

DOI: 10.5846/stxb202111253331

范育鹏, 方创琳. 城市可持续发展新型定量研究方法进展. 生态学报, 2023, 43(8): 3020-3031.

Fan Y P, Fang C L. Advances in the innovatively quantitative research approach for urban sustainable development. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3020-3031.

城市可持续发展新型定量研究方法进展

范育鹏^{1,2,*}, 方创琳^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101

摘要: 城市体现了集约化的发展方式, 以仅占陆地 3% 的面积承载了世界一多半的人口, 因此城市是人类社会可持续发展的主阵地, 城市可持续发展是区域可持续发展的重要实践。研究试图从可持续发展的基本内涵着手, 聚焦于城市尺度的研究, 梳理了相关理论和概念演变历程, 着重对新型定量方法——评价指标体系法、复杂系统建模、资源环境可持续性探索等进行综述。研究发现指标体系法常用于传统的城市可持续发展评估, 大多是针对表象的分析, 隔离了系统内部的组织关联, 对系统机理探索不够。资源环境对人类社会的发展起到基础支撑作用, 从资源环境可持续性出发研究可持续发展诞生了一些较为创新的方法, 但研究集中在描述人类对自然的压力 and 影响, 而对于自然对人类的反馈以及人对自然的积极改造探索不足, 也很难直接表达系统整体的可持续性。弹性思维和复杂系统科学近年来被多次用于解释城市运行的灰箱模型, 但研究稍浅。研究提出可将弹性思维和复杂系统科学结合起来, 借助数据科学和计算科学的新兴方法, 分析城市的可持续发展, 深入探索可持续性的科学表达和深层机理, 为解决复杂的城市问题提供科学指导, 为城市可持续发展提供理论依据。

关键词: 机理机制; 多尺度; 复杂性; 城市; 系统科学; 整合

Advances in the innovatively quantitative research approach for urban sustainable development

FAN Yupeng^{1,2,*}, FANG Chuanglin^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Cities embody the intensive development mode, with only 3% of the land area to carry more than half of the world's population, so cities are the main front of sustainable development of human society. Urban sustainable development is an important practice of regional sustainable development. Starting from the basic connotation of sustainable development, this study focuses on urban sustainable development research, sorts out the evolution process of related theories and concepts, and reviews the research methods, especially new quantitative methods including evaluation index system method, complex system modeling, resource and environment sustainability exploration, etc. It is found that the index system method is often used in previous urban sustainable development assessments, but most assessments stay only on appearance and isolate the systemically internally organizational association, and the exploration of the system mechanism is not enough. The resources and environment play a fundamental role in supporting the development of human society, so some relatively innovative methods have been developed to study sustainable development from the perspective of resource and environmental sustainability. Human pressure and influence on nature were studied more, and the feedback of nature to human beings and the positive transformation of human beings to nature were not explored enough, also it is difficult to

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171287, 41590840); 科技部第二次青藏高原综合科学考察专题项目 (2019QZKK1005)

收稿日期: 2021-11-25; **网络出版日期:** 2022-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanyp@igsrr.ac.cn

directly express the sustainability of the whole system. In recent years, resilience thinking and complex system science have been used many times to explain the grey box model of urban operation, but the research is slightly superficial. This study proposes research prospects which can combine resilience thinking and complex system science to analyze the sustainable urban development with new approaches in data science and computing science, and explore the scientific expression and deep mechanism of sustainability. Our study could provide scientific guidance for solving the complicated urban problems, and provide a theoretical basis for urban sustainable development.

Key Words: mechanism; multi-scale; complexity; city; system science; integration

1 概念界定与演变

1.1 可持续发展

在 20 世纪,世界环境污染公害事故明显增加,30—60 年代发生了马斯河谷事件、多诺拉烟雾事件、伦敦烟雾、日本水俣病、四日市哮喘、米糠油事件、疼疼病、洛杉矶光化学烟雾旧八大公害事件;80 年代又发生了意大利塞维索化学污染、美国三里岛核电站泄漏、墨西哥液化气爆炸、印度博帕尔农药泄露、前苏联切尔诺贝利核电站泄漏、瑞士巴塞尔赞多兹化学公司莱茵河污染事故、全球大气污染和非洲大灾荒新八大公害事件。严重危害人类社会与经济可持续发展的生态环境问题层出不穷,主要体现在废弃物排放、水污染、土地沙漠化、温室效应、大气臭氧层破坏、噪音污染等方面,促进了人类对可持续发展问题和概念的关注和提出。

可持续发展是在实现人类发展目标的同时保持自然系统提供经济和社会所依赖的自然资源和生态系统服务的能力的组织原则^[1]。可持续发展最普遍的定义是既满足当代人的需求,又不对后代人满足其需求的能力造成危害。既要发展经济又要保护好人类赖以生存的地球环境,使人类能够永续发展和安居乐业^[2]。可持续发展是在环境保护前提下的经济持续发展,发展是核心,保护是手段。发展有助于保护,保护有助发展,两者相互促进。可持续发展就其本质而言是在受自然规律支配,环境和资源约束限制下,为了实现人类社会永续发展的目的而进行的必要之路。1987 年,世界环境与发展委员会(WCED)发布了《我们共同的未来》报告,正式定义可持续发展,对世界面临的生存与发展问题进行了系统阐述,产生了广泛的深远影响。到如今,关于可持续发展的定义有近百种,但被普遍接受影响最广泛的仍是《我们共同的未来》中的定义。它包括需要和限制两个重要概念:需要是指人类的基本需要,应优先考虑;限制是指技术水平、社会组织、环境条件对满足目前和将来需要的能力的限制。此外,1980 年世界自然保护同盟编纂《世界自然资源保护大纲》,提出保护自然资源的目标,因为人类在谋求经济发展和享受自然财富的过程中,自然资源 and 生态系统的支持能力是有限的^[3]。1981 年,Lester R. Brown 发表《建设一个可持续发展的社会》,审查了人口增长、自然资源保护、可再生能源(例如木材、风能和水能)的价值,研究了可持续社会的形态——可持续的运输系统、农业的复兴、新的工业和就业、城市化、更大的地区自力更生能力和更简单的生活方式,并讨论了向可持续社会过渡的手段和体制挑战^[1]。1992 年 6 月,联合国环境与发展大会上,170 多个国家签署了《里约环境与发展宣言》《21 世纪议程》等指导各国制定和实施可持续发展战略的文件^[4],可持续发展思想在全世界层面达成共识。随后,各国纷纷响应制定出符合本地特色的 21 世纪议程;中国政府在 1994 年编制了中国 21 世纪议程——《中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》,提出了中国的可持续发展战略、对策和行动计划^[5]。中共十五大把可持续发展确定为我国现代化建设中必须实施的战略,包括社会可持续发展,生态可持续发展,经济可持续发展。

1.2 城市可持续发展

可持续发展理论在 20 世纪 80 年代首次提出就主张城市要具备持续满足人类需求的能力。20 世纪 90 年代初,联合国人居署(UN-HABITAT)和环境规划署(UNEP)提出“可持续城市发展计划”(SCP),认为社会、经济和自然环境都是可持续的城市才是可持续城市,城市发展对资源环境的使用要维持在可持续的水平,具备

防控潜在环境风险的能力^[6]。可持续发展逐步成为引导城市社会经济发展的基本准则。城市以其仅占 3% 的陆地面积供养了超过 1/2 的全球人口(预计 2050 年将上升到 2/3),产出了超过的全球 70% 的国内生产总值(GDP),能源消耗占到了 60% 至 80%,碳排放占到了 75%。城市人口与产业聚集对生态环境造成日益严峻的影响。因此城市在全球可持续发展中发挥着重大作用。亟需转变城市发展模式,改善城市环境质量和生态服务功能,探索适宜高效的可持续发展之路。首要任务就应对城市的可持续发展水平进行科学准确的评估与测量,从而为探索城市可持续发展路径提供科学依据和指导。

城市可持续发展的内涵十分丰富,城市本身就是资源环境与人类社会相互作用强度最大,关系最为复杂的地域,涉及到生态系统、资源、城市结构及公平、福利、效率等问题,因此出现了很多构建多方面指标体系来评估典型城市可持续发展水平的研究^[6-8]。但城市的可持续发展水平是城市系统各要素的相互作用的综合体现,不仅依赖于要素本身,还依赖于要素之间的交互作用对系统整体的影响。因此要想准确测量城市可持续发展水平相当复杂,要从系统可持续性的角度进行创新的量化研究;城市要想实现可持续发展,就要保证城市系统形态结构的合理,能够持续提供经济、生态、社会等方面的福利并朝着平衡方向发展^[9]。城市可持续性的研究随着城市化过程中出现的问题也在不断深化,形成一系列相互关联并各有侧重的城市可持续发展理念。城市是人类活动与自然环境相互作用、相互影响的复杂系统,这也就意味着其可持续发展具有复杂性^[10],城市可持续发展涵盖了环境科学、系统科学、生态学、经济学、社会学等多个学科领域^[11]。在城市的各组成部分中践行可持续发展,可以在提高各组分韧性水平的基础上,促进城市系统的协调发展,提高城市总体韧性水平^[12]。

城市作为实现可持续发展的重要力量和主要载体,人类从 19 世纪末的田园城市理念^[13]开始探寻城市可持续发展之路,直到今天的绿色城市^[14]、生态城市等^[15],城市可持续发展理念经历了一系列的转变与演化。但城市可持续发展水平怎样准确衡量和提高,城市可持续发展理论与研究方法如何创新与发展,如何揭示城市可持续性的内在机理与作用机制,尚值得探讨与厘清。

2 研究方法述评

城市和区域可持续发展的内涵涉及经济、社会和生态环境等众多领域,近年来关于可持续发展能力的研究不断深入,主要是通过构建多指标评价体系对不同地区不同方面的发展水平进行评价^[16]。早期的研究仅用单一或几个指标对地区的发展水平进行评价,后来逐步转向了多维度综合测评^[17]。对评价指标的综合加权过程也经历模型和算法的改进和创新,着重于指标处理及排序过程和权重确定的过程^[7]。与此同时,资源环境承载力相关理论方法也取得长足发展,以科学机理的数学化表达区域可持续发展的基础和限制^[18],由单一、静态研究向集成性、动态性演进^[19]。评价指标体系法容易割裂系统内在关联,难以揭示系统内在机理,而从系统组织间联系和演化机理的层次上进行的研究较少。由于资源环境与区域可持续发展相互关系的研究涉及多系统之间复杂的相互关系,无法清晰辨识,需打开黑箱揭示系统间复杂的作用机理。借助于新型技术与科学的兴起,可利用复杂系统建模集成弹性思维来入手进行深入探索^[20]。

2.1 评价指标体系法

2.1.1 综合指数

构建评价指标体系计算综合指数是测量和评估城市可持续发展水平的重要手段,也向来是城市可持续发展领域的焦点和研究热点。2000 年以来,学者们建立了多套城市可持续发展的指标体系,通过多种方法如加权综合、主成分分析法、回归分析等进行指标合成,对城市进行可持续发展评价^[6, 16, 21-22]。可持续发展评价指标体系虽有很多,但由于指标选择的合理性、权重确定的科学性和测度的准确性等问题并没有一个普遍认可的标准体系。社会只是城市系统的一个方面,人类社会赖以生存的整个系统是由大量的子系统组成的。Harris^[23]提出从环境、经济、社会等 3 个方面来评价城市可持续发展状况,如果单个组分不能正常运作,整个系统就不能实现可持续发展。

基于联合国可持续发展目标(SDGs)框架,构建城市可持续发展的标准化指标体系,是进行城市可持续发展评价的重要途径。Xu 等^[24]利用 119 个 SDGs 的指标构建评价体系对中国的可持续发展水平进行了分析。基于可持续发展目标建立指标体系对城市进行全面评估,能够清晰辨识城市发展中存在的问题和不足,找出目标与现状的差距,精准施策,实施更加可持续发展的决策。《2018 年 SDG 指标和仪表板报告》就利用指标评价体系对各国实现可持续发展目标的距离进行了修订和更新的评估^[25]。Simon 等^[26]选择了英国曼彻斯特、瑞典哥德堡、印度班加罗尔、南非开普敦、肯尼亚齐苏姆 5 个城市,基于专门关于城市的子目标 SDG11 提出了城市可持续发展评价的 10 大原则。

2.1.2 基于指标体系的模型算法

采用压力-状态-响应(PSR)以及它的扩展模型驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)构建城市可持续发展评价指标体系是通用方法之一。环境可持续性指数(ESI)就是基于 PSR 模型联合编制和发布,旨在衡量各个国家的环境可持续性进展并提供环境管理的综合概况^[27]。黄志辉等选取了 2001—2014 年北京城市发展数据,从驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个方面对北京市可持续发展水平进行系统评估和分析^[28]。本研究认为压力-状态-响应框架不能解释系统关系和动态,因为这种方法为特定的环境问题设定了孤立的因果链,并仅监测相应指标。例如:碳排放(压力)→大气 CO₂浓度(状态)→全球气温(影响)→碳税(响应)。它忽略了过程的系统性和动态性。用孤立的压力-状态-影响-响应(PSIR)链表示冲击链是不合理的,甚至不是一个恰当的近似。影响可以是一个因果链中的压力,也可以是另一个链中的状态,反之亦然。没有考虑多重压力和影响,且对状态和变化速率(存量和流量)的处理不一致,导致一个链不同组成部分之间真实的、非线性的关系无法解释。例如,CO₂排放不会是 CO₂浓度升高的全部原因,只有一部分 CO₂由人为排放,全球升温也只有部分归因于 CO₂排放,实行碳税也可能由其他原因导致,碳税会产生许多其他的经济和社会影响,而不只是影响 CO₂排放。

逼近理想解距离法(TOPSIS)是一种多准则决策方法^[8]。通过计算标准化数据离正负理想解的欧式距离,用贴近度来判断最优解,其中正理想解是指各指标值都达到最理想的方案,负理想解指各指标值都达到最不理想的方案,最优解应该距离正理想解最近且距离负理想解最远^[29]。TOPSIS 方法不受参考序列选择的影响、信息失真少、运算量少、对样本大小无特殊要求,在方案优选研究中非常有效,不但在市场、医疗、交通、农业等多个领域中广泛应用^[7, 30, 31],还多次应用到城市可持续发展评价上^[32, 33]。但传统的 TOPSIS 方法无法反映决策者偏好,不能解决实际存在的模糊信息和不确定因素,已有学者运用层次分析、模糊理论等对其进行了改进^[34]。

数据包络分析(DEA)是评价多投入多产出同类部门间相对有效性的一种方法。城市作为评价主体虽具有相同功能,但各主体内部支撑此功能的要素的“构效关系”具有多样性特征,同时各主体的功能在规模、效率等方面也具有多样性,DEA 则可以面向多属性评价指标形成无量纲的排序^[35]。多投入多产出情况下,需要确定各投入和产出之间相对重要程度的权重,而 DEA 方法中,权重通过数据本身的特征决定。DEA 是基于投入产出的方法,与可持续发展理念“产出更多影响更小”相符合,已经被广泛应用到城市可持续发展评价当中^[6, 36]。

遗传算法是仿照生物遗传和自然选择的原理,优胜劣汰进行全局优化的算法,寻找全局最优解。基本思路是先对问题的每个可能解决方案进行编码,形成不同个体或染色体从而组成群体;再对个体适应度进行计算,从原来群体中选择适应度高的个体组合成新的群体;通过选择、交叉、变异三种遗传操作不断地更新群体,利用群体的更新优化致使优良程度不断增强,靠近最优解^[37]。刘慧心运用遗传算法优化对大连市可持续发展水平进行了实证分析^[38]。神经网络是模拟大脑思维的网络化模型算法系统。反向传播算法(BP)神经网络是按照误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络,是应用最广泛的神经网络,可建立输入与输出间的非线性映射关系,其优点就在于处理非线性关系,而这正是城市可持续发展指标与结果之间,多要素之间的实际关系模式。一个三层的 BP 神经网络,可以以任意精度逼近给定的连续函数^[39]。Zhang 等构建了城市低碳可

持续发展能力指标体系,运用 TOPSIS-BP 神经网络模型^[29],对北京、上海、深圳、广州等城市的低碳可持续发展能力进行了评价。Zhang 等建立 BP 神经网络模型对克拉玛依和亚特兰大的智能增长计划进行评估,更好地为未来城市可持续发展制定新的规划^[40]。

2.2 资源环境承载核算方法

2.2.1 生态足迹

20 世纪快速的城市化和工业化进程导致的生物多样性锐减和生态系统改变可与地球过去经历的任何大规模灭绝相比拟。城市化的土地利用方式是独特的,无论是在强度上还是在对自然生态系统的影响程度上。Rees 等于 1992 年提出生态足迹的概念,即人类活动消耗资源所需的土地数量,试图量化人类对自然的影响^[41]。生态足迹是由用来满足人类的食物、水、材料、交通和住房需求等各种资源组成。生态足迹方法用土地作为货币来衡量人类拥有什么,人类需求多少,以及人类活动对自然的影响。它衡量了支持当前消费水平和技术水平所需的土地资源,用全球公顷(ghm^2)来度量。根据 Wackernagel 等的分析,地球的生态承载力是人均 1.87 ghm^2 ,而现在的生态足迹达到了人均 2.2 ghm^2 ^[42]。有研究特意指出城市的生态足迹过大,如果不限制城市的生态足迹,将给决策者和公众带来巨大的挑战^[43—45]。高收入城市的生态足迹超过了城市行政面积的两到三个数量级^[46]。Kissinger 等计算了以色列拉阿纳纳的生态足迹,并与预期的生态可持续性作比较,发现拉阿纳纳的生态足迹是 $4.0 \text{ ghm}^2/\text{人}$,这意味着所产生的生态足迹是城镇生态承载力的近 180 倍^[47]。生态足迹分析已成为评价城市可持续性的有效政策和规划工具。Geng 等采用生态足迹法对中国沈阳和日本川崎两个工业城市进行了评价。结果表明沈阳市的生态足迹显著增加,而川崎市的生态足迹较为稳定,但沈阳人均足迹远低于川崎市^[48]。Baabou 等核算了 1998—2014 年期间 20 个国家的 63 项生态足迹,发现城市人均足迹处于伊朗伊斯法罕的 1.22 ghm^2 到加拿大卡尔加里的 $9.5—9.9 \text{ ghm}^2$ 之间^[49]。然而,由于时间尺度、研究方法的差异,使得研究之间的可比性具有挑战性。生态足迹的研究范围很广但却备受争议,一般集中于生态足迹核算的准确性及其在可持续发展政策的相关性上面。即它是否适合测量可持续性,是否在准确量化生物容量和城市足迹方面存在障碍。

2.2.2 行星边界

行星边界是由一些地球系统和环境学家于 2009 年提出的一个涉及包含环境边界的地球系统过程的概念^[18]。Rockström 和他的同事们认为,确定并量化不可逾越的地球边界有助于防止人类活动造成不可接受的环境变化^[50]。Steffen 等更新了框架,调整了当前值,更好地定义了不确定性区域^[51]。行星边界被细化为气候变化、新实体的引入(如新的物质)、臭氧损耗、气溶胶负荷、海洋酸化、生物地球化学循环(氮和磷)、淡水利用、陆地系统变化、生物圈的完整性(遗传多样性和尚未量化的功能多样性)。Lade 等调查并初步量化了由行星边界代表的地球系统过程之间的相互作用,并分析了它们对可持续性治理的影响^[52]。Hoornweg 等基于行星边界探讨了城市可持续发展的生物物理和社会经济边界,提出了一套指标对多伦多、圣保罗、上海、孟买和达喀尔五个大城市开展了实证研究^[53]。Li 等提出了两种新的定量足迹指标-超水足迹和剩余水足迹-量化了中国各省市对商品和服务的需求导致当地和全球水资源过度消耗的程度^[54]。Randers 等分析了如何在地球的行星边界内实现联合国可持续发展目标,并指出要在地球上安全的运行空间内成功地实现人类繁荣,需要哪些转型条件^[55]。Hachaichi 等将地球边界指标降至城市规模,可用于加强现有城市可持续发展议程的运作范围,或用于设计新的城市工具,以更好地将增长中的经济体纳入全球环境可持续发展问题^[56]。Norman 等认为在行星边界内规划为城市环境提供了一种必要的健康检查,可为环境可持续性提供强有力的基础^[57]。

2.2.3 能值分析

20 世纪 80 年代美国著名生态学家 Howard T. Odum 基于对自组织过程中生态系统和经济系统能量流动模式的观察创立了能值理论,可应用于国家、地区、城市等多个尺度的可持续性评估^[58]。这种方法使环境、社会和经济资本能够转换成一个普遍的非货币度量单位-太阳能焦耳(sej)^[59]。能值理论认为,所有系统(如社会、生态和经济)的结构、组织和功能都源于可用能源的转换。这种转换还以等级顺序定义了能源的质量^[59]。

能值是衡量以太阳能为基础的不同形式能量的质量差异的指标,太阳能是地球系统最基本的驱动源。太阳能值转换率作为各种物质或能量的转换单位,突破了不同能量形式统一评价的障碍,展现了对不同形式、不同层次的能量值进行测量和比较的能力。它在一定程度上解决了衡量自然生态系统和社会经济系统中各种能量流、物质流、货币流和信息流对可持续发展贡献的问题。

不少城市的可持续发展研究中使用了能值分析法^[60],包括:中国的澳门、北京和其他城市^[61-63],加拿大蒙特利尔^[64],瑞典乌普萨拉^[65]和意大利罗马^[66-69]。Vega-Azamar 等利用能值分析对加拿大蒙特利尔岛城市环境可持续性进行了评价,并提出了改善其环境绩效的建议^[64]。陆宏芳等^[70]在分析能值可持续指数(ESI)不足的基础上,结合可持续发展的概念推导出一种新的城市可持续发展能值指数(EISD),以中山市为例进行了实证分析。Viglia 等应用能值法和累积能源需求(CED)方法,以意大利 5 个不同规模的城市系统为例,开发并验证了城市环境可持续性指标^[71]。Lou 等提供了一套基于能值核算的可持续性指标,可用于评价和比较中国和世界其他城市的可持续性^[72]。

2.3 可持续发展机理解析法

2.3.1 弹性思维

弹性思维起源于 20 世纪 70 年代的生态学^[73],逐渐延展至分析相互依存的生态系统和人类系统的视角。社会-生态系统是不断演变的,不确定性是形成其发展轨迹的关键(图 1)。例如,随机脉冲扰动在森林和珊瑚礁等许多生态系统中很常见,这种扰动可以永久地改变生态系统^[74]。弹性是系统在经历变化以保持本质上相同的功能、结构、特性和反馈的过程中吸收干扰和重组的能力。城市系统的弹性是指城市系统能够化解外界干扰,并保持原有结构和功能的能力。弹性思维强调逐渐变化与突然干扰、反馈、替代稳定状态和体制转移、跨尺度关系和适应周期的相互作用。在保护生物学中,弹性思维对功能冗余、功能多样性、响应多样性^[75]和物种^[76]的跨尺度相互作用的重要性有深刻的认识,对理解和管理生态系统做出了重要贡献,包括澳大利亚的大堡礁^[77, 78]和瑞典的克里斯蒂安斯塔德湿地^[79]。城市弹性则强调了社会和生态系统之间的联系,特别是在生态动态、管理实践和制度安排之间的关系。城市弹性对城镇发展也起到十分重要的管理和规划作用^[80-83]。当城市及其子系统具有一定弹性并相互协调发展时,城市及区域便能实现可持续发展。近年有学者提出了城市弹性的测度方法^[84, 85],并对城市弹性的演化进程进行实证研究^[86, 87]。目前将弹性思维应用到城市的研究具有一定的局限性和限制,主要源于对“社会弹性”概念背后的规范性和认识论问题缺乏关注^[88]。

弹性思维对功能冗余、功能多样性、响应多样性^[75]和物种^[76]的跨尺度相互作用的重要性有深刻的认识,对理解和管理生态系统做出了重要贡献,包括澳大利亚的大堡礁^[77, 78]和瑞典的克里斯蒂安斯塔德湿地^[79]。城市弹性则强调了社会和生态系统之间的联系,特别是在生态动态、管理实践和制度安排之间的关系。城市弹性对城镇发展也起到十分重要的管理和规划作用^[80-83]。当城市及其子系统具有一定弹性并相互协调发展时,城市及区域便能实现可持续发展。近年有学者提出了城市弹性的测度方法^[84, 85],并对城市弹性的演化进程进行实证研究^[86, 87]。目前将弹性思维应用到城市的研究具有一定的局限性和限制,主要源于对“社会弹性”概念背后的规范性和认识论问题缺乏关注^[88]。

2.3.2 复杂系统与网络分析

复杂适应系统(CAS)理论兴起于 20 世纪末叶,该理论中的自组织演化思维及其对系统复杂性和适应性的阐释,对考察城市系统韧性及其演化意义重大且深远^[89-91]。它认为城市整体功能具备不可还原性,不能片面割裂地观察各要素,因为这些要素彼此间通过复杂关联和相互作用涌现出系统整体功能。城市是典型的开放复杂巨系统,城市子系统彼此交融,并非封闭和隔离的,子系统需不断适应新环境以达到整体可持续发展^[69]。系统中的成员是可适应的主体,它们之间相互联系,不可分割(图 2)。城市复杂适应系统的各主体通过与环境或其它主体之间相互作用,改变自身结构和行为方式,从而使系统在非平衡态下涌现出新的更稳定的耗散结构,促进城市系统演进。这种相互作用通过物质、能量、信息流动表现为城市与区域,城市与生态、经济、社会、文化等子系统所具有的“共生”“协同”和“共同进化”的关系。城市系统受到内外部作用的综合型铸,主体即可视作节点,关系即网络的边(图 3),网络思想与复杂系统内部结构特征最为契合,也开展了一些

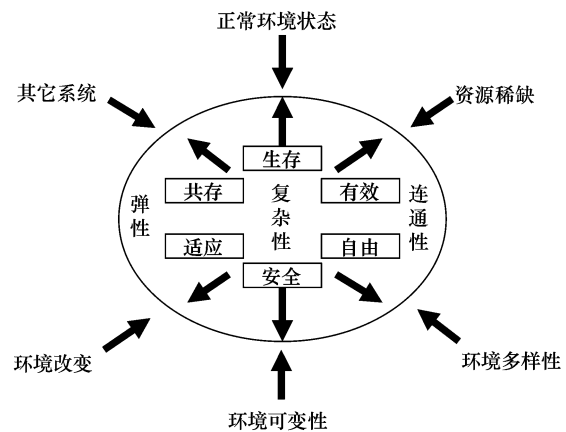


图 1 城市社会-生态系统的弹性

Fig.1 The resilience of urban social-ecosystem systems

初步研究,最初社会网络分析可通过统计网络中节点和连线特征来半量化的描述系统结构^[81],随着计算科学和跨学科研究的融合发展,网络分析也可定量地探索系统内部的各种非线性复杂关联,例如运用城市生态网络模拟系统的物质流动,可观测某些行为对城市内节点和关联的作用以及对整个网络的影响,探索城市系统的稳定性和协同性^[82],揭示系统演化过程与机理,而这正是实现城市系统可持续发展的关键^[83-84]。

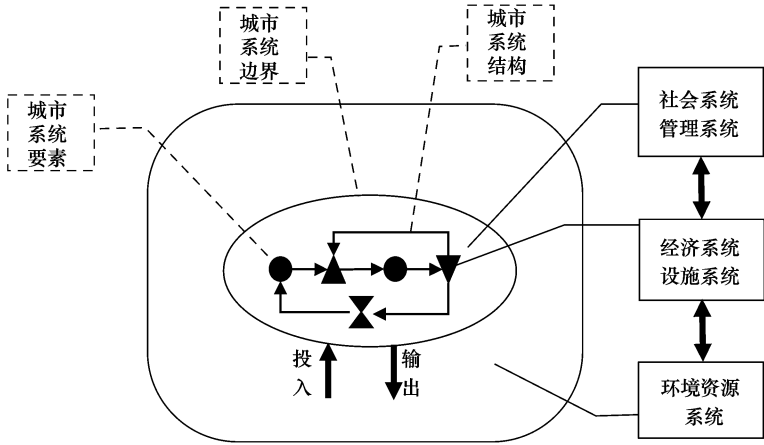


图2 城市系统及其相互关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of urban systems and their interrelationships

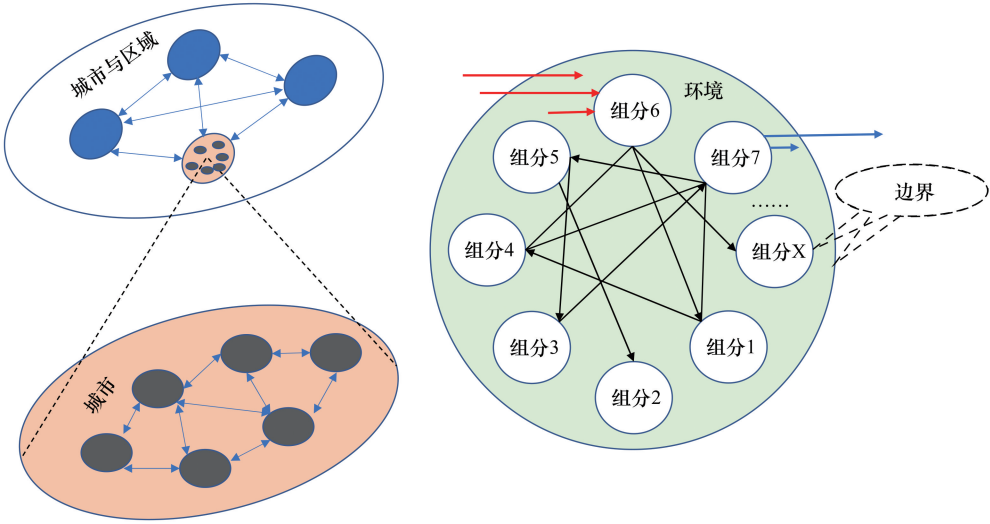


图3 城市系统网络分析示意图

Fig.3 Schematic diagram of network analysis for urban system

3 结论和展望

(1) 需要全面识别和准确衡量基本指标

以往传统的研究不足以涵盖城市可持续发展所定义的内容和目的:①提供关于一个系统的可行性及其变化速度的所有基本信息,②表明各组分对系统可持续发展目标的贡献。基本指标通常不明显或不直观,应充分观察可持续发展的指标,理解并应对动态环境。否则容易被错误的信号误导或困惑,进行不适当的回应,朝着不可持续的方向发展。寻找更广泛的指标,比如包容性财富,可能会有所帮助,但如果没有政府的积极参

与,就难以准确衡量,因为财富的很大一部分是公共产品,如基本保健、教育和自然资源。城市可持续发展研究有必要确定基本组成,并确定能够提供关于每个组织和整个系统生存能力的基本和可靠资料的指标,形成关于可持续发展的系统的全面信息。因此建议要将传统的评价指标方法、资源环境承载核算、与系统内在机理探索相结合(表 1),将城市系统的内外要素统一到一个框架考虑城市的可持续发展。城市系统本身的可持续发展不仅与其内在各个组织的发展有关,还与城市子系统之间的关联关系是否协调密切相关,需要通过一种系统思维来探索构建城市可持续性指标。如果系统单个组成不能正常运作,整个系统就不能正常运作或者运作的可持续性很低,也就不能维持下去。

表 1 研究方法对比分析表

Table 1 Overview of research methods				
研究方法 Methods	核心内涵 Core connotation	案例介绍 Case introduction	特点 Features	劣势 Weaknesses
评价指标体系法 Evaluation index system	是指由反映可持续发展不同特性的多个指标构成的具有综合性的体系来评价城市可持续发展的方法	Yang 等 ^[92] 提出了城市可持续发展线性无量纲坐标系,对中国东、中、西部地区 287 个城市进行了评价研究。李峰等 ^[93] 构建了济宁市可持续发展的指标体系(包含经济发展、生态建设、环境保护和社会进步 4 大类 45 项指标)评价了济宁市可持续发展水平。孙晓等 ^[17] 建立了不同规模城市的可持续发展指标体系,包括社会进步、经济发展、生态环境 3 大类 24 项指标,对 277 个中国城市的可持续发展能力进行了综合评价。	综合性、典型代表性、独立性、可操作性、可对比、可量化	表象性,容易割裂系统组织间的关联;不能探索系统机理;指标设置容易重叠;基本指标难以全面识别
资源环境承载核算方法 Resources and environment bearing accounting method	资源环境是人类社会赖以发展的根基。一个地区对人类的承载能力是可持续发展的根本限制因素。这种方法是物理条件和自然法则的约束,包含生态足迹、行星边界、能值分析等。这些方法正经历着创新和发展。	Dearing 等 ^[94] 选取空气质量、土壤稳定性、水质、泥沙质量等指标为研究对象,对安徽省舒城县等区域的环境边界进行了设置。Wei 等 ^[95] 建立了一个综合城市承载力分析框架,评估了中国 30 个省会城市和直辖市的城市承载力状况,以改进城市土地可持续利用与发展决策。赵正等 ^[96] 利用生态足迹模型分析大庆市生态承载力时空变化,为大庆市与同类资源型城市可持续发展提供科学依据。吴凡 ^[97] 基于能值分析对陕西省各市的经济效率和生态效率进行研究,找出问题和现状,为促进城市合理规划和可持续发展提供科学依据。	自然资源与环境及其约束;物质资源储备;太阳能流动、足迹等统一核算框架	核算时转换率系数难以准确核定;缺乏网络视角,不能进行拓扑分析;强度性质考虑较少
可持续性机理解析法 Analytical method of sustainability mechanism	从系统论解析可持续性机理。主要包括弹性理论和复杂系统分析	Xu 等 ^[80] 试图将弹性思维应用于生态敏感地区的新城区开发,特别提出在规划阶段实施生态容量控制和建设规模预测,建立规划与实施之间的可操作性指标体系,在决策中利用反馈机制,确保规划的准确实施。Sotoudeh 等 ^[81] 探索了一个整合遥感、空间度量和城市增长模型的框架,以证明弹性思维在选择更可持续的城市发展场景中的应用,旨在应用弹性思维支持设拉子城市区域的城市规划和管理。Zellner 等 ^[98] 基于复杂系统视角集成了涵括政策、经济、资源、环境的模型,探索不同情境下城市系统的可持续性,以判别政策决策是否有助于提升整个城市系统的可持续性。Ponte 等 ^[99] 从复杂性的角度探讨了治理安排和制度如何影响里斯本绿色基础设施体系的有效实施,以及参与者的角色,可以为可持续转型提供新的视角。	弹性是系统在经历变化以保持本质上相同的功能、结构、特性和反馈的过程中吸收干扰和重组的能力;系统自适应和自组织过程决定了可持续性;通过模拟复杂系统内部相互关联可从机理层次揭示系统特性	概念式的探讨较多;多为黑箱理论;弹性难以科学全面量化。复杂系统研究则大多为隐喻描述性探讨。

(2)需要细化资源环境承载力和复杂系统方法的结合点和分析层次

目前对于资源环境承载缺乏统一的定义,如何准确评估承载力、如何确定承载力的阈值是研究的难点。必须根据系统及其过程来深度剖析,必须更仔细地分析整个城市系统复杂的问题和任务。这需要对整个城市系统及其组分建立一个相当详细的模型,尽量能够包含各个层次关联和过程。结合资源环境承载力和复杂系统理论方法研究城市的可持续发展存在三个独立的任务:①我们必须确定与城市可持续发展有关的主要系统;②必须制定一种方法来确定这些系统的生存能力和可持续性指标;③必须思考如何利用这些信息来评估

城市发展在不同层次的社会组织中的可行性和可持续性。

(3) 借助计算科学和数据科学推动复杂系统模拟城市可持续性

随着计算科学和数据科学的发展,新的方法不断涌现,数据可获得性及数据模型的发展让研究拥有更成熟的工具和方法来处理复杂的城市可持续发展问题。然而新方法如何与可持续发展研究框架融合,并用来解决城市发展中的问题值得深入思考。需要更好地管理自然和社会之间的关系,如果不能准确衡量这种关系那么就不可能实现科学管理。另外可持续研究需要政府的大力支持,政府在支持数据收集、方法标准化、建立和发展跨学科专业队伍方面发挥着至关重要的作用。可持续发展是人与自然系统的共同进化,既要处理好人的问题,又要解决自然的问题。更重要的是探索人与自然系统之间相互关系的深层次机理和调节机制,即要明白反映这种关系的基本指标是什么,并且理解其背后的驱动机制和运行规律。从而为城市可持续发展提供科学依据和实践指导。

参考文献 (References):

- [1] 曾贤刚,李琪,孙瑛,魏东. 可持续发展新里程:问题与探索——参加“里约+20”联合国可持续发展大会之思考. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(8): 41-47.
- [2] Xu Z C, Li Y J, Chau S N, Dietz T, Li C B, Wan L W, Zhang J D, Zhang L W, Li Y K, Chung M G, Liu J G. Impacts of international trade on global sustainable development. *Nature Sustainability*, 2020, 3(11): 964-971.
- [3] 封志明. 资源科学研究的五大趋向. 地球科学进展, 1992, 7(6): 46-50.
- [4] 唐大为. 迈向 21 世纪——联合国环境与发展大会文献汇编. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [5] 中国 21 世纪议程编辑委员会. 中国 21 世纪议程:中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [6] 韩传峰,陈建业,孙庆荣. 山东省城市可持续发展的评价. 石油大学学报: 社会科学版, 2005, 21(5): 35-38.
- [7] 宋宇辰,王贺,闫昱洁,薛建春. 基于熵值-TOPSIS 法的包头市可持续发展评价研究. 国土资源科技管理, 2015, 32(4): 133-140.
- [8] 何伟,杨春红. 基于 Topsis 的江苏省中心城市可持续发展状况评价. 南京师大学报: 社会科学版, 2010(6): 68-72.
- [9] 王如松,李锋,韩宝龙,黄和平,尹科. 城市复合生态及生态空间管理. 生态学报, 2014, 34(1): 1-11.
- [10] 方创琳,崔学刚,梁龙武. 城镇化与生态环境耦合圈理论及耦合器调控. 地理学报, 2019, 74(12): 2529-2546.
- [11] 方创琳,周成虎,顾朝林,陈利顶,李双成. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径. 地理学报, 2016, 71(4): 531-550.
- [12] 方创琳,王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征. 地理学报, 2015, 70(2): 234-247.
- [13] 金经元. 再谈霍华德的明日的田园城市. 国外城市规划, 1996, 11(4): 31-36.
- [14] 张梦,李志红,黄宝荣,李颖明,陈劭锋. 绿色城市发展理念的产生、演变及其内涵特征辨析. 生态经济, 2016, 32(5): 205-210.
- [15] 蒋艳灵,刘春腊,周长青,陈明星. 中国生态城市理论研究现状与实践问题思考. 地理研究, 2015, 34(12): 2222-2237.
- [16] 张卫,郭玉燕. 城市可持续发展指标体系的研究. 南京社会科学, 2006(11): 45-51.
- [17] 孙晓,刘旭升,李锋,陶宇. 中国不同规模城市可持续发展综合评价. 生态学报, 2016, 36(17): 5590-5600.
- [18] Running S W. Ecology. A measurable planetary boundary for the biosphere. *Science*, 2012, 337(6101): 1458-1459.
- [19] 方恺,高凯,李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较. 地理研究, 2013, 32(9): 1657-1667.
- [20] 杨博宇,白中科. 试论矿区生态保护修复中的弹性思维. 中国农业大学学报, 2022, 27(1): 212-221.
- [21] 董仁才,王韬,张永霖,张雪琦,李欢欢. 我国城市可持续发展能力评估指标的元数据分析与管理. 生态学报, 2018, 38(11): 3775-3783.
- [22] 许学强,张俊军. 广州城市可持续发展的综合评价. 地理学报, 2001, 56(1): 54-63.
- [23] Harris J. Basic principles of sustainable development. *Dimensions of Sustainable Development*, 2000.
- [24] Xu Z C, Chau S N, Chen X Z, Zhang J, Li Y J, Dietz T, Wang J Y, Winkler J A, Fan F, Huang B R, Li S X, Wu S H, Herzberger A, Tang Y, Hong D Q, Li Y K, Liu J G. Assessing progress towards sustainable development over space and time. *Nature*, 2020, 577(7788): 74-78.
- [25] Sachs J, Schmidt-Traub G, Kroll C, Lafortune G, Fuller G. Sustainable Development Report 2020. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [26] Simon D, Arfvidsson H, Anand G, Bazaz A, Fenna G, Foster K, Jain G, Hansson S, Evans L M, Moodley N, Nyambuga C, Oloko M, Ombara D C, Patel Z, Perry B, Primo N, Revi A, van Niekerk B, Wharton A, Wright C. Developing and testing the Urban Sustainable Development Goal's targets and indicators-a five-city study. *Environment and Urbanization*, 2016, 28(1): 49-63.
- [27] 张坤民,杜斌. 环境可持续性指数:尝试评价国家或地区环境可持续能力的指标. 环境保护, 2002(08): 24-29.

- [28] 黄志辉, 李桂君, 李玉龙, 常远. 基于 DPSIR 模型的北京市可持续发展评价. 城市发展研究, 2016, 23(9): 20-24.
- [29] Zhang W, Zhang X X, Liu F, Huang Y, Xie Y W. Evaluation of the urban low-carbon sustainable development capability based on the TOPSIS-BP neural network and grey relational analysis. Complexity, 2020, 2020: 6616988.
- [30] Li H Q, Li W Q, Zheng F. Optimal land use structure for sustainable agricultural development—a case study in Changsha County, south central China. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12(2): 203-213.
- [31] 陈军飞, 王慧敏. 基于 TOPSIS 模型的城市生态系统可持续发展评价. 生态经济, 2005, 21(9): 38-40.
- [32] Tang J, Zhu H L, Liu Z, Jia F, Zheng X X. Urban sustainability evaluation under the modified TOPSIS based on grey relational analysis. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(2): 256.
- [33] 方创琳, 梁龙武, 王振波. 京津冀城市群可持续爬升规律的定量模拟及验证. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(1): 104-121.
- [34] Ding L, Shao Z F, Zhang H C, Xu C, Wu D W. A comprehensive evaluation of urban sustainable development in China based on the TOPSIS-entropy method. Sustainability, 2016, 8(8): 746.
- [35] Cooper W W, Seiford L M, Zhu J. Data envelopment analysis: History, models, and interpretations[M]//Handbook on data envelopment analysis. Springer, Boston, MA, 2011: 1-39.
- [36] Yang Q, Wan X Z, Ma H M. Assessing green development efficiency of municipalities and provinces in China integrating models of super-efficiency DEA and malmquist index. Sustainability, 2015, 7(4): 4492-4510.
- [37] 王昊煜, 高培超, 谢一茹, 宋长青, 程昌秀, 叶思菁. 基于改进型 NSGA-II 算法的西宁市土地利用多目标优化. 地理与地理信息科学, 2020, 36(6): 84-89.
- [38] 刘慧心. 人居环境视角下的港口城市可持续发展能力评价——以大连市为例[D]. 大连: 东北财经大学, 2017.
- [39] 张庚鑫. 基于 BP 神经网络的城市韧性动态模拟研究[D]. 哈尔滨师范大学, 2021. DOI:10.27064/d.cnki.ghasu.2021.000229.
- [40] Zhang R, Wang Y, Wang K B, Zhao H Y, Xu S, Mu L J, Zhou G Z. An evaluating model for smart growth plan based on BP neural network and set pair analysis. Journal of Cleaner Production, 2019, 226: 928-939.
- [41] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [42] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Callejas Linares A, Susana López Falfán I, Méndez Garcia J, Isabel Suárez Guerrero A, Guadalupe Suárez Guerrero M. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [43] 高卿, 苗毅, 宋金平. 青藏高原可持续发展研究进展. 地理研究, 2021, 40(1): 1-17.
- [44] 杨晓俊, 方传珊, 侯叶子. 基于生态足迹的西安城市生态游憩空间优化研究. 地理研究, 2018, 37(2): 281-291.
- [45] 张乐勤, 陈素平, 荣慧芳, 许信旺. 安徽省池州市 2001—2010 年可持续发展动态测度与分析. 地理研究, 2012, 31(3): 439-449.
- [46] Rees W E. Ecological footprints: a blot on the land. Nature, 2003, 421(6926): 898.
- [47] Kissinger M, Haim A. Urban hinterlands—the case of an Israeli town ecological footprint. Environment, Development and Sustainability, 2008, 10(4): 391-405.
- [48] Geng Y, Zhang L M, Chen X D, Xue B, Fujita T, Dong H J. Urban ecological footprint analysis: a comparative study between Shenyang in China and Kawasaki in Japan. Journal of Cleaner Production, 2014, 75: 130-142.
- [49] Baabou W, Grunewald N, Ouellet-Plamondon C, Gressot M, Galli A. The Ecological Footprint of Mediterranean Cities: awareness creation and policy implications. Environmental Science & Policy, 2017, 69: 94-104.
- [50] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin F S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, de Wit C A, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A. A safe operating space for humanity. Nature, 2009, 461(7263): 472-475.
- [51] Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell S E, Fetzer I, Bennett E M, Biggs R, Carpenter S R, de Vries W, de Wit C A, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace G M, Persson L M, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 2015, 347(6223).
- [52] Lade S J, Steffen W, de Vries W, Carpenter S R, Donges J F, Gerten D, Hoff H, Newbold T, Richardson K, Rockström J. Human impacts on planetary boundaries amplified by Earth system interactions. Nature Sustainability, 2020, 3(2): 119-128.
- [53] Hoornweg D, Hosseini M, Kennedy C, Behdadi A. An urban approach to planetary boundaries. Ambio, 2016, 45(5): 567-580.
- [54] Li M, Wiedmann T, Liu J G, Wang Y F, Hu Y C, Zhang Z Y, Hadjikakou M. Exploring consumption-based planetary boundary indicators: an absolute water footprinting assessment of Chinese Provinces and cities. Water Research, 2020, 184: 116163.
- [55] Randers J, Rockström J, Stoknes P E, Goluke U, Collste D, Cornell S E, Donges J. Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries. Global Sustainability, 2019, 2: e24.

- [56] Hachaichi M, Baouni T. Downscaling the planetary boundaries (Pbs) framework to city scale-level; De-risking MENA region's environment future. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2020, 5: 100023.
- [57] Norman B, Steffen W. Planning within planetary boundaries. *Sustainable Pathways for our Cities and Regions*. New York: Routledge, [2018]: Routledge, 2018; 20-44.
- [58] Nino-Murcia A. Investing in natural capital. *The Journal of Environment & Development*, 2006, 15: 317-331.
- [59] González-Mejía A M, Ma X. The emergy perspective of sustainable trends in Puerto Rico from 1960 to 2013. *Ecological Economics*, 2017, 133: 11-22.
- [60] Bonilla S H, Papalardo F, Tassinari C A, Sacomano J B, de Carvalho F R. Contribution of the Paraconsistent Tri-Annotated Logic to emergy accounting and decision making. *Ecological Modelling*, 2019, 393: 98-106.
- [61] Su M R, Yang Z F, Chen B, Ulgiati S. Urban ecosystem health assessment based on emergy and set pair analysis—a comparative study of typical Chinese Cities. *Ecological Modelling*, 2009, 220(18): 2341-2348.
- [62] Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Ulgiati S. Monitoring trends of urban development and environmental impact of Beijing, 1999-2006. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(18): 3295-3308.
- [63] Zhang Y, Yang Z F, Liu G Y, Yu X Y. Emergy analysis of the urban metabolism of Beijing. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2377-2384.
- [64] Vega-Azamar R E, Glaus M, Hausler R, Oropeza-García N A, Romero-López R. An emergy analysis for urban environmental sustainability assessment, the Island of Montreal, Canada. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 118: 18-28.
- [65] Russo T, Buonocore E, Franzese P P. The urban metabolism of the city of Uppsala (Sweden). *Journal of Environmental Accounting and Management*, 2014, 2(1): 1-12.
- [66] Ascione M, Campanella L, Cherubini F, Bargigli S, Ulgiati S. The material and energy basis of Rome: an investigation of direct and indirect resource use through material flow, energy and footprint methods. *ChemSusChem*, 2008, 1(5): 450-462.
- [67] Ascione M, Campanella L, Cherubini F, Ulgiati S. Environmental driving forces of urban growth and development. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 93(3/4): 238-249.
- [68] Ascione M, Bargigli S, Campanella L, Ulgiati S. Exploring an urban system's dependence on the environment as a source and a sink: the city of Rome (Italy) across space and time scales. *ChemSusChem*, 2011, 4(5): 613-627.
- [69] Zucaro A, Ripa M, Mellino S, Ascione M, Ulgiati S. Urban resource use and environmental performance indicators. An application of decomposition analysis. *Ecological Indicators*, 2014, 47: 16-25.
- [70] Hongfang L, Zheng Y, Xinfeng Z, Shaolin P. A new emergy index for urban sustainable development. *Acta Ecologica Sinica*, 2003
- [71] Viglia S, Civitillo D F, Cacciapuoti G, Ulgiati S. Indicators of environmental loading and sustainability of urban systems. An emergy-based environmental footprint. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 82-99.
- [72] Lou B, Qiu Y H, Ulgiati S. Emergy-based indicators of regional environmental sustainability: a case study in Shanwei, Guangdong, China. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 514-524.
- [73] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [74] Bengtsson J, Angelstam P, Elmqvist T, Emanuelsson U, Folke C, Ihse M, Moberg F, Nyström M. Reserves, resilience and dynamic landscapes 20 years later. *Ambio*, 2021, 50(5): 962-966.
- [75] Elmqvist T, Folke C, Nyström M, Peterson G, Bengtsson J, Walker B, Norberg J. Response diversity, ecosystem change, and resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(9): 488-494.
- [76] Peterson G, Allen C R, Holling C S. Ecological resilience, biodiversity, and scale. *Ecosystems*, 1998, 1(1): 6-18.
- [77] Hughes T P, Bellwood D R, Folke C, Steneck R S, Wilson J. New paradigms for supporting the resilience of marine ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(7): 380-386.
- [78] Olsson P, Folke C, Hughes T P. Navigating the transition to ecosystem-based management of the Great Barrier Reef, Australia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9489-9494.
- [79] Walker B H, Salt D. Resilience practice building capacity to absorb disturbance and maintain function. Washington: Island Press, 2012
- [80] Xu L Q, Zhou J Q. The new town development in ecological sensitive area based on resilience thinking. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2016, 216: 998-1005.
- [81] Sotoudeh A, Parivar P. Applying resilience thinking to select more sustainable urban development scenarios in Shiraz, Iran. *Scientia Iranica*, 2016, 23(5): 1975-1983.
- [82] Ruiz Agudelo C A, Mazzeo N, Díaz I, Barral M P, Piñeiro G, Gadino I, Roche I, Acuña-Posada R J. Land use planning in the Amazon Basin: challenges from resilience thinking. *Ecology and Society*, 2020, 25: art8.
- [83] Masnavi M R, Gharai F, Hajibandeh M. Exploring urban resilience thinking for its application in urban planning: a review of literature.

- International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(1): 567-582.
- [84] Cheek W, Chmutina K. Measuring resilience in the assumed city. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2022, 13(3): 317-329.
- [85] Ilmola L. Approaches to measurement of urban resilience. *Urban Resilience*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 207-237.
- [86] 蒲波. 城市弹性的测度与时空分析——以四川省为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [87] Shi Y J, Zhai G F, Xu L H, Zhou S T, Lu Y W, Liu H B, Huang W. Assessment methods of urban system resilience: from the perspective of complex adaptive system theory. *Cities*, 2021, 112: 103141.
- [88] McGill R. Urban resilience-An urban management perspective. *Journal of Urban Management*, 2020, 9(3): 372-381.
- [89] Gell-Mann M. Complexity and complex adaptive systems. 1992.
- [90] Gell-Mann M. Complex adaptive systems. 1994.
- [91] Huang H J. An adaptive troubleshooting model for complex and dynamic system. *IFAC Proceedings Volumes*, 1995, 28(15): 571-574.
- [92] Yang B, Xu T, Shi L Y. Analysis on sustainable urban development levels and trends in China's Cities. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 868-880.
- [93] 李锋, 刘旭升, 胡聃, 王如松. 城市可持续发展评价方法及其应用. *生态学报*, 2007(11): 4793-4802.
- [94] Dearing J A, Wang R, Zhang K, Dyke J G, Haberl H, Hossain M S, Langdon P G, Lenton T M, Raworth K, Brown S, Carstensen J, Cole M J, Cornell S E, Dawson T P, Doncaster C P, Eigenbrod F, Flörke M, Jeffers E, Poppy G M. Safe and just operating spaces for regional social-ecological systems. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 227-238.
- [95] Wei Y G, Huang C, Li J, Xie L L. An evaluation model for urban carrying capacity: a case study of China's mega-cities. *Habitat International*, 2016, 53: 87-96.
- [96] 赵正, 宁静, 周非飞, 杜可, 荣国华. 基于生态足迹模型的资源型城市生态承载力评价——以黑龙江省大庆市为例. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 281-287.
- [97] 吴凡. 基于能值分析的陕西省城市经济效率和生态效率对比研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [98] Zellner M L, Theis T L, Karunanithi A T, Garmestani A S, Cabezas H. A new framework for urban sustainability assessments: linking complexity, information and policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(6): 474-488.
- [99] Ponte T, Queirós M. Planning for urban sustainability: a complex adaptive system analyses of the Lisbon green infrastructure. *Proceedings of the 1st International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2021)*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 558-567.