

城市空间多风险耦合及规划的韧性应对*

彭 翀 左沛文 李月雯 张梦洁

提 要 随着城市人口与要素持续高密集聚,城市发展面临多风险耦合加剧的严峻挑战,城市风险迈向“3.0阶段”,多风险耦合成为城市韧性领域的研究热点。基于未来城市发展挑战的现实背景,从多风险的特征情景、效应机制和规划实践等方面梳理多风险耦合的相关研究,总结规划经验,剖析多风险领域的研究趋势与热点。在此基础上,探索应对多风险耦合的城市韧性四大领域、长短周期、阈值以及层级传导等理论要点。构建应对多风险耦合的韧性空间规划编制框架,尝试提出城市空间规划的韧性要点。展望包括人工智能规划在内的未来规划编制的技术方向,期待对新时代建设韧性城市提供多风险的理论参考与方法指引。

关键词 城市空间多风险; 风险耦合; 城市韧性; 空间规划

Urban Multi-Risk Coupling and Resilient Responses Through Urban Planning

PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, ZHANG Mengjie

Abstract: As cities continue to agglomerate, urban risk has moved to “3.0 stage,” challenged by intensified multi-risk coupling, where multi-risk coupling has become a research hotspot in the field of urban resilience. Addressing future urban development challenges, this paper examines multi-risk coupling through its characteristics, scenarios, effects, mechanisms, and corresponding planning responses. Drawing on a synthesis of relevant planning experiences and research trends, the paper explores four critical fields of urban resilience, long and short cycles, thresholds, and policy transmission mechanisms. Furthermore, the paper introduces a framework for resilient urban spatial planning, highlighting key aspects of urban resilience. Finally, it outlines the technical directions of future planning, including the application of artificial intelligence, which provide theoretical references and methodological guidelines for building resilient cities in the new era.

Keywords: urban multi-risk; risk coupling; urban resilience; spatial planning

我国城市风险不确定性加剧,空间高质量发展面临安全韧性挑战。建设应对多风险的韧性国土空间,已成为空间规划促进实现中国式现代化的重要课题。

纵观空间风险发展变化历程,大致可分为三阶段(图1)。1.0阶段,城市韧性的主要挑战是可持续风险,即如何应对城市内部的长期压力,如土地植被变化、生态环境恶化等,表现为具有一定的可预见性的“灰犀牛”事件;2.0阶段,城市韧性重点应对极端事件或突发风险,称为“黑天鹅”事件,如极端暴雨、地质灾害等自然灾害和城市火灾、危化品事故等人为灾害;目前,我国韧性发展已迈向应对常态化风险的3.0阶段,“后疫情”时代,城市高密化加剧,长期性与突发性风险并存,体现为时间频率常态化、空间类型耦合化。多重不确定风险加剧,呈现出复杂的连锁效应,致险因子间的耦合作用可能将单一风险转变为系统性的循环危害,造成更严重的损失。

因此,在当前及未来一定时期内,我国空间规划应对多风险耦合尚有一些关键科学问题值得探讨:第一,城市空间多风险耦合的特征与规律有何不同?第二,多风险耦合对城市空间造成的空间效应及机制是什么?第三,韧性应对理论的要点有哪些?第四,如何基于当前空间规划体系确定韧性应对的重点内容及技术方向?本文梳理城市空间多

中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.16361/j.upf.202405012

文章编号 1000-3363(2024)05-0088-10

作者简介

彭 翀,华中科技大学建筑与城市规划学院、自然资源部城市仿真重点实验室教授、博导, pengchong@hust.edu.cn

左沛文,华中科技大学建筑与城市规划学院博士研究生

李月雯,华中科技大学建筑与城市规划学院博士研究生

张梦洁,华中科技大学建筑与城市规划学院、自然资源部城市仿真重点实验室讲师,通信作者, zhangmj@hust.edu.cn

* 国家自然科学基金面上项目:“高密度城区多风险耦合的空间效应、韧性机制与规划调控——以武汉市为例”(项目编号:52378057);华中科技大学交叉研究支持计划:“极端洪涝情景下城乡系统人地互馈机制、空间优化及政策调控——以武汉都市圈为例”(项目编号:2023JCYJ020)

风险耦合的概念特征与情景、空间效应与机制以及规划实践,按照“多风险耦合研究基础—应对多风险耦合的城市韧性理论—韧性空间规划编制与技术方向”的研究思路,初步提出了应对多风险耦合的城市韧性理论要点与规划应对方向,以期对未来研究与实践提供参考。

1 城市空间多风险耦合相关理论及规划经验

1.1 多风险耦合的概念特征与情景

与“风险”相关的概念是“灾害”,两者的概念学界并未形成共识。城市系统由灾变因子诱发而产生扰动,造成一定时空范畴的物理损失,即城市灾害。城市自然环境、功能结构、人类社会等系统间存在复杂耦合关联,具有产生灾害的可能概率^[1],即城市风险。辨析二者的内涵,灾害的核心概念是发生的事件、演变的过程以及造成的损失;风险的核心概念是“损失的不确定性”,在一定程度上是可量化的^[2-3]。

学者^[4]关注到特定地区与时段多种风险并存的情况。城市空间多风险是时间或空间上重合的多个危险源和多个易损要素的风险态势^[5-6],具备领域的多样性和时间的共存性特征(表1)。从领域多样性看,多风险包括城市的自然风险、技术风险、经济风险、社会风险、政治风险等;从时间共存性看,则包括长期压力与突发扰动^[7]。

多风险间的相互作用情景在近十年得到了充分关注,典型灾害链演化的过程与特征研究取得了一些成果^[15-17]。我国城市典型的多风险链式反应包括“台风—暴雨—渍涝/洪水”“地震—滑坡/泥石流”“高温—干旱—土地退化/病虫害”“寒潮—雪灾/生物冻害”等。从城市空间的角度,城市环境很大程度上决定了风险的传递路径与耦合形态,进一步导致灾害事件的潜在影响扩大^[18-19]。因此,不同城市面临的风险危险性和自身空间环境敏感性不同,城市风险的动态演化过程也不尽相同。多风险间相互激发的情景,包括灾害链、灾害遭遇、灾害间的级联效应、诱发效应、多米诺效应在内的多种现象,其本质是多风险耦合的体现^[18,20-23],即复杂风险系统的不同风险

因子之间存在相互影响与依赖的关系,这种耦合情景会造成风险演化,可能加剧潜在损失。

根据激发方式,多风险耦合可以分为累积式风险耦合和突发式风险耦合;根据风险类型,多风险耦合可以分为自然风险耦合、人为风险耦合和自然与人为风险的耦合。现有面向自然与人为风险的耦合研究相对较少,其中自然技术风险(Natech)、自然社会风险的风险关联性极强,次生风险可能产生极严重的损失^[18]。多个致险因子本身并不极端,但其相互作用能够导致极端事件的产生,这样的多个风险事件同时或相继发生的情景,被称作复合极端事件。由于多风险的内在耦合性,复合极端事件所带来的空间效应往往大于单个极端事件的简单叠加,给城市生命线系统的各个部门带来更大的空间威胁^[24-26]。

1.2 应对多风险的规划实践

国外城市空间规划中,多风险耦合的问题得到关注,如从信息平台、韧性社区建设、城市基础设施等多方面阐释应对多风险的实施策略,其中洛杉矶、伦敦等部分城市空间规划将风险划分为长期压力和突发扰动,分类开展风险预防。但总的来说,缺乏对多重风险评估与管理的理论和方法,现有空间规划对于多风险耦合效应的讨论仍较少。见表2。

2015年以来,随着海绵城市和气候适应性城市建设试点的推进,我国韧性相关空间规划逐步发展。至今,多数城市将韧性安全建设视为总体规划的重要议题。如《北京市韧性城市空间专项规划(2022年—2035年)》纳入考虑了多风险的韧性应对。应对多风险的规划实践正在探索中。见表3。



图1 城市风险三阶段及其韧性挑战

Fig.1 Three stages of urban risk development and the challenge to resilience

表1 多风险相关概念及内涵

Tab.1 Related concepts of multi-risk

概念	定义	来源
灾害 (hazard)	对城市经济、基础设施、居民生活、社会服务和生态环境造成损害的物理现象	Unisdr, 2009; IPCC, 2012; Gallina V et al., 2016.
风险 (risk)	灾害事件对城市空间的潜在后果的量化表达, 可以用概率或半定量的术语来表示	IPCC, 2012; Gallina V et al., 2016.
多灾种 (multi-hazard)	威胁同一暴露元素的、因子间具有不同相互作用的危险事件,同一空间相关的灾害、同一时间或短暂跟随的灾害	Saarinen T et al., 1973; Carpignano A et al., 2009; Marzocchi W et al., 2012; Komendantova N et al., 2014; Terzi S et al., 2019.
多灾种风险 (multi-hazard risk)	由多重致险因子产生的风险,通常未考虑脆弱性水平相关关系	Kappes M S et al., 2012; Ward P J et al., 2022.
多风险 (multi-risk)	由具有时空重合性的、独立或依存的多重致险因子和多个易损要素产生的风险,一种风险导致另一风险的概率、频率和幅度改变,通常考虑脆弱性水平相关关系	Carpignano A et al., 2009; Kappes M S et al., 2012; Marzocchi W et al., 2012; de Ruiter M C et al., 2020; Ward P J et al., 2022.

资料来源:整理自参考文献[5-6,8-14]

2 应对多风险耦合的城市韧性理论要点

韧性本义为“恢复到原来的状态”，其基本含义是面对危机事件时的应对、恢复及可持续发展能力^[27-28]，城市韧性是韧性概念在城市的扩展，指城市能够消化并吸收外界干扰，保持原有的关键特征、结构和功能的能力^[29]。随着韧性理念的发展，韧性目标也发生了变化，从“恢复稳态”到“塑造稳态”再到“持续适应”^[30]；风险3.0阶段，城市韧性发展的重点是“持续适应”常态化风

险的过程。本节基于前述讨论，提出应对多风险耦合的城市韧性理论要点。见图2。

2.1 多风险耦合的空间效应与韧性机制

城市承险体系统可视为由用地、建筑、设施等三个空间子系统构成，所有子系统都会承受多风险冲击。多风险耦合的空间效应是在一定的孕险环境内部，致险因子危险性与承险体的脆弱性之间相互作用而导致的有害结果，例如房屋倒塌、道路交通中断、基础设施损坏等。CBD、城市中心区、老旧小区等地区^[31-33]

是空间效应的重点研究对象，这是由于高密度城区是风险耦合的典型区域，高密城市空间可能扩大多风险的耦合作用，加剧多风险的空间效应。

致险因子的多样性和城市空间系统的复杂性与不确定性相互作用，风险可能产生叠加、耦合等不同的复合空间机制。叠加即城市遭受多种风险的累加影响，其风险特征是灾害之间不存在明显的关联，或测度时可以忽略多种灾害过程之间的关联性。目前，城市规划领域的机制研究集中于特定时空的多风险叠加分析。从风险系统的角度看，风险的

表2 世界应对多风险的典型空间规划实践

Tab.2 Typical spatial planning practices in response to multi-risk worldwide

城市	韧性政策	年份	典型风险	目标及重点领域	多风险应对
鹿特丹	鹿特丹韧性战略	2017	海平面上升、洪水、极端降雨等	建立防洪和排水系统，提高城市数据安全共享，促进社会创新参与	重点强调以洪水为代表的水环境自然灾害应对与气候适应
洛杉矶	韧性洛杉矶发展战略	2018	地震、火灾、泥石流、高温热浪等	组织领导与公众参与、灾难准备和修复能力、经济安全性、气候适应性和基础设施现代化程度	构建面向居民的多灾害信息平台；改变政府合作的方式，增强和保护社区，以建立城市应对意外灾难性事件和长期潜在压力的韧性能力
纽约	一个纽约2050：建立一个强大且公平的城市	2019	气候变暖、洪水、风暴潮、海平面上升、城市热浪等	长期应对气候变化，不再依赖化石燃料，城市的建筑、交通和经济将由可再生能源供能	分析了气候危机、经济风险、社会压力等城市多重叠加风险
伦敦	伦敦城市韧性战略2020	2020	持续洪水、干旱、极端高温等	考虑突发灾害的应对以及更加广泛和长期的城市抗风险能力	从长短期开展多风险应对，识别城市的冲击与压力；主要冲击是气候变化；主要压力是不平等造成的社会融合缺乏
新加坡	2030年新加坡绿色发展蓝图	2021	暴雨、干旱、疫情等	“五大支柱”，即大自然中的城市、能源重置、可持续生活、绿色经济、韧性未来	通过绿地建设、“冷却新加坡”计划等措施，提高适应环境变化和雨洪自然灾害的韧性
芝加哥	芝加哥气候行动计划	2022	酷热夏天、极端冬天、浓雾、洪水、暴雨、龙卷风等	减少未来不确定性的影响，并能够持久、公平地适应气候的变化	跨市域与合作伙伴共同识别风险，并为洪水、极端冬季天气和龙卷风等多种自然灾害制定适当的应对计划
东京	国土强韧化基本计划	2023	地震、海啸、台风、洪水、火灾、疫情等	保护人身安全、维持基本生命功能运转、减少国民财产和公共设施损失、尽快恢复重建	加强地方防灾能力，积极利用数字技术等新技术，提高应对自然灾害的能力，着力提高国土强韧化的执行力

资料来源：整理自互联网公开资料

表3 我国应对多风险的空间规划实践示例

Tab.3 Spatial planning practices in response to multi-risk in China

城市	规划政策	年份	典型风险	目标及重点领域	多风险应对
北京	北京城市总体规划(2016年—2035年)	2016	洪涝、森林火灾、地质灾害等	从城市系统和韧性管理两个维度提出建设韧性城市规划路径	建设统一的灾害风险评估和监测预警体系
	关于加快推进韧性城市建设的指导意见	2021		统筹拓展城市空间韧性、有效强化城市工程韧性、全面提升城市管理韧性、积极培育城市社会韧性	强化多灾并发和灾害链式反应风险分析，完善城市风险地图
	北京市韧性城市空间专项规划(2022年—2035年)	2024		构建安全可靠、灵活转换、快速恢复、有机组织、适应未来的首都韧性城市空间治理体系	应对复杂极端风险、推进“平急两用”，通过灾害推演模拟预判在城市空间中能够采取的各项措施
上海	上海市城市总体规划(2017—2035年)	2018	台风、暴雨、热岛效应等	建设更可持续的韧性生态之城	完善对城市多灾种的监测预警机制
深圳	深圳市应急疏散救援空间规划(2021—2035年)	2023	暴雨、台风、地震、地质灾害等	全面分析城市可能面临的自然灾害、事故灾难和公共卫生、社会安全等突发事件风险	平灾结合，多灾兼顾，开展多灾种综合应对
香港	香港2030+：跨越2030年的规划远景与策略	2021	台风、高温、洪涝等	提升蓝绿资源系统以成为自然大都会、成为能适应气候变化和生物多样性的城市	充分考虑气候变化、生物多样性等环境因素，在新发展或市区重整项目纳入适应、抗御气候变化设计

资料来源：整理自互联网公开资料

耦合效应包括风险形成要素的耦合和风险演化过程的耦合^[21]，不同系统的风险因子耦合作用可能造成潜在灾损的提升、降低或抵消^[34-36]，即产生强耦合、弱耦合和零耦合的作用，可以通过风险矩阵表述风险间的耦合作用（图3）。风险耦合的内在机理体现为，多种致险因子、孕险环境和承险体组成的复杂系统在时间上、空间上相互关联推动了风险演化，进而产生更严重的损失^[18,37]。

韧性体现在多风险“灾前一灾中一灾后”应对的“抵御—吸收—恢复—适应—学习”全过程能力^[38]，与应急管理全生命周期和全过程治理密切相关。多风险环境中，城市需在灾前采取措施以减少风险发生的可能性或潜在损失；灾中保持城市运作的稳定性，吸收并减轻风险带来的冲击；灾后需要迅速恢复，通过适应和学习提高对未来风险的应对能力。

城市韧性在多风险耦合情景下表现出多种特征，从致险因子危险性、孕险环境敏感性和承险体脆弱性等三个维度展开（图4）。具体而言，城市内部空间系统的复杂性和不确定性使得风险事件可能在某些特定的孕险环境下更易诱发；致险因子危险性之间的耦合作用可能放大风险对城市空间的威胁；不同的脆弱性特征的承险体在面对多风险时，会呈现出不同的风险耦合效应。在特定的孕险环境下，应对多风险耦合的城市韧性不仅涉及多致险因子危险性问题，也关系到多承险体脆弱性问题。

2.2 多风险耦合的韧性领域与交互

规划视角下的城市韧性研究始于单一维度的生态韧性，至今已拓展至生态、社会、工程、经济等四大领域^[39]。在城市生态领域，城市化与气候变化带来的常态化风险对城市生态系统产生压力，影响其提供关键生态系统服务的能力。多风险耦合可能导致生态退化，损害城市生态系统对人类活动的支持与反馈作用，进而削弱其在城市洪涝、微气候、碳排碳汇等方面的调控功能，常态化风险下的城市生态功能恢复与城市结构维系成为城市生态韧性的关键方面^[40-41]。在城市社会领域，人类系统需要增强抵御多风险耦合的能力，要求城市社区与居民适应常态化风险。城市社会韧性的

重点在于强化城市社会的自组织学习能力，完善社会网络、促进社区参与、提升文化认同，着眼于社会公平福祉^[42-43]。在城市工程领域，城市基础设施系统的韧性评估应当纳入多风险耦合的考量，通过生命线设施的冗余提升其应对复合极端事件的能力，尤其是提高绿色基础设施的应变能力，降低多风险耦合的空间效应^[44-46]。在城市经济领域，从突发扰动的角度看，城市需要保证产业结构多元、要素网络连通，优化产业链、供应链和创新链的安全性与可靠性。从长期压力的角度看，韧性重点在于城市应对金融等危机的应变能力及实现经济复苏的灵活结构，以适应常态化风险^[7,47]。

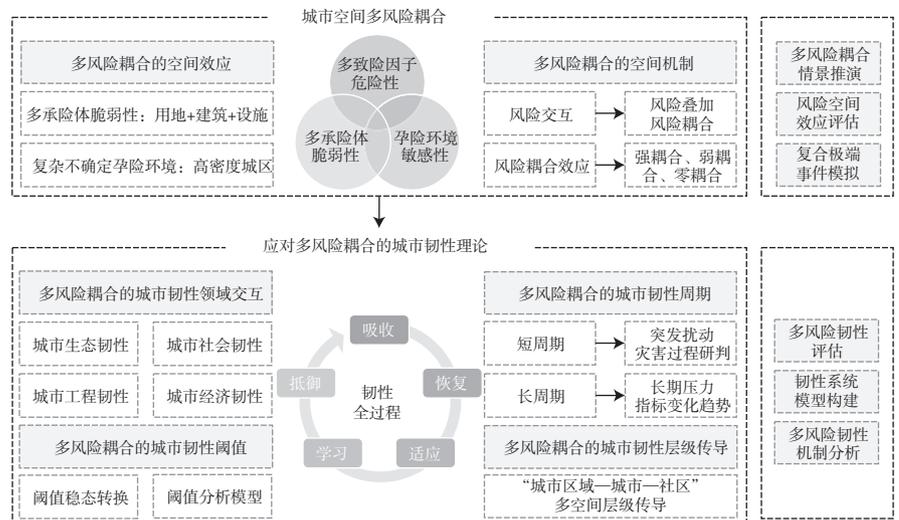


图2 应对多风险耦合的城市韧性理论要点

Fig.2 Theories of urban resilience in response to multi-risk coupling

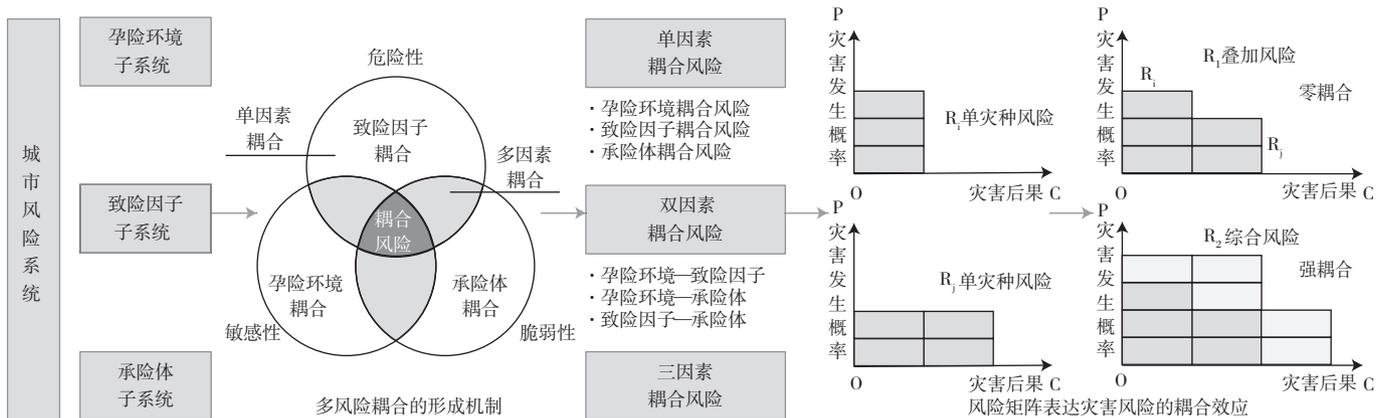


图3 城市耦合风险的内部作用

Fig.3 The internal effects of coupled urban risk

资料来源：改绘自参考文献[34-36]

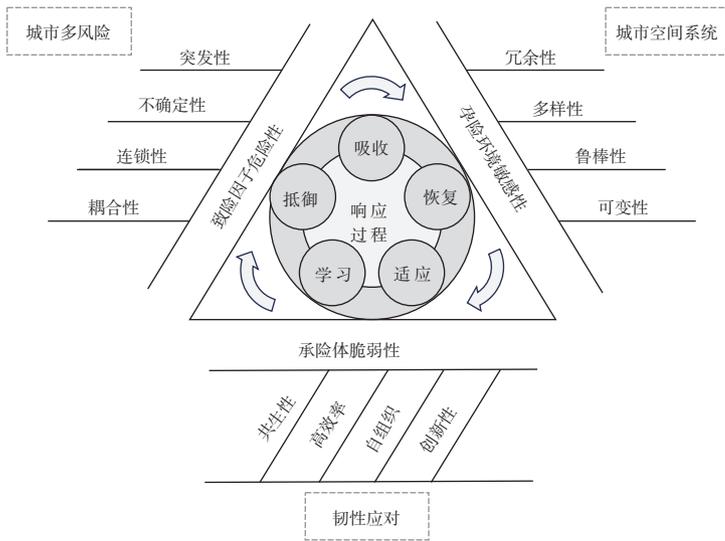


图4 多风险耦合的城市韧性特征

Fig.4 Characteristics of urban resilience in the context of multi-risk coupling

不同风险及其耦合作用不仅影响各自领域的城市韧性，还影响领域之间的交互关系。城市风险在时间与空间上的相互作用可能造成空间损害，主要表现在以下两个方面：一是多种风险可能直接导致特定领域内的局部性危害；二是多风险的耦合可能加剧跨领域的城市韧性受损。在韧性四大领域中，每个领域的内部要素都在不同程度上相互影响并共同推进城市韧性的演化。例如，城市交通可达性作为城市工程韧性的主控因素，直接影响城市空间与产业结构，反映在改变城市空间的发展方向与布局方式，进一步影响城市产业的分工与协作关系，是城市面临多风险保持协调可持续、维持城市内生韧性建设动力的主要因素；而城市空间的过分扩张与高密度城区的形成则可能扩大城市社会要素的不稳定，提高对城市维持社会秩序、防止社会动荡的要求。各领域下的主控要素对城市韧性水平的影响程度存在着差异，为了提高应对多风险耦合的城市韧性，在增强各领域内部韧性的基础上，需要进一步明确领域主控要素之间的交互关系，优化跨领域的协同作用，从而形成相互支持、有效应对多风险耦合的韧性城市空间系统，提出相应的规划策略和措施。

2.3 多风险耦合的韧性周期与阈值

城市韧性的发展是周期性演进的过

程⁴⁸⁻⁵⁰，适应性循环模型是阐释韧性周期的经典模型⁵¹⁻⁵²，该模型认为应通过具备不同韧性特征的多个韧性阶段实现城市系统再生与创新，从而实现周期性的螺旋演进。3.0阶段，城市时刻遭受长期压力和突发扰动风险的影响，城市韧性演进也同时发生。据此，应对多风险耦合的城市韧性周期可以从“双周期”角度展开研究，将城市韧性的周期分为应对长期压力的“长周期”以及应对突发扰动的“短周期”。

通过识别多风险耦合的突发扰动事件，可以观察短周期的城市韧性变化趋势，主要手段是研判灾害过程。短周期内的城市韧性演化不等于孤立的灾害事件影响的叠加，应当纳入多风险耦合所造成的城市韧性演化。从短周期视角测度城市韧性，可根据多风险耦合的突发扰动事件分为两个阶段，即灾害过程中应对冲击的韧性收缩期和恢复过程中的韧性扩张期。在收缩期内，城市韧性的抵抗力发挥主要作用，以削弱多灾害风险对城市造成的空间效应；在扩张期内，城市韧性的恢复力和适应力发挥主要作用，以促进城市恢复甚至转型发展。由于短周期对韧性演进的划分，纳入多个短周期的长期性韧性变化会遭到忽视，因此有必要对长周期的城市韧性展开测度。应对长期压力的城市韧性长周期是多个多风险耦合事件的综合表现，更具统计属性。可以通过多指标的长期

变化测度城市韧性的总体变化趋势（通常以年计），分析城市韧性及其增速演进的上升或下滑趋势，总结城市韧性演进的长周期规律，展开韧性演进的模拟预测。从韧性评价与周期划定的角度看，短周期可以通过测度城市应对短期冲击所造成的韧性表现或空间效应，分析评估韧性冲击前后的抵抗、恢复、适应力的变化趋势。长周期可以通过构建韧性指标体系，量度某一领域或城市综合韧性水平。通过长短周期的评价分析，能够更好地分析城市韧性的时空演化特征。

韧性的阈值是应对城市空间多风险耦合的关键点。城市韧性存在阈值的原因是，作为复杂巨系统的城市结构、功能、状态的演化受到多种因素共同影响，某些指标超过一定范围则可能导致城市失衡、崩溃甚至退化，无法维持原有状态⁵³，即从系统动力学的角度看，城市功能并不一定恢复到其初始状态，而可能会稳定在一个更低或更高的水平。类比“稳态转换”概念⁵⁴⁻⁵⁵，城市受到耦合多风险的干扰后，韧性系统状态相应地产生波动，当干扰强度超过阈值，城市系统便脱离当前的稳态而跃迁至新的状态。城市应对多风险影响，阈值产生变化，实际上是一种稳态转换的过程。

多风险的耦合特性可能导致城市韧性的阈值偏离系统原始状态而产生振荡。从韧性双周期的视角分析，应对多风险的城市韧性面向突发扰动或长期压力，都可能突破城市韧性的阈值。从短周期角度看，多风险耦合的突发扰动不确定性很强，快变量可能具有更大的冲击力，瞬时改变系统状态；从长周期的角度看，虽然多风险耦合的作用速度较慢，但持续的慢变量干扰作用下，一旦突破阈值将直接导致城市系统状态的改变。基于此，城市系统韧性的阈值可以理解城市在长短周期中能够保持其功能正常运转的韧性指标的最低水平，或者其对应的最大多风险耦合事件，特定的城市环境会通过影响城市系统韧性的阈值进一步影响多风险耦合的空间效应。基于学者⁵³关于单风险事件的韧性周期分析，应对多风险的韧性周期分析示意如图5所示，以两个风险事件耦合导致韧性演变为例，可能产生韧性学习提升、受损下降或进入非稳态等3种不同的耦合

效应。

2.4 多风险耦合的韧性层级与传导

城市韧性跨越“城市区域（城市群—都市圈）—城市—社区”的多空间层级，每个层级都有其显著风险、韧性特征及应对策略，层级之间存在复杂的交互关系。例如，区域层级的对外交通、物流网络能够确保城市层级在面对多风险时的有效应对；城市层级通过提供应急避难场所、医疗救治网络来支撑社区层级；韧性强的社区可以通过其组织和资源支持邻近社区，从而提高整个城市的韧性水平。这些层级内部或层级之间存在相互影响和支撑的复杂关系构成了城市系统的整体韧性的基础。

韧性传导是指韧性如何在层级之内或不同层级之间传递和扩散。在城市的空间尺度上，韧性存在跨层次、多方向的传导关系，具有系统性与联动性。基于复杂系统的视角，面对多风险耦合事件时，随着城市系统长期或短期的动态演变，各个层级之间的相互依赖关系也产生变化。应对多风险耦合，韧性传导确保不同层级间的支持和缓冲，在一个层级遭受冲击时，其他层级可以提供必要的支持和资源，帮助受影响层级快速恢复。多风险耦合的城市韧性传导涉及从宏观到微观的多个空间尺度，需要考虑不同层级的韧性特征及其相互关系，分析层级如何共同作用于城市系统的整体韧性。在空间规划中，系统性地识别和强化各层级的韧性特征，促进层级间的相互支撑协作，可以提高城市系统的整体韧性，使城市更能够抵御和适应未来可能出现的各种风险和挑战。

3 应对多风险耦合的韧性空间规划编制

应对多风险耦合的城市韧性理论为韧性空间规划编制提供了理论指引。因此，积极探索如何将应对多风险的韧性安全理念融入“五级三类”的国土空间规划体系非常重要，这里提出可供参考的思路。见图6。

3.1 总体规划的韧性要点

应对常态化风险，构建韧性国土空

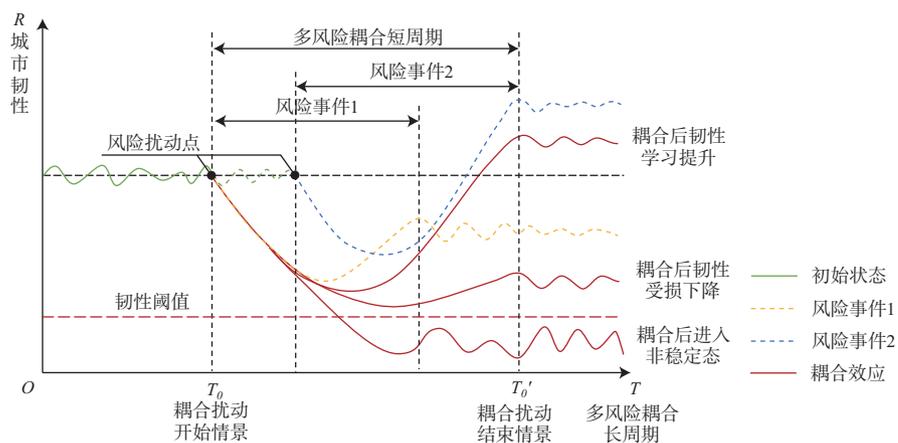


图5 应对多风险的韧性周期分析

Fig.5 Theoretical model of resilience cycles in response to multi-risk

间已成为城市规划的重要理念，国家、省级层面总体规划提供了韧性空间发展的战略引导。在衔接国家级韧性安全战略决策的基础上，省级层面通过空间风险识别与“双评价”，构筑韧性安全的区域空间格局，划定韧性安全的国土空间功能分区，为国土空间尤其是重点风险区的风险管控与生态修复提供总体指引。

在衔接上位总体规划的基础上，市、县级和乡镇级国土空间总体规划需要充分立足韧性实施。市、县级层面，按需将韧性城市作为重要专题展开研究，开展全要素、全领域、全周期的空间多风险耦合识别与韧性评价；构建多风险耦合的城市安全底图，明确韧性管控指标的底线约束与管控作用；塑造城市空间开发与保护格局的多中心和网络化布局，构建开敞连续与网络完整的城市生态系统，划定韧性单元；对自然容灾空间展开识别，推进生态修复，改善生态调节功能，吸收和减缓风险效应^[56]；提升各类设施应对多风险的能力，完善基础设施体系的适实性和高效率；提出现有城市空间的韧性更新与未来城市空间的韧性发展策略，为不同风险区的适应性规划提供策略指引。乡镇级层面，需要以韧性单元为基础开展空间规划设计，完善空间系统组织模式；提高资源利用效能，强调三生空间的统筹优化与科学布局，预留韧性空间；制定各类空间单元的平时风险防控措施和灾时功能转换策略，共同构筑多层次、网络化的韧性空间体系。

3.2 详细规划的韧性要点

2023年，自然资源部《关于加强国土空间详细规划工作的通知》对详细规划改革与实践提出了新的要求。详细规划是总体规划的具体深化落实，其直接安排土地利用方式、布局城市设施空间，是韧性城市理念落实到城市空间系统的重要途径。城镇开发边界内外空间环境与韧性特征有极大的区别，面向常态化风险，规划重点有所差异。

城镇开发边界内，对于单元层次，可通过多风险的耦合评估，明确风险易发区域与耦合隐患点，重点细化应急避难场所、人防工程等韧性城市设施的空间布局，确定单元的韧性城市建设控制指标要求。对于街区层次，需要保持单元内人口规模、建设强度和空间形态之间的匹配关系，满足基础设施、公共管理与公共服务设施、绿地广场等的配置，合理提升韧性设施的冗余度，确保应急设施的落地。对于重点地段，可考虑增强城市空间的多样性与可变性，倡导韧性关键地区如城市更新地段、公共活动核心区、沿山滨水景观地区的用地功能混合。

城镇开发边界外，乡村是韧性空间的薄弱环节，可以通过多村连片规划编制，促进韧性设施共建共享，强化韧性同层级传导支持。集聚提升类与城郊融合类的村庄，重点通过产业升级、环境优化激发村庄活力，增强村庄的自组织能力，预留弹性发展空间；特色保护类与搬迁撤并类的村庄，突出生态保护功

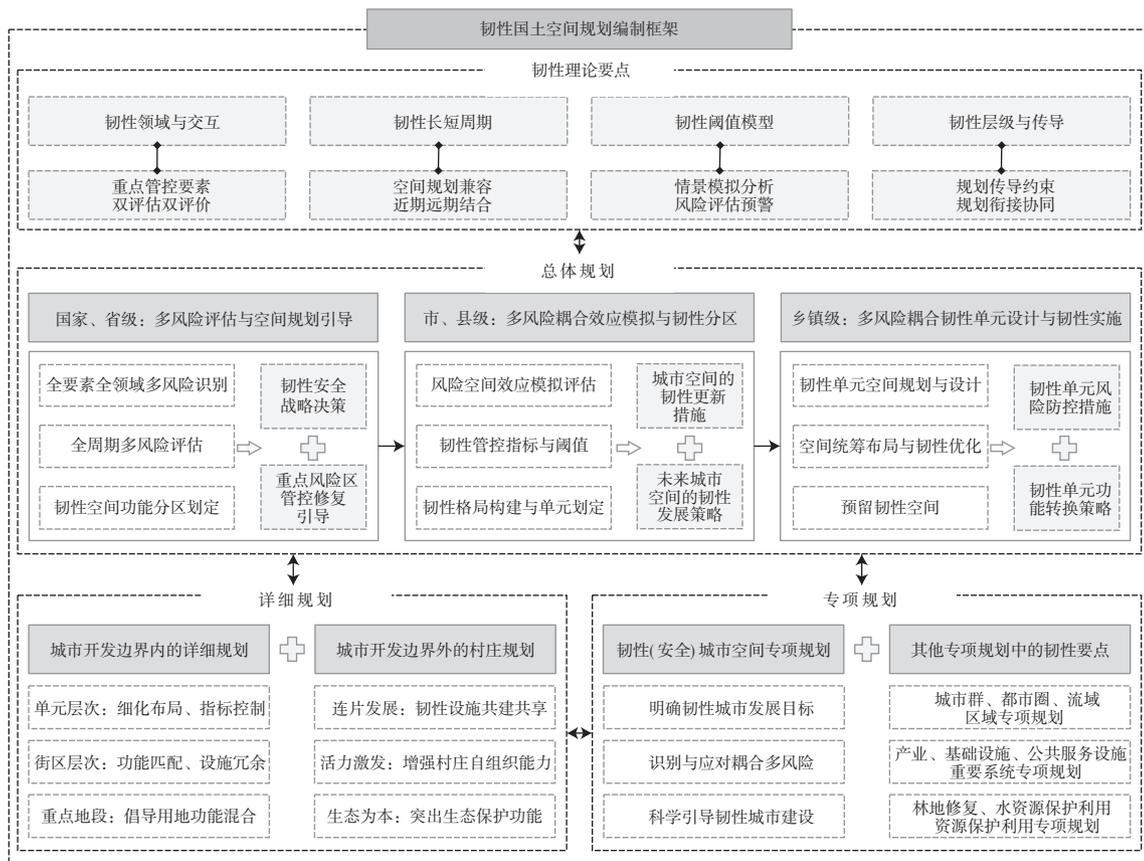


图6 韧性国土空间规划编制框架

Fig.6 Framework of resilient territorial spatial planning

能，重点开展人居环境整治。对于需要进行详细规划编制的国家公园、自然保护区、重要水源地等生态保护区或农业用地，排查消防、地质地震风险隐患，重点保证生态系统服务功能完整。

3.3 专项规划的韧性要点

目前，我国应对多风险耦合的韧性观念多以海绵城市建设、灾害防治的形态，分散在综合防灾减灾^[57]、公共服务设施、道路交通、绿地系统等专项规划之中。在韧性发展的新阶段，城市韧性提供了化解安全问题的理论框架与技术手段，可将全过程、多领域、跨层级的韧性理念融入城市空间的防灾减灾中，形成专门的韧性（安全）城市空间专项规划。结合北京等一些城市开展的韧性空间规划相关探索，形成如图7所示的初步框架。

韧性（安全）城市空间专项规划解决3.0阶段的共性问题：韧性城市发展目标是什么、如何应对常态化风险以提升城市韧性、怎样引导韧性城市的空间布

局。具体可包括：①整合多部门风险数据，系统识别城市潜在多风险并展开韧性评估，明确多风险薄弱环节；②放眼长期城市发展和安全需求，开展超前谋划，制定前瞻性的韧性城市发展目标，适应未来不确定耦合风险；③合理配置资源，完善韧性城市空间结构、布局与分区，统筹城乡平急两用、功能复合公共基础设施布局，形成有机整体的韧性城市空间体系；④提出城市生态、社会、工程、经济分领域的精细化韧性措施，明确不同风险情景的韧性提升策略；⑤设立明确的实施时间表和责任主体，确保规划的有效执行，定期评估规划实施效果，更新规划内容。

我国城市地理环境与规模差异大，具体对象应当具体分析。如从地理环境的角度，需要重点研判典型耦合风险类型，例如东南沿海城市应对台风—暴雨耦合风险、地震带城市应对地震—地质灾害耦合风险，提出专门化韧性措施，研判平急需求，实现平急兼容与快速转换。从城市规模的角度，中小城市、县

城空间环境与致险因子相对单一，重点降低常见耦合风险的潜在影响，促进基层社区的韧性建设。大城市空间复杂程度更高，需要识别韧性建设的重点空间单元，开展多风险情景的推演仿真，从“全域—中心城区—重点空间单元—社区”多层次指引韧性建设。超大特大城市由于中心城区人口与要素高度密集，有必要面向城市区域，强化韧性共建共治，群圈协同提升韧性传导能力；应对极端情景，战略预备极端气候事件、突发恶性事件复杂耦合风险，布局极端情景下空间功能转换、资源流动模式；运用数字孪生等新技术，强化多风险感知与应对能力，提高应对长期压力和突发扰动的风险治理能力。

4 韧性空间规划编制的技术方向

分析前述规划的韧性要点发现，规划编制的全过程要求规划师采集多源城市空间数据、揭示城市复杂风险、模拟仿真风险效应等，综合信息化和人工智

能技术。吴志强等^[58]指出人工智能技术带来规划多角度智能化,未来将伴生人工智能与城市结合的多重挑战。彭仲仁等^[59]设想未来城市规划人工智能将包含“辅助—增强—自动—自主”四个发展阶段。面向韧性空间规划编制的关键技术方向可能涉及空间信息采集与处理、风险叠加与耦合评估、情景推演与模拟仿真、智能规划与实施监测等重点方向。

4.1 空间信息采集与处理

遥感、物联网、互联网等技术都在城市空间与风险数据的信息采集与处理方面有广泛的应用,未来随着城市多元流数据的推广应用以及数据质量的提升将大大拓展多风险的城市韧性研究的维度,有效提升韧性规划编制的效率。随着相关技术的发展,人工智能技术在城市大数据深度挖掘方面具较大优势,新技术参与城市分析成为热点趋势。可以通过机器学习算法关联、融合或集成历时、实时的城市风险数据,实现城市模型的自动化构建^[58]。数字赋能韧性空间规划,重点需要关注大数据的应用推广与质量提升,深入进行数据挖掘,实现多源数据的集成,促进人工智能赋能的城市复杂系统的自动化信息处理、文图生成与模型构建,提高韧性规划的效率和质量,实现城市韧性的数字驱动和智能化。

4.2 风险叠加与耦合评估

风险叠加与耦合评估是灾害风险研究的重要发展方向,也是韧性空间规划编制的重要一环。目前规划编制中运用的风险评估技术,由“单灾种评估”“多因素综合”向复杂城市系统的“多风险耦合”转变,构建了灾害风险系统理论、触发关系规则、“压力—状态—响应”框架、多智能体模型在内的多种多风险叠加与耦合评估模型^[17,60-62]。按照评估结果,可以将现有风险评估的编制技术分成两个主要类别:一是多风险等级评估,通过对风险指数进行分级,展现风险的空间分布;二是多风险概率评估,深入分析风险之间的耦合关系,在事件尺度上计算风险的概率与损失。

随着城镇化进程,城市空间系统复杂程度将日益提升,聚焦风险自身而忽

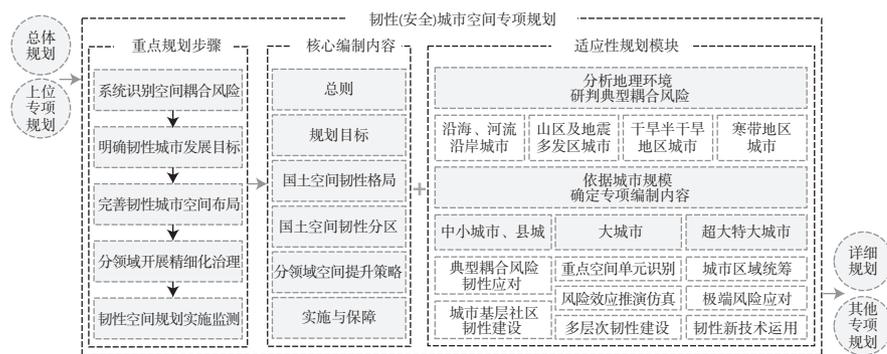


图7 韧性(安全)城市空间专项规划内容初步框架

Fig.7 Framework of specialized planning for resilient urban spaces

略风险关系的评估将不能满足未来城市需求,甚至可能低估实际风险,风险在城市环境中的空间效应的识别与评估有待深入。未来在城市空间多风险耦合评估领域,可以结合遥感技术和更丰富的空间信息,制作高精度的风险地图,识别城市空间的潜在风险点;借助机器学习、深度学习等技术,构建多风险耦合数学模型与城市网络模型,实现更加精细甚至动态的城市空间多风险评估,深入识别风险模式,考察多风险间复杂关系及其形成机理,进一步对国土空间的敏感性与脆弱性进行识别与评价。

4.3 情景推演与模拟仿真

面向多风险耦合的规划编制有必要对城市典型风险展开情景推演,从多种风险数据出发,构建风险的要素系统,判定城市空间多风险耦合的关键情景,通过风险的概率评估构建演化模型,识别空间要素的功能状态。根据风险情景演化规律,可以采用自然语言模型的方法进行知识图谱的建构,展开情景构建,分析多风险过程,提取风险影响因素与空间要素;通过贝叶斯网络、Petri网络、水动力模型等多种方法进行风险过程的时空推演^[63-66],识别潜在灾损空间,评估承险体的空间效应。

对韧性机制的探讨可使用系统动力学方法展开模型构建、系统仿真,获取风险之间的复杂相互作用,剖析多风险耦合下各影响因素之间的复杂关系。未来,城市仿真模拟也可以结合智能化手段,构建城市空间多风险仿真模型,捕捉多风险影响的空间演化阈值效应^[58];

进一步通过虚拟现实、数字孪生等相关技术,探索城市风险与空间规律,开展多情景的多风险耦合的城市模拟,从而筛选提取切实有效的城市韧性政策措施。

4.4 智能规划与实施监测

目前,在规划编制的方案生成、实施与监测的过程中,智能技术开始提供切实有效的支持。规划可以利用遗传算法,模拟自然选择和遗传变异的过程,为韧性空间格局规划制定提供最优解;可以使用智能化图像识别技术分析遥感、物联网设备获取的城市数据,对韧性规划实施过程展开监测,提供空间反馈;可以利用智能化的自然语言处理技术,自动监测并分析风险突发时的社交媒体文本数据,评价韧性规划效果,提供切实的规划实施社会反馈。

在人工智能技术的辅助下,自适应的动态规划成为可能。利用生成式人工智能,规划师能够实现智能化的韧性设计决策与快速高质量的文稿与图像输出^[58,67]。国内学者已经提出深度强化学习技术在城市社区空间规划中的运用方法^[68],实现规划方案动态调整与更新,可以预见,未来将能够面向不确定和变化的城市环境条件,为规划实施提供智能适应性指导。

5 结语

随着城市风险应对进入3.0阶段,应对多风险耦合的城市韧性理论探索有待逐步深入。作为新时代韧性发展的必然趋势,面向常态化多风险耦合的城市规

划是提升城市韧性、促进平灾结合的重要手段。本文从未来城市发展的风险挑战出发,分析了城市空间多风险耦合的研究基础与规划经验,尝试探索应对多风险耦合的城市韧性理论与应用,并从韧性空间规划编制及其技术方向两个方面提出未来韧性空间规划重点关注的三个问题:第一,从风险自身看,需要进一步明确城市内部典型风险特征与规律,重点考察多风险耦合的情形;第二,从风险与城市关系看,需要探索多风险耦合的空间效应与机制,明确城市用地、设施、建筑系统应对多风险的空间效应,从人一地互动关系开展韧性机制研究;第三,从风险与规划的关系看,需要在应对多风险耦合的韧性空间规划中纳入针对特定多风险对象的耦合情景分析,在此基础上采取有针对性的规划与设计。期待本文为风险3.0阶段的韧性安全城市规划与建设提供理论参考与方法指引。

参考文献

- [1] 周姝天, 翟国方, 施益军, 等. 城市自然灾害风险评估研究综述[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 180-186.
- [2] 倪长健, 王杰. 再论自然灾害风险的定义[J]. 灾害学, 2012, 27(3): 1-5.
- [3] 翟国方. 气候变化背景下规划视角的城市雨洪灾害韧性应对: 关键概念、基本思路和通用框架[J]. 城市规划学刊, 2024(1): 29-37.
- [4] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 1-9.
- [5] CARPIGNANO A, GOLIA E, DI MAURO C, et al. A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application[J]. Journal of Risk Research, 2009, 12(3-4): 513-534.
- [6] GALLINA V, TORRESAN S, CRITTO A, et al. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: consequences and challenges for a climate change impact assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 168: 123-132.
- [7] PENDALL R, FOSTER K A, COWELL M. Resilience and regions: building understanding of the metaphor[J]. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 2010, 3(1): 71-84.
- [8] SAARINEN T, HEWITT K, BURTON I. The hazardousness of a place: a regional ecology of damaging events[J]. Geographical Review, 1973, 63: 134.
- [9] KOMENDANTOVA N, MRZYGLOCKI R, MIGNAN A, et al. Multi-hazard and multi-risk decision-support tools as a part of participatory risk governance: feedback from civil protection stakeholders[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2014, 8: 50-67.
- [10] MARZOCCHI W, GARCIA-ARITIZABAL A, GASPARINI P, et al. Basic principles of multi-risk assessment: a case study in Italy[J]. Natural Hazards, 2012, 62(2): 551-573.
- [11] KAPPES M S, KEILER M, VON ELVERFELDT K, et al. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review[J]. Natural Hazards, 2012, 64(2): 1925-1958.
- [12] DE RUITER M C, COUASON A, VAN DEN H, et al. Why we can no longer ignore consecutive disasters[J]. Earth's Future, 2020, 8(3): e2019EF001425.
- [13] TERZI S, TORRESAN S, SCHNEIDERBAUER S, et al. Multi-risk assessment in mountain regions: a review of modelling approaches for climate change adaptation[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 759-771.
- [14] WARD P J, DANIELL J, DUNCAN M, et al. Invited perspectives: a research agenda towards disaster risk management pathways in multi-(hazard-)risk assessment[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2022, 22(4): 1487-1497.
- [15] 何锦屏, 李双双. 多灾种时空耦合网络构建: 从多维网到单点网[J]. 地理研究, 2021, 40(8): 2314-2330.
- [16] 郭睿, 王卿, 张焕, 等. 台风“级联效应”灾害下乡环境的响应机制与营建策略: 基于乐清市虹桥的研究[J]. 城市规划学刊, 2024(2): 110-118.
- [17] 卢颖, 侯云玥, 郭良杰, 等. 沿海城市多灾种耦合危险性评估的初步研究: 以福建泉州为例[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 211-216.
- [18] 魏政长. 风险耦合与级联: 社会新兴风险演化态势的复杂性成因[J]. 学海, 2019(4): 125-134.
- [19] LIU H, WANG J, LIU J, et al. Combined and delayed impacts of epidemics and extreme weather on urban mobility recovery[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 99: 104872.
- [20] ZHANG B, LI X, WANG S. A novel case adaptation method based on an improved integrated genetic algorithm for power grid wind disaster emergencies[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(21): 7812-7824.
- [21] 孔锋. 灾害系统视角下的灾害耦合效应探讨[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 1-5.
- [22] 史培军, 吕丽莉, 汪明, 等. 灾害系统: 灾害群、灾害链、灾害遭遇[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(6): 1-12.
- [23] PESCAROLI G, ALEXANDER D. Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: a holistic framework[J]. Risk Analysis, 2018, 38(11): 2245-2257.
- [24] ZSCHEISCHLER J, WESTRA S, VAN DEN HURK B J J M, et al. Future climate risk from compound events[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(6): 469-477.
- [25] ZSCHEISCHLER J, MARTIUS O, WESTRA S, et al. A typology of compound weather and climate events[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(7): 333-347.
- [26] HAO Z. Compound events and associated impacts in China[J]. iScience, 2022, 25(8): 104689.
- [27] FOLKE C. Resilience: the emergence of a perspective for social - ecological systems analyses[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 253-267.
- [28] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49.
- [29] 邵亦文, 徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析[J]. 国际城市规划, 2015, 30(2): 48-54.
- [30] 颜文涛, 李子豪, 管天语, 等. 空气环境健康导向下的老旧社区生态化更新: 理论框架与案例实践[J]. 城市发展研究, 2022, 29(1): 121-132.
- [31] KONDO T, LIZARRALDE G. Maladaptation, fragmentation, and other secondary effects of centralized post-disaster urban planning: the case of the 2011 “cascading” disaster in Japan[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 58: 102219.
- [32] 曾坚, 左长安. CBD空间规划设计中的防灾减灾策略探析[J]. 建筑学报, 2010(11): 75-79.

- [33] 林展鹏. 高密度城市防灾公园绿地规划研究: 以香港作为研究分析对象[J]. 中国园林, 2008(9): 37-42.
- [34] 薛晔, 刘耀龙, 张涛涛. 耦合灾害风险的形成机理研究[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 44-50.
- [35] 陈伟珂, 张欣. 危化品储运火灾爆炸事故多因素耦合动力学关系[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6): 49-54.
- [36] 李宏男, 李钢, 郑晓伟, 等. 工程结构在多灾害耦合作用下的研究进展[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 1-14.
- [37] ACEMOGLU D, OZDAGLAR A, TAHBAZ-SALEHI A. Systemic risk and stability in financial networks[J]. American Economic Review, 2015, 105(2): 564-608.
- [38] 彭翀, 郭祖源, 彭仲仁. 国外社区韧性的理论与实践进展[J]. 国际城市规划, 2017, 32(4): 60-66.
- [39] 蔡建明, 郭华, 汪德根. 国外弹性城市研究述评[J]. 地理科学进展, 2012, 31(10): 1245-1255.
- [40] ALBERTI M, MARZLUFF J M. Ecological resilience in urban ecosystems: linking urban patterns to human and ecological functions[J]. Urban Ecosystems, 2004, 7(3): 241-265.
- [41] JABAREEN Y. Planning the resilient city: concepts and strategies for coping with climate change and environmental risk[J]. Cities, 2013, 31: 220-229.
- [42] ADGER W N. Social and ecological resilience: are they related?[J]. Progress in Human Geography, 2000, 24(3): 347-364.
- [43] ADGER W N, SAFRA DE CAMPOS R, SIDDIQUI T, et al. Commentary: inequality, precarity and sustainable ecosystems as elements of urban resilience[J]. Urban Studies, 2020, 57(7): 1588-1595.
- [44] 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.
- [45] LOVELL S T, TAYLOR J R. Supplying urban ecosystem services through multifunctional green infrastructure in the United States[J]. Landscape Ecology, 2013, 28(8): 1447-1463.
- [46] MEEROW S, NEWELL J P. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: growing resilience in Detroit[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 159: 62-75.
- [47] MARTIN R, SUNLEY P. On the notion of regional economic resilience: conceptualization and explanation[J]. Journal of Economic Geography, 2015, 15(1): 1-42.
- [48] YANG L, YANG H, ZHAO X, et al. Study on urban resilience from the perspective of the complex adaptive system theory: a case study of the Lanzhou-Xining urban agglomeration[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(20): 13667.
- [49] SIMMIE J, MARTIN R. The economic resilience of regions: towards an evolutionary approach[J]. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 2010, 3(1): 27-43.
- [50] 陈梦远. 国际区域经济韧性研究进展: 基于演化论的理论分析框架介绍[J]. 地理科学进展, 2017, 36(11): 1435-1444.
- [51] XIE W, SUN C, LIN Z. Spatial-temporal evolution of urban form resilience to climate disturbance in adaptive cycle: a case study of Changchun city[J]. Urban Climate, 2023, 49: 101461.
- [52] 郑艳, 翟建青, 武占云, 等. 基于适应性周期的韧性城市分类评价: 以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 31-38.
- [53] 祝锦霞, 潘艺, 张艳彬, 等. 种植类型变化对耕地系统韧性影响的关键阈值研究[J]. 中国土地科学, 2022, 36(4): 49-58.
- [54] FOLKE C, CARPENTER S, WALKER B, et al. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35(1): 557-581.
- [55] 唐海萍, 陈姣, 薛海丽. 生态阈值: 概念、方法与研究展望[J]. 植物生态学报, 2015, 39(9): 932-940.
- [56] 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(3): 19-28.
- [57] 戴慎志, 刘婷婷, 高晓昱, 等. 国土空间防灾减灾规划编制体系与实施机制[J]. 城市规划学刊, 2023(1): 48-53.
- [58] HERZOG O, 潘海啸, 邓智团, 等. 新一代人工智能赋能城市规划: 机遇与挑战[J]. 城市规划学刊, 2023(4): 1-11.
- [59] PENG Z R, LU K F, LIU Y, et al. The pathway of urban planning AI: from planning support to plan-making[J]. Journal of Planning Education and Research, 2023, 0(0): 0739456X231180568.
- [60] 薛晔, 陈报章, 黄崇福, 等. 多灾种综合风险评估软层次模型[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 353-360.
- [61] 牛彦合, 焦胜, 操婷婷, 等. 基于PSR模型的城市多灾种风险评估及规划响应[J]. 城市发展研究, 2022, 29(4): 39-48.
- [62] 王飞, 尹占城, 温家洪. 基于多智能体的自然灾害动态风险评估模型[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(2): 85-88.
- [63] 饶文利, 罗年学. 台风风暴潮情景构建与时空推演[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(2): 187-197.
- [64] 李思宇, 梁达, 韦燕芳, 等. 基于贝叶斯网络的干旱-森林火灾灾害链定量建模研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(1): 38-46.
- [65] 李勇建, 王循庆, 乔晓娇. 基于随机Petri网的震后次生灾害演化模型研究[J]. 运筹与管理, 2014, 23(4): 264-273.
- [66] 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.
- [67] 甘惟, 吴志强, 王元楷, 等. AIGC辅助城市设计的理论模型建构[J]. 城市规划学刊, 2023(2): 12-18.
- [68] ZHENG Y, LIN Y, ZHAO L, et al. Spatial planning of urban communities via deep reinforcement learning[J]. Nature Computational Science, 2023, 3(9): 748-762.