

人类世科学: 研究地球与人类共同未来的科学

刘丛强^{1*}, 方创琳², 张晓玲^{3,4}

1. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3. 香港大学可持续发展科学与技术创新实验室, 香港 999077

4. 香港大学建筑学院房地产与建设系, 香港 999077

* 联系人, E-mail: liucongqiang@tju.edu.cn

人类世这一概念是伴随从地质概念到文明危机的历史背景下诞生的, 其提出迅速超越学科边界, 成为理解地球系统与人类文明关系的核心范式。诺贝尔奖得主保罗·克鲁岑(Paul Crutzen)于2000年首次提出该术语, 强调人类活动已超越自然营力, 成为地球系统演化的主导力量^[1]。国际地层委员会人类世工作组(Anthropocene Working Group, AWG)进一步建议将20世纪中叶“大加速”时期作为新地质时代的起点, 标志化石能源、工业化农业与城市化进程的全球扩散。人类世的科学内涵包含三重维度: 地质学维度体现为可识别的地层信号; 系统科学维度指向自然地球系统与社会技术系统的深度耦合; 哲学维度则批判人类中心主义, 呼吁重构文明与自然的关系。这一概念的演化, 折射出科学界对工业文明生态后果的深刻焦虑, 昭示地球系统正逼近不可逆的临界点。人类世的概念不仅是对工业文明生态后果的深刻反思, 更是对未来文明发展路径的探索。

本文构建人类世科学的学科体系, 旨在回答以下问题: 如何量化人类活动对地球系统临界点的触发机制? 社会技术系统转型需突破哪些路径依赖与权力锁定? 行星治理工具如何平衡效率与公平? 首先论述人类世科学的理论基础, 即整合地球系统突变理论、社会代谢分析与批判哲学; 其次论述了其核心问题, 包含聚焦级联效应、公正转型与治理创新; 第三是方法论, 强调开发跨尺度模型与数字孪生工具; 最后探索教育、制度与技术协同的实践路径。本文研究的理论贡献在于提出“自然-社会-伦理”协同演化框架, 推动地球系统科学与社会科学的深度耦合; 实践意义则体现为设计可操作的转型路径, 遏制资本权力对行星治理的侵蚀, 为构建安全公正的地球未来提供科学指南。

1 人类世科学的学科定位与必要性

1.1 人类世科学的核心定义

人类世(Anthropocene)概念的提出标志着地球科学与人



刘丛强 天津大学地球系统科学学院院长, 中国科学院院士、美国地球化学学会和欧洲地球化学学会会士、爱丁堡皇家学会外籍院士, 中国矿物岩石地球化学学会名誉理事长, 中国地质学会、中国地理学会和中国生态学会会士。主要从事地表地球化学和表层地球系统科学研究。

文社科领域的革命性交汇, 其内涵具有多维度的科学界定。从地质学视角, 国际地层委员会人类世工作组(AWG)将其定义为“以人类活动作为地球系统主要驱动力”的新地质时代, 其典型地层标志包括全球分布的放射性核素(如钚-239)、塑料沉积层、氮磷循环失衡等新型地质记录^[2]。系统科学进一步拓展了其内涵, 指出人类世的核心在于地球系统(大气圈、水圈、生物圈、岩石圈、冰冻圈)与社会技术系统(经济、技术、文化)的深度耦合, 形成不可分割的“社会-生态-技术复合体”^[3]。哲学思辨层面, 人类世概念颠覆了传统“人类例外论”, 揭示人类既是地球演化的主动参与者, 亦是其脆弱性的主要制造者^[4]。可见人类世不仅是地质时间单元的划分, 更是一场科学范式与文明认知的深刻变革。

在此背景下, 人类世科学(Anthropocene Science)应运而生, 其核心定义是: 以“地球-人类协同演化系统”为研究对象, 旨在通过整合自然科学、工程技术、社会科学与人文哲学, 揭示人类活动与地球系统相互作用的复杂机制, 并探索可持续生存路径。与传统学科不同, 人类世科学具有鲜明的目标导向性, 以维持地球系统稳定性与社会公正性为终极使命, 而非单纯追求知识积累; 其研究方法强调时空嵌套性, 需同时解析局地行动(如城市碳足迹优化)与全球效应(如气候临

引用格式: 刘丛强, 方创琳, 张晓玲. 人类世科学: 研究地球与人类共同未来的科学. 科学通报, 2025, 70: 3489–3504

Liu C-Q, Fang C, Zhang X. Anthropocene science: the science of shaping Earth's and humanity's interconnected future (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 3489–3504, doi: [10.1360/CSB-2025-0382](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0382)

界点触发)之间的跨尺度关联^[5], 构建“从局地到行星”的系统分析框架; 其底层价值承认科学研究的伦理责任, 摒弃“价值中立”的实证主义范式^[6], 主张将环境正义、代际公平等嵌入研究与政策建议. 通过打破学科壁垒、重构知识体系、推动范式革新, 为破解人类世面临的困境提供了理论工具与实践路径.

1.2 人类世科学的必要性

当前针对人类世挑战的研究分散于传统学科, 其结构性缺陷日益凸显. 首先, 学科割裂导致“还原论困境”, 研究视角局限于单一领域而忽视系统性关联. 例如, 气候经济学模型多聚焦碳定价机制, 却未整合生物多样性流失对农业生产的连锁影响, 致使国际气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)与生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)的评估长期分离^[7]; 而生态学模型常忽略数字技术对资源开采的加速效应, 如比特币挖矿的指数级能源需求重构了全球矿产供应链与碳排放格局^[8]. 其次, 时空尺度错配使局地政策与地球系统边界脱节, 例如本地的退耕还林政策虽提升本地碳汇, 却因国际木材贸易将毁林压力转移至热带雨林地区, 形成“泄漏效应”^[9]. 碳中和路径设计若忽视北极冻土千年尺度的碳释放潜力, 可能严重低估气候系统的不可逆风险^[10]. 此外, 技术治理盲区导致工具理性掩盖权力不平等, 例如碳捕获技术(carbon capture and storage, CCS)的部署集中于发达国家^[11], 加剧全球南北技术鸿沟; 生态修复项目忽视原住民土地权, 引发亚马逊保护区与原住民领地的冲突^[12]. 可见, 从“人类世问题研究”到“人类世科学”, 体现出以问题为导向构建人类世科学的必要性.

人类世科学的整合性优势为解决上述困境、弥补传统学科缺陷提供了系统性方案. 一是可构建系统性认知框架:

通过构建“自然-社会-技术”耦合模型(如CLIMADA-ACE)^[13], 量化气候灾害与社会不平等、技术迭代的协同风险, 突破单一学科的知识壁垒. 二是可提供跨尺度分析工具, 进一步连接微观行为与宏观效应. 三是可创建参与式知识生产机制, 融合科学实证与地方性知识, 不仅提升生态保护方案的文化适应性, 更保障技术治理的公平性^[14]. 这些创新方法表明, 人类世科学通过系统性认知框架、跨尺度分析工具和包容性知识范式的三重整合, 能重构人类与地球系统的互动逻辑, 破解复杂环境危机, 实现可持续发展.

1.3 人类世科学的独特性

人类世科学与相关传统科学存在多维差异(表1), 非既有科学的简单叠加, 其独特性体现为研究范式、问题域与方法论的三重创新.

在研究范式层面, 人类世科学突破了传统科学的还原论框架, 通过构建“自然-社会-技术”协同演化理论, 将人类社会系统放在更加突出的位置, 将社会技术系统对地球系统的重构效应纳入核心分析, 超越地球系统科学对单一自然过程的物理建模, 同时以行星边界为刚性约束重构发展伦理, 优先保障地球系统稳定性. 相较于可持续发展科学的“经济-社会-环境”的三元平衡逻辑^[15], 人类世科学更加强调多维主体交互作用下的系统稳定和人的主体作用.

在问题域层面, 人类世科学突出人的主体和人类活动的主导影响, 通过问题域的革新, 体现出对复杂人地关系的全域覆盖, 既关注地球系统突变风险(如气候临界点触发), 也解析技术迭代的瞬时反馈(如人工智能驱动的能源消耗速率), 其时空跨度跨越核废料管理的万年尺度效应与城市化进程的十年周期, 形成全面的问题矩阵, 显著区别于其他科学对小范围问题域的局部探究.

在方法论层面, 人类世科学通过耦合基于主体的社会行为模型(agent-based model, ABM)与地球系统模型(earth sys-

表 1 人类世科学与相关传统科学的多维差异

Table 1 Multidimensional differences between Anthropocene science and related traditional sciences

科目	地球系统科学	可持续发展科学	环境人文学	新城市科学	生态经济学	人类世科学
目标导向	理解自然系统运行规律	平衡经济-社会-环境关系	解构环境认知的文化框架	城市系统优化	量化自然资本的生态经济价值	优先维持地球系统的稳定性和社会公正性, 探索可持续生存路径
伦理基础	实证主义(价值中立)	弱人类中心主义(代际公平)	非人类中心主义(生态正义)	技术治理框架(数据正义)	生态现代化理论(经济理性主导)	多元整合伦理(环境正义+生态实体内在价值+跨代际责任)
核心问题	地球系统阈值与反馈机制	代际资源公平分配	人类中心主义的批判	城市复杂系统运行规律	生态服务货币化路径	人地系统协同演化与突变风险治理
研究对象	自然圈层交互作用	社会-生态系统服务流	环境观念与权力叙事	空间-社会-数字耦合网络	经济-生态复合系统	社会技术系统与地球系统耦合效应
研究方法	地球物理模型	多准则决策分析	文本解构与哲学思辨	大数据分析 with 复杂系统建模	成本-效益分析	社会行为模型与地球系统模型耦合
时空跨度	千年-地质时间尺度	当代至近代和未来	历史语境与未来想象	城市生命周期	市场周期	深时(万年)与实时嵌套

tem model, ESM), 整合质性批判(如环境正义评估)与量化模拟(如碳泄漏的全球贸易网络分析), 实现人地关系的动态优化和伦理维度与科学理性的动态平衡。这种“价值显化”的方法论创新, 既规避了环境人文学“解构多于建设”的实践困境, 也突破了新城市科学依赖技术优化的工具理性局限, 最终形成兼具危机干预能力与社会转型张力的学科范式。

1.4 人类世科学独立化的紧迫性

科学层面, 构建人类世科学的紧迫性源于地球系统突变的不可逆风险。当前气候系统、生物圈完整性等关键行星边界已突破阈值^[16], 但传统学科仍依赖线性外推与渐进改良研究范式, 无法预判并阻止“气候临界点”触发的级联效应^[17]。人类世科学通过构建突变模型, 识别多米诺骨牌式崩溃路径, 为规避系统性风险提供预警框架。这种超越还原论的研究转型, 是避免科学认知滞后于生态剧变的必要条件。

治理层面, 构建人类世科学的困境源于学科独立化的现实需求。民族国家体系受主权边界与利益博弈限制, 难以应对跨境环境外部性挑战。例如, 跨境PM_{2.5}污染造成的死亡数占与PM_{2.5}相关的总死亡数的12%, 但现有国际法缺乏强制约束力^[18]。人类世科学通过设计多中心治理网络, 可突破主权壁垒, 将“人类命运共同体”理念转化为可操作制度。

伦理层面, 进一步凸显人类世科学建构的生存意义。技术扩张正在重塑行星尺度的权力关系: 太空殖民计划可能将地球生态危机转嫁为星际资源掠夺, 加剧行星尺度不平等, 需学科提供制衡知识。人类世科学通过技术评估与参与式设计, 制衡技术权力的集中化趋势。

2 人类世科学的理论基础

人类世科学的理论体系源于对地球系统突变、社会技术转型和伦理范式危机的三重回应, 其核心在于整合自然科学的客观规律与人文社科的批判反思, 形成“地球-社会-伦理”协同演化理论框架。

2.1 地球系统科学: 人类世科学的自然基础

地球系统科学(Earth System Science, ESS)为人类世科学提供了量化人类活动对地球影响的工具, 核心理论包括行星边界理论、大加速理论和临界点理论, 这些理论共同构成人类世科学的自然基础。

2.1.1 行星边界(Planetary Boundaries)理论

行星边界理论由Rockström等人^[19]在2009年首次提出, 其核心目的在于界定9个地球系统过程的安全操作空间, 这些过程涵盖了气候变化、生物圈完整性、氮磷循环等多个关键领域。该理论所定义的边界, 标志着地球系统在遭受人类活动干扰时能够维持相对稳定的极限, 一旦跨越这些边界, 地球系统将面临不可逆的系统性风险。在人类世背景下, 行星边界理论具有特别重要的意义, 主要体现在以下两个方面:

其一, 阈值量化。行星边界理论为地球系统的关键过程设定了量化阈值, 为评估人类活动对地球系统的影响提供了科学依据。其二, 政策工具化。行星边界理论已成为指导全球环境政策的重要工具, 对国际政策的制定产生了实质性影响。如《巴黎协定》将全球温升目标设定为1.5°C, 这一目标的设定直接源于气候变化行星边界的科学界定, 并转化为政策工具, 为人类在地球系统中寻求可持续发展路径提供了重要的理论支撑和实践指导。

2.1.2 大加速(Great Acceleration)理论

大加速理论由Steffen等人^[20]2015年提出, 该理论基于社会经济指标与环境指标的同步指数增长, 将20世纪中叶界定为人类世的起点。这一理论深刻揭示了工业文明与地球系统崩溃之间的因果关系^[21]。其作用体现在两个方面: 其一, 历史分期。大加速理论为人类世的历史分期提供了坚实依据。以1950~2010年为例, 全球塑料产量在这段时间增长了200倍, 这一增长与海洋微塑料沉积层的形成同步。该现象不仅凸显了人类活动对地球系统的深远影响, 还为人类世的地层学证据提供了有力支持。其二, 路径依赖警示。大加速理论揭示了化石能源基础设施的路径依赖问题。以燃煤电厂为例, 其生命周期通常为40年, 这意味着即便全球温控目标得以实现, 现有的高碳基础设施仍会锁定高排放路径, 从而增加未来可持续发展转型的成本与难度^[22]。

2.1.3 临界点(Tipping Points)理论

临界点理论由Lenton等人^[23,24]2008年提出, 指出地球系统可能突破临界阈值, 进入不可逆的新稳态, 强调了地球系统的非线性和不可预测性^[25]。关键案例包括: (1) 亚马逊雨林退化。研究表明, 亚马逊雨林的毁林率超过20%~25%可能引发雨林向稀树草原转变。这一临界点的突破将释放670亿吨碳, 并破坏区域水循环, 对全球气候和生态系统产生深远影响^[26]。(2) 西南极冰盖消融。西南极冰盖底部的暖流侵蚀可能导致冰架的不可逆消融, 即使全球温控目标达成, 也可能引发海平面上升3.3 m。这一临界点的突破将对全球沿海城市和生态系统构成重大威胁^[27]。

2.2 社会技术系统理论: 人类世科学的社会动力机制

社会技术系统理论(Socio-Technical Systems Theory)揭示了人类活动如何通过制度、技术与文化的协同演化驱动地球系统的变化。其核心在于理解社会与自然系统之间的复杂互动, 以及如何通过技术创新和制度设计实现可持续发展。包括社会代谢理论、技术锁定效应和多重稳态理论等。

2.2.1 社会代谢理论(Social Metabolism)

社会代谢理论由Fischer-Kowalski^[28]于1997年提出, 强调社会通过物质和能量的流动与自然系统进行互动。其核心观点是, 社会的代谢规模(如人均GDP与资源消耗的弹性系数)直接决定了生态压力的大小。在人类世背景下这一理论的重要性在于, 揭示了人类社会从农业社会到工业社会再到人类

世社会的代谢模式转变。在人类世,社会需要设计循环代谢模式,以减少资源消耗和生态压力。社会代谢理论为政策制定者提供了工具,如物质流分析(material flow analysis, MFA),用于量化资源流动和识别关键干预点。这种分析方法已被广泛应用于评估城市和国家的资源效率,并为循环经济政策的实施提供了科学依据^[29,30]。

2.2.2 技术锁定效应(Technological Lock-in)

技术锁定效应由Arthur^[31]于1989年提出,描述了技术路径因规模经济、学习效应和制度互补性而形成的“锁定”现象。这种锁定效应阻碍了低碳技术的扩散,使得高碳技术体系难以被替代。燃油车基础设施就是一个典型的技术锁定案例。全球加油站网络、炼油厂投资和汽车文化共同锁定了对石油的依赖,尽管电动汽车技术已逐渐成熟,但基础设施和消费者习惯的惯性使得转型缓慢^[30,32]。另外,工业化生产的农业化肥、农药和机械化农业体系虽提高了农业生产效率,但也导致了土壤退化和生物多样性丧失。

2.2.3 多重稳态(Multiple Stable States)理论

多重稳态理论由Scheffer等人^[33]于2001年提出,指出社会生态系统可能因外部扰动在不同稳态之间跃迁。强调适应性治理在维持系统韧性中的重要性,认为从高碳锁定态(化石能源主导)向低碳稳态(可再生能源+储能系统)的跃迁需要政策杠杆的推动,如碳税和绿色补贴。这些政策工具可以加速技术转型,并减少对高碳技术的依赖。另外,城市气候韧性指数(city resilience index, CRI)的构建需整合电网冗余度、社区组织能力等指标。通过指标量化可评估城市在面对气候变化时的适应能力,为政策制定提供依据^[30]。

2.3 思辨性认识论:人类世科学的伦理与哲学根基

人类世科学需超越实证主义范式,通过哲学思辨重构人类与地球的伦理关系,具体包括后人类主义、深时伦理、气候正义等伦理哲学根基。

2.3.1 后人类主义(Posthumanism)

后人类主义作为一种哲学思辨范式,旨在解构传统的人类中心主义(Anthropocentrism),强调人类与非人类行动者(如病毒、算法、森林)之间的相互构成性(symptoiesis)。Haraway提出的“共生本体论”认为,人类并非独立于自然世界的主宰者,而是与非人类实体共同演化的参与者。这一理论挑战了现代科学中占主导地位的实证主义范式,主张将伦理关系扩展到非人类领域,重新定义人类与地球的关系^[34,35]。人类世意义:(1) 非人类行动者赋权:后人类主义在人类世中的实践体现在对非人类实体的法律承认。例如,新西兰的旺格努伊河和印度的恒河被授予法人权利,标志着法律体系对生态实体的承认与保护。这种赋权不仅是对自然权利的认可,也是对人类与自然关系的重新定义^[36,37]。(2) 技术伦理:在后人类主义框架下,技术的伦理问题也备受关注。例如,AI气候模型的设计需避免算法偏见,特别是在数据收集和处理过程中,

应确保小岛屿国家等脆弱群体的数据不被忽视。这种伦理考量有助于实现更公平的气候治理^[38,39]。

2.3.2 深时伦理(Deep Time Ethics)

深时伦理由Chakrabarty^[4]于2021年提出,强调人类需在“深时”(deep time)尺度上承担责任。深时尺度超越了人类历史的短暂性,将地球系统的演化与人类活动的影响置于更广阔的时空背景中。这一理论要求我们不仅关注当前的环境问题,还要考虑当前决策对未来数万年的地球状态的影响^[40]。其实践挑战包括:(1) 核废料管理。深时伦理在核废料管理中的应用尤为突出。例如,芬兰的Onkalo核废料储存库设计寿命长达10万年,远超人类文明的历史。这一项目不仅涉及工程技术问题,更要求跨代际的伦理审查,以确保未来人类和生态系统的安全^[40]。(2) 基因驱动技术。基因驱动技术的应用可能引发生态链的未知突变,其影响可能延续数千年。深时伦理要求我们在技术开发和应用过程中,进行严格的跨代际伦理评估,以避免不可逆的生态灾难^[41]。

2.3.3 气候正义(Climate Justice)理论

气候正义理论由Shue^[42]于2014年提出,强调减排责任应基于历史排放与能力原则。这一理论旨在纠正“奢侈排放”(发达国家)与“生存排放”(发展中国家)之间的不平等,要求发达国家承担更多的减排责任,并为发展中国家提供资金和技术支持^[40,42,43]。政策工具包括:(1) 损失与损害基金:在COP27上设立的损失与损害基金,旨在补偿气候脆弱国家因气候变化造成的不可逆损失。这一政策工具体现了气候正义的核心原则,即对最脆弱群体的保护与支持^[43,44]。(2) 碳边境调节机制(carbon border adjustment mechanism, CBAM):欧盟推出的碳边境调节机制对进口商品的碳含量征税,旨在防止“碳泄漏”并推动全球减排^[43,45]。

2.4 复杂性科学:人类世科学的方法论桥梁

复杂性科学为跨尺度、跨学科研究提供了强大的工具,其核心理论包括复杂适应系统(complex adaptive system, CAS)理论和网络科学(network science),这些理论在人类世背景下的应用尤为关键。

2.4.1 复杂适应系统理论

复杂适应系统理论由Holland^[46]于1995年提出,强调系统通过主体之间的互动实现自组织演化。其核心在于主体的适应性行为及其对系统整体动态的影响。该理论特别适用于气候-社会耦合系统的建模,因其能够捕捉到系统中多主体(如企业、家庭、政府)之间的非线性互动和反馈机制^[46,47]。研究表明,碳税政策的有效性不仅取决于税率本身,还取决于各主体的适应性行为。例如,企业可能会通过技术创新降低排放,而家庭则可能调整消费模式。这种多主体互动的动态模拟为政策制定提供了科学依据^[48,49]。

2.4.2 网络科学

网络科学由Barabás^[50]于2016年发展,其核心在于分析节

点之间的连接模式及其对系统整体行为的影响。例如,全球贸易网和气候遥相关网络都是典型的复杂网络,其结构特征(如无标度性、小世界性)决定了系统的稳定性和脆弱性^[51]。人类世的应用包括:(1) 供应链韧性分析。网络科学被用于识别全球粮食贸易网络中的关键节点。例如,乌克兰战争对全球小麦价格的影响揭示了供应链网络的脆弱性。通过分析网络的拓扑结构,可以识别出关键节点(如主要出口国),并制定相应的风险缓解策略^[52]。(2) 气候临界点传导。网络科学还被用于研究气候系统中的临界点传导机制。例如,北极放大效应通过急流扰动引发欧洲极端天气的级联效应^[53,54]。

2.5 理论整合:人类世科学的“三螺旋”模型

人类世科学通过“自然-社会-伦理”三螺旋模型,将复杂适应系统理论和网络科学整合为协同分析工具。这一模型的核心在于将地球系统的物理约束、人类活动的驱动机制以及转型的公平原则有机结合,形成综合性的分析框架^[55]。

自然维度(行星边界+临界点):自然维度强调地球系统的物理约束。例如, Rockström等人^[19]提出的行星边界理论为评估人类活动对地球系统的影响提供了科学依据。海洋塑料浓度超安全阈值的研究表明,人类活动已对地球系统造成了不可逆的影响^[56,57]。

社会维度(社会代谢+技术锁定):社会维度关注人类活动的驱动机制。例如, Malm的研究揭示了一次性塑料经济如何锁定石油化工利益集团,阻碍了可持续转型。这种技术锁定效应表明,社会系统的复杂性不仅体现在动态性上,还体现在路径依赖性上^[58,59]。

伦理维度(气候正义+深时责任):伦理维度强调转型的公平原则。例如, UNEP(2021)的报告指出,全球南海岸社区承担了85%的塑料污染后果。这种不公正分配机制表明,人类世科学不仅需要关注自然和社会的互动,还需要关注伦理层面的公平性^[60,61]。

综上所述,复杂性科学通过复杂适应系统理论和网络科学为人类世研究提供了强大的工具,而“三螺旋”模型则为整合自然、社会和伦理维度提供了综合性的分析框架。这种跨学科、跨尺度的研究范式不仅深化了我们对人类世的理解,还为全球治理提供了科学依据。

3 人类世科学的核心科学问题

人类世科学的核心科学问题聚焦于解析人类活动与地球系统的非线性交互机制、探索社会技术系统的转型路径,以及设计行星尺度的治理工具。这些问题不仅涉及自然系统的突变风险,还涵盖社会结构与伦理范式的重构需求。以下从三大维度系统阐述其具体内涵、研究挑战与前沿方向。

3.1 地球系统突变机制

地球系统突变(Earth system tipping points)是人类世科学

(Anthropocene science)的核心研究领域,旨在揭示人类活动如何触发地球系统的不可逆转变,并量化其级联效应。这一研究不仅涉及对自然系统的深刻理解,还需要整合社会科学、经济学和技术创新,以应对全球环境变化的复杂挑战。以下从触发条件与临界点识别、级联效应与跨系统耦合、不可逆性与恢复力评估三个方面展开分析。

3.1.1 触发条件与临界点识别

随着人类活动对地球系统影响的日益加深,哪些人类活动(如化石燃料燃烧、土地利用变化)最可能突破地球系统的关键阈值?为解决这一问题,由Rockström等人^[19]于2009年提出的行星边界理论量化了气候、生物多样性、氮磷循环等九大子系统的安全操作空间(safe operating space)。通过设定阈值,帮助识别人类活动对地球系统的潜在威胁^[62]。此外,基于分岔理论(Bifurcation Theory)提出的临界点动力学模型(tipping point dynamics)为预测系统突变条件提供了有效方法^[63]。例如,北极海冰消融的临界升温值约为1.5°C,超过这一阈值可能导致不可逆的冰盖崩塌。

3.1.2 级联效应与跨系统耦合

级联效应与跨系统耦合是一个至关重要的研究领域。其核心科学问题在于:局地扰动如何通过自然与社会网络引发全球性连锁反应?为解决这一问题,网络科学提供了一种有效的分析工具,广泛应用于分析气候遥相关现象,识别全球供应链中的脆弱性节点。这些网络中的关键节点一旦遭受扰动,便可能引发全球范围的连锁反应^[64]。此外,耦合地球系统模型与经济模型的方法也为我们提供了深入理解自然与社会系统相互作用的途径。在实际案例中,西伯利亚多年冻土融化是一个典型的正反馈循环:冻土融化释放甲烷,加剧全球变暖,进而加速北方针叶林野火,野火又进一步加速冻土碳释放^[20]。这些研究不仅有助于我们理解局地扰动如何通过复杂网络引发全球性连锁反应,还为制定应对策略提供了科学依据^[65]。

3.1.3 不可逆性与恢复力评估

地球系统突变是否可逆?如何量化社会生态系统的恢复力?为解决这些问题,由Scheffer等人^[33]提出的滞后效应模型(hysteresis model)指出,系统从突变状态恢复原状需要远超触发阈值的反向干预。例如,即使全球降温1°C,可能也无法逆转冰盖消融^[66]。此外,韧性指数(resilience index)被用来量化系统的恢复力,它整合了生态冗余度(如珊瑚礁基因多样性)与社会适应能力(如灾害预警系统)。这些理论框架不仅有助于我们理解地球系统的不可逆性,还为政策制定提供了科学依据。

3.2 社会技术系统转型路径

社会技术系统转型是避免地球系统突变的关键,其研究需破解路径依赖、权力结构和技术伦理的复杂交织。

3.2.1 解锁技术-制度锁定效应

在全球能源转型进程中,解锁技术-制度锁定效应是指如

何突破高碳基础设施(如燃煤电厂、燃油车)与社会制度的协同锁定? 高碳基础设施与社会制度之间的协同锁定效应是全球能源转型的主要障碍之一, 这种锁定效应不仅体现在技术层面, 还深深嵌入到经济、政治和社会制度中. 例如, 燃煤电厂和燃油车的长期存在依赖于政府的补贴、现有的基础设施投资以及消费者的行为习惯, 根据国际货币基金组织(IMF, 2020)的数据, 全球石油补贴高达5.9万亿美元/年, 这进一步强化了高碳技术的路径依赖. 为解决这一问题, 1989年Arthur^[31]提出技术锁定理论指出, 规模经济和制度互补性会强化现有技术路径.

3.2.2 公正转型与社会公平

如何设计转型政策以减少对弱势群体的剥夺(如煤炭工人失业、原住民土地权受损)? 能源转型不仅涉及技术和制度的变革, 还关乎社会公平. 弱势群体, 如煤炭工人和原住民, 往往在转型过程中面临失业、土地权受损等风险, 因此, 设计公正的转型政策至关重要. 为解决这一问题, 社会代谢分析作为一种有效的分析工具^[67], 通过量化不同群体资源获取的公平性, 揭示转型过程中的不平等现象. 此外, 参与式正义评估通过公民陪审团(citizen juries)等机制, 协商能源转型的补偿方案.

3.2.3 技术创新的风险与伦理

在全球能源转型与技术创新的进程中, 新兴技术, 特别是地球工程(如太阳辐射管理(solar radiation management, SRM))和基因驱动技术, 具有改变地球系统的潜力, 但同时也可能引发不可预见的系统性风险. 这些技术的复杂性和不可逆性使其成为科学界和伦理学界关注的焦点. 例如, 地球工程中的平流层气溶胶注射(stratospheric aerosol injection, SAI)可能通过改变大气层的光学特性来减缓全球变暖, 但其跨世代影响和潜在的生态系统扰动尚未完全被理解. 基因驱动技术则可能通过快速传播遗传修饰来抑制或消除目标物种, 但其对生态系统和生物多样性的长期影响仍存在巨大不确定性. 为应对这些风险, 预防性原则强调在科学不确定性较高的情况下, 应避免可能带来不可逆后果的技术应用^[68]. 共进化伦理则主张技术设计应纳入非人类利益相关者的利益, 特别是生态系统和生物多样性的保护^[69].

3.3 行星尺度治理工具

3.3.1 地球系统建模与预测

在全球环境变化研究中, 如何开发整合社会行为与自然过程的跨学科模型, 以更好地理解 and 预测全球环境变化及其对人类社会的反馈. 这一问题的复杂性源于社会系统与自然环境之间的非线性互动和反馈机制. 传统的模型往往将社会行为简化为外生变量, 而未能充分反映人类决策、政策干预和社会动态对地球系统的深远影响. 因此, 开发跨学科模型成为当前研究的重点, 旨在通过融合社会科学、生态学、气候学等多学科知识, 构建更为全面和动态的地球系统模型.

基于主体的建模(agent-based modeling, ABM)是一种自下而上的建模方法, 通过模拟个体(如企业、家庭、政府)的决策行为, 揭示宏观层面的社会动态. 数字孪生地球是一种通过高性能计算技术实时模拟气候-社会耦合系统的创新方法, 旨在构建一个高分辨率的地球系统数字孪生体, 整合多源数据(如卫星观测、地面监测数据)和复杂模型(如气候模型、社会经济模型), 从而实现对社会-自然系统的实时监控和预测.

3.3.2 全球公域治理机制

在全球化的背景下, 公海、大气层与极地等全球公域的治理已成为国际社会面临的重大挑战. 传统的国家主权模式无法有效应对跨边界、跨区域的环境问题, 需要设计超越主权的治理制度. 这一科学问题的核心在于如何在多利益相关方的复杂网络中, 构建一个既能保护地球系统稳定性, 又能公平分配资源使用权的全球治理框架. 为解决这一问题, 需要建立全球性的公域治理机制, 包括建立全球公共资源的治理机制、多边合作机制、多中心网络治理机制, 以及建立行星边界协议公约等. 全球公域治理需要树立地球公共资源、人类共同遗产、人类公共资产的共识, 需要更强的法律约束力与多边合作机制, 避免把全球公共资源和资产据为己有, 引发的越来越严重的全球资源争夺和国际冲突.

3.3.3 危机响应与适应性治理

地球系统的突变可能引发不可逆的全球性后果, 例如极地冰盖崩塌、海洋环流停滞或大规模生物多样性丧失等. 这些突变不仅威胁生态系统稳定性, 还会对人类社会造成深远影响. 因此, 建立应对地球系统突变的快速响应机制是当前全球治理的核心挑战之一. 这一机制需要整合科学监测、政策干预和资金支持, 以确保在临界点临近时能够迅速采取行动, 减缓或避免灾难性后果. 在制度设计方面, 气候紧急减排法是一个重要的框架, 其核心是通过法律授权政府在气候临界点临近时实施紧急减排措施, 以快速减少温室气体排放. 另一个重要的制度设计是韧性基金, 旨在为脆弱国家提供资金支持, 帮助其适应气候变化的不可逆损失. 这一基金应由历史排放国注资, 因为这些国家对全球温室气体排放的累积贡献最大. 如何提高韧性基金的透明度和效率, 确保资金能够有效支持脆弱国家的适应需求, 亟待优化韧性基金的运作机制.

4 人类世科学的方法论创新

人类世科学的方法论创新源于其研究对象的复杂性和跨尺度特性, 需整合自然科学量化分析、社会科学机制解析与人文伦理思辨, 形成“观测-建模-参与-评估-预测”五位一体的方法体系. 以下从五大维度系统阐述其方法论突破.

4.1 空天地一体化技术: 深海深空深地与深时观测

空天地一体化技术是融合地面、空中、卫星和海洋通信系统的新兴网络架构, 在人类世科学中, 这种技术在深海、

深空、深地及深时观测中具有广泛的应用前景,通过有效整合深海、深空、深地与深时观测数据,高精度捕捉自然-社会系统实时状态。深海观测通过布设传感器网络,实时监测海底地质、生物和环境变化,如全球海洋观测系统(global ocean observing system, GOOS)围绕许多自动平台(如Argo浮标)建立,动态收集与传输海洋数据^[70]。深空观测利用卫星、航空平台遥感与物探手段,对遥远天体或空间环境开展探测活动。其中,遥感系统能监测气候变量、土地覆盖变化、大气成分、地表海洋和城市发展等各类过程和指标^[71],并快速处理、分析和可视化大量数据,展示地球系统在行星尺度上结构和功能的变化速度和幅度^[72]。深地观测利用深地钻探、深地探测等技术,探索地球内部结构、地质灾害预警、自然资源分布等情况,全球长期观测网络(如FLUXNET)能高效测量陆地表面和大气间的能量与气体通量以及主要生态系统的土壤生根深度^[73]。深时观测通常需结合地质年代学、古生物学等方法,剖析地球历史时期的地质、气候、生物等变化,进而理解地球演化历史、气候变化长期趋势,以及人类活动对自然环境的长期影响。例如,研究发现在5600万年前发生的古新世-始新世极热事件中,快速释放的温室气体导致全球气温上升5~6°C^[74]。

4.2 跨尺度建模技术: 连接微观人类行为与宏观地球系统

传统模型通常受限于单一时空尺度,而人类世科学通过嵌套式建模技术揭示局地行动与全球效应的非线性关联,将微观人类行为与宏观地球系统进行有效连接。嵌套式耦合模型(nested coupled models)是在一个主模型中嵌入一个或多个子模型,用于处理特定的子过程或局部问题,由此通过数据交换与相互作用实现主模型与子模型的耦合。在人类世科学中,将微观行为模型(如家庭能源消费选择)嵌入宏观地球系统模型(如气候-碳循环模型)中,可有效实现跨尺度反馈模拟,常用技术工具包括“CLIMADA-ACE框架”和“全球-区域嵌套模型”。可通过耦合气候灾害模型(climate adaptation, CLMADA)与基于主体的经济模型(agent-based computational economics, ACE),充分整合不同利益相关者的风险与回报,评估热带气旋对加勒比地区保险市场与碳价的连锁影响^[13]。IPCC第六次评估报告采用CMIP6模型嵌套区域气候模型(regional climate models, RCMs),解析城市热岛效应与全球变暖的协同机制^[75]。

4.3 混合研究范式: 融合量化分析与质性思考

人类世科学拒绝“方法论割裂”,通过量化分析与质性批判的融合方法捕捉社会-生态系统的复杂性,参与式行动研究、数字人文技术和多模态数据融合是混合研究方法的重要代表。参与式行动研究(participatory action research, PAR)以社群为中心,强调研究人员与社群成员之间的共同参与与反

思性循环。在人类世科学中,科学家与政策制定者可与在地社群的原住民共同定义问题、设计解决方案,合力推动人地系统的协调可持续发展。有研究将原住民口述史与多源遥感数据相结合,绘制亚马逊生物文化地图,精准识别雨林站点与生物多样性热点重叠区^[76]。利用数字平台下伦敦市民报告的洪涝热点,编制了伦敦城市气候韧性规划,科学指导市政排水系统升级^[77]。数字人文技术(Digital Humanities Techniques)将新兴数字技术应用于传统人文科学领域中,为理解人类活动对地球系统的影响提供全新视角和方法,常见技术包括文本挖掘与情感分析以及虚拟现实(VR)模拟。可搜索社交媒体Twitter中的海量气候变化话题并展开文本挖掘,解析社交媒体数据中的公众风险感知差异^[78]。开展虚拟现实(VR)模拟,将VR技术与工程决策工具相结合,让决策者“体验”2100年海平面上升情景,推动建设具备韧性的未来基础设施^[79]。而多模态数据融合(multimodal data fusion)将来自不同类型的传感器或数据源信息进行整合,以提供更全面和更准确的决策分析能力。联合哨兵卫星(sentinel)遥感与物联网设备,可监测亚马逊地区森林退化实时动态,并自动化测绘大规模土地利用与土地覆盖^[80]。可融合经济数据与生态足迹,利用多区域投入产出模型(multi-regional input-output, MRIO)评估发达国家与欠发达国家的生态系统影响足迹,为制定生物多样性政策提供全新视角^[81]。

4.4 伦理评估框架: 量化责任与正义

人类世科学将伦理批判转化为可操作评估工具,确保技术干预与政策设计符合公平原则,代际正义模型和非人类主体评估是重要的评估手段。其中,代际正义模型(intergenerational justice models)重点探讨当代人与后代人之间如何公平分配自然和社会资源、享有和传承人类文明成果。在人类世科学中,该模型通过贴现率调整与福利函数设计,量化当前人类决策对未来世代地球系统的影响。例如,斯特恩报告采用近零贴现率,强调后代权益^[82]。此外,代际正义模型还关注生态系统服务、文化遗产、教育和健康等非经济价值,因为其对后代人的生存发展同样至关重要。非人类主体评估(non-human agent evaluation)强调对非人类主体的行为、功能和能动性进行系统性分析和评估。为明确以河流为代表的生态实体权利量化,新西兰旺格努伊河在被授予法人地位后,其“健康权”通过水质指标与鱼类种群量进行评估,以强化对河流生态系统的可持续管理^[83]。而算法伦理审计能有效应对算法中的伦理问题,推动算法透明化、公平化和责任化,可用以协助评估AI气候模型是否公平代表以小岛屿国家为代表的边缘群体利益^[84]。

4.5 地球系统数字孪生: 实时映射与智能预测

地球系统数字孪生技术(digital twin of the Earth)基于大数据与人工智能构建实时动态地球镜像,并通过数据驱动方

式对人类活动干预下的地球系统进行模拟和预测,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,进而支撑决策实验与危机预演。地球数字孪生设想将地球大数据与基于物理的模型融合在一个交互式计算框架中,从而能够监测和预测环境和社会扰动,以用于可持续治理,数据同化为将高分辨率观测数据纳入地球系统模型提供了框架,因果推理和强化学习的进步分别提高了大数据的可解释性和模拟解决顺序决策问题的能力,社会传感数据可以通过智能体与环境之间的反馈循环为多智能体深度强化学习提供输入,从而在人类系统建模中实现大规模应用^[85]。在地球系统数字孪生技术架构中,卫星观测、社交媒体流、经济交易记录等实时数据构成数据层,物理模型(如气候、海洋环流)、社会模型(如基于主体的城市模拟)与伦理约束模块构成模型层,供用户测试不同干预方案优越性(如征收碳税与实行碳交易的比较)的政策沙盒则构成交互层。基于“数据层-模型层-交互层”,构建多维度未来情景,可进行情景路径分析(scenario pathway analysis)和构建气候冲突预警系统(climate-conflict early warning),进而预演与解译地球系统未来发展轨迹。例如,可设定地球系统突变事件(如北极冰盖崩塌)作为情景变量,以极端事件预演评估社会韧性阈值,表明全球升温必须控制在1.5°C范围内^[17]。Rigaud等结合GIS技术和人口流动模型,模拟海平

面上升所导致的跨境移民压力,通过极端事件预演响应气候变化风险^[86]。

4.6 方法论的系统整合: 人类世科学的“五维透镜”

人类世科学通过“观测-建模-参与-评估-预测”方法论的“五维透镜”(图1),系统解析复杂问题。综合来看,空天地一体化技术立足观测维度,整合深海、深空、深地与深时观测,精准捕捉自然-社会系统的实时状态。跨尺度建模技术立足建模维度,通过“CLIMADA-ACE框架”、“全球-区域嵌套模型”等工具,连接微观人类行为与宏观地球系统,有效实现跨尺度反馈模拟。混合研究范式立足参与维度,纳入多元主体知识与价值观,融合量化分析与质性批判,利用参与式行动研究、数字人文技术、多模态数据融合等手段,系统捕捉社会-生态系统的复杂性。伦理评估框架立足评估维度,利用代际正义模型、非人类主体评估等工具,量化责任与正义,确保方案符合代际与种际正义。地球系统数字孪生则立足预测维度,在“数据层-模型层-交互层”支持下,通过情景路径分析和气候冲突预警系统等手段,高效支撑决策实验与危机预演。通过系统整合技术创新与伦理反思,构建人类世科学方法论工具箱,为解决跨学科问题提供实践路径。

然而,目前人类世科学的“五维透镜”仍存在技术瓶颈和



图1 人类世科学方法论创新的“五维透镜”示意图

Figure 1 “Five-dimensional lens” for methodological innovation in Anthropocene science

方法论争议等问题,例如,现阶段发达国家掌控了数字孪生技术,可能会加剧全球知识权力不平等和数据殖民主义风险^[87]。此外, AI驱动下的复杂模型缺乏透明度,诱发模型黑箱化问题,由此会削弱决策者与公众信任^[88]。下一步可深入探讨具体技术瓶颈(如模型不确定性管理)或方法论争议(如参与式研究的权力失衡问题)。

5 实践启示:从知识生产到行星治理

人类世科学的知识生产需超越学术范畴,转化为重塑教育体系、革新治理架构与规范技术应用的实践行动。其核心目标是构建适应地球系统复杂性的“行星文明”,实现从“人类征服自然”到“人类与地球共生”的范式转型。

5.1 重构知识生产的科学教育体系:培养行星公民

在人类世时代,全球生态系统正经历前所未有的剧烈变革,人类活动与自然过程已形成难以分割的复杂共演网络^[89]。这一现实要求我们彻底更新认知框架,将地球理解为自然-社会-伦理的多重耦合系统,探索超越行星边界的新型知识图景。然而,传统教育体系仍深陷于学科分化的困境之中,在应对当下跨尺度、跨学科的系统性挑战时显得捉襟见肘。人类世科学呼唤教育范式的根本转型,重构知识生产的教育体系,从多学科知识整合到全球协作实践,从伦理责任嵌入到能力导向建构,最终培育一代具备地球系统思维、跨文化协作能力与伦理责任感的“行星公民”,为人类与地球的可持续共生奠定认知基础。

5.1.1 设计学科交叉课程,培养行星公民

联合国教科文组织《共同重塑我们的未来》报告指出,当今全球挑战要求教育体系根本性重构以应对复杂的全球性问题,塑造和平、公正与可持续发展的共同未来^[90]。人类世科学发展呼唤教育范式转型,从学科分割走向知识整合,从理论灌输转向能力建构。在这一新范式下,课程设计必须融通社会-生态-文化多维度知识,培养学生不仅获取知识,更能应用并生产知识,同时发展批判思维与全球协作能力,从而推动多重正义实现^[91,92]。斯坦福大学“地球系统科学”项目通过区域气候韧性方案设计,结合地质学、经济学和伦理学的知识解决实际环境问题。柏林洪堡大学“人类世研究”硕士项目则以棕地修复的田野调查为载体,分析社会与生态之间的冲突,培养学生在复杂环境中进行跨学科调查与解决问题的能力^[93]。这些实践案例为应对全球环境与社会挑战提供新的教育模式,表明以培养具有跨学科知识和全球视野的“行星公民”为重心的科学教育体系具有重要意义。

5.1.2 建设公民科学网络,打开科学决策“黑箱”

公民科学网络建设是行星治理的关键,通过技术赋能与制度创新重塑环境治理的权力结构与合法性基础^[94]。首先,技术民主化架构打破了环境数据的精英垄断。分布式传感器网络(如AirVisual空气质量监测节点)建立起毛细血管式的公

民数据采集系统,填补官方数据盲区。印尼“Plastic Bank”项目则以区块链技术将海洋塑料回收转化为可验证的数字资产,实现环境治理从命令控制向价值共创的范式转换^[95,96]。其次,治理合法性重构赋予公民环境决策的直接参与权。法国气候公民议会通过统计学随机抽样组建公民团体,制定减排60%的气候政策,并促成立法改革,打开了科学决策的“黑箱”,将公众从数据被动消费者转变为政策积极生产者。行星治理不仅仅依赖于国家和跨国组织的治理体系,还应当广泛吸纳公民、社区和地方政府的参与。

5.1.3 开展深时教育,沉浸体验地质时间

深时教育(deep time education)通过时空尺度的认知革命,将地球和人类历史的深远时间尺度纳入教育体系,理解人类活动与自然环境的长期互动及其深刻后果。在深时教育的框架下,教育不仅仅关注当下和近期的利益,而是强调考虑数百万年乃至数十亿年的时间跨度。随着虚拟现实技术愈发成熟,可以利用VR技术让学生沉浸体验地质时间,“穿越”至二叠纪大灭绝,亲历物种灭绝的级联效应,或未来1000年的核废料储存库,直面“当前行动-万年后果”的伦理重负。还可以通过跨代际对话的形式,青少年与长者共同撰写“致2123年的信”,反思当前决策的长远后果。

5.2 推动制度实验:构建行星治理架构

在人类世的地球系统危机面前,国家体系与市场机制在应对地球系统危机时表现出结构性失效^[97],亟需通过制度实验探索新型治理模式,构建行星治理架构。正如Dryzek和Pickering^[98]在《人类世的政治学》一书中写道:“人类不再与地球系统疏远,而是以一种更富有成效的关系参与其中。我们仍然可以追求民主、社会正义和可持续发展,但不再像以前那样。今后,所有的政治都应首先是人类世政治”。

5.2.1 组建行星议会

行星议会(planetary parliament)是对治理主权的重新审视,在地球系统中各要素相互联结的背景下,谁有权参与塑造共同未来的决策过程?亚马逊流域议会试验中,九国代表与原住民共享决策权,确保生态完整性优先于国家利益^[99]。非人类代理人制度赋予自然实体前所未有的法律主体性。新西兰旺格努伊河和英国弗洛姆河获得诉讼权,实现从“资源管理”到“权利保障”的法理转型^[100]。这些实践表明生态中心的政治代表机制已初见雏形。然而,行星议会也面临深刻挑战。

5.2.2 建立危机响应机制

应对地球系统临界点风险已超出传统渐进决策的能力范围,催生了一系列危机响应机制创新^[71]。气候紧急状态法作为前沿制度工具,赋予超国家机构临界风险干预权^[101]。欧盟碳边境调整机制(CBAM)则通过经济手段将紧急权力具体化,对高碳进口产品征收气候关税,实现环境成本内部化^[102]。地球系统戒严概念更进一步,主张在关键生态系统面临崩溃

风险时启动全球应急措施。如北极理事会的季节性航道管制实验^[103]。但这类危机响应机制引发了持续的争议,紧急权力可能被滥用侵犯公民自由,同时全球公域执法机制的缺位又使应急措施沦为空洞宣言。

5.2.3 创新全球公域治理

面对大气、海洋、生物多样性等全球公共资源的加速耗竭,创新治理机制成为关键突破口。行星边界协议尝试将科学共识转化为法律约束,设定“生物多样性配额”,将Rockström等人^[19]提出的九大行星边界指标设为各国必须遵守的“生态红线”^[104]。联合国《公海生物多样性协定》确立了深海资源的“人类共同遗产”地位,参照《南极条约》模式,对公海资源开发设立了国际信托基金机制,确保50%收益用于海洋生态系统修复,实现资源利用与保护的制度平衡。技术赋能进一步增强了全球公域治理的可操作性。Global Forest Watch平台利用卫星实时监测全球森林变化,追踪非法捕捞与森林砍伐。亚马逊基金智能合约则实现了生态补偿的自动执行,根据卫星验证的森林保护面积自动触发支付,消除了传统跨国生态补偿中的信任障碍。这些治理实践创新表明,行星治理架构并非空中楼阁,而是已在实践层面展开的多中心制度实验^[105]。人类正探索从以“国家主权—市场逻辑”为主导的分割治理,向“地球系统—行星边界”为框架的整体治理转型,为应对人类世的复杂挑战提供制度基础^[106]。

5.3 技术民主化路径: 建立技术共享新模式

技术创新在应对人类世危机中扮演着双面角色,既可能成为解决方案,也可能强化现有结构并产生新的风险。跨国企业与投资者应开放更多的气候技术解决方案,形成共享的技术创新路径与技术应用新模式^[107]。

5.3.1 开源地球工程

开源地球工程(open-source geoengineering)技术代表人类对地球系统最直接的干预,其跨界影响与系统性风险应当需要开放的治理架构。开源地球工程应当遵守技术透明性和全球否决权的管理原则,公开实验数据、模型代码与风险评估报告,赋予最易受气候干预技术负面影响的弱势地区(如可能遭受季风变化的小岛屿国家联盟)以一票否决权。分布式碳移除技术提供了替代大型地球工程的另一路径。非洲乡村能源网络推广的社区生物炭项目,使农民可利用作物残渣来生产固碳材料,既改良土壤又获得碳补偿收入。这种小规模、多中心的碳移除实践,与跨国公司主导的大型碳捕获与封存(CCS)形成鲜明对比,后者往往因高昂成本和技术壁垒而强化资本集中。这种分布式的替代方案不仅降低了技术风险,更重要的是实现了碳治理权力的去中心化,将气候行动转化为社区自主的发展路径。

5.3.2 生物安全监管全球公约

合成生物学与基因工程技术正以前所未有的速度重塑地球生命系统,其不可逆性与生态耦合性要求建立超越市场

逻辑的监管体系。全球基因驱动禁令的提出,要求任何基因驱动生物释放必须经由地球议会2/3多数批准,引入了类似联合国安理会的全球治理机制。参照《禁止生物武器公约》制定的合成生物安全协议,则要求所有人工合成微生物必须植入生物降解“终止开关”,确保其在特定条件下自我降解,防止生物污染。跨物种伦理委员会的建立,彻底重构了技术评估的价值框架。该委员会由科学家、原住民代表与伦理学家共同组成,审查生物技术对整体生态网络的长期影响。这一系列的技术管理措施,完善了生物安全监管全球公约,有效制衡了科技资本主义的短期效益逻辑。

5.3.3 算法气候治理

随着人工智能与大数据等技术的不断发展,算法气候治理(algorithmic climate governance)成为现实。公平碳预算分配模型基于历史责任与基本生存需求,自动计算各国碳配额。有学者提出的“人均累积排放均等化”方案,将历史排放数据纳入碳预算核算,试图通过算法实现跨代际的气候正义,挑战了发达国家长期主导的基于现状排放的分配机制。然而,算法本身也可能复制并强化现有偏见。比如主流气候经济模型系统性低估了热带国家的适应成本,并给予发达国家技术创新过高的减排贡献权重。这种结构性偏见直接影响气候资金分配与技术转让政策。

5.4 实践整合: 行星治理的“教育—制度—技术”三螺旋模型

人类世挑战的系统性特征决定了应对路径必须超越单一维度干预,采取协同演化的整体策略^[108]。基于以上实践启示,提出行星治理的“教育—制度—技术”三螺旋模型(图2)。该模型通过教育、制度、技术三系统动态耦合,构建行星治理的实践框架。教育螺旋重构科学教育体系,培养具备地球系统思维的行星公民,为制度变革提供认知基础;制度螺旋创新变革实验,构建超越主权的行星治理架构,为技术应用创

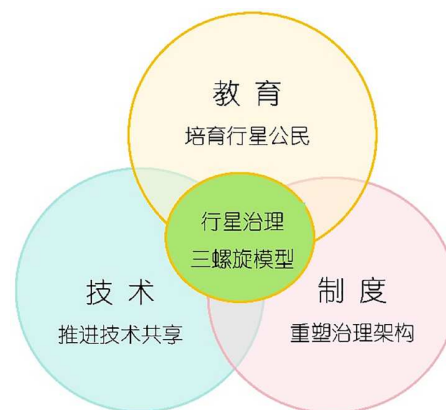


图2 行星治理的“教育-制度-技术”三螺旋模型

Figure 2 Triple helix model of “education-institution-technology” for planetary governance

造合法空间;技术螺旋走民主化路径,遏制技术资本主义霸权,确保技术应用符合地球边界与社会正义。三螺旋模型实现了从单点突破到系统转型的飞跃,以人类世科学为理论基础,为行星文明建构提供路径图示。以全球塑料污染治理为例,从教育上为中小学开设“塑料代谢”课程构建生命周期意识,在制度上通过《全球塑料公约》按生物区分配生产配额,在技术中开源酶解塑料技术,由社区工厂生产替代材料。

6 主要结论与展望

6.1 主要结论

人类世(Anthropocene)的提出标志着地球进入了一个新的人类主导的地质时代,从此开辟了地球系统与人类文明深度耦合的新纪元。人类世科学揭示了工业文明与地球系统的根本性冲突,人类活动已成为驱动地球系统突变的核心地质营力,其影响跨越大气圈、生物圈、水圈、岩石圈与社会技术系统,引发气候临界点突破、生物多样性丧失和物质代谢失衡等全球性危机。

(1) 人类世科学(Anthropocene Science)的核心定义,是以“地球-人类协同演化系统”为研究对象,旨在通过整合自然科学、工程技术、社会科学与人文哲学,揭示人类活动与地球系统相互作用的复杂机制,并探索可持续生存路径。与传统学科不同,人类世科学具有鲜明的问题导向性和目标导向性,以维持地球系统稳定性与社会公正性为终极使命。

(2) 人类世科学的理论基础,源于对地球系统突变、社会技术转型和伦理范式危机的三重回应,其核心在于整合自然科学的客观规律与人文社科的反思,形成“自然-社会-伦理”协同演化的“三螺旋”理论模型。地球系统科学的主要理论包括行星边界理论、大加速理论、临界点理论、复杂性科学、社会技术系统理论等为人类世科学提供了量化人类活动对地球影响的工具,思辨性认识论成为人类世科学的伦理与哲学根基,通过哲学思辨重构人类与地球的伦理关系。

(3) 人类世科学的核心科学问题,聚焦于解析人类活动与地球系统的非线性交互机制和突变机制,分析触发条件与临界点识别,揭示级联效应与跨系统耦合,开展地球系统突变的不可逆性与恢复力评估;通过解锁技术-制度锁定效应、公正转型与社会公平、技术创新伦理正义等手段探索社会技术系统的转型路径;通过地球系统建模与预测、建立全球公域治理机制、危机响应与适应性治理等手段设计行星尺度的治理工具。这些问题不仅涉及自然系统的突变风险,还涵盖社会结构与伦理范式的重构需求。

(4) 人类世科学的方法论创新,源于其研究对象的复杂性和跨尺度特性,需整合自然科学量化分析、社会科学机制解析与人文伦理思辨,整合形成“观测-建模-参与-评估-预测”的“五维透镜”方法体系。具体包括基于空天地一体化技术的深海深空深地与深时观测、基于跨尺度建模技术的微观人类

行为与宏观地球系统模拟、基于混合研究范式的融合量化分析与质性思辨、基于伦理框架的量化责任与正义评估、基于地球系统数字孪生的实时映射与智能预测等。

(5) 人类世科学的实践启示在于,知识生产需超越学术范畴,转化为重塑教育体系、革新治理架构与规范技术应用的实践行动。其核心目标是构建适应地球系统复杂性的“行星文明”,实现从“人类征服自然”到“人类与地球共生”的范式转型。需要重构知识生产的科学教育体系,培养行星公民,开展深时教育,建设公民科学网络,打开科学决策“黑箱”;需要推动制度实验,构建行星治理架构,组建行星议会,建立危机响应机制,创新全球公域治理;需要通过技术民主化路径,构建技术共享新模式;需要整合形成行星治理的“教育-制度-技术”的“三螺旋”治理实践体系。

6.2 学科创新

本文提出的人类世科学,从理论框架、方法整合和实践范式层面都具有学科的创新性。

(1) 提出了人类世科学的“三螺旋”理论体系。将行星边界理论、多重稳态模型与深时伦理纳入统一框架,解析自然-社会-伦理系统协同演化的“三螺旋”理论模型,形成“自然-社会-伦理”协同演化的人类世科学理论体系。

(2) 创建了人类世科学的“五维透镜”方法体系:通过嵌套式耦合模型与参与式行动研究,整合自然科学量化分析、社会科学机制解析与人文伦理思辨,实现微观行为与宏观效应的动态关联,形成由“观测-建模-参与-评估-预测”组成的“五维透镜”方法体系,实现了人类世科学研究的方法突破。

(3) 建立了人类世科学的“三螺旋”治理体系:提出“行星公民教育”等制度实验,推动治理体系从“国家中心”向“地球公域”转型,整合科学教育、公域治理和技术民主化,形成“教育-制度-技术”的三螺旋治理体系,建立了人类世研究的实践范式。

6.3 研究挑战与展望

人类世当前研究面临以下挑战:(1) 认知混沌性。作为新科学思维,对于人类世到底是否已经客观存在,以及表征人类世的关键参数确定,尚需经历从混沌到有序的耗散过程。(2) 模型不确定性。临界点阈值与ABM参数校准存在显著误差,需开发概率化情景工具,趋于精准识别地球的行星边界到底有多大。(3) 权力结构阻力。跨国公司游说与主权让渡困境削弱治理效力,需强化透明度机制与全球司法协作;构建从以“国家主权-市场逻辑”为主导的分割治理,向“地球系统-行星边界”为框架的全球公域治理面临组建行星议会的阻力;(4) 文化多样性冲突。不同国家文化不同,需构建多元知识编码技术,发展技术民主化路径,遏构建技术共享新模式。

人类世未来研究方向包括:(1) 深时数据系统。开发万年尺度的地球系统档案库,支持代际正义评估;(2) 抗干扰问题

治理. 设计适应性框架应对气候工程、基因驱动等技术的不可逆风险; (3) 替代经济网络. 实验去增长合作社与区域循环代谢模式, 探索地球边界内的发展可能性.

人类世不仅是地质时间单元的划分, 更是一场科学范式与文明认知的深刻变革; 不仅是认知革命, 更是生存实践的

革命, 其终极使命在于回答: 在一个有限的地球上, 人类能否设计出与复杂生命网络共存的智慧文明与长寿地球? 人类世科学既是警示碑, 也是行动令. 唯有通过科学范式革命、伦理觉醒与制度创新, 人类方能在有限行星中锚定可持续文明的航向.

推荐阅读文献

- Crutzen P J, Stoermer E F. The 'Anthropocene'. *Global Change Newsl*, 2000, 41: 17–18
- Zalasiewicz J, Williams M, Steffen W, et al. The new world of the Anthropocene. *Environ Sci Technol*, 2010, 44: 2228–2231
- Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, 347: 1259855
- Chakrabarty D. *The Climate of History in a Planetary Age*. Chicago: University of Chicago Press, 2021
- Liu J, Mooney H, Hull V, et al. Systems integration for global sustainability. *Science*, 2015, 347: 1258832
- Jasanoff S. *States of Knowledge*. London and New York: Taylor & Francis Abingdon, 2004
- Pörtner H O, Scholes R J, Agard J, et al. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) and Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021
- Krause M J, Tolaymat T. Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies. *Nat Sustain*, 2018, 1: 711–718
- Meyfroidt P, Rudel T K, Lambin E F. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 20917–20922
- Schuur E A G, McGuire A D, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 2015, 520: 171–179
- Kern F, Gaede J, Meadowcroft J, et al. The political economy of carbon capture and storage: an analysis of two demonstration projects. *Tech Forecasting Soc Change*, 2016, 102: 250–260
- Rodríguez I, Inturias M L. Conflict transformation in indigenous peoples' territories: doing environmental justice with a 'decolonial turn'. *Dev Stud Res*, 2018, 5: 90–105
- Bresch D N, Aznar-Siguan G. CLIMADA v1.4.1: towards a globally consistent adaptation options appraisal tool. *Geosci Model Dev*, 2021, 14: 351–363
- Díaz S, Demissew S, Carabias J, et al. The IPBES Conceptual Framework – connecting nature and people. *Curr Opin Environ Sustainability*, 2015, 14: 1–16
- Griggs D, Stafford-Smith M, Gaffney O, et al. Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, 2013, 495: 305–307
- Richardson K, Steffen W, Lucht W, et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci Adv*, 2023, 9: eadh2458
- Lenton T M, Rockström J, Gaffney O, et al. Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature*, 2019, 575: 592–595
- Zhang Q, Jiang X, Tong D, et al. Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature*, 2017, 543: 705–709
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461: 472–475
- Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, et al. The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *Anthropocene Rev*, 2015, 2: 81–98
- Berbee M L, Strullu-Derrien C, Delaux P M, et al. Genomic and fossil windows into the secret lives of the most ancient fungi. *Nat Rev Microbiol*, 2020, 18: 717–730
- Zalasiewicz J, Steffen W, Leinfelder R, et al. Petrifying earth process: the stratigraphic imprint of key earth system parameters in the Anthropocene. *Theory Cult Soc*, 2017, 34: 83–104
- Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 1786–1793
- Lenton T M, Williams H T P. On the origin of planetary-scale tipping points. *Trends Ecol Evol*, 2013, 28: 380–382
- Hughes T P, Carpenter S, Rockström J, et al. Multiscale regime shifts and planetary boundaries. *Trends Ecol Evol*, 2013, 28: 389–395
- Grainger A. The prospect of global environmental relativities after an Anthropocene tipping point. *For Policy Economics*, 2017, 79: 36–49
- Galaz V, Österblom H, Bodin Ö, et al. Global networks and global change-induced tipping points. *Int Environ Agreements*, 2016, 16: 189–221
- Fisher-Kowalski Marina. Society's Metabolism: on the childhood and adolescence of a rising conceptual star. In: Redclif M, Graham W, eds. *The International Handbook of Environmental Sociology*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 1997
- Laborde S, Fernández A, Phang S C, et al. Social-ecological feedbacks lead to unsustainable lock-in in an inland fishery. *Glob Environ Change*, 2016, 41: 13–25
- Schmidt R C, Marschinski R. A model of technological breakthrough in the renewable energy sector. *Ecol Econ*, 2009, 69: 435–444

- 31 Arthur W B. Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. [Economic J](#), 1989, 99: 116–131
- 32 Lusfia, T. K., Yunita, D., Mavilinda, H. F. Pengaruh social media marketing terhadap keputusan pengunjung di 3D stable palembang. *J Nasional Manajemen Pemasaran SDM*, 2023, 4: 188–194
- 33 Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems. [Nature](#), 2001, 413: 591–596
- 34 Herbrechter S, Callus I, Rossini M, et al. *Palgrave Handbook of Critical Posthumanism*. Cham: Springer International Publishing, 2020
- 35 Adam S, Juergensen L, Mallette C. Harnessing the power to bridge different worlds: an introduction to posthumanism as a philosophical perspective for the discipline. [Nurs Philosophy](#), 2021, 22: 12362
- 36 Guia J. Conceptualizing justice tourism and the promise of posthumanism. [J Sustain Tourism](#), 2020, 29: 503–520
- 37 Herzog C. Of deep time and slow violence: anthro-po-scenic timespaces and the chronotopes of climate theatre. [UBR](#), 2024, 14: 19–53
- 38 Chappell K, Natanel K, Wren H. Letting the ghosts in: re-designing HE teaching and learning through posthumanism. [Teaching Higher Education](#), 2021, 28: 2066–2088
- 39 Bozalek V, Zembylas M, Tronto J C. *Posthuman and Political Care Ethics for Reconfiguring Higher Education Pedagogies*. London: Routledge, 2020
- 40 Gaard G. Ecofeminism. In: LaFollette H, ed. *The International Encyclopedia of Ethics*. New York: Wiley, 2019
- 41 Egerer, C. Anglophone World Literatures and World Ecologies (Environmental Humanities). In: Helgesson S, Neumann B, Rippl G, eds. *Handbook of Anglophone World Literatures*. Berlin and Boston: De Gruyter, 2020
- 42 Shue H. *Climate Justice: Vulnerability and Protection*. Oxford: Oxford University Press, 2014
- 43 Jordan K E, Jónsson Ó P. Towards posthuman climate change education. [J Moral Education](#), 2024, 54: 44–63
- 44 Nayar P K. 13Posthumanisms. [Years Work Crit Cultural Theor](#), 2022, 30: 227–251
- 45 Edwards G A S. Climate justice. In: Coolsaet B, ed. *Environmental Justice*. London: Routledge, 2020
- 46 Holland J H. *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. New York: Basic Books, 1995
- 47 Simon Z B, Thomas J A. Earth system science, Anthropocene historiography, and three forms of human agency. [Isis](#), 2022, 113: 396–406
- 48 Khan F R, Croft S S, Herrando E E, et al. A brief perspective on environmental science in the Anthropocene: recalibrating, rethinking and re-evaluating to meet the challenge of complexity. [Environments](#), 2021, 8: 98
- 49 Inkpen S A, DesRoches C T. Revamping the Image of Science for the Anthropocene. [Philosophy Theor Pract Biol](#), 2019, 11: 20220112
- 50 Barabási A L. *Network Science*. Cambridge: Cambridge University Press, 2016
- 51 Young O R. Conclusion: Science, Policy, and the Governance of Complex Systems. In: Oran R Y, ed. *Governing Complex Systems*. Cambridge: MIT Press, 2017
- 52 Smith-Nonini S. Making complexity your friend: reframing social theory for the Anthropocene. [Weather Clim Soc](#), 2017, 9: 687–699
- 53 Cosens B, Ruhl J B, Soininen N, et al. Governing complexity: integrating science, governance, and law to manage accelerating change in the globalized commons. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2021, 118: 2102798118
- 54 Richter D D. Game changer in soil science. The Anthropocene in soil science and pedology. [J Plant Nutr Soil Sci](#), 2019, 183: 5–11
- 55 Mychajliw A M, Kemp M E, Hadly E A. Using the Anthropocene as a teaching, communication and community engagement opportunity. [Anthropocene Rev](#), 2015, 2: 267–278
- 56 Allenby B. Macroethical systems and sustainability science. [Sustain Sci](#), 2006, 1: 7–13
- 57 Skrimizea E, Haniotou H, Parra C. On the ‘complexity turn’ in planning: an adaptive rationale to navigate spaces and times of uncertainty. [PLanning Theor](#), 2018, 18: 122–142
- 58 Peša I. A planetary Anthropocene? Views from Africa. [Isis](#), 2022, 113: 386–395
- 59 Fazio X E, Campbell T. Science curriculum-making for the Anthropocene: perspectives and possibilities. *Intl J Sci Educ*, 2024, 2: 1–24
- 60 Hamilton, C. The Anthropocene. In: Fath B, Jørgensen S E, eds. *Encyclopedia of Ecology*. Amsterdam: Elsevier, 2019
- 61 Savenije H H G, Hoekstra A Y, van der Zaag P. *Evolving Water Science in The Anthropocene*. Göttingen: Copernicus GmbH, 2013
- 62 Ellis E C, Haff P K. Earth science in the Anthropocene: new epoch, new paradigm, new responsibilities. [EoS Trans](#), 2009, 90: 473
- 63 Young O R, Steffen W. The earth system: sustaining planetary life-support systems. In: Folke C, Kofinas G P, Stuart Chapin F, eds. *Principles of Ecosystem Stewardship*. New York: Springer, 2009
- 64 Lockie S. A better Anthropocene? *Environ Sociol*, 2017, 3: 167–172
- 65 Zipper S C, Jaramillo F, Wang - Erlandsson L, et al. Integrating the water planetary boundary with water management from local to global scales. [Earths Future](#), 2020, 8: e2019EF001377
- 66 Sena M B, Costa L, Leitão A, et al. The United Nations SDG13 and the EU27 countries performance: a comparative analysis. [Environ Dev Sustain](#), 2024, doi: [10.1007/s10668-024-05057-8](#)
- 67 Fischer-Kowalski, M., Haberl, H. *Socioecological Transitions and Global Change: Trajectories of Social Metabolism and Land Use*. Cheltenham and Northampton: Edward Elgar Publishing, 2007

- 68 UNESCO. The Precautionary Principle. World Commission on the Ethics of Scientific Knowledge and Technology, 2005
- 69 Haraway, D. Staying with the Trouble: making Kin in the Chthulucene. Durham: Duke University Press, 2016
- 70 Steffen W, Rockström J, Richardson K, et al. Trajectories of the earth system in the Anthropocene. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 8252–8259
- 71 Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399: 429–436
- 72 Lovelock J E, Margulis L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. *Tellus A-dynamic meteor oceanography*, 1974, 26: 2–10
- 73 Yang Y, Donohue R J, McVicar T R. Global estimation of effective plant rooting depth: implications for hydrological modeling. *Water Resour Res*, 2016, 52: 8260–8276
- 74 McInerney F A, Wing S L. The paleocene-eocene thermal maximum: a perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2011, 39: 489–516
- 75 IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- 76 Tran T C, Ban N C, Bhattacharyya J. A review of successes, challenges, and lessons from Indigenous protected and conserved areas. *Biol Conservation*, 2020, 241: 108271
- 77 Marvin S, Bulkeley H, Mai L, et al. Urban Living Labs: Experimenting with City Futures. London, New York: Routledge, 2018
- 78 Pearce W, Niederer S, Özkula S M, et al. The social media life of climate change: platforms, publics, and future imaginaries. *WIREs Clim Change*, 2019, 10: e569
- 79 Ismael D. Immersive visualization in infrastructure planning: enhancing long-term resilience and sustainability. *Energy Efficiency*, 2024, 17: 83
- 80 Cherif E, Hell M, Brandmeier M. DeepForest: novel deep learning models for land use and land cover classification using multi-temporal and -modal sentinel data of the Amazon basin. *Remote Sens*, 2022, 14: 5000
- 81 Verones F, Moran D, Stadler K, et al. Resource footprints and their ecosystem consequences. *Sci Rep*, 2017, 7: 40743
- 82 Stern N. The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge: Cambridge University Press, 2006
- 83 Kramm M. When a river becomes a person: a rights-based approach to protecting the Whanganui River. *J Human Rights Environ*, 2020, 11: 203–222
- 84 Hochrainer-Stigler S, et al. Evidence of economic benefits from proactive disaster risk management. *Intl J Disaster Risk Reduc*, 2020, 51: 101764
- 85 Li X, Feng M, Ran Y, et al. Big Data in Earth system science and progress towards a digital twin. *Nat Rev Earth Environ*, 2023, 4: 319–332
- 86 Rigaud K K, et al. Groundswell: preparing For Internal Climate Migration. Washington D.C.: World Bank Group, 2018
- 87 Couldry N, Mejiyas U A. The Costs of Connection: how Data Is Colonizing Human Life and Appropriating It for Capitalism. New York: Stanford University Press, 2019
- 88 Beck S, Jörgensen P S, Niewöhner J, et al. The Anthropocene as a boundary concept: from scientific debate to social accountability. *Anthropocene Rev*, 2021, 8: 134–156
- 89 Latour B. Facing Gaia: Eight Lectures on The New Climatic Regime. New York: John Wiley & Sons, 2017
- 90 UNESCO. Reimagining Our Futures Together: A New Social Contract for Education. International Commission on the Futures of Education, 2021
- 91 Brondizio E S, O'brien K, Bai X, et al. Re-conceptualizing the Anthropocene: a call for collaboration. *Glob Environ Change*, 2016, 39: 318–327
- 92 Sterling S. Assuming the future: repurposing education in a volatile age. In: Jickling B, Sterling S, eds. Post-Sustainability and Environmental Education. London: Palgrave Macmillan, 2017
- 93 Radakovic N. Transdisciplinarity and the curriculum: reading UNESCO's "Reimagining Our Futures Together" with transdisciplinarity in mind. *Encounters*, 2023, 24: 195–209
- 94 Jasanoff S. The Ethics of Invention: Technology and The Human Future. New York: W.W. Norton, 2016
- 95 Vohland K, Land-Zandstra A, Ceccaroni L, et al. The Science of Citizen Science. London: Springer Nature, 2021
- 96 Howson P, Oakes S, Baynham-Herd Z, et al. Cryptocarbon: the promises and pitfalls of forest protection on a blockchain. *Geoforum*, 2019, 100: 1–9
- 97 Biermann F, Oomen J, Gupta A, et al. Solar geoengineering: the case for an international non-use agreement. *WIREs Clim Change*, 2022, 13: e754
- 98 Dryzek J S, Pickering J. The Politics of the Anthropocene. Oxford: Oxford University Press, 2019
- 99 Bäckstrand K, Kuyper J W, Linnér B O, et al. Non-state actors in global climate governance: from Copenhagen to Paris and beyond. *Environ Politics*, 2017, 26: 561–579
- 100 O'donnell E L, Talbot-Jones J. Creating legal rights for rivers: lessons from Australia, New Zealand, and India. *Ecol Soc*, 2018, 23: 7
- 101 Spijkers O. The Urgenda case: a successful example of public interest litigation for the protection of the environment? In: Voigt C, Makuch Z, eds.

Courts and the Environment. London: Edward Elgar Publishing, 2018

- 102 Mehling M, van Asselt H, Das K, et al. Designing Border Carbon Adjustments for Enhanced Climate Action. *Clim Strat*, 2017, 13: 433–481
- 103 Young O R. Constructing the “New” Arctic: the future of the circumpolar north in a changing global order. [Kontury glob transform-polit èkon pravo](#), 2019, 12: 6–24
- 104 Biermann F. The Anthropocene: a governance perspective. *Anthropocene Rev*, 2021, 8: 31–46
- 105 Ostrom E. Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. [Glob Environ Change](#), 2010, 20: 550–557
- 106 Kim R E, Bosselmann K. International environmental law in the Anthropocene: towards a purposive system of multilateral environmental agreements. *Trans Environ Law*, 2015, 4: 285–309
- 107 Malm A. *How to Blow Up a Pipeline*. London: Verso Books, 2021
- 108 Bai X, van der Leeuw S, O’Brien K, et al. Plausible and desirable futures in the Anthropocene: a new research agenda. [Glob Environ Change](#), 2016, 39: 351–362

Summary for “人类世科学: 研究地球与人类共同未来的科学”

Anthropocene science: the science of shaping Earth's and humanity's interconnected future

Cong-Qiang Liu^{1*}, Chuanglin Fang² & Xiaoling Zhang^{3,4}

¹ School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

³ Sustainability X-Lab, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

⁴ Department of Real Estate & Construction, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

* Corresponding author, E-mail: liucongqiang@tju.edu.cn

The Anthropocene, an epoch defined by humanity's dominance over geological processes, was proposed by Paul Crutzen in 2000. It erases the divide between humans and nature, with the Anthropocene Working Group pinpointing the mid-20th century as its start. This era is marked by escalating plastic pollution, fossil fuel use, and urbanization, reflecting crises like climate change, biodiversity loss, and nitrogen cycle disruption. Human activities have surpassed Earth's planetary boundaries, while geophysical and socio-technical systems interact nonlinearly—e.g., Amazon deforestation disrupting water cycles and amplifying global warming. Ethically, neoliberal frameworks obscure inequities: the Global South endures 85% of plastic pollution despite minimal waste production, and Arctic Indigenous communities lose land without redress. Traditional disciplines fragment solutions—climate economics prioritizes carbon pricing over water crises, urban planning promotes green tech yet ignores systemic flaws. To address this, the paper advocates Anthropocene Science, an interdisciplinary framework blending Earth system modeling, socio-technical analysis, and ethics to balance ecological resilience and social justice, aiming to govern planetary tipping points and resolve the “development-stability” paradox.

Anthropocene science is built on three pillars: the Planetary Boundaries theory outlines nine thresholds for Earth's systems (e.g., climate change, ocean acidification), stating that surpassing them triggers irreversible tipping points. The Socio-Technical Transition theory exposes institutional lock-ins like fossil fuel subsidies blocking low-carbon transitions and car-dependent urban sprawl or industrialized agriculture as path dependencies. The Deep Time Ethics framework expands moral responsibility to geological timescales, requiring intergenerational ethical assessments for nuclear waste and gene-drive tech. The core research of the Anthropocene has three dimensions: (1) Earth system critical dynamics, using models like CLIMADA-ACE to show feedback loops such as Arctic tundra deforestation – wildfire – methane release. Simulations reveal global warming melts Arctic ice, accelerating temperature rise from ice-albedo decline; (2) Breaking socio-technical lock-ins, suggesting a decision-making empowerment mechanism combining participatory action research (PAR) and digital twin technology; (3) Planetary governance innovation, criticizing carbon offset mechanisms' neocolonial tendencies and building an Earth digital twin system with satellite data and ethical constraints to simulate cascading effects like coral reef degradation causing fisheries collapse.

Research on the “Five-Dimensional Lens” methodology integrates diverse approaches: (1) merging deep-sea sensors, remote sensing, and social media analysis to map planetary health; (2) combining Earth system and agent-based models to project climate impacts; (3) using ethnography and blockchain platforms to democratize knowledge; (4) developing AI-driven climate conflict alerts with GIS maps of displaced populations for preventive governance. This framework blends quantitative and qualitative methods to analyze Earth system tipping points, address socio-technical power inequities, and promote governance aligning planetary boundaries with social justice. Its application spans scales—from microplastic migration to planetary biogeochemical cycles—advancing Anthropocene science toward actionable solutions.

Anthropocene science proposes a major change in Earth's governance, requiring a shift in knowledge and education to foster planetary citizens with a deep understanding of Earth systems. It suggests a new governance model that combines education, institutions, and technology, known as the “triple helix” model. Innovative measures include a planetary parliament giving veto power to indigenous groups, open-source geoengineering to counter corporate monopolies, and ethical imperatives prioritizing justice in planetary governance. The paper also promotes “deep-time ethics” to ensure fairness across generations, particularly in decisions about nuclear waste and synthetic biology. Anthropocene science redefines sustainability as essential for the survival of civilizations, not just a technological issue. It advocates for a “safe operating space” for planetary life, based on Earth's regenerative limits, and envisions a future where humanity and nature coexist harmoniously.

Anthropocene science, earth-human coevolution system, natural-social-technical systems, planetary governance, deep time ethics, five-dimensional lens methodology

doi: [10.1360/CSB-2025-0382](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0382)