

海平面上升风险中国大陆沿海地区人口与经济暴露度

高超¹, 汪丽², 陈财¹, 罗纲¹, 孙艳伟¹

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211;

2. 西安外国语大学旅游学院人文地理研究所, 西安 710061)

摘要: 基于全球潮汐和浪涌再分析数据集, 利用数字高程模型在 ArcGIS 空间分析工具支持下, 提取了中国大陆沿海 11 个省市海平面上升可能淹没范围, 结合人口、经济、土地利用数据构建海平面上升风险暴露度评估模型, 评估中国大陆沿海地区海平面上升风险的人口和经济暴露度。结果表明: ① 海平面上升风险可能淹没范围主要集中在长三角及苏北沿海、珠三角和环渤海等滨海平原地区, 其中可能淹没范围最大的是江苏、上海等长三角地区; 土地利用类型中受影响最严重的为耕地, 约占受影响总面积的 65%, 其次为建设用地; ② 基于 2015 年人口、经济统计数据, 随着海平面上升水位值重现期的变化 (10 a 一遇至 1000 a 一遇), 海平面上升风险影响的人口和经济总量逐渐增加; 对海平面上升风险暴露度而言, 广州是暴露度等级最高的城市, 高暴露度等级的区域仍集中于长三角及苏北沿海、珠三角、环渤海地区; ③ 基于 5 种共享社会经济路径预估的人口和经济统计数据, 随着海平面上升水位值重现期的变化, 2025 年和 2100 年受影响的人口、经济总量在不同路径下均呈增长趋势, 常规发展路径下受影响的人口和经济总量最大, 局部或不一致发展路径和不均衡发展路径下受影响的人口、经济低于其他 3 种路径; 从重现期角度看, 10 a 一遇至 1000 a 一遇海平面上升风险的人口、经济暴露度向高暴露度等级转移; 对比 2025 和 2100 年两时段的人口、经济暴露度, 2100 年的暴露度等级整体低于 2025 年。

关键词: 海平面上升; GTSR 数据集; 暴露度; 重现期; SSPs; 中国大陆沿海

DOI: 10.11821/dlxb201908008

1 引言

全球气候变暖, 海水热膨胀、陆地冰川消融等事件频发, 海平面快速上升^[1], 中国大陆沿海地区海平面多年平均上升速率约达 3.7 mm/a, 为有观测数据以来的最高值^[2]。IPCC 第五次评估报告指出人类在面对极端气候事件时表现出明显的脆弱性和暴露度^[3-5]。脆弱性和暴露度是灾害风险损失的重要决定因子, 由于无法完全消除各种风险, 因此灾害风险管理和气候变化适应的重点是如何减少脆弱性和暴露度, 并提高对各种潜在极端事件不利影响的恢复力。

海平面上升风险的暴露度同样受到学者广泛关注, 主要从以下几个方面开展工作: ① 研究数据上, 基于验潮站数据^[6]、多星融合高度计数据^[7]、遥感数据^[8]、中国海洋公报^[9]等来预测海平面上升, 利用人口、经济统计数据分析省市级尺度海平面上升风险暴露度; ② 研究方法上, 利用线性回归^[10]、灰色系统理论^[11]或时间序列分析^[12]、经验模态分

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2019-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871024, 41571018) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41871024, No.41571018]

作者简介: 高超(1978-), 男, 安徽全椒人, 博士, 教授, 研究方向为气候变化与水文水资源。E-mail: gaoqinchao1@163.com

通讯作者: 孙艳伟(1983-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 讲师, 研究方向为城市地理与环境经济管理。

E-mail: sunyanwei@nbu.edu.cn

解方法^[13]等对海平面上升进行长期趋势预测, 构建海平面上升风险指标体系, 进而评估海平面上升的风险^[14]; ③ 研究内容上, 关注海平面上升风险对沿海潮滩红树林湿地^[15-16]、三角洲^[17]和沙质岸滩^[18]等生态系统的影响, 评估生态系统种群暴露度^[19]; 也有开展海平面上升风险区划研究^[20]以及应对海平面上升风险对策等方面的研究^[21]。海平面上升被认为是人类社会面临的最重要风险之一^[22], 海平面上升的预测与分析, 只选择海平面上升值的中间范围与情景, 不能够满足对风险决策的需求, 海平面上升风险作为一种致灾因子, 不仅要预测可能的未来情景, 还要了解其发生的概率, 关注低概率高影响的高限或上限情景^[23]。此前的研究多针对局部地区, 缺乏对中国大陆沿海的整体研究, 海平面上升数据多为中国海平面公报或IPCC预估结果^[24-25], 且对人口、经济影响方面研究较少, 此前关于海平面变化的预测主要基于全球CO₂排放典型浓度路径情景 (Representative Concentration Pathways, RCPs), 少有选择更全面的海平面上升概率和发生情景, 本研究力图从普遍认可的最新社会情景和海平面上升预测数据, 开展基于未来共享社会经济路径 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs) 海平面上升风险的人口、经济暴露度研究。海平面上升情景和概率及其上限情景已应用于国际海岸风险管理实践, 但该问题还未引起中国学界和沿海规划与管理相关部门的足够关注^[23]。现阶段, 开展更多研究来预估不同重现期时间和空间尺度的海平面上升风险显得尤为重要。

本文拟基于Muis等^[26]提供的全球潮汐和浪涌再分析数据集, 利用ArcGIS空间分析工具提取中国大陆沿海可能淹没范围, 结合2015年人口、经济统计数据 and 共享社会经济路径的未来人口、经济预估数据, 利用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP), 选取人口、经济、土地利用数据作为海平面上升风险暴露度评估指标, 构建中国大陆沿海地区海平面上升暴露度评估模型, 开展海平面上升风险的人口、经济暴露度研究, 为应对沿海地区海平面上升风险带来的防灾减灾工作提供技术支撑。

2 材料与研究方法

2.1 研究区概况

中国大陆沿海地区 (18°N~40°N、107°E~124°E) 包括天津、江苏、上海、广东等11个省、直辖市行政范围 (不含港澳台), 区域面积约140万km² (图1), 区域内海拔高程多为1~4 m, 最低不到1 m, 易受到海平面上升威胁。该区域也是中国经济发达, 人口集中的地区, 截至2015年, 中国大陆沿海地区的国土面积约占全国14.58%, 但国内生产总值 (GDP) 却约占全国55.25%, 常住人口约占全国43.39%。

2.2 数据来源

2.2.1 GTSR 数据集 海平面上升水位数据采用了4TU.ResearchData 网站 (<http://data.4tu.nl/>) 提供的全球潮汐和浪涌再分析 (the Global Tide and Surge Reanalysis, GTSR) 数据集。GTSR 数据集借助GTSM (the Global Tide and Surge Model) 水动力模型模拟风暴潮和FES 2012 (the Finite

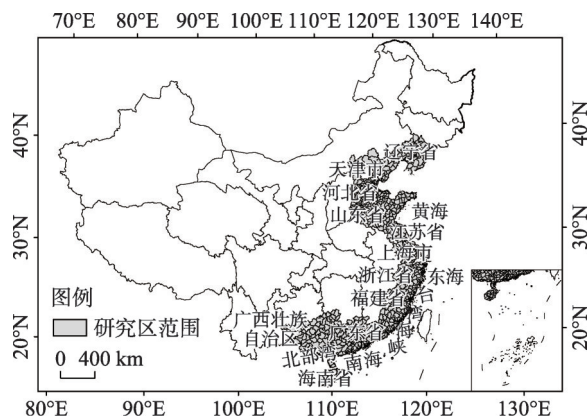


图1 研究区范围

Fig. 1 The map of the study area

Element Solution) 水动力模型模拟潮汐。GTSR 数据集是根据 1979-2016 年全球潮汐观测站模拟海平面上升预测值, 且其结果数据覆盖全球海岸线, 同时将此前的静态计算改为动态计算, 将绝对海平面上升高度纠正为相对海平面上升高度。为了获得更可靠的估计, 在计算重现期 10 a 海平面上升数据时, 结合全球 472 个观测时段超过 10 年的潮汐站水位数据, 而在计算重现期 100 a、1000 a 海平面上升数据时, 结合全球 144 个观测时段超过 25 年的潮汐站水位数据。GTSR 数据集中海平面上升水位模拟值与实际潮汐站的记录相比较, 置信度达到 95%^[26]。该数据集在世界范围内得到了大量的应用, Hinkel 等学者利用 GTSR 数据评估全球海平面上升和社会经济情景下沿海洪涝灾害的破坏程度^[27], 世界银行和联合国组织共同成立的全球减灾与灾后恢复组织基于 GTSR 动态数据集在 ThinkHazard (www.thinkhazard.org) 网站预报全球海岸洪水风险水平^[28]。研究选取了 GTSR 数据集中重现期 10 a、100 a、1000 a 的中国大陆沿海地区海平面上升水位数据。

2.2.2 人口、经济数据 人口、经济现状数据来源于 2015 年中国大陆沿海各县、市国民经济和社会发展统计公报, 包括除港澳台以外中国大陆沿海的 728 个县、市级行政区。

未来人口数据采用的是国家气候中心提供的 2010-2100 年人口预估数据, 该套数据将中国人口问题与气候变化情景相结合, 综合考虑各地区间经济发展不平衡、全面二孩政策实施和分省迁移影响等中国特有的人口政策和规律; 通过 PDE (Population-Development-Environment Analysis) 人口模型率定生育率、死亡率、迁移率等关键参数^[29-30], PDE 人口模型已经成功在北非、东南亚、阿拉伯地区开展了人口预估变化研究^[31-33]; 在未来情景设置上, 综合考虑人口、经济、技术进步、资源利用等因素, 采用 IPCC 公布的可持续发展路径 (SSP1)、中度发展路径 (SSP2)、局部或不一致路径 (SSP3)、不均衡发展路径 (SSP4)、常规发展路径 (SSP5) 5 种共享社会经济路径 (SSPs)^[34], 预估 2010-2100 年中国的人口格点 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 数据^[35]。

未来经济数据采用国家气候中心提供的 2010-2100 年经济预估数据, 该套数据根据全国经济普查及逐年统计资料, 借助 Cobb-Douglas 预测模型, 输入劳动力投入量、全要素生产率、资本存量等参数进行未来经济预估, Cobb-Douglas 预测模型已经广泛应用于全世界各国 GDP 预测研究^[36-37]; 再依据 5 种 SSPs 框架, 预估 2010-2100 年中国的经济格点 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 数据^[38]。

2.2.3 土地利用和 DEM 数据 2015 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 是根据 Landsat 8 遥感影像, 通过人工目视解译更新生成。数字高程模型 (DEM) 采用空间分辨率为 30 m 的 ASTER GDEM V2, 对 V1 版 GDEM 影像进行改进, 提高了数据的空间分辨率和高程精度。该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 (<http://www.gscloud.cn>)。

2.3 研究方法

2.3.1 受海平面上升影响的人口、经济数据的提取 海平面上升风险可能淹没范围评估方法主要包括高程面积法、递减律法及沉积速率法^[24]。研究采用高程面积法, 即根据 GTSR 数据集提取重现期 10 a、100 a、1000 a 的中国大陆沿海地区各省平均海平面上升水位值 (图 2), 以不同重现期各省海平面上升水位值为基础, 结合 DEM, 借助 ArcGIS 软件空间分析工具提取出不同重现期海平面上升风险可能淹没范围。其原理为: 通过提取近岸陆域高程值和海平面上升水位值, 定义在海平面上升水位值以下是淹没范围, 反之不属于淹没范围, 使用 ArcGIS 地统计工具得到可能淹没面积^[25]。通过可能淹没面积与中国大陆沿海各县级行政区 2015 年人口、经济统计数据 and 行政区划面积计算出人口密度 (万人/ km^2) 和经济密度 (万元/ km^2), 获取重现期 10 a、100 a、1000 a 海平面上升风险影响的

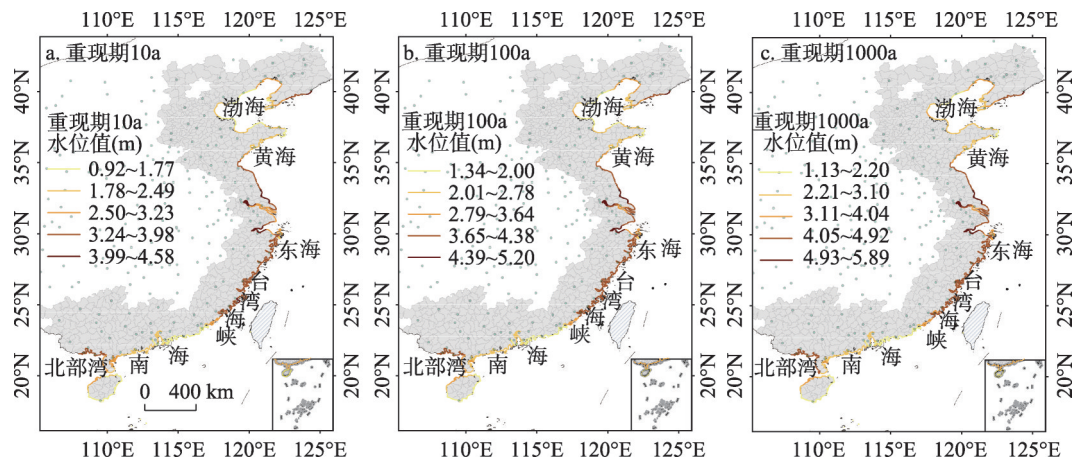


图2 不同重现期中国大陆沿海海平面上升水位值

Fig. 2 The sea level rise value of China's coastal areas in different return periods

人口、经济数据。在提取未来受影响的人口、经济中采用面积权重法,即确定格网内可能淹没面积与格网面积的比例,以可能淹没面积所占百分比来分配属性值^[39],再根据共享社会经济路径下2025年和2100年的人口、经济预估数据,计算出重现期10 a、100 a、1000 a以格点为单位海平面上升风险影响的人口、经济预估数据。

2.3.2 暴露度评估模型的建立 海平面上升风险的暴露度评估指标权重确定是运用层次分析法,利用指标之间的重要程度和内在联系进行赋值,根据人口、经济、土地利用数据一级指标构建判断矩阵(表1),计算矩阵的特征向量。

计算矩阵的特征向量与特征根,进行一致性检验:

$$CI=(\lambda \max -n)/(n+1)$$

(1)

式中:CI为一致性指标; $\lambda \max$ 为最大特征根; n 为指标个数。

$$CR=CI/RI$$

(2)

式中:RI为随机一致性指标。若 $CR<0.1$,则说明此矩阵通过了满意一致性检验,否则该矩阵不符合要求,需进一步调整。

计算矩阵得到 $CR=0.0036$,满足 $CR<0.1$,通过满意一致性检验,得到人口、经济、土地利用数据的一级指标权重分别为0.6483、0.2297、0.1220。二级指标中人口、经济暴露量是利用ArcGIS自然断点法将数据划分5个等级分别赋相应权重,而土地利用数据则依据类型之间的社会价值量和重要程度划分6个二级指标分别赋相应权重。

层次分析法虽易操作,但不同的赋值方法权重数据差别较大,为此利用熵值法对层次分析法进行改进以求最佳赋值方案。泛系观控理论认为所有信息组成的系统中,信息量越小,方案配置中的观控风险越大,比较收益越大,但同时不确定性越大;反之,信息量越大,不确定性越小。

根据此前的层次分析法确定6种不同的一级指标权重赋值方案(表2),由于二级指标间的赋值差距较一级指标而言不大,故只对一级指标进行权重赋值。

表1 一级评估指标判断矩阵

Tab. 1 The judgment matrix of the first level evaluation index

	人口	经济	土地利用数据
人口		3	5
经济			2
土地利用数据			

利用泛系观控计算公式得到各方案的约束信息量 BI 值, 公式如下:

$$BI = \log_2 n + \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i, \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(3)

$$P_i = \frac{D_{ij}}{\sum D_{ij}}, \quad (i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m)$$

(4)

式中: P_i 为第 i 个观控对象所对应的概率; n 为观控指标数; m 为方案数。

$$D_{ij} = \frac{K_{ij}}{\text{Max}(K_i)}$$

(5)

$$(i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m)$$

式中: K_{ij} 为第 j 种方案的第 i 个指标权重; n 为观控指标数; m 为方案数。

计算得到不同的约束信息量 (表3), 根据泛系观控理论 BI 值越小, 不确定性越小, 风险越低, 因此选取约束信息量最小的方案5作为最佳指标权重赋值方案 (表4)。

参照灾变指数^[40]计算公式推演出暴露度评估模型, 对人口、经济、土地利用数据的级别求加权, 计算公式为:

$$e(P, G, L)_j = \sum_{i=1}^n W_i \times D_{ij}$$

(6)

$$(i = 1, 2, \cdots, n)$$

式中: e_j 表示 j 地区人口、经济、土地利用数据暴露度因子指数; W_i 表示二级指标权重; D_{ij} 表示人口、经济、土地利用数据指标对应暴露量。

$$E_j = A_P \times e_{Pj} + A_G \times e_{Gj} + A_L \times e_{Lj}$$

(7)

式中: E_j 表示 j 地区的暴露度指数; A_P 、 A_G 、 A_L 分别表示人口、经济、土地利用数据一级指标权重; e_{Pj} 、 e_{Gj} 、 e_{Lj} 分别表示 j 地区人口、经济、土地利用数据暴露度因子指数。

3 结果与分析

3.1 海平面上升可能淹没范围

在重现期 10 a、100 a、1000 a 海平面上升风险下, 中国大陆沿海可能淹没面积分别约为 $4.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $5.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $6.67 \times 10^4 \text{ km}^2$, 淹没面积持续扩大 (表5)。以省为单位进行统计, 3 个不同

表2 6种不同权重赋值方案

Tab. 2 Six assignment schemes with different weights

方案	人口	经济	土地利用数据	CR值
1	0.7050	0.2053	0.0897	0.0176
2	0.7375	0.1773	0.0852	0.0015
3	0.7608	0.1576	0.0816	0.0012
4	0.7396	0.1666	0.0938	0.0136
5	0.6483	0.2297	0.1220	0.0036
6	0.7306	0.1884	0.0810	0.0624

表3 6种不同权重赋值方案的约束信息量

Tab. 3 The binding information of six assignment schemes with different weights

方案	1	2	3	4	5	6
CR	0.0176	0.0015	0.0012	0.0136	0.0036	0.0624
BI	0.4484	0.5157	0.5697	0.5120	0.3218	0.5067

表4 海平面上升风险暴露度指标及权重

Tab. 4 The exposure risk index and weight of sea level rise

目标	指标	权重	二级指标	权重
暴露度评估	人口	0.6483	P_1	0.0388
			P_2	0.0479
			P_3	0.0979
			P_4	0.1688
			P_5	0.2950
	经济	0.2297	G_1	0.0105
			G_2	0.0206
			G_3	0.0252
			G_4	0.0528
			G_5	0.1207
	土地利用数据	0.1220	L_1 (水域)	0.0039
			L_2 (未利用地)	0.0086
			L_3 (草地)	0.0091
			L_4 (林地)	0.0163
			L_5 (耕地)	0.0314
			L_6 (建设用地)	0.0526

注: $P_1 \sim P_5$ 和 $G_1 \sim G_5$ 是利用 ArcGIS 自然断点法划分不同等级的人口暴露量(万人)和经济暴露量(万元)。

重现期淹没面积的均值排名依次为江苏、广东、山东、天津、河北、辽宁、浙江、上海、福建、海南、广西。

从空间分布特征(图3)看,随着海平面上升水位值重现期的变化(10 a一遇至1000 a一遇),中国大陆沿海海平面上升风险可能淹没范围主要集中在长三角及苏北沿海、珠三角、环渤海地区,尤其以长江入海口、珠江入海口、黄河入海口至海河入海口段、辽河入海口最为严重。其中,可能淹没范围最广的为长三角及苏北沿海地区,其他可能淹没范围较小区域大致沿海岸线分布,例如浙闽海岸带、山东半岛海岸带、辽东半岛海岸带。

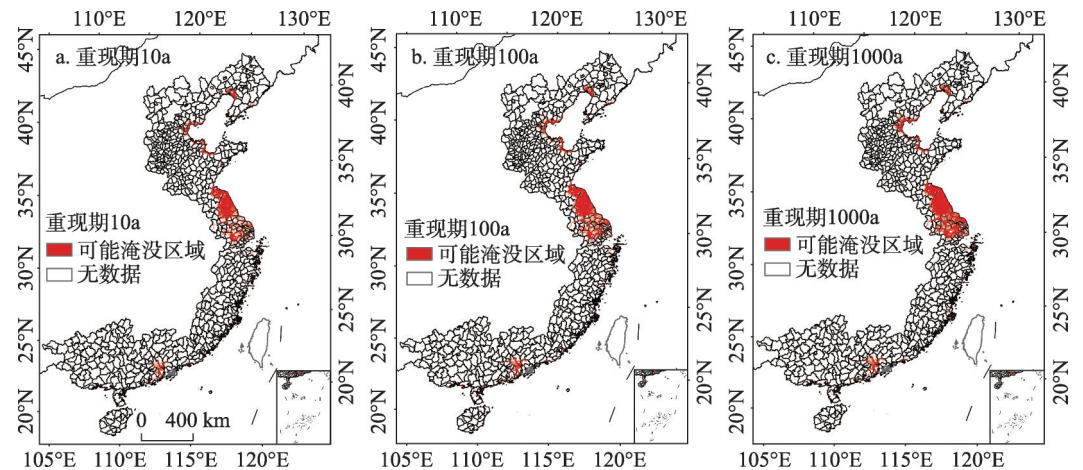


图3 不同重现期中国大陆沿海地区海平面上升淹没范围空间分布
Fig. 3 The spatial distribution of flooded areas by sea level rise in different return periods

3.2 海平面上升淹没的土地利用类型

在重现期10 a、100 a、1000 a海平面上升风险下,中国大陆沿海地区淹没的土地利用类型中,耕地的淹没面积最大,占重现期10 a、100 a、1000 a总淹没面积的比例分别达到64.89%、65.50%、65.64%,随着海平面上升水位值重现期的变化(10 a一遇至1000 a一遇),建设用地、水域、草地、林地、未利用地的淹没面积均持续增加(图4)。

3.3 海平面上升风险影响的人口、经济特征

3.3.1 2015年受影响的人口、经济情况 由表6可知,在重现期10 a、100 a、1000 a海平面上升风险下,以2015年中国大陆沿海县级行政区人口、经济统计数据为例,可能受影响的人口分别约为3856.51万人、4734.42万人、6025.99万人,可能受影响的经济分别约为336.54×10⁶万元、434.86×10⁶万元、543.16×10⁶万元,均呈现上升趋势。统计得知,受影响最严重的江苏,3个重现期受影响人口均值是广西的98倍,受影响的经济均值是

表5 不同重现期中国大陆沿海可能淹没面积(×10⁴ km²)
Tab. 5 The possible flooded areas of China's coast in different return periods (×10⁴ km²)

	重现期10 a	重现期100 a	重现期1000 a
可能淹没面积	4.59	5.65	6.67

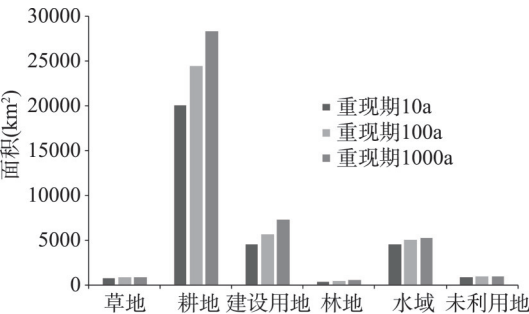


图4 不同重现期海平面上升淹没的土地利用类型
Fig. 4 The type of land use flooded by sea level rise in different return periods

表 6 不同重现期受影响的中国大陆沿海地区人口和经济情况
Tab. 6 The affected population and economy in different return periods

	人口(万人)			经济(×10 ⁶ 万元)		
	重现期 10 a	重现期 100 a	重现期 1000 a	重现期 10 a	重现期 100 a	重现期 1000 a
合计	3856.51	4734.42	6025.99	336.54	434.86	543.16

广西的 722 倍。

从不同重现期（均值）空间分布特征分析（图 5），受影响的人口、经济总量整体表现为长江入海口以北大于长江入海口以南地区，尤其以杭州湾北岸至连云港段沿海地区最为严重，而其他较为严重的地区主要分布在环渤海、辽河三角洲；而长江入海口以南地区主要集中于珠江三角洲，其余受海平面上升风险影响的地区基本沿海岸线分布。

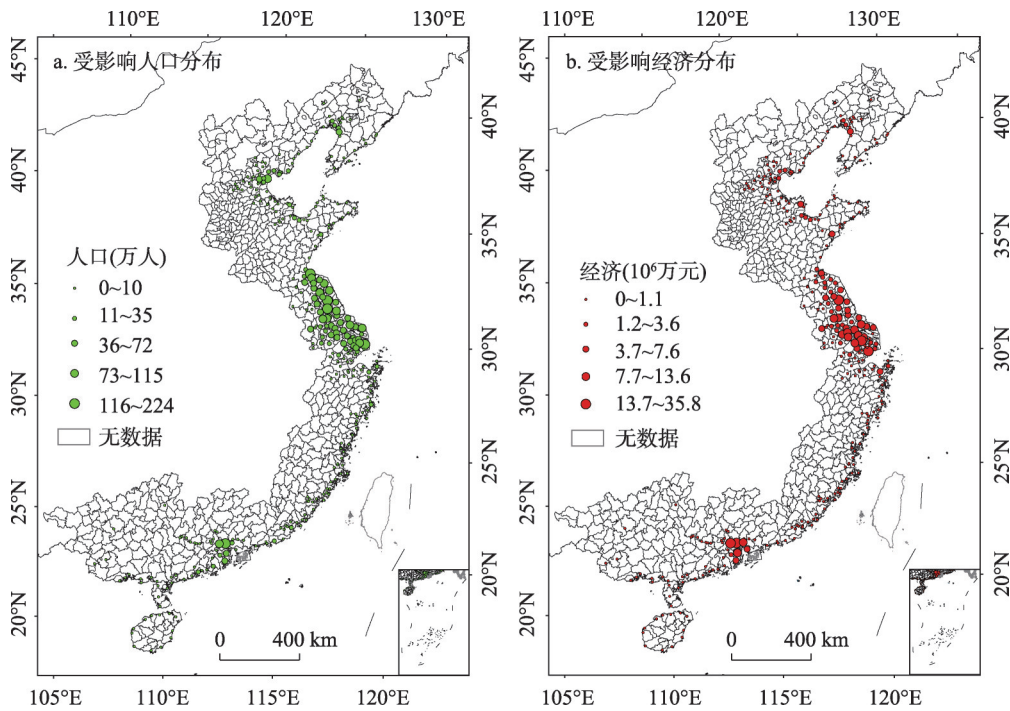


图 5 中国大陆沿海地区受影响人口和经济空间分布(3 种不同重现期数据均值)
Fig. 5 The spatial distribution of affected population and economy (average data of three return periods)

从不同重现期（均值）受影响的单个城市而言（图 6），在海平面上升风险下，人口方面受影响最严重的城市为盐城，经济方面受影响最严重的城市为广州，其中广州在人口受影响方面仅次于盐城，在前 20 名人口、经济受影响的城市排名中均出现广州、盐城、佛山、南通、泰州、扬州、常州，由此判断出长三角及苏北沿海地区为受海平面上升风险影响最严重的地区。

3.3.2 2025 年和 2100 年受影响的人口、经济情况 在 5 种共享社会经济路径下（SSP1-5）（图 7），2100 年受影响的人口总量低于 2025 年，受影响的经济总量高于 2025 年。同一年份不同路径，重现期 10 a、100 a、1000 a 在 SSP5 路径下受影响人口、经济总量均最大，在 2100 年中尤为明显，远高于其他 4 种路径。分别对比 2025 年和 2100 年同一路径不同重

表 7 不同重现期中国大陆沿海地区暴露度等级城市数量
Tab. 7 The number of cities exposed in different return periods

暴露度等级	极高	高	中等	低	极低	合计
重现期 10 a 城市个数	2	9	18	37	250	316
重现期 100 a 城市个数	4	15	18	36	245	318
重现期 1000 a 城市个数	7	16	19	34	243	319

险影响的城市数量为 316 个，而重现期 100 a 和重现期 1000 a 分为 318 个、319 个。其中，约 90% 的城市属于“极低”和“低”暴露度等级，暴露度等级为“高”和“极高”城市数量仅占总量的 3%。从不同重现期暴露度等级的城市数量变化来看，暴露度等级为“极低”“低”的城市数量随着海平面上升水位值重现期的变化有所减少，暴露度等级为“中等”“高”的城市数量均有所增加，重现期 1000 a 暴露度等级为“极高”的城市数量较重现期 10 a 的 2 个增至 7 个，可见城市的暴露度等级呈现向更高暴露度等级转移的趋势。

环渤海地区（图 9a~9c），营口、东营、青岛为在不同重现期暴露度等级均为“中等”的城市，在 3 个重现期未发生暴露度等级变化；而天津是唯一重现期 10 a 到 1000 a 暴露度等级发生变化的城市，由“低”升至“高”暴露度等级。

长三角及苏北沿海地区、珠三角地区为高暴露度等级城市的主要分布地区。长三角及苏北沿海地区（图 9d~9f），重现期 100 a，盐城和昆山是暴露度等级为“极高”的城市，而重现期 1000 a 暴露度等级为“极高”的城市有所扩大，包括盐城、苏州、常州、上海市金山区。无锡、张家港、南通在重现期 10 a 暴露度等级为“中等”，在重现期 100 a 和重现期 1000 a 升至“高”暴露度等级；海门在重现期 10 a、重现期 100 a、重现期 1000 a 的暴露度等级分别为“低”“中”“高”，是长三角及苏北沿海地区唯一暴露度等级发生连续变化的城市。

珠三角地区（图 9g~9i），广州在不同重现期暴露度等级均为“极高”，同时也是中国沿海地区受海平面上升风险威胁最严重的城市，佛山重现期 100 a 到重现期 1000 a 暴露度等级升至为“极高”。珠海、深圳在重现期 10 a 至重现期 100 a 期间，均上升了一个暴露度等级，东莞、中山 3 个重现期暴露度等级均为“高”。

3.4.2 2025 年和 2100 年人口、经济暴露度等级特征 随着海平面上升水位值重现期的变化（10 a 一遇至 1000 a 一遇），暴露度等级呈现由较低向更高暴露度等级转移的规律。表 8 中，2025 年在 SSP2 路径下，暴露度等级为“极低”的格网数在重现期 10 a 为 145 个，重现期 100 a 为 136 个，重现期 1000 a 为 130 个，而暴露度等级为“高”和“极高”的格网数重现期 10 a 为 3 个，重现期 100 a 和重现期 1000 a 分别为 7 个和 10 个。

从 2025 年与 2100 年两个时段对比上，2100 年暴露度等级情况要低于 2025 年，主要表现为暴露度等级“极高”“高”“中”格网数之和占总格网数比例由 2025 年的 17.6% 下降到 2100 年的 9.3%，其主要原因是暴露度评估模型中人口一级指标权重为 0.6483，所占权重较大，而人口预估数据到 2030 年左右达到峰值，其后呈现递减趋势，影响了最后暴露度评估结果。

通过对暴露度等级为“高”和“极高”格网数统计得知（表 8），SSP2 和 SSP5 路径下暴露度等级格网数大于其他 3 种路径；SSP3 路径下暴露度等级格网数相对最低，这与 SSP3 路径下受影响的人口和经济暴露量变化情况一致；SSP5 路径下的暴露度等级情况与 SSP2 路径相比更为严重，说明中国大陆沿海海平面上升风险的人口和经济暴露度在 SSP5 下最为严重。

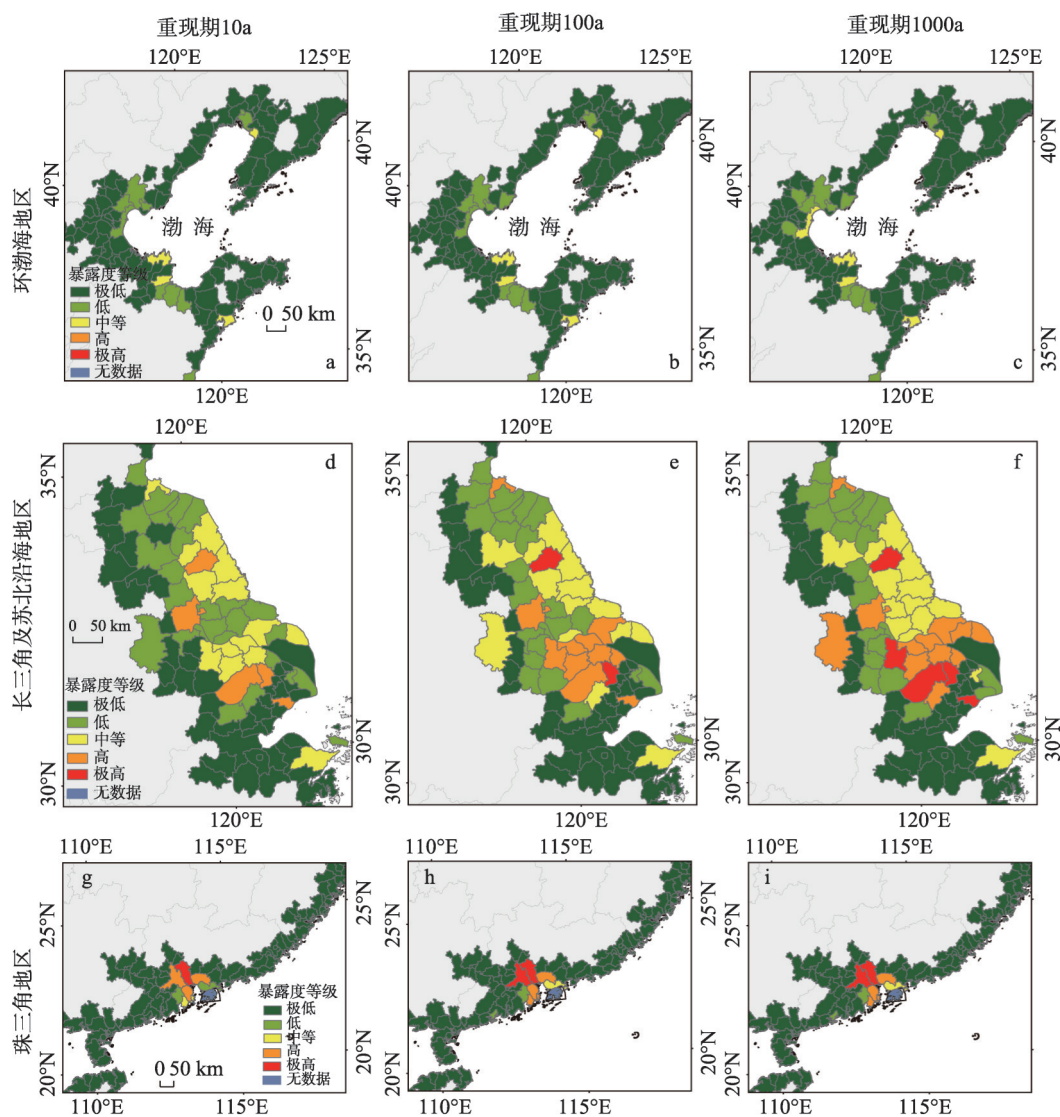


图9 中国大陆沿海不同地区暴露度等级变化

Fig. 9 The changes of exposure levels in different regions

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 对海平面上升可能淹没范围的讨论。借助GTSR数据集,综合考虑10 a、100 a、1000 a 3种重现期,获取沿海11个省、直辖市平均海平面上升的水位数据,结合DEM提取可能淹没范围。GTSR数据集已成功应用于ThinkHazard网站预测预报全球海岸洪水风险等研究,该数据集不仅考虑风暴潮、潮汐、风速、大气压力等因素对海平面上升水位值产生的影响,还根据行政单元和社会经济特点等划分不同海岸带类型,分别计算其海平面上升水位值。而前人进行中国大陆沿海海平面上升水位值预估时,多利用中国海平面公报或IPCC预估结果假设某区域的海平面上升范围。利用GTSR数据集进行海平面上

表8 共享经济路径下暴露度等级格网数量

Tab. 8 The grid numbers of exposure levels under the shared socioeconomic pathways

	等级	2025年					2100年				
		SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
重现期 10 a	极低	145	145	144	145	144	145	145	144	145	144
	低	27	27	28	27	27	27	27	28	27	27
	中	15	15	16	15	14	15	15	16	15	14
	高	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3
	极高	1	1	0	1	2	1	1	0	1	2
重现期 100 a	极低	137	136	136	137	137	155	151	148	156	146
	低	30	31	31	30	30	26	29	33	26	29
	中	17	17	17	17	17	7	9	7	6	12
	高	6	4	5	5	4	2	2	3	2	1
	极高	1	3	2	2	3	1	1	0	1	3
重现期 1000 a	极低	130	130	130	130	129	153	149	146	154	144
	低	31	32	32	32	31	26	28	33	26	28
	中	20	19	20	20	19	8	10	8	7	13
	高	7	5	6	6	7	2	3	4	3	3
	极高	3	5	3	3	5	2	1	0	1	3

升水位值预估时综合考虑多种影响因素且对未来可能上升范围更加定量化刻画。但在提取中国大陆沿海海平面上升风险的可能淹没范围时，本研究目前只是以低于某一高程的范围为淹没区；实际上，海平面上升对陆地的影响要考虑诸多因素，例如海岸类型、地形条件、工程设施等参数设置尚不够精细，在进一步研究中，可运用更加科学方法模拟海平面上升风险的淹没范围和选取更多暴露度指标，使得海平面上升风险所带来的灾情灾损评估更加精细化，完善中国大陆沿海地区海平面上升风险的暴露度研究。

(2) 对人口、经济情景设定的讨论。基于5种共享社会经济路径下中国人口、经济预估数据，在不同重现期和不同发展路径下，开展中国大陆沿海地区海平面上升风险暴露度研究，为沿海地区选择发展路径提供依据。在对人口数据预估时，二孩政策影响下的人口参数设定尚存在主观因素，会对人口预估结果产生一定影响；在对经济数据预估时，尽管中国和分省经济预测模型考虑了劳动力投入量、全要素生产率和资本存量等参数，但影响未来经济发展的因素众多，存在诸多的不确定性。因此，对人口、经济预估数据有待进一步验证。

(3) 对暴露度评估模型的讨论。由于暴露度评估模型中人口一级指标所占权重较大，达到0.6483，尽管苏北沿海地区经济总量相较于长三角地区较小，但人口众多，使得苏北沿海地区的整体暴露度较高；2100年与2025年相比有着较低暴露度，是由于中国大陆沿海各个省份共享社会经济路径下人口预估总量在2030年左右达到峰值，其后呈现下降趋势，经济总量持续上升但增速持续放缓。在统计暴露度指标——人口数据时，研究统计了2015年常住人口数量，但不同年龄、不同性别的人群面对海平面上升风险的适应力不同，因此进一步研究中可在统计人口数据时考虑不同年龄段人口数量和人口结构；在统计暴露度指标——经济数据时，研究统计了2015县级行政区国内生产总值，但不同产业类型面对海平面上升风险暴露度的脆弱性和恢复水平不尽相同，地区间经济发展方式和产业结构并不具有一致性，因此，进一步研究可在统计不同产业类型经济数据时选取不同的指标，以求更加精准的开展中国大陆沿海地区海平面上升风险暴露度研究。

通过评估中国大陆沿海各县级行政区海平面上升风险暴露度等级,可知高等级暴露度区域多为经济发达,人口活动密集地区,且多处于河口沿江地区,如长三角与珠三角河口地区。随着海平面上升,沿海沿江海拔较低地区在海水顶托叠加风暴潮影响下,面临着极高的风险。中国大陆沿海90%以上县级行政区为暴露度较低地区,需要加强对其余几个极高暴露度等级城市的岸防基础设施建设,提高海平面上升风险灾害监测预警能力,依次推进区域海平面上升风险防控。

4.2 结论

基于GTSR数据集,提取中国大陆沿海地区重现期10 a、100 a、1000 a海平面上升风险可能淹没范围,结合人口、经济、土地利用数据,利用暴露度评估模型,评估不同重现期中国大陆沿海人口、经济暴露度,结论如下:

(1) 中国大陆沿海不同重现期海平面上升风险可能淹没范围主要集中在长三角及苏北沿海、珠三角、环渤海地区,尤其以长江入海口、珠江入海口、黄河入海口至海河入海口段、辽河入海口最为严重。土地利用类型中淹没面积最多的为耕地,约占受影响总面积的65%,其次为建设用地、水域、草地、林地、未利用地。

(2) 随着海平面上升水位值重现期的变化,2015年受影响的人口、经济总量逐渐增加。对海平面上升暴露度而言,城市的暴露度等级呈现由低暴露度等级向高暴露度等级转移的趋势,高暴露度等级的城市主要分布在长三角及苏北沿海、珠三角、环渤海等河口地区,广州为中国大陆沿海地区海平面上升风险受威胁最严重的城市,天津、无锡、常州、珠海、深圳等地随着重现期的变化暴露度等级有所增加。

(3) 随着海平面上升水位值重现期的变化,2025年和2100年受影响的人口、经济总量在不同路径下均有所增长,SSP5路径下受影响的人口、经济总量均最大,SSP3和SSP4路径下受影响的人口、经济低于其他3种路径。从重现期角度看,10 a一遇至1000 a一遇重现期变化过程中人口、经济暴露度等级均呈现向高暴露度等级转移的趋势;从2025年与2100年两个时段对比上,2100年的人口、经济暴露度等级整体低于2025年,主要表现为暴露度等级“极高”“高”“中”格网数之和占总格网数之比由2025年的17.6%下降到2100年的9.3%。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] State Oceanic Administration. China Sea Level Bulletin 2016. Beijing: State Oceanic Administration, 2017. [国家海洋局. 2016年中国海平面公报. 北京: 国家海洋局, 2017.] http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/201703/t20170322_55304.html.
- [3] Jiang Tong, Li Xiucang, Chao Qingchen, et al. Highlights and understanding of Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. *Advances in Climate Change Research*, 2014, 10(3): 157-166. [姜彤, 李修仓, 巢清尘, 等. 《气候变化2014: 影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知. *气候变化研究进展*, 2014, 10(3): 157-166.]
- [4] Yin Zhan'e, Tian Pengfei, Chi Xiaoxiao. Multi-scenario-based risk analysis of precipitation extremes in China during the past 60 years (1951-2011). *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 405-413. [尹占娥, 田鹏飞, 迟潇潇. 基于情景的1951-2011年中国极端降水风险评估. *地理学报*, 2018, 73(3): 405-413.]
- [5] Zheng Fei, Sun Cheng, Li Jianping. Climate change: New dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability, and resilience. *Advances in Climate Change Research*, 2012, 8(2): 79-83. [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. *气候变化研究进展*, 2012, 8(2): 79-83.]
- [6] Yin Jie, Yin Zhan'e, Yu Dapeng, et al. Hazard analysis of extreme storm flooding in the context of sea level rise: A case study of Huangpu river basin. *Geographical Research*, 2013, 32(12): 2215-2221. [殷杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 海平面上升背景下黄浦江极端风暴洪水危险性分析. *地理研究*, 2013, 32(12): 2215-2221.]
- [7] Li Maolin, Jin Guocheng, Zhou Lijia, et al. Analysis on the characteristics of sea level change in the Pacific Ocean

- based on multi-satellite altimeter data. *Journal of Ocean Technology*, 2017, 36(1): 37-41. [李茂林, 金国成, 周立佳, 等. 基于多星融合高度计数据的太平洋海域海平面变化特征分析. *海洋技术学报*, 2017, 36(1): 37-41.]
- [8] Wu Bingfang, Zhang Miao. Remote sensing: Observations to data products. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2093-2111. [吴炳方, 张森. 从遥感观测数据到数据产品. *地理学报*, 2017, 72(11): 2093-2111.]
- [9] Yan Baiyang. Assessment of social-economic vulnerability of the megacity of Shanghai to sea-level rise and associated storm surges [D]. Shanghai: East China Normal University, 2016. [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.]
- [10] Li Yongping, Qin Zenghao, Duan Yihong. An estimation and assessment of future sea level rise in Shanghai region. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(5): 393-403. [李永平, 秦曾灏, 端义宏. 上海地区海平面上升趋势的预测和研究. *地理学报*, 1998, 53(5): 393-403.]
- [11] Cheng Heqin, Wang Dongmei, Chen Jiyu. Study and prediction of the relative sea level rise in 2030 in Shanghai area. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 11(4): 231-238. [程和琴, 王冬梅, 陈吉余. 2030年上海地区相对海平面变化趋势的研究和预测. *气候变化研究进展*, 2015, 11(4): 231-238.]
- [12] Zheng Dawei, Yu Nanhua. Research on the long-range forecast for the third of sea level rising in the area of Shanghai. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 1996, (17): 36-45. [郑大伟, 虞南华. 上海地区海平面上升趋势的长期预测研究. *中国科学院上海天文台年刊*, 1996, (17): 36-45.]
- [13] Gu Xiaoli, Li Peiliang, Tan Haitao, et al. Sea level variation analysis with RBF neural network based EMD method. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(5): 532-539. [顾小丽, 李培良, 谭海涛, 等. 基于RBF神经网络的EMD方法在海平面分析中的应用. *海洋与湖沼*, 2009, 40(5): 532-539.]
- [14] Li Xiang, Duan Xiaofeng, Liu Kexiu, et al. The risk assessment research on the sea level rise of Tianjin and Hebei coastal areas. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(3): 108-114. [李响, 段晓峰, 刘克修, 等. 津冀沿海地区海平面上升的风险评估研究. *灾害学*, 2014, 29(3): 108-114.]
- [15] Yi Si, Tan Jinkai, Li Mengya, et al. Projection of sea level rise and its impacts on coastal wetlands within the Yangtze estuary. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 13(6): 598-605. [易思, 谭金凯, 李梦雅, 等. 长江口海平面上升预测及其对滨海湿地影响. *气候变化研究进展*, 2017, 13(6): 598-605.]
- [16] Luo Zidan, Meng Xianwei, Luo Xinzhen. Impact of global sea level rise, crustal rise and tidal flat sedimentation for one hundred years on the mangrove distribution in the Yingluo Bay of Guangxi. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(2): 209-216. [罗紫丹, 孟宪伟, 罗新正. 百年内全球海平面上升、地壳上升和潮滩沉积对广西英罗湾红树林分布的影响. *海洋通报*, 2017, 36(2): 209-216.]
- [17] Sun Zhilin, Li Guanghui, Xu Dan, et al. Predicting the impact of sea level rise on saltwater intrusion in the Qiantang Estuary. *China Environmental Science*, 2017, 37(10): 3882-3890. [孙志林, 李光辉, 许丹, 等. 海平面上升对钱塘江河口盐水入侵影响的预测研究. *中国环境科学*, 2017, 37(10): 3882-3890.]
- [18] Jiang Changbo, Huang Qiong, Wu Zhiyuan, et al. Numerical study of sandy beach profile induced by change of sea-level. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(1): 81-87. [蒋昌波, 黄琼, 伍志元, 等. 沙质岸滩形态对海平面变化响应的数值研究. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2017, 32(1): 81-87.]
- [19] Huang Xiaojun, Huang Xin, Cui Cailan, et al. The concept, analytical framework and assessment method of social vulnerability. *Progress in Geography*, 2014, 33(11): 1512-1525. [黄晓军, 黄馨, 崔彩兰, 等. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1512-1525.]
- [20] Li Xiang, Liu Kexiu, Dong Junxing, et al. Research on the risk zoning method of sea level rise in China. *Marine Forecasts*, 2014, 31(2): 41-49. [李响, 刘克修, 董军兴, 等. 中国沿海海平面上升风险区划方法研究. *海洋预报*, 2014, 31(2): 41-49.]
- [21] Liu Shuguang, Liu Yang, Yin Peng. International research on progress in measures of dealing with sea level rise. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, 2017, (6): 7-10. [刘曙光, 刘洋, 尹鹏. 海平面上升对策问题国际研究进展. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2017, (6): 7-10.]
- [22] Wong P P, Losada I J, Gattuso J P, et al. Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 361-409.
- [23] Wen Jiahong, Yuan Suiping, Li Dali, et al. Sea level rise and its risk management. *Process in Geography*, 2018, 33(4): 350-360. [温家洪, 袁穗萍, 李大力, 等. 海平面上升及其风险管理. *地理科学进展*, 2018, 33(4): 350-360.]
- [24] Li You, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Assessment of loss of ecosystem service value under sea-level rise: A case study

- of Shekou Peninsula in Shenzhen. *Process in Geography*, 2009, 28(3): 417-423. [李猷, 王仰麟, 彭建, 等. 海平面上升的生态损失评估: 以深圳市蛇口半岛为例. *地理科学进展*, 2009, 28(3): 417-423.]
- [25] Zhang Ping, Kong Hao, Wang Daifeng, et al. The impact of sea-level rise superimposed storm surges on China's ocean economy in 2050. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(1): 129-135. [张平, 孔昊, 王代锋, 等. 海平面上升叠加风暴潮对2050年中国海洋经济的影响研究. *海洋环境科学*, 2017, 36(1): 129-135.]
- [26] Muis S, Verlaan M, Nicholls R J, et al. A comparison of two global datasets of extreme sea levels and resulting flood exposure. *Earth's Future*, 2017, 5(4): 379-392.
- [27] Hinkel J, Lincke D, Vafeidis A T, et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3292-3297.
- [28] Ward P J, Jongman B, Salamon P, et al. Usefulness and limitations of global flood risk models. *Nature Climate Change*, 2015, 5(8): 712-715.
- [29] Rogers A. *Introduction to Multiregional Mathematical Demography*. New York: Wiley, 1975.
- [30] Lutz W. Population-development-environment: understanding their interactions in Mauritius. *Population*, 1995, 50(2): 525-526.
- [31] Cao G Y, Lutz W. China's future urban and rural population by level of education. 2016. <http://pure.iiasa.ac.at/7255>.
- [32] Goujon A, Kc S. The past and future of human capital in South-east Asia. *Asian Population Studies*, 2008, 4(1): 31-56.
- [33] Goujon A, Alkitkat H, Lutz W, et al. Population and human capital growth in Egypt: projections for governmental to 2051. 2007. <http://pure.iiasa.ac.at/8445>.
- [34] van Vuuren D P, Riahi K, Moss R, et al. A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2012, 22(1): 21-35.
- [35] Jiang Tong, Zhao Jing, Jing Cheng, et al. National and provincial population projected to 2100 under the shared socioeconomic pathways in China. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 13(2): 128-137. [姜彤, 赵晶, 景丞, 等. IPCC共享社会经济路径下中国和分省人口变化预估. *气候变化研究进展*, 2017, 13(2): 128-137.]
- [36] Dort T, Schecroun N, Standaert B. Improving the hospital quality of care during winter periods by optimizing budget allocation between rotavirus vaccination and bed expansion. *Applied Health Economics and Health Policy*, 2018, 16(1): 123-132.
- [37] Roshdi I, Hasannasab M, Margaritis D, et al. Generalised weak disposability and efficiency measurement in environmental technologies. *European Journal of Operational Research*, 2018, 266(3): 1000-1012.
- [38] Jiang Tong, Zhao Jing, Cao Lige, et al. Projection of national and provincial economy under the shared socioeconomic pathways in China. *Advances in Climate Change Research*, 2018, 14(1): 50-58. [姜彤, 赵晶, 曹丽格, 等. 共享社会经济路径下中国分省经济变化预测. *气候变化研究进展*, 2018, 14(1): 50-58.]
- [39] Gao Chao, Zhang Zhengtao, Liu Qin, et al. Study on the optimal grid method in assessment of vulnerability to floods disaster: A case study in the mainstream of Huaihe River Basin. *Journal of Natural Disasters*, 2018, 27(3): 119-129. [高超, 张正涛, 刘青, 等. 承灾体脆弱性评估指标的最优网格化方法: 以淮河干流区暴雨洪涝灾害为例. *自然灾害学报*, 2018, 27(3): 119-129.]
- [40] Ge Quansheng. *A Preliminary Research on the Comprehensive Assessment of Natural Disaster Risk in China*. Beijing: Higher Education Press, 2008. [葛全胜. *中国自然灾害风险综合评估初步研究*. 北京: 高等教育出版社, 2008.]

Population and economic risk exposure in coastal region of China under sea level rise

GAO Chao¹, WANG Li², CHEN Cai¹, LUO Gang¹, SUN Yanwei¹

(1. Department of Geography & Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. School of Tourism and Research Institute of Human Geography, Xi'an International Studies University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on the Global Tide and Surge Reanalysis (GTSR) dataset, the relevant Digital Elevation Model (DEM) was imported into ArcGIS and spatial analysis tools were used to extract possible flooding ranges due to sea level rise in 11 provinces and cities of coastal China. Combined with population, economic, and land use data, a sea level rise risk exposure assessment model is constructed and the population and economic risk exposure from sea level rise in coastal region of China are assessed. Three primary conclusions are drawn from the evaluation: (1) The impact of sea level rise on the coast areas is mainly concentrated in the Yangtze River Delta and northern Jiangsu coastal plains, as well as the Pearl River Delta and Bohai Rim, and other coastal plain areas. The most seriously affected land use types are arable land, which accounts for 65% of affected areas, followed by construction land; (2) Based on population and economic statistics from 2015 and 10 to 1000 years return periods, sea level rise increases risks to populations and the aggregated economy. In terms of sea level rise risk exposure, Guangzhou is most exposed and other areas with high exposure are concentrated in the Yangtze River Delta, northern Jiangsu coastal plains, the Pearl River Delta and Bohai Rim Region; (3) Based on population and economic statistics estimated using five shared social economic paths (SSPs), and variations in return periods from 10 to 1000 years, the gross population and the aggregated economies for 2025 and 2100 tended to increase in different paths. The conventional development path (SSP5) resulted in the largest affected population and aggregated economy while the local or inconsistent development path (SSP3) and unbalanced development path (SSP4) resulted in lower impacts than those of the other three paths. Changes in the return period from 10 to 1000 years can shift the risk exposure. Comparing the exposure risk to the population and economies, we found that the exposure degree in 2100 will be lower than that in 2025.

Keyword: sea level rise; GTSR data; exposure; return period; SSPs; coastal area of China