

火成岩研究若干进展

李 晖, 孙 凯, 张琳琳, 黄 凯

(中国地质大学, 北京 100083)

[摘 要] 本文简要地阐述了火成岩研究的若干进展, 表明火成岩在造山带、壳幔相互作用、大陆地壳生长等方面的研究中起着重要作用, 火成岩岩石学在地球科学研究中正扮演着越来越重要的角色。壳幔相互作用与花岗岩形成演化的关系是 21 世纪前 20 年重点研究的问题之一, 其科学前沿主要是花岗岩形成与大陆生长和深部过程的关系、深熔作用、热源以及花岗岩的成因类型与构造环境。与其他学科结合, 开展“岩浆系统”与“火山系统”的深层次研究, 是火成岩岩石学研究的重要发展方向。

[关键词] 构造环境 火成岩构造组合 壳幔相互作用 若干进展

[中图分类号] P588.1 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2011)02-180-07

Li Hui, Sun Kai, Zhang Lin-lin, Huang Kai. Progresses in the research of igneous rocks [J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(2): 180-186.

花岗岩是组成大陆地壳的主要岩石, 对其研究经历了不同过程: 20 世纪 70 年代岩浆岩石学以洋中脊岩浆活动为主, 80 年代以大陆边缘板块俯冲带岩浆活动为主, 90 年代加强了对碰撞造山带花岗岩类的研究; 20 世纪 90 年代尤其是 21 世纪以来地质学家们普遍认识到岩浆岩与壳-幔相互作用, 特别是下地壳、岩石圈地幔/软流圈系统变迁对其有重要的控制作用, 把成矿作用与成矿物质供给-传输-集聚过程和大陆形成演化联系起来(邓晋福等, 1999, 2001; 肖庆辉等, 2003; 邱瑞照等, 2004), 从壳幔相互作用和物质-能量交换传递新视角研究岩浆作用过程已成为重要方向(肖庆辉等, 2003; 邱瑞照等, 2004, 2006)。本文根据近年来火成岩岩石学研究的若干进展作一概述, 并就其发展趋势谈谈初浅的看法。

1 花岗岩分类与形成构造环境

花岗岩是组成大陆地壳的主要岩石, 对其研究历来受到重视。自从 Read(1956) 提出存在各种各样的花岗岩以来, 许多地质学家都试图区分这些不同类型的花岗岩, 70 年代以来, 以岩石学(杨超群, 1982)、伴生矿化(徐克勤等, 1982)、化学成分特征(Debon and Lefort, 1983, 1988)、成因(Capdevila 等, 1973) 或

产出构造环境(Pitcher, 1983, 1987) 等为基础的较有影响的花岗岩类岩石分类方案不少于 20 种, 各种分类各有千秋, 但至今尚无一种让人们普遍接受的方案, 在众多的分类中是都大致分出了与壳源、幔源和壳幔混合源相对应的 3 大花岗岩类。自 70 年代澳洲学者(White and Chappel, 1974) 提出的 I-S 型花岗岩分类以来, 其后又增添了幔源花岗岩(M 型) 和非造山碱性花岗岩(A 型)(Loiselle and Wones, 1979); 这些类型的分出在地球化学意义上来说可反映它们的源岩, 基于这种认识, 花岗岩类又被作为确定大地构造环境的一个向导(如提出了花岗岩的构造环境分类(Pitcher W. S., 1982)), 同时, 由于花岗岩类起源于岩石圈地幔或下地壳, 携带有大量地球深部信息, 因而又被作为“岩石圈探针”; Castro 等(1991) 认为很多造山带花岗岩都有岩浆混合作用存在, 这类花岗岩应为幔源(M 型) 和壳源(S 型) 两个端元岩浆混合的产物, 称为 H 型(混染) 花岗岩, 并根据幔源和壳源混合量的不同将 H 型花岗岩进一步划分为 Hm、Hss、Hs 型。B. F. Leake(1990) 则把 I、S、A、M 型花岗岩分类形象地与红、橙、黄、绿、青、兰、紫的光波分类比拟, 很形象地说明了花岗岩的多样性。花岗岩的起源也许并不存在真正意义上的壳-幔界线, 而只有

[收稿日期] 2010-04-15; [修订日期] 2010-09-06; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 国土资源部国土资源大调查地质调查项目(编号: 1212010916023) 资助。

[第一作者] 李 晖(1968 年-), 女, 在读博士生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: xindikaixin@163.com。

各具“地方特色”的地壳源与地幔源之间的连续谱系。

近年来越来越多的研究强调了花岗岩的多源物质混合成因(王涛,2000)。如,Collins(1998)提出了三源组分混熔模式。目前,对花岗岩的特征有如下基本认识:①花岗岩基本上是经过地壳重熔,在广泛的温压条件下由多种地质作用相互制约而形成的,大体上可用重熔实验来模拟;②花岗岩实际上可能是一种地壳来源和地幔来源之间的连续谱系,由于不同来源的混合程度有别及经历的过程不尽相同,造成了花岗岩类岩石的多样性;③导致地壳熔融形成花岗岩浆的过程中,地幔提供的热能起了十分重要的作用;④由于热流传递机理不完全相同,花岗岩可以分为以热流传导体制为主的超变质作用型(混合花岗岩)和以热流对流体制为主的深熔型(花岗岩)两种类型,在一定条件下它们之间也可以相互转化;⑤H₂O及其它挥发份对花岗岩浆的物理性质和状态、化学性质有重要影响,因而也对花岗岩浆的形成起重要的控制作用;⑥花岗岩的形成同它所处的构造环境有密切的联系(刘宝珺等,2001)。

Pitcher(1979)提出花岗岩成因的板块构造环境分类,使花岗岩研究深入到探索构造环境的新阶段。Pitcher(1982,1993)认为特定的构造环境将产生特定的花岗岩,其花岗岩成因的构造环境分类为:1)海洋岛弧(M)型,以大洋岛弧型斜长花岗岩为主;2)活动大陆边缘型(科迪勒拉I型),以大量辉长岩、石英闪长岩为代表;3)造山期后隆起型(加里东I型),以花岗闪长岩和花岗岩为主;4)克拉通褶皱带和大陆碰撞带型(S型),为过铝质花岗岩组合;5)稳定褶皱带和克拉通穹隆和裂谷型(A型),为碱性花岗岩组合;此即为我们通常所说的 ISMA 分类。Barbarin(1999)将花岗岩类的分类与其来源相联系,分为壳源、幔源和壳-幔混合源的花岗岩类。Pearce(1982)提出的花岗岩构造分类的地球化学判别图解得到广泛应用。但是,受同一岩石可产于不同环境,不同环境可产出相同岩石的困扰,对各种判别图解的使用需要特别小心,必须对花岗岩类进行正确定名和准确定年,并与构造地质资料相结合来进行构造环境解释(Barbarin,1999)。国内邓晋福等(1996)提出用火成岩构造组合来约束。邓晋福等(2007)讨论的不同构造环境下的火成岩组合:(1)洋中脊扩张,(2)洋岛,(3)岛弧,(4)MORS型和SSZ型蛇绿岩,(5)活动大陆边缘弧,(6)与俯冲作用有关的火成岩弧的组成极性,(7)大陆碰撞,(8)大陆裂谷,(9)稳定的克拉通或地台等环境的火成

岩组合。通过火成岩构造组合来约束,不仅使火成岩形成构造环境判别更加具体,而且使岩石大地构造的内涵更加丰富。

张旗(2006)提出根据花岗岩 Sr、Yb 含量可以中酸性火成岩大致按照 $Sr = 400 \mu g / g$ 和 $Yb = 2 \mu g / g$ 的标志可以划分为 5 种类型,即高 Sr 低 Yb($Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$)、低 Sr 低 Yb($Sr < 400 \times 10^{-6}$, $Yb < 2 \times 10^{-6}$)、低 Sr 高 Yb($Sr < 400 \times 10^{-6}$, $Yb > 2 \times 10^{-6}$) 和非常低 Sr 高 Yb($Sr < 100 \times 10^{-6}$, $Yb > 2 \times 10^{-6}$) 以及高 Sr 高 Yb($Sr > 400 \times 10^{-6}$, $Yb > 2 \times 10^{-6}$) 型。根据这 5 类花岗岩形成的源区深度,按照残留相组成和花岗岩 Sr、Yb 含量,可以将花岗岩形成的压力分为 3 或 4 个级别:(1)在高压下,有石榴子石无斜长石,残留相为榴辉岩,与其平衡的花岗岩具有高 Sr 低 Yb 的特点,无 Eu 异常或有弱的负 Eu 异常,在玄武岩熔融的相图中其相应的位置在石榴子石稳定区(图 1 的 1 区)。在图 1 中,石榴子石出现的压力大于 0.8 ~ 1 GPa;当压力大于 1.5 GPa 时出现金红石(Xiong X. L., et al., 2005)。(2)在中等压力下,石榴子石与斜长石共存,残留相为麻粒岩(斜长石+石榴子石+角闪石+辉石),花岗岩表现为低 Sr 低 Yb 的特点,具中等的负 Eu 异常(图 1 的 2 区)。(3)在低压下,斜长石稳定存在(无石榴子石),残留相为角闪岩(斜长石+角闪石+辉石),花岗岩具低 Sr 高 Yb 的特征,有中等或弱的负 Eu 异常

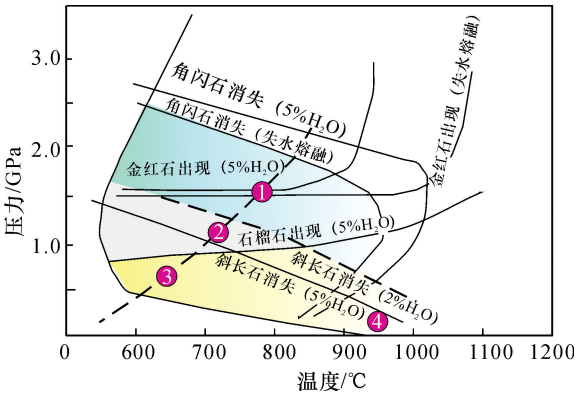


图 1 玄武岩熔融实验结果(after Xiong et al., 2005)
Fig. 1 Experimental results of partial melting of basalt (after Xiong et al., 2005)

(图 1 的 3 区)。(4)在非常低压(和高温)下,有斜长石无石榴子石,残留相为辉长岩(斜长石+辉石),相当于现代洋中脊环境,熔出的花岗岩具有非常低 Sr 高 Yb 的特点,并具中等或强的负 Eu 异常,相当于 M 型花岗岩。全球洋壳厚度不超过 7 ~ 8 km,辉长岩位

于洋底之下约 2 ~5 km 的深度,可能代表了非常低压（和高温）条件下形成的花岗岩(图 1 中的 4 区)。

表1 花岗岩类各种岩石分类一览表（据战明国，1998修改）

Table 1 Summary of the classification of granitoids(Modified from Zhan, 1998)

主 要 分 类 基 础	作 者	成 因									
		壳 源		混 合 源				幔 源			
最 先 的 化 学 成 分 术 语	Shand(1943)	过 铝 岩 石			偏 铝 质 岩 石					过 碱 性 岩 石	
	Lacroix(1933)	钙 碱 性 、 过 铝 岩 石		钙 碱 性 岩 石					碱 性 岩 石		
岩 石 学	Capdevila等 (1970、1973)	地 壳 中 部 花 岗 岩		混合源花 岗岩	地壳底部花岗岩						
	Orsini (1976、1979)			亚碱性铝 质岩浆组 合	亚 碱 性 低 铝 岩 浆 组 合	钙碱性岩 浆 组 合					
	杨超群(1982)		MM型	CR型	MS型				MD型		
	Tischendorf Palchen (1985)	St	Ss	St	I _{KK}	I _{OK}	I _{MT}	I _{MA}			
包 体	Didier等(1969、 1982)	壳源浅色花岗岩			混 合 源 或 幔 源 二 长 花 岗 岩 和 花 岗 闪 长 岩						
矿 物 学 (QAP 体 系)	Lameyre等 (1980、1982)	浅色花岗岩（地壳 熔融）		钙碱性系列（高、中、低K）				拉 斑 玄 武 系 列	（过）碱 性 系 列		
铁 镁 矿 物	Rossi和 Chevremont (1987)	铝 钾 质 AM			二 长 质 AM	CA AM	TH AM	A-PA AM			
黑 云 母 成 分	Nacht等（1985）	铝 钾 质 系 列			钙碱、次碱系列				（过）碱 性 系 列		
矿 石 形 态	Pupin (1980、1985)	1型	2型	3型	4型和5型		7型	6型			
不 透 明 氧 化 物	石原舜三(1977) Czamanske等 (1981)	钛铁矿系列				磁铁矿系列					
地 球 化 学 (主 要 元 素)	Chappell和 White (1974、1983); Collins等 (1982); Whalen 等(1987)			S型		(I型)		M型	(A型)		
	La Roche等 (1980、1986)	AL-L MA		AK-GMA		CA MA	TH MA	A-PA MA			
	Debon和Lefort (1983、1988)	铝质MA			铝钙镁铁质和钙镁铁质MA						
	Maniar和 Piccoli(1989)	CCG			POG	CAG	LAG	OP	RRG	CEUG	
地 球 化 学 (微 量 元 素)	Tauson和 Kozlov(1973)	刚 玉 奥 长 花 岗 岩	超MM花 再 生 花 岗 岩 （正 常 系 列 和 斜 长 花 岗 岗 岩 亚 碱 性 系 列） 岩							钠 质 浅 色 花 岗 岩	
	Pearce等(1984)	（同构造、构造后）碰撞花岗岩				火 山 弧 花 岗 岩		ORG	板 块 内 花 岗 岩		
伴 生 矿 化	徐克勤等(1982)	改 造 型 （陆 壳）			同熔型（过渡壳）		幔 源 型				
Sr、Yb含量	张旗等(2006)	低Sr低Yb		低Sr高Yb	高Sr高Yb	高Sr低Yb	非常低Sr高Yb				

结合以上论述以及前人的研究成果,将花岗岩类各种岩石分类情况总结如下:

2 火成岩构造组合在造山带研究中的重要作用

在造山带研究,尤其是与大洋发育有关的造山带研究中,火成岩构造组合研究起着重要作用。以往,因蛇绿岩对恢复古板块构造格局、重建造山带演化过程、深源成矿作用等方面研究带来的重要信息,20余年来,一直受到地质学界的重视,成为板块构造和岩石圈动力学研究不可缺少的环节(赵宗溥,1984;肖序常,1995;张旗等,1998)。但是随着对全球许多地区的蛇绿岩研究资料的积累,人们认识到现存的多数特提斯蛇绿岩只是大洋或边缘海盆地闭合后古洋壳的残骸记录(Coleman R G. 1984;张旗,1994),正如地震层析成像填图所证实(Maruyama, 1994),绝大部分的大洋岩石圈已通过俯冲方式再循环重新回到地幔去了。因此,现今人们所观察到的蛇绿岩所记录的古构造演化史是不完整的和残缺的。根据板块构造和造山带演化模式,这个过程包括大陆拉张阶段(包括大陆裂谷阶段)、洋盆扩张阶段、俯冲阶段、碰撞阶段和碰撞后阶段(张旗等,1999);“碰撞后的强过铝花岗岩”,即指铝饱和指数 $A/CNK > 1.1$ 的花岗岩,绝大多数与碰撞有关的SP花岗岩都是“碰撞后”的,形成于地壳缩短高峰之后(Sylvester, 1998)。通过“火成岩构造组合”的研究,识别各个阶段火成岩组合特征(产出时间、空间、来源和形成环境的特征),并与蛇绿岩的信息结合起来,配合高精度的同位素测年和地质时间信息,就可以厘定出完整的构造-岩浆事件序列,恢复特提斯演化过程、构筑造山带演化历史,也可为探讨大陆/大洋岩石圈转换、岩石圈深部过程、大陆动力学研究(肖庆辉等,1993)等提供有用的信息。因此,根据造山带形成-演化不同阶段火山岩浆作用的特点,可以重溯造山带构造-岩浆演化历史及其动力学过程(夏林圻,2001),如张本仁(2001)探讨的秦岭造山带地幔柱源岩浆活动的大陆动力学意义。

3 壳幔相互作用与大陆地壳生长

1993年美国制定大陆动力学计划,提出岩浆的形成、运移和侵位是大陆生长的基本过程,从此开创了将壳幔相互作用与花岗岩形成演化紧密结合的新方向。

传统的大陆生长模型认为,大陆地壳主要形成于地球历史的早前寒武纪,以太古宙最为重要,大陆生

长主要通过发生在汇聚板块边界上的弧岩浆作用和弧杂岩增生来实现,即以水平增生为主。近年来的研究表明,显生宙大陆生长非常重要,而中亚造山带(我国新疆北部、内蒙古、东北大兴安岭及哈萨克斯坦、蒙古、俄罗斯远东)是地球上显生宙大陆生长最重要的地区。显生宙大陆生长已经引起国际地学界的普遍关注(肖庆辉等,2003,2009)。在对中国大陆内秦岭、东昆仑、兴蒙造山带及中国东部的东北、华北和华南等地花岗岩进行综合研究的基础上,根据区域地质学、岩石学和地球化学对比研究,已初步总结出中国大陆的5种大陆地壳生长方式(肖庆辉等,2005)。

邓晋福等(1996)在论述深部过程研究新技术时,①把火山喷发可比喻为深达壳-幔的巨型超深钻:上地幔与下地壳深源捕虏体或捕虏晶为天然样品;火成岩记录了源区物质的组成与温度等物理学信息,壳-幔混合型岩浆的侵入或喷发记录了壳-幔相互作用的各种信息;②前寒武纪变质岩系常常是抬升地表的深部陆壳剖面,变质岩 p - T - t 轨迹记录了岩石圈形成与构造隆升的历史信息;③痕量元素与同位素地球化学示踪深部物质与深部过程;④各种地球物理场获得深部结构与物理过程,地学大断面与多种地球物理成果的再开发,热结构与壳-幔地震层析成像;⑤岩石学、地球化学与地球物理学的结合关键与纽带是深部岩石高压相平衡实验、岩石物理性质实验与热力学研究。邓晋福等(2006)指出火成岩是壳-幔相互作用的产物,如果只有幔源玄武岩岩浆注入大陆,那么,岩石圈地幔将被强烈改造,地壳部分的改造则相对较弱。如果主要是再循环古老陆壳局部形成的强过铝花岗岩岩浆,则陆壳将被强烈改造,而岩石圈地幔的改造相对较弱。如果岩浆来源同时有地幔软流圈和深部陆壳,则壳-幔混合型岩浆发育,那么,原有的陆壳和岩石圈地幔将同时受到强烈改造。因此,通过地表出露的火成岩构造组合判断岩浆的性质,进而推测壳-幔相互作用的方式及对深部物质组成的影响。

埃达克岩与地壳生长。埃达克岩不是指的某一种具体的岩石,而是具有特定地球化学性质的一套中酸性火成岩组合的术语。其地球化学标志是: $SiO_2 \geq 56\%$,高铝($Al_2O_3 \geq 15\%$), $MgO < 3\%$ (很少 $> 6\%$),贫Y和Yb($Y \leq 18 \mu g/g$, $Yb \leq 1.9 \mu g/g$),Sr含量高($> 400 \mu g/g$),LREE富集,无Eu异常(或有轻微的负Eu异常)。87Sr/86Sr比值小于0.704, ϵNd 通常 > 0 (Defant M J, et al., 1990)。埃达克岩通常由斜长石、石英和角闪石组成,黑云母、辉石和不透明矿物可有可无。埃达克岩贫Y和Yb,暗示部

分熔融时有石榴石稳定存在,富 Sr、Eu 和具 Sr(相对于 Ce 和 Nd)的正异常,说明熔融时斜长石在源区是不稳定的(Defant M J, *et al.*, 1990; 2001)。埃达克岩的上述特征类似太古宙的高铝 TTD(或 TTG)岩套,通常解释为由年轻的(<25 Ma)、热的俯冲板片在 75~85 km 深处(相当于角闪岩-榴辉岩过渡带)发生部分熔融形成的(Defant M J, *et al.*, 1990)。埃达克岩可以分为两类:C 型埃达克岩与 O 型埃达克岩(张旗等, 2002)。O 型埃达克岩富 Na, 分布于太平洋及其周边地区,其成因主要与板块的消减作用有关,部分与低 K 拉斑玄武岩底侵或具洋壳特征的增厚下地壳部分熔融有关;C 型埃达克岩富 K(大部分仍然是钠质的,少数为钾质),产于大陆内部,主要可能是加厚陆壳(>50 km)底部的下地壳中基性麻粒岩部分熔融形成的,少数可能是底侵的大陆溢流玄武质岩浆或岩石圈地幔中的基性岩部分熔融的产物。根据埃达克岩,我们可以追踪地质历史上的地壳增厚及其相关事件(张旗等, 2002)。

4 岩浆作用与变质核杂岩及其控矿作用

自 70 年代后期以来,大陆岩石圈特别是造山带伸展构造形成了一个研究热点作为伸展构造的特征产物,变质核杂岩一般都与大型岩浆侵入体相伴生,使岩浆侵入作用与变质核杂岩形成机制的关系成为一个较为前沿的研究课题。对于伸展构造与岩浆作用的成因关系的认识目前总趋势认为:区域水平拉伸应力场为伸展构造和岩浆作用提供了条件,但未必是先决条件,也不一定是伸展构造发育的直接原因,而岩浆作用则是形成伸展构造的必要因素,并且可能是产生拉伸应力场的原因之一。关于变质核杂岩与岩浆侵入体的关系,以前倾向于以伸展构造为主导,但越来越多的研究表明岩浆侵位在变质核杂岩的形成过程中起着决定作用,主要包括对地壳的加热、弱化导致拆离断层的形成及由其浮力和密度产生不均一隆升而形成穹隆(张进江等, 1998)。

变质核杂岩的控矿作用主要表现在其构造与矿产的关系上,主要表现为主滑脱构造带控矿、次级滑脱构造带控矿和伸展剥离断层即正断层系统控矿。

5 火成岩与成矿作用

大量的实际观测表明,花岗岩相关矿床的共同特征是强烈的围岩蚀变,因而大规模流体活动是内生金属成矿作用的基本条件(毛景文等, 2005; 罗照

华等, 2007)。花岗质岩石对成矿作用的影响大致有 3 个方面:(1)成矿物质的提供者。大量证据表明,花岗质岩浆可以提供大量的金属元素,足以形成大型、超大型矿床。但是,对于所有的与花岗质岩浆有关的矿床,人们并没有确切的证据表明所有成矿物质就是来自于岩浆,某些同位素失踪研究表明,成矿物质也可能来自于围岩。(2)成矿作用的热能提供者。成矿作用需要大量流体的活动,而流体的活动必然需要热量的供应,岩浆就起着热机的作用。(3)成矿体系的开路先锋。科尔任斯基的透岩浆流体成矿理论认为含矿体系与岩浆体系是并列的,岩浆仅仅是成矿流体上升的开路先锋与通道。含矿流体位于岩浆中有两个有利条件,一是成矿流体的环境始终是熔浆,其物理化学条件改变很小,有利于流体的性质长期保持不变;二是岩浆的温度很高,可以提高成矿元素在流体中的溶解度。同时,成矿物质的结晶温度比寄主岩浆低得多,在主岩浆发生结晶作用之前,成矿流体不会发生结晶,因而具有很强的活动能力。因此,当岩浆侵位较浅时,由于寄主岩浆快速冷却,含矿流体将被封存在寄主岩浆之中,如斑岩铜矿。岩浆侵位较深时,寄主岩浆固结较慢,有利于成矿流体的析出,在接触带形成接触交代型矿床。在更深侵位的条件下,含矿流体甚至可以远距离迁移,只有在遇到化学活性岩层时,才发生反应形成远程低温热液矿床。

总之,即使成矿物质的分布形式是清楚的,成矿机理的解释也仍然需要进一步的证据。目前,花岗质岩石与成矿作用的关系依然扑朔迷离。

6 火成岩岩石学展望

岩浆岩石学与其它学科的交叉渗透形成新的学科生长点(刘宝珺等, 2001):一是岩石大地构造学,着重研究岩浆作用与大地构造背景的关系,重建构造—岩浆的时空格局(Pitcher, 1993; Tatsumi & Eg-gins, 1995);二是岩石地球化学,以大量主元素、微量元素和同位素地球化学为基础,研究岩浆岩的成因和演化(Wilson, 1989);三是岩石物理化学,模拟岩石的部分熔融作用和岩浆的结晶分异作用,重现岩浆的产生和结晶过程,代表性著作如:《Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks》;四是以岩石学方法为基础,结合地球物理、地热、地质历史等,重建岩石圈的物质结构及演化过程(邓晋福等, 1996; 邱瑞照等, 2006; 肖庆辉等, 2009)。

综上,起源于地球深部的火成岩岩石学,在地球

科学研究中正扮演着越来越重要的角色。壳幔相互作用与花岗岩形成演化的关系是 21 世纪前 20 年重点研究的问题之一(刘宝珺等,2001),其科学前沿主要是花岗岩形成与大陆生长和深部过程的关系、深熔作用、热源以及花岗岩的成因类型与构造环境(肖庆辉等,2003)。围绕大陆动力学优先领域,开展“岩浆系统”与“火山系统”的深层次研究,探讨壳幔物质运动的状态、过程与动力学以及深部能量的传导与转化,进一步深化对大陆地质演化的认识,是火成岩石学研究的重要发展方向。

[References]

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46: 605–626

Capdevila. R. ,Corretgé, L. G. & Floor. P. 1973. Les granitoïdes varisques de la Meseta Ibérique [J]. *Bulletin de la Societé Géologique de France*, 15: 209–228

Chappell B W, White A. J. R. 1974. Two contrasting granite types [J]. *Pacific Geology*, 8: 173–174

Debon. F. & Le Fort. P. 1983. A chemical–mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* [J]. *Earth Sciences*, 73: 135–149

Debon. F. & Le Fort. P. 1988. A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications [J]. *Bulletin de Minéralogie*, 111: 493–510

Loiselle M C, Wones D R, 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites 1979 [J]. *Geological Society of America, Abstract with Program*, 11: 468

Maruyama S. 1994. Plume Tectonics [J]. *Geol. Soc. Japan. , (100)*: 24–49

M. P. Atherton, W. S. Pitcher & V. Warden. 1983. The Mesozoic marginal basin of central Peru [J]. *Nature*, 305: 303–306

Pitcher, W. S. 1983. Granite type and tectonic environment [A]. *Mountain Building Processes*, Hsii (ed). *Acad. Press, London*, 19–40

Pitcher W. S. 1993. The nature and origin of granite. *Chapman & Hall, London*: 1–408

RG Coleman. 1984. The Tihama Asir igneous complex, a passive margin ophiolite [J]. *Petrology (igneous and metamorphic rocks)*: 221–238

Sylvester P J. 1998. Post–collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 45: 29–44

Wallace Spencer Pitcher. 1987. Granites and yet more granites forty years on [J]. *Geologische Rundschau*, 76(1): 51–79

Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile /melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis [J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 339–359

Deng Jin–fu, Mo Xuan–xue, Zhao Hai–ling, Luo Zhao–hua, Zhao Guo–chun, Dai Sheng–qian. 1999. The YanShanian lithosphere–asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in east China [J]. *Mineral Deposits*, 18(4): 309–315 (in Chinese with English abstract)

Deng Jin–fu, Wu Zong–xu. 2001. Lithospheric thinning event in the lower YANGTZE craton and Cu–Fe metallogenic belt in the middle and

lower YANGTZE River reaches [J]. *Anhui Geology*, 11(2): 86–91 (in Chinese with English abstract)

Deng Jin–fu, Zhao Hai–ling, Mo Xuan–xue, Luo Zhao–hua. 1996. Root–column tectonic in China—the key of continental dynamics [M]. *Beijing: Geological Publishing House*: 3–21 (in Chinese)

Liu Bao–jun, Li Ting–dong. 2001. Some Problems of Geology [J]. *Advances in Earth Science*, 16(5): 607–616 (in Chinese with English abstract)

Luo Zhao–hua, Huang Zhong–min, Ke Shan. 2007. An overview of granitoid [J]. *Geological Review*, 53 (Supp.): 180–226 (in Chinese with English abstract)

Mao Jing–wen, Li Xiao–feng, Li Hou–min, Qu Xiao–ming, Zhang Chang–qing, Xue Chun–ji, Wang Zhi–liang, Yu Jin–jie, Zhang Zuo–heng, Feng Cheng–you, Wang Rui–ting. 2005. Types and Characteristics of Endogenetic Metallic Deposits in Orogenic Belts in China and Their Metallogenic Processes [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(3): 342–372 (in Chinese with English abstract)

Qiu Rui–zhao, Deng Jin–fu, Zhou Su, Li Jin–fa, Xiao Qing–hui, Wu Zong–xu, Liu Cui. 2004b. Types of lithosphere in north China: geological and geophysical evidence [J]. *Science in China (Series D)*, 34(8): 689–711 (in Chinese with English abstract)

Qiu Rui–zhao, Li Ting–dong, Zhou Su, Deng Jin–fu, Xiao Qing–hui, Geng Shu–fang. 2006. The composition and evolution of lithosphere in China continent [M]. *Beijing: Geological Publishing House*: 1–308 (in Chinese)

Qiu Rui–zhao, Li Ting–dong, Deng Jin–fu, Zhou Su, Xiao Qing–hui, Ye Tian–zhu, Geng Shu–fang, Cheng Xiu–fa, Wang Cui–zhi, Liu Yong. 2006. Large–scale metallogenesis and petroleum field formation in continental China—constraints from the lithosphere [J]. *Geology in China*, 33(4): 852–865 (in Chinese with English abstract)

Wang Tao. 2000. Origin of hybrid granitoids and the implications for continental dynamics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 161–168 (in Chinese with English abstract)

Xia Lin–qi. 2001. Volcano–magmatism of orogenic belts [J]. *China Northwestern Geology*, 34(3): 18–28 (in Chinese with English abstract)

Xiao Qing–hui, Xing Zuo–yun, Zhang Yu, Wu Guang–ying, Tong Jin–song. 2003. The major frontiers of the recent studies of granite [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 221–229 (in Chinese with English abstract)

Xiao Qing–hui, Wang Tao, Deng Jin–fu. 2009. Granitoids and continental crustal growth modes in typical orogenic belts of China [M]. *Beijing: Geological Publishing House*: 199–497 (in Chinese)

Xiao Qing–hui, Qiu Rui–zhao, Deng Jin–fu, Li Ting–dong, Mo Xuan–xue, Hong Da–wei, Wang Tao, Lu Xin–xiang, Wu Fu–yuan, Xie Cai–fu. 2005. Granitoids and continental crustal growth modes in China [J]. *Geology in China*, 2005, 32(3): 336–343 (in Chinese with English abstract)

Xiao Xu–chang. 1995. Discussion on the classification of ophiolites by spreading rate [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (Supp.): 10–23 (in Chinese with English abstract)

Xu Ke–qin, Sun Nai, Wang De–zi, Liu Chang–shi, Chen Ke–rong. 1982. Two genetic series of granitic rocks in southeastern China [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 1(2): 1–11 (in Chinese with Eng-

lish abstract)

- Zhan Ming-guo. 1998. Trend and progress in the study of the classification and emplacement mechanism of granitoids[J]. Regional Geology of China, 17(2): 182-188 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Jin-jiang, Zheng Ya-dong. 1998. Review on the relationship between the formation of metamorphic core complex and the magmatism [J]. Geological Science and Technology Information, 17(1): 19-25 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Qian Qing, Zhou De-jing. 1998. The main features of ophiolite in China. Compiling units; School of Earth Science, Peking University, The proceedings of international union of geological sciences [A]. Beijing: Earthquake Publishing House, 643-649 (in Chinese)
- Zhang Qi. 1994. Recent advances in the study of ophiolites[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 1(1-2): 98-102 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Yan, Xu Ping, Han Song, Jia Xiu-qin. 1999. Late Paleozoic basic magmatism from SW Yangtze Massif and evolution of the Paleo-Tethyan Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 15(04): 576-583 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Wang Yan, Liu Wei, Wang Yuan-long. 2002. Adakite: Its characteristics and implications [J]. Geological Bulletin of China, 21(7): 431-435 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Cheng-dong, Jin Wei-jun, Jia Xiu-qin. 2006. A granite classification based on pressures[J]. Geological Bulletin of China, 25(11): 1274-1278 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Zong-pu. 1984. Ophiolite and Continental suture[J]. Scientia Geologica sinica, (4): 359-372 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 罗照华, 赵国春, 戴圣潜. 1999. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 18(4): 309-315
- 邓晋福, 吴宗絮. 2001. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游Cu-Fe成矿带[J]. 安徽地质, 11(2): 86-91
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 罗照华. 1996. 中国大陆根-柱构造-大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社. 3-21
- 刘宝珺, 李廷栋. 2001. 地质学的若干问题[J]. 地球科学进展, 16(5): 607-616
- 罗照华, 黄忠敏, 柯珊. 2007. 花岗质岩石的基本问题[J]. 地质评论, 53(增刊): 180-226
- 毛景文, 李晓峰, 李厚民, 曲晓明, 张长青, 薛春纪, 王志良, 余金杰, 张作衡, 丰成友, 王瑞廷. 2005. 中国造山带内生金属矿床类型、特

- 点和成矿过程探讨[J]. 地质学报, 79(3): 342-372
- 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 李金发, 肖庆辉, 吴宗絮, 刘翠. 2004b. 华北地区岩石圈类型: 地质与地球物理证据[J]. 中国科学(D辑), 34(8): 689-711
- 邱瑞照, 李廷栋, 周肃, 邓晋, 肖庆辉, 耿树方. 2006. 中国大陆岩石圈物质组成及演化[M]. 北京: 地质出版社: 1-308
- 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 周肃, 肖庆辉, 叶天竺, 耿树方, 陈秀法, 王翠芝, 刘勇. 2006. 中国大陆大规模成矿作用、油气田形成—来自岩石圈的约束[J]. 中国地质, 33(4): 852-865
- 王涛. 2000. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义[J]. 岩石学报, 16(2): 161-168
- 夏林圻. 2001. 造山带火山岩浆作用[J]. 西北地质, 34(3): 18-28
- 肖庆辉, 邢作云, 张昱, 伍光英, 童劲松. 2003. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 221-229
- 肖庆辉, 王涛, 邓晋福. 2009. 中国典型造山带花岗岩与大陆地壳生长研究[M]. 北京: 地质出版社: 199-497
- 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 李廷栋, 莫宣学, 洪大卫, 卢欣祥, 王涛, 吴福元, 谢才富. 2005. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 336-343
- 肖序常. 1995. 从扩张速率试论蛇绿岩的类型划分[J]. 岩石学报, 11(增刊): 10-23
- 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 刘昌实, 陈克荣. 1982. 华南两类不同成因花岗岩岩石学特征[J]. 岩矿测试, 1(2): 1-11
- 战民国. 1998. 花岗岩类分类与定位机制研究动向和进展[J]. 中国区域地质, 17(2): 182-188
- 张进江, 郑亚东. 1998. 变质核杂岩与岩浆作用成因关系综述[J]. 地质科技情报, 17(1): 19-25
- 张旗, 钱青, 周德进. 1998. 中国蛇绿岩的主要特征[A]. 北京大学地质学系编, 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京: 地震出版社: 643-649
- 张旗. 1994. 蛇绿岩研究的进展[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 1(1-2): 98-102
- 张旗, 钱青, 王焰, 徐平, 韩松, 贾秀琴. 1999. 扬子地块西南缘晚古生代基性岩浆岩的性质与古特提斯洋的演化[J]. 岩石学报, 15(04): 576-583
- 张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义[J]. 地质通报, 21(7): 431-435
- 张旗, 王焰, 李承东, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩按照压力的分类[J]. 地质通报, 25(11): 1274-1278
- 赵宗溥. 1984. 蛇绿岩—上陆缝台线[J]. 地质科学, (4): 359-372

Progresses in the Research of Igneous Rocks

LI Hui, SUN Kai, ZHANG Lin-lin, HUANG Kai
(China University of Geosciences, Beijing 10083)

Abstract: Some progresses in the study of igneous rocks are presented briefly in this paper. They indicate that the igneous rock has played an important role in the study of orogenic belts, crust-mantle interaction and the growth of continental crust. Igneous petrology has been increasingly significant in geosciences. The relationship between crust-mantle interaction and the formation and evolution of granite is one of issues which will be studied in the first 20 years of 21st century, of which the frontiers include the relationships between granite formation and the growth of continental and deep processes, anatexis, heat sources, petrogenetic classification of granite and their tectonic settings. Combining other disciplines, and carrying out a thorough study of the "magma system" and "volcanic system" are important directions for igneous petrology in the future.

Key words: tectonic environment, igneous structure assemblage, crust-mantle interaction, progress