

网络化城市及在可持续的城市韧性构建中的应用

克里斯·卡纳博 贺剑锋*

德国欧博迈亚集团旗下欧博迈亚工程咨询(北京)有限公司, 上海 200062

摘要: 随着城市化的发展, 城市所面临的不确定和挑战也不断增大, 于是韧性城市的建设便成为城市抵抗内外扰动的工具。本文在全面回顾韧性概念演化和城市韧性核心特征的基础上, 总结了韧性城市的网络化特征。通过城市网络理论的阐述, 引发了利用网络化城市规划方法助力可持续城市韧性构建的探讨, 并用项目实例进一步验证了网络化思维在韧性城市中的作用。

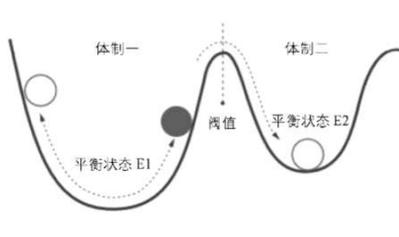
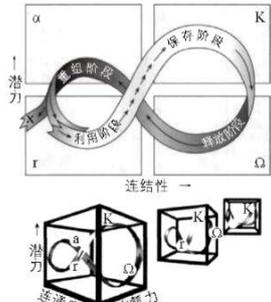
关键词: 城市韧性; 网络化城市

一、引言

城市, 这一人类社会发展史上的最大成就, 是高度人类文明最为集中的体现。过去一个世纪城市化的快速发展, 既极大地改变了人类的生活方式和水准, 也对地球环境造成前所未有的影响。城市作为高度复杂的社会生态系统, 面临的挑战也再不断加剧。这些危机不仅来包括地震、洪水、台风等来自外界的各种冲击和扰动, 也包括城市体系自身的系统性、结构性隐患, 例如健康安全危机、经济社会危机等, 以及其连带引起的诸如能源短缺、气候变化等一系列外部反馈。始于2020年初的新型冠状病毒全球大流行, 更是让人类认识到城市发展所面临的不确定性和未知风险有多复杂, 且其所造成的潜在影响和后果有多显著和深远。面对日益增多的种类繁多、随机性高、破坏性大的内外危机, 如何完善城市系统, 提升其应急反应和适应恢复能力, 已经成为学术界、科学界和各级政府共同面临的挑战。作为城市发展建设的框架性制定者和奠基人, 城市规划和系统设计在城市危机管理和处置领域的基础性作用也逐步被认可和重视。

二、城市韧性概念演变

表1 韧性理论的演变

韧性视角	工程韧性	生态系统韧性	社会-生态韧性
特点	恢复时间, 效率	缓冲能力, 抵挡冲击, 保持功能	重组, 维持, 发展
关注	恢复, 恒定	坚持, 抗扰性	适应能力, 可变换性, 学习, 创新
语境	邻近单一平衡状态	多重平衡	适应性循环, 综合系统反馈, 跨尺度动态交互
图示			

资料来源: 参考文献^[1], p16。

韧性的概念最初被广泛用于工程领域, 而城市相关的韧性概念则源于20世纪70年代美国生态学教授霍林(C.S.Holling)在其关于生态系统学的著作《生态系统韧性和稳定性》(Resilience and Stability of Ecological

*通讯作者: 贺剑锋, 1984年7月, 男, 汉族, 江苏常州人, 现任德国欧博迈亚集团旗下欧博迈亚工程咨询(北京)有限公司城市规划与智能交通高级主管, 注册城乡规划师, 清华大学建筑学学士、香港大学建筑学院城市规划硕士、香港大学社会科学学院交通运输政策与规划硕士。研究方向: 智慧城市、韧性城市、智能绿色交通。

Systems) 中对“生态系统韧性”的阐述,即“自然系统应对自然或认为原因引起的生态系统变化时的持久性”^[1]。随后,学术界对韧性的研究逐步深入,并从最初的自然生态向韧性生态延展。2001年,霍林(C.S.Holling)和冈德森(L.H.Gunderson)就首次将生态韧性的概念运用于人类社会系统,用以描述社会—生态系统中干扰和重组之间的相互作用及其韧性变化^[2]。总体看来,韧性的概念提出以来,经历了两次较为明显的概念演进:从最初的工程韧性到自然生态韧性,再到社会生态韧性,内涵也从“单一平衡”到“多重平衡”,再到“适应性循环”逐步演变(表1)^[3]。城市作为现代人类社会生态系统的核心载体,韧性的概念自然而然被应用到城市研究中,而基于适应性循环、强调综合系统反馈,和跨尺度动态交互的社会生态韧性理论也成了城市韧性研究的参照基础^[4]。

随着对韧性理论研究的不断深入,城市韧性的概念也得到更为清晰地表述,即城市系统和区域通过合理准备、缓冲和应对不确定扰动,实现公共安全、社会秩序和经济建设等正常运行的能力^[4]。城市本质上是可持续的物质系统和人类社会的结合体^[5]。城市韧性也相应地同时具备了物理和社会的双重属性,由四个主要的组成部分,包括基础设施韧性、制度韧性、经济韧性和社会韧性。基础设施韧性指城市建成环境与设施,包括生命线工程和城市社区,的可靠程度和应急反应能力;制度韧性指政府和非政府组织管制城市 and 社区的引导能力;经济韧性指城市面对危机时表现出来的经济整体性、多样性和活力度的维持能力;社会韧性则指城市人口特征、组织结构方式及人力资本要素的集成,及在应急状态时的适应性和稳定性^[6]。

三、城市韧性的特征

关于城市韧性的特征,在学术界已经有了相对完整和透彻地分析。其中维尔德夫斯基(Wildavsky)的六项特征最为有代表性:内稳态,即组成系统的各个部分之间具备的强有力的联系和反馈作用;多样性,即资源和方式配置的多元性;高流动性,即系统内资源的快速调动和补充能力;扁平化,而非等级分明的层次组织关系;缓冲性,具备一定超越自身需求的能力,以使临界阈值不被轻易跨越;冗余性,即功能的重叠^[7]。

埃亨(Ahern)则提出了韧性城市的五要素模型:多功能性,即城市功能的混合型和叠加性,反之,功能单一的城市要素间缺乏联系,易导致系统崩溃;冗余度和模块化特征,即城市需具备一定程度的重复和备用设施模块,通过在时间上和空间上分散风险,从而降低危机状态下的损失;生态和社会的多样性,可以带来更过多问题解决思路、信息和能力;多尺度的网络和连接,无论是在城市的物质实体和空间分布层面,还是在人际群体之间关系上;以及适应性的规划设计^[8]。

四、网络化城市

城市韧性的特性与复杂网络的特征有着极高的相似度。城市及其区域本质上是一个开放的复杂巨系统^[9]。城市系统由一系列相互依赖的子系统共同构成,各子系统的叠合和交互作用促使了城市“混合式社会—物理复杂性网络”(HSPN: Hybrid Socio-Physical Complex Networks)的形成(图1)^[10]。这种内在的动力机制使得城市具备了鲜明的网络特征。



图1 城市混合式社会—物理复杂性网络(HSPN)建构示意

资料来源:参考文献^[3], p16

萨林加罗斯(Salinas)将城市理解为由某些简单规则自组织演化形成的复杂网络系统,并开创性地提出了城市网络理论(theory of urban web)来描述城市受这些简单规则驱动而自发涌现出的整体复杂性,完整诠释了城市形态、空间结构的演化过程^[11]。

城市网络理论中城市网络结构为三大核心要素：节点（nodes）、连接（connections）与层级（hierarchy），提出了城市系统可分解为若干组模块（modules）的理念。这些模块复杂、半自主且并非同质，由具有丰富内部链接的一组尺度相同、功能相异的节点所构成。居住区、商业办公区、公园、社区活动场所等城市日常生活中最基本的人类活动构成元素都属于城市网络中的节点。这些节点功能互补，并由多样的连接通道串联，共同构成了多尺度上的有秩序和层次的城市空间（图2）^[11-12]。

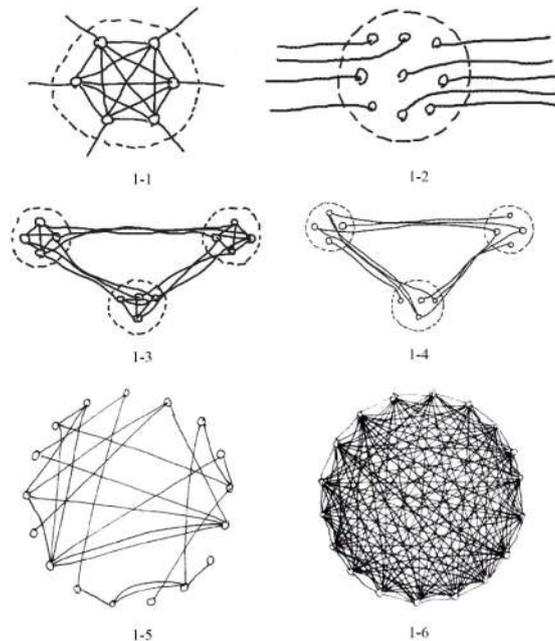


图2 城市网络理论模型示意图

1-1：六个节点构成一个模块；1-2：若干个节点之间由于没有内部连接，而不能形成模块；

1-3：模块通过节点之间的连接作用产生关联性；1-4：三个没有内部链接的非模块；

1-5：节点随机连接，形成网络；1-6：城市网络的典型模型

资料来源：参考文献^[12]，p78，p80

五、网络化城市规划的思考

城市网络理论的核心理念和观点给城市的韧性化设计与运营提供了完善的理论基础和实践导引。其应用覆盖多尺度的城市规划及建筑、景观、生态、基础设施等城市各系统的设计。除了在新城建设中的框架性指导意义，城市网络理论也能被广泛地应用城市更新过程中对既有城市空间和系统的改造升级。网络化规划逻辑在应对城市系统韧性问题方面主要有六大要点，包括路径连接互补节点、多重不规则的连接路径、抗失联的稳定性、避免连接通道过载、层次与分形，以及必要的不连续和分离性^[11]。

（一）路径连接互补节点

一般来说，连接只发生在不同或互补的节点之间，这源于构架学的基本定律^[13]。城市网络是基于家到学校、商店、办公室或公园的需求而产生的，从一个居所到另一居所的需求则要少得多。只有通过设置差异节点以促进近似节点之间产生积极联系时，邻里才能正常运转。于是构建城市网络的关键就有赖于在互补节点之间建立多个连接，然后合并成同样连接相似节点的路径。相比之下，只有相似节点之间的连接太弱，无法形成路径。我们需要在相似节点和相反节点之间保持平衡。在将多个连接合并为一条路径时，必须注意不要使通道过载，但这只是在高密度情况下才需要考虑的问题。如果没有足够的密度和节点的多样性，功能性路径永远无法形成。功能的过度分离和集中会引致城市网络的崩溃。而在任何一个同质的城市区域中，根本没有足够不同类型的节点组成一个网络。截然不同类型的元素，如住宅、商业和自然，必须相互交织才能催化连接过程^[14]。功能失调的城市通常集聚一系列同类型的节点，而功能均衡的城市则更多地集集成对的差异化节点。

（二）多重不规则的连接路径

城市环境中的每一个元素都有其与人类活动相关的意义。一个复杂的组织过程连接着城市网络的不同节点。连接使各类城市流 (city flows) 能够很容易地到达任何一点, 最好是通过许多不同的路径。一个有序的、紧密相连的城市环境从形态上看通常是不规则的^[15-16]。根据数学定理, 两个点只能用一条直线连接, 但它们可以用无数条曲线连接起来。为了最大化城市节点之间的可能连接数, 突破直角坐标 (方格网) 体系下的直接连接也就成为了必然趋势。多重连接性理论是由物理学中的一个主要结果所驱动和支持的。在费曼的量子力学路径积分公式中, 两个物体之间的相互作用可以写成所有可能路径上相互作用的总和。为了计算总的相互作用强度, 需要考虑连接两点的所有可能路径, 并根据它们发生的概率赋予适当的权重。然后沿着所有这些路径积分, 得到总的相互作用强度。以此类推, 如果希望城市网络中的每个节点都是强连接的, 那么只有通过大量不规则路径才能实现。东京地铁网络就提供了一个多个网络相互叠加的完美例子。

(三) 抗失联的稳定性

以网络概念解释, 那些运作良好的城市拥有着极高的冗余度。当有越来越多的途径经由各个节点穿越城市, 那么如果切断两个节点之间的链接, 城市仍然可以运作。这好比人类的大脑内部有太多的冗余神经联络, 当失去了一些连接时 (无论是由于受伤、手术治疗, 还是由于自然衰老), 信息仍然可以传递, 大脑在很大程度上依旧能起作用^[17]。与之相比, 当一个小电路损坏时, 机器就会完全停止工作。这种针对网络中断的稳定性概念是对后来的复杂性阈值概念的补充。对于每一条线路都有一定的故障概率的通信网络, 其稳定性研究已经存在, 这也直接适用于城市网络。在集中式网络、分散式网络与分布式网络这三种主要网络类型 (图3) 中, 分布式网络才能真正保证失联状态下的稳定性。可以说, 高韧性的城市网络系统必然具备显著的分布式特征。

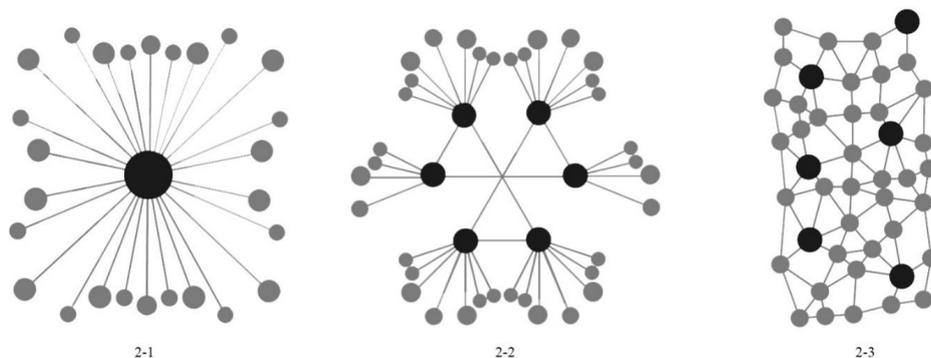


图3 集中式网络、分散式网络与分布式网络对比示意图

- 2-1: 集中式网络:所有节点都在一个中心下连接
 - 2-2: 分散式网络:没有单一的中心控制各个节点, 它们都有单独的实体
 - 2-3: 分布式网络:每一个节点都是相互独立、相互连接的
- 资料来源: 参考文献^[18]

(四) 避免连接通道过载

多重连接性有其功能上的原因, 通常太多的路径会合并到一个通道中。当所有的连接都是同一类型时, 它们会相互竞争并超过通道的所能承受的流量容量。在城市网络中具体表现为各类城市流, 比如行人或车辆, 的堵塞。在不同类型的连接重合的情况下, 较弱的连接会完全消失。例如, 人行道或自行车道不能与高速公路共存。不同层次上的联系可以纵横交错, 但不能重合。

(五) 层次与分形

一个成功城市在整体空间形态显然是不规则 (分形) 的^[19], 这不仅是一个视觉上的巧合, 更是体现出城市网络分形性质的本质^[20]。相比之下, 一个人工的缺乏活力的城市在平面上看起来往往非常规则, 没有小规模的结构。成功的城市是一个层次结构分明的网络集合体, 从高速公路到人行道, 所有这些都是不同的尺度上相互关联的。小规模的结构最终保证了城市的宜居性, 而大规模的连接促进了更高规模的要素流动。城市的空间结构是长期小规模渐进变化的无序结果^[16, 21]。由此产生的图案既没有几何上的简单性, 也没有功能上的简单性。城市的设计是从一个局部有序的系统自发产生的。这也强调了城市规划和城市发展从小规模开始并允许其发展以影响更大范围的重要性。

(六) 必要的不连续和分离性

在城市网络中，并不是任何一个节点之间都彼此相连。对于部分城市构成要素，如果不能有效地进行分离，甚至应该想到周边相连的其他要素。事实上，城市系统的核心要素通常会通过某种屏障或分界线进行彼此之间的分离^[14]，而边界（edge）扮演着屏障或分界线这种重要且不可或缺的角色^[22]。当不同的城市功能和社区之间存在分界时，它们往往可以更为健康平衡地共存^[14]。连接元素和隔离元素是互补的，它们的误用往往源自对城市网络概念的误解。当城市网络受到扰动威胁时，隔离元素，而不是连接元素，会做出有机反映来保护自身和与之相连的部分。这种单一的反应行为在空间上重组了社区，切断其与危险源头的联系，从而保障整个城市网络系统的安全。因此，在城市网络的构建中，系统内部节点或节点群落之间保证必要的不连续性和分离性，对加强城市韧性有着极其重要的作用。

美国洛克菲勒基金基于由四大领域、十二项目标、五十二个指标以及七大特性构成的城市韧性评价体系，系统性地对全球100座城市构建韧性城市的实践进行了评估，发现它们做采取的韧性行动都体现出了和上述六大要点类似的显著特征，包括多中心、分布式、内稳态、连通性、多样性等^[23]。

六、网络化规划在韧性城市建设中的应用实践

欧博迈亚长期致力于应用网络化设计思维，构建韧性城市模型，加强应对城市发展面临自然及人为的不确定因素，探索理想未来城市模型。

(一) 青岛中德生态城：网络化的组团核心

本案的突出特色在于营造网络化的组团核心（图4），在构建完整、和谐的城市的增加每个组团主体复杂性和多元性。也就是说，组成生态园的是不同组团，每个组团内部有共同的特征和主题，同时功能上又有不同的侧重，如工业组团、科研组团、商务商业组团、居住组团等，互相之间既有依赖性，又各自独立。每个组团的节点同时也是组团公共空间，即体现组团特色的区域。节点的设计多位于每个组团的几何中央，由建筑围合公共空间形成，结合中心绿地、广场及标志性建筑物等，突出组团特色。



图4 青岛中德生态城空间规划图



图5 青岛中德生态城组团功能构成图

以”中德文化交流组团”为例（图5），设计重点是贯穿的整个组团的中央公共空间，它作为公众集会、交往的空间，聚集人气，在承担公共交往功能的同时，结合商业、商务、文化娱乐等公共服务设施形成组团核心，提供完善

的公共服务，串联周边居住功能，形成功能多元、特点明确的社区组团。组团核心交通条件良好，毗邻重要道路或交通枢纽，并有直接通道相连。

(二) 雄安新区启动区城市设计国际咨询：网络化创新社区单元

本案力推网络化创新功能单元模式在新城开发的应用，创新功能单元强调以社区级的公共空间为核心，体现社会公平，塑造城市活力，以合理的空间层级划分满足不同功能和群体的需求。

相较于以功能实用性出发，形态风貌高度重复的现代居住区单元，创新城市单元优势在于空间组织形式灵活可变；以中运量公共交通站点为单元开发核心，可达性强；公共空间层次丰富，公共、半私密、私密空间过渡清晰。功能混合的土地利用旨在避免大型居住区、集中办公园区的产生，同时提高社区自足性，提升创新单元内部居住、工作的人数与外部通勤者的比值，缩短通勤距离，实现社区内部职住平衡。结合TOD开发模式，进一步协调居住、工作、通勤之间的关系。

以下图为例(图6)，创新城市单元以200×200米为模数，每个单元内均含有住宅、办公区、配套公共服务和商业中心，满足居民、白领日常生活的绝大部分需求。沿街形成完整的城市界面，地块内部再划分形式丰富的居住单元，引入生活次街概念，构建开放、生动、富有都市感的生活空间，实现从开放的街道空间到半开放的院落空间到私密的宅前空间的过渡。单元内部无机动车交通，适宜步行，尺度舒适宜人。



图6 雄安新区启动区城市设计创新城市单元构想图

(三) 义乌丝路新区启动区城市设计：网络化基础设施管理模式

本案引入了网络化的蓝、绿、灰三大基础设施相结合的运行管理模式，将自然水系、绿地和道路系统相结合的海绵城市系统，与将地下排水管网系统与垃圾处理相结合的半集中式供水排污系统，统筹规划，统一整合到设计中去。

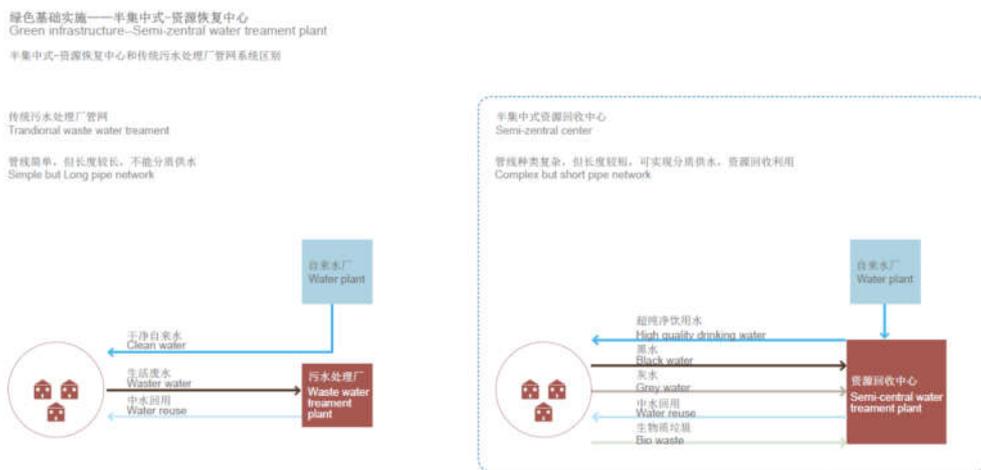


图7 义乌丝路新区启动区半集中式资源回收系统示意图

以半集中式供水排污系统为例，有别于传统污水处理厂，通过整体考量不同物质流和能量流的处理手法，将雨污、垃圾进行分类平行处理，实现降低能耗的同时，节约日用水量达30%~40%以上。通过真空二元管网系统，平行分离收集灰水（污染较少的水，如淋浴、洗涤后的水等）和黑水（含有大量有机污染物的黑水，包括油污水、冲厕

水等),在资源再生利用中心分开处理(图7)。灰水在处理中心在地消毒净化处理后,通过独立的管道进行中水回用,可以用作冲厕、清洁和灌溉用水。黑水处理过程中产生的污泥协同有机厨余垃圾一起发酵,提高沼气产量,在降低污染排放的同时,实现能耗自给自足运行。

七、结语

城市是人类社会创造的最复杂的社会生态巨系统,在经济社会活动高度密集的当今社会,城市抵御不断频发的不确定因素和危机的能力显得越发重要。城市韧性的研究和实践成为实现城市可持续发展的全新途径。在达成城市韧性的目标过程中,需摒弃传统工程和生态韧性思维,充分运用网络化思维,尊重城市作为混合式社会—物理复杂性网络的基本规律。要构建和维持负责的城市网络系统不可避免地很耗费成本。然而,所有迹象都表明,如果这些解决办法得不到实施,人类社会的代价将无比巨大的,其结果甚至可能是毁灭性的。城市规划者和城市系统建设者都必须仔细考虑这些最终成本。

参考文献:

- [1]Holling C S.Resilience and Stability of Ecological Systems[J].Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(4):1-23.
- [2]Gunderson L H.,Holling C S. (eds.)Panarchy:Understanding Transformations in Human and Natural Systems[M].Island Press, Washington,DC, 2002.
- [3]李彤玥.韧性城市研究新进展[J].国际城市规划, 2017,32(5):15-25.
- [4]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.
- [5]Godschalk D R.Urban Hazard Mitigation:Creating Resilient Cities[J].Natural Hazards Review, 2003,4(3):136-143.
- [6]Jha A K,Miner T W,Stanton-Geddes Z.(eds.)Building Urban Resilience:Principles,Tools,and Practice[M].World Bank Publications, 2013.
- [7]Wildavsky A B.Searching for Safety(Vol.10)[M].Transaction Publishers, 1988.
- [8]Ahern J.From Fail-Safe to Safe-to-Fail:Sustainability and Resilience in the New Urban World[J].Landscape and Urban Planning, 2011,100(4):341-343.
- [9]Salingaros N A.,Bilsen A V.Principles of Urban Structure[M].The Netherlands:The Techne Press, 2005.
- [10]Paul G,Tanizawa T,Havlin S,et al.Optimization of Robustness of Complex Networks[J].The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems, 2004,38(2):187-191.
- [11]Salingaros N A.Theory of the Urban Web[J].Journal of Urban Design, 1998(3):53-71.
- [12]肖彦,孙晖.如果城市并非树形——亚历山大与萨林加罗斯的城市设计复杂性理论研究[J].建筑师, 2013(6):78-85.
- [13]Salingaros,N A.The Laws of Architecture from a Physicist's Perspective[J].Physics Essays, 1995(8):638-643.
- [14]Alexander C.Ishikawa S.Silverstein M.Jacobson M.Fiksdahl-King I.Angel S.A Pattern Language[M].New York:Oxford University Press, 1977.
- [15]Gehl J.Life Between Buildings[M].New York:Van Nostrand Reinhold, 1987.
- [16]Hillier B.Space is the Machine[M].Cambridge:Cambridge University Press, 1996.
- [17]Fischler M A.Firschein O.Intelligence:The Eye,the Brain,and the Computer,Reading[M].Massachusetts:Addison-Wesley, 1987.
- [18]Blockchain Engineer.Centralized vs Decentralized vs Distributed Network:An Overview[EB/OL].<https://blockchainengineer.com/centralized-vs-decentralized-vs-distributed-network/>, 2020.
- [19]Batty M.Longley P.Fractal Cities[M].London:Academic Press, 1994.
- [20]Batty M.Xie Y.Preliminary Evidence for a Theory of the Fractal City[J].Environment and Planning A, 1996(28):1745-1762.
- [21]Hillier W R G.Hanson J.The Social Logic of Space[M].Cambridge:Cambridge University Press, 1984.
- [22]Lynch K.The Image of the City[M].Cambridge,Massachusetts:MIT Press, 1960.
- [23]Rockefeller Foundation,ARUP.City Resilience Index:Understanding and Measuring City Resilience[EB/OL].<https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/city-resilience-index>, 2017.