https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.302

实验地球科学的前沿与发展战略

许文良[1],任建国[2],章军锋[3]

1. 吉林大学地球科学学院,吉林长春 130061
2. 国家自然科学基金委员会地球科学部,北京 100085
3. 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

摘 要: 实验地球科学是利用实验装置和技术模拟地球内部的高温高压条件,开展地球内部物质的物理和化学属性与地球内部过程研究.我国的实验地球科学在过去10年得到了快速发展,已成为国际高温高压实验领域的一支重要研究力量.主要介绍了实验地球科学的定义与战略价值,简述了我国实验地球科学的发展现状与薄弱环节,提出了未来学科发展的思路和重要举措,并展望了学科未来的优先发展方向.

关键词: 实验地球科学;发展现状;发展战略;优先发展方向.

中图分类号: P5 **文章编号:** 1000-2383(2022)08-2667-12 **收稿日期:** 2022-07-30

Frontiers and Development Strategies of Experimental Geoscience

Xu Wenliang[1], Ren Jianguo[2], Zhang Junfeng[3]

1. *School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061, *China*
2. *Earth Science Department, National Natural Science Foundation of China, Beijing* 100085, *China*
3. *School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: Experimental geoscience utilizes experimental devices and technologies to simulate the high-temperature and high-pressure conditions inside the Earth, and conduct research on the physical and chemical properties of the Earth's interior materials and the Earth's interior processes. In the past ten years, the rapid development of experimental geoscience in China has made China becomes an important international research force in the field of high-temperature and high-pressure experiments. This paper mainly introduces the definition and strategic value of experimental geoscience, briefly describes the status and weakness of experimental geoscience in China, puts forward ideas and important measures for the future development of the discipline, and looks forward to the priority development direction of the discipline in the future.

Key words: experimental geoscience; development status; development strategy; priority development direction.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42042007).

作者简介: 许文良(1959-),男,教授,主要从事火成岩成因和岩石圈动力学方面的教学和科研工作. ORCID:0000-0002-5129-8586. E-mail: xuwl@jlu.edu.cn

引用格式: 许文良,任建国,章军锋,2022.实验地球科学的前沿与发展战略.地球科学,47(8):2667-2678.

Citation: Xu Wenliang, Ren Jianguo, Zhang Junfeng, 2022. Frontiers and Development Strategies of Experimental Geoscience. *Earth Science*, 47(8):2667-2678.

1 实验地球科学的定义与战略价值

1.1 定义与内涵

实验地球科学是利用实验装置和技术模拟地球内部的高温高压条件,开展地球内部物质(矿物、岩石、流体、熔体等)物理和化学属性与地球内部过程方面的研究.早期的实验模拟研究偏重于岩石熔融和熔体结晶等内容,被称为实验岩石学.高温高压实验的研究手段后来被广泛应用到地球科学的多个分支学科,发展为实验地球科学(experimental geoscience),或称高温高压实验地球科学.

高温高压实验研究为解释岩石学和矿物学现象、特征、地球化学分析数据以及地球物理探测资料提供了必要依据,奠定了坚实基础.实验地球科学为认识难以直接进入的地球和其他行星的内部结构和过程乃至地球和行星的形成和演化历史提供了有效的研究手段,已成为固体地球和行星科学研究的重要支柱.一切的模型或假说必须能够经受起实验地球科学的检验,才有望上升为被广泛接受的理论和学说.

根据实验研究对象和侧重点的不同,高温高压实验地球科学可分为实验岩石学(experimental petrology)、实验地球化学(experimental geochemistry)、实验矿床学(experimental economic geology)、实验矿物学(experimental mineralogy)、实验矿物物理学(mineral physics)、实验流变学(experimental rheology)等分支学科.

1.2 学科特点

地球科学在很大程度上是一门观测科学.矿物和岩石是天然实验室地质过程的产物,而地震波速度等物理性质是反映地球内部的地球物理场.固体地球科学研究者通过对天然矿物和岩石样品进行形貌、结构和化学分析,或对地球内部进行地球物理探测,从获得的观测结果反演地球内部的状态和过程.然而,这种反演必须建立在坚实的物理化学原理和对地球内部物质物理化学性质的准确了解基础之上.

实验地球科学在精确控制体系温度、压力和化学组成的条件下,正演模拟地球内部的状态和过程,获取地球内部物质的物理化学性质参数,揭示支配地质和地球物理现象和过程的物理化学原理,剖析地球形成和演化的规律和机制.实验地球科学具有基础性、前沿性、交叉性等鲜明的学科特点.

1.2.1 基础性 实验是检验科学真理的唯一标准.岩石学等传统地质学科在发展早期基本属于经验科学,对岩石成因的解释缺乏扎实依据、存在很多争议,例如著名的“火成说”与“水成说”之争.北美学者鲍文在20世纪20年代开展了岩浆结晶演化实验,构建了鲍文反应序列(Bowen, 1928),这为认识岩浆岩成因提供了重要启示,奠定了现代岩石学的基础.随着20世纪60~70年代多面砧压机技术的发展,澳大利亚学者林伍德等开展了系统的地幔矿物相变实验研究(Ringwood, 1959),这为解释地震波波速突变的原因、认识地球内部层圈结构提供了关键依据(Ringwood, 1975),奠定了矿物物理学的基础.高温高压实验研究获得的相变条件和过程、物理性质与各种热力学和动力学参数可靠性强,对于正确诠释岩石地球化学和地球物理数据具有不可或缺的重要作用.因此,与经典的岩石地球化学和地球物理研究相比,实验地球科学具有更强的基础性,可以为地球科学反演提供重要依据和关键启示.

1.2.2 前沿性 实验地球科学在技术上和理论上都处于地球科学的前沿领域.实验地球科学开发和应用多种先进的高温高压实验技术(例如多面砧压机技术、金刚石压腔技术、动态高压技术等),并通过与同步辐射、阻抗谱等现代分析测试技术的结合,可以实现高温高压条件下物质结构、组成和物性的原位实时测量.很多基于实验研究的判断和预测都为后来的天然样品研究所证实.例如,实验测量很早就发现地幔过渡带矿物瓦兹利石和林伍德石具有很强的储水能力(Smyth, 1987; Kohlstedt *et al.*, 1996),因而评估地幔过渡带可能十分富水.数十年之后,对超深来源金刚石中林伍德石包裹体和冰VII包裹体的研究证实地幔过渡带起码在局部环境的确具有非常高的水含量(Pearson *et al.*, 2014; Tschauner *et al.*, 2018).日本学者通过高压矿物实验率先发现下地幔底部可以发生后钙钛矿相变(Murakami *et al.*, 2004).后续实验预测了这一相变可能引发的地球物理效应,后来被一系列的地震学观测所证实(Hernlund *et al.*, 2005; Lay *et al.*, 2006).因此,实验地球科学往往可以对地球科学研究起到前沿性和引领性的作用.

1.2.3 交叉性 高温高压实验已经在矿物学、岩石学、矿床学、地球化学、构造地质学、地球物理学中得到了广泛的应用,对于这些学科的发展起到了极

大的推动作用.此外,实验地球科学开发的很多高温高压实验和分析测试方法还可以应用到材料科学、无机化学和凝聚态物理等领域甚至工业生产,例如多面砧压机被广泛用于合成金刚石等超硬材料,金刚石压腔被用于金属氢和超导效应的研究.除了模拟地球内部状态,高温高压实验还可以被拓展应用到行星科学领域,用于破解太阳系内行星乃至系外行星的形成和演化奥秘.

无可讳言,实验地球科学也有其一定的内在局限性.(1)空间局限性.实验样品的尺寸一般不超过厘米量级,在超过几十GPa压力下更只有亚毫米量级,这与地球物理学km到上千km的空间尺度差别甚大;(2)时间局限性.实验时间一般仅为几分钟到几天,最多长至数月,而地质学往往以百万年甚至亿年为时间尺度.由于低温下物理和化学变化太慢,有时被迫提高实验温度,将高温下的实验结果外延到较低温度时难免带来一定的不确定性;(3)体系局限性.由于自然界真实体系的复杂性以及实验技术方面的困难,有时需要对体系作出一定程度的简化,才能抓住问题的关键所在,但这也对实验结果的适用性造成一定影响.

1.3　学科发展需求及经济社会发展对学科的需求

实验地球科学已经历了近百年的蓬勃发展,对于地球科学整体的学科发展发挥了关键的支撑作用.实验地球科学在技术、应用和理论等各层面仍有十分巨大的潜力可供挖掘,存在广泛、旺盛的学科发展需求.我国经济社会的快速发展也对实验地球科学提出了更高、更全面的需求.

1.3.1　学科发展需求　实验地球科学学科发展需求主要体现在以下几个方面:

(1)实验装置实现更高更准的温度、压力以及更大的样品空间.更高的温度和压力条件一直是实验地球科学孜孜以求的目标.从水热高压釜到活塞圆筒压机、多面砧压机,再到激光加热金刚石压腔技术的出现,现在已经实现包括地球中心在内的所有温压条件的全覆盖.巨行星乃至系外行星的压力条件(千万大气压以上量级)也可以通过冲击波动态高压技术实现.实验地球科学仍在持续追求突破更高的温度压力上限,同时实现更精确的温度压力控制.更大的样品空间可以允许研究更复杂、更贴近固体地球实际条件的体系,也便于布设原位测量的探针.我国正在积极研发可以实现超大样品空间的6万吨多面砧大压机.

(2)高温高压实验技术与原位分析测试技术的进一步融合.从高温高压淬火到常温常压的过程中样品可能发生多种变化,造成原始信息的丢失.高温高压技术与分析测试技术相结合,开展高温高压条件下的原位实时测量已成为实验地球科学的重要发展方向.金刚石压腔与包括同步辐射在内的多项光谱分析技术的结合已经十分成熟,但受各方面条件限制,在多面砧压机上开展原位测量仍有待进一步发展.我国的上海同步辐射光源正在规划建设与多面砧压机配套的新线站.

(3)实验地球科学与计算地球科学相结合.计算地球科学基于统计力学和量子力学方法,利用计算机技术模拟地球物质体系,其优势在于它可以轻松实现高温高压条件,而且可以提供微观视角.第一性原理计算技术的发展使计算结果的可靠性进一步增强.随着第一性原理加机器学习的多尺度分子模拟等计算技术的发展,实验和计算两种手段相互结合,取得的结果相互比对和印证,成为地球科学研究的重要发展趋势.

(4)实验地球科学与天然矿物岩石样品研究和地球物理观测的进一步结合.实验研究必须以解决地质学和地球物理学实际问题为依托.如何把高温高压实验研究与经典的天然样品岩石地球化学研究和地球物理观测更好地结合,切实解决地球科学重大问题,是实验地球科学的使命所在.

1.3.2　经济社会发展对学科的需求　我国经济社会的快速发展对地球科学提出了多方面更高的要求,包括揭示矿产资源的形成机制、查明地表环境变迁及其对生命的影响与地球内部过程之间的联系、厘清火山和地震等地质灾害的发生过程和机理等.实验地球科学可以在相关研究中发挥十分关键的作用,支撑国民经济对矿产资源的需求,为防灾减灾和保持地表宜居环境提供科学的理论支撑,助力经济社会发展.

2　我国实验地球科学的发展现状与薄弱环节

2.1　发展现状

2000年以来,通过从国外引进优秀青年人才、增强国际合作以及高温高压实验平台建设,我国在实验地球科学研究上取得了长足进步,在多个研究领域都形成了稳定的研究团队,譬如中国科学院地化所、中国科学院广州地化所、国家地震局地质所、

中国地质大学、中国科学技术大学、南京大学、北京大学、吉林大学、浙江大学以及北京高压科学研究中心等都建成了国际先进水平的高温高压实验平台和各具特色的研究团队,并取得了多项创新研究成果,受到国际地球科学界广泛瞩目(例如:Huang *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017a). 近十年主要代表性研究进展包括,熔体与橄榄岩相互作用的机制和产物、金红石在硅酸盐熔体和超临界流体中的溶解行为、水在玄武质熔体中扩散的速率和机制、C-O-H流体在地幔矿物中的溶解度、地壳→下地幔条件下矿物的状态方程、弹性、电导率、波速、热物理性质、脱水、(部分)熔融与结晶、自旋相变、氧逸度、水和微量元素的配分、地球内部挥发分(H、C、N等)的赋存与迁移、铁及其合金的相变、状态方程、剪切强度、波速和熔融、多个矿物体系的同位素分馏行为、矿物、流体、熔体体系中的稳定同位素分馏平衡、硅酸盐熔体的内部结构和$FeSiO_3$中铁电子的自旋状态变化、麻粒岩、辉长岩、钙钛矿等常见壳幔矿物的流变性质等(详见章军锋等, 2021的综述).

2.2 国际地位

尽管我国实验地球科学起步较晚,但近十年的发展非常迅速,已成为国际高温高压实验领域一支重要研究力量. 据Web of Knowledge数据库检索高压的结果,中国学者参与完成的论文已占到地质学、地球化学和地球物理学领域论文总量的19%,位列世界第三位,次于美国(38%),与实验地球科学领域其他传统强国德国(20%)、日本(17%)、法国(15%)一起稳稳站在了第二梯队. 我国实验地球科学研究工作近十年的发展主要体现了两个特点:(1)起点高,国际化程度高,国际合作论文比例高;(2)学科跨度广,各领域发展比较均衡. 随着我国在高温高压实验平台建设和国外优秀人才引进方面的巨大投入,包括国家自然科学基金委针对科学仪器研制和高水平科学研究建立了强力支持政策,使更多的团队和青年学者有条件开展国际同步甚至先进水平的实验研究,必将促进实验地球科学及相关学科的进一步快速发展,使实验模拟和计算成为固体地球科学研究的重要手段.

2.3 优势方向和薄弱之处

我国实验地球科学的研究成果逐年增加,研究方向的覆盖面也迅速拓展,在运用大腔体压机测量矿物岩石的热学、电学、弹性、相变、扩散性质,运用金刚石压砧测量高压布里渊散射和红外谱学、状态方程,以及运用流变仪测量岩石和矿物流变性质等方向上具有比较优势,相关的研究方法、技术创新和体系研究成果也得到了广泛的关注和引用,为地球物理和地球化学数据解释和地球深部过程的探讨提供了实验依据(章军锋等, 2021). 该领域目前存在的一些因发展不充分造成的问题主要包括:首先,我国还缺乏研究队伍规模和主攻方向稳定的学术团队,尚未建成类似美国卡内基研究所、布鲁克海文国家实验室、阿贡国家实验室、德国的BGI和GFZ、日本东京大学、冈山大学、爱媛大学等世界知名的研究团队;其次,在仪器设备方法创新方面还非常薄弱,缺乏技术人才储备,缺乏同步辐射等国家大型科学装置支持,目前主要采用国际上成熟的技术方法开展研究;最后,我国还没有形成地质天然观测、实验模拟和计算模拟协同创新的工作模式,需要国家通过资助重大科技项目或科技计划凝聚国内分散但精干的研究力量开展协作.

3 未来学科发展思路与重要举措

3.1 学科发展的总体思路

面向国际地球科学前沿和国家重大需求,大力支持实验地球科学的基础研究,加强国际合作与交流,坚持原创探索,力争在地球科学若干重大领域研究与发达国家并驾齐驱并保持部分领先;保持实验地球科学各分支学科均衡发展的同时,鼓励学科交叉和技术创新,不断拓展实验地球科学研究领域的深度和广度,为资源和能源供给、环境保护和治理、灾害预测等提供有力的实验科学理论和技术支撑.

首先,面向国际地球科学前沿,鼓励学科交叉和原创探索. 实验地球科学天然就具有科学交叉的特点,要瞄准科学前沿,促进实验地球科学与地球科学其他学科、以及与物理、化学、生物学等学科的大跨度交叉研究,鼓励原创探索.

其次,面向国家重大需求,突出服务国家目标. 以国家经济社会发展需求为导向,以服务国家目标为宗旨,面向国家"三深一系统"国家战略,突出解决国家资源能源安全、自然灾害的防灾减灾、生态环境保护的国家需求,发展地球系统科学理论.

最后,原始创新,技术先行. 新技术在地球科学应用所产出的新资料使我们对地质过程有了前所未有的新认识,同时也对以往的认识提出挑战. 实

验地球学科要积极关注新技术的发展，与时俱进，善于利用本学科和其他学科（特别是非地球科学学科）的技术研究和解决重大地球科学问题，特别是当前大数据、人工智能等先进技术的应用．要以重大科学问题为导向，开展重大科学仪器和计算模拟技术的研制，夯实实验地球科学高质量全面发展的基础．

3.2　学科发展目标

首先，夯实基础，不断扩大学科优势．是以科学问题为导向，瞄准国际地质科学前沿，通过多学科综合交叉研究，带动传统地学发展，缩小与国际先进水平的差距．力争在矿物物理、岩石物理、岩石流变学等学科方向上继续保持国际优势地位．

其次，加强新兴学科的培育与发展．注重新技术和新方法的发展与应用，不断研究新问题、开拓新前沿、进入新领域、发展新学科．加强新兴学科研究，力争在传统领域与国际先进水平并驾齐驱，在若干新领域产生引领性成果．

最后，加强人才培养．适应地球科学基础研究创新要求，围绕提高人才自主创新能力和国际竞争力，在重点学科和领域，通过创新人才培养模式、搭建人才培养平台、改善人才成长环境等方式，培养和造就一批国际水平的高端人才和高层次创新型实验地球科学研究人才．

3.3　加强学科建设的重要举措

首先，加大和稳定对实验地球科学的科研投入．基础研究是一个长期的过程，而实验地球科学又是一个以实验为基础的学科，大量实验观测和长期的资料积累是实现创新的根本．目前，面对“深地、深海、深空”的国际地学前沿和我国资源能源安全、自然灾害的防灾减灾、生态环境保护的国家需求，急需发展地球系统科学理论，为资源开发、环境保护和灾害防治提供理论支撑．这就要求对实验地球科学研究有稳定的科研经费投入，把发现、培养和稳定优秀实验地球科学创新人才作为科研投入的一个重要方向，只有这样才能发展实验地球科学，实现科技创新，满足国家需求．

其次，加强高水平高温高压实验和数值模拟研究平台建设．高温高压实验和数值模拟研究平台是实现地球表层和深部物质属性观测、动力学过程模拟，积累原始数据和资料、进行地学科技创新的重要基础．相比国际先进水平，我国目前在实验地球科学领域平台建设上还有很大的差距，需要以重大科学问题和实验地球科学技术创新的需求为导向，加强宏观管理与调控，在有稳定支撑的国家级和省部级重点实验室中布局高水平高温高压实验和数值模拟研究平台建设，健全和完善共享机制，增强原始数据采集和积累能力，建立实验地球科学大数据，推进成果共享和服务，打造一批具有国际水平的实验地球科学国际联合研究中心，为地球科学创新提供强有力的基础支撑．

最后，加强实验地球科学领域的国际合作与交流．地球科学研究具有全球性和地域性，许多地质问题的宏大空间尺度和漫长时间尺度要求国际地学界的广泛合作研究．中国的实验地球科学研究也是世界地质研究不可或缺的重要组成部分．高温高压实验和数值模拟研究平台由于其前期的高资金投入和高技术集成性，一直是地球科学领域国际合作与交流的典范．坚持“传承创新并重，合作互利共赢”的原则，立足全球合作，实现我国实验地球科学国际合作研究更深、领域更宽、层次更高，缩小与国际先进水平差距，是我国实验地球科学研究从跟跑到领跑的必由之路．

4　未来学科优先发展方向

4.1　大地幔楔的物质属性与深部过程

地球深部是驱动地球系统运行的发动机．地球深部物质的属性和过程不仅控制地球深部的壳幔系统演化、地球物理异常和地球化学的不均一性，而且制约着浅表矿产资源的形成、火山作用和地震活动、大气和海洋的演化（Mao *et al.*, 2017；董树文和陈宣华，2018；Hou and Wang, 2019）．“地球内部如何运行”被《Science》杂志列为125个最具挑战性的前沿科学问题之一，该问题的回答直接取决于对地球内部物质属性和深部过程的准确认识．因此，地球深部物质属性与过程已经成为固体地球科学研究的重大前沿科学问题．

板片与地幔的相互作用是地球深部过程的核心，促进了地球表层与深部圈层的物质循环和能量传输，使地球逐渐演化为宜居星球（Zheng, 2020）．全球地震层析成像显示，俯冲板片进入地幔过渡带之后主要有两种形式：一种是直接穿越地幔过渡带进入下地幔，甚至可能到达核幔边界；另外一种是平躺滞留在地幔过渡带（Goes *et al.*, 2017）．根据板片俯冲的深度及其在地幔中的形态，可以把板片与地幔相互作用的区域划分为由俯冲板片－上地

幔－岩石圈地幔－岛弧构成的小地幔楔系统；以及从小地幔楔系统发展而来，由俯冲/滞留板片－地幔过渡带－软流圈地幔－岩石圈构成的大地幔楔系统．大地幔楔是地球内部的常见构造，全球有近一半的深俯冲板片在地幔过渡带附近出现了几百到上千km的滞留（Goes *et al.*, 2017），其中以东北亚地区最为显著（Huang and Zhao, 2006; Zhao *et al.*, 2009; Zhao, 2017）．

国际上先后启动了“边缘带”（MARGINS）、“地质棱镜”（GeoPRISMS）、“聚焦板块边界”（zooming in between plates）等重大研究计划或项目来推动对地幔楔结构、物质属性、元素循环、变形、地震和演化过程的研究．但这些研究多偏重小地幔楔系统，缺乏从地质、地球物理、高温高压实验与计算和数值模拟角度综合阐明大地幔楔系统的板片－地幔相互作用过程及其效应的相关研究．相对小地幔楔，大地幔楔作用范围更广，是研究地球深部板片与地幔相互作用的重要突破口．

大地幔楔形成及其在东北亚大陆边缘演化和成矿中的作用已引起学术界的高度重视，并取得了一系列突出成果，主要表现在：(1)揭示了华北克拉通破坏与华南大陆再造的动因，即显著受到了（古）太平洋板块俯冲作用的制约（Li and Li, 2007; Zheng *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2012）；(2)阐明了东亚大陆边缘中－新生代岩浆作用与成矿成藏作用机制，与（古）太平洋板块俯冲及壳幔相互作用密切相关（Wu *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2020a）；(3)明确了东亚大地幔楔形成演化过程中地幔碳、水循环机制及其对新生代板内岩浆作用的制约（Kuritani *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2016; Xia *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2018, 2020）；(4)地球物理研究工作刻画了大地幔楔内不同圈层的波速和电导结构，发现了起伏的复杂多重地震反射界面（LAB、410 km和660 km地震不连续面）、起源于地幔过渡带的上地幔低速体（高导体）（Huang and Zhao, 2006; Chen and Ai, 2009; Zhao *et al.*, 2009; Ye *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2013a, 2020; Guo *et al.*, 2014; Tian *et al.*, 2016）和地幔过渡带底部及下地幔顶部的横波低速体（Li *et al.*, 2013b; Shen *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2016; Tauzin *et al.*, 2017）．

这些地质学和地球物理学的研究成果，使东亚大地幔楔成为了解地球内部不同圈层物质属性和相互作用的良好天然实验室．虽然近年来在大地幔楔形成与演化的研究已取得了许多重要成果，但仍有一系列核心科学问题没有得到很好地解决，主要包括：(1)大地幔楔深部物质结构与属性如何？着重体现在各圈层（岩石圈、软流圈、地幔过渡带和下地幔）界面的物质属性、地球物理探测所发现的复杂多重地震反射界面和高导低速异常体的地质意义、以及俯冲板片在地幔过渡带大量滞留的机制和条件；(2)大地幔楔深部物质循环过程与机理是什么？着重体现在再循环洋壳物质如何改造地幔、板块俯冲过程中的重要挥发分（H、C、S等）如何循环及其对深部物质循环有什么效应和启示、各圈层间相互作用的机制是什么；(3)大地幔楔深部地球动力学过程如何？着重体现在地球动力学的驱动机制是什么、再循环物质与成矿成藏作用、地震和火山活动之间有什么成因联系．这些问题的解决，不仅有助于揭示东亚洋－陆俯冲对大陆岩石圈演化和深部地幔过程的影响，同时从全球构造研究的角度，对提升大地幔楔认知水平和建立跨圈层地球系统科学理论框架具有重要意义．

对大地幔楔内部物质属性和深部过程进行精准研究是解决这些科学问题的关键．高温高压实验和计算模拟以先进的实验技术和量子力学为依托，直接确定地球深部条件下物质（包括矿物、岩石、流体和熔体等）的物理化学性质，精细刻画地球深部的物质组成、结构和动力学过程，在大地幔楔深部物质属性和过程研究中具有不可替代的优势．实施高温高压实验与计算模拟、地质学分析和地球物理大地电磁测量联合攻关，是解决东北亚大地幔楔形成和演化机制及其效应的有效途径．

本优先研究方向的核心科学问题是：大地幔楔的物质属性与深部过程．围绕该核心问题，需解决以下3个关键科学问题：(1)大地幔楔的深部结构与物质属性；(2)大地幔楔深部物质循环过程与机理；3)大地幔楔深部地球动力学过程．

4.2 深下地幔关键物质的物理化学属性与深部过程

下地幔占固体地球体积的一半以上，在各种尺度上都表现出强烈的不均一性，是认识地球形成、演化、物质组成、内部结构以及动力学过程的关键场所．通过板块俯冲作用，浅部关键物质可进入下地幔甚至核幔边界．这些关键物质在地球深部经历物质化学重组，可经由地幔热柱岩浆返回地表（Mao and Mao, 2020）．基于深部过程主控地球演

化的新理论，亟需对下地幔关键物质的循环过程及其效应开展研究．下地幔深部关键物质的物理化学特征、变化及其动力学过程已经成为固体地球科学研究的重大前沿科学问题．通过高温高压实验模拟和理论计算，测定超深地幔岩石矿物物理化学新特性，结合数值模拟、地球物理和地球化学观测，揭示深下地幔关键物质循环过程对地质、地球物理和地球化学现象的调控机理，原创性突破地球系统演化的深部动力学机制等科学问题，为掌握地球系统的运行机制提供科学基础，丰富地球宜居性研究的理论体系，为了解地球系统的过去、预测未来，以及构建深时、深地四维地球系统提供理论支撑（Mao and Mao, 2020）．

下地幔关键物质的物理化学属性以及循环过程已引起学术界的高度重视，并取得了一系列突出成果，主要表现在：(1)研究下地幔主要矿物的热力学稳定性（后尖晶石相变、铁的电子自旋相变、及后钙钛矿相变等），为探索地球内部结构和物质组成提供重要矿物学证据（Irifune *et al*., 1998; Badro *et al*., 2003; Murakami *et al*., 2004; Lin *et al*., 2005）；(1)揭示了下地幔顶部的低波速区、地幔深部的大型低剪切波速省、核幔边界的超低速带和高导异常等下地幔不均一性的成因机制（Schmandt *et al*., 2014; Liu *et al*., 2017b; Wang *et al*., 2020b）；(2)发现含水硅酸盐H相、δ－AlOOH以及高压黄铁矿相$(Mg,Fe)O_2H_x$等含水矿物可稳定存在于下地幔极端温度压力环境中，表明地表含水物质可被俯冲板片携带进入下地幔直至核幔边界，将深部水循环扩展至整个地幔（Nishi *et al*., 2014; Pamato *et al*., 2015; Hu *et al*., 2016; Duan *et al*., 2018; Ohtani, 2020），并揭示了下地幔深部氢、氧循环分离、超离子态氢及氧原子之间的强相互作用等新化学现象（Yang *et al*., 2016; Hu *et al*., 2017, 2021; Liu *et al*., 2019, 2021a; Hou *et al*., 2021）；(3)确定了俯冲板片中碳酸盐矿物在高温高压下的热力学稳定性，揭示了下地幔重要的深部碳载体（Isshiki *et al*., 2004; Liu *et al*., 2015; Dorfman *et al*., 2018; Li *et al*., 2018; Zhang *et al*., 2018; 刘勇胜等, 2019; Santos *et al*., 2019）．

这些深地科学研究成果对下地幔深部过程和内部结构形成了初步认识，但仍有一系列核心科学问题没有得到很好地解决，主要包括：下地幔水、氢、氧等挥发分来源与如何分布？深部地幔新的化学平衡过程如何演化？在深下地幔圈层之间如何进行物质交换？深下地幔富氧物质参与的新物质过程对地球动力学有何影响？对地表环境宜居性的调控机理如何？

对下地幔关键物质的物理化学属性和深部过程进行精准研究是解决这些科学问题的关键．聚焦下地幔科学前沿开辟由深下地幔活动主控的深时、深地四维地球系统演化模式的框架，需从“板块俯冲进入深地—物质的超深部重组过程—以全新面貌回到地面”的大循环着手，以高压研究为基础，结合数值模拟、地球物理探测、地质和地球化学观测等，验证深部稳态形貌，并利用深时发生的地质大事件来验证突变的记录．

本优先研究方向的核心科学问题是：下地幔关键物质的物理化学属性与深部过程．围绕该核心问题，需解决以下3个关键科学问题：(1)下地幔的深部结构与物质属性；(2)下地幔关键物质循环过程与机理；(3)下地幔关键物质的循环效应．

4.3　地球深部挥发分的赋存、迁移及其资源环境效应

挥发分是地球内部最活跃的组分，是驱动地球形成和演化的重要因素．如同血液在人体不同器官间的流动一样，挥发分在地球内部不同储库间以及地球内部与地表间的交换、循环和反应，贯穿了地球的内外不同圈层和漫长地质历史．挥发分把地球的地球化学演化、地球物理属性和地球动力学过程有机地联系了起来（Stevenson and Blake, 1998; Huppert and Woods, 2002; Karato, 2013; Xu *et al*., 2018; Yang and Faccenda, 2020），是充分体现地球科学的系统科学特征的重要标志之一．同时，挥发分还很大程度上直接参与并促进了深部岩浆活动、成矿元素迁移和富集、生命的起源和演化、大气圈与水圈的形成和演变以及地表环境的变迁（Miller, 1953; Kuchner, 2003; Keppler, 2013; Holland and Turekian, 2014; Wallace *et al*., 2015; Hou and Wang, 2019）．可以说，挥发分是回答地球内部如何运行以及地表资源环境如何演变等重要科学问题的重中之重．

按照地球化学经典模型，大气圈、水圈和浅部地壳等地表附近圈层的挥发分主要来自地球内部去气作用，地球深部挥发分的储量可能远超地表总量（Marty, 2012; Holland and Turekian, 2014）．由于板块俯冲和岩浆作用，挥发分在地球内外不断发生交换和循环．对该过程及其地表效应认识的关

键,是对深部地球中挥发分的赋存、储量和迁移等方面提供准确制约.在地幔中,氢、氮、磷、卤素和惰性气体等挥发分应当主要存储在矿物晶体结构中(Bell and Rossman, 1992; Beyer *et al.*, 2012; Shcheka and Keppler, 2012; Yoshioka *et al.*, 2018);碳和硫也能一定程度上赋存在矿物结构中,但可能主要以石墨、金刚石和硫化物等独立矿物相形式存在(Shcheka *et al.*, 2006).对地幔中这些挥发分的赋存和储量,国际上已经开展了一些探索性的工作,但已有的研究不系统、实验条件与地球内部并不符合或一些挥发分并未被研究,特别是这些挥发分在赋存方面的耦合关系很少被考虑.长期以来,学术界一直认为地核中也含有少量的轻元素(主要是各种挥发分元素,尤其是氢、碳、氧、氮、磷、硫等),但它们的赋存形式和储量以及在地核与地幔间的分布一直是悬而未决的难题(Poirier, 1994; Badro *et al.*, 2007; Hirose *et al.*, 2021).板块俯冲是将地表附近的挥发分再循环到地球内部的重要途径,但俯冲板块中的哪些物质能将多少挥发分输送到地球内部什么深度是极具争议的问题(Hilton *et al.*, 2002; Wallace, 2005; Bekaert *et al.*, 2020; Cannaò *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021b).

相应地,挥发分对地表附近矿产资源和环境变化的影响,也取决于对地球深部挥发分的赋存和迁移等方面的深刻理解.板块俯冲能携带挥发分到地球内部,这些挥发分在不同深度释放会脱离体系、进入上覆地幔、改变矿物挥发分组成、形成含水流体和/或引发熔融作用.目前已知的成矿作用和成矿带分布,大都与俯冲带体系有关,或者更准确地说是与深俯冲板块脱挥发分相关的流体/熔体作用有关(Li *et al.*, 2013a; Sun *et al.*, 2015; Hou and Wang, 2019; Zheng *et al.*, 2019).显然,准确认识俯冲板块向地球内部迁移和再循环挥发分的能力,是正确评估地表附近成矿元素迁移和富集成矿的关键基础.厘定了地球深部挥发分的赋存以及俯冲板块迁移和循环挥发分的能力后,就可以对地球内外不同圈层间挥发分的平衡和通量提供准确的约束(Richard *et al.*, 2006; Karato, 2011; Bodnar *et al.*, 2013; Korenaga *et al.*, 2017; Nakagawa and Iwamori, 2017; Plank and Manning, 2019).基于此,有可能对地球演化过程中一些重大的地表环境变化(比如大气圈的大氧化事件等)提供新的制约.同时,由于挥发分对地球内部矿物和岩石各种物理化学性质的显著影响,这些工作的开展也是深刻理解地球深部物质属性和动力学过程的重要前提.

超过100 km深度的地球内部,大都超出了人们能够直接取样的范围.以高温高压实验和计算模拟为依托,直接研究地球深部物质中挥发分的赋存、储量和迁移,在地球内部过程和作用机制研究中具有不可替代的优势.在此基础上,对地表资源和环境等进行理论约束,这是切合国家资源发展战略和宜居性环境发展规划的有效途径,也高度符合国家"向深部地球进军"和"深地"发展总体规划(董树文和陈宣华, 2018).

本优先研究方向的核心科学问题是:地球深部挥发分的赋存、迁移和资源环境效应.围绕该核心问题,解决以下3个关键科学问题:(1)深部地球中挥发分的赋存和储量;(2)深俯冲板块迁移和再循环挥发分的能力和机理;(3)深部挥发分的资源环境效应.

致谢:本文成文过程得到金振民院士的指导,倪怀玮、杨晓志、刘锦等人提供了宝贵素材和资料,在此一并表示衷心感谢!

References

Badro, J., Fiquet, G., Guyot, F., et al., 2007. Effect of Light Elements on the Sound Velocities in Solid Iron: Implications for the Composition of Earth's Core. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(1/2): 233−238. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.11.025

Badro, J., Fiquet, G., Guyot, F., et al., 2003. Iron Partitioning in Earth's Mantle: Toward a Deep Lower Mantle Discontinuity. *Science*, 300(5620): 789−791. https://doi.org/10.1126/science.1081311

Bekaert, D. V., Turner, S. J., Broadley, M. W., et al., 2020. Subduction-Driven Volatile Recycling: A Global Mass Balance. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(1): 37−70. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071620-055024

Bell, D. R., Rossman, G. R., 1992. Water in Earth's Mantle: The Role of Nominally Anhydrous Minerals. *Science*, 255(5050): 1391−1397. https://doi.org/10.1126/science.255.5050.1391

Beyer, C., Klemme, S., Wiedenbeck, M., et al., 2012. Fluorine in Nominally Fluorine-Free Mantle Minerals: Experimental Partitioning of F between Olivine, Orthopyroxene and Silicate Melts with Implications for Magmatic Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 337−338(4): 1−9. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.05.003

Bodnar, R.J., Azbej, T., Cannatelli, C., et al., 2013. Whole

Earth Geohydrologic Cycle, from the Clouds to the Core: the Distribution of Water in the Dynamic Earth System. *Geological Society of America*, 500:431—461.

Bowen, N. L., 1928. The Evolution of the Igneous Rocks. Princeton University Press, Princeton.

Cannaò, E., Tiepolo, M., Bebout, G. E., et al., 2020. Into the Deep and Beyond: Carbon and Nitrogen Subduction Recycling in Secondary Peridotites. *Earth and Planetary Science Letters*, 543(19): 116328. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116328

Chen, L., Ai, Y. S., 2009. Discontinuity Structure of the Mantle Transition Zone beneath the North China Craton from Receiver Function Migration. *Journal of Geophysical Research*, 114(B6): 307. https://doi.org/10.1029/2008jb006221

Dong, S.W., Chen, X.H., 2018. Deep Earth Exploration: the Research Frontier of Earth and Natural Resources Science. *Frontier Science*, 12(3): 84—87(in Chinese).

Dorfman, S. M., Badro, J., Nabiei, F., et al., 2018. Carbonate Stability in the Reduced Lower Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 489: 84—91. https://doi. org/10.1016/j.epsl.2018.02.035

Duan, Y. F., Sun, N. Y., Wang, S. H., et al., 2018. Corrigendum to "Phase Stability and Thermal Equation of State of Δ-AlOOH: Implication for Water Transportation to the Deep Lower Mantle". *Earth and Planetary Science Letters*, 527: 115812. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.05.003

Goes, S., Agrusta, R., van Hunen, J., et al., 2017. Subduction-Transition Zone Interaction: A Review. *Geosphere*, 13(3): 644—664. https://doi.org/10.1130/ges01476.1

Guo, X. Z., Yoshino, T., 2014. Pressure-Induced Enhancement of Proton Conduction in Brucite. *Geophysical Research Letters*, 41(3): 813—819. https://doi. org/10.1002/2013gl058627

Hernlund, J. W., Thomas, C., Tackley, P. J., 2005. A Doubling of the Post-Perovskite Phase Boundary and Structure of the Earth's Lowermost Mantle. *Nature*, 434(7035): 882—886. https://doi.org/10.1038/nature03472

Hilton, D. R., Fischer, T. P., Marty, B., 2002. Noble Gases and Volatile Recycling at Subduction Zones. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47(1): 319—370. https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.9

Hirose, K., Wood, B., Vočadlo, L., 2021. Light Elements in the Earth's Core. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9): 645—658. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00203-6

Holland, H.D., Turekian, K.K., 2014. Treatise on Geochemistry. Elsevier, Oxford.

Hou, M. Q., He, Y., Jang, B. G., et al., 2021. Superionic Iron Oxide-Hydroxide in Earth's Deep Mantle. *Nature Geoscience*, 14(3): 174—178. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00696-2

Hou, Z. Q., Wang, R., 2019. Fingerprinting Metal Transfer from Mantle. *Nature Communications*, 10(1):3510. https://doi.org/10.1038/s41467-019-11445-w

Hu, Q. Y., Kim, D. Y., Yang, W. G., et al., 2016. FeO_2 and FeOOH under Deep Lower-Mantle Conditions and Earth's Oxygen-Hydrogen Cycles. *Nature*, 534(7606): 241—244. https://doi.org/10.1038/nature18018

Hu, Q. Y., Liu, J., Chen, J., et al., 2021. Mineralogy of the Deep Lower Mantle in the Presence of H_2O. *National Science Review*, 8(4): 98. https://doi. org/10.1093/nsr/nwaa098

Hu, Q., Kim, D. Y., Liu, J., et al., 2017. Dehydrogenation of Goethite in Earth's Deep Lower Mantle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7): 1498—1501. https://doi.org/10.1073/pnas.1620644114

Huang, H. J., Fei, Y. W., Cai, L. C., et al., 2011. Evidence for an Oxygen-Depleted Liquid Outer Core of the Earth. *Nature*, 479(7374): 513—516. https://doi.org/10.1038/nature10621

Huang, J. L., Zhao, D. P., 2006. High-Resolution Mantle Tomography of China and Surrounding Regions. *Journal of Geophysical Research*, 111(B9): 305. https://doi.org/10.1029/2005jb004066

Huppert, H. E., Woods, A. W., 2002. The Role of Volatiles in Magma Chamber Dynamics. *Nature*, 420(6915): 493—495. https://doi.org/10.1038/nature01211

Irifune, T., Nishiyama, N., Kuroda, K., et al., 1998. The Postspinel Phase Boundary in Mg_2SiO_4 Determined by in Situ X-Ray Diffraction. *Science*, 279:1698—1700.

Isshiki, M., Irifune, T., Hirose, K., et al., 2004. Stability of Magnesite and its High-Pressure Form in the Lowermost Mantle. *Nature*, 427(6969): 60—63. https://doi. org/10.1038/nature02181

Karato, S. I., 2011. Water Distribution Across the Mantle Transition Zone and its Implications for Global Material Circulation. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(3/4): 413—423. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.038

Karato, S., 2013. Physics and Chemistry of the Deep Earth. Wiley-Blackwell, New York.

Keppler, H., 2013. Volatiles under High Pressure. In: Karato, S.I., ed., Physics and Chemistry of the Deep Earth, Wiley-Blackwell, New York, 1—37.

Kohlstedt, D. L., Keppler, H., Rubie, D. C., 1996. Solubility of Water in the A, β and γ Phases of $(Mg,Fe)_2SiO_4$. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(4): 345—357. https://doi.org/10.1007/s004100050161

Korenaga, J., Planavsky, N. J., Evans, D. A. D., 2017. Global Water Cycle and the Coevolution of the Earth's Interior and Surface Environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2094): 20150393. https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0393

Kuchner, M. J., 2003. Volatile-Rich Earth-Mass Planets in the Habitable Zone. *The Astrophysical Journal*, 596(1): L105—L108. https://doi.org/10.1086/378397

Kuritani, T., Ohtani, E., Kimura, J. I., 2011. Intensive Hydration of the Mantle Transition Zone beneath China Caused by Ancient Slab Stagnation. *Nature Geoscience*, 4(10): 713—716. https://doi.org/10.1038/ngeo1250

Lay, T., Hernlund, J., Garnero, E.J., et al., 2006. A Post-Perovskite Lens and D″ Heat Flux Beneath the Central Pacific. *Science*, 314:1272—1276.

Li, J. K., Liu, Y. C., Zhao, Z., et al., 2018. Roles of Carbonate/CO_2 in the Formation of Quartz-Vein Wolframite Deposits: Insight from the Crystallization Experiments of Huebnerite in Alkali-Carbonate Aqueous Solutions in a Hydrothermal Diamond-Anvil Cell. *Ore Geology Reviews*, 95(7): 40—48. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.024

Li, J. L., Gao, J., John, T., et al., 2013a. Fluid-Mediated Metal Transport in Subduction Zones and its Link to Arc-Related Giant Ore Deposits: Constraints from a Sulfide-Bearing HP Vein in Lawsonite Eclogite (Tianshan, China). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 120(47): 326—362. https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.06.023

Li, J., Wang, X., Wang, X. J., et al., 2013b. P and SH Velocity Structure in the Upper Mantle beneath Northeast China: Evidence for a Stagnant Slab in Hydrous Mantle Transition Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 367(6): 71—81. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.02.026

Li, S. G., Yang, W., Ke, S., et al., 2016. Deep Carbon Cycles Constrained by a Large-Scale Mantle Mg Isotope Anomaly in Eastern China. *National Science Review*, 4(1): 111—120. https://doi.org/10.1093/nsr/nww070

Li, S. W., Weng, A. H., Li, J. P., et al., 2020. Deep Origin of Cenozoic Volcanoes in Northeast China Revealed by 3-D Electrical Structure. *Science China Earth Sciences*, 63(4): 533—547. https://doi.org/10.1007/s11430-018-9537-2

Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300-km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2): 179. https://doi.org/10.1130/g23193a.1

Lin, J. F., Struzhkin, V.V., Jacobsen, S.D., et al., 2005. Spin Transition of Iron in Magnesiowustite in the Earth's Lower Mantle. *Nature*, 436:377—380.

Liu, H. Y., Zhang, K., Ingrin, J., et al., 2021a. Electrical Conductivity of Omphacite and Garnet Indicates Limited Deep Water Recycling by Crust Subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, 559: 116784. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116784

Liu, J., Hu, Q. Y., Bi, W. L., et al., 2019. Altered Chemistry of Oxygen and Iron under Deep Earth Conditions. *Nature Communications*, 10(1): 153. https://doi.org/10.1038/s41467-018-08071-3

Liu, J., Hu, Q. Y., Young Kim, D., et al., 2017a. Hydrogen-Bearing Iron Peroxide and the Origin of Ultralow-Velocity Zones. *Nature*, 551(7681): 494—497. https://doi.org/10.1038/nature24461

Liu, J., Xia, Q. K., Kuritani, T., et al., 2017b. Mantle Hydration and the Role of Water in the Generation of Large Igneous Provinces. *Nature Communications*, 8(1): 1824. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01940-3

Liu, J., Wang, C. X., Lv, C., et al., 2021b. Evidence for Oxygenation of Fe-Mg Oxides at Mid-Mantle Conditions and the Rise of Deep Oxygen. *National Science Review*, 8(4):96. https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa096

Liu, Y. N., Brenan, J., 2015. Partitioning of Platinum-Group Elements (PGE) and Chalcogens (Se, Te, As, Sb, Bi) between Monosulfide-Solid Solution (MSS), Intermediate Solid Solution (ISS) and Sulfide Liquid at Controlled f_{O2}-f_{S2} Conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 159(5): 139—161. https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.03.021

Liu, Y.S., Chen, C.F., He, D.T., et al., 2019. Deep Carbon Cycle in Subduction Zones. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 49(12): 1982—2003(in Chinese).

Liu, Z., Park, J., Karato, S. I., 2016. Seismological Detection of Low-Velocity Anomalies Surrounding the Mantle Transition Zone in Japan Subduction Zone. *Geophysical Research Letters*, 43(6): 2480—2487. https://doi.org/10.1002/2015gl067097

Mao, H. K., Hu, Q. Y., et al., 2017. When Water Meets Iron at Earth's Core-Mantle Boundary. *National Science Review*, 4(6): 870—878. https://doi.org/10.1093/nsr/nwx109

Mao, H. K., Mao, W. L., 2020. Key Problems of the Four-Dimensional Earth System. *Matter and Radiation at Extremes*, 5(3): 038102. https://doi.org/10.1063/1.5139023

Marty, B., 2012. The Origins and Concentrations of Water, Carbon, Nitrogen and Noble Gases on Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 313—314(7348): 56—66. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.040

Miller, S. L., 1953. A Production of Amino Acids under Pos-

sible Primitive Earth Conditions. *Science*, 117(3046): 528—529. https://doi.org/10.1126/science.117.3046.528

Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., et al., 2004. Post-Perovskite Phase Transition in $MgSiO_3$. *Science*, 304(5672): 855—858. https://doi.org/10.1126/science.1095932

Nakagawa, T., Iwamori, H., 2017. Long-Term Stability of Plate-Like Behavior Caused by Hydrous Mantle Convection and Water Absorption in the Deep Mantle. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(10): 8431—8445. https://doi.org/10.1002/2017jb014052

Nishi, M., Irifune, T., Tsuchiya, J., et al., 2014. Stability of Hydrous Silicate at High Pressures and Water Transport to the Deep Lower Mantle. *Nature Geoscience*, 7(3): 224—227. https://doi.org/10.1038/ngeo2074

Ohtani, E., 2020. Hydration and Dehydration in Earth's Interior. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(1): 253—278. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-080320-062509

Pamato, M. G., Myhill, R., Boffa Ballaran, T., et al., 2015. Lower-Mantle Water Reservoir Implied by the Extreme Stability of a Hydrous Aluminosilicate. *Nature Geoscience*, 8(1): 75—79. https://doi.org/10.1038/ngeo2306

Pearson, D. G., Brenker, F. E., Nestola, F., et al., 2014. Hydrous Mantle Transition Zone Indicated by Ringwoodite Included within Diamond. *Nature*, 507(7491): 221—224. https://doi.org/10.1038/nature13080

Plank, T., Manning, C. E., 2019. Subducting Carbon. *Nature*, 574(7778): 343—352. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1643-z

Poirier, J. P., 1994. Light Elements in the Earth's Outer Core: A Critical Review. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 85(3/4): 319—337. https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)90120-1

Richard, G., Bercovici, D., Karato, S. I., 2006. Slab Dehydration in the Earth's Mantle Transition Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(1/2): 156—167. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.006

Ringwood, A.E., 1959. The Olivine-Spinel Inversion in Fayalite. *American Mineralogist*, 44: 659—661.

Ringwood, A.E., 1975. Composition and Petrology of the Earth's Mantle. McGraw-Hill, New York.

Santos, S. S. M., Marcondes, M. L., Justo, J. F., et al., 2019. Stability of Calcium and Magnesium Carbonates at Earth's Lower Mantle Thermodynamic Conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 506(4): 1—7. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.030

Schmandt, B., Jacobsen, S. D., Becker, T. W., et al., 2014. Dehydration Melting at the Top of the Lower Mantle. *Science*, 344(6189): 1265—1268. https://doi.org/10.1126/science.1253358

Shcheka, S. S., Keppler, H., 2012. The Origin of the Terrestrial Noble-Gas Signature. *Nature*, 490(7421): 531—534. https://doi.org/10.1038/nature11506

Shcheka, S. S., Wiedenbeck, M., Frost, D. J., et al., 2006. Carbon Solubility in Mantle Minerals. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(3/4): 730—742. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.036

Shen, X. Z., Yuan, X. H., Li, X. Q., 2014. A Ubiquitous Low-Velocity Layer at the Base of the Mantle Transition Zone. *Geophysical Research Letters*, 41(3): 836—842. https://doi.org/10.1002/2013gl058918

Smyth, J. R., 1987. The Beta -Mg_2SiO_4: a Potential Host for Water in the Mantle? *American Mineralogist*, 72:1051—1055.

Stevenson, D. S., Blake, S., 1998. Modelling the Dynamics and Thermodynamics of Volcanic Degassing. *Bulletin of Volcanology*, 60(4): 307—317. https://doi.org/10.1007/s004450050234

Sun, W. D., Ding, X., Ling, M.X., et al., 2015. Subduction and Ore Deposits. *International Geology Review*, 57(9/10): iii—vi. https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1029543

Tauzin, B., Kim, S., Kennett, B. L. N., 2017. Pervasive Seismic Low-Velocity Zones within Stagnant Plates in the Mantle Transition Zone: Thermal or Compositional Origin?. *Earth and Planetary Science Letters*, 477(1): 1—13. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.08.006

Tian, Y., Zhu, H. X., Zhao, D. P., et al., 2016. Mantle Transition Zone Structure beneath the Changbai Volcano: Insight into Deep Slab Dehydration and Hot Upwelling near the 410 km Discontinuity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8): 5794—5808. https://doi.org/10.1002/2016jb012959

Tschauner, O., Huang, S., Greenberg, E., et al., 2018. Ice-VII Inclusions in Diamonds: Evidence for Aqueous Fluid in Earth's Deep Mantle. *Science*, 359(6380): 1136—1139. https://doi.org/10.1126/science.aao3030

Wallace, P. J., 2005. Volatiles in Subduction Zone Magmas: Concentrations and Fluxes Based on Melt Inclusion and Volcanic Gas Data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140(1/2/3): 217—240. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.07.023

Wallace, P.J., Plank, T., Edmonds, M., et al., 2015. Volatiles in Magmas. In: Houghton, S.H., McNutt, B., Hazel, R. S., Stix, J., eds., The Encyclopedia of Volcanoes, Academic Press, Amsterdam, 163—183.

Wang, C. G., Lo Cascio, M., Liang, Y., et al., 2020a. An

Experimental Study of Peridotite Dissolution in Eclogite-Derived Melts: Implications for Styles of Melt-Rock Interaction in Lithospheric Mantle beneath the North China Craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 278: 157—176. https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.09.022

Wang, W. Z., Xu, Y. H., Sun, D. Y., et al., 2020b. Velocity and Density Characteristics of Subducted Oceanic Crust and the Origin of Lower-Mantle Heterogeneities. *Nature Communications*, 11(1): 64. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13720-2

Wu, F. Y., Sun, D. Y., Ge, W. C., et al., 2011. Geochronology of the Phanerozoic Granitoids in Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1—30. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.11.014

Wu, F. Y., Yang, J. H., Xu, Y. G., et al., 2019. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47(1): 173—195. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060342

Xia, Q. K., Liu, J., Kovács, I., et al., 2017. Water in the Upper Mantle and Deep Crust of Eastern China: Concentration, Distribution and Implications. *National Science Review*, 6(1): 125—144. https://doi.org/10.1093/nsr/nwx016

Xu, L. L., Mei, S. H., Dixon, N., et al., 2013. Effect of Water on Rheological Properties of Garnet at High Temperatures and Pressures. *Earth and Planetary Science Letters*, 379: 158—165. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.002

Xu, W. L., Chen, J. H., Weng, A. H., et al., 2020. Stagnant Slab Front within the Mantle Transition Zone Controls the Formation of Cenozoic Intracontinental High-Mg Andesites in Northeast Asia. *Geology*, 49(1): 19—24. https://doi.org/10.1130/g47917.1

Xu, Y. G., Li, H. Y., Hong, L. B., et al., 2018. Generation of Cenozoic Intraplate Basalts in the Big Mantle Wedge under Eastern Asia. *Science China Earth Sciences*, 61(7): 869—886. https://doi.org/10.1007/s11430-017-9192-y

Yang, J. F., Faccenda, M., 2020. Intraplate Volcanism Originating from Upwelling Hydrous Mantle Transition Zone. *Nature*, 579(7797): 88—91. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2045-y

Yang, X., Keppler, H., Li, Y., 2016. Molecular Hydrogen in Mantle Minerals. *Geochemical Perspectives Letters*, 2: 160—168. https://doi.org/10.7185/geochemlet.1616

Ye, L. L., Li, J., Tseng, T. L., et al., 2011. A Stagnant Slab in a Water-Bearing Mantle Transition Zone beneath Northeast China: Implications from Regional SH Waveform Modelling. *Geophysical Journal International*, 186(2): 706—710. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05063.x

Yoshioka, T., Wiedenbeck, M., Shcheka, S., et al., 2018. Nitrogen Solubility in the Deep Mantle and the Origin of Earth's Primordial Nitrogen Budget. *Earth and Planetary Science Letters*, 488: 134—143. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.021

Zhang, J.F., Ni, H.W., Yang, X.Z., et al., 2021. Progress and Perspective of Experimental Geoscience in China (2011-2020). *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(3): 597—609, 777(in Chinese with English abstract).

Zhang, Z., Mao, Z., Liu, X., et al., 2018. Stability and Reactions of $CaCO_3$ Polymorphs in the Earth's Deep Mantle. *Journal of Geophysical Research*, 123:6491—6500. https://doi.org/10.1029/2018jb015654

Zhao, D. P., 2017. Big Mantle Wedge, Anisotropy, Slabs and Earthquakes beneath the Japan Sea. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 270: 9—28. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.06.009

Zhao, D. P., Tian, Y., Lei, J. S., et al., 2009. Seismic Image and Origin of the Changbai Intraplate Volcano in East Asia: Role of Big Mantle Wedge above the Stagnant Pacific Slab. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(3/4): 197—206. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.11.009

Zheng, Y. F., Mao, J. W., Chen, Y. J., et al., 2019. Hydrothermal Ore Deposits in Collisional Orogens. *Science Bulletin*, 64(3): 205—212. https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.01.007

Zheng, Y. F., Xu, Z., Zhao, Z. F., et al., 2018. Mesozoic Mafic Magmatism in North China: Implications for Thinning and Destruction of Cratonic Lithosphere. *Science China Earth Sciences*, 61(4): 353—385. https://doi.org/10.1007/s11430-017-9160-3

Zheng, Y. F., 2020. Plate Tectonics. In:Alderton, D., Elias, S., eds., Encyclopedia of Geology. Elesvier, Amsterdam.

Zhu, R. X., Xu, Y. G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565—1587. https://doi.org/10.1007/s11430-012-4516-y

附中文参考文献

董树文，陈宣华，2018. 深地探测：地球和自然资源科学的研究前沿. 前沿科学，12(3): 84—87.

刘勇胜，陈春飞，何德涛，等，2019. 俯冲带地球深部碳循环作用. 中国科学：地球科学，49(12): 1982—2003.

章军锋，倪怀玮，杨晓志，等，2021. 中国实验地球科学研究进展与展望(2011—2020). 矿物岩石地球化学通报，40(3): 597—609，777.