

孙凤霞, 崔月菊, 杨帆, 等, 2022. 利用流体包裹体分析技术研究地震和断层活动的进展. 中国地震, 38(3): 446~454.

利用流体包裹体分析技术研究地震 和断层活动的进展

孙凤霞^{1,2)} 崔月菊¹⁾ 杨帆³⁾ 刘轶男⁴⁾ 姜莉^{1,2)} 杜建国^{1,2)}

1) 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

2) 中国地质大学(北京), 地球科学与资源学院, 北京 100083

3) 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

4) 吉林丰满地震台, 吉林吉林 132108

摘要 矿物中的流体包裹体记录了地球古流体的形成和演化、矿物的形成环境等各种地质信息。利用微区微量测量技术测定断裂带脉石矿物流体包裹体可以获得断层和地震活动的信息, 延长认识地震复发周期的时间, 对确定地震活动规律有重要意义。迄今为止, 地震流体研究主要是关于宏观区域流体(水和气体)变化规律及其与地震的关系, 对微区微量流体的研究很少。本文扼要介绍了地震和构造活动中流体作用与流体包裹体拉曼光谱测量技术, 综述了流体包裹体(FI)分析在地震与断裂活动方面的研究进展, 并提出了进一步研究的领域, 以期促进微区微量地震流体研究和应用。

关键词: 流体包裹体 古地震 断层 地震活动周期 岩脉

[文章编号] 1001-4683(2022)03-0446-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

流体在地球与行星形成、演化过程中起着重要作用。在地质历史中, 流体参与了从内生到外生作用、从无机到有机的所有过程, 经历了各种各样的演化。获取现代大气圈和水圈的样品, 即使是在一些极端环境(深海、极地冰川、火山和高空等)都较为容易。但是, 获取不同时期、不同环境的古流体样品比较困难, 唯一途径是提取岩石孔隙和矿物晶体中封存的流体。将矿物晶体缺陷或损伤部位愈合封存的流体称为流体包裹体(FI), FI具有体积小、量微等特征, 可分为4种成因类型: 原生包裹体、假次生包裹体、次生包裹体和变生包裹体。由于FI可以将不同时期环境中形成的流体圈闭在各种矿物内, 因此对FI的研究得到了广泛应用, 涉及从微观的水-岩反应到宏观的地球脱气、岩浆起源到火山喷发、沉积成岩到变质、热

[收稿日期] 2020-12-08 [修定日期] 2021-08-04

[项目类别] 中国地震局基本科研业务费专项(2019IEF0502)、高压物理与地震科学联合实验室基金项目(2019HPPE08)共同资助

[作者简介] 孙凤霞, 女, 1990年生, 助理研究员, 主要从事流体地球化学等研究。E-mail: 396425908@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: jiangduo@hotmail.com

液萃取到化学沉淀、矿产资源勘探开发到环境治理、天然材料到合成材料、地震与构造活动以及考古、核废料地质处置等诸多领域 (Dubessy et al, 2012; Frezzotti et al, 2012; Neuville et al, 2014; Randive et al, 2014; 刘斌, 2014、2018a、2018b; Hurai et al, 2015; Feely, 2018; Naumov et al, 2017; Klein et al, 2019)。

FI 分析在构造与地震活动研究方面的应用处于起步阶段, 是一个发展前景很好的新科学领域。Tuttle (1949) 最早报道了石英颗粒内次生 FI 直线形连续分布形成的 FI 面具有高度的取向性, 在不同时期形成的几组 FI 面的相对年龄记录了裂隙形成的时序和剪应力的方向。直到 20 世纪 80 年代, FI 在构造研究方面有了新进展, 实验和对天然样品的观测发现 FI 的体积、形状和盐度与包裹体圈闭环境的温度应力有密切关系, FI 面可以将流体渗流的不同阶段与变形事件的区域序列联系起来 (Lespinasse et al, 1986)。Boullier (1999) 结合实验资料, 以喜马拉雅变质岩石英透镜体中次生 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 的 FI 研究为例, 阐明了 FI 可用作温度、压力、结构、构造标志。刘斌 (2014) 介绍了利用 FI 研究古地震构造性质、应力场状态、物理化学环境及其地震成因。

破坏性地震的活动周期是防灾减灾的重要研究内容。由于地震记载的历史仅有几千年, 因此需要研究古地震来延长认识大震复发周期的时间尺度 (McCalpin, 1996; Du et al, 2010; 孙凤霞等, 2019)。活动构造研究在揭露更新世以来地震复发周期方面有了长足的进步, 如通过探槽判断晚更新世以来古地震期次及时间 (McCalpin, 1996; 郑颖平等, 2014; 扈桂让等, 2018; 程理等, 2020)。通过断裂带脉石矿物流体包裹体对古地震进行分析研究, 能够研究更长时间范围内的多期次历史地震活动 (Saishu et al, 2017; Smeraglia et al, 2018; Louis et al, 2019; 李春锐等, 2021)。通过对岩脉和流体包裹体寄主矿物定年、显微构造、力学性质、温度-压力等热力学性质进行识别与综合分析, 可识别地震震级 (能量)、应力变化、复发周期及断裂带愈合的温度压力条件等重要参数 (刘斌, 2014)。本文基于流体在地震和构造活动方面的作用和测定流体包裹体显微拉曼技术, 概述流体包裹体分析技术在地震与断裂活动方面的研究进展以及尚需深入研究的内容, 以期促进该研究领域的发展。

1 流体包裹体分析简介

从粒子、元素的发现到宇宙的探测, 光谱是打开自然奥秘之门的钥匙。拉曼光谱学的物理基础是固态、液态或气态物质对光的非弹性散射。拉曼散射 (拉曼效应) 是用单色光源将分子激发到一种虚态, 受激发分子跃迁到与基态不相同的振动能量级时, 少量光子 (约 $1/10^7$) 失去或得到能量, 产生散射频率与入射频率不同的散射光。频率不发生变化的散射称之为弹性散射, 即瑞利散射。入射光在介质中出现拉曼散射光和瑞利散射光的频率差值 ($\Delta\lambda$) 为拉曼位移 (Frezzotti et al, 2012)。单色光发生散射伴有分子振动、旋转或电子能量的变化。物质的拉曼活性取决于分子的偶极矩 (μ) 和极化率 (α); 拉曼光谱依赖于共价键分子内部振动模式, 与极化率变化显著相关的对称拉伸振动具拉曼活性。形成离子键的金属离子无拉曼活性, 因此离子键化合物和流体中的金属离子无法用拉曼光谱测量方法进行测量。

在过去的半个世纪, FI 测量在理论、技术研究与应用方面得到快速发展 (Neuville et al, 2014)。分析 FI 化学成分及形成环境的方法有很多, 可以分为两大类: 无损测量方法 (光学

方法、光谱方法和热学方法)和破坏性测量方法(色谱、质谱等各种化学分析方法)。用相应的方法测量 FI 物理化学参数的定性、定量数据,可以确定 FI 形成时的温度、压力、密度和化学成分及其物质来源,判断地球内部流体的赋存相态、物质来源和演化过程。

每个 FI 可视为一个独立的化学体系。化学体系的状态能够反映包裹体形成时的环境及其后期随环境的改变。用激光拉曼光谱技术可以分析微米级 FI,获得地质流体温度、压力、摩尔体积和组分性质的重要参数。按照包裹体内组分的相态,FI 可以分为单相体系、两相体系和多相体系。天然的 FI 中常见组分有 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 、 CO 、 C_2H_6 、高碳数烃(石油)、电解质等。对 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 、 CO 等单组分体系的热力学研究已较为成熟,其已成为研究微区微量地震流体的有效工具(Dubessy et al, 2012; Frezzotti et al, 2012; Neuville et al, 2014; Hurai et al, 2015; 刘斌, 2018a、2018b; Feely, 2018)。

2 流体包裹体分析在构造与地震活动研究中应用

2.1 流体参与地震和构造活动研究

利用 FI 研究构造和地震的客观依据是流体直接参与构造与地震活动(Ellsworth, 2013; 李丽等, 2015; Du et al, 2021)。断裂带是深部流体运移的通道。在断裂带速度强化区域内,经流体作用弱化的岩石的缓慢蠕滑,使得断层附近产生糜棱岩化剪切带,甚至产生地震摩擦熔融形成假玄武玻璃,进而引起浅层速度弱化区的新地震滑移事件,同时岩石的动力学破裂又为流体侵入和接触变质创造了条件(Jamtveit et al, 2019)。断裂带异常高压流体与断层和地震活动密不可分(Sibson, 2014),除流体循环作用形成断层“阀门”和断层带的蠕滑作用触发地震外,超高压流体隐爆、侵位等作用也可直接导致地震发生(Sibson, 2014; Yamashita et al, 2018; 杜建国等, 2010、2018a、2018b; Jamtveit et al, 2019; Müller et al, 2018; Du et al, 2021)。断层控制的含金石英脉系记录了流体参与的断裂活动过程,提供了地震带深部产生地震的证据,实验也证明超高压流体注入脆性岩石断裂可产生震群(Cox, 2016; Yamashita et al, 2018; 杜建国等, 2018b; Du et al, 2021)。大陆地壳韧性剪切带内的各种岩脉是流体搬运大量离子和离子沉淀的结果,标志着大量流体经历同构造渗流过程,并伴有大规模物质的带入和带出,在交代作用过程中形成的 FI 记录了与晶体爆裂相关的地震事件(Losh, 1989)。隐爆发生地震后,围压突然降低,在高流体压力环境中形成的大体积 FI 会发生矿物晶体内的爆裂。当包裹体内压力与限制压力之间的压力差(ΔP)大于寄主矿物抗压强度时,包裹体发生爆裂,在早期大体积 FI 周边形成微裂隙,再愈合形成晶体内的 FI 面(Roedder, 1984)。注水实验和地热区地震活动类型表明,向低渗透率岩石中注入大量流体形成超高压,导致震群活动,其震级分布范围为 $-2.0 < M_w < 4.0$ 。单一震群活动造成的破裂面积小于几平方千米,累积最大位移小于几厘米(Cox, 2016)。因此,从不同尺度研究流体参与地震断裂活动的地质现象有助于深入认识地震成因的多样性。

断裂带元素和同位素地球化学研究可以揭示流体在断裂活动过程中的作用(杜建国等, 2018; 鲍志诚等, 2019; 石宏宇等, 2022)。FI 记录了大陆发震区高流体通量通过断裂带时的超压条件,这促使许多热液矿床形成,同时,大量超高压流体注入低渗透率岩石导致与成矿相关的震群活动(Cox, 2016)。日本延冈逆断层带脉岩的微观元素地球化学特征表明,在地震反复活动过程中氧化还原状态发生波动,影响裂隙的愈合(Yamaguchi et al, 2011)。挪威

中部特伦德拉格县境内热液角砾岩基质(石英和钾长石)的化学特征与对 FI 的分析研究表明,角砾岩的形成与中三叠世一次快速释放应力的地震具有因果关系,基质是从含 CO_2 的 $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ 水溶液中晶出的,热液主要为变质流体(Müller et al,2018)。挪威西部麻粒岩中地震断层滑动面假玄武玻璃旁碎裂石榴石细网状变形和纳米级包裹体记录了流体参与地震活动的过程,在加载的早期出现了显微破裂和硫化物熔体,随后扩容作用引起流体普遍流入碎裂石榴石,在其中形成大量矿物包裹体,这反映了大约 4.2 亿年前地震触发的初期变质阶段(Austrheim et al,2017)。但是,应该注意形成这种假玄武玻璃的熔体有可能是流体隐爆冲击波作用产生的,或是高温高压变质过程部分熔融形成的,而局部摩擦产生熔融的可能性很小。

2.2 流体包裹体记录古地震参数和活动周期

FI 研究有利于确定古地震参数和活动周期。地球化学、显微观测、FI 拉曼光谱分析和岩石变形实验等多种方法的综合使用能够揭示断裂带碳酸盐胶结对地震周期活动及后期岩石物性的影响(Lacey,2018)。震后 SiO_2 沉淀使地震带力学和水文地质性质恢复,石英的沉淀使裂隙愈合,有利于流体再形成超高压。根据断裂带石英脉 FI 测温和测压资料、 SiO_2 饱和的流体中石英沉淀速率以及裂隙几何参数,建立石英脉形成的动力学模型,来判断流体运移过程中石英脉形成所需的时间,进而推断古地震复发周期(Saishu et al,2017)。通过同位素测年确定脉体形成时间、磷灰石(U-Th)/He 热年代法厘定岩脉形成后的热历史,结合流体对流和传导的有限元模型模拟上涌流体的热效应,可以恢复断裂带流体活动的周期性,从而确定流体触发地震活动的周期(Louis et al,2019)。根据最深埋藏条件下同构造增生石英的微量元素含量和 FI 成分能确定流体的性质,切割中地壳的断裂系统的流体流动主要发生在渗透率最大的余震群发的地方,大的余震和触发地震对小断层网内的高压流体流动起控制作用(Ehteshami-Moinabadi,2018)。北安纳托利亚断裂带同震裂隙中的方解石 U-Th 年代学揭示碳酸盐沉淀发生了 8 期,与历史地震记录对应较好,其显示在过去 1000 年内地震重复周期为 130~330a(Karabacak et al,2019)。对阿尔卑斯山和日本两个横穿脆性-塑性转换带的剖面的研究表明,转换带以下为流体封闭系统,在大约 350°C 时,气体为 CH_4 或 CO_2 ,仅棕色荧光的石英内流体盐度变化大,并常高于海水的盐度。外部流体阶段性注入断裂带导致蓝色石英的重结晶,体系中反复的流体瞬态开放是地震复发的要素,FI 测定的压力可能反映了震后降低的流体压力(Raimbourg et al,2018)。日本野岛断层钻探岩心中断层岩的矿物学、FI 研究表明,426.2m 深处存在强烈的脆性变形和蚀变的花岗闪长岩,FI 组分和蚀变矿物组合记录了 3 期热液蚀变和伴生的周期性复发地震(Ohtani et al,2000)。意大利亚平宁中部张性瓦尔·罗维特断裂为最长的潜在发震构造,对穿越该主断裂面的梳状和平行断裂滑动方向的方解石脉进行研究,发现这些岩脉是在更新世地震活动过程中地壳和地幔热流体向上运移,随温压变化沉淀方解石形成的,如果能够证明是同震形成的,那么岩脉就是独特的古地震史册(Smeraglia et al,2018)。对亚东裂谷断层发育的方解石脉显微结构及同位素测年分析表明,方解石脉形成与同震及震后同构造期记录了 679ka、544ka、444ka 和 408ka 的四次古地震(李春锐等,2021)。包裹体带间距的变化是慢滑移震颤(SST)及大型逆冲地震复发间隔时间的潜在地质指标。幕式震颤和慢滑移 ETS 复发间隔受石英沉淀控制,因此裂隙-愈合脉体及其流体包裹体为 SST 复发间隔时间提供了线索(Hyndman et al,2015)。日本

东部九州白垩系混杂岩中裂隙-愈合剪切脉体记录了短时间间隔内(几年)反复的低角度脆性逆冲作用,该事件与 SST 复发间隔相对应(Ujiie et al,2018)。对日本九州东部槇峰混杂岩中石英脉体进行分析,发现脉体中包裹体带间距在 $(4\pm 1) \sim (65\pm 18) \mu\text{m}$ 范围内循环变化,表明单个裂隙封闭时间在 $(0.16\pm 0.04) \sim (2.7\pm 0.8) \text{a}$,共存在两个循环周期,单个周期持续的时间大于 $27 \sim (93\pm 5) \text{a}$,分别与 SST 和大型逆冲地震复发时间间隔一致(Nishiyama et al,2021)。假玄武玻璃中 $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ 包裹体分析、假玄武玻璃层的几何特征和热估算表明产生假玄武玻璃的地震震级为 6~7 级(Boullier et al,2001)。

2.3 流体包裹体分析追溯断裂带愈合的温压条件

断裂带内矿物 FI 记录了断裂带裂隙愈合的温度、压力演化,利用 FI 面可以有效地确定古应力场的方向和强度以及同构造事件的流体压力。古埋藏深度和流体压力是确定地质构造变形与应力的关键因素,确定古应力场是研究构造史的关键。岩脉系是高流体压力、流动方向、流体温度变化、溶解与沉淀等物理化学过程的标志,利用每组 FI 面及其 $P-V-T-x$ 参数能够确定古应力方向和大小。当 FI 的成分和密度及其圈闭温度确定时,根据等容线可以确定流体压力,根据孔隙流体压力、岩石密度和深度可以估算垂向有效压力(Lespinasse,1999)。对次生 FI 数据进行统计得到石英中包裹体直径 D (单位: μm)与开始非弹性变形所需内压 P (单位:MPa)之间的函数关系为: $P=4.26D^{-0.423}$ (Bodnar et al,1989)。一个断裂带内 FI 和矿物学特征的变化表明了断层愈合过程中化学成分、温度和压力不同的多种流体作用。裂隙中流体降压导致石英、方解石、钾长石、钠长石的沉淀,矿物组合可以反映流体从高压储集区向低压储集区流动的降压过程。一些断裂带中不同成分的 FI 具有相似的均一温度(T_h)和估算的压力,反映了相近的形成深度。石英脉封闭断层带裂隙是在冷却、降压或盐度降低过程中完成的,而方解石封闭裂缝是通过降低 CO_2 分压和盐度实现的。降低 CO_2 分压的同时增大 pH 值,可促进钾长石或钠长石的沉淀。智利北部科洛索超壳断裂内发育横穿碎裂带的石英脉,脉石英愈合微裂隙中 200 多个 FI 的定向、化学组成和盐度的研究资料表明,在断裂带核心部位 FI 的 CO_2 含量高,盐度变化范围大,地震破裂过程导致的微裂隙引起断裂带流体相分离和不同源流体的混合;产生微裂隙的应力场方向与地震动态破裂模型中推断出的应力场方向一致(Mitchell et al,2017)。方解石中的 FI 受热温度高于其形成压力下的初始温度,会发生体积增大,进而导致 T_h 增高,反映了裂隙愈合的高温地质事件。因此,脉石矿物中 FI 扩展或体积增加可以指示断层摩擦生热。对在震源深度 4~6km 形成的几厘米厚的超碎裂岩中的方解石 FI 的分析表明,FI 的 T_h 统计直方图呈正偏态,向高温端拖尾;而在围岩中 FI 的 T_h 没有这种正偏态频率分布现象。方解石 FI 加温实验也证明 FI 体积扩展可以导致 T_h 增高 50~150°C(Ujiie et al,2008)。对不同期次脉体的几何特征及其相互交错关系和脉石矿物 FI 同位素组成的系统研究表明,大巴山造山带方解石脉标志的 3 期构造运动中,第三期张性裂隙形成时的应力场拉张方向为 NW-SE,流体超压为 92~167MPa,流体为混有大气降水的变质水(覃小丽等,2017)。

2.4 流体包裹体分析判断流体运移途径

FI 可以指示岩石渗透率、裂隙在断层附近的空间分布状态。研究微裂隙的产生、扩展机制及其空间分布有益于深入认识微裂隙影响岩石的强度、波速、电性、渗透率等物理性质的变化。地震破裂相关的瞬态应力扰动产生高角度相交的微裂缝网,大大增加了断裂带的

渗透率, 流体也可通过微裂缝网运移和混合; 形成的次生 FI 面平行最大应力面 (σ_1 - σ_2), 垂直于最小主应力方向 (σ_3)。晶体间和晶体内次生 FI 面定向在断层两侧出现的规律性变化反映了裂隙的空间分布特征。在卡罗莱纳州北部逆断层下盘发育了与逆断层平行的塑性变形石英脉, 其中 FI 的最终融化温度和 T_h 随距断层面的距离增加而改变, 最高的 T_h 值 ($300 \pm 20^\circ\text{C}$) 反映了沿亚颗粒边界流体泄露的温度, 最低的 T_h 值 ($120 \sim 160^\circ\text{C}$) 代表了静水压环境 (O'Hara et al, 1992)。

利用 FI 面可以恢复古流体运移通道。断层脉石矿物中封闭的 FI 是古流体渗流的最好记录。自然界形成大量含金石英脉的流体是沿地震断裂带从深部向上运移的, 岩石圈内聚集的超高压流体发生爆炸, 产生地震和赋矿空间, 同时流体压力突然降低导致流体溶解能力下降, 搬运的成矿物质沉淀形成矿床 (Weatherley et al, 2013; 杜建国等, 2018a; Du et al, 2021)。FI 面的立体结构能反映微裂隙网的三维几何特征 (裂隙群的方向、平均长度、喉道半径、体密度等), 据此可以估计渗透系数和判断古渗流方向 (Roedder, 1984; Lespinasse, 1999)。日本野岛断裂带假玄武玻璃的傅里叶转换红外光谱分析和 FI 分析表明, 玻璃中碳是过饱和的, 摩擦熔融作用使断裂带岩石排除含碳挥发分, 估计地震引起的 CO_2 排放中大约有 99wt.% 是从断裂带围岩中排放的。对于地壳尺度的大断裂, 如神户 $M7.2$ 地震在几秒钟之内就能排放 $(1.8 \sim 3.4) \times 10^3 \text{ t}$ 的 CO_2 , 同时导致断裂带内流体压力瞬态增大并触发余震, 引起大地震后断裂带温泉 CO_2 含量的增加 (Famin et al, 2008)。尤因塔山脉北麓山前逆冲断裂下盘方解石脉的 FI 分析表明, 其主要组分为 CH_4 , 次要组分有 CO_2 、 N_2 、 Ar 、 H_2S 和 $\text{C}_2 \sim \text{C}_6$ 烷烃, 指示该断裂为油气运移的通道 (Parry et al, 2010)。但是, 对多期构造活动形成的微裂隙愈合叠加形成复杂的 FI 面的破译是有难度的, 通过详细研究不同尺度的构造配套及其与 FI 的关系有可能解决该难题。

3 结语

流体包裹体拉曼光谱分析在地球科学研究方面取得了长足进展, 但在构造与地震活动研究方面尚处于起步阶段。为发挥包裹体微量流体在地震研究领域中的作用, 尚需深入开展下列几个方向的研究:

(1) 高分辨率拉曼光谱成像技术的研发以及显微激光拉曼 3-D 成像技术的应用, 是提高包裹体相体测量精度的重要途径。

(2) 流体包裹体的定年技术研发和应用是确定古地震活动周期的关键。

(3) 加强 FI 面识别和 FI 流体成分-同位素技术研究, 确定古地震流体渗流方向、微裂隙渗透率、微裂隙网的三维几何形状, 探讨地震流体的性质来源及其在地震孕育和发生过程中的作用机制。

(4) 提高利用 FI 准确判断断裂带超压的不均匀性和活动断裂成为流体通道与地震活动期次的有效程度。

(5) 加强山前断裂、盆地同生断裂带脉石矿物 FI 的研究, 拓宽研究地震活动周期的时间范围。

参考文献

鲍志诚, 高小其, 张磊等, 2019. 九江地震台观测井水氢氧同位素特征及意义. 中国地震, 35(3): 499~508.

- 程理,李光涛,吴昊,等,2020. 云南中甸-大具断裂马家村-大具段古地震初步研究. 中国地震, **36**(2):211~220.
- 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.
- 扈桂让,李自红,闫小兵,等,2018. 韩城断裂北东段晚更新世以来最新活动研究,中国地震, **34**(3):580~590.
- 李春锐,李海兵,潘家伟,等,2021. 断裂带中方解石脉显微结构、地球化学和年代学研究:藏南亚东裂谷带古地震记录. 岩石学报, **37**(10):3185~3203.
- 李丽,刘剑,吴昊昱,等,2015. 2015年1月山西介休 M_L 3.3 震群发震原因初步研究,中国地震, **31**(4):647~655.
- 刘斌,2014. 地震流体包裹体. 北京:科学出版社,1~493.
- 刘斌,2018a. 流体包裹体测定计算和分析(上)/流体包裹体专著系列. 北京:科学出版社,1~382.
- 刘斌,2018b. 流体包裹体测定计算和分析(下)/流体包裹体专著系列. 北京:科学出版社,1~762.
- 石宏宇,周晓成,王万丽,等,2022. 岷江断裂带北段温泉流体地球化学特征. 中国地震, **38**(1):61~79.
- 孙凤霞,杜建国,李静,等,2019. 晚寒武世早期河北北部柳江盆地发生的强地震. 地震, **39**(2):77~87.
- 覃小丽,李荣西,杨玲,等,2017. 大巴山陆内造山带高压古流体及其运移动力学机制研究. 地学前缘, **24**(2):123~129.
- 郑颖平,姚大全,翟洪涛,等,2014. 郯庐断裂带新沂-五河段晚第四纪活动的新证据. 中国地震, **30**(1):23~29.
- Austrheim H, Dunkel K G, Plümper O, et al, 2017. Fragmentation of wall rock garnets during deep crustal earthquakes. *Sci Adv*, **3**(2):e1602067.
- Bohnar R J, Binns P R, Hall D L, 1989. Synthetic fluid inclusions-VI. Quantitative evaluation of the decrepitation behaviour of fluid inclusions in quartz at one atmosphere confining pressure. *J Metamorph Geol*, **7**(2):229~242.
- Boullier A M, 1999. Fluid inclusions: tectonic indicators. *J Struct Geol*, **21**(8~9):1229~1235.
- Boullier A M, Ohtani T, Fujimoto K, et al, 2001. Fluid inclusions in pseudotachylytes from the Nojima fault, Japan. *J Geophys Res*, **106**(B10):21965~21977.
- Cox S F, 2016. Injection-driven swarm seismicity and permeability enhancement: implications for the dynamics of hydrothermal ore systems in high fluid flux, overpressured faulting regimes—an invited paper. *Econom Geol*, **111**(3):559~587.
- Du J G, Fu B H, Guo W S, et al, 2010. Significance of prehistoric liquefaction features in the Xilinhot district, Inner Mongolia, northern China. *Terr, Atmos Oceanic Sci*, **21**(5):767~779.
- Du J G, Sun F X, Cui Y J, et al, 2021. Earthquakes generated by fluid overpressure: insights from cryptoexplosive breccias. *J Asian Earth Sci*, **6**:100069.
- Dubessy J, Caumon M C, Rull F, 2012. Raman Spectroscopy Applied to Earth Sciences and Cultural Heritage. Twickenham: European Mineralogical Union and the Mineralogical Society of Great Britain & Ireland.
- Ehteshami-Moinabadi M, 2018. Fossil Fault zones: significance and applications. *Geol Balc*, **47**(1):61~71.
- Ellsworth W L, 2013. Injection-induced earthquakes. *science*, **341**(6142):1225942.
- Famin V, Nakashima S, Boullier A M, et al, 2008. Earthquakes produce carbon dioxide in crustal faults. *Earth Planet Sci Lett*, **265**(3~4):487~497.
- Feely M, 2018. Editorial for special issue “fluid inclusions: study methods, applications, and case histories”. *Minerals*, **8**(7):307.
- Frezzotti M L, Tecce F, Casagli A, 2012. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *J Geochem Explor*, **112**:1~20.
- Hurai V, Huraiová M, Slobodnik M, et al, 2015. Geofluids: Developments in Microthermometry, Spectroscopy, Thermodynamics, and Stable Isotopes. Amsterdam: Elsevier, 1~484.
- Hyndman R D, McCrory P A, Wech A, et al, 2015. Cascadia subducting plate fluids channelled to fore-arc mantle corner: ETS and silica deposition. *J Geophys Res: Solid Earth*, **120**(6):4344~4358.
- Jamtveit B, Petley-Ragan A, Incel S, et al, 2019. The effects of earthquakes and fluids on the metamorphism of the lower continental crust. *J Geophys Res: Solid Earth*, **124**(8):7725~7755.
- Karabacak V, Uysal I T, Mutlu H, et al, 2019. Are U-Th dates correlated with historical records of earthquakes? Constraints from coseismic carbonate veins within the North Anatolian Fault Zone. *Tectonics*, **38**(7):2431~2448.
- 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.
- Lacey H, 2018. The properties and role of carbonate cementation in fault zones. Ph. D. thesis. London; Imperial College London.
- Lespinnas M, 1999. Are fluid inclusion planes useful in structural geology? *J Struct Geol*, **21**(8~9):1237~1243.
- Lespinnas M, Pêcher A, 1986. Microfracturing and regional stress field; a study of the preferred orientations of fluid-inclusion planes in a granite from the Massif Central. France. *J Struct Geol*, **8**(2):169~180.
- Losh S L, 1989. Fluid-rock interaction in an evolving ductile shear zone and across the brittle-ductile transition, Central Pyrenees, France. *Am J Sci*, **289**(5):600~648.
- Louis S L, Luijendijk E, Dunkl I, et al, 2019. Episodic fluid flow in an active fault. *Geology*, **47**(10):938~942.
- McCulpin J P, 1996. Paleoseismology. New York: Academic Press.
- Mitchell T M, Cembrano J M, Fujita K, et al, 2017. Fluid inclusion evidence of coseismic fluid flow induced by dynamic rupture. In: Thomas M Y, Mitchell T M, Bhat H S. *Fault Zone Dynamic Processes: Evolution of Fault Zone Properties During Seismic Ruptures*. Hoboken: John Wiley and Sons, 37~45.
- Müller A, Ganerød M, Wiedenbeck M, et al, 2018. The hydrothermal breccia of Berglia-Glassberget, Trøndelag, Norway: snapshot of a Triassic earthquake. *Minerals*, **8**(5):175.
- Naumov V B, Dorofeeva V A, Mironova O F, 2017. Physicochemical parameters of the origin of hydrothermal mineral deposits: Evidence from fluid inclusions. IV. Copper and molybdenum deposits. *Geochem Int*, **55**(8):711~725.
- Neville D R, De Ligny D, Henderson G S, 2014. Advances in Raman spectroscopy applied to earth and material sciences. *Rev Mineral Geochem*, **78**(1):509~541.
- Nishiyama N, Ujiie K, Kano M, 2021. Spatial changes in inclusion band spacing as an indicator of temporal changes in slow slip and tremor recurrence intervals. *Earth, Planets Space*, **73**(1):126.
- O'Hara K, Haak A, 1992. A fluid inclusion study of fluid pressure and salinity variations in the footwall of the rector branch thrust, North Carolina, U.S.A. *J Struct Geol*, **14**(5):579~589.
- Ohtani T, Fujimoto K, Ito H, et al, 2000. Fault rocks and past to recent fluid characteristics from the borehole survey of the Nojima fault ruptured in the 1995 Kobe earthquake, Southwest Japan. *J Geophys Res; Solid Earth*, **105**(B7):16161~16171.
- Parry W T, Blamey N J F, 2010. Fault fluid composition from fluid inclusion measurements, Laramide age Uinta thrust fault, Utah. *Chem Geol*, **278**(1~2):105~119.
- Raimbourg H, Famin V, Palazzin G, et al, 2018. Fluid properties and dynamics along the seismogenic plate interface. *Geosphere*, **14**(2):469~491.
- Randive K R, Hari K R, Dora M L, et al, 2014. Study of fluid inclusions: methods, techniques and applications. *Gond. Geol Mag*, **29**(1~2):19~28.
- Roedder E, 1984. Fluid inclusions. In: Ribbe H P. *Reviews in Mineralogy*. Washington: Mineralogical Society of America, 1~646.
- Saishu H, Okamoto A, Otsubo M, 2017. Silica precipitation potentially controls earthquake recurrence in seismogenic zones. *Sci Rep*, **7**(1):13337.
- Sibson R H, 2014. Earthquake rupturing in fluid-overpressured crust: How common? *Pure Appl Geophys*, **171**(11):2867~2885.
- Smeraglia L, Bernasconi S M, Berra F, et al, 2018. Crustal-scale fluid circulation and co-seismic shallow comb-veining along the longest normal fault of the central Apennines, Italy. *Earth Planet Sci Lett*, **498**:152~168.
- Tuttle O F, 1949. Structural petrology of planes of liquid inclusions. *J Geol*, **57**(4):331~356.
- Ujiie K, Yamaguchi A, Taguchi S, 2008. Stretching of fluid inclusions in calcite as an indicator of frictional heating on faults. *Geology*, **36**(2):111~114.
- Weatherley D K, Henley R W, 2013. Flash vaporization during earthquakes evidenced by gold deposits. *Nat Geosci*, **6**(4):294~298.
- Yamaguchi A, Cox S F, Kimura G, et al, 2011. Dynamic changes in fluid redox state associated with episodic fault rupture along a megasplay fault in a subduction zone. *Earth Planet Sci Lett*, **302**(3~4):369~377.
- Yamashita T, Tsutsumi A, 2018. *Involvement of Fluids in Earthquake Ruptures, Field/Experimental Data and Modeling*. Tokyo: Springer, 1~18.

Development of Analyzing Techniques of Fluids Inclusions in Investigations for Earthquake and Fault

Sun Fengxia^{1,2)}, Cui Yueju¹⁾, Yang Fan³⁾, Liu Yinan⁴⁾, Jiang Li^{1,2)}, Du Jianguo^{1,2)}

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

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

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

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

Abstract Fluid inclusions in minerals record many kinds of information about formation and evolution of paleofluids in the Earth, environment of mineral formation, etc. Measurement of fluid inclusions by the techniques of micro area and trace amount analysis can help to obtain information about earthquake and fault activities. Investigation of paleoearthquake using analyzing fluid inclusion in minerals in veins can extend the time scale for studying earthquake recurrence period, which is significant for seismic study. So far, seismic researches of fluids mainly concern correlation between law of fluid variations (water and gas) in the macro regions and earthquakes, but rarely for trace fluids in minerals. In this paper we briefly introduced fluid role in earthquake and fault activities and techniques for analyzing fluids inclusions, and reviewed advance of investigations for earthquake and fault using analyzing techniques of fluids inclusions, and finally suggested the further related research aspects.

Keywords: Fluid inclusion; Paleoearthquake; Fault; Earthquake recurrence period; Vein