

花岗岩成因研究的若干问题*

吴福元¹ 李献华¹ 杨进辉¹ 郑永飞²

WU FuYuan¹, LI XianHua¹, YANG JinHui¹ and ZHENG YongFei²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院 壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026

1. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, Chinese Academy of Sciences; School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

2007-02-12 收稿, 2007-05-20 改回.

WU FY, LI XH, YANG JH and ZHENG YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1217-1238

Abstract As a major component of continental crust, granites have been served as the most important subject in geology. Based on advancements obtained during past decades, this paper provides a comprehensive overview about the issues related to granitic formation. As for genetic types, the classifications between I-, S- and A-type granites are sometimes difficult, especially for those of highly fractionated rocks. It is stated that the concentrations of zirconium in whole-rock and titanium in zircon can be used to provide information on the temperature of partial melting and magma crystallization, but the pressure under which the source partially melted is hard to estimate. The granites are mostly occurred in the subduction zones and post-orogenic extensional settings, where the inputs of volatile and heat resulted in crustal partial melting of orogenic roots, and then the formation of granites. The traditionally used geochemical diagrams for the tectonic discrimination could not get right answer in most cases. This paper also presents a concise summary about the recent achievements of granitic study in China. Finally, potential breakthroughs for the Mesozoic granites in eastern China are explored.

Key words Granites, Genetic type, Petrogenesis, Mesozoic, Eastern China

摘要 花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,是地质学研究的重要课题。本文对当前花岗岩研究中的几个重要问题进行了讨论,内容包括:(1)花岗岩的成因分类,(2)花岗岩浆起源的温度与压力条件,(3)结晶分异作用与花岗岩成分变化,(4)花岗岩成因与壳幔演化,(5)花岗岩形成的构造环境等。通过分析认为,高分异花岗岩成因类型的确定是比较困难的,在有些情况甚至不可能准确分类。花岗岩的锆饱和温度和锆石钛温度计可对花岗岩浆形成的温度提供重要信息,但花岗岩浆起源的压力条件确定相对困难。花岗岩主要形成于俯冲带或碰撞造山带后造山的拉张构造背景中,在这两种情况下,挥发份和热的加入可使地壳发生部分熔融而形成花岗岩。本文还对我国近年来花岗岩研究的进展情况做了概要性叙述,并就我国东部中生代花岗岩研究的近期突破问题进行了分析。

关键词 花岗岩;成因分类;成因;中生代;中国东部

中图分类号 P588.121

花岗岩是地球大陆地壳的重要组成部分,是地球区别于太阳系内其他行星的重要标志。尽管花岗岩的组成矿物较其他类型岩石简单,但关于花岗岩形成与演化的一系列问题

一直存在激烈的争论,这就是著名的“granites and granites”(有各种各样的花岗岩)(Read, 1948)的由来。随着近年来大陆动力学研究的开展,花岗岩问题成为新一轮地球科学研

* 国家自然科学基金资助项目(40325006, 40523003)研究成果。

第一作者简介:吴福元,男,1962年生,研究员,岩石学与地球化学专业, E-mail: wufuyuan@mail.igcas.ac.cn

究的热点与重点。新的野外观察和高质量分析资料的获得,使人们较以前对花岗岩的认识有了很大进步,但仍存在很多亟待解决的问题。本文主要结合近年来我国花岗岩研究的情况,对当前花岗岩研究中的若干问题进行讨论。但由于受作者知识积累和学术水平的限制,有些问题的讨论很不深刻,甚至出现错误,请读者指正。

1 花岗岩的分类问题

上世纪 80 年代是花岗岩分类研究的鼎盛时期,国内外学者从不同侧面提出了近 20 种花岗岩的成因分类方案。通过 20 年的研究,这些方案中的大部分已不再被有关研究者所采纳和应用。相比之下,以岩浆源区性质区分的 I (intracrustal 或 igneous)、S (supracrustal 或 sedimentary) 型花岗岩分类被大多数学者所接受。加上目前经常讨论的 A (alkaline, anorogenic 和 anhydrous) 型和较为少见的 M (mantle-derived) 型, MISA (即 M、I、S 和 A 型) 是目前最常用的花岗岩成因分类方案。但从它们的原始英文定义可以看出,这些分类的参照系是不同的。

另一个有别于上述成因分类的是根据花岗岩化学成分而确定的准铝 (metaluminous)、过铝 (peraluminous) 和过碱性 (peralkaline) 的成分分类。由于花岗岩通常具有较高的 SiO₂ 含量,一般岩浆岩中的拉斑、钙碱性和碱性系列的划分在花岗岩研究中并不经常被采用,即便是 Frost *et al.* (2001) 最近根据铁镁相对含量而提出的分类也不被大多数研究者所青睐。

到目前为止,已有大量的文献论述 I、S 和 A 型花岗岩的区别及成因机制。我们对此不必作更多的论述,只是强调,角闪石、堇青石和碱性暗色矿物是判断上述三大类型花岗岩的重要矿物学标志,而白云母和石榴石并不是鉴定 S 型花岗岩的有效标志 (Miller, 1985)。同时,很多人经常运用的

Sr-Nd 同位素等指标实际上与 I、S 和 A 型花岗岩的分类无关,因为这些同位素比值更多地反映的是岩浆源区的时代及其同位素演化特征。但需要指出的是,无论是 I 型、S 型或者是 A 型,当它们经历高度分异结晶作用之后,其矿物组成和化学成分都趋近于低共结的花岗岩,从而使得上述三类型的鉴定出现困难,甚至不可能。首先是 I 和 S 型的划分,早期研究提出以含铝指数 [Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 摩尔分数比] 1.1 作为两者的分界 (Chappell and White, 1974, 1992), 这一指标虽然适用于未经强烈结晶分异的花岗岩 (图 1 左), 但明显在高分异的花岗岩判别中失效 (图 1 右)。根据近年来的研究 (Chappell and White, 1992), P₂O₅、Th、Ba、Rb 等元素可能是判断上述两类花岗岩的较为可靠的标志, 但最可靠的还是寻找与高分异花岗岩相关的偏镁铁质的岩石, 因为它们较多地保留了原始的矿物学和地球化学特征, 在分类上比较容易进行。

花岗岩分类的第二个问题是最近鉴定出的高分异型具有稀土元素四分组效应 (Tetrad effect) 花岗岩的成因类型判定。实际上, 该类型花岗岩首先是在我国华南地区发现的 (Masuda and Akagi, 1989), 它经常与区内大规模成矿作用关系密切。根据目前我们掌握的资料, 我国东北地区有两类此种花岗岩出现 (图 2)。其一是以含碱性暗色矿物为特征的巴尔哲岩体 (Jahn *et al.*, 2001), 其岩石稀土和其它微量元素含量明显比正常花岗岩高出许多; 第二是以含白云母和石榴石为特征的卧都河、东清和香水园子岩体 (Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2004), 其稀土和微量元素含量比前者低 1~2 个数量级。按照目前 A 型花岗岩的判别图解, 这些岩体均属于 A 型花岗岩。虽然目前对这类花岗岩的成因还存在争议 (Monecke *et al.*, 2007), 但大多认为其与岩浆结晶晚期熔体-流体的强烈相互作用有关 (Bau, 1996; Irber, 1999; Jahn *et al.*, 2001), 即在晚期结晶时, 元素的行为已发生了很大变化, 因此对它们成因类型的鉴定只能借助于其它标志。巴尔

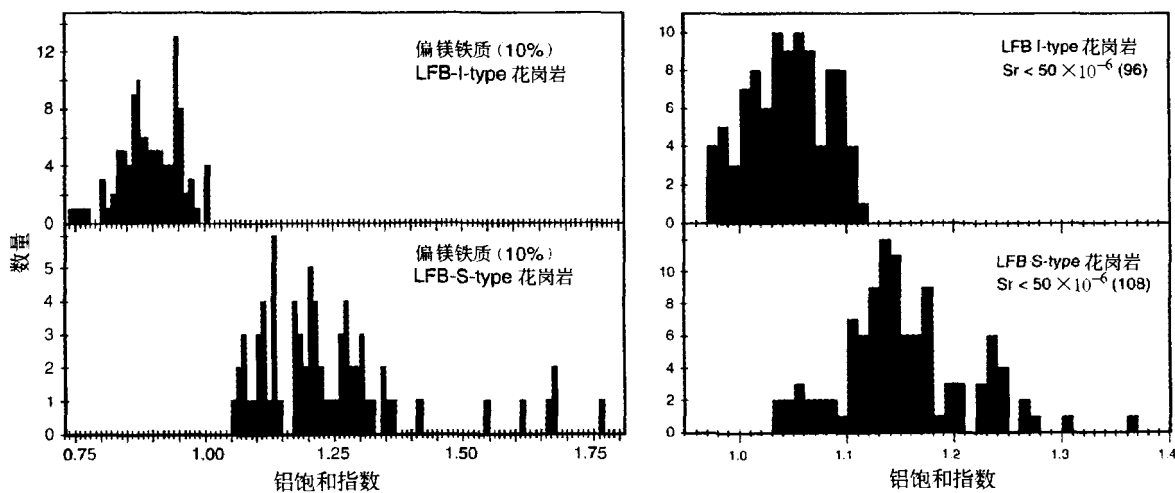


图 1 澳大利亚拉克兰褶皱带花岗岩含铝指数特征 (Chappell, 1999)

Fig. 1 Aluminium Saturation Index of the granites in the Lachlan Fold Belt (LFB) of Australia (Chappell, 1999)

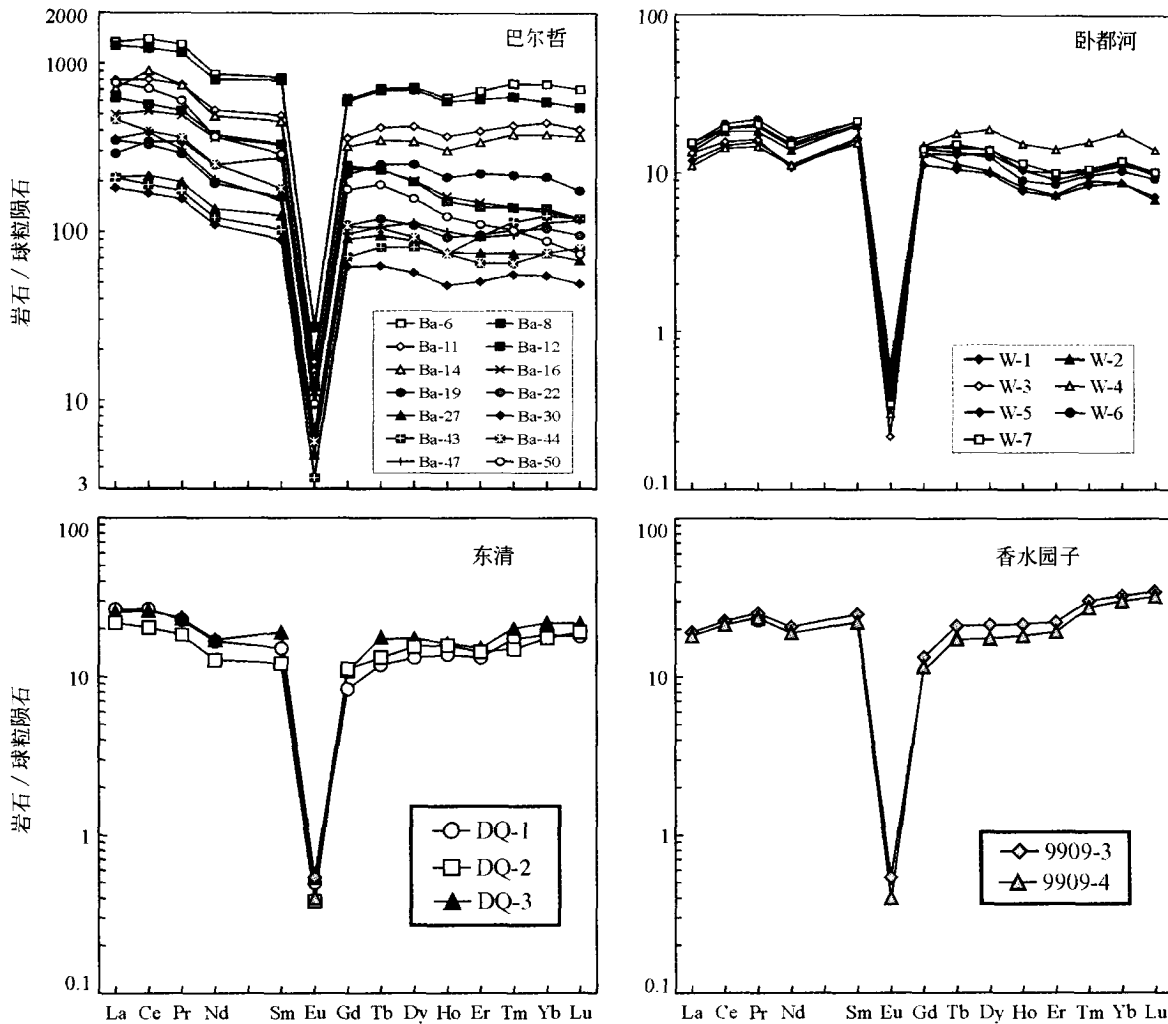


图2 东北地区具四分组效应稀土型式的花岗岩 (Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2004)

Fig.2 Tetrad effect granites in northeastern China (Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2004)

哲岩体由于含有碱性暗色矿物而无疑属于 A 型花岗岩,东清和香水园子岩体由于与区内同时代 I 型花岗岩伴生而应属于 I 型花岗岩 (Wu *et al.*, 2004),但大兴安岭地区的卧都河岩体与周围的 I 型花岗岩并不同时,因而我们曾将其归于 A 型 (Jahn *et al.*, 2001),但现在看来,我们的认识仍需要进一步的论证。

虽然稀土元素四分组效应花岗岩在我国分布较多,但目前的研究仍很有限。除东北外,我国华南此类岩石大量发育,如千里山岩体。在新疆地区,不少含天河石的花岗岩也都具有此种特征。由于这类花岗岩与成矿作用关系密切,应引起我们更多的注意。但我们强调的是,对此类花岗岩成因类型的确定是非常困难的,甚至目前还没有可靠的方法来确定其成因类型。

花岗岩分类中的另一个问题是 A 型花岗岩的鉴定。传统上 A 型花岗岩是无水、碱性和非造山的 (Loiselle and Wones, 1979),但现在定义已发生很大的变化 (Bonin, 2007)。如有时 A 型花岗岩并不贫水,不少 A 型花岗岩是过

铝质的,且大多数 A 型花岗岩形成于造山后而不是非造山的环境。由于目前的研究大多赞同 A 型花岗岩来自于火成岩为源岩的源区 (King *et al.*, 1997, 2001),因此有研究者认为 A 型花岗岩只是 I 型花岗岩的一种, A 型没有继续存在的必要 (Creaser *et al.*, 1991)。但是,考虑 A 型花岗岩的独特矿物组成以及它在反映构造背景方面的特殊意义,大多数研究者仍赞同保留这一类型,问题是 A 型花岗岩如何鉴定。在通常情况下,碱性暗色矿物,如钠闪石-钠铁闪石、霓石-霓辉石、铁橄榄石等厘定 A 型花岗岩的重要矿物学标志 (过碱性 A 型花岗岩)。但在高分异情况下 (铝质 A 型花岗岩), I 和 S 型花岗岩具有与 A 型花岗岩相同的矿物学与地球化学特点,从而导致成因类型判定的困难 (Chappell and White, 1992)。如果采用目前常用的 $1000 \times Ga/Al = 2.6$ 为 A 型花岗岩的判别标志 (Whalen *et al.*, 1987),这些高分异花岗岩全为 A 型。在我国的华南,不少岩体以前认为是 S 型,前几年有研究者认为是 A 型,就是一个典型的例子。

由于 Whalen *et al.* (1987) 提出的判别标准是根据当时

有限的资料而得出的,现在看来有重新评介这些标准的必要。其一,如果采用 $1000 \times \text{Ga}/\text{Al} > 2.6$ 为 A 型花岗岩的判定标准,不少高分异的 I-和 S-型花岗岩均落入 A 型花岗岩区。其二, A 型花岗岩由于其富碱性性质而往往具有较高的 Zr、Nb、Ce 和 Y 含量,但如果我们以 $\text{Zr} > 250 \times 10^{-6}$, $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} > 350 \times 10^{-6}$ 为判别标准,强分异的 A 型花岗岩则不属于 A 型,因为 A 型花岗岩如果经历强烈的结晶分异作用,其 Zr 含量甚至可低至 100×10^{-6} 左右 (King *et al.*, 2001),从而表现出与高分异 I 型花岗岩相同的特点。因此,在无较富镁铁质岩石伴生的情况下, A 型花岗岩的确定非常困难。尽管如此,我们认为 Whalen *et al.* (1987) 的指标仍是判定 A 型花岗岩最有效的方法,部分国内学者采用的其他一些判别图解会经常使 A 型花岗岩的判定扩大化。

无论 A 型花岗岩怎样成因,有一点大家比较公认,即该类岩石的形成温度较高,而且部分 A 型花岗岩形成压力还较低(即来源于较浅部的中上地壳),这不仅有岩石学依据,也得到实验岩石学资料的支持 (Clemens *et al.*, 1986; Patino Douce, 1997)。因此,正常的 I 或者 S 型花岗岩经分异作用是形成不了 A 型花岗岩的。

2 花岗岩浆起源的温度与压力条件

花岗岩研究中一个较难获取的资料是岩浆形成时的温压条件。以前人们认为,混合岩可能是花岗岩形成的初级阶段,这样通过原地-半原地和异地混合岩中原地类型的研究便可对花岗岩浆起源的情况有所了解,但现在人们认识到,混合岩在很大程度上不能代表花岗岩浆形成时的情况,或最多只能代表有限的水饱和情形下花岗岩浆的形成,因此我们目前对花岗岩浆起源温度压力的认识主要是基于实验岩石学资料。然而问题是,花岗岩是千差万别的,我们不可能对所有的岩石都进行实验岩石学工作。因此温压资料的匮乏在一定程度上影响了花岗岩成因问题的讨论,我们不得不借助于其它方面的方法来获取相关信息。首先是温度,由于花岗岩浆大多是绝热式上升就位的,那么岩浆在早期结晶时的温度可以近似代表岩浆形成时的温度。在这方面,目前有两种办法。其一是锆石饱和温度计算 (Watson and Harrison, 1983), 第二是锆石的钛温度计 (Watson and Harrison, 2005)。

对于前者,其基本原理是 Zr 这一元素在岩浆中的含量与温度存在相关性。Chappell *et al.* (1998, 2001, 2004) 发现,澳大利亚拉克兰地区花岗岩明显可划分为高温 (high temperature) 和低温 (low temperature) 花岗岩两类。其中高温花岗岩在早期由于 Zr 含量较低(未饱和),表现出随温度增加 Zr 含量增加的规律;随着岩浆结晶作用的持续进行, Zr 含量由于达到过饱和而发生降低。而低温花岗岩含有较多的残留锆石,岩浆一开始结晶时 Zr 就达到了饱和,因而只表现为结晶过程中 Zr 含量降低的特点。很显然,前者计算的温度代表了岩浆的最低温度,而后者反映的是最高温度。

对于上述这两类不同温度花岗岩的成因, Chappell 等人认为可能与源区物质成分有关系,即高温花岗岩来源于镁铁质源岩,而低温花岗岩的源区可能是长英质的。很显然这种解释难以令人置信,因为我们并没有发现花岗岩的岩石类型与温度之间存在明显的相关性。同样, Miller *et al.* (2003) 根据锆石饱和温度,提出热 (hot) 和冷 (cold) 花岗岩的概念。其中前者的温度大约在 840°C 左右,含源区残留物较少,其形成可能与外来热的加入有关;而后的温度不超过 800°C (平均为 766°C),含源区残留物较多,其形成主要与流体加入有关。很显然,在强调花岗岩形成热源的今天,上述关于花岗岩温度的讨论将为花岗岩的成因研究提供新的思路 (Claiborne *et al.*, 2006)。

关于花岗岩中锆石钛温度计的使用,目前还较少有资料发表 (Watson and Harrison, 2005; Watson *et al.*, 2006)。

除上述方法以外,目前采用的还有磷灰石、金红石和长石等温度计。但磷灰石温度计不适用于高硅的花岗岩 (Harrison and Watson, 1984),长石温度计给出的温度一般较低,而金红石温度计目前还较少有资料发表 (Zack *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2006)。

花岗岩中第二个重要的物理化学参数是压力,对这一问题的讨论难度更大。我们有较好的办法来获得岩浆结晶时的压力(或深度)资料 (Anderson, 1997),但对岩浆起源时的深度,目前所知甚少。近几年来热烈讨论的 adakite 对这一问题的解决提供了重要信息。由于花岗岩的源岩主要是中基性的岩石,它们在熔融时主要受石榴石、角闪石和斜长石等矿物的制约。根据实验岩石学资料(图 3),如果岩浆源区存在斜长石,则表明岩浆起源的压力较低 ($< 10\text{kb}$ 或 30km)。但若源区中出现石榴石,其形成的压力明显升高。特别是,如果源区中不存在角闪石,则形成的深度可能达到 $60 \sim 70\text{km}$ 。但问题是,虽然我们目前可以较有把握地确定石榴石的存在,但难以有有效的手段来判断源区中不存在角闪石,而角闪石又是判断源区含水量的重要矿物。

在这一研究中,我国学者熊小林对 TTG 型岩石的微量元素分配系数进行了大量研究,提出该岩石中 Nb、Ta 异常受控于金红石,进而推导出该岩石起源于 $50 \sim 80\text{km}$ 的深度 (Xiong, 2006),为 TTG 岩石的成因争论 (Foley *et al.*, 2002; Rapp *et al.*, 2003) 提供了重要资料。

3 结晶分异作用与花岗岩成分演化

和玄武岩不同,花岗质岩浆在很大程度上表现为晶粥体 (Pitcher, 1997),其发生分离结晶作用的可能性大为降低,因而部分学者反对花岗岩的分离结晶作用研究 (Reid *et al.*, 1993)。但野外实际观察和室内研究发现有大量此类地质作用存在的证据 (Pitcher, 1997; Cobbing, 2000)。因此,目前对花岗质岩浆分离结晶作用的认识形成两种截然不同的观点。

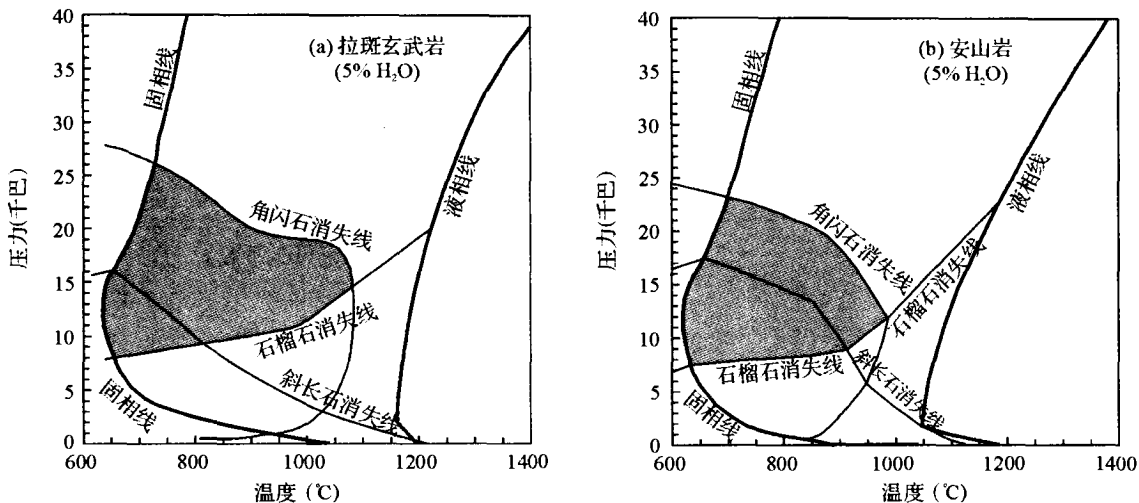


图3 5% H₂O 情形下拉斑玄武岩和安山岩相图 (据 Green (1982) 简化)

Fig. 3 Phase diagrams of the tholeiite and andesite with 5% H₂O (simplified from Green (1982))

Chappell 等人在一系列文章中强调残留体与熔体的分凝过程是控制花岗岩成分演化的重要机制 (Chappell and white, 1992; Chappell *et al.*, 1987)。按照这一学术思想, 我们所获得的岩石化学成分并不代表岩浆的成分, 且其中应存在大量的源区矿物残留。但详细的岩相研究并没有发现拟应存在的源区矿物, 如高钙斜长石残留等。因此, 绝大部分花岗岩研究者并不赞成这一观点 (Collins, 1998; Clemens, 2003)。

但是, 最近美国学者对内华达地区著名的 Tuolumne 岩套进行了仔细的年代学研究 (Coleman *et al.*, 2004), 结果发现, 该岩套中不同侵入体的锆石 U-Pb 年龄变化在 85 ~ 95Ma 之间, 并具有从外向内年龄渐新的规律 (图 4)。按照目前的实验模拟和理论计算的结果 (Pitcher, 1997; Petford *et al.*, 2000; Glazner *et al.*, 2004), 单个侵入体从岩浆形成到锆石 U-Pb 同位素体系封闭的时间不超过 1Ma。因此, 上述较大 (约 10Ma) 的年龄间隔说明这些侵入体不是同批岩浆结晶形成的, 而可能是从源区上升的不同批次岩浆就位的结果。因此, 该岩套不同侵入体的岩石成分变化并不是以前认为的岩浆分离结晶作用的结果, 而更可能是岩浆源区成分的反映 (Coleman *et al.*, 2004)。这一研究不仅为花岗岩的成分变化研究提供了新的思路, 同时对花岗岩的侵位机制有重要的启示作用 (Zak *et al.*, 2007), 因为目前的研究发现, 许多花岗岩基都具有与 Tuolumne 岩套相似的年代学变化规律 (Matzel *et al.*, 2006)。显然, 对重要花岗岩区中的侵入体进行详细的多学科解剖仍是今后花岗岩研究的重要方向 (Lipman, 2007)。

在花岗岩成分演化研究中, 花岗质岩浆是否可以发生混合作用是目前讨论的另一个重要话题。Castro *et al.* (1991) 就提出了混合 (H 型, hybrid) 花岗岩的概念, 大致相当于国内一些学者提出的浆混花岗岩。实际上, 岩浆混合作用有大量的地质和岩石学证据, 其中最重要的证据是所谓的淬冷包

体, 它是镁铁质岩浆注入长英质岩浆后由于温度的显著降低而发生的一种物理现象。另一个重要的地质现象是同深成岩墙 (synplutonic dyke), 它是两种不同性质的岩浆在不同深度混合的体现。但是, 同是这些现象, 不同的学者有截然不同的认识。如包体的存在既可以暗示存在岩浆混合作用, 但也说明岩浆混合是有限的, 否则为何包体在后续的岩浆演化过程中仍继续保留。真是仁者见仁, 智者见智。

需要指出的是, 目前有大量的研究运用 Harker 图解来证明岩浆结晶分异的存在。我们认为, Harker 图解上的线性变化趋势是多解的。一方面, 非线性的变化并不表示没有结晶分异作用, 只是分离的矿物相发生了变化; 另一方面, 线性的变化趋势也可以由地壳混染、岩浆混合作用产生, 关键是野外和室内岩相学观察需要确定所研究的岩石之间属何种关系。另一个值得指出的问题, 一些学者运用 La-La/Sm 来讨论花岗岩的成因机制 (分离结晶和部分熔融), 如果仔细分析元素的地球化学行为, 我们不难发现, 该图解只适用于玄武岩体系 (Treuil and Joron, 1975; Allegre and Minster, 1978), 对花岗岩而言, 它是失效的, 因为在该体系中, 稀土元素的分配主要受副矿物控制, 与玄武岩体系截然不同。

4 花岗岩成因与壳幔演化

从有地质学起, 花岗岩的成因就被经常讨论和争论。在研究的早期, 由于发现自然界中的喷出岩以玄武岩为主, 而侵入岩以花岗岩为主, 人们便认为花岗岩是由玄武岩分异而来。但后来的研究发现, 与花岗岩成分相当的喷出岩也相当多见, 有些情况下, 花岗岩便是喷出岩的岩浆通道或补给体。因此, 花岗岩并不是由玄武岩分异而来, 只是侵入岩上方的喷出岩大多已被剥蚀而难以被观察到, 即花岗岩可以是独立起源的, 这就是岩石学中二元论的由来。后来的实验岩石学

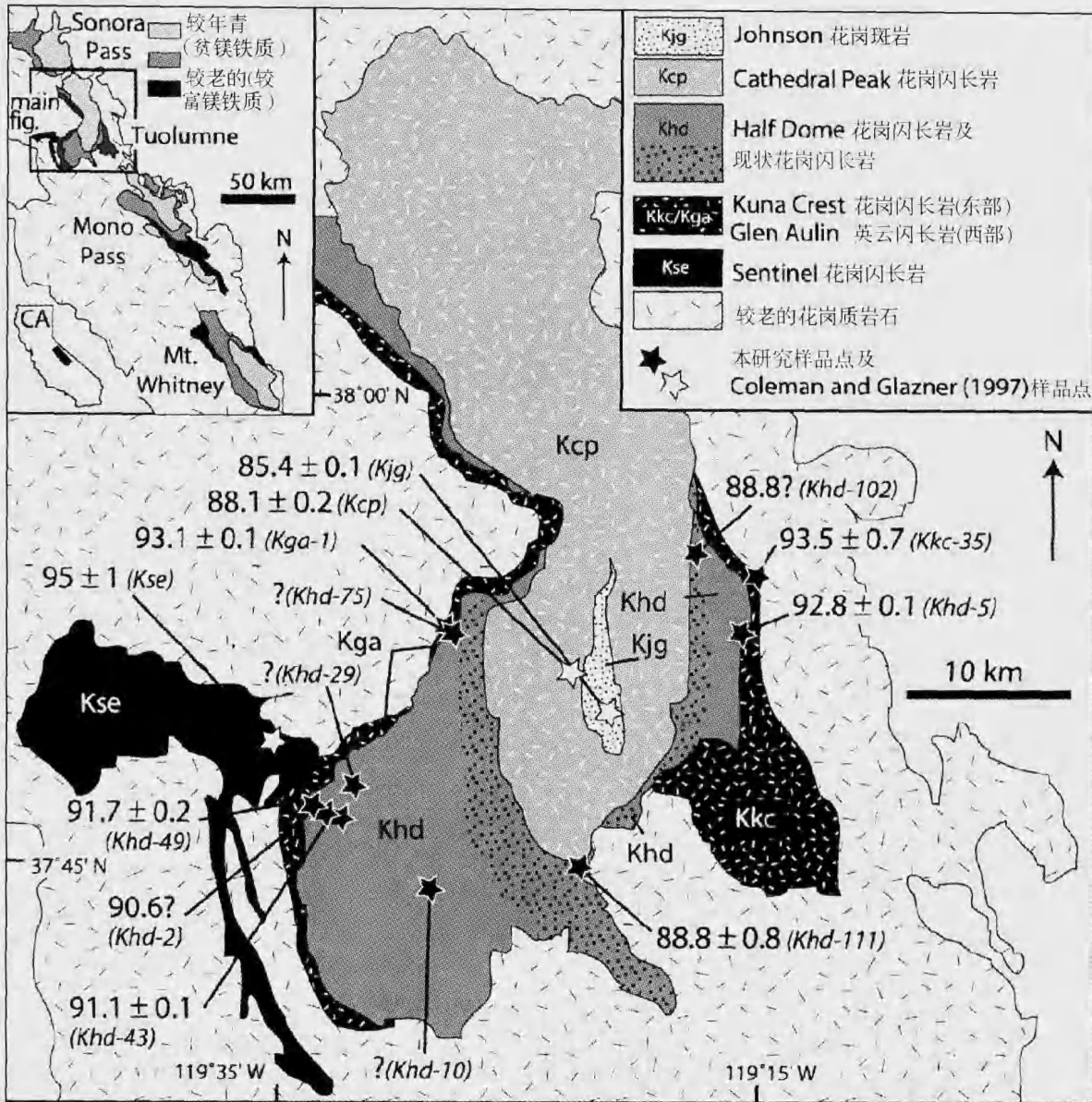


图4 内华达 Tuolumne 不同侵入体就位年龄 (Ma) (Coleman et al., 2004)

Fig. 4 Emplacement age of the individual plutons in the Tuolumne suite of Nevada (Coleman et al., 2004)

研究确认,花岗岩主要是地壳来源的,即花岗岩的地壳深熔论 (crustal anatexis, Wyllie, 1977),这也是目前学术界讨论花岗岩成因的基础所在。

由于花岗岩是大陆地壳的重要组成岩石,花岗岩的成因显然与大陆的演化存在密切的联系 (DePaolo et al., 1991; Rudnick, 1995)。从地球演化的理论出发,地壳是从地幔中分异而来的,这一前提指示初始的大陆地壳是玄武质成分的,但现今大陆地壳的成分却是长英质的,这就要求早期形成的地壳必须发生分异而使部分镁铁质的物质再循环进入地幔。目前对这一地球化学之谜的最佳解释是拆沉作用 (delamination) 模型。当早先形成的地壳岩石受到某种机制的影响而发生部分熔融产生花岗岩时,其源区残留将由于密度的增大而被拆入地幔。而在发生拆沉作用的过程中,由于

深部热的上涌,会加热上覆的地壳,使其进一步发生部分熔融,从而不断使地壳向长英质方向演化。在造山带,由于板块汇聚作用使地壳明显加厚,使深部地壳岩石转变成榴辉岩,而高密度的榴辉岩由于重力不稳定性而会发生拆沉作用。因此,造山作用晚期造山带的垮塌或拆沉作用是目前认为地壳发生成分变化的最重要时期,也是花岗岩形成的最重要的构造背景 (Kay and Kay, 1991, 1993; Rudnick, 1995; Wu et al., 2006)。太平洋东岸有大量这方面研究的实例 (Ducea, 2001; Saleeby et al., 2003),我们不再详述。

在上述花岗岩形成的过程中,一个热烈讨论的话题是地幔在花岗岩形成过程中的作用问题。我们认为,通常情况下,地幔的部分熔融是形成不了花岗岩的。也就是说,除蛇绿岩中可出现少量分异的大洋斜长花岗岩外,我们见到的花

岗岩主要都是地壳来源的,幔源花岗岩极为少见(部分蛇绿岩中的斜长花岗岩实际上也是壳源的,是辉长岩脱水部分熔融形成的)。Chappell 等人在提出 I、S 和 A 型等花岗岩概念时,也一再强调花岗岩是壳源的。他们认为花岗岩中的包体并不是地幔来源的,而是形成花岗岩的源区残留(Chappell *et al.*, 1987)。由于在绝大多数情况下依靠野外地质、岩石学和元素地球化学研究难以对这一问题提出确切的制约,人们大多希望同位素的研究能为这一问题提供重要信息。但遗憾的是,目前所发表的结果基本都显示花岗岩主岩和包体具有相同或相近的 Sr-Nd 同位素,只有少数例外才显示两者存在有限的差别(Holden *et al.*, 1987; Yang *et al.*, 2004)。因此, Sr-Nd 同位素在岩浆混合作用的鉴别上往往比较困难。

然而,杨进辉等最近通过锆石 Hf 同位素为这一问题的解决提供了新途径(Yang *et al.*, 2007a)。由于锆石具有很高的 Hf 同位素封闭温度,两种岩浆发生混合时首先结晶的锆石有可能记录下各自的初始 Hf 同位素组成。如图 5 所示,辽东半岛的古道岭岩体存在明显的岩浆混合现象,锆石 U-Pb 年龄测定也显示混合的岩石具有相同的年龄,但它们锆石的 Hf 同位素却存在显著的差别,反映包体和主岩是两种不同来源的岩浆,其中包体锆石的 Hf 同位素显示其来源于相对亏损的地幔,这就证明了地幔确实参与了花岗岩浆的形成。Hawkesworth 等人最近从 Hf 同位素角度也得出了与上类似的结论(Kemp *et al.*, 2006, 2007; Hawkesworth *et al.*, 2006)。从我们的实践经验来看,地幔尽管在物质组成上对花岗岩的贡献相对较小,但它所提供的热量可能是多数花岗岩得以形成的重要因素,这也是很多研究者相信底侵作用(underplating)可能是与花岗岩成因关系极为密切的一种地质作用过程(Bergantz, 1989; Petford and Gallagher, 2001; Annen and Sparks, 2002)。

但是,我们需要提及另外一种情况,即当包体与花岗岩主岩具有相同的 Sr-Nd 同位素组成时,一种可能性是包体与主岩发生了充分的同位素交换,或者它们就是同源岩浆结晶的产物,但另外一种可能性是镁铁质的包体可能是岩石圈地幔直接来源的,而花岗岩的源岩可能是早期岩石圈地幔来源的底侵物质。因为很多情况下,岩石圈地幔可以与上覆地壳具有相同的 Sr-Nd 同位素特征。关于这一问题,目前有很多讨论(Coleman *et al.*, 1992, 1995, 1997; Sisson *et al.*, 1996; Neves *et al.*, 2000; Ratajeski *et al.*, 2001),因为这涉及岩石圈地幔的演化问题。这也表明,尽管花岗岩主要是地壳来源的,但它的成因却涉及到岩石圈的演化,而不仅仅是一个壳内组份调整的问题,这也是现在花岗岩研究非常注意镁铁质岩石的原因。

在对上述这一问题的研究中,我们不能不提及 Pitcher 等人多年在安第斯山花岗岩工作的最后结论(Pitcher *et al.*, 1985)。他们通过详细的野外填图和岩石学研究提出,花岗岩主要是通过两阶段岩浆作用而形成的。在该区活动大陆边缘的背景下,弧后的扩张使地幔发生部分熔融造成岩浆底

侵作用,而正是持续不断的底侵作用又使早期的底侵物质发生部分熔融而形成花岗岩,这对岛弧和活动大陆边缘环境下 I 型花岗岩的形成可能有一定的普适性。

除上述讨论的 I 型花岗岩的情况外, S 型花岗岩在形成过程是否也具有地幔的贡献存在较大争议。从基本定义来看, S 型花岗岩不仅是壳源的,而且经历了地表过程(Chappell and White, 1992),但在部分地区的 S 型花岗岩中也可见到反映地幔参与的淬冷包体(Elburg *et al.*, 1995; Waight *et al.*, 2001)。因此,有学者认为, S 型花岗岩形成过程中也可能具有地幔物质的贡献(Clemens, 2003),实验岩石学似乎也支持这一结论(Patino Douce, 1999)。实际上,考虑典型的 I 和 S 型花岗岩的源岩之间有一系列的过渡类型, S 型花岗岩中出现少量相对亏损的地幔物质参与并不奇怪,但是需要区分是直接还是间接贡献。Wu *et al.* (2006) 对江南造山带东部新元古代皖南花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf-O 同位素分析以及岩石地球化学研究揭示,弧陆碰撞带弧源新生地壳通过造山带拉张垮塌熔融,不仅能够改变大陆地壳的化学成分,而且能够形成岩石学和氧同位素上与 S 型而放射成因同位素上与 M 型相似的特殊花岗岩。因此,对花岗岩中所加入地幔物质的演化性质需要明确。由于地幔岩浆分异不可能直接形成长英质花岗岩,具有正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 或 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的花岗岩基本上都是初生地壳再造的产物。如果设想同时期软流圈地幔物质分异物质直接加入,则需要考虑特殊的地质构造环境和对应双峰式岩浆活动产物。从这个角度来说,花岗岩中所包含的地幔地球化学信息很可能与新生镁铁质地壳有关。

下一个是 A 型花岗岩的成因问题,这也是目前争议最大的地方。目前提出的观点各式各样(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990, 1992; Turner *et al.*, 1992; Landenberger and Collins, 1996; King *et al.*, 1997, 2001; Bonin, 2007),但归结起来是: 1) A 型花岗岩是否是幔源岩浆分异而来的, 2) 目前提出的过碱性(peraluminous)和铝质(aluminous) A 型花岗岩在成因上是否有差别。我们不拟对这一问题进行全面的论述,但简单述说 A 型花岗岩的基本特点,以及这些特点对岩石成因的基本约束。首先,实验岩石学资料和锆石饱和温度计算已经证明(Clemens *et al.*, 1986; King *et al.*, 1997, 2001), A 型花岗岩是高温的,这一基本的形成条件暗示该类型岩石不可能是 I 型花岗岩分异而来,这也是 A 型花岗岩可作为一种独立成因类型存在的原因。第二,无论是高分异还是未分异的类型, A 型花岗岩都表现出低 Sr、Eu 和富集 Nb、Zr 等元素的特点,反映其源区存在斜长石的残留(形成的压力较低),因此它也不可能是幔源岩浆分异而来(在极端情况下,幔源岩浆的强烈结晶分异可能会产生有限的低 Sr、Eu 的碱性岩石,但此时应与大规模的镁铁质岩石伴生),或来源于镁铁质源岩的部分熔融。Wei *et al.* (2002) 对东北碾子山 A 型花岗岩的 Nd-O 同位素联合示踪发现,其岩浆源区为受到高温热液蚀变的初生地壳,因此经

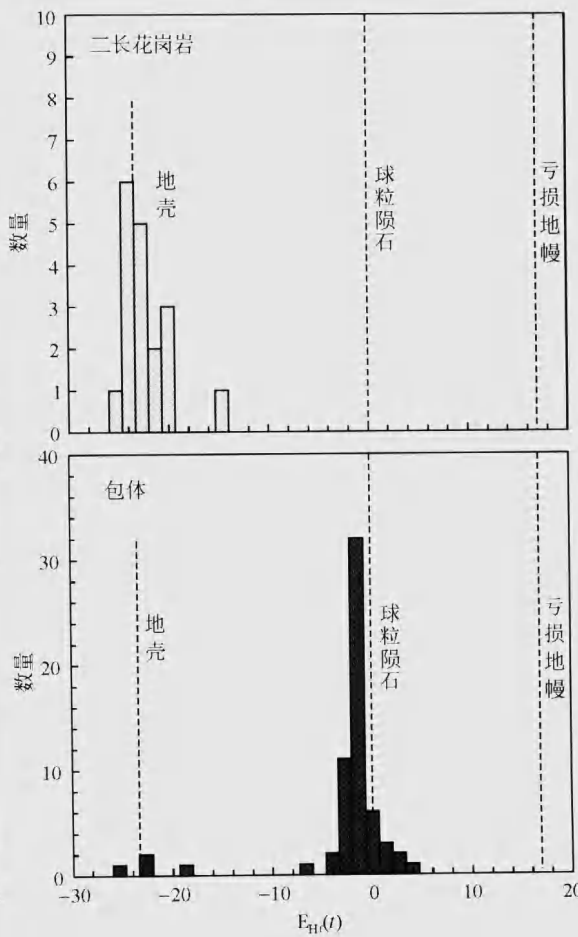
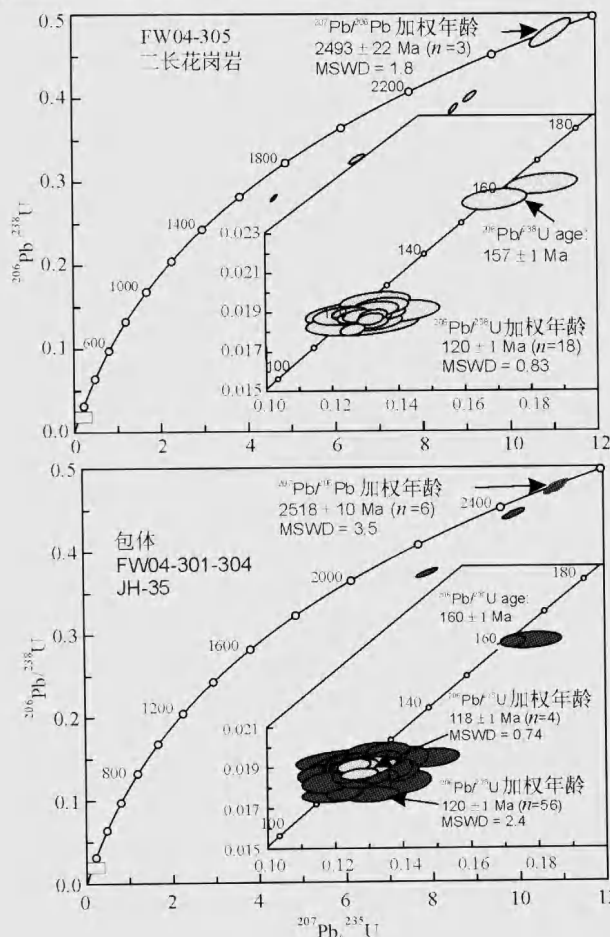
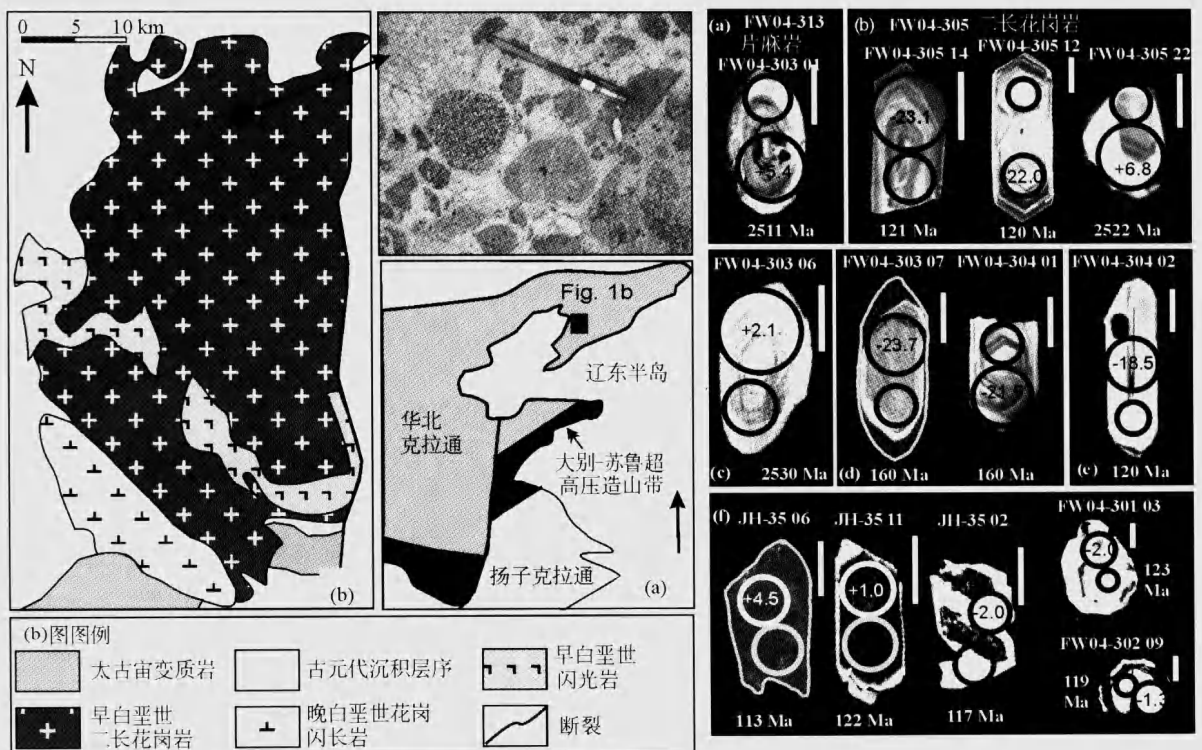


图5 辽东半岛古道岭岩体岩浆混合作用的 Hf 同位素识别 (Yang *et al.*, 2007a)

Fig. 5 Hf isotopic constraint on the magmatic mixing in the Gudaoqing pluton, Liaodong Peninsula (Yang *et al.*, 2007a)

历了由浅部到深部的两阶段地壳过程。进一步的实验岩石学资料约束的最可能的 A 型花岗岩源区可能是长英质地壳 (Creaser *et al.*, 1991; Skjerlie and Johnston, 1993a, 1993b; Patino Douce, 1997), 特别是该地壳岩石中含水矿物的脱水熔融。但是, 在该条件下, 所形成的熔体基本上都属于铝质 A 型花岗岩, 反映过碱性 A 型花岗岩的成因可能与铝质 A 型花岗岩有所不同。因此 King *et al.* (1997) 认为, 铝质 A 型花岗岩的源岩可能是长英质的, 而过碱性 A 型花岗岩的源岩可能是镁铁质的。显然, 对这一问题, 我们仍需要更多的研究。但是, A 型花岗岩的最重要之处是, 如果浅部地壳能够发生高温部分熔融, 显然暗示其深部存在热异常, 而这大多只会在拉张情况下出现。因此, A 型花岗岩是判断伸展背景的重要岩石学标志。

上世纪 80 年代, 地球科学界有一句名言, 即 “No water, no granite; no ocean, no continent” (Campbell and Taylor, 1983), 这一表述深入地刻画出水在花岗岩形成过程中的主导地位。但越来越多的证据显示, 压力的降低或者外来热的加入也同样可以产生花岗质岩浆, 而且可能是两种更重要的导致花岗岩形成的机制 (Thompson, 1999)。关于这一点, 我们将在下面论述。

5 花岗岩形成的构造环境判别

花岗岩形成的构造环境是目前大家非常关心的问题。花岗岩作为特定地质背景下的产物, 它的岩石学、矿物学和地球化学特点应该记录下它形成时的构造背景情况。这样, 如果我们能够通过地表上大量出露的花岗岩获得其形成构造背景信息的话, 那将对我们反演构造演化历史提供重要资料。然而, 问题并不如此简单。即使对一些已知构造环境的花岗岩来说, 其源区继承性和熔融分异都会影响最终形成的花岗岩的物质成分, 导致与构造环境之间对应性的丢失。

尽管目前我们对花岗岩构造环境的判别有多种方法, 但最经常采用的还是岩石学和地球化学方法。对于前者, 不少学者认为一定的花岗岩类型对应特定的构造背景 (Pitcher, 1997; Barbarin, 1999), 如 I 型花岗岩对应于俯冲、S 型花岗岩对应于碰撞和 A 型花岗岩对应于伸展的认识。实际上这一认识是没有岩石学依据的, 因为花岗岩成因类型的划分与构造背景无关。如 Barbarin (1999) 提出含白云母的过铝质花岗岩为大陆碰撞成因的, 但我们会在很多地区看到这种岩石是 I 型花岗岩经高度分异作用而来; 他提出过碱性花岗岩是幔源的, 也与现今的主流认识相差甚远。我们认为, 如果花岗岩的成因类型真的是与构造背景呈简单的——对应关系, 那花岗岩的研究倒是多么的简单和平庸! 关于这一点, 我们可以举出国内学者熟悉的例子。如在我国的川西地区, 与峨眉山玄武岩喷发同时形成的花岗岩既有 A 型, 又有 I 型 (Zhong *et al.*, 2006), 它们都是板内成因的, 其成岩机制与地幔柱构造有关, 而这里发育的 I 型花岗岩肯定与俯冲等挤

压背景无关。当然, 这些花岗岩在物质来源上属于“就地取材”, 从而可能继承了源岩形成时的特征。在华南, 侏罗纪 I 型、S 型和 A 型花岗岩同时同地产出 (Li *et al.*, 2007), 难道该区同时有三种构造背景存在? 还是同一种构造启动机制导致了不同成因类型源岩物质的熔融? 从目前的研究来看, 只有 A 型花岗岩的形成与伸展背景相关可能是成立的, 因为该类型花岗岩所要求的较高温度条件和较浅的岩浆形成深度大多只有在这一背景下才能得到满足。

在地球化学方法中, 目前最为普及和被滥用的是地球化学投点, 如 Pearce *et al.* (1984) 和 Maniar and Piccoli (1989) 等提出的各式图解。但需要注意的是, 花岗岩的地球化学成分取决于其源岩的矿物组成和化学成分、熔融时的物理化学条件 (包括温度、压力和挥发份) 和其后岩浆的演化 (如分离结晶作用、岩浆混合作用、同化混染作用等), 这些因素没有一个是构造上的。因此, 花岗岩的地球化学成份与构造背景并不直接挂钩, 构造背景更可能只是控制了上述岩浆过程的某些方面。但由于这种控制性并不是一一对应的, 从而导致花岗岩构造环境的判别往往是多解的 (Pearce, 1996; Foster *et al.*, 1997)。因此, 目前国际上已经抛弃了花岗岩形成构造环境的地球化学判别方法, 取而代之的是各种方法的综合运用。

例如, 我们最近在辽东半岛进行的花岗岩研究中, 发现饮马湾山、古道岭等众多早白垩世 (年龄在 120 ~ 130Ma 左右) 花岗岩就位于辽南变质核杂岩的拆离断层中, 且表现出早期侵入体具有明显的同侵位变形、而晚期侵入体基本不显示变形的特点 (郭春雨等, 2004), 反映这些岩体是同伸展变形就位的, 变形作用的年代学研究也支持这一认识 (Yang *et al.*, 2007b), 因而我们从地质上证明了这些 I 型花岗岩是伸展背景的产物。

在运用综合方法来讨论花岗岩形成构造背景时, 我们在讨论花岗岩物质来源的同时, 还应更多地考虑花岗岩形成的物理化学条件。我们已经提及, 三种条件利于岩石的熔融而形成花岗岩浆, 即挥发份、降压和升温。挥发份的加入可导致岩石熔点的降低, 这就是为何俯冲带有较多岩浆活动的原因。但现在的研究已经发现, 花岗岩浆主要是水不饱和的 (Thompson, 1999)。因此, 降压和升温可能是更主要的因素。在挤压构造过程中, 岩石是升压的, 因而产生岩浆活动的可能性较小。但在拉张情况下, 压力的降低非常有利于岩石的熔融; 同时, 地壳的拉张减薄还可伴随深部软流圈地幔的上涌和幔源岩浆的底侵作用, 从而使地壳加热而进一步发生部分熔融, 这就是为什么后造山的伸展垮塌会产生大量花岗岩的重要原因 (Collins, 1994; Costa and Rey, 1995; Sylvester, 1989, 1998; Bonin *et al.*, 1998)。就具体的 A 型花岗岩而言, 如果它来源于长英质地壳的部分熔融, 且其源区存在斜长石残留, 它形成的深度一般不会大于 30km, 而该类花岗岩的高温必然要求其形成时具有很高的地热梯度。显然, 这种环境与拉张的构造背景相吻合。实际上, 最近几

年的工作已经发现,花岗岩主要是在拉张环境中形成,挤压环境下形成的花岗岩可能非常有限。即使是在俯冲带,花岗岩的形成多是与其上方的拉张和底侵作用有关。

在当前花岗岩与构造背景关系的研究中,后造山(post-orogenic)是一个经常提及的名词,但目前对这一术语的涵义存在争议(Liegeois, 1998)。从目前的研究来看,后造山阶段可形成各种类型的花岗岩,因而单从花岗岩的角度来判断后造山阶段是极为困难的,只能依靠相关的地质证据。但无论如何,后造山仍是造山作用的一部分,它不同于非造山(anorogenic)。如果一个造山带结束某次造山作用而后再被卷入到另外一次造山作用,那么后一阶段所产生的花岗岩就不能说是前一阶段的后造山。显然,对这一问题的界定取决于对造山过程的理解及不同造山期次和阶段的判定。

6 花岗岩与大陆地壳增生

花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,是研究大陆形成时间和机制的重要对象。尽管全球尺度上的大陆地壳增生研究主要依赖特定地质对象的Nd-Hf同位素方面的工作,但在区域尺度上,花岗岩成因研究可为大陆地壳是否存在增生提供重要信息。从定义出发,大陆地壳的生长是指亏损地幔物质添加到地壳的过程。由于地幔的部分熔融产生的是玄武质岩石,而花岗岩在大多数情况下并不是直接从地幔起源的。因此,从花岗岩角度来研究大陆地壳增生实际上并不是我们想象的那样简单。

一种情况,如果花岗岩是由地幔来源的玄武质和地壳来源的长英质岩浆混合、或玄武质岩浆经高度结晶分异或同化混染已有的早期地壳而成,那么,我们通过花岗岩的研究,可以推算出地幔岩浆的比例,进而对大陆地壳生长情况提供制约(Zheng *et al.*, 2007)。但在大多数情况下,花岗岩的形成是通过两阶段模式实现的,即地幔部分熔融形成镁铁质火成岩,而该火成岩在后期再发生部分熔融便形成花岗岩。在这种情况下,花岗岩本身是地壳内部物质再循环的结果,花岗岩本身实际上并不能直接反映地壳的生长情况。但花岗岩在此时至少有两个用途。其一,花岗岩是大陆地壳向长英质演化的重要指示物,是地壳成分成熟度的重要标志。特定地区花岗岩产出的多少在某种程度上反映了地壳演化的程度。其二,既然花岗岩的源岩是早期地幔来源的岩石,那么通过花岗岩的研究就有可能追索这一早期的岩石的起源与演化。如果我们能够对花岗岩的源岩形成时间和成因机制提供制约,那便可以通过花岗岩来研究大陆地壳的增生(Wu *et al.*, 2006)。

目前,不少学者认为,正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的花岗岩就是大陆地壳增生的标志。但实际上,问题并不如此简单。正如前面所指出的那样,如果该花岗岩是直接由亏损地幔起源的,那无疑是大陆地壳生长的证据。但如果该花岗岩是两阶段起源的,那只是表明该花岗岩的源岩是初生的年轻地壳。在此情

况下,我们需要对这一初生地壳的具体年代做出回答,因为只有这一初生地壳才代表了大陆生长。如在我国北方的兴蒙造山带中,绝大部分花岗岩都具有正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,但其Nd模式年龄为新元古代-显生宙(Jahn *et al.*, 2000)。因此,该地区地壳生长的具体时间仍需进一步厘定,以确定地壳增生究竟是发生在新元古代、显生宙,抑或是新元古代-显生宙。虽然这一问题的研究有很大的难度,但是锆石Hf同位素示踪有可能提供定量制约。

现代研究已经证明,大陆地壳的平均成分是长英质的(Rudnick, 1995; Taylor and McLennan, 1995),而非地幔熔融的直接产物,反映存在一种使地壳中更富镁铁质物质返回地幔的机制。而花岗岩形成后,其残留物肯定是较富镁铁的,它很可能通过拆沉等机制返回地幔。从另外一个角度来看,镁铁质岩石本身在地壳深部是重力上不稳定的,因而也是短寿命的。另外,当镁铁质岩石发生侵位时,它所带来的热量又可使地壳发生部分熔融而形成花岗岩,这也是很多情况下花岗岩形成的同时存在地壳增生的原因。

在这项研究中需要提及的另外一个问题是,当岩石圈地幔发生部分熔融,它所熔出的组份大多是早期进入地幔的地壳物质,它对大陆地壳生长来说,贡献有限。因此,在当前花岗岩与大陆地壳增生的成因中,需要正确地区分能量与物质的贡献、软流圈地幔与岩石圈地幔的贡献、新生地壳与古老地壳的贡献、源区不均一性与地壳混染的贡献等。

7 近年来我国主要地区花岗岩研究概况

中国是一个花岗岩极为发育的国家,其中华南和东北出露有大面积的花岗岩,堪称花岗岩的海洋。上世纪80年代,华南花岗岩的研究曾达到国际水平。在这一研究的带动下,近年来我国北方(包括东北和新疆)、华北、大别-秦岭-昆仑和西藏等地区花岗岩的研究呈现良好的发展态势,但和澳大利亚Lachlan带、欧洲的加里东-海西带和太平洋东岸的花岗岩带相比,我们的研究显然要落后得多,同时也存在一些亟待解决的基本问题。

7.1 华南花岗岩

华南是我国花岗岩研究程度最高的地区(图6),且由于该区花岗岩与大规模金属成矿作用关系密切而受到持续的关注与研究。最近几年华南花岗岩研究的重要进展主要体现在两个方面,其一是新元古宙花岗岩的详细时代厘定及其与Rodinia超大陆关系的研究,第二是大面积中生代花岗岩成因类型及其对构造环境演变响应的再认识。

华南的新元古宙花岗岩大多以含堇青石或白云母为主要特征,属于S型花岗岩,因而一直被认为其形成与挤压作用有关,但详细的岩石学和地球化学研究也已鉴定出存在一些I型花岗岩。近几年研究的最重要成果是发现它们的形成时代主要集中在820~825Ma(Li *et al.*, 2003a)。由于

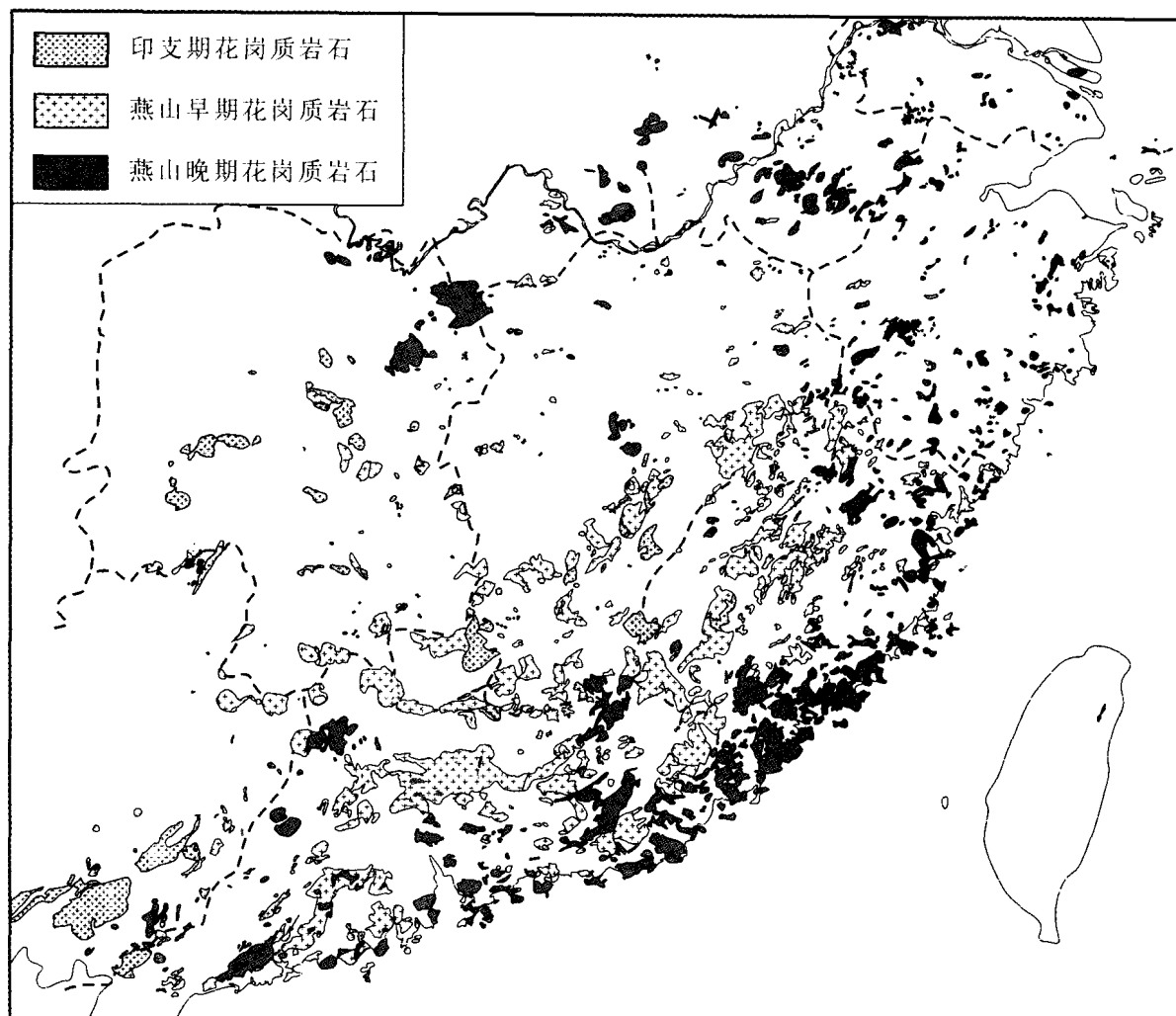


图6 华南中生代花岗岩分布图(据孙涛(2006)改编)

Fig. 6 Distribution map of the granites in southeastern China (Modified after Sun (2006))

这一时段被认为与 Rodinia 超大陆裂解有关,因此暗示该区大规模的 S 型花岗岩可能产于伸展构造背景。锆石 Hf-O 同位素联合示踪发现,这些 S 型花岗岩既有中元古代晚期-新元古代早期初生岛弧地壳的再造(Wu *et al.*, 2006),也有古元古代古老大陆弧地壳的再造(Zheng *et al.*, 2007)。但是,目前对这一时段花岗岩的形成构造机制存在诸多争论,主要有以下三种假说:(1)地幔柱活动产物(Li *et al.*, 2003a), (2)岛弧岩浆作用产物(Wang *et al.*, 2006), (3)板块-裂谷演化产物(Wu *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2007)。究其实质,这种争论还是花岗岩形成的构造环境如何准确判别的问题,而解决这个问题的关键应该是加强岩石学、沉积学、构造地质学和地球化学的综合研究。就 Rodinia 超大陆裂解来说,无论是地幔柱上拱引起的主动裂谷还是岩石圈拉张引起的被动裂谷,都没有导致扬子陆块和华夏陆块沿江南造山带裂解开来,但是引起部分熔融的构造机制则可能与弧陆碰撞后拉张垮塌有关。

关于华南中生代花岗岩的研究,近几年成果叠出,并获

得了一些新的认识。例如,华南(特别是南岭地区)大面积的侏罗纪花岗岩多含有白云母或二云母而表现为过铝的特点(孙涛,2006),因而以前多数研究都认为它们主要是 S 型花岗岩。但近年来根据野外观察和矿物学、地球化学的研究发现,它们大部分实质上为 I 型(Li *et al.*, 2007; 李献华等, 2007),或主体为高分异 I 型花岗岩,真正的 S 型花岗岩仍是少数。第二,目前在这些大面积花岗岩中确定出不少 A 型花岗岩。根据年代学资料(王强等,2005),该区至少存在有三期 A 型花岗岩,即:早一中侏罗世(152 ~ 185Ma)、早白垩早期(123 ~ 137Ma)和晚白垩世(86 ~ 101Ma),前两期还伴随有碱性的正长岩形成(Li *et al.*, 2003b, 2004)。由于 A 型花岗岩和正长岩的形成主要与伸展构造体制有关,因而目前认为华南在中生代时以伸展构造体制为主,或至少说,该区存在过多期伸展事件,伸展构造和幔源基性岩浆的底侵很可能是形成华南燕山期花岗岩的两个最主要的动力机制(Zhou and Li, 2000)

关于华南燕山期花岗岩形成的构造背景,前人提出了许

多不同的模式,概括起来主要包括:(1)与古太平洋俯冲有关的活动大陆边缘模式(Jahn *et al.* 1976; Holloway 1982; Sewell and Campbell, 1997; Zhou and Li, 2000)、(2)陆-陆碰撞模式(Hsü *et al.* 1988; 1990)和(3)陆内伸展-裂谷模式(Gilder *et al.*, 1991, 1996; Li, 2000)。活动大陆边缘模式虽然可以较好地解释东南沿海白垩纪钙碱性岩浆岩的成因,但很难解释南岭燕山早期宽阔的花岗岩及共生碱性系列岩石的形成;陆-陆碰撞模式缺乏必要的沉积地质和蛇绿岩证据;陆内伸展-裂谷模式虽然可以解释华南的盆岭构造和板内岩浆活动,但仍没有很好地说明岩石圈伸展的机制。最近 Li and Li (2007)用大洋岩石圈的水平俯冲模式来解释华南~1300km 宽的印支期造山运动和岩浆岩带。Izanagi 大洋板块很可能在 $\approx 270\text{Ma}$ 时开始向华南俯冲引发印支期造山运动(Li *et al.*, 2006); $\sim 250 \sim 240\text{Ma}$ 时发生大洋岩石圈的水平俯冲,导致了同造山的逆冲推覆、变质-变形以及岩浆作用逐渐向华南陆内迁移;在 $\sim 190\text{Ma}$ 时,水平俯冲结束,印支期造山运动迁移停止,下覆的大洋岩石圈板块开始裂解,导致软流圈地幔上涌和大陆岩石圈破裂、拆离与俯冲板片后撤,从而形成了宽阔的盆岭系统和陆内花岗岩岩浆活动。

7.2 北方花岗岩

我国北方在地质上属于华北和西伯利亚所夹持的中亚造山带,该区花岗岩极为丰富,与蒙古和俄罗斯贝加尔地区一起,它们构成世界上最大的花岗岩区。由于这些花岗岩大多具有主要表现为富含放射性成因铅、明显低的初始铀和高初始铀的同位素特点,暗示区内存在显著的显生宙地壳增生。对这一问题的研究,以及与其同时开展的国际地质对比计划第 420 项的实施,将我国北方花岗岩的研究推向了国际学术界(Jahn *et al.*, 2000)。由于该区面积巨大,我们在此仅简单介绍东北地区花岗岩的研究情况。

东北地区是花岗岩的海洋,分布着大约 30 万 km^2 的不同类型的花岗岩(图 7),它和华南花岗岩一起,构成我国面积最大的花岗岩分布区。上世纪 90 年代以前,我国地质界一直认为该区花岗岩主要形成于古生代。但最近几年进行的大量高精度同位素年龄测定发现,该区花岗岩的主体形成于中生代(230~120Ma),只有少数岩体形成于古生代,而以前认为的大量海西期和加里东期花岗岩其实质大多都是中生代的侵入体。这些中生代花岗岩可进一步划分为晚三叠—中侏罗世(230~160Ma)和早白垩(130~120Ma)两期,且大体具有自东向西逐渐年轻的规律。这一年代学格架的建立,为今后该区花岗岩的进一步研究提供了重要基础资料。

东北花岗岩研究的第二个重要进展是,通过岩石学、矿物学和地球化学的详细研究,确定出这些中生代花岗岩主要为 I 型,并以高度分异的 I 型为主,少数为 A 型,基本不存在 S 型花岗岩(Wu *et al.*, 2000, 2002, 2003),这与以往认为该区存在大量 S 型花岗岩的认识有很大差别,也是与我国华南花岗岩的重要区别所在。区内目前发现的少数几个含有石

榴石的花岗岩原被怀疑为 S 型花岗岩,但后来的研究发现它们均属于具有稀土元素四分组效应(Tetrad)的高分异花岗岩(图 2, Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2004),从而否定了原先的认识。但例外的是,在东北最东部的饶河地区,出露在那丹哈达增生地体中的饶河花岗岩由于含堇青石而被确定为 S 型花岗岩(程瑞玉等, 2006)。尽管我们目前并没有对全区所有的岩体均进行仔细的研究,但我们相信其基本框架今后不会有实质性改变。

7.3 华北花岗岩

华北是我国早前寒武纪花岗质岩浆作用研究最重要的地区,受文章篇幅的限制,我们不拟对该地区太古宙花岗岩的研究情况作全面的介绍。该地块从 18 亿年至晚古生代属于克拉通演化阶段,基本不发育岩浆活动,但从中生代开始,由于克拉通的破坏,该地区成为我国东部中生代岩浆作用极为强烈的地区。

从目前有限的高精度年龄数据可以看出,华北北缘发育一定数量的晚古生代花岗岩,以前确定的部分太古宙 TTG 实际上也为该时期的侵入体。但该地块最重要的特征还是中生代花岗岩极为发育(图 8)。根据内部不同地区所获得的年代学资料来看,其中三叠纪花岗岩出现在燕辽东部、辽东和胶东地区;侏罗纪岩石的出露范围与三叠纪岩石基本相当,但有向西进一步扩展的趋势,但在太行山还未发现有此期岩体;早白垩世岩体遍布全区,但东西部地区的岩石类型存在系统差别,主要表现为东部以花岗岩为主,而西部出现较多的镁铁质和碱性岩石,反映两者形成机制上的差别。

7.4 大别-苏鲁造山带花岗岩

大别-苏鲁造山带是世界上规模最大的超高压变质带,是研究大陆深俯冲的最佳场所。与这些超高压岩石伴生的另外一套岩石便是占区内基岩出露面积近一半的中生代花岗岩。随着近年来超高压变质岩研究的进展,对这些中生代花岗岩的时代和成因研究也取得了大量新的认识,为大陆深俯冲物质的演化提供了重要认识。但到目前为止,在大别和苏鲁地区还未发现同碰撞成因的花岗质岩石,有限的碰撞后花岗岩只发现有荣城的甲子山正长岩杂岩体(Chen *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2005a),这种特征可能与俯冲的大陆地壳物质贫水有关,但为何也少发育板块碰撞前的与大洋俯冲成因有关的花岗岩,目前仍是待解之谜。另一个至今仍使人难以理解的事实是,大别地区到目前为止仍未发现确切的侏罗纪花岗岩,而它两侧的华北与华南都有该时期花岗岩的大量发育。

考虑苏鲁和大别地区晚中生代花岗岩的发育特点几乎完全一致(Yang *et al.*, 2005b),我们在此仅介绍大别地区的有关情况。首先是时代。近年来高精度锆石 U-Pb 年龄测定显示(Xue *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; Bryant *et al.*, 2004; 马昌前等, 2004; Zhao *et al.*, 2004, 2007; Huang *et al.*,

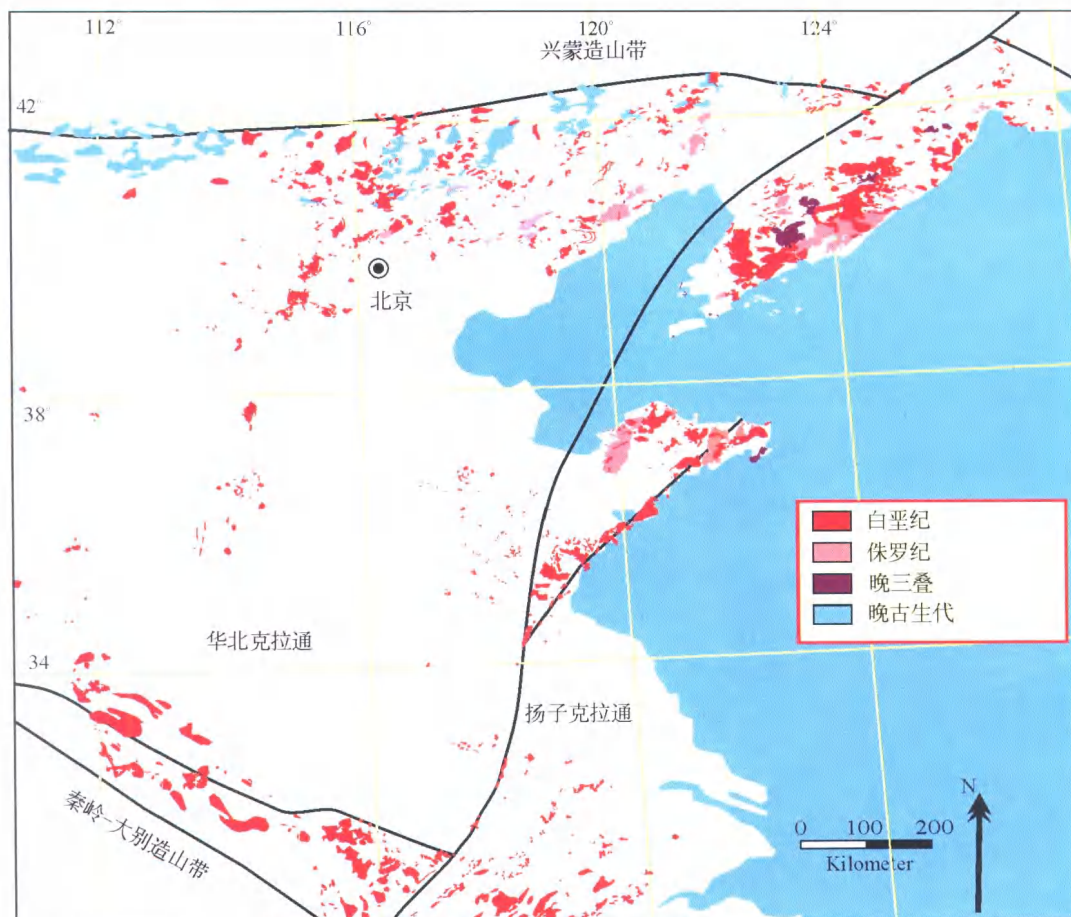


图8 华北克拉通显生宙花岗岩分布图

Fig. 8 Distribution map of the Phanerozoic granites in the North China Craton

2006; Xie *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2007), 这些花岗岩 (包括 I 和 A 型) 主要都是在早白垩世形成的, 具体的同位素年龄集中在 116 ~ 142 Ma 的较短的时间内。与这些花岗岩伴生的镁铁-超镁铁岩, 其时代也集中在上述年龄范围内 (Jahn *et al.*, 1999; 葛宁杰等, 1999; 李曙光等, 1999; 王江海和邓尚贤, 2002; 夏群科等, 2003; Zhao *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2007), 为同期岩浆作用的产物, 甚至部分麻粒岩也是在此时间内变质的 (侯振辉等, 2005), 反映这些花岗岩形成时存在强烈的壳幔相互作用。研究还发现, 区内发育的中生代火山岩也具有与花岗岩一致的同位素年龄 (杨祝良等, 1999; 王岳军等, 2002; 薛怀民等, 2002; 刘敦一等, 2002; Wang *et al.*, 2005), 而且区内不少以前认为的片麻岩实际上也是中生代的侵入体 (Xue *et al.*, 1997; Xu *et al.*, 2007)。而这些来源与侵位深度不同火成岩的共生, 表明当时地壳存在快速的隆升与剥蚀 (Wang *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2007)。

第二是关于岩石成因。详细的研究发现, 这些早白垩世花岗岩及相关火成岩中继承锆石的 U-Pb 年龄分别为新元古代和三叠纪 (Zhao *et al.*, 2004, 2007; Huang *et al.*, 2006), 与大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩和变质时间一致 (Zheng *et al.*, 2003, 2004), 证明三叠纪大陆俯冲加厚的下

地壳在早白垩世发生熔融形成了现在所观察到的花岗岩和各类火成岩 (Zhao *et al.*, 2004, 2007; Huang *et al.*, 2006)。这是通过 U-Pb 定年证明花岗岩直接源区的最好研究实例, 并且得到元素和同位素地球化学资料的支持 (Jahn *et al.*, 1999; Huang *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2007)。

第三是这些花岗岩的形成机制。由于这些花岗岩的形成时代与中国东部早白垩世大火成岩事件的时代一致 (Wu *et al.*, 2005a), 反映它们不是大陆深俯冲的结果, 而是受控于中国东部的晚中生代地质演化 (Zhao *et al.*, 2004, 2007; Wu *et al.*, 2005a)。但正是三叠纪期间造山带的碰撞加厚, 才为后来造山带的拉张垮塌提供了可能, 这从另外一个角度说明碰撞造山带的拉张垮塌是产生花岗岩的重要机制 (Xie *et al.*, 2006)。由于这些花岗岩形成时, 其应力体制和方向与叠纪时相比已发生了明显的变化, 我们认为这些花岗岩是造山后后岩浆岩, 但不是大别-苏鲁三叠纪造山带的后造山 (post-orogenic) 花岗岩, 但是否是中国东部中生代造山带的后造山花岗岩, 可以讨论。

7.5 西藏花岗岩

西藏是我国花岗岩较为发育的一个重要地区, 尽管该区

花岗岩占基岩出露的面积要小于华南和东北地区,但独特的地理位置使花岗岩成为理解青藏高原地质演化的重要地质标志。上世纪80年代的中法和中英合作对这些花岗岩进行了较深入的研究(Scharer *et al.*, 1984; Xu *et al.*, 1985; Debon *et al.*, 1986),最近几年花岗岩方面的工作开展得相对较少(Chung *et al.*, 2005; 莫宣学等, 2005),加之野外工作的困难,使当前西藏花岗岩的研究程度较国内其它地区要低,但它的重要性在全国是独一无二的。

西藏的花岗岩至少有两个独特之处,其一是大面积展布的冈底斯岩基。从更大的空间范围来考虑,该岩基从东南亚经藏南而西延至拉达克(Lakhdak)和科希斯坦(Kohistan)地区,延伸达3000km左右,是目前世界上延伸最长的巨型花岗岩基之一。传统上,该岩基由于较多发育闪长岩-花岗闪长岩而被认为是新特提斯洋向北在欧亚大陆下俯冲的结果(Rowley, 1996),属于活动大陆边缘的岩浆岩建造。但这一认识目前已受到部分学者的质疑(Yin and Harrison, 2000),因为年代学资料已经发现,该岩基中的部分花岗岩年轻于印度与欧亚板块碰撞的时代(Chung *et al.*, 2005)。在对该岩基的研究中,人们还逐渐认识到其北部花岗岩的形成要早于南部的冈底斯地区,因而有学者建议该岩带北部的花岗岩可能是班公湖-怒江带向南俯冲的结果。另一个重要进展是发现该带中存在15Ma左右的与铜矿关系密切的斑岩建造,它们在地球化学特征上与adakite十分相似(Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004),其具体的成因机制可能与加厚地壳的熔融有关(Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004),但存在一定的争议(Gao *et al.*, 2007)。很显然,对冈底斯岩基,目前工作的重点应是理清其岩浆活动的年代学格架,然后根据相关学科得出的关于该区地质演化的认识,重新研究这些花岗岩的形成机制及在碰撞造山作用中所扮演的角色。

西藏花岗岩的第二个特色是所谓的高喜马拉雅淡色花岗岩(leucogranite),它经常与藏南的变质核杂岩相伴生,其形成时代大约集中在10~20Ma左右(Murphy and Harrison, 1999; Searle and Godin, 2003; Zhang *et al.*, 2004; Lee and Whitehouse, 2007)。由于这些花岗岩含有白云母而表现为强过铝性质,因而大多数学者认为它应该是印度和欧亚大陆碰撞挤压的产物。但实际上,这些花岗岩形成时正是藏南拆离系和南北向伸展构造发育的时候,是青藏高原在早期加厚后垮塌的结果(Le Fort, 1996),因此,本文作者更倾向于认为,这些花岗岩的形成可能与伸展背景有关。

8 中国东部中生代花岗岩是我国花岗岩研究的突破口

中国是一个花岗岩分布广泛的大国,但并不是花岗岩研究的强国,如何使我国的花岗岩研究尽快在国际学术舞台上占有一席之地是每一个花岗岩研究工作者都在考虑的问题。显然,从目前的研究基础和学术积累出发,中国东部中生代

花岗岩的研究无疑是当前我国花岗岩研究的重点。我们无意在此对我国东部中生代花岗岩研究的各个方面进行全面的回顾与展望,但从基础研究角度提出以下几点作为今后工作的重点方向。

8.1 中生代花岗岩的形成时代

传统上,我国东部中生代花岗岩主体活动的时代被称之为燕山期,并被较多地划分为燕山早期和晚期。对目前发表的高精度年代学资料进行归纳后发现(图9, Wu *et al.*, 2005a, 2005b),这些花岗岩可明显地划分为两大阶段。早期花岗岩浆活动主要发生在早—中侏罗世,可称之为燕山早期;而晚期花岗岩主要发育在早白垩世,应为燕山晚期。值得注意的是,以前认为的晚侏罗—早白垩世岩浆活动峰期实际上花岗岩浆活动较弱,只是长江中下游一带此期花岗岩较为发育。一个亟待解决的问题是,东北、华北和华南地区上述两阶段的中生代花岗岩在年代上是否完全可以对比。目前的资料对比发现,东北地区东部张广才岭地区的花岗岩主体形成于燕山早期,并具有自东而西逐渐年轻的变化趋势,而西部大兴安岭地区的花岗岩主要形成于燕山晚期(图8)。在华北,燕山早期花岗岩主要分布在胶辽半岛,其年代学变化规律与华北类似,但燕山晚期花岗岩在全区均有展布(图7)。在华南,燕山早期花岗岩主要分布在南岭地区,而晚期花岗岩主要分布在东南沿海,显示自西向东逐渐年轻的趋势,但长江中下游一带的早白垩世花岗岩却沿江向内陆延伸较长的距离,显示华南地区中生代花岗岩的时空分布与东北和华北地区有所不同(图6)。但由于目前积累的资料仍然有限,上述花岗岩时空展布上的不同是否是真实情况的体现仍需要进一步的年代学工作,而这是进行大区域对比研究的基础。

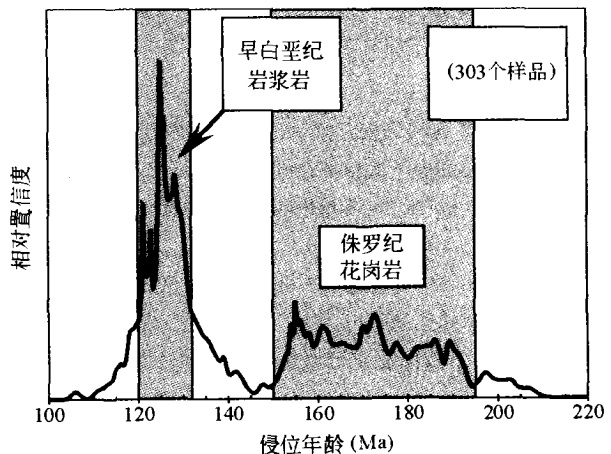


图9 中国东部中生代花岗岩年代学格架(Wu *et al.*, 2005b)

Fig. 9 Geochronological framework of the Mesozoic granites in eastern China (Wu *et al.*, 2005b)

8.2 中生代花岗岩的成因类型与地壳演化

正如前面已经论述过的,花岗岩主要是壳源的,由于东北、华北和华南地区早期地壳生长的情况有所差异,上述不同地区花岗岩的源岩或成因类型肯定有所不同。仅就东北和华南对比来看,华南中生代花岗岩显示较多强过铝的特点,但这些花岗岩是否就是S型显然仍需要细致的研究,因为很多以前认定的S型花岗岩实际上是高分异型的,而它们周围的岩石大多含角闪石而应为I型(Li *et al.*, 2007)。在东北地区,花岗岩的主体尽管也为强分异型,但与其相关的岩石主要属I型(Wu *et al.*, 2002)。在华北地区,中生代花岗岩主要为I型争议不大。因此,中国东部中生代花岗岩均以I型为主,这是观察到的基本事实。那引出的问题是,这些花岗岩的源区物质究竟是什么?从Nd同位素的角度来看,上述三个地区的中生代花岗岩存在明显的差别(图10),华北花岗岩的源区时代明显较老(太古宙为主),华南花岗岩主要是中元古代地壳再循环的结果,但在东北地区,这些花岗岩具有年轻的Nd同位素模式年龄,应来自相对年轻的地壳物质,但对这年轻地壳物质的具体属性,目前有多种解释,如早期大洋地壳或岛弧增生杂岩、花岗岩形成同期的底侵物质等。特别是,底侵作用对花岗岩源区物质的贡献到底有多大,因为这与地壳的增生时代和演化机制密切相关。

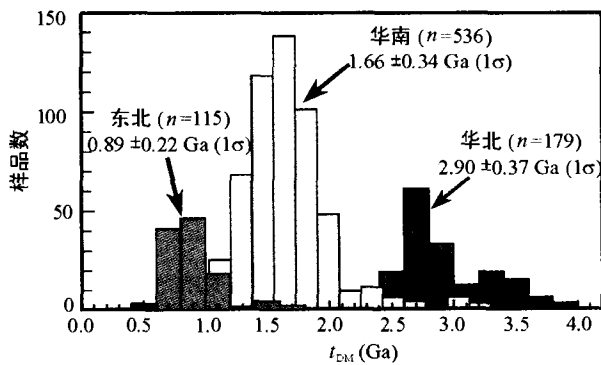


图10 东北、华北与华南基底岩石Nd同位素特征对比
Fig. 10 Nd isotopic differences of the basements among northeastern, northern and southeastern China

就我们目前的研究方法,对底侵物质的鉴定还存在一定的困难。尽管地球物理手段可以对此提供一定的线索(如Zhang *et al.*, 2005),但岩浆形成后的地质演化可能会改变当时的状况。最近,Kemp *et al.* (2006)提出的锆石Hf-O同位素的联合运用为这一问题的解决开拓了新的途径,值得我们借鉴。

在这里,我们顺便提及关于花岗岩Sr-Nd同位素初始值的确定问题。通常情况下,我们通过分析岩石的Sr-Nd同位素成分,然后经过年龄校正便可获得岩石的初始Sr-Nd同位素组成。但如图11所示,我国华南地区的中生代花岗岩有

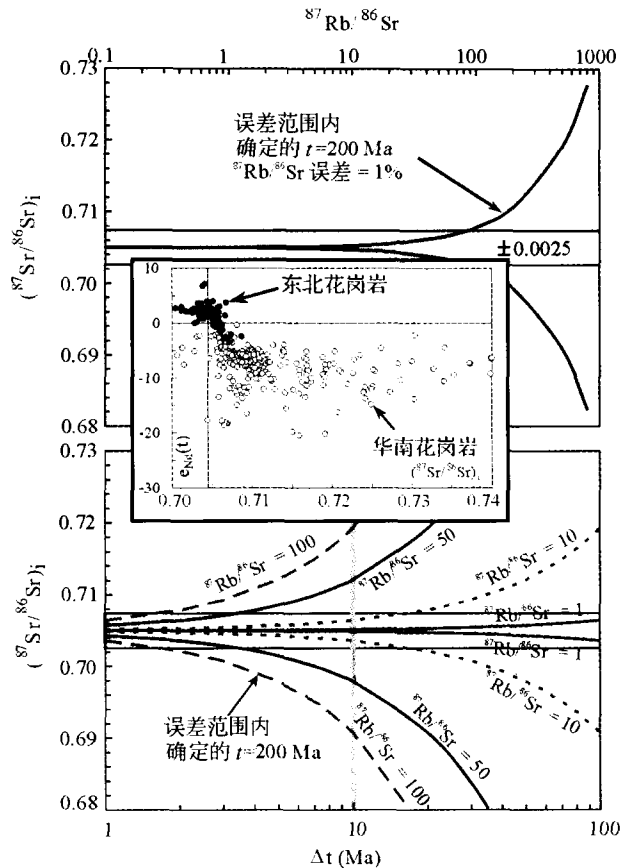


图11 不同Rb/Sr比花岗岩初始Sr同位素比值计算误差示意图

Fig. 11 Error propagation of the initial Sr isotope for the granites with high Rb/Sr ratios

很多样品表现为异常高或低的初始Sr同位素比值,其中一部分是真实情况的反映,但也有一部分是由于其它因素引起的。当花岗岩经历强烈的结晶分异作用后,其Rb/Sr比值将明显升高,假定我们在实际测定过程中Rb/Sr的比值有1%的误差,它便可对高Rb/Sr比值花岗岩初始Sr同位素比值的计算带来很大的偏差。同样,如果我们对花岗岩形成时代的确定存在偏差,那也很难准确确定其初始的Sr同位素组成(图11)。由于岩浆结晶分异过程中,Sm/Nd比值的变化范围相对有限,从而Nd同位素大多不会出现这种效应。因此,建议在实际工作中尽可能采用Rb/Sr比值低的样品来进行Sr同位素初始值的计算。

8.3 花岗岩形成的构造背景

对中生代花岗岩形成构造背景的研究是重溯我国东部当时地质演化的重要方面。但遗憾的是,目前对这一问题的认识分歧尤其甚。尽管东北、华北和华南均沿我国东部分布,但也有不少研究者提出其演化与太平洋板块无关。可是早,白垩世岩浆活动在中国东部不同地区或造山带的产出,促使我们思考它们大规模同时期形成的地球动力学机制。太平

洋板块对这种大规模岩浆作用无疑发挥了不可替代的作用 (Wu *et al.*, 2005a), 但是对它们在这一时期的集中产出还需要考虑早白垩世太平洋地幔超柱活动对太平洋板块俯冲方向和速度改变的可能性 (Zhao *et al.*, 2007)。我们在前面的论述中已经提及, 花岗岩构造环境的判别是极为困难的, 但不是不可作为的。

由于问题的复杂性, 我们不拟对此做仔细的讨论, 仅简述华北岩石圈减薄对整个中国东部中生代花岗岩研究的启示作用。在当前华北岩石圈减薄的研究中, 问题讨论的焦点是减薄的机制是拆沉还是热侵蚀。热侵蚀是指原来已有的富集型岩石圈地幔物质通过软流圈地幔的侵蚀作用而逐渐转变成亏损型的岩石圈地幔, 而所谓的拆沉是指岩石圈(包括岩石圈地幔和部分下地壳)由于重力不稳定性而发生分离, 从而使岩石圈变薄。显然, 热侵蚀模型要求岩石圈减薄是一个缓慢而长期的过程, 而拆沉模型则要求岩石圈减薄快速而短暂。但无论何种模型, 岩石圈的减薄势必伴随软流圈的上涌, 从而使地壳发生部分熔融而产生岩浆活动。因此, 花岗岩的研究可为岩石圈减薄研究提供重要信息。从图 9 的情况来看, 尽管东部中生代岩浆活动有较长的发育历史, 但主要集中在两个阶段, 这一特征与热侵蚀模型有一定的出入, 而与拆沉模型较为吻合。但拆沉模型的最大障碍是, 岩石圈地幔的低密度使其不易发生拆沉, 除非其受到大量流体的改造而使其流变性质发生根本性的变化。

最近, 我们通过对辽东半岛中生代花岗岩的研究为这一问题的解决提供了重要思路。该区的燕山期花岗岩可划分为侏罗纪 (180 ~ 156Ma) 和早白垩世 (131 ~ 117Ma) 两个阶段, 其中前者的岩石类型主要为 I 型的石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩, 并大多经历过变形作用的改造; 而后者不仅发育 I 型的闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩, 也发育 A 型的碱长花岗岩和过碱性花岗岩, 并大多具有块状构造。对这些岩石 ($\text{SiO}_2 > 65\%$) 的锆石饱和温度的计算发现, 侏罗纪花岗岩的形成温度大约在 750°C 左右 (平均为 742°C , 22 件样品) (图 12), 而白垩纪 I 和 A 型花岗岩的形成温度大约比前者高出 $50^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 左右 (平均为 799°C 和 865°C , 分别为 24 和 12 件样品, 图 12)。很显然, 前者属于低温花岗岩, 其形成可能与流体的加入有关, 非常可能反映了一种与俯冲作用有关的构造背景; 而后者属于高温花岗岩, 推测其高热的产生与岩石圈减薄而导致的软流圈上涌有关。正是侏罗纪的俯冲作用, 可能使华北东部的岩石圈受到流体的强烈改造而失去应有的高应变性质, 进而导致在早白垩世发生岩石圈拆沉。尽管这一结论是初步的, 但这一过程应该适用于整个中国东部, 这也是为什么我们一直坚持岩石圈减薄不仅仅只发生在华北, 而是发生在整个中国东部, 且与太平洋板块俯冲有关的原因所在。

以上我们对当前花岗岩研究中的几个问题进行了简单的回顾与讨论, 由于受知识背景的限制, 我们未对花岗岩与成矿作用的关系进行讨论。从上面的论述可以看出, 花岗岩

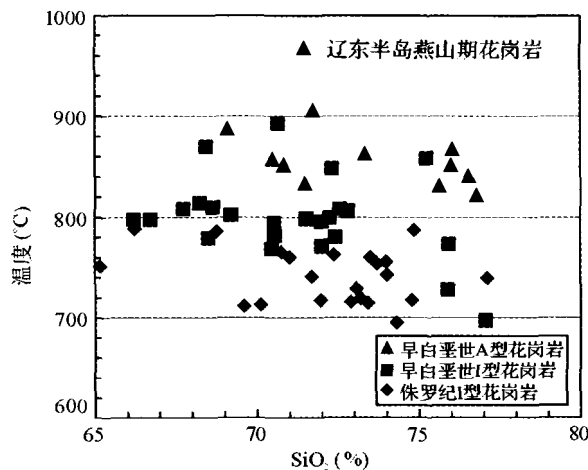


图 12 辽东半岛燕山期花岗岩的锆饱和温度

Fig. 12 Zirconium saturation temperature of the Yanshanian granites in the Liaodong Peninsula

的问题既古老又现代, 但花岗岩首先是一个地质问题, 简单的野外采样和仅有的室内分析是难以解决花岗岩问题的, 只有开展多学科的深入研究和实质性交叉融合, 花岗岩问题的进步才有可能。另一方面, 花岗岩的问题必须将其置于大的宏观地质框架中才能开展真正的研究。我国近年来的花岗岩研究虽然取得了一些进展, 但在诸如花岗岩侵位机制、花岗岩浆物理性质等方面的研究上, 还基本处于起步甚至是空白的状态。从这几方面来看, 我国花岗岩的研究仍任重而道远。

References

- Allegre CJ and Minster JF. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38: 1 - 25
- Anderson JL. 1997. Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Trans. Roy. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 87: 125-138
- Annen C and Sparks RSJ. 2002. Effects of repetitive emplacement of basaltic intrusions on thermal evolution and melt generation in the crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 203: 937-955
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605 - 626
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 123: 323 - 333
- Bergantz GW. 1989. Underplating and partial melting: Implications for melt generation and extraction. *Science*, 245: 1093 - 1095
- Bonin B, Azzouni-Sekkal A, Bussy F and Ferrag S. 1998. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: Petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 45: 45 - 70
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, in press
- Bryant DL, Ayers JC, Gao S, Miller CF and Zhang HF. 2004. Geochemical, age, and isotopic constraints on the location of the Sino Korean/Yangtze Suture and evolution of the Northern Dabie Complex, east central China. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 116: 698 - 717

- Campbell IH and Taylor SR. 1983. No water, no granites-no oceans, no continents. *Geophys. Res. Lett.*, 10: 1061-1064
- Castro A, Moreno-Ventas I and de la Rosa JD. 1991. H-type (hybrid) granitoids: a proposed revision of the granite-type classification and nomenclature. *Earth Sci. Rev.*, 31: 237-253
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geol.* 8: 173-174
- Chappell BW, White AJR and Wyborn D. 1987. The importance of residual Source material (restite) in granite petrogenesis. *J. petrol.*, 28: 1111-1138
- Chappell BW and White AJR. 1992. I-and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 83: 1-26
- Chappell BW, Bryant CJ, Wyborn D, White AJR and Williams IS. 1998. High-and low-temperature granites. *Resource Geol.*, 48: 225-236
- Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated hapogranites. *Lithos*, 46: 535-551
- Chappell BW, White AJR, Williams IS, Wyborn D and Wyborn LAI. 2001. Lachlan Fold Belt granites revisited: High-and low-temperature granites and their implications. *Australian J. Earth Sci.*, 47: 123-138
- Chappell BW, White AJR, Williams IS and Wyborn D. 2004. Low-and high-temperature granites. *Trans. Royal. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 95: 125-140
- Chen JF, Xie Z, Li HM, Zhang XD, Zhou TX, Park YS, Ahn KS, Chen DG and Zhang X. 2003. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochem. J.*, 37: 35-46
- Cheng RY, Wu FY, Ge WC, Sun DY and Yang JH. 2006. Emplacement age of the Raohé Complex in eastern Heilongjiang Province and the tectonic evolution of the eastern part of Northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 353-376 (in Chinese with English abstract)
- Chung SL, Liu DY, Ji JQ, Chu MF, Lee HY, Wen DJ, Lo CH, Lee TY, Qian Q and Zhang Q. 2003. Adakites from continental collision zones: melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31: 1021-1024
- Chung SL, Chu MF, Zhang YQ, Xie YW, Lo CH, Lee TY, Lan CY, Li XH, Zhang Q and Wang YZ. 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth Sci. Rev.*, 68: 173-196
- Claiborne LL, Miller CF, Walker BA, Wooden JL, Mazdab FK and Bea F. 2006. Tracking magmatic processes through Zr/Hf ratios in rocks and Hf and Ti zoning in zircons: An example from the Spirit Mountain batholith, Nevada. *Mineral. Mag.*, 70: 517-543
- Clemens JD, Holloway JR and White AJR. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. *Am. Mineral.*, 71: 317-324
- Clemens JD. 2003. S-type granitic magmas-petrogenetic issues: Models and evidence. *Earth Sci. Rev.*, 61: 1-18
- Cobbing J. 2000. *The geology and mapping of granite batholiths.* Springer, 141
- Coleman DS, Frost TP and Glazner AF. 1992. Evidence from the Lamarck Granodiorite for rapid Late Cretaceous crust formation in California. *Science*, 258: 1924-1926
- Coleman DS, Glazner AF, Miller JS, Bradford KJ, Frost TP, Joye JL and Bachl CA. 1995. Exposure of a Late Cretaceous layered mafic-felsic magma system in the central Sierra Nevada batholith, California. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120: 129-136
- Coleman DS and Glazner AF. 1997. The Sierra crest magmatic event: Rapid formation of juvenile crust during the Late Cretaceous in California. *Inter. Geol. Rev.*, 39: 768-787
- Coleman DS, Gray W and Glazner AF. 2004. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California. *Geology*, 32: 433-436
- Collins WJ, Beams SD, White AJR and Chappell BW. 1982. Nature and origin A-type granites with particular reference to Southeastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80: 189-200
- Collins WJ. 1994. Upper-and middle-crustal response to delamination: An example from the Lachlan fold belt, eastern Australia. *Geology*, 22: 143-146.
- Collins WJ. 1998. Evaluation of petrogenetic models for Lachlan Fold Belt granitoids: Implications for crustal architecture and tectonic models. *Aust. J. Earth Sci.*, 45: 483-500
- Costa S and Rey P. 1995. Lower crustal rejuvenation and growth during post-thickening collapse: Insights from a crustal cross section through a Variscan metamorphic core complex. *Geology*, 23: 905-908
- Creaser RA, Price RC and Wormald RJ. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model. *Geology*, 19: 163-166
- Debon F, Le Fort P, Sheppard SM and Sonet J. 1986. The four plutonic belts of the Transhimalaya-Himalaya: A chemical, mineralogical, isotopic, and chronological synthesis along a Tibet-Nepal section. *J. Petrol.*, 27: 219-250
- DePaolo DJ, Linn AM and Schubert G. 1991. The continental crust age distribution: Methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data and implication to the southwestern United States. *J. Geophys. Res.*, 96 (B2): 2071-2088
- Ducea MN. 2001. The California arc: Thick granitic batholiths, ecogitic residues, lithospheric-scale thrusting, and magmatic flare-ups. *GSA Today*, 11(11): 4-10
- Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26: 115-134
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641-644
- Elburg MA and Nicholls IA. 1995. Origin of microgranitoid enclaves in the S-type Wilsons Promontory batholith, Victoria-evidence for magma mingling. *Aust. J. Earth Sci.*, 42: 423-435
- Foley SF, Tiepolo M and Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 417: 837-840
- Föster HJ, Tischendorf G and Trumbull RB. 1997. An evaluation of the Rb vs. (Y + Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40: 261-293
- Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ and Frost CD. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.*, 42: 2033-2048
- Gao YF, Hou ZQ, Kamber BS, Wei RH, Meng XJ and Zhao RS. 2007. Adakite-like porphyries from the southern Tibetan continental collision zones: Evidence for slab melt metasomatism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153: 105-120
- Ge NJ, Hou ZH, Li HM, Chen JF, Liu B, Yuan J and Qin LP. 1999. Zircon U-Pb age of the Shacun mafic-ultramafic intrusion in Yuxi of Dabie orogenic belt. *China Sci. Bull.*, 44: 2110-2114 (in Chinese)
- Gilder SA, Keller GR, Luo M and Goodell PC. 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, 197: 225-243
- Gilder SA, Gill J, Coe RS, Zhao XX, Liu Z, Wang G, Yuan K, Liu W, Kuang G and Wu H. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *J. Geophys. Res.*, 101: 16137-16154
- Glazner AF, Bartley JM, Coleman DS, Gray W and Taylor RZ. 2004. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? *GSA Today*, 14(4/5): 4-11
- Green TH. 1982. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite. In: Thorpe RS (ed). *Andesites*, John Wiley & Sons, 465-487
- Guo CL, Wu FY, Yang JH, Lin JQ and Sun DY. 2004. The extensional setting of the Early Cretaceous magmatism in Eastern China-example from the Yinmawanshan pluton in southern Liaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1193-1204 (in Chinese English abstract)
- Hacker BR, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D and Dong SW. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 161: 215-230
- Harrison TM and Watson EB. 1984. The behavior of apatite during

- crustal anatexis; Equilibrium and kinetic considerations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48; 1467 - 1477
- Hawkesworth CJ and Kemp AIS. 2006. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chem. Geol.*, 226; 144 - 162
- Holden P, Halliday AN and Stephens WE. 1987. Neodymium and strontium isotope content of microdiorite enclaves points to mantle input to granitoid production. *Nature*, 330; 53 - 56
- Holloway NH. 1982. North Palawan Block, Philippines-Its relation to Asian Mainland and role in evolution of South China Sea. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 66; 1355 - 1383
- Hou ZH, Li SG, Chen NS, Li QL and Liu XM. 2005. Sm-Nd and zircon SHRIMP U-Pb dating of the Huilanshan mafic granulite in Dabie Mountains and its zircon trace element geochemistry. *Sci. China (D)*, 48; 2081 - 2091
- Hou ZQ, Gao YF, Qu XM, Rui ZY and Mo XX. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 220; 139 - 155
- Hs KJ, Sun S, Li JL, Chen HH, Pen HP and Sengor AMC. 1988. Mesozoic overthrust tectonics in south China. *Geology*, 16; 418 - 421
- Hs KJ, Li JL, Chen HH, Pen HP and Sengor AMC. 1990. Tectonics of south China: Key to understanding west Pacific geology. *Tectonophysics*, 183; 9 - 39
- Huang F, Li SG, Dong F, Li QL, Chen FK, Wang Y and Yang W. 2007. Recycling of deeply subducted continental crust in the Dabie Mountains, central China. *Lithos*, 96; 151 - 169
- Huang J, Zheng YF, Zhao ZF, Wu YB, Zhou JB and Liu XM. 2006. Melting of subducted continent: Element and isotopic evidence for a genetic relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen. *Chem. Geol.*, 229; 227 - 256
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63; 489 - 508
- Jahn BM, Chen PY and Yen TP. 1976. Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86; 763 - 776
- Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the Northern Dabie complex, Central China. *Chem. Geol.*, 157; 119 - 146
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23; 82 - 92
- Jahn BM, Wu FY, Capdevila R, Fourcade S, Wang YX and Zhao ZH. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an (Khingan) Mountains in NE China. *Lithos*, 59; 171 - 198
- Kay RW and Kay SM. 1991. Creation and destruction of the lower continental crust. *Geol. Rundsch.*, 80; 259 - 270
- Kay RW and Kay SM. 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219; 177 - 189
- Kemp AIS, Hawkesworth CJ, Paterson BA and Kinny PD. 2006. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Nature*, 439; 580 - 583
- Kemp AIS, Hawkesworth CJ, Foster GL, Paterson BA, Woodhead JD, Hergt JM, Gray CM and Whitehouse MJ. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. *Science*, 315; 980 - 983
- King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *J. Petrol.*, 38; 371 - 391
- King PL, Chappell BW, Allen CM and White AJR. 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. *Australian J. Earth Sci.* 48; 501 - 514
- Landenberger B and Collins WJ. 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi complex, Eastern Australia. *J. Petrol.*, 37; 145 - 170
- Lee J and Whitehouse MJ. 2007. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages. *Geology*, 35; 45 - 48
- Le Fort P. 1996. Evolution of the Himalaya. In: Yin A and Harrison TM (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, 95 - 109
- Li SG, Hong JA, Li HM and Jiang LL. 1999. U-Pb zircon ages of the pyroxenite-gabbro intrusions in Dabie Mountains and their geological implications. *Geol. J. Uni.*, 5; 351 - 355 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China. *J. Asian Earth Sci.*, 18; 293 - 305
- Li XH, Li ZX, Ge WC, Zhou HW, Li WX, Liu Y and Wingate MTD. 2003a. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Res.*, 122; 45 - 83
- Li XH, Chen ZG, Liu DY and Li WX. 2003b. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin and tectonic significance. *Int. Geol. Rev.*, 45; 898 - 921
- Li XH, Chung SL, Zhou HW, Lo CH, Liu Y and Chen CH. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi: ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for tectonic evolution of SE China. In: Malpas J, Fletcher CJ, Aitchison JC and Ali J (eds). *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. Geol. Soc. London, Special Publ., 226; 193 - 216
- Li XH, Li ZX, Li WX and Wang YJ. 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on the Hainan Island. *J. Geol.*, 114; 341 - 353
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr Nd Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96; 186 - 204
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35; 179 - 182
- Liegeois (ed). 1998. Post-collisional magmatism. *Lithos*, 45; 1 - 563
- Lipman PW. 2007. Incremental assembly and prolonged consolidation of Cordilleran magma chambers: Evidence from the southern Rocky Mountain volcanic field. *Geosphere*, 3; 42 - 70
- Liu DY, Tang JF, Zhou CT, Gao TS, Shen HS and Yang C. 2002. U-Pb zircon dating and its geological significance of the Taoyuanzhai volcanic rocks, central Dabie Orogenic Belt. *Acta Geol. Sinica* 76; 217 - 221 (in Chinese with English abstract)
- Loiselle MC and Wones DR. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geol. Soc. Am. Abstr. Prog.*, 11; 468
- Ma CQ, Yang KG, Ming HL and Lin GC. 2004. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites. *Sci. China (D)*, 47; 453 - 464
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101; 635 - 643
- Masuda A and Akagi T. 1989. Lanthanide tetrad effect observed in leucogranites from China. *Geochem. J.*, 23; 245 - 253
- Matzel JEP, Bowring SA and Miller RB. 2006. Time scales of pluton construction at differing crustal levels: Examples from the Mount Stuart and Tenpeak intrusions, North Cascades, Washington. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 118; 1412 - 1430
- Miller CF. 1985. Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary sources? *J. Geol.*, 93; 673 - 689
- Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31; 529 - 532
- Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, Zhou S, Wang LL, Qiu RZ and Zhang FQ. 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth

- and evolution. *Geol. J. China Uni.*, 11: 281–290 (in Chinese with English abstract)
- Monecke T, Dulski P and Kempe U. 2007. Origin of convex tetrads in rare earth element patterns of hydrothermally altered siliceous igneous rocks from the Zinnwald Sn W deposit, Germany. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 335–353
- Murphy MA and Harrison TM. 1999. Relationship between leucogranites and the Qomolangma detachment in the Rongbuk Valley, south Tibet. *Geology*, 27: 831–834
- Neves SP, Mariano G, Guimarães IP, da Silva Filho AF and Melo SC. 2000. Intralithospheric differentiation and crustal growth: Evidence from the Borborema province, northeastern Brazil. *Geology*, 28: 519–522
- Patino Douce AE. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 25: 743–746
- Patino Douce AE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds). *Understanding granites: intergrading new and classical techniques*. *Geol. Soc. London. Spec. Publ.*, 168: 55–75
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956–983
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19: 120–125
- Petford N, Cruden AR, McCaffrey KJW and Vigneresse JL. 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, 408: 669–673
- Petford N and Gallagher K. 2001. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 193: 483–499
- Pitcher WS. 1997. *The Nature and Origin of Granite (2nd edition)*. Chapman & Hall, London, 386
- Pitcher WS, Atherton MD, Cobbing EJ and Beckinsale RD. 1985. *Magmatism at a plate edge: The Peruvian Andes*. Blackie, Glasgow
- Rapp RP, Shimizu N and Norman MD. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature*, 425: 605–609
- Ratajeski K, Glazner AF, Miller BV. 2001. Geology and geochemistry of mafic to felsic plutonic rocks in the Cretaceous intrusive suite of Yosemite Valley, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 113: 1486–1502
- Read HH. 1948. Granites and granites. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 28: 1–19
- Reid JB, Murray DP, Hermes OD and Steig EJ. 1993. Fractional crystallization in granites of the Sierra Nevada: How important is it? *Geology*, 21: 587–590
- Rowley DB. 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 145: 1–13
- Rudnick RL. 1995. Making continental crust. *Nature*, 378: 571–578
- Saleeby J, Ducea M and Clemens-Knott D. 2003. Production and loss of high-density batholithic root, southern Sierra Nevada, California. *Tectonic*, 22: 2002TC001374
- Scharer U, Xu RH and Allegre CJ. 1984. U-Pb geochronology of Gandese (Transhimalaya) plutonism in the Lhasa-Xigaze region Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 69: 311–320
- Searle MP and Godin L. 2003. The South Tibetan Detachment and the Manaslu leucogranite: A structural reinterpretation and restoration of the Annapurna-Manaslu Himalaya, Nepal. *J. Geol.*, 111: 505–523
- Sewell RJ and Campbell SDG. 1997. Geochemistry of coeval Mesozoic plutonic and volcanic suites in Hong Kong. *J. Geol. Soc. Lond.*, 154: 1053–1066
- Sisson TW, Grove TL and Coleman DS. 1996. Hornblende gabbro sill complex at Onion Valley, California, and a mixing origin for the Sierra Nevada batholith. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 126: 81–108
- Skjerlie KP and Johnston AD. 1993a. Fluid-absent melting behavior of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: Implications for the generation of anorogenic granites. *J. Petrol.*, 34: 785–815
- Skjerlie KP and Johnston AD. 1993b. Vapor-absent melting at 10kbar of a biotite-and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. *Geology*, 20: 263–266
- Sun T. 2006. New map showing the distribution of granities in south China and its explanatory notes. *Geol. Bull. China*, 25: 332–335 (in Chinese with English abstract)
- Sylvester PJ. 1989. Post-collisional alkaline granites. *J. Geol.*, 97: 261–280
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29–34
- Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, 33: 241–165
- Thompson AB. 1999. Some time-space relationships for crustal melting and granitic intrusion at various depths. In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds). *Understanding granites: Intergrading new and classical techniques*. *Geol. Soc. London. Spec. Publ.*, 168: 7–25
- Treuil M and Joron JL. 1975. Utilisation des éléments hybromagmaphiles pour la simplification de la modélisation quantitative des processus magmatiques. *Soc. Ital. Miner. Petrol.*, 31: 125–174
- Turner SP, Foden JD and Morrison RS. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Pathaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28: 151–179
- Waight TE, Maas R and Nicholls IA. 2001. Geochemical investigations of microgranitoid enclaves in the S-type Cowra Granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia. *Lithos*, 56: 165–186
- Wang JH and Deng SX. 2002. Emplacement age for the mafic-ultramafic plutons in the northern Dabie Mts. (Hubei): Zircon U-Pb, Sm-Nd and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating. *Sci. China (D)*, 45: 1–12
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xiong XL, Bao ZW, Dai TM, Xu JF and Ma JL. 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, south China: Constraints for the late Mesozoic tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 795–808
- Wang Q, Wyman DA, Xu JF, Jian P, Zhao ZH, Li CF, Xu W, Ma JL and He B. 2007. Early Cretaceous adakitic granites in the Northern Dabie Complex, central China: Implications for partial melting and delamination of thickened lower crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71: 2609–2636
- Wang YJ, Fan WM and Guo F. 2002. K-Ar dating of late Mesozoic volcanism and geochemistry of volcanic gravels in the North Huaiyang Belt, Dabie orogen: Constraints on the stratigraphic framework and exhumation of the northern Dabie orthogenesis complex. *Chinese Sci. Bull.*, 47: 1528–1534 (in Chinese)
- Wang XL, Zhou JC, Qiu JS, Zhang WL, Liu XM and Zhang GL. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. *Precambrian Res.*, 145: 111–130
- Wang YJ, Fan WM, Peng TP, Zhang HF and Guo F. 2005. Nature of the Mesozoic lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie Orogen, Central China: Evidence from ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology, elemental and Sr Nd Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic igneous rocks. *Chem. Geol.*, 220: 165–189
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 64: 295–304
- Watson EB and Harrison TM. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308: 841–844
- Watson EB, Wark DA and Thomas JB. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 151: 413–433
- Wei CS, Zheng YF, Zhao ZF and Valley JW. 2002. Oxygen and neodymium isotope evidence for recycling of juvenile crust in northeast China. *Geology*, 30: 375–378
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis.

- Contrib. Mineral. Petrol., 95: 407–419
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA and Sun DY. 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328: 89–113
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde SA. 2002. A-type granites in Northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem. Geol.*, 187: 143–173
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66: 241–273
- Wu FY, Sun DY, Jahn BM and Wilde SA. 2004. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns. *J. Asian Earth Sci.*, 23: 731–744
- Wu FY, Lin JQ, Wilde SA, Sun DY and Yang JH. 2005a. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233: 103–119
- Wu FY, Yang JH, Wilde SA and Zhang XO. 2005b. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem. Geol.*, 221: 127–156
- Wu RX, Zheng YF, Wu YB, Zhao ZF, Zhang SB, Liu X and Wu FY. 2006. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Res.*, 146: 179–212
- Wyllie. 1977. Crustal anatexis: an experimental review. *Tectonophysics*, 43: 41–71
- Xia QK, Zheng YF and Delouie E. 2003. U-Pb ages and oxygen isotope compositions of zircons from post-collisional volcanic rocks of Dahieshan. *Geol. J. Uni.*, 9: 163–171 (in Chinese with English abstract)
- Xie Z, Zheng YF, Zhao ZF, Wu YB, Wang ZR, Chen JF, Liu XM and Wu FY. 2006. Mineral isotope evidence for the contemporaneous process of Mesozoic granite emplacement and gneiss metamorphism in the Dabie orogen. *Chem. Geol.*, 231: 214–235
- Xiong XL. 2006. Trace element evidence for growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite. *Geology*, 34: 945–948
- Xu HJ, Ma CQ and Ye K. 2007. Early cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U Pb dating and geochemistry. *Chem. Geol.*, 240: 238–259
- Xu RH, Scharer U and Allegre CJ. 1985. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block (Tibet): A geochronological study. *J. Geol.*, 93: 41–57
- Xue F, Rowley DB, Tucker RD and Peng ZX. 1997. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie Complex, eastern Dabie Shan, China. *J. Geol.*, 105: 744–753
- Xue HM, Dong SW and Liu XC. 2002. U/Pb zircon dating for Cretaceous adakitic volcanic rocks in eastern part of the north Dabie Mountains. *Geochimica*, 31: 455–463 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Chung SL, Wilde SA and Chu MF. 2004. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, NE China. *Geochim Cosmochim Acta*, 68: 4469–4483
- Yang JH, Chung SL, Wilde SA, Wu FY, Chu MF, Lo CH and Fan HR. 2005a. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: Geochronology, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chem. Geol.*, 214: 99–125
- Yang JH, Wu FY, Chung SL, Wilde SA, Chu MF, Lo CH and Song B. 2005b. Petrogenesis and tectonic significance of Early Cretaceous granitic magmatism in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, East China. *Chem. Geol.*, 222: 200–231
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA, Xie LW, Yang YH and Liu XM. 2007a. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153: 177–190
- Yang JH, Chung SL, Wu FY, Lo CH, Wilde SA, Zhao Y, Liu W and Zhai MG. 2007b. Rapid exhumation and cooling of the Liaonan metamorphic core complex inferred from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology: Implications for the Late Mesozoic tectonic evolution of North China craton. *Geol. Soc. Am. Bull.*, in revision
- Yang ZL, Shen JL, Shen WZ, Tao KY and Xie FG. 1999. Isotopic chronology of Mesozoic volcanic-intrusive rocks in Beihuaiyang. *Geol. Rev.*, 45 (sup.): 674–680 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211–280
- Zack T, Moraes R and Kronz A. 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: Empirical calibration of a rutile thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 471–488
- Žák J, Paterson SR and 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. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 119: 184–201
- Zhang HF, Harris N, Parrish R, Kelley S, Zhang L, Rogers N, Argles T and King J. 2004. Causes and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan antiform. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 228: 195–212
- Zhang ZJ, Badal J, Li YK, Chen Y, Yang LQ and Teng JW. 2005. Crust upper mantle seismic velocity structure across Southeastern China. *Tectonophysics*, 395: 137–157
- Zhao ZF, Zheng YF, Wei CS and Wu YB. 2004. Zircon isotope evidence for recycling of subducted continental crust in post-collisional granitoids from the Dabie terrane in China. *Geophys. Res. Lett.*, 31: 2004GL021061
- Zhao ZF, Zheng YF, Wei CS, Wu YB, Chen FK and Jahn BM. 2005. Zircon U-Pb age, element and C-O isotope geochemistry of post-collisional mafic-ultramafic rocks from the Dabie orogen in east-central China. *Lithos*, 83: 1–28
- Zhao ZF, Zheng YF, Wei CS and Wu YB. 2007. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. *Lithos*, 93: 248–272
- Zheng YF, Fu B, Gong B and Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Reviews*, 62: 105–161
- Zheng YF, Wu YB, Chen FK, Gong B, Li L and Zhao ZF. 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4145–4165
- Zheng YF, Zhang SB, Zhao ZF, Wu YB, Li XH, Li ZX and Wu FY. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust. *Lithos*, 96: 127–150
- Zhong H, Zhu WG, Chu ZY, He DF and Song XY. 2006. Shrimp U Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chem. Geol.* 236: 112–133
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269–287

附中文参考文献

- 程瑞玉, 吴福元, 葛文春, 孙德有, 杨进辉. 2006. 黑龙江省东部饶河杂岩的就位时代与东北东部中生代构造演化. *岩石学报*, 22: 353–376
- 葛宁杰, 侯振辉, 李惠民, 陈江峰, 刘斌, 阮俊, 秦礼萍. 1999. 大别造山带岳西沙村镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 44: 2110–2114
- 郭春丽, 吴福元, 杨进辉, 林景村, 孙德有. 2004. 中国东部早白垩

- 世岩浆作用的伸展构造性质-以辽东半岛南部饮马湾山岩体为例. 岩石学报, 20: 1193 - 1204
- 侯振辉, 李曙光, 陈能松, 李秋立, 柳小明. 2005. 大别造山带惠兰山镁铁质麻粒岩 Sm-Nd 和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及锆石微量元素地球化学. 中国科学(D), 35: 1103 - 1111
- 李曙光, 洪吉安, 李惠民, 江来利. 1999. 大别山辉石岩-辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 高校地质学报, 5: 351 - 355
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 52: 981 - 991
- 刘敦一, 汤加富, 周蹲亭, 高天山, 沈荷生, 杨淳. 2002. 大别造山带核部桃园寨火山岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. 地质学报, 76: 217 - 221
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 林光春. 2003. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学(D), 33: 817 - 827
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张风琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息. 高校地质学报, 11: 281 - 290
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报, 25: 332 - 335
- 王江海, 邓尚贤. 2002. 湖北北大别镁铁-超镁铁质侵入体的时代: 锆石 U-Pb, Sm-Nd 和⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年结果. 中国科学(D), 32: 1 - 12
- 王强, 赵振华, 简平, 熊小林, 包志伟, 戴檀谟, 许继峰, 马金龙. 2005. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. 岩石学报, 21: 795 - 808
- 王岳军, 范蔚茗, 郭锋. 2002. 北淮阳晚中生代火山岩定年及火山砾石地球化学: 对大别灰色片麻岩隆升和中生代地层格架的约束. 科学通报, 47: 1528 - 1534
- 夏群科, 郑永飞, Deloule E. 2003. 大别山碰撞后火山岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成. 高校地质学报, 9: 163 - 171
- 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 2002. 北大别东部白垩纪埃达克质火山岩及其锆石 U-Pb 年代学. 地球化学, 31: 455 - 463
- 杨祝良, 沈加林, 沈渭洲, 陶奎元, 挟芳贵. 1999. 北淮阳中生代火山-侵入岩同位素年代学研究. 地质论评, 45(增刊): 674 - 680