

## ·花岗岩新思维问题讨论·(1)

写在前面 花岗岩是地球科学最古老的研究对象之一,迄今已有几百年的历史。经过多少代人的努力,花岗岩研究已取得很大的成绩。自板块构造学说问世以来,一方面,花岗岩研究取得了很大的进步;另一方面,花岗岩研究也陷入了很大的误区。如何一分为二地看待花岗岩研究中的是是非非?如何清理花岗岩研究的思路?出路何在?这些都是亟待解决的问题。感谢《岩石矿物学杂志》提供了一个平台,使笔者能够系统地谈一下这方面的问题,虽然不可能面面俱到,但是,希望能够就花岗岩面临的某些问题做一次新的探索。文中观点可能与学术界流行的观点不同,笔者热诚欢迎大家(专家、学者、学生)不拘形式的批评和讨论。笔者相信,真理都是相对的,任何理论都是可以怀疑的,科学需要争论,科学不惧批评,只有创新才能发展科学。

# 花岗质岩浆能够结晶分离和演化吗?

张 旗

(中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029)

摘 要:学术界普遍认为花岗岩能够分离和演化,实际上这是不对的,理由是没有野外和镜下观察的证据。岩浆演化的理论是对的,该理论是从研究玄武质岩浆得来的,只适合玄武质岩浆而不适合花岗质岩浆。本文指出,鲍温反应原理不适用于花岗质岩浆。文中呼吁要重视区分幔源岩浆和壳源岩浆,幔源岩浆可以演化,但是,幔源岩浆不可能演化为壳源岩浆,壳源岩浆不可能演化。

关键词:花岗岩;玄武岩;鲍温反应原理;岩浆演化

中图分类号:P588.12<sup>+1</sup>

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2012)02-0252-09

## Could granitic magmas experience fractionation and evolution?

ZHANG Qi

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** It is commonly accepted that granitoid plutons can be produced by differentiation of granitic magmas. However, field observations of granitic plutons and textural relationship of the rocks fail to support such a viewpoint. The theory of magma differentiation is based on the study of basaltic magmas rather than granitic magmas. Likewise, the Bowen reaction principle is not applicable to the study of granitic magmas. It is crucial to distinguish mantle-derived magmas from crust-derived magmas prior to discussing the differentiation of magmas. It is possible for mantle-derived magmas to experience fractionation but impossible for crust-derived magmas to do so.

**Key words:** granite; basalt; Bowen reaction principle; evolution of magma

国内外有关花岗岩的研究文章多得无其数,所有这些文章在论及花岗岩成因时几乎没有不认为花岗岩能够结晶分离和演化的(fractionation and evolution)。问题是,这种见解对吗?笔者认为,花岗岩不

收稿日期:2011-11-15;修订日期:2012-01-25

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90714011,90714007)

作者简介:张 旗(1937-),研究员,岩石学和地球化学专业,E-mail:zq1937@sina.com.

可能结晶分离和演化,理由如下:

## 1 野外和镜下没有花岗岩结晶分离的证据

(1) 野外可以见到与辉长质岩浆有关的堆晶岩,见不到与花岗岩伴生的堆晶岩。与辉长质岩浆有关的堆晶岩是大家所熟知的,如蛇绿岩中的堆晶橄榄岩、辉石岩和辉长岩,层状侵入体的堆晶橄榄岩、辉石岩、辉长岩和斜长岩,阿拉斯加型环状侵入体从中心向外依次由超基性岩变为基性岩,大都是堆晶岩。国外著名的堆晶岩有南非 Bushveld、格陵兰 Skaergaard 以及津巴布韦大岩墙等(Wager and Brown, 1968),国内有四川攀枝花辉长岩以及河北大庙岩体等。此外,野外还可以见到与闪长质岩浆有关的堆晶岩,最著名的是由美国的 A. W. Snoke 命名的橄榄岩-闪长岩杂岩(peridotite-diorite complex, Snoke *et al.*, 1982)。在一个大的闪长岩体中分布有少量堆晶岩,包括单辉橄榄岩、辉石岩、辉长岩以及角闪石岩等,表明从闪长质岩浆中可以结晶出橄榄石、辉石和角闪石,它们可以堆积在一起形成不同成分的堆晶岩,类似阿拉斯加型的环状侵入体。国内的实例有云南景洪地区的南联山岩体(内有角闪橄榄岩、辉石岩、辉长岩和角闪石岩,张旗等, 1992),甘肃景泰地区的老虎山岩体(内包裹角闪石岩和辉长岩,钱青等, 1998)。此外,华北南部晋中—冀南—豫北—鲁西的一条高镁闪长岩带中也有少量基性和超基性堆晶岩出露。但是,与花岗岩相伴的堆晶岩在哪儿呢?大陆上花岗岩出露面积最大,如果花岗岩能够结晶分离,应当在野外见到与其相伴的堆晶岩,例如角闪石岩、角闪石-黑云母岩、角闪斜长岩等。一个面积达几百或几千平方公里的花岗岩体或岩基,如果有堆晶岩,堆晶岩至少应当有几平方公里的面积吧。可是,花岗岩的文献千千万万,这样的堆晶岩哪里有?国外曾有过“层状花岗岩(layered granite)”的报道(如 Paterson *et al.*, 2009),但是,所谓的“层状花岗岩”面积很小,层厚仅几米,大多不到 1 m,延伸也仅几米,很少有延伸达十几米的,主要由定向排列的角闪石组成。据笔者判断,大多可能是花岗岩流动构造的反映,部分还可能与花岗岩不同期次的侵位、花岗岩中暗色包裹体的解体以及卷入的围岩沉积岩有关。在北京八达岭碓臼峪花岗岩中即可观察到这种现象。因此,笔者认为此“层状花岗

岩”并非堆晶岩,也非结晶分离作用形成的。

(2) 喷出的玄武质岩浆和流纹质岩浆的构造不同,是它们黏性差异的反映。玄武质岩浆黏性低,喷出的岩浆大多为熔岩,形成熔岩流,属于宁静式喷发,以较快的速度流动,流纹质岩浆由于黏性大,喷出易受阻,常常以剧烈爆发的形式出现,如火山弹、火山角砾、火山渣等,并形成大量的火山灰。

(3) 岩相学观察表明,能够结晶分离的辉长岩和不能结晶分离的花岗岩的结构是不一样的。辉长岩具辉长结构,辉长结构的长石是自形的,包括快速结晶的辉绿岩(辉绿结构)和喷出的玄武岩(粗玄结构),它们的长石也是自形的,即使玄武岩中呈针状的微晶斜长石也不例外。花岗岩具花岗结构,花岗结构的长石大多是自形至半自形的,石英是它形的,说明花岗质岩浆的黏性大,阻止了斜长石在岩浆中的从容生长。有人认为花岗岩中某些巨晶长石的聚集是结晶分离的证据,但长石的密度与花岗质岩浆相差无几(钙长石  $2.74 \sim 2.76 \text{ g/cm}^3$ , 钠长石  $2.62 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ , 钾长石  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , 花岗岩  $2.6 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ , 引自张旗等, 2008),它怎么分离?

(4) 一个大的花岗岩体或岩基的组成往往很复杂,成分变化很大,可以有辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩以及钾长花岗岩等,结构有粗粒的、中粒的、细粒的以及斑状的等。有人认为它们之间是演化的关系,是从辉长岩演化为闪长岩再演化到花岗岩,实际上它们大多具侵入的接触关系,并非同期的。此外还有许多环状侵入体的报道,许多人认为,环状侵入体的边部偏基性,中心偏酸性,是岩浆演化分异的结果。其实这样的分布并非到处如此,而且从偏基性到偏酸性也不是演化的关系,它们很多都是不同成分、不同时代的侵入体。例如研究较详的美国加利福尼亚 Tuolumne 环状侵入体,由花岗闪长岩、英云闪长岩和花岗斑岩组成。早先的研究即已发现它们不是同期侵入的,从外到内,由老到新。后来,他们又对该岩体进行了详细的年代学研究(Coleman *et al.*, 2004),发现该岩套中不同侵入体的年龄变化在  $85 \sim 95 \text{ Ma}$  之间,并具有从外向内年龄渐新的规律(图 1)。同样的实例在国内也有,如杨富全等(2007)和马寅生等(2007)报道的天津蓟县盘山岩体。盘山花岗岩的主体为偏中性的官庄石英二长岩,边部为偏酸性的小盘山二长花岗岩(图 2),岩浆具环状分布但不是岩浆分异形成的,而是不同期次侵入的产物,侵入时间在  $203 \sim 207$

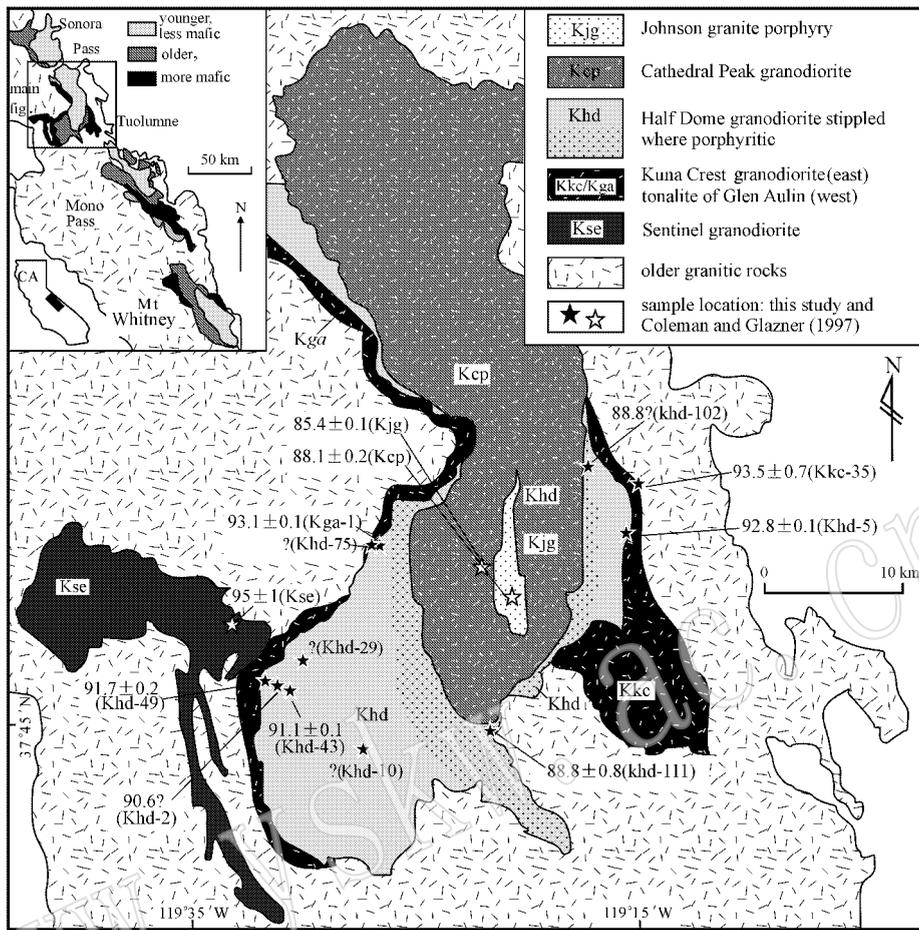


图 1 内华达 Tuolumne 不同侵入体就位年龄 (Coleman *et al.*, 2004)

Fig. 1 Emplacement age of individual plutons in the Tuolumne suite of Nevada (after Coleman *et al.*, 2004)

Ma 之间 (杨富全等, 2007; 马寅生等, 2007)。同样, 许多文献报道的火山岩剖面包括了从玄武岩-安山岩-流纹岩的组合, 不少也认为是演化的关系, 实际上是不可能的。玄武岩为幔源岩浆, 流纹岩为壳源岩浆, 幔源岩浆可以演化, 但是, 不可能演化到壳源岩浆, 而壳源岩浆是不可能演化的。所谓的火山岩连续演化的剖面, 仔细研究很可能是不同时期喷发形成的, 至少玄武岩和流纹岩不可能具有连续渐变过渡的关系。

## 2 锆石和磷灰石能结晶分离吗?

锆石和磷灰石等副矿物密度大 (磷灰石在 2.9~3.2 g/cm<sup>3</sup> 之间, 锆石高达 3.9~4.8 g/cm<sup>3</sup>) , 通常认为容易发生结晶分离作用, 许多人把花岗岩中 Zr 和 P 元素的变化简单地归结为锆石和磷灰石的结晶分离作用。实际情况是否这样呢? 恰恰相反。

我们知道, 玄武质岩浆黏性低, 有利于结晶分离的进行, 锆石虽然密度比玄武质岩浆 (如夏威夷基拉韦厄玄武岩为 2.6 g/cm<sup>3</sup>) 大得多, 但是, 在镜下并未见到锆石和磷灰石发生结晶分离的现象。锆石和磷灰石均呈自形晶产出, 分散分布, 并不聚集在一起, 也不富集在岩浆房的底部, 这很令人奇怪。在堆晶岩中, 橄榄石、辉石和斜长石都可以呈堆晶矿物产出, 而锆石却分散在残余岩浆中或在堆晶间矿物相中。这说明锆石虽然密度很大, 虽然呈很好的自形晶, 但是随着基性岩浆的分异演化, 锆石仍然留存于残余岩浆中, 并不发生结晶分离作用。锆石和磷灰石在黏性低的玄武质岩浆中都不能发生结晶分离作用, 何况黏性高的花岗质岩浆了。

锆石和磷灰石在玄武岩中为什么不发生结晶分离? 笔者早先也是丈二和尚摸不着头脑, 直到看了夏威夷火山岩的实验才解开这个谜团。在这里, 笔者推荐马昌前在 1989 发表的一篇文章: “结晶分异

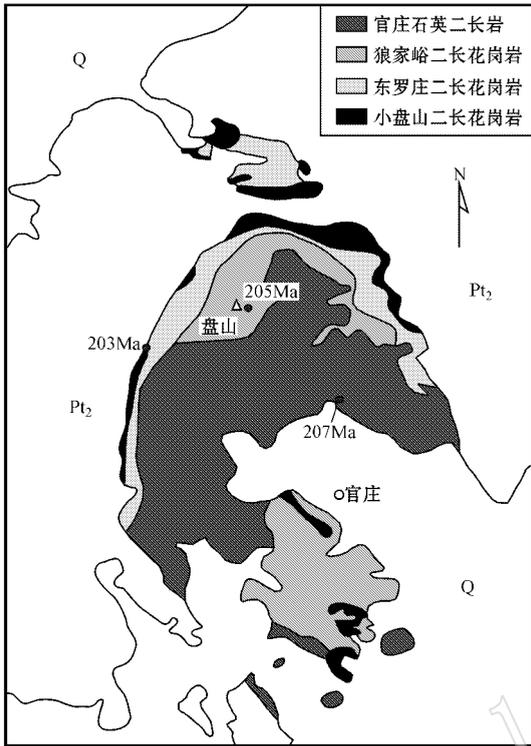


图 2 天津蓟县具环状分布的盘山花岗岩地质图  
[据杨富全等(2007)简化]

Fig. 2 Geological map of the Panshan pluton with zoned distribution in Jixian County, Tianjin (after Yang Fuquan et al., 2007)

作用的岩浆动力学条件”，该文介绍了国外在岩浆结晶分离方面研究的若干重要原理。文中公式多了一些，但是道理仍然是清楚的。文中指出，结晶分异作用最重要的方式之一是晶体的重力沉降。岩浆是一种黏性流体，可以用流体力学原理来考察其中晶体的行为。一般认为，在高于液相线温度条件下，可以把硅酸盐熔体当作牛顿流体来处理。这时，静止熔体中(含量很少的)球状晶体(可以理解为堆晶相矿物)的行为可用斯托克斯方程来描述，国外学者以夏威夷基拉韦厄火山为例做了很好的说明。

基拉韦厄火山于 1959 年喷发时在火山口内形成了一个 100 m 厚的玄武质熔岩湖，熔岩所含的橄榄石斑晶长 2~3 mm。按照斯托克斯方程估算，橄榄石晶体(密度 3.3~3.5 g/cm<sup>3</sup>)在几个月、至多 1~2 年内就能下沉到熔岩湖底部。但事实证明这一预测不正确。70 年代末钻孔取样发现，在熔岩湖上部的橄榄石斑晶大小和含量都跟 15 年前的情况相同，橄榄石并未沉入湖底。橄榄石为什么不下沉？研究

发现，原因是斯托克斯定律只适用于牛顿流体，而随着结晶的进行，岩浆的黏度急剧增大，含有一定量晶体的岩浆就不再表现出牛顿流体行为，斯托克斯定律也就不再适用。文中指出，当岩浆含有的晶体达到一定的体积比时，就具有有限屈服强度，表现出宾汉塑性体的流变学行为。花岗质岩浆即使含晶体很少，通常也具宾汉体的特征。野外实测和实验结果表明，在低于液相线温度时，无水硅酸盐熔体的屈服强度会随着晶体的不断析出而增大，岩浆成分愈趋酸性，屈服强度越大。只有当晶体生长到足够大时，才能克服岩浆的屈服强度而下沉。对于基拉韦厄火山岩而言，晶体大小只有超过 6.27 mm 才能下沉，而实际晶体只有 2~3 mm 大小，远远满足不了晶体下沉所要求的粒度，故橄榄石虽然密度大也不下沉(以上摘自马昌前, 1989, 略有修改)。

这是很有启发的，笔者早年在考察蛇绿岩和阿拉斯加型岩体时，野外见到的堆晶岩的矿物颗粒都比较大(大多在 1 cm 左右)，很少有粒度小的。当时不明白是什么原因，现在看来，可能也是受屈服强度的制约。因此，粒度比橄榄石更小的锆石和磷灰石当然更不可能发生结晶分离了，相信锆石和磷灰石能够发生结晶分离只是一厢情愿，既不符合事实，也没有依据。

有一种见解认为，花岗岩中的 Zr 是不相容元素，丰度低，富集于副矿物中，结晶晚，故不能结晶分离。其实结晶早晚与能否结晶分离没有关系。辉长质岩浆橄榄石结晶早，斜长石结晶晚，橄榄石和斜长石都可以成为自形晶，都可以结晶分离。一个矿物能否结晶分离，取决于 3 个因素：岩浆的黏性、矿物的密度和粒度。只要岩浆的黏性足够低，结晶的矿物密度超过岩浆，有较大的粒度，即可结晶分离。同样是斜长石，在辉长质岩浆中能够结晶分离，在花岗质岩浆中不能结晶分离，关键是受岩浆黏性的制约。锆石结晶晚，虽然密度很大，但是由于粒度小，不能结晶分离。尖晶石富相容元素 Cr，结晶早，在辉长岩中结晶顺序甚至可以排在橄榄石之前。虽然尖晶石密度很大，但是，由于尖晶石粒度小，同样不能结晶分离。

还可以举“可吸入颗粒物”的例子来加以说明。电视台每天的气象预报都有可吸入颗粒物含量的报告。什么是可吸入颗粒物？按照一般的说法，任何物质(固体和液体)的粒度 < 10 μm 即可漂浮在空气中成为可吸入颗粒物。煤灰、金属粉末、沙尘、橄榄

石、辉石、斜长石、石英、锆石、磷灰石、尖晶石、水、工业废物、有机物等等,都可以成为可吸入颗粒物。虽然这些物质的密度没有一个是低于空气的,但是,只要达到足够小的粒度,即可漂浮在空中。水珠很小即为云漂浮在空中,水珠聚成水滴即为雨落下来。锆石和磷灰石在玄武岩和花岗岩中的分散分布不就像空气中的可吸入颗粒物一样吗?因此,应当凡事问一个为什么,看看锆石在花岗岩和玄武岩中的分布,它是否能够结晶分离就一目了然了。

### 3 花岗岩有原始岩浆吗?

玄武岩有原始岩浆和演化岩浆之分,花岗岩有吗?花岗岩如果有,其标准是什么?如果认为花岗岩能够结晶分离,从逻辑上说,就回避不了原始岩浆的问题,实际上许多人认可花岗岩存在原始岩浆。

我们知道,玄武岩原始岩浆最重要的特征是富 Mg 贫 Fe, MgO 含量高,相应地,与橄榄石和辉石等矿物相容的 Cr、Ni、Co 等元素的丰度也高,通常以  $Mg^{\#}$  值 0.68~0.75 作为标志:在该值范围内的是原始岩浆,小于该值的是分离和演化的岩浆。例如 MORB 文献中发表的数据大多是经历了结晶分离的岩浆,真正的原始岩浆并不多,包括从海底扒捞和深海钻探得到的 MORB。洋岛玄武岩(OIB)和大陆溢流玄武岩(CFB)几乎都是演化的玄武岩,很少有原始岩浆出现的情况,说明大多数玄武质岩浆都经历过结晶分离作用。

大多数人认为花岗岩是能够分异和演化的,那么,花岗岩也应当有原始岩浆了,它们具有什么标志呢?玄武岩以  $Mg^{\#}$  为标志,花岗岩是贫 Mg 的,特别是富  $SiO_2$  的花岗岩, MgO 含量极低。玄武岩地球化学研究离不开对  $Mg^{\#}$  的讨论,表明玄武岩结晶分离作用是玄武岩成因和演化的一个非常重要的因素。而花岗岩文献的一个重要特点是很少对花岗岩全岩的  $Mg^{\#}$  进行讨论,所谓的花岗岩演化是从贫  $SiO_2$  的花岗质岩浆演化为富  $SiO_2$  的花岗质岩浆。可是,又怎样证明贫  $SiO_2$  的花岗质岩浆具有原始岩浆或接近原始岩浆的特征呢?实际上,花岗岩不能分离,很难演化。因此,花岗岩无所谓原始岩浆和演化岩浆之分,学术界至今拿不出原始的花岗岩和演化的花岗岩之间的区分标志,就否定了花岗岩有原始岩浆之说。

### 4 关于鲍温反应系列

鲍温反应系列是岩浆结晶分离理论的理论基础。鲍温是一位伟大的地质学家,早在上个世纪初即开展了对玄武质岩浆结晶分离的模拟研究,并结合岩石学观察和实验,提出了玄武质岩浆演化过程中矿物结晶顺序的一般规律,即著名的鲍温反应原理。其主要内容是:岩浆在结晶过程中先析出的矿物由于物理化学条件的改变,会与剩余岩浆发生反应,使矿物成分发生变化并形成新的矿物。随着温度的降低,反应继续进行,便有规律地产生一系列矿物(引自徐夕生和邱检生 2010)。

1928 年鲍温在其经典的《火成岩的演化》一书中指出,一个地区在特定时期侵入的(从镁铁质到长英质)多种多样的岩石,其矿物成分或化学成分总是会显示某种相似性,于是通常认为它们之间有着共同的成因联系,由此他引伸出了分异作用的概念。从此,现代岩浆岩岩石学在相当大的程度上就是围绕这一科学命题展开的(引自马昌前等,2003)。鲍温认为,随着岩石中  $SiO_2$  含量的增加,岩石将由玄武岩演化为安山岩、英安岩、流纹岩(相应的侵入岩为辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩),组成鲍温反应系列(图 3,引自都城秋穗等,1984)。该系列由连续的和连续的两支组成,连续系列为斜长石系列,该系列的特点是:先结晶的矿物与剩余岩浆发生反应,形成在成分上连续的但结晶格架不发生根本改变的一系列矿物,即从高温到低温依次由钙质斜长石向钠质斜长石方向转变。另一支不连续系列则反映了深色的镁铁质矿物从岩浆中晶出的先后顺序,其特点是先结晶的矿物与剩余岩浆反应,形成在成分和晶体结构上均有显著差异的一系列矿物,即由岛状结构的橄榄石到单链结构的辉石和双链结构的角闪石再到层状结构的黑云母,相邻矿物在结构和成分上都不呈渐变关系。随着温度的降低,从岩浆中可以同时晶出一种斜长石和一种镁铁质矿物。两支反应独立进行,两支之间处于同一水平位置的矿物可以构成共结关系,共结成分相当于某类岩石的主要矿物成分,如辉石与基性斜长石共结形成辉长岩,角闪石与中性斜长石共结形成闪长岩等。两个分支在下部汇合形成简单的不连续系列,石英为其最后结晶的产物(引自徐夕生和邱检生 2010)。鲍温认为,地球上火成岩具有多样性的原因是由于岩

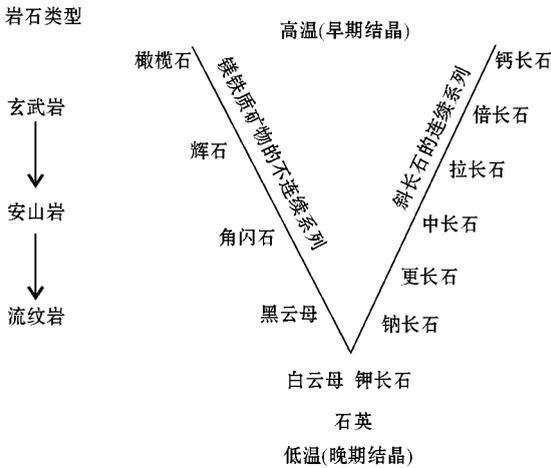


图 3 鲍温反应系列

Fig. 3 Bowen's reaction series

浆具有上述反应关系造成的(Bowen, 1928)。

从今天的角度,我们如何评价鲍温反应原理呢?笔者认为:

- (1) 鲍温反应原理是有历史功绩的,它对火成岩岩石学发展有着至关重要的贡献;
- (2) 对鲍温反应原理应当一分为二,鲍温反应原理正确的部分应当予以继承,错误的部分应当予以修正;
- (3) 具体来说,鲍温反应原理关于基性岩的部分仍然大体是正确的,因为有大量野外和实验岩石学资料的支持;
- (4) 鲍温反应原理中错误的部分大体有以下一些:

第一,鲍温主张单一岩浆来源说不对,岩浆应当是多源的。例如 I 型、S 型和 M 型花岗岩之间出现的明显差异可能主要是岩浆来源的不同所致。

第二,玄武岩和花岗岩是地球上分布最广的两类岩石,前者是幔源的,后者是壳源的,两类岩浆之间无必然的成因联系,二者研究的思路和方法也不同。因此,鲍温将二者一视同仁是不对的。区分开幔源岩浆和壳源岩浆是火成岩研究中最重要的前提。

第三,鲍温主张岩浆可以随 SiO<sub>2</sub> 含量增加而演化的说法不对。按照鲍温的见解,玄武岩可以演化为安山岩再演化为英安岩和流纹岩,相应的侵入岩由辉长岩演化到闪长岩再演化到花岗闪长岩和花岗岩。笔者认为,辉长质岩浆(幔源岩浆)可以演化,演化的结果仍然是辉长岩,在很少的情况下(有水的加入)可以演化到闪长质岩浆,但不可能再演化到花岗

质岩浆。而花岗质岩浆不可能演化,无论其是否含水 and 含水多少。

第四,鲍温反应原理的几个阶段,从局部看都是对的,但是,连续起来不对。例如,橄榄石可以演化为辉石,辉石可以被角闪石取代,角闪石可以被黑云母取代。但是,不存在橄榄石-辉石-角闪石-黑云母的一系列演化关系。自然界并不存在一个如图 3 所示的鲍温反应系列。鲍温反应系列至少应当被腰斩为幔源的和壳源的两段,而且两段之间无必然的成因关系。

图 4 为笔者尝试的对鲍温反应系列的修改,图中粗虚线分割开两个不同的岩浆系列,带箭头的细实线具演化的关系,细虚线部分不具有演化关系。该图可能很不完善,它所表述的意思是:① 基性岩浆是幔源的,幔源岩浆可以演化;② 酸性岩浆为壳源的,壳源岩浆不能演化;③ 幔源岩浆不可能演化为壳源岩浆;④ 安山质岩浆具过渡的性质,其中高镁的(闪长岩和安山岩)是幔源的,遵循幔源岩浆的规律,低镁的(安山岩和闪长岩)是壳源的,遵循壳源岩浆的规律。

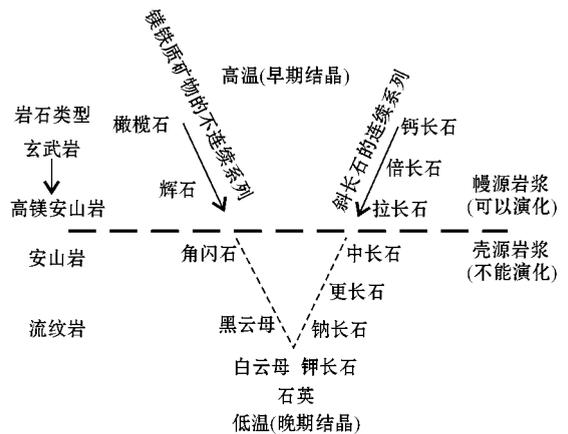


图 4 修改后的鲍温反应系列

Fig. 4 Revised Bowen's reaction series

有一种见解在学术界很流行,认为花岗岩可以是玄武质岩浆结晶分离形成的(如某些双峰式火山岩)。其实这种说法可能性很小。在许多层状侵入体中常见花岗岩或石英闪长岩出露,如著名的 Bushiveld、Skaergaard 及攀枝花岩体等。仔细阅读文献发现,具层状分布的镁铁质和超镁铁质堆晶岩是连续过渡的,包括矿物成分的变化。而花岗岩大多呈单独的侵入体产出,与层状分布的镁铁质和超镁铁质堆晶岩不具连续过渡的分布,也不整合在镁铁

质堆晶岩之上。此外,花岗岩的成分与基性堆晶岩也有很大的间断。因此,与基性-超基性堆晶岩伴生的花岗岩不可能是基性岩结晶分离形成的,应当是基性岩部分熔融形成的。

#### 4 花岗岩能够演化的理论为什么备受推崇?

花岗岩能够演化的理论至今仍然备受推崇的原因是什么?笔者猜测,可能有下列 3 个支柱在支撑着这个理论:① 理论支柱:鲍温反应原理;② 方法支柱:哈克图解;③ 逻辑支柱:三段论法。花岗岩结晶分离的理论被鲍温反应原理误导了,被哈克图解误导了,被三段论法误导了。关于鲍温反应原理本文已经讨论了,哈克图解问题笔者将在下一篇予以讨论,下面谈谈三段论法问题。

我们知道,三段论法是逻辑学一个著名的法则,人们的认识很多是从这里得来的。三段论法指的是大前提、小前提和结论,遵循的原则是:如果大前提成立,小前提也成立,则结论正确。例如:

岩浆能够分离和演化,玄武岩是岩浆,所以玄武岩能够分离和演化(三段论 1)。

这里“岩浆能够分离和演化”是大前提,大前提正确;“玄武岩是岩浆”是小前提,小前提正确;“玄武岩能够分离和演化”是结论,于是结论正确。在这里,最关键的是大前提要正确,如果大前提出错,结论必错;其次,小前提必须与大前提一致,如果小前提与大前提不一致,结论也必错无疑。

又如:

岩浆能够分离和演化,花岗岩是岩浆,所以花岗岩能够分离和演化(三段论 2)。

这里“岩浆能够分离和演化”是大前提,正确;“花岗岩是岩浆”是小前提,正确;于是人们认为“花岗岩能够分离和演化”的结论是正确的。这个认识持续了几十年,很少有持异议的。因为,从三段论法上说,它合乎逻辑,没有任何错误。

然而,在上述三段论 1 和三段论 2 中,实际上正确的是三段论 1,三段论 2 不正确。为什么?因为三段论 1 经过了实践的检验而证明是对的,而三段论 2 经不起实践的检验而被证明为不正确的。为什么三段论 2 不正确?三段论法适合玄武岩,为什么不适

合花岗岩?原因在于真理的条件没有说清楚,大前提不正确。岩浆能够分离和演化是客观真理,但是这个真理是相对的,是有条件的,条件就是岩浆的黏度不能太大。玄武岩和花岗岩都是有黏性的,只不过黏性大小不同而已。玄武岩岩浆黏性小,结晶的矿物密度大可以克服岩浆黏性的阻力向下沉,于是,岩浆就发生了分离,残余岩浆就发生了演化。花岗岩岩浆由于黏性大,结晶的矿物(角闪石和斜长石)的密度不够大,矿物的重力就不足以克服岩浆的黏性而下沉,岩浆就不能分离和演化。于是,上述三段论应当修改大前提,将原来的三段论 1:

岩浆能够分离和演化,玄武岩是岩浆,所以玄武岩能够分离和演化。

修改为(修改的部分以黑体字表示):

黏性低的岩浆能够分离和演化,玄武岩是黏性低的岩浆,所以玄武岩能够分离和演化(三段论 3)。

玄武岩符合上述大前提的条件:黏性低的岩浆,所以结论正确。

对于花岗岩来说,应将原来的三段论 2 修改为:

黏性低的岩浆能够分离和演化,花岗岩是黏性高的岩浆(或花岗岩不是黏性低的岩浆),所以花岗岩不能够分离和演化(三段论 4)。

在三段论 4 中,花岗岩这个小前提(黏性高)不符合上述大前提(黏性低)的条件,因此“花岗岩能够分离和演化”的结论是错的,而“花岗岩不能够分离和演化”的结论是正确的。

在这里,关键不是三段论法有什么对或错,而是由三段论法得出的结论还需要经由实践的检验才能证明其是对还是错。

但是,三段论 2“岩浆能够分离和演化,花岗岩是岩浆,所以花岗岩能够分离和演化”已经深入人心,许多人信服这个推理,想不到这个结论还需要一个前提(黏性低),想不到还需要经由实践来检验(野外和镜下岩相学证据)。人们忽略了“黏性低的岩浆才能够演化”这个大前提和先决条件,致使“花岗岩能够结晶分离”的概念十分流行,这就是学术界目前的现状,无奈和尴尬。虽然实践已经证明三段论 2 是错误的,应当修正为三段论 4,但是,人们依然近乎盲目地推崇和信赖三段论 2。看来,一个正确的认识,一个真理被大家接受,是需要时间的。

## 5 结语

(1) 岩浆是能够演化的,也能够结晶分离,这个理论是对的。但是,在这里笔者强调两点:一,该理论是从研究玄武质岩浆得出来的;二,因此,该理论只适合玄武质岩浆而不适合花岗质岩浆。因为,岩浆演化受制于岩浆的温度、压力、黏性、密度、成分、挥发分及岩浆中固结物的含量。这里黏性是一个重要的因素,黏性低的岩浆可以容许矿物自由生长,岩浆可以演化;而黏性高的岩浆则不利于矿物的自由生长,故岩浆很难演化。综合各种因素及实验研究结果表明,基性成分的岩浆可以发生结晶分离,结晶分离基本上只是在基性岩浆范围内进行,少数情况下(含一定量水)可以演化为中性岩浆,而酸性成分的岩浆很难发生结晶分离和演化。

(2) 花岗岩能够分离和演化的理论流行了许多年,却是一个错误的说法。因为它缺乏证据,因为它经不起实践的检验。野外和室内既没有花岗岩结晶分离的证据,为什么人们还相信它?可能是错误理论的误导,其中鲍温反应原理是最应当反思的。鲍温反应原理在上个世纪初堪称先进,但是,无论它怎样先进,它仍然属于相对真理,随着时间的推移和科学的发展,必然要被新的理论所代替或改变,这是科学发展的必然,就如伟大的牛顿经典力学一样,不可避免地要让位于量子力学和相对论。同样,光辉夺目的爱因斯坦相对论以后也一定会被更加先进的理论所替代。科学发展遵循否定之否定的规律,鲍温反应原理某些错误的部分被否定,是科学进步的表现,并不掩盖它的光辉和历史功绩。但是,科学发展到今天,如果仍然对鲍温反应原理津津乐道,抱残守缺,就不是科学的态度了。

(3) 实践表明,火成岩研究一个最重要的前提是要区分开幔源岩浆和壳源岩浆,它们的成因理论和研究方法均不相同。岩浆演化的理论适用于幔源岩浆而不适用于壳源岩浆。幔源岩浆可以演化和分异,但是,幔源岩浆不可能演化为壳源岩浆,壳源岩浆不可能演化。

(4) “怀疑一切”是马克思最喜欢的格言,这句话最早是笛卡尔说的。“70名哈佛学生对金融危机不满罢大牌教授的课”的报道(<http://www.sznews.com> 2011-11-17 17:56 来源:青年参考)很有意思,它的启迪是:“对一切结论持怀疑态度”是哈佛重要的

一课。人云亦云是中国学术界当前最大的毛病。花岗岩结晶分离的理论流行了多年,是否可以怀疑一下呢?古人云:心之官则思。我们必须学会思考,不迷信外国人,不迷信权威认识,有一种打破砂锅问到底的精神,这样才能创新,中国科学才有希望。

致谢 马昌前教授审阅了本文并提出了很好的意见,笔者按照他的审稿意见对本文做了适当的修改,包括论文题目。此前,笔者在2010年曾就锆石能否分离的问题请教过马昌前教授,他指出两点:“1,对夏威夷基拉韦厄火山的实验是在地表的熔岩流中观察的,下部没有持续的热源供热,岩浆会越来越向非牛顿流体方向发展。不过,对深部(比如在莫霍面附近)和软流圈上隆的区域内的岩浆房,情况就可能有些差别。2,玄武岩等缺少锆石的分离结晶,不光是一个岩浆性质问题,还与Zr在玄武岩浆中是一个高度不相容元素有关。因此,锆石不会早早地就结晶出来,只有在最晚期才会有所富集”。笔者接受马昌前的第1点意见,对第2点意见笔者有不同的理解,在文中已有所讨论。在此对马昌前教授致以衷心的感谢。

## References

- Bowen N J. 1928. *The Evolution of the Igneous Rocks*[M]. Princeton N J: Princeton University Press.
- Coleman D S, Gray W and Glazner A F. 2004. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California [J]. *Geology*, 32: 433~436.
- Ma Changqian. 1989. Magma-dynamical conditions on crystallization differentiation[J]. *Earth Science*, 14: 245~252 (in Chinese).
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Ming Houli, et al. 2003. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites [J]. *Science in China(D)*: 47: 453~462.
- Ma Yinsheng, Zeng Qingli, Song Biao, et al. 2007. SHRIMP U-Pb dating of zircon from Panshan granitoid pluton in Yanshan orogenic belt and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 547~556 (in Chinese with English abstract).
- Miyashiro A and Kawamoto T (translated by Chang Ziwen, et al.). 1984. *Petrology*[M]. Beijing: Science Press, 1~344 (in Chinese).
- Paterson J S R, Janousek V and Kabele P. 2009. The Mammoth Peak sheeted complex, Tuolumne batholith, Sierra Nevada, California: a record of initial growth or late thermal contraction in a magma

- chamber[ J ]? Contrib. Mineral. Petrol. , 158 : 447~470.
- Qian Qing , Wang Yueming , Li Huimin , *et al.* 1998. Geochemical characteristics and genesis of diorites from Laohushan , Gansu Provind[ J ]. Acta Petrologica Sinica , 14 : 520~528( in Chinese with English abstract ).
- Snoke A W , Sharp W D , Wright J E , *et al.* 1982. Significance of mid-Mesozoic peridotite to dioritic intrusive complex , Klamath Mountains , western Sierra Nevada , California[ J ]. Geology , 10 : 160~166.
- Wager L R and Brown G M. 1968. Layered Igneous Rock[ M ]. Edinburgh and London : Oliver and Boyd.
- Xu Xisheng and Qiu Jiansheng. 2010. Igneous Petrology[ M ]. Beijing : Science Press( in Chinese with English abstract ).
- Yang Fuquan , Zhao Yue , Zeng Qingli , *et al.* 2007. I- and A-type composite granites of the Panshan pluton in the Jixian , Tianjin : a record of regional tectonic transformation ? [ J ]. Acta Petrologica Sinica , 23 : 529~546( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qi , Wang Yan , Xiong Xiaolin , *et al.* 2008. Adakite and Granite : Challenge and Opportunity[ M ]. Beijing : China Land Press( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qi , Zhang Kuiwu and Li Dazhou. 1992. Mafic-Ultramafic Rocks in Hengduan Mountains Region[ M ]. Beijing : Science Press( in Chinese ).

## 附中文参考文献

- 都城秋穗,久城育夫(常子文等译).1984.岩石学[M].北京:科学出版社,1~344.
- 马昌前.1989.结晶分异作用的岩浆动力学条件[J].地球科学,14:245~252.
- 马昌前,杨坤光,明厚利,等.2003.大别山中生代地壳从挤压向伸展的时间:花岗岩的证据[J].中国科学(D),33:817~827.
- 马寅生,曾庆利,宋彪,等.2007.燕山中段盘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定及其构造意义[J].岩石学报,23:547~556.
- 钱青,王岳明,李惠民,等.1998.甘肃老虎山闪长岩的地球化学特征及其成因[J].岩石学报,14:520~528.
- 徐夕生,邱检生.2010.火成岩岩石学[M].北京:科学出版社.
- 杨富全,赵越,曾庆利,等.2007.天津蓟县盘山 I 型-A 型复合花岗岩体区域构造环境转变的记录[J].岩石学报,23:529~546.
- 张旗,王焰,熊小林,等.2008.埃达克岩和花岗岩:挑战与机遇[M].北京:中国大地出版社.
- 张旗,张魁武,李达周.1992.横断山区镁铁-超镁铁岩[M].北京:科学出版社.