

Digital transformation of infrastructure and urban resilience

Article

Published Version

Deng, C. X. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4896-6333>
and He, L. (2024) Digital transformation of infrastructure and urban resilience. *Global Cities Research*, 5 (1). 017-033.
Available at <https://centaur.reading.ac.uk/117422/>

It is advisable to refer to the publisher's version if you intend to cite from the work. See [Guidance on citing](#).

Published version at: <https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2024&filename=QQCS202401002&uniplatform=OVERSEA&v=zCVq0o7EWuhMTLq87b25ic8N5De4zxWNjpZ2R6bY-bDsevvOvMCPJGFNTYc3Wz7o>

All outputs in CentAUR are protected by Intellectual Property Rights law, including copyright law. Copyright and IPR is retained by the creators or other copyright holders. Terms and conditions for use of this material are defined in the [End User Agreement](#).

www.reading.ac.uk/centaur

CentAUR

Central Archive at the University of Reading
Reading's research outputs online

增强城市安全韧性的基础设施数字化转型研究

邓筱莹 赫 磊

摘要：本研究从基础设施数字化的现状出发，总结基础设施数字化的内涵及其数字化技术特征。目前全球城市对基础设施数字化的应用和发展处于初步阶段，发展潜力巨大。基础设施数字化如何增强全球城市安全韧性是涉及经济、科技、城市发展的重要命题，本文将重点介绍全球城市群基础设施的数字化现状，其主要模式及区别，系统剖析数字化对基础设施的安全韧性增强作用和背后可能隐藏的风险。

关键词：基础设施数字化；城市安全韧性；数字化转型；全球城市

基础设施是促进全球城市经济稳健增长和韧性发展的关键。^①完善的基础设施是城市为居民提供基本日常生活保障和便利的基础，是城市平稳运行的前提。在数字化经济驱动下，基础设施能从吸引人才、投资，促进经济活动等多方面带动城市发展。^②经济发展来自对各种要素的优化配置，基础设施能加快这一进程从而促进经济发展。^③基础设施如何影响城市经济发展是城市经济学、经济地理学等学科的重要研究问题。然而，以往研究主要从市场整合角度考察了基础设施的经济影响。^④通过对国内生产总值（GDP）总量、GDP增长率及全要素生产率这种反映宏观经济综合状况的变量进行研究而得出的结论，^⑤由于变量本身将纷繁复杂的国民经济进行了高度抽象与简化，很难对基础设施的政策制定、建设决策、城市规划等起到具体的指导

作者简介：邓筱莹，雷丁大学享利商学院副教授；赫磊，同济大学建筑与城市规划学院副教授。

- ① Ejaz Ghani, Arti Grover Goswami and William Kerr, "Highway to Success: The Impact of the Golden Quadrilateral Project for the Location and Performance of Indian Manufacturing," *The Economic Journal*, vol. 126, no. 591 (2016), pp. 317—357.
- ② Abhijit Banerjee, Esther Duflo and Nancy Qian, "On the Road: Access to Transportation Infrastructure and Economic Growth in China," *Journal of Development Economics*, vol. 145 (2020), p. 102442.
- ③ Edward M. Gramlich, "Infrastructure Investment: A Review Essay," *Journal of Economic Literature*, vol. 32, no. 3 (1994), pp. 1176—1196.
- ④ Kevin T. Duffy-Deno and Randall W. Eberts, "Public Infrastructure and Regional Economic Development: A Simultaneous Equations Approach," *Journal of Urban Economics*, vol. 30 (1991), pp. 329—343.
- ⑤ Benjamin Faber, "Trade Integration, Market Size, and Industrialization: Evidence from China's National Trunk Highway System," *The Review of Economic Studies*, vol. 81, no. 3 (2014), pp. 1046—1070.

作用。

与此同时，人类社会如今进入数字化经济时代，数字经济成为全球城市吸引力与竞争力的重要影响因素。数字化经济作为全球经济增长的新引擎，改变着全球城市的生产以及生活方式。截至2019年，数字经济的全球总规模占全球生产总值的比例估计为4.5%至15.5%，以中美为发展核心。^①截至2018年，就中国市场，其数字经济规模达到31.3万亿元，占经济生产总值的34.8%。^②城市内部的基础设施如何面向信息时代下海量多源数据的“采集—存储—计算—管理—应用”，是支撑基础设施数字化的关键。

在此背景下，本文将从数字化经济的角度探讨基础设施建设以及运营过程中的经济效应，关注更长远、更宏观的问题，即因数字化经济带来的基础设施建设和运营成本的降低，^③是否真的为这些城市地区的基础设施运行带来安全韧性，在城市管理的微观层面上其经济效益和应用具体体现在哪些方面？本论文将进一步丰富对基础设施数字化转型的探讨。

本文力图从基础设施数字化的现状出发，总结基础设施数字化的内涵及其数字化技术特征。在研究过程中，发现目前全球城市对基础设施数字化的应用和发展仍处于初步阶段，基础设施数字化如何增强全球城市安全韧性是涉及经济、科技，以及城市发展的重要命题。本文将重点介绍全球城市群基础设施的数字化现状、主要模式及区别，系统剖析数字化对基础设施安全韧性的增强作用和背后可能隐藏的风险。本文是全球城市基础设施数字化全面转型研究的一个起点，未来研究希望能够进一步厘清基础设施数字化转型的需求和市场应用，更好地指导相关技术、相关产业应用的发展，并为城市规划、集聚经济等方面提供宏微观证据和政策支持。

一、城市基础设施数字化含义与意义

基础设施数字化涵盖传统基础设施的数字化和新型基础设施的数字化。传统基础设施的数字化涵盖建设中工程主体的数字化，例如安装数字化感应器，和基础设施运营系统的数字化。新型基础设施涵盖数据接入、数据存储、数据计算、数据管理和数据应用这五个领域，以数据为底层资产，最大化数据的使用价值和应用价值。2020年4月，国家发展和改革委员会首次对新型基础设施进行初步界定。狭义的新型基础

^① 联合国：《2019年数字经济报告》，https://unctad.org/system/files/official-document/der2019_overview_ch.pdf。

^② 中国网络空间研究院编：《中国互联网发展报告2019》，北京：电子工业出版社，2019年。

^③ Jeffrey P. Cohen and Catherine J. Morrison Paul, “Public Infrastructure Investment, Interstate Spatial Spillovers, and Manufacturing Costs”, *Review of Economics and Statistics*, vol. 86, no. 2 (2004), pp. 551—560.

设施数字化是传统信息基础设施的延伸，是基于新一代信息技术发展而建设的基础设施。新型基础设施数字化的广义定义，泛指信息基础设施以及融合基础设施。融合基础设施为传统基础设施利用新信息技术智能化数字化后所形成的数字化生态。^① 数据基础设施通过汇聚各方数据，构建数据安全体系，将海量数据转化为数据资产，为海量数据提供“采取—存储—计算—管理—应用”的数据全生命周期支撑，建立数据生态环境。

近年来，在全球经济增长疲软、贸易争端加剧、国际金融状况失衡^②以及新冠疫情^③等诸多因素叠加下，全球政治经济秩序和一体化进程面临高度不确定性。如何有效应对不确定性的冲击，推动疫情后的经济复苏是全球城市面临的重大议题。全球城市的基础设施数字化对全球城市将产生革命性的影响。

第一，基础设施数字化将为全球城市经济以及社会数字化转型和城市的创新发展提供新动力与新支撑。从预期看，基础设施数字化转型可以降低全球城市企业数字化创新的技术成本，^④ 构建以大数据为驱动的企业运营体系和数据应用生态，促进全球城市的经济发展和产业实力提升。

第二，基础设施数字化是以大数据融合和信息网络为基础，新一代信息技术和数字化对城市基础设施的发展与应用场景转型具有重要意义。^⑤ 基础设施数字化如何增强全球城市安全韧性是涉及经济、科技，以及全球城市发展的重大命题。

第三，全球城市的基础设施数字化处于成长阶段，未来具有可持续的成长性。随着技术的发展，围绕着海量多源数据，会形成全新的基础设施生态。由于全球城市的技术和商业模式尚处于不同的演进阶段，不同城市的基础设施数字化转型所处的阶段不同，其城市层面的数字化程度也不同。

二、城市基础设施数字化发展现状与特征

近 20 年，全球主要经济体对基础设施的持续性投资加速了全球城镇化的高速发展。^⑥ 以区域大都市为中心的现代城市群将成为全球经济发展的主要增长源。全球

① 黄舍予：《中国信通院院长刘多：数字基建在新基建中发挥核心作用》，《人民邮电报》2020 年 4 月 22 日。

② 联合国：《2019 年世界经济形势与展望》，https://unctad.org/system/files/official-document/der2019_overview_ch.pdf。

③ 国际货币基金组织表示，相较于非典和埃博拉疫情，由新冠疫情导致的全球经济以及产业链不确定性，已高于非典的 3 倍和埃博拉疫情的 20 倍，达到历史的高点。

④ Saugata Datta, “The Impact of Improved Highways on Indian Firms,” *Journal of Development Economics*, vol. 99, no. 1 (2012), pp. 46—57.

⑤ 工业和信息化部等：《物联网新型基础设施建设三年行动计划（2021—2023 年）》，http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/29/content_5640204.htm [2021-09-29]。

⑥ Nathaniel Baum-Snow, “Did Highways Cause Suburbanization?,” *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 122, no. 2 (2007), pp. 775—805.

城市中心城区高强度开发，形成三维立体城市。各类设施是由节点和边构成的复杂网络。单系统复杂网络和多系统复杂网络之间的依赖性，全局集聚，形成更加复杂的网络。各类基础设施空间交错、功能关联形成复杂网络。现代大都市—城市群的发展，使得城市基础设施（交通、电力、通讯、供水、排水、燃气等）形成了规模庞大、非常复杂的工程网络系统。城市重大基础设施由大型公共建筑（例如老旧小区以及旧老建筑）、大型地下空间、生命线网络系统基础设施、城市区域基础设施构成。

城市是一个不断演变的动态巨系统。将增强全球城市安全韧性的基础设施与应对突发事件的关键要素融入城市基础设施规划的各个系统，要求编制各系统规划（如居住系统、公共设施系统、交通系统、景观系统、市政基础设施系统等），根据自身问题和发展趋势，遵照规范采取相宜的安全对策与应急措施。

目前，全球城市基础设施数字化正处于快速发展时期。^①顺应新一代信息技术趋势，全球范围内主要的超大城市提出建设智慧城市的市政计划，其中以基础设施数字化转型为主要内容。全球的各类基础设施数字化转型以及韧性智慧城市项目达到数百个。在推进全球城市基础设施数字化转型的过程中，据估计，以数字城管、平安城市等为数字化转型为核心的基础设施数字化市场规模将在2026年左右达万亿元。^②从实践来看，全球超大城市基础设施数字化正处于转型阶段，北京、上海、广州、深圳等中国一线城市基础设施数字化转型进程和数字化发展较快。

2021年8月23日，经济学人智库（EIU）发布《2021年全球城市安全指数报告》，报告中对全球60个城市的76项安全指标进行了调查评比（见表1）。报告对全球城市的基础设施安全、数码安全等五大方面进行打分，评选出全球十大最安全城市为：哥本哈根（82.4）、多伦多（82.2）、新加坡（80.7）、悉尼（80.1）、东京（80.0）、阿姆斯特丹（79.3）、惠灵顿（79.0）、香港（78.6）、墨尔本（78.6）和斯德哥尔摩（78.0）。就中国大陆城市来说，上海排名第30，得分67.9，北京排36，得分63.8。

对全球城市基础设施的安全韧性的调查评比中，香港、新加坡、哥本哈根排名靠前，上海和北京基础设施的安全韧性水平较2019年有所提升（见表2）。^③其中，全球主要城市的城市安全韧性质量与城市基础设施的安全韧性、城市数字安全呈现高度正相关的趋势（图1、图2）。

^① OECD, "Infrastructure to 2030 OECD Policy Brief," *Technical Report*, 2008.

^② Barclays Corporate & Investment Bank, "The future of Smart Cities", 2020, <https://www.cib.barclays/our-insights/Rethinking-smart-cities-prioritising-infrastructure.html> [2020-11-13].

^③ 经济学人智库（EIU）：《2021年全球城市安全指数报告》，<https://safecities.economist.com/> [2021-08-23]。

表1 2021年全球城市安全韧性指数排名

排名	全球城市	评分	排名	全球城市	评分	排名	全球城市	评分
1	哥本哈根	82.4	21	马德里	74.7	41	波哥大	60.8
2	多伦多	82.2	22	达拉斯	74.5	42	墨西哥城	60.3
3	新加坡	80.7	23	巴黎	74.3	43	曼谷	60.2
4	悉尼	80.1	24	台北	74	44	基多	58.8
5	东京	80	25	首尔	73.8	45	胡志明市	58.5
6	阿姆斯特丹	79.3	26	布鲁塞尔	73.6	46	雅加达	56.4
7	惠灵顿	79	27	米兰	71.3	47	约翰内斯堡	56.2
=8	香港	78.6	28	里斯本	70.1	48	新德里	56.1
=8	墨尔本	78.6	29	罗马	69.4	49	利雅得	55.1
10	斯德哥尔摩	78	30	上海	67.9	50	孟买	54.4
=11	巴塞罗那	77.8	31	阿布达比	66.9	51	马尼拉	52.5
=11	纽约	77.8	32	吉隆坡	66.6	52	巴库	49.8
13	法兰克福	77.7	33	圣地亚哥	65.3	53	科威特城	49.4
14	华盛顿特区	77.4	34	布宜诺斯艾利斯	64.9	54	达卡	48.9
=15	伦敦	77.2	35	迪拜	64.6	55	卡萨布兰卡	48.2
=15	旧金山	77.2	36	北京	63.8	56	拉各斯	45
17	大阪	76.7	37	伊斯坦布尔	62.9	57	开罗	43.7
18	洛杉矶	76.5	38	莫斯科	62.5	58	加拉加斯	40.5
19	苏黎世	76.3	39	里约热内卢	61.8	59	卡拉奇	39.7
20	芝加哥	75	40	圣保罗	61.7	60	仰光	39.5
	平均值	66.1						

资料来源：经济学人智库（EIU）。

表2 2021年全球城市基础设施安全韧性指数排名

排名	全球城市	评分	排名	全球城市	评分	排名	全球城市	评分
1	香港	93.4	=12	惠灵顿	84.2	23	伦敦	82.7
2	新加坡	92.1	=12	苏黎世	84.2	24	巴黎	82.6
3	哥本哈根	89	14	法兰克福	84.1	25	台北	82.4
4	多伦多	88.6	=15	马德里	84	26	布鲁塞尔	82.3
5	东京	87.7	=15	墨尔本	84	27	上海	80.3
6	斯德哥尔摩	87.3	17	巴塞罗那	83.7	28	里斯本	77.4
7	大阪	86.6	18	旧金山	83.6	29	阿布达比	77.3
8	华盛顿特区	86.5	19	阿姆斯特丹	83.5	30	米兰	76.6
=9	芝加哥	84.5	20	首尔	83	31	北京	76.5
=9	悉尼	84.5	=21	达拉斯	82.9	32	迪拜	76
11	纽约	84.4	=21	洛杉矶	82.9	33	罗马	74.5

续表

排名	全球城市	评分	排名	全球城市	评分	排名	全球城市	评分
34	莫斯科	74.2	43	墨西哥城	62.1	52	马尼拉	52.9
35	伊斯坦布尔	72.1	44	新德里	59.8	53	卡萨布兰卡	52.2
36	圣地亚哥	70.8	45	胡志明市	59.5	54	约翰内斯堡	49.8
37	吉隆坡	69	46	基多	59.1	55	达卡	49.6
38	圣保罗	66.5	47	巴库	58.6	56	开罗	47.2
39	曼谷	65.7	48	孟买	57.3	57	卡拉奇	43
40	雅加达	63.7	49	波哥大	57	58	仰光	40.5
41	里约热内卢	62.9	50	利雅得	55.2	59	加拉加斯	38
42	布宜诺斯艾利斯	62.6	51	科威特城	53.4	60	拉各斯	32.4
	平均值	71.5						

资料来源：经济学人智库（EIU）。

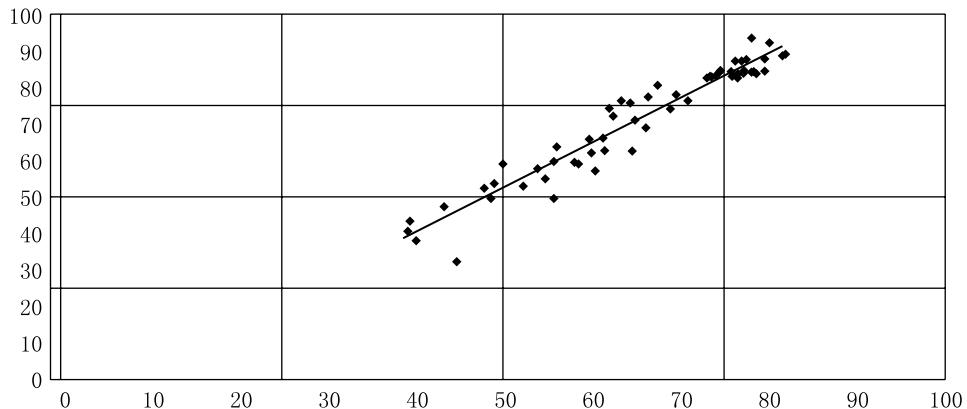


图 1 2021 年全球主要城市的城市安全韧性指数与城市基础设施的安全韧性指数的相关性

资料来源：经济学人智库（EIU）。

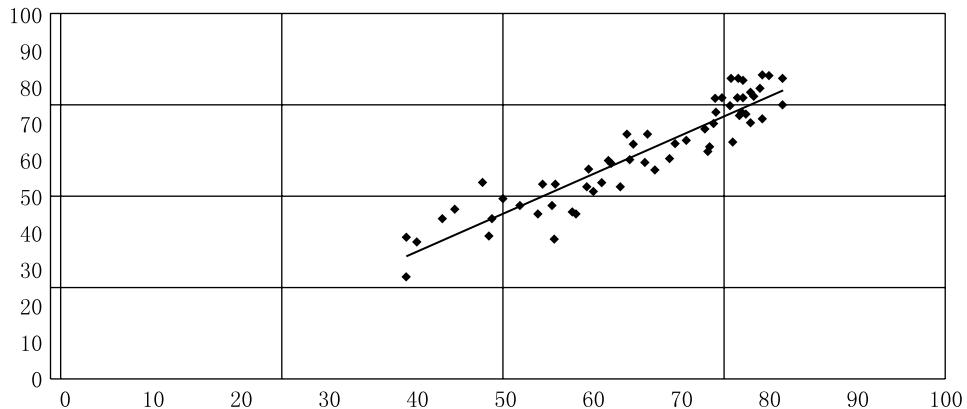


图 2 2021 年全球主要城市的城市安全韧性与城市数字安全的相关性

资料来源：经济学人智库（EIU）。

在全球城市的数字化转型过程中，新型基础设施孕育而生。数据基础设施层的数字化涵盖数据存储、数据计算以及网络等硬件设施的数字化。数据基础设施的数字化通过匹配多样性数据，对海量数据进行多样性计算，再利用多样性融合存储代替传统的单一类型存储，让计算和存储效率更加高效。数据管理层的数字化通过对操作系统、数据系统以及大数据系统的数字化运营管理，对海量数据实施全生命周期管理，对大数据处理提供“采集—存储—计算—管理—应用”的全流程数字化系统支撑，智能融合处理多源数据。新型基础设施的数字化目前具备以下几个数字化特征：^①

第一，融合。新型基础设施数字化的融合分为横向以及纵向融合。横向融合是指新型基础设施底层数据在全生命周期的存储融合。纵向融合具体是指对海量数据处理以及后续存储的垂直优化，提高数据处理效率。纵向融合通过将数据库、大数据以及人工智能引擎融合，对存储层、数据协议、算力层和管理层进行基础设施底层数据在数据全生命周期的管理，特别是对新型基础设施数字化在异构算力、存算、数据库存储、协议、格式等多层面进行融合，以满足不同数据库、海量大数据、人工智能等多种应用场景的分析与应用需求。

第二，协同。鉴于基础设施数字化的本质是对大数据的处理和应用、与成熟的各类数据库以及不同的数据存储技术相辅相成，在基础设施的硬件、数据算力以及海量数据等融合的过程中，基础设施的数字化要求对异构异地的多源数据进行协同分析。新型基础设施的数字化利用智能算子下推、计算任务下推、跨域高速数据传输等关键协同技术，在以下数字化应用场景实现协同：（1）跨数据源协同，以此实现对多个数据源的分散数据交叉分析；（2）跨域协同，以此实现对多个异地数据中心的数据碰撞分析；（3）云边协同，即为“云一边一端”三级的硬件基础设施的数字化分析；（4）异地数据即时访问；（5）统一访问接口，即协同对外提供统一数据的查询接口；（6）计算能力共享，即同一类型的基础设施的多个数据中心分布在不同地域（以地铁为例），通过协同实现跨域的调度以及计算能力共享，用以提升整体基础设施数据资源的利用率。

第三，智能。基础设施数字化中的数据智能整合处理与挖掘、人机交互、机器学习等多种技术，以及智能化海量数据，为基础设施的场景应用提供数据智能化支持。基础设施的数据智能化是驱动决策，让设施拥有推理等认知能力，使基础设施的底层大数据能够指导应用场景和决策。新型基础设施的数字智能化应该从智能芯片、智能软件框架、人工智能数据治理等环节提供新型基础设施的数字智能化的能力支撑，降

^① 华为信通院：《数据基础设施白皮书 2019》，http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201911/t20191118_269749.htm [2021-11-18]。

低对人工流程的依赖，缩短上线周期。

第四，开放。新型基础设施的数字化需要开放且包容的科学技术和产业生态。新型基础设施的数字化作为关键环节，涉及硬件产业和软件产业，以及各类开源技术和闭源技术，需要各环节的协同。制定公平、透明规则，构建“平台+生态”的新型基础设施的数字化的生态信任体系，建立价值分享模式，有助于基础设施数字化未来的市场化。

三、全球城市基础设施数字化与城市的安全韧性

在超大城市运行中，借助有限的人力，无法对各类潜在风险作出预判预警，是基础设施应急管理面临的主要困境。利用现代科技进行数字化城市治理是超大城市建设安全韧性城市基础设施的重要支撑。

（一）基础设施数字化手段

基础设施数字化转型，主要采用技术、平台、采取措施等三大手段。增强城市安全韧性的基础设施数字化转型可通过大数据进行多灾种的风险评估，将不同灾种的灾害进行风险耦合，现阶段一般通过多重灾害风险指标体系、多重风险评估的指数参数法以及基于概率的多灾种叠加灾害风险并绘制风险图的方法来评价城市灾害风险。推动城市基础设施数字化转型，可有效提高风险动态感知与监测预警能力。下面本文将从基础设施系统的网络拓扑结构数字化、基础设施系统耦合数字化以及基础设施系统依赖数字化三个方面，对基础设施的工程建设数字化加以说明阐述，厘清基础设施数字化转型如何增强城市生命体的安全韧性。

1. 基础设施系统的网络拓扑结构数字化

在对市政网管系统的数字化转型中，可利用数字化复杂网络拓扑结构分析识别关键组分。在大数据分析的基础上，对随机灾害作用下网络进行敏感性分析并进行安全韧性压力测试。以某科技智慧城燃气管网为例，其网络拓扑结构示意图如图 3 所示，燃气管网系统重要管段分布如图 4 所示。

在不同的情景下，MATLAB 对燃气管网系统的可靠度指标模拟结果如图 5 所示。

2. 基础设施系统耦合数字化

系统耦合数字化指的是当一类基础设施的安全韧性受到影响，将影响与之具有“依赖性”的其他设施的正常使用功能，进而将引起网络的连锁反应。此时，利用数字化和大数据规划识别出网络中设施的失效概率和重要性程度，从而对网络状的设施进行分级，规划提出失效概率高、重要性程度高的设施的防灾对策措施：冗余设计、结构特别设计、监控检测点布设等。基于大数据网络的拓扑分析方法，可为网络实时递推分解算法编程（见图 6）。

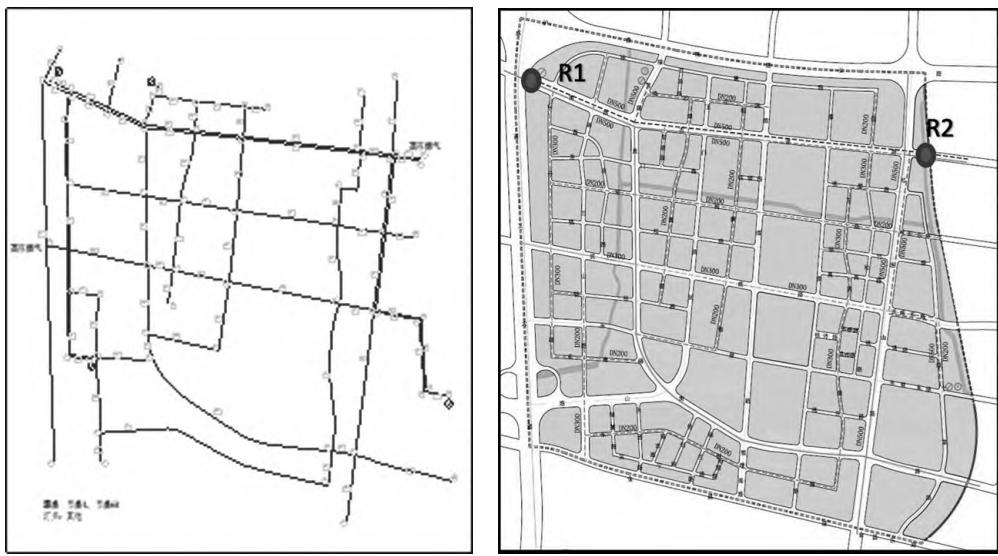


图3 某科技智慧城市燃气管网气源点及网络拓扑结构示意图

(左图：气源点示意图 右图：网络拓扑结构示意图)

资料来源：作者自绘。

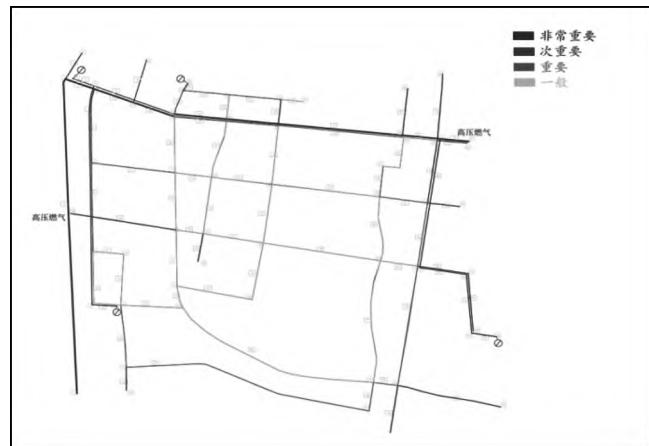


图4 燃气管网系统重要管段分布示意图

资料来源：作者自绘。

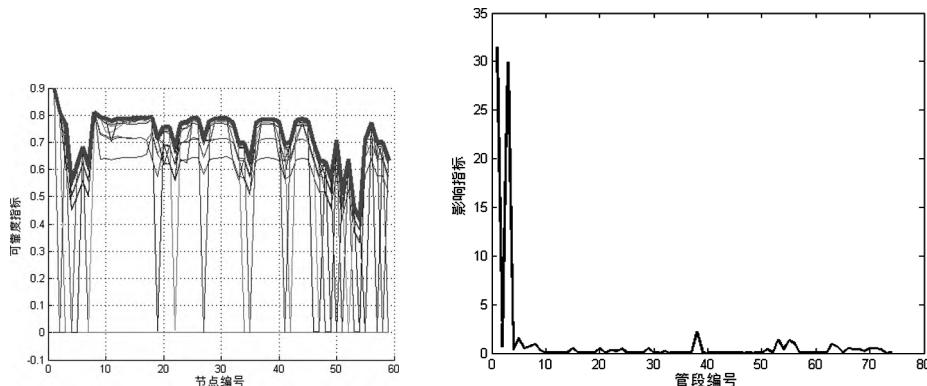


图 5 MATLAB 对燃气管网系统的模拟结果（左图：可靠度指标 右图：影响指标）

资料来源：作者自绘。

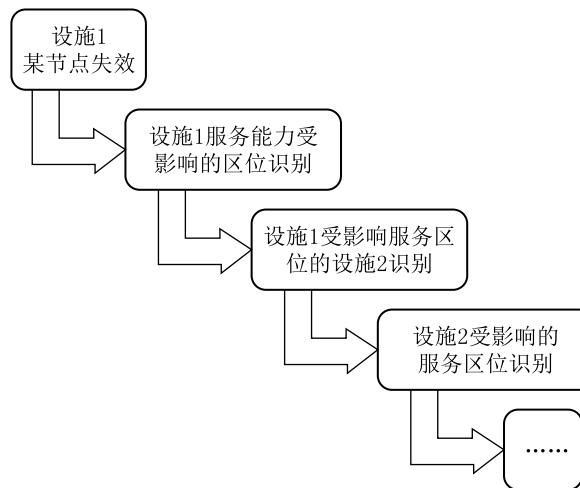


图 6 基础设施系统耦合路径图

资料来源：作者自绘。

3. 基础设施系统依赖数字化

基础设施系统依赖数字化是指不同基础设施间的互相依赖。以排水泵站与电网依赖性为例，电力网络重要管段破坏导致 K12 开关站和 35 kV 变压站连通可靠度下降，进而使得两个雨水泵站工作中断，在恶劣天气下大量降雨将无法排入河道，对雨水系统产生极大压力。电力网络重要管段（见图 7 中加粗线路）破坏导致 K12 开关站和 35 kV 变压站连通可靠度下降，进而使得两个雨水泵站工作中断，在恶劣天气下大量降雨将无法排入河道，对雨水系统产生极大压力。

可通过以下数字化手段解决：

- 第一步，识别雨水设施、燃气设施、通信设施等位置节点；
- 第二步，从电网中识别临近上述位置节点的 10 kV 开关站或 35 kV 变压站，以此置为待分析的节点，下称“重要节点”；
- 第三步，电网系统识别出网络中哪些线路对“重要节点”影响重大；
- 第四步，假定雨水设施、燃气设施、通信设施等位置节点破坏，这些系统将发生何种变化；
- 第五步，按照事故链因果关系和上述分析结果，梳理事故响应。

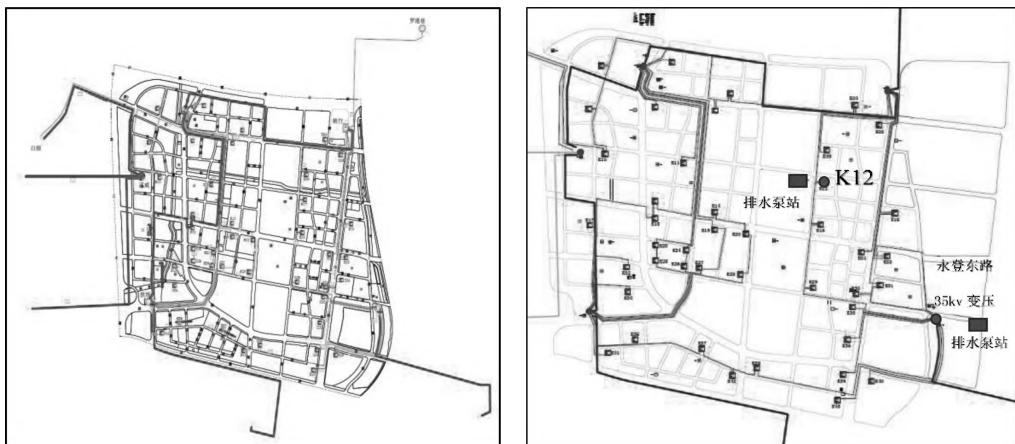


图 7 基础设施系统依赖：排水泵站与电网线路
(左图：电网线路 右图：排水泵站线路)

资料来源：作者自绘。

综上所述，全球超大型城市可充分应用公共安全关键技术和人工智能等新兴技术，推进城市数字化转型，领域涉及城市生活、城市经济发展、城市治理。在全球城市数字化转型中，各城市体应根据自身情况搭建城市网络信息化公共服务，例如“一网通办”以及“一网统管”。同时利用算法开发和玻璃幕墙等“神经元”建设应用场景，智能覆盖全球城市风险动态地图，完善提升城市数字化智能化信息平台，及时监控预警，识别风险点，让不同城市在城市生命周期全过程管理中呈现出安全性以及韧性。

(二) 基础设施数字化与城市安全韧性

由于地理关联、网络拓扑关联和功能关联，失效事件在复杂网络中传递蔓延，往往形成小灾致大灾。城市单系统自身构成复杂的网络，且不同系统潜在的脆弱性不同：多个系统相互之间的依赖性形成级联效应，会放大单一系统的脆弱性；单一系统失效极易导致网络的整体中断、瘫痪或失效。近年来全球各大城市出现的暴雨中“看海”情景，节假日出现人流踩踏等安全事故，是城市各类基础设施在数字化转型过程中未

有效增强城市安全韧性的典型体现。

城市市政管网基础设施系统频发各类突发事故、泄漏爆炸、路面塌陷以及运行安全事件，造成经济损失以及人员伤亡。根据近 15 年来全球城市管线事故数据统计，燃气、供水和排水管道事故约占 80%，城市市政管线每年事故 2 000 次以上，因灾害或事故造成年损失高达 450 亿元。当前全球城市的基础设施在应对突发事件时暴露出安全韧性不足、系统整合不够，主要表现在：（1）城市基础设施系统孤立、效率低下，新信息技术手段未能充分应用；（2）各基础设施子系统多头管理、争夺空间，难以有效联动、现状矛盾突出。

地下空间风险监测预警的问题主要表现在：（1）对风险难以做到全过程、全周期的智能化动态监控识别，多源数据实时采集、融合传输和数据处理能力不足；（2）风险智慧监控系统平台多为独立运行系统，资源整合、资源共享、综合运用效能较低，系统利用率低、资源闲置率高、信息可用性差；（3）风险评估与预警存在基础数据薄弱、隐患识别手段单一、动态评估模型缺乏等问题，缺少风险大数据机器处理算法和分级预警模型；（4）地下空间火灾预警系统与平台能力不足；（5）地下空间治理与智能化、信息化融合水平低。

鉴于此，可利用地下空间基础设施的数字化转型进行数字技术赋能的风险感知与消防设备监控。

1. 数字技术赋能的火灾风险感知与基础设施预警监控

在对城市地下空间火灾风险感知与预警监控中，火灾预警数字化系统运行逻辑为：基于海量多源数据收集和高效处理，构建评价指标体系，建立安全风险预警信息数据平台以及数据库，监控实时风险因素的变动以及评价各种风险状态偏离预警线的强弱程度，最后发出预警信号和预控对策（见图 8）。

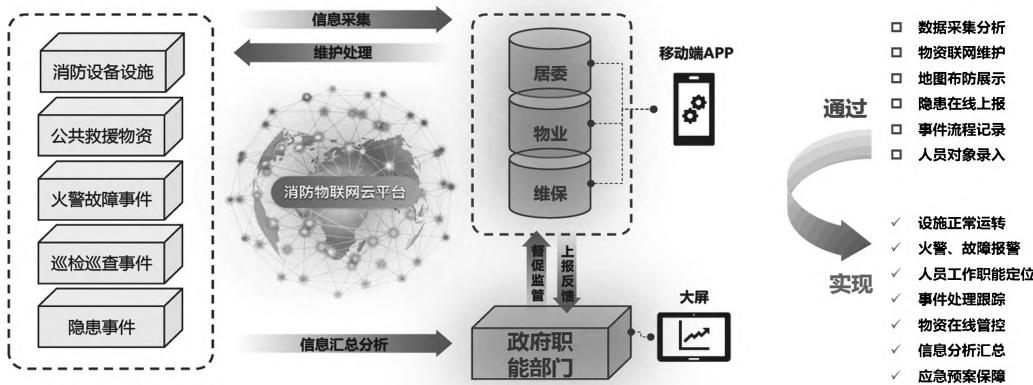


图 8 城市地下空间火灾风险感知与预警监控路径图

资料来源：作者自绘。

智能监测感知地下建筑内消防设施状态、燃气泄漏、人的不安全行为等信息，通过探测火灾早期特征参数，实现对火灾风险评价，使用的探测装置包括温度湿度传感器、烟雾传感器、图像热成像传感器、水位探测器、可燃气体探测器、电气火灾探测器、智慧用电监测、视频监控等。

同时，融合建筑设计文件、3D模型、建筑信息模型（BIM）等数据，装备自动报警系统、消防给水系统、消火栓系统、自动喷水灭火系统、防烟排烟系统、燃气等数字孪生可视化。通过无标定物的建筑图纸识别技术、相机标定以及多场景匹配，解决图像上传、进一步识别图纸特征等问题，实现3D场景的自助化云服务，让消防安全管理不再“扁平化”。

在基础设施数字化过程中，对火灾隐患进行智能识别、可视化监测以及建立交互式虚拟仿真模型，实现智能消防数字化建模与实体映射。现有基础设施通过自主学习历史数据、实时监测，做出预测性洞察，以火灾防控、物联感知、历史火灾数据等为支撑，采用机器学习和深度学习的方式，分析影响地下建筑消防安全的危险因素，构建智能化地下建筑消防安全风险动态评估模型。

最后，提出地下建筑火灾风险评估量化指标体系及评估方法，开发地下建筑消防安全隐患排查及风险评估系统。其由大数据交互中心、规则中心、事件研判中心等组成，利用人工智能算法将汇集的消防数据，传输至规则中心进行模型研判，最终输出消防安全分析报告并触发事件通知到相应人员，进入下一步事件数据跟踪，形成数据驱动事件的监管闭环。

2. 数字技术赋能的水灾风险感知与基础设施预警监控

在对水灾风险感知和基础设施数字化预警过程中，可采用数字化赋能方式，收集各个位置的实时图像，包括：（1）水位传感器（在出入口、连通处、重点位置布设）；（2）降水监测（在地下空间所在的合适的地表位置）；（3）排水、挡水设施运行监测；（4）监控摄像设备（淹没水深、排水及挡水设施运行、人群密度等）；（5）临近建筑设施合作联合收集浸水信息；（6）其他相关要素。

紧接着，利用图像识别技术，计算实时淹没水深、排水及挡水设施运行、人群密度和其他相关信息，将收集到的相关信息反馈给洪水监测与预警预报平台，系统平台实时分析洪灾动态变化，实现智能化水灾预警预报。

3. 数字技术赋能的极端气象风险感知与基础设施预警监控

全球主要超大城市因地貌、气候、水系等因素，自然灾害频繁，并成为影响全球城市安全韧性的主要风险（见图9、图10）。

现有全球主要城市的基础设施数字化尚未考虑各子系统安全与应对突发事件的综合规划对策，对提高安全韧性存在不足。传统型安全韧性的基础设施规划涵盖三个层

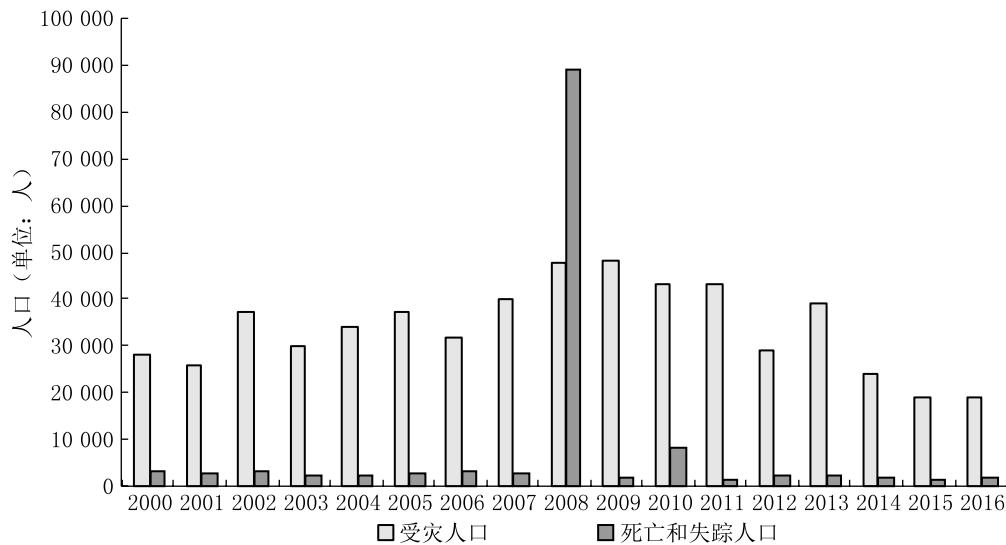


图 9 2000—2016 年我国自然灾害受灾人口统计

资料来源：国家民政部《民政事业发展统计公报》，<https://www.mca.gov.cn/article/sj/tjgb/> [2017-08-03]。

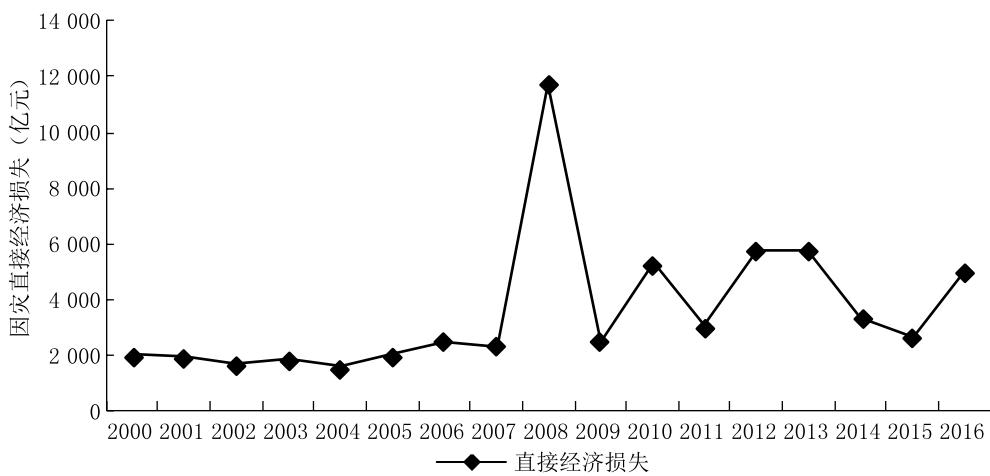


图 10 2000—2016 年我国自然灾害受灾直接经济损失

资料来源：国家民政部《民政事业发展统计公报》(2000—2016)，<https://www.mca.gov.cn/article/sj/tjgb/> [2017-08-03]。

面的研究：(1) 单个基础设施系统内部安全韧性关键组分识别与防灾规划；(2) 各类基础设施网络之间的安全韧性依赖性分析与关键组分识别；(3) 基础设施网络整体安全韧性的评价指标与影响因素。在未全面数字化转型前，城市主要基础设施各子系统之间的依赖性影响并没有研究，单系统要素的失效对综合防灾网络可能产生的级联效应影响并不清楚(见图 11)。

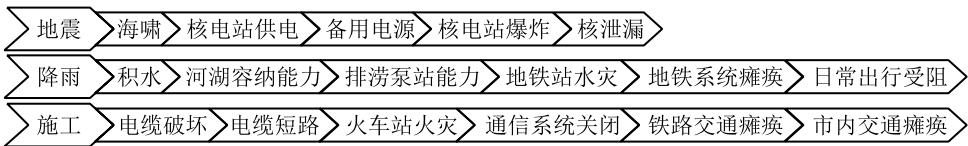


图 11 基础设施与自然灾害的级联效应

资料来源：作者自绘。

城市的生命线基础设施在应对突发事件例如高温、节假日等时发生严重损坏和服务中断，通过以下传导路径导致城市应对突发事件及其次生灾害问题时损失加剧：

- (1) 空间放大效应——由于地域广大，现代城市的安全风险往往产生耦合效应，引发次生风险、衍生风险；
- (2) 人口放大效应——由于人口密集，一旦发生灾害或事故，防灾与应急难度加大，导致人员伤亡多、社会影响严重；
- (3) 损失放大效应——现代城市社会经济与财富密集，灾害或事故发生后会形成连锁反应，经济损失巨大；
- (4) 网络放大效应——城市生命线网络系统相互依赖性强，灾害发生后产生连锁反应，加剧灾害破坏，形成区域性瘫痪，且修复难度大、恢复周期长。

因此，在城市基础设施的数字化转型中，应充分完善市政管网及地下综合体供给管网的监测与预警评估体系，并利用备用电源的冗余配置与通讯网络的多种传输方式。

四、基础设施数字化的潜在风险

基础设施数字化转型的过程中承载了海量的数据，数据来源多样化，涵盖基础设施的运营的核心数据以及隐私数据。海量数据在基础设施数字化和新型基础设施平台整合显著增加了黑客的攻击收益，且降低了攻击成本，这给基础设施数字化和数据的安全使用带来了新的挑战，风险具体体现在：

- (1) 因海量数据来源多样化、组件多样化、用户多层次化，数据误用风险显著提升；
- (2) 因分布式计算和大数据存储，基础设施系统运营的数字化增加了管理难度，潜在风险更难发现；
- (3) 非结构化数据快速增长叠加海量数据流动路径复杂化，对各类大数据进行整合分析共享会带来新的风险。

基础设施的底层数据支撑着基础设施的日常运营，关系着城市的生命线。因此在增强城市韧性的基础设施数字化转型的进程中，需要做好以下工作：

- (1) 全方位构建数据安全体系。尽可能让基础设施的底层数据在数据全生命周期

的过程中做到数据不泄露、数据可追溯和数据隐私合规。

(2) 保证基础设施运营的平台安全。基础设施系统的安全和防攻击性是基础设施数字化全方位的数据安全体系的基石，应该从设施的需求、设计、开发、测试、运行和维修的全生命周期分阶段管控，确保基础设施系统的安全。基础设施系统的平台安全包括传感器等硬件设备安全，操作系统、数据库等软件安全，以及网络协议等安全。

(3) 保证基础设施的底层数据安全。基础设施的底层数据安全指基础设施为支撑海量数据在数据全生命周期的过程中提供的对数据安全的保护，如数据私密隔离和访问限制控制等。在目前各类大数据融合的背景下，不同网络叠加各类海量数据融合汇集，数据泄露风险在基础设施数字化转型过程中突出。

(4) 保证数据隐私合规。数据合规是指数字化基础设施通过数据脱敏、密文搜索等方式，保障底层数据在全生命周期的过程中合规。^①

五、总结与展望

气候变化、公共突发事件的不确定性将成为未来全球韧性城市面对的主要挑战。利用基础设施数字化，多手段的对策是我们的必然选择。其中，智慧城市、基础设施、应急预案等措施相互之间不可替代，应该彼此作为补充。大数据、智能化、移动互联网和云计算等技术为智慧城市的基础设施数字化奠定了基础，也为城市治理提供了手段，但是却依赖于城市网络基础设施的服务能力，它是城市建成环境与城市居民之间的桥梁，这也凸显出基础设施数字化对增强城市安全韧性的重要性。在全球城市基础设施数字化推进过程中，更要专注于数字化的过程及其应用效果。在未来的城市基础设施数字化转型和韧性智慧城市的建设中，全球城市应该重点关注以下几个方面。

(一) 实施全方位城市基础设施的数字化更新与韧性投资，筑牢城市安全防线

从“城市生命线系统链”的思维出发，基础设施工程的安全韧性构建韧性城市的基础。在城市发展过程中，超大型城市的老旧小区、老建筑、老设备等，供水、电力、管线等能源供给系统，是城市生命线风险的高发区和应对突发事件的脆弱区。因此，加大城市基础设施安全韧性的投资力度，实施城市硬件和数字化更新换代，切实提高城市硬件的安全韧性和抵御力，对提高超大型全球城市的整体安全韧性具有重要作用。

(二) 加大城市生命线的数字化建设

城市生命线涵盖电力燃气等能源管道、交通、电信、水等管网廊道。在超大城市运行中，借助有限的人力，无法对各类潜在风险做出预判预警，这成为对基础设施进行应急管理时所面临的主要困境。利用现代科技进行数字化城市治理是超大城市建设

^① 欧盟于2018年10月4日发布《非个人数据自由流动条例》，放宽非个人数据流动限制。

安全韧性城市基础设施的重要支撑。可利用城市智慧大脑结合大数据、天网系统、舆情监测数据分析系统、北斗导航、人工智能、物联网、5G 智能社区等现代科技，实时监测城市生命体，对其潜在风险点在第一时间进行分析研判预警，打造生命线安防数字智能一体化系统。

（三）推动全球城市数字化转型，提高城市生命线风险动态感知与基础设施监测预警能力

全球超大型城市可充分应用公共安全关键技术和人工智能等新兴技术，推进城市数字化转型，领域涉及城市生活、城市发展、城市治理。在全球城市数字化转型中，各城市应根据自身情况搭建城市网络信息化公共服务，例如“一网通办”以及“一网统管”。同时利用算法开发和玻璃幕墙等“神经元”建设应用场景，智能覆盖全球城市风险动态地图，完善提升城市数字化智能化信息平台，及时监控预警，识别风险点。针对老旧小区、城中村、老建筑等大型公共基础建筑设施，可采取“集中成片”“微更新”等城市更新手段，改善设施的数字化标准，促使城市具备安全韧性的特征，根除设施中的安全风险隐患。

（四）加快基础设施的数字化风险防范和应急管理^①

此次新冠疫情首次利用通信，结合交通基础设施数据进行大数据追踪，有效遏制疫情蔓延。为此，建议全球城市在基础设施数字化转型中建立数字化平台共享应急信息以及多基础设施系统协同工作机制平台，设定并建设“城市安全健康单元”，配置应急基础设施例如逃生通道和应急避难场所，配套公共服务设施体系，帮助提升城市综合体的安全应急能力。

（责任编辑：高鹏）

^① 徐辉：《基于“数字孪生”的智慧城市发展建设思路》，《学术前沿》，2020年第8期。

Abstract and key words

The Economic Globalization and the Development of China's Global Cities

Shi Guangyu

Abstract: Global cities emerge from a confluence of factors, with economic globalization being the cornerstone. This study explores how the latest wave of globalization has spurred not just worldwide economic expansion but also reshaped the economic landscape, contributing significantly to the rise of global cities. In this context, developing nations have integrated into the global economic fabric, with China, post-reform and opening-up, cementing its role in the global value chain. The rapid growth of China's economy and the evolution of its industrial framework are highlighted, underscoring the country's pivotal global cities as linchpins in both national economic growth and the broader global urban matrix.

Keywords: Global City, China, Economic Globalization

Digital Transformation of Infrastructure and Urban Resilience

Deng Xiaoying, He Lei

Abstract: The digitization of urban infrastructure is at a nascent stage globally, presenting vast potential. This research delves into the nature of digital infrastructure and its role in bolstering the security and resilience of global cities amidst challenges posed by economic, technological, and urban development shifts. The study's scope includes assessing the current state of urban digital infrastructure, exploring various digital modalities and their disparities, and offering an exhaustive analysis of the interplay between infrastructure digitization and urban resilience.

Keywords: Infrastructure Digitization; Urban Resilience; Digital Transformation; Global City