都会遭受破坏和影响。由此可见,城市景观系统是重要的承灾要素,但已有相关研究主要是针对湿地、农业等自然景观系统的评价,缺乏对城市多种景观类型受灾风险的综合考虑。与此同时,对于经济发达的珠三角地区,海平面上升及其对该地区城市造成的影响一直受到广泛关注^[14-15],但对于海平面上升和风暴潮风险对该地区影响的定量评估研究,如未来沿海城市景观的受淹没范围,以及居住区、工业、交通等各类景观系统因淹没而导致的经济损失评估等则鲜见报道。

本研究选取珠三角沿海城市广州市为研究区域,预测在近期(2030年)、中期(2050年)和远期(2100年)3个时间段海平面上升叠加风暴潮情景下各类景观系统的受淹没范围,以敏感性和适应性为基础构建评估体系,分别量化居住区景观、商业与公共服务景观、工业景观、交通景观、公园绿地与湿地景观以及农业景观的受灾程度和可能的经济损失,从而对海平面上升叠加风暴潮风险下的广州市景观系统脆弱性进行量化评估,以期对广州市未来海岸灾害的风险管理与防范、提升城市韧性景观建设提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

广州市位于广东省中南部(22°26′~23°56′N, 112°57′~114°3′E),珠江三角洲北缘,是典型的河口城市。广州市域内水网密布,湖塘众多,景观资源丰富。同时,广州市人口密集,居住区、商业区等建筑群密布,城市化水平整体较高,是典型的高密度

城市。近年来随着全球气候变暖和城市化进程的快速发展,海平面加速上升,风暴潮等海岸灾害加剧,造成广州市城市景观系统的脆弱性增大,尤其是常年受到海岸灾害影响的广州中部和南部临近海岸区域。

1.2 数据来源与处理

本研究所使用的数据主要包括(表1):(1)海平面上升和风暴潮数据。2030年、2050年和2100年海平面上升数据来源于2014年IPCC第5次评估报告(AR5)^[16]。同时,研究表明,在海平面上升趋势下珠江口沿岸设防应按照大于200年一遇风暴潮的设防标准^[17],因此,选取南沙潮位站200年一遇的风暴潮增水高度(3.078 m),与海平面上升数据综合考虑^[18]。(2)景观类型数据。本研究中使用的广州市地图的底图来源于国家地理信息公共服务平台“天地图”的标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>),审图号为粤S(201)1号。景观类型遥感图像源自Landsat 8,空间分辨率为30 m×30 m,在eCognition平台和Arc GIS平台上将其与POI(point of interest)数据和OSM(open street map)路网数据结合处理得到各类景观系统用地信息,包括居住区景观、商业与公共服务景观、工业景观、交通景观、公园绿地与湿地景观、农业景观六大类(图1)。(3)深度-损失曲线数据。源于欧盟委员会联合研究中心(European Commission's Joint Research Centre)于2017年发布的全球各大洲平均深度-损失函数曲线报告^[19]。由于目前可获取的广州市相关数据较少,无法获得该地区确切的深度-损失曲线。因此,采用该报告提供的各大洲平均深度-损失函数曲线作为计算参考数据。(4)社会经济数据。来源于地理空间数据云、中国科学院资源环境科学与数据中心、广州市统计局官网以及建筑、交通、房地产行业等网络信息平台中的公开数据,包括人口空间分布数据、居住用地经济总量、农业经济总量、平均道路长度建设成本、公

表1 广州市未来海平面上升及风暴潮增水情景

Table 1 The scenarios of sea level rise and storm surge in Guangzhou in the future

项目 Item	m		
	2030年 In 2030	2050年 In 2050	2100年 In 2100
海平面上升高度 Height of sea level rise	0.180	0.400	1.130
200年一遇风暴潮增水高度 Height of the 200-year storm surge		3.078	
海平面上升叠加风暴潮增水高度 Height of the sea level rise combined with storm surge	3.258	3.478	4.208

立学校总数等,用于计算敏感性和适应性指标值。由于当前各项数据最为全面的广州市统计年鉴年份为2016年,故本研究采用该年份的社会经济数据。

1.3 研究方法

1)构建评估框架。综合分析 IPCC 和不同研究人员对脆弱性的理解^[1,20-23],本研究基于已有基础数据,构建“敏感性-适应性”评估框架,通过量化敏感性和适应性指标计算出脆弱性指数,对不同海平面上升叠加风暴潮影响下广州城市景观系统的脆弱性进行评估(图2)。其中,脆弱性由敏感性和适应性构成,暴露度只是系统脆弱性改变的驱动因素,不作为脆弱性的一部分,它是景观系统接触或受到外界海平面上升和风暴潮干扰的持续时间和程度,可以用淹没深度和淹没面积来表示。各类城市景观系统在接触外界干扰之后会受到不同程度的影响,即为系统的敏感性^[24],可以用经济价值损失作为量化指标。同时,景观系统也会通过自身调节能力等来适应海平面上升带来的影响,可以看作是系统的适应性^[25],本研究结合 Cutter 等^[26]制定的灾害适应性评价指标

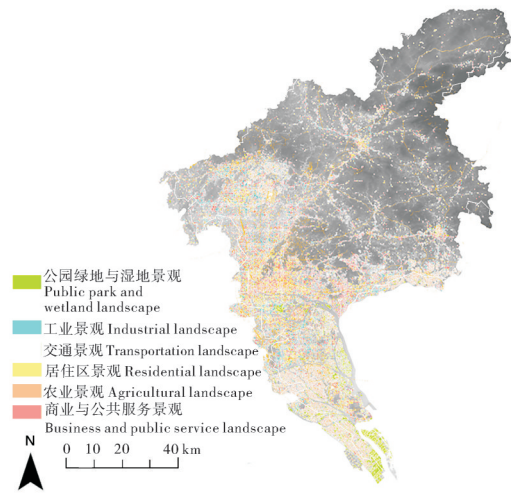


图1 广州市各类景观系统分布

Fig.1 Distribution of landscape systems in Guangzhou

与计算方法,从灾前预防能力、灾中应急能力和灾后恢复能力3个方面选取合适的指标进行量化。最后,根据量化的敏感性和适应性指标计算脆弱性指数,对景观系统的脆弱性进行评估。

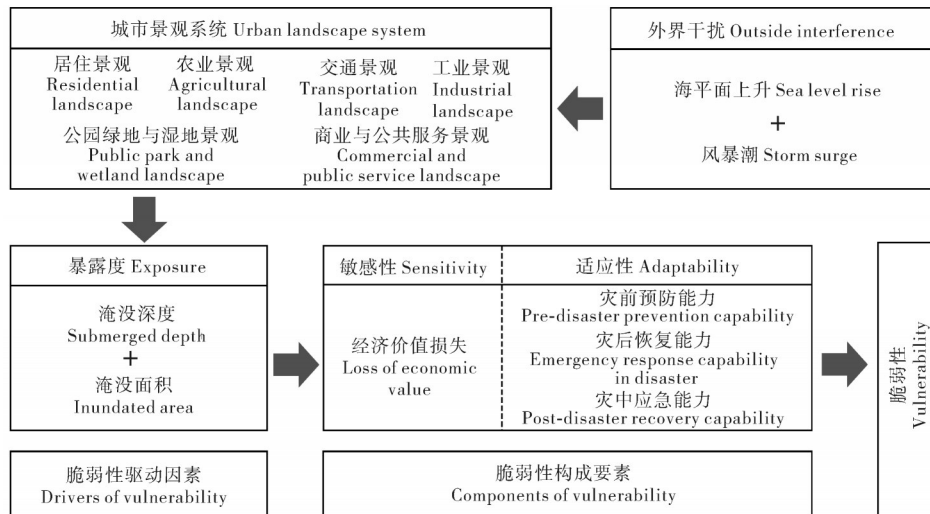


图2 评估框架

Fig.2 Assessment framework

2) 评估指标体系构建。基于评估框架,本研究从系统对外界干扰的敏感性和应对风险的适应性两方面构建了海平面上升叠加风暴潮影响下广州城市景观系统脆弱性评估指标体系,并根据已有相关基础数据计算各个敏感性和适应性指标(表2)。

3)脆弱性指数计算及分级。基于脆弱性评估框架和评估指标体系,本研究计算脆弱性指数以评估海平面上升叠加风暴潮背景下广州市各类景观系统的脆弱性程度。参照 Huang 等^[27]的研究,脆弱性指

数的计算方式为:

$$V_i = \frac{S_i}{A_i} \tag{1}$$

式(1)中, V_i 为脆弱性指数, S_i 为敏感性指数, A_i 为适应性指数。为消除量纲和数据取值范围影响,本研究使用最大最小归一化方法对数据进行处理,该方法已经被运用于灾害弹性评价分析研究的多维度评估指标标准化中,各类指标都逐一通过减去最小值并除以其数值的范围(最大值减去最小值),将数据值统一在 $[0,1]$ ^[28],计算公式为:

表2 海平面上升叠加风暴潮影响下广州城市景观系统脆弱性评估指标体系
Table 2 Vulnerability assessment index system of urban landscape systems in Guangzhou under the influence of sea level rise and storm surge

项目层 Project	指标层 Index	计算方法 Calculation method	
敏感性 Sensitivity	居住区景观价值损失/百万元	深度-损失曲线值×淹没面积×(居住用地经济总量/居住用地面积)	
	商业与公共服务景观价值损失/百万元	深度-损失曲线值×淹没面积×(商业与公共服务用地经济总量/商业与公共服务用地面积)	
	工业景观价值损失/百万元	深度-损失曲线值×淹没面积×(工业用地经济总量/工业用地面积)	
	农业景观价值损失/百万元	深度-损失曲线值×淹没面积×(农业经济总量/农业用地面积)	
	交通景观价值损失/百万元	深度-损失曲线值×同一类型道路淹没长度×平均道路长度建造成本	
适应性 Adaptability	公园绿地与湿地景观价值损失/百万元	(绿地深度-损失曲线值×绿地淹没面积×绿地单位面积生态价值)+(湿地深度-损失曲线值×湿地淹没面积×湿地单位面积价值)	
	灾前预防能力	可渗透表面/%	可渗透表面面积/总面积
		自然抗洪区域/%	湿地面积/总面积
	灾中应急能力	临时避难所可达性(避灾人数)/万人	(避灾场所数量×面积×单位面积避灾人数)/总人口数
		疏散路线(交叉点数)/万人	道路交叉点数量/总人口数
		医疗能力(床位数)/万人	(卫生组织数量×对应床位数)/总人口数
		未退休人口比重/%	低于60岁人口数/总人口数
	灾后恢复能力	政府组织(组织数)/万人	政府组织数量/总人口数
		大型零售分布(商店数)/万人	商店数量/总人口数
		工业补给潜力/(km/km ²)	铁路长度/面积

$$z_j = \frac{x_{j,i} - x_{j,\min}}{x_{j,\max} - x_{j,\min}} \quad (2)$$

式(2)中, j 为指标类型, i 为某类指标中具体的值, z_j 为第 j 类指标的标准化指数, $x_{j,i}$ 为第 j 类的指标值, $x_{j,\min}$ 为第 j 类的指标最小值, $x_{j,\max}$ 为第 j 类的指标最大值。基于公式(1)、(2),构建脆弱性指数,计算公式为:

$$V_1 = \sum V_{1,j} \quad (3)$$

$$V_{1,j} = \frac{S_{1,j}}{A_1} \quad (4)$$

$$S_{1,j} = \frac{s_{j,i} - s_{j,\min}}{s_{j,\max} - s_{j,\min}} \quad (5)$$

$$A_1 = \sum \frac{a_{j,i} - a_{j,\min}}{a_{j,\max} - a_{j,\min}} \quad (6)$$

式(3)~(6)中, $V_{1,j}$ 为各类景观系统的脆弱性指数, $S_{1,j}$ 为各类景观系统的敏感性指数, A_1 为总体适应能力指数,其余计算项目与公式(2)相对应。

根据计算所得的脆弱性指数,在 Arc GIS 10.8 中利用自然间断点分级法将脆弱性程度分为极低、低、中、高、极高5个等级。自然间断点分级法可以对相似值进行最恰当的分组,使得各个类之间的差异最大化^[29],直观清晰地反映了不同海平面上升和

时间尺度下广州市城市景观系统脆弱性的空间分布。

2 结果与分析

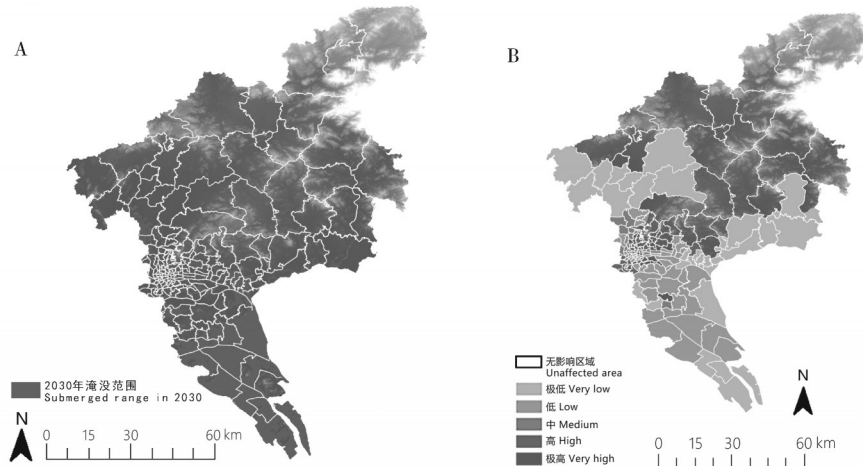
2.1 近期(2030年)脆弱性评估

2030年的模拟结果显示,在RCP8.5高排放情景下,海平面上升叠加200年一遇风暴潮影响下的洪水高度可达3.258 m,广州市的淹没地区主要集中在珠江水系沿河低地区域,其中处于广州南部的南沙区和番禺区受淹情况尤为严重(图3)。

在广州市景观的淹没情况和经济损失方面(表3),景观系统受淹面积总计高达约44 095 hm²,因淹没而导致的经济损失总计约5 511亿元,其中农业景观和公园绿地与湿地景观的受淹面积最大,分别约为18 028.6、12 251.1 hm²,但其所遭受的经济损失最小。而经济损失最高的是商业与公共服务景观和工业景观,分别约为2 442.801亿、2 041.647亿元,其原因可能是生态系统具有较强的适应能力,使得农业景观和公园绿地与湿地景观的价值损失小于商业景观和工业景观的价值损失。在景观的脆弱性空间分布方面,从整体来看,广州南部区域虽受淹面积最大,但脆弱性程度普遍较低,而广州中部的荔湾区和

黄埔区等河域交汇区的脆弱性程度却偏高,其原因可能是这些城区人口密集,房地产和商业经济较为发达,导致受淹没时潜在的经济价值损失较高,同时适应水平较低,相较于其他区域脆弱性偏高(图3)。从各类景观系统来看,居住区景观、商业与公共服务景观脆弱性较高的区域主要分布在广州中部的白云

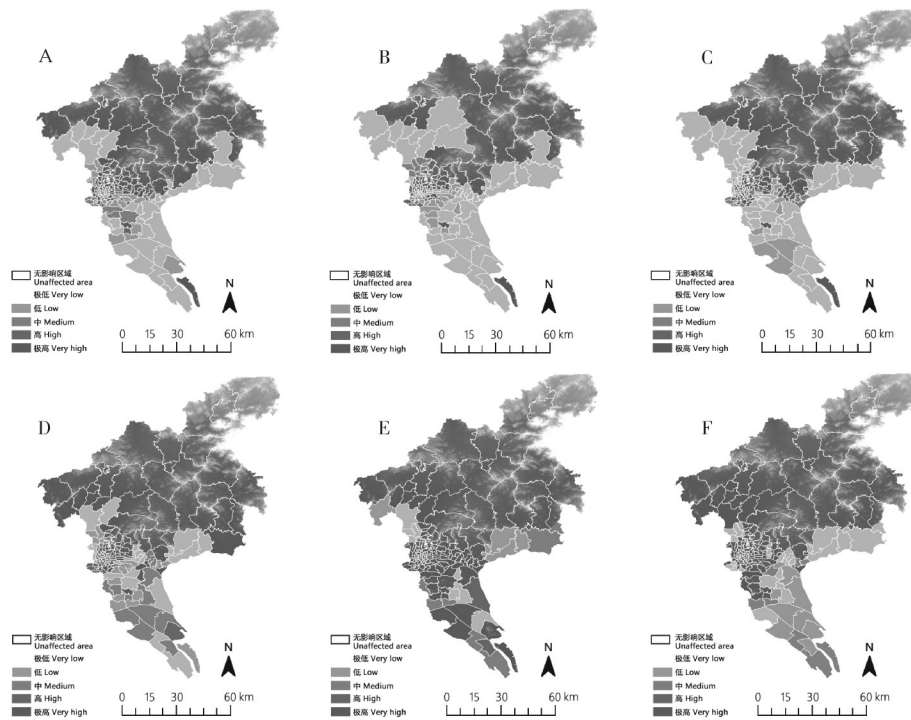
区、荔湾区和黄浦区;工业景观、公园绿地与湿地景观较高脆弱性区域主要分布在广州中部的海珠区和黄浦区以及广州南部的南沙区,其中南沙区工业景观呈现出极高脆弱性;交通景观和农业景观脆弱性较高的区域主要集中在广州南部的番禺区和南沙区(图4)。



A: 2030年广州市淹没范围 Inundate area of Guangzhou in 2030; B: 2030年广州市总体脆弱性空间分布 Spatial distribution of overall vulnerability of Guangzhou in 2030.

图3 2030年广州市总体受灾风险

Fig.3 Overall disaster risk of Guangzhou in 2030



A: 居住区景观 Residential landscape; B: 商业与公共服务景观 Commercial and public service landscape; C: 工业景观 Industrial landscape; D: 交通景观 Transportation landscape; E: 农业景观 Agricultural landscape; F: 公园绿地与湿地景观 Public park and wetland landscape.

图4 2030年广州市各类景观系统脆弱性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of various landscape systems vulnerability of Guangzhou in 2030

表3 未来不同时期各类景观系统淹没面积和经济损失评估结果

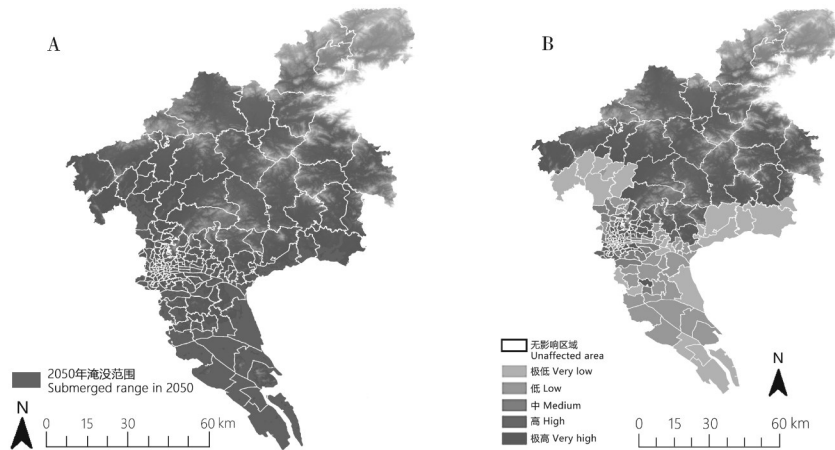
Table 3 Inundated area and economic loss assessment results of various landscape systems in different periods in the future

系统类型 System type	淹没面积/hm ² Inundated area			经济损失/亿元 Economic loss		
	2030年 In 2030	2050年 In 2050	2100年 In 2100	2030年 In 2030	2050年 In 2050	2100年 In 2100
居住区景观 Residential landscape	2 848.8	3 390.6	3 957.4	656.872	770.284	948.232
商业与公共服务景观 Commercial and public service landscape	6 776.2	8 062.4	9 257.4	2 442.801	2 885.444	3 468.156
工业景观 Industrial landscape	2 588.3	3 028.2	3 736.5	2 041.647	2 277.981	3 031.630
交通景观 Transportation landscape	1 602.1	2 250.8	2 483.9	231.454	345.388	400.878
农业景观 Agricultural landscape	18 028.6	20 047.9	24 461.1	49.572	54.448	61.417
公园绿地与湿地景观 Public park and wetland landscape	12 251.1	12 993.2	14 060.5	88.954	94.211	99.828

2.2 中期(2050年)脆弱性评估

2050年的预测结果显示,珠江口在未来30 a的海平面上升高度可达0.4 m。在海平面上升叠加200年一遇风暴潮的影响下,洪水高度可达3.478 m。结

合海平面上升叠加风暴潮的淹没模拟图和广州卫星图分析,至2050年,广州市的淹没地区仍然主要集中在珠江水系沿海和沿河低地地区,但淹没方向有向内陆发展的趋势(图5)。



A: 2050年广州市淹没范围 Inundate area of Guangzhou in 2050; B: 2050年广州市总体脆弱性空间分布 Spatial distribution of overall vulnerability of Guangzhou in 2050.

图5 2050年广州市总体受灾风险

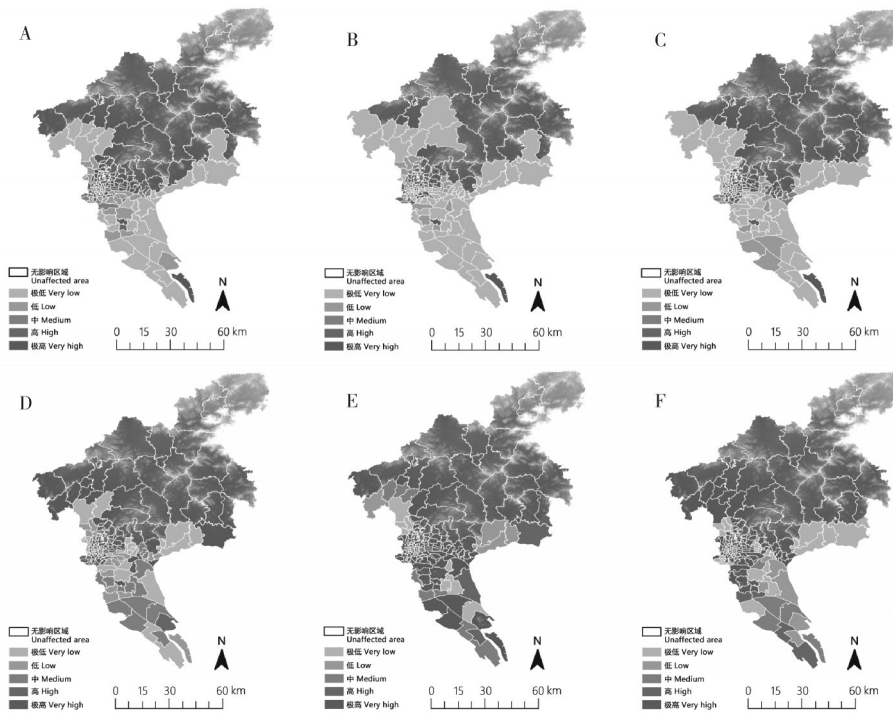
Fig.5 Overall disaster risk of Guangzhou in 2050

在广州市景观的淹没情况和经济损失方面(表3),景观系统受淹面积总计高达约49 773 hm²,因淹没而导致的经济损失总计约6 428亿元。整体受损情况与2030年基本一致,其中,农业景观和公园绿地与湿地景观由于地理位置大多处于临近水系的区域,因此受淹面积仍然最大,分别约为20 047.9、12 993.2 hm²,而经济损失最高的也依然是商业与公共服务景观和工业景观,分别约为2 885.444亿、2 277.981亿元。在景观的脆弱性空间分布方面,从整体上看,2050年脆弱性空间分布基本延续2030年的趋势,但由于淹没范围的扩大,广州中部海珠区的

脆弱性风险有所加剧(图5)。从各类景观系统来看,大多区域的脆弱性程度相较于2030年无明显变化,少数区域的脆弱性程度有所上升,例如广州西北部花都区 and 广州东北部增城区的农业景观脆弱性,以及广州南部番禺区的交通景观脆弱性都明显升高(图6),这主要与海平面上升和风暴潮造成淹没面积和深度的显著增加有关。

2.3 远期(2100年)脆弱性评估

2100年的预测结果显示,珠江口在未来80 a的海平面上升高度可达1.13 m。在海平面上升叠加200年一遇风暴潮的影响下,洪水高度可达4.208 m。



A: 居住区景观 Residential landscape; B: 商业与公共服务景观 Commercial and public service landscape; C: 工业景观 Industrial landscape; D: 交通景观 Transportation landscape; E: 农业景观 Agricultural landscape; F: 公园绿地与湿地景观 Public park and wetland landscape.

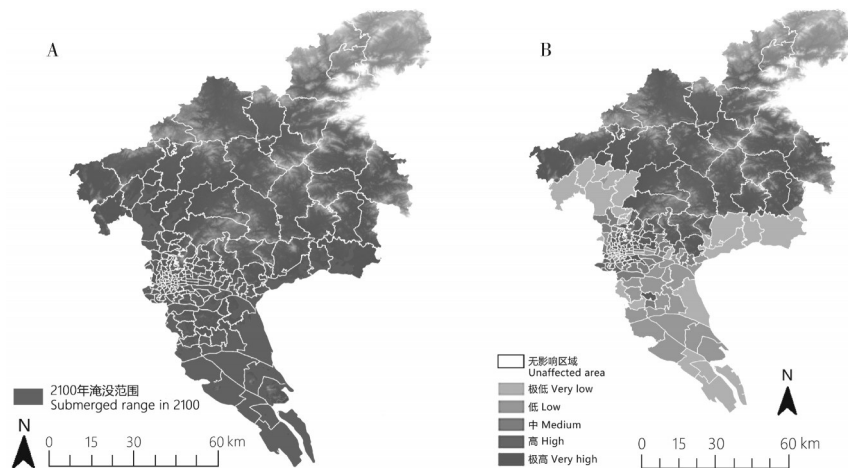
图6 2050年广州市各类景观系统脆弱性空间分布

Fig.6 Spatial distribution of various landscape systems vulnerability of Guangzhou in 2050

至2100年,除了临近珠江水系的低地区域以外,广州市中部和北部的淹没范围也有所增加(图7)。

在广州市景观的淹没情况和经济损失方面(表3),系统受淹总面积约57 957 hm²,经济损失总计高达约8 010亿元。与2030年和2050年受损情况一样,各类景观系统中受淹没面积最大的仍然是农业景观和公园绿地与湿地景观,分别约为

24 461.1、14 060.5 hm²,经济损失最高的依然是商业与公共服务景观和工业景观,分别约为3 468.156亿、3 031.630亿元。在脆弱性空间分布方面,从整体来看,由于淹没范围和深度的增大,广州中部的黄浦区脆弱性风险相较于2050年有所加剧,其他区域无明显变化(图7)。从各类景观系统来看,不同景观的脆弱性区域都有一定程度上的空间扩张,其中商业与



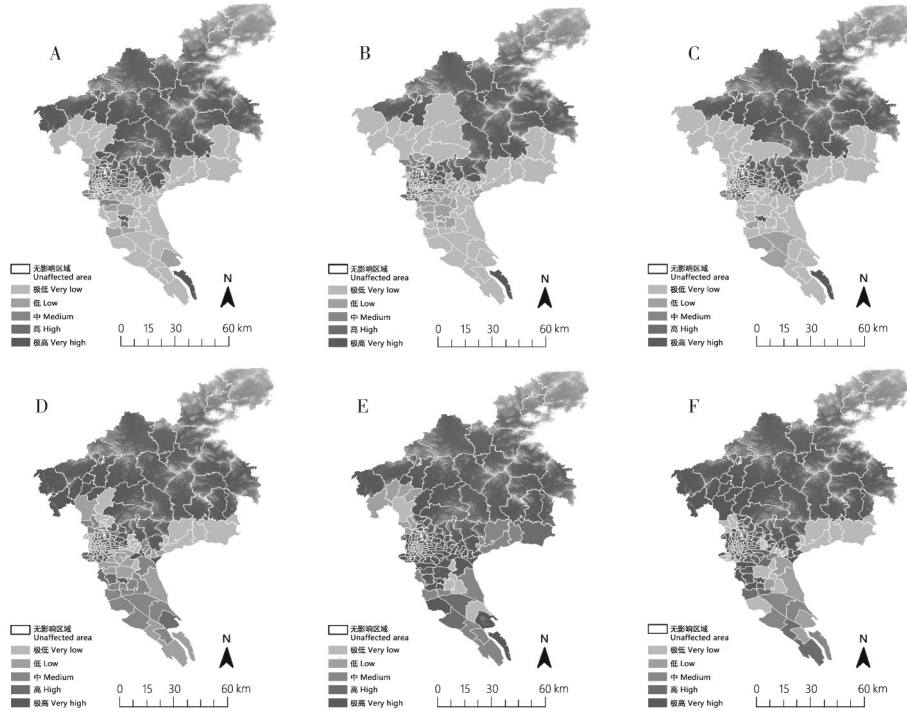
A: 2100年广州市淹没范围 Inundate area of Guangzhou in 2100; B: 2100年广州市总体脆弱性空间分布 Spatial distribution of overall vulnerability of Guangzhou in 2100.

图7 2100年广州市总体受灾风险

Fig.7 Overall disaster risk of Guangzhou in 2100

公共服务景观的脆弱性分布扩大范围最多,广州西北区域的白云区东部和北部,以及广州东部的增城

区东南部都由无影响区域变为低脆弱性区域(图8)。



A: 居住区景观 Residential landscape; B: 商业与公共服务景观 Commercial and public service landscape; C: 工业景观 Industrial landscape; D: 交通景观 Transportation landscape; E: 农业景观 Agricultural landscape; F: 公园绿地与湿地景观 Public park and wetland landscape.

图8 2100年广州市各类景观系统脆弱性空间分布

Fig.8 Spatial distribution of various landscape systems vulnerability of Guangzhou in 2100

3 讨论

全球气候变暖加速了海平面上升,对海岸地区经济、社会和生态环境等造成了严重威胁^[30]。在海平面上升叠加风暴潮风险背景下,本研究针对广州市景观系统的脆弱性评估结果显示:

1)在淹没范围和经济损失方面,从整体来看,近期海平面上升对广州南沙区域的影响严重,但随着中期和远期海平面进一步上升,广州北部为主的内陆区域受淹没范围也逐渐增加。从各类景观系统来看,未来不同情景下受淹没面积最大的始终是农业景观和公园绿地与湿地景观,而经济损失最为严重的是商业与公共服务景观和工业景观。

2)从整体脆弱性空间分布来看,近期海平面上升阶段脆弱性较高的区域主要集中在广州中部的荔湾区、白云区和黄浦区,中期和远期在整体上基本延续近期脆弱性空间分布的特点,但广州中部区域的海珠区和黄浦区脆弱性程度会根据淹没范围和深度的增加而升高。

3)从各类景观系统的脆弱性空间分布来看,近期居住区景观、商业与公共服务景观脆弱性较高的区域主要分布在广州中部的白云区、荔湾区和黄浦区;工业景观、公园绿地与湿地景观的较高脆弱性区域主要分布在广州中部的海珠区和黄浦区以及广州南部的南沙区;交通景观和农业景观脆弱性较高的区域主要集中在广州南部的番禺区和南沙区。同时,在各类景观中,农业景观的较高脆弱性区域最多。在中期和远期海平面上升阶段,整体基本延续近期的脆弱性空间分布特点,但各类景观的脆弱性风险都有不同程度的加剧,其中公园绿地与湿地景观的脆弱性程度变化较为显著,在广州中部的海珠区和黄浦区,以及广州南部的番禺区和南沙区均分布有较高脆弱性的区域。

根据以上评估结果可以看出,未来海平面上升和风暴潮风险对广州景观系统的影响显著,制定有效的海岸灾害应对策略是该地区未来发展的必要性工作。结合当前沿海地区普遍采用的相关策略,本研究基于研究区域的现状条件和评估结果,提出3点

建议来提升应对未来灾害风险的能力:

1)对于农业景观、公园绿地与湿地景观这类淹没面积较大的区域,尤其是沿岸地区的农田、公园和湿地受海水冲刷和侵蚀的破坏风险较大,可以采用防御性策略为主的应对方式。一方面,加强该区域现有的硬性工程防御措施,提高海岸的防护能力;另一方面,在现有工程设施的基础上引入人工沙丘等软性防御设施,形成自然缓冲区,从而避免景观系统遭受海水的侵蚀和冲刷。同时,对于受损的湿地景观及时开展修复和重建工程,并严格控制大规模的湿地围垦。此外,农业景观还可以通过调整农业类型、结构及生产方式以适应未来的环境变化,例如,可以借鉴桑基鱼塘等可循环模式,加强传统农业与水产养殖业的结合,提高景观系统的灾前预防能力;未来还可以通过工程技术手段在海上构建悬挑或漂浮结构的农业种植基础设施,进一步适应新的海岸环境,也在一定程度上带动休闲旅游业的发展。

2)对于处于高密度城区环境的商业与公共服务景观、工业景观、居住区景观以及交通景观,由于这类景观区域人口密度较大、人类活动强度较高,且因淹没而导致的经济损失较为严重,主要采用预防和减小经济损失的适应性策略来应对灾害风险。例如,增加城市排水系统,实施多渠道疏水,以减少洪水的淹没时间和深度;增加应急避灾点,提高景观系统的灾中应急和灾后恢复能力;在建筑物外层使用防水涂料,做好建筑性减灾措施等。

3)此外,对于地势较低、易受海水淹没的居住区、商业区、工厂及交通基础设施等,可以将其迁移至地势较高或远离海岸线的区域,以此限制高风险地区土地的使用,从而减少海岸灾害造成的损失。

然而,由于气候变化和沿海城市景观系统的复杂性与动态性,目前人类对气候变化的认识及其影响下海岸带景观系统响应机制的研究尚有很多不足,从而导致系统的脆弱性评价结果产生一定的局限性和不确定性,这也是目前气候变化背景下海岸灾害风险对沿海城市影响评价中的难点和挑战^[31-33]。本研究建立的海平面上升叠加风暴潮影响下广州城市景观系统脆弱性定量评估的方法仍然基于有限的假设,在一定程度上简化了城市景观系统与海岸灾害动态变化以及复杂的相互作用过程,所得出的结果存在一定的局限性。因此,今后需要更加综合考虑沿海城市景观系统与海岸灾害之间的多

种复杂关系和反馈过程,不断结合更先进的计算机技术以获取更加准确的模拟评估结果,从而提出有效的灾害应对策略,为沿海城市景观系统的韧性规划提供参考。

参考文献 References

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] GRUBESIC T H, MATISZIW T C. A typological framework for categorizing infrastructure vulnerability [J]. *GeoJournal*, 2013, 78(2): 287-301.
- [3] 魏丛亮. 沿海城市热带风暴灾害防范系统运行机制研究: 以深圳市为例[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018. WEI C L. Research on the operating mechanism of tropical storm disaster prevention system in coastal cities [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [4] SUBRINA S, CHOWDHURY F K. Urban dynamics: an undervalued issue for water logging disaster risk management in case of Dhaka City, Bangladesh [J]. *Procedia engineering*, 2018, 212: 801-808.
- [5] LIN T, LIU X F, SONG J C, et al. Urban waterlogging risk assessment based on Internet open data: a case study in China [J]. *Habitat international*, 2018, 71: 88-96.
- [6] 孙阿丽, 石勇, 石纯, 等. 上海市水灾风险分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 94-98. SUN A L, SHI Y, SHI C, et al. Risk analysis of flood disaster in Shanghai municipality [J]. *Journal of natural disasters*, 2011, 20(6): 94-98 (in Chinese with English abstract).
- [7] SHARAAN M, ISKANDER M, UDO K. Coastal adaptation to sea level rise: an overview of Egypt's efforts [J/OL]. *Ocean & coastal management*, 2022, 218: 106024 [2022-09-30]. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.106024>.
- [8] 张华, 韩广轩, 王德, 等. 基于生态工程的海岸带全球变化适应性防护策略[J]. 地球科学进展, 2015, 30(9): 996-1005. ZHANG H, HAN G X, WANG D, et al. Ecological engineering based adaptive coastal defense strategy to global change [J]. *Advances in earth science*, 2015, 30(9): 996-1005 (in Chinese with English abstract).
- [9] 易雨君, 刘奇, 王雪原, 等. 生态海岸防护工程研究进展与展望[J]. 海洋与湖沼, 2022, 53(4): 806-812. YI Y J, LIU Q, WANG X Y, et al. Coastal ecological infrastructure: research progress and prospect [J]. *Oceanologia et limnologia sinica*, 2022, 53(4): 806-812 (in Chinese with English abstract).
- [10] OSLAND M J, GRIFFITH K T, LARRIVIERE J C, et al. Assessing coastal wetland vulnerability to sea-level rise along the northern Gulf of Mexico coast: gaps and opportunities for developing a coordinated regional sampling network [J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12(9): e0183431 [2022-09-30]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183431>.

- org/10.1371/journal.pone.0183431.
- [11] 陈崇贤,夏宇,杨潇豪.广州市南沙区农业区域海平面上升应对策略[J].景观设计学,2020,8(3):10-25.CHEN C X, XIA Y, YANG X H. Resilience strategies to impacts of sea level rise on the agricultural areas in Nansha District of Guangzhou [J]. Landscape architecture frontiers, 2020, 8(3): 10-25 (in Chinese with English abstract).
- [12] 闫白洋.海平面上升叠加风暴潮影响下上海市社会经济脆弱性评价[D].上海:华东师范大学,2016.YAN B Y. State key laboratory of estuarine and coastal research[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王多多.河口岛屿生态脆弱性评价:以崇明岛为例[D].上海:华东师范大学,2018.WANG D D. Assessment of ecological vulnerability in estuarine island[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [14] 冯伟忠,张娟,游大伟,等.被高估的“海平面上升对珠江口风暴潮灾害评估影响”的原因探析[J].热带地理,2013,33(5):640-645.FENG W Z, ZHANG J, YOU D W, et al. A discussion on reasons for impact of over-estimated sea level rise on storm surge disaster forecasting of the Pearl River Estuary[J]. Tropical geography, 2013, 33(5): 640-645 (in Chinese with English abstract).
- [15] 游大伟,汤超莲,陈特固,等.近百年广东沿海海平面变化趋势[J].热带地理,2012,32(1):1-5.YOU D W, TANG C L, CHEN T G, et al. Sea level changes along Guangdong coast over the last century[J]. Tropical geography, 2012, 32(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [16] SIMS R. Climate change 2014: synthesis report [R]. Geneva, Switzerland: [s.n.], 2014.
- [17] 黄镇国,张伟强,陈奇礼,等.海平面上升对广东沿海工程设计参数的影响[J].地理科学,2003,23(1):39-41.HUANG Z G, ZHANG W Q, CHEN Q L, et al. Impacts of sea level rise on design parameters of coastal engineering in Guangdong Province[J]. Scientia geographica sinica, 2003, 23(1): 39-41 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李国胜,李阔.广东省中部沿海地区风暴潮灾害风险综合评价[J].西南大学学报(自然科学版),2013,35(10):1-9.LI G S, LI K. Integrated assessment on risk of storm surges in the central coastal area of Guangdong Province [J]. Journal of Southwest University (natural science edition), 2013, 35(10): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [19] HUIZINGA J, MOELHANS DE M, SZEWCZYK W. Global flood depth-damage functions: methodology and the database with guidelines [R/OL]. Luxembourg: Joint Research Centre, 2017 [2022-09-30]. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC105688>.
- [20] IPCC. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [21] GALLOPÍN G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity [J]. Global environmental change, 2006, 16(3): 293-303.
- [22] 李鹤,张平宇,程叶青.脆弱性的概念及其评价方法[J].地理科学进展,2008(2):18-25. LI H, ZHANG P Y, CHENG Y Q. Concepts and assessment methods of vulnerability [J]. Progress in geography, 2008(2): 18-25 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈佳,杨新军,王子侨,等.乡村旅游社会-生态系统脆弱性及影响机理:基于秦岭景区农户调查数据的分析[J].旅游学刊,2015,30(3):64-75.CHEN J, YANG X J, WANG Z Q, et al. Vulnerability and influence mechanisms of rural tourism socio-ecological systems: a household survey in China's Qinling Mountain area [J]. Tourism tribune, 2015, 30(3): 64-75 (in Chinese with English abstract).
- [24] 施瑶,李嘉艺,高娜,等.气候变化背景下北京浅山区社会-生态系统脆弱性评估[J].北京林业大学学报,2020,42(4):132-141.SHI Y, LI J Y, GAO N, et al. Assessment on socio-ecosystem vulnerability in shallow mountain area of Beijing under climate change background [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(4): 132-141 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李莎莎.海平面上升影响下广西海岸带红树林生态系统脆弱性评估[D].上海:华东师范大学,2015.LI S S. Vulnerability assessment of the coastal mangrove ecosystems in Guangxi, China to sea-level rise [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [26] CUTTER S L, ASH K D, EMRICH C T. The geographies of community disaster resilience [J]. Global environmental change, 2014, 29: 65-77.
- [27] HUANG Y F, LI F Y, BAI X M, et al. Comparing vulnerability of coastal communities to land use change: analytical framework and a case study in China [J]. Environmental science & policy, 2012, 23: 133-143.
- [28] CASADI O, TARABUSI E, GUARINI G. An unbalance adjustment method for development indicators [J]. Social indicators research, 2013, 112(1): 19-45.
- [29] 李乃强,徐贵阳.基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析[J].测绘通报,2020(4):106-110,156.LI N Q, XU G Y. Grid analysis of land use based on natural breaks (jenks) classification [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2020(4): 106-110, 156 (in Chinese with English abstract).
- [30] NICHOLLS R J. Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding [J]. Physics and chemistry of the earth, parts A/B/C, 2002, 27(32/33/34): 1455-1466.
- [31] HALLEGATTE S, RANGER N, MESTRE O, et al. Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen [J]. Climatic change, 2011, 104(1): 113-137.
- [32] SAHIN O, MOHAMED S. Coastal vulnerability to sea-level rise: a spatial-temporal assessment framework [J]. Natural haz-

ards, 2014, 70(1):395-414.
[33] NICHOLLS R J, CAZENAVE A. Sea-level rise and its im-

act on coastal zones [J]. Science, 2010, 328 (5985) : 1517-1520.

Vulnerability assessment of urban landscape systems under risk of sea level rise superimposed with storm surge : a case study of Guangzhou

CHEN Chongxian, FANG Yan, LIU Jingyi

College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Abstract In the context of global climate change and sea level rise, coastal disasters will have a significant impact on the landscape and socio-economic development of coastal cities. Guangzhou, a coastal city in the Pearl River Delta, was used to construct a “sensitivity adaptability” vulnerability assessment framework based on the land use and socio-economic data in the area. The vulnerability characteristics of urban landscape system in Guangzhou under three different scenarios of sea level rise superimposed with storm surge risk in the short-term (2030), the medium-term (2050) and the long-term (2100) were assessed. The results showed that the agricultural landscape, park green space, and wetland landscape had the largest inundation area under different risk scenarios in the future, while the industrial landscape and commercial and public service landscape had the most severe economic losses from the perspective of inundation scope and economic losses. The areas with high landscape vulnerability in the short-term were mainly concentrated in Liwan District, Baiyun District and Huangpu District in the central part of Guangzhou from the perspective of the overall spatial distribution of vulnerability. In the medium and long term, the risk of landscape vulnerability in Haizhu District in the central part of Guangzhou gradually increased. From the perspective of spatial distribution of various landscape vulnerability, the most vulnerable areas of agricultural landscape in the short-term are Panyu District and Nansha District in southern Guangzhou compared with other landscapes including the transportation landscape and residential landscape. In the mid-term and long-term stages, the vulnerability risks of various landscapes have increased to varying degrees, with significant changes in the vulnerability levels of park green spaces and wetland landscapes. This article systematically assessed the impact of sea level rise combined with storm surge on different types of urban landscapes in Guangzhou. It will provide decision-making reference for the risk management and prevention of coastal disasters in the future, and the construction of urban resilience in Guangzhou.

Keywords sea level rise; storm surge; urban landscape system; vulnerability assessment; climate change; extreme climate; Pearl River Delta

(责任编辑:陆文昌)