

气候变化背景下城市基础设施的安全韧性建构 与文化意蕴

程洪伟, 颜钦涵

中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120

DOI:10.61369/ADA.2026010008

摘 要 : 全球气候系统失衡引发极端天气事件频发,对城市基础设施安全构成严峻挑战。文章聚焦气候变化语境下城市基础设施安全韧性的理论内涵与建构路径,深入剖析其多维价值体系中的文化意蕴。通过解构韧性核心要素,融合工程技术与人文关怀,提出以“适应性协同”为核心理念的韧性提升框架,并创新引入文化韧性评估模型,强调历史经验传承、空间场所精神与社区参与意识在风险应对中的关键作用。研究表明,将文化基因植入基础设施全生命周期,可显著提升系统抗逆力与社会认同,为城市可持续发展提供新参考。

关 键 词 : 气候变化; 城市基础设施; 安全韧性; 建构; 文化意蕴

The Construction of Safety Resilience and Cultural Implications of Urban Infrastructure in the Context of Climate Change

Cheng Hongwei, Yan Yihan

China Urban Construction Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120

Abstract : The imbalance of the global climate system has led to frequent occurrence of extreme weather events, posing a severe challenge to the safety of urban infrastructure. This article focuses on the theoretical connotation and construction path of the resilience of urban infrastructure in the context of climate change, and deeply analyzes the cultural implications within its multi-dimensional value system. By deconstructing the core elements of resilience and integrating engineering technology with humanistic care, a resilience enhancement framework centered on the concept of "adaptive synergy" is proposed, and a cultural resilience assessment model is innovatively introduced. It emphasizes the crucial role of historical experience inheritance, spatial place spirit, and community participation awareness in risk response. Research shows that embedding cultural genes in the entire life cycle of infrastructure can significantly enhance the system's resilience and social recognition, providing new references for urban sustainable development.

Keywords : climate change; urban infrastructure; safety resilience; construction; cultural implications

引言

地球系统正经历以变暖为显著特征的深刻变革,大气环流异常导致暴雨洪涝、高温热浪、干旱风暴等极端事件强度与频率同步增加^[1]。作为人口与经济活动的核心载体,城市面临日益复杂的风险叠加效应。基础设施作为维系城市生命线的物质骨架,其失效可能引发级联灾难,造成难以估量的社会经济损失。传统“抵御-恢复”的被动防御模式已显局限,亟需向具备动态适应能力的韧性系统转型。这一转型不仅是技术升级过程,更是深植于地方文脉的文化重构实践,关乎城市文明存续的根本命题。

一、城市基础设施韧性理论的多维解构与演进脉络

(一) 概念与发展阶段

韧性(Resilience)理论的源头可追溯至20世纪70年代生态学领域,加拿大生态学家霍林(Holling)首次将其定义为“系

统吸收扰动并维持核心功能的能力”,突破了传统“稳定平衡”的认知框架,强调系统在动态变化中的适应潜力^[2]。随着研究向城市复杂系统延伸,韧性内涵逐渐分化出三重维度:工程韧性聚焦物理设施的鲁棒性,如建筑抗震标准、排水管网冗余设计,以“抵御冲击”为核心;生态韧性关注自然-人工复合系统的自我修

作者简介:

程洪伟(1991.10-),男,北京市西城区人,汉族,中级工程师,硕士研究生,城市更新、景观设计;

颜钦涵(1995.03-),男,浙江宁波人,汉族,助理工程师,本科,生态研究。

复，如湿地调蓄洪水、植被固土保水等自然机制的利用；演进韧性则强调社会系统的学习与转型能力，通过制度创新、技术迭代应对未知风险，如社区参与式规划、弹性政策调整。三者共同构成理解城市韧性的基础坐标。

当前研究已从单一维度分析转向“技术-制度-文化”协同的整合框架，认为现代城市韧性需突破“重硬轻软”的传统思维。工程韧性提供物质基础，但若缺乏制度保障（如跨部门应急协调机制）和文化支撑（如公众风险意识），其效能将大打折扣；生态韧性强调自然与人工的耦合，如蓝绿基础设施替代纯灰色工程，既降低能耗又提升景观价值；演进韧性则通过文化基因（如历史防灾智慧、社区自组织传统）激活社会内生动力，使韧性从“外部强加”转为“内在生长”^[3]。这种整合视角下，城市不再是孤立的“防御机器”，而是能动态学习、持续适应的“生命有机体”，为应对气候变化的长期挑战提供了更立体的理论支撑。

（二）韧性核心要素解析

冗余性（Redundancy）关键功能多重备份设计，如双回路供电、备用交通廊道。其价值函数可表示为下式（1）：

$$R = \sum_{i=1}^n (1 - P_i) \cdot C_i \quad (1)$$

其中 R 为系统可靠度， P_i 为第 i 子系统故障概率， C_i 为其重要系数。

快速性（Rapidity）灾中响应与灾后恢复效率，受资源调度能力与组织流程影响；适应性（Adaptability）通过反馈机制持续优化系统参数，如根据气候模型调整雨洪管理策略；转型性（Transformability）突破路径依赖进行根本性变革，如从灰色基础设施转向蓝绿灰结合模式

二、安全韧性建构的技术路径

（一）多尺度空间干预策略

面对气候变化下城市风险的多尺度叠加特征，单一空间维度的干预往往顾此失彼，亟需构建覆盖“区域-城区-场地”的分层应对体系。多尺度空间干预策略以系统思维统筹不同空间层级的脆弱性与功能定位，通过差异化的目标导向形成韧性防护网络：宏观层面锚定生态本底安全，中观层面聚焦风险精准管控，微观层面优化人居环境微生态^[4]。这种“自上而下”与“自下而上”结合的思路，使基础设施韧性从抽象概念落地为可操作的空间行动。以下表格具体呈现各层级的核心干预方向与典型措施，清晰勾勒多尺度协同的实践路径。具体见下表1。

表1 多尺度空间干预策略（表格来源：作者自绘）

空间层级	干预重点	典型措施
宏观区域	生态安全格局	建设生态滞洪区、保护与修复行洪通道
中观城区	风险分区分控	划定洪水高风险区，设定禁建或限建范围
微观场地	微气候调节与雨洪管理	采用透水铺装、雨水花园、垂直绿化以降温蓄水

（二）关键设施韧性提升模型

关键设施韧性提升模型以系统性思维重构基础设施的功能逻辑，通过多级冗余与动态适配增强抗风险能力，供水系统是其典型应用场景。该模型构建“水源保障→多级蓄水→智能管网→分布式净水站”的四级保障体系：水源保障通过多元水源（如常规水源与非常规水源协同）避免单一依赖；多级蓄水整合水库、地下水、雨水回收等储水单元，形成“大中小”嵌套的调蓄网络，应对干旱或污染等突发断供；智能管网依托压力自适应阀门动态调节流量，防止爆管或局部过载，同时实时监测漏损；分布式净水站则靠近需求端布局，缩短输水路径，减少中间环节失效风险^[5]。

系统可靠性通过马尔可夫链模型量化，其如下式（2）：

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

其中 λ 为失效率，t 为运行时间。该公式揭示可靠度随运行时间呈指数衰减，而多级保障体系的核心作用在于通过冗余设计降低关键环节的 λ 值——例如，多级蓄水可分散水源风险，使单一蓄水单元失效时整体系统仍维持功能，从而延缓可靠度衰减速率。这一模型为关键设施韧性设计提供了量化依据，推动从“单点强韧”向“系统容错”的范式转型。

（三）智慧赋能技术应用

智慧赋能技术正推动城市基础设施韧性从“经验驱动”向“数据驱动”跃迁，通过物联网与数字孪生的深度融合，构建全周期风险防控的“智慧神经中枢”。物联网传感器如同设施的“末梢感知器”，密集部署于桥梁应力点、排水管网节点、堤坝渗压区等关键部位，实时采集形变、渗漏、流量等动态数据，形成覆盖“监测-传输-存储”的闭环链路，让隐性风险显性化^[6]。数字孪生平台则以这些数据为底图，叠加气候模型与工程力学算法，模拟暴雨内涝、极端荷载等灾害情景，推演设施失效的级联效应，辅助管理者预判薄弱环节并预置干预方案。

三、文气候变化背景下城市基础设施的文化意蕴

（一）集体记忆的韧性价值

地方性知识蕴含应对气候波动的历史智慧。如传统聚落选址遵循“择高而居、趋利避害”原则，其空间逻辑与现代灾害学高度契合。文化记忆通过三种路径增强韧性：该公式综合衡量系统区分真实威胁与干扰信号的能力，高准确率意味着减少“狼来了”式的误报消耗，同时杜绝漏报导致的突发危机，让智慧预警真正成为韧性防护的主要环节。

（二）场所精神的再生机制

场所精神的再生机制是城市基础设施韧性建构中激活文化认同的核心路径，其本质是通过空间叙事将冰冷的工程载体转化为承载集体记忆与情感归属的“文化容器”，让场所从单纯的物理功能空间升维为凝聚社会韧性的精神锚点。基础设施的设计需超越工具理性，主动植入地方文脉的“基因片段”：滨水步道以水文历史浮雕再现流域变迁中的治水智慧，让行人在漫步中感知人

与水的共生历程；地铁站厅借地质变迁影像串联区域百万年的地层故事，使地下通勤空间成为解读大地记忆的窗口^[7]；老旧桥梁加固时保留原有拱券形态与建造铭文，让结构本身成为跨越时空的“历史证人”。这些实践并非简单装饰，而是通过“空间-文化-人”的互动，让场所精神在当代生活中“复活”。

场所认同感的量化评估可通过模型（3）实现：

$$P = \sum_{k=1}^m W_k \cdot S_k \quad (3)$$

其中 W_k 为文化要素权重， S_k 为公众评分。

（三）社区参与的治理创新

社区参与的治理创新是韧性建构中激活社会内生动力的关键路径，其核心在于通过“自下而上”的赋权机制，将居民从被动防护对象转变为主动风险共治主体。“减灾町内会”这类居民自治模式（注：此处隐去具体国别，聚焦模式内核）即典型实践——居民基于共同生活经验自主绘制风险地图、制定分级应急预案，甚至组建邻里互助小组，形成“人人有责、人人尽责”的韧性共同体。这种模式的有效性并非偶然，而是取决于社区参与效能。

四、文化韧性评估指标体系

（一）文化韧性评估指标体系的建构逻辑与价值导向

文化韧性评估指标体系的构建，旨在突破传统韧性评价中“重技术轻人文”的局限，将文化基因作为衡量城市基础设施抗逆力的深层维度。气候变化下的韧性不仅是物理系统的存续能力，更是社会文化认同与历史经验在风险中的延续力。该体系以“文化赋能韧性”为核心导向，通过量化与质性结合的方式，捕捉文化要素在风险应对中的隐性作用——既关注历史智慧的现实转化，也重视场所精神的社会凝聚，更警惕现代性对地方文脉的消解。其价值在于为韧性建设提供“文化诊断”工具，引导规划者从“工程优先”转向“文化-技术协同”，让基础设施成为承载集体记忆、激发社区认同的活态载体，最终实现物理安全与人文归属的双重提升^[8]。

（二）文化韧性指数的构成解析与分项内涵

文化韧性指数（CRI）以“历史智慧传承度（A）×场所认同强度（B）/现代性冲击系数（C）”为核心公式，三维联动揭示文化韧性的动态平衡。其中，A值聚焦非物质文化遗产中防灾智慧的转化率，强调将口述史记载的避险经验、传统聚落的空间营造逻辑（如依山傍水的选址智慧）、节气历法指导的农事防灾策略等，转化为当代基础设施设计的隐性准则，如将“海绵村落”的雨水调蓄理念融入现代社区绿地系统。B值指向公众对文化地标的情感依恋指数，通过识别承载地方记忆的桥梁、古堤、老码头等空间，评估其在灾时作为心理庇护所、日常作为认同载体的双重功能，让文化地标从“观赏对象”变为“韧性锚点”。C值则量化全球化同质化对地方特色的侵蚀程度，警惕标准化设计对地域气候适应性的抹除，如避免因盲目复制外来景观而丧失本土植被固土、微气候调节的独特优势^[9]。三者相乘相除的逻辑，既凸显历

史与认同的正向增益，也强调对现代性冲击的主动调适。

（三）指标体系的应用场景与人文关怀协同

该指标体系的应用贯穿基础设施全生命周期，从规划设计阶段的“文化基因筛查”，到建设运维中的“场所精神注入”，再到灾后重建的“记忆修复”。在规划中，可通过A值评估候选方案对传统智慧的吸纳度，避免“千城一面”的灰色工程；在设计中，借B值识别需强化的文化地标节点，如在滨水步道嵌入水文变迁浮雕，让设施讲述地方故事；在运维中，以C值为镜反思技术更新对文脉的影响，倡导“适应性再利用”而非彻底拆建。其人文关怀核心在于，将韧性从“技术达标”升维为“文化自觉”——当居民在熟悉的文化场景中参与防灾演练，当老匠人的营建口诀指导新材料应用，基础设施便超越了物理功能，成为连接过去、现在与未来的文化纽带，让韧性真正扎根于社会肌理，实现“有温度的抗逆”。

五、实施路径与挑战应对

（一）全生命周期整合策略

全生命周期整合策略是将文化韧性理念贯穿基础设施从诞生到更新的全过程，通过“规划设计-文化植入-弹性施工-智慧运维-评估反馈”的闭环链条，实现文化要素与工程功能的深度融合。在规划设计阶段，需超越单纯的技术可行性分析，转向“文化基因筛查”，挖掘地方历史防灾智慧（如传统聚落的排水组织、材料选用逻辑）与场所精神载体（如承载集体记忆的古道、老堤），将其转化为空间布局与形态设计的隐性准则，例如将“顺势筑堰”的生态智慧融入现代滞洪区轮廓。弹性施工工艺则强调在施工中保留文化痕迹，采用可逆性材料减少对历史地层的破坏，或通过“微介入”手法让新建结构与既有文化地标形成对话（如新旧桥梁在材质、尺度上的呼应）。智慧运维平台进一步拓展文化维度，除监测物理状态外，增设文化要素健康度模块，追踪文化地标的使用频率、公众情感反馈，及时发现“文化失活”风险。使用后评估反馈则是闭环的关键，通过对比预期文化目标与实际效果，调整后项目的文化植入策略，形成“实践-反思-优化”的动态循环。这种整合不仅提升设施抗逆力，更让文化在基础设施的全生命周期中持续“呼吸”，避免沦为一次性装饰。

（二）制度创新关键点

制度创新是打通文化韧性从理念到实践的核心抓手，需针对当前韧性建设中“文化缺位”的制度根源精准发力。首要关键是建立跨部门文化遗产风险评估机制，打破文物、住建、应急等部门间的条块分割，将文化要素纳入基础设施立项的前置评估——在项目论证阶段即识别可能对地方文脉造成的冲击（如标准化设计对特色风貌的抹除），形成“文化风险清单”并与技术方案同步优化。其次是设立韧性文化专项基金，定向资助社区主导的文化韧性项目，如支持居民整理口述防灾史、活化闲置公共空间为防灾文化角，通过资金杠杆激活基层文化创造力，弥补政府单一供给的不足。最具突破性的是推行“适应性管理法”替代僵化规范，承认气候风险的动态性与文化的在地性，允许在符合核心安

全目标的前提下，对地方特色做法（如传统材料的现代改良、非标准空间的防灾利用）给予弹性审批空间。

例如，对采用本土植物群落进行微气候调节的项目，可突破通用绿地率指标限制。这些制度创新共同指向一个目标：让文化从“被管理的对象”转变为“韧性建构的主体”，通过规则重构释放文化与社会协同潜能。

（三）潜在冲突调适

现代化进程中“效率优先”与“文化保护”的张力，是韧性建构不可忽视的挑战，而“适应性再利用”（Adaptive Reuse）为化解这一矛盾提供了创造性路径。该方法的核心在于拒绝“拆旧建新”的线性思维，通过对既有文化载体的功能重置与意义叠加，使其在保留历史记忆的同时承载新的韧性使命。典型如旧厂房改造为防灾体验馆：保留工业建筑的钢结构骨架与斑驳墙面作为“记忆锚点”，内部植入互动展陈（如模拟历史洪灾的沉浸式场景）、应急物资储备空间与社区培训教室，既延续了工业时代的场所精神，又将文化认同转化为防灾教育的现实场域。这种调适逻辑可延伸至更广场景——古桥加固后兼作步行疏散通道，老城墙遗址改造为暴雨观测点与生态教育径，废弃矿坑转型为雨

水调蓄公园并嵌入采矿历史解说系统。其关键在于把握“变与不变”的平衡：“不变”的是承载集体记忆的物质载体与文化符号，“变”的是功能属性与服务人群^[10]。通过这种方式，效率不再等同于“推倒重来”，而是在尊重文化脉络中实现资源的最优配置，让基础设施在时间的褶皱中积累韧性，最终达成“文化存续即韧性增值”的深层共识。

六、结论

气候变化背景下的基础设施韧性建构，本质是工程技术理性与文化感性智慧的深度融合。当防洪堤坝镌刻着治水史诗，当避难场所承载着集体记忆，冰冷的结构便获得了生命的温度。这种融合不仅提升系统物理性能，更重塑着人与环境的关系认知——从征服对抗转向共生调适。未来的韧性城市应是流动的诗篇，在技术精度与人文厚度之间谱写和谐乐章。唯有将文化基因植入基础设施的血脉，方能在气候变局中守护文明的火种，实现真正意义上的永续发展。

参考文献

[1] 马慧生, 张伟, 李冰等. 云边链融合的城市基础设施物联网安全可信管控架构 [J]. 人工智能, 2025, (06): 40-51.
[2] 张清艳, 邱锦林. 让民生福祉更有质感 [N]. 闽西日报, 2025-12-23 (001).
[3] 杨岚. 数智时代, 守好百姓“身边事”重在守好网络安全 [N]. 人民政协报, 2025-12-01 (010).
[4] 张文泽, 钟美慧. 土木类专业视角下城市更新中旧城改造的规划策略研究 [J]. 住宅与房地产, 2025, (33): 17-19.
[5] 刘玲娜, 陈彬. 以新型基础设施筑牢韧性城市安全根基 [J]. 前线, 2025, (11): 25-28.
[6] 魏攻长, 谢雅楠, 孙鹏等. 城市基础设施敏捷治理的实践路径研究——基于城市生命线安全工程“合肥模式”的分析 [J]. 公共管理与政策评论, 2025, 14 (05): 57-73.
[7] 唐道明. 全过程识别管控风险 提高城市安全韧性水平 [N]. 中国建设报, 2025-08-25 (001).
[8] 王冰洁. 提速“新城建”, 建设安全可靠的韧性城市 [N]. 青岛日报, 2025-08-19 (003).
[9] 吴小环. 市政基础设施智能化改造及政策机制创新赋能自动驾驶发展路径研究 [J]. 广东土木与建筑, 2025, 32 (08): 88-91.