

广西花山-姑婆山燕山期花岗岩的 地球化学特征及成因研究

顾晟彦¹, 华仁民¹, 戚华文^{1,2}

(1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 广西花山-姑婆山燕山期花岗岩体以高硅、高钾、富碱、低磷、准铝质为特征, 具有较高的 TFeO/MgO 值, 富集大离子亲石元素、高场强元素和稀土元素, 普遍出现褐帘石, 应归属于富钾的钙碱性花岗岩(KCG)系列岩石, 相当于高钾钙碱性 I 型花岗岩。产生于后造山陆内挤压向拉张转换的地球动力学背景下, 其形成与岩石圈伸展-减薄、亏损地幔岩浆的上涌和富含金云母-钾质碱镁闪石的岩石圈地幔的部分熔融有关。

关键词: 燕山期花山-姑婆山花岗岩体; KCG; 含金云母-钾质碱镁闪石的岩石圈地幔; 后造山

中图分类号: P588.12⁺1; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)02-0097-13

Geochemistry and petrogenesis of the Yanshanian Huashan-Guposhan granites in Guangxi

GU Sheng-yan¹, HUA Ren-min¹ and QI Hua-wen^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: The Yanshanian Huashan-Guposhan granites in Guangxi are characterized by high silicon, high potassium, high alkaline, low phosphor and metaluminous nature, with relatively high FeO^T/MgO ratios and enrichment of LILE, HFSE and REE. In addition, they commonly contain allanites. They can thus be assigned to the high-potassium calc-alkaline granite (or KCG in the classification system of Barbarin, 1999). They were formed during the conversion of the tectonic setting from compression to extension. The extension-thinning of lithosphere, the upwelling of the depleted mantle, and the partial melting of the lithospheric mantle rich in phlogopite and K-richterite might have served as the principal factors in producing this kind of granitic rocks.

Key Words: Yanshanian Huashan-Guposhan granites; KCG; lithospheric mantle rich in phlogopite-K-richterite; post-orogenic period

花岗岩问题是地质学界长期关心的重要课题。华南尤其是南岭地区以不同时代、不同成因类型花岗岩类的广泛分布为特征, 并发育与花岗岩类相关的极其丰富的有色、稀有金属矿产资源, 因而一直受到地质学界的重视, 其中, 燕山期花岗岩占有重要地

位(莫柱孙等, 1980; 卢焕章, 1986; 陈毓川等, 1989; 地矿部南岭项目花岗岩专题组, 1989; 夏宏远等, 1991; 陈毓川等, 1995)。上世纪 90 年代中期以来, 有关华南地区中生代岩石圈演化、华南花岗岩类成因的研究不断深入, 并取得不少新的成果(王德滋

收稿日期: 2005-01-08; 修订日期: 2005-09-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划研究项目(1999CB403209); 国家自然科学基金重点资助项目(40132010)

作者简介: 顾晟彦(1979-), 女, 汉, 矿物岩石矿床学博士研究生, E-mail: xirudagu@sohu.com.

等,1999,2002;陈江峰等,1999;沈渭洲等,2000;肖庆辉等,2002)。对南岭花岗岩成因及相关的大陆动力学的研究正进入一个新的高潮。

花山-姑婆山复式岩体是南岭花岗岩的重要代表之一。前人已经对本区花岗岩做了许多工作(张德全等,1985;朱金初等,1988,1989;杨学明等,1990),但是在许多方面的认识还很不一致。对于岩石的成因类型,有的认为是典型的改造型或S型花岗岩(汪传胜,2004),有的认为是I(燕山早期)+S型(燕山晚期)花岗岩(朱金初等,1988,1989),有的认为是Li-F花岗岩(王联魁等,2000),也有的把它们归入钾玄质岩石系列(李献华等,1999)。由于花山-姑婆山花岗岩处在华南很特征的一条低 t_{DM} 花岗岩带——“十杭带”上(Gilder *et al.*, 1996;Chen and

Jahn, 1998),构造位置上又位于扬子和华夏两大古陆块的交界处(洪大卫等,2002),所以具有特殊和典型的研究意义。本文在前人研究的基础上,着重对花山-姑婆山花岗岩的岩石地球化学特征进行了较系统深入的研究,并提出对其成因归属、物质来源、构造背景的一些看法。

1 地质概况

花山-姑婆山复式花岗岩岩体位于广西东北部富川县、贺州市和钟山县交界区域,史称“富贺钟”地区。大地构造位置处在湘桂海西-印支拗陷区与粤北-东江海西期、燕山复合拗陷区交汇部位(图1)。

1.1 花山复式岩体

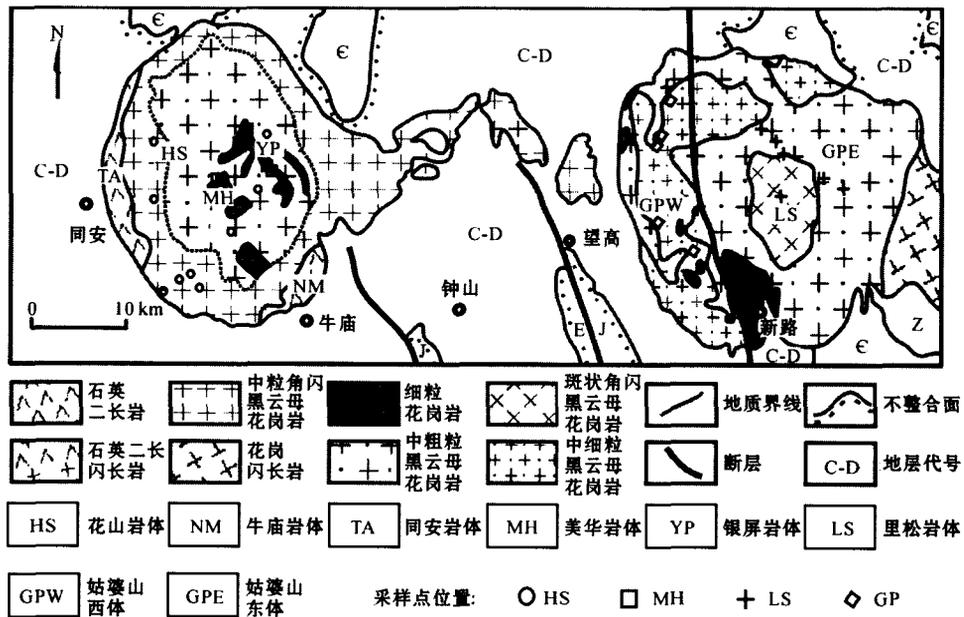


图1 花山-姑婆山复式花岗岩地质简图[据朱金初等(1989)、冯佐海等(2002)及张佩华(2003)资料改编]

Fig.1 Simplified regional geological map of the Huashan-Guposhan granite complex [modified from Zhu Jinchu *et al.* (1989), Feng Zuohai *et al.* (2002) and Zhang Peihua (2003)]

花山复式岩体呈近圆形,出露面积约 571 km²。岩体北部侵入于寒武纪变质岩和泥盆纪砂页岩中,南部仅与泥盆纪接触,围岩受岩体侵入的影响,产生角岩化、大理岩化和矽卡岩化。花山复式岩体由印支期牛庙岩体和同安岩体(210 Ma,朱金初等,1988)、燕山早期花山主体花岗岩(165 Ma,朱金初等,1988)和燕山晚期美华和银屏等细粒花岗岩体(129 Ma,朱金初等,1988)组成。其中牛庙岩体与同安岩体为石英二长闪长岩及石英闪长岩,花山主体

为中粒(角闪石)黑云母花岗岩,美华和银屏为细粒花岗岩。

1.2 姑婆山复式岩体

姑婆山复式岩体呈圆形,出露面积约 678 km²。岩体西南及西北缘侵入中-上泥盆统,东南部和东北部侵入寒武系及下泥盆统,东部与大宁岩体接触。围岩蚀变有角岩化、硅化、大理岩化和矽卡岩化等。晚期的红花园-新路断裂呈南北向展布,将岩体切割成东西两个部分,分别称为东体和西体。含有大量

暗色闪长质包体的里松岩体近等轴状分布于姑婆山东体的中心,面积超过 70 km²。

姑婆山复式岩体岩性及分布较为复杂,岩基中心的里松岩体为中粒似斑状角闪石黑云母二长花岗岩(160 Ma,张德全等,1985;杨学明等,1990),里松岩体外围的姑婆山东体以中粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩(148 Ma,张德全等,1985)为主,而西体则以中细粒斑状黑云母花岗岩-细粒花岗岩为主(140 Ma,张德全等,1985;杨学明等,1990)。

1.3 样品采集

本文研究的花山-姑婆山花岗岩不包括印支期的牛庙岩体与同安岩体。

对于燕山期花岗岩,根据前人的年龄资料分别采集燕山早期和晚期的样品。在花山岩体中,燕山早期花岗岩的代表性样品主要取自花山主体中央相带内各采石场(样号 HS),燕山晚期花岗岩采自美华岩体和银屏岩体(样号 MH)。在姑婆山岩体中,燕山早期花岗岩取自里松岩体和姑婆山东体中的粗粒花岗岩(样号 LS),燕山晚期样品分别采自新路矿区的细粒黑云母花岗岩和姑婆山西体中的细粒花岗岩(样号 GP)。

2 岩石地球化学特征和岩石类型

对研究区 30 件代表性样品的主量和微量元素含量进行了测试。主量元素分析在南京大学现代分析中心实验室的 ARL9800XP+ 型 X 射线荧光光谱仪上测试。使用 Li₂B₄O₇ 和 LiBO₂(67:33)混合熔剂和加拿大 Glaisse 高温自动燃气熔样机制样,测试条件:X 射线工作电压 40 kV,电流 60 mA。微量和稀土元素分析在中国科学院矿床地球化学重点实验室完成前期处理后,在南京大学成矿作用研究国家重点实验室 Finnigan Element2 高分辨率等离子质谱仪上测试。稀土元素全流程测试空白小于 0.1 ppb,分析精度优于 5%;微量元素除 Nb 分析精度为 9%,其余均优于 5%。氟和氯由南京地矿所分析测试中心分析。分析过程依据国土资源部行业标准 DZG20-01,将样品碱熔分解,分别用茜素络合剂分光光度法和硫氰酸汞间接分光光度法测定氟和氯,分析精度约 10%。所有样品的主量和微量元素分析结果(以及前人部分分析结果)列于表 1 中。

2.1 地球化学特征

2.1.1 主量元素

总体来说,花山-姑婆山燕山期花岗岩以高硅、高钾、富碱、低磷(多数样品 P₂O₅ 含量低于 XRF 检测限)为特征,具有较高的 FeO^T/MgO 值(4.02~45.74,平均 11.16)和 NK/A[(Na₂O + K₂O)/Al₂O₃, mol]指数,以及相对较低的 ACNK[Al₂O₃/(Na₂O + K₂O + CaO), mol]值。花山-姑婆山的燕山早期花岗岩(HS+LS)的 SiO₂ 为 69.04%~75.07%(平均 72.85%,n=18),ACNK 值(平均 0.96)和 FeO^T/MgO 值(平均 7.48)较低。与燕山早期花岗岩相比,花山-姑婆山的燕山晚期花岗岩(MH+GP)更富硅, SiO₂ 为 74.80%~76.38%(平均 75.93%,n=14),A/CNK 值(平均 1.02)略有增高,而 FeO^T/MgO 值(平均 15.90)明显增高。从早到晚,花山-姑婆山燕山期花岗岩向酸性和演化程度更高的方向发展。

在以 SiO₂ 为横坐标的 Harker 图解(图 2)中,花山-姑婆山花岗岩所有样品的 SiO₂ 与 Al₂O₃、TiO₂、FeO^T、MnO、MgO 和 CaO 呈明显的负相关,结合本区花岗岩普遍低磷,说明它们经历了钛铁矿、长石和磷灰石等矿物的分离结晶。SiO₂ 与 Na₂O、K₂O 的相关关系不明显。花山-姑婆山燕山晚期花岗岩样品通常位于燕山早期花岗岩演化趋势的前端,表明燕

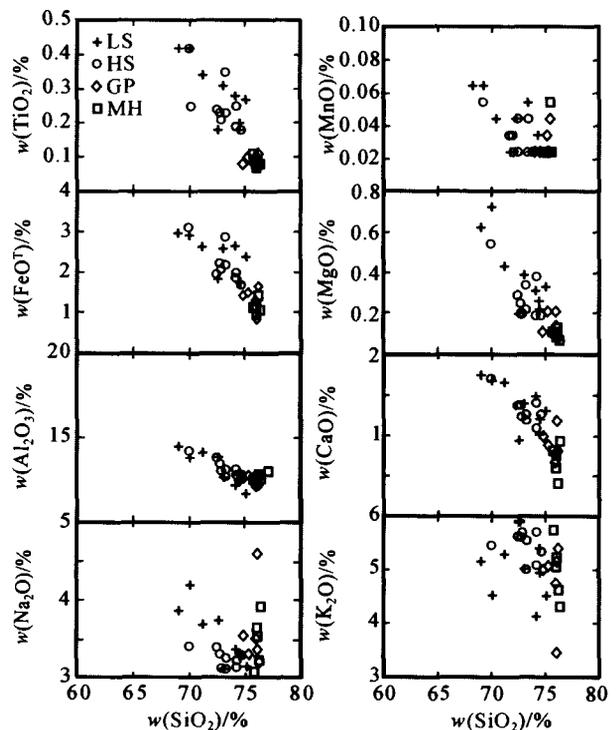


图 2 花山-姑婆山复式花岗岩花岗岩类的 Harker 图解
Fig. 2 Harker diagrams of the Huashan-Guposhan granite complex

表1 花山-姑婆山燕山期花岗岩主量元素($w_B/\%$)、微量和稀土元素含量($w_B/10^{-6}$)及地球化学参数
Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) element compositions and chemical parameters of the Yanshanian Huashan-Guposhan granites

岩体 样号	花山主体(HS)									美华、银屏等(MH)			
	HS-4	HS-7	HS-9	HS-10	HS-13	HS-16	HS-26	HS-29	HS-33	HS-20	HS-25	HS-28	HS-31
SiO ₂	74.62	72.71	74.14	72.82	73.24	72.43	74.17	69.96	73.21	79.51	76.04	75.72	76.35
TiO ₂	0.18	0.23	0.19	0.21	0.23	0.24	0.25	0.42	0.35	0.06	0.07	0.11	0.08
Al ₂ O ₃	12.86	13.49	13.17	13.08	13.15	13.85	12.84	14.25	12.75	12.62	12.67	12.56	12.59
TFeO	1.67	2.21	1.85	2.06	2.17	1.94	1.98	3.10	2.86	1.02	0.94	1.12	1.05
MnO	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06	0.03	0.03	0.03
MgO	0.19	0.25	0.19	0.20	0.22	0.29	0.38	0.54	0.34	0.04	0.10	0.11	0.07
CaO	1.26	1.37	1.09	1.23	1.26	1.37	1.40	1.70	1.19	0.69	0.76	0.81	0.93
Na ₂ O	3.31	3.32	3.15	3.14	3.27	3.41	3.24	3.42	3.13	3.87	3.55	3.08	3.93
K ₂ O	5.35	5.62	5.72	5.71	5.56	5.64	5.10	5.47	5.02	4.82	5.24	5.75	4.33
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.08	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00
LOI	0.34	0.29	0.33	0.74	0.43	0.47	0.53	0.69	0.44	0.54	0.69	0.38	0.34
Σ	100.00	99.78	100.07	99.45	99.80	99.92	100.19	100.03	99.70	99.75	100.19	99.79	99.82
K ₂ O+Na ₂ O	8.66	8.94	8.87	8.85	8.83	9.05	8.34	8.89	8.15	8.69	8.79	8.83	8.26
FeO*/MgO	8.81	8.85	9.76	10.30	9.86	6.70	5.21	5.73	8.42	25.42	9.36	10.14	15.04
A/CNK	0.95	0.96	0.99	0.96	0.96	0.97	0.96	0.97	1.0	0.98	0.98	0.98	0.98
F	2300	2700	1800	2400	2100	1200	1500	1200		2000	1600	670	620
Cl	330	1200	470	430	670	180	290	620		560	700	410	270
Rb	531	598	554	537	552	539	559	571	618	855	756	646	574
Sr	103	104	101	76.3	108	157	162	199	87.34	16.0	18.4	61.8	24.0
Ba	383	352	375	314	370	673	484	628	121	12.1	13.2	58.3	11.8
Y	54.1	54.8	48.4	56.6	54.2	51.9	45.2	53.2	35.6	73.7	50.6	30.9	53.1
Nb	51.7	49.5	43.1	53.1	54.8	56.4	37.7	55.0	50.4	63.3	49.3	34.3	52.4
Ta	10.2	6.28	4.32	6.14	6.43	7.18	5.94	6.23	6.89	12.6	7.08	5.96	5.71
Zr	305	333	322	299	323	276	360	384	354	139	85.6	131	98.8
Hf	10.8	10.4	9.57	10.0	10.4	8.11	11.2	11.4	11.17	8.22	4.32	5.22	3.87
Th	68.4	86.4	71.8	67.2	73.6	67.5	63.4	75.3	118.8	46.6	41.3	53.1	50.5
Ga	27.3	28.9	27.9	26.7	27.7	26.0	25.8	29.9	26.7	26.0	24.4	20.1	23.3
La	92.0	108	98.7	98.1	103	72.4	68.1	118	92.97	14.8	16.6	37.3	32.1
Ce	182	209	192	178	199	134	130	219	189	39.8	42.2	80.2	69.7
Pr	18.8	21.6	19.5	19.0	20.6	14.3	13.6	22.4	19.6	5.20	5.99	9.38	10.1
Nd	64.7	76.9	70.9	66.1	72.2	48.9	48.3	77.6	68.1	22.7	23.9	34.5	40.1
Sm	11.8	13.7	12.1	11.3	12.6	9.40	8.78	12.9	10.38	7.17	6.56	6.73	9.61
Eu	0.97	1.01	1.02	0.83	1.02	1.30	1.15	1.49	0.81	0.22	0.24	0.48	0.35
Gd	11.5	12.6	10.4	10.5	11.7	9.53	8.13	12.2	8.22	8.47	6.97	6.09	9.99
Tb	1.69	1.74	1.43	1.49	1.67	1.43	1.14	1.51	0.96	1.55	1.23	0.93	1.62
Dy	11.1	10.9	9.22	9.61	10.9	9.49	7.60	9.65	5.96	11.7	8.91	6.13	10.8
Ho	2.36	2.31	1.88	2.09	2.32	2.11	1.64	1.97	1.3	2.83	2.00	1.34	2.41
Er	7.00	6.60	5.62	6.03	6.63	6.35	4.91	5.66	3.75	9.45	6.35	4.17	7.24
Tm	1.05	1.00	0.82	0.86	0.97	0.98	0.78	0.91	0.58	1.67	1.00	0.66	1.07
Yb	6.89	6.12	4.91	5.19	6.02	6.05	5.00	5.61	3.59	11.9	6.48	4.22	6.66
Lu	1.01	0.92	0.74	0.79	0.91	0.91	0.81	0.83	0.60	1.93	0.99	0.64	0.97
Ga/Al	4.01	4.05	4.00	3.86	3.98	3.55	3.80	3.96	3.96	3.89	3.64	3.02	3.50
K/Rb	83.64	78.02	85.71	88.27	83.62	86.87	75.74	79.53	67.37	46.80	57.54	73.89	62.62
Rb/Sr	5.16	5.75	5.49	7.04	5.11	3.43	3.45	2.87	7.08	53.44	41.09	10.45	23.92
Nb/Ta	5.07	7.88	9.98	8.65	8.52	7.86	6.35	8.83	7.31	5.02	6.96	5.76	9.18
Zr/Hf	28.24	32.02	33.65	29.90	31.06	34.03	32.14	33.68	31.69	16.91	19.81	25.10	25.53
ΣREE	413	472	429	410	450	317	300	490	405	139	129	193	203
LREE/HREE	8.69	10.20	11.26	10.21	9.93	7.61	8.99	11.77	15.25	1.82	2.81	6.97	3.97
δEu	0.25	0.24	0.28	0.23	0.26	0.42	0.42	0.36	0.27	0.09	0.11	0.23	0.11
(La/Sm) _N	4.91	4.96	5.13	5.46	5.13	4.85	4.88	5.74	5.63	1.30	1.59	3.48	2.10
(Gd/Yb) _N	1.34	1.66	1.71	1.63	1.57	1.27	1.31	1.75	1.85	0.57	0.87	1.16	1.21

续表 1-1

Continued Table 1-1

岩体 样号	美华、银屏等(MH)				里松(LS)						新路及姑婆西(GP)		
	HS-34	HS-36	II-6-2*	HS408*	LS-4	LS-6	LS-7	LS-9	LS-10	LS-11	GP-1	GP-6	GP-13
SiO ₂	76.18	75.99	76.28	76.38	74.49	69.04	70.05	74.44	72.57	71.20	75.07	73.05	74.12
TiO ₂	0.08	0.08	0.03	0.06	0.20	0.42	0.42	0.18	0.18	0.34	0.27	0.31	0.28
Al ₂ O ₃	12.86	12.66	13.02	12.69	12.54	14.50	13.84	12.87	13.88	14.16	11.73	12.68	12.22
TFeO	1.41	1.11	0.91	1.35	1.75	2.96	2.90	1.75	1.82	2.61	2.38	2.57	2.65
MnO	0.06	0.03	0.02	0.08	0.03	0.07	0.07	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05	0.06
MgO	0.13	0.09	0.02	0.04	0.22	0.62	0.72	0.26	0.20	0.43	0.33	0.39	0.31
CaO	0.41	0.60	0.45	0.23	1.20	1.74	1.67	1.01	0.94	1.65	1.30	1.39	1.48
Na ₂ O	3.24	3.66	3.60	3.09	3.33	3.88	4.21	3.29	3.75	3.70	3.16	3.13	3.38
K ₂ O	4.64	5.07	4.98	4.80	4.95	5.17	4.54	5.41	5.91	5.30	4.52	5.03	4.15
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.04		0.00	0.15	0.14	0.00	0.00	0.05	0.01	0.03	0.02
LOI	0.69	0.50	0.00		0.39	0.53	1.42	0.55	0.45	0.40	0.29	0.67	0.41
Σ	99.86	99.91	99.46	98.87	99.29	99.41	100.3	99.99	99.93	100.18	99.36	99.59	99.37
K ₂ O+Na ₂ O	7.88	8.73	8.58	7.89	8.28	9.05	8.75	8.70	9.66	9.00	7.68	8.16	7.53
FeO*/MgO	10.87	12.30	45.74	33.77	7.93	4.77	4.02	6.75	9.09	6.07	7.20	6.60	8.53
A/CNK	1.16	1.00	1.07	1.19	0.96	0.96	0.93	0.98	0.97	0.95	0.94	0.97	0.96
F	1 100	1 600			1 500	950	870	1 500	1 700	1 400	1 600	1 600	2 900
Cl	220	130			330	320	150	380	300	250	550	1 120	1 100
Rb	836	782	480	527	412	410	412	473	563	443	412	446	455
Sr	15.7	19.6	11.4	10.6	89.7	308	223	77.2	76.4	149	72.0	134	81.8
Ba	38.3	13.9	16.0	30.4	364	824	549	334	412	605	303	558	218
Y	60.5	65.8	66.1	44.3	38.0	35.9	39.2	60.9	58.1	56.8	46.3	84.4	89.6
Nb	53.7	62.5	52.4	42.3	38.3	56.0	59.1	37.7	55.2	49.3	33.9	38.0	61.4
Ta	15.8	10.1	6.80	7.47	4.54	7.29	8.82	4.91	6.78	6.53	4.37	4.56	9.24
Zr	99.9	125	214	78.6	290	303	342	271	265	331	362	289	373
Hf	5.24	5.57	10.5	3.28	9.02	8.24	9.33	8.7	8.93	9.99	10.9	9.46	12.9
Th	35.2	49.2	41.8	27.2	64.3	45.6	43.4	61.7	60.8	54.3	67.3	45.8	96.3
Ga	27.5	26.5			26.3	25.1	25.8	27.4	31.6	28.7	27.3	28.5	31.1
La	34.7	23.9	15.8	21.6	72.3	68.2	64.3	78.0	98.3	74.1	74.6	75.9	103
Ce	68.1	50.4	39.1	48.7	148	125	120	165	202	150	156	160	218
Pr	9.00	7.59	4.99	5.58	15.9	13.1	12.4	18.1	21.9	16.1	17.4	18.3	24.5
Nd	32.9	30.3	19.5	21.2	56.1	45.5	44	64.6	77.9	58.5	60.4	69.5	92.6
Sm	8.90	7.99	5.24	5.50	9.65	7.84	7.91	13.3	14.4	11.2	11.3	15.6	18.8
Eu	0.18	0.26	0.13	0.10	0.89	1.53	1.28	0.83	0.99	1.37	0.79	1.2	0.85
Gd	9.20	8.85	5.92	5.70	8.63	7.34	7.44	13.6	13.2	11.1	9.80	16.2	18.2
Tb	1.6	1.52	1.14	1.13	1.15	1.01	1.06	1.97	1.83	1.56	1.31	2.53	2.74
Dy	11.5	11.2	9.09	7.75	7.26	6.69	6.87	13.0	12.0	10.5	8.46	17.1	18.5
Ho	2.53	2.7	2.3	1.72	1.55	1.43	1.52	2.87	2.54	2.21	1.79	3.56	4.07
Er	8.00	8.69	7.45	5.36	4.45	4.39	4.61	8.04	7.16	6.74	5.12	10.4	11.6
Tm	1.33	1.40	1.47	0.83	0.67	0.67	0.74	1.16	1.08	1.03	0.80	1.52	1.83
Yb	9.01	9.34	10.5	5.71	4.24	4.44	5.06	7.1	7.06	6.67	4.96	9.24	11.7
Lu	1.35	1.46	1.67	0.82	0.61	0.68	0.8	1.07	1.05	0.99	0.78	1.34	1.81
Ga/Al	4.04	3.95			3.96	3.27	3.52	4.02	4.30	3.80	4.40	4.28	4.81
K/Rb	46.08	53.82	86.13	75.61	99.74	104.68	91.48	94.95	87.14	99.32	91.07	93.62	75.72
Rb/Sr	53.25	39.90	42.11	49.72	4.59	1.33	1.85	6.13	7.37	2.97	5.72	3.33	5.56
Nb/Ta	3.40	6.19	7.71	5.66	8.44	7.68	6.70	7.68	8.14	7.55	7.76	8.33	6.65
Zr/Hf	19.06	22.44	20.38	23.96	32.15	36.77	36.66	31.15	29.68	33.13	33.21	30.55	28.91
ΣREE	198	166	124	132	331	288	278	389	461	402	354	352	528
LREE/HREE	3.45	2.67	2.14	3.54	10.60	9.80	8.89	6.96	9.05	5.50	9.71	7.63	6.50
δEu	0.06	0.09	0.07	0.05	0.30	0.62	0.51	0.19	0.22	0.23	0.23	0.38	0.14
(La/Sm) _N	2.45	1.88	1.90	2.47	4.71	5.47	5.11	3.70	4.29	4.15	4.15	3.06	3.43
(Gd/Yb) _N	0.82	0.76	0.45	0.81	1.64	1.33	1.19	1.54	1.50	1.42	1.60	1.35	1.25

续表 1-2
Continued Table 1-2

岩体 样号	新路及姑婆西(GP)					
	GP-5	GP-8	GP-11	GP-16	LH-1	LS-15
SiO ₂	76.05	76.01	76.31	76.17	74.80	75.26
TiO ₂	0.10	0.07	0.09	0.11	0.08	0.10
Al ₂ O ₃	12.18	12.64	12.41	12.23	12.63	12.83
TFeO	0.83	1.25	1.30	1.64	1.41	1.48
MnO	0.03	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03
MgO	0.14	0.21	0.10	0.10	0.11	0.21
CaO	1.18	0.79	0.64	0.81	0.99	0.88
Na ₂ O	3.38	4.61	3.62	3.22	3.56	3.32
K ₂ O	5.17	3.48	4.74	5.41	5.01	5.08
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
LOI	0.59	0.71	0.74	0.47	0.43	0.51
Σ	99.74	99.94	100.20	100.39	99.21	99.87
K ₂ O + Na ₂ O	8.55	8.09	8.36	8.63	8.57	8.40
FeO* /MgO	5.91	5.96	13.41	16.38	12.84	7.07
A/CNK	0.91	0.99	1.01	0.97	0.96	1.02
F		1 400	2 300	2 300	1 900	1 800
Cl		580	330	200	380	160
Rb	526	597	956	636	636	569
Sr	29.7	12.4	18.2	23.6	33.8	52.6
Ba	37.9	19.5	41.0	44.8	107	205
Y	106	114	108	132	110	96.1
Nb	67.7	76.1	70.5	57.9	43.3	49.5
Ta	19.9	39.8	27.5	9.78	10.3	7.63
Zr	139	156	165	221	128	109
Hf	8.8	12.5	8.94	9.63	7.17	4.72
Th	50.6	58.2	53.5	75.1	36.2	33.2
Ga	23.7	34.0	30.6	27.8	25.1	29.5
La	21.81	31.3	26.9	67.1	33.0	37.9
Ce	48.3	67.9	58.4	161	69.8	85.7
Pr	6.54	8.79	7.20	19.2	9.25	10.2
Nd	27.93	35.1	27.4	74.7	36.4	40.9
Sm	9.21	11.4	8.74	18.4	11.7	11.3
Eu	0.27	0.1	0.21	0.34	0.34	0.53
Gd	11.85	13.8	11.2	20.1	14.4	13.9
Tb	2.21	2.72	2.27	3.35	2.59	2.5
Dy	16.47	21.1	17.8	23.8	18.4	18.1
Ho	3.9	5.01	4.23	5.23	4.16	4.16
Er	11.74	16.7	13.9	15.6	12.3	12.2
Tm	1.99	2.92	2.41	2.3	1.90	1.86
Yb	12.98	21.2	16.9	14.1	12.7	12.2
Lu	2.09	3.34	2.60	2.12	1.92	1.77
Ga/Al	3.67	5.08	4.66	4.29	3.75	4.34
K/Rb	81.56	48.39	41.16	70.61	65.39	74.12
Rb/Sr	17.74	48.15	52.53	26.95	18.82	10.82
Nb/Ta	3.40	1.91	2.56	5.92	4.20	6.49
Zr/Hf	15.80	12.48	18.46	22.95	17.85	23.09
ΣREE	177	241	200	427	229	253
LREE/HREE	1.80	1.78	1.81	3.93	2.35	2.80
δEu	0.08	0.02	0.06	0.05	0.08	0.13
(La/Sm) _N	1.49	1.73	1.94	2.29	1.77	2.11
(Gd/Yb) _N	0.74	0.53	0.54	1.16	0.91	0.91

山早期和晚期的花岗岩可能具有类似的源区。

2.1.2 卤族元素(F,Cl)

总体来说花山-姑婆山花岗岩富卤族元素,且相对富F贫Cl。28件样品氟分析含量范围为(620~2900)×10⁻⁶,峰值为(1000~2000)×10⁻⁶;氯分析含量范围为(130~1200)×10⁻⁶,峰值为(200~600)×10⁻⁶。高卤族元素含量对本区花岗岩岩浆的地球化学特征产生了一系列重要影响(刘昌实等,2003):①F⁻或Cl⁻代替聚合的铝硅酸盐熔体中桥氧(O^θ),形成Si—F、Si—Cl、Al—F、Al—Cl键,使熔体解聚(depolymerization),大大降低富卤素硅酸盐体系的固相线温度(幅度达200℃;London,1987;Manning *et al.*,1980;Xiong *et al.*,1996),在结晶分异演化过程中使其残余岩浆成分或趋同于花岗岩体系,或趋同于似长石正长岩体系中的低熔组分。②氟是负电性很强的元素(3.9),能以共价键形式与HFSE元素,特别是钨系、钽系和稀有金属元素组成高次配位数的复杂络合物,如MoF₆、(Ga, Al)F₃、(Nb, Ta)F₅、(Yb, Y)F₃、(Th, U)F₃和LaOF等(Richardson *et al.*,1979;Collins *et al.*,1982),使这些络合物在有平衡离子Na⁺、K⁺存在下趋于稳定,致使HFSE元素活性增高。本区样品的F—Th、F—Yb、F—Zr、F—Hf都具有一定的正相关性,直接证明了氟对这些元素络合作用的重要意义。

2.1.3 稀土元素

花山-姑婆山燕山早期花岗岩具有较高的稀土元素含量,ΣREE=278×10⁻⁶~528×10⁻⁶(平均393×10⁻⁶),稀土元素分配模式向右倾(图3a),LREE/HREE=5.50~15.25(平均9.37),具有明显的Eu负异常,δEu=0.14~0.62(平均0.31),LREE的分馏程度大于HREE;(La/Sm)_N=2.97~5.56(平均4.56),(Gd/Yb)_N=1.25~1.84(平均1.49)。

燕山晚期花岗岩与早期相比,稀土元素总量降低,ΣREE=124×10⁻⁶~427×10⁻⁶(平均201×10⁻⁶),LREE分馏程度降低,HREE略有富集,稀土元素分配模式近于“海鸥形”(图3a),LREE/HREE=1.78~6.97(平均2.99),Eu负异常更明显(0.025~0.232,平均0.09);(La/Sm)_N=1.26~3.38(平均1.97),(Gd/Yb)_N=0.45~1.20(平均0.81),均低于燕山早期花岗岩。稀土元素的这一变化可能表明燕山晚期花岗岩斜长石和富含轻中稀土元素的副矿物褐帘石、楣石、磷灰石分离结晶作用更为明显。

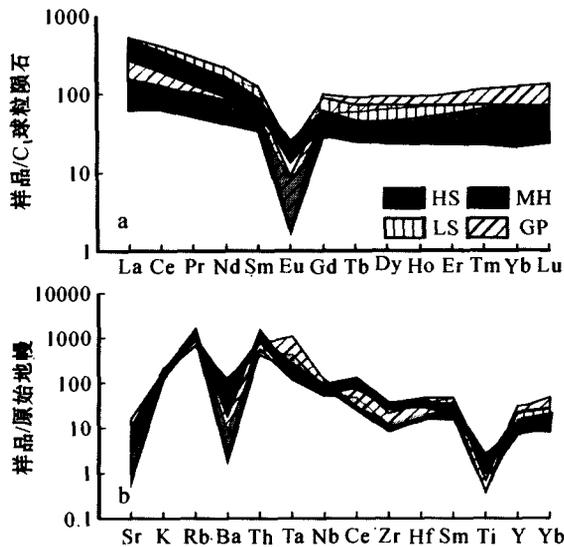


图 3 花山-姑婆山复式花岗岩类的 REE 配分图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) of the Huashan-Guposhan granite complex

球粒陨石标准化值据 Taylor 和 McLemann(1985),

原始地幔标准化值据 McDonough 和 Sun (1995)

Chondrite-normalized REE standard value after Taylor and McLemann (1985), primitive mantle-normalized standard value after McDonough and Sun (1995)

2.1.4 微量元素

花山-姑婆山花岗岩代表性样品的微量元素分析结果见表 1。微量元素蛛网图(图 3b)表明,本区花岗岩样品的微量元素分布型式相似,表现为大离子亲石元素(Rb、Th、Ce、K)的强富集和高场强元素(Y、Ta、Nb、Zr、Hf)的弱富集,暗示其来源的一致性;与相邻元素相比,Ba、Sr、Ti、P(图中未标出)负异常明显,这可能是由于斜长石、磷灰石和钛铁矿等矿物的分离结晶作用所致。与燕山早期花岗岩相比,花山-姑婆山燕山晚期花岗岩更加亏损 Ba、Sr、Ti、Zr 和 LREE,但相对富集 HREE 和 Ta(图 3),这与本区花岗岩相应矿物的结晶分离相对应。

花山-姑婆山花岗岩具有较高的 10^4 Ga/Al 值和较低的 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值。其中 10^4 Ga/Al 值(3.02~5.09)大于绝大部分 I、S 型花岗岩而与 A 型花岗岩相似(Collins, 1982)。Manning(1980)提出在水不饱和条件下, F 对 Ga 的络合能力很强,形成八面体络合物离子团 GaF_3^- , 后者在高温熔体中稳定。

相反八面体 AlF_3^- 络合物离子团在水不饱和和

熔体中不稳定,故高 F 含量也可以促使出熔体 Ga/Al 值增高。本区相对富氟而贫氯,对 29 件样品进行分析, F-Ga 具正相关性。

本区燕山早期和燕山晚期花岗岩的 Nb/Ta(分别为 7.74 和 5.08)和 Zr/Hf(分别为 32.13 和 19.96)明显低于正常花岗岩的对应值(正常的花岗岩中, Nb/Ta 值约为 11, Zr/Hf 值为 36~39)(Taylor and McLemann, 1985; Green and Pearson, 1989; Dostal and Chatterjee, 2000)。Collins 等(1982)和 Cerny 等(1986)认为富 F 成分的流体可以导致 Nb/Ta 和 Zr/Hf 这两组元素对的分馏,即富 F 流体的作用促使 Ta、Hf 的含量升高而形成的。锆石的分离结晶作用能使分异岩浆中的 Zr 含量减少(Dostal and Chatterjee, 2000),这也是促使 Zr/Hf 下降的一种可能。该区燕山晚期花岗岩的 Nb/Ta、Zr/Hf 比值与燕山早期花岗岩的相比明显降低,说明前者经历了更大比例的流体改造和锆石的分离结晶作用,这也从另一方面体现了本区燕山晚期花岗岩是燕山早期花岗岩岩浆分异演化产物的可能性。

2.2 岩石成因类型

花山-姑婆山燕山早期花岗岩中普遍出现褐帘石,呈自形斑状,有时内部可见环带,并含有磷灰石等包裹体,说明这些褐帘石是原生的(图 4)。根据岩石含原生褐帘石、不含辉石、可见少量角闪石、高钾、钾长石斑状结构、以岩基形式产出并含少量闪长质包体、准铝质为主、较低的 $^{87}Sr/^{86}Sr_i$ (~0.707)(张德全等, 1985; 朱金初, 1989; 杨学明等, 1990)等一系列的地质地球化学特征,均表明该燕山早期花岗岩应属于 Barbarin(1999)提出的花岗岩分类中典型的 KCG(富钾的钙碱性花岗岩类),也可对应高钾钙碱性 I 型花岗岩。

花山-姑婆山燕山晚期花岗岩,则同时具有 MPG 和 KCG 的特点,应为 MPG 和 KCG 之间的过渡岩体,在矿物学特征上出现独居石、磷钇矿、褐钇铈矿等 MPG(含白云母过铝花岗岩)中常见的副矿物,局部还出现电气石,且美华花岗岩体的 $^{87}Sr/^{86}Sr_i$ 达到 0.716,与 MPG 较为相似;但在主量元素特征上,燕山晚期花岗岩整体上是准铝-弱过铝质岩石,钾含量很高, $FeO^T/(FeO^T + MgO)$ 为 0.86~0.96,与 KCG 较为相似。不含大量原生白云母,与 MPG 的差异较大,笔者将其划分为经过更多地壳混染的、高分异的 KCG。

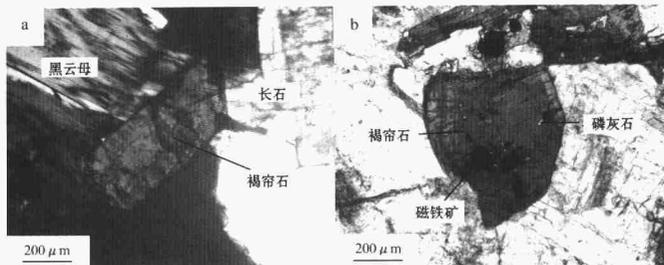


图4 花山-姑婆山燕山早期花岗岩中的原生褐帘石(单偏光)

Fig. 4 Primary allanites in Early Yanshanian Huashan-Guposhan granite (single-crossed)

a—板状褐帘石与黑云母、长石共生,HS-13-01; b—褐帘石的内部结构及其包体,LS-9-01

a—paragenesis of slaty-allanite, biotite and feldspar,HS-13-01; b—inner structure of allanite and its enclaves,LS-9-01

3 物质来源与源区性质讨论

目前,有关高钾钙碱性花岗岩的源区主要有2种观点:①由高钾安山岩组成的年轻的地壳(Roberts and Clemens, 1993; Liégeois *et al.*, 1998;),并在其深处应有体积足够大的安山质源岩存在;②富含金云母-钾质碱镁闪石的岩石圈地幔(Nelson *et al.*, 1986; Liégeois *et al.*, 1998)。

本地区的构造背景显示没有适合的体积足够大的安山质源岩存在。花山-姑婆山燕山早期花岗岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值变化范围为 $-2.4 \sim -3.2$ (朱金初等, 1988), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值变化范围为 $0.707 \sim 0.708$ (张德全等, 1985; 朱金初等, 1988; 杨学明等, 1990), 表明本区花岗岩应以幔源物质为主, 并混染了一部分壳源物质。花山-姑婆山燕山晚期花岗岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值变化范围为 $-4.4 \sim -5.0$ (朱金初等, 1988), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 值变化范围为 $0.712 \sim 0.716$ (朱金初等, 1988; 杨学明等, 1990), 表明其与地壳的混染程度进一步增加。因此, 本区燕山期花岗岩最有可能的源岩来自于富含金云母-钾质碱镁闪石的岩石圈地幔部分熔融产物与下地壳不同程度混染形成的混合源区, 这与本区花岗岩富集不相容元素的性质相一致(Mckenzie, 1989)。

花山-姑婆山花岗岩较高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值以及无明显Nb、Ta异常, $\text{Nb}/\text{La} = 0.44 \sim 4.27$, 表明该区岩石很可能受到亏损的软流圈地幔和富集的岩石圈地幔岩浆混合的影响(李献华等, 1999)。此外软流

圈地幔物质的加入也为下地壳的熔融作用提供了足够热能(Miller *et al.*, 1999)。

综上所述, 由于亏损的软流圈地幔上涌而导致的富含云母-钾质碱镁闪石的岩石圈地幔的部分熔融形成了不相容元素富集的高钾钙碱性岩浆, 并与地壳重熔的岩浆混合, 从而形成本区高钾钙碱性花岗岩。需要指出的是, 混合熔体在聚集成岩浆房后可能有一段时间的滞留, 期间经历了钛铁矿、长石、磷灰石、褐帘石、榍石等矿物的分离结晶作用。

鉴于岩浆的化学成分主要取决于源岩性质, 而不是形成过程(Roberts and Clemens, 1993), 用岩浆的主微量元素特征来讨论源区的矿物组成已成为地球动力学研究的一个重要领域(Hawkesworth *et al.*, 1990; Miller *et al.*, 1999)。

长石是花岗质熔体的主要组成部分, 同时也是Sr、Ba和 Eu^{2+} 的捕获者(Rollison, 1993; 刘红涛等, 2002)。花山-姑婆山燕山期花岗岩普遍亏损Sr和Ba, 并具有明显的负Eu异常, 说明熔体从源区部分熔融到大规模结晶前发生过显著的长石分离结晶作用。由于K是高度不相容元素, 钾长石不可能作为一个稳定的矿物相残留在源区。因此, 源区部分熔融的残留相中应当含有大量的斜长石。

源区残留大量的石榴石可导致重稀土元素和Y极度亏损及LREE/HREE强烈分馏。花山-姑婆山燕山期花岗岩类的HREE呈现出较为平坦的分布, 表明其源区不可能残留大量的石榴石。

辉石类(Opx, Cpx以及En)是地壳岩石脱水熔融实验产物中最常见的残留矿物(Beard and Lof-

gren, 1991; Patiño and Beard, 1995; Singh and Johannes, 1996; Montel and Vielzeuf, 1997), 在花山-姑婆山燕山期花岗岩中的缺失表明其全部进入残留相中。类似的缘故, 可能还有少量角闪石进入了残留相中。辉石和角闪石的大量残留可以导致长英质熔体具有正的 Eu 异常, 但花山-姑婆山燕山期花岗岩具有明显的负 Eu 异常, 说明它们在残留相中的比例不大。

在含金云母和钾质角闪石的富集地幔不同程度熔融过程中, 熔体中 La 与 Ba、K 含量呈不同的变化趋势, 与富集地幔熔融形成的熔体在分离结晶、地壳混染过程中 La、Ba、K 的性质一致 (Feldstein *et al.*, 1999; 王建等, 2003)。因此 La/Ba - La、La/K - La 图解 (图 5) 可以限制幔源熔体的源区性质。花山-姑婆山燕山早期花岗岩的 La/Ba、La/K 与 La 表现出正相关性, 说明源区可能存在残留的金云母和/或钾质角闪石。

因此, 花山-姑婆山燕山期花岗岩类的源岩部分熔融时的残留相主要以斜长石为主, 含少量的辉石、角闪石和金云母, 其整体组成类似于中-基性的麻粒岩。这与典型大陆地壳 25~30km 深处的组成类

似 (Wedepohl, 1995)。

4 花岗岩形成的构造环境判别

长期以来, 南岭中生代大地构造背景一直受到广大地质学家的重视。近年来的研究表明, 南岭地区燕山早期存在 A 型花岗岩 (陈培荣等, 1998; 范春方等, 2000; 付建明等, 2004)、双峰式火山岩 (陈培荣等, 1999) 和玄武质岩浆 (Chung *et al.*, 1997; 赵振华等, 1998) 活动, 陈培荣等 (2002) 指出南岭燕山早期花岗岩具有后造山花岗岩套的矿物-岩石学特征, 这些都表明南岭在燕山早期 (160~180 Ma) 就开始进入岩石圈拉张-减薄的后造山地球动力学环境。

Gilder 等 (1996)、洪大卫等 (2002)、chen 和 Jahn (1998) 在浙赣湘桂地区识别出一条近北东向的高 ϵ_{Nd} 、低 t_{DM} 的花岗岩带, 花山-姑婆山岩体位于该带底部。该带被认为是华夏陆块与扬子陆块之间碰撞对接带 (洪大卫, 2002), 构造相对薄弱, 是岩石圈地幔上涌和岩石圈伸展-减薄的有利地区。

花山-姑婆山燕山期花岗岩普遍富集 Rb、Th、K、Y 和稀土元素, 具明显的 Rb、Th 峰, 以及因分离结晶作用而导致的 Ba、Ti、P、Sr 谷, 无明显的 Nb、Ta 负异常, 其微量元素分布形式总体上和洋岛玄武岩 (OIB) 相似。与正常的洋脊玄武岩相比, 本区花岗岩更富 Nb、Ta、Zr、Hf, 其地球化学性质类似 Ascension 和 Oslo Rift, 呈现板内幔源的地球化学特点 (Pearce *et al.*, 1984; Rogers *et al.*, 1998; Li, 2000)。在 SiO_2 - FeO^* - MgO - Al_2O_3 - CaO 构成的系列判别图解 (Maniar 和 Piccoli, 1989) 中, 花山-姑婆山花岗岩体绝大部分落在后造山花岗岩类 (POG) 区内 (图 6)。在 Pearce 等 (1984) 的花岗岩类构造环境判别图解中 (图 7), 花山和姑婆山复式花岗岩体中两期花岗岩的投影点均在 (Yb + Ta) - Rb 图解中均分布在同碰撞花岗岩 (Syn-COLG) 与板内花岗岩 (WPG) 的分界线上, 而在 Yb - Ta 图解中, 均投在板内花岗岩分布区内。考虑到本区所处的地球动力学背景, 本区花岗岩更接近于板内花岗岩。

Tsai 等 (2000) 研究表明, 铁镁质侵入岩、A 型花岗岩和双峰式火山岩是在地壳减薄过程中与区域性岩浆底侵有关的伸展作用的产物。花山-姑婆山燕山早期花岗岩 (160~165 Ma) 与华南铁镁质侵入岩、A 型花岗岩和双峰式火山岩形成年代相似或稍早, 这可能代表该区花岗岩形成于陆内由挤压向拉张的

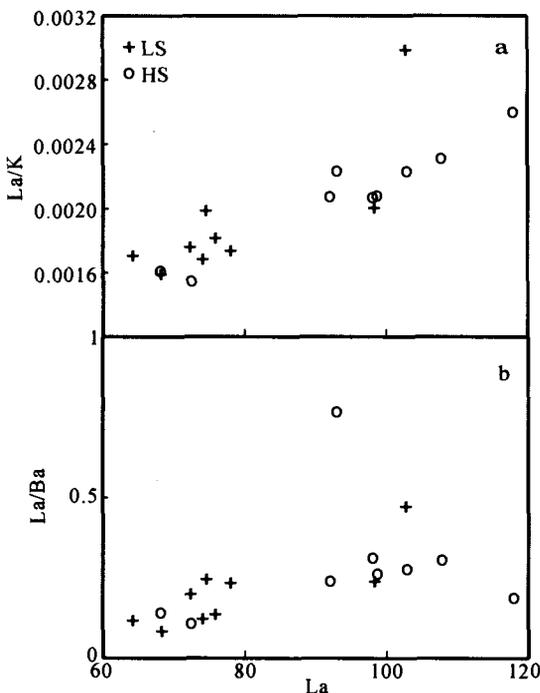


图 5 花山-姑婆山燕山早期花岗岩的 La/K - La(a) 和 La/Ba - La(b) 图解 (据 Feldstein 等, 1999)

Fig. 5 La/K - La(a) and La/Ba - La(b) diagrams of Early Yanshanian Huashan-Guposhan granite (after Feldstein *et al.*, 1999)

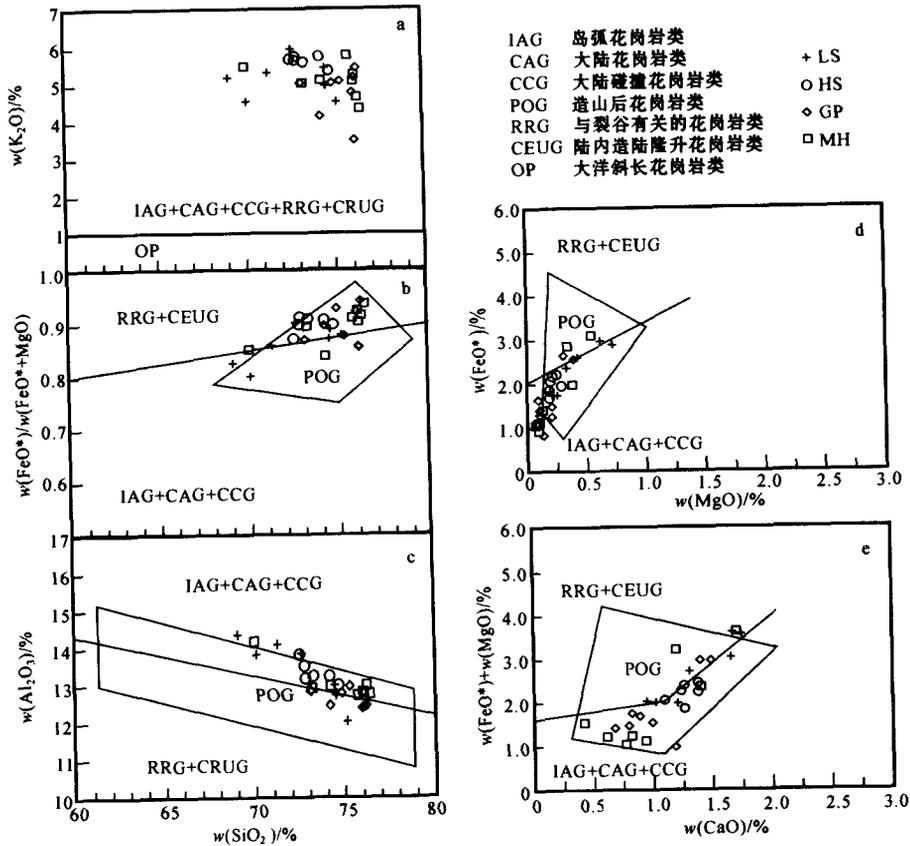


图 6 花山-姑婆山复式花岗岩 $\text{SiO}_2 - \text{FeO}^* - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ 构造环境判别图解 (Maniar 和 Piccoli, 1989)
 Fig. 6 $\text{SiO}_2 - \text{FeO}^* - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$ discrimination diagram for the tectonic settings of Huashan-Guposhan granite complex (after Maniar and Piccoli, 1989)

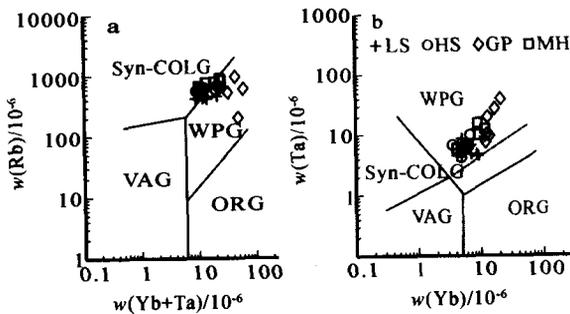


图 7 Rb-(Yb+Ta)(a)和 Ta-Yb(b)构造环境判别图 (Pearce 等, 1984)

Fig. 7 Rb-(Yb+Ta)(a) and Ta-Yb(b) discrimination diagrams for the tectonic settings (after Pearce *et al.*, 1984)

ORG—洋脊花岗岩类; VAG—火山弧花岗岩类;
 WPG—板内花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩类
 ORG—ocean ridge granites; VAG—volcanic arc granites; WPG—
 intraplate granites; Syn-COLG—syntectonic collision granites

构造转折时期,这一假设得到了图 8 的支持。在以常量元素为主的 $\lg[\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})] - \text{SiO}_2$ 图解(图 8a)中,花山-姑婆山燕山早期花岗岩均投在挤

压型与伸展型构造环境的重叠部分中, $\text{Th}/\text{Ta} - \text{Yb}$ 图解(图 8b)也反映本区山燕山早期花岗岩具有向板内火成岩演化的趋势,而燕山晚期花岗岩绝大部分投在伸展型构造环境或板内火山带中。这些特征都表明花山-姑婆山花岗岩体(尤其是燕山早期岩体)形成于陆内由挤压向拉张的构造转折时期,与 KCG 的生成环境相一致(Barbarin, 1999)。

综上所述,花山-姑婆山燕山期花岗岩体形成于后造山陆内环境、岩石圈伸展-减薄、陆内由挤压向拉张的构造转折时期的地球动力学背景。

5 结论

广西花山-姑婆山燕山期花岗岩体以高硅、高钾、富碱、低磷、准铝-弱过铝质为特征,具有较高的 FeO^*/MgO , 富集大离子亲石元素、高场强元素和稀土元素,属 Barbarin(1999)分类中的 KCG(富钾钙碱性)系列岩石。

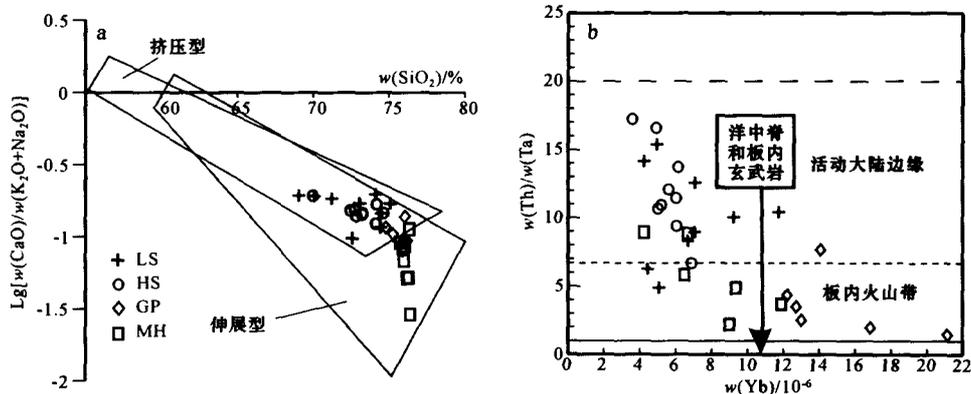


图 8 花山-姑婆山复式花岗岩 $\lg[CaO/(K_2O+Na_2O)] - SiO_2$ 图解 (据 Brown,1982)和 Th/Ta - Yb 图解(据 Gorton,2000)

Fig. 8 $\lg[CaO/(K_2O+Na_2O)] - SiO_2$ diagram (after Brown,1982) and Th/Ta - Yb diagram (after Gorton,2000) of the Huashan-Guposhan granite complex

在区域构造演化分析基础上,得出花山-姑婆山花岗岩体形成于后造山陆内环境,其中,燕山早期花岗岩体还继承了造山期同碰撞花岗岩的某些特征,而燕山晚期花岗岩则表现出明显的板内花岗岩的特征。因此总体上花山-姑婆山燕山期花岗岩体形成于由挤压向拉张的构造转折时期的地球动力学背景。富含金云母-钾质碱镁闪石的岩石圈地幔的部分熔融形成了原始的富钾钙碱性岩浆,并与由此而引发的地壳重熔岩浆混合,最终形成了花山-姑婆山复式花岗岩体。

References

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46 (3): 605~626.

Beard J S and Lofgren G E. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb[J]. *Journal of Petrology*, 32(2): 365~401.

Brown G C. 1982. Calc-alkaline intrusive rocks: their diversity evolution and relation to volcanic arcs[A]. Thorpe R S. *Andesites - Orogenic Andesites and Related Rocks*[C]. New York: John Wiley and Sons, 437~464.

Cerny P, Goad B E and Hawthorne F C, et al. 1986. Fractionation trends of the Nb-and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatitic aureole, southeastern Manitoba [J]. *Am. Mineral*, 71: 501~517.

Chen J F and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: evidence from Sr, Nd and Pb isotopic compositions of granitoids and sedimentary rocks[J]. *Tectonophy*, 284: 101~133.

Chen Jiangfeng and Jahn B M. 1999. Nd, Sr, and Pb isotope tracing and evolution of continental crust of Southeast China[A]. Zheng Yongfei. *Chemical Geodynamics*[C]. Beijing: Science Press, 262~287 (in Chinese).

Chen Peirong, Hua Renmin, Zhang Bangtong, et al. 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region[J]. *Science in China(series D)*, 45(8): 755~768 (in Chinese).

Chen Peirong, Kong Xinggong, Ni Qisheng, et al. 1999. Ascertainment and implication of Early Yanshanian bimodal volcanic association from south Jiangxi Province [J]. *Geological Review*, 45 (supp.): 734~741 (in Chinese).

Chen Peirong, Zhang Bangtong, Kong Xinggong, et al. 1998. Geochemical Characteristics and Tectonic Implication of Zhaibei A-type Granitic Intrusives in South, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 163~173 (in Chinese).

Chen Yuchuan and Mao Jinwen. 1995. *Metallogenic Series of Ore Deposits and Metallogenic Evolution through Geologic History in North Guangxi*[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1~433 (in Chinese).

Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Zhang Hongliang, et al. 1989. *Geology of Non-ferrous and Rare Metal Deposits Related with Mesozoic Granitoids in the Nanling area*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~508 (in Chinese).

Chung S L, Cheng H, Jahn B M, et al. 1997. Major and trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China sea opening [J]. *Lithos*, 40: 203~220.

Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to south-eastern Australia[J]. *Contr. Mineral. Ptol.*, 80: 189~200.

Dostal J and Chatterjee A K. 2000. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton Nova Scotia, Canada [J]. *Chemical Geology*, 163: 207~218.

Fan Chunfang and Chen Peirong. 2000. Geochemical characteristics and tectonic implication of Beitou A-type granitic intrusive in South Jiangxi Province[J]. *Geochimica*, 29(4): 358~366 (in Chinese).

Feldstein S N and Lange R A. 1999. Pliocene potassic magmas from the Kings River region, Sierra Nevada, California: evidences for melting of a subduction-modified mantle[J]. *Journal of Petrology*, 40: 1301~1320.

- Feng Zuohai, Liang Jincheng, Zhang Guilin, *et al.* 2002. On the litho-demarc units of Mesozoic granitoid in east Guangxi[J]. Journal of Guilin institute of technology, 22(3): 333~340 (in Chinese).
- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, *et al.* 2004. Geochemistry and tectonic setting of Xishan aluminous A-type granitic volcanic intrusive complex, Southern Hunan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 26(4): 15~23 (in Chinese).
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, *et al.* 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. Journal Geophy. Res., 101(B7): 16 137~16 154.
- Gorton M P and Schandl E S. 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks[J]. Canada Mineral, 38: 1 065~1 073.
- Green T H and Pearson N J. 1989. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 51: 55~62.
- Hawkesworth C J, Kempton P D and Rogers N W. 1990. Continental mantle lithosphere, and shallow level enrichment processes in earth's mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 96: 256~268.
- Hong Dawei, Xie Xilin and Zhang Jisheng. 2002. Geological Significance of the Hangzhou - Zhuguangshan - Huashan high- ϵ Nd granite belt [J]. Geological Bulletin of China, 21(6): 348~354 (in Chinese).
- Liégeois J P, Navez J, Hertogen J, *et al.* 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: The use of sliding normalization [J]. Lithos, 45(1~4): 1~28.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, *et al.* 1999. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: Petrology and geochemistry[J]. Chinese Science Bulletin, 44(18): 1992~1998 (in Chinese).
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 18: 293~305.
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Chen Peirong, *et al.* 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A type rock suites[J]. Geological Journal of China Universities, 9(4): 573~591 (in Chinese).
- Liu Hangtao, Zhai Mingguo, Liu Jianming, *et al.* 2002. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: evolution from post-collisional to anorogenic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 433~448 (in Chinese).
- London D. 1987. Internal differentiation of rare-element pegmatites: Effects of boron, phosphorus, and fluorine[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 51: 403~420.
- Lu Huanzhang. 1986. Ore Geneses of Tungsten Deposits in South China [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1~232 (in Chinese).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 101: 635~643.
- Manning D A C, Hamilton D L, Henderson C M B, *et al.* 1980. The probable occurrence of interstitial Al in hydrous, F-bearing and F-free aluminosilicate melts[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 75: 257~262.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. Chem. Geol., 120: 223~253.
- Mckenzie D P. 1989. Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle[J]. Earth and Planetary Science Letters, 95: 53~72.
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, *et al.* 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. Journal of Petrology, 40(9): 1 399~1 424.
- Montel J M and Vielzeuf D. 1997. Partial melting of metagreywackes, Part II. Compositions of minerals and melts[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 128: 176~196.
- Mo Zhusun and Ye Bodan. 1980. Nanline Granite Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~363 (in Chinese).
- Nelson D R, McCulloch M T and Sun S S. 1986. The origins of ultrapotassic rocks as inferred from Sr, Nd and Pb isotopes [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 50: 231~245.
- Patiño Douce A E and Beard J S. 1995. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar[J]. Journal of Petrology, 36(2): 706~738.
- Pearce J A, Harris B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 25(4): 956~983.
- Richardson C K and Holland H D. 1979. The solubility of fluorite in hydrothermal solutions: an experimental study [J] Geochim. Cosmochim. Acta, 43: 1 313~1 325.
- Roberts M P and Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids[J]. Geology, 21: 825~828.
- Rogers N W, James D and Kelley S P. 1998. The generation of potassic lava from the eastern Virunga province, Rwanda[J]. J. Petrol., 39: 1 223~1 247.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Pearson Education Limited, 1~255.
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Wuxian, *et al.* 2000. Nd modal ages of granitoids and crust evolution in Southeast China[J]. Science in China (Series D), 30: 471~478 (in Chinese).
- Singh J and Johannes W. 1996. Dehydration melting of tonalities. Part I. Beginning of melting[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 125: 16~25.
- Singh J and Johannes W. 1996. Dehydration melting of tonalities. Part II. Composition of melts and solids[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 125: 26~44.
- Taylor S R and McLemann S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell: Oxford Press, 312.
- The Granitoid Research Group of the Nanling Project, MGMR. 1989. Geology of Granitoids of Nanling Region and their Petrogenesis and Mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 171~185 (in Chinese).
- Tsai C H, Lo C H, Liou J G, *et al.* 2000. Evidence against subduction-related magmatism for the Jiaoziyuan Gabbro, northern Dabie Shan, China[J]. Geology, 28: 943~946.
- Wang Chuansheng. 2004. Petrogenetic models of the composite granitic plutons in the mid-western Nanling Region[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 23(3): 203~213 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi and Zhou Jincheng. 1999. Look back and look forward to granite research[J]. Acta Petrologica Sinica, 15(2): 161~169 (in Chinese).
- Wang Dezi and Zhou Xinmin. 2002. Origin of Late Mesozoic Granitic

- Volcanic-intrusive Complex and Crust Evolution in Southeastern China[M]. Beijing: Science Press, 1~295 (in Chinese).
- Wang Jian, Li Jianping and Wang Jianghai. 2003. Shoshonitic magmatism in Dali - Jianchuan area, Western Yunnan: a geochemical study of arc magmatism in a post-collisional strike-slip extensional setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 61~70 (in Chinese).
- Wang Liankui, Wang Huifen and Huang Zhilong. 2000. Geochemical indicators of trace element in Li-F granite liquid segregation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 145~152 (in Chinese).
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217~1232.
- Xia Hongyuan and Liang Shuyi. 1991. Genetic Series of Ore Deposits Related to W, Sn and Rare-metal Granites[M]. Beijing: Science Press, 61~182 (in Chinese).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. 2002. The Ways of Investigation on Granitoids [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~118 (in Chinese).
- Xiong X L, Zhu J C and Rao B. 1996. A preliminary experimental investigation on genesis of topaz greisen[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 41: 1451~1454.
- Yang Xueming and Zhang Peishan. 1990. Geological significance of Pb-Sr and Pb isotope to the limitation of sources of granitic rocks[J]. *Chinese Science Bulletin*, 35(15): 1174~1176 (in Chinese).
- Zhang Dequan, Wang Xueying and Sun Guiying. 1985. Cooling history and emplacement ages of the Guposhan - Lisong granite masses, Guangxi[J]. *Geological Review*, 31(3): 232~239 (in Chinese).
- Zhang Peihua. 2003. On the crust - mantle interaction of Mesozoic granitoids in the middle sector of Nanling area, Southern China [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese).
- Zhao Zhenhua, Bao Zhiwei and Zhang Boyou. 1998. Geochemistry of Mesozoic basalts in central Hunan[J]. *Science in China (series D)*, 28(supp.), 102~112 (in Chinese).
- Zhu Jinchu and Li Xiangdong. 1988. Petrological-geochemical features and source materials of Huashan Granites, Guangxi Autonomous Region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 7(1): 28~38 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Li Xiangdong and Shen Weizhou. 1989. Sr, Nd and O isotope studies on the genesis of the Huashan Granite complex[J]. *Acta Geologica Sinica*, 63(3): 225~235 (in Chinese).
- [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1~433.
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良, 等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1~508.
- 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 171~185.
- 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[J]. *地球化学*, 29(4): 358~366.
- 冯佐海, 梁金城, 张桂林, 等. 2002. 论广西东部中生代花岗岩类岩石谱系单位[J]. *桂林工学院学报*, 2(3): 333~340.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 2004. 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*, 26(4): 15~23.
- 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 2002. 试析杭州-诸广山-花山高 ϵ_{Nd} 值花岗岩带的地质意义[J]. *地质通报*, 21(6): 348~354.
- 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(18): 1992~1998.
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. 2003. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. *高校地质学报*, 9(4): 573~591.
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 等. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩类: 从碰撞后到非造山[J]. *岩石学报*, 18(4): 433~448.
- 卢焕章. 1986. 华南钨矿成因[M]. 重庆: 重庆出版社, 1~232.
- 莫柱孙, 叶伯丹. 1980. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1~363.
- 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 2000. 中国东南部花岗岩类的 Nd 模式年龄与地壳演化[J]. *中国科学(D 辑)*, 30: 471~478.
- 汪传胜. 2004. 南岭中西段若干复式花岗岩体的成因模式研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(3): 203~213.
- 王德滋, 周金城. 1999. 我国花岗岩研究的回顾与展望[J]. *岩石学报*, 15(2): 161~169.
- 王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗岩质火山-侵入杂岩成因与地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 1~295.
- 王建, 李建平, 王江海. 2003. 滇西大理-剑川地区钾玄岩浆作用: 后碰撞走滑拉伸环境岛弧型岩浆作用的地球化学研究[J]. *岩石学报*, 19(1): 61~70.
- 王联魁, 王慧芬, 黄智龙. 2000. Li-F 花岗岩液态分离的微量元素地球化学标志[J]. *岩石学报*, 16(2): 145~152.
- 夏宏远, 梁书艺. 1991. 华南钨锡稀有金属花岗岩矿床成因系列[M]. 北京: 科学出版社, 61~182.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1~118.
- 杨学明, 张培善. 1990. Rb-Sr 和 Pb 同位素在限定花岗岩质岩石源岩中的地质意义[J]. *科学通报*, 35(15): 1174~1176.
- 张德全, 王雪英, 孙桂英. 1985. 关于广西姑婆山-里松岩体的定(侵)位年龄和冷凝历史的探讨[J]. *地质论评*, 31(3): 232~239.
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. *中国科学(D 辑)*, 28(增刊): 7~14.
- 张佩华. 2003. 南岭中段中生代花岗岩壳幔相互作用的初步研究[D]. 南京大学.
- 朱金初, 李向东. 1988. 广西花山花岗岩的岩石学和地球化学特征及成岩物质来源的探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 7(1): 28~38.
- 朱金初, 李向东, 沈渭洲. 1989. 广西花山复式花岗岩体成因的锶、铷和氧同位素研究[J]. *地质学报*, 63(3): 225~235.

附中文参考文献

- 陈江峰, 江博明. 1999. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化[A]. 郑永飞. 化学地球动力学[C]. 北京: 科学出版社, 262~287.
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. *中国科学(D 辑)*, 32(4): 279~289.
- 陈培荣, 孔兴功, 倪琦生, 等. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山岩的厘定和意义[J]. *地质论评*, 45(增刊): 734~741.
- 陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 等. 1998. 赣南寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义[J]. *岩石学报*, 14(3): 163~173.
- 陈毓川, 毛景文. 1995. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹