

# 乡村人地系统耦合研究进展与展望

胡斯威<sup>1,2</sup>, 王永生<sup>1</sup>, 曹 智<sup>1\*</sup>

(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:**现代人类活动对地球表层资源环境的利用方式和影响程度在不断变化,人地圈环境和人类社会可持续发展正面临严峻挑战。人地系统耦合研究是破解生态环境和社会经济问题的综合途径,然而目前对乡村人地系统耦合研究的认识还不够充分。因此,梳理乡村人地系统耦合研究进展对于促进人地系统科学发展,支持人地系统协调与可持续发展决策具有重要意义。研究发现,乡村人地系统耦合是乡村社会经济系统与自然生态系统交互作用、相互影响的综合过程,形成了“过程—机理—格局—效应—调控”的理论范式。乡村人地系统耦合的研究主题主要包括乡村自然社会要素耦合过程格局、气候变化对农业生产的影响反馈、城镇化对乡村发展的驱动效应、全球化与农业贸易的远程作用、政策管理与工程治理的调控响应5个方面,研究方法主要涉及耦合评价模型和耦合机理模型。针对多尺度乡村人地系统耦合互馈和传导机制的研究不足以及数据模型匮乏,未来研究应当注重探测结构转型和尺度延伸下的乡村人地系统耦合过程与格局,探析要素流动和效应传导下的乡村人地系统耦合机理,探寻数据驱动和模型集成下的乡村人地系统模拟和决策方法,探明人与自然和谐共生和全球可持续发展目标下的乡村人地系统协调路径。

**关键词:**人地系统耦合;人地系统科学;乡村地域系统;过程—机理—格局;乡村可持续发展

全球工业化和快速城镇化给自然环境带来了前所未有的巨大影响,人类活动成为地球环境变化的主要驱动力,地球由此进入了“人类世”地质新时期<sup>[1]</sup>,并且人地耦合与交互渗透形成了地表圈层“人地圈”<sup>[2]</sup>。人地圈环境和人类社会正面临复杂严峻的挑战。气候变化、生物多样性损失和氮磷循环等地球系统过程已经超过地球安全界限<sup>[3-4]</sup>。自然灾害、水土污染、生态退化和环境风险等人地耦合效应已威胁人类安全空间<sup>[2]</sup>。全球有近45%的人口生活在气候变化高度脆弱环境中<sup>[5]</sup>,土地退化威胁至少32亿人的生计<sup>[6]</sup>。农业与粮食安全<sup>[7-8]</sup>、工业与能源危机<sup>[9]</sup>、减贫与乡村振兴<sup>[10-11]</sup>、福祉与社会公平<sup>[12]</sup>等经济社会问题制约着17项联合国可持续发展目

标(SDGs)的实现。全球可持续发展发展面临的突出问题本质是地球表层人地系统失调的结果<sup>[13]</sup>。

人地系统耦合研究是破解生态环境和社会经济发展问题的综合途径,对于人地系统协调与可持续发展决策,促进人与自然和谐共生具有重要意义,已成为地理学研究的前沿领域<sup>[14-15]</sup>。国际上人与环境耦合系统(coupled human-environment systems)<sup>[16]</sup>、人与自然耦合系统(coupled human and natural systems)<sup>[17]</sup>、社会—生态系统(social-ecological systems)<sup>[18]</sup>相继提出,为揭示人地系统自然—社会要素相互作用的互馈关系和动态机制提供了科学思路。国内吴传钧先生提出的人地关系地域系统为地理学深入探究人类活动与自然环境的相互作

收稿日期:2023-04-11;修订日期:2023-10-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(41931293,42271279)。**[Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No. 41931293 and 42271279. ]

第一作者简介:胡斯威(1997—),男,湖南湘乡人,博士生,研究方向为人地系统耦合与乡村可持续发展。

E-mail: husiwei101x@igsnrr.ac.cn

\*通信作者简介:曹智(1989—),男,山东济南人,博士,副研究员,硕士生导师,研究方向为土地利用与乡村发展。

E-mail: caoz@igsnrr.ac.cn

引用格式:胡斯威,王永生,曹智.乡村人地系统耦合研究进展与展望[J].地理科学进展,2023,42(12):2439-2452. [Hu Siwei, Wang Yongsheng, Cao Zhi. Progress and prospects of rural human-earth system coupling research. Progress in Geography, 2023, 42(12): 2439-2452. ] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.12.013

用关系以及人地系统要素结构、时空格局、分异规律、动力机制、调控途径等提供了核心基础,并且向人地系统非线性表征、复杂性模拟、动态性预测、可持续性评价等方面发展<sup>[2,19-20]</sup>。党的十八大以来,国家高度重视生态文明建设,二十大报告将“人与自然和谐共生的现代化”纳入了中国式现代化的基本特征。人地关系地域系统研究在推动地理学发展、服务国家经济建设和重大发展战略中发挥了支撑作用<sup>[21]</sup>。在中国地理学家提议下,2016年国际地理联合会“农业地理与土地工程委员会”(IGU-AGLE)成立,2017年国际地理联合会“面向未来地球的地理学:人地系统耦合与可持续发展委员会”(IGU-GFE)成立,进一步推动了人地系统耦合综合研究和全球地理学领域创新。

随着工业化、城镇化、信息化持续推进,人地系统经历了从自然系统到农业系统,再到乡村系统、城镇系统,最后到城乡融合系统的演化过程,人地系统耦合方式和程度也在不断变化<sup>[22-23]</sup>。早期人类活动通过农业生产及其土地利用改变地表结构,影响地表自然属性和生态功能,生物、资源、经济和技术要素相互作用形成了农业系统<sup>[24]</sup>。伴随产业类型和村庄聚落多样化发展,乡村经济和社会属性增强,人文与自然要素相互作用更加紧密,形成了具有生产、生活、生态、文化等多重功能的乡村地域系统<sup>[25]</sup>。随着现代人类活动对区域资源环境的利用程度加深,乡村地域系统的自然、经济、社会、技术等要素融合加快,物理、化学、生物、人文等过程演变加剧,系统类型、地域功能和时空分异特征变得更加复杂,城镇系统不断成长和壮大,最后城乡交互作用形成城乡融合系统<sup>[13]</sup>。然而,当前对乡村人地系统耦合的内涵和机理认识不清,缺乏乡村人地系统演化过程的传导机制解析。

因此,为适应全球变化和可持续发展新形势,响应国家战略号召新需求,顺应乡村地域系统转型

新趋势,本文通过文献梳理首先从内涵特征、结构机制和理论范式阐述了乡村人地系统耦合的理论认知,然后分别从主要研究内容和方法归纳总结了乡村人地系统耦合的研究主题和模型方法,最后针对研究不足与战略导向提出了未来研究重点,以期促进解决如何清楚认知乡村人地系统内涵与边界,如何定量刻画乡村人地系统结构与耦合机理,如何调控提升乡村人地系统价值与效能等关键科学问题,为人地系统科学研究提供借鉴,为人与自然和谐共生现代化实践提供参考。

## 1 乡村人地系统耦合理论认知

### 1.1 内涵特征

乡村人地系统耦合源于乡村地域系统的深入研究和发(图1)。早在1988年,郭焕成<sup>[26]</sup>就提出乡村是以居民点为中心、与周围地区相联系的区域综合体,也称乡村地域系统。这一概念将乡村理解为人类生活居住及其生产活动与地表环境相互联系的综合系统,开启了从单一农业部门或聚落形态转向乡村系统的认知。2018年,刘彦随<sup>[25]</sup>揭示了乡村地域系统的科学内涵,指出乡村地域系统是由人文、经济、资源与环境相互联系、相互作用下构成的具有一定结构、功能和区际联系的乡村空间体系。在进一步对乡村人地系统科学的阐述中,学者提出了乡村人地系统耦合是乡村社会经济系统与自然生态系统交互作用、相互影响的综合过程,所形成的乡村人地耦合系统具有复杂性、综合性、动态性、开放性、尺度性特征<sup>[13]</sup>。

乡村人地交互过程并非单向的线性作用,通常是非线性的互馈循环,而且具有效应的时间滞后和意外后果及形态的空间异质性,呈现复杂特征<sup>[17]</sup>。乡村人地耦合系统是自然要素和社会要素的综合集成,随着人类活动和自然过程的任一变化而发生

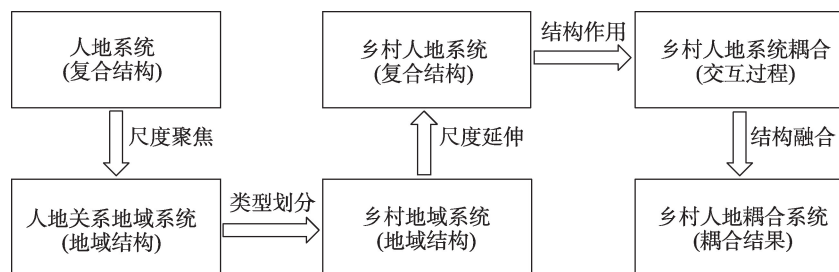


图1 乡村人地系统耦合相关概念

Fig.1 Concepts related to rural human-earth system coupling

动态变化,当变化超过弹性阈值则可能发生稳态转换。此外,乡村人地耦合系统并非孤立的封闭系统,而是一个开放的巨系统,在乡村内和城乡间存在物质、能量和信息流。乡村人地耦合系统延伸了乡村地域系统的地域性,向上可以拓展到全球尺度的地带性,向下可以细化到农户尺度的地方性,因此,具有时空多尺度特征<sup>[13]</sup>。

### 1.2 结构机制

乡村人地系统结构基于属性视角可以划分为“人—地”二元结构<sup>[20]</sup>、“社会—经济—自然”三元结构<sup>[27]</sup>、“人文—经济—资源—环境”四元结构<sup>[25]</sup>等;基于层次视角可以解构为外缘系统与内核系统,内核系统包括本体系统与主体系统<sup>[28]</sup>;基于类型视角可以细分为农业系统、村庄系统、乡域系统、城镇系统等子系统<sup>[2]</sup>。

乡村人地系统耦合机制同样具有不同视角的认知。从内外部发展动力机制来看,乡村人地系统耦合受到工业化、城镇化、信息化等外援动力和乡村资源禀赋、生产技术、组织管理等内生动力的共同作用,外援动力和内生动力的矢量合力决定了乡村人地系统发展方向<sup>[28]</sup>。从主客体互馈机制来看,乡村社会经济活动对自然生态系统产生影响,自然环境变化又进一步影响乡村社会经济活动,形成反馈与响应,具体表现为人口集聚、土地利用、资源开发、环境排放、政策管理和工程治理<sup>[2]</sup>。人口集聚是工业化和城镇化主导过程,引发各类要素在城乡间的流动和配置,推动土地利用方式和强度变化,进而影响水土资源开发和环境排放,对资源环境承载力和生态环境质量产生影响。同时,土地利用变化和能源消耗带来的碳排放加剧气候变化,进一步影响农业生产和乡村发展。人类通过政策管理和工程治理主动调控人地关系,推动人地耦合向协调转变。

从生态系统服务流动供需机制来看,生态系统服务是连接自然过程与人类福祉的桥梁,既存在乡村自然的服务供给,也包括城市和乡村对服务的需求,生态系统服务流是实现生态系统服务供给与需求耦合的过程<sup>[29]</sup>。乡村人地系统耦合还与空间尺度和距离密切相关。多尺度之间的嵌套与传导过程表明农户尺度行为与决策可能影响社区尺度的可持续发展,区域尺度的环境变化可能影响农户尺度的生计与福祉<sup>[30]</sup>。全球化使乡村人地交互作用范围由区域内耦合向远程耦合拓展,不同乡村地域范围内生计活动和生态环境相互影响<sup>[31]</sup>。

### 1.3 理论范式

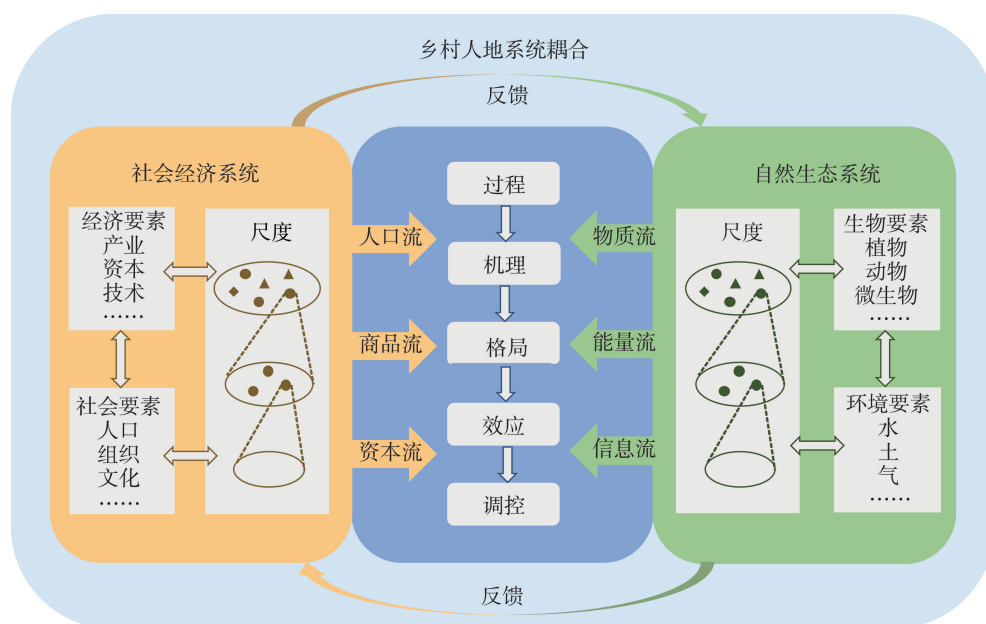
20世纪末在可持续发展背景下提出的“驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)”框架和可持续生计框架开始应用于人类活动对自然环境的影响及其反馈与响应研究,并得到农业农村可持续发展的关注<sup>[32-34]</sup>。随着人与自然耦合系统概念的出现和发展,人与自然全程耦合框架<sup>[31]</sup>、“格局—过程—服务—可持续性”框架<sup>[35]</sup>成为乡村人地系统耦合研究的重要范式。刘彦随等<sup>[13]</sup>提出乡村人地系统科学以乡村人地系统耦合机理、演化过程及其复杂交互效应为研究对象,进一步明确了乡村人地系统耦合的理论范式。本文综合概括为“过程—机理—格局—效应—调控”框架(图2)。乡村人地系统的人口、产业、资本、技术等社会经济要素与水、土、气、生等自然环境要素流动或演变形成人文过程与自然过程,产生人口流、商品流、资本流、物质流、能量流和信息流,不同尺度过程驱动社会经济结构与自然生态结构相互作用和影响,形成人地系统耦合机理。人文与自然过程会影响系统格局类型和空间分异特征,并产生资源环境和社会经济效益,效应进一步反馈给社会经济系统,再通过调控反馈至自然生态系统,由此形成人地系统耦合互馈。

## 2 乡村人地系统耦合研究主题

围绕“过程—机理—格局—效应—调控”的理论范式,目前乡村人地系统耦合研究主要聚焦在乡村自然社会要素耦合过程格局、气候变化对农业生产的影响反馈、城镇化对乡村发展的驱动效应、全球化与农业贸易的远程作用、政策管理与工程治理的调控响应5个方面。

### 2.1 乡村自然社会要素耦合过程格局

人类活动对地球表层的干扰使乡村人口、产业等社会经济要素和土地、水等自然要素的耦合过程和格局正发生显著变化。以土地和水资源为纽带的人口—土地—农产品<sup>[36]</sup>、水—能源—食物(WEF)<sup>[37]</sup>、人口—水—土地<sup>[38]</sup>等要素耦合研究受到关注。1978—2018年,中国乡村人口—耕地—粮食(PLG)的耦合协调度显著下降,尤其在东部沿海和四川盆地,东北地区PLG协调上升<sup>[36]</sup>。东北平原和黄淮海平原人均耕地面积和人均粮食占有量的耦合关系由“耕减粮增”向“耕粮俱增”转变,长江以南的大部分区域发展为“耕粮俱减”或“耕增粮减”<sup>[39]</sup>。水是



注:图中三角形、菱形、圆圈分别代表不同尺度下的不同要素。

图2 乡村人地系统耦合理论框架

Fig.2 Theoretical framework of rural human-earth system coupling

干旱地区和流域系统的关键要素<sup>[40]</sup>。研究发现,黄河流域水—能的空间匹配度下降,水—耕地的空间匹配度在源区和中游地区提高<sup>[41]</sup>;WEF经历了从解耦到耦合,再到解耦的过程,空间平衡度从西北向东南增加<sup>[37]</sup>。人口—宅基地也是中国乡村人地耦合的核心,其耦合关系主要表现为“人减地增”的负解耦过程<sup>[42-43]</sup>。

综合考虑社会经济和自然要素,一些学者通过构建要素相互作用模型为定量刻画乡村人地系统结构和耦合过程提供了新视角。例如,Wu等<sup>[44]</sup>基于人口、耕地、森林指标的分段线性回归分析揭示了近千年黄土高原社会—生态系统稳态转换过程。Wang等<sup>[45]</sup>进一步纳入收入、作物面积和产量、农业生产投入、环境状况和气候等指标,采用社会—生态网络方法分析了1949—2020年黄土高原社会—生态系统要素相互作用过程。Chen等<sup>[46]</sup>使用人口、GDP、净初级生产力和牲畜指标及其耦合系数识别了蒙古高原人与自然耦合系统的动态变化与地区差异特征。

然而,大量研究仍聚焦构建乡村人口—土地—产业<sup>[47]</sup>、社会—经济—自然<sup>[48]</sup>、生产—生活—生态<sup>[49]</sup>、DPSIR<sup>[50]</sup>的评价指标体系和综合指数模型来解析人地耦合协调过程和格局。此外,也有研究从基于土地利用类型功能的“三生”空间视角识别人

地系统协调格局<sup>[51]</sup>,从乡村地域多体系统视角衡量人口、社会、经济、资源、环境子系统的协同发展水平<sup>[52]</sup>,从乡村人地系统类型结构视角探究农牧业、村庄、乡域、城镇系统的耦合协调特征<sup>[53]</sup>,从资源系统(resources system)、人类主体(actors system)、交互作用(interactions)和系统效应(outcomes)评价乡村社会—生态系统可持续性<sup>[54]</sup>。

## 2.2 气候变化对农业生产的影响反馈

气候变化不仅受到人类活动影响,而且进一步影响人类活动。一方面,气候变化改变了农业生产的适宜性环境,促使农业系统适应性管理。气候变化通过影响生物地球化学循环改变积温、水分以及土壤状况,进而对农作物种植、产量、分布产生影响<sup>[55]</sup>。气候变化导致全球大部分地区作物产量减少,尤其是非洲等热带地区,但高纬度地区作物产量增加;作物对灌溉水的依赖总体增加,但一些缺水地区依赖减少<sup>[56]</sup>。气候变暖使中国一年一季、两季和三季种植界线北移<sup>[57]</sup>。东北地区水稻面积随着0℃等温线北移不断向高纬度地区扩张<sup>[58]</sup>。另一方面,气候变化也在改变农户生计的脆弱性环境,迫使生计方式适应性转型。气候暖干化加速了农牧交错带土地退化和水资源短缺,导致作物产量下降,家庭收入减少,使当地农牧业主导型生计向务工型和旅游型转变<sup>[59-60]</sup>。社区尺度的耕地、灌溉、

造林面积和农户尺度的生计资本等关键要素相互作用共同影响干旱地区乡村人地系统脆弱性和适应性演化<sup>[61-62]</sup>。

气候变化下的乡村人地系统发展情景和优化路径研究成为前沿主题。自IPCC于2010年提出社会经济情景(共享社会经济路径,SSPs)和气候情景(典型浓度路径,RCPs)共同预估气候变化影响并制定气候减缓和适应策略以来,SSPs已广泛应用于乡村人口、农林牧渔业、土地利用等领域的气候变化影响评估,以及影响在社会经济和自然系统间的双向反馈<sup>[63]</sup>。Delazeri等<sup>[64]</sup>将考虑收入、教育、技术、城镇化等因素的社会经济情景与温室气体排放的气候情景结合预测巴西乡村人口外流及其规模变化。Popp等<sup>[65]</sup>探究了5种SSPs情景下未来全球农业需求、生产和贸易、土地利用、农业集约化、温室气体排放和粮食价格的动态变化和影响特征。

### 2.3 城镇化对乡村发展的驱动效应

城镇化是乡村地域系统人口、土地、经济结构转型的综合过程,它通过乡城人口流动、建设用地扩张、产业结构转变等不断驱动地表人地交互作用<sup>[23]</sup>。不同维度城镇化对乡村资源环境和社会经济的影响机制不同<sup>[66]</sup>。乡村人口向城市聚集带来乡村劳动力减少和人口老龄化,进而导致耕地撂荒和宅基地空废<sup>[11]</sup>。人口老龄化造成农业产出和劳动生产率降低,化肥流失率 and 环境污染效应增加<sup>[67]</sup>。经济发展以及机械化提高了农业生产效率,加速大量农村剩余劳动力向非农产业转移,进一步释放农村土地并促进农业规模化生产<sup>[66,68]</sup>。然而,经济快速增长下化肥投入、畜禽养殖和农村生活污染排放加剧了乡村地区资源环境压力<sup>[69]</sup>。区域城镇化、农业现代化和土地利用转型对不同来源的面源污染影响存在显著差异<sup>[70]</sup>。由小农转向规模化经营可以减少化肥施用及氮排放<sup>[71]</sup>。

城镇化驱动下的土地利用变化及其生态效应是乡村人地耦合的直接表现。城镇建设用地扩张导致耕地被侵占、生态空间被蚕食,生态系统服务下降,而城市地区激增的粮食需求又带来农业用地扩增<sup>[22,72]</sup>。中国乡村地区土地利用/覆被变化表明80%以上的建设用地扩张来自对耕地的占用<sup>[73]</sup>。耕地和乡村建设用地转型成为乡村人地关系变化的焦点<sup>[39]</sup>。值得关注的是,发达地区建设用地扩张会产生跨区域土地利用变化效应,导致欠发达地区出现大规模森林砍伐和农田开垦<sup>[74]</sup>。农村住宅用地

扩张会占用栖息地导致生境质量的直接损失,同时还会产生间接影响(如向周围地区排放生活污水),并且间接影响大于直接影响<sup>[75]</sup>。

### 2.4 全球化与农业贸易的远程作用

全球化形成的复杂贸易网络尤其是互联网的“时空压缩”和要素流的连接转化会打破原有的乡村地域系统耦合方式与交互机制<sup>[13]</sup>。人口、商品、资本、信息、技术等要素在“全球乡村”中远距离流动使世界各国乡村地域系统直接或间接关联,由此将不同地区的社会经济与生态环境系统耦合起来<sup>[76-77]</sup>。

全球农产品贸易带来的生产资料 and 市场价格变动引起农业生产结构、效率、规模和分布变化,进而对贸易进出口地区的资源环境和农户生计产生影响<sup>[78]</sup>。中国与巴西大豆贸易的研究发现,出口国巴西大豆种植面积扩张加速城市内部和邻近城市的森林砍伐,而土地集约化生产提升了农业生产效率<sup>[79]</sup>。对于进口国中国而言,贸易冲击了国内小农的大豆生产,大量用于种植固氮大豆的农田转变为种植高氮需求作物玉米和水稻,同样也带来氮污染风险<sup>[80]</sup>。对于影响溢出地区,美国对中国大豆出口的全球市场份额下降,加拿大出口给巴西的化肥总量上升<sup>[81]</sup>。

伴随着贸易还有虚拟土地和水资源流动,远程耦合下的土地利用置换效应会加速部分地区耕地扩张,转移区域农业水土资源与生态压力<sup>[82]</sup>。中国省际农产品贸易使西南、东北和中部地区省份的农田土壤侵蚀受到来自发达省份农业需求的远距离影响<sup>[83]</sup>。美国生物燃料生产扩大当地玉米种植面积,并引发世界其他地区油料作物和玉米种植扩张,导致林地和草地减少及更多CO<sub>2</sub>排放<sup>[84]</sup>。与谷物和油菜籽种植情景相比,蔬菜贸易促进了中国西北干旱地区节水和减贫,贡献了30%的节水量和33%的农村居民收入增长<sup>[85]</sup>。

### 2.5 政策管理与工程治理的调控响应

政策管理与工程治理利用自然—经济—技术手段干预资源空间配置,调控生态系统结构过程和人类社会经济行为,进而响应人地系统变化<sup>[86]</sup>。土地利用政策如耕地占补平衡、城乡建设用地增减挂钩、农村土地整治等通过优化土地数量、质量、空间格局和资源、资产、资本属性促进乡村人地关系协调<sup>[87]</sup>。毛乌素沙地整治工程基于土体营造、土层复配和土壤改良提高了作物的适宜性和产量<sup>[88]</sup>。黄土高原治沟造地工程通过农业水—土—气—生要

素调控和生产模式调整提升了耕地规模产能和生态安全状况<sup>[89]</sup>。太行山荒坡地整治工程促使土地资源向资产转化,形成特色产业模式和农户参与机制,增加农民收入<sup>[90]</sup>。生态保护政策如生态补偿、生态系统服务付费、生态产品价值实现等通过建立生态系统服务供给者与受益者之间的关联机制,在不同尺度和利益相关者之间协调农村生计改善、区域经济发展和生态环境保护<sup>[91-92]</sup>。密云水库上游“稻改旱”工程使农户生计由种植水稻向玉米转变,水库水量和水质得到提升,并且保证了下游北京居民用水<sup>[92]</sup>。

政策工程实施也会产生意外后果,例如干旱、植被覆盖度等自然环境条件和放牧、人口迁移、非农就业等生计活动改变会影响退耕还林的效果<sup>[93]</sup>。黄土高原生态工程控制土壤侵蚀后,黄河泥沙负荷减少,黄河下游三角洲转向侵蚀,且大规模植被恢复引起的蒸散量增加导致土壤干燥,黄河天然径流量下降<sup>[44]</sup>。耕地占补平衡政策实施下虽然耕地总量已达到平衡,但由于省际之间耕地补偿措施不当,如林地转耕地导致植被碳储量显著减少,特别是在西南地区<sup>[94]</sup>。南水北调工程使输水地区丹江口水库水源地生态系统服务和当地居民就业收入增加,但使生态风险指数提高,受水地区城市用水量增加,但也带来外来物种入侵风险。此外,还会带来

调水沿线和长江流域水体富营养化、水文和水生生物量改变等溢出效应<sup>[95-96]</sup>。

综合来看,乡村自然社会要素间的相互作用或耦合协调过程和格局类型识别是乡村人地系统耦合研究的基础。因此,探究气候变化、城镇化和全球化等自然环境和社会经济因素的影响机理与效应是研究的核心,政策工程的调控影响是识别反馈机制的关键(图3)。然而,乡村人地系统耦合研究仍存在以下不足:① 反馈与传导机制认识不清。大多研究从单一要素或方向探究耦合过程,缺乏多要素的双向耦合及传导机制探究,例如综合考虑气候变化、城镇化、政策工程等因素对乡村人地系统的作用并且由此产生的反馈还认识不够,通过指标体系来分析系统耦合过程往往会掩盖要素间的相互关系和权衡与协同作用。② 远程耦合机制量化不足。城乡之间、区域之间的物质、能量和信息流加快,单一地理空间范围内的乡村人地系统耦合探究已不能完全反映现实情况,亟待破解乡村人地系统的远程耦合机理。尽管一些研究已经认识到远程耦合下发送系统、接收系统和溢出系统相互作用原因和效应,但仍缺乏贡献程度的定量化研究,并且有必要同时考虑生态环境和社会经济的综合效应和级联作用。③ 时空尺度拓展不够。目前研究的时间尺度通常以年或10年为单元,对长时间范围如

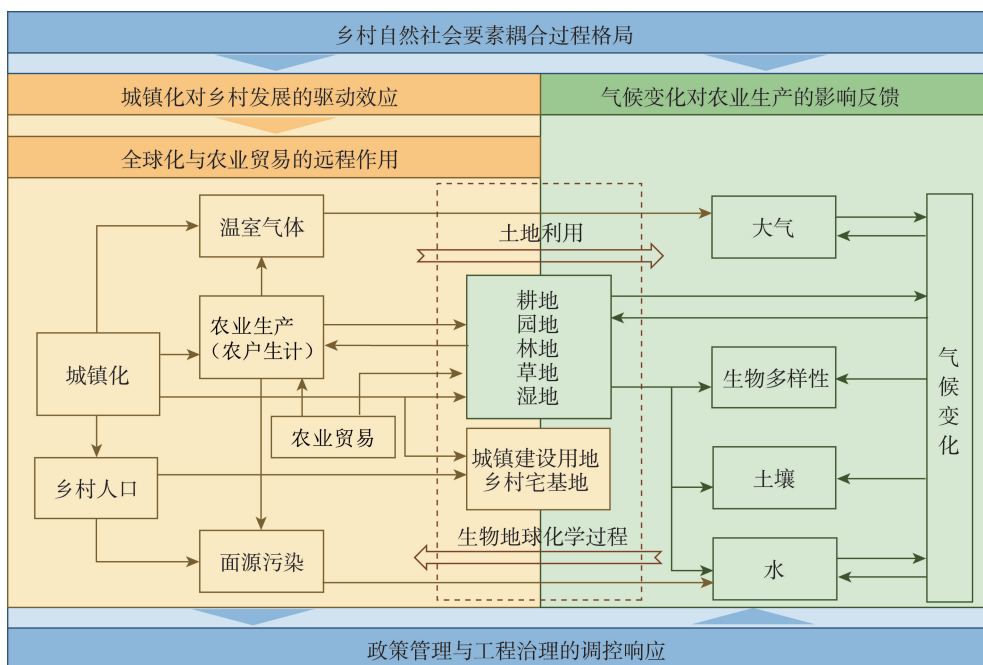


图3 乡村人地系统耦合研究主题

Fig.3 Research themes of rural human-earth system coupling

世纪甚至往上的研究较少,短时间序列难以充分刻画乡村人地系统的演化阶段;空间尺度以全国、省域、市域和县域等行政单元或区域尺度为主,对全球尺度和农户尺度的乡村人地耦合过程研究还不够。

### 3 乡村人地系统耦合模型方法

乡村人地系统耦合模型可以划分为耦合评价模型和耦合机理模型:耦合评价模型通常涉及时空格局、影响因素和综合效应的数理统计测度,耦合机理模型则注重要素过程模拟和相互作用机制刻画(图 4)。目前常用的弹性系数模型<sup>[42]</sup>、Tapio 脱钩模型<sup>[43]</sup>、耦合协调度模型<sup>[49]</sup>、综合指数模型<sup>[54]</sup>为识别乡村人地系统耦合的时空格局和演变特征提供了重要手段。承载力模型和足迹模型广泛用于综合表征人地关系和测度人地平衡状态<sup>[97]</sup>。新兴的社会—生态网络方法在定量刻画人地系统结构、分析系统要素相互依赖的动态变化方面具有较大的应用潜力<sup>[45]</sup>。在探究乡村人地系统耦合的影响因素及作用程度上,计量或空间回归分析、归因分析等

是主要的研究方法。结构方程模型整合了因子分析、路径分析和回归分析,同时可包含无法直接观测的潜变量,应用于农村生计研究中<sup>[93]</sup>。在人地耦合效应评价尤其是资源环境效应评价上,生命周期评价和多区域投入产出模型已成为全过程经济活动和跨区域资源环境影响分析的重要研究手段<sup>[78]</sup>。

可以看出,基于要素指标和数理统计分析的乡村人地系统耦合评价模型是研究主要采用的方法。然而,对于要素状态的刻画和关联影响的判别未能深入揭示乡村人地系统动态过程和互馈机制。目前自然要素过程模型较多,社会经济及其与自然要素耦合的过程模型相对较少,耦合机理模型的应用还处于起步阶段<sup>[98]</sup>。近年发展起来的多主体模型(ABM)<sup>[99]</sup>、系统动力学模型(SD)<sup>[100]</sup>、综合评估模型(IAM)<sup>[101]</sup>等已开始应用于农业部门或乡村发展的综合研究。ABM 侧重模拟个体行为决策对宏观格局的影响以及不同环境情境下个体行为的差异和动态变化,如农户行为对土地利用和环境变化的影响研究<sup>[99]</sup>。SD 通过计算机仿真试验分析系统结构和功能,识别系统内部复杂要素的因果反馈及动

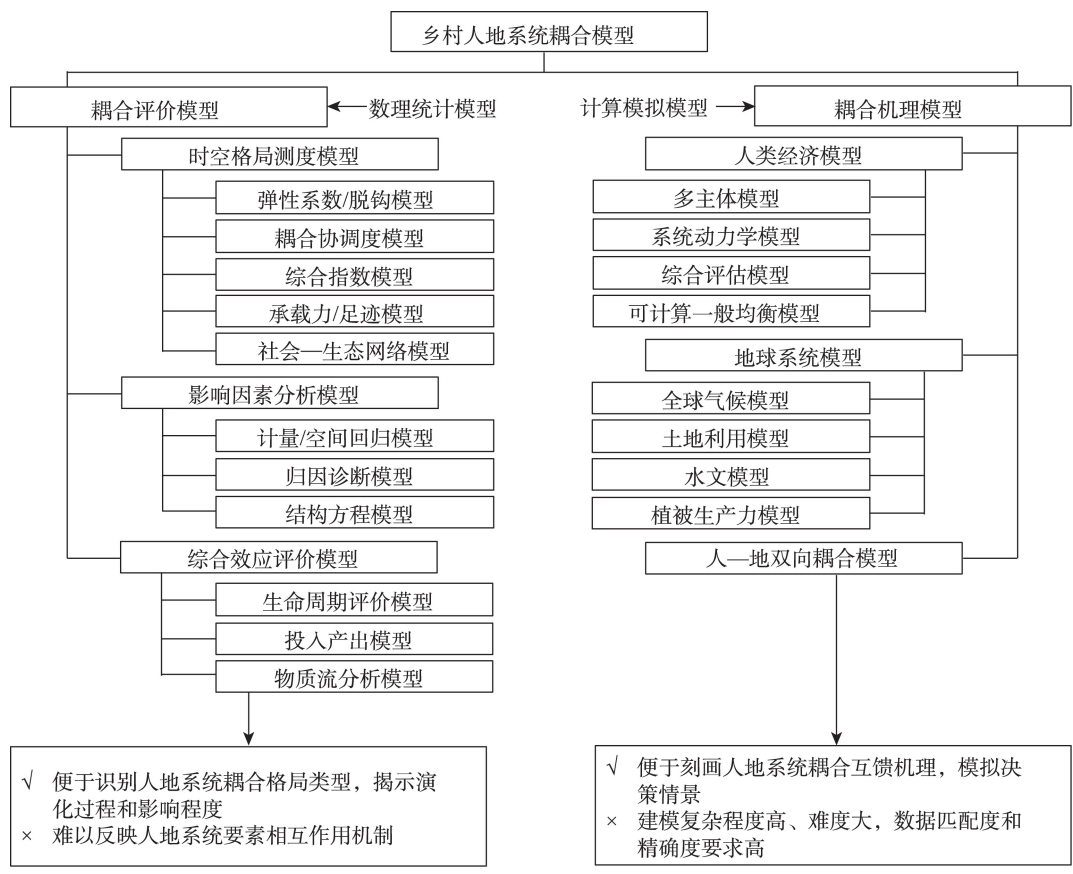


图 4 乡村人地系统耦合模型方法

Fig.4 Research methods of rural human-earth system coupling

态关系,可较好地反映人地系统耦合非线性特征,并且从资源利用、产业发展等单个子系统转向整个乡村地域系统可持续发展模拟<sup>[100]</sup>。IAM是模拟能源经济系统、温室气体排放和气候变化之间相互作用的单向反馈模型,它通过连接地球系统模型如水文模型、土地利用模型、作物模型等实现双向耦合<sup>[101-102]</sup>。

数据是支撑模型方法应用的基础。乡村人地系统耦合研究涉及的数据量大、种类多、格式标准不统一,这些特点影响着人地系统耦合微观化、量化的持续深入研究。不同于自然过程,人文过程受到人类主观意识和行为的影响而带来的不确定性较大,并且相对于城市地区人类活动的高度和长期以来受到研究的重点关注,乡村地区人类活动分散,缺乏综合研究关注,人地系统数据获取难度大。从数据获取途径上看,生态环境数据可以通过遥感观测或自动监测等手段获取,但社会经济数据包括人口流动等数据通常需要通过入户调研才能获取,而乡村地区缺乏长期监测和调查。从数据使用需求来看,不同途径和来源获取的资源环境与社会经济数据在不同尺度匹配困难,粗精度数据难以满足质量需求。此外,乡村数据普遍集成度较低,缺乏社会经济和资源环境等各类要素综合集成的大数据平台。

## 4 乡村人地系统耦合研究展望

随着全球化与国内国际双循环加速推进,乡村人地系统要素、结构和功能正在朝多元化和立体化方向发展,过程、机理和格局正在往交互式和网络化方向转变。未来需要用多要素、多维度、跨部门的系统思维,多尺度、流空间、跨区域的科学范式,大数据、多模型、跨学科的技术手段创新乡村人地系统耦合研究。同时面向全球乡村的复杂问题和人与自然和谐共生的现代化目标理念,需要发挥人地系统科学在服务国家战略需求和乡村可持续发展决策中的实践作用(图5)。

### 4.1 探测结构转型和尺度延伸下的乡村人地系统耦合过程与格局

乡村人地系统耦合过程与格局是多要素演化及结构转变的结果,从人—地双要素或水—能源—食物三要素转向气候—土地—水—能源—食物—生态等多要素关联,从乡村人—地—业要素内耦合转向城乡生产—生活—生态—社会—文化功能互耦合,将诠释复杂人地系统耦合的结构特征和格局类型,有待进一步深化大尺度、多层级的研究。将时间尺度延伸到长时间序列,从而识别乡村人地系统转型的节点阈值和变化类型,揭示乡村人地系统演化的稳态转换机制,模拟乡村人地系统耦合的动

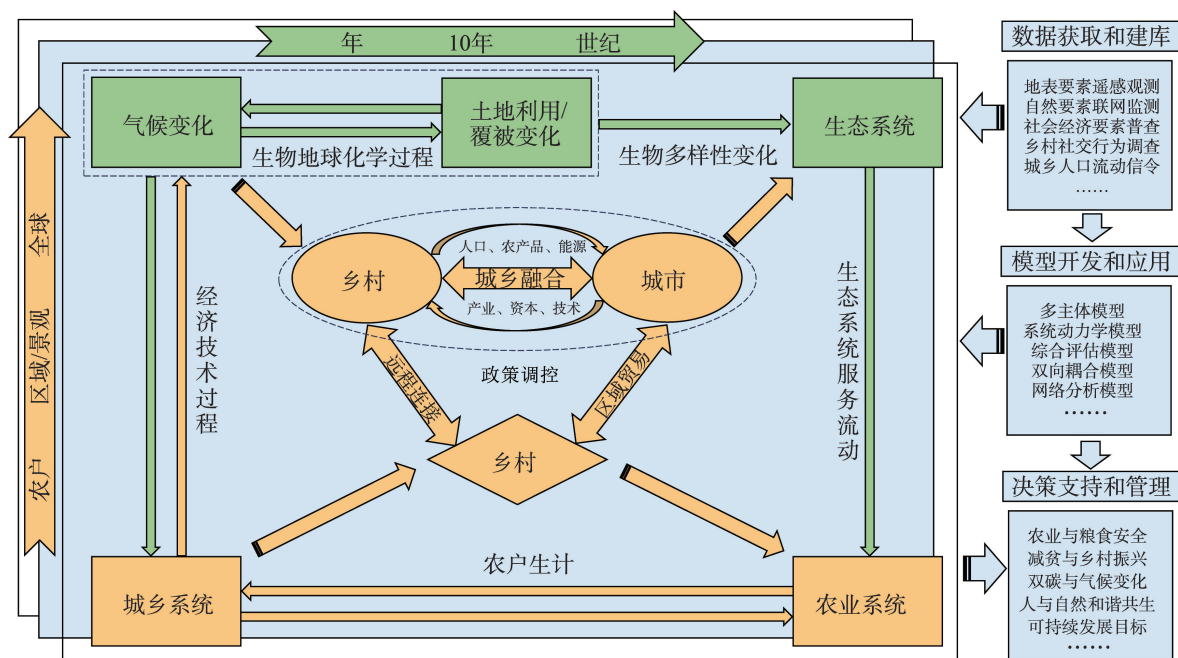


图5 乡村人地系统耦合研究方向

Fig.5 Research directions of rural human-earth system coupling

态情景格局;将区域尺度向全球尺度扩展,同时向农户尺度细化,并且聚焦景观尺度在连通全球地表和农户地块的枢纽作用,形成乡村人地系统科学综合研究的“地带性—地域性—地方性”结构层次和组织序次。围绕不同气候带和地形区开展“样带—样区—样点”的范式研究,重点探究海陆交界带、农牧交错带、城乡过渡带等关键地带,生态脆弱区、粮食主产区、深度贫困区等典型地区的乡村人地系统多尺度耦合过程与格局。

#### 4.2 探析要素流动和效应传导下的乡村人地系统耦合机理

全球化和城镇化驱动人类活动的空间集聚性和需求中心性增强,人口、物质、能量、信息等要素在城乡间和区域间的流动范围扩大,以“流”为载体的跨区域或远距离乡村社会经济与生态环境相互作用已成为人地系统耦合的特征和趋势。全程耦合框架提供了系统思维和综合视角,未来研究需要定量解析乡村自然和经济要素在不同尺度或范围上的协同作用机理。全球和区域尺度上,农产品、能源等生态系统服务的流动受到城市经济技术和乡村资源环境的综合影响,需要考虑气候、经济、政策等要素对不同地区生态系统服务流的影响。同时亟待破解气候变化—土地利用—生态系统服务—居民福祉—可持续发展级联关系和传导机制,例如气候变化和人类活动如何综合影响生态系统和土地利用,进而如何影响农业生产和乡村发展,最后又如何改变城乡格局。农户尺度上应当关注农户生计方式受到哪些生计资本的影响,又是如何影响资本的开发和利用,从而基于农户生计来解析生态系统服务与居民福祉的耦合机理。此外,探究尺度传导下个体行为和区域变化的相互影响过程对于理解人地系统耦合机制具有重要意义。

#### 4.3 探寻数据融合和模型集成下的乡村人地系统模拟和决策方法

网络和信息技术发展催生了数据革命和大数据时代,应充分借助遥感监测、无人机航拍、地面观测等天—空—地—网一体化技术手段获取地表要素数据以及环境要素的动态监测数据。在传统人工调查基础上,通过网络基站、手机信令、二维码等获取乡村人口流动与社交行为数据。从而创建囊括对地遥感监测、地面生态系统联网观测、国情普查、乡村调查、社交行为分析在内的协同观测大数据库和人地系统大数据平台。在模型开发和应用

上,乡村人地系统评估和模拟目前还缺乏综合集成模型,需要进一步优化并嵌套各类模型,发展网络分析模型和双向耦合模型等。依托机器学习、人工智能等技术方法,将多源、多粒度、多模态的大数据与多尺度、多维度的耦合模型相匹配和转换,揭示乡村人地耦合时空模式、协同机制、演化规律,服务乡村可持续发展决策。

#### 4.4 探明人与自然和谐共生和全球可持续发展目标下的乡村人地系统协调路径

人与自然和谐共生的现代化是中国式现代化的基本特征之一,它强调人与自然的相互作用关系以及人地系统协调与可持续发展,其内涵与人地系统科学高度一致。创新发展人地系统科学,阐明人地关系演化方向,揭示人地交互作用规律,预测人地耦合发展情景,提出人地系统协调路径,对于支撑城乡融合与乡村振兴,生态文明建设与高质量发展,构建人与自然生命共同体具有重要实践意义。SDGs涵盖从土地、粮食、水、能源、生态系统等人类生存底线到健康、福利、就业、经济活力、社会公平等人类发展需求的各个方面。面向SDGs以及全球土地退化与生态挑战、农业与粮食安全问题、减贫与发展战略、气候变化与“双碳”目标,未来还应建立乡村可持续发展目标评价和管理体系,评估多个目标或系统间的权衡和协同关系,提出保护与利用乡村生态环境,提升农业系统产能与乡村功能价值的政策路径。

#### 参考文献(References)

- [1] Crutzen P, Stoermer E. The 'Anthropocene' [J]. IGBP Newsletter, 2000, 41: 17-18.
- [2] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学 [J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1221-1234. [Liu Yansui. Modern human-earth relationship and human-earth system science. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1221-1234.]
- [3] Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity [J]. Nature, 2009, 461: 472-475.
- [4] Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet [J]. Science, 2015, 347: 1259855. doi: 10.1126/science.1259855.
- [5] IPCC. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2022.
- [6] Montanarella L, Scholes R, Brainich A. The IPBES assess-

- ment report on land degradation and restoration [R]. Bonn, Germany: IPBES, 2018.
- [7] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people [J]. *Science*, 2010, 327: 812-818.
- [8] Foley J A, Ramankutty N, Brauman K A, et al. Solutions for a cultivated planet [J]. *Nature*, 2011, 478: 337-342.
- [9] Sachs J D, Schmidt-Traub G, Mazzucato M, et al. Six transformations to achieve the sustainable development goals [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(9): 805-814.
- [10] Li Y H, Wu W H, Wang Y S. Global poverty dynamics and resilience building for sustainable poverty reduction [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(8): 1159-1170.
- [11] Liu Y S, Li Y H. Revitalize the world's countryside [J]. *Nature*, 2017, 548: 275-277.
- [12] O'Neill D W, Fanning A L, Lamb W F, et al. A good life for all within planetary boundaries [J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(2): 88-95.
- [13] 刘彦随, 龙花楼, 李裕瑞. 全球乡城关系新认知与人文地理学研究 [J]. *地理学报*, 2021, 76(12): 2869-2884. [Liu Yansui, Long Hualou, Li Yurui. Human geography research based on the new thinking of global rural-urban relationship. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(12): 2869-2884.]
- [14] 傅伯杰. 联合国可持续发展目标与地理科学的历史任务 [J]. *科技导报*, 2020, 38(13): 19-24. [Fu Bojie. UN sustainable development goals and historical mission of geography. *Science & Technology Review*, 2020, 38(13): 19-24.]
- [15] 赵文武, 侯焱臻, 刘焱序. 人地系统耦合与可持续发展: 框架与进展 [J]. *科技导报*, 2020, 38(13): 25-31. [Zhao Wenwu, Hou Yanzhen, Liu Yanxu. Human-natural coupling system for sustainable development: Framework and progress. *Science & Technology Review*, 2020, 38(13): 25-31.]
- [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] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems [J]. *Science*, 2007, 317: 1513-1516.
- [18] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems [J]. *Science*, 2009, 325: 419-422.
- [19] 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. The core of study of geography: Man-land relationship areal system. *Economic Geography*, 1991, 11(3): 1-6.]
- [20] 陆大道. 关于地理学的“人—地系统”理论研究 [J]. *地理研究*, 2002, 21(2): 135-145. [Lu Dadao. Theoretical studies of man-land system as the core of geographical science. *Geographical Research*, 2002, 21(2): 135-145.]
- [21] 樊杰. 中国人文地理学70年创新发展与学术特色 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(11): 1697-1719. [Fan Jie. The progress and characteristics of Chinese human geography over the past 70 years. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, 49(11): 1697-1719.]
- [22] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. *Science*, 2005, 309: 570-574.
- [23] Liu Y S. Urban-rural transformation geography [M]. Singapore, Singapore: Springer Nature, 2021.
- [24] 刘彦随, 吴传钧. 农业持续发展研究进展及其理论 [J]. *经济地理*, 2000, 20(1): 63-68. [Liu Yansui, Wu Chuanjun. Theories and progress of study on sustainable agriculture development. *Economic Geography*, 2000, 20(1): 63-68.]
- [25] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴 [J]. *地理学报*, 2018, 73(4): 637-650. [Liu Yansui. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 637-650.]
- [26] 郭焕成. 乡村地理学的性质与任务 [J]. *经济地理*, 1988, 8(2): 125-129. [Guo Huancheng. The nature and task of rural geography. *Economic Geography*, 1988, 8(2): 125-129.]
- [27] 王如松, 欧阳志云. 社会—经济—自然复合生态系统与可持续发展 [J]. *中国科学院院刊*, 2012, 27(3): 337-345, 403. [Wang Rusong, Ouyang Zhiyun. Social-economic-natural complex ecosystem and sustainability. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 27(3): 337-345, 403.]
- [28] 张富刚, 刘彦随. 中国区域农村发展动力机制及其发展模式 [J]. *地理学报*, 2008, 63(2): 115-122. [Zhang Fugang, Liu Yansui. Dynamic mechanism and models of regional rural development in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(2): 115-122.]
- [29] 赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151. [Zhao Wenwu, Liu Yue, Feng Qiang, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 139-151.]
- [30] 贺艳华, 邬建国, 周国华, 等. 论乡村可持续性与乡村可持续性科学 [J]. *地理学报*, 2020, 75(4): 736-752. [He Yanhua, Wu Jianguo, Zhou Guohua, et al. Discussion on rural sustainability and rural sustainability science. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4): 736-752.]
- [31] Liu J G. Integration across a metacoupled world [J]. *Ecol-*

- ogy and Society, 2017, 22(4): 29. doi: 10.5751/ES-09830-220429.
- [32] 于伯华, 吕昌河. 基于DPSIR概念模型的农业可持续发展宏观分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(5): 68-72. [Yu Bohua, Lv Changhe. Application of DPSIR framework for analyses of sustainable agricultural development. China Population, Resources and Environment, 2004, 14(5): 68-72.]
- [33] 汤青. 可持续生计的研究现状及未来重点趋向[J]. 地球科学进展, 2015, 30(7): 823-833. [Tang Qing. Research progress and future key trends of sustainable livelihoods. Advances in Earth Science, 2015, 30(7): 823-833.]
- [34] Peng W J, Robinson B E, Zheng H, et al. Telecoupled sustainable livelihoods in an era of rural-urban dynamics: The case of China [J]. Sustainability, 2019, 11(9): 2716. doi: 10.3390/su11092716.
- [35] Fu B J, Wei Y P. Editorial overview: Keeping fit in the dynamics of coupled natural and human systems [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2018, 33: A1-A4. doi: 10.1016/j.cosust.2018.07.003.
- [36] Liu Y S, Zhou Y. Reflections on China's food security and land use policy under rapid urbanization [J]. Land Use Policy, 2021, 109: 105699. doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105699.
- [37] Wang Y R, Song J X, Sun H T. Coupling interactions and spatial equilibrium analysis of water-energy-food in the Yellow River Basin, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 88: 104293. doi: 10.1016/j.scs.2022.104293.
- [38] 薛东前, 王莎, 王佳宁, 等. 黄土高原乡村“人水土”系统协同与机制[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1809-1823. [Xue Dongqian, Wang Sha, Wang Jianing, et al. Coordination of human-water-land system and mechanism in rural areas of the Loess Plateau. Resources Science, 2022, 44(9): 1809-1823.]
- [39] Long H L. Land use transitions and rural restructuring in China [M]. Singapore, Singapore: Springer Nature, 2020.
- [40] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 等. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控[J]. 中国科学基金, 2021, 35(4): 504-509. [Fu Bojie, Wang Shuai, Shen Yanjun, et al. Mechanisms of human-natural system coupling and optimization of the Yellow River Basin. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(4): 504-509.]
- [41] Wang J, Bao Z X, Zhang J Y, et al. Spatio-temporal matching and nexus of water-energy-food in the Yellow River Basin over the last two decades [J]. Water, 2022, 14(12): 1859. doi: 10.3390/w14121859.
- [42] Cai E X, Chen W Q, Wei H J, et al. The coupling characteristics of population and residential land in rural areas of China and its implications for sustainable land use [J]. Sustainable Development, 2020, 28(4): 646-656.
- [43] Shi L N, Wang Y S. Evolution characteristics and driving factors of negative decoupled rural residential land and resident population in the Yellow River Basin [J]. Land Use Policy, 2021, 109: 105685. doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105685.
- [44] Wu X T, Wei Y P, Fu B J, et al. Evolution and effects of the social-ecological system over a millennium in China's Loess Plateau [J]. Science Advances, 2020, 6(41): eabc0276. doi: 10.1126/sciadv.abc0276.
- [45] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, et al. Escaping social-ecological traps through ecological restoration and socioeconomic development in China's Loess Plateau [J]. People and Nature, 2023, 5(4): 1364-1379.
- [46] Chen J Q, John R, Zhang Y Q, et al. Divergences of two coupled human and natural systems on the Mongolian Plateau [J]. BioScience, 2015, 65(6): 559-570.
- [47] 黄晶, 薛东前, 马蓓蓓, 等. 黄土高原乡村地域人—地—业协调发展时空格局与驱动机制[J]. 人文地理, 2021, 36(3): 117-128. [Huang Jing, Xue Dongqian, Ma Beibei, et al. Spatial and temporal evolution pattern and driving mechanism of coordinated level of human-land-industry system in rural areas of the Loess Plateau. Human Geography, 2021, 36(3): 117-128.]
- [48] Hu S W, Yang Y Y, Zheng H, et al. A framework for assessing sustainable agriculture and rural development: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 97: 106861. doi: 10.1016/j.eiar.2022.106861.
- [49] Yang Y Y, Bao W K, Liu Y S. Coupling coordination analysis of rural production-living-ecological space in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106512. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106512.
- [50] Khan S U, Cui Y, Khan A A, et al. Tracking sustainable development efficiency with human-environmental system relationship: An application of DPSIR and super efficiency SBM model [J]. Science of the Total Environment, 2021, 783: 146959. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146959.
- [51] 刘彦随, 夏军, 王永生, 等. 黄河流域人地系统协调与高质量发展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 357-370. [Liu Yansui, Xia Jun, Wang Yongsheng, et al. Coordinated human-earth system and high-quality development in Yellow River Basin. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 357-370.]
- [52] 李琳娜, 璩路路, 刘彦随. 乡村地域多体系统识别方法及应用研究[J]. 地理研究, 2019, 38(3): 563-577. [Li Linna, Qu Lulu, Liu Yansui. Research on identification

- method and application of rural regional multi-body system. *Geographical Research*, 2019, 38(3): 563-577. ]
- [53] 崔潇, 王永生, 施琳娜. 北方农牧交错带人地系统耦合协调的时空特征及障碍因子 [J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 206-217. [Cui Xiao, Wang Yongsheng, Shi Linna. Spatio-temporal characteristics and obstacle factors of human-land system coupling coordination in farming-pastoral ecotone of Northern China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 206-217. ]
- [54] Zang Y Z, Yang Y Y, Liu Y S. Understanding rural system with a social-ecological framework: Evaluating sustainability of rural evolution in Jiangsu Province, South China [J]. *Journal of Rural Studies*, 2021, 86: 171-180.
- [55] Yu Q Y, Wu W B, Yang P, et al. Proposing an interdisciplinary and cross-scale framework for global change and food security researches [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 156: 57-71.
- [56] Liu J G, Folberth C, Yang H, et al. A global and spatially explicit assessment of climate change impacts on crop production and consumptive water use [J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e57750. doi: 10.1371/journal.pone.0057750.
- [57] Liu X Q, Liu Y S, Liu Z J, et al. Impacts of climatic warming on cropping system borders of China and potential adaptation strategies for regional agriculture development [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142415. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142415.
- [58] Liu Y S, Liu X Q, Liu Z J. Effects of climate change on paddy expansion and potential adaption strategies for sustainable agriculture development across Northeast China [J]. *Applied Geography*, 2022, 141: 102667. doi: 10.1016/j.apgeog.2022.102667.
- [59] 石育中, 杨新军, 赵雪雁. 气象干旱对甘肃省榆中县乡村社会—生态系统的影响 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(9): 1987-2000. [Shi Yuzhong, Yang Xinjun, Zhao Xueyan. Impacts of meteorological drought on social-ecological system in rural areas of Yuzhong County in Gansu Province. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(9): 1987-2000. ]
- [60] Li W L, Kuang W H, Lyu J, et al. Adaptive evolution of the rural human-environment system in farming and pastoral areas of Northern China from 1952–2017 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(6): 859-878.
- [61] Zhang J, Li J J, Yang X J, et al. Rural social-ecological systems vulnerability evolution and spatial-temporal heterogeneity in arid environmental change region: A case study of Minqin Oasis, Northwestern China [J]. *Applied Geography*, 2022, 145: 102747. doi: 10.1016/j.apgeog.2022.102747.
- [62] Yin S, Yang X J, Chen J. Adaptive behavior of farmers' livelihoods in the context of human-environment system changes [J]. *Habitat International*, 2020, 100: 102185. doi: 10.1016/j.habitatint.2020.102185.
- [63] 翁宇威, 蔡闻佳, 王灿. 共享社会经济路径(SSPs)的应用与展望 [J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(2): 215-222. [Weng Yuwei, Cai Wenjia, Wang Can. The application and future directions of the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). *Climate Change Research*, 2020, 16(2): 215-222. ]
- [64] Delazeri L M M, Da Cunha D A, Vicerra P M M, et al. Rural outmigration in Northeast Brazil: Evidence from shared socioeconomic pathways and climate change scenarios [J]. *Journal of Rural Studies*, 2022, 91: 73-85.
- [65] Popp A, Calvin K, Fujimori S, et al. Land-use futures in the shared socio-economic pathways [J]. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 2017, 42: 331-345.
- [66] Li L N, Liu D. Exploring the bidirectional relationship between urbanization and rural sustainable development in China since 2000: Panel data analysis of Chinese cities [J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2021, 147(3): 05021024. doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000721.
- [67] Ren C C, Zhou X Y, Wang C, et al. Ageing threatens sustainability of smallholder farming in China [J]. *Nature*, 2023, 616: 96-103.
- [68] Wang S T, Bai X M, Zhang X L, et al. Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China [J]. *Nature Food*, 2021, 2(3): 183-191.
- [69] Zou L L, Liu Y S, Wang Y S, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978–2017 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110400. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110400.
- [70] Zhang Y N, Long H L, Li Y R, et al. Non-point source pollution in response to rural transformation development: A comprehensive analysis of China's traditional farming area [J]. *Journal of Rural Studies*, 2021, 83: 165-176.
- [71] Duan J K, Ren C C, Wang S T, et al. Consolidation of agricultural land can contribute to agricultural sustainability in China [J]. *Nature Food*, 2021, 2(12): 1014-1022.
- [72] Cumming G S, Buerkert A, Hoffmann E M, et al. Implications of agricultural transitions and urbanization for ecosystem services [J]. *Nature*, 2014, 515: 50-57.
- [73] Zhou Y, Li X H, Liu Y S. Land use change and driving factors in rural China during the period 1995–2015 [J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105048. doi: 10.1016/j.land

- dusepol.2020.105048.
- [74] Xiong B, Chen R S, An L, et al. Telecoupling urbanization and mountain areas deforestation between 2000 and 2020: Evidence from Zhejiang Province, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(16): 4727-4739.
- [75] Chen Z F, Li Y R, Liu Y S, et al. Does rural residential land expansion pattern lead to different impacts on eco-environment? A case study of loess hilly and gully region, China [J]. *Habitat International*, 2021, 117: 102436. doi: 10.1016/j.habitatint.2021.102436.
- [76] Woods M. Engaging the global countryside: Globalization, hybridity and the reconstitution of rural place [J]. *Progress in Human Geography*, 2007, 31(4): 485-507.
- [77] Liu J G, 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.
- [78] 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. ]
- [79] da Silva R F B, Viña A, Moran E F, et al. Socioeconomic and environmental effects of soybean production in meta-coupled systems [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 18662. doi: 10.1038/s41598-021-98256-6
- [80] Sun J, Mooney H, Wu W B, et al. Importing food damages domestic environment: Evidence from global soybean trade [J]. *PNAS*, 2018, 115(21): 5415-5419.
- [81] Liu J G, Dou Y, Batistella M, et al. Spillover systems in a telecoupled Anthropocene: Tology, methods, and governance for global sustainability [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 58-69.
- [82] Lambin E F, Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity [J]. *PNAS*, 2011, 108(9): 3465-3472.
- [83] Wang Z, Zeng Y, Li C, et al. Telecoupling cropland soil erosion with distant drivers within China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112395. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112395.
- [84] Liu J G, Mooney H, Hull V, et al. Systems integration for global sustainability [J]. *Science*, 2015, 347: 1258832. doi: 10.1126/science.1258832.
- [85] Yao Y Y, Sun J, Tian Y, et al. Alleviating water scarcity and poverty in drylands through telecouplings: Vegetable trade and tourism in Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140387. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140387.
- [86] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, et al. China's response to a national land- system sustainability emergency [J]. *Nature*, 2018, 559: 193-204.
- [87] Liu Y S, Fang F, Li Y H. Key issues of land use in China and implications for policy making [J]. *Land Use Policy*, 2014, 40: 6-12.
- [88] 刘彦随, 冯巍仑, 李裕瑞. 现代农业地理工程与农业高质量发展: 以黄土丘陵沟壑区为例 [J]. *地理学报*, 2020, 75(10): 2029-2046. [Liu Yansui, Feng Weilun, Li Yurui. Modern agricultural geographical engineering and agricultural high- quality development: Case study of loess hilly and gully region. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(10): 2029-2046. ]
- [89] Li Y R, Li Y, Fan P C, et al. Impacts of land consolidation on rural human-environment system in typical watershed of the Loess Plateau and implications for rural development policy [J]. *Land Use Policy*, 2019, 86: 339-350.
- [90] Wu Y F, Feng W L, Zhou Y. Practice of barren hilly land consolidation and its impact: A typical case study from Fuping County, Hebei Province of China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(5): 762-778.
- [91] Ouyang Z Y, Song C S, Zheng H, et al. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making [J]. *PNAS*, 2020, 117(25): 14593-14601.
- [92] Zheng H, Robinson B E, Liang Y C, et al. Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program [J]. *PNAS*, 2013, 110(41): 16681-16686.
- [93] Dang D L, Li X B, Li S K, et al. Changing rural livelihood activities may reduce the effectiveness of ecological restoration projects [J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(2): 362-376.
- [94] Gao R Y, Chuai X W, Ge J F, et al. An integrated tele-coupling analysis for requisition-compensation balance and its influence on carbon storage in China [J]. *Land Use Policy*, 2022, 116: 106057. doi: 10.1016/j.landusepol.2022.106057.
- [95] Liu J G, Yang W, Li S X. Framing ecosystem services in the telecoupled Anthropocene [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(1): 27-36.
- [96] Su Q M, Chang H S, Chen X, et al. Metacoupling of water transfer: The interaction of ecological environment in the middle route of China's South-North Project [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(17): 10555. doi: 10.3390/ijerph191710555.
- [97] 李扬, 汤青. 中国人地关系及人地关系地域系统研究方法述评 [J]. *地理研究*, 2018, 37(8): 1655-1670. [Li Yang, Tang Qing. Review for the methodologies on man-land relationship and man-land areal system in China. *Geographical Research*, 2018, 37(8): 1655-1670. ]
- [98] 彭书时, 朴世龙, 于家烁, 等. 地理系统模型研究进展

- [J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 109-120. [Peng Shushi, Piao Shilong, Yu Jiahuo, et al. A review of geographical system models. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 109-120. ]
- [99] An L, Linderman M, Qi J G, et al. Exploring complexity in a human-environment system: An agent-based spatial model for multidisciplinary and multiscale integration [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2005, 95(1): 54-79.
- [100] 马历, 龙花楼. 中国乡村地域系统可持续发展模拟仿真研究 [J]. *经济地理*, 2020, 40(11): 1-9. [Ma Li, Long Hualou. Simulation on sustainable development of rural territorial system in China. *Economic Geography*, 2020, 40(11): 1-9. ]
- [101] Calvin K, Bond-Lamberty B. Integrated human-earth system modeling: State of the science and future directions [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6): 063006. doi: 10.1088/1748-9326/aac642.
- [102] Thornton P E, Calvin K, Jones A D, et al. Biospheric feedback effects in a synchronously coupled model of human and Earth systems [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 496-500.

## Progress and prospects of rural human-earth system coupling research

HU Siwei<sup>1,2</sup>, WANG Yongsheng<sup>1</sup>, CAO Zhi<sup>1\*</sup>

(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:** The utilization of the resources and environment and the impact on the Earth system of modern human activities have been undergoing great changes. The environment and sustainable development of human society are facing severe challenges. The study of human-earth system coupling provides integrated approaches for solving ecological and socioeconomic problems. However, the understanding of the rural human-earth system coupling is insufficient. Therefore, reviewing the progress of research on rural human-earth system coupling is of great significance for promoting the development of human-earth system science and supporting the decision making for coordinated and sustainable development. The results of this study show that rural human-earth system coupling is a comprehensive process of interaction and mutual influence between the rural socioeconomic system and the natural ecosystem, forming a theoretical paradigm of "process-mechanism-pattern-effect-regulation". The research themes mainly include five aspects, namely, the process and pattern of rural natural and social elements coupling, the influence and feedback of climate change on agricultural production, the driving mechanism of urbanization on rural development, the telecoupling effect of globalization and agricultural trade, and the regulation effects of policy intervention and engineering measures. The research methods mainly involve the coupling evaluation models and the coupling mechanism models. Given the insufficient research on the mutual feedback and transmission mechanisms of rural human-earth system coupling at multiple scales and the lack of data models, future studies should focus on detecting the coupling process and pattern of rural human-earth system under structure transformation and scale extension, analyzing the coupling mechanism of rural human-earth system under elements flow and effects cascade, exploring the simulation and decision-making methods of rural human-earth system that are data-driven and characterized by model integration, and finding the coordination pathways of rural human-earth system under the objective of harmony between humans and nature and global sustainable development.

**Keywords:** human-earth system coupling; human-earth system science; rural territorial system; process-mechanism-pattern; sustainable rural development