



深地科学与地质时变原位探测的发展与展望

张茹^{1,2}, 谢和平^{1,2,3}, 张泽天^{1,2*}, 艾印双⁴, 邓建辉², 陈赞⁴, 李名川⁵, 熊开智⁵, 申满斌⁵, 郭泽秋¹, 汪莎¹, 姜明明⁴, 梁超¹, 安露^{1,2}, 张志龙^{1,2}, 杨明庆^{2,5}

1. 四川大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 成都 610065

2. 四川大学水利水电学院, 成都 610065

3. 深圳大学深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 深地科学与地热能开发利用广东省重点实验室, 深圳 518060

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

5. 雅砻江流域水电开发有限公司, 锦屏深地前沿科学及暗物质四川省重点实验室, 成都 610056

*联系人, E-mail: zhangzetian@scu.edu.cn

收稿日期: 2024-10-11; 接受日期: 2024-12-05; 网络出版日期: 2025-02-21

国家自然科学基金(编号: U23B20146)和新基石科学基金会科学探索奖(编号: XPLOER-2024-1035)资助项目

摘要 深地开发与深空、深海开发并重为国家“三深”策略, 向地球更深处要资源、要能源是必然趋势和国家重大需求. 亟需探索深地科学新奥秘, 拓展深地工程技术新认知, 揭示深部原位环境演变进程及机制, 为保障深地能源资源开发等重要工程实践奠定理论和技术基础. 本文综述了深地科学探测最新研究进展, 提出了“深地科学与地质时变”的学术内涵, 并针对“深地地质时变与浅表响应关联机制与规律”基础科学问题, 围绕“深地地质信息时变规律”与“深地-浅表地质时变关联机制”两大前沿方向, 提出了基于中国锦屏地下实验室深地原位优势探测空间和独特地质环境的“一中心+多节点”深地科学原位探测布局, 助力开展极低环境背景干扰下深地科学与地质时变原位探测实验(GeoDEX)创新研究与前沿探索. GeoDEX项目组基于世界最深中国锦屏地下实验室极深硐室群, 首次开展了千米级纵深振动、磁场、微形变等多物理场时空联测预研实验, 发现了锦屏深地实验场地具有极低环境背景干扰条件(相比地表低2个数量级), 可大幅提升精密仪器探测灵敏度与可靠性, 实现对深地岩体时变微弱信息“探得清、探得准”, 并从4个方面阐述了深地科学原位探测的未来发展趋势. GeoDEX科学探测计划将助力获取高精度深地原位时变多源多场科学数据和浅表响应信息, 揭示地质时变多物理场微弱信号传播机制和变化规律, 探明内外动力作用下不同时空尺度地质体稳态/非稳态响应及演变过程, 推动在深地科学领域获得原创性-突破性-颠覆性发现, 探索深地工程前沿技术, 具有重大科学意义和研究价值.

关键词 深地科学, 地质时变, 中国锦屏地下实验室, 原位探测

PACS: 62.20.-x, 89.30.-g, 91.25.-r, 91.30.-f, 93.85.-q

1 引言

探索深地科学奥秘是解决人类能源、资源和生存

空间问题的关键基础, 向地球深部进军是当前必须解决的科技问题. 全球最前沿的“Science 125个科学问题”以及美国国家科学基金会(NSF)提出的“时域地球

引用格式: 张茹, 谢和平, 张泽天, 等. 深地科学与地质时变原位探测的发展与展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 111015

Zhang R, Xie H P, Zhang Z T, et al. Development and prospect of deep Earth science and *in-situ* detection for geology in time (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 111015, doi: 10.1360/SSPMA-2024-0463

12个科学问题(2020–2030)” (如地球内部运行机制^[1]), 均指向深地至今仍有诸多未解之谜, 是充满挑战的科学前沿. 破解深地科学前沿问题不仅有助于揭示地球的形成与演化历史, 也对推动深地能源资源开发和地下空间利用等人类发展相关联的重大工程科学问题解决具有重要意义^[2,3].

深地地质演变是科学界最为关注的深地科学问题之一, 也是直接影响深地资源开发和空间利用的工程科学前沿问题. 美国地质调查局(USGS)发布2020–2030十年科学计划, 强调打破学科界限, 加强学科融合, 贯穿深地科学观测、模拟、评估和预测流程, 全面实施“地球监测、分析和预测”(EarthMAP)计划, 构建USGS数字地球, 实现对地球系统未来状态的模拟和预测^[4]. 英国地质调查局(BGS)提出通往地球之门科学策略^[5], 强调了去碳化与资源管理、适应环境变化、多重灾害与风险等科学挑战, 在地质环境演化、去碳化资源管理、多重地质灾害与风险等方面, 开展地质灾害信息调查、监测和实验, 利用人工智能技术构建地质灾害全球信息基础设施, 创新实现全球数据的提供、预测和预报模式. 深地原位环境探测已成为当前世界深地前沿科技发展的聚焦点.

世界发达国家均建有深地实验室, 抢占深地科学制高点, 利用深地原位独特环境, 屏蔽宇宙射线和地表噪声, 从而提供极为安静、稳定的实验条件, 研究暗物质、中微子、深地岩体力学和地下生物学等前沿科学问题, 共同推动对地球系统和宇宙的认知^[6,7]. 我国“十四五”规划和2035远景目标纲要中, 明确瞄准深地等前沿领域, 加强原创性引领性科技攻关的部署^[8,9]. 深地科学与工程广泛涉及能源资源、地下空间和防护等领域, 关乎国家重大需求和国民经济可持续发展^[10]. 然而, 向地球更深处安全高效地要资源、要能源很难, 基于传统浅表观测及深孔观测技术与方法, 难以实现深地信息探得到、探得清、探得全, 导致深地地质演变致灾机制不清楚、深部赋存资源勘探开发技术不完善、深部地质活动与浅表地貌及气候变化关系不明确等诸多问题^[11,12], 关乎人类社会的可持续发展和长久安全.

因此, 亟需构建深地探测平台, 开展深地科学与地质时变原位探测实验(Geo-information Detection Experiment, GeoDEX), 探索深地原位时变多物理场探测、科学解译和灾害防控新原理和新技术, 揭示深地

地质信息时变与深地-浅表地质时变关联机制, 倾听来自地球内部的声音, 为探索深地科学奥秘、推进深地能源资源开发奠定先导性理论与技术储备.

2 深地科学探测研究现状

2.1 基于地表台站的多物理场探测

当前, 对地观测正深入拓展到深层结构探测, 长期稳定获取振动、重力、地磁、地电、地温等深地多场信息, 是探究深部地质体物理属性和分布规律、探索深地科学规律的核心关键^[13]. 20世纪70年代以来, 以地表台站为基础, 世界多国启动了深部探测计划, 将研究范围从地表延伸至地下深处^[14]. 英国自1981年实施的反射地震计划(BIRPS), 通过海陆联测累计探测了长达2000 km剖面的地壳结构^[15]. 2004年, 美国开始了“地球透镜计划(EarthScope)”, 探测研究北美大陆地壳的三维结构和构造演化^[16,17]. 德国DEKORP计划、澳大利亚GlassEarth计划、加拿大Lithoprobe等项目通过地震波探测深部构造, 为揭示地下构造和物质属性提供了重要依据^[18]. 此外, 非震勘探方法(如大地电磁测深、重力测量和地热流研究等)则对岩石圈的物理属性提供了补充^[19]. 基于地表地震台阵观测, 揭示了陆陆碰撞带双莫霍面结构, 提出了岩石圈拆沉模式和大陆深俯冲理论, 并解读了青藏高原的隆升和东扩过程^[20,21].

自20世纪60年代邢台地震之后, 中国逐步完善了以地基和天基为主的重力、地电磁和地震观测网络, 并于2008年启动了深部探测技术与实验研究专项SinoProbe^[22]. 截至2023年, 全国可实时汇集和交换的测震台站数量达1178个, 在网运行超宽带地震仪16台、甚宽带地震仪230台、宽频带地震仪794台、短周期地震仪138台; 地电观测网囊括102个地电场固定观测台, 集中分布在中国大陆地震断裂带及附近^[23]; 85个连续重力台、105个绝对重力点和约4000个相对重力点组成了中国重力监测网^[24]. 未来将逐步向海域拓展, 以完成多场参量观测全域覆盖.

然而, 多物理场高精度探测设备受地表复杂振动、噪声、电磁等干扰导致监测数据质量下降问题逐渐凸显^[25–27]. 此外, 对深部物质分异、调整和物质与能量的交换的研究与探索也同样需要更高精度的深地信息探测^[28]. 尤其随着地表开发接近饱和, 向深地寻求发

展空间已成为广泛共识。

2.2 基于深井探测的深地探测

受限于地面复杂背景干扰, 传统浅表监测在深地探测上存在较大局限. 全球探测实践逐渐将探测手段从地面延伸至地下, 建立区域深井观测台网, 获取深部数据. 深井观测系统的建立在降低噪声、提升信噪比等方面表现突出, 显著提升了数据采集质量, 小震、余震的监测能力明显优于常规地面台站^[29,30]. 通过深井长期观测地层变形、应力积累及流体运动等关键多物理场数据, 为分析深地应变场的动态变化提供了精准依据^[31].

前苏联实施的科拉科学SG-3超深井项目, 钻井深度达12262 m, 是世界最深的科学钻井, 奠定了科学钻井技术的基础. 进入21世纪, 美国启动了“圣安德烈斯深部探测计划(SAFOD)”, 钻井深入震源区内部^[32], 建成了以深钻孔综合观测仪为核心的观测站, 发现了断裂带发展过程中可能缺乏深层流体的作用^[33], 改写了地震发生机理认识; 德国大陆超深钻井计划(KTB)建立了世界最先进的深井长期观测系统, 通过注水诱发地震实验, 揭示了该区地震活动深度极限在10 km左右^[34]. 相关观测成果促进了对深地结构、全球环境变化以及能源探测的认知.

2001年中国大陆科学钻探项目的获批, 标志着我国科学钻探与深井观测正式进入实施阶段^[35]. 在国际大陆科学钻探计划(ICDP)框架下, 实施了青海湖科学钻探、松辽盆地科学钻探、台湾车笼埔断层钻探等项目^[36]. 江苏东海县5000 m深井、黑龙江7018 m松科二井等多个深井观测站的建设^[37], 深地川科1井、塔科1井等万米级深井持续掘进, 构建了不同深度超深钻井空间多参数观测系统, 丰富了我国对深部地质活动和物质运移演化的探测能力.

但深井观测仍面临多重挑战, 深井空间狭小导致难以配套超高精度设备, 多参量四维协同联测技术尚存空白. 此外, 深井空间的维护成本较高, 现阶段的观测多为小规模实验, 且浅埋井中观测在排除地面干扰方面仍存在一定局限性^[25].

2.3 基于地下实验室的深地探测

目前, 世界在建或运行的地下实验室已有数十个, 国际上代表性深地实验室如图1所示^[38]. 多数地下实

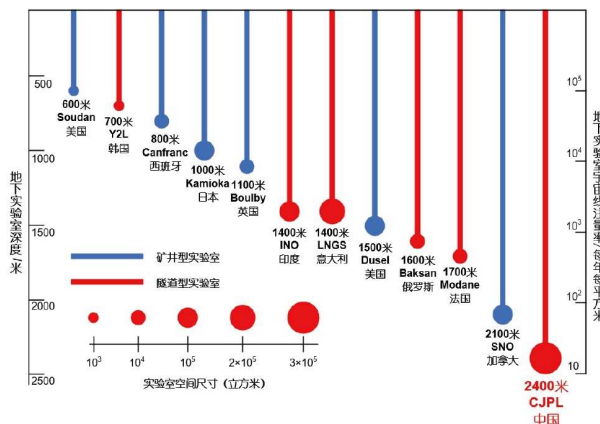


图1 世界主要深地实验室统计^[38]

Figure 1 Deep underground laboratories in the world ^[38].

验室埋深在千米以内, 部分则深至2000 m, 多为矿井、地下军事工程等改造而来, 主要开展以天体物理、粒子物理学为主的暗物质探测、粒子对冲、引力波探测等物理实验研究, 扩展至地球科学、工程科学、生命科学等领域. 多数地下实验室都依托其上覆岩层优良的屏蔽效果和稳定的地理区位, 建立了低本底实验测试平台, 为前沿科学实验提供了绝佳条件^[39].

依托深部地下实验室的低辐射本底、低电磁干扰、低振动噪声的极低背景干扰环境, 部分地下实验室也逐步开始布局地球物理信息探测研究, 以更清晰地捕捉地球深部信息. 法国吕斯特雷低噪声地下实验室(LSBB)就开展了地磁和水化学的研究, 以及地震波在介质中传播引起的孔隙弹性耦合过程动力学的研究. 现有研究主要针对地震3D观测、高灵敏度重力测量、 μ 介子测量法测量光密度、MIGA干涉仪观测地球引力场等科学领域, 同时该实验室也能探测到全球范围内的地震发生和可能引起的电磁异常反应^[40,41]. 伯克山(Baksan)地下实验室在厄尔布鲁斯火山附近的地下深处开展了振动和磁参数的精确监测, 而且还包括如大气电及其与宇宙射线 μ 子通量的关系的研究, 并计划布设用于地质体微弱形变测量的激光干涉仪^[42]. 英国伯毕(Boulby)地下实验室也开展了压缩气体盐穴储能、利用 μ 子成像监测废弃油井中现有捕获的液体二氧化碳等深地工程科学研究^[43,44]. 加拿大斯诺(SNOLab)地下实验室开展了不同深度应力波传播研究项目(PUPS), 以及通过研究地球中微子以探究地球内部热量来源与物质运移等地球物理实验^[45]. 美国

南达科他州的桑福德地下实验室(SURF)被纳入美国能源部(EGS)合作项目^[46], 通过在相关深度密集监测的中尺度模拟实验, 提高对创建地下热交换器的理解, 利用深部原位多口监测井的振动接收器, 探测微地震震源位置并解析震源机制, 以研究水力压裂扩展过程, 该处安装的传感器阵列也多次监测到了日本、智利、海地等地的地震, 为深地科学提供了第一手信息^[47,48]. 近年来, 国内学者也尝试利用煤矿巷道空间开展地磁、地震连续探测, 对比分析了地下探测与地表探测结果的差异性^[49].

中国锦屏地下实验室(China Jinping Underground Laboratory, CJPL), 埋深达到2400 m, 是迄今为止世界上埋深最大、实验空间最大、辐射本底最低的地下实验室, 独特的优势地质条件为深地科学探测提供了极低背景干扰环境. 锦屏区域深部地质活动是深地原位时变的核心驱动力, 直接影响浅表工程岩体力学行为及工程响应, 构成了独特的地质信息宝库^[50]. 基于CJPL开展深地原位探测具有重要科学价值, 可深入拓展人类对深地工程原位时空效应的认知边界, 显著提升深地能源与资源安全开发和空间利用的基础理论和技术水平.

3 深地科学与地质时变的内涵与科学问题

3.1 深地科学的定义及学术内涵

我国中长期科技发展规划曾提出“上天、入地、下海、登极”的科研八字方针, 目前人类对于深地原位环境演变的认知相对匮乏, 亟需探测深地原位地质时变规律, 揭示深地科学奥秘. 然而, 工程界和学术界尚未对深地科学领域形成统一认识, 包括在不同学科领域、不同专业行业对地球“深部”及“深地”的表述、理解及认识各有不同. 谢和平等人^[37]首次从地球科学的视角定义深地科学的学术内涵, 理清深地科学与地球科学的区别与联系. 深地科学以地球浅层以深的深层和超深层为研究对象, 旨在探索地球不同层圈和不同赋存深度(深层和超深层)的科学奥秘和基本规律、分析内在机理, 从而揭示人类现有科学理论和认知水平尚未涉及、无法解译的地球浅层以深的深层物理力学差异性行为, 以及超深层的深地内部结构、物质行为、内外动力响应等定性定量基本规律, 直接服务于人类生存发展所必需的资源能源、空间利用与工程安全等

重大科学与技术问题.

3.2 地质时变的学术内涵和科学问题

与地球浅表相比, 深地岩体经历了漫长地质历史背景, 充满建造和改造历史遗留痕迹. 针对深部地质环境演变本质属性, 谢和平团队^[50]首次赋予“地质时变”学术内涵: 地质时变是指在内外地质作用下, 区域构造运动产生应力累积, 使得不同尺度的地质体(大到地壳板块, 小到岩体岩石), 在不同时间-空间尺度上发生稳态/非稳态的演变响应过程. 地质时变跨越了地质年代与人类时间尺度的不同空间地质体与地质环境的演变过程, 提供了充分的地质时变信息及证据, 使解决与人类发展关联的重大科学问题(能源资源、空间利用、地质灾害等)成为可能. 但现有地球地质研究对于深地工程而言, 通常尺度偏大, 存在分辨率限制, 未考虑深地工程及区域环境演变对地质体宏观力学响应的影响, 缺乏真实的深地原位地质体时变信息观测数据支撑.

因此, 必须聚焦“深地地质时变与浅表响应关联机制与规律”这一科学问题, 围绕“深地地质信息时变规律”和“深地-浅表地质时变互馈机制”两个前沿方向, 开展深地科学与地质时变原位探测实验(GeoDEX)创新研究与前沿探索, 有望获取地质时变孕生过程中的原创性-突破性-颠覆性发现.

3.3 地质时变原位探测技术瓶颈和难点

地质时变具备“多场物理力学表征耦合性”“时空尺度力学跨越关联性”“深地-浅表力学响应互馈性”三大基本特性. 深地岩体时变过程蕴含着丰富的多物理场信息, 实时诠释着深地岩体物性演变过程及稳定性状态^[51,52]. 获取深地岩体时变多场信息, 解译深地岩体多场耦合时变原理, 对于深地科学研究具有重要意义. 然而, 传统浅表观测及深孔观测技术方法受限于空间、仪器、精度、手段、试验规模等问题^[37], 难以在深地-浅表原位实现地质时变信息跨尺度、全手段、高精度长期联动观测; 同时, 基于地质时变多参量信号耦合进行三维联合反演的技术仍不成熟, 难以实现深部工程地质体时变演变的有效定量刻画. 因此, 亟需创新构建“深地科学与地质时变理论与技术体系”从0到1的突破.

4 基于CJPL的深地原位探测布局与实践

4.1 中国锦屏地下实验室优势条件

中国锦屏地下实验室世界最深(2400 m)、规模最大、综合条件最优, 推动我国暗物质探测由“跟跑”到“并跑”, 是我国深地工程科学前沿探索的世界级研究平台. 地处青藏高原东缘地势阶梯过渡区与Y字形断裂带, 使其具备地质环境“时变强”特征(图2^[53-55]). 拥有极深、极静、极低背景干扰的不同深度深地原位环境, 具备“覆盖全”的优势探测条件. 同时, 克服了浅表

强干扰探测失真, 深井小空间难以同步布设大型精密仪器等问题, 拥有约30万m³的“大容积”深地原位空间. 中国锦屏地下实验室成为深地科学与地质时变研究的绝佳探索平台.

4.2 GeoDEX项目探测布局

GeoDEX科学探索计划采用“一中心+多节点”的整体布局构思(图3), 在锦屏山深地和浅表开展形变、振动、电磁等地质背景时变多场辅助信息探测研究^[50]. 其中, “一中心”指围绕2400 m中国锦屏地下实验

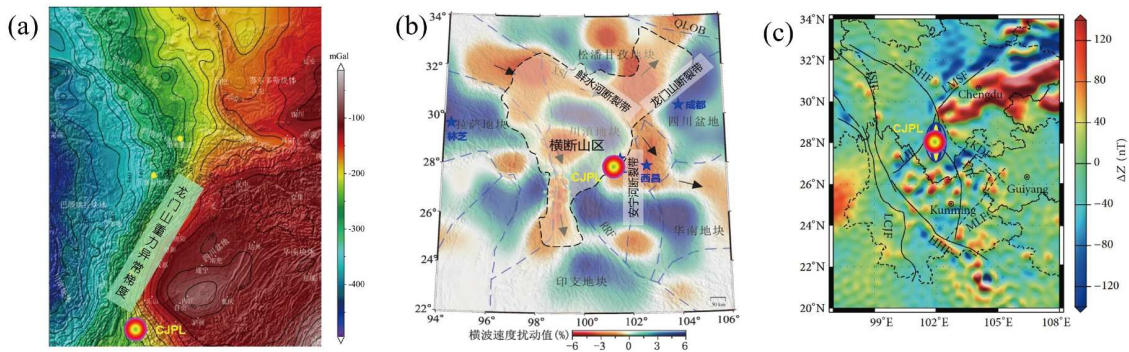


图 2 CJPL独特地理位置和地质构造. (a) 青藏高原东缘重力异常梯度^[53]; (b) 沿下地壳和上地幔边界的Y字形断裂带地区速度结构^[54]; (c) 青藏高原东缘地磁异常梯度^[55]

Figure 2 Unique geographic location and geological structure near CJPL. (a) Gravity gradient anomaly on the eastern edge of the Tibetan Plateau ^[53]; (b) velocity structure of the Y-shaped fault zone along the boundary between the lower crust and upper mantle ^[54]; (c) anomaly of geomagnetic gradient on the eastern edge of the Tibetan Plateau ^[55].

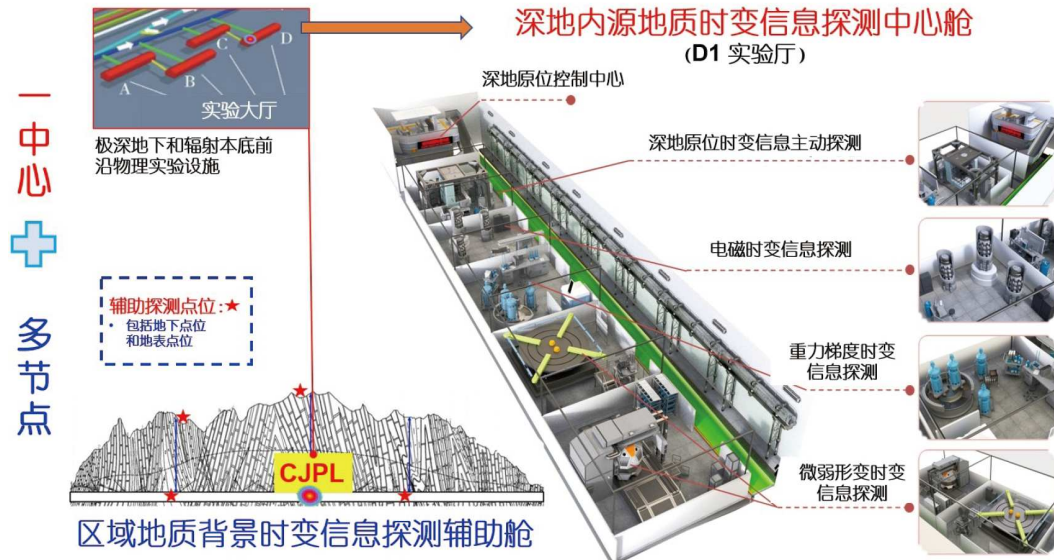


图 3 深地科学与地质时变“一中心+多节点”的原位探测布局^[50]

Figure 3 The in-situ detection layout of “one center+multiple nodes” of the GeoDEX ^[50].

室D1厅的优势空间建设探测中心舱, 创新地质时变多场信息(形变、振动、电磁场等)大型精密仪器“同点+ 同步+同源”多场耦合原位联测创新布局, “一中心”具有地质时变探测极低背景干扰及大空间的优势探测条件, 具备极稳探测环境、极低背景干扰水平、极深原位探测空间的深地探测优势. “多节点”指利用锦屏山地面和不同深度交通洞横通道建立探测辅助舱, 创新千米级区域纵深、连续长周期的时空联动探测体系, 实现丰富的物理力学、岩层响应等区域地质时变深地-浅表互馈信息精确捕捉. 目前GeoDEX探测项目正在中国锦屏地下实验室推进“一中心+多节点”实验平台建设, 同步开展深地-浅表不同环境下的地质体形变、振动、电磁场等多物理场时变探测与分析.

4.3 GeoDEX项目多场时变信息探测进展

4.3.1 深地-浅表振磁时变信息差异性

在振磁时变信息联测方面, 率先开展了锦屏深地-浅表振磁多场时变预研探测(>400d), 清晰捕捉了深部岩体时变微弱响应信号(低频震颤等), 实现了深地-浅表不同深度振磁信号差异性演化特征分析. 地表振动信息以1 Hz以上高频为主, 地下则以0.01–0.1 Hz低频为主(图4(a)), 推测浅表松散沉积层与深地岩层结构差异导致了上述差异性分布的产生^[48]. 地磁功率谱密度对比发现深地空间中高频磁背景干扰信号比地表低1–3个数量级(图4(b)). 在锦屏深地长期观测过程中, 首次于2400和1900 m不同深度均记录到区域及全球数十次大型地震、磁暴数据信息, 对比深地-浅表磁暴观测数据的差异性特征, 发现上覆岩层能一定程度减弱磁暴

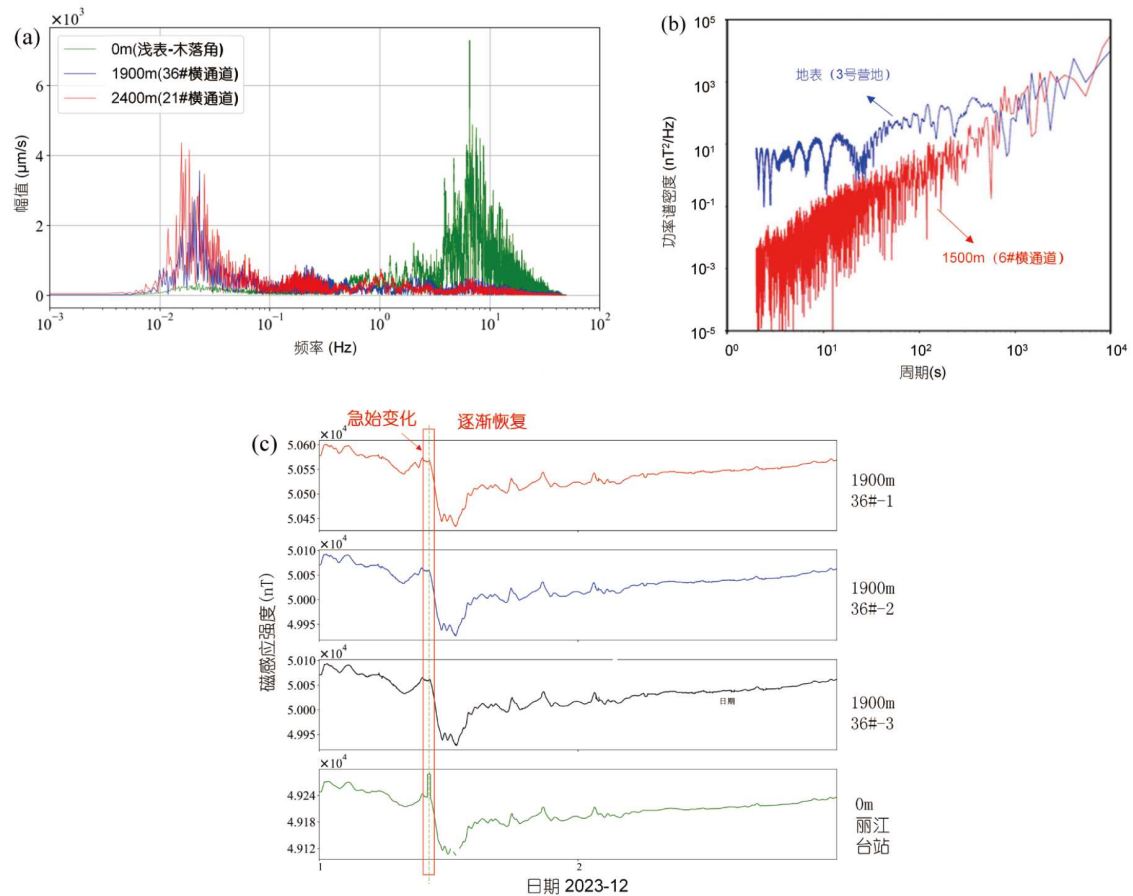


图 4 锦屏不同深度振磁信息长期变化监测. (a) 深地-浅表振动时变信息结果对比; (b) 磁总场功率谱密度对比^[50]; (c) 磁暴事件记录

Figure 4 The waveform of long-term vibration and magnetic detection data at different depths in Jinping. (a) Comparison of time varying vibration between deep ground and shallow surface; (b) comparison of power spectral density of magnetic total field ^[50]; (c) magnetic storm event records.

过程对磁场影响的现象(图4(c)). 深地原位探测受地表效应影响显著减弱, 可获取深地内源时变真实演化过程信号, 深地空间低背景干扰环境有利于微弱地质时变信息的清晰捕捉.

4.3.2 基于涡旋光的深地微弱形变信息探测

为实现地质时变微弱形变数据高精度测试, 建立了一种双环共轭涡旋光的干涉位移探测方法(图5^[56]), 自主研发了一套高稳定性的共轭涡旋光干涉激光应变仪原理样机, 并设计搭建了四面挡板和顶部盖板, 实现全封闭式防尘. 与传统的高斯激光光束相比, 基于涡旋光干涉图样精密位移检测系统, 对微量位移测量精度更高, 测试响应速度更快, 利用尺度不变特征变换对图像进行处理, 识别出各亮条纹的旋转不变性特征点和整个干涉图的中心旋转点. 干涉图样发生旋转前后对应的亮条纹特征点与中心旋转点的连线分别用虚线和实线表示, 如图5(b)所示, 其中 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 分别对应内环、外环旋转的角度. 基于该套装备完成了50 nm步长

位移探测预研实验, 旋转角和位移显示出强线性相关, 拟合曲线如图5(b)右所示. 在实验中得到了小于1 nm的位移探测值, 验证了该系统的亚纳米位移探测能力. 经计算, 该方法的位移分辨率达到 $0.38^\circ/\text{nm}$, 比单独使用内环提高了约13.32%, 比单独使用外环提高了747.34%. 实际测量时, 将角锥反射镜和干涉仪主体分别安置在两个位置. 两者之间距离发生变化时, 干涉图案发生旋转. 所用激光的波长为632.8 nm, 根据理论分析, 提取到的干涉图案每旋转 0.38° , 表示反射镜相对干涉仪主体发生1 nm的位移. 成功验证了该仪器装备的设计可行性和实际测试效果, 为在深地实验室内布设长臂涡旋光干涉激光应变仪, 开展地质体微弱形变信息探测奠定了良好基础.

4.3.3 深地缪子成像探测

缪子是12种基本粒子之一, 能量高、穿透性强、对密度敏感, 作为天然的无损“探针”, 适合地下结构的高精度、高分辨率“CT成像”, 是深部岩层密度分布

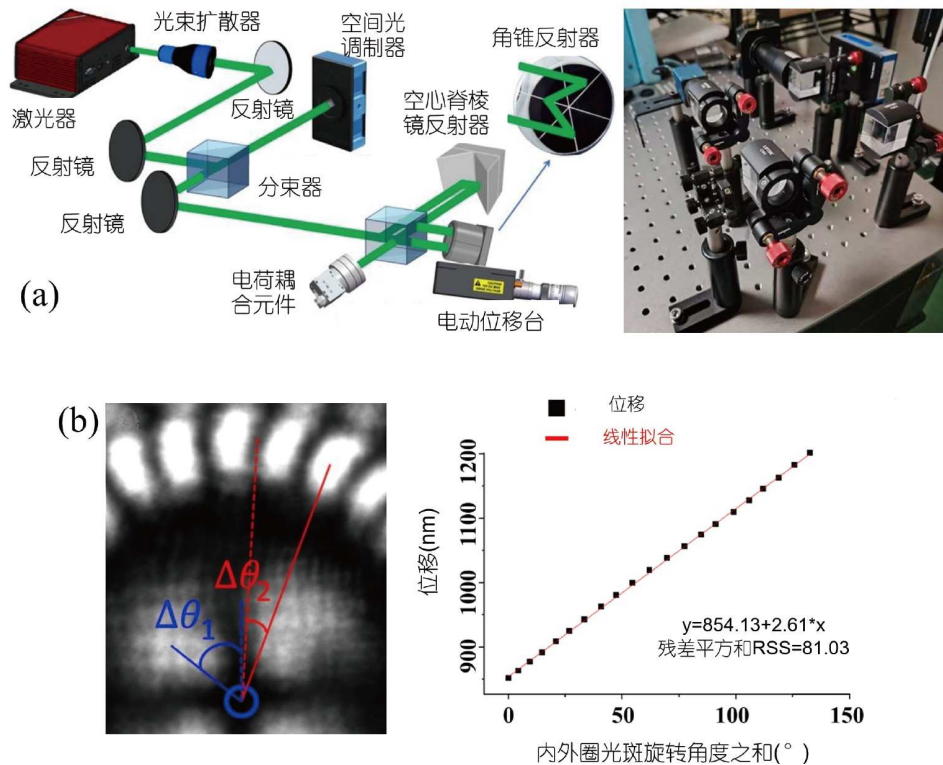


图 5 双环共轭涡旋光的干涉位移探测. (a) 室内验证性实验原理样机; (b) 涡旋光干涉微距探测图样^[56]

Figure 5 Interference displacement detection of double ring conjugate vortex rotation. (a) Indoor verification principle prototype; (b) vortex light interference micro detection pattern [56].

和异常结构探测的崭新手段^[57]. 率先开展千米级纵深缪子成像探测透视千米级巨厚岩层.

使用缪子成像仪配合温湿压记录仪等装备, 在锦屏不同深度环境下(800, 1900, 2400 m)开展了持续时间超400 d的缪子成像深地探测, 提取数据量超12 G, 同月周期处理密度信息图像超1500幅. 研究首次捕捉了锦屏不同深度岩体密度时变信息(分米级分辨率)与地质结构产状变化特征. 该结果对比国际地下实验室测试数据, 验证了锦屏缪子通量随深度指数关系, 为全球缪子深地探测数学模型提供了重要原始数据(图6).

5 深地科学原位探测发展趋势

随着深入地球策略的推进, 深地科学前沿需求日

益凸显, 对深地科学原位探索提出了新的更高的要求^[58,59]. 首先, 深地工程通常面临极端的温度、压力和流体环境, 这对现有的勘探和监测手段提出了更高要求, 需整合深地优势探测空间(如深地实验室、矿区及深地工程示范基地), 利用其低扰动、低噪声、低成本的特性, 开发大尺度、高精度的探测优势, 通过深地高精度-跨纵深-长时域联动探测, 更好地理解深部复杂环境下的地质时变机制. 其次, 深地工程尺度的研究要求更为系统的多学科交叉合作, 基于深地多学科融合智慧探测, 以实现深地系统整体性和时空变化特征的全面把握, 研究交叉学科深地科学规律和地质时变机制. 此外, 基于深地空间的深空模拟环境主动探测, 利用深地的特殊环境条件模拟深空环境实验平台, 在地球上即可进行高效且可控的实验, 减少了深

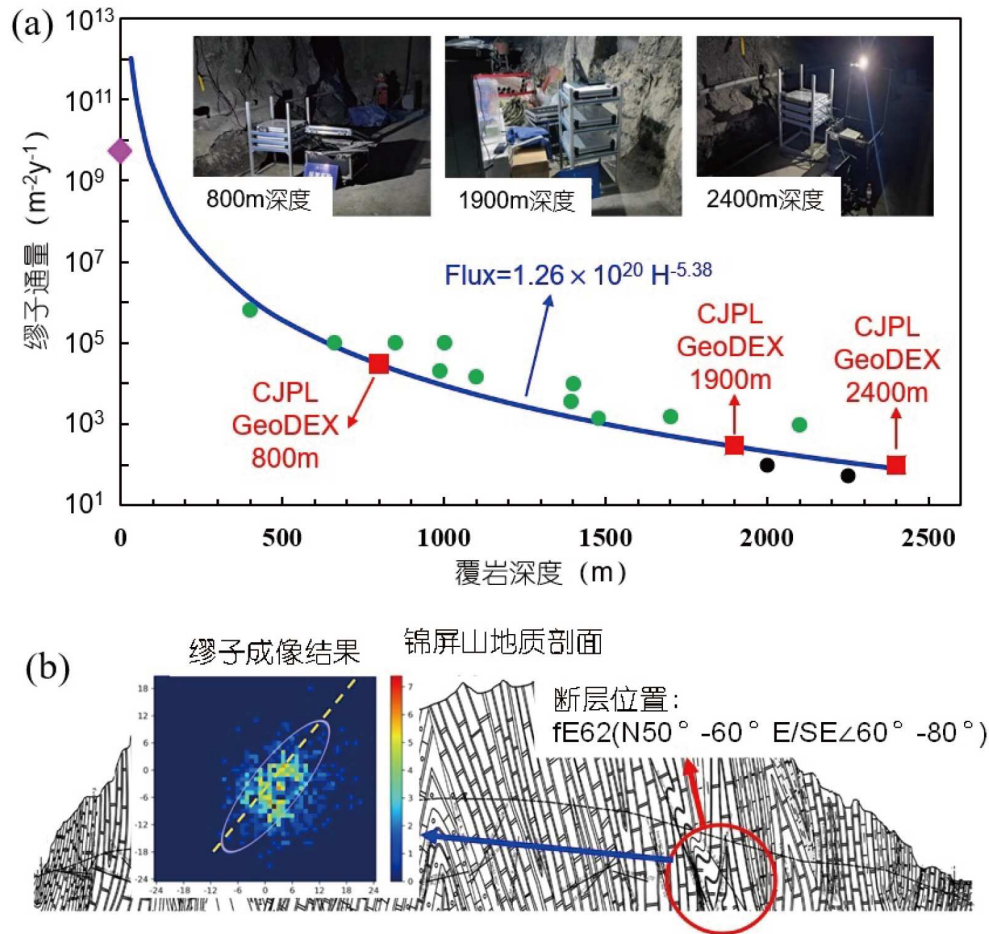


图 6 锦屏不同深度缪子通量探测与成像. (a) 锦屏不同深度缪子通量原位探测(根据文献^[57]修改); (b) 锦屏岩体密度减弱区成像

Figure 6 Detection and imaging of muon flux at different depths in Jinping. (a) *In-situ* detection of muon flux at different depths in Jinping (revised according to ref. ^[57]); (b) imaging of the weakened density zone in Jinping rock mass.

空探测任务中高成本与高风险的不确定性, 其高效、可控的实验条件, 为未来深空探测提供了重要的技术验证途径, 也为人类理解宇宙起源和地外环境开辟了新视野. 因此, 以深地高精度-跨纵深-长时域联动探测, 深地多学科融合智慧探测、基于深地空间的深空模拟环境主动探测和基于全球视角的深地原位联动探测四个核心方向, 展望未来深地科学与地质时变原位探测趋势(图7).

5.1 深地高精度-跨纵深-长时域联动探测

未来深地科学的核心挑战之一在于实现更高精度的探测技术突破, 这不仅体现在更深层次的地层结构内部成像上, 也涵盖了高精度、长时域的原位探测装备的发展. 近年来, 随着高分辨率地球物理探测技术的进步, 科学家得以观察地球内部深达几百公里的结构与动态过程. 例如, 深地原位保真取芯技术^[60]能够在超高压、超高温等极端条件下获取真实的地质样本和数据, 为长时域探测提供了基础支撑, 已成为了解深地物理力学性质的关键途径之一.

未来的探测技术有望将成像精度推向更高, 揭示更细微的深地结构变化, 这对于理解深地物质循环和动力学行为尤为重要. 为应对深地科学探测需求, 未来GeoDEX平台的形变探测精度可达纳米级, 以便实

现细微地质结构的捕捉监测; 振动探测精度可达DC~50 Hz, 实现深地全参量、宽频域的振动监测; 电磁探测精度可达fT级别, 捕捉普通磁力仪(nT级)无法探测的时变瞬时磁信号; 重力探测精度可达 10^{-7} mGal, 可捕捉地质时变微弱重力信号. 同时, 深地原位探测装备的突破性发展也显现出深远影响. 除了原位保真取芯技术, 现代原位高精度传感器和数据采集系统能够在极端环境下运行数十年, 提供稳定、可靠的深地动态数据. 随着智能化、自适应技术的融合, 探测装备可以在深地复杂条件下自我调节, 实现长时域(数十年甚至数百年)的精准监测. 这将帮助科学家捕捉到更长时间尺度上的动态变化, 揭示如深地应力释放、流体迁移及热活动等过程的长期演变, 有望揭示地质时变多物理场微弱信号传播机制和变化规律, 探测内外动力作用下不同尺度地质体在不同时间-空间尺度上发生稳态/非稳态的响应及演变过程.

5.2 深地多学科融合智慧探测

深地探测的复杂性使其愈发依赖多学科的合作. 深地科学、地球物理、地球化学、材料科学、生物科学等学科的融合, 多种探测手段结合使用, 形成全新的探测框架. 利用地震波、重力、电磁、遥感等技术, 结合地质钻探与实验室模拟, 研究人员得以构建更全面的深地结构模型. 这一多学科协同探测为深地科学带来了更广阔的研究前景, 尤其是在深地环境的极端条件下, 不同学科领域的合作尤为重要.

深地环境的特殊条件, 如低本底、低扰动、低噪声, 为多学科研究提供了独特的实验平台. 例如, 在深地微生物学的研究中, 科学家发现了适应极端条件的微生物群落, 这些生物不仅挑战了我们对生命极限的理解, 还为生物技术和医疗领域的研究提供了启发^[61,62]. 深地医学研究揭示了深地环境对人体生理系统的影响, 尤其是高压环境对心血管、呼吸系统及免疫系统的特殊效应, 为未来的极端环境医学提供了重要的理论支持^[63]. 深地农业也在这些条件下崭露头角, 研究表明深地环境对作物种子的存储和发芽具有显著影响, 特别是在发芽率和活力方面出现了明显变化, 同时也发现了植物生长过程中的一些适应性反应, 该研究为未来极端环境下的农业生产奠定了重要的理论基础^[64]. 这些深地多学科研究不仅为人类在极端环境下的生存提供了技术储备, 也为开发新的农业和医疗技



图 7 深地科学与地质时变原位探测发展趋势

Figure 7 Development direction of deep Earth science and geological time-varying in-situ detection.

术带来了可能. 从天文学中汲取灵感, 电磁辐射和中微子等多种信号揭示了宇宙现象, 类似的方法可以应用于地球内部探索. 通过分析地震波、引力和磁场以及中微子等^[65,66]各种“信使”, 研究人员可以间接推断地质结构和过程, 特别是在深地等低干扰环境中, 为深地科学探索提供了可靠的深地信息获取路径.

随着数据量的爆发性增长, 传统的数据处理手段已无法应对复杂的深地探测数据. 大数据、机器学习与人工智能的应用, 正在为深地探测带来新的变革. 这些技术不仅能够处理海量数据, 还能通过智能算法发现数据中的隐藏模式, 从而建立更精细的三维地质模型, 并预测深地地质灾害的发生, 有望推动在深地科学领域获得原创性-突破性-颠覆性发现, 探索深地工程前沿技术. 未来, 随着人工智能技术的进一步发展, 智慧探测将更加自动化、智能化, 逐步实现对深地过程的实时监测和分析, 逐步实现“智慧探测”.

5.3 基于深地空间的深空模拟环境主动探测

深地科学的发展不仅限于对地球内部的探测, 其技术与成果也为其他天体的研究及深空探测提供了重要参考. 通过对深地结构的深入研究, 科学家能够将这些认识应用于类地行星(如火星、月球等)内部结构与演化过程的理解^[67]. 这种跨学科的技术迁移, 不仅揭示了深地动力学过程, 还为未来的行星探测任务提供了借鉴.

更为重要的是, 深地环境提供了一个独特的实验平台, 能够一定程度上模拟深空的极端条件. 深空探测过程中的测试受复杂本底和环境背景干扰, 导致许多关键信息的探测受到精度影响, 深地环境中低振动环境和恒定的温度和湿度对探测器的稳定运行非常重要, 同时环境背景干扰是影响对深空物质测量精度的主要障碍之一. 利用深地空间的原位低本底、低扰动、低噪声的环境优势, 可提供深空辐照精细模拟条件, 并显著提升探测精度, 为未来样品返回任务和星际资源开发提供必要的理论和技术基础. 通过在深地空间模拟火星、月球等天体的环境, 科学家可测试航天器、探测设备以及人类生命支持系统在这些极端环境下的表现. 这一独特环境将为未来的深空探测任务提供关键的技术验证支持, 推动人类在地外探索中的技术创新与突破^[68,69]. 此外, 深地与天空、地表的协同探测技术, 利用地面、空中和地下网络化设备进行

集成探测, 将有助于实现更大范围内地球活动的精细观测, 极大提升未来在不确定区域的探测能力.

5.4 基于全球视角的深地原位联动探测

深地科学探测的复杂性和规模使得国际合作成为不可或缺的部分. 基于全球深地原位探测的地球整体观测在未来的深地科学研究和应用中具有重要意义. 通过多国协作、尖端技术和多学科融合, 为深入探究深地地质结构及其动力学过程、能源资源全球分布, 开展基础物理协同实验, 带来前所未有的地球整体观测视角^[70,71]. 随着大数据^[72]、云计算^[73]、机器学习^[74]等技术的引入, 科学家可开展多源观测数据进行实时分析和模拟, 并通过全球共享的地震波数据、重力异常数据、电磁测量数据的融合, 可构建高精度的深地模型, 为全球地质时变规律提供更准确的解释. 基于全球深地原位探测的地球整体观测不仅可为地球科学带来革命性变革, 还将在深地能源开发基础科学研究等领域发挥深远影响. 未来随着技术和国际协作的不断进步, 全球地下观测网络将初具规模, 涵盖全球超过数十个深地实验室^[75]的协同观测系统, 提供全面的地球深部动态数据, GeoDEX项目将充分挖掘平台的科学研究深度, 并提升该平台的开放合作水平, 与国内国际其他深地实验室及深井探测联动开展协同研究, 这将为人类应对自然灾害、资源短缺等挑战提供强有力的科学依据.

6 总结

深地科学是关系到人类生存发展的重要科学探索领域, 为抢占深地科学制高点, 世界发达国家均建有深地实验室, 并开展如暗物质、深地原位探测、深地医学等前沿科学研究. 本文面向深地资源安全高效开发全球争夺热点和国家需求, 攻关深地原位环境演变致灾世界前沿科学难题. 率先引入深地岩体地质时变科学视角, 开拓世界最深(2400 m)中国锦屏地下实验室绝佳研究平台, 创新千米级纵深时空联测解译独特构思, 首次开展了千米级纵深振动、磁场、微形变等多物理场时空联测预研实验, 发现了锦屏深地实验场地具有极低环境背景干扰条件(相比地表低2个数量级), 可大幅提升精密仪器探测灵敏度与可靠性, 实现对深地岩体时变微弱信息“探得清、探得准”. 形成以岩体

地质时变为突破口的深地科学与工程安全探索新范式。

深地科学与地质时变科学探索计划实施, 将有效促进深地原位环境演变致灾国际前沿科学难题的解决, 拓宽国际学术界在深地工程时空效应的认知边界, 为深地工程科学全球热点研究提供崭新视角。通过构

建世界最深中国锦屏深地探测空间站, 获取全参量高精度的深地原位多源异构时变数据, 为国际学术界提供宝贵的深地原位探测平台和科学数据支撑, 有望推动全人类在深地科学领域获得原创性-突破性-颠覆性发现, 为深地能源资源开发奠定先导性理论与技术储备。

致谢 GeoDEX科学探测计划得到了雅砻江流域水电开发有限公司、清华大学、锦屏深地前沿科学及暗物质四川省重点实验室等单位的大力支持和帮助, 在此一并致谢。

参考文献

- Kerr R A. How does Earth's interior work? *Science*, 2005, 309: 87
- 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]
- Xu Y G, Xie S C. To strengthen studies on the connection between Earth's interior and exosphere (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 146–148 [徐义刚, 谢树成. 加强地球系统内外联动的研究. 科学通报, 2024, 69: 146–148]
- Bristol R S, Euliss N H, Booth N L, et al. Science Strategy for Core Science Systems in the U.S. Geological Survey, 2013–2023. Technical Report. Reston: USGS, 2012
- Shi J F. The major accomplishments and geological events during the past two decades in the world and their implications for geological work in China in the next thirty years (in Chinese). *Geol Bull China*, 2020, 39: 2044–2057 [施俊法. 21世纪前20年世界地质工作重大事件、重大成果与未来30年中国地质工作发展的思考. 地质通报, 2020, 39: 2044–2057]
- Wang Y, Kan Y F, He Y S, et al. Underground laboratories and deep underground geophysical observations (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2022, 65: 4527–4542 [王贇, 菅一凡, 贺永胜, 等. 地下实验室与深地环境下的地球物理观测. 地球物理学报, 2022, 65: 4527–4542]
- Bereš J, Zeyen H, Sénéchal G, et al. Seismic anisotropy analysis at the Low-Noise Underground Laboratory (LSBB) of Rustrel (France). *J Appl Geophys*, 2013, 94: 59–71
- Wang L. Research on the optimization of development planning—Reflections on the 14th five-year planning (in Chinese). *Spec Zone Econ*, 2022, (6): 18–22 [王琳. 对优化发展规划编制的研究探讨——基于“十四五”规划的几点思考. 特区经济, 2022, (6): 18–22]
- Huang Q F. Key stage of great renaissance—Learning from “The 14th five-year plan for national economic and social development of the People's Republic of China and the outline of vision targets for 2035” (in Chinese). *People's Tribune*, 2021, 15: 6–10 [黄奇帆. 伟大复兴的关键阶段——学习《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》的认识和体会. 人民论坛, 2021, 15: 6–10]
- Xie H P, Gao F, Ju Y, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep Earth (in Chinese). *Adv Eng Sci*, 2017, 49: 1–8 [谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向. 工程科学与技术, 2017, 49: 1–8]
- Ananthaswamy A. Earth's poles are shifting because of climate change. *New Sci*, 2013, 220: 12
- Gao R, Li P W, Li Q S, et al. Deep processes of collision deformation on the northern edge of the Tibetan Plateau (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2001, 31(S1): 66–71 [高锐, 李朋武, 李秋生, 等. 青藏高原北缘碰撞变形的深部过程——深地震探测成果之启示. 中国科学: 地球科学, 2001, 31(S1): 66–71]
- Zhou X, Pan J, Wu Y R. Transparent Earth-observing—Exploring the new generation of earth observation technology (in Chinese). *Natl Remote Sens Bull*, 2024, 28: 529–540 [周翔, 潘洁, 吴一戎. 透视地球——新一代对地观测技术. 遥感学报, 2024, 28: 529–540]
- Dong S W, Li T D, Gao R, et al. Overview of international development and current status of deep Earth exploration in China (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2010, 84: 743–770 [董树文, 李廷栋, 高锐, 等. 地球深部探测国际发展与我国现状综述. 地质学报, 2010, 84: 743–770]
- Cavazza W, Roure F M, Spakman W, et al. The Transmed Atlas, the Mediterranean Region from Crust to Mantle. Berlin: Springer, 2004
- Zhao G Z, Zhang X M, Cai J T, et al. A review of seismo-electromagnetic research in China (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2022, 52: 1499–1515 [赵国泽, 张学民, 蔡军涛, 等. 中国地震电磁研究现状和发展趋势. 中国科学: 地球科学, 2022, 52: 1499–1515]

- 17 Zhang H L, Ravat D, Lowry A R. Crustal composition and Moho variations of the central and eastern United States: Improving resolution and geologic interpretation of EarthScope USArray seismic images using gravity. *JGR Solid Earth*, 2020, 125: e2019JB018537
- 18 Dong S W, Li T D, Gao R, et al. Progress of SinoProbe—Deep exploration in China 2008–2012 (in Chinese). *Acta Geosci Sin*, 2013, 34: 7–23 [董树文, 李廷栋, 高锐, 等. 我国深部探测技术与实验研究与国际同步. *地球学报*, 2013, 34: 7–23]
- 19 Huang D N, Yu P, Di Q Y, et al. Development of key instruments and technologies of deep exploration today and tomorrow (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2012, 42: 1485–1496 [黄大年, 于平, 底青云, 等. 地球深部探测关键技术装备研发现状及趋势. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42: 1485–1496]
- 20 Ringler A T, Anthony R E, Aster R C, et al. Achievements and prospects of global broadband seismographic networks after 30 years of continuous geophysical observations. *Rev Geophys*, 2022, 60: 98
- 21 Zhu D C, Wang Q, Weinberg R F, et al. Continental crustal growth processes recorded in the Gangdese batholith, Southern Tibet. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2023, 51: 155
- 22 Dong S W, Li T D, Chen X H, et al. Progress of deep exploration in mainland of China: A review (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 3884–3901 [董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等. 我国深部探测技术与实验研究进展综述. *地球物理学报*, 2012, 55: 3884–3901]
- 23 Zhou J Q, Guo J F, Wang L B, et al. Seismological and geomagnetic observation and research (in Chinese). *Seismol Geomagn Observ Res*, 2019, 40: 52–61 [周剑青, 郭建芳, 王利兵, 等. 地磁、地电台网记录傅里叶频谱分析. *地震地磁观测与研究*, 2019, 40: 52–61]
- 24 Shen C Y, Zhu Y Q, Hu M Z, et al. Time-varying gravity field monitorings and strong earthquake prediction on the Chinese mainland (in Chinese). *Earthq Res China*, 2020, 36: 729–743 [申重阳, 祝意青, 胡敏章, 等. 中国大陆重力场时变监测与强震预测. *中国地震*, 2020, 36: 729–743]
- 25 Chen Q F, Ai Y S, Chen Y. Overview of deep structures under the Changbaishan volcanic area in Northeast China (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2019, 49: 778–795 [陈棋福, 艾印双, 陈赞. 长白山火山区深部结构探测的研究进展与展望. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 778–795]
- 26 Enescu B, Ito K. Some premonitory phenomena of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe) earthquake: Seismicity, *b*-value and fractal dimension. *Tectonophysics*, 2001, 338: 297–314
- 27 Fraser-Smith A C, Helliwell R A. The Stanford University ELF/VLF radiometer project: Measurement of the global distribution of ELF/VLF electromagnetic noise. In: *Proceedings of the 1985 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Wakefield: IEEE, 1985. 305–311
- 28 Teng J W. High-precision geophysics: The inevitable development track of the innovative future (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2021, 64: 1131–1144 [滕吉文. 高精度地球物理学是创新未来的必然发展轨迹. *地球物理学报*, 2021, 64: 1131–1144]
- 29 Xu J R, Zhao Z X. Recent advance of borehole geophysical observation and Chinese continental scientific drilling long-term observatory at depth (in Chinese). *Progr Geophys*, 2009, 24: 1176–1182 [徐纪人, 赵志新. 深井地球物理观测的最新进展与中国大陆科学钻探长期观测. *地球物理学进展*, 2009, 24: 1176–1182]
- 30 Xu J R, Zhao Z X. Advances and prospects for long-term geophysical observation in deep borehole (in Chinese). *Earth Sci*, 2006, 31: 557–563 [徐纪人, 赵志新. 深井地球物理长期观测的最新进展及其前景. *地球科学*, 2006, 31: 557–563]
- 31 Cai M F. A brief talk on comprehensive crustal activity observation technology of deep-holes (in Chinese). *J Geomech*, 2023, 29: 301–312 [蔡美峰. 深井地壳活动综合观测技术略谈. *地质力学学报*, 2023, 29: 301–312]
- 32 Zoback M, Hickman S, Ellsworth W. Scientific drilling into the San Andreas fault zone—An overview of SAFOD’s first five years. *Sci Drill*, 2011, 11: 14–28
- 33 Chavarria J A, Malin P, Catchings R D, et al. A look inside the San Andreas fault at Parkfield through vertical seismic profiling. *Science*, 2003, 302: 1746–1748
- 34 Tu Y M, Chen Y T. The accurate location of the injection-induce earthquakes in German continental deep drilling program (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2002, 6: 587–598 [涂毅敏, 陈运泰. 德国大陆超深钻井注水诱发地震的精确定位. *地震学报*, 2002, 6: 587–598]
- 35 Xu Z Q, Yang J S, Zhang Z M, et al. Completion and achievement of the Chinese continental scientific drilling (CCSD) project (in Chinese). *Geol China*, 2005, 32: 177–183 [许志琴, 杨经绥, 张泽明, 等. 中国大陆科学钻探终孔及研究进展. *中国地质*, 2005, 32: 177–183]
- 36 Zou C C, Wang C S, Peng C. Development of the Chinese continental scientific deep drilling: Perspectives and suggestions (in Chinese). *Geoscience*, 2023, 37: 1–14 [邹长春, 王成善, 彭诚, 等. 中国大陆科学深钻发展的若干思考与建议. *现代地质*, 2023, 37: 1–14]
- 37 Xie H P, Zhang R, Zhang Z T, et al. Reflections and explorations on deep Earth science and deep Earth engineering technology (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2023, 48: 3959–3978 [谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考. *煤炭学报*, 2023, 48: 3959–3978]

- 38 Cheng J P, Li Y J, Zeng Z. Research on radioactive background of dark matter direct detection experiment: Taking Jinping underground facility project as example (in Chinese). *Exp Technol Manag*, 2021, 38: 1–10 [程建平, 李元景, 曾志. 暗物质直接探测实验辐射本底研究——以锦屏大设施项目为例. *实验技术与管理*, 2021, 38: 1–10]
- 39 Yue Q. CJPL and CDEX direct detection experiments of dark matter in China's deep laboratory (in Chinese). *Mod Phys*, 2018, 30: 14–22 [岳骞. 我国的深地实验室CJPL和CDEX暗物质直接探测实验. *现代物理知识*, 2018, 30: 14–22]
- 40 Gaffet S, Guglielmi Y, Virieux J, et al. Simultaneous seismic and magnetic measurements in the Low-Noise Underground Laboratory (LSBB) of Rustrel, France, during the 2001 January 26 Indian earthquake. *Geophys J Int*, 2003, 155: 981–990
- 41 Waysand G, Barroy P, Blancon R, et al. Seismo-ionosphere detection by underground SQUID in low-noise environment in LSBB-Rustrel, France. *Eur Phys J Appl Phys*, 2009, 47: 12705
- 42 Kuzminov V V. The Baksan Neutrino Observatory. *Eur Phys J Plus*, 2012, 127: 113
- 43 Talbot C J, Tully C P, Woods P J E. The structural geology of Boulby (potash) mine, Cleveland, United Kingdom. *Tectonophysics*, 1982, 85: 167–204
- 44 Mathanlal T, Bhardwaj A, Vakkada Ramachandran A, et al. Subsurface robotic exploration for geomorphology, astrobiology and mining during MINAR6 campaign, Boulby mine, UK: Part I (rover development). *Int J Astrobiol*, 2020, 19: 110–125
- 45 Atkinson G M, Kaka S I, Eaton D, et al. A very close look at a moderate earthquake near Sudbury, Ontario. *Seismol Res Lett*, 2008, 79: 119–131
- 46 Heise J. The Sanford underground research facility. *J Phys-Conf Ser*, 2021, 2156: 012172
- 47 Schoenball M, Ajo-Franklin J B, Blankenship D, et al. Creation of a mixed-mode fracture network at mesoscale through hydraulic fracturing and shear stimulation. *JGR Solid Earth*, 2020, 125: e2020JB019807
- 48 Chen Y, Huang L. Optimal design of 3D borehole seismic arrays for microearthquake monitoring in anisotropic media during stimulations in the EGS collab project. *Geothermics*, 2019, 79: 61–66
- 49 Wang Y, Yang Y X, Sun H P, et al. Observation and research of deep underground multi-physical fields—Huainan-848 m deep experiment (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2023, 53: 55–71 [王贇, 杨亚新, 孙和平, 等. 深部地下多物理场观测研究——淮南-848m深地试验. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53: 55–71]
- 50 Xie H, Zhang R, Zhang Z, et al. Preliminary research and scheme design of deep underground *in situ* geo-information detection experiment for geology in time. *Int J Min Sci Tech*, 2024, 34: 1–13
- 51 Chen J, Wen N, Chen B Y. Joint inversion of gravity-magnetic-electrical-seismic combination survey: Progress and prospect (in Chinese). *Prog Phys Geog*, 2007, 22: 1427–1438 [陈洁, 温宁, 陈邦彦. 重磁电震联合反演研究进展与展望. *地球物理学进展*, 2007, 22: 1427–1438]
- 52 Teng J W, Pi J L, Yang H, et al. The ponder for study the intension and locus of continental dynamics in China (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 851–862 [滕吉文, 皮蛟龙, 杨辉, 等. 中国大陆动力学研究内涵与轨迹的思考. *地球物理学报*, 2012, 55: 851–862]
- 53 Yang G L, Shen C Y, Li Z J, et al. Gravity isostasy and effective elastic thickness of the eastern Bayan Har block and adjacent areas (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2020, 63: 956–968 [杨光亮, 申重阳, 黎哲君, 等. 巴颜喀拉地块东部及邻区重力均衡与岩石圈有效弹性厚度. *地球物理学报*, 2020, 63: 956–968]
- 54 Wang Z, Wang J, Fu X G. Deep structure and crustal deformation in the Tethys tectonic domain of the eastern Xizang (Tibetan) margin-Yangtze platform (in Chinese). *Geol Rev*, 2021, 67: 1–13 [王志, 王剑, 付修根. 青藏高原东缘——扬子特提斯构造域深部结构与地壳形变研究. *地质论评*, 2021, 67: 1–13]
- 55 Bai C, Kang G, Gao G. Distribution of the crustal magnetic field in Sichuan-Yunnan region, Southwest China. *Sci World J*, 2014, 2014: 1–11
- 56 Yu X, Li H, Zhang Z, et al. Micro-displacement measurement of optical interference with two-ring conjugated vortices. *Laser Phys*, 2024, 34: 105401
- 57 Zhang Z X, Enqvist T, Holma M, et al. Muography and its potential applications to mining and rock engineering. *Rock Mech Rock Eng*, 2020, 53: 4893–4907
- 58 Zheng Y F, Guo Z T, Jiao N Z, et al. Research trends in Earth system science (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2024, 54: 3065–3090 [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]
- 59 2021–2030 Earth Science Development Strategy Research Group. 2021–2030 Earth Science Development Strategy—The Past, Present, and Future of a Livable Earth (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [2021–2030地球科学发展战略研究组. 2021–2030地球科学发展战略——宜居地球的过去、现在和未来. 北京: 科学出版社, 2021]
- 60 Xie H P, Gao M Z, Zhang R, et al. Study on concept and progress of *in situ* fidelity coring of deep rocks (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*,

- 2020, 39: 865–876 [谢和平, 高明忠, 张茹, 等. 深部岩石原位“五保”取芯构想与研究进展. 岩石力学与工程学报, 2020, 39: 865–876]
- 61 Drake H, Ivarsson M, Bengtson S, et al. Anaerobic consortia of fungi and sulfate reducing bacteria in deep granite fractures. [Nat Commun](#), 2017, 8: 55
- 62 Morciano P, Cipressa F, Porrazzo A, et al. Fruit flies provide new insights in low-radiation background biology at the INFN Underground Gran Sasso National Laboratory (LNGS). [Radiat Res](#), 2018, 190: 217–225
- 63 Wadsworth J, Cockell C S, Murphy A S J, et al. There’s plenty of room at the bottom: Low radiation as a biological extreme. [Front Astron Space Sci](#), 2020, 7: 50–61
- 64 Wang Y, He Y, Wang J, et al. An endeavor of “deep-underground agriculture”: Storage in a gold mine impacts the germination of canola (*Brassica napus* L.) seeds. [Environ Sci Pollut Res](#), 2022, 29: 46357–46370
- 65 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. [Phys Rev Lett](#), 2017, 119: 161101
- 66 Albert A, André M, Anghinolfi M, et al. Search for high-energy neutrinos from binary neutron star merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory. [Astrophys J](#), 2017, 850: L35
- 67 Shi K, Yue Z, Di K, et al. The gardening process of lunar regolith by small impact craters: A case study in Chang’E-4 landing area. [Icarus](#), 2022, 377: 114908
- 68 Fa W. Bulk density of the lunar regolith at the Chang’E-3 landing site as estimated from lunar penetrating radar. [Earth Space Sci](#), 2020, 7: e2019EA000801
- 69 Feng J C, Liang J, Cai Y, et al. Deep-sea organisms research oriented by deep-sea technologies development. [Sci Bull](#), 2022, 67: 1802–1816
- 70 Zhou Y, He B, Cao X, et al. Remotely sensed estimates of long-term biochemical oxygen demand over Hong Kong marine waters using machine learning enhanced by imbalanced label optimisation. [Sci Total Environ](#), 2024, 943: 173748
- 71 Gardiner L J, Marshall M, Reusch K, et al. DGCNN approach links metagenome-derived taxon and functional information providing insight into global soil organic carbon. [npj Biofilms Microbiomes](#), 2024, 10: 113
- 72 Yang C, Huang Q, Li Z, et al. Big data and cloud computing: Innovation opportunities and challenges. [Int J Dig Earth](#), 2017, 10: 13–53
- 73 Guo H, Wang L, Chen F, et al. Scientific big data and digital Earth. [Chin Sci Bull](#), 2014, 59: 5066–5073
- 74 MacLEOD N. Artificial intelligence & machine learning in the Earth sciences. [Acta Geol Sin \(Eng\)](#), 2019, 93: 48–51
- 75 Cheng J P, Wu S Y, Yue Q, et al. A review of international underground laboratory development (in Chinese). [Physics](#), 2011, 40: 149–154 [程建平, 吴世勇, 岳骞, 等. 国际地下实验室发展综述. 物理, 2011, 40: 149–154]

Development and prospect of deep Earth science and *in-situ* detection for geology in time

ZHANG Ru^{1,2}, XIE HePing^{1,2,3}, ZHANG ZeTian^{1,2*}, AI YinShuang⁴, DENG JianHui²,
CHEN Yun⁴, LI MingChuan⁵, XIONG KaiZhi⁵, SHEN ManBin⁵, GUO ZeQiu¹,
WANG Sha¹, JIANG MingMing⁴, LIANG Chao¹, AN Lu^{1,2},
ZHANG ZhiLong^{1,2} & YANG MingQing^{2,5}

¹ State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

² School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China

³ Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

⁴ Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁵ Jinping Deep Underground Frontier Science and Dark Matter Key Laboratory of Sichuan Province, Yalong River Hydropower Development Company Limited, Chengdu 610056, China

*Corresponding author (email: zhangzetian@scu.edu.cn)

The deep Earth, deep sea and deep space are equally important as the national “three deep” strategy. It is an inevitable trend and a significant strategic demand to explore new mysteries of deep Earth science, expand new knowledge of deep Earth engineering technology, reveal the evolution process and mechanism of deep *in-situ* environment, and lay a theoretical and technical foundation for important engineering practices such as deep Earth energy resource development. In this work, the latest research progress in deep earth scientific exploration was reviewed, and the academic connotation of “deep Earth science and geology in time” was proposed. In response to the fundamental scientific question of “the correlation mechanism and law of deep geology in time and shallow geological response”, focusing on the two frontier directions of “the law of deep geology in time” and “the correlation mechanism of deep and shallow for geology in time”, according to the “one center and multiple nodes” detection layout based on the China Jinping Underground Laboratory, the innovative research and frontier exploration of deep Earth science and geo-information detection experiment (GeoDEX) was carried out. Based on the world’s deepest Jinping ultra deep chamber group, GeoDEX conducted the multi-physics field detection and pre-research experiments at a depth of kilometers, including vibration, magnetic field, and micro deformation. It was found that the Jinping deep experimental site has extremely low environmental background interference conditions (2 orders of magnitude lower than the surface), which can greatly improve the sensitivity and reliability of precision instrument detection, and achieve “clear and accurate detection” of time-varying weak information in deep rock masses. The future development trend of *in-situ* detection in deep Earth science was elaborated from four aspects. GeoDEX is expected to realize precise detection of deep Earth multi-field time-varying signals and shallow time-varying response information, reveal the weak multi-field signal propagation and evolution laws for geology in time, detect the steady-state/nonstationary evolution response processes of geological bodies at different time and space scales under the action of internal and external forces, promote the field of deep Earth science to achieve original, breakthrough, and disruptive discoveries, explore the frontier technology of deep underground engineering, which has great scientific significance and research value.

deep Earth science, geology in time, China Jinping Underground Laboratory, *in-situ* detection

PACS: 62.20.-x, 89.30.-g, 91.25.-r, 91.30.-f, 93.85.-q

doi: [10.1360/SSPMA-2024-0463](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2024-0463)