

DOI: 10.20103/j.stxb.202305090964

胡俊辉, 刘丹凤, 任利剑, 运迎霞. 国外韧性城市形态研究述评. 生态学报, 2024, 44(10): 4423-4436.

Hu J H, Liu D F, Ren L J, Yun Y X. Review of foreign studies on resilient urban form. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4423-4436.

国外韧性城市形态研究述评

胡俊辉¹, 刘丹凤^{1,*}, 任利剑², 运迎霞²

¹ 河南科技大学, 洛阳 471000

² 天津大学, 天津 300072

摘要: 面对突发的自然和人为灾害, 城市表现出极大的脆弱性。韧性城市形态被认为是化解城市脆弱性的关键得到关注, 梳理国外研究成果对应我国快速城市化进程中的不确定灾害风险具有重要意义。以韧性城市形态为主题, 从概念与特征、形态要素韧性表现、评估及韧性设计等方面追踪国外研究进展。研究结果表明: 国外文献重点探讨了形态与自然灾害的关联; 韧性城市形态的概念尚未达成一致意见; 从宏观、中观、微观空间层次视角探讨城市形态要素韧性表现成果较多; 形态要素韧性评估集中于道路网络要素的韧性表现; 形态要素韧性设计关键在于空间异质性。基于分析结果可知, 我国未来研究重点应集中在全方位构建韧性城市形态研究框架、丰富并拓展形态要素韧性评估方法与技术、重视形态要素空间异质性等方面。

关键词: 气候变化; 韧性城市形态; 述评

Review of foreign studies on resilient urban form

HU Junhui¹, LIU Danfeng^{1,*}, REN Lijian², YUN Yingxia²

¹ Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China

² Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Faced with suddenly natural and man-made disasters, cities exhibit great vulnerability. It has been widely discussed that the resilient urban form is the key to resolve urban vulnerability. Combing the foreign research is great significance to deal with the uncertain disaster risk in the rapid urbanization of China. Based on the theme of resilient urban form, the research progress in foreign countries is tracked from the aspects of concept and characteristics, resilience function and evaluation, and resilience design. The results shows that: The foreign literature focuses on the relationship between urban form and natural disasters, especially in heat wave and flood; Resilient urban form design is an important means to enhance urban resilient, Although no consensus has been reached on the concept of resilient urban form, but a preliminary consensus has been reached on its attribute characteristics, which are mainly reflected in connectivity, latency, modularity, adaptability; There are many ways to divide urban form elements, and hierarchical method can better reflect the nested attributes of form elements. In this way, the macro level is divided into urban and regional categories, the medium level is divided into neighborhood, block, plot, open space and street categories, and the micro level is divided into buildings and sites categories; The paper analyzes the resilience performance of form elements from the perspective of layout, type, scale and shape in macro, from the perspective of overall city scale, urban grade scale, development mode and functional agglomeration mode; from the perspective of neighborhood modularization, neighborhood density, land mix, plot scale, urban block scale, open space shape and scale, street network mode and design; from the perspective of micro, the paper analyzes the resilience performance of form elements from the perspective of layout, type, scale and shape; The

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51268007); 河南省省重点研发与推广专项 (软科学) 项目 (232400410199); 河南省社科联、经团联课题 (SKL-2023-2544); 河南省教育厅人文社会科学研究项目 (2024-ZZJH-249)

收稿日期: 2023-05-09; **网络出版日期:** 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 719394688@qq.com

evaluation index system of morphological elements toughness is usually constructed based on the standards of resilient cities. Especially, there are many results of using centrality and connectivity indexes to evaluate the resilience of road network form elements; The focus of resilient design for form elements lies in harmony with nature, diversity, redundancy, modularity, spatial heterogeneity, connectivity and so on. From the results, it can be seen that China's future research should focus on constructing a comprehensive research framework for resilient urban form, enriching and expanding the resilience assessment methods and technologies of form elements, and paying attention to the spatial heterogeneity of form elements.

Key Words: climate change; resilient urban form; review

气候变化使城市面临严峻的灾害风险(世界经济论坛 2017)。尤其是进入 21 世纪,灾害风险发生的频率和强度也在增加并体现出持续性,城市比以往任何时候更加脆弱^[1],成为制约城市健康发展的瓶颈问题。作为应对脆弱性的韧性被委以重任,成为城市应对灾害风险的新思路。城市形态对灾害风险的发生频率和强度具有重要影响^[2],且形态韧性也是城市韧性的重要物理属性,故从形态学角度探讨城市韧性问题也不失为一种新视角。基于韧性思维的城市形态可以在不断变化的环境条件下高效地维持建成环境的完整性、宜居性、功能性和生态性^[3],同时减少脆弱性,这得到国外学者的共识并取得较为丰富的成果。当前,我国城市普遍存在空间开发效率低、基础设施建设滞后、应急响应能力不足等问题,应对灾害风险的防灾能力严重不足。因此,如何设计韧性城市就至关重要。然而,迄今为止,国内关于韧性城市形态的文献较少,故文章按照为什么提出韧性城市形态?什么是韧性城市形态?形态的韧性表现怎么样?如何设计韧性城市形态的逻辑原则对国外韧性城市形态研究进行总结与分析,以期为我国韧性城市建设提供借鉴。

1 韧性城市形态的提出

1.1 韧性与韧性城市

韧性来自拉丁文词根 *resilire*,本意是“回弹”。Holling 于 1973 年将韧性思维引入生态学领域,将其描述为系统吸收变化和干扰而不失去其组成要素之间原有关系的能力^[4]。一般而言,韧性系统除强调保持功能的同时具备吸收干扰、赋予系统在干扰后重新组织自身、适应和学习等能力外,还具有稳定性、冗余性、多样性、模块化、复杂性、灵活性、多功能性、自组织、适应性和效率等多种特征从而更好的应对未来变化。韧性一词也由生态领域逐步被应用于工程、心理、环境、社会、经济、信息技术、灾害等诸多领域。

对于城市来说,韧性使城市具备抗冲击、吸收、适应、反应、重建、学习等能力来应对复杂的社会、经济和环境问题^[5],故而在学术领域被广泛关注:首先便是城市规划、地理学、灾害学、经济学、心理学等学科学者对韧性城市概念的探讨,但未形成普遍接受的韧性城市定义,多是基于生态视角经历了以“维护”、“恢复”和“平衡”为中心的静态概念到“适应”和“更新”的动态过程,佐证了韧性城市是动态发展的;其次,不同学科学者基本上认为韧性城市包含经济韧性、工程设施韧性、社会韧性和生态韧性等几方面,也从生态、工程、社会-生态等提出了多条实现路径;第三,韧性城市应强调生态类要素对灾害风险消解作用,得到生态、地理、城市规划、灾害等学科学者认可^[6]。第四,不同学科学者从韧性多维度^[3]、防灾减灾、生态韧性潜力等开展韧性城市评价研究。尤其是从形态角度开展评估得到学者重视,如以景观形态类^[7]、“规模、密度、形态”^[8]等为指标开展的评估研究。第五,自然环境对于韧性城市建设至关重要。经久不衰的魅力古城无不揭示着城市以适应自然而兴,适应自然环境是韧性城市的最初诠释^[9],而侧重自然生态环境的空间因具有强大的抵御灾害风险的能力也得到学者专家的认可^[10]。从学术研究角度,韧性城市探讨是广泛且全面的,整合地理、灾害、城市规划、经济等多学科,从不同学科角度完善韧性城市研究框架。除学者们探讨外,许多国际组织和机构也出台了较多手册指导韧性城市建设,如可持续发展国际理事会的城市防灾减灾韧性应对原则、韧性联盟的社会-生态韧性、联合国国际减灾战略组织的韧性城市十大准则、洛克菲勒基金会全球韧性 100 城计划、联合国人居署的韧性城市设计等,为韧性城市研究提供借鉴。

由此可知,将韧性思维引入城市领域,作为应对灾害风险保障城市健康运转的新思路已成为全球发展的共识并取得丰富成果,证实了城市获得韧性可最大程度地减轻其脆弱性。关键在于如何增强城市韧性,Adger 认为形态设计是重要的技术手段^[11],这正符合 Mirti 对韧性城市的定义:形态要素在面对灾害风险时保持完整功能的能力^[12]。此定义透露出形态要素对韧性的重要性。然而,现有研究很少涉及韧性与城市形态联系的论述。事实上,城市形态与灾害风险存在较大关联。

1.2 韧性与城市形态的关系

韧性理论是针对城市不确定的灾害风险而提出的^[5],城市形态与灾害风险的发生存在关联,故而韧性与城市形态建立关联的媒介在于灾害风险。

凯文·林奇认为城市形态是“城市中大型、静态的、永久性实物的空间格局”^[13];汉迪指出城市形态是重复元素的集合,体现出与土地利用格局、空间组织和土地利用相关的混合特征^[14],这两个定义突出了形态要素对城市空间格局的重要作用。在城市化进程中,形态通过土地利用方式对气候变化、减灾和响应能力以及建筑和交通能耗产生影响^[15],具体操作层面,即形态要素通过与周围环境的相互作用形成复杂的结构从而与灾害风险建立关联(表 1)。

表 1 城市形态要素与主要灾害风险的关联

Table 1 Correlation between urban form elements and major disaster risks

空间尺度 Spatial scale	形态要素 Form elements	热浪 Heat waves	洪水 Flooding
微观 Micro	窗户	数量与样式、玻璃比例、朝向	—
	建筑外立面	材料、表面反射率、遮阳装置、植被覆盖	建筑规模(体量、体型)
	屋顶	材料、植被覆盖-绿色屋顶	植被覆盖-绿色屋顶(减少/减缓径流)
中、宏观 Meso, Macro	建筑物	取决于外立面和屋顶	选址高度、防水材料
	地块	植被覆盖类型和数量、铺装类型和数量	透水和不透水的表面、植物覆盖
	街道	材料、遮阳、天空可见系数、通风路径	洪水滞留
	开敞空间	规模、材料、植被覆盖、水、天空景观因子	可渗透、不渗透、植被覆盖、洪水(径流与滞留)
	社区(区域)	开敞空间分布、大型蓝色和绿色空间的距离和通风路径	河漫滩外布置、绿化河流、小规模控制措施的位置和数量
	城市	应急处理设施(电力、医疗救助、人工降雨设施等)	大型堤防、水坝、溢洪道基础设施、应急处理设施

改自参考文献^[16]

Gill 基于英国土地利用数据库设计出农田、采矿、居住、商业、工业、能源等 29 种城市形态类型分析大曼彻斯特的城市热岛效应,归纳出 9 种地表覆盖类型,验证城市形态对缓解气候变化的积极作用^[17]。Ayyoob 采用特定指标评估形态要素对热浪、洪水等灾害的韧性表现^[18]。也有研究表明气温与风流模式^[19]、相对湿度与太阳辐射^[20]等受形态要素组合影响很大,决定了城市对灾害风险的应对能力。因此,形态要素的科学组合设计被认为是增强韧性的重要手段。

韧性理论可追溯到 1960 年代初期,将近 60 多年的时间跨度,出现大量关于韧性城市的文献,但城市设计中的韧性研究历史并不长^[21]。城市研究领域韧性常被用作规划设计的原则来应对社会、经济、环境的变化。尤其在城市设计层面更关注:韧性是针对何种灾害风险的、何种城市形态要素来应对灾害风险、形态要素应对灾害风险的阶段、应对灾害风险最终实现何种目标等问题^[22—24],这些问题具有紧密的内在逻辑关系,为从城市设计角度分析韧性提供指引(图 1)。

城市形态作为设计学科的关键领域,由多个相互关联和依存的要素组成,可分为宏观、中观和微观三个空间尺度^[15]。正是由于每个尺度形态要素的空间配置形式和格局及相互作用决定了不同灾害风险的频率与强度、形态要素韧性功能的发挥及处置灾害风险能力等,这是形态与韧性关系的关键科学问题^[25],而 Masnavi 通过引入城市韧性指数分析不同尺度形态要素可持续组合设计如何应对灾害风险也证实了这些问题^[26],这对

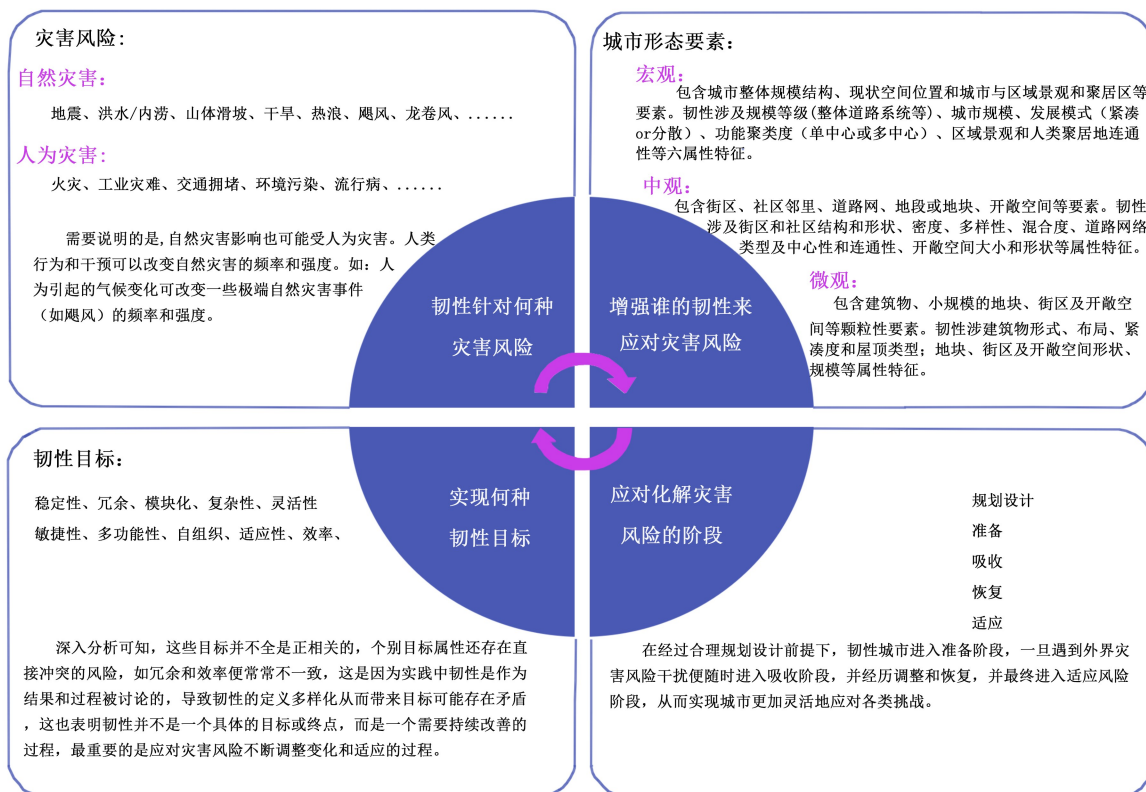


图1 城市设计中韧性研究关键问题及内在关联分析图

Fig.1 Key issues and internal correlation analysis of resilience research in urban design

改绘自参考文献^[22-24]

韧性城市形态研究很有帮助,尤其激发了学者们对韧性城市形态概念与特征的探讨。

2 韧性城市形态概念与特征

2.1 韧性城市形态概念

韧性概念在1990年代被引入城市规划领域,此后很长一段时间学者们开展的是韧性城市规划与建设的研究。直到2010年前后认识到形态对韧性的重要意义后,韧性城市形态才被学者们关注:Dibble认为形态要素的空间组合方式影响灾害风险的发生频率与强度,从而影响韧性,由此指出韧性城市形态即是形态要素空间组合的韧性表现^[27];Tapan指出韧性城市形态是可以优化资源并促进可持续发展的一种形态模式^[28]。对此进行深入探讨的Ayyoob,认为它是与社会生态互连的空间网络系统,能够在不断变化的社会经济环境条件下保持其完整性、灵活性、适应性^[3];此后进一步指出它是可吸收冲击,促进灾后快速恢复并增强城市适应能力的形态要素的可持续组合^[22]。目前,关于韧性城市形态的定义较为有限且尚未得到共识,仍处于不断探讨之中。但有一点是可以肯定的:韧性城市形态的最大特点可使城市系统做好规划和准备、吸收、快速恢复来适应灾害风险,在不断变化的环境中持续保持高效的运营。

整体上分析,城市形态韧性受到不同尺度形态要素间及与城市系统经济社会环境间相互作用的影响。从时空角度,借鉴Ayyoob的观点,本文认为,韧性城市形态是不同空间层次且相互嵌套的要素组合形成的空间格局状态,且这种组合具有充足的空间弹性可不断动态转变以满足与经济社会环境时空相互作用的影响,并能适应不确定性的突发灾害风险。其本质在于不同空间层次要素的组合能维持城市系统的完整性、功能性和适应外界条件的时空动态变化,优化资源空间分布并促进可持续发展,发挥韧性思维在城市设计领域的益处。

2.2 韧性城市形态特征

城市形态在降低风险和增强韧性方面具有重要作用,体现在其具有的连通性、冗余性、模块化、适应性的重要属性特征。连通性是形态韧性的先决条件,实现信息、资产和资本的双向流动,提供及时疏散通道^[29],但有学者指出过度互连会产生新问题^[30]。模块化解释不同形态要素在空间上与整体之间的组织关系、如何跨尺度与整体相互作用及在多大程度上可以分解或集成更高层次的整体,同时保持独立于系统其余部分的内在韧性关联^[31]。冗余性指形态要素如何执行相同、相似或备份功能及如何连接,降低了具有相同性能的要素通向同一目的地的所有路径受到灾害影响的可能性,使要素具有高的复原力。适应性指形态要素随时应对灾害风险的能力,减少对气候变化的暴露,与揭示形态要素敏感度的脆弱性密切相关^[32]。韧性城市形态的重要属性揭示形态要素面对不确定性灾害风险时可持续发展的能力及形态要素增强韧性的巨大潜力。

2.3 韧性城市形态与城市生态学的关系

由前文分析知,城市形态通过土地利用方式对灾害风险产生影响,科学合理的土地利用方式有助增强城市韧性。城市生态学研究的核心问题在于处理城市与自然环境的关系,促进城市可持续发展,也可以说是研究城市土地利用方式对城市气候、水文、土壤、生物等的单一生态环境要素的影响及土地利用强度所带来的生态环境效应,尤其是土地利用变化对生态结构和功能产生的重大影响^[33]。因此,可以认为韧性城市形态与城市生态学通过土地利用方式建立正向的关联。城市形态学的研究内容随着时代发也在不断扩容,韧性城市形态也将成为城市生态学未来重要的研究领域,韧性城市形态设计也将填补城市生态学与规划设计学科联系不够紧密的状况。

3 韧性城市形态的韧性表现

城市是复杂巨系统,正如 Masnavi 所言城市形态的韧性表现取决于不同空间尺度要素的组合。因此,需要对形态要素的空间尺度进行划分,明晰空间尺度的要素类型。

3.1 城市形态要素空间尺度划分

城市是一个相互嵌套的动态等级网络,具有不同的时空尺度,这对韧性至关重要^[34]。学术研究中,城市形态构成要素的分类有多种方法(表2),其中分层方法更能体现城市形态的等级嵌套且更容易理解城市系统的复杂性。遵循分层方法,韧性城市形态要素可从单个建筑物、街区、地块、城市到区域的尺度层次进行分类,即宏观、中观和微观三个尺度(表3),实现低等级尺度的元素通过组合设计连接到高等级尺度中,形成具有等级层次的尺度网络。这种划分有助于了解形态要素的等级规模、彼此空间位置及相互影响,聚焦不同尺度要素的物理属性及空间组合设计以增强城市韧性潜力促进可持续发展。现实中,三个尺度没有严格界限,且存在一定重叠,这需要了解不同尺度相对于彼此和相对于整个城市的状态及不同要素的相互关系,以把握形态要素的韧性作用机制。

表2 城市形态要素分类方法一览表
Table 2 Classification methods of urban form elements

方法类别 Approach	要素类型 Elements	提出者 Presenter
感知法 Perceptual	路径、边界、区域、节点、标志	Lynch, 1960 ^[13]
二分法 Bipartite	建成环境、交通网络	Silva, 2017 ^[34]
基于特征分类法 Feature-based	密度、多样性、连通性、可达性等	Bourdieu, 2012 ^[35]
三分法(康泽恩学派) Tripartite (Conzenian School)	街道、地块和建筑物	Conzen, 1960 ^[36]
分层法(卡尼吉亚学派) Hierarchical (Caniggian School)	结构、系统、有机体	Caniggia, 2001 ^[37]

来源: 改自参考文献^[24]

表 3 城市形态要素划分一览表

Table 3 Division of urban form elements

尺度 Scale	形态要素 Form elements	韧性表现 Resilience performance	尺度 Scale	形态要素 Form elements	韧性表现 Resilience performance
宏观 Macro	城市整体结构类要素或 区域景观资源等	城市规模	中观 Meso	街区、地块、开敞空 间和街道	土地混合
		等级规模			地块、街区形状与规模
		发展模式			开敞空间规模、类型与形状
		功能集聚			街道网络模式
中观 Meso	邻里	景观连通性	微观 Micro	建筑物、场地等颗粒 性要素	街道设计:街道宽度、边缘以及布局 方向
		邻里模块化			布局与类型、屋顶等
		邻里密度			场地布局与规模等

来源:根据参考文献^[22—24]整理

表 3 所列要素对韧性具有重要影响,已得到相关研究验证,但另一些我们所熟知的建筑开窗、立面、后退及住宅单元类型、地块覆盖及停车场等形态微观要素未得到充分探索,缺乏如何抵御灾害风险的韧性证据,仍然需要进一步研究弥补这些空白。实际上,作为复杂的系统,城市需要这些要素以综合的方式建立起运作良好的整体^[38],我们不应孤立地研究不同的要素,而应考虑它们在时空尺度上的相互联系,结合地域实际创造出多种城市形态元素的组合,探讨对韧性的影响。

3.2 城市形态的韧性要素

以不同空间尺度形态要素为对象,基于国外文献的梳理,分析其韧性表现。

3.2.1 宏观层面形态韧性要素

宏观层面的城市形态要素体现在城市整体和区域范畴,其韧性往往通过城市规模、等级规模、发展模式、功能集聚模式等表现。

(1) 城市规模

城市规模对韧性有不同的影响。直观的论点是,大城市更易受到灾难性事件的不利影响,但规模经济和改善的资源可用性和冗余可增强韧性^[39]。事实上,城市增长模式决定了规模的扩大能否带来社会与环境效益^[40],扩大规模实现经济韧性很可能是以牺牲社会和环境维度为代价,这需采取综合的土地利用和交通设计手法,降低规模扩大带来的社会和环境风险^[41]。

(2) 等级规模

以等级规模为特征的系统具有更好的韧性^[42],它创造了嵌套子系统的空间层次结构,允许增量变化及自组织、随时间和跨空间的适应,及在必要时出现新模式和关系,降低城市脆弱性增强形态韧性。实践证实,等级规模将不同的小规模组件集成到更高规模系统中,形成具有分形特征的网络系统,提高城市面临灾害风险的灵活性^[43],有助于促进交通友好型城市设计,提高建筑环境渗透性,增强城市社会韧性。

(3) 发展模式

对于发展模式,学者们讨论更多的是紧凑和分散模式对韧性的影响。在自然环境方面:紧凑通过提供土地混合、职住临近、便捷出行等减少建筑、交通的能源需求^[44],高紧凑地区更为明显^[45];在紧凑模式中通过适当的街道和开敞空间设计来提供“韧性”场所从而避免扰乱自然通风,可使城市具备对灾害风险的强抵御能力^[23]。

相比之下,分散蔓延模式虽可提供绿色基础设施、大规模开敞空间来应对风险,但却带来更多的不透水地面^[46]、土地资源过度开发、侵占湿地敏感资源、生物多样性丧失、生态系统破坏等扰乱建成区和自然环境间能量的自然流动,增加洪水、极端高温不利事件频率和强度^[30],尤其是低密度蔓延韧性更差^[47]。

紧凑模式对经济社会韧性也有重要影响。在经济方面,紧凑通过降低城市基础设施和公共服务设施成本及家庭交通成本增强经济韧性^[48],紧凑且适合步行的环境有助于吸引外来投资增强生产力,影响经济韧性^[49]。在社会方面,紧凑带来丰富的多样性满足居民广泛的社会需求并提供交往互动的机会,减少隔离、社会排斥增强社会韧性^[50]。

然而,有研究指出紧凑阻碍形态要素的吸收、响应能力,且对环境产生额外压力,限制绿色空间,不利于健康和社会公平,降低社会韧性^[48]。在应急响应方面,紧凑地区疏散、避难所需的开敞空间受限,减少城市灵活性,削弱生态系统韧性功能^[51]。

总体而言,紧凑本身不能提供明显的韧性优势,应结合其他措施,如土地混合、改善便利设施可达性^[52],增强韧性。紧凑和蔓延都有自身优势,实践中关键在于确定两种模式的最佳组合,将负面影响降至最低以增强韧性。

(4) 功能聚集模式

功能聚集模式即单中心、多中心。多中心通过增强系统模块化促进韧性,在系统不同规模上分配服务设施、功能^[53],促进混合用途开发、便捷公共交通联系、职住平衡与设施邻近性增强韧性,还通过分散潜在风险并将其分布在子中心来提高冗余度,增强韧性^[54]。子中心松散连接使系统内资源自由流动,增强对灾害风险吸收能力^[53]。相比之下,单中心导致中心区人口高度集中,能源消耗大,更易受极端事件负面影响。也有研究指出多中心导致高的土地消耗和有限的生态系统服务,增加对环境的负面影响^[55]。因此,功能聚集模式应结合城市规模、地域特点、经济水平等综合确定。

(5) 景观连通性

景观连通性意味着城市与边界内外生态系统的连接多样性和冗余性不断增加,确保城市与自然系统平衡、提供生态服务、减缓热浪和洪水风险使城市具备吸收冲击和重组能力^[49],而且科学设计连通性可防止景观破碎化并促进能量和资源自由流动^[30]。事实上,过度连接的系统会导致灾难事件快速传播。理想的连通性与形态韧性的模块化属性相关,在模块化系统中,许多强短连接和少量弱长连接提供最佳连接状态,减轻风险,且大量短距离连接通过增强系统灵活性促进城市韧性^[53]。

城市规模和等级规模、紧凑和分散、单中心和多中心、连通性等提高城市应对灾害风险的能力,但仍有一些形态要素韧性表现与某种灾害风险关系需进一步研究(表4),这是今后应重点关注的领域。

表4 文献中关于城市形态宏观要素韧性表现与灾害风险关系已有研究统计表^[22]

Table 4 Statistical table of existing studies on the correlation between the resilience performance of macro elements of urban form and disaster risk in literature

灾害风险 Disaster risk	等级规模 Scale hierarchy	城市规模 City size	紧凑 Compactness	分散 Sprawl	多中心 Poly- centricity	单中心 Mono- centricity	连通性 Connectivity
自然 Natural	地震		✓	✓	✓	✓	
	洪水和海啸		✓	✓	✓		✓
	火灾		✓	✓	✓	✓	
	风暴和飓风				✓	✓	
	其他自然灾害		✓	✓			
环境 Environment	气候变化	✓	✓	✓	✓	✓	
	极端天气	✓	✓				✓
	资源短缺	✓	✓	✓	✓		✓

✓表示已有文献证明两者存在关系,空白表示缺少两者关联的文献

3.2.2 中观层面形态韧性要素

中观侧面城市形态要素体现在邻里、街区、地块、开敞空间和街道等范畴,其韧性往往通过邻里模块化、邻里密度、土地混合、地块规模、城市街区规模、开敞空间形状与规模、街道网络模式与设计等表现。

(1) 邻里模块化

邻里模块化使要素融入更广的城市结构实现自组织和适应^[56],提高邻里自给自足和其他部分中断时保持功能不丧失的能力,便于模块间的可控交换,即在模块遭受灾难时获得其他模块救助^[53],也易于设计以行人和公交为导向的出行环境,减轻私家车依赖,增强社会、环境韧性。

(2) 邻里密度

合适的邻里密度提供多样的服务设施、便捷的公共交通以降低能源消耗、改善居民健康,减少对环境的不利影响^[57],增强邻里社区对灾害风险的抵御能力;为居民提供多的交往机会促进形成邻里社交网络,增强社会韧性^[58]。

(3) 土地混合

土地混合带来多样的城市环境,提高城市系统冗余度^[53];鼓励非机动车交通,降低能源消耗,对居民心理和健康有益,增强环境韧性;有助于创建步行友好且充满活力的社区,增加社会交往,增强社会韧性^[34];促进商业灵活性提升地区经济活力,增强经济韧性^[59]。

(4) 地块规模

小地块可提高城市灵活性、冗余、多样性和适应性,容纳多样的活动^[60],将更多的土地分配给提供生态服务的街道、开敞空间^[61],增加雨水渗透,缓解内涝和热岛效应,增强环境韧性。此外,小地块利于实现幂率分布,促进地块多样性、可达性,更易在城市空间建立冗余,增强城市应急响应能力,且高空间冗余更利于激发社区活力,增强社会经济韧性。简单的地块几何形状更容易聚合、分解,促进可达性、连通性、灵活性,也容易采取干预措施使城市形态以低成本适应未来变化^[62],在短时间内对灾害风险做出有效应对。

(5) 城市街区

在规模方面,形状规则的中小街区通过渐进式进化适应不断变化的环境,并提供多个接入点连接公共空间,提高建筑环境渗透性,对灾害风险响应极为有益;也可改善行人、机动车出行环境促进交通友好型设计^[63],增强社会、经济和环境韧性。大型街区形成狭长、不透水的街道边缘,降低建筑环境多样性、可达性、步行性和活力,对社会经济韧性不利^[3]。

(6) 开敞空间

形状不太复杂的开敞空间提供好的冷却效益^[64],其多样性的规模和类型有助于城市应对不同干扰和改善异质空间的步行距离实现灾后快速恢复^[58]。不同规模与类型开敞空间的均匀分布增加形态模块化,加快灾后恢复、重建^[65],改善空气流动和风循环模式缓解热浪。然而,大型绿地可能会对区域内可达性和街道连通性产生负面影响。在这种情况下,可以在城市核心区开发小规模且连接良好的绿色空间,在外围开发大规模绿色空间,限制城市蔓延和缓解城市热浪。

(7) 街道网络模式

街道网络模式探讨最多的是网格和树状网络。网格网络是以短街道和频繁交叉口为特征的网络,将灵活性和冗余特征集成到道路网络中适应不利事件^[53]。这种网络连通性很强,不会因为某段街道故障影响全局,具有高的中断韧性。

树状网络是类似于树的结构网络,减少系统模块化,破坏较低规模的灵活性和自组织能力^[66],某部分的中断可能导致其他部分功能丧失及城市活动分散,无意中促进郊区蔓延,韧性较差。为此,常采用遵循幂率分布的设计手法使道路网络具有许多小型连接,较少中型连接和更少大型连接,提高街道网络连通性、稳健性和冗余性来增强韧性^[67]。

(8) 街道设计

增强城市韧性的最佳街道宽度因环境、街道峡谷形状、土地利用强度而异。研究表明,宽的街道提供好的疏散能力和对不断变化条件的适应能力,有助于增设步行道和绿色基础设施^[68]。从等级规模角度分析,无论密度水平如何,在层次结构中拥有狭窄的街道有助于创造人性化的环境,提供室内外连通性,增强社会韧

性^[69]。街道边缘的适当设计,可保持建筑环境的渗透性并加强室内外空间连通性^[53],增强社会韧性。街道布局方向主要通过风流分布和街道峡谷及两侧建筑物所受太阳辐射量来影响城市小气候^[70]。在确定街道方向时,应考虑主导风向,与盛行风向平行的深街道峡谷会通过风通道效应增加风速,提高夏季街道层面的热舒适度,增强城市气候韧性。

3.2.3 微观层面形态韧性要素

微观层面形态要素体现为建筑物、场地等颗粒性要素,其韧性通过布局、类型、规模、形状等表现。

建筑布局通过影响建筑物太阳能接入和自然通风,对能源消耗产生影响^[3]。不同建筑类型表现出不同的能源消耗,并与其他形态措施(如密度)共同作用影响韧性;地方乡土建筑构造技术由于环境适应性可为能源韧性和热舒适性提供协同效益^[50]。屋顶类型影响建筑物的热量需求和太阳能潜力。场地布局、规模与形状受街区划分的影响,小街区带来较多功能细分和形态要素的空间异质性,对场地多样性、模块化和冗余产生积极影响^[53],提高城市紧急服务设施的应变能力,增强形态韧性。

城市形态要素的韧性作用机制,不应隔离单独研究,某个要素可能受其他要素影响,如街道韧性受地块和建筑物设计、形式和配置的影响。因此,应统筹考虑要素的相互联系,且何种形态要素组合能有效增强韧性,尚未有绝对证据,需要深入研究形态要素的韧性作用,采用全面的方法探索适合地域特征的最佳组合,这是未来研究的重点领域之一。

4 韧性城市形态设计

韧性城市形态设计的关键在于精确掌握形态要素的韧性表现,基于表现状况采取针对性的设计策略。

4.1 韧性城市形态评估

韧性评估针对的是形态要素的韧性作用机制,很大程度上是指标选择的问题^[71],建立指标的目的在于通过定义一个模糊概念,提高对复杂问题的认识,确定韧性设计方案。韧性理念提出后,Ayyoob 从基础设施、安全、环境、经济、社会、人口、机构和健康等方面建立二级指标提出城市韧性评估标准^[72];并于 2021 年^[18]以该标准为基础,选定密度、土地利用混合、街区和地块、开放空间、绿地等指标评估形态与热浪、洪水等灾害的韧性相关性(表 5),结果表明形态对热浪和洪水灾害具有重要影响,但仍缺乏形态对其他灾害风险的韧性分析,这是未来应重点关注的领域。

表 5 城市形态对热浪、洪水风险的韧性相关性分析表

Table 5 Correlation analysis of urban form resilience to earthquake, high temperature and flood risks

形态指标 Form indicator	量化方法 Quantization method	热浪 Heat waves	洪水 Flooding
密度 Density	人口密度	-	-
地块规模 Lot size	面积	-	-
地块形状 Lot shape	周长/面积比	-	-
街区规模 Block size	面积	-	-
街区形状 Block shape	周长/面积比	-	-
开敞空间规模 Size of open space	面积	+	+
开敞空间形状 Shape of open space	周长/面积比	-	NA
开敞空间可进入性 Access of green space	居住点到开敞空间的平均网络距离	+	+
开敞空间比例 Fraction of green space	绿地面积与总用地比例	+	+
铺装空间比例 Fraction of paved space	铺装面积与总用地比例	-	-
土地利用混合度 LUM Land-use mix	$LUM = \frac{-1(\sum_{i=1}^N p_i \times \ln(p_i))}{\ln(n)}$;其中 p_i 是土地利用 i 类比例, n 是土地利用类别数量	+	+
街道连接性 Street connectivity	指与给定线路直接相连的线路数	+	+

续表

形态指标 Form indicator	量化方法 Quantization method	热浪 Heat waves	洪水 Flooding
街道集成度 Street integration	集成度 = $\frac{1}{\sum_k d_{ik}}$; d_{ik} 为直线 i 和 k 间的最短路径; 衡量可达性的重要指标	+	+
中介中心性 Betweenness centrality	街道网络节点/连接的相对重要性	-	-
街道深度 Street depth	一点到达另一点的容易程度。较高的街道深度值表示较低的可达性	NA	-
街道宽度 Street width	街道网平均街道宽度	+	+
天空视域因子 Sky view factor	城市形态对热岛效应的影响程度	-	NA

+表示高的值有助于降低风险, -表示低的值有助于降低风险, NA 表示不适用

道路网络是城市形态的主要要素,常用于评估形态对灾害风险适应能力,韧性取决于节点(交叉口)和连接(路段)的数量和排列方式。有学者据此提出中心性、连通性等评估道路网络要素韧性的指标(表6),得到其他学者认同^[23],如 Umut 将这些指标用于衡量城市热岛效应,验证了街道与热岛效应具有重要关系^[73]。

表6 道路网络要素韧性评估指标表

Table 6 Evaluation indicators of road network system resilience

指标 Indicator	量化公式 Quantization formula	韧性意义 Meaning of resilience
中心性度量	度中心性 $C_i^D = \frac{\sum_{j=1, N} a_{ij}}{N-1} = \frac{k_i}{N-1}$	一个节点有多少连接,体现低、中、高等中心度节点关系是否符合逆幂率
Centrality measures	临近中心性 $C_i^C = \frac{N-1}{\sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij}}$	在可达性方面增强韧性,尤其是疏散空间和紧急服务设施布置在高值附近,提高灾难发生时的可达性
	介数中心性 $C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j=1, k=1, j \neq k \neq i}^N \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$	节点/连接中的任何中断都将对整个系统韧性重大影响
	街道网络效率 $E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} \frac{d_{ij}^{eucl}}{d_{ij}}$	提高街道网络效率有助于城市形态韧性
	直线中心性 $C_i^E = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq i} \frac{d_{ij}^{Eucl}}{d_{ij}}$	高值表明连接两个节点的最短链路与他们之间的欧几里得线的偏差较小,促进节点间有效交互增加韧性
	信息中心性 $C_i^I = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E[S] - E[S']}{E[S]}$	灾害发生时,高值可避免节点成为灾害救援的瓶颈,影响城市形态韧性
连通性度量	特征路径长度 $L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} d_{ij}$	是交叉点之间分离的度量,低值表示更好的连通性
Connectivity measures	圈数 $\mu = K - N + 1$	高圈数表示好的连接性,具备更好的韧性
	α 指数 $= \frac{\mu}{2N-5}$	揭示路网结构特性
	β 指数 $= \frac{L}{N}$	
	γ 指数 $= \frac{L}{3(N-2)}$	

a_{ij} :表示节点 i 和 j 间是否有连接(有为1,否则为0); d_{ij} :节点 i 和 j 间最短距离; d_{ij}^{eucl} :节点 i 和 j 间欧氏距离; N :节点总数; k_i :与节点 i 相邻的节点数; n_{jk} :节点/连接 j 和 k 之间最短路径总数; $n_{jk}(i)$:穿过节点/连接 i 的最短路径数; $E[S]$:有 N 个节点 K 条连接的街道网络效率; $E[S']$ 具有 N 个节点和 $K-k_i$ 条连接的街道网络效率(k_i 为删除特定节点 i 的路径)

连通性除采用表达路网结构特性的特征路径长度、圈数以及 α 、 β 和 γ 指数度量外, Ayyoob (2019) 指出交叉点密度和平均距离等网络拓扑类指标也是度量道路网韧性的重要指标^[23],实践中应结合应用以准确识别道路网韧性表现。

除了道路韧性评估探讨较多外,也有学者从其他要素出发提出评估指标研究城市的气候韧性。城市气候可认为是形态要素和气候变量间相互作用的表现^[74]。Tapan 从生态、物理、功能和空间四个维度提出整合形态要素的城市设计韧性指数评估形态对气候变化的韧性^[28]。众所周知,密度对能源消耗有明显影响,Perera 基于密度分析采用建筑体积面积比、容积率、场所覆盖指数、建筑迎风面密度、建筑密度与布局、建筑高度指数、邻里规模等参数评估形态与能源系统韧性的协同化程度,为气候适应性设计提供依据^[2]。整体上分析,道路网络要素学者们进行了较为详细的探讨,但关于其他形态要素的韧性评估文献较少,这将是今后形态韧性评估的重要方向。

与较多研究关注城市形态物质韧性不同,Long 将社会经济等非物质形态作为评估关键,采用经济和社交数据,评估形态与经济活力的联系,分析形态要素对经济社会韧性贡献程度^[59]。事实上,韧性城市形态评估不应局限于单个因素,须考虑综合方法。正如 Cutter 指出由于多种因素的参与,没有一种万能的工具可用于评估形态韧性^[75]。故应选择适合地域特征的指标集,尤其是考虑除道路网络要素之外其他要素韧性评估指标的设计,将是今后研究的热点。

然而不可否认,现有多维指标评估是学者们最常用的衡量方法,具有操作性强、易于横向比较等优点,但局限于评估结果的简单相加。城市是复杂的动态系统,单纯的静态指标评估未能体现城市系统网络的动态互补性,难以反映观测对象的时间变化,需要结合当前的人工智能、地理信息科学等技术手段动态地评估形态韧性,这也是今后需要重点探讨的领域。

4.2 韧性城市形态设计

韧性城市形态设计通常是基于形态要素的韧性表现,来分析其设计的思路与方法。城市设计作用是前瞻性地识别风险强度和持续时间,使城市系统具备在破坏结束后及时恢复的能力,这取决于形态韧性设计^[76]。设计是构建人与自然环境和谐关系的有效途径,而形态又为理解建成环境复杂性提供基础,通过设计可帮助城市应对灾害风险。将韧性思维纳入形态设计,Vargas 指出韧性城市形态设计应重点关注与空间韧性高度相关的广场、街道、公园等要素^[77];Vanista 从城市住房、交通、公众参与、灾害管理、绿化、城乡联系、城市管治、地方意识等方面提出韧性设计原则,并在塞尔维亚韧性形态设计中进行实践,取得较好效果^[78]。Ayyoob 从设计愿景、公众参与、文化遗产、土地利用、基础设施、机构改革等方面提出韧性设计策略^[3]。Tapan^[28]在整合形态要素基础上,提出韧性城市形态的设计思路(表7)。一般而言,形态代表城市物理环境及景观独特特征,设计实践因时间、尺度和空间而异,故形态设计宜因地制宜,尤其要考虑形态要素的空间异质性。

表 7 韧性城市形态设计思路

Table 7 Design ideas of resilient urban form

形态韧性设计关注点 Design concerns for form resilience	形态韧性设计思路 Design idea for form resilience
与自然和谐相处 Harmony with nature	提倡维护生态环境的技术增强自然系统的动态韧性,采用绿色基础设施可减少气候变化影响。
冗余 Latency	冗余使城市形态拥有充足的设计余地应对不确定性。
多样性 Diversity	多样性设计突出城市系统服务于多种用途的能力,提高灾害期间和之后的复原力。
不确定性 Indeterminacy	随着时间的推移,不确定性为应对未知的功能、空间和环境变化提供可能性。
异质性 Heterogeneity	异质性将城市形态不同组成部分划分为不同部分,并在时空上分散风险。
模块化 Modularity	模块化使形态分组不同的部分,并在不影响其他部分的情况下增强应变能力。
连通性 Connectivity	连通性和分级网络增加城市未来发展余地,促进应急恢复能力。

5 国外研究的启示性

我国在十九届五中全会和“十四五”规划中已明确提出建设韧性城市。以此为指导,中国城市科学研究会和中国工程建设标准化协会分别成立了韧性城市专业委员会、各地市也纷纷成立韧性城市与防灾减灾规划

学术委员会(重庆、上海、北京等)、北京成立了北京韧性城市建设中心、浙江大学也顺势成立了韧性城市研究中心等机构,促进了国内韧性城市建设进程。梳理文献可知,国内学者在概念、建设路径、韧性评估、生态系统韧性方法、研究框架、韧性实践等韧性城市领域方面开展了较多研究,基本上与国外研究保持一致,相关的韧性研究处于起步探索阶段,但也为开展韧性城市形态研究提供了一定的研究基础。国内学者在韧性城市形态领域的研究十分有限,仅集中在中微观城市形态要素韧性评价^[79]、形态与韧性的关系^[80]、历史街区韧性形态评价^[81]等方面。此外,有学者从形态角度探讨了韧性城市评估与时空演化^[82-83]、生态要素韧性的空间评估^[84]、优化布局^[85]等问题。目前,华南理工大学田银生教授团队开展了一系列韧性城市形态的相关研究,为后续研究提供了研究方向。韧性城市形态作为韧性城市建设的新议题具有较大研究潜力。梳理已有文献,国外成果对国内研究的启示体现在以下几方面:

第一,构建具有我国特色的韧性城市形态研究框架。城市需要增强自身的适应能力,韧性被广泛用来应对灾害风险,国外开展了较多韧性城市形态的研究,但概念尚未达成一致,且鉴于国情、文化等差异性,成果的国内应用局限性较为明显。尤其是我国高速的城市化进程与国外也存在明显不同,城市灾害风险发生的频率、强度也存在差异。未来研究应在充分吸收国外成果基础上,以我国国情和城市建设实际出发,着重强化形态与除自然灾害外人为灾害的关系研究,并以概念、全面形态要素韧性评估及设计的探讨为重点,提出具有中国城市特色的韧性城市形态研究框架。

第二,重视城市形态要素韧性的空间异质性。异质性将城市形态要素划分为不同空间,异质性程度提供给定城市系统内要素应对不确定性的能力,并在时空上分散风险。以往研究尺度多以城市整体为基本单位,忽略城市空间异质性特征。城市不同区域的韧性状况受要素密度、规模强度和组合形态的影响而存在显著差异,而韧性城市形态设计应具有差异化和特色化,未来研究需重视韧性的空间异质性。

第三,评估方法与技术。城市是复杂的系统,需要创新的思路、复杂的方法和技术来满足韧性城市形态研究。在借鉴国外评估指标经验基础上,结合我国城市特点,未来评估研究要突破学科壁垒,以多学科观点,将复杂科学、多源数据、人工智能、地理空间技术等结合起来,构建智能的韧性城市形态评估框架,尤其是重视除道路网络外其他要素韧性评估的探讨,从而实现对所有形态要素韧性表现的精确识别,这应是我国后续研究的重点方向。

参考文献(References):

- [1] Gurney. Climate change: track urban emissions on a human scale. *Nature*.2015, 525:179-181.
- [2] Perera A T D, Javanroodi K, Nik V M. Climate resilient interconnected infrastructure: co-optimization of energy systems and urban morphology. *Applied Energy*, 2021, 285: 116430.
- [3] Ayyoob. Resilient urban form: A conceptual frame-work. In Y. Yamagata, & A. Sharifi (Eds.). *Resilience-oriented urban planning: Theoretical and empirical insights*. Springer.2018.
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [5] Fastiggi M, Meerow S, Miller T R. Governing urban resilience: Organisational structures and coordination strategies in 20 North American city governments. *Urban Studies*, 2021, 58(6): 1262-1285.
- [6] Alberti M, Marzluff J M. Ecological resilience in urban ecosystems: linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban Ecosystems*, 2004, 7(3): 241-265.
- [7] 夏楚瑜,董照樱子,陈彬.城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例. *生态学报*, 2022, 42(1): 116-126.
- [8] 王少剑,崔子恬,林靖杰,谢金燕,苏坤.珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究. *地理学报*, 2021, 76(4): 973-991.
- [9] Allen. *Mat Urbanism: The Thick2-D. CASE;Le Corbusier's Venice Hospital*,2001:118-126.
- [10] Comerio M C. Built for change: neighborhood architecture in San Francisco. *Journal of Architectural Education*, 1989, 43(1): 51-53.
- [11] Adger W N, Safrá de Campos R, Siddiqui T, Szaboova L. Commentary: inequality, precarity and sustainable ecosystems as elements of urban resilience. *Urban Studies*, 2020, 57(7): 1588-1595.
- [12] Mirti Chand A V. Place Based Approach to plan for Resilient Cities: a local government perspective. *Procedia Engineering*, 2018, 212: 157-164.
- [13] Lynch K. *A theory of good city form*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981.
- [14] Handy S. Methodologies for exploring the link between urban form and travel behavior. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1996, 1(2): 151-165.
- [15] Clark T A. Metropolitan density, energy efficiency and carbon emissions: multi-attribute tradeoffs and their policy implications. *Energy Policy*,

- 2013, 53: 413-428.
- [16] Stangl P. Prospects for urban morphology in resilience assessment. Yamagata Y, Sharifi A. *Resilience-Oriented Urban Planning*. Cham: Springer, 2018: 181-193.
- [17] Gill S E, Handley J F, Ennos A R, Pauleit S. Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built Environment*, 2007, 33 (1): 115-133.
- [18] Sharifi A, Roosta M, Javadpoor M. Urban form resilience: a comparative analysis of traditional, semi-planned, and planned neighborhoods in Shiraz, Iran. *Urban Science*, 2021, 5(1): 18.
- [19] Yang A S, Su Y M, Wen C Y, Juan Y H, Wang W S, Cheng C H. Estimation of wind power generation in dense urban area. *Applied Energy*, 2016, 171: 213-230.
- [20] Zhang J, Xu L, Shabunko V, Tay S E R, Sun H X, Lau S S Y, Reindl T. Impact of urban block typology on building solar potential and energy use efficiency in tropical high-density city. *Applied Energy*, 2019, 240: 513-533.
- [21] Pearson. *Resilient Sustainable Cities*. Routledge. 2014.
- [22] Sharifi A. Resilient urban forms: a macro-scale analysis. *Cities*, 2019, 85: 1-14.
- [23] Sharifi A. Resilient urban forms: a review of literature on streets and street networks. *Building and Environment*, 2019, 147: 171-187.
- [24] Sharifi A. Urban form resilience: a meso-scale analysis. *Cities*, 2019, 93: 238-252.
- [25] Barau A S, Maconachie R, Ludin A N M, Abdulhamid A. Urban morphology dynamics and environmental change in Kano, Nigeria. *Land Use Policy*, 2015, 42: 307-317.
- [26] Masnavi M R, Gharai F, Hajilbandeh M. Exploring urban resilience thinking for its application in urban planning: a review of literature. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(1): 567-582.
- [27] Dibble J, Prelorndjos A, Romice O, Zanella M, Strano E, Pagel M, Porta S. On the origin of spaces: Morphometric foundations of urban form evolution. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(4): 707-730.
- [28] Dhar T K, Khirfan L. A multi-scale and multi-dimensional framework for enhancing the resilience of urban form to climate change. *Urban Climate*, 2017, 19: 72-91.
- [29] Ahern J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 341-343.
- [30] Olazabal M, Chelleri L, Sharifi A. Is connectivity a desirable property in urban resilience assessments?. *Resilience-Oriented Urban Planning*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 195-211.
- [31] Feliciotti. *Urban Resilience and Design: A System Approach to Study of Resilience in Urban Form Learning from the Case of Grabales*. University of Strathclyde. 2018.
- [32] Leupen B. *Frame and generic space*. Rotterdam: 010 Publishers, 2006.
- [33] 戴楠. 城市形态与生态的耦合策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [34] Silva M, Oliveira V, Leal V. Urban form and energy demand. *Journal of Planning Literature*, 2017, 32(4): 346-365.
- [35] Bourdic L, Salat S, Nowacki C. Assessing cities: A new system of cross-scalespatial indicators. *Building Research and Information*. 2012, 40(5), 592-605.
- [36] Conzen M R G. Alnwick, Northumberland a study in town-plan analysis. *Transactions of the Institute of British Geographers*. 1960, 27: 1-122.
- [37] Caniggia G, Maffei G L. Architectural composition and building typology: Interpreting basic building. *Alinea*, Firenze. 2001.
- [38] Karl K. Aspects of urban form. *Urban Morphology*, 2009, 13(2): 105-120.
- [39] Capello R, Caragliu A, Fratesi U. Spatial heterogeneity in the costs of the economic crisis in Europe: are cities sources of regional resilience? *Journal of Economic Geography*, 2015, 15(5): 951-972.
- [40] Lee S, Lee B. The influence of urban form on GHG emissions in the U.S. household sector. *Energy Policy*, 2014, 68: 534-549.
- [41] Louf R, Barthelémy M. How congestion shapes cities: from mobility patterns to scaling. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5561.
- [42] Salat S. A systemic approach of urban resilience: power laws and urban growth patterns. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 2017, 9(2): 107-135.
- [43] Stead D, Marshall S. The relationships between urban form and travel patterns. an international review and evaluation. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2001: 113-141.
- [44] Des Rosiers F, Thériault M, Biba G, Vandersmissen M H. Greenhouse gas emissions and urban form: linking households' socio-economic status with housing and transportation choices. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2017, 44(5): 964-985.
- [45] Mörtberg U, Goldenberg R, Kalantari Z, Kordas O, Deal B, Balfors B, Cvetkovic V. Integrating ecosystem services in the assessment of urban energy trajectories-A study of the Stockholm Region. *Energy Policy*, 2017, 100: 338-349.
- [46] Larco N. Sustainable urban design: a (draft) framework. *Journal of Urban Design*, 2016, 21(1): 1-29.
- [47] Syphard A D, Massada A B, Butsic V, Keeley J E. Land use planning and wildfire: development policies influence future probability of housing loss. *PLoS One*, 2013, 8(8): e71708.
- [48] Alawadi K, Benkraouda O. The debate over neighborhood density in Dubai: between theory and practicality. *Journal of Planning Education and Research*, 2019, 39(1): 18-34.
- [49] De Rosa. Beyond a 'side street story' Naples from spontaneous centrality to entropic polycentricism, towards a 'crisis city'. *Cities*, 2016, 51: 74-83.
- [50] Sharifi A. From Garden City to Eco-urbanism: the quest for sustainable neighborhood development. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 20: 1-16.

- [51] Villagra P, Herrmann G, Quintana C, Sepúlveda R D. Resilience thinking and urban planning in a coastal environment at risks of tsunamis; the case study of Mehuín, Chile. *Revista De Geografía Norte Grande*, 2016, (64): 63-82.
- [52] Hachem C. Impact of neighborhood design on energy performance and GHG emissions. *Applied Energy*, 2016, 177: 422-434.
- [53] Feliciotti. Design for change: Five proxies for resilience in the urban form. *Open House International*. 2017, 41(4): 23-30.
- [54] Sharifi A, Chelleri L, Fox-Lent C, Grafakos S, Pathak M, Olazabal M, Moloney S, Yumagulova L, Yamagata Y. Conceptualizing dimensions and characteristics of urban resilience: insights from a co-design process. *Sustainability*, 2017, 9(6): 1032.
- [55] Veneri P, Bungalassi D. Questioning polycentric development and its effects. issues of definition and measurement for the Italian NUTS-2 regions. *European Planning Studies*, 2012, 20(6): 1017-1037.
- [56] Sharifi A. A critical review of selected tools for assessing community resilience. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 629-647.
- [57] Lehmann S. Sustainable urbanism: towards a framework for quality and optimal density? *Future Cities and Environment*, 2016, 2: 8.
- [58] Ann C. Resilience in the social and physical realms: lessons from the Gulf Coast. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015, 14: 290-301.
- [59] Long Y, Huang C C. Does block size matter? The impact of urban design on economic vitality for Chinese cities. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(3): 406-422.
- [60] Marcus L, Colding J. Toward an integrated theory of spatial morphology and resilient urban systems. *Ecology and Society*, 2014, 19(4): art55.
- [61] Bruwier M, Mustafa A, Aliaga D G, Archambeau P, Ericum S, Nishida G, Zhang X, Pirotton M, Teller J, Dewals B. Influence of urban pattern on inundation flow in floodplains of lowland rivers. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 446-458.
- [62] Byahut S, Mittal J. Using land readjustment in rebuilding the earthquake-damaged city of Bhuj, India. *Journal of Urban Planning and Development*, 2017, 143(1): 05016012.
- [63] Brand D, Nicholson H. Public space and recovery: learning from post-earthquake Christchurch. *Journal of Urban Design*, 2016, 21(2): 159-176.
- [64] Vaz Monteiro M, Doick K J, Handley P, Peace A. The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 16: 160-169.
- [65] Villagra P, Rojas C, Ohno R, Xue M, Gómez K. A GIS-base exploration of the relationships between open space systems and urban form for the adaptive capacity of cities after an earthquake: the cases of two Chilean cities. *Applied Geography*, 2014, 48: 64-78.
- [66] Wang S H, Huang S L, Budd W W. Resilience analysis of the interaction of between typhoons and land use change. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(4): 303-315.
- [67] Marshall S. *Streets and Patterns*. London/New York: Routledge, 2004.
- [68] Radhakrishnan M, Pathirana A, Ashley R, Gersonius B, Zevenbergen C. Flexible adaptation planning for water sensitive cities. *Cities*. 2018, 78: 87-95.
- [69] Ewing R, Hamidi S. Compactness versus sprawl. *Journal of Planning Literature*, 2015, 30(4): 413-432.
- [70] Chatzidimitriou A, Yannas S. Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 33: 85-101.
- [71] Dauphiné A, Provitolo D. La résilience: un concept pour la gestion des risques. *Annales De Géographie*, 2007, 654(2): 115-125.
- [72] Sharifi A, Yamagata Y. Resilient urban planning: major principles and criteria. *Energy Procedia*, 2014, 61: 1491-1495.
- [73] Erdem U, Cubukcu K M, Sharifi A. An analysis of urban form factors driving Urban Heat Island: the case of Izmir. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(5): 7835-7859.
- [74] Oke T R. *Boundary layer climates*. 2nd ed. London: Methuen, 1987.
- [75] Cutter. Urban-Rural differences in disaster resilience. *Annals of the American Association of Geographers*, 2016, 106: 1236-1252.
- [76] Newman P, Beatley T, Boyer H. Introduction: urban resilience: cities of fear and hope. *Resilient Cities*. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2017: 1-22.
- [77] Vargas. A Framework for Using Open Green Spaces for Climate Change Adaptation and Resilience in Barranquilla. Colombia. ICLEI. Bonn. 2014.
- [78] Vaništa Lazarević E, Keković Z, Antonić B. In search of the principles of resilient urban design: Implementability of the principles in the case of the cities in Serbia. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 1130-1138.
- [79] 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. *城市发展研究*, 2021, 28(6): 101-111, 2, 45.
- [80] 王丽华, 马东辉. 城市韧性恢复能力与空间形态特征相互关系研究. *武汉理工大学学报: 信息与管理工程版*, 2021, 43(3): 197-202.
- [81] 赵鹏瑞, 田银生. 历史街区形态韧性量化评估方法研究——以洛阳市东西南隅历史文化街区为例. *南方建筑*, 2023, (3): 1-11.
- [82] 颜文涛, 李子豪, 付磊. 基于“形态-网络-功能”的城市韧性评估方法——以十堰市中心城区为例. *上海城市规划*, 2023, (1): 1-8.
- [83] 修春亮, 魏冶, 王绮. 基于“规模-密度-形态”的大连市城市韧性评估. *地理学报*, 2018, 73(12): 2315-2328.
- [84] 薛飞, 张念慈, 夏楚瑜, 张健, 王楚玥, 李淦, 周珺. 城市生态韧性水平空间评估及其驱动力——以北京市通州区为例. *生态学报*, 2023, 43(16): 6810-6823.
- [85] 冯一凡, 冯君明, 李翹. 生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展. *生态学报*, 2023, 43(14): 5648-5661.