

文章编号: 1000-6524(2001)03-0247-08

北京西山晚侏罗世粗安岩的成因及其地质意义

李伍平^{1,2}, 路凤香³, 李献华¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 长安大学地球科学系, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 北京西山晚侏罗世髻髻山组粗安岩具有高的 SiO_2 (> 56%)、 Al_2O_3 (16.33% ~ 17.9%)、 Na_2O (3.11% ~ 4.80%)、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (6.11% ~ 8.10%) 和 CaO (3.68% ~ 5.82%) 含量及低的 MgO (< 3.0%, $\text{Mg}^\# \leq 0.50$) 含量, 高 Sr ($554 \times 10^{-6} \sim 1258 \times 10^{-6}$)、低 Yb (< 1.70×10^{-6}) 和 Y (< 21×10^{-6})、高 Sr/Y 、 Y/Yb 和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (0.93 ~ 2.73) 比值及低 Rb/Sr 比值; 轻重稀土元素分馏十分明显, 没有 Eu 异常, 具有 adakitic 岩的一般特征。认为这些粗安岩起源于下地壳钙碱性玄武质岩石的部分熔融, 与底侵作用有关。根据地球化学特征推测, 粗安岩浆起源深度不超过 50 km。

关键词: 粗安岩; 下地壳钙碱性玄武质岩石; 部分熔融; 底侵作用; 晚侏罗世; 北京西山

中图分类号: P588.14; P581

文献标识码: A

髻髻山组粗安岩是燕山造山带中生代最有代表性的钙碱性火山岩之一, 其成因倍受关注, 主要观点有: ① 岩浆起源于上地幔的部分熔融^[1]; ② 岩浆是由幔源的钾玄质岩浆与壳源的高钾钙碱性酸性岩浆混合形成的^[2,3]; ③ 岩浆起源于下地壳的部分熔融^[4] 或下地壳-壳幔过渡带玄武质岩石的部分熔融^[5], 岩浆在演化过程中主要受到部分熔融作用的控制^[6]。本文通过对北京西山安家庄一大台煤矿一带髻髻山组粗安岩的地质调查和最新分析资料, 探讨粗安岩的成因及其地质意义。

1 区域地质背景

北京西山位于华北板块北部燕山造山带的西段。中生代早期, 华北板块与华南板块碰撞后已形成统一的大陆。此时, 位于华北板块北部的蒙古-大兴安岭褶皱带与西伯利亚板块之间仍被蒙古-鄂霍茨克海阻挡, 直到晚侏罗世蒙古-鄂霍茨克海闭合碰撞后, 才形成了统一的欧亚大陆。从中侏罗世开始, 古太平洋板块向欧亚大陆斜向俯冲, 从此中国东部进入了太平洋构造体系^[7]。这时, 燕山造山带位于古太平洋板块俯冲带以西水平距离达 1000 km 以上, 因此, 燕山造山带中生代火山岩形成于板内构造环境^[8-10]。

北京附近发育大量的晚侏罗世髻髻山组火山岩。以北京西山髻髻山一带为例, 髻髻山组主要为一套中性火山岩, 厚度达 1000~3400 m。按岩石组合分为 3 段, 一段和二段主要为复成分砾岩和含砾岩屑砂岩, 与下伏中侏罗世九龙山组区域性角度不整合; 三段分布也较广, 主要为各种中基性-中性熔岩和火山角砾岩、火山角砾岩夹凝灰质砂岩、砂泥岩、砂砾岩等, 该段是髻髻山组火山岩的主体。在区域上, 髻髻

收稿日期: 2001-07-15; 修订日期: 2001-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49733110); 国家杰出青年科学基金资助项目(49725309)

作者简介: 李伍平(1963-), 男, 博士, 副教授, 从事区域地质学和岩石学教学与科研工作。

山组被张家口组或东岭台组角度不整合覆盖。本文采样剖面位于西山大台煤矿北北西方向至 1139.8 高地之间,样品采集于第三段火山熔岩中。岩石类型为粗安岩,主要由斜长石、单斜辉石和少量角闪石组成,岩石具有气孔和杏仁状构造。

2 分析方法

样品新鲜。所有分析样品经破碎、多次去离子水超声波洗涤、烘干、磨碎(> 200 目)制成。主量元素采用 ICP-AES 分析,除 SiO₂ 和灼减量采用重量法分析外,其它氧化物采用酸熔法测定。溶样流程:制样在超净实验室进行。将装有 0.04 g 左右样品的 Teflon 溶样器中加入 0.3 ml 的 1:1HNO₃,充分摇匀后加入 1ml HF,经超声波震荡 60 分钟后,置低温电热板上 120℃ 加热、蒸干。再加入 0.3ml 的 1:1HNO₃ 及 1ml HF,加盖置于低温电热板上 80℃ 加热保温 10 天(期间隔日超声波震荡 30 分钟),待样品充分溶解后开盖蒸干。加入 4ml 1:2HNO₃(1HNO₃:2Milli-Q 纯化水)加盖超声波震荡 30 分钟后,置于低温电热板上 80℃ 加热过夜。次日趁热以 1% HNO₃ 稀释至 100 ml 聚乙烯塑料瓶中,溶液质量为样重的 2000 倍。取约 8 ml 稀释样于清洗干净聚乙烯塑料离心管中,送 Varian VISTA 型等离子体光谱分析(ICP-AES)。另外,取上述稀释样约 4 g 于聚乙烯塑料离心管中,并加入同等质量的 20 ppb Rh 内标溶液,摇匀,送 PE Elan 6000 型等离子体质谱测定(ICP-MS)。测试单位为中国科学院广州地球化学研究所同位素分析中心。微量元素分析过程详见刘颖等^[11]。

采用 HNO₃、HF 混合溶样的方法,不仅能够保证样品完全溶解,而且不会带入任何金属离子,同时 HNO₃ 和 HF 易于纯化,污染小,具有分析本底低、测定限低的优点。制样过程中使用的 Milli-Q 纯化水要求电阻率达到 18.20 MΩ/cm 以上。

3 地球化学特征

分析结果见表 1~3。

在 SiO₂-(Na₂O+K₂O) 及 SiO₂-K₂O 有关图解中,样品主要落在粗安岩区和高钾钙碱性区。主要氧化物 SiO₂> 56%, Al₂O₃> 15% (< 18.0%), MgO< 3.0%, Mg[#] ≤ 0.50, Na₂O> 3.0% (≤ 4.80%), K₂O> 1.60% (≤ 3.59%), Na₂O+K₂O> 6.1% (≤ 8.10%), CaO ≥ 3.68% (≤ 5.82%)。除样品 Tj-10 外, Na₂O/K₂O> 1.0 (< 2.80),总体上具有富 Al 富碱的特点。

稀土元素总量中等,轻稀土元素强烈富集[(La/Yb)_N> 25],而重稀土元素亏损(Yb< 1.70×10⁻⁶, Y< 19×10⁻⁶) (除 TJS-12 外), Y/Yb 比值> 10(12~13.69),基本无 Eu 异常,稀土元素配分曲线为轻稀土富集型(图 1A)。一般认为,这种现象与源区残留物中含石榴石有关,因为重稀土元素(尤其是 Yb)易于富集在石榴石中,因而引起熔浆中轻稀土元素富集并造成 Y/Yb 比值增高(球粒陨石、原始地幔和洋中脊玄武岩 Y/Yb 比值基本不变,约为 10)。对于样品 TJS-12,重稀土元素 Yb(1.63×10⁻⁶)和 Y(20.9×10⁻⁶)偏高,说明源区残留物中石榴石含量较少或出现了斜长石。Eu 异常取决于斜长石是否发生了分离结晶,因为 Eu 在斜长石中的分配系数远大于其他矿物,当残留相中缺少斜长石时(即没有斜长石的分离结晶)熔浆出现 Eu 正异常或没有异常。相反,当源区残留相中有少量斜长石出现时熔浆会产生弱的 Eu 负异常。北京髻髻山组粗安岩可能属于后一种情况。

大离子亲石元素(LILE),如 U、Th、Rb 含量及 Rb/Sr 比值较低,而 Ba、Sr 含量及 Sr/Y 比值较高。后者可用斜长石的结晶分离作用解释,因为 Ba、Sr 与 Ca 具有相似的化学性质,彼此间常发生类质同相替换。K/Rb 比值低—中等(383~856)。K、Rb 具有相似的化学性质,但二者在角闪石中的分配系数不同,K 比 Rb 更富集于角闪石,故角闪石的结晶分离造成熔浆 K/Rb 比值降低^[13]。因此,源区残留物也可能存在角闪石。此外, K/Rb 比值似乎与源区有关,如底侵的玄武质地壳具有低—中等的 K/Rb 比值(300~650)^[14]。在微量元素蛛网图中(图 1B),高场强元素(HFSE)如 Nb、Ta、P 和 Ti 出现了明显负异常,大离子亲石元素

表 1 主量元素分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Major elements compositions by ICP- AES(%)

样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ [*]	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Mg [#]	Na ₂ O/K ₂ O	备注
T _j 1	57.14	1.08	16.33	7.51	0.09	2.56	5.82	4.47	1.64	0.59	2.47	99.70	0.40	2.73	[5]
T _j 10	56.44	0.84	17.71	6.50	0.08	2.72	5.63	3.11	3.34	0.49	3.24	100.10	0.45	0.93	[5]
DJS ₉	56.64	0.67	17.90	6.52	0.10	2.64	3.68	4.51	3.59	0.34	1.90	98.50	0.45	1.25	本文
DJS ₁₁	56.02	0.82	17.74	7.21	0.14	2.48	4.64	4.63	2.56	0.49	2.45	99.18	0.41	1.81	本文
DJS ₁₂	57.86	1.11	17.01	7.30	0.08	2.28	4.50	4.26	3.44	0.52	1.27	99.65	0.38	1.24	本文
DJS ₁₅	59.44	0.58	17.57	5.92	0.10	2.01	3.99	4.80	2.67	0.33	1.58	99.01	0.40	1.80	本文
DJS ₁₇	60.63	0.77	17.52	6.73	0.07	1.22	5.17	3.76	3.19	0.40	0.67	100.13	0.26	1.18	本文

Mg[#] = MgO/(MgO+ Fe₂O₃^{*})(摩尔数比)。

表 2 稀土元素分析结果

 $w_B/\%$

Table 2 Rare earth elements compositions by ICP- MS

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣEu	(La/Yb) _N	Y/Yb
T _j 1	34.81	73.24	8.89	37.12	6.12	1.75	4.37	0.57	2.58	0.49	1.23	0.18	0.93	0.14	12.46	0.98	26.85	13.40
T _j 10	34.40	67.30	8.21	31.80	5.10	1.46	4.02	0.54	2.66	0.53	1.30	0.20	1.20	0.21	14.40	0.95	20.56	12.00
DJS ₉	33.67	67.30	8.44	32.52	5.31	1.50	3.97	0.54	2.66	0.52	1.36	0.20	1.26	0.20	17.28	0.95	19.14	13.69
DJS ₁₁	35.69	72.74	9.56	36.81	6.25	1.72	4.62	0.62	3.10	0.58	1.56	0.22	1.39	0.22	18.57	0.94	18.44	13.38
DJS ₁₂	53.33	105.72	13.82	53.45	8.31	2.21	5.67	0.78	3.68	0.70	1.86	0.25	1.63	0.26	20.93	0.93	23.52	12.87
DJS ₁₅	34.68	69.05	8.30	30.68	4.87	1.34	3.54	0.50	2.45	0.47	1.30	0.19	1.22	0.19	15.03	0.94	20.45	12.36
DJS ₁₇	36.58	72.43	9.13	34.44	5.44	1.51	3.82	0.52	2.53	0.48	1.28	0.18	1.16	0.18	14.93	0.96	22.64	12.88

表 3 微量元素分析结果

 $w_B/\%$

Table 3 Trace elements compositions by ICP- MS

样号	Co	Ni	U	Th	Pb	V	Rb	Sr	Ba	Ta	Nb	Hf	Zr	Ga	Sc	Rb/Sr	K/Rb	Sr/Y
T _j 1	18.0	23.0	0.40	6.40	14.7	128.0	15.9	1258	1194	0.57	9.30	4.10	156.0	19.7	9.5	0.01	856	101.0
T _j 10	18.0	11.0	0.90	10.50	15.8	130.0	61.5	1200	1315	0.41	9.60	4.70	173.0	16.3	9.2	0.05	451	83.3
DJS ₉	12.1	8.6	0.64	2.74	6.7	84.1	49.0	554	1488	0.38	6.75	4.15	177.2	18.7	7.4	0.09	610	32.1
DJS ₁₁	11.5	2.1	0.58	2.53	11.9	95.4	55.3	897	1209	0.40	7.60	4.17	178.9	21.3	7.3	0.06	384	48.3
DJS ₁₂	13.2	7.2	0.98	4.67	13.6	118.9	66.3	1019	2205	0.65	11.61	6.38	265.2	20.7	10.8	0.07	533	48.7
DJS ₁₅	9.4	3.2	0.79	3.14	12.4	66.7	36.2	973	1163	0.46	7.61	4.39	186.7	17.9	5.9	0.04	612	64.8
DJS ₁₇	9.6	2.7	0.58	2.65	9.5	90.2	45.1	1124	1760	0.41	7.65	4.26	189.2	17.5	7.2	0.04	587	75.3

Rb、Th、U 为负异常, Ba、K 为正异常, 但 Sr、Zr 为弱正异常, 这些都是大陆下地壳或太古代 TTG 岩套的一般特征^[15, 16], 不同于正常岛弧安山岩存在 Rb、Zr、Hf 异常。因为岛弧安山岩一般具有 Rb 正异常和明显的 Zr、Hf 负异常。对于高场强元素负异常的成因目前仍有争议, Pearce and Norry 认为 Nb 的亏损与角闪石的结晶分离作用有关^[17], 而 Martin 认为与俯冲板片中存在难熔的 Ti 矿物有关^[18], 也可能与大陆上地壳的混染作用有关。一般认为, 高场强元素富集于难熔矿物(如榍石、钛铁矿、金红石、锆石和磷灰石)中, 当岩浆发生分离结晶时, 熔体中的 HFSE 含量减少而出现负异常。Rb、Th 和 U 负异常及低的 Rb/Sr 比值取决于源区岩石的变质程度, 一些麻粒岩中存在这种现象^[19]。

在 (La/Yb)_N-Yb_N 及 Sr/Y-Y 图解中(图 2-3), 所有样品均落在太古代 TTG 岩套范围, 与正常岛弧安山岩-英安岩-流纹岩不同, 显示出北京西山髻髻山组粗安岩具有独特的地球化学特征。

4 讨论

根据地球化学成因分析, 我们认为北京西山晚侏罗世粗安岩浆起源于下地壳钙碱性玄武质岩石的部

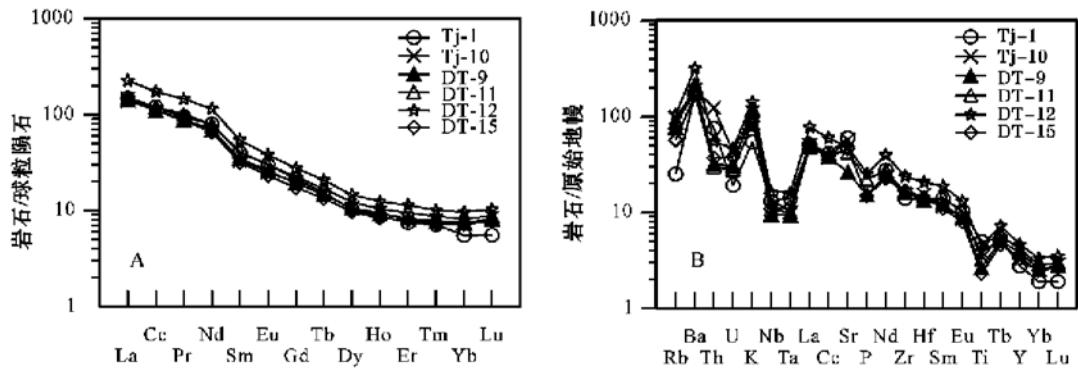


图1 北京西山髻髻山组粗安岩稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图(标准值引自文献[12])

Fig. 1 Chondrite-normalized REE patterns and trace elements web diagram of trachyandesite from Tiaojianshan Formation, Western Hills of Beijing

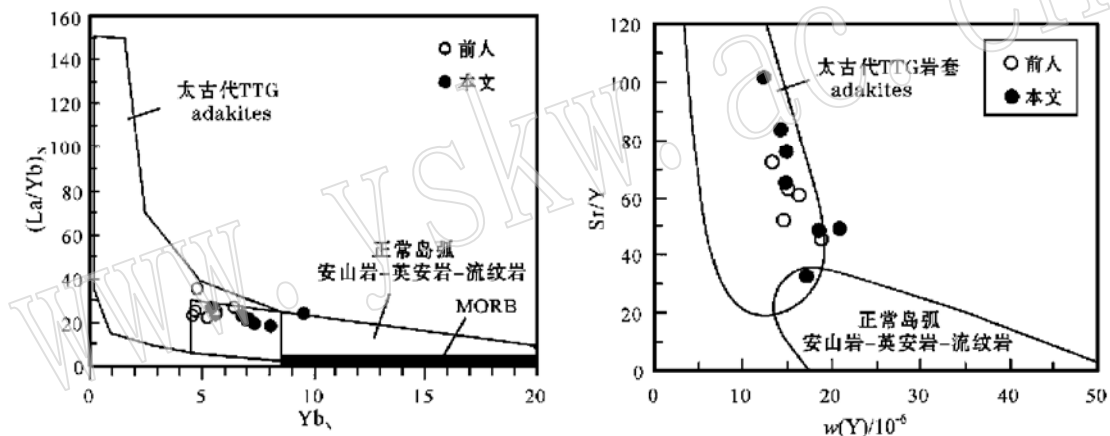


图2 $Yb_N - (La/Yb)_N$ 关系图解(据文献[16])

Fig. 2 Yb_N versus $(La/Yb)_N$ diagram
前人资料见文献[4]

图3 $Sr/Y - Y$ 关系图解(据文献[25])

Fig. 3 Sr/Y versus Y diagram
图例同图2

分熔融,且与底侵作用有关。

一般情况下,下地壳基性岩石的部分熔融是很难发生的。原因之一,下地壳孔隙中的流体很难存在;之二,正常地温梯度下不会引起大规模的部分熔融。但是,最新实验研究表明,蚀变玄武岩和变质角闪岩的部分熔融能够形成一种富铝富钠的中酸性熔浆,其源区残留物为含石榴石的角闪岩或榴辉岩^[20-24]。这种中酸性熔浆的地球化学特征与由年轻的(≤ 25 Ma)和热的大洋俯冲板片在未到达洋壳脱水深度(70~90 km)时发生部分熔融形成的中-酸性岩石(adakite)相似^[25]。adakite具有高 SiO_2 ($\geq 56\%$)、 Al_2O_3 ($\geq 15\%$)、 Na_2O ($K_2O/Na_2O < 0.5$)、 Sr ($> 400 \times 10^{-6}$)含量, $Mg^\# > 0.47$, Yb ($\leq 1.9 \times 10^{-6}$)和 Y ($\leq 18 \times 10^{-6}$)含量低,稀土元素分馏强烈,因而 Sr/Y 和 La/Yb 比值较高;在稀土元素配分曲线中,无Eu异常;熔融后的残留物为含石榴石角闪岩或榴辉岩,一般不含斜长石。可见,adakite具有特殊的地球化学特征和构造背景。近年来,许多学者认为加厚的陆壳下底侵玄武质岩石的部分熔融能够形成与adakite地球化学特征相似的火成岩,与太古代TTG岩套具有相似的地球化学特征^[18,25-30],并称之为adakitic岩^[14,21,23,31],如埃塞俄比亚晚元古代Birbir岩浆弧TTG片麻岩^[14]、秘鲁中新世的Cordillera Blanca岩基^[31]、新西兰新生代

Separation Point 岩基^[23]和我国东秦岭晚加里东—早海西期的灰池子花岗质复式岩体^[32]。与 adakite 相比, adakitic 岩 $Mg^{\#} < 0.5$, Sr/Y 比值 < 100 , Ni 和 Cr 含量较低^[16, 33]。产生这一差别的主要原因为 adakitic 岩熔浆与地幔之间不发生反应, 且残留物中可能存在斜长石。

从地球化学特征分析, 北京西山髻髻山组粗安岩似乎更类似于 adakitic 岩或太古代 TTG 岩套, 但二者之间也存在不同之处: ① 岩石组合: adakitic 岩为安山岩—英安岩—流纹岩(以英安岩为主), 太古代 TTG 岩套为英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩, 本文为粗安岩; ② 岩石系列: adakite/adakitic 岩一般为中钾钙碱系列, 太古代 TTG 岩套趋向于奥长花岗岩(富钠), 本文为高钾钙碱系列(富钾); ③ 源岩: adakite 岩为低钾拉斑玄武岩(洋壳), adakitic 岩为底侵的玄武质岩石, 而髻髻山组粗安岩的源岩具有古老下地壳玄武质岩石特点, 故髻髻山组粗安岩的源岩应为下地壳古老的钙碱性玄武质岩石, 源区岩石富钾的原因可能与地幔交代或地壳混染有关。从现有资料分析, 髻髻山组粗安岩浆直接起源于地幔的证据不充分, 岩浆主要受控于部分熔融, 壳幔岩浆混合或结晶分异或地壳混染不明显^[5], 因此, 不排除源岩受到地幔流体交代作用的影响。

然而, 下地壳玄武质岩石发生部分熔融需要外界提供足够的热能。就目前所知, 玄武质岩浆的底侵作用能够提供这些热量。目前还未发现中晚侏罗世以前中生代下地壳基性麻粒岩包体的报道, 仅在汉诺坝新生代玄武岩中发现了 J_3-K_1 基性麻粒岩包体^[34], 证实了燕山造山带中生代确实发生过底侵作用^[35]。从这些下地壳基性麻粒岩包体中, 我们可以获得当时下地壳的重要信息: ① 基性麻粒岩包体主要造岩矿物中普遍含有斜长石, 有的含有单斜辉石、斜方辉石和石榴石^[34, 36-38], 类似于 adakite 岩/adakitic 岩源区残留物的矿物组合; ② 从基性麻粒岩包体形成时的温压条件($T = 800 \sim 1050 \text{ } ^\circ\text{C}$, $P = 0.6 \sim 1.2 \text{ GPa}$)推算当时(J_3-K_1)地壳厚度不超过 40 km ^[37, 38]; ③ 获得了基性麻粒岩包体中古老锆石的 U-Pb 年龄(上交点年龄为 $2.5 \sim 3.1 \text{ Ga}$, 表面年龄为 $1.7 \sim 3.0 \text{ Ga}$)^[39], 表明太古宙—元古宙底侵作用是存在的, 与粗安岩亏损地幔模式年龄($T_{DM} = 1.26 \sim 3.3 \text{ Ga}$)^[5]一致, 暗示地幔流体与下地壳可能发生过交代作用(引起粗安岩的 K_2O 含量增高)。

张旗等认为燕山造山带存在着 adakitic 岩, 其源区深度至少大于 50 km ^[40, 41]。邓晋福等根据燕山造山带中生代火山岩的 K_2O 含量和 Eu 无异常也认为中生代(J_3 以前)存在一个增厚的地壳($60 \sim 80 \text{ km}$), 类似于现今青藏高原的地壳^[42, 43]。从推覆构造^[44, 45]和火山—沉积盆地河湖堆积相分析, 燕山造山带在晚侏罗世以前处于板内挤压构造环境, 有地壳加厚的可能性。

蚀变玄武岩和变质角闪岩在缺失流体和不饱和水条件下的部分熔融实验结果显示, 低压条件下($P < 1.0 \text{ GPa}$, $800 \sim 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$)不出现石榴石^[46-48], 而在高压条件下($\geq 1.0 \text{ GPa}$, $800 \sim 1100 \text{ } ^\circ\text{C}$)形成石榴石^[47, 49, 50]。类似的现象在 Sen and Dunn^[20]、Rapp and Watson^[24]的实验中出现过。当温度达到固相线(含 $5\% \text{ H}_2\text{O}$)时, 低温条件下($\approx 620 \text{ } ^\circ\text{C}$)斜长石稳定存在的压力不超过 1.6 GPa , 温度升到 $700 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时斜长石存在的压力约 1.4 GPa 。当温度 $> 850 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时斜长石分解, 此时压力约为 1.0 GPa ^[18]。含水量降低时(含 $0.3\% \sim 1.3\% \text{ H}_2\text{O}$), 固相线初熔温度可升高至 $750 \text{ } ^\circ\text{C}$, 相应斜长石的稳定压力降为约 1.2 GPa ^[50], 显然水能降低固相线的温度。另外, 底侵玄武岩部分熔融后发现残留物中形成石榴石($P > 1.0 \text{ GPa}$)时会出现少量钙质斜长石($P = 0.8 \sim 1.2 \text{ GPa}$; 当 $P = 1.2 \text{ GPa}$ 时, An_{50-55}), 但在水活度较低的情况下高压存在的斜长石则为更长石(1.8 GPa , An_{20-22})^[14, 51], 一些麻粒岩或含石榴石麻粒岩中已发现了斜长石的存在。另外, 上述实验揭示出角闪石稳定存在的温度一般不超过 $950 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。在水不饱和条件下($1\% \text{ H}_2\text{O}$), 低压时($\approx 1.0 \text{ GPa}$, $900 \text{ } ^\circ\text{C}$)角闪石分解形成单斜辉石, 压力增高($> 1 \text{ GPa}$)时则形成石榴石^[51]。

根据上述髻髻山组粗安岩地球化学特征、部分熔融实验及岩浆房温压条件估算($740 \sim 950 \text{ } ^\circ\text{C}$, $P \leq 0.85 \text{ GPa}$, 深度 $\leq 28.2 \text{ km}$ ^[5, 6]), 我们认为髻髻山组粗安岩形成的压力在 $1.0 \sim 1.5 \text{ GPa}$ 之间(即岩浆起源深度相当于 $33 \sim 50 \text{ km}$, 约等于地壳厚度), 这表明燕山造山带晚侏罗世以前存在的地壳厚度可能略大于晚侏罗世—早白垩世地壳厚度($33 \sim 40 \text{ km}$)^[36-38], 但不超过 50 km 。

5 结 论

(1) 北京西山髻髻山组粗安岩具有与 adakitic 岩相似的地球化学特征, 岩浆起源于下地壳钙碱性玄武质岩石的部分熔融, 与底侵作用有关。

(2) 北京西山髻髻山组粗安岩的源区深度为 33~ 50 km; 晚侏罗世地壳厚度可能大于晚侏罗世—早白垩世地壳厚度, 但不超过 50 km。

致谢 感谢中国地质大学孙善平教授、李家振教授和白志民副教授, 石油大学周瑶琪教授和章大港博士在野外考察期间给予的帮助。感谢中国地质科学院地质力学研究所赵越研究员和中国科学院地质与地球物理研究所张旗研究员的热情鼓励。感谢中国科学院广州地球化学研究所刘颖副研究员、涂湘林副研究员、胡光黔工程师、钱志新高工和曾文工程师在实验室内分析过程中给予的支持与帮助。

参考文献:

- [1] 孙善平, 汪 洋, 李家振, 等. 北京西山中生代火山活动特征及构造环境分析[A]. 李东旭等. 北京西山地质构造系统分析[C]. 北京: 地质出版社, 1995. 65~ 76.
- [2] 廖群安, 邱家骧. 北京地区中生代钾玄岩系列—高钾钙碱性系列的识别与成因分析[J]. 岩石学报, 1993, 9(增刊): 1993. 14~ 23.
- [3] 邱家骧, 廖群安. 北京地区中元古代与中生代火山岩的酸度、系列、构造环境及岩浆成因[J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(2): 104~ 117.
- [4] 鲍亦冈, 白志民, 葛世伟, 等. 北京燕山期火山地质及火山岩[M]. 北京: 地质出版社, 1995, 1~ 160.
- [5] 李伍平, 路凤香, 李献华, 等. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(2): 123~ 133.
- [6] 白志民. 北京西山中生代火山岩中单斜辉石矿物化学及成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(2): 174~ 187.
- [7] 赵 越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. 地质科学, 1994, 29(2): 105~ 119.
- [8] 葛肖虹. 华北板内造山带的形成史[J]. 地质论评, 1989, 35(3): 255~ 261.
- [9] 宋鸿林. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 307~ 314.
- [10] 张长厚. 初论板内造山带[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 213~ 306.
- [11] 刘 颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP—MS 准确测定岩石样品中 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6): 552~ 558.
- [12] Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. Saundern A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins[C]. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313~ 345
- [13] Saunders A D, Rogers G, Marriner G F, *et al.* Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Baja California, Mexico: implications for the petrogenesis of post_subduction magmas[J]. J. Vol. Geotherm. Res, 1984, 32: 223~ 245.
- [14] Wolde B, Team G_G. Tonalitic—trondhjemite—granite genesis by partial melting of newly underplated basaltic crust: an example the Neoproterozoic Birbir magmatic arc, western Ethiopia[J]. Precambrian Research, 1996, 75: 3~ 14.
- [15] Weaver B, Tarney J. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust[J]. Nature, 1984, 310: 575~ 577.
- [16] Martin H. The archaic grey gneisses and the genesis of continental crust[A]. Condie K C. Developments in Precambrian geology 11_Archaic crustal evolution[C]. Elsevier, 1994, 205~ 260.
- [17] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1979, 69: 33~ 47.

- [18] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*[J], 1999, 46: 411~ 429.
- [19] Weaver B L, Tarney J. Lewisian gneiss geochemistry and Archaean crustal development models[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1981, 55: 171~ 180.
- [20] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 GPa and 2.0 GPa: implication for the origin of adakites[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1994, 117: 394~ 409.
- [21] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*[J], 1993, 362: 144~ 146.
- [22] Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 121: 227~ 244.
- [23] Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, *et al.* The Cretaceous Separation Point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere[J]. *Journal of Geological Society*, 1995, 152: 689~ 701.
- [24] Rapp R P, Wastson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8– 32 Kbar: implication for continental growth and crust – mantle recycling[J]. *J. Petrol.*, 1995, 36: 891~ 931.
- [25] Defant M J and Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*[J], 1990, 347(18): 662~ 665.
- [26] Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, *et al.* The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview[J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149: 569~ 579.
- [27] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite– tonalite– dacite genesis and crustal growth via slab melting: archaean to modern comparisons[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(B13): 21 503~ 21 521.
- [28] Sajona F G, Maury R, Bellon H, Cotton J, *et al.* Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines[J]. *Geology*, 1993, 21: 1 007~ 1 010.
- [29] Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Austral Volcanic Zone[J]. *Contrib. Miner. Petrol.*, 1996, 123: 263~ 28.
- [30] Prouteau G, Maury R C, Sajona F G, *et al.* Behavior of Niobium, Tantalum and other high field strength elements in adakites and related lavas from the Philippines[J]. *The Island Arc*, 2000, 9: 487~ 497.
- [31] Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. *J. Petrology*, 1996, 37: 1 491~ 1 521.
- [32] 李伍平, 王涛, 王晓霞. 秦岭灰池子花岗质复式岩体的源区讨论: 元素– 同位素地球化学制约. *地球科学*, 2001, 30(3): 269~ 278.
- [33] Simithies R H. The Archaean tonalite– trondhjemite– granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 182: 115~ 125.
- [34] 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 等. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学[J]. *科学通报*, 1998, 43(2): 133~ 137.
- [35] Furlong K P and Fountain D M. Continental crust underplating consideration and seismic-petrologic consequences[J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91(B8): 8 285~ 8 294.
- [36] 史兰斌, 林传勇, 陈孝德, 等. 由包体推导的河北汉诺坝下地壳—上地幔地温线及其地质意义. *地震地质*, 2000, 22(1): 37~ 46.
- [37] 樊祺诚, 刘若新. 汉诺坝玄武岩中高温麻粒岩捕虏体[J]. *科学通报*, 1996, 41(3): 235~ 238.
- [38] 陈绍海, 张国辉, 周新华, 等. 汉诺坝玄武岩中麻粒岩类捕虏体的岩石学特征[J]. *岩石学报*, 1998, 14(3): 366~ 380.
- [39] 张国辉, 周新华, 陈绍海, 等. 汉诺坝麻粒岩锆石 U—Pb 分析结果及讨论[J]. *科学通报*, 1997, 42(1): 6~ 8.
- [40] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 248~ 255.
- [41] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义[J]. *岩石学报*, 2001, 14(2): 236~ 244.
- [42] 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲, 等. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型[J]. *现代地质*, 1996, 10(2): 137~ 148.

- [43] 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期火山岩构造组合与造山-深部过程[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 41~48.
- [44] 张之一, 李红阳. 推覆构造在太平洋东西两岸的表现及其成因机制的探讨[J]. 河北地质学院学报, 1993, 16(5): 474~480.
- [45] 张长厚, 宋鸿林. 燕山板内造山带中生代逆冲推覆构造及其与前陆褶冲带的对比研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(1): 33~36.
- [46] Beard J S, Lofgren G E. Dehydration melting and water_saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6.9 kb[J]. J. Petrol, 1991, 32: 365~401.
- [47] Rushmer T. Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid_absent conditions[J]. Contrib. Mineral. Petrol, 1991, 107: 41~59.
- [48] Patino_Douce A E and Beard J S. Dehydration_melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 2~15 kbar[J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 707~738.
- [49] Wolf M B and Wyllie P J. Dehydration_melting of amphibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1994, 115: 369~383.
- [50] Vielzeuf D, Schmidt M W. Melting relations in hydrous systems revisited: application to metapelites, metagreywackes and metabasalts[J]. Contrib. Mineral. Petro., 2001, 141: 251~267.
- [51] Rushmer T. Experimental high_pressure granulites: some application to natural mafic xenolith suites and Archean granulite terranes[J]. Geology, 1993, 21: 411~414.

Genesis of Late Jurassic Trachyandesite in Western Hills of Beijing and Its Geological Implications

LI Wu_ping^{1,2}, LU Feng_xiang³, LI Xian_hua¹

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 2. Department of Earth Sciences, Chang'an University, Xi'an 710054; 3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract: Late Jurassic trachyandesites from Tiaojishan Formation in Western Hills of Beijing are similar to adakitic rocks in geochemical characteristics. They contain high SiO₂ (> 56%), Al₂O₃ (16.33% ~ 17.9%), Na₂O (3.11% ~ 4.8%), Na₂O + K₂O (6.11% ~ 8.10%), K₂O (1.64% ~ 3.59%) and CaO (3.68% ~ 5.82%), low MgO (< 3.0%, Mg[#] ≤ 0.50), high Sr (554 × 10⁻⁶ ~ 1258 × 10⁻⁶), low Yb (< 1.70 × 10⁻⁶) and low Y (< 21 × 10⁻⁶), and have high Sr/Y, Y/Yb and Na₂O/K₂O ratios and low Rb/Sr ratios. In addition, they are characterized by strongly fractionated REE and absence of Eu anomaly. It is thought that the trachyandesites are derived from partial melting of lower_crust calc_alkaline basaltic rock and are related to the underplating of basic magma. Based on the geochemical features, the depth of magma is less than 50 km.

Key words: trachyandesite; lower_crust calc_alkaline basaltic rock; partial melting; underplating; Late Jurassic; Western Hills of Beijing