

# 熔体包裹体及挥发分的研究进展及其地质意义

杨天畅<sup>1)</sup>, 徐悦<sup>2)</sup>, 王萌<sup>2)</sup>

1) 上海建桥学院珠宝学院, 上海, 201306;

2) 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京, 100083



**内容提要:** 熔体包裹体可在岩浆演化过程中保留相对原始的岩浆演化信息, 包括熔体成分和物理化学条件, 因此具有重要的研究价值和科学意义; 岩浆挥发分的溶解度和脱气作用可以为解释特定岩浆行为提供重要证据, 因而逐渐成为研究热点。然而, 获取熔体包裹体的成分准确性高度依赖均一化手段和分析测试技术。当包裹体存在结晶矿物时, 将其均一化得到捕获成分开展包裹体研究的先决条件, 而当无法准确获知捕获包裹体时的物理化学条件时, 均一化所使用的温度和压力存在不确定性。此外, 当熔体包裹体含有挥发分时, 挥发分的种类和含量(包括 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、S、Cl 和 F 等)是熔体包裹体的重要信息, 对其精确分析和测试也是目前的难点。因此, 本文从熔体包裹体的均一化、分析技术手段, 尤其是挥发分的溶解度和脱气作用影响等方面系统梳理和阐述近年来熔体包裹体及其挥发分的研究进展, 以期提升和进一步完善熔体包裹体研究的地质意义。

**关键词:** 熔体包裹体; 挥发分; 分析技术; 脱气作用; 岩浆挥发分

熔体包裹体(melt inclusion)是指处于岩浆系统中被捕获在晶体里的熔体液滴, 形成过程与流体包裹体相似(Sorby, 1858; Roedder, 1979, 1984)。如果熔体包裹体在岩浆演化过程中能够保持独立性与完整性, 则可保存较早期的岩浆熔体(包括挥发分)及各阶段演化信息, 例如岩浆成分、挥发分含量和结晶温度等, 常用于揭示挥发分的饱和与脱气、岩浆分异、岩浆混合及同化混染等过程。对于经过风化、热液蚀变或低温变质作用的岩石, 尤其是在此过程中成分发生了改变, 如挥发分、碱和碱土元素等易活动组分丢失, 熔体包裹体则为直接确定岩浆熔体成分的唯一手段(Shimizu et al., 2001; Kamenetsky et al., 2002)。

尽管如此, 准确获得熔体包裹体的成分及条件并非易事, 主要原因如下: ① 熔体被捕获后伴随温度和压力下降, 会出现矿物的结晶, 例如子相矿物、寄主矿物和包裹体界面上的矿物等。然而因无法准确获知捕获时的条件, 均一化的温度和压力存在不确定性。② 挥发分的出溶, 例如熔体包裹体中常见 CO<sub>2</sub> 气泡是因在熔体中溶解度较低所致。③ 一部

分熔体包裹体的体积过小, 成分分析时会存在一定难度, 例如激光剥蚀可能会使寄主矿物受损, 继而使后续分析更困难。④ 氢会“透过”寄主矿物, 影响熔体包裹体成分中水含量和氧逸度等, 导致其计算误差较大。目前常用脱气模型来恢复岩浆初始含量并反映岩浆演化过程中的变化, 但这一方法的精确性仍待研究, 例如水在熔体中的溶解形式有分子 H<sub>2</sub>O 和 OH<sup>-</sup>, 在计算时通常都会比原含量低。

因此, 本文整理了不同岩浆类型中熔体包裹体的种类和含量, 从熔体包裹体的均一化、分析技术手段以及挥发分的溶解度与脱气作用影响等三个方面系统阐述近年熔体包裹体和挥发分的研究进展。

## 1 不同岩浆类型中熔体包裹体中挥发分种类与含量

封闭的熔体包裹体保存了岩浆中的挥发分实际浓度, 是获得岩浆挥发分含量的有效手段(夏林圻, 2002)。不同的挥发分 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、S、Cl 和 F 在岩浆演化过程中发挥重要作用, H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 可显著降低岩浆黏度和固相线温度, 例如扩大橄榄石稳定域, 缩

注: 本文为国家重点研发项目(编号:2024ZD1003402)的成果。

收稿日期:2025-09-30; 改回日期:2026-02-03; 网络首发:2026-02-15; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2026.02.065

作者简介: 杨天畅, 女, 1987年生, 硕士, 副教授, 主要从事地质学与宝石学教学、研究; Email: 13012@gench.edu.cn。通讯作者: 王萌, 女, 1988年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩浆岩岩石学和实验岩石学研究; Email: mwang@cugb.edu.cn。

小单斜辉石稳定域);S 对于氧化还原状态非常敏感,进而影响亲硫元素(Cu、Au 和 PGE)的分配行为及相关矿床形成;F 和 Cl 等卤素元素易与多种金属元素结合形成可溶性络合物,极大提高金属在熔流体中的溶解度,从而控制金属元素的分异和富集行为。随着原始岩浆不断分离结晶,残余熔体按照鲍文反应序列方向,由超基性岩浆向酸性岩浆持续演化,不同类型岩浆中挥发分含量存在一定差异(表 1)。

从表 1 可见,H<sub>2</sub>O 和 F 平均含量在岩浆演化过程中由基性到酸性表现出增加的趋势,CO<sub>2</sub>、S 和 Cl 平均含量表现出减少的趋势,其中 F、Cl 可能在岩浆演化晚期高度富集。挥发分含量在相当程度上控制岩浆的规模、侵位方式与演化方向,同时也影响着成矿熔体和流体的形成与演化(李福春等, 2000a)。

## 2 熔体包裹体的岩相学分析与均一化实验

### 2.1 熔体包裹体捕获后变化与岩相学分析

熔体冷却时间和挥发分的出溶程度使熔体包裹体具有不同的冷却速率(蔡佳祺等, 2024),最终演变出不同的外观特征(图 1)。正常速率冷却的熔体包裹体主要为玻璃、子矿物及气泡;快速冷却的熔体包裹体缺少子矿物;较慢冷却的熔体包裹体可能含有骨骼或树枝状结构的子矿物(Roedder, 1979)。

岩相学分析可为研究熔体包裹体提供许多直观信息,例如包裹体位置、形态大小和分布方式等,可判别是原生、次生或假次生包裹体。除常用的偏光显微镜、红外显微镜等设备外,高分辨率 X 射线计算机断层扫描技术可观察包裹体三维形态并辅助计算包裹体的体积及各项体积分数,解决了部分矿物在红外显微镜下透明度不佳问题(Richard et al., 2018; 蔡佳祺等, 2024)。

### 2.2 均一化实验方法和实验条件

在岩浆演化过程中,被捕获后的熔体包裹体结构和成分常随着温度、压力等条件而发

生改变,这些变化分为可逆变化(挥发分逃逸)和不可逆变化(成分损耗)(Cervantes et al., 2002; Danyushevsky et al., 2002)。从寄主矿物成分中获得的结晶条件可作为均一化的目标温度和压力条件,但还需结合包裹体最终均一化条件来检验。尽管这个估测条件可能与被捕获时真正的温度和压力存在误差,但仍然是目前较为理想的办法。均一化实验由特定装置加热熔体包裹体到被捕获时的温度,使包裹体内部达到均一玻璃相,结合当时岩浆的温压条件,减少可逆变化的影响(Danyushevsky et al., 2002; Schiano, 2003)。

目前常用均一化实验方法有三种:① 马弗炉或其他类型管式淬火炉加热。② 显微高温热台加热。③ 利用 HDAC 热液金刚压腔、活塞—圆筒、内加热高压釜和冷封式高压釜等设备加温加压(Roedder, 1979, 1984; Nielsen et al., 1995, 1998; Danyushevsky et al., 2002)。

#### 2.2.1 均一化实验温压条件的选择

不同类型样品的均一化应采取不同的实验装置,并在均一化前根据寄主矿物及岩石样品的矿物学特征,对包裹体捕获时的温度、压力和氧逸度等变量进行估算。在合适的温压条件基础上,使包裹体出溶的挥发分重新溶解并达到均一玻璃相。对于经过明显地壳岩浆房过程的样品,尤其是处于高压下被捕获的情况,均一化时需选择活塞—圆筒或高压釜来提高对应压力,避免因压力差异而发生爆裂(Cannatelli et al., 2016)。

#### 2.2.2 马弗炉或其他类型管式淬火炉

马弗炉或其他淬火炉直接或分步加热熔体包裹体至最终温度,优点是单次实验的样品数量多、耗时

表 1 不同类型岩浆中主要挥发分质量分数(%) (据李福春等, 2000b 修改)

Table 1 The main volatile content in different types of magma (%) (modified from Li Fuchun et al., 2000b&)

岩浆类型	挥发分种类										
	H <sub>2</sub> O		CO <sub>2</sub>		S		Cl		F		
	均值	最高	均值	最高	均值	最高	均值	最高	均值	最高	
超基性岩浆	0.802	5.0	0.056	0.38	0.111	0.33	0.063	0.39	0.029	0.51	
基性岩浆	1.344	2.40	-	-	0.161	0.75	0.346	1.40	0.299	1.43	
中性岩浆	2.260	7.4	0.119	0.43	0.073	0.34	0.251	1.62	0.143	1.62	
酸性岩浆	普通酸性岩浆	2.998	13.3	0.010	0.10	0.023	0.09	0.172	1.13	0.196	2.011
	富 F 酸性岩浆	1.338	7.4	-	-	-	-	0.212	0.55	2.087	9.22
	富 Cl、Fe 酸性岩浆	3.292	8.5	-	-	-	-	0.498	1.13	0.273	0.80

注:样品来自熔体包裹体和海底火山淬火玻璃;最低含量均为 0。

Note: Samples are from melt inclusions and quenched glasses of submarine volcanoes; minimum content is 0.

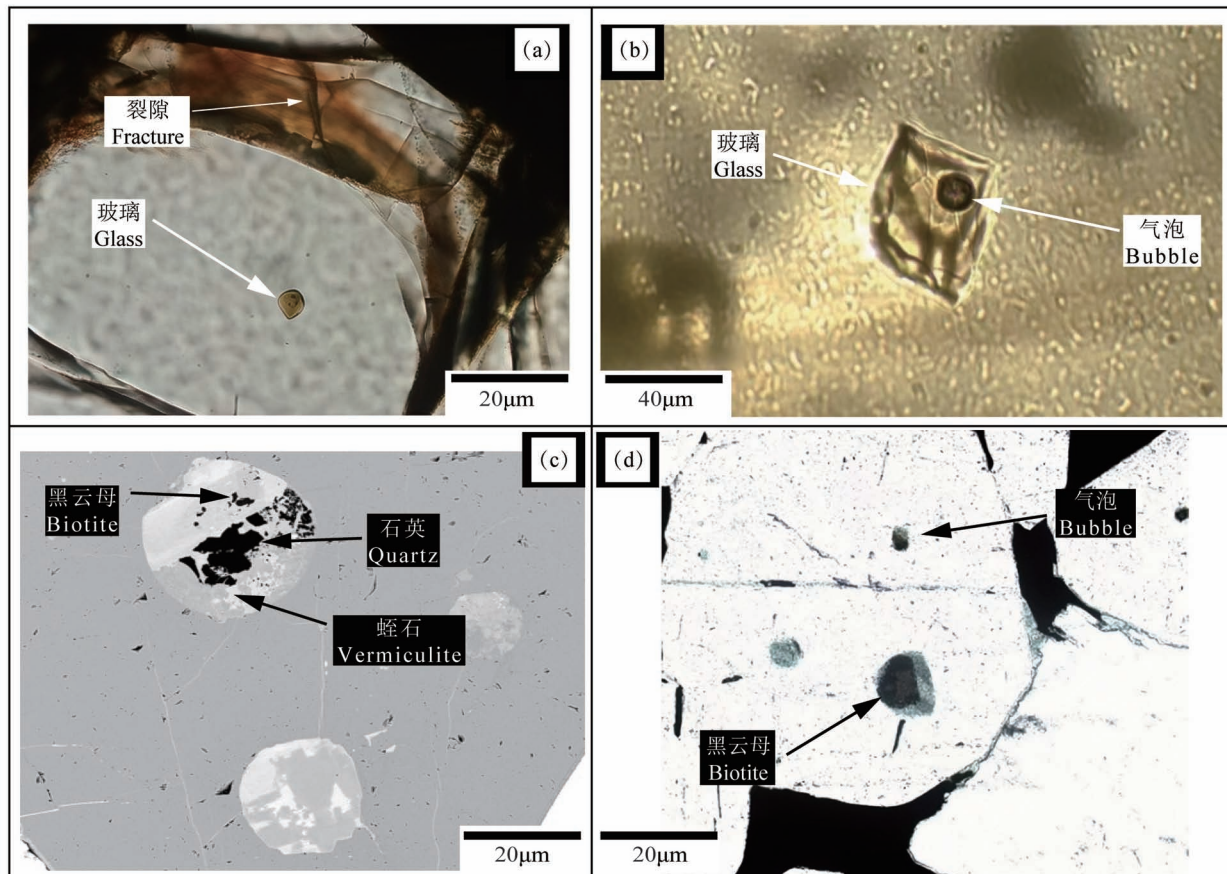


图 1 熔体包裹体岩相学观察照片(本文):(a)(b)云南腾冲城子楼橄榄石中熔体包裹体,包括玻璃质熔体及一个或多个黑色气泡,单偏;(c)河北大庙磷灰石中熔体包裹体,可见黑云母、石英、蛭石等矿物,背散射图像;(d)Bushveld 层状岩体磷灰石中熔体包裹体,包括黑云母及其他蚀变矿物,背散射图像

Fig. 1 Petrographic observation photograph of melt inclusions (this paper): (a) (b) melt inclusions in olivine in Chengzilou, Tengchong, Yunnan Province, including glassy melt and one or several black bubbles, plane-polarized; (c) melt inclusions in apatites in Damiao, Hebei Province, comprised with biotite, quartz, vermiculite and other minerals; BSE images; (d) melt inclusions in apatite in Bushveld layered intrusion, including biotite and other altered minerals; BSE images

短;缺点是无法观察加热过程中包裹体的相态变化,容易因缺少重要信息而产生较大误差,实验前需查阅资料找到同样样品的均一温度范围和氧化还原条件(蔡佳祺等, 2024)。此外,该方法忽略了包裹体被捕获时的压力条件,所以多适用于浅部岩浆房形成条件,在实际应用中由于其便携性仍有较广使用。然而,考虑到在包裹体被捕获后一定量的氢会透过寄主矿物逃逸,而且在加热的过程中可能会继续逃逸导致熔体氧化程度变高。对于这样均一化的结果,在讨论熔体中水的含量及氧逸度时要格外注意。

### 2.2.3 显微高温热台

显微高温热台由显微镜与冷热台连接而成,实验中可原位观察包裹体形态和不同温度下的相态变

化及子矿物和气泡消失顺序。但该方法单次检测样品数量少、耗时久,且同样未考虑到压力对熔体包裹体成分的影响,这可能会导致所得均一化熔体的含水量结果不准确。

目前常用的装置有 Vernadsky 加热台和 Linkam 高温热台(Esposito et al., 2014; Cannatelli et al., 2016; 蔡佳祺等, 2024)。Vernadsky 加热台可直接测量各种矿物相和气泡消失时的温度,并在短时间内恢复室温(Cannatelli et al., 2007)。Linkam 高温热台装载样品方便,还可在加热过程中进行暂停操作,应用范围相对更广;但缺点是样品制备时间较长,而且在加热过程中需通入惰性气体来防止样品氧化(Esposito et al., 2012)。

显微热台测温时需要注意以下几点:①避免加热时间过长造成熔体包裹体的  $H_2O$  蒸发 (Gaetani and Watson, 2000)。②尽量缩短熔体包裹体处于高温状态下的时间,避免包裹体内部破裂发生成分流失 (Danyushevsky et al., 2002; Massare et al., 2002)。③控制升温速率,过快会引起挥发分不完全扩散,过慢会引起包裹体与寄主晶体再次平衡交换 (Tait, 1992; Lowenstern, 1994)。

### 2.2.4 HDAC 热液金刚压腔及其他高压设备

HDAC 是目前唯一可在高压条件下的均一化过程中原位观察包裹体相态变化的方法 (Li Jiankang and Li Shenghu, 2014; 蔡佳祺等, 2024)。该设备可模拟接近熔体捕获时的压力条件,有效避免加热过程中因压强导致的破裂;可精准控制加热速率,常与拉曼光谱结合对包裹体进行原位定性定量分析 (王新彦, 2014; 李胜虎等, 2021)。缺点是无法淬火,无法得到熔体精确的化学成分,因此应用并不广泛。

针对此缺点已有解决办法,内加热高压釜和密封式高压釜可以精确控制时间、压力及氧逸度,并对所选包裹体样品进行快速淬火。Portnyagin 等 (2019) 采用该方法进行了包裹体均一化实验,首先将熔体包裹体样品经含水玻璃包裹后放入样品仓,再通入混合气体控制氧逸度加压。在快速淬火的过程中,矿物内外含水量保持平衡,避免了氢逃逸,得到的包裹体水含量与氧逸度结果更准确。

## 3 熔体包裹体的成分分析技术优缺点

随着对熔体包裹体研究不断深入,成分分析技术逐渐丰富,这些技术的测试范围、分析精度、样品制备优缺点各有不同。而包裹体体积小,在检测时需保证使用率最大化,本文将目前常用的分析技术方法,按照合理的使用顺序排列如下 (表 2, Ihinger et al., 1994; Hervig et al., 2003; Jugo et al., 2005; Blundy et al., 2008; 王蝶等, 2017; 丁一等, 2019; 李菊景等, 2022; Rose-Koga et al., 2021; 蔡佳祺等, 2024)。

### 3.1 激光拉曼光谱

激光拉曼光谱 (LRS) 是分子被激光穿过时发生非弹性散射,改变原有入射光频率形成的光谱,反映分子化学键、晶体结构和相的组成等信息 (戴慧等, 2022; 蔡佳祺等, 2024)。可用于定性分析熔体包裹体中的挥发分 ( $H_2O$ 、 $CO_2$  等)、有效识别玻璃质和结晶相的组成、半定量估算阳离子含量 (Ihinger et

al., 1994; González-García et al., 2020)。优点是无损、快速且分辨率高,实验分析时可考虑先完成。但该手段荧光效应强、计算过程复杂,需设定与待测样品成分相近的标样,无法测定包裹体中金属元素含量 (蔡佳祺等, 2024)。

拉曼光谱在熔体包裹体运用广泛, Yuan Jiangyan 等 (2022) 联合使用共焦距拉曼成像与扫描电子显微镜,逐层扫描锆石中的熔体包裹体并建立了三维空间结构,对包裹体的矿物相进行定性分析并定量其体积分数。赵汇珍等 (2024) 通过显微激光拉曼光谱测得柳江盆地凝灰岩中的石英斑晶中熔体包裹体的  $H_2O$  的质量分数为 0.99%~4.98%, 以此判断出该地早期岩浆富水。

### 3.2 傅里叶变换红外光谱

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 是分子的化学键或官能团吸收与之振动或转动频率一致的红外光,发生能级跃迁形成具有自身特征的吸收光谱。可用于定量分析矿物和熔体包裹体中的挥发分 ( $H_2O$ 、 $CO_2$  等)。该手段无损且可检测较小的包裹体 (~20 $\mu m$ ), 但无法检测同位素组成,反射法缺少统一标样且精确程度低 (Hervig et al., 2003); 仪器精度对测试环境湿度敏感。

红外光谱在直接测试熔体包裹体的  $H_2O$  存在形式应用广泛 (夏林圻, 2002), Seaman 等 (2006) 通过 FTIR 检测到埃里伯斯山的歪长石中熔体包裹体主吸收峰为 O—H 键伸缩振动 3300  $cm^{-1}$ , 缺少水分子 H—O—H 键弯曲振动的 1630  $cm^{-1}$  吸收峰,证明水以羟基形式存在。

### 3.3 X 射线吸收近边结构光谱

X 射线吸收近边结构光谱 (XANES) 是 X 射线激发原子内层电子后在吸收谱上形成的特征谱图,主要用于确定熔体包裹体的元素价态及分配关系,一般在 FTIR 后开展。该技术手段相对无损且原位分析,分辨率较高 (2  $\mu m \times 2 \mu m$ ); 但可能造成  $H_2O$  损失 (李菊景等, 2022)。

XANES 在检测 Fe 价态方面运用广泛, Rose-Koga 等 (2021) 通过 XANES 测定了  $Fe^{3+}/\Sigma Fe$  比值,获得熔体包裹体与宿主矿物的平衡程度和岩浆物理化学状态。随后 Botcharnikov 等 (2024) 进一步开发了共聚焦微区 X 射线吸收近边结构光谱 (confocal  $\mu$ -XANES) 的技术手段,成功分析了小体积非均质单面打磨的橄榄石中熔体包裹体的  $Fe^{3+}/\Sigma Fe$  变化。该技术的空间 3D 分辨率很高,有效减

表 2 熔体包裹体成分分析方法一览表

Table 2 Analytical methods of melt inclusion compositions

测试方法	测试范围	样品制备	优点	缺点
激光拉曼光谱 (LRS)	H <sub>2</sub> O、CO <sub>2</sub> 、HS <sup>-</sup> 、CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、CH <sub>4</sub>	普通包裹体片,包裹体需靠近表面	无损快速,分辨率高(~1μm),对H <sub>2</sub> O的灵敏度较高(1×10 <sup>-6</sup> ),可检测未暴露至表面的包裹体	荧光效应强;计算复杂;需设定与待测样品成分相近的标样;无法测定包裹体中重要金属含量(Na <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、Ca <sup>2+</sup> 、Mg <sup>2+</sup> 、Fe <sup>2+</sup> 、Fe <sup>3+</sup> )
傅里叶变换红外光谱 (FTIR)	H <sub>2</sub> O、CO <sub>2</sub> 等	粉末或薄片,双面抛光	无损,对H <sub>2</sub> O灵敏度较高,精度较高(<0.1%)	空间分辨率较低(>25~35μm);湿润环境检测会产生误差
X射线吸收近边结构光(XANES)	Fe <sup>2+</sup> 、Fe <sup>3+</sup> 等元素形态分析,X射线测绘和层析成像	单/双面抛光	无损,分辨率较高(2×2μm);可分析较小体积包裹体(<30μm <sup>3</sup> );空间3D分辨率高(<100μm <sup>3</sup> )	可能造成H <sub>2</sub> O损失
二次离子探针 (SIMS)	主微量元素,挥发分(H <sub>2</sub> O、CO <sub>2</sub> 、F、S、Cl),稳定同位素(H、Li、B、O、C、S、Cl)、特征同位素Pb、稀土元素(REE)等	单面抛光并压入金属钢	无损;分析范围广;空间分辨率高(10~30μm);精度高(含量高于1×10 <sup>-6</sup> ~10×10 <sup>-6</sup> 的元素,精度为5%~10%;痕量元素精度为10%~40%)	设备昂贵;效率低、耗时长(30~90分钟/次);需要内标;实验结果受基体效应影响较大
同步辐射X射线荧光光谱(SR-XRF)	原子序数在19~92的元素	普通包裹体片,包裹体需靠近表面	微区、原位、无损,定性—定量分析,灵敏度较高(~1×10 <sup>-6</sup> ),可分析元素价态	定量分析难,X射线荧光穿透能力有限
粒子诱发X射线荧光分析(PIXE)	原子序数>12的元素,部分金属元素(Cu、Fe、Zn、Mn、Ca)	普通包裹体片,包裹体需靠近表面	灵敏度较高(~1×10 <sup>-6</sup> )	电子束穿透能力不及LA-ICP-MS
电子探针(EPMA)	主、微量元素,部分挥发分(F、Cl和S)	单面抛光,部分样品需镶嵌在环氧树脂或其他介质中制靶,喷碳(金)镀膜	无损;分辨率较高(1~2μm)	检测限较高(0.1%~1%);精度受仪器校准质量和元素丰度控制
激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)	主、微量元素,同位素Sr、Pb	单面抛光	快速、便宜,整体剥蚀时无需均一化处理	有损;需要内标;造成较大的剥蚀坑(直径10~50μm,深10μm)

少了寄主矿物成分对实验数据的干扰,且该技术稳定可靠,也可适用于其他类型非均质含铁材料的检测。

### 3.4 二次离子探针

二次离子探针(SIMS)是利用高能离子束轰击样品表面使部分原子或分子电离形成二次离子,从而获得样品表面的元素组成和分布的技术手段(周强等,2004)。该手段可定量分析主、微量元素、稀土元素、稳定同位素(H、Li、B、O、C、S、Cl)和Pb同位素等。具有高分辨率、高分析精度和低检出限这些显著的优点(Kent and Elliott, 2002; Portnyagin et al., 2007; Sadofsky et al., 2008)。缺点是设备昂贵、分析时间长,需要内标(例如Si等),离子穿透能

力弱,实验结果受仪器精度和基体效应影响,应用在熔体包裹体中的限制条件较多。

SIMS在检测微量元素方面运用广泛,张乐(2019)利用SIMS对峨眉山大火成岩省橄榄石中熔体包裹体进行了微量元素分析,发现明显LREE富集和Nb负异常,验证其岩浆源自富集地幔。

### 3.5 同步辐射X射线荧光光谱

同步辐射X射线荧光光谱(SR-XRF)是X射线激发样品的内层电子发生跃迁并释放能量产生特征谱图,根据不同的波长和强度测定元素种类和含量的技术手段(马莉等,2014),可用于定性和定量分析原子序数高的重元素和元素价态。该方法具有束斑小且无损的优点,但受限于穿透能力有限,需控制

样品的厚度和避免宿主矿物的干扰(王蝶等, 2017)。目前该方法多用于流体包裹体的分析,在熔体包裹体应用上仍存在较大发展空间。

### 3.6 粒子诱发 X 射线荧光分析

粒子诱发 X 射线荧光分析(PIXE)是高能质子束轰击样品使原子发生电离,外层电子跃迁将内层电子空位充填并释放出特征 X 射线,通过检测特征射线对元素定性定量分析的技术手段(Harris et al., 2003)。主要用于分析熔体包裹体中原子序数>12的元素和部分金属元素(Cu、Fe、Zn、Mn、Ca)。该方法无需对样品进行均一化处理,但也表现出穿透能力不强,测试程度有限(Günther et al., 1998; 王蝶等, 2017)。

PIXE 可对样品进行面扫, Harris 等(2003)通过 PIXE 对阿根廷斑岩铜矿的橄榄石中熔体包裹体进行面扫并绘制了多种元素分布图,发现了 Cu 和 Cl 强烈富集在原始的流体相中,证明了 Cu 在熔流体相分离过程中更易进入高盐度的卤水相。

### 3.7 电子探针

电子探针(EPMA)是通过电子束在样品表面聚焦产生特征 X 射线,实现元素定量分析的技术手段(Blundy and Cashman, 2008; 蔡佳祺等, 2024)。主要用于检测主量元素和部分挥发分(F、Cl 和 S)含量(Straub et al., 2003; Blundy et al., 2008),检测硅酸盐玻璃可能会导致 Na 元素损失,建议采用低电流小束斑测试(王坤等, 2013)。该方法测试简单,无需内标;但是挥发分含量误差较大,需通过烧失量的差值间接确认;敏感度低于 SIMS、LA-ICP-MS;且穿透能力有限,需选择在探针片表面的包裹体测试。

EPMA 在精准检测 Fe 价态方面也取得了进展,可通过 Flank method 标定计算得到  $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ ,对玻璃中 Fe 的价态进行原位定量分析(张超和李晓彦, 2025)。基于该方法, Shaikh 等(2023)使用 EPMA 测定印度金伯利岩中石榴子石的  $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ ,结合温压等物理化学条件评估出了该地区钻石形成的可能性。

### 3.8 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪

激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)是样品受到激光剥蚀,经惰性气体搬运至电感耦合等离子体发生电离,质谱仪分离不同质荷比的离子,通过不同信号强度分析元素含量。该技术手段广泛运用于原位定量分析单个包裹体的主、微量及同位素(Sr、Pb 等)。优点是灵敏度高,采用整体

剥蚀时无需均一化处理。缺点是有损且需用选择合适的内标(Ca、Al、Ti、Mg、Si 等),测试中要注意寄主矿物和熔体成分相混,会造成某些组分的含量变化。LA-ICP-MS 目前在定量分析结晶质的熔体包裹体方面也取得了很大进展, Chang Jia and Audétat (2021) 对不同保存状态的包裹体提出了三种分析方法,对于保存完好的包裹体可以先检测包裹体和宿主矿物的混合信号,进行计算得出包裹体数据;保存良好的包裹体,要先确认矿物共生关系,再利用元素比值验证包裹体成分;严重改造的包裹体,首先要识别到未被改造的元素,选择合适内标后获取其他元素的估计值。

近年来 LA-ICP-MS 与 SIMS 作为两种常用的微量元素定量分析手段,经常会被比较和讨论,尽管二者仪器原理和所用设备不同,但都采用了同种计算和校准微量元素丰度的方法,二者均对不相容元素的分析不够敏感,对相容元素的分析很灵敏。Kent 等(2002)用 LA-ICP-MS 与 SIMS 分别对橄榄石中熔体包裹体的微量元素进行分析,结果显示 SIMS 的检出范围约  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ , LA-ICP-MS 比 SIMS 低 1~2 个数量级( $10^{-4} \sim 10^{-6}$ )。但 LA-ICP-MS 具有分析时间短、电离率高的优势,易检测过渡金属和亲硫元素。

此外,两者在同位素检测方面的能力也常进行对比。SIMS 常用于检测稳定同位素  $\delta D$ 、 $\delta^7 Li$ 、 $\delta^{11} B$ 、 $\delta^{13} C$ 、 $\delta^{18} O$  和  $\delta^{34} S$  等,但数据常受到包裹体单个元素丰度、挥发分脱气等影响。LA-ICP-MS 也适用于检测 Sr 和 Pb 同位素,目前常用的两种方法包括多收集器阵列和电子倍增器测量  $^{206} Pb$ — $^{207} Pb$ — $^{208} Pb$  丰度的快速静电扫描,然而该方法会受到  $^{204} Pb$  含量低和动态范围影响(Paul, 2006; Jochum et al., 2006)。对于 Sr 同位素的检测,该方法更适用于 Rb/Sr 比值较低时的情况。

## 4 熔体包裹体中的挥发分与脱气作用的影响

上述分析手段目前多以研究熔体包裹体中的微量元素为主,很少关注挥发分的研究。而挥发分会影响岩浆的物理性质(密度、黏性),为火山喷发提供大量能量,同时也会影响矿物的结晶,因此恢复捕获熔体包裹体的挥发分含量是研究岩浆演化过程的关键。以下通过讨论岩浆中常见挥发分( $H_2O$ 、 $CO_2$ 、S、Cl、F)的溶解度和熔—流体分配,归纳获取挥发分的初始含量和脱气量的方法,并揭示脱气作

用产生的影响。

#### 4.1 熔体包裹体中挥发分的溶解度

##### 及含量计算方法

目前计算挥发分初始含量的方法有:①元素比值法,即利用未脱气熔体包裹体中某挥发分与非挥发性微量元素的质量分数比值 $[w(\text{CO}_2)/w(\text{Ba})$ 、 $w(\text{CO}_2)/w(\text{Nb})$ 、 $w(\text{H}_2\text{O})/w(\text{Ce})$ 、 $w(\text{S})/w(\text{Dy})$ 、 $w(\text{Cl})/w(\text{K})$ 、 $w(\text{F})/w(\text{P})]$ ,由于非挥发性元素浓度在岩浆演化过程中变化小,因此该比值的可靠性高(Dixon and Clague, 2001; Saal et al., 2002)。②通过SIMS、EPMA、FTIR、LRS等技术,检测保存完好的熔体包裹体来获取信息。

当挥发分饱和(所有溶解挥发分的分压之和等于围压)时,气泡开始形成,经成核、生长和上升等过程最终与岩浆分离(陈勇, 2002)。通过对比脱气前后挥发分含量的差异,可以更好地掌握岩浆演化

和喷发趋势。计算岩浆喷发时脱气量的方法如下:

(1)直接法,使用红外分光计、红外分光光度计及相关分光计,直接测得火山口气体的喷发量。

(2)间接法,也称“岩石学”法。即通过火山喷发前斑晶矿物中的挥发分含量减去喷发后玻璃基质中的挥发分残余量,所得的差值即为脱气量(Harms et al., 2000; 李菊景等, 2022)。

尽管“岩石学”法是目前常用计算脱气量的方法,但结果仍普遍存在误差。主要是该方法假设熔体包裹体被捕获时挥发分完全溶解,且全部来源于喷发过程中的熔体脱气,并未考虑到挥发分在火山喷发前已饱和的情况。然而已经饱和的挥发分会随岩浆上升发生部分逃逸,导致计算脱气量产生偏差(李霓和孙嘉祥, 2018)。

##### 4.1.1 水和二氧化碳

水和二氧化碳( $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ )是岩浆中最主要

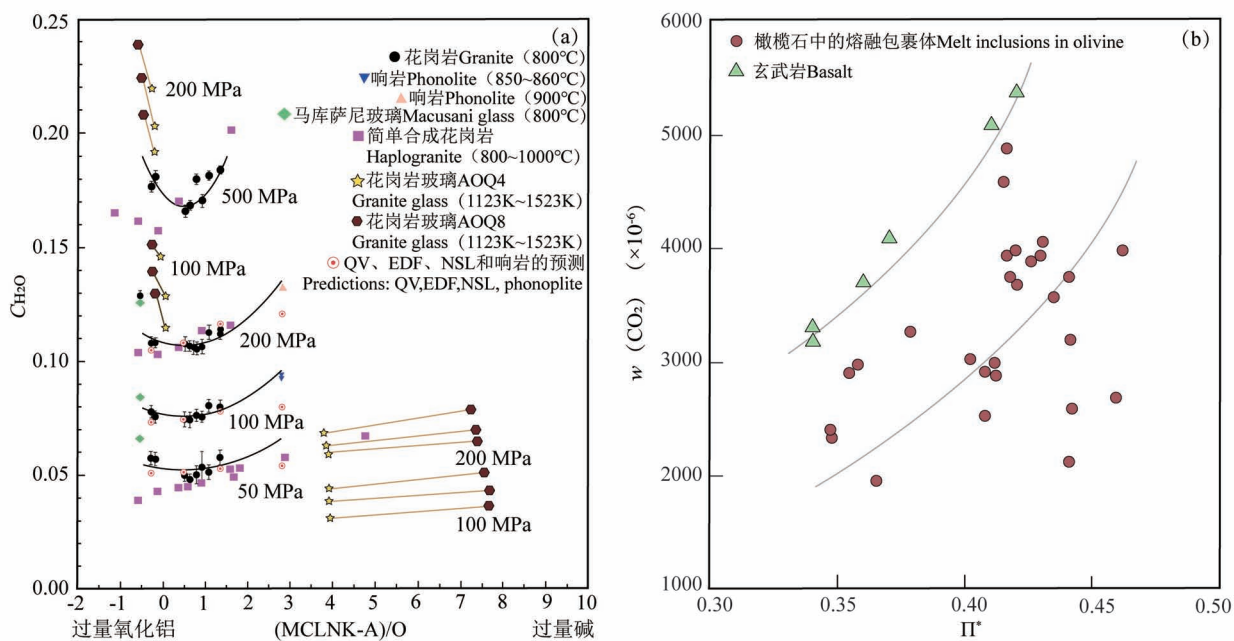


图 2 (a) 在不同压力条件下花岗质熔体中碱含量的变化对于水活度的影响(据 Behrens and Jantos, 2001; Allabar et al., 2022 修改);(b) 熔体成分阳离子含量变化对玄武岩和熔体包裹体中  $\text{CO}_2$  溶解度影响(据 Moore, 2008; Shishkina et al., 2014 修改)

Fig. 2 (a) Effect of alkaline changes in granitic melts on  $\text{H}_2\text{O}$  solubility at various pressures. (modified from Behrens and Jantos, 2001; Allabar et al., 2022); (b) effect of the changes in the content of cations in the melt compositions on  $\text{CO}_2$  solubilities (modified from Moore, 2008; Shishkina et al., 2014)

$C(\text{H}_2\text{O})$ 指  $\text{H}_2\text{O}$  在熔体中溶解的物质的量分数(摩尔分数);

$C(\text{H}_2\text{O})$  refers to the molar fraction of  $\text{H}_2\text{O}$  dissolved in melt

$$(\text{M(LNK-A)}/\text{O})=100 \times [2n(\text{Mg}) + 2n(\text{Ca}) + n(\text{Li}) + n(\text{Na}) + n(\text{K}) - n(\text{Al})]/n(\text{O});$$

$$\Pi^* = \frac{n(\text{Ca}^{2+}) + 0.8n(\text{K}^+) + 0.7n(\text{Na}^+) + 0.4n(\text{Mg}^{2+}) + 0.4n(\text{Fe}^{2+})}{n(\text{Si}^{4+}) + n(\text{Al}^{3+})}$$

的挥发分,物质的量分数分别为 35%~90%和 5%~50%(Schmincke et al., 2004; 李菊景等, 2022),常用 SIMS、FTIR、LRS 测试方法检测熔体包裹体中的初始含量。其中  $H_2O$  可降低固—液相线的温度,使相平衡发生变化,从而影响岩浆分异趋势,同时也影响着岩浆的黏度和密度。 $CO_2$  在硅酸盐熔体中溶解度比  $H_2O$  小一个数量级,高压条件下逸出的  $CO_2$  纯度高,随着岩浆上侵、压力降低,逐渐有  $H_2O$  逸出(陈勇, 2002)。

$H_2O$  和  $CO_2$  溶解度会受到温度、压力和熔体成分的影响(Wallace et al., 2015):当压力增大时,溶解度变大;温度升高时,溶解度变小; $H_2O$  在流纹质熔体中的溶解度比玄武质熔体更大(李菊景等, 2022);随着碱含量的增加会增大  $H_2O$  溶解度(图 2a),随着熔体成分阳离子含量变化会改变  $CO_2$  溶解度(图 2b), $Ca^{2+}$  影响最大(系数为 1)(Shishkina et al., 2014)。

准确恢复并计算出熔体包裹体中  $H_2O$  的初始含量,一直是大家关注的重点,同时也是熔体包裹体研究中的难题。Portnyagin 等(2019)提供了一种重建熔体包裹体初始含水量的方法,制备初始物时采用含水玻璃先包裹住熔体包裹体,再放入高压釜在合适的物理化学条件下加热加压,此时矿物内外  $H_2O$  含量平衡,所得数据更贴实际情况,有效避免了由于  $H_2O$  溶解为  $OH^-$  和分子  $H_2O$  而导致的氢逃逸(Stolper, 1982; Silver et al., 1990)。

$CO_2$  在硅酸盐熔体中可溶性小,在玄武岩中以  $CO_3^{2-}$  形式存在(Fine and Stolper, 1986)。但在玄武质熔体中绝大部分  $CO_2$  已在地壳深处脱气,因此用 VolatileCalc 模型计算时会增大  $CO_2$  溶解度,使所测的熔体包裹体总挥发分饱和压力 [ $P(CO_2) + P(H_2O)$ ] 偏高。Rasmussen 等(2020)研究出了 python 代码 MIMiC 用于校正熔体包裹体被捕获后成分变化的影响,重建所得  $CO_2$  含量与包裹体均一化后的数据一致(李菊

景等, 2022)。

#### 4.1.2 硫

硫(S)在原始地幔和亏损的 MORB 地幔中浓度虽低,却深刻影响着火山活动、俯冲物质循环、热液矿床成因及气候效应。常用 SIMS 和 EPMA 分析熔体包裹体中 S 的含量,利用同步辐射 X 射线分析 S 的价态(Metrich et al., 2003; Wilke et al., 2008)。S 主要以硫酸盐形式溶解在熔体中,在硫化物饱和和熔体中的溶解度与 FeO 和温度呈正相关,与压力呈负相关(O'Neill and Mavrogenes, 2002; Liu Yanan et al., 2007);在氧化程度较高的熔体中,硫的溶解度受到硬石膏含量或不混溶的硫酸盐熔体影响(Luhr, 1990; Jugo et al., 2005)。玻璃质熔体中 S 的  $K_{\alpha}$  波长(受到高能电子束轰击时,原子内层电子跃迁释放的特征射线)测定结果显示,随着氧逸度升高,S 在熔体中的溶解度出现显著上升。这主要是熔体中  $S^{2-}$  在氧化环境下会变成  $S^{6+}$  所致(Carroll and Rutherford, 1988)。

目前常用于研究饱和和熔体中硫浓度的模型有两个:1)针对无水玄武岩熔体校准的模型(Li Chusi and Ripley, 2005)。2)无水—含水的玄武岩—流纹岩熔体模型(Liu Yanan et al., 2007)。Liu Yanan

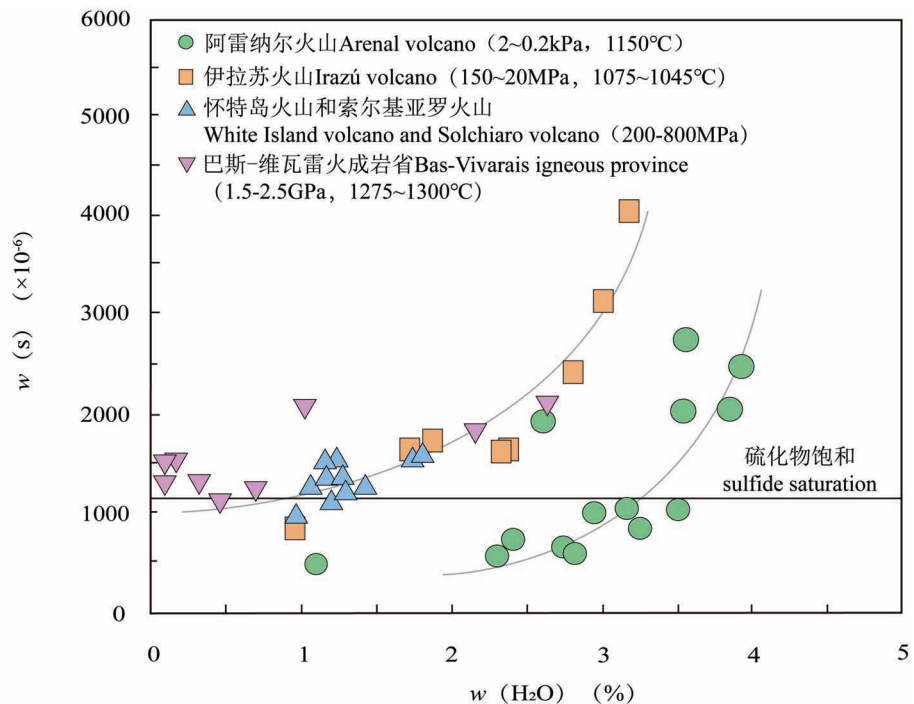


图 3 橄榄石中熔体包裹体的  $H_2O$  和 S 浓度变化(据 Wade et al., 2006; Benjamin et al., 2007; Esposito et al., 2014; Buso et al., 2022 修改)

Fig. 3 Variations in  $H_2O$  and S concentrations in melt inclusions in olivines (modified from Wade et al., 2006; Benjamin et al., 2007; Esposito et al., 2014; Buso et al., 2022)

等(2007)对二者进行比较,证明后者模型比前者检测准确度高,该模型阐明了熔体 S 含量和  $f(S_2)$  之间的关系:假设在熔体—气相平衡,已知氧逸度、温度、压力和  $H_2O$  含量,从而计算出  $H_2S$  和  $SO_2$  的物质的量分数 (Scaillet and Pichavant, 2005)。

S 在减压过程中大量脱气,随着  $H_2O$  含量减少而减少。尤其当岩浆条件是氧化且富水时,硫在较深位置就会开始脱气(图 3)。岩浆喷发前后硫含量很少,残余在基质玻璃中(除高爆炸性产物和海底喷发产物外)的质量分数小于  $50 \times 10^{-6} - 150 \times 10^{-6}$  (Witter et al., 2004; Witter et al., 2005; Spilliaert et al., 2006)。

目前常用“岩石学”法来估计火山喷发释放的  $SO_2$  的质量  $[m(SO_2)]$ :

$$m(SO_2) = 2m(\text{magma})[w(MI) - w(WR)]$$

其中  $m(\text{magma})$  是喷发产物中岩浆的质量,  $w(MI)$  是喷发岩浆中未脱气熔体包裹体中硫的质量分数,  $w(WR)$  是根据结晶程度校正后的岩石或基质玻璃中硫的质量分数,系数是根据  $SO_2/S$  质量比为 2 设定 (Wallace, 2001; Self et al., 2006)。由于绝大部分的 S 以  $SO_2$  和  $H_2S$  形式随着火山喷发到外界,常形成  $H_2SO_4$  气溶胶从而对地球和大气造成影响 (Robock and Oppenheimer, 2003),因此评估硫的脱气量也有助于我们了解地球的宜居性。

#### 4.1.3 氯和氟

氯 (Cl) 在硅酸盐熔体中的溶解度受到温度、压力、含水量和熔体成分的影响,其中硅酸盐熔体成分的影响显著,特别是在富硅熔体中,溶解度随  $FeO^T$  增加而增加 (丁一等, 2019)。实验表明 (图 4),氯在玄武岩熔体中溶解度高,常以  $NaCl$  熔体存在于岩浆中;随着岩浆含  $H_2O$  量增加,  $NaCl$  熔体溶解  $H_2O$  形成水盐熔体;当  $H_2O$  含量达一定程度,熔体与  $H_2O-Cl$  气相达到平衡 (Botcharnikov et al., 2007)。但一般情况下玄武岩熔体中 Cl 浓度不

高,实际上无法达到水盐熔体饱和。

岩浆中氟 (F) 的溶解度影响因素是近年来研究热点,李福春等(2000)检测了熔体包裹体和火山玻璃中的 F 含量,根据岩性酸碱程度划分为五类,得出了 F 偏向于在晚期酸性岩浆中富集倾向。后续学者们进一步验证并完善了 F 更易溶解于高 Al/ (Al+Si) 硅酸盐熔体中 (Dalou et al., 2015; 丁一等, 2019)。此外, Li Xiaoyan 等(2020)对于硅酸盐熔体中萤石饱和时的 F 溶解度进行了研究,揭示了 F 溶解度是由其网络修饰性阳离子与网络形成性阳离子的比例 (萤石饱和指数  $I_{FS}$ ) 共同控制,其中阳离子按成键倾向强弱顺序为  $Mg > Al^{NM} > Na > Ca > Fe^{2+} > K$  排序,其中  $Al^{NM}$  是以网络修饰阳离子形式存在的铝。除此之外 F 溶解度也受到温度、压力及水含量的协同影响。

目前常用 SIMS 和 EPMA 来获取 Cl 和 F 的初始含量,二者脱气程度不高,Cl 的损失范围在初始量的 10% ~ 50%, F 的损失含量小于初始量的 15% (Mtrich et al., 2001; Spilliaert et al., 2006)。Cl 脱气原因通常与岩浆上升和挤压动力学有关,

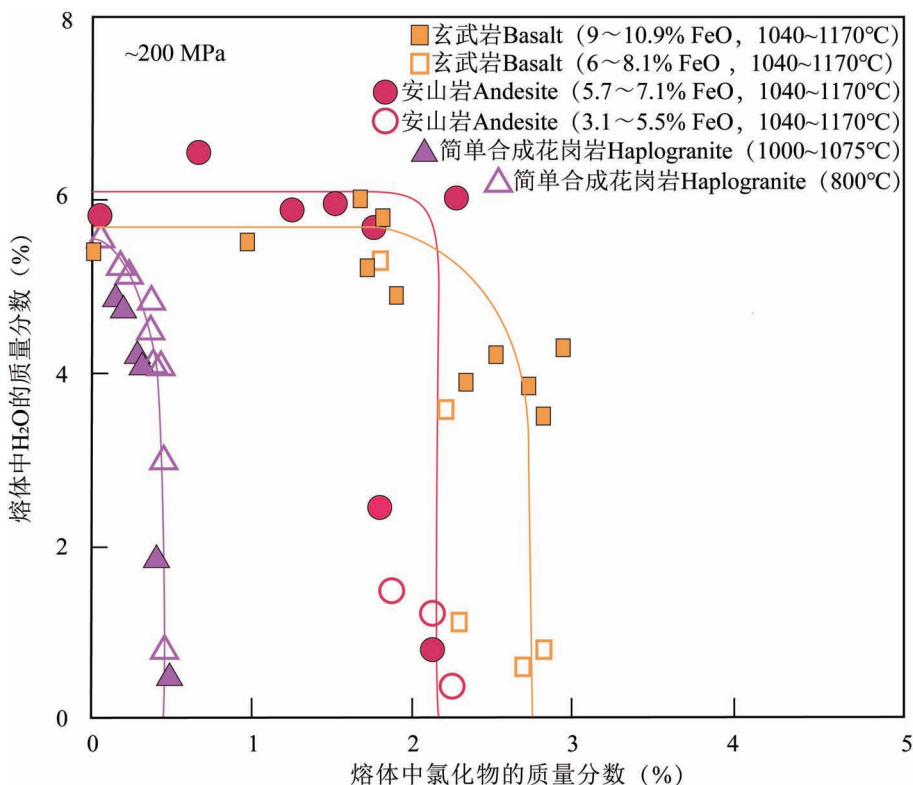


图 4 Cl 和  $H_2O$  在含  $Cl^-$  水蒸气或水盐饱和的熔体中的溶解度

(据 Webster, 1997; Webster et al., 1999 修改)

Fig. 4 Solubility of Cl and  $H_2O$  in basalt melts saturated with  $Cl^-$  vapor or brine (modified from Webster, 1997; Webster et al., 1999)

Gardner 等(2006)在含水量高的流纹岩熔体中进行减压实验,发现基质玻璃中保留的 Cl 含量与喷发的浮石碎屑大小有关:在高度破碎的碎屑中,Cl 脱气量更高(Spilliaert et al. , 2006)。

#### 4.2 熔体包裹体中挥发分脱气作用的影响

脱气作用给挥发分含量带来的影响通常与海沟、沿弧位置和板块特点有关,例如危地马拉弧前火山 H<sub>2</sub>O 较低是因包裹体被捕获前已发生了部分脱气,最高含量只在弧峰处发现(Walker et al. , 2003)。堪察加半岛和北千岛群岛弧的橄榄石中熔体包裹体的 H<sub>2</sub>O 含量随着远离海沟而降低,但母岩中 S、Cl 和 F 的平均含量会随着远离海沟而增加(Portnyagin et al. , 2007)。

脱气作用也会影响熔体包裹体的其他成分,Portnyagin 等(2019)以 Klyuchevskoy 火山的橄榄石中熔体包裹体为样品,用 SIMS 分析了 S、Cl 和 CO<sub>2</sub> 含量,发现岛弧岩石中的高镁橄榄石中存在大量 SiO<sub>2</sub> 不饱和熔体包裹体。这些包裹体是由原先富水的 SiO<sub>2</sub> 饱和熔体包裹体经脱气作用演化而成,并且 SiO<sub>2</sub> 含量随着 H<sub>2</sub>O 含量的减少而减少。

挥发分脱气还会有效驱动矿物结晶,例如由于 H<sub>2</sub>O 的出溶、逸出和发生分离结晶作用,墨西哥

Jorullo 火山岩浆系统中的斜长石、单斜辉石、角闪石和橄榄石,以及滇西北衙金矿床长英质熔体中的磁铁矿、铬铁矿、钾长石、普通辉石出现的温度和压力不同,都表明 H<sub>2</sub>O 的脱气作用会对矿物结晶产生影响(Johnson et al. , 2008; 鲍新尚等, 2017)(图 5a)。CO<sub>2</sub> 会在冲刷(fluxing)熔体的过程中使 H<sub>2</sub>O 从熔体中出溶(无论 H<sub>2</sub>O 是否达到饱和状态),从而促进矿物的结晶,例如 Jorullo 火山中的橄榄石由于受到 CO<sub>2</sub> 的影响,在 150MPa 的条件下沿着橄榄石的 H<sub>2</sub>O 饱和线或者在其下方发生了结晶(Johnson et al. , 2008)(图 5b)。

在岩浆演化过程中,熔体包裹体的挥发分脱气对岩浆上升和喷发动力学起到了控制作用(Tait et al. , 1989)。富含挥发分的岩浆快速上升会导致爆炸性喷发,Portnyagin 等(2012)采集 Hekla 火山的橄榄石熔体包裹体,通过 FTIR、SIMS 和 EPMA 等对包裹体的主、微量元素和挥发分进行检测,并使用“岩石学”法估计挥发分含量,证明了 Hekla 火山的爆炸性和剧烈性是由脱气前的岩浆含水量高所致。

## 5 结论

熔体包裹体保留着大量岩浆演化信息,是相对

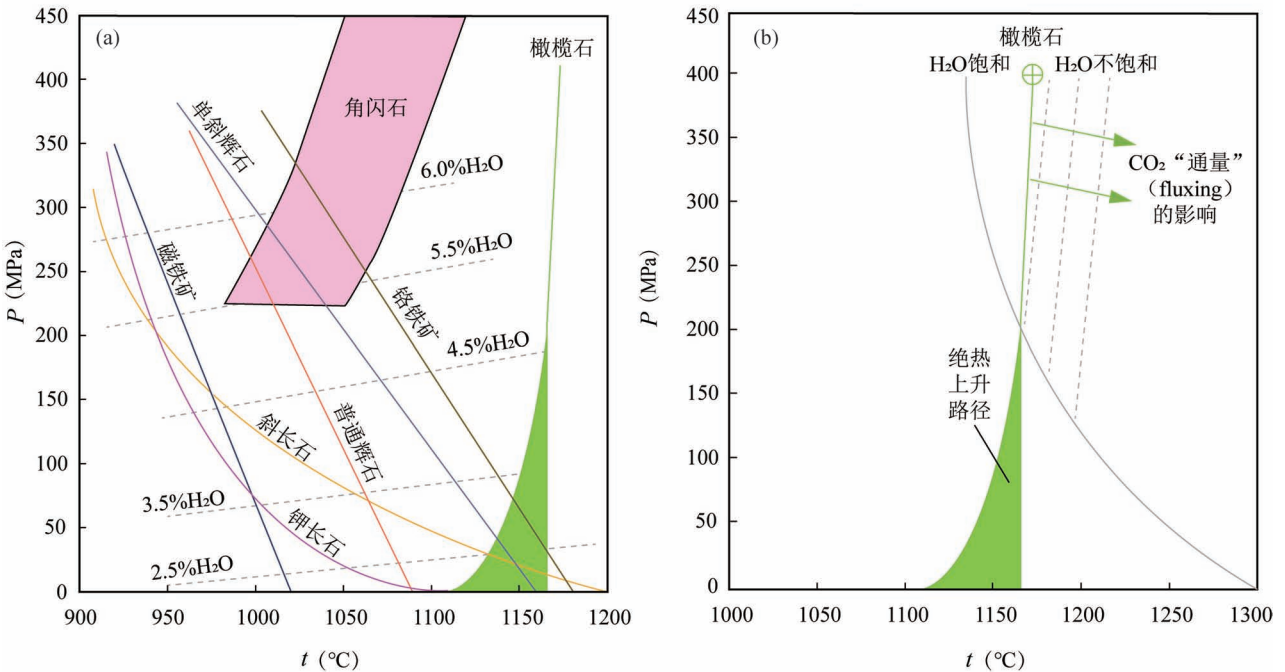


图 5 (a) H<sub>2</sub>O 的含量的饱和程度对岩浆矿物结晶的影响;(b) CO<sub>2</sub> 的“通量”对橄榄石结晶的影响(据 Johnson et al. , 2008; 鲍新尚等, 2017 修改)

Fig. 5 (a) Effect of H<sub>2</sub>O saturation on mineral crystallization in magma; (b) effect of CO<sub>2</sub> “fluxing” on mineral crystallization in magma. (modified from Johnson et al. , 2008; Bao Xinshang et al. , 2017&)

于分析大块岩石更有优势的工具。因此在获取包裹体的成分和条件时,需综合考虑多方面因素来尽可能获取更准确的数据,具体结论如下:

(1)通过岩相学分析获得包裹体冷却速度的信息,再综合考虑温度、压力和捕获条件进行均一化实验,使出溶的气体再次溶解、包裹体恢复到均一玻璃相。

(2)综合运用不同的分析技术如:LRS、FTIR、XANES、SIMS、SR-XRF、PIXE、EPMA和LA-ICP-MS等,掌握在包裹体测试方面的新应用和新研发,合理安排测试顺序,有利于样品利用率最大化,从而更有效得获取熔体包裹体的元素、同位素和挥发分等成分信息。

(3)在熔体包裹体研究中重点考虑岩浆演化过程中挥发分脱气作用的影响,利用元素比值法、“岩石学”等方法,结合脱气模型来计算熔体包裹体中挥发分的初始量和脱气量,对包裹体成分最大程度进行还原,从而提供更准确有效的地质信息。

**致谢:**张超教授(西北大学)等两位审稿专家和责任编辑对本文提出了宝贵意见和建议,在此深表谢意!

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

鲍新尚,和文言,高雪. 2017. 滇西北衙金矿床富水岩浆对成矿的制约. 岩石学报, 33(7): 2175~2188.

蔡佳祺,冯珮玲,周伶俐,陈伟军,张亚辉,史艳茹,王永彬. 2024. 熔体包裹体分析技术进展. 矿床地质, 43(1): 86~101.

陈勇. 2002. 挥发分在岩浆脱气动力学中的作用及火山岩包裹体初步研究. 导师:周瑶琪. 山东:中国石油大学(华东)硕士学位论文.

戴慧,黄文清,曹素巧,王枫,于露,左锐,郭连巧. 2022. 激光拉曼光谱在包裹体研究中的应用. 宝石和宝石学杂志(中英文), 24(5): 146~154.

丁一,刘吉强,宗统,李正刚. 2019. 熔体包裹体挥发分应用的研究进展. 岩石矿物学杂志, 38(6): 897~913.

李福春,朱金初,金章东. 2000a. 熔融包裹体研究的最新进展. 世界地质, 卷号(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.

李菊景,郭正府,赵文斌,张茂亮. 2022. 熔体包裹体在火山释放CO<sub>2</sub>规模研究中的应用. 矿物岩石地球化学通报, 41(4): 711~728+692~694.

李霓,孙嘉祥. 2018. 火山岩中熔体包裹体研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 37(3): 414~423+560.

李胜虎,熊玉新,单伟,舒磊,迟乃杰. 2021. 热液金刚石压腔(HDAC)高温高压实验平台简介. 山东国土资源, 37(1): 50~52.

马莉,李以科,王安建,姜高珍,杨轩,肇创,杨彪. 2014. LA-ICPMS与SRXRF测试流体包裹体的应用研究. 矿床地质, 卷号(S1): 547~548.

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.

王坤,邢长明,任钟元,王焰. 2013. 攀枝花镁铁质层状岩体磷灰石中的熔融包裹体:岩浆不混熔的证据. 岩石学报, 29(10): 3503~3518.

王新彦. 2014. 熔体包裹体均一实验及熔体水含量测试方法研究. 导师:张德会. 北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文.

夏林圻. 2002. 岩浆岩中的熔体包裹体. 地学前缘, 9(2): 403~414.

张超,李晓彦. 2025. 电子探针Fe价态原位分析的原理和方法. 西北大学学报(自然科学版), 55(3): 585~600.

张乐. 2019. 峨眉山大火成岩省中高钛和低钛镁铁质岩浆成因——熔体包裹体和微量元素模拟的研究. 导师:任钟元. 广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所)博士学位论文.

赵汇珍,陈勇,涂聪,冯艳伟. 2024. 柳江盆地髻髻山组凝灰岩地球化学与熔体包裹体水含量特征. 岩矿测试, 44(1): 88~101.

周强,李金英,梁汉东,伍昌平. 2004. 二次离子质谱(SIMS)分析技术及应用进展. 质谱学报, 25(2): 113~120.

Allabar A, Petri P L, Eul D, Nowak M. 2022. An empirical H<sub>2</sub>O solubility model for peralkaline rhyolitic melts. Contributions to Mineralogy and Petrology, 177(5): 1~17.

Bao Xinshang, He Wenyan, Gao Xue. 2017&. The Beiya gold deposit: Constraint from water-rich magmas to mineralization. Acta Petrologica Sinica, 33(7): 2175~2188.

Behrens H, Jantos N. 2001. The effect of anhydrous composition on water solubility in granitic melts. American Mineralogist, 86(1~2): 14~20.

Benjamin E R, Plank T, Wade J A, Kelley K A, Hauri E H, Alvarado G E. 2007. High water contents in basaltic magmas from Irazú Volcano, Costa Rica. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 168(1~4): 68~92.

Blundy J, Cashman K. 2008. Petrologic reconstruction of magmatic system variables and processes. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 69(1): 179~239.

Botcharnikov R E, Holtz F, Behrens H. 2007. The effect of CO<sub>2</sub> on the solubility of H<sub>2</sub>O—Cl fluids in andesitic melt. European Journal of Mineralogy, 19(5): 671~680.

Botcharnikov R, Wilke M, Garrovet J, Portnyagin M, Klimm K, Buhre S, Krasheninnikov S, Almeev R, Moune S, Falkenberg G. 2024. Confocal μ-XANES as a tool to analyze Fe oxidation state in heterogeneous samples: The case of melt inclusions in olivine from the Hekla volcano. European Journal of Mineralogy, 36(1): 195~208.

Buso R, Laporte D, Schiavi F, Cluzel N, Fonquernie C. 2022. High-pressure homogenization of olivine-hosted CO<sub>2</sub>-rich melt inclusions in a piston cylinder: Insight into the volatile content of primary mantle melts. European Journal of Mineralogy, 34(3): 325~349.

Cai Jiaqi, Feng Peiling, Zhou Lingli, Chen Weijun, Zhang Yahui, Shi Yanru, Wang Yongbin. 2024&. A review of analytical techniques for melt inclusion study. Mineral Deposits, 43(1): 86~101.

Cannatelli C, Doherty A L, Esposito R, Lima A, De Vivo B. 2016. Understanding a volcano through a droplet: A melt inclusion approach. Journal of Geochemical Exploration, 171: 4~19.

Cannatelli C, Lima A, Bodnar R J, De Vivo B, Webster J D, Fedele L.

2007. Geochemistry of melt inclusions from the Fondo Riccio and Minopoli 1 eruptions at Campi Flegrei (Italy). *Chemical Geology*, 237(3~4): 418~432.
- Carroll M R, Rutherford M J. 1988. Sulfur speciation in hydrous experimental glasses of varying oxidation state; results from measured wavelength shifts of sulfur X-rays. *American Mineralogist*, 73(7~8): 845~849.
- Cervantes P, Kamenetsky V, Wallace P. 2002. Melt inclusion volatile contents, pressures of crystallization for Hawaiian picrites, and the problem of shrinkage bubbles. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2002, V22A-1217.
- Chang Jia, Audétat A. 2021. LA-ICP-MS analysis of crystallized melt inclusions in olivine, plagioclase, apatite and pyroxene: Quantification strategies and effects of post-entrapment modifications. *Journal of Petrology*, 62(4): ega085.
- Chen Yong. 2002. The Role of Volatiles in the Dynamics of Magma Degassing and a Preliminary Study of Volcanic Rock Inclusions. Mentor: Zhou Yaoqi. Shandong: Master's thesis of China University of Petroleum (East China).
- Dai Hui, Huang Wenqing, Cao Suqiao, Wang Feng, Yu Lu, Zuo Rui, Guo Lianqiao. 2022. Application of Laser Raman Spectroscopy in the Study of Inclusion. *Journal of Gems Gemmology*, 24(5): 146~154.
- Dalou C, Mysen B O. 2015. The effect of H<sub>2</sub>O on F and Cl solubility and solution mechanisms in aluminosilicate melts at high pressure and high temperature. *American Mineralogist*, 100(2~3): 633~643.
- 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(1~4): 5~24.
- Ding Yi, Liu Jiqiang, Zong Tong, Li Zhenggang. 2019. A review on the application of volatiles in melt inclusions. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(6): 897~913.
- Dixon J E, Clague D A. 2001. Volatiles in basaltic glasses from Loihi Seamount, Hawaii: Evidence for a relatively dry plume component. *Journal of Petrology*, 42(3): 627~654.
- Esposito R, Hunter J, Schiffbauer J D, Shimizu N, Bodnar R J. 2014. An assessment of the reliability of melt inclusions as recorders of the pre-eruptive volatile content of magmas. *American Mineralogist*, 99(5~6): 976~998.
- Esposito R, Klebesz R, Bartoli O, Klyukin Y I, Moncada D, Doherty A L, Bodnar R J. 2012. Application of the Linkam TS1400XY heating stage to melt inclusion studies. *Central European Journal of Geosciences*, 4(2): 208~218.
- Fine G, Stolper E. 1986. Dissolved carbon dioxide in basaltic glasses: Concentrations and speciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 76(3~4): 263~278.
- Gaetani G A, Watson E B. 2000. Open system behavior of olivine-hosted melt inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 183(1~2): 27~41.
- Gardner J E, Burgisser A, Hort M, Rutherford M. 2006. Experimental and model constraints on degassing of magma during ascent and eruption. *Geological Society of America Bulletin*, 402: 99~113.
- González-García D, Giordano D, Russell J K, Dingwell D B. 2020. A Raman spectroscopic tool to estimate chemical composition of natural volcanic glasses. *Chemical Geology*, 556: 119819.
- Günther D, Audétat A, Frischknecht R, Heinrich C A. 1998. Quantitative analysis of major, minor and trace elements in fluid inclusions using laser ablation - inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 13(4): 263~270.
- Harms E, Schmincke H U. 2000. Volatile composition of the thephonolitic Laacher See magma (12,900 yr BP): Implications for syn-eruptive degassing of S, F, Cl and H<sub>2</sub>O. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 138(1): 84~98.
- Harris A C, Kamenetsky V S, White N C, van Acherbergh E, Ryan C G. 2003. Melt inclusions in veins: Linking magmas and porphyry Cu deposits. *Science*, 302(5653): 2109~2111.
- Hervig R L, Mazdab F K, Moore G, McMillan P F. 2003. Analyzing hydrogen (H<sub>2</sub>O) in silicate glass by secondary ion mass spectrometry and reflectance Fourier transform infrared spectroscopy. *Developments in Volcanology*, 5: 83~103. Elsevier.
- Ihinger P D, Hervig R L, McMillan P F. 1994. Analytical methods for volatiles in glasses. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 30(1): 67~121.
- Jochum K, Stoll B, Herwig K, Woodhead J. 2006. MPI-DING reference glasses for in situ microanalysis: New reference values for element concentrations and isotope ratios. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7(2): 1~44.
- Johnson E R, Wallace P J, Cashman K V, Granados H D, Kent A J. 2008. Magmatic volatile contents and degassing-induced crystallization at Volcán Jorullo, Mexico: Implications for melt evolution and the plumbing systems of monogenetic volcanoes. *Earth and Planetary Science Letters*, 269(3~4): 478~487.
- Jugo P J, Luth R W, Richards J P. 2005. Experimental data on the speciation of sulfur as a function of oxygen fugacity in basaltic melts. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 69(2): 497~503.
- 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(1~4): 287~303.
- Kent A J, Baker J A, Wiedenbeck M. 2002. Contamination and melt aggregation processes in continental flood basalts: Constraints from melt inclusions in Oligocene basalts from Yemen. *Earth and Planetary Science Letters*, 202(3~4): 577~594.
- Kent A J, Elliott T R. 2002. Melt inclusions from Marianas arc lavas: Implications for the composition and formation of island arc magmas. *Chemical Geology*, 183(1~4): 263~286.
- Li Chusi, Ripley E M. 2005. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits. *Mineralium Deposita*, 40(2): 218~230.
- Li Fuchun, Zhu Jinchu, Jin Zhangdong. 2000a. Contents of Main Volatiles In Magma; Evidence From Melt Inclusions And Quenched Glasses. *Geology Geochemistry*, 28(2): 8~13.
- Li Fuchun, Zhu Jinchu, Jin Zhangdong. 2000b. The Latest Progress of Melt Inclusion Study. *World Geology*, 1: 8~14.
- Li Jiankang, Li Shenghu. 2014. Application of hydrothermal diamond anvil cell to homogenization experiments of silicate melt inclusions. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 88(3): 854~864.
- Li Jujing, Guo Zhengfu, Zhao Wenbin, Zhang Maoliang. 2022. Application of Melt Inclusions for Studying Volcanic CO<sub>2</sub> Fluxes. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(4): 711~728+692~694.
- Li Ni, Sun Jiaxiang. 2018. A Review on Research Progress of Melt

- Inclusion in Volcanic Rocks. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(03): 414~423+560.
- Li Shenghu, Xiong Yuxin, Shan Wei, Shu Lei, Chi Najjie. 2021. Brief Introduction of High Temperature and High Pressure Experimental Platform for HDAC. *Shandong Land and Resources*, 37(1): 50~52.
- Li Xiaoyan, Zhang Chao, Wang Lianxun, Behrens, H., Holtz, F. 2020. Experiments on the saturation of fluorite in magmatic systems: Implications for maximum F concentration and fluorine-cation bonding in silicate melt. *Journal of Earth Science*, 31(3): 456~467.
- Liu Yanan, Samaha N T, Baker D R. 2007. Sulfur concentration at sulfide saturation (SCSS) in magmatic silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(7): 1783~1799.
- Lowenstern. 1994. Chlorine, fluid immiscibility, and degassing in peralkaline magmas from Pantelleria, Italy. *American Mineralogist*, 79(3~4): 353~369.
- Luhr J F. 1990. Experimental Phase Relations of Water- and Sulfur-Saturated Arc Magmas and the 1982 Eruptions of El Chichón Volcano. *Journal of Petrology*, 31(5): 1071~1114.
- Ma Li, Li Yike, Wang Anjian, Jiang Gaozhen, Yang Xuan, Zhao Chuang, Yang Biao. 2014. Application of LA-ICPMS and SRXRF in fluid inclusion analysis. *Mineral Deposits*, 31: 547~548.
- Massare D, Métrich N, Clochiatti R. 2002. High-temperature experiments on silicate melt inclusions in olivine at 1 atm: Inference on temperatures of homogenization and H<sub>2</sub>O concentrations. *Chemical geology*, 183(1~4): 87~98.
- Métrich N, Susini J, Galois L, Calas G, Bonnin-Mosbah M, Menez B. 2003. X-ray microspectroscopy of sulfur in basaltic glass inclusions. Inference on the volcanic sulfur emissions. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 104: 393~397.
- Moore G. 2008. Interpreting H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> Contents in Melt Inclusions: Constraints from Solubility Experiments and Modeling. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 333~362.
- Métrich N, Bertagnini A, Landi P. 2001. Crystallization Driven by Decompression and Water Loss at Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Italy). *Journal of Petrology*, 42(8): 1471~1490.
- Nielsen R L, Crum J, Bourgeois R, Hascall K, Forsythe L M, Fisk M R, Christie D M. 1995. Melt inclusions in high-temperature plagioclase from the Gorda Ridge: An example of the local diversity of MORB parent magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122(1): 34~50.
- Nielsen R L, Michael P J, Sours-Page R. 1998. Chemical and physical indicators of compromised melt inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(5): 831~839.
- O'Neill H S T C, Mavrogenes J A. 2002. The sulfide capacity and the sulfur content at sulfide saturation of silicate melts at 1400 C and 1 bar. *Journal of Petrology*, 43(6): 1049~1087.
- Paul M B T. 2006. A New Perspective on Melt Inclusions: Development of Novel in-situ analytical protocols. Melbourne: Ph. D. dissertation of University of Melbourne.
- Portnyagin M, Hoernle K, Plechov P, Mironov N, Khubunaya S. 2007. Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H<sub>2</sub>O, S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1~2): 53~69.
- Portnyagin M, Hoernle K, Storm S, Mironov N, van den Bogaard C, Botcharnikov R. 2012. H<sub>2</sub>O-rich melt inclusions in fayalitic olivine from Hekla volcano: Implications for phase relationships in silicic systems and driving forces of explosive volcanism on Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, 357: 337~346.
- Portnyagin M, Mironov N, Botcharnikov R, Gurenko A, Almeev R R, Luft C, Holtz F. 2019. Dehydration of melt inclusions in olivine and implications for the origin of silica-undersaturated island-arc melts. *Earth and Planetary Science Letters*, 517: 95~105.
- Rasmussen D J, Plank T A, Wallace P J, Newcombe M E, Lowenstern J B. 2020. Vapor-bubble growth in olivine-hosted melt inclusions. *American Mineralogist*, 105(12): 1898~1919.
- Richard A, Morlot C, Créon L, Beaudoin N, Balistky V S, Penteleci S, Dya-Person V, Giuliani G, Pignatelli I, Legros H. 2018. Advances in 3D imaging and volumetric reconstruction of fluid and melt inclusions by high resolution X-ray computed tomography. *Chemical Geology*, 508: 2~11.
- Robock A, Oppenheimer C. 2003. Volcanism and the Earth's Atmosphere, 137. American Geophysical Union Washington, DC.
- Roedder E. 1979. Origin and significance of magmatic inclusions. *Bulletin de Mineralogie*, 102(5): 487~510.
- Roedder E. 1984. Volume 12: Fluid inclusions. *Rev. Mineral*, 12: 1~644.
- Rose-Koga E F, Bouvier A S, Gaetani G A, Wallace P J, Allison C M, Andrys J A, De La Torre C A, Barth A, Bodnar R J, Gartner A B. 2021. Silicate melt inclusions in the new millennium: A review of recommended practices for preparation, analysis, and data presentation. *Chemical Geology*, 570: 120145.
- Saal A E, Hauri E H, Langmuir C H, Perfit M R. 2002. Vapour undersaturation in primitive mid-ocean-ridge basalt and the volatile content of Earth's upper mantle. *Nature*, 419(6906): 451~455.
- Sadosky S J, Portnyagin M, Hoernle K, van den Bogaard P. 2008. Subduction cycling of volatiles and trace elements through the Central American volcanic arc: Evidence from melt inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4): 433~456.
- Scailliet B, Pichavant M. 2005. A model of sulphur solubility for hydrous mafic melts: Application to the determination of magmatic fluid compositions of Italian volcanoes. *annals of geophysics*, 48(4~5): 671~698.
- Schiano P. 2003. Primitive mantle magmas recorded as silicate melt inclusions in igneous minerals. *Earth-Science Reviews*, 63(1~2): 121~144.
- Schmincke H U. 2004. Volcanism 28. Berlin Heidelberg, Germany: Springer Verlag.
- 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(1): 12~20.
- Self S, Widdowson M, Thordarson T, Jay A E. 2006. Volatile fluxes during flood basalt eruptions and potential effects on the global environment: A Deccan perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1~2): 518~532.
- Shaikh A M, Bussweiler Y, Viljoen F, Bolhar R, Ravi S, Hezel D C, Ueckermann H, Tappe S. 2023. Redox state of the Dharwar craton root as inferred from eclogite and peridotite sourced mantle cargo, with implications for kimberlite and lamproite magma formation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 178(12): 86.
- Shimizu K, Komiya T, Hirose K, Shimizu N, Maruyama S. 2001. Cr-spinel, an excellent micro-container for retaining primitive melts - implications for a hydrous plume origin for komatiites. *Earth and Planetary Science Letters*, 189(3~4): 177~188.

- Shishkina T A, Botcharnikov R E, Holtz F, Almeev R R, Jazwa A M, Jakubiak A A. 2014. Compositional and pressure effects on the solubility of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> in mafic melts. *Chemical Geology*, 388: 112~129.
- Silver L A, Ihinger P D, Stolper E. 1990. The influence of bulk composition on the speciation of water in silicate glasses. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(2): 142~162.
- Sorby H C. 1858. On the microscopical, structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 14(1~2): 453~500.
- Spilliaert N, Métrich N, Allard P. 2006. S - Cl - F degassing pattern of water-rich alkali basalt: Modelling and relationship with eruption styles on Mount Etna volcano. *Earth Planetary Science Letters*, 248(3~4): 772~786.
- Stolper E. 1982. The speciation of water in silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(12): 2609~2620.
- Straub S M, Layne G D. 2003. The systematics of chlorine, fluorine, and water in Izu arc front volcanic rocks: Implications for volatile recycling in subduction zones. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(21): 4179~4203.
- Tait S. 1992. Selective preservation of melt inclusions in igneous phenocrysts. *American Mineralogist*, 77(1~2): 146~155.
- Tait S, Jaupart C, Vergnolle S. 1989. Pressure, gas content and eruption periodicity of a shallow, crystallising magma chamber. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(1): 107~123.
- Wade J A, Plank T, Melson W G, Soto G J, Hauri E H. 2006. The volatile content of magmas from Arenal volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 157(1~3): 94~120.
- Walker J A, Roggensack K, Patino L C, Cameron B I, Matías O. 2003. The water and trace element contents of melt inclusions across an active subduction zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146(1): 62~77.
- Wallace P J. 2001. Volcanic SO<sub>2</sub> emissions and the abundance and distribution of exsolved gas in magma bodies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108(1~4): 85~106.
- Wallace P J, Plank T, Edmonds M, Hauri E H. 2015. Volatiles in Magmas. *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*, 163~183.
- Wang Die, LuHuanZhang, Shan Qiang. 2017&. Advances on melt inclusion studies. *Acta Petrologica Sinica*, 33(2): 653~666.
- Wang Kun, Xing Changming, Ren Zhongyuan, Wang Yan. 2013&. Melt inclusions in apatite from the Panzhihua mafic layered intrusion: Evidence for magmatic immiscibility. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3503~3518.
- Wang Xinyan. 2014&. Study on the Text Methods of Homogenization Experiment of Melt Inclusions and Water Content of Melt. Mentor: Zhang Dehui. Bei Jing: Master's thesis of China University of Geosciences (Beijing).
- Webster J D. 1997. Exsolution of magmatic volatile phases from Cl-enriched mineralizing granitic magmas and implications for ore metal transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(5): 1017~1029.
- Webster J D, Kinzler R J, Mathez E A. 1999. Chloride and water solubility in basalt and andesite melts and implications for magmatic degassing. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 63(5): 729~738.
- Wilke M, Jugo P J, Klimm K, Susini J, Botcharnikov R, Kohn S C, Janousch M. 2008. The origin of S<sup>4+</sup> detected in silicate glasses by XANES. *American Mineralogist*, 93(1): 235~240.
- Witter J B, Kress V C, Delmelle P, John S. 2004. Volatile degassing, petrology, and magma dynamics of the Villarrica Lava Lake, Southern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 46(11): 2337~2366.
- Witter J, Kress V, Newhall C. 2005. Volcan Popocatepetl, Mexico. Petrology, magma mixing, and immediate sources of volatiles for the 1994—Present eruption. *Journal of Petrology*, 46(11): 2337~2366.
- Xia Linqi. 2002&. Melt inclusions in magmatic rocks. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 403~414.
- Yuan Jiangyan, Su Wen, Hu Ximeng, Li Xiaoguang, Fei Chenhui. 2022. Application of Raman imaging and scanning electron microscopy techniques for the advanced characterization of geological samples. *Microscopy Research and Technique*, 85(7): 2729~2739.
- Zhang Chao, Li Xiaoyan. 2025&. Review of the Principle and Method for EPMA in-situ analysis of Fe oxidation state. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 55(3): 585~600.
- Zhang Le. 2019&. The Origins of High-Ti and low-Ti Magmas in the Emeishan Large Igneous Provinces, Insights from Melt Inclusion Study and Trace Element Modeling. Mentor: Ren Zhongyuan. Guangzhou: Doctoral dissertation of University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences).
- Zhao Huizhen, Chen Yong, Tu Cong, Feng Yanwei. 2024&. Geochemical Characteristics and Water Content of Melt Inclusions in the Tuff of the Tiaojishan Formation, Liujiang Basin. *Rock and Mineral Analysis*, 44(1): 88~101.
- Zhou Qiang, Li Jinying, Liang Handong, Wu Changping. 2004&. Recent Developments on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS). *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 25(2): 113~120.

## Research progress and geological significance of melt inclusions and volatiles

YANG Tianchang<sup>1)</sup>, XU Yue<sup>2)</sup>, WANG Meng<sup>2)</sup>

1) School of Jewelry, Shanghai Jianqiao University, Shanghai, 201306;

2) Academy of Sciences, China University of Geosciences, Beijing, 100083

**Abstract:** Melt inclusions can preserve relatively primitive magma evolution information during the magma evolution process, including melt composition and physicochemical conditions, which hold important research value and scientific significance. The solubility and degassing of magma volatiles can provide crucial evidence for

interpreting specific magma behaviors, thereby attracting increasing research attention. However, obtaining the composition of melt inclusions is highly dependent on homogenization methods and analytical techniques. When melt inclusions contain crystallized minerals, homogenization to restore the trapped melt composition is a prerequisite for inclusion studies. Nevertheless, when the physicochemical conditions of the trapped inclusion are not accurately known, there is uncertainty about the temperature and pressure for the homogenization condition. In addition, the types and concentrations of volatiles are crucial information in melt inclusions. Accurate measurement of volatile contents (including H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, S, Cl, and F) in homogenized melt inclusions is still challenging, and the precise determination remains a current challenge. Accordingly, this paper systematically reviews and discusses research progress on melt inclusions and their volatiles in recent years, focusing on aspects such as melt inclusion homogenization, analytical techniques, and the volatiles' solubility and degassing effects, to enhance and further refine the geological significance of melt inclusion studies.

**Keywords:** Melt inclusions; volatiles; analytical techniques; magma degassing; magmatic volatiles

**Acknowledgements:** This paper was supported by National Key Research and Development Projects (2024ZD1003402). Thanks to Professor ZHANG Chao (Northwest University), another reviewer and responsible editor for their valuable opinions and suggestions on this article.

**First author:** YANG Tianchang, female, born in 1987, master's degree, associate professor, is mainly engaged in geology and gemology teaching and research; Email: 13012@gench.edu.cn

**Corresponding author:** WANG Meng, female, born in 1988, Ph. D., associate researcher, is mainly engaged in magmatic rock petrology and experimental petrology research; Email: mwang@cugb.edu.cn

**Manuscript** received on: 2025-09-30; Accepted on: 2026-02-03; Published online on: 2026-02-15

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2026.02.065

**Edited by:** ZHANG Yuxu

