

智慧城市与基础设施韧性建设：文献综述

李佳莹

重庆大学公共管理学院，重庆

收稿日期：2023年7月12日；录用日期：2023年8月28日；发布日期：2023年9月4日

摘要

智慧城市建设为城市韧性治理提供了新的研究视角，其中，基础设施作为智慧城市建设的关键环节，为城市韧性治理提供着基础保障。因此，文章在文献梳理的基础上，从智慧城市内涵、建设现状以及基础设施韧性的相关研究三方面梳理了现有相关研究的主要成果和前沿动态，并结合研究主题述评现存文献的不足。通过梳理前人对智慧城市研究的大量资料可以发现，从智慧城市自身的发展看，目前专家的研究大多都集中在智慧城市的构成要素、发展现状、对其发展质量的评价等；从基础设施韧性的角度看，研究内容多为基础设施建设水平、投资效率以及对城市发展的影响效应等。

关键词

城市韧性，韧性治理，智慧城市，建设现状，基础设施韧性

Smart Cities and Infrastructure Resilience-Building: A Literature Review

Jiaying Li

School of Public Policy and Administration, Chongqing University, Chongqing

Received: Jul. 12th, 2023; accepted: Aug. 28th, 2023; published: Sep. 4th, 2023

Abstract

Smart city construction provides new research perspectives for urban resilience governance, in which infrastructure, as a key link in smart city construction, provides a basic guarantee for urban resilience governance. Therefore, on the basis of literature combing, this paper combs the main results and cutting-edge dynamics of the existing related research from three aspects, namely the connotation of smart city, the current situation of construction, and the related research on infrastructure resilience, and reviews the deficiencies of the existing literature in the light of the research theme. Through combing the large amount of information on smart city research, it can be

found that, from the point of view of the development of the smart city itself, most of the current expert research focuses on the constituent elements of the smart city, the current status of development, and the evaluation of the quality of its development, etc.; from the point of view of the resilience of the infrastructure, the research content contains the level of infrastructure construction, the efficiency of the investment, and the impact of the impact on the city's development, etc.

Keywords

Urban Resilience, Resilience Governance, Smart Cities, State of Construction, Infrastructure Resilience

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

改革开放以来，中国城市化建设取得了历史性成就，与此同时，不确定性和复杂性等问题在城市治理中业已逐渐凸显，火灾、洪水、飓风、疫情等城市风险和安全隐患不断涌现，城市安全风险不断增加，逐渐制约了城市的长久持续发展[1]。面对这一治理困境，传统的被动式减灾策略难以适应城市可持续发展的要求，韧性治理理念为城市灾害治理提供了新思路与创新途径[2]，受到越来越多的研究者和决策人员的重视。韧性城市理念主要表现为城市系统在应对灾害和风险时，能够吸收干扰，基本不改变自身状态的能力[3]。联合国于2005年发布的《兵库行动框架(2005~2015)》(United Nations Hyogo Framework for Action)以及2015年发布的《仙台减少灾害风险框架(2015~2030)》(The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction)均重点指出了发展韧性的重要性，全球减少灾害风险评估的结论中也指出，加强城市韧性是全球减少灾害风险的四个优先领域之一。2020年，《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中也提出了韧性城市的建设，要求提升城市抵御重大灾害如洪涝、地震、疫情等的冲击，减轻灾害损失，助力城市从灾害中迅速恢复。党的二十大报告中指出，打造宜居、韧性、智慧城市，推进城市基础设施体系化建设。实施基础设施补短板 and 更新改造专项行动，建设集约高效、经济适用、智能绿色、安全可靠的现代化基础设施体系。

作为城市建设的重要子系统之一的基础设施系统，是维系城市系统运作的重要枢纽，其中的供水、供电、交通、通信等工程更是被人们形象地称为“城市生命线”，其应对风险的韧性直接影响城市系统整体韧性水平。《“十四五”全国城市基础设施建设规划》中指出，要全面提升城市各类基础设施的防灾、减灾、抗灾、应急救援能力和极端条件下城市重要基础设施快速恢复能力、关键部位综合防护能力，持续增强城市基础设施安全韧性能力。因此，在城市化加速发展、城市基础设施安全事故高发的背景下，引入韧性思维和韧性视角来规划、设计和建设“有韧性的基础设施”，有利于应对各种风险和威胁、提升城市综合防灾减灾能力并保障城市的安全运行。为了提升城市韧性，提高基础设施安全运行和抵抗风险的水平，增强城市应对灾害的能力，多种治理方案应运而生。其中，自2009年提出并于2012年正式启动的智慧城市试点，借助新一代技术，改善城市的生态、社会、工程等子系统对复杂和不确定环境的适应能力，一定程度上实现城市系统整体性能运行的最优化和可持续性，为提升城市韧性提供了路径可能。在基础设施建设方面，智慧城市政策提出，要将物联网感知设施、通信系统等纳入公共设施的统一规划中，推进市政公用设施的物联网应用和智能化改造。现有研究多关注智慧城市建设和城市整体韧性、

经济发展、环境污染等方面的影响，如智慧城市对城市发展质量的影响，能通过技术效应和集聚效应推动地区发展质量的提升[4]；在环境方面，其通过产业结构、绿色技术环节规制等可以抑制污染增长[5]；在韧性视角，智慧城市建设借助创新驱动产生的技术效应和结构效应对城市韧性发挥作用[1]。因此，总结概述智慧城市建设与基础设施韧性的现有研究，理清智慧城市概念、基础设施韧性概念、精细研究内容等，对智慧城市的持续健康发展和城市韧性的提升具有重要的理论和实践意义。

2. 国内外研究现状综述

2.1. 智慧城市基本内涵与实践

城市是人口、资金、信息、资源等发展要素的集聚中心，为人类社会的发展提供了保障。然而在城市快速发展的过程中，人口膨胀、交通拥堵、环境污染等城市病不断加剧，制约了城市的快速可持续发展，当城市面临这些问题时，必须应用新的措施和解决办法使城市管理变得更加智能。2008年，IBM提出了“智慧地球”的重大发展理念，强调世界的基础结构正在向可感应可度量的智慧化方向发展[6]。伴随着“智慧地球”理念提出，2009年，美国迪比克市与IBM共同宣布，将建设第一个“智慧城市”，借助信息技术将城市的资源和城市水、电、油、气等基础设施连接起，从而引领政府作出智能化的响应，最终提高城市的公共管理和服务水平[7]。尽管智慧城市理念已提出多年，但至今没有统一的定义。IBM公司有关智慧城市的描述为“能够充分运用信息和通信技术手段感测、分析、整合城市运行核心系统的各项关键信息，从而对包括民生、环保、公共安全、城市公共服务、工商业活动在内的各种需求作出智能性回应，为人类创造更美好的城市生活[8]”。美国麻省理工学院智慧城市研究团队认为，城市是由不同子系统组成的，智慧城市就是将数字神经系统引入城市系统的各层面。通过数字神经系统的横向沟通，协同不同系统的运作，从而实现效率提升和可持续发展[9]。李德仁等认为，智慧城市是城市全面数字化基础之上建立的可视化和可量测的智能化城市管理和运营，智慧城市 = 数字城市 + 物联网，包括城市的信息、数据基础设施，以及在此基础上建立的网络化的城市信息管理平台和综合决策平台[10][11]。辜胜阻等从智慧城市与相关城市发展概念的区分入手，提出智慧城市是城市信息化的高级形态，依托信息和通信技术，促进经济、社会、生态的可持续发展，推动城市治理的现代化和提高城市居民生活质量和幸福指数[12]。尽管国内外研究机构、学者对智慧城市的理解和阐释各有不同，但城市的“智慧”建设已成为共识。

对于智慧城市概念的界定，是进行智慧城市研究的起点，不同的智慧城市概念定义对智慧城市建设实践具有重要的引导作用。从全球视野来看，美国、欧盟、日韩、东盟、印度和非洲等世界各地的城市将智慧城市作为主要的发展、治理和转型范式，并积极投入大量资源，努力将其自身转变为更富智慧的实体[13][14]。美国政府对智慧城市建设精心规划和部署下，将智能电网项目作为其绿色经济振兴计划的关键性支柱，投资40多亿美元用于电网的现代化建设[7]。荷兰首都阿姆斯特丹是欧洲智慧城市建设的典范，是世界上最早开始智慧城市建设的城市之一，其智慧城市建设主要由可持续性生活、可持续性工作、可持续性交通以及可持续性公共空间四个主题组成[15]。新加坡作为最早提出建设智慧城市的亚洲国家，已发布“智慧国家2025”规划，提出要通过覆盖全岛的数据收集、连接和分析基础设施平台，根据所获数据预测公民需求，以提供更好的公共服务[16]。伴随着世界各国智慧城市建设浪潮，中国政府也紧随其后。自2010年始，中央和各级地方政府分别从顶层设计到具体应用不断推出指导和鼓励智慧城市建设的相关政策。2012年12月，住房城乡建设部正式发布关于开展国家智慧城市建设试点工作的通知。2015年，中央政府首次将智慧城市建设写入政府工作报告，2017年写进党的十九大报告，与科技强国、质量强国、航天强国、网络强国、交通强国、数字中国等并列。在政策的大力支持下，南京市政府提出

了建设“智慧南京”的战略定位,以创新为先导,着力促进产业转型升级,加快发展创新型经济,从根本上提高南京整体城市的综合竞争实力[15][17][18]。张永民等指出,中国智慧城市建设单位众多且各有特色,汇总起来主要分为以创新推进智慧城市建设(包括智慧南京、智慧深圳等城市)、以发展智慧产业为核心(包括智慧武汉、智慧宁波等城市)、以发展智慧管理和智慧服务为重点(包括智慧昆山、智慧佛山等城市)、以发展智慧技术和智慧基础设施为路径(包括上海推出的“云海计划”、数字南昌等城市建设)以及以发展智慧人文和智慧生活为目标(包括成都、无锡等城市)等五大类[19]。

2.2. 智慧城市建设现状

智慧城市建设在大数据、人工智能、云计算、物联网等新一代信息技术的研发与应用基础上,改变了社会公众的生活与生产方式,对城市经济增长、社会发展、政府治理及生态环境改善产生了重大影响。首先,智慧城市建设对经济发展的影响涉及多个方面。Caragliu等指出借助通信及信息技术,智慧城市政策可以对城市经济增长、生活质量提升、可持续性增强和整体福祉等城市绩效产生积极影响[20]。周小敏等研究发现,智慧城市依托现代信息通信技术,实现了城市中基础设施、经济、文化、环境等各系统的相互融合,通过资源配置、经济集聚以及产业结构三条途径来培育经济增长新动能[21]。除此之外,还有研究关注了智慧城市显著促进了试点城市整体的产业结构升级,其中科技创新、政府财政支出和外商投资成为智慧城市影响产业结构升级效应的重要渠道[22][23]。其次,在促进社会治理和提高政府公共服务能力方面,智慧城市也显示出了其强大的生命力。Al-Hader等学者从技术逻辑上详细说明了智慧城市发展的技术组件,包括智慧借口、智慧楼宇管理系统、智慧数据库资源和智慧基础设施等硬件和软件设备将通过数据采集、挖掘、分析等功能,实现智慧城市建设在基本公共服务方面的积极效能。郭雨晖采用双重差分模型验证了以数字信息技术的应用为支撑的智慧城市建设能够促进基本公共服务供给水平的提升[24]。于扬等研究发现智慧城市建设能够通过提升知识溢出水平、加大人力资源培训、吸引人口流入以及调整产业结构等路径改善营商环境[25]。Wenlong Zhu等基于刺激-有机体反应(SOR)模型和不确定性管理理论,提出智慧城市“高质量的信息内容、高度可靠的系统和高度响应的系统”等特征可以提高突发事件下的公民参与[26]。最后,智慧城市建设对城市创新、生态环境改善等方面也起到了显著的影响。石大千等指出,智慧城市建设运用现代信息技术,通过技术效应、配置效应和结构效应降低了城市环境污染[5]。王帆等人指出,智慧城市试点的施行能通过人才集聚、对外开放、基础设施建设、产业结构升级等传导机制显著提升企业研发,并进一步提升企业绩效[27]。亦有部分学者指出了智慧城市可能带来的负效果。唐斯斯等指出,尽管智慧城市建设取得了积极成效,但以数据、软件和技术为主导要素的智慧治理系统恰恰增强了城市的系统性风险和城市失序的可能性[28]。Rob Kitchin指出,智慧城市技术在解决城市治理问题的同时也伴随着技术官僚建华主义风险,即复杂的城市问题会被简单视为技术问题,而忽视城市发展中不可或缺的文化、政策、资本等要素的影响[29]。亦有学者指出,智慧城市一旦出现技术失控或系统故障,对城市系统将是破坏性的[30]。在公民参与层面,Vanolo等人指出,智慧城市发展会形成“智慧鸿沟”,科技文盲、穷人以及更广泛的弱势群体会被排除在智慧城市的话语之外[31],从而导致城市社会的不平等和中产阶级化[32]。在城市韧性方面,孟凡坤等指出,“健康码”等智能技术在新冠疫情中有效实现了疫情防控,但另一方面,特大灾害导致的“无电无网”情况会使得城市瘫痪,导致智慧城市决策迟滞,智慧城市本身就成为了风险[13]。

2.3. 基础设施韧性相关研究

基础设施系统作为城市中最重要子系统之一,是支撑人类生产生活发展的生命线工程,在城市面对气候变化、灾害加剧、人口压力增大等风险下,承担着维持城市基本功能运转、为人类生产生活提供

可靠服务的压力。据世界银行报告，基础设施中断给低收入和中等收入国家的家庭和企业带来每年3910~6470亿美元的额外成本负担，自然灾害造成的基础设施损害在中低收入国家和地区造成每年约180亿美元的损失[33]。因此，有关基础设施韧性的研究愈加受到各国研究机构和学者的重视。Bruneau等认为基础设施韧性是指城市基础设施在应对灾害时的恢复和保障能力[34]，并描述了基础设施面对灾害时所呈现的系统机能曲线的变化[35]。王淑良等人梳理了国内外相关研究，将基础设施韧性定义为城市基础设施所具有的灾害发生时抵御灾害、吸收损失并及时恢复至正常运行状态的能力[36]。邵亦文、徐江指出基础设施韧性指的是建成结构和设施脆弱性的减轻，同时也涵盖生命线工程的畅通和城市社区的应急响应能力[37]。方东平等将城市视为在“物理、社会、信息”组成的三度空间下的系统，其核心功能是为城市里的人提供各类服务，而城市里的各个子系统便是发挥城市功能的载体。其中，城市里基础设施的韧性是保障城市系统基本功能的关键[38]。

与城市居民基本生活休戚相关的能源、水、交通、电力等市政公用工程设施韧性和公共生活服务设施韧性也是国内外学者研究的重点内容。俞孔坚等评述了水系统韧性的评价方法以及韧性策略，并在全国多个城市开展了城市抗洪、抗内涝韧性设计的研究[39]。Pandit等基于复杂网络，结合城市供水系统的网络属性，提出了基于供水网络拓扑结构的韧性指标[40]。阮前途等提出了韧性电网的定义，并详细阐述了韧性电网应具备的6个关键特征，即应变力、防御力、恢复力、感知力、协同力和学习力[41]。陈长坤、何凡等基于系统机能曲线，构建了包含公交车系统和出租车系统两个维度的城市道路公共交通系统韧性评估模型[42]。

3. 文献评述

从智慧城市自身的发展看，当前研究大多都集中在智慧城市的构成要素、发展现状、对其发展质量的评价等方面；从智慧城市的政策效应角度看，现有研究多聚焦于智慧城市对经济发展水平、创新水平以及环境污染的影响等方面；从基础设施韧性的角度看，研究内容多为基础设施韧性内涵、在技术逻辑下衡量其韧性水平等方面。综合以上研究发现，第一，对于智慧城市影响城市的经济、社会、政府治理、公众参与、环境污染及创新等方面的研究问题，现有文献已对此进行了充分的讨论。但对智慧城市在抵抗外部干扰，应对自然灾害、传染病疫情等重大突发事件的韧性能力方面的研究仍显不足，缺乏深入的分析和探讨，因此，有必要探讨智慧城市如何在面临不断变化的环境压力下提高其韧性。第二，现有研究多集中于智慧城市对城市整体韧性水平的影响效应，对于智慧城市基础设施的韧性研究也较为有限。由于现代城市依赖于各种基础设施系统来支撑其运行，基础设施系统的韧性对于城市的可持续发展至关重要。我国“十四五”全国城市基础设施建设规划中明确了要系统提升城市基础设施供给能力，持续增强城市基础设施安全韧性能力，推进水、电、气、热等城市基础设施建设。因此，识别并测量基础设施韧性水平、在智慧城市背景下分析基础设施韧性水平的变化较为迫切。然而，目前的研究主要集中在单个基础设施系统的韧性，如供水、交通和电力等，缺乏对不同基础设施系统之间相互作用的综合分析。在实际应用中，这些基础设施系统之间的相互影响是非常复杂的，因此需要开展更多的研究来探讨其韧性。第三，虽然智慧城市与基础设施韧性之间存在着紧密的联系，但目前的研究缺乏对二者关系的深入理解。智慧城市的发展需要依赖强大的基础设施支撑，而韧性能够增强基础设施系统的适应能力和抗灾能力。因此，进一步的研究可以探讨智慧城市如何通过增强基础设施韧性来提高整体城市的韧性。综上所述，智慧城市与基础设施韧性的研究还有很大的发展空间。未来的研究可以从深入理解智慧城市的韧性概念开始，并探讨智慧城市和基础设施系统之间的相互作用，以及如何提高整体城市的韧性以及如何在设计和建设阶段就考虑灾害风险，并采取相应的应对措施，以增强基础设施的韧性和适应性。这些研究成果将为实际应用中的智慧城市建设和基础设施规划提供更有针对性的指导。

参考文献

- [1] 武永超. 智慧城市建设能够提升城市韧性吗?——一项准自然实验[J]. 公共行政评论, 2021, 14(4): 25-44, 196.
- [2] 陈玉梅, 李康晨. 国外公共管理视角下韧性城市研究进展与实践探析[J]. 中国行政管理, 2017(1): 137-143.
- [3] Walker, B., Hollin, C.S., Carpenter, S.R. and Kinzig, A. (2004) Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems. *Ecology and Society*, **9**, Article 5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
- [4] 刘成杰, 胡钰芬, 李虹桥, 等. 中国智慧城市试点政策对城市发展质量的影响——基于韧性发展的视角[J]. 城市问题, 2021(11): 79-89.
- [5] 石大千, 丁海, 卫平, 等. 智慧城市建设能否降低环境污染[J]. 中国工业经济, 2018(6): 117-135.
- [6] 陈柳钦. 智慧城市: 全球城市发展新热点[J]. 青岛科技大学学报(社会科学版), 2011, 27(1): 8-16.
- [7] 袁竞峰, 林翰, 夏侯迺逊, 谢红, 黄伟, 等. 智慧城市建设与发展研究[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [8] Dirks, S. and Keeling, M. (2009) A Vision of Smarter Cities: How Cities Can Lead the Way into a Prosperous and Sustainable Future. IBM Global Business Services Executive Report.
- [9] Deakin, M. and Al Waer, H. (2011) From Intelligent to Smart Cities. *Intelligent Buildings International*, **3**, 140-152. <https://doi.org/10.1080/17508975.2011.586671>
- [10] 李德仁, 姚远, 邵振峰. 智慧城市的概念、支撑技术及应用[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2012, 4(4): 313-323.
- [11] 李德仁, 姚远, 邵振峰. 智慧城市中的大数据[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(6): 631-640.
- [12] 辜胜阻, 王敏. 智慧城市建设的理论思考与战略选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(5): 74-80.
- [13] 孟凡坤, 吴湘玲. 重新审视“智慧城市”: 三个基本研究问题——基于英文文献系统性综述[J]. 公共管理与政策评论, 2022, 11(2): 148-168.
- [14] Desouza, K.C., Smith, K.L., 王奎明. 追赶智慧城市潮流: 我们是否已迷失方向[J]. 探索与争鸣, 2018(8): 4-10, 15.
- [15] 张飞舟, 杨东凯, 张弛. 智慧城市及其解决方案[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [16] 刘学华, 赖丹馨, 罗婕. 新加坡“智慧 2025”发展规划[J]. 中国建设信息化, 2016(9): 24-25.
- [17] 冯茂岩, 蒋兰芝. 浅谈“智慧城市”与“智慧产业”发展——以南京为例[J]. 改革与战略, 2011, 27(9): 127-128, 155.
- [18] 陈铭, 王乾晨, 张晓海, 等. “智慧城市”评价指标体系研究——以“智慧南京”建设为例[J]. 城市发展研究, 2011(5): 84-89.
- [19] 张永民, 杜忠潮. 我国智慧城市建设的现状及思考[J]. 中国信息界, 2011(2): 28-32.
- [20] Caragliu, A. and Del Bo, C.F. (2019) Smart Innovative Cities: The Impact of Smart City Policies on Urban Innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, **142**, 373-383. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.022>
- [21] 周小敏, 李连友. 智慧城市建设能否成为经济增长新动能? [J]. 经济经纬, 2020, 37(6): 10-17.
- [22] 王林杉. 智慧城市政策对中国产业结构升级的影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中央财经大学, 2021.
- [23] 辜胜阻, 杨建武, 刘江日. 当前我国智慧城市建设中的问题与对策[J]. 中国软科学, 2013(1): 6-12.
- [24] 郭雨晖, 汤志伟, 翟元甫. 政策工具视角下智慧城市政策分析: 从智慧城市到新型智慧城市[J]. 情报杂志, 2019, 38(6): 200-207.
- [25] 于扬, 夏德峰. 智慧城市建设对营商环境的影响研究[J]. 经济经纬, 2022, 39(1): 24-35.
- [26] Zhu, W., Yan, R. and Song, Y. (2022) Analysing the Impact of Smart City Service Quality on Citizen Engagement in a Public Emergency. *Cities*, **120**, Article ID: 103439. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103439>
- [27] 王帆, 章琳, 倪娟. 智慧城市影响企业创新的宏观机制研究[J]. 中国软科学, 2022(11): 109-118.
- [28] 唐斯斯, 张延强, 单志广, 等. 我国新型智慧城市发展现状、形势与政策建议[J]. 电子政务, 2020(4): 70-80.
- [29] Kitchin, R. (2014) The Real-Time City? Big Data and Smart Urbanism. *GeoJournal*, **79**, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10708-013-9516-8>
- [30] Kitchin, R. and Dodge, M. (2019) The (In) Security of Smart Cities: Vulnerabilities, Risks, Mitigation, and Prevention. *Journal of Urban Technology*, **26**, 47-65. <https://doi.org/10.1080/10630732.2017.1408002>
- [31] Vanolo, A. (2014) Smartmentality: The Smart City as Disciplinary Strategy. *Urban Studies*, **51**, 883-898. <https://doi.org/10.1177/0042098013494427>

-
- [32] Hollands, R.G. (2020) Will the Real Smart City Please Stand up? Intelligent, Progressive or Entrepreneurial? In: Willis, K.S. and Aurigi, A., Eds., *The Routledge Companion to Smart Cities*, Routledge, London, 179-199. <https://doi.org/10.4324/9781315178387-13>
- [33] Hallegatte, S., Rentschler, J. and Rozenberg, J. (2019) Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity. World Bank Publications, Washington DC. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1430-3>
- [34] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., *et al.* (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, **19**, 733-752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- [35] Bruneau, M. and Reinhorn, A. (2007) Exploring the Concept of Seismic Resilience for Acute Care Facilities. *Earthquake Spectra*, **23**, 41-62. <https://doi.org/10.1193/1.2431396>
- [36] 王淑良, 岳昕, 于巍巍, 等. 基础设施系统脆弱性研究综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(4): 168-174.
- [37] 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.
- [38] 方东平, 李在上, 李楠, 等. 城市韧性——基于“三度空间下系统的系统”的思考[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 1-7.
- [39] 俞孔坚, 许涛, 李迪华, 等. 城市水系统弹性研究进展[J]. 城市规划学刊, 2015(1): 75-83.
- [40] Pandit, A., Minne, E.A., Li, F., *et al.* (2017) Infrastructure Ecology: An Evolving Paradigm for Sustainable Urban Development. *Journal of Cleaner Production*, **163**, S19-S27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.010>
- [41] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6783.
- [42] 陈长坤, 何凡, 赵冬月, 等. 基于系统机能曲线的城市道路公共交通系统韧性评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(6): 1016-1022.