

空间科学强国的生态底座韧性：理念、架构与实践

党伟^{1,2*}, 喻亚静³, 杨克巍⁴, 翁欣⁵, 蔡远利¹, 张雯⁶, 吕德胜⁷, 詹虎⁸, 董永伟⁹, 薛长斌¹⁰

(1. 中国科学院大学星际航行学院, 北京 100049; 2. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 3. 中国科学院微生物研究所, 北京 100101; 4. 国防科技大学系统工程学院, 长沙 410000; 5. 福州大学经济与管理学院, 福州 350108; 6. 装备发展部信息中心, 北京 100034; 7. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; 8. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 9. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 10. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 空间科学强国战略实施在多样性、引领性成果的价值可持续要求方面存在的协同风险, 需要管理理论的底层支撑。本文提出了空间科学战略实施可持续牵引的生态底座韧性 (ResoF) 理论框架, 以破解该领域组织实施工程与科学任务时面临的时序矛盾、目标矛盾、风险矛盾、治理矛盾。贯通以空间科学战略实施牵引科技创新涌现、实现全面生态愿景目标, 采取“不与认知差为敌、良性流动认知差”理念, 洞察工程管理中高难度引领目标的刚性实现、创新生态系统中全系统范围认知的柔性提升、都江堰生态中底座及韧性的千年运行、亚马逊雨林生态中成果产出多样性的刚柔并济, 厘清了以人为主、有人参与、无人干预等类型的生态底层逻辑及其集成演进过程, 构建了包含概念理念、数学物理模型、运行机制的 ResoF 理论框架。结合多层次案例进行了适用性验证和探索性应用, 阐明了支撑多元引领成果持续涌现与跨生态体系赋能的有效性。

关键词: 空间科学; 生态体系; 生态底座; 韧性; 认知差; 工程管理

中图分类号: V11 **文献标识码:** A

Resilience of Ecological Foundation for Boosting China's Strength in Space Development: Philosophy, Architecture, and Practice

Dang Wei^{1,2*}, Yu Yajing³, Yang Kewei⁴, Weng Xin⁵, Cai Yuanli¹, Zhang Wen⁶,
Lyu Desheng⁷, Zhan Hu⁸, Dong Yongwei⁹, Xue Changbin¹⁰

(1. School of Space Exploration, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China; 5. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 6. Information Center, Equipment Development Department of the Central Military Commission, Beijing 100034, China; 7. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 8. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 9. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 10. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Synergistic risks inherent in boosting China's strength in space development, particularly concerning the sustainability of

收稿日期: 2026-01-21; 修回日期: 2026-03-22

通讯作者: *党伟, 中国科学院空间应用工程与技术中心正高级工程师, 研究方向为太空探索的系统工程与可靠性; E-mail: dangwei@csu.ac.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0610100); 中国载人航天工程国家科技重大专项

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

diverse and pioneering achievements, call for foundational support from management theories. This study proposes a theoretical framework for the resilience of the ecological foundation (ResoF) that enables the sustainable traction of the space science strategy, aiming to resolve the temporal, objective, risk, and governance contradictions encountered in the organization and implementation of engineering and scientific missions in this domain. Guided by the overarching vision of driving technological innovation and realizing a comprehensive ecological future through the traction of the space science strategy, the framework adopts the core philosophy of “leveraging, rather than opposing, cognitive gaps, and fostering their benign flow.” It draws insights from the rigid realization of highly challenging pioneering goals in engineering management; the flexible, system wide enhancement of cognition within innovation ecosystems; the millennial operation of the foundation and its resilience in the Dujiangyan ecosystem; and the dynamic balance of rigidity and flexibility in the diverse output of the Amazon rainforest ecosystem. The analysis clarifies the foundational logic and integrated evolutionary processes of ecosystems characterized by “human dominant, human involved, and human uninvolved” operational modes, and establishes a complete ResoF theoretical framework that encompasses the conceptual philosophy, mathematical physical models, and operational mechanisms. The applicability of the framework is validated and explored through multi-level case studies, demonstrating its effectiveness in supporting the continuous emergence of diverse pioneering achievements and enabling cross-ecosystem empowerment.

Keywords: space science; ecosystem; ecological foundation; resilience; cognitive gap; engineering management

一、前言

空间科学是研究宇宙中自然现象及其规律的综合交叉学科，也因具有引领基础科学重大进展的突出价值而获得发达国家的广泛关注与重大投入^[1-6]。我国也在空间科学领域发布了《国家空间科学中长期发展规划（2024—2050年）》（简称《规划》），以实现空间科学强国为总目标，统筹载人航天工程、嫦娥探月工程、空间科学卫星、深空探索等重大任务资源，提出了2050年前空间科学发展三阶段规划以及有望取得突破的极端宇宙、日地全景、宜居行星等科学主题^[7]。我国曾于1963年成立“星际航行委员会”，由钱学森等牵头统筹全国星际航行的长远规划工作^[8]。《规划》接续这一历史使命，分别在科学研究向极宏观拓展、向极微观深入、向极端条件迈进、向极综合交叉发力4个极向科研^[9]，前沿导向的探索性基础研究、战略导向的体系化基础研究、市场导向的应用性基础研究3类基础研究^[10]方面发挥体系化先遣队、协同需求侧的多元牵引作用。在《规划》引领下，推动构建“科学→技术→工程”及其产出的“原理→机理→应用”范式^[11]，以人类能感知的最远、最深、最极端时空尺度及其综合交叉演变为原则，推进“物穷其理、宏微交替”研究，不断突破认知边界，持续产出多样性、引领性、高质量的空间科学成果^[12]。

战略规划的组织实施需要以科学的管理理论为支撑，如钱学森在“两弹一星”工程后牵头总结的《组织管理的技术——系统工程》^[13]成为我国管理领域学科建设发展的重要基础^[14]。《规划》布局至

2050年并牵引探索科技“无人区”，相关战略目标的性质由“已知的未知”扩展到“未知的未知”，可使空间科学强国的科技生态效益较“两弹一星”工程更为显著^[15,16]。可见，《规划》涉及的管理理论具有类似“粮草先行”的关键性与紧迫性，也应考虑本已超出生态韧性理论范畴^[17]的生态效益“丰收”及其可持续性课题。对于空间科学强国的生态，一方面从空间维度出发，践行从源头和底层解决关键技术问题的理念，将平面化思维转向立体式、层次化，即管理理论依托生态的基础及多层能力协同（生态底座）突破，支撑生态保“丰收”的效益；另一方面，从时间维度出发，将静态思维转向波动式、动态化，即管理理论以生态底座多层能力协同的韧性为核心，确保生态保“丰收”效益的可持续性。《规划》的发布体现出，以空间科学为制高点并“由点到面”逐级部署，协同空间技术、空间应用全面发展，形成空间科学战略实施区域生态的可持续发展态势，支撑航天强国建设；进而牵引推动科技创新涌现的全面生态愿景和战略目标，支撑科技强国建设^[7]。相关的管理理论对我国体系化、建制化开展4个极向科研、3类基础研究具有直接参考意义。

空间科学在本质上归于基础研究^[1-6]，发展之路受时代认知的影响而较为曲折。从工程实践角度看，我国历史上对空间科学的资源投入与国外空间科学、国内空间技术相比长期处于不平衡状态，位于供给侧的科学家群体一直处于“小而散”状态^[12,18]；从工程哲学角度看，空间科学强国生态相较“工程造物”^[19]务实求是、一致收敛的要求，增

加了探索求真、多样发散的特征。整体上，相关的管理理论需要支持解决四方面矛盾：“补课”与领先（同步弥补历史能力短板、抢占未来科技前沿）的时序矛盾，务实与求真（兼顾工程实现的确定性要求、科学探索的内在不确定性和非已知特点）的目标矛盾，生存与发展（既能“如履薄冰、如临深渊”探索“无人区”，又能长期成功“履冰、临渊”持续探索“无人区”）的风险矛盾，集中与多元（平衡任务不容有失的刚性约束、激发创新活力的柔性环境）的治理矛盾。这是一个极具挑战性、兼有复杂系统管理特征的工程管理理论难题^[20-23]。

本文基于生态视角、系统科学基本理论，把握相关管理理论的演进逻辑，深挖典型生态案例的底层启示，对我国既有的空间科学发展多元化工程实践进行总结提炼，借鉴韧性概念并从生态底座源头出发，面向空间科学强国目标，提出空间科学战略实施可持续牵引的生态底座韧性（*Resilience of the Ecological Foundation (ResoF) for the sustainable traction of the space science strategy implementation*，简称生态底座韧性或 *ResoF*）理论框架；结合多层次案例开展适用性验证和探索性应用，为我国空间科学强国建设提供管理理论依据。

二、相关管理理论的进展与启示

（一）我国空间科学发展历程与管理理论构建启示

空间科学在工程任务中以空间飞行器为主要平台，开展发生在地球空间、日地空间、行星际空间乃至整个宇宙空间的物理、天文、化学、生命等单一主题或交叉主题的多样性探索活动^[6,12,18]。在20世纪50—60年代的“两弹一星”工程时期，空间科学以空间探测和实验名义发源^[5,24]。1992年启动的载人航天工程以“造船为建站、建站为应用”原则，将空间科学实质性、系统地推进了一大步^[25]。空间科学之名正式出现在《中国航天白皮书》（2000年）中^[18]。中国科学院结合中欧“双星计划”合作情况、我国航天领域发展态势，在2011年启动了空间科学先导专项^[9]。我国在2016年确立了“空间科学、空间技术、空间应用”航天强国科技创新架构^[5]，2021年确立了空间站工程承载“建设科技强国、航天强国的重要引领性工程”价值定位^[25]，2024年发布《规划》并启动空间科学强国建设。

我国空间科学经历了从无到有、从少到多、从弱到逐渐变强、从无法构成生态到追求强劲且持续引领生态的发展过程，尽管如此，当前在管理层面仍存在突出矛盾。从历史经验看，我国相关管理理论发源于系统工程^[14,26]，系统工程的基础是工程控制论^[27,28]，而控制论的根源是通过仿生构建理论^[28]。这就启示本研究应遵循系统论^[27]，从根源上运用跨尺度仿生思想^[29]，充分借鉴无人干预的自然生态、有人参与但接近自然的生态系统，再通过还原论、整体观来协同跨领域的规律。

《规划》涉及的管理理论，与工程管理、复杂系统管理具有强相关性。工程管理理论以重大工程为基线持续发展，如我国高速铁路赶超^[30,31]；分析相关理论研究进展^[22,23,30,31]可见，底层规律体现为围绕“政府保障资源供给、总体抓总结果集成、全体学习提升认知”的管理要素体系；随着工程难度的逐步提升，出现了以复杂性为依托的复杂系统管理^[20,21]等前沿理论，在继承工程管理底层规律的基础上强化了认知提升要素。综合来看，工程管理理论是以认知提升为根源要素，在目标需求、结果要求明确的情况下（对应“已知的未知”），统筹工程难度与认知能力、总体集成与供应链管理（SCM）、“政府—市场”二元协同方式等3对要素而演进发展的理论体系。这为时序矛盾的解决提供了直接依据，但认知提升张力因工程研制生命周期结束而消失；而对于目标、风险、治理等矛盾，鉴于空间科学伴生探索发现的特点，目标是明确的但结果是无法预知的，即工程造物的“造”法和“物”相均存在非已知状态（对应“未知的未知”），则在矛盾的解决中，认知提升张力不能因工程研制生命周期结束而消失。因此，面对本研究需求，现有的工程管理理论存在明显的能力不足。

（二）生态系统理论的底层逻辑启示

生态系统相关理论或现象具有生命演进的特征，如市场背景下以人为主的创新生态系统^[32-35]、都江堰灌区式有人参与的生态系统^[36-39]、亚马逊热带雨林式无人干预的自然生态^[40]等。为了应对市场环境变化带来的组织间竞争与生存的可持续性，在引入“生态系统”理念的基础上构建了创新生态系统的理论框架^[32-35]。在该框架下，创新的关键来源并非创意或知识，而是在于生态系统对价值主张的

共识程度、共同价值蓝图中活动依赖结构关系的清晰度、活动中各位置参与方能力的匹配度、应对共同创新风险的协同能力，本质上是生态系统的认知能力。这与工程管理中以认知提升为根源，动态统筹3对要素的理论体系是一致的。创新生态系统相关理论在持续发展，作为生态系统构建基础的核心价值主张，其性质、“诞生-扩张-领导-自我更新或死亡”过程均是确定性的状态，也与工程管理“造物”本质特征相符。此外，从生态系统的认知能力提升角度出发，通过价值主张牵引共同认知提升、实现“造物”的可持续，能够解除工程研制生命周期的约束，更加趋近于符合空间科学战略实施可持续牵引的管理理论需求。

都江堰工程及其区域生态（都江堰灌区）属于人与自然协同的人造生态系统，已持续运行约2280年。有学者基于当地治水经验并发挥引领性认知能力创建了“都江堰工程-区域生态文明”，提出了“都江堰学”理论^[36-39]。都江堰生态系统建设采取“不与水敌”理念，构建“无坝引水、岁修维护”机制，提出“深淘滩、低作堰”要求，实现生态系统抵抗共同风险（洪涝灾害）且安流利济。这与理论生态结构具有本质趋同性。对于创新生态系统中的位置体系与参与方，都江堰灌区以“渠首-渠系-农田”为官民责任分工依据，构建参与协同体系；将核心价值主张从国家战略顶端贯穿到农户/农田末端，以“端到端”形式打通国家储粮需求与农业产粮供给，形成多元化利益共同体模式^[39]。在长期运行过程中逐渐固化“利他全赢-时空制宜-官民协同-制度习俗”的刚性原则，也不失柔性地保持生态系统的动态平衡、协同发展、自我更新能力，进而筑牢以共同利益为基础的千年命运共同体模式。当然，空间科学领域具有学科主题多样性、成果价值可持续性的核心价值主张，不同于都江堰生态系统中以水稻为单一核心成果的形式，但与自然生态系统中亚马逊热带雨林的种群特征趋同^[40]。

综上，分析3类生态系统的底层逻辑，相关成果产出的稳定性与持续性按照以人为主、有人参与、无人干预依次增加，说明存在支撑生态系统的底座且特性表现依次更优；相关生命周期的长度也在依次增加，说明生态系统底座具有韧性且韧性表现依次更优；相关系统认知能力的表现依次更接近

或回归自然，成为ResoF的根源。该逐级递进的底层逻辑，在理论方面与以探索未知的系统工程（TSE）为代表的系统科学体系相一致，即更接近生物适应机能（不可能假定预先知悉周围情况）的系统结构原理及其前沿探索TSE方法体系“D-K-L”框架^[16,41]。整体上，这与遵循系统论、运用跨领域跨尺度仿生思想的启示是相符的。

三、ResoF的理念与总体框架

（一）根源辨析、核心概念及基本原理

1. 根源辨析

本研究遵循系统论、运用跨领域跨尺度仿生思想的方式，在底层逻辑上与科学技术工程三元论演变到工程生态论的趋势特征是一致的^[42,43]，表现为科学哲学与工程哲学的对立统一^[44]。关于“对立”，有学者提出了工程科学哲学的解决思路与发展方向^[44]。关于“统一”，“对立”张力的本质与系统科学中开放的复杂巨系统（OCGS）原理^[41]是协调相通的，彼此开展物质、信息、能量交换以实现关系的可持续和高质量演进。

有关支持解决时序矛盾的运用辨析如下。①以热力学第一定律为基础，协同热力学第二定律、OCGS实现系统熵减的原理，向外开放以外部环境的物质、信息、能量交换，促成时序矛盾的解决；向内开放以认知能力为外部环境、认知能力为科学求真的具象载体，产出与所求之“真”的差距称为认知差，以此作为OCGS开放交换的载体来促成认知相关矛盾的解决。②以热力学第二定律为基础，协同热力学第一定律、OCGS实现系统熵减的原理，将认知差按照有利于求真、不利于求真分为正、负两种（前者有利于系统熵减、后者不利于系统熵减），支撑开放交换的认知差，确保整体为负熵状态。③空间科学强国生态目标具有可持续、高质量发展的特性，为避免处于生态系统最大熵状态而致死寂（如不可持续、无法高质量），需要持续引入负熵，即引入向外开放、向内开放的物质、信息和能量，追求系统持续以最低熵状态运行；向外开放的外部环境要素以客观状态为呈现形式，资源供给存在不可控情况；向内开放的外部环境以主观状态为呈现形式，资源供给能够稳定。这种对立统一产生的张力，使系统

持续以最低熵状态运行是可行的。

关于支持解决目标矛盾的运用辨析如下。务实、求真分别是工程哲学、科学哲学的本质特征^[44]，空间科学强国生态的终极目标价值体现是科学求真、实现过程价值体现是工程务实，这种在时间维度上宏观的对立统一张力促进不断突破人类认知的边界（即求同）。

关于支持解决风险矛盾的运用辨析如下。从还原论视角看，生存与发展不可能发生在同一时刻（如无法同时发生“履冰”“落水”情况），则生存与发展在空间维度上处于不同的层级状态。这一判断符合系统工程中的“总-分”分层思想，也表明在空间维度上以生态底座层次化为突破口构建 ResoF 理论框架是合理的。

关于支持解决治理矛盾的运用辨析如下。从还原论视角看，刚性与柔性不可能同一时刻发生在同一空间位置上，则刚性与柔性在同一时刻的空间维度上处于不同层级状态、在同一空间的时间维度上处于不同时刻状态。这表明在时间维度上构建 ResoF 理论框架是合理的。从系统论视角看，系统中既有刚性又有柔性是合理的，即刚柔并济、系统涌现，也表明在时空维度上构建 ResoF 理论框架是合理的。

2. 核心概念

生态、生态底座及其韧性具有空间与时间维度上的特性。以都江堰生态底座为例，在空间维度上具有多层级状态^[39]，各层级及其韧性表现分别为刚性的知水层、柔性的引水层、刚柔并济的用水层，据此实现生态底座各层协同、生态结构稳定、参与方多元共赢，也在时间维度上表现为“惠泽永敷”^[38]可持续命运共同体的状态。

ResoF 理论框架解释如下。① 按照“生态成果←生态系统←底座能力←底层技术←管理基础←国家战略及其资源”分别定义空间维度上的多层级体系化状态，每层均有认知输入、价值产出，整体上称为生态体系；生态底座包括能力层（A层）、技术层（T层）、基础层（B层），各自的表征变量分别为 A 、 T 、 B 。B层如同知水层，是对国家战略及其资源（如市场政策、政府投资等）的认知（刚性）；T层如同引水层，是灵活多变、乘势利导^[41,42]的实现通道（柔性）；A层如同用水层，将资源转化为工具集并支撑安流利济^[38]（刚柔并济）。② 在

时间维度上，生态底座的韧性是为应对生态体系共同风险而在空间维度上跨层级的预先协同，即上一层级遭遇本层级不可承担之风险时，下一层级已备好向上化险为夷的价值供给（自适应）；下一层级面临本层级不可持续之发展时，上一层级已自动提供向下转危为安的有效牵引（自组织）。ResoF（变量表示为 R ）的定义与系统科学中的韧性^[16]、组织韧性^[45]、供应链韧性等^[46-48]是一致的。认知能力（变量表示为 C ）及认知差不仅是空间维度上影响生态成果引领性和多样性的关键，也是时间维度上影响跨层级预先协同的根源，决定着 ResoF 的表现。

综合认知能力在以上理论背景中的基础性关键作用、“不与水敌”思想在都江堰灌区中历经了长期验证。认知差指认知能力作用所获、认知对象客观本真之间的差异（绝对差），或者不同认知主体利用认知能力所获之间的差异（相对差）；正、负认知差产生的结果分别对应生态体系多样引领成果产出、价值不可持续发生。认知差是确定 ResoF 理论框架的核心依托，刚性部分为“不与认知差为敌”、柔性部分为“良性流动认知差”。以上述理念为指导、价值可持续供给为原则，在现有理论能用尽用的基础上实现相关理论的协同（即“集大成、得智慧”^[49]），是 ResoF 理论框架的基本特征。

3. 基本原理

采取“不与认知差为敌、良性流动认知差”理念，协同工程管理中高难度引领目标的刚性实现、创新生态系统中全系统范围认知的柔性提升、都江堰生态中底座及其韧性的千年运行、亚马逊雨林生态中成果产出多样性的刚柔并济，创建了 ResoF 理论框架。以生态底座时空特征显著的“都江堰学”理论作为构建 ResoF 底层基本原理的根源，同时把握重大工程管理和创新生态系统的主要特征与理论前沿，提炼“不与水敌”的可持续发展基因、动力、实施路径^[39]；在对人造生态体系认识的基础上“嫁接”自然生态特征，作为构建 ResoF 底层基本原理的原则。ResoF 的基本原理可表示为“‘都江堰工程及其灌区和农田’生态的体系架构+亚马逊热带雨林种群自然生态的基本特征”（见图1）。图中的整体概貌为都江堰灌区及其蓄水功能示意，以千年持续演进的区域生态文明展现 ResoF 的价值；在理论原理上“嫁接”并融合亚马逊热带雨林种群自然

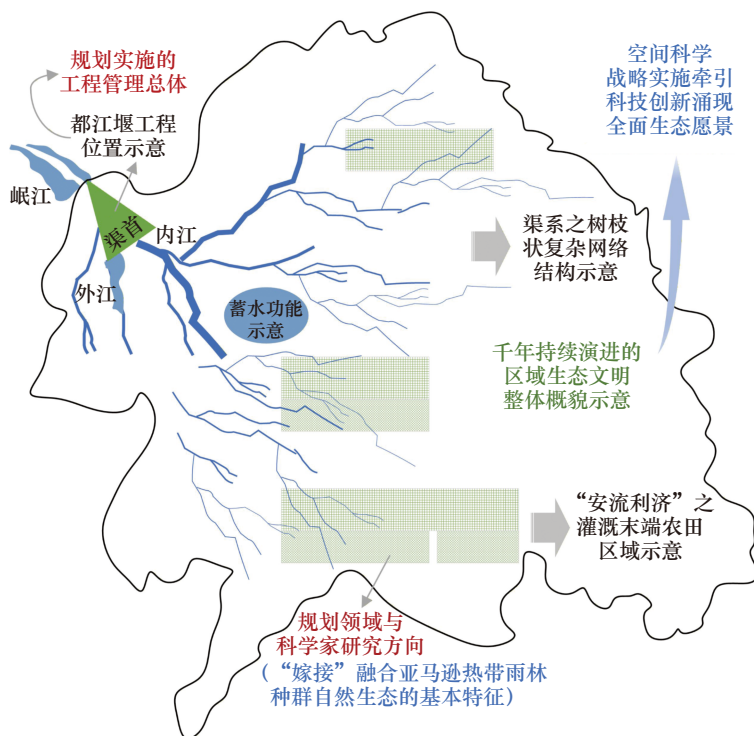


图1 ResoF 理论框架的基本原理示意图

生态的基本特征，以“规划实施的工程管理总体”融合替代渠首的“都江堰工程”，以“规划领域与科学家研究方向”融合替代农田，再以系统科学相关理论促进“嫁接”融合，形成长期维持ResoF的功能，支撑并滋养发展生态；在价值产出末端以多样性和引领性的成果融合替代“水稻”。由此展现空间科学战略实施牵引科技创新涌现的全面生态愿景与战略目标。

（二）总体框架及其数学表示

1. 总体框架的核心价值主张

都江堰灌区代表目标收敛的应用创新型生态体系（记为 Δ 型），科学共同体代表求真发散的探索研究型生态体系^[11]（记为X型）。空间科学战略实施可持续牵引所需的生态体系，既要目标的收敛刚性及其可持续发展的变化柔性，又要探索的多样柔性及其可持续发展的涌现刚性，即战略性先导型生态体系（记为X| Δ 型）。图1中，X| Δ 型生态体系的核心价值主张是按照规划领域、科学家研究方向在“末端农田”实施协同，支撑生态体系产出多样性、引领性的科研成果，同时保持可持续、高质量产出的状态（即太空探索价值可持续^[16]）；具有

刚柔并济、二元交替的特点，外在的一元表现为多样引领的生态成果（如实施《规划》），内在的一元表现为协同坚韧的生态底座，内外二元交替协同体现在实现全面的生态愿景和战略目标。

2. 总体框架的物理模型与平衡关系

X| Δ 型生态体系与X型、 Δ 型相互作用，以认知提升为源动力，成为动态统筹工程管理中3对要素的理论体系，相应总体框架建立在以认知能力为核心，协同战略与资源匹配（如市场政策、政府投资等）、总体设计部^[50]作用（如架构者、核心企业等）的基础上。在跨生态体系协同中，ResoF理论框架用于支撑实现价值循环：X| Δ 型生态体系从X型汲取前沿“新知”，从作为应用创新方的 Δ 型生态体系中汲取先进“新物”^[32-35]，再通过自身生态底座的转化，产出科学发现、技术创新、组织管理方面的引领成果（分别记为 x 类、 δ 类、 ω 类）；相关成果反馈给X型、 Δ 型生态体系以提升各自的整体能力，形成不断增强的协同创新循环。这与OCGS原理是一致的，即通过物质、信息、能量交换，支撑各型生态体系实现持续熵减，保持有序的运行状态，取得跨生态体系的时空动态平衡，从而杜绝生态体系因处于最大熵导致死寂的风险，促进扩增认

知空间、提升生态活力、涌现科技创新。

面向科技强国目标，以4个极向科研的不断突破作为所提综合创新生态体系的核心价值主张（见图2）。X| Δ 型生态体系体现了核心价值主张的宏观集成涌现意义（协同务实和求真以求同）。 Δ 型生态体系在跨生态体系中作为SCM供给产品或技术，在生态底座基础层上依据高质量发展目标导向开展国家资源的跨生态体系协同。X型生态体系在跨生态体系中作为潜在项目方供给高质量项目建议，在生态底座基础层上依据高质量发展目标导向开展国家资源的跨生态体系协同。X| Δ 型生态体系对X型、 Δ 型的核心价值主张为《规划》的愿景和战略目标，即X| Δ 型求同并分别与X型协同开展求真探索、与 Δ 型协同进行务实发展。

X| Δ 型生态体系的多样性成果（即 x 类）普遍具有价值引领的特点，部分具有面向全人类的重大引领价值^[1-6,12]；通过规划指南、多样引领成果示范，通常可加速X型生态体系的产出，有利于体系化落实前沿导向的探索性基础研究。X| Δ 型生态体系的技术突破类成果（即 δ 类）普遍具有价值引领的特点，部分具有面向市场的重大引领价值；通过高质量成果引领示范，通常可加速 Δ 型生态体系

的产出，有利于体系化落实市场导向的应用性基础研究。X| Δ 型生态体系的组织管理类成果（即 ω 类）普遍具有价值引领的特点，部分具有面向工程应用的重大引领价值；通过工程管理、知识管理、标准化管理等高质量成果示范，通常可加速其他生态体系的认知能力提升与产业变革进程，有利于增强升其他生态体系底座韧性的自组织能力，体系化落实从源头和底层解决关键技术问题。

3. 总体框架的数学表示与基本假设

从定性到定量的综合集成方法是OCGS原理的基础，而数学方程是工程科学理论体系的严谨表达^[28]。按照“不得使用”和最小化原则，采用数学方程定量表达ResoF理论框架，各类生态体系及其底座韧性、产出成果符号及其说明如表1所示。以各类生态体系方程的单调递增定义作为边界条件，给出X| Δ 型ResoF动力学方程及说明，引出跨生态价值系数函数 V 。

对于以一般性丰富成果在短期实现《规划》，条件定为 $V \geq 0$ ，即X| Δ 型生态体系对X型、 Δ 型的核心价值主张实现不能具有竞争性， R 的增长率不能低于1个负常数，由此确保X| Δ 型ResoF的存在，本质上属于以人为主生态。对于以高质量引领

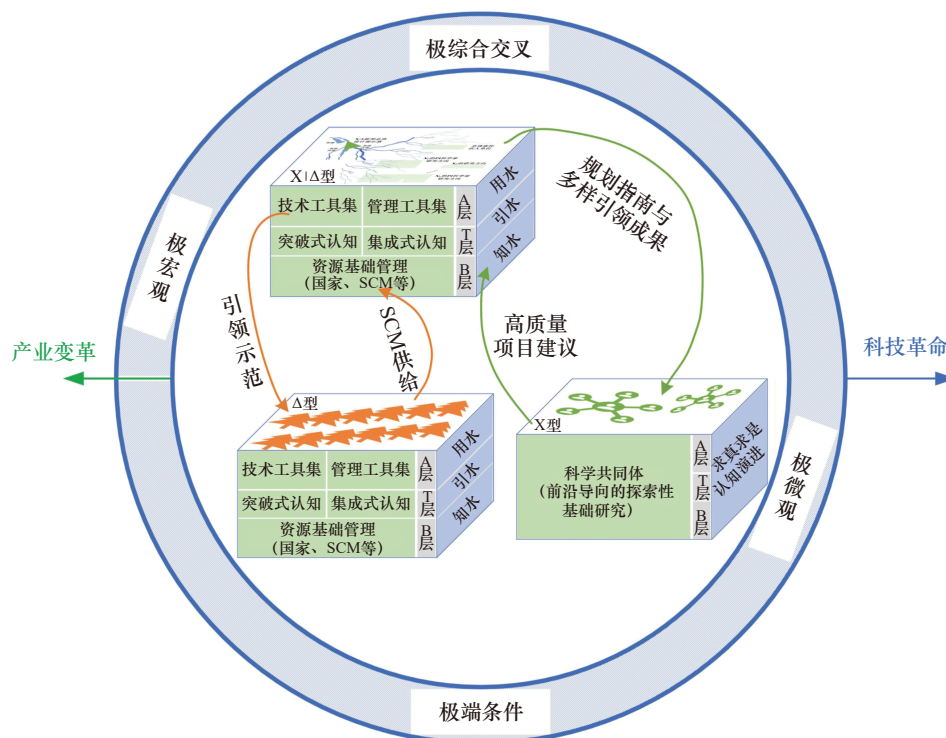


图2 ResoF理论总体框架——物理模型与平衡关系

表1 ResoF理论总体框架——跨生态体系的数学表示

生态类型	生态体系及其底座韧性	产出成果符号及其说明	成果产出背景	跨生态价值
X Δ型	$E=f_1(R, \Delta, X, t)$	E_x , 生态科学发现引领成果	科学 / 基础研究 (x类)	引领示范X型生态产出
	$R=g_1(A, T, B, t)$	R_δ^E , 生态技术创新先进成果	技术 / 应用基础 (δ类)	引领示范Δ型生态产出
		R_ω^E , 生态组织管理技术成果	工程 / 应用研究 (ω类)	加速其他生态产出进程
Δ型	$\Delta=f_2(R, x, t)$	Δ_δ , 生态高质量一致性产品	产品 / 研制生产 (δ类)	承担其他生态体系SCM
	$R=g_2(A, T, B, t)$	R_x^A , 多元形式知识产权成果	技术 / 研发创新 (x类)	学习 R_ω^E 、加速创新能力 协同B层、加速变革进程
X型	$X=f_3(C, \delta, t)$	X_x , 本领域的先进科研成果	科学 / 探索研究 (x类)	供给其他生态体系知识 获得其他生态δ类成果 学习 R_ω^E 、提升认知能力

注： E 表示X | Δ型生态体系的多样性和引领性成果， Δ 、 X 分别表示Δ型生态体系务实满足用户需求与一致性的产品成果、X型生态体系开展探索求真的研究成果； f 表示生态系统产出函数； g 表示ResoF函数； x 表示Δ型生态体系内部研发创新的结果； δ 表示X型生态体系内部投入的产品或技术资源；各生态体系方程的单调递增定义为 $\frac{\partial^2 E}{\partial R \partial A} > 0$ ， $\frac{\partial^2 E}{\partial R \partial X} > 0$ ； $\frac{\partial^2 \Delta}{\partial R \partial x} > 0$ ； $\frac{\partial^2 X}{\partial C \partial \delta} > 0$ ；X | Δ型ResoF动力学方程为 $\frac{dR}{dt} = \alpha V(\{E_{ij}\}, \{R_{ij}^E\}, \{R_{ok}^E\}, \Delta, X) - \beta R$ ，其中 V 是跨生态价值系数（ $V > 0$ 表示有引领价值、 $V = 0$ 表示无引领价值、 $V < 0$ 表示负价值（竞争））， α 、 β 为正常数， i 、 j 、 k 分别为成果集中的元素序号。

性丰富成果实现《规划》，条件定为 $V > 0$ 、 R 的增长率应至少大于1个正常数，本质上属于有人参与生态。对于全面实现《规划》愿景和战略目标，条件定为 $V \gg 0$ 、 R 的增长率值应在正数范围内越来越大并与图2上外圈直径增长趋势一致，本质上属于无人干预生态。

构建ResoF理论框架需以认知能力及认知差为基础，在数学表示方面有4个基本假设。

假设1（认知状态谱系）。与TSE方法体系^[6]一致，将对客观的认知状态分为非已知状态、已知状态两大类以及6个独立的认知状态等级：未（认）知（ S_{C0} ）、非已知不确定的不确定（ S_{C1} ）、主观不确定（ S_{C2} ）、客观不确定（ S_{C3} ）、已知且确定（ S_{C4} ）、公理类已知（ S_{C5} ），每种认知状态载体的可信程度按序号依次增加；认知状态的载体（认知载体），包括生态体系中的数据（D）、知识（K）、逻辑（L）以及认知差。

假设2（认知差控制环）。生态体系的认知能力取决于数据质量、知识规模、逻辑体量、基于TSE方法体系“D-K-L”相关原理^[6]（即“D-K-L”认知差控制环）的认知状态转移速度。存在认知差是X型生态体系科学求真、Δ型生态体系技术创新、3类基础研究的源头性机会，文中的认知差不考虑个体主观导致的差异（相对差）。

假设3（动态认知原理）。生态体系中认知载体内容规模的扩增、认知状态的转移，都遵循“D-K-L”认知差控制环，即规模或认知状态是动态变化

的，认知状态的高低从根本上取决于应用实践数据或严谨理论逻辑的可信程度。以真理认知的目标为基线，当前认知的非已知状态、已知状态分别等同于目标实现所需的柔性状态、刚性状态，即 S_{C0} 、 S_{C5} 分别为柔性边界、刚性边界，二者之间具有最大的张力。

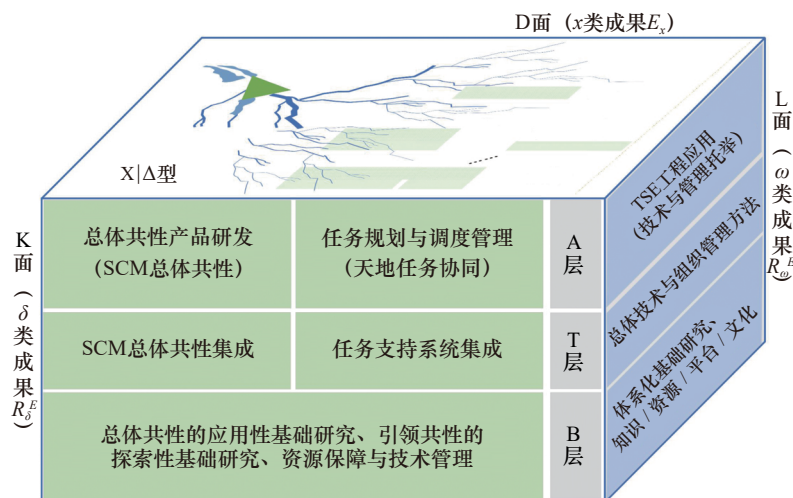
假设4（韧性构建原理）。ResoF函数的构建取决于认知能力。生态体系成果的多样性取决于生态体系（含生态底座）对认知差管理的广泛程度。生态体系成果的引领性取决于生态体系及其底座对认知差管理的先进程度（即“D-K-L”认知差控制环的应用情况）。一般，较低可信程度的认知载体内容的组合无法支撑获得较高可信程度认知状态的结果。

四、ResoF的实施路径与运行机制

（一）ResoF的实施路径

1. X | Δ型生态模型及底座韧性实现路径

X | Δ型生态模型具有三面三层结构（见图3）：顶面为生态系统及成果（本质上是反映生态效益的数据），记为D面，正面为知识面（K面），侧面为逻辑面（L面），与TSE方法体系“D-K-L”框架是一致的。ResoF构建主体为X | Δ型总体设计部。K面在A层的技术工具集、管理工具集分别体现为总体共性产品研发（SCM总体共性）、任务规划与调度管理（天地任务协同），向上支撑D面的产品研制

图3 X| Δ 型生态体系及其底座的“能力-技术-基础”模型

与运行。T层基于突破式认知、集成式认知形成的内容分别为SCM总体共性集成、任务支持系统集成，向上支撑A层的建设与运行。B层内容包括总体共性的应用性基础研究、引领共性的探索性基础研究、资源保障与技术管理，向上支撑T层的建设与运行。B层中不存在“总体个性”“引领个性”的相关基础研究，杜绝潜在的跨生态体系竞争关系，确保 $V \gg 0$ 条件的实现。L面与“用水-引水-知水”底层逻辑相一致的内容分别为TSE工程应用（技术与管理托举）、总体技术与组织管理方法、体系化基础研究和知识/资源/平台/文化，也是逐级向上支撑的关系。生态底座中K面、L面上认知载体内容的认知状态符合4个基本假设，为多状态形式存在，按照“D-K-L”认知差控制环随生态体系的核心价值主张导向动态演进。其中，D面与K面的A层自上向下以结果导向牵引认知动态演进，协同推动目标实现（刚柔并济）；K面的T层在继承历史认知载体内容、B层刚性支撑的条件下，自下向上以目标导向牵引认知动态演进（柔性）；K面的T层与A层存在供需引发的可信程度跃迁（即问题导向），驱动力来自L面的协同机制。

ResoF自适应特性构建所需的向上支撑机制，可通过L面与K面协同实现。在上层未遭遇风险（即正常运行）或者遭遇已知状态风险的“平时”场景下，按照各层串行协同的方式实施；在遭遇非已知状态风险或者生死攸关风险的“战时”场景下，按照跨层并行协同的方式实施，最终以正的认知差结果化解上层风险。保持构建效果涉及“平

时”“战时”场景。①在“平时”场景下，A层技术认知持续积累的方式为标准化管理、质量技术风险识别分析与管理，T层持续应用3类基础研究成果来提升总体共性、引领共性的体系化技术可信程度，B层以“知水”逻辑引入国家相关资源（如3类基础研究/仪器设备/专家库等）、构建知识管理相关数字化平台、锻造先进企业文化等。②在“战时”场景下，由上至下以“端到端”方式解决风险，通过临时地贯通各层、扩增资源，以“集智”方式提升认知能力、快速迭代“D-K-L”认知差控制环，从而获取可信程度较高的认知载体内容，在最短时间内将认知差由负转正，支撑顶层风险处置决策（如载人航天工程神舟二十号飞船在轨异常引发的应急救援处置^[51]）。

在ResoF自组织特性构建过程的牵引下，针对生态体系的目标进行时空上的动态分解（即求同），以持续认知短期目标、中期目标、远期目标。在以短期目标为牵引的构建方面，当前目标的认知状态为 S_{C4} ，则L面各层所用逻辑的最低认知状态与目标保持一致（即 S_{C4} ），K面A层、T层、B层所用知识的最低认知状态分别为 S_{C4} 、 S_{C3} 、 S_{C3} 。在以中期目标为牵引的构建方面，可信程度相比短期目标降低到 S_{C3} ，但未来将逐渐转化为 S_{C4} ，当前L面各层所用逻辑的最低认知状态与目标保持一致（即 S_{C3} ），K面A层、T层、B层所用知识的最低认知状态分别为 S_{C3} 、 S_{C2} 、 S_{C2} 。在以远期目标为牵引的构建方面，可信程度相比中期目标降低到 S_{C2} ，但未来将逐渐转化为 S_{C4} ，当前L面各层所用逻辑的最低认知

状态与目标保持一致（即 S_{C2} ），K面A层、T层、B层所用知识的最低认知状态分别为 S_{C2} 、 S_{C1} 、 S_{C1} 。分析时空上的状态特征可知，目标在时间维上终归于 S_{C4} ，带动K面和L面各层中形成张力；在“平时”，应持续自组织优先扩增B层“知水”的认知载体内容规模，以全面提升K面A层和T层已知认知载体内容的规模、L面A层和T层认知载体内容的可信程度；面向“战时”所需，协同持续自组织优先提升B层认知载体内容的可信程度。

2. Δ 型和X型生态模型及底座构成

Δ 型生态模型与X | Δ 型生态模型的三面三层结构相一致（见图4）。D面的运行符合当前通用的创新生态系统理论^[32-35]，相应产出符合红杉树林植物群体特征，呈现供给一致性和耐久性的特点，该ResoF构建主体为 Δ 型总体设计部（如架构者、核心企业等）。K面A层包括基础通用产品研发（SCM基础通用，如中央处理器、存储器、电阻器等）、部组件产品研发（SCM中间环节，如计算单元、存储单元等），T层包括关键材料与工艺、集成与质量管理，B层包括市场导向的应用性基础研究、SCM资源管理；L面的A层、T层、B层分别为组织的经营管理、组织的核心竞争力、国家创新驱动发展相关政策运用；各面均按“基础→技术→能力”的次序向上提供支撑。 Δ 型ResoF构建的实施路径与X | Δ 型相一致，应持续优先扩增B层认知载体内容的规模与可信程度，以全面提升K面A层和T层已知认知载体内容的规模、L面A层和T层认知载体内容的可信程度。

在资源基础观基础上发展的动态能力理论^[52-54]认为，通过“感知-捕获-转型”促进组织在快速变化、动荡甚至几乎不可预测的市场环境下（即“战时”）进行变革，不断调整资源的结构与配置以为技术创新活动提供资源投入、创造适宜环境并进而维持竞争优势。该理论的核心要义是生态系统内部的知识创造、流动与转化通过前置性活动使技术创新更高效、更能适应不断变化的动态竞争环境。相关思路与本研究是趋同的，即 Δ 型生态的整体特征是内部的柔性创新支撑外部的刚性生存并实现内柔外刚。

X型生态模型与X | Δ 型生态模型的三面三层结构相一致（见图5）。D面的运行符合常春藤式藤本植物生长形态，呈现蔓延式科研成果^[11,55]的特点，该ResoF构建无显著特征的主体。K面A层为科学家或首席研究员（PI）团队的科研创造创新能力，T层为科学家或PI团队的实验技术 / 集成技术（通常持续突破技术极限），B层为前沿导向的探索性基础研究、科研资源管理，各面按“基础→技术→能力”的次序向上提供支撑；L面为科学共同体求真探索的认知演进，具有范式依赖的特征^[11,55]。X型生态体系的整体特征是刚性的范式支撑柔性的探索并实现内刚外柔。

3. 基于系统科学相关理论的协同验证

以系统工程、“都江堰学”理论的代表性成果为基线，结合ResoF进行协同验证；各自的底层逻辑是一致的，在根源理念、架构体系、目标愿景方面均有协调性。① 在理念方面，ResoF“不与认知

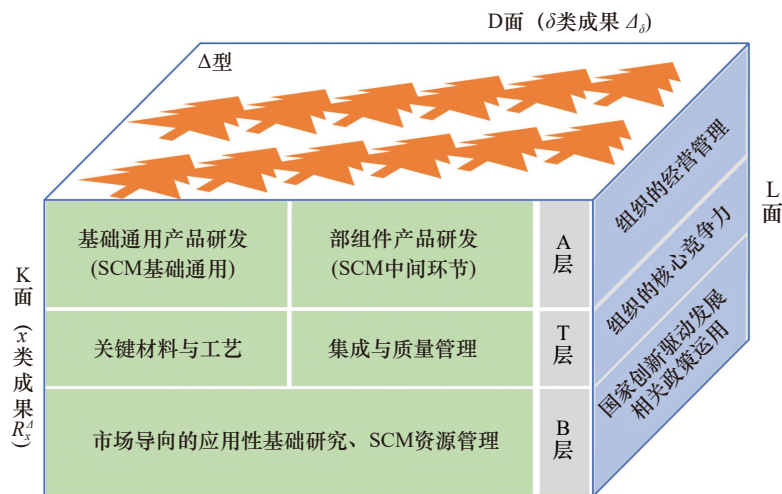


图4 Δ 型生态体系及其底座“能力-技术-基础”模型

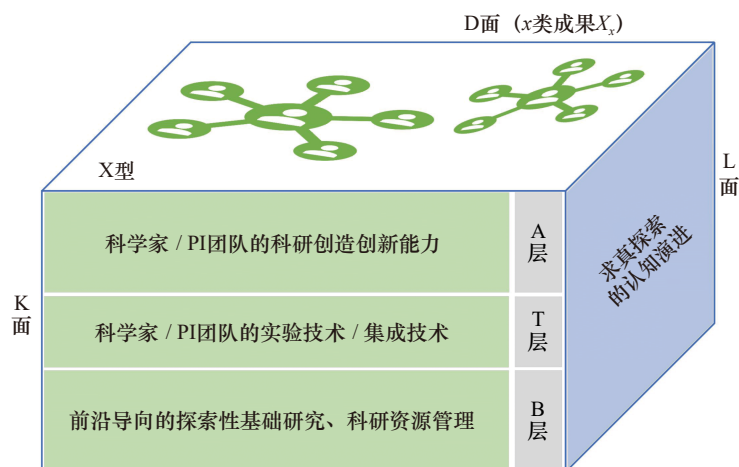


图5 X型生态体系及其底座“能力-技术-基础”模型

差为敌、良性流动认知差”理念中极大的负认知差，如同岷江汛期面临洪涝灾害风险的可能性，而正认知差如同“安流”可促进生态体系“利济”的作用；在落实原则方面，ResoF承载架构关于系统概念的抽象与“知水-引水-用水”具象保持一致，如图1、图2及生态底座三面三层模型体现的“总-分”“分-总”关系。②在总体设计方面，ResoF理论框架及其构建与“钱学森总体设计部思想”^[50]相一致，ResoF自适应机制、“平时”“战时”组织机制、TSE工程应用能力（见图3的L面A层），与位于渠首的鱼嘴、飞沙堰、宝瓶口分别在分认知差与分水、负认知差风险处置与排沙泄洪、引正认知差与引水的底层逻辑趋同。在系统设计方面，ResoF沿用系统工程理论中的组织管理模式（见图3的A层和T层），系统总体、分系统、子系统的逐级分层关系与渠首、输水渠系（干渠-支渠-斗渠）、用水渠系（农渠-毛渠）的底层逻辑趋同；沿用的标准化管理^[27]、质量问题归零^[56]、TSE“物穷其理、宏微交替”的认知差管理机制^[16]与“无坝引水”一致； $V>0$ 的要求与“乘势利导”原则一致；T层与B层在“平时”协同柔性运行，与图1中的蓄水功能实现类似。③在长期生态运行方面，ResoF生态底座模型B层的持续优先扩增认知载体内容规模和可信程度、ResoF自组织机制，在底层逻辑上分别与“深淘滩”“低作堰”一致，依据的“D-K-L”认知差控制环与都江堰“三石人测水位”^[36]、“因时制宜”岁修政策^[38,39]的底层逻辑是协调的。对于可持续命运共同体实现，在全面愿景和战略目标的牵引

下，以“D-K-L”认知差控制环协同“基础→技术→能力”底座各层认知载体内容的规模与可信程度持续增长，加速高质量成果产出和开放交换，实现 $V\gg 0$ ，与“安流利济、惠泽永敷”的思路是一致的。

综上，ResoF理论框架在跨生态体系方面超越了“都江堰学”理论中的单一生态体系，X| Δ 型生态体系可在 $V\gg 0$ 的前提下，通过 Δ 型生态体系调用与B层关联的非同质化资源，再以开放交换来加速生态底座各层认知载体内容的规模与可信程度持续增长，或者进一步提升图1中示意的蓄水功能，维持X| Δ 型 $V\gg 0$ 状态，即通过OCGS原理支撑并增强图2中跨生态体系时空动态平衡关系的保持能力。

（二）ResoF的运行机制

1. $V\gg 0$ 状态的保持

我国高速铁路高质量发展的底层逻辑是：从想法提出到引领性结果的全过程实现“端到端”式应用（行业“从0到1”的示范），由此拉动产业进步（促进技术创新活跃），进而繁荣相关创新生态系统（行业领域“从1到n”的市场规模扩增）。这与通过X| Δ 型生态体系实现“从0到1”进而支撑 Δ 型生态实现“从1到n”是一致的。 $V\gg 0$ 状态的保持机制如下。①正向引领的保持。基于认知状态具有最大张力、“D-K-L”认知差控制环原理，通过“策源、论证、培育、立项、工程研制、使用运行、……”的全生命周期活动，实施具有国际引领特征

的重大项目，持续保持X|Δ型生态体系的引领状态。② 逆向反馈的保持。基于核心竞争力被市场价值认可的基本原理（见图3中“引领共性”相关技术成果（δ类）在Δ型生态体系中实现合同行为），持续保持Δ型生态体系协同市场价值的反馈状态。③ 科学家精神“勇攀高峰、敢为人先”的保持。面对艰巨任务或高难风险时，发挥置生死于度外的刚毅坚卓品性^[57,58]，实施对正向引领、逆向反馈机制的再次托举，促进良性循环与 $V \gg 0$ 状态的保持。

2. B层、T层、A层认知规模和可信程度的增长

在国家科技创新体系中，以科学、技术、工程为“立身之本”的各类科技实体，都需要创造并供给价值^[59]，相关的运行原理即为“D-K-L”认知差控制环、组织管理模式即为“基础→技术→能力”功能协同。科技实体作为社会法人，其生存必然取决于使命愿景或目标定位驱动的科技体系贡献价值^[59,60]，则B层、T层、A层认知规模随之增长。科技实体的可持续发展通过提质、降本、增效实现，驱动技术或管理的认知追求正确性和科学性，则B层、T层、A层的可信程度随之增长。B层、T层、A层认知载体内容的规模和可信程度，与社会法人治理的本性密切相关。

3. K面“技术→能力”认知状态跃迁的措施

认知状态的跃迁需要更高可信程度的逻辑协同。实施标准化管理、质量问题归零，经由高价值应用实践获得兼有高的质量和可信程度的数据或知识及其底层逻辑。运用TSE“物穷其理、宏微交替”理念，获得兼有高的质量和可信程度的逻辑。因而遵循TSE方法体系“D-K-L”相关原理协同认知差管理（即4个基本假设），促成生态底座K面“技术→能力”认知状态的跃迁。

4. 解决空间科学强国四方面矛盾的综合机制

通过 $V \gg 0$ 状态的保持运行机制，解决时序矛盾。通过跨生态体系时空动态平衡关系的保持能力、生态体系及其底座模型的刚柔协同机制，解决目标矛盾。通过ResoF的自适应和自组织特性运行机制，解决风险矛盾。通过跨生态体系时空动态平衡关系的保持能力、 $V \gg 0$ 状态的保持运行机制，解决治理矛盾。对于空间科学战略实施区域生态可持续发展、牵引实现科技创新涌现的全面生态愿景和战略目标而言，ResoF理论框架是有效的。

五、ResoF的实践案例

（一）我国空间科学的发展实践与理论协同

在《规划》发布前，我国空间科学领域已取得诸多成就，如载人航天工程及空间站工程、月球与行星探测工程、空间科学卫星系列等支持开展的新现象探测或研究^[61]、新技术实验或试验^[62]；启动的重要任务有“嫦娥七号”首次月球水冰探测^[63]、“天问二号”首次小行星探测^[64,65]、小行星防御试验^[66]等。相关进展探索了以引领性为要求的“任务孵化→工程实现→成果产出”全生命周期链，以多样性为特点的空间科学、空间技术、空间应用跨尺度持续性，在一定程度上体现了生态韧性特征，也协同验证了ResoF理论框架的科学性。对照空间科学强国目标，依然存在对人类现代知识贡献度较低、重大前沿探测能力不足、“溢出效应”未充分发挥等客观差距，需要培育空间科学原创突破生态^[12,25,43]。该高要求关联的生态式发展态势与本研究具有协同接续的关系。以“百年航天、千年航宇”战略延续性为基线，构建了时间全景图下ResoF支撑的生态式发展框架（见图6）。

图6中，横向为以《规划》“三步走”计划节点为主的时间轴线。时间轴上半部分为价值可持续太空探索状态保持的目标性质，对应于图3模型的D面。根据假设1（认知状态谱系）和客观规律，标记出战略规划实施三级的认知状态，即战略级认知状态、战役级认知状态、战术级认知状态。《规划》“三步走”目标性质均为已知状态；战役级的前两步路径基本上为已知状态，而第三步为非已知状态；战术级的第一步方案为已知状态，而后两步为非已知状态。这与我国载人航天工程“三步走”战略的认知状态及其动态演进是趋同的。

时间轴下半部分内容对应于图3模型K面和L面。① B层作为知水层，具有刚性本质，即引领性认知能力可持续产生正认知差，根据假设4（韧性构建原理），运用治理体系（包括战略愿景、中长期规划、五年规划、商业航天等）、精神力量、3类基础研究科技管理政策等国家相关资源。韧性构建的思维路径为：按照目标导向、结果导向、问题导向，开展3类基础研究，形成有效的新增知识，提升现有认知载体内容的可信程度，实现ResoF运行机制中B层、T层、A层认知规模和可信

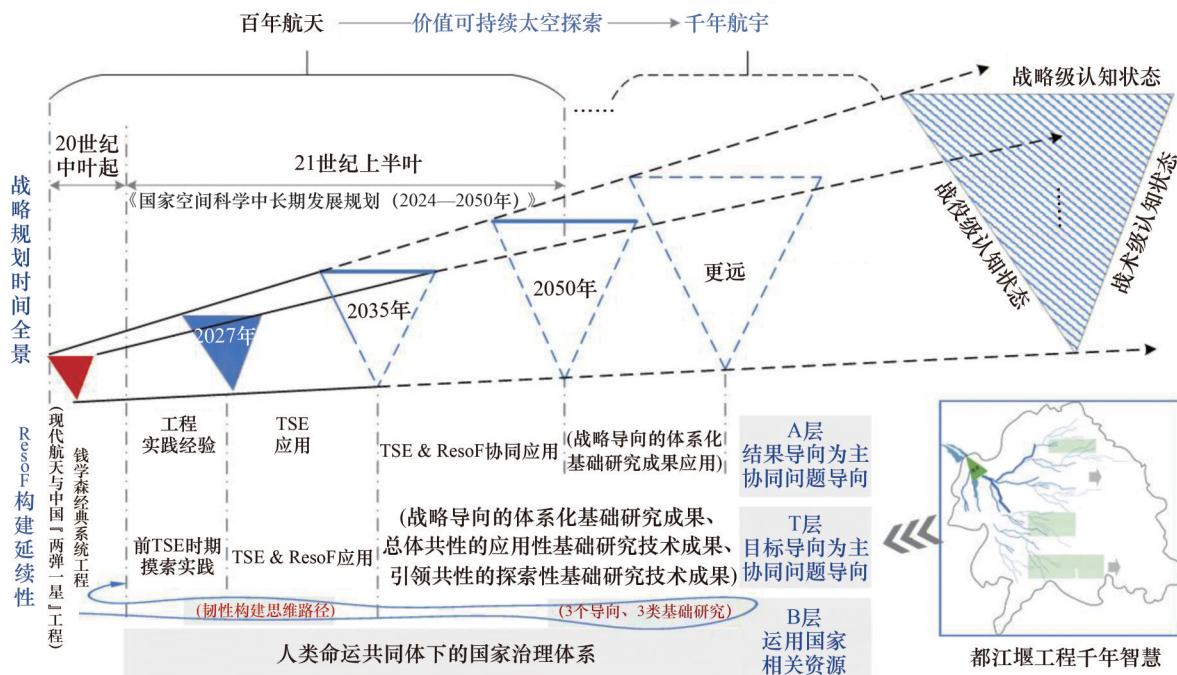


图6 空间科学强国的时间全景图及其ResoF构建的协同关系

程度的增长。② T层作为引水层，具有柔性本质，取决于以D面结果为导向、服务于A层认知载体内容的规模扩增或可信程度提升。在目标导向原则下，针对K面T层内容，基于经典系统工程方法开展早期的摸索实践，持续从B层获得总体共性的应用性基础研究技术成果、引领共性的探索性基础研究技术成果；根据假设2（认知差控制环）和问题导向，获得突破式认知、集成式认知，支撑A层能力构建与持续演进。针对L面T层内容，通过战略导向的体系化基础研究，将经典系统工程方法发展到TSE方法体系、ResoF理论框架，根据假设2（认知差控制环）、假设3（动态认知原理）和问题导向，支撑A层能力构建与持续演进。③ A层作为用水层，按照结果导向、问题导向，在任务饱满期积累多元化实践经验^[12]、开展TSE方法体系应用，在任务低谷期根据假设2（认知差控制环）开展跨生态体系合作。例如，分别源于总体共性、引领共性的FC-AE-1553高可靠光纤通信技术、商业货架产品（COTS）元器件质量保证高可靠降成本技术，已经赋能 Δ 型生态构建，支持建立了企业实体并可服务更广泛的市场^[67-69]，促进产出成果的高频应用、持续迭代、可信程度提升。

ResoF理论框架具有与国家科技政策及资源运

用的协同性，能够充分发挥自身价值，展示ResoF构建方面的可靠性。ResoF理论框架与TSE方法体系协同，为建设先进总体设计部提供了“物理-事理”支撑，对《规划》的总体设计及布局具有参考意义。

（二）研究类和研制类的实践案例

2016年，国内相关机构开展了空间冷原子钟在轨实验，取得了引领国际的成果^[71]。该科研主体作为X型生态体系的典型代表，积极接受来自X| Δ 型生态体系中 ω 类和 δ 类成果，如系统工程相关组织管理、COTS元器件空间应用的可靠性技术服务等，逐步体系化构建并持续发展自身的生态底座，具备了专题领域范围内局部生态的底座韧性；迄今在空间冷原子钟技术方向仍持续引领国际^[70,71]，证明了ResoF理论框架的可行性和有效性。识别并利用X| Δ 型生态体系中的 ω 类和 δ 类成果，有利于项目成功并保持引领，相关经验可迁移至具有国际引领潜力的研究类项目，如处于研制阶段的巡天空间望远镜^[72]、高能宇宙辐射探测设施^[73]。ResoF理论框架下的总体设计部、“D-K-L”认知差控制环协同，适应刚性需求并显现出应用价值。

为支撑空间科学取得引领性成果，载荷技术指

标务必先进，选用 Δ 型生态体系的基础产品“不得不引领”。例如，光电转换模块空间应用可靠性、直流电源转换模块额定功率需求和降额使用比例等的突破，需要基础产品探索创新，离不开 $X|\Delta$ 型生态体系中 δ 类成果、 X 型生态体系中 x 类成果的赋能，如突破技术极限所需的耐受空间辐射应力可靠性设计、不同功能或工艺材料的热膨胀耦合原理与服役退化机理等。采用原理开放协同、包容竞合关系跟踪研制策略，从源头和底层出发解决相关引领共性的关键技术问题，进而增强 Δ 型生态主体的核心竞争力、扩增相关技术成果市场合同行为与市场规模，同时反向支撑相关认知载体内容可信程度的提升。沿用 Δ 型生态体系的市场机制有利于短期内提升相关引领型技术认知状态的可信程度，也就体现出ResoF理论框架运行机制的有效性。

（三）星际博望计划的跨尺度综合性探索应用

依托星际航行^[74]，星际博望计划以《规划》五大主题之一的宜居行星为核心价值主张，定位于培育具有人类命运共同体性质、国际引领特征的未来重大项目。总目标是构建在抵近宜居行星条件下执行任务的能力，支撑实现自组织、自适应的“航行-勘察-宜居”，为延续人类文明提供新的手段。星际博望计划目前处于“策源-论证-培育”协同战略导向下的体系化基础研究阶段，根据假设3（动态认知原理）具有较强张力。针对 $X|\Delta$ 型总体设计部及生态底座模型的L面，在传统的空间科学、空间应用优势参与方的基础上，以广泛扩增非传统航天参与方、正认知差引领利益共同体等方式，落实“桥梁式”工程科学家的价值^[75]，开展跨生态体系B层的物质、信息、能量交换（如核心价值主张共识达成后的多元化经费渠道支撑、引领企业带资参与等）；按照“战略目标体系牵引、价值结果供给导向的作战挂图”机制运行，在与 X 型生态体系合作中以“良性流动认知差”柔性理念持续驱动价值供给^[76]。

针对 $X|\Delta$ 型总体设计部及生态底座模型的K面，协同《规划》“三步走”计划节点，构建以自组织为主的韧性要点及延续性。面向A层的最终目标（高效能高可信自主任务实施），协同运用“太空探索+当前领先技术（Space+SOTA）”、融合可持续发展相关理论与技术，建立领先的 $X|\Delta$ 型

生态体系。① A层以高价值场景下可信自主技术应用为主题，按照“敢用、多用、好用”的步骤提升能力成熟度。运用ResoF运行机制，横向分步推进“效能牵引自主技术的可信应用→自主技术促任务效能跨越发展→高效能高可信自主任务实施”；在总体共性产品研发、任务规划与调度管理能力方面，构建“Space+SOTA”可信自主技术体系，逐步突破快速感知与预警（如系外访客）、遥感或观测载荷、月球/火星等地外科研使用太空探索自主运行可信性技术体系（DMAODSE）^[76]等，并以纵向贯通需求（如微观高精自标定与量测能力）牵引T层和B层的自组织发展。② T层以太空探索自主技术体系为主题，提升智能、可信、低耗协同等方面的技术成熟度。运用跨生态体系动态模型并根据假设3（动态认知原理），逐步形成“自主运行的可信性技术体系→高可信低资源消耗自主运行架构→自主/可信/低耗的探索体系”。在SCM总体共性集成、任务支持系统集成方面，突破健康管理（PHM）、数字伴飞（DT）等SOTA技术集成难点，探索“Space+SOTA”可信自主技术体系。以纵向贯通需求（如基于微观精密量测的任务自标定及DT技术）牵引B层的自组织发展。③ B层以A层和T层需求包络的相关基础研究为主题，以多元化、多方向、多层级协同方式推进。根据假设2（认知差控制环）、假设3（动态认知原理），递次开展“可信性技术体系的基础研究→‘端到端’技术体系的基础研究→人工智能协助的基础研究”，填补创建系统学^[41]等基础理论的空白，逐步接近牵引科技创新涌现的全面生态愿景和战略目标。在信息理论需求方面，从人工智能伴生幻觉可信应用的基础研究拓展到香农信息论关于信息源头不完全可信的探索性基础研究。在精密量测与建模方面，并行发展先进的软件和硬件技术，如功能材料可靠性导向的白盒模型^[76]及数据链传递准确性保持的基础研究、基于功能材料精密量测的DT体系化基础研究，最终形成微观内嵌高精自标定的能力。在自主体系理论方面，集成信息理论、精密量测与建模的阶段性成果，协同发展面向全柔性需求的低资源消耗与高可靠的通信技术、全链路资源消耗的自主调度与优化，最终形成基于微观具身智能、全功能材料系服役退化与恢复的DT体系化基础能力。

构建的星际博望计划生态底座K面内容，在时间维上具有延续性、在空间维上具有协同性，反映了ResoF理论框架在跨尺度、综合性地支撑 $V \gg 0$ 状态保持方面的可行性；为建设先进总体设计部提供了总体核心技术能力的建设要点，对《规划》实施具有启发意义。

六、结语

本文面向空间科学强国生态建设与运行的重大战略实施背景，针对管理理论难以协同支撑生态成果多样性、引领性、价值可持续性要求的现状，提出了ResoF理论框架。采取“不与认知差为敌、良性流动认知差”理念，基于三面三层生态架构，厘清了以人为主、有人参与、无人干预等类型的生态体系底层逻辑以及集成演进过程，构建了总体框架的物理模型与数学表示、X| Δ 型ResoF动力学方程，据此显现跨生态体系的时空平衡关系；从“基础-技术-能力”出发，形成了ResoF的实施路径和运行机制，契合系统科学的基本原理，支持解决空间科学强国四方面矛盾。在构建理论框架的基础上，探讨了相应实践进展，确认了理论框架针对空间科学强国生态不同主体、不同层级的可行性与适应性。相关内容将加速高质量、高价值空间科学成果的持续产出，为推进航天强国建设、空间科学强国战略提供管理方法论与工程实践支撑。

面向未来，还可从两方面继续发展ResoF理论框架。对ResoF中的刚性、柔性、刚柔并济特征及其时空动态规律进行系统的数学刻画，以充分完善ResoF理论框架涉及的数学基础内容。“不与认知差为敌、良性流动认知差”的载体是人员个体，而人员个体也是正认知差人际流动的载体，可进一步研究多元个性个体情况下个体与集体认知差的涌现规律，即新型组织行为学理论。

致敬

中国航天事业创建70周年。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 21, 2026; **Revised date:** March 22, 2026

Corresponding author: Dang Wei is a professor-level senior engineer from the Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences. His major research fields include systems

engineering and reliability of space exploration. E-mail: dangwei@csu.ac.cn

Funding project: National Key Research and Development Program of China (2022YFF0610100); China Manned Space Project of National Science and Technology Major Project

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略·空间科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's discipline development strategy: Space science [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [2] 顾逸东. 关于空间科学发展的一些思考 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1031-1049.
Gu Y D. Thoughts on space science development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1031-1049.
- [3] 周建平, 吴季. 统筹空间科学、空间技术、空间应用协调发展的思考 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 59-66.
Zhou J P, Wu J. Coordinated development of space science, space technology, and space application in China [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 59-66.
- [4] 王赤. 空间科学突破的前瞻和中国的贡献 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1050-1065.
Wang C. Prospects of global space science breakthroughs and China's contributions [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1050-1065.
- [5] 王赤. 加速空间科学发展 建设世界科技强国 [J]. 红旗文稿, 2022 (19): 16-19.
Wang C. Accelerate the development of space science and build a world science and technology power [J]. Red Flag Manuscript, 2022 (19): 16-19.
- [6] 吴季, 王赤, 范全林. 中国科学院空间科学战略性先导科技专项实施11年回顾与展望 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1019-1030.
Wu J, Wang C, Fan Q L. Review on 11 years of implementation of strategic priority program (SPP) on space science and its prospect [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1019-1030.
- [7] 国家空间科学中长期发展规划(2024—2050年) [EB/OL]. (2024-10-15)[2026-03-15]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10616360/content.html>.
National mid and long-term development program for space science (2024—2050) [EB/OL]. (2024-10-15)[2026-03-15]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758838/c10616360/content.html>.
- [8] 刘艳琼. 两弹一星工程的成功经验与启示 [D]. 长沙: 国防科学技术大学(硕士学位论文), 2002.
Liu Y Q. The success experience and enlightenment of the project of "two bombs, one satellite" [D]. Changsha: National University of Defense Technology (Master's thesis), 2002.
- [9] 在全国科技大会、国家科学技术奖励大会、两院院士大会上的讲话 [EB/OL]. (2024-06-24)[2026-03-15]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202406/content_6959120.htm.
Speech at the nationwide S&T conference, national science and

- technology awards conference, and the conference of academicians of CAS and CAE [EB/OL]. (2024-06-24)[2026-03-15]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202406/content_6959120.htm.
- [10] 加强基础研究 实现高水平科技自立自强 [EB/OL]. (2023-07-31)[2026-03-15]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6895642.htm.
Strengthening basic research and realizing high-level scientific and technological self-reliance [EB/OL]. (2023-07-31)[2026-03-15]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202307/content_6895642.htm.
- [11] 托马斯·库恩. 科学革命的结构——新译精装版 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2022.
Thomas S K. The structure of scientific revolutions [M]. Beijing: Peking University Press, 2022.
- [12] 王赤, 宋婷婷, 曹松, 等. 空间科学“十五五”: 战略突破、协同创新, 迈向航天强国新征程 [J]. 科技导报, 2026, 44(3): 50–56.
Wang C, Song T T, Cao S, et al. Space science in the 15th Five-Year Plan Period: Strategic breakthroughs, collaborative innovation, advancing a new chapter as a leading space nation [J]. Science and Technology Review, 2026, 44(3): 50–56.
- [13] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术——系统工程 [N]. 文汇报, 1978-09-27(01).
Qian X S, Xu G Z, Wang S Y. Systems engineering: A technology for organization and management [N]. Wenhui Daily, 1978-09-27(01).
- [14] 杨善林, 付超, 任明仑, 等. 中国管理科学与工程学科的形成与发展 [J]. 中国管理科学, 2026, 34(1): 1–27.
Yang S L, Fu C, Ren M L, et al. The formation and development of China's management science and engineering discipline [J]. Chinese Journal of Management Science, 2026, 34(1): 1–27.
- [15] 吴季. 发展空间科学卫星系列就是新时期的“两弹一星”任务 [J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(8): 873–878.
Wu J. Space science satellites as key national programs for sustainable development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(8): 873–878.
- [16] 党炜, 许鹏程, 郑作环, 等. 价值可持续太空探索的系统工程——理念、架构与实践 [J]. 中国工程科学, 2025, 27(3): 229–246.
Dang W, Xu P C, Zheng Z H, et al. Systems engineering for value-sustainable space exploration: Philosophy, architecture, and practice [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(3): 229–246.
- [17] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1–23.
- [18] 顾逸东. 我国空间科学发展的挑战和机遇 [J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(5): 575–582.
Gu Y D. Challenge and opportunity for promoting space science in China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(5): 575–582.
- [19] 殷瑞钰, 汪应洛, 李伯聪, 等. 工程哲学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
Yin R Y, Wang Y L, Li B C, et al. Philosophy of engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [20] 盛昭瀚, 于景元. 复杂系统管理: 一个具有中国特色的管理学新领域 [J]. 管理世界, 2021, 37(6): 36–50.
Sheng Z H, Yu J Y. Complex systems management: An emerging management science with Chinese characteristics [J]. Journal of Management World, 2021, 37(6): 36–50.
- [21] 杨晓光, 高自友, 盛昭瀚, 等. 复杂系统管理是中国特色管理学体系的重要组成部分 [J]. 管理世界, 2022, 38(10): 1–24.
Yang X G, Gao Z Y, Sheng Z H, et al. The complex systems management is an important component of the management system with Chinese characteristics [J]. Journal of Management World, 2022, 38(10): 1–24.
- [22] 盛昭瀚. 管理: 从系统性到复杂性 [J]. 管理科学学报, 2019, 22(3): 2–14.
Sheng Z H. Management: From systematism to complexity [J]. Journal of Management Sciences in China, 2019, 22(3): 2–14.
- [23] 盛昭瀚, 薛小龙, 安实. 构建中国特色重大工程管理体系与话语体系 [J]. 管理世界, 2019, 35(4): 2–16, 51.
Sheng Z H, Xue X L, An S. Constructing theoretical system and discourse system of mega infrastructure construction management with Chinese characteristics [J]. Journal of Management World, 2019, 35(4): 2–16, 51.
- [24] 顾逸东, 吴季, 陈虎, 等. 中国空间探测领域40年发展 [J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 10–21.
Gu Y D, Wu J, Chen H, et al. Review of the 40-year development of China's space exploration [J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(1): 10–21.
- [25] 李丽仙, 高铭, 王艺璇, 等. 中国载人航天工程空间应用系统的工程生态分析 [J]. 工程研究—跨学科视野中的工程, 2025, 17(1): 78–90.
Li L X, Gao M, Wang Y X, et al. An engineering ecology analysis of the space utilization system in China manned space [J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(1): 78–90.
- [26] 张维, 马寿峰, 熊熊, 等. 中国系统工程: 学科起源、演进与重大影响 [J]. 系统工程学报, 2025, 40(5): 683–696.
Zhang W, Ma S F, Xiong X, et al. China's systems engineering: Origin of the discipline, evolution, and major impacts [J]. Journal of Systems Engineering, 2025, 40(5): 683–696.
- [27] 钱学森. 论系统工程——新世纪版 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
Qian X S. On systems engineering (new century edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.
- [28] 钱学森. 工程控制论(新世纪版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
Qian X S. Engineering cybernetics (new century edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.
- [29] 韩凯航, 陈湘生, 江媛, 等. 基于跨尺度仿生思想的地下生态城市构建新范式 [J/OL]. 中国工程科学, 1–12 [2024-03-15]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4421.G3.20260210.1651.002>.
Han K H, Chen X S, Jiang Y, et al. A new paradigm for constructing underground eco-cities based on the concept of cross-scale bionics [J/OL]. Strategic Study of CAE, , 1–12 [2024-03-15]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4421.G3.20260210.1651.002>.
- [30] 谭劲松, 宋娟, 陈晓红. 产业创新生态系统的形成与演进: “架构者”变迁及其战略行为演变 [J]. 管理世界, 2021, 37(9): 167–191.
Tan J S, Song J, Chen X H. The formation and evolution of industrial innovation ecosystem: “Architect” transition and the evolution of its strategic behavior [J]. Journal of Management World,

- 2021, 37(9): 167–191.
- [31] 江鸿, 吕铁. 政企能力共演化与复杂产品系统集成能力提升——中国高速列车产业技术追赶的纵向案例研究 [J]. 管理世界, 2019, 35(5): 106–125, 199.
- Jiang H, Lyu T. Government-firm capability coevolution and development of CoPS integration capabilities: A longitudinal case study of technological catch-up in the Chinese high-speed train industry [J]. Journal of Management World, 2019, 35(5): 106–125, 199.
- [32] 梅亮, 陈劲, 刘洋. 创新生态系统: 源起、知识演进和理论框架 [J]. 科学学研究, 2014, 32(12): 1771–1780.
- Mei L, Chen J, Liu Y. Innovation ecosystem: Origin, knowledge evolution and theoretical framework [J]. Studies in Science of Science, 2014, 32(12): 1771–1780.
- [33] Moore J F. Predators and prey: A new ecology of competition [J]. Harvard Business Review, 1999, 71(3): 75–86.
- [34] Adner R. Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy [J]. Journal of Management, 2017, 43(1): 39–58.
- [35] 王高峰, 杨浩东, 汪琛. 国内外创新生态系统研究演进对比分析: 理论回溯、热点发掘与整合展望 [J]. 科技进步与对策, 2021, 38(4): 151–160.
- Wang G F, Yang H D, Wang C. Comparative analysis of the evolution of innovation ecosystem research domestic and overseas: Theoretical retrospection, hot spot discovery and integration prospect [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2021, 38(4): 151–160.
- [36] 彭述明. 都江堰史 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- Tan X M. The history of Dujiangyan [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [37] 《都江堰文献集成》编委会. 都江堰文献集成: 历史文献卷 [M]. 成都: 巴蜀书社, 2007.
- Editorial Committee of the *Collection of Dujiangyan literature*. Collection of Dujiangyan literature: Historical documents volume [M]. Chengdu: Bashu Press, 2007.
- [38] 陈光宇, 税发萍, 鲁若愚, 等. 重大工程价值创造过程的适应性迭代机制——以都江堰水利工程“惠泽永敷”为例 [J]. 管理世界, 2025, 41(3): 205–227.
- Chen G Y, Shui F P, Lu R Y, et al. Adaptive iteration mechanisms for value creation process of megaprojects: The case of “Huize Yongfu” of Dujiangyan water conservancy project [J]. Journal of Management World, 2025, 41(3): 205–227.
- [39] “都江堰水利工程的管理学问题研究”课题组. 都江堰千年延续的管理解码: 重大工程可持续发展视角 [J]. 管理世界, 2023, 39(4): 175–195.
- The Research Group on “Management issues of Dujiangyan water conservancy project”. Decoding the management of Dujiangyan’s millennium continuation: The perspective of sustainable development of megaprojects [J]. Journal of Management World, 2023, 39(4): 175–195.
- [40] 莱希霍夫·约瑟夫. 热带雨林: 多样、美丽而稀少的热带生命 [M]. 台北: 日出出版社, 2022.
- Josef H R. Tropical rainforests: Diverse, beautiful and rare tropical life [M]. Taipei: Sunrise Press, 2022.
- [41] 钱学森. 创建系统学——新世纪版 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.
- Qian X S. Creating systematology (new century edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2007.
- [42] 傅志寰, 李伯聪, 王大洲. 扎根工程生态, 审视工程管理 [J]. 工程研究—跨学科视野中的工程, 2025, 17(1): 3–6.
- Fu Z H, Li B C, Wang D Z. The engineering ecosystem: A lens for engineering management [J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(1): 3–6.
- [43] 傅志寰. 工程生态论若干理论和实践问题 [J]. 自然辩证法研究, 2025, 41(9): 10–16.
- Fu Z H. Several theoretical and practical issues of engineering ecology [J]. Studies in Dialectics of Nature, 2025, 41(9): 10–16.
- [44] 王大洲. 迈向工程科学哲学: 研究进展、主要问题与研究策略 [J]. 自然辩证法研究, 2024, 40(9): 3–11, 61.
- Wang D Z. Towards philosophy of engineering science: Research progress, key issues and research strategy [J]. Studies in Dialectics of Nature, 2024, 40(9): 3–11, 61.
- [45] 李平, 竺家哲. 组织韧性: 最新文献评述 [J]. 外国经济与管理, 2021, 43(3): 25–41.
- Li P, Zhu J Z. A literature review of organizational resilience [J]. Foreign Economics & Management, 2021, 43(3): 25–41.
- [46] 盛昭瀚, 王海燕, 胡志华. 供应链韧性: 适应复杂性——基于复杂系统管理视角 [J]. 中国管理科学, 2022, 30(11): 1–7.
- Sheng Z H, Wang H Y, Hu Z H. Supply chain resilience: Adapting to complexity—Based on the perspective of complex system thinking [J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(11): 1–7.
- [47] Wolke D, Zhou Y L, Liu Y W, et al. A systematic review of conceptualizations and statistical methods in longitudinal studies of resilience [J]. Nature Mental Health, 2025, 3(9): 1088–1099.
- [48] 胡晗, 颜克高, 吕添贵, 等. 湖南省生态韧性时空演变与非线性效应 [J]. 生态学报, 2025, 45(21): 10526–10536.
- Hu H, Yan K G, Lyu T G, et al. Exploring the spatiotemporal evolution and nonlinear effects of ecological resilience in Hunan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(21): 10526–10536.
- [49] 上海交通大学钱学森研究中心. 集大成 得智慧——钱学森谈教育 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015.
- SJTU Qian Xuesen Research Center. Wisdom: Qian Xuesen on education [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015.
- [50] 王成斌, 刘兆世. 钱学森总体设计部思想初探 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- Wang C B, Liu Z S. A preliminary study on Qian Xuesen’s thought of the systems engineering design department [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2011.
- [51] 郝祎吟, 吴馥桐, 张馨方. 神舟二十号航天员乘组“换船”返航, 彰显中国航天应急能力 [J]. 国际太空, 2025(12): 5–6.
- Hao Y N, Wu F T, Zhang X F. Shenzhou 20 crew’s “vessel swap” return demonstrates China’s space emergency response capability [J]. Space International, 2025(12): 5–6.
- [52] 张璐, 王岩, 苏敬勤, 等. 资源基础理论: 发展脉络、知识框架与展望 [J]. 南开管理评论, 2023, 26(4): 246–258.
- Zhang L, Wang Y, Su J Q, et al. Resource-based theory: Development context, knowledge framework and outlook [J]. Nankai

- Business Review, 2023, 26(4): 246–258.
- [53] Teece D J, Pisano G, Shuen A. Dynamic capabilities and strategic management [J]. Strategic Management Journal, 1997, 18(7): 509–533.
- [54] David J T. Dynamic capabilities: Foundational concepts [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2025.
- [55] Santo F, Carl T B, Katy B, et al. Science of science [J]. Science, 2018, 359(6397): eaaa0185.
- [56] International Organization for Standardization. Space systems: Closed loop problem solving management (ISO 18238: 2015) [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.
- [57] 姜玉平. 钱学森与中国战略核武器的研制与试验 [J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(S2): 51–61.
- Jiang Y P. Qian Xuesen and China's development and test of strategic nuclear weapons [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(S2): 51–61.
- [58] 王艳明, 温大壮, 范俊, 黄旭华在中国核潜艇研制中的学术成就与驱动力 [J]. 科技导报, 2025, 43(5): 121–124.
- Wang Y M, Wen D Z, Fan J. In commemoration of academician Huang Xuhua: An analytical exploration into the motivational forces underpinning his scholarly achievements [J]. Science & Technology Review, 2025, 43(5): 121–124.
- [59] 斯蒂芬·罗宾斯, 蒂莫西·贾奇. 组织行为学 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2021.
- Stephen R, Timothy J. Organizational behavior [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2020.
- [60] 彼得·德鲁克. 管理的实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- Peter F D. The practice of management [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [61] 袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的X射线宇宙 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(3): 6–25.
- Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein probe: Exploring the ever-changing X-ray universe [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48(3): 6–25.
- [62] 中国载人航天工程办公室. 中国空间站科学研究与应用进展报告 [R]. 北京: 中国载人航天工程网, 2026.
- China Manned Space Engineering Office. Progress report on scientific research and application of China space station [R]. Beijing: China Manned Space Engineering Network, 2026.
- [63] 张杰, 刘洋, 薛长斌, 等. 月球南极水冰科学问题与探测方法 [J]. 空间科学与试验学报, 2025, 2(3): 1–10.
- Zhang J, Liu Y, Xue C B, et al. Scientific questions and detection methods of water ice at the lunar south pole [J]. Journal of Space Science and Experiment, 2025, 2(3): 1–10.
- [64] 张荣桥, 张焜, 刘建军, 等. 天问二号小天体探测任务 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55(7): 6–15.
- Zhang R Q, Zhang H, Liu J J, et al. Tianwen-2 small bodies exploration mission [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2025, 55(7): 6–15.
- [65] 徐海涛, 薛长斌, 刘鹏, 等. 中国首次小行星探测工程有效载荷总体设计 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55(7): 16–24.
- Xu H T, Xue C B, Liu P, et al. Overall design of payload for China's first asteroid exploration mission [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2025, 55(7): 16–24.
- [66] Zou Y L, Xue C B, Jia Y Z, et al. Scientific objectives and configuration payloads of asteroid defense test missions [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(2): 169–176.
- [67] 陈勇, 林宝军, 张善从. 不同拓扑结构FC-AE-1553B网络性能研究 [J]. 计算机工程, 2011, 37(22): 79–81.
- Chen Y, Lin B J, Zhang S C. Research on FC-AE-1553B network performance with different topology structure [J]. Computer Engineering, 2011, 37(22): 79–81.
- [68] 曹素芝, 房亮, 吴少俊, 等. 总线型FC-AE-1553网络结构及实时性分析 [J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 858–861.
- Cao S Z, Fang L, Wu S J, et al. A bus network topology structure of FC-AE-1553 and real-time analysis [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 858–861.
- [69] 谭一泓, 贺春禄. 国科赛思: 做国产元器件自主可控的助推者 [J]. 高科技与产业化, 2019, 25(1): 60–63.
- Tan Y H, He C L. CISSDATA: Booster for autonomic and controllable domestic components [J]. High-Technology & Commercialization, 2019, 25(1): 60–63.
- [70] 项静峰, 任伟, 邓思敏达, 等. 空间冷原子钟技术 [J]. 中国激光, 2024, 51(11): 1101012.
- Xiang J F, Ren W, Deng S M D, et al. Space cold atomic clock technologies [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(11): 1101012.
- [71] Committee on Biological and Physical Sciences Research in Space 2023–2032. Thriving in space: Ensuring the future of biological and physical sciences research: A decadal survey for 2023–2032 [R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2023.
- [72] 詹虎. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天 [J]. 科学通报, 2021, 66(11): 1290–1298.
- Zhan H. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the survey space telescope of China Manned Space Program [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(11): 1290–1298.
- [73] 张双南, 卢方军, 徐玉朋, 等. 探索极端宇宙 [J]. 现代物理知识, 2024, 36(1): 34–41.
- Zhang S N, Lu F J, Xu Y P, et al. Explore the extreme universe [J]. Modern Physics, 2024, 36(1): 34–41.
- [74] 钱学森. 星际航行概论 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2008.
- Qian X S. Introduction to interplanetary travel [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2008.
- [75] 李培楠, 包为民, 姚伟. 工程科学发展战略问题与机制完善 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(3): 317–325.
- Li P N, Bao W M, Yao W. Strategic development problems and mechanism improvement in engineering science [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(3): 317–325.
- [76] 党炜, 骆军委, 郑作环, 等. 深空探测自主运行的一种可信性技术体系 [J]. 空间科学学报, 2024, 44(2): 228–240.
- Dang W, Luo J W, Zheng Z H, et al. Dependability technology system for autonomous operation of deep space exploration [J]. Chinese Journal of Space Science, 2024, 44(2): 228–240.