

中国实验地球科学研究进展与展望 (2011—2020)

章军锋¹, 倪怀玮², 杨晓志³, 毛竹², 张宝华⁴, 熊小林⁵, 侯通⁶, 许文良⁷

1. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074; 2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;
3. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023; 4. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027; 5. 中国科学院 广州
地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 6. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院,
北京 100083; 7. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

摘要: 过去十年, 我国的实验地球科学快速发展, 已成为国际高温高压实验领域的一支重要研究力量。代表性研究进展主要体现在地球深部重要挥发分的赋存与效应、成矿过程和机制、壳幔物质的物理化学性质和相互作用等方面。本文综述了实验地球科学 2011—2020 年间取得的主要研究进展和平台与技术建设情况, 并展望了该领域未来的发展方向。

关键词: 实验地球科学; 高温高压; 物理化学属性与地质过程

中图分类号: P599 **文章编号:** 1007-2802(2021)03-0597-13 **doi:** 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.040

Progress and Perspective of Experimental Geoscience in China (2011–2020)

ZHANG Jun-feng¹, NI Huai-wei², YANG Xiao-zhi³, MAO Zhu², ZHANG Bao-hua⁴,
XIONG Xiao-lin⁵, HOU Tong⁶, XU Wen-liang⁷

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
5. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 6. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
7. School of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: In the past ten years, the rapid development of experimental geoscience in China has made China an important international research force in the field of high-temperature and high-pressure experiments. The representative research progresses of experimental geoscience in China mainly included studies of occurrence and effects of important volatiles in the deep Earth, mineralization process and mechanism, and physicochemical properties and interactions of crust and mantle materials. This article reviews the major research progresses, the platform construction, and the technological advancements of experimental geoscience from 2011 to 2020 in China and looks into future directions of research in this field.

Key words: experimental geoscience; high temperature and high pressure; physicochemical properties and geological processes

1 学科总体发展概述

实验地球科学(experimental geoscience), 或称高温高压实验地球科学, 是利用高温高压实验装置和技术在实验室模拟地球内部条件, 开展地球内部物质(矿物、岩石、流体、熔体等)属性与过程方面的研究。早期的实验模拟研究偏重于岩石熔融和熔

体结晶等内容, 习惯上称为实验岩石学; 高温高压实验后来被广泛应用到地球科学的多个分支学科, 发展为综合性更强的实验地球科学。实验研究为解释矿物学和岩石学现象、地球化学数据以及地球物理探测资料提供了必要依据。实验结果为认识难以直接观测的地球和其他行星的内部结构、过程及其形成和演化提供了强有力的依据。根据实验

研究对象和侧重点的不同,实验地球科学可分为实验岩石学、实验地球化学、实验矿床学、实验矿物学、实验矿物物理、实验流变学等分支学科。实验地球科学在精确控制温度、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参数,揭示控制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。

尽管我国实验地球科学起步较晚,但通过不懈的人才培养和人才引进、加强国际合作和高水平高温高压实验平台建设,近十年(2011—2020)我国在实验地球科学研究上取得了长足进步,突出体现了两个特点:一是起点高,国际化程度高;二是学科跨度大,各领域发展比较均衡。目前,中国地质大学、吉林大学、中国科学技术大学、南京大学、北京大学、浙江大学和中国科学院地球化学研究所、中国科学院广州地球化学研究所、北京高压科学研究中心等单位,都初步建成了国际水平的高温高压实验平台和各具特色的研究队伍。中国的实验地球科学研究人员取得了一系列创新研究成果,在 *Nature*、*Nature Geoscience*、*Nature Communications*、*PNAS*、*NSR*、*Geology*、*EPSL*、*JGR-Solid Earth*、*GRL*、*GCA* 等权威期刊上发表了大量高水平研究论文,已成为国际高温高压实验领域的一支重要研究力量。代表性研究进展主要体现在地球深部重要挥发分的赋存与效应、成矿过程和机制、壳幔物质的物理化学性质和相互作用等方面。

2 重要原创理论进展

2.1 地球深部重要挥发分的赋存与效应

氢、碳和氮等重要挥发分对地球的形成与演化有深远的影响。挥发分在地球内部的分布、储存和迁移控制着地球内部物质的物理化学性质、层圈相互作用、地幔对流与板块运动、地幔熔融以及火山作用、矿床的形成。挥发分在地球各圈层之间的循环交互也是大气圈和水圈的演化以及生物圈的形成和演化等地球宜居性的决定性因素。过去十年中,国内的实验地球科学团队在地球深部重要挥发分的赋存状态与效应的实验研究中取得了重要进展和突破。

2.1.1 地幔挥发分物质组成与效应研究

(1) 分子氢(H_2)是地幔中比结构羟基更重要的水的赋存方式:南京大学杨晓志团队在地幔中 H 的赋存状态研究中取得重要进展。他们的一系列研

究发现,受共存矿物、地质流体和氧逸度等的影响,上地幔中羟基(OH)形式结构水的最大储量其实很低,较前人广为接受的估计值偏低可达 20 倍以上(Yang et al., 2014, 2015),因而结构羟基所能产生的一些物理和化学效应需要重新评估。此外,他们还首次提出在深部地幔高度还原的条件下,分子氢(H_2)可以显著赋存在矿物的晶体结构中。分子氢主要以中性分子形式填充在晶格间隙中(与惰性气体分子相似),其赋存与矿物的结构和成分关系并不大,其储存能力随压力强而显著增大(Yang et al., 2016)。地幔中分子氢的赋存形式的发现,打破了前人认为地幔中的 H 主要是羟基的认识。这还意味着,早期增生和核幔分异过程中,原始大气中占主体的 H_2 可经由星云物质-岩浆海-硅酸盐矿物间的平衡直接存储在成型中的固体地球内部,这为地球上水的起源提供了新的机制。之后随着浅部地球的逐渐氧化,矿物中的 H_2 转化为 H_2O 或 OH,并最终经去气作用和俯冲作用产生了地球上现代形式的水循环。这对认识地球和类地行星上水的起源提供了全新的思路。

(2) 水在上地幔和过渡带矿物中的结构特征对弹性性质的影响:浙江大学杨燕等在原位高温高压条件下对上地幔矿物中水的赋存状态进行了研究(Yang et al., 2019a, 2019b),他们发现在上地幔温压环境下,辉石和橄榄石中的氢在晶体结构中呈现无序化,并且发生占位迁移和重新组合。该研究弥补了目前在常温常压下认识地幔矿物中水的赋存方式的不足,为探索水对地幔物理化学性质的影响提供了新依据。中国地质大学(武汉)地球深部研究团队利用高温红外及高温拉曼光谱,测量了一系列含水矿物在地幔温压条件下的稳定性和结构特征(Liu et al., 2019b, 2019c; Zhu et al., 2019)。他们发现对于可以稳定存在于过渡带冷俯冲板片的重要含水矿物水镁石,氢同位素替代会对其非谐效应产生显著影响,进而影响氢同位素在地幔过渡带物相之间的平衡分馏(Zhu et al., 2019)。中国科学技术大学毛竹团队利用金刚石压砧研究了超级含水相 B 的弹性性质(Li et al., 2016a),发现含有 17%~22% 超级含水相 B 的俯冲板片在过渡带底部和下地幔顶部的堆积可以解释该区域地震波速度异常。此外,他们还利用所发展的外加热金刚石对顶砧技术在高温高压下原位测量了上地幔的主要构成矿物橄榄石的单晶弹性模量(Mao et al., 2015),推断 500 km 的深度处的亚稳态橄榄石具有低速和强横波分裂特征,这为判定深部地震是否由

亚稳态橄榄石相变造成提供了重要的矿物学依据。

(3) 过渡带金刚石生长的 C-H-O 流体来源: 采用激光加热 X 光衍射发现, 方解石在过渡带底部存在的新方解石-VII 相在俯冲板片温压条件下会与洋壳中的 SiO_2 发生反应, 释放出的 CO_2 与水一起为超深金刚石在过渡带的生长提供所需的 C-H-O 流体 (Li et al., 2018b)。

(4) 下地幔深部环境存在稳定的含氢过氧化铁相 (FeO_2H_x): 北京高压科学研究中心研究团队对高压下 Fe-O-H 体系相变开展了系统的金刚石压砧实验研究工作。胡清扬等 (Hu et al., 2016, 2017b) 发现针铁矿 (FeOOH) 在下地幔 1800 km 深度发生部分脱氢作用, 形成黄铁矿立方晶体结构的含氢过氧化铁相 (FeO_2H_x); 刘锦等 (Liu et al., 2017) 和毛河光等 (Mao et al., 2017) 进一步研究发现, 俯冲下去的水接触到铁核时将产生 FeO_2H_x 相并释放氢气, 水不仅可以与纯铁在下地幔深部高温高压环境下产生 FeO_2H_x 相, 也可以与一系列地表常见铁氧化物 (如 FeO 和 Fe_3O_4) 反应生成 FeO_2H_x 相; 刘锦等 (Liu et al., 2017) 的实验结果表明, FeO_2H_x 相可稳定于下地幔底部极端的温压环境, 具有非常高的结构稳定性; 张莉等 (Zhang et al., 2018a) 发现 FeO_2H_x 相结构中的 Fe 可以被 Al 替代, 形成六方晶系的含铝量为 20%~40% 的 (Fe, Al) O_2H_x (HH 相); 刘锦等 (Liu et al., 2019a) 研究发现 FeO_2 和含氢 FeO_2H_x 相中的铁为 +2 价, 氧为 -1 价, 同时氢极有可能是游离的 0 价。含氢 FeO_2 相是第一个由金刚石对顶砧实验发现的地球深部含水物质, 这对于理解水在下地幔的赋存形式和分布具有重大意义。通常, 深部水循环与氢循环被认为是同一个过程。然而, 针铁矿在下地幔深部脱氢形成含氢 FeO_2 相, 将导致地球内部氢元素循环与氧循环的解耦。同时, 含氢 FeO_2 相中氧价态为 -1, 而不是常规的 -2, 表明在深部下地幔, 氧元素将和铁元素一样价态可变。核幔边界累积 10 km 以上厚度的含氢 FeO_2 相可能是超低速区的重要潜在成因机制。这些发现打破了此前的传统观点, 给地球深部物质研究带来诸多全新的认识。

2.1.2 早期地球和类地行星的挥发分物质组成与效应

(1) 氮和碳在地球早期岩浆海中的赋存形式和环境效应: 挥发性元素在地核、地幔及早期大气圈中的分布和丰度直接取决于氮、碳元素在岩浆海中的溶解能力和在不同圈层之间的分配行为。中国科学院广州地球化学研究所李元团队 (Li et al.,

2016c) 发现, 氮在金属相和硅酸盐熔体相之间的分配系数在 1~20 之间, 因此核幔分异过程中大量的氮可能进入到地核中。实验结果也显示在温度高达 1800 °C 的条件下, 氮同位素在金属相和硅酸盐熔体相之间仍然有巨大的分馏: 地核富 ^{14}N , 硅酸盐地幔富 ^{15}N 。根据这些实验结果, 他们推断地球氮可能主要来源于顽火辉石球粒陨石。Li 等 (2015a) 还对碳在岩浆海中金属相和硅酸盐熔体相中的存在形式、溶解度及其分配进行了系统研究, 结果显示, 碳在岩浆海硅酸盐熔体中主要以甲烷或者碳酸根的形式存在, 溶解度为几十至几百 ppm; 碳在金属相中的溶解度可达百分之几, 具体受金属相成分控制。碳在金属相和硅酸盐熔体相之间的分配系数为 100~5000。因此, 在核、幔分异过程中, 岩浆海中大量的碳进入到地核中。此外, 岩浆海的去气可能主要释放 CH_4 到早期的大气中, 导致最初地球大气圈可能相对比较富集 CH_4 。Li 等 (2016b) 发现, 如果类地行星的金属核富集硅或硫, 碳将从金属核中被“驱逐”出去, 形成一个富碳的行星硅酸盐幔。水星的金属核硅极度富集, 这和我们今天所观测到的水星壳非常富集石墨相一致。他们据此提出在地球增生的晚期, 一个类似水星的小行星冲击 44 亿年前的原始地球, 导致大量的碳进入地球, 这可以解释地球碳的成因和来源。

(2) 地幔矿物、岩浆熔体和流体中碳、氮元素的地球化学行为: 中国科学院广州地球化学研究所李元团队 (Li et al., 2013) 研究了氮在地幔矿物中的溶解度。他们发现, 在氧化条件下, 氮在上地幔矿物中的溶解度小于 5×10^{-6} , 而在还原条件下, 氮在上地幔矿物中的溶解度可达几百 ppm。基于这些实验结果, 他们计算出当前地球的地幔可容纳 20~40 倍的大气氮, 因此硅酸盐地幔可能是一个巨大的氮储库。在岩浆去气过程中, 氮在流体相和熔体相之间的分配系数为 60~10 000, 因此岩浆去气时, 氮会强烈富集于流体中 (Li et al., 2015b)。Li 和 Kepler (2014) 指出, 岩浆流体中的氮主要以氨气和/或氮气的形式存在, 早期地球的去气主要释放 NH_3 到大气中, 从而导致早期地球大气圈是相对还原的。

Li 等 (2017a) 对碳在火星、月球以及水星玄武岩中的溶解行为的研究发现, 在整个火星壳形成过程中, 地幔释放到大气圈中的 CO_2 总量不足 0.1 MPa, 月球玄武岩中可能含几十到几百 ppm 碳, 因此 CO_2/CO 可能是月球火山喷发的重要驱动力; 水星玄武岩只能携带低于 10×10^{-6} 的碳释放到地表, 导

致玄武岩从水星幔中所携带的碳不足以成为水星玄武岩喷发的重要驱动力。此外, Li (2017) 还发现在高压下存在富水流体与富碳流体 ($\text{CH}_4 + \text{H}_2$, $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ 或 CO_2) 的不混溶现象, 这挑战了地幔条件下 C-H-O 流体完全混溶的传统观点, 同时他提出了一种重要的俯冲带碳循环机制。

上述成果的获得不仅推动了对地幔深部、早期地球和类地行星中挥发分地球化学行为的理解, 而且为深入阐明圈层相互作用和行星演化规律提供了重要的物理化学参数和关键的原理启示。

2.2 成矿过程和机制的实验模拟

通过高温高压实验模拟矿物-熔体-流体体系的物理化学条件(压力、温度、组成、氧逸度等)、精细刻画成矿过程中元素的地球化学行为, 是揭示成矿元素迁移、富集过程和成矿机制的重要途径。近十年来, 我国高温高压实验在元素分配行为与成矿、中基性岩浆作用成矿效应以及热液实验地球化学研究等方面取得了重要进展。

2.2.1 元素分配行为与成矿实验 元素分配是理解地球和行星核-幔-壳分异、元素地球化学行为及成矿机制的基础, 近十年来我国在该领域取得了很多重要进展。

(1) Cu、Au、Mo、Re、W 等成矿金属元素在硅酸盐岩浆中的分配和迁移: 由于 Cu 易于与贵金属形成合金使得 Cu 分配系数实验测定成为一个难题, 中国科学院广州地球化学研究所熊小林团队通过发展含 Cu 贵金属样品管新技术, 系统测定了 Cu 在硅酸盐矿物(橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、角闪石、石榴子石、斜长石)与铁镁质-中酸性熔体之间的分配系数, 同时发现 Cu 在硅酸盐矿物中是高度不相容的(Liu et al., 2014, 2015)。这一成果解决了 Cu 在硅酸盐矿物中是相容还是不相容的争论, 对理解 Cu 在岩浆过程中的行为和成矿有重要意义, 已经被收录到由美国、欧洲和日本主编的最新版 *Encyclopedia of Geochemistry* (Liu and Xiong, 2018) 中, 成为地球化学和成矿定量研究的重要参数, 获得广泛应用。该团队最近还发现, 还原条件下地幔矿物与铁镁质熔体之间 Cu 分配系数(0.045)是一个不受压力、温度和体系组成影响的“金钉子”分配系数(Sun et al., 2020), 使用该分配系数并结合 Cu 的亲 S 行为, 发展了估算地幔硫丰度的新方法, 揭示了硫在上地幔的高度不均一性($120 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$)。中国科学院广州地球化学研究所李元团队开展了硫化物/硅酸盐熔体 Au、Mo、Re 分配系数研究(Li et al., 2019; Feng and Li, 2019), 他们发现 Mo 和 Re

在硫化物和熔体中的分配系数有三个数量级的变化, 主要受熔体 FeO 含量和氧逸度的控制, 而且 Mo 和 Re 的分配系数呈完美的正相关。因此, 可以通过研究岩浆中 Mo 的地球化学行为来研究 Re 的地球化学行为。Au 在硫化物和熔体中的分配系数有四个数量级的变化, 主要受硫逸度和熔体中 S 含量的控制。岩浆结晶分异过程中大量的 Re 会进入到硫化物当中, 然后再重新循环到地球深部地幔。俯冲板片熔体对 Au 的携带能力有限, 因此大量的 Au 会和硫一起被循环到地球深部。岛弧岩浆结晶分异过程中, 即使硫化物饱和条件下, 如果岩浆比较富水、富硫, 氧化性适当, 富 Au 的岩浆仍可以形成。岛弧条件下富 Au 岩浆的形成可能和一些大型 Au 矿的形成密切相连。中国科学技术大学倪怀玮团队确定了 Cu、Mo、W 等关键金属元素在含水硅酸盐熔体中的扩散系数, 为认识岩浆热液作用过程中金属元素迁移和富集机制提供了关键制约(Ni et al., 2018; Zhang et al., 2018b)。

(2) 高场强元素在矿物与富溶质超临界流体间的分配和迁移: 熊小林团队通过金红石/熔体和金红石/流体分配实验(Xiong et al., 2011; Chen et al., 2018b)发现, 流体中溶质含量增加能增强高场强元素(HFSE)的迁移, 富溶质的超临界流体具有接近含水熔体的元素迁移能力; 他们通过角闪石/熔体 Nb、Ta 分配实验(Li et al., 2017c)发现 H_2O 是导致角闪石 Nb/Ta 分异的重要因素, 这些成果对示踪俯冲带熔/流体性质和弧岩浆演化过程具有重要的应用价值。

(3) 过渡族元素在地幔矿物与玄武质熔体间的分配: 第一排过渡族元素在地幔部分熔融过程中从相容到不相容, 其分配行为对理解地幔岩性不均一和地幔氧逸度有重要应用。熊小林团队的实验表明, 变价元素 V 在地幔矿物(橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石)与玄武质熔体之间的分配系数不仅敏感于氧逸度, 而且温度对之也有重要影响(Wang et al., 2019a); 他们利用 V、Ti、Sc 分配系数揭示弧下地幔比大洋地幔的氧逸度高 ~ 10 倍, 调和了利用不同方法获得的地幔楔氧逸度的争论。

2.2.2 岩浆作用及其成矿效应的实验研究 通过实验岩石学手段, 查明岩浆作用及其成矿效应, 是理解岩浆系统矿床(如铁±钛±钒±磷矿床等)形成机制的关键, 近十年来我国在该领域取得很多重要进展。

(1) 液态不混溶作用是基鲁纳型矿床形成的关键: 基鲁纳型铁矿在空间上与中酸性火山岩-次火山

岩密切相关,是高品质铁矿石的主要来源之一。绝大多数矿石的主要组成矿物只有磁铁矿和磷灰石(或萤石)。对该类型富铁矿石的成因均存在岩浆成因(铁矿浆成因)和热液成因之争。由于热液蚀变广泛发育,因此厘清岩浆期该成矿系统的原生过程,即液态不混溶作用是否发生,能否直接产生铁矿浆就成为解决矿床成因的关键。以此为目标,中国地质大学(北京)侯通课题组开展了一系列的研究工作,证实了岩浆在演化过程中,当母岩浆演化形成高度氧化富水($\Delta FMQ=3.3$, $a_{H_2O}>0.7$)的中基性岩浆时,可以发生不混溶作用形成两种成分差异很大的熔体,其中富铁相为与矿石成分类似的铁钙磷熔体(铁磷矿浆),而对于富氟体系,富铁相与结晶矿物组合形成的“晶粥”(铁氟矿浆)在冷却结晶后就可成矿。以上两个系列的实验,为全球范围内基鲁纳型矿石的成因提供了关键实验证据(Hou et al., 2017, 2018)。

(2)高温硅酸盐多组分系统液态不混溶作用的形成温度:侯通课题组开展的富铁基性岩石和酸性岩石的高温不混溶实验表明,部分样品表面不混溶作用可以在相对高温的条件下稳定存在。这比原来认定的拉斑玄武岩系统液态不混溶的温度上限(1050℃)要高,为岩浆演化的早期(高温)阶段可以发生不混溶提供了实验证据,这在岩石学和矿床学上均具有重要意义(Hou and Veksler, 2015)。

(3)高钛富铁苦橄岩的辉石岩/榴辉岩部分熔融成因:虽然地幔柱与大规模岩浆成矿作用被认可,但地幔柱与成矿作用之间的内在联系却不甚清楚。众所周知,全球有不同时代的大火成岩省,为何仅我国峨眉山大火成岩省的攀西地区有全球最大的钒钛磁铁矿矿集区,且沿南北向分布?侯通课题组根据地球化学研究结果提出,源区存在俯冲成因的辉石岩(榴辉岩)是攀西地区钒钛磁铁矿矿床巨量富集的根本原因(Hou et al., 2011, 2013),但缺少直接的实验证据。随后,针对这个问题,他们选取高钛($TiO_2=5.4\%$)富铁苦橄岩进行近液相线平衡实验,结果表明多组分平衡点在1320℃和1 GPa左右,即在1 GPa以上,富铁高钛苦橄岩的液相线矿物从橄榄石转换为斜方辉石,说明高钛富铁苦橄岩在最后离开岩石圈地幔时是和橄榄石的地幔岩石平衡的(Zhang et al., 2018c)。这为富铁高钛苦橄岩源区存在辉石岩提供了重要的实验岩石学证据。

2.2.3 热液实验地球化学 查明热液中元素的迁

移和富集机制是重建热液矿床成矿过程和建立成矿模式的基础和关键。我国在热液实验领域最为显著的进展是发展了可视化、在线观测实验技术,应用新的透明高压腔和原位拉曼光谱分析技术,实现了热液条件下流体组成和结构的实时解析。

(1)流体包裹体成分的原位拉曼光谱定量分析技术:包裹体捕获温度(T)、压力(p)和流体组成(x)等可为热液实验的 T - p - x 条件设计提供有益借鉴。传统的包裹体成分分析技术是显微测温法,而受制于包裹体大小、流体亚稳定以及流体成分复杂等因素的制约,显微测温法存在较大的局限性。针对这些问题,南京大学王小林、中国地质大学(武汉)吕万军和中国科学院深海科学与工程研究所 I-Ming Chou 等研究团队应用熔融毛细硅管透明腔技术制备实验标样,建立和完善了包裹体中常见组分,如盐度、硫酸盐浓度、 CO_2 和 CH_4 密度的原位拉曼光谱分析技术,实现了单个包裹体成分的快速、无损分析(Wang et al., 2011, 2013b, 2013c, 2019b; Qiu et al., 2020a)。目前,这些研究团队正在开发复杂的C-H-O-S-N挥发分体系的原位拉曼光谱定量分析技术(Fang et al., 2018; Qiu et al., 2020b)。这一技术被广泛应用于成岩、成矿包裹体成分的测定,同时,也为在线热液实验过程中流体成分的检测提供了技术支撑。

(2)液-液相分离是热液中元素富集的潜在机制:王小林团队针对硫酸盐-水体系高温相变开展了系统的可视化在线观察,结果发现Li、Mg、Zn、Cu等硫酸盐溶液在高温条件下都会发生液-液相分离,形成富硫酸盐和贫硫酸盐的两个不混溶液相(Wang et al., 2013b, 2016b, 2016c, 2017b; Wan et al., 2015, 2017)。他们从宏观相变特征和微观离子相互作用角度揭示了液-液相分离的发生机制,即复杂的络合作用是触发液-液相分离的主要原因。另外,他们的研究还发现 CO_2 、 CH_4 等挥发分和有机组分的存在会促进液-液相分离的发生,流体减压也会降低液-液相分离的发生温度(Wan et al., 2017)。这些发现丰富了人们对含硫热液体系元素富集机制的认识。由于液-液相分离形成的高密度流体相可以作为晶体生长的前驱物,他们的实验结果也为非传统晶体生长理论研究提供了新的实验依据。

(3)热液中钨的迁移方式和成矿过程中 CO_2 的 H^+ 储库效应:王小林团队通过对 K_2WO_4 -HCl-NaCl- CO_2 - H_2O 体系热液条件下原位拉曼光谱的分析,揭示了复杂钨络合物稳定的温压区间。他们发现,在

高盐度和较酸性的流体中,钨可能以复杂钨络合物的形式迁移,而在中性-中偏酸性流体中,复杂钨络合物的稳定性会随温度的升高而降低,在 350 °C 以上时几乎检测不到复杂钨络合物的信号(Wang et al., 2020a, 2020b)。这些实验结果证实,复杂钨络合物的分解可能是流体中钨卸载的潜在机制,CO₂ 逸出、流体混合及围岩蚀变均可降低钨络合物的稳定性。此外,他们还发现在围岩蚀变过程中,CO₂ 的存在有利于维持流体的 H⁺ 浓度,进而提高流体从围岩中萃取铁、锰的效率,有利于高品位矿化的发生(Wang et al., 2020c)。

2.3 壳幔物质的物理化学性质和相互作用

地球深部物质(矿物、岩石、熔体和流体)在高温高压下的物理化学性质和相互作用是认识和了解地球内部圈层结构、状态和动力学过程的重要参数。通过开展高温高压实验及相关的理论研究,系统测定和查明地球深部物质的物理化学性质和相互作用具有十分重要的意义。近十年来,我国高温高压实验在壳幔物质的物理化学性质和相互作用研究方面取得了重要进展。

2.3.1 壳幔物质的电导和热导性质

(1)岩石圈中高导异常的成因:中国地质大学(武汉)地球深部研究团队利用多面砧大压机对钠长石-石英-水体系、钠长石-石英-盐水及斜长石-盐水体系开展了系统的高温高压电导率测试,建立了 1 GPa 和 800 K 条件下全岩电导率-盐度-流体含量之间的定量关系,对我国青藏高原等地区中-下地壳中出现的高导异常的流体成因进行了定量约束(Guo et al., 2015; Li et al., 2018a)。南京大学杨晓志研究团队发现,富氟的金云母沿特定方向的电导率可以很好地解释大陆岩石圈内出现的高导异常(Li et al., 2016d, 2017b);中国科学技术大学倪怀玮团队利用自己开发的实验方法,系统测定了不同种类熔体和流体在高温高压下的电导率(Ni et al., 2014; Guo et al., 2016a, 2016b, 2017, 2018),查明了熔体和流体电导率随各种物理化学条件的变化规律,建立了熔体电导率定量模型,为揭示长白山天池火山等地区的岩浆房状态以及评估火山喷发前景提供了科学依据。张宝华团队通过高温高压电导率实验,指出含水斜方辉石和绿辉石(Zhang et al., 2012, 2019a)以及颗粒边界碳膜模型(Zhang and Yoshino, 2017)不是上地幔高导异常的合理解释,并在国际上率先建立了剪切变形下部分熔融岩石电导率测量的新方法,提出了剪切变形

下差应力诱发熔体各向异性分布是上地幔高导层形成机制的新认识(Zhang et al., 2014, 2020)。

(2)与俯冲带相关的高导异常的成因:中国科学院大学的研究团队测试了蛇纹石在 3、4 GPa 下脱水前后的电导率(Wang et al., 2017a),结果表明蛇纹石在脱水后电导率可以达到 1 S/m,蛇纹石在不同的地温梯度下脱水的深度与出现高导异常的深度完美耦合,因此在 40~200 km 深度出现的与俯冲带相关的高导异常很可能是由俯冲板块内蛇纹石的脱水造成的。而对于出现在上地幔中更深的、与俯冲带相关的高导异常(250~300 km)可能与多硅白云母有关。中国地质大学(武汉)地球深部研究团队测试了多硅白云母在 2.3~12 GPa 条件下多硅白云母脱水前后的电导率,结果表明多硅白云母脱水后产生的富钾流体使全岩电导率急剧增大 4 个数量级。通过 Cube 模型定量计算,在北菲律宾海以下 250~300 km 深度的高导异常可能是由多硅白云母分解产生的、体积含量不超过 0.9% 富钾流体造成的;而出现在阿根廷中部以下 250~300 km 深度的高导异常可能由体积含量低于 3% 的富钾流体造成(Chen et al., 2018a)。中国科学院地球化学研究所李和平团队通过对绿帘石、角闪石的电导率实验研究,认为绿帘石的脱水可能对解释出现在热俯冲带内、深度为 70~120 km 的高导异常有重要作用,并提出高温高压下角闪石发生的氧化-脱氢反应,释放出氢气而非含水流体,然而脱氢后电导率的增强足以解释俯冲板片与地幔楔界面和大陆中地壳底部的高导异常(Hu et al., 2017a, 2018)。

(3)水在地球和月球熔体中的扩散系数和水扩散机制:水在熔体中的扩散系数是揭示岩浆去气动力学、进而约束岩浆源区水含量的关键参数。熔体中水的不同存在形式(H₂O 和 OH)可能具有不同的活动性,导致其对水扩散的贡献也有所不同。中国科技大学倪怀玮团队实验测定了水在地球和月球玄武质熔体中的扩散系数,发现并量化了 OH 对玄武质熔体水扩散和电导率的影响,进而揭示月幔比地幔中度贫水(Zhang et al., 2017, 2019c)。在查明硅酸盐熔体中水扩散速率和机制的基础上,Ni 和 Zhang(2018)建立了高精度、广适用性的俯冲带钙碱性系列熔体水扩散系数定量模型,为揭示岩浆水含量演化提供了关键依据。

(4)一些常见壳幔矿物在高温高压条件下的热导率和热扩散系数:中国地质大学(武汉)地球深部研究团队在上地幔条件下(14 GPa, 1000 K)测量了绿辉石、硬玉、透辉石的热导率(Wang et al.,

2014),为理解榴辉岩对俯冲板片热结构的影响提供了新认识。中国科学院地球化学研究所苗社强等利用激光闪射法(LFA427)在高温高压下测量了华北克拉通主要类型岩石和矿物的热扩散系数(Miao et al., 2014a, 2014b, 2019),为中国东部岩石圈的热结构和热演化提供了重要约束。中国科学院地球化学所张宝华课题组在多面砧大压机上建立了同时测量矿物岩石热扩散系数和热导率的瞬态平面热源法,目前已取得了花岗岩(Fu et al., 2019)、辉石岩(Ge et al., 2021)、橄榄石、长石、石榴子石等矿物岩石热物理性质测量方面的大量第一手实验数据,发现花岗岩的热物理性质主要受石英含量控制,从矿物热物理角度论证了青藏高原中上地壳存在部分熔融的合理性;同时实验揭示了水能显著降低地幔矿物(特别是橄榄石)的热导率(Zhang et al., 2019b),为精确约束地球以及类地行星内部的热结构提供了重要参数和理论基础。

这些研究成果为壳幔不同深度、不同构造背景下的高导异常的成因提供了多种可能解释机制,为深入了解地球内部物质状态和热结构提供了依据。

2.3.2 壳幔矿物和岩石的流变性质

(1)下地壳麻粒岩的流变和地震活动的相变成因:中国地质大学(武汉)地球深部研究团队深入研究了下地壳麻粒岩的高温高压变形(Wang et al., 2012),他们的实验结果表明,华北克拉通的基性麻粒岩具有较低的流变强度,比上地幔橄榄岩的强度低一个数量级,为经典的大陆岩石圈的果冻三明治强度模型中的弱下地壳和华北克拉通下地壳拆沉作用提供了实验依据。Shi等(2018)进一步的准稳态麻粒岩变形实验研究表明,麻粒岩的榴辉岩化会导致岩石高压脆性破裂,为下地壳地震活动的成因物理机制的合理解释首次提供了实验依据。

(2)地幔过渡带的力学强度:中国地质大学(武汉)地球深部研究团队系统研究了以 Mg_2GeO_4 为相似物的地幔转换带的强度和粘度,他们的实验结果表明地幔转换带相对上地幔可能具有高的力学强度,当俯冲大洋板片中的橄榄石在进入下地幔发生相变的过程中,其力学强度由于联通相变结构可能不会发生大的变化(Zhao et al., 2012; Shi et al., 2015),这些实验结果约束了转换带的粘度变化特征,为俯冲带在转换带发生偏转的形态特征提供了一个合理的解释。

(3)后钙钛矿的塑性变形可导致下地幔D"层剪切波速异常:中国地质大学(武汉)地球深部研究团队率先借助先进的同步辐射径向X衍射技术、激光

加温技术和自动加压装置,对 $(\text{Mg}_{0.75}\text{Fe}_{0.25})\text{SiO}_3$ 在对应D"层温压力条件下的形变过程进行了原位表征,阐明了后钙钛矿在真实的D"层高温高压环境下的主滑移面应该是(001)面(Wu et al., 2017)。此滑移属于后钙钛矿的形变产生而非布里奇曼石到后钙钛矿的相变产生。结合地球动力学模拟,指出此滑移系会造成D"层的剪切波速在水平偏振方向快于垂直偏振方向,大约3.7%的差异。该成果的主要贡献在于揭示了环太平洋边界下D"层剪切波速异常的机理。

上述研究成果为定量揭示由物质成分和热结构控制的地球不同圈层流变学性质的三维结构(横向不均一性和纵向分层性)和地震活动成因物理机制提供了重要基础数据。

2.3.3 壳幔相互作用的岩石学和地球化学过程

壳幔相互作用是重要的地球动力学过程,决定了地壳和地幔之间物质与能量的交换,它发生在俯冲带、大陆内部造山带、洋中脊等多种活动构造环境中,是全球范围岩浆活动、构造演化和成矿作用的重要环节。

(1)富硅熔体与橄榄岩反应实验揭示地幔不均一性成因和克拉通破坏机制:中国地质大学(武汉)地球深部研究团队系统研究了榴辉岩熔体与橄榄岩在等静压和差异应力条件下反应的高温高压实验。研究表明,实验产物具有与汉诺坝地区幔源复合捕虏体相似的结构,反应熔体与华北克拉通中生代高镁闪长岩具有相似的成分(Wang et al., 2010)。Zhang等(2012)发现在等静压力条件下,无水榴辉岩部分熔融的熔体对橄榄岩的侵蚀能力较弱;在差应力存在的条件下,榴辉岩熔体对橄榄岩的侵蚀能力增强。提出华北克拉通的减薄是长期小规模拆沉作用的结果,拆沉作用导致的熔体-橄榄岩反应和纵向构造变形加快了再循环熔体对残留岩石圈地幔的侵蚀,为拆沉作用导致的华北克拉通破坏物理机制提供了实验角度的约束。吉林大学研究团队系统研究了熔体主量元素成分对壳源熔体-橄榄岩反应过程和结果的影响(Wang et al., 2013a),结果发现熔体-橄榄岩反应的产物受控于反应熔体的液相线矿物组成。若反应熔体的液相线矿物为斜方辉石($\pm$ 橄榄石),则反应形成方辉橄榄岩;若反应熔体的液相线矿物为橄榄石,则反应形成纯橄岩。通过实验结果与华北克拉通地幔捕虏体的对比研究,为华北克拉通岩石圈地幔受再循环环壳熔体改造的时间和空间范围提供了实验约束。Yu等(2014)和Wang和Tang(2013)开展

的角闪榴辉岩和英云闪长岩熔体与地幔橄榄石反应的实验,证实了富硅熔体与橄榄岩反应由橄榄石的溶解和新矿物相的结晶主导,反应使英云闪长质熔体的 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 升高,说明拆沉的地壳物质部分熔融产生的熔体与地幔橄榄石反应,为克拉通内部高镁安山质岩浆的成因提供了实验依据。吉林大学研究团队系统研究了熔体中水对熔-岩反应动力学的影响(Wang et al., 2016a),他们的实验结果表明,含水熔体-橄榄岩反应可以形成高孔隙度斜方辉石岩反应带,并将初始二辉橄榄岩转化为贫斜方辉石的方辉橄榄岩甚至纯橄岩(Wang et al., 2016a);他们提出水的存在提高橄榄岩的部分熔融程度,辉石优先熔融形成的部分熔体与反应熔体混合,使后者 SiO_2 过饱和,该混合熔体与橄榄岩反应形成斜方辉石岩;指出地幔岩石中斜方辉石岩的存在是含水壳源熔体运移和交代的重要标志。Wang 等(2020a)发现地幔橄榄岩熔融与否在很大程度上影响榴辉岩熔体-橄榄岩反应的机制、速率和结果。当橄榄岩处于亚固相时,反应具有较低的速率,形成富含石榴石的岩性;当橄榄岩部分熔融时,反应速率明显提高,形成富含斜方辉石的岩性。提出不同类型的熔体-橄榄岩反应对岩石圈地幔造成不同的岩石学效应和不同的熔体成分变异趋势。

(2)俯冲沉积物与橄榄岩反应实验揭示大陆俯冲带后碰撞高钾岩浆的成因:中国地质大学(武汉)地球深部研究团队通过沉积物与橄榄岩反应的高温高压实验,发现实验熔体与东地中海地区和中国东北富钾岩石具有相似的微量地球化学特征,据此提出受到俯冲沉积物交代的地幔可能是具有富集属性岩浆的源区(Wang and Foley, 2018; Zhang et al., 2019d)。Gao 等(2019)发现,花岗质岩浆与橄榄岩反应的过程分为两个阶段:第一阶段反应消耗橄榄石和反应熔体生成斜方辉石和金云母,第二阶段使反应产物重新熔融形成富钾富硅的熔体,熔体与 Variscan 造山带后碰撞高钾岩浆岩具有相似的地球化学特征。Wang 等(2019c)通过对比角闪石的部分熔融熔体和钾玄岩与石榴角闪岩部分熔融的熔体,发现 20% 的地幔钾玄岩的加入可以提供下地壳部分熔融所需的热,以及埃达克质岩浆中的钾和不相容元素。这些研究成果为大陆俯冲带后碰撞高钾岩浆的成因提供了重要的实验约束。

3 实验平台和技术进展

先进的高温高压实验模拟平台和技术对推动地球深部物质属性与过程的深入研究起到了至关

重要的作用。过去十年,国内的实验岩石学与矿物学高温高压实验平台建设发展迅速,许多大学和科研院所先后建立了高水平的高温高压实验室,主要包括中国科学院地球化学研究所、中国地质大学(武汉)、吉林大学、中国科学院广州地球化学研究所、中国科学技术大学、南京大学、北京大学、北京高压科学研究中心、中国地震局地质所等。

中国科学院地球化学研究所拥有铰链式 600 吨和 1400 吨、Kawai 型 1000 吨、D-DIA 型 2000 吨和 DIA 型 YJ-3000 吨多面砧压机, LPC 250-300/50 型活塞圆筒压机,在地球深部物质物性研究方面具有传统优势。

中国地质大学(武汉)地球深部研究实验室拥有 2 台 Walker 型 1000 吨多面砧压机、1 台 5000 吨多面砧压机、30 多套各式金刚石压腔、Quick Press 活塞圆筒压机、以及自主研发的 2 台 5 GPa 围压 Griggs 型高温高压流变仪和 1 台 3 GPa 活塞圆筒压机,在大压机和流变仪实验技术研发上具有领先优势,以地幔岩实验岩石学、壳幔矿物高压流变学实验研究为主要特色。

吉林大学拥有完整的从高温高压合成到高温高压原位物性探测的实验装备。其中大型压机包括德国 Max Voggenteiter 1000 吨德国多面砧大腔体压机(配备自动控压和高压电学、超声测试系统)、六面顶液压机、铰链式六面顶液压机、六面顶 Walker 型压机、Cubic 型多面砧压机、Quick Press 活塞圆筒压机和高压水热装置。基于金刚石对顶砧的高压原位物性测量装置有 X 光、Raman、霍尔效应、电导率、激光加温、荧光、红外光谱、热导率等系统,可以实现从结构分析到光、电、热等输运特性以及光学和热电性质等全方位的高压原位物性探测,形成了以熔体-橄榄岩反应动力学和地球深部物质合成与物性研究为主要特色和优势。

中国科学院广州地球化学研究所拥有分别由美国 Depth of the Earth 公司生产的 Quick Press 和 Rockland Research 公司生产的两种不同类型的活塞圆筒压机和多台冷封式高压釜,最近又引进了多台 1000 吨和 2500 吨多面砧压机,以微量元素分配行为研究为主要特色。

中国科学技术大学高温高压岩石学实验室拥有 3 台德国产 Voggenteiter LPC250 活塞圆筒压机、3 台快速淬火冷封式高压釜和 10 台各式水热金刚石压腔,在熔体和流体的物理化学性质研究方面特色鲜明。

南京大学拥有 2 台可自动控压的德国产

Voggenreiter LPC250 活塞圆筒压机和 5 台快速淬火冷封式高压釜,在矿物物性和挥发性元素溶解度等方向具有研究优势。

北京大学装备了六面顶压机和 Quick Press 活塞圆筒压机,在矿物晶体结构、热弹性参数和相平衡研究方面取得了一系列成果。

北京高压科学研究中心拥有 1 台德国产 Voggenreiter Kawai 型 1500 吨多面砧压机,1 台德国产 Voggenreiter LPC250 活塞圆筒压机,以及 3 套自主研发的激光加温系统和近千套激光加温金刚石压腔,在研发金刚石压腔加热和超高压技术上具有领先优势,以深俯冲物质的物理化学属性研究为主要特色。

此外,浙江大学依托“超重力离心模拟与实验装置”国家重大科技基础设施建设,正在筹建具有自己鲜明特色的融合超重力实验装置的高温高压实验平台。中国科学院海洋研究所、自然资源部第二海洋研究所、西北大学也先后装备了 1000 吨多面砧压机。中国地质大学(北京)正在筹建岩浆系统成岩成矿过程的高温高压实验室,目前已拥有可控氧逸度的高温管式炉,即将装备 5 台 MHC 冷封式高压釜。高温高压实验岩石学/矿物学的平台建设在国内正呈现前所未有的大发展景象。

4 学科未来发展方向和趋势

过去十年,我国实验地球科学的研究成果逐年增加,研究方向也迅速拓展,在应用大腔体压机测量矿物岩石的热学、电学、弹性、相变、扩散等物理性质,应用金刚石压砧测量高压布里渊散射和红外谱学、电学、状态方程,以及应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。该学科目前存在以下亟需发展的问题:首先,我国还缺乏有国际影响力的稳定学术团队,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,在仪器设备研制和实验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撑,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。

当前,许多国家都开展了大量的地球物理深部探测,极大促进了地球深部物质研究的发展。了解不同温度、压力、应力状态、流体活动等条件下地球深部物质物理化学性质及其变化规律,是进一步认识各种地质过程和动力学成因的先决条件,更是解释地球物理探测新发现(如各种反射层构造、流变分层、高导低速体、地震波各向异性等)和地球物理反演模型(如密度、波速、泊松比、导电率、流体逸度等)的重要基础。地球物理深部探测已经积累了大量科学问题,急需地球深部物质研究的支持,包括:大陆形成与演化过程中物质性质的变化、Moho 面的组成与特殊性质、岩石圈流变状态、软流圈熔融条件、地幔物质对流特征、地球内部物质运移机理、地球内部化学动力学过程、流体运动、壳-幔和核-幔边界物质运移和相互作用、诱发地震与火山喷发的过程和机理、成矿元素的迁移、富集和沉淀等等。以科学问题为导向的高温高压实验地球科学研究,对解决深部地质、成矿作用与地球动力学所面临的这些前沿问题是十分必要和重要的。实验地球科学的未来发展方向主要包括:①地球深部(从地幔到地核)物质结构、状态和物理化学性质;②深部岩浆作用以及元素迁移和富集的机制;③地球物理探测数据的综合解释、深部过程与浅表响应、矿产资源寻找以及自然灾害机理探索的理论和实验约束;④地球早期演化过程的理论和实验约束。

当前实验地球科学在技术上主要展现出四方面的发展趋势: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、更贴近实际的体系,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和超重力条件下的多面砧大压机。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,在大压机上开展原位测量仍有待进一步发展。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。随着机器学习等计算技术的发展,实验和计算两种技术相互结合,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。

致谢: 本文成文过程得到金振民院士的指导,郭新转、李元、刘锦、王春光、王小林、巫翔、杨燕、叶宇、张艳飞、高春晓等人提供了宝贵素材和资料,在此一并表示衷心感谢!

参考文献 (References):

Chen S B, Guo X Z, Yoshino T, Jin Z M, Li P. 2018a. Dehydration of phengite inferred by electrical conductivity measurements: Implications for the high conductivity anomalies relevant to the subduction zones. *Geology*, 46(1): 11–14

Chen W, Xiong X L, Wang J T, Xue S, Li L, Liu X C, Ding X, Song M S. 2018b. TiO₂ solubility and Nb and Ta partitioning in rutile-silica-rich supercritical fluid systems: Implications for subduction zone processes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(6): 4765–4782

Fang J, Chou I M, Chen Y. 2018. Quantitative Raman spectroscopic study of the H₂-CH₄ gaseous system. *Journal of Raman Spectroscopy*, 49(4): 710–720

Feng L, Li Y. 2019. Comparative partitioning of Re and Mo between sulfide phases and silicate melt and implications for the behavior of Re during magmatic processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 517: 14–25

Fu H F, Zhang B H, Ge J H, Xiong Z L, Zhai S M, Shan S M, Li H P. 2019. Thermal diffusivity and thermal conductivity of granitoids at 283–988 K and 0.3–1.5 GPa. *American Mineralogist*, 104(11): 1533–1545

Gao M D, Xu H J, Zhang J F, Foley S F. 2019. Experimental interaction of granitic melt and peridotite at 1.5 GPa: Implications for the origin of post-collisional K-rich magmatism in continental subduction zones. *Lithos*, 350–351: 105241

Ge J H, Zhang B H, Xiong Z L, He L F, Li H P. 2021. Thermal properties of harzburgite and dunite at 0.8–3 GPa and 300–823 K and

implications for the thermal evolution of Tibet. *Geoscience Frontiers*, 12(2): 947–956

Guo X Z, Yoshino T, Shimojuku A. 2015. Electrical conductivity of albite-(quartz)-water and albite-water-NaCl systems and its implication to the high conductivity anomalies in the continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 412: 1–9

Guo X, Chen Q, Ni H W. 2016a. Electrical conductivity of hydrous silicate melts and aqueous fluids: Measurement and applications. *Science China Earth Sciences*, 59(5): 889–900

Guo X, Li B, Ni H W, Mao Z. 2017. Electrical conductivity of hydrous andesitic melts pertinent to subduction zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(3): 1777–1788

Guo X, Zhang L, Behrens H, Ni H W. 2016b. Probing the status of felsic magma reservoirs: Constraints from the *P-T-H₂O* dependences of electrical conductivity of rhyolitic melt. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 54–62

Guo X, Zhang L, Su X, Mao Z, Gao X Y, Yang X Z, Ni H W. 2018. Melting inside the Tibetan crust? constraint from electrical conductivity of peraluminous granitic melt. *Geophysical Research Letters*, 45(9): 3906–3913

Hou T, Charlier B, Holtz F, Veksler I, Zhang Z C, Thomas R, Namur O. 2018. Immiscible hydrous Fe-Ca-P melt and the origin of iron oxide-apatite ore deposits. *Nature Communications*, 9(1): 1415–

Hou T, Charlier B, Namur O, Schütte P, Schwarz-Schampera U, Zhang Z C, Holtz F. 2017. Experimental study of liquid immiscibility in the Kiruna-type Vergenoeg iron-fluorine deposit, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 203: 303–322

Hou T, Veksler I V. 2015. Experimental confirmation of high-temperature silicate liquid immiscibility in multicomponent ferrobasic systems. *American Mineralogist*, 100(5–6): 1304–1307

Hou T, Zhang Z C, Encarnacion J, Santosh M, Sun Y L. 2013. The role of recycled oceanic crust in magmatism and metallogeny: Os-Sr-Nd isotopes, U-Pb geochronology and geochemistry of picritic dykes in the Panzhihua giant Fe-Ti oxide deposit, central Emeishan large igneous province, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(4): 805–822

Hou T, Zhang Z C, Ye X R, Encarnacion J, Reichow M K. 2011. Noble gas isotopic systematics of Fe-Ti-V oxide ore-related mafic-ultramafic layered intrusions in the Panxi area, China: The role of recycled oceanic crust in their petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(22): 6727–6741

Hu H Y, Dai L D, Li H P, Hui K S, Sun W Q. 2017a. Influence of dehydration on the electrical conductivity of epidote and implications for high-conductivity anomalies in subduction zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(4): 2751–2762

Hu H Y, Dai L D, Li H P, Sun W Q, Li B S. 2018. Effect of dehydrogenation on the electrical conductivity of Fe-bearing amphibole: Implications for high conductivity anomalies in subduction zones and continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 498: 27–37

Hu Q Y, Kim D Y, Liu J, Meng Y, Yang L X, Zhang D Z, Mao W L, Mao H K. 2017b. Dehydrogenation of goethite in Earth’s deep lower mantle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(7): 1498–1501

- Hu Q Y, Kim D Y, Yang W G, Yang L X, Meng Y, Zhang L, Mao H K. 2016. FeO_2 and FeOOH under deep lower-mantle conditions and Earth's oxygen-hydrogen cycles. *Nature*, 534(7606): 241–244
- Li L, Xiong X L, Liu X C. 2017c. Nb/Ta fractionation by amphibole in hydrous basaltic systems: Implications for arc magma evolution and continental crust formation. *Journal of Petrology*, 58(1): 3–28
- Li P, Guo X Z, Chen S B, Wang C, Yang J L, Zhou X F. 2018a. Electrical conductivity of the plagioclase-NaCl-water system and its implication for the high conductivity anomalies in the mid-lower crust of Tibet Plateau. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(2): 16
- Li X Y, Mao Z, Sun N Y, Liao Y F, Zhai S M, Wang Y, Ni H W, Wang J Y, Tkachev S N, Lin J F. 2016a. Elasticity of single-crystal superhydrous phase B at simultaneous high pressure-temperature conditions. *Geophysical Research Letters*, 43(16): 8458–8465
- Li X Y, Zhang Z G, Lin J F, Ni H W, Prakapenka V B, Mao Z. 2018b. New high-pressure phase of CaCO_3 at the topmost lower mantle: Implication for the deep-mantle carbon transportation. *Geophysical Research Letters*, 45(3): 1355–1360
- Li Y, Dasgupta R, Tsuno K. 2015a. The effects of sulfur, silicon, water, and oxygen fugacity on carbon solubility and partitioning in Fe-rich alloy and silicate melt systems at 3 GPa and 1600 °C: Implications for core-mantle differentiation and degassing of magma oceans and reduced planetary mantles. *Earth and Planetary Science Letters*, 415: 54–66
- Li Y, Dasgupta R, Tsuno K. 2017a. Carbon contents in reduced basalts at graphite saturation: Implications for the degassing of Mars, Mercury, and the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(6): 1300–1320
- Li Y, Dasgupta R, Tsuno K, Monteleone B, Shimizu N. 2016b. Carbon and sulfur budget of the silicate Earth explained by accretion of differentiated planetary embryos. *Nature Geoscience*, 9(10): 781–785
- Li Y, Feng L, Kiseeva E S, Gao Z H, Guo H H, Du Z X, Wang F Y, Shi L L. 2019. An essential role for sulfur in sulfide-silicate melt partitioning of gold and magmatic gold transport at subduction settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 528: 115850
- Li Y, Huang R F, Wiedenbeck M, Keppler H. 2015b. Nitrogen distribution between aqueous fluids and silicate melts. *Earth and Planetary Science Letters*, 411: 218–228
- Li Y, Jiang H T, Yang X Z. 2017b. Fluorine follows water: Effect on electrical conductivity of silicate minerals by experimental constraints from phlogopite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 217: 16–27
- Li Y, Keppler H. 2014. Nitrogen speciation in mantle and crustal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 129: 13–32
- Li Y, Marty B, Shcheka S, Zimmermann L, Keppler H. 2016c. Nitrogen isotope fractionation during terrestrial core-mantle separation. *Geochemical Perspectives Letters*, 2(2): 138–147
- Li Y, Wiedenbeck M, Shcheka S, Keppler H. 2013. Nitrogen solubility in upper mantle minerals. *Earth and Planetary Science Letters*, 377–378: 311–323
- Li Y, Yang X Z, Yu J H, Cai Y F. 2016d. Unusually high electrical conductivity of phlogopite: The possible role of fluorine and geophysical implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(4): 37
- Li Y. 2017. Immiscible C-H-O fluids formed at subduction zone conditions. *Geochemical Perspectives Letters*, 3(2): 12–21
- Liu D, Wang S, Smyth J R, Zhang J F, Wang X, Zhu Z, Ye Y. 2019c. In situ infrared spectra for hydrous forsterite up to 1243 K: Hydration effect on thermodynamic properties. *Minerals*, 9(9): 512
- Liu D, Pang Y W, Ye Y, Jin Z M, Smyth J R, Yang Y, Zhang Z M, Wang Z P. 2019b. In-situ high-temperature vibrational spectra for synthetic and natural clinohumite: Implications for dense hydrous magnesium silicates in subduction zones. *American Mineralogist*, 104(1): 53–63
- Liu J, Hu Q Y, Bi W L, Yang L X, Xiao Y M, Chow P, Meng Y, Prakapenka V B, Mao H K, Mao W L. 2019a. Altered chemistry of oxygen and iron under deep Earth conditions. *Nature Communications*, 10(1): 153
- Liu J, Hu Q Y, Kim D Y, Wu Z Q, Wang W Z, Xiao Y M, Chow P, Meng Y, Prakapenka V B, Mao H K, Mao W L. 2017. Hydrogen-bearing iron peroxide and the origin of ultralow-velocity zones. *Nature*, 551(7681): 494–497
- Liu X C, Xiong X L, Audétat A, Li Y, Song M S, Li L, Sun W D, Ding X. 2014. Partitioning of copper between olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, spinel, garnet and silicate melts at upper mantle conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 125: 1–22
- Liu X C, Xiong X L, Audétat A, Li Y. 2015. Partitioning of Cu between mafic minerals, Fe-Ti oxides and intermediate to felsic melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 151: 86–102
- Liu X C, Xiong X L. 2018. Copper. In: White W M, ed. *Encyclopedia of Geochemistry*. Cham: Springer, 303–305
- Mao H K, Hu Q Y, Yang L X, Liu J, Kim D Y, Meng Y, Zhang L, Prakapenka V B, Yang W G, Mao W L. 2017. When water meets iron at Earth's core-mantle boundary. *National Science Review*, 4(6): 870–878
- Mao Z, Fan D W, Lin J F, Yang J, Tkachev S N, Zhuravlev K, Prakapenka V B. 2015. Elasticity of single-crystal olivine at high pressures and temperatures. *Earth and Planetary Science Letters*, 426: 204–215
- Miao S Q, Li H P, Chen G. 2014a. The temperature dependence of thermal conductivity for lherzolites from the North China Craton and the associated constraints on the thermodynamic thickness of the lithosphere. *Geophysical Journal International*, 197(2): 900–909
- Miao S Q, Li H P, Chen G. 2014b. Temperature dependence of thermal diffusivity, specific heat capacity, and thermal conductivity for several types of rocks. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115(2): 1057–1063
- Miao S Q, Zhou Y S, Li H P. 2019. Thermal diffusivity of lherzolite at high Pressures and high temperatures using pulse method. *Journal of Earth Science*, 30(1): 218–222
- Ni H W, Chen Q, Keppler H. 2014. Electrical conductivity measurements of aqueous fluids under pressure with a hydrothermal diamond anvil cell. *Review of Scientific Instruments*, 85(11): 115107
- Ni H W, Shi H F, Zhang L, Li W C, Guo X, Liang T. 2018. Cu diffusivity in granitic melts with application to the formation of porphyry

- Cu deposits. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(6): 50
- Ni H W, Zhang L. 2018. A general model of water diffusivity in calc-alkaline silicate melts and glasses. *Chemical Geology*, 478: 60–68
- Qiu Y, Wang X L, Liu X, Cao J, Liu Y F, Xi B B, Gao W L. 2020b. In situ Raman spectroscopic quantification of CH_4 - CO_2 mixture: Application to fluid inclusions hosted in quartz veins from the Longmaxi Formation shales in Sichuan Basin, southwestern China. *Petroleum Science*, 17(1): 23–25
- Qiu Y, Yang Y X, Wang X L, Wan Y, Hu W X, Lu J J, Tao G L, Li Z, Meng F W. 2020a. In situ Raman spectroscopic quantification of aqueous sulfate: Experimental calibration and application to natural fluid inclusions. *Chemical Geology*, 533(5): 119447
- Shi F, Wang Y B, Yu T, Zhu L P, Zhang J F, Wen J G, Gasc J, Incel S, Schubnel A, Li Z Y, Chen T, Liu W L, Prakapenka V, Jin Z M. 2018. Lower-crustal earthquakes in southern Tibet are linked to eclogitization of dry metastable granulite. *Nature Communications*, 9(1): 3483
- Shi F, Zhang J F, Xia G, Jin Z, Green II H W. 2015. Rheology of Mg_2GeO_4 olivine and spinel harzburgite: Implications for Earth's mantle transition zone. *Geophysical Research Letters*, 42(7): 2212–2218
- Sun Z X, Xiong X L, Wang J T, Liu X C, Li L, Ruan M F, Zhang L, Takahashi E. 2020. Sulfur abundance and heterogeneity in the MORB mantle estimated by copper partitioning and sulfur solubility modelling. *Earth and Planetary Science Letters*, 538: 116169
- Wan Y, Wang X L, Hu W X, Chou I M. 2015. Raman spectroscopic observations of the ion association between Mg^{2+} and SO_4^{2-} in MgSO_4 -Saturated droplets at temperatures of $\leq 380^\circ\text{C}$. *The Journal of Physical Chemistry A*, 119(34): 9027–9036
- Wan Y, Wang X L, Hu W X, Chou I M, Wang X Y, Chen Y, Xu Z M. 2017. *In situ* optical and Raman spectroscopic observations of the effects of pressure and fluid composition on liquid-liquid phase separation in aqueous cadmium sulfate solutions ($\leq 400^\circ\text{C}$, 50 MPa) with geological and geochemical implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 211: 133–152
- Wang C G, Liang Y, Dygert N, Xu W L. 2016a. Formation of orthopyroxene by reaction between peridotite and hydrous basaltic melt: An experimental study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(8–9): 77
- Wang C G, Liang Y, Xu W L, Dygert N. 2013a. Effect of melt composition on basalt and peridotite interaction: Laboratory dissolution experiments with applications to mineral compositional variations in mantle xenoliths from the North China Craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(5): 1469–1488
- Wang C G, Lo Cascio M, Liang Y, Xu W L. 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
- Wang C, Jin Z M, Gao S, Zhang J F, Zheng S. 2010. Eclogite-melt/peridotite reaction: Experimental constraints on the destruction mechanism of the North China Craton. *Science China Earth Science*, 53(6): 797–809
- Wang C, Yoneda A, Osako M, Ito E, Yoshino T, Jin Z M. 2014. Measurement of thermal conductivity of omphacite, jadeite, and diopside up to 14 GPa and 1000 K: Implication for the role of eclogite in subduction slab. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(8): 6277–6287
- Wang D J, Liu X W, Liu T, Shen K W, Welch D O, Li B S. 2017a. Constraints from the dehydration of antigorite on high-conductivity anomalies in subduction zones. *Scientific Reports*, 7(1): 16893
- Wang J T, Xiong X L, Takahashi E, Zhang L, Li L, Liu X C. 2019a. Oxidation State of Arc Mantle Revealed by Partitioning of V, Sc, and Ti Between Mantle Minerals and Basaltic Melts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5): 4617–4638
- Wang M L, Tang H F. 2013. Reaction experiments between tonalitic melt and mantle olivine and their implications for genesis of high-Mg andesites within cratons. *Science China: Earth Sciences*, 56(11): 1918–1925
- Wang W J, Caumon M C, Tarantola A, Pironon J, Lu W J, Huang Y H. 2019b. Raman spectroscopic densimeter for pure CO_2 and CO_2 - H_2O - NaCl fluid systems over a wide P - T range up to 360 °C and 50 MPa. *Chemical Geology*, 528: 119281
- Wang X L, Chou I M, Hu W X, Burruss R C, Sun Q, Song Y C. 2011. Raman spectroscopic measurements of CO_2 density: Experimental calibration with high-pressure optical cell (HPOC) and fused silica capillary capsule (FSCC) with application to fluid inclusion observations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(4): 4080–4093
- Wang X L, Chou I M, Hu W X, Burruss R C. 2013b. *In situ* observations of liquid-liquid phase separation in aqueous MgSO_4 solutions: Geological and geochemical implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 103: 1–10
- Wang X L, Hu W X, Chou I M. 2013c. Raman spectroscopic characterization on the OH stretching bands in NaCl - Na_2CO_3 - Na_2SO_4 - CO_2 - H_2O systems: Implications for the measurement of chloride concentrations in fluid inclusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 132: 111–119
- Wang X L, Qiu Y, Chou I M, Zhang R Q, Li G L, Zhong R C. 2020b. Effects of pH and salinity on the hydrothermal transport of tungsten: Insights from *in situ* Raman spectroscopic characterization of K_2WO_4 - NaCl - HCl - CO_2 solutions at temperatures up to 400 °C. *Geofluids*, 2020: 2978984
- Wang X L, Qiu Y, Lu J J, Chou I M, Zhang W L, Li G L, Hu W X, Li Z, Zhong R C. 2020c. *In situ* Raman spectroscopic investigation of the hydrothermal speciation of tungsten: Implications for the ore-forming process. *Chemical Geology*, 532: 119299
- Wang X L, Wan Y, Hu W X, Chou I M, Cai S Y, Lin N, Zhu Q, Li Z. 2016b. Visual and *in situ* Raman spectroscopic observations of the liquid-liquid immiscibility in aqueous uranyl sulfate solutions at temperatures up to 420 °C. *The Journal of Supercritical Fluids*, 112: 95–102
- Wang X L, Wan Y, Hu W X, Chou I M, Cao J, Wang X Y, Wang M, Li Z. 2016c. *In situ* observations of liquid-liquid phase separation in aqueous ZnSO_4 solutions at temperatures up to 400 °C: Implications for Zn^{2+} - SO_4^{2-} association and evolution of submarine hydrothermal

- fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 181: 126–143
- Wang X L, Wang X Y, Chou I M, Hu W X, Wan Y, Li Z. 2017b. Properties of lithium under hydrothermal conditions revealed by in situ Raman spectroscopic characterization of $\text{Li}_2\text{O}-\text{SO}_3-\text{H}_2\text{O}(\text{D}_2\text{O})$ systems at temperatures up to 420 °C. *Chemical Geology*, 451: 104–115
- Wang X, Zhang J F, Rushmer T, Adam J, Turner S, Xu W C. 2019c. Adakite-like potassic magmatism and crust-mantle interaction in a postcollisional setting: An experimental study of melting beneath the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12): 12782–12798
- Wang Y F, Zhang J F, Jin Z M, Green II H W. 2012. Mafic granulite rheology: Implications for a weak continental lower crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 353–354: 99–107
- Wang Y, Foley S F. 2018. Hybridization melting between continent-derived sediment and depleted peridotite in subduction zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(5): 3414–3429
- Wu X, Lin J F, Kaercher P, Mao Z, Liu J, Wenk H R, Prakapenka V B. 2017. Seismic anisotropy of the D" layer induced by (001) deformation of post-perovskite. *Nature Communications*, 8(1): 14669
- Xiong X L, Keppler H, Audétat A, Ni H W, Sun W D, Li Y. 2011. Partitioning of Nb and Ta between rutile and felsic melt and the fractionation of Nb/Ta during partial melting of hydrous metabasalt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(7): 1673–1692
- Yang X Z. 2015. OH solubility in olivine in the peridotite-COH system under reducing conditions and implications for water storage and hydrous melting in the reducing upper mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 432: 199–209
- Yang X Z, Keppler H, Li Y. 2016. Molecular hydrogen in mantle minerals. *Geochemical Perspectives Letters*, 2(2): 160–168
- Yang X Z, Liu D and Xia Q K. 2014. CO_2 -induced small water solubility in olivine and implications for properties of the shallow mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 37–47
- Yang Y, Ingrin J, Xia Q K, Liu W D. 2019a. Nature of hydrogen defects in clinopyroxenes from room temperature up to 1000 °C: Implication for the preservation of hydrogen in the upper mantle and impact on electrical conductivity. *American Mineralogist*, 104(1): 79–93
- Yang Y, Liu W D, Qi Z M, Wang Z P, Smyth J R, Xia Q K. 2019b. Re-configuration and interaction of hydrogen sites in olivine at high temperature and high pressure. *American Mineralogist*, 104(6): 878–889
- Yu Y, Xu W L, Wang C G. 2014. Experimental studies of melt-peridotite reactions at 1–2 GPa and 1250–1400 °C and their implications for transforming the nature of lithospheric mantle and for high-Mg signatures in adakitic rocks. *Science China: Earth Sciences*, 57(3): 415–427
- Zhang B H, Ge J H, Xiong Z L, Zhai S M. 2019a. Effect of water on the thermal properties of olivine with implications for lunar internal temperature. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(12): 3469–3481
- Zhang B H, Yoshino T. 2017. Effect of graphite on the electrical conductivity of the lithospheric mantle. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 18(1): 23–40
- Zhang B H, Yoshino T. 2020. Temperature-enhanced electrical conductivity anisotropy in partially molten peridotite under shear deformation. *Earth and Planetary Science Letters*, 530, 115922
- Zhang B H, Yoshino T, Yamazaki D, Manthilake G, Katsura T. 2014. Electrical conductivity anisotropy in partially molten peridotite under shear deformation. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 98–109
- Zhang B H, Yoshino T, Zhao C C. 2019b. The effect of water on Fe-Mg interdiffusion rates in ringwoodite and implications for the electrical conductivity in the mantle transition zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(3): 2510–2524
- Zhang J F, Wang C, Wang Y F. 2012. Experimental constraints on the destruction mechanism of the north china craton. *Lithos*, 149: 91–99
- Zhang L, Guo X, Li W C, Ding J L, Zhou D Y, Zhang L M, Ni H W. 2019c. Reassessment of pre-eruptive water content of lunar volcanic glass based on new data of water diffusivity. *Earth and Planetary Science Letters*, 522: 40–47
- Zhang L, Guo X, Wang Q X, Ding J L, Ni H W. 2017. Diffusion of hydrous species in model basaltic melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 215: 377–386
- Zhang L, Yuan H S, Meng Y, Mao H K. 2018a. Discovery of a hexagonal ultradense hydrous phase in (Fe, Al)OOH. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(12): 2908–2911
- Zhang P P, Zhang L, Wang Z P, Li W C, Guo X, Ni H W. 2018b. Diffusion of molybdenum and tungsten in anhydrous and hydrous granitic melts. *American Mineralogist*, 103(12): 1966–1974
- Zhang Y F, Wang C, Zhu L Y, Jin Z M, Li W. 2019d. Partial melting of mixed sediment-peridotite mantle source and its implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(7): 6490–6503
- Zhang Y S, Hou T, Veksler I V, Leshner C E, Namur O. 2018c. Phase equilibria and geochemical constraints on the petrogenesis of high-Ti picrite from the Paleogene East Greenland flood basalt province. *Lithos*, 300–301: 20–32
- Zhao S, Jin Z, Zhang J, Xu H, Xia G, Green II H W. 2012. Does subducting lithosphere weaken as it enters the lower mantle? *Geophysical Research Letters*, 39(10): L10311
- Zhu X, Guo X Z, Smyth J R, Ye Y, Wang X, Liu D. 2019. High-temperature vibrational spectra between $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and $\text{Mg}(\text{OD})_2$: Anharmonic contribution to thermodynamics and D/H fractionation for brucite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(8): 8267–8280