

杨帆,孙凤霞,刘轶男,等,2022. 地幔流体及其在地震孕育中的作用. 中国地震,38(3):432~445.

# 地幔流体及其在地震孕育中的作用

杨帆<sup>1)</sup> 孙凤霞<sup>2,3)</sup> 刘轶男<sup>4)</sup> 杜建国<sup>2,3)</sup>

1) 中国地震局第二监测中心,西安 710054

2) 高压物理与地震科学联合实验室,中国地震局地震预测重点实验室,北京 100036

3) 中国地质大学(北京),地球科学与资源学院,北京 100083

4) 吉林丰满地震台,吉林吉林 132108

**摘要** 依据地球物理宏观资料、行星化学和地球化学微观分析以及高温高压实验结果,阐明了地幔中存在丰富的流体,扼要介绍了若干流体引发地震的假说,简述了隐爆产生地震的机制。地幔矿物流体包裹体、高温高压相含水硅酸盐矿物与地球物理探测资料表明,整个地幔内普遍存在高能密流体,地幔过渡带和 D"层是流体富集的地带,地幔中存在的总水量比海水高出几个数量级。地幔高能密流体流动产生热对流,造成了固体地球内温度、电导率、地震波速度以及地球化学组成的不均一性。高能地幔流体向外逃逸,不仅改变了壳幔岩石的物理和化学性质,且为岩浆形成和地震孕育提供了能量。流体在地震孕育中的作用包括两个方面:降低断层带摩擦力以及岩石强度触发地震和流体爆炸或相变产生地震。流体爆炸产生地震是地核与下地幔流体以“运移—局部聚集—爆炸的幕式循环”反复进行,产生不同震源深度、不同震级的各类地震。然而,地幔流体的组成、行为及其在孕震过程中的作用机制还需深入研究。

**关键词:** 地幔流体 地震 流体包裹体 地幔矿物 高温高压实验

[文章编号] 1001-4683(2022)03-0432-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

在地球演化过程中,流体起着重要作用,同时流体也经历了各种各样的变化。固体地球实际上是个富含流体的体系,流体参与了从内生到外生、从无机到有机的所有地质过程。因此,流体与地震活动的关系也越来越受到重视。人们对于地壳浅层内的流体有了比较清晰的认识,但对于上地壳以下流体的赋存形式、空间分布和总质量还在探索中,近年来相关研究也取得了一些新的进展(Wallace, 2005; Hirschmann et al, 2012; Pearson et al, 2014; Zhang, 2014; Litasov et al, 2016; 杜乐天, 2017; Houle et al, 2017; 杜建国等, 2018a; Matjuschkin et al, 2019; Frezzotti, 2019)。这些资料表明地幔中存在大量流体,深部流体直接影响地震活动(杜

[收稿日期] 2021-03-09 [修定日期] 2021-09-25

[项目类别] 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2019 IEF0502)、高压物理与地震科学联合实验室基金(2019 HPPES08)、国家自然科学基金(41373059)共同资助

[作者简介] 杨帆,男,1992年生,工程师,主要从事构造地质等研究。E-mail: 550542986@qq.com

杜建国,通讯作者,男,1956年生,研究员,主要从事地球化学、岩石物理、地震地质等研究。

E-mail: jiangquodu@hotmail.com

乐天,2017;Du et al,2021a)。行星化学和地球化学方法、地球物理探测、高温高压实验是揭示地球深部物质组成、结构、物理性质和动力学过程的有效手段。地幔和地核可能与类行星的组成相似,天体化学研究表明流体是类行星的主要物质组成。对陨石和天体的研究表明,类行星中普遍存在 C-H-O 流体(Shin et al,2012;Blamey et al,2015;Peslier et al,2019)。因此,地球内部可能封存了原始的流体组分。除岩浆之外,地质流体中最常见的挥发组分主要包括  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $H_2$ 、惰气等,地球脱气作用将这些挥发组分从地核、地幔最终排放到大气圈,同时将大量热能传输到地壳和大气圈,参与了地球内部不连续带的形成以及地震的孕育发生(Du,1992,1994;Hirschmann et al,2012;Zhang,2014;Litasov et al,2016;杜乐天,2017;杜建国等,2018a;Du et al,2021a)。

高温高压实验、原位测量技术和微区微量分析测量技术成为研究地球深部的重要手段(杜建国等,2010;Hurrai et al,2015;Du et al,2021b)。高温高压实验表明地幔硅酸盐矿物结合数量可观的氢,使地幔成为巨大的水库(Schmandt et al,2014;Fei et al,2017;Ohtani,2020)。利用激光拉曼测量技术可以分析尺度小于  $10\mu m$  的单个包裹体样品,矿物流体包裹体的激光拉曼分析在追流体参与地质作用的过程中起到了重要作用,获得了游离态地幔流体的物证(Hurrai et al,2015)。

地球内部流体是地球的血脉。从地核、核幔边界向上逃逸的流体是高能密流体,其携带大量溶解物质和能量,在局部富集,造成地球内部的物理、化学性质不均一。毫无疑问,流体参与了地震孕育发生的过程。长期的地震监测研究表明地震常伴有地下流体物理、化学异常变化(车用太等,2006;Du et al,2008;杜乐天,2017;杜建国等,2018a)。尽管已有许多地震成因方面的研究成果,但地震成因和地震前兆成因机理尚不清晰,成为地震预测发展的障碍(车用太等,2006;杜建国等,2018a)。由于断层切割深度和岩石聚集的应变能有限,地震后断层不能短期愈合再积累应变能、许多地震震源不在断层上,使得传统的弹性回跳学说(断层位移释放应变能产生地震)受到了挑战,在解释中-深源地震、非双力偶地震、强震震群、大地震形成时显得乏力(Gilat et al,2005,2012;李德威,2008,2017;岳中琦,2013;Liang,2017;杜建国等,2018b)。流体在地震孕育过程中的作用一直备受关注,流体减小断层带的摩擦力触发地震似乎容易被人们接受(El Hariri et al,2010;Cornelio et al,2019),但由流体直接产生地震这一结论(Gilat et al,2005,2012;Du et al,2007;杜建国等,2010,2018b;岳中琦,2013;Liang,2017)尚存争议,争议焦点为地幔有无足够流体,流体如何直接产生地震。本文以地幔流体为基础、以流体运移为线索、以高能密流体聚集和释放(爆炸)为核心阐述流体与地震成因机制,即根据地球物理探测资料、陨石和地幔矿物微区微量地球化学分析数据以及高温高压岩石实验结果阐明流体存在于整个地幔,逃逸的地幔流体在适当的条件下产生地震,同时归纳了流体触发和产生地震的若干学说。

## 1 地幔中蕴藏巨大数量的流体

类行星对比、微区微量流体分析、高温高压实验和地球物理探测等方面的资料证明地幔含有流体且数量巨大。地幔中流体以游离的形式(水溶液和岩浆)存在于矿物缺陷和岩石孔隙,或以结构水的形式赋存于矿物中。

## 1.1 地球化学微观证据

### 1.1.1 类行星中的流体

类行星中存在的流体指示地球内部封存了行星形成时的原始流体。在土卫六号(Titan)表面存在液态甲烷,其深部有可能存在固体甲烷(Shin et al,2012)。火星表面探测到甲烷含量突发性异常变化,火星陨石粉碎释放的气体主要组分为富 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$ 和少量 $\text{O}_2$ 、Ar, $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ 值在3~23的范围内, $\text{H}_2/\text{CO}_2$ 值在0.5~7的范围内,Ar/ $\text{O}_2$ 值约为13(Blamey et al,2015)。陨石矿物中的流体包裹体分析发现了类行星存在的流体。例如,Tissin火星陨石分析结果表明,有机化合物以芳香烃为主(包括含氧、氮、硫杂原子化合物),可溶盐组分主要为氯,包括高氯酸盐(Jaramillo et al,2019)。在Sutter's Mill CM陨石中,方解石有纳米级(小于100nm) $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ 的流体包裹体,呈环带分布,包裹体中的流体可能是太阳系形成早期的流体(Tsuyhuyama et al,2018)。辉橄无球粒陨石中不同颗粒含有不等量的 $\text{H}_2\text{O}$ ,其中,辉石为 $(0.1\sim 387)\times 10^{-6}$ 、熔体包裹体为 $(26\sim 4130)\times 10^{-6}$ 、充填物为 $(1130\sim 7850)\times 10^{-6}$ ,水的含量降低、其氢同位素 $\delta\text{D}$ 组成变重( $-268\text{‰}\sim +4858\text{‰}$ )(Peslier et al,2019),表明地幔和地核应保留着类似的原始流体组分。

### 1.1.2 地幔矿物流体包裹体拉曼光谱分析

对在地幔条件下合成含烃流体包裹体和地幔矿物中的流体包裹体研究表明,地幔中存在流体和非生物成因烃。天然金刚石是在地幔中形成的矿物。因此,天然金刚石中流体包裹体是封存的地幔流体,可以作为研究岩石圈以下C-N-H-O流体和金刚石生长环境的理想样品。例如,印度河缝合带Nidar蛇绿岩超高压橄榄岩矿物包裹体拉曼光谱测量表明,辉石中有八面体晶形的金刚石包裹体和烃、氢流体包裹体,橄榄石中有金刚石假象的石墨、烃和 $\text{H}_2$ 包裹体;包裹体和超高压矿物学资料以及退变质形成的 $\beta\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$ 表明烃类来自上地幔过渡带,橄榄岩中的金刚石是在地幔上涌过程中从C-H流体中晶出的(Das et al,2017)。阿尔卑斯含金刚石岩石中流体包裹体显微拉曼光谱测量表明,金刚石表面具有 $\text{sp}^2$ -和 $\text{sp}^3$ -键合的非晶碳和羧酸官能团(羧酸、羧酸盐、甲基、亚甲基)涂层,表明金刚石成核是由亚稳态分子前驱转变的,这不仅是地球深部流体中有机化合物合成金刚石的证据,也为地球深部存在有机物化合物提供了新证据(Frezzotti,2019)。在粉碎和加热金刚石过程中释放的气体中测到了 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2$ (Melton et al,1975)以及稀有气体(Timmerman et al,2018),证明地幔存在富C-H-O-N流体。在天然金刚石中还发现了固态 $\text{CO}_2$ ,形成的压力大于5GPa,对应深度大约220~270km(Schrauder et al,1993)。在金伯利岩岩筒中的金刚石内有亚微米级白云石、碳钙钾石和碳镁钠石,表明金刚石形成于1300℃以上的碱性碳酸盐熔体,环境压力5~7GPa(Logvinova et al,2019)。津巴布韦克拉通东部Marange冲积型矿藏中发现混合生长习性(八面体+立方体)的金刚石,其中快速生长的浅灰色立方体金刚石晶体富含 $\text{H}_2$ 缺陷,包裹了丰富的 $\text{CH}_4$ ,且伴有石墨包裹体,而干净的八面体晶体部分仅含 $\text{N}_2$ 。从晶体中心到边缘,金刚石中 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ 和N含量的同步变化反映了早期富 $\text{CH}_4$ 的流体与晚期富集 $\text{CO}_3^{2-}$ 或 $\text{CO}_2$ 流体混合的过程,这表明金刚石是从 $\text{CH}_4$ - $\text{CO}_2$ 流体晶出的(Smit et al,2016)。西非克拉通南部兹密榴辉岩金刚石中流体包裹体的碳同位素组成和氮浓度表明,金刚石形成于还原性流体或失水的C-H-O流体(Smit et al,2019)。此外,超深金刚石来源深度可达2700~2900km,世界各地发现的超深金刚石中有固相、液相和气相包裹体,多数为含碳化合

物,含有非生物成因甲烷(郑昕雨等,2020),这意味着流体存在于整个地幔。

橄榄石及其异构体是地幔岩石的主要矿物。橄榄石中流体包裹体证明地幔内存在游离的流体。比如,地幔捕虏体中封存的原始流体挥发分,其主要成分为  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$ ,其次为  $\text{CO}_2$  以及少量  $\text{CH}_4$  等烃类(高金亮等,2017)。采自洋中脊、俯冲带和蛇绿岩带的 160 个橄榄石流体包裹体的分析结果表明,包裹体的主要成分为蛇纹石、水镁石、磁铁矿子矿物和气态  $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 。热动力学研究资料表明高于  $400^\circ\text{C}$  热液进入上地幔和海底洋壳,岩石蚀变过程中形成了流体包裹体;当温度低于  $340^\circ\text{C}$  时,形成了包裹体壁上薄层的蛇纹石子晶,消耗了包裹体内圈闭的  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Fe}^{3+}$  的沉淀形成强还原环境,  $\text{H}_2$  还原无机碳形成  $\text{CH}_4$  (Klein et al, 2019)。岛弧原始玄武岩橄榄石中熔融包裹体具有高的  $\text{Cl}/\text{H}_2\text{O}$  值,表明岩浆中含有 1.0~15.0wt.%  $\text{NaCl}$  的水溶液(Wallace, 2005)。在日本四国岛中部高压变质带榴辉岩相岩石中发现了含  $\text{CH}_4$  气泡的  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$  (7.7 wt.%) 流体包裹体,在室温下,包裹体的液相和气泡体积分别为  $86.4\mu\text{m}^3$  和  $11.8\mu\text{m}^3$ ,  $\text{CH}_4$  的分压为 5.5MPa,气相中水蒸气含量为 0.59mol%,  $\text{CH}_4$  的密度  $407.7\text{cm}^3/\text{mol}$  ( $24^\circ\text{C}$ ),液相的密度为  $17.6\text{cm}^3/\text{mol}$  (7.7wt.%  $\text{NaCl}$ );包裹体整体成分的质量分数为 91.8%  $\text{H}_2\text{O}$ 、0.5%  $\text{CH}_4$  和 7.7%  $\text{NaCl}$ ,整体摩尔体积为  $19.9\text{cm}^3/\text{mol}$  (Yoshida et al, 2016)。上述研究不仅表明地幔中存在流体,而且揭示了其化学组成及相态。

## 1.2 高温高压矿物岩石实验

利用高温高压实验技术可以揭示地球深部(不同温压力下)可能存在的矿物相,流体组成、赋存形式和流体对岩石物性的影响,同时也为解释地球物理探测资料提供了科学依据。在  $1000^\circ\text{C}$  和 2.4GPa 的条件下 C-O-H 体系中存在流体组分,组分平衡分配受流体中  $\text{O}/(\text{O}+\text{H})$  含量的控制(Hazen et al, 2013)。在温度低于  $1300^\circ\text{C}$ 、压力为 5GPa、控制氧逸度 (IW, MMO) 的条件下,使用金管密封橄榄石粉+斜方辉石粉+硬脂酸的实验产物中,橄榄石中形成了流体包裹体,拉曼光谱测量表明该包裹体的组分为  $\text{CH}_4$ ,这意味着上地幔条件可以存在甲烷(Matjuschkin et al, 2019)。在 5.5~7.8GPa、 $1100\sim 1400^\circ\text{C}$ 、控制氧逸度 (IW, MMO) 的条件下进行的含氢流体与碳(炭黑状  $^{13}\text{C}$ 、石墨、金刚石)实验结果表明,在地幔条件下可以形成烃,以气态烃为主 ( $\text{C}_2 > \text{C}_1 > \text{C}_3 > \text{C}_4$ ),还有少量不饱和烃和含苯环化合物(Sokol et al, 2019)。在常压条件下,高温时甲烷会发生分解,但在高温高压条件下甲烷分子发生聚合反应形成高碳数烃类,这表明上地幔较高的温度压力区间若干种烃类可以稳定存在,甲烷稳定存在的温度、压力范围更大(Kolesnikov et al, 2017)。

含水岩石体系高温高压实验表明橄榄石的异构体(高压相)含水量高达 1~3wt.%。这些高压相熔融或退变质能够产生大量水。含水橄榄石体系在高温高压下形成的瓦兹利石和林伍德石含水量可高达 3wt.% 左右(Smyth, 1994; Schmandt et al, 2014; 谢鸿森, 2015; 叶宇, 2016)。2014 年,在巴西开采的 II a 型钻石中首次发现天然的林伍德石(粒径约  $40\mu\text{m}$ ),其化学组成证实了地幔过渡带富含流体(Pearson et al, 2014)。根据斜方辉石电导率估算的软流层中的电导率为  $4\times 10^{-2}\sim 1\times 10^{-1}\text{S}/\text{m}$ ,相应的水含量为 0.01~0.04wt.% (Dai et al, 2009)。根据高压含水地幔矿物中的水和地表水作为地球总水量,其中大约 93.4wt.% 赋存于地幔(约 69% 赋存于地幔过渡带),地表水仅占 6.6% (谢鸿森, 2015)。在下地幔的温压条件下,铁与过量的水反应生成的 Py 相 ( $\text{FeO}_2\text{H}_x$ ) 和氢化铁 ( $\text{FeH}$ ),表明在下地幔可能存在这些含水化合物(Mao et al, 2017)。 $\delta$ -H 固溶体 ( $\text{AlO}_2\text{H}$ - $\text{MgSiO}_4\text{H}_2$ ) 等含水相也可能存在于下地幔

(Ohtani, 2020)。在 135 GPa 条件下, 合成  $\delta$ -( $\text{Al}_{0.95}\text{Fe}_{0.05}$ )OOH 晶体掺入 5 mol% 的铁导致  $\delta$ -AlOOH 的体积增大, 但使横波速度 ( $v_s$ ) 降低大约 5%, 这有助于解释下地幔底部 D" 层的形成 (Su et al, 2021)。核幔边界的 D" 层应该是富含初始挥发分的巨大流体库 (Kim et al, 2020; Miller, 2020)。

近些年的研究表明, 地核的化学组成不仅包含铁和镍, 还有轻的元素或挥发性组分。地核的物质组成大约为 80% 的铁、5% 的镍以及 15% 的轻元素 (如氢、氧、硅、碳、磷和硫等轻元素) (Li et al, 2007; 张友联等, 2011; Litasov et al, 2016)。因此, 考虑到新发现的高温高压含水矿物相和地核组成, 地核与地幔中的水量应该比海水高几个数量级。高压相含水矿物熔融或相变为低压相即会产生熔体和游离的水流体。在核幔演化过程中, 地核内的轻元素逃逸可能是形成 D" 层、地幔柱以及地震、火山的重要因素 (张友联等, 2011; Litasov et al, 2016)。

### 1.3 地球物理探测宏观证据

在漫长的地质历史中, 流体活动是地球演化出圈层结构的决定性因素。流体富集和温度升高会引起岩石的弹性波速和电导率的变化。地球经早期熔融、液态分异和流体运移形成了圈层结构之后, 持续的热传导 (特别是热对流) 形成了地球内部温度场非均匀变化。因此, 全球地幔的地震波速度和电导率的不均匀反映了流体分布的空间变化。宽频大地电磁 (MT) 和长周期大地电磁 (LMT) 探测结果表明, 青藏高原东缘壳幔中 (王绪本等, 2017)、丽江—小金河断裂带和楚雄盆地下地壳内 (Li et al, 2020) 以及大兴安岭—松辽盆地的壳幔内 (韩江涛等, 2018) 均存在富集流体的低速高导层。地球物理观测表明, 上地幔过渡带边界处的低速异常可能是由高能密含水岩浆引起的, 而下地幔上部的  $Q$  值和横波异常区可能是由流体或含水岩浆所致 (Ohtani, 2020)。全球下地幔地震成像揭示了异常高流体压力导致剪切波速降低, 大型低剪切波速省 (LLSVPs) 标志着大规模流体富集区 (Ritsema et al, 2020)。显然, 核幔边界的 D" 层应该是巨大流体源 (Kim et al, 2020; Miller, 2020)。

地球物理研究表明, 地震波速度对晶间流体的敏感性很强, 但对晶体内结构水反应不敏感, 而电导率对晶间流体和晶体内结构水均很敏感 (Özaydın et al, 2020)。这与岩石高温高压实验结果一致。瓦兹利石和林伍德石的电导率相近, 均比橄榄石电导率高一倍; 在 1.0~3.0 GPa 和 500~600 °C 的条件下, 蛇纹石脱水导致岩石电导率增高 3 个数量级 (杜建国等, 2010; 谢鸿森, 2015)。在岩石开始出现部分熔融时, 其声波速度出现急剧下降, 但电导率没有明显变化; 当部分熔融产生的流体增多、形成联通网络时, 波速和电阻率均急剧减小, 流体的存在会使岩石产生类似于电解质溶液的电导机制 (杜建国等, 2010)。岩石电阻率与水含量存在函数关系, 因此, 在适当的约束条件下利用大地电磁测量资料可以估算地幔内的流体 (熔体和水) 含量 (Evans et al, 2005; Özaydın et al, 2020)。大地电磁测量资料反演的上地幔水含量与利用实验测量电导率数据估算的含水量相近 (Zhang et al, 2012)。此外, 孔隙结构影响岩石的电导率, 在高温高压条件下, 当颗粒介质中孔隙二面角 ( $\theta$ ) 小于 60° 时, 孔隙流体形成联通的网络 (Watson et al, 1987); 流体中的电解质不仅可以降低流体的电阻, 而且有助于降低二面角, 例如, 在 5 wt.% NaCl, 甚至在 2 GPa 和 1 wt.% NaCl 时, 流体中的电解质能够显著降低橄榄石颗粒间二面角 (小于 60°), 形成联通的流体, 导致高导地体的形成 (Huang et al, 2019)。这充分表明固体地球内大面积分布的低速高导体为流体富集区。

## 2 地球深部流体在地震活动中的作用

地核和下地幔的流体属于高能密流体。这种高能密流体不断地向上逸散,给上地幔和地壳输入大量物质和能量,在环太平洋、洋中脊和大陆裂谷等地带形成了大地热流通量很高的地热田、火山和地震。全球地震活动带与火山带、地热带重叠以及地震震源下方常存在低速高导层,这表明流体活动与地震孕育发生存在内在联系(车用太等,2006;Du et al,2007)。中国大陆地球物理探测表明多数强地震发生在低-高阻体过渡带、低泊松比地区,在震源下部存在低速、高泊松比异常体,如青藏高原东缘多数大地震(王绪本等,2017)、海原弧形构造区历史地震(莘海亮等,2020)、川滇地区地震(胡敏章等,2020)、吉林省前郭地震和松原地震(杨宇等,2019;唐裕等,2021)、首都圈地区强地震(齐诚等,2006;刘文玉等,2017)、郯庐断裂带地震(徐常芳,2003;Deng et al,2013),均说明流体作用是导致地震的主要因素。在印度西北部板内地震活动区,地球物理研究表明受断层控制的地幔流体动力能够产生中强地震(Kumar et al,2017)。对印度库奇地区地壳 3-D 电阻率结构以及断裂带地表变形和余震的系统研究表明,流体在地震孕育发生过程中起着重要作用(Azeez et al,2018)。地球物理综合探测表明,博茨瓦纳壳幔内软化带(低速高导层)控制着地震活动,地幔流体向上运移触发了 2017 年拉张带发生的强地震和余震(Moorkamp et al,2019)。智利中部板块俯冲带存在不同深度的高导体,流体导致弧前地幔蚀变,控制了孕震带的展布(Cordell et al,2019)。新西兰活动大陆裂谷中部岩石圈内存在的 10~40km 连续低速带表明,裂谷内震群产生的驱动力来自深部流体(Reyners et al,2007)。Vidale 等(2006)对美国南加州 71 组独立的地震序列进行分析,研究结果发现 57 个序列震群没有主从关系,表明周期性地震活动归因于流体压力波动。2011 年 3 月 11 日日本发生大地震,16 个月之后在其板块边界断裂带进行的为期 9 个月的海底钻孔(660~820m)测温发现存在瞬态流体水平流动,测得的温度升高是深部流体携带的热能引起的(Fulton et al,2016),这意味着断层带的热异常不是由摩擦产生的,深部流体参与了地震活动。

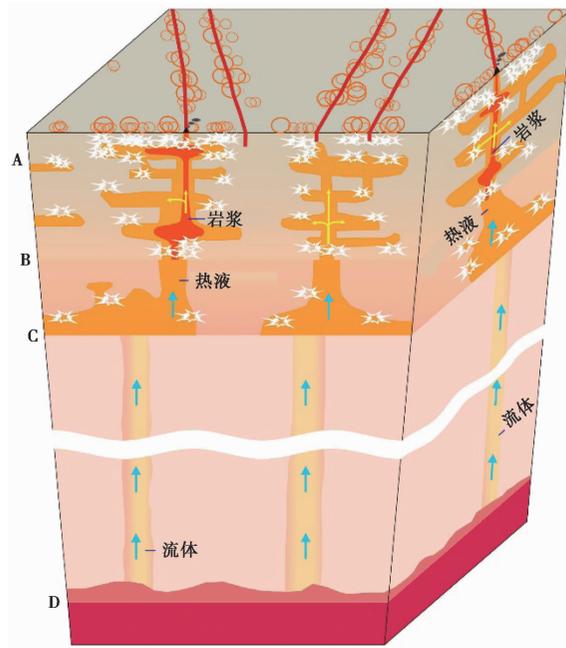
地幔流体不仅能改变孕震介质的物理和化学性质,而且为地震孕育的发生供给充足的能量(张友联,2011;杜建国等,2018a,2018b)。流体的物理和化学作用(孔隙压力、温度缓冲、溶解、水解弱化等)直接影响岩石的强度以及地震的成核、传播和遏止(Violay et al,2013)。根据流体的相态、作用方式和孕震的地质环境,可以将在地震孕育发生过程中流体的作用归为 4 类:①断裂带流体的润滑和孔隙压力作用触发地震;②流体溶解、沉淀化学反应改变岩石强度从而触发地震;③超高压流体聚集爆炸产生地震,④流体相变产生地震。

目前,有许多关于流体作用触发和产生地震的文献资料,在此进行归纳列举。

### 2.1 地震流体隐爆成因说

地核与下地幔流体反复幕式(运移—局部聚集—爆炸的循环)向上运移,直至排泄到大气层为止(杜建国等,2018a,2018b;Du et al,2021a)。无论是在脆性、粘弹性或柔性介质中,当流体局部聚集使流体压力大于围岩束缚压力时,均会发生流体爆炸从而产生地震。流体爆炸力越大,产生的地震震级越大,连续的爆炸产生慢地震,间歇性爆炸产生复发性地震或震群,即隐爆可以产生不同震源深度、不同震级的各类型地震(图 1)。

广泛分布的隐爆角砾岩是流体隐爆的产物,是古地震的确凿证据(刘巍等,2000;Du



注:A:软流层; B:地幔内 420km 的不连续层; C:670km 的不连续层; D:核幔边界的 D"层。箭头方向表示深部流体运移方向; 白色星标表示不同深度的爆炸,其大小示意规模(震级)的大小; 红线表示断裂; 红色圆圈及其大小表示震中和震级; 黑色三角表示火山。断层降低了地壳的抗压强度,流体更容易在断裂带下方和附近发生爆炸,形成地震震中,相对集中于断裂带及其附近

图1 隐爆产生地震的概念模型 (Du et al,2021a)

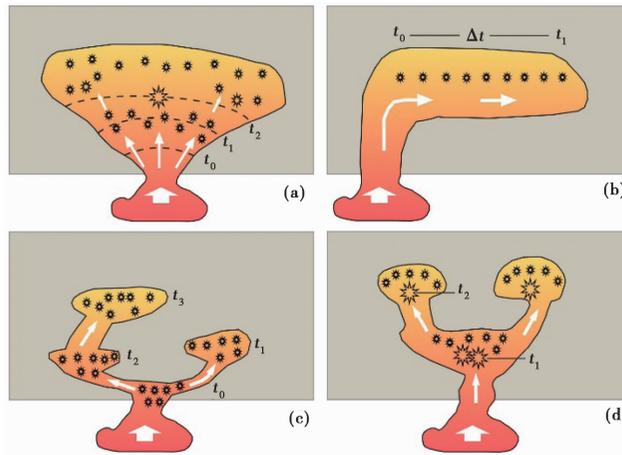
et al,2008、2021a; 杜建国等,2010、2018a、2018b)。源于地核-下地幔的高能密流体携带大量热能,为地震孕育、岩浆起源和地热田形成提供了充足的能量,在全球性张性构造带,诸如环太平洋海沟、大洋中脊、东印度洋海沟、非洲裂谷、地中海—黑海—里海—波斯湾、欧亚大陆中部的伊塞克湖—阿拉湖—乌布苏湖—库苏古尔湖—贝加尔湖等裂谷系,形成了火山、地热和地震带。此外,高能密流体活动在地壳中形成的大量多期石英脉也是古地震的标志。地球内部流体爆炸可以在脆性、弹塑性、塑性介质中发生。地球内部弹性和塑性岩石破裂需要快速加载,流体爆炸可产生天然的极快速加载作用。不同的流体爆炸作用方式和过程产生不同的地震(图2)(Du et al,2021a)。流体爆炸导致含热液体系瞬态等温降压,流体溶解力降低,使电解质沉淀形成脉体。实验表明急速降压导致的热液闪电式蒸发会形成纳米级 SiO<sub>2</sub> 颗粒沉淀 (Amagai et al,2019)。张先等(2003)认为华北地区发生的若干 8 级地震是地幔热流沿莫霍面断裂上涌至中、上地壳,在闭锁状态发生爆炸的产物。

### 2.2 圈闭隐爆致震说

在大型地堑-地垒构造环境中,地壳内圈闭聚气—熔融岩浆—隐蔽爆破—楔块运动产生地震(宋玉琳等,2006; 白思胜,2012)。由于地堑均发育在地壳内,因此该模型局限于解释地堑系统内的浅源地震。

### 2.3 燃气爆炸致震说

岳中琦(2013)根据汶川地震发生时喷出大量岩石和四川盆地蕴藏丰富天然气,提出汶



注：(a)：前震-主震-余震， $t_0$  时刻高能流体不断涌入系统， $t_1$  时刻流体小规模爆炸产生前震， $t_2$  时刻主震发生，随后产生余震。(b)：慢地震，在  $\Delta t$  时间内发生连续的流体（岩浆）爆炸，爆炸和通道是由快速流动岩浆沿着较弱的层从  $t_0$  到  $t_1$  时间持续流动造成的，产生慢地震，同时形成岩床、岩墙或岩脉。(c)：地震震群，随着流体注入系统，在  $t_0$  时间的流体爆炸产生首次地震震群，同时形成通道使流体进一步流动；随后在  $t_1$  时间爆炸产生新的地震震群；一段时间后，在  $t_2$  时间又产生了地震震群，随后在  $t_3$  时间再次爆炸产生地震震群。(d)：重复地震，表示两次大重复地震和余震发生在同一地点，较短  $t_1$  时间段，流体相继爆炸产生两次大地震以及同一地区的余震，随后较短时间内，在  $t_2$  时间再发生大的爆炸，产生大地震

图 2 不同流体爆炸过程产生不同地震的模式图 (Du et al, 2021a)

川 8 级地震是燃气爆炸形成的。然而，自然界可燃气体的聚集需要特殊的地质条件，因此该模型的适应范围具有局限性。

### 2.4 岩石溶解和部分熔融致震说

流体可以使地幔和地壳岩石发生弱化、熔融和排气，导致地震等众多自然灾害发生 (杜乐天, 2017)。超临界流体具有较强的溶解能力，岩石孔隙流体溶解作用降低岩石的强度，高能流体降低岩石的熔融温度，促使岩石发生部分熔融，降低岩石抗压强度，导致地体位移产生地震。岩浆上涌导致地壳脆性-韧性过渡带的局部弱化，可能触发了某些大陆地震。熔融物质的侵入，使大陆地壳的水力学或热力学性质产生扰动，致使中地壳的脆性-韧性过渡带附近的强度降低，形成弱化带，在区域应力作用下，弱化带变形导致应力集中，进而产生地震 (Moorkamp et al, 2019)。该模型强调了流体弱化孕震介质强度触发构造地震，难以解释中-深源地震的成因。

### 2.5 地震成因的外核对流顶托说

地球液态外核连续的对流团进入核幔边界，会顶托其上方的壳幔物质作上升运动，导致壳幔物质温度升高，同时压缩壳幔岩石，岩石圈脆性层内的应力不断积累，当达到整个脆性层的破裂强度时，导致脆性岩层振荡破裂产生地震 (高晓清等, 2016)。该模型是从地球整体的角度解释岩石弹性回跳产生地震，但外核流体导致地震的作用机制尚需更多资料证明。

### 2.6 地震流体成因说

该学说最初于 1996 年提出，认为地震断层带内上涌的高压流体使错动的岩体成为悬浮

岩体,在重力和水平力的作用下岩体发生快速的剪切错动,岩体具有的巨大重力势能转换为动能而产生地震。主震发生后,在中、上地壳高渗透层内截封的深部高压流体,具有储能、拆沉、解耦和润滑等作用,从而引发了大量的余震,并生成了许多活断层(徐常芳,2003)。该模型以地震弹性回跳理论为基础,强调流体压力作用触发构造地震,主要解释浅源地震的成因。

### 2.7 地幔流体热能转化为应变能致震说

李德威(2008)通过研究青藏高原地震发生规律,提出了大陆地震成因机理:大洋软流层的流体流入大陆底部加厚了地幔软流层,流体底辟进入大陆地壳,带入巨量热能,在下地壳孕育板内地震,在中地壳韧-脆性剪切带积累能量,形成震源层,热能-应变能转化产生地震。该模型的发震机制仍属于地震弹性回跳理论,强调地震释放的能量源于地幔流体传输的热能,在震源介质中转化为应变能,应变能释放产生地震,主要解释地壳内地震的成因。

### 2.8 超临界流体相变致震说

该学说有两个典型的地震成因模型。一个模型为地震的超临界水流体退相爆发成因模型:超临界水为高温高压热流体,含巨大的内能,可大量运移,集聚及临震减压排气,进而退相爆发产生地震(曾明果,2009)。另外一个模型为水的临界奇异性致震说:地壳和上地幔中脆性、韧性断裂带降压和聚水导致局部的压力下降和温度升高,当达到水的临界温度和压力时,引发水的二级相变,水的物理和化学性质发生奇异性突变导致地壳和上地幔局部的力学性质突然减弱,引发局部水热爆炸而触发地震(胡宝群等,2020),该模型强调超临界水的二级相变释放能量是产生地震的主要因素,适用于解释低密度流体产生或触发的地震。

### 2.9 断层带流体润滑致震说

该学说的理论依据是经典的弹性流体动力润滑理论,即在两个亚平行和粗糙表面之间薄的粘性流体受剪切而产生的超压所引起的弱化。断层两盘位移需要克服断层面的摩擦力,断层带的流体在岩石和矿物颗粒表面形成薄膜,起到流体动力润滑的作用,减小两盘间的摩擦力,促进断层位移产生地震。断裂带流体润滑作用取决于多种因素(Violay et al, 2013; Cornelio et al, 2019)。

### 2.10 孔隙流体压力弱化断层触发地震说

该学说于20世纪50年代提出,断裂带内部孔隙流体压力影响断裂带的力学行为,在应力作用下,垂直于断层面的正压力加大了断层的摩擦力,阻止断层滑动。但是,断层带的流体压力抵消正压力,降低了摩擦力,有利于断层滑动。断裂带孔隙流体压力的瞬态变化会导致断层蠕变或失稳滑移产生地震(Byerlee, 1990; Faulkner et al, 2018)。模型以地震弹性回跳理论为基础,强调流体作用如何促进岩石释放应变能产生地震,适合解释脆性岩石中产生的小地震,因为岩石聚集的应变能很有限(杜建国等, 2018a、2018b)。

## 3 结语

行星化学和地球化学、地幔矿物流体包裹体、地球物理测深资料和矿物岩石高温高压实验表明,地幔保留了初始流体组分,水存在于整个地幔,地幔过渡带和D"层为流体富集带。地幔内的流体以游离态和结构水的形式存在。结构水在高压含水矿物熔融和转变为低压相时产生流体。地幔内的总水量比海水总量高出几个数量级。地核含有挥发性流体,并向D"

层逃逸。地幔流体是高能密流体,为地震孕育和其他地质过程提供热能和成矿物质。尽管已经有多种流体导致地震的学说,但是多数是以断层位错产生地震为基础,强调流体的触发作用,在解释中-深源地震和大地震产生机理方面有一定的局限性。由本文可知,流体隐爆应该是产生地震的最重要机制,能够解释不同深度、不同震级的各类型地震的形成。

迄今为止,地幔和地核中确切的物质组成尚无定论,这导致对地球内部物理、化学性质和物质运动认识的不确定性。因此,为澄清地幔流体的行为及其与地震的关系,应该按照从“原子到地球、从原子-分子动力学到地球动力学”的科学观(杜建国等,2010)深入开展工作:

- (1) 揭示地核、地幔的物质组成及其赋存相态,同时为地球物理探测资料解释提供新依据;
- (2) 研究地幔温压条件下流体的行为;
- (3) 研究地幔温压条件下流体-岩石相互作用的化学动力学过程;
- (4) 寻求新方法破解地幔流体携带的各种深部信息;
- (5) 深入研究流体爆炸产生地震的地质环境和动力学条件,为预测地震提供新的科学依据。

## 参考文献

- 白思胜,2012. 倒楔运动与汶川特大地震的成因. 宁夏师范学院学报(自然科学),**33**(3):78~84.
- 车用太,鱼金子,2006. 地震地下流体学. 北京:气象出版社,1~498.
- 杜建国,李营,崔月菊,等,2018a. 地震流体地球化学. 北京:地震出版社,1~272.
- 杜建国,李营,王传远,等,2010. 高压地球科学. 北京:地震出版社,1~335.
- 杜建国,仵柯田,孙凤霞,2018b. 地震成因综述. 地学前缘,**25**(4):255~267.
- 杜乐天,2017. 新地球科学原理导论. 兰州:兰州大学出版社,1~522.
- 高金亮,刘嘉麒,郭正府,等,2017. 双辽新生代玄武岩及地幔捕虏体内流体的组成、碳同位素特征及其来源. 岩石学报,**33**(1):81~92.
- 高晓清,杨丽薇,郭安宁,等,2016. 地震成因的外核对流顶托说. 地震工程学报,**38**(增刊1):1~7.
- 韩江涛,郭振宇,刘文玉,等,2018. 松辽盆地岩石圈减薄的深部动力学过程. 地球物理学报,**61**(6):2265~2279.
- 胡宝群,高海东,王运,等,2020. 水的临界奇异性致震说. 地学前缘,**27**(1):234~243.
- 胡敏章,金涛勇,郝洪涛,等,2020. 青藏高原东南缘岩石圈有效弹性厚度及其构造意义. 地球物理学报,**63**(3):969~987.
- 李德威,2008. 大陆板内地震的发震机理与地震预报——以汶川地震为例. 地质科技情报,**27**(5):1~6.
- 李德威,2017. 地震与地热的关联性:从预测减灾到取能减灾. 地球科学与环境学报,**39**(4):563~574.
- 刘巍,杜建国,白利平,2000. 浅谈超临界流体在地震孕育过程中的作用. 地震地质,**22**(4):439~444.
- 刘文玉,李桐林,韩江涛,等,2017. 怀-涿地区深部孕震环境研究与涿鹿地震发震机制的讨论. 地球物理学报,**60**(7):2693~2706.
- 齐诚,赵大鹏,陈颀,等,2006. 首都圈地区地壳 P 波和 S 波三维速度结构及其与大地震的关系. 地球物理学报,**49**(3):805~815.
- 宋玉琳,白思胜,韩宁,2006. 郟城大地震成因分析. 固原师专学报(自然科学),**27**(6):39~42.
- 唐裕,翁爱华,杨悦,等,2021. 松原地震与流体作用联系的大地电磁证据. 中国科学:地球科学,**51**(1):134~149.
- 王绪本,余年,高嵩,等,2017. 青藏高原东缘地壳上地幔电性结构研究进展. 地球物理学报,**60**(6):2350~2370.
- 谢鸿森,2015. 探索地球深部之路. 北京:地震出版社,1~404.
- 莘海亮,曾宪伟,康敏,等,2020. 海原弧形构造区地壳三维精细速度结构成像. 地球物理学报,**63**(3):897~914.
- 徐常芳,2003. 中国大陆壳内与上地幔高导层成因及唐山地震机理研究. 地学前缘,**10**(增刊1):101~111.
- 杨宇,雷建设,张广伟,等,2019. 前郭  $M_s 5.8$  和松原  $M_s 5.7$  地震震源区地壳速度结构与孕震环境. 地球物理学报,**62**(11):

- 4259~4278.
- 叶宇,2016.俯冲带及转换带中含水硅酸盐矿物的晶体结构和状态方程.中国科学:地球科学,**46**(3):313~328.
- 岳中琦,2013.汶川地震与山崩地裂的极高压甲烷天然气成因和机理.地学前缘,**20**(6):15~20.
- 曾明果,2009.地震的超临界水流体退相爆发成因-以汶川大地震震中“爆裂式泥火山”场景为例.四川地质学报,**29**(3):371~377.
- 张先,张先康,刘敏,等,2003.华北地区8级大震的深部构造特征及地震成因的探讨.地震学报,**25**(2):136~142.
- 张友联,2011.深部流体与地震成因的研究.地震研究,**34**(2):239~245.
- 张友联,杜建国,崔月菊,2011.地核物质成分研究进展.地球科学进展,**26**(4):365~374.
- 郑昕雨,丘志力,邓小芹,等,2020.超深金刚石包裹体:对深部地幔物理化学环境的指示.地球科学进展,**35**(5):452~464.
- Amagai T, Okamoto A, Niibe T, et al, 2019. Silica nanoparticles produced by explosive flash vaporization during earthquakes. *Sci Rep*, **9**(1):9738.
- Azeez K K A, Mohan K, Veeraswamy K, et al, 2018. 3D crustal resistivity structure beneath the Wagad aftershock zone of the 2001 Bhuj earthquake, Kutch, India; heterogeneous resistivity structure controlled by widespread fluid infiltration and clues to aftershocks pattern. *Tectonophysics*, **747~748**:54~67.
- Blamey N J F, Parnell J, McMahan S, et al, 2015. Evidence for methane in Martian meteorites. *Nat Commun*, **6**:7399.
- Byerlee J, 1990. Friction, overpressure and fault normal compression. *Geophys Res Lett*, **17**(12):2109~2112.
- Cordell D, Unsworth M J, Diaz D, et al, 2019. Fluid and melt pathways in the central Chilean subduction zone near the 2010 Maule earthquake (35°~36°S) as inferred from magnetotelluric data. *Geochem, Geophys, Geosyst*, **20**(4):1818~1835.
- Cornelio C, Spagnuolo E, Di Toro G, et al, 2019. Mechanical behaviour of fluid-lubricated faults. *Nat Commun*, **10**(1):1274.
- Dai L D, Karato S I, 2009. Electrical conductivity of orthopyroxene: implications for the water content of the asthenosphere. *Proc Japan Acad, Ser B*, **85**(10):466~475.
- Das S, Basu A R, Mukherjee B K, 2017. In situ peridotitic diamond in Indus ophiolite sourced from hydrocarbon fluids in the mantle transition zone. *Geology*, **45**(8):755~758.
- Deng Y F, Fan W M, Zhang Z J, et al, 2013. Geophysical evidence on segmentation of the Tancheng-Lujiang fault and its implications on the lithosphere evolution in East China. *J Asian Earth Sci*, **78**:263~276.
- Du J, Zhang Y, Li H, 2007. Advances in studies of thermal-fluid geochemistry and hydrothermal resource in China. In: Ueckermann H I. *Geothermal Energy Research Trends*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 51~88.
- Du J G, 1992.  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios and heat flow in the continental rift-valley, Eastern China. *Chin J Geochem*, **11**(3):237~243.
- Du J G, 1994. Helium isotope evidence of mantle degassing in rift valley, Eastern China. *Chin Sci Bull*, **39**(12):1021~1024.
- Du J G, Si X Y, Chen Y X, et al, 2008. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China. In: Stefánsson Ó. *Geochemistry Research Advances*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 57~92.
- Du J G, Sun F X, Cui Y J, et al, 2021a. Earthquakes generated by fluid overpressure: insights from cryptoexplosive breccias. *J Asian Earth Sci*, **6**:100069.
- Du J G, Zhang B H, Zou B, et al, 2021b. High pressure geochemistry: preface. *Geosci Front*, **12**(2):893~895.
- El Hariri M, Abercrombie R E, Rowe C A, et al, 2010. The role of fluids in triggering earthquakes: observations from reservoir induced seismicity in Brazil. *Geophys J Int*, **181**(3):1566~1574.
- Evans R L, Hirth G, Baba K, et al, 2005. Geophysical evidence from the MELT area for compositional controls on oceanic plates. *Nature*, **437**(7056):249~252.
- Faulkner D R, Sanchez-Roa C, Boulton C, et al, 2018. Pore fluid pressure development in compacting fault gouge in theory, experiments, and nature. *J Geophys Res: Solid Earth*, **123**(1):226~241.
- Fei H Z, Yamazaki D, Sakurai M, et al, 2017. A nearly water-saturated mantle transition zone inferred from mineral viscosity. *Sci Adv*, **3**(6):e1603024.
- Frezzotti M L, 2019. Diamond growth from organic compounds in hydrous fluids deep within the Earth. *Nat Commun*, **10**(1):4952.
- Fulton P M, Brodsky E E, 2016. In situ observations of earthquake-driven fluid pulses within the Japan Trench plate boundary fault zone. *Geology*, **44**(10):851~854.

- Gilat A L, Vol A, 2005. Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. *HAIT J Sci Eng B*, **2**(1~2): 125~167.
- Gilat A L, Vol A, 2012. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geosci Front*, **3**(6): 911~921.
- Hazen R M, Jones A P, Baross J A, 2013. Carbon in earth. In: Swainson I. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. De Gruyter.
- Hirschmann M, Kohlstedt D, 2012. Water in Earth's mantle. *Phys Today*, **65**(3): 40~45.
- Houle M A, Burruss R C, Ridsdale A, et al, 2017. Rapid 3D chemical-specific imaging of minerals using stimulated Raman scattering microscopy. *J Raman Spectrosc*, **48**(5): 726~735.
- Huang Y S, Nakatani T, Nakamura M, et al, 2019. Saline aqueous fluid circulation in mantle wedge inferred from olivine wetting properties. *Nat Commun*, **10**(1): 5557.
- Hurai V, Huraiová M, Slobodník M, et al, 2015. *Geofluids: Developments in Microthermometry, Spectroscopy, Thermodynamics, and Stable Isotopes*. Amsterdam: Elsevier, 1~484.
- Jaramillo E A, Royle S H, Claire M W, et al, 2019. Indigenous organic-oxidized fluid interactions in the Tissint Mars meteorite. *Geophys Res Lett*, **46**(6): 3090~3098.
- Kim D, Lekić V, Ménard B, et al, 2020. Sequencing seismograms: a panoptic view of scattering in the core-mantle boundary region. *Science*, **368**(6496): 1223~1228.
- Klein F, Grozeva N G, Seewald J S, 2019. Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine-hosted fluid inclusions. *Proc Natl Acad Sci USA*, **116**(36): 17666~17672.
- Kolesnikov A Y, Saul J M, Kutcherov V G, 2017. Chemistry of hydrocarbons under extreme thermobaric conditions. *ChemistrySelect*, **2**(4): 1336~1352.
- Kumar G P, Mahesh P, Nagar M, et al, 2017. Role of deep crustal fluids in the genesis of intraplate earthquakes in the Kachchh region, northwestern India. *Geophys Res Lett*, **44**(9): 4054~4063.
- Li J, Fei Y, 2007. Experimental constraints on core composition. *Treat Geochem*, **2**: 1~31.
- Li X, Ma X B, Chen Y, et al, 2020. A plume-modified lithospheric barrier to the southeastward flow of partially molten Tibetan crust inferred from magnetotelluric data. *Earth Planet Sci Lett*, **548**: 116493.
- Liang G H, 2017. Earthquake detection with seismic exploration method. In: Di Q Y, Xue G Q, Xia J H. *Technology and Application of Environmental and Engineering Geophysics*. Singapore: Springer, 185~194.
- Litasov K D, Shatskiy A F, 2016. Composition of the Earth's core: a review. *Russ Geol Geophys*, **57**(1): 22~46.
- Logvinova A M, Shatskiy A, Wirth R, et al, 2019. Carbonatite melt in type Ia gem diamond. *Lithos*, **342~343**: 463~467.
- Mao H K, Hu Q Y, Yang L X, et al, 2017. When water meets iron at Earth's core-mantle boundary. *Natl Sci Rev*, **4**(6): 870~878.
- Matjuschkin V, Woodland A B, Yaxley G M, 2019. Methane-bearing fluids in the upper mantle: an experimental approach. *Contrib Mineral Petrol*, **174**(1): 1.
- Melton C E, Giardini A A, 1975. Experimental results and a theoretical interpretation of gaseous inclusions found in Arkansas natural diamonds. *Am Mineral*, **60**(5~6): 413~417.
- Miller M S, 2020. Mapping Earth's deepest secrets. *Science*, **368**(6496): 1183~1184.
- Moorkamp M, Fishwick S, Walker R J, et al, 2019. Geophysical evidence for crustal and mantle weak zones controlling intra-plate seismicity—the 2017 Botswana earthquake sequence. *Earth Planet Sci Lett*, **506**: 175~183.
- Ohtani E, 2020. The role of water in Earth's mantle. *Natl Sci Rev*, **7**(1): 224~232.
- Özaydin S, Selway K, 2020. MATE: an analysis tool for the interpretation of magnetotelluric models of the mantle. *Geochem, Geophys, Geosyst*, **21**(9): e2020GC009126.
- 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.
- Peslier A H, Hervig R, Yang S, et al, 2019. Determination of the water content and D/H ratio of the Martian mantle by unraveling degassing and crystallization effects in Nakhilites. *Geochim Cosmochim Acta*, **266**: 382~415.
- Reyners M, Eberhart-Phillips D, Stuart G, 2007. The role of fluids in lower-crustal earthquakes near continental rifts. *Nature*, **446**

- (7139):1075~1078.
- Ritsema J, Lekić V, 2020. Heterogeneity of seismic wave velocity in Earth's mantle. *Ann Rev Earth Planet Sci*, **48**:377~401.
- 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.
- Schrauder M, Navon O, 1993. Solid carbon dioxide in a natural diamond. *Nature*, **365**(6441):42~44.
- Shin K, Kumar R, Udachin K A, et al, 2012. Ammonia clathrate hydrates as new solid phases for Titan, Enceladus, and other planetary systems. *Proc Natl Acad Sci USA*, **109**(37):14785~14790.
- Smit K V, Shirey S B, Stern R A, et al, 2016. Diamond growth from C-H-N-O recycled fluids in the lithosphere; evidence from CH<sub>4</sub> micro-inclusions and  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$  content in Marange mixed-habit diamonds. *Lithos*, **265**:68~81.
- Smit K V, Stachel T, Luth R W, et al, 2019. Evaluating mechanisms for eclogitic diamond growth; an example from Zimmi Neoproterozoic diamonds (West African craton). *Chem Geol*, **520**:21~32.
- Smyth J R, 1994. A crystallographic model for hydrous wadsleyite( $\beta$ -Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>): an ocean in the Earth's interior?. *Am Mineral*, **79**(9~10):1021~1024.
- Sokol A G, Tomilenko A A, Bul'bak T A, et al, 2019. Hydrogenation of carbon at 5.5~7.8GPa and 1100~1400°C: implications to formation of hydrocarbons in reduced mantles of terrestrial planets. *Phys Earth Planet Inter*, **291**:12~23.
- Su X W, Zhao C S, Lü C J, et al, 2021. The effect of iron on the sound velocities of  $\delta$ -AlOOH up to 135GPa. *Geosci Front*, **12**(2): 937~946.
- Timmerman S, Honda M, Phillips D, et al, 2018. Noble gas geochemistry of fluid inclusions in South African diamonds; implications for the origin of diamond-forming fluids. *Mineral Petrol*, **112**(sup 1):181~195.
- Tsuchiyama A, Miyake A, Kawano J, 2018, Nano-Sized CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Fluid Inclusions in Calcite Grains of the Sutter's Mill CM Meteorite[C]//81st Annual Meeting of the Meteoritical Society. **81**(2067):6187.
- Vidale J E, Shearer P M, 2006. A survey of 71 earthquake bursts across southern California; exploring the role of pore fluid pressure fluctuations and aseismic slip as drivers. *J Geophys Res:Solid Earth*, **111**(B5):B05312.
- Violay M, Nielsen S, Spagnuolo E, et al, 2013. Pore fluid in experimental calcite-bearing faults; abrupt weakening and geochemical signature of co-seismic processes. *Earth Planet Sci Lett*, **361**:74~84.
- Wallace P J, 2005. Volatiles in subduction zone magmas; concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data. *J Volcanol Geotherm Res*, **140**(1~3):217~240.
- Watson E B, Brenan J M, 1987. Fluids in the lithosphere, 1. Experimentally-determined wetting characteristics of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O fluids and their implications for fluid transport, host-rock physical properties, and fluid inclusion formation. *Earth Planet Sci Lett*, **85**(4):497~515.
- Yoshida K, Hirajima T, Miyake A, et al, 2016. Combined FIB microsampling and X-ray microtomography: a powerful tool for the study of tiny fluid inclusions. *Eur J Mineral*, **28**(2):245~256.
- Zhang B H, Yoshino T, Wu X P, et al, 2012. Electrical conductivity of enstatite as a function of water content; implications for the electrical structure in the upper mantle. *Earth Planet Sci Lett*, **357~358**:11~20.
- Zhang Y X, 2014. Degassing history of Earth. *Treatise Geochem(Second Ed)*, **6**:37~69.

## Mantle Fluids and Their Role in Earthquake Generation

Yang Fan<sup>1)</sup>, Sun Fengxia<sup>2,3)</sup>, Liu Yinan<sup>4)</sup>, Du Jianguo<sup>2,3)</sup>

1) Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

2) United Laboratory of High-Pressure Physics and Earthquake Science, Key Laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China

3) School of the Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

4) Fengman Seismic Station, Jilin Earthquake Agency, Jilin 132108, Jilin, China

**Abstract** Analysis of the geophysical, planetary-geochemical and high pressure and temperature experimental data indicates that plenty of fluids exists in the mantle. In this paper, some hypotheses of fluid-induced earthquakes were briefly introduced and the prospects were suggested. The data of the fluid samples in mantle rocks, water-bearing high-pressure phases of silicate and geophysical exploration indicate that fluids exist in the whole mantle, mantle transition zone among which D'' layer are enriched in the fluids that are high energy density, and total amount of water in the mantle is estimated being several magnitudes higher than that of sea water on the earth. Thermal convection caused by migration of the high energy density fluids results in heterogeneities of temperature, seismic wave velocity, electrical conductivity and chemical compositions in the solid earth. The upwards migrating fluids alter the physical and chemical properties of the crust and mantle rocks, and provide huge amount of heat energy for producing magma and earthquake. The functions of mantle fluids in the earthquake generation involve two aspects that are inducing earthquake by reducing friction between two walls of a fault, and producing earthquake by explosion or phase transfer of the fluids. The cryptoexplosive mechanics means that the high energy density fluids derived from the core and mantle migrate repeatedly in the way of episodic penetration-inflate-cryptoexplosion cycle, resulting in different types of earthquakes at the different depths. However, more work should be done further to understand both behavior of mantle fluids and their role in earthquake generation.

**Keywords:** Mantle fluid; Earthquake; Fluid inclusion; Mantle minerals; High temperature and high pressure experiment