

# 城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展

崔学刚<sup>1,2</sup>, 方创琳<sup>1,2</sup>, 刘海猛<sup>1</sup>, 刘晓菲<sup>1,2</sup>, 李咏红<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 北京东方园林环境股份有限公司水生态研究所, 北京 100015)

**摘要:** 城镇化与生态环境耦合是当前研究热点, 而其动态模拟将是未来的重要方向。基于系统科学与跨尺度耦合理论揭示城镇化与生态环境耦合系统的本质, 即一个非线性的、具有高低阶多重反馈的开放的复杂巨系统。通过综述城镇化与生态环境耦合动态模拟的理论、方法与应用的研究进展, 可知: ① 动态模拟成为趋势, 相关理论与机理解析不断完善; ② 动态模拟技术趋向多元化、精细化、智能化和集成化; ③ 应用研究基于多类型案例区、多要素以及近远程与跨区域3个方面。当前研究不足包括: ① 理论发展与整合不足; ② 方法集成与数据共享力度滞后; ③ 耦合关系链条和主控要素的动态特征未被完整揭示, 远程耦合模拟缺乏定量表达、系统性整合以及与区域联动层面的应用衔接。今后, 应以理论为根基, 推动多科学交叉融合; 以方法为支撑, 推动动态模拟技术整合与数据共享; 以应用为导向, 揭示城市群等重点地区的近远程关系链条与主控要素的动态演化模式, 为区域可持续城镇化提供决策支持。

**关键词:** 城镇化与生态环境耦合; 动态模拟; 理论; 方法; 应用

DOI: 10.11821/dlxb201906002

## 1 引言

城镇化是驱动多尺度环境变化的重要因素, 从根本上改变了地区景观生态<sup>[1-2]</sup>。国际科学理事会和国际社会科学理事会(两者已合并成立新的国际科学理事会)发起了“未来地球(Future Earth)”计划, 将城市化与全球环境变化项目(UGEC)列为核心研究计划之一, 旨在研究城镇化进程中的全球环境变化响应<sup>[3-5]</sup>。研究表明, 城市扩张直接导致景观格局变化, 进而影响土地利用与土地覆盖变化(LUCC)、生物多样性和水文系统, 而城镇化过程中的废物排放也对全球气候与生物地球化学循环(Biogeochemical Cycles)造成影响<sup>[6-7]</sup>。

若将视线转移至中国, 可见城镇化进程中对资源环境硬约束的忽视<sup>[8]</sup>。目前, 中国城镇化的资源环境剥夺效应显著, 引发了耕地资源流失、水资源和能源短缺、生境破碎化(Habitat Fragmentation)和PM<sub>2.5</sub>污染等问题<sup>[9-11]</sup>。尤其在城市群地区, 大气污染、水污染等环境问题集中爆发, 成为生态高度脆弱地区及重点治理地区<sup>[12-14]</sup>。通过跟踪国际地球系

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2019-03-16

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(41590840, 41590842); 国家重点研发计划项目(2016YFC0503006); 中国博士后科学基金项目(2018M630196) [Foundation: Major Program of National Natural Science Foundation of China, No.41590840, No.41590842; National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0503006; China Postdoctoral Science Foundation, No.2018M630196]

**作者简介:** 崔学刚(1990-), 男, 山东淄博人, 博士生, 主要从事城市地理与区域规划研究。E-mail: cuixg.16b@igsrr.ac.cn

**通讯作者:** 方创琳(1966-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 研究员, 主要从事城市发展与规划研究。E-mail: fangcl@igsrr.ac.cn

1079-1096 页

统科学与可持续性科学前沿,并结合中国城镇化现状,诸多学者的研究兴趣转向城镇化与生态环境耦合<sup>[15-17]</sup>。城镇化与生态环境之间呈现复杂的非线性交互耦合关系,内部作用机制复杂,且阶段性与空间差异性特征显著<sup>[18-19]</sup>。根据不同区域的历史数据,诸多学者定量测度了城镇化与生态环境的耦合规律,发现其呈现双指数<sup>[20-21]</sup>或倒“U”型<sup>[22]</sup>等曲线形式。由于耦合机制的复杂性,采用单一范式研究城镇化与生态环境耦合已力不从心。地理学正经历由知识描述到过程模拟,再到决策支持的发展趋势,城镇化与生态环境耦合的动态模拟将是未来的重要方向<sup>[23]</sup>。

动态模拟是对地理过程的历史重现,可预测地理过程的发展趋势<sup>[24]</sup>。采用动态模拟技术模拟多情景下的城镇化与生态环境耦合,可揭示运行机制与演化趋势,比选最优调控措施,促使两者趋向协调。动态模拟需强化理论、方法与应用层面的科学衔接,解决3个关键问题:① 动态模拟的理论基础是什么,揭示了何种演化机理?② 目前有哪些动态模拟方法,它们的精度和适用性如何?③ 基于现有理论和方法,具体进行了哪些应用,又是如何体现地域差异、识别主控要素以及体现跨尺度耦合?本文将基于理论、方法与应用综述解答上述问题。

## 2 城镇化与生态环境耦合动态模拟的理论研究进展

揭示系统结构和演化机理是模拟的前提。基于人地系统、城市社会-生态系统和复杂系统等系统科学理论,以及人类与自然耦合系统理论、近远程耦合框架等跨尺度耦合理论,将城镇化与生态环境耦合系统表征为一个非线性的、具有高低阶多重反馈的开放的复杂巨系统,以此揭示系统结构和演化机理。

### 2.1 地理系统观:人地系统可持续性理论

人地关系是地理学的研究核心,其思想源自以白兰士(Blache)和白吕纳(Brunhes)为代表的法国人地学派<sup>[25]</sup>。吴传钧先生提出,“地理学的理论研究首先对人地关系要有全面的认识”。在人文地理学领域,诸多学者基于人地关系理论研究了可持续发展问题<sup>[26]</sup>。人地关系强调人类活动与地理环境之间存在客观联系,重点研究主体(人)和环境(地)的相互作用,两者共同构成了一个开放的复杂巨系统——人地系统<sup>[27]</sup>。

城镇化是当今最显著的人类活动之一,生态环境也构成了狭义上的地理环境。人地系统理论是城镇化与生态环境耦合研究的理论根基,城镇化与生态环境协调发展也是人地系统可持续发展的重要体现。随着人类活动强度的加剧,人地系统融合程度不断加深,二者边界趋向模糊,导致内生化趋势显著、作用机制更趋复杂化<sup>[28]</sup>。人地关系协调与否事关系统整体稳定性,一旦人类活动强度超出系统承载力阈值,将加剧人地系统崩溃风险。人地系统演化应以可持续发展为永恒目标,尤其要充分发挥“人”的主观能动性,通过技术进步、政策工具调控发展方向。今后,应重点关注人类活动的资源环境效应,科学评估水资源、土地资源、能源和矿产资源、生态环境资源等对经济社会活动的远期承载力<sup>[29]</sup>,保障人地系统可持续发展。

### 2.2 城市复合系统观:城市社会—生态系统理论

城镇化与生态环境耦合系统是一个具有动态性、多维性和协同性的城市复合系统,构成了一个概念集,包括社会—经济—自然复合生态系统(SENCE)、城市生态—经济系统(UUE)、经济—资源—环境复合系统(ERE)和城市PRED系统等<sup>[30-31]</sup>。

目前,城市社会—生态系统(Urban Social-Ecological Systems, USESs)理论得到国际认可。Ostrom<sup>[32]</sup>认为一个社会—生态系统(Social-Ecological Systems, SESs)包含资源

单位 (RU)、资源系统 (RS)、治理系统 (GS) 和使用者 (U) 4 个子系统, 各个子系统通过复杂的相互作用形成一个整体。作为自适应系统, 政策和行为导致了 SESs 的不确定性, 显著影响了系统弹性和可持续性<sup>[33]</sup>。USES 理论可指导城镇化与生态环境耦合的动态模拟。为了降低动态模拟难度, 一方面可减少由不确定性子系统造成的模糊关系; 另一方面由于城镇化与资源环境承载力的关系更为直接, 应重视资源子系统 (R), 构建城镇化—资源—环境系统 (Urbanization-Resources-Environment System, URE)。城镇化—资源—环境系统是一个开放、复杂和动态的系统, 各要素之间相互作用、相互联系, 具有特定的结构和功能<sup>[34-35]</sup> (图 1)。

### 2.3 复杂系统观: 复杂系统理论

复杂系统理论由系统科学和复杂性科学发展而来, 采用自适应性、自组织性、不确定性、涌现性、开放性 etc 名词描述了系统特征, 可解释不确定性系统的演化机制<sup>[36]</sup>。钱学森等提出了“开放的复杂巨系统”概念, 认为“定性定量相结合的综合集成方法”是当前唯一可行的研究方法<sup>[37]</sup>。

城镇化与生态环境耦合系统是一个由简单到复杂、由线性到非线性的复杂集合, 内部存在着高低阶多重反馈。另外, 系统与外界始终保持着物质、能量和信息交换, 是一个开放的、远离平衡态 (在稳态和非稳态之间摆动) 的系统<sup>[38]</sup>。由于要素互馈、能量传输等多重自组织演化机制, 系统经历着“涌现生成→协同共生→临界相变”的反复动态涨落过程, 不断向高级有序状态演化<sup>[39-40]</sup>。其中, 少数慢变化参量 (序参量) 支配着系统的协同演化<sup>[41]</sup>。序参量 (Order Parameter) 是指决定系统有序性的参量, 当其变化突破临界点 (阈值) 时, 系统产生相变<sup>[42]</sup>。城镇化、资源和环境要素可被视为序参量, 其中城镇化要素起主导。系统演化的最终目标是由混沌无序转变为协调有序, 其间经历复杂、多层次的时空耦合过程。自组织、自适应、自学习特征导致系统组分、序参量时刻变化, 整体演化过程呈现复杂性、动态性和随机性<sup>[43]</sup>。

### 2.4 多尺度耦合: 人类与自然耦合系统理论

进入 21 世纪, 人类比以往任何时期都更加关注全球环境变化。特别是 CO<sub>2</sub> 等温室气体人为排放量增加引起全球变暖趋势显著, 不仅可能破坏生态系统平衡, 也可能危及到人类社会系统的安全, 导致供水、食物和健康危机, 使得可持续发展面临极大挑战<sup>[44]</sup>。人类意识到人类活动是全球变化的重要驱动力, 实质是人类与自然系统的不协调及其引发的级联 (Cascading) 效应<sup>[45-47]</sup>。

在以往的研究中, 人类与自然系统的作用机理未被很好地理解<sup>[48]</sup>。为揭示连接人类和自然系统的模式、过程及多尺度的作用机制, 人类与自然耦合系统 (Coupled Human and Natural Systems, CHANS) 被提出。CHANS 在组织、空间和时间上呈现复杂性, 体现为<sup>[49]</sup>: ① 在组织结构上存在层级嵌套现象, 并通过直接或间接的影响和反馈得以体现, 人类和自然系统通过相互作用构成了一个超越不同组织层次的复杂网络系统<sup>[50-52]</sup>, 呈现出脆弱性<sup>[53-54]</sup>、阈值<sup>[55]</sup>和恢复力<sup>[56-57]</sup>等特性; ② 由于全球化及人口、物质和信息流动加速, 在空间上存在多重嵌套现象, 导致全球与局地系统以及局地系统之间的相互作用加

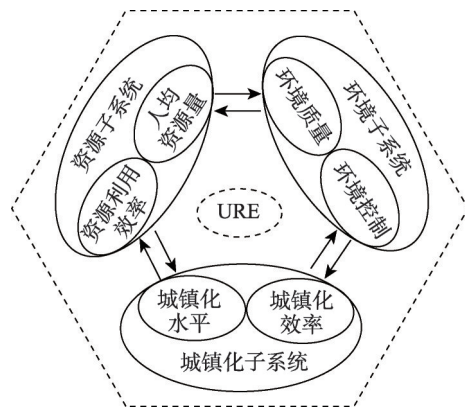


图 1 城镇化—资源—环境系统(URE)中城镇化、资源和环境之间的相互作用

Fig. 1 Interactions between urbanization, resources and environment in URE



剧<sup>[58-59]</sup>。空间异质性也被揭示，如在城市和农村地区人类活动对自然系统的损害程度不同<sup>[60-61]</sup>；③ 在时间上存在剧烈变动，尤其是人口、生产和消费增长快速，导致人类对自然变化的驱动力显著增强<sup>[62-64]</sup>。此外，变化的滞后性也被考虑<sup>[65-66]</sup>。CHANS将人类与自然耦合系统进行多尺度整合与分级，强调了系统在时空维度下的不断变化，解释了耦合系统的复杂行为特征和演化机制。

2.5 跨区域耦合:近远程耦合框架

在以往的研究中，人们更加关注系统内部的相互作用，外界影响仅被视为外在变量。事实上，系统间的远程相互作用同样存在反馈。近远程耦合框架因而被构建，用于解释开放系统之间的空间耦合机制，特别是经济社会和环境的远距离相互作用<sup>[67-68]</sup>。

近远程耦合框架是由一系列相互作用的耦合系统构成的多层次框架，其组织结构包括5个部分，即系统、系统间的流以及组成系统的代理、原因和影响<sup>[67]</sup>。① 系统即为人类与自然耦合系统，包括发送系统、接收系统和外溢系统；② 流指物质、能源和信息流；③ 代理（参与者）指自主决策的实体；④ 原因指导致远程耦合产生和变化的因素；⑤ 影响指远程耦合对系统造成的后果<sup>[67]</sup>。Fang等<sup>[69]</sup>基于近远程耦合框架分析了中欧光伏贸易对能源系统可持续性的影响。其中，中国和欧盟分别作为发送系统和接收系统。由于中国的劳动力和环保成本优势，以及欧盟对光伏产品的兴趣，中国对欧盟的光伏设备出口量占据了欧盟市场份额的22.04%。结果为，中国得到了就业和税收增长的好处，但加剧了温室气体和污染物排放，而欧盟有效缓解了气候变化。对城镇化与生态环境耦合而言，这一过程存在于不同空间系统之间，如由于人口、产业高度集聚导致用水需求庞大，北京虚拟水净进口量已由2002年的3.59亿m<sup>3</sup>攀升至2012年的28.54亿m<sup>3</sup><sup>[70]</sup>。

2.6 理论研究评述

系统科学理论和跨尺度耦合理论为动态模拟提供了理论支撑，前者包括人地系统可持续性理论、城市社会—生态系统理论和复杂系统理论，分别对应为地理系统观、城市复合系统观和复杂系统观；后者包括人类与自然耦合系统理论和近远程耦合框架，揭示了时空耦合演化模式。

基于相关理论，可将城镇化与生态环境耦合系统表征为一个非线性的、具有高低阶多重反馈的开放的复杂巨系统，并揭示其演化机理（图2）。① 耦合关系。地理系统论认为城镇化与生态环境耦合系统是一个开放的复杂巨系统，各要素之间存在复杂的非线性联系，包括“一对一”“一对多”与“多对多”3种类型。② 关联机制。基于近远程耦合框架和距离衰减理论，可分为系统内的强耦合机制

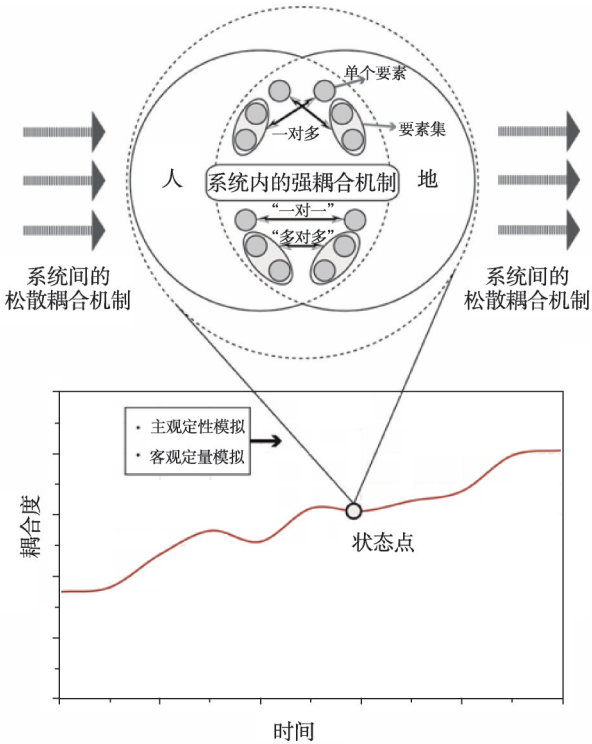


图2 城镇化与生态环境耦合机理

Fig. 2 The mechanism of urbanization and ecological environment coupling

和系统间的松散耦合机制。系统内的强耦合往往决定演化方向,系统间的松散耦合也是不容忽视的因素,尤其在全球化背景下,远程耦合强度大大高于以往。<sup>③</sup>过程模拟与调控。根据钱学森等提出的“开放的复杂巨系统”的研究方法,应把握定性和定量之间的逻辑关系,区分主客观模拟的适用范围。在解释某些自然性质或长时段耦合规律时,采用客观定量模拟较为有效。当进行政策调控时,采用主观定性模拟更为有效。

当前诸多理论处于发展期,部分观点存在争论,不同理论之间也缺乏整合。今后,一方面要推动复杂系统理论、跨尺度耦合理论等新理论的发展;另一方面要模糊学科边界,实现人文—自然综合交叉研究,形成基于多学科智慧、面向复杂决策问题的城镇化与生态环境耦合研究网络,为解决动态模拟中的“混沌问题”而尽力。

### 3 城镇化与生态环境耦合动态模拟的方法研究进展

由于计算机、人工智能、GIS等技术的不断突破,动态模拟方法发展迅速。不同方法的学科背景、算法、优缺点不同,导致精度和适用性差异较大。总结不同方法的发展脉络、适用条件和缺陷,并展望未来优化和突破方向。

#### 3.1 系统动力学(SD)动态模拟技术

系统动力学(System Dynamics, SD)模型是发展最早、最常用的动态模拟技术,在20世纪50年代由Forrester教授提出。作为一门由系统科学理论与计算机动态技术集成的学科,系统动力学基于“定性+定量”的方法模拟各类高阶次、非线性的人地系统、城市复合系统和复杂系统<sup>[71]</sup>。基于“理论分析—SD建模—动态模拟—情景调控”这一流程,系统动力学在城市系统演化、城市可持续发展和城镇化与生态环境多要素耦合动态模拟中应用广泛,起始标志是1972年罗马俱乐部出版的《增长的极限》。通过构建一个包括人口、农业生产、工业生产、自然资源和污染5个模块的“世界模型”,《增长的极限》定量模拟了全球社会经济活动与资源、环境的耦合趋势,宣扬了可持续发展理念<sup>[72]</sup>。在后续研究中,一方面,学者们基于系统性、复杂性、协调性和持续性等理念模拟了城市系统演化与城市可持续发展,明确了人口、经济、资源、环境协调发展的可持续城镇化模式<sup>[73-74]</sup>;另一方面,学者们在全球与区域尺度模拟了城镇化与自然资源、能源、温室气体与地质形态等要素的耦合过程<sup>[75-77]</sup>。

系统动力学是一类广泛、简便的动态模拟方法,但也存在显著缺陷。一是模型结构的固定性导致难以模拟技术进步、制度和行为等不确定性系统,部分变量关系局限于回归关系;二是模拟对象偏向宏观系统,在处理微观或栅格系统时相对劣势。

#### 3.2 人工智能模拟技术

目前,以人工神经网络(ANN)和贝叶斯网络(BN)为代表的人工智能技术发展迅速,在一定程度上解决了自组织、自适应、自学习系统的处理难题。ANN和BN在算法复杂度和训练方式等方面具有相似性,但在拓扑结构、学习规则和算法原理等方面存在差异。其中,ANN包括有向无环图和循环图两种类型,并基于激活函数(由二进制到线性,再到非线性)进行模型训练和学习规则构建,而常用的误差反向传播(BP)神经网络是有向无环图,并采用误差反向传播算法进行多层神经网络训练<sup>[78]</sup>;BN是有向无环图,并根据变量之间的条件独立关系将联合分布分解为多个概率分布,以此进行“自顶而下”的因果推理和“自底而上”的诊断推理<sup>[79-80]</sup>。在优劣势方面,ANN具有自学习、联想储存、高速寻优和非线性映射逼近性等优势,但不擅长因果推理和处理不确定性问题<sup>[81]</sup>;BN擅长因果推理以及处理不确定性问题和不完整数据集,但算法处理效率和结构

学习能力不足<sup>[82]</sup>。目前,人工智能动态模拟技术主要模拟城市扩张及其生态环境效应、城市资源需求预测与可持续管理、城市生态脆弱性与灾害风险识别等<sup>[83-85]</sup>。

城镇化与生态环境耦合的动态模拟存在“黑箱”,人工智能可基于深度学习功能破解该难点。然而,由于人工智能技术正处于发展期,目前存在是否是“伪智能”的争论。但就发展前景而言,人工智能技术是模拟不确定性系统的重要技术方向。下一步,应尝试将这类方法嵌入到其他方法之中,以扩展其适用范围。

### 3.3 土地系统动态模拟技术

土地系统动态模拟技术加强了空间解释,通过展现城市与生态空间“此消彼长”的动态演化过程,体现了城镇化与生态环境的空间耦合过程,可确定未来城市边界的生长方向。土地系统动态模拟技术形成了一个模型家族,以CLUE/CLUE-S、元胞自动机(CA)和多智能体系统(MAS)模型为代表<sup>[86]</sup>。CLUE/CLUE-S模型是基于经验统计的局部均衡分析模型,主要模拟多尺度土地利用空间分配<sup>[87]</sup>。相比之下,基于预先设定的转换规则,CA模型可通过“自下而上”的建模路径模拟局部土地系统的复杂离散演化过程,但作为建立在空间均质假设上的理想化模型,难以解决空间异质问题<sup>[88]</sup>。更进一步来看,MAS模型通过加入多个Agent,将行为、决策等因素纳入到土地利用变化的驱动机制之中,更能反映复杂自适应系统的演化过程<sup>[89]</sup>。然而,MAS模型正处于初步应用阶段,并受到空间均质假设的限制。

CLUE/CLUE-S、CA和MAS模型分别基于经验统计、空间信息规则以及复杂自适应系统理论模拟土地城镇化与生态环境耦合,但局限于空间视角,应与其他模型集成,推动进一步应用。

### 3.4 综合集成模拟技术

为了实现各方法之间的互补,研发以“SD+”为代表的综合集成动态模拟技术成为趋势<sup>[90]</sup>。①将SD与GIS集成是重要趋势,实现了动态模拟的空间表达<sup>[91]</sup>;②将SD与CA集成也是技术热点,增强了对城市土地变化的生态环境效应的解释<sup>[92]</sup>;③将SD与基于主体建模(ABM)集成正被尝试,旨在解决随机性、离散性、空间异质性与适应性问题<sup>[93]</sup>;④另有部分工作对SD与CLUE-S集成,期望模拟城市经济社会发展情景下的土地利用变化状况<sup>[94]</sup>。还有部分其他集成技术取得了一定成果,如胡健等<sup>[95]</sup>基于对模糊积分、遗传算法和人工神经网络的集成,探测了区域能源安全的外生警源。

系统动力学融合了定性和定量两类特点,成为研发综合集成技术的重要接口。但是,技术集成难度较高,现有成果也难以验证真实性和有效性。今后,应整合系统工程、人工智能、LUCC模拟及预测、3S等技术学科,构建动态模拟集成技术链。

### 3.5 人机交互决策支持技术

为实现在区域应用层面的技术输出,诸多研究提出了基于不同实施目标的决策支持方案,包括以城镇化效率最优为目标的转调型决策支持方案、以生态环境约束为导向的管控型决策支持方案、以城镇化与生态环境协同为目标的决策支持方案和基于多目标统筹的综合型决策支持方案,以期为可持续城镇化提供决策支持。然而,以上决策支持方案过于经验化,亟需开发人机交互决策支持平台。陈利顶等<sup>[96]</sup>以区域生态安全保障协调联动为目标,设计了京津冀城市群生态安全保障决策系统,包括生态修复与重建、风险预测与预警等关键模块;方创琳等<sup>[17]</sup>基于多层次—多尺度—多视角—多情景优化方案,提出构建城镇化与生态环境交互耦合智能决策支持系统平台。

实现动态模拟与决策支持的人机交互是技术趋势。然而,当前人机交互决策支持平台缺乏成型产品,更多地依赖于经验判断。今后,应构建智能化人机交互决策支持平台。



### 3.6 方法研究评述

在计算机、3S和人工智能等技术的支持下,动态模拟方法趋向多元化、精细化、智能化和集成化。常见的单一方法包括SD、人工智能和土地系统动态模拟技术。其中,SD动态模拟技术主要模拟城市系统演化、城市可持续发展以及城镇化与生态环境要素耦合,但存在空间解释不足以及忽视系统自适应性的缺陷。人工智能动态模拟技术(ANN和BN)在自组织、自适应、自学习系统模拟中具有显著优势,主要模拟城市扩张及其生态环境效应、城市资源需求预测与可持续管理、城市生态脆弱性与灾害风险识别,但限制条件偏多。以CLUE/CLUE-S、CA和MAS模型为代表的土地系统动态模拟技术分别基于经验统计、空间信息规则以及复杂自适应系统理论模拟土地城镇化与生态环境耦合。为实现各方法之间的互补,研发以“SD+”为代表的综合集成动态模拟技术成为趋势。此外,为实现在区域应用层面的技术输出,提出开发人机交互决策支持平台。

当前方法研究不足主要包括:①方法集成难度大,导致多情景—多尺度—多要素—多主体集成动态模拟遇到较大阻碍;②跨尺度耦合缺乏定量化、系统性的动态模拟方法,大量研究处于定性分析层面;③人机交互决策支持平台建设处于理论设想阶段,缺乏成型产品及在规划部门中的技术服务;④城镇化与生态环境耦合的数据源获取存在较多困难,特别是一手数据的获取是一个难点。

今后,应推动动态模拟技术整合和数据共享,研发近远程耦合动态模拟集成技术链,开发智能化人机交互决策支持平台,建设大数据支持下的多源共享数据库,加快由理论研究走向动态模拟,再到为区域可持续城镇化提供决策支持。

## 4 城镇化与生态环境耦合动态模拟的应用研究进展

城镇化与生态环境耦合动态模拟的应用研究基于多类型案例区、多要素以及近远程与跨区域3个方面,回答了如何体现地域差异、识别主控要素以及体现跨尺度耦合。

### 4.1 多类型案例区的动态模拟应用

目前,基于国家与省域宏观尺度的研究较多,如Roberts<sup>[97]</sup>认为城市人口的膨胀导致了发展中国家的环境危机,农村生产力下降、财富集中和城市分区混乱等问题愈发显著;刘耀彬等<sup>[98]</sup>研究了中国省际城镇化与生态环境系统的耦合过程,认为城镇化对生态环境的胁迫性和生态环境对城镇化的约束性同时存在;张荣天等<sup>[99]</sup>认为中国城镇化与生态环境耦合正处于磨合阶段,且东部地区协调性优于中西部地区;谭俊涛等<sup>[100]</sup>评估了2000-2012年吉林省城镇化和生态环境耦合的时空演化过程,认为受益于振兴东北老工业基地战略,城镇化和生态环境趋向高级协调。由于城镇化与生态环境耦合因地理环境不同而呈现空间差异性,应基于多类型案例区体现地域性特征。

(1)城镇化地区。一是对超大城市、特大城市和大中城市的研究。Hayashi等<sup>[101]</sup>基于伦敦、东京、名古屋和曼谷的比较,认为城镇化进程中的运输环节导致能源消耗和环境退化;Wilby等<sup>[102]</sup>以伦敦为例,强调通过城市绿色空间规划降低城镇化对生物多样性和环境质量的威胁;Zhang等<sup>[103]</sup>采用ARDL模型评估了1980-2013年北京城镇化与碳排放的关系,认为无论长期或短期,城镇化对碳排放均具有积极影响;He等<sup>[104]</sup>评估了1980-2013年上海城镇化与生态环境的耦合协调过程,发现其符合“S”型曲线。二是对城市群地区的研究。城市群地区是参与国际竞争、承接国际产业转移的重要阵地,但面临着严峻的资源环境问题<sup>[17]</sup>。Wang等<sup>[105]</sup>基于交互胁迫模型(ICM)和动态耦合协调度模型(DCCDM)估算了京津冀城市群城市化与生态环境的关系,认为其符合倒“U”型曲线;

Zhao 等<sup>[106]</sup>基于改进的环境库兹涅茨曲线模型 (EKC) 和动态协调耦合度模型 (CCD), 揭示了长三角城市群城镇化与生态环境的耦合协调关系, 发现其符合“S”型曲线。

(2) 流域。在流域地区, 水资源、水环境和水生态对经济社会系统具有重要的承载功能, 水文系统与城镇化格局、过程的相互作用显著<sup>[107]</sup>。方创琳等<sup>[108]</sup>模拟了黑河流域水—生态—经济复合系统的动态演变过程, 提倡实施促进三者协调发展的 WEE 方案; 张洁等<sup>[109]</sup>模拟了 1996-2006 年渭河流域人地耦合系统的协同演变过程, 发现符合“S”型曲线; 杨丽花等<sup>[110]</sup>模拟了 1991-2010 年松花江流域经济系统与水环境系统的时空耦合过程, 发现其呈现非线性递增态势; 郭月婷等<sup>[111]</sup>基于模糊物元分析模型模拟了淮河流域城镇化与生态环境系统的交互耦合过程, 认为两者产生了良好的协同效应; 杜湘红等<sup>[112]</sup>基于灰色关联度模型模拟了 2002-2012 年洞庭湖流域水资源系统与经济社会系统的时空耦合过程, 认为两者处于协调阶段。

(3) 干旱区绿洲。作为生态脆弱区, 干旱区绿洲城镇化受到资源环境的强烈约束。乔标等<sup>[113]</sup>分析了干旱区城镇化与生态环境耦合的函数、轨迹、类型和阶段, 认为这是一个交互胁迫的动态过程; 阿布都热合曼·哈力克等<sup>[114]</sup>评估了且末绿洲水资源—经济社会耦合系统的可持续性; 董雯等<sup>[115]</sup>基于 VAR 模型模拟了天山北坡绿洲城镇化与水土资源的时空耦合过程, 认为城镇化水平的提升导致水资源消耗量不断增长; 唐志强等<sup>[116]</sup>分析了张掖市城镇化与水资源系统之间的响应关系, 认为最终方向是协同共生。

(4) 山地地区。山地地区在主体功能区划中通常被定位为限制开发区或禁止开发区, 陷入发展与保护之间的两难境地。王静等<sup>[117]</sup>模拟了 2000-2010 年南方丘陵山地带植被覆盖度的时空演变过程, 认为人类活动和气候共同影响了 NDVI 的变化; 王卫林等<sup>[118]</sup>评价了曲靖金麟湾区块的生态风险指数, 认为坡度分层梯度开发模式将导致山地生态风险指数增加; 温晓金等<sup>[119]</sup>模拟了 1997-2013 年秦岭山区社会—生态系统 (SES) 脆弱性演变过程, 构建了多适应目标下的情景调控方案。

#### 4.2 多要素耦合与调控的动态模拟应用

随着系统科学和复杂性科学的不断发展, 研究认为城镇化与生态环境耦合由多要素复杂集成。Wang 等<sup>[105]</sup>认为城镇化与生态环境耦合系统由城镇化子系统 (人口、空间、经济、社会) 和生态子系统 (水平、禀赋、压力) 构成; 张荣天等<sup>[99]</sup>将城镇化系统分为人口、空间、经济、社会 4 个方面, 并将生态系统分成环境污染和环境治理 2 个方面; 张引等<sup>[120]</sup>基于效率—水平理论将城镇化系统分为城镇化水平和城镇化效率 2 个方面, 并将生态环境系统分为生态环境水平、生态环境压力和生态环境保护 3 个方面。在多要素耦合的基础上识别关键主控要素, 可调控城镇化与生态环境耦合模式。

(1) 水资源是城镇化发展的重要胁迫因素。城镇化进程中的水资源需求是直接的和必要的, 人口和生产规模需维持在水资源承载力范围内, 水文系统也影响着城镇化格局和过程<sup>[121]</sup>。通过测算水资源对城镇化的贡献率, Varis 等<sup>[122]</sup>讨论了第三世界城市化的推动力量, 认为水是这一过程方程中的关键变量; Srinivasan 等<sup>[123]</sup>以印度金奈为例, 讨论了发展中国家城市人水系统脆弱性的演变过程, 认为具有动态性、可变性和空间依赖性; Mcdonald 等<sup>[124]</sup>发现全球地表供水总量的  $78 \pm 3\%$  输往了大城市, 但水资源压力依然显著。在干旱区绿洲, 水资源对于城镇化的影响更是决定性的, 实现人水系统协调发展是保证干旱区可持续城镇化的根本<sup>[41, 125]</sup>。

(2) 土地资源是城镇化发展的又一胁迫因素。目前, 国际研究倾向于将城镇化视为景观城镇化, 主要表现为自然、乡村等地域景观向城市景观转变, 伴随着土地利用类型、景观破碎度等的动态变化<sup>[126-127]</sup>。土地为城镇化提供了空间载体和资源支撑, 土地开



发模式滞后将导致土地利用效率低下,对城镇化质量产生不利影响。在中国,人口城镇化与土地城镇化的协调性成为热点。李子联<sup>[128]</sup>解释了中国人口城镇化滞后于土地城镇化的原因,认为是用地快速扩张、土地财政和户籍管制三者共同作用的结果;吕添贵等<sup>[129]</sup>评估了2002-2011年南昌人口城镇化与土地城镇化的协调性,认为人口滞后特征已取代土地滞后特征。

(3) 部分学者考虑了地形地貌对城镇化的胁迫效应。中国有超过50%的城镇布局在山地地区,山地城镇化是一大特色<sup>[130]</sup>。与平原、盆地和海岸带等相比,地形地貌及相关地质灾害是山地城镇化的重要胁迫因素。张磊等<sup>[131]</sup>以三峡工程建设为例,分析了该事件前后三峡库区城镇化格局的时空变化,认为在促进区内城镇化格局趋向均衡化的同时,三峡工程的建设破坏了城市空间的完整性;曹珂等<sup>[132]</sup>对西南山地的研究表明,城市功能和形态、路网组织和结构等需与山地地貌形态契合;韩笑等<sup>[133]</sup>基于熵权-TOPSIS模型评估了2000-2013年中国城镇化发展与地质灾害的耦合关系,发现自2003年以后两者逐渐趋向协调。

(4) 亦有学者构建了综合承载力评估方案,推动主控要素识别趋向综合化。张引等<sup>[120]</sup>评估了2000-2012年重庆城镇化发展与生态环境承载力的耦合关系,认为城镇化导致区域生态环境承载压力增加;刘凯等<sup>[134]</sup>基于“城镇化与资源环境承载力关系”理论模型评估了1991-2014年山东省城镇化的资源环境承载力响应关系,认为正经历由“正”转“负”的过程;池源等<sup>[135]</sup>研究了庙岛群岛城镇化的资源环境承载力,认为达到临界状态。

#### 4.3 近远程与跨区域的动态模拟应用

近远程耦合框架将耦合尺度扩展到时间、空间、组织等多个维度。Eakin等<sup>[136]</sup>关注了社会—生态远程耦合对土地系统的外部效应;Deines等<sup>[137]</sup>基于远程连接框架分析了境外水源对北京城市供水可持续性的意义,认为降低了供水风险;Lenschow等<sup>[138]</sup>认为社会生态系统之间的远距离关联给全球化带来了风险,应加强全球治理;Quan等<sup>[139]</sup>基于IBWTPs模型评估了跨流域调水引发的生态风险,认为加强生态安全管理的核心是实现信息共享;Hulina等<sup>[140]</sup>研究了全球人口迁移对生物多样性的影响,认为同时影响了旅游、土地利用和气候变化等外溢系统;方创琳等<sup>[68]</sup>基于城市能值代谢法模拟了1980-2015年京津冀城市群近远程要素的动态变化,为京津冀协同发展提供了科学依据。

另一方面,跨区域的经济合作、文化交流、贸易、通勤甚至污染等现象不断凸显,导致政府、企业和公共部门更为重视区域协同发展。李琳等<sup>[141]</sup>基于哈肯模型分析了1992-2011年中国区域经济协同发展的驱动机制,认为区域经济联系、区域产业分工取代区域比较优势成为新动力。在城市群地区,亟需谋求协同发展以实现全域统筹。薄文广等<sup>[142]</sup>认为京津冀协同发展面临的问题包括产业结构趋同、发展差距偏大和治理机制匮乏3个方面;方创琳<sup>[143]</sup>分析了京津冀城市群协同发展的规律性,认为这是一个非线性的螺旋式上升过程。

#### 4.4 应用研究评述

应用研究包括多类型案例区、多要素以及近远程与跨区域3个方面:①案例区类型多元化,城市群地区成为热点。案例区包括城镇化地区、流域、干旱区绿洲和山地地区,研究热点集中在城市群地区城镇化与生态环境耦合的理论阐述与框架搭建、经验实证与关系表达、机理解析与过程识别、方案比选与决策支持等;②多要素集成趋势显著,主控要素识别趋向综合化。随着系统科学和复杂性科学的发展,更多研究认为城镇化与生态环境耦合由多要素复杂集成。在揭示水、土和地形地貌等主控要素的基础上,构建了综合承载力评估方案,推动主控要素识别趋向综合化;③近远程耦合与区域协同

发展受到关注。国际研究发生空间尺度转向,国内研究更加关注区域协同发展。

当前应用研究不足包括:① 主控要素识别忽视动态性。多数研究仅关注空间差异性,需在识别过程中应找准规律性、摸清趋势性以及把握动态性;② 城镇化与生态环境耦合的关系链条未被完整揭示。碎片化应用难以完整揭示关系链条,如城镇化率提升一个百分点,将新增多大规模的建设用地,占用多少额外资源(承载力问题),经济、能源、用水效率是增是减(效率问题),倒“U”型或“S”型等曲线是否具有普遍性;③ 远程耦合模拟偏重于跨境旅游、能源贸易、城市安全、生态风险、物种入侵等微观案例,缺乏定量表达、系统性整合以及与区域联动层面的应用衔接。

今后,应以响应国家战略和全球变化为目标,基于模拟整合深度揭示城市群等重点地区的近远程关系链条,突出主控要素识别的动态性与空间协同战略的科学性,推动拐点识别、阈值界定、动态模拟与监测以及风险预警与响应等方面的应用研究。

## 5 评述与展望

城镇化与生态环境之间存在复杂的非线性交互耦合过程,如何科学模拟这一复杂动态过程,是由经验描述走向动态模拟的关键。基于系统科学理论与跨尺度耦合理论揭示城镇化与生态环境耦合系统的本质,即一个非线性的、具有高低阶多重反馈的开放的复杂巨系统。

通过综述城镇化与生态环境耦合动态模拟的理论、方法与应用进展,可知:① 动态模拟成为趋势,相关理论与机理解析不断完善。城镇化与生态环境耦合研究源自对环境库兹涅茨曲线(EKC)的借鉴和改进,揭示了两者的关系曲线(倒“U”型或“S”型)。由于滞留在经验描述阶段,诸多学者基于系统科学理论与跨尺度耦合理论开展了动态模拟;② 动态模拟技术趋向多元化、精细化、智能化和集成化。基于SD、人工智能和土地系统模型的动态模拟技术发展迅速,研发综合集成动态模拟技术成为趋势,部分研究提出开发人机交互决策支持平台;③ 应用研究基于多类型案例区、多要素以及近远程与跨区域3个方面。

当前研究不足包括:① 理论发展与整合不足,制约机理解析和动态模拟;② 方法集成与数据共享力度滞后,人机交互决策支持平台建设缺乏成型产品;③ 耦合关系链条和主控要素的动态特征未被完整揭示,远程耦合模拟缺乏定量表达、系统性整合以及与区域联动层面的应用衔接。

今后,应以理论为根基,推动复杂系统理论、跨尺度耦合理论等新理论的发展,实现人文—自然综合交叉研究,形成基于多学科智慧、面向复杂决策问题的城镇化与生态环境耦合研究网络;以方法为支撑,推动技术整合和数据共享,研发动态模拟集成技术链,开发智能化人机交互决策支持平台,建设大数据支持下的多源共享数据库;以应用为导向,基于模拟整合完整揭示城市群等重点地区的近远程关系链条,动态识别主控要素,科学谋划空间协同战略,推动拐点识别、阈值界定、动态模拟与监测以及风险预警与响应等方面的应用研究,为区域可持续城镇化提供决策支持。

## 参考文献(References)

- [1] Tratalos J, Fuller R A, Warren P H, et al. Urban form, biodiversity potential and ecosystem services. *Landscape & Urban Planning*, 2007, 83(4): 308-317.
- [2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.

- [3] Xie Lijian, Zhou Suhong, Yan Xiaopei. A review of the recent researches on China's urbanization and global environmental change. *Progress in Geography*, 2010, 29(8): 952-960. [解利剑, 周素红, 闫小培. 近年来中国城市化与全球环境变化研究述评. *地理科学进展*, 2010, 29(8): 952-960.]
- [4] Li Yangfan, Zhu Xiaodong, Ma Yan. Urbanization, global environmental change and IHDP. *Environment and Sustainable Development*, 2008(6): 42-44. [李杨帆, 朱晓东, 马妍. 城市化和全球环境变化与IHDP. *环境与可持续发展*, 2008(6): 42-44.]
- [5] Sanchez-Rodriguez R, Seto K, Simon D, et al. *Science Plan: Urbanization and Global Environmental Change*. Bonn: International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, 2014.
- [6] Chen Liding, Sun Ranhao, Liu Hailian. Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: Progresses, problems, and perspectives. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1042-1050. [陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050.]
- [7] Schneider A, Mertes C M, Tatem A J, et al. A new urban landscape in East-Southeast Asia, 2000-2010. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(3): 1-14.
- [8] Fang Chuanglin. *Report on China's Urbanization and the Resources and Environment Security*. Beijing: Science Press, 2009. [方创琳. 中国城市化进程及资源环境保障报告. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [9] Li Shuangcheng, Zhao Zhiqiang, Wang Yanglin. Urbanization process and effects of natural resource and environment in China: Research trends and future directions. *Progress in Geography*, 2009, 28(1): 63-70. [李双成, 赵志强, 王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 63-70.]
- [10] Zhou Xiang, Han Ji, Meng Xing, et al. Comprehensive analysis of spatio-temporal dynamic patterns and driving mechanisms of cropland loss in a rapidly urbanizing area. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1191-1202. [周翔, 韩骥, 孟醒, 等. 快速城市化地区耕地流失的时空特征及其驱动机制综合分析: 以江苏省苏锡常地区为例. *资源科学*, 2014, 36(6): 1191-1202.]
- [11] Cui Xuegang, Wang Chengxin, Wang Xueqin. Research on optimizing the new path of metropolises' spatial structure under the fog and haze crisis. *Shanghai Journal of Economics*, 2016(1): 13-21. [崔学刚, 王成新, 王雪芹. 雾霾危机下大都市空间结构优化新路径探究. *上海经济研究*, 2016(1): 13-21.]
- [12] Fang Chuanglin, Song Jitao, Lin Xueqin, et al. *Theory and Practice on the Sustainable Development of China's Urban Agglomeration*. Beijing: Science Press, 2010. [方创琳, 宋吉涛, 蔺雪芹, 等. 中国城市群可持续发展理论与实践. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [13] Wang Chengxin, Cui Xuegang, Wang Xueqin. Analysis of Chinese "urban agglomerations disease" phenomenon under new urbanization background. *Urban Development Studies*, 2014, 21(10): 12-17. [王成新, 崔学刚, 王雪芹. 新型城镇化背景下中国“城市群病”现象探析. *城市发展研究*, 2014, 21(10): 12-17.]
- [14] Wang Chengxin. *Structural Interpretation and Development Transformation: A Comprehensive Analysis on Chinese Urbanization*. Beijing: People's Publishing House, 2017. [王成新. 结构解读与发展转型: 中国城市化综合思辨. 北京: 人民出版社, 2017.]
- [15] Kates R W, Clark W C, Corell R, et al. Environment and development: Sustainability science. *Science*, 2001, 292(5571): 641-642.
- [16] Reid W V, Chen D, Goldfarb L, et al. Earth system science for global sustainability: Grand challenges. *Science*, 2010, 330(6006): 916-917.
- [17] Fang Chuanglin, Zhou Chenghu, Gu Chaolin, et al. Theoretical analysis of interactive coupled effects between urbanization and eco-environment in mega-urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 531-550. [方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 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.]
- [18] Fang Chuanglin, Yang Yumei. Basic laws of the interactive coupling system of urbanization and ecological environment. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1): 1-8. [方创琳, 杨玉梅. 城市化与生态环境交互耦合系统的基本定律. *干旱区地理*, 2006, 29(1): 1-8.]
- [19] Fang C L, Liu H M, Li G D. International progress and evaluation on interactive coupling effects between urbanization and the eco-environment. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(8): 1081-1116.
- [20] Huang Jinchuan, Fang Chuanglin. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment. *Geographical Research*, 2003, 22(2): 211-220. [黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. *地理研究*, 2003, 22(2): 211-220.]
- [21] Liu Yanyan, Wang Shaojian. Coupling coordinative degree and interactive coercing relationship between urbanization



- and eco-environment in Pearl River Delta. *Human Geography*, 2015, 30(3): 64-71. [刘艳艳, 王少剑. 珠三角地区城市化与生态环境的交互胁迫关系及耦合协调度. *人文地理*, 2015, 30(3): 64-71.]
- [22] Sun Huangping, Huang Zhenfang, Xu Dongdong, et al. The spatial characteristics and drive mechanism of coupling relationship between urbanization and eco-environment in the Pan Yangtze River Delta. *Economic Geography*, 2017, 37(2): 163-170. [孙黄平, 黄震方, 徐冬冬, 等. 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. *经济地理*, 2017, 37(2): 163-170.]
- [23] Fu Bojie. Geography: From knowledge, science to decision making support. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 1923-1932. [傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. *地理学报*, 2017, 72(11): 1923-1932.]
- [24] Tang Zhipeng, Zhang Jin, Liu Weidong, et al. A comparative study on the differences of physical process and human process modeling. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(12): 1581-1590. [唐志鹏, 张进, 刘卫东. 自然过程与人文过程模拟之差异比较分析. *地理学报*, 2010, 65(12): 1581-1590.]
- [25] Wu Chuanjun. The core of geographical study: Man-earth areal system. *Economic Geography*, 1991, 11(3): 1-6. [吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统. *经济地理*, 1991, 11(3): 1-6.]
- [26] Lu Dadao, Guo Laixi. Man-earth areal system: The core of geographical study: On the geographical thoughts and academic contributions of Academician Wu Chuanjun. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(2): 3-11. [陆大道, 郭来喜. 地理学的研究核心——人地关系地域系统: 论吴传钧院士的地理学思想与学术贡献. *地理学报*, 1998, 53(2): 3-11.]
- [27] Wu Chuanjun. *Human-Earth Relations and Economic Layout*. Beijing: Xueyuan Press, 2008. [吴传钧. *人地关系与经济布局*. 北京: 学苑出版社, 2008.]
- [28] Fan Jie. Frontier approach of the sustainable process and pattern of human-environment system. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1060-1068. [樊杰. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索. *地理学报*, 2014, 69(8): 1060-1068.]
- [29] Li Xiaoyun, Yang Yu, Liu Yi. Research progress in man-land relationship evolution and its resource-environment base in China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2067-2088. [李小云, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系演进及其资源环境基础研究进展. *地理学报*, 2016, 71(12): 2067-2088.]
- [30] Ma Shijun, Wang Rusong. The social-economic-natural complex ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(1): 1-9. [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.]
- [31] Zheng Defeng, Zang Zheng, Zhang Yu, et al. Comprehensive assessment of regional PRED system based on new urbanization approach: A case study in Dalian. *Progress in Geography*, 2014, 33(3): 364-374. [郑德凤, 臧正, 张雨, 等. 基于新型城镇化视角的区域PRED系统综合评价: 以大连为例. *地理科学进展*, 2014, 33(3): 364-374.]
- [32] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [33] Walker B, Carpenter S R, Anderies J M, et al. Resilience management in social-ecological systems: A working hypothesis for a participatory approach. *Ecology & Society*, 2002, 6(1): 840-842.
- [34] Xie M X, Wang J Y, Chen K. Coordinated development analysis of the "Resources-Environment-Ecology-Economy-Society" complex system in China. *Sustainability*, 2016, 8(6): 582-604.
- [35] Zeng Rong, Wei Yiming, Fan Ying, et al. System analysis of harmonization development among population, resource, environment and economy. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2000(12): 1-6. [曾嵘, 魏一鸣, 范英, 等. 人口、资源、环境与经济协调发展系统分析. *系统工程理论与实践*, 2000(12): 1-6.]
- [36] Liu Xiaoping, Tang Yiming, Zheng Liping. Survey of complex system and complex system simulation. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(23): 6303-6315. [刘小平, 唐益明, 郑利平. 复杂系统与复杂系统仿真研究综述. *系统仿真学报*, 2008, 20(23): 6303-6315.]
- [37] Qian Xuesen, Yu Jingyuan, Dai Ruwei. A new discipline of science: The study of open complex giant system and its methodology. *Chinese Journal of Nature*, 1990(1): 3-10. [钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域: 开放的复杂巨系统及其方法论. *自然杂志*, 1990(1): 3-10.]
- [38] Li Shuangcheng, Wang Yang, Cai Yunlong. The paradigm transformation of geography from the perspective of complexity sciences. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11): 1315-1324. [李双成, 王羊, 蔡运龙. 复杂性科学视角下的地理学研究范式转型. *地理学报*, 2010, 65(11): 1315-1324.]
- [39] Fang Chuanglin. Dissipative structure theory and geography system. *Arid Land Geography*, 1989, 12(3): 53-58. [方创琳. 耗散结构理论与地理系统论. *干旱区地理*, 1989, 12(3): 53-58.]
- [40] Liu Haimeng, Fang Chuanglin, Mao Hanying, et al. Mechanism of oasis urbanization: A theoretical framework based on complexity theory. *Geographical Research*, 2016, 35(2): 242-255. [刘海猛, 方创琳, 毛汉英, 等. 基于复杂性科学的绿洲城镇化演进理论探讨. *地理研究*, 2016, 35(2): 242-255.]

- [41] Liu Haimeng, Shi Peiji, Yang Xuemei, et al. Self-organization evolution simulation and empirical study of human-water system. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 709-718. [刘海猛, 石培基, 杨雪梅, 等. 人水系统的自组织演化模拟与实证. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 709-718.]
- [42] Dong Chunyu. Analyzing the meaning of order parameter and slaving principle for wholism. *Chinese Journal of Systems Science*, 2011, 19(2): 17-21. [董春雨. 试析序参量与役使原理的整体方法论意义. *系统科学学报*, 2011, 19(2): 17-21.]
- [43] Song Changqing, Cheng Changxiu, Shi Peijun. Geography complexity: New connotations of geography in the new era. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1204-1213. [宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵. *地理学报*, 2018, 73(7): 1204-1213.]
- [44] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [45] IGBP. *Reberberation of change. IGBP Science Series*, 2001, 4: 15-18.
- [46] Liu Dongsheng. Global changes sustainability science. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 1-9. [刘东生. 全球变化和可持续发展科学. *地学前缘*, 2002, 9(1): 1-9.]
- [47] Xu Guanhua, Ge Quansheng, Gong Peng, et al. Societal response to challenges of global change and human sustainable development. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(21): 2100-2106. [徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策. *科学通报*, 2013, 58(21): 2100-2106.]
- [48] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [49] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, et al. Coupled human and natural systems. *Ambio*, 2007, 36(8): 639-649.
- [50] Allen T F H, Starr T B. *Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity*. Chicago: University of Chicago Press, 1982.
- [51] Gunderson L H, Holling C S, Gunderson L H, et al. Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems. *Ecological Economics*, 2004, 49(4): 488-491.
- [52] Sta P, Cadenasso M L, Grove J M. Biocomplexity in coupled natural-human systems: A multidimensional framework. *Ecosystems*, 2005, 8(3): 225-232.
- [53] Turner B L, Matson P A, McCarthy J J, et al. Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: Three case studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8080-8085.
- [54] Sven F, Margreth K, Thomas G. Editorial to the special issue on resilience and vulnerability assessments in natural hazard and risk analysis. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 2017, 17(7): 1203-1206.
- [55] *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washinton D.C.: Island Press, 2005.
- [56] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1973, 4(1): 1-23.
- [57] Jabareen Y. *The Risk City Resilience Trajectory*. Berlin: Springer Netherlands, 2015.
- [58] Liu J G, Diamond J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179-1186.
- [59] Lenschow A, Newig J, Challies E. Globalization's limits to the environmental state? Integrating telecoupling into global environmental governance. *Environmental Politics*, 2016, 25(1): 136-159.
- [60] O'Meara M. *Reinventing cities for people and the planet/Worldwatch Paper*. Washington D.C.: Worldwatch Institute, 1999.
- [61] Liu Z, He C, Zhou Y, et al. How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. *Landscape Ecology*, 2014, 29(5): 763-771.
- [62] Liu J G, Daily G C, Ehrlich P R, et al. Effects of household dynamics on resource consumption and biodiversity. *Nature*, 2003, 421(6922): 530-533.
- [63] Arrow K J, Dasgupta P, Mäler K. Evaluating projects and assessing sustainable development in imperfect economies. *Environmental & Resource Economics*, 2003, 26(4): 647-685.
- [64] Entwisle B, Stern P C. *Population, Land Use, and Environment*. Washinton D.C.: National Academies Press, 2005.
- [65] Rignot E, Kanagaratnam P. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet. *Science*, 2006, 311(5763): 986-990.
- [66] Bartlett R V. Protecting the ozone layer: Science and strategy. *Journal of Politics*, 2010, 67(1): 285-286.
- [67] Liu J G, Hull V, Batistella M, et al. Framing sustainability in a telecoupled world. *Ecology & Society*, 2013, 18(2): 344-365.

- [68] Fang Chuanglin, Ren Yufei. Analysis of emergy-based metabolic efficiency and environmental pressure on the local coupling and telecoupling between urbanization and the eco- environment in the Beijing- Tianjin- Hebei urban agglomeration. *Science China Earth Sciences*, 2017, 47(7): 833-846. [方创琳, 任宇飞. 京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合能值代谢效率及环境压力分析. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(7): 833-846.]
- [69] Fang B L, Tan Y, Li C B, et al. Energy sustainability under the framework of telecoupling. *Energy*, 2016, 106: 253-259.
- [70] Sun Yanzhi, Lu Chunxia, Xie Gaodi, et al. Water footprint in Beijing. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2): 524-531. [孙艳芝, 鲁春霞, 谢高地, 等. 北京市水足迹. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 524-531.]
- [71] Zhong Yongguang, Jia Xiaojing, Qian Ying, et al. *System Dynamics*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2013. [钟永光, 贾晓菁, 钱颖, 等. *系统动力学*. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [72] Meadows D H, Meadows D L, Randers J, et al. *The Limits to Growth*. New York: Universe Books, 1972.
- [73] Liu Chengliang, Yan Qi, Luo Jing. System dynamics simulation on the coupling of economy resources environment system in Wuhan Metropolitan Region. *Geographical Research*, 2013, 32(5): 857-869. [刘承良, 颜琪, 罗静. 武汉城市圈经济资源环境耦合的系统动力学模拟. *地理研究*, 2013, 32(5): 857-869.]
- [74] Fang W, An H, Li H, et al. Accessing on the sustainability of urban ecological-economic systems by means of a coupled emergy and system dynamics model: A case study of Beijing. *Energy Policy*, 2017, 100: 326-337.
- [75] Zuo Qiting. The embedded system dynamic model used to human- water system modeling. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(2): 268-274. [左其亭. 人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型. *自然资源学报*, 2007, 22(2): 268-274.]
- [76] Feng Y Y, Chen S Q, Zhang L X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling*, 2013, 252(1755): 44-52.
- [77] Yan Dong, Li Ainong, Nan Xi, et al. The study of urban land scenario simulation in mountain area based on modified Dyna-CLUE Model and SDM: A case study of the upper reaches of Minjiang River. *Journal of Geo- Information Science*, 2016, 18(4): 514-525. [严冬, 李爱农, 南希, 等. 基于 Dyna-CLUE 改进模型和 SD 模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究: 以岷江上游地区为例. *地球信息科学学报*, 2016, 18(4): 514-525.]
- [78] Haykin S S. *Neural Networks and Learning Machines*. Uper Saddle River: Pearson Prentice-Hall, 2009.
- [79] Zhang Lianwen, Guo Haipeng. *Introduction to Bayesian Networks*. Beijing: Science Press, 2006. [张连文, 郭海鹏. *贝叶斯网引论*. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [80] Huang Yingping. Survey on Bayesian network development and application. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(12): 1211-1219. [黄影平. 贝叶斯网络发展及其应用综述. *北京理工大学学报*, 2013, 33(12): 1211-1219.]
- [81] Xu Jianhua. *Geomodeling Methods*. Beijing: Science Press, 2010. [徐建华. *地理建模方法*. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [82] Li Shuohao, Zhang Jun. Review of Bayesian networks structure learning. *Application Research of Computers*, 2015, 32(3): 641-646. [李硕豪, 张军. 贝叶斯网络结构学习综述. *计算机应用研究*, 2015, 32(3): 641-646.]
- [83] Cai M, Yin Y, Xie M. Prediction of hourly air pollutant concentrations near urban arterials using artificial neural network approach. *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, 2009, 14(1): 32-41.
- [84] Froelich W. Forecasting daily urban water semand using Dynamic Gaussian Bayesian Network. *Communications in Computer & Information Science*, 2015, 521: 333-342.
- [85] Balbi S, Villa F, Mojtahed V, et al. A spatial Bayesian network model to assess the benefits of early warning for urban flood risk to people. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2016, 16(6): 1323-1337.
- [86] Deng Xiangzheng, Lin Yingzhi, Huang Heqing. Simulation of land system dynamics: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(10): 2123-2129. [邓祥征, 林英志, 黄河清. 土地系统动态模拟方法研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 2123-2129.]
- [87] Tang Huajun, Wu Wenbin, Yang Peng, et al. Recent progresses of land use and land cover change (LUCC) models. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(4): 456-468. [唐华俊, 吴文斌, 杨鹏, 等. 土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展. *地理学报*, 2009, 64(4): 456-468.]
- [88] Zhao Li, Yang Jun, Li Chuang. System dynamic model for sustainable development of Wuhai City. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 24(12): 55-60. [赵莉, 杨俊, 李闯, 等. 地理元胞自动机模型研究进展. *地理科学*, 2016, 36(8): 1190-1196.]
- [89] Chen H, Liang X Y, Gao H D, et al. A review on multi-agent system for the simulation of land-use and land-cover change. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(2): 345-352.
- [90] Gu Chaolin, Zhang Yue, Zhai Wei, et al. Progress in urban and regional quantitative research. *Progress in Geography*,



- 2016, 35(12): 1433-1446. [顾朝林, 张悦, 翟伟, 等. 城市与区域定量研究进展. 地理科学进展, 2016, 35(12): 1433-1446.]
- [91] Wan L, Zhang Y, Qi S, et al. A study of regional sustainable development based on GIS/RS and SD model: Case of Hadaqi industrial corridor. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 142: 654-662.
- [92] Wang Xingfeng, Wang Yunjia, Li Yongfeng. Analysis and assessment model of environmental cumulative effects based on the integration of SD, CA and GIS methods and its application. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(7): 2078-2086. [王行风, 汪云甲, 李永峰. 基于SD-CA-GIS的环境累积效应时空分析模型及应用. 环境科学学报, 2013, 33(7): 2078-2086.]
- [93] Guerrero C N, Schwarz P, Slinger J H. A recent overview of the integration of system dynamics and agent-based modelling and simulation//*Proceedings of the 34th International Conference of the System Dynamics Society*, 2016.
- [94] Tian Duosong, Fu Bitian, Lv Yongpeng, et al. Effect of regional land-use change on soil organic carbon storage based on SD and CLUE-S model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(4): 613-620. [田多松, 傅碧天, 吕永鹏, 等. 基于SD和CLUE-S模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 613-620.]
- [95] Hu Jian, Sun Jinhua. Early classification warning for regional energy security exogenous sources based on FI-GA-NN model. *Resources Science*, 2017, 39(6): 1048-1058. [胡健, 孙金花. 基于FI-GA-NN融合的区域能源安全外生警源分级预警研究. 资源科学, 2017, 39(6): 1048-1058.]
- [96] Chen Liding, Zhou Weiqi, Han Lijian, et al. Developing key technologies for establishing ecological security patterns at the Beijing-Tianjin-Hebei urban megaregion. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7125-7129. [陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 等. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策. 生态学报, 2016, 36(22): 7125-7129.]
- [97] Roberts B R. Urbanization and the environment in developing countries//*Latin America in Comparative Perspective. Population and Environment: Rethinking the Debate*. Boulder: Westview Press, 1994.
- [98] Liu Yaobin, Li Rendong, Song Xuefeng. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 237-247. [刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. 地理学报, 2005, 60(2): 237-247.]
- [99] Zhang Rongtian, Jiao Huafu. Coupling and coordination between urbanization and ecological environment in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(7): 12-17. [张荣天, 焦华富. 中国省际城镇化与生态环境的耦合协调与优化探讨. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 12-17.]
- [100] Tan Juntao, Zhang Pingyu, Li Jing, et al. Spatial-temporal evolution characteristic of coordination between urbanization and eco-environment in Jilin Province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3827-3834. [谭俊涛, 张平宇, 李静, 等. 吉林省城镇化与生态环境协调发展的时空演变特征. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3827-3834.]
- [101] Hayashi Y, Suparat R, Mackett R, et al. Urbanization, motorization and the environment nexus: An international comparative study of London, Tokyo, Nagoya and Bangkok. *Xenotransplantation*, 1994, 21(3): 254-266.
- [102] Wilby R L, Perry G L W. Climate change, biodiversity and the urban environment: A critical review based on London, UK. *Progress in Physical Geography*, 2006, 30(1): 73-98.
- [103] Zhang Y J, Yi W C, Li B W. The Impact of urbanization on carbon emission: Empirical evidence in Beijing. *Energy Procedia*, 2015, 75: 2963-2968.
- [104] He J, Wang S, Liu Y, et al. Examining the relationship between urbanization and the eco-environment using a coupling analysis: Case study of Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2017, 77(1): 185-193.
- [105] Wang S J, Ma H, Zhao Y B. Exploring the relationship between urbanization and the eco-environment: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei region. *Ecological Indicators*, 2014, 45(5): 171-183.
- [106] Zhao Y, Wang S, Zhou C. Understanding the relation between urbanization and the eco-environment in China's Yangtze River Delta using an improved EKC model and coupling analysis. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 862-875.
- [107] Yuan Xuying, Wu Yijin, Li Xingming. Progress on unity coupling problems of watershed system dynamic model. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(4): 68-72. [袁绪英, 吴宜进, 李星明. 流域系统动力学模型的全耦合问题研究进展. 环境科学与管理, 2012, 37(4): 68-72.]
- [108] Fang Chuanglin, Bao Chao. The coupling model of water-ecology-economy coordinated development and its application in Heihe River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5): 781-790. [方创琳, 鲍超. 黑河流域水—生态—经济发展耦合模型及应用. 地理学报, 2004, 59(5): 781-790.]

- [109] Zhang Jie, Li Tongsheng, Wang Wuke. Quantitative analysis of coupling status of man-land relationship areal system in Weihe River Basin. *Progress in Geography*, 2010, 29(6): 733-739. [张洁, 李同昇, 王武科. 渭河流域人地关系地域系统耦合状态分析. *地理科学进展*, 2010, 29(6): 733-739.]
- [110] Yang Lihua, Tong Lianjun. Dynamic coupling and spatial disparity of economic development and water environmental quality in Songhua River Basin of Jilin Province, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 503-510. [杨丽花, 佟连军. 吉林省松花江流域经济发展与水环境质量的动态耦合及空间格局. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 503-510.]
- [111] Guo Yueting, Xu Jiangang. Coupling coordination measurement of urbanization and eco-environment system in Huaihe River Basin of China based on fuzzy matter element theory. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1244-1252. [郭月婷, 徐建刚. 基于模糊物元的淮河流域城市化与生态环境系统的耦合协调测度. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1244-1252.]
- [112] Du Xianghong, Zhang Tao. The simulation to coupling development between water resource & environment and socio-economic system: Dongting Lake ecological economic zone as an example. *Economic Geography*, 2014, 34(8): 151-155. [杜湘红, 张涛. 水资源环境与社会经济系统耦合建模和仿真测度: 基于洞庭湖流域的研究. *经济地理*, 2014, 34(8): 151-155.]
- [113] Qiao Biao, Fang Chuanglin, Huang Jinchuan. The coupling law and its validation of the interaction between urbanization and eco-environment in arid area. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2183-2190. [乔标, 方创琳, 黄金川. 干旱区城市化与生态环境交互耦合的规律性及其验证. *生态学报*, 2006, 26(7): 2183-2190.]
- [114] Abdurahman Halik, Wahap Halik, Bian Zhengfu. The quantitative analysis of coupling system sustainable development of oasis water resources-ecological environment-economic society. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(4): 26-31. [阿布都热合曼·哈力克, 瓦哈甫·哈力克, 卞正富. 且末绿洲水资源与经济社会耦合系统可持续发展的量化分析. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(4): 26-31.]
- [115] Dong Wen, Yang Yu, Zhang Yufang. Coupling effect and spatio-temporal differentiation between oasis city development and water-land resources. *Resources Science*, 2013, 35(7): 1355-1362. [董雯, 杨宇, 张豫芳. 绿洲城镇发展与水土资源开发的耦合效应及其时空分异. *资源科学*, 2013, 35(7): 1355-1362.]
- [116] Tang Zhiqiang, Cao Jin, Dang Jie. Interaction between urbanization and eco-environment in arid area of Northwest China with constrained water resources: A case of Zhangye City. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 520-531. [唐志强, 曹瑾, 党婕. 水资源约束下西北干旱区生态环境与城市化的响应关系研究: 以张掖市为例. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 520-531.]
- [117] Wang Jing, Wang Kelin, Zhang Mingyang. Temporal-spatial variation in NDVI and drivers in hilly terrain of Southern China. *Resources Science*, 2014, 36(8): 1712-1723. [王静, 王克林, 张明阳, 等. 南方丘陵山地NDVI时空变化及其驱动因子分析. *资源科学*, 2014, 36(8): 1712-1723.]
- [118] Wang Weilin, Ye Liaoyuan, Yang Kun, et al. Ecological risk analysis of land use change on the gentle hillside mountain urbanization construction based on GIS. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 358-362. [王卫林, 叶燎原, 杨昆, 等. 山地城镇化建设背景下的土地利用生态风险分析. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 358-362.]
- [119] Wen Xiaojin, Yang Xinjun, Wang Ziqiao. Assessment on the vulnerability of social-ecological systems in a mountainous city depending on multi-targets adaption. *Geographical Research*, 2016, 35(2): 299-312. [温晓金, 杨新军, 王子乔. 多适应目标下的山地城市社会—生态系统脆弱性评价. *地理研究*, 2016, 35(2): 299-312.]
- [120] Zhang Yin, Yang Qingyuan, Min Jie. An analysis of coupling between the bearing capacity of the ecological environment and the quality of new urbanization in Chongqing. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 817-828. [张引, 杨庆媛, 闵婕. 重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析. *地理学报*, 2016, 71(5): 817-828.]
- [121] Bao Chao. Spatio-temporal coupling relationships among urbanization, economic growth and water use change in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1799-1809. [鲍超. 中国城镇化与经济增长及用水变化的时空耦合关系. *地理学报*, 2014, 69(12): 1799-1809.]
- [122] Varis O, Somlyódy L. Global urbanization and urban water: Can sustainability be afforded? *Water Science & Technology*, 1997, 35(9): 21-32.
- [123] Srinivasan V, Seto K C, Emerson R, et al. The impact of urbanization on water vulnerability: A coupled human-environment system approach for Chennai, India. *Global Environmental Change*, 2013, 23(1): 229-239.
- [124] McDonald R I, Weber K, Padowski J, et al. Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change*, 2014, 27(1): 96-105.
- [125] Zhang Shengwu, Shi Peiji, Wang Zujing. Analysis of coupling between urbanization and water resource and

- environment of inland river basin in arid region: A case study of Shiyang River Basin. *Economic Geography*, 2012, 32(8): 142-148. [张胜武, 石培基, 王祖静. 干旱区内陆河流域城镇化与水资源环境系统耦合分析: 以石羊河流域为例. *经济地理*, 2012, 32(8): 142-148.]
- [126] Antrop M. Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 67(1-4): 9-26.
- [127] Weng Y. Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(4): 341-353.
- [128] Li Zilian. A study on the causes of population urbanization lagging behind land urbanization. *China Population, Resources and Environment*, 2013, 23(11): 94-101. [李子联. 人口城镇化滞后于土地城镇化之谜: 来自中国省际面板数据的解释. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(11): 94-101.]
- [129] Lv Tianguai, Wu Cifang, Li Hongyi, et al. The coordination and its optimization about population and land of urbanization: A case study of Nanchang City. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 239-246. [吕添贵, 吴次芳, 李洪义, 等. 人口城镇化与土地城镇化协调性测度及优化: 以南昌市为例. *地理科学*, 2016, 36(2): 239-246.]
- [130] Li Heping. The philosophical debate in mountainous city planning. *City Planning Review*, 1998(3): 52-53. [李和平. 山地城市规划的哲学思辨. *城市规划*, 1998(3): 52-53.]
- [131] Zhang Lei, Wu Bingfang, Yuan Chao, et al. Urban development and environment change before and after Three Gorges Project construction in Three Gorges Reservoir Area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(3): 317-324. [张磊, 吴炳方, 袁超, 等. 三峡工程建设前后库区城镇发展与环境变化. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(3): 317-324.]
- [132] Cao Ke, Xiao Jing. Road system planning based on topographic analysis: Case studies of mountainous cities in southwest China. *Mountain Research*, 2013, 31(4): 473-481. [曹珂, 肖竞. 契合地貌特征的山地城镇道路规划: 以西南山地典型城镇为例. *山地学报*, 2013, 31(4): 473-481.]
- [133] Han Xiao, Zhang Nan. Analysis on coupling coordination degree between urbanization and geo-hazards in China based on TOPSIS. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 167-171. [韩笑, 张楠. 基于TOPSIS的我国城镇化与地质灾害耦合协调度分析. *水文地质工程地质*, 2017, 44(2): 167-171.]
- [134] Liu Kai, Ren Jianlan, Zhang Lijuan, et al. Urbanization's resource environmental bearing capacity response from man-land relationship perspective: Take Shandong Province as an example. *Economic Geography*, 2016, 36(9): 77-84. [刘凯, 任建兰, 张理娟, 等. 人地关系视角下城镇化的资源环境承载力响应: 以山东省为例. *经济地理*, 2016, 36(9): 77-84.]
- [135] Chi Yuan, Shi Honghua, Sun Jingkuan, et al. Evaluation on island resources and environment carrying capacity under the background of urbanization. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1374-1384. [池源, 石洪华, 孙景宽, 等. 城镇化背景下海岛资源环境承载力评估. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1374-1384.]
- [136] Eakin H, Defries R, Kerr S, et al. Significance of Telecoupling for Exploration of Land-Use Change. Cambridge: MIT Press, 2014.
- [137] Deines J M, Liu X, Liu J. Telecoupling in urban water systems: An examination of Beijing's imported water supply. *Water International*, 2016, 41(2): 251-270.
- [138] Lenschow A, Newig J, Challies E. Globalization's limits to the environmental state? Integrating telecoupling into global environmental governance. *Environmental Politics*, 2016, 25(1): 136-159.
- [139] Quan Y, Wang C, Yan Y, et al. Impact of inter-basin water transfer projects on regional ecological security from a telecoupling perspective. *Sustainability*, 2016, 8(2): 162-173.
- [140] Hulina J, Bocetti C, Ili H C, et al. Telecoupling framework for research on migratory species in the Anthropocene. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2017, 5: 5-27.
- [141] Li Lin, Liu Ying. The driving forces of regional economic synergistic development in China: Empirical study by stages based on Haken model. *Geographical Research*, 2014, 33(9): 1603-1616. [李琳, 刘莹. 中国区域经济协同发展的驱动因素: 基于哈肯模型的分阶段实证研究. *地理研究*, 2014, 33(9): 1603-1616.]
- [142] Bo Wenguang, Chen Fei. The coordinated development among Beijing, Tianjin and Hebei: Challenges and predicaments. *Nankai Journal (Philosophy, Literature and Social Science Edition)*, 2015(1): 110-118. [薄文广, 陈飞. 京津冀协同发展: 挑战与困境. *南开学报(哲学社会科学版)*, 2015(1): 110-118.]
- [143] Fang Chuanglin. Theoretical foundation and patterns of coordinated development of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Progress in Geography*, 2017, 36(1): 15-24. [方创琳. 京津冀城市群协同发展的理论基础与规律性分析. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 15-24.]



# Dynamic simulation of urbanization and eco-environment coupling:

## A review on theory, methods and applications

CUI Xuegang<sup>1,2</sup>, FANG Chuanglin<sup>1,2</sup>, LIU Haimeng<sup>1</sup>, LIU Xiaofei<sup>1,2</sup>, LI Yonghong<sup>3</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Water Ecology, Beijing Orient Landscape & Environment Co., Ltd., Beijing 100015, China)

**Abstract:** At present, urbanization and eco-environment coupling has become a research hotspot. Owing to the complexity of the coupling mechanism, as well as the limitation of mathematical statistics methods, the process simulation of urbanization and eco-environment coupling needs to be strengthened. Based on the systems science and cross-scale coupling theory, we can define the coupled urbanization and eco-environment system as a nonlinear open system with multiple feedbacks. Based on the above analysis, the progress of dynamic simulation for urbanization and eco-environment coupling is reviewed. (1) As dynamic simulation has become a trend, the relevant analysis of theory and mechanism is being improved. (2) Dynamic simulation technologies have shown a trend of diversified, refined, intelligent and integrated pattern. (3) The simulation application mainly focuses on three aspects, including multiple-case regions, multiple elements, local coupling and telecoupling, and regional synergy. In addition, we found some shortcomings. (1) The development and integration of basic theories are insufficient. (2) The method integration and data sharing is lagging. (3) The coupling relational chains and dynamic characteristics of the main control elements are not fully revealed. Besides, telecoupling simulation is not quantified and systematically integrated, and could not be effectively applied to spatial synergy. In future, we should promote the intersection of research networks, technology integration and data sharing, and then uncover the evolution process of coupling relational chains and the main control elements in urban agglomerations. Finally, we should build decision-making support systems for regional sustainable urbanization.

**Keywords:** urbanization and eco-environment coupling; dynamic simulation; theory; methods; applications