

北京白查 A 型花岗岩的地球化学特征及其成因与构造指示意义*

汪洋

WANG Yang

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2008-06-10 收稿, 2008-07-04 改回.

Wang Y. 2009. Geochemistry of the Baicha A-type granite in Beijing Municipality: Petrogenetic and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1):13–24

Abstract Located in Changping District of Beijing Municipality, the 127Ma aged Baicha pluton is a vug peralkaline granitic stock intruded into the Badaling Batholith of Yanshan orogenic belt. It obtains high contents of silica, Zr, Ga, Pb, HFSE, and REE, with high Fe/Mg and Ga/Al ratio, but extreme low contents of Ca, Sr, and Eu; meanwhile, the granite exhibits the depleted radiogenic lead isotopes. Therefore, Baicha pluton is the typical reduced A-type granite defined by Dall'Agnol and Oliveira (2007). In geochemistry, Baicha pluton is very similar to the late Mesozoic Houshihushan (Shanhaiguan) and Kulongshan A-type granites in Yanshan belt. The origin of Baicha pluton is inferred to low-degree melting of the lower mafic crust of North China Craton, under the high temperature, low water and oxygen fugacity conditions. Based on regional geology and petrogenetic regime, Baicha granite is considered as a hallmark of the beginning of orogenic collapse in the western segment of Yanshan orogenic belt. Besides Yaokeng pluton in southeastern Zhejiang Province, Baicha pluton is another peralkaline granite reported in China that has A1-type element geochemistry but was not generated in anorogenic tectonic setting.

Key words A-type granite; Geochemistry; Petrogenesis; Tectonic significance; Yanshan; Beijing

摘要 位于北京昌平区的年龄为 127Ma 的白查岩体是一个晶洞过碱性花岗岩岩株,其侵位于燕山造山带西段的八达岭岩基中。白查岩体具有高硅、Zr、Ga、Pb、HFSE 和 REE 含量,高 Fe/Mg 和 Ga/Al 比值,强烈亏损 Ca、Sr、Eu,具有亏损放射性成因 Pb 同位素的特征。白查岩体属于 Dall' Agnol 和 Oliveira (2007) 定义的典型的还原型 A 型花岗岩,其地球化学特征与燕山带中生代晚期的后石湖山(山海关)和窟窿山 A 型花岗岩非常相似。白查花岗岩起源于华北克拉通下地壳镁铁质源岩在相对贫水、高温、低氧逸度条件下的低程度部分熔融。综合区域地质背景和该岩体的成岩机制判断,白查花岗岩的形成标志燕山西段造山崩塌阶段的到来。除浙江东南瑶坑过碱性花岗岩外,白查岩体是具有 A1 型花岗岩元素地球化学特征但并非形成于非造山大地构造背景的过碱性花岗岩的又一个实例。

关键词 A 型花岗岩; 地球化学; 岩石成因; 构造意义; 燕山; 北京

中图法分类号 P588.121

A 型花岗岩的成因一直存在争议 (Collins *et al.*, 1982; Creaser *et al.*, 1991; Landenberger and Collins, 1996; King *et al.*, 2001; Martin, 2006; Bonin, 2007), 一般认为其既可以是碱性玄武岩岩浆经结晶分离过程的演化产物,也可由地壳物质通过部分熔融作用形成 (Eby, 1990)。对于近年来提出的“铝质”A 型花岗岩的成因也有不同认识,有人根据 Nd 同

位素特征和 Nb/Y 比值将 A1 和 A2 型花岗岩分别归为碱性玄武岩结晶分离和地壳熔融成因 (如: Li *et al.*, 2003, 2007), 分别对应于非造山 (anorogenic) 和后造山 (postorogenic) 背景 (Eby, 1990, 1992)。实验岩石学研究表明,钙碱性岩浆岩在低压下部分熔融可以形成“铝质”A 型花岗岩 (Patino Douce, 1997); 然而不少“铝质”A 型花岗岩的岩

* 国家自然科学基金 (批准号: 40572128, 40376013, 40104003) 资助成果。

第一作者简介: 汪洋, 男, 博士, 岩石学专业, E-mail: allen_thalassa@sina.com

石学和地球化学特征并不支持低压部分熔融的观点 (King *et al.*, 2001; Martin, 2006; Bonin, 2007; Dall' Agnol and Oliveira, 2007)。同时,肖娥等(2007)的最新研究表明,具有 A1 型地球化学特征的过碱性花岗岩可以形成于后造山(后碰撞)阶段。因此, A 型花岗岩的成岩过程和大地构造背景需要根据岩石地球化学资料加以细致分析。

发育在以 I 型花岗岩为主的八达岭岩基中的白查过碱性花岗岩为一小型岩株(池际尚等, 1963 [1997]), 具有典型的 A 型花岗岩特征, 对其成岩过程的深入研究可以为研究燕山西段早白垩世时期构造—岩浆活动的动力学背景提供线索, 也可以为探讨 A 型花岗岩成岩机制和构造背景提供一个实例。

1 地质背景与岩石学特征

白查花岗岩出露于北京市昌平区北部南口镇以北, 平面呈哑铃状, 面积约 0.03 km², 侵入于八达岭岩基带西南部的九仙庙石英二长岩中(图 1)。在大地构造上位于燕山中生代褶皱—逆冲推覆带的西段。该岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 127 ± 1 Ma (Deng *et al.*, 2004; 孙志明等, 2007)。岩株岩性较均一, 主要为浅肉红色中细粒碱性长石花岗岩(白岗岩), 不发育相带。岩石中晶洞构造发育, 晶洞内可见有碱性长石、石英和碱性铁镁矿物(钠闪石)充填, 表明岩石定位浅。主要矿物组成为: 石英(约 25% ~ 30%) + 碱性长石(约 70%) + 钠闪石(约 2% ~ 5%)。副矿物包括: 锆石、榍石、磷钇矿、磷灰石、萤石、钛铁氧化物等。光学鉴定表明, 碱性长石种属为钠正长石(池际尚等, 1963 [1997])。钠闪石具明显的多色性, 多呈填隙状分布, 结晶晚于长英质矿物。由于含碱性铁镁矿物, 白查花岗岩属于过碱性花岗岩(peralkaline granite) (Le Maitre, 2002)。

2 分析方法

将样品进行无污染碎样至 200 目, 在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室分析主量和微量元素。其中主量元素采用 ICP-AES 方法分析, 测试仪器为 JY38S 型电感耦合等离子体光谱仪, 主要氧化物的分析误差一般小于 2%。FeO 含量由南京大学地球科学系实验室湿化学法分析测定。微量元素(包括稀土元素)采用 ICP-MS 方法分析, 测试仪器为德国生产的高分辨率电感耦合等离子体质谱仪(Finnigan ELEMENT II HR-ICP-MS)。样品用 1 mol/L HF + 0.5 mol/L HNO₃ 在 190℃ 溶解 48h, 以保证样品完全溶解; 同时, 在测试过程中采用 F⁻ 基体匹配分析技术(高剑峰等, 2003), 有效地解决了 Nb、Ta、Zr、Hf 等元素在稀硝酸介质中的不稳定性问题。对 USGS 国际标准样品(BHVO-2)的测定结果表明, 样品测定值和推荐值得相对误差均小于 10%, 且大多数微量元素的分析误差在 5% 以内。详细的样品制备、

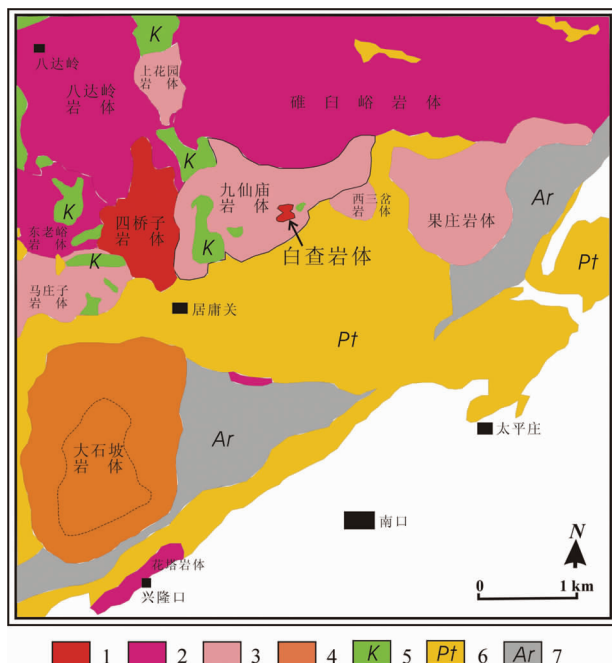


图 1 白查花岗岩体地质略图(据池际尚等, 1963; 白志民等, 1991 修改)

1-早白垩世晚期花岗岩; 2-早白垩世早期花岗岩; 3-侏罗纪花岗岩; 4-三叠纪花岗岩; 5-白垩纪火山岩, 6-元古宙地层, 7-太古宙地层

Fig. 1 Sketch geological map of the Baicha granitic pluton (Modified after Chi *et al.*, 1963; Bai *et al.*, 1991)

1-the late Early Cretaceous granite; 2-the early Early Cretaceous granite; 3-Jurassic granite; 4-Triassic granite; 5-Cretaceous volcanic rocks, 6-Proterozoic strata, 7-Archean strata

分析流程及对国际标准样品的测试结果见高剑峰等(2003)。

有 2 件样品的主量元素测定在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成。分析采用 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪(XRF)分析, 样品的元素含量由 36 种涵盖硅酸盐样品范围的参考物质双变量拟合的工作曲线确定, 基体校正根据经验的 Traill-Lachance 程序进行。其详细步骤与 Li *et al.* (2005) 所述相同, 分析精度优于 1% ~ 5%。

样品的铅同位素在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室分析, 测试流程如下。取 100mg 粉末样品用 HNO₃ + HF 混合液完全溶解。蒸干后用 HBr 再次溶样, 而后再蒸干, 如此反复 3 次, 使残余物完全溶解。之后将 50 μL 溶解液其置于 AG 1-X8 阳离子交换树脂柱内分离; 萃取出的 Pb 再通过交换树脂柱进行二次提纯。采用硅胶-H₃PO₄ 技术 (Gerstenberger and Haase, 1997) 将约 100 ng Pb 装入 TIMS 的 Re 丝。分析仪器是 Finnigan MAT Triton TI 热离子质谱仪 (TIMS)。质量校正采用 Todt *et al.* (1996) 给出的 NBS-981 标准。

3 地球化学

表 1 列出白查花岗岩代表性岩石样品的主量、微量和稀土元素测定结果。

3.1 主量元素

白查花岗岩在主量元素组成上具有以下特征:

(1) 非常富硅, SiO_2 为 76% ~ 78%, 与中国东部晚中生代典型的 A 型花岗岩—河北北部后石湖山(山海关)、窟窿山以及浙江东南部瑶坑花岗岩的硅含量相当(表 2)。

(2) 富碱、相对富钾, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 为 7.61% ~ 8.45%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.90 ~ 1.24, 碱度指数(A. I. 值)变化于 0.87 ~ 1.01。在 Frost *et al.* (2001) 提出的 SiO_2 -MALI 图解中落在(Peacock 意义上的)钙碱性区域(图 2)。与后石湖山、窟窿山和瑶坑花岗岩相比,白查花岗岩全碱含量及 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值略低;白查花岗岩碱度指数(A. I.)为 0.87 ~ 1.01, 与后石湖山和瑶坑花岗岩相当,而略高于窟窿山花岗岩(表 2)。

(3) 显著富铁、贫镁, $\text{FeO}_T/(\text{FeO}_T + \text{MgO})$ 为 0.92 ~ 1.00。在 Frost *et al.* (2001) 提出的 SiO_2 - $\text{FeO}_T/(\text{FeO}_T + \text{MgO})$ 图解中落在铁质(Ferroan)区域(图 2)。在 Dall' Agnol and Oliveira (2007) 提出的钙碱性、氧化型 A 型(oxidized A-type)和还原型 A 型(reduced A-type)花岗岩判别图中,均落在还原型 A 型花岗岩区域(图 3),与瑶坑花岗岩特征相同(肖娥等, 2007)。

(4) 钙、铝含量低, CaO 为 0.06% ~ 0.22%, Al_2O_3 为 11.46% ~ 12.20%。与瑶坑花岗岩相比,白查花岗岩钙、铝含量略高;与后石湖山、窟窿山花岗岩相比,白查花岗岩钙、铝含量略低(表 2)。白查花岗岩过铝指数(A/CNK 值)变化于 0.98 ~ 1.14, 样品大于 1.10 的 A/CNK 值是由于 CaO 含量很低所致。

白查花岗岩含碱性铁镁矿物以及富硅、富碱、富铁、贫镁、贫钙的主量元素特征均可以和典型的 A 型花岗岩相对比(Eby, 1990)。该花岗岩准铝质-弱过铝质、相对较低的碱度指数以及含少量钠闪石的矿物学特征表明,其与 King *et al.* (1997, 2001) 研究的 Lachlan 褶皱带“铝质”A 型花岗岩有相近之处,但白查花岗岩的硅含量明显高于 Lachlan 褶皱带“铝质”A 型花岗岩中的未分异花岗岩。

3.2 微量和稀土元素

由表 1 数据可知,白查花岗岩的稀土元素总量(ΣREE)介于 203.67×10^{-6} ~ 545.10×10^{-6} , 略高于燕山造山带后石湖山、窟窿山花岗岩,较之产于后碰撞环境的浙东南苍南县马站瑶坑花岗岩(肖娥等, 2007)和阿尔及利亚 Djebel Drissa 钠闪石花岗岩(Kohoui and Mahdjoub, 2004)明显偏高,而与法国 Corsica 过碱性花岗岩(Poitrasson *et al.*, 1995)和纳米比亚

表 1 白查花岗岩样品的主量(wt%)、微量和稀土元素($\times 10^{-6}$)含量

Table 1 Major (wt%), trace and rare earth ($\times 10^{-6}$) element contents of the samples for the Baicha granite

	33-1	33-2	33-3	33-4	WY-52	WY-55
SiO_2	77.62	77.35	78.05	77.57	77.66	76.85
TiO_2	0.18	0.17	0.08	0.10	0.10	0.09
Al_2O_3	11.46	12.01	11.95	11.96	11.92	12.20
Fe_2O_3	1.16	1.41	1.16	1.20	1.83	2.23
FeO	0.60	0.37	0.29	0.27		
MnO	0.03	0.03	0.01	0.05	0.02	0.05
MgO	0.09	0.09	0.11	0.05	0.00	0.00
CaO	0.09	0.08	0.08	0.06	0.22	0.09
Na_2O	4.29	3.88	3.55	4.43	3.48	3.83
K_2O	4.16	3.73	4.20	4.01	4.31	4.46
P_2O_5	0.05	0.05	0.06	0.06	0.00	0.00
LOI	0.28	0.54	0.47	0.30	0.20	0.10
A/CNK	0.98	1.14	1.13	1.02	1.10	1.08
A. I.	1.01	0.87	0.87	0.97	0.87	0.91
$\text{FeO}_T/(\text{FeO}_T + \text{MgO})$	0.95	0.95	0.92	0.96	1.00	1.00
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	8.45	7.61	7.75	8.44	7.79	8.29
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	0.97	0.96	1.18	0.90	1.24	1.16
Ga	25.45	25.58	27.31	25.96	24.70	29.81
Pb	65.10	80.28	52.71	61.55		
Cs	2.16	1.88	0.61	2.24		
Rb	222	221	265	248	234	306
Sr	13	8	5	6		
Ba	40	25	30	19	45	69
Y	38.76	30.30	29.35	31.37		
Zr	613	508	417	328	261	360
Hf	20.21	17.98	17.55	14.02		
Nb	92.96	80.54	149.34	75.89	58.30	73.52
Ta	5.77	5.77	8.57	4.97		
Th	33.50	28.23	20.81	45.33	16.80	13.91
U	6.22	6.06	6.86	6.59		
La	135.3	106.6	42.3	48.6		
Ce	246.5	213.4	81.3	109.0		
Pr	28.5	22.6	10.7	11.6		
Nd	88.8	72.5	36.4	38.1		
Sm	13.43	10.56	7.05	7.23		
Eu	0.13	0.09	0.07	0.07		
Gd	8.64	6.91	4.85	5.27		
Tb	1.61	1.32	1.06	1.17		
Dy	7.99	6.37	6.02	6.83		
Ho	1.54	1.28	1.31	1.35		
Er	4.70	3.75	4.30	4.08		
Tm	0.89	0.76	0.93	0.86		
Yb	6.23	5.14	6.50	5.83		
Lu	0.84	0.74	0.88	0.77		
ΣREE	545.10	452.02	203.67	240.76		
LREE/HREE	15.80	16.21	6.88	8.20		
(La/Yb) _N	14.68	14.01	4.40	5.63		
(La/Sm) _N	6.34	6.35	3.78	4.23		
(Gd/Yb) _N	1.12	1.09	0.60	0.73		
Eu/Eu*	0.0036	0.0032	0.0037	0.0035		
$\text{TE}_{1,3}$	1.07	1.09	1.07	1.16		
$10^4 \text{ Ga}/\text{Al}$	4.20	4.02	4.32	4.10	3.91	4.62
Zr + Y + Nb + Ce	991	833	677	544		
Nb/Ta	16.1	14.0	17.4	15.3		
Zr/Hf	30.3	28.3	23.8	23.4		
Th/U	5.38	4.66	3.03	6.88		
Rb/Sr	17	28	53	41		
Rb/Ba	5.50	8.99	8.87	13.24		
Y/Nb	0.42	0.38	0.20	0.41		
Rb/Nb	2.38	2.75	1.78	3.26		
T_{Zr} (°C)	917	915	894	856	844	872

前 4 个样品由南京大学内生金属成矿作用国家重点实验室采用 ICP-AES 法分析主量元素, ICP-MS 法分析微量元素。后 2 个样品由中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室采用 XRF 法分析, 其中 Fe_2O_3 为全铁。LOI—烧失量。A/CNK—铝饱和指数, $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/n(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ 。A. I.—碱度指数, $n(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 。 T_{Zr} —锆石温度计求得温度值(Watson and Harrison, 1983)。 $\text{TE}_{1,3}$ —稀土元素四组分指数(Irber, 1999)

表2 白查花岗岩与中国东部晚中生代几个A型花岗岩的成分对比

Table 2 Comparison of the composition of Baicha granite and those of some late Mesozoic A-type granites in eastern China

	白查	后石湖山	窟窿山	瑶坑
SiO ₂	76.8~78.1	75.9~76.7	75.4~77.9	77.5~77.8
Al ₂ O ₃	11.46~12.20	11.84~12.64	11.76~12.93	11.01~11.47
CaO	0.06~0.22	0.28~0.33	0.13~0.76	0.00~0.24
A/CNK	0.98~1.14	0.99~1.10	1.00~1.14	0.97~1.04
A. I.	0.87~1.01	0.86~1.01	0.86~0.89	0.96~1.00
FeO _T / (FeO _T + MgO)	0.92~1.00	0.99~1.00	0.95~1.00	0.88~0.99
Na ₂ O + K ₂ O	7.61~8.45	8.07~8.90	7.67~8.26	8.04~8.48
K ₂ O/Na ₂ O	0.90~1.24	1.09~1.37	1.16~1.39	1.02~1.25
Ga	24.7~29.8	20.2~25.4	23.0~28.3	21.7~25.8
Zr	260~613	415~678	243~362	371~602
Nb	58.3~149.3	38.8~98.2	44.1~79.1	51.5~71.7
Y	29.35~38.76	37.62~86.91	40.74~96.22	31.6~62.3
Rb	221~306	122~198	276~457	268~342
Sr	5~13	3.9~8.0	4.8~22.5	2.0~11.4
Ba	18.7~68.6	5.1~117.3	3.2~29.1	10.5~13.7
ΣREE	203~545	327~356	154~288	102~204
LREE/HREE	6.88~16.21	4.95~9.18	3.22~5.88	3.92~6.18
(La/Yb) _N	4.40~14.68	4.32~10.52	2.46~5.76	1.85~5.73
(La/Sm) _N	3.78~6.35	2.72~4.38	2.42~3.05	5.06~7.96
(Gd/Yb) _N	0.60~1.12	1.15~1.46	0.88~1.43	0.24~0.64
Eu/Eu*	0.0032~0.0037	0.008~0.015	0.022~0.045	0.15~0.20
TE _{1,3}	1.07~1.16	0.94~1.03	1.00~1.08	0.95~1.21
10 ⁴ Ga/Al	3.91~4.62	3.02~4.05	3.70~4.46	3.64~4.41
Zr + Y + Nb + Ce	544~991	643~999	402~614	548~797
Nb/Ta	13.9~17.4	14.4~16.6	12.2~12.8	15.4~17.4
Zr/Hf	23.4~30.3	24.8~34.7	17.5~24.1	24.2~30.7
Th/U	3.03~6.88	3.45~5.91	4.34~7.78	4.60~7.30
Rb/Sr	17~53	15~47	4.7~10	24~131
Rb/Ba	5.5~13.2	1.0~12.2	9.4~145	19.6~28.8
Y/Nb	0.20~0.42	0.79~1.37	0.59~1.22	0.57~1.09
Ce/Nb	0.54~2.65	1.38~3.57	0.89~1.76	0.86~1.44
Rb/Nb	1.78~3.26	2.02~4.40	5.49~6.26	4.24~5.99

主量元素单位 wt%，微量和稀土元素含量单位 $\times 10^{-6}$ 。A/CNK—铝饱和指数， $n(\text{Al}_2\text{O}_3)/n(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ 。A. I.—碱度指数， $n(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/n(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 。TE_{1,3}—稀土元素四组分指数 (Irber, 1999)。后石湖山钠铁闪石花岗岩和窟窿山铁云母花岗岩数据来自刘红涛等(2002)，瑶坑过碱性花岗岩数据来自肖娥等(2007)

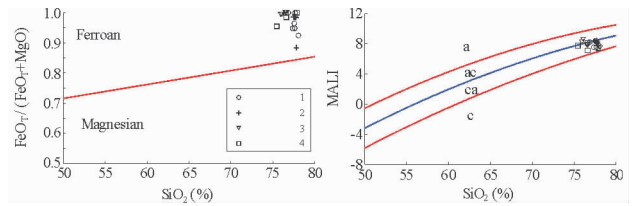


图2 白查花岗岩 SiO₂-FeO_T/(FeO_T + MgO) 和 SiO₂-MALI 图解(底图据 Frost *et al.*, 2001)

MALI—Na₂O + K₂O-CaO (%) ; a-碱性, ac-碱钙性, ca-钙碱性, c-钙性; Ferroan-铁质, Magnesian-镁质

1-白查花岗岩(本文); 2-瑶坑花岗岩(肖娥等, 2007); 3-后石湖山花岗岩(刘红涛等, 2002); 4-窟窿山花岗岩(刘红涛等, 2002)

Fig. 2 SiO₂-FeO_T/(FeO_T + MgO) and SiO₂-MALI diagrams of the Baicha granite (After Frost *et al.*, 2001)

MALI—Na₂O + K₂O-CaO (%) ; a-alkalic, ac-alkali-calcic, ca-calc-alkalic, c-calcic. 1-Baicha granite (this study); 2-Yaokeng granite (Xiao *et al.*, 2007); 3-Houshishushan granite(Liu *et al.*, 2002); 4-Kulongshan granite (Liu *et al.*, 2002)

Brandberg 含钠铁闪石花岗岩 (Schmitt *et al.*, 2000) 相近。白查花岗岩稀土元素总的特征表现为富轻稀土 (图 4), LREE/HREE 变化于 6.88~16.21, (La/Yb)_N = 4.40~14.68, 其中轻稀土分馏程度较重稀土更为显著, (La/Sm)_N 和 (Gd/Yb)_N 比值分别为 3.78~6.35 和 0.60~1.12; 铕负异常显著, Eu/Eu* = 0.0032~0.0037, 表明白查花岗岩成岩时的熔体—矿物体系中富含斜长石矿物相。与后石湖山、窟窿山和瑶坑过碱性花岗岩相比, 白查花岗岩的铕负异常最为明显, 轻稀土富集程度最大; 轻稀土分馏程度高于后石湖山、窟窿山花岗岩, 低于瑶坑花岗岩; 重稀土分馏程度低于后石湖山、窟窿山花岗岩, 高于瑶坑花岗岩 (表 2, 图 4)。

微量元素组成上, 白查花岗岩富 Rb、Cs、Th、U, 贫 Sr、Ba (图 5), 其 Rb/Sr、Rb/Ba 比值较高, 分别为 17~53 和 5.5~13.2 (表 1)。白查花岗岩富 Ga, 10⁴ × Ga/Al = 3.91~4.62, 在 Whalen *et al.* (1987) 提出的以 Ga/Al 比值为基础的多种判别图中, 白查花岗岩成分点均投入 A 型花岗岩区域 (图 6)。白查花岗岩的 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素的含量均较高, 其中 Zr 含量高达 260 × 10⁻⁶~613 × 10⁻⁶, 与 Lachlan 褶皱带未分异的“铝质”A 型花岗岩相当 (King *et al.*, 1997, 2001)。白查花岗岩的 Zr、Rb、Ba、Sr 含量与后石湖山、窟窿山、瑶坑花岗岩基本相当, Nb 略高、Y 含量略低, Y/Nb、Rb/Nb 比值偏低 (表 2)。白查花岗岩 Nb/Ta 比值偏高 (多数介于 15~17, 表 1), 明显高于窟窿山花岗岩, 而与瑶坑花岗岩 Nb/Ta 比值相近 (表 2), 也接近幔源岩浆 Nb/Ta = 17 ± 1 的比值 (Hofmann, 1988; Green, 1995)。

白查花岗岩锆石饱和温度变化于 844~917℃, 平均 883℃, 略低于瑶坑花岗岩锆石饱和温度 896℃ (肖娥等, 2007), 略高于澳大利亚 Lachlan 褶皱带未分异的“铝质”A 型

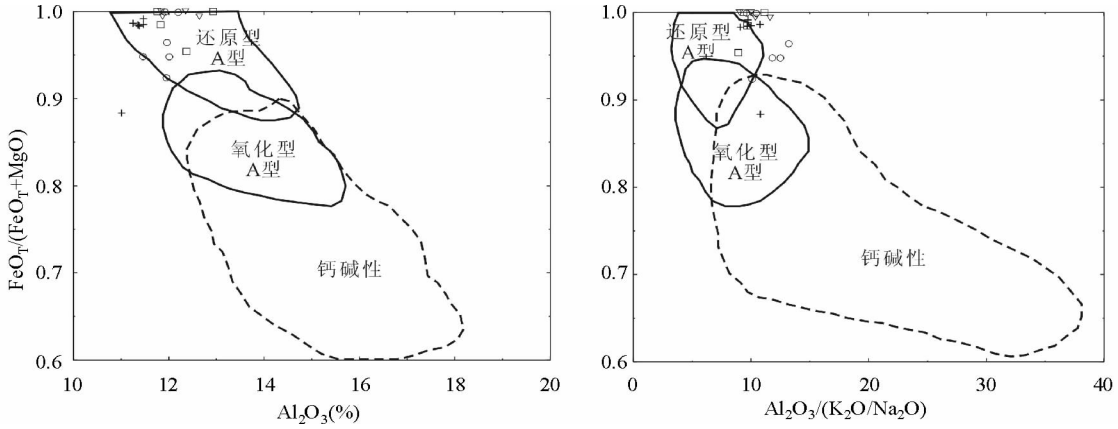


图3 白查花岗岩 Al_2O_3 - $FeO_T/(FeO_T + MgO)$ 和 $Al_2O_3/(K_2O/Na_2O)$ - $FeO_T/(FeO_T + MgO)$ 图解 (底图据 Dall' Agnol and Oliveira, 2007)

图例及资料来源同图2

Fig. 3 Al_2O_3 - $FeO_T/(FeO_T + MgO)$ and $Al_2O_3/(K_2O/Na_2O)$ - $FeO_T/(FeO_T + MgO)$ diagrams of the Baicha granite (After Dall' Agnol and Oliveira, 2007)

Legend and data sources are same as Fig. 2

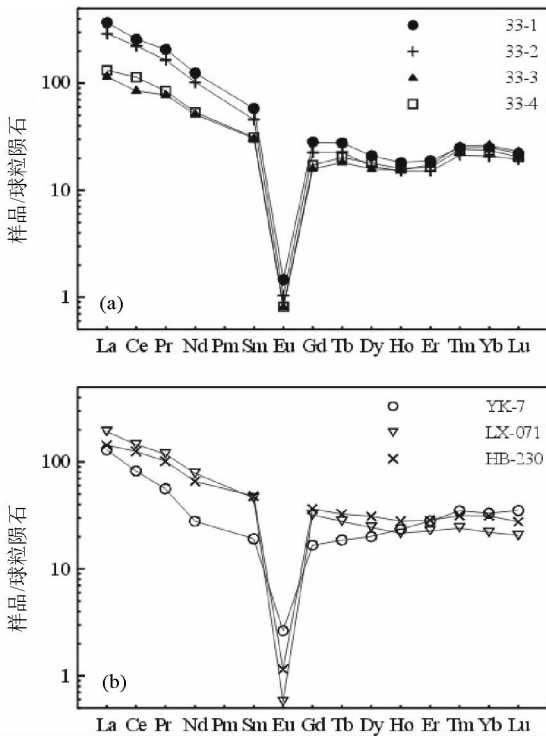


图4 白查花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分型式
a-白查花岗岩(样品号同表1); b-瑶坑岩体 YK-7(据肖娥等, 2007)、后石湖山岩体 LX-071 和窟窿山岩体 HB-230(据刘红涛等, 2002)。球粒陨石值据 Boynton (1984)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the Baicha granite

(a) Baicha granite (Sample number is same as that in Table 1);
(b) Yaokeng granite YK-7 (Xiao *et al.*, 2007), Houshishushan granite LX-071 and Kulongshan granite HB-230 (Liu *et al.*, 2002). Chondrite values used in normalization are from Boynton (1984)

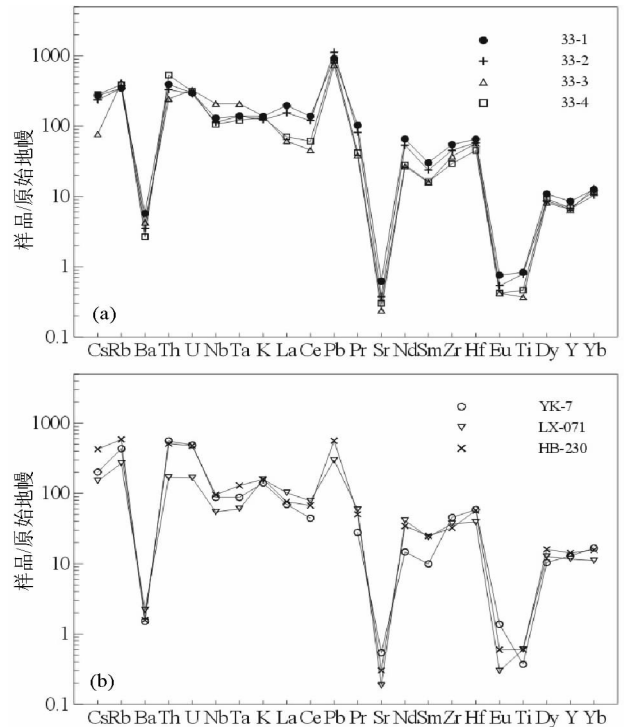


图5 白查花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

a-白查花岗岩(样品号同表1); b-瑶坑岩体 YK-7(据肖娥等, 2007)、后石湖山岩体 LX-071 和窟窿山岩体 HB-230(据刘红涛等, 2002)。原始地幔标准化值据 Sun and McDonough (1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized spider diagrams for trace elements of the Baicha granite

a-Baicha granite (Sample number is same as that in Table 1); b- Yaokeng granite YK-7 (Xiao *et al.*, 2007), Houshishushan granite LX-071 and Kulongshan granite HB-230 (Liu *et al.*, 2002). Primitive mantle values used in normalization are from Sun and McDonough (1989)

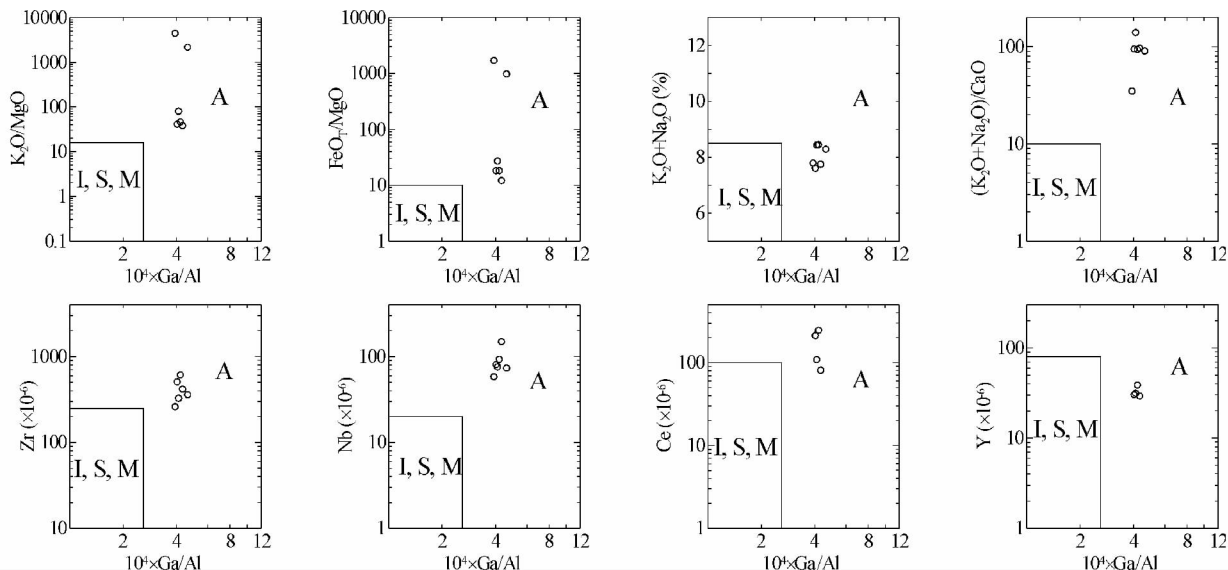


图6 白查花岗岩 K_2O/MgO -, FeO_T/MgO -, $K_2O + Na_2O$ -, Zr -, Nb -, Ce -和 $Y \cdot 10^4 \times Ga/Al$ 关系图

I, S, M, A 分别代表 I 型, S 型, M 型, A 型花岗岩, A 型花岗岩与其他类型花岗岩分界线据 Whalen *et al.* (1987)

Fig. 6 K_2O/MgO -, FeO_T/MgO -, $K_2O + Na_2O$ -, Zr -, Nb -, Ce -, and $Y \cdot 10^4 \times Ga/Al$ diagrams of the Baicha granite

I, S, M, A are represented I-, S-, M-, and A-type granite, respectively. The boundaries between A-type and other type granites are from Whalen *et al.* (1987)

花岗岩锆石饱和温度 $848^\circ C$ (King *et al.*, 1997, 2001), 和刘昌实等(2003)统计的过碱性 A 型花岗岩的锆石饱和温度 $883^\circ C$ 相同。

3.3 Pb 同位素比值

对白查花岗岩样品 33-1 的 Pb 同位素测试结果显示, $^{206}Pb/^{204}Pb = 16.131$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.188$, $^{208}Pb/^{204}Pb = 36.146$ 。该结果表明, 白查花岗岩 Pb 同位素比值明显低于洋岛玄武岩 (OIB) 和洋中脊玄武岩 (MORB), 而落在下地壳麻粒岩 Pb 同位素比值范围的低端, 表明白查花岗岩中的放射性成因 Pb 同位素与长期亏损 U、Th 的源区有关 (Rollinson, 1993)。华北克拉通下地壳岩石明显亏损 U、Th (鄢明才和迟清华, 1997; Gao *et al.*, 1998), 具有亏损放射性成因 Pb 同位素的特征 (Gao *et al.*, 1998)。与辽西地区晚中生代火山岩相比, 白查花岗岩 Pb 同位素比值落在辽西南部喀参 1 井火山岩 Pb 同位素比值范围的下限附近 (表 3)。喀参 1 井中性火山岩具有高 Sr 低 Y、Yb 的特点 (陈义贤和陈文奇, 1997), 来自华北克拉通加厚下地壳的部分熔融 (张旗等, 2001; 张旗, 2008)。因此, 白查花岗岩的源岩应该是具有长期亏损 U、Th 的华北克拉通下地壳岩石。

4 岩石成因与构造背景

4.1 A 型花岗岩——范畴、成因与构造背景概述

根据 Loiselle 和 Wones (1979) 的原始定义, A 型花岗岩

是指非造山花岗岩类, 在化学成分上具有低 CaO/Al_2O_3 , 高 FeO_T/MgO 和 K_2O/Na_2O 比值, 相对高的全碱含量, 富集 REE (除 Eu 外), Zr、Nb、Ta, 低 Sc、Cr、Co、Ni、Ba、Sr 和 Eu 的特征。Whalen *et al.* (1987) 给出了判别 A 型花岗岩类的元素地球化学指标。Eby (1990) 总结了 A 型花岗岩的岩石学、地球化学特征, 并按构造背景和来源不同区分出 A1 与 A2 两类。澳大利亚东南部 Lachlan 褶皱带中的 A 型花岗岩曾被称为“铝质 A 型花岗岩” (King *et al.*, 1997), 但原作者很快就明确声明放弃这个易于引起误解的名词, 而只称其为 A 型花岗岩 (King *et al.*, 2001)。主要基于美国西南部和巴西亚马逊克拉通元古宙的 A 型花岗岩, Dall' Agnol and Oliveira (2007) 提出氧化型 A 型花岗岩的概念, 指具有 A 型花岗岩地球化学特征但 FeO_T/MgO 比值较低的花岗岩类, 进一步扩大了 A 型花岗岩的范畴。Bonin (2007) 指出, 现在 A 型花岗岩是指在 Frost *et al.* (2001) 花岗岩分类方案中属于铁质 (Ferroan), (Peacock 定义的) 碱性-碱钙性 (alkaline to alkali-calcic), 准铝质、弱过铝质或过碱质 (metaluminous, slightly peraluminous, and peralkaline) 的一大类火成岩, 以与 Cordillera 花岗岩为代表的镁质钙性-钙碱性岩套以及过铝质淡色花岗岩相区别。

A 型花岗岩的成因一直是争论的议题。早期研究认为富 F 麻粒岩相下地壳部分熔融可以形成 A 型花岗岩 (Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Skjerlie and Johnston, 1993)。Patino Douce (1997) 基于脱水部分熔融实验结果认为“铝质”的 A 型花岗岩形成于高温低压条件。但是, Lachlan 褶皱带和澳大利亚东部其它地区“铝质”A 型花岗岩和过碱性花岗岩分别由长英质和镁铁质源岩部分熔融形成,

表 3 白查花岗岩与下地壳岩石及地幔源区的 Pb 同位素组成对比

Table 3 Comparison of lead isotopes of the Baicha granite and those of lower crustal rocks and mantle sources

	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
白查花岗岩 33-1	16.131	15.188	36.146
辽西晚中生代火成岩			
喀参 1 井火山岩	15.72 ~ 18.07	15.10 ~ 15.53	35.53 ~ 38.29
叶参 1 井火山岩	16.88 ~ 17.13	15.25 ~ 15.34	36.80 ~ 37.31
惠德营子	16.44 ~ 16.55	15.22 ~ 15.33	36.51 ~ 36.72
张强凹陷	17.56 ~ 18.20	15.32 ~ 15.48	37.30 ~ 37.97
下地壳麻粒岩			
Lewison	13.52 ~ 20.68	14.43 ~ 15.67	33.19 ~ 57.36
Edinburgh 区	15.68 ~ 27.05	15.61 ~ 19.52	35.50 ~ 126.6
印度南部	13.52 ~ 27.71	14.54 ~ 17.47	33.61 ~ 44.32
N-MORB	17.31 ~ 18.50	15.43 ~ 15.56	37.10 ~ 38.70
E-MORB	18.50 ~ 19.69	15.50 ~ 15.60	38.00 ~ 39.30
洋岛玄武岩			
Saint Helena (HIMU)	20.40 ~ 20.89	15.71 ~ 15.81	39.74 ~ 40.17
Cap Verde (HIMU/EM)	18.88 ~ 20.30	15.52 ~ 15.64	38.71 ~ 39.45
Kerguelen (EMI-Dupal)	17.99 ~ 18.31	15.48 ~ 15.59	38.29 ~ 38.88
Hawaii	17.83 ~ 18.20	15.44 ~ 15.48	37.69 ~ 37.86
弧火山岩			
菲律宾	18.27 ~ 18.47	15.49 ~ 15.64	38.32 ~ 38.83
Mariana	18.70 ~ 18.78	15.49 ~ 15.57	38.14 ~ 38.43
爪哇岛	18.70 ~ 18.72	15.63 ~ 15.65	38.91 ~ 38.96
Greater Andes	19.17 ~ 19.93	15.67 ~ 15.85	38.85 ~ 39.75
美国西部	18.82 ~ 18.91	15.57 ~ 15.62	38.45 ~ 38.65

白查数据据本文;辽西数据来自陈文贤和陈文寄(1997);其它数据据 Rollinson(1993)的资料汇编

而且不一定需要低压环境或特殊的源岩(Landenberger and Collins, 1996; King *et al.*, 1997, 2001)。但是, Bonin (2007)综合现有地质证据后认为, A 型花岗岩更有可能是幔源的碱性基性岩—中性岩分异演化而来。由于 A 型花岗岩的范畴越来越广泛, 本文作者认为, 对 A 型花岗岩成因的判断需要针对具体岩体进行综合分析, 而不应简单套用某些现成的成因模式, 那种认为所有 A 型花岗岩的形成都需要“高温—低压条件”的认识是不全面的。

对于 A 型花岗岩的大地构造背景(tectonic environment), Loiselle and Wones (1979)的原始定义强调其非造山特性。Eby(1990, 1992)认为, A1 型花岗岩以其元素比值与洋岛玄武岩相似为特征, 岩浆来源于地幔并产于大陆裂谷或地幔热柱、热点环境, A2 型花岗岩类似大陆平均地壳及岛弧玄武

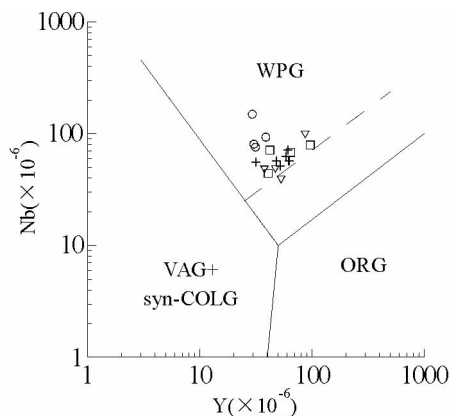


图 7 白查花岗岩 Y-Nb 图解(底图据 Pearce *et al.*, 1984)

图例及资料来源同图 2。ORG-洋中脊花岗岩, syn-COLG-同碰撞花岗岩, VAG-火山弧花岗岩, WPG-板内花岗岩

Fig. 7 Y-Nb diagram of the Baicha granite (After Pearce *et al.*, 1984)

Legend and data sources are same as Figure 2. ORG-Oceanic Ridge Granite, syn-COLG-syn-Collision Granite, VAG-Volcanic Arc Granite, WPG-Within Plate Granite

岩, 岩浆起源于大陆地壳或由岛弧岩浆派生, 产于碰撞后或造山期后的构造背景。洪大卫等(1995)也认为 A 型花岗岩可分成非造山(AA)和后造山(PA)两类。但是, King *et al.* (1997)明确指出, Lachlan 带 A 型花岗岩可以形成于造山期的各个阶段, 而非局限于碰撞后或造山期后时期。Azer (2006)对埃及西奈半岛南部和肖娥等(2007)对浙闽沿海 A 型花岗岩带的研究都发现, 形成于相同构造背景的 A 型花岗岩显示 A1 与 A2 亚类共存的现象; 并认为是幔壳物质混入比例不同所致, Eby 提出的 A 型花岗岩亚类判别图解应该更适合反映岩石源区的差异, 而不是确切的(大地)构造背景。Bonin (2007)指出, A 型花岗岩也可以产出于板块汇聚的活动边缘背景(如: 巴布亚新几内亚和新西兰 Mayor 岛, Smith *et al.*, 1977)。因此, 本文作者认为, 对 A 型花岗岩形成的大地构造背景的判断也需要针对具体岩体结合区域地质加以厘定。

4.2 白查花岗岩岩石成因

白查花岗岩具有典型的 A 型花岗岩的地球化学和矿物学、岩石学特征, 其具有少量的碱性镁铁矿物、准铝质-弱过铝质全岩化学成分与 Lachlan 褶皱带“铝质”A 型花岗岩相似, 但白查花岗岩具有更高的硅含量($\text{SiO}_2 > 75\%$)。白查花岗岩具有高的 $\text{FeO}_T/(\text{FeO}_T + \text{MgO})$ 比值, 属于还原型 A 型花岗岩。按张旗等(2008)的花岗岩形成深度分类方案, 白查花岗岩属于非常低 Sr 高 Yb 的“南岭型”花岗岩。白查 A 型花岗岩在 Pearce 图解中成分点落在板内花岗岩区域(图 7), 其 Nb 相对于 Y 更富集, 属于 Eby(1990, 1992)的 A1 型花岗岩

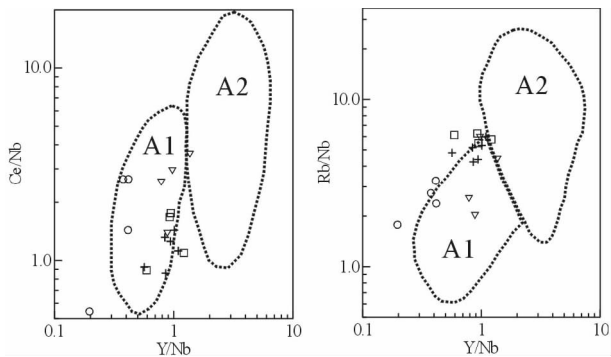


图8 白查花岗岩 Y/Nb-Ce/Nb 和 Y/Nb-Rb/Nb 图解(底图据 Eby, 1992)

图例及资料来源同图2

Fig. 8 Y/Nb-Ce/Nb and Y/Nb-Rb/Nb diagrams of the Baicha granite (After Eby, 1992)

Legend and data sources are same as Figure 2

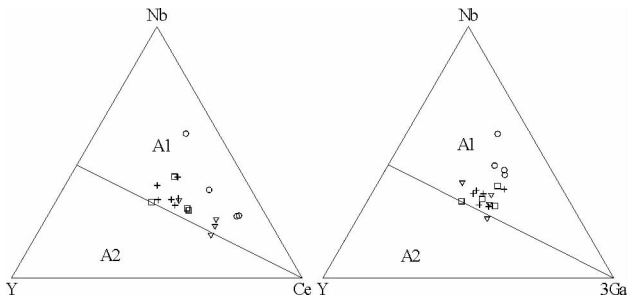


图9 白查花岗岩 Nb-Y-Ce 和 Nb-Y-3Ga 三角图解(底图据 Eby, 1992)

图例及资料来源同图2

Fig. 9 Nb-Y-Ce and Nb-Y-3Ga triangle diagrams of the Baicha granite (After Eby, 1992)

Legend and data sources are same as Figure 2

(图8, 9), 具有与洋岛玄武岩相似的 Y/Nb 等元素比值。同时白查花岗岩具有壳源岩石的高 Pb 含量, 以及与华北北缘中生代岩浆岩相近的 Pb 同位素组成特征。因此, 合理的岩石成因模式必须能够解释: ① 高硅; ② 高 $FeO_T / (FeO_T + MgO)$ 比值; ③ A1 型花岗岩的微量元素特征, 尤其是其相对于 REE 富集 Nb 的特征; ④ 反映长期亏损 U、Th 的源岩所导致的低放射性成因 Pb 同位素组成。

由于白查花岗岩体积很小, 碱性玄武岩的分离结晶是形成该花岗岩的一种可能的成岩过程。如果假设基性岩浆源于华北克拉通亏损 U、Th 的岩石圈地幔, 可以解释白查岩体的 Pb 同位素特征, 但难于解释其相对富 Nb 的微量元素特征。在包括北京北部在内的燕山造山带, 与白查花岗岩同时代或稍早期形成的基性岩均显示 Nb、Ta 相对于 LREE 明显亏损的特征(李晓勇等, 2004; 汪洋等, 2005; 王晓蕊等, 2005; 汪洋, 2006)。若认为基性岩浆源于软流圈地幔, 虽然

可以解释白查花岗岩的 A1 型花岗岩的微量元素特征, 但与白查花岗岩亏损放射性成因 Pb 同位素的特点相矛盾。若在分离结晶的同时, 岩浆经历下地壳物质的混染作用——即 AFC 过程, 可以解释白查花岗岩 Pb 同位素和微量元素特征相矛盾的现象。但是, 由于 A 型花岗岩浆的温度高、相对贫水, 黏度低而易于快速上升侵位, 不利于在岩浆房处发生显著的地壳物质混染。同时, 白查岩体所在的八达岭岩基西段, 并没有与其同时代的大规模基性岩发育, 南口双峰式岩墙群的侵位时代为 120Ma, 明显晚于白查岩体, 并且酸性脉岩并不具备 A 型花岗岩成分特征(邵济安等, 2001)。白查岩体周边也没有发育同时代的中性岩等一系列基性岩分离结晶演化的中间产物(池际尚等, 1963 [1997]; 白志民等, 1991; 孙志明等, 2007)。因此, 现有的地质证据尚不足以充分支持碱性玄武岩浆通过分离结晶形成白查 A 型花岗岩的成因解释。

地壳岩石的部分熔融是形成花岗岩浆的另一种主要成岩机制(Tuttle and Bowen, 1958; Wyllie, 1977)。实验岩石学研究显示, 在贫水条件下玄武质和长英质地壳物质的部分熔融作用均可形成 A 型花岗岩(Dixon Spulber and Rutherford, 1983; Patino Douce, 1997)。对于白查岩体而言, 在相对贫水、高温低压条件下壳源长英质岩石的部分熔融可以解释其高硅、贫钙、贫 Sr、Eu、高 Ga、Pb 含量和 Pb 同位素特征。但无法解释其相对于 LREE 的高 Nb、Ta 含量, 即 A1 型花岗岩的元素地球化学特征。我们认为, 镁铁质岩低程度甚至是极低程度的部分熔融过程可以解释白查花岗岩具有相对高 Nb、Ta 等 HFSE 的特点。Green (1982) 的实验结果表明, 在高温低压条件下玄武岩无水部分熔融的残余矿物相是斜长石和单斜辉石。由于在镁铁质岩石中单斜辉石对于 Nb 的分配系数(矿物/熔体)低, 而对 REE、Y 的分配系数较高, 所以在低程度部分熔融时, 将导致熔融产物中 Nb 相对于 REE、Y 明显富集。同时, 由于斜长石对 U、Th、Ga 的分配系数低而对 Sr、Eu 分配系数高, 低程度部分熔融时熔融产物 U、Th、Ga 会强烈富集而 Sr、Eu 强烈亏损(Rollinson, 1993)。白查花岗岩高 Pb 含量和相对亏损的 Pb 同位素特征很有可能继承自其源岩, 即华北北缘具有亏损 Pb 同位素特征的下地壳基性岩。

根据前人实验岩石学研究结果(Green, 1982; Dixon Spulber and Rutherford, 1983; Sisson *et al.*, 2005)和白查花岗岩的地球化学特征, 可以限定其成岩过程中: (1) 部分熔融程度很低。除了上述微量元素特征而外, 白查花岗岩的高硅特征也要求镁铁质源岩的部分熔融很低, 大量实验表明, 基性源岩熔融程度增高后形成的是相对低硅的酸性或中性熔体。(2) 相对贫水和低氧逸度的熔融条件。含水部分熔融所要求的熔融温度较低, 这与白查花岗岩高的 T_m 不符。在高氧逸度和相对富水条件下, 基性岩部分熔融形成的酸性熔体在成分上更接近强过铝质“S”型花岗岩(Sisson *et al.*, 2005), 而白查花岗岩属于还原型 A 型花岗岩。(3) 相对高

温。实验结果表明,在无水条件下玄武岩的固相线温度在 0 ~ 1.2 GPa 压力下变化于 1080 ~ 1150 °C。但是这并不意味着白查花岗岩源区的压力一定很低,因为当部分熔融体系的温度、压力一定时,玄武岩或安山岩体系的含水量越高,斜长石作为稳定矿物相存在的压力约低,在无水条件玄武岩部分熔融体系中,斜长石可以在 1.0 ~ 1.6 GPa 压力下 (35 km ~ 55 km 深度) 作为稳定矿物相与单斜辉石共存 (Green, 1982)。所以,就目前的资料而言,尚无法确切估计白查花岗岩起源的深度。因此,仅仅根据 A 型花岗岩浆的形成需要高温条件而认为其形成于高温低压环境的观点是不全面的 (李献华等, 2007; 吴福元等, 2007)。

燕山带早白垩世晚期后石湖山和窟窿山 A 型花岗岩的元素地球化学特征与白查花岗岩非常类似,即高硅、贫钙、高 $\text{FeO}_T/(\text{FeO}_T + \text{MgO})$ 比值、贫 Sr、Eu、高 Ga、Pb 含量,以及相对于 REE 的高 Nb、Ta 含量 (表 2, 图 2 ~ 5, 7 ~ 9); 同时后石湖山和窟窿山花岗岩均具有明显富集的 Nd 同位素特征, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -11 \sim -15$ (魏春生等, 2001; 李伍平, 2002), 表现出元素地球化学指标属于 A1 型花岗岩, 而 Nd 同位素属于 A2 型花岗岩的特征。李伍平 (2002) 认为这 2 个 A 型花岗岩是幔源岩浆最终分异的产物。但是, 后石湖山和窟窿山岩体出露面积分别约为 60 km² 和 105 km² (王季亮等, 1994)。根据 McCaffrey and Cruden (2002) 的统计公式, 求得这 2 个岩体的厚度分别约为 1.5 km 和 3.0 km, 则岩体体积分别约为 90 km³ 和 310 km³。由 $\text{SiO}_2 \approx 50\%$ 的玄武岩演化到 $\text{SiO}_2 \approx 76\%$ 的高硅花岗岩, 其结晶分离程度要达到 90% 以上 (Raymond, 2002)。这意味着形成后石湖山和窟窿山花岗岩需要 900 km³ ~ 3000 km³ 的原始基性岩浆发生分离结晶, 而其周边并无同时代大规模基性岩浆活动 (河北省地质矿产局, 1989)。所以幔源玄武岩浆分异模式无法解释后石湖山和窟窿山岩体的成因。这 2 个 A 型花岗岩的成岩过程应该与白查花岗岩相似, 是下地壳镁铁质源岩在相对高温、贫水、低氧逸度条件下发生低程度部分熔融的产物。Wei *et al.* (2000) 基于全岩 Nd、O 同位素和锆石 O 同位素的系统研究, 也认为后石湖山 (山海关) A 型花岗岩是下地壳或俯冲洋壳镁铁质源岩部分熔融的产物。

4.3 白查花岗岩形成的大地构造背景

一般认为, A1 型花岗岩形成于非造山 (anorogenic) 的大陆裂谷或地幔热柱、热点环境 (Eby, 1990, 1992; Li *et al.*, 2007)。然而, 肖娥等 (2007) 的研究清楚地表明, 具有 A1 型花岗岩元素地球化学和 Nd 同位素特征的浙江瑶坑花岗岩形成于后造山 (后碰撞) (post-orogenic / post-collisional) 背景, 而不是非造山背景。Clemens (2003) 强调, “It is the geology of a region that should tell us the particular setting of the magmatism, not the types of granites we find or the geochemistry of some basalts (识别岩浆活动的构造背景应基于区域地质学研究, 而不是花岗岩类型或玄武岩的地球化学特征)。”

白查岩体形成的早白垩世晚期 (130 ~ 125 Ma), 燕山带仍然发育挤压构造。例如: Davis *et al.* (2001) 指出, 北京北部山区的挤压构造一直持续到 127 Ma 之后, 而云蒙山变质核杂岩的发育在 120 Ma 之后。在燕山西段的北京密云丰台一带, 早白垩世张家口组火山岩卷入强烈的挤压变形形迹中 (姬广义和汪洋, 2004)。在燕山带中南部的河北卢龙县—抚宁县的燕河营地区, 早白垩世张家口组、义县组火山岩和含热河动物群的九佛堂组均已经历叠加褶皱作用 (汪洋, 2006)。在燕山带东段的辽西地区, 早白垩世义县组 (125 Ma) 卷入广泛而强烈的逆冲推覆构造 (杨庚等, 2001)。在区域岩石学方面, 位于白查花岗岩以东约 15 km 的 125 Ma 黑山寨石英二长岩, 在地球化学成分上属于典型的 C 型埃达克岩 (王焰和张旗, 2001; 钱青等, 2002; Deng *et al.*, 2004), 暗示燕山西段当时仍然存在厚地壳 (> 50 km, 即 $P > 1.5 \text{ GPa}$) (张旗等, 2008)。而可以反映地壳伸展的南口双峰式岩墙群的侵位时代为 120 Ma (邵济安等, 2001), 晚于白查岩体的 127 Ma。因此, 区域地质学证据并不支持白查花岗岩形成于非造山的裂谷环境。

近年最新研究表明, 花岗岩浆从熔融源区分离 (segregation) 要求源区受到挤压偏应力的作用而使其可以从残留相矿物间的孔隙中排出、聚集并上升 (ascending), 因此挤压或走滑的区域地质背景最适宜花岗岩浆发生源区分离 (Vigneresse, 2004)。前面 4.2 小节我们已经论证白查花岗岩很有可能形成于下地壳基性岩的低程度部分熔融。对于发生低程度熔融的源区, 挤压应力而不是浮力应该是使岩浆与残留相发生分离的主要驱动力。如果源区处于伸展背景, 则小比例熔融形成的少量岩浆仅凭浮力不可能克服残留相矿物间的孔隙的毛细阻力而发生分离 (segregation) 并上升 (Vigneresse, 2004)。白查岩体发育的晶洞构造表明, 其经历了由深而浅的上升侵位过程, 而非原地就位。所以, 白查岩体本身的形成也要求相对挤压的区域应力条件。

白查花岗岩成岩温度平均约 900 °C (表 1, 2), 并且我们推测其形成于相对贫水条件下基性下地壳的部分熔融, 这都意味着源区温度高。基性岩浆的底侵 (underplating) 或内侵 (intraplating) 可以为其提供能量。对于造山带而言, 基性岩浆的形成需要地幔中富水流体的加入或地幔减压熔融。在早白垩世的燕山带, 第一种情况基本可排除。地幔减压熔融需要岩石圈地幔拆沉或被“热侵蚀”, 这似乎与挤压构造背景相矛盾。实际不然, Houseman and Molnar (2001) 的数值模拟研究表明: 造山带在挤压过程中岩石圈地幔不断增厚, 过度加厚的岩石圈地幔最终不可避免地发生拆离, 导致加厚的地壳下伏薄的岩石圈地幔。此时地幔减压部分熔融形成的基性岩浆底侵将诱发地壳内的花岗岩岩浆活动。由于白查岩体规模很小, 而且其周边没有同时期大规模基性岩浆活动的显示, 所以我们认为, 白查花岗岩形成于该区段的造山带岩石圈地幔刚刚发生拆离之时, 此时基性岩浆活动的规模不大, 尚不能形成区域规模的基性火山—侵入活动, 但足以促

使下地壳发生低程度的部分熔融。之后,由于岩石圈地幔减薄导致的减压熔融等因素而使得燕山造山带上地幔处于高温状态,而由于地壳并未同时发生减薄,导致造山带重力势能大(厚地壳所致),但岩石圈强度低(温度升高),必然发生造山崩塌(orogenic collapse),形成科迪勒拉式变质核杂岩。这一点与白查岩体形成(127Ma)后北京北部区域地质演化历程相吻合(Davis *et al.*, 2001)。白查过碱性花岗岩的侵位标志着燕山西段造山崩塌阶段的到来。

5 结论

北京昌平区白查过碱性花岗岩具有高硅、高 Fe/Mg、Ga/Al 比值、高 Zr、Ga、Pb、HFSE 和 REE 含量,强烈贫 Ca、Sr、Eu,具有亏损放射性成因 Pb 同位素的特征,属于典型的还原型 A 型花岗岩。其地球化学特征与燕山带中生代晚期的后石湖山和窟窿山 A 型花岗岩非常相似。白查花岗岩起源于下地壳镁铁质源岩在相对贫水、高温、低氧逸度条件下的低程度部分熔融过程。综合区域地质背景和该岩体的成岩机制判断,白查岩体的形成标志燕山西段造山崩塌阶段的到来。

继浙江东南瑶坑过碱性花岗岩之后,白查花岗岩是具有 A1 型花岗岩元素地球化学特征但并非形成于非造山(anorogenic)大地构造背景的 A 型花岗岩的又一个实例。

致谢 姬广义高级工程师参加了野外工作;张旗研究员、罗照华教授、Roberto Dall' Agnol 教授、Anthony I S Kemp 博士、李杰博士和肖娥硕士提供了最新参考文献,在此一并致谢!

References

- Azer MK. 2006. The petrogenesis of Late Precambrian felsic alkaline magmatism in south Sinai, Egypt. *Acta Geologica Polonica*, 56(4): 463–484
- Bai ZM, Xu SZ and Ge SW. 1991. Badaling granitic complex. Beijing: Geological Publishing House, 1–169 (in Chinese)
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97: 1–29
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the earth elements; Meteorite studies. In: Henderson R (ed.). *Rare earth element geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63–114
- Chen YX and Chen WJ. 1997. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in West Liaoning and adjacent regions. Beijing: Seismological Press, 1–279 (in Chinese)
- Chi JS, Li ZN, Li WX, E ML, Lu FX, Zhang DQ, Mo XX. 1963. The Nankou granite in the western segment of Yanshan (mainly including magma differentiation, assimilation and metallogenic preference). In: *The Collection of the 32rd Annual Academic Meeting of Geological Society of China (Mineralogy, Petrology, Geochemistry Section)*, reprint in *The Selected Papers of Academician Chi Ji-Shang*. Beijing: Geological Publishing House, 1997, 115–128 (in Chinese)
- Clemens JD. 2003. S-type granitic magmas-petrogenetic issues, models and evidence. *Earth-Sci. Rev.*, 61: 1–18
- Collins WJ and Beams SD, White AJR and Chappell BW. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80: 189–200
- Creaser RA, Price RC and Wormald RJ. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model. *Geology*, 19: 163–166
- Dall'Agno R and Oliveira DC. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajas, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, 93: 215–233
- Davis GA, Zheng YD, Wang Z, Darby BJ, Zhang CH and Gehrels G. 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt: With emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hendrix MS and Davis GA (eds.). *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. Boulder, Colorado: Geological Society of America Memoir, 194: 171–197
- Deng JF, Su SG, Mo XX *et al.* 2004. The sequence of magmatic-tectonic events and orogenic processes of the Yanshan belt, north China. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 260–266
- Dixon Spulber S and Rutherford MJ. 1983. The origin of rhyolite and plagiogranite in oceanic crust: An experimental study. *J. Petrol.*, 24: 1–25
- Eby GN. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26: 115–134
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641–644
- Frost BR, Barnes CG, Collins WJ, Arculus RJ, Ellis DJ and Frost CD. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrology*, 42: 2033–2048
- Gao JF, Lu JJ, Lai MY, Lin YP and Pu W. 2003. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS. *J. Nanjing Uni. (Natural Sciences)*, 39(6): 844–850 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Hu YK and Zhao ZD. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1959–1975
- Gerstenberger H and Haase G. 1997. A highly effective emitter substance for mass spectrometric Pb isotope ratio determinations. *Chemical Geology*, 136: 309–312
- Green TH. 1982. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite. In: Thorpe RS (ed.). *Andesites*. New Jersey: John Wiley and Sons, 465–487
- Green TH. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 120: 347–359
- Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional geology of Hebei Province, Beijing Municipality and Tianjin Municipality. Beijing: Geological Publishing House, 1–731 (in Chinese with English abstract)
- Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90: 297–314
- Hong DW, Wang SG, Han BF and Jin MY. 1995. Tectonic setting classifications and discrimination criteria for alkaline granites. *Science in China (Series B)*, 25(4): 418–426 (in Chinese)
- Houseman G and Molnar P. 2001. Mechanism of lithospheric rejuvenation associated with continental orogeny. In: Miller JA, Holdsworth E, Buick IS and Hand M (eds.). *Continental Reactivation and Reworking*. Geological Society, London, Special Publications, 184: 13–38
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 489–508
- Ji GY and Wang Y. 2004. Geology of the area around Fengtaiding Mount in the eastern part of Beijing Municipality. *Beijing Geology*, 16(1): 1–15 (in Chinese with English Abstract)
- King PL, White AJR and Chappell BW. 1997. Characterization and

- origin of aluminous A type granites of the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *J. Petrol.*, 36: 371 – 391
- King PL, Chappell BW, Allen CM and White AJR. 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 501 – 514
- Kohou M and Mahdjoub Y. 2004. An Eburnian alkaline peralkaline magmatism in the Reguibal rise: The Djebel Drissa ring complex (Eglat Shield, Algeria). *J. African Earth Sciences*, 39: 115 – 122
- Landenberger B and Collins WJ. 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia. *J. Petrol.*, 37: 145 – 170
- Le Maitre RW. 2002. *Igneous rocks: A classification and glossary of terms* (2nd Edition). Cambridge: Cambridge University Press, 1 – 236
- Li WP. 2002. The geochemistry characteristics and its geodynamics for Mesozoic igneous rocks in Yanshan orogenic belt. Post-doctoral Research Report. GuangZhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1 – 90 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Chen ZG, Liu DY and Li WX. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin and tectonic significance. *Int. Geol. Rev.*, 45: 898 – 921
- Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. A further discussion on the genetic type and tectonic significance of the Early Yanshanian granites in Nanling area. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981 – 991 (in Chinese)
- Li XH, Li ZX, Li WX, Liu Y, Yuan C, Wei GJ and Qi CS. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96: 186 – 205
- Li XH, Qi CS, Liu Y, Liang XR, Tu XL, Xie LW and Yang YH. 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2481 – 2486
- Li XY, Fan WM, Guo F, Wang YJ, Li CW and Peng TP. 2004. Petrogenetics and dynamic regime of the high-K volcanic rocks of Donglanggou Formation in Western Hills, Beijing. *Geochimica*, 33(4): 353 – 360 (in Chinese with English abstract)
- Liu CS, Chen XM, Chen PR, Wang RC and Hu H. 2003. Subdivision, discrimination criteria and genesis for A-type rock suites. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 573 – 591 (in Chinese with English abstract)
- Liu HT, Zhai MG, Liu JM and Sun SH. 2002. Mesozoic granitoids in the north margin of North China craton: From post-collisional to anorogenic. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 433 – 448 (in Chinese with English abstract)
- Loiselle MC and Wones DR. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geol. Soc. Am. Abstracts and Programs*, 11: 468
- Martin RF. 2006. A-type granites of crustal origin ultimately result from open-system fenitization-type reactions in an extensional environment. *Lithos*, 91: 125 – 136
- McCaffrey KJW and Cruden AR. 2002. Dimensional data and growth models for intrusions. In: Breikreuz C, Mock A and Petford N (eds.). *First International Workshop: Physical Geology of Subvolcanic System Laccoliths, Sills and Dykes (LASI)*. *Wissenschaftliche Mitteilungen der Bergakademie Freiberg*, 20: 37 – 39
- Patino Douce AE. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 25: 743 – 746
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956 – 983
- Poitrasson F, Duthou JL and Pin C. 1995. The relationship between petrology and Nd isotopes as evidence for contrasting anorogenic granite genesis: Example for the Corsican Province (SE France). *J. Petrology*, 36: 1251 – 1274
- Qian Q, Chung SL, Lee TY and Wen DJ. 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: A comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275 – 292 (in Chinese with English abstract)
- Raymond LA. 2002. *Petrology: The study of igneous, sedimentary and metamorphic rocks* (2nd Edition). Boston: McGraw-Hill, 1 – 720
- Rollinson H. 1993. *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. London: Longman Group UK Limited, 1 – 352
- Schmitt AK, Emmermann R, Trumbull RB, Buhn B and Henjes-kunst F. 2000. Petrogenesis and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Brandberg Complex, Namibia: Evidence for a major mantle contribution in metaluminous and peralkaline granites. *J. Petrology*, 41: 1207 – 1239
- Shao JA, Zhang LQ, Wei CJ and Han QJ. 2001. Compositions and characteristics of the Mesozoic bimodal dyke swarm in Nankou, Beijing. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 205 – 212 (in Chinese with English abstract)
- Sisson TW, Ratajeski K, Hankins WB and Glazner AF. 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 635 – 661
- Skjerlie KP and Johnston AD. 1993. Fluid-absent melting behavior of a F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: Implications for the generation of anorogenic granites. *J. Petrol.*, 34: 785 – 815
- Smith IEM, Chappell BW, Ward GK and Freeman RS. 1977. Peralkaline rhyolites associated with andesitic arcs of the Southwest Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 37: 230 – 236
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42: 313 – 345.
- Sun ZM, Wang Y, Deng JF, Ji GY, Xia XF and Su SG. 2007. Temporal sequence of Mesozoic intrusive bodies in the Beijing area and its geological significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(3): 258 – 262 (in Chinese with English abstract)
- Todt W, Cliff RA and Hanser A. 1996. Evaluation of a ²⁰²Pb-²⁰⁵Pb double spike for high-precision lead isotope analysis. *Geophys. Monogr.*, 95: 429 – 437
- Tuttle OF and Bowen NL. 1958. Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O. *Geological Society of America Memoir*, 74: 1 – 153
- Vigneresse JL. 2004. Toward a new paradigm for granite generation. *Trans. Royal Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 95: 11 – 22
- Wang JL, Li BZ, Zhou DX, Yao SC and Li ZY. 1994. Geological characteristics and its relation to metallogenesis of the intermediate-acid plutons in Hebei province. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 213 (in Chinese)
- Wang XR, Gao S, Liu XM, Yuan HL, Hu ZC, Zhang H and Wang XC. 2005. Geochemistry of the high-magnesium andesite of Early Cretaceous Yixian Formation in Sihetun, Western Liaoning Province: Constraint on the delamination of lower crust and indication to the variation of Sr/Y ratio. *Science in China (Series D)*, 35(8): 700 – 709 (in Chinese)
- Wang Y and Zhang Q. 2001. Badaling granitic complexes in Beijing area: Their composition, geochemical characteristics and geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 533 – 540 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y. 2006. Late Mesozoic Crustal thickening of Yanshan belt, North China: Constraints from structural mapping and geochemistry of high-potassium calc-alkaline volcanic rocks. Post-doctoral Research Report. GuangZhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1 – 131 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Ji GY and Xia XF. 2005. Early Cretaceous Donglanggou potassic volcanics from Dahuihang, Western Hills, Beijing:

- Tectonic setting and geological significance. Beijing Geology, 17 (3): 1-10 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth Planet. Sci. Lett., 64: 295-304
- Wei CS, Zheng YF and Zhao ZF. 2000. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry of A-type granites in the continental margins of eastern China. Tectonophysics, 328: 205-227
- Wei CS, Zheng YF and Zhao ZF. 2001. Nd-Sr-O isotopic geochemistry constraints on the age and origin of the A-type granites in eastern China. Acta Petrologica Sinica, 17(1): 95-111 (in Chinese with English abstract)
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contrib. Mineral. Petrol., 95: 407-419
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussion on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)
- Wyllie P. 1977. Crustal anatexis: An experimental review. Tectonophysics, 43: 41-71
- Xiao E, Qiu JS, Xu XS, Jiang SY, Hu J and Li Z. 2007. Geochronology and geochemistry of the Yaokeng alkaline granitic pluton in Zhejiang province: Petrogenetic and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1431-1440 (in Chinese with English abstract)
- Yan MC and Chi QH. 1997. The chemical compositions of crust and rocks in the eastern part of China. Beijing: Science Press, 1-292 (in Chinese)
- Yang G, Chai YC and Wu ZW. 2001. Thin-skinned thrust nappe structures in western Liaoning in the eastern sector of the Yanshan orogenic belt. Acta Geologica Sinica, 75(3): 322-332 (in Chinese with English Abstract)
- Zhang Q, Wang Y, Xiong XL and Li CD. 2008. Adakites and granites: Challenges and opportunities. Beijing: Land Press, 1-344 (in Chinese)
- Zhang Q, Qian Q, Wang EQ, Wang Y, Zhao TP, Hao J and Guo GJ. 2001. Existence of East China Plateau in mid-late Yanshanian period: Implication from adakites. Scientia Geologica Sinica, 36(2): 248-255 (in Chinese with English abstract)
- 力学背景. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士后研究工作, 1-90
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 52(9): 981-991
- 李晓勇, 范蔚茗, 郭峰, 王岳军, 李超文, 彭头平. 2004. 北京西山东狼沟组钾质火山岩成因及其动力学机制. 地球化学, 33(4): 353-360
- 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 王汝成, 胡欢. 2003. A型岩套的分类、判别标志和成因. 高校地质学报, 9(4): 573-591
- 刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. 岩石学报, 18(4): 433-448
- 钱青, 钟孙霖, 李通艺, 温大任. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比. 岩石学报, 18(3): 275-292
- 邵济安, 张履桥, 魏春景, 韩庆军. 2001. 北京南口中生代双峰式岩墙群的组成及其特征. 地质学报, 74(2): 205-212
- 孙志明, 汪洋, 邓晋福, 姬广义, 夏希凡, 苏尚国. 2007. 北京地区中生代侵入岩的时间序列及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 26(3): 258-262
- 汪洋. 2006. 燕山晚中生代地壳增厚——来自构造填图和高钾钙碱性火山岩地球化学的制约. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所博士后研究工作, 1-131
- 汪洋, 姬广义, 夏希凡. 2005. 北京西山大灰厂东狼沟组钾质火山岩形成的构造背景探讨. 北京地质, 17(3): 1-10
- 王季亮, 李丙泽, 周德星, 姚士臣, 李支荫. 1994. 河北省中酸性岩体地质特征及其与成矿关系. 北京: 地质出版社, 1-213
- 王晓蕊, 高山, 柳小明, 袁洪林, 胡兆初, 张宏, 王选策. 2005. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳俯冲作用和 Sr/Y 变化的指示. 中国科学(D辑), 35(8): 700-709
- 王焰, 张旗. 2001. 八达岭花岗岩杂岩的组成、地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17: 533-540
- 魏春生, 郑永飞, 赵子福. 2001. 中国东部 A 型花岗岩形成时代及物质来源的 Nd-Sr-O 同位素地球化学制约. 岩石学报, 17(1): 95-111
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238
- 肖娥, 邱检生, 徐夕生, 将少涌, 胡建, 李真. 2007. 浙江瑶坑碱性花岗岩体的年代学、地球化学及其成因与构造指示意义. 岩石学报, 23(6): 1431-1440
- 鄯明才, 迟清华. 1997. 中国东部地壳与岩石的化学组成. 北京: 科学出版社, 1-292
- 杨庚, 柴育成, 吴正文. 2001. 燕山造山带东段—辽西地区薄皮逆冲推覆构造. 地质学报, 75(3): 322-332
- 张旗, 王焰, 熊小林, 李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇. 北京: 大地出版社, 1-344
- 张旗, 钱青, 王二七, 王焰, 赵太平, 郝杰, 郭光军. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248-255

附中文参考文献

- 白志民, 许淑贞, 葛世伟. 1991. 八达岭花岗岩杂岩. 北京: 地质出版社, 1-169
- 陈义贤, 陈文寄. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩——年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1-279
- 池际尚, 李兆鼎, 李文祥, 鄂莫岚, 路凤香, 张德全, 莫宣学. 1963. 燕山西段南口花岗岩(主要涉及岩浆分异作用、同化作用和成矿专属性). 见: 中国地质学会《第卅二届学术年会论文选集》(矿物、岩石、地球化学), 重印于《池际尚论文选集》. 北京: 地质出版社, 1997, 115-128
- 高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 林雨萍, 濮巍. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. 南京大学学报(自然科学), 39(6): 844-850
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-731
- 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 靳满元. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其判别标志. 中国科学(B辑), 25(4): 418-426
- 姬广义, 汪洋. 2004. 北京东部丰台顶一带地质构造特征. 北京地质, 16(1): 1-15
- 李伍平. 2002. 燕山造山带中生代火成岩地球化学特征及其地球动