

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.316>



晶粥储存、侵入体累积组装与花岗岩成因

马昌前^{1,2}, 邹博文¹, 高珂¹, 文霞³

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南衡阳 421001

摘要: 花岗质岩浆在地壳内的储存、迁移和分异,是导致大陆地壳生长演化的基本过程.有关地壳岩浆冷储存的新发现,挑战了数十年来深部存在以熔融体为主要组成的大岩浆房的观点.对活火山区的地球物理探测、岩石矿物学研究以及热历史模拟都一致证明,岩浆储库中的物质以晶粥为主,它们长时间处于固相线下的温度条件,属于冷储存状态.今天出露地表的大型侵入岩体,是古岩浆储库的代表,它们大都是在数百万年甚至更长的时间跨度内,多幕式的岩浆运输、累积侵位和多次添加组装而成的.侵入体的累积组装,可以通过岩石单元间接接触关系的观察、岩石和矿物成分的不均一性研究以及侵入体内大的结晶时间跨度来证明.地壳浅部大型侵入体的形成,大体积的火山喷发,都要求存在穿地壳的岩浆通道系统,该系统中岩浆主要以岩墙形式将不同深度的岩浆储库串联起来,并通过无数岩床的堆垛而形成巨大的岩株或岩基等侵入体.高分异花岗岩和高硅流纹岩的存在,尤其是火山的超级喷发现象,要求岩浆储库的晶粥体发生活化和分异,而晶粥的解体往往是由于从下部侵入的新岩浆注入了额外的热和流体.保留在岩石中的晶体种群蕴含了侵入体累积组装、晶粥活化和岩浆分异的线索.尤其是再循环晶可以提供岩浆通道系统结构和演变的新信息.未来,在花岗岩成因研究中,重点要从晶粥活化与岩浆分异演化过程、岩浆上升和组装机理、火山岩与侵入岩的成因联系等方面入手,开展岩浆通道系统的跨学科研究,构建花岗岩岩浆过程研究的新范式,深入认识大陆地壳的生长和演化机理.

关键词: 晶粥;岩浆储库;岩浆通道系统;冷储存;累积组装;花岗岩类.

中图分类号: P581;P313;P317

文章编号: 1000-2383(2020)12-4332-20

收稿日期: 2020-08-24

Crystal Mush Storage, Incremental Pluton Assembly and Granitic Petrogenesis

Ma Changqian^{1,2}, Zou Bowen¹, Gao Ke¹, Wen Xia³

1. School of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China

Abstract: Storage, migration and differentiation of granitic magma in the crust are the basic processes leading to the growth and evolution of continental crust. Studies of magma storage and assembly in the crust over the past decade have challenged traditionally-held views of magma chambers as large, molten melt bodies. Geophysical exploration, petrological and mineralogical studies, and thermal history simulations in active volcanic areas have consistently demonstrated that the material in magma reservoirs is mainly crystal mush residing under sub-solidus temperature conditions for a long time and remaining in relatively cold storage. The large plutons outcropping on the surface today represent fossil magma reservoirs. Most of them were formed by multiple additions and incremental assembly of magma over a span of millions of years or even longer. The incremental assembly of

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41972066).

作者简介: 马昌前(1958-),男,教授,博士,主要从事岩石学、花岗岩地质学和岩浆动力学教学与研究工作. ORCID: 0000-0002-1778-0547. E-mail: cqma@cug.edu.cn

引用格式: 马昌前,邹博文,高珂,等,2020.晶粥储存、侵入体累积组装与花岗岩成因.地球科学,45(12):4332-4351.

plutons can be proved by observation of contact relationships between intrusive units, heterogeneity of rock and mineral compositions, and large timescales of pluton emplacement. The intrusion of large plutons in a shallow crust and large-volume volcanic eruptions require the existence of transcrustal magma plumbing systems in which magma is connected by a series of dykes to magma reservoirs at different depths, and huge stocks and batholiths are assembled by stacking of numerous sills. The existence of highly-fractionated granites and high-silica rhyolites, and especially the phenomena of super-eruptions require the reactivation and differentiation of crystal mush in magma reservoirs. The disaggregation of crystal mush is often due to a fresh magma intrusion from below injecting additional heat and fluid. The crystal cargo can provide clues to the pluton assembly, crystal mush rejuvenation and magma differentiation. In particular, antecrysts can provide new insights into the evolution of magma plumbing systems. In future, the study of granitic petrogenesis will focus on crystal mush rejuvenation and magma differentiation, the mechanisms of magma rise and assembly, the genetic relationships between volcanic rocks and intrusive rocks, and interdisciplinary research on magma plumbing systems, in order to construct a new paradigm for the study of granitic magma processes, and in-depth understanding of the growth and evolution mechanisms of continental crust.

Key words: crystal mush; magma reservoirs; magmatic plumbing system; cold storage; incremental assembly; granitoids.

0 引言

在汇聚板块边缘,花岗质熔体的提取、岩浆的上升和侵位代表了从大陆下地壳到上地壳的热和质量的大幅度转移的过程(Brown, 2007). 自从 18 世纪后期 James Hutton 提出侵入作用的想法之后,大陆上出露最多、体积巨大的花岗岩体(即侵入体)的形成机制就一直是地质学家热烈讨论的话题. 最近 100 多年来,地学界一直把巨大的花岗岩体当成是“冻结”的岩浆房,认为现在出露地表的侵入岩体在岩浆活动期间是一个如同水库一样的岩浆房,其中充满了可以流动的岩浆(Daly, 1933). 在 20 世纪的大部分时间里,地壳岩石为大体积的岩浆腾出空间的方式一直是地质学家面对的挑战性问题(Pitcher, 1993; 翟明国, 2017). 正是基于地壳内存在大型岩浆房这一假说,岩石学家在研究侵入体时,除了考虑源区性质和部分熔融程度的影响外,大都把侵入体内部岩石和矿物成分的变化归结为岩浆房内的分离结晶、岩浆混合、岩浆同化与分离结晶(AFC)等过程. 同时还认为,侵入体大都是单一岩浆房固结而成的岩体,而液态的岩浆房又直接为大型超级火山的喷发提供了物质.

然而,最近 20 多年来,发现有很多现象用经典的岩浆房模式难以解释,也没有找到大型岩浆房存在的证据(马昌前和李艳青, 2017; Jackson *et al.*, 2018). 目前,地学界正在形成一个新的共识,就是地壳内的岩浆储库,主要物质是“晶粥”(crystal mush)(Reid, 2003; Bachmann and Bergantz, 2004). “晶粥”是高含量的晶体(晶体含量在 40%~60% 以上)和晶间熔体组成的混合物,它们的活动性较弱,不容易流动,也

不会直接引起火山喷发. 因此,这种主要由晶粥组成的岩浆储库模型可以简称为晶粥储库模型. 在这样的岩浆储库内,局部可能存在以熔体为主的岩浆房,但体积较小(宽度 < 1 000 m)(Cashman *et al.*, 2017; 马昌前和李艳青, 2017). 即使在超级火山喷发前有可能存在大型的岩浆房,其存在的时间也很短(Druitt *et al.*, 2012; Wotzlaw *et al.*, 2014).

许多侵入体在结构和成分上都是不均匀的,显示出不同程度的分带性(王涛等, 2020). 年代学和岩石学资料显示,大型的侵入体和岩浆储库是由若干次小的岩浆脉冲侵位和累积组装(incremental assembly)而成的(Coleman *et al.*, 2004; Glazner *et al.*, 2004; Annen, 2011). 多数带状深成岩体,都可能属于复式岩体,它们并非由巨大的岩浆房冷凝而成,而是岩浆多批次脉动添加的产物.

大型侵入体究竟是由大体积的岩浆房固结而成,还是多批岩浆逐渐聚积组装而成的,这是岩石学和构造地质学的一个核心科学问题,因为它涉及如何认识地壳的组装方式,如何解释侵入体内外的组构关系,也涉及岩浆如何产生以及岩浆系统如何发生化学演化的问题(Coleman *et al.*, 2004). 如果晶粥模型和侵入体累积组装机制成立,就会挑战地学界沿袭上百年的“大水库式”岩浆房模型,对建立在岩浆房基础上的分离结晶、岩浆混合等成因模式以及底辟作用等侵位机制也必然会提出质疑(Glazner *et al.*, 2004; 马昌前和李艳青, 2017; Jackson *et al.*, 2018).

本文重点综述了晶粥储存、侵入体累积组装以及晶粥活化机理. 在此基础上,分析了火成岩矿物成因类型的多样性,讨论了花岗岩类成因研究的新挑战,并初步探讨了花岗岩类研究的一些新方向.

1 晶粥与岩浆的冷储存

在本文的讨论中,我们把晶体含量较少($<40\%$),主要由具有活动性的熔体组成的岩浆库称为岩浆房,而把主要由晶粥组成的岩浆库称为岩浆储库(图 1).

地壳中的花岗质晶粥体可以在比喷发时的岩浆温度低 $200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下长时间储存,一般处于固相线以下的温度条件(约 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下),即属于冷储存.根据石英温度计计算,有些岩体中石英的结晶温度为 $474\sim 561\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ackerson *et al.*, 2018).由于晶粥的晶体含量高,储存温度低,流动性差(粘度大),难以发生大规模的流动,不能直接为火山喷发提供物质(Burgisser and Bergantz, 2011; Cooper and Kent, 2014; Jackson *et al.*, 2018).只有当大量岩浆从深部涌入或有高温物质注入时,岩浆才能维持固相线以上的温度条件(Cashman *et al.*, 2017; Szymanowski *et al.*, 2017).在这种情况下,原先小的岩浆房体积就可能增大,当岩浆房达到一定规模后,岩浆储库就快速活化.有些人认为,即使地壳内存在大的岩浆房,也不会停留很长时间(有的推测只停留数十天到数月;Druitt *et al.*, 2012; Wotzlaw *et al.*, 2014).

有哪些证据可以证明深部存在着晶粥体呢?

考察活火山区之下的岩浆储存状况,最有可能提供岩浆系统的有说服力的证据.

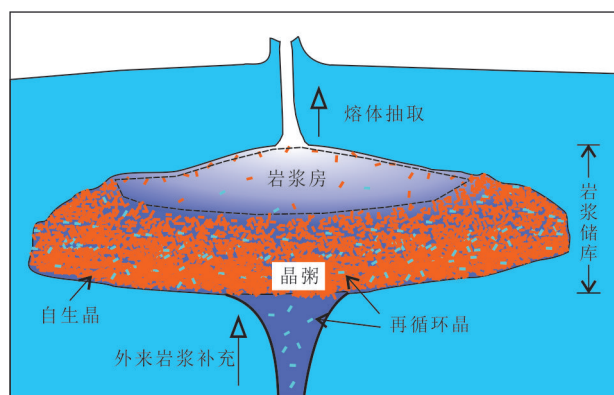


图 1 岩浆储库与岩浆房关系示意

Fig.1 Schematic diagram showing the relationship between a magma storage and its magma chamber

再循环晶和自生晶的解释见第 3 节,再循环晶是岩浆从深部储库中抠出来的同一岩浆系统稍早结晶的矿物随新岩浆上升进入上面的岩浆储库中的

1.1 活火山区的地球物理证据

由于火山喷发预测和危害评估的需要,目前在许多活火山区开展了地球物理学、大地测量学、岩石学、火山学等的多学科研究,取得了丰富的资料.世界各地的研究表明,即使在活火山之下,地震波速一般也仅降低百分之几,换算出的熔体含量比较低(Glazner *et al.*, 2004),一般不超过 25% .

尽管地震波速与熔体分数之间的关系与系统中熔体的几何形状密切相关(例如,Hammond and Humphreys, 2000),但地震波速实验研究(例如, Murase and McBirney, 1973; Sato *et al.*, 1988)和解析计算(例如, Mavko, 1980; Hammond and Humphreys, 2000)都表明,压缩波速度降低的百分比通常大于或等于部分熔融体的百分数(Waite and Moran, 2009).Hammond 和 Humphreys(2000)的研究表明,在上地幔,熔体体积如果达到 2% ,就可以使地震波 V_p 降低 $\sim 7\%$, V_s 降低 $\sim 16\%$.由于 S 波只能在固体中传播,不能在液相中传播,如果深部存在以熔体为主的岩浆房,应能发现 V_s 的阴影区.但事实上,在几乎所有的活火山区,都没有发现过这种阴影区,甚至连大 V_p/V_s 值的异常区都罕见,表明深部不存在大的岩浆房.以下是一些探测的例子.

北美西北太平洋地区的岩浆活动是太平洋板块俯冲、微板块相互作用、板块边缘以东的地幔柱活动等共同引起的.该区从北内华达裂谷(NNR)向东北方向沿着蛇河平原东部形成了黄石热点轨迹,岩浆活动年龄从老变新:即从西南部高岩杂岩的 16.6 Ma 、麦德米特的 15.6 Ma 、向东北的海斯火山区 6.6 Ma 和黄石破火山口的 $2.1\sim 0\text{ Ma}$ (Khatiwada and Keller, 2017).过去 210 万年来,黄石火山每隔 60 多万年便会有一次指数超过八级的超级爆发.64 万年前的超级喷发产生了 40 km 宽、 60 km 长的黄石破火山口.之后又有 30 次较小的流纹岩流喷发,而最新的喷发发生在 7 万年前.由于它是地球上唯一活跃的超级火山,近期出现了广泛的地震、极高的热流、巨大的大陆热液系统以及 2004 年开始出现地表的快速隆升(Chang *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2015).因此,黄石地区近期会不会发生新的超级喷发,就成为广泛关注的问题.新近在该区的地球物理勘察确定了两个低速体,分别位于上地壳($5\sim 16\text{ km}$ 深处)和下地壳($20\sim 50\text{ km}$ 深处),认为它们分别代表了流纹质和玄武质的岩浆储库,估算的熔体含量分别为 19% 和 5% ,平均温度分别为 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$

和 1 100 °C, 估算的岩浆储库体积分别为 46 000 km³ 和 10 000 km³ (Huang *et al.*, 2015; Jorgensen and Zhdanov, 2019).

位于太平洋东北的 Juan de Fuca 脊与科布—艾克尔伯格海山链交汇处附近的轴向 (Axial) 活火山, 1998 年曾喷发过. 利用三维地震速度结构模型, 在破火山口下方 2.5~3.5 km 处, 确定了一个大小为 8 km×12 km、体积达 250 km³ 的岩浆储库, 其熔体含量为 5%~25% (West *et al.*, 2001).

美国华盛顿州西南部的圣海伦斯层火山具有 30 万年的喷发历史, 尤其是在 1980 年 5 月 18 日大喷发之后, 就对该区开展了深入的地质和地球物理研究. 地球物理资料分析表明, 在该破火山口之下 1~3 km 深处, 存在地震波低速异常区, 岩浆储库中的熔体含量可能只有 5% (Waite and Moran, 2009), 而中地壳内的高导电率说明, 其中存在 ~2%~12% 的相互连通的熔体 (Hill *et al.*, 2009).

南美安第斯山中部的 Altiplano-Puna 地区, 在 11~1 Ma 间形成的火山杂岩体之下, 还存在大体积 (~500 000 km³) 的地震低速带, 其深度为 4~25 km, 地球物理勘探结果换算的熔体含量最高可达 25% (Ward *et al.*, 2014).

冰岛形成于大洋中脊, 由于地幔柱的作用而抬高到了海平面之上. 在西、东和北火山带都有活火山分布. 新近对北火山带内的 Askja 破火山口进行的微地震成像研究表明, 在 6~11 km 深处存在一个比背景低 8%~12% 的低速异常区, 宽度大约 6 km. 由于没有显示大的 V_p/V_s 值, 故推测该低速异常区是一个温度较高、但处于固相线之下的岩浆储库 (Mitchell *et al.*, 2013).

总之, 世界各地活火山的探测确定的岩浆储库, 其中的熔体含量整体上低于“流变学临界熔体百分数”的值 (40% 的熔体; 马昌前等, 1994), 表明都属于粘度大、晶体含量高的晶粥状态.

1.2 热历史和岩石学证据

岩浆的热历史在很大程度上控制了岩浆的结晶度和喷发能力. 因此, 定量确定岩浆储库内的热状况及其随时间的演变, 对于确定岩浆在喷发前储存于何处以及储存了多长时间至关重要. 晶体化学和热状态的研究都表明, 岩浆在储库中长时间处于固相线下的温度条件 (Cooper and Kent, 2014; Andersen *et al.*, 2017; Rubin *et al.*, 2017; Szymanowski *et al.*, 2017). 在这样的储存条件下, 只有新的高温岩

浆注入到储库内, 使储存在近固态条件下的富晶体的岩浆发生活化, 才能达到可喷发的条件 (Cooper and Kent, 2014). 反过来, 已经喷发到地表的大体积火山岩, 对应的岩浆就可能曾经短时间处于较高的温度条件下.

有人认为, 单纯采用地球物理方法换算出的熔体含量往往偏低. 岩浆储库越小, 埋深越大, 越难检测到岩浆储库的存在. 因此, Paulatto *et al.* (2012) 把地震层析成像技术、岩浆房的数值模型以及岩石学和大地测量学资料结合起来, 获得的小安的列斯群岛一个活火山下岩浆储库的熔体含量达到了 30%, 而由地震速度异常估计的熔体分数只有 3%~10%.

美国俄勒冈州 Hood 山曾经在 1 500 年和 220 年前发生过喷发 (Scott *et al.*, 1997). 大量的证据表明, 由于上升的镁铁质岩浆注入到地壳浅部的流纹英安岩—流纹岩岩浆体中而产生了安山岩的喷发 (Kent *et al.*, 2010). 利用 U 系不平衡获得的时间尺度, 结合晶体大小和微量元素环带研究, 证明该火山深部的岩浆在整个储存期内温度高于活化条件 (即结晶度小于 60% 的晶粥活化临界条件) 的时间不到 12% (Cooper and Kent, 2014). 这同样证明, 可以喷发的大型岩浆体存在的时间很短. 甚至有学者认为, 倘若地球物理成像能检测到岩浆储库内存在有液态的岩浆, 就意味着火山即将喷发了 (Cooper and Kent, 2014).

Rubin *et al.* (2017) 将单晶锆石环带的 ²³⁸U-²³⁰Th 原位测年与同一晶体的 Li 浓度的扩散年龄计相结合, 获得了结晶作用的绝对年龄和晶体停留的时间. 对新西兰陶波火山区奥卡塔纳火山中心的 Kaharoa 火山 (700 年前喷发了 5 km³ 的物质) 中的 7 个锆石晶体进行了热历史研究, 发现锆石在岩浆系统中停留了 10³~10⁵ 年, 但它们在温度高于 650°~750 °C 的条件下停留的时间只有数年至几个世纪. 这说明, 晶体是在近固相线的岩浆储库中长期储存, 但有几次发生过快速加热, 反映了岩浆储库受到了新的岩浆的多次脉动和加热的影响.

副矿物精确测年和微量元素温度计计算可以提供岩浆储库演化过程的信息, 进而判断岩浆在地下的储存条件和热活化过程 (Szymanowski *et al.*, 2017). 美国新墨西哥州西部的 Kneeling Nun 凝灰岩喷发是地质历史上 10 个超级火山喷发之一 (Mason *et al.*, 2004), 估计的火山岩体积达 900 km³. 始新世—渐新世时期的超级喷发产生了低硅—高硅流

纹质熔结凝灰岩席,其中的晶体含量平均为 30%~40%。该火山岩中的透长石和榍石记录的溶解-重结晶旋回,表现为明显的晶体环边包围了被溶蚀的晶核,其中,透长石的环边富 Ba, Sr, Ti, P 和 REE 元素,而榍石的环边富 REE, Sr, Ba, Zr 等元素,认为这是喷发前岩浆储库发生过再加热事件的反映;结合锆石和榍石 Ti 温度计,认为这些岩浆物质长时间处于冷储存状态(Szymanowski *et al.*, 2017)。大量对比表明,富含晶体的岩浆储库,只有发生晶粥活化,才会有火山喷发。

岩浆能在地壳中停留下来,正是多批次侵位的小体积岩浆活动性减弱的结果。这时,岩浆系统的晶体含量增加,粘度和屈服强度增大。花岗岩浆系统的低温储存和结晶,可能主要与岩浆上升演化中产生的熔体成分(例如,富碱、富水的硅酸盐熔体)和热梯度有关,而这种条件,正是在多批次侵位和累积组装下实现的(Ackerson *et al.*, 2018)。

2 岩体多次侵位与储库累积组装

早先,把花岗岩体的产生归结为相对独立的 4 个阶段,即岩浆的生成、分凝、上升和侵位(Petford *et al.*, 2000)。关于岩浆的侵位(emplacment),目前还没有一致的定义。在 1983 年地质出版社出版的《英汉地质词典》中,将侵位解释为“侵入并定位”,这与 Petford *et al.* (2000) 定义的岩浆从向上的运动转换为水平流动的过程基本相当。但是,也有一些其他的提法。例如, Horsman *et al.* (2009) 就将侵位描述为岩浆开辟空间的机制,而把岩体从小到大的生长过程称为组装(assembly)。有些文献把侵位与组装当作两个过程来分别讨论(例如, McNulty *et al.*, 1996; Horsman *et al.*, 2009),前者强调岩体获得占位空间的力学机制,后者指的是岩浆在储库中的充填和排列方式,并可以从侵入体内的明显接触关系、岩性的多变性和岩石地球化学的变化反映出来(Clemens and Birch, 2012; Farina *et al.*, 2012)。换句话说,由同种侵位机制产生的侵入体,其内部的岩石既可以是一次脉动的产物,也可以是多次脉动的结果,而多次脉动就表现为不同的组装和充填方式(见 Horsman *et al.*, 2009 文中图 1)。

按照岩浆在侵位中的作用,可以分为强力侵位(forceful emplacement)和被动侵位(passive emplacement)两种类型(Stevenson, 2009)。当岩浆供应的速率超过了空间产生速率时,发生强力侵位。这时,主

要依靠岩浆的构造超压,使围岩变形,将围岩推开,为岩浆储库的形成提供空间。岩浆的构造超压(或称为岩浆的附加压力)是超出围岩静岩压力的那一部分压力,通常由挥发分的聚积和岩浆浮力等引起。当岩浆的附加压力与围岩的静岩压力之和大于围岩的抗张强度和最小挤压主应力之和时,岩浆就会上侵(马昌前等, 1994; Gudmundsson, 2020)。当最小挤压主应力为水平方向时,形成垂直的岩墙;最小挤压主应力为垂向时,形成近水平的岩床(Gudmundsson, 2020)。周口店岩体所发生的热气球膨胀侵位(马昌前, 1988)就属于强力侵位。相反,当岩浆供应速率小于构造引起围岩张开的速率时,发生被动侵位,岩浆会被动充填到张开的空间中,而不会把围岩推开(Hutton, 1988)。火口沉陷(或称顶盖沉陷, cauldron subsidence)就是一种典型的被动侵位机制:当岩浆喷出到地表后,岩浆储库上方发生火口沉陷,大块的围岩下沉到岩浆储库中,岩浆储库中的岩浆就会上升充填到下沉岩块所腾出的空间内。

越来越多的证据表明,火成岩体大多是由分散的小侵入体多次添加、先后聚集而成的,称为累积组装(incremental assembly)过程。现在认识到,产生花岗岩体的 4 个阶段其实难以截然分开。在开始熔融后不久,就可以发生分凝和上升。很多花岗岩体是由地幔热引起的连续熔融过程中,熔体分凝、上升、侵位循环出现而发生多次组装的产物(Vigneresse, 2007)。对北美西部中生代科迪勒拉的许多侵入体的野外和地质年代学研究就表明,这些岩体在 $>10^6$ 年的间隔期间,都是由小批次的岩浆逐渐生长和固结的,在侵入体生长和岩基组装的任何阶段,都不存在体积巨大的可以喷发的(“大水库”式)岩浆体(Lipman, 2007)。

2.1 大岩体和岩浆储库多次累积组装的证据

大岩体或为超级火山提供物质的岩浆储库,一般都是岩浆多次侵位和组装的产物。

2.1.1 野外证据 从岩体内部各单元之间的接触关系、岩体中出现的岩浆组构及多期构造变形组构、晚阶段岩石单元中存在早阶段单元的捕虏体、围岩中变斑晶的多期生长等方面,都可以提供岩浆累积组装的证据。这里重点讨论岩体内部的接触关系。

多期次累积组装的识别主要靠侵入岩各单元之间接触关系的观察。多批次的岩浆注入意味着相邻的脉动岩浆之间存在一个接触边界,其清晰程度取决于两次脉动的时间间隔和岩浆侵位深度(与固

结速率有关)(王涛等,2020).明显的接触关系多半是存在成分差异、温度差异和应变差异引起的.岩体内部单元之间的接触关系以及矿物内部存在的成分环带,都被看成是岩浆累积组装的标志(Farina *et al.*,2012).过去根据单元之间的渐变关系划分岩相,认为代表了岩体内部的分异现象.其实,两种岩性的渐变关系也同样可能是先后脉动的产物,只是两批岩浆的侵位时间间隔较短而已.由于先后的两批岩浆温差不大,侵位后在边界附近就可能发生混合而导致界线的模糊.由于侵入体体积的增大,或不同批次岩浆之间相隔的时间较短而发生相互作用,接触关系就变得越来越隐蔽.在地壳深处,围岩温度高,岩体散热慢,它们出露地表后显示的接触关系也比较隐蔽,往往难以观察到多次组装的证据,但这并不意味着没有发生过多次的脉冲组装.

2.1.2 年代学证据 岩体各单元有不同的结晶年龄,岩体侵位的时间跨度远大于岩体冷凝的时间范围,也是岩体多次累积组装的证据(马昌前和李艳青,2017).根据热模拟结果,中上地壳侵入体冷凝较快,1 000 m宽的侵入体冷凝到固相线只需要近万年的时间,而更大的侵入体也只要数十万年就能冷凝到固相线的温度条件(Jaeger,1957;Stimac *et al.*,2001).然而,很多花岗岩体的年龄跨度可以达到数百万年,远远超过了中上地壳同体积岩浆体固结所需的时间.

美国加州 Tuolumne 侵入岩套出露面积约 1 200 km²,是内华达山脉晚白垩世时期巨大的带状侵入岩套之一.这些侵入岩套外部均为富镁铁质的花岗闪长岩,向内渐变为花岗岩.根据锆石 U-Pb 定年结果,整个侵入岩套岩浆活动时代介于 95~85 Ma,持续时间达 10 Ma.热模拟表明,半径为 10 km 的花岗闪长岩成分的岩浆房只需要不到 1 Ma 就能通过传导冷凝到 700 °C 以下而固结,如岩浆房同时还发生对流则冷凝更快.由于 700 °C 远低于锆石中 Pb 的封闭温度(>900 °C).如此规模的岩体的固结时间一般都小于 1 Ma.而测得的其中一个花岗闪长岩单元的侵位时间跨度为 4 Ma(Coleman *et al.*,2004;Matzel *et al.*,2006).这就证明,即使是大岩套中的一个侵入单元,也不是单一的岩浆房固结产生的,而是由多个更小的岩浆体聚合而成的.

对 Tuolumne 岩套各单元之间接触关系的观察表明,既存在截然接触关系,也有渐变关系,但这两种情况对应的单元之间的年龄差的大小不同.具有渐变接触关系的单元之间年龄相差很小或没有差

别;而截然接触者往往相邻岩石的年龄存在明显差异.例如,在 Tuolumne 岩套内 Kuna Crest 花岗闪长岩和 Half Dome 花岗闪长岩的接触关系是渐变的,界线附近获得的两单元的锆石 U-Pb 年龄几乎无法区分,分别为 93.5±0.7 Ma 和 92.8±0.1 Ma.在优胜美地山谷中,可观察到外部的英云闪长岩(91.7±0.2 Ma)与 Half Dome 花岗闪长石之间具有截然接触关系,二者的年龄相差就大一些(Coleman *et al.*,2004).

美国犹他州南部亨利山脉的闪长玢岩,包括了 5 个岩浆侵入中心,每个中心分别以岩盖、岩栓、岩床等形式产出,每个岩体内部又可以分解出多个相互连接、几何形态多样的较小的岩席等侵入体.该区是当年 Gilbert(1877)率先开展火成岩侵位机制研究并命名“岩盖”(laccolith)的地方.由于这些侵入体体积小,侵位浅,冷凝快,岩浆的流动样式、岩体的内部结构和几何形态都得以保留,由此提供了多次脉冲组装的证据.它们的形成年龄介于 30~21 Ma,形成的年龄跨度达到了 9 Ma(Horsman *et al.*,2009).

2.1.3 矿物成分的多变性 钾长石巨晶在很多花岗岩类岩体中都能见到.钾长石巨晶的自形形态、韵律成分环带、矿物包裹体的定向排列、巨晶排列显示的岩浆组构等,都说明这些巨晶是岩浆成因的(例如,马昌前和王人镜,1990;Moore and Sisson,2008).Chambers *et al.*(2020)对采自 Tuolumne 侵入岩套内部 Half Dome 单元和 Cathedral Peak 单元界线附近的钾长石巨晶进行了锆石包裹体 U-Pb 年代学和微量元素分析,发现巨晶核部的锆石年龄比巨晶边部的锆石年龄老 0.5 Ma,而边部的锆石年龄又比基质中锆石的年龄略老.巨晶核部的年龄与 Half Dome 单元年龄相匹配,巨晶边部和基质的年龄与杂岩体内较年轻的 Cathedral Peak 花岗闪长岩单元的年龄相重叠.在微量元素方面,巨晶核部和边部的锆石中的微量元素特征与基质锆石中的特征基本相似,但前者具有更演化的(低的 Zr/Hf)微量元素特征.这些现象表明,巨晶可能在 2 次以上的侵入事件中持续生长,随着岩浆系统演变,晶体可以从老单元循环进入到较年轻的岩浆中继续生长.

Wotzlaw *et al.*(2014)对黄石高原火山区的研究表明,凝灰岩中的锆石显示了明显的晶间和晶内的氧同位素组成的不均一性,认为这些锆石是从同位素组成明显不同的岩浆中结晶出来的.因此,锆石的同位素不均匀性也是岩体累积组装的证据.而这样的钾长石巨晶和锆石,其实都是后面要详细讨论

的再循环晶。

2.2 岩体的复合侵位机制与岩浆通道系统

Petford *et al.* (2000) 认为, 岩浆从向上运动转换为水平流动的过程主要受岩浆与围岩的力学相互作用(例如, 岩浆进入到了原有的围岩构造或岩浆侵位产生的围岩构造中)以及岩浆与围岩之间的密度差共同控制的。

Wang *et al.* (2000) 在对秦岭造山带灰池子花岗岩体的研究中提出, 该岩体的多期次侵位包含了围岩韧性压缩、围岩刚性位移和岩浆侵吞三元复合机制, 对岩体侵位空间的贡献分别占 20%、19%~31% 以及 37%。

爱尔兰西北的 Rosses 花岗质杂岩体, 是晚加里东期(约 400 Ma) 多内加尔岩基的一部分。该杂岩体出露面积约 200 km², 是由 4 次岩浆脉动形成的嵌套式侵入体(Pitcher, 1993), 4 个单元之间都有明显的接触关系, 接触带产状以内倾为主, 倾角 40°~80°。岩体首先通过东部的主剪切带上升, 然后横向注入到剪切带的壁部, 是一个经历了从强力侵位到被动侵位转换的典型实例。其中, 前两次是岩浆从东向西横向强力侵位, 而后两次的岩浆属于被动侵位。侵位机制从强力到被动的转换可能是在东西向的伸展应变场中岩浆供给量减少的结果(Stevenson, 2009)。

很多非岩席状的大岩基, 内部成分相对均一, 很难找到多期次脉动的接触关系(Žák *et al.*, 2012)。有的认为这主要是由于岩浆成分相对均一(Lipman *et al.*, 1997), 或整个岩体内的岩浆面理和线理产状连续统一(Žák *et al.*, 2007) 而难以识别造成的。但也有人提出了其他的机制, 例如岩浆储库顶部的快速顶蚀, 伴随着顶板隆起, 弱岩性中的韧性流动, 有助于大部分无岩席状的大型岩基在上地壳的侵位(Žák *et al.*, 2012)。

总之, 由于岩浆与围岩物性的变化以及岩体侵位的区域在构造体制上的变化, 很多延续时间较长的侵入体的侵位就会受不同的因素控制, 从而经历不同的侵位过程。很多大型火成岩体, 是在数百万年甚至更长的时间跨度内, 多次岩浆运输、添加、累积侵位而成的(Petford *et al.*, 2000; Michel *et al.*, 2008)。由于晶粥流动性很差, 具有相当于宾汉体的流变学行为(马昌前等, 1994), 只有向晶粥储库注入更热的岩浆或挥发分, 降低岩浆粘度, 增加熔体含量, 冷藏的晶粥才会活化(Cooper and Kent,

2014), 引起岩浆的进一步分异, 促进成矿的发生, 甚至触发超级火山的喷发。可见, 晶粥活化不仅是岩浆分异和地壳演化的基本方式, 也是成矿发生和火山爆发的前提。

岩体的多次累积组装和复合侵位机制意味着深部存在多个岩浆储库, 能先后从下向上提供多批次的岩浆。在造山带, 花岗质岩浆从深熔的源区到侵位层次的距离是多变的, 但一般不会超过 30 km, 而深熔源区的厚度往往小于 20 km(Brown, 2007)。现在把岩浆活动期间从岩浆源区向浅部延伸、由岩浆管道和岩浆—晶粥储库(岩浆房)构成的相互连通的网络(图 2)称为岩浆通道系统(magmatic plumbing system)(Ma *et al.*, 1998; Gudmundsson, 2012; Cashman *et al.*, 2017)。岩浆通道系统既起输运岩浆和流体的作用, 也是岩浆/晶粥储存和演化的场所(Tibaldi, 2015; Magee *et al.*, 2018)。古老岩浆通道系统是由垂向的岩墙(脉)、水平的岩床(盖)、倾斜的岩席及破火山口杂岩等构成的网状集合体(Burchardt, 2018), 也包括由若干小岩床堆垛而成的岩株和岩基。

岩浆的多层次储存是岩浆通道系统的重要特征。在地壳中上升的岩浆, 由于中性浮力面的出现、

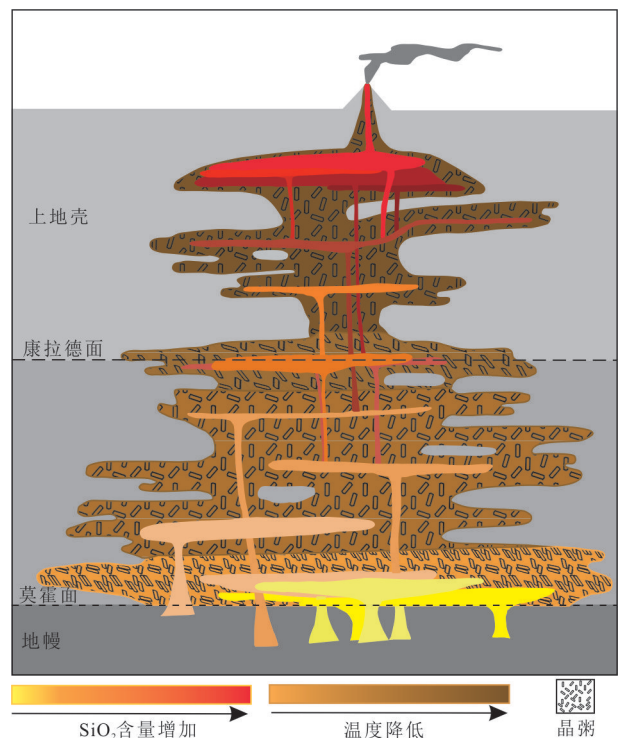


图 2 岩浆通道系统模型图(据 Cashman *et al.*, 2017 修改)
Fig.2 Model of a magma plumbing system (modified from Cashman *et al.*, 2017)

地壳和岩浆流变学性质的变化以及构造体制的转变(Brown, 2007),就可能先后多次侵位,在纵向上形成了多个岩浆储库(Magee *et al.*, 2018).在地壳的不同深度上,有的岩浆通道系统出现7~14个岩浆储库(Tibaldi, 2015; Morley, 2018),且储库深度会随时间变化(Caracciolo *et al.*, 2020),但有的岩浆通道系统储库很少(Holt *et al.*, 2014).根据岩石学和地球物理的估算结果,9个活火山区中酸性岩浆在地壳内的储存压力介于3.5~1.3 kbar,平均储存压力 2.0 ± 0.5 kbar(Huber *et al.*, 2019).岩浆在中地壳内的堆积时间最长、形成的岩体面积最大(Ratschbacher, 2017).

3 晶粥活化与晶体种群

由于与大型火山喷发相连的岩浆储库主要由晶粥组成,富含晶体的岩浆要发生喷发,首先要使储存在近固相线下的岩浆发生活化(Cooper and Kent, 2014).关于晶粥活化机制,目前还有很多争论,没有取得一致的看法.提出过晶粥压实(crystal-mush compaction; Philpotts and Philpotts, 2005)、气体喷射(sparging model; Bachmann and Bergantz, 2006)、解压(unzipping model; Burgisser and Bergantz, 2011)、屈服面模型(yield surface model; Karlstrom *et al.*, 2012)、热力学方式(thermomechanical mode; Huber *et al.*, 2011)、反应性熔体流动(reactive melt flow; Jackson *et al.*, 2018)以及热和水运输的局部活化(Zou and Ma, 2020)等多种模型.这些模型大都把更高温、更具活动性的新岩浆(多数是镁铁质岩浆)注入到岩浆储库作为晶粥活化的动因(Parmigiani *et al.*, 2014),并可概括为三类机制:一是深部上来的基性岩浆对晶粥加热,使长英质晶粥中的矿物溶解,熔体含量增大(Burgisser and Bergantz, 2011; Tapster *et al.*, 2016);二是基性岩浆注入到晶粥时,提供挥发分,增强活动性(Bachmann and Bergantz, 2006);三是深部向晶粥注入岩浆的同时,带来的热和挥发分使系统中的熔体含量增大,晶粥粘度降低,对晶粥起活化作用(Huber *et al.*, 2011; Parmigiani *et al.*, 2014).推断火山喷发前岩浆储库的条件和晶粥活化的机理,一个重要的切入点就是岩浆岩中矿物的精细研究.

晶粥的活化与晶粥分异既可能属于同一个过程,也可能是完全不同的过程.如果新岩浆(流体)的注入和加热导致晶粥体的粘度降低、整体的活动

性增大,则晶粥在活化过程中就没有分异作用的发生.反之,如果通过晶粥的分异而把晶粥体中的熔体全部或部分提取出来(晶间熔体的聚积),导致活动性的增强,则该活化过程也是分异的过程.

晶粥分异涉及晶体与其共生的熔体的物理分离(Pistone *et al.*, 2015).在浅部岩浆储库内,在高结晶度($\geq 70\%$ 的晶体,体积百分含量)下缓慢发生的压实作用(Jackson *et al.*, 2003)以及在中等结晶度(40%~50%晶体,体积百分含量)的受阻沉降(hindered settling,即晶体在稠密的悬浮液中的沉降)(Bachmann and Bergantz, 2004),都会由于熔体相中挥发分的聚积和随后因出溶而引起的压滤作用(Sisson and Bacon, 1999),提升岩浆分异的效果.

新的熔体注入到晶粥中,同时就带来了晶体和挥发分.深部带上的晶体遇到晶粥中的孔隙熔体后,会发生反应或调整成分;新上来的熔体和挥发分也会使晶粥中已有的晶体出现溶蚀、反应、增生而形成具有复杂结构或成分的晶体群.这些过程,都会造就岩浆岩中晶体种群和结构的多样性(罗照华等, 2013).归纳起来,岩浆岩的矿物有5大类(Jerram and Martin, 2008):(1)完全由寄主岩浆结晶而成的大颗粒“斑晶”和细小的“微晶”,统称为自生晶(auto-crysts),其特点是其成分与周围的基质(熔体)是完全平衡的.(2)主体结晶于同一岩浆系统的早期阶段、之后通过一次或多次的再循环被带到现在的寄主岩浆当中的晶体,称为“再循环晶”(ante-crysts,该词最早由Wes Hildreth于2001年在Penrose会议上提出),它们既属于现在所处的岩浆系统的一部分(例如,再循环晶与基质中的微晶等自生晶具有协同演变的晶体化学成分,这与捕虏晶不同),又与现在赋存的基质(代表最后的寄主岩浆)不平衡(这与捕虏晶相同)(Larrea *et al.*, 2013).当然,如果再循环晶进入到现在的寄主岩浆后又生长出新的幔边,则这种幔边与现在赋存的基质是平衡的(这时核部属于再循环晶,边部属于自生晶).一般,再循环晶生成早,对同源岩浆演化系列而言,再循环晶对应的岩浆温度较高,演化程度低,混染程度也低.我们的教科书上所称的“斑晶”应包括粒度明显比基质粗大的自生晶和再循环晶(图1).(3)从外部围岩中带入到岩浆系统的“捕虏晶”,它与周围的基质(熔体)不平衡.(4)源区熔融或地壳混染时发生转熔反应产生的“转熔晶”(有的译为包晶, peritectic crystals)(Clemens *et al.*, 2011; Stevens *et al.*,

2007; Erdmann *et al.*, 2009; Clemens and Stevens, 2012; 吴才来等, 2014). 形成转熔晶的典型反应是: 原生晶体±熔体 1→熔体 2+转熔晶±流体, 转熔晶的组合、结构和组成提供了被反应掉的先存晶体和反应过程的信息(Couch *et al.*, 2001). (5)多过程叠加产生的矿物(例如, 很多锆石核部属于再循环晶, 边部属自生晶; Beard, 2008; Miller *et al.*, 2007). 可见, 如果岩浆岩中存在捕虏晶、再循环晶或转熔晶, 其全岩成分就不同于岩浆成分, 更不等于熔体成分. 在对全岩成分演化趋势进行解释之前, 应该先进行岩石结构和晶体成因类型的深入研究(Luo *et al.*, 2018).

为了判断全岩成分的变化是不是因岩石中包含了较多的再循环晶所引起的, Latypov(2003)开发了一个数学模型. 对于一块由再循环晶和基质(代表晚期的寄主岩浆)组成的岩石, 某个元素 i 的分配可以表示为:

$$C_R^i = C_G^i(1 - \sum p) + \sum (C_A^i \times p), \quad (1)$$

其中, C_R^i , C_G^i 和 C_A^i 分别代表元素 i 在全岩样品 R、基质 G 和再循环晶 A 的浓度, p 是再循环晶 A 在样品 R 中的比例, 加和号表示与多种再循环晶矿物相关组分的加和. 如果全岩的成分变化是由再循环晶含量的变化引起的, 那么, 对不同的样品, 计算的 C_G^i 都应该接近或相同. 这时, 计算的基质成分就相当于捕获再循环晶的岩浆的成分. 由于很多矿物核部是再循环晶, 边部为自生晶, 故计算再循环晶的含量时, 应只计核部的部分.

再循环晶的认定可以从矿物化学入手. 第一, 由于再循环晶与自生晶都属于同一岩浆系统的产物, 因此, 不同粒度的同种矿物在成分协变图中有着共同的演变趋势(例如, 根据探针分析结果, 单斜辉石的 $Mg^{\#}$ vs. Cr, 或 Al vs. Ti 呈现出线性关系); 第二, 如果这些晶体的成分与基质中同种矿物成分处于平衡状态, 属于自生晶, 如果不平衡, 就是再循环晶. 对于在同一岩浆系统中经历过两阶段甚至多阶段再循环而生长的晶体, 如果核部的成分与基质不平衡, 则核部就属于再循环晶, 而再循环晶外面的幔边部分若与寄主岩的基质平衡, 就相当于是自生晶成分. 对单斜辉石等镁铁质矿物, 可以用矿物与熔体之间的 Fe-Mg 来判断在估计的岩浆温度下结晶的矿物-熔体对是不是平衡的. 例如, 用岩石(基质)的 $Mg^{\#}$ (横坐标)对矿物的 $Mg^{\#}$ (纵坐标)作图(类似的图称为“罗得图”), 并利用分配系数来计算出图中矿物与熔体的平衡线. 单斜辉石-熔体的

分配系数 [${}^{cpx-melt}D_{Fe-Mg} = (Fe^{cpx}/Fe^{melt}) \times (Mg^{melt}/Mg^{cpx})$] 一般为 0.27 ± 0.02 (Mollo *et al.*, 2013). 当矿物的成分投入到平衡线上方或下方时, 属于不平衡, 投在平衡线上的就是平衡的自生矿物. Lerrea *et al.* (2013) 给出了大西洋中脊亚速尔群岛的研究实例. 对于长英质岩石中的钾长石, 可以用微量元素 Ba 来考察矿物与熔体的平衡性. 长石和硅酸岩熔体中 Ba 的分配, 主要取决于温度 ($T, ^\circ C$) 和熔体成分. 碱性长石-熔体分配系数 (D_{Ba}) (Iddon *et al.*, 2019) 可以表示为:

$$\ln(D_{Ba}) = 37.8 - 0.06NKA - 0.037T(^{\circ}C), \quad (2)$$

其中, NKA 是基质(熔体)的碱度 [$(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3, mol\%$]. 如果用岩石(基质)的 $Ba(10^{-6})$ (横坐标)对长石的 $Ba(10^{-6})$ (纵坐标)作图, 并根据式(2)计算的分配系数在图中绘出矿物与熔体的平衡线. 当矿物和岩石的 Ba 含量投入到平衡线上方时, 矿物与基质(熔体)属于不平衡, 投在平衡线上或线的下方时就是平衡的.

再循环晶的出现是岩体累积组装的证据. 在花岗岩的研究中, 再循环晶涉及最多的是锆石, 而对长英质火山岩, 涉及角闪石、斜长石、黑云母、磷灰石、榍石、磁铁矿等矿物. 由于再循环晶是从同源岩浆演化系列的早阶段熔体中结晶出来的, 它们应该具有更高的结晶温度, 更低的不相容元素含量. Heinen *et al.* (2016) 对芬兰古元古代晚期的环斑花岗岩中的锆石进行了研究. 他们用微钻技术从具有环斑结构的碱性长石巨晶中取出锆石包裹体后进行 U-Pb 定年和微量元素分析, 并与基质中的锆石进行对比, 发现作为长石巨晶中包裹体的锆石 U-Pb 年龄略老, 比基质中锆石的不相容元素 (U 和 REE) 含量更高, 而 Ti 的温度计获得的温度反而比基质中锆石的温度要低. 这些长石巨晶中的锆石确实可以看成是来自早阶段岩浆中的再循环晶, 基质中的锆石年龄代表了花岗岩的最终结晶年龄, 但由于与基质锆石平衡的熔体具有更高的温度、演化程度更低的成分, 暗示晚期注入到岩浆储库的熔体含有更多的幔源组分. 东昆仑白石崖花岗闪长岩的矿物学特征也证明了类似过程的出现 (Yin *et al.*, 2020). 显然, 在这种情况下, 环斑结构的碱性长石巨晶的核部也可能属于再循环晶.

国内学者在识别再循环晶方面取得了不少新进展(例如, Xu *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2014; Wei *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016;

Zhu *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; Feng and Zhu, 2018; Zhao *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019; Yin *et al.*, 2020). 文献中报道的再循环晶包括锆石、榍石、磷灰石、斜长石、钾长石、辉石、角闪石、黑云母、石榴石等.

一般说来,利用岩相学方法从花岗岩中识别转熔矿物是很困难的,这是由于,转熔晶颗粒细小,在岩浆上升和侵位过程中,很容易与岩浆重新平衡而消失.当岩浆上升时,熔体中水的溶解度降低,转熔长石就会溶解.随着温度降低和水活度的升高,镁铁质的转熔矿物就会与熔体发生反应,形成黑云母和角闪石(Clemens and Stevens, 2012).转熔晶报道最多的是S-型花岗岩或过铝质花岗岩、混合岩等(Erdmann *et al.*, 2009; Díaz-Alvarado *et al.*, 2011; Dorais and Tubrett, 2012),涉及石榴石、堇青石、黑云母、角闪石、锆石等矿物(Gao *et al.*, 2016; Xia *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018; 孟繁聪等, 2018).

总之,火成岩晶体种群的识别,对认识岩浆通道系统的形成过程和岩浆储库的累积组装机制,是十分重要的.

4 对火成岩成因理论的挑战

晶粥储库模型和多批次累积组装机制,对岩浆成因理论提出的挑战是多方面的,甚至会颠覆我们现成的火成岩成因研究范式.这里,择要列举如下.

4.1 岩浆分异演化的研究

火成岩岩石学中的一个关键问题是花岗岩类化学成分多样性的形成机制.许多岩石学模型都把大型岩浆体的冷凝、结晶分异、岩浆混合看成是地壳内的一个单一的岩浆体内发生的(即“大水库”岩浆房模式;例如, Huppert and Sparks, 1988),认为岩浆房主要由高熔融状态且容易流动的物质组成的,并假定岩浆侵位过程中熔体的含量高,侵位过程快,主要用侧壁结晶作用、分离结晶作用、岩浆混合作用来解释侵入体和相关火山岩的地球化学变异.但在晶粥储库内,这些岩浆过程的发生就受到了极大的限制,以往通过全岩地球化学分析推断的岩石成因机理就需要重新审视.

周口店岩体是岩浆多次脉冲热气球膨胀侵位的典型实例(Ma, 1989).该岩体平面近椭圆形,出露面积约 54 km².其主体岩性为花岗闪长岩,宏观上具有明显的 3 个同心圆状的岩相带.中央相为巨斑状

花岗闪长岩,其榍石 U-Pb 年龄为 130±5 Ma(Sun *et al.*, 2012),碱性长石巨晶含量较高,镁铁质暗色微粒包体较少;过渡相主要为中粗粒斑状花岗闪长岩,其榍石 U-Pb 年龄为 132±2 Ma(Sun *et al.*, 2012),暗色包体含量相对较少,也有碱性长石巨晶;边缘相为中粒石英二长闪长岩(榍石 U-Pb 年龄 132±2 Ma; Sun *et al.*, 2012),多见微粒闪长质包体和角闪辉长岩包体,且形态不一,成分繁多,也可见围岩捕虏体(马昌前等, 1992),闪长质包体中的榍石 U-Pb 年龄为 133±1 Ma(Sun *et al.*, 2012),花岗闪长岩和闪长质包体的年龄在误差范围内是一致的.边缘相之外,是断续分布、与花岗闪长岩有明显侵入接触关系的石英二长闪长岩(132±2 Ma; 张金阳等, 2013)和闪长岩单元.岩体的全岩地球化学与岩浆混合作用的特征完全相符,混合端元分别为花岗闪长岩(酸性端元)和二长辉长岩(基性端元)(马昌前等, 1992).Sun *et al.* (2010) 通过锆石 Hf 同位素、磷灰石 Sr-Nd 同位素和榍石 Nd 同位素识别出两套岩浆源区,分别为镁铁质富集地幔和中下地壳部分熔融的长英质组分,证明了参与混合作用的两端元的存在.

岩浆混合是产生火成岩成分多样性的主要方式,也是触发火山喷发的机制.岩体中广泛出现的微粒闪长质包体,一般认为是岩浆不完全混合的产物,即为岩浆(机械)混合(magma mingling)的产物(Vernon, 1984; 马昌前等, 1992; Bonin, 2004).在周口店岩体的西北部,还能见到同侵入岩墙或岩墙群,它们的化学成分与微粒包体相近,表明闪长质包体是同侵入岩墙破碎的产物.闪长质包体的出现应当是外来闪长质岩浆在侵位层次机械性注入寄主的长英质岩浆的反映.由于闪长质包体本身在哈克图解和共分母比值图解上处于混合线的中间位置,表明这些闪长质包体也是基性和酸性岩浆(化学)混合(magma mixing)的产物(马昌前等, 1992; 张金阳等, 2013).这就意味着,真正的岩浆混合作用并非发生在岩体侵位的地壳层次内,而是发生在更深处.石英二长闪长岩与花岗闪长岩之间的侵入接触关系也支持了这一点,体现了岩体的多批次累积组装过程.这就提出了一个问题,基性和酸性端元的岩浆是在什么深度上混合的?发生过几次混合?为什么混合而成的中间产物(以石英二长闪长岩和闪长质包体等为代表)还能以流体(熔体)形式上侵并注入到主岩体中?

现在,越来越多的研究发现,全岩成分可能反映的是深部过程,而矿物相的化学成分才是在较浅部位岩浆多批次侵位后结晶相之间元素重新分配的产物(Miles *et al.*, 2013).

在地壳浅部的岩浆储库内,岩浆(晶粥)之间的混合不一定是两种液态岩浆的混合,而是一种凝固着的晶粥被后来高温的岩浆不断渗透、反应而发生的一种混合,这些混合作用有可能记载在晶体的结构和成分上,特别是具有复杂的环带结构的晶体群中(Kahl *et al.*, 2011). 周口店岩体花岗闪长岩中环带斜长石从核部到边部显示了 An 值的多次突变(图 3),可能反映了新添加的富镁铁质岩浆中的斜长石受储库内长英质岩浆的改造,或长英质岩浆对镁铁质岩浆的冷却作用. 这是因为,斜长石的成分环带的产生与温度、压力、熔体成分(包括含水量)的变化有关,晶体与新的岩浆接触最容易体现在环带成分的变化上. 也就是说,导致化学不平衡的主要过程是岩浆储库内多批次的岩浆—晶粥之间发生混合和相互作用的结果.

高分异花岗岩和高硅流纹岩(无水时 $\text{SiO}_2 > 75\%$) 的出现,说明花岗质岩浆的结晶分异是实实在在的过程(Glazner *et al.*, 2008; 吴福元等, 2017). 质疑之处,主要是认为酸性岩浆粘度大、矿物与熔体之间的密度差较小而不利于分异(张旗, 2012). 这些质疑是有道理的,但在开放体系中,情况就会起变化. 对于岩浆通道系统,岩浆混合(杂)现象的普遍存在,多批次的高温熔体和流体的反复注入,会极大改变岩浆储库的流变学性质,降低粘度,增强

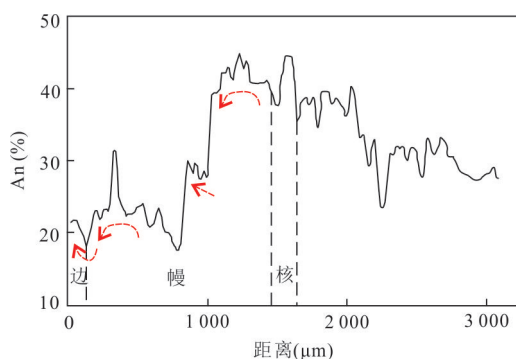


图 3 周口店岩体主体花岗闪长岩中环带斜长石 An 变化图(据 Zhang *et al.*, 2014 修改)

Fig. 3 Compositional zoning in plagioclase from the main granodiorite unit of Zhoukoudian pluton, western Beijing (modified from Zhang *et al.*, 2014)

活动性,尤其是在流动分异、压滤作用等(Pistone *et al.*, 2015; 吴福元等, 2017)的参与下,会极大促进晶粥体的活化和岩浆的分异,先前形成的堆晶集合体也会被打散和重组(例如,河南洛阳五龙村的闪长玢岩“牡丹石”; Zhu *et al.*, 2018). 显然,对侵位前和储库内的岩浆分异和混合作用的识别是未来火成岩成因研究的重要方向,这首先需要获得高精度的年代学资料来划分出累积组装的岩浆批次,也需要通过精细的矿物学研究(如再循环晶的识别)确定深部复杂的岩浆过程. 同时,岩浆压力计是佐证岩浆混合作用发生深度的直接线索. 此外,还需解决的问题是发生深部混合和分异的场所何在,究竟是源区预混合,上升通道中的混合,还是深部岩浆通道系统中一系列岩浆储库中均可发生混合?混合与分异在岩浆通道系统构建中各占有怎样的地位? 对高分异花岗岩,要在大量地质观察基础上,构建岩浆高度分异的野外识别标志和岩相学证据(包括矿物组合和结构证据;例如,出现钠长石、钾长石、石英、锂云母、黄玉等矿物组合). 同时,要系统总结堆晶花岗岩的结构特征(Vernon and Collins, 2011),结合热动力学和地球化学模拟(Zhao *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018)来认识花岗岩浆系统的分异过程.

4.2 岩浆上升和侵位机制研究

如果在岩体生长过程中不存在大的岩浆房,就不会发生底辟作用和顶蚀作用(例如, Pitcher, 1993; Coleman *et al.*, 2004). 在这种情况下,与岩体侵位有关的应变速率可能比底辟作用所产生的低得多,并且在地质上也更为合理. 如果侵入体内部各单元的侵位是不等时的,则侵入体中的组构也是不等时的(Hutton, 1988),并可能是岩体侵位后发生应变的产物(Paterson and Vernon, 1995).

岩体的累积侵位和组装一般经历 3 个阶段(马昌前和李艳青, 2017),即岩浆以岩墙形式上升、在地层或岩性界面处横向扩展形成岩床以及若干个岩床的垂向堆垛而形成复式侵入体. 就现在所知,地壳中的含熔体层形成了力学上弱化的区域,因为只要有很少量的熔体存在就能大大降低岩石的强度(Brown, 2007). 侵入体形状(和相关的岩墙)的显著变化似乎受岩浆粘度、密度差(中性浮力面)、地壳各向异性及岩浆岩侵入体与区域应力场之间的相互作用所控制(Grande *et al.*, 2015),而侵入体大小的限制因素包括源区的厚度、可以从源区中提取

熔体的量、以及垂向上为侵入体提供岩浆的导管之间的间距等。

研究发现,侵入体的体积和组装持续的时间之间存在着正相关关系.侵入体越大,组装的时间越长.迄今尚未发现大/快或小/慢的侵入体的情况.这一观察结果暗示,在不同的地质时间尺度内,从一种地球动力学环境到另一种地球动力学环境的岩浆通量似乎具有可比性(de Saint Blanquat *et al.*, 2011).在深部,岩浆的多期次组装形成大型岩体.由于岩浆散热慢,当先后侵位的岩浆之间的时间间隔较短时,就有利于不同脉冲的岩浆之间发生相互作用.这种情况下,不仅难以观察到多次岩浆脉冲的现象,而且还可能观察到岩浆的分异和混合现象.如果岩浆是连续运输的或属于时间间隔很短的(几天到几年)断续运输,则侵入体的组装就可能非常快(数千到数十万年).反之,如果新的岩浆脉动的周期性添加之间的时间间隔接近于新补充岩浆的结晶时间,那么,侵入体的形成就可能要花数百万年的时间(Brown, 2007).

问题是,到现在为此,还不十分理解为什么有些地区岩浆在地壳的不同深度上形成了多个岩浆储库,有些地区的岩浆可以从源区直通地表.岩浆纵向堆积的细节受哪些因素控制?为什么岩浆附加压力或岩浆过压驱动的上升会变为沿水平方向的岩浆侵位,从而形成水平的板状、楔形、菱形侵入物或滴状岩体?侵入体在垂向上的厚度以及三维形态有何变化规律?哪些因素控制了造山带岩浆(火山)中心的迁移?侵入体的大小与岩浆过程的时间尺度是什么关系?等.这些都是在岩浆通道系统和晶粥储库模型下需要深入理解的问题.由于岩浆作用和花岗质侵入体的侵位和组装会显著改变地壳的流变学行为,需要结合地壳流变学和岩浆动力学的深入研究来认识这些问题.

4.3 火山岩与侵入岩关系的研究

如果具有活动性的岩浆房体积都较小,为何存在可以喷出体积巨大的火山物质的大型火山或超级火山?这个问题就涉及当前讨论最热烈的火山岩与侵入岩的关系问题(Zhang *et al.*, 2018).

火山岩和侵入岩的关系,尤其是流纹岩和花岗岩的关系问题,一直是地质学家讨论的焦点:火山岩和侵入岩都是相同的岩浆不同产状的产物,还是分别代表了岩浆里排出的熔体和残留的晶体(堆晶)?

如果流纹岩代表了岩浆储库中的熔体成分,而

花岗岩代表残留的晶体,那么二者的地球化学组成就应存在明显差别.相平衡研究表明(Tuttle and Bowen, 1958),流纹岩浆如果与石英—长石的残留相平衡,二者的天然样品就会呈现出系统的互补性,即流纹岩富集不相容元素,亏损相容元素,而花岗岩相反,会富集相容元素而亏损不相容元素.对比典型地区的流纹岩及对应的花岗岩,可以对这一假设进行验证.对高硅流纹岩的研究表明,与其对应的花岗岩相比,高硅流纹岩的少数高度不相容元素(如K、Rb)确实呈现富集的特征(Lee and Morton, 2015; Schaen *et al.*, 2017).然而,在全球和一些地区的火山岩和侵入岩系统的对比研究中,并没有发现流纹岩和侵入岩之间的这种互补性,而是显示出十分相似的地球化学特征,这说明二者是由相同岩浆固结而成(Glazner *et al.*, 2015; Keller *et al.*, 2015).但也有学者指出,全球尺度上二者成分的相似性,是由于酸性熔体粘度大,抽取效率低(Caricchi *et al.*, 2007),有大约30%的熔体残留在堆晶中,而这些晶间熔体的存在会掩盖堆晶的属性,导致二者很难区分(Lee and Morton, 2015).

如果流纹岩和花岗岩成分一致,则同一岩浆系统的火山作用和侵入作用的时间尺度也应该一致.然而,地质年代学证据表明,百万年级的岩体侵位的时间尺度与相似规模的火山过程的时间尺度明显不同.例如,美国Mount Givens花岗岩体和Fish Canyon凝灰岩规模相似($\sim 5\ 000\ \text{km}^3$),但Mount Givens花岗岩体的侵位时间长达7 Ma之久(Frazer *et al.*, 2014),Fish Canyon凝灰岩的年龄显示了约0.44 Ma的持续时间(Wotzlaw *et al.*, 2013),有的火山作用年限甚至更短,只有千年级(Pappalardo and Mastrolorenzo, 2012; Pamukcu *et al.*, 2015).当然,也存在火山作用的时间尺度很长的例子,其时间跨度与对应的侵入作用一致(百万年级),只不过喷出物质在绝大多数时间以晶粥状态冷储存在于深部,而千年到百年的年龄纪录只是代表了活化的过程(Deering *et al.*, 2016).另外,根据数值模拟结果,同等规模的火山岩的岩浆通量要比侵入岩的高一到两个数量级(Annen, 2009),这似乎也对应于晶粥的活化过程,暗示火山岩和侵入岩可能是相同物质在不同热状态下的产出形式.

综上所述,要解决火山岩和侵入岩的关系问题,还存在一系列问题需要澄清.如何理解全球尺度下火山岩和侵入岩的地球化学相似性?是残留在

晶体中的熔体导致二者难以区分,还是说火山岩与对应的侵入岩本来就有相近的化学成分?火山岩喷出前的赋存状态和时间尺度是怎样的?如果曾经有大体积的熔体储存在深部,为何鲜有地球物理的记录?是因为大规模的熔体存在的时间很短,还是火山作用发生的几率占比很小?研究这些问题,需要将细致的矿物学、岩石学、地球化学、地球物理观测和数值模拟研究结合起来。

5 总结与展望

岩浆储库的性质和内部过程直接联系到地壳的生长和演化机制,并影响到火山喷发的方式和灾害强度,因而是地球深部过程与动力学的核心科学命题。通过本文的分析,我们就岩浆储库性质、作用过程以及与花岗岩成因问题得出如下几点认识。

(1) 晶粥是岩浆冷储存的产物。地壳内的岩浆通道系统,长时间以晶粥体形成存在,但不时会受到不同成分、不同来源、不同性质的流体和熔体的影响,导致地壳流变学性质的突变,直接制约了岩浆系统的行为。

(2) 岩浆通道系统是一种穿地壳的岩浆系统,它既起到输运岩浆的作用,也是储存岩浆的场所。由于地壳性质、构造环境、岩浆与地壳相互作用的变化,地壳内岩浆储库的多寡、规模、岩浆注入的方式和在地壳中的位置都会变化。大型侵入体和岩浆储库,都是多批次岩浆累积组装的产物。

(3) 岩浆的多批次累积组装,造就了岩浆储库结构的复杂性、成分的不均一性和矿物成因类型的多样性。仔细鉴别和深入研究再循环晶,是理解岩浆通道系统内部结构和动力学过程的钥匙。

(4) 晶粥储库模型和侵入体多批次累积组装机制提出后,对花岗岩类及相关岩石的研究提出了一系列崭新的科学命题。未来,重点要从晶粥活化与岩浆分异演化过程、岩浆上升和侵位机制、火山岩与侵入岩的成因联系等方面入手,把长英质岩石与镁铁质岩石结合起来,把火山岩与侵入岩结合起来,把地壳不同层次的热学状态、流变学特征、岩浆与地壳的相互作用与地壳岩浆通道系统的构建过程结合起来,野外地质观察、地球物理探测与岩石学研究相互支撑,全岩化学、矿物微区分析与岩浆动力学过程模拟相互印证,开展地壳岩浆通道系统的综合研究,构建花岗岩成因研究的新范式。

致谢: Roger Mason 提供了有益的建议和讨论;

审稿专家的建设性意见帮助我们改善了文稿质量,特此致谢! 谨以此文纪念中国地质大学(武汉)地质调查研究院成立 20 周年!

References

- Ackerson, M. R., Mysen, B. O., Tailby, N. D., et al., 2018. Low-Temperature Crystallization of Granites and the Implications for Crustal Magmatism. *Nature*, 559: 94–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0264-2>
- Andersen, N.L., Jicha, B.R., Singer, B.S., et al., 2017. Incremental Heating of Bishop Tuff Sanidine Reveals Pre-eruptive Radiogenic Ar and Rapid Remobilization from Cold Storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(47): 12407–12412. <https://doi.org/10.1073/pnas.1709581114>
- Annen, C., 2009. From Plutons to Magma Chambers: Thermal Constraints on the Accumulation of Eruptible Silicic Magma in the Upper Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 284(3–4): 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.05.006>
- Annen, C., 2011. Implications of Incremental Emplacement of Magma Bodies for Magma Differentiation, Thermal Aureole Dimensions and Plutonism - Volcanism Relationships. *Tectonophysics*, 500(1–4): 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.04.010>
- Bachmann, O., Bergantz, G. W., 2004. On the Origin of Crystal-Poor Rhyolites: Extracted from Batholithic Crystal Mushes. *Journal of Petrology*, 45(8): 1565–1582. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh019>
- Bachmann, O., Bergantz, G. W., 2006. Gas Percolation in Upper-Crustal Silicic Crystal Mushes as a Mechanism for Upward Heat Advection and Rejuvenation of Near-Solidus Magma Bodies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 149(1–2): 85–102. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.06.002>
- Beard, J.S., 2008. Crystal-Melt Separation and the Development of Isotopic Heterogeneities in Hybrid Magmas. *Journal of Petrology*, 49(5): 1027–1041. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn015>
- de Saint Blanquat, M., Horsman, E., Habert, G., et al., 2011. Multiscale Magmatic Cyclicity, Duration of Pluton Construction, and the Paradoxical Relationship between Tectonism and Plutonism in Continental Arcs. *Tectonophysics*, 500(1–4): 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.12.009>
- Bonin, B., 2004. Do Coeval Mafic and Felsic Magmas in Post-Collisional to Within-Plate Regimes Necessarily Imply

- Two Contrasting, Mantle and Crustal, Sources? A Review. *Lithos*, 78(1–2): 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.042>
- Brown, M., 2007. Crustal Melting and Melt Extraction, Ascent and Emplacement in Orogens: Mechanisms and Consequences. *Journal of the Geological Society*, 164(4): 709–730. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-171>
- Burchardt, S., 2018. Volcanic and Igneous Plumbing Systems. Uppsala University, Uppsala, Sweden. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-06837-x>
- Burgisser, A., Bergantz, G. W., 2011. A Rapid Mechanism to Remobilize and Homogenize Highly Crystalline Magma Bodies. *Nature*, 471: 212–215. <https://doi.org/10.1038/nature09799>
- Caracciolo, A., Bali, E., Guðfinnsson, G. H., et al., 2020. Temporal Evolution of Magma and Crystal Mush Storage Conditions in the Bárðarbunga-Veiðivötn Volcanic System, Iceland. *Lithos*, 352–353: 105234. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105234>
- Caricchi, L., Burlini, L., Ulmer, P., et al., 2007. Non-Newtonian Rheology of Crystal-Bearing Magmas and Implications for Magma Ascent Dynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 264(3–4): 402–419. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.09.032>
- Cashman, K. V., Sparks, R. S. J., Blundy, J. D., 2017. Vertically Extensive and Unstable Magmatic Systems: A Unified View of Igneous Processes. *Science*, 355(6331): eaag3055. <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
- Chambers, M., Memeti, V., Eddy, M. P., et al., 2020. Half a Million Years of Magmatic History Recorded in a K-Feldspar Megacryst of the Tuolumne Intrusive Complex, California, USA. *Geology*, 48(4): 400–404. <https://doi.org/10.1130/g46873.1>
- Chang, W. L., Smith, R. B., Wicks, C., et al., 2007. Accelerated Uplift and Magmatic Intrusion of the Yellowstone Caldera, 2004 to 2006. *Science*, 318(5852): 952–956. <https://doi.org/10.1126/science.1146842>
- Chen, L., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2018. Geochemical Insights from Clinopyroxene Phenocrysts into the Effect of Magmatic Processes on Petrogenesis of Intermediate Volcanics. *Lithos*, 316–317: 137–153. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.07.014>
- Clemens, J. D., Stevens, G., 2012. What Controls Chemical Variation in Granitic Magmas? *Lithos*, 134–135: 317–329. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.01.001>
- Clemens, J. D., Stevens, G., Farina, F., 2011. The Enigmatic Sources of I-Type Granites: The Peritectic Connexion. *Lithos*, 126(3–4): 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.004>
- Clemens, J. D., Birch, W. D., 2012. Assembly of a Zoned Volcanic Magma Chamber from Multiple Magma Batches: The Cerberean Cauldron, Marysville Igneous Complex, Australia. *Lithos*, 155: 272–288. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.09.007>
- Coleman, D. S., Gray, W., Glazner, A. F., 2004. Rethinking the Emplacement and Evolution of Zoned Plutons: Geochronologic Evidence for Incremental Assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California. *Geology*, 32(5): 433–436. <https://doi.org/10.1130/g20220.1>
- Cooper, K. M., Kent, A. J. R., 2014. Rapid Remobilization of Magmatic Crystals Kept in Cold Storage. *Nature*, 506: 480–483. <https://doi.org/10.1038/nature12991>
- Couch, S., Sparks, R. S. J., Carroll, M. R., 2001. Mineral Disequilibrium in Lavas Explained by Convective Self-Mixing in Open Magma Chambers. *Nature*, 411: 1037–1039. <https://doi.org/10.1038/35082540>
- Daly, R. A., 1933. Igneous rocks and Depths of the Earth. McGraw-Hill, New York, 316.
- Deering, C. D., Keller, B., Schoene, B., et al., 2016. Zircon Record of the Plutonic-Volcanic Connection and Protracted Rhyolite Melt Evolution. *Geology*, 44(4): 267–270. <https://doi.org/10.1130/g37539.1>
- Díaz-Alvarado, J., Castro, A., Fernández, C., et al., 2011. Assessing Bulk Assimilation in Cordierite-Bearing Granitoids from the Central System Batholith, Spain; Experimental, Geochemical and Geochronological Constraints. *Journal of Petrology*, 52(2): 223–256. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq078>
- Dorais, M. J., Tubrett, M., 2012. Detecting Peritectic Garnet in the Peraluminous Cardigan Pluton, New Hampshire. *Journal of Petrology*, 53(2): 299–324. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr063>
- Druitt, T. H., Costa, F., Deloule, E., et al., 2012. Decadal to Monthly Timescales of Magma Transfer and Reservoir Growth at a Caldera Volcano. *Nature*, 482: 77–80. <https://doi.org/10.1038/nature10706>
- Erdmann, S., Jamieson, R. A., MacDonald, M. A., 2009. Evaluating the Origin of Garnet, Cordierite, and Biotite in Granitic Rocks: A Case Study from the South Mountain Batholith, Nova Scotia. *Journal of Petrology*, 50(8): 1477–1503. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp038>
- Farina, F., Stevens, G., Villaros, A., 2012. Multi-Batch, Incremental Assembly of a Dynamic Magma Chamber: The Case of the Peninsula Pluton Granite (Cape Granite Suite, South Africa). *Mineralogy and Petrology*, 106(3–4): 193–216. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-012-0>

- 0224-8
- Feng, W. Y., Zhu, Y. F., 2018. Decoding Magma Storage and Pre-Eruptive Processes in the Plumbing System beneath Early Carboniferous Arc Volcanoes of Southwestern Tianshan, Northwest China. *Lithos*, 322: 362–375. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.09.030>
- Frazer, R. E., Coleman, D. S., Mills, R. D., 2014. Zircon U-Pb Geochronology of the Mount Givens Granodiorite: Implications for the Genesis of Large Volumes of Eruptible Magma. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4): 2907–2924. <https://doi.org/10.1002/2013jb010716>
- Gao, P., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F., 2016. Experimental Melts from Crustal Rocks: A Lithochemical Constraint on Granite Petrogenesis. *Lithos*, 266–267: 133–157. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.005>
- Gilbert, G. K., 1877. Report on the Geology of the Henry Mountains. Government Printing Office, Washington, D.C..
- Glazner, A. F., Bartley, J. M., Coleman, D. S., et al., 2004. Are Plutons Assembled over Millions of Years by Amalgamation from Small Magma Chambers. *GSA Today*, 14(4): 4–11.
- Glazner, A. F., Coleman, D. S., Bartley, J. M., 2008. The Tenuous Connection between High-Silica Rhyolites and Granodiorite Plutons. *Geology*, 36(2): 183–186. <https://doi.org/10.1130/g24496a.1>
- Glazner, A. F., Coleman, D. S., Mills, R. D., 2015. The Volcanic-Plutonic Connection. In: Breikreuz, C., Rocchi, S., eds., *Physical Geology of Shallow Magmatic Systems. Advances in Volcanology*, Springer, Cham, 61–82. https://doi.org/10.1007/11157_2015_11
- Grande, M. M., Alasino, P. H., Rocher, S., et al., 2015. Asymmetric Textural and Structural Patterns of a Granitic Body Emplaced at Shallow Levels: The La Chinchilla Pluton, Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 64: 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.09.011>
- Gudmundsson, A., 2012. Magma Chambers: Formation, Local Stresses, Excess Pressures, and Compartments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 237–238: 19–41. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.05.015>
- Gudmundsson, A., 2020. *Volcanotectonics: Understanding the Structure, Deformation and Dynamics of Volcanoes*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Hammond, W. C., Humphreys, E. D., 2000. Upper Mantle Seismic Wave Velocity: Effects of Realistic Partial Melt Geometries. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B5): 10975–10986. <https://doi.org/10.1029/2000jb900041>
- Heinonen, A., Mänttari, I., Rämö, O. T., et al., 2016. A Priori Evidence for Zircon Antecryst Entrainment in Megacrystic Proterozoic Granites. *Geology*, 44(3): 227–230. <https://doi.org/10.1130/g37696.1>
- Hill, G. J., Caldwell, T. G., Heise, W., et al., 2009. Distribution of Melt beneath Mount St Helens and Mount Adams Inferred from Magnetotelluric Data. *Nature Geoscience*, 2: 785–789. <https://doi.org/10.1038/ngeo661>
- Holt, S. J., Holford, S. P., Foden, J., 2014. New Insights into the Magmatic Plumbing System of the South Australian Quaternary Basalt Province from 3D Seismic and Geochemical Data. *Australian Journal of Earth Sciences*, 60(8): 797–817. <https://doi.org/10.1080/08120099.2013.865143>
- Horsman, E., Morgan, S., de Saint-Blanquat, M., et al., 2009. Emplacement and Assembly of Shallow Intrusions from Multiple Magma Pulses, Henry Mountains, Utah. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 100(1–2): 117–132. <https://doi.org/10.1017/s1755691009016089>
- Huang, H. H., Lin, F. C., Schmandt, B., et al., 2015. The Yellowstone Magmatic System from the Mantle Plume to the Upper Crust. *Science*, 348(6236): 773–776. <https://doi.org/10.1126/science.aaa5648>
- Huber, C., Bachmann, O., Dufek, J., 2011. Thermo-Mechanical Reactivation of Locked Crystal Mushes: Melting-Induced Internal Fracturing and Assimilation Processes in Magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 304(3–4): 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.022>
- Huber, C., Townsend, M., Degruyter, W., et al., 2019. Optimal Depth of Subvolcanic Magma Chamber Growth Controlled by Volatiles and Crust Rheology. *Nature Geoscience*, 12: 762–768. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0415-6>
- Huppert, H. E., Sparks, R. S. J., 1988. The Generation of Granitic Magmas by Intrusion of Basalt into Continental Crust. *Journal of Petrology*, 29(3): 599–624. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.3.599>
- Hutton, D. H. W., 1988. Granite Emplacement Mechanisms and Tectonic Controls: Inferences from Deformation Studies. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 79(2–3): 245–255. <https://doi.org/10.1017/s0263593300014255>
- Iddon, F., Jackson, C., Hutchison, W., et al., 2019. Mixing and

- Crystal Scavenging in the Main Ethiopian Rift Revealed by Trace Element Systematics in Feldspars and Glasses. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(1): 230–259. <https://doi.org/10.1029/2018gc007836>
- Jackson, M.D., Blundy, J., Sparks, R.S.J., 2018. Chemical Differentiation, Cold Storage and Remobilization of Magma in the Earth's Crust. *Nature*, 564: 405–409. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0746-2>
- Jackson, M.D., Cheadle, M.J., Atherton, M.P., 2003. Quantitative Modeling of Granitic Melt Generation and Segregation in the Continental Crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B7). <https://doi.org/10.1029/2001jb001050>
- Jaeger, J.C., 1957. The Temperature in the Neighborhood of a Cooling Intrusive Sheet. *American Journal of Science*, 255(4): 306–318. <https://doi.org/10.2475/ajs.255.4.306>
- Jerram, D.A., Martin, V., 2008. Understanding Crystal Populations and Their Significance Through the Magma Plumbing System. *Geological Society, London, Special Publications*, 304(1): 133–148. <http://dx.doi.org/10.1144/sp304.7>
- Jorgensen, M., Zhdanov, M. S., 2019. Imaging Yellowstone Magmatic System by the Joint Gramian Inversion of Gravity and Magnetotelluric Data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 292: 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.05.003>
- Kahl, M., Chakraborty, S., Costa, F., et al., 2011. Dynamic Plumbing System beneath Volcanoes Revealed by Kinetic Modeling, and the Connection to Monitoring Data: An Example from Mt. Etna. *Earth and Planetary Science Letters*, 308(1–2): 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.05.008>
- Karlstrom, L., Rudolph, M.L., Manga, M., 2012. Caldera Size Modulated by the Yield Stress within a Crystal-Rich Magma Reservoir. *Nature Geoscience*, 5(6): 402–405. <https://doi.org/10.1038/ngeo1453>
- Keller, C.B., Schoene, B., Barboni, M., et al., 2015. Volcanic-Plutonic Parity and the Differentiation of the Continental Crust. *Nature*, 523: 301–307. <https://doi.org/10.1038/nature14584>
- Kent, A.J.R., Darr, C., Koleszar, A.M., et al., 2010. Preferential Eruption of Andesitic Magmas through Recharge Filtering. *Nature Geoscience*, 3(9): 631–636. <https://doi.org/10.1038/ngeo924>
- Khatiwada, M., Keller, G.R., 2017. A Crustal-Scale Integrated Geophysical and Tectonic Study of the Snake River Plain Region, Northwestern U.S.A. *International Geology Review*, 59(15): 1929–1943. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1303647>
- Larrea, P., Franca, Z., Lago, M., et al., 2013. Magmatic Processes and the Role of Antecrysts in the Genesis of Corvo Island (Azores Archipelago, Portugal). *Journal of Petrology*, 54(4): 769–793. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs084>
- Latypov, R. M., 2003. The Origin of Basic-Ultrabasic Sills with S-, D-, and I- Shaped Compositional Profiles by in Situ Crystallization of a Single Input of Phenocryst-Poor Parental Magma. *Journal of Petrology*, 44(9): 1619–1656. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg051>
- Lee, C.T.A., Morton, D.M., 2015. High Silica Granites: Terminal Porosity and Crystal Settling in Shallow Magma Chambers. *Earth and Planetary Science Letters*, 409: 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.10.040>
- Li, S.R., Santosh, M., Zhang, H.F., et al., 2014. Metallogeny in Response to Lithospheric Thinning and Craton Destruction: Geochemistry and U-Pb Zircon Chronology of the Yixingzhai Gold Deposit, Central North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 56: 457–471. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.10.008>
- Li, X.C., Niu, M.L., Yakymchuk, C., et al., 2018. Anatexis of Former Arc Magmatic Rocks during Oceanic Subduction: A Case Study from the North Wulan Gneiss Complex. *Gondwana Research*, 61: 128–149. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.04.016>
- Lipman, P. W., 2007. Incremental Assembly and Prolonged Consolidation of Cordilleran Magma Chambers: Evidence from the Southern Rocky Mountain Volcanic Field. *Geosphere*, 3(1): 42–70. <https://doi.org/10.1130/ges00061.1>
- Lipman, P., Dungan, M., Bachmann, O., 1997. Comagmatic Granophyric Granite in the Fish Canyon Tuff, Colorado: Implications for Magma-Chamber Processes during a Large Ash-Flow Eruption. *Geology*, 25(10): 915–918.
- Liu, H.M., Shen, J.F., Santosh, M., et al., 2019. Polymetallic Droplets within Trapped Globules in a Quartz Diorite Porphyry from Gangcha-Kemo Gold Deposit, West Qinling Orogen, China: Implications for Petrogenesis and Prospecting. *Lithos*, 326–327: 446–459. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.038>
- Luo, B.J., Zhang, H.F., Xu, W.C., et al., 2018. The Magmatic Plumbing System for Mesozoic High-Mg Andesites, Garnet-Bearing Dacites and Porphyries, Rhyolites and Leucogranites from West Qinling, Central China. *Journal of Petrology*, 59(3): 447–482. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy035>
- Luo, Z.H., Yang, Z.F., Dai, G., et al., 2013. Crystal Popula-

- tions of Igneous Rocks and Their Implications in Genetic Mineralogy. *Geology in China*, 40(1): 176–181(in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., 1988. Magmatic-Dynamic Mechanism of Emplacement and Compositional Zonation of the Zhoukoudian Stock, Beijing. *Acta Geologica Sinica*, (4): 329–341(in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., 1989. The Magma-Dynamic Mechanism of Emplacement and Compositional Zonation of the Zhoukoudian Stock, Beijing. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2(2): 159–174.
- Ma, C. Q., Li, Y. Q., 2017. Incremental Growth of Granitoid Plutons and Highly Crystalline Magmatic Differentiation. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1479–1488(in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Li, Z. C., Ehlers, C., et al., 1998. A Post-Collisional Magmatic Plumbing System: Mesozoic Granitoid Plutons from the Dabieshan High-Pressure and Ultrahigh-Pressure Metamorphic Zone, East-Central China. *Lithos*, 45(1–4): 431–456. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00043-7](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00043-7)
- Ma, C. Q., Wang, R. J., 1990. The Characteristic Features and Origin of K-Feldspar Megacrysts in the Zhoukoudian Pluton, Beijing. *Acta Mineralogica Sinica*, 10(4): 323–331(in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Wang, R. J., Qiu, J. X., 1992. Enclaves as Indicators of the Origin of Granitoid Magma and Repeater Magma Mingling: An Example from the Zhoukoudian Intrusion, Beijing. *Geological Review*, 38(2): 109–119(in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Yang, K. G., Tang, Z. H., et al., 1994. Magma-Dynamics of Granitoids: Theory, Method and a Case Study of the Eastern Hubei Granitoids. China University of Geosciences Press, Wuhan(in Chinese).
- Magee, C., Stevenson, C. T. E., Ebmeier, S. K., et al., 2018. Magma Plumbing Systems: A Geophysical Perspective. *Journal of Petrology*, 59(6): 1217–1251. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy064>
- Mason, B. G., Pyle, D. M., Oppenheimer, C., 2004. The Size and Frequency of the Largest Explosive Eruptions on Earth. *Bulletin of Volcanology*, 66(8): 735–748. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0355-9>
- Matzel, J. E. P., Bowring, S. A., Miller, R. B., 2006. Time Scales of Pluton Construction at Differing Crustal Levels: Examples from the Mount Stuart and Tenpeak Intrusions, North Cascades, Washington. *Geological Society of America Bulletin*, 118(11–12): 1412–1430. <https://doi.org/10.1130/b25923.1>
- Mavko, G. M., 1980. Velocity and Attenuation in Partially Molten Rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B10): 5173–5189. <https://doi.org/10.1029/jb085iB10p05173>
- McNulty, B. A., Tong, W. X., Tobisch, O. T., 1996. Assembly of a Dike-Fed Magma Chamber: The Jackass Lakes Pluton, Central Sierra Nevada, California. *Geological Society of America Bulletin*, 108(8): 926–940.
- Meng, F. C., Tian, G. K., Duan, X. P., et al., 2018. Evidence from Garnet for Genesis of Garnet-Cordierite-Granite in the Jinshuikou Area, Eastern Segment of the East Kunlun Mountains. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): 192–204(in Chinese with English abstract).
- Michel, J., Baumgartner, L., Putlitz, B., et al., 2008. Incremental Growth of the Patagonian Torres Del Paine Laccolith over 90 k. y. *Geology*, 36(6): 459–462. <https://doi.org/10.1130/g24546a.1>
- Miles, A. J., Graham, C. M., Hawkesworth, C. J., et al., 2013. Evidence for Distinct Stages of Magma History Recorded by the Compositions of Accessory Apatite and Zircon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(1): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s00410-013-0862-9>
- Miller, J. S., Matzel, J. E. P., Miller, C. F., et al., 2007. Zircon Growth and Recycling during the Assembly of Large, Composite Arc Plutons. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167(1–4): 282–299. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.019>
- Mitchell, M. A., White, R. S., Roecker, S., et al., 2013. Tomographic Image of Melt Storage beneath Askja Volcano, Iceland Using Local Microseismicity. *Geophysical Research Letters*, 40(19): 5040–5046. <https://doi.org/10.1002/grl.50899>
- Mollo, S., Putirka, K., Misiti, V., et al., 2013. A New Test for Equilibrium Based on Clinopyroxene-Melt Pairs: Clues on the Solidification Temperatures of Etnean Alkaline Melts at Post-Eruptive Conditions. *Chemical Geology*, 352: 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.026>
- Moore, J. G., Sisson, T. W., 2008. Igneous Phe-Nocrystic Origin of K-Feldspar Megacrysts in Granitic Rocks from the Sierra Nevada Batholith. *Geosphere*, 4(2): 387–400. <https://doi.org/10.1130/ges00146.1>
- Morley, C. K., 2018. 3-D Seismic Imaging of the Plumbing System of the Kora Volcano, Taranaki Basin, New Zealand: The Influence of Syn-Rift Structure on Shallow Igneous Intrusion Architecture. *Geosphere*, 14(6): 2533–2584. <https://doi.org/10.1130/ges01645.1>

- Murase, T., McBirney, A. R., 1973. Properties of some Common Igneous Rocks and Their Melts at High Temperatures. *Geological Society of America Bulletin*, 84(11): 3563–3592.
- Pamukcu, A. S., Gualda, G. A. R., Bégué, F., et al., 2015. Melt Inclusion Shapes: Timekeepers of Short-Lived Giant Magma Bodies. *Geology*, 43(11): 947–950. <https://doi.org/10.1130/g37021.1>
- Pappalardo, L., Mastrolorenzo, G., 2012. Rapid Differentiation in a Sill-Like Magma Reservoir: A Case Study from the Campi Flegrei Caldera. *Scientific Reports*, 712. <https://doi.org/10.1038/srep00712>
- Parmigiani, A., Huber, C., Bachmann, O., 2014. Mush Microphysics and the Reactivation of Crystal-Rich Magma Reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(8): 6308–6322. <https://doi.org/10.1002/2014jb011124>
- Paterson, S. R., Vernon, R. H., 1995. Bursting the Bubble of Ballooning Plutons: A Return to Nested Diapirs Emplaced by Multiple Processes. *Geological Society of America Bulletin*, 107(11):1356–1380.
- Paulatto, M., Annen, C., Henstock, T. J., et al., 2012. Magma Chamber Properties from Integrated Seismic Tomography and Thermal Modeling at Montserrat. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(1): Q01014. <https://doi.org/10.1029/2011gc003892>
- Petford, N., Cruden, A. R., McCaffrey, K. J. W., et al., 2000. Granite Magma Formation, Transport and Emplacement in the Earth's Crust. *Nature*, 408:669–673. <https://doi.org/10.1038/35047000>
- Philpotts, A. R., Philpotts, D. E., 2005. Crystal-Mush Compaction in the Cohasset Flood-Basalt Flow, Hanford, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145(3–4): 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.01.008>
- Pistone, M., Arzilli, F., Dobson, K. J., et al., 2015. Gas-Driven Filter Pressing in Magmas: Insights into In-Situ Melt Segregation from Crystal Mushes. *Geology*, 43(8): 699–702. <https://doi.org/10.1130/G36766.1>
- Pitcher, W. S., 1993. The Nature and Origin of Granite. Blackie Academic and Professional, London.
- Ratschbacher, B. C., 2017. Depth-Dependent Physical, Chemical and Temporal Evolution of Crustal Differentiation in Magmatic Arcs (Dissertation). University of Southern California, Los Angeles.
- Reid, M. R., 2003. Timescales of Magma Transfer and Storage in the Crust. *Treatise on geochemistry*, Amsterdam, 3: 167–193. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03022-x>
- Rubin, A. E., Cooper, K. M., Till, C. B., et al., 2017. Rapid Cooling and Cold Storage in a Silicic Magma Reservoir Recorded in Individual Crystals. *Science*, 356(6343): 1154–1156.
- Sato, H., Sacks, I. S., Murase, T., et al., 1988. Thermal Structure of the Low Velocity Zone Derived from Laboratory and Seismic Investigations. *Geophysical Research Letters*, 15(11): 1227–1230. <https://doi.org/10.1029/gl015i011p01227>
- Schaen, A. J., Cottle, J. M., Singer, B. S., et al., 2017. Complementary Crystal Accumulation and Rhyolite Melt Segregation in a Late Miocene Andean Pluton. *Geology*, 45(9): 835–838. <https://doi.org/10.1130/g39167.1>
- Scott, W. E., Gardner, C. A., Sherrod, D. R., et al. 1997. Geologic History of Mount Hood Volcano, Oregon: A Field Trip Guidebook. USGS Open File Report 97-263, U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr97263>
- Sisson, T. W., Bacon, C. R., 1999. Gas-Driven Filter Pressing in Magmas. *Geology*, 27(7):613–616.
- Stevens, G., Villaros, A., Moyen, J. F., 2007. Selective Peritectic Garnet Entrainment as the Origin of Geochemical Diversity in S-Type Granites. *Geology*, 35(1): 9–12. <https://doi.org/10.1130/g22959a.1>
- Stevenson, C., 2009. The Relationship between Forceful and Passive Emplacement: The Interplay between Tectonic Strain and Magma Supply in the Rosses Granitic Complex, NW Ireland. *Journal of Structural Geology*, 31(3): 270–287. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.11.009>
- Stimac, J. A., Goff, F., Wohletz, K., 2001. Thermal Modeling of the Clear Lake Magmatic-Hydrothermal System, California, USA. *Geothermics*, 30(2–3): 349–390. [https://doi.org/10.1016/s0375-6505\(00\)00062-6](https://doi.org/10.1016/s0375-6505(00)00062-6)
- Sun, J. F., Yang, J. H., Wu, F. Y., et al., 2010. Magma Mixing Controlling the Origin of the Early Cretaceous Fangshan Granitic Pluton, North China Craton: In Situ U-Pb Age and Sr-, Nd-, Hf- and O-Isotope Evidence. *Lithos*, 120(3–4): 421–438. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.09.002>
- Sun, J. F., Yang, J. H., Wu, F. Y., et al., 2012. In Situ U-Pb Dating of Titanite by LA-ICPMS. *Chinese Science Bulletin*, 57(20): 2506–2516. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5177-0>
- Szymanowski, D., Wotzlaw, J. F., Ellis, B. S., et al., 2017. Protracted Near-Solidus Storage and Pre-Eruptive Rejuvenation of Large Magma Reservoirs. *Nature Geoscience*, 10(10):777–782. <https://doi.org/10.1038/ngeo3020>
- Tapster, S., Condon, D. J., Naden, J., et al., 2016. Rapid Ther-

- mal Rejuvenation of High-Crystallinity Magma Linked to Porphyry Copper Deposit Formation; Evidence from the Koloula Porphyry Prospect, Solomon Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, 442: 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.046>
- Tibaldi, A., 2015. Structure of Volcano Plumbing Systems: A Review of Multi-Parametric Effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 298: 85–135. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.03.023>
- Tuttle, O. F., Bowen, N. L., 1958. Origin of Granite in the Light of Experimental Studies in the System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O . *Geological Society of America Memoir*, 74: 153. <https://doi.org/10.1130/mem74>
- Vernon, R. H., 1984. Microgranitoid Enclaves in Granites: Globules of Hybrid Magma Quenched in a Plutonic Environment. *Nature*, 309: 438–439. <https://doi.org/10.1038/309438a0>
- Vernon, R. H., Collins, W. J., 2011. Structural Criteria for Identifying Granitic Cumulates. *The Journal of Geology*, 119 (2): 127–142. <https://doi.org/10.1086/658198>
- Vignerresse, J. L., 2007. The Role of Discontinuous Magma Inputs in Felsic Magma and Ore Generation. *Ore Geology Reviews*, 30(3–4): 181–216. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.001>
- Waite, G. P., Moran, S. C., 2009. VP Structure of Mount St. Helens, Washington, USA, Imaged with Local Earthquake Tomography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182(1–2): 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.02.009>
- Wang, S. W., Zhou, T. F., Yuan, F., et al., 2016. Geochemical Characteristics of the Shujiadian Cu Deposit Related Intrusion in Tongling: Petrogenesis and Implications for the Formation of Porphyry Cu Systems in the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt, Eastern China. *Lithos*, 252–253: 185–199. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.02.013>
- Wang, T., Tong, Y., Guo, L., et al., 2020. Geological Survey and Mapping Methods of Intrusive Rocks. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, T., Wang, X. X., Li, W. P., 2000. Evaluation of Multiple Emplacement Mechanisms: The Huichizi Granite Pluton, Qinling Orogenic Belt, Central China. *Journal of Structural Geology*, 22(4): 505–518. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00169-8](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00169-8)
- Ward, K. M., Zandt, G., Beck, S. L., et al., 2014. Seismic Imaging of the Magmatic Underpinnings beneath the Altiplano-Puna Volcanic Complex from the Joint Inversion of Surface Wave Dispersion and Receiver Functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 404: 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.022>
- Wei, X., Xu, Y. G., Luo, Z. Y., et al., 2015. Composition of the Tarim Mantle Plume: Constraints from Clinopyroxene Antecrysts in the Early Permian Xiaohaizi Dykes, NW China. *Lithos*, 230: 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.010>
- West, M., Menke, W., Tolstoy, M., et al., 2001. Magma Storage beneath Axial Volcano on the Juan de Fuca Mid-Ocean Ridge. *Nature*, 413: 833–836. <https://doi.org/10.1038/35101581>
- Wotzlaw, J. F., Schaltegger, U., Frick, D. A., et al., 2013. Tracking the Evolution of Large-Volume Silicic Magma Reservoirs from Assembly to Supereruption. *Geology*, 41 (8): 867–870. <https://doi.org/10.1130/g34366.1>
- Wotzlaw, J. F., Bindeman, I. N., Watts, K. E., et al., 2014. Linking Rapid Magma Reservoir Assembly and Eruption Trigger Mechanisms at Evolved Yellowstone-Type Supervolcanoes. *Geology*, 42(9): 807–810. <https://doi.org/10.1130/g35979.1>
- Wu, C. L., Gao, Y. H., Lei, M., et al., 2014. Zircon SHRIMP U-Pb Dating, Lu-Hf Isotopic Characteristics and Petrogenesis of the Palaeozoic Granites in Mangya Area, Southern Altun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (8): 2297–2323 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Scientia Sinica (Terrae)*, 47(7): 745–765 (in Chinese with English abstract).
- Xia, Q. X., Wang, H. Z., Zhou, L. G., et al., 2016. Growth of Metamorphic and Peritectic Garnets in Ultrahigh-Pressure Metagranite during Continental Subduction and Exhumation in the Dabie Orogen. *Lithos*, 266–267: 158–181. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.043>
- Xu, L. J., He, Y. S., Wang, S. J., et al., 2017. Iron Isotope Fractionation during Crustal Anatexis: Constraints from Migmatites from the Dabie Orogen, Central China. *Lithos*, 284–285: 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.04.005>
- Xu, X. W., Jiang, N., Yang, K., et al., 2009. Accumulated Phenocrysts and Origin of Feldspar Porphyry in the Chanho Area, Western Yunnan, China. *Lithos*, 113(3–4): 595–611. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.034>
- Yin, S., Ma, C. Q., Xu, J. N., 2020. Recycling of K-Feldspar Antecrysts in the Baishiya Porphyritic Granodiorite, East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau: Implications for Magma Differentiation in a Crystal Mush Reservoir. *Lithos*. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.04.005>

- os.2020.105622
- Žák, J., Paterson, S. R., Memeti, V., 2007. Four Magmatic Fabrics in the Tuolumne Batholith, Central Sierra Nevada, California (USA): Implications for Interpreting Fabric Patterns in Plutons and Evolution of Magma Chambers in the Upper Crust. *Geological Society of America Bulletin*, 119(1–2): 184–201. <https://doi.org/10.1130/b25773.1>
- Žák, J., Verner, K., Johnson, K., et al., 2012. Magma Emplacement Process Zone Preserved in the Roof of a Large Cordilleran Batholith, Wallowa Mountains, Northeastern Oregon. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 227–228: 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.03.001>
- Zhai, M. G., 2017. Granites: Leading Study Issue for Continental Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1369–1380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Davidson, J. P., Humphreys, M. C. S., et al., 2015. Magmatic Enclaves and Andesitic Lavas from Mt. Lamington, Papua New Guinea: Implications for Recycling of Earlier-Fractionated Minerals through Magma Recharge. *Journal of Petrology*, 56(11): 2223–2256. <https://doi.org/10.1093/petrology/egv071>
- Zhang, J. H., Yang, J. H., Chen, J. Y., et al., 2018. Genesis of Late Early Cretaceous High-Silica Rhyolites in Eastern Zhejiang Province, Southeast China: A Crystal Mush Origin with Mantle Input. *Lithos*, 296–299: 482–495. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.11.026>
- Zhang, J. Y., Ma, C. Q., Wang, R. J., et al., 2013. Mineralogical, Geochronological and Geochemical Characteristics of Zhoukoudian Intrusion and Their Magmatic Source and Evolution. *Earth Science*, 38(1): 68–86 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Y., Ma, C. Q., Zhang, C., et al., 2014. Fractional Crystallization and Magma Mixing: Evidence from Porphyritic Diorite-Granodiorite Dykes and Mafic Microgranular Enclaves within the Zhoukoudian Pluton, Beijing. *Mineralogy and Petrology*, 108(6): 777–800. <https://doi.org/10.1007/s00710-014-0336-4>
- Zhang, Q., 2012. Could Granitic Magmas Experience Fractionation and Evolution? *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2): 252–260 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K., Xu, X. S., Erdmann, S., 2018. Thermodynamic Modeling for an Incrementally Fractionated Granite Magma System: Implications for the Origin of Igneous Charnockite. *Earth and Planetary Science Letters*, 499: 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.07.039>
- Zhu, J. J., Hu, R. Z., Richards, J. P., et al., 2017. No Genetic Link between Late Cretaceous Felsic Dikes and Carlin-Type Au Deposits in the Youjiang Basin, Southwest China. *Ore Geology Reviews*, 84: 328–337. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.01.014>
- Zhu, Y. X., Wang, L. X., Ma, C. Q., et al., 2018. A Flower-Like Glomerophytic Diorite Porphyry from Central China: Constraints on the Unusual Texture. *Lithos*, 318–319: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.07.031>
- Zou, B. W., Ma, C. Q., 2020. Crystal Mush Rejuvenation Induced by Heat and Water Transfer: Evidence from Amphibole Analyses in the Jialuhe Composite Pluton, East Kunlun Orogen, Northern Tibet Plateau. *Lithos*, 376–377: 105722. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105722>

附中文参考文献

- 罗照华, 杨宗锋, 代耕, 等, 2013. 火成岩的晶体群与成因矿物学展望. *中国地质*, 40(1): 176–181.
- 马昌前, 1988. 北京周口店岩株侵位和成分分带的岩浆动力学机理. *地质学报*, (4): 329–341.
- 马昌前, 李艳青, 2017. 花岗岩体的累积生长与高结晶度岩浆的分异. *岩石学报*, 33(5): 1479–1488.
- 马昌前, 王人镜, 1990. 北京周口店岩体中钾长石巨晶的特征及成因. *矿物学报*, 10(4): 323–331.
- 马昌前, 王人镜, 邱家襄, 1992. 花岗质岩浆起源和多次岩浆混合的标志: 包体——以北京周口店岩体为例. *地质论评*, 38(2): 109–119.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等, 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 孟繁聪, 田广阔, 段雪鹏, 等, 2018. 东昆仑东段金水口石榴堇青石花岗岩成因: 石榴子石证据. *矿物岩石地球化学通报*, 37(2): 192–204.
- 王涛, 童英, 郭磊, 等, 2020. 侵入岩地质调查与填图方法. 北京: 地质出版社.
- 吴才来, 郜源红, 雷敏, 等, 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因. *岩石学报*, 30(8): 2297–2323.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. *中国科学: 地球科学*, 47(7): 745–765.
- 翟明国, 2017. 花岗岩: 大陆地质研究的突破口以及若干关键科学问题——“岩石学报”花岗岩专辑代序. *岩石学报*, 33(5): 1369–1380.
- 张金阳, 马昌前, 王人镜, 等, 2013. 周口店岩体矿物学、年代学、地球化学特征及其岩浆起源与演化. *地球科学*, 38(1): 68–86.
- 张旗, 2012. 花岗质岩浆能够结晶分离和演化吗? *岩石矿物学杂志*, 31(2): 252–260.