

广西型花岗岩的地球化学特征及其构造意义

张 旗

(中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘 要: 花岗岩按照 Sr-Yb 含量可以分为 5 类: 富 Sr 贫 Yb 的埃达克型, 贫 Sr、Yb 的喜马拉雅型, 贫 Sr 富 Yb 的浙闽型, 非常贫 Sr 富 Yb 的南岭型和富 Sr、Yb 的广西型。广西型花岗岩在自然界出露较少, 主要由花岗闪长岩、角闪黑云母花岗岩、二长花岗岩和石英正长岩等组成, 通常还富 Al、Fe、K 和 P, SiO₂ 含量较低, 属于钾玄岩系列或高钾钙碱性系列。富 Sr 指示源区残留相缺少斜长石, 富 Yb 暗示源区缺少石榴石。既无斜长石也无石榴石的岩石则主要由角闪石±辉石组成, 属于超镁铁岩类。因此, 广西型花岗岩形成的条件比较苛刻, 至少需要很高的温度。在相图中广西型花岗岩位于斜长石消失线之上、石榴石出现之前的区域, 形成的压力大体 < 1.0 GPa, 温度至少 > 900°C。它代表正常厚度或减薄的地壳在很高的温度下形成的花岗岩类。

关键词: 广西型花岗岩; 富 Sr 和 Yb; 地球化学 构造背景; 高温花岗岩

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0199-12

Geochemistry of the Guangxi-type granite and its tectonic implications

ZHANG Qi

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

Abstract: Granites can be divided into five types on the basis of their Sr and Yb content: high-Sr and low-Yb adakitic-type; low-Sr and Yb Himalaya-type; low-Sr and high-Yb Zhemin-type; very low-Sr and high-Yb Nanling-type and high-Sr and Yb Guangxi-type. Guangxi-type granites are exposed less in field and mainly composed of granodiorite, hornblende biotite granite, monzonitic granite and quartz syenite. Guangxi-type granites have low SiO₂, and are characterized by rich Al, Fe, K and P, belonging to shoshonite or high-K calc-alkaline series. Magma with high Sr and Yb content indicates lack of plagioclase and garnet in the residual phase. That means Guangxi-type granites are mainly composed of amphibolite plus/minus pyroxene, belonging to ultramafic rocks. Therefore, the condition for the formation of Guangxi-type granites was tough and needed high temperature at least. Guangxi-type granites are located in a narrow area in the phase diagram, above the plagioclase vanishing line, under the garnet appearing line and before the amphibolite disappearing line. Guangxi-type granites were formed under the pressure of about < 1.0 GPa and at the temperature of > 900°C at least. These characteristics show that Guangxi-type granites were formed at the normal or thinning thickness of the crust with high temperature.

Key words: Guangxi-type granite; high-Sr and Yb; geochemistry; tectonic setting; high temperature granite

收稿日期: 2013-04-01; 修订日期: 2013-06-07

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91014001)

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

我们曾经按照 Sr 和 Yb 含量将花岗岩分为 5 类:埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型、南岭型和广西型,其中前 4 类在自然界出露较多,笔者已经对它们做了详细的讨论,尽管仍然是初步和肤浅的(张旗等,2006,2008,2010;张旗和李承东,2012)。但是,对于富 Sr 富 Yb 的广西型花岗岩到底具有哪些特征和如何解释,笔者一直不清楚。广西型花岗岩的名称最早是根据李献华等(1999)在广西发现的一套中生代钾玄岩质花岗岩命名的(张旗等,2008)。这类花岗岩除了富 Sr、Yb 外,还富 Fe 和 K,大多是高钾钙碱性或钾玄质的,有人还把它归为 A 型花岗岩类。这类花岗岩虽然出露很少,但是,也在许多地区被识别出来,除了广西外,还分布在广东、浙江、福建、河北、辽宁、四川、内蒙古、陕西、新疆和西藏等地(林景仟等,1992;姜耀辉等,1999;段志明等,2005;耿全如等,2005;高山林等,2006;黄俊平等,2006;杨永胜等,2011;李永飞等,2012;Wang T *et al.*, 2004;Wang Q *et al.*, 2005;Shellnutt and Zhou, 2007;Yang and Li, 2008;Fu *et al.*, 2010),国外在美国、挪威、波兰、日本、墨西哥、土耳其等也有出露(Askren *et al.*, 1997;Verplanck *et al.*, 1999;Bogaerts *et al.*, 2003;Auwera *et al.*, 2003;Ilbeyli *et al.*, 2004;Caizia and Ramo, 2005;Brueseke and Hart, 2009;Mora *et al.*, 2007;Yamamoto, 2007),其中以出露在挪威南部晚元古代的灵达尔(Lyngdal)花岗闪长岩最典型(Bogaerts *et al.*, 2003;Auwera *et al.*, 2003;Mora *et al.*, 2007)。

埃达克型花岗岩富 Sr 贫 Yb,指示源区有石榴石无斜长石,喜马拉雅型贫 Sr 贫 Yb,暗示源区既无石榴石也无斜长石,浙闽型贫 Sr 富 Yb,说明源区无石榴石有斜长石,南岭型非常贫 Sr 富 Yb,表明源区富高钙的斜长石和辉石。但是,广西型富 Sr 富 Yb 是什么含义?经过反复对比,按照上述逻辑推理,可能可以做如下解释:富 Sr 说明源区贫斜长石,富 Yb 说明源区贫石榴石。既无石榴石也无斜长石,就只剩角闪石(和/或辉石)了。以角闪石为主的残留相(角闪岩、辉石角闪岩)已经属于超镁铁岩了,应当不是一般条件下能够出现的,至少需要很高的温度。无怪乎广西型花岗岩在自然界中很少出现,原来其形成条件很苛刻。为进一步了解广西型花岗岩的特征及其形成的构造背景,本文尝试做一初步的探讨,以弥补花岗岩分类中的这一空缺,也希望对该类花岗岩的认识能够有所深入。

1 广西型花岗岩的若干实例

1.1 广西的实例

据李献华等(1999)报道,在广西东南部发育许多中生代的二长岩、正长岩以及与之共生的碱性花岗岩,属钾玄质系列,它们共同组成一个北东向的钾玄质侵入岩带。酸性的二长岩的暗色矿物主要为黑云母(1%~8%)和角闪石(<1%~5%),斜长石($A_n = 10 \sim 40$)含量在 20%~40%之间,钾长石含量 25%~50%,石英含量 15%~40%。这些岩体的特点是两种长石含量高,普遍含有角闪石,岩性为石英二长岩和碱长花岗岩(李献华等,1999)。野外地质、岩石学和地球化学研究表明,这些钾玄质侵入岩富集大离子亲石元素、高场强元素和稀土元素,Sr 和 Yb 含量很高($Sr = 210 \sim 795 \times 10^{-6}$, $Yb = 2.00 \sim 7.64 \times 10^{-6}$, $\delta Eu = 0.91 \sim 0.54$)。与大多数具有岛弧特征的钾玄质岩石不同的是,桂东南钾玄质侵入岩无明显的 Nb-Ta 负异常, $Nb/La = 0.59 \sim 1.45$ (表 1),微量元素分布形式总体上与板内玄武岩相似,表明可能是在中生代区域软流圈地幔上涌和岩石圈伸展构造背景下形成的(李献华等,1999)。

最近,胡升奇等(2012)也报道了一个广西大黎石英二长(斑)岩的资料,岩体出露于广西大瑶山地区,LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 102~101 Ma。 SiO_2 含量为 60.09%~62.91%, Na_2O 和 CaO 含量分别为 2.90%~3.08%和 3.32%~4.35%。Sr 和 Yb 含量高但变化不大($Sr = 484 \times 10^{-6} \sim 497 \times 10^{-6}$, $Yb = 2.98 \times 10^{-6} \sim 3.19 \times 10^{-6}$)。 $A/CNK = 0.83 \sim 0.93$,均小于 1.0,属于钙碱性、准铝质花岗岩。稀土元素总体显示轻稀土元素富集,轻、重稀土元素分馏明显,具弱的负铈异常。微量元素总体显示相对富集 Rb、Th、U、K、La、Ce、Pb 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。结合区域构造演化历史,认为大黎石英二长(斑)岩是燕山晚期后碰撞阶段张性构造环境的产物。

1.2 西藏冈底斯叶巴组火山岩

叶巴组早侏罗世双峰式火山岩分布在拉萨、达孜至墨竹工卡之间,岩性为浅变质玄武岩、玄武质熔结凝灰岩、英安岩、酸性凝灰岩及火山角砾岩等(耿全如等,2005)。酸性火山岩的 SiO_2 在 64%~69% 之间,为钙碱性系列的英安岩类, $Sr = 397 \times 10^{-6} \sim 903 \times 10^{-6}$, $Yb = 1.45 \times 10^{-6} \sim 2.34 \times 10^{-6}$,亏损

表 1 桂东南中生代广西型花岗岩的代表性主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果(据李献华等, 1999)

Table 1 Major and trace element content of Mesozoic Guangxi-type granites in southeastern Guangxi (after Li Xianhua *et al.*, 1999)

样品 岩体	HK-2 马山	HK-3 马山	HK-12 马其岗	HK-16 清湖	HK-21 清湖	HK-34 南渡	HK-65 同安	HK-67 同安	HK-28 杨梅	HK-71 西山	HK-76* 西山
SiO ₂	58.77	65.16	63.6	63.27	58.68	58.02	62.43	64.40	63.83	68.55	63.30
TiO ₂	0.83	0.44	0.97	0.68	1.02	1.65	1.12	1.14	0.81	0.44	0.57
Al ₂ O ₃	19.96	17.07	15.10	16.98	17.57	15.83	15.78	14.81	15.89	15.02	16.56
Fe ₂ O ₃	6.18	3.47	6.09	3.55	5.76	7.64	6.45	6.35	5.03	3.13	4.49
MnO	0.11	0.09	0.10	0.06	0.12	0.11	0.09	0.09	0.11	0.07	0.12
MgO	0.85	0.50	1.26	0.60	1.35	2.29	1.40	1.45	1.06	0.50	0.71
CaO	3.92	1.75	3.23	2.43	4.20	4.48	3.38	3.06	2.28	1.72	1.78
Na ₂ O	3.81	5.17	2.90	4.82	5.17	3.21	3.47	3.09	3.58	3.79	3.58
K ₂ O	5.63	5.34	4.60	4.80	4.33	4.78	4.76	4.69	5.54	5.11	7.27
P ₂ O ₅	0.16	0.14	0.30	0.18	0.30	0.49	0.27	0.26	0.32	0.14	0.17
V	110	16.0	58.4	43.4	68.2	119	81.6	77.0	39.9	24.5	25.6
Cr	3.89	3.22	15.2	13.6	10.1	12.6	7.25	8.06	9.02	7.48	11.0
Rb	132	171	143	232	183	154	265	268	225	213	316
Sr	795	414	308	458	652	665	383	327	450	307	210
Y	19.4	27.2	37.3	19.8	29.2	32.2	35.6	40.8	32.8	26.9	75.9
Zr	898	258	447	385	522	309	338	356	334	259	619
Nb	17.6	62.5	35.4	76.0	77.4	81.7	51.9	50.9	87.6	54.6	110
Cs	2.87	1.50	19.7	6.56	4.11	7.45	21.6	18.4	7.54	4.50	7.08
Ba	1940	906	1118	670	645	888	918	571	708	750	561
La	29.8	56.5	64.0	60.5	53.3	77.0	61.4	71.0	36.5	52.8	21.7
Ce	58.2	97.0	121	123	100	141	120	133	89.0	96.8	63.4
Pr	6.73	11.7	13.6	11.2	11.3	16.2	14.0	15.6	10.5	10.6	9.93
Nd	25.6	43.1	49.1	36.9	39.9	58.0	50.1	55.5	41.8	35.9	44.2
Sm	4.42	7.36	9.11	5.87	7.07	10.3	8.85	10.0	8.13	6.48	12.5
Eu	2.98	2.12	2.10	1.33	2.01	2.24	1.85	1.56	1.56	1.37	1.34
Gd	3.58	6.86	8.24	5.41	6.41	8.79	8.37	9.41	6.57	578	11.5
Tb	0.57	0.90	1.17	0.71	0.89	1.19	1.09	1.24	1.02	0.85	2.01
Dy	3.32	4.95	6.83	4.05	4.89	6.37	5.93	6.79	5.61	4.81	13.2
Ho	0.66	0.91	1.28	0.77	0.93	1.12	1.13	1.26	1.05	0.88	2.46
Er	1.81	2.55	3.70	2.11	2.53	3.14	3.07	3.56	2.86	2.59	7.18
Tm	0.33	0.39	0.53	0.36	0.40	0.44	0.47	0.51	0.46	0.38	1.16
Yb	2.00	2.27	3.39	2.16	2.40	2.66	2.80	2.97	2.67	2.42	7.64
Lu	0.33	0.35	0.52	0.32	0.34	0.40	0.40	0.43	0.39	0.38	1.16
Hf	20.3	6.27	10.6	9.63	10.9	7.45	8.47	8.95	8.22	7.00	17.2
Ta	1.62	4.13	2.11	5.68	4.92	4.72	3.37	3.21	4.74	5.49	15.2
Th	9.04	13.3	18.2	33.4	24.7	17.7	30.5	33.8	8.12	25.2	26.9
U	3.01	5.91	3.78	25.1	9.01	3.69	10.2	7.80	4.07	6.39	13.0

注: 本文引用时删去了原表中 SiO₂ 含量偏低的牛庙岩体以及里松和花山岩体的资料。

HFS 中的 P 和 Ti, Ta, Nb 略具负异常, REE 分布具弱的正铈异常, $\epsilon_{Nb}^* = 0.74 \sim 1.06$, 平均为 0.86。酸性火山岩可能属于广西型与埃达克型之间过渡的类型。

1.3 攀西与峨眉山玄武岩有关的花岗岩

在攀西有一些与峨眉山大火成岩省伴生的二叠纪花岗岩, 其中 260 Ma 的攀枝花和太和花岗岩 (Shellnutt and Zhou, 2007) 是过碱性的 (ASI = 0.76 ~ 1.12, $Na + K/Al = 0.78 \sim 1.2$) 和富铁质的 $Fe^* =$

0.92 ~ 0.99, 负铈异常变化很大 ($Eu/Eu^* = 0.022 \sim 0.98$)。过碱性的卧水正长岩 (260 Ma) 是准铝质的 (ASI = 0.84 ~ 1.0, $Na + K/Al = 0.91 \sim 1.01$), 中等富铁 ($Fe^* = 0.79 \sim 0.81$), 真正的铈异常 ($Eu/Eu^* = 0.82 \sim 1.91$)。 $\epsilon_{Nd}(t) = +1.3 \sim +3.2$, 推测与地幔柱的活动有关。花岗岩富 Sr ($407 \times 10^{-6} \sim 682 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($1.4 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6}$)。

1.4 辽西蓝旗组的实例

Yang 和 Li (2008) 研究了分布在辽西北票和义

县地区 166~153 Ma 的蓝旗组火山岩,该火山岩主要由玄武质安山岩、安山岩和流纹岩组成。安山岩和流纹岩的 SiO_2 含量为 56%~66%(表 2),富

Al_2O_3 ($>16\%$) 贫 MgO ($<2.5\%$), 富 LREE、LILE 和 Pb, 亏损 HFSE, 富 Sr ($295 \times 10^{-6} \sim 558 \times 10^{-6}$) 和 Y ($2.7 \times 10^{-6} \sim 3.7 \times 10^{-6}$)。

表 2 辽西蓝旗组安山岩和流纹岩主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 数据 (Yang 和 Li, 2008)

Table 2 Major and trace elements of andesite and rhyolite from the Lanqi Formation in western Liaoning (after Yang and Li, 2008)

	LQ-9	LQ-10	LQ-11	LQ-16	LQ-20	LQ-27	LQ-28	LQ-29
SiO_2	65.26	65.86	64.4	57.04	57.96	65.62	66.06	66.14
TiO_2	0.5	0.5	0.57	1.38	1.44	0.47	0.47	0.48
Al_2O_3	16.27	16.27	16.76	17.06	17.02	16.59	16.57	16.44
Fe_2O_3	4.73	4.29	4.66	7.27	7.07	3.9	3.24	3.46
MnO	0.06	0.06	0.03	0.13	0.09	0.09	0.12	0.08
MgO	0.24	0.24	0.42	1.38	1.14	0.33	0.69	0.69
CaO	1.67	1.75	1.54	4.88	4.17	2.17	2.08	2.29
Na_2O	4.55	4.62	4.62	4.45	4.55	5.1	5	5.2
K_2O	4.96	4.96	4.88	3.32	3.5	3.88	3.7	3.62
P_2O_5	0.19	0.18	0.2	0.64	0.66	0.15	0.17	0.17
LOI	1.57	1.31	1.84	2.47	2.14	1.33	1.51	1.44
Total	100.01	100.04	99.92	100.02	99.74	99.63	99.61	100.01
$\text{Mg}^\#$	9	10	15	28	24	14	30	29
Sc	6.5	6.6	7	13.2	13.6	3.5	3.61	3.28
Cr	0.35	1.19	0.1	0.45		0.3	0.18	
Ni		5.13			0.81	1.23	1.66	
Rb	162	163	159	110	109	105	100	89.5
Sr	295	305	355	558	547	415	392	387
Y	36.3	38.5	35.5	39.6	40.2	28.4	27.8	28
Zr	440	442	439	311	318	283	276	270
Nb	23.5	23.9	24	19.6	20.2	11.5	11.4	11.1
Ba	1318	1288	1340	1079	1187	1246	1225	1140
Hf	11.7	11.75	11.5	8.45	8.5	6.47	6.33	6.17
Ta	1.15	1.17	1.16	0.94	0.958	0.533	0.53	0.511
Pb	27	24.1	24.3	15.6	17.9	15.9	15	14.7
Th	10	10.37	9.93	6.78	6.94	4.85	4.77	4.57
U	2.11	2.33	1.93	1.61	1.59	0.73	0.749	0.731
La	65.7	65.6	62.8	56.9	57.5	43.4	42.3	41
Ce	109	107	104	120	118	77.8	80.3	78.9
Pr	15.5	15.5	14.9	15.3	15.3	10.3	9.87	9.54
Nd	53.7	54.2	52.1	57.6	58	37	35.1	33.8
Sm	9.58	9.58	9.13	11	11.1	6.725	6.31	6.04
Eu	1.81	1.8	1.79	2.43	2.46	1.63	1.56	1.5
Gd	8.06	8.31	7.59	9.5	9.59	5.79	5.48	5.27
Tb	1.1	1.12	1.03	1.28	1.29	0.807	0.762	0.734
Dy	5.87	6.09	5.56	6.77	6.77	4.44	4.16	4.09
Ho	1.25	1.28	1.18	1.38	1.39	0.961	0.907	0.892
Er	3.28	3.35	3.12	3.45	3.44	2.46	2.42	2.36
Tm	0.549	0.548	0.524	0.531	0.528	0.411	0.403	0.396
Yb	3.7	3.7	.57	3.44	3.4	2.77	2.77	2.65
Lu	0.559	0.547	0.542	0.501	0.494	0.414	0.42	0.404

注: 本文引用时删去了 SiO_2 含量低于 57% 的样品。

1.5 挪威南部的实例

在挪威南部出露一套 1.0~0.9 Ga 的富铁和钾质系列的 A 型花岗岩, 包括 Bessefjellet、Rustfjellet、

Verhuskjerringi、Valle、Holm、Svöfjell、Handeland-Tveit、Åseral、Lyngdal 等岩体。其中, 除 Bessefjellet 是南岭型的、Rustfjellet 是浙闽型的以外, 其余岩体

均为广西型。Bessefjellet 和 Rustfjellet 为淡色花岗岩,其余主要为花岗闪长岩、花岗岩和二长花岗岩 (Auwera *et al.*, 2003)。花岗岩中磷灰石饱和温度计测定的温度是 1 005 ~ 1 054℃,代表高温花岗岩,侵位的压力是 0.13 ~ 0.27 GPa (Auwera *et al.*,

2003)。其中灵达尔 (Lyngdal) 花岗闪长岩研究程度较高,岩体属角闪石-黑云母花岗岩系列, SiO_2 含量在 59% ~ 65% 之间,Sr 和 Yb 含量很高 ($Sr = 326 \times 10^{-6} \sim 525 \times 10^{-6}$, $Yb = 5.0 \times 10^{-6} \sim 10.1 \times 10^{-6}$, 表 3),在哈克图解中类似奥长环斑花岗岩的趋势

表 3 挪威南部灵达尔花岗岩的主量元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 成分 (据 Bogaerts 等, 2003)

Table 3 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions of Lyngdal granite, southern Norway (after Bogaerts *et al.*, 2003)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	59.6	60.8	60.9	60.9	61	61.4	62.3	63.3	64.5	64.8	65.2
TiO ₂	1.72	1.17	1.67	1.49	1.73	1.31	1.48	1.33	1.12	1.1	0.91
Al ₂ O ₃	13.6	15.1	13.4	12.9	12.9	15	13.9	14.1	14.1	14.3	14
Fe ₂ O ₃	10.2	7.61	9.42	9.66	9.25	7.87	8.73	7.76	6.2	6.41	5.64
MnO	0.16	0.12	0.15	0.16	0.14	0.12	0.15	0.14	0.1	0.1	0.08
MgO	2.1	1.3	1.9	1.7	1.67	1.8	1.63	1.56	1.28	1.38	1.09
CaO	5.3	5.25	5	4.7	4.36	4.43	4.32	4.16	3.7	3.49	3.24
Na ₂ O	3.1	3.2	3.1	2.8	3.1	3.7	3.5	3.6	3.1	3.3	4.5
K ₂ O	2.85	3.21	3.26	3.7	3.46	3.37	3.62	3.84	3.89	4.29	4.36
P ₂ O ₅	0.84	0.76	0.83	0.82	0.74	0.53	0.59	0.55	0.45	0.39	0.35
LOI	0.34	0.62	0.35	0.79	0.72	0.48	0.67	0.5	0.9	0.7	0.55
Total	99.8	99.3	100	99.8	99.1	100	100.8	100.8	99.4	100.2	99.9
Rb	89	96	82	139	108	95	111	124	116	113	120
Sr	525	507	477	423	326	490	358	458	406	397	401
Ba	1 510	1 398	1 554	1 694	1 200	1 466	1 010	1 955	1 507	1 417	1 396
V	82	47	66	58	77.6	58	67	62	43	41	40
Cr	3.3	3	27	12					66	0	0
Co	26	11	24	20	15	14	18	20	19	10	23
Ni	3	0	10	3.5	0	0	1.2		6	1.5	0
Cu	10	3	13	8	5	9	7	9	12	7	9
Zn	169	234	169	200	221	142	163	145	118	110	108
Ga	22	26	23	33	24	25	25	31	24	23	23
Zr	525	595	621	779	548	600	584	547	543	527	471
Hf	19	16	16	23	18	20	12		14	22	25
Nb	22	22	26	33	21	24	4	24	23	24	21
Ta	1.9	1.2	1.5	1.4	1.3	1.4	2	1	1.3	1.2	1.1
U	1.8	1.23	1.5	1.3	1.1	1.22	1.3	1.17	1.8	1.09	0.84
Th	7.1	9.8	8	7.5	8.1	8.2	15.1	7.5	12	7.8	8.4
Pb	25	21	24	22	24	23	24	21	24	25	24
Y	88	88	90	129	82	75	116	76	72	81	63
La	107	80	96	151	75	87	104	114	81	87	96
Ce	226	185	222	310	167	180	209	228	185	182	188
Pr	30	23.8	29	40	21.9	22.9	26.5	28	23.5	23.8	22.3
Nd	124	102	120	163	93	94	114	111	98	101	88
Sm	24.7	20.5	22.8	32	19.1	19.3	24.4	21	18.3	19.9	16.8
Eu	5.23	4.82	4.81	6.26	4.25	4.34	3.88	4.74	3.85	3.96	3.61
Gd	22	18	20	31	17	17	25	18	16	19	15
Tb	3	2.8	3	3.9	2.7	2.5	3.7	2.2	2.4	2.8	2.2
Dy	16	15	16	21	15	13	21	12	13	15	11
Ho	3.4	3.4	3.5	4.2	3.3	2.6	4.4	2.5	2.8	3.2	2.4
Er	8.5	8.2	8.6	10.7	8.2	6.9	11.5	6.4	6.7	8.2	5.9
Tm	1.25	1.09	1.2	1.62	1.13	0.99	1.61	0.91	0.92	1.1	0.83
Yb	7.9	7.4	7.5	10.1	7.4	6.2	9.6	5.9	6.1	7	5.6
Lu	1	1.1	1.1	1.3	1.1	0.9	1.4	0.8	0.9	1	0.8
Eu/Eu*	0.68	0.75	0.68	0.61	0.7	0.72	0.48	0.72	0.68	0.61	0.67
NK/A	0.6	0.58	0.65	0.67	0.68	0.66	0.7	0.71	0.66	0.7	0.86
A/CNK	0.76	0.82	0.76	0.75	0.77	0.84	0.79	0.8	0.88	0.88	0.78
XFe	0.81	0.84	0.82	0.83	0.83	0.8	0.83	0.82	0.81	0.81	0.82

注: 仅摘取了原文表 4 的部分数据; $X_{Fe} = FeO / (FeO + MgO)$

(Bogaerts *et al.*, 2003), 为碰撞后花岗岩。空间上与斜长岩-纹长二长岩-紫苏花岗岩套伴生, 类似奥长环斑花岗岩-斜长岩-紫苏花岗岩组合。

1.6 墨西哥的实例

在墨西哥恰帕斯州中部有一个延伸约 150 km 的第四纪 (<3 Ma) Chiapanecan 火山岩带 (CVA), 主要由安山岩和英安岩组成, SiO_2 含量介于 57% ~ 66% 之间, 贫 Ti、P、Nb 和 Ta, 富集轻稀土元素, 亏损 HREE,

有小的负钕异常(表 4), 富 Sr ($402 \times 10^{-6} \sim 827 \times 10^{-6}$) 和 Y ($2.0 \times 10^{-6} \sim 3.76 \times 10^{-6}$)。所有地球化学指标均表明火山岩与科科斯板块 (Cocos plate) 俯冲有关, 属于岛弧火山活动的产物 (Mora *et al.*, 2007)。

1.7 波兰的实例

在波兰东北部有一个 1.5 Ga 的 Mazury 角闪-黑云母花岗岩 (Duchesne *et al.*, 2010), 其中的 Bartoszyce、Goldap 和 Boreholes 3 个岩体具广西型的特

表 4 墨西哥 Chiapanecan Volcanic Arc 火山岩 (广西型) 化学分析数据 (据 Mora 等, 2007)

Table 4 Whole-rock chemical analyses of the Chiapanecan Volcanic Arc (Guangxi-type), Mexico (after Mora *et al.*, 2007)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	58.37	63.72	62.54	63.47	61.15	61.48	60.6	61.76	56.75
TiO_2	0.59	0.41	0.51	0.49	0.63	0.6	0.51	0.41	0.64
Al_2O_3	18.23	16.8	16.62	16.76	16.42	16.78	17.09	18.07	17.45
Fe_2O_3	6.14	4.31	4.95	4.93	5.92	5.36	5.43	5.13	7.17
MnO	0.16	0.12	0.14	0.12	0.12	0.13	0.13	0.09	0.16
MgO	1.44	1.12	1.46	1.17	1.97	1.55	1.28	1.68	2.75
CaO	6.09	5.46	5.69	5.26	6	5.75	5.51	6.78	8.46
Na_2O	4.38	4.38	4.12	4.42	3.99	4.41	3.59	4.15	3.91
K_2O	3.03	2.5	2.85	2.61	2.4	2.91	2.5	1.38	2.05
P_2O_5	0.32	0.21	0.23	0.2	0.22	0.25	0.19	0.17	0.26
LOI	0.79	1.05	0.75	0.52	1.25	0.85	3.19	0.31	0.58
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$\text{Mg}^\#$	0.33	0.35	0.38	0.33	0.41	0.38	0.33	0.41	0.45
Sr	827	617	679	578	566	669	582	565	638
Ba	672	505	588	761	713	785	762	698	566
Co	11.1	7.9	8.9	8.3	13.4	10.6	8.5	38	20.3
Cr	6	11.5	11.4	8.1	18	14.4	15	b2	41.9
Cu	21	68	5	13	14	12	54	14	55
Ni	157	99	4	22	13	10	26	11	23
Sc	8.27	5.63	8.46	5.65	10.3	6.8	6.24	nm	13.9
Th	7.1	6.5	7.1	8.8	9.2	11.4	9.6	6	7.2
Pb	7	8	11	13	8	10	12	6	10
V	139	74	92	82	118	105	82	89	147
Zn	73	46	50	59	56	61	60	56	61
Y	20	22	23	23	26	27	23	22	26
Rb	81	90	98	95	81	90	96	65	76
Zr	128	166	171	170	178	187	165	129	155
Be	2	2	2	2	2	2	2	nm	2
Cs	3.9	3.5	4	3.5	3.2	4	3.7	nm	1
Hf	3.2	3.8	4.5	3.8	4.2	4.5	3.8	nm	3.8
Ta	ndl	ndl	ndl	ndl	ndl	1.5	1.2	nm	1
U	3.3	3	3.2	3.6	3.7	4	4.2	nm	2.1
Cd	0.6	0.9	1.8	1.8	1.7	0.6	1.8	nm	0.7
La	24.4	21.4	25.7	26.8	29.8	39.2	30.1	18.27	30
Ce	45	40	47	49	57	66	53	34.48	54
Nd	20	19	23	22	27	30	26	16.07	25
Yb	2	2.2	2.33	2.35	2.45	2.61	2.56	1.34	2.44
Lu	0.3	0.34	0.35	0.35	0.35	0.36	0.38	0.18	0.37
Eu	1.31	0.94	1.2	1.07	1.21	1.44	1.16	1.2	1.23
Sm	4.48	3.7	4.58	4.31	5.06	5.76	4.7	3.25	4.79
Tb	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	1	0.9	0.4	0.7
Nb	31	24	26	24	23	29	24	12	23

注: nm—未测定; ndl—低于检测线; $\text{Mg}^\#$ 值是笔者计算的。

征(其余3个2个是具幔源特征的闪长岩,1个是浙闽型花岗岩)。广西型岩体的 SiO_2 含量在58.46%~66.51%之间,富Al($\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.42\% \sim 17.05\%$)、 TiO_2 (0.75%~2.22%)、 Sr ($356 \times 10^{-6} \sim 457 \times 10^{-6}$)、 Yb ($3 \times 10^{-6} \sim 8.5 \times 10^{-6}$)和 P_2O_5 (0.41~1.29), $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.53 \sim 0.96$ 。是富铁和钾质的碱钙质的A型花岗岩。笔者认为,根据花岗岩贫硅富铝富钛以及不明显的负钕异常等特征,推测它可能不是A型的,虽然在Whalen等(1987)的判别图中投在A型花岗岩区域。

2 广西型花岗岩的地球化学特征

众多实例表明,广西型花岗岩的成分是变化的, SiO_2 含量较低,但是变化很大,多数在56%~66%之间,少数可超过70%。 Al_2O_3 通常很高且变化大(从12%~20%), Al_2O_3 高达18%~20%的花岗岩出露在广西(表1,李献华等,1999)美国(Askren *et al.*, 1997)土耳其(Ilbeyli *et al.*, 2004)和墨西哥(表4,据Mora *et al.*, 2007)等地,已经达到花岗岩含铝的极限高度了,甚至超过埃达克型花岗岩的 Al_2O_3 含量(14%~17%),说明残留相强烈亏损 Al_2O_3 ,缺失斜长石,富集角闪石。多数广西型花岗岩富铁和钾,属于钾玄岩或高钾钙碱性系列, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$,部分样品甚至 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 2$,只有少数属于钙碱性系列, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 0.5$,产于岛弧环境,如产于美国内华达州北部的中新世 Santa Rosa Calico 火山岩,为钙碱性和拉斑质的安山岩、英安岩组合(Brueseke and Hart, 2009)。此外,它们的Ti、P含量也很高,且变化很大,如波兰的Bartoszyce、Goldap和Boreholes岩体, TiO_2 含量超过了2%, P_2O_5 含量超过了1.2%(Duchesne *et al.*, 2010)。REE分布大多为右倾型的,负钕异常很小,个别可以为正钕异常,与埃达克型类似。

不少国外文献把具有该类地球化学特征的花岗岩归入A型花岗岩类,如波兰的Bartoszyce、Goldap和Boreholes岩体和挪威南部新元古代的富铁和钾质的花岗岩(Bogaerts *et al.*, 2003; Auwera *et al.*, 2003)。在Whalen(1987)厘定的判别图中它们落入A型花岗岩区域,但是,它们显然不可能是A型的。因为:①REE分布是右倾型的,负钕异常很小,而A型花岗岩特征的REE为燕式分布。② SiO_2 含量偏

低,多数广西型花岗岩 SiO_2 含量低于70%,部分低于60%,而A型花岗岩是强烈富 SiO_2 的,很少小于70%。③ Al_2O_3 含量是A型花岗岩一个重要的标志,典型的A型花岗岩 Al_2O_3 含量在12%~13%之间,是花岗岩类中 Al_2O_3 含量最低的;而广西型的 Al_2O_3 含量变化很大,是所有花岗岩中含量最高的(超过埃达克型花岗岩)。

广西型花岗岩最重要的地球化学特征是富Sr和Yb。在Sr-Yb图中位于埃达克型的右边和浙闽型的上部(图1)。图1中埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型、南岭型花岗岩数据据张旗等(2010);广西型共收集了372个数据,资料来源于Brueseke和Hart(2009)、Huang等(2013)、Liu等(2012)、Duchesne等(2010)、Askren等(1997)、Auwera等(2003)、Verplanck等(1999)、Wang T等(2004)、Wang Q等(2005)、Bogaerts等(2003)、Brueseke和Hart(2009)、Calzia和Ramo(2005)、Fu等(2010)、Ilbeyli等(2004)、Mora等(2007)、Qin等(2009)、Shellnutt和Zhou(2007)、Yamamoto(2007)、Yang和Li(2008)、Zhou等(2002)、林景仟等(1992)、段志明等(2005)、高山林等(2006)、耿全如等(2005)、胡升奇等(2012)、黄俊平等(2006)、姜耀辉等(1999)、李献华等(1999)、李永飞等(2012)、杨永胜等(2011)。广西型有部分样品点与埃达克型、浙闽型重叠,除了数据本身的因素外,可能表明存在不同类型花岗岩之间过渡的情况(图1、图2)。图2a是2010年版的花岗岩分类图(张旗等,2010),图2b是增加了广西型之后重新调整的花岗岩分类图(同图1),适合全球所有花岗岩类。在图2b中,各类花岗岩的指标的统计数据大体是:埃达克型($\text{Sr} > 300 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2.5 \times 10^{-6}$),喜马拉雅型($\text{Sr} < 350 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 2.0 \times 10^{-6}$),浙闽型($\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 1.5 \times 10^{-6}$),广西型($\text{Sr} > 300 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2.0 \times 10^{-6}$),南岭型($\text{Sr} < 100 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 1.0 \times 10^{-6}$)。

3 广西型花岗岩形成的构造背景

埃达克型、喜马拉雅型、浙闽型和南岭型在相图中的位置笔者已经讨论过了(张旗等,2008,2010;张旗和李承东,2012)。广西型的地球化学特征要求源区既无斜长石也无石榴石,它应当出现在斜长石消失线之上、石榴石出现之前的一个相对狭窄的范围(图3中的蓝色区域),压力 $< 1.0 \text{ GPa}$,温度 $> 900^\circ\text{C}$,属

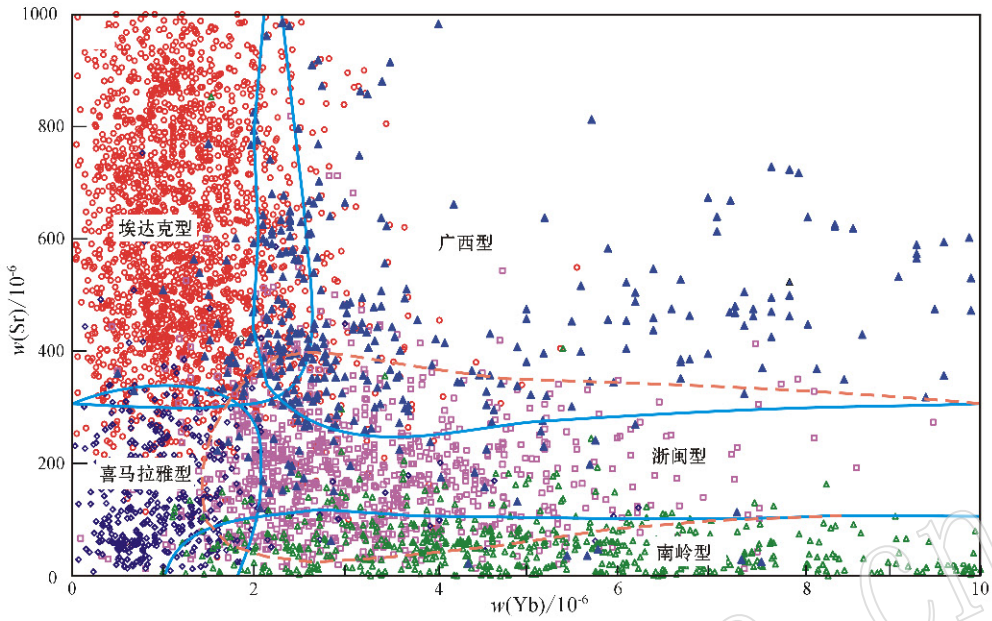


图 1 各类花岗岩的 Sr - Yb 图

Fig. 1 Sr - Yb diagram of granite classification all over the world

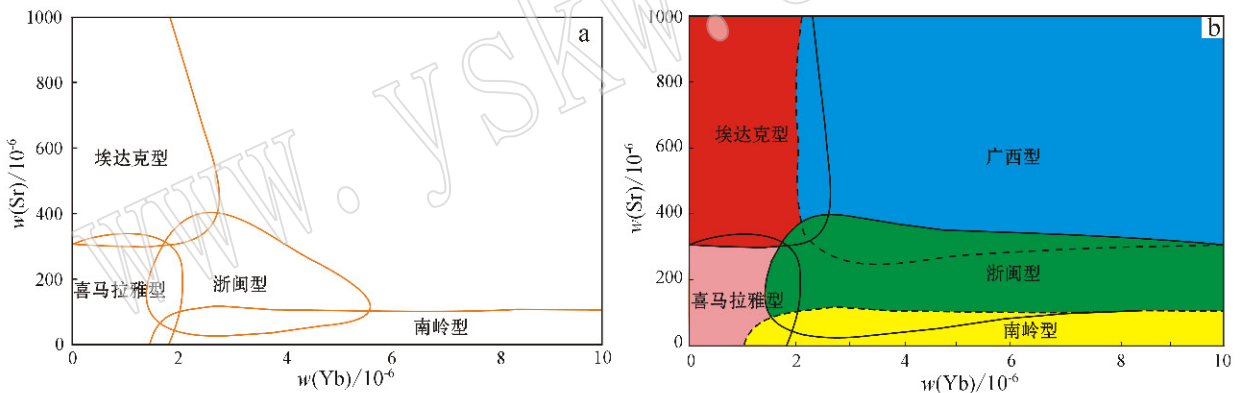


图 2 花岗岩的 Sr - Yb 分类图

Fig. 2 Sr - Yb diagram of granite classification

于高温花岗岩类。图 3 中金红石、斜长石和角闪石矿物出现和消失线引自 Xiong 等(2005), 石榴石出现线据 Vielzeuf 和 Schmidt (2001), 脱水熔融固相线据 Wyllie 和 Wolf (1993), 干玄武岩固相线据 Lambert 和 Wyllie (1972)。

在图 3 中, 埃达克型位于石榴石消失线的上部(图 3 的红色区域), 是所有花岗岩类中压力最高的, 残留相如果有石榴石无金红石, 压力 > 1.0 GPa, 如果有金红石则压力 > 1.5 GPa (Xiong *et al.*, 2005), 代表的岩石是榴辉岩(含或不含金红石)。喜马拉雅型贫 Sr 和 Yb, 位于斜长石消失线之前和石榴石出现的区域, 压力约在 1.0~1.5 GPa 范围, 为低温下

形成的花岗岩, 残留相由石榴石 + 斜长石组成, 为麻粒岩相(图 3 的粉红色区域)。浙闽型花岗岩贫 Sr 富 Yb, 位于斜长石消失线之下和石榴石出现之前, 压力 < 1.0 GPa, 残留相由斜长石、角闪石和辉石组成, 属于斜长角闪岩相(图 3 的绿色区域)。南岭型由于极度亏损 Sr, 暗示源区残留相由富 Ca 的斜长石和角闪石、辉石组成, 也相当于角闪岩相, 位于相图的右下角(图 3 的黄色区域), 是在低压高温条件下形成的。

广西型花岗岩过去笔者很少讨论, 原因是广西型的概念不清楚。广西型以富 Sr 富 Yb 为特征, 按照上述逻辑推理, 富 Sr 表明源区无斜长石, 富 Yb

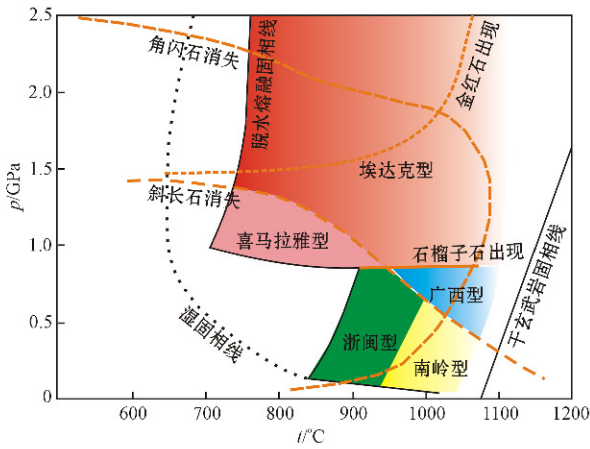


图3 不同类型花岗岩形成的温度压力条件

Fig. 3 Pressure-temperature conditions of different types of granite

表明源区无石榴石。在图3中位于石榴石出现之前和斜长石消失之后(图3的蓝色区域),压力 < 1.0 GPa。从图3看,浙闽型和广西型同处于石榴石线的下面,暗示它们都是低压条件下形成的,二者分别处于斜长石消失线的两侧:浙闽型源区以出现斜长石为特征,广西型的源区以斜长石消失为特征。上述情况说明广西型与浙闽型的压力相当,但是温度不同:低温下形成浙闽型花岗岩,高温下形成广西型花岗岩。广西型与南岭型都是高温花岗岩,区别是广西型压力较高,源区无斜长石;南岭型压力低,源区富斜长石。一个花岗岩的源区残留相如果既没有石榴石也没有斜长石,则主要由角闪石和辉石组成,相当于角闪岩或角闪辉石岩,已经属于超镁铁岩了,形成的温度自然高。角闪石丰富,表明源区富水。壳源的斜长角闪岩在高温条件下发生部分熔融,形成花岗岩后留下的残留物为角闪石,必定需要部分熔融的程度很高,而且源区还要富水,这样苛刻的条件在自然界很难达到。因此,广西型花岗岩出露的数量很少(不超过花岗岩总量的3%,张旗和李承东,2012),故长期被忽略。

从图3看,广西型与喜马拉雅型是彼此分开的,喜马拉雅型源区为石榴石+斜长石,广西型源区为角闪石+辉石。喜马拉雅型形成的温度低,广西型形成的温度高。在正常的地温梯度下或低的地温梯度下可能出现喜马拉雅型花岗岩,不可能出现广西型花岗岩;而在高的地温梯度下,有可能出现广西型花岗岩,不可能出现喜马拉雅型花岗岩。在图3中

广西型与埃达克型、浙闽型和南岭型相邻。如果压力略高,过渡为埃达克型;如果温度较低,过渡到浙闽型;如果压力降低,过渡为南岭型。

图3中不同类型的花岗岩受不同矿物稳定的范围制约,其中石榴石出现的线在不同温度压力条件下变化不是很大(0.8~1.0 GPa之间),而斜长石和角闪石消失线变化很大。斜长石消失线可以从1 GPa变化到2 GPa(温度在800°C左右),取决于水的含量,缺水条件下斜长石消失的压力升高。角闪石则由于自身成分变化大,其消失线是各种各样的,温度压力变化极大(熊小林等,2011)。在图3中,广西型有可能跨越在角闪石消失线的两侧,如果角闪石也消失了,残留相仅余辉石,则需要更高的温度,这样的条件可能在自然界极难实现。

笔者上面着重讨论了广西型花岗岩在相图中的位置,目的是为了探求其形成的地球动力学背景。广西型处于高温低压环境(压力 < 1.0 GPa,温度 $> 900^{\circ}\text{C}$),这种温压条件最可能的地球动力学背景应当是陆壳伸展减薄的环境和裂谷环境,地壳厚度不大的岛弧环境也是可能的。

那么,野外实践告诉我们的是什么呢?李献华等(1999)认为广西地区具钾玄岩质岩石产于中生代区域软流圈地幔上涌和岩石圈伸展构造背景。胡升奇等(2012)认为广西大黎与铜钼矿有关的石英二长(斑)岩是燕山晚期早白垩世晚期后碰撞阶段张性构造环境的产物。Huang等(2013)认为产于广东南部159~166 Ma的高钾钙碱性花岗岩是陆内伸展环境的产物。Liu等(2012)确认内蒙古晚三叠世的解放营子高钾钙碱性花岗岩是碰撞后至造山后伸展阶段形成的。Bogaerts等(2003)和 Auwera等(2003)则直接指认产于挪威南部新元古代的富铁和钾质的花岗岩属于A型花岗岩。Duchesne等(2010)也认为波兰1.5 Ga的Mazury具广西型特征的角闪石-黑云母花岗杂岩是准铝质、富铁和钾质的A型花岗岩。而墨西哥的广西型Chiapanecan火山岩不同,Mora等(2007)认为火山岩属于亚碱性系列,钾含量中等至高的钙碱性类型,以英安岩和安山岩为主,形成于板块消减带环境。无独有偶,杨永胜等(2011)也认为产于内蒙古苏尼特左旗二叠纪的高Sr和Yb的北达布锡勒图岩体不是埃达克岩,产于大陆弧构造背景。只有很少的文献认为广西型花岗岩与加厚地壳有关(如李永飞等,2012)。

4 结论

(1) 广西型花岗岩是一套在自然界出露较少的富 Sr 和 Yb 的花岗岩类, 主要由花岗闪长岩、角闪黑云母花岗岩、二长花岗岩和石英正长岩等组成。它通常还富 Al、Fe、K 和 P, SiO₂ 含量通常较低, 也有较高的, 属于钾玄岩系列或高钾钙碱性系列。广西型花岗岩对源岩没有特殊的要求, 不论哪种成分的源岩, 只要形成的压力较低 (< 1.0 GPa), 温度较高 (> 900℃), 形成的即可能是广西型花岗岩。

(2) 广西型花岗岩富 Sr 指示源区残留相缺少斜长石, 富 Yb 暗示源区缺少石榴石。既无斜长石也无石榴石的岩石则主要由角闪石 ± 辉石组成, 属于超镁铁岩, 因此, 它形成的条件比较苛刻, 在自然界出露较少。

(3) 在相图中广西型花岗岩位于斜长石消失线之上、石榴石出现之前的区域。取决于斜长石和角闪石消失线的变化, 广西型花岗岩形成的条件不同地区可能存在某些差异。形成的压力大体 < 1.0 GPa, 温度至少 > 900℃。是在正常的或减薄的地壳和较高的温度下形成的。在正常的地壳厚度情况下, 如果温度较低出现浙闽型花岗岩, 如果温度较高出现广西型花岗岩。高温下形成的广西型花岗岩, 压力降低转变为南岭型花岗岩, 压力增加转变为埃达克型花岗岩。

(4) 国外文献大多将具有高 Sr 高 Yb 特征的富铁和钾质的(广西型)花岗岩当成 A 型花岗岩可能有他们的考虑, 至少暗示它们形成的温度较高和压力较低。由于与典型的 A 型花岗岩相比, 这类花岗岩的 SiO₂ 含量偏低, Al₂O₃ 含量偏高, REE 分布无明显的负铕异常, 离典型的 A 型花岗岩相差甚远, 因此, 笔者并不赞同国外的见解。笔者赞同广西型花岗岩和南岭型花岗岩都属于高温花岗岩, 前者压力大一些, 后者压力小一些, 广西型花岗岩处于正常厚度的地壳, 南岭型产于减薄的地壳。

致谢 感谢李献华研究员提供了广西钾玄质花岗岩的原始数据, 感谢审稿人建设性的意见, 文中按照审稿意见做了一些补充和修改。

References

- Askren D R, Roden M F and Whitney J A. 1997. Petrogenesis of Tertiary Andesite Lava Flows Interlayered with Large-Volume Felsic Ash-Flow Tuffs of the Western USA[J]. *Journal of Petrology*, 38: 1021~1046.
- Auwera J V, Bogaerts M, Liégeois J P, *et al.* 2003. Derivation of the 1.0-0.9 Ga ferro-potassic A-type granitoids of southern Norway by extreme differentiation from basic magmas[J]. *Precambrian Research*, 124: 107~148.
- Bogaerts M, Scaillet B, Liégeois J P, *et al.* 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[J]. *Precambrian Research*, 124: 149~184.
- Brueseke M E and Hart W K. 2009. Intermediate composition magma production in an intracontinental setting: Unusual andesites and dacites of the mid-Miocene Santa Rosa-Calico volcanic field, Northern Nevada[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188: 197~213.
- Calzia J P and Ramo O T. 2005. Miocene rapakivi granites in the southern Death Valley region, California, USA[J]. *Earth-Science Reviews*, 73: 221~243.
- Duan Zhiming, Li Yong, Zhang Yi, *et al.* 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[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 79(1): 88~97 (in Chinese with English abstract).
- Duchesne J C, Martin H, Baginski B, *et al.* 2010. The origin of ferro-potassic A-type granites: The case of the hornblende-biotite granite suite of the mesoproterozoic Mazury complex, northeastern Poland[J]. *The Canadian Mineralogist*, 48: 947~968.
- Fu X G, Wang J, Tan F W, *et al.* 2010. The Late Triassic rift-related volcanic rocks from eastern Qiangtang, northern Tibet (China): Age and tectonic implication[J]. *Gondwana Research*, 17: 135~144.
- Gao Shanlin, He Zhiliang and Zhou Zuyi. 2006. Geochemical characteristics of the Karamay granitoids and their significance in west Junggar, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 24: 125~130 (in Chinese with English abstract).
- Geng Quanru, Pan Guitang, Jin Zhenmin, *et al.* 2005. Geochemistry and genesis of the Yeba volcanic rocks in the Gangdise magmatic arc, Tibet[J]. *Earth Science*, 30(6): 747~760 (in Chinese with English abstract).

- Hu Shengqi, Zhou Guofa, Peng Songbo, *et al.* 2012. Chronology and geochemical characteristics of quartz monzonite (porphyry) in the Dali copper-molybdenum deposit and its geological significance [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(1): 23~37 (in Chinese with English abstract).
- Huang H Q, Li X H, Li Z X, *et al.* 2013. Intraplate crustal remelting as the genesis of Jurassic high-K granites in the coastal region of the Guangdong Province, SE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2012.09.009.
- Huang Junping, Cao Shenghua, Chen Zhenhua, *et al.* 2006. Geological characteristics and tectonic significance for late Jurassic-early Cretaceous granite in middle Gangdise, Tibet [J]. *Resources Survey & Environment*, 27(4): 277~285 (in Chinese with English abstract).
- Ilbeyli N, Pearce J A, Thirlwall M F, *et al.* 2004. Petrogenesis of collision-related plutonics in Central Anatolia, Turkey [J]. *Lithos*, 72: 163~182.
- Jiang Yaohui, Guo Kunyi, He Jurui, *et al.* 1999. Geochemistry and rock series of quartz monzonite intrusion in west-side of Datong on Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Geochimica*, 28: 542~550 (in Chinese with English abstract).
- Lambert I B and Wyllie P J. 1972. Melting of gabbro (quartz eclogite) with excess water to 35 kilobars, with geological applications [J]. *J. Geol.*, 80: 693~708.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, *et al.* 1999. The Shoshonitic intrusive belt of SE Guangxi and its petrological and geochemical characteristics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(18): 1992~1998 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongfei, Li Zhitong, Yang Fanglin, *et al.* 2012. Geochemical characteristics and geological implication of the acidic-intermediate dyke and lava of the major cycle of Yixian Formation [J]. *Geology and Resources*, 21(1): 42~50 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jingqian, Tan Dongjuan, Chi Xiaoguo, *et al.* 1992. Mesozoic Granite in Jiao-Liao Peninsula [M]. Beijing: Sci. Publ. House, 1~208 (in Chinese).
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, *et al.* 2012. Petrogenesis of middle Triassic post-collisional granite from Jiefangyingzi area, southeast Inner Mongolia: Constraint on the Triassic tectonic evolution of the north margin of the Sino-Korean paleoplate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 147~159.
- Mora J C, Jaimés-Viera M C, Garduño-Monroy V H, *et al.* 2007. Geology and geochemistry characteristics of the Chiapanecan Volcanic Arc (Central Area), Chiapas Mexico [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 162: 43~72.
- Qin J F, Lai S C, Grapes R, *et al.* 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China) [J]. *Lithos*, 112: 259~276.
- Shellnutt J G and Zhou M F. 2007. Permian peralkaline, peraluminous and metaluminous A-type granites in the Panxi district, SW China: Their relationship to the Emeishan mantle plume [J]. *Chemical Geology*, 243: 286~316.
- Verplanck P L, Farmer G L, McCurry M, *et al.* 1999. The chemical and isotopic differentiation of an epizonal magma body: Organ Needle pluton, New Mexico [J]. *Journal of Petrology*, 40: 653~678.
- Vielzeuf D and Schmidt M W. 2001. Melting relations in hydrous systems revisited: application to metapelites, metagreywackes and metabasalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141: 251~267.
- Wang Q, Li J W, Jian P, *et al.* 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): link to Permian-Triassic transtension [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 230: 339~354.
- Wang T, Zheng Y D, Li T B, *et al.* 2004. Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 715~729.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discriminations and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wyllie P J and Wolf M B. 1993. Amphibolite dehydration-melting: sorting out the solidus [A]. Alabaster H M, Harris N B W and Neary C R. *Magmatic Processes and Plate Tectonics* [C]. Geological Society Special Publication, 76: 405~416.
- Xiong X L, Adam J and Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: implications for TTG genesis [J]. *Chemical Geology*, 218: 339~359 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xiaolin, Liu Xingcheng, Zhu Zhimin, *et al.* 2011. Adakitic rocks and destruction of the North China Craton: Evidence from experimental petrology and geochemistry [J]. *Sci China Earth Sci*, 54: 858~870, doi: 10.1007/s11430-010-4167-9.
- Yamamoto T. 2007. A rhyolite to dacite sequence of volcanism directly from the heated lower crust: Late Pleistocene to Holocene Numazawa volcano, NE Japan [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167: 119~133.
- Yang W and Li S G. 2008. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton [J]. *Lithos*, 102: 88~117.
- Yang Yongsheng, Sun Bonian, Kang Hongjie, *et al.* 2011. Major and trace element geochemical characteristics and petrogenesis of Dabuxiletu pluton in the north part of Sonid Left Banner, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 38(2): 301~316 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong, *et al.* 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 985~1015 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Qi and Li Chengdong. 2012. Granites: Implications for Continental Geodynamics [M]. Beijing: Ocean Press (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Yb and Sr contents and its implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2249~2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, *et al.* 2008. Adakite and Granite: Challenge and Opportunity [M]. Beijing: China Land Press, 1~344 (in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51~67.
- ### 附中文参考文献
- 段志明, 李勇, 张毅, 等. 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 [J]. *地质学报*, 79(1): 88~97.
- 高山林, 何治亮, 周祖翼. 2006. 西准噶尔克拉玛依花岗岩体地球化学特征及其意义 [J]. *新疆地质*, 24: 125~130.
- 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等. 2005. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因 [J]. *地球科学*, 30(6): 747~760.
- 胡升奇, 周国发, 彭松柏, 等. 2012. 广西大黎铜钼矿石英二长(斑)岩年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. *地球学报*, 33(1): 23~37.
- 黄俊平, 曹圣华, 陈振华, 等. 2006. 西藏冈底斯中段晚侏罗-早白垩世花岗岩特征 [J]. *资源调查与环境*, 27(4): 277~285.
- 姜耀辉, 郭坤一, 贺菊瑞, 等. 1999. 青藏高原大同西侧石英二长岩体地球化学及岩石系列 [J]. *地球化学*, 28: 542~550.
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征 [J]. *科学通报*, 44: 1992~1998.
- 李永飞, 李之彤, 杨芳林, 等. 2012. 义县组中期酸性岩墙与熔岩地球化学特征及其地质意义 [J]. *地质与资源*, 21(1): 42~50.
- 林景任, 谭东娟, 迟效国, 等. 1992. 胶辽半岛中生代花岗岩 [M]. 北京: 科学出版社, 1~208.
- 熊小林, 刘星成, 朱志敏, 等. 2011. 华北埃达克质岩与克拉通破坏: 实验岩石学和地球化学依据 [J]. *中国科学(D)*, 41(5): 654~667.
- 杨永胜, 孙柏年, 康鸿杰, 等. 2011. 内蒙古苏尼特左旗北达布锡勒图岩体主微量元素地球化学特征及成因探讨 [J]. *中国地质*, 38(2): 301~316.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 2010. 再论花岗岩按照 Sr-Yb 的分类——标志 [J]. *岩石学报*, 26: 985~1015.
- 张旗, 李承东. 2012. 花岗岩: 地球动力学意义 [M]. 北京: 海洋出版社, 1~276.
- 张旗, 王焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 22: 2249~2269.
- 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 2008. 埃达克岩和花岗岩——挑战与机遇 [M]. 北京: 中国大地出版社, 1~344.