

火山岩中熔体包裹体研究进展

李霓, 孙嘉祥

中国地震局 地质研究所, 北京 100029

摘要: 火山岩斑晶矿物中保存完好的熔体包裹体含有原始熔浆的成分和挥发分含量, 带有原始岩浆的信息, 是恢复火山喷发前岩浆化学成分和了解岩浆作用过程及源区特征的最好工具。本文概述了熔体包裹体研究的发展历程和国内外研究进展及应用, 总结了目前对熔体包裹体的分析测试仪器, 还对熔体包裹体均一实验和熔体挥发分及脱气作用展开了充分讨论。随着现代测试仪器精度的不断提高和测试应用范围的扩大, 熔体包裹体研究从传统的高温热台研究转向地球化学研究和应用领域, 可以更好地解释岩浆过程中的地质现象、了解岩浆演化, 目前熔体包裹体的研究已进入更快发展阶段。

关键词: 熔体包裹体; 均一实验; 挥发分; 火山岩

中图分类号: P59, P581 **文章编号:** 1007-2802(2018)03-0414-10 **doi:** 10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.091

A Review on Research Progress of Melt Inclusion in Volcanic Rocks

LI Ni, SUN Jia-xiang

Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: The intact melt inclusion well preserved in phenocrysts of host volcanic rocks contains primary magma and volatile components, with the recorded information of the primary magma. It is the best medium to reconstruct the magma composition prior to eruption as well as to understand magmatic process and source characteristics of the magma. This paper has briefly summarized the development process, research progress, and application at home and abroad on the research of the melt inclusion, described various instruments for analyzing the melt inclusions, and fully discussed the questions concerning the homogenization test for the melt inclusion, the volatile components in the melt, as well as the degasification of the magma. With the continuous improvement of the precision of modern instruments and the expansion of the test applications, the melt inclusion research target has been moved from the traditional high temperature heating stage experiment to the geochemical research and the related application, in order to make better interpretation on the geological phenomena by the magmatic process, and to deeply understand the magma evolution. At present, the melt inclusion research has entered in a fast developing stage.

Key words: melt inclusion; homogenization test; volatile; volcanic rock

熔体包裹体(也称“岩浆包裹体”“玻璃包裹体”和“熔融包裹体”),是指存在于火山岩矿物中、通常粒径大小在1~300 μm的微小硅酸盐熔体,是矿物在岩浆里结晶生长过程中捕获周围熔浆而成。在常温下有的熔体包裹体保存为成分均匀的玻璃质,有的含结晶相,表明其寄主熔岩在熔体包裹体捕获后冷却率较慢,使熔体包裹体有足够时间形成子晶(Kent & Elliott, 2002),还有一些因冷凝收缩而出现

气泡,形态多样(图1)。熔体包裹体多出现在火山岩矿物中,也有少量出现在侵入岩或脉体矿物中,本文讨论的熔体包裹体均属前者。

若斑晶矿物在岩浆房中结晶生长时完全包裹了熔体包裹体,它们从被捕获后是一个封闭的系统,而寄主的斑晶矿物又相对不可压缩,这样就会形成一个封闭的压力腔,可以有效防止岩浆上升时的减压和喷发时的气体逃逸(Lowenstern, 2003),故

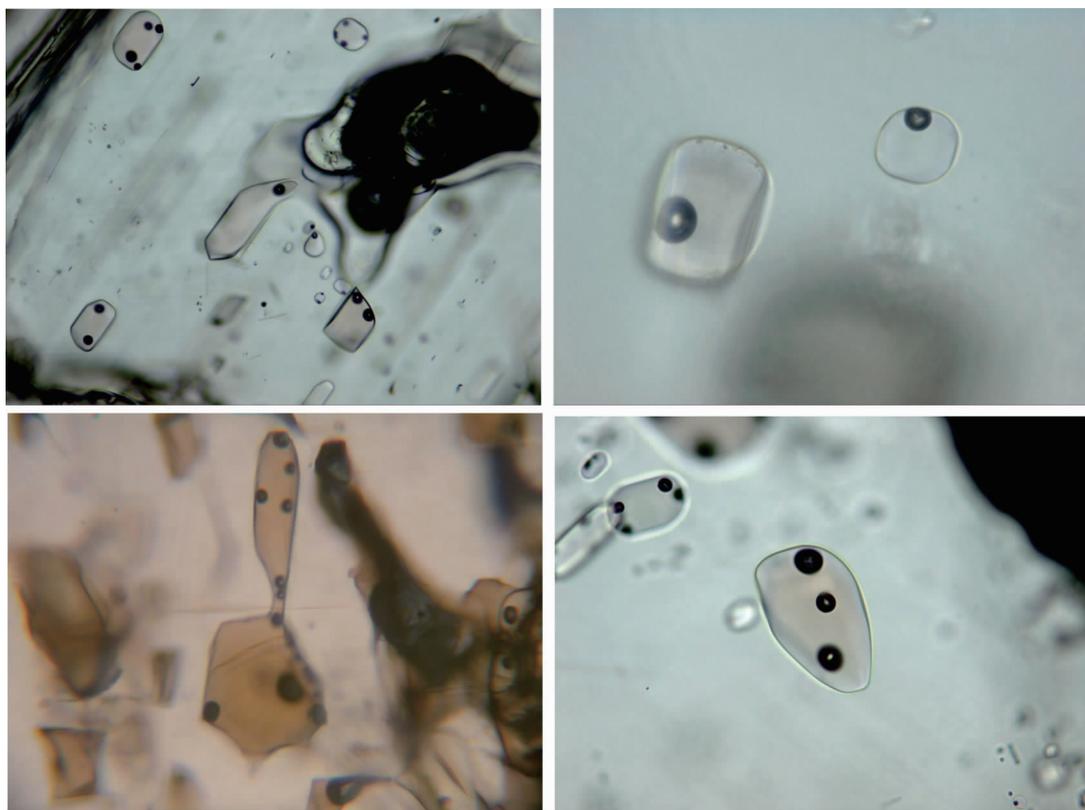


图1 长白山天池火山近代喷发物长石斑晶中的熔体包裹体

Fig.1 The melt inclusions hosted in feldspar phenocrysts from volcanic rocks in the Tianchi area of the Changbaishan mountains

保存完好的熔体包裹体应含有原始熔浆的成分和挥发分,带有原始岩浆的信息(Roedder, 1984; Sobolev, 1996),因而成为恢复火山喷发前岩浆化学成分和运移演化过程的最好媒介。通过研究火山岩矿物中微小的包裹体,即用 10^{-14} g 样品来研究地下 10^{10} g 庞大的岩浆系统,从微观入手,见微知著,可以追溯地下岩浆的发展变化过程。

1 熔体包裹体的早期研究历程

据 Hauri 等(2002),早期熔体包裹体研究的里程碑式进展如下:

◆对矿物中包裹体的研究最早可追溯到 1858 年, Sorby 首先观察到了矿物中的熔体包裹体,并首次提出其中的蒸汽气泡(vapor bubbles)是包裹体中流体冷凝收缩形成的;

◆1879 年, Fouqué 和 Michel Lévy 认识到熔体包裹体和包含它的侵入岩浆的特性之间具有相关性;

◆1956 年, Barrabé 和 Deicha 通过加热至很高温度,第一次成功地把石英斑晶中的熔体包裹体均一;

◆1961 年, Carron 用电子探针方法测试了硅质

熔体包裹体中的主量元素成分——这是地球化学研究史上的一座里程碑;

◆1971 年, Clocchiatti 首先使用非破坏性的测试手段来研究包裹体,即不破坏包裹体本身且精度更高;

◆1975 年, Clocchiatti 综述了对石英中熔体包裹体的光学和测温学研究成果,得到了大量有关熔体包裹体行为的观察和实验数据;

◆1984 年, Roedder 在其所著的《流体包裹体》一书中对熔体包裹体的起源、研究和工作方法作了全面的论述;

◆1989 年, Anderson 等首次对同一次喷发中的一系列熔体包裹体进行了红外光谱定量测试;同年 Dunbar 等用离子探针对玻璃质熔体包裹体中 H_2O 等挥发分进行了测定;

◆1993 年, Sobolev 和 Shimizu 首次用离子探针对包裹体中微量元素进行了分析;

◆1997 年, Gurenko 和 Chaussidon 测定了熔体包裹体中的稳定同位素成分;

◆1998 年, Saal 等测试了单个熔体包裹体中的放射性同位素。

◆2002 年,《Chemical Geology》出版熔体包裹体

专辑,这是对熔体包裹体研究的重要阶段性总结。其中,Hauri 等(2002)在开篇中对世纪之交的熔体包裹体研究概况以及如何通过它更深入地了解岩浆过程进行了全面阐述;Danyushevsky 等(2002)综述了幔源岩浆斑晶中熔体包裹体的实验与岩石学研究,对技术、优点和复杂性进行了分析。专辑中涉及到熔体包裹体高温均一实验的文章仅一篇(Massare *et al.*, 2002),更多的文章是涉及熔体包裹体的地球化学研究,即指示母岩浆多样性、对岛弧岩浆成分和形成的启示、对岩浆起源和演化的制约等(Gurenko & Schmincke, 2002; Kamenetsky *et al.*, 2002; Kent & Elliott, 2002; Michael *et al.*, 2002; Nikogosian *et al.*, 2002; Norman *et al.*, 2002; Sokolov, 2002; Sours-Page *et al.*, 2002)。

2 中国熔体包裹体研究状况

尽管国外早已开展对熔体包裹体的研究并已发展到一定阶段,但中国起步较晚,而且在2000年以前开展这方面研究的人员为数不多(郑祥身, 1983; 陈银汉, 1984; 夏林圻, 1984, 1985, 1987, 1988, 1990; 刘英俊等, 1985; 郑祥身和李家驹, 1986; 刘蒙华, 1988; 周德进等, 1995; 吴才来等, 1997; 魏海泉等, 1999; 李福春等, 2000a; 2000b),同时研究的内容、深度和广度也都有限。

夏林圻(1984, 1985, 1987, 1988, 1990, 2002)、夏林圻等(1986a, 1986b, 1990)较早开展了对火山岩矿物中熔体包裹体的系统研究。他们连续多年对五大连池火山区火山喷发物中橄榄石、单斜辉石和浙江桐庐、寿昌中生代火山杂岩中石英晶屑及斑晶中的熔体包裹体都进行了系列分析测试和研究,同时结合熔体包裹体的显微测温、测压和化学成分数据,分别计算了单个包裹体被捕获时的 $p_{\text{总}}$ 、 f_{O_2} 等物理化学参数,从而奠定了国内对熔体包裹体研究的基础。刘英俊等(1985)研究了我国东部若干玄武岩矿物中的非晶质熔体包裹体的数量、体积及包裹体中的气体含量,发现自五大连池向华东地区,包裹体中的气体含量有下降趋势,即五大连池玄武岩含较多水及挥发分,岩浆粘度较小;而华东地区挥发分较少,岩浆粘度较大。此外,还发现不同地区玄武岩矿物中包裹体的相态变化也较悬殊,显示岩浆的不均匀性,在其形成时曾产生过沸腾作用。吴才来等(1997)把天池火山包裹体的物相分为3种类型:玻璃相+气相、玻璃相+子晶+气相、气相,并采用激光拉曼光谱测试了幔源包体橄榄石中包裹体

的气相成分。此后,李霓(2007)、Li 等(2009)、李霓和张柳毅(2011)相继开展了对火山岩斑晶矿物中熔体包裹体的成分和挥发分的系统研究,包括长白山天池火山千年大喷发产物、五大连池和腾冲黑空山等新生代火山岩矿物中的熔体包裹体,还通过测试全岩和熔体包裹体中的挥发分含量变化,研究了天池火山在全新世爆炸喷发中的脱气作用。此外,樊祺诚等(2008)、郭玲利等(2009)、张春来等(2011)、徐九华等(2012)、赵令浩等(2013)、刘芳等(2015)、张道涵等(2017)也相继开展过多地区火山岩矿物中熔体包裹体的研究,深化和丰富了国内对熔体包裹体的研究内容。

非常值得一提的是,近几年来,中科院广州地化所任钟元团队利用多种仪器,开展了对橄榄石寄主晶及其中熔体包裹体的主微量元素和 Pb 同位素的系统地球化学研究,取得了丰硕的成果(Hong *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015; Qian *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016; Qian *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2017, Zhang *et al.*, 2017),极大地丰富和发展了国内对熔体包裹体的专项研究,也为传统的地球化学研究开拓了新思路。

3 均一实验

熔体包裹体均一实验是利用熔体包裹体研究原始岩浆演化和挥发分组成的重要手段。1967年 Бакуменко 等人用人工合成透辉石的实验证明熔体包裹体均一温度可以代表其寄主矿物的结晶温度,之后,熔体包裹体均一法测温就成为天然岩浆演化热历史研究中一项经典而必不可少的内容(夏林圻, 1990)。一直以来,包裹体均一温度实验的设备是主要为 Linkam 系列的高温热台,而热液金刚石压腔(HDAC)是近年来才被应用到熔体包裹体均一实验中(王新彦等, 2015)。

用高温热台对熔体包裹体进行加热升温,使之均一(图2),即实际地质过程的逆过程,理论上均一化实验可以使熔体包裹体恢复到熔体被捕获时的状态。通过观察升温过程中子矿物熔化顺序来了解矿物的结晶顺序。熔体包裹体中子晶最后消失的温度可视为岩浆的最低捕获温度(Frezzotti, 2001)。从熔体包裹体在高温热台中的各种物相变化(子晶、气泡等渐次消失达到熔体均一),来反推矿物及岩浆熔体在地下储存和运移时的变化过程,即高温热台测试可以用来恢复岩浆熔体的演化过程。

斑晶中熔体包裹体快速减压和随之产生的过

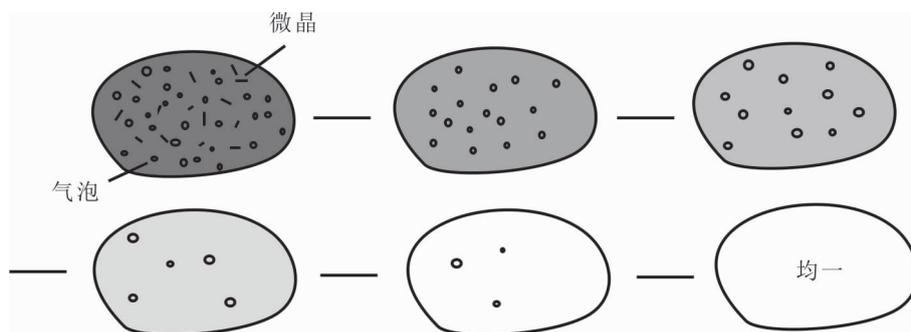


图2 熔体包裹体均一过程示意图

Fig.2 Sketch diagrams showing various states of the melt inclusion during the homogenization process

压可能会导致熔体包裹体泄露、裂纹和挥发分逸失 (Marianelli *et al.*, 1999)。因此, Danyushevsky 等 (2002) 提出采用熔体包裹体均一法测温需要的 5 个前提: ①包裹体封闭时所捕获的流体为单一均匀相; ②捕获有流体的包腔在封闭后体积不变, 流体处于饱和状态; ③封闭后的包裹体中没有物质的加入或漏失, 主晶成分保持不变; ④压力效应不重要或为已知; ⑤包裹体的成因已知。在实验中, 熔体包裹体中水的分解会造成均一温度的变化。加热时水丢失主要是由于寄主矿物的分解或 H 扩散, 因为实验是在惰性环境 (防止高温氧化) 和低 H 逸度 (防止与铂加热器反应) 下进行的。高温加热时熔体包裹体里的压力相对较高导致 H 逸度高于晶体周围的惰性气体环境, 即使熔体包裹体中的水含量较低也是如此。如果熔体包裹体被捕获后几乎无结晶现象, 也未见磁铁矿子晶, 即表明没有水损失或氢扩散现象 (Sobolev & Danyushevsky, 1994)。

熔体包裹体均一实验得到的均一温度常高于用 Fe-Ti 氧化物或其他地温计的计算结果, 原因可能有: 熔体成分扩散慢、热台存在热梯度、 H_2 或 H_2O 的扩散损失。实验还表明, 加热时气泡消失的温度高于冷却时气泡重新出现的温度。边界层、再平衡和结晶都能改变熔体包裹体的成分 (Lowenstern, 2003)。实验结果还表明, 高温时因熔体包裹体中水分解或 H 扩散造成的均一温度升高, 一般对个体较大的包裹体影响较小, 而对较小的包裹体则影响较大。此外, 热台实验中要注意控制熔体包裹体的升温速率, 较快的升温速率可能引起硅酸盐熔体中挥发分不完全扩散平衡, 因此会导致比实际熔体包裹体捕获时高的均一温度 (Lowenstern, 1994); 但加热升温速率也不能太慢, 虽然升温速率太慢并不一定导致较低的均一温度, 但可能导致熔体包裹体与寄主晶成分发生再交换平衡; 而且加热速率与熔体包裹体大小也有极大关系, 需要在实验中多次摸索

和控制。Massare 等 (2002) 也提到熔体包裹体均一实验中可能出现的问题, 即在连续加热过程中, 熔体包裹体内部会形成压力, 可能会出现以下 4 个现象: 包裹体可能伸展; 可能经受部分破裂; 可能泄露; 也可能完全破裂。还需注意的是, 在进行热台实验时, 熔体包裹体在高温下存在的时间越短越好, 否则不易反映真实的变化过程。对于形成于火山环境中的岩浆包裹体, 由于硅酸盐熔体相对而言具有不可压缩性, 其均一温度的压力校正一般可以忽略 (Roedder, 1984), 也就是说火山岩矿物中岩浆包裹体的均一温度与捕获温度相当, 无需进行压力校正, 测试温度大致可以代表寄主矿物的结晶温度 (夏林圻, 1984, 1985)。

在国内的相关实验研究中, 郑祥身 (1983)、郑祥身和李家驹 (1986) 很早就注意到了天池碱流岩歪长石斑晶中所含的固态包裹体 (即熔体包裹体)。他们利用淬火法求出了这些包裹体的均一化温度, 并据此讨论了歪长石分离结晶时的温压条件。李霓等 (2006, 2007)、Li 等 (2008) 在详细总结长白山天池火山全新世几期喷发物的浮岩长石斑晶中熔体包裹体形态特征的基础上, 对它们进行了系统的高温热台实验研究, 结果发现天池火山千年大喷发期的情况较为复杂, 实验发现当时有两个不同温度段的熔体存在, 这对揭示岩浆混合作用可能具有重要意义。王新彦等 (2015) 在对 Linkam 高温热台和热液金刚石压腔的熔体包裹体均一实验对比研究中发现, 后者能够在加热的同时提供接近于熔体捕获的外压, 更适于开展富挥发分的高内压熔体包裹体的均一实验。王锦团等 (2016) 利用氧逸度可控的气体混合炉进行了设定氧逸度下的实验, 并根据新的物理化学数据, 对不同混合气体体系 (如 CO_2-CO , CO_2-H_2 和 H_2-H_2O) 的温度-氧逸度-气体混合比例关系重新进行了计算和评估。

4 熔体包裹体的主要分析手段

由于矿物中的包裹体一般都很微小,因此对包裹体的研究微束分析技术非常合适。Carron(1961)首先将电子探针技术用于包裹体的研究上,开启了利用电子仪器分析测试微小熔体包裹体的历程。但是电子束穿透能力很浅,因此进行电子探针(EP-MA)分析前,要把寄主矿物镶嵌制靶,并把熔体包裹体磨出至表面,才能进行电子探针分析。

对个体稍大($>50\ \mu\text{m}$)的熔体包裹体,用傅里叶变换红外光谱法(FTIR)和拉曼光谱(LRS)测试较为合适。包裹体中存在的许多相及组分(特别是 H_2O 和 CO_2)在红外线区域内可以显示出很强的、清晰且有特征的吸收光谱。红外光谱法大多用在区别矿物及包裹体中H可能出现的各种价态,已被用于硅酸盐玻璃中 H_2O 的测定(Ohlhorst *et al.*, 2001; Seaman *et al.*, 2006)。虽然 H_2O 对大部分波长范围的红外线基本上是不透明的,但对 $0.8\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 波长范围的红外线是透明的,因此可以了解包裹体内含物的详细情况(卢焕章和王卿铎,1986)。

当光通过物质时,其散射光中有部分光的频率发生了变化,这种现象被称为“拉曼效应”,改变了频率的光谱即为拉曼光谱。拉曼光谱是迅速发展起来的物理谱学分析技术,它是对物质结构的分子特征的测量,不同物种由于分子基团不同,结构不同,其拉曼谱特征也不同。据此可以获取有用信息,达到测量和鉴定的目的。拉曼光谱仪适用于任意形状的样品:无损、快速、准确,可以测量未暴露于矿物表面的熔体包裹体(Thomas *et al.*, 2006)。由于不同的寄主矿物、同一主矿物中不同的部位及包裹体在主矿物中的位置的差异,拉曼散射光在不同波数处的能量均不相同,故无法获得包裹体中某一组分的绝对含量。然而同一包裹体中不同组分的相对含量,可以通过比较它们相对应的拉曼谱峰的面积获得。除 H_2O 的拉曼效应十分弱外,它适合测量 CH_4 、 CO_2 、 H_2S 等气体,其检出限为 $1\%\sim 2\%$ (mol)。由于拉曼光谱是一种散射技术,对样品要求不高,一般只需把样品磨制成厚度为 $50\sim 200\ \mu\text{m}$ 两面抛光的薄片即可(黄伟林,1990;陈晋阳等,2002)。

随着现代测试仪器精度的提高和应用范围的扩大,激光剥蚀-电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)、二次离子质谱(SIMS)、热电离质谱(TIMMS)、X射线荧光光谱(SR-XRF)、粒子诱发X射线荧光分析(PIXE)等方法相继被用于分析熔体包裹体中的

主微量元素及同位素(Hervig *et al.*, 1989; Halter *et al.*, 2002; Hauri, 2002; Humphreys *et al.*, 2006; Paul *et al.*, 2011; Koornneef *et al.*, 2015; 王蝶等, 2017)。值得一提的是,近年来,Zhang等(2014)开发了一种通过LA-MC-ICP-MS测试熔体包裹体($>40\ \mu\text{m}$)中Pb同位素的方法,可以快速、精准、原位分析,不仅适合年轻火山岩中的熔体包裹体,也适合于需要进行U-Th衰减校正的老火山岩中的熔体包裹体,从而拓宽了熔体包裹体的应用研究范围。

5 熔体包裹体中的挥发分与岩浆脱气作用

5.1 挥发分与岩浆脱气作用

火山的喷发类型与其化学成分密切相关,尤其是岩浆中的挥发分在火山喷发方式、喷发类型中扮演着重要角色。挥发分的种类(H_2O 、 CO_2 、Cl、S等)、含量和岩浆气泡化的速率影响着岩浆的粘度、喷发方式和强度,挥发分在岩浆上升过程中出溶,通过气泡化作用控制了爆炸性火山的喷发行为。 H_2O 是硅酸盐熔体中最主要的挥发性组分, H_2O 溶解在岩浆熔体中能明显降低固相线和液相线温度,使体系的相平衡关系发生变化(朱永峰等,1994),控制岩浆分异演化的趋势; H_2O 、D/H值还可提供水在地幔的来源、在其中所起的作用等信息,而 CO_2 的丰度可用来估计熔体包裹体捕获时的压力(Hauri, 2002),岩浆中的 H_2O 或 CO_2 强烈影响着岩浆系统的脱气行为和喷发动力过程(Dunbar *et al.*, 1989; Wallace, 2005; Métrich & Wallace, 2008)。

对岩浆气泡化过程的理论研究和模拟实验表明,极猛烈的喷发可能是岩浆上升过程中挥发分过饱和的结果,因而导致了岩浆爆炸性的气泡化作用、快速膨胀和向上加速,并在近地表破碎(Mangan *et al.*, 2001)。挥发分还可以影响熔体的结晶温度、密度等;挥发分浓度也随着岩浆结晶过程、岩浆混合和压力降低(岩浆上升)而变化(Saito *et al.*, 2001)。可以说,要研究脱气作用就离不开岩浆中的挥发分变化情况,而形成于岩浆演化各阶段的熔体包裹体中可能就保存着挥发分的信息。因此,了解地下深部的岩浆在复杂的溢流-爆炸喷发中所发生变化的较好方式就是研究其斑晶矿物中的熔体包裹体,特别是其中对火山喷发起决定性作用的水和其他挥发分,因为地表的火山岩(包括新喷发的火山渣和熔岩)是由大量挥发分逃逸之后的岩浆冷凝而成,因此也就不能完全代表深部的岩浆特性(Marianelli *et al.*, 2005)。

有关挥发分与岩浆脱气作用的实例较多, 相关研究已取得了很大进展。Belkin 等(1998)和 Signorelli 等(1999)用电子探针、二次离子质谱等手段研究了意大利 Vesuvius 火山在 3000 多年前和 1631 年喷发前岩浆中的挥发分含量和岩浆演化情况, 通过分析熔体包裹体和火山岩基质中主、微量元素及挥发分 H_2O 、F、Cl、S 在喷发前后的含量差异, 得出了挥发分在岩浆房中有两个脱气阶段的结论。Marianelli 等(1999)和 Fulignati 等(2004)曾对 1944 年 Vesuvius 火山的喷发产物进行了研究, 分析了其全岩、基质及熔体包裹体的成分, 还根据红外光谱仪测出的熔体包裹体中 H_2O 和 CO_2 含量计算了岩浆的压力及储存深度, 认为维苏威火山那次喷发时地下补给的岩浆经历了不同压力下的分异, 从而解释了为何喷发方式发生了突然改变。Martel 等(2000)通过研究培雷火山布里尼式喷发和培雷式喷发产物的全岩多孔度、斑晶中玻璃包裹体和基质玻璃的水含量, 进一步查明了布里尼式和培雷式两种喷发方式的脱气条件, 说明喷发方式的不同取决于培雷火山喷发时的岩浆脱气行为。Métrich 等(1989, 1993, 1998, 2004)经系列研究发现, 意大利 Etna 火山喷发物的熔体包裹体化学成分范围远大于全岩成分范围, 极富挥发分, 他们从熔体包裹体中找到了 Etna 岩浆上升和混合的证据, 并发现在此过程中挥发份 S 比 Cl 经历了更早期和广泛的脱气, 并且利用包裹体挥发分含量计算出位于火山下 14.5~6.5 km 的玄武质岩墙的侵入是触发 2001 年 Etna 火山侧翼熔岩流喷发的主要原因。Métrich 等(2001)还研究了意大利 Stromboli 火山喷发物中的熔体包裹体形态及其中的元素对, 认为矿物结晶与捕获熔体处于不平衡状态, 而且从熔体包裹体成分中也反映出喷发前挥发分 S 和 Cl 已部分逃逸。Michaud 等(2000)发现熔体包裹体中的 S 含量比基质玻璃中的 S 含量低的现象, 说明 S 脱气过程比较复杂, 它不仅在喷发时脱气, 更可能是一个连续的岩浆脱气过程, 因为 S 因溶解度小很快就在岩浆中达到饱和, 易于随时脱气。因此有必要考虑 S 脱气的方式, 由于脱气过程连续, 喷发时的脱气量仅占总脱气量的一部分, 发生实际脱气的岩浆比看到的地上形成喷发的岩浆要多得多(即还应包括地下看不见的部分)。

5.2 “岩石学法”估算脱气量的原理及应用

前已述及, 保存完好的熔体包裹体蕴含着喷发前岩浆的各种成分, 因此科学家除定性研究岩浆的脱气作用外, 还可利用矿物中所含的熔体包裹体来

定量研究岩浆的脱气率、脱气量以及对大气环境的影响。估算岩浆的脱气量, 主要是通过直接测定和间接计算的办法。直接测定法是在飞机上用航空红外分光计、相关分光计等仪器直接测定从火山口喷出的各种气体的含量, 一般来说此法较为可靠, 适用于现在正在喷发或近期喷发过的现代火山, 但费用昂贵。而间接法则是通过测定火山岩矿物斑晶中的熔体包裹体和基质玻璃中各项挥发份含量差值, 结合喷发物体积和总质量, 获得火山喷出气体的总量, 此法称为“岩石学法”(也称“差异法”)。后一种方法尽管精确度没有前者高, 但显然费用低廉, 而且切实可行, 基本可以满足对火山喷发脱气量数量级的估计。

由于岩浆自形成伊始就一直在分异、演化, 因此在岩浆演化晚期至侵位时结晶的斑晶矿物中熔体包裹体的组成则最接近于喷发前的熔浆成分, 熔体包裹体中的挥发分含量可以代表喷发前岩浆中的气体含量。当岩浆沿各种裂隙通道上升侵位或喷出地表时, 由于骤然减压或沿裂隙逸散, 气体被大量释放至大气中, 此时硅酸盐熔体快速结晶, 形成基质玻璃, 即与斑晶矿物共存的基质玻璃是火山喷发后遇冷迅速结晶形成的, 其成分则与喷发后的熔浆成分相同, 代表了熔浆脱气之后的成分, 因此这种未经历脱玻化的基质玻璃中的挥发份含量可以代表岩浆刚喷出后残余的挥发组分含量。

上述斑晶中熔体包裹体和基质玻璃的挥发分含量之差即岩浆的脱气率, 如果能较为准确地计算喷发的岩浆体积(指致密岩石等效物体积 DRE)和总质量, 则可以得到气体的总逸出量, 这就是“岩石学法”的理论依据。

在实际应用中, 郭正府等(2001, 2003)、李霓(2007)根据火山岩斑晶中熔体包裹体的挥发分含量和基质中挥发分含量差异的“岩石学”方法, 结合喷发物质量, 估算了天池火山在千年大喷发时喷出的火山气体(HCl 、 HF 、 H_2O 、 SO_2 等)质量, 认为 Cl、S 的脱气量分别为 62.9 Mt、7.34 Mt; 而据刘若新等(1998)的研究, 天池火山千年大喷发时喷发柱高达 25 km, 而长白山地区平流层底界高度约为 14 km, 可见当时的喷发物已大量进入平流层中, 对大气环境的影响是不言而喻的。张招崇和李树才(2000)、Zhang 等(2013)也曾分别对镜泊湖地区全新世火山岩的蒸汽—岩浆型喷发以及峨眉山大火成岩省喷发时的 S 脱气量进行了研究, 计算出峨眉山溢流玄武岩喷发时每平方公里玄武质熔岩可释

放 5 Mt SO₂,同时讨论了 S 脱气对气候环境的影响。

6 熔体包裹体在地球化学研究中的应用

目前,随着分析技术的发展,微小的熔体包裹体在地球化学研究领域中得到了广泛应用。通过分析熔体包裹体的组分,可以知晓原始岩浆成分、挥发分含量及熔体演化线,岩浆混合和结晶分异等一系列岩石学过程(Frezzotti, 2001; Roggensack, 2001; Danyushevsky, 2002),即得到更多的有关地下岩浆房的岩石学和地球化学方面的信息,从而追溯岩浆的源区特征、岩浆起源和演化信息,甚至对地幔深部碳循环也有了新的认识(Le Voyer *et al.*, 2017)。

Michaud 等(2000)曾根据斑晶矿物中的反环带、圆形内核以及矿物相成分的双峰式分布,认为希腊 Santorini 火山在毁灭米诺斯文明的大喷发时岩浆房内的混合活动很活跃,他们再进一步根据熔体包裹体成分演化趋势及热台实验得出的岩浆温度逐渐降低,判明岩浆房内确实发生了同源岩浆的混合,很可能是由于有新的玄武质岩浆的注入或结晶分异的缘故。Sours-Page 等(2002)研究了东太平洋洋隆北部火山熔岩及其中的熔体包裹体,发现二者成分重叠,且含有相似的 N-MORB 型相容和不相容元素,熔体包裹体化学成分的变化代表了同时期岩浆的混合和分异,因此他们认为熔体包裹体可以作为母岩浆多样性变化的指示剂。Ren 等(2005)通过 EPMA 和 LA-ICP-MS 分析手段,对夏威夷帝王火山岛和海山链全岩和橄榄石斑晶中熔体包裹体的主微量元素比值(Al_2O_3/CaO 、 TiO_2/Na_2O 、 Zr/Nb 、 Sr/Nb)进行对比研究,发现寄主晶橄榄石中的熔体包裹体记录了地幔源区的复杂性,并推测地幔柱的化学结构和热结构。Laubier 等(2007)则研究了大西洋中脊地区橄榄石中熔体包裹体与熔融过程的关系。

李霓等(2006)较早应用红外光谱仪测试和计算了长白山天池火山千年大喷发产物中的熔体包裹体水含量,发现当时岩浆中挥发分含量高,由此解释了发生爆炸式大喷发的原因。刘芳等(2015)则利用 LRS 和 LA-ICP-MS 研究手段,对中国东部新生代碱性玄武岩橄榄石斑晶中熔体包裹体进行了研究,结果显示熔体包裹体中含有高含量的 CH₄ 等烃类,而且含有石墨和碳酸盐等矿物,这为 CH₄ 在上地幔高温高压条件下能够稳定存在提供了直接证据,为中国东部的深部碳循环形式提供了新思路。

Li 等(2016)把新生代华北克拉通东部的山东和渤海湾玄武岩分成高、中、低 Si 3 组,发现低 Si 组橄榄石中的熔体包裹体的主量元素特征与正常橄榄岩或榴辉岩地幔不同,说明源区发生碳酸盐化,并提出了一个被俯冲改造过的地幔的差异熔融模型来解释 3 组成分玄武岩。Hong 等(2013)、Liu 等(2015)、Qian 等(2015)、Qian 等(2017)、Ren 等(2017)均利用熔体包裹体及寄主橄榄石成分,及熔体包裹体包裹体 Pb 同位素成分,分别对赤峰、汉诺坝、峨眉山、琼北晚新生代等地区玄武岩橄榄石中的熔体包裹体进行了熔体包裹体成分分析,对这些地区的玄武岩成因获得了许多新的认识,或证明有的岩浆喷发前发生过混合现象,或证明有的幔源岩浆曾被下地壳不同程度混染,或说明源区碳酸盐化,还提出一个被俯冲改造过的地幔的差异熔融模型等等,成果卓著。

最近,Zhang 等(2017)研究了山东于家沟组玄武岩橄榄石中熔体包裹体及 Pb 同位素的组成,认为这些玄武岩可能是辉石岩部分熔融的产物,结合实验结果,推测新生代玄武岩随着时间的成分变化可能源于因热异常导致的差异性部分熔融。Manzini 等(2017)对洋中脊玄武岩中橄榄石的磷分布特征进行了详细研究,发现橄榄石中的复杂磷环带和橄榄石内熔体包裹体周边磷亏损区的出现表明寄存熔体包裹体的系统有一个较复杂的演化史,绝热减压熔融作用可能导致了部分橄榄石发生溶解-再结晶过程,此过程中二者可能发生了磷的交换。因此解释熔体包裹体中磷和其他不相容元素的来源时需要更加谨慎。

7 结语

火山岩斑晶矿物中保存完好的熔体包裹体含有原始岩浆的成分和挥发分含量,带有原始岩浆的信息,是恢复火山喷发前岩浆化学成分和运移演化过程的最好工具。随着现代测试仪器精度的不断提高和测试应用范围的扩大,对矿物中熔体包裹体的研究方式已从传统的高温热台研究转向更复杂的地球化学研究和应用,不仅可以从熔体包裹体中了解原始岩浆成分及挥发分含量、岩浆混合、结晶分异等岩浆作用过程,还可以探知源区特征,解释更多的地质现象。总之,熔体包裹体的研究进入了更快发展阶段。

国内有关熔体包裹体研究也从无到有并迅速发展起来,近几年的研究主要是综合利用多种仪器测试手段开展研究,尤其是对橄榄石寄主晶及其中

熔体包裹体的主微量元素和 Pb 同位素的研究取得了较大进展,不仅丰富了熔体包裹体的专项研究,也迅速赶上了国际先进水平。

参考文献 (References):

- Belkin H E, De Vivo B. 1998. Kalman Torok, Pre-eruptive volatile content, melt-inclusion chemistry, and microthermometry of interplinian Vesuvius lavas pre-A. D. 1631. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 82: 79-95
- Danyushevsky L V, McNeill A W, Sobolev A V. 2002. Experimental and petrological studies of melt inclusions in phenocrysts from mantle-derived magmas: an overview of techniques, advantages and complications. *Chemical Geology*, 183: 5-24
- Dunbar N W, Hervig R L, Kyle P R. 1989. Determination of pre-eruptive H₂O, F and Cl contents of silicic magmas using melt inclusions: examples from Taupo volcanic center, New Zealand. *Bulletin Volcanologique*, 51: 177-184
- Frezzotti M-L. 2001. Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: applications to petrology. *Lithos*, 55: 273-299
- Fulginiti P, Marianelli P, Proto M, Sbrana A. 2004. Evidences for disruption of a crystallizing front in a magma chamber during caldera collapse: an example from the Breccia Museo unit (Campanian Ignimbrite eruption, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133: 141-155
- Gurenko A A, Schmincke H-U. 2002. Orthopyroxene-bearing tholeiites of the Iblean Plateau (Sicily): constraints on magma origin and evolution from glass inclusions in olivine and orthopyroxene. *Chemical Geology*, 183: 305-331
- Halter W E, Pettke T, Heinrich C A, Rothen-Rutishauser B. 2002. Major to trace element analysis of melt inclusions by laser-ablation ICP-MS: methods of quantification. *Chemical Geology*, 183: 63-86
- Hauri E, Kent A J R, Arndt N. 2002. Melt inclusions at the millennium: toward a deeper understanding of magmatic processes. *Chemical Geology*, 183: 1-3
- Hauri E. 2002. SIMS analysis of volatiles in silicate glasses, 2: isotopes and abundances in Hawaiian melt inclusions. *Chemical Geology*, 183: 115-141
- Hervig R L, Dunbar N, Westrich H R, Kyle P R. 1989. Pre-eruptive water content of rhyolitic magmas as determined by ion microprobe analyses of melt inclusions in phenocrysts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 36: 293-302
- Hong L B, Zhang Y H, Qian S B, Liu J Q, Ren Z Y, Xu Y G. 2013. Constraints from melt inclusions and their host olivines on the petrogenesis of Oligocene-Early Miocene Xindian basalts, Chifeng area, North China Craton. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 165: 305-326
- Humphreys M C S, Kearns S L, Blundy J D. 2006. SIMS investigation of electron-beam damage to hydrous, rhyolitic glasses: implications for melt inclusions analysis. *American Mineralogist*, 91: 667-679
- Kamenetsky V S, Sobolev A V, Eggins S M, Crawford A J, Arculus R J. 2002. Olivine-enriched melt inclusions in chromites from low-Ca boninites, Cape Vogel, Papua New Guinea: evidence for ultramafic primary magma, refractory mantle source and enriched components. *Chemical Geology*, 183: 287-303
- Kent A J R, Elliott T R. 2002. Melt inclusions from Marianas arc lavas: implications for the composition and formation of island arc magmas. *Chemical Geology*, 183: 263-286
- Koornneef J M, Nikogosian I, van Bergen M J, Smeets R, Davies G R. 2015. TIMS analysis of Sr and Nd isotopes in melt inclusions from Italian potassium-rich lavas using prototype 1013Ω amplifiers. *Chemical Geology*, 397: 14-23
- Laubier M, Schiano P, Doucelance R, Ottolini L, Laporte D. 2007. Olivine-hosted melt inclusions and melting processes beneath the FAMOUS zone (Mid-Atlantic Ridge). *Chemical Geology*, 240: 129-150
- Le Voyer M, Kelley K A, Cottrell E, Hauri E. 2017. Heterogeneity in mantle carbon content from CO₂-undersaturated basalts. *Nature Communications*, 8: 1-8
- Li H Y, Xu Y G, Ryan J G, Huang X L, Ren Z Y, Guo H, Ning Z G. 2016. Olivine and melt inclusion chemical constraints on the source of intracratonic basalts from the eastern North China Craton: Discrimination of contributions from the subducted Pacific slab. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 178: 1-19
- Li N, Fan Q C, Sun Q, Sun R. 2009. Lithogeochemistry of Volcanic rocks and hosted melt inclusions in Wudalianchi, Heilongjiang, China. *Journal of Earth Science*, 20(5): 771-783
- Li N, Métrich N, Fan Q C. 2008. Heating stage experimental study of melt inclusions in feldspars from three Holocene eruptions of Changbaishan Tianchi volcano. *Earthquake Research in China*, 22(2): 153-163
- Liu J Q, Ren Z Y, Nichols A R L, Song M S, Qian S P, Zhang Y, Zhao P P. 2015. Petrogenesis of Late Cenozoic basalts from North Hainan Island: Constraints from melt inclusions and their host olivines. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 152: 89-121
- Lowenstern J B. 1994. Chlorine, fluid immiscibility, and degassing in peralkaline magmas from Pantelleria, Italy. *American Mineralogist*, 79: 353-369
- Lowenstern J B. 2003. Melt inclusions come of age: volatiles, volcanoes, and Sorby's legacy. De Vivo B, Bodnar R J (eds). *Melt inclusions in volcanic systems: methods, applications and 5 problems, developments in volcanology 5*. Amsterdam: Elsevier Press, 1-21
- Mangan M, Sisson T. 2000. Delayed, disequilibrium degassing in rhyolite magma: decompression experiments and implications for explosive volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 183: 441-455
- Manzini M, Bouvier A-S, Baumgartner L P, Müntener O, Rose-Koga E F, Schiano P, Escrig S, Meibom A, Shimizu N. 2017. Weekly to monthly time scale of melt inclusion entrapment prior to eruption recorded by phosphorus distribution in olivine from mid-ocean ridges. *Geology*, 45(12): 1059-1062
- Marianelli P, Métrich N, Sbrana A. 1999. Shallow and deep reservoirs involved in magma supply of the 1944 eruption of Vesuvius. *Bulletin Volcanologique*, 61: 48-63
- Marianelli P, Sbrana A, Métrich N, Cecchetti A. 2005. The deep feeding system of Vesuvius involved in recent violent strombolian eruptions. *Geophysical Research Letters*, 32(2): 287-294

- Martel C, Bourdier J L, Pichavant M, Traineau H. 2000. Textures, water content and degassing of silicic andesites from recent plinian and dome-forming eruptions at Mount Pelee volcano (Martinique, Lesser Antilles arc). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 96: 191-206
- Massare D, Métrich N, Clocchiatti R. 2002. High-temperature experiments on silicate melt inclusions in olivine at 1 atm: inference on temperatures of homogenization and H₂O concentrations. *Chemical Geology*, 183: 87-98
- Métrich N, Allard P, Spilliaert N, Andronico D, Burton M. 2004. 2001 flank eruption of the alkali- and volatile-rich primitive basalt responsible for Mount Etna's evolution in the last three decades. *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 1-17
- Métrich N, Bertagnini A, Landi P, Rosi M. 2001. Crystallization driven by decompression and water loss at Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Italy). *Journal of Petrology*, 42 (8): 1471-1490
- Métrich N, Clocchiatti R, Mosbah M, Chaussidon M. 1993. The 1989-1990 activity of Etna: magma mingling and ascent of H₂O-Cl-S-rich basaltic magma, evidence from melt inclusions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59(1-2): 131-144
- Métrich N, Clocchiatti R. 1989. Melt inclusion investigation of the volatile behaviour in historic alkali basaltic magmas of Etna. *Bulletin Volcanologique*, 51: 185-198
- Métrich N, Rutherford M. 1998. Low pressure crystallization paths of H₂O-saturated basaltic-hawaiitic melts from Mt Etna: implications for open-system degassing volcanoes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1195-1205
- Métrich N, Wallace P J. 2008. Volatile abundances in basaltic magmas and their degassing paths tracked by melt inclusions. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69: 363-402
- Michael P J, McDonough W F, Nielsen R L, Cornell W C. 2002. Depleted melt inclusions in MORB plagioclase: messages from the mantle or mirages from the magma chamber? *Chemical Geology*, 183: 43-61
- Michaud V, Clocchiatti R, Sbrana S. 2000. The Minoan and post-Minoan eruptions, Santorini (Greece), in the light of melt inclusions: chlorine and sulphur behavior. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 99: 195-214
- Nikogosian I K, Elliott T, Touret J L R. 2002. Melt evolution beneath thick lithosphere: a magmatic inclusion study of La Palma, Canary Islands. *Chemical Geology*, 183: 169-193
- Norman M D, Garcia M O, Kamenetsky V S, Nielsen R L. 2002. Olivine-hosted melt inclusions in Hawaiian picrites: equilibration, melting, and plume source characteristics. *Chemical Geology*, 183: 143-168
- Ohlhorst S, Behrens H, Holtz F. 2001. Compositional dependence of molar absorptivities of near-infrared OH- and H₂O bands in rhyolitic to basaltic glasses. *Chemical Geology*, 174: 5-20
- Paul B, Woodhead J D, Hergt J, Danyushevsky L, Kunihiro T, Nakamura E. 2011. Melt inclusion Pb-isotope analysis by LA-MC-ICPMS: Assessment of analytical performance and application to OIB genesis. *Chemical Geology*, 289 (3): 210-223
- Qian S P, Ren Z Y, Richard W, Zhang L, Zhang Y H, Hong L B, Ding X L, Wu Y D. 2017. Petrogenesis of Early Cretaceous basaltic lavas from the North China Craton: Implications for cratonic destruction. *Journal of Geophysical Research*, 10.1002/2016JB013548
- Qian S P, Ren Z Y, Zhang L, Hong L B, Liu J Q. 2015. Chemical and Pb isotope composition of olivine-hosted melt inclusions from the Hannuoba basalts, North China Craton: Implications for petrogenesis and mantle source. *Chemical Geology*, 401: 111-125
- Ren Z Y, Ingle S, Takahashi E, Hirano N, Hirata T. 2005. The chemical structure of the Hawaiian mantle plume. *Nature*, 436: 837-840
- Ren Z Y, Wu Y D, Zhang L, Nichols A R L, Hong L B, Zhang Y H, Zhang Y, Liu J Q, Xu Y G. 2017. Primary magmas and mantle sources of Emeishan basalts constrained from major element, trace element and Pb isotope compositions of olivine-hosted melt inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 208: 63-85
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America, 12(6): 71-77
- Roggensack K. 2001. Sizing up crystals and their melt inclusions: a new approach to crystallization studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 187: 221-237
- Saito G, Kazahaya K, Shinohara H, Stimac J, Kawanabe Y. 2001. Variation of volatile concentration in a magma system of Satsuma-Iwojima volcano deduced from melt inclusion analyses. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108: 11-31
- Seaman S J, Dyar M D, Marinkovic N, Dunbar N W. 2006. An FTIR study of hydrogen in anorthoclase and associated melt inclusions. *American Mineralogist*, 91: 12-20
- Signorelli S, Vaggelli G, Romano C. 1999. Pre-eruptive volatile (H₂O, F, Cl and S) contents of phonolitic magmas feeding the 3550-year old Avellino eruption from Vesuvius, southern Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 93: 237-256
- Sobolev A V, Danyushevsky L V. 1994. Petrology and geochemistry of boninites from the North termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas. *Journal of Petrology*, 35: 1183-1211
- Sobolev A V. 1996. Melt inclusions in minerals as a source of principle petrological information. *Petrology*, 4: 228-239
- Sokolov S. 2002. Melt inclusions as indicators of the magmatic origin of carbonatite rare metal and rare earth minerals. *Chemical Geology*, 183: 373-378
- Sours-Page R, Nielsen R L, Batiza R. 2002. Melt inclusions as indicators of parental magma diversity on the northern East Pacific Rise. *Chemical Geology*, 183: 237-261
- Thomas R, Kamenetsky V S, Davidson P. 2006. Laser Raman spectroscopic measurements of water in unexposed glass inclusions. *American Mineralogist*, 91: 467-470
- Wallace P J. 2005. Volatiles in subduction zone magmas: Concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140 (1-3): 217-240
- Zhang L, Ren Z Y, Nichols A R L, Zhang Y H, Zhang Y, Qian S P, Liu J Q. 2014. Lead isotope analysis of melt inclusions by LA-MCICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 29: 1393-1405

- Zhang L, Ren Z Y, Wang C Y. 2015. Melt inclusions in the olivine from the Nantianwan intrusion: Implications for the parental magma of Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions of the ~260 Ma Emeishan large igneous province (SW China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 72-85
- Zhang Y, Ren Z Y, Hong L B, Zhang Y, Zhang L, Qian S P, Xu Y G, Chen L L. 2017. Differential partial melting process for temporal variations of Shandong basalts revealed by melt inclusions and their host olivines. *Gondwana Research*, 49: 205-221
- Zhang Y, Ren Z Y, Xu Y G. 2013. Sulfur in olivine-hosted melt inclusions from the Emeishan picrites: Implications for S degassing and its impact on environment. *Journal of Geophysical Research*, 118: 4063-4070
- 陈晋阳, 郑海飞, 曾贻善. 2002. 流体包裹体的喇曼光谱分析进展. *矿物岩石地球化学通报*, 21(2): 133-138
- 陈银汉. 1984. 矿物包裹体中的子矿物研究. *矿物岩石*, 3: 86-96
- 樊祺诚, 隋建立, 孙谦, 李霓, 赵勇伟, 杜星星. 2008. 北部湾涠洲岛橄榄岩中熔体包裹体——大陆岩石圈地幔交代作用的新证据. *岩石学报*, 24(11): 2495-2500
- 郭玲利, 魏俊浩, 周圣华. 2009. 单矿物中熔体包裹体研究进展及地质指示意义. *地质与勘探*, 45(1): 36-40
- 郭正府, 刘嘉麒, 隋淑珍, 刘强, 贺怀宇, 倪云燕. 2001. 白头山火山公元 1199/1200 年喷发的火山气体总量估算及其意义. *中国科学(D 辑)*, 31(8): 668-676
- 郭正府, 刘嘉麒, 汪筱林. 2003. 辽西中生代火山喷发对古气候和古脊椎动物生存环境的影响. *中国科学(D 辑)*, 33(1): 59-71
- 黄伟林. 1988. 八十年代国外流体包裹体理论研究的某些新进展. *地质科技情报*, 7(3): 59-66
- 李福春, 朱金初, 金章东. 2000a. 熔体包裹体研究的最新进展. *世界地质*, 19(1): 8-14
- 李福春, 朱金初, 金章东. 2000b. 岩浆中主要挥发份含量-熔体包裹体和淬火玻璃证据. *地质地球化学*, 28(2): 8-13
- 李霓, Métrich N, 樊祺诚. 2006. 长白山天池火山千年大喷发岩浆含水量研究——熔体包裹体含水量的红外光谱研究. *岩石学报*, 22(6): 1465-1472
- 李霓, Métrich N, 樊祺诚. 2007. 长白山天池火山全新世 3 期浮岩长石斑晶中熔体包裹体高温热台实验研究. *地震地质*, 29(3): 459-469
- 李霓, 张柳毅. 2011. 云南腾冲新期火山岩及其熔体包裹体研究. *岩石学报*, 27(10): 2842-2854
- 李霓. 2007. 长白山天池火山全新世爆炸喷发的岩浆脱气作用研究. 博士学位论文. 北京中国地震局地质研究所, 1-102
- 刘芳, 宗克清, 刘勇胜, 胡兆初, 朱律运, 徐荣. 2015. 中国东部新生代碱性玄武岩橄榄石斑晶中含 CH₄ 熔体包裹体的发现及其地质意义. *科学通报*, 60(14): 1310-1319
- 刘蒙华. 1988. 黑龙江科洛富钾火山岩及其地幔包体中包裹体的初步研究. *华东地质学院学报*, 11(1): 55-58
- 刘若新, 魏海泉, 李继泰. 1998. 长白山天池火山近代喷发. 北京: 科学出版社, 1-159
- 刘英俊, 李兆麟, 吴启志, 赵梅芳, 蒋浩深. 1985. 中国东部若干玄武岩矿物中包裹体研究. *地球化学*, 3: 216-226
- 卢焕章, 王卿铎, 译(EDWIN ROEDDER 著). 1986. 流体包裹体. 长沙中南工业大学出版社, 1-272
- 王蝶, 卢焕章, 单强. 2017. 岩浆熔体包裹体研究进展. *岩石学报*, 33(2): 653-666
- 王锦团, 张乐, 任钟元, 熊小林. 2016. 气体混合炉中氧逸度控制. *地球化学*, 45(5): 475-485
- 王新彦, 李建康, 李胜虎, 张德会, 鲍波. 2015. Linkam 热台与热液金刚石压腔的熔体包裹体均一实验对比研究. *矿床地质*, 34(3): 589-601
- 魏海泉, 刘若新, 郑德文, 樊祺诚. 1999. 长白山天池火山熔体包裹体均一过程研究及地质意义. *地质论评*, 45(增刊): 248-256
- 吴才来, 李兆麟, 尚如相. 1997. 长白山地区新生代火山岩及其幔源包体的矿物化学及矿物包裹体研究. *岩石矿物学杂志*, 16(4): 289-302
- 夏林圻, Clocchiatti R. 1986b. 印度尼西亚克拉托火山安山质熔岩斑晶矿物中的岩浆包裹体. *地球化学*, 3: 1-12
- 夏林圻, 徐培苍, 王之王. 1990. 岩浆包裹体挥发组分的研究. *地球化学*, 2: 108-116
- 夏林圻, 程淑兰, 黄月华. 1986a. 我国五大连池、集宁碱性玄武岩的岩浆包裹体. *矿物学报*, 6(1): 51-58
- 夏林圻. 1984. 硅酸盐熔体包裹体均匀化过程的动力学性质. *地质科学*, 3: 323-329
- 夏林圻. 1985. 岩浆包裹体的成因和意义. *中国地质科学院院报*, 11: 55-78
- 夏林圻. 1987. 岩浆包裹体研究在火山岩石学中的地位. *岩石学报*, 2: 51-63
- 夏林圻. 1988. 岩浆包裹体化学成分研究. *岩石矿物学杂志*, 7(1): 1-19
- 夏林圻. 1990. 论五大连池火山岩浆演化. *岩石学报*, 1: 13-29
- 夏林圻. 2002. 岩浆岩中的熔体包裹体. *地学前缘*, 9(2): 403-414
- 徐九华, 魏浩, 王燕海, 曾庆栋, 刘建梁. 2012. 黑龙江乌拉嘎金矿的次火山岩浆-热液成矿: 熔体流体包裹体证据. *岩石学报*, 28(4): 1305-1316
- 张春来, 刘勇胜, 高山, Zajacz Z, 胡兆初, 高长贵. 2011. 四合屯玄武岩斑晶中单个熔体包裹体元素组成及其对岩浆演化的指示. *地球化学*, 40(2): 109-125
- 张道涵, 魏俊浩, 付乐兵. 2017. 熔体包裹体的形成、改造和分析方法及其矿床学应用. *地球科学(中国地质大学学报)*, 42(6): 990-1007
- 张招崇, 李树才. 2000. 火山喷发过程中岩浆脱气率和脱气量的估算方法及其意义. *岩石矿物学杂志*, 19(4): 307-314
- 赵令浩, 詹秀春, 胡明月, 范晨子, 孙冬阳, 刘传宝. 2013. 单个熔体包裹体激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析及地质学应用. *岩矿测试*, 32(1): 1-14
- 郑祥身, 李家驹. 1986. 白头山碱流岩斑晶中固态包裹体成分的研究. *岩石学报*, 2(1): 33-39
- 郑祥身. 1983. 白头山天池碱流岩中歪长石斑晶所含的固态包裹体. *吉林地质*, 1: 77-79
- 周德进, 鄂莫岚, 徐平, 韩松, 黄忠祥, 贾秀勤, 董金泉. 1995. 雷琼新生代玄武岩中地幔岩包体矿物中的流体-熔体包裹体的 REE 组成特征. *岩石学报*, 11(4): 434-440
- 朱永峰. 1994. 熔体包裹体中水含量的测定方法. *岩石学报*, 10(3): 311-316