科学通报 2025 年 第 70 卷 第 36 期: 6188 ~ 6203
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

# 地球科学研究前沿

郑永飞

岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026
E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn

2025-07-16 收稿, 2025-10-14 修回, 2025-10-15 接受, 2025-10-17 网络版发表
国际大科学计划深时数字地球(DDE)资助

**摘要** 地球科学作为研究地球形成和演化及其资源能源和环境灾害的自然科学, 正在步入一个新的发展阶段. 随着全球气候变化的加剧、资源枯竭问题的凸显以及自然灾害的频发, 地球科学研究对于人类社会可持续发展的重要性日益凸显. 国际大科学计划深时数字地球学科组创建了2014~2023地球科学领域30个研究趋势, 通过邀请世界各地科技人员投票选出了前10个研究前沿, 即地球三维结构、机器学习和大数据分析、关键矿产、过去现在未来气候变化、能源资源、全球海洋碳循环、生命起源、碳捕获与封存、遥感、自然灾害与极端地震. 这十大前沿的遴选体现了技术整合的威力, 一方面标志着地球科学从描述性学科向预测性系统科学的跃迁, 另一方面却在“技术乐观主义”中暗藏认知危机——当人类用深时数据模拟亿年板块运动时, 却难解十年尺度的气候变化难题. 地球科学革命从20世纪下半叶的板块构造理论和地球系统科学, 正在迈向“深时大数据+人工智能”驱动的新台阶. 本文简要介绍这10个地球科学研究前沿, 旨在提示地球科学研究的最新趋势, 同时为如何应用地球系统科学来认识地球的过去和现在以及保护地球的未来指明方向.

**关键词** 地球圈层, 地球系统, 学科交叉, 可持续发展, 地球宜居性

随着全球气候变化加剧、资源枯竭问题凸显及自然灾害频发, 地球科学在人类社会可持续发展中的重要性日益提升. 从生命起源到气候变化、从关键矿产到能源资源、从山脉河湖到自然灾害、从地球系统到生物活动、从地球现代到过去, 地球科学研究从未变得如此重要. 但在众多关注的热点和前沿中, 研究人员如何优先考虑最重要的科学问题?

国际大科学计划深时数字地球(Deep-time Digital Earth, DDE)学科组在2024年2~4月份创建了过去10年(2014~2023)地球科学领域30个研究趋势主题的清单[1]. 在创建过程中, 他们首先筛选并确定有关学科领域中创新概念和实际应用交汇的关键区域, 然后利用Dimensions和Web of Science数据库, 分析了466份地球科学期刊的411815篇文章. 他们采用谱聚类算法将这些庞大的数据集组织成407个主题簇, 通过使用Log-Likelihood Ratio算法识别最相关的研究术语来精炼每个簇, 结果将其中30个簇确定为显著趋势. 这些趋势涵盖了跨越六大领域的科研主题: 深地、深时、深海、深空、地球大数据和宜居地球(图1). 因此, 这30个趋势是根据其在地球科学中的代表性、相关性和影响力选择的. 深时数字地球学科组为这些趋势提出了名称, 然后与深时数字地球科学委员会的专家们一起进行最终确定, 确保每个名称都能准确概括相应研究主题的基本内容和本质.

深时数字地球学科组于2024年5~7月份通过与*Nature*的合作, 向全球同行寻求答案. 他们邀请世界各地的专家进行投票, 1100多名来自85个国家的研究人员参与了这项活动, 在11000多张选票中最终选出前10个研究前沿(图1), 其中宜居地球占据4个, 深时和地球大数据各有2个, 深地和深海各只有1个, 而深空1个没有. 显

**引用格式:** 郑永飞. 地球科学研究前沿. 科学通报, 2025, 70: 6188–6203
Zheng Y F. Research forefronts in Earth science (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 6188–6203, doi: 10.1360/CSB-2025-5248

© 2025《中国科学》杂志社

**地球科学研究趋势和前沿**

(*从 30 个研究趋势中通过投票遴选的 10 个研究前沿)

**深地**
地球三维结构*
大陆生长与超大陆旋回
地球历史中的造山过程
板块构造与地幔动力学
地形变化与地球动力学
地壳物质循环
矿产资源
岩浆系统

**深海**
全球海洋碳循环*
深海沉积
边缘海

**深时**
过去、现在和未来气候变化*
生命起源*
地球历史上物种大灭绝
地球历史上游离氧气
早期板块构造
地质年代测定
地球冰川史

**深空**
比较行星学
地球早期分异

**地学大数据**
机器学习和大数据分析*
遥感*

**宜居地球**
碳捕获与封存*
能源资源*
关键矿产*
自然灾害与极端地震*
水文地质学与地球水资源
气候与构造
人为诱导地震
核废料地质处置

**图 1** 地球科学研究趋势和前沿分类框图
**Figure 1** Category scheme for research trends and forefronts of Earth science

然，为了将这10年的研究进展和成果从30个主题缩减到10个前沿，他们集成了专家驱动和数据驱动的方法，整合了专家知识、文献数据和论文引用方法，以实现趋势分析的适度粒度．与此相比，那些发展历史较长、研究程度较高、知识结构相对完整的传统学科领域似乎没有受到青睐．完整结果已于2024年8月25~31日在韩国举行的第三十七届国际地质大会上公布．在这前10个研究前沿中，宜居地球占据4个，指示这个学科交叉领域越来越受到地球科学界的关注[2~8].

深时数字地球学科组通过聚类高被引论文和关键词共现显著的论文来识别研究趋势[1]．这些论文来自Web of Science和Dimensions，时间范围设定为2014~2023年研究内容不仅包括地球内部，而且涉及地球表层(图2). 通过让全球研究人员参与投票过程, 从他们遴选的30个地球科学研究趋势中确定了最重要的和最相关的10个研究前沿，希望以此来指导未来的地球科学研究．得票最多的前10个主题反映了地球科学领域最受关注的研究趋势和进展，不仅包括自然过程对地球系统的扰动，而且涉及资源能源和生态环境对地球宜居性的影响，特别注重解决与科学、技术和社会密切相关的可持续发展问题. 通过这次投票, 深时数字地球学科组准备发布一份评估地球科学进展的报告，旨在提供有关地球科学重大研究突破、研究方法和重要科学问题解决方案的关键认识．本文简要介绍这些前沿的核心内容、挑战与未来方向，旨在揭示地球科学的研究新范式，推动地球系统科学在认知地球演化、保障宜居性中的应用.

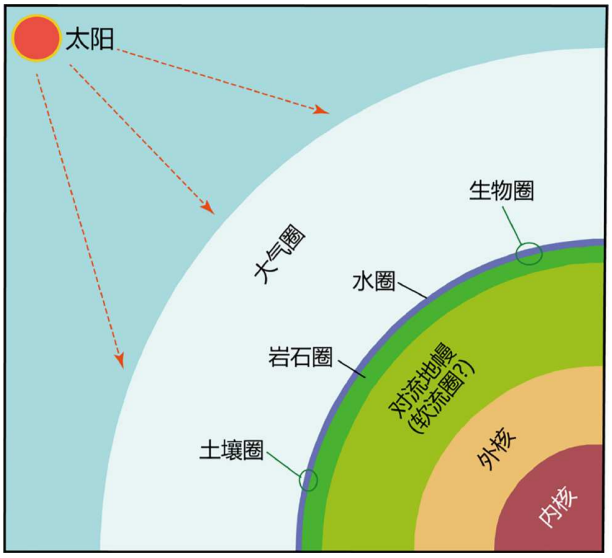


**图 2** 深时数字地球(DDE)大科学计划研究对象示意图
**Figure 2** Schematic diagram for the research object of the Deep-time Digital Earth (DDE) project

## 1 地球科学研究前沿

### 1.1 地球三维结构

地球三维结构研究是地球科学的重要领域之一. 通过地震波、重力场、地磁场等地球物理观测数据可以构建地球内部的三维结构模型, 揭示地球内部的物质组成和动力学过程[9~15]. 对地球三维结构的研究, 不仅需要确定地球内部各圈层的物理结构及其随时间的变化, 而且还要确定主要元素、微量元素和同位素组成等地球化学组成随时间的变化, 结果对于理解地球的形成、演化和地质现象至关重要.

该领域的进步主要得益于地震成像和层析成像, 揭示了现今地球内部复杂的对流地幔动力学和岩石圈结构. 重大发现包括识别热点之下的大规模地幔柱, 以及对不同区域地壳-地幔相互作用的深入了解. 这个领域的挑战包括复杂的地球内部动力学、精确的地球组分成分确定, 以及整合各种类型数据集. 目前, 亟待解决的问题包括地幔极向对流与地幔柱之间的成因联系以及地幔侧向对流与地幔柱上升之间的影响程度.

关于轻元素超离子态和振荡旋转模式的假设, 提出了关于地球内核的一种新视角. 此外, 将土壤结构整合到地球系统模型中以及用于表面波色散反演的创新方法代表了重要的跨学科进步. 全面的模型, 例如LITHO1.0和全球海洋重力模型的开发, 对于揭示隐藏的构造结构和更新全球沉积物厚度估计至关重要. 关于全球冰川冰厚度估计共识的取得, 进一步增强了人们对环境影响的理解.

未来工作应重点关注改进深层地球成像技术以及促进多学科合作, 以更细致地描绘地球内部结构和组成及其随时间的变化. 强调地球不同层圈之间的相互作用, 并阐明水和轻元素在地幔和地核过程中的作用也至关重要. 计算模型的进步对于模拟复杂的地质过程至关重要, 有助于自然灾害预测和减灾、资源管理以及加深人们对地球动态历史的理解.

### 1.2 地学中的机器学习和大数据分析

随着大数据时代的到来, 机器学习技术在地球科学中的应用日益广泛, 业已在高分辨海相无脊椎生物多样性曲线构建[16]、矿物多样性模型鉴定[17]、新生代大气$CO_2$记录更新[18]、新生代沉积速率与全球景观演化模型[19]等领域取得了显著进展. 深度学习、神经网络等算法能够自动提取和分析复杂的地学数据, 提高数据处理和预测的精度和效率. 例如, 在气候数据分析中, 深度学习技术可以预测气温、雨量等气候变化趋势. 因此, 地球科学中的机器学习和大数据分析属于新兴研究领域[20~24]. 通过应用先进的算法和庞大的数据集来解决复杂的地球科学问题, 正在彻底改变人们对地球复杂系统的理解和管理. 这种整合在改进预测和更深入地了解地球过程方面发挥着至关重要的作用, 这对有效管理资源、保护环境和减轻灾害至关重要.

大数据分析为地球科学研究提供了丰富的数据源和强大的分析工具. 通过对海量数据的挖掘和分析, 科学家们能够揭示地球系统的复杂运行机制, 为制定科学决策提供依据. 该领域在气候和天气预测方面取得了显著进步, 在改进极端温度预测的偏差校正方法方面取得了重大进展, 并实施了生成对抗网络等创新方法, 用于随机参数化. 然而, 该领域面临着与数据整合和复杂模型的可解释性相关的挑战, 这些挑战对于充分发挥机器学习在地球科学中的潜力至关重要.

该领域在预测建模方面的进展也很显著, 特别是在矿产勘探和地下水测绘方面, 采用了随机森林和支持向量机等先进算法. 这些方法增强了人们识别矿床和评估地下水潜力的准确性. 在地震学和水文学等学科中, 机器学习技术(包括LSTM网络等尖端模型)的应用, 彻底改变了地震检测、地震层析成像和河流流量的预测. 将数据驱动分析与传统物理模型相结合的混合模型, 越来越被认为是进行全面预测的必要手段.

机器学习和大数据分析的持续发展具有巨大的潜力, 可以改变人们解决地质科学中多方面挑战的能力. 通过创新的解决方案和加强对地球资源的管理, 这些技术有望塑造一个更可持续和更有韧性的未来. 展望未来, 地质科学中的机器学习和大数据分析的发展轨迹将体现在各个领域与物理建模更深入的整合. 克服与数据异构性相关的挑战并增强模型的可解释性是关键目标. 在矿物加工、城市洪水风险评估以及改进模型效率和泛化能力的参数学习技术方面扩大应用, 是具有重大发展潜力的关键领域.

### 1.3 关键矿产

关键矿产是国家经济安全和可持续发展的重要物质基础. 地球科学研究为关键矿产的勘探和开发提供了科学依据和技术支持. 通过地质勘探、遥感监测、大数据集成等手段, 科学家们能够发现新的关键矿产资源[25~34], 为国家的经济建设提供有力保障.

就稀土元素(REE)这类关键矿产而言, 它们对于各种高科技和可再生能源应用不可或缺, 但其供应量往往受到地缘政治因素的影响, 从而给区域经济发展带来了重大挑战. 在供应链中中国占据主导地位的情况下, 平衡全球需求与可持续采购仍然是主要关切点. 从科学角度来看, 关键问题围绕着从不同地质环境中高效提取稀土元素、了解其环境行为, 以及评估其对生态系统和人类健康的影响. 值得注意的进展包括: 探索沉积磷酸盐矿床以提取稀土元素、从风化玄武岩等来源中提取稀土元素的增强技术, 以及稀土二次资源回收利用相关技术的创新及载体. 在阐明稀土元素的生态毒性方面以及通过沉积物地球化学分析以揭示其沉积历史的研究方面也取得了进展.

对于关键矿产具有多种研究方法, 包含了科学、环境和地缘政治方面的考虑. 持续的研究对于实现需求与可持续管理实践之间的平衡至关重要. 未来的努力应优先考虑可持续采矿实践、全面的健康风险评估和新型回收方法. 至关重要的是了解这些关键金属元素如何受生态系统的长期环境影响, 以及它们在各种环境介质中的行为. 制定有效管理策略以减轻关键金属元素的环境影响也同样至关重要.

关键矿产资源与地球可持续发展之间存在着密切的关系, 主要体现在资源的有限性、环境保护、经济发展以及全球合作等4个方面. 首先, 关键矿产资源的可持续利用已经成为地球可持续发展的重要议题. 例如锂、钴、镍、稀土等关键矿产, 是支撑现代工业、清洁能源技术和高科技产业发展的基础, 但是这些资源在地球上的储量是有限的, 且形成周期长, 通常需要几十万甚至几千万年的时间. 为了实现可持续利用, 需要采取一系列措施, 包括提高资源开采效率, 通过技术创新和设备升级来减少资源浪费; 鼓励循环经济的发展, 实现资源的回收再利用; 加强资源储备和管理, 确保资源的稳定供应.

其次, 关键矿产的开采过程中往往伴随着环境污染和生态破坏. 例如, 开采过程中会产生大量的废弃物和有害物质, 对土壤、水源和生物多样性造成严重威胁. 因此, 环境保护是实现关键矿产资源可持续利用的重要保障. 为了实现环境保护与可持续发展的协调, 需要加强环境监管和执法力度, 确保开采活动符合环保标准; 推广绿色开采技术, 减少开采过程中的环境污染和生态破坏; 开展生态修复工程, 恢复受损的生态环境.

再次, 关键矿产资源对于经济发展具有重要意义. 它们不仅是工业生产的原材料, 也是清洁能源技术和高科技产业发展的关键要素. 然而, 随着全球经济的快速发展和人口的不断增长, 对关键矿产资源的需求也在不断增加. 为了保障经济发展的资源供应, 需要加强全球矿产资源的勘探和开发, 发现新的矿产资源; 建立多元化的资源供应体系, 减少对单一资源的依赖; 加强国际合作与交流, 共同应对资源短缺问题.

最后, 关键矿产资源的可持续利用需要全球合作与共同努力. 由于矿产资源的分布不均和各国经济实力的差异, 单靠某个国家或地区难以实现资源的可持续利用. 为了实现全球合作与可持续发展, 需要加强国际的政策协调与对话, 共同制定和执行矿产资源可持续利用的政策和措施; 推动跨国矿业公司的合作与交流, 实现资源共享和优势互补; 加强国际援助与合作项目, 帮助发展中国家提高矿产资源的开采和利用能力. 为了实现地球的可持续发展, 需要全球各国和地区共同努力, 采取一系列措施来保障资源的可持续利用、加强环境保护、促进经济发展和推动全球合作.

### 1.4 过去、现在和未来气候变化

过去、现在和未来的气候变化代表着地球大气圈-水圈-生物圈-土壤圈-岩石圈系统随时间推移所发生的广泛变化, 涵盖了过去的时代、现在的状况以及未来的预测. 研究气候变化对于理解地球的气候历史、评估正在进行的环境变化以及预测未来的气候变化至关重要, 而这些对于全球可持续性和风险减缓又至关重要[35~43]. 为了应对破译过去气候信号、准确监测当前气候趋势以及预测未来变化的挑战, 需要解决复杂且相互作用的自然和人为因素. 核心的科学问题包括理解地质历史时期气候变化背后的驱动力, 包括地球外部太阳辐射、地球表层生物活动、地球内部物质和能量扰动等三个方面, 分别量化这三个要素对地球环境和气候变化的影响, 以及在各种碳排放路径下模拟未来的气候和环境变化.

地球表面的气候一直在不断波动, 通过研究地球的历史气候记录, 如黄土沉积、珊瑚化石、冰芯等, 揭示了地球在过去数百万年间的气候变化规律. 同位素分析、石笋记录、团簇同位素测温和气候模型的突破, 使人们对气候动力学有了更深入的了解. 这些工具揭示了关于过去地表温度变化、季风模式、冰盖动力学和海平面变化的关键见解, 增强了人们对海洋热浪、干旱模式、北极放大效应和洪水事件的理解和预测.

所积累的研究阐明了地质历史气候时代的关键方面, 包括新生代、中生代和古生代, 强调了气候系统对温室气体和海洋温度等因素的复杂性和敏感性.

研究过去气候变化的历史, 才能预测未来气候的变化. 基于历史气候数据, 通过构建运用复杂的气候模型有望预测未来气候变化趋势. 这些模型需要考虑多种因素, 包括温室气体浓度、太阳辐射变化、海洋环流等. 未来气候变化预测对于制定应对策略、减少灾害风险具有重要意义. 未来的研究必须集中在整合跨学科方法、改进气候模型和扩大观测数据范围. 这包括将模型预测与观测数据相协调, 尤其是在北极和热带等代表性数据不足的地区. 技术的进步和方法的改进将在微调未来气候情景预测方面发挥关键作用, 有助于制定有效的全球应对措施, 以减缓和适应气候变化. 这部分工作强调了持续调查的重要性, 将历史数据与创新科学方法相结合, 以加深人们对气候变化的理解, 并为未来制定有效的政策和管理策略提供信息, 以构建一个更具韧性的未来.

### 1.5 能源资源

能源资源, 从传统的化石燃料到可再生能源和新兴技术, 是现代文明的支柱, 为工业、交通和日常生活提供动力. 化石能源是全球能源消耗的主要来源, 但其不可再生性和使用过程中产生的温室气体排放对环境造成了严重影响. 随着化石能源的枯竭和全球气候变化的加剧, 开发更清洁的可再生能源成为未来发展的必然趋势. 可再生能源具有可再生性和环境友好性等特点, 是未来能源发展的主要方向. 太阳能、风能、水能、生物质能等可再生能源技术不断成熟, 已成为全球能源结构转型的重要推动力[44~50]. 有效管理这些资源, 对于平衡全球能源需求与环境保护至关重要. 对各种研究的成果综合分析, 揭示了这个关键领域面临的多样化挑战和进步.

就化石能源的现状与挑战而言, 一个关键的关注领域是页岩油和页岩气以及氢气等非常规能源的勘探和开发. 该领域的挑战包括减轻水力压裂等开采方法的环境影响、应对复杂的储层地质, 以及有效管理副产品. 高压甲烷吸附等温线和分形分析等技术在理解气体储存能力方面发挥着至关重要的作用, 这对高效利用资源至关重要. 页岩气的演变, 特别是在美国和中国等地区, 通过水平钻探和水力压裂技术的进步, 释放了巨大的潜力. 然而, 关于用水、诱发地震和甲烷排放等问题依然存在担忧.

就可再生能源的发展来说, 虽然碱性/表面活性剂/聚合物驱油等方法提高了采收率方法, 但是也带来了经济和环境方面的挑战. 人们对天然气水合物作为未来能源的兴趣日益浓厚, 成功的实地试验展示了其潜力. 然而, 需要技术突破来解决与该资源相关的生产复杂性和环境风险. 与此同时, 海上风能和波浪能等可再生能源的整合代表着向可持续能源系统的转变. 尽管存在技术和基础设施方面的障碍, 但这种转变有望减少对化石燃料的依赖并减轻环境影响.

总体而言, 需要开发一种协调一致的方法, 将技术创新与环境和经济因素结合起来. 能源资源的未来轨迹可能会优先考虑完善非常规资源的开采技术、更加严格地解决环境问题以及增强可再生能源的整合和效率. 随着全球能源需求的持续增长, 创新研究、明智的政策制定和跨学科合作在塑造未来几代人的可持续能源使用方面变得越来越重要.

### 1.6 全球海洋碳循环

全球海洋碳循环是地球系统中一个至关重要的环节, 它不仅调节着大气中的$CO_2$浓度, 还深刻影响着全球气候和生态系统. 海洋作为地球上最大的碳汇, 每年吸收并储存大量的$CO_2$, 这一过程对缓解全球变暖或变冷具有重要意义. 然而, 随着生物活动环境的变化, 包括化石燃料的燃烧、森林砍伐以及海洋酸化等, 海洋碳循环的平衡正受到前所未有的挑战[51~57].

全球海洋碳循环体现了海洋-大气-土壤-生物之间碳的物理、化学和生物学相互作用, 在某种程度上是控制着大气中$CO_2$浓度的主导因素之一, 因此在调节地球气候方面发挥着一定的作用. 应用先进的海洋观测技术, 如浮标、遥感卫星和潜水器, 对海洋中的碳循环过程进行了深入研究, 发现海洋表层水通过光合作用吸收$CO_2$, 形成有机物质并沉入海底, 这一过程被称为生物泵, 其中微生物碳泵可能对于全球海洋碳吸收和释放的自然调控发挥着不可忽视的作用. 同时, 海洋内部的环流系统, 如温盐环流, 也在全球范围内重新分配着碳元素. 然而, 该循环面临着重大挑战, 包括精确量化不同的碳通量和储量、理解生物活动的影响以及破译碳系统内部的复杂动态. 主要科学问题在于深入研究海洋碳吸收和释放背后的机制、海洋和陆地生态系统对气候波动的不同响应, 以及全球碳储存和排放趋势的持久变化.

近年来在全球海洋碳循环的若干方面都取得了重大进展，特别是通过开发复杂的耦合气候-碳循环模型比较项目(C4MIP)中的模型，以及使用轨道碳观测站2(OCO-2)等工具提高观测能力. 这些创新加深了人们对海洋碳循环反馈机制的理解. 通过整合各种数据源, 包括历史记录到最先进的卫星观测，研究人员对陆地和海洋碳汇和碳源进行了更细致的评估. 研究强调了海洋碳循环动力学与陆表温度和降水等气候因素之间的复杂关系，揭示了显著的区域差异以及极端天气事件对地表碳汇的深远影响.

为了更准确地理解海洋碳循环的动态变化，需要应用大数据分析技术, 整合来自多个来源的数据集, 包括海洋温度、盐度、pH、叶绿素含量以及海洋生物群落分布等. 这些数据可以为构建海洋碳循环模型提供了基础，使得人们能够预测未来海洋碳汇的变化趋势, 并评估其对全球气候的可能影响. 展望未来, 应重点改进测量技术和建模方法，同时深入研究海洋碳循环对极端气候事件和生物活动的潜在影响. 采用将海洋观测数据与模型模拟相结合的综合方法，对于增强人们预测陆地气候变化和制定有效的陆地气候政策至关重要. 这种综合的理解对于应对地球气候变化带来的环境挑战、制约生物活动变化减缓其影响能力以及实现地球宜居性的可持续保障不可或缺.

### 1.7 生命起源

生命起源与地球和行星演化之间存在着密不可分的联系. 地球的形成和环境的变迁为生命的出现提供了必要的条件；而生命的出现和进化又进一步推动了地球的演化和发展[58~66]. 这种相互作用和协同进化构成了地球上丰富多彩的生命现象和地质景观. 一方面, 生命的出现不仅改变了地球的表面环境，还通过生物作用促进了地壳运动、岩石风化和土壤形成等地质过程，从而进一步改变了地球表层的化学组成和物理结构. 另一方面, 随着地球环境的不断变化, 生物面临着更多的挑战和机遇，它们通过不断进化来适应新的环境条件，从而推动了生物多样性的增加和生态系统的复杂化，因此地球的演化又为生命的进化提供了更多可能性.

就生命起源的假说而言，其中较为普遍接受的是化学起源说. 这一假说认为, 在地球早期, 一系列复杂的化学反应在原始海洋和大气中发生，最终导致了生命的产生. 另一种假说则是外来起源论, 认为生命可能来自宇宙中的其他星球或彗星. 然而, 这一假说目前仍缺乏确凿的证据支持. 无论如何, 在生命起源之后, 地球上的生物开始与环境进行协同进化. 生物通过基因突变和自然选择等机制不断适应环境变化，同时也在一定程度上改变着环境. 例如, 植物通过光合作用产生氧气, 改变了大气成分; 而动物则通过呼吸作用消耗氧气并产生二氧化碳等气体.

探索生命起源，涉及深入探究地球上生命令人着迷的起始和早期演化. 但是, 目前这方面积累的数据还很少, 并且确切的证据也不多. 因此, 需要更多地关注生命在整体表层地球系统演化过程中各种不同类型的生物起源问题，包括生物多样性大幅增加、生态系统的复杂化和现代生态系统的形成等. 这是一项多学科的探索, 对于理解生命的韧性和适应性至关重要, 并且对于寻找地外生命方面也发挥着关键作用. 确定不同类型生命起源的研究充满了挑战，尤其是建立准确的时间线，例如古代热液喷口的发现和对最早期微生物生命的研究就说明了这一点. 这些发现表明, 生命的出现时间比之前假设的要早得多，但是否早达始太古代依然是个尚未解决的问题.

通过化石记录、分子生物学等手段，可以探索地球上生命的起源和演化过程. 一个基本的科学问题是解开滋养早期生命的环境条件. 对寒武纪早期海洋氧化以及氧化还原异质海洋作用的研究表明，不断进化的生命与地球的大气和海洋之间存在着动态的相互作用. 分子钟分析的进步至关重要, 它挑战了传统的观点, 并提出了生命逐渐出现和多样化的假设. 包括对寒武纪早期生物群和火星二氧化硅沉积物的分析在内的研究表明, 生命的演化以一系列辐射事件为特征, 这些事件发生在不同的环境中，与地球不断变化的地球化学和大气状态密切相关. 未来的研究方向应集中于整合地质学、化学和生物学见解，以增强人们对生命起源的理解. 这种综合方法是解开生命形式与其环境之间复杂相互作用的关键，对理解地球上和地球之外的生命具有深远意义.

### 1.8 碳捕获与封存

碳捕获与封存(CCS)技术旨在减缓温室气体排放, 是实现二氧化碳($CO_2$)净零排放的重要途径. 根据封存地点的不同，碳封存技术可以分为地质封存、海洋封存和生物封存三大类[67~75]. 地质封存是将二氧化碳注入地下岩石层中，通过岩石的物理和化学作用将其长

期封存; 海洋封存则是将二氧化碳注入深海中, 利用海水的溶解和化学反应形成稳定的化合物进行封存; 生物封存则是通过植物的光合作用将二氧化碳转化为有机物质进行储存.

目前常用的方法是从工业和能源相关来源捕获二氧化碳, 经过处理后注入地下深层地质构造中进行永久储存. 随着技术的进步, CCS技术的效率和安全性不断提高, 有望为实现全球碳减排目标提供有力支持, 对气候变化缓解工作和碳中和转型作出重大贡献. 最近的研究强调了该领域的各种挑战和创新突破. 利用地球物理学、地质学、岩石物理学等多学科知识和技术手段, 对储存地点的圈闭、容量和注入能力进行全面评估, 以确保项目的安全性和可行性. 因此, 在CCS项目中, 地下风险评估是关键环节. 此外, 经济和社会障碍, 例如成本和公众接受度, 构成了重大阻碍, 而技术挑战则包括开发高效的捕获方法、理解地质构造中的流体动力学, 以及确保长期安全性和封存.

值得注意的进展包括使用机器学习模型预测$CO_2$捕获效率、新型水合物基碳捕获技术以及对页岩气回收过程的深入了解. 目前的努力集中在开发经济高效的管理全球碳捕获与封存布局, 将储存容量提高到十亿吨级, 以及加深人们对气候变化与各种$CO_2$汇相互作用的理解. 碳捕获与封存的未来方向包括加强全球合作, 特别是在金融和技术领域, 重点关注了解区域气候对碳汇的影响、提高公众接受度以及解决伦理问题. 数据驱动方法和计算建模在优化碳捕获与封存运营中的日益普及, 再加上对碳捕获与封存部署的环境和伦理方面的关注, 凸显了将其成功地集成到全球气候变化缓解战略中研究的综合方法之中的必要性.

随着全球对气候变化问题的重视和减排压力的加大, 碳捕获与封存技术的前景日益广阔. 该技术不仅有助于实现全球减排目标, 还能促进能源产业的可持续发展. 未来, 随着技术的不断进步和成本的降低, 碳捕获与封存技术有望在更多领域得到应用和推广. 但是, 碳捕获与封存技术应用仍面临诸多挑战. 首先, 技术本身尚未完全成熟, 需要不断研究和创新以提高效率和降低成本; 其次, 储存地点的选择和评估也是一个复杂的过程, 需要综合考虑地质条件、环境风险和经济性等因素; 最后, 政策支持和市场机制的建立也是推动该技术发展的关键. 不过, 这些挑战也为碳捕获与封存技术的发展提供了机遇. 通过加强国际合作、推动技术创新和政策支持等措施, 有望克服这些挑战并实现技术的广泛应用.

### 1.9 遥感

遥感技术作为地球科学研究的重要手段之一, 正在发挥着越来越重要的作用. 遥感技术通过非接触的方式获取地球表面的信息, 具有覆盖范围广、更新速度快、数据量大等特点. 在地球科学研究中, 遥感技术被广泛应用于环境监测、资源调查、灾害预警等领域[76~82]. 遥感技术的这些发展, 得益于人工智能和机器学习的整合, 正在彻底改变研究和理解各种环境和城市挑战的方法.

在环境监测方面, 遥感技术能够实时监测大气中的污染物浓度、水体中的悬浮物含量以及土壤湿度等参数, 为环境保护提供科学依据. 空气质量评估, 特别是关于$PM_{2.5}$浓度的评估, 是遥感作出重大贡献的另一个关键领域. 利用先进的机器学习技术, 现在可以更准确地预测$PM_{2.5}$水平, 有助于减轻与空气污染相关的健康风险. 这种能力至关重要, 因为这些细颗粒物与严重的健康问题有关. 在资源调查方面, 遥感技术能够快速获取地表覆盖类型、植被分布以及矿产资源分布等信息, 为资源开发和利用提供重要支持. 在灾害预警方面, 遥感技术能够及时发现并预警地震、洪水、火灾等自然灾害的发生, 为防灾减灾提供有力保障.

遥感是理解和管理地球表面和大气层的至关重要工具, 近年来取得了重大进展. 一个关键应用是监测城市热岛效应, 这是因为城市化与气候变化相互作用, 导致城市地区温度比农村地区高. 一项在印度加尔各答和勒克瑙等城市开展的研究表明, 土地利用变化、城市化和植被减少对局部气候产生影响. 此外, 遥感在环境变化的时空分析中发挥着关键作用. 例如, 监测土壤水分和蒸散量的进步, 为认识农业生产力、水资源管理和气候变化影响提供了宝贵的见解. 多传感器数据的整合增强了更全面地描述复杂环境现象的能力. 像Google Earth Engine这样的平台使人们能够获得地理空间分析, 使更广泛的用户能够参与环境监测和管理.

随着遥感技术的不断发展, 其空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率不断提高, 使人们能够更加精细地观测和分析地球表面的变化. 同时, 遥感技术与其他技术的融合应用, 如与人工智能、云计算等技术的结合, 将进一步推动地球科学研究的发展和创新. 展望未来, 遥感技术的潜力在于扩展这些能力, 特别是在城市研究和空气质量监测方面, 以及开发更全面、更易于

使用的分析平台. 这项技术的不断发展有望增强人们有效观察、理解和应对全球环境变化的能力.

### 1.10 自然灾害与极端地震

在地球科学领域, 自然灾害包括地震、海啸、火山喷发和冰川湖溃决洪水. 由于它们对地球地貌的深远影响以及对人类(尤其是人口稠密和生态脆弱地区)的重大威胁, 具有至关重要的意义[83~89]. 在火山事件中观察到的复杂的海啸成因机制以及对多断层地震活动的详细研究, 强调了需要更细致的预测模型和全面的风险评估. 综合分析一系列最新研究成果, 发现在自然灾害预测领域既取得了显著进展, 也面临着持续的挑战.

自然灾害如地震、洪水、滑坡等对人类社会造成巨大威胁, 因此需要加强有关监测与预警. 通过遥感、地震监测等手段, 实现了对自然灾害的实时监测和预警, 为防灾减灾提供了重要支持. 极端地震是自然灾害中最为严重的一种, 需要加强研究与应对. 通过地震波分析、地质构造研究等手段, 有望揭示地震的发生机制和分布规律, 为地震预测和应对提供了科学依据. 在技术进步方面, 特别是在开发复杂的震动预测模型以及将深度学习技术应用于地震数据分析方面, 也取得了重大进展, 增强了人们理解和预测地震影响的能力. 然而, 准确预测缓慢断层滑动的机制、实现地震危险性评估的一致性以及快速识别偏远地区的火山喷发, 仍然是该领域面临的巨大挑战.

侧重于人口增长与海平面上升背景下沿海地区风险的分析, 以及对2021年恰莫利灾难的调查, 凸显了城市化沿海地区的风险不断升级. 同样, 2022年洪加汤加-洪加哈阿帕伊火山喷发所揭示的错综复杂的动力学, 以及2016年凯库拉地震的多方面特征, 反映了地球物理事件与人类基础设施之间的复杂相互作用. 由气候变化引起的冰川融化导致的冰川湖溃决洪水发生频率和严重程度的增加, 也引起了人们对地质灾害变化性以及应对策略适应性的热切关注.

在这个充满活力且不断发展变化的领域, 持续的研究和创新对于提升人们对自然地质灾害的理解和应对准备至关重要. 未来自然地质灾害研究的方向越来越倾向于整合多学科方法, 将地质学、地震学、气候学和计算科学融为一体. 加强全球合作、数据共享以及利用机器学习和先进模拟等尖端技术至关重要. 这些共同努力不仅旨在改进预测模型和风险评估, 而且旨在制定更有效的缓解策略, 从而增强全球对这些强大自然现象的抵御能力.

## 2 专家观点

为了配合国际大科学计划DDE发布这10个地球科学研究前沿, Springer-Nature出版社Nature Portfolio栏目采访了两位DDE科学委员会成员, 其中一位是意大利博洛尼亚大学地层学家和沉积学家William Cavazza教授, 另一位是美国华盛顿卡内基科学研究院地球与行星科学实验室矿物学家Robert Hazen教授. Cavazza教授说, 现在最重要的是获得可靠的科学信息, 以帮助和指导未来几十年地球科学研究必须作出的“艰难选择”; 这正是DDE可以提供帮助的地方, 为重新关注人类的首要任务之一提供了坚实的基础. 他表示, 此次调研的规模意味着“结果有着重大的影响力”; 这些主题需要更多的研究, 目前媒体的报道往往肤浅且耸人听闻, 公众和决策者需要更多易于理解的确凿数据.

根据DDE的这项调查, 过去、现在和未来的气候变化是受到最多关注的研究前沿(图1), 其次是碳捕获和储存、能源资源, 强调了控制温室气体排放等相关研究的重要性. Cavazza教授表示, 基于数据的知识可以帮助我们为气候变化主导的未来做好准备, 过去地球的气候变化为未来几十年变暖或变冷的世界提供了可能的模型; 地质历史的变化揭示了地球系统(包括大气、海洋、土壤、植被和气候)如何对地球碳循环精细平衡的扰乱产生反应. 他补充道, 地球历史上的气候一直以极端变化为特征, 其中一些变化可与当下比拟.

地球三维结构、机器学习和大数据分析等也是受到较多关注的研究前沿(图1), 反映了人们对地球内部知识的渴求以及对人工智能应用到地球科学和期望. 此外, 对生命起源以及自然灾害与极端地震等研究前沿的热情依旧, 反映了人们对人类生存环境的持续关注. Hazen教授说, 这项调研非常具有启发性, 因为结果反映了对地球科学重要趋势富有思考深度的概述; 不过, DDE的数据科学工作必须超越任何一项调查重点, 并将地球视为一个复杂演化中的系统. 他补充道, 气候变化在调研结果中理应占据首位; 很难说还有什么比之更能帮助我们了解我们的星球, 以及人类在其变化中发挥的作用.

Hazen教授团队的研究着眼于矿物的演化, 对5659种矿物类型的研究揭示了与其不断演变的形成环境相关的矿物多样性和分布模式[17,90]. 与之前的估计相反,

只有三分之一的矿物类型完全是生物过程的结果. 增强地球矿物多样性的一个更重要的因素是动态水文循环; 至少有4583种矿物(占所有类型的81%)是通过水与岩石的相互作用产生的. 这对生命的演化有重要意义. 他说, 矿物质在生命起源中发挥了关键作用, 生命和矿物质共同演化了四十亿年; 如果不了解固体地球的演变, 没有别的方法可以了解地表环境的变化.

Cavazza教授说, 虽然有大量的科学数据, 但这些数据分散在众多数据库、出版物、数据存储库和其他渠道中. 他解释说, 即使是同一专业的数据也经常使用不同的标准进行记录, 这使得比较和整合变得困难; 这种异构数据集需要统一, 这就需要DDE的作用. 通过该计划, 数据将在可访问的中心提供, 从而深入了解资源和材料的分布和价值以及风险. 它还可以帮助研究人员更清楚地了解地球的地质历史, 同时洞察地球的未来.

## 3 关于深时数字地球

### 3.1 总体概况

深时数字地球(DDE)大科学计划是由中国科学家领衔发起的第一个国际大科学计划, 得到国际地质科学联合会(IUGS)的认可, 于2019年2月在北京的香山会议中心正式启动. 该计划与世界各地的专业协会、学术机构和科学家合作, 旨在通过整合全球地球演化大数据, 构建数据驱动的地球科学研究平台, 推动地球科学范式变革. 其核心目标是运用人工智能、大数据、超级计算等技术, 解析地球46亿年的物质、生命、气候和地理演化规律, 为全球可持续发展提供科学支撑[91~94].

深时数据与地球层圈在数百万年的地质时期经历的各种变化过程有关, 包括环境和气候的演变、板块运动和大陆演变的数据. 国际大科学计划DDE致力于全球数据整合和利用, 拓展人工智能(AI)大模型在地学预测中的应用, 例如开发地球系统数字孪生模型, 模拟极端地质事件对人类社会的影响. 同时, 其国际合作网络将进一步向“一带一路”国家延伸, 推动地学科技成果普惠共享, 助力实现联合国可持续发展目标(SDGs). DDE计划的首要重点是研究地球和其他类地行星的地核、地幔和地壳及其表层土壤圈、生物圈、水圈和大气圈, 特别是与物质、生命、能量、地貌、环境和气候演化相关的结果, 属于地球系统科学的范畴[95]. 这涉及探索深部地球系统如何与表层地球系统之间发生相互作用(图3), 不仅需要大数据和人工智能的支撑, 而且需要专业学术思想和创新发展意识.

深时数据与地球圈层在地球形成以来的四十多亿年地质时间中经历的不断变化的宏观、中观和微观过程相关. 它们既包括短周期尺度的生命和气候演化的数据, 也包括长周期尺度的构造板块运动以及地球内部和外部演化的数据, 构建不同类型和层次的知识图谱[96~100], 不仅聚焦表层地球系统[96,97], 而且延伸到深部地球系统(图4). DDE的使命就是协调“深时”数字地球数据, 促进数据驱动的科学发现, 以了解地球圈层内部及其之间的物理、化学和生物演化. 通过该计划的实施, 有关数据将在可访问的中心提供, 从而为认识能源、资源和灾害的分布提供有价值的线索. 因此, 它可以帮助研究人员更清楚地了解地球的过去和现在, 并对地球的未来提供预测.

作为一个国际大科学计划, DDE汇集了世界各地的专业地球科学协会、学术机构和科学家的资源, 旨在协调深时数字地球数据, 促进数据驱动的发现, 以了解地球不同层圈之间的物理学、化学和生物学相互作用及其时空演化, 促进地球系统科学的发展[91~100]. 因此, 自2019年初DDE平台正式搭建以来, 已经开展了若

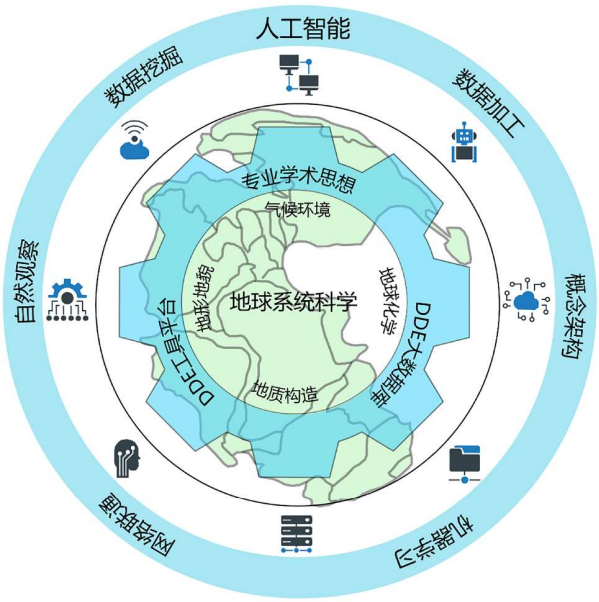


**图 3** 深时数字地球(DDE)系统工作框架示意图(修改自Wang等人[94])

**Figure 3** Schematic diagram for the operational framework of the Deep-time Digital Earth project (revised after Wang et al.[94])

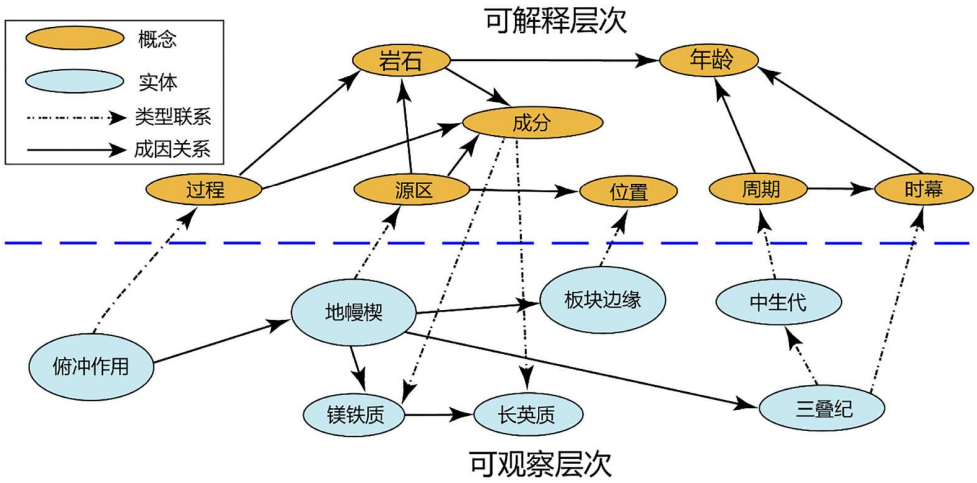


**图 4** 深部地球系统知识层次示意图(修改自Hu等人[97])
**Figure 4** Schematic diagram for knowledge levels in deep Earth system (adapted after Hu et al.[97])

干重要活动, 取得了若干初步成果, 简要概括如下.

### 3.2 重要活动

(1) 国际平台与数据基础设施建设: 一是2022年11月在联合国教科文组织巴黎总部全球发布Deep-time.org网址, 向大众告知这一数字化公共基础设施整合了全球地质、气候、生物等多源数据, 支持在线分析与动态模拟, 成为DDE的核心载体. 二是2025年Earth Explorer系统升级, 其中深时可视化分析系统实现了从5.4亿年前到现代的古板块动态旋转模拟, 集成全球1:500万地质图、古气候数据集等, 支持跨时空数据叠加与科研场景复现, 已服务于古地理、古生态等领域. 三是学科数据库建设, 如岩浆岩数据库(One Petrology)整合全球2660个岩浆岩锆石U-Pb年龄数据, 揭示了中亚造山带的闭合机制; 沉积物知识图谱项目构建了覆盖沉积学全领域的知识体系.

(2) 国际合作与学术交流: 一是举办国际学术论坛与工作坊, 包括2022年DDE开放科学论坛、2024年沉积学科组工作推进会、2025年总体专家组会议等, 推动全球科学家在数据共享、方法创新等方面的协作. 二是全球科研网络构建, 截至2025年, DDE已吸引29个国际机构和学术组织加入, 形成覆盖六大洲的研究网络, 并建立“非洲六张图”等区域合作项目, 提升发展中国家科研能力.

(3) 技术研发与人才培养: 一是人工智能与大数据应用, 如开发MyDDE模块, 实现地学数据的全生命周期管理与在线协同分析; 利用Python和AI技术完成黄土高原沟壑覆盖度分析, 为区域地质灾害防治提供新方法. 二是跨学科人才培育, 通过系列工作坊(如Python地学应用实战培训)和国际暑期学校, 培养数据驱动的地球科学复合型人才.

### 3.3 初步成果

(1) 地球演化研究突破: 一是生命与环境协同演化, 如利用古生物大数据和超算技术, 重建了寒武纪至早三叠世海洋生物多样性演化曲线, 揭示了五次大灭绝事件的精细过程. 二是地质事件机制解析, 利用岩浆岩数据库支持的研究发现, 如蒙古-鄂霍茨克洋闭合受西伯利亚克拉通旋转和俯冲带后撤联合作用, 修正了传统板块理论模型.

(2) 数据驱动科研范式创新: 一是知识图谱与智能分析, 如“沉积物知识图谱与知识演化”项目团队构建了包含172个字段的沉积学数据标准体系, 实现从样品分析到全球演化规律的智能推理. 二是AI辅助地学发现, 如地学大模型GeoGPT整合矿物、岩石、化石等数据, 可自动识别地质异常并生成演化假说, 在云南东川发现新矿物“Qiumingite”.

(3) 全球公共科技产品贡献: 一是开源平台与工具共享, Deep-time.org已开放200余个数据集和分析工具, 累计访问量超10万次; 全球超高分辨率地貌类型图下载量突破1300次, 服务于地质灾害预警和资源勘探. 二是国际标准制定, DDE推动建立地学数据FAIR原则(可

发现、可访问、可互操作、可重用), 成为全球地球科学数据管理的标杆.

(4) 可持续发展应用: 一是资源与环境评估, 其中非洲地质灾害数据集和风险评估图为当地基础设施建设提供依据; 全球岩浆岩同位素填图揭示了中亚显生宙陆壳省的成矿规律, 指导矿产资源勘探. 二是气候预测支撑, 通过重建过去6600万年大气二氧化碳浓度记录, DDE为预测未来气候变化提供关键参数, 相关成果被纳入联合国IPCC报告参考体系.

### 3.4 小结

总体来说, DDE计划在数据规模、技术创新和国际影响力上已处于全球重要地位, 其发展前景可概括为"三个转变": (1) 从数据整合到科学发现: 通过AI驱动的知识图谱, 在不久的将来可揭示一系列新的地球科学演化规律; (2) 从科研工具到治理平台: 其气候预测模型将纳入《巴黎协定》全球监测体系, 资源勘探成果可支撑联合国SDG 12(负责任消费)目标; (3) 从国际合作到全球治理: DDE有望成为继IPCC之后的又一全球地学治理核心机构, 主导制定地学数据、AI伦理等领域的国际规则.

## 4 结语

在20世纪60年代建立的板块构造理论, 从根本上引领了固体地球科学的革命[101,102]. 在20世纪80年代提出的地球系统科学, 从一定程度上推动了全球变化领域的气候和环境科学研究[103~105]. 进入21世纪以来, 地球科学研究不仅正经历着前所未有的变革, 而且正面临着前所未有的挑战和机遇[7,8,95,106,107]. 当前, 地球表面正经历显著的全球性和区域性环境变化, 人类面临气候冷暖交替、极端天气事件频发、海平面升降、生态系统兴衰等一系列挑战, 深刻反映地球系统内部与外部之间复杂的物质相互作用和能量反馈机制[108]. 随着技术的进步和跨学科合作的加深, 新的研究方法和理论不断涌现. 在深时数字地球大科学计划遴选的前10个地球科学研究前沿中, 就涉及从多个维度研究地球科学, 对这些新趋势的认识和理解可以为未来的科学研究提供参考. 随着科技的进步和跨学科合作的加深, 新的研究方法和理论不断涌现, 为地球科学研究注入了新的活力. 在未来, 地球科学将继续围绕气候变化、圈层相互作用、资源可持续利用、自然灾害防治等重大问题展开深入研究, 为解决人类面临的全球性问题提供科学依据和技术支持.

深时数字地球计划作为全球首个聚焦地球46亿年演化的国际大科学计划, 其发展前景在技术创新、国际合作和应用价值等方面呈现显著优势, 同时也面临数据整合、经费支持、政策协调等挑战. 从目前的进展来看, 有关核心技术积累已经奠定了有利的发展基础, 其中数据基础设施全球领先, 人工智能与数字孪生技术深度融合, 国际合作网络初具规模. 深时数字地球计划的未来潜力在于科学突破与应用价值双轮驱动, 包括科学研究范式革新、地质事件精准解析、全球演化模拟升级等. 此外, 可持续发展应用场景广泛, 涉及资源勘探、气候预测、灾害预警等. 中国《政务数据共享条例》(2025年8月1日起施行)为深时数字地球计划跨部门数据整合提供法律保障, 其FAIR原则(可发现、可访问、可互操作、可重用)被欧盟、东盟等采纳为国际标准. 预计2026年深时数字地球计划将主导制定首个"全球地质数据交换协议", 推动150个国家数据互通. 然而, 深时数字地球计划面临的关键挑战在于: (1) 数据整合与质量控制: 全球地学数据标准化率不足40%, 不同国家坐标系、年代地层单位差异显著; (2) 国际协作机制优化: 不同国家对数据初的贡献度有很大产别, 需建立"数据-技术"交换机制; (3) 算力与伦理风险: 地球系统数字孪生模型单次模拟需消耗1000 PFlops算力, 人工智能生成的演化假说需建立"专家-机器"双验证机制, 否则会导致伪科学传播. 总体而言, 深时数字地球计划不仅将为推动地球科学研究创新提供大数据平台, 而且将为应对气候变化、资源短缺、灾害预报等全球性环境挑战提供科学支撑, 其发展前景广阔且具有战略意义.

一般来说, 科学研究趋势是指在当前学术界广泛讨论和研究的问题或主题. 这些趋势反映了学术界最为关注的研究进展和成果, 并有可能解决与科学、技术和社会密切相关的实际问题. 它们在短时间内吸引了大量高质量论文的发表, 导致特定领域内文献引用频率的显著增加. 然而, 我们也应该认识到, 地球科学研究存在复杂性和长期性. 研究热点可以用文献计量方法来衡量, 而研究前沿则随着科学的发展而变化. 在基础科学研究中, 能够把冷门做成热门的, 就是把前沿成功发展成了热点. 在地球科学研究中, 像气候变化和大地构造等综合性学科需要不同领域科学家群体之间的合作和努力才能取得有效进展. 因此, 加强国际合作、推动跨学科研究、提高公众意识, 已经成为地球

系统科学研究的重要发展方向. 总之, 地球科学研究的新趋势就是推动我们对地球圈层及其相互作用的认识和了解不断深入. 通过不断探索和创新, 我们有信心为构建一个更加美好、可持续的地球未来贡献智慧和力量.

**致谢** 本文内容主要编译自公开媒体, 其中涉及的大数据调查得到国际大科学计划深时数字地球(DDE)资助, 有关研究趋势和前沿部分主要来自DDE网站https://trends.ddeworld.org, 引言和专家观点部分主要来自Springer-Nature出版社Nature Portfolio栏目网站https://www.nature.com/articles/d42473-024-00094-3和d42473-24-00095-2. 两位评审专家提出的建设性意见对于完善本文发挥了重要作用.

## 参考文献

1 Zhao Y, Wang M, Ding J X, et al. Data-enhanced revealing of trends in Geoscience. J Data Inf Sci, 2024, 9: 29–43
2 Lissauer J J. How common are habitable planets? Nature, 1999, 402: C11–C14
3 Langmuir C H, Broecker W. How to Build a Habitable Planet. Princeton: Princeton University Press, 2012
4 Elkins-Tanton L. What makes a habitable planet? EoS Trans, 2013, 94: 149–150
5 Shahar A, Driscoll P, Weinberger A, et al. What makes a planet habitable? Science, 2019, 364: 434–435
6 Huang J P, Liu X Y, He Y S, et al. The oxygen cycle and a habitable Earth. Sci China Earth Sci, 2021, 64: 511–528 [黄建平, 刘晓岳, 何永胜, 等. 氧循环与宜居地球. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 487–506]
7 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]
8 Xu Y G, Huang X L, Wang Q, et al. Earth's habitability driven by deep processes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 169–183 [徐义刚, 黄小龙, 王强, 等. 地球宜居性的深部驱动机制. 科学通报, 2024, 69: 169–183]
9 Yoshida M. Three-dimensional visualization of numerically simulated, present-day global mantle flow. J Vis, 2013, 16: 163–171
10 Pasyanos M E, Masters T G, Laske G, et al. LITHO1.0: an updated crust and lithospheric model of the Earth. J Geophys Res- Solid Earth, 2014, 119: 2153–2173
11 Sandwell D T, Müller R D, Smith W H F, et al. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. Science, 2014, 346: 65–67
12 Montagner J P. Deep Earth structure-upper mantle structure: global isotropic and anisotropic elastic tomography. Treatise on Geophysics, 2015, 1: 613–639
13 Tromp J. Seismic wavefield imaging of Earth's interior across scales. Nat Rev Earth Environ, 2020, 1: 40–53
14 Yao H J, Luo S, Li C, et al. Direct surface wave tomography for three-dimensional structure based on surface wave traveltimes: methodology review and applications (in Chinese). Rev Geophys Planet Phys, 2023, 54: 231–251 [姚华建, 罗松, 李成, 等. 基于面波走时的三维结构面波直接成像: 方法综述与应用. 地球与行星物理论评, 2023, 21: 231–251]
15 Cao X, Liu Z, Hu C, et al. Three-dimensional geological modelling in Earth science research: an in-depth review and perspective analysis. Minerals, 2024, 14: 686
16 Fan J, Shen S, Erwin D H, et al. A high-resolution summary of Cambrian to Early Triassic marine invertebrate biodiversity. Science, 2020, 367: 272–277
17 Hazen R M, Morrison S M. On the paragenetic modes of minerals: a mineral evolution perspective. Am Miner, 2022, 107: 1262–1287
18 Hönisch B, Royer D L, Breecker D O, et al. Toward a Cenozoic history of atmospheric $CO_2$. Science, 2023, 382: eadi5177
19 Salles T, Husson L, Rey P, et al. Hundred million years of landscape dynamics from catchment to global scale. Science, 2023, 379: 918–923
20 Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. Nature, 2019, 566: 195–204
21 Stephenson M H. The uses and benefits of big data for geological surveys. Acta Geol Sin (Eng), 2019, 93: 64–65
22 Li X, Feng M, Ran Y, et al. Big Data in Earth system science and progress towards a digital twin. Nat Rev Earth Environ, 2023, 4: 319–332
23 Verdu E, Nieto Y V, Saleem N. Big data and artificial intelligence in Earth science: recent progress and future advancements. Acta Geophys, 2023, 71: 1373–1375
24 Vance T C, Huang T, Butler K A. Big data in Earth science: emerging practice and promise. Science, 2024, 383: eadh9607
25 Hayes S M, McCullough E A. Critical minerals: a review of elemental trends in comprehensive criticality studies. Resour Policy, 2018, 59: 192–

199
26 Cheng Q. Integration of Deep-time Digital Data for mapping clusters of porphyry copper mineral deposits. Acta Geol Sin (Eng), 2019, 93: 8–10
27 Wang D H. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation (in Chinese). Acta Geol Sin, 2019, 93: 1189–1209 [王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向. 地质学报, 2019, 93: 1189–1209]
28 Hou Z Q, Chen J, Zhai M G. Current status and frontiers of research on critical mineral resources (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3651–3652 [侯增谦, 陈骏, 翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿. 科学通报, 2020, 65: 3651–3652]
29 Li W C, Li J W, Xie G Q, et al. Critical minerals in China: current status, research focus and resource strategic analysis (in Chinese). Earth Sci Front, 2022, 29: 1–13 [李文昌, 李建威, 谢桂青, 等. 中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析. 地学前缘, 2022, 29: 1–13]
30 Dou S, Xu D, Zhu Y, et al. Critical mineral sustainable supply: challenges and governance. Futures, 2023, 146: 103101
31 Vivoda V. Friend-shoring and critical minerals: exploring the role of the Minerals Security Partnership. Energy Res Soc Sci, 2023, 100: 103085
32 Britt A F, Czarnota K. A review of critical mineral resources in Australia. Aust J Earth Sci, 2024, 71: 1016–1049
33 Bulin D. The critical mineral rush: lithium and cobalt–A Canadian perspective. Springer Proceed Business Economics, 2024, 24: 315–32
34 Xue F, Zhang X, Yu X, et al. Critical mineral resources for future green energy: understanding formation mechanisms and processing technologies—introduction. Geol J, 2025, 60: 1771–1774
35 Paillard D. From atmosphere, to climate, to Earth system science. Interdisciplinary Sci Rev, 2008, 33: 25–35
36 Blois J L, Zarnetske P L, Fitzpatrick M C, et al. Climate change and the past, present, and future of biotic interactions. Science, 2013, 341: 499–504
37 Sensoy S, Coskun M, Turkoglu N, et al. Future Earth and expected mega changes. In: Beer T, Li J P, Alverson K, eds. Global Change and Future Earth: The Geoscience Perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. 15–27
38 Tierney J E, Poulsen C J, Montañez I P, et al. Past climates inform our future. Science, 2020, 370: eaay3701
39 Seltzer A M, Blard P H, Sherwood S C, et al. Terrestrial amplification of past, present, and future climate change. Sci Adv, 2023, 9: eadf8119
40 Chen J, Zhang Q, Lu Z, et al. Reconciling East Asia's mid-Holocene temperature discrepancy through vegetation-climate feedback. Sci Bull, 2024, 69: 2420–2429
41 Judd E J, Tierney J E, Lunt D J, et al. A 485-million-year history of Earth's surface temperature. Science, 2024, 385: eadk3705
42 Brasseur G, Stammer D, Friedlingstein P, et al. Climate science for 2050. Front Clim, 2025, 7: 1554685
43 Hait M, Chaturwedi A K, Mitra J C, et al. Emerging technologies for climate change mitigation and adaptation. In: Ogwu M C, Chibueze Izah S, eds. Evaluating Environmental Processes and Technologies. Cham: Springer, 2025
44 Danish, Ulucak R, Khan S U D. Determinants of the ecological footprint: role of renewable energy, natural resources, and urbanization. Sustain Cities Soc, 2020, 54: 101996
45 Gilani M A, Kazemi A, Ghasemi M. Distribution system resilience enhancement by microgrid formation considering distributed energy resources. Energy, 2020, 191: 116442
46 Guerrero J, Gebbran D, Mhanna S, et al. Towards a transactive energy system for integration of distributed energy resources: home energy management, distributed optimal power flow, and peer-to-peer energy trading. Renew Sustain Energy Rev, 2020, 132: 110000
47 Mahmud K, Khan B, Ravishankar J, et al. An internet of energy framework with distributed energy resources, prosumers and small-scale virtual power plants: an overview. Renew Sustain Energy Rev, 2020, 127: 109840
48 Gao Z, Zhao Y, Li L, et al. Economic effects of sustainable energy technology progress under carbon reduction targets: an analysis based on a dynamic multi-regional CGE model. Appl Energy, 2024, 363: 123071
49 Akpasi S O, Smarte Anekwe I M, Tetteh E K, et al. Hydrogen as a clean energy carrier: advancements, challenges, and its role in a sustainable energy future. Clean Energy, 2025, 9: 52–88
50 Namahoro J P, Wu Q, Ihimbabzwe B, et al. Mineral resources and investment drive clean energy progress: evidence from economic and governance effectiveness tiers. Energy, 2025, 327: 136480
51 Mackenzie F T, Lerman A, Andersson A J. Past and present of sediment and carbon biogeochemical cycling models. Biogeosciences, 2004, 1: 11–32
52 Heinze C. The role of the ocean carbon cycle in climate change. Eur Rev, 2014, 22: 97–105
53 Bates N R. Ocean carbon cycle. Encyclopedia Ocean Sci, 2019, 1: 418–428
54 DeVries T. The Ocean Carbon Cycle. Annu Rev Environ Resour, 2022, 47: 317–341
55 Regnier P, Resplandy L, Najjar R G, et al. The land-to-ocean loops of the global carbon cycle. Nature, 2022, 603: 401–410
56 Gruber N, Bakker D C E, DeVries T, et al. Trends and variability in the ocean carbon sink. Nat Rev Earth Environ, 2023, 4: 119–134
57 Terhaar J. Drivers of decadal trends in the ocean carbon sink in the past, present, and future in Earth system models. Biogeosciences, 2024, 21: 3903–3926

58 Russell M J, Hall A J, Martin W. Serpentinization as a source of energy at the origin of life. Geobiology, 2010, 8: 355–371
59 Ma W. The origin of life: a problem of history, chemistry, and evolution. Chem Biodiversity, 2014, 11: 1998–2010
60 Pressman A, Blanco C, Chen I A. The RNA world as a model system to study the origin of life. Curr Biol, 2015, 25: R953–R963
61 Świeżyński A. Where/when/how did life begin? A philosophical key for systematizing theories on the origin of life. Int J AstroBiol, 2016, 15: 291–299
62 Walker S I. Origins of life: a problem for physics, a key issues review. Rep Prog Phys, 2017, 80: 092601
63 Sleep N H. Geological and geochemical constraints on the origin and evolution of life. Astrobiology, 2018, 18: 1199–1219
64 Osinski G R, Cockell C S, Pontefract A, et al. The role of meteorite impacts in the origin of life. Astrobiology, 2020, 20: 1121–1149
65 Preiner M, Asche S, Becker S, et al. The Future of origin of life research: bridging decades-old divisions. Life, 2020, 10: 20
66 Sasselov D D, Grotzinger J P, Sutherland J D. The origin of life as a planetary phenomenon. Sci Adv, 2020, 6: eaax3419
67 Metz B, Davidson O, de Coninck H, et al. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
68 Tysoe S, Burnard K. Carbon capture and storage: pulling down the barriers in the European Union. Proc Institution Mech Engineers Part A-J Power Energy, 2009, 223: 281–291
69 Mac Dowell N, Fennell P S, Shah N, et al. The role of $CO_2$ capture and utilization in mitigating climate change. Nat Clim Change, 2017, 7: 243–249
70 Celia M A. Modeling geological storage of carbon dioxide with a focus on leakage risk assessment. In: Zhan L, Chen Y, Bouazza A, eds. Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics, Vol 1. Singapore: Springer, 2019
71 Hepburn C, Adlen E, Beddington J, et al. The technological and economic prospects for $CO_2$ utilization and removal. Nature, 2019, 575: 87–97
72 Gür T M. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: review of materials, processes and technologies. Prog Energy Combust Sci, 2022, 89: 100965
73 Chen S, Saraji S, McLaughlin F J. Carbon capture and storage. In: Sustainable Oil and Gas Using Blockchain. Lecture Notes in Energy, vol 98. Cham: Springer, 2023
74 Agyekum E B, Khan T, Tahir M, et al. Evolution, trends, and future research directions of carbon capture, utilization and storage–A comprehensive bibliometric and systematic review. Energy Rep, 2025, 13: 5357–5374
75 Chaturwedi A K, Kashyap N K, Shukla A, et al. Carbon capture, storage, and utilization technologies. In: Ogwu M Ce, Izah S C, eds. Evaluating Environmental Processes and Technologies. Cham: Springer, 2025. 349–384
76 Amani M, Ghorbanian A, Ahmadi S A, et al. Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: a comprehensive review. IEEE J Sel Top Appl Earth Observations Remote Sens, 2020, 13: 5326–5350
77 Lechner A M, Foody G M, Boyd D S. Applications in remote sensing to forest ecology and management. One Earth, 2020, 2: 405–412
78 Weiss M, Jacob F, Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: a meta-review. Remote Sens Environ, 2020, 236: 111402
79 Yuan Q, Shen H, Li T, et al. Deep learning in environmental remote sensing: achievements and challenges. Remote Sens Environ, 2020, 241: 111716
80 Pandey P C, Sharma L K. Introduction to natural resource monitoring using remote sensing technology. In: Pandey P C, Sharma L K, eds. Advances in Remote Sensing for Natural Resource Monitoring. Hoboken, NJ: Wiley & Sons, 2021. 3–8
81 Mashala M J, Dube T, Mudereri B T, et al. A systematic review on advancements in remote sensing for assessing and monitoring land use and land cover changes impacts on surface water resources in semi-arid tropical environments. Remote Sens, 2023, 15: 3926
82 Wu Z F, Cao Z, Zheng Z H, et al. A review of urban remote sensing in China (in Chinese). Natl Remote Sens Bull, 2025, 29: 2188–2215 [吴志峰, 曹峥, 郑子豪, 等. 中国城市遥感研究综述. 遥感学报, 2025, 29: 2188–2215]
83 Plag H P. Foreword: extreme geohazards—a growing threat for a globally interconnected civilization. Nat Hazards, 2014, 72: 1275–1277
84 Ismail-Zadeh A T. Geohazard research, modeling, and assessment for disaster risk reduction. Russ J Earth Sci, 2016, 16: 1–8
85 Dikshit A, Pradhan B, Alamri A M. Pathways and challenges of the application of artificial intelligence to geohazards modelling. Gondwana Res, 2021, 100: 290–301
86 Dilek Y, Ogawa Y, Okubo Y. Characterization of modern and historical seismic–tsunamic events and their global–societal impacts. Geol Soc Spec Publ, 2021, 501: 1–22
87 Jena R, Naik S P, Pradhan B, et al. Earthquake vulnerability assessment for the Indian subcontinent using the Long Short-Term Memory model (LSTM). Int J Disaster Risk Reduction, 2021, 66: 102642
88 Rutgersson A, Kjellström E, Haapala J, et al. Natural hazards and extreme events in the Baltic Sea region. Earth Syst Dynam, 2022, 13: 251–301
89 Yigitcanlar T, Regona M, Kankanamge N, et al. Detecting natural hazard-related disaster impacts with social media analytics: the case of australian states and territories. Sustainability, 2022, 14: 810
90 Hazen R M, Downs R T, Eleish A, et al. Data-driven discovery in mineralogy: recent advances in data resources, analysis, and visualization.

Engineering, 2019, 5: 397–405
91 Normile D. Earth scientists plan a ‘geological Google’. Science, 2019, 363: 917
92 Oberhänsli R. Deep-time Digital Earth (DDE) the first IUGS big science program. J Geol Soc India, 2020, 95: 223–226
93 Stephenson M H, Cheng Q, Wang C, et al. Progress towards the establishment of the IUGS Deep-time Digital Earth (DDE) programme. Episodes, 2020, 43: 1057–1062
94 Wang C S, Hazen R M, Cheng Q M, et al. The Deep-time Digital Earth program: data-driven discovery in geosciences. Natl Sci Rev, 2021, 8: nwab027
95 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]
96 Zhou C H, Wang H, Wang C S, et al. Geoscience knowledge graph in the big data era. Sci China Earth Sci, 2021, 64: 1105–1114 [周成虎, 王华, 王成善, 等. 大数据时代的地学知识图谱研究. 中国科学: 地球科学, 2021, 51: 1070–1079]
97 Hu X M, Xu Y W, Ma X G, et al. Knowledge System, ontology, and knowledge graph of the Deep-Time Digital Earth (DDE): progress and perspective. J Earth Sci, 2023, 34: 1323–1327
98 Zhu Y Q, Sun K, Hu X M, et al. Research and practice on the framework for the construction, sharing, and application of large-scale geoscience knowledge graphs (in Chinese). J Geo-inform Sci, 2023, 25: 1215–1227 [诸云强, 孙凯, 胡修棉, 等. 大规模地球科学知识图谱构建与共享应用框架研究与实践. 地球信息科学学报, 2023, 25: 1215–1227]
99 Hou C, Liu K, Wang T, et al. DDE KG Editor: a data service system for knowledge graph construction in geoscience. Geosci Data J, 2024, gdj3.245
100 Zhu Y, Wang Q, Wang S, et al. Methodology, progress and challenges of geoscience knowledge graph in International Big Science Program of Deep-Time Digital Earth. J Geogr Sci, 2025, 35: 1132–1156
101 Oreskes N. Plate Tectonics, An Insider’s History of the Modern Theory of the Earth. Boulder: Westview Press, 2023. 424
102 Zheng Y F. Plate tectonics in the twenty-first century. Sci China Earth Sci, 2023, 66: 1–40 [郑永飞. 21世纪板块构造. 中国科学: 地球科学, 2023, 53: 1–40]
103 Lawton J. Earth System Science. Science, 2001, 292: 1965
104 Lenton T M. Earth System Science. A Very Short Introduction. Oxford: Oxford University Press, 2016
105 Steffen W, Richardson K, Rockström J, et al. The emergence and evolution of Earth System Science. Nat Rev Earth Environ, 2020, 1: 54–63
106 Wang P X, Guo Z T, Jiao N Z, et al. Development of East system science of China: a decadal prospect (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 4691–4695 [汪品先, 郭正堂, 焦念志, 等. 中国地球系统科学的十年展望. 科学通报, 2024, 69: 4691–4695]
107 Xie S C, Luo G M, Zhu Z M. Surface system impact on the spatiotemporal evolution of deep Earth (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 149–159 [谢树成, 罗根明, 朱宗敏. 地球表层系统对深部圈层时空演变的影响. 科学通报, 2024, 69: 149–159]
108 Zheng Y F. Earth system perturbation and global environmental change (in Chinese). Frontiers, 2025, 15: 22–31 [郑永飞. 地球系统扰动与全球环境变化. 学术前沿, 2025, 15: 22–31]

Summary for “地球科学研究前沿”

# Research forefronts in Earth science

Yongfei Zheng

*State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*
E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn

Earth science, as a natural science that studies the formation and evolution of Earth as well as its resource, energy, environment and disaster, is entering a new stage of development. With the intensification of global climate change, the prominence of resource depletion issues, and the frequent occurrence of natural disasters, the importance of Earth science research for sustainable human social development is increasingly prominent. Deep-time Digital Earth (DDE), as an international grand science program established in 2019, has focused on the major scientific proposition of Earth evolution since its formation, attempting to make paradigm shifts in the study of Earth science by coordinating global data and sharing global knowledge of this field. Its work group has lately identified 30 research trends in the field of Earth science from 2014 to 2023. By inviting scientists worldwide to vote, top 10 trends were selected as forefronts: three-dimensional structure of the Earth; machine learning and big data analysis; critical minerals; past, present, and future climate change; energy resources; global ocean carbon cycle; origin of life; carbon capture and storage; remote sensing; and natural disasters and extreme earthquakes. In these top ten frontiers, four relate to the habitable Earth and two each pertain to deep time and big data. This reflects a paradigm shift in the study of Earth science from individual layers to a comprehensive “lithosphere-biosphere-climate” system, highlighting interdisciplinary integration. Moreover, machine learning, remote sensing, and big data can be used to reshape research paradigms, such as global sedimentation rate models and three-dimensional mantle convection simulations, showcasing technology-driven transformations. The selection of these top ten frontiers demonstrates the power of technological integration. On one hand, it marks the progressive transition of Earth science from a traditionally descriptive discipline through a modern experiment and calculation-based discipline to a predictive systematic science. On the other hand, it harbors cognitive crises in “technological optimism” — when humans use deep-time data to simulate the tectonic movement of plates over billions of years, they struggle to address the challenge of climate change on a decadal scale. The Earth science revolution, which began with the plate tectonics theory and the Earth system science in the late 20th century, is now advancing towards new levels driven by “deep-time big data+artificial intelligence”. The DDE program aims to build a globally shared one-stop processing and analysis platform through integrating the Earth’s spatiotemporal big data over the past billions of years. For this purpose, it has organized a number of important academic activities and made a series of conspicuous achievements. Its goal is to provide a big-data platform through multi-layer interaction studies not only for the innovation of Earth science research but also for addressing the climate change, resource scarcity and natural disasters on both global and regional scales. This article presents a brief introduction to the 10 forefronts of Earth science, aiming to highlight what are the newest trends in this field and how to advance Earth system science to recognize the past and present of Earth as well as to protect the planet’s future.

**geosphere, Earth system, interdisciplinary crossover, sustainable development, Earth habitability**

doi: 10.1360/CSB-2025-5248