

## 我国城市多尺度社会-生态系统可持续管理框架研究

张平<sup>1,2</sup> 林昕<sup>1</sup> 张永翔<sup>1</sup> 孙强强<sup>1</sup> 孙亚楠<sup>1</sup> 孙丹峰<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193;

2. 中国农业大学 土地利用与管理研究中心, 北京 100193)

**摘要** 面向SDG11“可持续的城市和社区”目标和我国城市体检及国土空间统一治理的内在需求,开展城市复杂系统视角下的可持续管理研究。基于系统辨析和梳理“城市可持续性”相关概念,借鉴社会-生态系统、脆弱性/韧性分析、城市土地系统转型等相关理论,识别城市系统协同演化主体,构建多尺度城市可持续管理理论框架。该框架以人地互馈作用为驱动,以城市地表景观结构和转型为连接社会-生态系统互馈网络的“桥梁”,以城市社会-经济-生态时空耦合格局-过程为系统可持续演化路径的表征;该框架有机整合了多尺度人类与自然耦合系统,以及各子系统内的反馈关系,提升了对复杂自适应城市社会-生态系统网络的认知。最后,结合我国城市可持续科学研究及管理实际,围绕提出的理论框架,本研究阐述了未来城市可持续发展亟待开展的科学研究问题和管理实践重点。

**关键词** 城市复杂系统; 社会-生态系统; 可持续管理框架; 多尺度

中图分类号 X321

文章编号 1007-4333(2022)07-0199-11

文献标志码 A

## Research on sustainable management framework of urban multi-scale social-ecological system in China

ZHANG Ping<sup>1,2</sup>, LIN Xin<sup>1</sup>, ZHANG Yongxiang<sup>1</sup>, SUN Qiangqiang<sup>1</sup>, SUN Yanan<sup>1</sup>, SUN Danfeng<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Center of Land Use and Management Research, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** Aiming at the SDG11 oriented ‘Sustainable City and Community’ target and the internal needs of urban physical examination and unified governance of national land space in China, a sustainable management research from the perspective of urban complex systems is carried out in this study. On the basis of systematic discrimination and sorting of the related urban sustainability concepts, this study attempts to identify the subject of urban system co-evolution and construct the theoretical framework of multi-scale urban sustainable management by referring to the theories of social-ecological system, vulnerability/resilience analysis, and urban land system transformation. The results show that: The framework is driven by the interaction between human and land, and the urban landscape structure and land use transformation are taken as the ‘bridge’ connecting the feedback network of social-ecological subsystems. The multi-stable pathways of the sustainable evolution of the urban system through the pattern and process of social-economic-ecological multi-dimensional spatio-temporal coupling are characterized. This proposed framework integrated the coupled human-nature systems at multiple scales, as well as various feedback relationships within each subsystems, thus leading an improved understanding of complex and adaptive urban social-ecological networks. Finally, combining with the urban sustainable scientific research and management in China, and based on the proposed theoretical framework, the urgent scientific research issues and management practices that need to be carried out for city sustainable development in future are suggested.

**Keywords** urban complex system; social-ecological system; sustainable management framework; multi-scale

收稿日期: 2021-11-27

基金项目: 中国国土勘测规划院外协项目(20181011323)

第一作者: 张平, 博士研究生, E-mail: Pingzh@cau.edu.cn

通讯作者: 孙丹峰, 教授, 主要从事土地系统与遥感定量化分析研究, E-mail: Sundf@cau.edu.cn

随着人类迈入“城市纪元”<sup>[1]</sup>,积极地应对和解决城市地区可持续发展的挑战对于推进全球可持续性转型具有重要意义。预计至2030年,联合国可持续发展目标截止期限,全球人口的城市化率将超过60%<sup>[2]</sup>。城市地区虽然贡献了全球75%以上的GDP,但同时也产生了大量的能源需求和碳排放过程<sup>[3]</sup>。2030年联合国可持续发展议程提出建设包容性、安全性、韧性和可持续的城市未来目标(简称为SDG11),进一步明确了城市可持续发展在全球可持续进程中的重要作用<sup>[4]</sup>。因此,迫切需要以全新的、整体性的视角来理解城市面临的复杂交互式挑战<sup>[5-6]</sup>,以期权衡和协同多目标发展战略,实现符合未来城市可持续发展战略的空间规划和政策管理。

城市作为典型的复杂土地利用系统,具有抵御自然和人为灾害的韧性功能<sup>[7]</sup>。然而随着全球变化和人类活动的加剧,处于“人类世”<sup>[8]</sup>影响中心的城市系统因其人口、资源的高度聚集和基础设施的密切联系而变得更加脆弱,存在连锁反应引发系统崩溃的风险<sup>[9]</sup>。例如,全球性金融体系、贸易网络的建立,将城市当地影响引发扩散到区域甚至全球范围<sup>[10]</sup>。因而,当今城市系统面临的可持续性挑战存在跨越多时空尺度的耦合交互作用<sup>[5-6]</sup>。

中国在过去的近30年中经历了前所未有的快速城市化进程。联合国世界城市化展望报告中指出1970年以来,中国城市人口增加了接近60%,1978—2017年,中国的城市扩张速度从17.92%提升至58.52%;在1992—2012年,建成区面积扩张了大约4倍<sup>[2]</sup>。然而,这个过程却加剧了有限的土地资源、生态环境和社会经济发展之间的矛盾,产生了诸如地区经济差距扩大、环境污染加剧、资源过度消耗利用等一系列严峻的问题<sup>[11-12]</sup>,阻碍了地区可持续发展目标的实现。

传统的单要素、单维度、独立性研究难以满足当前我国城市体检及国土空间统一治理等管理实践的内在需求,迫切需要发展面向城市复杂系统的多尺度、综合性、全面性的认知,以减缓区域和跨尺度的不利影响,提升城市可持续管理在国土生态安全、资源节约集约利用、国土空间开发保护等方面的效用。为应对城市可持续管理中问题的复杂性和不确定性,国内外已有研究开发了诸多概念理论及分析框架:一方面,“城市可持续性”<sup>[13]</sup>、“城市韧性”<sup>[14]</sup>、“城市转型”<sup>[15-17]</sup>等相关概念的规范化是开展耦合系统研究的科学基础;另一方面,社会-生态系统(Social-ecological system, SES)<sup>[18]</sup>、人类-环境系统

(Human-environment system, H-E)、人与自然耦合系统(Coupled human-environment systems, CHANS)<sup>[19-20]</sup>等理论框架,也为科学认识城市复杂系统互馈机制、表现形式及演化路径提供了可借鉴的思路。

因此,本研究面向SDG11“可持续的城市和社区”目标和我国城市管理实践的需求,基于人地耦合关系、复杂性科学、土地利用系统等相关理论,以及“城市可持续性”<sup>[13]</sup>、“城市韧性”<sup>[14]</sup>、“城市转型”<sup>[15-17]</sup>等相关概念基础,采用社会-生态系统耦合视角统一组织城市复杂性结构和动态互馈过程。本研究重点关注关键的土地利用过程和社会-经济-生态多维度耦合动态对系统可持续性多稳态的表征能力,以期识别城市系统协同演化及不确定性分析的主体,建立多尺度城市可持续综合管理理论框架,并以该框架为基础,提出未来城市可持续研究亟待开展的科学问题和管理重点。

## 1 城市可持续性基本概念与理论基础

### 1.1 城市可持续性基本概念系统梳理与逻辑组织

城市可持续转型需要引入全新的概念以应对日益增长的复杂性、高度的不确定性,满足全球范围内不断增加的人类福祉需求。在“人类世”<sup>[8]</sup>和“城市纪元”<sup>[1]</sup>提出以前,“城市可持续性”<sup>[13]</sup>、“城市韧性”<sup>[14]</sup>、“城市转型”<sup>[15-17]</sup>等一系列相关概念已被应用于城市可持续管理实践。然而,目前已有研究与政策文件对相关基础概念内涵解读不一,限制了城市复杂系统演化和可持续发展的知识传递和认知提升<sup>[21]</sup>。例如:《新城市议程》等政策文件对城市的可持续性、韧性、脆弱性以及转换等概念局限在相对狭义的范围(表1),甚至出现了“城市韧性”与可持续性发展政策的重叠性和混淆性解读<sup>[19]</sup>。在联合国《新城市议程》等政策文件中,“城市可持续性”相关概念定义为既满足当代人的需求,又能够确保后代人拥有商品和服务而不使人类-环境耦合系统结构和功能产生退化<sup>[23]</sup>,侧重于强调以提高资源利用效率为主要目的,在此情形下,对效率的单一关注可能会造成系统多样性减少,从而削弱系统韧性,导致可持续发展与韧性管理目标冲突<sup>[23]</sup>。因此,本研究首先总结了现有文献和政策实践对“城市可持续性”等相关概念的定义,并且借鉴Elmqvist等<sup>[24]</sup>对于城市可持续概念统一性的解释框架,对城市可持续性-韧性/脆弱性-转型等基础概念作出系统梳理和逻辑组织。

表 1 城市可持续性相关概念对比

Table 1 Comparisons of concepts related to urban sustainability

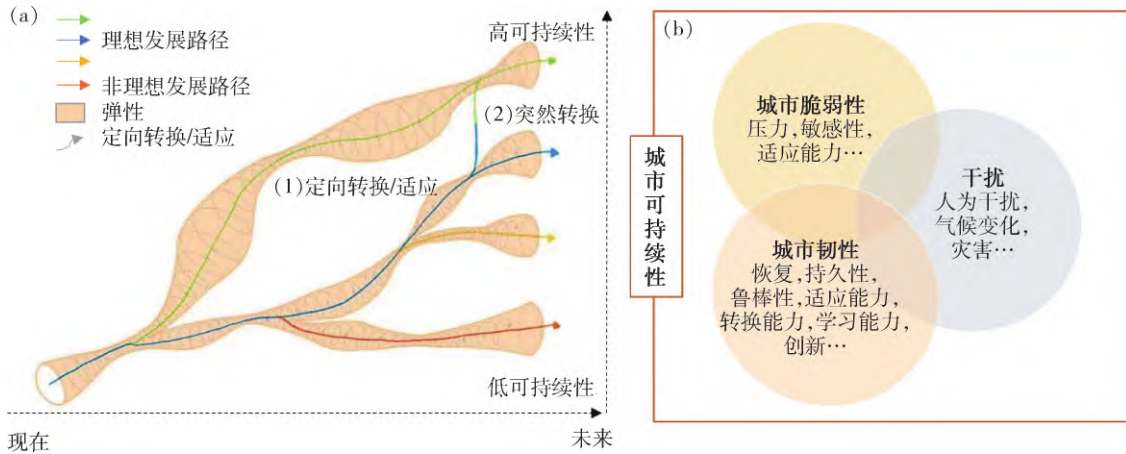
概念 Concept	政策内容 Policy content	文献定义 Description in other literature	本研究中的概念内涵 Description in this study
城市可持续性 Urban sustainability	资源利用效率 增强和优化	强调城市各组成系统(社会-经济-资源-环境)正向协同演变和协调发展,而不损害未来或周边地区发展的能力,通过可持续性的手段减少对生态环境的损害影响 <sup>[13]</sup> 。	对城市所依赖的资源进行管理,促进城市区域各个子系统的综合协调能力,以保证当代人和未来的人类福祉和分配平等。
城市韧性 Urban resilience	应对灾害的恢 复能力	衡量跨时空尺度城市系统及其社会-生态网络以及社会-技术网络应对干扰时具有维持或迅速恢复到理想状态的能力,且能够适用变化,转向未来可适应的系统 <sup>[14]</sup>	城市系统在承受变化压力的过程中吸收干扰、进行重组,以保持系统的基本结构、功能、关键特征、反馈机制不发生根本性变化的能力。这种能力属性构成来源于系统组分的多样性、冗余性、自组织等特性。
城市脆弱性 Urban vulnerability	系统对极端气 候导致的负面 影响的敏感程 度和不能处理 的程度	社会、经济、自然和环境等条件的状态与极端灾害可能造成的损失之间的相互关系,城市中要素的抵抗力决定了损害可能的严重程度 <sup>[25]</sup> 。	脆弱性各个组成部分的互动关系是动态的,一般包括干扰和外部压力的暴露状况、敏感性和适应能力等,且这种关系随干扰类型、具体地点和系统特征而不断变化。适应是降低脆弱性的途径,人们可以预测未来可能发生的环境变化,分析未来情景下的脆弱性,然后通过适应策略的选择改善当前系统状态,降低脆弱性。
城市(状态)转换 Urban (state) transition	系统属性的大 规模变化	城市系统技术、社会、经济和生态等属性从一种状态向另一种状态发生的根本性转变。“城市转型”是与系统和机构层面相联系的类似概念,其重点关注多主体启动、加速和进一步促进系统转型过程的能力,通过当地实践和机构制度产生可持续问题解决办法 <sup>[15-17]</sup> 。	城市系统的系统性转变,表征其在基础设施、生态系统、机构配置、生活方式、城市创新、制度和治理等方面发生根本性不可逆转的变化。

本研究结合国内外文献综述,在明确城市可持续性、韧性、脆弱性及系统转换概念内涵的基础上(表 1),梳理其在“人类世”和“城市纪元”可持续管理过程中的相互联系,结果见图 1。假设城市是处于不断动态演化中的复杂自适应系统,涵盖非线性动态、多阈值、不确定性以及渐变与突变等多时空互馈的动态过程,且具有多种可能的发展路径(或轨迹)(图 1(a))<sup>[26]</sup>。系统韧性则是对特定路径的维持、(简单)强化的能力,在图 1(a)中表现为沿着特定轨迹的周边“隧道”,其宽度代表系统抵御外部性因素扰动的韧性范围,即一种应对不确定性风险以及维持在正常轨迹持续发展的能力。而系统脆弱性

和韧性既有区别又有联系。两者均是强调城市复杂系统应有足够的应变能力来达到可持续发展的目的,时间维度上比可持续发展要短,均是达到可持续性发展的手段。城市的韧性与其适应力、调整力、转型力成正比,与外界的扰动因素、脆性因素成反比(图 1(b))<sup>[27-28]</sup>,且涵盖了包括了脆弱性范围之外的转换能力和学习能力<sup>[29]</sup>。通过运用韧性和脆弱性管理思维,“隧道”的宽度得以控制,并且存在以下 2 种情况:1)韧性范围扩大以确保系统始终沿着理想的轨迹进行定向转换(适应和主动转换);2)处于狭窄范围内的韧性系统与短期可持续性政策发生冲突,促使系统向更高层次、更加理想状态的轨迹发生

的突发性“跃迁”。“嵌套的适应更新循环”模型<sup>[30]</sup>也是对系统“韧性-转换力”动态过程的有力支撑。2种系统演化路径,即定向转换与突变,在规模以及转换路径上有所区别,但均可以促使系统向更加可持

续的状态进行演化,最终达到减少贫困、改善健康、促进教育公平和经济增长以及应对极端气候变化等方面协调、健康、可持续发展能力(<https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>)。



(a) 修改自 Elmqvist 等<sup>[24]</sup>; (b) 修改自方修琦等<sup>[27]</sup>和仇保兴<sup>[28]</sup>。

(a) is adapted from Elmqvist et al. <sup>[24]</sup>; (b) is adapted from Fang et al. <sup>[27]</sup> and Qiu<sup>[28]</sup>.

图1 城市可持续性、韧性、脆弱性与转型的演化路径 (a)城市脆弱性和城市韧性的内在联系 (b)

Fig.1 Evolution pathways of urban sustainability, resilience, vulnerability and transformations (a) and the inter-relationship of urban vulnerability and urban resilience (b)

### 1.2 城市可持续性管理相关理论基础

目前,已有国内外研究提出了诸多城市可持续管理综合性的5个理论框架,见图2。这5个理论框架有助于指导对城市多尺度社会-生态系统动

态演化和互馈机制的认知,用于科学地组织城市系统协同演化的主体、结构及各子系统之间的传递路径,以识别和揭示城市复杂系统关键的非线性变化过程。



图2 城市可持续管理相关理论基础

Fig.2 Related theories basis for urban sustainable management

其中,社会-生态系统框架 SESs 通过阐明社会子系统和生态环境子系统相互作用的复杂模式,揭示系统的非线性、自组织、多稳态、多层次和嵌套网

络的构成特征<sup>[11]</sup>,为理解城市复杂自适应系统开辟了统一综合的宏观性研究框架。在社会-生态系统和人地关系理论应用的研究领域,“可持续性科学”

建立了多目标集成理解人与自然状态的思维方式——既满足社会发展的需求,同时维持人类赖以生存的地球系统,从而进一步强调科学技术与政策调控交互促进的必要意义。其中,社会-生态系统耦合的脆弱性/韧性(Vulnerability/Resilience)是可持续分析的核心内容<sup>[31]</sup>。随着该主题框架内容的不断拓宽和加深,系统框架不仅考虑系统受到压力/灾害的损失程度,而且进一步将系统对压力的敏感性以及韧性纳入其中<sup>[32]</sup>,以建立符合可持续发展能力的脆弱性/韧性分析模型,为应对多尺度人类活动和全球环境变化带来的挑战提供了突破口和落脚点<sup>[33-34]</sup>。此外,为衡量不同区域环境和社会发展的可持续进程,1999年由欧洲环境署(Europe Environmental Agency)<sup>[35-37]</sup>提出剖析社会-生态系统互馈机制和因果关系的驱动力(Driving forces)-压力(Pressure)-状态(State)-影响(Impact)-响应(Response)(简称“DPSIR”)模型,能够有效整合资源、发展、环境与人类健康问题,为生态环境效应评价指标体系的建立提供了一个基本框架。基于对社会-生态系统内部互动机制的整合,压力-脉冲框架将影响系统结构和功能的过程凝练为短促脉冲式的活动以及广泛持续性的压力作用<sup>[38-39]</sup>,为识别影响生物物理系统及生态系统福祉的驱动模式提供了科学参考<sup>[38]</sup>。在此过程中,复杂的人类活动和自然因素变化不断推动城市土地利用空间模式和景观结构的转变<sup>[40]</sup>,地表的动态过程又进一步影响着城市系统的社会、经济和环境效应。土地利用范围和强度发生变化,可能导致土地系统从当前结构状态转向另一种稳态,从而产生非线性、结构性转变<sup>[41]</sup>(城市的生长、衰退和更新等循环转换过程<sup>[42]</sup>)。因此,城市土地利用系统及其转型模式(Land system transform)是连接社会经济活动压力、系统内部状态及生态系统响应结果的重要表征<sup>[43]</sup>,如何管理区域城市土地利用系统成为人地系统可持续发展的关键<sup>[44]</sup>。

## 2 城市多尺度社会-生态系统可持续管理理论框架

基于以上的理论框架基础,本研究认为系统的整体性和复杂性是城市可持续动态分析的重要特征,但受现实数据的可获取性限制,亟需开发简化、清晰、综合的“城市可持续性”分析框架。因此,本研究将城市可持续管理分析纳入多维度、不同时空尺

度社会-生态耦合系统框架,目的在于:1)明晰城市复杂系统协同演化及不确定性分析的主体,聚焦关键组成因子及其参量特征;2)理解多尺度城市社会-生态系统的结构及各子系统间的相互反馈关系及传递路径;3)基于我国城市可持续科学研究和管理现状,提出未来城市可持续管理的科学和实践挑战。

### 2.1 城市复杂系统协同演化及不确定性分析的主体

城市复杂系统的可持续分析框架见图3。该框架是一个由多层次子系统及子系统内相互关联的多属性变量构成的抽象化概念框架。基于可持续的人与环境耦合系统视角,该框架的主体构成如下:1)源于系统内外的压力/干扰的作用集合;2)系统受到压力/干扰的暴露特征,包括暴露对象及表现特征;3)耦合系统对于压力/干扰的敏感性;4)系统的可持续状态变化结果,包括响应、调整、适应、重组、转换等特征。这些构成主体彼此相互作用,且具有尺度依赖特征。

对于多尺度城市社会-经济系统,城市可持续动态横跨局地-区域-全球空间尺度,具体涉及的主体如下:

1)压力/干扰作用集合。城市复杂系统的压力/干扰集具有多时空尺度、多维度、多形式以及远程耦合和相互连接的特征。首先,城市系统的驱动力来自于社会-经济-生态多维度耦合的变化,且存在多时空尺度的耦合交互作用<sup>[45]</sup>。全球/区域尺度人类社会活动及生态环境变化通过“自上而下”的方式驱动小尺度上的系统变化,反之,局地尺度的社会-生态系统内部反馈的相互作用,也可以通过“自下而上”的尺度推演反馈到大尺度的系统变化;其次,不同要素的压力作用形式各有差异,主要包括快速脉冲式压力和缓慢持久式压力;最后,由于城市内部基础设施、社会网络密切联系,压力产生跨越系统边界的远程溢出效应,例如:城市扩张不但在近距离直接导致周边其他土地利用类型的占用和转换,且在远距离上,通过要素聚集过程直接或间接改变了遥远区域的土地利用形态<sup>[46]</sup>。这些干扰/压力的性质还主要取决于其所作用的客体<sup>[47]</sup>。因而研究这些干扰的性质、主体、效应以及他们与作用客体和城市系统之间的联系对可持续管理有重大意义。

2)系统的压力暴露特征。城市复杂系统压力的暴露特征包括暴露单元和暴露方式两部分,分别描述了压力的作用对象及不同压力源的作用形式。其中,暴露单元覆盖不同对象主体和多个空间尺度范

围,既可以以不同个体、群体及其社会组织为对象,又可以以城市内部不同地块、街区、景观要素、生态系统或是整个城市为研究目标。同时,人类活动与暴露单元相互联系,城市内景观结构和土地利用类型的变化一定程度上能够反映人类活动规模、强度、方向等的作用结果。系统的暴露方式一般包括压力的频率、发生时点、作用方向、程度、持续时间等。例如:我国城市不仅面临着海平面上升、降水、干旱、台风、地震等频发的自然灾害的冲击,还易受全球气候变化(诸如热浪、雾霾、碳排放)的威胁<sup>[48]</sup>,因此识别压力源的作用形式和主要暴露单元对构建“韧性”城市和实现可持续发展目标尤为重要。

3)系统的敏感性。城市复杂系统所处的整体状态形成于已经建立的社会-生态反馈机制,系统保持在当前稳态范围之内。城市复杂系统主要由社会经济和生态环境两个子系统构成,二者的状态决定了系统应对压力的敏感性。例如,根据中国国际经济交流中心与哥伦比亚大学地球研究院发布的中国可持续发展指标体系(China Sustainable Development Index System, CSDIS),城市可持续系统状态评价涵盖了人类系统和环境系统两个维度。在人类子系统中,经济发展、社会福祉以及土地利用和空间配置等构成了量化系统发展效率、公平性及社会经济可持续能力的指标;在环境子系统中,则将人类发展所需要的生态服务、资源禀赋、能源消耗、污染排放等作为衡量系统生态环境可持续状态的基本要素。

4)系统的可持续性。系统的可持续性体现于其应对压力的3个不同路径的响应方式,即风险防御(脆弱性)、恢复和适应能力(韧性)和稳态转换能力(系统转型)。在城市复杂系统中,这些响应方式主要受到人类子系统中诸多相关利益者的调控,如政府、非政府组织、企业和个人。社会系统的适应性调控不但能够改变生态系统的可持续性能力,也受到其生物物理属性的反馈效应。多主体、多形式、多路径耦合系统的响应机制甚至产生了城市系统的可持续性跨尺度的溢出效应。在我国目前制度体制下,政府规划、监测、评估、监督等国土空间规划和用途管制的管理行为居于土地利用调控行为的主导地位。一方面,经济发展、户籍、住房和土地政策影响了城市土地利用变化特征<sup>[49]</sup>,产生了城市扩张、致密化、城市绿化和更新等变化类型;另一方面,城市土地系统变化的结果又可以影响社会经济和环境的变化<sup>[50]</sup>,形成多样化异质性的社会-经济-环境耦合

状态及空间格局。城市社会-经济-环境耦合状态成为社会-生态系统自组织响应和可持续动态演化的关键表征。

## 2.2 多尺度城市社会-生态系统结构特征

针对多尺度城市社会-生态系统管理,系统的结构组成及其相互联系是综合框架分析的重要内容(图3)。人类社会活动(全球政治、经济和环境变化等)及生态环境状态和过程通过一系列交互作用从邻近影响延伸至更远距离,在尺度上产生从局部影响跨越到全球范围的发展趋势。而系统内部、周边以及远程人类活动和大尺度自然过程能够跨越自然系统与政治边界,从而构成在局部到全球多种嵌套尺度空间的压力或干扰,而这些压力通过不同的形式进一步影响着耦合系统的过程,或呈现快速脉冲式,或呈现缓慢持续作用力,直接或间接地影响着系统社会-经济-环境可持续的发展状态。

针对当地系统本身,城市中不同尺度范围的个体、群体、城市地块、街道甚至生态系统构成压力作用/灾害的主要暴露单元,具有嵌套的分层结构,在多时空尺度上与不同的压力形式产生了交互作用。一方面,压力的频率、发生时点、作用方向、程度、持续时间等表征了系统所暴露压力的具体形式;另一方面,人地系统的耦合状态,包括社会经济状态和生态环境状态,通过当前系统已形成的社会-生态反馈机制维持,并由反馈网络决定系统对特定压力的敏感度。因此,系统的压力暴露特征和敏感性(状态)共同解释了城市社会-经济系统多个行为主体自组织系统的形成。

城市复杂系统应对压力的响应机制主要来自于个体、自发性群体组织及宏观政策的调控行为,社会系统的自适应调控与生物物理系统动态变化互为影响和反馈,即社会系统遭受不确定性风险暴露的脆弱性或韧性组织能力能够影响生态系统稳态变化的阈值,反之亦然。在一般情形下,城市社会-生态系统所具有的韧性范围能够通过自身的学习能力进行系统自我适应和调整,使系统状态始终处于理想的范围内,这一过程也表现为系统稳态始终沿着理想的轨迹进行定向转换(适应和主动转换)。但当压力超过系统维持自身理想状态的阈值或系统脆弱性增加时,城市社会-经济系统将断崖式转向另一个相对稳定的状态,即系统向更加可持续状态发生的突变性转换。因此,城市社会-生态耦合系统所产生的适应、调整、转换的结果是多样化、多稳态的社会-生态

系统可持续转换路径的具体表现，并且可以产生跨越不同系统维度和时空尺度的影响。

综上，多尺度城市社会-生态系统结构特征强调了针对城市系统关键过程监测与表征的几个重要方面：

1)在城市人地耦合系统自组织和非线性响应下，城市地表景观要素与土地利用结构转型也处于不断变化之中，城市地表转型与状态转换又可以引发新的政策调整 and 响应，因此成为社会-生态系统互馈网络传递路径的“桥梁”，也是可以进行景观监测关键过程。

2)城市地表转型是自然环境状态和社会经济发展因素综合作用的结果。其中，社会经济制度、政策、规划可以直接塑造地表转型格局，又可以通过调节和影响社会经济变化和技术创新，对城市地表过程产生重要影响。因此，揭示政策-社会经济与城市

土地利用转型关联作用和互馈规律有助于形成可持续的城市治理模式。

3)在已建立/形成的社会-生态作用机制状态下，城市土地利用类型和景观结构倾向于维持现有的状态，反映的是人为活动和经济发展强度对地表及其生态系统的影响。当人口压力超过资源供给阈值，或在特定政策导向下，城市土地利用及地表景观发生转型产生满足人类发展需求的经济价值的同时，也带来诸多负面环境效应<sup>[51]</sup>，形成新的社会-生态系统的自组织稳态。因此，社会-生态-环境多维度的时空耦合格局和过程便成为系统可持续演化多稳态路径的综合表征。同时，城市社会-生态系统“近远程耦合”通过空间全覆盖整合了不同距离、跨系统和多尺度的反馈关系，能够有效地加强跨部门、多区域和多尺度权衡的科学决策和可持续治理<sup>[52]</sup>。

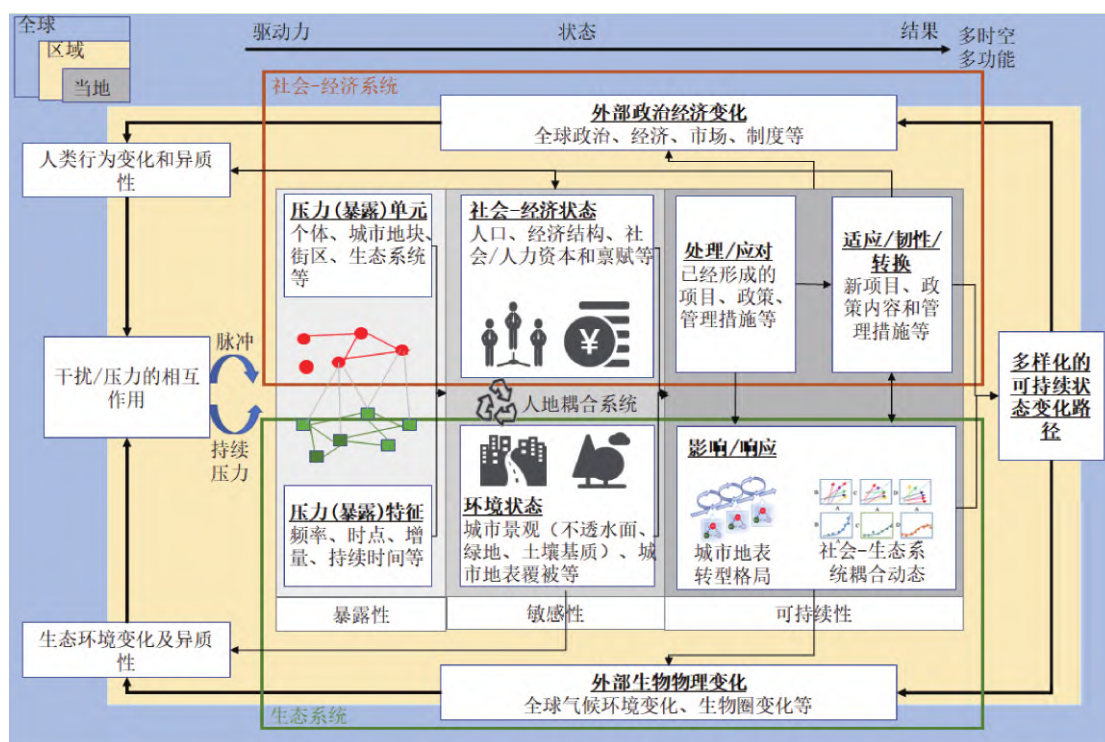


图 3 多尺度城市社会-生态系统可持续管理框架

Fig. 3 An multiple-scale, integrated sustainable framework of urban social-ecological systems

### 3 未来城市可持续管理的科学与实践

#### 3.1 构建城市社会-生态耦合系统时空变异和脆弱性预警管理体系

系统脆弱性取决于其暴露于压力/干扰/灾害时的人地系统的状态及时空变异特征，因此应用定量

化的数据、指标、模型等测度方法和定性化信息分析手段进行多重扰动背景下的脆弱性制图、动态多反馈的时空演化路径分析及脆弱性早期预警，是“城市可持续性”管理的重要构成部分。尽管目前建立了针对自然灾害脆弱性、全球环境变化脆弱性、生态环境脆弱性等专题的函数评价模型和综合指标体系，

但基于耦合系统多要素作用关系的复杂性和不确定性、系统的关键过程和要素的综合集成等问题仍缺乏有力的方法支撑<sup>[53]</sup>。此外,基于特定空间尺度和时间截面的城市脆弱性单元表达是实现城市脆弱性风险分区管理的科学途径,但在时间维度上对其动态变化路径及驱动因素的研究较少,空间尺度上跨尺度传递和转移过程的解析不足。未来需要进一步加强脆弱性过程与机制的分析,这对于城市风险早期预警和科学解决可持续性时空协调问题有重大意义。

### 3.2 建立多尺度嵌套的城市社会-生态系统风险响应机制

自人类进入“城市纪元”以来,全球经济和环境发生变化,城市系统各要素联系日益紧密,要素间相互作用的强度、速度和尺度均发生了重大改变。局地-区域-全球通过累积效应和溢出效应呈现跨尺度传递,因此需要新的范式刻画城市社会-经济系统多时空尺度的耦合作用<sup>[54]</sup>。传统研究将韧性概念应用于城市系统单一尺度的“城市韧性”或可持续性分析,或用于针对具体问题(例如,人口、能源和系统安全等)的阐述,均忽略了城市系统所具有的开放性、多尺度的特征,即局地的社会-经济-生态系统的改变可能会影响周边地区的韧性能力,同时系统的转换也会引起子系统或跨区域-全球的效应。因此,跨尺度的系统耦合和远程连接网络给“城市可持续性”管理关键控制变量和系统临界阈值的识别带来一定挑战<sup>[55]</sup>。此外,城市管理者不同角度的可持续管理行为存在联系或冲突。例如,城市密度增加可以提高能源利用效率,但却降低了城市景观多样性和生态系统服务健康。如何权衡社会-生态多个子系统间的目标冲突亦是目前城市可持续管理需要关注的问题。综上,采用多尺度的“城市韧性”管理与社会-生态系统多目标协同,采用综合调控手段建立抵御、应对、处理、转换等不同形式的响应机制,可为推动城市可持续发展路径的转型升级提供有效支撑。

### 3.3 推进多主体参与-协同合作-共担风险的城市可持续治理模式

城市可持续转型管理实践需要借助一系列规划工具和管理政策进行城市脆弱性、韧性、状态转型的管理。然而,城市系统具有复杂的要素-功能网络连是多部门、多主体协同参与治理的结果。局限于部门内部决策、面向单线问题处理的管理模式会滞后于全球化城市可持续发展的风险挑战。因此,需要

重视多主体利益相关者在“城市可持续性”评价和调控中发挥的重要作用<sup>[56]</sup>,建立促进当地环境和全球变化知识的交融机制,强化城市治理的转换学习能力,从而为及时避免城市发展中“效率陷阱”、为加快实现城市可持续发展转型提供必要的政策环境。此外,通过全球城市可持续管理的评价和比较,寻求不同发展阶段、不同制度背景下未来发展的适宜路径,积极地将多尺度的城市社会-经济复杂系统的科学认知纳入到可持续发展决策和管理的实践中去。搭建科学研究-政府管理知识共享、协同合作的沟通平台,可以充分发挥复杂系统可持续研究对管理实践的指导作用。

## 4 结 论

面向未来城市可持续发展的政策管理和规划,针对当前科学研究和政策文件中对“城市可持续性”相关概念存在的混淆和矛盾,对城市可持续性-韧性-转型作出统一规范的解释。在此基础上,借鉴社会-生态系统理论、城市土地系统转型理论、脆弱性/韧性分析框架、压力-脉冲响应框架、DPSIR 框架等,识别城市系统协同演化及不确定性分析的主体,构建多尺度城市社会-生态系统可持续管理理论框架。该框架以人地互馈作用为驱动,以城市景观结构和土地利用转型为连接社会-生态系统子系统互馈网络的“桥梁”,以城市社会-经济-生态时空耦合格局-过程为系统可持续演化的路径表征。在该框架中,多尺度社会-生态系统相互作用,以及各子系统内关联反馈,形成自适应循环的城市复杂网络。并以该理论框架为指导,提出未来城市亟待开展的科学研究问题和管理实践的重点,分别是构建城市社会-生态耦合系统时空变异和脆弱性预警管理体系、建立多尺度嵌套的城市社会-生态系统风险响应机制以及推进多主体参与-协同合作-共担风险的城市可持续治理模式。

## 参考文献 References

- [1] Wigginton N S, Fahrenkamp-Uppenbrink J, Wible B, Malakoff D. Cities are the future[J]. *Science*, 2016, 352 (6288): 904-905
- [2] United Nations. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*[M]. New York: UN, 2019
- [3] Hopkins F M, Ehleringer J R, Bush S E, Duren R M, Miller C E, Lai C T, Hsu Y K, Carranza V, Randerson J T.



- Mitigation of methane emissions in cities: How new measurements and partnerships can contribute to emissions reduction strategies[J]. *Earth's Future*, 2016, 4(9): 408-425
- [4] Seto K C, Golden J S, Alberti M, Turner B L 2nd. Sustainability in an urbanizing planet[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(34): 8935-8938
- [5] Elmqvist T, Andersson E, Frantzeskaki N, McPhearson T, Olsson P, Gaffney O, Takeuchi K, Folke C. Sustainability and resilience for transformation in the urban century[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(4): 267-273
- [6] Liu J G, Mooney H, Hull V, Davis S J, Gaskell J, Hertel T, Lubchenco J, Seto K C, Gleick P, Kremen C, Li S X. Systems integration for global sustainability [J]. *Science*, 2015, 347(6225): 1-9
- [7] Bettencourt L M A, Lobo J, Helbing D, Kühnert C, West G B. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(17): 7301-7306
- [8] Lewis S L, Maslin M A. Defining the anthropocene [J]. *Nature*, 2015, 519(7542): 171-180
- [9] Paulais T. Urban risk assessments: An approach for understanding disaster and climate risk in cities[M]. World Bank Publications, 2012
- [10] Galaz V, Crona B, Dauriach A, Scholtens B, Steffen W. Finance and the Earth system-: Exploring the links between financial actors and non-linear changes in the climate system [J]. *Global Environmental Change*, 2018, 53: 296-302
- [11] Adger W N, Crépin A, Folke C, Ospina D, Chapin III F S, Segerson K, Seto K C, Anderies J M, Barrett S, Bennett E M. Urbanization, migration, and adaptation to climate change [J]. *One Earth*, 2020, 3(4): 396-399
- [12] Nagendra H, Bai X, Brondizio E S, Lwasa S. The urban south and the predicament of global sustainability[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(7): 341-349
- [13] Zhang X L, Li H. Urban resilience and urban sustainability: What we know and what do not know? [J]. *Cities*, 2018, 72: 141-148
- [14] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: A review[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49
- [15] Elmqvist T, Bai X, Frantzeskaki N, Maddox D. *The Urban Planet: Knowledge Towards Sustainable Cities* [M]. Cambridge University Press, 2018
- [16] Frantzeskaki N, Broto V C, Coenen L, Loorbach D. *Urban Sustainability Transitions*[M]. New York: Routledge, 2017
- [17] Ehnert F, Frantzeskaki N, Barnes J, Borgström S, Gorissen L, Kern F, Strenchock L, Egermann M. The acceleration of urban sustainability transitions: A comparison of Brighton, Budapest, Dresden, Genk, and stockholm[J]. *Sustainability*, 2018, 10(3): 612
- [18] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems[J]. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422
- [19] 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 [J]. *AMBIO*, 2007, 36(8): 639-649
- [20] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z Y, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of coupled human and natural systems[J]. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516
- [21] Elmqvist T. Development: Sustainability and resilience differ [J]. *Nature*, 2017, 546(7658): 352
- [22] United Nations. New Urban Agenda [R]. Quito: United Nations, 2017
- [23] Folke Carl F C. Resilience (republished) [J]. *Ecology and Society*, 2016, 21(4): 44
- [24] Elmqvist T, Andersson E, Frantzeskaki N, McPhearson T, Olsson P, Gaffney O, Takeuchi K, Folke C. Sustainability and resilience for transformation in the urban century[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(4): 267-273
- [25] UNDP. *Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development: A Global Report*[M]. New York: United Nations, 2004
- [26] Levin S A. Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems[J]. *Ecosystems*, 1998, 1(5): 431-436
- [27] 方修琦, 殷培红. 弹性、脆弱性和适应: IHDP 三个核心概念综述[J]. *地理科学进展*, 2007(5): 11-22  
Fang Q X Q, Yin P H. Review on the three key concepts of resilience, vulnerability and adaptation in the research of global environmental change[J]. *Progress in Geography*, 2007(5): 11-12 (in Chinese)
- [28] 仇保兴. 基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J]. *景观设计学*, 2018, 6(4): 42-47  
Qiu B X. Resilient urban design methods and principles based on the complex adaptive system theory [J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2018, 6(4): 42-47 (in Chinese)
- [29] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武, 李琰. 空间恢复力理论支持下的人地系统动态研究进展[J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 891-903  
Liu Y X, Fu B J, Wang S, Zhao W W, Li Y. Research progress of human-earth system dynamics based on spatial resilience theory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5):

- 891-903 (in Chinese)
- [30] Holling C S, Gunderson L H. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems* [M]. Washington, DC: Island Press, 2002
- [31] Kasperson J X, Kasperson R E. SEI Risk and vulnerability programme report 2001-01[J]. *Stockholm: Stockholm Environment Institute*, 2001
- [32] Turner B L 2nd, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8074-8079
- [33] Kelly P M, Adger W N. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation[J]. *Climatic Change*, 2000, 47(4): 325-352
- [34] Cutter S L. Vulnerability to environmental hazards [J]. *Progress in Human Geography*, 1996, 20(4): 529-539
- [35] Agency E E. Halting the loss of biodiversity by 2010: proposal for a first set of indicators to monitor progress in Europe[Z]. *European Environment Agency Copenhagen*, 2007
- [36] Binimelis R, Spangenberg J H, Martinez\_Alier J. The DPSIR framework for biodiversity assessment [J]. *Ecological Economics*, 2009, 69(1): 12-23
- [37] Rodriguez-Labajos B, Binimelis R, Monterroso I. Multi-level driving forces of biological invasions [J]. *Ecological Economics*, 2009, 69(1): 63-75
- [38] Collins S L, Carpenter S R, Swinton S M, Orenstein D E, Childers D L, Gragson T L, Grimm N B, Grove J M, Harlan S L, Kaye J P, Knapp A K, Kofinas G P, Magnuson J J, McDowell W H, Melack J M, Ogden L A, Robertson G P, Smith M D, Whitmer A C. An integrated conceptual framework for long-term social-ecological research [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(6): 351-357
- [39] Smith M D, Knapp A K, Collins S L. A framework for assessing ecosystem dynamics in response to chronic resource alterations induced by global change[J]. *Ecology*, 2009, 90(12): 3279-3289
- [40] Peters D P, Pielke R A, Bestelmeyer B T, Allen C D, Munson-McGee S, Havstad K M. Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(42): 15130-15135
- [41] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change[J]. *Land Use Policy*, 2010, 27(2): 108-118
- [42] Clark T N, Lloyd R, Wong K K, Jain P. Amenities drive urban growth[J]. *Journal of Urban Affairs*, 2002, 24(5): 493-515
- [43] Meyfroidt P, Chowdhury R R, de Bremond A, Ellis E C, Erb K, Filatova T, Garrett R D, Grove J M, Heinimann A, Kuemmerle T, Kull C A, Lambin E F, Landon Y, de Waroux Y L P, Messerli P, Müller D, Nielsen J Ø, Peterson G D, Verburg P H. Middle-range theories of land system change [J]. *Global Environmental Change*, 2018, 53: 52-67
- [44] Qu Y, Long H L. The economic and environmental effects of land use transitions under rapid urbanization and the implications for land use management [J]. *Habitat International*, 2018, 82: 113-121
- [45] 孙黄平, 黄震方, 徐冬冬, 施雪莹, 刘欢, 谭林胶, 葛军莲. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制 [J]. *经济地理*, 2017, 37(2): 163-170, 186
- Sun H P, Huang Z F, Xu D D, Shi X Y, Liu H, Tan L J, Ge J L. The spatial characteristics and drive mechanism of coupling relationship between urbanization and eco-environment in the Pan Yangtze River Delta [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(2): 163-170, 186 (in Chinese)
- [46] Seto K C, Reenberg A, Boone C G, Fragkias M, Haase D, Langanke T, Marcotullio P, Munroe D K, Olah B, Simon D. Urban land teleconnections and sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(20): 7687-7692
- [47] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 581-586
- Chen L D, Fu B J. Ecological significance, characteristics and types of disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 581-586 (in Chinese)
- [48] 董锁成, 陶澍, 杨旺舟, 李飞, 李双成, 李宇, 刘鸿雁. 气候变化对中国沿海地区城市群的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6(4): 284-289
- Dong S C, Tao S, Yang W Z, Li F, Li S C, Li Y, Liu H Y. Impacts of climate change on urban agglomerations in coastal region of China[J]. *Climate Change Research*, 2010, 6(4): 284-289. (in Chinese)
- [49] 韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京市土地利用变化特征及驱动机制[J]. *经济地理*, 2015, 35(5): 148-154, 197
- Han H R, Yang C F, Song J P. The spatial-temporal characteristic of land use change in Beijing and its driving mechanism[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(5): 148-154, 197 (in Chinese)
- [50] 张佰林, 杨庆媛, 鲁春阳, 孙丕苓, 宗会明. 不同经济发展阶段区域土地利用变化及对经济发展的影响——以重庆市40个区县为例[J]. *经济地理*, 2011, 31(9): 1539-1544

- Zhang B L, Yang Q Y, Lu C Y, Sun P L, Zong H M. Effect on economic development of regional land use change in different development phase: Forty countries in Chongqing as the research object[J]. *Economic Geography*, 2011, 31(9): 1539-1544 (in Chinese)
- [51] 杨忍, 刘彦随, 龙花楼. 中国环渤海地区人口—土地—产业非农化转型协同演化特征[J]. *地理研究*, 2015, 34(3): 475-486  
Yang R, Liu Y S, Long H L. The study on non-agricultural transformation co-evolution characteristics of “population-land-industry”: Case study of the Bohai Rim in China [J]. *Geographical Research*, 2015, 34(3): 475-486 (in Chinese)
- [52] 马恩朴, 蔡建明, 韩燕, 廖柳文, 林静. 人地系统远程耦合的研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 310-326  
Ma E P, Cai J M, Han Y, Liao L W, Lin J. Research progress and prospect of telecoupling of Human-Earth system [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(2): 310-326 (in Chinese)
- [53] Liu C L, Golding D, Gong G. Farmers’s coping response to the low flows in the lower Yellow River: A case study of temporal dimensions of vulnerability[J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 543-553
- [54] Folke C, Carpenter S R, Walker B, Scheffer M, Chapin T, Rockström J. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability [J]. *Ecology and Society*, 2010, 15(4): 20
- [55] 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[J]. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550  
Fang C L, Zhou C H, Gu C L, Chen L D, Li S C. Theoretical framework and technical route of interactive coupled effects between urbanization and eco-environment in mega-urban agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 531-550 (in Chinese)
- [56] 宋爽, 王帅, 傅伯杰, 陈海滨, 刘焱序, 赵文武. 社会—生态系统适应性治理研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2019, 74(11): 2401-2410  
Song S, Wang S, Fu B J, Chen H B, Liu Y X, Zhao W W. Study on adaptive governance of social-ecological system: Progress and prospect[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2401-2410 (in Chinese)

责任编辑：杨爱东