

圈层动力跨维整合: 社会对地球科学源头创新的迫切需求

郭正堂^{1,2*}, 姚玉鹏^{1*}, 刘哲¹

1. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* 联系人, E-mail: ztguo@mail.iggcas.ac.cn; yaoyp@nsfc.gov.cn

1 现代地球科学发展简史

现代地球科学是以地球的固体和流体圈层及生命系统为研究对象, 结合日地空间及行星探测, 综合运用观测、实验与模拟等手段, 系统揭示地球和行星的物质组成、结构构造、演化历史和动力机制, 并预测其未来变化的综合性学科体系。其研究领域广泛, 涵盖地理科学、地质学、地球化学、地球物理学和空间物理学、大气科学、海洋科学、环境地球科学及月球与行星科学等分支学科。地球科学肩负着认识自然、利用自然、协调人与自然关系的核心使命。相关研究不仅深刻拓展了人类对地球的认知边界, 也极大地推动了社会生产力的提升, 催生了新的财富形态, 重塑了人类的生活方式, 提升了社会经济面对自然灾害的韧性, 促进了人与自然关系的协调, 并为全球治理提供了重要科技支撑, 为人类文明发展作出了巨大贡献。

现代地球科学孕育于18世纪末~19世纪初(图1), 到20世纪早期, 已初步形成一系列重要科学发现与理论雏形。随着观测与实验技术的不断进步, 20世纪中期获取了大量的关键科学证据, 促成了多项重大理论突破。自20世纪末至今, 地球科学主要处于已有理论的持续深化与领域拓展阶段(图1)。

1.1 现代地球科学的孕育

现代地球科学诞生的核心标志, 是“物质循环”与“时间演化”这两大科学观念的萌芽与确立。18世纪末, Hutton^[1]在《地球理论》(*Theory of the Earth*)中开创性地提出“地球是一个动态系统”, 并系统阐述了地质循环的概念。这不仅标志着地质学作为一门独立学科的诞生, 也为日后地球系统科学的发展奠定了重要思想基础。Lyell^[2]随后在其《地质学原理》(*Principles of Geology*)中进一步发展了这一思想, 提出了“现在是认识过去的钥匙”这一著名的现实主义原则, 强调地质过程的漫长性与持续性。



郭正堂 中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士, 国家自然科学基金委员会地球科学部主任, 曾任国际第四纪研究联合会副主席。主要从事新生代地质环境与全球变化研究。



姚玉鹏 国家自然科学基金委员会地球科学部常务副主任、研究员。主要研究领域为岩石学和南极地质学; 长期从事国家自然科学基金管理工作。

18世纪末的科学发展也拉开了天文学与地球科学交叉和近代行星科学研究的序幕(图1)。例如, 受益于地球科学的航海定位和测绘技术, Herschel^[3]通过望远镜发现天王星, 突破了肉眼可见的太阳系疆域。Kant(1755)^[4]与Laplace(1796)^[5]先后从不同理论视角提出星云假说, 分别侧重宇宙演化与天体力学, 为太阳系起源构建了理论雏形。虽然星云假说通常被归入天文学范畴的突破, 但后来的地球科学进展, 如同位素年代学、地球内部物理学和比较行星学等, 为星云假说的验证起到了不可替代的作用, 使该假说最终发展为现代行星科学中经过实证检验的理论框架。

引用格式: 郭正堂, 姚玉鹏, 刘哲. 圈层动力跨维整合: 社会对地球科学源头创新的迫切需求. 科学通报, 2026, 71: 5225–5239

Guo Z, Yao Y, Liu Z. Integrating Earth Dynamics Across Dimensions: society's pressing need for fundamental innovation in Earth science (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 5225–5239, doi: [10.1360/CSB-2026-0615](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0615)

分支学科	现代地球科学孕育 18世纪末–19世纪	重要理论雏形出现 20世纪早期	关键证据与理论突破 20世纪中期	理论深化与领域拓展 20世纪末–21世纪初
地理科学	● 洪堡《宇宙》(1845) ● 李特尔《地学》(1852)	● 柯本气候分类(1918–36)	● 遥感科学兴起(1960s) ● 地理信息系统(GIS)兴起(1960s)	● 全球对地观测系统建立(2005)
地质学	● 赫顿《地球理论》(1795) ● 莱伊尔《地质学原理》(1830) ● 达尔文《物种起源》(1859)	● 四次冰期理论提出(1901) ● 大陆漂移假说提出(1912)	● 米兰科维奇假说初构(1941) ● 板块构造理论建立(1967–68) ● 米兰科维奇理论确立(1976) ● 《黄土与环境》(1985)	● 大陆动力学兴起(1990s) ● 页岩气革命(2000s)
地球化学		● 元素克拉克值确定(1908) ● 晶体化学定律确立(1926)	● 氦同位素发现(1932) ● 同位素年代学兴起(1950s)	● 地幔地球化学储库研究(1980s)
地球物理学 和空间物理学	● 高斯《地磁学通用理论》(1839) ● 现代地震仪发明(1894)	● 莫霍面发现(1909) ● 核幔边界发现(1914)	● 地球内核发现(1936) ● 人造卫星发射(1957) ● 定量地震学兴起(1970s)	● 地球参考模型(PREM)建立(1981)
大气科学		● 天气预报初值问题提出(1904) ● 锋面气旋理论建立(1919)	● 数值天气预报成功(1950) ● 混沌理论提出(1963) ● 全球变暖概念提出(1975)	● 《地球系统科学：深入审视》(1988) ● IPCC成立(1988) ● 气候突变发现(1988–93)
海洋科学	● 挑战者号环球科学考察(1872–76)		● 深海环流理论奠基(1960) ● 海底扩张学说建立(1961) ● 深海钻探计划(DSDP)启动(1968) ● 深海热液系统发现(1977)	● 冷泉系统发现(1984) ● 冰芯研究突破(1980s) ● 大洋传送带理论建立(1987)
环境地球科学			● 八大公害事件警示(1930–68) ● 联合国人类环境会议宣言通过(1972)	● 臭氧洞发现和机制解释(1985–87) ● 《巴黎协定》通过(2015)
月球与行星科学	● 康德-拉普拉斯星云说(1755–96) ● 望远镜发现的首颗行星(天王星, 1781)	● 日食观测验证广义相对论(1919)	● 月球、金星、火星探测启动(1959–61) ● 阿波罗载人登月(1969) ● 太阳系星云模型(1970s) ● 月球大碰撞起源假说提出(1975)	● 首颗类太阳恒星系外行星(1995) ● 嫦娥着陆取样返回(2019–20) ● 祝融号火星着陆(2021)

图 1 现代地球科学发展历程中的重要事件举例

Figure 1 Examples of key events in the development of modern Earth science

进入19世纪, 地球科学多个分支取得关键进展(图1)。Humboldt^[6](1845)在《宇宙》(*Kosmos*)中提出自然地理学综合理念, 并揭示了植被垂直地带性规律; Ritter^[7]在《地学》(*Geographie*)中系统阐述人地关系与地理学的综合性。Darwin^[8]基于“小猎犬号”环球考察, 发表了著名的《物种起源》(*On the Origin of Species*), 系统阐述了自然选择学说, 改变了人类对生命起源及演化的认知, 对现代生物学产生了深刻的影响。英国“挑战者号”环球科学考察(1872–1876)奠定了现代海洋学的基础^[9]。固体地球物理学领域同样取得突破: Gauss^[10]在《地磁学通用理论》(*Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*)中, 首次以数学物理方法系统刻画地球磁场, 奠定了现代地磁学基础。1894年, 米尔恩成功研制现代地震仪^[11], 使全球地震观测具备统一可比的物理基础。上述进展共同推动人类对地球的认知从局部描述走向系统解释, 标志着地球科学研究进入一个新的阶段。

1.2 20世纪早期的“认知大爆发”

20世纪初期是地球科学理论发展的关键时期(图1)。这些突破多数源于自由探索式的研究, 例如: 基于阿尔卑斯山冰川沉积提出的四次冰期理论^[12], 揭示了地球存在旋回性冰期-间冰期气候变化; 莫霍洛维契奇(1909)发现的莫霍面^[13]与

Gutenberg^[14](1914)确定的核幔边界为地球内部动力学研究开启了新的起点。Wegener于1912年系统提出^[15]并在《海陆的起源》(*Entstehung der Kontinente und Ozeane*, 1915)^[16]中完整阐述的大陆漂移假说, 挑战了当时相对固化的地球观, 并为后来的板块构造理论奠定了重要的思想基础。元素克拉克值的确定^[17]及戈尔德施密特建立的晶体化学定律^[18], 则标志着地球化学研究走向量化。

Bjerknes^[19]将天气预报问题表述为大气运动方程组的初值问题, 后由其子Bjerknes^[20]进一步建立了锋面气旋理论, 分别从数值求解与天气过程物理机制两个层面, 奠定了现代天气学与动力气象学的核心基础。Köppen^[21](1918–1936)提出以气温和降水为指标的柯本气候分类法, 奠定了气候学中量化、可对比的全球分类框架。1919年的日食观测成功验证广义相对论^[22], 标志着该理论从预言走向实证检验的关键跨越, 有力推动了现代引力物理学的建立。这一成果既是天文学观测的直接体现, 也是物理学理论的实证检验, 同时依赖于地球科学所提供的基础支撑——从日食事件的精确预测、观测站位的全球布设, 到大气扰动的校正处理, 地球科学在其中发挥了不可或缺的“幕后支撑”作用, 构成了该交叉验证体系的重要基础。1936年, Lehmann^[23]通过远震波形分析发现地球内核, 揭示了固体地球内部的圈层结构, 完善了地震

学对地球深部的认知。

1.3 20世纪中期的关键证据和理论突破

到1940年代, Milankovitch^[24]基于对日地关系的研究, 提出了冰期旋回的天文学解释(即米兰科维奇假说), 将地球轨道参数的周期性变化与第四纪冰期-间冰期交替之间首次建立起定量联系, 成为地球科学与天文学交叉领域的一座里程碑(图1)。1950年, Charney等人^[25]首次成功实现数值天气预报, 不仅确立了天气预报的物理科学基础, 也推动了地球流体动力学的形成。随后, Stommel与Arons^[26]提出了深海环流理论, 首次从行星尺度揭示了大洋深层环流的基本运动格局, 为现代深海环流研究奠定了理论基础。新型观测与实验技术的发展深刻改变了地球科学的研究范式: 氦同位素的发现^[27]奠定了同位素地球化学的基础, 推动了地质学、宇宙化学及环境科学等多学科的方法学变革; 同位素年代学的兴起^[28]则实现了地质学从“相对年代学”到“绝对年代学”的跨越, 并为许多地球系统过程提供了关键的示踪手段。

在20世纪中期, 遥感科学的兴起实现了地表与大气观测从点状采集向区域乃至全球尺度的拓展^[29], 同期兴起的地理信息系统(Geographic Information System, GIS)研究^[30], 则显著提升了空间数据的组织、分析及制图表达能力。此外, 定量地震学的兴起^[31]进一步增强了对地震波传播机制与地球内部结构反演的定量刻画能力。同时, 地球科学的研究对象与空间范畴也逐步向深空扩展。1957年人造卫星成功发射^[32], 正式开启了空间时代。此后, 月球、金星及火星探测任务的相继启动^[33], 推动行星科学进入工程化探测阶段。阿波罗载人登月计划^[34]则直接获取了月球样品, 并为行星比较研究提供了新的实证依据。太阳星云盘模型^[35]与月球大碰撞起源假说^[36]的提出, 则拓展了有关地球—月球—行星系统起源的研究问题与理论框架。

20世纪60~70年代, 深海钻探计划^[37]和地磁技术等的发展^[38]为海底扩张^[39,40]和板块构造理论提供了关键证据^[41-45](图1), 板块构造理论应运而生, 由此成为或可与相对论、量子力学及分子生物学诞生相并列的自然科学重大突破, 也极大地推动了矿产资源勘探与灾害防治等实际问题的解决。米兰科维奇假说亦在理论与气候记录层面获得双重验证^[46,47], 使米兰科维奇假说最终确立为米兰科维奇理论。深海热液系统的发现^[48]则揭示了海底能量、物质循环与生命过程之间的新型耦合关系。继数值天气预报成功实现后, 洛伦兹提出的混沌理论^[49]进一步在多个自然科学领域引发了非线性科学的研究热潮。该理论从根本上重塑了预测理论的思想基础, 推动了大气科学、物理学及地球系统建模等领域的方法论革新。

到20世纪80年代, 全球变化与表层地球系统科学逐渐成为地球科学研究的主流方向之一(图1)。古气候学家、海洋化学家布勒克提出“全球变暖”的概念之后^[50], 又构建了“大洋

传送带”理论^[51], 为全球变化与气候突变研究奠定了重要的基础。中国第四纪黄土的研究则为地球环境系统的演变历史提供了关键的陆相证据和新的认识^[52]。1980~2000年代, 冰芯研究将大气温室气体记录拓展至80万年尺度^[53-55], 成为气候变化与碳循环关系研究的关键依托之一。基林曲线(Mauna Loa观测)记录了近70年来大气CO₂浓度的快速上升; 与冰芯记录相比, 这一增幅与增速远超过去80万年的自然波动^[55]。冰芯和海洋记录研究相继揭示气候突变现象^[56,57], 进一步表明气候系统具有显著的非线性特征。南极臭氧洞的发现^[58]和机制解释^[59,60], 直接推动了国际社会签署《蒙特利尔议定书》, 成为全球合作解决环境问题的里程碑事件。随着全球环境问题日益突出, 如20世纪中叶发生于比利时、美国、英国和日本等工业化国家的“八大公害事件”(即马斯河谷烟雾、多诺拉烟雾、伦敦烟雾、洛杉矶光化学烟雾、水俣病、富山骨痛病、四日市哮喘和米糠油事件)相继爆发, 环境地球科学应运而生。联合国人类环境会议通过《人类环境宣言》^[61], 标志着环境问题开始成为全球治理的重要议题, 地球科学的研究范畴也随之大幅拓展。

1.4 20世纪后期以来的理论深化与领域拓展

20世纪80年代末, 联合国大会通过决议^[62], 支持世界气象组织与联合国环境规划署设立的政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)开展工作, 气候变化研究进一步走向系统化。同年, 《地球系统科学: 深入审视》(*Earth System Science: A Closer View*)出版^[63], 明确提出地球系统科学的概念, 其核心内涵主要指表层地球系统。事实上, 物理气候模式的持续快速发展, 为理解气候系统及人类活动的影响奠定了科学基础^[64], 开创了解决复杂地球系统科学问题的先河。在此基础上, 联合国《21世纪议程》将地球科学列为可持续发展战略的重要科学支撑。

海洋、固体地球深部过程与行星科学领域的研究在这一时期也持续深化: 地球参考模型(Preliminary Reference Earth Model, PREM)的建立^[65]、冷泉系统的发现^[66]以及地幔地球化学储库研究的推进^[67], 分别推动了地球内部结构成像、海底物质与能量循环机制以及地球化学演化过程的量化与综合集成。大陆动力学的兴起^[68]、首颗围绕类太阳恒星运行的系外行星的发现^[69]、页岩气革命^[70]、综合大洋钻探计划的启动^[71]以及全球对地观测系统的建立^[72], 深刻体现了基础理论探索与观测技术创新之间的协同促进关系。进入21世纪后, 嫦娥工程的着陆与采样返回^[73,74]、《巴黎协定》确立的全球排放达峰与源汇平衡框架(对应我国“碳达峰”和“碳中和”目标)^[75], 以及祝融号火星车的成功着陆^[76], 进一步表明地球科学已与深空探测、能源结构转型及全球治理议题之间形成了日益紧密的关联。

值得指出的是, 上述代表性科学进展(图1)难以涵盖地球科学发展历程中的所有重大突破。不同学者对关键事件的重

要性可能存在不同判断,且诸多突破往往具有显著的交叉学科特征,难以严格归属于某一分支学科。此外,囿于作者的知识局限,文中对这些事件在科学发展中作用与意义的阐述,亦难免存在疏漏或不够全面之处。尽管如此,毋庸置疑的是,在上述发展历程中,地球科学为人类文明作出了不可替代的贡献^[77]。地球科学不断拓展并深化人类对自身所居星球的认知,其积累的知识体系不仅丰富和推动了自然科学的整体发展,也为人类合理开发利用自然资源、实现人与环境的和谐共生提供了根本性支撑。同时,地球科学在自身演进过程中,持续吸收数学、物理学、化学、生物学等基础学科的新理论与新方法,反过来也为这些学科的进步作出了重要贡献。

可以毫不夸张地说,没有地质学,就没有进化论;而后者又对现代生物学等学科有深远的影响,地质学也因此被称为科学上的皇冠明珠^[78]。由于人类文明史在很大程度上是一部能源和资源的利用史,而能源和资源的突破,均以地球科学基础理论的突破为先导,充分展示了基础研究对社会经济发展和产业源头的决定性作用。从这个意义上讲,没有地球科学就难以有工业革命。地球科学创造的地图是人类文明史上的伟大创想之一,它用科学的符号系统、精确的地图投影和系统的综合方法,表达复杂地理世界的空间结构和空间关系,为人类社会交通运输、区域规划和导航等提供了基础,从而改变了世界。大陆漂移—海底扩张假说的提出,直接催生了板块构造理论的诞生,为地球上资源、灾害和环境的分布及演化给出了合理解释和有效预测。源于地球科学的混沌理论,挑战了传统的决定论,解释了复杂系统的动态行为,重塑了科学和哲学对复杂性及因果关系的认知。地球科学中的气候系统建模,揭示了复杂系统的内在运动规律,提出了量化分析与预测工具,奠定了现代地球科学数值模拟基础,推动了人类对复杂系统的科学认知。从20世纪80年代开始的全球变化和气候变化研究,则催生了低碳经济,促进了世界经济发展范式的变革。

新中国成立以来,我国地球科学迅速发展,为国家建设作出卓越贡献。早在20世纪80年代中期,中国气象学家叶笃正、地质学家刘东生等老一辈科学家就以地球系统科学思想为指引,率先开展中国的全球变化预研究。来自地球科学多个领域的不少科学家和研究工作获得国家科学技术奖。其中,地质学家刘东生(2003)、气象学家叶笃正(2005)、气象学家曾庆存(2019)和测绘遥感学家李德仁(2023)获得国家最高科学技术奖。大庆油田发现过程中的地球科学工作(1982)、中国地质图类及亚洲地质图(1982)、青藏高原隆起及其对自然环境与人类活动影响的综合研究(1987)、东亚大气环流(1987)、中国层控矿床地球化学(1987)和澄江动物群与寒武纪大爆发(2003)等获得国家自然科学奖一等奖;高钛型钒钛磁铁矿的高炉冶炼新技术(1979)、白云鄂博中贫氧化矿浮选—选择性团聚选矿工艺(1988)、京津冀地下水污染防治关键技术与应用(2023)等获得国家技术发明奖一等奖。在新中国

“两弹一星”的伟大事业中,地球科学家更是默默地提供了放射性矿产资源的强力支撑,成为“无名英雄”。

2 地球科学发展新态势及社会对学科源头创新的迫切需求

从上述学科发展历程来看,近百年来地球科学研究的主旋律每隔20~30年便会经历一次重大变革^[79]。1910年代,冰期旋回理论、莫霍面的发现及大陆漂移假说等一系列自由探索性科学突破,彻底打破了地球静态演化的传统认知,推动地球科学从“描述现象”真正迈向“揭示机理”的新时代(图2)。1940年代,对冰期旋回的天文解释(米兰科维奇假说)颠覆了传统冰期成因观,深化了人类对“日地关系”、气候驱动力及未来气候的理解,奠定了地球环境科学与古气候学的重要基石。20世纪60年代,聚焦地球固体圈层运动规律的板块构造研究催生了板块构造理论,不仅是地球科学领域的突破,也代表了整个自然科学的重大突破,极大地推动了资源与灾害领域的研究(图2)。20世纪80年代开始的全球变化研究以地球流体圈层的运动规律为主攻方向,标志着地球科学进入“表层地球系统科学”时代,取得了一批前所未有的新认识,催生了支撑世界经济可持续发展的低碳理念。

当前,地球科学正面临一系列新的挑战。资源、环境与灾害等问题似乎已触及现有认知体系的“天花板”,亟需从学科“最上游”实现新的突破(图3)。应对全球性重大挑战与推动科学研究范式转型,已成为当代地球科学的重要时代特征。在此背景下,我国的地球科学也面临新的挑战与机遇^[79~84]。我们亟需加强地球科学的体系布局研究,系统分析其发展态势与社会需求,从基础前沿、国家需求、学科交叉和研究范式等维度,梳理地球科学的重点领域,为优化基金资助布局和制定学科未来发展规划提供支撑,进而推动地球科学更好地服务于国家经济建设与社会可持续发展。近年来,学科日益强调“圈层动力跨维整合”^[84],致力于从地质到人类时间尺度上系统理解多圈层演变的物理、化学、生物与地质过程及其动态变化机制。这一趋势既源自地球科学实现源头创新的内在驱动,也回应了当代人类社会对地球科学日益迫切的知识需求——集中体现在资源、环境与灾害三大领域。

在资源领域,近年来的进展显示出,仅研究固体地球过程难以全面解决人类面临的资源问题,因为许多矿物和矿产资源(特别是外生矿床)的形成不仅受固体地球系统的影响,而且受地表气候-环境系统的显著影响^[85],两者各自均可视为一个由三维空间和时间(演化)构成的“四维运动系统”,且在不同维度上相互作用^[84]。蕴藏于地下甚至深部的矿产资源受表生环境过程影响的机理仍未被深刻认识。不少控制资源富集的关键固体地球过程(如板块的驱动力)极可能受到地表环境和生物过程的控制^[86]。近年来的研究进展表明,油气资源和自然氢能源等的形成均与固体地球系统与地表环境系统的相互作用密切相关^[87]。

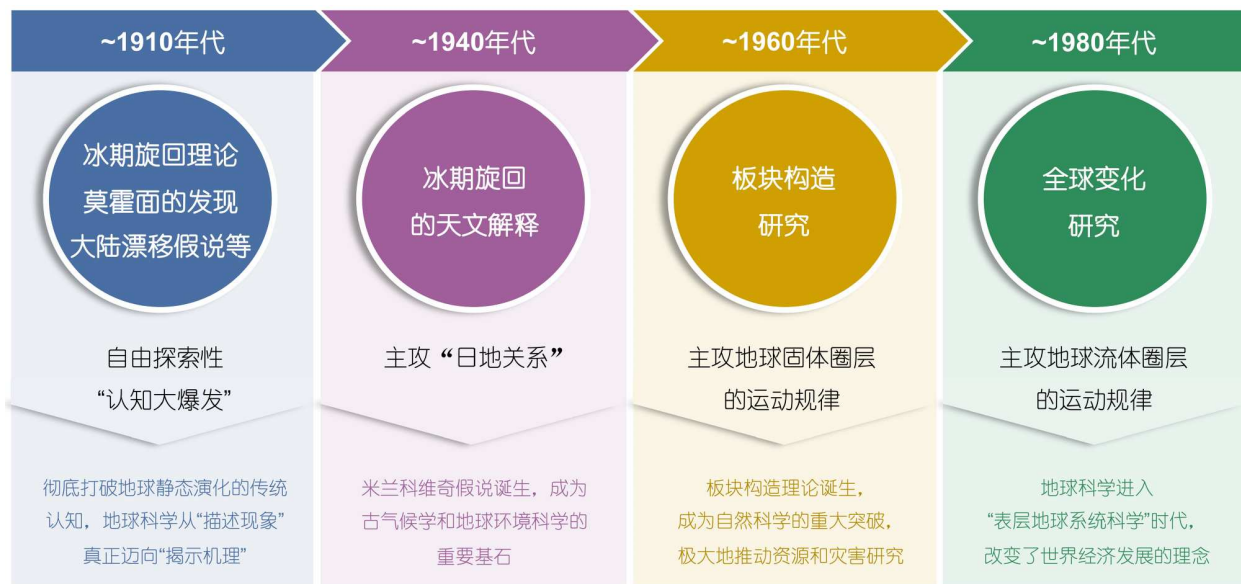


图2 近百年地球科学研究的“主旋律”每隔20~30年发生一次大变革

Figure 2 Major transformations of the main theme in Earth science research occur every 20–30 years over the past century

在环境领域, 仅聚焦于地表圈层过程研究, 也难以从根本上破解人类面临的环境问题, 因为许多固体地球过程对环境演变有强烈的控制作用^[88]。近年来的研究^[89,90]表明, 不同尺度的环境演变存在显著的“跨尺度效应”, 并呈现双向影响特征。其过程与机理的解析, 无疑是未来研究的挑战, 也进一步凸显了整合多尺度环境演变过程对于理解人类尺度环境变化的关键意义。

自农业起源, 特别是工业革命以来, 人类活动已成为地球系统的重要营力^[91]。虽然地质尺度的气候-环境演变多数是缓慢的长尺度过程, 而社会尺度的气候-环境变化是相对快速的短尺度过程, 但二者的整合对理解社会尺度的气候-环境变化机制至关重要, 因为环境演变的最终结果源于不同尺度变率的叠加。社会尺度的环境变化往往具有变幅小, 难识别的特点, 只能用来揭示部分过程和机制; 而地质尺度的过程由于持续时间尺度长, 变幅大, 往往更易于识别, 可作为短尺度过程与机制的“放大镜”^[84]。

从另一角度看, 如果我们不能对新生代全球变冷、冰期-间冰期旋回、气候突变等气候系统的基本行为给出科学合理的解释, 便意味着我们对整个气候系统运作机制的理解尚不全面、不够深入, 无疑会影响对未来气候环境变化预测的准确性和可靠性。越来越多的证据显示, 地球历史上的碳循环与气候变化之间的关系, 对未来人类应对气候变化所开展的地球工程研究具有重要的启示和借鉴价值^[92]。当前地球上已知的6000余种矿物中, 相当一部分源于人类活动的塑造。这些矿物有望用于更精准、定量地示踪人类活动的过程、历史与强度, 进而揭示人类对地球系统的改造作用和人地关

系。然而, 目前对这一潜力的挖掘仍非常有限。

在灾害领域, 新的研究表明, 多数自然灾害的致灾过程实际上都是固体-表层圈层相互作用的结果^[93], 意味着相对割裂的地表和深部圈层过程研究也无法根本解决灾害问题。多数自然灾害源于固体地球与表层环境的复杂互动。地壳运动引发地震、火山喷发及海啸, 而构造抬升与外力侵蚀共同塑造了山体滑坡、崩塌的地质基础。气候系统则通过降水、径流等过程作用于地表——暴雨诱发泥石流, 干旱加剧土地沙化。固体地球为灾害提供物质与能量背景, 表层环境(水、大气、生物圈)通过风化、搬运和堆积等作用触发或放大灾害效应。正是二者在时空尺度上耦合, 使板块边界与季风区等关键地带成为灾种频发区域。理解这种相互作用, 是预测与减轻灾害的科学前提。

发展空间与行星科学, 是我国推进“深空战略”的迫切需求。实际上, 这一领域并非孤悬于地球科学体系之外的前沿阵地, 而是与地球科学各分支学科深度耦合、彼此赋能的知识纽带^[94]。一方面, 行星探测为理解地球提供了不可替代的“对照实验”。金星失控的温室效应、火星古磁场的湮灭、土卫六的碳氢化合物循环, 这些地外情境极大拓展了地球科学的问题域, 使研究者得以在更宽广的参数空间中检验板块构造、气候演化、生命起源等理论模型的适用边界。另一方面, 地球本身便是离我们最近的行星实验室。海底热液喷口生态系统的发现, 直接重塑了天体生物学对宜居环境的判别标准; 地球上的环境过程, 则为解读火星环境演变提供了重要参照^[95,96]。反过来, 空间探测所催生的遥感成像、高光谱分析等技术, 如今已深度嵌入区域地质调查与全球变化监测的常

规流程。这种双向渗透正催生出一批新兴交叉方向，推动地球科学从“局域认知”迈向“行星尺度”的整合视野。

从上述分析可以看出，相对割裂的地球深部与表层研究已难以应对社会和国家重大战略需求对地球科学的知识需求，亟待地球科学“最上游”的基础性和原创性理论突破，以更好地支撑资源、环境和灾害等新难题的解决。这就要求必须整合地球的固体-流体-生物-人类圈层过程与动力学，充分考虑自然过程与人类活动的相互影响。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于1983年设立的地球系统科学委员会于1986和1988年先后发布了研究报告，系统阐述“地球系统科学”框架^[63,97]，而全球变化研究也常被视为地球系统科学的典型范式，考虑了碳循环的气候系统模式即被称为“地球系统模式”。但不少学者指出，早期的“地球系统”概念主要指向地球表层系统^[80,82]。仅侧重表层系统的研究，虽然在气候-环境领域部分问题的研究上更为聚焦，却不足以应对当前地球科学面临的许多新挑战，例如：固体地球与地表环境两个四维运动系统的相互作用对矿产资源和灾害的控制；与固体地球、环境和生物过程密切相关的“矿物演化”问题；以及环境演变的跨尺度效应背后的动力机制难题等。

从这一角度来看，“圈层动力跨维整合”正逐步成为继板块构造与全球变化研究之后，地球科学领域兴起的又一研究“主旋律”。它既可能是破解气候、环境、资源与灾害等重大问题的全新突破口，也有望孕育地球科学的下一个重大理论。其“纲领性科学问题”可概括为：理解从地质到人类时间尺度上，联系地球各个系统变化的物理、化学、生物与地质过程及动态变化机制(图3)。

科学研究的发展并非线性累积的过程，而是通过范式变革来实现的。科学范式主要包括两重内涵，一是科学理念，二是科学方法学体系。就地球科学来讲(图3)，“圈层动力跨维整合”首先需要科学理念的变革^[84]。由于过去的板块构造和全球变化研究已分别在地球固体和流体圈层的分时间尺度和分圈层过程整合方面取得了长足进展，跨越地球固体-流体圈层的立体整合、跨时间尺度整合以及各种过程在时-空维度上的动态耦合，就成为未来的主要挑战(图3)。为此，地球科学必须推动科学理念的根本性变革——即实现打破时空尺度界限、跨越地球固体-流体-生物-人类圈层的“跨维动力整合”。

因此，“圈层动力跨维整合”并非表层地球系统科学向固体地球研究的简单延伸，其核心在于揭示跨圈层关联的动力过程与动态变化机理，尤其关注这些过程在时空维度上的相互作用及动态耦合演化机制，从而定量解析地球系统关键要素的“前世今生”“演化脉络”与“内在机理”——这即是跨维动力整合的本质。为此，在推进相关研究时，应避免两种倾向：一是将地球系统研究泛化为“对地球的系统性研究”，二是将地球系统的不同组成部分割裂为孤立单元分别对待。

实际上，地球的许多物质组成与自然现象，正是跨越时空维度的动力过程共同作用或相互作用的产物。在矿产资源方面，地球深部与地表环境这两个四维运动系统对矿产资源的控制作用^[84]，以及太阳系形成初期(陨石阶段)从约60种矿物演化为如今地球上6000余种^[98,99]，均为跨越时间与空间维度的地球系统过程和人类活动之结果。在环境领域，前述的环境演变的跨尺度效应^[89,90]表明，长尺度环境演变不仅仅是短尺度变化的背景，两者之间有时存在互为因果的动力学关

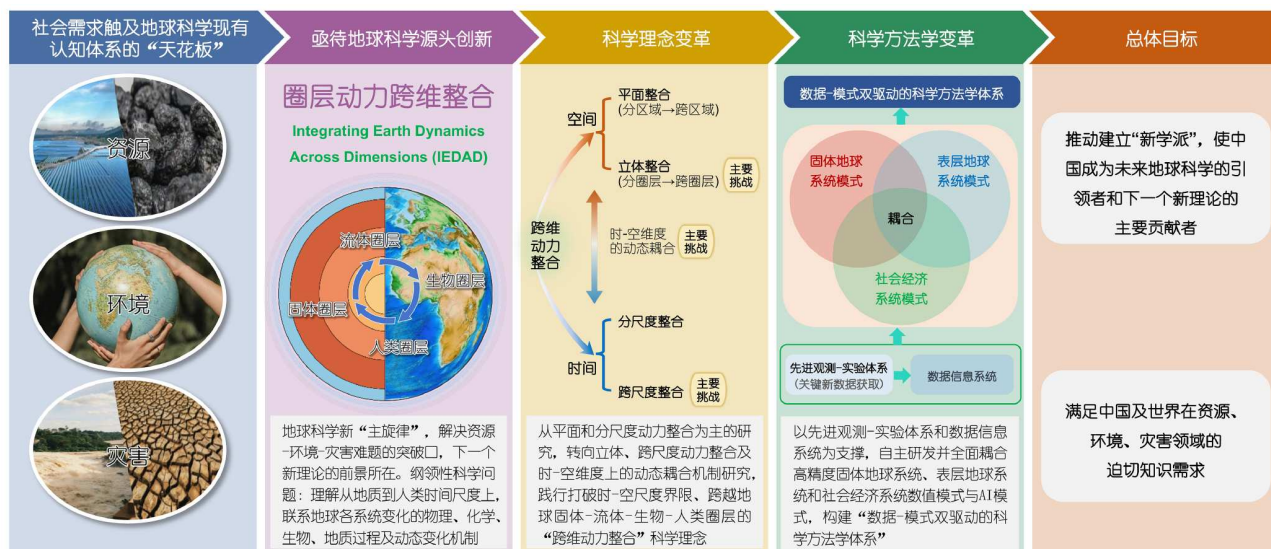


图3 圈层动力跨维整合的总体思路

Figure 3 Overall approach to Integrating Earth Dynamics Across Dimensions

联,说明整合跨维动力过程对于理解气候-环境演变机制、实现更精准预测具有重要意义。在灾害领域,以地震为例:某一具体地点的地震,实质是全球尺度板块运动与中小尺度构造运动耦合演化的产物;不同空间尺度的过程之间存在着密切的动力学联系;而这种空间上的关联,进一步决定了从百万年时间尺度(板块运动)到秒级时间尺度(地震)上动力过程的耦合。为此,破解地震预测这一世界性难题,关键可能在于实现不同时空尺度动力过程的跨维整合。由此可见,从跨学科角度推进地球圈层动力跨维整合,或许会像当年基于大气运动提出的“混沌理论”^[49]引发数学、物理学乃至社会科学中非线性研究热潮一样,促进其他自然科学领域的新突破。

要实现“跨维动力整合”的科学理念,地球科学界迫切需要科学方法学体系的变革(图3),即从单一学科研究真正走向多学科交叉,从定性研究迈向定量化的过程解析,从相对独立的数据观测与模拟研究,转向以先进观测-实验体系和数据信息系统为支撑,自主研发并全面耦合高精度固体地球系统、表层地球系统和社会经济系统数值模式与人工智能(artificial intelligence, AI)模式,构建“数据-模式双驱动的科学方法学体系”^[79]。其中, AI技术在地球科学中的应用十分重要,不仅可推动研究范式转变,支撑地球科学的发展,同时也可为人工智能本身的进步提供不可替代的应用场景^[84]。

从当前发展现状来看,全球尺度的大气-海洋数值模式相对成熟。然而,受过程与机制的复杂性、观测技术及计算能力等因素所限,固体地球与深部地球的数值模式仍较为零散。因此,发展全方位的新型探测技术,提升计算能力,并在全球尺度上整合与构建固体地球系统的数值模式,已成为地球科学一项十分紧迫的阶段性任务。而将固体地球系统模式与表层地球系统模式进行耦合,则是更为艰巨但势在必行的任务,也是国际学术界正在争夺的制高点。可以预见,板块驱动机制、冰期起源、生物与环境的相互关系等重大科学难题的破解,均离不开这类大型数值模式的支撑^[79]。

AI技术要更好地赋能地球科学研究,关键之一在于数据与信息系统的基础性支撑。因此,先进超前的观测系统和数据信息系统建设十分重要。从更长远的视角可以预见,在“圈层动力跨维整合”的新时代,哪些国家能够真正建立起“数据-模式双驱动的科学方法学体系”,率先构建出以新数据获取和大数据为支撑、全面耦合地球固体-流体-生物-人类圈层过程的先进数值模式和AI模式系统,哪些国家就有望成为未来地球科学的引领者,成为下一个新理论的主要贡献者^[79]。正因如此,构建“数据-模式双驱动的科学方法学体系”,是当前真正的科学制高点之一(图3)。

我国地球科学经过数十年的发展,已形成较为完善的学科体系^[100-106]。探测技术、数据获取能力和平台建设水平显著提升,部分领域已与国际领先水平并驾齐驱。但到目前为止,源头引领成果依然偏少,主要体现在:海量数据尚未有效整合并转化为系统模型,理论泛化能力不足,跨尺度与跨圈

层整合研究薄弱等。同时,学科发展不平衡,高端仪器依赖进口,国际话语权也有待提升。

在国家需求层面,我国正面临矿产资源短缺、能源对外依存度持续攀升、环境污染严重、自然灾害风险上升等一系列现实挑战。据国家统计局、自然资源部、生态环境部、中国地震局、中国气象局等部门近年公开统计与报告,2024年我国能源消费总量超过40亿吨油当量,其中石油和天然气的进口依存度分别超过70%和40%。铁、铜、锂、钴等36种矿产消费量居全球首位,但约30种矿产长期依赖进口,近一半矿种的对外依存度超过50%。我国每年大宗工业固废产生量超过40亿吨,受污染耕地面积超过1.5亿亩;新污染物(如微塑料、抗生素、内分泌干扰物、持久性有机污染物等)的影响日益凸显,对生态系统与人体健康构成严重威胁。气象灾害占我国灾害损失的70%以上,已排查出地质灾害隐患点30余万处。20世纪以来,全球有三分之一陆上破坏性地震发生在中国,七度及以上地震高烈度区占国土面积的58%,我国因地震造成的死亡人数接近全球总数的一半。上述重大社会需求,对地球科学的“最上游”提出了一系列十分迫切的认知需求。

3 地球科学重点资助领域布局

国家自然科学基金委员会地球科学部在延续“十四五”重点资助领域^[107,108]、系统梳理地球科学八个分支学科研究进展的基础上,立足“圈层动力跨维整合”的整体思路(图3),聚焦未来地球科学的纲领性科学问题——从地质到人类时间尺度,深入理解跨越地球固体-流体-生物-人类圈层的物理、化学、生物与地质过程及动态变化机制,践行打破时空尺度、跨越地球固体-流体-生物-人类圈层的“跨维动力整合”科学理念,着力推动地球科学方法学体系变革,构建数据-模式双驱动的科学方法学体系。研究紧密对接国家重大战略需求,强化化学交叉融合,最终凝练形成地球科学十个重点资助领域(图4),作为国家自然科学基金委员会地球科学部在“十五五”期间的优先资助方向。

该方案强调地球科学“最上游”的基础性突破,倡导在地球科学内部及与其他大学科之间开展更深入的跨学科合作,推动研究范式的变革,并注重基础研究与紧迫社会需求之间更有效的衔接。同时,希望这些跨领域的研究将有助于培育全球地球科学领域的“新学派”,使中国成为未来地球科学的引领者和下一个新理论的主要贡献者,满足中国和世界在资源、环境和灾害方面的迫切知识需求,同时培养一批视野开阔、真正具有跨学科整合能力的青年人才队伍。

十个重点资助领域按照“4-4-2”结构布局(图4)。其中,侧重科学前沿的四个重点领域为:地球系统碳循环与水循环、全球变化与自然—社会系统耦合、地球和行星宜居性及生命起源、人类和文明演化与环境;侧重社会需求的四个重点领域为:跨圈层物质循环与资源环境、海洋系统演化与跨圈



图4 “十五五”期间国家自然科学基金委地球科学部的十个重点资助领域

Figure 4 Ten key funding priorities of the Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, during the 15th Five-Year Plan period

层互馈、新污染物循环与治理、灾害多圈层动力过程与防控；面向关键科学方法学的两个重点领域为：地球系统模式与人工智能技术、面向地球系统圈层整合的观测新方法与新技术。

3.1 地球系统碳循环与水循环

碳循环与水循环贯穿地球演化全程，其运行机制决定了地球宜居性的演变、能源的赋存状态，也是全球变化的核心驱动力。该领域聚焦从地球早期到未来地球系统中碳、水循环的阶段演化过程，重点揭示板块运动、生命演化及人类活动对碳、水循环的影响，阐明气候—环境变化与碳、水循环之间的互馈机制，构建地球宜居性演化的理论框架，为应对气候变化、服务国家“双碳”目标提供科学支撑。

领域的核心科学问题是：地球形成以来不同阶段碳、水循环的演化规律及其过程与机制是什么？碳、水循环与气候—环境变化之间如何相互反馈？领域主攻方向包括：地球演化与水碳循环、全球变化与碳循环、水循环关键过程与机制、水循环与水资源等。

3.2 全球变化与自然—社会系统耦合

人类已成为影响地球演化的重要营力，自然系统与社会系统的交互作用不仅重塑了地球表层格局，更显著加剧了全球变化的进程。理解全球变化与自然—社会系统的耦合机制，是实现联合国可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)的科学根基。该领域旨在揭示全球变化背景下人类社会与自然环境的相互作用机理及反馈机制，提出可持续发展

方案与治理路径，为实现人与自然和谐共生提供科学依据与技术支持。

领域的核心科学问题是：全球变化背景下，自然环境系统与社会经济系统如何相互作用与反馈？其机理是什么？应如何优化调控？领域主攻方向包括：全球与区域气候的关联、全球变化与地表系统、自然—社会系统互馈机制、可持续发展路径及人地系统优化调控等。

3.3 地球和行星宜居性及生命起源

地球和行星宜居性及生命起源，是地球系统科学与行星科学交汇的重大前沿领域，聚焦于理解行星宜居性的形成与演化规律、生命起源和演化的条件与机制，以及行星体之间演化路径的共性与差异。该领域重点研究早期地球的环境演化、宜居性演变及生命起源条件，评估其他行星及卫星的宜居性及其孕育生命的可能性，构建宜居星球形成与演化的理论体系，服务国家深空探测发展战略。

领域的核心科学问题是：地球与太阳系其他行星及卫星是如何分异演化的？地外行星存在哪些生命迹象？生命起源的条件是什么？领域主攻方向包括：地球系统与宜居性、行星系统与宜居性、生命起源与演化、空间环境与宜居性、生命信号与宜居性探测等。

3.4 人类和文明演化与环境

人类与文明的起源及演化，是自然科学领域的核心基本问题之一，也是中国特色的研究领域。人类的生物特征、文化行为与社会结构的演化历程始终与地球环境变化紧密交

织,其与自然生态系统的互馈关系深刻影响着人类社会自身的稳定性与可持续性。该领域旨在揭示海陆分布与地形演化对人类迁徙的作用,探索环境演变对灵长类及人类演化的塑造机制,阐释农业起源、文明演替与环境的互动关系,科学回应“人类从哪里来,向何处去”的终极命题,为构建人与自然和谐共生的未来贡献智慧与方案。

领域的核心科学问题是:气候—环境演变对人类演化与文明演替具有怎样的影响?过去人类如何适应气候—环境变化?领域主攻方向包括:海陆—地形演变与人类迁徙、环境演变与人类演化、农业起源与环境、环境变化与中华文明演替、科技考古新方法与新技术等。

3.5 跨圈层物质循环与资源环境

地球是一个内外联动的整体。金属元素与挥发分的跨圈层迁移与分配,深刻影响着资源分布与环境演变。该领域旨在揭示地球内部圈层(核—幔—壳)的结构、组成及其跨圈层循环过程,解析地球表层多组分、多尺度、多介质的交互作用,研究多尺度构造体系对地球内、外圈层物质循环的控制机制,阐明跨圈层物质循环对资源、能源和环境的影响,为国家资源安全提供科学支撑。

领域的核心科学问题是:地球系统各圈层之间的物质交换与循环机制是什么?其如何控制关键资源与能源的形成与分布?领域主攻方向包括:地球内部圈层结构与物质循环、地球表层系统物质循环、构造变动与物质循环、跨圈层物质循环与资源能源等。

3.6 海洋系统演化与跨圈层互馈

海洋作为高度复杂且非线性的巨系统,是连接地球各圈层的重要纽带;其中发生的多要素、多尺度、跨圈层耦合过程深刻影响着地球演化、生物进化、气候变化以及人类社会的变迁与可持续发展。该领域旨在揭示海洋系统演化的物质与能量循环特征,阐明其与大气圈、生物圈、岩石圈、冰冻圈之间的复杂互馈机理,评估并预测其气候、资源及生态环境效应,服务海洋强国战略,为我国深度参与全球海洋治理提供科学支撑。

领域的核心科学问题是:海洋系统具有怎样的演化规律?其跨圈层物质—能量循环的特征与机理是什么?如何评估其生态、气候与资源效应,并实现可持续治理与利用?领域主攻方向包括:海洋过程与圈层耦合、海洋生命与环境适应、海洋环境与生态安全、极地系统快速变化及全球影响、海洋观测与模拟、海洋可持续发展与全球治理等。

3.7 新污染物循环与治理

新污染物是近百年来人类活动催生的新兴环境问题,构成国际共性难题,也是全人类面临的共同危机与挑战。该领域聚焦新污染物在地球圈层中的来源与归趋、跨圈层迁移

转化过程、区域至全球尺度的循环演替规律,阐明其在复杂环境介质中的危害效应、致毒机理与暴露风险,着力破解协同治理、绿色替代与风险管控中的基础科学问题,为美丽中国、健康中国、安全中国建设提供科技支撑。

领域的核心科学问题是:新污染物在地球系统各圈层中具有怎样的来源归趋、迁移转化与生物地球化学循环演替规律?其引发的生态与健康风险如何?领域主攻方向包括:污染物识别、迁移转化与跨圈层循环、毒性效应与生态风险评估、环境暴露与健康风险评估、风险防控与协同治理等。

3.8 灾害多圈层动力过程与防控

灾害是地球表层系统的关键过程,是内外动力耦合作用的结果;灾害动力过程与防控关乎全球防灾减灾与人居安全,是社会可持续发展的重要支撑。该领域重点研究复杂灾害系统的动力学机制与过程,探索多圈层孕灾、多动力成灾、精准智慧防灾与韧性绿色减灾,服务国家防灾减灾目标。

领域的核心科学问题是:地球系统跨圈层过程如何控制复合灾害?如何实现有效的灾害防控与减灾?领域主攻方向包括:多圈层孕灾机制、多动力成灾机理、精准智慧防灾、韧性绿色减灾等。

3.9 地球系统模式与人工智能技术

地球系统模式是地球系统科学理论与知识的集大成者,其与人工智能技术的融合,能够深化对地球系统多圈层变化及其与人类活动相互作用的认识,提升地球系统科学研究水平及其服务社会的能力。该领域立足于地球系统多圈层、多过程、多要素的耦合机制研究,发展自主可控、融合人工智能技术的地球系统模式,实现对地球系统变化及影响的科学理解与精准预测,支撑国家安全与可持续发展。

领域的核心科学问题是:如何从数值模拟与人工智能角度,构建并完善全球尺度的表层与深部地球系统模式,实现二者的有效耦合?领域主攻方向包括:地球系统圈层耦合过程、地球系统建模、人工智能与地球系统模式融合、地球系统模式评估与数据等。

3.10 面向地球系统圈层整合的观测新方法与技术

地球系统观测技术开辟了人类研究地球的新途径与新视野,推动地球科学研究从局部拓展至全球乃至空间尺度,持续拓展人类的知识边界。该领域聚焦发展地球系统空间观测的新理论、新方法,创新面向地球系统与人类活动的观测感知技术与装备,增强对地球系统关键过程及多圈层相互作用的跨尺度观测能力。

领域的核心科学问题是:如何将数理、化学、生命和信息科学等学科的理论与技术,应用于地球系统的跨尺度、动态化、高精度与量化观测?领域主攻方向包括:地球系统遥感理论与技术、地球系统传感与实验分析技术、地球时

空基准理论与智能测绘、地球系统观测实验与大数据分析等。

4 现有人才、团队与科技平台条件

经过多年的发展,我国已构建起较为完善的地球科学本科—硕士—博士人才培养体系,研究队伍持续壮大,学科整体活力不断增强。近20年来,随着基础研究投入的稳步增长,我国学者在地学领域国际期刊上的发文量快速攀升,目前已在全球处于领先地位^[109],部分领域或方向已步入国际先进水平行列,尤其在国内外传承和积累深厚的研究领域中表现突出。我国地球科学家为世界地球科学的发展贡献了中国智慧,创造了“世界奇迹”。

依托国家自然科学基金委员会卓越研究群体项目、重大研究计划、创新研究群体项目、国家重大科研仪器设备研制专项等,地球科学领域形成了一批具有重要影响力的重点团队,覆盖了学科各分支方向。现有重点团队聚焦科学前沿,围绕“宜居地球的过去、现在与未来”,取得了系统性、原创性研究成果,显著提升了我国地球科学研究的国际声誉与影响力;在服务国家需求方面,为资源保障、环境治理、灾害防控与气候变化应对等提供了关键解决方案,有力支撑了人类社会的可持续发展和宜居地球建设;在人才培养方面,造就了一批具有战略思维和国际视野的领军科学家,推动了地球系统科学的快速发展,并引领地球科学研究范式的变革。

地球科学重点科技平台建设也取得显著进展,建立了包括国家实验室、国家重大科技基础设施、全国重点实验室等在内的系列平台。这些科研平台覆盖了地球科学的关键研究领域,提升了我国仪器的自主研制能力,推动了地球系统观测技术的发展,支撑我国学者参与并推动国际大科学计划,在认识自然规律、利用自然规律服务人类社会等方面发挥了至关重要的作用,助力产出一系列突破性原创成果,不仅推动了地球科学的跨越式发展,也促进了其他学科的创新。

然而,与科技发达国家相比,我国地球科学领域具有高水平学术鉴赏力的科学家群体体量仍然偏小。地球科学内部各分支学科自身活力不足,各分支学科之间,以及地球科学与其他学科(数理、化学、生命、信息等)之间的交叉融合未被足够重视,致使学科交叉团队偏少,制约了原创思想和新前沿生长点的大量涌现。人才队伍的学科结构与梯队结构不尽合理,基础研究与应用基础衔接不畅,国际合作团队偏少,持之以恒主攻学科制高点、敢于啃“硬骨头”方向的氛围不浓。青年学者的成长与研究仍存在“冒泡型”“打乱仗”现象,加之近年来高校地学专业招生与就业形势不甚理想,已对青年人才梯队建设造成影响。

在地球科学科技平台方面,存在重点科技平台的领域和区域布局不均衡问题,部分领域和地区缺乏相应平台支撑,不利于地球科学的整体协调发展。部分平台的仪器设备、试

验材料等对进口产品依赖性强,将科学探索与方法手段研发有机结合的意识和能力不足,原创科研仪器、原创软件与模式研究薄弱,不但制约了源头发现的产出,而且在常规研究中存在“卡点”风险。此外,现有平台之间缺乏高效联动机制,跨学科合作不足,资源与数据在部门、科研单位、项目和团队之间共享不畅,制约了重大科技问题的联合攻关,不利于地球科学领域迎接人工智能驱动下的科研范式变革。

针对上述问题,应加强地球科学的顶层设计与规划,优化人才培养模式和研究资助体系。引导青年学者潜心研究,畅通拔尖学生培养通道,助力学科人才队伍梯队建设,做好后备人才储备。通过卓越研究群体、重点资助领域、重大研究计划、原创探索项目等方式,进一步促进学科交叉融合。针对学科制高点建立长期稳定支持机制,设立应用基础研究团队与国际合作研究中心。对国家亟需的科技平台予以重点支持。优化重点科技平台的学科与区域布局,加强平台间共享合作机制建设,实现优势互补,提升地球科学研究的整体水平。我国地球科学应持续加强跨学科科学家群体与高鉴赏力科学家群体的培养,着力打造一批具有全球视野、国际竞争力、原创科研仪器研发能力和多学科交叉背景的顶尖学者与优秀团队,支持建设一批先进、高效的科技平台和数据平台,引领我国及世界地球科学的发展。

5 未来展望与建议

当前,复杂的经济社会形势与不断提升的人类需求,对地球科学提出了更高要求。人类生存与发展面临的资源、生态、环境、灾害、气候变化等重大挑战,实际上已触及现有学科认知体系的“天花板”,亟需地球科学学科理论源头的突破性进展来应对。为此,地球科学正经历深刻变革,步入各分支学科整合发展的新阶段,进入地球系统理论与技术体系协同创新的新时期。面对这一发展机遇,我国地球科学应立足学科源头的战略设计、推动研究范式变革、加强人才队伍建设,瞄准世界科技前沿,聚焦社会和国家重大战略需求,深入开展跨学科交叉融合研究,促进基础研究与应用实践紧密结合,统筹中国特色与全球视野,加快推动地球科学及其分支领域“中国学派”的形成,努力成为未来地球科学的引领者和新理论的主要贡献者,为满足世界及我国经济社会发展对地球科学紧迫知识的需求贡献中国智慧。其中,以下几个方面值得进一步重视。

(1) 学科思维转型: 践行“圈层动力跨维整合”的科学理念。地球系统是多圈层相互作用的复杂巨系统,其演化过程具有显著的非线性、多尺度与强耦合特征。因此,需不断强化圈层动力跨维整合的科学理念,即打破时空尺度,跨越地球固体、流体、生物和人类圈层,强化系统整体观,突破传统学科边界约束,构建统一的地球系统科学认知框架。

(2) 研究范式升级: 构建“数据-模式双驱动的科学方法学体系”。随着观测技术与信息技术的快速发展,地球科学研究

正进入数据密集型阶段,应加快推动“观测—模拟—数据融合”一体化发展,提升对地球系统复杂过程的定量理解与预测能力。一方面,提升多源观测数据的集成与同化能力;另一方面,发展可解释的智能模型,实现从相关性认知向因果机制认知的跃升,推动形成可预测、可验证的科学研究新范式。

(3) 以原创性基础理论突破,抢占国际科学前沿制高点:围绕地球系统演化的关键过程与基本规律,加强原创性基础理论的系统布局,推动从现象描述向理论建构跃升。聚焦跨圈层、跨尺度耦合机制等核心科学问题,如深部过程与表层系统相互作用、气候系统与生物地球化学循环协同演化等,力争提出具有普适性的理论框架与解释模型。强化理论创新的源头供给,推动形成具有国际影响力的原创成果,抢占地球科学前沿研究制高点,提升我国在地球科学基础理论领域的话语权与引领能力,并推动其他学科的发展。

(4) 以自主核心技术创新,提升服务国家发展的支撑能力:加强自主核心技术研发与集成应用,提升地球科学服务国家发展的能力。重点推进高精度观测技术、关键模拟平台与数据智能分析方法的发展,增强在气候变化、资源能源、生态环境及防灾减灾等领域的技术支撑能力。推动技术创新与基础研究协同发展,促进科研成果向业务化、决策化应用转化,为国家重大战略实施提供坚实的科技支撑。

人才是科技创新的第一资源。应以评价体系改革、资助导向和学科结构优化为抓手,构建更加符合地球科学发展规律的评价体系,深化以代表性成果为核心的评价制度,健全不同类型人才的分类评价标准,引导科研人员潜心“做实事、做难事、做大事”,从而引导优化人才结构布局,培育具有跨学科整合能力与国际学术影响力的科研队伍,形成支撑地球科学持续创新发展的高水平人才队伍格局,全方位提升我国地球科学的创新能力。

致谢 本次地球科学资助体系布局研究是在国家自然科学基金委员会副主任兰玉杰教授的亲自领导和指导下进行的。地球科学部在十个重点资助领域的遴选、设计及征求意见过程中,先后组织了约2000人次的专家参与研讨。在此,一并向所有参与专家及参与组织的学科处工作人员致以诚挚的谢意。特别感谢孙建奇、张仲石、陈朝晖、范宣梅、符慧山、付巧妹、刘良云、彭书时、赵军红、赵晓丽和史锋等在稿件准备过程中的大力协助。

推荐阅读文献

- 1 Hutton J. Theory of the Earth, with Proofs and Illustrations. Edinburgh: Messrs Cadell, Junior, and Davies, and William Creech, 1795
- 2 Lyell C. Principles of Geology. Vol. 1. London: John Murray, 1830
- 3 Herschel W. Account of a comet. Philos Trans R Soc Lond, 1781, 71: 492–501
- 4 Kant I. Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels. Königsberg und Leipzig: Johann Friedrich Petersen, 1755
- 5 Laplace P S. Exposition du Système du Monde. Paris: Cercle Social, 1796
- 6 Humboldt A von. Kosmos – Entwurf Einer Physischen Weltbeschreibung. Vol. 1. Stuttgart: Johann Georg Cotta, 1845
- 7 Ritter C. Einleitung zur Allgemeinen Vergleichenden Geographie, und Abhandlungen zur Begründung Einer Mehr Wissenschaftlichen Behandlung der Erdkunde. Berlin: G. Reimer, 1852. 10–15
- 8 Darwin C. On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. London: John Murray, 1859. 502
- 9 Thomson C W. The Voyage of the Challenger: The Atlantic. London: Macmillan, 1877
- 10 Gauss C F. Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus. Resultate aus den Beobachtungen des Magnetischen Vereins im Jahre 1838. Leipzig: Weidmannsche Buchhandlung, 1839. 121–193
- 11 Dewey J, Byerly P. The early history of seismometry (to 1900). Bull Seismol Soc Am, 1969, 59: 183–227
- 12 Penck A, Brückner E. Die Alpen im Eiszeitalter. 3-volume monograph. Leipzig: Tauchnitz, 1901–1909
- 13 Thybo H, Artemieva I M, Kennett B. Moho: 100 years after Andrija Mohorovičić. [Tectonophysics](#), 2013, 609: 1–8
- 14 Gutenberg B. Über Erdbebenwellen VIIA: Beobachtungen an Registrierungen von Fernbeben in Göttingen und Folgerungen über die Konstitution des Erdkörpers. Nachr Königl Ges Wiss Göttingen Math-Phys Kl, 1914. 125–176
- 15 Wegener A. Die Entstehung der Kontinente. Geol Rundsch, 1912, 3: 276–292
- 16 Wegener A. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1915
- 17 Clarke F W. The Data of Geochemistry. U.S. Geological Survey Bulletin 330. Washington DC: Government Printing Office, 1908
- 18 Goldschmidt V M. Die Gesetze der Krystallochemie. Naturwissenschaften, 1926, 14: 477–485
- 19 Bjerknes V. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. Meteorol Z, 1904, 21: 1–7
- 20 Bjerknes J. On the structure of moving cyclones. Mon Weather Rev, 1919, 47: 95–99

- 21 Köppen W. Das geographische System der Klimate. In: Köppen W, Geiger R, eds. Handbuch der Klimatologie. Band I, Teil C. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936
- 22 Dyson F W, Eddington A S, Davidson C. A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of May 29, 1919. *Philos Trans R Soc Lond A*, 1920, 220: 291–333
- 23 Lehmann I. P'. *Bur Cent Seismol Int Publ Série A Trav Sci*, 1936, 14: 87–115
- 24 Milankovitch M. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Belgrade: mihaila Ćurčića, 1941
- 25 Charney J G, Fjørtoft R, von Neumann J. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 1950, 2: 237–254
- 26 Stommel H, Arons A B. On the abyssal circulation of the world ocean—I. Stationary planetary flow patterns on a sphere. *Deep Sea Res*, 1960, 6: 140–154
- 27 Urey H C, Brickwedde F G, Murphy G M. A hydrogen isotope of mass 2 and its concentration. *Phys Rev*, 1932, 39: 164–165
- 28 Patterson C. Age of meteorites and the earth. *Geochim Cosmochim Acta*, 1956, 10: 230–237
- 29 Fussell J, Rundquist D, Harrington J A Jr. On defining remote sensing. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1986, 52: 1507–1511
- 30 Tomlinson R F. An introduction to the geo-information system of the Canada Land Inventory. Ottawa: Department of Forestry and Rural Development, 1967
- 31 Aki K, Richards P G. Quantitative Seismology: Theory and Methods. San Francisco: W. H. Freeman, 1980
- 32 National Aeronautics and Space Administration. Sputnik and the Dawn of the Space Age. NASA History Series. Washington DC: NASA History Office, 2007
- 33 Siddiqi A A. Beyond Earth: A Chronicle of Deep Space Exploration, 1958–2016. NASA SP-2018-4041. Washington DC: NASA History Program Office, 2018
- 34 National Aeronautics and Space Administration. Apollo 11 Mission Report. NASA SP-238. Washington DC: NASA, 1971
- 35 Cameron A G W. Physics of the primitive solar accretion disk. *Moon Planets*, 1978, 18: 5–40
- 36 Hartmann W K, Davis D R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus*, 1975, 24: 504–515
- 37 Warme J E, Douglas R G, Winterer E L. The Deep Sea Drilling Project: A Decade of Progress. SEPM Special Publication No. 32. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1981
- 38 Vine F J, Matthews D H. Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 1963, 199: 947–949
- 39 Dietz R S. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, 1961, 190: 854–857
- 40 Hess H H. History of ocean basins. In: Engel A E J, James H L, Leonard B F, eds. *Petrologic Studies: A Volume in Honor of A. F. Buddington*. Boulder: Geological Society of America, 1962. 599–620
- 41 Wilson J T. A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, 1965, 207: 343–347
- 42 Wilson J T. Did the Atlantic close and then re-open? *Nature*, 1966, 211: 676–681
- 43 McKenzie D P, Parker R L. The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature*, 1967, 216: 1276–1280
- 44 Le Pichon X. Sea-floor spreading and continental drift. *J Geophys Res*, 1968, 73: 3661–3697
- 45 Morgan W J. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *J Geophys Res*, 1968, 73: 1959–1982
- 46 Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, 1976, 194: 1121–1132
- 47 Berger A L. Obliquity and precession for the last 5000000 years. *Astron Astrophys*, 1976, 51: 127–135
- 48 Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science*, 1979, 203: 1073–1083
- 49 Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 1963, 20: 130–141
- 50 Broecker W S. Climatic change: are we on the brink of a pronounced global warming? *Science*, 1975, 189: 460–463
- 51 Broecker W S. The biggest chill. *Nat Hist*, 1987, 96: 74–82
- 52 Liu T S. Loess and the Environment (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985 [刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985]
- 53 Neftel A, Moor E, Oeschger H, et al. Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries. *Nature*, 1985, 315: 45–47
- 54 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
- 55 Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 2008, 453: 379–382
- 56 Alley R B, Meese D A, Shuman C A, et al. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event. *Nature*, 1993, 362: 527–529
- 57 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218–220
- 58 Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 1985, 315: 207–

- 59 Crutzen P J, Arnold F. Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime ‘ozone hole’. *Nature*, 1986, 324: 651–655
- 60 Solomon S, Garcia R R, Rowland F S, et al. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, 1986, 321: 755–758
- 61 United Nations. Report of the United Nations conference on the human environment, Stockholm, 5–16 June 1972. UN Doc. A/CONF.48/14/Rev.1. New York: United Nations, 1973
- 62 United Nations General Assembly. Protection of global climate for present and future generations of mankind. A/RES/43/53. New York: United Nations, 1988
- 63 Earth System Sciences Committee, NASA Advisory Council. Earth System Science: A Closer View. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1988
- 64 Manabe S. Climate and the ocean circulation: 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth’s surface. *Mon Weather Rev*, 1969, 97: 739–774
- 65 Dzierwonski A M, Anderson D L. Preliminary reference Earth model. *Phys Earth Planet Inter*, 1981, 25: 297–356
- 66 Paull C K, Hecker B, Commeau R, et al. Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa. *Science*, 1984, 226: 965–967
- 67 Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1986, 14: 493–571
- 68 National Science Foundation. Continental Dynamics (CD). NSF 04-512. Arlington, VA: National Science Foundation, 2004
- 69 Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359
- 70 Wang Q, Chen X, Jha A N, et al. Natural gas from shale formation – The evolution, evidences and challenges of shale gas revolution in United States. *Renew Sustain Energy Rev*, 2014, 30: 1–28
- 71 National Research Council. Earth, Oceans and Life: Scientific Investigations of the Earth System Using Multiple Drilling Platforms and New Technologies, Integrated Ocean Drilling Program Initial Science Plan, 2003–2013. Washington DC: National Academies Press, 2001
- 72 Group on Earth Observations. The Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) 10-Year Implementation Plan. Geneva: GEO Secretariat, 2005
- 73 Liu J J, Ren X, Yan W, et al. Descent trajectory reconstruction and landing site positioning of Chang’e-4 on the lunar farside. *Nat Commun*, 2019, 10: 4229
- 74 Li C L, Hu H, Yang M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang’e-5 mission. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwab188
- 75 Victor D G, Leape J P. Global climate agreement: after the talks. *Nature*, 2015, 527: 439–441
- 76 Liu J J, Li C L, Zhang R Q, et al. Geomorphic contexts and science focus of the Zhurong landing site on Mars. *Nat Astron*, 2022, 6: 65–71
- 77 Xu Y G. The contribution of Earth sciences to human civilization (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, doi: 10.1360/CSB-2025-0635 [徐义刚. 地球科学对人类文明的贡献. 科学通报, 2025, doi: 10.1360/CSB-2025-0635]
- 78 Álvarez W. Geology: the once and future crown jewel of science? *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2025, 53: 1–31
- 79 Guo Z T. *Earth System and Evolution: a future frame of Earth Sciences* (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 883–884 [郭正堂. 《地球系统与演变》: 未来地球科学的脉络. 科学通报, 2019, 64: 883–884]
- 80 Zheng Y F, Guo Z T, Jiao N Z, et al. A holistic perspective on Earth system science. *Sci China Earth Sci*, 2024, 67: 3013–3040 [郑永飞, 郭正堂, 焦念志, 等. 地球系统科学研究态势. 中国科学: 地球科学, 2024, 54: 3065–3090]
- 81 Wang P X, Guo Z T, Jiao N Z, et al. Development Strategy of Earth System Science in China Toward 2035 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2024 [汪品先, 郭正堂, 焦念志, 等. 中国地球系统科学2035发展战略. 北京: 科学出版社, 2024]
- 82 Wang P X. Earth system science: *quo vadis?*—Odyssey of the Earth I (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 5029–5045 [汪品先. 地球系统科学向何处去?——地球春秋之一. 科学通报, 2025, 70: 5029–5045]
- 83 Fu C B. Some basic issues on Earth system science (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2025, 43: 16–19 [符淙斌. 关于地球系统科学若干基本问题的讨论. 科技导报, 2025, 43: 16–19]
- 84 Guo Z T, Yao Y P, Liu Z. Integrating Earth Dynamics Across Dimensions: the next main theme of Earth science. *Natl Sci Rev*, 2026, 13: nwag226
- 85 Bao X J, Hu Y Y, Scotese C R, et al. Quantifying climate conditions for the formation of coals and evaporites. *Natl Sci Rev*, 2023, 10: nwad051
- 86 Zhang S X, Li Y L, Leng W, et al. Photoferrotrophic bacteria initiated plate tectonics in the Neoproterozoic. *Geophys Res Lett*, 2023, 50: e2023GL103553
- 87 Zhu R X, Zhang W, Wang H J, et al. A theory of multi-spheric interaction-driven hydrocarbon formation and enrichment. *Sci China Earth Sci*, 2025, 68: 2492–2510 [朱日祥, 张旺, 王华建, 等. 多圈层驱动的油气形成与富集理论. 中国科学: 地球科学, 2025, 55: 2603–2620]
- 88 Hu Y Y, Li X, Boos W R, et al. Emergence of the modern global monsoon from the Pangaea megamonsoon set by palaeogeography. *Nat Geosci*, 2023, 16: 1041–1046

- 89 Zhao Y, Tzedakis P C, Li Q, et al. Evolution of vegetation and climate variability on the Tibetan Plateau over the past 1.74 million years. *Sci Adv*, 2020, 6: eaay6193
- 90 Zhao Y, Qin F, Cui Q Y, et al. Three-and-a-half million years of Tibetan Plateau vegetation dynamics in response to climate change. *Nat Ecol Evol*, 2025, 9: 1153–1167
- 91 Ruddiman W F, He F, Vavrus S J, et al. The early anthropogenic hypothesis: a review. *Quat Sci Rev*, 2020, 240: 106386
- 92 Goldblatt C, Watson A J. The runaway greenhouse: implications for future climate change, geoengineering and planetary atmospheres. *Phil Trans R Soc A*, 2012, 370: 4197–4216
- 93 Peng J B, Zhang Y S, Huang D, et al. Interaction disaster effects of the tectonic deformation sphere, rock mass loosening sphere, surface freeze-thaw sphere and engineering disturbance sphere on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Earth Sci*, 2023, 48: 3099–3114 [彭建兵, 张永双, 黄达, 等. 青藏高原构造变形圈-岩体松动圈-地表冻融圈-工程扰动圈互馈灾害效应. *地球科学*, 2023, 48: 3099–3114]
- 94 Wang P X. External forcing to the Earth system evolution—Odyssey of the Earth II (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2026, 71: 1211–1229 [汪品先. 驱动地球演变的地外因素——地球春秋之二. *科学通报*, 2026, 71: 1211–1229]
- 95 Liu J J, Qin X G, Ren X, et al. Martian dunes indicative of wind regime shift in line with end of ice age. *Nature*, 2023, 620: 303–309
- 96 Qin X G, Ren X, Wang X, et al. Modern water at low latitudes on Mars: potential evidence from dune surfaces. *Sci Adv*, 2023, 9: eadd8868
- 97 Earth System Sciences Committee, NASA Advisory Council. Earth System Science Overview: A Program for Global Change. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1986
- 98 Hazen R M, Papineau D, Bleeker W, et al. Mineral evolution. *Am Miner*, 2008, 93: 1693–1720
- 99 Hazen R M, Ferry J M. Mineral evolution: mineralogy in the fourth dimension. *Elements*, 2010, 6: 9–12
- 100 Chen D K. Looking back at 70 years of marine science and technology in China (in Chinese). *Haiyang Xuebao*, 2019, 41: 1–2 [陈大可. 回顾中国海洋科技70年. *海洋学报*, 2019, 41: 1–2]
- 101 Fu S Y, Xu J Y, Wei Y, et al. Seventy years of space physics research in China (in Chinese). *Sci Sin Terrae*, 2019, 49: 1641–1658 [傅绥燕, 徐寄遥, 魏勇, 等. 探索中前行——中国空间物理研究70年. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1641–1658]
- 102 Huang J P, Chen W, Wen Z P, et al. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: climate and climate change. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 1514–1550 [黄建平, 陈文, 温之平, 等. 新中国成立70年以来的中国大气科学研究: 气候与气候变化篇. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1607–1640]
- 103 Li J W, Zhao X F, Deng X D, et al. An overview of the advance on the study of China's ore deposits during the last seventy years (in Chinese). *Sci Sin Terrae*, 2019, 49: 1720–1771 [李建威, 赵新福, 邓晓东, 等. 新中国成立以来中国矿床学研究若干重要进展. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1720–1771]
- 104 Lv J, Lin Y Y, Yao L W. Analysis on the effect of flood and drought disaster prevention in the 70 years since the founding of New China (in Chinese). *J China Inst Water Resour Hydropower Res*, 2019, 17: 242–251 [吕娟, 凌永玉, 姚力玮. 新中国成立70年防洪抗旱减灾成效分析. *中国水利水电科学研究院学报*, 2019, 17: 242–251]
- 105 Teng J W, Yang D H, Tian X B, et al. Geophysical investigation progresses of the Qinghai-Tibetan Plateau in the past 70 years (in Chinese). *Sci Sin Terrae*, 2019, 49: 1546–1564 [滕吉文, 杨顶辉, 田小波, 等. 青藏高原深部地球物理探测70年. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 1546–1564]
- 106 Wang H J, Ren H L, Chen H P, et al. Highlights of climate prediction study and operation in China over the past decades (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2020, 78: 317–331 [王会军, 任宏利, 陈活泼, 等. 中国气候预测研究与业务发展的回顾. *气象学报*, 2020, 78: 317–331]
- 107 Yao Y P, Guo Z T. Implementing the strategic plan of Earth sciences and optimizing funding structure of disciplines (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 143–144 [姚玉鹏, 郭正堂. 落实地球科学战略规划、优化学科资助格局. *科学通报*, 2021, 66: 143–144]
- 108 Zhu R X, Hou Z Q, Guo Z T, et al. Summary of “the past, present and future of the habitable Earth: development strategy of Earth science” (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4485–4490 [朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 等. 宜居地球的过去、现在与未来——地球科学发展战略概要. *科学通报*, 2021, 66: 4485–4490]
- 109 Ren X Y, Wu R M, Zhang Z Q. Analysis of the international development trends and the Chinese influence on Earth Science in the 2010s (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2024, 39: 140–156 [任晓亚, 武瑞敏, 张志强. 2012–2022年地球科学国际发展态势与中国影响力分析. *地球科学进展*, 2024, 39: 140–156]

Summary for “圈层动力跨维整合：社会对地球科学源头创新的迫切需求”

Integrating Earth Dynamics Across Dimensions: society's pressing need for fundamental innovation in Earth science

Zhengtang Guo^{1,2*}, Yupeng Yao^{1*} & Zhe Liu¹

¹ Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

* Corresponding authors, E-mail: ztguo@mail.iggcas.ac.cn; yaoyup@nsfc.gov.cn

Earth science is a fundamental and comprehensive discipline that investigates the material composition, structural architecture, evolutionary history, dynamic mechanisms, and future trajectories of Earth and planetary systems. Its central mission is to provide theoretical foundations and technological solutions for addressing major societal challenges, including resource security, environmental forecasting and protection, and disaster risk mitigation. Building on the priority funding areas established during the 14th Five-Year Plan period, the Department of Earth Sciences of the National Natural Science Foundation of China has conducted a systematic assessment of disciplinary progress, emerging frontiers, and current societal needs. It proposes that Earth science is entering a new era of Integrating Earth Dynamics Across Dimensions (IEDAD). Over the past century, the main theme of Earth science research has undergone a major change roughly every 20 to 30 years; following plate tectonics and global change research, IEDAD is gradually becoming yet another main theme. It may provide a new breakthrough for major scientific problems of climate, environment, resources, and disasters, and give rise to the next major theory in Earth science. The overarching scientific question is to decipher the physical, chemical, biological, and geological processes and the dynamic mechanisms that link changes across Earth's systems over timescales ranging from geological to human. IEDAD calls for a shift in scientific thinking: removing spatiotemporal barriers to achieve cross-dimensional dynamic integration across Earth's solid, fluid, biological, and human spheres. It also demands a transformation in scientific methodology: leveraging advanced observation and experimental systems to acquire critical new data, and building data informatics infrastructures that enable the full coupling of high-precision numerical models with Artificial Intelligence (AI)-driven models for Earth's solid-fluid-bio-human systems, thereby establishing a scientific methodology system driven by both data and models. Guided by this overarching framework, the new funding plan focuses on fundamental breakthroughs at the most upstream levels of Earth science and outlines ten priority areas for the 15th Five-Year Plan period, organized in a “4–4–2” structure. The first four, oriented toward scientific frontiers, are: (1) Earth System Carbon and Water Cycles (ESCWC); (2) Global Change and Nature–Society Systems Coupling (GCNSSC); (3) Habitability of Earth and Planets and Origin of Life (HEPOL); and (4) Human and Civilizational Evolution in Relation to the Environment (HCERE). The next four, oriented toward societal needs, are: (5) Cross-sphere Material Cycle and Impacts on Resource and Environment (CMCIRE); (6) Ocean System Evolution and Cross-sphere Interactions (OSECI); (7) New Contaminants Cycle and Control (NCCC); and (8) Multi-sphere Dynamic Processes and Prevention of Hazards (MDPPH). The final two, oriented toward key scientific methodologies, are: (9) Earth System Models and AI Technology (ESMAIT); and (10) Novel Observation Methods and Technologies for Integrated Earth System (NOMTIES). The plan advocates for deeper and broader interdisciplinary collaboration both within Earth science and across other major disciplines such as mathematics, physics, chemistry, life sciences, information science, and engineering. It also emphasizes the synergy between emerging interdisciplinary fields and traditional branches of Earth science, promotes a paradigm shift in research approaches, and facilitates the effective translation of fundamental research into solutions for pressing societal needs. Through this top-level design and strategic layout, the goal is to advance China's Earth science research toward the future scientific frontier of Integrating Earth Dynamics Across Dimensions, foster original innovations in fundamental Earth science theories, and more effectively address humanity's urgent demand for knowledge regarding resources, the environment, and natural disasters.

Earth science, history of Earth science, Integrating Earth Dynamics Across Dimensions (IEDAD), Earth system science, disciplinary development strategy

doi: [10.1360/CSB-2026-0615](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0615)