

人地系统远程耦合的研究进展与展望

马恩朴^{1,2}, 蔡建明^{1*}, 韩燕^{1,2}, 廖柳文^{1,2}, 林静¹

(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, 北京 100049)

摘要:在越发紧密关联的全球化世界中,如何实现可持续发展日益需要跨系统思维和超区域政策。这首先要求致力于可持续发展研究的学科要提升自身对跨区域资源环境问题的洞察力,因此就有必要推动地理学传统研究框架的适应性创新和变革。远程耦合作为聚焦于“远距离人类与自然耦合系统之间社会经济与环境相互作用”的理论框架,有极大的潜力和优势来促进这一理论创新进程。为了缩小国内外在远程耦合领域的研究差距,论文基于文献研究和笔者对远程耦合框架的理解,从远程耦合的理论建构、经验证据、重点研究领域和研究方法4个方面介绍了该理论框架及其应用进展,并提出3个方面的展望来激发新的研究。综述表明,由于远距离人类活动不断增长以及大尺度自然过程与人类活动的相互作用,在远程连接、全球化和城市化维度上均存在大量远程耦合的经验证据;目前学术界对远程耦合框架的应用主要集中于生态系统服务、远程耦合的社会经济和环境影响及土地变化科学3个方面;同时得益于理论操作化的进展,目前开展远程耦合研究已具备较好的方法支持。基于此,论文认为,为应对新兴的现实科学命题,基于远程耦合框架的地理学研究应当在人地关系网络系统的理论创新、远程耦合动力机制和远程耦合的调控工具集3个方面实现突破。

关键词:人地系统;远程耦合;经验证据;生态系统服务;远程耦合影响;土地变化科学

人地关系地域系统是地理学研究的核心领域^[1],围绕人地系统进行的理论创新、实证研究和服务实践为中国乃至世界地理学作出了重要贡献。但是,在以“流”(人口流、货物流、资金流、信息流)为主要特征和基本运行机制的全球化世界中,地理学研究人地关系的传统框架正面临着适应性创新与变革的需要。

自18世纪60年代以来,由于能源使用、交通运输和信息通讯的技术进步,区域连通性、人类可移动性和资源流动性不断增强,使人类得以扩展自身活动的空间范围。这种变化在机制上与全球化和城市化密切相关:一方面,随着经济全球化进程的

开始,国家尺度的地域系统在过去半个世纪中呈现出开放性不断增强的总体趋势^[2];另一方面,伴随经济开放发展的城市化进程也同步进行,通过普遍的城市化,1950—2015年全世界由农村转移至城市的人口高达32.24亿人。受全球化和城市化共同驱动,不断强化的区域联系和日益加速的要素流动逐步将基于当地生态系统服务的乡村社会转变为以非生态系统服务和远距离资源调度为基础的城市社会,并深刻重塑了人类与自然的互动方式。尤其20世纪中叶以来,人类影响和改变生态系统的程度比历史上任何时期都强^[3],其中最重要的变化是远距离人类与自然耦合系统(coupled human and natu-

收稿日期:2019-01-22;修订日期:2019-07-21。

基金项目:国家自然科学基金项目(71734001,41371008);“中欧可持续城镇化合作”二期项目(770141)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 71734001 and 41371008; Transition towards Urban Sustainability through Socially Integrative Cities in the EU and in China, No. 770141.]

第一作者简介:马恩朴(1989—),男,博士生,贵州毕节人,研究方向为城市农业、可持续城市化与土地利用/覆被变化研究。

E-mail: maenpu2015@sina.com

*通信作者简介:蔡建明(1961—),男,山西临猗人,博士,研究员,主要从事城乡可持续发展、都市农业研究。

E-mail: caijm@igsnrr.ac.cn

引用格式:马恩朴,蔡建明,韩燕,等.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 Enpu, Cai Jianming, Han Yan, et al. Research progress and prospect of telecoupling of Human-Earth system. Progress in Geography, 2020, 39(2): 310-326.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.02.012

ral systems, CHANS)的相互作用在不断增加^[4]。

在人类历史的大部分时期,人们主要从其生活的当地环境中获取食物、水、木材和其他材料等生态系统服务,并依赖于当地环境的自净能力进行废物处理^[5-6]。而在连接性和流动性不断强化的今天,随着人口增长和城市化推动人类需求的空间集聚,以及物质生产与消费之间日益增加的空间分离,仅靠当地资源来供给城市人口已变得不可能^[7]。另外,许多国家缺少足够的土地或水资源来养活其人口,因此也不依赖于全球贸易市场^[8]。实际上,近几十年来,国际贸易已成为全球数十亿人满足其生活需求的主要来源,几乎每个现代社会都或多或少地依赖于跨区域的资源流动,同时日益紧密联系的世界中任何区域的生产、消费和决策行为都有可能给遥远区域的生态系统造成无形负担和难以预料的影响^[5,7]。

在这种情况下,尽管人文地理学的传统研究框架也强调人地系统是开放的复杂巨系统,但实际操作中大量基于单一空间尺度或离散区域的研究难以揭示多尺度、跨区域的复杂交互作用及其蕴含的可持续性挑战。现有的大量可持续发展研究是针对特定区域进行的,很少关注多个区域之间的远距离相互作用及其对可持续性的影响^[9]。这无疑削弱了科学研究对“流空间”中人类与环境隐性联系和间接反馈的洞察力。如何更好地理解远距离人类与自然耦合系统(CHANS)的相互作用及其对可持续性的影响,迫切需要通过跨学科方式开发具有多尺度和跨系统分析能力的综合框架和系统集成工具,以提升地理学对跨区域资源环境问题的解释力,以及促进在全球范围内实现可持续发展目标的决策支持能力。在地学领域建立的诸多综合性研

究框架^①中,远程耦合(telecoupling)作为聚焦于“远距离人类与自然耦合系统之间社会经济与环境相互作用”的理论框架,有望在推动地理学传统研究框架的适应性创新和变革上发挥关键作用。因此,有必要系统回顾远程耦合的研究进展,并展望其未来发展方向。本文通过多层次检索、逐条筛选以及泛读与精读相结合的方法进行文献研究和主题分类,以文献分类为基础,分别综述远程耦合框架的理论建构与国内进展、远程耦合的经验证据、远程耦合研究的重点领域和远程耦合研究方法,并对未来研究重点进行展望及全文总结,以期促进地理学研究的理论和方法创新。

1 文献研究

笔者于2017年11月27日开始陆续搜集有关“远程耦合(telecoupling)”的国内外文献和事实材料,于2019年6月18日更新了文献检索结果。在Elsevier的ScienceDirect全文数据库中,以telecoupling为术语进行检索得到3894条结果,由于涉及学科范围过于宽泛,进一步将搜索语句限定为“telecoupling AND coupled human and natural systems”后得到543条结果。这些文献包含了综述、学术论文、书籍章节等14种,同时在中文期刊全文数据库中以“远程耦合”为主题进行检索得到相关中文文献7条。初步检索结果的文献类型组成如表1所示。

总体而言,截至2019年6月18日,以“telecoupling AND coupled human and natural systems”和“远程耦合”为主题的中英文文献共550条^②,但快速浏览标题和摘要后,发现这些文献中仍有很大部分不属于地理学范畴。为此,对检索到的550条文献,

表1 中英文文献初步检索结果的类型组成

Tab.1 Types of Chinese and English literature from a preliminary search

文献类型	综述	学术论文	百科全书	书籍章节	会议摘要	书评	会议信息
数量/篇	55	204	11	122	41	1	5
百分比/%	10.00	37.09	2.00	22.18	7.46	0.18	0.91
文献类型	通信	讨论稿	社论	勘误表	新闻	短篇报道	其他
数量/篇	1	4	3	2	2	4	95
百分比/%	0.18	0.73	0.55	0.36	0.36	0.73	17.27

① 这些综合性研究框架主要包括环境足迹^[10]、行星边界(planetary boundaries)^[11]、人类与自然关系框架、社会-生态系统(SESs)^[12]、生态系统服务、远程耦合(telecoupling)^[9]、水-能源-粮食网络^[13]、可持续生计框架^[14]等。

② 值得注意的是,“远程耦合世界的可持续性框架”一文实际上译自“Framing sustainability in a telecoupled world”,因此内容独立的文献实际上是549条。

逐条浏览其标题和摘要,以标题和摘要为主要判断依据,同时结合文献来源和作者信息进行综合判断,逐条剔除非地理学科文献并合并多语种发表的文献后,共得到154篇属于地理学领域的独立文献。笔者通读了所有154篇文献,并在全文阅读过程中筛选出87篇以“远程耦合”为核心主题的文献进行精读,另外还阅读了大量背景支撑性文献。通过文献研究,可逐步明晰当前远程耦合研究关注的6个主题,即远程耦合理论建构、远程耦合的经验证据、生态系统服务流动及评估与管理、远程耦合的社会经济和环境的影响、远程耦合下的土地变化科学和远程耦合研究方法6大方面。基于对现有研究的主题分类,本文拟从理论建构、经验证据、重点内容和研究方法4个方面进行综述。

2 远程耦合理论建构

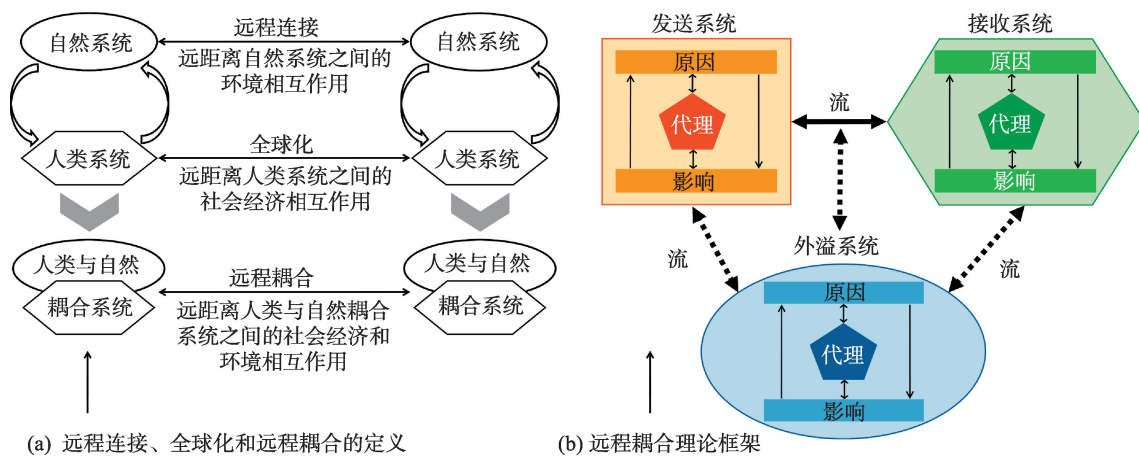
远程耦合理论建构是对人类与自然耦合系统^[4,15]、人类与环境耦合系统^[16-17]、社会与生态耦合系统^[18]研究的自然延伸,在2007年的论文——人类与自然耦合系统^[4]中,刘建国等就揭示出人类与自然耦合系统(CHANS)在连接方面从邻近演化到更远距离、在尺度上从局部演化到全球的发展趋势。这种趋势的本质在于,人类与自然的相互作用由于远距离人类活动(如贸易、移民)和大尺度自然过程(如EN-SO事件、台风、海啸)而跨越了政治与生态系统的边界,从而在局部到全球多重嵌套的空间尺度上发生并相互反馈^[4]。

2011年,在美国科学进步协会“人与自然系统

耦合”专题讨论会上,刘建国等提出了远程耦合(telecoupling)的综合概念^[19],并于稍后发表的“远程耦合世界的可持续性框架”^[9,20]一文中详细论述了这一综合概念。所谓远程耦合,是指“远距离人类与自然耦合系统之间的社会经济和环境相互作用”^[9,20]。该理论框架由人类与自然耦合系统、流、代理、原因和影响5个相互联系的部分组成,明确将远程因素作为系统反馈,注重研究多个地点之间远距离相互作用对可持续性的影响^[9,20]。远程耦合系统具有嵌套的分层结构,在整体层面上,远程耦合系统由一系列通过流相互作用的人类与自然耦合系统构成;其中每一个人类与自然耦合系统又包含代理、原因和影响3个组成部分,根据流方向的不同,人类与自然耦合系统又可定义为发送、接收和(或)外溢系统^[9,20](图1)。

在人类与自然耦合系统的组成部分中,代理是一系列决策和行为主体,主要包含个人、家庭、组织团体和企业等不同类型的,是决定耦合系统之间是否产生流的直接因素;原因是代理作出决策和行为的动机,受供求关系、要素价格、政治环境、相关政策、社会文化和个人偏好等多种因素影响,是决定耦合系统之间是否产生流的根本因素;影响则通过反馈环路与原因相连,在耦合系统的不同层面上相互传递。一方面,代理的决策和行为可能同时受到社会经济与环境的影响;另一方面,决策和行为的后果又会在社会经济与环境层面对人类与自然耦合系统产生多方面的影响^[9,20],如土地利用/覆被变化、土壤碳储量下降、生物多样性丧失和小农生计变迁等。

通过整合远距离自然系统之间的环境相互作用



注:资料来源于文献[9,20]。

图1 远程耦合的定义与理论框架

Fig.1 Definition and theoretical framework of telecoupling

用和远距离人类系统之间的社会经济相互作用,远程耦合框架实现了对远程连接、世界体系理论和全球化等概念的归纳和综合。在此基础上,刘建国^[21]进一步提出了一个涵盖所有空间尺度,集成内部耦合(intracoupling)、周边耦合(pericoupling)和远程耦合(telecoupling)的元耦合框架(metacoupling)。在结构层次上,元耦合由内部耦合(intracoupling)和相互耦合(intercoupling)组成,其中相互耦合包括周边耦合和远程耦合。内部耦合是指单个耦合系统(CHANS)内人类与自然的相互作用,主要关注单一空间尺度上特定区域内的人地作用关系,在这种意义上,内部耦合与人地关系地域系统十分相似,但内部耦合明确规定了系统内的交互可以对附近和(或)远处的其他系统产生溢出效应^[21]。周边耦合是指相邻人类与自然耦合系统之间的社会经济和环境相互作用^[21],其作用过程与远程耦合具有许多共同特征。元耦合框架的优势是它涵盖了由近及远的所有目标耦合系统,因此有助于化解远程耦合研究中的距离争论。

自远程耦合框架提出以来,已在国内激发出大量理论创新,其中尤以城镇化与生态环境交互耦合方面的进展最为明显。在中国进入快速城镇化阶段后,城市群作为国家经济发展的支柱和实施新型城镇化战略的主体却面临着日益加剧的资源环境胁迫压力^[22]。因应特大城市群地区可持续发展调控的理论和需求,方创琳等^[22]系统建立了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,并逐步凝练出“近远程耦合”的理论模型;通过将近远程要素同时纳入解析过程,梳理了特大城市群城镇化与生态环境近远程关键主控要

素的交互胁迫关系,揭示了特大城市群地区城镇化与生态环境交互胁迫的近远程耦合机理与规律。基于近远程耦合系统提出的耦合圈理论框架在京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合的案例研究中已得到应用^[23]。近期又进行了“耦合魔方”的理论创新,将空间维度的近远程耦合、时间维度的近远程耦合、组织维度的组内间耦合和表象维度的显隐性耦合统一纳入“耦合魔方(CHNC)”理论框架中,并重点剖析了隐性、组间、远期和远程耦合的科学内涵、研究方法和典型案例^[24],从而将人地系统耦合研究推向了新的水平。

从不同理论框架的空间图式和具体内涵来看,“近远程耦合”与元耦合框架有异曲同工之妙,两者均通过空间全覆盖的方式整合了不同距离上的目标耦合系统,通过兼顾特定系统内部及跨越空间距离的人地相互作用,上述理论框架弥补了地理学传统研究框架的不足,同时也填补了远程耦合框架自身的空白。从理论框架的对应关系来看,在远程耦合的现有研究中,发送和接收系统之间的距离从100 km到数千 km不等^[25];而在近远程耦合的现有研究中,近程要素主要在城市群尺度上进行定义^[23]。从国内3大城市群(京津冀、长三角和珠三角)来看,其内部主要城市间的平均公路距离介于100~200 km之间^③,因此“近远程耦合”中的近程耦合(城市群尺度)就大致相当于元耦合框架中的内部耦合(intracoupling)+周边耦合(pericoupling)(图2)。

总之,远程耦合的理论创新为更加准确地揭示当今面临的可持续性挑战提供了有力的工具,近年来的大量相关研究正逐渐使远程耦合成为有一定影响力的综合性框架之一。在为推动全球可持

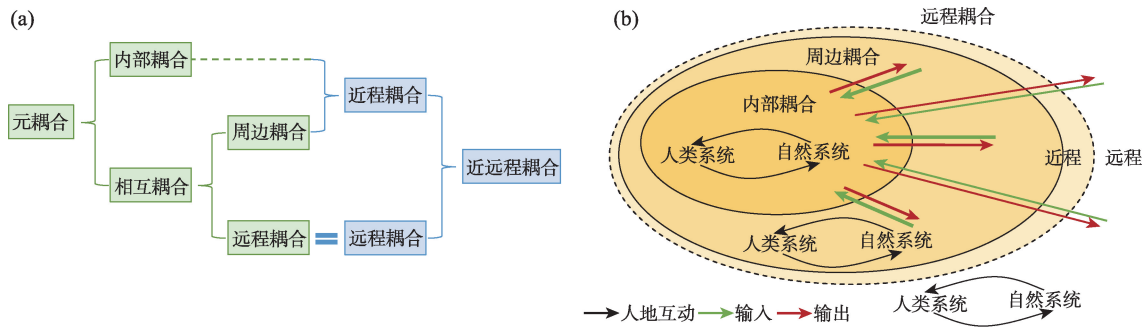


图2 元耦合与近远程耦合的关系

Fig.2 Relationship between metacoupling and near-remote coupling

③ 基于百度地图的计算结果显示,珠三角城市群、长三角城市群和京津冀城市群内部主要城市间的平均公路距离分别为106、152.98和198.25 km。

续发展而进行的系统集成中,远程耦合框架有望在空间维度的系统集成方面发挥独特作用^[26]。通过内化过去被视为外生变量的远距离或跨区域因素,识别并量化溢出系统^[26],以及通过元耦合框架与互联法(nexus approaches)的结合^[13],可以同时观察到跨区域、多部门之间的相互作用,有望为促进全球可持续发展提供更加公正、科学的决策支持。

3 远程耦合的经验证据

寻找经验证据是理解远程耦合现象和理论的有效方法,近几年来快速涌现的大量远程耦合研究为理解该现象提供了充分的证据。根据笔者前期研究对远距离相互作用形式的讨论,可将远距离相互作用的主要形式归纳为远距离人类活动和大尺度自然过程2大类,其中远距离人类活动又包括全球化和城市化中的远距离行为。据此,可从远程连接、全球化和城市化3个方面寻找远程耦合的经验证据。

3.1 远程连接维度的经验证据

远程连接是大气科学中用来描述远距离气候系统相互作用的概念^[9,20],现在通常指远距离自然系统之间的环境相互作用,是大尺度自然过程的统称。大气环流(行星尺度)、季风环流(海陆尺度)和海洋环流是这类自然过程的典型代表^[27]。尽管远程连接是一个用于描述远距离自然系统之间环境相互作用的专用概念,但随着人类世的到来,人类本身已成为影响生物物理过程(如气候、生物多样性、N/P循环)的重要力量^[28-29],大气环流和海洋环流等大尺度自然过程不再是单纯的环境相互作用,而是越来越深刻地打上人类活动的烙印,其中以远程连接中的废物流动最为典型。如今,人类活动排放的有害气体、污水、垃圾和船舶泄漏等废弃物正借助气压梯度和温盐梯度的驱动,在大气环流和海洋环流形成的“全球输送带”上运移。

一个典型例子是太平洋垃圾带^[30-31],受北太平洋副热带环流驱动,从北美和亚洲陆地的人类活动中排放的大量垃圾顺洋流运动,形成横跨北美西海岸到日本水域的巨型垃圾漩涡,给海洋生物带来毁灭性影响^④^[30]。另有研究发现,中国电镀工业每年大约排放10~14 t F-53B,这是电镀工业中常用的铬

雾抑制剂,其中累积排放量的0.02%~0.50%通过海洋平流到达北极,尽管显示出较低的远距离运输潜力,但其累积效应仍然增加了水生环境的潜在风险^[32]。

远程连接本身会影响社会-生态系统的可持续性。例如,受东北信风驱动,每年大量来自撒哈拉沙漠的尘埃通过大气运动穿越大西洋到达加勒比地区,在这些地方造成珊瑚礁减少、哮喘病增加、疾病传播和土壤肥力下降等多重影响^[33-34]。其他典型例子,如厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)在一些区域引发极端降水的同时,却又在另一些区域引起极端干旱,进而影响农业生产和粮食安全,甚至改变土地利用/覆被,有研究就论证了ENSO循环是东亚土地覆盖变化的重要驱动力^[35]。

同时,远程连接本身也受到人类活动的影响,某些情况下人类活动甚至可能改变生物地球化学循环的状态。例如,一些大型气候模型表明,随着全球变暖,格陵兰冰盖融化导致的海水盐度变化很可能导致北大西洋的温盐循环停止^[36-37]。显然,远程连接中的废物流动以及远程连接与人类活动的相互影响本质上是人类系统与自然系统相互作用的表现。这些相互作用给多个可持续发展目标带来挑战(如零饥饿、建设具备灾害抵御能力的基础设施和海洋生物保护),并且具有大尺度甚至全球性特点,因此是远程耦合的重要证据。

3.2 全球化维度的经验证据

全球化是指全球互联的扩大、深化和加速,是通过将人类活动联系在一起并在各个地区和大陆之间扩展人类活动,从而促进人类事务组织方式转变的时空变化过程^[38]。与远程连接不同,全球化中远距离人类与自然耦合系统的相互作用往往需要经历各种流(信息流、资金流、人口流、货物流)在社会、经济、政治和文化等不同人类组织层面的传递和反馈过程^[39],因此更为复杂。以巴西和中国的大豆贸易为例,其实质是通过大豆流、资金流和农产品价格、农业技术等信息流将中国消费者和巴西的社会经济与生态环境联系起来,并给发送系统(巴西)、接收系统(中国)和外溢系统(如美国)带来多方面的影响,如巴西土地利用集约度提高、亚马孙河流域边缘地带林地减少^[40]、中国豆农受到竞争冲击、美国大豆在中国的市场份额被部分取代^[41]等。

④ 有关太平洋垃圾带影响海洋生物的大量触目惊心的事实数据详见 <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/great-pacific-garbage-patch/>。

在全球化的世界经济中,区域间贸易不仅将商品或服务从一个地区转移到另一个地区,也通过商品贸易中隐形土地利用的跨境转移从其他地区获得环境福利^[42]。如日本的间接耕地利用主要来自亚洲和非洲国家,这相当于日本耕地利用需求的90%以上;而印度本土可耕地资源中约20%则用于国外消费。

这些事实表明,随着全球贸易中生产与消费活动的脱钩,越来越多的地区不再完全依赖当地环境提供的生态系统服务,而是越来越多地消耗遥远区域的环境资源^[43-44]。贸易使一些地区能够获得当地稀缺的资源,从而改善其发展条件,但某些时候也会将环境影响转移到其他国家,在这种情况下,一些地区可能通过将环境负担转移到国外来缓解其自身环境压力,但这种做法并不会产生整体优化的结果^[45],对于实现全球可持续性而言,资源环境压力(特别是污染物)的跨境转移无疑是一项重大挑战。

此外,海外农业投资、移民、跨国旅游和信息传播等也是全球化中远距离人类与自然耦合系统相互作用的主要形式。在海外农业投资方面,围绕“跨国土地使用权交易”和“供应链管理”的2类研究出现了相反的叙事。就前者而言,目前许多研究针对所谓的“全球土地掠夺”现象进行了关于正义与地方土地权力的叙事^[46-50],认为在跨国土地使用权交易中,由于被投资国通常面临治理薄弱问题,导致其很难有效管理外商的农业投资,进而难以确保这些投资能够促进当地农村发展和减贫^[47]。与此相反,在供应链管理方面,Newton等^[51]则认为提高供应链的透明度,例如通过体制改革、政策工具和奖励等方式对供应链加以干预可以改变投资者与生产者的行为,进而直接影响商品生产过程的可持续性;也可以通过改变下游买家(包括消费者)与上游供应商之间的互动关系来间接影响商品生产过程的可持续性。例如哥伦比亚的咖啡生态认证改善了咖啡种植小农的资源管理,使关键生态系统服务和生物多样性得到保护;通过生态认证的咖啡不仅将大部分产品溢价留给了农民,也更加符合国际市场对高品质咖啡饮料的需求^[52]。

在信息传播方面,对中国卧龙自然保护区的全球性报道是一个典型例子。由于纽约时报和BBC等新闻媒体的报道以及大量书籍、文章的介绍,该自然保护区的国内外知名度不断提高。据统计,1980—2012年期间有关“卧龙自然保护区”的国际

新闻报道多达806篇^[53-54]。这些围绕卧龙自然保护区和大熊猫的信息流为世界各地的读者提供了文化服务,而作为反馈,这些信息流则帮助保护区吸引了世界自然基金会(WWF)的大熊猫保护项目资金,并在汶川地震后促进了国内外的救灾捐款流向大熊猫栖息地^[54]。可见,全球化视角下的远程耦合证据十分丰富。同时应当认识到全球化中各个方面所体现的跨区域相互作用既可能是消极的,也可能是积极的,准确把握全球化带来的机遇和挑战,通过强化对远程耦合本身的调控,如采取供应链干预和生态认证等创新举措实现多赢目标对于促进全球可持续性无疑是富有建设性的。

3.3 城市化维度的经验证据

城市化是通过资源要素的集聚与扩散,以及多元文化与价值观念的融合、再生与传播等作用,使乡村型的人口、产业、生活方式和居住景观向城市型系统转化的历史过程。城市化是陆地表层人文与自然因素交互作用的综合地理过程,具有综合性与多维度特点^[55]。在远程耦合的证据探讨中之所以将城市化作为一种独立类型加以讨论,是因为城市化过程本身就是不同空间距离上人类与自然耦合系统之间的社会经济和环境相互作用,这种区域间相互作用跨越了不同的空间距离,其作用方式、具体内涵与主要依赖于交通运输和信息技术的全球化存在很大区别^[39]。以土地利用/覆被变化为例,一方面,在近距离上,城市化通过空间扩张直接导致土地利用/覆被变化,如建设用地扩张不断占用城市周边的其他类型土地;另一方面,在远距离上,城市化则通过要素集聚过程,如乡村人口迁移、远距离调水、农产品和原材料运输等方式直接或间接地改变遥远区域的土地利用/覆被^[39]。

城市化是社会-生态系统体制转换的重要原因^[56],并且在生产与消费的空间分离和环境足迹扩张方面起主要作用,因此寻找城市化中的远程耦合证据,开展近远程耦合视角下的城市化研究对于理解城市化中的跨区域资源环境问题显然具有重要意义。目前,几项代表性研究已采用了远程耦合或与此相近的理论框架,并具有很好的启发性。例如,Seto等^[57]借用气候科学中的“遥相关”概念提出城市土地遥相关的概念框架,通过将土地变化与潜在的城市化动态联系起来,城市土地遥相关方法能够发现遥远地区之间,尤其是城市化与农村土地利用变化之间的联系。另外,一项关于土地利用/覆被

变化解释的研究基于远程耦合框架,提出了城市化背景下土地利用覆被/变化的近远程驱动力概念模型(图3),该模型有助于同步解释中国近几十年来的城乡土地利用/覆被变化,如城市扩张、城中村涌现、村庄空心化和农地边际化^[39]。

此外,远程耦合的理论思想也见于城镇化与生态环境交互耦合的相关研究中,该领域被认为是未来10a地理学研究的前沿课题,尤其特大城市群地区城镇化与生态环境的交互耦合效应已成为该领域研究的重点内容^[22]。方创琳等^[23]借鉴远程耦合理论思想,从能值代谢角度分析了京津冀城市群地区城镇化与生态环境近远程耦合的能值代谢效率及其环境压力。周伟奇等^[58]指出,城市集群(metacity)、城乡连续体(continuum of urbanity)、远程耦合(telecoupling)、遥相关(tele-connection)等理论概念和研究框架有利于丰富城市与区域生态关联的研究思路,进而有利于构建区域生态安全格局、促进城市与区域健康发展。

总之,鉴于城市化是不同空间距离上人类与自然耦合系统之间通过流相互作用和系统转化的历史过程,更应该将城市化纳入到远程耦合研究中来,或在城市化相关研究中引入远程耦合框架,这对于理解和破解城市化过程中的跨区域资源环境问题将大有裨益。

4 远程耦合研究的重点领域

从现有研究看,生态系统服务流动、评估与管理,远程耦合的社会经济与环境影响和远程耦合下的土地变化科学是目前学者们进行远程耦合研究的重点领域。

4.1 生态系统服务流动、评估与管理

生态系统服务流是远距离人类与自然耦合系统相互作用的核心机制,也是远程耦合理论框架提出以来学术界关注的重点领域。所谓生态系统服

务流,是指生态系统产生的物质、能量和信息在人类与自然耦合系统之间的空间运动^[54]。

根据运动中载体类型和能量消耗方式的不同,生态系统服务流可划分为主动型生物物流和被动型生物物流2大类,其中主动型生物物流又包括交通运输型和物种迁徙型^[54]。在交通运输型流动中,承运人借助基础设施、运输工具与技术等人工资本将某种生态系统服务产品从A运输到B^[54]。在物种迁徙型流动中,作为生态系统服务提供者的动物需要消耗自身能量才能完成迁徙,进而通过授粉、传播种子、控制害虫和美学欣赏等生态系统服务将发送和接收系统连接起来^[54,59-60]。例如由墨西哥越冬栖息地向北迁徙的帝王蝶为美国和加拿大提供了文化服务^[61];在加拿大和美国之间迁徙的北针尾鸭为观鸟和狩猎活动提供了文化服务^[62-63],同时北针尾鸭也是北极地区土著居民的食物来源^[64]。

与以上主动型生物物流十分不同的是,在被动型生物物流中,载体的运动既未消耗自身能量,也不依赖于人类安排的外部动力,而是受地球内外营力,如重力、风力和水流的影响。被动型生物物流也通过生物和非生物过程发生,如在河流、海洋和大气中发生的生物物理流动^[54]。最典型的例子是水源涵养区通过流域为下游提供淡水供应服务,以及植物种子通过大气运动发生迁移等。

近年来,随着大量研究跟进,远程耦合框架在生态系统服务流及其评估与管理方面的应用产生了众多富有启发性的成果。如Schröter等^[54]系统论述了区域间生态系统服务流的概念和类型,这些跨区域的生态系统服务流可以在不同空间尺度下进行,并且一个层面上发生的事情会对另一个层面产生影响^[65]。例如,在黄土高原退耕还林项目实施中,人类影响和多种生态系统过程相互关联,导致生态系统管理在多个尺度上产生了连锁影响^[66],尽管退耕还林使局部水土流失得到有效控制^[66],黄河泥沙运移减少^[67],但同时也导致了当地的土壤干

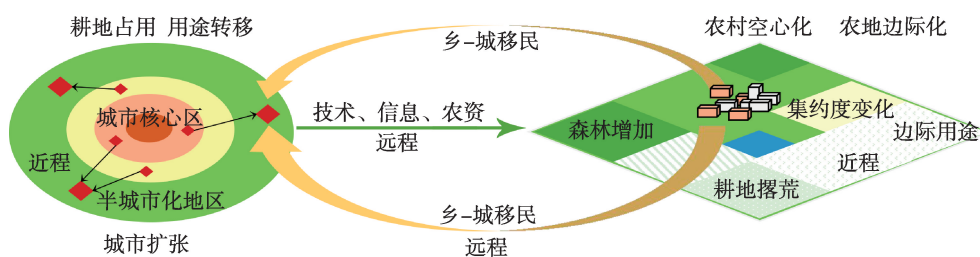


图3 城市化对土地利用/覆被变化的近远程驱动力示意图

Fig.3 Near-remote driving force of urbanization on land use/cover change

层,以及黄河中下游地区的缺水和湿地退化^[68]。显然,认识到人类与自然相互作用中的意外影响对于更好地评估和管理生态系统至关重要,而远程耦合框架凭借其跨系统和多尺度分析优势,可以在促进这种认识方面发挥独特作用。

为此,Zhao等^[68]通过将元耦合框架与河流上、中、下游的生态系统服务流相结合,提出了一个具备双向分析功能的土壤保持服务评估框架,并指出为了避免生态系统管理对目标过程和非目标过程可能产生的负面影响,应加强土壤保持服务与其他生态系统服务之间的多尺度权衡。Bagstad等^[69]开发了基于“服务路径归因网络”的生态系统服务建模框架,该框架将生态系统服务流结构化为源区、汇区和使用区,并提出5步法来实现对不同生态系统服务供给、需求与流动的一致评价。Zhao等^[70]将网络分析方法应用于流域生态系统管理,提出一个由生态系统、生态系统服务、生态系统服务受益者、驱动力和管理5个要素组成的流域生态系统管理评估框架,并就其适用性在黑河流域进行了验证。总之,多尺度权衡和生态系统服务的网络分析是将远程耦合框架应用于生态系统服务评估与管理的良好抓手。

4.2 远程耦合的社会经济与环境的影响

远程耦合框架本身关注远距离人类与自然耦合系统之间的社会经济和环境相互作用^[9,20],因此远程耦合的社会经济与环境的影响自然是该领域的重点研究内容。近年来,学者们应用远程耦合框架,在能源可持续性、全球农业贸易的生物多样性影响、碳排放、栖息地碎片化、生物能源贸易和小农生计等方面取得诸多进展,这些成果总体上可归纳为社会经济影响、生态环境影响和耦合反馈3个方面。

4.2.1 远程耦合的社会经济影响

Yao等^[41]研究了中国-巴西大豆贸易对美国的溢出效应,发现巴西大豆出口的强劲增长取代了美国大豆在中国的部分市场份额,同时也冲击了中国国内的大豆生产,使中国的大豆行业依赖于补贴艰难生存。反过来看,也正是中国饮食转型带来的大豆需求增长促使巴西将更多的土地用于大豆生产并不断改进品种和技术,使单产水平提高^[71]。在远程耦合的社会经济影响研究中,小农户受到了重点关注。始于20世纪80年代中期的新自由主义经济改革使小农逐渐融入全球市场^[72],随着跨国土地交易^[73]、劳务移民和全球消费者对高附加值农产品的

需求增长^[52],以前孤立的农村地区正通过远程耦合越来越多地与其他遥远的地方(如城市)联系起来^[74],并产生或消极或积极的社会经济影响。

在消极影响方面,某些远程耦合对小农而言通常是不利的^[52],特别是大规模土地使用权交易会直接影响当地农户,因为小农会失去土地,而土地和自然资源是他们赖以生存的资本^[75]。另外,由于海外农业投资倾向于种植出口型作物,因此也会增加目标国在农产品价格冲击中的脆弱性^[47]。小规模渔业和远洋捕捞方面的情形与此类似,Crona等^[76]研究发现,当小规模渔业融入全球市场时,当地的社会生态系统会对生计、经济和生态产生多方面的影响,例如,由于当地治理能力薄弱,外部市场需求常常导致过度捕捞,进而冲击当地渔民生计。

然而,远程耦合对小农的影响也并非都是消极的,某些条件实际上有利于加强社会生态系统的可持续性^[52]。如哥伦比亚生态认证的咖啡农林系统、美国有机认证的小农乳制品生产、摩洛哥高附加值的生态坚果油,以及玻利维亚将小型农业生态系统与国际劳务移民相结合的社会生态系统^[52]。这些有益的实践表明,在市场(商品、劳动力、金融)、城市化、治理和技术的全球一体化中,通过诸如生态有机认证、地理标志认证、建立合作社以及进行稀缺性和独特性营销叙事的系列善治安排,提高小农的全球化参与水平完全可以实现改善生计、保护生物多样性和保障粮食安全的多维目标^[52]。

4.2.2 远程耦合的生态环境影响

远程耦合对资源环境承载力、生物多样性、碳排放和生态系统服务等产生了多方面的影响。在生物多样性方面,Chaudhary等^[77]的研究发现,人均国内生产总值高的工业化国家是热带地区发展中国家生物多样性影响的主要净进口国,其中印度尼西亚向美国和中国出口产生的影响最大。在此基础上,Chaudhary等^[78]计算了所有国家木材生产导致的物种灭绝,结果发现热带地区的林地使用会带来生物多样性和净经济损失,全球485起林业导致的物种灭绝中155起归因于木材出口,一些低收入国家因木材出口每年失去的生态系统服务价值高达3000美元/hm²。

区域连接性的增强同样会影响生态系统。在远程耦合系统中,道路等基础设施是各种“流”的物理载体^[79]。道路在连接不同区域并促进区域间人口和资源流动上发挥了重要作用,但同时道路也破

坏了自然地域,随着全球范围内的道路建设,陆地表面已被分割成大约60万块,其中一半以上小于1 km²,这导致了栖息地碎片化和物种丧失等严重问题^[80]。来自奥地利的证据表明,随着高速公路建设和公路密度的增加,当地的孢子和野猪种群数量减少^[81]。

此外,远程耦合系统的温室气体排放也得到一定关注。Schierhorn等^[82]的研究展示了1991年苏联解体后俄罗斯牛肉生产和消费的变化如何促成巴西与俄罗斯之间牛肉贸易关系的建立,以及这种远程联系对巴西牛肉出口中碳排放的影响。总之,远程耦合对生态系统施加的影响具有隐蔽性、介导性和时空滞后性等特征。

4.2.3 远程耦合系统的耦合反馈

随着远程耦合领域的学术发展,对其社会经济与环境影响的研究逐步拓展到耦合反馈和外溢系统方面。耦合反馈是指发送系统或接收系统对系统相互作用本身的影响,例如,退耕还林计划实施后农户意愿对继续执行该计划的影响。早先以卧龙自然保护区为案例的研究发现,退耕还林推动的边缘农田造林显著增加了野生动物对剩余耕地上作物的损害^[83],这可视为远程耦合(即退耕还林政策)对当地社会-生态系统的影响。新近的跟踪式研究则聚焦于:野生动物造成作物损害后,农户意愿对继续开展退耕还林的影响,结果表明,作物损害非但不会使农户拒绝退耕还林,反而会激励他们将林地边缘10.4%的耕地用于新的退耕还林^[74]。也有研究关注不可抗因素对远程耦合的影响,Zhang等^[84]研究了汶川地震对卧龙与世界其他地区远程耦合的影响,结果表明,地震改变了远程耦合的多个主要成分,并在当地产生复杂的社会经济和生态效应。Easter等^[85]研究了未来50 a气候变化下非洲锥虫病地理范围变化对养牛业生产模式的影响,以及生产模式变化对人类福祉和环境可持续性的影响。相关研究还进一步拓展到外溢系统,刘建国等^[86]针对远程耦合中溢出影响的复杂性,基于流、系统距离、溢出效应、外溢系统大小、外溢系统的主体角色和外溢系统起源6个要素对外溢系统进行分类,并提出定性定量相结合的方法体系来检测和研究所外溢系统。可见,有关远程耦合影响的研究正逐步向系统化和模拟预测方向发展。

4.3 远程耦合下的土地变化科学

驱动土地利用/覆被变化的诸多因子具有发挥

远距离作用的特性,或者会受到远程因素的影响。近年来,由于2项重要研究的启发,土地变化科学正成为应用远程耦合框架的重要领域。一是刘建国等^[9,20]在建立远程耦合框架时通过生物燃料和大豆贸易案例提供了远程耦合影响土地利用/覆被的有力证据。二是Seto等^[57]开创性地提出了城市土地遥相关的概念,明确将非城市地区的土地变化与潜在的城市化过程联系起来;通过捕捉远距离过程(如城市化)与具体地点之间的联系,城市土地遥相关能够克服传统研究中土地分类制度导致城乡二元划分的不足,同时有助于重建地点之间特别是城市功能与农村土地用途之间的远程联系。

在此基础上,土地系统科学的几项理论研究确认了上述进展^[87-89],并指出远程耦合与城市土地遥相关激发了一种综合的社会生态系统视角,在该视角下,土地变化被视为社会生态系统内跨时空尺度的动态相互作用^[87-88]。这种观点也使土地系统科学从关注最直观的土地覆盖变化转向更加注重人类与自然环境相互作用的微妙变化,如土地管理^[90-91]与生态系统服务的广泛提供^[92]等。

实际上,为了更好地化解“土地掠夺”和“保护幻觉”等一系列具有争议性的全球环境问题,亟需在土地变化科学中应用远程耦合理论框架,这有助于对跨界土地变化的驱动因素实施多层次治理^[89]。特别是能够弥补土地变化科学在跨国土地使用权转让问题中的缺位,这种缺位根本上源于跨国土地使用权转让研究与土地变化科学之间的双重脱节^[93]。在跨国土地使用权转让研究中,对转让决策和土地变化驱动力的研究主要建立在基于过程的概念化空间上(如笼统的国家),而土地变化科学则主要将土地视为具有固定属性的有界地理区域,这使得土地变化科学难以将间接驱动因素纳入社会生态分析^[93-94]。而远程耦合框架则能够将基于地点的土地变化与基于过程的土地利用决策和土地变化驱动因素结合起来,这种结合有助于找到大规模土地征用问题的症结所在,进而有助于将“土地掠夺”转变为可持续的土地投资^[93]。同时,在土地变化科学中应用远程耦合框架也有助于揭示全球范围内的“保护幻觉”,例如对亚马孙地区森林砍伐的有效遏制实际上加剧了巴西塞拉多斯和非洲萨瓦纳的森林砍伐^[95]。

最近的一项研究则探讨了土地利用变化驱动力研究中应用远程耦合框架的具体方法,认为建立

“时-空-事”三位一体的土地利用/覆被变化解析路径、土地利用/覆被变化的近远程驱动力分解和基于网络的跨系统综合研究是在远程耦合视角下解释土地利用/覆被变化的重点内容^[99]。总之,目前远程耦合下的土地变化科学仍以理论研究为主,案例研究偏少,在案例研究中严格应用定量方法的文献也较少,实际上该领域正处于起步阶段,还有很大的潜力空间等待挖掘。

5 远程耦合研究方法

自远程耦合理论提出以来,学界围绕该理论框架开展了大量富有启发性的研究,但目前大部分研究属于理论探讨,实证研究中对远程耦合框架的量化应用较少。缺乏实证应用的一个原因是,该理论框架在案例研究中仍面临实际应用的挑战^[96-97],要将理论框架应用于实证分析还需要研究工具和具体方法的支撑。近年来对远程耦合理论进行方法操作化的呼声不断出现,一些旨在实现量化和建模的研究工具和方法创新不断取得进展^[26,98]。Tonini等^[99]运用Python和R语言开发了远程耦合工具箱,这是为远程耦合理论操作化开发的第一套分析工具,用于映射和识别远程耦合框架的5个相互关联的组件,即系统、流、代理、原因和影响。该工具箱是在地理信息系统(GIS)环境中开发的并具有良好的模块化设计,因此能很好地整合到ArcGIS和INVEST等现有的工具和软件中,实际上远程耦合工具箱是作为ArcGIS软件的自定义工具箱开发的,目前该工具箱与10.3.1或更高版本的GIS兼容^[99]。在此基础上,McCord等^[100]进一步开发了一种基于Web-GIS的应用程序——Telecoupling GeoApp,实际上这是远程耦合工具箱中一个基于网络的组件,其特点是无需安装软件或许可,因此使用起来更加灵活,它是对远程耦合工具箱的良好补充。Telecoupling GeoApp具有映射和地理空间分析工具,也具备可视化量化远程耦合框架中5大组件(系统、流、代理、原因和影响)的功能^[100]。远程耦合工具箱和Telecoupling GeoApp的开发无疑具有重要意义,因为它们提供了系统操作远程耦合框架的工具,借助这两种工具,研究人员目前已能够系统和半定量地研究远距离人类与自然耦合系统间的社会经济和环境相互作用^[99-100]。

除了针对远程耦合框架而专门开发的研究工具以外,一些更加成熟的研究方法,如多区域投入产出模型(MRIO)、物质流分析(MFA)、生命周期评估(LCA)和环境投入产出分析(EIOA)等区域间分析方法在远程耦合研究中也得到应用。如Lenzen等^[101]基于多区域投入产出表量化了全球商品和服务贸易中体现的生物多样性损失;Haberl等^[102]通过建立农产品消费的原始账户和目的地账户,评估了奥地利农产品贸易和消费中体现的“人类净初级生产力占用”(eHANPP);Bruckner等^[103]系统比较了环境经济核算、实物核算和混合核算3种土地足迹核算方法的差异和优缺点,认为混合核算方法在土地足迹评估中更具优势。此外,由于远程耦合系统本质上是一种复杂的地理网络,因此社会网络分析法也有望为远程耦合研究提供有益的方法借鉴^[9,20]。总之,得益于远程耦合工具箱和Telecoupling GeoApp的开发以及区域间分析方法的支持,目前远程耦合的量化研究已具备较好的可操作性。以上主要研究方法的适用性和优缺点总结如表2所示。

6 远程耦合研究展望

由于能源使用、交通运输和信息通讯的技术进步,区域连通性、人类可移动性和资源流动性不断增强,这不仅是历史发展的重要特征,也是未来发展的主要趋势。在开放系统条件下,通过要素流发生的近远程人地相互作用及其对可持续性的影响已成为地理学需要面对的现实科学命题。特别是,随着城市化世纪的到来,人类需求正日益集聚到地球表面的特定节点空间,这些区域越来越难以单凭自身满足其人口需求,转而需要通过发达的基础设施网络从腹地获得供应。在这种情况下,跨区域要素流的急剧增长就不仅仅是简单的数量变化,而是社会运行机制的根本变革。某种程度上,跨区域要素流已成为城市运行的基本机制,甚至决定着城市安全存续的命脉^⑤。因此,以“流”为载体的远距离人地系统相互作用及其对可持续性的影响应当成为当前及未来地理学研究的重点领域,并建议从以下方面开展研究。

(1) 基于远程耦合框架的人地关系网络系统理论创新。地球表层存在若干多尺度嵌套的网络结构,如流域水系、物种迁徙廊道以及人类建造的基

⑤ 如跨区域输水管网、电力线、能源运输管网和农产品物流体系就决定着特大城市(群)存续的命脉。

表2 不同研究方法的适用性和优缺点

Tab.2 Applicability and advantages and disadvantages of different research methods

方法名称	方法(工具)简介及适用性	优点	缺点
远程耦合工具箱	是在 ArcGIS 环境下开发的软件工具,能够映射和量化远程耦合框架的5个组件,可用于空间显式的多种远程耦合研究,如农产品贸易、生态系统服务付费计划和国际旅游等 ^[99]	空间明确,远程耦合框架的各组件均与特定位置相关联;能够进行多尺度分析和可视化表达;模块化、可扩展;允许整合现有工具和软件 ^[99]	对于更广泛的远程耦合过程仍缺乏相应的分析工具;对因果关系等机理性问题的研究效果有限 ^[99]
Telecoupling GeoApp	是基于远程耦合工具箱的 Web 应用程序,用于快速可视化和量化远程耦合组件及其结果 ^[100]	无需安装软件或许可,使用灵活方便 ^[100]	定量化功能不足;在揭示社会影响和溢出效应方面存在明显缺陷 ^[100]
多区域投入产出模型(MRIO)	通过双边贸易流连接多个国家或地区的物流网络,能够利用国家特定的生产技术和经济结构信息跟踪全球供应链 ^[104-105]	可以考虑到各国具体的资源强度 ^[106] ;覆盖面广,能够跟踪国际供应链上的复杂流动 ^[107]	模型所能决定的货物和区域细节有限 ^[108] ;货币流与具体土地之间未必相称,“分配逻辑”可能导致结果扭曲;数据存在时滞 ^[103]
物质流分析(MFA)	通过评估时空上定义的任何宏观系统,如城市、区域、国家中货物的总存量和流动来提供有关能源和物质资源在相关系统内移动、消耗和储备情况的完整、一致的信息 ^[7]	可以应用更详细的货物信息,并根据报告的生物质流量和技术转化率分配土地 ^[103] ;可以促进对环境负荷和资源耗竭等具体问题的早期识别 ^[109]	在高度加工的生物制品特别是纺织品等非食品产品的供应链方面存在局限性 ^[103]
环境投入产出分析(EIOA)	使用部门货币交易矩阵来解释现代经济中部门之间复杂的相互依赖关系 ^[110] ,EIOA 通过估算材料和能源投入,以及不同规模(从特定商品到整个行业)的经济活动产生的环境排放产出,扩展了传统的货币投入产出分析(MIOA) ^[7]	可以将货币价值与实物和环境成本联系起来 ^[7] ,计算简便、快捷,不存在截断偏差 ^[111]	由于很少有城市编制投入产出表,因而限制了该方法在城市一级的应用;EIOA 方法的“纯部门假设”在合并具有不同环境影响的部门后会导导致计算偏差;数据处理时间长、更新频率低等 ^[111]
生命周期评估(LCA)	评估产品从原材料到生产、使用直至废弃整个生命周期的投入、产出和潜在的环境影响,该方法对特定产品生产所需的不同材料和能源投入进行了量化 ^[7]	LCA 能够确定与主题产品生命周期相关的一些环境影响,从而有助于提高材料和能源使用效率,或制定产品生命周期中减少污染负荷的干预措施 ^[7]	数据跟踪周期长,调查过程繁琐;只适用于单个或数个产品的投入产出与环境影响分析,当扩大对象范围时工作量会剧增

基础设施网络。在城市化世纪,随着人类需求的空间集聚,以及快速交通网络和区域性运输管网的形成,跨越空间距离的人地相互作用变得十分普遍。顺应这种趋势,亟需从远程耦合框架中汲取营养,在人地关系地域系统理论基础上开展人地关系网络系统的理论创新研究。建立以网络结构作为基本空间骨架、以面域空间作为基本支撑单元、以要素流动作为基本运行机制的人地关系网络系统。其中,网络结构由通道(如道路、管线、迁徙路径及河流等,抽象为线)和节点(如城市群、城镇、村庄、生物群落、栖息地等,抽象为点)组成;面域空间是除网络结构以外的其余地球表层系统,如耕地、林地、草地和湖泊水域等;要素流是在节点之间的通道上作单向、双向或多向运动的人口、资源、货物、生物和非生物。在明晰网络系统基本构成的基础上,应从格局、过程、机制和影响出发,研究人地关系网络系统中近远程耦合的机理和规律,寻找近远程耦合蕴含的可持续性挑战,并提出应对挑战的调控工具集。其中又以远程耦合机制和远程耦合的调控工

具集为重难点,需将其单独列为重点领域,以便在未来研究中进行优先突破。

(2) 远程耦合的动力机制研究。对于“远程耦合缘何发生”的研究仍然是现有文献中的薄弱点。尽管现有研究已从远程连接、全球化和城市化方面找到了一些经验证据,但大多数研究仅仅是用这些现象来印证远程耦合框架,而不是由现象及本质地探索其发生机理。另外,从3个方面的进展来看,目前对于远程耦合中城市化驱动力的研究不足,对于远程连接、全球化和城市化如何联合作用进而引致远程耦合的研究鲜有报道。鉴于此,未来应强化远程耦合的动力机制研究。运用空间分工、专业化和集聚经济的理论和方法,结合自然地理学、生态学和大气科学等多学科知识来解释远程耦合的驱动力过程,重点是加强对城市化驱动力、不同驱动因素协同作用,以及驱动过程的跨界面(人类系统界面/自然系统界面)和时空滞后性等特征的研究。

(3) 远程耦合的调控工具集。远程耦合是以全球可持续性为价值导向的理论框架,其科学追求与

全球治理目标不谋而合,而且对远程耦合的调控(如供应链管理)本身就是全球治理的重要内容。当前,逆全球化正在给全球治理蒙上阴影;气候变化、疫情扩散和污染物跨境转移等传统挑战影响不减。如何在全球范围内促进可持续发展目标的实现,亟需制定一系列有效措施来管控风险挑战。特别是对于具有隐蔽性和时滞性的社会经济与环境影响,更应该通过远程耦合研究方法的应用找到问题的症结所在,进而制定有针对性的调控工具集;除生态有机认证、地理标志认证和独特性营销以外,还应该制定更多类似于供应链管理及碳交易的市场化和普适性调控工具;要通过跨系统综合、多尺度权衡和网络分析等手段强化对生态系统服务的评估与管理。在国家范围内,对远程耦合的调控应着力于促进跨区域资源调度格局的优化和生态补偿机制的落实。

总之,远程耦合框架本质上是基于离散区域的单系统研究转变为基于地理网络的跨系统研究,将过去被视为外生变量的“区外因素”内化为系统反馈,因此有望成为地理学理论创新与变革的催化剂。

参考文献(References)

- [1] 吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统 [J]. 经济地理, 1991, 11(3): 1-6. [Wu Chuanjun. On the research core of geography: The regional system of human-earth relations. *Economic Geography*, 1991, 11(3): 1-6.]
- [2] Dicken P. *Global shift: Mapping the changing contours of the world economy* [M]. 7th Edition. Los Angeles, USA: Sage, 2015.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment Panel. *Ecosystem and human well-being: Synthesis* [M]. Washington D C, USA: Island Press, 2005.
- [4] Liu Jianguo, Dietz T, Carpenter S R, et al. Coupled human and natural systems [J]. *AMBIO*, 2007, 36(8): 593-596.
- [5] Kissinger M, Rees W E, Timmer V. Interregional sustainability: Governance and policy in an ecologically interdependent world [J]. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14: 965-976.
- [6] Fridman D, Kissinger M. An integrated biophysical and ecosystem approach as a base for ecosystem services analysis across regions [J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 242-254.
- [7] Kissinger M, Rees W E. An interregional ecological approach for modelling sustainability in a globalizing world: Reviewing existing approaches and emerging directions [J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221: 2615-2623.
- [8] Gould J. Nutrition: A world of insecurity [J]. *Nature*, 2017, 544(4): S6-S7.
- [9] Liu Jianguo, Hull V, Batistella M, et al. Framing sustainability in a telecoupled world [J]. *Ecology and Society*, 2013, 18(2): 26. doi: 10.5751/ES-05873-180226.
- [10] 方恺. 足迹家族研究综述 [J]. 生态学报, 2015, 35(24): 7974-7986. [Fang Kai. Footprint family: Current practices, challenges and future prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 7974-7986.]
- [11] Steffen W, Richardson K, Rockstrom J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet [J]. *Science*, 2015, 347: 1259855. doi: 10.1126/science.1259855.
- [12] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems [J]. *Science*, 2009, 325: 419-422.
- [13] Liu Jianguo, Hull V, Godfray H C J, et al. Nexus approaches to global sustainable development [J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(9): 466-476.
- [14] Sherbinin A D, Vanwey L, Mcsweeney K, et al. Rural household demographics, livelihoods and the environment [J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(1): 38-53.
- [15] Alberti M, Asbjornsen H, Baker L A, et al. Research on Coupled Human and Natural Systems (CHANS): Approach, challenges, and strategies [J]. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 2011, 92(2): 218-228.
- [16] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *PNAS*, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [17] Moran E F. *Environmental social science: Human-environment interactions and sustainability* [M]. Hoboken, USA: Wiley-Blackwell, 2010.
- [18] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in Social- ecological Systems [J/OL]. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): 5. <https://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>.
- [19] Liu Jianguo, McConnell W, Baerwald T, et al. Symposium on "Telecoupling of Human and Natural Systems" at the meeting of the American Association for the Advancement of Science [EB/OL]. <http://aaas.confex.com/aaas/2011/webprogram/Session2889.html>, 2011.
- [20] 刘建国, Hull V, Batistella M, 等. 远程耦合世界的可持续性框架 [J]. 生态学报, 2016, 36(23): 7870-7885. [Liu Jianguo, Hull V, Batistella M, et al. Framing sustainability in a telecoupled world. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7870-7885.]

- [21] Liu Jianguo. Integration across a metacoupled world [J]. *Ecology and Society*, 2017, 22(4): 29. doi: 10.5751/ES-09830-220429.
- [22] 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 [J]. *地理学报*, 2016, 71(4): 531-550. [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.]
- [23] 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 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(7): 833-846. [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. *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(7): 833-846.]
- [24] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架 [J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 1-19. [Liu Haimeng, Fang Chuanglin, Li Yonghong. The Coupled Human and Natural Cube: A conceptual framework for analyzing urbanization and eco-environment interactions. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 1-19.]
- [25] Liu Jianguo, Yang Wu. Integrated assessments of payments for ecosystem services programs [J]. *PNAS*, 2013, 110(41): 16297-16298.
- [26] Liu Jianguo, Mooney H, Hull V, et al. Systems integration for global sustainability [J]. *Science*, 2015, 347: 963-972.
- [27] Bollmann M, Bosch T, Colijn F, et al. World ocean review: Living with the oceans [M]. Hamburg, Germany: Maribus GmbH, 2010.
- [28] Pichler M, Schaffartzik A, Haberl H, et al. Drivers of society-nature relations in the Anthropocene and their implications for sustainability transformations [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2017, 26-27: 32-36. doi: 10.1016/j.cosust.2017.01.017.
- [29] Steffen W, Persson A, Deutsch L, et al. The anthropocene: From global change to planetary stewardship [J]. *AMBIO*, 2011, 40: 739-761.
- [30] National Geographic Society. Great Pacific garbage patch-Pacific trash vortex [EB/OL]. <http://www.national-geographic.org/encyclopedia/great-pacific-garbage-patch/>, 2017.
- [31] Stokols D. Social ecology in the digital age: Solving complex problems in a globalized world [M]. San Diego, USA: Elsevier Science Publishing Co Inc, 2017: 265-317.
- [32] Ti B, Li L, Liu J, et al. Global distribution potential and regional environmental risk of F-53B [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 1365-1371.
- [33] Prospero J M, Mayol-Bracero O L. Understanding the transport and impact of African dust on the Caribbean Basin [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(9):1329-1337.
- [34] Griffin D W, Kellogg C A, Garrison V H, et al. The global transport of dust [J]. *American Scientist*, 2002, 90(3): 228-235.
- [35] 香宝, 刘纪远. 东亚土地覆盖对 ENSO 事件的响应特征 [J]. *遥感学报*, 2003, 7(4): 316-320. [Xiang Bao, Liu Ji-yuan. Characteristic of East Asia land cover's response to ENSO events. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(4): 316-320.]
- [36] Hawkins E, Smith R S, Allison L C, et al. Bistability of the Atlantic overturning circulation in a global climate model and links to ocean freshwater transport [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): 415-421.
- [37] Verburg P H, Dearing J A, Dyke J G, et al. Methods and approaches to modelling the Anthropocene [J]. *Global Environmental Change*, 2016, 39: 328-340.
- [38] David H, Anthony M, David G, et al. Global transformations: Politics, economics and culture [M]. California, USA: Stanford University Press, 1999.
- [39] 马恩朴, 蔡建明, 林静, 等. 远程耦合视角下的土地利用/覆被变化解释 [J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 421-431. [Ma Enpu, Cai Jianming, Lin Jing, et al. Explanation of land use/cover change from the perspective of telecoupling. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 421-431.]
- [40] 杜国明, 匡文慧, 孟凡浩, 等. 巴西土地利用/覆盖变化时空格局及驱动因素 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(1): 73-82. [Du Guoming, Kuang Wenhui, Meng Fanhao, et al. Spatiotemporal pattern and driving forces of land use/cover change in Brazil. *Progress in Geography*, 2015, 34(1): 73-82.]
- [41] Yao G, Hertel T W, Taheripour F. Economic drivers of telecoupling and terrestrial carbon fluxes in the global soybean complex [J]. *Global Environmental Change*, 2018, 50: 190-200.
- [42] Wu X D, Guo J L, Han M Y, et al. An overview of arable land use for the world economy: From source to sink via the global supply chain [J]. *Land Use Policy*, 2018, 76: 201-214.
- [43] Dittrich M, Bringezu S. The physical dimension of international trade: Part 1: Direct global flows between 1962 and 2005 [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(9): 1838-1847.

- [44] Schaffartzik A, Mayer A, Gingrich S, et al. The global metabolic transition: Regional patterns and trends of global material flows, 1950–2010 [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 87-97.
- [45] Infante-Amate J, Aguilera E, Palmeri F, et al. Land embodied in Spain's biomass trade and consumption (1900–2008): Historical changes, drivers and impacts [J]. *Land Use Policy*, 2018, 78: 493-502.
- [46] Behrman J, Meinzen-Dick R, Quisumbing A. The gender implications of large-scale land deals [J]. *The Journal of Peasant Studies*, 2012, 39(1): 49-79.
- [47] Schutter O D. How not to think of land-grabbing: Three critiques of large-scale investments in farmland [J]. *The Journal of Peasant Studies*, 2011, 38(2): 249-279.
- [48] Li T M. Centering labor in the land grab debate [J]. *The Journal of Peasant Studies*, 2011, 38(2): 281-298.
- [49] Margulis M E, McKeon N, Borras S M. Land grabbing and global governance: Critical perspectives [J]. *Globalizations*, 2013, 10(1):1-23.
- [50] White B, Borras S M, Hall R, et al. The new enclosures: Critical perspectives on corporate land deals [J]. *The Journal of Peasant Studies*, 2012, 39(3-4): 619-647.
- [51] Newton P, Agrawal A, Wollenberg L. Enhancing the sustainability of commodity supply chains in tropical forest and agricultural landscapes [J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(6): 1761-1772.
- [52] Zimmerer K S, Lambin E F, Vanek S J. Smallholder telecoupling and potential sustainability [J]. *Ecology and Society*, 2018, 23(1): 30. doi:10.5751/ES-09935-230130.
- [53] Liu Jianguo, Hull V, Luo J, et al. Multiple telecouplings and their complex interrelationships [J]. *Ecology and Society*, 2015, 20(3): 44. doi:10.5751/ES-07868-200344.
- [54] Schröter M, Koellner T, Alkemade R, et al. Interregional flows of ecosystem services: Concepts, typology and four cases [J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 231-241. doi:10.1016/j.ecoser.2018.02.003.
- [55] 陈明星. 城市化领域的研究进展和科学问题 [J]. *地理研究*, 2015, 34(4): 614-630. [Chen Mingxing. Research progress and scientific issues in the field of urbanization. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 614-630.]
- [56] Cumming G S, Buerkert A, Hoffmann E M, et al. Implications of agricultural transitions and urbanization for ecosystem services [J]. *Nature*, 2014, 515(11): 50-57.
- [57] Seto K C, Reenberg A, Boone C G, et al. Urban land teleconnections and sustainability [J]. *PNAS*, 2012, 109(20): 7687-7692.
- [58] 周伟奇, 王坤, 虞文娟, 等. 城市与区域生态关联研究进展 [J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5238-5245. [Zhou Weiqi, Wang Kun, Yu Wenjuan, et al. Understanding the social and ecological connections between cities and surrounding regions for urban and regional sustainability. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 5238-5245.]
- [59] López-Hoffman L, Chester C C, Semmens D J, et al. Ecosystem services from transborder migratory species: Implications for conservation governance [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2017, 42(1): 509-539.
- [60] Semmens D J, Diffendorfer J E, López-Hoffman L, et al. Accounting for the ecosystem services of migratory species: Quantifying migration support and spatial subsidies [J]. *Ecological Economics*, 2011, 70: 2236-2242.
- [61] Semmens D J, Diffendorfer J E, Bagstad K J, et al. Quantifying ecosystem service flows at multiple scales across the range of a long-distance migratory species [J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 255-264.
- [62] Austin J E, Miller M R. Northern pintail (*Anas acuta*) [M]// Poole A, Gill F. *The birds of North America*. Philadelphia, USA: The Academy of Natural Sciences, Philadelphia, and Washington D C, USA: the American Ornithologists' Union, 1995.
- [63] Mattsson B J, Runge M C, Devries J H, et al. A modeling framework for integrated harvest and habitat management of North American waterfowl: Case-study of northern pintail metapopulation dynamics [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 225: 146-158.
- [64] Goldstein J H, Thogmartin W E, Bagstad K J, et al. Replacement cost valuation of Northern pintail (*Anas acuta*) subsistence harvest in Arctic and Sub-Arctic North America [J]. *Human Dimensions of Wildlife*, 2014, 19(4): 347-354.
- [65] Kolosz B W, Athanasiadis I N, Cadisch G, et al. Conceptual advancement of socio-ecological modelling of ecosystem services for re-evaluating brownfield land [J]. *Ecosystem Services*, 2018, 33: 29-39.
- [66] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [67] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 38-41.
- [68] Zhao W W, Liu Y, Daryanto S, et al. Metacoupling supply and demand for soil conservation service [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 136-141. doi: 10.1016/j.cosust.2018.05.011.
- [69] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. Spatial dynam-

- ics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125. doi: 10.1016/j.ecoser.2012.07.012.
- [70] Zhao Y, Wei Y P, Wu B F, et al. A connectivity-based assessment framework for river basin ecosystem service management [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 34-41. doi: 10.1016/j.cosust.2018.03.010.
- [71] Arvor D, Meirelles M, Dubreuil V, et al. Analyzing the agricultural transition in Mato Grosso, Brazil, using satellite-derived indices [J]. *Applied Geography*, 2012, 32(2): 702-713.
- [72] Zimmerer K S, Carney J A, Vanek S J. Sustainable smallholder intensification in global change? Pivotal spatial interactions, gendered livelihoods, and agrobiodiversity [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2015, 14: 49-60. doi: 10.1016/j.cosust.2015.03.004.
- [73] GRAIN. Seized: The 2008 land grab for food and financial security [R]. Barcelona, Spain: GRAIN, 2008.
- [74] Yang H, Lupi F, Zhang J, et al. Feedback of telecoupling: The case of a payments for ecosystem services program [J]. *Ecology and Society*, 2018, 23(2): 45. doi: 10.5751/ES-10140-230245.
- [75] Oberlack C, Tejada L, Messerli P, et al. Sustainable livelihoods in the global land rush? Archetypes of livelihood vulnerability and sustainability potentials [J]. *Global Environmental Change*, 2016, 41: 153-171.
- [76] 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 [J]. *Global Environmental Change*, 2015, 35: 162-175.
- [77] Chaudhary A, Kastner T. Land use biodiversity impacts embodied in international food trade [J]. *Global Environmental Change*, 2016, 38: 195-204. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.03.013.
- [78] Chaudhary A, Carrasco L R, Kastner T. Linking national wood consumption with global biodiversity and ecosystem service losses [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 985-994. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.078.
- [79] 张晋东, 罗欢. 道路在保护区远程耦合系统中的重要性分析: 以地震后的卧龙大熊猫保护区为例 [R]. 2018 世界交通运输大会. 北京, 2018. [Zhang Jindong, Luo Huan. Analysis of the importance of roads in tele-coupling system of the reserve: A case study of Wolong giant panda reserve after the earthquake. World Transport Congress 2018. Beijing, China, 2018.]
- [80] Ibisch P L, Hoffmann M T, Kreft S, et al. A global map of roadless areas and their conservation status [J]. *Science*, 2016, 354: 1423-1427.
- [81] Koemle D, Zinngrebe Y, Yu X. Highway construction and wildlife populations: Evidence from Austria [J]. *Land Use Policy*, 2018, 73: 447-457. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.02.021.
- [82] Schierhorn F, Meyfroidt P, Kastner T, et al. The dynamics of beef trade between Brazil and Russia and their environmental implications [J]. *Global Food Security*, 2016, 11: 84-92. doi: 10.1016/j.gfs.2016.08.001.
- [83] Chen X, Lupi F, Vina A, et al. Using cost-effective targeting to enhance the efficiency of conservation investments in payments for ecosystem services [J]. *Conservation Biology*, 2010, 24(6): 1469-1478.
- [84] Zhang J, Connor T, Yang H, et al. Complex effects of natural disasters on protected areas through altering telecouplings [J]. *Ecology and Society*, 2018, 23(3): 17. doi: 10.5751/ES-10238-230317.
- [85] Easter T S, Killion A K, Carter N H. Climate change, cattle, and the challenge of sustainability in a telecoupled system in Africa [J]. *Ecology and Society*, 2018, 23(1): 10. doi: 10.5751/ES-09872-230110.
- [86] Liu Jianguo, Dou Y, Batistella M, et al. Spillover systems in a telecoupled Anthropocene: Typology, methods, and governance for global sustainability [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 58-69.
- [87] Verburg P H, Crossman N, Ellis E C, et al. Land system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective [J]. *Anthropocene*, 2015, 12: 29-41. doi:10.1016/j.ancene.2015.09.004.
- [88] Verburg P H, Erb K H, Mertz O, et al. Land System Science: Between global challenges and local realities [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5: 433-437.
- [89] Boillat S, Scarpa F M, Robson J P, et al. Land system science in Latin America: Challenges and perspectives [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2017, 26-27: 37-46. doi:10.1016/j.cosust.2017.01.015.
- [90] Erb K H, Haberl H, Jepsen M R, et al. A conceptual framework for analysing and measuring land-use intensity [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5: 464-470.
- [91] Kuemmerle T, Erb K, Meyfroidt P, et al. Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5: 484-493.
- [92] Crossman N D, Bryan B A, Groot R S, et al. Land science contributions to ecosystem services [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5: 509-514.

- [93] Messerli P, Heinemann A, Giger M, et al. From 'land grabbing' to sustainable investments in land: Potential contributions by land change science [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5: 528-534.
- [94] Turner II B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability [J]. *PNAS*, 2007, 104(52): 20666-20671.
- [95] Arvor D, Tritsch I, Barcellos C, et al. Land use sustainability on the South-Eastern Amazon agricultural frontier: Recent progress and the challenges ahead [J]. *Applied Geography*, 2017, 80: 86-97.
- [96] Friis C, Nielsen J Ø, Otero I, et al. From teleconnection to telecoupling: Taking stock of an emerging framework in land system science [J]. *Journal of Land Use Science*, 2016, 11(2): 131-153. doi: 10.1080/1747423X.2015.1096423.
- [97] Global Land Programme (GLP). Global land programme: Science plan and implementation strategy 2016-2021 [EB/OL]. https://glp.earth/sites/default/files/uploads/glpsciencesplan_25_10_16.pdf. Bern, Switzerland: Global Land Programme, 2016.
- [98] Millington J D A, Xiong H, Peterson S, et al. Integrating modelling approaches for understanding telecoupling: Global food trade and local land use [J]. *Land*, 2017, 6 (3): 56-74.
- [99] Tonini F, Liu J. Telecoupling Toolbox: Spatially explicit tools for studying telecoupled human and natural systems [J]. *Ecology and Society*, 2017, 22(4): 11. doi: 10.5751/ES-09696-220411.
- [100] McCord P, Tonini F, Liu J. The Telecoupling GeoApp: A Web-GIS application to systematically analyze telecouplings and sustainable development [J]. *Applied Geography*, 2018, 96: 16-28.
- [101] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, et al. International trade drives biodiversity threats in developing nations [J]. *Nature*, 2012, 486(6): 109-112.
- [102] Haberl H, Kastner T, Schaffartzik A, et al. Global effects of national biomass production and consumption: Austria's embodied HANPP related to agricultural biomass in the year 2000 [J]. *Ecological Economics*, 2012, 84: 66-73.
- [103] 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 [J]. *Ecological Economics*, 2015, 114: 11-21.
- [104] Wiedmann T. A review of recent multi-region input-output models used for consumption-based emission and resource accounting [J]. *Ecological Economics*, 2009, 69: 211-222.
- [105] Wiedmann T, Wilting H C, Lenzen M, et al. Quo Vadis MRIO? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input-output analysis [J]. *Ecological Economics*, 2011, 70: 1937-1945.
- [106] Tukker A, Dietzenbacher E. Global multiregional input-output frameworks: An introduction and outlook [J]. *Economic Systems Research*, 2013, 25(1): 1-19.
- [107] Chen Z M, Chen G Q. Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 28: 142-149.
- [108] Bruckner M, Giljum S, Lutz C, et al. Materials embodied in international trade-Global material extraction and consumption between 1995 and 2005 [J]. *Global Environmental Change*, 2012, 22: 568-576.
- [109] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004, 9(5): 337-338.
- [110] Munksgaard J, Wier M, Lenzen M, et al. Using input-output analysis to measure the environmental pressure of consumption at different spatial levels [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(1-2): 169-185.
- [111] 丛建辉, 刘学敏, 赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24 (4): 19-26. [Cong Jianhui, Liu Xuemin, Zhao Xueru. Demarcation problems and the corresponding measurement methods of the urban carbon accounting. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(4): 19-26.]

Research progress and prospect of telecoupling of Human–Earth system

MA Enpu^{1,2}, CAI Jianming^{1*}, HAN Yan^{1,2}, LIAO Liuwen^{1,2}, LIN Jing¹

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic

Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Achieving sustainable development in an increasingly interconnected globalized world requires cross-system thinking and more integrated regional policy. First, it requires disciplines devoted to sustainable development research to improve their insights into trans-regional resource and environmental issues. Accordingly, it is necessary to promote the adaptive innovation and transformation of the traditional research framework of geography. Telecoupling, as a theoretical framework focusing on socioeconomic and environmental interactions among coupled human and natural systems over distances, has great potential and advantages to facilitate the process of theoretical innovation. In order to narrow the gap between Chinese and international research in the field of telecoupling, we introduce the telecoupling framework and its application progress from theoretical construction, empirical evidence, key research areas, and research methods based on literature review, document analysis, and our own understanding of telecoupling, and further give some suggests. The review shows that there is a large amount of empirical evidence of telecoupling in the dimensions of teleconnection, globalization, and urbanization due to the continuous growth of long-distance human activities and their interaction with large-scale natural processes. Currently, the application of the telecoupling framework in academia mainly focuses on three aspects: ecosystem services, the socioeconomic and environmental impacts of telecoupling, and land change science. Due to the progress in operationalizing the theories, current telecoupling research has been well supported methodologically. We further argue that geographical research based on the telecoupling framework should make breakthroughs in the theoretical innovation of Human-Earth relationship network system, telecoupling mechanism, and telecoupling regulatory tool sets, so that scientific research can keep up with the latest trends and solve the emerging real world problems.

Keywords: Human–Earth system; telecoupling; empirical evidence; ecosystem services; telecoupling effects; land change science