

城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展

任宇飞^{1,2}, 方创琳^{1,2}, 李广东¹, 孙思奥¹, 鲍超¹, 刘若文^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究是国际人地系统研究的前沿和热点领域, 对于如何协调中国城镇化与生态环境的关系问题也具有重要的参考价值。本文紧扣城镇化与生态环境近远程耦合关系研究主题, 在对国际研究进行梳理的基础上, 集中从城镇化与生态环境近远程耦合关系理论、方法以及关键应用领域三个方面, 对城镇化与生态环境近远程耦合关系研究国际前沿与进展进行评述。分析发现, 国际上近远程耦合概念提出时间不长, 其理论的完备性与系统性尚显薄弱, 对实证研究统领性指导还略显不足。而从其他研究视角出发, 国际上对互为远端的人地系统间关联现象进行了大量研究, 实证内容充足, 内涵丰富。展望未来, 关注城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合关系、挖掘城镇化与生态环境近远程耦合主导路径与动态演变特征、加强中国城镇化与生态环境近远程耦合理论研究, 是推动中国城镇化与生态环境耦合研究迈向新的发展阶段的重要方向。

关键词: 城镇化; 生态环境; 近远程耦合; 城市群地区; 进展

DOI: 10.11821/dlxb202003011

1 引言

城镇化与生态环境耦合是以陆地表层人类活动与生态环境系统为研究对象, 揭示城镇化过程与生态环境系统交互胁迫效应的科学理论与研究范式, 也是新时期中国地理学人地关系系列研究的重要组成部分^[1-3]。进入“人类世”(Anthropocene)以来, 经济全球化和科技日益革新促使资本流、资源流、人口流和信息流具有多层次、多尺度的流动特征, 使得城镇化与生态环境系统存在着跨越空间距离的网络结构并产生了新的演进特征^[4-5]。本地(Local)生态环境系统将因此受到流动要素引发的远端响应效应, 该过程进一步加剧了城镇化与生态环境系统的脆弱性^[6]。在此背景下, 孤立地以国家、地区、城市空间尺度作为研究对象, 将难以适应信息和物质快速跨层级、跨时空流动背景下人类活动与生态环境交互耦合研究的理论诉求与现实需要。为此, 诸多研究者在研究中连续提到, 世界上任意区域人地系统的可持续发展问题将越来越直接或间接的依赖其他地区, 今后的人类活动与生态环境可持续发展研究中必须加入全新的“多区域联系尺度”(Interregional Scale)来描述和归纳区域间人地系统动态互动关联的新现象^[7-10]。因此, 对

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2019-11-10

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41590840, 41590842) [Foundation: Major Program of the National Natural Science Foundation of China, No.41590840, No.41590842]

作者简介: 任宇飞(1990-), 男, 甘肃兰州人, 博士生, 中国地理学会会员(S110012498M), 研究方向为城市群地区城镇化的资源环境效应。E-mail: renyuf@126.com

通讯作者: 方创琳(1966-), 男, 甘肃庆阳人, 研究员, 中国地理学会会员(S110001715M), 研究方向为城市地理、城市群发展与城镇化的资源环境效应等。E-mail: fangcl@igsrr.ac.cn

于城镇化与生态环境耦合关系,可根据研究对象的人为划分边界(行政区划、人文地理区划等),或根据自然区划(气候、流域等)边界为系统内外区分,不仅表现为单一系统内部城镇化与生态环境各要素之间的交互胁迫关系(近程耦合关系),还表现为系统与外部系统内部城镇化与生态环境要素之间的交互胁迫关系(远程耦合关系),则城市群系统城镇化与生态环境内外部各要素之间的耦合关系理论上可称其为近远程耦合关系^[11]。

目前,尽管国内外对城镇化与生态环境系统在要素流跨越物理空间影响下的交互胁迫关系研究仍处于起步阶段,但近年来在 *Science* 和 *PNAS* 等国际顶级期刊上发表的相关文章表明^[9, 12-13],考虑跨越空间距离摩擦下要素对人地系统影响的近远程交互胁迫研究是国际人地系统研究的前沿和热点领域。国际新进展对于认识城镇化与生态环境近远程耦合关系,协调中国城镇化与生态环境的发展具有重要的参考价值。因此,本文以梳理与总结城镇化与生态环境近远程耦合领域相关理论为出发点,列举并分析了具有代表性的概念、内涵及特征,归纳了相关研究框架;对解决城镇化与生态环境近远程耦合问题的定性方法与定量模型进行了详解与梳理,对其原理和应用进行了归纳与总结;对城镇化与生态环境近远程耦合主要应用领域的研究思路与一般范式进行了总结。

2 城镇化与生态环境近远程耦合关系理论进展

2.1 城镇化与生态环境近远程关联理论

“远程关联”(Teleconnection)术语发轫于气候科学,用于描述气候异常现象(Climatic Anomalies),指气候在较远地理空间距离上仍然存在一定相关性的现象^[14]。随着全球化和信息化的不断深入,西方学界普遍认同不能简单地对地方(Place)采取孤立和固定的地理区位视角进行研究,需要探讨和发展具有多层次、跨距离、复杂网络特征的多地理区位综合研究视角和方法,以此反映区域间信息和物质流交换引起的城市社会经济与生态环境问题,并揭示复杂性与动态性^[15-16]。部分学者在研究中引用气候科学中常用的“远程关联”概念,以描述和捕捉系统外部要素驱动下形成的高度复杂性和不确定性的系统间关联机理,进而立足和结合空间尺度特性,建立了包含3个空间尺度层次(区域、国家、全球)的远程关联分析框架,对不同尺度的多要素间要素流关联方式和正负反馈效应进行定性分析^[17]。在这样的科学思想引导下,诸多学者从不同学科视角与研究领域出发,采用隐喻方法从人地系统脆弱性、土地利用变化、经济全球化三个重点领域各有侧重的建立了针对性强、目标导向明确的远程关联理论框架。

从系统脆弱性视角出发,全球人口、食品、能源等要素在全球经济市场下具有的跨区域供需关系是城镇化与生态环境近远程关联的基础^[9, 18],是重塑人类社会与生态环境系统的驱动力,进而使得人类社会与生态环境系统在要素的远程流动下构建成为复杂嵌套网络^[6]。该理论认为基于地方特性的单一视角无法完整的和综合的探讨人地系统的脆弱性特征,尤其是生态环境的脆弱性与全球经济市场的变化与冲击密不可分的现实背景下,亟需通过运用综合集成分析手段和判识行为主体的方式去寻找全球化背景下要素远程作用导致的生态环境问题的解决方案^[19]。对于土地利用变化领域的远程关联,通常考虑在城镇化的驱动和响应作用下,远端与本地的人口、商品和服务流动导致本地土地利用发生变化的过程,Seto等通过归纳和演绎的方法构建了基于远程关联的城市用地变化分析框架(Urban Land Teleconnection, ULT)^[9],提出不同区位(Location)的城镇化进程将对其他地域单元的土地利用变化产生远端驱动效应,基于空间辩证逻辑,该过程被分为四类远程关联类型:即多个城镇化地区将对远端单个场所(Site)土地利用产生影响;单

个场所将对多个远端场所的土地利用产生影响；单个场所的城镇化过程将对一个或多个远端场所或城市边缘地区的土地利用造成影响；多个场所发生的城镇化过程对多个远端场所或邻近场所的土地利用造成影响（图1）。

经济全球化对人地系统的正负向反馈与影响是众多学者争论的对象，直接关系到远程关联的定义与内涵解析。现有研究视角从系统分析方法、复杂人地网络演化、系统脆弱与适应性以及多时空尺度耦合角度出发，强调经济全球化对区间远程关联作用的重要性和独特性，探索了区域间尺度上人地系统远程关联的定义与内涵，揭示了经济全球化引发的可持续发展挑战^[20]。与学术圈对全球贸易作用过度解读的偏激观念相反，2015年Moser等提出社会化远程关联（Societal Teleconnections）研究框架，首先其批判了前期学者在该领域的研究，提出全球化只是远程关联研究问题产生和激发的过程，而不是区域间产生远程互动效应的唯一解释，认为远程关联研究应该将研究重点放在研究对象和其结构与功能本身，不能简单强调全球化背景下远程关联现象对人地系统造成的胁迫交互作用，并且应尽量使问题化繁为简，因此其提出了基于过程—构造—介质的理论分析框架^[21]（图2）。

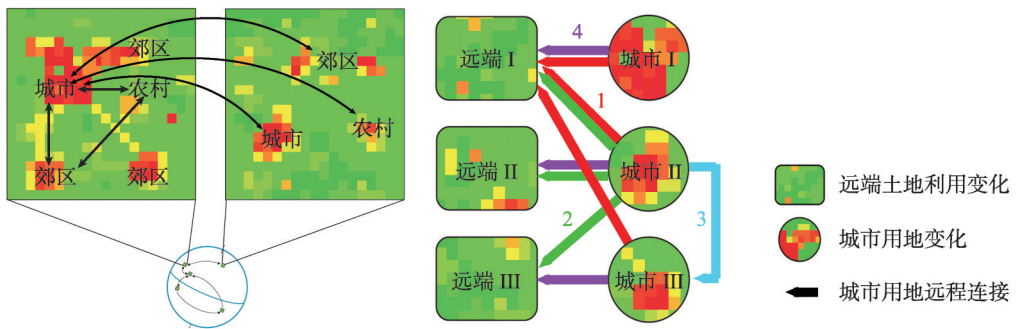


图1 基于远程关联的城市用地变化分析框架示意图(根据文献[9]转绘)

Fig. 1 Framework of urban land teleconnections

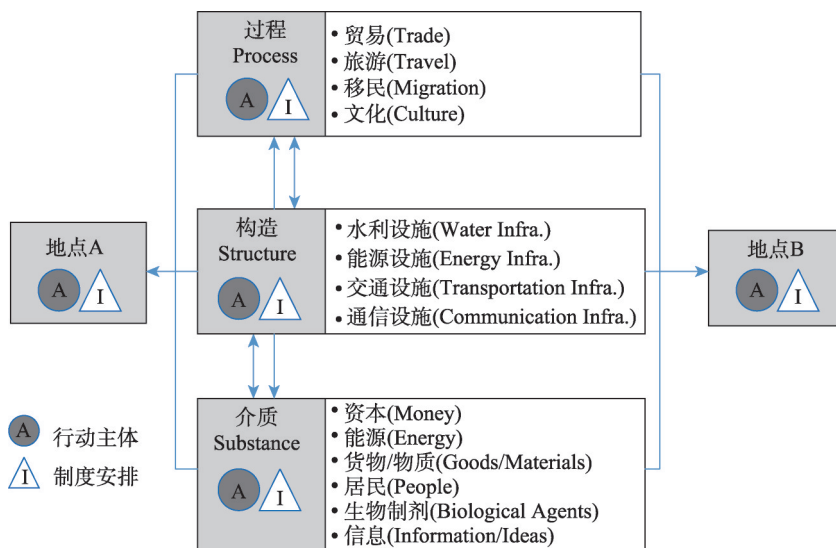


图2 地点间社会化远程关联结构组成示意图(根据文献[20]转绘)

Fig. 2 Key components of a societal teleconnection between two locations

2.2 城镇化与生态环境近远程耦合理论

区别于远程关联视角单一性、研究方法缺乏集成性以及对于可持续发展指导与借鉴作用的局限性。2013年, Liu^[22]启发性的提出了远程耦合(Telecoupling)概念及研究框架。相比远程连接理论更多关注人类土地利用变化、经济全球化进程带来的景观格局或社会经济的正负效应, 该理论更加针对人类活动的整体性, 尤其涵盖城镇化蕴含的诸多领域, 如土地变化、能源消费、经济发展的环境效应等方面, 是传统人地耦合关系研究在理论和方法上的逻辑拓展和深化。进一步拓展远程要素所致系统间影响的内涵与外延, 并且着重强调了定性定量综合集成方法的重要应用价值, 具有更高的复杂性特征。其提出的远程耦合研究框架包含5个基本组成部分, 即系统、流、中介、原因和效应, 分别对应未来远程耦合需研究的问题, 这些问题主要关系到识别远程耦合系统的主控因素、厘清交互胁迫机理及明确动态演变过程(表1)。

Liu所提出的远程耦合系统为复杂的层次型结构, 从宏观的系统尺度来说, 每一个远程耦合系统都包括三个组成部分(代理、结果、影响); 从微观的组成尺度来说, 每一个组件包含不同维度的多种人文和自然要素。上述系统和组件之间通过跨地区间信息与物质流的交换以及本地作用产生互馈式的社会及生态胁迫效应, 当其趋于饱和时会产生溢出效应, 继续对其他区域的社会—生态环境系统造成胁迫效应。Liu^[23]在提出的远程耦合基础上进一步对其进行了发展和完善, 提出了基于研究对象不同空间距离的邻近耦合(Peri-coupling)和内部(近程)耦合(Intra-coupling), 并将其和远程耦合统称为元耦合(Meta-coupling), 在此框架中, 3种耦合方式具有相同的内涵, 均强调要素流主导下跨越空间距离的人地系统交互胁迫效应, 但由于两个及以上的研究对象间相对空间距离所隐含作用机制的差异性, 其三者定义有所不同。

表1 远程耦合研究框架内容及未来研究方向(资料来源: 文献[21])

Tab. 1 Summary of five major components of tele-coupling framework and example questions for further research on tele-coupling and sustainability

组件名称	包含内容	未来亟待解决问题
系统(Systems)	发送系统(Sending) 接受系统(Receiving) 溢出系统(Spillover)	远程耦合中的发送、接受、溢出系统的性质和演变原因是什么? 系统的空间关系是怎样影响到发送、接受或溢出系统的功能定位和远程耦合作用的?
流(Flows)	物质流或能量流(Material/Energy) 信息流(Information) ...	远程耦合要素流是怎样在空间和时间上演变的? 远程耦合要素流是怎样影响两个系统的? 不同的远程要素流间的相似与差别?
中介(Agents)	政府(Governments) 劳工(Labors) 公司(Companies) ...	中介是怎样在空间和时间上变化的? 中介是如何影响两个系统? 中介为了回应远程耦合效应和动态变化将做出怎样的改变? 中介间的社会网络是怎样构成的, 他们又是如何维持的?
原因(Causes)	经济原因(Economic) 政治原因(Political) 技术原因(Technological) 环境原因(Environmental) 文化原因(Cultural) ...	影响远程耦合动态变化和系统胁迫作用强度的主控因素是哪些? 影响远程耦合形式的多种因素中相对来说哪个更重要? 这些因素是怎样随着时间影响和变化的?
效应(Effects)	环境效应(Environmental) 社会经济效应(Socioeconomic) ...	远程耦合作用是怎样从本地至全球层面实现社会经济和环境可持续发展的? 对于可持续发展问题, 远程耦合和近程耦合哪一个更重要? 时间对于过程的滞后性和后续效应是怎样的? 三系统间的相互反馈作用是怎样的? 远程耦合效应是怎样改变远程耦合系统的弹性和脆弱性的?

2014年, Eakin在远程连接理论框架基础上, 从土地利用转型角度提出了远程耦合研究框架, 其主张本地土地系统越来越受到远端其他地区人类活动和生态环境演替的影响, 认为两个具有一定空间距离的人地系统间的反馈作用将在两个系统内部产生新的发展策略和管制模式, 未来经济全球化和城镇化过程将进一步推动远程耦合现象的发展^[24]。该理论框架与土地远程连接框架具有内涵的一致性, 均致力于描述具有空间距离的两个社会—经济系统(简称系统)在特定行动主体的管治和制度安排范围内, 通过贸易和外来知识与技术转化等多种方式作用而产生的远程交互胁迫作用。其从土地远程耦合驱动因素、流要素特征、要素流胁迫效应等方面进一步阐述和完善了土地远程耦合的关联特征。该理论核心在于, 系统A与系统B土地系统产生远程关联的诱因内生于本地新技术、新信息和新政策等要素的动态演变; 系统间构成的行动网络外生于具有多样性特征的要素流动, 并且在内容上区别以往远程关联理论着重探讨经济要素流, 包括非经济要素(人口迁移、生物入侵等)、环境要素(沙尘、火灾、富营养物、碳等要素的空间传播)和虚拟要素流(信息、知识、灵感和技术); 各类要素流在传播方式上也表现出相应的多样性、复杂性、和综合性, 例如人口通过社会网络联系、移民等方式, 环境要素流通过生物圈、水文圈、大气圈循环过程, 金融要素通过跨国银行网络和金融机构网络搭建系统间远程联系桥梁, 并且各类要素流传播过程具有并发性和胁迫叠加性特征; 系统内部的政策与管治理念在要素流动网络中扮演着重要作用, 其特性将决定系统间要素流的传导模式与动态连通性(要素胁迫性质嬗变、累积效应以及通过性等); 进一步明确远程耦合胁迫负面效应, 一方面来源于生态环境方面, 例如碳排放变化、生态用地减少、生物多样性衰退; 另一方面来自于社会层面, 例如居民生活成本不断上升、城市宜居度下降、劳动力加速外迁等。此外, 其还着重强调了土地利用转型主要关注该过程在不同空间尺度上引发的土地系统可持续发展问题, 例如土地利用转型机制与不同系统间正负反馈的耦合关系(图3)。

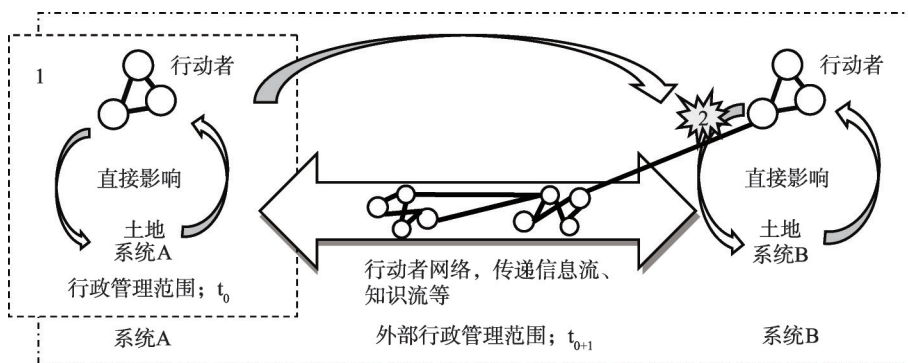
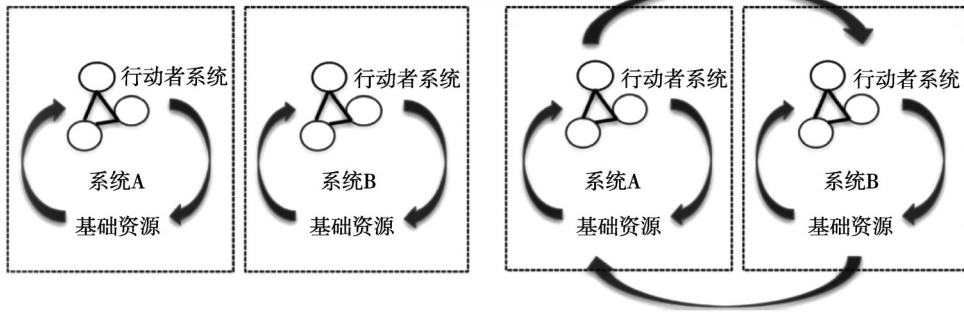


图3 土地利用远程耦合概念框架图(根据文献[23]转绘)

Fig. 3 A schematic representation of telecoupling between two systems

2017年Eakin等进一步完善了其提出远程耦合框架, 从要素的空间辩证关系上识别和提出普遍意义上互为远端的系统间存在的4种不同的远程耦合模式, 该模式在不同的历史时期具有不同的表现形式, 还具有显著的动态变化和边界模糊特征^[25]: ①图4a表达了具有空间距离的两个系统在经济社会和生态环境的功能与结构上彼此独立, 各自与系统边界内的资源产生交互胁迫作用, 产生该作用的驱动主体为各自系统的社会、文化、政治和制度安排等; ②图4b表达了具有空间距离的两个系统在经济社会和生态环境的功能与结构上通过贸易网络等产生联系, 产生该作用的驱动主体是基于比较优势的自然禀

- a. 具有空间距离的系统, 其之间没有社会和制度联系
- b. 具有空间距离的系统, 其之间有一定的社会和制度联系



- c. 共享基础资源的系统, 其之间没有社会和制度联系
- d. 共享基础资源和社会结构的系统, 但存在不同的制度

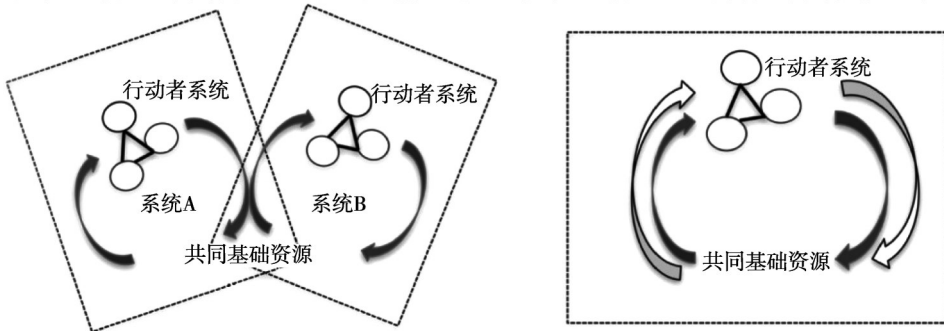


图4 Eakin近远程耦合关系概念框架图(根据文献[24]转绘)

Fig. 4 Typology of possible initial conditions in telecoupled interactions

赋和经济社会发展需求；③图4c和4d表达了具有空间距离的两个系统在资源要素和整体上具有重叠关系，各自系统尽管在社会、文化、政治和制度安排等方面具有较强的独立性，但是在资源利用上具有竞争关系。实际上，图4c和4d是由于远程耦合分析中系统边界具有模糊性的特征而反映出的空间辩证分析结果。

2.3 城镇化与生态环境多要素近远程关联理论

要素关联 (Nexus) 分析是人地系统可持续发展研究探索的最前沿领域，也是近年来国际重要科学机构和科学团体研究的热点区^[12, 26]。进入“人类世”后，人类发展正在遇见前所未有的气候变化挑战为研究导向^[27]，以响应和满足联合国《2030年可持续发展议程》(SDGs) 等为全球层面提出的各类科学计划和相关科学问题研究目标，以要素为基本研究对象，立足要素流动的时空压缩特征，着重从食品、能源和水资源等主控因素出发，为人类可持续发展提出解决方案^[28]。“Nexus”概念最早发轫于1983年的自然资源科学的食品—能源关联 (Food-Energy Nexus) 科学研究计划，该项目试图通过处理和解决具有显著差异的多元实体间的联系作用的方法，解决全球粮食和能源危机^[29]。因此，多要素近远程关联理论研究在食品、水资源、能源要素等领域得到了广泛的应用^[30-31]。从目前研究内容来看，要素间关联由简单到复杂角度可分为双要素关联^[32]、三要素关联^[33]和多要素关联^[34]，从要素性质角度可分为自然—自然要素关联、自然—社会经济要素关联以及社会—社会要素关联。总体来看，水资源、食品、能源始终是该领域研究重点关注对象，社会经济—自然要素跨界复杂式关联则是未来国际上的研究热点。

相比远程关联与远程耦合理论，该理论透过要素在生产、流通、消费环节中的关联作用（如电力生产过程中需要消耗水资源、能源开采过程中需要消耗水资源）拓宽了人

地系统远程耦合的研究视角,为追求系统性、全面性的远程耦合研究范式提供新思路。区别于远程关联与远程耦合,远程关联以要素间关系为研究重点,揭示了要素间协同与共惠效应为目的。尤其对于城市而言,资源要素的高效利用往往因协同与共惠性伴随着关联要素利用率的提高,其通过要素转移方式,对远端城市的资源利用效率产生提升效应,反之亦然。从要素流的空间转移出发,可以深度挖掘该过程隐含着的生态环境负面效应,尤其关注地区间贸易所带来的资源分配不公平问题和要素关联特性可能引起的附着式负面效应,例如为了减少全球碳排放量,部分国家和地区推行了生物能源替代化石燃料革新,尽管该举动达到了人们预期的减排效果,但是由于生物能源生产中的高耗水特性,导致生物能源产地出现水资源短缺现象^[35]。因此,通过要素关联视角,决策者和科研人员可以清晰在政策制定前发现要素间互动关系,通过统筹的通盘考虑,避免城镇化对生态环境的负面胁迫影响。该理论在增强决策者在规划、政策制定与管治中的全局视野方面具有优势,因其可以进一步阐述与明确要素关系主导下人类经济活动与不同尺度对象间在信息与物质交互过程中所产生的正负效应,尤其是部门间、国家间的互动效应,为建设高度弹性和可持续性的城镇化与生态环境系统提供科学依据与理论支撑。

3 近远程耦合关系研究方法进展评述

3.1 地方时空特性的城镇化与生态环境近远程耦合定性分析方法

该定性分析方法从西方人类学、政治生态学、传统人文地理学视角出发,通过研究者实地调研获得的一手经验和知识,从本地政治、文化和环境影响等语境化(Progressive Contextualization)角度还原和叙述研究对象的全部变动过程,回答问题如何发生、包含哪些对象、详细演变过程等,强调确定并追溯行动者(Actors)在系统间形成的交互胁迫网络中的功能与作用。该方法在实证研究中可根据实地观测需要,灵活设置系统边界和精准定义时空尺度^[36-38],同时具备捕捉和评价远程耦合过程中折射出的环境退化以及地缘政治争论等难以定量分析问题的优势。目前,该方法已广泛的用于土地利用领域研究中:如Baird等采用访谈调查法为土地利用问题提供了重要的启发性探索,其透过政治生态学视角,调查研究了老挝和柬埔寨大尺度空间下土地利用远程耦合关系,建立了从地方到全球尺度将土地利用和森林覆被变化与政治经济动态交互结合的研究分析思路,为深化远程耦合研究,明确物质流及其影响路径提供了定性分析方法^[39];Friis等立足远程耦合理论,通过研究者感性观测、半结构化访谈、家庭入户调查和焦点群体讨论等访谈方法构建了基于地方(Place-based)和过程导向(Process-oriented)的远程耦合定性分析框架,深入探究了村镇尺度下老挝北部城镇化地区香蕉种植用地与不同距离外各类土地远程耦合过程引发的土地利用转型问题,该项研究识别出了不同时空尺度上的四类物质要素流在直接和间接作用下产生的远程耦合模式以及正负反馈机制^[38]。

3.2 基于区域间投入产出模型的城镇化与生态环境近远程耦合分析方法

区域间投入产出模型(Multi-regional Input-output Model, MRIO)是利用商品和劳务流动,将区域投入产出模型根据贸易系数连接而成的多区域投入产出模型^[40]。与地区投入产出模型相比,区域间投入产出模型在反映区域内部各产业之间的经济关联基础上,系统全面地刻画出不同区域、不同产业之间的经济联系^[41]。基于区域间投入产出模型的近远程耦合分析模型通常利用竞争型区域间投入产出模型,首先追踪区域间分行业经济要素转移总量,然后通过计算研究对象分区域分行业水资源、能源、食品消耗系数,把某行业转入经济总量乘以转入区该产业要素消耗系数,即可获得该行业转移所带来的要

素转移,最后将所有行业要素消耗转移量加总,即可获得某区域产业转移带来的相应区域要素消耗量的转移^[42-45]。然而由于统计条件限制,区域间投入产出模型多运用于省际或国家尺度,对于推动研究尺度的精细化有所不足。该方法已广泛应用于虚拟水贸易、能源、碳排放、土地、粮食贸易、污染物转移、PM_{2.5}等要素跨区域的近远程耦合研究中,研究尺度通常为国家或省际(区域)尺度^[46-49]。如Ali利用世界投入产出数据库(WIOD)覆盖35个部门和41个国家的数据,运用区域间投入产出模型评估了1995—2009年全球碳、水和土地足迹的带来的远程环境压力,并比较了欧盟、经合组织、金砖组织国家和全球其他地区的远程碳足迹分析结果,结果表明在整个研究期间,欧盟和经合组织区域的碳排放、土地利用和水利用均以远端消费方式为主导,对于金砖四国和世界其他地区,碳排放、土地和水利用则以本地(近程)生产方式为主导^[50]。

3.3 基于空间计量模型的城镇化与生态环境近远程耦合分析方法

根据Tobler提出事物之间必将存在关联,而空间距离越近的事物其属性值之间相关性越大^[51]。近年来,基于面板数据的空间计量模型的设定和估计方法逐步成熟和明确,因为其能依靠理论并结合实际情况,通过设置不同类型空间权重矩阵(Spatial Weight Matrix)的方式,探索和验证各类变量在不同空间尺度与层级上表现出的跨区“溢出”效应。因此,空间面板模型被越来越多地用于分析空间和区域经济与生态环境近远程作用问题。该领域主要运用到模型有:①Anselin等提出观测个体之间在空间上存在相互影响的关联效应时,空间面板模型中应包含空间滞后变量(Spatial Lagged Dependent Variable)或令误差项服从空间自回归(Spatial Autoregressive)^[52]。上述第一个模型被称为空间滞后模型(Spatial Auto Regression Model, SAR),后者则被称为空间误差模型(Spatial Error Model, SEM)。②Lesage等构建了适用性更加广泛的空间面板模型,即空间Durbin模型(Spatial Durbin Model, SDM),包含空间滞后的内生变量和外生变量^[53]。③Pace等提出的包含空间滞后变量的概率单位模型(Spatial Lagged Probit Model, SAR Probit)以及误差项服从空间自回的空间误差概率单位模型(Spatial Error Probit Model, SEM Probit)^[54]。

基于空间计量模型近远程耦合分析方法广泛应用于多个空间尺度,包括县域单元、地级市单元及省际单元,所研究的要素包括水资源、土地扩展、空气污染等,如Li等人运用空间概率单位模型,基于经济地理分区,验证了中国城市用地扩张的驱动因素,结果表明社会经济、自然禀赋、交通可达性、区位条件等因素是影响空间扩张的主要因素,同时也验证了研究对象之间存在要素的远程溢出效应^[55];Liu等运用空间自相关分析和三种空间计量模型,分析了中国289个地级市空气质量指数(AQI)的时空分异特征,对自然与人文影响因素贡献及其空间溢出效应进行系统地甄别和量化,结果表明植被覆盖度与汽车密度具有显著的远程溢出效应,将对邻域单元的空气质量产生影响^[56]。

3.4 基于代谢分析的城镇化与生态环境近远程耦合分析方法

代谢的概念源于生物学中对于单个有机体及生态学中对于生态环境系统的研究,是生物体与外界环境间物质和能量的交换以及生物体内物质与能量一切物理化学过程的总和^[57-58]。研究者通过对比城市与生物有机体,将代谢的概念引入到城市研究中,认为城市不断从外界获取物质与资源,从而维持自身的经济社会运行。经历50年发展,城市代谢研究已分化为2个主要方向,即能值分析法(Emergy Analysis, EA)和物质流分析法(Material Flow Analysis, MFA)。Odum于20世纪80年代提出能值分析法,核心内容是将物质能量用单位太阳能表示,通过以单位能值为基准,可以测度资源、产品、资本和服务贸易(以下简称服贸)形成所需间接或直接利用的太阳能,从而解释代谢流的流动和

贮存的过程,同时还避免了在代谢分析中由于要素量纲造成的不可比缺陷^[59]。物质流分析法对资源、产品、资本和服贸的核算方式与能值法有较大区别,一般从实物质量出发,主要解释单位质量(通常为吨)的城市资源、物质以及能量从原始物质转变为城市所需商品与排泄废物的流动特征以及转化效率^[60-61]。

这两种方法都是城市代谢理念的具体实现,以描述城市—生态交互系统间物质和能量的转换过程为主要目的,但由于物质固有的物理属性差异,导致物质流分析法很难集成研究不同类别物质间的转化过程。对于城镇化与生态环境系统,物质流分析法对于以经济、社会、人口等要素流动为主的城市代谢现象的解释能力相对薄弱。相比而言,能值分析法通过将系统的能量流、物质流、货币流、人口流和信息流等转换成统一量纲的能值后,利用既定公式进行测度与分析,综合评价系统代谢结构、功能特征和生态经济效益。

3.5 基于城市生态网络模型的城镇化与生态环境近远程耦合分析方法

2002年Bodini等将生态网络分析(Ecological Network Analysis)引入城市—生态环境系统研究后,引起了广泛的关注与探讨,突出研究对象的空间层次性和异质性是该领域当下研究的重点^[62]。该模型深入城市—生态环境系统构成网络的节点内部,从多系统、多节点间物质与能量的流动层面入手,为识别城市内部功能差异性所带来的生态环境影响提供了测度手段。基于复杂系统学分析范式,该模型将复杂的城镇化与生态环境系统表示为由节点和边(表征节点之间物质、能量、信息传输)所构成的复杂关系网络,主要关注系统组成要素间介质的流动方向和强度。该模型主要运用投入产出分析,一般通过对数据进行矩阵计算,研究城镇化与生态环境系统的结构、功能以及发展与演变规律^[63-64]。针对城镇化与生态环境系统近远程耦合研究,该方法对系统与外部系统内组分间影响作用进行量化,获得系统间的直接与间接联系,还能通过设置不同情景与仿真模拟的方法,定量分析系统内外部组分间或连接变化时对其他组分或系统产生的影响(溢出效应)。此外,还能通过设定刻画系统整体状态的网络指标,描述对比城镇化与生态环境系统在不同阶段或不同系统在同一阶段的变化特征与规律,如MacArthur等将香农提出的信息论概念引用到生态环境系统网络研究中,初步形成了生态网络系统整体分析法^[65],Ulanowicz等则提出了系统总体流量(TST)、优势度(A)、韧性度(Φ)、容量度(O)、冗余度(R)、发展能力度(C)等评价系统整体特性的指标^[66]。

目前该模型研究对象多集中于城市—生态环境系统中的水^[67]、能源^[68]、化学元素^[69]等资源要素,研究尺度相对广泛,包括全球^[45]、国家^[70]、城市群与流域^[71]等不同空间尺度。其中,水要素研究以流域尺度为重点,通常通过构建水资源利用系统,以水要素生产消费链为主要过程,利用相应的网络评价指标对水流动过程进行评价^[72]。还有学者基于要素投入产出模型,构建虚拟水生态网络模型,模拟商品传递过程中生产与消费部门之间所负载的全部蓝水、绿水以及灰水资源流动情况^[73-74]。

3.6 基于远程耦合框架的城镇化与生态环境近远程耦合定性分析方法

Liu等提出的远程耦合研究框架集成了社会经济要素和环境要素系统跨越空间距离的交互胁迫关系,该框架包含五个基本组成部分,即系统、流、中介、原因和效应^[12]。学者通过明确上述不同组成部分内容与相互间作用机理和过程的基础上,对具有不同空间距离的人地系统耦关系用进行探讨。远程耦合研究主要关注土地资源^[24]、水资源^[75]、能源^[76]、食物^[25]等要素流动过程中伴随的生态环境效应,还在渔业等领域进行了创新性的开拓与发展^[77]。基于远程耦合框架的定性分析方法受收据可得性限制,通常运用在全球及国家尺度层面,如Liu认为发展中国家凭借当地廉价生态资源,将原材料和制成品出口到发达国家的过程以外部动力形式,加剧了本地人类活动对生态环境的压力与干扰,这一过

程将会导致社会不稳和承载人类生产生活的生态环境系统服务发生严重退化^[78]；Fang等基于远程耦合框架，构建了能源贸易远程耦合分析框架，对中欧间可再生能源交易对双方人地系统带来的远程影响进行了分析，认为该远程耦合过程将促进中国就业率和税收的上升，但也会造成潜在的污染物和温室气体排放量上升，对于欧洲国家而言，将会减少城市“热岛”效应和碳排放强度^[79]；Gasparri等立足远程耦合框架视角，探讨了北非与南非大豆贸易所引发的远程耦合效应，分析认为大豆贸易引发种植面积的扩大是造成北非森林砍伐和生物多样性降低的重要驱动力，认为双方应在统筹考虑生态环境影响的框架下商讨贸易问题^[79]；Carlson提出远程耦合框架需要将焦点集中于人地系统的结构、功能、动态演变、要素交换和要素协同几大方面，并认为渔业将促进全球粮食安全，对不断增长的水产养殖部门以及商业、娱乐和居民生计具有重要的支撑作用，因此渔业是应用远程耦合框架以便更好理解当地和远端社会经济影响的理想中介系统^[77]。

4 城镇化与生态环境近远程耦合在关键领域的应用进展评述

4.1 土地利用变化领域中的应用进展评述

在土地系统研究中，学界存在普遍性共识，即全球化的深入发展促进了复杂货品供应网络和贸易关系网络的形成，某个国家对商品货物需求模式的变化都将引起具有一定距离的远端地区生产与消费模式的变化，这种模式的变化则是导致土地利用和管理模式发生改变的重要诱因^[10, 80-81]。基于上述共识，学者从远程耦合和可持续发展角度出发，从农业用地^[82]、草地^[83]和森林^[78]等不同用地类型方面着手，对全球^[84]、城市^[85]、乡村^[38]等不同空间尺度的土地系统在货品供应网络和贸易关系网络远程支配下的演化过程、机理以及生态环境效应进行了研究，从实现人类社会可持续发展，减轻全球气候变化，保障粮食安全角度为政府等机构提供了不同层面的政策建议。从研究方法来看，现有文献主要以定性分析为主，如建立远程耦合分析框架；定量模型主要包括物质流代谢分析和土地足迹核算、区域间投入产出模型生命周期评价法以及投入产出与生命周期法相结合的混合评价模型。总之，不同方法的实质相似，均在阐明社会经济与生态环境远程交互耦合关系的基础上，聚焦并锁定研究对象系统边界，通过分析土地系统在不同尺度、功能组块（如城市层面的经济系统、创新系统、社会系统，生态层面的不同土地利用类型）间存在的物质流、资金流和信息流影响下的土地利用变化特征响应机理。

4.2 水资源领域中的应用进展评述

目前，城镇化与生态环境近远程耦合在水系统中的应用主要分为两类。一是基于虚拟水理论。虚拟水概念提出的初衷是为了提倡贫水国家和地区可以通过进口水资源密集型的农产品来减少用水赤字，自从虚拟水提出以来，逐渐成为水科学领域研究的热点和相关水问题研究的创新领域。Hoekstra对虚拟水概念进一步拓展，将其定义为生产商品和服务所需要的水资源总量，对于城市而言，社会经济活动不仅消耗实体水资源，还通过生产与消费贸易商品的形式，消耗了隐含在货品生产过程中“看不见”的水，因此虚拟水可以看作是水资源概念的外延^[86]。国际上有关虚拟水的研究主要围绕产品虚拟水核算^[87]、虚拟水贸易评估^[88]、虚拟水变化机制分析^[89]共3个方面。大量研究发现，虚拟水资源流动不仅仅从水资源丰富地区流向匮乏地区，而是存在广泛的逆向过程，即从匮乏地区流向富足地区，这样的过程损害了全球水资源分配均衡性，不仅是全球贸易不公平性的集中反映，对缺水地区生态环境将产生极其负面的影响^[90-91]。

二是基于Liu提出的新兴远程耦合分析框架, 强调运用具有可比性的方法评价跨越距离系统间的社会经济与生态环境联系, 通过识别远程耦合系统包含的5个基本组成部分, 以及确定系统的三大功能, 即发送(Sending)、接收(Receiving)、溢出(Spillover)的方式考察水资源的可持续利用程度与问题。该方法着重于从发送和接收方视角切入, 分析与解释水资源跨境运输过程中造成的成本利益, 并且避免了将实体水和虚拟水分开考察的缺陷, 增加了该研究的整体性综合性。如Deines等人认为远程耦合研究是评价城市水资源供给的重要工具, 其基于该框架分析了跨流域调水工程(Interbasin Water Transfer Projects)对北京市水资源利用压力, 揭示了北京市远程水资源供应压力远低于本地水资源供应压力, 同时表明输水将对水资源发送方产生系列经济社会正负效应, 对气候和物种迁徙也将产生影响^[75]。Quan从跨流域调水的工程性角度出发, 分析了区域水资源供应和需求错配现象, 并提出跨流域调水工程对发送方、接收方和路过方的区域生态安全和居民福利产生不利影响, 其采用DPSIR框架对远程耦合框架进行了改善, 利用改进后的远程耦合框架对中国南水北调中段沿线地区进行了实证分析, 得出区域间有效的信息共享是维护生态安全的重要方式, 以及生态用水需求指标是量化与调控跨流域调水工程对生态环境安全影响的主要指标^[92]。

4.3 能源领域中的应用进展评述

能源系统的可持续发展问题一直是国内外研究的重点领域^[93]。对于能源领域而言, 最大的挑战来自于解决能源在地理空间分布上的不均性与世界能源需求的错配关系。人地系统近远程耦合视角为上述问题提供了具有系统性和综合性的解决方案。

(1) 基于传统的能源国际贸易概念框架^[94-95]。该框架将能源贸易系统区分为供应端、交易端、国家和用户, 对国际贸易中商品隐含的能源及其对研究对象社会—环境系统可持续发展影响进行研究, 如验证碳外包假说(Carbon Outsourcing Hypothesis)等。研究范围包括宏观层面的经济体和国家, 也包含中观尺度的地区与城市。研究对象包括多种要素, 如太阳能及多种碳化物。实证中, 如Tang等通过构建能源投入产出表, 不仅核算了英国进出口贸易中隐含的化石能源, 还计算了不同部门和国家对隐含化石燃料的贡献度, 结果发现英国进口隐含化石能源量不断上升, 其能源安全面临较大风险^[95]; Xia等通过构建经扩展的投入产出框架以及运用多主体结构分解方法对中国碳排放强度进行了测算, 并对其驱动因素进行了分析, 结果表明工业废气排放强度和最终需求是中国排放强度下降的主要原因, 工业部门结构变化抑制了能源排放强度的逐渐升高趋势^[96]。

(2) 基于新兴的远程耦合分析框架。该框架包含能源发送、接收系统以及非能源系统, 研究视角从个人、能源组织等微观主体出发, 统筹考虑了能源系统远程作用下能源与非能源组成部分(如空气、水资源、生物等)的响应, 着重综合关注具有一定空间距离的能源系统间在要素流作用下所产生的社会经济与生态环境问题。但由于该框架提出时间较晚, 目前采用该框架进行实证研究的案例较少。仅有Fang等从多学科交叉视角出发, 采用综合集成与类比的方式构建了能源远程耦合研究框架, 并基于此提出了能源可持续分析方法, 该方法重在评估社会经济要素驱动的远程耦合过程对能源可持续发展的提升作用, 最后进一步强调远程分析框架为深入和综合的研究能源可持续发展问题提供了全新的机会^[76]。

5 启示与展望

本文紧紧围绕城镇化与生态环境近远程耦合主题, 从理论、方法和应用三个层面对

主题进行了系统和前沿的梳理,探讨城镇化与生态环境近远程耦合的理论研究前沿进展,对运用的定性定量方法进行了梳理与评述,并对国际上得到广泛研究的重点领域进行了归纳与总结。总体而言,城镇化与生态环境近远程耦合毫无争议的成为了近年来国际人地系统研究领域的最优先和最值得关注的领域之一。尽管近远程耦合概念相关定义提出时间不长,相关理论完备性与系统性尚显薄弱,理论框架对实证研究统领性的指导还略显不足。但事实上,国际上围绕互为远端人地系统间关联现象进行了大量的基于不同视角的研究,实证内容充足,内涵丰富。研究尺度涵盖全球、区域、城市、乡村、栅格等多个空间层级。研究领域具备交叉性与前沿性,涉及城市地理、经济地理、乡村地理、土地利用、城市生态学、生态经济学等多门学科和领域。涌现了一批启发性研究框架、基础理论假设、先进方法和研究范式,并在全球各地进行了实践验证,为城镇化与生态环境近远程耦合研究提供了理论构建的实证基础、研究方法指导和实践指南。尽管国内城镇化与生态环境耦合问题一直是地理学研究的热点领域,但围绕城镇化与生态环境近远程耦合理论的研究相对不足,仅有方创琳对此问题展开初步探讨^[4]。未来,在中国地理学丰沃的研究土壤上,通过实践积累进一步完善理论和强调研究领域的融合交叉将是综合提升城镇化与生态环境近远程耦合研究的重要途径。结合作者思考,建议中国城镇化与生态环境近远程耦合研究应着重从以下几个方面推动:

(1) 刻画城镇化与生态环境近远程耦合关系中的空间尺度效应,尤其是实现以城市群地区为研究主体的多尺度集成研究。集成国际上通用的WIOD、Eora以及中国区域间投入产出表构建全球及国家—地区—城市群—城市多尺度嵌套下的区域间远程耦合关系模型,识别与分析影响关键主控近远程要素在自下而上、自上而下、内部联结的此消彼长式动态关联,明确要素跨尺度流动对城市群地区城镇化与生态环境耦合作用机制,以及近远程主控要素的空间重塑效应;将城镇化与生态环境近远程耦合关系按照研究对象的空间相对位置划分为远程型、领域型和近程型,分析城镇化与生态环境在不同空间状态下的交互机制与响应方式;揭示城镇化与生态环境近远程耦合关键主控要素的空间相关关系,如空间关联型、弱关联性与随机型要素,分别探讨不同类型主控要素对城镇化与生态环境耦合胁迫过程的耦合升压、减压及恒压效应。

(2) 挖掘城镇化与生态环境近远程耦合主导路径与动态演变特征。提炼并阐明城镇化与生态功能交互耦合的近远程关键组分及主控要素间的相互联系,建立城镇化与生态环境近远程耦合驱动机制与主导路径的动态分析思路,将本地城镇化与生态环境系统视为人地系统整体,通过科学辨识近远程主控物质和信息流要素,将其与远程人地系统建立社会经济与生态环境近远程耦合联系(图5),为完善城镇化与生态环境近远程耦合理论奠定基础。识别驱动城镇化与生态环境近远程耦合的人类—自然主控模块,研究不同空间距离以及不同性质的近远程物质流与信息流的流动性特征以及在不同主导模块间的传导特性;对近远端两大城镇化与生态环境系统之间的耦合路径进行差异化、精细化的计量表达;对近远程多要素交互耦合状态同步性以及城镇化与生态环境近远程交互耦合状态进行诊断;综合评判特大城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合的生态环境系统响应与正负反馈路径。

(3) 立足多视角、学科交叉前沿性,加强中国城镇化与生态环境近远程耦合研究理论研究。从经济全球化视角、要素多样性与内在关联视角、远程耦合系列理论视角以及生态风险阈值与预警视角出发,以复杂系统理论为指导,从建立哲学方法论角度切入,加强对城镇化与生态环境近远程耦合概念和内涵的探讨,并充分挖掘其理论构建中育

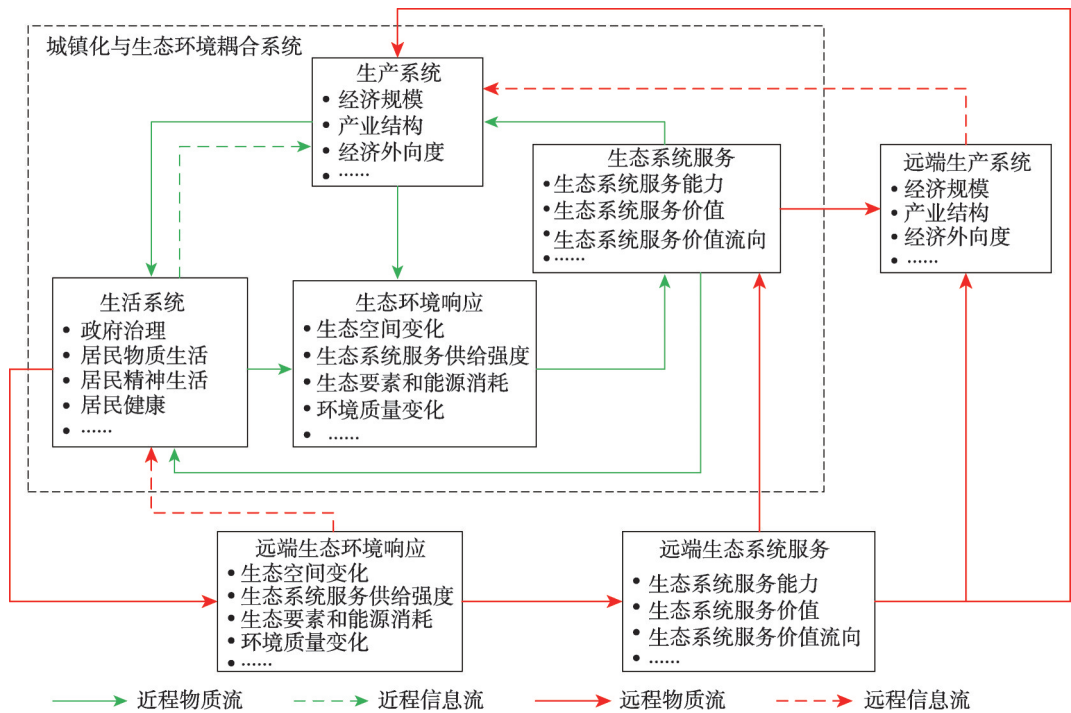


图5 城镇化与生态环境近远程耦合机理路径

Fig. 5 Pathway of mechanism for local and tele-coupling relationship between urbanization and eco-environment

论、立论、成论与行论依据；对国际学术界中远程关联理论、远程耦合理论、要素近远程关联理论在城镇化与生态环境近远程耦合研究中的价值进行探索；完善中国城镇化与生态环境近远程耦合概念，根据研究对象的人为划分边界（行政区划、人文地理区划等），或根据自然区划（气候、流域等）为边界区分系统近远程边界；明晰系统间近远程耦合关系的耦合层和系统外正负反馈传导边界层的形成过程（供给与需求驱动力）与作用机理（正负向反馈效应）（图6）。最后，从现实情况来看，依赖单一学科已经无力揭

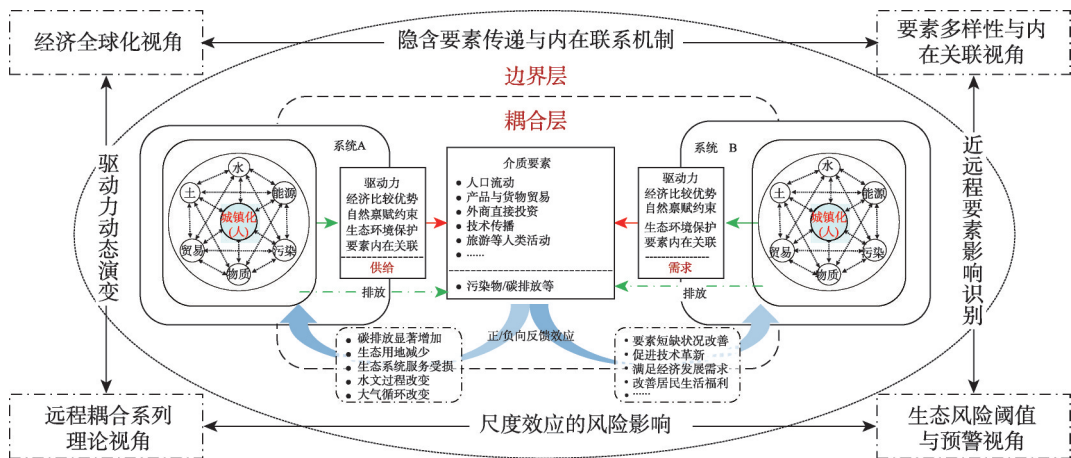


图6 城镇化与生态环境近远程耦合概念框架

Fig. 6 Conceptual framework of the local and tele-coupling relationship between urbanization and eco-environment

示城市群地区表现出的跨城市、跨界、跨领域、跨学科甚至跨国的功能特征,无法很好的解释现实世界中社会经济功能与自然生态环境相互作用。因此,亟需通过多学科交叉,共同建立城镇化与生态环境近远程耦合理论,以此突出理论的交叉前沿性和实用性,推动中国城镇化与生态环境耦合研究迈向新的发展阶段。

参考文献(References)

- [1] Huang Gengzhi, Leng Shuying. The development of human geography in China under the support of National Natural Science Foundation of China (1986-2017). *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 578-594. [黄耿志, 冷疏影. 国家自然科学基金推动下的中国人文地理学发展. *地理学报*, 2018, 73(3): 578-594.]
- [2] 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.]
- [3] 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.]
- [4] Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, et al. The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2015, 2(1): 81-98.
- [5] Bai X M, Van Der Leeuw S, O'brien K, et al. Plausible and desirable futures in the Anthropocene: A new research agenda. *Global Environmental Change*, 2016, 39: 351-362.
- [6] Adger W N, Eakin H, Winkels A. Nested and teleconnected vulnerabilities to environmental change. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2009, 7(3): 150-157.
- [7] Duit A, Galaz V, Eckerberg K, et al. Governance, complexity, and resilience. *Global Environmental Change*, 2010, 20(3): 137-139.
- [8] Kissinger M, Rees W E. An interregional ecological approach for modelling sustainability in a globalizing world: Reviewing existing approaches and emerging directions. *Ecological Modelling*, 2010, 221(21): 2615-2623.
- [9] Seto K C, Reenberg A, Boone C G, et al. Urban land teleconnections and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(20): 7687-7692.
- [10] Meyfroidt P, Lambin E F, Erb K H, et al. Globalization of land use: Distant drivers of land change and geographic displacement of land use. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(5): 438-444.
- [11] Fang C L, Ren Y F. 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, 60(6): 1-15.
- [12] Liu J G, Mooney H, Hull V, et al. Sustainability. Systems integration for global sustainability. *Science*, 2015, 347(6225): 963-975.
- [13] Seto K C, Golden J S, Alberti M, et al. Sustainability in an urbanizing planet. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(34): 8935-8938.
- [14] Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, et al. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1998, 103(C7): 14291-14324.
- [15] Clark D. *Urban World/Global City*. London: Routledge, 1996.
- [16] Sassen S. *The Global City*. Princeton: Princeton University Press, 2001.
- [17] Eakin H, Winkels A, Sendzimir J. Nested vulnerability: Exploring cross-scale linkages and vulnerability teleconnections in Mexican and Vietnamese coffee systems. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12(4): 398-412.
- [18] Crona B I, Holt T V, Petersson M, et al. Using social-ecological syndromes to understand impacts of international seafood trade on small-scale fisheries. *Global Environmental Change*, 2015, 35(11): 162-175.
- [19] 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.
- [20] Challies E, Newig J, Lenschow A. What role for social- ecological systems research in governing global teleconnections? *Global Environmental Change*, 2014, 27(1): 32-40.
- [21] Moser S C, Hart J A F. The long arm of climate change: Societal teleconnections and the future of climate change

- impacts studies. *Climatic Change*, 2015, 129(1/2): 13-26.
- [22] Liu J G, Hull V, Batistella M, et al. Framing sustainability in a telecoupled world. *Ecology and Society*, 2013, 18(2): 26-45.
- [23] Liu J G. Integration across a metacoupled world. *Ecology and Society*, 2017, 22(4): 29.
- [24] Eakin H, Defries R, Kerr S, et al. Significance of Telecoupling for Exploration of Land-use Change. *Rethinking Global Land Use in an Urban Era*. Boston: Massachusetts Institute of Technology Press, 2014.
- [25] Eakin H, Rueda X, Mahanti A. Transforming governance in telecoupled food systems. *Ecology and Society*, 2017, 22(4): 32.
- [26] Hatfielddodds S, Schandl H, Adams P D, et al. Australia is 'free to choose' economic growth and falling environmental pressures. *Nature*, 2015, 527(7576): 49-53.
- [27] Riahi K. Fifth Assessment Report, IPCC. 2014.
- [28] Sun Xinzhang. China's strategy to participating in the 2030 Agenda for Sustainable Development. *China Population Resources and Environment*, 2016, 26(1): 1-7. [孙新章. 中国参与2030年可持续发展议程的战略思考. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(1): 1-7.]
- [29] Kurian M, Ardakanian R. *Governing the Nexus*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [30] Pahl-Wostl C, Bhaduri A, Bruns A. Editorial special issue: The Nexus of water, energy and food: An environmental governance perspective. *Environmental Science Policy*, 2018, 90: 161-163.
- [31] Zhang P P, Zhang L X, Chang Y, et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 215-224.
- [32] Liu D D, Guo S L, Liu P, et al. Optimisation of water-energy nexus based on its diagram in cascade reservoir system. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 347-358.
- [33] Märker C, Venghaus S, Hake J-F. Integrated governance for the food-energy-water nexus: The scope of action for institutional change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 97: 290-300.
- [34] Beck M B, Walker R V. On water security, sustainability, and the water-food-energy-climate nexus. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, 7(5): 626-639.
- [35] Scott C A, Sugg Z P. Global energy development and climate-induced water scarcity-physical limits, sectoral constraints, and policy imperatives. *Energies*, 2015, 8(8): 8211-8225.
- [36] Friis C, Nielsen J Å S, Otero I, et al. From teleconnection to telecoupling: Taking stock of an emerging framework in land system science. *Journal of Land Use Science*, 2016, 11(2): 131-153.
- [37] Abson D J, Fischer J, Leventon J, et al. Leverage points for sustainability transformation. *Ambio*, 2017, 46(1): 1-10.
- [38] Friis Cecilie, Nielsen J. On the system, boundary choices, implications, and solutions in telecoupling land use change research. *Sustainability*, 2017, 9(6): 974.
- [39] Baird I G, Fox J. How land concessions affect places elsewhere: Telecoupling, political ecology, and large-scale plantations in Southern Laos and Northeastern Cambodia. *Land*, 2015, 4(2): 436-453.
- [40] Hulu E, Hewings G J D. The development and use of interregional input-output models for indonesia under conditions of limited information. *Review of Urban & Regional Development Studies*, 2010, 5(2): 135-153.
- [41] Deng G Y, Ma Y, Li X. Regional water footprint evaluation and trend analysis of China: Based on interregional input-output model. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 112: 4674-4682.
- [42] Cazcarro I, Duarte R, Sánchez C J. Multiregional input-output model for the evaluation of Spanish water flows. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(21): 12275-12283.
- [43] Guo S, Shen G Q. Multiregional input-output model for China's farm land and water use. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(1): 403-414.
- [44] Lin J Y, Hu Y C, Zhao X F, et al. Developing a city-centric global multiregional input-output model (CCG-MRIO) to evaluate urban carbon footprints. *Energy Policy*, 2017, 108: 460-466.
- [45] Yang X, Zhang W Z, Fan J, et al. Transfers of embodied PM_{2.5} emissions from and to the North China region based on a multiregional input-output model. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 381-393.
- [46] Feng K, Davis S J, Sun L, et al. Outsourcing CO₂ within China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(28): 11654-11659.
- [47] Liang S, Chao Z, Wang Y F, et al. Virtual atmospheric mercury emission network in China. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(5): 2807-2815.
- [48] Liu Q L, Wang Q. Sources and flows of China's virtual SO₂ emission transfers embodied in interprovincial trade: A

- multiregional input-output analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 735-747.
- [49] Zhang B, Qiao H, Chen Z M, et al. Growth in embodied energy transfers via China's domestic trade: Evidence from multi-regional input-output analysis. *Applied Energy*, 2016, 184: 1093-1105.
- [50] Ali Y. Carbon, water and land use accounting: Consumption vs production perspectives. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 921-934.
- [51] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 1970, 46(Suppl.): 234-240.
- [52] Anselin L, Gallo J L, Jayet H. *Spatial Panel Econometrics*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [53] Lesage J P, Pace R K. *Spatial econometric models*/Fischer M M, Getis A. *Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 355-376.
- [54] Pace R K, Lesage J P. *Spatial Econometric Models, Prediction*. Springer US, 2008.
- [55] Li G D, Sun S A, Fang C L. The varying driving forces of urban expansion in China: Insights from a spatial-temporal analysis. *Landscape & Urban Planning*, 2018, 174: 63-77.
- [56] Liu H M, Fang C L, Zhang X L, et al. The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in Chinese cities: A spatial econometrics approach. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 323-333.
- [57] Barles S. Urban metabolism of Paris and its region. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 13(6): 898-913.
- [58] Niza S, Rosado L, Ferrão P. Urban metabolism: Methodological advances in urban material flow accounting based on the Lisbon case. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(3): 384-405.
- [59] Odum H T. *System Ecology: An Introduction*. New York: John Wiley, 1983.
- [60] Kennedy C A, Stewart I, Facchini A, et al. Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(19): 5985-5990.
- [61] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan: Emery synthesis versus material flow analysis. *Resources Conservation & Recycling*, 2006, 48(2): 166-196.
- [62] Bodini A, Bondavalli C. Towards a sustainable use of water resources: A whole-ecosystem approach using network analysis. *International Journal of Environment & Pollution*, 2002, 18(5): 463-485.
- [63] Fath B D, Patten B C. Review of the foundations of network environ analysis. *Ecosystems*, 1999, 2(2): 167-179.
- [64] Tollner E W, Schramski J R, Kazanci C, et al. Implications of network particle tracking (NPT) for ecological model interpretation. *Ecological Modelling*, 2009, 220(16): 1904-1912.
- [65] Macarthur R H. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability. *Ecology*, 1955, 36(3):533-536.
- [66] Ulanowicz R E, Holt R D, Barfield M. Limits on ecosystem trophic complexity: Insights from ecological network analysis. *Ecology Letters*, 2014, 17(2): 127-136.
- [67] Fang D L, Chen B. Ecological network analysis for a virtual water network. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11): 6722-6730.
- [68] Chen S Q, Chen B. Urban energy consumption: Different insights from energy flow analysis, input-output analysis and ecological network analysis. *Applied Energy*, 2015, 138: 99-107.
- [69] Small G E, Sterner R W, Finlay J C. An ecological network analysis of nitrogen cycling in the Laurentian Great Lakes. *Ecological Modelling*, 2014, 293: 150-160.
- [70] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, et al. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China. *Energy Policy*, 2015, 86: 651-663.
- [71] Wang S G, Chen B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Applied Energy*, 2016, 178: 773-783.
- [72] Mao X F, Yang Z F. Ecological network analysis for virtual water trade system: A case study for the Baiyangdian Basin in northern China. *Ecological informatics*, 2012, 10: 17-24.
- [73] Fang D L, Chen B. Ecological network analysis for a virtual water network: A case study of the Heihe River Basin. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11): 6722-6730.
- [74] Yang Z F, Mao X F, Zhao X, et al. Ecological network analysis on global virtual water trade. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(3): 1796-1803.
- [75] 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.
- [76] Fang B L, Tan Y, Li C B, et al. Energy sustainability under the framework of telecoupling. *Energy*, 2016, 106: 253-259.

- [77] Carlson A K, Taylor W W, Liu J, et al. The telecoupling framework: An integrative tool for enhancing fisheries management. *Fisheries*, 2017, 42(8): 395-397.
- [78] Liu J G. Forest sustainability in China and implications for a telecoupled world. *Asia & the Pacific Policy Studies*, 2014, 1(1): 230-250.
- [79] Gasparri N I, Kuemmerle T, Meyfroidt P, et al. The emerging soybean production frontier in Southern Africa: Conservation challenges and the role of south-south telecouplings. *Conservation Letters*, 2016, 9(1): 21-31.
- [80] Lambin E F, Meyfroidt P. Inaugural article by a recently elected academy member: Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(9): 3465-3472.
- [81] Bruckner M, Fischer G, Tramberend S, et al. Measuring telecouplings in the global land system: A review and comparative evaluation of land footprint accounting methods. *Ecological Economics*, 2015, 114: 11-21.
- [82] Bruckner M, Giljum S, Lutz C, et al. Materials embodied in international trade: Global material extraction and consumption between 1995 and 2005. *Global Environmental Change*, 2012, 22(3): 568-576.
- [83] Krausmann F, Erb K H, Gingrich S, et al. Global patterns of socioeconomic biomass flows in the year 2000: A comprehensive assessment of supply, consumption and constraints. *Ecological Economics*, 2008, 65(3): 471-487.
- [84] Kastner T, Erb K H, Haberl H. Rapid growth in agricultural trade: Effects on global area efficiency and the role of management. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(9): 034015.
- [85] Tsai Y H, Huang Y H, Lin S Y, et al. Intercity transportation's role in affecting distal area's urbanization/green coverage: a high-speed rail's case in urban land teleconnections. *Journal of Transport & Health*, 2018, 9: S7-S8.
- [86] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalisation of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, 2004, 15(1): 45-56.
- [87] Morillo J G, Díaz J A R, Camacho E, et al. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 594-602.
- [88] Zhao X, Liu J G, Liu Q Y, et al. Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(4): 1031-1035.
- [89] Zhao C F, Chen B. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(21): 12723-12731.
- [90] Kumar M D, Singh O P. Virtual water in global food and water policy making: Is there a need for rethinking? *Water Resources Management*, 2005, 19(6): 759-789.
- [91] Zhang Z Y, Shi M J, Hong Y. Understanding Beijing's water challenge: A decomposition analysis of changes in Beijing's water footprint between 1997 and 2007. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(22): 12373-12380.
- [92] Quan Y, Wang C X, Yan Y, et al. Impact of inter-basin water transfer projects on regional ecological security from a telecoupling perspective. *Sustainability*, 2016, 8(2): 162.
- [93] Afgan N H, Carvalho M D G. Sustainable energy development. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011, 2(3): 235-286.
- [94] Farah P D, Cima E. Energy trade and the WTO: Implications for renewable energy and the OPEC Cartel. *Journal of International Economic Law*, 2013, 16(3): 707-740.
- [95] Tang X, Snowden S, Höök M. Analysis of energy embodied in the international trade of UK. *Energy Policy*, 2013, 57(1): 418-428.
- [96] Xia Y, Fan Y, Yang C H. Assessing the impact of foreign content in China's exports on the carbon outsourcing hypothesis. *Applied Energy*, 2015, 150: 296-307.

Progress in local and tele-coupling relationship between urbanization and eco-environment

REN Yufei^{1,2}, FANG Chuanglin^{1,2}, LI Guangdong¹, SUN Si'ao¹,
BAO Chao¹, LIU Ruowen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The local and tele-coupling relationship between urbanization and eco-environment has received extensive attention from researchers in recent years. Understanding the synergies and trade-off between urbanization and eco-environment systems is essential in addressing eco-environment problems in rapidly urbanized China. Based on a comprehensive literature review on the subject, this article presents the theories, methods and key applications that are associated with the coupling relationship between urbanization and eco-environment. We found that the concept of local and tele-coupling relationship between urbanization and eco-environment has only been developed since two decades ago. Related theories are still in development and applications based on this concept are limited until now. However, from other perspectives, many studies have adopted various methods to investigate the relations between the human and nature systems, providing abundant empirical evidence on the coupling relationship between the two systems. Lastly, future research directions are recommended. It is essential to examine the local and tele-coupling relationship between urban and eco-environmental systems in urban agglomeration areas, which helps enhance our understanding on the dynamic characteristics of involved systems and dominating pathways of evolving relationships in rapidly developed regions in China.

Keywords: urbanization; eco-environment; telecoupling; urban agglomeration; research progress