DOI:10.14188/j.2095-6045.20250456

文章编号:2095-6045(2026)05-0048-12

我国沿海地区海平面上升风险评估及对策研究

黄经南[1,2]　邹翔林[1]　朱志宏[3]　谢　东[1]

1 武汉大学城市设计学院,湖北 武汉,430072

2 湖北省人居环境工程技术研究中心,湖北 武汉,430072

3 广东省城乡规划设计研究院科技集团股份有限公司,广东 广州,510315

Risk Analysis and Countermeasure Research on Sea Level Rise in China's Coastal Areas

HUANG Jingnan[1,2]　*ZOU Xianglin*[1]　*ZHU Zhihong*[3]　*XIE Dong*[1]

1 School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 Hubei Habitat Engineering and Technology Research Center, Wuhan 430072, China

3 Guangdong Urban and Rural Planning and Design Institute Technology Group Co. Ltd., Guangzhou 510315, China

摘　要:海平面不断上升已是不争的事实。沿海地区是我国社会经济发展的重点区域,在海平面上升的背景下将面临更大的危险,但当前对于这一地区缺乏系统的风险评估及应对。本研究以中国沿海地区为研究区域,采取基于数字高程模型(digital elevation model,DEM)的高程淹没法,从沿海城市群、沿海省份、沿海城市、沿海区县四个空间尺度分析各评估单元的风险情景变化趋势及临界点,并选取重要情景明晰风险要素特征及评估风险等级。结果表明:①6 m为沿海地区风险提升的关键临界点;②沿海城市群中,长三角城市群、京津冀城市群风险较高;③沿海省份中,广东、河北、天津、山东、江苏和浙江风险较高;④沿海城市中,高风险城市集中于渤海湾和莱州湾地区、江苏沿海;⑤沿海区县中,大多数区县处于较低的风险水平,主要为福建、浙江、海南等沿海区县。结合上述评估结果,最后提出应对挑战的工程韧性、生态韧性、演进韧性和治理韧性的规划策略。

关键词:海平面上升;沿海地区;多维尺度;风险;韧性理论;规划对策

中图分类号:TU984;P731

文献标志码:A

Abstract: It is an indisputable fact that global sea levels are rising continuously. Coastal areas are the key areas of China's social and economic development, and will face greater dangers under the background of sea level rise. However, there is a lack of systematic assessment and response to this slow and long-term challenge. Taking China's coastal regions as the study area, this paper adopts the elevation inundation method based on DEM to analyze the risk scenario change trend and critical point of each assessment unit from four spatial scales: coastal city clusters, coastal provinces, coastal cities, and coastal districts and counties. Key scenarios are selected to clarify the characteristics of risk factors and assess risk levels. The findings reveal that: (1) the 6-meter sea-level rise scenario is the critical tipping point scenario for increased risk in coastal regions; (2) at the coastal city clusters level, the Yangtze River Delta and Beijing-Tianjin-Hebei city cluster exhibit higher risks; (3) at coastal provinces level, Guangdong, Hebei, Tianjin, Shandong, Jiangsu, and Zhejiang provinces face greater vulnerabilities; (4) at coastal cities level, high-risk cities concentrate in the Bohai Bay, Laizhou Bay, and Jiangsu coastal regions; (5) at coastal districts and counties level, most districts and counties are at moderate to low risk levels, primarily in Fujian, Zhejiang, and Hainan coastal districts and counties. Based on these assessments, this study proposes integrated planning strategies to enhance resilience through engineering, ecological, evolutionary, and governance dimensions.

Key words: sea level rise; coastal areas; multi-scale dimensions; risk; resilience theory; planning countermeasures

自工业革命以来,全球气候变暖导致海平面上升已是不争的事实。2023年3月,IPCC(政府间气候变化专门委员会)第六次评估报告(AR6)指出:从工业化前时期到现在的人为排放造成的变暖将持续数百至数千年,全球平均海平面预计到2100年在变

引用格式:黄经南,邹翔林,朱志宏,等. 我国沿海地区海平面上升风险评估及对策研究[J]. 测绘地理信息,2026,51(5):48-59(HUANG Jingnan, ZOU Xianglin, ZHU Zhihong, et al. Risk Analysis and Countermeasure Research on Sea Level Rise in China's Coastal Areas[J]. Journal of Geomatics,2026,51(5):48-59)

基金项目:国家社会科学基金(21BGL252)。

暖 1.5 ℃情景下上升 0.7 m,在变暖 2 ℃情景下上升 0.9 m[1]。海平面上升严重威胁自然生态与社会经济的可持续发展,对全球沿海地区的影响最为直接,也最为巨大。全球沿海地区普遍地势低平且人口、经济集中。海平面上升加剧了风暴潮、海水侵袭、海岸侵蚀等灾害,严重影响沿海地区农业耕作、工业生产和居民生活。

海平面上升对于我国沿海地区的影响也不容忽视。一方面,近 40 年来,中国沿海海平面呈加速上升趋势。《2023 年中国海平面公报》显示,1993 年~2023 年,我国沿海海平面平均上升速率为每年 4.0 mm,高于同时段全球均值[2]。另一方面,沿海地区是改革开放以来我国经济社会发展的重心。据统计,东部沿海地区的承载人口占全国的比值为 40%,创造的经济生产总值占 52%[3]。同时,我国最重要的城市基本都在沿海地区,三大国家级城市群,即京津冀、长三角、珠三角城市群也都位于这一地区。

在海平面上升的大背景下,我国沿海地区面临的洪涝、极端气候状况、工农业损失等风险也在不断加大。因此,准确识别全球海平面上升对我国沿海地区影响的主要区域,评估其正面及负面影响,并研究应对策略,对我国沿海地区乃至全国持续、高效、协调发展至关重要。

1　国内外研究综述

海平面上升是一个综合的过程。除了全球变暖导致的海平面的绝对上升,台风风暴潮等进一步抬高了海水平面,导致极值水位不断出现,加大了致灾程度[4]。所谓极值水位是指海平面上升能够达到的最高水位。事实上,极值水位往往不会以单一的形式出现,而是由多种因素如海平面上升、暴雨、风暴潮、地表沉降和天文大潮共同作用的结果[5]。有证据表明,全球气候变暖引起海水升温,由此导致极端气候如台风、热带气旋等产生的机会增加,沿海地区风暴潮导致的极值水位发生频率和强度也因此大幅增加[6]。尽管过去 40 年间,我国海平面累计上升了 13 cm,但由于上述极端天气状况的频发,我国北方沿海地区的极值水位普遍出现 6 m 左右的纪录,而南方地区包括上海、浙江、福建等地更是出现了 10 m 左右的极值水位。可以说,极值水位在我国沿海地区的频繁出现已经给这一地区的社会经济发展和国土安全带来了巨大挑战。但是目前,海平面极值水位的研究侧重于收集沿海地区历年的潮位高度记录,统计分析其中出现的极值水位,计算不同极值水位出现的重现期,并结合气候变化预测海平面可能上升的情况,对于海平面极值水位下,我国沿海地区的所受风险则缺乏系统的评估。

海平面上升对我国沿海地区的影响已有相当的研究。有学者评估了海平面上升对中国沿海低洼地区的人口、经济和土地利用的影响[7]。研究表明,珠江三角洲地区、长江三角洲和苏北沿岸地区以及黄河三角洲、渤海湾和莱州湾地区是中国沿海主要脆弱区。还有学者预测,至 2050 年,沿海部分区域相对海平面的上升幅度可达 500~900 mm,部分城市的土地将被淹没[8]。当前,海平面上升对我国沿海地区的影响研究多为定性的描述,侧重于宏观社会经济影响的预测和总结,有限的定量研究集中在评估潮水上涨造成的淹没损失,而对于极值水位下海平面上升造成的损失缺乏精确的评估,对于沿海地区社会经济发展的重点,即城市及城市群的关注也不够。

为应对海平面上升,各个国家纷纷制定相应的规划策略。荷兰等国家的研究侧重于应对绝对和相对海平面上升,通过制定“水环境评估”政策,将水议题和洪涝风险纳入空间规划的编制过程,约束、协调和指导规划方案制定。美国的相关应对措施更多是从极端海平面上升的角度出发。如加州自 2009 年开始先后制定《气候适应战略》[9]和多版战略进展报告,旨在提供未来时间节点的海平面上升估值范围,以应对海平面上升和其他影响;波士顿根据多年来海平面上升的研究,发布了《应对海水上升》计划,并在此基础上制定更为全面的《波士顿气候变化应对策略》[10]。新西兰考虑城市发展、气候变化、风险资产变动等因素,根据一系列未来情景“测试”应对气候变化的措施,制定相互关联的途径,在既定的触发点或决策点发生变化时,基于适应目标和风险评估结果确定适应性行动,协调交通、土地利用、海岸工程等,制定多个短期行动和长期选择[11-13]。新加坡成立国家气候委员会,负责协调并统筹城市建设、环境、基础设施等多个部门,设立专门的灾害风险研究所,提出风险评估、保护措施与适应措施等策略。

国内现有与海平面上升相关的规划策略集中于政府宏观规划指导和学界理论探索两方面。在政府宏观规划指导方面,目前尚未出台专项的政策和规划文件,而是把海平面上升归属于气候变化的影响结果之一,基于气候韧性视角在相关规划编制中提出建议。由自然资源部负责开展年度全国海平面变化监测、影响调查与评估,提出强化海岸防护以及加强适应性规划等措施[2]。2020 年编制《国家适应气候变化战略 2035》,建议完善海洋灾害观测预警与评估体系,提升沿海地区及沿岸地区防灾御灾能力,加

强沿海生态系统保护修复，持续改善海洋生态环境质量，以构建适应气候变化的国土空间[14]。在学界理论探索方面，建议在沿海城市的规划实践中，将海平面上升作为重要因素来考虑和纳入各个层面的规划决策中。借鉴动态适应性政策路径，考虑到海平面上升的难以预测性，引入新的理论、技术，完善现有规划方法[15]。但综合来看，对于海平面上升这一长期而缓慢的挑战，我国沿海地区尚不明确可能导致重大危害的转折点或者触发点，也因此缺乏相应的策略。

近年来我国形成了建设“海绵城市”的热潮。“海绵城市”是增强城市韧性，使城市从灾害中快速恢复的能力。当前，正在进行的国土空间规划改革也强调韧性、可持续和安全的价值导向，提高城市风险响应和适应能力。但“海绵城市”和“韧性城市”均强调以工程性措施应对为主，往往缺乏系统的应对。对于沿海城市，采用这一策略，可能使其在未来面临更多的风险。这是因为，在海平面上升的背景下，尽管滨海城市可以通过修建堤坝等方式抵御海洋灾害的破坏，但也间接推动形成了增加更多的近岸经济布局和城镇建设的开发模式，使之远期隐含了极端状况出现时的更大风险。因此，有必要反思当前我国沿海城市应对自然灾害，包括海平面上升带来的一系列灾害所采取的“防御型”策略，形成新的“适应型”，即适应海平面上升的长远变化的规划策略。

2 沿海地区海平面上升风险分析思路及方法

本文以海平面上升为分析背景，不同尺度的沿海地区为分析对象，基于不同情景极值水位模拟海平面上升的过程，并系统分析海平面上升对各级城市带来的风险，最后根据不同韧性理念提出对应的规划策略。

2.1 明确风险分析范围

海平面上升极值水位致灾的影响范围是海水可能淹没的近岸陆域空间范围，由海水倒灌的积水深度和广度两个维度构成。

就积水深度而言，从海平面上升预测值来看，IPCC AR6报告指明全球绝对海平面上升高概率的上升值的上限为1.88 m，低概率的上限为5 m[1]。IPCC AR5报告中将高程10 m以下的沿海土地定义为沿海低地，并指出高程10 m以下的沿海土地是海平面上升的关键和高度敏感区域[16]。而根据我国过去40年间的观测结果，即使在考虑极端气候的状况下，海平面极值水位也多数位于10 m以下[2]。在世界范围内，沿海低地虽然仅占据土地面积的2%，但却承载了10%的世界人口和13%的世界城市人口，而中国沿海高程10 m以下的面积约占全国面积的2%，承载了总人口的11%[17]。由此可见，海平面极值水位10 m不仅是目前预测研究结论的最高可能范围，也是威胁我国及全球各个国家地区人口和城市区域的关键值。

对于广度则是由调查目标与技术条件共同决定。依据《全国海岸带和海涂资源综合调查》和《海洋灾害承灾体调查指南》，沿海地区海洋灾害的陆域分析范围与狭义海岸带一致，即从海岸线向陆侧延伸10 km(见图1)[18,19]。随着与海岸线距离的增加，中国沿海低地的面积和人口数量逐渐减少。尤其是在距离海岸线10 km以内的地区，沿海低地的面积和人口数量均接近全国低地总面积和总人口的四分之一[20]。因此，对中国而言，低地面积和人口都相对集中在狭义海岸带范围内。

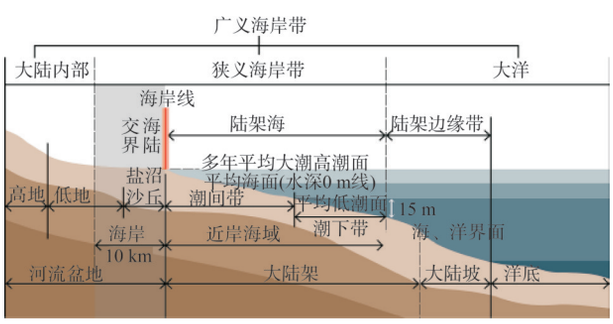


图1 影响范围广度示意

Fig. 1 Illustration of the Breadth of Influence Range

因此，本文依据海平面上升预测值和沿海地区的实际情况，将影响范围界定为海岸线向陆域缓冲10 km且高程在10 m以下的空间范围，以评估海平面上升对我国沿海城市和土地密集区域的极值水位淹没风险。

灾害的评估范围基于行政单位统计分析。由于地区的自然环境和社会经济发展差异较大，对于风险的敏感性和应对策略不完全一致，因此本文评估单元的尺度为“城市群、省级、市级和区县级”层面，满足不同层级的管理制定管控体系和发展策略差异化的措施需求。

2.2 风险情景模拟方法

本文采取基于DEM的高程淹没法，将极值水位积水深度作为风险分析上限情景，模拟不同的海平面上升情景对沿海地区的影响，进而预测可能发生的灾害情况[21]。即借助Arc GIS空间分析工具，通

过采集、整理和分析相关的空间数据、海洋数据,在高程数据基础上叠加土地覆盖数据,探究在不考虑沿海地区防潮堤等防灾基础设施的情况下,不同水位高程下沿海地区陆域部分的海水侵袭状况,包括面积、增速,并描述情景变化对评估范围风险的威胁趋势。

其中行政区划数据来自国家地球系统科学数据中心提供的全国县级行政区划矢量数据集[22]。高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台提供的GDEMV3数据[23]。海岸线数据来自全球变化科学研究数据出版系统提供的基于Google Earth遥感影像研发的全球海陆岸线数据集,本研究采用空间分辨率30米的海陆(岛)岸线数据[24,25]。土地覆盖数据来自Globeland30 2020版[26,27]。城区人口数据来自《中国城市建设统计年鉴2020》[28],用以划分不同城市规模的等级。

2.3　风险指数评估方法

在IPCC的气候变化相关研究中,通常将风险定义为危险性、暴露性和脆弱性的乘积,即:风险=危险性×暴露性×脆弱性。本研究依据风险构成要素的定义及其对沿海地区产生的因果关系,参考IPCC风险评估模型,构建海平面上升背景下的沿海地区风险评估模型。

首先,从危险性、暴露性和脆弱性三方面构建评价指标体系,计算在相同海平面上升情景下各评估单元的相对风险指数;其次,通过对各项指标的加权平均得到综合分析指数,根据计算的风险值大小,设置风险区划标准;最后,将风险值归类,通过界定风险等级形成风险区划,反映各评估单元的总体风险水平和等级(见表1)。

表1　沿海地区风险评估模型计算方法

Tab.1　Calculation Method for Risk Assessment Models in Coastal Areas

评估指数	计算公式	公式描述
沿海地区评估单元风险综合指数	$RI=a*HI+b*EI+c*VI$	HI、EI、VI分别为空间危险性指数、空间暴露性指数以及空间脆弱性指数,a、b、c为对应的权重系数,总和为1
空间危险性指数	$HI=\mathrm{N}*\frac{S_i-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}}+1$	N为量化参数,将参数N取值为4,S_i为i评估单元的淹没面积,$S_{\min}$和$S_{\max}$表示所有评估单元的沿海地区最小淹没面积和最大淹没面积
空间暴露性指数	$EI=N*\frac{NI-NI_{\min}}{NI_{\max}-NI_{\min}}+1$ $NI=\frac{S_i}{M_i}$	M_i为评估单元i的缓冲区面积,NI表示评估单元i的暴露度,$NI_{\min}$和$NI_{\max}$表示所有评估单元的最小暴露度和最大暴露度
空间脆弱性指数	$VI=N*\frac{GI-GI_{\min}}{GI_{\max}-GI_{\min}}+1$ $GI=\sum_{k=1}^{n}G_k\times\frac{S_{ik}}{S_i}$	n为土地类型总数,G_k为不同土地类型的脆弱度,S_{ik}为评估单元i中土地类型k的面积,GI表示评估单元i的脆弱度,$GI_{\min}$和$GI_{\max}$表示所有评估单元的最小脆弱度和最大脆弱度

3　中国沿海地区海平面上升风险分析

3.1　沿海地区分析范围

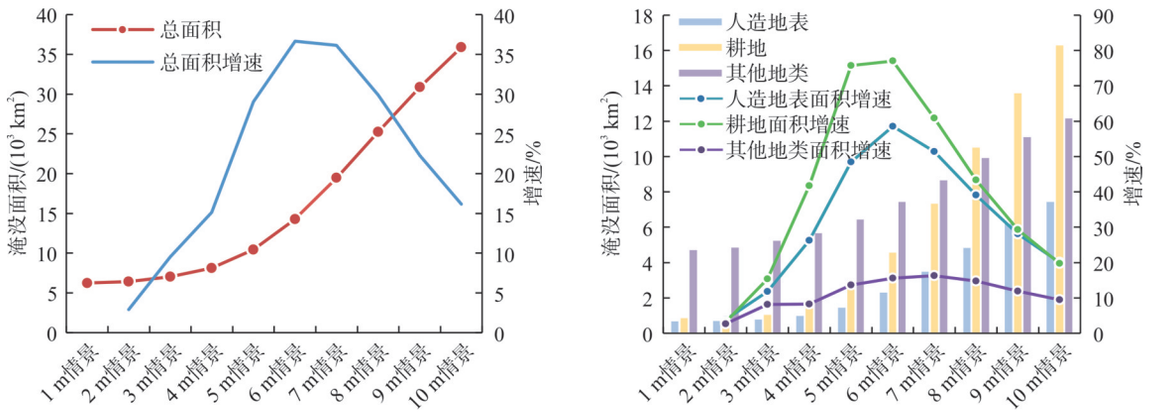
以海岸线向内陆一侧缓冲10 km得到海岸线陆域缓冲区,提取缓冲区内高程10 m以下区域作为海平面上升的影响范围,总面积为35 885 km^2。影响范围内土地覆盖类型以耕地、人造地表和水体为主。依据目前的行政区划,选取拥有海岸线的沿海城市群、沿海省份、沿海城市、沿海区县四个空间尺度作为评估范围,共计7个城市群级评估单元、11个省级评估单元、53个市级评估单元和216个县级评估单元。其中城市群级评估单元包括辽中南城市群、京津冀城市群、山东半岛城市群、长三角城市群、粤闽浙沿海城市群、珠三角城市群和北部湾城市群,省级评估单元包括辽宁省、河北省、天津市、山东省、江苏省、上海市、浙江省、福建省、广东省、广西壮族自治区和海南省。

3.2　沿海地区淹没风险情景模拟

本文以1 m为分析变量,分别模拟10种(1 m,2 m,3 m,…,10 m)海水上升情景,以区间极值(1 m、10 m)情景描述总体变化特性,综合所有情景结果进行分析。

从极值情景面积来看,1～10 m情景下,沿海地区淹没的陆域面积逐渐增加。从增速来看,沿海地区的总面积增速呈现先增加后减少趋势,6 m海平面水位淹没沿海地区面积增速最大。由于分析范围的空间尺度较大,且Globeland30 2020版用地分类较多,不宜局限于具体的土地覆盖类型,因此依据地类的主导功能进行归类,划分为人造地表、耕地和其他地类三大类。6 m海平面水位淹没面积增速最大时对应的人造地表、耕地和其他地类淹没面积增速分别为58.55%、77.03%、15.58%,分别是同比的

第一、第一和第二增速，成为沿海地区风险突变的关键临界点情景（见图 2）。



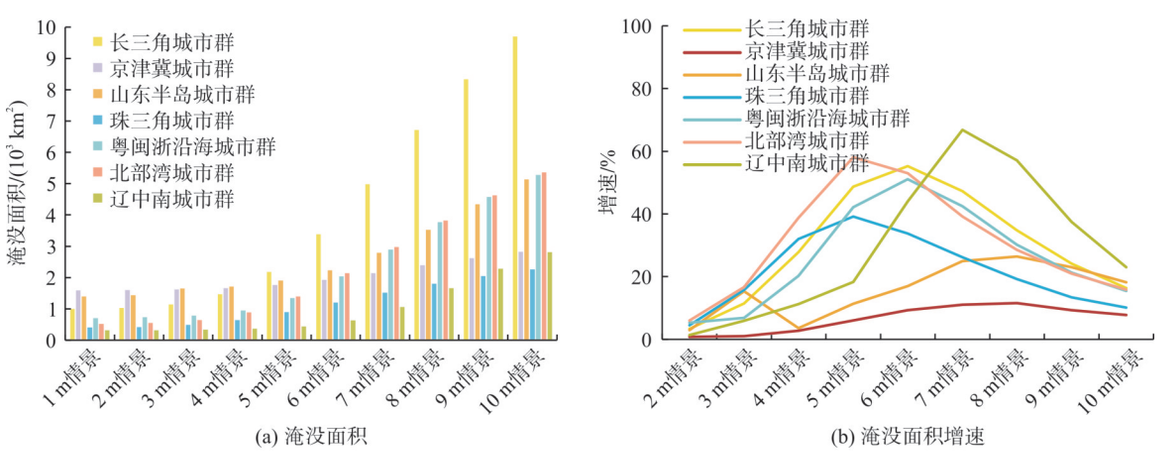
(a) 沿海地区淹没面积及增速　　(b) 各地类淹没面积及增速

图 2　不同情景下沿海地区和各地类淹没面积及增速

Fig. 2　The Inundation Area and Growth Rate of Coastal Regions and Various Areas Under Different Scenarios

3.2.1　城市群级评估单元情景模拟

从极值情景面积来看，在 1 m 极值水位情景时，京津冀城市群沿海地区淹没面积最多；在 10 m 时长三角城市群淹没面积最多。从增速来看，总体呈现先增后减趋势，各城市群变化差异较大。辽中南城市群增速变化最大；北部湾城市群、长三角城市群、粤闽浙沿海城市群整体变化趋势相似；珠三角城市群在 5 m 情景时增速达到最大；山东半岛城市群增速变化在 3 m 和 8 m 时出现两次波峰；京津冀城市群整体增速较为缓慢，8 m 时达到最大增速（见图 3）。



(a) 淹没面积　　(b) 淹没面积增速

图 3　不同情景下沿海城市群沿海地区淹没面积及增速

Fig. 3　The Submerged Area and Growth Rate of Coastal Regions in Coastal Urban Agglomerations Under Different Scenarios

3.2.2　省级评估单元情景模拟

从极值情景面积来看，在 1 m 极值水位情景时，山东、河北、广东三省沿海地区淹没面积较多；在 10 m 极值水位情景时，广东、江苏、山东三省沿海地区淹没面积较多。总的来说，极值情景下，广东省淹没面积增量最多。

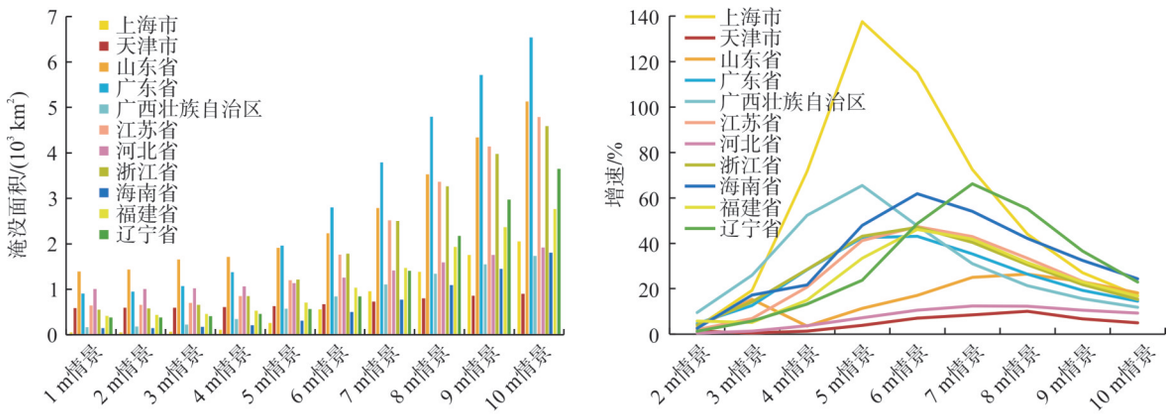
从增速来看，总体呈现先增后减趋势，各省变化差异明显。上海在 5 m 情景下达到最大增速，福建、江苏、浙江、广东四省风险临界点都是 6 m，天津和河北分别在 8 m、7 m 达到风险临界点（见图 4）。

3.2.3　市级评估单元情景模拟

从极值情景面积来看，1 m 极值水位情景时，唐山市淹没面积最多，日照市最少；10 m 极值水位情景时，南通市最多，东莞市淹没面积最少。综合来看，南通市淹没的沿海地区面积增量最大（见表 2）。

从增速来看，2 m 情景下各城市增速差异变化不大；5 m、6 m、7 m 情景下各城市整体增速变大，且城市间差异明显；8 m 情景下增速进一步放缓，大部分城市增速不超过 50%；9 m、10 m 情景相似，各城市间差异不大，所有城市增速均小于 50%（见图 5）。

从临界点情况及对应增速来看，5 m、6 m、7 m 达到临界点的城市较多，分别有 14 个、17 个、15 个。从临界点对应的增速来看，最大增速为日照市，最小增速为滨州市。



(a) 淹没面积　　(b) 淹没面积增速

图 4　不同情景下沿海省份沿海地区淹没面积及增速

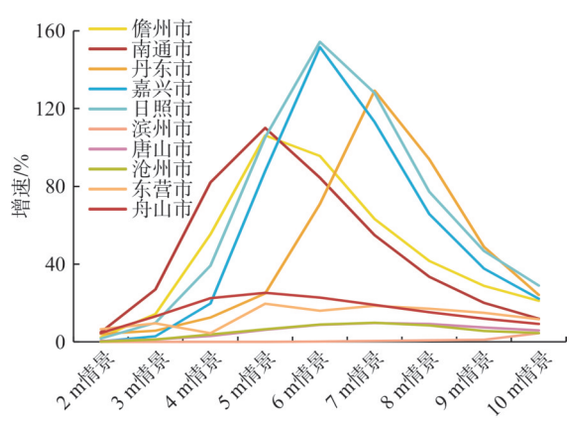
Fig. 4　The Submerged Area and Growth Rate of Coastal Regions in Coastal Provinces under Different Scenarios

表 2　沿海城市极值情景下淹没面积、临界点高程及对应增速

Tab. 2　Submerged Area under Extreme Scenarios, Critical Point Elevation and Corresponding Growth Rate in Coastal Cities

地区	1 m情景/hm^2	10 m情景/hm^2	临界点情景/m	对应增速/%
日照市	402.30	24 957.90	6	154.35
唐山市	70 550.91	116 313.66	7	9.67
东莞市	2 382.57	15 402.78	5	45.91
南通市	7 805.97	203 708.61	5	110.03
	26 288.82	64 334.79	3(1个)	—
	18 339.48	122 499	4(2个)	—
其他沿海城市(48个)	116 057.88	682 925.85	5(12个)	—
	91 283.67	818 495.82	6(16个)	—
	114 702.30	814 089.51	7(14个)	—
	62 601.30	273 745.89	8(3个)	—

注:选取典型城市单列,剩余城市汇总为“其他沿海城市”



注:为简化图表,选取增速变化特征差异化城市对比展示

图 5　不同情景下沿海城市淹没面积增速

Fig. 5　The Growth Rate of Submerged Area in Coastal Cities Under Different Scenarios

3.2.4　县级评估单元情景模拟

从极值情景的面积来看,1 m极值水位情景时,天津滨海新区淹没面积最多。10 m极值水位情景时,上海崇明区淹没面积最多,深圳罗湖区淹没面积最少(见表 3)。

从增速来看,2 m情景下各区县增速差异变化不大;3 m情景下除昌江黎族自治县、寒亭区、奉贤区等少数区县超过50%,其余区县增速差异较小;4 m情景下各区县的增速差距拉开态势初显;5 m、6 m、7 m、8 m情景下各区县整体增速变大,并且区县间差异明显;8 m、9 m情景下增速开始放缓,整体差异减少,大部分城市增速不超过50%;10 m情景下各区县间增速差异不大(见图 6)。

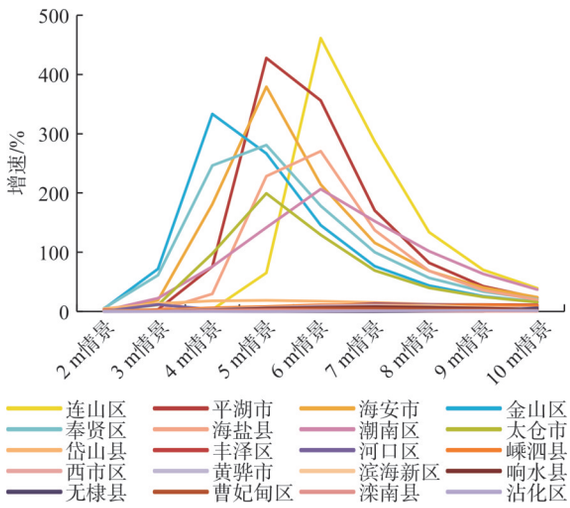
从临界点情况来看,5 m、6 m、7 m达到临界点的区县数量较多,分别有47个、71个、57个。从临界点对应的增速来看,最大增速为辽宁丹东市振兴区,最小增速为山东滨州市沾化区。

表 3　沿海区县极值情景下淹没面积、临界点高程及对应增速

Tab. 3　Submerged Area Under Extreme Scenarios, Critical Point Elevation and Corresponding Growth Rate in Coastal Counties and Districts

地区	1 m情景/hm^2	10 m情景/hm^2	临界点情景/m	对应增速/%
滨海新区	58 578.93	89 852.49	8	10.08
罗湖区	3.51	145.80	8	160.43
崇明区	2 518.47	101 717.55	5	146.70
沾化区	14 206.50	15 121.53	9	1.92
振兴区	1.17	3 578.94	6	1 508.20
	7 629.48	20 241.45	2(2个)	—
	15 687.90	67 306.41	3(4个)	—
	19 722.42	202 443.93	4(10个)	—
	86 324.31	912 642.84	5(46个)	—
其他沿海区县(211个)	96 578.01	895 157.19	6(70个)	—
	230 954.31	999 988.38	7(57个)	—
	39 276.72	163 776.42	8(16个)	—
	10 352.52	28 410.66	9(4个)	—
	36 297.99	48 623.31	10(2个)	—

注:选取典型区县单列,剩余区县汇总为“其他沿海区县”



注:为简化图表,选取增速变化特征差异化区县对比展示

图 6 不同情景下沿海区县淹没面积增速

Fig. 6 The Growth Rate of Submerged Area in Coastal Counties and Districts Under Different Scenarios

3.2.5 沿海地区风险评估模型参数确定

从时间尺度看,IPCC 预测到 2100 年,绝对海平面有可能上升至 5 m,叠加海平面上升、风暴潮、地表沉降等的影响,沿海区域海平面更可能上升超过 5 m。在未来的较长时间跨度内,海平面上升 6 m 情景尽管发生概率较低,但是不能排除。从情景分析结果看,6 m 情景是各层级评估单元风险值的集中点或临界点,即极值水位 6 m 左右,我国沿海地区开始遭受重大损失。因此,选取 6 m 作为风险评估值,既可作为所有评估单元在空间规划的远期目标中制定初始适应规划的基线,也可以满足大部分评估单元采取措施管理灾难性低频事件的实际需求。

其次是确定土地类型的脆弱度。《海洋灾害风险评估和区划技术导则》对土地利用现状将不同地类的脆弱性等级进行了划分[29]。依据本研究所选用土地数据的地类划分结果,参考导则和相关研究[21, 30],将沿海地区内人造地表、耕地和其余地类的脆弱度由高到低分别设为 4、2、1。

最后是对评估要素赋予权重。一般认为,对于沿海地区而言,危险性是风险的根源和基础,暴露性和脆弱性都是受危险性的影响而产生的,在危险性基础上发挥作用[31]。沿海地区危险性是本体性因素决定,即地理区位和高程的相对固定性是沿海地区陆域是否被淹没及淹没面积多少的决定因素。因此确定危险性权重为 0.5。暴露性和脆弱性具有动态性质,随风险源、不同的时间和空间尺度而变化,并取决于社会经济发展和管理因素。从风险形成的层次结构来看,脆弱性是在危险性和暴露性已经确定的基础上,对风险结果的进一步修饰和调整。因此结合相关研究[32, 33],将权重 a、b、c 确定为 0.5、0.3、0.2。

3.3 沿海地区淹没风险指数评估

将各评估单元在海平面上升 6 m 情景下的相关指标量化值代入风险评估模型(表 1),计算各评估单元海平面上升的危险性指数(HI)、暴露性指数(EI)、脆弱性指数(Ⅵ)和风险指数(RI),根据计算的风险值(RI)设置风险区划标准,通过界定风险等级形成风险区划,并采用自然断点分级法,划分评估单元风险等级。

3.3.1 城市群级评估单元风险评估

从得到的城市群级风险评估计算模型可以看出,沿海城市群的相对风险指数在 1.5~4.1 之间,风险指数差距较大(见表 4)。

由于城市群数据量较少,因此将各城市群的风险指数划分为 4 个级别。根据沿海城市群风险区划标准以及划定的风险区划结果(见表 5),长三角城市群属于海平面上升高风险区,京津冀城市群为较高风险区,山东半岛城市群、浙闽粤沿海城市群、珠三角城市群和北部湾城市群为中风险区,辽中南城市群为低风险区。

表 4 沿海城市群风险计算结果

Tab. 4 Risk Calculation Results of Coastal Urban Agglomerations

地区	空间危险性指数	空间暴露性指数	空间脆弱性指数	风险综合指数
长三角城市群	5.00	2.03	5.00	4.11
京津冀城市群	2.89	5.00	1.30	3.20
山东半岛城市群	3.33	1.84	1.00	2.42
珠三角城市群	1.83	2.17	32.00	2.25
粤闽浙沿海城市群	3.04	1.31	3.47	2.61
北部湾城市群	3.19	1.53	1.31	2.32
辽中南城市群	1.00	1.00	3.63	1.53

表 5 沿海城市群海平面上升风险等级划分表及风险区划结果

Tab. 5 Risk Levels and Risk Zoning Results for Sea Level Rise in Coastal Urban Agglomerations

风险值	风险等级	地区
1~1.53	低风险	辽中南城市群
1.54~2.63	中风险	山东半岛城市群、粤闽浙沿海城市群、珠三角城市群和北部湾城市群
2.64~3.20	较高风险	京津冀城市群
3.21~4.11	高风险	长三角城市群

3.3.2 省级评估单元风险评估

从得到的省级风险评估计算模型可以看出,沿海省份的相对风险指数在 1.0~3.4 之间,风险指数呈现梯级结果(见表 6)。

沿海省份的风险区划标准和风险区划结果(见表 7)表明:广东属于海平面上升高风险区,河北、天津、山东、江苏和浙江为较高风险区,辽宁、上海、福建和广西为中风险区,海南为低风险区。

表 6　沿海省份风险计算结果

Tab. 6　Risk Calculation Results of Coastal Provinces

地区	空间危险性指数	空间暴露性指数	空间脆弱性指数	风险综合指数
上海市	1.10	1.85	5.00	2.11
天津市	1.30	5.00	1.82	2.51
山东省	4.01	1.70	1.10	2.74
广东省	5.00	1.65	1.85	3.37
广西壮族自治区	1.60	1.90	1.46	1.66
江苏省	3.20	2.33	3.24	2.95
河北省	2.32	3.51	1.00	2.41
浙江省	3.23	1.57	3.77	2.84
海南省	1.00	1.00	1.16	1.03
福建省	1.93	1.16	2.38	1.79
辽宁省	1.60	1.14	2.57	1.65

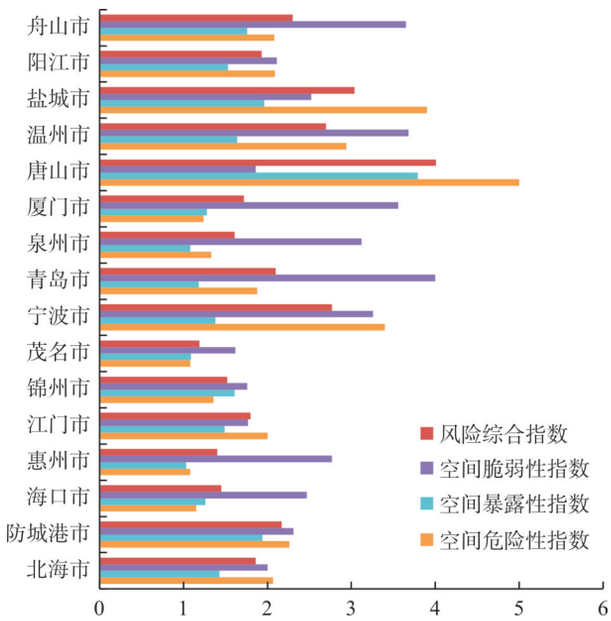
表 7　沿海省份海平面上升风险等级划分表及风险区划结果

Tab. 7 Risk Levels and Risk Zoning Results for Sea Level Rise in Coastal Provinces

风险值	风险等级	地区
1～1.03	低风险	海南省
1.04～2.11	中风险	辽宁省、上海市、福建省、广西壮族自治区
2.12～2.95	较高风险	河北省、天津市、山东省、江苏省、浙江省
2.96～3.37	高风险	广东省

3.3.3　市级评估单元风险评估

市级风险评估结果表明,沿海城市的相对风险指数在 1.2～4.0之间,各城市风险指数差距较大(见图 7)。由于市级评估单元较多,因此将各城市的风险指数划分为5个级别(见表 8)。



注:为简化图表,各风险等级选取典型城市展示

图 7　沿海城市风险计算结果

Fig. 7　Risk Calculation Results of Coastal Cities

从空间分布来看,高风险城市集中于渤海湾和莱州湾地区、江苏沿海。此外,宁波、珠海和湛江也是高风险城市。辽宁和福建的沿海城市都是中风险及以下,海南省的城市全部为低风险,山东半岛沿海城市风险等级较高。广西沿海的三个城市都是处于中高风险。广东省沿海城市数量较多,城市间的风险等级差异较大,空间分布较为均匀。

3.3.4　县级评估单元风险评估

从沿海区县的风险评估结果可以看出,沿海区县的相对风险指数在 1.1～4.0之间,风险指数差距较大,整体以低值为主,绝大部分区县都处于较低的水平(见图 8)。将各区县的风险指数划分为5个级别(见表 9)。

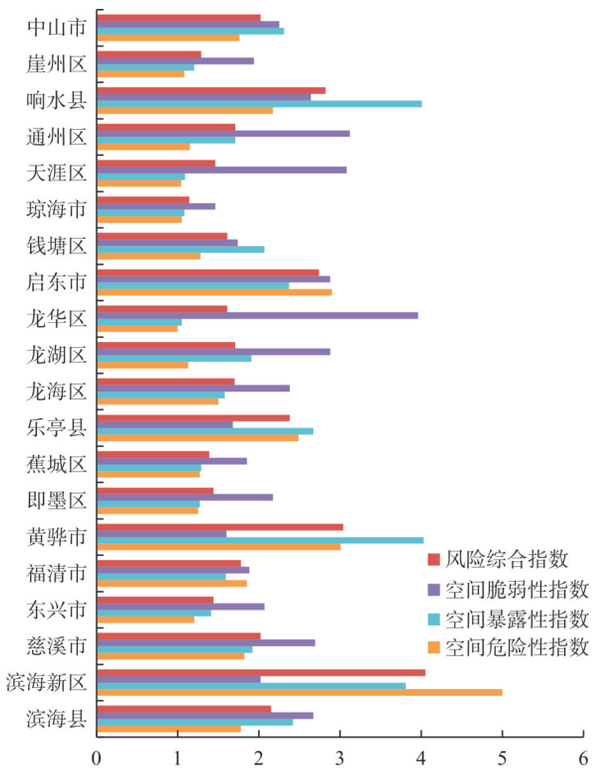
表 8　沿海城市海平面上升风险等级划分表及风险区划结果

Tab. 8　Risk Levels and Risk Zoning Results for Sea Level Rise in Coastal Cities

风险值	风险等级	地区
1～1.45	低风险	惠州市、海口市、秦皇岛市、茂名市、揭阳市、三亚市、潮州市、丹东市
1.46～1.72	较低风险	杭州市、厦门市、汕头市、绍兴市、泉州市、锦州市、莆田市、盘锦市、日照市、葫芦岛市、宁德市
1.73～2.10	中风险	深圳市、青岛市、东莞市、福州市、苏州市、大连市、江门市、烟台市、威海市、中山市、嘉兴市、北海市、漳州市、阳江市、营口市
2.11～2.70	较高风险	广州市、台州市、连云港市、温州市、舟山市、防城港市、钦州市、汕尾市
2.71～4.01	高风险	宁波市、潍坊市、珠海市、湛江市、盐城市、南通市、唐山市、沧州市、滨州市、东营市

从风险等级结果来看,沿海216个区县中,从高到低风险区的区县依次有6个、21个、48个、80个、61个。低风险区与较低风险区的区县占总数的65%,较高风险区与高风险区城市数量占总量的13%。整体而言,沿海大部分区县处于低风险等级。

从空间分布来看,海平面上升风险因各区县自然特征和发展水平表现出明显的空间差异,大多数区县处于较低的风险水平。环渤海区域的区县是各项风险要素高指数叠加地区,因而风险水平处于较高。中风险区的自然、经济特征为地势低平、较长海岸线、城镇化水平较高,如渤海湾、上海市、雷州半岛等区域的区县;低风险区域的区县主要是经济发展



注:为简化图表,各风险等级选取典型区县展示

图 8 沿海区县风险计算结果

Fig. 8 Risk Calculation Results of Coastal Counties and Districts

程度不高或者地势较高,如福建、浙江、海南沿海区县。

4 中国沿海地区应对风险的韧性规划对策

结合韧性城市理念,依据韧性策略的重点,构建针对沿海地区海平面上升风险的综合规划策略框架体系。

4.1 工程韧性:巩固沿海地区空间抵御力

4.1.1 结合风险区划成果综合考虑海平面变化的影响

从时间尺度来看,近期项目应能抵御低海平面上升极值水位情景的淹没风险。长期项目应考虑中、高海平面上升极值水位情景。在沿海低平原地区,如长三角、珠三角和环渤海地区,重要设施场地标高的确定要考虑在今后数十年或百年内海平面上升允许的标高范围,以适应最坏的情况下海平面上升的未来影响。

4.1.2 根据临界点模拟结果采取针对性措施

对于沿海地区而言,因其临界点普遍在5m-7m,因此可在国家、省级层面推动防洪标准更新,将此作为防洪工程标准的制定依据。对于临界点较低的区域,应充分评估海平面上升的影响,提高现有城市防洪标准并加大对沿海堤防等基础设施的投资力度,以确保防洪标准的达成并提高堤围的防御能力。对于临界点中等的区域,需要提高必要的应对等级,增高现有防护工程。对于临界点高的区域,需要对现有防洪工程加强监督和维护,监测海平面上升。

4.2 生态韧性:增强沿海地区空间恢复力

4.2.1 城镇空间留白增绿,增加应急弹性

面对不确定风险,强调刚性控制的同时为城市不确定性应急留有弹性空间[34]。各级国土空间规划

表 9 沿海区县海平面上升风险等级划分表及风险区划结果

Tab. 9 Risk Levels and Risk Zoning Results for Sea Level Rise in Coastal Counties and Districts

风险值	风险等级	地区
1~1.44	低风险	昌江黎族自治县、昌黎县、潮南区、潮阳区、城厢区、澄迈县、电白区、东台市、东兴市、奉化区、福安市、福鼎市、福田区、抚宁区、盖州市、海安市、海城区、海棠区、海阳市、濠江区、惠安县、惠东县、惠来县、吉阳区、即墨区、蕉城区、莱阳市、崂山区、乐东黎族自治县、荔城区、连山区、临高县、陵水黎族自治县、龙岗区、罗源县、洛江区、马尾区、南澳县、南票区、普兰店区、琼海市、乳山市、嵊泗县、石狮市、遂溪县、铁山港区、万宁市、文昌市、霞浦县、霞山区、翔安区、兴隆台区、秀英区、徐闻县、崖州区、阳东区、银海区、云霄县、长海县、诏安县、中山区
1.45~1.70	较低风险	北戴河区、苍南县、常熟市、澄海区、大丰区、儋州市、东方市、东港区、东港市、东山县、丰泽区、福山区、甘井子区、赣榆区、广饶县、海沧区、海港区、海宁市、海盐县、涵江区、环翠区、黄岛区、惠阳区、集美区、椒江区、金州区、晋江市、莱山区、莱州市、连江县、廉江市、临海市、凌海市、龙港区、龙海区、龙华区、龙口市、鹿城区、罗湖区、旅顺口区、美兰区、牟平区、南安市、宁海县、蓬莱区、平湖市、平潭县、平阳县、钱塘区、泉港区、饶平县、荣成市、三门县、沙河口区、山海关区、上虞区、市北区、市南区、思明区、绥中县、太和区、天涯区、同安区、瓦房店市、西岗区、新会区、兴城市、秀屿区、盐田区、阳西县、鄞州区、永嘉县、余姚市、玉环市、漳浦县、长乐区、招远市、振兴区、芝罘区、庄河市
1.71~2.02	中风险	鲅鱼圈区、宝安区、北仑区、昌邑市、城区、城阳区、慈溪市、大洼区、岱山县、定海区、东营区、洞头区、防城区、奉贤区、福清市、海丰县、合浦县、湖里区、江城区、胶州市、金山区、柯桥区、垦利区、岚山区、乐清市、雷州市、李沧区、龙港市、龙湖区、陆丰市、路桥区、麻章区、南山区、坡头区、浦东新区、普陀区、瑞安市、射阳县、台山市、太仓市、通州区、温岭市、文登区、吴川市、仙游县、香洲区、象山县、镇海区
2.03~2.74	较高风险	宝山区、滨海县、崇明区、斗门区、丰南区、港口区、灌云县、海门区、寒亭区、金湾区、乐亭县、连云区、龙湾区、滦南县、南沙区、启东市、钦南区、如东县、寿光市、西市区、沽化区
2.75~4.05	高风险	滨海新区、曹妃甸区、河口区、黄骅市、无棣县、响水县

中在沿海地区范围内,特别是城镇空间内预留战略留白用地,为未来可能承接的受灾人群转移、临时方舱等需求预留一定的空间。同时还需注重增加绿地,强化生态空间作为屏障以消化和减缓海平面上升的冲击,可将高风险区已开发用地逐步置换为城市公园绿地,并建设适当面积的河流、湖泊、湿地,作为城市的蓄滞洪区,规划沿海景观公园作为未来的洪水灾害缓冲区。

4.2.2　优化农业空间布局,保障粮食安全

为了适应未来的环境变化,需要采取有效措施来指导农业空间内的农业种植类型和结构,提高农业空间的适应性和韧性。例如,制定政策确保最大限度地保护农业用地、开放空间和其他沿海资源。限制适合农业的土地转换为非农业用途,确定并指定适合农业生产的区域,以取代可能因海平面上升而受淹的农业生产区域,在适用时规定将其转化为农业用途。

4.3　演进韧性:提高沿海地区空间适应性

适应性规划的实施措施包括基于生态系统的适应、推进、保护、顺应和撤退[35,36]。其中,基于生态系统的适应是指利用生态系统及其服务来提高人类社会对气候变化和自然灾害的适应能力[37]。推进是指通过填海造田,减少了内陆和新高地的沿海风险,并通过建造堤坝等方式,保障区域安全,平衡开发建设用地需求和风险应对。保护指的是建造防洪堤设施,阻止海平面上升极值水位向内陆侵袭,减少沿海地区风险和影响,如堤坝、海堤、防波堤和屏障等。顺应是指通过减少沿海居民、人类活动、生态系统和建筑环境的脆弱性来减轻沿海风险和影响,从而使沿海地区的可居住性成为可能。如限制洪水易发地区的开发、修改现有开发或设计新开发以减少风险,适用于人口密度较高的地区。撤退是指通过将暴露的人员、资产和人类活动移出沿海危险区,并限制在脆弱地区的新开发项目建设的战略来降低沿海风险。

考虑到规划方案的经济性和实效性、技术可行性,为适应海平面的动态风险和深度不确定性,从规划措施的集成和实施顺序方面来看,在近期或者海平面上升情景下,应首先采取基于生态系统的适应措施,逐渐过渡到推进、保护、顺应和撤退,以适应远期或者海平面上升情景(见图 9)。

4.4　治理韧性:顶层设计强化思维转型力

借助规划体制改革契机,将韧性策略贯穿于各层级、各类型的规划以及相关法律和制度的内容中,

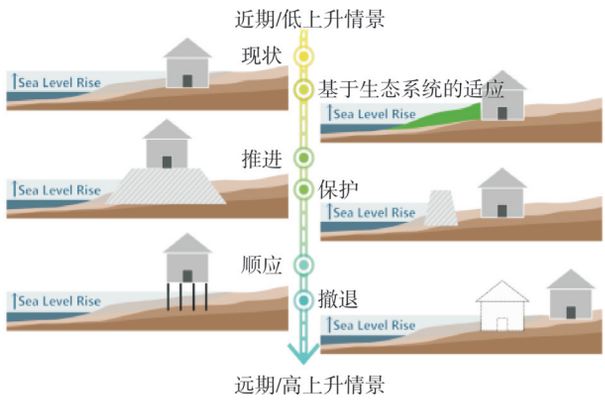


图 9　多情景适应规划方案

Fig. 9　Multi-scenario Adaptive Planning Scheme

强化规划体系的纵向传导和横向衔接,确保整个规划体系的连续性和协调性。

4.4.1　法律法规:建立沿海地区韧性政策法规

积极推动沿海地区管理的相关法规制度建设,协调地方风险管理实际操作需求与国家体制和法律框架、政策和规划之间的关系。沿海地区特别是风险等级较高的地区、经济发展水平较高的地区,需考虑未来海平面上升极值水位,相应地修订现行环境、建设标准。建立专门的监管机构,负责管理和监督沿海地区的开发活动,审批海岸线开发项目,确保其合法性和安全性。对沿海地区的开发项目进行环评,以确保项目对海岸线和环境造成的影响是可控的。定期监测沿海地区的环境进行,及时发现和解决问题。

4.4.2　技术标准:对接行业标准,完善风险评估应用

在《省级国土空间规划编制指南》(试行)将“主动应对全球气候变化带来的风险挑战,提升国土空间韧性”作为指导性要求之一。结合城镇化发展、气候变化等趋势,判断国土空间开发利用需求,在国土安全、自然灾害、生态保护等方面识别可能面临的风险,并开展情景模拟分析[38]。同样在《市级国土空间总体规划编制指南》中,要求研究气候变化等因素对空间开发保护的影响和对策,系统梳理国土空间开发保护中的问题,开展综合的灾害风险评估,强化因气候变化造成海平面上升的灾害应对措施[39-40]。

4.4.3　编制体系:将适应海平面上升纳入沿海地区规划体系

在全面评估的基础上,以风险区划为基础,构建总体和详细规划为核心的综合规划体系。

陆海统筹编制沿海地区适应海平面上升总体规划。明确沿海地区定位和城市适应海平面上升的总体目标和优先领域,充分考虑中、长期海平面上升对

沿海地区土地、人口、经济、生态等的影响，将其纳入国土空间规划编制的重点研究专题。明确各级风险区的用地管控依据、范围和手段，并将其作为指导控制性详细规划制定的基础，同时提供刚性要求和底线约束，以确保其他专项规划和城市设计的实施与风险管控的要求相一致。

探索编制沿海地区详细规划。梳理规划区域内土地、人口及资源状况，匹配详细规划层面适应海平面上升的强制性内容，确定适应海平面上升的空间约束指标，明确城市建筑空间形态，开发强度和开发密度等控制要素和技术指引。依据沿海地区风险类别制定相应的管控要求，转变和调整国土空间开发属性，进一步安排功能布局，制定适合不同风险区的用地建设导则和发展指引。

4.4.4 规划内容：明确各层级沿海地区空间规划的韧性重点

在城市群级层面，从宏观战略视角建立跨管辖边界的适应协作区域平台，发挥资源协调职责，提出政策性指导。在省级层面，建立省域层面的适应海平面上升的目标体系、重点任务清单并制定行动计划以及保障措施。结合各省份的海洋及地理条件特征，在城市群级战略指导下，根据风险区划等级结果，制定分区、分级的灾害适应性防控方略。在市级层面，将海平面上升纳入国土空间规划风险评估体系，提出基于风险区划的土地利用空间约束指标和控制用地空间扩张的政策法规。制定海岸防护措施的建设标准，划定海平面上升风险控制线和重大基础设施的安全评价范围。在区县级层面，进一步细化灾害的分区，依据岸线的功能，制定不同岸线的开发与保护内容。对于高风险的沿海地区，严格控制岸线利用活动，保护生态敏感区，禁止改变岸线现有自然形态。对于中风险的沿海地区，以生态景观建设为主，保护生态敏感区，限制改变岸线现有自然形态。对于低风险的沿海地区，根据科学的规划和论证，有序进行城乡和工业、港口建设。综合分析水文、气象、地形地貌、建成环境、社会经济，划分近期、中期和远期时序的风险区，明确国土空间安全发展底线。

5 结束语

本文基于海平面上升的大背景，以沿海地区为研究主体，分析海平面上升极值水位可能的淹没范围，构建沿海地区的风险情景模拟、风险评估方法。在此基础上，对中国沿海地区进行实证研究。分析结果表明，沿海地区风险临界点集中于 6 m 左右的情景；长三角城市群、广东省等区域属于高风险地区，大城市受影响较大，大多数区县处于较高的风险水平。最后基于模拟结果，提出韧性规划策略。在工程韧性方面，强调将海平面作为城市建设考虑因素，利用临界点完善沿海区域的防洪工程设施；在生态韧性方面，依据生态理念建设海岸，发挥滨海的自然防洪功能，城镇空间预留白地以增加弹性并增加绿地空间，农业空间可通过优化农业种植和结构提升韧性；在演进韧性方面，制定多情景的动态适应方案，完善海洋灾害风险的联防联控机制；在治理韧性方面，完善应对洪涝灾害的法律法规，对接海洋行业标准，强化风险评估成果的应用，以总体规划和详细规划为核心构建韧性规划体系，明确各类、各层级适应性规划的内容。

受限于资料的可获取性和技术的可行性，本文仍然存在一些不足之处，例如，实际淹没过程与防护工程、增水时间、地面排水情况等因素有关，本研究仅模拟理想状态下海平面上升分析沿海区域的影响，简单运用高程面积法来估算沿海区域淹没面积，进而影响了最终结果的准确性；关于应对措施的探讨和建议仅停留在理论层面，缺少具体、可操作性的指导等，均有待进一步深化。

参 考 文 献

[1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021

[2] 中华人民共和国自然资源部海洋预警监测司. 2023中国海平面公报[R]. 北京：自然资源部，2023

[3] 吴瑞君. 从“五普”到“七普”：中国人口分布与经济增长的时空耦合和区域均衡发展[J]. 华东师范大学学报(哲学社会科学版)，2021，53(5)：174-183

[4] 徐一剑. 我国沿海城市应对气候变化的发展战略[J]. 气候变化研究进展，2020，16(1)：88-98

[5] 蔡祎，艾松涛，赵前胜. 我国东南沿海风暴潮灾害时空分布规律及可视化研究[J]. 测绘地理信息，2023，48(4)：116-121

[6] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. 自然灾害学报，2000，9(3)：23-30

[7] 许世远，王军，石纯，等. 沿海城市自然灾害风险研究[J]. 地理学报，2006，61(2)：127-138

[8] 郑铣鑫，武强，应玉飞，等. 相对海平面上升——21世纪中国沿海地区重大战略问题[J]. 中国基础科学，2001，3(6)：21-25

[9] California Natural Resources Agency. California 2009 Climate Adaptation Strategy[R]. California: California Natural Resources Agency, 2009

[10] 陈崇贤，刘京一. 气候变化影响下国外沿海城市应对海平面上升的景观策略与启示[J]. 风景园林，2020，

27(12): 32-37

[11] 陈奇放, 翟国方, 李文静, 等. 新西兰适应沿海灾害和海平面上升的规划经验与启示[C]. 2019中国城市规划年会, 重庆, 2019

[12] Bell R, Lawrence J, Allan S, et al. Coastal Hazards and Climate Change[R]. Ministry for the Environment, 2017

[13] Lawrence J, Bell R, Stroombergen A. A Hybrid Process to Address Uncertainty and Changing Climate Risk in Coastal Areas Using Dynamic Adaptive Pathways Planning, Multi-Criteria Decision Analysis & Real Options Analysis: A New Zealand Application[J]. Sustainability, 2019, 11(2): 406

[14] 中华人民共和国生态环境部, 国家发展和改革委员会, 财政部, 等. 国家适应气候变化战略2035[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2022

[15] 陈奇放, 翟国方, 葛懿夫. 国外应对海平面上升的DAPP规划方法及其启示——以澳大利亚莱克斯恩特伦斯为例: 2020/2021[C]. 中国城市规划年会暨2021中国城市规划学术季,成都, 2021

[16] IPCC. Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects [R]. Contribution of Working Group Ⅱ to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University , 2014

[17] McGranahan G, Balk D, Anderson B. The Rising Tide: Assessing the Risks of Climate Change and Human Settlements in Low Elevation Coastal Zones[J]. Environment and Urbanization, 2007, 19(1): 17-37

[18] 何萍. 论滨海湿地保护的制度完善[J]. 环境保护, 2017, 45(4): 18-20

[19] 中华人民共和国自然资源部. 海洋灾害承灾体调查指南: HY/T 0313—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021

[20] 施敏琦. 中国沿海低地人口分布及人群自然灾害脆弱性研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2012

[21] 陈奇放, 翟国方, 施益军. 韧性城市视角下海平面上升对沿海城市的影响及对策研究——以厦门市为例[J]. 现代城市研究, 2020(2): 106-116

[22] 国家地球系统科学数据中心. 全国县级行政区划矢量数据集[DB/OL].[2022-09-17].http://www.geodata.cn

[23] 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台. GDEMV3 30M 分辨率数字高程数据[DB/OL]. [2022-09-03]. http://www.gscloud.cn

[24] 刘闯, 石瑞香, 张应华, 等. 2015年全球岛(礁)有多少陆地面积及海岸线长几何 ——基于Google Earth遥感影像的数据结果[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2019, 3(2): 124-148

[25] 刘闯, 石瑞香, 张应华, 等. 基于Google Earth遥感影像全球多尺度海陆(岛)岸线数据集(2015)[DB/OL]. [2022-09-25]. https://doi. org/10.3974/geodb. 2019.04.13.V1

[26] Chen Jun, Ban Yifang, Li Songnian. Open Access to Earth Land-Cover Map[J]. Nature, 2014, 514(7 523): 434

[27] Chen J, Chen J, Liao A , et al. Remote Sensing Mapping of Global Land Cover [M]. Beijing: Science Press, 2016

[28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴—2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021

[29] 中华人民共和国自然资源部. 海洋灾害风险评估和区划技术导则 第1部分:风暴潮:HY/T 0273—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020

[30] 侯西勇, 徐新良. 21世纪初中国海岸带土地利用空间格局特征[J]. 地理研究, 2011, 30(8): 1 370-1 379

[31] 邬满, 刘金, 文莉莉, 等. 基于深度学习的海洋承灾体评价方法研究[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(6): 91-95

[32] 李响, 刘克修, 陈满春, 等. 中国沿海地区海平面上升风险评估与管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2015

[33] 李杰, 谭晓璇, 李响, 等. 天津沿海海平面上升影响风险等级研究[J]. 海洋开发与管理, 2022, 39(1): 49-53

[34] 黄建中, 马煜箫, 刘晟. 城市规划中的风险管理与应对思考[J]. 规划师, 2020, 36(6): 33-35

[35] Portner H O, Roberts D C, Masson-Delmotte V, et al. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate[R]. Cambridge, UK and New York, USA: IPCC, 2019

[36] 项松林, 潘莉媛. 韧性城市的理念演进与发展路径——以合肥市为例[J]. 湖北经济学院学报, 2022, 20(6):120-127

[37] 蒋存妍, 袁青, 于婷婷. 城市应对气候变化不确定性的动态适应性规划国际经验及启示[J]. 国际城市规划, 2021, 36(5): 13-22

[38] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《省级国土空间规划编制指南》(试行)的通知[EB/OL]. (2020-01-17)[2023-02-17]. https://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200120_2498397.html

[39] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》的通知[EB/OL]. (2020-09-22)[2023-02-17]. https://gi.mnr.gov.cn/202009/t20200924_2561550.html

[40] 郑菲,孙诚,李建平. 从气候变化的新视角理解灾害风险、暴露度、脆弱性和恢复力[J]. 气候变化研究进展,2012, 8(2):79-83

修回日期:2026-07-13

第一作者:黄经南,博士,教授,主要从事新技术在城乡规划中的应用等。E-mail:huangjn73@qq.com

通信作者:谢东,博士,主要从事新技术在城乡规划中的应用等。E-mail:xiedong@whu.edu.cn