



人类-自然系统耦合模型研究动态

岳天祥^{1,2*}, 吴晨辰^{1,2}, 史文娇^{1,2}, 田永中³, 王情⁴, 卢毅敏⁵, 张丽丽^{6*}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408;

3. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

4. 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所, 北京 100021;

5. 福州大学地理空间信息技术国家地方联合工程研究中心, 福州 350108;

6. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

* 通讯作者, E-mail: yue@lreis.ac.cn(岳天祥), zhangll203913@aircas.ac.cn(张丽丽)

收稿日期: 2024-03-25; 收修改稿日期: 2024-08-08; 接受日期: 2024-09-23; 网络版发表日期: 2024-09-30

国家自然科学基金项目(41930647, 42330707, 72221002)、资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目(KPI005)和江西省抚州市“揭榜挂帅”项目(2022JDA07)资助

1 引言

Malthus(1798)关于人口增长与食物供给关系的讨论是人类-自然系统耦合模型的早期思想之一。他认为, 人口按几何级数增长, 而食物按算术级数增长, 意味着人均粮食逐年减少, 因此会引发粮食危机。Ritter(1840)在他的自然与人类关系地理学中指出, 土地上自然的与文化的产物、自然的与人文的面貌, 完美地体现了人与自然的相互作用; 土地影响着人类, 而人类影响着土地。Hettner(1927)将人类-自然系统关系的以往认识归纳为环境决定论(Environmental determinism)、可能论(Possibilism)、或然论(Probabilism)、人类决定论(Human determinism)和生态人类学(Ecological anthropology)五大类型。环境决定论强调自然环境的统治地位, 有人认为是达尔文进化论的自然结论。可能论认为, 所有自然环境条件只是给人类提供了一个可能利用的范围, 人们可以在这个范围自由地选择和利用它们。或然论强调, 当自然施加某种限制, 影响人类利用自然时, 对自然的实际利用取决于人的文化背

景和价值观。人类决定论认为, 人具有生存于自然限制之外的能力, 可以克服任何潜在的环境威胁。生态人类学强调人在自然环境中与动植物的同等地位。

人类-自然系统耦合是人与自然要素相互作用的集成系统(Liu等, 2007)。人口增长、城市化、土地利用变化和气候变化已经大规模地修改了人类赖以生存的自然系统, 改变了人类与自然系统的关系。我们需要观测、评估、分析和预测人类-自然系统关系, 指导人类在行星边界中开展合理、恰当的活动和决策(Fu和Wei, 2018)。模型模拟是认识人类-自然系统耦合机理与双向反馈机制的至关重要手段, 可以探索人类-自然系统的各子系统如何变化和如何相互作用, 解决全球环境变化和社会变化产生的问题(Moallemi等, 2020)。例如, 联合国2030年可持续发展议程涵盖17个可持续发展目标, 为了实现这些多样的目标, 需要分析人类-自然关系的形成过程和刻画手段, 给出基于目标之间权衡的可持续发展实现路径, 这正是人类-自然系统耦合模拟的最终目的(Wu等, 2022)。

人类活动影响自然环境, 进而影响人类福祉和未

中文引用格式: 岳天祥, 吴晨辰, 史文娇, 田永中, 王情, 卢毅敏, 张丽丽. 2024. 人类-自然系统耦合模型研究动态. 中国科学: 地球科学, 54(11): 3668–3673, doi: 10.1360/SSTe-2024-0086

英文引用格式: Yue T, Wu C, Shi W, Tian Y, Wang Q, Lu Y, Zhang L. 2024. Progress in models for coupled human and natural systems. Science China Earth Sciences, 67(11): 3631–3637, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1434-2>

来行为. 人类与自然环境的相互作用产生了由多要素和非线性反馈表征的多时空尺度动态复杂性, 使人们很难识别人类与自然环境彼此影响的许多直接和间接途径. 也就是说, 人类-自然系统是动态、非线性的自适应系统. 认识人类-自然耦合系统的动态复杂性对洞察系统行为、保护和改善自然系统的人类行动至关重要(Liu等, 2021).

2 人地系统和人类-自然系统耦合模型

人地系统和人类-自然系统概念在一定程度上能够交叉使用. 人地系统是由地理环境和人类活动两个子系统交错构成的复杂开放巨系统(吴传钧, 1991). 人必须依赖所处的“地”为生活动的基础, 要主动地认识, 并自觉地在“地”的规律下去利用和改变“地”, 以达到“地”更好为人类服务的目的. 人类-自然系统是人与自然要素相互作用的综合系统, 它是一种社会与生态系统和人与环境系统的合成架构, 它有利于人们更好地认识看似独立系统之间的联系. 这个概念的核心是人类系统和自然系统的相互作用, 人类活动改变了自然系统的状况, 自然过程塑造了人类系统的环境; 人类决策和行动影响自然系统的结构和功能, 自然系统结构和功能的变化影响人类的决策和行动(Fu等, 2021; Liu等, 2021).

2.1 人地系统模型

自20世纪90年代初以来, 我国对人地关系开展了系统性研究. 例如, 吴传钧(1991)将人地关系表达为人类社会和地理环境两个子系统之间的物质循环和能量转化, 强调人的主动地位, 地是被人认识、利用和保护的对象. 蔡运龙(1998)将环境评价与管理、环境感知与适应、自然灾害研究、气候影响评价和区域可持续发展罗列为人地关系研究范型. 陆大道(2002)指出, 运用地理学、生态学、系统科学、经济学等多学科理论, 建立人地关系地域系统模型, 实现人地关系地域系统结构、功能的时空动态综合集成是人地关系研究的当务之急. 樊杰(2014)研究表明, 过程归纳、区域比较、定性分析和逻辑判断是人地系统综合研究的实用方法; 区域均衡、资源环境承载能力、地域功能和空间结构是人地系统研究的前沿领域. 毛汉英(2018)认为, 人地系统综合调控的最终目标是协调人与自然的的关系, 谋求人与自然的和谐共生. 而人地系统调控的

前提是从功能角度认识自然对人类的贡献, 生态系统服务是连接自然系统与人类福祉的桥梁, 是人地系统耦合研究的核心内容(赵文武等, 2018). 现代人地系统具有复杂性、地域性和动态性特征, 亟需深入探究人地系统耦合格局与机理, 探明人地系统地域系统类型、结构及其动力机制(刘彦随, 2020). 刘彦随等(2024)基于人地关系地域系统理论及主体功能分区、主导类型分类和主要用途分级方法, 构建了人地系统识别-诊断-评估科学认知体系和综合分析框架.

随着理论研究与实践探索的不断深入, 人们已经基于对人地系统地域系统组成要素间以及要素与系统间相互作用和反馈关系的认识, 初步建立了人地系统的认知体系. 人地系统研究需要加强遥感和地面观测调查的结合, 其最终目的是发展和建立系统模型, 开展预测(陆大道, 2002). 翟瑞雪和戴尔阜(2017)研究表明, 人地关系的发展表现为人对地的开发利用深度、广度不断增强, 人逐渐主导地的变化; 基于主体模型充分考虑了人类的行为和决策, 使得它很适合模拟人地关系中人与环境的交互作用. 曹威威等(2020)利用改进能值生态足迹模型, 分析人地关系供需平衡变化和经济发展与能值生态足迹之间的关系. 然而, 人地系统研究仍存在量化程度不高和理论创新性不足等问题(刘彦随, 2020).

人地系统是中国人文与经济地理学主流学派形成的核心理论, 它强调人与自然的相互影响与反馈作用, 人地关系地域系统研究的主要目标是协调人地关系, 从空间结构、时间过程、组织序变、整体效应、协同互补等方面去认识和寻求各自空间尺度人地关系系统的整体优化、综合平衡及有效调控机理(樊杰, 2018).

2.2 人类-自然系统耦合模型

人类社会和自然系统相互作用的生态系统工程理念和综合模拟是人类与自然系统耦合模型研究的成果之一(Patten, 1994). 人类-自然系统是复杂系统, 包含了社会、技术、经济和生态等多方面要素的相互作用, 很难依据个别要素行为进行预测和解释. 早期研究通过社会模型和生态模型的简单耦合, 将经济、政策和法律通过资源管理团体机制与环境联系在一起, 模拟分析环境行动的社会约束, 并对模型参数变化的灵敏性进行评估. 近30年来, 人类-自然系统耦合模型有了长足的发展, 主要包括三大类: 基于主体模型的耦合、

基于指标体系的耦合和基于机理模型的耦合。

生态系统受到环境变化导致生物多样性减少和社会对生态系统服务需求增加的双重压力, 为了应对生态系统及其管理者面临的全球变化挑战, 需要建立人类-自然耦合系统概念体系。而生态系统模型忽视了社会的适应能力, 社会系统模型忽略了生态过程对环境变化的动态响应。为此, 许多学者运用自下而上的主体模型(agent-based modeling)认识人类-自然系统耦合系统的复杂性。例如, 以森林生态系统为案例, 探讨生态过程模型(自然系统模拟模型)与主体模型(人类系统模拟模型)的耦合问题, 模拟分析森林保护、可持续管理和提高森林碳储量对减少森林采伐和森林退化碳排放支付方案的影响, 捕捉决策过程的基本特征和保证森林生态系统长期可持续性的决定因素(West等, 2018)。通过集成随机斑块占用模型与土地利用变化主体模型, 建立了集合种群的模拟框架; 并运用这个人类-自然系统耦合框架, 定量分析集合种群动态的驱动力及其潜在的相互作用和反馈, 检验它们对变化景观中集合种群行为的预测结果, 评估政策选择对集合种群生存的影响。基于主体模型就是对人类与自然系统按照特定规则相互作用的计算机模拟(An, 2012)。

除主体模型有较大发展和广泛应用空间之外, 还形成了许多基于指标体系的模拟分析模型。例如, 为了便于研究人员构建和检验理论模型, 发展了基于10组子系统变量的社会-生态系统可持续发展分析综合框架(Ostrom, 2009)。将人类福祉、环境政策、人类活动、环境压力和生态系统服务凸显为人类-自然耦合系统的五要素, 通过分析各要素之间的阈值变化, 为环境管理提供决策支持(Stevenson, 2011)。运用人类-自然耦合系统模型框架探讨自然保护区政策、社会经济和环境之间的复合关系(Wandersee等, 2012)。将空间模型和多层次统计模型相结合定量表达人类-自然耦合系统的多空间尺度效应(López-Carr 等, 2012)。运用集成人口变化、农业用地森林清理和野生种群变化的空间精准模拟模型定量分析社会-生态变化对环境可持续性的影响(Iwamura等, 2016)。运用生态系统活力、资源环境承载力和社会发展能力等指标体系, 模拟分析人类-自然耦合系统的生态承载能力(Peng等, 2016)。运用探索建模(Exploratory modeling)方法调查研究决策选择的多样性和主要利弊的权衡、处理各种备选假设与观测结果的认知复杂性(Trindade等, 2017)。Senf

等(2017)运用陆地卫星的32年时间序列数据, 分析了中欧地区人类干扰(包括土地利用变化和森林管理等)和自然干扰(包括气候变化、林火和昆虫爆发等)对森林生态系统结构和组成的单独影响和共同影响。为了充分考虑资源替代性问题和资源不对称管理问题, Oh和Muneepeerakul (2019)提出了集中式管理结构中两种资源和基础设施的人类-自然系统耦合模型。Motschmann等(2022)开发了一种水资源供给和水资源需求变量的集成模型, 探索耦合人类-自然系统的复杂性和不确定性。Kibria等(2022)通过甄别粮食自足、民生保障、身体健康、压力指数、选择自由、社会凝聚力等人类福祉方面的指标体系, 模拟分析了它们之间的相互联系和经济对生态系统服务的依赖性。Wu等(2022)基于全球可持续发展目标(SDG)数据集, 运用相关网络法(correlational network approach)模拟分析了可持续发展目标相互作用的演化规律。

另外, Feng等(2018)提出了基于人类-自然耦合系统框架的水资源可持续利用模型, 分析气候变化和人类活动对淡水空间分布的影响及淡水供需的潜在矛盾。鉴于以往研究只聚焦于水的整体状态评估, 忽视了水的环境属性, 没有揭示人类活动与自然过程的相互作用动态, Zhou(2019)建立了基于多主体系统模型、系统动力学模型和元胞自动机模型的集成模型, 揭示区域人-水相互作用, 识别主要污染源, 提出提高当地可持续发展能力的时-空精准措施。Yin等(2021)提出了基于水对气候变化、人口增长和土地利用响应的人类-自然耦合系统模型, 模拟分析了黄河流域生态恢复、粮食生产与社会经济活动的相互关系。

在联合国生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)《生物多样性和生态系统服务情景模型方法评估》报告中涉及的主要集成模型包括全球环境评价集成模型(IMAGE)、全球生物多样性模型(GLOBIO)、全球生物圈管理模型(GLOBIOM)、生物圈全球统一元模型(GUMBO)、生态系统服务多尺度集成模型(MIMES)、全球植被动态模型(DGVM)、土地利用转换及其影响模型(CLUE)、生态模拟通道模型(EwE)、生态系统服务及权衡综合评价模型(InVEST)、生态服务人工智能模型(ARIES)和地球系统模型(ESM)等(IPBES, 2016)。这些模型的具体说明参见岳天祥等(2020)。上述集成模型大多数是基于机理模型的紧凑耦合, 虽然它们在许多国际计划中发挥了

重要作用, 然而它们仍存在许多问题(Steffen等, 2020). 例如, 目前人类与自然系统相互作用动态模拟都是单向的, 不能表达许多反馈回路和复杂行为(Motesharrei等, 2016). 它们仍主要局限于自然要素, 还缺乏对人类系统动态的深刻认识, 忽视了自然保护的政策目标及自然系统在人类福祉中的重要作用; 现有模型与算法的运行速度不足实现实时决策支持(IPBES, 2016). 在当前的人类-自然系统建模研究中, 自然系统内容考虑的很好, 但基于社会的内容很少(Szetey等, 2023). 虽然模型-数据同化提供了将高分辨率数据融入地球系统模型的框架, 但缺乏人类-自然系统耦合模拟所需的学习能力(Li等, 2023). 如何量化和实现其协同发展是实现可持续发展目标的重要问题, 它们的时空变化和相互作用机理尚不清楚(Liu等, 2023).

3 基本认识

人类-自然系统耦合模型是对系统生态学(Systems ecology)的继承和发展. 系统生态学是运用系统分析的基本原理和技术研究生态学的方法(Odum, 1983; Kitching, 1983). 人类与自然系统互为因果和制约关系, 这种相互作用关系形成了一个社会、经济和自然复合生态系统(马世骏和王如松, 1984). 以微观的机理阐明宏观格局, 宏观与微观结合, 使模拟自然规律、揭开自然界物理、化学与生物系统之间相互作用的动态过程成为可能(马世骏, 1990).

人类-自然系统耦合一般是非线性的, 其主要原因包括: (1) 系统耦合常常出现时间滞后效应; (2) 人类-自然系统过程涉及各种不同的时空尺度, 将它们集成在一起时, 尺度错配是难免的问题; (3) 系统耦合及其后果存在着空间和时间异质性; (4) 当达到临界阈值后系统会发生突变, 而不是像线性系统一样, 系统状态随着条件变化而逐渐变化(翟瑞雪和戴尔阜, 2017; Li等, 2023).

人类-自然系统耦合是宏观生态学问题, 它不总是服从于Tobler的地理学第一定理; 基于“距离越近相关性越强”的大数据处理模型不适用于所有尺度的模拟分析(Tromboni等, 2021). 尤其是遥耦合问题的模拟分析和未来预测(Liu等, 2013), 不但需要宏观格局信息, 同时也需要地基观测点的细节信息以分离出模拟结果中的背景噪音. 也就是说, 控制地面过程的细节信息和控制宏观格局的全局信息是人类-自然系统耦合模型

缺一不可的两种互补消息; 与此同时, 耦合模型的正确运行需要能有机合成这两种信息的恰当方法来支持(岳天祥等, 2020; 陈旻等, 2021; Haber, 2021). 人类-自然系统耦合模型面临的主要挑战包括以下四个方面.

(1) 人类与自然系统的双向反馈问题. 当前, 学界对人类-自然耦合系统的特征和基本联系已在认知层面形成一定的共识. 然而, 当这些认知运用于实践时, 捕捉人类-自然系统耦合动态的能力非常有限, 几乎没有研究能够系统的表达人类与自然系统的双向反馈; 也就是说, 虽然人类系统与自然系统耦合模型是研究人类活动与生态过程相互联系的重要工具, 但是人类与自然系统耦合模型仍多处于概念认知层面而很少能直接参与决策.

(2) 自然科学与社会科学的深度结合问题. 以往对人类-自然系统的模拟分析通常只研究自然系统对人类系统的约束或人类对自然系统的干扰, 这种自然科学与社会科学脱节的人类-自然系统单项关系研究, 阻碍了人们对人类-自然系统耦合中反馈、非线性、阈值、异质性和时滞等复杂性问题的正确认识.

(3) 多尺度问题. 目前, 宏观系统研究主要聚焦于临近生态系统的相互响应, 将局地与全局相互作用和反馈及社会-生态系统动态明确地归并到人类-自然系统的研究寥寥无几, 很难进行局地到大陆尺度的连通性和不同人类-自然系统跨域相互反馈的多尺度分析.

(4) 模拟速度的变革性改进问题. 目前, 计算机软件和硬件的模拟速度不足以支持高时空分辨率的实时动态三维可视化, 这是将人类与自然系统耦合模型运用于决策支持的主要瓶颈问题之一(Yue等, 2022).

为了解决上述问题, 需要开展以下研究: (1) 建立自然系统模型组、自然系统对人类贡献模型组和自然系统变化驱动力模型组, 分析各种时间尺度和空间尺度的人类与自然系统耦合效应, 量化人类与自然系统的非线性动态关系, 探讨跨越地理、生态、环境、社会和经济等领域的整合方法, 建立耦合人类与自然系统的曲面模型; (2) 发展面向传统计算机的时空插值、时空升尺度、时空降尺度、数据融合和模型-数据同化的自适应算法, 形成适用于图形处理器和中央处理器的传统算法库; 将最新深度学习的算法设计成果有效融入量子计算, 在大幅度降低运行量子机器学习所需门电路数的同时, 提高量子机器学习精度, 实现量子机器学习的深度优化, 形成与传统算法库对应的量

子机器学习算法库; (3) 构建大规模稀疏矩阵量子求解方案, 研究量子计算的输入、输出、成本和标杆问题, 实现传统计算与量子计算优势互补; 构建可大幅度降低计算成本的自适应算法, 发展可实现相对于传统算法指数级加速的量子机器学习算法, 大幅度提高耦合模型的模拟精度和运算速度, 助力高效决策支持, 尤其是实时决策支持(岳天祥等, 2023; IPBES, 2024)。

参考文献

蔡运龙. 1998. 人地关系研究范型: 地域系统实证. 人文地理, 13: 7–13

曹威威, 孙才志, 杨璇业, 崔莹. 2020. 基于能值生态足迹的长山群岛人地关系分析. 生态学报, 40: 89–99

陈旻, 闫国年, 周成虎, 林琿, 马载阳, 乐松山, 温永宁, 张丰源, 王进, 朱之一, 许凯, 何元庆. 2021. 面向新时代地理学特征研究的地理建模与模拟系统发展及构建思考. 中国科学: 地球科学, 51: 1664–1680

樊杰. 2014. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索. 地理学报, 69: 1060–1068

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

刘彦随. 2020. 现代人地关系与人地系统科学. 地理科学, 40: 1221–1234

刘彦随, 刘亚群, 欧聪. 2024. 现代人地系统科学认知与探测方法. 科学通报, 69: 447–463

陆大道. 2002. 关于地理学的“人-地系统”理论研究. 地理研究, 21: 135–144

马世骏, 王如松. 1984. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 4: 1–9

马世骏. 1990. 20世纪生态科学的过去、现在与未来. 生物科学信息, 2: 150–154

毛汉英. 2018. 人地系统优化调控的理论方法研究. 地理学报, 73: 608–619

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, 11: 1–6

岳天祥, 吴晨辰, 刘熠, 杜正平, 赵娜, 焦毅蒙, 徐喆, 史文娇. 2023. HASM量子机器学习. 中国科学: 地球科学, 53: 1958–1966

岳天祥, 赵娜, 刘羽, 王轶夫, 张斌, 杜正平, 范泽孟, 史文娇, 陈传法, 赵明伟, 宋敦江, 王世海, 宋印军, 闫长青, 李启权, 孙晓芳, 张丽丽, 田永中, 王薇, 王英安, 马胜男, 黄宏胜, 卢毅敏, 王倩, 王晨亮, 王玉柱, 鹿明, 周伟, 刘熠, 尹笑哲, 王宗, 包正义, 赵苗苗, 赵亚鹏, 焦毅蒙, Ufra NASEER, 范斌, 李赛博, 杨阳, Wilson J. 2020. 生态环境曲面建模基本定理及其应用. 中国科学: 地球科学, 50: 1083–1105

翟瑞雪, 戴尔阜. 2017. 基于主体模型的人地系统复杂性研究. 地理

研究, 36: 1925–1935

赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 2018. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 37: 139–151

An L. 2012. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecol Model*, 229: 25–36

Feng X, LIU Q, Yin L, Fu B, Chen Y. 2018. Linking water research with the sustainability of the human–natural system. *Curr Opin Environ Sustainability*, 33: 99–103

Fu B, Wei Y. 2018. Editorial overview: Keeping fit in the dynamics of coupled natural and human systems. *Curr Opin Environ Sustainability*, 33: A1–A4

Fu B, Stafford-Smith M, Fu C. 2021. Editorial overview: Dryland social-ecological systems in changing environments. *Curr Opin Environ Sustainability*, 48: A1–A5

Haber W. 2021. Eco-environmental surface modelling requires integration of both extrinsic and intrinsic informations. *Sci China Earth Sci*, 64: 185–186

Hettner A. 1927. Die Geographie: Ihre Geschichte, Ihre Wesen und Ihre Methoden. *Geograph J*, 70: 501–502

IPBES. 2016. The Methodological Assessment Report on Scenarios and Models of Biodiversity and Ecosystem Services. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn. 209–215

IPBES. 2024. Thematic Assessment of the Interlinkages among Biodiversity, Water, Food and Health. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn

Iwamura T, Lambin E F, Silvius K M, Luzar J B, Fragoso J M. 2016. Socio-environmental sustainability of indigenous lands: simulating coupled human–natural systems in the Amazon. *Front Ecol Environ*, 14: 77–83

Kibria S A, Costanza R, Soto J R. 2022. Modeling the complex associations of human wellbeing dimensions in a coupled human–natural system: In contexts of marginalized communities. *Ecol Model*, 466: 10988

Kitching R L. 1983. Systems Ecology. London: University of Queensland Press

Li X, Feng M, Ran Y, Su Y, Liu F, Huang C, Shen H, Xiao Q, Su J, Yuan S, Guo H. 2023. Big Data in Earth system science and progress towards a digital twin. *Nat Rev Earth Environ*, 4: 319–332

Li Y, Sang S, Mote S, Rivas J, Kalnay E. 2023. Challenges and opportunities for modeling coupled human and natural systems. *Natl Sci Rev*, 10: nwad054

Liu J, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. 2007.

- Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317: 1513–1516
- Liu J G, Hull V, Batistella M, DeFries R. 2013. Framing sustainability in a telecoupled world. *Ecol Soc*, 18: 26
- Liu J, Dietz T, Carpenter S R, Taylor W W, Alberti M, Deadman P, Redman C, Pell A, Folke C, Ouyang Z, Lubchenco J. 2021. Coupled human and natural systems: The evolution and applications of an integrated framework. *Ambio*, 50: 1778–1783
- Liu Y, Fu B, Wang S, Rhodes J R, Li Y, Zhao W, Li C, Zhou S, Wang C. 2023. Global assessment of nature's contributions to people. *Sci Bull*, 68: 424–435
- López-Carr D, Davis J, Jankowsk M M, Grant L, López-Carr A C, Clark M. 2012. Space versus place in complex human–natural systems: Spatial and multi-level models of tropical land use and cover change (LUCC) in Guatemala. *Ecol Model*, 229: 64–75
- Malthus T K. 1798. *Essays on the Principles of Population*. Printed for J. Johnson, in St. Paul's Church-Yard, London
- Moallemi E A, Kwakkel J, de Haan F J, Bryan B A. 2020. Exploratory modeling for analyzing coupled human-natural systems under uncertainty. *Glob Environ Change*, 65: 102186
- Motesharrei S, Rivas J, Kalnay E, Asrar G, Busalacchi A, Cahalan R, Cane M, Colwell R, Feng K, Franklin R, Hubacek K, Miralles-Wilhelm F, Miyoshi T, Ruth M, Sagdeev R, Shirmohammadi A, Shukla J, Srebric J, Yakovenko V, Zeng N. 2016. Modeling sustainability: population, inequality, consumption, and bidirectional coupling of the earth and human systems. *Natl Sci Rev*, 3: 470–494
- Motschmann A, Teutsch C, Huggel C. 2022. Current and future water balance for coupled human-natural systems—Insights from a glacierized catchment in Peru. *J Hydrol-Reg Stud*, 41: 101063
- Odum H T. 1983. *Systems Ecology: An Introduction*. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience
- Oh W S, Muneeppeerakul R. 2019. How do substitutability and effort asymmetry change resource management in coupled natural-human systems? *Palgr Commun*, 5: 80
- Ostrom E. 2009. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325: 419–422
- Patten B C. 1994. Ecological systems engineering: toward integrated management of natural and human complexity in the ecosphere. *Ecol Model*, 75-76: 653–665
- Peng J, Du Y, Liu Y, Hu X. 2016. How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems. *Ecol Indicators*, 60: 1017–1030
- Ritter C. 1840. *Die Erdkunde im Verhältnis zur Natur und zur Geschichte des Menschen IX*. Berlin
- Senf C, Pflugmacher D, Hostert P, Seidl R. 2017. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe. *ISPRS J*, 130: 453–463
- Stevenson R J. 2011. A revised framework for coupled human and natural systems, propagating thresholds, and managing environmental problems. *Phys Chem Earth Parts A B C*, 36: 342–351
- Steffen W, Richardson K, Rockström J, Schellnhuber H J, Dube O P, Dutreuil S, Lenton T M, Lubchenco J. 2020. The emergence and evolution of Earth System Science. *Nat Rev Earth Environ*, 1: 54–63
- Szety K, Moallemi E A, Bryan B A. 2023. Knowledge co-production reveals nuanced societal dynamics and sectoral connections in mapping sustainable human–natural systems. *Earth's Future*, 11: e2022EF003326
- Tromboni F, Liu J, Ziaco E, Breshears D D, Thompson K L, Dodds W K, Dahlin K M, LaRue E A, Thorp J H, Viña A, Laguë M M, Maasri A, Yang H, Chandra S, Fei S. 2021. Macrosystems as metacoupled human and natural systems. *Front Ecol Environ*, 19: 20–29
- Trindade B C, Reed P M, Herman J D, Zeff H B, Characklis G W. 2017. Reducing regional drought vulnerabilities and multi-city robustness conflicts using many-objective optimization under deep uncertainty. *Adv Water Resources*, 104: 195–209
- Wandersee S M, An L, López-Carr D, Yang Y. 2012. Perception and decisions in modeling coupled human and natural systems: A case study from Fanjingshan National Nature Reserve, China. *Ecol Model*, 229: 37–49
- West T A P, Grogan K A, Swisher M E, Caviglia-Harris J L, Sills E O, Roberts D A, Harris D, Putz F E. 2018. Impacts of REDD+ payments on a coupled human-natural system in Amazonia. *EcoSyst Services*, 33: 68–76
- Wu X T, Fu B J, Wang S, Song S, Li Y, Xu Z, Wei Y, Liu J. 2022. Decoupling of SDGs followed by re-coupling as sustainable development progresses. *Nat Sustain*, <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00868-x>
- Yin L, Feng X, Fu B, Wang S, Wang X, Chen Y, Tao F, Hu J. 2021. A coupled human-natural system analysis of water yield in the Yellow River basin, China. *Sci Total Environ*, 762: 143141
- Yue T, Liu Y, Du Z, Wilson J, Zhao D, Wang Y, Zhao N, Shi W, Fan Z, Zhao X, Zhang Q, Huang H, Wu Q, Zhou W, Jiao Y, Xu Z, Li S, Yang Y, Fu B. 2022. Quantum machine learning of eco-environmental surfaces. *Sci Bull*, 67: 1031–1033
- Zhou X Y. 2019. Spatial explicit management for the water sustainability of coupled human and natural systems. *Environ Pollution*, 251: 292–301

(责任编辑: 李新)