

迈向行星工程: 地球系统工程学的学科构建与实践路径

刘丛强

天津大学地球系统科学学院, 天津 300072

E-mail: liucongqiang@tju.edu.cn

1 引言: 从被动适应到主动塑造——迈向行星工程的时代必然

作为新的地质时代概念,“人类世”既表明人类活动会在地层记录中留下清晰印记,更意味着人类文明历程与地球系统演变间的结构性耦合持续加深^[1,2]。全球变暖、生物多样性锐减、污染物质累积以及淡水循环格局改变等现象,并非孤立的环境事件,而是通过地球系统内部复杂的理化与生物过程互动,形成级联效应,逐步演化为高度非线性的“行星尺度危机复合体”^[3-6]。在这一跨尺度、强耦合的复杂背景下,人类现有的认知与治理体系暴露出明显的“系统性认知赤字”,即地球系统科学精于机理解析但整合设计能力不足,工程学擅长局部优化但缺乏全局视角,社会科学对制度与治理的探讨常跟不上快速演变的物理现实,知识结构与行动机制的割裂,使我们难以有效应对关乎文明长期存续的系统性挑战。

长期主导全球环境治理议程的“减缓-适应”二元范式,在应对上述愈发突出的系统性危机时,其内在局限性逐渐显现^[7]。该范式试图通过减排来削弱风险驱动因子,并辅以社会经济层面的适应性调整来缓冲已发生的冲击。然而,在人类世背景下,地球系统非线性风险的快速累积,使这一治理路径所隐含的结构性缺陷愈发难以回避。其中,一个突出的问题是时间尺度错配。减排行动往往受到技术路径选择、制度安排以及既有经济结构惯性的多重制约,其实际成效往往滞后于地球系统中某些临界过程可能被触发的关键时间窗口,从而在客观上放大了潜在风险窗口^[8,9]。与此同时,许多适应策略仍建立在渐进、连续变化的假设之上,这种线性思维假设在面对系统突变或状态跃迁时显得力有不逮,甚至可能陷入难以摆脱的“适应性陷阱”之中。更为重要的是,在缺乏系统性思维与全局视角时,分散在不同行业和区域的部门化举措,往往难以识别更高层级上的耦合张力,进一步诱发新的非预期危机。例如,以固碳为主要目标的大规模造林,在特定区域内可能同时对水资源安全、粮食生产以及地表能量平衡产生复杂且相关交织的影响^[10,11]。因此,在这一背景下,



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。

仅依靠对既有范式框架的局部修补,已难以有效应对指数级演化的系统性威胁,从认知逻辑到实践路径的深刻革命势在必行。

在此背景下,人类文明事实上正处在一个需要重新审视自身角色的历史节点上。当人类活动已经成为驱动地球系统演变的重要地质营力时,继续以“最小干预”为导向的被动适应逻辑,本身也构成一种具有深远且难以预判后果的作为。这一现实促使人类社会有必要完成一次根本性的范式跃迁:从将人类自身视为地球系统的“乘客”或“外部扰动者”,转向将其理解为在严格约束条件下地球系统的“共同进化者”与“管家”。围绕这一角色重构,逐步孕育出一项面向行星尺度的整体性实践构想——行星工程(地球系统工程)。其核心在于,在最严谨的科学认知和工程伦理约束下,对高度耦合的社会-技术-生态系统进行有意识、可反思且具有可逆性的适应性管理与系统再设计,从而在“行星边界”所界定的安全空间内,引导人类文明走向更加可持续且更具韧性的演化路径。

为推动“行星工程”从概念愿景走向可操作的实践,亟需一门能够承载行星尺度复杂性的整体性学科。基于此,文章提出并系统论证了“地球系统工程学”的学科框架。该学科以行星尺度的社会-技术-生态复合系统为研究对象,强调系统科学、前沿工程、数据科学与治理伦理的深度融合,旨在形成一种面向复杂系统调控的新型交叉学科范式。在功能定位

引用格式: 刘丛强. 迈向行星工程: 地球系统工程学的学科构建与实践路径. 科学通报, 2026, 71: 3614–3624

Liu C-Q. Toward planetary engineering: discipline building and practice pathways for Earth system engineering (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 3614–3624, doi: [10.1360/CSB-2025-5910](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5910)

上,地球系统工程被视为行星工程的认知引擎(发展系统理解与预测工具)、设计工坊(创制调控与修复技术体系)与治理实验室(探索新型制度与伦理框架)。围绕这一总体构想,文章拟在后续章节中澄清相关核心概念及其理论基础,构建多维度的学科架构,并进一步梳理关键挑战,勾画从理论构建、技术研发、区域与全球层面示范,再到制度化治理的渐进式实践路径,以期人类社会实现从被动适应走向主动塑造的文明转型提供坚实的学科基础与行动指南。

2 学科本质与定位

2.1 核心定义

地球系统工程与管理的概念最早由美国环境科学家Braden R. Allenby于21世纪初提出^[12,13]。在其早期论述中,该概念主要指通过研究和实践人类技术系统及其与自然系统的关联要素,在满足社会所需功能的同时,对高度耦合的自然系统动态实施更加主动的管理。这类自然系统涵盖范围较广,既包括元素(如碳、氮、硫等)循环过程,也涉及重要栖息地以及大气和海洋系统。其核心观点认为:不需要完全消除扰动,而是尽可能降低非计划性或不良扰动对系统稳定性和长期运行所带来的风险与影响规模。

地球系统工程随后在美国弗吉尼亚大学、康奈尔大学等美国大学以及英国纽卡斯尔大学得到研究发展,但在中国至今并没有相应的系统研究行动和机构。鉴于国际国内至今没有从学科角度系统深入开展地球系统工程有关学科的研究,本文提出构建“地球系统工程”学科,系统规划和构建这门新兴交叉学科的理论框架、学科属性、研究方法和人才培养模式,并对其给出如下定义:地球系统工程是一门以地球系统(地球自然系统和人类社会的复合体)为研究对象,重点关注如何通过跨学科、系统化且符合伦理约束的设计、干预与管理手段对研究对象的关键过程与状态进行有意识的调控,以维护或恢复地球系统的健康、韧性与可持续性的交叉性应用学科。

2.2 学科属性

地球工程学的学科属性可以从以下四个方面进行概述。

首先是交叉融合性。地球系统工程本质是一门交叉学科,并不是既有学科的自然延伸。地球系统工程的发展依赖地球科学、生态学、工程学、信息科学、社会科学与人文伦理学的深度整合与协同创新。需要强调的是,这种交叉并非简单意义上的概念和知识拼接,而是在理论框架、研究问题设定与方法路径上实质性打通不同学科边界,围绕复杂问题的跨学科协同应对,形成新的综合性理论框架和方法论。

其次,系统导向性是该学科区别于传统工程学的重要特征。地球系统工程以整体论和系统思维为基本方法论,关

注多尺度、多要素之间的非线性耦合,注重从全局视角理解系统行为及其随时间的演化路径。在这一取向下,研究重点不再局限于单一过程或局部单元的优化,而是力图在不确定性条件下把握系统整体行为,为跨部门、跨尺度的决策提供连贯、稳健的系统依据。

再次,设计干预性体现了该学科鲜明的工程实践导向。相较于以被动“认知-适应”为主的传统研究范式,地球系统工程转向以“诊断-设计-干预-反馈”为核心的工程化流程。在这一过程中,科学认知并不止步于机理揭示与问题诊断,而是通过工程化设计在迭代的干预-反馈中不断优化调整。这种转向让科学认知和社会实践间的联结更加紧密。

最后,规范价值性为地球系统工程划定了不可忽视的约束边界。该学科在研究与实践过程中内嵌明确的价值取向,始终将“行星健康”和长期“可持续性”作为终极目标,确保所有工程设计和干预行动都在严格的伦理原则约束下。这一属性要求在论证技术可行性的同时,审视公平性、责任分配以及潜在的代际影响,避免因短期效率或局部利益而损害地球系统的长期福祉。

2.3 学科边界与关联

在学科谱系中,地球系统工程既与现有学科领域保持紧密联系,又与他们存在明确区别。

地球系统科学为地球系统工程奠定了不可或缺的认知基础。地球系统科学通过揭示气候反馈循环、生物地球化学循环以及人类活动与自然过程之间的相互作用机制^[3,14,15],形成了理解地球系统行为的科学认知。地球系统工程则在此基础上,进一步聚焦于如何将这些科学认知转化为对复杂的地球系统的工程化设计、适应性干预措施和管理方案。前者是后者的科学基础,提供系统分析与预测工具;后者是前者的工程延伸与治理实践,致力于将科学认知转化为实质性解决方案。从地球系统科学到地球系统工程,实现了由理解“地球系统如何运行”到“在特定约束下应当如何介入”的跨越,在功能上也形成从系统理解到系统改造的“知识-行动”正向链条。同时,地球系统工程实践反馈地球系统科学理论,实现反向优化,形成闭环演进机制。

环境工程、土木工程等传统工程学科为地球系统工程提供了重要的技术工具和工程经验。对于特定子系统或工程问题,如废水处理、结构抗震或土壤固化等^[16-18],传统工程学科能够提供成熟的解决方案。地球系统工程并不试图取代这些学科,而是大尺度上承担系统集成和协同优化的角色,负责评估传统工程措施在区域乃至行星尺度上的联动效应与潜在权衡,获取系统最优方案,为传统工程学科提供全局视野和系统理论。

狭义的“地球工程”通常特指太阳辐射管理等宏观气候干预技术,也被视为地球系统干预的一个技术选项^[19]。相较之下,地球系统工程被构想为一个更高层次、更为全面的学

科范畴。它将各类技术方案置于社会、经济、伦理和治理等更广阔的系统背景中加以设计与运用,不仅关注技术本身的可行性,更注重不同利益主体间的协作机制、风险分担机制以及长期适应性。这种差异使地球系统工程学的研究范围覆盖了从局部工程实践到行星尺度系统调控的各个领域。

2.4 核心本质:“人类世”元问题的应答范式

从本质上看,地球系统工程学既非源于单项技术突破,也不是传统学科的线性外延,而是对“人类世”这一元问题的系统性回应,即在人类已深度嵌入地球系统演化过程的条件,如何组织知识、技术与制度,引导社会-生态-技术耦合系统向更加安全、公正与更具韧性的未来演进。其核心目标在于诊断地球系统状态并在行星边界约束内设计干预路径,实质上体现为对人类世地球的有意识、负责任的伦理再设计。

更进一步,这一学科表现出三方面的核心转向。首先是研究主体的转向,从以客体为中心的研究,转向承认人类主体介入的研究框架,把人类社会行为本身视为系统演化的一部分;其次是问题解决到系统设计的转向,从针对单一问题的修补式应对,转向以系统健康与韧性为目标的整体设计;最后是价值转向,从传统意义上的强调价值中立(value neutrality)的技术理性转向明确承认价值负载(value-laden),将伦理、正义、公平以及代际责任视为研究和实践不可分割的组成部分。

2.5 战略定位:国家与全球可持续发展的核心枢纽学科

基于上述学科本质,地球工程学的定位是在国家长期发展与全球治理体系中发挥战略性枢纽作用的关键学科领域。其价值并非体现在单一领域的技术突破,而是体现在其能够围绕认知、技术、治理与教育等多个层面,推动对应行星尺度挑战能力的系统性重构。

在认知层面,地球系统工程学被视为知识整合的熔炉,着重发展面向“社会-生态-技术”的耦合理论与分析方法,打破自然科学与社会科学之间的百年分野,为理解气候变化、生物多样性丧失等复合地球系统危机提供统一且可操作的分析框架,为系统性决策奠定更为坚实的知识基础。在技术层面,它是范式创新的驱动引擎,将“地球系统影响”与“行星边界”约束嵌入技术研发核心,推动技术范式从“高效排放”自然过渡到“主动负排放”,引导基础设施从“抵御自然”的被动防御模式,逐步转向“与自然协同”的适应性设计,使科技创新直接服务于地球系统安全。在治理层面,地球系统工程学被构想为一种全球制度实验室,为全球公域管理和地球系统工程类技术,提供探索新型、多层级协作与责任分担机制的试验场,补充和拓展以国家为中心的传统治理模式。在教育层面,该学科通过跨学科、项目导向与伦理嵌入的培养模式,

推动高等教育从强调单一专业能力,转向培育具备系统整合与复杂问题应对能力的复合型人才。

综上,地球系统工程学的战略枢纽作用体现在其能够协同赋能知识生产、技术创新、制度设计与人才培养,为文明在“人类世”中实现安全、公正与繁荣的转型,提供不可或缺的支撑。

3 核心知识体系

3.1 支撑学科范式理论基石

地球系统工程学的理论体系是由三个相互关联、功能互补的理论支柱共同支撑。这三者分别从系统认知、工程实现与规范约束等不同方向,为学科开展行星尺度的分析、设计与实践行动提供基础理论支撑,最终形成具有内在一致性的统一理论框架。

行星系统认知与调控理论(Theory of Planetary System Cognition and Steering)是地球工程学的科学根基。该理论关注的核心问题是如何在明确考虑人类干预情景的前提下,理解、模拟并预测地球系统的整体行为。与早期以自然过程为主导地球系统科学相比,这一理论更加强调将人类社会经济代谢过程(物质与能量流)视作系统演化的重要驱动力,并系统揭示其与地球生物和地球化学循环之间的双向耦合与反馈机制。在此理论框架下,关键科学任务不仅包括对关键节点与临界点的识别,也涉及在高不确定性情境中发展具有可操作性的鲁棒性决策理论,以及构建能够刻画社会-气候相互作用的耦合模型^[20-22]。相关研究往往需要整合复杂系统科学、控制论和非平衡态热力学等理论工具,并依托先进的地球系统模拟与数据同化技术加以实现。

可持续性系统设计与工程实现理论承担着将抽象的可持续性目标转化为可被工程化实施的系统设计原则和方法的任务,是地球系统工程学技术方法论的核心组成部分。该理论融合了生态工程、工业生态学与系统设计理论等多方面成果^[23]。该理论重点关注如何在动态环境条件下仍能持续提供关键生态系统服务(如碳封存、水源涵养和生物多样性支持等)且具备内在韧性的社会-技术-生态复合系统。在方法路径上,该理论倡导从传统的“生命周期评估”进一步延展到“系统生命周期设计”,即在方案构思阶段即统筹考虑系统全生命周期与地球系统物质、能量交换过程^[24],并围绕多目标权衡优化、自适应与自修复工程设计等关键问题,在区域尺度上实现能源、水、食物与废弃物等子系统的协同整合。

行星尺度治理与伦理责任理论则为地球系统工程学提供了必要的规范框架与风险约束。该理论聚焦于行星尺度工程干预所引发的治理、伦理与责任问题,尤其是在应对全球集体行动困境的背景下,技术本身可能引发新的治理、伦理和分配正义与制度风险。该理论的核心目标在于构建覆盖知

识生产、技术评估、部署决策、运行监测以及责任追溯等环节的适应性行星治理体系。具体议题包括：为高风险技术（如二氧化碳移除和太阳辐射管理）设计国际授权与监测机制，明确当代作为“行星受托人”对未来世代所承担的伦理责任，以及探索包容多元文化背景的全球知识共创和公民审议机制，以增强相关决策的民主正当性与社会合法性。该理论支柱通常需要综合风险治理、全球环境法、责任伦理、机制设计和协商民主等领域的最新研究进展。

总之，这三大理论支柱并非彼此孤立，而是在功能上相互嵌套：行星系统认知与调控理论主要回答“在给定条件下能够做什么”，可持续性系统设计与工程实现理论聚焦“如何将目标转化为可实施方案”，而行星尺度治理与伦理责任理论则进一步回应“为何而做”以及“由谁承担责任”等规范性问题。三者的协同作用，使地球系统工程得以在科学性、工程性和社会规范性之间保持内在一致，为地球系统工程学的发展、壮大奠定坚实的理论基础。

3.2 实践场域：五大关键子领域及其协同网络

在上述三大理论支柱的支撑下，地球系统工程学的实践聚焦于五个相互关联的关键子领域。这些子领域并非彼此独立的学科分支，而是在问题导向下形成了一个动态协同的行动网络，共同构成应对“人类世”挑战的实践场域。

3.2.1 子领域一：气候系统引导工程

该子领域以大气温室气体浓度与全球能量平衡为核心调控对象，其基本目标是在降低长期气候风险的同时，更有效地管理极端气候事件相关风险。在实践层面，该领域主要围绕两类核心任务：一是致力于研发高效、可持续且可规模化的二氧化碳移除技术路径（如直接空气捕集、增强风化等）^[25,26]，并同步应对由此引发的资源竞争、监测与核查以及长期封存可靠性等挑战；二是在最严格的治理与伦理框架约束下，对太阳辐射管理等潜在干预技术开展基础科学研究与情景模拟，系统评估其在不同情境下可能产生的潜在气候效应、副作用以及所谓“终止效应”风险，为极端情景下应急决策预案提供科学依据^[27,28]。在实际操作中，该领域往往与生态系统工程（如土地利用及其变化）、代谢系统工程（尤其是能源供应结构）紧密交织，并高度依赖信息工程和治理框架的共同支撑^[29,30]。

3.2.2 子领域二：生态系统修复与强化工程

该子领域更侧重于对通过主动调节生态系统结构、过程与服务功能，应对环境变化条件下生态系统稳定性下降的问题。这一取向已超出传统“保护-恢复”框架，更强调在持续变化的环境条件下，设计并构建具备更高韧性的“新型生态系统”。相关实践包括发展基于生态学原理的工程化修复工具与技术组合，构建能够在一定程度上同时提升碳汇能力、生物多样性、水文调节与社区福祉等的多功能复合系统（如混农林系统和滨海湿地综合工程等）^[31-33]。同时，相关实践也涉及

对营养盐循环的精准调控，以减轻污染负荷并探索将养分回收转化为资源的可行路径^[34]。该领域面临的关键挑战包括，如何可靠量化生态系统服务的增量价值，以吸引长期且可持续的投资；如何识别并管理工程干预可能带来的中长期生态风险^[35,36]。在整体实践中，该子领域既是实现气候目标的重要自然途径，也为社会-技术代谢系统提供关键支撑，并高度依赖信息工程提供的生态模型和遥感监测能力。

3.2.3 子领域三：社会-技术代谢系统重构工程

该子领域则将关注焦点转向城市与工业系统中物质和能量流动网络的系统性重构，其目标在于推动当前以线性消耗为主的人类社会代谢模式，与地球生物、地球化学循环实现更为紧密的再耦合，逐步形成低废弃、可再生的生产和消费体系^[37,38]。相关实践通常通过物质流分析与系统优化方法，探索产业共生模式和城市代谢闭环结构，使废弃物和余能在更多情境下被再利用；同时，对能源、水、交通和建筑等基础设施进行重新设计，使其在满足功能的同时具备低碳化、分布式、自适应以及与自然过程协同发展的特征，如“海绵城市”、净正能耗建筑片区等^[39,40]。该领域的主要难点在于突破既有基础设施布局和制度安排所形成的锁定效应与制度惯性，并设计出能够有效激励循环转型的经济与政策工具。作为实现深度减排的重要抓手，它对土地利用和生态格局会产生深远影响，同时也是信息与模拟工程开展复杂系统优化的关键应用场景之一。

3.2.4 子领域四：地球系统信息与模拟工程

该子领域旨在建设高保真度、可多方交互的“地球数字孪生”体系，作为跨领域共享的认知平台与决策基础设施。这一目标需要发展新一代高分辨率地球系统模型，将自然过程和社会-生态过程在更大程度上加以耦合。同时，还需要整合空-天-地-海观测网络与物联网数据，并借助人工智能方法推进实时数据同化，使数字孪生系统尽可能同步反映物理世界的演化状态^[41-43]。面向不同层级和类型的决策主体，还需要开发可视化程度较高的交互式决策支持平台，用于方案比选、风险沟通与情景推演。该子领域面临的挑战不仅来自算力需求和海量数据处理压力，也包括如何在模型复杂性与决策可理解性之间取得平衡，以及围绕全球数据共享与使用规则所引发的治理问题。该子领域为前述三个工程取向子领域提供基础性的“洞察”与“预见”支持，是各类规划、设计、评估与优化活动的共同支撑平台。

3.2.5 子领域五：行星工程治理与政策设计

该子领域聚焦于为行星尺度干预活动制定合理的规则、制度与运行流程，以在更大范围内维护相关行动的合法性、公平性、透明性与有效性。具体而言，其任务包括根据不同技术的风险特征和空间影响尺度，设计从社区到国家再到国际层面的多层级、分类治理框架；探索并试验能够推动转型的政策工具，如碳汇认证制度、监管沙盒机制和生态补偿安排等^[44,45]；以及讨论是否如何建立常设化的国际科学评估与

咨询机构,以加强跨国合作与知识共享。该领域的核心难题在于如何在复杂多变的全球地缘政治格局中,逐步积累必要的信任基础,并形成持续的合作机制。它与其他各子领域划定行动边界和“游戏规则”,是各类活动得以在制度上获得支持和约束的前提条件,同时又必须根据其他子领域积累的实践经验不断调整和演进。

从整体结构上看,这五大子领域可被理解为一个具有内外层次的“实践同心圆”结构:地球系统信息与模拟工程构成内层的赋能基础,为认知和决策提供支撑;气候系统引导工程、生态系统修复与强化工程以及社会-技术代谢系统重构工程构成中层的主要行动空间;而行星工程治理与政策设计则形成外层的规范与保障框架。在三大理论支柱的贯通作用下,这一多层协同结构共同指向对“人类世”复杂挑战的综合性应对(图1)。

4 研究方法与实践路径:从诊断到全球治理

4.1 集成研究方法:一个多层嵌套的框架

鉴于研究对象本身具有高度复杂性,研究目标内嵌明确的规范与价值要求,地球系统工程学难以沿用单一学科的经典研究路径,有必要发展一套能够同时容纳计算分析、工程实践与治理评估的集成研究方法论体系。该体系并非以某一固定方法为核心,而是以多层嵌套、持续迭代为基本特征,形成从定量分析到情景实践,再到制度与规范层面的反思与评估的研究行动闭环。

(1) 核心层:系统建模、仿真与数字孪生。核心层可被视为地球系统工程学的“计算实验室”,为复杂系统分析与虚拟实验提供基础支撑。其研究重点在于构建能够全面耦合社会、生态与技术过程的地球系统模型,以刻画人类活动与自然过程之间的动态互动关系。在具体实践中,人工智能与机器学习方法主要用于参数优化、因果结构识别以及替代建模,从而提升情景模拟与不确定性分析的效率与可扩展性。核心层的一个重要目标,是逐步发展具备高保真度、支持实时同步并允许许多主体交互的地球系统数字孪生平台。该平台的核心功能包括对历史事件的归因分析、对未来演化路径的情景探索,以及对潜在工程干预方案的风险的预演评估。

(2) 中间层:跨学科设计科学与转型实验。中间层承担着将模型分析结果转化为可操作行动方案的关键作用,是连接计算分析与实际行动的“设计界面”。在方法上,跨学科设计科学通常采用“系统架构-模块设计-集成评估”的循环流程,并结合系统动力学等方法,对区域乃至全球尺度系统开展结构性设计与方案比选。鉴于转型过程普遍伴随高度不确定性,转型实验与“生活实验室”模式在这一层面具有重要意义。通过在城市、工业园区或流域尺度构建实验场景,使研究人员、政策制定者、企业与社区共同参与技术与社会干预措

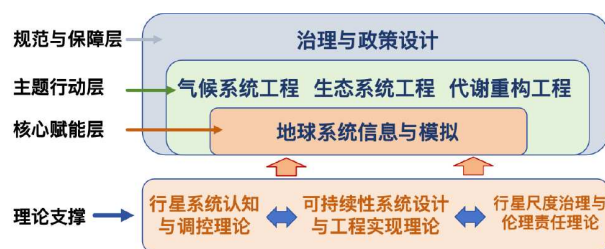


图1 三大理论支柱与五大子领域之间的关系。其中,五大子领域共同构成一个动态的“实践同心层”:信息与模拟工程提供核心赋能层;气候、生态、代谢三大工程构成主体行动层;治理与政策设计则作为外层的规范与保障层。它们在三大理论支柱的共同作用框架支撑下,协同应对“人类世”的复杂挑战

Figure 1 The relationship between the three core theoretical pillars and the five key sub-domains. The five sub-domains collectively form a dynamic “concentric sphere of practice”: information and Simulation Engineering constitute the inner enabling layer; the three engineering domains of Climate, Ecology, and Metabolism form the primary action layer; and Governance and Policy Design serves as the outer layer of normative guidance and safeguard. Operating within the overarching framework of the three core theoretical pillars, these layers synergistically address the complex challenges of the Anthropocene

施的测试与调整。该层面的产出不仅包括技术性验证,也涵盖制度创新与行为改变等社会层面的经验性知识,为后续规模化应用提供重要依据。

(3) 顶层:行星尺度技术评估与适应性治理研究。顶层方法论主要关注行星尺度工程实践所涉及的伦理审查与社会导航问题。顶层的核心任务在于发展具有包容性与前瞻性的参与式技术评估框架,使规范性考量能够在技术研发的早期阶段就被纳入决策过程。具体而言,这一层面强调在技术概念形成甚至在概念构想阶段,通过情景研讨、公民陪审团等方式,引入包括脆弱群体在内的多元利益相关主体,共同讨论技术发展的社会目标与伦理边界^[46-48]。与此同时,该层面还结合制度分析、机制设计与博弈论等方法,重点研究适应性治理机制的构建路径,例如探索能够随科学认知进展动态调整的“触发式”国际部署协议,或设计用于抑制投机行为的全球补偿机制,以应对具有全球外部性的技术风险。

需要指出的是,上述三层嵌套框架并不是一个线性推进的流程,而是一个动态迭代、双向反馈的有机整体。顶层治理需求塑造中间层实验的设计方向,中间层的实践数据反馈至核心层用于模型校准与优化,而核心层的模拟预测结果则为顶层决策提供依据(图2)。通过这种跨层级的持续互动,该方法论体系使地球系统工程学得以在科学严谨性、工程创造力与社会责任之间取得平衡,从而系统性地应对“人类世”所带来的治理挑战。

4.2 阶梯式实践路径:从区域原型到全球机制

鉴于地球系统工程实践涉及问题的复杂性、潜在影响



图2 地球系统工程的三层嵌套框架研究方法：顶层治理需求塑造中间层实验的设计方向，中间层的实践数据反馈至核心层用于模型校准与优化，而核心层的模拟预测结果则为顶层决策提供依据，构成一个相互反馈的相对完整的研究行动循环

Figure 2 The three-layer nested framework research methodology of Earth systems engineering: the governance demands of the top layer shape the design direction of experiments in the middle layer; practical data from the middle layer are fed back to the core layer for model calibration and optimization; and the simulation and prediction results from the core layer provide a basis for decision-making in the top layer, forming a relatively complete research-action cycle with mutual feedback

的深远性以及内在的全球属性，其推进路径过程难以通过一次性部署或单一尺度行动完成，需要遵循审慎、累积且渐进的实践逻辑。基于这一认识，本文提出“区域聚焦-跨域整合-全球规范”的三阶段实践路径，通过由局部探索逐步走向整体协同、由技术探索延伸至制度建构，推动形成具有可持续扩展能力的行星尺度行动体系。

(1) 第一阶段：区域综合解决方案示范区。在初始阶段，实践重点是在若干面临典型复合挑战、具备一定科研与治理基础且可能产生外溢效应的区域，探索建设“区域地球系统工程”示范区。这一阶段的其核心任务，并不在于追求技术方案的全面铺开，而是通过有限但系统的实践，验证干预路径的可行性。具体而言，包括构建覆盖陆-海-气-城系统的高分辨率诊断与数字孪生平台，以系统识别多重风险之间的耦合关系；围绕水、能源、碳、生态与城市系统等关键领域，设计并试点成组协同的工程方案；同时，在实践过程中搭建跨行政区、跨部门的临时性治理平台，在生态补偿、蓝碳交易与联合风险预警等方面开展制度层面的探索。通过这一阶段的积累，逐步形成具有可复制潜力的技术组合、治理模式与评估指标体系，为后续扩展提供经验与实证支撑。

(2) 第二阶段：跨区域/国家战略工程与知识网络扩展。第二阶段的重点转向对区域示范经验的系统整理与情境化应用，实现由单点试验向多点联动的拓展。一方面，将在示范区内逐步成熟的技术-治理组合推广至不同类型区域，并根据差异化的社会-生态条件进行必要调整，以增强方案的适应

性；另一方面，通过多边合作机制，在更大范围内开展相关技术包与治理模式的联合实践。同时，有必要同步建设面向全球的知识平台，对实践过程进行标准化记录、数据共享与比较分析，从中提炼既具有通用意义、又保留情境差异的经验原则与操作指南，为政策制定与工程实施提供参考。

(3) 第三阶段：全球公共品管理与治理机制成型。在前两个阶段积累实践与认知基础上，第三阶段旨在推动形成应对全球高风险挑战的、稳定的合作与治理框架。其核心任务包括：逐步建立全球尺度的碳移除方法学与认证体系，并与现有或新兴碳市场机制相衔接；围绕太阳辐射管理等高风险技术，构建明确决策程序、责任分配与监测核查规则的国际治理制度；以及将地球观测与数字孪生系统逐步发展为面向全体成员开放的全球公共基础设施，保障包括脆弱国家在内的各方能够平等获取必要的信息与分析工具。通过这一阶段的推进，地球系统工程有望由区域原型探索，逐步转化为具备制度化运行特征的全球公共品管理机制，为行星边界治理提供长期支撑。

4.3 贯穿实践路径的核心原则：学习、适应与公平

在地球系统工程的实践推进过程中，无论是在区域尺度的试点探索，还是在全球尺度的制度部署，均需要受到若干基本原则的持续约束。这些原则并非外加的规范性要求，而是在面对高度不确定性与多方利益交织的现实情境中逐步显现出的实践共识。首先，实践过程需要坚持审慎乐观与适应性管理原则。实践应在保持对系统转型目标雄心的同时，充分承认当前科学认知与预测能力的局限性。在这一前提下，工程干预更应被视为可调整的社会-技术实验，并嵌入持续反馈的闭环管理过程之中，根据实际结果不断修正策略重点，实现从以预测和控制为主导，向以学习和适应为导向的转变。其次，公正转型与普惠性分配构成获取社会支持与维持长期合法性的关键条件。相关实践需在设计初期就主动识别并矫正潜在的的不平等影响，保障受影响社区和脆弱群体在决策过程中的参与权，并通过收益分享、绿色就业等机制，使转型所带来的红利在不同群体之间得到更为公平的分配。公平性是行星尺度干预得以持续推进的重要基础。最后，开放科学与协同知识共创是降低系统性试错成本、加速全球学习进程的重要前提。通过开放共享研究成果、数据与实践经验，不仅有助于避免重复探索，也能够透明与互信的基础上，促进跨区域、跨部门的协作，为行星尺度问题的共同应对提供更加稳固的知识支撑。

5 学科发展脉络与三阶段路线图

5.1 学科演进脉络：从思想萌芽到建制化探索

从现有研究格局看，与地球系统工程领域相关的研究与实践工作，仍主要分散于不同科研机构与高校之中，尚未形

成边界清晰、范式稳定的独立学科体系^[12,13]。地球系统工程学仍处于新兴阶段,其学科内涵与发展路径有待进一步凝练与规范。本文首次提出地球系统工程学的学科概念,正源于人类社会对全球环境变化不断加深的反思与应对实践。

从历史脉络上看,这一演进大体可以区分为三个相互递进、但并非彼此割裂的阶段,其认知重心呈现出由局部性的“技术修补”逐步转向整体性“系统设计”的变化趋势。

较早阶段可概括为思想萌芽与争议聚焦期(20世纪70年代至21世纪初)。在全球变暖风险评估不断进行、国际减排合作前景尚不明朗的背景下,“地球工程”概念被提出,并逐渐进入科学讨论视野,其中具代表性的是平流层气溶胶注入等方案^[49,50]。这一阶段的研究多围绕太阳辐射管理展开,带有明显的“技术应急修复”取向,相关讨论主要集中于物理可行性及潜在效果评估层面,地球科学和社会科学之间的对话相对有限,因而常被视为应对气候风险的边缘性或补充性选项。

随着研究视角的拓展,地球工程研究进入概念拓展与系统认知期(约21世纪10年代)。随着“人类世”与“行星边界”等框架的提出与传播,地球工程相关研究开始被置于更广阔的地球系统背景下重新审视。研究对象由单一的太阳辐射管理,扩展至二氧化碳移除、生态系统工程等多种干预路径^[51-53]。与此同时,复杂系统科学、风险分析与治理研究等视角被逐步引入,使讨论重心不再局限于单项技术本身,而转向不同干预手段的组合效应、系统影响及其治理条件。在这一过程中,伦理与治理问题逐渐由外在约束转变为研究框架的内在组成部分,“地球系统干预”也随之成为更具包容性的概念表述。

近年来,逐步过渡到学科建制化探索期(约2020年代至今)。在全球碳中和承诺不断强化、极端气候事件频发以及相关技术逐步成熟的推动下,围绕地球系统工程的研究开始呈现出跨学科整合的趋势。然而,从整体上看,学科边界与方法体系仍不清晰,规范化、系统化的学科框架尚未完全建立,这也在一定程度上凸显了进一步推进学科建构的现实必要性。

5.2 未来三阶段发展路线图: 通向成熟的行星工程能力

在上述学科演进脉络的基础上,本文提出一个涵盖近、中、远期的三阶段发展路线图,旨在为地球系统工程学发展方向作出阶段性的展望。需要强调的是,这一路线图并非对学科演进的确定性预测,而是基于当前认知与实践条件,对其由探索走向成熟所需关键环节的概括性判断。

近期阶段(约2025~2035年)可视为学科发展的奠基期。这一阶段的重点不在于全面铺开实践,而在于通过理论整合与区域示范,逐步确立相对清晰的学科范式。可能的推进方向包括:通过报告或白皮书等形式系统梳理学科内涵与研究重点;在高等教育体系中探索设立跨学科培养项目;围绕若干关键问题启动针对性的研发计划,并在具备条件的区域开展示范性工程实践;同时,搭建有助于促进国际合作与规范讨

论的科研与治理平台,为后续扩展奠定基础。

中期阶段(约2035~2050年)可理解为学科发展的集成期,其特征技术能力与知识网络的协同扩展。随着科学认知的深化与工程经验的积累,部分关键技术与方法有望取得实质性进展,例如更高分辨率、全耦合的地球系统模型逐步成熟,二氧化碳移除等技术的成本与不确定性显著降低,区域与跨国层面的地球系统工程实验网络不断扩展,并在此基础上形成较为稳定的国际学术共同体与交流机制。

在远期阶段(2050年以后),地球系统工程学有可能逐步走向成熟,并嵌入全球治理体系之中。其基本愿景在于,将地球系统工程的相关理念、分析工具与制度安排,纳入应对全球环境风险的常态化机制。这一进程可能体现在多个方面,包括运行相对成熟的碳移除监测与市场体系,逐步形成针对高风险气候干预技术的国际法律与治理框架,使系统思维与地球系统影响评估成为公共决策的重要组成部分,并依托全球尺度的数字孪生基础设施,为行星层面的协同管理提供长期支撑。

6 人才培养与全球协作

6.1 核心理念: 从“专业人才”到“行星世代”的人才培养范式转型

地球系统工程学所面对的是高度不确定、强耦合且内嵌规范约束的行星尺度问题,其人才需求已难以通过传统以单一专业为中心的传统培养模式满足。随着问题尺度与复杂性的不断上升,未来更为迫切的需求,不再仅是某一领域的“技术专家”,而是能够在多重约束条件下进行系统整合与责任判断的复合型人才。本文将这一潜在所需的人才类型概括为具备系统意识与行星责任感的“行星世代”人才。这类人才不仅需要气候建模、生态设计和工程分析等具体领域具备扎实的专业素养,还应具备跨越技术、生态、经济、社会与政治等多个维度,对复杂问题进行综合权衡的能力,能够开展系统设计,并将行星边界与代际正义内化为基本的伦理准则。

从能力结构上看,“行星工程师”更接近一种“π型-双螺旋”的发展模式:纵向维度体现为对地球系统科学及工程或设计方法的深入掌握,横向维度则覆盖复杂系统理论、可持续性科学以及科技伦理与治理框架等关键知识领域。这两类能力并非彼此独立,而是在科学认知、工程实践与规范反思的持续互动中同步演进。相应的人才成长路径,也不宜将“硬技能”与“软能力”割裂对待,而应在“分析-建模-设计”与“协作-治理-伦理”两条螺旋中并行推进,使真实项目既成为技术训练的平台,也成为价值判断与责任意识逐步形成的重要场域。

6.2 教育体系的系统性创新

要实现上述能力目标,单纯依赖对现有高等教育体系的局部修补显然不够,有必要围绕若干关键支点推进系统性重

构。在教学组织逻辑上,需要从以学科知识传授为核心的课程结构,逐步转向以重大行星尺度挑战为主线的项目式学习模式,将知识模块化并嵌入问题求解过程之中,而非作为相互割裂的课程单元存在。同时,需要构建连接校园与现实世界的“行星实验室”网络,在国内具有代表性的生态与社会系统中设置实践锚点,并通过与全球关键区域的基地结成联盟,引入跨文化、跨区域的实践轮转机制。在这一过程中,传统的单一导师制也面临调整空间,可探索由不同学科背景专家共同组成的“导师组”模式,以更好地支撑跨学科研究与实践导向的学习过程。在评价体系中,更需要充分地认可团队协作成果、跨界创新能力以及实际社会影响,而非仅以单一学术指标作为衡量标准。此外,科技伦理、环境正义与历史反思等价值维度,应贯穿教学与实践的全过程,而非作为独立的附加课程。总之,上述路径共同指向一种沉浸式、跨学科且面向真实问题的教育方式,为培养能够应对行星尺度挑战的新一代研究者与决策者提供制度基础。

6.3 全球协作网络与中国的战略行动: 共建行星工程“公地”

作为一门面向行星尺度问题的公共性学科,地球系统工程学的发展离不开开放、互信且稳定的国际协作机制。在实践层面,可通过建立类似“国际行星工程教育联盟”平台,整合不同高校与研究机构的优势能力,逐步推动课程体系、学位结构与培养标准之间的对接,并通过联合课程、全球挑战赛等形式,促进跨国、跨学科的学习交流与协同设计。同时,有必要为青年研究者提供更连续国际合作通道。例如,通过设立面向青年学者的“行星世代研究计划”,支持跨区域轮岗与长期合作实践,并同步建设开放共享的地球系统工程数字知识公地,以降低参与门槛、提升资源可及性,使发展中地区的研究者也能够有效融入相关研究网络。

在这一进程中,中国具备成为重要公共品供给者的潜在条件。依托较强的制度动员能力、丰富的工程实践经验以及绿色转型需求,中国可探索设立面向行星尺度问题的国家级人才培养计划,支持跨学科领军人才成长;在国际层面,将相关研究与实践纳入南南合作及多边合作框架,推动联合研究与示范项目;同时,通过主办高水平国际会议与协作平台,在科学讨论与治理设计层面贡献具有普遍意义的中国经验与方案。通过这些方式,逐步推动行星工程相关知识与能力由“专属资源”向全球“公地”转化。

7 结论与倡议: 共同开启负责任的行星工程时代

7.1 核心结论: 一门应对“人类世”元问题的战略性学科

综合全文论述可以看出,地球系统工程学并非针对单一

环境问题提出的技术性对策,而是一种面向“人类世”挑战的战略性学科回应。其意义不仅体现在具体技术路径的拓展,更在于对认知方式、方法体系与制度安排的系统性重构。从研究对象与问题取向上看,该学科以社会-生态-技术复合系统为核心分析单元,强调在行星边界约束条件下,通过设计科学与适应性管理,引导地球系统朝向更安全、更具韧性且兼顾公平性的演化方向。与以往以单一部门或单项技术为中心的应对方式相比,这一取向更关注系统整体行为及不同干预手段之间的相互作用。在理论与实践层面,地球系统工程学以行星系统认知、可持续性系统设计以及行星尺度治理三大理论支柱为支撑,并通过气候系统引导、生态系统修复、社会-技术代谢系统重构、信息与模拟工程以及治理与政策设计等关键子领域加以落实。这一体系体现出应对逻辑由碎片化措施向系统性能力构建的转变,也为不同尺度、不同行动主体之间的协同提供了方案。进一步,学科实践路径本身并非追求快速铺开,而是遵循由区域探索逐步走向跨区域协同、最终形成全球协同的阶梯式逻辑。在这一过程中,面向未来培育具备系统视野与伦理责任的“行星世代”人才,不仅是教育议题,更构成支撑这一转型长期推进的关键性战略投资。

7.2 行动倡议: 面向多元主体的协作议程

地球系统工程学从理论构想走向现实,离不开不同社会主体之间形成相对清晰、相互支撑的协作格局。在这一进程中,科学共同体、公共部门、产业体系与公民社会所承担的角色并不相同,但又具有高度互补性。对于科研机构与高等教育体系而言,关键在于降低跨学科合作的制度成本,使联合研究与复合型人才培养逐步成为常态。这不仅涉及课程设置与组织方式的调整,还需要探索与之匹配的学位结构和评价机制,将数据、模型以及社会-生态影响评估系统性地纳入科研规范之中。政府部门与国际组织则在战略层面发挥着不可替代的引导作用。通过将地球系统工程相关议题纳入长期发展与风险治理框架,支持关键基础设施建设,并借助多边进程推动高风险技术的规范制定,可以为学科实践提供必要的制度环境与稳定投入。产业体系在这一协作网络中承担着连接认知与行动的重要角色。通过在公司治理与投资决策中引入行星边界与系统风险考量,引导资本流向具有净正效益的技术路径,并参与区域尺度的“生活实验室”实践,产业部门能够在转型过程中发挥实质性推动作用。

与此同时,公民社会在价值对话、公共监督与社会学习方面具有不可替代的作用。提升公众对相关技术与政策议题的理解能力,拓展参与不同层级决策过程的渠道,并对潜在的“漂绿”行为保持警惕,有助于增强行星工程实践的社会合法性与长期稳定性。

7.3 最终展望: 迈向一个共同进化的未来

从更长远的视角看, 当代人类正处于历史分叉节点: 一条可能的路径是延续既有工业文明的发展惯性, 在被动应对中承受行星尺度风险的不断累积; 另一条潜在路径则是在审慎与责任的前提下, 通过重构知识体系与治理范式, 对地球

未来进行有意识的塑造. 地球系统工程学为后者提供了一种系统化的思考框架: 在科学层面, 将人类活动明确纳入地球系统演化的内生变量; 在工程层面, 探索社会-生态-技术复合系统的协同演化路径; 在规范层面, 将伦理、公平与多层次治理需求嵌入决策与实施过程之中.

致谢 感谢国家自然科学基金(42293262)资助.

推荐阅读文献

- Lewis S L, Maslin M A. Defining the Anthropocene. *Nature*, 2015, 519: 171–180
- Waters C N, Turner S D. Defining the onset of the Anthropocene. *Science*, 2022, 378: 706–708
- Liu J, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317: 1513–1516
- Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity. *Nature*, 2009, 461: 472–475
- Gebrechorkos S H, Sheffield J, Vicente-Serrano S M, et al. Warming accelerates global drought severity. *Nature*, 2025, 642: 628–635
- Nie W, Kumar S V, Getirana A, et al. Nonstationarity in the global terrestrial water cycle and its interlinkages in the Anthropocene. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121: e2403707121
- Biesbroek G R, Swart R J, van der Knaap W G M. The mitigation-adaptation dichotomy and the role of spatial planning. *Habitat Int*, 2009, 33: 230–237
- Davis S J, Caldeira K, Matthews H D. Future CO₂ emissions and climate change from existing energy infrastructure. *Science*, 2010, 329: 1330–1333
- Riahi K, Schaeffer R, Arango J, et al. Mitigation pathways compatible with long-term goals. In: Shukla P R, Skea J, Slade R, et al., eds. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022
- Farley K A, Jobbágy E G, Jackson R B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Glob Change Biol*, 2005, 11: 1565–1576
- Kreidenweis U, Humpenöder F, Stevanović M, et al. Afforestation to mitigate climate change: impacts on food prices under consideration of albedo effects. *Environ Res Lett*, 2016, 11: 085001
- Allenby B. Earth systems engineering: the role of industrial ecology in an engineered world. *J Industrial Ecol*, 1998, 2: 73–93
- Allenby B R. Earth systems engineering: the world as human artifact. *The Bridge*, 2000, 30: 5–13
- Taylor R G, Scanlon B, Döll P, et al. Ground water and climate change. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 322–329
- Tchobanoglous G, Stensel H D, Tsuchihashi R, et al. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. New York: McGraw-Hill Education, 2014
- Augusti G. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. *Meccanica*, 1996, 31: 719–720
- Das B M. *Principles of Geotechnical Engineering-SI Version*, 7th Edition. Boston, MA: Cengage Learning, 1985
- Liu C Q, Li S L, Liu X Y, et al. Biogeochemical cycles in the Anthropocene and its significance (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2024, 31: 455–466 [刘丛强, 李思亮, 刘学炎, 等. 人类世生物地球化学循环及其科学. *地学前缘*, 2024, 31: 455–466]
- Reynolds J L. Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals. *Proc R Soc A*, 2019, 475: 20190255
- 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
- Haasnoot M, Kwakkel J H, Walker W E, et al. Dynamic adaptive policy pathways: a method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Glob Environ Change*, 2013, 23: 485–498
- Farmer J D, Hepburn C, Ives M C, et al. Sensitive intervention points in the post-carbon transition. *Science*, 2019, 364: 132–134
- Graedel T E, Allenby B R. *Industrial ecology and sustainable engineering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2009
- Zuo L, Huang B, Chen N, et al. Life cycle engineering and sustainable manufacturing for net-zero targets and environmental sustainability. *Resour Conserv Recycl*, 2025, 215: 108132
- Beerling D J, Reinhard C T, James R H, et al. Challenges and opportunities in scaling enhanced weathering for carbon dioxide removal. *Nat Rev Earth Environ*, 2025, 6: 672–686
- Kim D, Liu S, Devasagayam T, et al. Passive direct air capture via evaporative carbonate crystallization. *Nat Chem Eng*, 2025, 2: 736–746

- 27 Ming T, de_Richter R, Liu W, et al. Fighting global warming by climate engineering: is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change? [Renew Sustain Energy Rev](#), 2014, 31: 792–834
- 28 Zhang X, Fan Y, Tjiputra J, et al. Divergent impacts of climate interventions on China's north-south water divide. [Commun Earth Environ](#), 2025, 6: 736
- 29 Qiu L, He J, Yue C, et al. Substantial terrestrial carbon emissions from global expansion of impervious surface area. [Nat Commun](#), 2024, 15: 6456
- 30 Haberl H. The energetic metabolism of societies part I: accounting concepts. [J Ind Ecol](#), 2008, 5: 11–33
- 31 Jose S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. [AgroFor Syst](#), 2009, 76: 1–10
- 32 Duarte C M, Losada I J, Hendriks I E, et al. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. [Nat Clim Change](#), 2013, 3: 961–968
- 33 Barbier E B, Hacker S D, Kennedy C, et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. [Ecol Monogr](#), 2011, 81: 169–193
- 34 Robles Á, Aguado D, Barat R, et al. New frontiers from removal to recycling of nitrogen and phosphorus from wastewater in the Circular Economy. [Bioresour Tech](#), 2020, 300: 122673
- 35 Fu S, Zhang J, Li Y, et al. Environmental variables affect the effectiveness of ecosystem services of ecological restoration project: evidence from Xiangjiang River Basin-Dongting Lake. [J Cleaner Prod](#), 2025, 527: 146739
- 36 Li K, Liu J, Zheng H, et al. Quantifying realized ecosystem services from the supply-flow-demand perspective and understanding the management implications: a case study of the Chengdu Prefecture, China. [Ecol Indic](#), 2025, 181: 114337
- 37 Kennedy C, Pincetl S, Bunje P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. [Environ Pollut](#), 2011, 159: 1965–1973
- 38 Cao Z, O'sullivan C, Tan J, et al. Resourcing the fairytale country with wind power: a dynamic material flow analysis. [Environ Sci Technol](#), 2019, 53: 11313–11322
- 39 Brozovsky J, Gustavsen A, Gaitani N. Zero emission neighbourhoods and positive energy districts-A state-of-the-art review. [Sustain Cities Soc](#), 2021, 72: 103013
- 40 Griffiths J, Chan F K S, Shao M, et al. Interpretation and application of Sponge City guidelines in China. [Phil Trans R Soc A](#), 2020, 378: 20190222
- 41 Bauer P, Hoefler T, Stevens B, et al. Digital twins of Earth and the computing challenge of human interaction. [Nat Comput Sci](#), 2024, 4: 154–157
- 42 de Koning K, Broekhuijsen J, Kühn I, et al. Digital twins: dynamic model-data fusion for ecology. [Trends Ecol Evol](#), 2023, 38: 916–926
- 43 Seabra G S, Mücke N T, Silva V L S, et al. AI enhanced data assimilation and uncertainty quantification applied to Geological Carbon Storage. [Int J Greenh Gas Control](#), 2024, 136: 104190
- 44 Ostrom E. Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. [Glob Environ Change](#), 2010, 20: 550–557
- 45 Engel S, Pagiola S, Wunder S. Designing payments for environmental services in theory and practice: an overview of the issues. [Ecol Econ](#), 2008, 65: 663–674
- 46 Hatzilacou D, Kallis G, Mexa A, et al. Scenario workshops: a useful method for participatory water resources planning? [Water Resour Res](#), 2007, 43: 2006WR004878
- 47 Stilgoe J, Owen R, Macnaghten P. Developing a framework for responsible innovation. [Res Policy](#), 2013, 42: 1568–1580
- 48 Reed M S. Stakeholder participation for environmental management: a literature review. [Biol Conserv](#), 2008, 141: 2417–2431
- 49 Keith D W. Geoengineering the climate: history and prospect. [Annu Rev Energy Environ](#), 2000, 25: 245–284
- 50 Govindasamy B, Caldeira K. Geoengineering Earth's radiation balance to mitigate CO₂-induced climate change. [Geophys Res Lett](#), 2000, 27: 2141–2144
- 51 Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. [Science](#), 2015, 347: 1259855
- 52 Griscom B W, Adams J, Ellis P W, et al. Natural climate solutions. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2017, 114: 11645–11650
- 53 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

Summary for “迈向行星工程: 地球系统工程学的学科构建与实践路径”

Toward planetary engineering: discipline building and practice pathways for Earth system engineering

Cong-Qiang Liu

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

E-mail: liucongqiang@tju.edu.cn

Confronting the global environmental crisis of the Anthropocene—characterized by climate change and biodiversity loss—the traditional “mitigation-adaptation” governance paradigm exhibits inherent limitations: temporal misalignment, linear thinking constraints, and systemic perspective deficiencies. Given the Earth system’s high coupling and nonlinearity, localized measures prove inadequate for planetary-scale challenges. Humanity must transition to proactive shaping through Earth system engineering, employing systematic diagnostics and management of complex planetary systems to drive civilization’s transformation toward security, justice, and resilience. This paper systematically proposes and validates the framework, theoretical system, and practical pathways of this discipline for the first time, advancing its institutional development to provide comprehensive solutions for addressing Anthropocene challenges.

The article first elucidates the historical inevitability of establishing Earth System Engineering as a discipline, positioning it as a systematic response to the fundamental challenges of the Anthropocene. In defining its essence and positioning, the discipline adopts a socio-ecological-technological composite system as its research focus, emphasizing four core attributes: interdisciplinary integration, systems thinking, design-based interventions, and normative values. It further clarifies the distinctions and connections between Earth System Engineering and Earth system science, traditional engineering disciplines, and the narrow definition of “geoengineering.” The discipline is positioned as a strategic hub supporting national and global sustainable development. Regarding its core knowledge framework, three theoretical pillars are proposed: Planetary System Cognition and Regulation Theory, Sustainable System Design and Engineering Implementation Theory, and Planetary-Scale Governance and Ethical Responsibility Theory. Building upon this foundation, the article establishes a collaborative action network comprising five practical subfields: Climate System Guidance Engineering, Ecosystem Restoration and Enhancement Engineering, Socio-Technical Metabolic System Reconstruction Engineering, Earth System Information and Simulation Engineering, and Planetary Engineering Governance and Policy Design.

At the methodological level, a multi-layered nested integrated research framework was constructed, comprising the core layer of system modeling and digital twins, the intermediate layer of interdisciplinary design science and transformation experiments, and the top layer of technology evaluation and adaptive governance research. The practical approach adheres to the principle of prudence and gradualism, designing a three-stage ladder path from “regional comprehensive solution demonstration zones” to “cross-regional/national strategic projects and knowledge network expansion,” ultimately leading to “the formation of global public goods management and governance mechanisms.” The article also traces the evolution of the discipline and proposes a near-, medium-, and long-term development roadmap. Finally, it emphasizes the paradigm shift in talent cultivation for the “planetary generation” and the necessity of global collaboration networks, while exploring the strategic role China can play in this process.

Earth systems engineering constitutes a strategic intellectual and capability response to the challenges of the Anthropocene, representing a profound revolution from cognitive foundations to practical paradigms. By integrating systems science, engineering design, and governance ethics, this discipline is dedicated to the conscious, reflective, and responsible design and adaptive management of socio-ecological-technological composite systems under planetary boundaries. Its development not only involves the integration of technical solutions but also signifies humanity’s transition from being a “passive passenger” to a “responsible steward” and “co-evolutionary partner” within the Earth system.

The study establishes a framework to address systemic cognitive deficits, breaking down disciplinary barriers to foster unified understanding with cognitive integration value. Technologically, it drives engineering technology toward systemic synergy and negative emissions, guiding adaptive infrastructure transformation. In governance innovation, it provides multi-level institutional frameworks and design principles for managing planetary-scale intervention technologies, offering pivotal capabilities for national development and global governance to enhance resilience with strategic significance. Educational reform focuses on cultivating talents with systemic thinking and planetary responsibility. As a civilization-oriented approach, it provides intellectual weapons and practical guidelines for humanity to proactively shape its path, achieving co-evolution for the future.

Earth system engineering, planetary engineering, anthropocene, planetary boundary, interdisciplinary paradigm, adaptive governance

doi: [10.1360/CSB-2025-5910](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5910)