

花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义*

张旗¹ 王焰² 李承东³ 王元龙¹ 金惟俊¹ 贾秀勤⁴

ZHANG Qi¹, WANG Yan², LI ChengDong³, WANG YuanLong¹, JIN WeiJun¹ and JIA XiuQin⁴

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 香港大学地球科学系, 香港

3. 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170

4. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100039

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China

3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

4. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

2006-05-08 收稿, 2006-06-26 改回.

Zhang Q, Wang Y, Li CD, Wang YL, Jin WJ and Jia XQ. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249–2269

Abstract Intermediate-acid igneous rocks including volcanic and intrusive rocks with $\text{SiO}_2 > 56\%$ can be divided into four types on the basis of their Sr and Yb contents: high-Sr and low-Yb type ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ and $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$); low-Sr and Yb type ($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$ and $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$), low-Sr and high-Yb type ($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$ and $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$), and high-Sr and Yb type ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ and $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$). In the low-Sr and high-Yb type, some granites can be grouped as very low-Sr and high-Yb type with $\text{Sr} < 100 \times 10^{-6}$ and $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$. It is therefore five types of granites on the basis of their Sr and Yb contents. The variation of the Sr and Yb contents of the granites are related to the depth of the magma source. With the contents of Sr and Yb and mineral assemblage of the residual magma, the pressure at which granite formed may have four ranges; (1) granites formed at high pressure with garnet left in the residual phase, magma have high Sr and low Yb content; (2) granites formed at medium or higher pressure such as granulite facies (composed of plagioclase + garnet + amphibolite + pyroxene) have low Sr and Yb, or high Sr and Yb content, depending on the composition of protolith; (3) granites formed at low pressure with plagioclase in residual phase (amphibolite facies) have low Sr and high Yb contents, and (4) M-type granites related to ophiolite formed by partial melting of gabbro at shallower depth (2 to 5 km) have very low Sr and Yb content. In general, most leucogranites are of low-Sr and Yb type, whereas some syenite and shoshonite are high-Sr and high-Yb type. The leucogranites in southern Tibet may have formed at relatively high pressure. It is discussed in this study that the relationship between the composition of magma and formation depth, which is a preliminary work and need more evidence to approve.

Key words Granites, Classification, Sr-Yb, Geochemistry, Depth, Pressure

摘要 研究表明, 中酸性岩浆岩 (包括 $\text{SiO}_2 > 56\%$ 的中酸性火山岩和侵入岩) 的 Sr 和 Yb 是两个非常有意义的地球化学指标, 如果大致按照 $\text{Sr} = 400 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Yb} = 2 \times 10^{-6}$ 为标志, 可以划分出 4 类花岗岩, 即: 高 Sr 低 Yb ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$)、低 Sr 低 Yb ($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$)、低 Sr 高 Yb ($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$) 和高 Sr 高 Yb ($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$) 型花岗岩。其中, 从低 Sr 高 Yb 型中还可以分出非常低 Sr 高 Yb ($\text{Sr} < 100 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$) 的一类。因此, 按照 Sr 和 Yb 含量的不同, 可以将花岗岩分为 5 类。文中着重探讨了这 5 类花岗岩形成的源区深度问题, 指出按照残留相组成和花岗岩地球化学特征, 可以将花岗岩形成的压力分为 3 或 4 个级别: 即: (1) 高压下与石榴石平衡的花岗岩具有高 Sr 低 Yb 的特征; (2) 在中等或较高压力、麻粒岩相 (由斜长石 + 石榴石 + 角闪石 + 辉石组成) 条件下, 花岗岩具低 Sr 低 Yb 或

* 国家“973”项目 (2002CB412601)、(G1999043206-05) 和中国科学院知识创新工程基金 (KZCX 1-07 和 KZCX2-SW-119) 资助的项目。

第一作者简介: 张旗, 男, 1937 年生, 研究员, 岩石学和地球化学专业, E-mail: zhangqi@mail.igcas.ac.cn

高 Sr 高 Yb 的特点(取决于原岩成分);(3)低压下,残留相有斜长石无石榴石(角闪岩相),花岗岩为低 Sr 高 Yb 类型的;(4)与蛇绿岩有关的在洋壳剖面浅部由辉长岩部分熔融形成的 M 型花岗岩,具有非常低 Sr 高 Yb 的特点,形成深度约 2~5km,可能是非常低压条件下形成的。研究表明,浅色花岗岩大多分布在低 Sr 低 Yb 区,部分正长岩和钾玄岩分布在高 Sr 高 Yb 区。藏南浅色花岗岩可能形成的压力较高。文中探讨了岩浆与深度的关系,得出了一些初步的认识,指出需要进一步研究的问题。为了得到经得起考验的结论,还需要更多资料的积累,更多理论的探讨和更多实验的佐证。

关键词 花岗岩;分类;Sr-Yb 关系;地球化学;深度;压力

中图法分类号 P588.121;P597.3

1 引言

花岗岩的分类历来受重视,据 Barbalin(1999)统计,迄今已报道过 20 多种花岗岩的分类方案,如 I 型、S 型、A 型、M 型、H 型、海西型、加里东型、安底斯型、碰撞型、火山弧型、洋中脊型、板内型,以及徐克勤教授于 1982 年提出的改造型、同熔型和重熔型分类等等(Chappell and White, 1974, 1992; Ishihara, 1977; Collins *et al.*, 1980; Xu KQ, 1982; Pitcher, 1983; Pearce *et al.*, 1984; Whalen *et al.*, 1987; Maniar and Piccoli, 1989; Barbalin, 1999)。许多分类着重于花岗岩的化学成分,更多的着重于花岗岩形成的构造环境,有的试图考虑综合的因素(包括花岗岩的成分、源区、环境等等),但是,很少有探讨花岗岩地球化学特征与其形成深度的关系的。埃达克岩的研究(Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990)为这一领域的研究提供了新的思路。研究表明,具有高 Sr 低 Yb(和 Y)地球化学特征的中酸性岩浆岩可能与榴辉岩(及含石榴石的变质岩)处于平衡,形成的深度较大(俯冲板片的深部和加厚下地壳的底部);而具有低 Sr 高 Yb 特征的岛弧安山岩-英安岩-流纹岩则与斜长角闪岩处于平衡,形成在较浅的深度(Defant and Drummond, 1990; Defant *et al.*, 2002; Kay and Kay, 2002; Rapp *et al.*, 2002; 张旗等, 2001, 2005)。

众多的资料表明,中酸性岩浆岩(包括 $\text{SiO}_2 > 56\%$ 的中酸性火山岩和侵入岩)的 Sr 和 Yb 是两个非常有意义的地球化学指标,如果大致按照 $\text{Sr} = 400 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Yb} = 2 \times 10^{-6}$ 为标志,可以划分出 4 类花岗岩,即:高 Sr 低 Yb($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$)、低 Sr 低 Yb($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2 \times 10^{-6}$)、高 Sr 高 Yb($\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$)和低 Sr 高 Yb($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$)型花岗岩(图 1)。其中,从低 Sr 高 Yb 区中还可以分出非常低 Sr 高 Yb 的一类,其 Sr 含量通常 $< 100 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$ (图 1)。因此,按照 Sr 和 Yb 含量可以将花岗岩分为 5 类。

2 花岗岩按照 Sr-Yb 分类的缘由

花岗岩的 Sr-Yb 分类源于 Defant and Drummond(1990)的 Sr/Y-Y 图,该图区分开板片熔融形成的埃达克岩和岛弧安山岩-英安岩-流纹岩系列。由 Kay(1978)发现、而由

Defant and Drummond(1990)完成的对于阿留申群岛中埃达克岛板片熔融的中酸性岩浆岩的研究,发现了一套具有独特地球化学特征的岩浆岩,并将其命名为“adakite”,以 $\text{SiO}_2 > 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ 、 $\text{MgO} < 3\%$ 、 $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ 、LREE 富集、HREE 亏损、 $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ 、无明显的负锆异常为标志(Defant and Drummond, 1990)。由于埃达克岩具有富 Sr 贫 Y(和 Yb)的特征,因此 Sr/Y 比值高。相反,产于岛弧区的由岛弧地壳熔融形成的安山岩-英安岩-流纹岩系列具有较低的 Sr 和较高的 Y(和 Yb)因而 Sr/Y 比值低。虽然该岩石系列也是富集 LREE 的,但通常具有中等至弱的负锆异常,表明熔体与角闪石和斜长石处于平衡(也可能与斜长石分离结晶有关)。应当指出的是,Defant and Drummond(1990)当初只圈定了岛弧区安山岩-英安岩-流纹岩的范围,并给出了埃达克岩各个样品在图中的投点位置,而未圈定埃达克岩的范围。图 2A 是后人根据该图埃达克岩样品点的分布圈定的。

随着研究的深入和资料的积累, Sr/Y-Y 图得到进一步的应用。Theblimont *et al.*(1997)在研究智利北部斑岩铜矿时,按照 $\text{Sr} = 400 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Y} = 1.8 \times 10^{-6}$ 绘制的 Sr/Y-Y 图(图 2B),比原先的图更加简单明了。

由于 Y 和 Yb 的地球化学性质接近, Kay and Kay(2002)将 Sr/Y-Y 图变化为 Sr/Yb-Yb 图($\text{Sr} = 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} = 1.9 \times 10^{-6}$, 见图 2C)。与 Defant and Drummond(1990)的 Sr/Y-Y 图比较, Sr/Yb-Yb 图更加合理。因为, Y 和 Yb 尽管地球化学性质相近,但也还有一些差别,差别在于: Y 在 HREE 部分是处于 Ho 和 Er 之间,接近 MREE 的位置;而 Yb 在 HREE 的靠近末端,是 HREE 的典型代表。因此,用 Yb 代替 Y 更能够体现 HREE 的特征。石榴石强烈富集 HREE(和 Yb),而角闪石强烈富集 MREE(引自吴福元等, 2002; 葛小月等, 2002),因此,花岗岩的 Yb 更能够反映石榴石残留的信息。如果花岗岩亏损 HREE 且 HREE 部分呈平坦型分布,则大体上 $\text{Yb} \times 10 = \text{Y}$; 如果 HREE 呈分离的分布, Y 可能 $> \text{Yb} \times 10$ 。如图 3A 所示,一个 HREE 强烈亏损的埃达克岩,其球粒陨石标准化的 $\text{Y} = 7$,而球粒陨石标准化的 Yb 仅为 3,因此,球粒陨石标准化的 $\text{Y} \gg \text{Yb}$ 。Defant and Drummond(1990)当初确定埃达克岩的标准时,限定 $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ 和 $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$,可能表明有相当一部分埃达克岩可能是 HREE 平坦型分布的。许多人认为,典型埃达克岩的 HREE 是亏损的,因为埃达克岩 HREE 亏损的分布与石榴石强烈富集 Yb 的性质

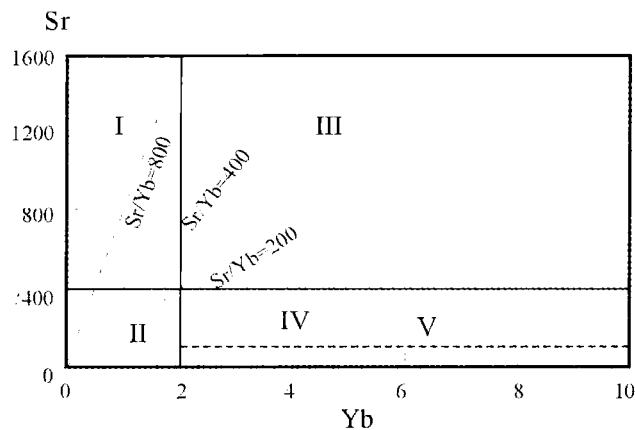


图1 花岗岩 Sr-Yb 分类图

I-高 Sr 低 Yb 型; II-低 Sr 低 Yb 型; III-高 Sr 高 Yb 型; IV-低 Sr 高 Yb 型; V-非常低 Sr 高 Yb 型

图中也展示了 Sr 与 Sr/Yb 的关系,如果 Yb 含量相同, Sr 含量越高,则 Sr/Yb 比值越大

Fig.1 Granite classification on the basis of Yb and Sr contents

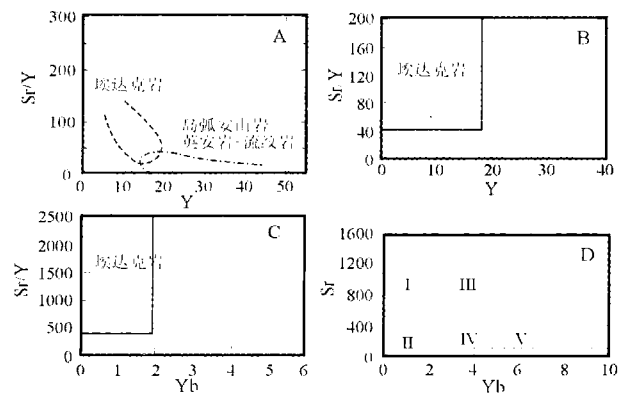


图2 Sr-Yb 图的演变

A- Sr/Y-Y 图(引自 Difant and Drummond, 1990); B-Sr/Y-Y 图 (Theblimont *et al.*, 1997); C-Sr/Yb-Yb 图 (Kay and Kay, 2002); D-Sr-Yb 图(本文)

D- I-高 Sr 低 Yb 型; II-低 Sr 低 Yb 型, III-高 Sr 高 Yb 型; IV-低 Sr 高 Yb 型; V-非常低 Sr 高 Yb 型

Fig.2 Evolution on plots of Sr vs Yb

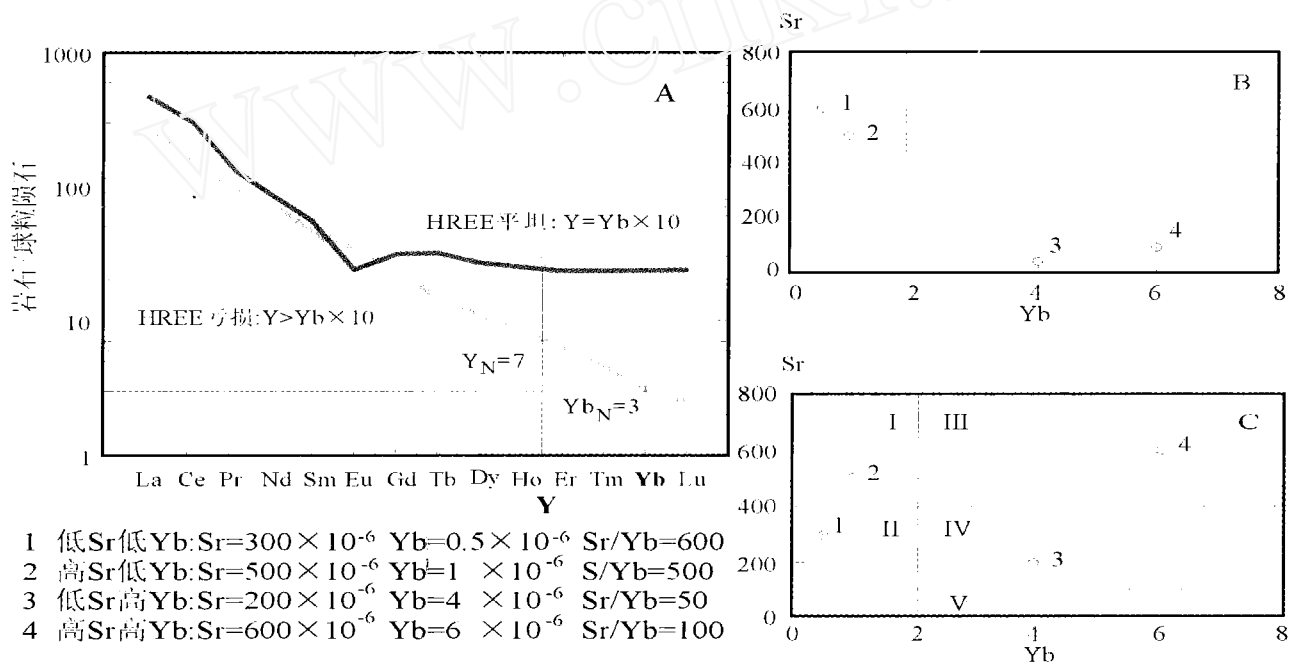


图3 Y 和 Yb 在 HREE 部分的分布(A)和不同 Sr 和 Yb 含量的样品在 Sr/Yb-Yb(B)和 Sr-Yb(C)图中的分布

从图 B 中看出,样品 1 和 2 落在埃达克岩范围,3 和 4 落在岛弧区范围,而在图 C 中,样品 1,2,3,4 分别属于本文确定的 4 个不同的花岗岩类型

Fig.3 Distribution of Y and Yb in HREE (A), and distribution of distinct Sr and Yb contents in Sr/Yb vs Yb plot (B) and Sr vs Yb plot (C)

匹配起来更加合理。在这种情况下,如果我们确定 $Y = 18 \times 10^{-6}$ 是一个重要的标志,则 Yb 应当小于 1.9×10^{-6} ;而如果我们假定 $Yb = 1.9 \times 10^{-6}$ 更加重要,则 Y 应当 $> 18 \times 10^{-6}$ 才合理(图 3A)。但是,Defant 和 Drummond(1990)却没有给我们这样的暗示,看来,岛弧区埃达克岩的 HREE 分布可能不像我们想象的那样简单。

本文与前述作者不同之处在于,我们把 Sr/Yb 比值改为 Sr 和 Yb 的含量(图 2D)。埃达克岩富 Sr 贫 Y 和 Yb,必然导致高的 Sr/Y 和 Sr/Yb 比值。在这里,分子 Sr 是不相容元素,而分母 Yb(Y)是相容元素。不像 Rb/Sr、Th/Ta、Nb/La 比值,它们的离子半径相近,地球化学行为相似,大体受同一种因素制约,随着岩浆的演化上述比值不会发生大的变化。而

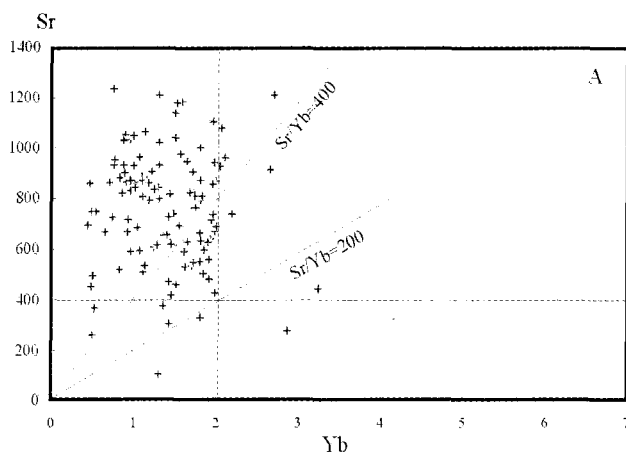


图4 高Sr低Yb型花岗岩在Sr-Yb图中的分布

展示了华北埃达克岩的分布,资料来源据马昌前等,1994,1999,2003; Trumbull *et al.*, 1996; 陈义贤和陈文奇,1997; Wang Q, *et al.*, 2000, 2004a, b; 2006a, b; 王焰和张旗,2001; 潘国强等,2001; 王强等, 2000; 2001a, b, 2002, 2003a, b, 2004; 李伍平等,2000, 2001a, b; 2004; 陈斌等,2002; 王岳军等,2002,2003; 武广等,2003a, b; 杨进辉等,2003; 马芳等,2003; 毛德宝等,2003; 孟繁聪等,2003; 苗来成等, 2003; 蔡剑辉等,2003,2005; 黄顺生等,2004; 李承东等,2004; 李晓勇等,2004; 王清海等,2004; 王元龙等,2004; 袁洪林等,2005; 张华锋等, 2004; 刘文斌等,2003; 张旗等(未刊)

Fig. 4 Plot of Sr vs Yb for high-Sr and lower-Yb type granites

Sr/Y 以及 Sr/Yb 比值的 Sr 和 Y (Yb) 是由不同因素制约的, Sr 主要与斜长石的 Ca 相关,而 Y 和 Yb 与石榴石相关(Y 可能还与角闪石有关),因而 Sr/Y (以及 Sr/Yb) 是一个变数。如图 3B 所示,对于低 Sr 低 Yb 的样品来说(如图 3C 中的 1),尽管 Sr 含量低于 400×10^{-6} ,表明它们不具有埃达克岩的特征,但是,如果该样品的 Yb 足够低,也会使 Sr/Yb 比值提高甚至进入埃达克岩范围(图 3B)。对比图 3B 和 C,同样的情况也可能出现在高 Sr 高 Yb 和低 Sr 高 Yb 样品中。因此,本文以 $Sr = 400 \times 10^{-6}$ 和 $Yb = 2 \times 10^{-6}$ 来标定 4 个岩区的范围,既保留了 Sr/Yb 比值的特征,也不至于因少数样品含量很大的变化带来的投点区的变化以及由此引发的模棱两可的认识。

本文以 $Sr = 400 \times 10^{-6}$ 来标定高 Sr 和低 Sr 的界线,是遵循前人的认识(Defant and Drummond, 1990; Martin, 1999; Martin *et al.*, 2005)和相关的实验资料(Rapp *et al.*, 2002)。至于本文为什么取 $Yb = 2 \times 10^{-6}$ 而不取 $Yb = 1.9 \times 10^{-6}$ 来界定高 Yb 和低 Yb,这里没有特殊的含义,只是为了方便使用而已。 $Yb < 1.9 \times 10^{-6}$ 只是一定数量样品统计的结果(Defant and Drummond, 1990),许多新的研究支持这一认识(Martin, 1999; Martin *et al.*, 2005)。 $Yb = 2 \times 10^{-6}$ 和 $Yb = 1.9 \times 10^{-6}$ 没有实质意义上的区别。 $Yb = 2 \times 10^{-6}$ 和 $Yb = 1.9 \times 10^{-6}$ 应当是分析误差范围之内允许的变化。埃达克岩的判别标准仍然是 $Yb < 1.9 \times 10^{-6}$, $Yb = 2 \times 10^{-6}$ 则是区分低 Yb 和高

Yb 的界线。我们只是说,高 Sr 低 Yb 区涵盖了埃达克岩,大体相当于埃达克岩。

3 各类花岗岩的特征

3.1 高 Sr 低 Yb 型

埃达克岩、大多数太古宙高铝 TTG、许多 I 型花岗岩、钙碱性和高钾钙碱性岩以及部分富碱性的花岗岩(包括 A 型花岗岩、钾玄岩或橄榄安粗岩、正长岩等)落入高 Sr 低 Yb 区。时代从太古宙的 TTG 直至新生代的岛弧埃达克岩以及新生代安第斯和青藏高原的埃达克岩。

中国东部中生代存在大量的高 Sr 低 Yb 型花岗岩(图 4),它们大多是高钾钙碱性的(张旗等,2001,2004c; 吴福元等,2002; 葛小月等,2002; Xu *et al.*, 2002; Rapp *et al.*, 2002; Davis, 2003; 肖龙等,2004; 张华锋等,2004)。最近,在青藏高原发现了许多新生代的埃达克岩,它们大多与青藏高原巨厚的地壳有关(见张旗等,2003; 候增谦等,2004; Wang *et al.*, 2005)。研究表明,中国绝大多数斑岩铜矿的寄主岩石也是埃达克岩(张旗等,2002,2003,2004a, b; 刘红涛等,2004;)。最近还报道了五台地区太古宙的埃达克岩(Wang Z H *et al.*, 2004)以及蛇绿岩中产出的具埃达克岩地球化学特征的斜长花岗岩(李武显和李献华,2003,2004; Li and Li, 2003; 刘敦一等,2003; 简平等,2003)。因此,高 Sr 低 Yb 型花岗岩(火山岩)在中国有广泛的分布(张旗等,2003,2004)。

高 Sr 低 Yb 型花岗岩的 REE 分布是 LREE 富集型的,可以细分为 3 类(图 5A): 1, HREE 强烈亏损,无铈异常或有正铈异常,暗示源区由石榴石 + 辉石组成,残留相为榴辉岩; 2, HREE 具平坦型的分布,说明源区可能有角闪石残留(石榴石 + 辉石 + 角闪石),残留相为角闪榴辉岩或含角闪石的辉石岩; 3, HREE 亏损或平坦型,有弱的负铈异常,说明残留相可能有少量斜长石存在,残留相为含斜长石的榴辉岩或麻粒岩; 或残留相中无斜长石存在,而熔体中的斜长石发生了分离结晶作用。

高 Sr 低 Yb 型花岗岩(即埃达克岩)的地球动力学意义很明确,尽管有许多不同的意见(葛小月等,2002; 陈斌等,2002; Qian *et al.*, 2003; 张静,2003; 董申保和田伟,2004)。可能不论埃达克岩的原岩是什么,只要源区有石榴石残留,都应当是高 Sr 低 Yb 的。

3.2 低 Sr 低 Yb 型

低 Sr 低 Yb 型花岗岩最早是李承东等(2004)研究冀北燕山期花岗岩时发现的(图 6A)。该类岩体富 Si 和 K (SiO_2 在 73.63 ~ 75.42 % 之间, $K_2O = 4.21 \sim 4.62\%$), $Na_2O/K_2O = 0.8 \sim 0.9$, 贫 Al_2O_3 (12.81 ~ 14.15 %), Sr ($13 \sim 344 \times 10^{-6}$, 平均 136×10^{-6}), Y ($7.3 \sim 26.9 \times 10^{-6}$, 平均 13×10^{-6}) 和 Yb ($0.82 \sim 3.91 \times 10^{-6}$, 平均 1.47×10^{-6}), 因而

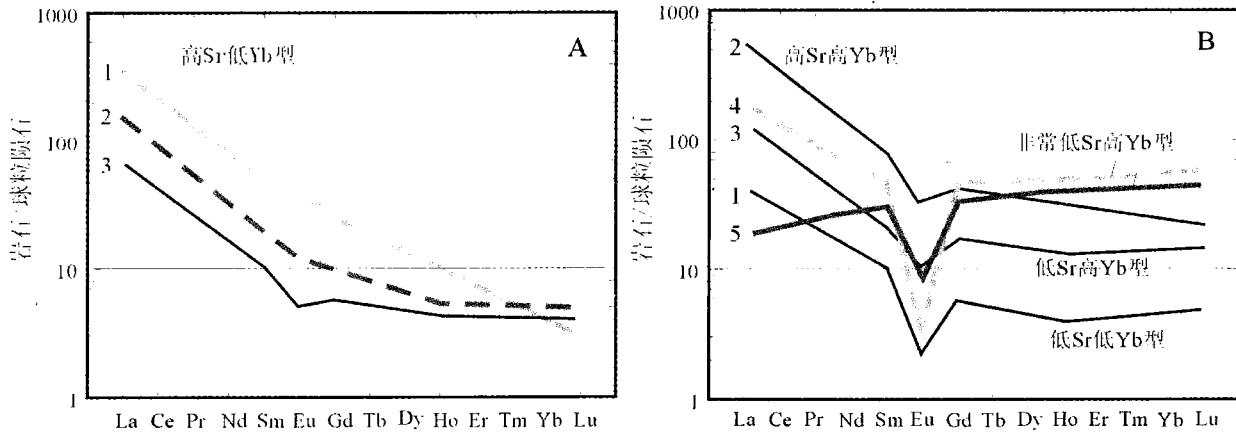


图5 各类花岗岩代表性的 REE 分布图

A-高 Sr 低 Yb 型花岗岩: 1-残留相为石榴石+辉石; 2-残留相为石榴石+角闪石+辉石; 3-残留相为石榴石+辉石+/-角闪石+/-斜长石。B-其他各类花岗岩: 1-低 Sr 低 Yb 型; 2-高 Sr 高 Yb 型; 3-低 Sr 高 Yb 型; 4和5-非常低 Sr 高 Yb 型,其中: 4-“燕式”REE 分布的 A 型花岗岩; 5-M 型花岗岩

Fig. 5 Schematic REE patterns from distinct granite types

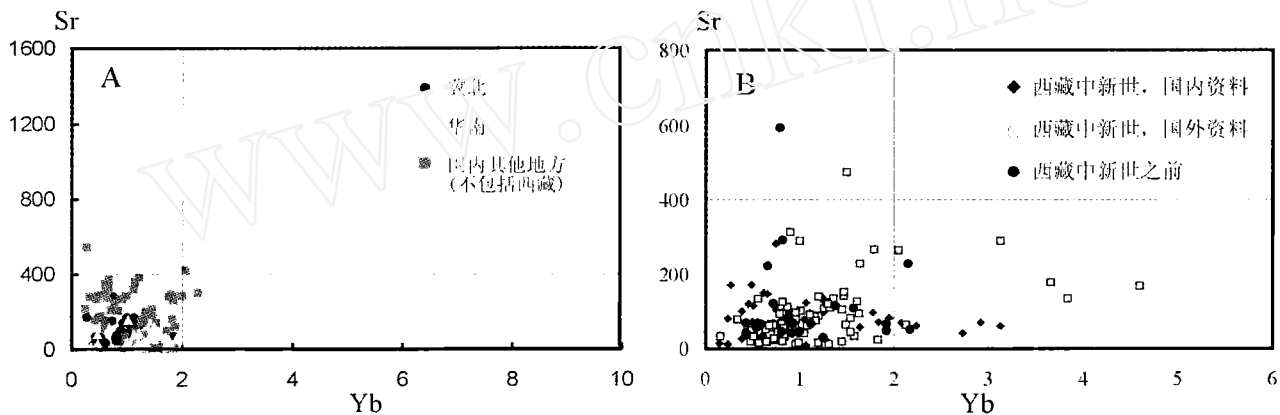


图6 低 Sr 低 Yb 型花岗岩的 Sr-Yb 图

A 和 B-资料来源: 1-冀北: 李承东等, 2004 及其所引用的参考文献; 2-华南: 董传万等, 1998; 葛良胜等, 2003; 3-其他地方 (不包括西藏): 许保良等, 1999; 和钟铨等, 2005; 彭艳东等, 2003; 林强等, 2004; 张晓琳等, 2005; 蔡明海等, 2005; Guillot and Le Fort, 1995; Ayres and Harris, 1997; Heumann and Davies, 1997; Currie *et al.*, 1998; Gamble *et al.*, 1999; Castro *et al.*, 1999; Xu *et al.*, 1999; Pressley and Brown, 1999; Ramirez and Grundvig, 2000; Guimaraes *et al.*, 2000; Visona and Lombardo, 2002; van de Flierdt *et al.*, 2003; Wu *et al.*, 2003, 2004; Liu *et al.*, 2005; Dini *et al.*, 2005。B, 西藏浅色花岗岩, 中新世资料据: 张金阳等, 2003; 邹光富等, 2003; 张宏飞等, 2005; 童劲松等, 2003; Guillot and Le Fort, 1995; Ayres *et al.*, 1997; Visona *et al.*, 2002。中新世之前 (白垩纪-早第三纪) 据: 翟庆国等, 2004, 2005

Fig. 6 Sr vs Yb plot of lower Sr and Yb type granites

Sr/Yb 比值低。LREE 富集, 有明显或不明显的负铕异常 (图 5B-1)。李承东等 (2004) 解释 HREE 和 Y 亏损表明源区可能有石榴石存在, 部分样品 HREE 具平坦型的分布, Ho_N 与 Yb_N 大体相当或 $Ho_N < Yb_N$ (MREE 亏损), 暗示角闪石可能是重要的残留相。岩浆贫 Al 和 Sr, 有比较明显的负铕异常, 说明残留相中可能有富 Ca 的斜长石存在, 致使熔融的岩浆贫 Al、Ca 和 Sr。因此推测该区低 Sr 低 Yb 型花岗岩可能是含斜长石-角闪石-石榴石-辉石的高压麻粒岩在较高的压力下部分熔融形成的 (李承东等, 2004)。

最近作者注意到, 在西藏南部 (从申扎、冈底斯、拉轨岗

日直至高喜马拉雅地区, 主要集中在藏南的拉轨岗日和高喜马拉雅地区) 发表了一系列讨论浅色花岗岩的文章, 令人惊叹的是, 它们几乎无例外地具有低 Sr 低 Yb 的特征 (图 6B, 例如: 葛良胜等, 2003; 童劲松等, 2003; 张金阳等, 2003; 邹光富等, 2003; 翟庆国等, 2004, 2005; 和钟铨等, 2005; 张宏飞等, 2005), 时代除个别为印支期和晚白垩世的以外, 大多是第三纪的。据本文调研, 在中国的其它地方也见有低 Sr 低 Yb 类型的花岗岩 (火山岩) 产出, 如华南、东北、东昆仑等地 (图 6A)。

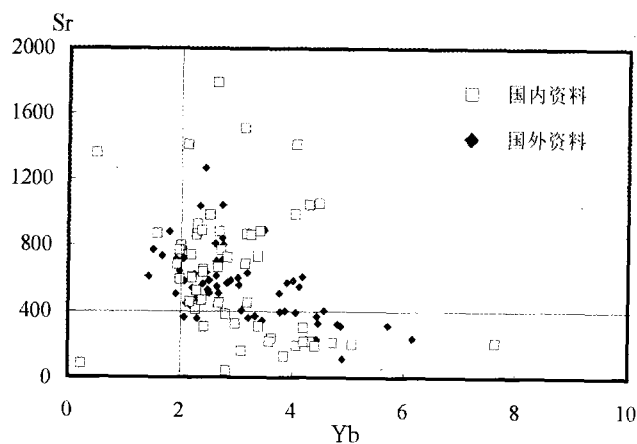


图7 高 Sr 高 Yb 型花岗岩的 Sr-Yb 图

资料来源: 据 Askren *et al.*, 1997; Ajaji *et al.*, 1998; Verplanck *et al.*, 1999; 姜耀辉等, 1999; 李献华等, 1999; Wang T *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2005; 段志明等, 2005; Wang Q *et al.*, 2005

Fig. 7 Plot of Sr vs Yb for high Sr and high Yb type granites

3.3 高 Sr 高 Yb 型

该类花岗岩很少被人注意, 国内外均有一些相关的实例。例如某些含辉石的正长岩和二长花岗岩, 岩石化学分析特别富集 Ca、P、Al, 即具有高 Sr 高 Yb 的特征。如美国新墨西哥州一个正长岩和石英正长岩 (Verplanck *et al.*, 1999), 摩洛哥海西期的 Tanncherfi 岩体 (Ajaji *et al.*, 1998) 和挪威的 Lyngdal 岩体 (Bogaerts *et al.*, 2003)。桂东南的钾玄岩 (李献华等, 1999) 和新疆乌依塔格大同的石英二长岩 (姜耀辉等, 1999) 也具有高 Sr 高 Yb 的特征 (图 7)。看来, 许多富钾质的花岗岩类 (正长岩和钾玄岩) 可能具有高 Sr 高 Yb 的特征。

3.4 低 Sr 高 Yb 型

这是地球上分布最广的一类花岗岩, 包括大多数岛弧花岗岩以及许多 I、S、A、M 型花岗岩, 部分奥长环斑花岗岩, 都是这种类型的。我们的研究表明, 华南和东北中生代的高钾钙碱性和钙碱性花岗岩 (以及相应的火山岩) 除少数外, 大多是低 Sr 高 Yb 类型的 (图 8) (张旗等, 2005)。

3.5 非常低 Sr 高 Yb 型

非常低 Sr 高 Yb 的花岗岩的最常见的例子是具“燕式”REE 分布的 A 型花岗岩、高分异花岗岩 (图 5B 之 4) 和与蛇绿岩有关的 M 型花岗岩 (图 5B 之 5)。非常贫 Sr 的花岗岩通常伴有非常明显的负铕异常, 主要受斜长石和钾长石的制约 (Hassanen, 1997)。对于具有 REE “四分组效应” (tetrad effect) 的高分异花岗岩的成因存在不同的认识 (张旗和刘丛强, 2001, 及其所附的参考文献), 本文暂不予讨论。最近的研究表明, 与蛇绿岩有关的 M 型花岗岩种类较多, 据李武显和李献华 (2003) 研究, 可以分为 4 类, 其中包括埃达克岩。

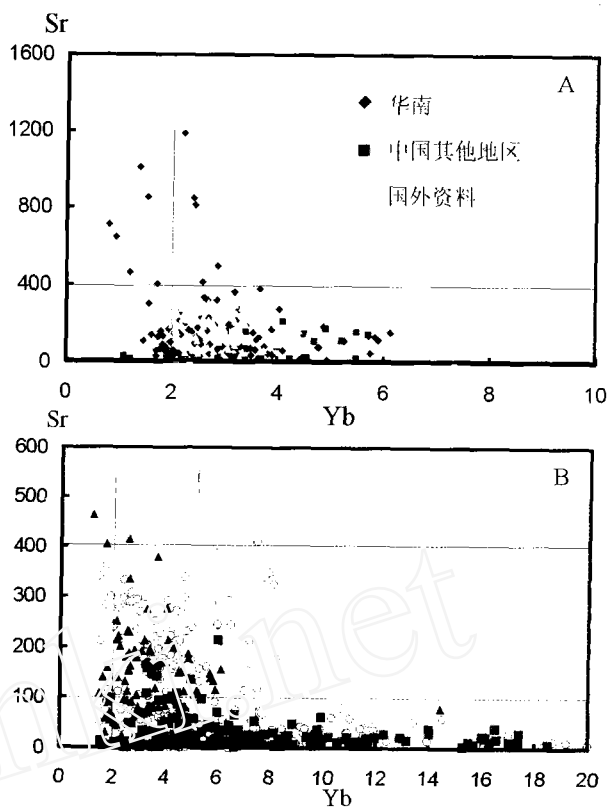


图8 低 Sr 高 Yb 型花岗岩的 Sr-Yb 图

A-高钾钙碱性-钙碱性花岗岩的 Sr-Yb 图。资料来源: 葛文春等, 2000; 王勇和余达淦, 2000; 李超文等, 2002; 王德滋等, 2002; 顾明光, 2003; 付建明等, 2003; 谢昕等, 2003, 2005; 林强等, 2004; 秦秀峰等, 2004; 张宏飞等, 2005; 张万良等, 2005; Grigoriev and Pshenichny, 1998; Gamble *et al.*, 1999; Altherr *et al.*, 2000; Griffin *et al.*, 2000; Johnson and Grunder, 2000; Li X H, 2000; Silva *et al.*, 2000; Waight *et al.*, 2001; Dini *et al.*, 2005。B-高钾钙碱性-钙碱性花岗岩和 A 型花岗岩的 Sr-Yb 图。图例: 实心三角, 高钾钙碱性和钙碱性岩; 空心圆, A 型花岗岩; 实心方块, “燕式”REE 分布的 A 型花岗岩。A 型花岗岩资料据: 邱检生等, 1996, 2000; 樊金涛, 2000; 范春方和陈培荣, 2000; 姜耀辉和杨万志, 2000; 葛文春等, 2000, 2001; 李献华等, 2002; 包志伟和赵振华, 2003; 孙德有等, 2004; 湛宏伟等, 2005; 张虹等, 2005; 章平和田邦生, 2005; 付建明等, 2005; Jung *et al.*, 1998; Li, 2000; Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2002, 2004; Auwera *et al.*, 2003; Ilbeyli *et al.*, 2004; Kahoui and Mahdjou, 2004; Tembo *et al.*, 2004; Tollo *et al.*, 2004; Wang Q *et al.*, 2005; Gregori *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2005

Fig. 8 Distribution of lower Sr and high Yb type granites in Sr-Yb plot

本文搜集的与蛇绿岩有关的花岗岩专指与蛇绿岩形成有关的斜长花岗岩 (张旗和周国庆, 2001)。它们具有很高的 HREE 丰度 (Yb 在 $2-30 \times 10^{-6}$ 之间), 中等至低的负铕异常, 很低的 Sr 含量 (Sr 大多 $< 100 \times 10^{-6}$, 很少超过 200×10^{-6}), 落入非常低 Sr 高 Yb 区 (图 9), 通常解释为辉长岩加水部分熔融形成的 (张旗和周国庆, 2001)。

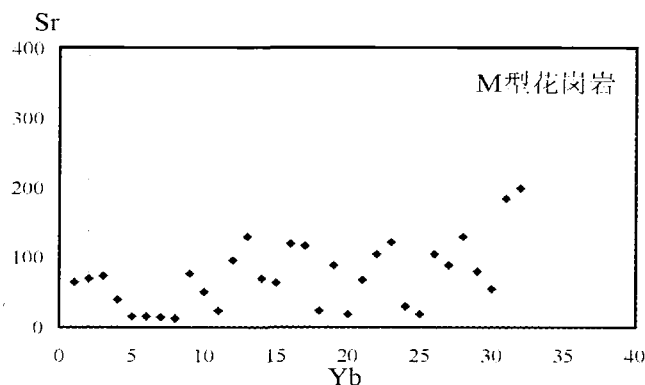


图9 M型花岗岩在 Sr-Yb 图中的分布

资料来源: Alabaster *et al.*, 1982; Pearce *et al.*, 1984; Borsi *et al.*, 1996; Floyd *et al.*, 1998; 姜耀辉等, 2000; Samson *et al.*, 2004; Kaur and Mehta, 2005 及其所附的参考文献

Fig. 9 Distribution of M-type granites in Sr vs Yb plot

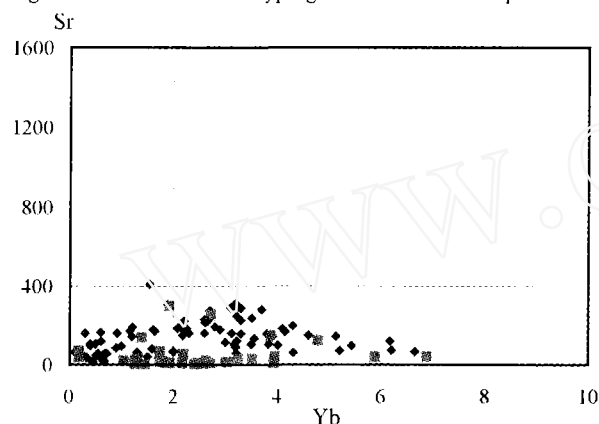


图10 花岗岩的 Sr-Yb 图,展示了若干代表性 S 型花岗岩的分布

菱形-国外的资料 (Schermaier *et al.*, 1997; Jung *et al.*, 2000; Kalsbeek *et al.*, 2001; Waight *et al.*, 2001; Kokonyangi *et al.*, 2004; Gregori *et al.*, 2005); 方块-国内的资料 (陈培荣等, 2000; 廖群安等, 1999; Wang *et al.*, 2001; Li X H *et al.*, 2003)

Fig. 10 Distribution of S-type granites in Sr vs Yb plot

据作者调研,许多 A1 型花岗岩和碱性-过碱性的 A 型花岗岩落入非常低 Sr 高 Yb 范围 (葛文春等, 2001; Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2002; Gregori *et al.*, 2005)。如图 8B 所示,“燕式”REE 分布的 A 型花岗岩的 Sr 含量很少超过 100×10^{-6} , 平均仅 26×10^{-6} , 而 Yb 很高 (最高为 98×10^{-6} , 平均 9.7×10^{-6}), 有明显的负铕异常 (图 5B 之 4)。

4 几类花岗岩在 Sr-Yb 图中的分布

4.1 S 型花岗岩

S 型花岗岩大多是贫 Sr 的 ($Sr < 300 \times 10^{-6}$), Yb 大多在 $1-7 \times 10^{-6}$ 之间, 在 Sr-Yb 图 (图 10) 中大多分布在低 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 区。澳大利亚 Lachlan 褶皱带典型的 S 型花岗

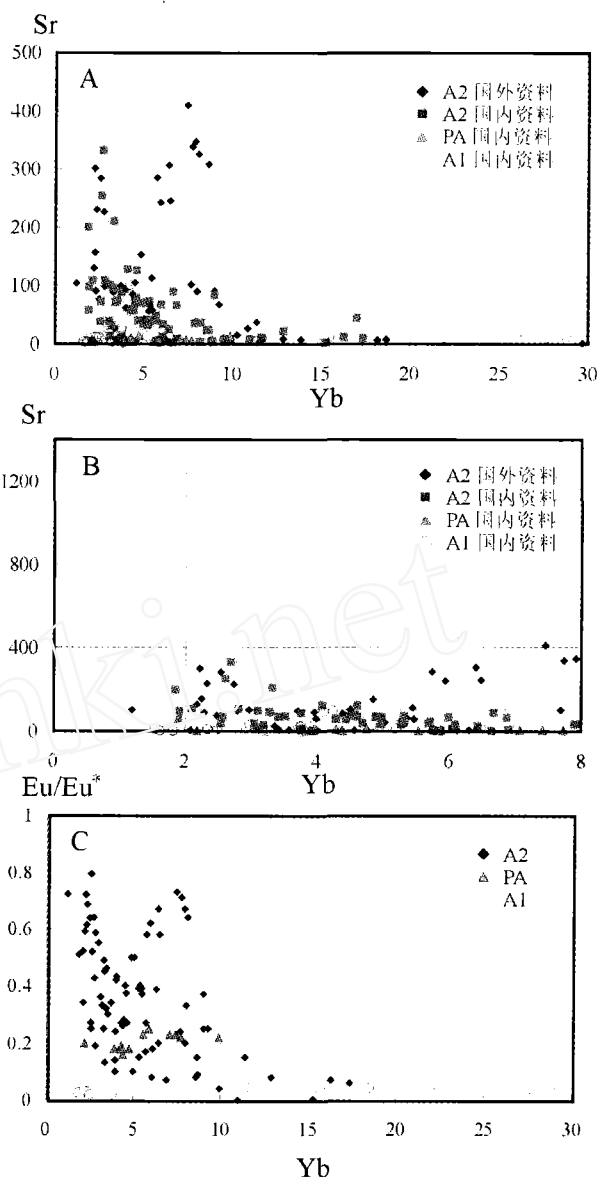


图11 Sr-Yb 图,展示 A 型花岗岩的分布

图 11A 和 B, Sr-Yb 图。A 和 B 图的座标尺度不同,资料来源相同: A1 (葛文春等, 2001; Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2002); A2 (樊金涛, 2000; 范春方和陈培荣, 2000; 姜耀辉和杨万志, 2000; 李献华等, 2002; Wu *et al.*, 2002; 包志伟和赵振华, 2003; 孙德有等, 2004; 张虹等, 2005; 章平和田邦生, 2005; 付建明等, 2005; Kebede and Koeberl, 2003; Tembo *et al.*, 2004; Kahoui and Mahdjou, 2004; Gregori *et al.*, 2005); PA 型花岗岩 (邱检生等, 1996, 2000)。图 11C, Yb-Eu/Eu* 图, 资料来源同上

Fig. 11 Distribution of A-type granites in Sr vs Yb plot

岩具有低 Sr 高 Y 的特征, 估计的形成深度约 $20 \sim 25\text{km}$ (相当于 $5 \sim 7\text{kbar}$) (Healy *et al.*, 2004)。S 型花岗岩的源岩大多是泥质岩, 熔融的温度相对较低 ($< 800^\circ\text{C}$), 且大多与白云母和黑云母的分解有关。S 型花岗岩形成的深度可能与其地球化学特征有关: 若 Yb 含量高, 可能形成的深度较浅; 相反, 若 Yb 含量低, 则形成的深度较大。

4.2 A 型花岗岩

A 型花岗岩在 Sr-Yb 图中主要集中于低 Sr 高 Yb 和非常低 Sr 高 Yb 区(图 11A 和 B)。A 型花岗岩是近 20 年花岗岩研究的热门话题。由于对 A 型花岗岩概念的理解不同,目前,A 型花岗岩的含义和范围似乎有包罗万象之嫌,几乎包容了除 I、S 型以外的各种花岗岩(许保良等,1998)。A 型花岗岩原先是指出现于非造山环境的、碱性和无水特征的花岗质岩石(Loiselle and Wones, 1979),后来发现 A 型花岗岩也可以出现在造山后环境(Whalen *et al.*, 1987, 1996; Sylvester, 1989; Bonin, 1990; Eby, 1992; Nedelec *et al.*, 1995; Pitcher, 1997)。Eby(1990, 1992)将 A 型花岗岩区分为 A1 和 A2 两个亚类,指出 A1 型花岗岩侵位在非造山环境,A2 型花岗岩是后造山的。

本文收集的部分资料表明,A1 和 A2 型花岗岩在 Sr-Yb 图中的区别似乎并不明显,它们统统落入低 Sr 高 Yb 区(图 11A 和 B)。比较而言,A1 型花岗岩的 Sr 含量更低(平均 17×10^{-6}),Yb 含量更高(平均 15.7×10^{-6}),几乎全部落入非常低 Sr 高 Yb 区(图 11A 和 B)。而 A2 型花岗岩则跨低 Sr 高 Yb 和非常低 Sr 高 Yb 两个区(图 11A 和 B,平均的 $Sr = 86 \times 10^{-6}$, $Yb = 6.3 \times 10^{-6}$)。

本次研究收集的 PA 型花岗岩的资料较少,在 Sr-Yb 图中它们的特征与 A2 型花岗岩类似,也落在低 Sr 高 Yb 区(图 11A 和 B),或许 PA 与 A2 型花岗岩具有某些类比性。与 A2 型花岗岩比较,A1 型花岗岩具有非常明显的负铕异常, Eu/Eu^* 通常 < 0.1 ,而 A2 型花岗岩的 Eu/Eu^* 通常在 $0.1 \sim 0.8$ 之间(图 11C)。

A 型花岗岩的形成深度是一个有争论的问题。Patin^o Douce (1997)指出,钙碱性岩浆在上地壳 < 4 kbar 下黑云母的脱水熔融可以形成富 Si 质的 A 型花岗岩。Patin Douce (1999)认为,A 型花岗岩形成在正常或较小的地壳厚度,是低压类型的花岗岩 (< 15 km)。而 Litvinovsky *et al.* (2000, 2002)的熔融实验表明,A 型花岗岩可以形成在陆壳加厚达 60 ~ 70 km 的下地壳底部。King *et al.* (1997)将 A 型花岗岩分为铝质的和碱性-过碱性的两类,他们的研究表明,碱性的 A 型花岗岩负铕异常更明显(图 5B),Sr 含量更低。看来,碱性的 A 型花岗岩大体属于非常低 Sr 高 Yb 型 ($Sr < 100 \times 10^{-6}$, $Eu^* < 0.4$,见:苏玉平和唐红峰,2005,图 2)。

4.3 淡色花岗岩

淡色花岗岩大多位于低 Sr 低 Yb 区,少数落入低 Sr 高 Yb 区(图 6)。淡色花岗岩大多为过铝质的,富 Si 和 K,贫 Ca、Fe 和 Mg,富 LREE、Rb、Ba 和 Th,贫 Hf、Zr、Y 和 Yb,呈现 S 型花岗岩的特征。对于淡色花岗岩的成因有不同的认识,归结起来有如下几种:

(1)淡色花岗岩的地球化学特征主要受副矿物磷灰石和独居石的控制(Ayres and Harris, 1997);

(2)在 LP/HT 条件下由白云母和黑云母脱水熔融形成,来自变质沉积岩(泥质岩)的深熔作用(Harris and Massey, 1994; 邓晋福等,1994,2004; Ayres and Harris, 1997; Patino Douce, 1999; Visona and Lombardo, 2002; 张金阳等,2003; 张宏飞等,2005 及其所引用的文献);

(3)高压成因的(Currie *et al.*, 1998; Neogi *et al.*, 1998; Kotkovii and Harley, 1999; Yang X S *et al.*, 2001)。

对于喜马拉雅淡色花岗岩长期以来的分歧主要在于,它是加厚的双倍地壳底部形成的,还是陆内俯冲带的产物?许多人认为喜马拉雅淡色花岗岩来自俯冲板片顶部泥质岩的部分熔融,形成于 7 ~ 28 km 深度(France-Lanord and Le Fort, 1988; Stephenson *et al.*, 2001; Visona and Lombardo, 2002; 张金阳等,2003)。邓晋福等(1994)认为淡色花岗岩形成于 30 ~ 35 km 深度,与陆内俯冲作用有关。许多人认为,北喜马拉雅和高喜马拉雅中新世淡色花岗岩起因于构造减压作用,由此导致白云母发生脱水反应,诱发了高喜马拉雅结晶岩系的深熔作用(Harris and Massey, 1994; 张金阳等,2003; 张宏飞等,2005 及其所引用的文献)。

淡色花岗岩的源岩为泥质岩,是白云母和黑云母分解形成的。与角闪石分解温度相比,白云母和黑云母的分解温度较低,属于低温花岗岩。因此,如果没有外来热的供给,仅靠地壳加厚的因素,通常地壳加厚达到高压麻粒岩相可能会使变质泥质岩发生部分熔融,形成淡色花岗岩。例如,藏南高喜马拉雅和拉轨岗日地区的淡色花岗岩中已经发现了紫苏辉石暗色麻粒岩、榴闪岩及斜长角闪岩残留体(张金阳等,2003)和高压变质的石榴辉石岩,矿物组合为 Grt + Cpx (富铝) + Rut + Q,斜长石已完全消失,形成温度在 845 ~ 896°C,压力大于 1.2 GPa,已达到榴辉岩相的压力条件(廖群安等,2003)。杨晓松等(2001a, b)对高喜马拉雅地区的黑云斜长片麻岩进行了脱水熔融的实验研究,形成花岗质熔体(淡色花岗岩)后留下的残留相矿物为麻粒岩相组合: Grt + Opx + Ilm(Rut) + Kfs + (Cpx) + Bio + Pl + Qz,压力在 0.8 ~ 1.4 GPa 之间。据刘树文等(2005)研究,源岩变质达到榴辉岩相-高压麻粒岩相(石榴石斜长辉石岩、石榴石二辉麻粒岩和辉石斜长角闪岩组合),压力在 1.35 ~ 1.48 GPa 之间,温度为 625 ~ 675°C,与杨晓松等(2001a, b)和廖群安等(2003)的结果一致,暗示淡色花岗岩形成的压力很大。

淡色花岗岩低 Sr 低 Yb 和具中等的负铕异常(图 5B 之 1),说明残留相可能有石榴石出现,由斜长石-角闪石-辉石-石榴石组成。Sylvester(1989, 1998)指出,高喜马拉雅强过铝质花岗岩属于高压型,原岩是变质泥质岩,形成深度 > 50 km。Kotkovii and Harley(1999)认为,波希米亚的淡色花岗岩是高压下形成的,来自地壳深部,源区为高压麻粒岩,矿物组合为石榴石 + 蓝晶石 + 中条纹长石,推测压力接近 15 kbar。看来,具有低 Sr 低 Yb 特征的花岗岩(包括由变质泥质岩熔融的淡色花岗岩)可能来源于加厚地壳的深部。

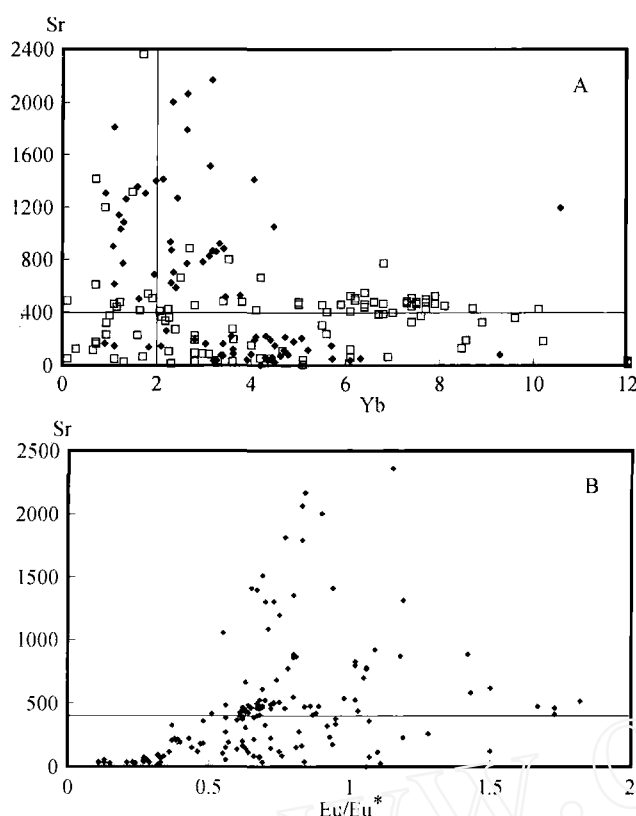


图 12 正长岩的 Sr-Yb 图和 Sr-Eu/Eu* 图

A-Sr-Yb 图。图例: 实心菱形为国内资料: 据杨树峰等, 1996; 林景仟等, 2000; 刘昌实等, 2003; 杨富全等, 2003; 张正伟等, 2003; 秦秀峰等, 2004; Yang *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2005; 周凌和陈斌, 2005。空心方块为国外的资料: Pla' Cid *et al.*, 2000; Teklay *et al.*, 2001; Litvinovsky *et al.*, 2002; Anderson *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2003; Ilbeyli *et al.*, 2004; Lustrino *et al.*, 2005; Lauri *et al.*, 2005。B-Sr-Eu/Eu* 图, 资料来源同图 A

Fig. 12 Distribution of syenites in Sr vs Yb and Sr vs Eu/Eu* plots

4.4 正长岩

正长岩因主要由钾长石组成而富 K (如果条纹长石多还富 Na)。目前, 对于正长岩的成因大体有三种见解:

- (1) 富挥发分的地壳部分熔融、或加厚地壳熔融形成的;
- (2) 交代地幔部分熔融形成的;

(3) 幔源基性岩浆与壳源酸性岩浆混合形成的 (以上引自 Yang J H *et al.*, 2005)。正长岩的 SiO₂ 含量通常较高, 为中性成分的。SiO₂ 较低的正长岩常与基性岩相伴, 显然与地幔成因有关。本文仅涉及偏酸性的正长岩类, 该类正长岩可以分布在 Sr-Yb 图的各个区域, 但主要分布在高 Sr 高 Yb 和低 Sr 高 Yb 区 (图 12A)。

正长岩非常复杂, 通常强烈富集 LILE 和 LREE, K₂O 和 Na₂O 很高又归入 A 型花岗岩类。干的地幔橄榄岩部分熔融通常形成玄武质岩石, 而含水地幔橄榄岩的部分熔融, 在不

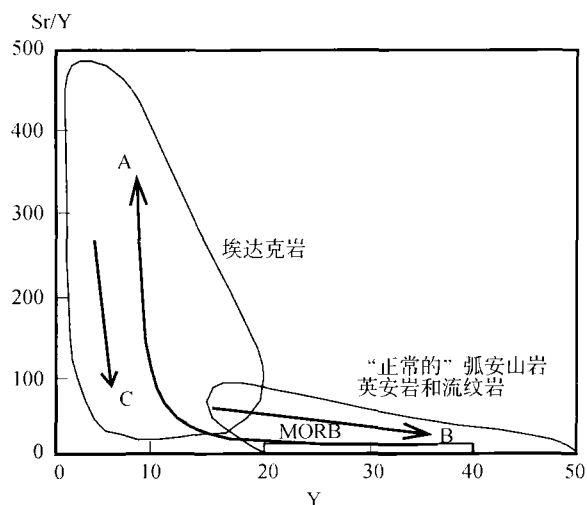
同的条件下可以形成富 SiO₂ 和 MgO 的岩浆 (如玻安岩、赞岐岩和高镁安山岩等) 以及富 SiO₂ 和 K₂O 的岩浆 (如钾玄岩、橄榄安粗岩和正长岩等)。本文搜集的正长岩均是富 SiO₂ 的, 但是, 并不能认为它们统统都是壳源的 (Litvinovsky *et al.*, 2002)。因此, 正长岩的 Sr 和 Yb 给出的信息是否主要与岩浆源区深度有关, 还是一个没有解决的问题。邓晋福等 (Deng *et al.*, 1998; 邓晋福等, 2004) 将正长岩划分为高压和低压的两类, 认为高压正长岩是加厚地壳部分熔融形成的 ($P > 1.5$ GPa), 熔融残余物中无斜长石, 相当于榴辉岩组合, REE 分布无铕异常。而低压 ($P < 1.5$ GPa) 正长岩是由玄武质岩浆结晶分离出斜长石后形成的派生岩浆, 具明显的负铕异常 (邓晋福等, 2004)。Wyllie (1977, 1984; 引自邓晋福等, 2004) 的早期实验研究指出, 在加厚陆壳的底部部分熔融形成的是粗面岩 (正长岩) 而非花岗岩。但是, 最近的实验研究表明, 在加厚地壳底部形成的是花岗质岩浆而非正长岩岩浆, 在所有的实验中 ($P > 15$ kbar, $T > 920^{\circ}\text{C}$) 残留相均有石榴石和辉石出现 (Litvinovsky *et al.*, 2000)。从图 12B 看出, 正长岩的 Sr 与 Eu/Eu* 大体呈正相关, 推测主要受斜长石的控制, 可能反映源区较高的压力。据苏尚国等 (2006) 报道, 北京八达岭蔺家石梁杂岩体中的正长岩具高 Sr 低 Y 及 Eu 正异常, 类似埃达克岩的特征, 推测其可能来源于加厚陆壳的底部。

5 讨论

5.1 Sr 和 Yb 的地球化学行为

花岗质熔体的地球化学组成受熔融温度、压力、源岩性质和残留相矿物组成的制约 (吴福元等, 2002), 不同类型花岗岩之间地球化学特征 (例如 Sr 和 Yb) 的差异可能反映它们熔融温度、压力以及残留相矿物组合的差异, 而 Sr 和 Yb 的地球化学行为以及相关的实验岩石学资料则是本文花岗岩 Sr-Yb 分类的基础。

Sr 对于石榴石和辉石是强不相容元素 (矿物-熔体分配系数 $D \ll 1$), 而 HREE 和 Y 对于石榴石是强相容元素 ($D \gg 1$), 因此, 与石榴石平衡的花岗岩富 Sr, 相应的 Sr/Yb 和 Sr/Y 比值高, 形成于高压环境 (Defant and Drummond, 1990; Rapp *et al.*, 2003; Martin *et al.*, 2005)。Sr 的矿物/熔体分配系数 (K_s) 对于斜长石和钾长石为 13, 对于黑云母为 0.4, 对于石榴石为 0 (引自 Nabelek and Bartlett, 1998)。Martin *et al.* (2005) 指出, 花岗质熔体的 Sr 含量与熔融源区的 Sr 含量以及熔融残留相有关, 且主要受残留相中斜长石的控制, 而斜长石的稳定性主要取决于压力 (Martin *et al.*, 2005)。玄武岩熔融实验表明, 部分熔融程度增加, Sr 和 Sr/Y 比值降低 (Defant and Drummond, 1990, 图 13 的矢量线 A)。斜长石的分离结晶将使 Sr 含量降低 (Ajaji *et al.*, 1998) (图 13 的矢量线 C), 随着斜长石中 Ca 含量的减少 (斜长石牌号降低), Sr 也将明显降低。

图 13 Sr/Y-Y 图 (据 Defant *et al.*, 2002)

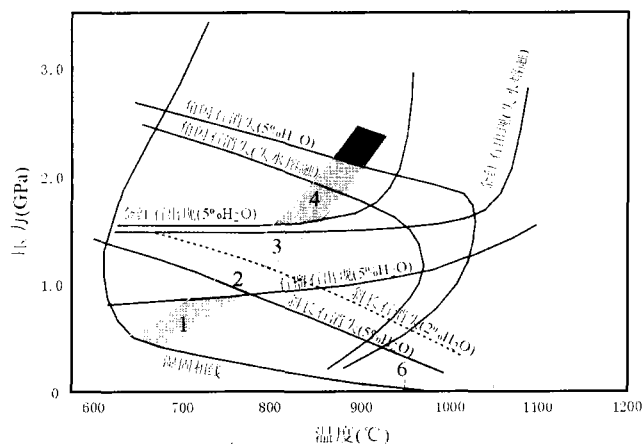
A-榴辉岩作为残留相的 MORB 部分熔融曲线 (箭头指示部分熔融程度减小的方向); B-矿物分离结晶趋势 (橄榄石、斜长石、辉石) (A 和 B 据 Defant *et al.*, 2002); C-中酸性岩中斜长石分离结晶趋势 (Hassanen, 1997; Ajaji *et al.*, 1998)

Fig. 13 Plot of Sr/Y vs Y (Defant *et al.*, 2002)

Yb 是 HREE 的典型代表, HREE (如 Dy, Er 和 Yb) 和 Y 对于石榴石来说是强相容元素 ($D \gg 1$), 地幔橄榄岩所有残留矿物的 Yb 的分配系数 $K_d \ll 1$, 因此, Yb 属于强不相容元素。花岗岩 Yb 主要与源岩成分、副矿物、部分熔融程度及熔融残留相组成有关, 花岗岩中能够容纳 Yb 的矿物有角闪石、石榴石以及副矿物磷钇矿、烧绿石、锆铁钛矿、褐钇铈 (钽) 矿、硅铍钇矿、硅钽钇矿、斜锆石、钛铁钇矿、硅钽钇矿以及钛钽钇矿等 (马吕前, 私人通讯), 因此, 上述矿物从岩浆中的分离必然影响熔体中 Yb 的含量。残留相对于花岗岩 Yb 的控制非常明显, 花岗岩亏损 Yb, 反映受 HREE 分配系数 $K_d > 1$ 的矿物控制, 石榴石是符合这些条件的矿物之一。因此, 石榴石可能是导致花岗岩 REE 强烈分离的最重要的矿物相 (Martin *et al.*, 2005)。

5.2 实验岩石学资料

含水拉斑玄武岩的实验表明, 在不同的温压条件下可能形成具有不同地球化学特征的熔体。从图 14 中看出, 在石榴石出现以前的斜长石稳定范围 (图 14 的 1 区), $< 0.8 \text{ GPa}$ ($650 \sim 800^\circ\text{C}$) 的条件下, 玄武岩熔融的残留相为斜长石 + 角闪石 ± 斜方辉石 ± 钛铁矿 (无石榴石) (吴福元等, 2002; 葛小月等, 2002), 形成的熔体与斜长石和角闪石处于平衡, 具有低 Sr 高 Yb 的特点。在石榴石出现以后和斜长石消失以前 (图 14 的 2 区), 大约 $0.8 \sim 1.3 \text{ GPa}$ ($700 \sim 800^\circ\text{C}$) 条件下, 残留物为石榴石 + 角闪石 + 单斜辉石 ± 斜长石 ± 钛铁矿, 由于石榴石和斜长石共存, 熔体既亏损 Yb, 也亏损 Sr, 形成的岩浆应当具有低 Sr 低 Yb 的特点。在图 14 中, 高 Sr 低 Yb 型花岗岩稳定的压力范围比较大 ($p = 1.2 \sim$

图 14 玄武岩熔融实验 (引自 Xiong *et al.*, 2005)

1 区为斜长石和角闪石稳定区, 熔出的花岗岩具有低 Sr 高 Yb 的特点; 2 区为石榴石 + 斜长石 + 角闪石稳定区 (石榴石出现), 花岗岩具有低 Sr 低 Yb 的特点; 3~5 区为高 Sr 低 Yb 型花岗岩分布区, 其中, 3 区为石榴石 + 角闪石稳定区 (斜长石消失), 4 区为石榴石 + 金红石 + 角闪石稳定区 (金红石出现), 5 区为石榴石 + 金红石稳定区 (角闪石消失)。1~5 区在地壳正常地热增温率下可能可以实现。6 区为斜长石稳定区 (角闪石消失), 处于非常低压和高温条件下, 属于非正常地热梯度, 大体相当于现代洋中脊环境, 形成的花岗岩通常具有非常低 Sr 高 Yb 的特点。

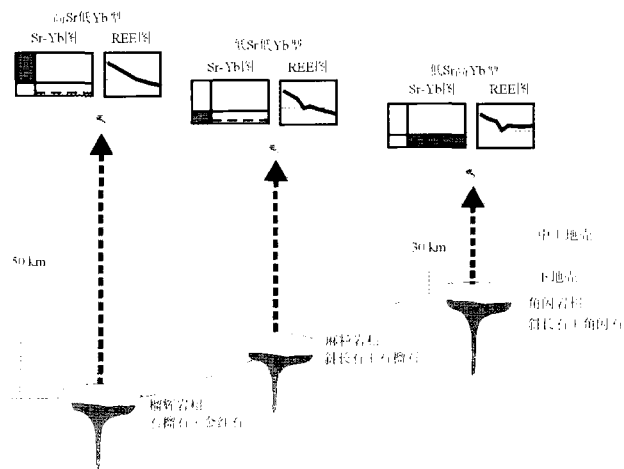
Fig. 14 The partial melting experiments of basalts (Xiong *et al.*, 2005)

图 15 花岗岩类型与地壳厚度关系模式图

图中表明, 在源区组成和部分熔融条件相同的条件下, 不同深度的下地壳部分熔融, 将形成具有不同地球化学特征的花岗岩

Fig. 15 The model of granite types and crustal thickness

$> 2 \text{ GPa}$, $t = 750 \sim 950^\circ\text{C}$), 包括 3~5 区: 其中 3 区为石榴石 + 角闪石稳定区 (斜长石消失), 压力 $> 1.2 \text{ GPa}$; 4 区为石榴石 + 角闪石 + 金红石稳定区 (金红石出现), $> 1.5 \text{ GPa}$; 5 区为石榴石 + 金红石稳定区 (角闪石消失), 视角闪石含水情

况,压力 >1.8 或 >2.2 GPa。因此,根据实验岩石学资料,高 Sr 低 Yb 型花岗岩(埃达克岩)形成的压力至少在 1.2 GPa 以上;如果残留相有金红石和石榴石共同存在(熔体强烈亏损 Nb 和 Ta),压力应当 >1.5 GPa,即大于 50 km 左右的深度(Xiong *et al.*, 2005);如果角闪石消失,压力将 >2 GPa。

与蛇绿岩伴生的 M 型花岗岩是在极低的压力和很高的温度下由辉长岩部分熔融形成的,残留相为辉石 + 斜长石(无角闪石),在图 14 中大体位于斜长石出现和角闪石消失的范围,温度 $>850^{\circ}\text{C}$,压力 <0.5 GPa(图 14 的 6 区)。但是,由于原岩成分、地温梯度以及含水程度的不同,上述相图及花岗岩稳定范围可能发生变化(罗照华等,待刊)。例如,斜长石是花岗岩中主要的富铝矿物, Sr 在其中的分配系数远高于其它矿物,因此,斜长石在相图中的分布对 Sr 有明显地制约作用。根据目前的研究成果,麻粒岩有很宽的压力变化范围(Green and Ringwood, 1967; Holland and Powell, 1998; 引自吴福元等, 2002)。此外,原岩物质组成对斜长石的稳定性也有作用,基性岩中的斜长石稳定压力就比中性岩小得多,因为斜长石容易分解进入高压辉石和石榴石中。而酸性岩由于没有足够多的镁铁质矿物来接受斜长石分解的产物,因而斜长石可以深入到较高压力条件(罗照华等,待刊)。Ringwood (1975) 的实验结果显示, SiO_2 含量较高的岩石,其麻粒岩相稳定的最大压力可显著较高(900°C 时可达 1.9 GPa, 据 Holland and Powell, 1998, 引自吴福元等, 2002)。因此,如果斜长石稳定的压力增加,则相应的熔体(低 Sr 低 Yb 型花岗岩)形成的深度可能相当大。例如,当熔融在含水 2% 的条件下进行时,斜长石消失线的压力增加,2 区和 6 区范围将适当扩大(图 14)。如果在无水条件下,斜长石的稳定压力甚至可以接近 2 GPa(900°C) (Holland and Powell, 1998)。

上述实验资料可以用图 15 的模式简单地予以表述:如果假定花岗岩熔融的源区成分相同,部分熔融条件相当,则在不同压力条件下将会形成具有不同地球化学特征的花岗岩。地壳厚的(例如 >50 km),留下的残留相为石榴石 + 辉石 + 金红石(榴辉岩相),形成高 Sr 低 Yb 型花岗岩(图 15 左);地壳薄的(约 30 km 左右),残留相为斜长石 + 角闪石 + 辉石(角闪岩相),熔体与斜长石处于平衡(无石榴石),形成低 Sr 高 Yb 型花岗岩(图 15 右);地壳厚度中等,残留相为斜长石 + 角闪石 + 石榴石(麻粒岩相),熔体与石榴石和斜长石处于平衡,形成低 Sr 低 Yb 型的花岗岩(图 15 中间的情况)。当然,这只是理想化的模式,具体野外情况可能不会这样简单。

5.3 花岗岩与压力的关系

许多现象说明,花岗岩可以形成在加厚地壳的深部很高的压力下(15 ~ 20 kbar, 据 Litvinovsky *et al.*, 2000 及其所附的参考文献)。Patino Douce (1999) 研究了各类花岗岩,认为花岗岩之所以存在不同,可能与熔融的源区组成和压力有关。在低压和源岩为变质泥质岩情况下,形成 S 型花岗岩;

而高压和低 Al 的变质杂砂岩的地壳组分有利于形成科迪勒拉型过铝质花岗岩。他指出,花岗岩熔融后留下的相应的镁铁质堆晶岩,在低压下为斜方辉石 + 斜长石组合,在高压下为单斜辉石 + 石榴石组合。近年来的研究表明,不仅变沉积岩在低压下(<1 GPa)部分熔融可以产生过铝花岗岩浆,而且长英质火成岩和变沉积岩发生高压(>2 GPa)熔融作用也可以衍生出过铝的 A 型花岗岩(Patino Douce and McCarthy, 1998; 林广春和吕昌前, 2003)。

综上所述,按照残留相组成和花岗岩地球化学特征,大体可以将花岗岩形成的压力分为 4 个级别:

(1) 高压下,残留相为榴辉岩,组成矿物为石榴石 + 辉石 + 金红石(无斜长石);与其平衡的花岗岩具有高 Sr 低 Yb 的特点(图 4),无铕异常或有弱的负铕异常(图 5A),在玄武岩熔融相图中落入图 14 中的 3 ~ 5 区,相应的模式见图 15 左。各种资料表明,石榴石稳定出现的压力至少 >0.8 - 1 GPa, >1.5 GPa 时出现金红石(Xiong *et al.*, 2005)。

(2) 中等压力下,石榴石仍然存在,斜长石开始出现,残留相为麻粒岩(斜长石 + 石榴石 + 角闪石 + 辉石);花岗岩表现为低 Sr 低 Yb 的特点(图 6),具中等的负铕异常(图 5B 之 1),在相图中落入石榴石 + 斜长石稳定区(图 14 的 2 区),相应的模式为图 15 中间的情况。

(3) 低压下,斜长石和角闪石稳定存在(无石榴石),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(图 8),有中等或弱的负铕异常(图 5B 之 3),在相图中落入斜长石稳定区(图 14 的 1 区和图 15 右)。

(4) 非常低 Sr 高 Yb 的压力范围我们还不清楚。“燕式”REE 分布的 A 型花岗岩大多处于非常低 Sr 高 Yb 区,它们形成的压力是否低于非“燕式”REE 分布的 A 型花岗岩,我们也不能肯定。但是,至少可以认为,与蛇绿岩有关的、在洋壳剖面浅部、由辉长岩部分熔融形成的、具有非常低 Sr 高 Yb 特征的 M 型花岗岩,应当是在非常低压条件下形成的(图 14 的 6 区,压力 <0.5 GPa)。这种 M 型花岗岩熔融后留下的残留相仍然由辉长岩组成(斜长石 + 辉石)。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 处,在这个部位形成的 M 型花岗岩具有非常低 Sr 高 Yb 的特点(图 9),可能代表了非常低压(和高温)条件下形成的花岗岩。

综上所述,从非常低 Sr 高 Yb 型 → 低 Sr 高 Yb 型 → 低 Sr 低 Yb 型 → 高 Sr 低 Yb 型花岗岩,其源区深度可能是逐渐增加的,如果源区性质和其它条件相当的话(图 14 和 15)。上述现象可归纳在 Sr-Yb 图中(图 16)。图 16 有两条曲线,其中曲线 A 代表钠质系列的演化趋势,从低 Sr 高 Yb 型 → 低 Sr 低 Yb 型 → 高 Sr 低 Yb 型,压力逐渐增加;曲线 B 为钾质系列(正长岩、钾玄岩)的演化趋势,从低 Sr 高 Yb 型 → 高 Sr 高 Yb 型 → 高 Sr 低 Yb 型,压力逐渐增加。中国东部 C 型埃达克岩虽然富钾,但是,并非以正长岩和钾玄岩为特征,仍然属于钠质系列(张旗等, 2001)。

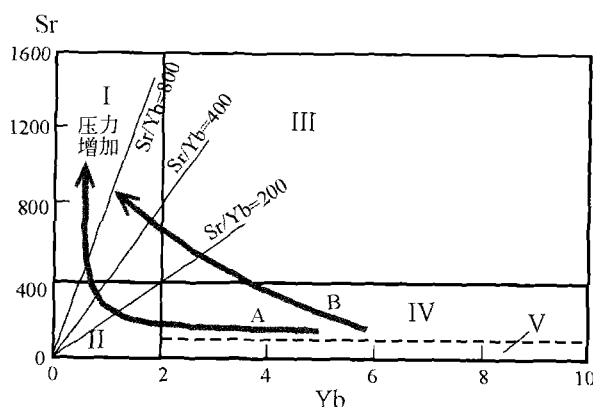


图 16 花岗岩类型与压力的关系

压力的增加有两条路径: A 为钠质系列, 从低 Sr 高 Yb 型→低 Sr 低 Yb 型→高 Sr 低 Yb 型, 压力逐渐增加; B 为钾质系列(正长岩、钾玄岩), 从低 Sr 高 Yb 型→高 Sr 高 Yb 型→高 Sr 低 Yb 型压力逐渐增加

Fig. 16 The relationship between granite types and pressures

5.4 几点思考

本文的研究表明, 花岗岩按照 Sr-Yb 的分类, 在一定条件下可能对于判断花岗岩源区深度是一个有效的方法。但是, 许多问题仍然不清楚:

(1) Sr 和 Yb 在花岗岩中的行为受什么因素制约? 压力、温度、主要造岩矿物、副矿物、分离结晶、部分熔融、混合作用以及水和挥发分等有什么影响? 在什么条件下, 哪些是主要的?

(2) 花岗岩按照压力的分类是否合适? 浅色花岗岩大多分布在低 Sr 低 Yb 区, 高 Sr 高 Yb 区主要为正长岩和钾玄岩, 是否受源区岩性控制? 高 Sr 高 Yb 型花岗岩的成因及其地球动力学意义是什么?

(3) 花岗岩的 Sr-Yb 分类表明, 地球化学方法可能是一个有效的花岗岩分类的方法。但是, 地球化学在花岗岩中的应用应当是有限度和有条件的, 至少, 与玄武岩相比, 将地球化学方法应用于花岗岩应当十分小心。

6 结论

花岗岩分类的方法很多, 几十年来, 许多作者从不同的角度进行了探索(见: Barbarin, 1999, 及其所附的参考文献)。本文以 Sr 和 Yb 为主要指标, 铕异常为次要指标, 将上述指标与花岗岩熔融的源区残留相结合, 着重探讨了中酸性岩浆与其形成压力(深度)的关系, 得出如下初步认识:

(1) 高 Sr 低 Yb 型可能是在高压下形成的, 因为, 残留相有石榴石出现, 至少, 与低 Sr 高 Yb 型(残留相无石榴石, 有斜长石)比较, 前者的压力高。其形成深度至少大于 40km(与石榴石平衡), 一般来说可能大于 50km(与石榴石+金红石平衡)。

(2) 低 Sr 低 Yb 型花岗岩可能是在中等压力下形成的。以藏南具低 Sr 低 Yb 特征的浅色花岗岩为例, 估计其压力至少 > 0.8 GPa, 相应的形成深度为 30km, 实验已经接近 1.5 GPa, 因此, 其极限深度可能接近 50km。

(3) 高 Sr 高 Yb 型花岗岩, 如果无明显的负铕异常, 可能是在中等或较高的压力下形成的。正长岩特别富 LILE、K 和 HFSE, 可能与挥发分的大量加入有关。

(4) 低 Sr 高 Yb 型花岗岩, 与其平衡的是斜长石和角闪石, 说明形成的压力较低(< 0.8 或 1.0 GPa), 可能是在正常地壳厚度下形成的(30km 左右)。

(5) 非常低 Sr 高 Yb 型花岗岩, 形成的压力可能非常低(< 0.5 GPa), 至少产于洋盆扩张脊的具有非常低 Sr 高 Yb 特征的斜长花岗岩形成的深度可能是非常低的(< 5km)。

花岗岩是大陆地壳的主要组成, 其化学组成和成因(与玄武岩相比)格外复杂, 不可能用一或两种方法简单概括之。岩浆与深度(压力)的关系是令人感兴趣的问题, 但是, 还有太多的问题需要研究。源区物质组成、岩浆结晶分离作用和岩浆混合作用对花岗岩中 Sr 和 Yb 的行为有多大的影响还不清楚。我们必须反复斟酌, 不断探索, 以求接近花岗岩的真实。限于作者的水平, 我们只是根据部分资料作了一些尝试性的探索, 得出了一些粗浅的认识。为了得到经得起考验的结论, 还需要更多资料的积累, 更多理论的探讨和更多实验的佐证。作者真诚地欢迎大家的批评和指正。

致谢 本文酝酿和撰写时, 与吴福元和郭敬辉研究员交换过意见; 熊小林研究员、罗照华教授、肖龙教授、王强、杨进辉和汪洋副研究员对本文初稿提出了许多建设性的意见; 罗照华教授提供了未发表的资料, 实验岩石学一节是在他的建议下增加的, 并得到他和熊小林研究员的帮助; 两位审稿人提出了许多好的意见, 作者在此一并表示衷心的感谢。

References

- Ajaji T, Weis D, Giret A, Bouabdellah M. 1998. Coeval potassic and sodic calc-alkaline series in the post-collisional Hercynian Tannacherfi intrusive complex, northeastern Morocco: geochemical, isotopic and geochronological evidence. *Lithos*, 45: 371–393
- Alabaster T, Pearce J A, Malpas J. 1982. The volcanic stratigraphy and petrogenesis of the Oman ophiolite complex. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81: 168–183
- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50: 51–73
- Anderson I C, Frost C D, Frost B R. 2003. Petrogenesis of the Red Mountain pluton, Laramie anorthosite complex, Wyoming: implications for the origin of A-type granite. *Precambrian Research*, 124: 243–267
- Askren D R, Roden M F, Whitney J A. 1997. Petrogenesis of Tertiary Andesite Lava Flows Interlayered with Large-Volume Felsic Ash-Flow Tuffs of the Western USA. *Journal of Petrology*, 38: 1021–1046

- Auwers J V, Bogaerts M, Liegeois J P, Demaiffe D, Wilmar E, Bolle O, Duchesne J C. 2003. Derivation of the 1.0–0.9 Ga ferro-potassic A-type granitoids of southern Norway by extreme differentiation from basic magmas. *Precambrian Research*, 124: 107–148
- Ayres M, Harris N. 1997. REE fractionation and Nd-isotope disequilibrium during crustal anatexis: constraints from Himalayan leucogranites. *Chemical Geology*, 139: 249–269
- Bao Z W, Zhao Z H. 2003. Geochemistry and tectonic setting of the Fugang aluminous A-type granite, Guangdong Province, China—a preliminary study. *Geology-Geochemistry*, 31: 52–61 (in Chinese with English abstract)
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605–626
- Bogaerts M, Scailliet B, Liegeois J P, Auwers J V. 2003. Petrology and geochemistry of the Lyngdal granodiorite (Southern Norway) and the role of fractional crystallisation in the genesis of Proterozoic ferro-potassic A-type granites. *Precambrian Research*, 124: 149–184
- Bonin B. 1990. From orogenic to anorogenic settings: evolution of granitoid suites after a major orogenesis. *Geol. J.* 25: 261–270
- Borsi L, Schiirer U, Gaggero L, Crispini L. 1996. Age, origin and geodynamic significance of plagiogranites in the ophiolites and gabbros of the Piedmont-Ligurian ocean basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 140: 227–241
- Cai J H, Yan G H, Chang Z S, Wang X F, Shao H X, Chu Z Y. 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wanganzhen complex and discussion on its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 81–92 (in Chinese with English abstract)
- Cai J H, Yan G H, Mu B L, Pan X, Song B, Li F T. 2005. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Pb isotopic compositions and trace element of Fangshan complex in Beijing and their petrogenesis significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 776–788 (in Chinese with English abstract)
- Cai M H, Liang T, Wu D C, Huang H M. 2004. Geochemical characteristics of granites and their tectonic setting of Dachang ore field in Guangxi. *Geological Science and Technology Information*, 23: 57–62 (in Chinese with English abstract)
- Castro A, Patino A. E., Corretge L. G. *et al.* 1999. Origin of peraluminous granites and granodiorites, Iberian massif (Spain): and experimental test of granite petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 135: 255–276
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173–174
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 83: 1–26
- Chen B, Zhai M G, Shao J A. 2003. Petrogenesis and significance of the Mesozoic North Taihang complex: Major and trace element evidence. *Science in China (D)*, 46: 941–953
- Chen H W, Luo Z H, Mo X X, Liu C D, Ke S. 2005. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt. *Geology in China*, 32: 386–395 (in Chinese with English abstract)
- Chen H W, Luo Z H, Mo X X, Liu C D, Ke S. 2005. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt. *Geology in China*, 32: 386–395 (in Chinese with English abstract)
- Chen P R, Fan C F, Kong X G, Zhang B T. 2000. Characteristics of igneous rocks in uranium district No. 6710 and their tectonic and geochemical metallogenic significance. *Uranium Geology*, 16: 334–342 (in Chinese with English abstract)
- Chen P R, Zhou X M, Zhang W L, Li H M, Sun T. 2005. Petrogenesis and significance of early Yanshanian syenite-granite complex in eastern Nanling Range. *Science in China Series (D)*, 48: 912–924
- Chen Y X, Chen W J. 1997. Mesozoic Volcanic Rocks in Western Liaoning Province and Surrounding Area—Geochronology, Geochemistry and Tectonic Environment. Beijing: Seis. Publ.
- House, 1–279 (in Chinese with English abstract)
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1980. Nature and origin of A-type granites with particular reference to south-eastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80: 189–200
- Currie K L, Whalen J B, Davis W J, Longstaffe F J, Cousens B L. 1998. Geochemical evolution of peraluminous plutons in southern Nova Scotia, Canada—a pegmatite-poor suite. *Lithos*, 44: 117–140
- Davis G A. 2003. The Yanshan belt of north China: tectonics, adakitic magmatism, and crustal evolution. *Earth Sciences Frontiers*, 10: 373–384
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Defant M J., Xu J F., Kepezhinskas P., Wang Q., Zhang Q., Xiao L. 2002. Adakites: some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 129–142
- Deng J F, Luo Z H, Zhao H L. 1998. Trachyte and syenite: petrogenesis constrained by the petrological phase equilibrium. *Coll. Works Int'l Symp. Geol. Sci., Peking Univ. Seism. Press, Beijing*, 745–757
- Deng J F, Zhao H L, Lai S C, Liu H X, Luo Z H. 1994. Generation of muscovite/two-mica granite and intracontinental subduction. *Earth Science*, 19: 139–147 (in Chinese with English abstract)
- Dini A, Gianelli G, Puxeddu M, Ruggieri G. 2005. Origin and evolution of Pliocene-Pleistocene granites from the Larderello geothermal field (Tuscan Magmatic Province, Italy). *Lithos*, 81: 1–31
- Dong S B, Tian W. 2004. The nomenclature, characteristics and petrogenesis of adakite. *Earth Science Frontiers*, 11: 585–594 (in Chinese with English abstract)
- Duan Z M, Li Y, Zhang Y, Li Y L. 2005. Zircon U-Pb age, continent dynamics significance and geochemical characteristics of the Mesozoic and Cenozoic granites from the Tanggula Range in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 79: 88–97 (in Chinese with English abstract)
- Eby, G. N. 1990. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26: 115–134
- Eby, G. N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641–644
- Fan C F, Chen P R. 2000. Geochemical characteristics and tectonic implication of Beitou A-type granitic intrusive in South Jiangxi Province. *Geochimica*, 29: 358–366 (in Chinese with English abstract)
- Fan J T. 2000. Genetic type and age of the protolith of the Niushan granite gneiss from northern Jiangsu and its geologic significance. *Progress in Precambrian Research*, 23: 213–220 (in Chinese with English abstract)
- Floyd P A, Yaliniz M K, Goncuoglu M C. 1998. Geochemistry and petrogenesis of intrusive and extrusive ophiolitic plagiogranites, Central Anatolian Crystalline Complex, Turkey. *Lithos*, 42: 225–241
- France-Lanord C, Le Fort P. 1988. Crustal melting and granite genesis during the Himalayan collision orogenesis. *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 79: 197–207
- Fu J M, Ma C Q, Xie C F, Zhang Y M, Peng S B. 2005. Ascertainment of the Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings. *Geochimica*, 34: 215–226 (in Chinese with English abstract)
- Gamble J A, Wood C P, Price R C, Smith I E M, Stewart R B, Waight T. 1999. A fifty year perspective of magmatic evolution on Ruapehu Volcano, New Zealand: verification of open system behaviour in an arc volcano. *Earth and Planetary Science Letters*, 170: 301–314
- Ge L S, Zou Y L, Li Z H, Zhang X J, Huang H, Li X M, Ma J W. 2003. Geochemistry and genetic discussion of the granite in Bengnangzangbu and Jiagang area, Tibet. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23: 55–61 (in Chinese with English abstract)
- Ge W C, Li X H, Lin Q, Sun D Y, Wu F Y, Yin C X. 2001. Geochemistry of Early Cretaceous alkaline rhyolites from Hulun lake, Daxing'anling and its tectonic implications. *Chinese Journal of*

- Geology, 36: 176–183 (in Chinese with English abstract)
- Ge W C, Lin Q, Sun D Y, Wu F Y, Li X H. 2000. Geochemical research into origin of two types of Mesozoic rhyolites in Daxing'anling. *Earth Science*, 25: 172–178 (in Chinese with English abstract)
- Ge X Y, Li X H, Chen Z G, Li W P. 2002. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: Constrains on crustal thickness. *Chinese Science Bulletin*, 47: 961–968
- Gregori D A, Lopez V L, Grecco L E. 2005. A Late Proterozoic-Early Paleozoic magmatic cycle in Sierra de la Ventana, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 19: 155–171
- Griffin T J, Page R W, Sheppard S, Tyler I M. 2000. Tectonic implications of Palaeoproterozoic post-collisional, high-K felsic igneous rocks from the Kimberley region of northwestern Australia. *Precambrian Research*, 101: 1–23
- Grigoriev S I, Pshenichny C A. 1998. Late Mesozoic post-collisional intermediate to silicic magmatism in the Badkhal area, Far East of Russia. *Lithos*, 45: 457–468
- Gu M G. 2003. Geochemical study on volcanic rocks of the Moshishan Group in Yantou region of southeast Zhejiang. *Geology and Mineral Resources of South China*, (4): 24–30 (in Chinese with English abstract)
- Guillot S, Le Fort P. 1995. Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites. *Lithos*, 35: 221–234
- Guimaraes I P, da Silva Filho A F. 2000. Evidence of multiple sources involved in the genesis of the Neoproterozoic Itapetim granitic complex, NE Brazil, based on geochemical and isotopic data. *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 561–586
- Harris N and Massey J. 1994. Decompression and anatexis of Himalayan metapelites. *Tectonics*, 13: 1537–1546
- Hassanen M A. 1997. Post-collision, A-type granites of Homrit Wagat Complex, Egypt: petrological and geochemical constraints on its origin. *Precambrian Research*, 82: 211–236
- He Z H, Yang D M, Zheng C Q, Huang Y C. 2005. Geochemistry of the Indosinian granitoids in the Manda area, Gangdise belt, Tibet and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 24: 354–359 (in Chinese with English abstract)
- Healy B, Collins W J, Richards S W. 2004. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: the Murrumbidgee Batholith example. *Lithos*, 78: 197–216
- Heumann A, Davies G R. 1997. Isotopic and chemical evolution of the Post-Caldera rhyolitic system at Long valley, California. *Journal of Petrology*, 38: 1661–1678
- Holland T J B, Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *J. Metamorphic Geol.*, 16: 309–343
- Hollocher, Bull J, Robinson P. 2002. Geochemistry of the metamorphosed Ordovician Taconian magmatic arc, Bronson Hill anticlinorium, western New England. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 5–45
- Hou Z Q, Gao Y F, Meng X J, Qu X M, Huang W. 2004. Genesis of Adakitic porphyry and Tectonic Controls on the Gangdese Miocene Porphyry Copper Belt in the Tibetan Orogen. *Acta petrologica sinica*, 20: 239–248
- Huang S S, Xu Z W, Gu L X, Hua M, Lu X C, Lu J J, Nie G P, Zhu S P. 2004. A discussion on geochemical characteristics and genesis of intrusions in Shizishan orefield, Tongling area, Anhui Province. *Geological Journal of China Universities*, 10: 217–226 (in Chinese with English abstract)
- Huang W L, Wyllie P J. 1981. Phase relationships of S-type granite with H_2O to 35 kbar: muscovite granite from Harney Peak, South Dakota. *J. Geophys. Res.*, 86: 10515–10529
- Ilbeyli N, Pearce J A, Thirlwall M F, Mitchell J G. 2004. Petrogenesis of collision-related plutonics in Central Anatolia, Turkey. *Lithos*, 72: 163–182
- Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27: 293–305
- Jahn B M, Wu F Y, Capdevila R, Martineau F, Zhao Z H, Wang Y X. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59: 171–198
- Jian P, Liu D Y, Zhang Q, Zhang F Q, Shi Y R, Shi G H, Zhang L Q, Tao H. 2003. SHRIMP dating of ophiolite and leucocratic rocks within ophiolite. *Earth Science Frontiers*, 10: 439–456 (in Chinese with English abstract)
- Jiang Y H, Guo K Y, He J R, Rui X J, Yang W Z. 1999. Geochemistry and rock series of quartz monzonite intrusion in west-side of Datong on Qinghai-Xizang Plateau. *Geochimica*, 28: 542–550 (in Chinese with English abstract)
- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, Zhou X R, Rui X J, Yang W Z. 2002. Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: implications for granitoid geneses. *Lithos*, 63: 165–187
- Jiang Y H, Rui X J, Guo K Y, He J R. 2000. Geochemistry of Oytang granite and its tectonic significance in Qinghai-Xizang Plateau. *Geochimica*, 29: 259–262 (in Chinese with English abstract)
- Jiang Y H, Yang W Z. 2000. Discovery of A-type granite zone and its geodynamic significance in the western Kunlun Mts., China. *Geological Review*, 46: 235–244 (in Chinese with English abstract)
- Johnson J A, Gruner A L. 2000. The making of intermediate composition magma in a bimodal suite: Duck Butte Eruptive Center, Oregon, USA. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95: 175–195
- Jung S, Hoernes S, Mezger K. 2000. Geochronology and petrogenesis of Pan-African, syn-tectonic, S-type and post-tectonic A-type granite Namibia: products of melting of crustal sources, fractional crystallization and wall rock entrainment. *Lithos*, 50: 259–287
- Jung S, Mezger K, Hoernes S. 1998. Petrology and geochemistry of syn- to post-collisional metaluminous A-type granites—a major and trace element and Nd Sr Pb O-isotope study from the Proterozoic Damara Belt, Namibia. *Lithos*, 45: 147–175
- Kahoui K, Mahdjou Y. 2004. An Eburnian alkaline peralkaline magmatism in the Reguibat rise: the Djebel Drissa ring complex (Eglaib Shield, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 39: 115–122
- Kalsbeek F, Jepsen H F, Jones K A. 2001. Geochemistry and petrogenesis of S-type granites in the East Greenland Caledonides. *Lithos*, 57: 91–109
- Kaur G, Mehta P K. 2005. The Gothara plagiogranite: evidence for oceanic magmatism in a non-ophiolitic association, North Khetri Copper Belt, Rajasthan, India? *Journal of Asian Earth Sciences*, 25: 805–819
- Kay R W, Kay S M. 2002. Andean adakites: three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 303–311
- Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesite: melts from subducted Pacific ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4: 117–132
- Kebede T, Koeberl C. 2003. Petrogenesis of A-type granitoids from the Wallagga area, western Ethiopia: constraints from mineralogy, bulk-rock chemistry, Nd and Sr isotopic compositions. *Precambrian Research*, 121: 1–24
- Kokonyangi J, Armstrong R, Kampunzu A B, Yoshida M, Okudaira T. 2004. U-Pb zircon geochronology and petrology of granitoids from Mitwaba (Katanga, Congo): implications for the evolution of the Mesoproterozoic Kibaran belt. *Precambrian Research*, 132: 79–106
- Kotkovii J, Harley S L. 1999. Formation and evolution of high-pressure leucogranulites: experimental constraints and unresolved issues. *Phys. Chem. Earth (A)*, 24: 299–304
- Lauri L S, Rämö O T, Huhma H, Manton S M, Raasinen J. 2006. Petrogenesis of silicic magmatism related to the ~ 2.44 Ga rifting of Archean crust in Koillismaa, eastern Finland. *Lithos*, 86: 137–166
- Lee S R, Cho M, Cheong C S, Kim H, Wingate M T D. 2003. Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South

- Korea. *Precambrian Research*, 122: 297–310
- Li C D, Zhang Q, Miao L C, Meng X F. 2004. Mesozoic high-Sr, low-Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei Province: geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 269–284 (in Chinese with English abstract)
- Li C W, Wang Y J, Guo F, Peng P T, Yu X B. 2002. Geochemistry of Late Mesozoic volcanic rocks in Rucheng area and its implication for the source nature. *Geotectonica et Metallogenia*, 26: 354–362 (in Chinese with English abstract)
- Li W P, Li X H, Lu F X. 2001a. Genesis and geological significance for the middle Jurassic High Sr and lower Y type volcanic rocks in Fuxin area of West Liaoning, northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 523–532 (in Chinese with English abstract)
- Li W P, Li X H. 2004. Petrogenesis and its implications for the middle-late Jurassic intermediate-acidic volcanic rocks in the middle section of Yanshan orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 501–510 (in Chinese with English abstract)
- Li W P, Lu F X, Li X H, Zhou Y Q, Sun S P, Li J Z, Zhang D G. 2001b. Geochemical features and origin of volcanic rocks of Tiaojishan Formation in Western Hills of Beijing. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17: 123–133. (in Chinese with English abstract)
- Li W P, Lu F X, Sun S P, Li J Z. 2000. Discussion on the origin of volcanic rocks of Donglingtai Formation in Beijing Xishan Mountain and its geological setting. *Acta Petrologica Sinica*, 16: 345–352
- Li W X, Li X H. 2003. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China: geochemical and Nd isotopic evidence. *Precambrian Research*, 112: 29–44
- Li W X, Li X H. 2003. Rock types and tectonic significance of the granitoid rocks within ophiolites. *Advance in Earth Sciences*, 18: 392–397 (in Chinese with English abstract)
- Li W X, Li X H. 2004. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, south China-geochemical and Nd isotopic evidence. *Geological Journal of China University*, 10: 199–208 (in Chinese with English abstract)
- Li X H, Li Z X, Ge W C, Zhou H W, Li W X, Liu, Wingate M T D. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, 122: 45–83
- Li X H, Zhou H W, Li Z X, Liu Y. 2002. Petrogenesis of Neoproterozoic bimodal volcanics in western Sichuan and its tectonic implications: geochemical and Sm-Nd isotopic constraints. *Chinese Journal of Geology*, 37: 264–276 (in Chinese with English abstract)
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 293–305
- Li X Y, Guo J, Fan W M, Wang Y J, Li C W. 2004. Early Cretaceous trachytes of Donglingtai Formation from the Xishan area in the northern North China block: constraints on melting of lower mafic crust. *Geotectonica et Metallogenia*, 28: 155–164 (in Chinese with English abstract)
- Liao Q A, Li C N, Wang J M. 1999. Characteristics and geological significance of S-type acid volcanic rocks in Late Jurassic along Jiangshao rift zone. *Earth Science*, 24: 63–68 (in Chinese with English abstract)
- Liao Q A, Li D W, Yi S H, Lu L. 2003. Petrologic and geologic significance of garnet pyroxenite and mafic granulites from high Himalayan region, Tibet. *Earth Science*, 28: 627–633 (in Chinese with English abstract)
- Lin G C, Ma C Q. 2003. Genesis of peraluminous granitoids and their tectonic settings. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 65–70 (in Chinese with English abstract)
- Lin J Q, Wei D J, Tan D J, San X L, Jin H. 2000. Geochemistry and genesis of Proterozoic syenite mass in Kuangdonggou-Liangtun, Liaoning province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19: 19–26 (in Chinese with English abstract)
- Lin Q, Ge W C, Wu F Y, Sun D Y, Cao L. 2004. Geochemistry of Mesozoic granites in Da Hingan Ling range. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 403–412 (in Chinese with English abstract)
- Litvinovsky B A, Jahn B M, Zandvilevich A N, Saunders A, Poulain S, Kuzmin D V, Reichow M K, Titov A V. 2002. Petrogenesis of syenite granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia): implications for the origin of A-type granitoid magmas. *Chemical Geology*, 189: 105–133
- Litvinovsky, B. A., Steel, I. M., Wickham, S. M., 2000. Silicic magma formation in overthickened crust: melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar. *J. Petrol.* 41: 717–737
- Liu C S, Chen X M, Wang R C, Hu H, Wang D Z. 2003. Characteristic and origin of the Shiling sodalite syenite, Conghua city, Guangdong province. *Geological Review*, 49: 28–39 (in Chinese with English abstract)
- Liu D Y, Jian P, Zhang Q, Zhang F Q, Shi Y R, Shi G H, Zhang L Q, Tao H. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77: 317–327 (in Chinese with English abstract)
- Liu H T, Zhang Q, Liu J M, Ye J, Zeng Q D, Yu C M. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits: a possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessment. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 205–218
- Liu S W, Zhang J J, Shu G M, Li Q C. 2005. Mineral chemistry, P-T-t paths and exhumation processes of mafic granulites in Dinggye, Southern Tibet. *Science in China (D)*, 48: 1870–1881
- Liu W B, Liu Z H, Zhang S J. 2003. Geological and geochemical features of Shangcheng granite body and its genetic implication, Henan. *Geology and Mineral Resources of South China*, (4): 17–23. (in Chinese with English abstract)
- Liu W, Siebel T W, Lia X J, Pan X F. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating. *Chemical Geology*, 21: 95–35
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geol. Soc. Am. Abstr. Prog.*, 11: 468
- Lustrino M, Melluso T L, Brotzu P, Gomes C B, Morbidelli L, Muzio R, Ruberti E, Tassinari C C G. 2005. Petrogenesis of the early Cretaceous Valle Chico igneous complex (SE Uruguay): Relationships with Parana Etendeka magmatism. *Lithos*, 82: 407–434
- Ma C Q, Yang K G, Ming H L, Lin G C. 2003. The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: Evidence from Mesozoic granites. *Science in China Series (D)*, 47: 453–462
- Ma C Q, Yang K G, Tang Z H. 1994. *Magma-Dynamics of Granitoids-Theory, Method and a Case Study of the Eastern Hubei Granitoids*. Wuhan: Press Chinese University of Geosciences, 1–260 (in Chinese with English abstract)
- Ma C Q, Yang K G, Xu C H. 1999. Mesozoic potassic magmatism in the Dabie Mountains: implication for exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic terranes. *Acta Petrol. Sinica*, 15: 379–395 (in Chinese with English abstract)
- Ma F, Mu Z G, Liu Y L. 2003. Fangshan intrusion, Beijing: constraints from trace and rare earth elements as well as Sr-isotope composition. *Acta Geoscience Sinica*, 24: 105–110 (in Chinese with English abstract)
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101: 635–643
- Mao D B, Chen Z h, Zhong C T, Zuo Y C Sgi S, Hu X D. 2003. Studies on the geochronology and geochemical characteristics of Mesozoic intrusions in Beichagoumen area, northern Hebei province. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 661–674 (in Chinese with English abstract)
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J-F, Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1–24
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- Meng F C, Xu Z Q, Zhang Z M, Liu F L. 2003. Geochemical

- characteristics of the Mesozoic post-collisional granites in northern Jiangsu, China and their geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 77: 567–576
- Miao L C, Fan W M, Zhai M G, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the granitoid intrusions from Jinchanggouliang-Erdaogou gold Orefield and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 71–80 (in Chinese with English abstract)
- Nabelek P I, Bartlett C D. 1998. Petrologic and geochemical links between the post-collisional Proterozoic Harney Peak leucogranite, South Dakota, USA, and its source rocks. *Lithos*, 45: 71–85
- Nedelec, A., Stephens, W. E., Fallick, A. E., 1995. The Panafrikan stratoid granites of Madagascar: alkaline magmatism in a postcollisional extensional setting. *J. Petrol.* 36:1367–1391
- Neogi S, Dasgupta M, Fukuoka M. 1998. High P-T metamorphism, dehydration melting, and generation of migmatites and granites in the higher Himalayan crystalline complex, Sikkim, India: *Journal of Petrology*, 39: 61–99
- Pan G Q, Lu X C, Yu H B. 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic adakite from Northern Huaiyang and discussion on its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 541–550 (in Chinese with English abstract)
- Patino Douce A E, McCarthy T C. 1998. Melting of crustal rocks during continental collisions and subduction. in: Hacker B R, Liou J G (eds). *Where Continents Collide: Geodynamic and Geochemistry of Ultrahigh-pressure Rocks*. Kluwer Academic Publishers, 27–55
- Patino Douce A E. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro *et al.* (eds.) *Understanding Granite: Integrating, New and Classical Techniques*. Geological Society, London, Special Publications, 168: 53–75
- Patino Douce, A. E., 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 25:743–746
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956–983
- Peng Y D, Zhang L D, Zhang C J, Guo S Z, Xing D H, Jia B, Chen S W, Ding Q H. 2003. Chemistry of volcanic rocks of Tiaoqishan Formation in Beipiao-Yixian, western Liaoning, China. *Geology and Resources*, 12: 177–184 (in Chinese with English abstract)
- Pitcher W S. 1983. Granite type and tectonic environment. in: Hsu K. ed., *Mountain Building Processes*, Academic Press, London, pp. 19–40
- Pitcher W S. 1993. *The Nature and Origin of Granite*. London: Blackie Academic and Progressional, 1–321
- Pla Cid J, Nardi L V S, Conceicao A O H, Bonin B, Jardim de Sa E F. 2000. The alkaline silica-saturated ultrapotassic magmatism of the Riacho do Pontal Fold Belt, NE Brazil: an example of syenite granite Neoproterozoic association. *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 661–683
- Pressley R A, Brown M. 1999. The Phillips pluton, Maine, USA: evidence of heterogeneous crustal sources and implications for granite ascent and emplacement mechanisms in convergent orogens. *Lithos*, 46: 335–366
- Qian Q, Chung S L, Lee T Y, Wen D J. 2003. Mesozoic high Ba-Sr granitoids from North China: geochemical characteristics and geological implications. *Terra Nova*, 15: 272–278
- Qin X F, Guo Y S, Liu X G, Han Z Z, Zhang G C. 2004. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Xingkaian granites from the north Dahingan Mountains. *Acta Geologica Gansu*, 13: 31–39 (in Chinese with English abstract)
- Qiu J S, Satoshi K, Wang D Z. 2000. Geochemical characteristics and genetic type of Yaokeng alkali granites in Cangnan County, Zhejiang province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19: 97–105 (in Chinese with English abstract)
- Qiu J S, Wang D Z, Peng Y M, Zhou J C. 1996. Petrology, geochemistry and genesis of Taohuadao alkali granite in Zhoushan, Zhejiang province. *Journal of Nanjing University (Nature Sciences)*, 32: 80–89 (in Chinese with English abstract)
- Qu X M, Hou Z Q, Li Y G. 2002. Ore-bearing adakites found in the Gangdese collision-orogenic belt. *Mineral Deposits*, 21 (Suppl.): 215–218 (in Chinese with English abstract)
- Ramlrez J A, Grundvig S. 2000. Causes of geochemical diversity in peraluminous granitic plutons: the Jalama pluton, Central-Iberian Zone Spain and Portugal. *Lithos*, 50: 171–190
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature*, 425: 605–609
- Rapp R P, Xiao L, Shimizu N. 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 293–302
- Samson S D, Inglis J D, D'Lemos R S, Admou H, Blichert-Toft J, Hefferan K. 2004. Geochronological, geochemical, and Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Neoproterozoic plagiogranites in the Tasriwine ophiolite, Anti-Atlas orogen, Morocco. *Precambrian Research*, 135: 133–147
- Schermaier A, Haunschmid B, Finger E. 1997. Distribution of Variscan I- and S-type granites in the Eastern Alps: a possible clue to unravel pre-Alpine basement structures. *Tectonophysics*, 272: 315–333
- Silva M M V G, Neiva A M R, Whitehouse M J. 2000. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area, central Portugal. *Lithos*, 50: 153–170
- Stephenson B J, Searle M P, Waters D J, *et al.* 2001. Structure of the main central thrust zone and extrusion of the High Himalayan deep crustal wedge, Kishitwar-Zanakar Himalaya. *Journal of the Geological Society*, 158: 650–651
- Su S G, Deng J F, Zhao G C, Zhao X G, Liu C. 2006. Characteristics, origin and resource property of Xuejiashiliang complex, Beijing area and their relationship with the way of lithospheric thinning. *Earth Science Frontiers*, 13: 148–157
- Su Y P, Tang H F. 2005. Trace element geochemistry of A-type granites. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24: 245–251 (in Chinese with English abstract)
- Sun D Y, Wu F Y, Gao S. 2004. LA-ICPMS zircon U-Pb age of the Qingshui pluton in the east Xiao Hinggan Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 25: 213–218 (in Chinese with English abstract)
- Sylvester, P. J. 1989. Post-collisional alkaline granites. *Journal of Geology*, 97:261–280
- Sylvester, P. J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29–44
- Teklay M, Kroner A, Mezger K. 2001. Geochemistry, geochronology and isotope geology of Nakfa intrusive rocks, northern Eritrea: products of a tectonically thickened Neoproterozoic arc crust. *Journal of African Earth Sciences*, 33: 283–301
- Tembo F, De Waele B, Katongo C, Koller F, Kloetzli U, Koeberl C. 2004. Petrography, geochemistry, and geochronology of granitoid rocks in the Neoproterozoic-Paleozoic Lufilian Zambezi belt, Zambia: Implications for tectonic setting and regional correlation. *Journal of African Earth Sciences*, 40: 219–244
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J-L. 1997. Epithermal and porphyry deposits: the adakitic connection. *Earth & Planetary Sciences*, 325: 103–109
- Tollo R P, Aleinikoff J N, Bartholomew M J, Rankin D W. 2004. Neoproterozoic A-type granitoids of the central and southern Appalachians: intraplate magmatism associated with episodic rifting of the Rodinian supercontinent. *Precambrian Research*, 128: 3–38
- Tong J S, Zhong H M, Lu R K, Yang S J. 2003. Geochemical feature and tectonic setting of peraluminous granite in the Lhozag area, southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 22: 308–318
- Trumbull R B, Hua L, Lehrberger G *et al.* 1996. Granitoid-hosted gold deposits in the Anjiayingzi district of Inner Mongolia, People's Republic of China. *Econ. Geol.*, 91: 873–895
- van de Fliedrt T, Hoernes S, Jung S, Masberg P, Hoffer E, Schaltegger U, Friedrichsen H. 2003. Lower crustal melting and the role of pen-system processes in the genesis of syn-orogenic quartz diorite granite

- leucogranite associations: constraints from Sr-Nd-O isotopes from the Bandombaai Complex, Namibia. *Lithos*, 67: 205 – 226
- Verplanck P L, Farmer G L, McCurry M, Mertzman S A. 1999. The Chemical and isotopic differentiation of an epizonal magma body: Organ Needle pluton, New Mexico. *Journal of Petrology*. 40: 653 – 678
- Vielzeuf J D, Clemens C P, Moinet E. 1990. Granites, granulites, and crustal differentiation. In: Vielzeuf J D, Vidal Ph. (Eds.), *Granulites and Crustal Evolution. Series C: Mathematical and Physical Sciences*, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 31: 59 – 85
- Visona D, Lombardo B. 2002. Two-mica and tourmaline leucogranites from the Everest Makalu region (Nepal Tibet). *Himalayan leucogranite genesis by isobaric heating?* *Lithos*, 62: 125 – 150
- Waight T E, Maas R, Nicholls I A. 2001. Geochemical investigations of microgranitoid enclaves in the S-type Cowra granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia. *Lithos*, 56: 165 – 186
- Wang D Z, Shu L S, Faure M, Sheng W Z. 2001. Mesozoic magmatism and granitic dome in the Wugongshan Massif, Jiangxi province and their genetic relationship to the tectonic events in southeast China. *Tectonophysics*, 339: 259 – 277
- Wang Q H, Xu W L, Wang D Y, Lin J Q. 2004. Determination of the magma depth of the Mesozoic adakitic rocks in the Xuzhou-Suzhou area: evidence from P-T estimation of deep-seated xenoliths. *Geological Review*, 50: 351 – 359 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Li J W, Jian P, Zhao Z H, Xiong X L, Bao Z W, Xu J F, Li C F, Ma J L. 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): link to Permian Triassic transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230: 339 – 354
- Wang Q, Wynan D K, Xu J F, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Li C F, Bai Z H. 2006a. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization. *Lithos*, in press
- Wang Q, Xu J F, Jian P, Bao Z W, Zhao Z H, Li C F, Xiong X L, Ma J L. 2006b. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, south China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47: 119 – 144
- Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, Wang R J, Qiu J X, Bao Z W, Sang L K, He B, Xu W, Hu Z X, Dai S Q. 2001a. The petrogenesis and geodynamic significances of heavy rare earth element (HREE)-depleted granitoids during Yanshan period in the Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 551 – 564 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, Wang R J, Xiong X L. 2002. Geochemical characteristics and genesis of Yanshanian intrusive rocks in Fanshan, Hebei Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 22: 160 – 168 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, Xiong X L, Bao Z W. 2003b. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province, China and their constraint on geodynamic process. *Science in China (Series D)*, 46: 801 – 815
- Wang Q, Xu J F, Zhao Z H. 2003c. Intermediate-acid igneous rocks strongly depleted in heavy rare earth elements (or adakitic rocks) and copper-gold metallogenesis. *Earth Science Frontiers*. 10: 561 – 572 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Xu J, Wang J, Zhao Z, Qiu J, Wang R, Xiong X, Sang L, Peng L. 2000. The recognition of adakite-type gneisses in the North Dabie Mountains and its implication to ultrahigh pressure metamorphic geology. *Chinese Science Bulletin*, 45: 1927 – 1933
- Wang Q, Zhao Z H, Xiong X L, Xu J F. 2001b. Melting of the underplating basaltic lower crust: evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30: 353 – 362 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao Z H, Xu J F, Bai Z H, Wang J X, Liu C X. 2004b. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzou adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 351 – 360 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao Z H, Xu J F, Li X H, Bao Z W, Xiong X L, Liu Y M. 2003a. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block. *Science in China (D)*, 46 (Supplement): 164 – 176
- Wang T, Zheng Y D, Li T B, Gao Y J. 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 715 – 729
- Wang Y and Zhang Q. 2001. Badaling granitic complexes in Beijing area: their composition, geochemical characteristics and geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 533 – 540 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y J, Fan W M, Guo F, Peng T P. 2003. Geochemical characteristics of Late Mesozoic volcanic rocks in the hinterland of north Dabie terrane and their tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, 10: 529 – 538 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y J, Fan W M, 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 orthogneiss complex. *Chinese Science Bulletin*, 47: 1688 – 1695
- Wang Y L, Wang Y, Zhang Q, Jia X Q, Han S. 2004. The geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis-geodynamic implications. *Anhui Province. Acta Petrologica Sinica*, 20: 325 – 338 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Yu D G. 2000. Trace element geochemical characteristics and genesis of Early Cretaceous moderately acidic volcanic-intrusive complex in northeastern Jiangxi. *Jiangxi Geology*, 14: 251 – 255 (in Chinese with English abstract)
- Wang Z H, Wilde S A, Wang K Y, Yu L J. 2004. A MORB-arc basalt adakite association in the 2.5 Ga Wutai greenstone belt: late Archean magmatism and crustal growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 131: 323 – 343
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discriminations and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 95: 407 – 419
- Whalen, J. B., Jenner, G. A., Longstaffe, F. J., Robert, F., Cariepy, C. 1996. Geochemical and isotopic (O, Nd, Pb and Sr) constraints on A-type granite: petrogenesis based on the Topsails igneous suite, Newfoundland Appalachians. *J. Petrol.* 37: 1463 – 1489
- Wu F Y, Ge W C, Sun D Y. 2002. The definition, diacrimination of adakites and their geological role. in: Xiao Q H, Deng J F, Ma D Q *et al.*, eds. *The Ways of Investigation on Granitoids*. Beijing: Geological Publishing House, 172 – 191 (in Chinese with English abstract)
- Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, Lod C H, Yui T F, Lin Q, Ge G W, Sun D Y. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66: 241 – 273
- Wu F Y, Sun D Y, Jahn B M, Wilde S. 2004. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 731 – 744
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143 – 173
- Wu G, Li Z Q, Li Z T. 2003a. Geochemical characteristics and genesis of the Early Mesozoic volcanic rocks in west Liaoning area. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 23: 44 – 50 (in Chinese with English abstract)
- Wu G, Li Z Q, Li Z T. 2003b. Identification of adakite-like rocks in the middle Jurassic volcanic rocks from Haifanggou Formation in west Liaoning area and its geological significance. *Journal of Chendu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 30: 457 – 461 (in Chinese with English abstract)
- Xiao L, Rapp P R, Xu J F. 2004. The role of deep processes controls on

- variation of compositions of adakitic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 219–228
- Xie X, Xu X S, Xing G F, Zou H B. 2003. Geochemistry and genesis of early Cretaceous volcanic rock assemblages in eastern Zhejiang. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 385–398 (in Chinese with English abstract)
- Xiong X L, Adam J, Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt; implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218: 339–359
- Xiong X L, Li X H, Xu J F, Li W X, Zhao Z H, Wang Q, Chen X M. 2003. Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate; The Late Cretaceous Zhantang andesites in the Huichang Basin, SE China. *Geochemical Journal*, 37: 233–252 (in Chinese with English abstract)
- Xu B L, Yan G H, Xu Z B, He Z F, Zhao H. 1999. Geochemistry and genetic implication of three series of Yanshanian granite in northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 15: 208–216 (in Chinese with English abstract)
- Xu J F, Shinjo R, Defent M J, Wang Q, and Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China; Partial melting of delaminated lower continental mantle crust? *Geology*, 30: 1111–1114
- Xu K, Sun N, Wang D, Hu S, Liu Y, Ji S. 1982. On the origin and metallogeny of the granites in South China. In: Xu K, Tu G. eds., *Geology of Granites and their Metallogenetic Relations, Proceed. Internat. Symp.*, Nanjing Univ., Sci. Press, Beijing, pp. 1–3 (in Chinese with English abstract)
- Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, Guo J H, Pei F P. 2005. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China; Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1–11
- Xu X S, Dong C W, Li W X, Zhou X M. 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: the significance of the gabbro-diorite granite association. *Lithos*, 46: 299–315
- Yang F Q, Wu H, Liu X W, Xu G, Zhao Y. 2003. The Jiashan syenite in northern Hebei; an Early record of lithospheric thinning in the Yanshan intracontinental orogenic belt. *Geological Review*, 49: 474–485 (in Chinese with English abstract)
- Yang J H, Chu M F, Liu W, Zhai M G. 2003. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 692–700 (in Chinese with English abstract)
- Yang J H, Chung S L, Wilde S A, Wu F Y, Chu M F, Lo C H, Fan H R. 2005. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214: 99–125
- Yang S F, Chen H L, Dong C W, Jia C Z, Wang Z G. 1996. The discovery of Permian syenite inside Tarim basin and its geodynamic significance. *Geochimica*, 25: 121–128 (in Chinese with English abstract)
- Yang X S, Jin Z M, Huenges E, Gao S, Wunder B, Schilling F R. 2002. Genesis of granulite in Himalayan lower crust; Evidence from experimental study at high temperature and high pressure. *Chinese Science Bulletin*, 47: 448–454
- Yang X S, Jin Z M, Huenges E, Schilling F R, Wunder B. 2001. Experimental study on dehydration melting of natural biotite-plagioclase gneiss from High Himalayas and implications for Himalayan crust anatexis. *Chinese Science Bulletin*, 46: 867–872
- Liu X M, Liu Y S, Gao S, Ling W L. 2006. Geochemistry and U-Pb zircon geochronology of Late-Mesozoic lavas from Xishan, Beijing. *Science in China Series (D)*, 49: 50–67
- Zhai Q G, Li C, Li H M, Wang T W. 2005. U-Pb zircon age of leucogranite in the Gangdise, Tibet, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 24: 349–353 (in Chinese with English abstract)
- Zhai Q G, Li C, Wang T W, Zhu Z Y. 2004. The geochemistry and tectonic settings of two-mica granite in Zhewu area, Tibet. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34: 27–31 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H F, Harris N, Parrish R, Zhang L, Zhao Z D, Li D W. 2005. Geochemistry of North Himalayan leucogranites: regional comparison, petrogenesis and tectonic implications. *Earth Science*, 30: 275–288 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H F, Zhao M G, He Z F, Peng P, Xu B L. 2004. Petrogenesis and implications of the sodium-rich granites from the Kunyushan complex, eastern Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 369–380 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H, Dai S Q, Guan Y C, Wu H Q. 2005. Petrology and geochemistry of the Fuling mass in Jixi, southern Anhui. *Geology in China*, 32: 411–416 (in Chinese with English abstract)
- Zhang H, Liu C Q. 2001. Tetrad effect of REE in apatites from pegmatite No. 3, Altay, Xinjiang and its implications. *Geochimica*, 30: 323–334
- Zhang J. 2003. Discussion on adakite, its ore-bearing potential and some other related issues. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 22: 365–371
- Zhang J Y, Liao Q A, Li D W. 2003. Geochemical features of the High Himalayan leucogranites of Dingjie area, Tibet; implication for magma sources. *Geological Science and Technology Information*, 22: 9–14 (in Chinese with English abstract)
- Zhang P, Tian B S. 2005. Primary discussion on the characteristics and metallogenesis of Lingshan composite massif in northeastern Jiangxi Province. *World Nuclear Geoscience*, 22: 31–38 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Li C D, Wang Y, Wang Y L, Jin W J, Jia X Q, Han S. 2005. Mesozoic high-Sr and Low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China; comparison and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1527–1537 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qin K Z, Wang Y L, Zhang F Q, Liu H T, Wang Y. 2004a. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 195–204 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qin K Z, Xu J F, Wang Y, Liu H T, Wang Y L. 2004b. On the distribution, prospecting principle and method for the adakite-related deposits in China. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 1–8 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Liu H T, Wang Y L, Li Z T. 2003. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China. *Earth Science Frontiers*, 10: 385–400 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang J H, Wang Y L, Zhao T P, Guo G J. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenetic significance of the adakites in Yanshan Period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 236–244 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Xu J F, Wang Y, Liu H T, Xiao L. 2004. On the diversity of adakite. *Geological Bulletin of China*, 21: 431–435 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Wang Y L, Zhang F Q, Wang Q, Wang Y. 2002. Adakite and porphyry copper deposit. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 85–90 (in Chinese with English abstract)
- Zhang W L, Liu D C, Li Z Y. 2005. Comparative research of lithogeochemistry for Jiulongzhang and Xiangshan volcano-intrusive complexes. *Geoscience*, 19: 205–210 (in Chinese with English abstract)
- Zhang X L, Qiu J S, Wang D Z, Wang R C, Xu X S, Chen X M. 2005. Geochemistry and magmatic mixing of the Putuoshan biotite myosites and their enclaves, Zhejiang Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24: 81–92 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Z W, Zhu B Q, Chang X. 2003. The geochemistry of the alkali-rich intrusive rocks in the east Qinling, central China. *Earth Science Frontiers*, 10: 507–519 (in Chinese with English abstract)
- Zhou L, Chen B. 2006. Petrogenesis and significance of the Hongshan syenitic pluton, South Taihang: zircon SHRIMP U-Pb age, chemical compositions and Sr–Nd isotopes. *Progress in Natural Science*, 66: 192–200
- Zou G F, Zhu T X, Feng X T, Jia B J, Zhou M K. 2003. The granite

units and their tectonic settings in the Gamba-Tingri zone, southern Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 23: 16–26 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 包志伟, 赵振华. 2003. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探. *地质地球化学*, 31: 52–61
- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 王晓芳, 邵宏翔, 储著银. 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨. *岩石学报*, 19: 81–92
- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 任康绪, 宋彪, 李凤棠. 2005. 北京房山岩 U-Pb 年龄和 Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨. *岩石学报*, 21: 776–788
- 蔡明海, 梁婷, 吴德成, 黄惠民. 2004. 广西大厂矿田花岗岩地球化学特征及其构造环境. *地质科技情报*, 23: 57–62
- 陈斌, 翟明国, 邵济安. 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. *中国科学(D)*, 32: 896–907
- 陈培荣, 范春方, 孔兴功, 章邦桐. 2000. 6710 铀矿区火成岩的地球化学特征及其构造和成矿意义. *铀矿地质*, 16: 334–342
- 陈义贤, 陈文寄. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩—年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1–279
- 湛宏伟, 罗照华, 莫宣学, 刘成东, 柯珊. 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制. *中国地质*, 32: 386–395
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 莫宣学, 于松松, 赖兴运, 湛宏伟. 2004. 岩石成因构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社, 1–381
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪等. 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用. *地球科学*, 19: 139–147
- 董传万, 李武显, 陈小明, 徐夕生, 周新民. 1998. 闽东南晚中生代岩浆混合作用: 平潭火成杂岩的岩石学证据. *自然科学进展*, 8: 581–586
- 董申保, 田伟. 2004. 埃达克岩的原义、特征与成因. *地学前缘*, 11: 585–594
- 段志明, 李勇, 张毅, 李亚林, 王谋. 2005. 青藏高原唐古拉山中新生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其大陆动力学意义. *地质学报*, 79: 88–97
- 樊金涛. 2000. 苏北牛山花岗岩片麻岩原岩成因类型、成岩时代及其地质意义. *前寒武纪研究进展*, 23: 213–220
- 范春方, 陈培荣. 2000. 赣南陂头 A 型花岗岩的地质地球化学特征及其形成的构造环境. *地球化学*, 29: 358–366
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 2005. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析. *地球化学*, 34: 215–226
- 葛良胜, 邹依林, 李振华, 张学军, 黄辉, 李兴谋, 马建文. 2003. 西藏崩纳藏布和甲岗雪山地区花岗岩的地球化学特征及成因初探. *矿物岩石*, 23: 55–61
- 葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义. *地质科学*, 36: 176–183
- 葛文春, 林强, 孙德有, 吴福元, 李献华. 2000. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究. *地球科学*, 25: 172–178
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. *科学通报*, 47: 474–480
- 顾明光. 2003. 浙东南岩头地区磨石山群火山岩岩石地球化学研究. *华南地质与矿产*, (4): 24–30
- 和钟铨, 杨德明, 郑常青, 黄映聪. 2005. 西藏冈底斯带门巴地区印支期花岗岩地球化学特征及其构造意义. *地质通报*, 24: 354–359
- 侯增谦, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金, 黄卫. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因与构造控制. *岩石学报*, 20: 239–248
- 黄顺生, 徐兆文, 顾连兴, 华明, 陆现彩, 陆建军, 聂桂平, 朱士鹏. 2004. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩地球化学特征及成因机制探讨. *高校地质学报*, 10: 217–226
- 简平, 刘敦一, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年. *地学前缘*, 10: 439–456
- 姜耀辉, 郭坤一, 贺菊端, 芮行健, 杨万志. 1999. 青藏高原大同西側石英二长岩体地球化学及岩石系列. *地球化学*, 28: 542–550
- 姜耀辉, 芮行健, 郭坤一, 贺菊端. 2000. 青藏高原乌依塔格花岗岩体地球化学及其大地构造意义. *地球化学*, 29: 259–262
- 姜耀辉, 杨万志. 2000. 西昆仑山 A 型花岗岩带的发现及其地球动力学意义. *地质论评*, 46: 235–244
- 李超文, 王岳军, 郭锋, 彭头平, 喻晓斌. 2002. 汝城地区晚中生代火山岩地球化学特征及其对源区属性的指示. *大地构造与成矿学*, 26: 354–362
- 李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪锋. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系. *岩石学报*, 20: 269–284
- 李伍平, 李献华, 路凤香. 2001a. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. *岩石学报*, 17: 523–532
- 李伍平, 李献华. 2004. 燕山造山带中段中晚侏罗世中酸性火山岩的成因及其意义. *岩石学报*, 20: 501–510
- 李伍平, 路凤香, 李献华, 周瑶琪, 孙善平, 李家振, 章大港. 2001b. 北京西山髫髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源. *岩石矿物学杂志*, 20: 123–133
- 李伍平, 路凤香, 孙善平等. 2000. 北京西山东岭台组 (J₃d) 火山岩的成因及其构造环境探讨. *岩石学报*, 16: 345–352
- 李武显, 李献华. 2003. 蛇绿岩中的花岗质岩石成因类型与构造意义. *地球科学进展*, 18: 392–397
- 李武显, 李献华. 2004. 赣东北蛇绿岩中的埃达克型花岗岩—地球化学和 Nd 同位素证据. *高校地质学报*, 10: 199–208
- 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖. 2002. 川西新元古代双峰式火山岩成因的微量元素和 Sm-Nd 同位素制约及其大地构造意义. *地质科学*, 37: 264–276
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 李寄山禹. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. *科学通报*, 44: 1992–1998
- 李晓勇, 郭锋, 范蔚茗, 王岳军, 李超文. 2004. 北京西山东岭台组粗面质火山岩地球化学: 下地壳熔融成因. *大地构造与成矿学*, 28: 155–164
- 廖群安, 李昌年, 王京名. 1999. 江绍断裂带晚侏罗世 S 型酸性火山

- 岩特征及其地质意义. 地球科学, 24: 63-68
- 廖群安, 李德威, 易顺华, 卢练. 2003. 西藏定结高喜马拉雅石榴辉石岩-镁铁质麻粒岩的岩石特征及其地质意义. 地球科学, 28: 627-633
- 林广春, 马昌前. 2003. 过铝花岗岩的成因类型与构造环境研究综述. 华南地质与矿产, (1): 65-70
- 林景仟, 魏代江, 谭东娟, 单玄龙, 金焯. 2000. 辽宁矿洞沟-梁屯元古宙正长岩体的地球化学及成因. 岩石矿物学杂志, 19: 19-26
- 林强, 葛文春, 吴福元, 孙德有, 曹林. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学. 岩石学报, 20: 403-412
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡欢, 王德滋. 2003. 广东从化石岭方钠石正长岩特征及其起源. 地质论评, 49: 28-39
- 刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据. 地质学报, 77: 317-327
- 刘红涛, 张旗, 刘建明, 叶杰, 曾庆栋, 于昌明. 2004. 埃达克岩与斑岩铜矿-浅成热液金矿: 有待深入研究的岩浆成矿关系. 岩石学报, 20: 205-218
- 刘树文, 张进江, 舒桂明, 李秋根. 2005. 藏南定结铁镁质麻粒岩矿物化学、PTt 轨迹和折返过程. 中国科学(D): 35: 810-820
- 刘文斌, 刘振宏, 张世俊. 2003. 河南商城岩体地质地球化学特征及成因意义. 华南地质与矿产, (4): 17-23.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 林广春. 2003. 大别山中生代地壳从挤压向伸展的时间: 花岗岩的证据. 中国科学, 33: 817-827
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华. 1994. 花岗岩类岩浆动力学—理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-260
- 马昌前, 杨坤光, 许长海等. 1999. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理. 岩石学报, 15: 379-395
- 马芳, 穆治国, 刘玉琳. 2003. 北京房山侵入岩体: 微量元素、稀土元素及 Sr 同位素组成对其成因的制约. 地球学报, 24: 105-110.
- 毛德宝, 陈志洪, 钟长汀, 左义成, 石森, 胡小蝶. 2003. 冀北北岔沟门地区中生代侵入岩地质年代学和地球化学特征研究. 岩石学报, 19: 661-670
- 孟繁聪, 许志琴, 张泽明, 刘福来. 2003. 苏北中生代碰撞后花岗岩的地球化学特征及其地质意义. 地质学报, 77: 567-576
- 苗来成, 范蔚茗, 翟明国, Qiu Y M, McNaughton N J, Groves D I. 2003. 金厂沟梁-二道沟金矿田内花岗岩类侵入体锆石的离子探针 U-Pb 年代学及意义. 岩石学报, 19: 71-80
- 潘国强, 陆现彩, 干航波. 北淮阳中生代 adakite 岩石地球化学特征及成因讨论. 岩石学报, 2001, 17: 541-550.
- 彭艳东, 张立东, 张长捷, 郭胜哲, 邢德和, 贾斌, 陈树旺, 丁秋红. 2003. 辽西北票、义县地区髻髻山旋回火山岩的地球化学特征. 地质与资源, 12: 177-184
- 秦秀峰, 郭原生, 刘旭光, 韩振哲, 张广纯. 2004. 大兴安岭北部兴凯期花岗岩地球化学特征及构造意义. 甘肃地质学报, 13: 31-39
- 邱检生, 王德滋, 彭亚鸣, 周金城. 1996. 浙江舟山桃花岛碱性花岗岩的岩石学和地球化学特征及成因探讨. 南京大学学报(自然科学版), 32: 80-89
- 邱检生, 蟹泽·聪史, 王德滋. 2000. 浙江苍南瑶坑碱性花岗岩的地球化学及其成因类型. 岩石矿物学杂志, 19: 97-105
- 苏尚国, 邓晋福, 赵国春, 赵兴国, 刘翠. 2006. 北京燕山地区薛家石梁杂岩体特征、成因、源区性质及岩石圈减薄方式. 地学前缘, 13: 148-157
- 苏玉平, 唐红峰. 2005. A 型花岗岩的微量元素地球化学. 矿物岩石地球化学通报, 24: 245-251
- 孙德有, 吴福元, 高山. 2004. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定. 地球学报, 25: 213-218
- 童劲松, 钟华明, 夏军, 鲁如魁, 杨世学. 2003. 藏南洛扎地区过铝质花岗岩的地球化学特征及构造背景. 地质通报, 22: 308-318
- 王德滋, 周金城, 邱检生, 范洪海. 2002. 花岗质火山-侵入杂岩. 见: 王德滋, 周新民等著. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社, 22-39, 1-295
- 王强, 许继峰, 赵振华, 王人镜, 熊小林. 2002b. 河北矾山燕山期侵入岩地球化学特征及成因. 矿物学报, 22: 160-168
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2003. 强烈亏损重稀土元素的中酸性火成岩(或埃达克质岩)与 Cu、Au 成矿作用. 地学前缘, 10: 561-572.
- 王强, 许继峰, 王建新, 赵振华, 邱家骧, 王人镜, 熊小林, 桑隆康. 2000. 北大别山 adakite 型灰色片麻岩的确定及其与超高压变质作用的关系. 科学通报, 45: 1017-1024
- 王强, 许继峰, 赵振华, 王人镜, 邱家骧, 包志伟, 桑隆康, 何斌, 许卫, 胡正祥, 戴圣潜. 2001a. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及动力学意义. 岩石学报, 17: 551-564
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001b. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学, 30: 353-362
- 王强, 赵振华, 许继峰, 李献华, 熊小林, 包志伟, 刘义茂. 2002a. 扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿. 中国科学(D), 32(增刊): 127-136
- 王清海, 许文良, 王冬艳, 林景仟. 2004. 徐州-宿州地区中生代埃达克质岩石岩浆起源深度的限定—深源捕虏体温度-压力条件证据. 地质论评, 50: 351-359
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗岩杂岩的组成、地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17: 533-540
- 王勇, 余达淦. 2000. 赣东北早白垩世中酸性火山—侵入杂岩微量元素地球化学特征及成因探讨. 江西地质, 14: 251-255
- 王元龙, 王焰, 张旗, 贾秀琴, 韩松. 2004. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿-地球动力学意义. 岩石学报, 20: 325-338
- 王岳军, 范蔚茗, 郭峰, 彭头平. 2003. 北大别晚中生代火山岩的地球化学特征及对北大别构造属性的启示. 地学前缘, 10: 529-538
- 王岳军, 范蔚茗, 郭峰. 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
- 吴福元, 葛文春, 孙德有. 2002. 埃达克岩的概念、识别标志及其地质意义. 见: 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 172-191
- 武广, 李忠权, 李之彤. 2003a. 辽西地区早中生代火山岩地球化学特征及成因探讨. 矿物岩石, 23: 44-50

- 武广, 李忠权, 李之彤. 2003b. 辽西中侏罗统海沟组埃达克质岩的确认及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 30: 457-461
- 谢昕, 徐夕生, 邢光福, 邹海波. 2003. 浙东早白垩世火山岩组合的地球化学及其成因研究. 岩石学报, 19: 385-398
- 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 蒋少涌, 张明, 邱检生. 2005. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J₂ 早期玄武岩. 中国科学(D), 35: 587-605
- 肖龙, Rapp P R, 许继峰. 2004. 深部过程对埃达克质岩石成分的制约. 岩石学报, 20: 219-228
- 许保良, 阎国翰, 徐振邦, 何中甫, 赵晖. 1999. 冀北燕山期三个系列花岗质岩石的地球化学特征及其成因学意义. 岩石学报, 15: 208-216
- 杨富全, 吴海, 刘晓文, 徐刚赵越. 2003. 冀北承德甲山正长岩——燕山陆内造山带岩石圈减薄的早期记录. 地质论评, 49: 474-485
- 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 翟明国. 2003. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因. 岩石学报, 19: 692-700
- 杨树锋, 陈汉林, 董传万, 贾承造, 汪振国. 1996. 塔里木盆地二叠纪正长岩的发现及其地球动力学意义. 地球化学, 25: 121-128
- 杨晓松, 金振民, Huenges E, Schilling F R, Wunder B. 2001a. 高喜马拉雅黑云片麻岩脱水熔融实验: 对青藏高原地壳深熔的启示. 科学通报, 45: 246-250
- 杨晓松, 金振民, Huenges E, 高山, Wunder B, Schilling F R. 2001b. 喜马拉雅造山带下地壳麻粒岩成因: 来自高温高压实验的证据. 科学通报, 46: 2025-2030
- 袁洪林, 柳小明, 刘勇胜, 高山, 凌文黎. 2005. 北京西山晚中生代火山岩 U-Pb 锆石年代学及地球化学研究. 中国科学(D), 35: 821-836
- 翟庆国, 李才, 李惠民, 王天武. 2005. 西藏冈底斯中部淡色花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 24: 349-354
- 翟庆国, 李才, 王天武, 朱志勇. 2004. 西藏折无地区晚白垩世二云母花岗岩地球化学及构造环境. 吉林大学学报(地球科学版), 34: 27-31
- 张宏飞, Harris N, Parrish R, 张利, 赵志丹, 李德威. 2005. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学: 区域对比、岩石成因及其构造意义. 地球科学, 30: 276-288
- 张虹, 戴圣潜, 管运财, 吴海权. 2005. 皖南绩溪伏岭岩体岩石地球化学特征. 中国地质, 32: 411-416
- 张华锋, 翟明国, 何中甫, 彭澎, 许保良. 2004. 胶东昆嵛山杂岩中高锆花岗岩地球化学成因及其意义. 岩石学报, 20: 369-380
- 张辉, 刘从强. 2001. 新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉磷灰石矿物中稀土元素“四分组效应”及其意义. 地球化学, 30: 323-334
- 张金阳, 廖群安, 李德威. 2003. 西藏定结地区高喜马拉雅淡色花岗岩的地球化学特征与岩浆源区研究. 地质科技情报, 22: 9-14
- 张静. 2003. 埃达克岩及其成矿作用和相关问题的讨论. 矿物岩石地球化学通报, 22: 365-371
- 张旗, 李承东, 王焰, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 韩松. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义. 岩石学报, 21: 1527-1537
- 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004a. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面. 岩石学报, 20: 195-204
- 张旗, 秦克章, 许继峰, 王焰, 刘红涛, 王元龙. 2004b. 中国与埃达克岩有关的矿床分布、找矿方向和找矿方法刍议. 华南地质与矿产, (2): 1-8
- 张旗, 王焰, 刘红涛, 王元龙, 李之彤. 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景, 附: 国内关于埃达克岩的争论. 地学前缘, 10: 335-400
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报, 17: 225-244
- 张旗, 王元龙, 张福勤, 王强, 王焰. 2002. 埃达克岩与斑岩铜矿. 华南地质与矿产, (3): 85-90
- 张旗, 许继峰, 王焰, 肖龙, 刘红涛, 王元龙. 2004c. 埃达克岩的多样性. 地质通报, 23: 959-965
- 张万良, 刘德长, 李子颖. 2005. 江西九龙峰和相山火山—侵入杂岩岩石地球化学的对比研究. 现代地质, 19: 205-210
- 张晓琳, 邱检生, 王德滋, 王汝成, 徐夕生, 陈小明. 2005. 浙江普陀山黑云母钾长花岗岩及其岩石包体的地球化学与岩浆混合作用. 岩石矿物学杂志, 24: 81-92
- 张正伟, 朱炳泉, 常向. 2003. 秦岭北部富碱侵入岩带岩石地球化学特征及构造意义. 地学前缘, 10: 507-519
- 章平, 田邦生. 2005. 赣东北灵山复式岩体特征及其成矿作用初探. 世界核地质科学, 22: 31-38
- 周凌, 陈斌. 2005. 南太行洪山正长岩的成因和意义: 锆石 SHRIMP 年代学、化学成分和 Sr-Nd 同位素特征. 自然科学进展, 15: 1357-1365
- 邹光富, 朱同兴, 冯心涛, 李建忠, 贾保江, 周铭魁. 2003. 藏南岗巴-定日地区花岗岩单元特征及构造环境. 沉积与特提斯地质, 23: 16-26