

韧性城市理念下的复合基础设施规划设计策略研究 ——以宁波东城生态走廊分析为例

Research on Integrated Infrastructure and Its Design Strategies Based on the Concept of Resilient Cities: Taking the Eco-Corridor of Ningbo's East Town as an Example

高晓明^{1,2} 王璐¹ 禹珊³
GAO Xiaoming^{1,2} WANG Lu¹ YU Shan³

(1. 山东建筑大学建筑城规学院, 济南 250101; 2. 山东建筑大学院士创新平台“动态建筑模块化研究”实验室, 济南 250101; 3. 山东省泰安市岱岳区职业教育中心, 泰安 271000)

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong, China, 250101; 2. Shandong Jianzhu University Academician Innovation Platform Kinetic Architecture Modular Research Lab, Jinan, Shandong, China, 250101; 3. Taianshi Daiyuequ Zhiye Jiaoyu Zhongxin, Taian, Shandong, China, 271000)

文章编号: 1000-0283(2023)08-0013-08

DOI: 10. 12193 / j. laing. 2023. 08. 0013. 002

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2023-05-12

修回日期: 2023-06-29

摘要

当前不断提速的城市化进程逐渐导致资源紧缺、污染加剧和气候恶化等一系列城市生态问题,也给城市基础设施带来了巨大扰动、冲击与压力。因此,如何通过各类基础设施的规划设计提升城市应对上述生态问题的适应力成为推进城市可持续发展的重要议题。基于此,立足于韧性城市理念,通过厘清韧性城市与基础设施之间的耦合关联关系,从资源生产供给、社会生活重塑和自然生态调节三层面阐述复合基础设施的内涵、层级与原则;同时借助对宁波东城生态走廊规划设计案例的分析,提出“生产—生活—生态”三位一体的复合基础设施规划设计策略,为中国城市可持续发展提供理论支撑与实践借鉴。

关键词

韧性; 韧性城市; 复合型基础设施; 三生一体

Abstract

At present, the accelerating urbanization process has gradually led to a series of urban ecological problems, such as resource shortage, pollution intensification, and climate deterioration. It has also brought great disturbance, impact, and pressure to urban infrastructure. Therefore, how to enhance the adaptability of cities to cope with the above-mentioned ecological problems through the planning and designing urban infrastructure has become an important issue in promoting urban sustainable development. Based on this, this article, based on the concept of resilience expounds on the connotation, hierarchy, and principles of composite infrastructure from three levels: resource production and supply, residents' life reconstruction and natural ecological regulation by clarifying the systematic relationship between resilient cities and infrastructure. At the same time, with the help of the analysis of the Eco-Corridor of Ningbo's East Town planning and design, the paper puts forward the composite infrastructure planning and design strategy of "production, life and ecology", which provides a theoretical and practical reference for China's sustainable urban development.

Keywords

resilience; resilient city; integrated infrastructure; production-life-ecology trinity

高晓明

1983年生/男/山东济宁人/博士/副教授/
研究方向为生态城市设计及其理论

王璐

1998年生/女/山东济南人/在读硕士研究生/
研究方向为建筑设计及其理论

禹珊

1996年生/女/山东泰安人/助理讲师/研
究方向为建筑设计及其理论

随着中国城市化进程的持续加速,资源紧缺、污染加剧和气候恶化等诸多问题日益突显,不断扰动冲击着原本脆弱的城市人居环境,继而导致系统性的城市生态危机。其

中,城市作为“社会—经济—自然”复合的生态系统,亟需建立以各类城市基础设施为依托且兼具适应力、抗压力和恢复力的“风险防御系统”,以缓解上述扰动和冲击对城

市生态系统的影响与损害。继中共中央十九届五中全会首次提及建设“韧性城市”的建议后，2021年3月国家“十四五”规划纲要明确提出“顺应城市发展新理念新趋势，开展城市现代化试点示范，建设宜居、创新、智慧、绿色、人文、韧性城市”^[1]。同时，城市基础设施作为增强城市生态系统适应力、抗压力和恢复力的重要支撑体则是构建韧性城市的关键要素，其也逐渐由优化资源配置、调节气候环境、降低污染排放等单一功能并置逐渐向“生产—生活—生态”多功能集成的复合型基础设施转变。

基于上述背景，文章立足于韧性城市的理念，以城市韧性提升为目标，通过整合城市生产类、生活类和生态类基础设施的空间、功能和技术要素而提出“生产—生活—生态”三位一体的复合基础设施概念模型，同时结合宁波东城生态走廊的分析进一步提出其规划设计策略，借以构建以韧性城市为导向的复合基础设施规划设计理论与实践指导框架。

1 韧性城市的相关概念

1.1 韧性的内涵与特征

“韧性”（Resilience）源自拉丁文 *resilio*，原意为“弹性，回弹，快速恢复的能力”。19世纪中期，“韧性”的概念缘起于机械学领域，用于描述机械工程中金属受外力冲击扰动作用发生形变后复原至之前均衡状态的能力；

20世纪中期，西方行为心理学学者借用“韧性”的概念描述个人遭受心理创伤等扰动影响后保持或恢复心理健康的能力；1973年，美国生态学家霍林（C. S. Holling）首次将“韧性”引入至生态学领域，用于描述生态系统的“多稳态”特征。此后，针对复杂多样的系统，霍林、冈德森（C. S. Buzz Gunderson）和沃克（P. C. Walker）等诸多生态学者针对不同系统特征，在“韧性”概念基础上先后提出了“工程韧性”（Engineering Resilience）、“生态韧性”（Ecological Resilience）和“演进韧性”（Evolutionary Resilience）的概念^[2]，从而逐步拓展了“韧性”的内涵。

其中，工程韧性强调单一平衡稳态特征的系统在受外部冲击扰动脱离其均衡状态后恢复至原平衡稳态的能力，其强弱取决于系统结构和功能对冲击扰动的抵抗力及其“后向恢复”（Recovery Back）的速度^[3]。生态韧性强调具有多重平衡稳态特征的系统在受外部冲击扰动超过最大“回弹阈值”（Elasticity Threshold）后从一个平衡稳态进入另一个平衡稳态的能力，其强弱取决于系统结构和功能承受冲击扰动的最大阈值及其对新平衡稳态的适应程度^[4]。演进韧性则立足系统演进的视角，强调具有非均衡演进特征的系统在受外部冲击扰动调整自身状态后动态演进至新平衡稳态的能力，其强弱取决于系统结构和功能“前向恢复”（Recovery Forward）而实现新平衡稳态的学习与转变程度^[5]（表1）。

1.2 韧性城市的内涵与特征

20世纪后期，美国学者米勒提（Miletti）首次将“韧性”应用至城市基础设施规划中用于应对气候变化和灾害^[6]。2002年，倡导地区可持续发展国际理事会（ICLEI）在联合国可持续发展全球峰会上首次提出的“城市韧性”（Urban Resilience）议题成为后续城市规划研究的热点问题。2003年，戈德沙尔克（Godschalk R.）指出“韧性城市”是有物质系统和人类社区组成的可持续性网络，其中物质系统指城市中的自然和人工环境要素^[7]；2005年，韧性联盟（Resilience Alliance）将“韧性城市”定义为：“城市系统能够消化并吸收外界干扰而保持原有主要特征、结构和关键功能的能力”^[8]；2013年，洛克菲洛基金会启动“全球100韧性城市”项目并提出了包含经济和社会、基础设施与环境、健康与福祉、领导与策略4个维度的韧性城市评价指标^[9]。此后，2016年梅罗（Meerow）等^[10]将“韧性城市”定义为：城市系统及其所有时空尺度的社会—生态—技术网络受干扰时维持及时恢复到所需功能，同时适应变化及其快速转变当前或未来适应能力的系统。

可见，韧性城市作为城市系统的韧性表征主要包括经济韧性、社会韧性、生态韧性和制度韧性4个方面内容，其在外部冲击扰动下的运行机理体现了韧性城市的基本特征：（1）通过城市系统的自我维持能力在一定时间确保其基本功能运行的稳定性和鲁棒性特

表1 三类“韧性”概念的异同分析
Tab. 1 Differences and similarities between three types of resilience concepts

类型 Types	概念 Concept	目标 Goal	重点 Emphasis	特征 Features
工程韧性	系统受冲击扰动后恢复至最初单一平衡稳态的能力	追求单一平衡稳态	强调抵抗程度和恢复速度	稳定与线性
生态韧性	系统受冲击扰动后从一个平衡稳态进入另一个平衡稳态的能力	追求多重平衡稳态	强调缓冲程度和适应程度	多变与适应
演进韧性	系统受冲击扰动后不断动态演进至新平衡稳态的能力	追求动态演进稳态	强调学习程度与转变程度	动态与混沌

征；(2) 通过城市系统的自我修复能力而实现其平衡的冗余性和恢复性特征；(3) 通过城市系统的自我组织能力而实现与环境协同进化的智慧性和适应性特征^[1]。同时，韧性城市作为城市系统物质环境的载体，主要包括自然和人工环境要素两方面内容：自然环境要素包括公园、水体、绿地等物质要素，是韧性城市的维持系统；人工环境要素主要指建筑、广场、基础设施等物质要素，是韧性城市的支撑系统。其中，城市基础设施作为韧性城市物质空间的重要构成内容，对于城市韧性特征的塑造具有积极作用。

2 韧性城市理念下的复合基础设施构建研究

2.1 韧性城市的复合基础设施

城市作为“经济—社会—自然”复合生态系统^[12]，其经济生产、社会生活和自然生态功能之间存在错综复杂的关联关系并借助于与之对应的生产基础设施、社会基础设施、绿色或生态基础设施而维系其自身的功能运行与结构稳定。然而，面对资源短缺、活力丧失和污染加剧等城市安全威胁问题，集中化、单一化且碎片化的传统城市基础设施模式逐渐导致城市复合生态系统脆弱性的增加、多样性的缺失和协同性的降低等诸多阻碍城市可持续发展的问题。因此，城市基础设施作为城市复合生态系统的支撑体系，针对上述城市安全威胁问题，以韧性城市理念为导向，以资源循环、社会融合和自然共生为目标，通过优化整合传统基础设施的资源生产自给、社会生活服务和自然生态调节功能而构建“生产—生活—生态”三位一体的分散化、多样化、网络化复合型城市基础设施体系，这是提升城市经济生产、社会生活和自然生态三重韧性并推动城市可持续发展的关键途径^[13]。

复合基础设施作为基于“经济—社会—自然”的城市韧性实现方式，特指为城市经济生产、社会生活和自然生态功能提供支持保障，由人工、半人工半自然与自然环境及其附属工程技术设施组成且具有功能多样性、空间连接性和技术集成性特征的城市人居环境开放空间网络，包括雨水花园、农业温室、运动场地、休闲广场、公园绿地、人工湿地、绿色屋顶等要素（图1）。其中，水、能源、食物等资源作为城市人居环境存续的“生命线”是城市复合生态系统的支撑要素，复合基础设施通过提供与水、能源、食物等资源相关的生产、生活和生态效益，在一定程度上提升了城市复合生态系统应对极端或缓发事件冲击扰动的能力并增强了其鲁棒性、冗余性、适应性等韧性特征，总体构成了实现城市可持续发展的韧性框架。

复合基础设施对城市韧性的影响作用主要体现在雨水收集净化、清洁能源利用、可食景观营造、公共参与推行、健康活力提升、热岛效应缓解、空气质量提升等生产、生活和生态效益三方面，以功能、空间和技术复合协同的方式提升经济、社会 and 自然环境的韧性。其中，经济生产韧性方面，复合基础设施可为城市提供诸如雨水净化、太阳能利用、沼气热电联产、农业温室种植等与水、能源、食物生产相关的资源管理技术或设施；社会生活韧性方面，其所依托的城市开放空间可为城市提供休闲健身、康养娱乐与文化教育等生活活动场所；自然生态韧性方面，其所包含的绿地、水体、湿地等自然环境要素也可提供雨水渗透、污染过滤、气候调节等生态调节特性。可见，复合基础设施与城市韧性相互承应，其将市政、环卫、服务、绿色等基础设施进行功能、空间和技术



图1 复合基础设施
Fig. 1 Composite infrastructure

层面的系统性整合，由此通过提升其耦合程度而从经济、社会 and 自然三方面增强城市的生产、生活和生态韧性。

2.2 复合基础设施的系统层级

2.2.1 空间系统层级

空间要素方面，复合基础设施作为城市空间演变、扩展与更新的支撑骨架主要包括城市、社区和场地尺度的空间要素，形成宏观、中观和微观的空间层级系统^[14]。同时，复合基础设施也因不同尺度的空间要素层级结构而发挥着不同的影响作用。其中，城市尺度的空间层级结构主要包含城市空间范围内的公园湿地、绿色农园、污水处理等大型集中式的基础设施，注重其生产、生活和生态空间要素的线性连接与组合；社区尺度的空间层级结构主要包含社区空间范围内的雨水花园、休闲广场、市民农园等中型分布式的基础设施，注重其生产、生活和生态空间要素的二维分区与配置；场地尺度的空间层级结构主要包含可食景观、街道绿化、绿色屋顶、环境卫生等小型零散式的基础设施，注重其生产、生活和生态空间要素的三维塑

造与营建。可见, 复合基础设施将各类城市基础设施整合至同一城市空间之中, 形成了集生产、生活与生态于一体的空间层级结构, 从而提升了复合基础设施作为空间承载系统的韧性特征。

2.2.2 功能系统层级

功能要素方面, 复合基础设施通过联动其他城市基础设施的功能整合了资源生产供给、社会生活服务和自然生态调节三类功能要素, 形成生产、生活和生态相融合的功能层级系统。其中, 资源生产供给功能主要包含水、能源、环卫基础设施以及农业种植设施的资源生产功能, 注重雨水收集净化、太阳能和风能利用、沼气热电联产、农业种植等资源自给与循环作用, 以满足城市居民的资源消费需求; 社会生活服务功能主要将资源生产作为社会生活活动的组成部分, 通过与康养娱乐、休闲健身、文旅科教等功能的结合互动而促进居民社会交往与公众参与活动的发生并提升其生活品质; 自然生态保育功能主要依托自然生态系统的自我调节作用, 注重水体净化、肥力维持、物质循环、废物分解、气候调节等维持生态平衡的功能, 以改善城市人居环境质量并带动城市可持续发展。可见, 复合基础设施将城市生产、生活与生态功能整合至单个基础设施之中, 形成“生产—生活—生态”三位一体的功能层级结构, 从而增强了复合基础设施作为功能单元模块的韧性特征。

2.2.3 技术系统层级

技术要素方面, 复合基础设施作为各类适宜技术要素的集成应用载体, 通过将其集成至复合基础设施水体、景观、绿地、建筑等空间要素之中, 形成以水、能源、食物和

养分等资源循环利用为目标的技术系统层级。其中, 水处理技术方面, 依据不同的水源类型一般包含雨洪利用、中水回用、污水处理、水质净化等节水净水技术, 以用于灌溉、清洁、观赏等生活用水的生产^[14]; 能源利用技术方面, 依据不同新能源类型可分为太阳能光伏电板、风力发电、生物质能、地热能等新清洁能源利用技术, 以用于电能、热能和燃气能的生产; 食物种植技术方面, 依据不同食物种植方式一般包含可食景观、温室农业、鱼菜共生等城市农业种植技术, 以用于果蔬、谷薯、鱼虾等食物的生产; 养分再生技术方面, 依据不同养分提取方式一般包含厌氧消化、生物膜修复、化学修复、植物修复、盐生植物过滤等生态适宜技术, 以用于有机废物消解与含磷养分催化再生。可见, 复合基础设施将与资源利用相关的各类适宜技术集成至单个基础设施之中, 形成资源生产供给与循环再生的技术系统层级结构, 从而提升复合基础设施作为技术集成单元的韧性特征。

2.3 复合基础设施的构建原则

2.3.1 资源生产的循环性原则

复合基础设施对与城市居民生活密切相关的资源的利用方式具有重要的重置作用, 因此复合基础设施的构建应重点考虑与水、能源、食物和养分相关的资源生产的循环性原则。首先, 水资源方面, 通过雨洪管理就地收集、储存和净化雨水资源, 同时依据水质标准供给于各城市用水部门, 以最大化地实现水资源的循环利用; 能源方面, 通过利用太阳能、风能、地热能等清洁能源而生产电和热两类主要能源, 同时依据其能源品位分别输配至各城市用能部门, 以最大化地实现能源的梯级利用; 食物方面, 通过城市农

业管理而生产果蔬、谷薯、鱼虾等食物, 同时依据其生产规模和地点就地进行加工处理, 以最大化地提高食物的自给自足; 养分方面, 通过有机废物填埋或堆肥等无害化处理实现养分提取与能源生产, 以最大化地实现有机废物的资源化利用^[15]。由此可见, 资源生产的循环性原则不仅可缓解资源紧缺问题, 还有助于推动城市循环经济的发展, 从而提升城市的经济韧性特征。

2.3.2 社会生活的融合性原则

复合基础设施对城市居民社会生活方式具有积极的重塑作用, 因此复合基础设施的构建还应重点考虑与空间多用、公众参与和环境友好等相关的社会生活的融合性原则。首先, 空间多用方面, 在充分利用有限城市用地的基础上, 通过地下、建筑和开放空间与生活活动方式之间耦合而创造出兼具多功能使用的空间类型, 以满足不同城市居民社会生活的多样化需求; 其次, 公众参与方面, 通过鼓励城市居民等利益相关者的全过程参与意见反馈而培养公众对其生活习俗及其文化特征的关注、认同和保护意识, 以增强城市居民的归属感和凝聚力; 另外, 环境友好方面, 以城市与自然景观营造为基础, 通过增加居民生活活动与自然环境直接接触的机会而充分发挥景观的心理调节和治愈功能, 以提升社会生活环境的辨识度和认知度。由此可见, 社会生活的融合性原则可以促进社会生活的互动与共融, 创造更和谐、健康且宜居的城市人居环境, 从而提升城市的社会韧性特征。

2.3.3 自然生态的共生性原则

复合基础设施对城市与自然环境的依存互动关系具有正向的重构作用, 因此复合基

基础设施的构建应考虑与环境保护、生态连通、协同治理等相关的自然生态的共生性原则。首先，环境保护方面，通过保护原有湿地、绿地、水体和栖息地而维护自然环境的生物多样性及其生态平衡，减少对自然生态系统的影响与破坏作用；同时，生态连通方面，通过建立绿地、绿带和绿廊将不同自然生境进行整合与连接，促进物种的迁移、繁殖与交流并维持其完整的生态功能，提升城市生态系统的适应能力；其次，协同治理方面，通过多方参与、跨部门合作、数据共享和统一决策等方式强化雨洪管理、环境监测和污染控制等，以改善城市生态系统的可持续性及其环境的健康质量。由此可见，自然生态的共生性原则强调尊重和保护自然生态系统，促进城市与自然的和谐共生，从而提升城市的自然韧性特征。

3 韧性城市理念下的复合基础设施规划设计策略

为减缓宁波老城发展压力并促进其可持续发展，宁波市政府自2002年就提出了以宁波东部新城带动老城从单中心走向多中心以实现其可持续发展的规划设计方案。其中，宁波东部新城的核心区为一条长约3.3 km、占地100 hm²且贯穿新城中心的生态走廊，以“城市绿肺”为概念^[16]，在尊重原有自然环境的基础上以中央水系串联北端的生态走廊意象区、中间的中央活动区及其南北两侧的社区活动休闲区，以及南端湿地花园区等5大功能区，从而形成兼具市政、环卫、绿色或生态等基础设施功能的复合基础设施作为城市韧性的提升媒介，以满足城市可持续发展的需求（图2）。

3.1 基于经济循环发展的资源生产策略

水、能源、食物和养分作为与城市居民生活密切相关的资源，其需求量和进口量随着城市扩张也逐渐加大且面临着近乎枯竭的境地。对此，宁波东城生态走廊规划设计以经济循环发展为目标，通过将各类适宜技术置入城市建筑、道路、绿地、景观和开放空间之中而创造系统化的城市资源生产供给空间，以重建循环再生的资源生产方式。

宁波东城生态走廊以城市经济的循环发展为目标，以水资源为核心要义，通过将生态农业和生产供应业整合为互联的产业网络链条而提出水、能源和食物资源生产系统的规划设计策略。其中，水资源方面，在利用原有水系基础上将场地划分为暴雨管理区、滨水岸区和水质处理区三类功能区，由此通过在建筑屋顶、透水广场、绿地公园等空间中置入雨水收集、介质过滤、根部过滤和曝气等水资源循环净化技术分别构建了由表面流湿地、生态蓄水池、生态净水沟、生态工程浮岛等组成的雨水资源生产系统；能源方面，依据能源使用需求，通过在建筑屋顶、景廊顶棚或开放绿地等空间中置入小型风车、太阳能光伏电板等适宜技术构建以

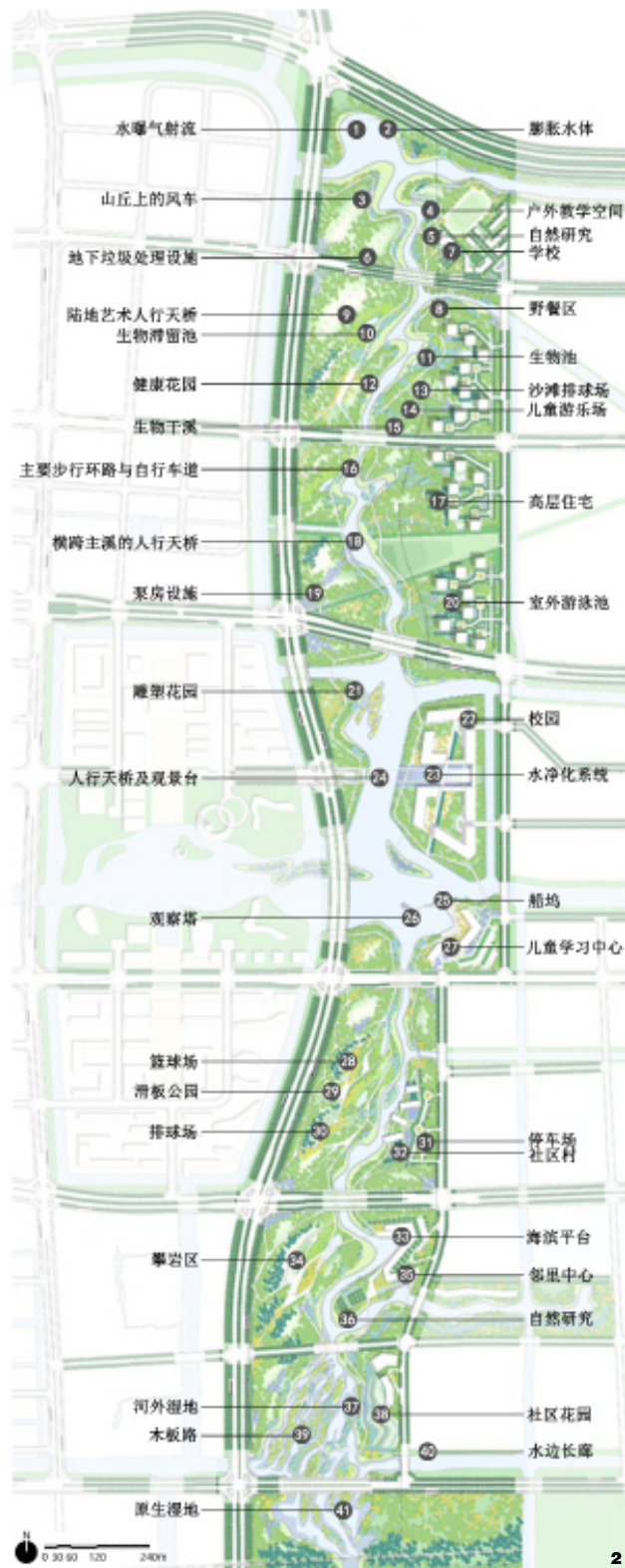


图2 宁波生态走廊规划
Fig. 2 Planning and issues of Ningbo Ecological Corridor

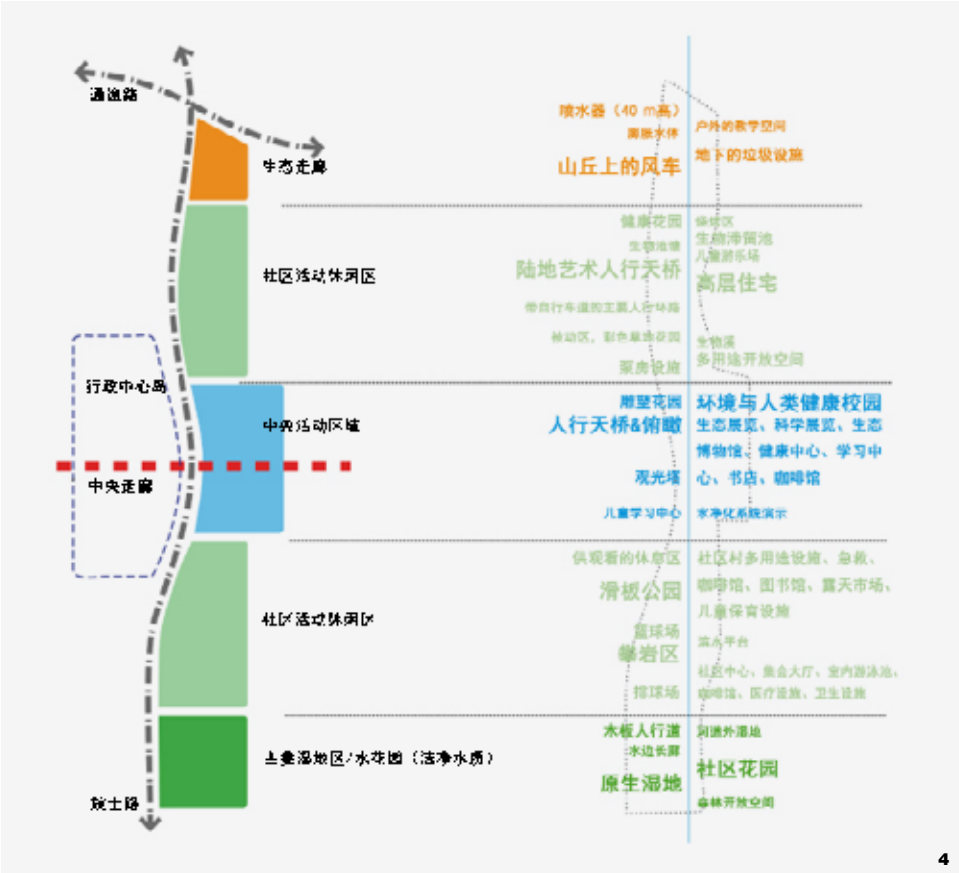
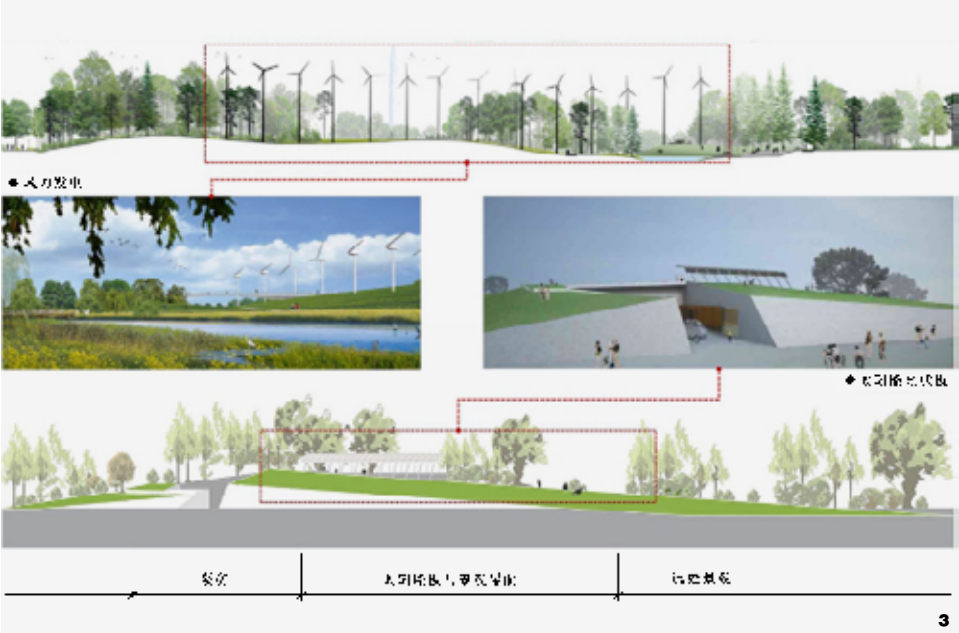


图3 清洁能源生产系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of clean energy production system

图4 宁波生态走廊生活服务设施示意图
Fig. 4 Analysis of living service facilities in Ningbo Ecological Corridor

绿色建筑、风车山丘与能源景观等为特征的清洁能源生产系统(图3);食物方面,在保留原有农田的基础上,通过在湿地和防林带之间的梯田中轮番耕作向日葵、油菜花和其他应季作物,构建以可食景观、有机农园为主的食物生产系统;养分方面,通过在地下或建筑空间中置入沼气、厌氧堆肥等适宜技术,将植物落叶、厨余垃圾、人畜粪便等进行有机消化,同时沼气渣料又作为肥料返还土壤用于农业种植。此外,生态走廊的水、能源和食物生产系统相互联系从而构成了完整的经济产业链,水资源生产系统为食物生产系统提供灌溉用水与养分,能源生产系统为水和食物生产系统提供电能,而食物生产系统则通过农贸市场而实现农产品供给,从而带动了资源的闭合循环。由此可见,宁波东城生态走廊作为资源生产型复合基础设施不仅缓解了城市资源短缺问题,还创造了一定的经济价值,从而增强了该地区经济的韧性特征并进一步促进了其经济的循环发展。

3.2 基于社会融合发展的生活重塑策略

快速城市化进程改变了城市居民的生活方式,加之社会服务设施的匮乏也使得居民生理与心理均呈现亚健康状态。对此,宁波东城生态走廊规划设计以社会融合发展为目标,通过在自然环境中置入各类社会生活服务设施而创造自然化的城市居民社会生活活动空间,以重塑健康融合的社会生活方式。

宁波东城生态走廊作为“活体过滤器”,其规划设计以自然环境为基底,以沿中央水系的一条“可游、可跑、可行”的多用途慢行步道作为主园路串联各功能区中休闲、健身、教育、医护、文化等社会生活服务设施^[17](图4)。其中,休闲类生活服务设施主

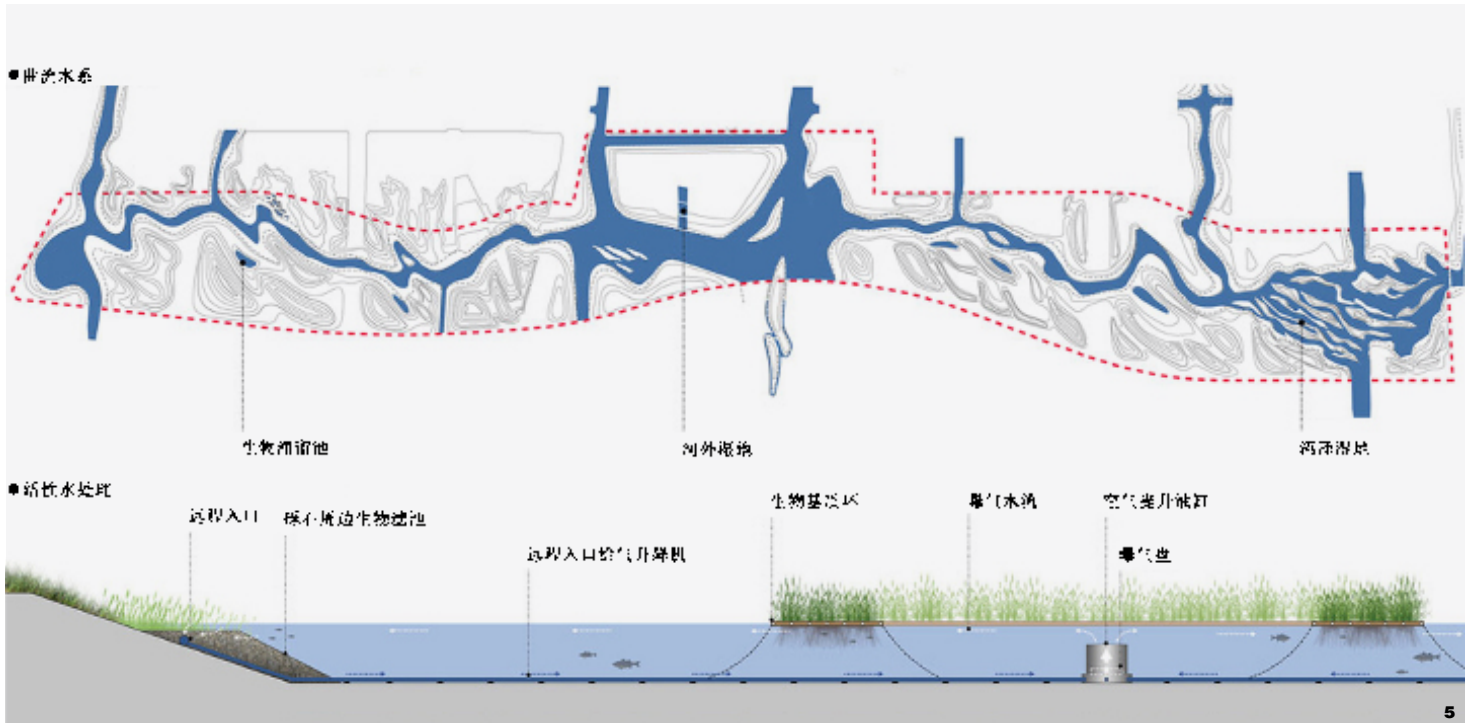


图5 水网布局与水质净化循环图
Fig. 5 Water network layout and water purification cycle diagram

要包含喷泉广场、观景平台、滨水步道、雕塑公园、咖啡馆等；健身类生活服务设施主要有环形跑道、篮排球场、室内游泳池、滑板攀岩公园等；教育类生活服务设施主要有生态净水展区、环保与健康园区、生态科学展馆、水生动植物教育区、儿童学习中心等；医护类生活服务设施主要有急救、医疗、保健和保育设施等；文化类生活服务设施主要有可食景观、农贸市集、大地艺术、社区礼堂、森林公园等。由此可见，宁波东城生态走廊作为社会生活型复合基础设施通过与自然生态环境的互联互动而为周边城市居民提供了多样化的社会生活活动空间，不仅缓解了城市居民的生活压力，还增强了认同感和归属感，从而提升该地区的社会韧性特征并进一步促进社会的融合发展。由此可见，宁波东城生态走廊作为社会融合型复合基础

设施，不仅增加了城市社会生活的活力，还创造了一定的社会价值，从而增强了该地区社会的韧性特征。

3.3 基于自然共生发展的生态平衡策略

宁波东城生态走廊用地包含一条荒废的河道和一部分“棕地”，因缺乏管理导致其环境破坏与污染严重。对此，设计以自然共生发展为目标，通过原有工业地块的修复、水系河道的净化和局部气候的改善而创建人与自然和谐发展的自然生境空间，以重构协同共生的生态平衡模式。

宁波东城生态走廊作为城市绿肺，其规划设计以原有运河水系为核心，借助于水系生态系统构建包含绿地、湿地、芦苇地、生物栖息地等自然生境要素的自然生态系统及其服务设施，从而实现其生态平衡（图5）。

为此，本设计基于当地水流分布及其水质的分析和检测，提出包含水体优化和水质净化措施的自然生态系统改善策略。首先，水系网络方面，通过局部地形高程的开挖填埋而形成高差分级的山谷区和山丘区，从而重塑河道水系网络；同时，滨水河岸方面，道路均采用透水铺装用于雨水下渗，道路两侧设置植草沟和生态洼地等用于汇集雨水；同时其河岸是由岩石拼砌而成的自然渗透型生态驳岸，其内种植大量喜水植物从而利用其根系稳固堤岸并通过沉积、曝气和生物吸附三重过滤作用净化雨水中的粒状污染物。另外，河流水体方面，通过集成生物膜、生态驳岸、水中植物种植槽以及水底生物曝气池等设施形成集介质过滤、岩石过滤、根系过滤和曝气于一体的水体循环净化系统，将原本只能用于工业和灌溉的Ⅴ类

用水改善为可供休闲娱乐的Ⅲ类用水。由此可见, 宁波东城生态走廊作为自然共生型复合基础设施不仅缓解了城市环境污染等问题, 还创造了一定的生态价值, 从而增强了该地区生态的韧性特征并进一步促进了其自然的共生发展。

4 结语

韧性城市作为推动城市可持续发展的理念之一, 往往借助于各类城市基础设施的生产、生活和生态功能而作用于城市生态系统并赋予其经济、社会和自然层面的韧性特征, 推动城市的可持续发展。因此, 本文以韧性城市理念为导向, 通过对城市生产基础设施、社会基础设施、绿色或生态基础设施的归类分析, 从经济韧性、社会韧性、生态韧性理论层面初步提出了“生产—生活—生态”三位一体的复合基础设施理论方法框架。与此同时, 宁波东城生态走廊作为一个具有“生产—生活—生态”功能复合特征的基础设施, 其规划设计在空间、功能、技术要素层级体现了复合基础设施的典型特征, 因此通过对宁波东城生态走廊的解析, 依次提出基于经济循环发展的资源生产策略、基于社会融合发展的生活重塑策略、基于自然共生发展的生态平衡策略三大复合基础设施的构建策略, 以期为未来韧性城市的建设提供理论和实践借鉴意义。

注: 图1由作者自绘, 图2-5根据参考文献[17]翻译绘制。

参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2023-01-13]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm
- [2] 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(02): 48-54.
- [3] MARTIN R, SUNLEY P. On the Notion of Regional Economic Resilience: Conceptualization and Explanation[J]. Journal of Economic Geography, 2015, 15(1): 1-42.
- [4] FINGLETON B, GARRETSEN H, MARTIN R. Recessionary Shocks and Regional Employment: Evidence on the Resilience of UK Regions[J]. Journal of Regional Science, 2012, 52(1): 109-133.
- [5] BOSCHMA R. Towards an Evolutionary Perspective on Regional Resilience[J]. Regional Studies, 2015, 49(5): 733-751.
- [6] MILETI D. Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States[M]. Washington D.C: Joseph Henry Press, 1999.
- [7] GODSCHALK D R. Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities[J]. Natural Hazards Review, 2003, 4(3): 136-143.
- [8] Resilience Alliance. Urban Resilience Research Prospectus[R]. Australia: CSIRO, 2007.
- [9] 闫水玉, 唐俊. 韧性城市理论与实践研究进展[J]. 西部人居环境学刊, 2020, 35(02): 111-118.
- [10] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining Urban Resilience: A Review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016(147): 38-49.
- [11] 陶希东. 韧性城市: 内涵认知、国际经验与中国策略[J]. 人民论坛·学术前沿, 2022(Z1): 79-89.
- [12] 马世骏, 王如松. 社会—经济—自然复合生态系统[J]. 生态学报, 1984(01): 1-9.
- [13] 王志鹏. 复合基础设施的理念与构建模式研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2021.
- [14] 智乾. 韧性城市理念下的市政基础设施规划策略初探[J]. 城市与减灾, 2021(06): 36-42.
- [15] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委

- 关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知[EB/OL]. (2021-07-07)[2023-01-14]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/t20210707_1285527.html
- [16] SWA. Ningbo East New Town Eco-Corridor[EB/OL]. (2014-03-10)[2023-01-14]. <https://www.swagroup.com/projects/ningbo-east-new-town-eco-corridor>.
 - [17] WALDHEIM P B C, CZERNIAK J, HUANG Y Y, et al. Landscape Infrastructure: Case Studies by SWA[M]. Birkhauser Architecture, 2013.