

与地幔柱有关的 A 型花岗岩的特点 ——以峨眉山大火成岩省为例

钟玉婷^{1,2}, 徐义刚¹

1. 中国科学院 广州地球化学研究所/同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘要:通过地幔柱条件(攀西地区)和非地幔柱条件下(华南、北方造山带)A 型花岗岩岩石学、地球化学特征的系统对比,厘定了与地幔柱有关的 A 型花岗岩的一些特点:(1)与基性—超基性岩体在时间和空间上紧密伴生;(2)具有较高的锆石饱和温度(860~960 °C);(3)具有较高 Nb/Th 和 Ga/Al 比值;(4)通常显示正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(但不超过 5),其模式年龄和岩体形成年龄相差不大。这些特点与岩浆源区或母岩浆的性质以及岩浆演化条件有关,为自然界同类岩石的甄别提供了依据。

关键词:A 型花岗岩;地幔柱;峨眉山大火成岩省;新生地壳

中图分类号:P588.1

文献标识码:A

文章编号:1671-5888(2009)05-0828-11

Characteristics of Plume-Related A-Type Granites: An Example from the Emeishan Large Igneous Province

ZHONG Yu-ting^{1,2}, XU Yi-gang¹

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Comparison of petrologic and geochemical characteristics of plume-related (Panxi area) and non plume-related (South China, Central Asian Orogenic Belt) A-type granites have been carried out in this study. It is shown that the plume-related A-type granites are characterized by (1) the close temporal and spatial association with mafic-ultramafic rocks; (2) high zircon saturation temperature (860 - 960 °C); (3) high Nb/Th and Ga/Al ratios, and (4) positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (but usually <5) and no significant difference between Nd model age and the formation age of the rocks. All these characteristics, largely relevant to the nature of the plume-generated magma source and/or parental magmas, and magmatic evolution, can be used to identify similar rock types in natural occurrence.

Key words: A-type granite; mantle plume; Emeishan large igneous province; juvenile crust

收稿日期:2009-05-27

基金项目:国家自然科学基金项目(40721063)

作者简介:钟玉婷(1986—),女,湖南株州人,博士研究生,主要从事地球化学研究, E-mail: zyt9797@gig.ac.cn

通讯联系人:徐义刚(1966—),男,江苏常熟人,研究员,博士,主要从事岩石地球化学研究, E-mail: yigangxu@gig.ac.cn。

0 引言

Loiselle 等^[1]根据某些花岗岩贫水(anhydrous)、富碱(alkaline)并受控于非造山环境(anorogenic)的地质地球化学特征引入了A型花岗岩这一术语,之后该类型岩石便受到众多学者的广泛关注^[2-6]。A型花岗岩多为石英正长岩、准铝质花岗岩和过碱性花岗岩,后者通常含有钠闪石-钠铁闪石、霓石-霓辉石等标志性的碱性暗色矿物。A型花岗岩根据其成分可分为过碱性和铝质两类。不同时代、不同地区、不同类型的A型花岗岩均具有以下特征:(1)高硅,富碱,铁镁比值大;(2)富集高场强元素(如Nb、Ta、Zr、Ga、Y等)和稀土元素(Eu除外);(3)贫Ca、Ba、Sr、Eu、Sc、Cr、Co、Ni等元素^[1-2]。

A型花岗岩多形成于非造山或者后造山的拉张环境,也可出现于地幔柱活动区。考虑到地幔柱活动的特殊性(热异常,下地幔物质的参与,岩浆活动时间相对短暂),在地幔柱条件下与非地幔柱条件下形成的A型花岗岩应该在某些方面有所差别。为了区分地幔柱条件下与非地幔柱条件下形成的A型花岗岩,本文拟对产于二叠纪峨眉山大火成岩省,华南东部和中亚造山带的A型花岗岩岩石学和地球化学特征进行综合对比。广泛分布于西南三省(云南、贵州、四川)的二叠纪峨眉山玄武岩,是我国唯一被国际学术界认可的大火成岩省,前期的研究工作已经证明其形成与源于核幔边界或上、下地幔边界的热异常物质——地幔柱有关^[7]。在峨眉山大火成岩省的中心攀西地区广泛发育的过碱性、准铝质、过铝质A型花岗岩,在时间和空间上均与基性—超基性岩石紧密共生,因此代表了与地幔柱活动相关的A型花岗岩。华南东部和中亚造山带发育有两条A型花岗岩带,一条位于我国东部广大地区,从闽、粤交界向北经闽、浙沿海至下扬子、江苏沿海;另一条出露于北部的大兴安岭和新疆乌伦古河地区,向北与俄罗斯、蒙古岩带连接,构成规模宏大的中亚岩带^[8-9],两者的成因均与地幔柱无关。

1 岩石学特征

攀西地区二叠纪A型花岗岩与峨眉山玄武岩、似层状基性—超基性侵入岩在时间和空间上紧密伴生,主要包括米易、太和、攀枝花、茨达等岩体^[10-12]。米易岩体属于铝质A型花岗岩,其主要矿物为钾长石、石英、斜长石,副矿物为锆石、磁铁矿等;太和、攀

枝花以及茨达岩体则属于过碱性A型花岗岩,其主要矿物有碱性长石、石英,次为钠闪石-钠透闪石,黑云母、普通角闪石偶见,副矿物为磷灰石、钛铁矿、磁铁矿和锆石等,与岩体紧密伴生的层状辉长岩岩体发育超大型钒钛磁铁矿矿床。

华南地区普遍发育铝质A型花岗岩,乌山、金刚山、新村岩体是区内铝质A型花岗岩的典型代表^[13]。岩体与围岩呈明显的侵入接触关系,在空间上多与I型花岗岩共生,构成I-A型复合岩体。铝质A型花岗岩的组成矿物主要为石英、钾长石和斜长石,副矿物为锆石-萤石型,伴有赤铁矿、磁铁矿、闪锌矿,镁铁矿物的含量很低,且主要为黑云母,岩石类型主要为钾长花岗岩。华南地区过碱性A型花岗岩主要有桃花岛、青田、瑶坑、魁岐岩体^[14],造岩矿物主要由碱性长石、斜长石、石英等组成,副矿物主要为锆石、萤石、磁铁矿。上述两类A型花岗岩均发育文象结构和晶洞构造,表明岩体定位较浅;晶洞中常充填有各种矿物,但两类岩石晶洞中的矿物组合有着较为明显的区别:铝质A型花岗岩的晶洞中或其副矿物组合中常有石榴子石、白云母等富铝矿物,而过碱性花岗岩的晶洞中常充填碱性铁镁矿物。此外,花岗岩同金属矿产有密切的成因联系,加上成矿作用主要集中在中生代,故区内分布的A型花岗岩还与锡-钨-铜-铅-锌等多金属成矿带有密切联系^[15-16]。

中国北方造山带,作为巨大的中亚造山带(Central Asian orogenic belt,简称CAOB)的一部分,以广泛发育不同时代的花岗岩为特点,特别是碱性—偏碱性花岗岩(高分异的I型花岗岩和A型花岗岩)极为发育^[17]。铝质A型花岗岩有西天山达巴特、锡林浩特、达布拉特、天桥岗、三道河等岩体^[18-25],主要岩性为二长花岗岩、碱长花岗岩,矿物成分为石英、钾长石、钠长石、少量黑云母,副矿物有钛铁氧化物、锆石、榍石、磷灰石等,部分岩体发育晶洞构造。区内过碱性A型花岗岩有乌伦古河、大王折子、毛家屯、白石砬子、清水、大黑山、碾子山岩体等^[26-29],岩性大多为碱性花岗岩,发育晶洞构造;主要矿物为石英、条纹长石,副矿物为磷灰石、锆石等,发育晶洞构造。

2 锆石饱和温度

由于花岗岩大多是绝热式上升就位的,那么岩浆在早期结晶时的温度(近液相线温度)可以近似代

表岩浆形成时的温度,锆石又是最早结晶的副矿物,因此其饱和温度可能记录了岩浆的形成条件。图 1(a)为根据 Watson 等^[30]提出的方法计算获得的锆石饱和温度分布频率直方图。攀西地区 A 型花岗岩样品的锆石饱和温度大多为 860~960 °C,低于 760 °C 的样品寥寥无几,平均值为 901 °C ($n=68$);而华南地区样品的锆石饱和温度大多集中在 760 °C 附近,没有高于 1 000 °C 的样品,温度变化范围为 680~885 °C,平均值为 790 °C ($n=107$);北方造山带 A 型花岗岩的锆石饱和温度分布则相当均匀,主要为 760~960 °C,同样没有高于 1 000 °C 的样品,平均值为 842 °C ($n=106$)。相比之下,华南以及北方造山带的 A 型花岗岩的锆石饱和温度明显低于攀西地区的值,其中北方造山带的平均值与澳大利亚 Lachlan 褶皱带的铝质 A 型花岗岩的锆石饱和温度平均值($T=839$ °C)接近^[31]。

图 1(b)是将 A 型花岗岩细分为铝质、过碱性两种类型而分别作图。大部分铝质 A 型花岗岩的锆

石饱和温度低于同区域的过碱性 A 型花岗岩。把 3 个区域的铝质/过碱性样品分别比较,得出的结论也与图 1a 类似,即: $T_{\text{攀西}} > T_{\text{北方造山带}} > T_{\text{华南}}$ 。

根据地幔柱的演化模式,来自地核深部的异常热的物质,通过地幔柱尾到达岩石圈底部后形成蘑菇状的地幔柱头。攀西地区位于峨眉山大火成岩省的内部,处在上升的地幔柱头所带来的异常热的影响范围之内,故其区内发育的 A 型花岗岩的成岩温度明显偏高,其热源便来自峨眉山地幔柱。

3 主量元素地球化学特征

表 1 列出了不同地区 A 型花岗岩主量元素的平均质量分数。从表中可以看出:

(1)总体而言,所对比的 3 个地区的 A 型花岗岩的主量元素特征与世界平均值基本一致,即富 SiO_2 (平均 70.56%~74.58%)、富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (平均 8.13%~9.4%)、贫 CaO (平均 0.61%~0.94%) 和 MgO (平均 0.18%~0.27%)

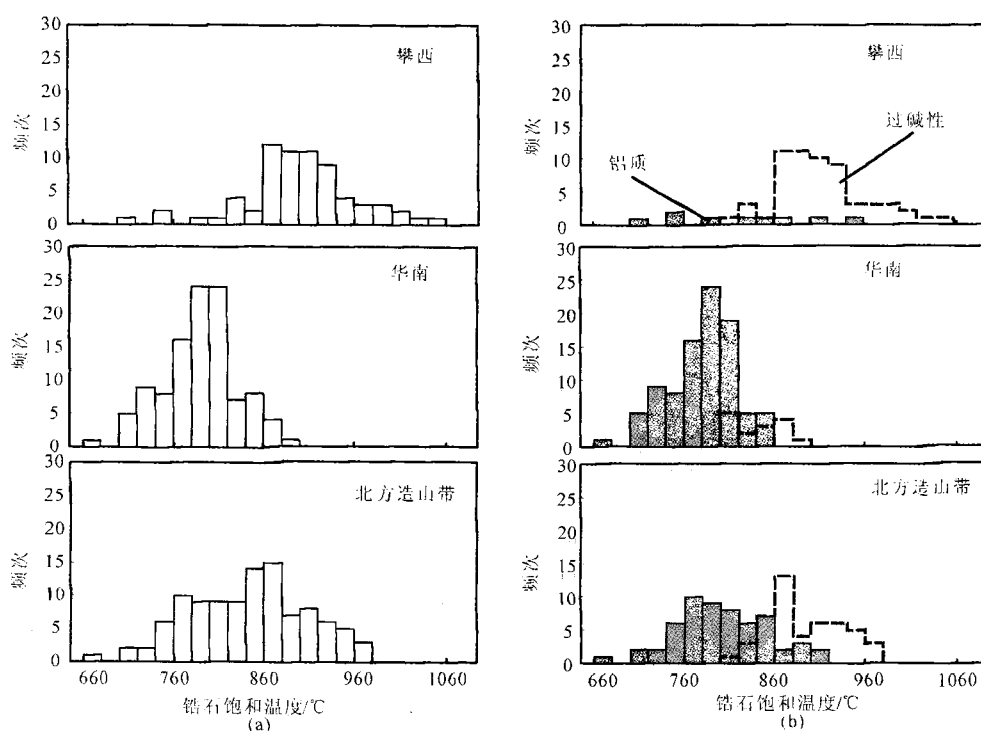


图 1 锆石饱和温度分布频率直方图

Fig. 1 Histogram of zircon saturation temperature

(a)据 Watson 等^[30]提出的方法计算;(b)将 A 型花岗岩分为铝质、过碱性两类;阴影部分为铝质 A 型花岗岩,虚线部分为过碱性 A 型花岗岩;数据来源:世界 A 型花岗岩平均值引自文献[3],中国 A 型花岗岩平均值引自文献[32],攀西 A 型花岗岩平均值原始数据引自文献[10~12],华南 A 型花岗岩平均值原始数据引自文献[14,33~42],北方造山带 A 型花岗岩平均值原始数据引自文献[18~28]

表1 国内外A型花岗岩主元素质量分数统计对比
Table 1 Major element contents of A-type granites in China and abroad

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
世界花岗岩	A型	73.81	0.26	12.40	1.24	1.58	0.06	0.20	0.75	4.07	4.65	0.04
平均值	(148)											
中国花岗岩	A型(197)	73.55	0.23	12.81	1.42	1.18	0.09	0.27	0.82	3.76	4.69	0.07
平均值	攀西A型(68)	70.56	0.47	12.06	0.75	4.27	0.15	0.26	0.65	4.82	4.58	0.05
	华南A型(107)	74.58	0.20	12.48	0.60	1.66	0.06	0.25	0.94	3.25	4.88	0.06
	北方造山带A型(106)	74.50	0.26	12.19	1.09	1.53	0.10	0.18	0.61	4.13	4.50	0.08

注:表中A型(148)表示A型花岗岩148个样品;数据来源同图1。

(2)攀西地区A型花岗岩也显示出其独有的特征:SiO₂含量稍低,全碱含量较华南、北方造山带明显偏高,尤其是Fe、Ti氧化物的含量是华南和北方带A型花岗岩平均值的2~3倍。推测攀西地区的A型花岗岩和与其紧密伴生的大型层状辉长岩岩体可能为同源岩浆演化关系或具有相同、相似的源区岩浆成分。

(3)在主要氧化物Harker图解上(图2),3个地区样品大体上显示了相似的变化趋势,如FeO、Al₂O₃、TiO₂均与SiO₂有良好的负相关关系。值得注意的是,与其他两个地区样品相比(在相同SiO₂含量时),攀西地区A型花岗岩中CaO、MgO和Al₂O₃含量偏低,而FeO含量偏高(图2)。这种差异可能与大火成岩省岩浆房的深度比一般拉张区浅有关。较小的压力使得斜长石在大火成岩省岩浆分异结晶中较早成为结晶相,从而导致CaO和Al₂O₃含量快速降低。

4 微量元素地球化学特征

图3a展示的是3个地区A型花岗岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式图,3个地区均呈现出LREE富集、HREE平坦的右倾型式,具有Eu的负异常;轻稀土元素分馏程度中等,重稀土元素内部基本无分馏。在原始地幔标准化蛛网图(图3b)上,与相邻元素比较,表现为Ba、Sr、P、Eu、Ti的强烈亏损。

将3个地区进行比较,攀西地区样品稀土元素总量较高,轻、重稀土元素分异较为明显,无Nb-Ta异常;华南和北方造山带的样品重稀土元素非常平坦,Nb、Ta负异常明显。三者均具有中等—强烈的Eu负异常。Eu的富集与亏损主要取决于含钙造岩矿物的聚集和迁移,此处Eu呈现强烈的负异

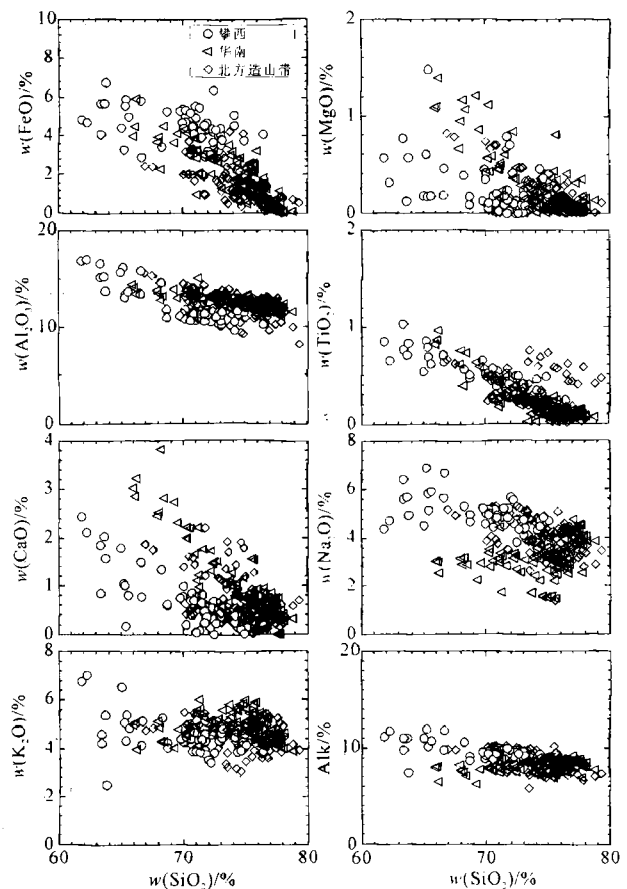


图2 攀西、华南、北方造山带A型花岗岩的主要氧化物Harker图解

Fig. 2 Variations of some major elements with SiO₂ of A-type granites from Panxi area, South China and orogenic belt of North China

常,结合CaO、Al₂O₃、Na₂O随着SiO₂增加而明显降低,可以确认岩浆经历了斜长石的分离结晶作用;Sr、Ba的亏损进一步表明斜长石、磷灰石和黑云母发生了分离结晶;P和Ti的亏损说明岩浆经历了磷灰石以及榍石、角闪石、黑云母等矿物的分离结晶作

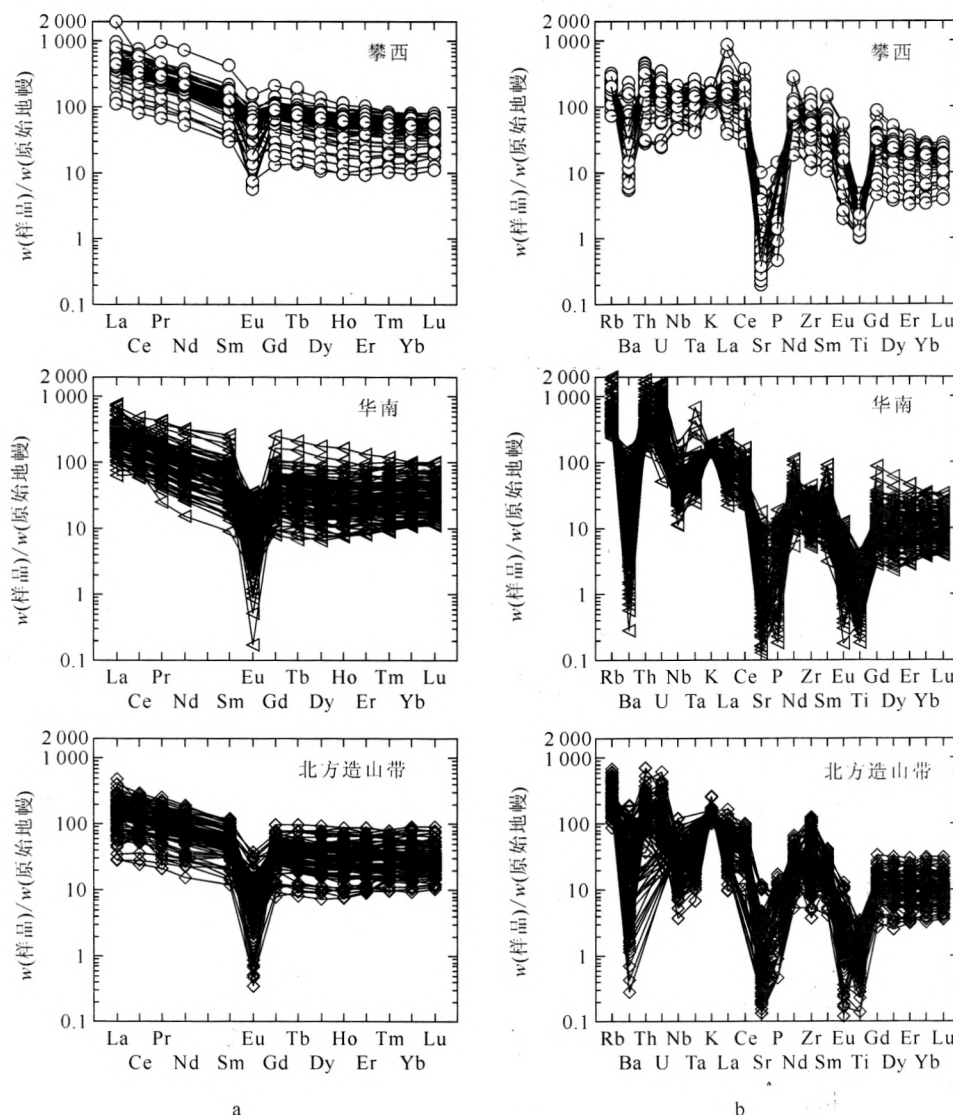


图 3 稀土元素配分模式图(a)与原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element spidergrams(b) of A-type granites from Panxi area, South China and orogenic belt of North China

图例同图 2, 数据来源同图 1

用。

A 型花岗岩微量元素的含量与主要造岩矿物的多少无直接关系,而是受制于源区性质、岩浆的物理化学条件、岩浆作用过程和络合作用等因素^[32]。A 型花岗岩通常具有 Sr 和 Eu 的负异常,暗示样品受到了分离结晶作用的改造。为了排除分离结晶作用的影响,用微量元素丰度比值能更好地反映岩浆源区的特征。这是因为:(1)两个不相容程度相似的微量元素之比值基本上不受部分熔融和分离结晶程度的影响,在很大程度上可以反映源区物质成分的特点;(2)选择的两元素往往具有相似的晶体化学性

质,或者两元素在同位素上为子体与母体的关系,这样便可以消除岩石成因复杂使元素丰度变化范围大而无规律可循的缺点。表 2 列出了不同地区 A 型花岗岩的微量元素平均含量统计数据。

10 000 Ga/Al 是 Whalen 等^[3]用来区分 A 型花岗岩与 S、I、M 型花岗岩的重要指标。Ga、Al 同为第三主族元素。当富含 Ca 质斜长石的源区部分熔融形成 A 型花岗岩时,Ga 比 Al 更加容易进入熔体^[2]。因此较高 Ga/Al 比值是 A 型花岗岩区别于另外 3 类花岗岩的典型特征。从表 2 中可以看出,华南和北方造山带样品 Ga/Al 值与世界 A 型花岗

表2 国内外A型花岗岩微量元素含量统计对比

Table 2 Trace element contents of A-type granites from China and Worldwide

 $w_B/10^{-6}$

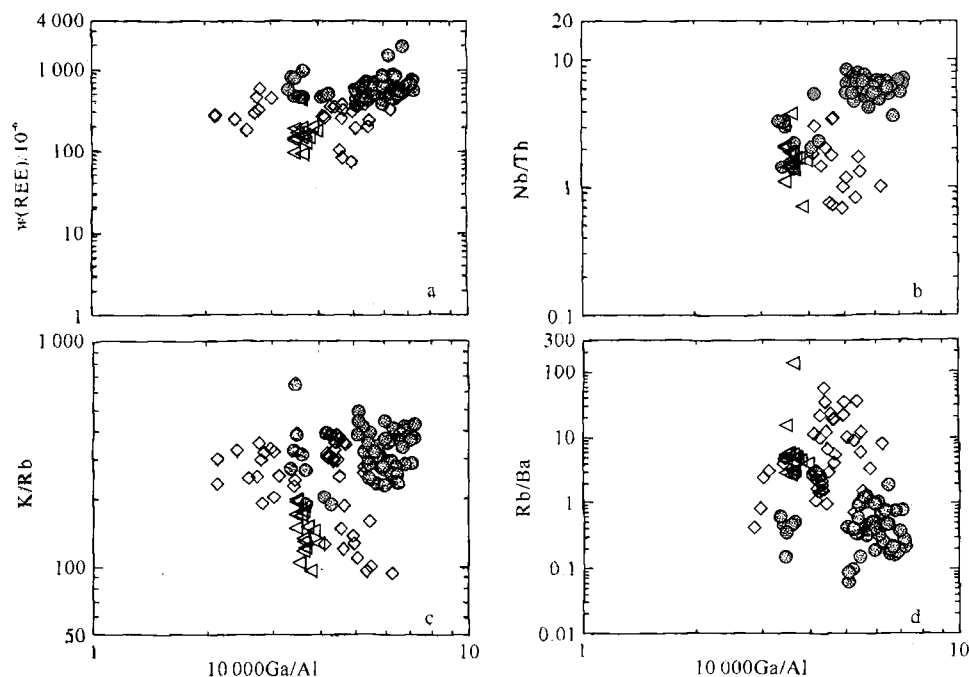
		Ba	Rb	Sr	Zr	Nb	Y	Ga	K/Rb	Rb/Sr	Rb/Ba	Ti/Y	Nb/Th	Ga/Al
世界花岗岩	A型													
平均值	(148)	352	169	48	528	37	75	24.6	229	3.52	0.48			3.75
中国花岗岩	A型(197)	235.96	269.69	57.54	333.77	34.93	54.03	18.54		20.58	8.94			
平均值	攀西A型(68)	340.4	117.8	28.8	773.9	92.4	80.1	33.4	345.8	8.97	0.69	48.4	6.5	5.38
	华南A型(107)	216.4	384.1	55.6	184.8	35.2	52.8	22.4	130.8	34.74	12.3	33.3	0.92	3.4
	北方造山带A型(106)	219.6	169.4	41.15	403.0	21.18	55.93	24.14	260.1	16.33	5.78	38.9	1.12	3.65

岩平均值基本一致,而攀西地区A型花岗岩的Ga/Al值高出世界平均值一半。

攀西地区A型花岗岩的K/Rb、Nb/Th比值也明显高于世界、华南地区和北方造山带样品的平均值。需要说明的是,上述平均值是由大量数据统计、计算得出的结果,每一项参数实际都有或大或小的变化范围;例如,攀西A型花岗岩的K/Rb比值平均为 345.8×10^{-6} ,而变化范围达 $(157.3 \sim 732.4) \times 10^{-6}$ 。但数据表明,与地幔柱有关的A型花岗岩的Nb/Th和K/Rb比值似乎高于无地幔柱条件下形成的A型花岗岩。

攀西、华南和北方造山带A型花岗岩中微量元素组成的差异在图4中可以直观地看到,特别是攀西A型花岗岩明显具有较高的 Σ REE含量、Ga/Al、Nb/Th、K/Rb等比值。这些微量元素比值的差异,证实与地幔柱有关的A型花岗岩和非地幔柱条件下形成的A型花岗岩的源区组成有明显的差异,前者主要为幔源基性岩浆,不亏损Nb,因此A型花岗岩的Nb/Th比值较高;后者可能有大陆地壳物质的参与,因此低Nb/Th比值是其显著的特征之一。

在以 $10\,000\text{ Ga/Al}$ 为横坐标, Σ REE、Nb/Th、

图4 过碱性A型花岗岩的 $10\,000\text{ Ga/Al}-\Sigma\text{REE}$ (a)、Nb/Th(b)、K/Rb(c)、Rb/Ba(d)图解Fig. 4 Diagrams of (a) ΣREE vs. $10\,000\text{ Ga/Al}$, (b) Nb/Th vs. $10\,000\text{ Ga/Al}$, (c) K/Rb vs. $10\,000\text{ Ga/Al}$, (d) Rb/Ba vs. $10\,000\text{ Ga/Al}$ of peralkaline A-type granite, respectively

●. 攀西; △. 华南; ◇. 北方造山带

K/Rb、Rb/Ba 分别为纵坐标的图解中(图4),攀西地区过碱性 A 型花岗岩样品与华南、北方造山带的样品区别明显,只有茨达岩体样品与之重叠。10 000 Ga/Al - Nb/Th 图解也可以很好地区分地幔柱有关的铝质 A 型花岗岩和地幔柱无关的铝质 A 型花岗岩(图5)。因此, Ga/Al 比值能够较好地地区分 A 型与 S、I、M 型花岗岩,而 Nb/Th 比值则能够较好地地区分地幔柱条件下与非地幔柱条件下形成的

花岗岩和铝质 A 型花岗岩,与地幔柱无关的同类花岗岩的 Nb/Th 界限清晰,配合纵坐标 K/Rb 值的明显差异,攀西地区的 A 型花岗岩确实能与华南、北方造山带的 A 型花岗岩区分开来。

5 同位素特征及模式年龄

对于花岗质岩石,由于它主要来源于地壳岩石的部分熔融,因此根据其模式年龄和形成年龄的对比,可以判断源区地壳的性质。

攀西地区 A 型花岗岩样品 I_{Sr} 较低,变化范围较大,多数样品的 $\epsilon_{Nd}(t) > 0$ (表3)。太和 A 型花岗岩岩体的模式年龄仅略高于其锆石结晶年龄,暗示其熔融源区可能以峨眉山火山作用时底侵的新生下地壳为主,并有少量新元古代古老地壳卷入^[45]。如图7所示, A 型花岗岩岩浆事件(约 260 Ma)与峨眉山大火成岩省主喷发期年龄和中一晚二叠世界限年龄一致。

华南区域的 A 型花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t) < 0$ (表3)。其中浙江和福建 A 型花岗岩岩体 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值的范围分别为 $-8.2 \sim -10.1$ 和 $-3.5 \sim -5.2$,加之广东、江西、湖南、江苏部分 A 型花岗岩岩体 $\epsilon_{Nd}(t)$ 数据,表明由南至北 A 型花岗岩中地幔组分的贡献渐减,而地壳的贡献渐增^[46]。这些 A 型花岗岩均为壳幔混熔岩浆经高度分异演化结晶的产物,但由于区域构造应力引张程度不同,导致不同地段、不同时代 A 型花岗岩成岩过程中壳幔物质混熔比例存在差异^[47]。

中亚造山带在显生宙曾经发生大规模的地壳生长,产生了一条跨越哈萨克斯坦、中国、蒙古等多个国家的 A 型花岗岩带^[28,48-49]。这些花岗岩均具有

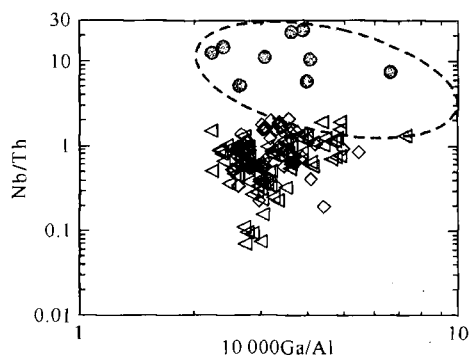


图5 铝质 A 型花岗岩的 10 000 Ga/Al - Nb/Th 图解

Fig. 5 Nb/Th vs. 10 000Ga/Al diagram of aluminous A-type granite

阴影部分为 Yemen - Ethiopia、Paraná - Etendeka 两个大火成岩省的铝质 A 型花岗岩,其他图例同图4

A 型花岗岩。图5中阴影部分为 Yemen - Ethiopia、Paraná - Etendeka 两个大火成岩省的铝质 A 型花岗岩岩体的地球化学数据^[43-44]。很显然,大火成岩省发育的 A 型花岗岩普遍具有高 Ga/Al 和 Nb/Th 比值的特点。

从图6可以看出,地幔柱有关的过碱性 A 型花

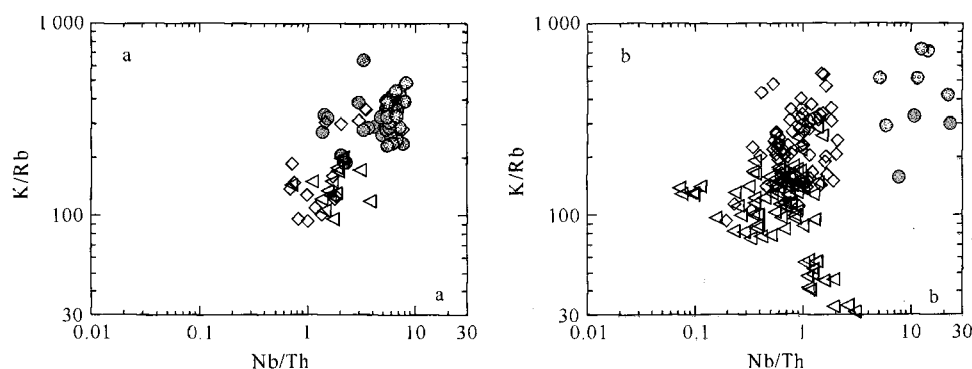


图6 过碱性 A 型花岗岩(a)和铝质 A 型花岗岩的 Nb/Th - K/Rb 图解(b)

Fig. 6 Plots of K/Rb vs. Nb/Th of peralkaline (a) and aluminous (b) A-type granites

图例同图4

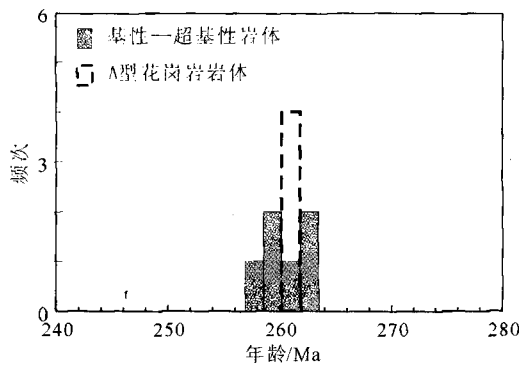


图7 峨眉山大火成岩省的基性和酸性岩浆的锆石 U - Pb 年龄统计图

Fig. 7 Histogram of zircon U - Pb ages of mafic magmatism and A-type granite pluton in the Emeishan large igneous province

底图引自文献[12]

低 I_{Sr} 、高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的特征,该特征与世界上其他一些典型显生宙造山带的地壳演化特点有明显的不同。这种同位素特点暗示岩浆可能:(1)来源于亏损地幔,并受少量地壳物质混染或与壳源岩浆混合;(2)起源于下地壳基性岩石的部分熔融。但是,直接由地幔熔融产生高 SiO_2 含量的花岗岩浆是十分困难和有限的。如果是地幔岩浆与地壳混染或与壳源岩浆混合形成的话,那么模拟计算表明必须有 98% 左右的地幔物质加入才能形成具有上述 Sr、Nd 同位素特点的花岗岩,这与直接由地幔熔融产生高硅花岗岩浆几乎没有区别,实际上也不可能^[25]。加之该区大部分花岗岩具有年轻的铍模式年龄,中亚造山带的绝大多数 A 型花岗岩源岩应是刚从地幔分离不久的年轻地壳。

表3 典型A型花岗岩岩体 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值统计对比

Table 3 The $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of A-type granites in China

$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$		$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	
攀西		华南	
米易	-2.34~4.76	南昆山	-1.54~-2.87
太和	0.92~3.91	佛冈	-4.5~-8.6
攀枝花	2.2~2.9	骑田岭	-5.05~-7.57
茨达	-0.25~1.35	西山	-7.1~-8.0
中亚造山带		密坑山	-3.56~-5.13
东准噶尔	5.2~7.1	寨背	-0.78~-6.55
达布拉克特	6.42~7.46	新村、金刚山、乌山	-4.28~-6.12
苏吉泉	5.9~6.3	普陀山	-9.3
天桥岗	1.06~2.35	青田	-7.0~-8.2
乌伦古河	5.1~6.7	桃花岛	-9.1~-10.1

综上所述,与地幔柱有关的 A 型花岗岩显示了强烈的地幔组分的贡献,这与非地幔柱条件下形成的 A 型花岗岩有明显的差异。中亚造山带 A 型花岗岩也显示了强烈的地幔组分,但其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高(最高可达 7.5),而与地幔柱有关的 A 型花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值一般不超过 5。

6 讨论与结论

A 型花岗岩是重要的花岗岩类,由于它一般产于非造山环境,因此在岩石大地构造研究中占有重要的地位。不过即使是在非造山环境中形成的 A 型花岗岩也是多样的。本文通过对比攀西、华南和北方造山带 3 个地区的 A 型花岗岩,厘定了与地幔柱有关的 A 型花岗岩的一些特点,有利于同类岩石的甄别。与地幔柱有关的 A 型花岗岩的主要特点包括:(1)与基性-超基性岩体在时间和空间上紧密伴生,并且其 Fe、Ti 氧化物的平均含量大大高于其他类型的 A 型花岗岩;(2)具有较高的锆石饱和温度(860~960 °C),可能与峨眉山地幔柱的热异常有直接关系;(3)地幔柱条件下形成的 A 型花岗岩 Nb/Th 和 Ga/Al 比值比非地幔柱条件下形成的岩体高,反映了源区或母岩浆的特征;(4)通常显示正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(但不超过 5),反映地幔组分的贡献;其模式年龄和岩体形成年龄相差不大,说明其岩浆源区为底侵的新生下地壳。

参考文献(References):

- [1] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. Geol Soc Am Abst Prog, 1979, 11: 468.
- [2] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189-200.
- [3] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [4] Eby G N. The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. Lithos, 1990, 26(1/2): 115-134.
- [5] Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications[J]. Geology, 1992, 20(7): 641-644.

- [6] Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 2007, 97(1/2): 1-29.
- [7] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. The geologic, geochemical and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood basalt province [J]. *Geology*, 2004, 30: 917-920.
- [8] 许保良, 阎国翰, 张臣, 等. A 型花岗岩的岩石学亚类及其物质来源 [J]. *地学前缘*, 1998, 5(3): 113-124. XU Bao-liang, YAN Guo-han, ZHANG Chen, et al. Petrological subdivision and source material of A-type granites [J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(3): 113-124.
- [9] 王德滋, 赵广涛, 邱检生. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约 [J]. *高校地质学报*, 1995, 1(2): 13-21. WANG De-zi, ZHAO Guang-tao, QIU Jian-sheng. The tectonic constraint on the Late Mesozoic A-type granites in Eastern China [J]. *Geological Journal of China Universities*, 1995, 1(2): 13-21.
- [10] Shellnutt J G, Zhou M F. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: their relationship to the Emeishan mantle plume [J]. *Chemical Geology*, 2007, 243(3/4): 286-316.
- [11] Zhong H, Zhu W G, Chu Z Y, et al. Shrimp U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2007, 236(1/2): 112-133.
- [12] 罗震宇. 峨眉山大火成岩省中酸性侵入岩的年代学和地球化学特征: 与峨眉山幔柱的成因联系 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007. LUO Zhen-yu. Geochronology and geochemistry of intermediate-acidic intrusions in the Emeishan large igneous province: implications for a genetic relation with the mantle plume [D]. Beijing: Graduate University, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [13] 邱检生, 王德滋, 蟹泽聪史, 等. 福建沿海铝质 A 型花岗岩的地球化学及岩石成因 [J]. *地球化学*, 2000, 29(4): 313-321. QIU Jian-sheng, WANG De-zi, Satoshi Kanisawa, et al. Geochemistry and petrogenesis of aluminous A-type granites in the coastal area of Fujian Province [J]. *Geochimica*, 2000, 29(4): 313-321.
- [14] Qiu J S, Wang D Z, McInnes B I A, et al. Two subgroups of A-type granites in the coastal area of Zhejiang and Fujian Provinces, SE China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Earth Sciences*, 2004, 95(1/2): 227-236.
- [15] 洪大卫, 王涛, 童英. 中国花岗岩概述 [J]. *地质论评*, 2007, 53(B08): 9-16. HONG Da-wei, WANG Tao, TONG Ying. An outline about granitoids in China [J]. *Geological Review*, 2007, 53(B08): 9-16.
- [16] 朱金初, 陈骏, 王汝成, 等. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带 [J]. *高校地质学报*, 2008, 14(4): 474-484. ZHU Jin-chu, CHEN Jun, WANG Ru-cheng, et al. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle part of the Nanling Mts region [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(4): 474-484.
- [17] 吴福元, 江博明, 林强. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义 [J]. *科学通报*, 1997, 42(20): 2188-2192. WU Fu-yuan, Jahn Bor-ming, LIN Qiang. Isotopic characteristics of the post orogenic granites in orogenic belt of North China and their implication in crustal growth [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(20): 2188-2192.
- [18] 陈志广, 张连昌, 吴华英, 等. 内蒙古西拉木伦成矿带碾子沟铜矿区 A 型花岗岩地球化学和构造背景 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 879-889. CHEN Zhi-guang, ZHANG Lian-chang, WU Huaying, et al. Geochemistry study and tectonic background of A style host granite in Nianzigou molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum metallogenic belt, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4): 879-889.
- [19] 唐功建, 陈海红, 王强, 等. 西天山达巴特 A 型花岗岩的形成时代与构造背景 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(5): 947-958. TANG Gong-jian, CHEN Hai-hong, WANG Qiang, et al. Geochronological age and tectonic background of the Dabate A-type granite pluton in the west Tianshan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(5): 947-958.
- [20] Shi G H, Miao L C, Zhang F Q, et al. Emplacement age and tectonic implications of the Xilinhot A-type granite in Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(7): 723-729.
- [21] Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane,

- NW China: Nd - Sr isotope and trace element evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23 (5): 691 - 703.
- [22] 贺锋,许立权,苏宏伟,等. 内蒙古西部甜水井地区中二叠世A型花岗岩[J]. *西北地质*, 2004, 37(3): 7 - 14.
- HE Feng, XU Li-quan, SU Hong-wei, et al. Characteristics and tectonic setting of Middle-Permian A-type granites in Tianshuijing area, west of Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 2004, 37(3): 7 - 14.
- [23] 苏玉平,唐红峰,侯广顺,等. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质A型花岗岩的地球化学研究[J]. *地球化学*, 2006, 35(1): 55 - 67.
- SU Yu-ping, TANG Hong-feng, HOU Guang-shun, et al. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in west Junggar, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 2006, 35(1): 55 - 67.
- [24] 苏玉平,唐红峰,刘丛强,等. 新疆东准噶尔苏吉泉铝质A型花岗岩的确立及其初步研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(3): 175 - 184.
- SU Yu-ping, TANG Hong-feng, LIU Cong-qiang, et al. The determination and a preliminary study of Sujiquan aluminous A-type granites in east Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2006, 25(3): 175 - 184.
- [25] 孙德有,吴福元,高山,等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质A型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 263 - 275.
- SUN De-you, WU Fu-yuan, GAO Shan, et al. Confirmation of two episodes of A-type granite emplacement during Late Triassic and Early Jurassic in the central Jilin Province, and their constraints on the structural pattern of eastern Jilin - Heilongjiang area, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 263 - 275.
- [26] 王式洸,韩宝福,洪大卫,等. 新疆乌伦古河碱性花岗岩的地球化学及其构造意义[J]. *地质科学*, 1994, 29(4): 373 - 383.
- WANG Shi-guang, HAN Bao-fu, HONG Da-wei, et al. Geochemistry and tectonic significance of alkali granites along Ulungur River, Xinjiang[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1994, 29(4): 373 - 383.
- [27] Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from north Xinjiang, China: geochemistry and Nd - Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 1997, 138(3/4): 135 - 159.
- [28] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1/2): 143 - 173.
- [29] 林强,葛文春,吴福元,等. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 403 - 412.
- LIN Qiang, GE Wen-chun, WU Fu-yuan, et al. Geochemistry of Mesozoic granites in Dahinggan Ling ranges[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 403 - 412.
- [30] Watson E B, Harrison T M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64(2): 295 - 304.
- [31] King P L, White A J R, Chappell B W, et al. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, Southeastern Australia[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(3): 371 - 391.
- [32] 吴锁平,王梅英,戚开静. A型花岗岩研究现状及其述评[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 57 - 66.
- WU Suo-ping, WANG Mei-ying, QI Kai-jing. Present situation of researches on A-type granites: a review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2007, 26(1): 57 - 66.
- [33] Li X H, Chen Z G, Liu D Y, et al. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: age, origin, and tectonic significance[J]. *International Geology Review*, 2003, 45(10): 898 - 921.
- [34] 包志伟,赵振华. 佛冈铝质A型花岗岩的地球化学及其形成环境初探[J]. *地质地球化学*, 2003, 31(1): 52 - 61.
- BAO Zhi-wei, ZHAO Zhen-hua. Geochemistry and tectonic setting of the Fugang aluminous A-type granite, Guangdong Province, China - a preliminary study[J]. *Geology - Geochemistry*, 2003, 31(1): 52 - 61.
- [35] 范春方,陈培荣. 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[J]. *地球化学*, 2000, 29(4): 358 - 366.
- FAN Chun-fang, CHEN Pei-rong. Geochemical characteristics and tectonic implication of Beitou A-type granite intrusive in south Jiangxi Province[J]. *Geochimica*, 2000, 29(4): 358 - 366.

- [36] 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 广东龙口南昆山铝质 A 型花岗岩的成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(1): 1-10.
LIU Chang-shi, CHEN Xiao-ming, WANG Ru-cheng, et al. Origin of Nankunshan aluminous A-type granite, Longkou County, Guangdong Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2003, 22(1): 1-10.
- [37] 邱检生, McInnes M I A, 蒋少涌, 等. 江西会昌密坑山岩体的地球化学及其成因类型的新认识[J]. 地球化学, 2005, 34(1): 20-32.
QIU Jian-sheng, McInnes M I A, JIANG Shao-yong, et al. Geochemistry of the Mikengshan pluton in Huichang County, Jiangxi Province and new recognition about its genetic type[J]. Geochimica, 2005, 34(1): 20-32.
- [38] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湘南西山铝质 A 型花岗岩质火山-侵入杂岩的地球化学及其形成环境[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 6(4): 15-23.
FU Jian-ming, MA Chang-qian, XIE Cai-fu, et al. Geochemistry and tectonic setting of Xishan aluminous A-type granitic volcanic-intrusive complex, southern Hunan[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2004, 6(4): 15-23.
- [39] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析[J]. 地球化学, 2005, 34(3): 215-226.
FU Jian-ming, MA Chang-qian, XIE Cai-fu, et al. Ascertainment of the Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings[J]. Geochimica, 2005, 34(3): 215-226.
- [40] 汪雄武, 王晓地, 刘家齐, 等. 湖南骑田岭花岗岩与锡成矿的关系[J]. 地质科技情报, 2004, 23(2): 1-12.
WANG Xiong-wu, WANG Xiao-di, LIU Jia-qi, et al. Relationship of Qitianling granite to Sn mineralization in Hunan Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(2): 1-12.
- [41] 柏道远, 陈建超, 马铁球, 等. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(4): 255-272.
BAI Dao-yuan, CHEN Jian-chao, MA Tie-qiu, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton in southeast Hunan [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2005, 24(4): 255-272.
- [42] 谭俊, 魏俊浩, 李水如, 等. 广西昆仑关 A 型花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2008, 33(6): 743-754.
TAN Jun, WEI Jun-hao, LI Shui-ru, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Kunlun A-type granite, Guangxi[J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(6): 743-754.
- [43] Kebede T, Koeberl C. Petrogenesis of A-type granitoids from the Wallagga area, western Ethiopia: constraints from mineralogy, bulk-rock chemistry, Nd and Sr isotopic compositions[J]. Precambrian Research, 2003, 121(1/2): 1-24.
- [44] Frindt S, Trumbull R B, Romer R L. Petrogenesis of the Gross Spitzkoppe topaz granite, central western Namibia: a geochemical and Nd-Sr-Pb isotope study[J]. Chemical Geology, 2004, 206(1/2): 43-71.
- [45] Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72(13): 3084-3104.
- [46] 王德滋, 周金城. 我国花岗岩研究的回顾与展望[J]. 岩石学报, 1999, 15(2): 161-169.
WANG De-zi, ZHOU Jin-cheng. Look back and look forward to granite research[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(2): 161-169.
- [47] 胡建, 邱检生, 王德滋, 等. 中国东南沿海与南岭内陆 A 型花岗岩的对比及其构造意义[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 404-414.
HU Jian, QIU Jian-sheng, WANG De-zi, et al. Comparative investigations of A-type granites in the coastal and the Nanling inland areas of SE China, and their tectonic significances[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(3): 404-414.
- [48] 祝洪臣, 张炯飞, 权恒. 大兴安岭中生代两期成岩成矿作用的元素、同位素特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(4): 436-442.
ZHU Hong-chen, ZHANG Jiong-fei, QUAN Heng. Two stages of Mesozoic lithogenesis and mineralization in Daxing'anling Mountains[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(4): 436-442.
- [49] Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364: 299-307.