

朱黎青,高翹,朱春阳.气候变化视角下上海黄浦江滨水区洪涝风险评估与分区分策[J].华中农业大学学报,2023,42(4):42-52.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.006

气候变化视角下上海黄浦江滨水区洪涝 风险评估与分区分策

朱黎青¹,高翹²,朱春阳²

1.上海交通大学设计学院,上海 200240; 2.华中农业大学园艺与林学院,武汉 430070

摘要 为进一步降低河口城市滨水区因气候变化引起的洪涝灾害风险,提高城市抗洪能力,基于政府间气候变化专门委员会(IPCC)关于风险的定义,按照危险性、脆弱性、暴露度构建洪水风险指数评估模型,选取11个评价指标,采用场景模拟与GIS空间叠加的方法计算洪水风险指数。选取上海市黄浦江滨水空间为研究区,并分别以2030年、2050年及2100年为时间节点进行情景模拟,进一步按照人口密度单因子进行叠加评价,通过情景模拟识别黄浦江滨水空间景观,更新“三区三策”。结果显示:根据黄浦江滨水区气候变化目标下洪水风险的空间格局,显示风险等级逐年提高;在2050及2100年的场景模拟中,黄浦江上、下游两部分均显示了高洪涝风险段。采取抵抗(抗洪)策略的岸线逐年增长,对城市高密度人口区等区域威胁日益增大;采取疏散策略的岸线逐年增长,水岸的宜居性降低;采取共处(承洪)策略的岸线逐年减少,需要采取更多抵抗策略与疏散策略。根据气候变化视角下黄浦江滨水区洪涝风险分区分策,泛洪区位于宝山区以东及浦东新区西北角,黄浦江滨水空间需要采取后退疏散策略,实施人口疏散,规划“河口保护计划”,以及在中游松江区内进行生态湿地建设;抗洪区位于中心城区,滨水空间需要继续采取抵抗洪水策略,且风险日益扩大;承洪区位于大部分黄浦江滨水空间,可采取与洪共处策略,但潜力日益缩小。

关键词 气候变化适应; 河口城市; 滨水区; 洪涝风险评估; 适洪策略

中图分类号 X43 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0042-11

工业革命以来,位于海陆河交界处的河口城市快速发展,人口与经济活动高度密集。然而,温室气体增加所导致的全球气候变化,使得河口城市面临前所未有的极端天气和超出自然变率的异常洪涝。此外,快速城市化引发自然水面减少及下渗困难,将加剧台风风暴潮及洪涝带来的危害,影响河口城市居民生产和生活安全。如何对灾害进行预判及进行适应以降低预期灾害损失,相关学者基于历史典型台风风暴潮与未来风暴潮不同重现期的预测,进行了情景模拟和风险评估等研究^[1-3]。贺芳芳等^[4]进行了基于情景预测的综合风险研究,重点关注了台风风暴潮。宋城城等^[5]及Wang等^[6-7]分别模拟了2040年与2030年/2050年/2100年上海风暴潮复合灾害情景的洪涝淹没情况。Wang等^[7]以上海为案例城市,模拟沿海气候灾害,评估了地面沉降、海

平面上升与风暴潮等因素综合后上海在2030年/2050年/2100年面临的洪涝风险。殷杰等^[3]模拟了2030年及2050年黄浦江风暴潮漫滩情况。Wang等^[1]系统地收集上海风暴潮、海平面上升和地面沉降数据,使用MIKE研究海堤和堤防被破坏的21种模型,并模拟了海防与堤防受破坏造成黄浦江漫滩的灾难场景(2030年/2050年/2100年),研究结果表明,洪水对未来黄浦江滨水空间用地影响极大,且洪水的分布在空间上呈现非匀质性。

洪涝风险指数常以集水区规模为标准,朱诗尧^[8]基于高精度地形表面模型进行雨洪模拟,对抗涝韧性进行了度量;Zonensein^[9]基于巴西等发展中国家实际情况定义了洪涝风险指数,该指数由洪涝属性与洪涝后果乘积组成,后果代表洪涝的暴露度与脆弱性。Miguez等^[10]采用MODCEL模型诠释了洪涝

收稿日期: 2022-10-30

基金项目: 国家留学基金委资助项目([2015]3069号)

朱黎青, E-mail: lqzhu88@sjtu.edu.cn

通信作者: 高翹, E-mail: gaochi@mail.hzau.edu.cn

的属性,探讨了河流、雨水径流及下水道排水对洪涝属性的影响;Zhang 等^[11]对大流域尺度进行洪涝风险评估,构建了空间多指标模型。这些指数和指标模型能够规范化地在空间上协同量化风险,从而评估洪涝的空间分布危险指数,对分区施策带来极大帮助。

面对气候变化日益增长的风险,城市管理思路将从城市排水转向洪涝风险管理,进一步建立综合洪涝风险指数和洪涝风险的概念,构建城市洪涝风险管理模型,将能够预测未来超过设计标准的防洪响应^[10]。根据 IPCC 提出的风险定义,洪涝风险由危险、脆弱性与暴露度组成。将洪涝风险进行叠加和分析,生成综合洪涝风险空间分布图,显得十分重要。但目前有关城市空间洪涝风险该如何采取对策的研究尚处于空白。上海市是典型的河口城市,黄浦江贯穿上海陆域,黄浦江两岸受风暴潮及相关洪水影响最大的范围约为沿岸纵深 2~3 km。面对未来气候变化,黄浦江滨水区域脆弱且暴露度大,未来极端洪涝灾害极可能给黄浦江沿岸带来严重影响。管控未来洪涝风险、增强气候灾害适应能力特别是洪涝灾害适应能力是上海市黄浦江滨水空间更新过程中必须正视的现实问题。

本研究选取上海市黄浦江滨水区作为对象,基于气候变化视角,对城市滨水区洪涝风险评估与分区分策进行研究,目的在于提高城市抗洪能力,为城市洪涝风险韧性空间的规划提供理论和实践依据,以降低洪灾风险。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

上海市人口高度密集且地势低洼,海拔 3~4 m,四分之一区域位于海拔 3 m 以下,黄浦江贯穿上海陆域。上海经常受到极端热带风暴潮的影响,过度淹没的风险很大。

1.2 气候变化适应性评价与流程

根据 IPCC 有关气候变化相关术语,危险性是指自然灾害发生的严重程度和概率,而脆弱性则是指社会、经济和环境系统在应对自然灾害时的抵抗能力;脆弱性越高,系统面对自然灾害的承受能力就越低;暴露性指的是人类活动和财产在不同自然灾害中的暴露程度。当危险性、脆弱性和暴露性相互作用时,就会产生风险。因此,风险评估需要综合考虑这 3 个要素,以便更好地理解和管理自然灾害造成的风险。本研究基于未来洪涝风险的危害性、暴露性与脆弱性及其对应的指标层进行全面审查和分析要点,获取上海市黄浦江滨水空间需要解决的洪涝风险的空间分布;再与人口密度等叠加,统筹权衡并识别出抗洪区、承洪区与泛洪区。针对不同滨水空间带采取“三区三策”,包括抵抗治洪策略、与洪共处策略及迁离水岸的策略。

1.3 评价准则与指标

1) 准则层与指标层。按 AHP 方法,以评价的目标层定义洪涝风险,危险性、脆弱性与暴露度组成评价的准则层。根据准则层建立多指标评价体系。根据因气候变化导致的洪涝风险相关的危险性、暴露度及脆弱性的相关研究,以及对国土空间双评价的有关洪涝风险的成果中的指标进行了收集分析,得到河流滨水洪涝风险指标集(表 1)。

基于文献阅读、专家咨询、数据的可获得性及空间布局的可行性,建立基于 GIS 空间分布的多指标模型来评估河口城市的滨水空间景观更新所面临的洪涝风险(表 2)。多指标体系包含目标层、准则层和指标层,其中目标层的指标是河流洪涝风险指数,而准则层则包括危险指数、脆弱指数和暴露指数。对指标层进行 GIS 空间叠加分析,试模拟所涉及到的 11 个指标在 2030 年、2050 年及 2100 年的空间分布,归一化处理后,再叠加分析,计算评价结果。在 0~1

表 1 气候变化适应性目标下的洪涝风险指标集
Table 1 Flood risk indicators set under climate change adaptation goals

项目 Item	归纳的指标 Inductive metrics	引用文献 Cited literature
危险性 Hazard	降水因子、风暴潮因子、河流洪涝影响因子、内涝影响因子等	[1-2, 6-7, 11-16]
脆弱性 Vulnerability	高程、坡度、地面沉降、排水密度、地表径流因子、植被覆盖因子、水面率、绿地率、堤防达标率、排水管网密度、河湖蓄容量、监测和预警能力等	[1, 6-7, 11-12, 14-15, 17-19]
暴露度 Exposure	人口密度、地均 GDP、土地利用类型、空间类型与建筑质量、水土流失度、现场污染风险、未成年人口比例、65 岁及以上比例、残疾人比例、老式房屋和低标住宅比例、每 10 万人中刑事案件发生率等	[13, 15, 17-18, 20-21]

区间内,数值越高,表示气候变化适应性视角下的洪涝灾害风险度越高,数值越小表示风险度越低。除了可用的公开数据外,引用了部分公开成果,根据相关领域学者文献进行解译而成(表2)。

表 2 气候变化适应性目标下的洪涝风险指标体系

Table 2 Flood risk indicator system under climate change adaptability goals

准则层 Guideline level	指标层 Indicator level	来源/解析度 Source/Resolution
危险指数(H_i) Hazard index	降水因子 Precipitation factor	中国气象信息中心(1 km)
	风暴潮淹没因子 Storm surge inundation factor	文献解译 ^[7]
	河流洪涝影响因子 River flooding impact factor	文献解译 ^[6-7]
脆弱指数(V_i) Vulnerability index	高程 Elevation	地理空间数据云平台 GDEMDEM 30M
	地面沉降 Ground subsidence	文献解译 ^[7]
	排水密度 Drainage density	国家1/25万基础地理信息数据,通过河网长度除以单位面积计算
	地表径流因子 Surface runoff factor	国家1/25万基础地理信息数据,根据土地利用不同进行赋值
暴露指数(E_i) Exposure index	人口密度 Population density	上海统计年鉴(2000—2019年)
	地均 GDP GDP per land area	上海统计年鉴(2000—2019年)
	土地利用类型 Land use type	根据 Landsat 5、7、8 数据进行遥感解译,采用BP法土地利用类型模拟
	建筑空间类型 Building space type	根据 Landsat 5、7、8 数据进行遥感解译,采用BP法空间类型模拟

城市的脆弱性与人口密度问题密不可分,高人口密度呈现着易遭受严重伤害的区域特征^[21]。人口密度高,适洪能力弱,洪涝风险大。本研究将风险结果与人口密度进行结合评估滨水空间景观更新策略,为免重复,在洪涝风险评估中没有纳入人口密度,而是在后续策略评估中将人口密度与洪涝风险评估结果进行叠加运算。根据 IPCC 的报告,人员和经济资产暴露度与天气和气候灾害有关的经济损失表现出一定的正相关关系,暴露度和脆弱性趋势是灾难风险变化的主要驱动力,这两点具有高可信度^[19]。基于 IPCC 论述,在上述多指标评价基础上对多指标进行延伸模拟基于气候变化的 3 种洪涝风险图景(scenario),分别对应 2030 年、2050 年、2100 年。

2) 指标计算。采用 AHP 层次分析法建立评价模型,构造判断矩阵并计算权重。基于专家咨询方法的问卷调查,选择城乡规划、水利、风景园林、地理等学科领域的专家对指标的重要性进行评分。根据各个准则层和指标层的权重,计算得到了每个指标的综合权重。危险性准则层下的指标层包括降水、河流洪涝和风暴潮,对应的综合权重分别为 0.620 1、0.153 3 和 0.378 1;脆弱性准则层下的指标层包括高程、地面沉降、排水密度和地表径流因子,对应的综合权重分别为-0.129 5、0.064 8、0.034 9 和 0.020 1;暴露度准则层下的指标层包括地均 GDP、土地利用类型和建筑空间类型,对应的综合权重分别为 0.023 8、0.119 1 和 0.014 2。

1.4 场景模拟

本研究利用场景模拟方法进行分析,根据数据

可获取性、GIS 空间化易表达以及场景模拟分析形成指标体系。由于气候场景模拟涉及水文学、地理学、气象学等众多自然学科,因此,不同学科领域的场景模拟参考相应研究领域的代表性成果,并且统一场景模拟的时间为 2030 年、2050 年与 2100 年。

1) 河流洪涝影响模拟。参考文献[1],并使用简化的二维洪水淹没模型(FloodMap-Inertial)模拟堤坝故障引起的洪水并推导淹没图(2030 年、2050 年、2100 年百年一遇)^[12],与地理空间数据云平台数据结合处理而成。

2) 风暴潮影响模拟。通过二维 MIKE 21 模型模拟上海市 2030 年、2050 年和 2100 年风暴潮灾难图景,其中,流量模型 MIKE 21 FM 使用二维浅水方程的垂直平均值,并采取离散 ADI(ahernating direction implicit)方法和双重扫描算法来计算有效差分^[6-7]。

3) 降水因子。以上海市降水量为研究对象,建立 GRNN 广义回归神经网络模型,结合逐步回归分析和 BP 神经网络进行拟合和模拟。模型数据与 1949—2000 年的降水量进行对照,效果较好。本研究根据其模型形成的曲线推算 2030 年、2050 年及 2100 年 3 个时期年降水情况。

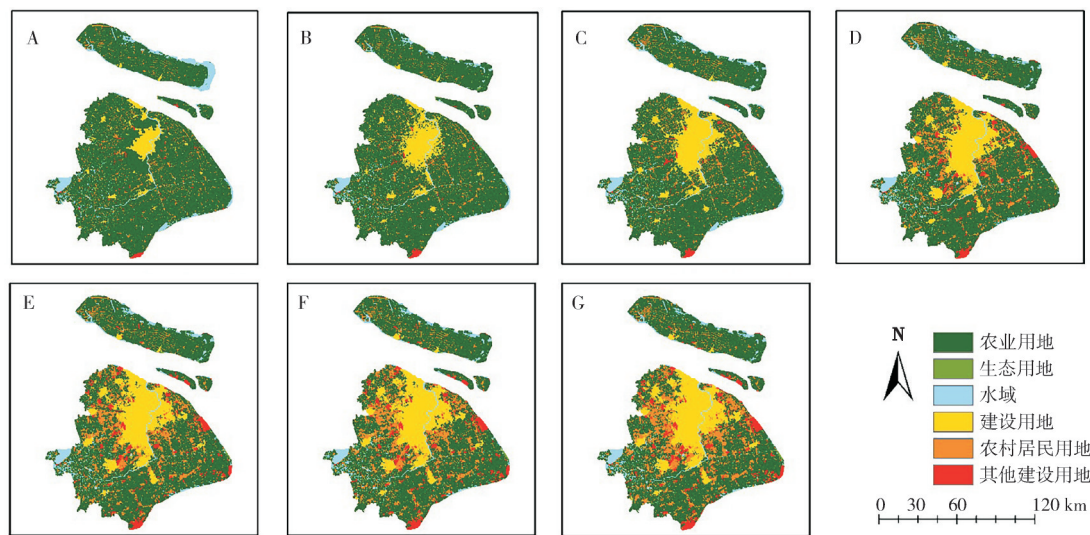
4) 高程。高程采用地理空间数据云平台 GDEMDEM 30M 成果。

5) 地面沉降因子模拟。上海市地面沉降分自然沉降与人为沉降两部分,基于长期监测数据,上海的新构造沉降稳定在 1.5 mm/a^[7]。人为沉降的空间数据来自上海地质研究所的长期监测项目(1985—2005 年)。

6)排水密度。排水密度通过河网长度除以单位面积计算,采用国家1/25万基础地理信息数据。因为河流受到严格的法定保护,假定2030年、2050年及2100年河流形态不受变化。

7)土地利用类型。本研究利用根据Landsat 5、7、8进行遥感解译数据,构建BP神经网络空间类型模拟得到2030年、2050年及2100年模拟数据。具体过程为:运用获得的中国科学院资源环境数据中心

1980年、1990年、1995年、2000年、2005年、2008年、2015年共7个时期土地利用数据解译(图1),在GIS软件中首先对各个年份土地利用数据进行空间配准,然后对地类进行重新分类,统一为6大地类,分别为农业用地、建设用地、农村居民用地、生态用地、其他建设用地与非建设用地,分类完成后,通过转化工具从栅格转出,再导入IDRISI软件的土地利用数据进行重新分类,实现地类分类呈现。



A:1980年;B:1990年;C:1995年;D:2000年;E:2005年;F:2008年;G:2015年.

图1 上海市1980—2015年不同时期的土地利用分类情况

Fig.1 Land use classification of Shanghai in different periods from 1980 to 2015

应用2015年以前的多期数据在Markov模块中生成土地利用数据转移矩阵。Markov工具用于分析2组土地利用类型数据之间的变化情况,计算得到1个过渡概率矩阵、1个过渡区域矩阵和1组条件概率文件。过渡概率矩阵记录了2组土地利用类型数据中每个土地类别转变为其他类别的概率;过渡区域矩阵记录了在单位时间内每个土地类别转变为其他土地类别的期望像素数量;条件概率文件组表征了在单位时间后每个像素出现各个土地类别的概率。CA_MARKOV工具是一个基于概率论的马尔科夫链,以元胞自动机为演变引擎的土地演变预测程序。通过输入基础土地利用类型图像、过渡区域矩阵、过渡适宜性文件组,工具以元胞自动机为引擎进行土地类型的演化预测。元胞自动机次数决定了演化的迭代次数,或者说对于演化时间段的划分次数,也代表了对每次迭代的时间单位的定义。对于1次10 a跨度的预测,迭代次数10代表了每次演化基于1 a的土地利用变化,迭代次数20则将以6个月

作为迭代演化的单位时间。CA_MARKOV工具需要相当长的演化预算时间,并随着迭代次数增加大幅增加。

8)建筑空间类型。从上述模拟中分离相关要素,进一步得到建筑空间类型敏感度。从建筑质量来看,城镇建筑质量高于农村居民点,农村居民点高于其他建设用地(存在诸多工矿企业建筑)。根据建筑空间类型敏感度归一化取值:非建设用地建筑空间为0.000,城镇建筑空间为0.333,农村居民点建筑空间为0.667,其他建设用地建筑空间1.000。

9)地表径流因子。本研究地表排水系数取值基于GB 50015—2009《建筑给水排水设计规范》,地表建筑密集区屋顶与道路取值0.9,较密集区取值0.5,建筑稀疏区取值0.3,公园绿地取值0.15。由于建筑与道路对于上海市域而言过于详细,且城市建设大部分完成后不同年份变化有限,考虑到本项指标占总权重约2%,因而没有进行2030年、2050年及2100年的场景模拟,此指标均采用2019年数据。

10)地均GDP。数据取2000—2019年上海统计年鉴数据,与上述土地用途的BP法模拟进行耦合,测算2030年、2050年及2100年的空间分布情况。

11)人口密度。由于要单独将人口密度与洪涝风险评估结果进行空间叠加计算以得出适应策略,为避免重复计算,此处将人口密度从风险评估中移去。

2 结果与分析

2.1 未来洪涝风险指数模拟结果

根据本研究提出的场景模拟方法,对所有10个指标分别模拟了2030年、2050年及2100年的空间表现,为便于相互比较,对场景模拟数据进行归一化处理,模拟结果如图2所示。在场景模拟基础上,按综合权重对各因素进行空间叠加分析,得到2030年、2050年及2100年的洪涝灾害风险度空间分布结果(图3)。从图3可知,因为气候变化的原因,2030至2050年的风险度等级逐年提高。在2050年及2100年的模拟中,黄浦江上、下游两部分均显示为高洪涝风险段。

2.2 洪涝风险空间分布的“三区三策”评估

对洪涝灾害进行风险性评估的目的是通过评估获得城市滨水空间景观更新的“三区三策”,获得抗洪、承洪与泛洪的3种区域划分依据。得到这种水岸策略,需要将洪涝风险指数继续与滨水空间水岸沿线人口密度进行叠加,进行空间计算得到相应结果。

根据本研究AHP模型计算结果,得到上海市2030年、2050年、2100年洪涝风险度空间分布的评价结果,与人口分布数据进行叠加运算得出不同策略类型。社会学科对人口分布进行预测有多种复杂模型,但难于按人口密度在空间进行分布。事实上,上海市人口增长受严格的地方人口准入、建设用地政策限制等因素影响。虽然政策难于预测,但可以按建设用地中不同类型用地的此消彼长,按预测前的人口密度与用地类型的对应关系预测用地类型变化后的人口密度分布。采用的具体方法是以预测前的地类人口密度为准,按2030年、2050年、2100年用地类型预测结果,对人口密度地图进行计算,获得相应人口密度分布。对人口密度进行划分时,以1万人/km²(100人/hm²)作为相对合理的城市人口密度标准,根据实际情况进行人口密度划分。其中: ≥ 200 人/hm²为高人口密度、 100 人/hm² \leq 中

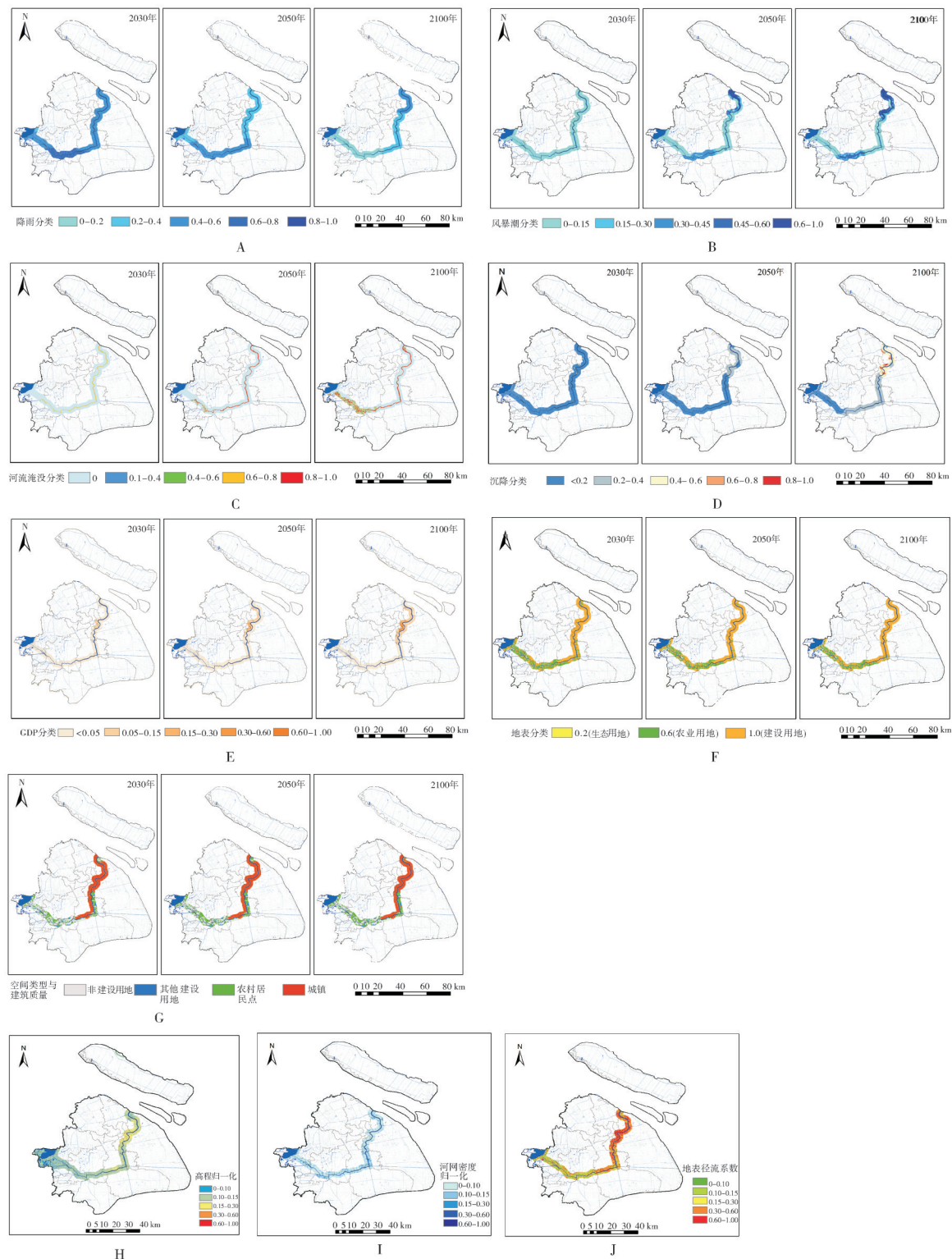
高人口密度 <200 人/hm²、 25 人/hm² \leq 中低人口密度 <100 人/hm²、低人口密度 <25 人/hm²(图4)。根据黄浦江两岸受风暴潮及相关洪水影响范围的最大值,选取黄浦江两岸各2 km范围淹没提取不同年份的评价结果,与不同人口密度进行叠加计算,根据结果采取不同策略,利于准确统计水岸研究结果所示的更新策略即抗洪、承洪及泛洪区相对的水岸线长度。

根据上述评估洪涝风险结果和人口密度分类结果,将黄浦江滨江区划分为抗洪区(策略是抵抗)、承洪区(策略是共处)与泛洪区(策略是疏散)。其中,高密度的人口无论面临哪一类洪涝风险,均采取抵抗策略;面临中、低洪涝风险的中高密度人口区采取抵抗策略;面临低洪涝风险的中高人口密度、中低人口密度与低人口密度区域采用与洪涝共处的策略;面临高洪涝风险的中低人口密度与低人口密度区域采用疏散策略(表3)。

根据表3所示更新策略,将人口密度单因子与模拟的2030年、2050年及2100年洪涝风险度空间分布进行叠加运算,得到黄浦江两岸2 km邻水区适应洪涝策略空间分布结果(图5)。根据上述洪涝敏感性模拟结果,得到不同策略对应的滨水空间面积(表4)。

从图5和表4可知,随着气候变化以及建设用地增长和相应的指标层的变化,黄浦江滨水空间景观的更新策略也会发生变化。从滨水空间景观更新策略的对应面积上看,黄浦江两岸需要采取抵抗策略的面积随时间变化日益增长,从2030年的102.247 km²,增加到2050年的116.852 km²,并进一步增加到2100年的143.971 km²。需要采取共处策略的面积随时间变化日益减少,从2030年的684.188 km²,减少到2050年的646.266 km²,并进一步减少到2100年的537.577 km²。而采取疏散策略的面积日益增长,从2030年的5.840 km²,增加到2050年的29.157 km²,以及进一步增加到2100年的110.727 km²。结果表明,随气候变化洪涝风险日益加大,与洪共处的可能性降低,滨水空间宜居性也在降低。

随着气候变化滨水空间景观的更新策略发生变化,主要规律表现为:采取抵抗(抗洪)策略的岸线逐年增长,是因为随气候变化沿岸的洪涝风险日益加大,对城市高密度人口区等区域的威胁日益增大。采取疏散策略的岸线逐年增长,是因为随气候变化沿岸的洪涝风险日益加大,水岸的宜居性降低。采



A:降雨 Rainfall;B:风暴潮 Storm surge;C:黄浦江洪涝淹没 Flood forecast of Huangpu River;D:地面沉降 Land subsidence; E: 地均 GDP Local average GDP;F:用地分类 Land use classification;G:空间类型与建筑质量空间分布 Plane distribution and normalization of space types and building quality;H:上海市地面高程 Shanghai ground elevation;I:河流密度 River density;J:地表径流排水系数 Surface runoff drainage coefficient.

图2 上海市黄浦江滨水空间2030年、2050年及2100年场景模拟及归一化结果

Fig.2 Scenario simulation and normalization results of Huangpu River waterfront space in Shanghai in 2030, 2050 and 2100

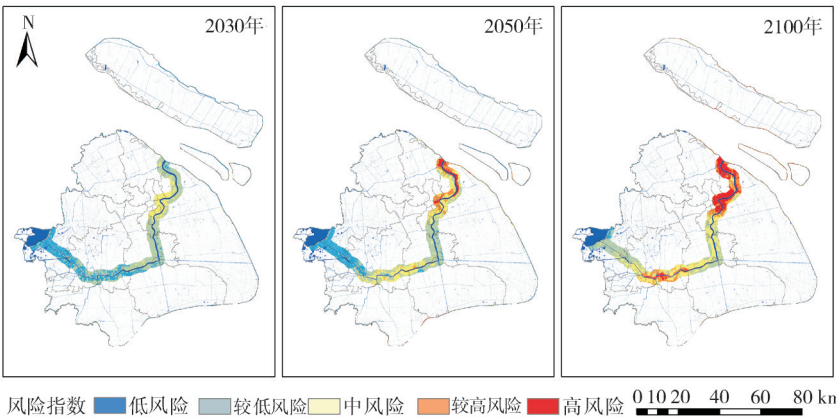


图 3 上海市黄浦江滨水空间洪涝风险分布

Fig.3 Flood risk distribution of the Huangpu River waterfront space in Shanghai

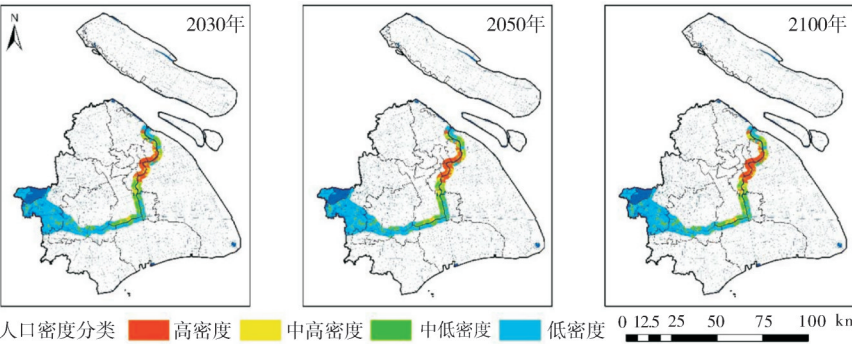


图 4 上海市人口密度分类示意图

Fig.4 Schematic diagram of population density classification in Shanghai

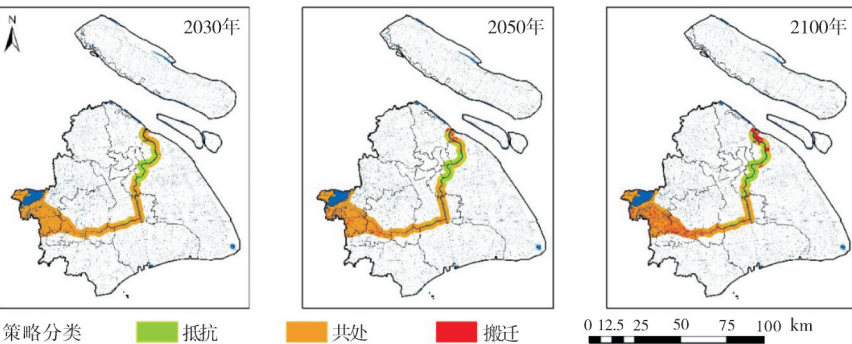


图 5 黄浦江两岸 2 km 邻水区适应洪涝策略空间分布

Fig.5 Spatial distribution of flood strategy within 2 km on both banks of Huangpu River

取共处(承洪)策略的岸线逐年减少,是因为随洪涝风险增长,需要采取更多抵抗策略与疏散策略,人们能与洪共处的空间越来越小。上述结果表明,在进行水岸线景观更新决策时,需要根据景观更新的合理使用年限来确定相应的策略。

2.3 黄浦江“河口保护计划”与生态湿地建设评估

黄浦江下游连接长江的河口处,将受影响的两岸宽度适当扩大并进行空间运算,发现防汛墙可以后退至抗洪策略处,留下的地方建成绿地与湿地以

适应未来气候变化。到 2030 年时,洪涝风险还不太明显;而根据 2050 年的洪涝图景,评估发现黄浦江河口将出现疏散区,即综合各要素而言,形成不适合居住及其他建设的地方。该区域位于上海市宝山区东面及浦东新区西北角,此处滨水空间在城市旧改时,宜疏散人口,建为泛洪区。泛洪区域建成公园绿地或湿地,平时可供人们游览,泛洪时则闭园。在泛洪区与抗洪区之间需要建设防汛墙,即该防汛墙的建设可以沿抗洪区而建。该抗洪策略形成的新的防汛

表 3 气候变化适应性目标下不同人口密度的滨水空间景观更新策略

Table 3 Waterfront landscape renewal strategies under different population densities and climate change adaptation goals

等级 Grade	高人口密度 High population density	中高人口密度 Medium to high population density	中低人口密度 Low to medium population density	低人口密度 Low population density
低洪涝风险 Low risk of flooding	抵抗 Resistance	共处 Accommodation	共处 Accommodation	共处 Accommodation
中低洪涝风险 Low to medium risk of flooding	抵抗 Resistance	共处 Accommodation	共处 Accommodation	共处 Accommodation
中等洪涝风险 Medium risk of flooding	抵抗 Resistance	抵抗 Resistance	共处 Accommodation	共处 Accommodation
中高洪涝风险 Medium to high risk of flooding	抵抗 Resistance	抵抗 Resistance	共处 Accommodation	疏散 Evacuation
高洪涝风险 High risk of flooding	抵抗 Resistance	抵抗 Resistance	疏散 Evacuation	疏散 Evacuation

表 4 滨水空间景观更新策略对应面积(两岸各宽 2 km)

Table 4 Corresponding area of waterfront landscape renewal strategy (2 km on both sides) km²

时期 Period	抵抗策略面积 Area of resistance strategy	共处策略面积 Area of accommodation strategy	疏散策略面积 Area of evacuation strategy
2030 年	102.247	684.188	5.840
2050 年	116.852	646.266	29.157
2100 年	143.971	537.577	110.727

墙类似曼哈顿岛的洪涝保护计划,平面呈现“U”形。2050 年长约 7 km、宽约 3 km,类似半圆区域,需要采用泛洪策略;2100 年则扩大到长约 9 km、宽约 4 km 的类似半圆区域,需要采用泛洪策略。该区域应纳入上海黄浦江河口的“BIG U”^[22]保护计划(图 6)。

在黄浦江上游的松江区与青浦区将出现泛洪区域(部分与承洪交织),这些泛洪区域需采用疏散策略,宜设为与江相连的生态湿地。模拟 2050 年情形,该区域为长约 7 km、宽约 4 km 的圆区域;模拟

2100 年情形,该区域扩大至长约 10 km、宽约 6 km 的区域。目前上海市郊区建有一些大型郊野公园,此处适合作为郊野公园或湿地选址。为了适应气候变化,上海市黄浦江河口需要制定“BIG U”计划,黄浦江上游需要规划建设生态湿地计划。该“U”形区域虽然位于河口,由于生态湿地位于上游,且保护的是城市的中心区域,因而具有全市气候适应性目标的全局意义。泛洪区内洪涝风险较高,人口密度相对较少,在未来气候变化背景下,该区域受洪涝影响较大,其适洪性较差。

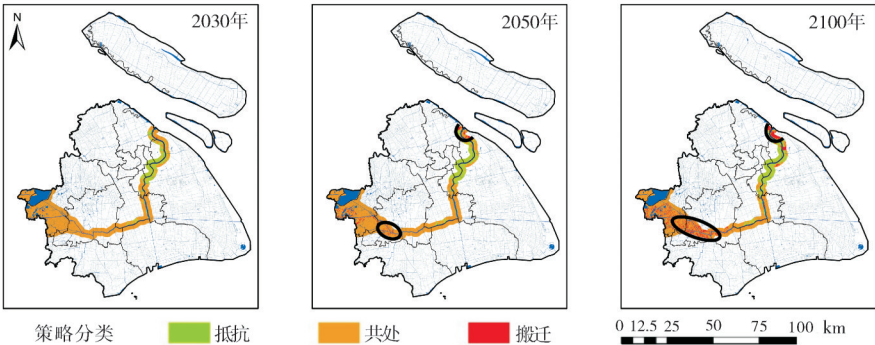


图 6 黄浦江河口 U 形保护示意图

Fig.6 U-shaped protection of the Huangpu River estuary

2.4 黄浦江滨水空间承洪区与洪共处策略

根据上述评价结果,至 2030 年上海市黄浦江可以采取承洪策略的岸线长度为 175.43 km,主要区段从黄浦江上游至上海市主城区的两岸(包含青浦区、

松江区与闵行区,但不含中游的松江区与金山区交界的泛洪区)。随着气候逐年变暖,雨水增加,受洪涝威胁区域增大以及人口增长影响,泛洪岸线将日渐增加。到 2050 年,上海市黄浦江承洪岸线长度将

减少至143.03 km,到2100年该长度还将进一步降至113.317 km。从占比上看,从2030年承洪岸线占总岸线比为72.7%,到2050年相应减少为59.3%,到2100年进一步减少到47.0%。以上岸线是中等人口密度及以下的居民区/商业区/工业区,重建时可以采用承洪策略。

2.5 黄浦江滨水空间抗洪区适洪策略

从抗洪区评价结果来看,上海市中心城区滨水空间需要继续采取抵抗策略且岸线日渐增加。抗洪区的策略主要形式为通过防汛堤保障水安全,通过对岸线长度进行描述得到明确数据。根据上述评价结果,至2030年可以采取抗洪策略的岸线长度为64.640 km,主要区段是上海市外环线内的黄浦江两岸中心城区部分,与闵行区江川路街道部分。随着气候逐年变暖,雨水增加,受洪涝威胁区域增大以及人口增长影响,抗洪岸线将日渐增加。到2050年抗洪岸线将少量增加到67.877 km,到2100年将进一步增加到76.130 km。从占比上看,从2030年承洪岸线占总岸线比为26.8%,到2050年相应增长为28.1%,到2100年进一步增加到31.6%。抗洪区的部分洪涝甚至全部洪涝需要通过人工排入黄浦江,抗洪区依靠不断加高的防汛堤保障水安全^[23-24]。抗洪区内的主要排洪方式为灰色基础设施;在可能情况下,增加水面率将减轻相应排洪压力。

3 讨 论

洪涝灾害是河口城市面临气候变化引发的主要风险。本研究探索了河口城市上海市未来洪涝风险指数,通过定义气候变化风险、预判未来气候灾害、评估洪灾风险指数,进而制定洪涝适应的“三区三策”,以及进一步采取水风险防控措施与后续评估。

本研究根据IPCC关于风险的定义,从灾害性、暴露度与脆弱性3个方面建立了上海市洪涝风险度相关指标体系。根据数据的可获得性,选取11个评价指标,指标充分反映了上海市作为河口城市在面临气候变化引发更大频率和更大强度洪涝灾害时的成因特点。根据对2030年、2050年及2100年洪涝风险度的10个指标模拟分析,得出风险度等级逐年提高的结果;在2050年及2100年的场景模拟中,黄浦江上、下游两部分均显示为高洪涝风险段。进一步按人口密度单因子进行叠加评价,识别黄浦江滨水空间景观更新“三区三策”结果,主要规律表现为:采取抵抗(抗洪)策略的岸线逐年增长,对城市高密度

人口区等区域的威胁日益增大;采取疏散策略的岸线逐年增长,水岸的宜居性降低;采取共处(承洪)策略的岸线逐年减少,需要采取更多抵抗策略与疏散策略。泛洪区评估结果表明,位于上海市宝山区以东及浦东新区西北角的黄浦江滨水空间需要规划“河口保护计划”,以及在黄浦江上游的青浦区与松江区内进行生态湿地建设。抗洪区评估结果表明,上海市中心城区滨水空间需要继续采取抵抗策略且相应空间日益扩大。承洪区评估结果表明,大部分黄浦江滨水空间可以采取与洪共处策略,但相应空间日益缩小。

洪涝风险的评估方法较多,主要包括以资料统计分析历史洪涝风险、以指标体系评估当前洪涝风险和以场模拟分析未来洪涝风险方法。方法的选择取决于评估的具体目标和可用数据。在选择最合适的方法之前,必须考虑每种方法的优势和局限性^[25-26]。历史洪涝风险分析的优点是有大量详细数据,缺点是无法反映风险的空间变化。当前洪涝风险分析的优点是可以综合考虑多种指标,缺点是没有通用指标。未来洪涝风险分析的优点是能模拟不同时间下的风险结果,缺点是准确度可能会受到工具和数据的影响。从时间尺度上看,本研究可进行历史灾害统计分析、通过指标体系进行当前情况评估或者对未来进行场景模拟。但本研究区域上海历史数据相对有限;指标体系评估反映的是当前面临的风险,虽然可以进行综合考虑,但每个城市所面临的洪灾情况存在差异,因此没有通用指标。本研究采用场景模拟方法分析洪涝风险,基于学者已有成果,能一定程度地反映未来面临的气候变化引发的洪涝风险,但受分析工具与数据的影响,准确度与实际结果也将存在一定差异。因此,在实际应用中需要谨慎使用本研究的结果,需要结合实际区位与相关信息进行综合评估。同时,本研究数据相对有限,限制了评估的有效度与可信度;最后,气候变化适应分区施策需要在实践中不断完善及调整。在实际实施过程中,可能会受到资金、技术、政策法规等因素的限制,因而也需要制订更加实际与具体的应对措施。

致谢:本研究过程中得到华东师范大学王军教授鼎力支持,特致谢忱!

参考文献 References

- [1] WANG J, XU S Y, YE M W, et al. The MIKE model applica-

- tion to overtopping risk assessment of seawalls and levees in Shanghai [J]. International journal of disaster risk science, 2011, 2(4): 32-42.
- [2] 殷杰. 基于高精度地形表面模型的城市雨洪情景模拟与应急响应能力评价[J]. 地理研究, 2017, 36(6): 1138-1146. YIN J. Urban pluvial flood scenario modeling and emergency response assessment using high resolution Lidar-DSM[J]. Geographical research, 2017, 36(6): 1138-1146 (in Chinese with English abstract).
- [3] 殷杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 基于情景的上海台风风暴潮淹没模拟研究[J]. 地理科学, 2013, 33(1): 110-115. YIN J, YIN Z E, YU D P, et al. Flood simulation study of typhoon storm surge based on scenarios in Shanghai[J]. Scientia geographica sinica, 2013, 33(1): 110-115 (in Chinese with English abstract).
- [4] 贺芳芳, 胡恒智, 董广涛, 等. 上海中心城区复合洪涝淹没模拟及未来重现预估[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 93-98, 134. HE F F, HU H Z, DONG G T, et al. Compound flooding simulation and prediction of future recurrence in Shanghai downtown area[J]. Journal of catastrophology, 2020, 35(4): 93-98, 134 (in Chinese with English abstract).
- [5] 宋城城, 李梦雅, 王军, 等. 基于复合情景的上海台风风暴潮灾害危险性模拟及其空间应对[J]. 地理科学进展, 2014, 33(12): 1692-1703. SONG C C, LI M Y, WANG J, et al. Simulation of typhoon storm surge impacts in Shanghai based on storm surge scenarios and disaster prevention measures [J]. Progress in geography, 2014, 33(12): 1692-1703 (in Chinese with English abstract).
- [6] WANG J, GAO W, XU S Y, et al. Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China [J]. Climatic change, 2012, 115(3/4): 537-558.
- [7] WANG J, YI S, LI M Y, et al. Effects of sea level rise, land subsidence, bathymetric change and typhoon tracks on storm flooding in the coastal areas of Shanghai [J]. Science of the total environment, 2018, 621: 228-234.
- [8] 朱诗尧. 城市抗涝韧性的度量与提升策略研究: 以长三角区域城市为例[D]. 南京: 东南大学, 2021. ZHU S Y. Evaluation and improvement strategy of urban flood resilience [D]. Nanjing: Southeast University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [9] ZONENSEIN J. Flood risk index as an urban management tool [C]//11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008. [S.l.]: [s.n.], 2008.
- [10] MIGUEZ M G, VERÓL A P. A catchment scale integrated flood resilience index to support decision making in urban flood control design [J]. Environment and planning B: urban analytics and city science, 2017, 44(5): 925-946.
- [11] ZHANG D F, SHI X G, XU H, et al. A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China [J/OL]. Environmental impact assessment review, 2020, 83: 106397 [2022-10-30]. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106397>.
- [12] YIN J E, JONKMAN S, LIN N, et al. Flood risks in sinking delta cities: time for a reevaluation? [J/OL]. Earth's future, 2020, 8(8): 1614 [2022-10-30]. <https://doi.org/10.1029/2020EF001614>.
- [13] IPCC. AR5 synthesis report: climate change 2014 [DB/OL]. (2020-08-23) [2022-10-30]. https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf.
- [14] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [DB/OL]. (2014-11-02) [2022-10-30]. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- [15] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [DB/OL]. (2020-07-30) [2022-10-30]. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_FD_SPM_final.pdf.
- [16] 许瀚卿. 沿海城市复合洪涝灾害评估与适应对策研究: 以上海为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2022. XU H Q. Compound flooding assessing and mitigating across coastal city [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [17] 陈崇贤. 河口城市海岸灾害适应性风景园林设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014. CHEN C X. The study of adaptive landscape design responses to coastal disasters in estuary cities [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [18] 冯璐. 弹性城市视角下的风暴潮适应性景观基础设施研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015. FENG L. Research on storm surge adaptive landscape infrastructure in light of resilient cities [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [19] Climate change 2021. AR6 climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability [DB/OL]. (2021-10-26) [2022-10-30]. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>.
- [20] 王原. 城市化区域气候变化脆弱性综合评价理论、方法与应用研究: 以中国河口城市上海为例[D]. 上海: 复旦大学, 2010. WANG Y. Theories and methodologies of climate change vulnerability comprehensive assessment and their application in urban area [D]. Shanghai: Fudan University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [21] ZAHARAN S, BRODY S D, PEACOCK W G, et al. Social vulnerability and the natural and built environment: a model of flood casualties in Texas [J]. Disasters, 2008, 32(4): 537-560.
- [22] ASLA. Rebuild by design, the big U [DB/OL]. (2016-12-30) [2022-10-30]. <https://www.asla.org/2016awards/172453.html>.
- [23] 环菲菲. 2021年极端天气应对对上海防汛工作的启示[J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(5): 79-81. HUAN F F. Implications of extreme weather response in 2021 for flood prevention in

- Shanghai City[J]. China flood & drought management, 2022, 32(5):79-81(in Chinese).
- [24] 涂婧林,侯东瑞,陈弋冉,等. 国土空间生态修复关键区域系统识别与修复:以武汉市蔡甸区为例[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(3):47-55. TU J L, HOU D R, CHEN Y R, et al. Systematic identification and restoration of key areas for ecological restoration of territorial space: a case study of Caidian District, Wuhan City [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (natural science edition), 2022, 41(3):47-55 (in Chinese with English abstract).
- [25] MERZ B, KREIBICH H, SCHWARZE R, et al. Review article "Assessment of economic flood damage" [J]. Natural hazards and earth system sciences, 2010, 10(8):1697-1724.
- [26] KAPPES M S, KEILER M, ELVERFELDT K, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review [J]. Natural hazards, 2012, 64(2):1925-1958.

Flood risk assessment and zoning strategies of Huangpu River waterfront in Shanghai from perspective of climate change

ZHU Liqing¹, GAO Chi², ZHU Chunyang²

1. College of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Flood disasters are the main risk faced by coastal cities due to climate change. Based on the IPCC's definition of risk, this article constructed an assessment model of flood risk index based on hazard, vulnerability, and exposure. 11 evaluation indicators were used to calculate the flood risk index with scenario simulation and GIS spatial overlay methods. The Huangpu River waterfront space in Shanghai was selected as the study area for empirical analysis. Scenarios in 2030, 2050, and 2100 were simulated. The spatial pattern of flood risk under climate change goals in the Huangpu River waterfront area was obtained based on the results of evaluation. Furthermore, a single-factor overlay evaluation was conducted based on population density to identify the "Three Zones and Three Policies" for landscape renewal in the Huangpu River waterfront space through scenario simulation. The results of assessing the flood-prone area showed that the risk level is increasing year by year according to the spatial pattern of flood risk under the objective of climate change in the Huangpu River waterfront. Both upstream and downstream parts of Huangpu River show high flood risk sections in the scenario simulation in 2050 and 2100. The coastline that adopts resistance (flood control) strategies has been increasing year by year, posing an increasing threat to areas with high urban population density. The number of shorelines adopting evacuation strategies has been increasing year by year, and the livability of water banks has decreased. The number of shorelines adopting coexistence (flood carrying) strategies is decreasing year by year, and more resistance and evacuation strategies are needed. According to the flood risk zoning policy of Huangpu River waterfront from the perspective of climate change, the flood area is located to the east of Baoshan District and the Northwest Angle of Pudong New Area. The Huangpu River waterfront space needs to adopt a retreat and evacuation strategy, implement population evacuation, plan the "estuary protection plan", and construct ecological wetlands in the middle reaches of the Songjiang District. The flood-resistant area is located in the central urban area, and the waterfront space needs to continue to adopt flood-resistant strategies, with increasing risks. The assessment of the flood bearing area is located in most of the Huangpu waterfront spaces, and the strategy of coexisting with the flood can be adopted, but the potential is increasingly shrinking.

Keywords adaptation to climate change; estuarine cities; waterfront areas; flood risk assessment; flood adaptation strategies

(责任编辑:陆文昌)