

文章编号: 1000- 6524(2001) 02- 0123- 11

北京西山髻髻山组火山岩的地球 化学特征与岩浆起源

李伍平^{1,2}, 路凤香³, 李献华¹, 周瑶琪⁵, 孙善平⁴
李家振⁴, 章大港⁵

(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; 4. 中国地质大学地质系, 北京 100029; 5. 石油大学油气资源与环境地质研究所, 山东 东营 257062)

摘要: 对北京西山髻髻山组粗安岩斜长石 Ar- Ar 年龄测定获得全坪年龄和等时线年龄分别为 $148.91 \text{ Ma} \pm 2.98 \text{ Ma}$ 和 $146.60 \text{ Ma} \pm 2.93 \text{ Ma}$ (相关系数 $r = 0.9997$), 本文将其时代划为晚侏罗世。元素- 同位素地球化学显示, 西山髻髻山组火山岩主要为高钾钙碱性系列, 低 Ti、K, 高 Al、Ca 和 Na, 轻稀土元素富集, Eu 异常不明显, 大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba 等相对富集, 高场强元素 Nb、Ta、Ti、Zr、Hf 相对亏损, Nd、Sr 和 Pb 同位素比值较低, 反映出火山岩形成于岛弧或活动大陆边缘, 其源岩为富集地幔。据此认为髻髻山组火山岩形成于陆内挤压环境, 由中生代玄武质岩浆底侵于下地壳- 壳幔过渡带诱发古老(太古宙)的玄武质岩石部分熔融形成的。

关键词: 髻髻山组; 下地壳- 壳幔过渡带; 玄武质岩石; 晚侏罗世; 陆内造山带; 北京西山

中图分类号: P588.14; P595 **文献标识码:** A

北京地区分布着大量的中生代髻髻山组火山岩, 其成因一直受到地质工作者的关注。近年来, 对该火山岩进行的岩石化学和地球化学研究取得了不少研究成果^[1-5], 但普遍缺乏系统的元素- 同位素资料, 因而制约了对火山岩源区的深入研究。为此, 本文着重对髻髻山组火山岩进行元素- 同位素地球化学研究, 探讨岩浆的起源与演化。

1 区域地质背景

北京地区地处中朝准地台北缘燕山台褶带的西段^[6], 燕山运动以来开始进入了“地台活化”阶段, 岩浆活动强烈。北京西山、赤城-延庆、宣化-蔚县等地分布着大量的髻髻山组火山岩, 以北京西山髻髻山和百花山一带向斜核部中基性火山岩最为发育, 厚度达 1 000~3 400 m, 系该组命名地。以北京地区大台剖面为例, 髻髻山组分为三段: 一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砂砾岩为区域性角度不整合; 二段分布较广, 主要为复成分砾岩和安山质砾岩, 与一段为整合接触; 三段分布也较广, 主要为各种中基

收稿日期: 2000- 10- 11; 修订日期: 2001- 01- 15

基金项目: 国土资源部“九五”重大基础项目(9501111); 国家自然科学基金资助项目(49602037) 及国家杰出青年科学基金项目(49725300)

作者简介: 李伍平(1963-), 男, 博士, 副教授, 多年从事区域地质学和岩石学的科研和教学工作。

性熔岩和火山角砾熔岩、火山角砾岩夹凝灰质砂岩、砂泥岩、砂砾岩等,是髻髻山组火山岩的主体,与二段为整合接触。地层总厚约 1 250 m^①。在区域上被张家口组或东岭台组角度不整合覆盖^②。

关于髻髻山组地层时代有不同认识,有中侏罗世^[2]和晚侏罗世^{[1,4] ① ②}之分。笔者对髻髻山组底部粗安岩进行了斜长石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄测试,获得全坪年龄和等时线年龄分别为 148.91 Ma ± 2.98 Ma 和 146.60 Ma ± 2.93 Ma,故将其划为晚侏罗世(表 1,图 1)。

表 1 北京西山髻髻山组斜长石⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄分析结果

Table 1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar Plateau ages of Plagioclase from trachyandesites of Tiaojishan Formation in Western Hills

stage	t/℃	³⁹ Ar%	⁴⁰ Ar%	Ra(Ar%)	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁹ Ar/ ³⁶ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	Σ ³⁹ Ar%	T/Ma
1	320	1.41	1.57	72.18	1063.381	45.5732	7.490074	1.41	165.42 ± 5.49
2	440	2.30	2.46	73.30	1107.029	50.1398	7.413544	3.71	159.33 ± 3.50
3	600	5.10	5.16	86.32	2167.029	122.2973	3.890932	8.81	150.85 ± 8.64
4	680	11.34	11.24	89.32	2778.592	166.0080	2.147010	20.15	147.58 ± 0.83
5	810	10.73	10.75	91.36	3437.731	207.7492	2.633845	30.88	149.17 ± 0.68
6	930	18.40	18.11	92.29	3855.923	239.8559	1.788179	49.28	146.51 ± 0.91
7	1030	29.30	29.19	94.41	5339.95	335.7644	1.349153	78.58	148.21 ± 0.87
8	1130	13.40	13.52	91.31	3417.769	204.9458	2.402575	91.98	150.20 ± 1.03
9	1240	5.34	5.31	89.30	2774.153	154.5693	6.014196	97.32	148.57 ± 1.26
10	1340	2.68	2.70	85.53	2048.595	114.7053	6.332960	100	150.67 ± 1.85

注:样品采集于北京西山燕翅髻髻山组三段底部(永定河剖面沿公路 55.280 km 处),岩性为紫色安山岩,样品新鲜。样品经破碎、清洗和分选后挑选出斜长石晶体(纯度 > 99%),送中国科学院广州地球化学研究所分析。实验条件:斜长石经快中子均匀照射 53 小时后(快中子积分通量达到 1.34×10^{18} n/cm²)冷却 106 天,采用标准样品(ZBH-2506, J 值为 5.6989×10^{-3} ,即⁴⁰Ar/³⁹Ar=13.32)进行校正。⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄测定在 MM1200 质谱仪上进行。

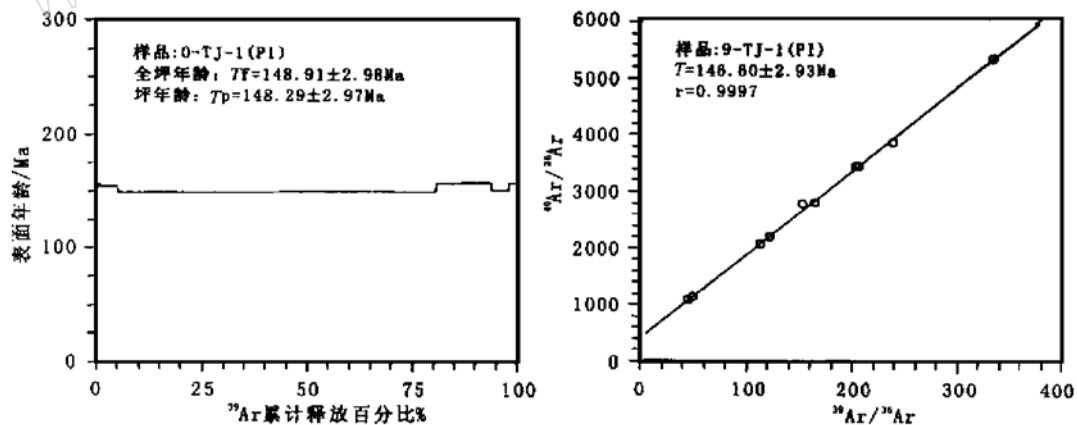


图 1 髻髻山组粗安岩斜长石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄谱(a)及等时线图(b)

Fig. 1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar plateau age and isochron age of plagioclase from trachyandesite of Tiaojishan Formation

① 北京市地质矿产局,中国地质大学(北京). 1:5 万大台幅区域地质调查报告,1990,172~190.

② 北京市地质矿产局,中国地质大学(北京). 1:5 万怀柔县幅区域地质调查报告,1991,19~29.

2 岩相学特征

髻髻山组火山岩以中性熔岩和火山碎屑岩为主。常见以下岩石类型:

2.1 粗安岩

为髻髻山组主要岩石类型。岩石呈灰绿色、紫色,斑状结构,块状、杏仁状构造。斑晶以斜长石为主,少量单斜辉石和角闪石,斑晶粒径 $2\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,含量 $5\% \sim 15\%$ 。对这些矿物研究表明^{①[7]},其中斜长石($\text{An}_{1-66}\text{Ab}_{33-99}\text{Or}_{<8}$),属于高拉长石、高中长石和高钠长石;单斜辉石($\text{Wo}_{42-51}\text{En}_{37-48}\text{Fs}_{10-19}$)属于普通辉石和透辉石;角闪石 Al_2O_3 为 $10.27\% \sim 13.60\%$, $\text{Si}/(\text{Si} + \text{Al} + \text{Ti})$ 比值为 $0.69 \sim 0.76$,相当于幔源角闪石^[8]。杏仁体由绿泥石、绿帘石、石英和方解石等组成,含量 $10\% \sim 20\%$,大小在 $1 \sim 3\text{ mm}$ 。斜长石斑晶正环带发育,角闪石暗化明显。基质为微晶或交织结构。副矿物为磷灰石和磁铁矿等。

2.2 紫红色玄武粗安质角砾熔岩及角砾集块岩

分布较广泛。具角砾熔岩结构、角砾结构,块状构造。角砾成分与胶结物基本一致,为玄武粗安岩和粗安岩;角砾为次棱角状到次浑圆状,砾径大小不等,含量 $15\% \sim 35\%$ 。基质为微晶结构。

2.3 浅灰绿色安山质角砾凝灰岩

具角砾凝灰结构,角砾含量 $10\% \sim 30\%$ 。角砾以次棱角状为主,成分主要为不同类型的安山岩与安山质凝灰岩及少量的异源角砾,如凝灰质砂岩、粉砂岩等,角砾含量 $15\% \sim 30\%$ 。

3 元素-同位素地球化学特征

在收集前人资料的基础上,本文选择了代表性岩石进行了常量元素、微量元素及 Nd、Sr、Pb 同位素分析(分别见表 2、表 3、表 4)。

3.1 主量元素特征

(1) 在 TAS 图解中(图 2),样品投影点位于碱性和非碱性系列分界线的两侧,主要岩石类型为玄武粗安岩、粗安岩,玄武安山岩、安山岩类较少,个别投影点落入粗面玄武岩、粗面岩和粗面英安岩区。在 FAM 图解中,样品落入钙碱性岩浆演化趋势线上。

(2) 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 3)上,绝大部分落入高钾钙碱性系列,少量落入钾玄岩系列。

(3) SiO_2 和 $\text{Mg}^\#$ 频率基本呈正态分布,其中 SiO_2 在 58% 左右出现高峰; $\text{Mg}^\#$ 在 0.45 处出现高峰, $\text{Mg}^\# \leq 0.55$ ($0.28 \sim 0.55$),说明主要为中性岩浆(图 4)。

(4) 除极个别样品外,绝大多数样品 $\text{TiO}_2 < 1.30\%$ ($0.23\% \sim 1.74\%$), $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ ($15.25\% \sim 19.98\%$), $\text{MgO} > 1.06\%$ ($0.96\% \sim 5.49\%$), $\text{CaO} > 2.0\%$ ($1.62\% \sim 7.99\%$), $\text{Na}_2\text{O} > 3.10\%$ ($3.10\% \sim 5.78\%$), $\text{K}_2\text{O} > 1.6\%$ ($1.58\% \sim 4.90\%$), $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 5.0\%$

① 北京市地质矿产局,中国地质大学(北京). 1:5 万大台幅区域地质调查报告,1990,172~190.

表2 髻髻山组火山岩主量元素和微量元素分析结果

Table 2 Analyses of major elements and trace elements in volcanic rocks of Tiaojishan Formation

样号	$w_B/\%$													合计	Mg [#]	A/NCK
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂			
Tj- 1	57.14	1.08	16.33	6.64	0.78	0.09	2.56	5.82	4.47	1.64	0.59	1.47	1.00	99.63	0.40	0.83
Tj- 10	56.44	0.84	17.71	1.66	4.36	0.08	2.72	5.63	3.11	3.34	0.49	2.40	0.84	99.63	0.45	0.93
Tj- 12	51.42	1.29	17.53	2.63	5.83	0.13	4.59	5.39	3.81	2.35	0.43	3.93	0.38	99.63	0.50	0.94

样号	$w_B/10^{-6}$														ΣREE	δEu	
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			Y
Tj- 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	184.88	0.98
Tj- 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	173.33	0.95
Tj- 12	25.76	54.75	7.38	30.93	5.81	1.81	4.82	0.69	3.47	0.68	1.67	0.26	1.47	0.24	18.12	157.86	1.01

样号	$w_B/10^{-6}$																
	Cr	Co	Ni	U	Th	Pb	V	Rb	Sr	Ba	Cs	Ta	Nb	Hf	Zr	Sc	Ga
Tj- 1	44	18.0	23.0	0.4	6.4	14.7	128	15.9	1258	1194	2.08	0.57	9.3	4.1	156	9.5	19.7
Tj- 10	10	18.0	11.0	0.9	10.5	15.8	130	61.5	1200	1315	3.19	0.41	9.6	4.7	173	9.2	16.3
Tj- 12	33	36.0	26.1	0.6	9.9	22.6	263	42.4	660	893	1.89	0.24	8.7	4.0	141	17.0	17.0

注: 样品由湖北省地质实验研究所分析, 主量元素采用碱熔玻璃片荧光分析(XRF), 微量元素采用 ICP-AES 分析。

表3 髻髻山组火山岩微量元素分析结果

Table 3 Analyses of trace elements in volcanic rocks of Tiaojishan Formation

样号	$w_B/10^{-6}$																	
	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Dy	Yb	Lu	Cr	Co	V	Th	Rb	Sr	Ba	Cs	Ta
B005- 2	42.5	79.8	33.0	5.35	1.60	0.66	2.9	2.0	0.33	24.0	8.3	56	8.37	70	690	1380	0.70	0.4
B005- 3	43.3	87.4	38.0	6.16	1.80	0.60	3.6	2.1	0.33	36.0	18.8	114	9.05	66	960	1010	1.00	0.4
B005- 6	35.3	65.0	24.0	5.00	1.50	0.40	2.6	1.3	0.20	78.2	21.6	150	4.00	24	104	500	0.60	0.5
B005- 7	43.4	84.9	44.0	6.47	2.31	0.63	3.0	1.8	0.28	3.2	13.4	116	2.99	62	870	1100	0.69	0.4
B006- 1	49.4	100.0	44.0	7.57	2.30	1.10	3.0	1.8	0.26	5.2	17.6	137	4.97	45	1000	1180	0.55	0.5
B006- 2	56.4	113.0	52.0	7.83	2.80	1.00	4.4	1.8	0.26	3.3	14.7	119	4.84	45	330	1530	0.50	0.5
B006- 3	37.3	16.0	38.0	5.88	2.50	0.32	3.0	1.5	0.21	3.9	14.1	108	2.90	29	1040	1310	0.50	0.5
B007- 1	35.2	74.8	44.0	6.19	2.10	0.88	3.5	1.3	0.24	58.0	24.7	174	2.60	22	1020	700	0.60	0.6
B007- 2	34.7	63.9	28.0	4.91	1.90	0.58	3.3	1.3	0.21	36.0	19.8	137	2.50	35	930	1440	0.60	0.5
B007- 3	49.6	90.6	43.0	6.21	1.90	0.70	3.6	2.7	0.22	3.3	13.3	107	3.70	63	1210	2110	1.10	0.4
B007- 4	41.3	77.0	47.0	5.76	2.03	0.44	3.2	1.3	0.25	7.6	14.4	103	3.50	49	1210	1820	0.40	0.4
B008- 1	39.7	79.3	36.0	6.41	2.40	0.59	3.0	1.5	0.21	7.8	22.7	190	3.40	30	1140	1230	0.60	0.37

样号	$w_B/10^{-6}$		$w_B/10^{-2}$							A/NCK						
	Hf	Sc	La _N /Lu _N	La _N /Yb _N	Yb _N	La/Sm	Sm/Nd	Rb/Sr	Al ₂ O ₃		TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MnO	TFeO
B005- 2	5.87	9.30	13.80	15.24	11.76	7.94	0.16	0.10	15.98	0.68	4.22	5.08	2.18	0.06	5.45	0.95
B005- 3	8.13	9.90	14.06	14.79	12.35	7.03	0.16	0.07	18.15	1.03	3.01	5.01	5.01	0.11	6.35	0.88
B005- 6	4.18	15.10	18.92	19.48	7.65	7.06	0.21	0.23	13.88	0.88	0.84	2.79	5.29	0.11	6.44	0.92
B005- 7	4.70	8.50	16.61	17.29	10.59	6.71	0.15	0.07	18.68	0.95	2.41	4.60	4.48	0.12	6.51	1.02
B006- 1	5.92	11.70	20.36	19.69	10.59	6.53	0.17	0.05	16.11	1.08	2.77	4.84	4.13	0.09	6.84	0.87
B006- 2	6.25	10.70	23.25	23.12	10.29	7.20	0.15	0.14	16.93	1.03	3.13	4.93	3.12	0.09	6.20	0.99
B006- 3	4.30	7.90	19.04	17.84	8.82	6.34	0.15	0.03	19.36	0.85	3.37	4.34	4.77	0.12	6.59	0.99
B007- 1	4.16	18.20	15.72	19.42	7.65	5.69	0.14	0.02	18.27	1.20	1.08	4.25	8.06	0.10	8.21	0.80
B007- 2	3.90	14.20	17.71	19.15	7.65	7.07	0.18	0.04	16.43	0.93	2.89	3.80	5.26	0.08	6.57	0.87
B007- 3	5.42	7.77	24.16	13.18	15.88	7.99	0.14	0.05	19.83	0.82	4.94	3.37	4.07	0.09	5.62	1.08
B007- 4	5.24	8.96	17.70	22.79	7.65	7.17	0.12	0.04	16.91	0.82	3.73	3.83	4.95	0.08	6.55	0.87
B008- 1	4.60	1.34	20.26	18.98	8.82	6.19	0.18	0.03	18.66	1.33	2.89	4.93	6.39	0.09	7.83	0.82

注: 由北京高能物理所采用中子活化分析, 其中的主量元素由 Al、Ca、Mn、Na、K 等元素分析结果换算而来。

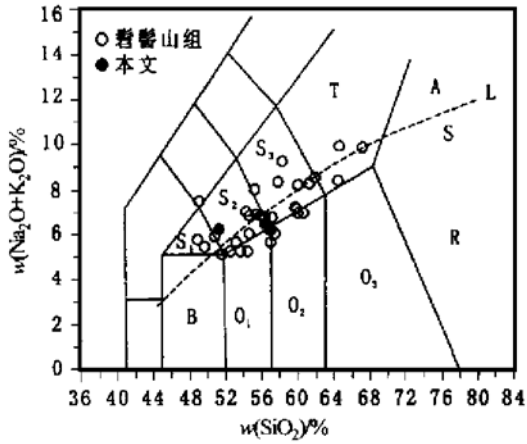


图2 北京西山髻髻山组火山岩 TAS 图解(据文献[9])

Fig. 2 TAS diagram for volcanic rocks of Tiaoji-shan Formation, western Hills

B—玄武岩; O₁—玄武安山岩; O₂—安山岩; O₃—英安岩; S₁—粗面玄武岩; S₂—玄武粗安岩类: 钾玄岩(Na₂O - 2 < K₂O), 橄粗安岩(Na₂O - 2 > K₂O); S₃—粗面安山岩: 安粗岩(Na₂O - 2 < K₂O); 歪长粗面岩(Na₂O - 2 > K₂O); T—粗面岩类(Q < 20%), 粗面英安岩(Q > 20%); R—流纹岩; L—线为碱性(A)与非碱性(S)系列的分界线; 除本文资料外, 其它资料来自于[3], ①

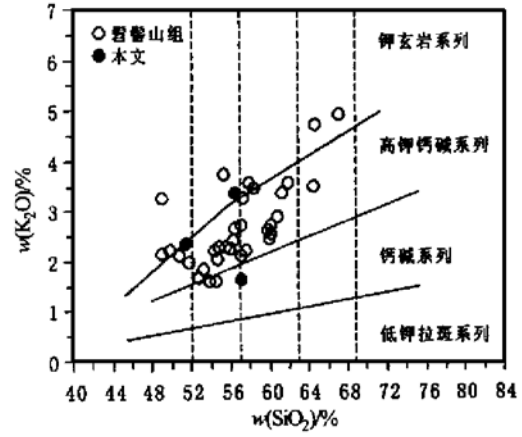


图3 K₂O-SiO₂ 关系图解(据文献[11])

Fig. 3 K₂O versus SiO₂ diagram

(资料来源同图2)

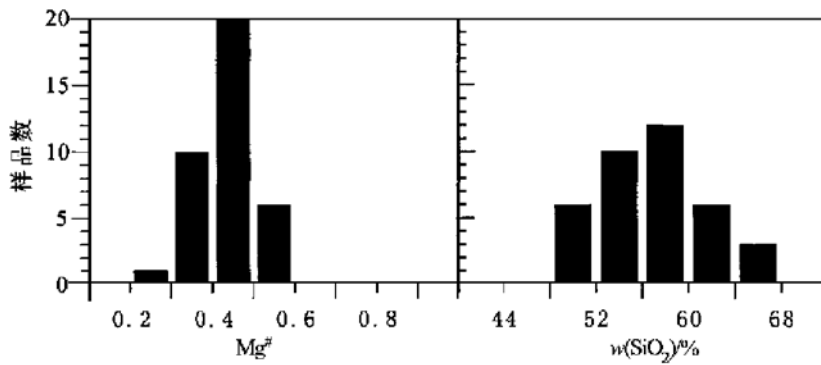


图4 SiO₂ 和 Mg[#] 频率图

Fig. 4 Frequency diagrams of SiO₂ and Mg[#]

(资料来源同图2)

(5.05% ~ 9.90%), Na₂O / K₂O > 1, Na₂O / CaO < 2.0 (0.45 ~ 2.33)。岩石总体上反映出富 Al、Ca、Na 贫 K、Ti 的特点。

① 北京市地质矿产局, 中国地质大学(北京). 1:5 万大台幅区域地质调查报告, 1990, 172~190.

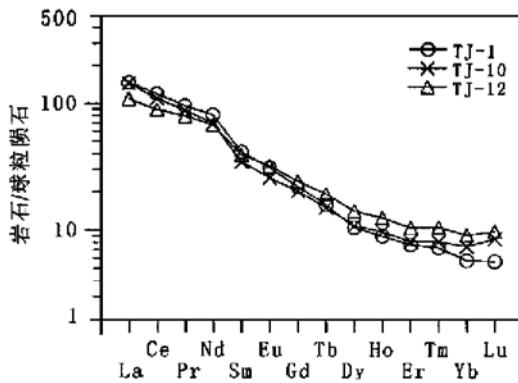


图5 稀土元素配分曲线模式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of volcanic rocks in Tiaojishan Formation

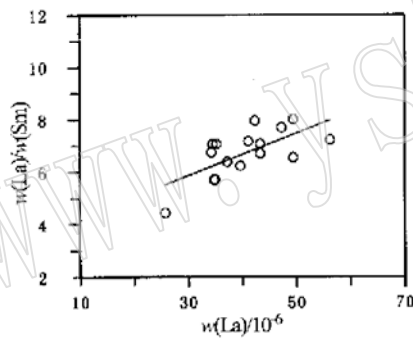


图6 La- La/Sm 关系图解

Fig. 6 La versus La/Sm diagram

(5) 大部分样品铝饱和指数 $A/NCK < 1$ (0.71~0.98), 说明岩石主要属准铝质类型。

3.2 微量元素特征

(1) 微量元素含量变化不大, 反映了可能的同源性。稀土元素总量中等, δEu 基本无异常, 轻重稀土元素分馏明显 [$(La/Yb)_N = 12.57 \sim 34.99$, 标准值引用 Sun *et al.*, 1989^[10]], 稀土元素配分曲线为向右倾斜的轻稀土元素富集型(图5)。造成 δEu 基本无异常的原因可能与岩浆中斜长石结晶分异较弱有关。这一点与图6中显示出部分熔融作用的特点相吻合。

(2) $Y < 18.12 \times 10^{-6}$, $U < 1.0 \times 10^{-6}$;

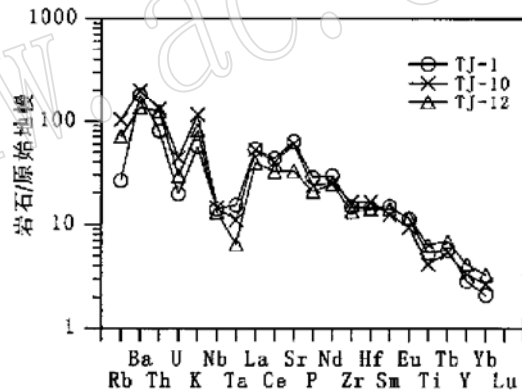


图7 微量元素蛛网图

Fig. 7 Primarymantle-normalized incompatible element spidergrams of volcanic rocks (原始地幔标准值采用 Sun *et al.* (1989) 数据)

$Th < 10.5 \times 10^{-6}$, $Sm/Nd < 0.20$, $Nb/Y < 1.0$, 大多数样品 Ba Sr 等元素及 Sr/Y 比值较高, 与正常火山弧火山岩不同^[11]。

(3) 在微量元素蛛网图中(图7), 出现了 Rb、U、Nb、Ta、Zr、P 和 Ti 负异常, Ba、Th、K、Th、Sr 正异常, 反映了岩浆较低的分异结晶程度和岛弧与活动大陆边缘的特点, 与 FeO-MgO-Al₂O₃ (Pearce *et al.*, 1977^[12]) 构造判断图解一致。在 $(La/Lu)_N$ 与 Nb/Nb^* 图解中(图略), 投点大致呈水平线, 说明岩浆发生混合或受到地壳的混染较弱^[13]。

3.3 同位素特征

(1) 髻髻山组火山岩的 $^{147}Sm/^{143}Nd$ 与 $^{144}Nd/^{143}Nd$ 呈线性相关, 可能与岩石长期演化有关。尽管 $^{147}Sm/^{143}Nd$ 和 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 变化范围较大, 但 $(^{144}Nd/^{143}Nd)_i$ (0.511658~0.511687) 和 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.705748~0.706072) 变化范围较小, $\epsilon Sr(149 Ma)$ 为 20.13~24.88, ϵNd

(149 Ma) 为 $-15.66 \sim -14.93$ 。 $f_{Sm/Nd}$ 和 Rb/Sr 比值较低, 分别为 $-0.22 \sim -0.81$ 和 $0.002 \sim 0.056$ 。 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 比值较低(分别为 $16.37 \sim 17.37$ 、 $15.19 \sim 15.38$ 和 $36.19 \sim 37.01$), 说明髻髻山组火山岩源区放射成因 Pb 较低。与燕山造山带前寒武纪结晶基底基性麻粒岩($^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 分别为 $15.18 \sim 17.12$ 、 $14.80 \sim 15.50$ 和 $35.43 \sim 37.76$)^①和中生代花岗岩 Pb 同位素相似^[14]。但与美国盆岭地区、日本 Aso-Towada 地区及安底斯型活动大陆边缘以洋壳熔融形成的中酸性火山岩同位素组成截然不同^[15, 16], 类似于 EMI 古老的岩石圈地幔或大陆下地壳或大陆岩石圈太古宙岩石的同位素组成^[17], 故推测髻髻山组火山岩的源岩可能为古老的太古宙变质基性岩。

表4 髻髻山组火山岩 Nd 和 Sr 同位素分析结果

Table 4 Isotopic analyses of Nd and Sr in volcanic rocks of Tiaojishan Formation

样号	Sm/10 ⁻⁶	Nd/10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	Rb/10 ⁻⁶	Sr/10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	$f_{Sm/Nd}$
Tj-1	5.16	35.01	0.0891	0.511758	17.39	1338	0.0367	0.705826	40	-0.55
Tj-4	4.65	28.44	0.0983	0.511783	26.60	823	0.0912	0.706265	29	-0.50
Tj-5	6.24	38.35	0.0984	0.511759						-0.50
Tj-10	8.79	34.60	0.1536	0.511835	37.33	667	0.1579	0.706117	24	-0.22
Tj-12	5.31	85.40	0.0376	0.511695	64.20	1345	0.1347	0.706169	29	-0.81
Tj-14	6.90	35.11	0.1188	0.511803	2.95	1382	0.0060	0.706048	29	-0.40

样号	εNd(t)	εSr(t)	T _{DM} (Ga)	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2σ
Tj-1	-15.32	20.13	1.70	0.705748	0.511671	16.373	0.007	15.187	0.003	36.188	0.003
Tj-4	-14.99	24.88	1.80	0.706072	0.511687	16.754	0.013	15.287	0.005	36.740	0.006
Tj-5	-15.46		1.83		0.511663						
Tj-10	-14.93	20.96	3.31	0.705783	0.511685	17.374	0.013	15.380	0.005	37.014	0.005
Tj-12	-15.66	22.33	1.26	0.705884	0.511658	16.683	0.006	15.375	0.004	36.959	0.004
Tj-14	-14.95	24.12	2.16	0.706035	0.511687	16.857	0.008	15.336	0.003	36.930	0.003

注: 1. Nd 和 Sr、Pb 同位素比值分别由核工业部地质分析测试中心和国土资源部“壳幔体系组成、物质交换及动力学开放实验室(武汉)承担; 2. $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值用 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.721900$ 标准化, 标准样品和溶液测定值分别为 GBW04419 (国标) $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.511846 \pm 0.000009$ (2σ), $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512725 \pm 0.000006$ (2σ), $Sm = 3.026 \times 10^{-6}$, $Nd = 10.15 \times 10^{-6}$; $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值用标准物质(La Jolla) $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.710203 \pm 0.000018$ (2σ) 标准化。标准样品和溶液测定值分别为 GBW04411 钾长石(国标) $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.760303 \pm 0.000044$ (2σ), $^{87}Rb/^{86}Sr = 4.425$, $Sr = 158.59 \times 10^{-6}$, $Rb = 247.57 \times 10^{-6}$ 。Pb 同位素分析标准样品为(NBS981Pb) $^{207}Pb/^{204}Pb = 0.91468 \pm 0.00003$ (2σ), Pb 全流程空白 2.5×10^{-9} g。样品测定在 MAT261 同位素质谱仪上完成。3. $t = 149$ Ma。

(2) 除样品 Tj-10 亏损地幔模式年龄(T_{DM})为 3.31 Ga 外, 其余样品 T_{DM} 为 1.26~2.16 Ga, 说明源区从地幔分异出来较早。

(3) 在 $^{144}Nd/^{143}Nd - 1/Nd$ 、 $^{87}Sr/^{86}Sr - 1/Sr$ 及 $\epsilon Nd - \epsilon Sr$ 图解中(图略), 投点趋势线近于水平, 说明源区均匀, 岩浆混合或混染作用不明显。这与主要造岩矿物中未发现斜长石反环带或其它非平衡矿物组合及深源包体相吻合。

4 讨论

从区域构造背景来看, 中生代俯冲带位置距北京西山一带的水平距离至少在 1500 km

① 罗毅, 周德安, 黄净白, 等. 燕辽地区火山岩热溶液型铀-金-多金属矿床成矿特征及分布规律(科研报告). 核工业部北京地质研究所, 1995.

以上,远大于目前已知的现代板块俯冲带最大水平距离($< 600 \text{ km}$)^[18],且源区无洋壳组成,显然,髫髻山组火山岩的形成与板块俯冲没有直接关系,属于陆内造山构造环境。因此,髫髻山组火山岩的地球化学特征主要取决于源区的性质。

髫髻山组火山岩的岩浆起源不外乎以下三种可能性:其一,岩浆由来自上地幔和下地壳的岩浆混合形成,并发生结晶分异作用^[4];其二,岩浆来自上地幔或下地壳,并受到地壳物质的混染^[2,3];其三,岩浆来自于大陆岩石圈地幔-下地壳基性岩石的部分熔融。根据前面元素-同位素分析,前两种可能性较小,后一种可能性较大。

(1) 利用 Hammarstrom 等(1986)^[20], Hollister 等(1987)^[21], Johnson 等(1989)^[22]和 Jonathan 等(1990)^[23]角闪石压力计以及 Blundy 等(1990)^[24]的斜长石-角闪石地质温度计,根据前人资料^[7],估算角闪石-斜长石结晶平衡时的温度为 $740 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$ (平均约为 $850 \text{ }^\circ\text{C}$),角闪石形成的最大深度约为 28.2 km 。白志民等(2000)^[25]根据 Putirka 等(1996)^[26]建立的单斜辉石-熔体平衡地质温压计获得单斜辉石形成时的最大温度和压力分别为 $1186 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 0.73 Ga ,形成深度相当于 24 km 。显然,岩浆结晶于相对低压($< 1.0 \text{ Ga}$,深度为 $24 \sim 28 \text{ km}$)中高温($740 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$)岩浆房内,相当于现今华北克拉通下地壳的上部^[27]。

据目前研究,中晚侏罗世燕山地区地壳的厚度($< 53 \text{ km}$)^[4]大于早白垩世地壳($\leq 40 \text{ km}$)^[29,30],地壳的厚度较大,存在一个增厚的地壳^[30],因此,髫髻山组火山岩的形成深度至少在 40 km 以上。

(2) 实验岩石学证实,①当 $t < 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, $p = 1.0 \text{ Ga}$ 时,含水二辉橄榄岩(水饱和与非饱和)部分熔融形成安山质岩浆;当 $t > 1100 \text{ }^\circ\text{C}$,则熔出玄武质岩浆^[31]。②含水玄武质岩石($t > 850 \text{ }^\circ\text{C}$)发生部分熔融形成中酸性岩浆,即使不含水的玄武质岩石在高温高压($950 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1150 \text{ }^\circ\text{C}$, $> 1.0 \text{ Ga}$,即地壳厚度 $> 40 \text{ km}$)条件下也能发生部分熔融(斜长石不稳定转变为单斜辉石^[32-35],形成相对偏碱性的中酸性岩浆(如粗安岩浆等),此时因缺乏斜长石的结晶分异 Eu 负异常不明显^[36]。因此,岩石圈地幔和下地壳玄武质岩石的部分熔融可以形成髫髻山组火山岩浆。

(3) 要使玄武质岩石发生大规模的部分熔融必须有持续的热能供应,底侵于下地壳的玄武质岩浆可能提供热能^[37]。燕山地区从晚侏罗世开始发生幔源岩浆的底辟作用,引起玄武质岩浆侵于下地壳-壳幔过渡带发生麻粒岩相变质作用^[29,30],并有可能诱发岩石圈地幔和玄武质岩石发生部分熔融。另外,虽然北京地区远离中生代俯冲带,但由于受到板块俯冲的影响在燕山造山带内部形成了 NW-SE 向主压应力和以左旋压扭性质的构造应力场^[38]及以挤压造山作用为主的构造变形^[39]。在这样以相对挤压为主的陆内构造环境下,岩石圈物质的封闭性好,渗透性弱,上侵玄武岩浆带去高温并绝大部分底侵于下地壳,有利于对岩石圈的加热,诱发下地壳古老的玄武质岩石的大规模的部分熔融形成中性岩浆^[40],因此,晚侏罗世燕山造山带的底侵作用引起下地壳-壳幔过渡带古老玄武质岩石的可能性存在。正是由于中晚侏罗世燕山造山带内部处于相对挤压状态,并且较厚的岩石圈有利于下地壳岩石的大部分熔融,使得基性岩浆喷发较少,造成了燕山造山带内部总体上以中性岩浆活动为主。

(4) 岩浆的形成主要表现为部分熔融,结晶分异较弱,壳幔岩浆混合的可能性比较弱。这点从图7不难看出。鲍亦冈等^[3](1995)和白志民等(2000)^[25]对髫髻山组熔岩的辉石成

分研究表明,自岩层下部到上部,辉石成分中Fs分子(即Fe、Mn)降低,而Wo、En分子(Ca、Mg)增加,这显然与岩浆结晶分异作用引起的单斜辉石Fe增加、Mg减少的趋势不一致,故认为髻髻山组熔岩可能主要受部分熔融作用的控制。这一认识与本文资料基本吻合。

5 结 论

(1) 北京地区髻髻山组火山岩主要为高钾钙碱性系列,岩浆起源于下地壳-壳幔过渡带古老(太古代)的玄武质岩石的部分熔融。造成源区岩石发生熔融的原因可能与中生代玄武岩浆的底侵作用有关。

(2) 岩浆在演化过程中以部分熔融作用为主,岩浆结晶分异作用较弱,壳幔岩浆混合作用可能性不大。

(3) 北京西山髻髻山组火山岩是陆内岩石圈挤压造山作用的产物,与中生代古太平洋板块俯冲无直接关系。

参考文献:

- [1] 廖群安, 邱家骥. 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): 14~23.
- [2] 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. 北京西山地质构造系统分析[C]. 北京: 地质出版社, 1995, 65~76.
- [3] 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.
- [4] 邱家骥, 廖群安. 北京地区中元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.
- [5] 河北省地质矿产局. 北京市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [6] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社, 1999, 29.
- [7] 刘厚祥. 燕辽地区中生代火山岩及其构造背景[D]. 北京: 中国地质大学, 1995.
- [8] 姜常义, 安三元. 论火成岩中钙质角闪石的化学组成及岩石学意义[J]. 矿物岩石, 1984, 4(3): 1~9.
- [9] LeMaitre R W, Bateman P, Dudek A, *et al.* A classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. Blackwell, Oxford, 1989.
- [10] Sun S S and McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society Special Publication [C]. 1989, No. 42: 313~345.
- [11] Defant M J and Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662~665.
- [12] Pearce J A and Gale G H. Identification of ore-deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks[J]. Geol. Soc. Spec. Publ., 1977, 7: 14~24.
- [13] Pin C and Marini F. Earth Ordovician continental break-up in Variscan Europe: Nd-Sr isotope and trace element evidence from bimodal igneous association of the southern Massif central, France[J]. Lithos, 1993, 29: 177~196.
- [14] 张理刚, 王可发, 陈振胜, 等. 中国东部中生代花岗岩长石铅同位素组成与铅同位素省划分[J]. 科学通报, 1993, 38(3): 254~257.
- [15] Hawkesworth C, S Turner, K Gallagher, *et al.* Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin

- and Range[J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100(B7): 10 271~ 10 286.
- [16] Hildreth W, and Moorbath S. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1988, 98: 455~ 489.
- [17] Rollison H. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[M]. London: Lonman Group Uk Limited, 1993.
- [18] Maruyama S, Lou J G and Seno T. Mesozoic and Cenozoic evolution of Asia[A]. Ben- Avraham Z. The evolution of the Pacific Ocean margin[C]. New York: Oxford University press, 1989, 75~ 99.
- [19] Doglioni C, Harabaglia P, Merlini S. *et al.* Orogens and slabs vs their direction of subduction[J]. *Earth Science Reviews*, 1999, 45, 167~ 208.
- [20] Hammarstrom J M and Zen E- an. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer[J]. *American mineralogist*, 1986, 71: 1 297~ 1 313.
- [21] Hollister L S, G C Grissom, E K Petes, *et al.* Confirmation of the empirical correlation of in hornblende with pressure of solidification of calc- alkaline plutons[J]. *American mineralogist*, 1987, 72: 213~ 239.
- [22] Jonson M C and M J Rutherford. Experimental calibration of the aluminum in hornblende geobarometer with application to Long Valleg caldera (California) volcanic rocks[J]. *Geology*, 1989, 17: 837~ 841.
- [23] Jonathan D B and J B H Timothy. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole- plagioclase geothermometer[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1990, 104(2): 208~ 224.
- [24] Blundy J D and T J B Holland. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole- plagioclase geothermometer[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1990, 104(2): 208~ 224.
- [25] 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.
- [26] Putirka K, Johnson M, Kinzler R, *et al.*, Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene- liquid equilibrium, 0~ 30kbar[J]. *Contributions to mineralogy and petrology*, 1996, (123): 92~ 108.
- [27] Gao Shan, Zhang Ben-ren, Jin Zhen-ming, *et al.* How mafic is the lower continental crust? [J] *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161: 101~ 117.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲, 等. 燕山地区燕山期火成岩与造山模型[J]. *现代地质*, 1996, 10(2): 137~ 148.
- [31] Hirose K. Melting experiments on lherzolite LKB- 1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melt[J]. *Geol.*, 1997, 25(1): 42~ 44.
- [32] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium- rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362: 144~ 146.
- [33] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1. 5Gpa and 2. 0Gpa: implication for the origin of adakites[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1994, 117: 394~ 409.
- [34] 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.
- [35] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, *et al.* Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3. 8Gpa[J]. *Chemical Geology*, 1999, 160: 335~ 356.
- [36] Huang W L, Wyllie P J. Phase relationships of gabbro- tonalite- granite- H₂O at 15kbar with applications to differentiation and anatexis[J]. *Am. Miner.*, 1986, 71: 301~ 316.
- [37] Guffanti M, Clyne M A, Muffler L J P. Thermal and mass implications of magmatic evolution in the Lassen volcanic region, California and constraints on basalt influx to the lower crust[J]. *J. of Geophysical Research*, 1996, 101: 3 001~ 3 013.
- [38] 李思田, 杨士恭, 吴冲龙, 等. 中国东部及邻区中生代裂陷作用的大地构造背景[A]. 王鸿祯等. 中国及邻区构造古地理和生物古地理[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990, 109~ 126.
- [39] 王 瑜. 北京西山及周边地区中生代构造演化与深层动力学[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, 57~ 64.

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

Geochemical Features and Origin of Volcanic Rocks of Tiaojishan Formation in Western Hills of Beijing

LI Wu_ping^{1,2}, LU Feng_xiang³, LI Xian_hua¹, ZHOU Yao_qi⁴,
SUN Shan_ping⁵, LI Jia_zhen⁵, ZHANG Da_gang⁴

(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; 4. Petroleum Resource and Environmental Geology Research Institute, University of Petroleum, Dongying 257062; 5. Department of Geology, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract: Tiaojishan Formation in Western Hills of Beijing was dated at Late Jurassic based on the Ar-Ar ages for tachyandesites (all plateau ages and isochrone ages of plagioclase are respectively 148.91 ± 2.98 Ma and 146.60 ± 2.93 Ma). Geochemistry of elements and isotopes show that volcanic rocks of Tiaojishan Formation are mainly of high_K calc_alkaline series characterized by indistinct Eu anomaly, relative enrichment of large_ion lithophile elements such as Rb, Sr and Ba, relative depletion of high field_strength elements (e. g. Nb, Ta, Ti, Zr, Hf), and low Nd, Sr and Pb ratios, suggesting the features of island_arc and active continental margin and enriched mantle. The authors think that volcanic rocks of Tiaojishan Formation were derived from partial melting of old_age (Archean) basaltic rocks of the lower crust and the crust_mantle transitive zone by the underplating of basaltic magma during intrcontinental orogeny.

Key words: Tiaojishan Formation; partial melting; the lower crust- the crust_mantle transitive zone; basaltic rocks; intrcontinental orogen zone; Western Hills of Beijing