

国内外极端气候下城市韧性研究进展： 概念框架、测度和优化策略

魏宗财，林宇栋，文晓岚，李 琼

【摘 要】频发的极端气候灾害与国家深化气候适应型城市建设试点政策对城市韧性测度及优化策略研究提出了新的方向和要求。基于对国内外关于城市韧性文献的计量分析，将国内外极端气候下的城市韧性研究成果划分为起步探索（2008 年之前）、稳步发展（2009—2019 年）和深度拓展（2020 年至今）3 个阶段，并围绕概念框架、测度方法、规划理论与策略、治理理论与策略等内容，对国内外研究成果进行系统梳理与凝练总结。研究发现，既有成果大多聚焦于极端气候下城市韧性的特征、测度方法、主动与被动规划策略及多主体治理模式等方面。未来研究应重点关注本土化理论体系的建构，推动数智技术赋能下静态指标与动态模型方法的综合使用，顺应国土空间规划等的发展趋势，积极探索中国特色的城市韧性提升路径与方案。研究成果能够为极端气候下城市韧性研究的本土化和数智化发展提供参考。

【关键词】极端气候；城市韧性；国土空间规划；数智技术

【文章编号】1006-0022(2025)07-0010-08 **【中图分类号】**TU981、TU984、X43 **【文献标志码】**A

【引文格式】魏宗财，林宇栋，文晓岚，等. 国内外极端气候下城市韧性研究进展：概念框架、测度和优化策略[J]. 规划师，2025(7): 10-17.

Research Progress on Urban Resilience Under Extreme Climates at Home and Abroad: Conceptual Framework, Measurement and Improvement Strategies/WEI Zongcai, LIN Yudong, WEN Xiaolan, LI Qiong

【Abstract】Frequent extreme climate disasters and the deepening of national pilot policies for climate-adaptive city construction have put forward new directions and requirements for the study of urban resilience measurement and improvement strategies. Based on a quantitative analysis of research articles related to urban resilience, the research progress of urban resilience under extreme climate conditions was divided into three stages: initial exploration (before 2008), steady development (2009—2019), and deep expansion (from 2020 to the present). Then, the research progress of domestic and foreign studies on the conceptual framework, measurement methods, planning theories and strategies, governance theories and strategies was reviewed and summarized. It was found that existing research on urban resilience under extreme climate conditions mainly focused on the conceptual characteristics, measurement methods, proactive and reactive planning strategies, and multi-stakeholder governance models. Future research should focus on constructing a localized theoretical framework, promoting the comprehensive application of static indicators and dynamic model methods empowered by digital and intelligent technologies, and following the development trends of territorial spatial planning to positively explore pathways and solutions for enhancing urban resilience with Chinese characteristics. The findings can provide references for the localization, digitization, and intelligentization of urban resilience research under extreme climate conditions in China.

【Keywords】extreme climate; urban resilience; territorial spatial planning; digital and intelligent technology

0 引 言

21 世纪以来，高温热浪、风暴潮、洪涝、干旱等多种类型的极端气候事件频发^[1]，对全球范围内城市的

影响远超预期，严重威胁人类健康与经济社会的持续发展，而传统的城市防灾减灾理念和规划策略难以提供有效应对方案。2002 年，倡导地区可持续发展国际理事会在联合国可持续发展全球峰会上倡议，将“韧性”

【基金项目】国家自然科学基金资助项目 (42271206)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2024ZYGXZR025)、中央高校基本科研业务费自然科学类—创新团队建设项目 (2024ZYGXZR003)、广州市哲学社科规划 2024 年度课题项目 (2024GZGJ10)

【作者简介】魏宗财，亚热带建筑与城市科学全国重点实验室、华南理工大学建筑学院教授、博士生导师。weizongcai@scut.edu.cn

林宇栋，通信作者，华南理工大学建筑学院硕士研究生。linyudong_scut@outlook.com

文晓岚，华南理工大学建筑学院硕士研究生。

李 琼，亚热带建筑与城市科学全国重点实验室、华南理工大学建筑学院研究员、博士生导师。

概念纳入城市建设与防灾减灾领域^[2]。这一倡议从动态与主动适应的角度为城市应对极端气候灾害的研究提供了新的思路和内容。国内自 2017 年起选取了 28 个城市开展气候适应型城市建设试点，并将韧性城市理念写入“十四五”规划纲要和党的二十大报告。2023 年，生态环境部、财政部等部门联合发布《关于深化气候适应型城市建设试点的通知》，从完善治理体系、优化空间布局等方面对极端气候下的城市韧性提升提出了新的要求。运用城市韧性理念提升城市全面、长期应对极端气候的能力，需深入厘清城市韧性的概念内涵，并对韧性测度的结果与影响机制进行分析，为科学和精准的规划治理策略提供支撑。然而，目前国内的文献研究多关注海平面上升等一般性气候变化和台风等单一极端气候灾害类型，或仅关注经济、基础设施等特定维度韧性^[3]，关于突发性、复合性的极端气候事件对城市韧性的影响尚未明晰，对极端气候下城市韧性成果的系统归纳也相对欠缺。因此，对极端气候情景下城市韧性概念框架、测度方法、规划路径与治理机制进行梳理与总结势在必行。

1 国内外城市韧性研究进展

1.1 研究数据与方法

对 2000 年 1 月至 2025 年 2 月的中英文主要文献进行系统检索和筛选。中文文献选择中国知网 (China National Knowledge Infrastructure, 简称“CNKI”) 核心数据库为检索源，英文文献选择科学引文索引 (Web of Science, 简称“WOS”) 核心合集为检索源。首先，检索城市韧性相关文献：综合考虑概念翻译的语境差异、灾害地域性、治理及政策差异等

因素，以“主题= ‘城市’ and(‘韧性’ or ‘弹性’ or ‘恢复力’ or ‘适应力’ or ‘适应性’ or ‘脆弱性’ or ‘抗毁性’ or ‘抗灾’ or ‘防灾’ or ‘减灾’ or ‘灾害’ or ‘应急管理’)”为条件检索中文文献，共检索到 8440 篇；以“主题= ‘urban’ and (‘resilience’ or ‘vulnerability’ or ‘adaptability’ or ‘robustness’ or ‘green infrastructure’ or ‘preparedness’ or ‘critical infrastructure’ or ‘disaster management’)”为条件检索英文文献，共检索到 37914 篇。在文献检索结果的基础上，进一步筛选极端气候下城市韧性的相关文献：以“主题= ‘气候’ or ‘高温’ or ‘热浪’ or ‘洪涝’ or ‘内涝’ or ‘暴雨’ or ‘雨洪’ or ‘风storm’ or ‘台风’ or ‘干旱’ ”为条件检索中文文献，共筛选出 3119 篇；以“主题= ‘climate’ or ‘extreme weather events’ or ‘microclimates’ or ‘flooding’ or ‘drought’ or ‘adaptation strategies’ or ‘nature-based solutions’ or ‘climatology’ or ‘environmental resilience’ ”为条件检索英文文献，共筛选出 9459 篇。其次，基于文献数据，

探讨 21 世纪以来城市韧性研究的中英文文献数量在时间维度的变化态势，发掘各阶段内极端气候下的城市韧性研究热点及其演变特征，进一步基于总体研究趋势与热点对具体研究内容进行评述。最后，根据国内外研究对比，总结国内相关研究成果存在的不足，并提出研究展望，为极端气候下城市韧性研究的进一步提升提供参考。见图 1。

1.2 研究阶段与热点主题

自 21 世纪以来，关于城市韧性研究的英文文献年均发文量持续增多，呈现出迅猛增长态势；国内相关成果也保持逐年递增趋势，但增长速度较国外缓慢。其中，极端气候下城市韧性研究的中英文文献也呈现出类似的对应关系。根据历年发文数量、相关政策颁布时间和研究关注点的变化，国内外城市韧性的中英文成果可分为起步探索、稳步发展和深度拓展 3 个阶段。使用 CiteSpace 软件分别对这 3 个阶段内极端气候下的城市韧性相关文献进行关键词共现分析，将时间切片设为一年，得到各阶段国内外城市韧性研究的核心关键词。见图 2。

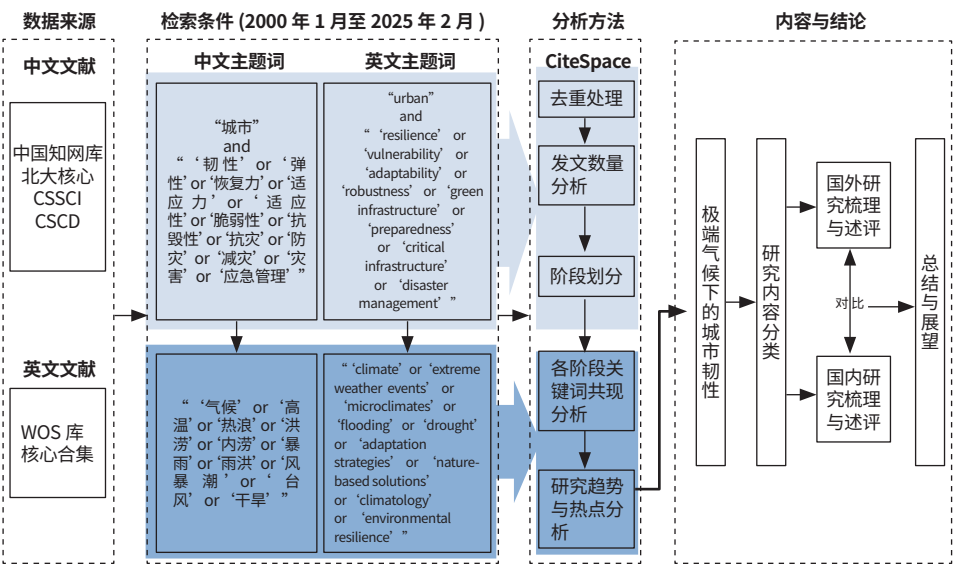


图 1 研究框架

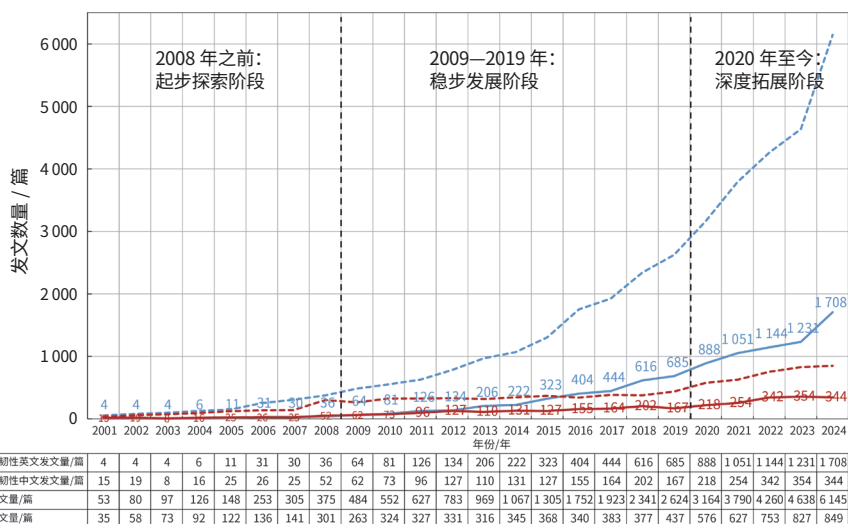


图2 国内外关于城市韧性研究的发文量时间分布

1.2.1 起步探索阶段(2008 年之前)

21 世纪初,国外城市韧性研究尚处于起步探索阶段,主要围绕城市韧性与脆弱性等概念展开讨论。在这一时期,研究较多关注干旱、高温热浪等极端气候下的城市韧性。2005 年,联合国减灾行动纲领提出要“应对气候变化的影响”。此后,极端气候下城市韧性研究的热度开始攀升,并以极端气候灾害对城市的影响研究为主,尤其关注气候变化下的城市脆弱性特征。此外,早期研究多以美国城市为研究案例,重点关注高温、空气污染等对城市的影响。

国内研究同样处于起步探索阶段,但研究进度滞后,多以被动的减灾防灾为导向。早期研究多沿用“减灾”“防灾”等传统术语,关注极端气候灾害本身,而对极端气候下城市韧性的关注较少。这一时期的研究呈现出被动应对的特征,即通过物理防御和危机管理,从工程视角提出降低灾害损失的对策。此外,1998 年特大洪水等极端气候事件的发生,使得洪涝、暴雨等灾害类型受到较大关注。在研究方法上,有学者开始尝试构建指标体系,对城市应对极端气

候灾害的能力进行测度^[4]。

1.2.2 稳步发展阶段(2009—2019 年)

在此阶段,国外针对极端气候影响下城市韧性的相关研究明显增多,研究视角不断丰富,气候变化适应性被正式提及且受到较高关注^[5]。研究聚焦于城市系统在气候变化下的风险适应能力分析,所构建的影响因素框架更加系统,涉及极端气候对城市生态、社会等多维度韧性的影响探讨。与此同时,关于极端气候下城市韧性提升策略的研究开始增多,涵盖城市规划、风险管理与公共政策等领域。此外,研究尺度不再局限于城市,基于社区尺度的研究同样受到了较多关注。

国内相关研究在这一阶段同样稳步推进,研究重点从工程思维主导的防灾减灾转向系统的城市韧性探讨。学者们开始探究城市在面对极端气候灾害时的脆弱性和适应性,气候变化成为该时期研究的关注重点之一^[6]。同时,随着特大暴雨灾害在上海、北京、广州等城市频发,有较多研究从城市尺度对洪涝灾害下的城市韧性规划和管理路径提出见解^[7],呈现本土化探索的特征。在研究方法上,

定量测度研究增多,基于指标体系的城市韧性测度成为主要探讨的内容。

1.2.3 深度拓展阶段(2020 年至今)

在此阶段,国外学术界对城市韧性维度的研究得到进一步拓展,涵盖社会、经济、生态、基础设施和制度等多个方面。相关研究以极端气候事件对城市的影响与气候变化适应性为主题,研究重心从宏观层面的理论讨论转向具体的气候适应性策略分析,聚焦于小尺度且精细化的分析视角。同时,学术界对“绿色基础设施”(Green Infrastructure,简称“GI”)、

“基于自然的解决方案”(Nature-based Solutions,简称“NbS”)等主动适应性策略的关注度显著增加。此外,研究更加关注极端气候事件对城市多维度的影响以及对居民生命健康造成的危害,对极端气候下的城市韧性测度也更为重视。

2020 年,党的十九届五中全会首次将“韧性城市”写入国家政策文件。此后,城市韧性概念框架也相应得到了多维拓展,覆盖生态、经济、社会等多个维度。国内针对极端气候事件的城市韧性测度研究大量涌现,研究视角趋于多元化,研究尺度也不再仅仅聚焦于城市,而是拓展至区域、社区等多个尺度。此外,还有学者针对沿海城市等不同城市类型展开了针对性探讨^[3, 8]。

1.2.4 小结

综上所述,国内外在极端气候下的城市韧性研究经历了起步探索、稳步发展和深度拓展 3 个阶段,内容主要围绕概念框架、测度方法、规划理论与策略、治理理论与策略 4 个方面展开。国外在各个阶段的相关研究成果分别呈现出理论探讨深化、议题多元化和分析精细化的特点。在起步探索阶段,国外学者已开始引入“韧性”(resilience)概念,对于“气候变化”(climate change)较为关

注, 聚焦于“干旱”(drought)、“高温热浪”(heat wave, heat stress)等极端气候类型。进入稳步发展阶段, 国外学者开始关注多类型极端气候灾害对城市的“影响”(impact), 且关注生态系统和规划管理等对城市韧性的提升作用。在深度拓展阶段, 国外研究更侧重基于精细化分析的气候适应性策略探索, GI、NbS等成为该阶段的热点词汇。

国内在极端气候下, 城市韧性研究在各阶段所取得的成果分别呈现出传统工程导向、路径本土化和视角多元化的特征。在起步探索阶段, 国内学者聚焦于洪涝、暴雨等极端气候灾害的应对与风险管理, 多从传统工程视角出发提出问题并给出对策, “防灾”“减灾”等传统术语的使用频次较高。进入稳步发展阶段后, 研究重点开始由传统的防灾减灾逐步转向系统的城市韧性, 针对极端气候下的城市韧性规划和治理路径展开了本土化探索, “韧性城市”“应急管理”等成为热点词汇。到了深度拓展阶段, 研究视角开始趋向多元化。一方面, 城市韧性研究范畴开始拓展至生态、社会、经济、基础设施等多个维度; 另一方面, “社区韧性”“黄河流域”等成为新的热点关键词。

2 国内外极端气候下城市韧性的主要研究内容

2.1 城市韧性概念框架

国外的研究成果经历了从脆弱性到城市韧性的研究范式转型, 逐渐建构形成较为系统的应对极端气候的城市韧性概念框架。早期研究围绕脆弱性概念展开, 强调极端气候下城市灾前的固有特征及易损程度。相较而言, 韧性概念更侧重于城市响应极端气候事件并从中恢

复的动态适应能力, 包括城市灾中应对灾害的能力以及灾后学习以应对新威胁的能力^[9-10]。有学者提出地区抗灾韧性概念框架, 分别用准备性、吸收性、恢复性和适应性来表征城市在灾前、灾中和灾后的韧性特征^[9]。在此基础上, 有学者围绕飓风、洪水、高温热浪等气候灾害, 提出气候灾害韧性概念框架, 强调城市在灾后动态重组以应对新一轮灾害的转化性特征^[10], 进一步丰富了城市韧性概念框架。总而言之, 国外研究倾向于将极端气候纳入多灾害的综合韧性概念框架, 而非构建独立的理论体系。

在借鉴国外研究成果的基础上, 国内学者针对极端气候下城市韧性概念框架展开了积极探索。早期, 学者们围绕减灾、防灾等概念, 针对洪涝等灾害开展城市韧性研究。随着极端气候灾害复杂性加剧, 降低城市脆弱性成为研究焦点^[11]。参考国外脆弱性概念框架, 学者们从社会、经济和生态维度出发, 提出干旱、高温等单一极端气候下城市脆弱性概念框架^[12]。引入韧性概念后, 国内研究主要对国外与极端气候相关的既有城市韧性概念框架进行总结与借鉴, 并针对洪涝、高温等本土常见的极端气候灾害类型下的城市韧性概念框架开展适

用性探索^[13-14]。然而, 目前国内对于多气候灾害下城市韧性概念框架的本土化探讨仍较为薄弱。

2.2 城市韧性测度方法

城市韧性测度是精准应对极端气候的重要环节。当前, 国内外均已构建了极端气候下城市韧性测度指标体系(图3)。

国外对于极端气候下城市韧性的测度方法主要包括基于静态指标的测度方法和基于动态模型的测度方法。其中, 基于静态指标的测度方法因具备较高的综合性和实用性而被广泛应用^[9]。相关研究通常从自然、经济、社会、物理和制度维度出发, 构建囊括城市韧性通用性指标与极端气候下针对性指标的指标体系, 并使用主成分分析和熵权法等方法测度城市韧性^[10]。其中, 极端气候下针对性指标包括特定极端气候的强度与频率、特定受灾人群、特定的市政与基础设施等^[15]。随着对极端气候灾害跨尺度特征认知的深化, 学者们开展了囊括社区、城市和区域等多尺度的韧性测度研究^[16]。然而, 基于静态指标的测度方法难以评估韧性的动态变化过程, 且忽视了社会、经济和基础设施等维度间存在的相互依赖性^[17-18], 故需要借助动态

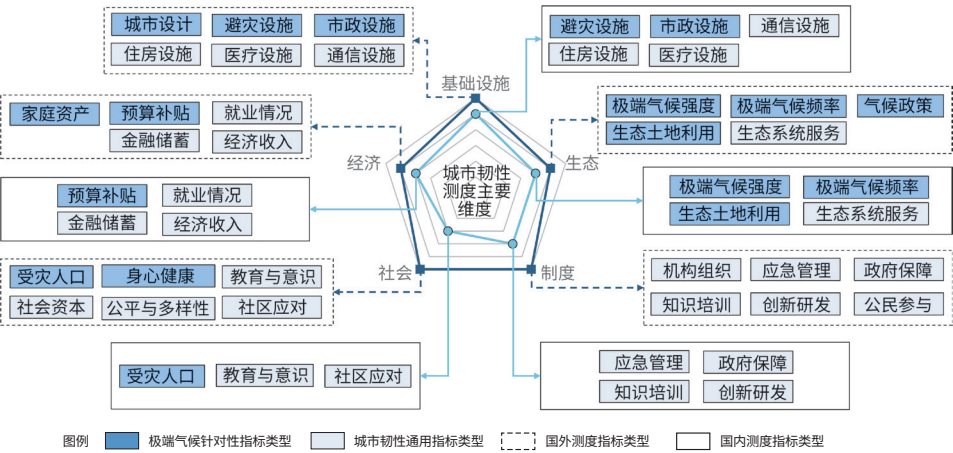


图3 国内外极端气候下城市韧性测度指标体系

模型的测度方法加以补充。有学者使用系统动力学模型，探讨极端气候下城市各系统的相互依赖关系，进而对城市韧性进行预测^[17]。也有学者主张把握大数据兴起的机遇，构建数据驱动的复杂系统模型，探讨城市韧性的动态变化轨迹^[18]。此外，还有学者关注到多种气候灾害间复杂的相互作用、触发和耦合关系，探索多灾害复合作用下城市韧性测度模型的构建^[19]。

与国外相似，国内极端气候下的城市韧性测度也主要包括基于静态指标的测度方法和基于动态模型的测度方法。学者们聚焦国内常见的洪涝、高温热浪等极端气候事件，从自然、经济、社会、基础设施和制度等维度出发，使用基于静态指标的测度方法，对社区、城市至区域等空间尺度的韧性水平进行评估。相较于国外，国内城市韧性研究在基础设施、经济和生态等维度的相关指标选取方面已较为成熟，但对于公民参与、机构组织等制度维度的指标，以及身心健康、公平与多样性等社会维度的指标探讨仍较为欠缺^[13-14]。此外，尽管有学者基于静态指标对洪水、风灾等灾害影响下的城市韧性进行测度^[20]，但对于关联灾害之间的相互关系，仍有待进一步深入研究。在基于动态模型的韧性测度方法研究方面，国内有学者使用系统动力学模型，揭示了城市洪涝韧性系统各要素间的交互关系，并对城市韧性进行了仿真模拟与预测^[21]，不过目前仍较少涉及多气候灾害叠加下城市韧性的动态演变过程及预测研究。

2.3 面向城市韧性提升的规划：理论与策略

国外针对极端气候下城市韧性提升的规划理论和策略研究主要从被动防灾

与主动适应两方面展开。在被动防灾领域，有学者强调极端气候跨区域、跨尺度的规模影响与级联效应，进而探讨了城市基础设施、交通网络和建筑形态等不同尺度空间要素在极端气候下的应灾机制，提出多尺度空间形态优化策略，特别是将宏观尺度的韧性基础设施体系建设、中观尺度的城市空间结构优化与微观尺度的建筑形态构建视为被动防灾的关键路径^[22-23]。然而，实证研究表明，此类依赖城市空间形态和灰色基础设施的刚性防灾体系存在明显局限，难以有效应对突发极端气候灾害事件^[24]。

鉴于此，国外针对极端气候下城市韧性的研究重心正逐步转向主动适应的规划理论与策略。其中，NbS 因具备生态调节与气候适应双重功能，成为西方城市韧性研究领域的热点。学者们阐述了 NbS 在水文调控、热环境缓解等方面的作用机制，并分析了其在降低高温热浪和洪涝等极端气候灾害风险方面的成本效益^[25]。此外，还有研究从多尺度视角提出了 NbS 的规划路径，强调通过蓝绿网络系统整合、绿色屋顶技术等多尺度策略协同，实现城市的主动适应以及韧性的系统提升^[26]。见图 4。

与国外类似，国内极端气候下的城

市韧性规划理论与策略研究也包括被动防灾与主动适应两类应对方式。早期成果以工程防御思维研究为主，主张通过城市防灾设施布局与应急资源的优化配置构建刚性防御体系。然而，传统防灾规划体系研究大多基于城市尺度展开，城市群或区域尺度的研究相对较少，难以实现大规模极端气候灾害的区域协同应对^[27-28]。随着 NbS 理念的引入，国内逐步开展了主动适应规划研究。有学者从生态网络整体构建、生态适应与防灾工程融合等角度出发，提出主动适应的韧性规划策略^[8]；也有学者提出以“生态系统解译—风险评估—城市规划—规划效果评估”为分析主线的规划策略，突出基础设施的平灾结合功能^[27]。然而，国内对主动适应规划的研究起步较晚，仍以国际经验借鉴为主，在 NbS 作用机制、成本效益分析等方面尚未形成系统的本土化理论，且存在工程化路径依赖、适应性不足等实践瓶颈^[28]。

随着国土空间规划体系变革的深化，国内学术界开始探索多层级国土空间规划应对极端气候的路径。在总体规划层面，有学者主张将应对气候变化的韧性防灾理念融入规划架构^[29]，也有学者认为韧性城市规划应与总体规划并行编制，

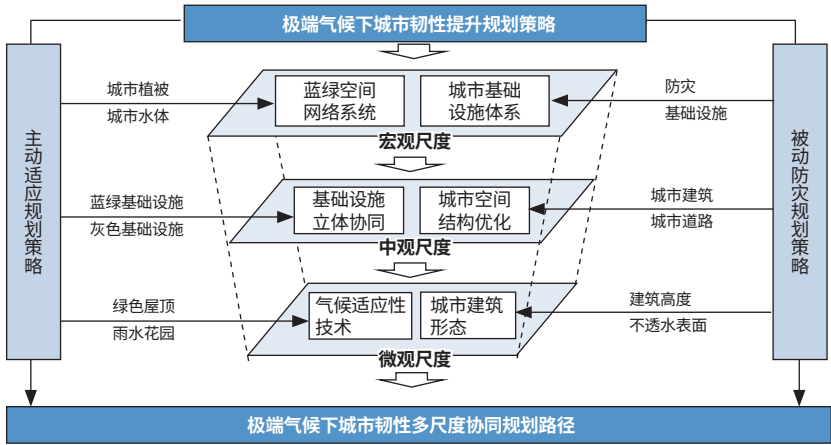


图 4 极端气候下国外面向城市韧性提升的多尺度协同规划策略

两者相互支撑^[30]。此外,学者们还提出气候韧性专项规划框架,通过整合洪涝等极端气候灾害防控的子系统规划,形成多目标协同的规划方案^[29-30]。在详细规划层面,有研究强调通过场地开发管控与建筑形态优化等措施,提升对极端气候灾害的适应能力^[31]。然而,也有研究指出,当前国土空间规划仍存在一些亟待解决的瓶颈问题,如与气候风险评估脱节,相应的规划理论与技术基础薄弱,等等^[32]。同时,各层级韧性规划之间的纵向传导路径和横向衔接机制也有待进一步深入探讨。

2.4 面向城市韧性提升的治理:理论与策略

国外在极端气候下的城市韧性治理策略研究方面,强调治理主体的多元化与治理过程的周期化,并对多主体间的协调机制等内容展开理论与策略探讨。国外学者构建了气候变化背景下的多主体伙伴关系理论框架,提出应构建由政府主导、社会组织引导、市场驱动和公众参与共同构成的多元主体协调的城市韧性治理机制^[33]。也有学者主张,政府可通过政策制定或财政激励,强化其与企业、在灾后资金筹集等方面的协作,并提高市民与社会组织在气候治理体系中的参与度,以提升应对极端气候灾害相关决策的适配性^[34-35]。另外,还有学者基于不同的受灾阶段,提出“预防—准备—响应—恢复”的全流程治理策略^[36]。

国内在极端气候下的城市韧性治理研究方面则呈现出明显的政府主导特征,同时也围绕多主体共治与全流程治理展开初步探讨。政府主导下的城市韧性治理研究主要围绕制度体系完善、城市试点政策等方面推进。在制度体系方面,有学者通过解构气候韧性治理的理论体

系,主张健全包括极端气候在内的气候变化监测与评估体系,建立多部门联动的灾害应急机制^[37]。也有学者指出,当前试点政策仍存在技术和数据储备不足、跨部门协作机制不健全等阻碍^[38]。此外,尽管有一些学者提出了多主体气候共治、全流程治理模式构建设想,初步明确了政府主导下各治理主体的定位与职责^[39],但极端气候下各主体间的本土化协同机制研究仍相对较少,且对灾后治理策略的探讨尚显不足。

3 极端气候下城市韧性研究评述和未来展望

3.1 研究现状总结

根据极端气候下城市韧性研究成果的发文数量和关注热点,可将国内外相关研究划分为起步探索、稳步发展和深度拓展3个阶段。在起步探索阶段,国外较早开始了对城市韧性概念的探索,对气候变化下的韧性水平较为关注,而国内研究则聚焦于传统工程导向下的减灾防灾研究;在稳步发展阶段,国外城市韧性研究转向多类型极端气候灾害的探讨,而国内在引入韧性概念后,逐步针对常见的气候灾害开展韧性提升的本土化探索;在深度拓展阶段,国外学者更关注气候适应性的精细化策略研究,而国内研究在视角与尺度上呈现多元化趋势,但对NbS等国际热点议题的本土化讨论仍不充分。

国内外针对极端气候下城市韧性的研究成果,重点围绕概念框架、测度方法、规划理论与策略、治理理论与策略4个方面展开。在概念框架方面,国外城市韧性研究范式经历了从特征描述向框架构建的转变,而国内研究的城市韧性概念框架则大多在综合防灾与脆弱性的

基础上,对国外既有成果进行借鉴。在测度方法上,国内外研究多使用基于静态指标的方法来测度极端气候下的城市韧性。不过,学术界已就测度方法革新的必要性达成共识,并开展了城市韧性测度动态化和模型化探索^[18-20],以增强对极端气候下城市韧性动态过程的研究与预测能力。在规划理论与策略方面,国内外研究均意识到被动防灾策略的局限性,因而倡导推动主动适应策略研究。国外研究从被动防灾和主动适应两方面出发,提出韧性提升的宏观—中观—微观多尺度协同策略;国内研究则多基于城市尺度展开,对气候变化下的城市韧性理念融入国土空间规划体系的路径展开了初步探索。在治理理论与策略方面,国外研究强调多主体协同参与和全流程治理,而国内研究则呈现显著的政府主导特征,聚焦于制度与政策的制定和成效研究,在治理主体和治理流程方面的研究还有待深化。

3.2 研究展望

与国外研究相比,国内既有成果在本土化理论构建、测度方法运用和实践创新等方面的探索仍显不足。人工智能、数字孪生、物联网等新兴数智技术的快速发展正重塑着极端气候下城市韧性的研究范式和应对策略,也为该领域的研究提供了新的方向、拓展了新的内容^[40]。未来研究需要综合考虑国家政策要求、极端气候特征及其对城市韧性的影响,从以下3个方面持续推进。

首先,立足于中国国情,强化本土化的城市韧性理论探讨。当前,国内相关研究仍以借鉴国外理论为主,尚未凝练出本土化的城市韧性理论体系。与欧美发达国家不同,中国的极端气候灾害具有显著的多样性、地域性特征,在独

特的气候分区与快速城镇化进程下,需要发掘和凝练总结出符合本国国情的、应对极端气候灾害的城市韧性“答案”。国内既有的单一极端气候研究成果难以回应多种极端气候灾害的连锁效应,也难以支撑多灾害下的城市韧性理论体系构建^[20]。未来研究应立足于中国不同地区特有的极端气候灾害,深入探究多灾害的相互作用机制及其对城市韧性的影响,并对西方主动适应规划理论进行本土适应性讨论。同时,要将适应气候变化的城市韧性研究深度融入“五级三类”的国土空间规划体系^[33],丰富和完善应对极端气候的跨区域、多层级、多灾种韧性国土空间规划理论框架。此外,鉴于中国城市韧性治理呈现出显著的政府主导特征,在极端气候事件中体现出较强的资源整合和调度能力^[39],后续研究应突破对西方多元参与理论的简单借鉴,积极探索建构本土化的多主体协同治理模型和机制。

其次,需推动数智技术赋能下基于静态指标与动态模型的城市韧性测度方法的综合使用和优化,提高极端气候下城市韧性测度的及时性和准确性。面对日渐复杂多变的极端气候事件,传统基于静态指标的测度方法在刻画多灾害叠加下的城市韧性动态变化方面存在局限,故需充分重视基于动态模型的城市韧性测度方法。此外,大数据、人工智能、数字孪生等数智技术的迅猛发展,为极端气候下城市韧性测度提供了新手段。未来研究需积极探讨如何完善应对极端气候灾害的多要素、长时序监测体系,结合人工智能技术开展多尺度、精细化的气候数据解译以及多模态受灾信息分析,开发面向多灾种的城市韧性动态测度模型,进而推动基于静态指标与动态模型的城市韧性测度方法的结合和优化。

最后,应推动极端气候下城市韧性规划与治理的实践创新,探索实操性强的城市韧性提升路径与方案。中国幅员辽阔,极端气候灾害类型存在明显的地域性差异,且其影响范围呈现跨区域特征。然而,国内目前的规划策略研究主要基于城市尺度展开,且聚焦于被动防灾规划策略。未来,应充分考虑极端气候灾害的地域性差异,识别高风险区,制作气候风险地图,完善主动适应与被动防灾规划策略的协同路径。同时,可构建基于大语言模型等技术的城市韧性本地化知识库和专家知识图谱,辅助规划方案的生成与深化,进而开发协同共享模型以优化规划流程,推动国土空间韧性提升过程中的跨部门协作。此外,鉴于当前城市韧性提升的治理实践研究大多集中于政府主导下的策略探讨,对极端气候灾后治理的关注也相对较少,未来研究要立足于实践,进一步创新和优化多主体参与流程及模式,探索构建覆盖“灾前—灾中—灾后”全流程的智慧协同治理平台,通过信息共享、方案审查和决策辅助,助推更具实操性的城市韧性提升的规划与治理方案的探索。

综上所述,未来极端气候下的城市韧性研究应立足于国内现存问题,借鉴国际经验,锚定国家政策导向开展本土化理论探讨。同时,积极推动静态指标与动态模型相结合的城市韧性测度方法的优化,并顺应国家治理体系和治理能力现代化的发展态势,探索符合国情的城市韧性提升路径,从而为全球应对极端气候的城市韧性规划和治理研究提供中国方案。■

[参考文献]

[1] BURTON C G. A validation of metrics for community resilience to natural hazards

and disasters using the recovery from Hurricane Katrina as a case study[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2015(1): 67-86.

- [2] 翟国方, 夏陈红. 我国韧性国土空间建设的战略重点[J]. 城市规划, 2021(2): 44-48.
- [3] 费伟, 王莹, 吴吉东, 等. 气候变化背景下的沿海城市台风灾害韧性研究进展[J]. 灾害学, 2025(2): 133-137.
- [4] 张风华, 谢礼立. 城市防震减灾能力评估研究[J]. 自然灾害学报, 2001(4): 57-64.
- [5] BROWN D. Making the linkages between climate change adaptation and spatial planning in Malawi[J]. Environmental Science and Policy, 2011(8): 940-949.
- [6] 李彤玥. 韧性城市研究新进展[J]. 国际城市规划, 2017(5): 15-25.
- [7] 王祥荣, 谢玉静, 徐艺扬, 等. 气候变化与韧性城市发展对策研究[J]. 上海城市规划, 2016(1): 26-31.
- [8] 宫清华, 叶玉瑶, 王钧, 等. 粤港澳大湾区防灾韧性空间规划策略研究[J]. 规划师, 2021(3): 22-27.
- [9] CUTTER S L, BARNES L, BERRY M, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. Global Environmental Change, 2008(4): 598-606.
- [10] TONG P. Characteristics, dimensions and methods of current assessment for urban resilience to climate-related disasters: a systematic review of the literature[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 60: 102276.
- [11] 方创琳, 王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征[J]. 地理学报, 2015(2): 234-247.
- [12] 杨林川, 杨皓森, 范强雪, 等. 大城市高温热浪脆弱性评价及规划应对研究: 以成都市为例[J]. 规划师, 2023(2): 38-45.
- [13] 杨晓, 鲁爽, 许险峰, 等. 城市雨洪脆弱性与韧性评估及适灾性优化策略: 以广州市为例[J]. 规划师, 2024(10): 41-49.

- [14] 陈天, 刘君男. 粤港澳大湾区高温灾害韧性评估与提升策略[J]. 上海城市规划, 2023(1): 9-17.
- [15] JONAS J, RAJIB S, YUKIKO T, et al. The adoption of a climate disaster resilience index in Chennai, India[J]. Disasters, 2014(3): 540-561.
- [16] SPAANS M, WATERHOUT B. Building up resilience in cities worldwide-rotterdam as participant in the 100 resilient cities programme[J]. Cities, 2016, 61: 109-116.
- [17] KLAMMLER H, RAO C S P, HATFIELD K. Modeling dynamic resilience in coupled technological-social systems subjected to stochastic disturbance regimes[J]. Environment Systems & Decisions, 2018(1): 140-159.
- [18] YABE T, RAO C S P, UKKUSURI V S, et al. Toward data-driven, dynamical complex systems approaches to disaster resilience[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2022(8): 1-7.
- [19] PUTRI D A, ARIYANINGSIH, RAJIB S. Community disaster resilience using multi-hazard assessment during Covid-19: the case of Denpasar, Indonesia[J]. Natural Hazards Research, 2023(3): 572-582.
- [20] 胡雨晨, 张梦琳, 毛义华, 等. 基于多灾害的城市韧性评估及应用研究[J]. 城市发展研究, 2024(2): 35-43.
- [21] 黄晶, 余靖雯, 袁晓梅, 等. 基于系统动力学的城市洪涝韧性仿真研究: 以南京市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2020(11): 2519-2529.
- [22] BRODY S, KIM H, Gunn J. Examining the impacts of development patterns on flooding on the Gulf of Mexico coast[J]. Urban Studies, 2013, 50: 789-806.
- [23] WIRIYA P, STEFAN G, JOERN B. Framework for collaborative local climate adaptation scenario development-nexus between climate resilience, public health service and spatial planning[J]. International Journal of Climate Change Strategies and Management, 2024(17): 311-332.
- [24] YAELLA D, TIMON M. Integrating the grey, green, and blue in cities: Nature-based Solutions for climate change adaptation and risk reduction[M]// NADJAK, HORST K, JUTTA S, et al. (eds), Nature-based Solutions to climate change adaptation in urban areas: linkages between science, policy and practice. Cham: Springer Cham, 2017: 91-109.
- [25] FERRARIO F, MOURATO J M, RODRIGUES M S, et al. Evaluating Nature-based Solutions as urban resilience and climate adaptation tools: a meta-analysis of their benefits on heatwaves and floods[J]. Science of the Total Environment, 2024, 950: 175179.
- [26] PAULEIT S, LIU L, AHERN J, et al. Multifunctional green infrastructure planning to promote ecological services in the city[M]// JARI N, JURGEN H B, THOMAS E, et al. (eds), Urban ecology: patterns, processes, and applications. Oxford: Oxford University Press, 2011: 272-285.
- [27] 戴伟, 孟梦, 卢培骏. 基于自然解决方案的滨海城市雨洪规划策略研究[J]. 城市规划, 2023(8): 66-78.
- [28] 张钰佳, 翟国方, 鲁钰雯. 融入基于自然的解决方案的社区韧性规划历程与实践: 美国的经验与启示[J]. 国际城市规划, 2025(3): 96-104.
- [29] 曾穗平, 王琦琦, 田健. 应对气候变化的韧性国土空间规划理论框架与规划响应研究[J]. 规划师, 2023(2): 21-29.
- [30] 陈智乾, 胡剑双, 王华伟. 韧性城市规划理念融入国土空间规划体系的思考[J]. 规划师, 2021(1): 72-76, 92.
- [31] 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.
- [32] 王凯, 蒋国翔, 罗彦, 等. 适应气候变化的国土空间规划应对总体思路研究[J]. 规划师, 2023(2): 5-10.
- [33] BULMER E, YÁÑEZ-ARAQUE B. Tackling climate change through multi-stakeholder partnerships: promoting SDG 17 to combat climate change[J]. Energies, 2023(9): 3777.
- [34] HUSTON S, RAHIMZAD R, PARSA A. "Smart" sustainable urban regeneration: institutions, quality and financial innovation[J]. Cities, 2015, 48: 66-75.
- [35] TOM H O, PROSPER B, JEFF D C, et al. Empowering citizen-led adaptation to systemic climate change risks[J]. Nature Climate Change, 2023(7): 671-678.
- [36] FASTIGGI M, MEEROW S, MILLER T R. Governing urban resilience: organisational structures and coordination strategies in 20 North American city governments[J]. Urban Studies, 2021(6): 1262-1285.
- [37] 王江, 许婷. 中国气候治理的韧性转型与展望[J]. 环境保护, 2024(增刊 1): 48-53.
- [38] 付琳, 曹颖, 杨秀. 国家气候适应型城市建设试点的进展分析与政策建议[J]. 气候变化研究进展, 2020(6): 770-774.
- [39] 苗婷婷, 单菁菁. 城市韧性的基本模式及本土化构建[J]. 城市问题, 2023(5): 24-33.
- [40] 周素红, 赖鹏程. 社会 5.0 背景下的城市安全韧性与国土空间智慧治理[J]. 规划师, 2023(3): 5-12.
- [收稿日期]2025-05-12;
[修回日期]2025-06-08