

深部流体与地震成因的研究

张友联

(地震出版社, 北京 100081)

摘要: 论述了地震的形成、发生机制与深部流体在地震形成过程中的作用。地震的孕育过程是十分复杂的, 地震的成因机制可能是多种多样的。对地震成因和地震前兆形成机理的深入认识对实现准确预测地震和减轻地震灾害有重要意义。地球内部是个含水体系, 流体和壳幔内不连续层与地震的孕育和发生有着密切关系。深部流体可以降低岩石的强度、熔点, 可以传输热能, 改变矿物相变的温压条件, 促进地震的孕育和发生。当地质体内流体的压力大于岩石抗压强度时, 可以直接导致地震发生。

关键词: 地震成因; 深部流体; 流体压力; 矿物相变

中图分类号: P315.72⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)02-0239-07

0 前言

地震灾害是主要自然灾害之一, 减轻地震灾害的一个重要环节是地震预报。研究地震形成、发生机制和地震前兆形成机理是准确预测地震的前提。20世纪人们对地震进行了广泛研究, 但是地震发生机制目前尚未清楚。过去40多年的地震科学研究进展与实现地震预报的目标之间还存在着很大的距离。最近20多年来世界各地发生的灾难性地震都没有成功预报 (Geller *et al.*, 1996), 其原因是人们对地震孕育、发生机制尚不清楚, 尚未掌握地震活动的规律。断层引发地震的理论能够较好地解释地壳浅层 (0~15 km) 地震的成因。但是, 也有许多地震地质现象得不到合理解释, 例如华北地区大部分活动断裂在11~12 km深的滑脱带消失, 但是大部分地震的震源深度在15~20 km的范围内。此外, 在15 km以下岩石主要表现为流变行为, 高温条件下, 在下地壳及其以下的岩石不可能发生脆性断裂 (Chen, Molnar, 1983; Ruff, 2004)。当然, 有人提出在地温梯度小的地区, 下地壳及地幔岩石圈温度较低, 能够发生脆性断裂 (Shudofsky *et al.*, 1987; Doser, Yarwood, 1994)。但是, 这与实际地质情况不符, 因为地震带一般与地热带重叠, 地温梯度低的稳定地块岩

石圈内很少发生大地震 (Du *et al.*, 2007)。因此, 我们看到的多数地震断层是地震活动的几何表现, 而不是地震成因。中地壳以下地震孕育发生的最重要因素之一是流体 (Reyners *et al.*, 2007; Du *et al.*, 2008; Terakawa *et al.*, 2010; Savage, 2010)。本文在介绍地震成因的研究历史、不同阶段认识的基础上, 主要阐述地球深部过程中矿物脱水、深部流体运移与地震成因的关系。

1 地震成因研究的发展与现状

人类与地震相识已久, 但是了解甚少。远在2700年前西周时就有探讨地震成因的记载: “阳伏而不能出、阴迫而不能蒸、于是有地震”。简单地回顾现代历史中对地震成因的研究: 1906年旧金山大地震之后, 美国人里德提出弹性回跳假说来解释地震的孕育和发生过程 (Reid, 1910); 1927年日本的和达认为断层型浅源地震产生视圆形节线, 地震是断层运动的概念逐步形成; 20世纪50年代展开了震源驱动力是单力偶还是双力偶的争论, 到60年代从弹性理论证明了与沿面滑动等价的模式是双力偶模式; 进入70年代, 在震源过程研究方面又提出了矩张量 (即通过震源区的积分量给出震源处不满足方程式的实际地下应力与满足方程式的应力之差), 用矩张量反演震源参数

* 收稿日期: 2010-12-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目: 矿物脱水与地震孕育的关系 (40873049) 资助.

(久家慶子, 1995)。郭增建等(1974)根据积累单元断层面的剪切应力与摩擦阻力之间的量比提出了大震孕育发生的三阶段模式。Kisslinger(1976)评述了激发地震的因素、激发地震释放能量的来源与激发地震连续发生的条件; 钻孔注水压裂和地下爆炸本身就是地震事件, 这可能与地球深部流体向上运移过程中发生地震的机制有相似性; 尽管多数地震的发生机制近似于双力偶机制, 但是的确存在部分非双力偶机制的地震; 到80年代非双力偶地震引起了争论, Julian和Sipkin(1985)认为非双力偶地震是在流体压力作用下沿水平方向快速引张地下裂缝发生的。Wallace等(1985)则认为地震是正断层和走滑断层同时滑动引起的; 地震成因与壳幔物质演化有关, 地幔物质部分熔融、上逸到地壳中, 为地震的发生创造了条件。岩浆上涌、岩浆挥发份的膨胀是唐山地震的力源(刘武英等, 1996); 最近的研究表明, 流体在地震孕育、发生过程中起着重要作用, 流体从地球内向外溢出可引起地震(Du *et al.*, 2008; Terakawa *et al.*, 2010; 杜乐天, 2005, 2007)。

人类对中源(震源深度在70~300 km)、深源(震源深度大于300 km)地震的成因机制的了解更少。由于地球内部物质处于高温高压状态, 岩层脆性减弱, 体现流变的特征, 难以发生脆性断裂。对于中、深源地震的成因机制存在多种假说, 如, 岩浆冲击、相变、地幔对流、温度应力等假说。Raleigh和Paterson(1965)发现在高压下蛇纹石脱水可以使蛇纹岩脆化, 岩石发生破裂。而蛇纹石不脱水时会发生塑性和柔性变形。Goto等(1985)用数值模拟方法研究了岛弧下消减板块内形成中—深源地震的应力, 认为热膨胀和橄榄石—尖晶石相变在地震形成过程中起重要作用。震源深度在400 km和600 km的峰值分别对应了辉石向钛铁矿相、石榴子石向钙钛矿相转变的深度, 地幔内相边界的热扰动引起的向下的压应力峰值和深源地震震源深度峰值的一致性表明矿物相变对俯冲板块内的应力有重要的影响(Bina, 1996)。俯冲板块内的橄榄石常处于亚稳定态, 随时有释放能量转变为尖晶石的可能, 从而引发深源地震(Stein, 1995; 侯渭, 谢鸿森, 1996)。Green和Houston(1995)在前人研究的基础上归纳了深源地震的形成机制: ①塑性不稳定性; ②剪切诱导

熔融; ③重结晶相伴的不稳定性; ④矿物相变。久家慶子(1995)总结出解释深源地震物理机制的理论主要有加速延性变形理论、间隙流体理论、相变触发理论等。但是, 目前对深源地震的物理机制尚无定论。

总之, 地震成因应该有多种, 地震的孕育和发生机制应该是多样的, “弹性回跳模型”不能解释所有地震, 用太简化的库伦应力模式表示中地壳以下岩石的破裂过程是不准确的。

2 深部流体在地震孕育中的作用

2.1 地球深部流体与地震活动

(1) 地震地质和实验证据

一般认为地震孕育和发生是断层发育过程中脆性剪切破裂或沿已有的断层走滑摩擦的结果, 符合双力偶模式。但是, 在中国大陆, 绝大多数地表看到的地震断层大约在中地壳左右就滑脱了, 而且地震震源并非在断层面上。显然, 上地壳内的地震断层应该不是中地壳以下发生地震的原因。当温度升高时, 岩石的流动应力大大降低, 岩石在高压下破裂和摩擦过程受到压力的限制(Wiens, Snider, 2001)。岩石在深度大于15~20 km的地壳内, 一般以塑性变形为主(马托埃, 1980)。岩石流变学实验表明在地下深度10~25 km的温压条件下, 岩石已经表现为非弹性的性质, 岩石破坏必定是一个与时间密切相关的复杂的蠕变破坏过程; 地球岩石圈或大陆造山带形成和演化的本质是地球物质非弹性变形的表现, 是在差异应力、时间、热状态、压力和流体等因素综合作用下流动和重新定位的结果(杨恒, 白武明, 2000)。刘俊来和岛田充彦(2000)在不同温度和不同围压条件实验研究的基础上, 提出脆—韧性转变域内脆性破裂机制和晶质塑性机制同时出现、互相制约和依存的理论, 以此来解释大陆地壳多震层的成因与中上地壳强震发震机理。牛树银等(2003)认为地幔亚热柱热物质流动控制了华北地震孕育和发生, 中地壳脆性—韧性过渡带的局部弱化, 可能是某些大陆地震的成因机制。Long和Zelt(1991)认为熔融物质的侵入使大陆地壳的水力学或热力学性质发生扰动, 致使中地壳脆性—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,进而发生地震。

(2) 深部流体与地震的关系

深部流体的运移、聚集和突破运移是一种重要的地震孕育模式。地球物理资料表明日本绝大多数壳内大地震发生在低速区或围绕低速区的地方,流体和岩浆对地震形成有重要影响(Zhao *et al.*, 2002),中国大陆大地震震源分布也有类似特征(Du *et al.*, 2008)。Chiodini 等(2004)完成了意大利西部地球脱气地质填图,发现了地震带 CO₂ 的直接排放量急剧减少,地壳内聚集 CO₂ 形成超压引发地震。Kurz 等(2004)对欧洲板块内震群的研究表明,板内震群可能与全球构造无关,而是流体触发的,温度的线性变化和孔隙压力的周期性变化是动力来源;在板内和板块边缘震群的形成都与流体是分不开的,而且这种震群的发震机制区分不出火山流体还是非火山流体(水)引起的。华北地震的孕育与亚地幔柱热流体活动有关(牛树银, 2003)。杜乐天(2005)论述了地球脱气对大地构造的影响,及其和地震等自然灾害的关系,地球内部流体穿透能量很强,可以引发地震。深部流体向上运移到地表形成地热异常区(Du *et al.*, 2005, 2007),如果在某个部位运移受阻、聚集时,就形成低速高导层,当流体压力超过岩石强度时,流体就会突破围岩产生地震(Du *et al.*, 2008)。地质历史中有许多天然的隐爆角砾岩、岩席、岩脉、岩墙和不同深度的侵入岩体,这些地质体的形成过程中无疑发生过许许多多的地震。钻孔注水压裂和地下爆炸本身就是地震事件,这与地球深部流体向上运移过程中发生地震的机制相类似(Kisslinger, 1976)。流体和岩浆对地震的形成有着重要影响,大地震的形成与地壳和地幔岩石的物理化学性质有关(Zhao *et al.*, 2002)。Wiens 和 Sinder(2001)发现在板块俯冲带内,在与富士山附近的三个深震群大致相同的地方和时间产生了小破裂,这表明热剪应力不稳定,热能触发了一系列的地震。

Konstantinou 和 Schlindwein(2002)把火山地区震群的成因模型分为4类:①岩浆流体传输通道内流体流动诱发地震;②流体充填裂隙激发或共振;③地下水水热沸腾引起的气泡生长和破灭;④各种关于不同尺度岩浆体颤动的模型。沿菲律

宾海板块俯冲带非火山区,在深度约30 km 的莫霍面附近发生了连续的地震动——长周期地震(long-period tremors), Julian(1994; 2002)也认为这种地震是由变质流体流动触发的,称之为“变质成因地震”(metamorphic tremor)。然而, Obara(2002)提出这些地震是由俯冲板块脱水引起的。

2.2 深部流体在地震形成中的作用机制

(1) 矿物脱水引起地震

在地壳和地幔中脱水作用和熔融反应不仅产生大量流体,而且在地震活动中起着重要作用。当脱水和熔融反应产生的流体压力足够大时,就会产生水压裂隙,进而影响岩石的孔隙度和渗透率;不同流体压力状态之间的压力阻挡层突然破裂会形成瞬间低压边界,压力降又促进了脱水和熔融反应(Miller *et al.*, 2003)。高温高压岩石实验发现,含水矿物脱水及其部分熔融可能与地球内部低速高导层的形成和地震的成因有内在联系(Liu *et al.*, 2002, 2003; 刘巍, 2005; Bai *et al.*, 2003; 白利平等, 2002)。Raleigh 和 Paterson(1965), Meade 和 Jealoz(1991)认为俯冲板块脱水脆化可能是中源地震发生的原因。徐常芳(1997, 1998)对地震前后的一些现象、深部探测结果和高温高压下流体性质进行研究,以深部流体为重要条件,提出了岩体势能—动能转换的地震成因说,强调了深部流体的重要性。

蛇纹石脱水实验结果表明脱水脆化是与深度无关的一种触发地震的机制,俯冲板块顶部低速带是流体充填定向排列的裂隙造成的(Jung *et al.*, 2004)。谢鸿森等(2000)在高压下用六面顶砧压机加热蛇纹石,使其脱水,约在670 °C时蛇纹石发生爆炸,这可能是一种发震机制。Irfune 等(1996)通过研究高温高压(200~300 °C, 14~27 GPa)下蛇纹石变成非晶质、脱水、快速结晶的结构转变,提出深震可能是由于蛇纹石脱水导致的。Dobson 等(2002)通过研究蛇纹石脱水,发现蛇纹石脱水产生裂隙和声发射,并模拟了俯冲带地震的成因。Omori 等(2004)证明了俯冲带地震的深度分布与水化的蛇纹岩板块内脱水有密切关系,尽管目前触发机制是未知的,但是在俯冲板块内特定的温压条件下脱水作用是地震的触发机制,因此,提出了持续脱水作用诱发地震的假说。

(2) 断层带高流体压力引起地震

Anderson (1951) 认为当应力超过岩石弹性极限时, 破裂不均匀的岩石在预期的断层面破裂, 引发地震。地体客观存在的断裂、层理、侵入接触等薄弱带都是形成破裂不均匀和波速各向异性的原因。在应力作用下, 岩石沿不同产状的薄弱带破裂引发地震需要的应力要远低于完整新鲜岩石破裂所需的应力。断层上盘的岩石压力, 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降低了摩擦力, 有利于断层滑动。地震谱上的初动和波形反映的震源机制, 可以用来判断断层活动面。多数地区, 特别是小震区, 利用靠近地震的断层面产状变化可以确定优选取向和区域应力矢量的相对大小 (Gephart, Forsyth, 1984)。Balfour 等 (2005), Mount 和 Suppe (1987) 利用这种方法反演的取向误差和大地震破裂表明, 美国 San Andreas 大断裂和新西兰 Marlborough 的小断层的弱化可能都是高孔隙压力引起的。Terakawa 等 (2010) 和 Lucente 等 (2010) 根据意大利 2009 年 L'Aquila 地震及其前震序列, 定量地研究了流体和流体运移与每个地震序列的关系。他们假定断层面摩擦变化与孔隙压力相比是可以忽略的, 利用每个断层的取向确定了孔隙压力的分布, 对断层任意方向破裂需要的最小孔隙压力变化填图, 进而对每个地震发生所需最小孔隙压力空间变化填图。用该方法确定的最高孔隙压力出现在前震和主震的地方, 这表明岩石破裂归因于流体压力。这种根据震源机制进行流体压力变化填图的新方法可谓是科学界的一个突破 (Savage, 2010), 利用全部主震和前震资料的流体填图结果表明, 在前震和主震附近流体压力异常高; 在 M4.0 前震和主震后一周内, 研究区内不同的 V_p/V_s 值和各向异性表明, 流体在前震区不同的地域之间发生运移 (Terakawa *et al.*, 2010; Lucente *et al.*, 2010; Di Luceio *et al.*, 2010)。

(3) 流体影响矿物相变有利于地震发生

Goto 等 (1985) 认为在岛弧下消减板块内中—深源地震发生的深度范围内, 热膨胀和橄榄石—尖晶石相变导致应力集中是地震形成的重要因素。400 km 以下深源地震的发生与该深度范围亚稳态橄榄石的存在有关, 并有可能受反裂纹机制

的控制 (Iidaka, Suetsugu, 1992; Furukawa, 1994; 宁杰远, 臧绍先, 1999)。由于物质处于低压亚稳相 (α) 向高压相 (γ) 转变时释放大量的潜能, 使周围的物质形成局部高温, 这种热异常就会触发应力释放从而引发地震。应力释放的发震剪切失稳机制包括脱水、失控相转变或依赖温度的流变弱化, 这与断裂产生地震的机制是不同的 (Bina, 1998)。在实际俯冲板块和上地幔环境中, 由于矿物脱水反应和板块俯冲带入的水是大量存在的 (Kohlstedt *et al.*, 1996), 而且水对橄榄石相变过程会产生很大的影响 (Chen *et al.*, 2002)。水在两个方面影响橄榄石相变: ①降低 Si—O 键断裂活化能, 增强原子通过两相接触面的扩散速率 (Rubie, 1986); ②导致矿物相的强度弱化, 减弱抑制新相生长的应力 (Kubo *et al.*, 1998)。Hosoya 等 (2005) 和 Kubo 等 (1998) 实验探讨了水对亚稳态橄榄石存在范围的影响, 进行了两组 Mg_2SiO_4 含水重量比分别为 $2\,000 \times 10^{-6}$ 和 $5\,000 \times 10^{-6}$ 的实验, 相变过程只考虑了 $\alpha-\beta$ 相变, 结果表明水含量的增加会大大降低亚稳态橄榄石的存在范围。

3 结语

地震孕育过程是十分复杂的, 地震的成因机制可能是多种多样的。在中地壳以下发生的地震, 不能简单地用“弹性回跳模型”来解释。地球内部是个含水体系, 流体和壳幔内不连续层与地震的孕育和发生有着密切关系。深部流体向上运移形成地热异常区, 地热异常区一般与地震带重合。流体在地震形成过程中的作用机制主要包括矿物脱水、矿物相变和异常高的流体压力形成。矿物脱水、矿物相变和异常高的流体压力不仅是形成和触发地震的重要因素, 还是低速高导层的形成演化的控制因素。但是, 关于地震成因机制还需深入研究, 尤其是深部流体在地震孕育中的作用。如果能得到一些定量地反映实际地震成因的结论, 那么地震预测将会有重大的突破。

感谢中国地震局地震预测研究所杜建国研究员对文章提出的建设性意见和对文章的修改, 感谢审稿专家对文章提出的宝贵意见。

参考文献:

- 白利平, 杜建国, 刘巍, 等. 2002. 高温高压下辉长岩纵波速度和电导率实验研究[J]. 中国科学(D 辑), 32(11): 959–968.
- 白利平, 杜建国, 刘巍, 等. 2002. 高温高压下斜长岩纵波速度与电导率实验研究[J]. 地震学报, 24(6): 638–646.
- 杜乐天. 2005. 地球排气作用的重大意义及研究进展[J]. 地质论评, 51(2): 174–180.
- 杜乐天. 2007. 固体地球观向流体地球观的概念更新[J]. 地球物理学进展, 22(4): 1220–1224.
- 郭增建, 秦保燕, 冯学才. 1974. 从震源孕育模式讨论大震前地下水的变化[J]. 地球物理学报, 16(2): 99–105.
- 侯涓, 谢鸿森. 1996. 板块俯冲带的构造岩浆活动与地幔矿物稳定性的成因关系[J]. 地质地球化学, (2): 14–17.
- 久家慶子. 1995. 地震メカニズム論の変遷[J]. 地震ジャーナル, 19: 26–32.
- 刘俊来, 岛田充彦. 2000. 大陆地壳多震层成因与一个新的地壳断层带模式[J]. 科学通报, 45(10): 1085–1091.
- 刘巍, 杜建国, 谢鸿森, 等. 2005. 4. 0GPa 压力下纯橄岩弹性纵波速度和衰减的实验研究[J]. 高压物理学报, 19(4): 293–298.
- 刘武英, 李龙海, 吴建华, 等. 1996. 从地球化学角度讨论 1978 年唐山 7.8 级地震的成因[J]. 地质地球化学, (5): 66–69.
- 马托埃. 1980. 地壳变形[M]. 孙坦, 张道安, 译. 北京: 地质出版社.
- 宁杰远, 臧绍先. 1999. 俯冲带深震成因探讨[J]. 地震学报, 21(5): 523–532.
- 牛树银, 侯泉林, 王宝德, 等. 2003. 华北地区拆离滑脱带控震作用初探[J]. 地震研究, 26(3): 257–264.
- 谢鸿森, 周文戈, 李玉文, 等. 2000. 高温高压下蛇纹岩脱水的 P 弹性特征及其意义[J]. 地球物理学报, 43(6): 806–811.
- 徐常芳. 1997. 壳内流体演化与地震成因(三)[J]. 地震学报, 19(2): 139–144.
- 徐常芳. 1998. 地震流体成因说及其应用研究[J]. 地震, 20(增刊): 89–97.
- 杨恒, 白武明. 2000. 岩石圈流变实验研究的进展[J]. 地球物理学进展, 15(2): 80–89.
- Anderson E. 1951. The Dynamics of Faulting and Dyke Formations with Applications to Britain (2nd Edition) [M]. Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Bai L, Du J, Liu W, Guo J. 2003. Evidence of grain boundary transport from impedance of Gabbro at 1–2 GPa and up to 890°C [J]. Chinese Phys Lett, 20(11): 2074–2077.
- Balfour N J, Savage M K, Townend J. 2005. Stress and crustal anisotropy in Marlborough, New Zealand: Evidence for low fault strength and structure-controlled anisotropy[J]. Geophys J Intern, 163(3): 1073–1086.
- Bina C R. 1996. Phase transition buoyancy contributions to stresses in subducting lithosphere [J]. Geophys Res Lett, 23(24): 3563–3566.
- Bina C R. 1998. A note on latent heat release from disequilibrium phase transformations and deep seismogenesis[J]. Earth Planets Space, 50(11/12): 1029–1034.
- Chen J H, Inoue T, Yurimoto H, et al. 2002. Effect of water on olivine-wadsleyite phase boundary in the (Mg, Fe)2SiO4 system [J]. Geophys Res Lett, 29(18): 1–4.
- Chen W P, Molnar P. 1983. Focal depths of intracontinental and intraplate earthquakes and their implications for the thermal and mechanical properties of the lithosphere [J]. J Geophys Res, 88(B5): 4183–4214.
- Chiodini G, Cardellini C, Amato A, et al. 2004. Carbon dioxide Earth degassing and seismogenesis in central and southern Italy [J]. Geophys Res Lett, 31(7), L07615, doi:10.1029/2004GL019480.
- Di Luccio F, Ventura G, Di Giovambattista R, et al. 2010. Normal faults and thrusts activated by deep fluids: The 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Central Italy [J]. J Geophys Res, 115(B6): doi:10.1029/2009JB007190.
- Dobson D P, Meredith P G, Boon S A. 2002. Simulation of subduction zone seismicity by dehydration of serpentine [J]. Science, 298(5597): 1407–1410.
- Doser D I, Yarwood D R. 1994. Deep crustal earthquakes associated with continental rifts [J]. Tectonophysics, 229(1–2): 123–131.
- Du J, Liu C, Fu B, et al. 2005. Variations of geothermometry and chemical-isotopic compositions of hot spring fluids in the Rehai geothermal field, Southwest China [J]. J Volcano Geotherm Res, 142(3–4): 243–261.
- Du J, Si X, Chen Y, et al. 2008. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China [M]//Stefánsson. Geochemistry Research Advances, New York: Nova Science Publishers, Inc, 57–92.
- Du J, Zhang Y, Li H. 2007. Advances in studies of thermal-fluid geochemistry and hydrothermal resource in China [M]//Ueckermann H I. Geothermal Energy Research Trends. New York: Nova Science Publishers, Inc. 51–88.
- Furukawa Y. 1994. Two types of deep seismicity in subducting slabs [J]. Geophys Res Lett, 21(12): 1181–1184.
- Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. 1996. Earthquakes cannot be predicted [J]. Sci, 275(5306): 1616–1617.
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence [J]. J Geophys Res, 89(B11): 9305–9320.
- Goto K, Hamaguchi H, Suzuki Z. 1985. Earthquake generating stresses in a descending slab [C]//Kobayashi K, Sacks I S. Structures and Processes in Subduction Zones. Tectonophysics, 112(1–4): 111–128.
- Green II H W, Houston H. 1995. The mechanics of deep earthquakes [J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 23: 169–213.
- Hosoya T, Kubo T, Ohtani E, et al. 2005. Water controls the fields of metastable olivine in cold subducting slabs [J]. Geophys Res Lett, 32(17): 1–4.
- Iidaka T, Suetsugu D. 1992. Seismological evidence for metastable olivine

- inside a subducting slab[J]. *Nature*, 356(6370): 593–595.
- Irfune T, Kuroda K, Funamori N, *et al.* 1996. Amorphization of serpentine at high pressure and high temperature[J]. *Sci*, 272(5267): 1468–1470.
- Julian B R, Sipkin S A. 1985. Earthquake processes in the Long Valley caldera area California[J]. *J Geophys Res*, 90(B13): 11155–11169.
- Julian B R. 1994. Volcanic tremor: Nonlinear excitation by fluid flow[J]. *J Geophys Res*, 99(B6): 11859–11878.
- Julian B. 2002. Seismological Detection of Slab Metamorphism[J]. *Science*, 296(5573): 1625–1626.
- Jung H, Green H W. 2004. Experimental faulting of serpentinite during dehydration: implications for earthquakes, seismic low-velocity zones, and anomalous hypocenter distributions in subduction zones[J]. *Intern Geol Rev*, 46(12): 1089–1102.
- Jung H, Green H W, Dobrzinetskaya L F. 2004. Intermediate-depth earthquake faulting by dehydration embrittlement with negative volume change[J]. *Nature*, 428: 545–549.
- Kisslinger C. 1976. A review of theories of mechanisms of induced seismicity[J]. *Eng Geol*, 10(2–4): 85–98.
- Kohlstedt D L, Keppeler H, Rubie D C. 1996. Solubility of water in the α , β and γ phases of $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$. *Contrib Mineral Petrol*, 123(4): 345–357.
- Konstantinou K I, Schlindwein V. 2002. Nature, wavefield properties and source mechanism M_s of volcanic tremor: A review[J]. *J Volcanol Geotherm Res*, 119(1–4): 161–187.
- Kubo T, Ohtani E, Fujino K. 1998. Effects of water on the α – β transformation kinetics in San Carlos olivine[J]. *Science*, 281(5373): 85–87.
- Kurz J H, Jahr T, Jentzsch G. 2004. Earthquake swarm examples and a look at the generation mechanism of the Vogtland/ Western Bohemia earthquake swarms[J]. *Phys Earth Planet Inter*, 142(1–2): 75–88.
- Liu W, Du J, Ba L, *et al.* 2003. Ultrasonic P wave velocity and attenuation in pyroxenite under 3.0 GPa and up to 1170°C[J]. *Chinese Physics Letter*, 20(1): 164–166.
- Liu W, Du J, Bai L, Guo J. 2002. Compressional elastic wave velocities of serpentinized olivine-bearing pyroxenite up to 960°C at 1.0 GPa[J]. *J Phys Condensed Matter*, 14(44): 11355–11358.
- Long L T, Zelt K H. 1991. A local weakening of the brittle-ductile transition can explain some intraplate seismic zones[J]. *Tectonophysics*, 186(1–2): 175–192.
- Lucente F P, Gori P D, Margheriti L, *et al.* 2010. Temporal variation of seismic velocity and anisotropy before the 2009 MW 6.3 L'Aquila earthquake, Italy[J]. *Geol*, 38(11): 1015–1018.
- Meade C, Jealoz R. 1991. Deep-focus earthquakes and recycling of water into the Earth's mantle[J]. *Sci*, 252(5002): 68–72.
- Miller S A, van der Zee W, Olgaard D L, *et al.* 2003. A fluid-pressure feedback model of dehydration reactions: experiments, modelling, and application to subduction zones[J]. *Tectonophysics*, 370(1–4): 241–251.
- Mount V S, Suppe J. 1987. State of stress near the San Andreas fault: Implications for wrench tectonics[J]. *Geol*, 15(12): 1143–1146.
- Obara K. 2002. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan[J]. *Sci*, 296(5573): 1679–1681.
- Omori S, Komabayashi T, Maruyama S. 2004. Dehydration and earthquakes in the subducting slab: empirical link in intermediate and deep seismic zones[J]. *Phys Earth Planet Inter*, 146(1–2): 297–311.
- Raleigh C B, Paterson M S. 1965. Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications 500–600°C, marked weakening[J]. *J Geophys Res*, 70(16): 3965–3985.
- Reid H F. 1910. The California Earthquake of April 18, 1906. Volume II. The Mechanics of the Earthquake[M]//Washington DC: Carnegie Institution of Washington, Publication, (87): 1–192.
- Reyners M, Eberhart P D, Stuart G. 2007. The role of fluids in lower-crustal earthquakes near continental rifts[J]. *Nature*, 446(7139): 1075–1078.
- Rubie D C. 1986. The catalysis of mineral reactions by water and restrictions on the presence of aqueous fluid during metamorphism[J]. *Mineral Mag*, 50: 399–415.
- Ruff L J. 2004. Limits of the Seismogenic Zone[M]//Karner G D, Taylor B, Driscoll N W, *et al.* Rheology and Deformation of the Lithosphere at Continental Margins. New York: Columbia Univ, Press, 138–165.
- Savage M K. 2010. The role of fluids in earthquake generation in the 2009 Mw 6.3 L'Aquila, Italy, earthquake and its foreshocks[J]. *Geol*, 38(11): 1055–1056.
- Shudofsky G N, Cloetingh S, Stein S, Wortel R. 1987. Unusually deep earthquakes in East Africa: constraints on the thermo-mechanical structure of a continental rift system[J]. *Geophys Res Lett*, 14(7): 741–744.
- Stein S. 1995. Deep earthquakes: A fault too big[J]. *Sci*, 268(5207): 49–50.
- Terakawa T, Zoporowski A, Galvan B, *et al.* 2010. High-pressure fluid at hypocentral depths in the L'Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms[J]. *Geol*, 38(1): 995–998.
- Wallace T C. 1985. A reexamination of the moment tensor solutions of the 1980 Mammoth Lakes earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 90(B13): 11171–11176.
- Wiens D A, Snider N O. 2001. Repeating deep earthquakes: evidence for fault reactivation at great depth[J]. *Sci*, 293(5534): 1463–1466.
- Zhao D, Mishra O P, Sanda R. 2002. Influence of fluids and magma on earthquakes: seismological evidence[J]. *Phys Earth Planet Inter*, 132(4): 249–267.

Review of the Seismogenic Study and the Mechanism of Earthquake Resulted from the Deep-earth Fluids

ZHANG You-lian

(*Seismological Press, Beijing 100081, China*)

Abstract

The role the of deep-earth fluids in seismogenic mechanism were sytematically discussed. The correct understandings for seismogenic mechanism and precursors are preconditions for the impending-earthquake prediction and the seismic-disaster mitigation. Over the past one hundred years, some hypotheses for seismogenesis were proposed. However, the seismogenic mechanism has not been well revealed. The important role of fluids in generation and occurrence of earthquakes has attracted more and more attention. The strength, the melting temperature of rocks in deep earth can be reduced by fluids. Fluids act as the medium for heat transfer, and they change the pressure and temperature for stabilities of minerals to facilitate the generation and occurrence of earthquakes. Fluids can directly result in earthquake when the pore fluid pressure exceeds the elastic stress of rock.

Key words: deep-earth fluids; earthquake; phase transfer; pore fluid pressure