

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

陈碧琳 李颖龙

提 要 气候变化加剧、极端天气事件频发背景下，高密度城市沿海地区面临严峻的洪涝灾害威胁。基于复杂适应系统和演进韧性中适应性转型的相关理论，通过协同普遍韧性和洪涝特定韧性，以分层图析方法将韧性特征转译至城市空间形态系统的景观生态空间、街道网络、街区与建筑等3个要素层，耦合量化评估与动态分析，构建洪涝韧性导向下适应性转型规划评估体系。运用该评估体系，借助GIS及其空间网络分析插件sDNA、景观格局指数分析软件Fragstats以及Mike21模拟台风“天鸽”风暴潮洪涝淹没情况，对典型高密度城市沿海地区深圳红树湾片区进行实证研究，量化评估传统与适应性转型两种规划干预模式的韧性水平。结果显示，相比传统规划路径，适应性转型规划干预提升了多样性、连通性、模块化、冗余性等普遍韧性以及应对洪涝灾害的吸收、应急反应与恢复能力等洪涝韧性特征，在极端天气引发的洪涝灾害冲击下仍维持城市系统的正常运行，为同类型地区建设提供一个基于自然的适应性解决方案。

关键词 洪涝韧性；高密度沿海城市；适应性转型规划；量化评估

中图分类号 TU984 文献标志码 A
DOI 10.16361/j.upf.202304010
文章编号 1000-3363(2023)04-0077-10

作者简介

陈碧琳，华南理工大学建筑学院博士研究生，
chenbilin92@foxmail.com
李颖龙，广州市城市规划勘测设计研究院注册规划师、工程师，通信作者，
1178671372@qq.com

Flood-Resilience-Oriented Adaptive Transformative Planning and Assessment of High-Density Coastal Cities: The Case of the Mangrove Bay Area, Shenzhen
CHEN Bilin, LI Yinglong

Abstract: Given the intensifying impact of climate change and more frequent occurrence of extreme weather events, high-density coastal cities are becoming more vulnerable to severe flood threats. Built on the theories of complex adaptive systems and an understanding of adaptive transformation under evolutionary resilience, through mapping, the research transforms the city's overall and flood resilience attributes into three urban spatial morphological elements: landscape, street network, block and building footprints. Consequently, the paper constructs a comprehensive framework for assessing adaptive transformative planning for flood resilience based on quantitative and dynamic analysis. Built upon this framework, the paper quantitatively evaluates the Mangrove Bay Area, a typical high-density coastal urban area in Shenzhen, for its resilience level under both the conventional and the adaptive planning scenarios. With the help of GIS, its spatial network analytical plug-in of sDNA, the landscape pattern analysis tool of Fragstats, and a 2D hydraulic software called Mike 21 to simulate the extent of inundation following Typhoon Hato. The simulation results demonstrate that, compared with conventional planning, the adaptive transformative planning intervention not only enhances the overall resilience level through increased diversity, connectivity, modularity, and redundancy, but also improves flood resilience by boosting absorptive capacity, accelerating emergency responses and recovery, and reducing disruption to the urban system. The research provides a nature-based adaptive solution in the development of high-density coastal cities in the face of flooding challenges.

Keywords: flood resilience; high-density coastal cities; adaptive transformative planning; quantitative assessment

1 引言：气候变化加剧背景下实现高密度沿海地区洪涝韧性与适应性转型的挑战

1.1 传统洪涝灾害风险管理缺乏应对气候变化加剧的动态适应性评估框架

当前全球面临气候变化加剧、极端天气事件频发的威胁。热岛效应导致海平面上

升, 2009—2018年我国海平面每年上升5.5 mm^[1]; 沿海地区洪涝灾害频发, 2017年台风“天鸽”导致珠江口水位超过历史极值, 其增水幅度、潮水位及破坏强度远超200 a堤防标准^[2]。以往基于稳态思维的传统规划干预强调静态刚性的单一抵御, 难以应对动态变化的不确定因素和极端情况^[3]。构建城市应对气候变化的动态适应性规划框架, 降低城市系统受外部扰动的程度, 成为城市气候适应性响应的紧迫任务。

1.2 高密度城市沿海地区洪涝韧性导向下的适应性转型规划探讨不足

深圳是粤港澳大湾区的超大沿海城市, 红树湾片区(图1)作为深圳典型高密度沿海地区, 面临2个城市建设主要矛盾: ①复杂的自然生态本底与高度集聚的社会经济要素的矛盾, 反映了高密度城市发展长期性普遍问题, 包括: 高生态敏感度下如何划定沿海自然保护空间、高密度集聚下如何集约利用沿海有限建设空间、高效率需求下如何构建安全活动环境3个命题^[4]; ②气候变化下洪涝灾害频发与沿海区实现安全防灾的矛盾, 体现了沿海洪涝灾害管理阶段性特定问题^[5]。

针对普遍问题, 已有研究就物质空间、社会资本、管理制度等试图确立涵盖全系统要素的韧性概念框架^[6-7], 然而这种全覆盖方法难以精确叙述指定冲击的动态适应情景; 针对洪涝特定问题, 学界聚焦于建立流域尺度的洪水模型分析动态成因, 就绿色设施、市政排水等要素提出韧性策略^[8-9], 该研究路线注重开展单个要素精细化洪涝适应性设计, 但容易导致过度关注单一防控手段而忽略未知危险的“堤防效应”^[10]。因此, 本文尝试厘清长短期风险, 以动态适应视角回应高密度城市沿海地区的普遍与洪涝特定问题, 制定洪涝韧性导向下适应性规划评估体系及干预路径。

2 溯源: 复杂适应系统理论推动城市韧性实践从静态刚性到动态适应的转变

2.1 动态认知: 基于复杂适应系统的演进韧性为动态适应性规划干预提供理论

工具

霍林在1973年率先提出韧性概念, 早期研究多集中在生态学和工程学领域, 城市韧性一般被描述为城市系统在面临干扰时恢复单一稳态的刚性能力^[11]。随着韧性理论的嬗变, 以复杂适应系统(complex adaptive system, CAS)为基础, 形成演进韧性的动态认知。CAS是由主体与环境相互作用的非线性要素系统, 具有聚集、非线性、流、多样性等4个特征, 主体通过学习与积累经验逐步适应环境和改变结构, 从而推进系统动态演进^[12]。适应性转型是演进韧性所定义的城市系统动态转型模式, 主体是街区网络、建筑和绿地公园等“多样性”物质空间要素, 通过“集聚”形成“流”^[13]。在外部环境相互作用的过程中, 城市韧性作为应对不确定扰动事件的工具, 基于自然生态和安全风险, 动态分析和预判历史变化及未来情景, 因时因地开展城市适应性规划, 及时监测多方案模拟情况并做出调整, 促进城市的“非线性”动态转型^[14]。

2.2 动态方法: 基于适应性转型的解决方案实现城市规划干预的韧性响应

城市规划干预为应对未知的城市问题和不确定的风险提供了可靠的模式, 是促进城市适应性转型的一种有力手段。耦合城市韧性与适应性转型的规划干预从单一静态、刚性抵御转向动态、适应环境变化的转型策略, 将不断调整的空间组合作为其发展轨迹不确定性的来源和应对策略, 根据动态情景采取及时行动, 当城市韧性水平跌破适应性临界值时, 开展额外的韧性干预, 从传统旧结构中识别风险并转化为发展机会, 形成适应发展需求的新结构^[15]。

通过梳理国际典型高密度沿海城市韧性规划实践案例, 归纳出洪涝韧性导向下适应性转型规划主要通过生态景观系统化、交通网络连通化、街区功能复合化以及洪涝韧性基础设施建设等4个空间维度的干预措施推动城市适应性转型。见表1。

3 思考: 构建洪涝韧性导向下高密度城市沿海地区适应性转型规划量化评估体系

3.1 协同普遍韧性与洪涝特定韧性: 城市适应性转型规划干预的需求

城市韧性根据时间维度和干扰源类型分为普遍韧性与特定韧性。从时间维度看, 普遍韧性满足城市系统应对不确定性冲击的长期转型需要, 支撑城市平时稳定运行^[18]; 洪涝特定韧性则通过城市宏观格局和细部空间响应洪涝灾害的短期冲击以满足应急管理需求^[19]。从干扰源类型看, 普遍韧性集成自然灾害、事故、公共卫生、社会安全等多风险作用叠加的安全韧性系统^[20], 表现为吸收可预知和不可预知的任何类型干扰的能力^[21], 包含多样性、连通性、模块化、冗余性等共性空间特征^[22]; 洪涝特定韧性以单一洪涝灾种为切入点, 开展复杂化风险分析, 制定未知极端事件的应对策略, 旨在提升城市系统适应洪涝灾害的3种韧性能力, 即实时吸收^[23]、应急反应^[24]和灾后恢复能力^[25]。见图2。

普遍韧性与洪涝韧性存在共性与个性的关系。共性存在于个性之中, 个性体现共性特征, 并在一定条件下相互转化。如街道网络在平时城市系统运行过程中具有连通性和冗余性等普遍韧性特

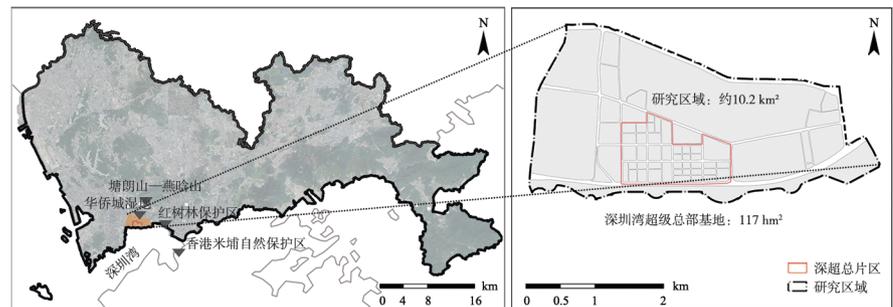


图1 深圳红树湾片区区位及研究区域示意图
Fig.1 Location and study area of the Mangrove Bay Area, Shenzhen

征，在洪涝灾时作为城市生命线工程之一，表现为避难场所连通性和疏散通道的冗余性等洪涝韧性应急反应能力^[26]。因此普遍韧性特征在洪涝特定灾害发生时仍具有有效性，并局部转化为洪涝韧性能力，发挥城市系统适应洪涝灾害的韧性效能。

洪涝韧性导向下适应性转型规划干预需协同普遍韧性和洪涝特定韧性。洪涝灾害不仅对高密度沿海城市的人口、经济和社会活动造成巨大损失，还会引发山体滑坡、河道淤塞、土地盐碱化、水环境污染、病菌和疫病等次生灾害^[27]，诱发级联效应，引起城市综合系统的韧性反馈。适应性转型规划干预需以应对不确定性为目标，对洪涝风险作出适应性响应，采取具体的安全防灾行动降低灾损率，关联洪涝灾害前预防、灾中应急和灾后恢复等3个阶段的韧性措施^[28]；同时还需提升城市回应多种可能产生的次生灾害干扰的整体适应能力，确保灾后城市正常运行的综合适应性系统建设。

3.2 转译韧性特征至城市形态系统：建立城市物质空间与普遍、特定韧性的交互框架

城市空间形态是城市系统实现韧性的着力点，也是适应性转型规划干预的物质载体。基于CAS组织异质、复合和连续的城市空间，结合典型韧性案例将适应性理论应用于规划干预措施的路径，即整合城市形态中生态景观、交通网络、街区功能和洪涝基础设施等4个维度，以图析方法分解城市形态的主要物质要素层，将普遍和特定韧性特征转译至形态要素。韧性城市形态的主要物质要素层包括：景观生态空间、街道网络、街区与建筑。景观生态空间作为“自然基底层”^[29]，由水系、绿地等子系统组成，对其他要素层起限定作用，其适应性涵盖景观结构、功能连通性和洪涝灾害的吸收能力^[30]。街道网络从属于“网络设施层”^[29]，是人流、物流、信息流的空间骨架，其适应性一般见于空间连通性和冗余性，可增强城市应对洪涝灾害的应急反应能力^[31]。街区与建筑作为“社会占用层”^[29]，由用地和建筑模块等子系统构成，是社会经济活动的物质载体，

表1 高密度沿海城市韧性规划响应案例
Tab.1 Resilient responses of high-density coastal cities

适应性干预措施	纽约曼哈顿区海洋气候韧性总体规划	新加坡滨海湾区韧性规划
生态景观系统化	基于改善“桑迪”飓风冲击下暴露的环境脆弱性，设置16 km连续滨海生态湿地公园、生态湿地和雨水花园建造绿色走廊	基于自然的解决方案，植入沿海大型缓冲绿地，提升沿海开放空间的规模与连续性，设立沿海红树林湿地及自然岛屿保护区生态防护岸线
交通网络连通化	增加人行桥循环路线、自行车道、桥下空间等与滨海立体联系的通道	搭建开放街区网络，确保10 min步行到达开放空间、应急场所和轨道站点
街区功能复合化	建设功能混合社区，防洪景观护堤系统串联社区、休闲、农业、服务等复合功能；引导滨海建筑防洪设计或改造韧性应对当前和未来的洪灾	街区功能混合，预留弹性白地促进多功能土地利用，为应对洪涝灾害预留生活、工作和应急空间，建筑水收集处理
韧性基础设施	设置可延伸的低墙和护堤等保护性雨水防御韧性设施，根据降雨强度和水量、海平面上升和沿海洪水的影响设计管道，兼顾内部和表面蓄水	建设防波堤、护岸、海墙、防洪闸门和泵站等增强海岸抵御力和水源调蓄的绿色基础设施
动态适应性体现	建立动态评估框架比较滨海防洪分区的韧性效能，根据动态评估结果更新防洪分区划定	构建沿海内陆洪水动态模型，模拟评估内陆强降雨和极端沿海事件影响。根据评估结果采取洪水风险管理、洪涝韧性工程设计等适应性响应措施

资料来源：根据参考文献[16-17]绘制

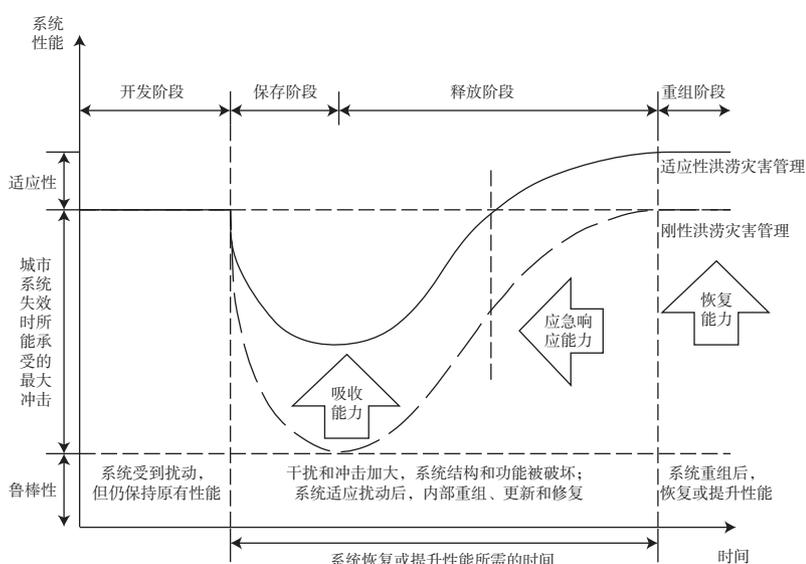


图2 适应性洪涝灾害管理的3种韧性能力作用机制
Fig.2 Three mechanisms of resilience in adaptive flood disaster management

其适应性侧重城市组团的功能多样性^[32]，提高洪涝灾害恢复能力。

3.3 耦合量化评估指标与动态分析：构建洪涝韧性导向下的适应性规划动态评价体系

针对高密度沿海城市建设的2个主要矛盾，适应性规划干预主张：①提升城市形态的普遍韧性特征，如多样性、连通性、模块化、冗余性，以可持续的方式平衡生态保护和城市发展；②增强应对沿海高密度地区洪涝灾害威胁的适

应性能力，包括吸收、应急反应和恢复能力。本文在协同普遍与洪涝韧性基础上，基于城市形态要素分层图析，耦合量化评估与动态模拟分析，建立韧性特征与城市空间及洪涝干扰因素之间的复杂关联，构建洪涝韧性导向下适应性规划评估体系。

首先，通过韧性特征在城市形态系统的转译确定景观生态空间、街道网络、街区与建筑等3类要素层，划分景观生态空间网络连通性、应对洪涝灾害的吸收能力，街道网络连通性、冗余性、应

对洪涝灾害的应急反应能力，街区与建筑的功能多样性、模块紧凑度、应对洪涝灾害的恢复能力等8项韧性一级指标。其次，确定一级指标在不同洪涝场景下的动态评价权重。基于普遍韧性与洪涝韧性的共性与个性协同关系，根据动态适应性路径，按洪涝事件发生概率划分平时、一般洪涝、极端洪涝等3类情景。洪涝韧性指标权重与洪涝发生概率呈负相关关系，即越低概率的洪涝事件造成越严重的灾害后果，越需加强洪涝韧性

干预的力度^[33]。将深圳市平时、一般和极端洪涝事件的发生概率进行标准化处理，得出一级指标在不同情景下的动态评价权重（表2）。再次，引入城市规划量化研究工具细化二级指标。景观生态空间韧性水平借助Fragstats软件对景观格局进行测度；街道网络韧性水平可基于GIS平台运用sDNA进行可达性和中介度等拓扑特性计算；街区与建筑韧性水平则通过用地功能指标、设施兴趣点密度进行度量。最后借助丹麦DHI公司开

发的Mike21水动力分析软件模拟洪涝事件的动态场景，综合评价规划干预的洪涝适应性水平，形成洪涝导向下适应性转型规划评估指标体系。见表3。

4 实证：基于洪涝动态场景模拟的红树湾片区适应性转型规划量化评估

针对深圳红树湾片区生态环境高敏感度与高强度社会经济活动的矛盾，基于控制性详细规划的传统规划干预模式和适应性转型规划干预模式呈现出两种不同的城市韧性设计响应。见图3和表4。

4.1 评估方法与数据来源

运用洪涝韧性导向下适应性转型规划评估指标，根据各要素层所呈现的空间特征观察不同子系统的韧性情况，整

表2 基于深圳洪涝事件不同预测情景的动态适应性评价权重条件

Tab.2 Weighted conditions of dynamic adaptation based on predicted flood scenarios in Shenzhen

预测情景	平时	一般洪涝事件	极端洪涝事件
洪涝发生概率(P)	1.0000	0.2000 ^[34]	0.0110 ^[35]
洪涝韧性指标权重(W _F)	0	0.8089	1.0000
普遍韧性指标权重(W _G)	1.0000	1.0000	1.0000

表3 洪涝韧性导向下适应性规划评估体系

Tab.3 Assessment of flood-resilience-oriented adaptive planning

目标层	要素层	一级指标	动态权重	二级指标	单位	说明	与目标层关系
洪涝韧性导向下城市适应性水平	景观生态空间	景观生态网络连通性	W _G	景观结构连接度(COHESION)	—	景观空间的物理连通性	(+)
				景观功能连接度(CONNECT)	%	生态网络的功能连接度	(+)
				景观功能连接度(ENN_MN)	m	斑块隔离度	(-)
		洪涝吸收能力	W _F	绿化覆盖率≥35%的街区占比	%	地面、屋顶与架空绿化、透水铺装的绿化覆盖率超过35%的街区数量占比	(+)
				蓝绿空间与洪涝的空间重合度	%	蓝绿空间布局与洪涝分布的重合程度	(+)
				洪峰时刻的洪涝流量	m ³ /s	一次洪涝事件过程中最大的瞬时流量	(-)
	洪峰时刻延缓时间			h	蓝绿空间可延缓洪峰时刻到来的时间	(+)	
	街道网络	连通性	W _G	步行可达性(NQPDE 500 m)	km ⁻¹	500 m步行半径的可达性程度	(+)
		冗余性	W _G	路网密度	km/km ²	街道长度之和与片区面积的比值	(+)
				车行中介度(TPBtE 10 km)	次	通过性主干道的车行穿行度	(-)
		应对洪涝灾害的应急响应能力	W _F	淹没后街道网络灾损率	%	受洪涝淹没的街道网络路径损失值和正常值之比	(-)
				洪涝灾中街道网络步行可达性(NQPDE 500 m)	km ⁻¹	去除淹没路径后的街道网络步行可达性	(+)
				洪涝灾中避难场所分布密度	个/km ²	未被淹没的应急避难场所的空间分布密度情况	(+)
	街区与建筑	功能多样性	W _G	片区内混合用地地块比例	%	片区内混合用地(≥2种用地性质且各部分功能的建筑面积占比>10%的用地)占总用地数量之比	(+)
				模块紧凑度	W _G	公共活动空间占比	%
		应对洪涝灾害的恢复能力	W _F	街区土地利用灾损率	%	结合土地利用类型与容积率的受淹用地损失值与正常值之比	(-)
洪涝灾后关键服务设施分布密度				个/km ²	超市、商场、便利店等购物设施与医院、门诊部、社区健康中心等医疗保障设施的空间分布密度情况	(+)	
洪涝灾后必要生活设施步行可达性(NQPDE 500 m)				km ⁻¹	耦合500 m步行半径的上述必要生活设施可达性情况	(+)	
建筑形态防风与防洪涝能力	—	是否有与防风、防洪涝措施结合的建筑形态控制(是:1,否:0)	(+)				

合各要素层的空间特性综合评价整体城市系统的适应性水平。借助GIS及其插件sDNA、Fragstats等软件工具，通过Mike21模拟风暴潮洪涝淹没情况，量化评估传统与适应性两种规划干预的韧性水平。其中，台风“天鸽”导致深圳沿海水位超过历史极值，风暴潮的增水幅度远超200年一遇的堤防标准，因此将其作为极端不利条件进行洪涝淹没模拟。见表5。

4.2 景观生态空间适应性转型规划评估

4.2.1 普遍韧性：从大型集中绿地到立体分散式生态网络，提升景观生态网络连通性

为应对沿海生态环境高敏感度问题，传统规划干预在片区植入中央绿轴大型面状绿地，连接华侨城湿地、欢乐海岸、滨海公园与红树林保护区，构建红树湾片区的基本景观格局与生态保护安全底线。适应性转型干预在此基础上增加沿

街绿带、街区广场、口袋公园等线性绿化连接以及屋顶景观平台、架空绿化生态踏脚石等点状绿化，搭建“面—线—点”立体分散式生态网络，进一步提高生态网络连通性特征。

在景观结构连接度方面，与传统规划干预相比，适应性干预下的蓝绿景观斑块面积(CA)增加约43.5 hm²，CHOHESION值增加了6.62，说明立体分散式蓝绿生态网络比集中式大型绿地更利于提升景观结构的连通性。在景观功能连接度方面，蓝绿景观斑块面积的CONNECT值由26.54%提升至28.73%，ENN_MN值由27.87 m下降至25.53 m，改善了城市物种的生存环境和活动空间。在连续贯通的立体生态网络支持下，适应性干预提升了生态景观空间普遍韧性中的连通性特征。见图4。

4.2.2 洪涝韧性：基于蓝绿海绵网络与水循环动力系统，构筑应对洪涝的吸收能力

一方面，依托立体分散式生态网络构建蓝绿海绵网络作为适应性干预的一种基于自然的解决方案，赋予红树湾片



图3 红树湾片区传统规划与适应性干预

Fig.3 Conventional and adaptive planning interventions in the Mangrove Bay Area

资料来源：根据参考文献[36-37]绘制

表4 红树湾片区传统规划与适应性干预措施比较

Tab.4 Comparison between conventional and adaptive planning in the Mangrove Bay Area

要素	韧性特征	传统规划干预	适应性干预
景观生态空间	景观连通性	大型集中式绿地植入	立体分散式生态网络构建
	洪涝吸收能力	—	构建蓝绿海绵系统、构建水循环动力系统
街道网络	路网连通性、冗余性	平面小街区密路网	立体多层冗余慢行网络构建
	洪涝应急反应能力	防灾减灾底线管控；按开发强度、人口规模设置避难场所	弹性冗余的应急预案；设置灵活利用的大型室内应急避难场所
街区与建筑	功能多样性、单一模块紧凑度	片区功能分区、适度紧凑型开发	开发控制单元(单一模块)的功能复合、高密度集约紧凑型开发
	洪涝恢复能力	按发展规模配套公共服务设施	沿海设置低脆弱性等低开发强度用地、滨海建筑适应形体设计和架空处理；提供冗余、高可达性的关键服务设施，如灾后必要生活设施和医疗卫生保障设施

表5 红树湾片区洪涝适应性评估方法及数据来源

Tab.5 Evaluation methods of flood adaption and data sources of the Mangrove Bay Area

评估内容	数据类型	评估方法	数据来源
台风“天鸽”洪涝淹没情景模拟	地形	基于Mike21二维水动力模块，建立2017年8月22日0时至23日23时红树湾片区的淹没模拟模型，并将相关数据整合至GIS平台进行地理信息空间化	陆地高程：AW3D30DEM(2006—2011) ^① ；海深值：GEBCO(2020) ^② ；现状堤岸高程：4.6 m，防浪墙高1.1 m ^[38]
	土地覆盖糙率		全球地表覆盖数据(2010) ^③ 及对应的土地覆盖类型曼宁值 ^[39]
	水文边界条件		台风风场面文件：深圳台风网 ^④ ；潮位开边界序列文件：赤湾站潮位数据取自深圳市气象局网站 ^⑤ ，尖鼻咀站潮位数据取自参考文献[40]；降雨速率序列文件：50 a珠三角流域24 h雨型雨量分配 ^[41]
城市形态要素分层图析	传统规划	基于Fragstats、sDNA等软件，对景观生态空间、街道网络、土地利用和建筑等进行普遍韧性测度；叠合洪涝模拟，通过景观空间调查情况、断裂被淹没链路、分析计算土地利用淹没程度等方式衡量洪涝韧性能力	景观生态空间、街道网络、街区土地利用等城市形态矢量数据根据参考文献[36]绘制
	适应性干预		城市形态矢量数据根据红树湾城市设计相关资料 ^[37] 绘制；现状应急场所与关键服务设施基于Python于高德开放平台获取

区较强的洪涝吸收能力。在应对严重的风暴潮洪涝灾害时，集中绿地吸收和净化外来洪水，立体分散式绿地网络截留和渗透内部涝水，控制地表径流。红树湾片区内81.7%的地块绿化覆盖率在35%以上，立体绿化系统与洪涝淹没区重合度达37%。片区共约650 hm²的绿化面积，可储存约619万 m³的水量，发挥截留雨水和涝水的作用。

另一方面，景观适应性干预构建连通深圳湾一大沙河—华侨城湿地—欢乐海岸的循环水动力系统疏通和调蓄潮水，降低风暴潮海浪冲击带来的涌潮压力。在发生台风“天鸽”极端洪涝事件时，风暴潮增水和增浪超过堤岸高程和排水口高度，传统刚性防洪措施失效，洪、潮越过堤岸进入红树湾片区，水动力系统和地面海绵体成为容纳洪、潮、涝的洪泛区，储存和下渗雨水，通过市政排水系统集水经由泵站排放至外海。在水动力系统作用下洪峰流量降低，从而滞缓洪峰发生的时间。片区在极端洪涝事件洪峰流量出现时间由23日12时延缓至23日13时，洪峰流量从1187.69 m³/s削减至734.18 m³/s，降幅超过1/3（图5），发挥洪涝吸收作用，回应沿海环境脆弱性，构建应对洪涝灾害威胁的生态安全系统。

4.3 街道网络空间适应性转型规划评估

4.3.1 普遍韧性：从平面小街区密路网到多表层慢行网络，提升模块组合连通性与冗余性

传统规划干预采取平面“小街区密路网”模式，以紧凑高效的交通组织回应高密度建设区高效联系需求，体现普遍韧性连通性与冗余性特征。适应性干预通过多表层的城市空间立体化组织，沿轨道交通站点展开，构建由城市道路、首层内街、空中廊道、地下步道和垂直交通组成的互联互通的立体网络，满足多种沿海活动场所空间安全性需求。

借助sDNA量化测度，多表层立体网络步行半径内的Nqpde均值是传统规划干预路网的3.4倍，步行可达性大幅增强。通行路径数量增加了1.5倍，可替代的冗余路径选择增加。片区内主要东西干道滨海大道和白石路的车行中介中心性从传统规划干预至适应性干预穿行度

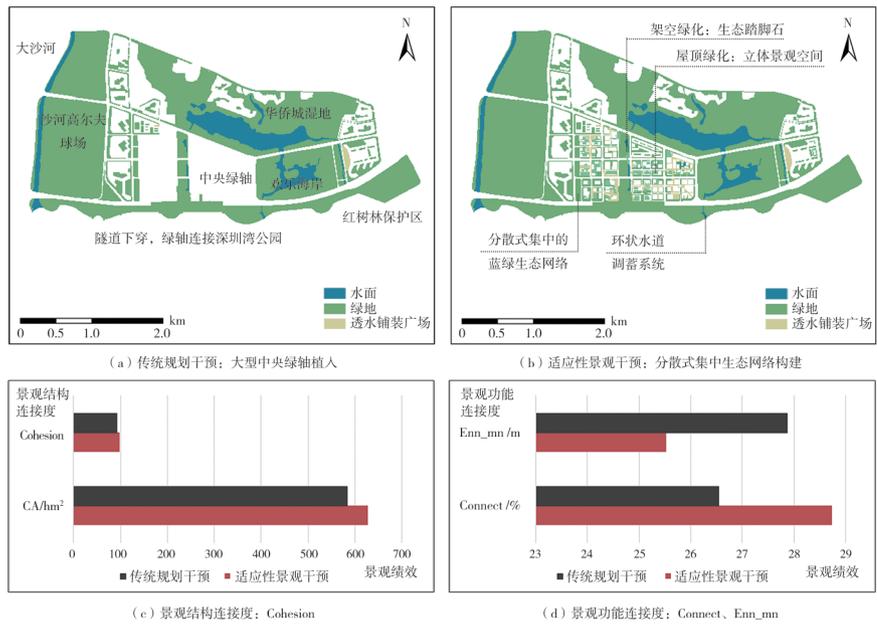


图4 传统与适应性规划干预下红树湾片区景观生态网络连通性对比

Fig.4 Comparisons of landscape and ecological network connectivity between conventional and adaptive interventions in the Mangrove Bay Area

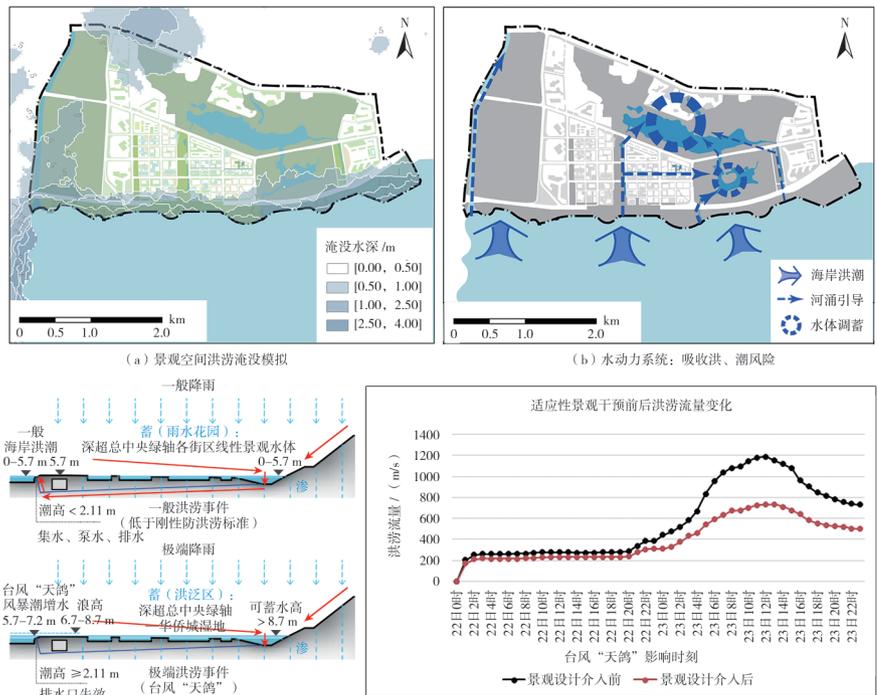


图5 红树湾片区适应性景观干预及其介入前后应对洪涝灾害的吸收能力分析

Fig.5 Analysis on absorptive capacity for coping with floods before and after adaptive landscape intervention in the Mangrove Bay Area

分别降低了7次和2次，城市干道的穿行依赖性降低，路网空间冗余度提升。因此，路网密化、多表层系统等适应性优化措施干预保障了高密度地区城市活动的高效开展和道路设施的安全运行。见

图6。

4.3.2 洪涝韧性：提供弹性冗余的应急备份预案，构筑应对洪涝的应急反应能力

因沿海缓冲空间有限，即使堤面高

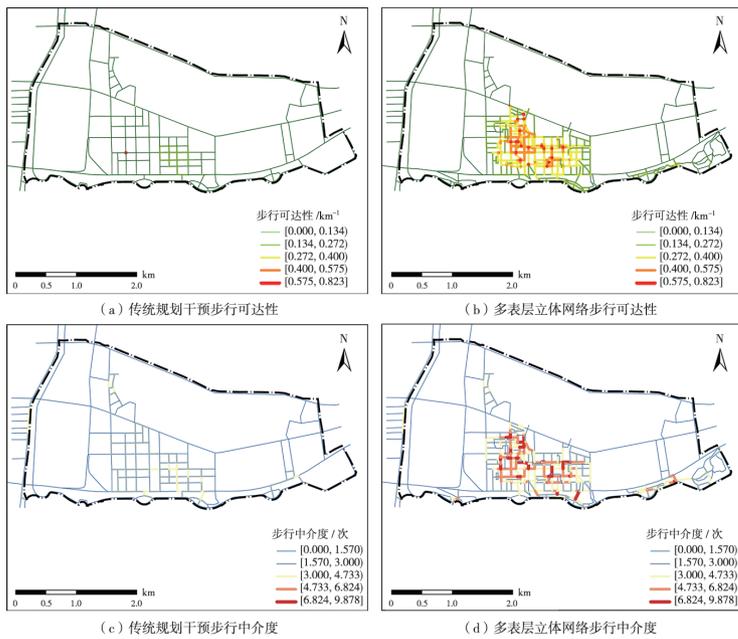


图6 传统与适应性规划干预下红树湾片区街道网络的慢行可达性与中介度对比
Fig.6 Comparisons of street network pedestrian accessibility and centrality between conventional and adaptive interventions in the Mangrove Bay Area

度达200年一遇标准, 片区仍受洪潮冲击, 适应性干预的关键应对措施是建立冗余备份的空中疏散通道, 在缺少缓冲带的低洼地区组织安全路径。借助Mike21软件模拟, 去除“天鸽”中被淹没的街道路径(淹没深度 ≥ 0.5 m), 在传统规划的分析样本中, 路径损失达42.4%, 适应性干预样本路径损失33.6%, 灾损率明显下降。淹没后的传统规划的路网步行可达性比淹没前下降了37.5%; 而在适应性干预下, 尽管部分路径失效, 但淹没前后步行范围内可达性和中介度差距不大, N_{pde} 均值几乎不变, 步行连通性未受洪涝影响。因此, 空中疏散通道的冗余备份保障了应急安全疏散效率, 局部链路损失不至影响街道网络总体运行。

适应性干预的另一措施是建立弹性冗余的应急备案。除传统规划设置的3个基本应急避难场所外, 灵活利用片区中包括会议中心、体育馆、学校、文化展览等设置在地势较高、未被洪涝影响的室内大型公共场所, 在风暴潮和洪涝灾害期间提供冗余安全的庇护所。将红树湾片区未被淹没的26个应急场所与淹没后的路网步行可达性进行空间关联, 应急场所步行可达性较高, 均值达 0.16 km^{-1} 。当洪涝灾害发生时, 片区人群在步行范围内快速疏散至应急避难场所。见图7。

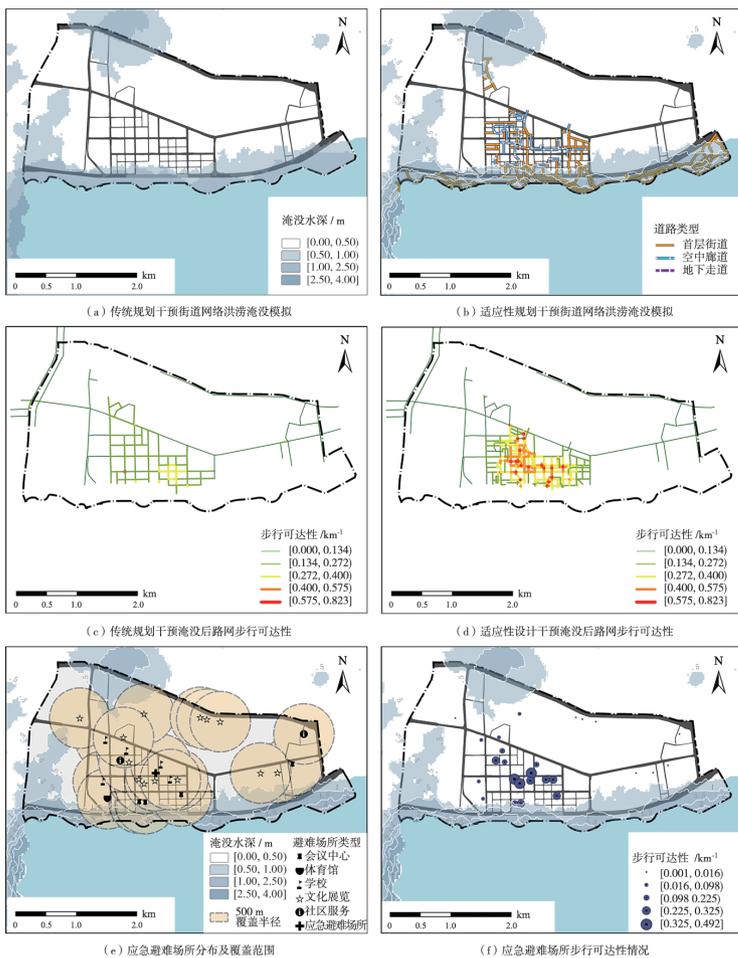


图7 传统与适应性规划干预下红树湾片区应对洪涝灾害的应急反应能力分析
Fig.7 Analysis on emergency response capacity for coping with floods under conventional and adaptive interventions in the Mangrove Bay Area

4.4 街区与建筑空间适应性转型规划评估

4.4.1 普遍韧性: 从功能分区到立体复合单元, 提升单一模块多样性与紧凑度

针对沿海高强度集聚要求与建设空间有限的矛盾问题, 以集约节约用地为原则, 传统规划基于片区职住平衡考虑混合作与生活功能, 划分商务办公区与居住配套区。功能区内以单一性质用地为主, 混合用地(≥ 2 种用地性质且各项功能建筑面积占比 $>10\%$)仅占约10%。适应性干预则进一步提升了细分控制单元的用地混合程度, 即单一模块的功能多样性, 整体混合用地占比达50%。与传统规划相比, 适应性干预在保持片区超过550万 m^2 的建设总量基础上精细化管控屋顶花园、口袋公园、步行广场等立体公共活动空间, 以灵活集

约的方式在密度城市环境中释放更多的开放场所，片区公共活动空间占比达50%以上，反映了单一模块紧凑度的提升。

4.4.2 洪涝韧性：适应性功能布局和提供冗余关键服务设施，构筑应对洪涝灾害的恢复能力

街区与建筑的适应性干预包含2方面：

(1) 建筑功能布局要具有适应性。沿海布置会议中心、文化展览等低脆弱性、低强度建筑功能，将高脆弱性、高强度的城市建筑如商业办公、住宅、医院、学校和交通枢纽等布置在未被淹没、地势较高的安全区域。滨海建筑考虑防风抗湍流设计，建筑形态以高度较低（≤20m）的散点状为主，做底层架空处理，缓解与洪潮的直接对抗。经洪涝模拟，“天鸽”灾后淹没街区22个，耦合各类型土地利用脆弱性等级系数和容积率系数，红树湾片区在适应性干预下土地利用灾损率为14.0%，比传统规划的灾损率下降了2.4%。

(2) 提供冗余、高可达的关键服务设施体系。配备综合医院、社区健康服务站等医疗卫生保障设施以及超市、便利店等必要生活需求的购物设施，与多表层交通网络联系，保障购物、就诊等必要活动。灾后红树湾片区关键服务设施98个，经核密度分析，片区设施整体分布密度9.6个/km²，其中白石洲密度最高（86.4个/km²），其次是深超总组团（57.6个/km²）。关键服务设施步行可达性均值为0.13 km⁻¹，较高可达性的设施主要集中在深超总组团，表明其多表层步行系统与设施耦合程度较高，可加快该组团在洪涝灾后正常运作的恢复速度。上述两点有效提升片区应对洪涝灾害的恢复能力，构建“生命线”系统保障灾后城市基本功能正常运行。见图8。

5 结果与结论

将上述传统与适应性转型干预的量化评估结果进行正向化、归一化处理，衡量洪涝韧性导向下红树湾片区两种干预模式下3个空间形态要素层及整体适应性水平（表6），因“天鸽”为极端洪涝事件，故一级指标的权重 $W_G = W_F = 1$ 。

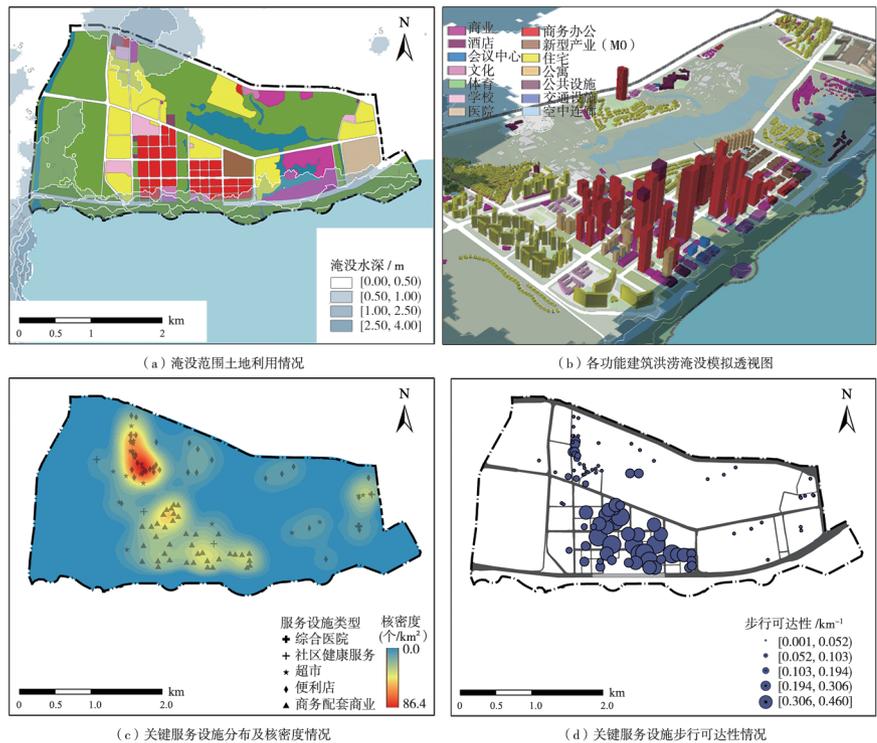


图8 适应性干预下红树湾片区应对洪涝灾害的恢复能力分析

Fig.8 Analysis on flooding recovery capacity under adaptive interventions in the Mangrove Bay Area

表6 洪涝韧性导向下红树湾片区适应性评价结果及数据正向化、归一化处理

Tab.6 Results of flood-resilience-oriented adaption assessment of the Mangrove Bay Area and data normalization

要素	一级指标	二级指标	原始数据		数据正向化、归一化		
			传统规划	适应性干预	传统规划	适应性干预	
景观生态空间	景观生态网络连通性	CA /hm ²	584.07	627.54	0.6084	0.6537	
		Cohesion	92.29	98.91	0.4807	0.5152	
		Connect /%	26.54	28.73	0.6911	0.7482	
		Enn_mn /m	27.87	25.53	0.7097	0.7341	
	应对洪涝灾害的吸收能力	绿化覆盖率≥35%的街区占比 /%	40.00	81.70	0.4167	0.8510	
		蓝绿空间与洪涝的空间重合度 /%	34.60	37.00	0.3604	0.3854	
街道网络	连通性	洪峰时刻的洪涝流量 / (m ³ /s)	1187.69	734.18	0.8763	0.9235	
		洪峰时刻延缓时间 /h	0.00	1.00	0.0000	0.5208	
	冗余性	连通性	NQPDE 500 m /km ⁻¹	0.08	0.27	0.2083	0.7031
		路网密度 / (km/km ²)	路网密度 / (km/km ²)	6.00	8.40	0.6250	0.8750
			主干道TPBiE 10km /次	29.00	21.00	0.6979	0.7813
		应对洪涝灾害的应急响应能力	淹没后街道网络灾损率 /%	42.39	33.60	0.9558	0.9650
灾中NQPDE 500 m /km ⁻¹	0.05		0.26	0.1302	0.6771		
街区与建筑	功能多样性	灾中避难场所密度 /个/km ²	0.29	2.50	0.0755	0.6510	
		灾中避难场所 NQPDE / (500 m /km ⁻¹)	0.03	0.16	0.0781	0.4167	
	单一模块紧凑度	片区内混合用地地块比例 /%	10.00	50.00	0.1042	0.5208	
		公共活动空间占比 /%	55.68	71.23	0.5800	0.7420	
		应对洪涝灾害的恢复能力	街区土地利用灾损率 /%	16.40	14.00	0.9829	0.9854
			灾后关键服务设施密度 / (个/km ²)	5.78	9.60	0.6021	1.0000
应对洪涝灾害的恢复能力	灾后关键服务设施 NQPDE 500 m /km ⁻¹	0.04	0.13	0.1042	0.3385		
	建筑形态防风与防洪涝能力	0.00	1.00	0.0000	0.5208		

(1) 景观生态空间层面。适应性干预在绿化覆盖率和洪峰时刻延缓时间这两方面提升显著, 凸显了该韧性措施所构建的立体分散式生态网络在高密度环境下对城市公共空间的补充, 以及蓝绿海绵网络与水动力系统应对极端洪涝事件的有效调蓄作用和吸收能力。

(2) 街道网络层面。适应性干预通过多表层慢行网络增强了系统连通性, 进而提供高可达、不被淹没的空中廊道连接冗余弹性的应急避难场所, 提升城市系统应对洪涝灾害的应急反应能力。

(3) 街区与建筑层面。适应性干预有效提高单一模块紧凑集约的功能多样性, 并通过适应性功能布局以及提供在洪涝灾害后更高的分布密度和可达性的冗余关键服务设施加强城市系统的恢复能力。

(4) 总体适应性层面。红树湾片区适应性干预在3个空间形态要素层一、二级指标的韧性水平平均优于传统规划干预, 即在高效利用城市空间、完善景观生态空间的三维覆盖和连接程度、增强街道网络立体可达性、提高多功能的空间叠合水平方面的提升尤为显著。

见图9。

综上所述, 本文基于复杂适应系统和演进韧性, 构建洪涝韧性导向下适应性转型规划的评估体系, 对典型高密度城市沿海地区深圳红树湾片区进行实证研究, 量化评估传统与适应性转型两种规划干预路径的韧性水平。相比传统规划干预, 适应性转型规划干预在多样性、连通性、模块化、冗余性等普遍韧性以及应对洪涝灾害的吸收、应急反应与恢复能力等洪涝韧性特征方面具有显著提升, 在极端天气引发的洪涝灾害冲击下仍维持城市系统的正常运行, 为沿海高密度城市环境下气候变化加剧、洪涝频发的问题提供了一个动态适应性转型解决方案。

注释

- ① 由 <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/> 获取。
- ② 由国家海洋科学数据中心 (<http://mds.nmdis.org.cn/>) 获取。
- ③ 由全国地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>) 获取。

- ④ 由 <http://tf.121.com.cn/index.html> 获取。
- ⑤ 由 <http://weather.sz.gov.cn/> 获取。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 涂金良, 罗庆锋, 刘海洋. “天鸽”和“山竹”台风沿海部分海堤损毁调查及对策分析[J]. 广东水利水电, 2021(5): 12-16.
- [3] PARK J, SEAGER T P, RAO P S C, et al. Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems[J]. Risk Analysis, 2013, 33(3): 356-367.
- [4] 潘海啸, 戴慎志, 赵燕菁, 等. “应对气候变化的城市韧性”学术笔谈[J]. 城市规划学刊, 2021(5): 1-10.
- [5] PATHAK S, LIU M, JATO-ESPINO D, et al. Social, economic and environmental assessment of urban sub-catchment flood risks using a multi-criteria approach: a case study in Mumbai city, India[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591: 125216.
- [6] LU Y, ZHAI G, ZHOU S, SHI Y. Risk reduction through urban spatial resilience: a theoretical framework[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2021, 27(4): 921-937.
- [7] CUI P, LI D. A SNA-based methodology for measuring the community resilience from the perspective of social capitals: take Nanjing, China as an example[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53: 101880.
- [8] KIM M, SONG K, CHON J. Key coastal landscape patterns for reducing flood vulnerability[J]. Science of The Total Environment, 2021, 759: 143454.
- [9] JOYCE J, CHANG N B, HARJI R, et al. Coupling infrastructure resilience and flood risk assessment via Copulas analyses for a coastal green-grey-blue drainage system under extreme weather events[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 100: 82-103.
- [10] CHANG H S, SU Q, JHENG D C. Comparing the spatial patterns of flooding and individual risk perception: a case study of Yunlin, Taiwan[J]. Urban Climate, 2022, 45: 101260.
- [11] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of

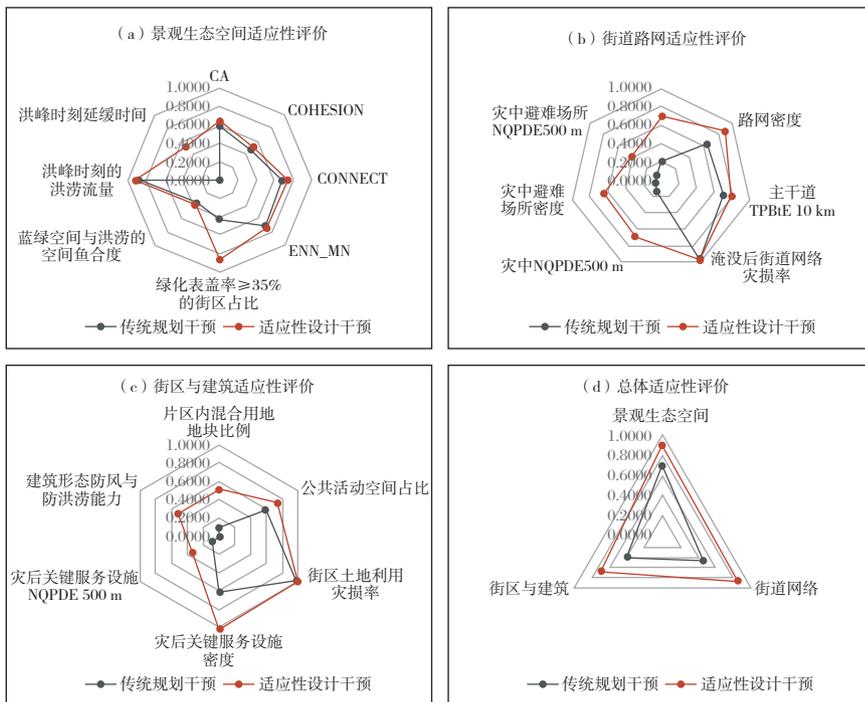


图9 传统与适应性规划干预下红树湾片区形态要素层及总体适应性评价
Fig.9 Morphological elements and overall adaption assessments of the Mangrove Bay area under conventional and adaptive interventions

- Ecological Systems, 1973, 4: 1-23.
- [12] 约翰·H·霍兰. 隐秩序: 适应性造就复杂性[M]. 周晓牧, 韩晖, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [13] 高见, 郎晓霞, 张琰. 系统性城市更新与实施路径研究: 基于复杂适应系统理论[J]. 城市发展研究, 2020, 27(2): 62-68.
- [14] 王凯, 徐辉, 周亚杰. “国家空间规划论”要义: 精准分析与适应性技术的方法及应用[J]. 城市规划学刊, 2022(6): 8-17.
- [15] YAMU C, DE ROO G, FRANKHAUSER P. Assuming it is all about conditions: framing a simulation model for complex, adaptive urban space[J]. Environment and Planning B, 2016, 43(6): 1019-1039.
- [16] BIG Team. The Big “U”: rebuild by design [EB/OL]. . (2021-12-30) [2023-06-20]. <http://rebuildbydesign.org/data/files/675.pdf>
- [17] 陈天, 石川森, 王高远. 气候变化背景下的城市水环境韧性规划研究: 以新加坡为例[J]. 国际城市规划, 2021, 36(5): 52-60.
- [18] YUMAGULOVA L, VERTINSKY I. Managing trade-offs between specific and general resilience: insights from Canada’s Metro Vancouver region[J]. Cities, 2021, 119: 103319.
- [19] 聂蕊. 城市空间对洪涝灾害的影响、风险评估及减灾应对策略: 以日本东京为例[J]. 城市规划学刊, 2012(6): 79-85.
- [20] 万汉斌. 适应新常态的城市安全韧性评价及规划编制思考[J]. 规划师, 2021, 37(3): 5-12.
- [21] 杨敏行, 黄波, 崔翀, 等. 基于韧性城市理论的灾害防治研究回顾与展望[J]. 城市规划学刊, 2016(1): 48-55.
- [22] 陈碧琳, 孙一民, 李颖龙. 中微观韧性城市形态适应性转型研究: 以深圳蛇口工业区为例[J]. 城市发展研究, 2021, 28(6): 101-111.
- [23] BOTTAZZI P, WINKLER M S, BOILLAT S, et al. Measuring subjective flood resilience in suburban Dakar: a before - after evaluation of the “live with water” project[J]. Sustainability, 2018, 10(7): 2135.
- [24] PÉREZ-MORALES A, GOMARIZ-CASTILLO F, PARDO-ZARAGOZA P. Vulnerability of transport networks to multi-scenario flooding and optimum location of emergency management centers [J]. Water, 2019, 11(6): 1197.
- [25] SANTOS J, YIP C, THEKDI S, et al. Workforce/population, economy, infrastructure, geography, hierarchy, and time (weight): reflections on the plural dimensions of disaster resilience[J]. Risk Analysis, 2020, 40(1): 43-67.
- [26] 谢磊, 周鹏飞, 杨鸿艺, 等. 气候变化冲击下沿海地区生命线工程韧性范式探索: 以宁波市为例[J]. 城市规划学刊, 2022(S2): 81-88.
- [27] LE T D N. Climate change adaptation in coastal cities of developing countries: characterizing types of vulnerability and adaptation options[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2020, 25(5): 739-761.
- [28] 颜文涛, 任婕, 张尚武, 等. 上海韧性城市规划: 关键议题、总体框架和规划策略[J]. 城市规划学刊, 2022(03): 19-28.
- [29] MEYER H, NIJHUIS S. Urbanizing deltas in transition[M]. Amsterdam: Techne Press, 2014.
- [30] RYAN J G, LUDWIG J A, MCALPINE C A. Complex adaptive landscapes (CAL): a conceptual framework of multi-functional, non-linear ecohydrological feedback systems[J]. Ecological Complexity, 2007, 4(3): 113-127.
- [31] BHAVATHRATHAN B K, PATIL G R. Capacity uncertainty on urban road networks: a critical state and its applicability in resilience quantification[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2015, 54: 108-118.
- [32] CARLUCCI M, ZAMBON I, SALVATI L. Diversification in urban functions as a measure of metropolitan complexity[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2020, 47(7): 1289-1305.
- [33] HUTTER G, NEUBERT M, ORTLEPP R. Building resilience to natural hazards in the context of climate change[M]. Wiesbaden, Germany: Springer, 2021: 17-40.
- [34] 鲁佳慧, 刘家宏, 刘创, 等. 深圳市洪涝风险量化评估与损失预测[J]. 水电能源科学, 2021, 39(12): 73-75.
- [35] 杨星, 蔡开玺, 杨虎. Clayton Copula模式下的深圳市洪潮组合风险率[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(5): 590-593.
- [36] 深圳市规划和自然资源局. 深圳市南山区08-03&08-04号片区“红树湾地区”法定图则[S/OL]. 2018-03-20 [2023-3-31]. <http://pnr.sz.gov.cn/ywzy/fdtz/cggbcx/nsq/>.
- [37] 苏峰, 谢莎, DONG W T. 从深圳湾超级总部基地预见未来[J]. 建筑实践, 2020(12): 118-127.
- [38] 深圳市规划和国土资源委员会. 深圳市南山区分区规划(2002-2010) [EB/OL]. (2018-7-31) [2021-12-08]. <http://pnr.sz.gov.cn/ywzy/ghzs/fqgh/nsgh/index.htm>.
- [39] NEUMANN T, AHRENDT K. Comparing the “bathtub method” with MIKE 21 HD flow model for modelling storm surge inundation[M]. Berlin, Germany: Ecologic Institute, 2013.
- [40] 香港天文台. 每月天气摘要 二〇一七年八月 [EB/OL]. (2017-09) [2021-12-08]. <https://www.hko.gov.hk/tc/publica/mws/files/mws201708.pdf>.
- [41] 许超峰, 荆燕燕, 陈文蛟. 城市设计暴雨雨型的推求及应用[J]. 河南科技, 2018(5): 159-160.

修回: 2023-07