

秦祈翔, 张卫平, 尹亚森. 滨海城市 4R 韧性评价模型构建与提升策略[J]. 风景园林, 2025, 32 (3): 100-109.

滨海城市 4R 韧性评价模型构建与提升策略

秦祈翔 张卫平 尹亚森*

摘要: 【目的】韧性设计是当前城市建设和研究的重点, 分析已有的韧性实践经验, 归纳总结适应未来滨海城市可持续发展的韧性导控重点与提升策略, 可为中国滨海地区城市的雨洪韧性规划与决策提供参考。【方法】构建包含鲁棒性 (robustness)、冗余性 (redundancy)、可获得性 (resourcefulness)、快速性 (rapidity) 4 个准则层指标、11 个要素层指标和 24 个因子层指标的滨海城市 4R 韧性评价模型, 评估不同开发强度的 9 个典型滨海城市样本。【结果】中高开发强度城市样本在冗余性和可获得性维度韧性水平较高, 低开发强度城市样本则在鲁棒性和快速性维度韧性水平较高。【结论】滨海城市应基于 4R 韧性评价结果, 明确自身韧性优势与短板, 制定符合在地环境特征的韧性策略体系, 以实现韧性城市高质量建设和发展。

关键词: 风景园林; 韧性城市; 4R; 鲁棒性; 冗余性; 可获得性; 快速性

基金项目: 国家重点研发计划“基于文脉保护的城市风貌特色塑造理论与关键技术”(编号 2023YFC3805500); 广州市城市规划勘测设计研究院科技基金项目“城市滨海地区多情景气候韧性设计策略研究”(编号 RDP2220202067)

中图分类号: TU984

文章编号: 1673-1530(2025)03-0100-10

收稿日期: 2024-07-17

文献标识码: A

DOI: 10.3724/j.fjyl.202407170390

修回日期: 2025-01-13

全球约 40% 的人口生活在沿海 100 km 范围内, 产出了近 70% 的国民生产总值, 滨海城市的发展直接影响着人类文明的进步。然而, 全球气候变化导致沿海地区遭遇极端天气事件的可能性增大。2012 年, 飓风“桑迪”在美国登陆, 导致上百人死亡, 该区域灾后重建工作所需资金超 420 亿美元; 2013 年, 台风“海燕”重创菲律宾中部, 造成 7 000 多人死亡或失踪; 2018 年, 台风“山竹”侵袭中国沿海多个省市, 造成 52 亿元的直接经济损失, 近 300 万人受灾; 2022 年, 风暴“尤尼斯”侵袭英国、德国、荷兰、比利时等欧洲多国, 导致大量航班取消、列车停运和渡轮停航。可见, 滨海城市在拥有独特区位与资源优势的同时, 也直接面对着风暴潮、海啸、暴雨等多重自然灾害的威胁, 开展滨海韧性城市研究迫在眉睫^[1]。

联合国国际减灾战略 (United Nations International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR) 组织将韧性 (resilience) 定义为“系统、社区或社会在受到干扰时, 能够及时应用有效方式抵抗、吸收、适应外部变化, 并

且从受到的影响中恢复的能力”^[2]。党的二十大报告强调, 要加快转变超大、特大城市的发展方式, 坚持以人民为中心, 在总体国家安全观的指导下打造宜居、韧性、智慧城市; 建设韧性城市应对城市化伴随的种种风险, 保持其正常运行和快速恢复能力, 让城市成为有活力的、联动的有机体^[3]。

通过文献梳理可以发现, 雨洪韧性与海绵城市是滨海韧性城市建设的核心议题。近年来, 国内外学者从建成环境^[4-5]、蓝绿空间^[6-7]、城市战略决策模式^[8-9]等维度开展了城市雨洪韧性研究, 涉及水力学模型^[10]、K-means 聚类算法^[11]、多准则妥协解排序法 (VIKOR) 和关联度分析^[12]等定量评估方法。其中, 部分研究已形成较为成熟的城市雨洪韧性评价体系, 但研究内容各有侧重 (表 1), 并未全面涉及韧性特征的各个评价维度, 缺乏对关键韧性特征与城市设计中空间要素、具体措施的映射, 以及不同情景下具体韧性策略绩效的研究, 城市韧性理论与城市设计实践的传导关系有待进一步梳理和细化。

本研究基于城市设计视角, 探索韧性特

文章亮点:

1、基于城市设计视角, 探索 4R 韧性特征与滨海城市空间要素的映射关系, 构建包含鲁棒性、冗余性、可获得性和快速性 4 个准则层指标、11 个要素层指标和 24 个因子层指标的滨海城市 4R 韧性评价模型。

2、对全球 9 个典型滨海城市样本开展实证研究, 基于各样本在 4R 评价维度上的差异性结果, 分析样本韧性水平与城市空间要素的关联性, 归纳总结不同开发强度滨海城市的韧性导控重点与提升策略, 以期对未来相关设计研究提供参考与借鉴。

征与滨海城市空间要素的映射关系, 提出适用于滨海城市韧性评价的研究框架 (图 1)。基于国内外众多学者的研究成果, 识别并归纳构成滨海城市雨洪韧性的各类要素, 建立体系化、精细化的滨海城市韧性评价模型。主要基于地理区位、国际影响力、韧性城市建设经验 3 个方面, 在全球范围内针对性、差异化地筛选 9 个典型滨海城市样本, 并开展韧性评价模型的实证应用, 分析各样本如何通过城市空间与功能布局提高自身韧性水平。结合评价分析结果和已有韧性实践经验, 归纳总结适应未来滨海城市可持续发展的韧性导控重点与提升策略, 以期为中国滨海地区城市的雨洪韧性规划与决策提供参考。

1 滨海城市 4R 韧性特征

在城市韧性领域, 最被广泛认可的城市韧性基本特征是由美国纽约州立大学布法罗分校 Michel Bruneau 教授提出的 4R——鲁棒性 (robustness)、冗余性 (redundancy)、可获得性 (resourcefulness)、快速性 (rapidity)^[13]。城市系统具有的 4R 特征越显著, 城市韧性越

表1 城市韧性评价相关文献归纳分析^[4-8]
Tab. 1 Research and analysis of relevant literature on urban resilience evaluation^[4-8]

年份	作者	主要内容	评价维度	文献评析
2021	朱诗尧 ^[8]	对城市抗涝韧性的度量与提升策略研究	压力韧性、状态韧性、响应韧性	评价维度侧重于社会层面，未深入涉及城市空间
2022	王岍等 ^[5]	以天津市为例，基于应对暴雨内涝的目标，开展城市建成环境韧性等级区划研究	坚固性、冗余性、资源可调配性、快速性	评价体系最完善成熟，但研究对象主要针对一般内涝城市，而非典型滨海城市
2022	王鑫等 ^[7]	以深汕特别合作区为例，开展水敏性城市研究，提出滨海地区绿色韧性空间评估方法	城市安全、生态安全、景观环境	详细介绍了韧性指标筛选方法，但未提出具体评价指标
2023	汪洁琼等 ^[6]	基于应对雨洪挑战的目标，对城市滨水码头区蓝绿空间耦合设计开展系统性研究	环境支撑、空间可变、风险管理	重点聚焦城市滨河区蓝绿空间，未深入考虑功能冗余与应急服务
2023	陈碧琳等 ^[4]	以深圳红树湾片区为例，基于洪涝韧性导向，分析高密度沿海城市适应性转型规划经验	景观生态空间、街道网络、街区与建筑	评价体系与研究对象最为契合，但对滨海岸线空间考虑较为薄弱

强（图2）。

1.1 鲁棒性——抵抗雨洪灾害

鲁棒性是指城市系统面对突发性内外部冲击时的抵抗能力。该特征主要反映在集中建设区域选址和滨海堤防建设2个方面：顺应地形地貌的合理选址和宽阔的滨海缓冲带可降低城市受灾风险；滨海堤防的形态、结构、材质等要素则决定了堤防抵抗雨洪灾害的能力。

1.2 冗余性——维持城市功能

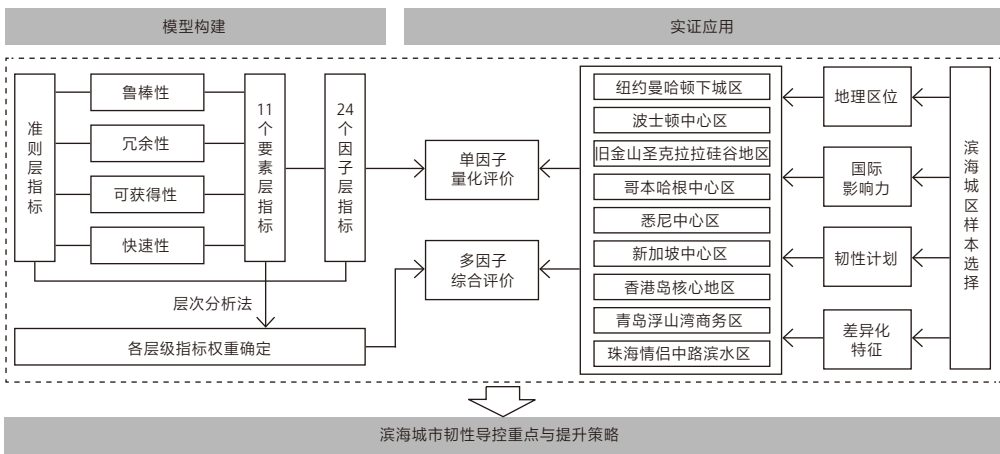
冗余性是指城市系统中维持城市基本运转的基本功能组件超出必要需求的数量或比例，冗余单元的数量或比例越高，城市系统的适应能力和吸收冲击的能力越强。冗余性主要体现在路径和节点2个方面的空间要素中，其中路径主要指市政交通网络，节点则主要指避难空间，包括露天避难场所、室内避难场所和平急两用避难场所。

1.3 可获得性——保障资源获取

可获得性是指城市抵御灾害以及灾后恢复阶段获取资源的能力。该特征与城市各类物资和公共服务设施的数量及分布息息相关，其数量越多、密度越高、分布越均匀，则代表该地区受灾后，每个城市居民对基本公共服务的获取能力越强。

1.4 快速性——消解雨洪影响

快速性是指城市从灾害中恢复的时效性，即尽快控制损失、避免次生灾害、恢复城市功能的能力。滨海城市主要面临的是极端天气、风暴潮带来的雨洪灾害，因此，快速性主要体现在快速渗水排水、消解雨洪影响。良好的蓝绿空间结构、透水下垫面、排水工



1 研究框架
Research framework

程等可以促进洪水的就地吸纳与快速排放，最大化地发挥城市雨洪韧性效能。

总体来说，鲁棒性、冗余性、可获得性和快速性分别在滨海城市的不同空间中发挥主要作用，四者共同在洪涝灾害发生的前、中、后期对于城市系统的持续运转和城市居民的避难疏散起到重要作用（图3）。

2 滨海城市4R 韧性评价模型构建

2.1 评价指标选取

基于对现有文献中韧性评价指标的归纳与整理，综合考虑滨海岸线特征、城市功能布局、交通网络、基础设施、蓝绿空间等城市空间要素，筛选具有代表性的评价指标，形成包含鲁棒性、冗余性、可获得性和快速性4个准则层指标、11个要素层指标和24个因子层指标的滨海城市4R韧性评价模型

（表2）。

2.2 指标权重确定

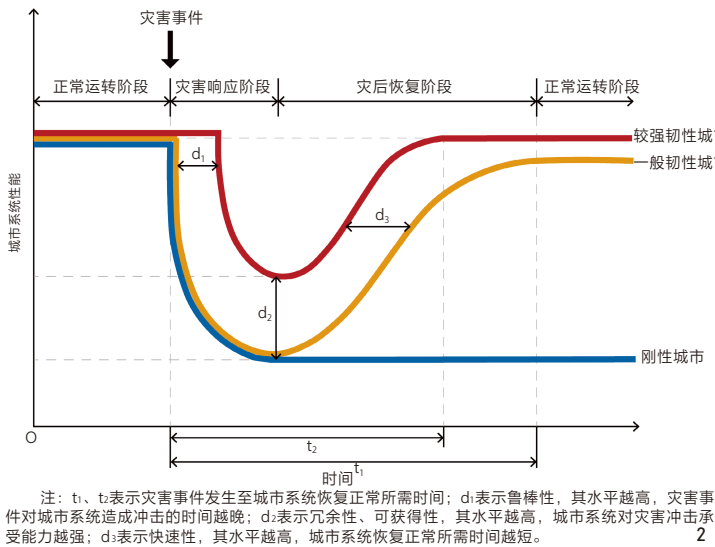
基于层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）确定各层级指标权重。首先，邀请30位规划领域专家进行打分，采用9度打分标准对各指标的相对重要等级进行两两比较；其次，构建判断矩阵，对所得数据进行一致性检验，将一致性比率（CR）>0.1的数据向专家反馈，并进行修正；最后，计算所有专家打分结果的算术平均值，得到评价模型中各指标的全局权重（表2）。

3 滨海城市4R 韧性实证研究

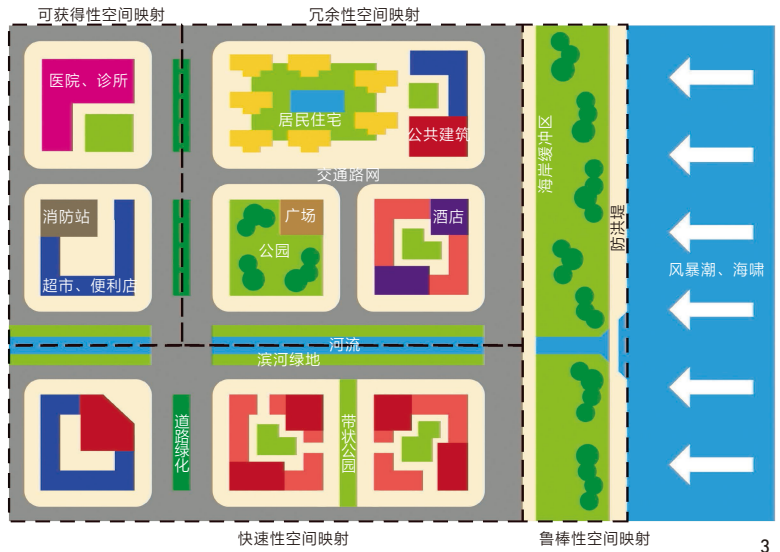
3.1 滨海城市样本选择

滨海城市样本主要基于地理区位、国际影响力、韧性城市建设经验3个方面进行筛选。

1）地理区位：城市的核心区域紧邻海域，



2 城市4R韧性在灾害事件发生至恢复正常各阶段的作用机制
Action mechanism of urban 4R resilience in various stages from the occurrence of disaster events to recovery



3 滨海城市空间与4R韧性指标的对应关系
Correspondence between coastal city space and 4R resilience indicators

表2 滨海城市4R 韧性评价模型及指标说明^[4, 6-7, 10-11, 14-25]
Tab. 2 4R resilience evaluation model and relevant indicators^[4, 6-7, 10-11, 14-25]

准则层	要素层	因子层	指标说明	单位	正负性	参考文献	全局权重
A1鲁棒性	B1岸线防护	C1滨海开敞空间宽度	建成区与海岸线之间缓冲区域的平均宽度	m	正	[6]	0.056
		C2堤顶相对高度	堤顶相对海平面的平均高差	m	正	[4][14]	0.051
		C3岸线结构	堤岸特殊设计结构对洪水冲击力的抵消作用		正	[6][15]	0.034
		C4岸线坚固性	堤岸表面材质的坚固程度		正	[15][16]	0.036
	B2地形防护	C5布局合理性	海啸淹没风险区之外的建成区面积与建成区总面积的比值		正	[17][18]	0.045
	B3景观防护	C6防浪植被	沿岸防浪防潮植被覆盖区域长度与岸线总长度的比值		正	[10]	0.029
A2冗余性	B4道路连通	C7路网密度	单位面积内市政道路的总长度	km/km ²	正	[4][11]	0.043
		C8路网整合度	市政交通网络体系的平均整合度		正	[11][19]	0.047
	B5功能复合	C9建筑功能多样性	建成区建筑功能的香农多样性指数		正	[20]	0.040
		C10混合用地	混合用地面积与城市建设用地总面积的比值		正	[7]	0.026
	B6空间灵活	C11应急避难场所	公共绿地、广场等开敞空间面积与建成区总面积的比值		正	[10][21]	0.036
		C12平急两用设施密度	单位用地面积内酒店、旅馆、公共建筑等可转化为平急两用设施的数量	处/km ²	正	[22]	0.038
C13平急两用设施耦合度		城市组团与平急两用设施的平均最近邻距离	m	负	[22]	0.040	
A3可获得性	B7物资补给	C14物资补给点密度	单位用地面积内超市、便利店等物资补给点的数量	处/km ²	正	[6][7]	0.044
		C15物资补给点耦合度	城市组团与物资补给点的平均最近邻距离	m	负	[6]	0.047
	B8医疗服务	C16医疗设施密度	单位用地面积内医院、诊所等医疗设施的数量	处/km ²	正	[10][23]	0.045
		C17医疗设施耦合度	城市组团与医疗设施的平均最近邻距离	m	负	[23]	0.046
	B9消防救援	C18消防设施密度	单位用地面积内消防设施的数量	处/km ²	正	[21][24]	0.039
		C19消防设施耦合度	城市组团与消防设施的最近邻距离	m	负	[24]	0.042
A4快速性	B10蓝绿空间	C20蓝绿空间面积	蓝绿空间面积与研究范围总面积的比值		正	[4][25]	0.053
		C21蓝绿空间结构	所有蓝绿空间几何中心到最近斑块距离的平均值	m	负	[7]	0.044
		C22蓝绿空间耦合度	城市组团与蓝绿空间分布的耦合程度	m	负	[6]	0.048
		C23排水廊道密度	单位面积内地面生态排水廊道的总长度	km/km ²	正	[23]	0.032
	B11地表覆盖	C24地表下渗能力	透水下垫面面积与城市开敞空间下垫面总面积的比值		正	[10]	0.040

具备典型滨海城市特征，且目前已面临多重沿海自然灾害的威胁。根据美国国家环境信

息中心（National Centers for Environmental Information, NCEI）统计的全球海啸源数据库

（2000—2012年）显示，环太平洋海岸、欧洲西海岸、地中海沿岸海啸灾害频繁发生；

表3 典型滨海城市样本详细信息
Tab. 3 Details about typical coastal city samples

序号	滨海城市	地理区位	最新国际影响力		韧性城市建设文件	
			称号	数据来源	文件名称	发布年份
1	纽约	北美东海岸	2023全球城市竞争力第1名	《2023第二十二届全球（国家）城市竞争力排行榜》	《一个更强大、更有韧性的纽约》	2013
2	波士顿	北美东海岸	2023全球最佳城市第2名	《2023年全球城市指数报告》（ <i>Global Cities Index 2023</i> ）	《波士顿滨海城市洪灾韧性设计导则》（ <i>Coastal Flood Resilience Design Guidelines</i> ）	2019
3	旧金山	北美西海岸	2023全球最佳城市第1名	《2023年全球城市指数报告》（ <i>Global Cities Index 2023</i> ）	《海平面上升行动计划》（ <i>San Francisco Sea Level Rise Action Plan</i> ）	2016
4	哥本哈根	北欧波罗的海门户	2023全球最宜居城市第2名	《2023年全球最宜居城市》（ <i>The World's Most Liveable Cities in 2023</i> ）	《气候适应规划》（ <i>Copenhagen Climate Adaptation Plan</i> ）	2011
5	悉尼	澳大利亚东海岸	2023全球最宜居城市第4名	《2023年全球最宜居城市》（ <i>The World's Most Liveable Cities in 2023</i> ）	《韧性悉尼：2018年城市韧性战略》（ <i>Resilient Sydney: A Strategy for City Resilience 2018</i> ）	2018
6	新加坡	亚洲马来半岛南端	2023全球城市竞争力第6名	《2023第二十二届全球（国家）城市竞争力排行榜》	《一个韧性的新加坡》	2019
7	香港	亚洲珠三角沿岸	2023全球最佳城市第9名	《2023年全球城市指数报告》（ <i>Global Cities Index 2023</i> ）	《香港韧性城市建设初步评估报告》	2017
8	青岛	亚洲黄海沿岸	2023全球最具幸福感城市第7名	《2023第二十二届全球（国家）城市竞争力排行榜》	《青岛市适应气候变化规划》	2020
9	珠海	亚洲珠三角沿岸	2023中国十佳宜居城市第1名	《2023第二十二届全球（国家）城市竞争力排行榜》	《珠海韧性城市发展：防洪措施建议》	2020

哥伦比亚大学灾害和风险研究中心（Center for Hazards and Risk Research, CHRR）统计的全球极端洪水灾害（1985—2003 年）显示，东亚、东南亚、北美、西欧等地区存在大量的洪水一级受灾区。

2）国际影响力：近年来在全球具有较高国际影响力的滨海城市。在《2023 年全球城市指数报告》《2023 年全球最宜居城市》榜单中，纽约、芝加哥、东京、新加坡、深圳、香港等滨海城市跻身全球具有竞争力的城市前 10 名，旧金山、波士顿、墨尔本等城市位列全球最佳城市前 5 名，上海、青岛、珠海等城市在《2023 第二十二届全球（国家）城市竞争力排行榜》中成为中国滨海城市的领先者。

3）韧性城市建设经验：当前已有较为成熟的韧性城市建设经验、计划或指引的城市。丹麦哥本哈根是全球最早关注气候变化的城市，中国知网（CNKI）收录的与哥本哈根气候韧性相关的文献超过 500 篇；美国纽约在飓风“桑迪”过后发布了《一个更强大、更有韧性的纽约》（*A Stronger, More Resilient New York*）的总体规划，指出要重点对曼哈

顿金融区的基础设施与岸线空间进行优化提升。此外，新加坡、波士顿、珠海等滨海城市也在近 5 年相继出台了《一个韧性的新加坡》（*A Resilient Singapore*）、《海岸抗洪设计指引》（*Coastal Flood Resilience Design Guidelines*）、《珠海韧性城市发展：防洪措施建议》等韧性城市建设计划，建设了较为完善的空间环境与应急系统。

除以上 3 个主要方面，本研究在选择样本时还综合考虑了人口密度、开发强度、城市空间代表性等多情景差异性因素，尽可能涉及全球滨海城市的气候与地理环境、空间风貌特点、居民生活方式等方面。因此，本研究选取纽约、波士顿、圣克拉拉（位于旧金山湾区）、哥本哈根、悉尼、新加坡、香港、青岛和珠海作为 9 个典型滨海城市样本（表 3）。划定临近海岸线 1~2 km 核心城区范围作为该滨海城市的研究范围，对于部分开发强度较低、岸线宽度较大的样本，则适当扩大范围，但需确保以生活性功能为主的建成环境面积控制在 5~7 km²（图 4）。

3.2 数据来源与处理方式

基于 Google Earth、OpenStreetMap 在

线地图平台，获取各样本研究范围内的城市空间数据、功能兴趣点数据、交通路网数据等，其中一部分数据可以直接用于计算指标原始数据，另一部分数据则需要基于 DepthMap、ArcGIS、AutoCAD 等软件进行分析，从而计算指标原始数据（表 4，图 5）。

采用最小-最大（Min-Max）标准化法，对各评价指标的计算结果进行线性变换，将指标原始数据映射到区间 [1, 5] 内，以便通过雷达图在同一评价维度对比分析各样本的最终评价结果。根据表 2 中各评价指标的正负性，按式（1）、（2）对原始数据进行标准化处理。

正向指标： $C_{(i,j)} = 1 + 4 \times \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$ ； （1）

负向指标： $C_{(i,j)} = 1 + 4 \times \left(1 - \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}\right)$ ； （2）

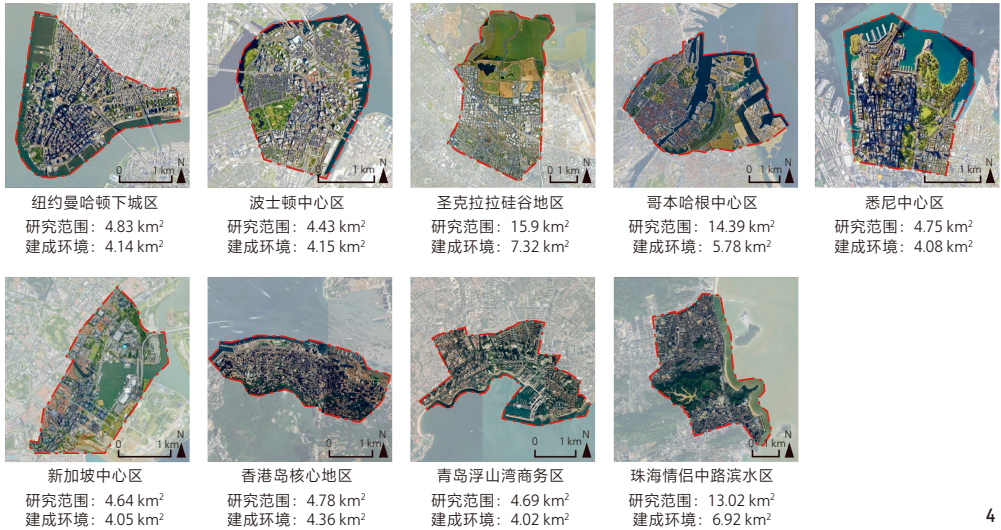
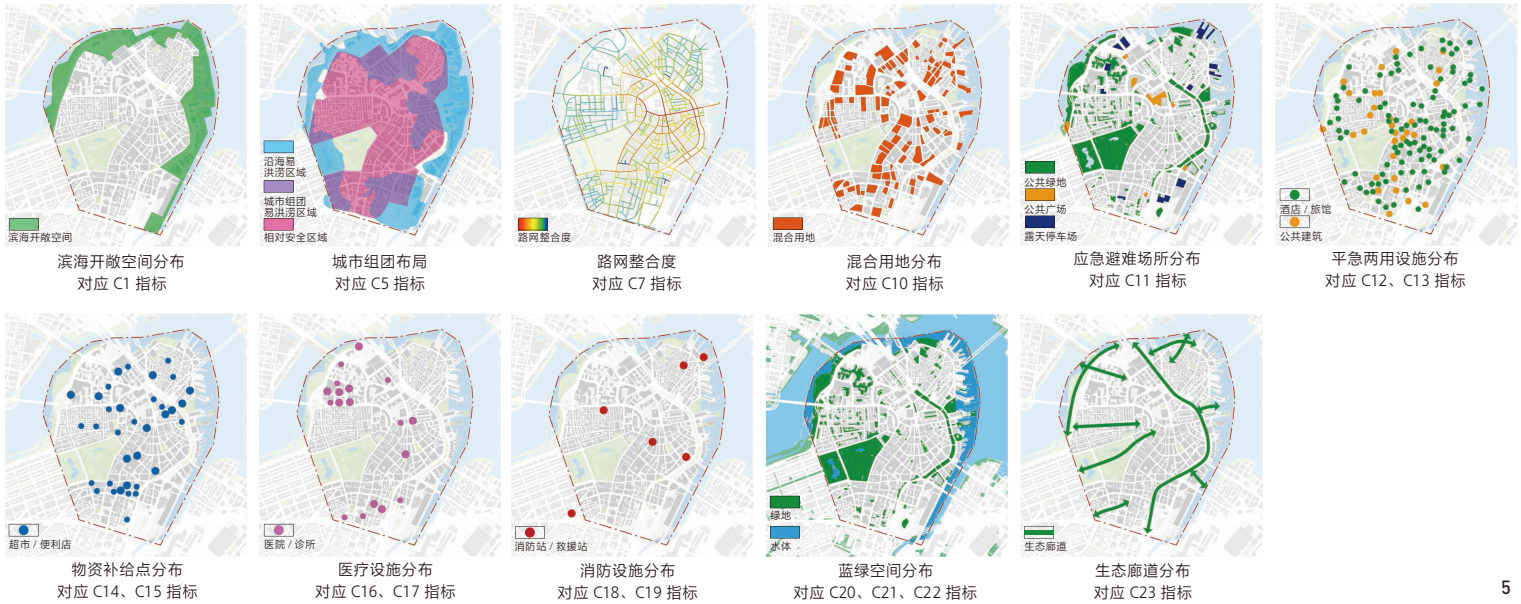
式中， $C_{(i,j)}$ 为第 i 个评价指标中城市样本 j 的标准化处理数值（ i, j 取值见表 4）， X_j 为城市样本 j 的原始数据， $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为所有城市样本原始数据的最大值和最小值。

3.3 评价结果分析

分别对 9 个典型滨海城市样本各评价指

表4 4R 韧性评价指标原始数据
Tab. 4 Raw data of 4R resilience evaluation indicators

滨海城市样本	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26
纽约曼哈顿下城区	142.1	2.4	4.3	4.5	0.90%	11.1	60.00%	40.20%	18.3	177.7	1.3	78.60%	17.70%	16.6	127.5	8.9	196.5	4.1	300.9	1.4	431.0	19.30%	155.1	89.5	1.8	15.30%
波士顿中心区	191.0	2.7	4.5	5.0	1.30%	15.8	64.40%	42.90%	17.9	163.9	1.3	54.20%	17.30%	31.8	81.1	5.8	162.3	3.9	326.9	1.2	323.2	21.60%	125.8	69.9	2.5	19.50%
圣克拉拉硅谷地区	250.0	1.5	5.0	2.0	0.30%	5.4	92.90%	74.30%	21.1	146.5	0.8	13.40%	26.60%	3.6	211.4	0.6	250.0	1.1	511.2	0.2	950.2	41.70%	298.6	77.8	0.4	27.30%
哥本哈根中心区	250.0	1.9	4.2	4.2	0.30%	5.4	88.90%	80.40%	14.4	85.9	1.1	37.80%	25.10%	10.3	168.6	2.2	245.0	2.1	499.1	0.4	940.2	37.40%	168.6	74.7	2.0	31.10%
悉尼中心区	209.2	2.2	4.2	4.0	1.90%	20.8	83.80%	45.70%	12.4	106.4	1.1	60.70%	27.10%	28.7	78.8	8.6	151.9	3.7	288.9	0.5	511.6	29.10%	335.3	124.6	1.3	23.00%
新加坡中心区	153.5	2.3	4.0	4.0	1.20%	17.6	62.50%	41.00%	11.8	76.1	1.2	50.50%	21.90%	19.3	113.9	6.8	172.7	4.8	228.9	0.8	593.5	22.40%	147.5	81.6	3.2	19.30%
香港岛核心地区	173.5	2.1	3.8	4.2	5.00%	53.1	88.30%	41.20%	15.5	72.0	1.0	32.40%	16.40%	24.6	116.5	8.7	156.4	5.3	237.2	0.9	565.2	18.40%	227.9	102.8	1.2	14.50%
青岛浮山湾商务区	151.3	3.2	2.0	4.0	0.90%	11.2	67.00%	50.40%	13.3	76.8	1.0	18.60%	18.10%	35.8	95.8	10.9	170.4	6.5	223.4	0.7	771.1	30.30%	154.8	60.8	3.3	19.00%
珠海情侣中路滨水区	223.2	3.0	2.8	3.0	1.00%	15.4	81.20%	83.20%	8.5	47.1	0.8	13.50%	32.30%	12.2	204.9	6.9	163.6	3.7	332.1	1.1	632.9	35.80%	277.3	100.2	1.6	26.30%
最大值 (Max)	250.0	3.2	5.0	5.0	5.00%	53.1	92.90%	83.20%	21.1	177.7	1.3	78.60%	32.30%	35.8	211.4	10.9	250.0	6.5	511.2	1.4	950.2	41.70%	335.3	124.6	3.3	31.10%
最小值 (Min)	142.1	1.5	2.0	2.0	0.30%	5.4	60.00%	40.20%	8.5	47.1	0.8	13.40%	16.40%	3.6	78.8	0.6	151.9	1.1	223.4	0.2	323.2	18.40%	125.8	60.8	0.4	14.50%



4 各滨海城市样本研究范围
Research scope of each coastal city sample

5 波士顿中心区部分评价指标原始数据
Raw data of some evaluation indicators in the central area of Boston

标的标准化计算结果进行加权计算，得到滨海城市4R韧性综合评价结果。

3.3.1 鲁棒性分析

鲁棒性水平较高的城市有波士顿、悉尼、哥本哈根、圣克拉拉和珠海（图6）。其中，哥本哈根、圣克拉拉、珠海开发强度均较低，城市组团布局在远离风暴潮灾害的区域内，这些城市的海域附近存在充足的生态化用地或港口用地，滨海开敞空间宽度均超过250 m，沿岸防浪植被占比达到80%以上。对于波士顿、悉尼等开发强度较高、选址紧邻海域的城市，虽然无法留出较宽的滨海缓冲带，但可以通过选用坚固的材质建设岸线、优化滨海堤岸结构等方式保障较高的鲁棒性水平。

3.3.2 冗余性分析

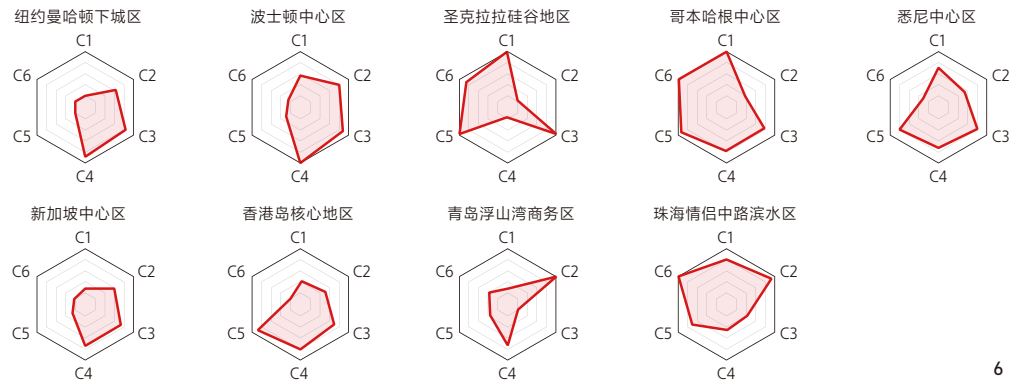
冗余性水平较高的城市有纽约、波士顿和悉尼（图 7）。其中，纽约和波士顿的路网密度分别为 18.3 km/km^2 和 17.9 km/km^2 ，两者均拥有较高的路网整合度。在功能复合性方面，波士顿、纽约、悉尼均为功能高度整合、土地利用多元化的城市中心区，混合用地面积占比达到 60%。悉尼在中心区优先预留出 25%~32% 面积占比的皇家植物园，可兼做灾害期间的应急避难场所。在平急设施转换方面，波士顿和悉尼研究范围内酒店/旅馆、公共建筑等分布密度达到 20 处/km^2 以上，且与居民点平均距离均在 100 m 以内，平急两用设施布局与人口密度空间分布的耦合度均较高。

3.3.3 可获得性分析

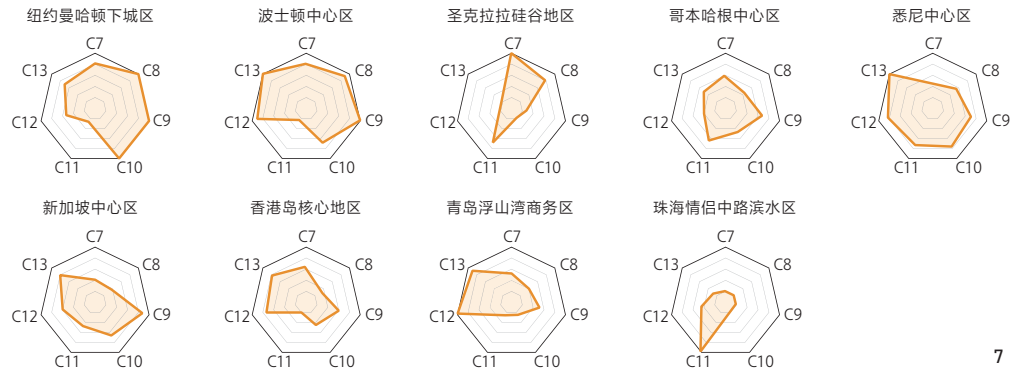
除哥本哈根和圣克拉拉外，其余 7 个城市的开发模式均为典型的城市中央商务区（central business district, CBD）模式，资源与服务高度集中，因而展现出较高的可获得性水平（图 8）。其中，纽约和香港 2 个城市在物资补给（物资补给点 9 处/ km^2 ）、医疗服务（医疗设施 5 处/ km^2 ）、消防救援（消防设施 1 处/ km^2 ）3 个方面的韧性水平较高。在其他城市中，悉尼的城市组团与物资补给点的平均最近邻距离仅 152 m，两者耦合度较高；青岛的医疗设施分布密度为 6.5 处/km^2 ，具备较好的服务供应保障；波士顿则在消防救援设施分布方面表现得更为突出，城市组团与消防救援设施的平均最近邻距离为 323 m，麻省总医院集群大幅增加了该区域的医疗设施密度。

3.3.4 快速性分析

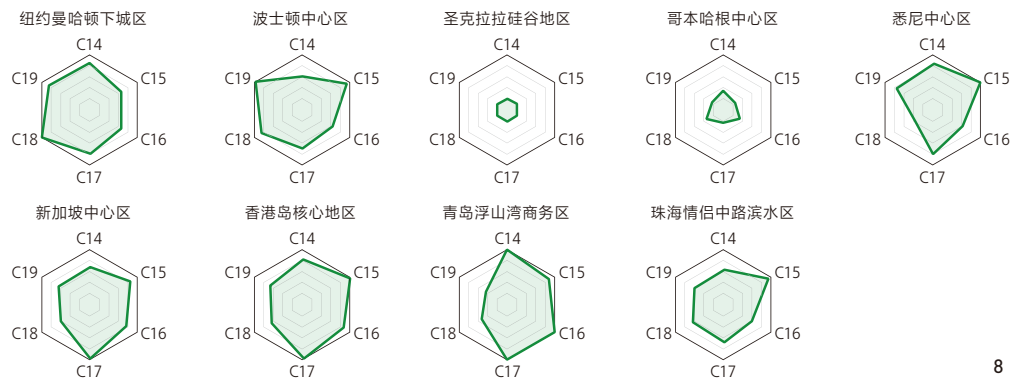
波士顿、新加坡、青岛、珠海、哥本哈根和圣克拉拉快速性水平较高，主要得益于这些城市规划的顶层设计或特殊的地理条件。波士顿、哥本哈根、新加坡均以优秀的绿色公共空间规划闻名于世，如波士顿的“翡翠项链”、哥本哈根的“指状规划”。青岛、珠海则更多体现了其滨海丘陵的地形地貌特征在防洪排涝方面的本底优势。青岛和哥本哈根的各指标评价结果表现较为均衡（图 9）。青岛浮山湾商务区与圣克拉拉硅谷



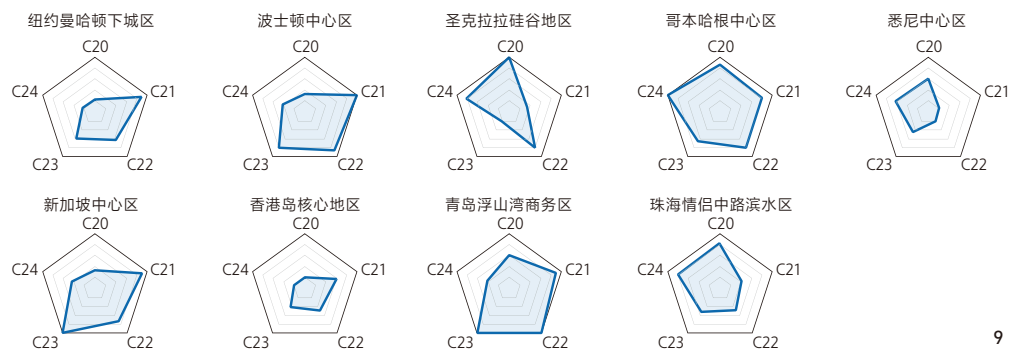
6



7



8



9

6 典型滨海城市样本鲁棒性指标评价结果
Evaluation results of the robustness indicator of typical coastal city samples

7 典型滨海城市样本冗余性指标评价结果
Evaluation results of the redundancy indicator of typical coastal city samples

8 典型滨海城市样本可获得性指标评价结果
Evaluation results of the resourcefulness indicator of typical coastal city samples

9 典型滨海城市样本快速性指标评价结果
Evaluation results of the rapidity indicator of typical coastal city samples

表6 滨海城市4R 韧性导控重点
Tab. 6 Priorities in guide and control of 4R resilience of coastal cities

4R韧性 维度	中高开发强度滨海城市导控重点		低开发强度滨海城市导控重点	
	主要	次要	主要	次要
鲁棒性	堤顶相对高度、岸线结构、岸线坚固性	岸线宽度、布局合理性、防浪植被占比	岸线宽度、布局合理性、防浪植被占比	堤顶相对高度、岸线结构、岸线坚固性
冗余性	用地功能多样性、混合用地占比、平急两用设施密度、平急两用设施耦合度、应急避难场所占比	路网密度、路网整合度	路网密度、路网整合度、应急避难场所占比	用地功能多样性、混合用地占比、平急两用设施密度、平急两用设施耦合度
可获得性	物资补给点密度、医疗设施密度、消防设施密度	物资补给点耦合度、医疗设施耦合度、消防设施耦合度	物资补给点耦合度、医疗设施耦合度、消防设施耦合度	物资补给点密度、医疗设施密度、消防设施密度
快速性	排水廊道密度、蓝绿空间结构	蓝绿空间耦合度、蓝绿空间面积、地表下渗能力	蓝绿空间面积、蓝绿空间结构、蓝绿空间耦合度	排水廊道密度、地表下渗能力

表5 滨海城市4R 韧性综合评价结果
Tab. 5 Comprehensive evaluation results of 4R resilience of coastal cities

滨海城市样本	鲁棒性	冗余性	可获得性	快速性	加权计算结果
纽约曼哈顿下城区	2.33*	3.80***	3.94***	2.55*	3.20***
波士顿中心区	3.13**	4.03***	3.91***	3.35***	3.63***
圣克拉拉硅谷地区	3.51***	2.57*	1.00*	3.33***	2.56*
哥本哈根中心区	3.96***	2.61*	1.41*	4.20***	2.98*
悉尼中心区	3.25***	3.57***	3.70***	2.00*	3.18***
新加坡中心区	2.29*	2.95**	3.78***	3.29***	3.07**
香港岛核心地区	2.92**	2.68*	4.15***	1.87*	2.95*
青岛浮山湾商务区	2.54*	2.79*	4.07***	3.87***	3.30***
珠海情侣中路滨水区	3.65***	1.72*	3.41***	3.06**	2.94*
平均值	3.06	2.97	3.26	3.06	3.08

注：***表示评价结果大于平均值，**表示评价结果接近平均值，*表示评价结果低于平均值。

地区存在大量住宅单元，城市居民点与绿地的平均最近邻距离小于 80 m，呈现较高的耦合度。哥本哈根中心区蓝绿空间面积占比达 37%，蓝绿空间耦合度与地表下渗能力也相对较高。新加坡、波士顿等城市虽然蓝绿空间面积占比较小，但蓝绿空间结构连续，排水廊道密度达 2.5 km/km² 以上，同样展现出较高的快速性水平。

3.3.5 4R 综合评价结果分析

以 4 个评价维度加权计算结果的平均值为标准，分析各城市高于平均值的指标（表 5）。结果显示，波士顿是唯一一个 4 个维度的评价结果均在平均值以上的城市，表现出较高的综合韧性水平。纽约、悉尼在冗余性和可获得性方面表现突出；青岛、新加坡的可获得性和快速性对总体韧性水平贡献度最大；香港对于可获得性的重视程度最高；哥本哈根、圣克拉拉、珠海则在鲁棒性和快速性方

面具有优势。

3.4 评价结果与城市空间要素关联性分析

纽约、新加坡等开发强度较高的城市与哥本哈根、圣克拉拉等开发强度较低的城市在不同韧性维度的表现明显不同，主要归纳为 3 个方面。

1) 高开发强度城市样本由于人口密集、土地紧张，更注重受灾期间的空间冗余与资源获取。城市核心功能区通过加密路网、混合用地功能、垂直布局等方式，使公共服务与应急服务设施的覆盖程度较高。同时，新加坡、波士顿等城市采用更加合理的地块组团划分，有利于内部绿带和绿廊的构建，快速性水平明显高于其他同类型城市。

2) 低开发强度城市样本的滨海空间充足，有相对宽裕的条件构建鲁棒性与快速性水平更高的海岸线防护体系与蓝绿空间网

络。一方面建立宽阔的海岸缓冲区，可以加大城市核心区与沿海风暴潮的距离；另一方面通过绿带分隔内部组团，可以提升对雨水、洪水的滞留、渗透能力。相反，由于地块尺度大、开发建设程度低，低开发强度样本的冗余性较弱，应急救援设施的分布也相对稀疏。

3) 滨海城市 4R 韧性水平整体表现与开发强度无明显关联，不同开发强度的城市均可通过强化自身优势或弥补弱势来提升整体韧性水平。高开发强度城市样本应优先完善冗余单元与优化应急资源布局，再通过拓宽岸线、连通绿廊等方式提升鲁棒性与快速性水平；低开发强度城市样本则应适当提高路网密度，均匀布局公服设施，以为基于生态城市建设本底更好地完善资源服务覆盖面提供保障。

4 滨海城市4R 韧性导控重点与提升策略

针对不同类型的滨海城市，本研究基于不同开发强度归纳总结出滨海城市在 4R 韧性维度的导控重点与提升策略，以期对未来相关设计研究提供参考与借鉴（表 6）。

4.1 鲁棒性——巩固“抵抗—缓冲”相结合的海岸基础设施

滨海城市应采用“人工+自然”融合的手段，将硬质海堤等灰色基础设施与岸滩植被等绿色基础设施相结合，提升海岸线防护能力，实现滨海城市的防灾减灾功能。

低开发强度城市应充分发挥选址优势，让城市组团远离滨海岸线，优先预留 200~

300 m 的韧性缓冲区,采用人工岛、红树林湿地、盐沼带等多种模式形成软性的生态防护层,构建防浪绿带或绿廊;而中高开发强度城市由于海岸宽度不足,要重点关注堤岸的坚固性与消浪结构的设置。如通过反斜式堤岸或联排硬质码头消解海浪冲击,并形成硬质化与生态化相结合的亲水活动空间。

4.2 冗余性——强化“立体复合、平急两用”的冗余功能单元

滨海城市应以“与水共存”为韧性目标,通过混合土地利用与功能立体布局,在城市街区组团中划分出充足的复合功能单元,将风暴潮灾害影响控制在阈值以下。

中高强度开发城市往往是城市的中心区,多采用“小街区、密路网”和土地复合利用的发展策略,核心功能区街区尺度应控制在100~150 m 以内,尽可能保证混合用地面积占比在40%以上,增加平急转换功能单元,保障较高的冗余性下限;低开发强度城区由于空间较为充足,在复合利用和平急转换方面要求相对较低,但路网密度与路网整合度需保持较高水平,通过提升城市系统网络化程度的方式增强冗余性。

4.3 可获得性——构建“滨海—腹地”一体化的应急救援体系

滨海城市应重点聚焦资源或服务与城市组团之间的空间耦合度,加强“多中心、小半径”的生活服务圈建设,保障特殊时期城市居民点获取应急物资与服务的能力。

中高开发强度城市由于人口密度大、灾时应急服务压力大,应保障物资补给点、医疗设施和消防救援均具有较高的分布密度,与城市组团保持较高的空间耦合度;低开发强度城市对资源配置的距离要求相对更高,较少的人口对于资源和服务数量和密度的要求相对宽松,故应首先保障物资、医疗、消防三类应急设施与城市组团具有较高的耦合度。

4.4 快速性——完善“点、线、面”共同发力的蓝绿生态系统

滨海城市应呈现“灰绿相融”的整体风貌,在各城市组团之间留出足够的绿色开放空间,结合当地地理条件恢复或增挖

河涌、湖泊等内陆水体空间,形成蓝绿生态网络。

低开发强度城市样本应重点关注蓝绿空间与城市组团的嵌套、耦合关系,通过雨水花园、楔形绿地、林荫路等方式,保障蓝绿空间占比不低于30%,城市组团内部及组团间有充足的蓝绿空间来吸纳和消解洪水;中高开发强度城市由于土地紧张,需要重点关注蓝绿空间结构与耦合度指标,保障城市居民点到达最近蓝绿空间的距离不超过100 m,并将分散的蓝绿斑块串联为连续整体的排水廊道网络,提升风暴潮灾害发生时城市疏散洪水的功能。

5 结语

本研究以鲁棒性、冗余性、可获得性和快速性所构成的4R韧性特征为基础,关注滨海城市对风暴潮、海啸等灾害事件的抵抗力与恢复力,通过构建韧性评价模型与对国内外典型案例开展实证研究,探讨不同开发强度下城市空间的差异化韧性表征,并提出滨海城市4R韧性导控重点与提升策略。研究发现:1)中高开发强度滨海城市土地集约,功能复合,在冗余性与可获得性方面整体水平更高;2)低开发强度滨海城市岸线宽阔,生态空间充足,在鲁棒性与快速性方面整体水平更高;3)滨海城市可结合自身条件聚焦不同的韧性导控重点,加强对优势韧性维度的巩固与弱势韧性维度的补足,进而提升整体韧性水平。

本研究结论可为滨海城市韧性设计提供借鉴与参考。中国沿海地区是受气候变化影响严重的高风险和高脆弱区,未来应充分借鉴国内外优秀滨海城市建设经验,通过开展4R韧性评价,制定符合在地环境特征的滨海韧性策略体系,并落实到具体的城市设计、功能布局与应急管理中。

此外,本研究分析的案例数量有限,存在一定局限性,在后续研究中可采用数字化平台、机器学习等技术手段,通过大量数据结果反馈优化评价模型,完善相关理论框架与实践经验,助力中国滨海城市在极端天气常态化趋势下实现高质量韧性发展。

参考文献 (References):

- [1] 田健, 曾穗平, 曾坚, 等. 基于智慧—韧性理念的滨海城市雨洪灾害防控规划方法[J]. 西部人居环境学刊, 2022, 37 (6): 66-72.
- [2] TIAN J, ZENG S P, ZENG J, et al. Planning Method of Coastal City Rain Flood Disaster Prevention and Control Based on the Concept of Intelligence-Resilience[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2022, 37 (6): 66-72.
- [3] UN-HABITAT. What Is Resilience?[EB/OL]. (2023-12-04) [2024-02-01]. <https://unhabitat.org/cn/node/3774>.
- [4] 北京市人民政府. “北京市贯彻落实党的二十大精神”系列主题新闻发布会(第十二场): “北京市韧性城市建设”专场[EB/OL]. (2023-12-27) [2024-03-25]. <https://www.beijing.gov.cn/shipin/Interviewlive/1012.html>.
- [5] Beijing Municipal People's Government. "Beijing Implements the Spirit of the Party's 20 Congresses" Series of Themed Press Conference (12th): "Beijing's Resilient City Construction" Special Session[EB/OL]. (2023-12-27) [2024-03-25]. <https://www.beijing.gov.cn/shipin/Interviewlive/1012.html>.
- [6] 陈碧琳, 李颖龙. 洪涝韧性导向下高密度沿海城市适应性转型规划评估: 以深圳红树湾片区为例[J]. 城市规划学刊, 2023 (4): 77-86.
- [7] CHEN B L, LI Y L. Flood-Resilience-Oriented Adaptive Transformative Planning and Assessment of High-Density Coastal Cities: The Case of the Mangrove Bay Area, Shenzhen[J]. Urban Planning Forum, 2023 (4): 77-86.
- [8] 王娇, 李含嫣, 臧鑫宇. 应对暴雨内涝的城市建成环境韧性等级区划研究: 以天津市中心城区为例[J]. 建筑学报, 2022 (S2): 201-207.
- [9] WANG Q, LI H Y, ZANG X Y. A Study on the Resilience Rating of Urban Built Environment in Response to Heavy Rainfall Flooding Tianjin Central City as an Example[J]. Architectural Journal, 2022 (S2): 201-207.
- [10] 汪洁琼, 沈桐羽, 王敏, 等. 应对雨洪挑战的城市滨水码头区蓝绿空间耦合设计研究[J]. 园林, 2023, 40 (3): 47-54.
- [11] WANG J Q, SHEN T Y, WANG M, et al. Green-Blue Spatial Coupling Design Research of Urban Docklands in Response to Flooding Challenge[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2023, 40 (3): 47-54.
- [12] 王鑫, 栾博, 祝明建, 等. 滨海地区绿色韧性空间评估方法与规划范式优化: 以深汕特别合作区韧性水敏性城市为例[J]. 城市观察, 2022 (5): 97-110, 162-163.
- [13] WANG X, LUAN B, ZHU M J, et al. Spatial Assessment Method and Planning Paradigm Optimization of Resilient Green Space in Coastal Areas: A Case Study of the Resilient Water-Sensitive City in the Shenzhen-Shanwei Special Cooperation Zone[J]. Urban Insight, 2022 (5): 97-110, 162-163.
- [14] 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.
- [15] ZHU S Y. Evaluation and Improvement Strategy of Urban Flood Resilience an Example of Cities in Yangtze River Delta[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [16] NAHIDUZZAMAN K M, ALDOSARY A S, RAHMAN M T. Flood Induced Vulnerability in Strategic Plan Making Process of Riyadh City[J]. Habitat International, 2015, 49: 375-385.
- [17] 耿煜周, 曾坚. 基于韧性理念的城市水系承洪优化策略: 以漳州市九十九湾流域为例[J]. 现代城市研究, 2022, 37 (8): 72-78.
- [18] GENG Y Z, ZENG J. Optimization Strategy of Urban Water



System Flood Bearing Function Based on the Concept of Resilience: A Case Study of Jiushijiwan Watershed in Zhangzhou[J]. Modern Urban Research, 2022, 37 (8): 72-78.

[11] 王娇, 李含嫣, 臧鑫宇, 等. 类型与等级双重限定下的雨涝韧性评估与优化[J]. 南方建筑, 2023 (12): 1-10.

WANG Q, LI H Y, ZANG X Y, et al. Assessment and Optimization of Stormwater Resilience via Classification and Grading[J]. South Architecture, 2023 (12): 1-10.

[12] ZHU S, LI D, HUANG G, et al. Enhancing Urban Flood Resilience: A Holistic Framework Incorporating Historic Worst Flood to Yangtze River Delta, China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 61: 102355.

[13] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19 (4): 733-752.

[14] 李阳力. 水生态韧性评价与规划研究: 以天津市为例[D]. 天津: 天津大学, 2021.

LI Y L. Research on Evaluation and Planning of Water Ecosystem Resilience: A Case Study of Tianjin[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[15] 孙丽辉, 曾娇娇, 李连盼. 基于韧性城市理念的珠海市沿海防风浪潮堤岸提升策略[J]. 园林, 2020, 37 (9): 40-45.

SUN L H, ZENG J J, LI L P. Resilient Cities with Its Upgrading Strategy for Coastal Embankment in Zhuhai[J]. Landscape Architecture Academic Journal, 2020, 37 (9): 40-45.

[16] CAO F, XU X, ZHANG C, et al. Evaluation of Urban Flood Resilience and Its Space-Time Evolution: A Case Study of Zhejiang Province, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110643.

[17] LIU R, CHEN Y, WU J, et al. Assessing Spatial Likelihood of Flooding Hazard Using Naïve Bayes and GIS: A Case Study in Bowen Basin, Australia[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016, 30 (6): 1575-1590.

[18] 刘刚, 张娟, 金娇, 等. 韧性景观理念下的城市滨海空间规划设计策略研究: 以青岛城阳区滨海绿道为例[J]. 建筑与文化, 2023 (11): 132-134.

LIU G, ZHANG J, JIN J, et al. Research on Urban Coastal Space Planning and Design Strategy Under the Concept of Resilient Landscape: A Case Study of Coastal Greenway in Chengyang District, Qingdao[J]. Architecture & Culture, 2023 (11): 132-134.

[19] XU W, XIE Y, YU Q, et al. An Evaluation of Factors Influencing the Resilience of Flood-Affected Communities in China[J]. Hydrology, 2023, 10 (2): 35.

[20] 栗玉鸿, 邹亮, 李利, 等. 推动海绵城市建设系统提升城市雨洪韧性[J]. 西部人居环境学刊, 2022, 37 (1): 22-26.

LI Y H, ZOU L, LI L, et al. Improving Urban Stormwater Resilience by Promoting Sponge City Construction System[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2022, 37 (1): 22-26.

[21] LUO Y, CHEN X, YAO L. Flood Disaster Resilience Evaluation of Chinese Regions: Integrating the Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets with Prospect Theory[J]. Natural Hazards, 2021, 105 (1): 667-690.

[22] 洪琰. 以广州知识城广场为样本的公共建筑群体韧性设计策略初探[J]. 南方建筑, 2022 (12): 9-17.

HONG Y. Primary Discussion on Resilience Design of Public Building Group Based on Guangzhou Knowledge City Square[J]. South Architecture, 2022 (12): 9-17.

[23] ZHANG H, YANG J, LI L, et al. Measuring the Resilience to Floods: A Comparative Analysis of Key Flood Control Cities in China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 59: 102248.

[24] 陈为公, 张娜, 张友森, 等. 基于 DEMATEL-ISM 的城市灾害韧性影响因素研究[J]. 灾害学, 2021, 36 (1): 1-6.

CHEN W G, ZHANG N, ZHANG Y S, et al. Study on Influencing Factors of Urban Disaster Resilience Based on DEMATEL-ISM[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36 (1): 1-6.

[25] 李可欣, 李超骥. 多维度视角下城市形态与气候韧性的关联[J]. 城乡规划, 2021 (3): 20-27.

LI K X, LI C S. Exploring the Linkages of Urban Form and Climate Resilience from a Multi-dimensional Perspective[J]. Urban and Rural Planning, 2021 (3): 20-27.

图表来源(Sources of Figures and Tables):

文中图表均由作者绘制。

(编辑 / 边紫琳)

作者简介:

秦祈翔 / 男 / 硕士 / 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司主任规划师、工程师 / 研究方向为城市设计

张卫平 / 男 / 学士 / 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司副所长、高级工程师 / 研究方向为城市设计

尹亚森 / 男 / 硕士 / 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司助理规划师、助理工程师 / 研究方向为风景园林规划与设计

通信作者邮箱: 524732638@qq.com

QIN Q X, ZHANG W P, YIN Y S. Strategy for Construction and Improvement of 4R Resilience Evaluation Model for Coastal Cities[J]. Landscape Architecture, 2025, 32(3): 100-109. DOI: 10.3724/j.fjyl.202407170390.

Strategy for Construction and Improvement of 4R Resilience Evaluation Model for Coastal Cities

QIN Qixiang, ZHANG Weiping, YIN Yasen*

Abstract:

[Objective] In the context of the normalization of global extreme weather, resilient design has become the focus of urban construction and urban design disciplines. Through literature review, it can be found that storm-flood resilience and sponge city are the core issues in the construction of coastal resilient cities. However, at present, there is still a lack of research on the mapping between the 4R (robustness, redundancy, resourcefulness, and rapidity) resilience characteristics and spatial elements and specific measures in urban design, or the evaluation of the performance of specific resilience strategies under different scenarios. The conduction relationship between urban resilience theory and urban design practice needs to be further rationalized and refined. Based on the perspective of urban design, this research aims to explore the correspondence between urban spatial form and stormwater resilience indicator, and put forward a research framework suitable for resilience evaluation of coastal cities.

[Methods] The research uses literature research, empirical research, quantitative analysis and other methods. Based on literature induction and extraction and integration of 4R resilience characteristics, a comprehensive evaluation model with 24 indicators fallen into the four categories of robustness, redundancy, resourcefulness and rapidity is constructed. According to the four principles of typicality, international influence, resilience construction experience and multi-scenario difference, 9 typical coastal city samples at home and abroad are selected in a targeted and differentiated way for a global empirical research. They are the Lower Manhattan of New York City, the central area of Boston, the Silicon Valley area of Santa Clara, the central area of Copenhagen, the central area of Sydney, the central area of Singapore, the core area of Hong Kong Island, the Fushan Bay Business District of Qingdao, and the waterfront area of Zhuhai. Then, this research analyzes how each sample above improves its 4R resilience level through urban spatial form and functional layout.

[Results] According to the analysis results, Boston is the only sample city scoring above average in all the four categories, showing a high level of overall resilience. For other cities, New York and Sydney excel in redundancy and resourcefulness. The resourcefulness and rapidity of Qingdao and Singapore contribute the most to the overall resilience level. Hong Kong attaches the highest importance to resourcefulness; Copenhagen, Santa Clara and Zhuhai need to focus on their resilience strategies in terms of robustness and rapidity. The reasons leading to the aforesaid results are mainly summarized in the following three aspects. 1) Due to dense population and land shortage, city samples with high development intensity pay more attention to spatial redundancy and resource acquisition during disasters, and their urban core functional areas have achieved full coverage of public services and emergency service facilities to a large extent through encrypted road networks, mixed land use, vertical functional layout and other ways. At the same time, reasonable division of land parcels is also conducive to the construction of green belts and green corridors in urban areas. For example, cities such as Singapore and Boston are significantly higher than other cities of the same type in terms of rapidity indicators. 2) The coastal space of city samples with low development intensity is sufficient, which can withstand and dissolve the impact of

stormwater through better shoreline protection and blue-green network. These city samples have the conditions to establish a generous coastal buffer zone, which can prevent coastal storm surge from attacking the urban core area in the first time. In addition, the clear separation of internal clusters through green belt can greatly enhance their retention and filtration of rain and flood. On the contrary, due to the large land scale and low degree of development and construction, city samples with low development intensity are typically featured by relatively poor spatial redundancy and relatively sparse distribution of emergency rescue facilities. 3) There is no significant correlation between the overall performance of 4R resilience and development intensity in coastal cities, and cities with different development intensity can enhance the overall resilience level by strengthening their own advantages or appropriately compensating for weaknesses. In city samples with high development intensity, priority should be given to improving the layout of redundant units and emergency resources, and the robustness and rapidity level should be improved by broadening the coastline and connecting the greenways. In city samples with low development intensity, road network should be properly encrypted and public service facilities should be evenly distributed to ensure better coverage of resource services in the context of ecological city construction.

[Conclusion] Through the empirical evaluation of typical coastal city samples, the guidance and control priorities and improvement strategies of coastal cities from the 4R evaluation dimensions are summarized. Coastal cities should consolidate coastal infrastructure combining resistance and buffering, strengthen three-dimensional and complex redundant functional units, build an integrated emergency rescue system spanning from coastal areas to hinterland, and improve the blue-green ecosystem by combining point, line and surface. In the future, China's coastal cities should shore up the weakness of planning homogeneity, fully learn from excellent coastal urban construction cases at home and abroad, classify and implement policies through 4R resilience evaluation results, formulate a resilience strategy system for coastal cities in line with local environmental characteristics, and integrate such system into specific urban spatial form, functional layout and emergency management.

Keywords: landscape architecture; resilient city; 4R; robustness; redundancy; resourcefulness; rapidity

Authors:

QIN Qixiang, Master, is a senior planner and engineer in Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute. His research focuses on urban design.

ZHANG Weiping, Bachelor, is a deputy director and senior engineer in Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute. His research focuses on urban design.

YIN Yasen, Master, is an assistant planner and assistant engineer in Guangzhou Urban Planning & Design Survey Research Institute. His research focuses on landscape planning and design.

Corresponding author Email: 524732638@qq.com