中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 5 期： 1738–1752
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

城乡聚落与生态环境级联耦合的理论解析

刘志涛[1]，方创琳[1,2*]，关洛桐[1]，刘梦航[1]

1. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟院重点实验室，中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101
2. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049
* 通讯作者，E-mail: fangcl@igsnrr.ac.cn

2025-09-04收稿，2025-12-27修回，2026-01-19接受，2026-03-30网络版发表
国家自然科学基金创新研究群体项目(42121001)、国家社会科学基金重大项目(25&ZD094)和博士后创新人才支持计划项目(BX20250082)资助

摘要 人类世背景下，城乡聚落扩张已成为改变地球表层环境的关键驱动力，但其通过多阶传导引发的隐性生态风险尚未得到系统揭示。因此，本文借鉴人地关系地域系统、近远程耦合与土地利用溢出理论，提出“级联耦合”概念，旨在解析影响传递的潜在过程，将研究焦点从“起点-终点”的关联深化为对过程链的解析。本文构建了认知级联耦合的宏-微观双尺度理论机制：宏观上，外部冲击通过多阶耦合关系进行跨系统传递；微观上，宏观过程由系统内单元的连锁式状态转移所支撑。具体现实过程表现为：城乡聚落受人口动态、经济要素、交通网络和政策制度等因素驱动，侵占自然土地和耕地，并通过空间结构改变、邻近影响溢出、远程土地置换等多路径进行多阶生态环境效应传导，该过程具有多级性、超限性、时滞性和隐秘性等基本特征。未来的研究应运用该理论框架，聚焦城乡差异以精准刻画传导路径，发展动态模拟方法以攻克时滞与不确定性瓶颈，并构建地方-全球嵌套范式以应对跨尺度挑战，从而为破解人地系统冲突提供新的理论视角和方法支撑。

关键词 城乡聚落，生态环境，人地系统，近远程耦合，级联耦合

1 引言

在人类活动日益强烈并主导地球发展轨迹的人类世，全球可持续发展面临多重危机：人类活动已推动地球系统突破七个行星边界的安全阈值，尤其在生物地球化学流动、生物圈完整性和气候变化三个领域进入高风险状态(Planetary Boundaries Science (PBScience)，2025)。作为人类活动最密集的空间载体，城乡聚落扩张对生态环境具有广泛的影响，已成为突破行星边界的关键胁迫因子——1985–2020年间，全球城乡聚落面积增长了112.5%，直接侵占了57.6万km^{2}的自然栖息地和耕地(Zhang等，2022)。快速的城乡聚落扩张通过多重路径加剧生态风险：物种多样性丧失，高强度利用的城市土地的物种丰富度较自然基底的下降34%–62%(McDonald等，2020)；陆地碳汇能力衰减，2000–2010年城市扩张引致陆地净初级生产力年均损失22.4 Tg C(Liu等，2019)；粮食安全危机，1992–2015年间城市扩张导致全球谷物减产1.22亿吨，相当于3.8亿人口年粮食需求缺口(van Vliet，2019)。在此背景下，系统解析城乡聚落与生态环境交互耦合机理，对于缓解人地系统冲突、推动可持续发展具有重要理论价值与现实紧迫性。

地理学、生态学、城市科学等领域构建的理论体系为解析城乡聚落与生态环境的交互机理提供了重要支撑。例如，人地关系地域系统理论强调“人”与“地”的交互作用，揭示了城乡聚落扩张对土地覆被变化的直接驱动机制(吴传钧，1991)；行星边界理论通过“行星边界”概念量化人类活动对地球系统的压力，指出土地系统变化是超越安全阈值的核心风险之一(Rockström等，2009)；地球生命力理论强调地球系统圈层之间的相互作用，评估了人类圈通过土地扩张与其他圈层交互作用对地球可持续性的影响(Fang和Liu，2024)；近远程耦合理论(方创琳等，2016)与全程耦合理论(Liu，2017)整合多尺度视

中文引用格式：刘志涛, 方创琳, 关洛桐, 刘梦航. 2026. 城乡聚落与生态环境级联耦合的理论解析. 中国科学: 地球科学, 56(5): 1738–1752, doi: 10.1360/SSTe-2025-0278
英文引用格式：Liu Z, Fang C, Guan L, Liu M. 2026. Cascading coupling between urban-rural settlements and the ecological environment. Science China Earth Sciences, 69(5): 1697–1712, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1844-7

© 2026《中国科学》杂志社

角，揭示城乡聚落动态通过物质流、信息流产生的跨区域影响；城市土地远程关联理论(Seto等，2012b)和土地利用溢出理论(Meyfroidt等，2018)则聚焦贸易、政策与市场机制，解析聚落扩张对异地生态系统的隐性影响。然而，尽管现有理论已发展出复杂交互、跨区域影响、隐性作用等前沿理念，但对全球化背景下聚落扩张的多阶级联效应关注不足，难以刻画类似“聚落扩张→耕地损失→贸易驱动→异地毁林”的多阶传导过程。

城市与乡村作为城乡地域系统的有机组成部分，始终是一个矛盾的有机统一体和不可分割的融合体(方创琳，2022)，但以往关于聚落扩张与生态环境耦合的研究主要聚焦于城市。这主要是由于城市聚落是人口的主要聚集地，承担了全球90%以上的经济产出、65%以上的能源消耗和70%以上的温室气体排放(Solecki等，2013)，对生态环境的影响更加明显。实际上，尽管全球城市聚落快速扩张，但全球乡村聚落总面积始终高于城市聚落，且乡村聚落扩张造成的作物产量损失是城市聚落的1.5倍(Liu等，2025)。而且乡村聚落分布更加零散、广泛，对重要栖息地和生物多样性热点地区构成更大威胁(McKenzie等，2011)。乡村聚落对生态环境的隐性影响不容忽视。

因此，本文立足人地关系地域系统理论、近远程耦合理论与土地利用溢出理论，从城乡聚落整体出发，以多阶影响为突破口，从理论模型、现实机理和基本特性三个方面详细阐述城乡聚落与生态环境级联耦合的理论内涵，并基于现有研究不足展望未来研究方向，以期为协调城乡融合发展和生态文明建设提供理论支撑。

2 城乡聚落与生态环境级联耦合的基本概念与理论基础

2.1 基本概念

2.1.1 城乡聚落

城乡聚落(Urban and Rural Settlement)是以满足人类生产生活需求为核心功能的人工建筑及其附属空间的集合体，涵盖城市聚落(Urban Settlement)与乡村聚落(Rural Settlement)两大基本类型。二者在空间结构、经济功能及社会组织维度呈现显著分异特征，共同构成城乡土地利用系统的核心要素。城市聚落以高密度人口集聚、立体化建筑形态和复合化服务功能为典型特征，其空间载体主要由高层住宅、工商业建筑、市政设施及硬化交通网络构成，地表覆盖以不透水面为主导。相比之下，乡村聚落表现为低密度、分散式空间格局，建筑多采用低层独栋形式，与农业生产空间形成紧密邻接关系，土地利用呈现不透水面与绿地、裸土等非硬化地表交错的混合模式。

作为人地系统交互作用的核心界面，城乡聚落的形成演化受人口迁移、产业转型、制度创新及技术革新等多维因子的复合驱动。其空间拓展不仅重塑土地利用结构与效率，更通过改变自然生态基底影响区域生态系统服务流的传输路径与供给能力。因此，城乡聚落的空间识别与定量表征已成为土地利用变化监测、生态服务评估及可持续空间规划等研究领域的基础性议题。在相关学科范畴内，不透水面(Impervious Surface)、建设用地(Construction Land)和建成区(Built-up Area)等概念与城乡聚落存在密切联系，但内涵与外延存在显著差异。

不透水面特指由建筑屋顶、道路铺装等人工硬化地表构成的空间实体，其核心特征是阻断地表水自然渗透过程(Gong等，2020)，此类空间单元在热岛效应模拟、水文过程分析等环境建模研究中具有重要应用价值(Liu等，2022；Si等，2022)。相较之下，城乡聚落既包含不透水面，亦涵盖住宅庭院、社区绿地等半透水/透水空间，其概念更强调人工建成环境与自然生态系统的交互作用机制。建设用地作为国土空间规划术语，指经法定程序批准用于城乡建设的土地类型，其外延包括城乡居民点用地、交通设施用地及特殊用地等，与城乡聚落存在部分空间重叠。但建设用地侧重行政管治功能分类，而城乡聚落更关注实体空间的物质形态特征。建成区在中国语境下特指城市行政区内集中连片开发的非农建设区域，其范围通常覆盖城市聚落主体，但需排除大型公园绿地等非居住功能空间。总体而言，城乡聚落通过整合自然基底与人工设施的系统关联，为揭示人地耦合过程提供了重要的空间解析单元。

2.1.2 生态环境

生态环境(Ecological Environment)是人类社会赖以存续与演化的自然与半自然地表空间集合体，涵盖自然土地与耕地两大类型。其中，自然土地由森林、草地、湿地、裸地、水体等原生或次生生态系统构成，半自然土地特指受人类活动持续干预的耕地系统。作为地球生命支持系统的物质基底，生态环境既通过资源供给维系城乡聚落运转，又借助生态过程调节人类生存环境质量，构成人地系统耦合研究的关键空间单元。

自然土地是维持区域生态安全的核心载体，其功能体现在多尺度生态服务供给中。森林、湿地等原生生态系统通过碳汇固存、水源涵养及生物多样性保育等过程，调节大气组分、稳定水文循环并支撑物种繁衍(刘志涛等，2021)。例如，热带雨林通过光合作用固碳；湿地生

态系统消纳地表径流污染；草地与灌木群落通过根系固土、冠层截流等机制减少地表侵蚀。此外，自然土地还为城乡聚落提供木材、药材等物质资源，并通过景观美学、文化传承等非物质服务提升人居环境品质。耕地作为半自然土地的主体，承载着全球粮食安全的基础性职能。当前全球约11%的陆地表面被耕地覆盖，其生产的农作物为78亿人口提供直接热量来源(Potapov等，2022)，并通过产业链延伸支撑城乡聚落的经济社会网络。值得注意的是，耕地系统通过轮作休耕、秸秆还田等农业实践，在养分循环、碳氮固定等方面展现出独特的半自然生态系统服务价值。

2.1.3　级联耦合

本文提出级联耦合(Cascading Coupling)概念，用于解析城乡聚落与生态环境的多阶相互作用，其定义为：初始扰动在复杂系统内部或系统之间，通过多个耦合关联的中间环节，触发多阶因果链的动态传导过程。该概念的核心在于揭示影响如何逐步地、跨越不同时空尺度地从一个节点传递至下一个节点，并将分析焦点从“起点-终点”的二元联系，深化为对连接二者的完整“过程路径”的解析。本文统一采用“阶”来描述影响在因果链中的传递步数，如一阶耦合指直接作用，二阶及以上的耦合则指通过至少一个中间环节产生的间接作用。

该概念通过整合“级联”(Cascade)与“耦合”(Couple)的核心内涵，揭示多要素跨尺度传导的非线性响应机制。级联概念源于生态学营养级联(Trophic Cascade)理论，Hairston等(1960)提出的“绿色世界假说”阐明捕食者通过食物链层级间接调控植被的生态过程，Paine(1980)对潮间带生态系统的实验研究则证实关键种缺失引发的连锁反应可导致系统结构颠覆(Paine，1980)。随着复杂性科学的发展，级联概念逐步突破生态学边界，电力系统的级联失效(Cascading Failure)揭示了局部故障通过网络关联引发系统性崩溃的传导路径(Nedic等，2006)，而Lambin和Meyfroidt(2011)提出的土地利用级联效应(Cascading Effect)则强调外部扰动通过间接土地转换产生跨区域环境影响的时空延迟特征。

耦合作为描述系统间能量-物质-信息交互的基础范式，其理论演进映射了人类认知从机械系统向人地系统的跃迁。19世纪物理学中振动系统的共振耦合研究奠定了经典理论基础，21世纪黄金川和方创琳(2003)将耦合分析引入城市化与生态环境交互作用领域，Liu等(2007)提出的“人与自然耦合系统”(Coupled Human-Nature System)构建了多要素协同演化的分析框架。这标志着耦合研究从单一物理过程描述转向复杂社会-生态系统的综合解析。

在城乡聚落与生态环境的交互研究中，级联耦合的解释力较高。例如，聚落扩张通过土地覆被改变引发一阶生态响应(如生物栖息地破碎化)，进而激活二阶效应(如养分循环受阻、微气候调节功能衰减)，最终通过非线性反馈，导致区域生态系统服务流的多阶级联退化。反之，生态环境约束(如耕地生产力阈值突破)亦可通过粮食供应链等路径传导至聚落社会经济系统，诱发人口迁移、产业转型等适应性反馈。这种双向、非对称的级联耦合机制，揭示了人地系统冲突的深层次动力学成因，为优化国土空间可持续治理提供了全新的理论透镜。

2.2　理论基础

2.2.1　人地关系地域系统理论

人地关系地域系统理论由吴传钧院士奠基性构建，深刻诠释了地理学“人地互动”的本质内核。该理论以地球表层人地相互作用为核心研究对象，强调人类活动与自然环境的动态反馈机制是塑造空间格局、驱动时间演变的根本动力(吴传钧，1991)。其理论内涵涵盖三个层次：一是系统性，将人地关系视为由功能、结构、过程与效应四维要素构成的动态系统，注重分析人地系统协调共生和耦合优化机制(方创琳，2004)；二是地域性，揭示不同尺度下人类适应自然与改造环境方式的区域分异规律，强调自然基底约束、文化传统差异与制度环境共同作用下的空间异质性(郑度，1998)；三是可调控性，主张通过分类、区划、建模等方法解析人地系统的组织序变规律，为区域开发与空间治理提供优化路径(樊杰，2018)。理论突破传统地理要素割裂分析的局限，提出从“空间结构-时间过程-尺度转换”的整合视角审视人地矛盾(吴传钧，2008)，为理解全球化背景下地域系统的复杂演化提供范式支撑。

该理论为城乡聚落与生态环境级联耦合研究奠定双重基础：其一，“人地系统中人与自然的相互影响与反馈作用”原理，为解析聚落扩张与生态响应间的非线性作用提供理论框架。传统人地关系研究多聚焦单一时空尺度下的直接效应，而级联耦合强调初始扰动通过多阶反馈链引发系统性演变，这本质上是对人地关系地域系统理论的动态延伸。其二，“区域间相互依赖性”支撑了跨域级联效应的理论建构。城乡聚落引发的生态压力不仅受本地自然-社会圈层制约，更通过物质流、能量流与信息流传递至更大空间尺度，例如城市群扩张导致的流域水文循环改变，这正是人地关系地域系统理论中“纵向区域系统影响”的现代表达。

2.2.2 远程关联与近远程耦合理论

远程关联与近远程耦合理论体系的形成经历了从自然系统向人文-自然复合系统的认知跃迁。远程关联(Teleconnection)概念最初源于气候学研究，用以解释跨越千公里的空间关联现象，如厄尔尼诺事件通过沃克环流引发印度洋季风异常、北美干旱等跨洋气候响应(Glantz等，1991)。Trenberth等(1998)揭示此类现象的本质在于大气-海洋系统的能量再分配过程，其空间尺度可达整个地球，时间尺度涵盖季节至年代际波动，为跨域相互作用研究提供了自然系统范式。随着全球化进程加速，地方间的虚拟距离日益缩短，遥远地区之间的相互联系显著增强，生产-消费链的空间分离导致土地利用变化呈现远程传导特征，传统局地分析范式难以解释跨境资源流动引发的生态效应(Erb等，2009；Haberl等，2009)。对此，Seto等(2012b)提出城市土地远程关联(Urban Land Teleconnection)理论，将城市视作全球土地变化的“触发器”，通过贸易网络、人口迁移等渠道驱动遥远腹地的森林砍伐、耕地转换，形成“城镇化地区-资源供给区”的跨区域级联关系网络，其空间作用模式涵盖单核辐射、多核联动等四类拓扑结构。

为突破单一学科视角局限，Liu等(2013)整合复杂系统理论与全球化研究，构建远程耦合(Telecoupling)分析框架，该框架包含发送系统(如商品出口国)、接收系统(如进口国)及溢出系统(如国际运输走廊)，通过物质流、能量流与信息流的三维交互，揭示跨区域生态-经济效应的传导机制。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(任宇飞等，2020)。

在此基础上，方创琳等(2016)提出近远程耦合理论，从区域内和区域外的视角将要素划分为近程要素和远程要素，根据要素之间的交互耦合关系分析近远程耦合过程，并以特大城市群地区为例解析了城镇化与生态环境交互胁迫的近远程耦合机理与规律。该理论统合了人类与自然耦合的所有空间尺度。尽管根据各种要素分布密度或事件发生频率的距离衰变曲线界定“近程”和“远程”更加科学合理，但数据的缺失使其缺少操作性(马恩朴等，2019)。同期，Liu(2017)发展的全程耦合(Metacoupling)理论将系统交互划分为内部耦合(Intracoupling，系统内部)、周边耦合(Pericoupling，相邻系统)与远程耦合(Telecoupling，遥远系统)，形成多尺度嵌套分析范式。马恩朴等(2020)将近远程耦合和全程耦合进行类比，认为内部耦合和周边耦合等同于城市群尺度的近程耦合。通过综合提炼，刘海猛等(2019)提出耦合魔方理论框架，将城镇化与生态环境的耦合关系总结为空间维度(近程耦合和远程耦合)、时间维度(近期耦合和远期耦合)、表象维度(显性耦合和隐性耦合)和组织维度(组内耦合和组间耦合)等四个维度。

这些理论为城乡聚落与生态环境级联耦合研究提供了关键支撑：其一，远程耦合理论揭示的跨域作用机制，解释了聚落扩张通过全球供应链引发的级联生态效应。例如，长三角城市群对热带木材的需求经由国际贸易网络传导，导致东南亚雨林砍伐与碳汇功能退化，此类远程响应需借助“发送-接收-溢出”系统框架进行量化解析。其二，近远程和全程耦合理论的空间分级模型，为识别聚落影响的尺度转换规律提供工具。例如，城乡聚落对耕地占用的直接影响多表现为周边30 km范围内的土地利用转型(近程耦合)，而通过贸易引发的其他国家农业集约化则属于远程耦合范畴。其三，耦合魔方的多维分析框架，支持从时间滞后性(近期粮食危机与远期耕地退化)、空间异质性(组间生态补偿与组内资源竞争)等维度解构级联耦合的复杂效应。

2.2.3 土地利用溢出理论

土地利用溢出理论聚焦于局地干预引发的跨区域连锁反应，揭示人类活动通过要素流动与市场关联产生的空间传导机制。该理论认为，某一地域的土地利用变化或政策干预可通过商品链、资本循环及劳动力迁移等路径引发其他区域的土地利用响应，形成泄漏效应(Leakage Effect)与反弹效应(Rebound Effect)两类典型模式(Lambin和Meyfroidt，2011)。泄漏效应表现为环境保护政策的非预期后果，其传导路径包括：生产要素跨域重置(活动泄漏)、土地价格波动引发的投资转移(土地市场泄漏)、供需失衡导致的市场价格信号扭曲(商品市场泄漏)以及供应链迂回规避可持续性约束(供应链泄漏)(Meyfroidt等，2018)。反弹效应是指旨在控制土地利用变化的措施所引发的与预期相反的土地利用效应。在土地保护领域，通常认为集约化的农业可以有效缓解对土地的需求压力，同时满足日益增长的社会需求，从而有助于保护自然环境(Meyfroidt等，2018)。然而，针对国家和地方层面的研究表明，农业集约化对土地转换的影响存在两种截然不同的情形，这种差异主要取决于新技术如何影响劳动力市场、迁移模式、作物的销售市场、农业盈利能力以及新技术的资本和劳动强度(Angelsen和Kaimowitz，2001)。

土地利用溢出理论通过解构空间传导的非线性逻辑，将城乡聚落演变纳入全球化网络语境，强调本地决策引

发的生态影响可通过多阶传导链重塑区域乃至全球人地系统格局。该理论对城乡聚落与生态环境级联耦合研究的支撑体现在以下两个方面：其一，泄漏效应的多路径机制阐释了级联耦合的跨域传导逻辑。城乡聚落扩张通过商品链重构与要素再配置驱动远程区域土地利用转型，其作用路径与泄漏效应中的市场波动、资本流动高度耦合，为解析聚落系统与生态系统的远程交互提供理论桥梁。其二，反弹效应的非线性特征深化了对级联过程动力学机制的认知。城乡聚落的土地集约化策略可能通过技术扩散与资本积累触发边缘区生态退化，这种负向反馈机制与反弹效应中“效率提升-规模扩张”的悖论具有内在一致性。

2.2.4　理论整合与深化：从关联识别到过程解析

综合上述理论，可以清晰地梳理出人地系统耦合研究的演进脉络。人地关系地域系统理论作为中国地理学的核心理论，为理解城乡聚落与生态环境的相互作用奠定了坚实的哲学基础，其“系统性”和“地域性”思想是所有耦合研究的出发点。随着全球化进程的加速，以远程关联、远程耦合、近远程耦合和全程耦合为代表的理论体系，成功地将人地系统的研究视野从局地和区域，拓展至全球尺度，并构建了包含“发送-接收-溢出”单元的系统性分析框架，为识别和量化“起点-终点”间的跨空间关联提供了有力工具。而土地利用溢出理论则更聚焦于土地利用领域，通过“泄漏效应”和“反弹效应”等概念，揭示了土地利用远程耦合背后具体的市场和行为传导机制。

然而，尽管现有理论已成功回答了“谁和谁产生了联系”(人地关系地域系统)、“联系的系统框架是怎样的”(近远程/全程耦合)，以及“在某些情境下联系的可能机制是什么”(土地利用溢出)等重要问题，但对于影响如何从“起点”逐步传导至“终点”的完整过程，仍缺乏一个专门的理论框架进行系统解析。为此，本文提出“级联耦合”理论，其核心学术贡献是对既有理论在“过程”维度上的补充与深化，旨在将分析焦点从“关联的识别”转向“过程的解析”，系统地刻画隐藏在近远程耦合背后的“多米诺骨牌效应”。

3　城乡聚落与生态环境级联耦合的理论内涵

城乡聚落与生态环境级联耦合是指城乡聚落的动态演变通过跨时-空-尺度的多阶耦合，对生态环境产生间接、远程、累积和非线性影响的过程。为深入解析其理论内涵，本研究在数理层面构建了宏观-微观理论模型，分别刻画了外部冲击通过耦合交互逐步影响多系统的稳定性和功能，以及系统内微观单元的状态变化导致系统状态转移并产生级联效应的机制。在机理层面解析了全球城乡聚落受人口动态、经济要素、交通网络和政策制度等社会经济过程驱动，侵占自然土地和耕地，并通过空间结构改变、邻近影响溢出、远程土地置换等多路径影响生态环境的理论机理。在认知层面总结了级联耦合的四大基本特性：多级性(影响的多阶传递)，超限性(影响多阶传递的跨空间、跨尺度、跨领域能力)，时滞性(多阶传递过程中影响的滞后显现)和隐秘性(影响多阶传递的不易观测性)。

3.1　城乡聚落与生态环境级联耦合的理论模型

3.1.1　宏观模型-跨系统级联耦合

宏观层面的级联耦合理论模型由三个主要部分组成：变量、组件和结构关系。该理论模型用于解释系统之间的多层次相互作用如何通过耦合机制传导并产生级联效应，其理论模型如图1所示。

(1)模型变量。模型变量包括驱动变量、状态变量、耦合变量、级联效应变量四种类型。

驱动变量(D)是指导致系统发生初始变化的外部冲击或干预，如政策调控、气候变化、人口增长等。

状态变量(S_i)是指系统的表象状态或功能状态。系统包括城乡聚落系统(包含城市聚落子系统和乡村聚落子系统)和生态环境系统(包含耕地子系统和自然土地子系统)。系统的表象状态指各系统或子系统的表象类别和属性，如土地利用覆被类型、面积、结构、空间分布等。系统的功能状态指土地的功能，如人口承载能力、作物产量、作物生产效率、生物多样性等。

耦合变量(C_{ij})是指不同子系统之间的交互关系或反馈路径的强度，用以描述耦合的形式及其方向性(正向或负向)。

级联效应变量(Y_k)是指外部冲击通过耦合机制传播后的结果，通常包含多阶影响。

(2)模型组件。模型组件主要包括城乡聚落系统(H)、生态环境系统(N)和跨系统反馈(F_{HN})。其中，城乡聚落系统和生态环境系统可进一步细分为城市聚落子系统(US)、乡村聚落子系统(RS)、耕地子系统(CS)、自然土地子系统(NS)，分别指其土地利用覆被类型的空间范围及其承载的功能的总称。跨系统反馈指城乡聚落系统和生态环境系统之间的反馈机制，反映双向耦合关系。

(3)模型结构关系。在级联耦合模型中，变量间的关系可以用一组非线性微分方程来描述，其核心公式如下：

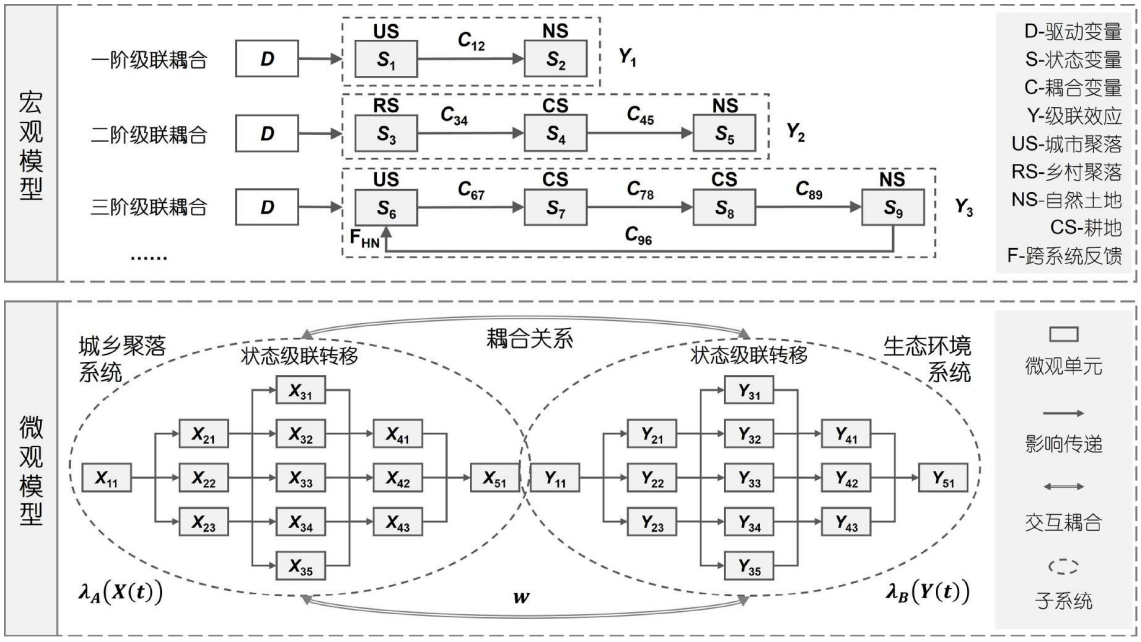


图 1 城乡聚落与生态环境级联耦合的理论模型

$$\frac{dS_i}{dt} = f\left(D, S_i, C_{ij}\right) \tag{1}$$

$$C_{ij} = g\left(S_i, S_j, F_{HN}\right) \tag{2}$$

$$Y_k = h\left(C_{ij}, D\right) \tag{3}$$

式中，$f\left(D, S_i, C_{ij}\right)$描述状态变量$S_i$随时间变化的动态过程，受外部驱动$D$和耦合变量$C_{ij}$的共同影响；$g\left(S_i, S_j, F_{HN}\right)$表示耦合变量$C_{ij}$的函数关系，取决于系统状态和反馈机制；$h\left(C_{ij}, D\right)$表示级联效应变量$Y_k$的函数关系，取决于外部驱动作用和系统多层次耦合过程，反映系统最终的响应结果。

宏观层面的级联耦合理论模型的核心原理在于，通过变量间的动态交互和耦合机制，揭示外部冲击如何逐步传播并影响整个系统的稳定性和功能。首先，外部驱动变量D触发某个系统状态变量S_i的变化。随后，耦合变量C_{ij}将初始变化传递至其他子系统，这一过程可能重复多次，具体取决于外部驱动变量的事件复杂性。同时，跨系统的反馈机制F_{HN}会加强或抑制变化的扩散。最终，表现为级联效应变量Y_k的累积影响。

以“城市扩张导致异地毁林”为例具象化宏观级联耦合过程：一项国家级新区发展政策(驱动变量D)的实施，首先引发了城市聚落面积(状态变量S_{US})的快速增加。这一变化通过城市对耕地的直接侵占(耦合变量$C_{\{US,CS_{\text{near}}\}}$)，导致本地耕地子系统的耕地保有量($S_{CS_{\text{near}}}$)急剧下降。本地耕地的损失增加了粮食进口需求，并通过全球商品链导致遥远出口国的粮食生产需求增加($C_{\{CS_{\text{near}},CS_{\text{remote}}\}}$)，促使当地耕地子系统的耕地面积($S_{CS_{\text{remote}}}$)快速增加。耕地扩张侵占周围林地$C_{\{CS_{\text{remote}},NS_{\text{remote}}\}}$，导致当地森林面积($S_{NS_{\text{remote}}}$)的加速减少。在这一传导链中，最终产生了包含本地粮食自给率下降(Y_1)、异地粮食产量增加(Y_2)和自然栖息地丧失(Y_3)等多阶级联效应。

3.1.2 微观模型-系统内级联耦合

级联耦合除了存在于多个系统之间的宏观层面，还存在于单个系统内的微观层面。微观层面的级联耦合主要指系统内的微观单元之间耦合关系的多层次传递，以及传递过程对系统间的耦合过程的影响(图1)。本研究从系统定义、耦合关系和状态转移三个方面探讨城乡聚落与生态环境的微观级联耦合。

(1)系统定义与单元变化率。城乡聚落系统由m个聚落单元(如城市、乡村等不同区域的聚落单元)组成。每个聚落有两种状态：未发展状态和发展状态。聚落的发展状态主要表现为人口增长、收入增加、基础设施建设等。

生态环境系统由n个生态环境单元(如耕地、林地、草地、湿地等自然或半自然土地单元)组成。每个生态环境单元也有两种状态：未退化状态和退化状态。生态环

境的退化会影响居民的生存环境，反之，聚落系统的变化也可能加速生态环境的变化。

当一个聚落单元开始发展时，其劳动力、资本、技术等生产要素将向剩余未发展的聚落单元进行扩散。剩余的聚落将获得更大的发展动力，导致这些单元的发展概率增加。聚落的整体发展概率表示如下：

$$\lambda_A(X(t)) = \lambda_A \cdot f\left(\frac{m}{m-X(t)}\right) \tag{4}$$

式中，$X(t)$表示时刻t发展的聚落单元数量；$f\left(\frac{m}{m-X(t)}\right)$是发展函数，反映了单个聚落发展对聚落整体发展率的影响；λ_A为初始发展率。

类似地，当一个生态环境单元(如耕地或森林)退化时，其负担由其他生态环境单元分担，导致这些生态环境单元的退化速率加速。生态环境的整体退化概率表示如下：

$$\lambda_B(Y(t)) = \lambda_B \cdot f\left(\frac{n}{n-Y(t)}\right) \tag{5}$$

式中，$Y(t)$表示时刻t退化的生态环境单元数量；$f\left(\frac{n}{n-Y(t)}\right)$是退化函数，反映了单个生态环境退化对生态环境整体退化率的影响；λ_B为初始退化率。

(2)系统耦合关系。城乡聚落系统与生态环境系统之间并非独立，而是存在相互依赖的耦合关系。例如，城乡聚落的发展会直接影响到生态环境的变化，反之，生态环境的恶化也会阻碍城乡聚落的发展。生态环境系统与城乡聚落系统的交互耦合关系表达如下：

$$\lambda_B(X(t),Y(t)) = \lambda_B \cdot f\left(\frac{n}{n-Y(t)}\right) \cdot w(X(t)) \tag{6}$$

式中，耦合函数$w(X(t))$表示城乡聚落系统对生态环境系统的影响强度，$X(t)$为时刻t发展的聚落单元数量。耦合函数反映了城乡聚落系统和生态环境系统之间的相互作用。其中$w(X(t)) \geqslant 1$，并且当$w(X(t)) = 1$时，生态环境系统不受聚落系统的影响；当$w(X(t)) \to \infty$时，城乡聚落系统对生境系统具有极大影响。

(3)系统状态转移与级联效应。城乡聚落系统和生态环境系统的状态由$X(t)$和$Y(t)$共同表示，状态空间为

$$S = \{(x,y) \mid 0 \leqslant x \leqslant m, 0 \leqslant y \leqslant n\} \tag{7}$$

系统的状态转移过程是由聚落单元和生态环境单元的变化引起的。当时刻t系统处于状态(x,y)时，若一个聚落单元发生变化，系统将从状态(x,y)转移至$(x+1,y)$；若一个生态环境单元发生变化，系统将从状态(x,y)转移至$(x,y+1)$。系统的状态转移概率表达如下：

$$P_{(x,y)\to(x+1,y)}(\Delta t) = (m-x) \cdot \lambda_A \cdot f\left(\frac{m}{m-x}\right) \cdot w(y) \cdot \Delta t \tag{8}$$

$$P_{(x,y)\to(x,y+1)}(\Delta t) = (n-y) \cdot \lambda_A \cdot f\left(\frac{n}{n-y}\right) \cdot w(x) \cdot \Delta t \tag{9}$$

$$P_{(x,y)\to(x,y)}(\Delta t) = 1 - P_{(x,y)\to(x+1,y)}(\Delta t) - P_{(x,y)\to(x,y+1)}(\Delta t) \tag{10}$$

式中，$P_{(x,y)\to(x+1,y)}(\Delta t)$、$P_{(x,y)\to(x,y+1)}(\Delta t)$和$P_{(x,y)\to(x,y)}(\Delta t)$分别表示城乡聚落系统状态转移概率、生态环境系统状态转移概率和无状态转移概率。

基于上述状态转移概率综合计算级联效应$F(t)$，其具体表达式如下：

$$F(t) = P\{(X(t),Y(t)) \in F\} \tag{11}$$

式中，F为系统变化状态集。

以“城市郊区扩张对邻近栖息地的边缘效应”为例，具象化微观级联耦合过程：假设一个城市远郊社区(A)由m个建设用地组团(聚落单元)构成，紧邻一个由n个区块(生态环境单元)组成的完整林地(B)。当一个聚落单元X_1开始建设，其活动(如交通尾气、噪声、夜间灯光)通过耦合函数$(w(X(t)))$直接作用于最邻近的林地区块Y_1，使其栖息地质量下降，发生退化状态转移。林地边缘区块Y_1的退化，削弱了其缓冲功能，使得邻近的其他林地区块暴露在更强的声、光和物种入侵风险之下，通过压力传导的退化函数$(f(n/(n-Y(t))))$，增加了其他林地区块后续发生退化的概率。与此同时，第一个聚落单元X_1完善了社区基础设施，通过正反馈的发展函数$(f(m/(m-X(t))))$，加速了其他聚落单元的开发。这一过程展示了单个微观单元的状态变化如何通过跨系统耦合(聚落→林地)和系统内扩散(林地→林地，聚落→聚落)，触发了连锁式的状态转移，最终的级联效应$(F(t))$则可量化为整个林地丧失其核心栖息地功能的总概率。

需要指出的是，上述宏-微观模型方程(1)–(10)旨在提供一个解析级联耦合过程的理论分析框架，而非一个具有确定参数的定量预测模型。其具体函数形式和变量的量化，需根据具体研究问题和数据可获得性进行设定。为增强模型的可检验性与可复核性，表1列出了模型中关键变量的定义、潜在测度口径及其数据来源，旨在为未来的实证研究提供清晰的路径指引。

3.2　城乡聚落与生态环境级联耦合的现实机理

城乡聚落作为承载人类活动的复杂空间实体，其自身的动态演变(如空间扩张、结构重组)是与生态环境级联耦合的直接界面和初始扰动。而人口动态、资本流动、技术变革与制度安排等社会经济要素，则是驱动这一空

表1　级联耦合模型关键变量的定义与实证路径

	类别	变量	定义范围	潜在可观测指标/测度方法	数据来源/分析工具
宏观模型	状态变量	S_i	描述子系统i(如城市、耕地)在特定时间点的状态或属性	建成区面积、人口密度、耕地保有量、粮食产量、栖息地斑块数量	遥感影像、统计年鉴、农业普查数据
	耦合变量	C_{ij}	描述子系统i对子系统j影响的强度或效率	土地利用转移矩阵系数；多区域投入产出模型(MRIO)中的贸易系数；空间计量模型中的回归系数	土地利用数据、投入产出表、社会经济面板数据
	级联效应变量	Y_k	描述经过多阶传导后，在特定维度上产生的累积效应	栖息地质量指数变化、区域碳储量变化、粮食自给率变化、生物多样性完整性指数	MRIO模型、生命周期评价(LCA)
微观模型	发展/退化率	λ_A，λ_B	微观单元发生状态转移的内在(初始)概率	特定区域历史上的年均土地利用变化率；专家打分法或历史数据拟合	长时序遥感数据、规划文本、德尔菲法
	系统内耦合	$f(\cdot)$	描述系统内单元间的相互影响(正反馈或压力传导)	基于元胞自动机(CA)的转换规则；基于网络分析的邻近效应函数	CA模型、地理加权回归(GWR)
	跨系统耦合	$w(X(t))$	描述一个系统的状态对另一个系统变化率的影响强度	InVEST模型中威胁源对栖息地的影响权重	GIS空间分析、InVEST模型

间实体发生变化的“上游”力量。现实的级联耦合机理与前述理论框架紧密对应：这些“上游”力量即驱动变量(D)，其首先作用于城乡聚落这一核心节点，改变其自身的状态变量(S_i)；随后，这一初始变化通过一系列耦合变量(C_{ij})所表征的传导路径，触发了对生态环境跨时空、跨领域的级联效应(Y_k).

3.2.1　社会经济驱动下的城乡聚落扩张

城市和乡村聚落是人类生产生活的主体空间和基本载体，其动态演变深刻嵌入社会经济转型的全过程。人口动态、经济要素、交通网络和政策制度的复合作用，通过多尺度传导机制重塑聚落形态，并影响其与生态基底间的耦合关系(图2)。

(1)人口动态的差异化驱动。人口增长与迁移的空间异质性深刻塑造城乡聚落扩张格局。全球人口总量攀升直接驱动建设用地需求增长(Mahtta等，2022)，但其效应呈现显著区域分异：发展中国家城市人口膨胀引发住房与基础设施需求激增，而发达国家低人口增长背景下仍延续低密度扩张模式(Weilenmann等，2017)，反映居住偏好与制度环境对土地需求的深层调控。人口迁移的极化效应进一步加剧空间失衡，城市作为主要人口流入地承受持续扩张压力(李爽和张晓虹，2024)，而乡村人口流出区建设用地却因土地制度僵化难以实现存量优化(戈大专和龙花楼，2020)，尤其在土地产权固化与退出机制缺失的背景下，乡村建设用地往往陷入“人走地留”的困境(王婧等，2014)。家庭结构小型化通过增加住房单元需求放大土地消耗(Wassmer，2006)，其效应在城市高密度区尤为显著，表现为核心城区高容积率开发与郊区低密度蔓延的叠加；人口老龄化则通过代际行为差异产生影响，老年人在子女离家后也不愿搬迁或缩小居住面积，这种“空间锁定”效应抑制了土地集约化利用(Mann，2009)。

(2)经济要素的多维牵引。经济发展水平与产业结构差异构成城乡聚落扩张的非对称动力。城市地区经济增长通过商业、工业用地需求扩张直接转化为空间扩张，收入提升更催生低密度居住偏好(Bimonte和Stabile，2017)，形成“增长-扩张”的正反馈循环。乡村地区经济驱动则因人口流失与产业弱势呈现边际递减特征，农业用地经济产出与建设用地的机会成本差异导致土地用途转换动力不足(Guastella等，2017)。全球化通过资本流动重塑城市用地格局，外资导向的产业园区建设成为重要扩张引擎(陈江龙等，2014)，而乡村受限于基础设施与市场整合度，全球化影响多限于初级产品供应链，对乡村聚落扩张的驱动作用有限。市场化改革在城乡间呈现分化效应：城市土地价格机制推动空间资源配置效率提升的同时，也因财政依赖诱发过度开发，形成土地财政驱动下的非理性扩张(梁若冰和蓝天，2023)；乡村土地流转的制度约束则导致低效扩张与闲置并存，土地要素市场化滞后削弱了资源配置效率。

(3)交通网络的空间塑形。交通基础设施通过可达性重构引导聚落空间演化。城市交通走廊成为蔓延主轴，高速公路与轨道交通的延伸直接触发边缘区开发(Chen等，2016)，形成“路网扩展-土地增值-开发跟进”的传导链条，这种空间塑形效应在通勤成本敏感的新兴城市群尤为显著。公共交通效率提升虽能促进高密度集约发展(Burchfield等，2006)，但其调控效力受制于城市发展阶

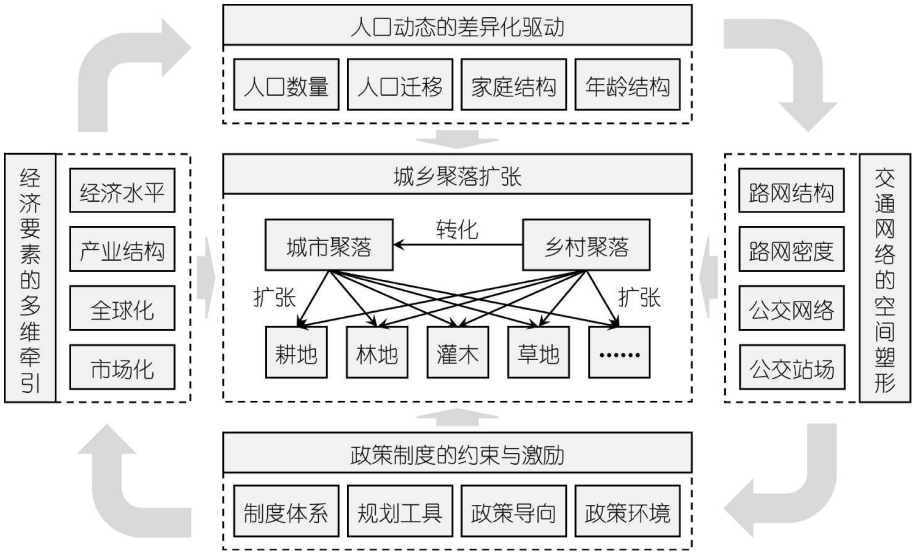


图 2　城乡聚落扩张的驱动机制

段与规划协同度，轨道交通站点周边开发强度与土地混合利用水平差异反映出规划整合的缺口。乡村地区交通网络扩张与居住区扩展则呈现弱关联性，路网延伸带来的边际效益受制于经济活力不足与人口密度阈值，难以形成持续扩张动力，低等级公路的毛细血管作用仅能维持基本生产生活需求。城乡交通投资的非均衡性进一步强化空间分异，城市交通现代化加速空间重组，而乡村路网改善多限于基础通达性提升(杨鹏等，2024)，这种基础设施供给的梯度差异固化了城乡聚落扩张的二元特征。

(4)政策制度的约束与激励。制度体系通过竞争与协调机制深刻干预扩张进程。城市地方政府间的“锦标赛”竞争催生土地开发冲动规划工具的不完备性与动态调整削弱空间管控效力，导致功能分区失序与蔓延加剧，开发区“政策飞地”现象凸显(Anas和Pines，2008；Hersperger和Bürgi，2009；Wang等，2017)。乡村地区则因制度执行能力薄弱陷入“低效扩张-监管缺位”的恶性循环，土地管理制度滞后难以应对人口流失背景下的存量优化需求，宅基地确权与流转受限加剧了空心村现象(胡智超等，2016)。政策导向的城乡分异特征显著：城市通过增长边界管控抑制无序扩张，但政策执行力度受地方财政压力影响呈现时空调控波动(刘颜，2019)；乡村耕地保护政策虽设立制度屏障，却因执法资源不足导致违规占补平衡现象频发(王世磊等，2025)。此外，决策者年龄结构与治理环境要素通过影响政策制定效率，年轻官员的晋升竞逐与任期周期往往强化短期开发导向(傅利平和李永辉，2015)，而任期稳定的管理者更倾向可持续空间治理。这一系列制度性因素与市场力量的交互作用，共同构成城乡聚落扩张的深层动因与约束条件。

3.2.2　城乡聚落与生态环境的级联耦合

城乡聚落与生态环境的相互作用呈现出跨尺度、跨领域、跨空间、跨时间的级联耦合特征，其影响路径既包含直接的空间侵占效应，更蕴含复杂的非线性传导机制(图3)。城乡聚落在耕地和自然土地上的扩张和乡村聚落向城市聚落的转化均会直接导致原有土地利用生态环境功能的衰退或消失：其一，水资源系统失衡。自然地表覆被的硬质化改变引发地表径流激增与地下水补给锐减的双重胁迫，显著破坏水文循环；人类活动的水资源超采与污染排放，触发水量-水质-水生态的复合退化链。其二，土地与土壤系统退化。土地硬化导致土壤渗透性和肥力下降，损害土壤功能；乡村聚落仍保留一定的复垦和还林潜力，而城市聚落因土壤结构的不可逆破坏而形成“生态疤痕”。其三，气候和大气环境变化。不透水层和建筑物的扩展导致自然碳汇减少、地表硬化吸热、通风廊道阻断等，改变全球和局部气候；新增的施工扬尘、机动车尾气和工业废气排放($PM_{2.5}$、NO_x等污染物)则会加剧空气污染。其四，生物多样性丧失。自然土地和耕地的动植物多样性远高于城乡聚落，城乡聚落扩张的过程会导致生物丰度和多样性的全面下降；生态敏感区的无序开发更造成特有种群的区域性灭绝。

然而，上述显性环境效应仅为级联耦合的初级表征。实际上，未被直接侵占的近程生态环境和远程生态环境同样会通过多路径与城乡聚落产生多阶级联耦合(图3)。

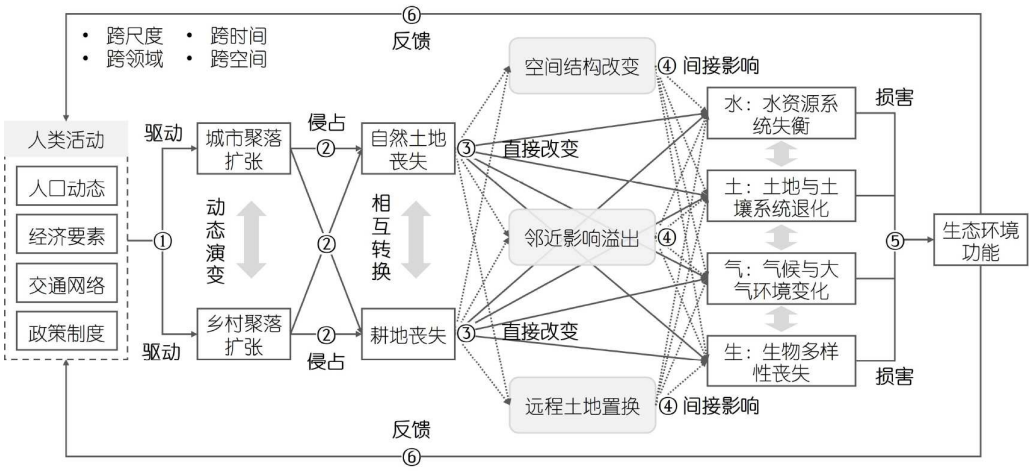


图3 城乡聚落与生态环境级联耦合机理

城乡聚落与生态环境级联耦合的主要间接路径可分为3类：空间结构改变、邻近影响溢出、远程土地置换。并且，城市与乡村聚落在主导这三类路径时，其驱动核心、强度与范围存在显著差异。空间结构改变指城乡聚落扩张导致自然土地和耕地空间分布变化的过程。例如，城市聚落的集中连片开发常导致大面积栖息地的永久性割裂，而乡村聚落的零散扩张同样会增加耕地的破碎性，阻碍农业机械化。邻近影响溢出指城乡聚落内人类活动的扰动和污染不受空间局限，逸散到周围未被侵占空间的过程。例如，城乡聚落的噪声、夜间灯光、践踏行为等会降低周围生物栖息地的适宜性，空气污染、水污染、热岛效应则影响周围大气环境、水环境、土壤质量和局部气候，但城乡聚落的影响溢出范围则存在明显差异。远程土地置换指被城乡聚落侵占的耕地通过政策和贸易远程补偿，进而间接侵占远程自然土地的过程。其中，城市聚落扩张会集中连片地侵占附近的高产农田，而乡村聚落侵占耕地过程在空间上更弥散，但累积效应不容忽视。不同区域耕地生产能力的差异会放大土地置换的生态环境影响。城乡聚落的直接和间接影响共同损害生态环境功能，并反过来威胁人类生存。

除受城乡聚落动态扩张的驱动外，饮食需求和结构变化、退耕还林政策、耕地撂荒等因素同样会驱动自然土地和耕地的相互转换(图3)。水、土、气、生等生态环境子系统之间也存在复杂的交互耦合关系。这些复杂关系会进一步掩盖城乡聚落演变的驱动作用。总体而言，城乡聚落会通过多种路径与生态环境级联耦合，产生间接、复杂、隐秘的影响。

3.3 城乡聚落与生态环境级联耦合的基本特性

城乡聚落与生态环境的级联耦合过程，展现出四个紧密关联且层层递进的基本特性(图4)。其中，“多级性”是其根本的结构属性，描述了其链式传导的核心特征。正是基于这一多阶传递的结构，级联耦合得以突破地理邻近性的限制，衍生出跨越空间、尺度与领域的“超限性”。同时，影响在因果链中逐阶传递所需时间的累积，导致了最终效应显现的“时滞性”。最后，多阶的复杂过程、跨域的超限联系以及漫长的时滞效应三者共同作用，使得整个因果链难以被完整观测和精准归因，从而呈现出极强的“隐秘性”。下文将对这四大特性逐一进行详细阐述。

3.3.1 多级性

全球城乡聚落通过一阶级联耦合、二阶级联耦合、三阶级联耦合乃至N阶级联耦合与生态环境发生交互作用，反映出全球城乡聚落与生态环境级联耦合的多级性，其内涵如图3所示。多级性是全球城乡聚落与生态环境级联耦合的核心特性，是级联耦合区别于人地关系地域系统、远程关联、近远程耦合、土地利用溢出等理论的根源。早期的局部尺度研究普遍将城乡聚落与生态环境的一阶级联耦合当作研究重点，例如，基于土地利用变化过程，分析城乡聚落扩张侵占耕地的面积、侵占自然栖息地的面积、诱发耕地和自然栖息地的破碎程度(Tu等，2021；王春晓等，2022)；将城乡聚落扩张抽象为解释变量，使用计量模型分析其与空气污染、气候变化、生态系统服务价值之间的关联(王班班等，2021；戚琦等，2024)；将城乡聚落扩张抽象为被解释变量，使用计量模型分析生态环境条件与城乡聚落演变过程的关联(吝涛等，2010；Haldar等，2024)；将生态环境作为限制条件，模拟城乡聚落扩张程度和时空格局(刘菁华等，2018；王萍等，2024)。部分研究考虑了空间溢出效应和非本地因

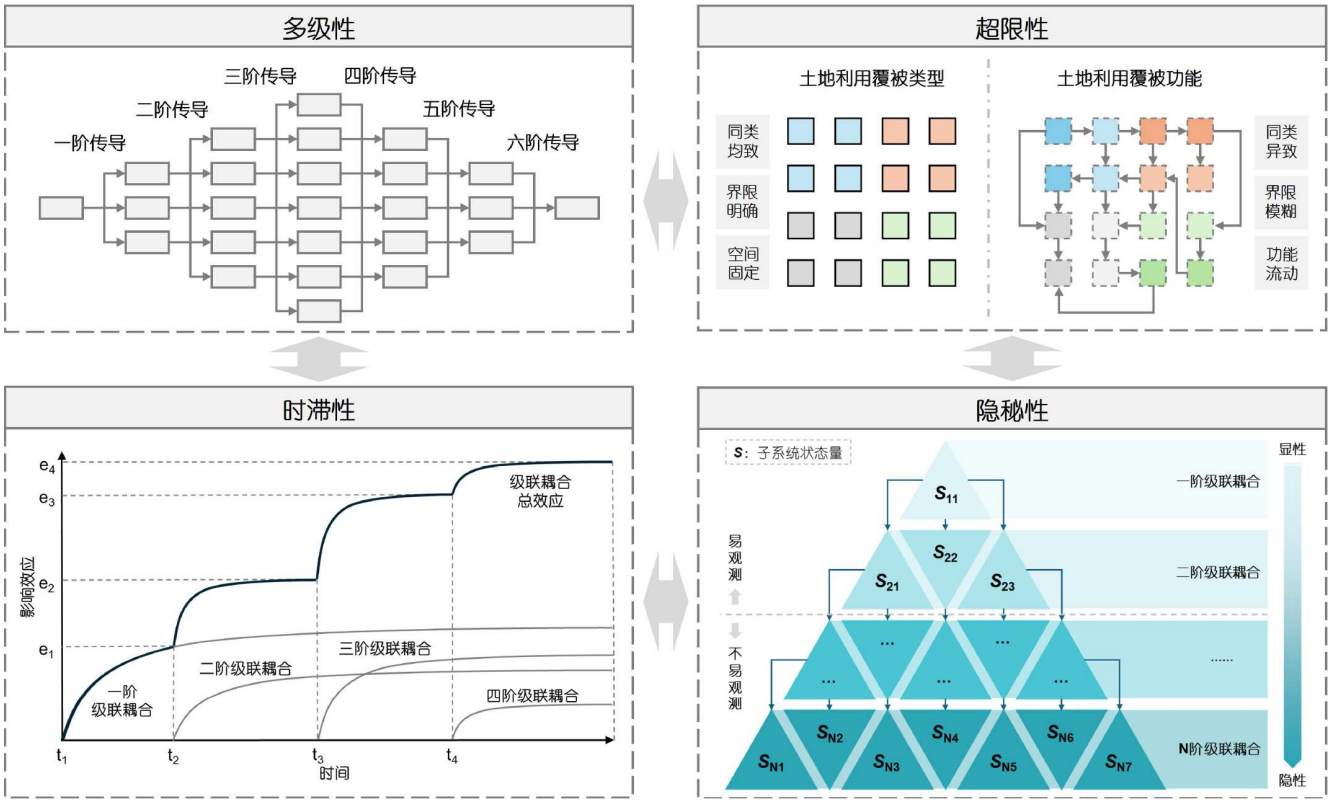


图 4　级联耦合四维基本特性示意图

素的远程影响(Liu等，2023b)，但分析的内容仍然是对象之间的一阶级联耦合过程。城乡聚落与生态环境的一阶级联耦合研究可以提供关于两个研究对象关系的总体认识，但无法揭示产生此种现象或关系的内在机制过程。

随着对社会生态过程关注的增强和多元数据的蓬勃发展，多尺度研究开始关注城乡聚落与生态环境的二阶乃至多阶级联耦合关系。多阶级联耦合关系研究通常是在一阶级联耦合研究的基础上，深挖潜在影响或内在过程。城乡聚落演化对生物多样性和农业可持续性的间接影响就是典型的多阶级联耦合过程。例如，van Vliet (2019)使用ESA-CCI土地利用覆被数据估计1992–2015年的全球城市扩张导致了24.3万km^{2}的耕地损失，刻画了城市聚落与近程耕地的一阶级联耦合关系；使用代表性生产力数据估计全球城市扩张导致了每年1.22亿吨谷物的损失，刻画了城市聚落与作物生产的二阶级联耦合关系；以谷物转移为中介关系估计全球城市扩张导致了32.5–58.0万km^{2}的耕地迁移，刻画了城市聚落与远程耕地的三阶级联耦合关系；结合土地利用覆被数据估计耕地迁移导致了17.8–32.4万km^{2}的森林损失和7.0–17.4万km^{2}的灌木损失，刻画了城市聚落与远程森林与灌木的四阶级联耦合关系(van Vliet，2019)。

3.3.2　超限性

超限性反映了城乡聚落与生态环境超越外部限制进行跨尺度、跨空间、多路径的级联耦合的能力(图4)。城乡聚落与生态环境本身是附着在陆地表面的土地利用覆被，类似的土地被赋予同一类型、彼此之间有明确的界限、被具体的空间位置限定。但城乡聚落与生态环境的功能存在明显的空间异质性、不同土地利用覆被的功能彼此渗透、所承载的物质、信息和能量具有流动性。本研究认为超限性源于全球城乡聚落与生态环境的功能联系，能够以物质、信息和能量的跨尺度、跨空间、多路径的流转为媒介产生多阶相互作用。

全球城乡聚落与生态环境通过物质、能量和信息等现实流产生相互影响，使其效应能够超越地理边界的限制。这种跨空间的影响，其强度和规模通常可以通过虚拟流(或称足迹)等概念进行量化和追踪(Galli等，2012)。现实流可以被具体分为物质流和非物质流。物质流指的是有形货物、材料、自然资源(如水)、物质(如$PM_{2.5}$污染物)、动物和人员的流动，以及疾病从一个地方传播到另一个地方；非物质流是指系统间无形资源或服务的转移，通常包括信息流和资金流(Li等，2023)。全球城乡聚落

与生态环境依托现实流产生了大量超限性级联耦合。例如，美国的城乡聚落扩张和蔓延大幅增加了对燃油交通工具的依赖以及对汽油和柴油等化石燃料的需求，在全球变暖日益严峻的背景下，低碳排放的生物燃料的市场价值大幅提升，促使美国大幅增加了生物燃料(玉米，可炼制乙醇汽油)的种植规模(城乡聚落与本地耕地的一阶级联耦合)(Lambin和Meyfroidt，2011；Liu等，2015)；美国生物燃料作物逐渐取代了本地的粮食和饲料作物，导致其粮食和肉类的价格上涨以及出口量下降(玉米下降62%，小麦下降31%，大豆下降28%，猪肉下降18%，鸡肉下降12%)，促使其他国家扩大耕地面积(10.8万km^2)以满足粮食需求(城乡聚落与异地耕地的二阶级联耦合)(Searchinger等，2008)；其他国家的耕地扩张(例如，巴西2.8万km^2、中国和印度2.3万km^2)将侵占森林、灌木和草地，影响其碳储存能力(城乡聚落与异地自然土地的三阶级联耦合)(Searchinger等，2008)。生物燃料和粮食贸易在全球市场的流动促使美国城乡聚落与全球生态环境产生级联耦合，展现出显著的超限性。

3.3.3 时滞性

城乡聚落与生态环境系统之间的级联耦合具有显著的时滞性，即影响需要时间的积累才能显现(图4)。城乡聚落与邻近生态环境级联耦合的时滞性因影响的具体功能而异。例如，Xu等(2018)采用时间顺序协同性分析发现，当自然表面转变为人工表面时碳会直接丢失，城市聚落扩张对碳封存的影响没有明显的时间滞后。但Dallimer等(2015)使用英国谢菲尔德1850–2000年的土地利用覆被数据和8种生态系统服务调查数据分析发现，地上碳密度、娱乐用途、鸟类物种丰富度、鸟类密度和娱乐体验质量更主要由过去的城乡聚落和生态环境演化决定，时间滞后从20年(鸟类物种丰富度和密度)到100年以上(地上碳密度)不等(Dallimer等，2015)。

城乡聚落与遥远生态环境的级联耦合则会随着时间推移逐步显现，最终形成显著的生态和社会后果。一方面，多阶级耦合的时间损耗会导致时滞性。例如，随着美国对生物燃料需求的增加，美国国内的玉米种植耕地大规模的扩张，耕地开垦和作物转换过程会存在时间损耗。此外，耕地扩张的后果逐步通过贸易和市场机制传递到其他国家，全球的粮食贸易运输会损耗时间。最终，巴西、中国、印度等国家开垦自然土地扩大耕地面积的过程同样会损耗时间。另一方面，影响的非线性积累会导致时滞性。例如，尽管自然土地被侵占会导致碳汇能力下降，但应用生物燃料同时驱动碳排放量减少，碳汇和碳排放双变量的同时变化使得城乡聚落与生态环境级联耦合的碳减排效应表现出非线性。据估计，美国使用生物燃料减排的温室气体将在167年后平衡土地利用变化增加的碳排放，对碳减排表现出明显的时滞性(Searchinger等，2008)。

3.3.4 隐秘性

城乡聚落与生态环境之间的级联耦合不易直接观测，且观测难度随级联阶数增加，表现出极强的隐秘性(图4)。一方面，生态环境的许多变化往往由多种因素驱动，例如区域的物种多样性的变化可通过实地调研观测，但物种多样性的变化由城乡聚落侵占栖息地、耕地开垦侵占栖息地、森林砍伐侵占栖息地、声光水污染降低栖息地质量、生物入侵、非法狩猎等多种因素共同驱动，而且因素之间存在复杂耦合关系，无法直接观测单一因素驱动的物种多样性实际变化。另一方面，级联耦合的多级性、超限性和时滞性会进一步增加现象背后原因的复杂性，加强全球城乡聚落与生态环境级联耦合的隐秘性。已有研究往往预先设定现实假设，采用过程模拟和参数模型估算来评估城乡聚落通过级联耦合对生态环境的影响。例如，Ren等(2022)使用栖息地质量模型，根据栖息地对城乡聚落不同扰动的差异化敏感性和扰动的空间衰减规律来评估城市扩张直接占用栖息地(一阶级联耦合)和间接扰动邻近栖息地(二阶级联耦合)对栖息地质量的影响。van Vliet(2019)根据被城乡聚落侵占的耕地并未消失而是以多种机制迁移到其他地区的现实假设，使用多元土地利用和作物生产数据估算了城市扩张导致的耕地和栖息地占用(一阶级联耦合)、作物产量损失(二阶级联耦合)、耕地虚拟迁移(三阶级联耦合)和远程栖息地损失(四阶级联耦合)。上述多阶级联耦合的影响均难以被观测并容易被忽视，但已有结果显示，隐秘的多阶级联耦合的影响是一阶级联耦合的数倍(McDonald等，2020)。

4 城乡聚落与生态环境级联耦合的研究展望

城乡聚落与生态环境级联耦合所呈现的多级性、超限性、时滞性和隐秘性，进一步衍生出一系列亟待破解的核心科学问题。首先，在复杂的社会-生态系统中，如何精准识别和刻画出关键的级联耦合传导路径，并揭示其主导驱动机制? 其次，如何定量识别不同级联过程中的时滞效应，并将最终的远期生态环境影响准确归因到最初的驱动源? 进一步地，在长链条的传导过程中，不确定性如何逐阶累积和传播? 最后，局地的级联过程如何通过跨尺度机制汇聚成全球性的环境影响? 下文将围绕这些核心科学问题与技术难点，提出未来研究的重点方向。

4.1　聚焦城乡差异以拓宽级联耦合的解析路径

破解级联耦合的路径识别与效应归因这一核心科学难题，首要任务是正视城乡聚落这一主体的内部异质性。当前学术界对城市聚落级联效应的研究已相对成熟，基于夜间灯光数据与传统遥感影像生成的海量长时序全球城市聚落数据集(Li等，2020；Huang等，2021；Zhao等，2022；Shi等，2023)，已支撑起城市聚落扩张威胁气候变化(Liu等，2019)、粮食安全(Bren d'Amour等，2017)及生物多样性(Seto等，2012a)等领域的深入研究。然而，全球乡村聚落数据产品严重匮乏(Liu等，2024)，多数乡村聚落提取局限于国家或局部地区(李扬换等，2019；Liu等，2023a)，导致相关研究明显滞后。这种学术焦点失衡与乡村聚落对于生态环境的重要价值形成矛盾——全球大部分土地(和水)，包括自然资源开采、能源生产、农业和粮食生产、减缓和适应气候变化的空间，都位于乡村地域(Gkartzios等，2022)，其作为自然资源管理主战场的战略地位亟待关注。这种“重城轻乡”的研究偏向，导致大量由乡村人口动态和地方性生计活动所驱动的级联耦合路径被长期忽视，极大地限制了我们对人地系统复杂性的完整认识。

未来的理论突破口在于构建城乡差异化的级联耦合分析范式。在数据层面，研发融合高光谱遥感、社交媒体地理标记与田野调查的全球乡村聚落数据库，为路径识别提供基础支撑。在机理层面，应重点对比城乡在不同级联路径上的主导机制、传导效率和时滞差异。例如，可采用因果推断模型(Causal Inference Models)结合过程追踪(Process Tracing)的混合方法，从纷繁复杂的关联中剥离出关键的城乡差异化因果链条，以真正实现对多元路径的精准刻画与效应归因。

4.2　创新模拟方法以应对时滞与不确定性挑战

既有研究基于土地利用覆被变化过程，从空间结构改变、邻近影响溢出、远程土地置换三条路径解析了城乡聚落扩张的级联生态环境效应。首先，在空间结构改变上，多尺度研究已证实聚落扩张通过重塑景观格局，显著加剧了栖息地的破碎化与孤立化(Li等，2022；Cai等，2024)。其次，通过邻近影响溢出，聚落产生的污染、热岛等扰动会扩散并降低周边生境质量，其间接生态破坏强度可达直接占用的数倍乃至一个数量级(Chen等，2022；Ren等，2022)。更为深远的是，在远程土地置换路径上，聚落对耕地的占用通过贸易和市场机制，触发了异地的补偿性农业扩张，其导致的间接毁林和栖息地损失远超聚落本身的直接空间足迹(Ke等，2018；van Vliet，2019)。总体而言，当前对级联耦合的解析多集中于静态的效应评估，成功量化了邻近影响溢出和远程土地置换的效应量级，但对效应的滞后反应、不确定性的时间累积等动态问题关注不足。

后续研究的方向应从静态的效应评估转向动态的过程模拟，重点发展能够内生化时滞效应与不确定性的耦合模型。在时滞效应方面，可引入系统动力学(System Dynamics)方法，构建包含多重反馈回路的仿真模型，以定量识别不同传导路径上的时滞周期，并揭示导致效应延迟显现的关键反馈节点。与此同时，为应对贯穿于长链条中的不确定性，亟需将概率模型引入级联耦合分析。例如，可应用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟来评估关键参数(如土地转换率、贸易弹性系数)的不确定性如何通过多阶传导进行累积和放大。通过整合这些动态模拟与概率分析方法，将推动级联耦合研究从“量化效应大小”的单一目标，迈向“刻画动态过程与评估结果稳健性”的更高阶段，为风险预警和适应性治理提供更可靠的科学支撑。

4.3　拓展研究尺度以适应地球系统的复杂联系

人类系统的社会复杂性、自然系统的物理复杂性以及两者之间的相互作用，共同将地球塑造成一个具有高度不确定性的复杂系统(Fang和Liu，2024)。在自然系统维度，远程关联机制通过大气-海洋能量再分配驱动跨洋环境响应——厄尔尼诺事件引发的沃克环流异常不仅重塑太平洋热力结构，更通过遥相关作用触发印度洋季风减弱与北美西岸干旱的链式反应(Trenberth等，1998)。在社会系统维度，全球化重构了“生产-消费-废弃”的物质代谢路径，基于虚拟水、虚拟碳和虚拟土地的隐形资源流动(Wu等，2018)，将城乡聚落扩张与亚马孙雨林砍伐、非洲耕地退化等远端生态危机编织成复杂耦合网络(Liu等，2013)。这种“本地行为-全球影响”的传导机制，使得局部尺度研究难以捕捉聚落扩张通过自然系统远程关联与社会经济网络传导的跨域生态效应。

破解这一困境亟需基于地方知识和全球数据，开展地方-全球嵌套的级联耦合研究。首先，解析局部区域的城乡聚落扩张与本地和异地生态环境的区域差异化互动过程。采用“案例对比-机理解耦”的混合研究方法，揭示典型区域(如热带雨林区、季风气候区与干旱半干旱区)级联效应的空间异质性。其次，基于地方知识和全球数据模拟和评估全球城乡聚落扩张对生态环境的级联影响。例如耦合地球系统模式与全球投入产出模型，构建“聚落扩张-资源流动-生态响应”的跨国界、跨介质的级联传导

模拟系统。唯有将研究视野拓展至全球尺度，方能全面揭示城乡聚落与生态环境级联耦合的复杂真相。

参考文献

陈江龙, 高金龙, 徐梦月, 等. 2014. 南京大都市区建设用地扩张特征与机理. 地理研究, 33: 427–438

樊杰. 2018. “人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石. 地理学报, 73: 597–607

方创琳. 2004. 中国人地关系研究的新进展与展望. 地理学报, 59(S1): 21–32

方创琳. 2022. 城乡融合发展机理与演进规律的理论解析. 地理学报, 77: 759–776

方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 2016. 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, 71: 531–550

傅利平, 李永辉. 2015. 地方政府官员晋升竞争、个人特征对城市扩张的影响——基于全国地级市面板数据的实证分析. 城市问题, (1): 27–32, 40

戈大专, 龙花楼. 2020. 论乡村空间治理与城乡融合发展. 地理学报, 75: 1272–1286

胡智超, 彭建, 杜悦悦, 等. 2016. 基于供给侧结构性改革的空心村综合整治研究. 地理学报, 71: 2119–2128

黄金川, 方创琳. 2003. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析. 地理研究, (2): 211–220

李换换, 宋伟, 张艳. 2019. 农村居民点演化数据制备综述. 资源科学, 41: 689–700

李爽, 张晓虹. 2024. 1843—2020年上海城市扩张时空过程及机理分析. 地理学报, 79: 1286–1302

梁若冰, 蓝天. 2023. 行政区扩张、土地出让依赖与城市发展质量——基于卫星灯光数据的准实验研究. 经济学(季刊), 23: 1019–1034

吝涛, 李新虎, 张国钦, 等. 2010. 厦门岛城市空间扩张特征及其影响因素分析. 地理学报, 65: 715–726

刘海猛, 方创琳, 李咏红. 2019. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架. 地理学报, 74: 1489–1507

刘菁华, 李伟峰, 周伟奇, 等. 2018. 权衡城市扩张、耕地保护与生态效益的京津冀城市群土地利用优化配置情景分析. 生态学报, 38: 4341–4350

刘颜. 2019. 土地财政对中国城市空间扩张的影响——基于动态空间计量模型的实证检验. 财经理论与实践, 40: 9–14

刘志涛, 王少剑, 方创琳. 2021. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制. 地理学报, 76: 2797–2813

马恩朴, 蔡建明, 韩燕, 等. 2020. 人地系统远程耦合的研究进展与展望. 地理科学进展, 39: 310–326

马恩朴, 蔡建明, 林静, 等. 2019. 远程耦合视角下的土地利用/覆被变化解释. 地理学报, 74: 421–431

戚琦, 王玲, 陈俊辰, 等. 2024. 武汉市城市快速扩张与生态系统服务价值权衡/协同的交互作用. 地理科学, 44: 953–963

任宇飞, 方创琳, 孙思奥, 等. 2020. 城镇化与生态环境近远程耦合关系研究进展. 地理学报, 75: 589–606

王班班, 廖晓洁, 谭秀杰. 2021. 城市化对雾霾暴露的贡献——基于对中国城市群的时空分解. 中国人口·资源与环境, 31: 63–74

王春晓, 何建华, 刘殿锋, 等. 2022. 土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响——以鄂州市为例. 生态学报, 42: 4197–4208

王婧, 方创琳, 李裕瑞. 2014. 中国城乡人口与建设用地的时空变化及其耦合特征研究. 自然资源学报, 29: 1271–1281

王萍, 林乐乐, 彭杨靖, 等. 2024. 基于CLUE-S模型的浙江省土地利用结构变化趋势分析. 生态科学, 43: 196–206

王世磊, 金晓斌, 洪步庭, 等. 2025. 新时期耕地保护规划的内在逻辑与战略构想. 地理研究, 44: 638–655

吴传钧. 1991. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统. 经济地理, (3): 1–6

吴传钧. 2008. 人地关系地域系统的理论研究及调控. 云南师范大学学报(哲学社会科学版), (2): 1–3

杨鹏, 黄洁, 王姣娥, 等. 2024. 中国农村物流末端配送网点可达性与公平性测度. 地理学报, 79: 2739–2753

郑度. 1998. 关于地理学的区域性和地域分异研究. 地理研究, 17: 5–10

Anas A, Pines D. 2008. Anti-sprawl policies in a system of congested cities. Regional Sci Urban Econ, 38: 408–423

Angelsen A, Kaimowitz D. 2001. Agricultural technology and forests: A recapitulation. In: Agricultural Technologies and Tropical Deforestation. 383–402

Bimonte S, Stabile A. 2017. Land consumption and income in Italy: A case of inverted EKC. Ecol Econ, 131: 36–43

Bren d’Amour C, Reitsma F, Baiocchi G, et al. 2017. Future urban land expansion and implications for global croplands. Proc Natl Acad Sci USA, 114: 8939–8944

Burchfield M, Overman H G, Puga D, et al. 2006. Causes of sprawl: A portrait from space. Q J Econ, 121: 587–633

Cai Y, Zhu P, Liu X, et al. 2024. Forest fragmentation trends and modes in China: Implications for conservation and restoration. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 133: 104094

Chen Y, Chang K, Han F, et al. 2016. Investigating urbanization and its spatial determinants in the central districts of Guangzhou, China. Habitat Int, 51: 59–69

Chen Z, Li Y, Liu Z, et al. 2022. Impacts of different rural settlement expansion patterns on eco-environment and implications in the loess hilly and gully region, China. Front Environ Sci, 10: 857776

Dallimer M, Davies Z G, Diaz-Porras D F, et al. 2015. Historical influences on the current provision of multiple ecosystem services. Glob Environ Change, 31: 307–317

Erb K H, Krausmann F, Lucht W, et al. 2009. Embodied HANPP: Mapping the spatial disconnect between global biomass production and consumption. Ecol Econ, 69: 328–334

Fang C, Liu Z. 2024. Earth vitality: An integrated framework for tracking Earth sustainability. Geogr Sustainab, 5: 96–107

Galli A, Wiedmann T, Ercin E, et al. 2012. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. Ecol Indic, 16: 100–112

Gkartzios M, Gallent N, Scott M. 2022. A capitals framework for rural areas: ‘Place-planning’ the global countryside. Habitat Int, 127: 102625

Glantz M, Katz R, Nicholls N. 1991. Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies. Cambridge University Press

Gong P, Li X, Wang J, et al. 2020. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. Remote Sens Environ, 236: 111510

Guastella G, Pareglio S, Sckokai P. 2017. A spatial econometric analysis of land use efficiency in large and small municipalities. Land Use Policy, 63: 288–297

Haberl H, Erb K H, Krausmann F, et al. 2009. Using embodied HANPP to analyze teleconnections in the global land system: Conceptual considerations. Geogr Tidsskr-Danish J Geogr, 109: 119–130

Hairston N G, Smith F E, Slobodkin L B. 1960. Community structure, population control, and competition. Am Naturalist, 94: 421–425

Haldar S, Chatterjee U, Bhattacharya S, et al. 2024. Peri-urban dynamics: Assessing expansion patterns and influencing factors. Ecol Process, 13: 58

Hersperger A M, Bürgi M. 2009. Going beyond landscape change description: Quantifying the importance of driving forces of landscape change in a Central Europe case study. Land Use Policy, 26: 640–648

Huang X, Huang J, Wen D, et al. 2021. An updated MODIS global urban extent product (MGUP) from 2001 to 2018 based on an automated mapping approach. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 95: 102255

Ke X, van Vliet J, Zhou T, et al. 2018. Direct and indirect loss of natural habitat due to built-up area expansion: A model-based analysis for the city of Wuhan, China. Land Use Policy, 74: 231–239
Lambin E F, Meyfroidt P. 2011. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. Proc Natl Acad Sci USA, 108: 3465–3472
Li G, Fang C, Li Y, et al. 2022. Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity. Nat Commun, 13: 1628
Li X, Gong P, Zhou Y, et al. 2020. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. Environ Res Lett, 15: 094044
Li Y, Jia N, Yu X, et al. 2023. Transboundary flows in the metacoupled Anthropocene: Typology, methods, and governance for global sustainability. Ecol Soc, 28: art19
Liu J. 2017. Integration across a metacoupled world. Ecol Soc, 22: art29
Liu J, Dietz T, Carpenter S R, et al. 2007. Complexity of coupled human and natural systems. Science, 317: 1513–1516
Liu J, Hull V, Batistella M, et al. 2013. Framing sustainability in a telecoupled world. Ecol Soc, 18: 26
Liu J, Mooney H, Hull V, et al. 2015. Systems integration for global sustainability. Science, 347: 1258832
Liu X, Pei F, Wen Y, et al. 2019. Global urban expansion offsets climate-driven increases in terrestrial net primary productivity. Nat Commun, 10: 5558
Liu Y, Ou C, Li Y, et al. 2023a. Regularity of rural settlement changes driven by rapid urbanization in North China over the three decades. Sci Bull, 68: 2115–2124
Liu Y, Ou C, Liu Y, et al. 2025. Unequal impacts of global urban–rural settlement construction on cropland and production over the past three decades. Sci Bull, 70: 1699–1709
Liu Z, Fang C, Sun B, et al. 2023b. Governance matters: Urban expansion, environmental regulation, and PM2.5 pollution. Sci Total Environ, 876: 162788
Liu Z, Huang S, Fang C, et al. 2024. Global urban and rural settlement dataset from 2000 to 2020. Sci Data, 11: 1359
Liu Z, Zhan W, Bechtel B, et al. 2022. Surface warming in global cities is substantially more rapid than in rural background areas. Commun Earth Environ, 3: 219
Mahtta R, Fragkias M, Güneralp B, et al. 2022. Urban land expansion: The role of population and economic growth for 300+ cities. npj Urban Sustain, 2: 10
Mann S. 2009. Institutional causes of urban and rural sprawl in Switzerland. Land Use Policy, 26: 919–924
McDonald R I, Mansur A V, Ascensão F, et al. 2020. Research gaps in knowledge of the impact of urban growth on biodiversity. Nat Sustain, 3: 16–24
McKenzie P, Cooper A, McCann T, et al. 2011. The ecological impact of rural building on habitats in an agricultural landscape. Landscape Urban Plann, 101: 262–268
Meyfroidt P, Roy Chowdhury R, de Bremond A, et al. 2018. Middle-range theories of land system change. Glob Environ Change, 53: 52–67
Nedic D P, Dobson I, Kirschen D S, et al. 2006. Criticality in a cascading failure blackout model. Int J Electrical Power Energy Syst, 28: 627–633
Paine R T. 1980. Food webs: Linkage, interaction strength and community infrastructure. J Anim Ecol, 49: 666–685
Planetary Boundaries Science (PBScience). 2025. Planetary Health Check 2025. Technical Report. Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)
Potapov P, Turubanova S, Hansen M C, et al. 2022. Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. Nat Food, 3: 19–28
Ren Q, He C, Huang Q, et al. 2022. Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands. Nat Sustain, 5: 869–878
Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. 2009. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. Ecol Soc, 14: art32
Searchinger T, Heimlich R, Houghton R A, et al. 2008. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. Science, 319: 1238–1240
Seto K C, Güneralp B, Hutyra L R. 2012a. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. Proc Natl Acad Sci USA, 109: 16083–16088
Seto K C, Reenberg A, Boone C G, et al. 2012b. Urban land teleconnections and sustainability. Proc Natl Acad Sci USA, 109: 7687–7692
Shi K, Wu Y, Liu S, et al. 2023. Mapping and evaluating global urban entities (2000–2020): A novel perspective to delineate urban entities based on consistent nighttime light data. GISci Remote Sens, 60: 2161199
Si M, Li Z L, Nerry F, et al. 2022. Spatiotemporal pattern and long-term trend of global surface urban heat islands characterized by dynamic urban-extent method and MODIS data. ISPRS J Photogramm Remote Sens, 183: 321–335
Solecki W, Seto K C, Marcotullio P J. 2013. It's time for an urbanization science. Environ-Sci Policy Sustain Dev, 55: 12–17
Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, et al. 1998. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. J Geophys Res, 103: 14291–14324
Tu Y, Chen B, Yu L, et al. 2021. How does urban expansion interact with cropland loss? A comparison of 14 Chinese cities from 1980 to 2015 Landscape Ecol, 36: 243–263
van Vliet J. 2019. Direct and indirect loss of natural area from urban expansion. Nat Sustain, 2: 755–763
Wang M, Krstikj A, Koura H. 2017. Effects of urban planning on urban expansion control in Yinchuan City, Western China. Habitat Int, 64: 85–97
Wassmer R W. 2006. The influence of local urban containment policies and statewide growth management on the size of United States urban areas. J Regional Sci, 46: 25–65
Weilenmann B, Seidl I, Schulz T. 2017. The socio-economic determinants of urban sprawl between 1980 and 2010 in Switzerland. Landscape Urban Plann, 157: 468–482
Wu S, Ben P, Chen D, et al. 2018. Virtual land, water, and carbon flow in the inter-province trade of staple crops in China. Resour Conserv Recy, 136: 179–186
Xu Q, Dong Y, Yang R. 2018. Influence of land urbanization on carbon sequestration of urban vegetation: A temporal cooperativity analysis in Guangzhou as an example. Sci Total Environ, 635: 26–34
Zhang X, Liu L, Zhao T, et al. 2022. GISD30: global 30 m impervious-surface dynamic dataset from 1985 to 2020 using time-series Landsat imagery on the Google Earth Engine platform. Earth Syst Sci Data, 14: 1831–1856
Zhao M, Cheng C, Zhou Y, et al. 2022. A global dataset of annual urban extents (1992–2020) from harmonized nighttime lights. Earth Syst Sci Data, 14: 517–534

（责任编委：贾小旭）