

# 中祁连西段野马南山埃达克质花岗岩的 地球化学特征及成因

苏建平<sup>1,2</sup> 张新虎<sup>2</sup> 胡能高<sup>3</sup> 付国民<sup>3</sup> 张海峰<sup>2</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000;  
3. 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 祁连西段野马南山一带发育大量的加里东期花岗岩, 其中大部分花岗岩具有与 adakite 岩相似的地球化学特征,  $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15.0\%$ , 低  $\text{MgO}$  (平均 2.04%), 高  $\text{Sr}$  (257~889  $\mu\text{g/g}$ , 平均值 546.42  $\mu\text{g/g}$ ), 低  $\text{Y}$  (7.1~25.3  $\mu\text{g/g}$ , 平均 16.67  $\mu\text{g/g}$ ),  $\text{Sr}/\text{Y}$  平均为 35.89  $\mu\text{g/g}$ ,  $\text{Eu}$  无明显负异常,  $\text{Sr}$  正异常, Adakite 岩石类型有石英闪长岩、石英二长闪长岩、石英二长岩、角闪花岗岩、二长花岗岩, 岩石中普遍含有角闪石, 属 I 型花岗岩, 地球化学图解反映该花岗岩形成环境为板块碰撞前的岛弧型, 锆石  $\text{U}-\text{Pb}$  同位素年龄为  $444 \pm 38/-33 \text{ Ma}$ , 处在祁连造山带板块俯冲收缩阶段, 因此可以推断野马南山埃达克质 Adakite 花岗岩是俯冲板片部分熔融和壳幔岩浆混合形成的。这一发现对于丰富中国埃达克岩的研究和对祁连造山带演化、地球动力学以及成矿作用的研究具有重大意义。

**关键词:** 埃达克质花岗岩; 地球化学特征; 成因探讨; 野马南山; 祁连西段

**中图分类号:** P584, P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2004)04-0365-07

埃达克岩 (Adakite) 的概念是 1990 年由 Defant et al.<sup>[1]</sup> 提出来的, 指由俯冲的年轻洋壳熔融形成的火成岩, 很快被国际地质学界所认同<sup>[2-3]</sup>, 并指出具有和蛇绿岩的发现同等重要的意义。Adakite 不是指的某一种的岩石, 而是具有特定地球化学性质的一套中酸性火成岩组合的术语, 其地球化学标志是:  $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ , 高铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ ),  $\text{MgO} < 3\%$  (很少  $> 6\%$ ), 贫  $\text{Y}$  和  $\text{Yb}$  ( $\text{Y} \leq 18 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Yb} \leq 1.9 \mu\text{g/g}$ ),  $\text{Sr}$  含量高 ( $> 400 \mu\text{g/g}$ ), LREE 富集, 无  $\text{Eu}$  负异常,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  小于 0.704,  $\epsilon_{\text{Nd}}$  通常大于零<sup>[1,2]</sup>。埃达克岩的上述特征类似太古宙的高铝 TTD (或 TTG) 岩系, 通常解释为年轻的 ( $< 25 \text{ Ma}$ )、热的俯冲板片在 75~85 km 深处 (相当于角闪岩—榴辉岩过渡带) 发生部分熔融形成的<sup>[4]</sup>。Adakite 的研究由于对花岗岩成因、构造演化和成矿作用等的重大意义, 已成为当前地球动力学领域的前沿课题。自从最初在现代岛弧近 10 个地方报道埃达克岩以来, 新近又在几个地方发现有埃达克岩 (如日本西南部, 外墨西哥火山岩带, 等等), 随着过去十多年研究的不断深入, Adakite 的内涵和外延不断拓展, 从最初的新生代岛弧火山岩拓展到古老

地壳的火成岩, 岩石类型及其组合与成因类型也有极大的丰富, 埃达克岩的研究已与陆壳的生长、演化及地球动力学过程紧密联系在一起。

中国的埃达克岩的研究起步较晚, 2000 年始有报道<sup>[4-6]</sup>, 张旗等人研究了中国东部的埃达克岩的问题<sup>[7-9]</sup>, 提出了 O 型和 C 型埃达克岩的分类方案, 潘国强等<sup>[10]</sup>、熊小林等<sup>[11,12]</sup> 分别报道了大别山北淮阳中生代埃达克岩的特征和西天山埃达克岩的地球化学特征, 王强等<sup>[13,14]</sup> 讨论了扬子地块东部燕山期埃达克质岩与成矿的特征以及裴先治等<sup>[15]</sup> 对东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩进行了研究报道。笔者在祁连西段的区域地质调查中首次发现了野马南山加里东期的具有埃达克岩特征的花岗岩, 这一发现对于丰富中国埃达克岩的研究和对祁连造山带演化和地球动力学以及成矿作用的研究具有重要意义。

## 1 地质背景及岩相学特征

祁连造山带由于在中国西北大地构造中所处的关键位

收稿日期: 2004-12-18; 改回日期: 2004-07-15

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (90102003); 中国地质调查局地质大调查项目 (DK0002019) 资助。

作者简介: 苏建平, 男, 1970 年生, 博士生, 高级工程师, 主要从事区域地质, 环境地质研究工作; E-mail: suj21@163.com。

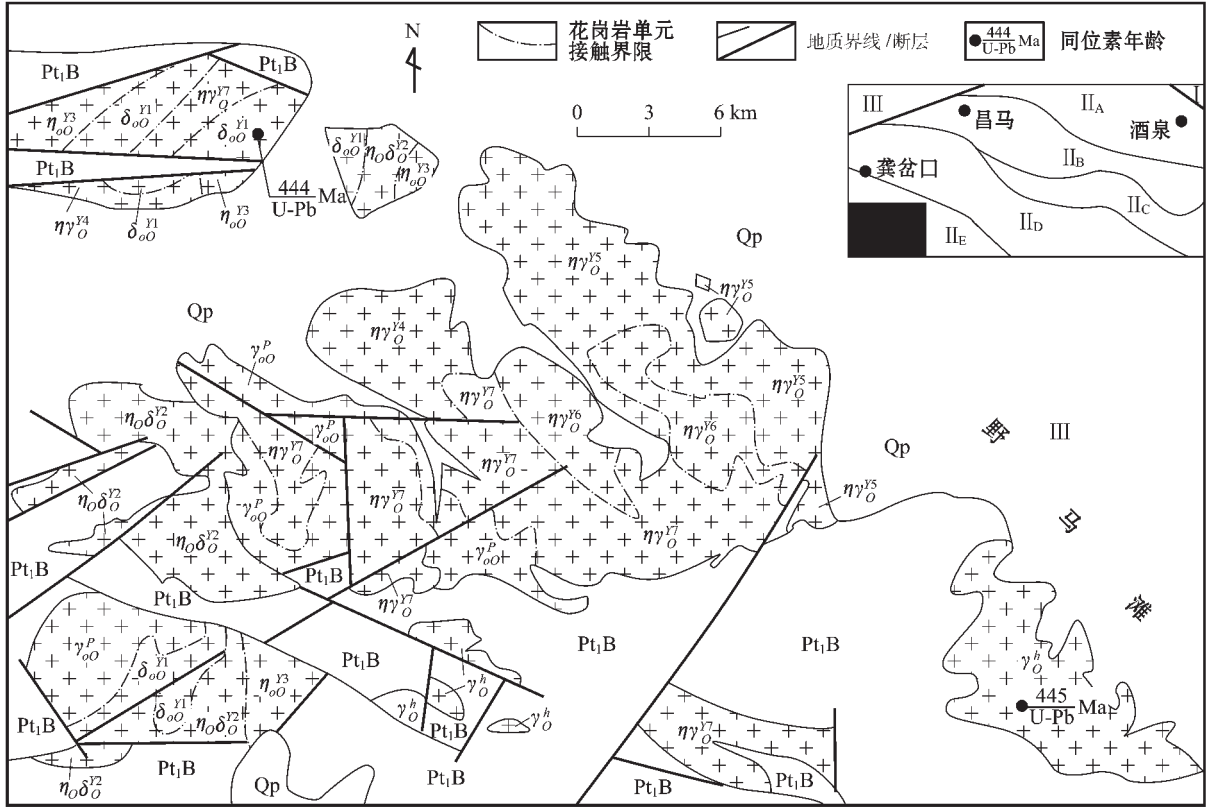


图1 野马南山地区地质略图

Qp—第四系;Pt<sub>1</sub>B—元古北大河岩群; $\gamma^h_o$ —黑沟梁子单元; $\gamma^p_o$ —平达坂单元; $\delta_{oo}^{Y1}$ —野马南山序列一单元;  
 $\eta_o \delta_o^{Y2}$ —野马南山序列二单元; $\eta_{\gamma_o}^{Y3}$ —野马南山序列三单元; $\eta_{\gamma_o}^{Y4}$ —野马南山序列四单元;  
 $\eta_{\gamma_o}^{Y5}$ —野马南山序列五单元; $\eta_{\gamma_o}^{Y6}$ —野马南山序列六单元; $\eta_{\gamma_o}^{Y7}$ —野马南山序列七单元

I—阿拉善地块;II<sub>A</sub>—走廊弧后盆地单元;II<sub>B</sub>—走廊南山早古生代活动陆缘;II<sub>C</sub>—祁连山单元;II<sub>D</sub>—托莱南山中新元古被动陆缘;  
 II<sub>E</sub>—野马南;南山单元;III—敦煌地块

Fig. 1 Geological sketch map of the Yema Nanshan area

Qp—Quaternary;Pt<sub>1</sub>B—Paleoproterozoic Beidahe Group-complex; $\gamma^h_o$ —Heiliangzi unit; $\gamma^p_o$ —Pingdaban unit; $\delta_{oo}^{Y1}$ —unit 1 of the Yema Nanshan sequence; $\eta_o \delta_o^{Y2}$ —unit 2 of the Yema Nanshan sequence; $\eta_{\gamma_o}^{Y3}$ —unit 3 of the Yema Nanshan sequence; $\eta_{\gamma_o}^{Y4}$ —unit 4 of the Yema Nanshan sequence;  
 $\eta_{\gamma_o}^{Y5}$ —unit 5 of the Yema Nanshan sequence; $\eta_{\gamma_o}^{Y6}$ —unit 6 of the Yema Nanshan sequence; $\eta_{\gamma_o}^{Y7}$ —unit 7 of the Yema Nanshan sequence;

I—Alxa block;II<sub>A</sub>—Corridor back-arc basin unit;II<sub>B</sub>—Corridor South Mountain early Palaeozoic active continent margin;  
 II<sub>C</sub>—Qilian Mountain unit;II<sub>D</sub>—Tuolai Nanshan Meso- and Neoproterozoic passive continent margin;  
 II<sub>E</sub>—Yema Nanshan unit III—Donghuang block

置和丰富而典型的地质构造现象,多年来一直成为中外地质学家关注的焦点之一。人们所取得的共识是北祁连造山带为典型的加里东期造山带,并对其裂解闭合、隆升造山的地质动力学过程具有较为一致的认识<sup>[16-20]</sup>,在加里东期造山之前,曾经历过早元古代和中晚元古代两次重大的“开合”。野马南山花岗岩体位于祁连造山带西段的大雪山以南的野马南山、平达坂口子等地,出露面积大于300 km<sup>2</sup>,花岗岩体侵位于下元古界的北大河岩群(Pt<sub>1</sub>B)中,北缘被第四纪覆盖(图1)。由于自然条件艰苦,对于该造山带中的花岗岩的研究相对比较薄

弱,前人对该岩体的研究仅为1:20万区域地质调查。笔者运用岩浆同源演化理论建立了该花岗岩的谱系单元,划分为7个单元,归并为一个序列,其中一单元为中粒黑云母石英闪长岩( $\delta_{oo}^{Y1}$ );二单元为中粗粒黑云母石英二长闪长岩( $\eta_o \delta_o^{Y2}$ );三单元为中粒角闪石英二长岩( $\eta_{\gamma_o}^{Y3}$ );四单元为中粒黑云母石英闪长岩( $\eta_{\gamma_o}^{Y4}$ );五单元为似斑状角闪花岗岩( $\eta_{\gamma_o}^{Y5}$ );六单元为似斑状黑云母二长花岗岩( $\eta_{\gamma_o}^{Y6}$ );七单元为中粒黑云母二长花岗岩( $\eta_{\gamma_o}^{Y7}$ ),各单元以脉动或涌动接触,

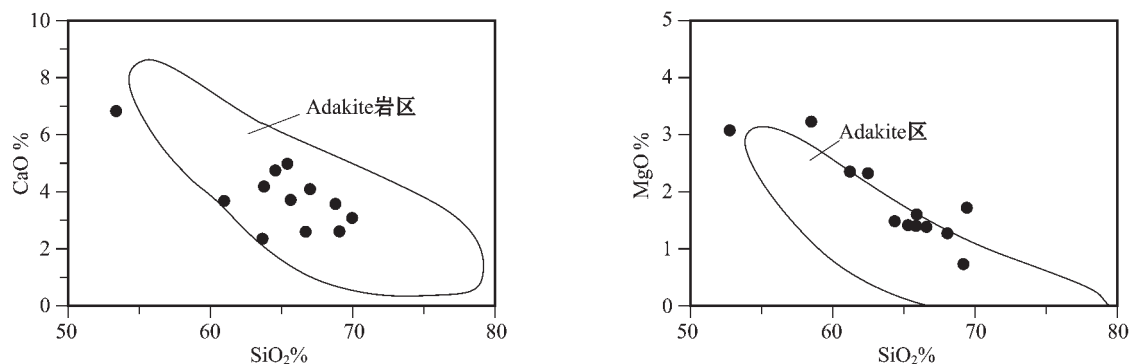


图 2 CaO—SiO<sub>2</sub> 和 MgO—SiO<sub>2</sub> 图解<sup>[3]</sup>

Fig. 2 Diagrams of CaO—SiO<sub>2</sub> and MgO—SiO<sub>2</sub><sup>[3]</sup>

表 1 野马南山埃达克质花岗岩的岩石化学 (%)、稀土和微量元素 (μg/g)组成

Table 1 Major element (%), REE and trace element (μg/g) compositions of Yema Nanshan adakitic granites

单元	1		2		3		4		5		6		7		Adakite <sup>[1]</sup>
样号	X-21	X-16	X-19	X-20	X-15	X-17	X-26	X-12	X-25	X-13	X-14	X-10			
SiO <sub>2</sub>	60.33	63.56	65.88	64.83	63.65	52.85	69.6	67.11	68.64	66.73	68.41	66.36			>56
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.60	0.34	0.40	0.53	0.86	0.04	0.37	0.03	0.37	0.29	0.38			>15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.27	16.12	16.17	16.13	16.88	18.62	15.27	16.15	15.53	15.01	16.76	16.7			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.53	1.46	2.2	2.82	1	4.61	1.4	1.74	0.81	1.82	1.72	1.66			
FeO	4.1	4.1	2.64	2.96	2.57	6.95	2.8	2.44	2.09	2.76	1.35	2.57			
MnO	0.16	0.11	0.16	0.13	0.11	0.24	0.13	0.11	0.09	0.11	0.09	0.10			
MgO	3.45	2.62	1.66	1.75	2.63	3.11	1.84	1.48	1.46	1.87	0.85	1.79			<3
CaO	5.99	4.42	5.19	5.04	4.11	6.78	3.27	4.16	2.51	2.47	3.66	3.92			
Na <sub>2</sub> O	3.23	2.78	2.30	2.40	2.62	2.30	3.21	2.78	3.99	2.80	3.66	2.50			>3.5
K <sub>2</sub> O	2.9	3.64	2.36	2.48	3.91	1.19	3.08	2.92	3.98	4.31	2.69	2.68			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.18	0.22	0.20	0.18	0.27	0.02	0.17	0.02	0.17	0.11	0.17			
灼失	0.93	0.78	1.31	0.9	1.16	0.86	1	0.68	0.62	1.31	0.68	1.60			
Total	98.99	100.67	100.46	100.04	99.35	98.64	101.66	100.11	99.77	99.80	100.27	100.42			
Cr	82.2	71.1	26.8	26.9	66.1	3.48	28.9	117	51.4	20.1	7.86	11.1			
Ni	10.7	6.66	15.5	6.03	6.32	3.33	3.31	43.3	10.2	2.27	10.1	5.66			
Co	24.8	16.9	8.88	9.63	13.9	26.9	11.9	12.7	8	8.31	1.7	7.73			
V	175	69.1	60.5	90	57.6	197	83.9	85.8	44.7	67.8	29.1	60.5			
Rb	125	13.2	50.9	11.3	23.3	27.9	131	84	241	28.1	20.6	59.9			
Cs	5.25	2.61	2.11	1.3	2.88	1.08	5.38	2.56	16	1.26	1.45	3.7			
Ba	1215	719	537	573	702	438	979	1301	552	1327	571	593			
Sr	889	331	631	449	363	511	492	851	257	507	555	721			>300
Ta	0.86	1.11	1.34	0.66	1	0.35	0.98	0.96	1.06	0.56	0.69	0.89			
Nb	13	16.6	13	9.25	14.1	5.57	14.2	10.8	11.9	15.1	8.68	11.1			
Hf	3.65	4.92	3.1	3.72	3.7	1.72	3.55	4.43	4.44	5.78	3.52	4.27			
Zr	161	202	133	112	151	53.7	156	172	159	238	129	158			
Th	10.8	3	7.59	0.92	2.11	2.44	13.1	7.14	25.8	1.8	5.51	9.86			
U	3.06	2.58	1.11	0.7	3.07	0.61	1.56	1.39	2.51	1.89	1.02	2.59			
Y	25.3	9.18	18.7	7.1	12.5	30.4	20.7	19.5	14.8	10.6	11.9	19.3			<18
Sr/Y	35.14	36.05	33.74	63.24	29.04	16.81	23.77	43.64	17.36	47.83	46.64	37.36			>20~40
La	36.7	15.8	26.7	7.65	13.6	11.4	34.1	26.4	43.3	19.1	13.7	22.1			
Ce	73.2	43.4	50.4	16.6	33.5	25.7	60.8	51.7	74.5	15.5	21.9	17.5			
Pr	8.83	4.91	5.49	2.62	4.08	3.68	7.01	6.08	7.88	5.28	3.09	4.96			
Nd	33.9	20.5	21.8	10.9	16.7	17.1	25.3	22.6	28	19.9	13	19.8			
Sm	6.5	3.89	3.95	2.3	3.52	4.27	4.58	4.41	4.38	3.76	2.57	4.02			
Eu	1.79	0.89	1.24	0.66	0.9	1.38	1.24	1.34	0.86	1.01	0.81	1.1			
Gd	5.09	2.76	1.66	1.73	2.51	3.02	3.66	3.89	3.16	3.33	2.93	3.81			
Tb	0.71	0.47	0.56	0.31	0.47	0.75	0.51	0.56	0.44	0.52	0.31	0.51			
Dy	1.07	2.6	3.06	2.09	0.74	4.93	0.81	3.24	2.6	2.96	1.95	3.07			
Ho	0.76	0.54	0.65	0.47	0.61	1.13	0.57	0.66	0.5	0.62	0.41	0.64			
Er	2	4.34	1.75	1.29	1.69	2.83	1.57	1.7	1.43	1.61	1.12	1.76			
Tm	0.3	0.21	0.31	0.21	0.26	0.44	0.24	0.27	0.21	0.25	0.19	0.3			
Yb	2.01	4.46	2.17	1.43	1.85	3.09	1.68	1.96	1.45	1.74	1.35	2.13			<1.9
Lu	0.32	0.22	0.33	0.23	0.28	0.47	0.28	0.29	0.22	0.29	0.2	0.33			
ΣREE	198.21	106.39	138.35	54.82	93.6	108.93	160.63	142.05	181.43	114.45	76.34	128.65			
ΣCe/ΣY	4.32	5.26	3.81	2.89	3.39	1.41	4.82	3.81	7.06	4.81	3.18	3.41			
(La/Yb)N	12.31	2.39	8.30	3.61	4.96	2.49	13.68	9.08	20.13	7.25	6.81	7.00			>10
La/Yb	18.26	3.54	12.3	5.35	7.35	3.69	20.30	13.47	29.86	10.98	10.10	10.38			>20
δEu	0.9193	0.7913	0.8822	0.9721	0.8791	1.1109	0.8969	0.9689	0.6751	0.8551	0.8999	0.8473			正异常

注:REE用等离子光谱法;微量元素用X荧光法;样品由中国地质大学(武汉)测试中心分析;1单元为黑云母石英闪长岩;2单元为黑云母石英二长闪长岩;3单元为角闪石英二长岩;4单元为中粒黑云母石英闪长岩;5单元为似斑状角闪花岗岩;6单元为似斑状黑云母二长花岗岩;7单元为中粒黑云母二长花岗岩。

岩石的主要矿物为钾长石、斜长石、石英、黑云母、角闪石等，次要矿物有磷灰石、锆石、磁铁矿、榍石。该岩体的显著特点是各单元岩石中普遍含有角闪石，在2和3单元中含有辉石矿物。花岗岩的结构主要为中粗粒结构、花岗结构、二长结构、似斑状结构。

2.1 岩石主量元素特征

从野马南山埃达克质花岗岩的 SiO<sub>2</sub> 含量(表 1)看出,除 X-17 号样品为 52.85%外,其余均为 60.33%~69.6%,平均 64.83%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 15.01%~18.62%,平均 16.20%;MgO 含量 0.35%~3.45%(2 个样品大于 3%),平均 2.04%;CaO 和 MgO 的含量与世界其他地区的埃达克岩基本一致(图 2);K<sub>2</sub>O 含量为 1.19%~4.31%,平均 3.01%,在 K<sub>2</sub>O—SiO<sub>2</sub> 图解上,样品投影点落在钙碱性和高钾钙碱性岩区,而世界上除美国加州的 Baja 和中国北淮阳中生代 adakite<sup>[10]</sup>属于高钾钙碱性外,新生代 adakite 全投影于钙碱性岩区<sup>[1-3,21-23]</sup>;σ 值为 1.15~2.48,NK/A 0.42~0.62,显示钙碱性岩系的特点;A/NCK 值为 0.79~1.18,属过铝质—次过铝质岩系。

2.2 岩石稀土元素特征

野马南山埃达克质花岗岩稀土元素(表 1)的 ΣREE 为 54.82~198.21;ΣCe/ΣY 为 1.41~7.09,LREE 富集,HREE 亏损,Yb 为 1.35~3.05,平均 2.11,(La/Yb)<sub>N</sub> 为 2.49~20.13,平均 8.58;La/Yb 为 3.69~29.86,平均 12.13;δEu 为 0.7913~1.1109,从稀土元素配分曲线(图 3)来看,Eu 没有明显的负异常。从以上稀土元素及特征值来看,野马南山花岗岩与典型的新生代 adakite 有一定的差距,Defant<sup>[1]</sup>和 Martin<sup>[9]</sup>等都强调 adakite 的特征之一是 Eu 为正异常,但他们所举实例中也不乏存在轻微 Eu 负异常的,如阿根廷的 Cerro Pampa adakites 中<sup>[23]</sup>Eu/Eu\* 为 0.9~1.01,类似的情况在日本也存在<sup>[24]</sup>,而野马南山地区非 adakite 花岗岩的 Eu/Eu\* 更低,如大雪山岩体 Eu/Eu\* 为 0.145~0.333,平均为 0.21;黑沟梁子花岗岩 Eu/Eu\* 为 0.12~0.15,平均为 0.135。野马南山花岗岩的 Yb 平均值 2.11,比较

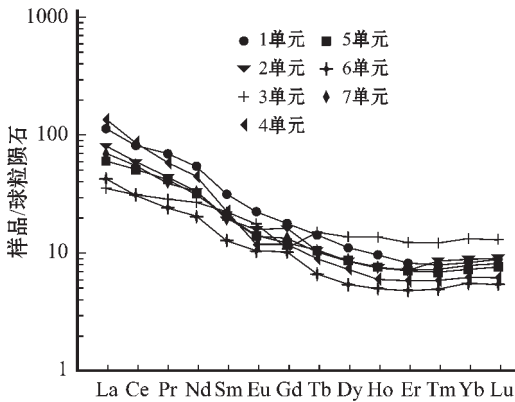


图 3 野马南山 Adakite 的 REE 配分模式(球粒陨石值参考 Taylor&Mclennan(1985)的数据)

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns of the adakites in Yema Nanshan

接近于 adakite 的 Yb 平均值 1.9,与相邻的大雪山花岗岩 Yb 平均值 4.39 和黑沟梁子花岗岩 Yb 平均值 6.12 相比要小许多。(La/Yb)<sub>N</sub> 平均值为 8.58,略小于 10,但比较接近,与大雪山花岗岩的平均值 4.39 和黑沟梁子花岗岩的平均值 4.07 相比显然更接近于 adakite。

2.3 岩石微量元素特征

从野马南山花岗岩(表 1)可以看出 Sr=257~889μg/g,平均值为 546.42μg/g,大于 300μg/g;Y=7.1~25.3μg/g,平均 16.67μg/g,小于 18μg/g;Sr/Y=17.36~47.83μg/g,平均为 35.89μg/g,大于 20μg/g;在 Sr—Y 图解上,大部分样品投影点在 adakite 岩区内。

Martin<sup>[9]</sup>强调 Ni 和 Cr 高含量是 adakites 的一个特征(据 81 个样品统计,平均 Ni 为 24μg/g,Cr36μg/g),并认为可与岛弧钙碱性岩相区别,但据一些地区 adakites 的资料来看,情况并非如此,如西南日本 adakite<sup>[25]</sup>的 Ni 平均为 11.5μg/g,Cr16.8μg/g(Morris,1995),巴拿马 El Valle 火山 adakite<sup>[23]</sup>的 Ni 为 7μg/g,Cr6.3μg/g,而岛弧钙碱性岩的 Ni 平均 39.9μg/g,Cr38.3μg/g,与 Martin<sup>[9]</sup>的结论正好相反。野马南山花岗岩的 Ni 平均为 10.28μg/g,Cr42.75μg/g。事实上,Ni、Cr 的高含量主要出现在富镁的 adakite 型安山岩或英安岩套内<sup>[26-27]</sup>。

3 成因探讨

3.1 锆石 U—Pb 同位素年龄

锆石 U—Pb 同位素年龄的样品采自岩体一单元的中粒黑云母石英闪长岩,采样点远离脉体和裂隙,原样重 15 kg,对样品首先进行人工粉碎,然后是手淘洗和电磁选分离,选取无磁或弱磁性的锆石单颗粒,最后在显微镜下挑选纯净的

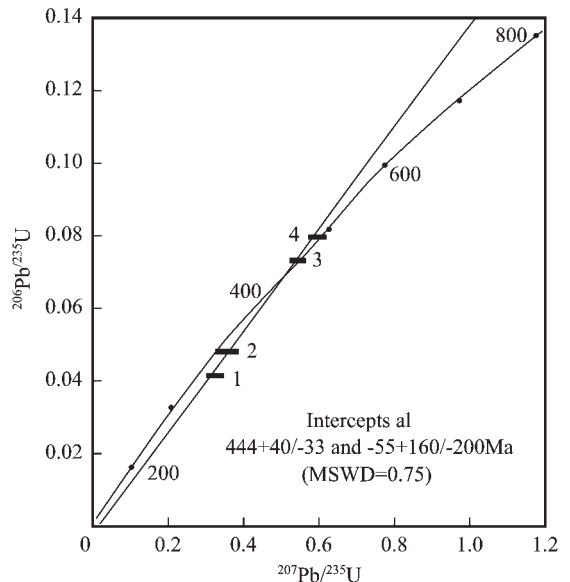


图 4 单颗粒锆石 U—Pb 年龄的谐和图

Fig. 4 Single-grain zircon U—Pb concordia diagrams

表 2 锆石 U-Pb 同位素组成  
Table 2 U-Pb isotopic composition of zircons

点号	样品情况 锆石类型及特征	浓度		普通铅 含量 (ng)	同位素原子比率						表面年龄 Ma		
		重量/g	U/( $\mu\text{g/g}$ )		Pb/ ( $\mu\text{g/g}$ )	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pu}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
1	近无色透明 细长柱断头晶	10	1003	61	0.130	157	0.1351	0.04103 (16)	0.3282 (210)	0.05802 (349)	259.2	288.0	530.7
2	浅褐色透明 长柱断头晶	10	1274	77	0.100	238	0.1091	0.04707 (15)	0.3589 (190)	0.05530 (277)	296.5	311.4	424.5
3	浅褐色透明 细长柱断头晶	10	897	88	0.120	210	0.1253	0.07296 (14)	0.5588 (154)	0.05554 (144)	454.0	450.7	434.2
4	近无色透明 长柱断头晶	10	1174	110	0.110	352	0.1189	0.07869 (16)	0.6081 (193)	0.05604 (168)	488.3	482.4	454.1

注:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  已对实验空白(Pb=0.050 ng,U=0.002 ng)及稀释剂作了校正;其他比率中的铅同位素均为放射成因铅同位素,括号内的数字为(2 $\sigma$ )绝对误差,例如:0.07869<16>表示 0.07869 $\pm$ 0.00016(2 $\sigma$ )。

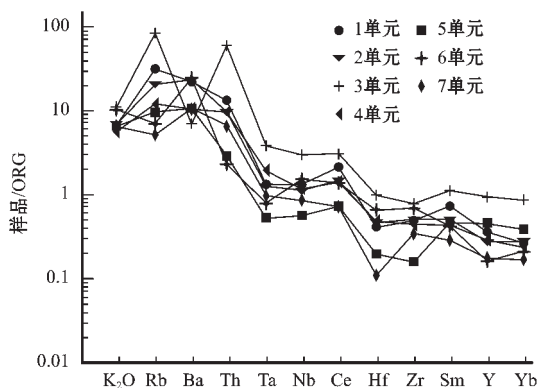


图 5 以洋脊花岗岩(ORG)为标准的微量元素蛛网图<sup>[31]</sup>

Fig.5 ORG-normalised trace element spidergrams for granites<sup>[31]</sup>

锆石矿物为测定年龄的对象。将选取的锆石在 0.25mL 容积的氟塑料容器内溶解,使用  $^{205}\text{Pb}-^{235}\text{U}$  混合稀释剂,将铀和铅用硅胶-磷酸溶剂加在同一单铱带灯丝上,在 VG354 型质谱仪上用高灵敏度 Daly 检测器进行 U-Pb 同位素测定<sup>[20]</sup>。所有同位素数据均对质量歧视效应进行校正,其中全流程铅空白为 0.05ng,铀空白为 0.002ng。

锆石 U-Pb 同位素测年工作由天津地质矿产研究所完成。分析结果和锆石 U-Pb 谱和图分别见表 2 和图 4。分析结果表明 1~4 号数据点组成的不一致直线与谐和线相交,获得上交点年龄为 444+40 /-33 Ma, 1~2 号数据点表面年龄值均符合  $t(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) < t(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) < t(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})$  的特征,该趋势是不一致锆石年龄的典型情况,最可能的解释是锆石中部分放射性铅发生了丢失<sup>[20]</sup>;而 3~4 号点放射性铅丢失不明显。一般认为该情况下同一火成岩样品中几个锆石的数据点构成的不一致线与谐和线的上交点年龄代表了锆石结晶年龄,即岩石的近似形成年龄,因此,野马南山花岗岩体的形成年龄为 444+40/-33Ma。

### 3.2 成因探讨

由岩石化学特征可知,野马南山花岗岩属于钙碱性过铝一次过铝质岩系,在  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$  图解上投点,大多数样品落入 I 区,少数样品落入 S 区,主体以 I 区花岗岩为主,兼具 S 花岗岩。在  $R_1-R_2$  构造环境判别图<sup>[30]</sup>上,大多数样品散布在板块碰撞前区,个别样点投影在地幔分离区、碰撞后的抬升区和同碰撞区;在  $R_b-(Yb+Ta)$  和  $R_b-(Yb+Nb)$  图解<sup>[31]</sup>上,样点均落入火山弧花岗岩区;在以洋脊花岗岩(ORG)为标准的微量元素蛛网图<sup>[32]</sup>(图 5)曲线向右倾斜,与典型的火山弧花岗岩曲线相似。根据以上分析可知,该花岗岩与祁连造山带碰撞前的板块俯冲有关。夏林祈等<sup>[33]</sup>认为北祁连加里东造山带是在前寒武纪基底上发生裂开拉伸(679~574 Ma),至寒武纪末期到早奥陶世成洋盆(522~495 Ma),自南西向北东往华北大陆板块之下俯冲贯穿整个奥陶纪(469~445Ma),大洋板块不断俯冲导致洋盆闭合(445~428 Ma),本次工作测得的锆石 U-Pb 上交点年龄 444+40/-33 Ma 符合这一认识。前已述及,野马南山花岗岩具有埃达克岩的特征,因此,可以推断该花岗岩是奥陶纪时期与板块俯冲有关的俯冲洋壳部分熔融和壳幔岩浆混合形成的与岛弧有关的花岗岩<sup>[1-3]</sup>。

### 4 结论

综上所述,野马南山花岗岩属高钾钙碱性过铝一次过铝质岩系,岩石类型有石英闪长岩、石英二长闪长岩、石英二长岩、角闪花岗岩、二长花岗岩,岩石中普遍含有角闪石,属 I 型花岗岩,地球化学特征及图解反映该花岗岩具有埃达克岩的特征,形成环境为板块碰撞前的岛弧型,锆石 U-Pb 同位素年龄为 444+38/-33 Ma,处在祁连造山带板块俯冲收缩阶段,因此可以推断野马南山 adakite-like 花岗岩是俯冲板片部分熔融和壳幔岩浆混合形成的。野马南山埃达克花岗岩的发现和初步研究对于丰富中国埃达克岩的研究和对祁连造山带演化及地球动力学以及成矿作用的研究具有重要意义。

致谢:笔者在野外调查阶段得到龚全胜、朱伟元和叶德金 3 位教授级高级工程师的指导,在此表示衷心的感谢。参

加野外调查的人员还有常青、仲新、庞振甲、柳煜、朱光儒。

### 参考文献(References):

- [1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347: 662~665.
- [2] Stern C R, Killian 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: 263~281.
- [3] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids [J]. *Lithos*, 1999, 46: 411~429.
- [4] 王焰, 张旗, 钱青. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义 [J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 251~256.  
Wang Yan, Zhang Qi, Qian Qing. Adakite: geochemical characteristics and tectonic significances [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2000, 35(2): 251~256 (in Chinese with English abstract).
- [5] Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, et al. The recognition of adakite-type gneisses in the North Dabie Mountain and its implication to ultrahigh pressure metamorphic geology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(21): 1927~1933.
- [6] Xu Jifeng, Wang Qiang, Yu Xueyuan. Geochemistry of high Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mi-an-Le ophiolitic melange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust [J]. *Geochem. J.*, 2000, 34: 359~377.
- [7] 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: 248~255.  
Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, et al. An east China plateau in mid-late Yanshan period: implication from adakites [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36: 248~255 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张旗, 王焰, 王元龙. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr, Nd 同位素制约 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 505~513.  
Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuanlong. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian Period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 505~513 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造成矿意义 [J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236~244.  
Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(2): 236~244 (in Chinese with English abstract).
- [10] 潘国强, 陆现彩, 于航波. 北淮阳中生代 adakite 岩石地球化学特征及成因讨论 [J]. *岩石学报*, 2001, 17: 541~550.  
Pan Guoqiang, Lu Xiancai, Yu Hangbo. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic adakite from Northern Huaiyang and discussion on its genesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17: 541~550 (in Chinese with English abstract).
- [11] 熊小林, 赵振华, 白正华, 等. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生 [J]. *科学通报*, 2001, 46(4): 281~287.  
Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenhua, et al. The adakite-type Na-rich intermediate-acid igneous rocks and crustal growth from Awulalei of west Tianshan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(4): 281~286 (in Chinese).
- [12] 熊小林, 赵振华, 白正华, 等. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因: Nd 和 Sr 同位素组成的限制 [J]. *岩石学报*, 2001, 17: 514~522.  
Xun Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bei Zhenghua, et al. Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17: 514~522 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据 [J]. *地球化学*, 2001, 30(4): 353~362.  
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, et al. Melting the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakite sedic quartz diorite-porphyrites, Anhui province, China [J]. *Geochimica*, 2001, 30(4): 353~362.
- [14] Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, et al. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block [J]. *Science in China (series D)*, 2003, 46(Supp.): 164~176.
- [15] 裴先治, 王涛, 丁仁平, 等. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2003, 30(4): 372~381.  
Pei Xianzhi, Wang Tao, Ding Saping, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling [J]. *Geology in China*, 2003, 30(4): 372~381 (in Chinese with English abstract).
- [16] 冯益民, 吴汉泉. 北祁连山及其邻区古生代以来大地构造演化初探 [J]. *西北地质科学*, 1992, 13(2): 61~74.  
Feng Yimin, Wu Hanquan. Tectonic evolution of north Qilian mountains and its neighbourhood since Paleozoic [J]. *Northwest geoscience*, 1992, 13(2): 61~74 (in Chinese with English abstract).
- [17] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.  
Xia Linqi, Xia Zhuchun, Xu Xueyi. Genetic Environments of Early Paleozoic Marine Volcanics of North Qilian Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese with English abstract).
- [18] 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1996.  
Feng Yimin, He Shiping. The Tectonic Evolution and Orogeny of Qilian Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese with English abstract).
- [19] 葛肖虹, 刘俊来. 北祁连造山带的形成与背景 [J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 223~230.  
Ge Xiaohong, Liu Junlai. Formation and tectonic background of the Northern Qilian orogenic belt [J]. *Earth science frontiers*, 1999,

- 6 (4):223~230(in Chinese with English abstract).
- [20] Blan Qiantao, Gao Shanlin, Li Dihui, et al. A study of the Kunlun-Qilian-Qinling structure system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(4):364~374.
- [21] Kay R W. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific ocean crust [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1978, 4: 117~132.
- [22] Kay S M, Romas V A, Marquez M. Evidence in Cerro pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101:703~714.
- [23] Defant M J, Clark L F, Stewart R H, et al. Andesite and dacite genesis via contrasting processes: The geology and geochemistry of El Valle volcano, Panama [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991, 106: 309~324.
- [24] Defant M J, Drummond M S. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted Lithosphere in a volcanic arc [J]. *Geology*, 1993, 21: 547~550.
- [25] Morris P A. Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and a seismicity in southwest Japan[J]. *Geology*, 1995, 23(5):395~398.
- [26] Smithies R H, Champion D C. The Archaean high-Mg diorite suite: Links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implications for Early Archaean crustal growth [J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41 (12): 1653~1671.
- [27] Kelemen P B. Genesis of high Mg<sup>#</sup> andesites and the continental crust [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1995, 120: 1~19.
- [28] 毛景文, 张招崇, 杨建民, 等. 北祁连西段前寒武纪地层单颗粒锆石测年及其地质意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(13): 1414~1417. Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Yang Jianmin, et al. Single-zircon dating of Precambrian strata in the west sector of the Northern Qilian Mountain and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(13): 1414~1417 (in Chinese).
- [29] 郭力宇, 甘枝茂, 李惠民. 北祁连山西段柳沟峡花岗岩质片麻岩锆石 U-Pb 法测年研究[J]. *中国地质*, 2002, 29(2): 126~128. Guo Liyu, Gan Zhimao, Li Huimin. Single-zircon U-Pb dating of the Liugouxia granitic gneiss in the western segment of the North Qilian Mountains [J]. *Geology in China*, 2002, 29(2): 126~128 (in Chinese with English abstract).
- [30] Batchelor R A, Bowden P. Petrographic interpretation of granitoid rocks using multicationic parameters [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48: 43~55.
- [31] Pitcher W S. The nature and origin of granite [J]. *Blackie Academic & Professional*, 1993, 229~230.
- [32] Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins [A]. In: Hawkesworth C J, Norry M J (eds), *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* [C]. Shiva Publishing, Nantwich, 1983, 158~185.

## Geochemical characteristics and genesis of adakite-like granites at Yema Nanshan in the western segment of the Central Qilian Mountains

SU Jian-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin-hu<sup>2</sup>, HU Neng-gao<sup>3</sup>, FU Guo-min<sup>3</sup>, ZHANG Hai-feng<sup>2</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. School of Earth Sciences and Resource Management, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Calidonian granites are widely developed in the Yema Nanshan area in the western segment of the Qilian orogenic belt. The geochemical characteristics of most of the granites are similar to those of adakites:  $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15.0\%$ , low MgO (average 2.04%), high Sr (257–889  $\mu\text{g/g}$ , average 546.42  $\mu\text{g/g}$ ), low Y (7.1–25.3  $\mu\text{g/g}$ , average 16.67  $\mu\text{g/g}$ ), average Sr/Y=5.89, no pronounced Eu anomaly and Sr positive anomaly. Adakites in this area have five rock types, quartz diorite, quartz monzodiorite, quartz monzonite, monzogranite and hornblende granite. These rocks commonly contain hornblende, belonging to I-type granites. The geochemical diagram indicates that the granites formed in a pre-collision island-arc environment, with a zircon U-Pb age of  $444 \pm 33$  Ma, in a plate subduction convergence stage of the Qilian orogenic belt. Therefore, it may be inferred that adakite-like granites of Yema Nanshan formed by partial melting of the subducted slab and crust-mantle magma mixing. This discovery has enriched the study of adakite in China and has great significance for the study of the evolution, geodynamics and metallogenesis of the Qilian orogen.

**Key words:** adakite-like granite; geochemical characteristics; genesis; Yema Nanshan; western segment of the central Qilian Mountains