

大陆花岗岩的地球动力学意义

张 旗

(中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要:大陆花岗岩的地球动力学意义是一个有争议的话题。笔者认为,花岗岩可分为大洋和大陆两个系列,产于洋盆内及其边缘的花岗岩属于大洋系列,产于大陆内(不包括造山带)的花岗岩属于大陆系列。大洋系列花岗岩最重要的地球动力学意义是判断花岗岩形成的构造环境,大陆系列花岗岩最重要的地球动力学意义是判断地壳状况,包括花岗岩形成时的地壳厚度和温度状况。花岗岩按照 Sr-Yb 含量可分为埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型、广西型和南岭型 5 类。产于大陆内的不同类型的花岗岩与其形成的深度有关:埃达克型花岗岩富 Sr 贫 Yb,与榴辉岩相处于平衡,产于加厚的地壳;喜马拉雅型花岗岩贫 Sr 和 Yb,与麻粒岩相处于平衡,产于较厚的地壳;浙闽型(贫 Sr 富 Yb)和广西型(富 Sr 和 Yb)花岗岩与角闪岩相处于平衡,产于正常或较薄的地壳;南岭型花岗岩也与角闪岩相处于平衡,地壳厚度最薄。喜马拉雅型花岗岩属于低温系列,浙闽型花岗岩为中或高温系列,广西型和南岭型花岗岩属于高温系列。埃达克型花岗岩则可以出现在各个温度系列。应用花岗岩分类可以恢复古代地壳厚度和下地壳底部温度状况,还可以追踪某些地区随时间变化地壳厚度和温度变化的情况和趋势。

关键词:花岗岩;大陆系列;大洋系列;地球动力学意义;构造环境;地壳状况;地壳厚度;温度系列

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)04-0785-14

Geodynamic implications of continental granites

ZHANG Qi

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

Abstract: The geodynamic implications of continental granite remain a controversial topic. The author believes that the granite can be divided into two series of ocean and continent. The granite produced in the ocean basin and the edge belongs to the ocean series, whereas the granite produced in the continent belongs to continental series. The most important geodynamic implications of ocean series granite is to distinguish tectonic settings, the same of continent series is to judge the crust thickness and temperature conditions. Granite can be divided into Adak-type, Himalaya-type, Zhemin-type, Guangxi-type and Nanling-type on the basis of Sr-Yb content. Different types of granite are related to the granite formation depth: Adak-type granite rich in Sr and poor in Yb is in equilibrium with eclogite facies and produced in the thickening crust; Himalaya-type granite with poor Sr and Yb is in equilibrium with granulite facies and produced in thick crust; Zhemin-type poor in Sr and rich in Yb and Guangxi-type rich in Sr and Yb are in equilibrium with amphibolite facies and produced in normal or thin crust; Nanling-type granite is also in equilibrium with amphibolite facies and produced in the thinnest crust. Himalaya-type granite belongs to the low temperature series, whereas Zhemin-type granite to the middle or high temperature series; Nanling-type and Guangxi-type belong to the high temperature series. Adak-type granite can appear in each temperature series. The application of classification of granite can restore ancient crustal thickness and

收稿日期: 2013-09-23; 修订日期: 2014-06-03

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91014001)

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

temperature conditions at the bottom of the lower crust and can also trace changes of the situation and trend of the change of crustal thickness and temperature with time in some regions.

Key words: granite; continent series; ocean series; geodynamic meaning; tectonic environment; crustal situation; crustal thickness; temperature series

花岗岩的地球动力学意义是花岗岩研究中最常遇到的、最令人感兴趣的、但也是争论不休的问题。

学术界普遍认为,构造环境是花岗岩最主要的地球动力学意义。实际上并非如此,甚至在大多数情况下并非如此。花岗岩可以区分为大洋系列和大陆系列,大洋系列和大陆系列花岗岩的地球动力学意义是不同的。前者判断构造环境,后者判断地壳状况(张旗和李承东,2012)。国外早在上个世纪 70~80 年代即对花岗岩的构造环境做过很好的研究,至今大多仍然有效(Pearce *et al.*, 1984)。按照国外学者的认识,全球花岗岩与玄武岩一样,也可以产于不同的构造环境,如洋脊环境、岛弧环境、活动陆缘环境、板内环境等。这是对的,但是,仅适用于大洋系列而不适用于大陆系列。

学术界还普遍认为,花岗岩与板块碰撞作用有关,可以识别出碰撞前、碰撞中和碰撞后花岗岩(Pearce *et al.*, 1984; Batchelor and Bowden, 1985; Harris *et al.*, 1986; Barbarin, 1999)。笔者认为,碰撞和构造环境不是一个概念,碰撞是构造事件,不是构造环境,不能将碰撞与构造环境相提并论,依靠花岗岩地球化学数据也不能判断花岗岩是碰撞前、碰撞中或碰撞后的(张旗, 2012b)。按照板块构造观点,全球构造环境无非板块增生、板块汇聚和板内 3 种环境。大陆既不是板块增生环境,也不是板块汇聚环境,而是板块内部环境。因此,从板块构造角度,大陆花岗岩的构造环境早已明确了:板内环境。只要是产于大陆内部的花岗岩(不包括造山带),全部是板内的,如中国东部中生代花岗岩。对于上述花岗岩,如果还要判断环境,无异于画蛇添足。

对于产于造山带的花岗岩,在造山时期,即板块构造存续时期(洋盆存续时期),属于大洋系列,可以判断环境,如北方造山带在古亚洲洋闭合以前的泥盆纪和早古生代的花岗岩。对于北方造山带内的二叠纪及其以后的花岗岩,则属于大陆系列(不论其 K_2O 含量多少, Na_2O/K_2O 比值多少, ϵ_{Nb} 为正值还是负值,也不论其是 I 型的 S 型的还是 A 型的),全部属于板内环境,无需再判断其构造环境。至于北方造山带内石炭纪的花岗岩,则需要根据具体地区

的构造演化史来判断,如果洋盆还没有消失,属于大洋系列,如果洋盆消失了,属于大陆系列。

大陆花岗岩不存在构造环境问题,那么,它的地球动力学意义是什么呢?笔者先前的研究认为是地壳厚度(张旗等, 2011; 张旗和李承东, 2012),最近的研究认为是地壳状况(本文),即花岗岩形成时的地壳厚度和温度状况。

1 大洋系列花岗岩的地球动力学意义:构造环境

花岗岩地球动力学问题是上个世纪中期才明确的是,板块构造理论兴起后提出来的。在板块构造以前,固定论占统治地位,人们关注的主要是花岗岩是什么的问题,例如花岗岩成分是怎么变化的?它的物理和化学性质是什么?它从哪里来?是怎么侵位的等等。对于为什么要研究花岗岩,研究花岗岩能够解决什么问题人们并不清楚,对花岗岩地球动力学问题也缺乏思想上和理论上的准备。在板块构造以前,人们发现在不同地区的花岗岩存在不同特点(例如大西洋地区与太平洋地区、地台区与地槽区等),但是,不明白其中的含义,解释上也缺乏理论深度。是板块构造学说开启了花岗岩地球动力学研究的新领域,极大地拓展了花岗岩研究的思路,使花岗岩研究上升到一个新的阶段。从这个角度说,板块构造学说的功绩是巨大的,它将花岗岩研究的新思路归结到一点,即构造环境。

大洋系列不同于大陆系列,它们的不同不在于岩石学和地球化学上,而在于产出的部位上:大洋系列花岗岩产于洋盆及其边缘(活动陆缘);大陆系列产于大陆(不包括活动陆缘)。

板块构造的一个重要贡献是厘清了花岗岩与构造环境的关系:在板块扩张脊出现的是洋脊型花岗岩,在岛弧是岛弧型花岗岩,在洋岛是洋岛型花岗岩,在大陆裂谷是裂谷型花岗岩,等等。这些都是对的,因为有大量资料的支持。因此,大洋系列花岗岩最重要的地球动力学意义就是构造环境。

花岗岩判断构造环境中有一个非常重要的问题

常常被学术界所忽略,即:花岗岩判断的基本上是花岗岩源区的环境而非花岗岩形成时的构造环境。当源区与花岗岩形成时代接近,构造环境没有发生迁移的前提下,花岗岩判断的环境是花岗岩形成和侵位时的构造环境;当花岗岩侵位的环境发生变化时,花岗岩所判断的环境即非花岗岩侵位时的环境。

据粗略统计,全球花岗岩约有90%位于大陆上,处于海洋内的只有10%左右。在这10%的大洋系列花岗岩中,按照构造环境可区分为3类:洋脊花岗岩(ORG)、岛弧和活动陆缘花岗岩(VAG)以及板内花岗岩(WPG)。其中,洋脊花岗岩和板内(洋内或海山)花岗岩极少,大约95%以上为岛弧和活动陆缘花岗岩(如日本、阿留申、千岛群岛、琉球群岛、伊豆-小笠原-马里亚纳群岛、俄罗斯远东、菲律宾、印尼、新西兰、北美西部、安第斯、加勒比等)。因此,全球花岗岩只有10%左右的花岗岩需要判断其构造环境,其余90%的花岗岩属于大陆花岗岩,不需要再判断其构造环境(张旗等,2008)。

2 大陆系列花岗岩的地球动力学意义 地壳状况

在大陆构造背景下,花岗岩最大的地球动力学意义是地壳状况而非构造环境。地壳状况包括两个方面的内容;一个是地壳厚度,另一个是地壳热状态。

花岗岩与地壳厚度的关系是一个新课题,早先的研究对此涉及很少,原因是缺少有效的方法(张旗等,2008;张旗和李承东,2012)。直到1990年Defant和Drummond(1990)关于埃达克岩论文发表,才使花岗岩与其形成的压力联系起来,探讨花岗岩与地壳厚度的关系才成为可能。Defant和Drummond不只提出了埃达克岩的新名词,而是开辟了一个研究花岗岩与压力关系的新方法,其最大的特点是将花岗岩的地球化学特征与源区熔融残留相联系起来,开创了花岗岩研究的新思路,是花岗岩研究史上又一个光辉的里程碑。其实,早在上个世纪80年代,人们即已通过实验和相平衡研究探索了花岗岩与压力之间的关系。邓晋福等(1996)对此有精辟的介绍,他们指出,在 <1.0 GPa下熔融的花岗岩,其残留相为斜长石+辉石,在 >1.0 GPa下则为辉石+石榴石+角闪石。来自正常地壳厚度(35 km)的花岗岩不论怎样形成,总是与斜长石处于平衡,总是伴随

负锶异常,而在 >55 km厚度的情况下形成的花岗岩则不与残留相斜长石处于平衡,因而不会出现负锶异常。因此,无负锶异常的中酸性火成岩标志着一个加厚地壳的存在,而具负锶异常的中酸性火成岩则说明是一个正常厚度或减薄的陆壳。由于燕辽地区燕山期中酸性火成岩均无负锶异常,邓晋福等(1996)明确指出该区是一个加厚的陆壳(60~70 km),类似现今的青藏高原。该见解应当是具有创新性的,可惜没有得到学术界的响应。虽然邓晋福等(1996)的研究比Defant和Drummond(1990)提出埃达克岩晚了几年,但是,当时埃达克岩术语还未引入国内,更显出其见识的超前和卓越。

花岗岩能够判断地壳热状况是笔者最近才认识到的,这有赖于对广西型花岗岩的认识(张旗,2014)。原因要从花岗岩的分类说起。

3 花岗岩的分类

我们曾经按照Sr和Yb含量将花岗岩分为5类:埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型、广西型和南岭型(张旗等,2006,2008,2010a,2010b;张旗和李承东,2012),它们的差别主要体现在残留相组合上:埃达克型花岗岩富Sr贫Yb,指示源区有石榴石无斜长石,残留相为榴辉岩;喜马拉雅型贫Sr和Yb,暗示源区既有石榴石还有斜长石,残留相为含石榴石的麻粒岩;浙闽型贫Sr富Yb,源区无石榴石有斜长石,残留相为斜长角闪岩;南岭型非常贫Sr富Yb,源区富高钙的斜长石和辉石,残留相也为斜长角闪岩;广西型富Sr和Yb,源区既无石榴石也无斜长石,残留相为角闪石岩或角闪辉石岩。以角闪石为主的残留相(角闪岩、辉石角闪岩)已经属于超基性岩了,应当不是一般条件下能够出现的,至少需要很高的温度和较基性的源岩,无怪乎广西型花岗岩在自然界中很少出现(不超过全球花岗岩总量的3%),原来其形成条件很苛刻(张旗,2014)。

不同类型花岗岩在Sr-Yb图上的位置见图1,其在相图中的位置见图2。图1是笔者提出的花岗岩Sr-Yb分类图的第3个版本(张旗,2014),是根据最新的资料在前两版(张旗,2006;张旗等,2010a)的基础上修改而成的,主要是增加了广西型的范围,并将浙闽型的范围向右扩展了。为了清晰起见,不同类型花岗岩范围以粗实线表示,浙闽型除外,以粗虚线表示(图1)。

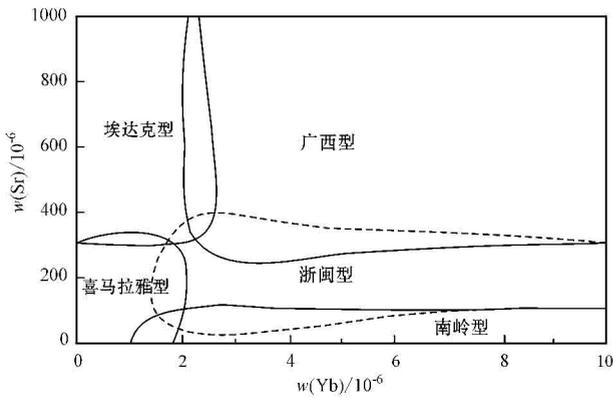


图 1 花岗岩的 Sr-Yb 分类图

Fig. 1 Sr-Yb diagram of granite classification

在图 2 中,不同花岗岩位于不同的位置,主要以石榴石和斜长石的反应线作为标志。图 2 中金红石、斜长石和角闪石矿物出现和消失线引自 Xiong 等(2005),石榴石出现线据 Vielzeuf 和 Schmidt (2001),花岗岩脱水熔融固相线据 Wyllie 和 Wolf (1993),干玄武岩固相线据 Lambert 和 Wyllie (1972)。

(1) 埃达克型和喜马拉雅型花岗岩位于石榴石出现线之上,是所有花岗岩类中压力最高的。它们的区别是:喜马拉雅型花岗岩的残留相中有斜长石存在,而埃达克型花岗岩无斜长石;喜马拉雅型花岗岩位于斜长石消失线之下,而埃达克型花岗岩位于斜长石消失线之上。于是,喜马拉雅型花岗岩形成的压力大体在 1.0~1.5 GPa 范围(主要取决于石榴石出现线和斜长石消失线位置的变化),形成的温度较低。埃达克型花岗岩形成在石榴石出现线之上,残留相如果有石榴石无金红石,压力 > 1.0 GPa;如果有金红石出现,则压力 > 1.5 GPa (Xiong *et al.*, 2005)。故在所有花岗岩类中,埃达克型花岗岩形成的温度和压力范围是最宽的(700~1100°C, 1.0~> 3.0 GPa, 图 2)。

(2) 浙闽型、广西型和南岭型花岗岩均位于石榴石出现线之下,说明它们形成的压力都较低。其中,在低温下形成的是浙闽型花岗岩,高温下如果残留相有斜长石为南岭型,高温下残留相如果没有斜长石则为广西型。广西型和南岭型的区别是以斜长石消失线为界(注意斜长石消失线是随水含量变化的):在斜长石消失线以下为南岭型,形成的压力较低;斜长石消失线之上为广西型,形成的压力略高(上限仍然不超过 1.0 GPa)。浙闽型和南岭型的界

线是模糊的,在图 2 中二者的界线是不确定的。浙闽型花岗岩亏损 Sr(通常 < 300 × 10⁻⁶),南岭型花岗岩强烈亏损 Sr(通常 < 100 × 10⁻⁶)。

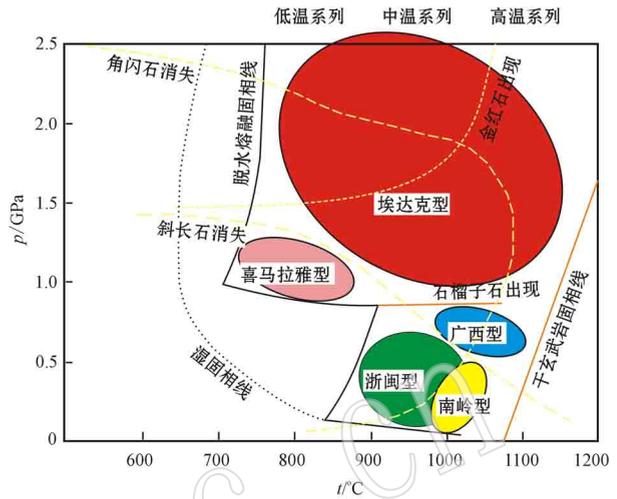
图 2 不同类型花岗岩形成的 p - T 条件

Fig. 2 Pressure-temperature conditions of different types of granite

上述关系展示的大陆花岗岩的地球动力学意义如下:

(1) 埃达克型花岗岩形成的压力最高,温度范围变化最大;喜马拉雅型花岗岩形成的压力较高,温度较低;浙闽型花岗岩形成于低温低压环境;广西型和南岭型形成于高温环境,压力略高为广西型,压力略低为南岭型。

(2) 从温度方面来看,地温梯度低(低温系列)形成喜马拉雅型(压力略低)和埃达克型花岗岩(压力略高);地温梯度中等(中温系列)形成浙闽型(压力低)和埃达克型花岗岩(压力高);地温梯度高(高温系列)形成南岭型(压力低)、广西型(压力略高)和埃达克型花岗岩(压力高)。

(3) 从压力关系来看,埃达克型花岗岩压力最高,喜马拉雅型较高,广西型和浙闽型较低,南岭型最低。

4 讨论

我们的研究成果学术界多数人不认可。学术界认为 Sr 和 Yb 受各种因素制约,主要因素不是压力。上述不同意见据何永胜(2010)的归纳主要有下述几个方面:同化混染和分离结晶成因说、岩浆混合说、麻粒岩部分熔融说以及低压下具高 Sr/Y 和 La/Yb

特征的源区熔融说等。此外,对于高镁的具高 Sr/Y 的岩石,也存在多种说法,如熔体/地幔交代、幔源岩浆加入、交代地幔熔融以及幔源岩浆分异、继承自初始岩浆说等。

许多人认为,埃达克岩不一定需要高压条件,玄武岩分离结晶、岩浆混合(尤其底侵的玄武岩与花岗岩混合)也可以形成埃达克岩,认为源岩成分对埃达克岩有明显的制约,不一定是压力,认为花岗岩是能够分异和演化的,如果早期形成的花岗岩是富 Sr 的,随着岩浆的演化,斜长石牌号降低, Sr 含量降低,也会变成贫 Sr 的了,实验表明埃达克岩在 1 GPa 压力下即可出现(有石榴石残留),相当于正常地壳厚度,无需加厚的地壳等。对上述见解笔者简要评述如下:

4.1 玄武岩分离结晶能否形成埃达克岩?

笔者已经反复指出,玄武岩分离结晶是不可能形成花岗岩的(张旗等,2008;张旗,2012a)。玄武岩分离结晶主要反映的是 MgO 含量和 Mg[#] 的降低,而不是 SiO₂ 含量的升高;相反,玄武岩分离结晶(例如斜长石和辉石的分离结晶)主要是使岩浆的 SiO₂ 含量降低而非升高。因此,玄武岩结晶分离的最后产物是富铁质的辉长岩或富铁质的闪长岩(闪长岩的出现暗示有含水的角闪石分离结晶出来),而不可能结晶分离出花岗岩(张旗等,2008;张旗,2013)。如果岩浆富水,水在角闪石中,角闪石是强烈贫 SiO₂ 的。因此,角闪石的分离将使玄武质岩浆中的 SiO₂ 含量增加,可以演化为闪长岩和石英闪长岩。当然,这里还需要考虑磁铁矿分离、液相不混溶以及氧逸度变化等的影响(Osborn, 1959; Veksler, 2009)。

4.2 岩浆混合能否形成埃达克岩?

岩浆混合包括两个方面:一是底侵的玄武岩与下地壳底部熔融的花岗岩发生混合;二是不同花岗岩(包括闪长岩)之间的混合。

(1)不同花岗岩之间的混合作用。这是完全有可能的,但是,笔者与学术界多数人认识不同之处在于,多数人认为混合是发生在花岗岩侵位之后或侵位过程中,笔者认为花岗岩混合主要发生在下地壳底部花岗质岩浆熔融的源区。笔者认为,花岗岩侵位之后很难混合,原因是花岗岩一旦离源区向上运移,即处于降温的过程;花岗质岩浆黏性很大,降温更增加了它的黏性;黏性越大,越难混合,这是显而易见的。但是,局部的小规模的混合是可能的,如花岗岩中暗色微粒包体的普遍存在,如花岗岩中局

部的流动构造、漩涡构造,如不同侵入体之间的渐变过渡关系等。上述现象不影响花岗岩的总体成分和格局。笔者认为花岗岩混合的最佳位置,花岗岩混合最容易发生的地方是在下地壳底部花岗岩熔融的源区,在那里,有来自地幔的持续的热的供给,有新的花岗岩熔体的不断加入,这是花岗质岩浆不断汇合、积累、对流、混合、形成的过程。在这个过程中,岩浆混合是一直在进行着的,从来不曾间断过。只要岩浆没有离源区向上运移,混合就一直在进行中。在这种情况下的岩浆混合,不论是哪种岩浆,也不论是两种还是三种、四种岩浆的混合,由于它们都处于同一压力下,它们的 Sr 和 Yb 含量均受同一压力的控制。如果是在正常的地壳厚度下,不论花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩,都是低 Sr 高 Yb 的,都属于浙闽型花岗岩,浙闽型花岗岩与浙闽型花岗岩混合得到的仍然是浙闽型花岗岩。如果是在高压条件下,也不论它们是花岗岩、花岗闪长岩或闪长岩,全部是埃达克岩。埃达克岩与埃达克岩混合的产物仍然是埃达克岩。

(2)底侵的玄武质岩浆与花岗质岩浆之间的混合。从理论上,在下地壳底部,这种混合是存在的。可以设想,如果富 Sr 的玄武岩与贫 Sr 的花岗岩混合,就会使混合的产物(例如闪长岩、安山岩) Sr 含量增加(相对贫 Sr 的花岗岩而言)。我们不否认上述过程的可能性。但是,考虑到野外实际情况,如果华北、大别的埃达克岩可以用这种方法来解释,那么,在南岭、浙闽地区也应当有玄武岩与花岗岩混合的情况,那里也有玄武岩的底侵作用,为什么那里没有埃达克岩?南岭有加里东、海西、印支、燕山期的大量花岗岩,为什么都不是埃达克岩?为什么玄武岩与花岗岩的混合独青睐华北和大别而不出现在南岭?因此,从理论上不能排除这种混合作用存在的可能性,但是,实际上这种混合作用是否能够出现并足以影响到使 Sr 含量发生明显的变化,则是很难证明的。

花岗岩中混合现象俯拾即是,说明花岗岩很难达到平衡,花岗岩成分很难均一化。虽然混合会在某种程度上改变花岗岩的成分,但是,可以确定的是,不论哪种形式的岩浆混合,大体不会影响到花岗岩的类型,不会因为混合使埃达克岩变成浙闽型花岗岩,也不可能使南岭型花岗岩变为埃达克岩。原因是在下地壳底部,混合是在同一深度、同一压力下进行的。同一深度下形成的花岗岩,不论成分如何

变化,均为同一类型的。

4.3 花岗质岩浆能否分异和演化?

不少人认为,花岗岩是能够分异和演化的,花岗岩发生了分异,成分就发生了改变,就不是原来的花岗岩了。例如随硅酸盐含量的增加,花岗岩中斜长石含量减少了,牌号降低了,于是 Sr 含量降低了, Rb 含量增加了, Rb/Sr 值增加了,于是,花岗岩就演化分异了。原来的埃达克岩(Sr 高)就可能变为非埃达克岩了(Sr 低)。

这种情况很有意思,但是,这种分异作用的可能性是否存在呢?笔者认为不可能存在。原因有 3 条:① 花岗岩虽然也是岩浆,但是,由于黏性大,即使有矿物从岩浆中结晶出来也不可能发生分离结晶作用。② 花岗岩的主要造岩矿物斜长石的密度与花岗岩相差无几,不利于矿物的分离。角闪石虽然密度大,但是由于花岗岩岩浆的黏性大,角闪石也不能分离。③ 镜下和野外都见不到花岗岩中有堆晶岩出现的现象。花岗岩的露头多得无其数,但是,哪里见到过花岗岩有堆晶现象出现的?玄武岩能够分离结晶,是因为野外可以见到玄武质岩浆结晶分离形成的堆晶的橄榄岩、辉石岩、辉长岩。花岗岩露头中有斜长石堆晶岩吗?有斜长石-角闪石堆晶岩吗?没有堆晶岩,何谈花岗岩的分离结晶和分异演化?

野外常见花岗岩存在岩相分带,存在成分差异,有些不同成分的花岗岩或界线清晰,或界线模糊,且成分差异较大的岩体共存于一个大花岗岩基中比比皆是。对上述现象不同作者有不同的解释,笔者认为它们不是花岗岩能够分离结晶的证据。例如花岗岩不同相带的问题,首先的一个问题是:这些不同相带的花岗岩是在什么部位形成的?是在岩体侵位的地壳浅部部位还是源区部位?如果是在岩体就位的地壳浅部,那么,花岗岩是怎么演化和分异的?花岗岩就位以后温度处于下降阶段,温度降低,黏性增大。花岗岩本来黏性就很大,很难分异,就位以后温度下降黏性更大,分异就更加不可能了。其次,如果花岗岩发生了分异,分异的产物出现了(表现为不同相带的岩体),分异的残留相(堆晶岩)又在哪里呢?我们认为,上述现象可能要从事花岗岩源区去寻找。在地下壳底部,花岗质岩浆经历了初熔、汇聚、混合的一系列过程。这是花岗岩逐渐演化的过程,是花岗岩从不均一到均一的过程。在花岗岩形成的上述过程中的任意阶段,如果有构造裂隙出现可以使岩浆上升,某一部分岩浆即上升侵位,这种过程如果多

次发生,岩浆即可多次上升。不同期次上升的岩浆成分可能不同,发育程度可能不同;有些花岗岩比较均一,代表花岗岩发育达到晚期阶段;有些不那么均一,显示较多混合的证据,代表花岗岩发育的早期阶段。上述岩浆分批次侵入,可能间隔时间很长,同位素年代学可以识别出来;也可能间隔时间很短,同位素年代学目前还识别不出来。如果有两期花岗岩接触,如果后期花岗岩侵入时,前期花岗岩已经固结冷却,则后期岩体边部将出现冷凝边现象,两期侵入体为侵入接触关系;如果后期岩浆侵入时,前期岩浆尚未冷却固结,则两期侵入体之间的界线即是模糊的、过渡的接触关系。

有些花岗岩具有环状分布的特点,边部偏基性,内部偏酸性,是否全部是混合或分异的成因需要具体问题具体分析。详细的野外研究表明,有些环状侵入体可能是不同期次岩浆沿同一岩浆通道先后侵入的结果。例如美国加利福尼亚的 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位的,从外到内是由老到新(Best and Christiansen, 2001)。Coleman 等(2004)的研究发现,该岩套中不同侵入体的锆石 U-Pb 年龄变化在 85~95 Ma 之间,并具有从外向内年龄渐新的规律(参见张旗, 2012a 的图 1)。因此,该岩套不同侵入体的岩石成分变化并不是岩浆分离结晶或分异的结果,而更可能是岩浆源区成分的反映(Coleman *et al.*, 2004)。

文献中常见晚期花岗岩是最后分异的产物的说法。笔者认为,晚期是可以的,但是否演化和分异形成的还需要证据,特别是需要野外和镜下岩相学的证据。而许多论文提供的绝大多数是哈克图解的证据。笔者指出,哈克图解给出的现象(包括某些元素之间的相关性)是实实在在的。但是,哈克图解的解释必须有镜下和野外证据才是可信的,才是有意义的,才是有说服力的。有些哈克图解给出随 SiO₂ 含量变化不同元素及元素比值变化的相关曲线,有人就解释为花岗岩发生了分异演化,其实,这是不确定的。闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩的 SiO₂ 含量不同,在哈克图解中如果以 SiO₂ 含量作为指标,其他元素会出现有规律或无规律的某些变化。这些变化通常被认为是花岗岩演化的证据,其实并非如此。因为闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩 SiO₂ 含量不同,矿物组成必然不同,斜长石牌号必然不同,由此带来的某些元素和元素比值的变化的不同花岗岩成分的反

映,与演化没有必然的逻辑的联系。

岩浆能够分异和演化的理论是对的,但是,这仅限于黏性低的玄武质岩浆而非花岗质岩浆。辉长岩的结构(主要是辉长结构)与花岗岩不同(主要是花岗结构),就说明前者可以分离结晶,后者不可能分离结晶。文献中常有岩浆从闪长岩演化为花岗闪长岩演化为花岗岩演化为钾长花岗岩的说法,认为花岗岩的演化使岩浆的酸性程度增加了,酸性程度高的岩浆是演化晚期的岩浆。学术界还有一种高分异花岗岩的说法,特指那些酸性程度特别高的岩浆。实际上高分异的花岗岩是更加不可能分异的花岗岩。一个大花岗岩基或大花岗岩体可以由不同成分的花岗岩组成,其中的闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩等,它们之间基本上不是演化的关系,而是侵入的关系,大多数情况下在野外是可以看见侵入接触关系的。

因此,在地下壳底部形成的埃达克岩,侵位上升到地壳浅部或出露于地表,它仍然是埃达克岩,如果在地下壳底部形成的是南岭型花岗岩,上升侵位到地壳浅部或喷出地表,它仍然是南岭型花岗岩或南岭型流纹岩,不会变为埃达克岩。

4.4 源岩对花岗质岩浆成分有何影响?

源岩对花岗岩的影响是非常明显的。许多人认为,如果源岩贫 Sr,对形成埃达克岩可能是不利的。学术界通常认为,典型的埃达克岩(O型埃达克岩)是 MORB 成分的板片部分熔融形成的, MORB 的平均 Sr 含量为 $100 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$ 。其实大陆壳的 Sr 含量比 MORB 高得多,平均在 340×10^{-6} 左右。下地壳一般是基性的, Sr 含量应当比陆壳平均含量还要高。下地壳如果是中性的,相当于安山岩,全球安山岩的 Sr 含量平均在 $240 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$ 之间(王仁民等, 1987; 李昌年, 1992), 都比 MORB 高。因此,源岩贫 Sr 的顾虑是不必要的。

全球大陆花岗岩以浙闽型居多,埃达克型、南岭型、喜马拉雅型较少,广西型更少见。上述花岗岩中仅埃达克型和广西型富 Sr,其余均贫 Sr。因此,富 Sr 的陆壳形成的花岗岩多数是贫 Sr 的。这里的关键因素可能不在源岩含 Sr 多少,而在压力多少,地壳厚度几何。

那么,不同的源岩是否可以改变花岗岩的性质呢?这个答案也是肯定的,当然,需要考虑的因素还很多。例如,埃达克型花岗岩的岩石组合可以包括闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长

花岗岩等,成分变化极大。原因很多,主要原因可能归结为源岩成分的不同。但是,它们都是富 Sr 贫 Yb 的,它们都受压力的限制。同样,浙闽型花岗岩的岩石组合也很多,如花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩等(很少闪长岩类岩石)。原因也很多,主要也可能与源岩成分有关。但是,它们全部是低 Sr 高 Yb 的,也主要受压力的制约。

有一个现象值得重视,即华北早白垩世(>130 Ma)的花岗岩绝大多数都是埃达克岩,其他类型的花岗岩很少。而浙闽地区中生代($160 \sim 110$ Ma)产出的花岗岩绝大多数是浙闽型的,其他类型的花岗岩也很少。这种不同的最大原因是什么?应当是地壳厚度。华北埃达克型花岗岩富 Sr 贫 Yb,形成的压力大,表明当时华北的地壳厚度大,浙闽地区的浙闽型花岗岩贫 Sr 富 Yb,形成的压力小,表明当时该区的地壳厚度正常或较薄。至于源区组成,华北和浙闽同样复杂,它们都是古老的克拉通,可能各种源岩都有,包括酸性的英云闪长岩、中酸性的长英质麻粒岩、基性的斜长角闪岩等。它们的部分熔融程度、水和挥发分含量、受混合的可能性、玄武岩底侵的可能性都可能是变化的。也就是说,浙闽地区源岩组成变化非常复杂,但是,它对花岗岩地球化学的影响大体只能在 $Yb = 1 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$ 、 $Sr = 30 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 之间变化。同样,华北埃达克型花岗岩的源岩、部分熔融程度、水和挥发分含量、受混合的可能性以及玄武岩底侵影响的可能性也是变化极大的,但是,无论上述因素怎样变化,变化多大,都大体限制在埃达克岩范围之内,不可能落入浙闽型花岗岩范围(张旗等, 2008)。南岭有加里东期、海西期、印支期、燕山期的花岗岩,几乎都是南岭型和浙闽型的,没有任何埃达克岩的迹象。南岭也是古老陆壳,它的源岩成分、部分熔融程度、水和挥发分含量、受混合的可能性以及玄武岩底侵影响的可能性也是变化的,为什么没有埃达克岩出现,一个可能的解释是南岭地区地壳从来没有加厚过(显生宙时期)。当然,问题不可能这样简单,需要研究的问题还很多很多。

4.5 Sr 和 Yb 主要的地球化学行为是什么?

在地球化学研究中,许多微量元素(如 K、Na、Zr、Hf、Th、Ta、Nb、Pb、Cr、Ni、Co、Ba、Rb、P、Ti、V 等和它们之间的比值,如 K/Na 、 Th/Ta 、 Zr/Hf 、 Ti/V 、 K/Ba 、 Rb/Sr 、 Zr/Y 、 Ti/Y 、 La/Yb 等)以及 Nd-Sr-Pb-Hf 放射性同位素的含量、组成、比值反映了源岩的不同情况。但是, Sr 和 Yb 是两个比较特殊的元素,它们主要不是与

花岗岩形成的源岩有关,而是与花岗岩形成时的压力有关。这个认识是 Defant 和 Drummond (1990)那篇文章的贡献。他们的解释是:花岗岩富 Sr 贫 Y, Sr/Y 比值高,表明源区部分熔融时斜长石进入熔体,残留相中出现石榴石。有石榴石或少斜长石的变质岩为榴辉岩,榴辉岩相形成的压力大,于是,在俯冲带环境产于俯冲带的深部。

判断一个花岗岩是否埃达克岩,学术界喜欢用 Sr/Y、Sr/Yb 和 La/Yb 等比值作为判别标志,这个标志是国外学者 (Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999)推荐的。但是,笔者不认为上述标志很好。因为 Sr 和 Yb 不是受同一种因素制约的,而是分别受两种矿物含量的制约。埃达克岩的 Sr/Yb 值高不错,但是,喜马拉雅型花岗岩也可以是 Sr/Yb 值高的,如果 Yb 含量很低的话。国外学者因为不知道还有一个低 Sr 低 Yb 的喜马拉雅型花岗岩,以为 Sr/Yb 值高的就是埃达克岩。其实,它是有多解性的,起码有两种可能性:埃达克岩或喜马拉雅型花岗岩。例如一个花岗岩, Sr = 600×10^{-6} , Yb = 1.5×10^{-6} , Sr/Yb = 400, 是埃达克岩无疑。如果另一个花岗岩, Sr = 200×10^{-6} , Yb = 0.5×10^{-6} , Sr/Yb 也等于 400, 它也是埃达克岩吗? 按照 Sr 含量,它是低 Sr 的,不是埃达克岩;但是,按照 Sr/Yb 值,它属于埃达克岩。我们究竟按照哪个标志来作为判别的依据呢? 按照我们的标志,前者是埃达克岩,后者是喜马拉雅型花岗岩,就不会出现标志本身出现矛盾的情况了(张旗等,2008)。

花岗岩 Sr 含量的高低受什么因素制约? Sr ($100 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$)含量并不高的 MORB 源岩,在高压下形成高 Sr 低 Yb 的埃达克岩,在低压下形成低 Sr 高 Yb 的弧岩浆岩,是残留相组成不同,与

源岩 Sr 含量高低无关。不同类型的玄武岩 Sr 含量不同,范围大体在 $100 \times 10^{-6} \sim 934 \times 10^{-6}$ 之间,以 MORB 最低,钾玄岩最高。许多人以为大陆地壳贫 Sr,其实大陆地壳 Sr 含量超过了 MORB(王仁民等,1987;李昌年,1992)。大量的实践告诉我们,无论源岩是什么成分的,只要压力足够高,形成的大多是埃达克岩;也无论源岩是什么成分的,只要压力比较低,形成的就不是埃达克岩。因此,Sr 和 Yb 两个元素不同于花岗岩中其他大多数微量元素的一个最重要的特征是,它们的地球化学行为主要与压力有关而不是与源区性质有关。Sr 和 Yb 可以作为花岗岩形成压力的指示剂,其理由即在此。

花岗岩是岩浆岩中最复杂的,在纷繁复杂的花岗岩中有两条最值得学术界关注:一是花岗岩的源岩性质,二是花岗岩的地球动力学意义。前述许多微量元素包括许多放射性同位素就是探讨这个问题的,而为数不多的若干元素则可能有指示其地球动力学背景的功能(如 Sr、Yb、Ta、Rb、Y、Nb 等),其中 Sr 和 Yb 是两个最关键的元素。花岗岩地球动力学背景主要体现在温度和压力两个方面,根据笔者的研究,使用 Sr 和 Yb 两个元素即可大体上了解花岗岩形成的温度和压力状况,如图 3 所示。图 3 是从图 2 简化得来的,只选用了花岗岩脱水熔融固相线、石榴石出现线以及斜长石消失线:

图 3a 只考虑石榴石出现的影响:当花岗岩熔融时,残留相如果无石榴石存在(角闪岩相),花岗岩则富 Yb,落入图 3a 的蓝色范围。可能出现的花岗岩为浙闽型(ZM)、南岭型(NL)和广西型(GX);压力增加,残留相如果出现石榴石(榴辉岩相),花岗岩则贫 Yb,落入图 3a 的棕色区域。可能出现的花岗岩为喜马拉雅型(XM)和埃达克型(AD)。

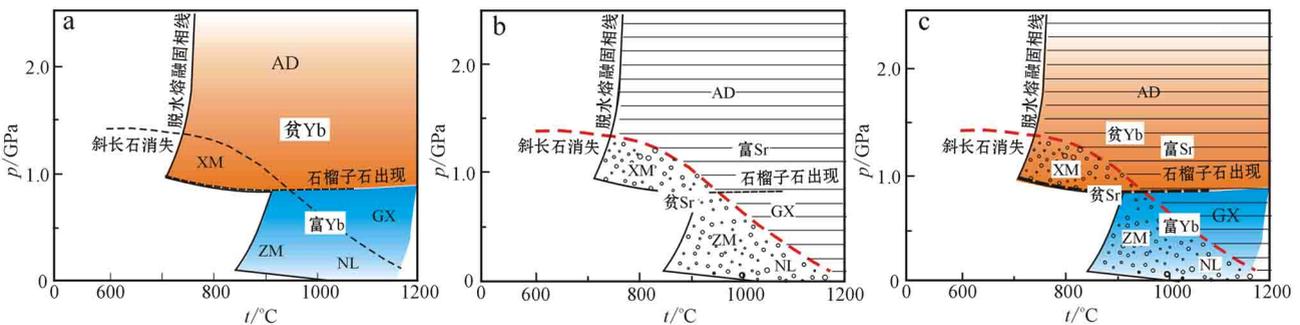


图 3 石榴石出现线与 Yb 的关系以及斜长石消失线与 Sr 的关系

Fig. 3 The relationship between garnet-appearing line and Yb, and between plagioclase-disappearing line and Sr

图 3b 显示斜长石的影响:花岗岩熔融的残留相如果有斜长石存在,残留相富 Sr,花岗岩则贫 Sr,落入圆圈指示的范围(可能出现的花岗岩为 XM、ZM 和 NL);压力增加,斜长石消失了,斜长石的 Sr 进入岩浆,花岗岩即富 Sr,落入横线指示的范围。可能出现的花岗岩为 AD 和 GX。

综合图 3a 和 3b 得到图 3c。从图 3c 看出,埃达克岩(AD)位于石榴石出现线之上和斜长石消失线之上,贫 Yb 富 Sr,压力最高,温度变化范围最大;喜马拉雅型(XM)位于石榴石出现线之上,斜长石消失线之下,压力较高,温度较低;广西型(GX)位于石榴石出现线之下和斜长石消失线之上,富 Yb 富 Sr,压力较低,温度较高;浙闽型(ZM)位于石榴石出现线之下和斜长石消失线之下,富 Yb 贫 Sr,压力较低,温度较低;南岭型(NL)同浙闽型一样,位于石榴石出现线之下和斜长石消失线之下,富 Yb 贫 Sr,温度较高,压力最低。

从图 2、3 得知,花岗岩的地球动力学意义主要体现在温度和压力上,利用 Sr 和 Yb 两个元素及其与花岗岩熔融过程中斜长石、石榴石的关系即可大致限制不同花岗岩类型的温度-压力范围。由于斜长石消失线和石榴石出现线是随不同地区源区性质、温度、压力、水和挥发分而变化的,所以具体到不同地区不同的花岗岩,它们形成的温度压力范围也是变化的。但它们之间的关系大体上是确定的,是可以指示花岗岩形成时的地球动力学意义的。

4.6 实验研究得出的结论怎么解释?

实验研究对于岩石学是非常重要的,国内外学者都非常重视,国内最近也有许多进展,详见邢印锁等(2010)的综述。其中也有不同的认识,争论的焦点是埃达克岩形成的最低压力是多少?是否需要高压条件?许多实验研究认为,形成埃达克岩的最低压力大约在 1.5 GPa(Rapp *et al.*, 1991; Sen and Dunn, 1994; 熊小林等, 2005, 2011; Xiao and Clemens, 2007)。值得注意的是,Beard 和 Lofgen (1991)对变质玄武岩和变质安山岩样品在 0.1~0.9 GPa、800~1 000℃ 进行的脱水熔融实验,得到了埃达克质熔体,残余组分为斜长石+辉石+磁铁矿+钛铁矿。值得特别指出的是,Wolf 和 Wyllie (1993)用低钾富钙的角闪岩样品在活塞圆筒高压装置上 1.0 GPa、750~975℃ 条件下,产生了高铝的英云闪长岩岩浆,残留相为 Hb + Gt ± Pl + Px。类似的实验还不少,如张超等(2012)、Qian 和 Hermann (2013)

的实验,得出的结论也与上述大体一致。笔者对 Beard 和 Lofgen (1991)等实验结果的评论是:该实验得出的石榴石出现的资料是对的,但是,他们的解释可能需要斟酌。笔者认为,他们实验得出的熔体可能不是埃达克岩而是喜马拉雅型花岗岩。因为,实验的残留产物中有斜长石存在。根据相图资料(图 2、图 3),他们的实验是在斜长石消失线之下进行的。由于国外没有喜马拉雅型花岗岩的概念,故一般认为鉴定是否埃达克岩主要依靠 Sr/Y 值,以为 Sr/Y 值高的就是埃达克岩,其实不然,理由如本文上一节所述。

一般认为,在 0.8~1 GPa 条件下,石榴石开始出现了,这是对的,但与其相应的熔体是否埃达克岩,还要看斜长石是否消失了。如果石榴石出现了,斜长石消失了,熔体成分相当于埃达克岩,如果石榴石出现了,斜长石没有消失,残留相为石榴石+斜长石,对应的熔体应当是喜马拉雅型花岗岩。因此,1 GPa 大体是最低极限,与其相应的熔体可能并非埃达克岩,真正的埃达克质熔体出现还需要更高的压力(取决于斜长石消失的压力和温度)。

5 实例

不同类型的花岗岩形成的温度压力不同,表征了不同的地球动力学意义,如何在实际工作中加以应用呢?可举例如下:

5.1 晚侏罗世—早白垩世的中国东部高原

这个问题是 10 多年前提出来的(张旗等, 2001),一直存在激烈的争论。中国东部存在一个高原是我们根据埃达克岩代表加厚地壳的概念、根据大体相近时代埃达克岩的分布推出来的。上述推理是否成立需要广泛实践的检验。如果实践检验高原不存在,则说明埃达克岩与加厚地壳有关的认识是错误的,如果实践检验高原存在,则说明埃达克岩的确可以反映压力的变化。高原是一个地貌概念,它早已在 125~130 Ma 前消失了,如何恢复它的面貌是一个难题。现有的资料能够告诉我们什么呢?

(1) 构造资料。据董树文等(2007)的研究,燕山运动有两幕:早期在 165 Ma 左右,是挤压背景的,晚期在 130 Ma 左右,是伸展背景的。这个时限与高原的抬升(挤压造山)和(伸展)垮塌恰好是大体吻合的。

(2) 沉积资料。据刘建忠等(2004)、曹珂(2013)研究,在中晚侏罗世时,高原上的沉积盆地很

少,华北大量缺失上白垩统地层,因此,华北晚侏罗世—早白垩世的沉积和剥蚀状态总体上反映了高原处于抬升状态。据王东坡等(1996)报道,他们在辽宁昌图和吉林长春新立城地区的早白垩世泉头组中鉴别出冰筏沉积。冰筏沉积是负载沉积物的冰块进入海洋或湖泊时由于冰块融化坠落形成的,它们可形成于高海拔具有明显气候垂直分带的低纬度地区或者是高纬度地区。泉头组孢粉组合除了具有热带—亚热带植物的孢粉外,还有少量喜冷分子混生现象,反映泉头组时期盆地外围地形高差大,形成明显的气候垂直分带现象(王东坡等,1996)。此外,程守田等(2002)报道在鄂尔多斯东北缘的山西左云地区发现了早白垩世的冰川泥石流沉积。冰川泥石流是由冰碛物与冰雪融水混合形成的一种碎屑重力流沉积,根据砾石冰川擦痕、冰冻痕、巨型冰川漂砾和巨型冲蚀槽谷等现象的存在,他们认为鄂尔多斯东北缘早白垩世泥石流沉积为冰川泥石流成因,暗示晋北在早白垩世曾有山谷冰川存在。上述现象我们推测可能与高原有关,推测早白垩世时高原(至少是高原的北缘)可能处于雪线之上。

(3) 粘土矿物的资料。徐宝亮等(2007)和李祥辉等(2008)研究了高原范围内粘土矿物的组成与古气候的关系,认为中生代中晚期中国东部确实可能存在一地貌高地。

(4) 高原南北两侧气候环境不同。在早白垩世高原鼎盛时期,北部东北地区处于温湿环境,盛产煤和石油,而高原之南则为干旱气候环境。北部出现热河生物群,南部则是建德生物群。这种气候分布与现代青藏高原南北两侧(如湿热的印度恒河平原和干旱的塔里木盆地)的气候分布类似,可能是受高原抬升的影响所致(张旗等,2001)。

(5) 高原剥蚀物堆积在何处?这是一个很难讨论的问题,因为,高原的范围据我们推测已经进入黄海和东海的一部分,高原剥蚀的堆积物可能大部分进入大海了,少部分可能进入鄂尔多斯盆地和松辽盆地。

5.2 中国三叠纪古地势

利用花岗岩分类的资料可以编制不同时期的大陆地壳厚度图(张旗等,2011,2013)。根据埃达克岩的分布可以确定,在三叠纪时期(主要是晚三叠世)中国存在几个高原和山脉,它们是:北山山脉、华北高原、东昆仑—秦岭山脉、龙门山山脉[图4,图中高原、山脉、山地范围据本文,海相沉积区和深海槽据王鸿祯(1985)的资料修改]。在湖南—江西中部一带

和羌塘地区,喜马拉雅型花岗岩特别发育,埃达克型花岗岩很少,暗示当时的地势高度不及前述几个山脉,故称之为山地(估计地势高度在3 000~4 000 m之间)。中国其他地区主要出露的是浙闽型和南岭型花岗岩,浙闽型花岗岩出露区代表平原或丘陵,南岭型花岗岩分布区代表浅海海台(如东北海台、内蒙古东部海台、北疆海台、西昆仑海台、华南海台等)。

上述山脉中,晚三叠世的古龙门山脉很有意思。该山脉位于四川盆地以西,古地理资料显示三叠纪时为一海槽(王鸿祯,1985),而我们根据花岗岩的资料却圈出一个山脉(图4),海槽与山脉重叠是怎么回事?

为了解决这个矛盾,我们对该区三叠纪沉积和花岗岩资料进行了仔细的分析,发现松潘—甘孜海槽的三叠纪沉积主要是早中三叠世的,而出露在该区的埃达克型花岗岩主要是晚三叠世晚期的。松潘地区上三叠统的顶界年龄大约为222 Ma,止于诺利期,部分可达210 Ma的瑞替期(孟庆仁等,2007),而花岗岩绝大多数是220 Ma以后的,平均的花岗岩峰期年龄在211~215 Ma之间(张旗等,2013)。看来,川西西部的古龙门山可能是古特提斯海在晚三叠世海水退出后扬子板块与松潘—甘孜地块发生碰撞快速抬升形成的。成都平原被侏罗—白垩纪地层覆盖,龙门山地区及石油钻井揭露的下伏地层为分布广泛的晚三叠世须家河组,其上部(诺利阶和瑞替阶)具有前陆盆地的性质(刘金华等,2010)。川西前陆盆地晚三叠世须家河组的物源主要来自松潘甘孜褶皱带地层的再旋回沉积和龙门山前陆冲断带,松潘甘孜褶皱带的形成和剥蚀与川西前陆盆地的发育和沉积具有良好的衔接关系(邓飞等,2008)。因此,推测前陆盆地的形成可能与晚三叠世古龙门山的抬升和剥蚀有关(王二七等,2001;王二七和孟庆仁,2008)。

上述对比说明,在晚三叠世诺利期前后,川西发生了翻天覆地的变化。诺利期以前海相沉积占优势,川西一片汪洋,属于海台地势;诺利期后海水消失,埃达克型花岗岩广泛发育,指示川西在晚三叠世末期出现了一次造山事件,形成了一个绵延千里的山脉(古龙门山),从川北一直延伸到滇西北。诺利期前后恰是印支运动造山最强烈的时期,暗示龙门山的崛起可能与印支运动有关。从全国范围看,晚三叠世的埃达克型和喜马拉雅型花岗岩是最发育的,也说明印支运动对中国三叠纪地势的影响是非

常重要的。此时川西已无海相沉积存在,埃达克型和喜马拉雅型花岗岩分布区为早侏罗世沉积缺失区。非常有意思的是,古地理图还给出了一个时隐

时现的山脉(大体沿现今的龙门山),与花岗岩的资料不期相合。

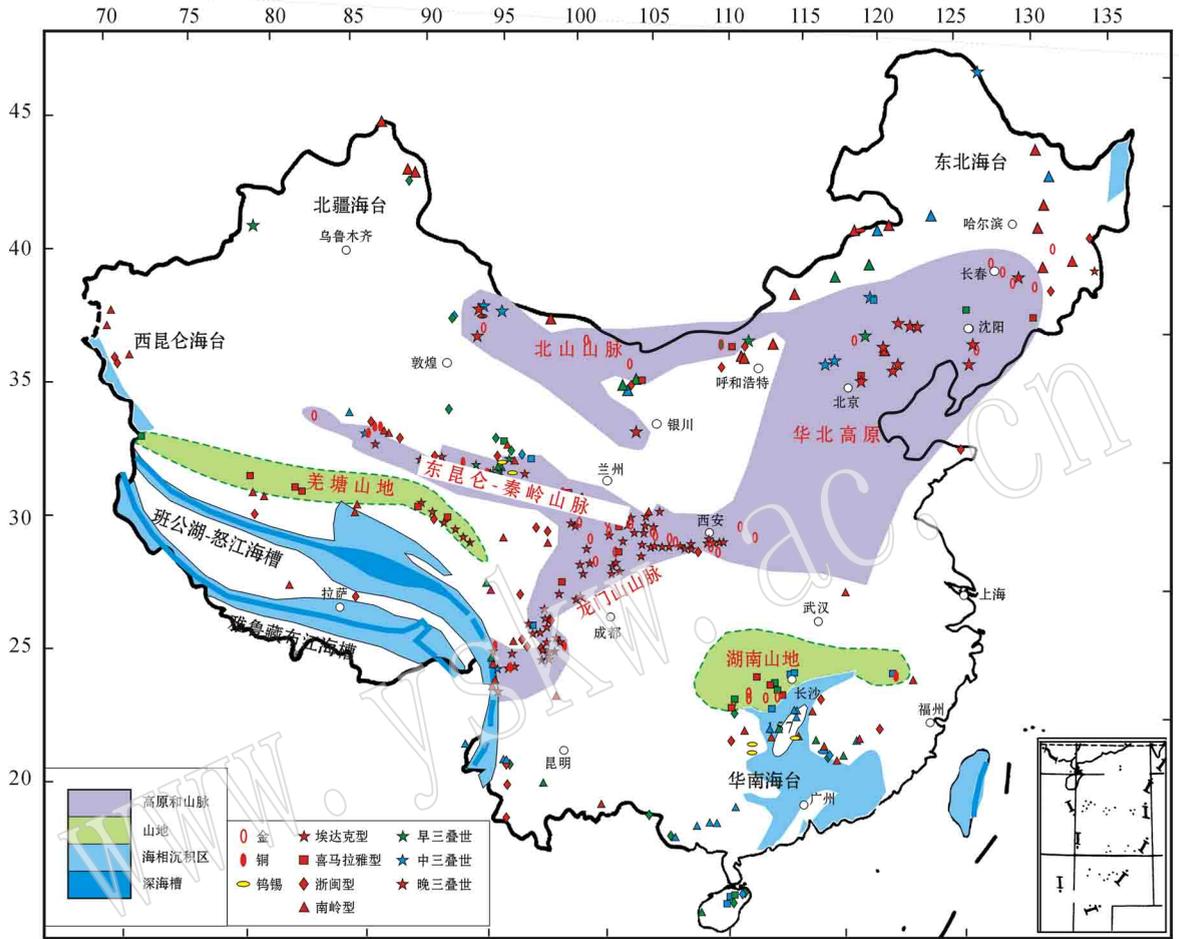


图 4 三叠纪中国古地势图(底图为中国早侏罗世古地理图,据王鸿祯, 1985; 据张旗等, 2013 修改)

Fig. 4 Palaeogeographic map of the Triassic of China (base map after Early Triassic paleogeographic map, after Wang Hongzhen, 1985; Zhang Qi *et al.*, 2013)

6 结论

(1) 花岗岩是各类岩浆岩中最复杂的。花岗岩研究的文献千千万,主要研究了两个方面的问题:什么是花岗岩?为什么要研究花岗岩?前者主要探索花岗岩的性质,包括物理性质、化学性质、热力学性质、动力学性质等;后者主要解决研究花岗岩有什么用的问题,包括花岗岩与成矿的关系,与大地构造的关系等。花岗岩最令学术界感兴趣的两个课题是:花岗岩的源区性质和花岗岩的地球动力学意义。

(2) 花岗岩可分为大洋系列和大陆系列。产于

洋盆内及其边缘的花岗岩属于大洋系列,产于大陆内的花岗岩属于大陆系列。大洋系列花岗岩最重要的地球动力学意义是判断花岗岩的构造环境;大陆系列最重要的地球动力学意义是判断地壳状况,包括花岗岩形成时的地壳厚度和温度状况。

(3) 花岗岩按照 Sr-Yb 含量可分为埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型、广西型和南岭型 5 类。其中,产于大陆内的不同类型的花岗岩与其形成的压力和温度状况有关。从压力的角度考虑,埃达克型形成的压力最大,产于加厚的地壳;喜马拉雅型花岗岩形成的压力较大,产于较厚的地壳;浙闽型和广西型花岗岩形成的压力较低,产于正常或较薄的地壳;南岭型

花岗岩压力最低,地壳厚度最薄。从花岗岩形成的温度考虑,喜马拉雅型花岗岩形成的温度最低,属于低温系列;浙闽型花岗岩为中温系列;广西型和南岭型花岗岩属于高温系列;埃达克型则可以出现在各个温度系列。

(4)应用花岗岩分类可以恢复古代地壳厚度和下地壳底部温度状况,还可以追踪某些地区随时间变化地壳厚度和温度变化的情况和趋势。

致谢 感谢 3 位匿名审稿人的批评与建议。

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46 : 605~626.
- Batchelor B and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48 : 43~55.
- Beard J S and Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6~9 kbar[J]. *J. Petrol.*, 32 : 365~401.
- Best M G and Christiansen E H. 2001. *Igneous Petrology*[M]. Blackwell Science Ltd., 1~458.
- Cao Ke. 2013. Cretaceous terrestrial stratigraphic correlation in China[J]. *Geological Review*, 59(1): 24~40(in Chinese with English abstract).
- Cheng Shoutian, Li Zhide, Huang Yanqiu, *et al.* 2002. Discovery and its genetic evidence of Early Cretaceous glacial debris flow in the northeast margin of Ordos[J]. *Geological Science and Technology Information*, 21 : 36~40(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347(6 294): 662~665.
- Deng Fei, Jia Dong, Luo Liang, *et al.* 2008. The contrast between provenances of Songpan-Garze and western Sichuan foreland basin in the Late Triassic : clues to the tectonics and palaeogeography[J]. *Geological Review*, 54(4): 561~573(in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Liu Houxiang, Zhao Hailing, *et al.* 1996. Yanshanian igneous rocks and orogeny model in Yanshan-Liaoning area[J]. *Geoscience*, 10 : 137~148(in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, *et al.* 2007. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan movement[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81 : 1 449~1 461(in Chinese with English abstract).
- Harris N B W, Marzouki F M H and Ali S. 1986. The Jabel Sayd Complex, Arabian shield : geochemical constraints on the origin of peralkaline and related granites[J]. *Journal of the Geological Society-London*, 143 : 287~295.
- Lambert I and Wyllie P. 1972. Melting of gabbro(quartz eclogite) with excess water to 35 kilobars, with geological applications[J]. *The Journal of Geology*, 80(6): 693~708.
- Li Changnian. 1992. *The Trace Element Petrology of Igneous*[M]. Wuhan : China University of Geosciences Press, 1~195(in Chinese).
- Li Xianghui, Xu Baoliang, Chen Yunhua, *et al.* 2008. Clay minerals of the Middle-Late Mesozoic mudrocks from North and Northeast China : Implications to paleoclimate and paleohighland[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 : 683~691(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianzhong, Li Sanzhong, Zhou Lihong, *et al.* 2004. Mesozoic tectonics and distribution in the Eastern North China plate[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 24 : 45~54(in Chinese with English abstract).
- Liu Jinhua, Yang Shaochun, Zhang Shiqi, *et al.* 2010. A study on the characters of the accommodation change and hydrocarbon in upper Xujiahe Formation in the western Sichuan basin[J]. *Geological Review*, 56 : 275~282(in Chinese with English abstract).
- Martin H. 1999. Adakitic magmas : modern analogues of Archean granitoid[J]. *Lithos*, 46 : 411~429.
- Meng Qingren, Qu Hongjie and Hu Jianming. 2007. Triassic deep-marine sedimentation in the western Qinling and Songpan terrane[J]. *Science in China Series D* 50(Supp): 246~263.
- Osborn E F. 1959. Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magma[J]. *American Journal of Science*, 257 : 609~647.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25 : 956~983.
- Qian Q and Hermann J. 2013. Partial melting of lower crust at 10-15 kbar : constraints on adakite and TTG formation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165 : 1 195~1 224.
- Rapp R P, Watson E B and Miller C F. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites[J]. *Precambrian Research*, 51 : 1~25.
- Sen C and Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1. 5 and 2. 0 GPa : implications for the origin of

- adakites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117 : 394 ~ 409.
- Veksler I V. 2009. Extreme iron enrichment and liquid immiscibility in mafic intrusions : Experimental evidence revisited [J]. *Lithos*, 111 : 72-82.
- Vielzeuf D and Schmidt M W. 2001. Melting relations in hydrous systems revisited : application to metapelites, metagreywackes and metabasalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(3): 251 ~ 267.
- Wang Dongpo, Liu Li and Frakes L A. 1996. The palaeoclimatic and palaeogeographic significance of the Cretaceous red-bed ice rafting deposits in the Songliao basin, Northeastern China [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 16 : 6 ~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Wang Erqi and Meng Qingren. 2009. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Longmenshan fault belt [J]. *Science China (Earth Science)*, 52(5): 579 ~ 592.
- Wang Erqi, Meng Qingren, Chen Zhiliang, *et al.* 2001. Early Mesozoic left-lateral movement along the Longmen shan fault belt and its tectonic implication [J]. *Earth Science Frontiers*, 8(2): 375 ~ 384 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongzhen. 1985. *Paleogeographic Atlas of China* [M]. Beijing : Map Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, *et al.* 1987. *The Diagram Discrimination Methods on Metamorphic Protolith* [M]. Beijing : Geological Publishing House, 1 ~ 199.
- Wolf M and Wyllie P. 1993. Garnet growth during amphibolite anatexis : implications of a garnetiferous restite [J]. *The Journal of Geology*, 101(3): 357 ~ 373.
- Wyllie P J and Wolf M B. 1993. Amphibolite dehydration-melting : sorting out the solidus [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 76 : 405 ~ 416.
- Xiao L and Clemens J D. 2007. Origin of potassic (C-type) adakite magmas : experimental and field constraints [J]. *Lithos*, 95 : 399 ~ 414.
- Xing Yinsuo, Zhou Wenge, Jiang Neng, *et al.* 2010. The extension of adakitic rocks and the progress of petrogenesis experiment [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 29(3): 317 ~ 320 (in Chinese with English abstract).
- Xiong X L, Adam J and Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt : implications for TTG genesis [J]. *Chemical Geology*, 218(3 ~ 4): 339 ~ 359.
- Xiong Xiaolin, Adam J, Green T H, *et al.* 2006. Trace element characteristics of partial melts produced by melting of metabasalts at high pressures : Constraints on the formation condition of adakitic melts [J]. *Science China (Earth Science)*, 49(9): 915 ~ 925 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaolin, Liu Xingcheng, Zhu Zhimin, *et al.* 2011. Adakitic rocks and destruction of the North China Craton : Evidence from experimental petrology and geochemistry [J]. *Science China (Earth Science)*, 54(6): 858 ~ 870 (in Chinese with English abstract).
- Xu Baoliang, Li Xianghui, Chen Yunhua, *et al.* 2007. Clay Minerals in Northeast of the " Eastern Plateau ", China [J]. *Sichuan Geology*, 27 : 166 ~ 170 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Ma Changqian and Holtz F. 2012. Partial melting of hydrous lower continental crust : discussion on the petrogenesis of C-type adakites from the Dabie orogen [J]. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 41 ~ 51 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2012a. Fractionation and evolution of granitic magmas can do [J]? *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2): 252 ~ 260 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2012b. Collision and granite : Collision is tectonic event, not a tectonic environment [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 745 ~ 749 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2014. Geochemical characteristics of the Guangxi-type granite and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(1): 199 ~ 210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi and Li Chengdong. 2012. *Granites : Implications for Continental Geodynamics* [M]. Beijing : Ocean Press (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jiao Shoutao, Wu Haoruo, *et al.* 2013. Triassic Paleogeographic map of China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 15(2): 181 ~ 202 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2009. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents : Index [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985 ~ 1 015 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2010b. On the classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb concentrations III : Practice [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3 431 ~ 3 455 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2011. On the relationship of granitic rocks and their formation depth in the crust [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(2): 255 ~ 265 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, *et al.* 2001. An East China Plateau in mid-late Yanshanian period : implication from adakites [J]. *Chinese J. Geol.*, 36 : 248 ~ 255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Yb and Sr contents and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 : 2 249 ~ 2 269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, *et al.* 2008. Adakite and Gran-

ite: Challenge and Opportunity[M]. Beijing: China Land Press, 1~344 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹珂. 2013. 中国陆相白垩系地层对比[J]. 地质论评, 59(1): 24~40.
- 程守田, 李志德, 黄焱球, 等. 2002. 鄂尔多斯东北缘早白垩世冰川泥石流沉积的发现及其成因证据[J]. 地质科技情报, 21: 36~40.
- 邓飞, 贾东, 罗良, 等. 2008. 晚三叠世松潘甘孜和川西前陆盆地的物源对比: 构造演化和古地理变迁的线索[J]. 地质论评, 54(4): 561~573.
- 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲, 等. 1996. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型[J]. 现代地质, 1: 137~148.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 81: 1449~1461.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~195.
- 李祥辉, 徐宝亮, 陈云华, 等. 2008. 华北-东北南部地区中生代晚期粘土矿物与古气候[J]. 地质学报, 82: 683~691.
- 刘建忠, 李三忠, 周立宏, 等. 2004. 华北板块东部中生代构造变形与盆地格局[J]. 海洋地质与第四纪地质, 24: 45~54.
- 刘金华, 杨少春, 张世奇, 等. 2010. 川西地区上三叠统须家河组前陆盆地可容空间变化特征与油气成藏研究[J]. 地质论评, 56: 275~282.
- 孟庆任, 渠洪杰, 胡健民. 2007. 西秦岭和松潘地体三叠系深水沉积[J]. 中国科学(D), 37: 209~223.
- 王东坡, 刘立, Frakes L. A. 1996. 白垩纪红层冰筏沉积的古气候及古地理意义[J]. 岩相古地理, 16: 6~11.
- 王二七, 孟庆任. 2008. 对龙门山中生代和新生代构造演化的讨论[J]. 中国科学(D), 38(10): 1221~1233.
- 王二七, 孟庆任, 陈智樑, 等. 2001. 龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因[J]. 地学前缘, 8(2): 375~384.
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社, 1~143.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珠, 等. 1987. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1~199.
- 邢印锁, 周文戈, 姜能, 等. 2010. 埃达克质岩的实验研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 29(3): 317~320.
- 熊小林, Adam J, Green T H, 等. 2005. 变质玄武岩部分熔体微量元素特征及埃达克熔体产生条件[J]. 中国科学(D): 35: 837~846.
- 熊小林, 刘星成, 朱志敏, 等. 2011. 华北埃达克质岩与克拉通破坏: 实验岩石学和地球化学依据[J]. 中国科学(D), 41(5): 654~667.
- 徐宝亮, 李祥辉, 陈云华, 等. 2007. 中国东部高原东北部黏土矿物特征研究[J]. 四川地质学报, 27: 166~170.
- 张超, 马昌前, Holtz F. 2012. 含水大陆下地壳的部分熔融: 大别山C型埃达克岩成因探讨[J]. 高校地质学报, 18(1): 41~51.
- 张旗. 2012a. 花岗岩岩浆能够结晶分离和演化吗[J]? 岩石矿物学杂志, 31(2): 252~260.
- 张旗. 2012b. 碰撞与花岗岩——碰撞是构造事件, 不是构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 31(5): 745~749.
- 张旗. 2014. 广西型花岗岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 199~210.
- 张旗, 焦守涛, 吴浩若, 等. 2013. 中国三叠纪古地势图[J]. 古地理学报, 15(2): 181~202.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2010a. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 标志[J]. 岩石学报, 26(4): 985~1015.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2010b. 三论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类: 应用[J]. 岩石学报, 26(12): 3431~3455.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2011. 花岗岩与地壳厚度关系探讨[J]. 大地构造与成矿学, 35(2): 255~265.
- 张旗, 李承东. 2012. 花岗岩: 地球动力学意义[M]. 北京: 海洋出版社, 1~287.
- 张旗, 钱青, 王二七, 等. 2001. 燕山中晚期的“中国东部高原”: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 36: 248~255.
- 张旗, 王焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22: 2249~2269.
- 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.