

# 岩浆混合作用研究综述

齐有强<sup>1,2</sup>, 胡瑞忠<sup>1</sup>, 刘 燊<sup>1</sup>, 田建吉<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

**摘 要:** 本文详细阐述了近年来国内外对岩浆混合作用的研究进展, 集中在混合作用的验证及地幔物质参与对混合作用的影响。从能量、物质运移的角度认识岩浆混合作用, 以揭示上地幔、地壳的信息, 并为认识区域构造-岩浆演化提供约束。综合归纳了岩浆混合作用主要的研究方法, 系统总结了混合作用发生的规律及主要影响因素, 并应用已有理论和数据进行简单的数值模拟, 合理解释岩脉的不混合特征。作为壳-幔间物质与能量交换的重要形式, 阐述了岩浆混合与底侵作用的关系, 并介绍了常见的岩浆混合作用岩石成因模型。最后说明了岩浆混合作用今后的发展趋势和存在问题。

**关 键 词:** 岩浆混合作用; 壳幔相互作用; 底侵作用; 岩石成因模型

中图分类号: P588.36 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2008)04-0409-08

## Review on Magma Mixing and Mingling

QI You-qiang<sup>1, 2</sup>, HU Rui-zhong<sup>1</sup>, LIU Shen<sup>1</sup>, TIAN Jian-ji<sup>1, 2</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** As an important geological process, magma mixing is of great significance in understanding genesis and evolution of magma. In this paper, the latest research advances of magma mixing, especially, validation of mixing process and contribution of mantle material to magma mixing process, were elaborated, magma mixing process were re-recognized from energy and material transfer perspectives, information of crust and mantle was revealed, and constrained conditions of the local structure and magma evolution were proposed. Based on the previous studies, this paper systemically classified the research methods for magma mixing process, summarized the rules and the major impact factors of magma mixing process, attempted numerical simulations on the literature data and theories, and offered a reasonable explanation for the non-mixing attribution of intruding veins. This paper explained the relationship between magma mixing and Under-Plating, which is an important form of Crust-Mantle interchange. By the end, this paper summarized the research directions and potential scientific questions of magma mixing.

**Key words:** magma mixing; crust-mantle interchange; under-plating; petrogenetic model

作为成岩体系中一个重要方式, 岩浆混合作用对于认识成岩过程、岩浆演化等有着重要意义, 尤其是深源岩浆在上升过程中与地壳偏酸性岩浆的混合作用。随着岩浆底侵作用、壳幔物质演化研究的逐渐深入, 与其关系密切的岩浆混合作用日益受到人们的关注。

岩浆混合包括岩浆混合(magma mixing)与混和(magma mingling), 对应岩浆的化学混合与机械混和, 是大量火山岩和深成岩在岩浆作用历史中一个重要的岩石学过程。因混合过程常伴随着二者共同作用, 使用广义的“混合”一词。岩浆混合作用形成的岩石称为岩浆混合岩, 岩浆混合岩再加上两个

收稿日期: 2008-05-27 收到, 06-10 改回

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411402); 国家自然科学基金资助项目(40634020, 40673029, 40773020)

第一作者简介: 齐有强(1982—), 男, 博士研究生, 地球化学专业, E-mail: qiyouqiang@sina.com.cn

通讯作者: 胡瑞忠, E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn

端员岩浆岩共同组成的杂岩体,称为岩浆混合杂岩体(hybrid complex)。已一致认可的是混合作用发生在岩浆房补给或火山喷发过程<sup>[1]</sup>。目前关注焦点是混合作用的物理机制和动力学<sup>[2]</sup>,特别是岩浆房补给过程中的混合作用,对于动力学研究甚为重要。

影响岩浆混合作用的一个重要因素是端员岩浆的物理性质。当两岩浆端员的成分间温度和粘度差异太大时,考虑到客体基性端员通常所占比例很小(<50%),镁铁质岩浆常处于过冷却状态而形成分离态包裹体,因此简单的流体-流体之间通常不能充分进行岩浆混合<sup>[3, 4]</sup>。许多学者在实验模拟方面做了大量的工作,试图为岩浆混合做出合理解释<sup>[2, 5, 6]</sup>。

## 1 研究进展

1851年,Bunsen曾建议用双端员岩浆不同比例的混合来解释火成岩化学组成的变化。随着复合岩墙和岩床的研究,镁铁质岩浆和长英质岩浆在封闭区域共存及快速就位现象得到广泛认可<sup>[7]</sup>。Anderson(1976)指出岩浆房中不同成分岩浆确实能发生混合作用。之后“开放岩浆体系”理论的发展,使岩浆混合作用被人们所熟知<sup>[8]</sup>。目前为止,从混合作用的发生方式、模式、混合岩中包体结晶过程等,到矿物、岩石、地球化学、实验岩石学、混合模型计算等方面均取得新的进展。

国外对岩浆混合作用的研究涉及范围较广。Neves<sup>[9]</sup>通过岩相学、流体动力学、热力学模式重点研究了巴西东北部 Fazenda Nova 剪切带控制下的基性端员岩浆的参与情况,发现它有多次闪长岩与花岗岩的混合,伴随剪切带发展,基性端员的贡献递减。Huppert<sup>[6]</sup>从模拟实验岩石学研究了基性岩浆在边界层对大陆壳岩浆的熔融作用,提出了岩浆侵位模式。Blundy<sup>[10]</sup>研究了意大利 Adamello 地块花岗岩类中基性包体,从微量元素地球化学特征入手,详细阐述了两岩浆端员间富集元素的迁移机理,指出包体与围岩的再平衡和再反应作用造成的内部微量元素异常。此外针对火山岩浆房内的岩浆混合作用,通过岩相学和同位素(Sr、Nd)手段进行研究,丰富了浅成岩浆房内化学分带理论<sup>[11]</sup>。还有学者重点研究了包体<sup>[12]</sup>。通过研究马里亚纳洋弧内包体中橄榄石和斜长石斑晶的岩石化学,验证了岩浆混合作用,提出了浅成岩浆房中的矿物结晶模式,成功解释了斜长石和橄榄石的结晶现象,为洋弧内部的岩浆演化提供重要思路。

国内对岩浆混合作用的研究集中于元古代和中

生代。李昌年(2006)研究了赣东北前寒武纪的港边火成杂岩体的岩相学和岩石学,探讨了岩浆混合的过程和机理。浙江新昌拔茅地区的早白垩世复合岩流成为中生代火山活动中岩浆混合作用的确凿证据;研究表明,这种复合岩流中的安山质岩浆由同时代橄榄斑玄武岩浆和流纹岩浆相互混合而成<sup>[13]</sup>。曲晓明<sup>[14]</sup>对胶东金矿区郭家岭岩体的系统研究,确认了壳幔岩浆混合作用,并估算出混合比例。董国臣<sup>[15]</sup>通过地表混合岩的分布比例推算出地幔底侵作用对地壳增厚的贡献。

总之,岩浆混合作用的研究集中在两方面:通过多种研究手段验证混合作用,以及估算地幔物质参与对混合作用的贡献。试图从能量、物质的运移交换角度深入认识岩浆混合作用,揭示上地幔、地壳的信息,为认识区域的构造-岩浆演化提供约束。

## 2 主要研究方法

(1)野外观察:区域地质图上的混合岩侵入体多呈圈层状分布,或见于断裂带。往往形成复合岩流、复合岩墙和复合杂岩体,各端员成分间常具过渡带或涌动接触关系。有些地区可见混合岩浆两端员岩浆岩,有的只可见其一(因地壳浅部发育规模差异,多为偏酸性端员),很多两端员都未见,而显示高度的岩浆混合作用<sup>[14, 16]</sup>。岩浆混合端员不局限于基性-酸性岩浆,还可为中性-酸性岩浆<sup>[17]</sup>;但后者发育规模较小,热量和能量在短期就达到了平衡,并多伴有火山喷发。这充分显示出混合作用的复杂性,必须准确判断。

(2)岩相学研究:岩浆混合作用显示矿物组合和岩石结构的不协调。早期结晶矿物常被另一类岩浆捕获,呈残核结构、文象结构、蠕虫结构和交代结构等,表示发生局部熔融。因此,中间过渡成分与两岩浆端员之间是否有同时结晶和岩浆共存现象,是岩相学上辨别混合作用的一个很重要手段。

此外在闪长岩、花岗岩中常有辉长岩类所特有的斜长石( $An > 70$ )。斜长石捕虏晶四周出现与花岗岩中成分相当的斜长石加膜,即双峰式斜长石斑晶<sup>[15, 18]</sup>。类似现象在辉石斑晶中也有发现,主要是Mg牌号的异常<sup>[17]</sup>。

(3)包体研究:作为研究混合岩的一个重要的手段日益受到重视。大部分包体具塑性流动特征,经历了与寄主岩石(英安质岩)共同的液态共存阶段,暗示发生过液态物质交换。呈现出复合特征的包体,酸性岩浆端员在成分上反而呈高镁铁质特征,基性端员却呈现高钾、铝特征,总体成分又类似于两端

员之间性质的岩石。斜长石包体的结构、成分、形状和粒度方面的特点已经作为岩相学上辨别混合岩和确认混合程度的重要标志和手段<sup>[18]</sup>。Troll<sup>[19]</sup>通过岩浆中各类长石的比例、包体的分解结构、混合区岩石成分呈大范围分布及氧同位素等方法,重点研究了熔结凝灰岩中的三种长石,提出了阶段循环模式(step-cycle model),即一个端员岩浆批次内结晶出的长石进入到另一个端员岩浆,然后又重新回到原来岩浆,中间过程伴随着矿物晶体的迁移、溶蚀、重结晶等,并发生元素的迁移。这一模式能有效地解释元素在岩浆中的分布特征及同一晶体内核心和边缘元素差异等现象。

岩浆混合的标志除有双峰式斜长石斑晶、淬冷包体外,还有辉长-闪长质深成岩墙、反向脉和包体矿物异常共生等。镁铁质包体岩浆因冷却结晶,导致固化程度高于偏长英质的寄主岩浆,同时结晶收缩或局部错动出现裂隙,过热的偏长英质的寄主岩浆贯入后形成反向脉。浙江大衢山花岗岩中的淬冷包体研究表明其有典型的反向脉结构<sup>[20]</sup>。因幔源碱性岩浆上升过程中捕获地壳岩石,经过长时间的相互作用,地壳岩石中易熔组分被碱性岩浆“消化”,难熔的锆石也就呈磨圆状残存于碱性岩浆中。东南沿海中生代玄武岩中发现过磨圆状锆石<sup>[21]</sup>,成为幔源岩浆与地壳岩石相互作用重要的矿物学证据。

### 3 元素及其同位素特征

混合岩的岩石化学成分相对 MgO 呈线性变化趋势, SiO<sub>2</sub> 和 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 之间呈过渡变化。岩石化学图解上,混合岩的成分常位于两端员岩石之间,呈线性趋势分布<sup>[9, 10]</sup>。混合岩的微量元素和稀土配分特征常与端员岩浆一致,稀土配分曲线位于两端员岩石成分之间,呈扇形分布(LREE 受影响相对较大,在图解中总体呈扇形)。混合岩的氧、锶、钕和铅等同位素特征值常位于壳、幔标准值之间,反映岩浆混合的特征。

我们用几组 Taylor 的数据,通过稀土元素配分曲线指示岩浆混合作用。对太古代双峰模式岩浆的两端员按照 2:1 的比例混合,模拟结果与代表全地壳成分组成的安山岩曲线一致(图 1)。

一般辉长岩类<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 值较高,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值较低,而偏酸性的花岗质岩石中<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 值较低,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值较高,构成线性分布趋势,并位于地幔演化线的延伸方向,显示区域岩浆混合作用特征<sup>[15]</sup>;此外微量元素的相关图解(Ce/Yb-Rb/Sr、Rb-Rb/Sr、Ce-Pb、Ni-MgO 和 MgO-CaO/Na<sub>2</sub>O),

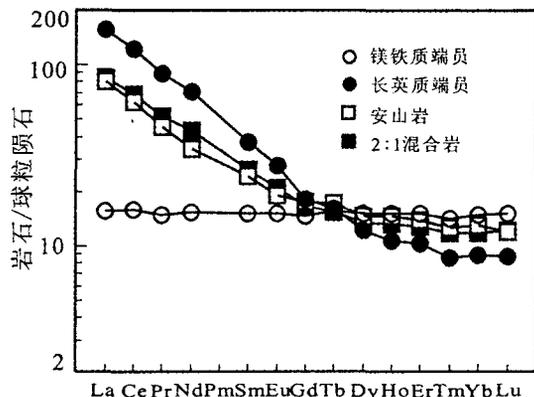


图 1 混合岩浆模拟的稀土元素球粒陨石配分图据文献<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Chondrite-normalized rare earth element patterns of mixing magma<sup>[22]</sup>

也显示良好双曲线或线性关系<sup>[23]</sup>。这主要与元素在混合过程中的不同特性有关。

岩浆混合过程中,主量元素和微量元素呈现不同的地球化学特征。Leshner<sup>[24]</sup>用扩散动力学理论来解释:同位素交换进程要远远快于化学的均一化进程,且不同同位素系统之间平衡速率也不同。主量元素因其成分、原子结构的影响,在岩浆混合中不易扩散和均匀化;而微量元素、Sr、Nd 同位素等可在原结构上直接交换,均匀化过程比主量元素更易进行,于是呈现出岩石成分的大范围分布<sup>[19]</sup>(large compositional amplitude)及同位素、微量元素丰度及变化的相似性。

### 4 年代学特征

发生混合作用的两个端员岩浆与混合岩常具相同的年龄。有些地区年龄会稍微滞后,岩浆活动显示多期次。在混合作用晚期,某一岩浆端员或两个岩浆端员会浅成侵入或喷出,出现所测混合岩年龄比其岩浆端员年龄还要早的现象。可见精确的岩石定年对研究岩浆混合作用有重要意义。

曲水深成岩体中锆石 SHRIMP-II U-Pb 定年<sup>[25]</sup>,得到混杂岩中花岗闪长岩(寄主岩)的年龄为 49.3~51.2 Ma,镁铁质微粒包体年龄为 49.9~51.1 Ma,辉长岩年龄为 47.0~48.9 Ma。显示曲水岩体岩浆作用活动时限为 50 Ma 左右,三类岩石属于同一时期。土耳其 Anatolia 地区混合杂岩体内岩浆阶段加热<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 法定年,得到辉长岩的年龄为 78.0~78.8 Ma,花岗岩年龄 77.6 Ma,两个端员的岩浆年龄一致<sup>[26]</sup>。

### 5 影响因素及规律总结

制约混合作用的一个重要因素是端员岩浆的物

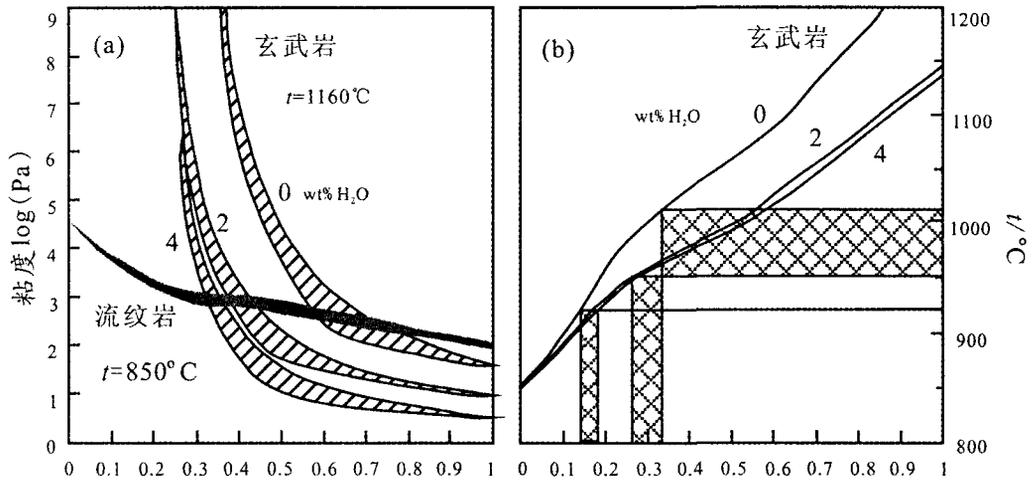
理性质:温度、粘度、岩浆密度差、挥发物含量及混合持续时间。相对于化学平衡,热平衡在混合作用中起主导作用,岩浆平衡后的温度对岩浆物理性质影响很大。以一般的热平衡系数  $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$  为例,传递 10~100 m 距离,热平衡需要 150~15000 a,相对于大体积岩浆房存在时间来说微乎其微<sup>[16]</sup>。

发生混合时如果两岩浆粘度差别较大(如超镁铁岩浆粘度常比闪长岩浆小 2~3 个数量级),前者容易被后者分割成较小体积的岩浆团,就不易发生显著的重力堆晶和结晶分异作用<sup>[27]</sup>。一般两岩浆端员粘度较低且相差不大有利于进行充分混合<sup>[16, 28]</sup>。

图 2a 显示了混合岩浆的混合程度( $X_B$ )和粘度间的关系。纵坐标选用粘度的对数值,以表明粘度间数量级的关系。从图中可知,玄武质岩浆与流纹质岩浆混合时  $X_B$  为 0.27~0.4,两岩浆端员粘度出现相交,但玄武质岩浆低于固相线,发生固化结晶(结晶度超过 60%)。当  $X_B$  小于 0.3 时,更低的温度使玄武质岩浆发生淬火效应,岩浆混合受到粘度

更多的抑制作用。当  $X_B$  大于 0.9 时,混合作用几乎完全进行。可见岩浆混合作用不仅仅受控于岩浆粘度,也与混合岩浆的过热状态有关,而这都受温度的影响。因而温度对于岩浆混合作用起主导作用。

图 2b 显示,玄武质岩浆的固相线在无水 and 含水环境下为 1010~950°C,对应着混合比例  $X_B$  为 0.34~0.26(阴影区),而流纹岩的固相线 920°C(对应  $X_B$  为 0.14),玄武质岩浆在降到此温度的过程中有一个过热状态区,而流纹质岩浆以液相存在,有利于混合作用的发生<sup>[16]</sup>。从图中还可以看出水的影响也非常明显。水含量的增加使熔融温度降低,从而延长两岩浆液态共存时间,更有利于混合作用。水的影响在某些元素上也能得到体现。含水和无水环境下 K 的性质差异明显:出现“上坡扩散”效应。即玄武岩含有比共存状态的流纹岩更高的元素 K, K 却从流纹岩向前者运移扩散。此现象多发生在水环境里,用硅酸盐岩浆化合物的活度理论可得到合理解释<sup>[10, 29]</sup>。



$X_B$  岩浆混合程度,即玄武质岩浆所占比例;

$X_B$ , degree of magma mixing, basaltic magma's proportion in mixture

图 2 混合岩浆粘度及温度与混合程度( $X_B$ )关系图(据文献[16]修改)

Fig. 2 Relationship chart of viscosity and temperature vs. degree of magma mixing ( $X_B$ )(modified after ref. [16])

因岩浆分层模型在岩浆混合中的典型代表性,建立在分层岩浆模型上的判别公式很多,马昌前<sup>[30]</sup>认为分层岩浆房中能否发生整体对流取决于双扩散对流的强度,提出判别式:

$$\Gamma = R_T/R_S = \alpha_T \cdot \Delta t / \alpha_c \cdot \Delta C \quad (1)$$

式中,  $R_T$  为热瑞利数;  $R_S$  为成分瑞利数;  $\Delta T$  为两岩浆层的温度差;  $\Delta C$  为岩浆房顶底之间的成分差;  $\alpha_T$  为热膨胀系数,指示温度每变化 1°C,材料长度变化

的百分率,单位为 1/K;  $\alpha_c$  为成分膨胀系数,若两岩浆密度分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ,则  $\alpha_c = (\rho_1 - \rho_2) / \rho_2$ ; 把分层岩浆房看作是二元系时,常取  $\Delta C = 1$ 。代入相应的参数计算后,当  $\Gamma > 1$  时,即热升腾作用大于成分沉降作用,岩浆层将发生对流。

曲晓明研究了郭家岭岩体,取长英质岩浆的  $t = 850^\circ\text{C}$ ,  $\rho_2 = 2.44 \text{ g/cm}^3$ ; 镁铁质岩浆  $t = 1250^\circ\text{C}$ ,  $\rho_1 = 2.52 \text{ g/cm}^3$ , 将这些参数代入(1)式得  $\Gamma =$

1.146, 显示满足整体对流的动力学条件<sup>[14]</sup>。

Campbell<sup>[5]</sup>在理论上提出了一个判断公式： $wd/v_2 > k$ 。这个判断式的前提是注入岩浆达到紊流态(瑞利数  $Re > 400$ )，应用在喷流和热流柱等方面。通过大量试验验证发现，当  $wd/v_2 > 70$  时，注入流体和围流体的混合会非常充分，可当  $7 < wd/v_2 < 70$ ，虽然岩浆喷泉内完全紊流状态，但是只会发生部分混合， $wd/v_2 < 7$  时，很少或几乎没有混合发生。

$wd/v_2$  的计算公式： $wd/v_2 = Q/v_2$ ； $Re$  的计算公式： $Re = \frac{Q}{v_1} = \frac{\rho_1 Q}{\eta_1}$ ； $Q$  为二维分散交换率： $Q = \left[ \frac{g\Delta\rho}{f\rho_m} \right]^{1/2} d^{3/2}$ ；式中  $v_1$ ：注入岩浆的运动粘度； $v_2$ ：周围岩浆的运动粘度； $w$ ：通过喷嘴注入流体的速度； $d$ ：喷嘴的直径(自然界中则为裂隙宽度)； $\rho_m$ ：注入

岩浆的密度； $\Delta\rho$ ：岩浆端员间的密度差； $f$ ：摩擦系数(与界面粗糙度有关)； $\eta_1$ ：注入岩浆的粘度。

取  $d$  值为 0.5~500 m，并选取合适的参数对  $Re$ 、 $Q$  和  $wd/v_2$  进行模拟计算，结果见表 1。考虑到自然界中的岩脉多为 10~100 m，针对此宽度，深部上升的基性岩浆侵入到浅地表时， $Re$  皆大于 400，而  $wd/v_2$  皆小于 1，属于不发生或发生极少量岩浆混合作用的阶段。可以成功解释基性岩脉露头一般都有明确接触界限，而存在冷凝边的现象。需要说明的一点是  $v_2$  值与含水量及温度关系密切，当含水 1% 花岗质岩浆从 900 °C 升温至 1200 °C 时， $v_2$  从 108 P 降为 106 P。在 900 °C，含水量从 1% 升至 4% 时， $v_2$  从  $10^8$  P 降为  $4 \times 10^5$  P<sup>[31]</sup>。

表 1  $Re$ 、 $Q$  和  $wd/v_2$  的计算模拟值  
Table 1 The simulation data of  $Re$ ,  $Q$  and  $wd/v_2$

$d/cm$	$\Delta\rho=0.1 \text{ g/cm}^3; v_2=10^8 \text{ P}$			$\Delta\rho=0.01 \text{ g/cm}^3; v_2=10^8 \text{ P}$		
	$Q$	$Re$	$wd/v_2$	$Q$	$Re$	$wd/v_2$
$5.00 \times 10$	$1.23 \times 10^4$	$1.11 \times 10^2$	$3.32 \times 10^{-4}$	$3.89 \times 10^3$	$3.50 \times 10$	$1.05 \times 10^{-4}$
$1.00 \times 10^2$	$3.48 \times 10^4$	$3.13 \times 10^2$	$9.39 \times 10^{-4}$	$1.10 \times 10^4$	$9.90 \times 10$	$2.97 \times 10^{-4}$
$5.00 \times 10^2$	$3.89 \times 10^5$	$3.50 \times 10^3$	$1.05 \times 10^{-2}$	$1.23 \times 10^5$	$1.11 \times 10^3$	$3.32 \times 10^{-3}$
$1.00 \times 10^3$	$1.10 \times 10^6$	$9.90 \times 10^3$	$2.97 \times 10^{-2}$	$3.48 \times 10^5$	$3.13 \times 10^3$	$9.39 \times 10^{-3}$
$5.00 \times 10^3$	$1.23 \times 10^7$	$1.11 \times 10^5$	$3.32 \times 10^{-1}$	$3.89 \times 10^6$	$3.50 \times 10^4$	$1.05 \times 10^{-1}$
$1.00 \times 10^4$	$3.48 \times 10^7$	$3.13 \times 10^5$	$9.39 \times 10^{-1}$	$1.10 \times 10^7$	$9.90 \times 10^4$	$2.97 \times 10^{-1}$
$5.00 \times 10^4$	$3.89 \times 10^8$	$3.50 \times 10^6$	$1.05 \times 10$	$1.23 \times 10^8$	$1.11 \times 10^6$	$3.32$

注： $g$  取  $980 \text{ cm/S}^{-2}$ ， $\Delta\rho$  分别取  $0.1 \text{ g/cm}^3$  和  $0.1 \text{ g/cm}^3$ ； $\eta_1$  取 300P； $f$  取 0.03； $\rho_m$  取  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ； $v_2$  取  $10^8 \text{ P}$  据文献[31]；参数据文献[5]

## 6 岩浆混合与底侵作用的关系

岩浆混合作用及底侵作用作为壳—幔间物质与能量交换的重要形式，对于陆壳的生长与改造、岩石圈成分、结构与热状态的演化，都有着重要意义。底侵作用为岩浆混合作用提供了关键的物质、能量准备。岩浆混合作用能为研究地壳纵向生长、岩石圈的加厚机制、壳—幔物质交换等提供约束<sup>[32]</sup>。

岩浆混合作用与构造活动关系密切，多发生在俯冲区造山带、大陆热点、地壳拉张区域、断裂带发育区<sup>[9, 33, 34]</sup>。发育区皆为壳幔物质作用强烈地区。玄武质基性岩浆和长英质酸性岩浆在有利构造条件下，能从不同深度近于同时地侵入或喷出，被认为是地壳拉张或岩石圈伸展作用的有力证据<sup>[35]</sup>。因此结合岩浆混合作用发生的构造背景，重点研究混合岩区的岩浆端员，对认识区域构造活动背景、岩浆活动情况，以及地壳的横向增长都有着重要研究意义<sup>[15, 36]</sup>。

玄武岩浆的底侵作用和幔源岩浆与壳源岩浆的

混合作用是壳幔作用最直观的表现形式<sup>[37]</sup>。混合作用的研究对于认识花岗岩形成(特别是 I 型和 A 型)及成分多样性也有着重要意义。

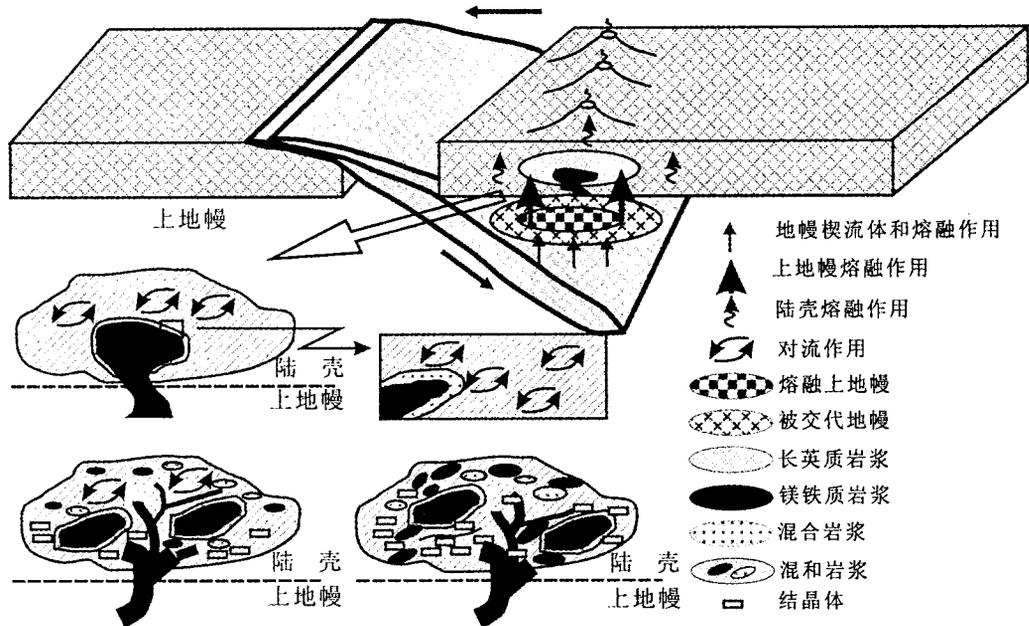
## 7 几种混合作用的模式

混合杂岩的成岩模式作为壳幔相互作用过程的一个重要形式，颇受重视<sup>[6, 15]</sup>。研究表明，进入上地壳的基性岩浆与酸性岩浆存在再平衡过程，并分三个阶段进行：1) 热平衡阶段。包体岩浆遭受快速冷却而结晶出大量的针状矿物如磷灰石、角闪石等，形成“淬火结构”，并伴有体积缩小现象；2) 活性组分扩散阶段。主岩岩浆中的一些活性组分 K、Na、Si、H<sub>2</sub>O 等在化学梯度力驱使下向包体中扩散。随着扩散的不断进行，偏基性矿物不断为偏酸性的矿物所交代，形成完整反应系列；3) 化学组分全面平衡阶段。因固相线差异，处于高度岩浆残余阶段的酸性熔融岩浆不断向接近固相线的包体扩散，使其高场强元素(HFSE)和轻稀土元素(LREE)含量不断提高，直至酸性岩浆固结<sup>[10]</sup>。

以上模式以热平衡及元素平衡成功地解释了岩浆混合作用发生时,主量元素、微量元素的特点,但宏观上缺少构造背景下岩浆混合作用的研究。

Huppert<sup>[6]</sup>提出了大陆壳构造背景下的岩浆混合模式,并引入陆壳的循序性加热(progressive heating)概念,指出陆壳的物理性质决定了对底侵

上升岩浆的利用效率。较高温度和高延展性的陆壳会束缚底侵岩浆的上升,其间俘获热可对英安质岩浆的熔融起到促进作用,有利于混合作用的发生。反之,较低温度和低延展性的陆壳则使底侵岩浆的上升变得很容易,以致在有利构造位置喷出地表,而不易发生混合作用。



据文献[26]修改

Modified after ref. [26]

图3 岩浆混合作用的岩石成因模型

Fig. 3 Petrogenetic model of magma mixing and mingling

碰撞-俯冲带作为典型的构造活动区,向来受学者们青睐。板块俯冲环境下,俯冲洋壳发生脱水,产生流体,导致上覆地幔楔的部分熔融,形成玄武质岩浆<sup>[38]</sup>,上涌的玄武质岩为下地壳带来高热能和流体,使其部分熔融,形成长英质岩浆<sup>[6]</sup>。当底侵岩浆进一步集中时,镁铁质岩浆会沿薄弱带(深大裂谷)继续上升侵入上部的长英质岩浆房,并与之发生混合,形成一系列介于两端员之间的过渡型岩石<sup>[39]</sup>,如二长花岗岩、闪长岩至辉长岩以及未完全混合的镁铁质微粒包体,甚至在合适的构造环境,基性端员岩浆会直接侵入地表,形成基性岩体或岩脉。

## 8 研究趋势及存在的问题

目前,岩浆混合作用研究有许多新趋势。实验岩石学通过人为设置实验条件,控制重要参数,以研究岩浆混合过程中元素的迁移性质和迁移规律。从分子角度,用元素迁移理论来解释模拟岩浆混合作

用的机理。比如在岩浆熔融时热量的供给方面,难熔物质是如何受热熔融的?实验研究发现难熔物质因密度较大向下进入基性端员岩浆,受到更深层次的熔融作用。同时因水的加入大大影响了岩浆密度,造成含水量高的高温基性岩浆密度低于含水量低的低温地壳物质,从而有利于岩浆上升,双向物质运移更有利于混合作用<sup>[6]</sup>。板块俯冲带因岩浆分异作用产生的大量水为岩浆混合提供了有利条件。

新的研究方法被更多的采用,如航空磁测等物理方法的使用。在研究土耳其 Anatolia 岩体时,应用地球物理方法反演出岩浆的深部特征<sup>[26]</sup>。理论研究上交叉学科影响增强<sup>[40]</sup>,电脑 3D 技术被用来分析和模拟岩浆在岩体内部空间上的分布特征;甚至引入数学分维学概念,来研究岩浆混合端员接触界面的细节问题,提供了新思路。

岩浆混合作用的研究还有不少问题。一个重要方面涉及到深源岩浆的规模,基性端员岩浆在深部

的所占比例是否会更大呢?用物理方法研究土耳其地区的深部辉长岩体,发现其规模向下有扩大趋势<sup>[26]</sup>。但此方法仅限于垂向空间上变化的浅成至深成的侵入岩体;不适合火山岩地区。

在与构造背景的关系上,岩浆混合作用的主要控制因素是什么?以华南地区为例,同样位于深大断裂带上,中元古代发生了玄武质岩浆的底侵作用<sup>[41]</sup>,在一个相对长的宁静期内,岩浆之间相互作用并发生混合。而中生代在赣杭断裂带上发育的基性脉岩和基性岩体,是在快速侵入地表的条件下形成的,却没有发生岩浆混合作用。相似的构造背景,展示了不同的岩浆演化过程,很值得探讨和研究。

另外实验模拟方面,前人常把一些参数简单化,如使用聚乙烯乙二醇(PEG)模拟围岩,NaNO<sub>3</sub>水溶液模拟岩浆,实验温度多在100℃内<sup>[6]</sup>。实验条件的简化,缺少真实有效性。岩浆内热和物质的迁移模拟,应在更接近自然的环境进行模拟。

#### 参考文献 (References):

- [1] Feeley T C, Dungan M A. Compositional and dynamic controls on mafic-silicic magma interactions at continental arc volcanoes: Evidence from Cordon El Guadal, Tatara-San Pedro complex, Chile [J]. *J. Petro.*, 1996, 37(6): 1547-1577.
- [2] Snyder D, Tait S. Magma mixing by convective entrainment [J]. *Nature*, 1996, 379(6565): 529-531.
- [3] Bacon C R. Magmatic inclusions in silicic and intermediate volcanic rocks [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91(B6): 6091-6112.
- [4] Sparks R S J, Marshall L A. Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas [J]. *J. Volcan. and Geoth. Res.*, 1986, 29(1-4): 99-124.
- [5] Campbell I H, Turner J S. The influence of viscosity on fountains in magma chambers [J]. *J. Petro.*, 1986, 27(1): 1-30.
- [6] Huppert H E, Sparks R S J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust [J]. *J. Petro.*, 1988, 29(3): 599-624.
- [7] Ray E W. The idea of magma mixing: History of a struggle for acceptance [J]. *J. Geology*, 1999, 107(4): 421-433.
- [8] 周珣若. 花岗岩混合作用[J]. *地学前缘*, 1994, 1(1-2): 87-97.  
Zhou Xunruo. Hybridization in the genesis of granitoids [J]. *Earth Science Frontiers*, 1994, 1(1-2): 87-97. (in Chinese with English abstract)
- [9] Neves S P, Vauchez A. Successive mixing and mingling of magmas in a plutonic complex of Northeast Brazil [J]. *Lithos*, 1995, 34(4): 275-299.
- [10] Blundy J D, Sparks R S J. Petrogenesis of mafic inclusions in granitoids of the Adamello Massif, Italy [J]. *J. Petro.*, 1992, 33(5): 1039-1104.
- [11] Civetta L, Galati R, Santacroce R. Magma mixing and convective compositional layering within the Vesuvius magma chamber [J]. *Bulletin of Volcan.*, 1991, 53(4): 287-300.
- [12] Lee J M, Robert J S. Glass inclusions in Mariana Arc Phenocrysts: A new perspective on magmatic evolution in a typical intra-oceanic arc [J]. *J. Geol.*, 1998, 106(1): 19-35.
- [13] 周金城, 俞云文. 浙江新昌早白垩世复合岩流中的岩浆混合作用[J]. *岩石学报*, 1994, 10(3): 236-247.  
Zhou Jincheng, Yu Yunwen. Magma mixing in early cretaceous composite lava flow in Xinchang, Zhejiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10(3): 236-247. (in Chinese with English abstract)
- [14] 曲晓明, 王鹤年. 郭家岭岩体壳幔岩浆混合作用与侵位机制的动力学研究[J]. *地质科学*, 1997, (4): 445-454.  
Qu Xiaoming, Wang Henian. Dynamic study on the crust-mantle magma mixing and emplacement mechanism of Guojialing granite [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1997, (4): 445-454. (in Chinese with English abstract)
- [15] 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 王亮亮, 陈涛, 李冰. 冈底斯岩浆带中段岩浆混合作用:来自花岗岩杂岩的证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 835-844.  
Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Wang Liangliang, Chen Tao, Li Bing. Magma mixing in middle part of Gangdisé magma belt: Evidences from granitoid complex [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 835-844 (in Chinese with English abstract)
- [16] Freundt A, Schmincke H U. Mixing of rhyolite, trachyte and basalt magma erupted from a vertically and laterally zoned reservoir, composite flow P1, Gran Canaria [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1992, 112(1): 1-19.
- [17] Venezky D Y, Rutherford M J. Pre-eruption conditions and timing of dacite-andesite magma mixing in the 2.2 ka eruption at Mount Rainier [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B9): 20069-20086.
- [18] 李武显, 董传万, 周新民. 平潭和漳州深成杂岩中斜长石捕虏晶与岩浆混合作用[J]. *岩石学报*, 1999, 15(2): 286-290.  
Li Wuxian, Dong Chuanwan, Zhou Xinmin. Plagioclase xenocryst and magma mingling in Pingtan and Zhangzhou Complexes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(2): 286-290. (in Chinese with English abstract)
- [19] Troll V R, Schmincke H U. Magma mixing and crustal recycling recorded in ternary feldspar from compositionally zoned peralkaline ignimbrite 'A', Gran Canaria, Canary Islands [J]. *J. Petro.*, 2002, 43(2): 243-270.
- [20] 周新民, 姚玉鹏, 徐夕生. 浙东大衢山花岗岩中淬冷包体及其成因机制[J]. *岩石学报*, 1992, 8(03): 234-242.  
Zhou Xinmin, Yao Yupeng, Xu Xishen. Quenched enclaves in Daqushan granitoid and their genesis, east Zhejiang, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1992, 8(03): 234-242. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周金城, 陈荣. 浙闽沿海晚中生代壳幔作用研究[J]. *自然科*

- 学进展:国家重点实验室通讯, 2000, 10(6): 571-574.
- Zhou Jincheng, Chen Rong. Mesozoic interaction between crust and mantle in coastal area of Zhejiang-Fujian [J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(6): 571-574. (in Chinese with English abstract)
- [22] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. United States: Blackwell Scientific Pub., Palo Alto, CA. 1985: 1-328.
- [23] 董传万, 李武显, 陈小明. 闽东南晚中生代岩浆混合作用: 平潭火成杂岩的岩石学证据[J]. 自然科学进展: 国家重点实验室通讯, 1998, 8(5): 581-586.
- Dong Chuanwan, Li Wuxian, Chen Xiaoming. Late Mesozoic magma mixing in the southeast area of Fujian: Petrological record of Pingtan igneous complexes [J]. Progress in Natural Science, 1998, 8(5): 581-586. (in Chinese with English abstract)
- [24] Lesher C E. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing [J]. Nature, 1990, 344(6263): 235-237.
- [25] Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, Guo T Y, Wang L L, Chen T. Timing of magma mixing in the Gangdisé magmatic belt during the India-Asia collision: Zircon SHRIMP U-Pb dating [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(1): 66-76.
- [26] Kadioglu Y K, Dilek Y, Gülec N, Foland K A. Tectonomagmatic evolution of bimodal plutons in the central anatolian crystalline complex, Turkey [J]. J. Geology, 2003, 111(6): 671-691.
- [27] 周新民, 朱云鹤. 江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒武纪地质[J]. 中国科学(B辑), 1992, (03): 296-303.
- Zhou Xinmin, Zhu Yunhe. Magma mixing and Precambrian geology on the both sides of Jiangshao Deep Fracture Zone [J]. Science in China (series B), 1992(03): 296-303. (in Chinese with English abstract)
- [28] Frost T P, Mahood G A. Field, chemical, and physical constraints on mafic-felsic magma interaction in the Lamarck Granodiorite, Sierra Nevada, California [J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1987, 99(2): 272-291.
- [29] Johnston A D, Wyllie P J. Interaction of granitic and basic magmas: Experimental observations on contamination processes at 10 kbar with H<sub>2</sub>O [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1988, 98(3): 352-362.
- [30] 马昌前, 杨坤光, 唐仲华. 花岗岩类岩浆动力学—理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994: 1-260.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua. Magmatodynamics of granitoids—Theory, method and a case study of the eastern Hubei granitoids [M]. Wuhan: Chinese University of Geosciences Press, 1994. 1-260. (in Chinese with English abstract)
- [31] Shaw H R. Obsidian-H<sub>2</sub>O viscosities at 1000 and 2000 bars in the temperature range 700 to 900 °C [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68: 6337-6343.
- [32] 吴福元. 壳—幔物质交换的岩浆岩石学研究[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 94-103.
- Wu Fuyuan. The material exchange at the crust-mantle boundary evidence from igneous petrology [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(3): 94-103. (in Chinese with English abstract)
- [33] Haase K M, Muhe R, Stoffers P. Magmatism during extension of the lithosphere: Geochemical constraints from lavas of the Shaban Deep, northern Red Sea [J]. Chemical Geology, 2000, 166(3-4): 225-239.
- [34] Shamberger P, Garcia M. Geochemical modeling of magma mixing and magma reservoir volumes during early episodes of Kilauea Volcano's Pu'u 'Ō'ō eruption [J]. Bulletin of Volcan., 2007, 69(4): 345-352.
- [35] Metcalf R V, Smith E I. Introduction to special section: magmatism and extension [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B7): 10249-10253.
- [36] 金振民, 高山. 底侵作用(underplating)及其壳—幔演化动力学意义[J]. 地质科技情报, 1996, 15(2): 1-7.
- Jin Zhenmin, Gao Shan. Underplating and geodynamical significances for the evolution of crust-mantle boundary [J]. Geol. Sci. Tech. Inform., 1996, 15(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [37] 王德滋. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. 高校地质学报, 2004, 10(3): 305-314.
- Wang Dezi. The study of granitic rocks in South China: Looking back and forward [J]. Geol. J. China Univ., 2004, 10(3): 305-314. (in Chinese with English abstract)
- [38] Tatsumi Y, Eggins S. Subduction zone magmatism [M]. Blackwell Publishing, 1995: 1-221.
- [39] Kuritani T, *et al.* Shift and rotation of composition trends by magma mixing: 1983 eruption at Miyake-Jima volcano, Japan [J]. J. Petro., 2003, 44(10): 1895-1916.
- [40] Perugini D, Poli G, Gatta G D. Analysis and simulation of magma mixing processes in 3D [J]. Lithos, 2002, 5(3-4): 313-330.
- [41] 李昌年, 廖群安. 赣东北前寒武纪港湾杂岩体的岩浆混合(和)作用及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(5): 357-376.
- Li Changnian, Liao Qun'an. Magmatic mixing and mingling of Precambrian Gangbian complex in northeastern Jiangxi Province and their geological significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25(5): 357-376. (in Chinese with English abstract)