DOI: 10.20103/j.stxb.202310232308

黄馨,韩玲,赵永华,黄晓军.城市社会-生态系统研究理论基础与分析框架.生态学报,2024,44(15):6892-6905.

Huang X, Han L, Zhao Y H, Huang X J.Theoretical foundations and analytical frameworks for urban socio-ecological system.Acta Ecologica Sinica,2024,44(15):6892-6905.

城市社会-生态系统研究理论基础与分析框架

黄 馨[1,2],韩 玲[1,2],赵永华[1,2],黄晓军[3,4,5,*]

1 长安大学土地工程学院,西安 710054

2 陕西省土地整治重点实验室,西安 710054

3 西北大学城市与环境学院,西安 710127

4 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,西安 710127

5 陕西西安城市生态系统定位观测研究站,西安 710127

摘要:耦合自然要素与人类活动的城市社会-生态系统正受到学者们越来越多的关注。然而,城市社会-生态系统研究主题的复杂性和研究方法的综合性使得该领域研究仍面临较大挑战,理论基础、分析框架与研究范式尚不统一。在梳理国内外已有研究基础上,对城市社会-生态系统的理论基础和分析框架进行了系统总结,并从脆弱性、韧性和适应性整合视角提出了开展城市社会-生态系统可持续性研究的分析框架和研究思路。能为我国城市社会-生态系统研究提供借鉴与启示。

关键词:社会-生态系统;生态系统服务;脆弱性;韧性;适应性

Theoretical foundations and analytical frameworks for urban socio-ecological system

HUANG Xin[1,2], HAN Ling[1,2], ZHAO Yonghua[1,2], HUANG Xiaojun[3,4,5,*]

1 *School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an* 710054, *China*

2 *Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an* 710054, *China*

3 *College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an* 710127, *China*

4 *Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an* 710127, *China*

5 *Shaanxi Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, Xi'an* 710127, *China*

Abstract: Urban socio-ecological systems (USES) that couple natural elements with human activities are critical for understanding urban ecosystem services and managing ecosystems to meet the needs of growing and diverse urban populations and sustainable development goals. However, the complexity of USES research topics and the comprehensiveness of research methodologies have made it challenging to conduct research in this filed. The theoretical foundations, analytical frameworks, and research paradigms are not yet unified. There is an urgent need to systematically review existing research and explore the theoretical foundations, analytical frameworks, and the content of USES. This paper reviews the relevant theoretical foundations of USES, mainly involving complex adaptive systems theory, coupled human and nature systems, socio-ecological urbanism, and urban metabolism theory. Meanwhile, the paper summarizes the analysis framework of USES, which mainly includes the multi-level analysis framework of social-ecological systems, the human ecological system model, the conceptual framework of USES, the conceptual model of USES based on natural solutions, the framework of urban social-ecological-technological systems, and the framework of socio-economic-natural composite ecological systems.

基金项目:陕西省创新能力支撑计划(2024ZC-YBXM-053);陕西省哲学社会科学研究专项智库项目(2024ZD505);陕西省重点研发计划项目(211435220242);陕西省创新能力支撑计划创新团队项目(2024RS-CXTD-55)

收稿日期:2023-10-23; **网络出版日期**:2024-05-24

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: huangxj@ nwu.edu.cn

Finally, the paper proposes a framework for analyzing sustainability of USES from an integrated perspective of vulnerability, resilience, and adaptation. Vulnerability, resilience, and adaptation are core research themes in sustainability science. They play a crucial role in integrating social and ecological elements, analyzing the intricate processes and mechanisms of social system and ecosystem interactions, and guiding the management of USES towards sustainability. The paper also provides methods for conducting research on the vulnerability, resilience, and adaptation of urban socio-ecological systems. Constructing a vulnerability evaluation index system based on exposure, sensitivity, and coping capacity, and conducting vulnerability assessments are crucial components for identifying disturbances in USES, evaluating the condition of USES, and analyzing the characteristics of USES issues. Resilience not only helps diagnose the state of USES and assess their ability to cope with disturbances, but also provides a framework for understanding the complex processes of interactions and dynamic evolution mechanisms within USES. Based on the long-term state change of the system, exploring the key time points of the system state change (regime shift) and its driving factors, and then revealing the evolution law of the USES is the main research approach in the field of USES resilience. Adaptation refers to the adjustment and response of USES to external disturbances. Adaptive management of USES is essential for integrating urban ecological resources and planning management, mitigating the vulnerability of USES, and enhancing their resilience and sustainability. This study can offer valuable lessons and insights for the study of USES in China, particularly for developing a framework for analyzing USES.

Key Words: social-ecological system; ecosystem services; vulnerability; resilience; adaptation

截至 2021 年,全世界约有 56%的人口居住在城市,预计到 2050 年,世界城市化水平将上升至 68%,城市面积将达到 120 万 km^2[1]。城市人口的快速集聚和空间规模的持续扩张给资源与生态环境带来沉重压力。联合国人居署研究表明,城市能源消费占全球能源消费总量的 71%,温室气体排放量占 76%[2],城市生态退化和环境污染问题日益加剧,特别是在全球气候变化背景下,城市暴雨内涝、高温热浪等极端天气事件发生的频率、强度和持续时间显著增强[3],给城市居民健康、生命财产安全、人居环境质量等带来严重威胁,构建安全、韧性和可持续的城市与人类住区成为全球可持续发展目标(SDGs)之一。

面对全球气候变化和快速城市化引发的一系列城市生态环境问题,维护城市生态系统健康与可持续性,提升城市生态系统服务能力的重要性不言而喻。城市中的绿地、河流、湖泊、农田等生态系统,为城市居民提供了重要的供给、调节、文化服务[4—5]。围绕城市生态系统服务的相关研究成果不断丰富,城市生态系统服务以及城市生态学正逐渐成为生态学的研究热点[6]。纵观城市生态学的演进历程,其起源于 20 世纪 20 年代芝加哥人类生态学派,早期的城市生态学只是将城市作为一类研究区域,将传统的生态学研究范式和方法移植到城市中,形成所谓的城市内的生态学 (ecology in cities),重点关注城市栖息地的生态格局和过程[7]。此后,学者们逐渐意识到,城市作为一个复杂系统,具有强烈的人类活动影响,不能依靠纯粹的生态过程分析,而必须与人类活动相结合,由此形成了城市系统生态学 (ecology of cities),研究主题也开始聚焦到城市系统中的社会要素与生态要素之间的相互作用[8]。近年来,随着可持续性科学的兴起与联合国可持续发展目标的提出,城市社会-生态系统的脆弱性、韧性、适应性与可持续性成为城市生态研究领域探讨的热点问题[9—10],研究范式转向多学科和跨学科的综合研究方法,城市生态学也开始转为面向可持续性的城市生态学 (ecology for sustainable cites)[11]。

在城市生态学发展过程中,研究主题的复杂性、研究方法的综合性已成为学者们的共识,而耦合自然要素与人类活动的城市社会-生态系统研究对于理解城市生态系统服务、管理生态系统以满足不断增加的多样化城市人口需求和可持续发展目标至关重要[12]。然而,城市社会-生态系统的复杂性和跨学科研究方法的综合性使得该领域研究仍面临较大困难,相关理论基础、分析框架与研究范式尚不统一,亟需对已有研究进行系统梳理,并开展城市社会-系统理论基础、分析框架与研究内容的探讨。综上,本文在总结国外已有研究基础上,对城市社会-生态系统的理论基础和分析框架进行了系统梳理与总结,并提出了城市社会-生态系统可持续性

研究框架与主要思路,期望为我国城市社会-生态系统研究提供借鉴与启示。

1 城市社会-生态系统的理论基础

目前尚未形成统一的城市社会-生态系统理论基础,但在反映人(社会)与环境(生态)相互关系和系统复杂性等方面见长的复杂适应系统理论、人与自然耦合系统、社会-生态城市主义、城市代谢理论可为理解城市社会-生态系统提供理论支撑。

1.1 复杂适应系统理论

复杂适应系统理论是在第一代系统论(即一般系统论、控制论和信息论)和第二代系统论(即耗散结构论、协同论、突变论)基础上演变形成的第三代系统论,最初由 Holland 于 1994 年提出。复杂适应系统理论的基本思想是:系统是由一系列具有适应性的个体组成,被称之为适应性主体,这些个体为了满足自身生存需要,能够与环境以及其它个体进行交流,在交流过程中不断进行演化学习,并根据学到的经验改变自身的结构和行为方式,在改变自身的同时也在不断影响和改变着环境,这成为系统发展与进化的主要动因[13]。Holland 还提出了 7 个相关概念,包括聚集、非线性、流、多样性、标识、内部模型、构件。此外,他在遗传算法基础上建立了“回声”模型,用以模拟和研究一般的复杂适应系统行为。

城市是一个典型的复杂适应系统,包括多样化的子系统,如社会、经济、文化、政治、生态、环境等,各子系统又由次一级系统和具体要素组成,形成不同层级的个体,每个个体都是具有一定适应性的主体,并在系统中承载着不同的功能,个体之间通过复杂的物质、能量和信息流动形成相互影响、相互作用的网络,某个个体的属性发生变化时,可能导致系统结构乃至整个系统发生变化。复杂适应系统理论为理解城市不同适应性主体之间的关系,以及城市系统的演变规律提供了重要的分析视角。

1.2 人与自然耦合系统

美国密歇根州立大学刘建国等对人与自然耦合系统(coupled human and natural systems, CHANS)进行了系统阐释,认为 CHANS 是指人与自然要素相互作用的系统,并强调 CHANS 的研究重点包括人类和自然系统的模式与过程、系统的相互作用和反馈以及系统要素之间的尺度内和跨尺度的相互作用[14]。在 CHANS 中,耦合的人类和自然系统可以概念化为具有嵌套层次结构的实体,它们在不同的组织层次上相互作用,形成了相互嵌入的复杂互动网络。在系统的反馈回路中,人类既影响自然模式和过程,又受其影响;不同的反馈(正反馈或负反馈)会导致系统要素及其相互作用变化速率的差异。在这个耦合系统中,还会呈现出涌现性、脆弱性、阈值效应和韧性等特征。人与自然耦合系统特别强调时间和空间的耦合,时间耦合体现在不同时期系统的相互作用及其累积和演变;空间耦合体现在系统的相互作用可能发生在嵌套的多个空间尺度上(从局地到全球)。

人与自然耦合系统提出后,受到学术界广泛关注,尤其是其所强调的不同尺度的社会和生态过程及其相互作用形成的复杂系统,对城市生态学和城市生态系统研究都提供了很好的启发[15]。城市作为一个独特的“尺度空间”,人与自然耦合系统的理论内涵及其所强调的综合分析框架和综合研究方法对理解城市社会-生态系统的复杂性提供了有力支撑。

1.3 社会-生态城市主义

社会-生态城市主义(social-ecological urbanism)最早出现于 Stephan Barthel 的《社会-生态城市主义原则》一书中[16],其主要针对的是城市生态与城市规划之间的鸿沟而提出的。长期以来,生态学家的工作并没有被很好地融入到城市规划中,生态学家作为顾问在城市规划方案制定之前编制清单,或在方案制定之后进行环境评估,其在城市规划中的贡献通常仅涉及现状数据的收集和分类,很少对具体规划方案提供支持[17]。对此,社会-生态城市主义强调城市生态与城市规划的结合。它将城市建成环境视为一个城市社会-生态系统,该系统由一系列关键的自然、社会、经济、文化资源构成,这些资源的流动和使用受到生态和社会系统(包括技术)的组合的调节。社会-生态城市主义指出,在相互关联的城市社会和生态系统中,如何通过明智的制度

设计和城市形态来解决韧性问题,一个关键原则是,更深入地了解话语、制度和城市形态如何与自组织的城市系统相联系,可以帮助创造符合可持续发展目标的社会生态结果[18]。

与人地关系理论和复杂适应系统理论相比,社会-生态城市主义更加强调其对城市规划的理论指导,通过构建城市社会系统和生态系统之间复杂相互关系的分析框架和方法,在具体的城市规划项目中整合和管理生态系统服务,并采用社会-生态韧性思维作为基本原则,来提高整个城市系统的韧性和可持续性。

1.4　城市代谢理论

城市代谢(urban metabolism)概念是 Wolman 提出的[19],被定义为"城市中发生的技术和社会经济过程的总和,导致的增长、能源生产和废物消除"[20]。城市可被视为一个巨大的有机体,同自然生物体相似,城市发展过程中也会消耗资源与能量并向周围环境排放废物,即城市的新陈代谢。城市代谢理论就是一种描述和分析城市内物质和能量流动的理论,通过模拟城市的代谢过程,找到其存在的问题(代谢紊乱)并进行诊断,进而为管理者提供解决方案。基于城市代谢理论,相关学者对不同城市开展了资源、能量和废物流动的量化研究,探讨影响能量流动的驱动因素,并尝试解释社会经济过程与生态环境过程的相互作用。能值分析、物质流分析、城市代谢效率等量化指标,以及黑箱模型、投入产出分析模型、生态网络模型、生态动力学模型等方法相继被引入,并将其作为研究城市可持续发展的重要组成部分[21—22]。

城市代谢理论在量化城市各种具体的物质和能量流动的基础上,将城市的社会经济过程和生态过程整合到一起,提供了一个研究城市自然系统和人类系统相互作用关系的框架。近年来,该理论不断完善,并越来越强调跨学科研究和综合方法的应用[23],特别是对人类社会的作用愈发重视。例如,如何实现资源的公平分配,促进城市环境正义和居民幸福感的提升等,以形成高效和公平的城市代谢。

2　城市社会-生态系统分析框架

2.1　社会-生态系统多层次分析框架

2007 和 2009 年,Ostrom 先后在 PNAS 和 Science 上撰文,提出了社会-生态系统多层次分析框架[24—25]。该框架由 4 个核心子系统构成,包括资源系统(RS)、资源单位(RU)、治理系统(GS)、使用者(U)(图 1)。每

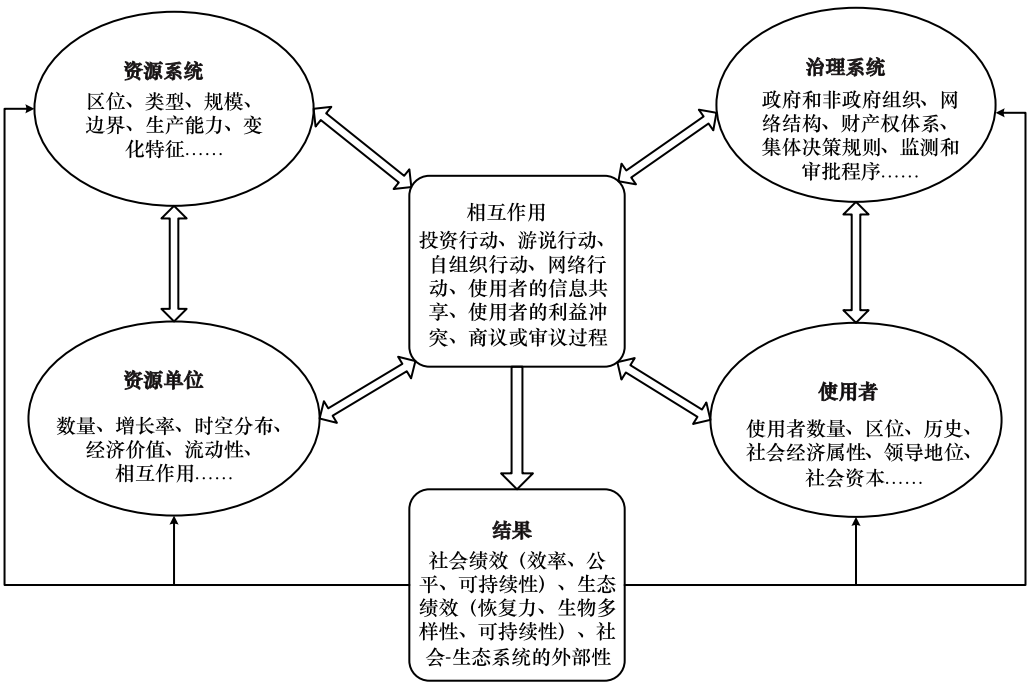

图 1　社会-生态系统多层分析框架(经改绘)

Fig.1　Multi-layer analysis framework of social-ecological system (redrawn)

个子系统由多个变量组成,其中,资源系统包括区位、类型、规模、边界、生产能力、变化特征等;资源单位包括数量、增长率、时空分布、经济价值、流动性以及彼此之间的相互作用等;治理系统包括政府和非政府组织、网络结构、财产权体系、集体决策规则、监测和审批程序等;使用者则涉及使用者的数量、区位、历史、社会经济属性、领导地位、社会资本等。这些变量之间相互作用,给社会和生态系统带来了不同的影响和后果。

该框架强调了社会和生态系统是相互依存、相互作用的,并提供了一套管理共同资源的原则和方法,以确保资源的可持续性和公正性。这些原则包括自组织、多层治理、规则设计、监督和惩处、适应性管理等。其中,自组织原则是指共同资源的管理应由使用者自行组织,而不是由外部的政府或市场进行管理,自组织管理能够促进使用者之间的合作并增强信任,使资源得到更好的保护和利用;多层治理原则强调共同资源的管理需要考虑多尺度影响,包括社区、地区、国家和全球等,且不同层次的治理机构需要相互协调和配合,以确保共同资源的可持续性;规则设计原则认为共同资源的管理需要设计合适的规则,包括资源使用限制、资源分配方式、违规行为的处罚措施等;监督和惩处原则强调共同资源的管理需要建立有效的监督和惩罚机制,以确保规则顺利运行。该框架已在森林、湖泊、渔业、牧场等特定类型的社会-生态系统研究中得到广泛应用[26],也被应用于城市生态系统的实证研究中,如城市雨洪管理[27],城市社区植树项目[28]等。总体来看,该框架在强调社会、生态系统相互作用的同时,更多侧重于自然资源和生态系统的可持续性管理。

2.2 人类生态系统模型

人类生态系统模型由 Machlis 提出[29],Pickett 等人在其基础上做了进一步的完善[30]。该模型整合了生态结构与社会过程,被定义为一个具有适应能力和可持续性的生物物理和社会因素的连贯系统。模型包括三种关键资源,即自然资源(如能源、土地、水、生物等)、社会经济资源(如人口、劳动力、资本、信息等)和文化资源(如信仰、组织)(图 2),这些资源维持着人类生态系统的运转,并通过相互作用影响着人类生态系统的动态变化。同时,这些关键资源的流动和使用依赖于人类社会系统的调节。人类社会系统由三个子系统组成,

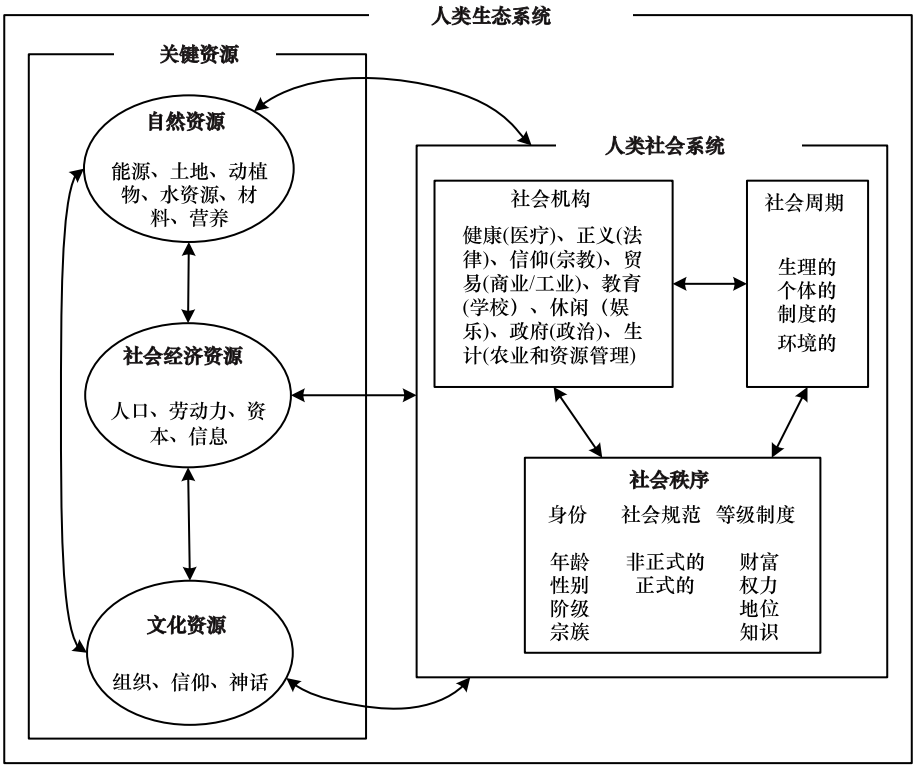

图 2 人类生态系统模型(经改绘)

Fig.2 Human ecosystem model (redrawn)

一是社会机构,即提供应对社会挑战或需求的集体解决方案的部门,包括教育、医疗、法律等;二是社会周期,即人类活动的时间模式,可能是生理上的(昼夜),季节性的(如狩猎季节),也可能是环境上的(如气候变化),社会周期会影响关键资源的分配;三是社会秩序,即一套个人和群体之间互动的文化模式,由个人和群体的身份、正式和非正式的行为规范以及决定资源分配的等级制度等因素决定。

人类生态系统模型全面考虑了人类活动与生态系统之间的相互作用,强调人类生态系统演变的驱动因素既有生物物理因素,也有社会因素,这些驱动因素的相对重要性可能会随着时间和空间的变化而变化。该模型也强调了系统的尺度和嵌套特征,认为人类生态系统规模不等,小到社区、县,大到城市、区域、国家。人类生态系统在一个尺度上的变化可能会在更大或更小尺度上产生影响。该模型的应用主要集中在三个方面,一是可作为与生态系统管理有关的社会影响评估的组织框架,指导相关从业者获取各种可能的影响;二是可作为制定生态系统管理社会指标的指南,并预测不同决策对生态系统的影响,评估自然资源管理策略的实施效果;三是可作为监测自然资源机构活动的基础,通过收集与模型变量有关的数据,设计出满足当地需要和维持可持续性的管理办法。

2.3　城市社会-生态系统概念框架

Dennis 在探讨如何创新城市社会-生态以适应自然资源管理时提出了城市社会-生态系统概念框架[31],框架包括三个部分,本文对其进行了整合(图 3)。该框架描述了城市社会-生态系统中的社会-生态条件、恢复力(韧性)和生态系统服务之间的循环反馈关系。自然资本是为人类社会提供生态系统服务的基础,同时,人类福祉的形成也受到社会资本和人力资本的影响,包括社会-生态记忆和学习,生物、组织和文化的多样性,社会网络和凝聚力等。实际上,人类福祉是自然资本和社会资本共同作用的结果,二者的结合提升了生态系统服务的功能冗余和多样性,可以促进系统在面对干扰时的恢复力和重要生态系统服务的持续生产。

如果自然资本和社会资本匮乏或适应能力缓慢,则可能出现负反馈,也就是说机会和陷阱并存。尤其是

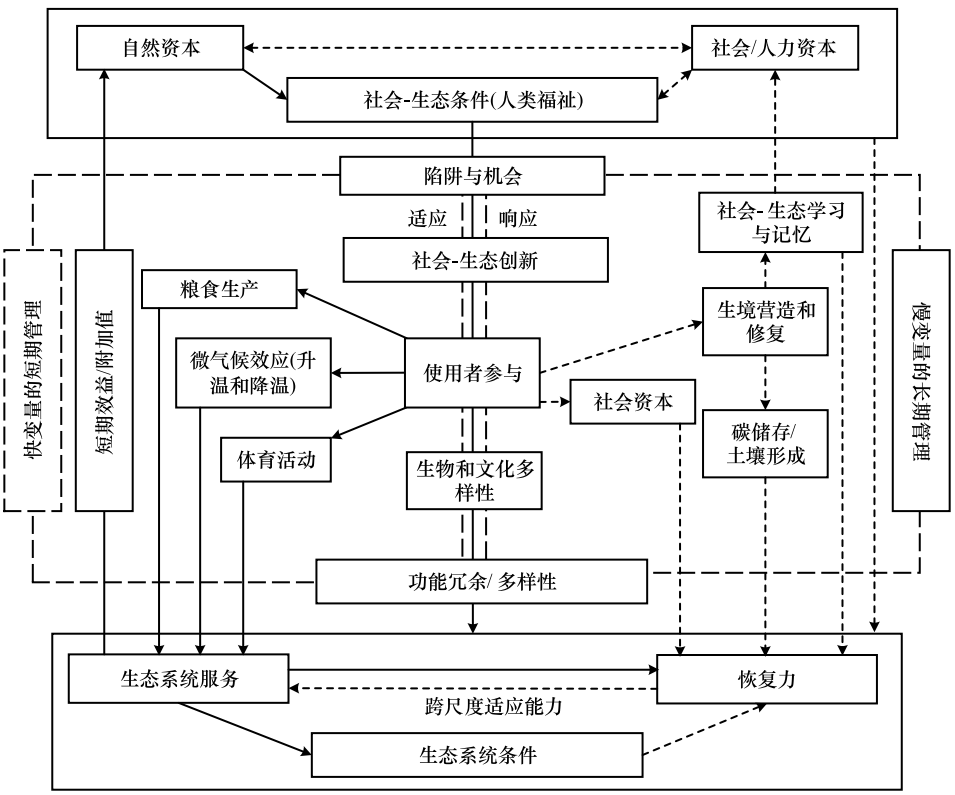

图 3　城市社会-生态系统概念框架(经改绘)

Fig.3　Conceptual framework of urban social-ecological system (redrawn)

面对外部干扰,当其引起的变化超过了系统维持其基本结构和功能的阈值时,系统就可能发生显著变化,进而影响生态系统服务的供给(包括粮食生产、微气候调节、固碳、生境营造和修复、生物多样性、体育活动等)。对此,该框架提出了 4 条标准,以评价生态系统服务的恢复力,包括对外部环境变化的响应和适应能力,快变量的短期管理能力,慢变量的长期管理能力以及生态系统功能的多样性和冗余性,并以社区集体管理的城市花园为例,说明了该框架在具体实践中的应用。该框架整合了社会和生态条件、生态系统服务、恢复力等核心概念,提供了一个开展社会-生态系统动态演变研究的综合分析框架,可在生态系统服务权衡、社会-生态系统恢复力评估、城市自然资源与环境管理等方面发挥一定作用。尽管该框架提供了一个整合分析思路,但对于社会、生态条件的具体要素和二者之间的相互作用过程和结果没有进行详细的描述,此外,对于外部快、慢变量的干扰过程、系统的阈值效应以及社会-生态系统恢复力评估方法也缺乏具体的说明。

2.4 基于自然解决方案的城市社会-生态系统概念模型

基于自然的解决方案(nature-based solutions)是指旨在同时应对生态、社会和经济挑战的生态系统干预措施。这样一个目标必然会涉及社会与生态要素的耦合,因此,相关学者将基于自然的解决方案概念化为社会-生态系统以便整合生态和社会因素,由此提出了基于自然解决方案的城市社会-生态系统概念模型[32]。该模型由 4 个部分构成(图 4),分别是社会和生态系统要素、时空尺度、理论依据、模型组织。其中,社会和生态系统要素各 6 个,社会系统涉及人口、文化、社会、技术、管理、金融,生态系统涉及生物、土壤、水、空气、气候、污染物,这些因素相互关联、相互作用构成了城市社会-生态系统。时间尺度包括短期、中期和长期,空间尺度包括场所、社区、城市、区域、国家、全球,不同系统在不同尺度上的运行具有明显差异,外部系统在大尺度上运行缓慢,内部系统在小尺度上运行迅速。涉及到的 4 个理论包括关系价值、多功能、跨学科和多中心治理,关系价值强调基于自然的解决方案要避免商品化和货币化的风险;多功能强调将各方面的利益、政策等进行权衡;跨学科强调整合多学科研究范式;多中心治理强调应对多方主体之间的合作、竞争和冲突。最后,模型提出了 8 个规划和实施阶段,每个阶段都会产生不同的设计元素,为基于自然的解决方案的实施提供了信息。

该模型全面定义了基于自然解决方案的社会-生态系统,强调了系统的复杂性、动态性和多尺度特征,并提出了规划实施阶段需要依据的理论,较好地整合了基于自然解决方案的概念、理论、规划和实施等内容,为城市社会-生态系统从理论研究走向规划实践提供了很好的启示。但是,该模型仍是概念化的,在具体实践过程中的适用性、可操作性等仍存疑,此外,该模型需要大量数据和技术的支持,不仅需要多方主体的参与,同时也对城市规划和设计人员的能力提出了更高的要求,使其在应用上面临较大挑战。

2.5 城市社会-生态-技术系统框架

为了应对城市生态系统服务在规划、管理方面存在的挑战,McPhearson 等提出了城市社会-生态-技术系统(SETS)框架[33]。该框架整合了社会-文化-经济-治理系统(社会维度)、气候-生物-物理-生态系统(生态维度)和技术-工程-基础设施系统(技术维度)(图 5)。其中,社会维度包括管理、规划、政策、财政、机构能力、价值观和文化规范等;生态维度包括气候、生物多样性、生态系统结构和功能以及不同尺度生态群落的相互作用等;技术维度包括物质构件(如堤坝、管道、涵洞)、气象传感器、工程流域、结构支撑、自动化系统、灌溉和建筑材料等。McPhearson 列举了粮食生产、洪水调控、气候调节和娱乐休闲四个生态系统服务案例,描述了它们之间的相互作用以及对城市生态系统服务和人类福祉的贡献。

该框架提供了一些案例来说明如何应对相关挑战。例如,在生态系统服务权衡与协同方面,通过城市农场和花园案例说明了其在食物供给、花粉传播、微气候调节等方面的生态系统服务关系;在生态系统服务价值评估方面,通过“绿色”和“灰色”基础设施案例,提出了雨水花园、生物湿地、人工湿地和绿色屋顶等生态与技术复合方案在雨水管理方面的作用;在生态系统服务的多时空尺度方面,通过城市社区绿色屋顶案例,说明了其在缓解城市热岛效应方面的价值;在生态系统服务的公平分配与环境正义方面,该框架承认结构性障碍如环境(或绿色、生态)绅士化的存在,强调正视这一问题并提出将不同主体纳入到决策过程,以保障生态系统服务供给的公平和公正。同其他框架相比,SETS 框架整合了社会、生态和技术维度,更加全面,并且其通过生

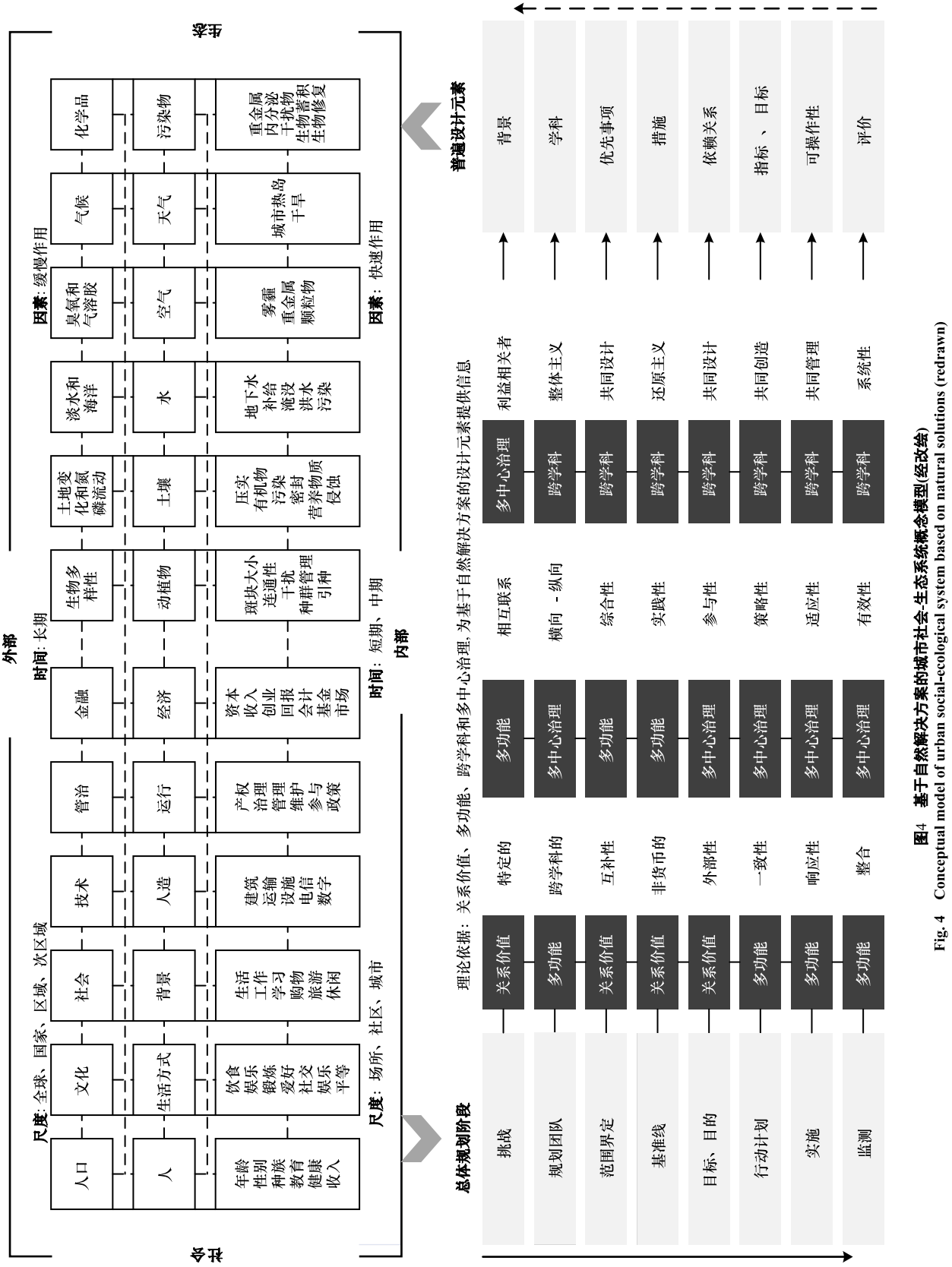

图4　基于自然解决方案的城市社会-生态系统概念模型(经改绘)

Fig. 4　Conceptual model of urban social-ecological system based on natural solutions (redrawn)

态系统服务将几个维度很好地联结到一起,反映了各维度的相互作用方式。此外,该框架不仅仅是停留在概念层面,而是充分考虑到了实践过程中可能遇到的问题和挑战,遗憾的是,该框架尚未对这些问题和挑战形成一个针对性的应对策略。

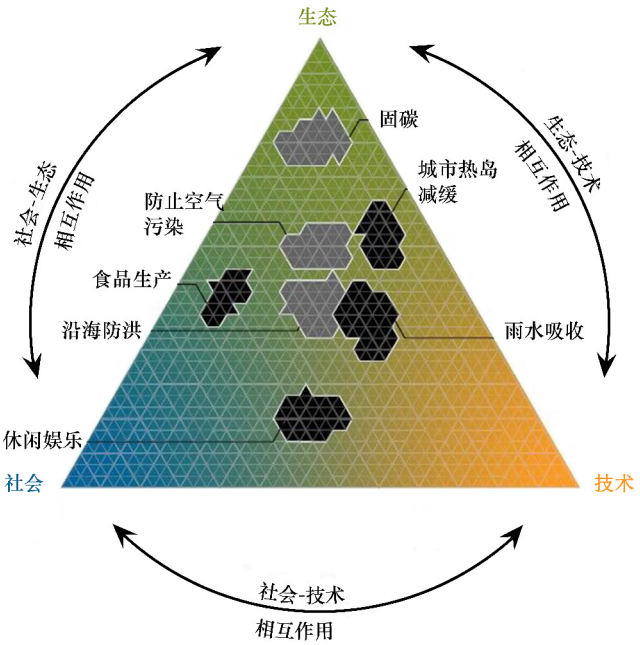

图 5 城市社会-生态-技术系统框架(经改绘)

Fig.5 Framework of urban social-ecological-technical system (redrawn)

图中的蓝色、绿色和黄色 3 种颜色梯度表示 3 个维度相互作用的程度,黑色图形表示假设的社会、生态和技术维度对生态系统服务的贡献,灰色图形表示假设的社会、生态和技术维度对减缓和适应气候变化的生态系统服务的贡献

2.6 社会-经济-自然复合生态系统框架

1984 年,我国生态学家马世骏、王如松发表《社会-经济-自然复合生态系统》一文,提出了复合生态系统分析框架[34]。该框架认为(图 6),社会系统涉及政策法令、科技教育、思想文化和组织管理,且受人口、政策及社会结构的制约,是分析社会组织和人类活动相互关系必须考虑的因素;经济系统体现为从生产到消费的各环节,以及在此过程中产生的成本、价值和效益;自然系统是自然界为人类生产生活提供的各种资源,如生物资源、矿产资源等。对于三者之间的关系表述为,稳定的经济发展需要持续的自然资源供给,大规模的经济活动必须通过高效的社会组织和合理的社会政策才能取得相应的经济效果;反过来,经济振兴也会促进社会发展,并促进社会对自然环境的保育和改善。自然社会与人类社会是互为因果的制约与互补关系,人类活动会受到自然条件的负反馈约束和调节,不能违背自然生态系统的基本规律。

该框架还提出了衡量复合系统的指标及其相互关系(图 7),认为复合系统的研究是一个多维决策过程,是对系统组织性、相关性、有序性、目的性的综合评判、规划和协调,具体来讲,就是判断自然系统是否合理、经济系统是否有利、社会系统是否有效,从而使系统的综合效益最高,导致危机的风险最小,存活进化的机会最大。此外,还提出了复合系统的研究程序,包括拟定指标、本底调查、系统分析与模拟等,并通过洪泽湖生产区、工业城市建设和区域建设规划三个案例对社会-经济-自然复合生态系统框架进行了应用。该框架是我国最早从综合性视角认识和研究生态系统的分析框架,尽管其具有一定的时代特征(如计划经济),但框架中所论述的社会、经济、自然三个系统的关系,正是当今可持续发展所关注的三个核心维度,其对系统结构和功能的分析、三个系统关系的表述、系统风险和效益的认知以及系统分析和模拟的研究范式,都具有较强的超前性和开拓性。

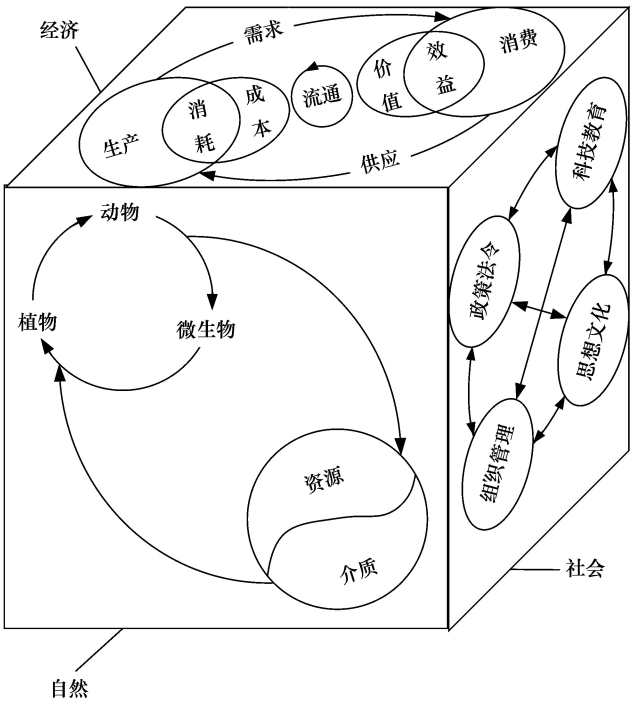

图 6　社会-经济-自然复合生态系统示意图(经重绘)

Fig.6　Framework of social-economic-natural complex system (redrawn)

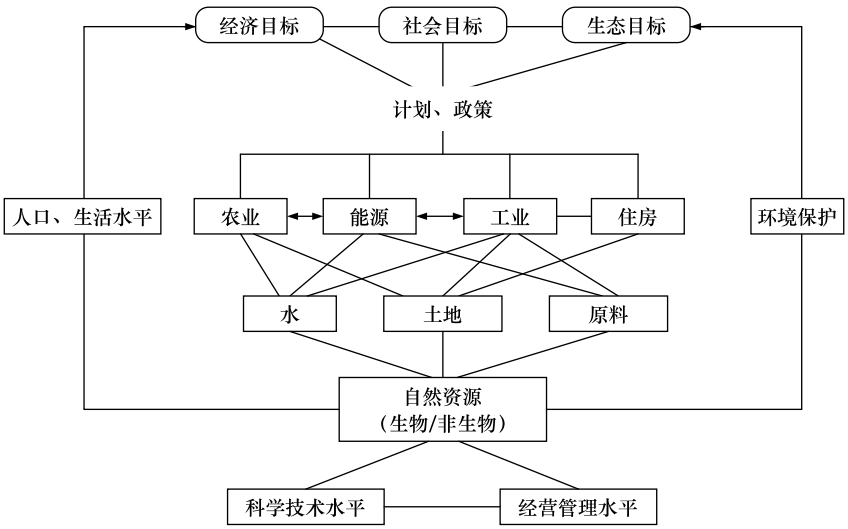

图 7　复合系统有关因素相互关系示意图(经重绘)

Fig.7　Interrelationships of factors involved in complex systems (redrawn)

3　城市社会-生态系统可持续性分析框架

当前,可持续发展目标(SDGs)为全球发展提供了政策实践导向,学术界的可持续性科学也为整合多学科综合研究提供了理论基础。其中,脆弱性(vulnerability)、韧性(resilience)与适应性(adaptation)作为可持续性科学的核心研究主题[35],是耦合社会与生态要素,深入分析其相互作用过程与机理,引导和管理城市社会-生态系统并使其迈向可持续性的重要支撑。因此,本文在吸收已有相关理论和研究框架的基础上,提出从脆弱

性、韧性和适应性整合视角开展城市社会-生态系统可持续性研究的分析框架(图 8)。

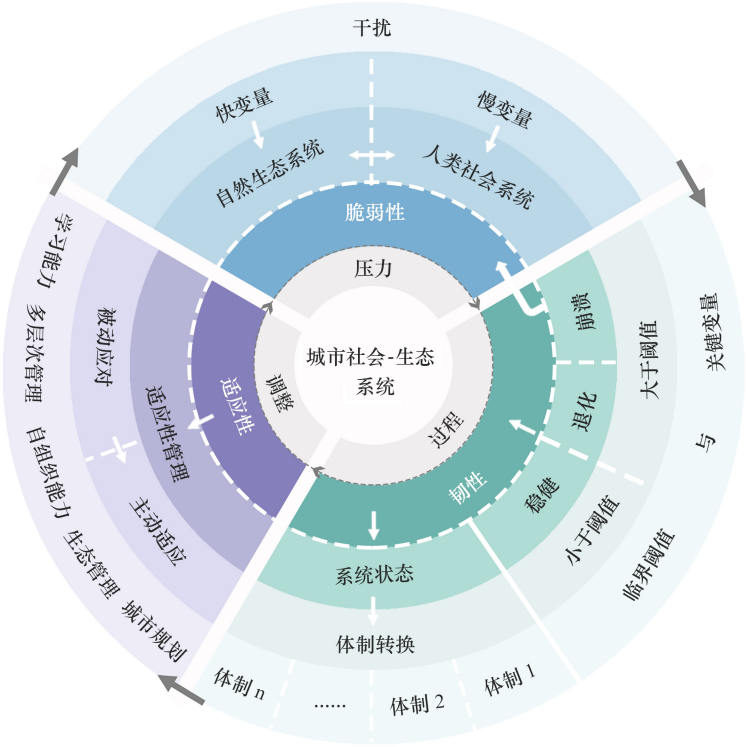

图 8 城市社会-生态系统的脆弱性、韧性与适应性分析框架

Fig.8 Framework for analyzing the vulnerability, resilience and adaptation of urban socio-ecological systems

该框架中,城市生态系统是指城市人口赖以生存和发展的自然环境系统,包括水、土壤、空气、生物等为城市发展提供各种生态系统服务功能的要素;社会系统是指城市中人类的社会经济活动及其组织方式,涉及城市的生产、生活、文化等各个方面。社会系统和生态系统及其各组成要素在高密度的城市地域范围内相互影响、相互作用,构成了具有突出的综合性、交互性和复杂性特征的城市社会-生态系统。

3.1 城市社会-生态系统脆弱性

脆弱性是城市社会-生态系统问题特征的突出表现,可被定义为城市社会-生态系统遭受干扰时引发的伤害或受到的不利影响。引发城市社会-生态系统脆弱性的原因(干扰)是多维的,可能单方面来自于自然生态系统(如自然灾害、天气变化等)或人类社会系统(如空气污染、城市建设对生物栖息地的破坏等),也可能由社会-生态系统各要素相互作用所致;干扰可能源于城市外部(如全球气候变化导致的极端灾害天气),也可能源于城市系统本身(如城市内工厂排放的污染物对生态环境的影响);干扰可能是快变量的突然暴发(如地震、台风、暴雨等),也可能是慢变量的持续扰动(如城市热岛效应、生态用地被建设空间逐步吞噬等)。这些干扰对城市社会-生态系统(也可能是子系统或某一要素)所产生的影响,在频率、范围、强度以及造成的脆弱性后果等方面可能都不尽相同,但城市社会-生态系统所面临的不确定性风险是不可避免的。因此,脆弱性研究可成为辨识城市社会-生态系统干扰、评估城市社会-生态系统状态、分析城市社会-生态系统问题特征的重要内容,脆弱性评估则是开展这一研究内容的主要切入点。

当前,暴露度、敏感性和应对能力是理解脆弱性内涵并开展脆弱性评价研究的主要维度[36]。暴露度反映了城市社会-生态系统受到外部干扰的程度,一般可通过干扰的强度、频率、持续时间等指标来测度;敏感性反映了系统容易受到干扰的影响程度,通常与系统的结构特征有关系,比如,以弱势群体为主的社会结构通常更容易受到干扰的影响,从而呈现出更大的敏感性;应对能力反映了系统应对外干扰的能力水平,一般由系统的

资源禀赋、技术水平、管理能力等决定。城市社会-生态系统的脆弱性评价可以结合城市具体特征,围绕这三个维度选取相应的评价指标体系并开展脆弱性评价。目前的评价方法也较多,常用的有综合指数法、函数模型法、人工神经网络模型、集对分析法、空间多准则评估法等[37]。

3.2　城市社会-生态系统韧性

韧性是指系统遭受干扰时能够维持其基本结构、功能、特性和反馈的能力[38]。自 Holling 提出生态系统韧性概念以来,便受到学术界广泛关注,目前已成为深刻理解社会-生态系统复杂过程,开展社会-生态系统综合研究的重要工具[39]。城市作为复杂系统,其变化过程具有非线性、多稳态(体制)特征,城市社会-生态系统可以在不同的体制间转换,这主要取决于系统关键变量的临界阈值是否被跨越。当城市社会-生态系统遭受外部干扰时,如果未超过系统的关键决定性变量的临界阈值,则意味着系统能够吸收、化解这些干扰,尽管系统仍会表现出各种脆弱性特征,但系统总体是稳健的;当系统所遭受的干扰超出其关键变量的临界阈值时,系统则可能发生重大变化,比如生态系统的严重退化甚至崩溃,此时,对生态系统服务和人类福祉将会产生重要影响。韧性工具不仅可帮助诊断城市社会-生态系统状态、评估城市社会-生态系统应对干扰的能力,更重要的是提供了理解城市社会-生态系统相互作用的复杂过程与动态演变机制的思维方式。

当前已有较多的韧性评估框架,代表性的如韧性联盟提出的复杂社会-生态适应系统韧性评估手册[40],联合国粮农组织的韧性指数测度和分析框架[41],韧性、适应和转型评估框架[42]等。在韧性评估指标体系中,缓冲能力、自组织能力、学习能力、转型能力是较为常用的指标,其中,缓冲能力是指社会-生态系统维持其结构和功能不变的情况下能够承受外部干扰的程度;自组织能力是社会-生态系统面对干扰时的行为调整与适应能力;学习能力是指系统获取知识、技能、经验,并将其转化为行动的能力;转型能力则是指系统转变当前状态,迈向新系统的创新能力。然而,当前已有的韧性评估多以静态评价为主,难以反映系统遭受干扰时的响应过程和机制,从静态的韧性评估转向演化韧性评估是该领域面临的较大挑战。此外,从社会-生态系统的韧性评估转向韧性机制的探索也是深刻理解社会-生态系统演变机理的重要内容。对此,基于系统长时间状态变化,探究系统状态转变(体制转换)的关键时间节点及其驱动因素,进而揭示社会-生态系统演变规律是当前该领域研究的主要途径,序贯 t 检验、Pettitt 检验、奇异谱分析等统计分析方法,以及系统动力学、均衡模型、分岔分析模型、贝叶斯网络等模型分析方法是识别体制转换和模拟社会-生态演变过程的主要方法[43]。

3.3　城市社会-生态系统适应性

适应是指城市社会-生态系统面对外部干扰时所做出的调整和响应。在诸多不确定性因素影响下,任何城市社会-生态系统都不可避免地会遭受不同程度的外部干扰,特别是在城市自然资源管理与城市规划相脱节的背景下,整合城市生态资源和规划管理手段,对减缓城市社会-生态系统脆弱性,提升其韧性与可持续性至关重要。

由于理论研究薄弱,加之城市社会-生态系统的复杂性,目前在城市社会-生态系统的可持续性治理和相关解决方案的实施方面还存在较多不足,需要进一步开展深入研究。比如,面向可持续性的城市社会-生态系统治理主体、治理机构、制度安排、政策体系、技术支持、监管机制、具体对策等,仍需要多学科研究人员和多部门管理人员的紧密合作和长期探索。当前较为流行的适应性管理是一个维持城市可持续性的重要工具,它强调的形成多中心多层次治理机构、在变化和不确定性中学习和丰富知识与经验、提高自组织能力、扩大利益相关者的参与度、加强管理的连通性等原则[44],为促进城市社会-生态系统的可持续性提供了许多创新性的管理和政策启示。

参考文献(References):

[1] UN-Habitat. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf.

[2] UN-Habitat. Rescuing SDG 11 for a Resilient Urban Planet. https://unhabitat.org/sites/default/files/2023/07/sdg_11_synthesis_report_2023_final_0.pdf.

[3] IPCC. Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental

Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[4] Pinto L V, Inácio M, Ferreira C S S, Ferreira A D, Pereira P. Ecosystem services and well-being dimensions related to urban green spaces-A systematic review. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: art104072.

[5] Remme R P, Frumkin H, Guerry A D, King A C, Mandle L, Sarabu C, Bratman G N, Giles-Corti B, Hamel P, Han B L, Hicks J L, James P, Lawler J J, Lindahl T, Liu H X, Lu Y, Oosterbroek B, Paudel B, Sallis J F, Schipperijn J, Sosič R, de Vries S, Wheeler B W, Wood S A, Wu T, Daily G C. An ecosystem service perspective on urban nature, physical activity, and health. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(22): arte2018472118.

[6] Almenar J B, Elliot T, Rugani B, Philippe B, Gutierrez T N, Sonnemann G, Geneletti D. Nexus between nature-based solutions, ecosystem services and urban challenges. Land Use Policy, 2021, 100: art104898.

[7] Wilson F D. Urban ecology: urbanization and systems of cities. Annual Review of Sociology, 1984, 10: 283-307.

[8] Grimm N B, Morgan Grove J, Pickett S T A, Redman C L. Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems. BioScience, 2000, 50(7): 571-584.

[9] Wu J G. Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research. Landscape Ecology, 2010, 25(1): 1-4.

[10] Wu J G. Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes. Landscape Ecology, 2013, 28(6): 999-1023.

[11] Wu J G. Urban ecology and sustainability: the state-of-the-science and future directions. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 209-221.

[12] McPhearson T, Pickett S T A, Grimm N B, Niemelä J, Alberti M, Elmqvist T, Weber C, Haase D, Breuste J, Qureshi S. Advancing urban ecology toward a science of cities. BioScience, 2016, 66(3): 198-212.

[13] 谭跃进, 邓宏钟. 复杂适应系统理论及其应用研究. 系统工程, 2001, 19(5): 1-6.

[14] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Folke C, Alberti M, Redman C L, Schneider S H, Ostrom E, Pell A N, Lubchenco J, Taylor W W, Ouyang Z Y, Deadman P, Kratz T, Provencher W. Coupled human and natural systems. Ambio, 2007, 36(8): 639-649.

[15] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Taylor W W, Alberti M, Deadman P, Redman C, Pell A, Folke C, Ouyang Z Y, Lubchenco J. Coupled human and natural systems: the evolution and applications of an integrated framework. Ambio, 2021, 50(10): 1778-1783.

[16] Barthel S, Colding J, Ernstson H, Erixon H, Grahn S, Krsten C. Principles of social-ecological urbanism. case study: Albano Campus, Stockholm, TRITA-ARK Forskningspublikationer: Stockholm, Sweden, 2013.

[17] Berghauser Pont M, Barthel S, Colding J, Gren Å, Legeby A, Marcus L. Editorial: social-ecological urbanism: developing discourse, institutions and urban form for the design of resilient social-ecological systems in cities. Frontiers in Built Environment, 2022, 8: art982681.

[18] Colding J, Samuelsson K, Marcus L, Gren Å, Legeby A, Berghauser Pont M, Barthel S. Frontiers in social-ecological urbanism. Land, 2022, 11(6): art929.

[19] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213: 179-190.

[20] Kennedy C, Pincetl S, Bunje P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. Environmental Pollution, 2011, 159(8/9): 1965-1973.

[21] Zhang Y. Urban metabolism: a review of research methodologies. Environmental Pollution, 2013, 178: 463-473.

[22] Zhang Y, Yang Z F, Yu X Y. Urban metabolism: a review of current knowledge and directions for future study. Environmental Science & Technology, 2015, 49(19): 11247-11263.

[23] Papangelou A, Bahers J B, Aissani L. Drivers of urban metabolism: toward a framework for urban transformations. Journal of Industrial Ecology, 2023, 27(5): 1389-1405.

[24] Ostrom E. A diagnostic approach for going beyond panaceas. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(39): 15181-15187.

[25] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 2009, 325(5939): 419-422.

[26] Nagendra H, Ostrom E. Applying the social-ecological system framework to the diagnosis of urban lake commons in Bangalore, India. Ecology and Society, 2014, 19(2): art67.

[27] Flynn C D, Davidson C I. Adapting the social-ecological system framework for urban stormwater management: the case of green infrastructure adoption. Ecology and Society, 2016, 21(4): art19.

[28] Vogt J M, Watkins S L, Mincey S K, Patterson M S, Fischer B C. Explaining planted-tree survival and growth in urban neighborhoods: A social-ecological approach to studying recently-planted trees in Indianapolis. Landscape and Urban Planning, 2015, 136: 130-143.

[29] Machlis G E, Force J E, Burch W R JR. The human ecosystem Part I: The human ecosystem as an organizing concept in ecosystem management. Society & Natural Resources, 1997, 10(4): 347-367.

[30] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, Nilon C H, Pouyat R V, Zipperer W C, Costanza R. Urban ecological systems: linking terrestrial

ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. Annual Review of Ecology and Systematics, 2001, 32: 127-157.

[31] Dennis M, James P. Urban social-ecological innovation: implications for adaptive natural resource management. Ecological Economics, 2018, 150: 153-164.

[32] Tzoulas K, Galan J, Venn S, Dennis M, Pedroli B, Mishra H, Haase D, Pauleit S, Niemelä J, James P. A conceptual model of the social-ecological system of nature-based solutions in urban environments. Ambio, 2021, 50(2): 335-345.

[33] McPhearson T, Cook E M, Berbés-Blázquez M, Cheng C, Grimm N B, Andersson E, Barbosa O, Chandler D G, Chang H, Chester M V, Childers D L, Elser S R, Frantzeskaki N, Grabowski Z, Groffman P, Hale R L, Iwaniec D M, Kabisch N, Kennedy C, Markolf S A, Matsler A M, McPhillips L E, Miller T R, Muñoz-Erickson T A, Rosi E, Troxler T G. A social-ecological-technological systems framework for urban ecosystem services. One Earth, 2022, 5(5): 505-518.

[34] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.

[35] Kates R W. What kind of a science is sustainability science? Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(49): 19449-19450.

[36] IPCC. Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

[37] 黄晓军, 黄馨, 崔彩兰, 杨新军. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1512-1525.

[38] Walker B, Hollin C S, Carpenter S R, Kinzig A. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. Ecology and Society, 2004, 9(2): art5.

[39] Carl F. Resilience (republished). Ecology and Society, 2016, 21(4): art44.

[40] Resilience Alliance. Assessing resilience in social-ecological systems: workbook for practitioners. Version 2.0, 2010. https://www.resalliance.org/files/ResilienceAssessmentV2_2.pdf

[41] Bousquet F, Botta A, Alinovi L, Barreteau O, Bossio D, Brown K, Caron P, Cury P, d'Errico M, DeClerck F, Dessard H, Kautsky E E, Fabricius C, Folke C, Fortmann L, Hubert B, Magda D, Mathevet R, Norgaard R B, Quinlan A, Staver C. Resilience and development: mobilizing for transformation. Ecology and Society, 2016, 21(3): art40.

[42] O'Connell D, Walker B, Abel N, Grigg N. The resilience, adaptation and transformation assessment framework: from theory to application. CSIRO, Australia, 2015.

[43] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 杨新军, 黄馨. 社会-生态系统恢复力研究进展——基于 CiteSpace 的文献计量分析. 生态学报, 2019, 39(8): 3007-3017.

[44] Plummer R, Crona B, Armitage D R, Olsson P, Tengö M, Yudina O. Adaptive comanagement: a systematic review and analysis. Ecology and Society, 2012, 17(3): art11.