

扬子板块西北缘碧口地块南一里花岗岩成因研究

骆金诚^{1,3)}, 赖绍聪²⁾, 秦江锋²⁾, 胡瑞忠¹⁾

1)中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550002;

2)西北大学大陆动力学国家重点实验室, 地质学系, 陕西西安 710069;

3)中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 本文对扬子板块西北缘南一里岩体进行了系统的地球化学研究, 探讨了该岩体的岩石成因、成岩物质来源及其地质意义。该岩体具有高 SiO₂(70.27%~71.21%)、Al₂O₃(14.97%~16.19%)、K₂O(3.11%~3.83%)含量, A/CNK=1.04~1.08, 以低 Y(<10.01×10⁻⁶)和 HREE(e.g. Yb<0.70×10⁻⁶)为特征, 富集 Rb、Th、U、K、Sr, 亏损 Ba、Nb、Ta、P 和 Ti, 稀土总量 73.55×10⁻⁶~93.86×10⁻⁶。Eu 异常不明显(0.67~0.83)。具有较高的 Sr/Y(33.01~50.53)和(La/Yb)_N(15.30~23.04)比值及强分异的稀土元素组成。结合岩体产出的时空位置, 表明南一里岩体形成于典型的后碰撞构造环境, 可能是三叠纪华北和扬子板块的碰撞作用导致该区地壳明显增厚, 在伸展-减薄的构造体制下, 地壳中变玄武质和泥质岩石通过角闪岩脱水发生部分熔融形成。

关键词: 南一里花岗岩; 地球化学; 岩石成因; 地壳深熔; 碧口地块

中图分类号: P588.121; P594.1; P541 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.05.06

Genesis of Nanyili Granite in Bikou Block, Northwest Margin of Yangtze Plate

LUO Jin-cheng^{1,3)}, LAI Shao-cong²⁾, QIN Jiang-feng²⁾, HU Rui-zhong¹⁾

1) Institute of Geochemistry, State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002;

2) State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069;

3) Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: The Nanyili granite pluton is located in Bikou block on the northwestern margin of the Yangtze Plate. This paper reports the geochemistry of the Nanyili granite and discusses its genesis, ore-forming material source and geological significance. The granite has high SiO₂ (70.27%~71.21%), Al₂O₃ (14.97%~16.19%) and K₂O (3.11%~3.83%) content with its A/CNK being 1.04~1.08, low Y (<10.01×10⁻⁶) and HREE (e.g., Yb<0.70×10⁻⁶). The ΣREE has a range of 73.55×10⁻⁶~93.86×10⁻⁶, characterized by enrichment of Rb, Th, U, K, Sr and depletion of Ba, Nb, Ta, Ti and P, slightly negative Eu anomalies (δEu=0.67~0.83) and high Sr/Y(33.01~50.53) and (La/Yb)_N(15.30~23.04) ratios with strongly fractionated REE patterns. According to these properties, in combination with a comprehensive analysis of the regional geological-tectonic settings, it is thought that the Nanyili granite pluton was formed in a typical post-collisional tectonic environment. It is probable that the collision between the North China and Yangtze plates during the Triassic resulted in obvious thickening of the crust. Under the extension and thinning tectonic mechanism, the metabasaltic and metapelitic rocks of the crust were partially melted through the amphibolitic dehydration.

Key words: Nanyili granite; geochemistry; petrogenesis; crustal anatexis; Bikou block

碧口地块呈NE-SW展布, 位于扬子板块西北缘, 是东、西秦岭、龙门山、松潘造山带的交接转换地段(张国伟等, 2001)。主要涉及的科学问题为东、西秦岭交接与龙门造山带的关系。包括晚古生代到中三叠纪时期, 勉略洋盆的形成闭合与龙门山断裂、攀西裂谷发生发展的时空关系; 现今交汇的构造几何学问题(张国伟等, 2004)。在这一复杂地体内侵入了大量的花岗岩, 它们成为研究碧口地区侵入岩体及相关矿床成因的最直接物质记录。因此, 探究其形成构造环境、源区特征及动力学机制, 可为揭示秦岭地区大地构造演化及多金属成矿作用问题提供新的资料。前人对这些岩体的成因认识: (1)拆沉作用后幔源岩浆底侵下地壳熔融(秦江锋等, 2005); (2)增厚下地壳富K玄武质岩类部分熔融形成的埃达

克质岩(张宏飞等, 2007); (3)地壳加厚环境下, 砂屑岩部分熔融形成的S型花岗岩(李佐臣等, 2009, 2010); (4)在增厚-伸展减薄的体制下, 混合源区脱水部分熔融形成的熔体进行一定程度的混合(骆金诚等, 2010a)。可以看出, 深部地壳物质的组成直接制约了碧口地区花岗岩的成因机制及其构造演化的认识。因此, 对南一里岩体的熔融机理和源区属性有进一步研究的必要。

1 地质背景和岩石学特征

南一里岩体近三角形(图 1), 似“葫芦状”, 分布面积约 140 km², 出露于碧口地块南缘平武县北部, 是碧口地块中最大的岩体, 该岩体北侧与碧口群变基性火山熔岩、火山碎屑岩、凝灰岩等呈侵入

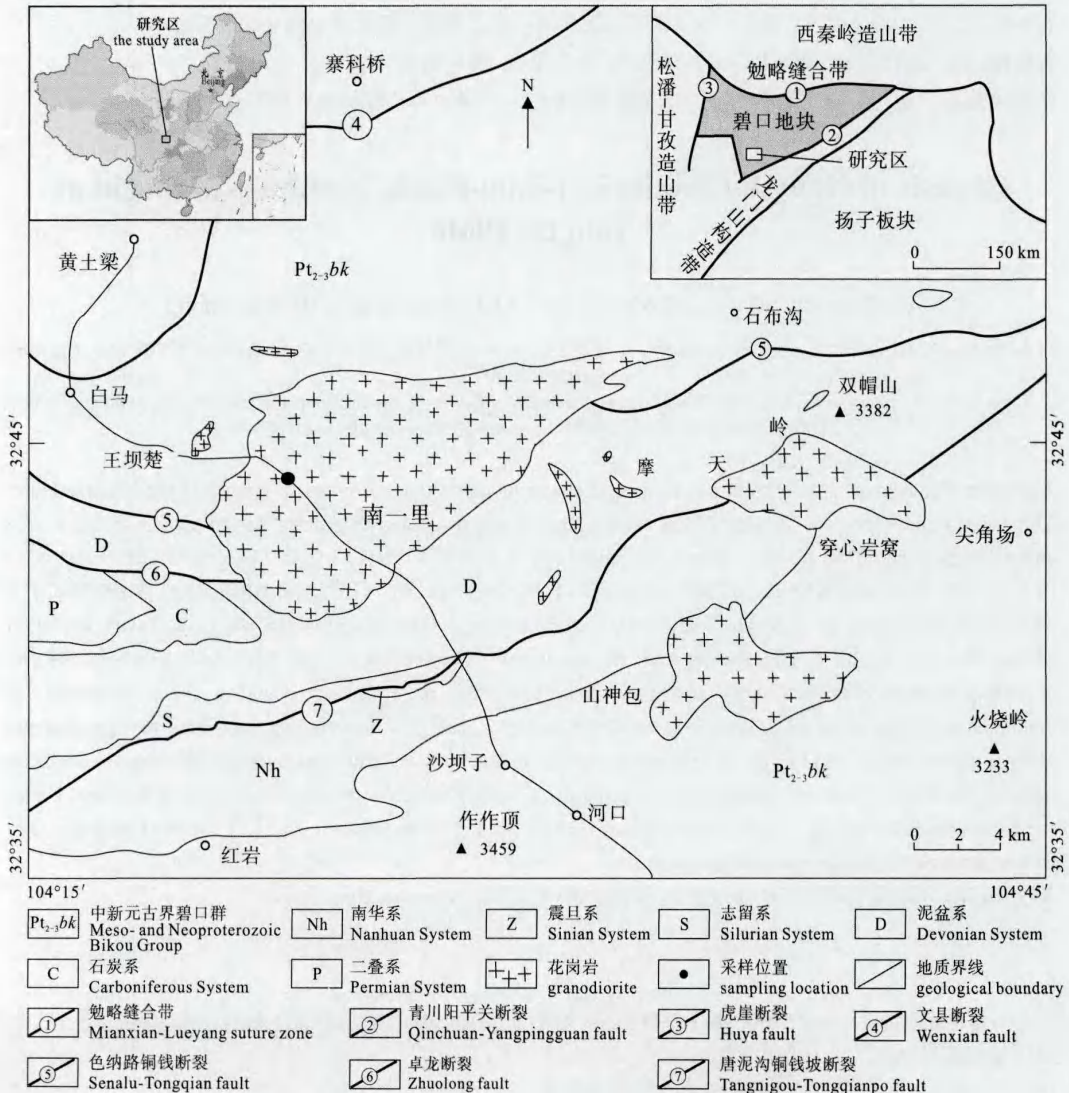


图 1 碧口地区南一里花岗岩体一带地质简图(据李佐臣等, 2009)

Fig. 1 Geological sketch map of Nanyili granite pluton around Bikou area (after LI Zuo-chen et al., 2009)

接触关系。南侧与泥盆纪变质细砂岩、粉砂质板岩等呈侵入接触关系, 色纳路-铜钱断裂和卓龙断裂被岩体切断。野外观察岩体与围岩的界线清楚, 岩体边缘见有少量捕虏体, 有典型的岩浆侵蚀围岩的港湾状、不规则界面。在岩体中可见沿岩体节理贯入的长英质脉体, 脉体多相互穿插呈 X 形。没有明显的构造变形, 表明这些脉体不是韧性剪切作用的产物, 而是岩浆期后热液作用的产物。该岩体岩性比为黑云母二长花岗岩, 岩石呈灰白色, 中-细粒花岗岩结构, 块状构造。主要矿物组成为石英, 它形粒状, 含量 25%~30%; 斜长石, 自形柱状, 含量 30%~35%; 钾长石, 不规则板状, 含量±30%。暗色矿物以黑云母为主, 含量±8%。副矿物以榍石和磷灰石为主, 其次为锆石、褐帘石、磁铁矿等。在斜长石边缘可见蠕英石。

2 地球化学特征

对野外采集新鲜样品进行详细的岩相学观察后, 选择没有脉体贯入的样品进行主、微量元素分析。分析测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素用 XRF 光谱测定, 分析精度一般优于 5%, 微量元素分析精度一般优于 10%。南一里花岗岩的主量及微量元素分析结果见表 1。

花岗岩 $SiO_2=70.27\% \sim 71.21\%$, 平均为 70.76%, 低 $Ti(TiO_2=0.24\% \sim 0.27\%)$; $MgO=0.67\% \sim 0.97\%$, $Mg\#=47 \sim 52$, 富 $Al_2O_3(14.97\% \sim 16.19\%)$, 铝饱和指数 $A/CNK=1.04 \sim 1.08$, 属于准铝-弱铝系列(图 2); $CaO=1.62\% \sim 2.20\%$, 富碱 ($Na_2O=4.22\% \sim 4.90\%$, $K_2O=3.11\% \sim 3.83\%$), K_2O+Na_2O 介于 7.68%~8.21%, 属于高钾钙碱性系列(图 3)。

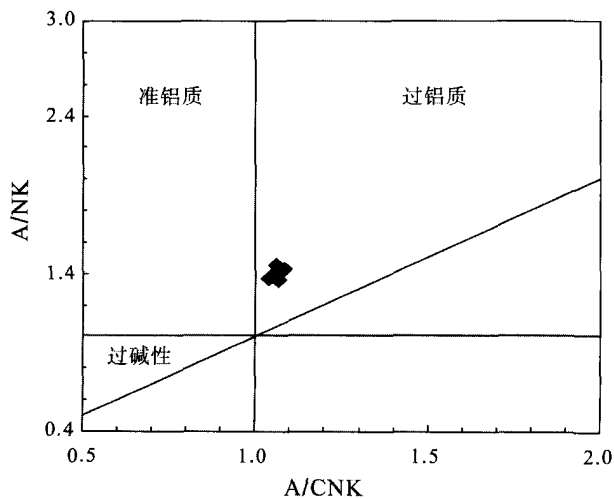


图 2 南一里花岗岩 A/CNK-A/NK 图
Fig. 2 A/CNK-A/NK plot of Nanyili granite

在球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 4a)中, 可以看出样品具有一致稀土配分曲线, 富集轻稀土(LREE)。轻重稀土高度分异, $(La/Yb)_N=15.30 \sim 23.04$, 强烈亏损重稀土 $Yb=0.56 \times 10^{-6} \sim 0.69 \times 10^{-6}$, 平均为 $0.63 \times 10^{-6} < 1.8 \times 10^{-6}$, 也表现强分异的元素分配模式, 稀土含量偏低 $\Sigma REE=73.55 \times 10^{-6} \sim 93.86 \times 10^{-6}$ 。Eu 异常不明显, $\delta Eu=0.67 \sim 0.83$ 。在微量元素蛛网图中(图 4b), 南一里花岗岩不同程度地富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Sr、K 等和轻稀土, 亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、P、Ti 和 Y($Y=7.92 \times 10^{-6} \sim 10.001 \times 10^{-6}$, 平均为 8.74×10^{-6}), 由此导致南一里花岗岩具有高的 Sr/Y 比值(33.01~50.53)。

3 问题讨论

3.1 岩浆源区性质

在很多陆-陆碰撞造山带中, 都形成了大量后碰撞准铝质高钾钙碱性花岗岩类, 其成因还存在很多争论, 目前主要认识: (1)高钾钙碱性花岗岩源于富 K 安山岩的部分熔融作用(Roberts et al., 1993); (2)高铝玄武质岩浆在上升过程中同化泥质岩石(Patiño Douce, 1995); (3)源自沉积岩的长英质岩浆和镁铁质岩浆的混合作用(Davis et al., 1993); (4)幔源钾质岩浆在上升过程中发生结晶分异并同化了大量地壳物质(Schaltegger et al., 1992)。而南一里高钾钙碱性花岗岩地球化学特征相对于 I 型和 S 型花岗岩(White et al., 1977), 亏损 Y($7.92 \times 10^{-6} \sim 10.01 \times 10^{-6}$)和强烈亏损重稀土(HREE) $Yb=0.56 \times 10^{-6} \sim 0.69 \times 10^{-6}$, 富集 Sr(405×10^{-6}), 使该岩体具有高的 Sr/Y 比值(51)和(La/Yb)_N 比值(23)。在目前用于鉴别埃达克岩的地球化学特征的图中(图 5), 样品都落于典型埃达克岩范围内, 显示该岩体具有部分类似

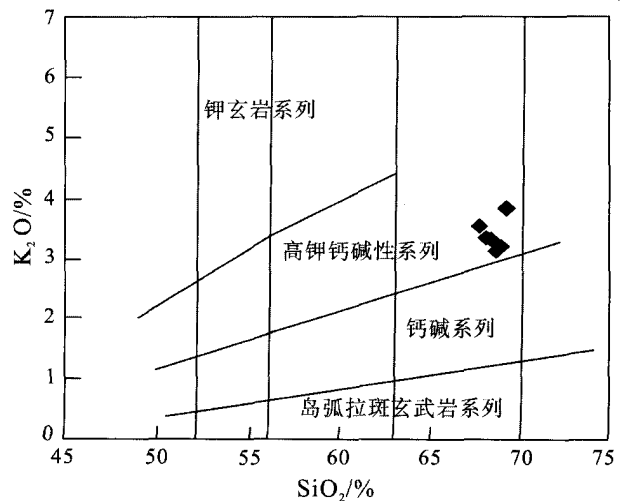


图 3 南一里花岗岩 K_2O-SiO_2 图
Fig. 3 K_2O-SiO_2 diagram of Nanyili granite

表1 南一里黑云母花岗岩主量(%)、微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果
 Table 1 Analytical results of major (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) for Nanyili granite

样品号	NYLG-01	NYLG-05	NYLG-06	NYLG-07	NYLG-08	NYLG-09	NYL*	N**
SiO ₂	71.21	70.67	70.88	70.49	70.27	71.03	71.29~73.05	69.82~73.41
TiO ₂	0.25	0.24	0.24	0.26	0.25	0.27	0.22~0.26	0.23~0.47
Al ₂ O ₃	14.97	15.78	15.77	15.87	16.19	15.74	14.82~15.81	14.58~15.50
Fe ₂ O ₃ ^T	1.82	1.46	1.75	1.63	1.63	1.69	0.76~1.26	1.49~2.90
MnO	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03~0.04	0.02~0.05
MgO	0.97	0.67	0.78	0.84	0.87	0.89	0.47~0.74	0.55~1.42
CaO	1.62	1.97	2.20	2.00	2.02	1.90	1.60~2.34	1.79~2.89
Na ₂ O	4.22	4.90	4.57	4.69	4.66	4.64	4.15~4.30	3.82~3.90
K ₂ O	3.83	3.31	3.11	3.33	3.52	3.17	3.05~3.62	2.40~3.61
P ₂ O ₅	0.09	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09~0.12	0.08~0.14
LOI	0.53	0.39	0.41	0.38	0.38	0.48	0.34~0.70	0.27~0.62
Total	99.54	99.52	99.83	99.61	99.92	99.94	99.57~100.09	100.62~100.93
A/CNK	1.07	1.04	1.06	1.06	1.07	1.08	1.07~1.11	1.09~1.14
A/NK	1.35	1.35	1.45	1.40	1.41	1.42	1.40~1.50	1.45~1.74
σ	2.30	2.44	2.12	2.34	2.45	2.18	1.84~2.07	1.44~1.91
Mg#	51.60	47.86	47.13	50.76	51.63	51.30	44.57~59.47	46.26~53.29
Ba	1017	653	601	717	772	551	573~679	636~931
Rb	145	140	124	128	132	126	165~121	76~143
Sr	314	374	329	405	383	374	275~396	352~506
Y	9.52	7.92	10.01	8.02	8.51	8.45	7.46~9.60	7.6~9.2
Zr	111	117	83	120	118	113	75~117	113~162
Nb	7.51	6.68	7.05	6.11	6.19	6.57	5.60~8.11	6.2~7.8
Th	8.55	7.36	5.43	7.10	6.75	7.52	4.96~8.76	5.48~8.19
Pb	30.92	24.08	21.84	24.10	24.56	23.27	~	18.6~27.13
Ga	20.31	21.06	20.04	20.26	20.53	20.13	17.98~21.45	19.6~22.1
Zn	46.42	41.39	43.38	43.66	42.88	45.28	34.27~43.4	34.1~61.1
Cu	5.46	8.12	10.70	10.56	11.99	8.01	1.96~8.73	3.3~21.2
Ni	12.56	4.89	5.35	8.79	10.04	9.44	7.11~9.43	4.4~38.9
V	30.12	18.41	24.84	25.68	26.34	24.80	~	17.4~56
Cr	19.95	7.20	10.82	11.71	12.19	12.20	5.85~11.59	9.2~37.1
Hf	3.05	3.18	2.45	3.26	3.14	3.09	2.16~3.13	2.83~4.45
Cs	14.49	8.47	7.94	7.77	8.56	10.91	6.38~16.65	~
Sc	4.35	3.49	4.52	3.79	3.86	3.93	4.58~6.96	2.96~7.73
Ta	1.11	0.90	1.19	0.78	0.75	1.06	0.67~1.10	0.62~0.94
Co	107.38	118.88	99.27	97.83	105.46	122.93	2.11~3.88	2.2~11.3
U	1.93	4.28	2.34	2.38	2.36	2.41	1.31~3.46	1.01~2.58
La	20.44	18.25	14.46	17.95	17.33	19.07	11.88~19.23	15.64~21.92
Ce	40.57	36.00	30.98	35.36	34.49	36.87	22.78~37.84	27.21~41.84
Pr	4.51	3.96	3.51	3.93	3.89	4.17	2.62~4.16	3.49~4.52
Nd	17.40	14.98	13.76	15.06	14.60	15.73	11.02~16.77	11.90~16.70
Sm	3.42	2.88	3.14	2.89	2.91	3.08	2.39~3.02	2.34~2.95
Eu	0.72	0.70	0.65	0.74	0.72	0.69	0.64~0.78	0.62~0.79
Gd	2.72	2.30	2.73	2.39	2.33	2.48	2.25~2.95	2.11~2.53
Tb	0.38	0.31	0.41	0.31	0.32	0.33	0.33~0.39	0.29~0.32
Dy	1.71	1.38	1.91	1.43	1.44	1.52	1.56~2.03	1.19~1.52
Ho	0.30	0.25	0.32	0.26	0.27	0.27	0.27~0.34	0.22~0.25
Er	0.78	0.65	0.79	0.68	0.70	0.71	0.67~0.89	0.56~0.73
Tm	0.12	0.10	0.12	0.10	0.11	0.11	0.09~0.12	0.09~0.10
Yb	0.69	0.58	0.68	0.56	0.64	0.66	0.56~0.77	0.53~0.75
Lu	0.11	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.08~0.12	0.08~0.12
Sr/Y	33.01	47.29	32.88	50.53	44.95	44.27	31.85~41.75	39.90~60.00
Y/Yb	13.83	13.73	14.76	14.35	13.24	12.76	11.48~15.57	11.20~15.56
La/Yb	29.68	31.67	21.32	32.11	26.95	28.80	21.21~32.00	25.39~36.95
δ Eu	0.70	0.81	0.67	0.83	0.82	0.74	0.74~0.96	0.74~0.89
T(Zr) ^C	754.56	754.84	730.30	759.05	757.64	757.15	~	~

NYL*和N**分别是李佐臣等(2009)和张宏飞等(2007)南一里岩体样品的变化范围。

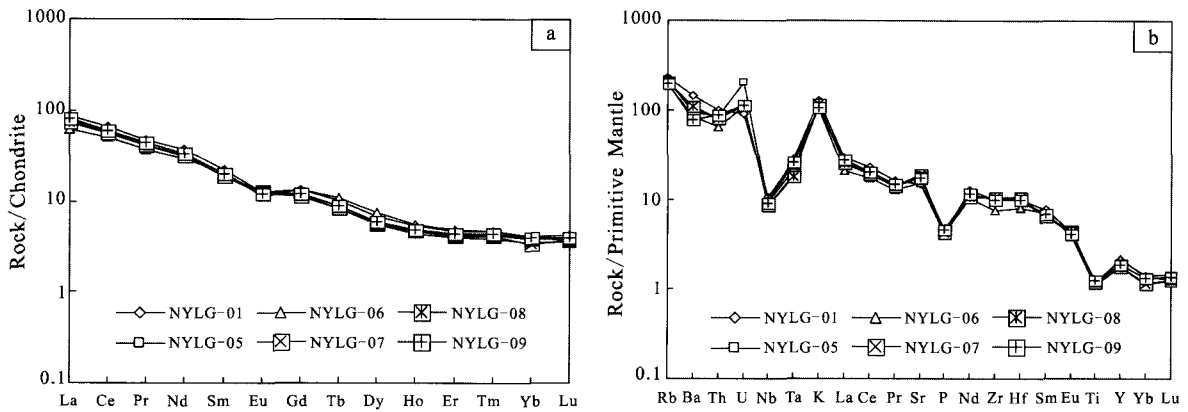


图 4 南一里花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式(a)和不相容元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化数据引自 Sun et al., 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized incompatible element spidergrams of Nanyili granites(b) (normalization values after Sun et al., 1989)

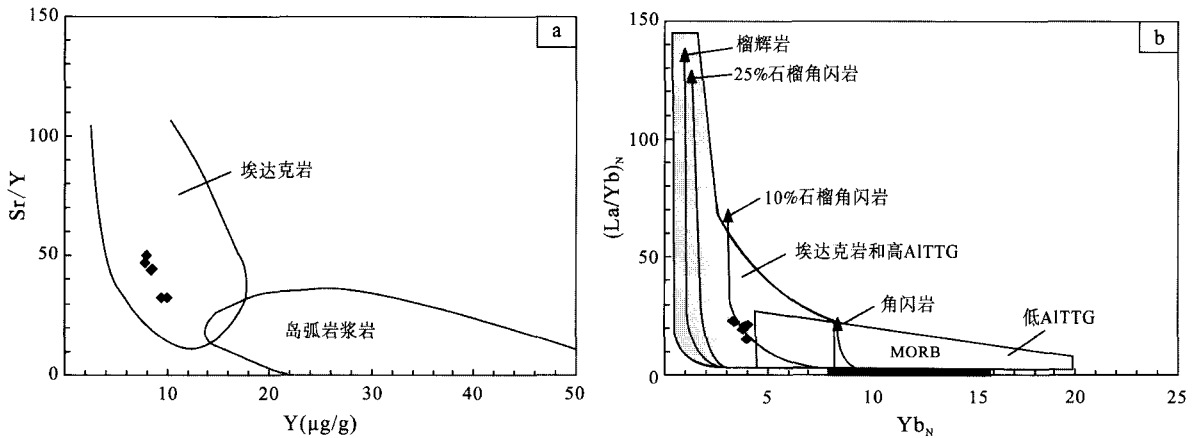


图 5 南一里花岗岩 Y-Sr/Y 图(a)和 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 图(b) (据 Defant et al., 1990)

Fig. 5 $Y-Sr/Y$ (a) and $Yb_N-(La/Yb)_N$ (b) diagrams for Nanyili granite (after Defant et al., 1990)

埃达克质岩的属性。但与典型埃达克岩相比, 具有低 Sr(314×10^{-6})、较低 Cr、Ni 含量, 高 Rb/Sr、CaO/Na₂O(0.38~0.55>0.3)比值及较高的 K₂O、铝饱和指数 A/CNK(1.04~1.14>1), 这种特性不可能简单地用岩浆分离结晶作用来解释。

目前研究表明: 区内这些岩体的地球化学特征主要显示准铝-弱过铝的高钾钙碱性 I 型花岗岩及高 K 埃达克质岩的特性(秦江峰等, 2005; 张宏飞等, 2005, 2007); 李佐臣等(2009)认为由杂砂岩熔融形成 S 型花岗岩。实验岩石学证实: 地壳中基性岩类(玄武质成分)部分熔融形成化学成分偏基性的准铝质花岗岩类(Johannes et al., 1996; Sisson et al., 2005), 而源岩为泥质岩石的熔融, 无论水是否饱和, 形成的花岗质岩浆 Al 总是过饱和 A/CNK>1.1(Sen et al., 1994; Rapp et al., 1995; Winther, 1996; Montel et al., 1997; Stevens et al., 1997), 硬砂岩熔融也形成铝饱和的花岗闪长岩和过饱和的花岗岩(Montel et al.,

1997; Stevens et al., 1997)。当 A/CNK 均小 1.1 时, 不可能是由泥质岩或是硬砂岩部分熔融形成。角闪岩在水饱和的条件下熔融形成的岩浆也是过铝的(Beard et al., 1991), 但角闪岩在水不饱和的条件下, 随着水压的降低, 脱水熔融形成岩浆的 A/CNK 逐渐从大于 1 变为小于 1, 而且铝的含量随着熔融压力的增加而增加, 因为其中斜长石的 An 组分在高压下变得不稳定(基性的斜长石比酸性的斜长含铝高)。由此看来, 南一里岩体的源岩可能在水压不高的条件下, 通过角闪岩的脱水作用导致部分熔融。

岩体的 $w(La)/w(Yb)$ 为 21.32~31.67, 平均为 28.42, $(La/Yb)_N$ 为 15.30~23.04, 平均为 20.40, 表明是在陆壳底部较深源区岩石脱水熔融形成。明显亏损 Y($7.92 \times 10^{-6} \sim 10.01 \times 10^{-6}$)和 HREE ($Yb=0.56 \times 10^{-6} \sim 0.69 \times 10^{-6} < 1.8 \times 10^{-6}$), 具有低 Yb/Lu(6~7)和 Dy/Yb(2.2~2.8)比值, 表明其源区残留相主要为石榴石+角闪石(Moyen, 2009), 这些特征表明玄武质地壳在高

温高压条件下达到石榴石角闪岩相发生脱水部分熔融(Rapp et al., 1995)。Nb、P 的亏损说明斜长石作为熔融残留相或结晶分离相存在,即熔融过程中斜长石没有耗尽(Patiño Douce, 1995)。Cr($7 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$)和 Ni($5 \times 10^{-6} \sim 13 \times 10^{-6}$)较低, Nb/U 比值为 1.6~3.9, Ce/Pb 比值为 1.3~1.6, 均和大陆上地壳非常接近。同时该岩体 U($1.9 \times 10^{-6} \sim 2.4 \times 10^{-6}$)、Th($6.8 \times 10^{-6} \sim 8.6 \times 10^{-6}$)等元素的含量较高,其 Th/U 比值介于 2.3 到 4.4 之间,与上地壳接近(U= 2.8×10^{-6} , Th= 10.7×10^{-6} , Th/U=3.8; Taylor et al., 1985),表明源区有一定量上地壳沉积物的参与。岩石的 Rb= $126 \times 10^{-6} \sim 145 \times 10^{-6}$, Sr= $314 \times 10^{-6} \sim 405 \times 10^{-6}$, Ba= $55 \times 10^{-6} \sim 1017 \times 10^{-6}$, Rb/Sr 比值介于 0.32 到 0.45 之间,表明源区由含不成熟地壳物质的部分熔融,与图 5 中显示含有泥质熔体加入一致。同时全岩 Sr-Nd-Pb 同位素表明这些花岗岩的岩浆源应为存留于下地壳的元古宙玄武质岩类(张宏飞等, 2007),该区元古宙下地壳主要为玄武质岩石,可能包含一定量砂岩、泥岩等沉积岩。在 CaO/Na₂O-Al₂O₃/TiO₂图中(图 6b),岩石具有低的 CaO/Na₂O 比值和高 Al₂O₃/TiO₂ 比值,表明源区可能包含一定量富 Al₂O₃ 的沉积岩(图 5)。Rb-Sr 图解(图 6a)反映源岩存在泥质熔融体的加入。

Sisson et al.(2005)证实低钾的玄武质岩石部分熔融不可能产生高钾岩浆,岛弧玄武质下地壳的部分熔融作用可以形成大量中钾到高钾钙碱性长英质岩浆,熔融反应为角闪石和黑云母裂解。

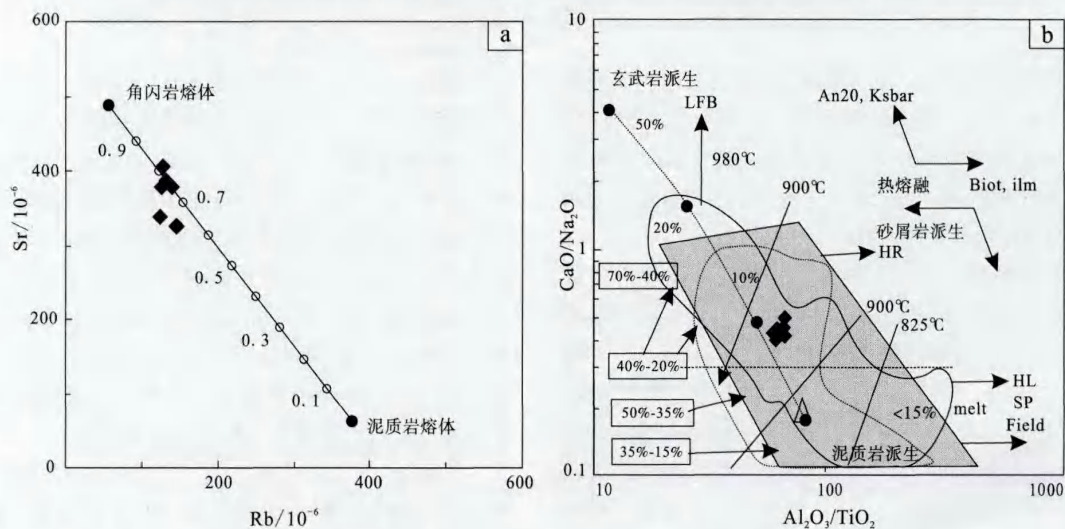


图 6 南一里花岗岩 Rb-Sr 图解(图 a 据高利娥等, 2010)和源岩成分判别图解(图 b 据 Sylvester, 1998)
 Fig. 6 Diagram for Rb versus Sr (Fig. a, after GAO Li-e et al., 2010) and discriminating compositions of source rocks (Fig. b, after Sylvester, 1998) for Nanyili granite

HL-喜马拉雅强过铝质花岗岩; HR-海西强过铝质花岗岩; LFB-拉克兰河褶皱带强过铝质花岗岩
 HL-Himalayan strongly peraluminous granitoids; HR-Hercynian strongly peraluminous granitoids;
 LFB-Lachlan fold belt strongly peraluminous granitoids

Clemens(2009)研究后碰撞型高钾钙碱性花岗岩的成因机制可能为:碰撞后阶段岩石圈的减薄作用导致岩石圈地幔部分熔融形成大量镁铁质岩浆,这些镁铁质岩浆底侵岛弧地壳底部,在地壳深部富 K 的镁铁质岩浆和源自地壳的长英质岩浆发生混合作用,花岗岩中的暗色微粒包体就代表来自地幔的镁铁质岩浆,岩石富 K 的原因是其源区有富 K 的镁铁质岩浆参与。野外地质工作中并没有发现这类包体,地球化学特征也没有显示明显的幔源贡献。因此,源岩可能为沉积岩和玄武质岩的互层,当角闪岩脱水其富 K 流体诱发部分熔融形成混合花岗岩岩浆或源自沉积岩的长英质熔体和富 K 的镁铁质熔体发生岩浆混合作用。Moyen(2009)研究表明源岩成分对于熔体的 Sr/Y 和 La/Yb 比值也具有重要控制作用,与洋壳玄武岩相比陆壳岩石本身具有高 Sr/Y 比值和 Al₂O₃ 含量,在一定压力条件下发生部分熔融作用时,其残留相很容易出现石榴子石,这时大陆下地壳起源的长英质岩浆一般也具有高 Sr/Y 比值和和亏损重稀土。加上该区域火山岩系具有高 Sr 和 La 及低 Y 和 Yb 含量(Sr= 550×10^{-6} , La= 20×10^{-6} , Y= 4×10^{-6} , Yb= 2×10^{-6} ; 闫全人等, 2004),反映源区本身可能具有这种性质,从而造成该区花岗岩显示了部分埃达克质岩的地球化学特征。

3.2 大地构造意义

秦岭-大别-苏鲁造山带东西延伸 2000 km,它标志着中国大陆最终成为统一体(张国伟等, 2001)。到

目前为止, 纵观前人对秦岭地区三叠纪花岗岩进行的年代学研究, 发现 U-Pb 锆石年龄主要集中在 245~200 Ma(金维浚等, 2005; 张宏飞等, 2005; 秦江锋等, 2005; Zhang et al., 2006a, b; 李佐臣等, 2007; 骆金诚等, 2010b; Qin et al., 2010a, b), 这些岩体多具后碰撞花岗岩的特征, 其形成时代较为集中, 暗示了这一时期内整个秦岭地区存在大面积地壳熔融事件, 而且不受某一个构造单元严格控制的特征。碧口地块中南一里岩体的侵位时间约 225 Ma(李佐臣等, 2007; 张宏飞等, 2007), 稍晚于秦岭造山带的主造山期(242±21 Ma)(李曙光等, 1996), 构造形式也显示出一种相对拉张环境下岩体的被动侵位, 没有明显的变形和岩浆面理, 边界也没有接触变形带(图 1)。在 $\lg[\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})]$ - SiO_2 图解中(图 7a), 显示该岩体形成于挤压环境向伸展环境转变的后造山期。在 Rb/30-Hf-3Ta 图解上(图 7b), 数据点主要落入后碰撞花岗岩区内。

碧口地块在该时期的演化过程中, 位于勉略缝合带以南, 龙门山构造带以西。勉略洋板块在早三叠世沿勉略缝合带向北插入微秦岭陆块之下, 华北和扬子发生大规模陆-陆碰撞, 碧口地块内的地壳受到强烈的横向缩短和构造挤压变形, 导致明显地壳增厚。野外地质特征显示, 碧口地区花岗岩的侵位不仅控制了印支期的变形过程, 而且花岗岩体直接侵入到已发生断裂和褶皱的地层中, 岩体的分布总体沿着 NEE 方向, 与区内的构造断裂带几乎平行。Meng 等(2005)通过对四川盆地西

北缘中生代沉积大地构造演化的研究表明, 扬子地块在晚三叠世发生顺时针的旋转作用, 秦岭造山带的西段在岩石圈深部处于相对挤压的环境而地壳部分可能仍为张性环境。伸展-减压的构造作用易诱发下地壳含水矿物(如云母类和/或角闪石)发生脱水反应而导致地壳物质的部分熔融。实验表明, 玄武质或玄武安山质岩石在水不饱和的条件下脱水熔融是形成地壳中酸性岩石的重要原因, 但是正常厚度地壳的下地壳部并没有足够高的温度使下地壳发生部分熔融。文中采用锆石饱和温度计得出约 750℃, 从角闪石的固相曲线看, 达到了角闪石脱水熔融的温度 650℃。笔者认为可能在三叠纪地壳处于伸展-减薄的构造体制, 该区中-基性下地壳减压增温, 由角闪岩脱水部分熔融形成。

目前对碧口地块的基底认识: (1)基底是一个古老的硬块(任纪舜等, 1980); (2)缺失大陆基底(Şengör, 1984); (3)具有扬子地块的属性, 其基底为陆壳组分(许志琴等, 1992; 姜春发等, 2000; 张国伟等, 2001; 张季生等, 2007; 赵永久等, 2007; 张宏飞等, 2007; 李佐臣等, 2009, 2010; 骆金诚等, 2010a)。结合南一里花岗岩体的空间位置, 张宏飞等(2007)认为碧口地块内太古宙鱼洞子群及新元古代碧口群基性火山岩类的 Sr-Nd-Pb 同位素组成均不能作为碧口地块中印支期花岗岩的直接来源。张季生等(2007)运用地球物理方法表明基底岩石由前南华纪变质地层组成。赵永久等(2007)认为基底岩

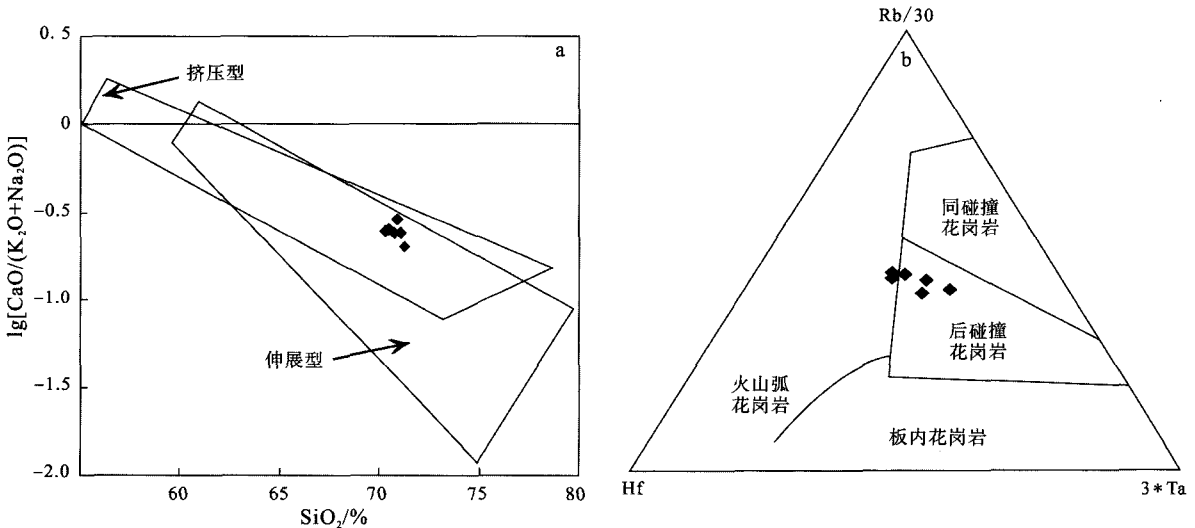


图 7 南一里花岗岩 $\lg[\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})]$ - SiO_2 图(a)(据 Brown, 1982)和微量元素构造环境判别图(b) (据 Harris et al., 1986)

Fig. 7 Diagrams of $\lg[\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})]$ - SiO_2 (Fig. a, after Brown, 1982) and tectonic setting of trace elements (Fig. b, after Harris et al., 1986) for Nanyili granite

石可能是黑云母片麻岩,其原岩主要是变质中性火成岩或杂砂岩。综上所述,笔者认为碧口基底的地壳并不均一,其源岩可能为变质的沉积岩和玄武质岩石的互层,正因这一复杂组构导致对其基底的认识尚不统一。

4 结论

1)研究表明南一里花岗岩为富 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 的高钾钙碱性系列,富集 LILE、Sr 及高 Sr/Y(33.01~50.53)和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值, Eu 异常不明显,明显亏损 Y 和 Yb,表现出部分类似埃达克质岩的地球化学特征。可能主要受其源岩控制,而非拆沉作用下地幔软流圈物质底侵下地壳物质熔融形成。

2)三叠纪华北—扬子两大板块发生大规模陆-陆碰撞导致碧口地块内的地壳明显增厚,在伸展-减薄减压增温的构造体制下,地壳中角闪岩脱水富 K 流体诱发互层的变玄武质和泥质沉积岩部分熔融形成。由此进一步限定了碧口地区深部地壳的属性。

致谢:匿名审稿人和编辑部细致认真地审阅了全文,并提出了启发性的修改意见,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- 高利娥,曾令森,胡古月. 2010. 藏南确当地区高 Sr/Y 比值二云母花岗岩的形成机制及其构造动力学意义[J]. 地质通报, 29(2-3): 214-226.
- 姜春发,王宗起,李锦轶. 2000. 中央造山带开合构造[M]. 北京:地质出版社.
- 金维浚,张旗,何登发,贾秀勤. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 21(3): 959-966.
- 李曙光,孙卫东,张国伟,陈家义,杨永成. 1996. 南秦岭勉略构造带黑沟峡变质火山岩的年代学和地球化学——古生代洋盆及其闭合时代的证据[J]. 中国科学(D)辑, 26(3): 223-230.
- 李佐臣,裴先治,丁仁平,刘战庆,李瑞保,李高阳,李夫杰,王飞. 2009. 川西北平武地区南一里花岗岩体地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 83(2): 260-271.
- 李佐臣,裴先治,丁仁平,刘战庆,李瑞保,孙雨,冯建赩,张亚峰. 2010. 川西北碧口地块老河沟岩体和筛子岩岩体地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 84(3): 343-356.
- 李佐臣,裴先治,丁仁平,刘战庆,王飞,李高阳,李瑞保,李夫杰. 2007. 川西北平武地区南一里花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 34(6): 1003-1012.
- 骆金诚,赖绍聪,秦江锋,李海波,李学军,臧文娟. 2010b. 南秦岭晚三叠世胭脂坝岩体的地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 56(6): 792-800.
- 骆金诚,赖绍聪,秦江锋,李学军,臧文娟,李海波. 2010a. 碧口地块王坝楚花岗岩成因及其地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 40(6): 1505-1563.
- 秦江锋,赖绍聪,李永飞. 2005. 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗岩闪长岩岩体成因研究及其地质意义[J]. 岩石学报, 21(3): 697-710.
- 任纪舜,姜春发,张正坤,秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化 1: 400 万中国大地构造图简要说明[M]. 北京:科学出版社.
- 许志琴,侯立玮,王宗秀,付小方,黄明华. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京:地质出版社.
- 闫全人, ANDREW D H, 王宗起, 闫臻, PETER A D, 王涛, 刘敦一, 宋彪, 姜春发. 2004. 扬子板块北缘碧口群火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 23(1): 1-11.
- 张国伟,程顺有,郭安林,董云鹏,赖绍聪,姚安平. 2004. 秦岭-大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合[J]. 地质通报, 23(9-10): 846-853.
- 张国伟,张本仁,袁学城,肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社.
- 张宏飞,靳兰兰,张利, HARRIS N, 周炼, 胡圣虹, 张本仁. 2005. 西秦岭花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成对基底性质及其构造属性的限制[J]. 中国科学(D)辑, 35(10): 914-926.
- 张宏飞,肖龙,张利,袁洪林,靳兰兰. 2007. 扬子陆块西北缘碧口块体印支期花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成: 限制岩石成因及其动力学背景[J]. 中国科学(D)辑, 37(4): 460-470.
- 张季生,高锐,李秋生,王海燕,朱海华. 2007. 松潘-甘孜和西秦岭造山带地球物理特征及基底构造研究[J]. 地质论评, 53(2): 261-267.
- 赵永久,袁超,周美夫,颜丹平,龙晓平,李继亮. 2007. 川西老君沟和孟通沟花岗岩的地球化学特征、成因机制及对松潘-甘孜地体基底性质的制约[J]. 岩石学报, 23(5): 995-1006.

References:

- BEARD J S, LOFGREN G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstone-amphibolites at 1.3 and 6.9 kb[J]. Journal of Petrology, 32: 365-401.
- BROWN G C. 1982. Calc-alkaline intrusive rocks: their diversity,

- evolution and relation to volcanic arcs[M]//THORPE R S. Andesites-orogenic andesites and related rocks. New York: John Wiley and Sons: 437-464.
- CLEMENS J D, DARBYSHIRE D P F, FLINDERS J. 2009. Sources of post-orogenic calcalkaline magmas: the Arrochar and Garabal Hill-Glen Fyne complexes, Scotland[J]. *Lithos*, 112: 524-542.
- DAVIS J, HAWKESWORTH C. 1993. The petrogenesis of 30-20 Ma basic and intermediate volcanics from the Mogollon-Datil Volcanic Field, New-Mexico, USA[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(12): 165-183.
- DEFANT M J, DRUMMOND M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662-665.
- GAO Li-e, ZENG Ling-sen, HU Gu-yue. 2010. High Sr/Y two-mica granite from quedang area, southern Tibet, China: formation mechanism and tectonic implication[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(2-3): 214-226(in Chinese with English abstract).
- HARRIS N B W, PEARCE J A, TINDLE A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 19: 67-81.
- JIANG Chun-fa, WANG Zong-qi, LI Jin-yi. 2000. Opening-Closing Tectonics of the Central Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English preface).
- JIN Wei-jun, ZHANG Qi, HE Deng-fa, JIA Xiu-qin. 2005. Shrimp dating of adakites in western Qinling and their implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 959-966(in Chinese with English abstract).
- JOHANNES W, HOLTZ F. 1996. Petrogenesis and experiment petrology of granitic rock[M]. Berlin: Springer-Verlag.
- LI Shu-guang, SUN Wei-dong, ZHANG Guo-wei, CHEN Jia-yi, YANG Yong-cheng. 1996. Chronology and geochemistry of metavolcanic rocks from Heigouxia Valley in the Mian-Lue tectonic zone, South Qinling: Evidence for a Paleozoic oceanic basin and its close time[J]. *Science in China (Series D)*, 39(3): 300-310.
- LI Zuo-chen, PEI Xian-zhi, DING San-ping, LIU Zhan-qing, LI Rui-bao, LI Gao-yang, LI Fu-jie, WANG Fei. 2009. Geochemical Features and Tectonic Setting of the Nanyili Granite in the Pingwu Area, Northwestern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 260-271(in Chinese with English abstract).
- LI Zuo-chen, PEI Xian-zhi, DING San-ping, LIU Zhan-qing, LI Rui-bao, SUN Yu, FENG Jian-yun, ZHANG Ya-feng. 2010. Geochemical Features and Tectonic Setting of the Laohegou Granite and Shaiziyan Granite in the Bikou Block, in Northwestern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(3): 343-356(in Chinese with English abstract).
- LI Zuo-chen, PEI Xian-zhi, DING San-ping, LIU Zhan-qing, WANG Fei, LI Gao-yang, LI Rui-bao, LI Fu-jie. 2007. Zircon U-Pb dating of the Nanyili granodiorite in the Pingwu area, northwestern Sichuan, and its geological significance[J]. *Geology in China*, 34(6): 1003-1012(in Chinese with English abstract).
- LUO Jin-cheng, LAI Shao-cong, QIN Jiang-feng, LI Hai-bo, LI Xue-jun, ZANG Wen-juan. 2010b. Geochemistry and Geological Significance of Late-Triassic Yanzhiba Pluton from the southern Qinling Orogenic Belt[J]. *Geological Review*, 56(6): 792-800(in Chinese with English abstract).
- LUO Jin-cheng, LAI Shao-cong, QIN Jiang-feng, LI Xue-jun, ZANG Wen-juan, LI Hai-bo. 2010a. Petrogenesis and geological significance of Wangbachu granite from Bikou area, Northwest margin of Yangtze Block[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 40(6): 1505-1563(in Chinese with English abstract).
- MENG Q R, WANG E, HU J M. 2005. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Sichuan basin: Implication for continued clockwise rotation of the South China block[J]. *Geological Society of America*, 117(3-4): 396-410.
- MONTEL J M, VIELZEUF D. 1997. Partial melting of metagreywackes, Part II. Compositions of minerals and melts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(2-3): 176-196.
- MOYEN J F. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the "adakitic signature"[J]. *Lithos*, 112(3-4): 556-574.
- PATÍÑO DOUCE A E. 1995. Experimental generation of hybrid silicic melts by reaction of high Al basalt with metamorphic rocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 100(B8): 623-639.
- QIN J F, LAI S C, DIWU C R, JU Y J, LI Y F. 2010a. Magma mixing origin for the post-collisional adakitic monzogranite of the Triassic Yangba pluton, Northwestern margin of the South China block: geochemistry, Sr-Nd isotopic, zircon U-Pb dating and Hf isotopic evidences[J]. *Contributions to Mineralogy and*

- Petrology, 159(3): 389-409.
- QIN J F, LAI S C, GRAPES R, DIWU C R, JU Y J, LI Y F. 2010b. Origin of Late Triassic high-Mg adakitic granitoid rocks from the Dongjiangkou area, Qinling orogen, central China: Implications for subduction of continental crust[J]. *Lithos*, 120(3-4): 347-367.
- QIN Jiang-feng, LAI Shao-cong, LI Yong-fei. 2005. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, Northern margin of Yangtze Plate[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 697-710(in Chinese with English abstract).
- RAPP R P, WATSON E B. 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931.
- REN Ji-shun, JIANG Chun-fa, ZHANG Zheng-kun, QIN De-yu. 1980. Geotectonics of China and its evolution—A brief description of 1: 4000000 geotectonic map in China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ROBERTS M P, CLEMENS J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids[J]. *Geology*, 21: 825-828.
- SCHALTEGGER U, CORFU F. 1992. The age and source of Late Hercynian magmatism in the central Alps evidence from precise U-Pb ages and initial Hf isotopes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 111(3): 329-344.
- SEN C, DUNN T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(4): 394-409.
- SENGÖR A M C. 1984. The Cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia[J]. *Geological Society of America*, 195: 82-82.
- SISSON T W, RATAJESKI K, HANKINS W B, GLAZNER A F. 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(6): 635-661.
- STEVENS G, CLEMENS J D, DROOP G T R. 1997. Melt producing during granulite-facies anatexis: experimental data from "primitive" metasedimentary protoliths[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(4): 352-370.
- SUN S S, McDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for the mantle composition and process[J]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., 42: 313-345.
- SYLVESTER P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1): 29-44.
- TAYLOR S R, McLENNAN S M. 1985. *The Continental crust: its composition and evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publishers.
- WHITE A J R, CHAPPELL B W. 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis[J]. *Tectonophysics*, 43(1-2): 7-22.
- WINTHER K T. 1996. An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts[J]. *Chemical Geology*, 127(1-3): 43-59.
- XU Zhi-qin, HOU Li-Wei, WANG Zong-xiu, FU Xiao-fang, HUANG Ming-hua. 1992. *Orogenic Process of the Songpan-Ganze Orogen in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YAN Quan-ren, ANDREW D H, WANG Zong-qi, YAN Zhen, PETER A D, WANG Tao, LIU Dun-yi, SONG Biao, JIANG Chun-fa. 2004. Geochemistry and tectonic setting of the Bikou volcanic terrane on the northern margin of the Yangtze plate[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(1): 1-11(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-wei, CHENG Shun-you, GUO An-lin, DONG Yun-peng, LAI Shao-cong, YAO An-ping. 2004. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China[J]. *Regional Geology of China*, 23(9-10): 846-853(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-wei, ZHANG Ben-ren, YUAN Xue-cheng, XIAO Qing-hui. 2001. *Qinling orogenic belt and continental dynamic*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHANG H F, ZHANG B R, HARRIS N, ZHANG L, CHEN Y L, CHEN N S, ZHAO Z D. 2006a. U-Pb zircon SHRIMP ages, Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic Affinity[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(6): 751-764.
- ZHANG H F, ZHANG L, HARRIS N, JIN L L, YUAN H L. 2006b.

- U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(1): 75-88.
- ZHANG Hong-fei, JIN Lan-lan, ZHANG Li, HARRIS N, ZHOU Lian, HU Sheng-hong, ZHANG Ben-ren. 2005. The restrictions to the character of basement and the tectonic attribute result from the granitoid geochemistry and Pb-Sr-Nd isotopic composition in west Qinling[J]. *Science in China(Series D)*, 35(10): 914-926(in Chinese).
- ZHANG Hong-fei, XIAO Long, ZHANG Li, YUAN Hong-lin, JIN Lan-lan. 2007. Granitoid geochemistry during indosinian of Bikou block on northwestern margin of Yangtze plate and Pb-Sr-Nd isotopic Composition: restrictions to petrogenesis and dynamic Setting[J]. *Science in China(Series D)*, 37(4): 460-470(in Chinese).
- ZHANG Ji-sheng, GAO Rui, LI Qiu-sheng, WANG Hai-yan, ZHU Hai-hua. 2007. A Study on Geophysical Characteristic and Basement in the Songpan-Garze and Western Qinling Orogenic Belt[J]. *Geological Review*, 53(2): 261-267(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yong-jiu, YUAN Chao, ZHOU Mei-fu, YAN Dan-ping, LONG Xiao-ping, LI Ji-liang. 2007. Geochemistry and petrogenesis of Laojungou and Mengtonggou granites in western Sichuan, China: constrains on the nature of Songpan-Ganzi basement[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 995-1006(in Chinese with English abstract).

亚洲地下水资源与环境地质编图等项目顺利通过评审

按照中国地质调查局水环部委托和统一安排,中国地质科学院水文地质环境地质研究所于2011年8月17—19日在北京组织召开了亚洲地下水资源与环境地质编图、江西萍乐拗陷带水文地质环境地质调查、地下水科学与工程大型试验基地水文地质环境地质参数研究、华北平原地下水安全与可持续利用和工程地质学科发展战略及对策研究等5个工作项目成果评审验收会议。

评审专家组由来自中国地质调查局、中国科学院地质与地球物理研究所、中国地质科学院岩溶地质研究所、中国地质科学院地质研究所、国家自然科学基金委员会、清华大学及中国地质科学院水文地质环境地质研究所的12位专家和学者组成。

与会专家在认真听取各项目承担单位的项目汇报的基础上,经专家组评议,全部成果都获得通过,其中亚洲地下水资源与环境地质编图和工程地质学科发展战略及对策研究评为优秀级。专家一致认为,亚洲地下水资源与环境地质编图项目在洲际专题编图领域做出了有益的探索,统一了跨国界编图方法和要求,首次编制了亚洲地下水资源图和亚洲地热图,并初步建立了亚洲地下水资源与环境地质数据库,能够与国际社会实现信息共享,便于及时更新信息数据。工程地质学科发展战略及对策研究项目提出了工程地质学科现阶段所面临的问题及发展方向,提炼出8个方面的工程地质前沿科学问题,系统地提出了工程地质学科应优先研究发展的领域,为开展工程地质战略研究奠定扎实的基础。

本刊编辑部 采编