

# 甘肃北山野马泉岩体同位素地球化学特征

范洪海<sup>1)</sup> 闵茂中<sup>2)</sup> 陈佳<sup>2)</sup> 季瑞利<sup>1)</sup>

1)核工业北京地质研究院,北京,100029 2)南京大学地球科学系,江苏南京,210093

**摘要** Nd、Sr、Pb 同位素研究结果揭示:甘肃北山野马泉岩体第 I、II 侵入阶段花岗岩类具有 I 型花岗岩的特征 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.708~0.710,  $\epsilon_{\text{Nd}} = -2.229 \sim -5.866$ , 在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  构造模式图上其投影点落在造山带演化线附近,在  $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Sr}}$  图解中,其投影点落入 I 型花岗岩类范围内,其成岩物质为壳幔混合来源。第 III 侵入阶段的岩石成因类型为 S 型,其 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.7149~0.7358,  $\epsilon_{\text{Nd}} = -7.3750 \sim -8.9556$ 。该岩体形成的地球动力学环境是北山陆内碰撞造山带。

**关键词** Nd、Sr、Pb 同位素 岩石成因 野马泉岩体 甘肃北山

## Isotopic Geochemical Characteristics of Yemaquan Granitic Intrusions in Beishan Area, Gansu Province

FAN Honghai<sup>1)</sup> MIN Maozhong<sup>2)</sup> CHEN Jia<sup>2)</sup> JI Ruili<sup>1)</sup>

1) Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029;

2) Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093

**Abstract** Sm-Nd-Pb isotope compositions reveal that I-type granite characteristics of the I, II Yemaquan intrusions are as follows: ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.708~0.710,  $\epsilon_{\text{Nd}} = -2.2291 \sim -5.8664$ , and the plot of  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  is near and below the evolutionary curve of the orogenic belt. The granitoids are characterized by mixed (crust + mantle) origin of rock-forming materials. The III granitoid is S-type granite, whose ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> are 0.7149~0.7358 and  $\epsilon_{\text{Nd}}$  are  $-7.3750 \sim -8.9556$ . The geodynamic environment of the granitoids was the Beishan orogenic belt related to intercontinental collision, especially at the time when collision was drawing to its end.

**Key words** Sm-Nd-Pb isotope compositions petrogenesis Yemaquan granitic complex Beishan in Gansu Province

甘肃北山野马泉花岗质杂岩体为一侵入岩基,面积约 120 km<sup>2</sup>。甘肃省地质矿产局(1989)、穆治国等(1994)曾对该岩体的岩石化学数据作过相关报道。穆治国等(1992)曾测得野马泉花岗质杂岩体外围的云母石英片岩(围岩;K-Ar 法)的成岩年龄(应是变质年龄)为 245.6 Ma;左国朝(1990,1996)、葛肖红等(1999)对北山地区早古生代的地质构造演化及岩浆活动进行了较为系统地研究。但迄今为止,针对野马泉花岗质杂岩体的系统的同位素研究工作尚属首次。本文通过 Nd、Sr、Pb 多元同位素示踪技术,探讨了野马泉花岗质杂岩体的岩石成因及其成岩环境。

## 1 地质概况

野马泉岩体位于祁连山脉的北缘,是天山造山

带的东延部分。受区域性近 EW 向断裂控制,岩体总体展布方向也呈近 EW 向。四周出露的地层主要有石炭纪红柳园组及侏罗纪沙枣河组(图 1)。前者主要为砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、安山岩、流纹斑岩及流纹质或安山质凝灰岩,底部见云英片岩及底砾岩。后者为砂岩、粉砂岩、碳质泥岩,夹煤系地层或薄的煤层,底部见底砾岩。

经过对野马泉岩体 1:5 万的地质调查,可将野马泉岩体划分为一个超单元(野马泉超单元)及 3 个岩石单元,即红旗泉单元:岩性为中-中细粒黑云母花岗闪长岩(第 I 侵入阶段);反修山单元:岩性为中-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩(第 II 侵入阶段);东炭窑井单元:岩性为细粒二云母二长花岗岩(第 III 侵入阶段)。从三者间的接触关系判断,红旗泉单元形成时间最早,反修山单元次之,而东炭窑井

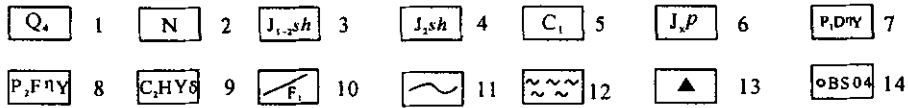
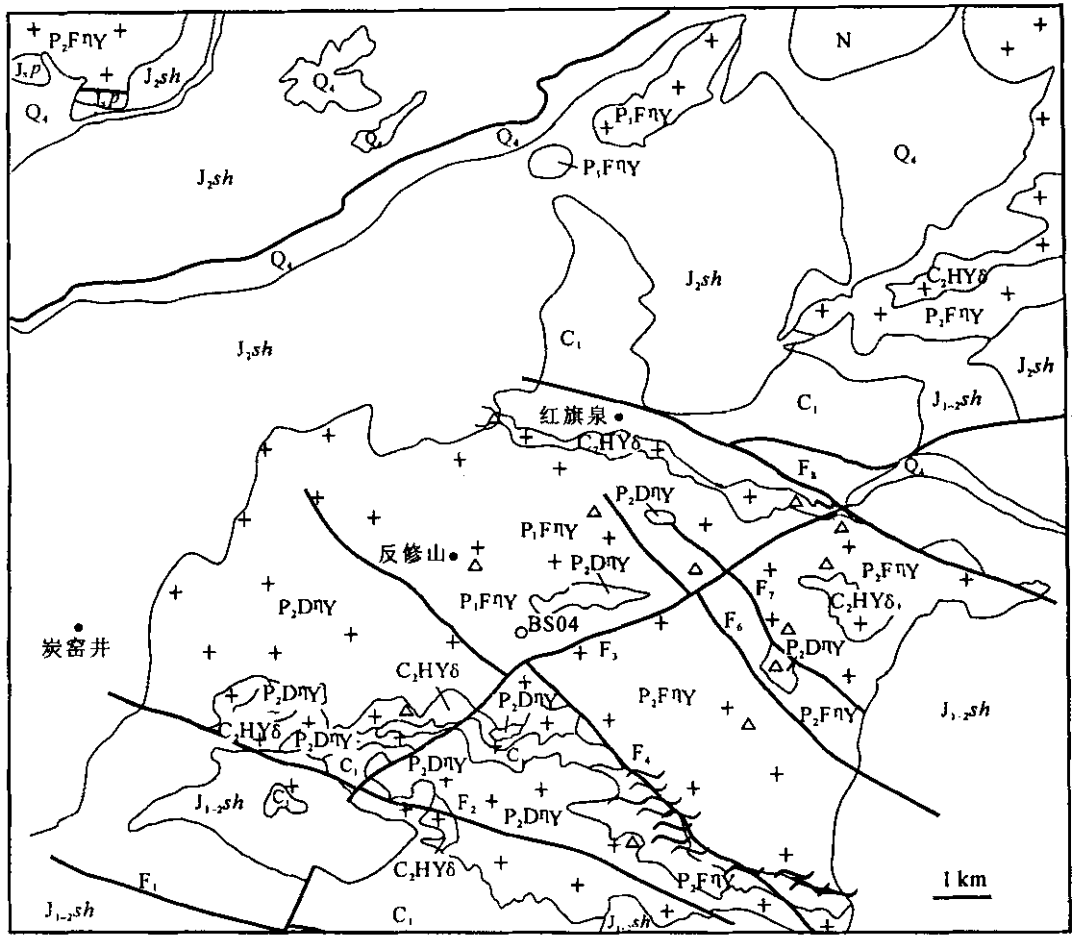


图1 野马泉岩体地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Yemaquan area

- 1-第四系 2-第三系 3-侏罗系水西沟组 4-侏罗系沙河枣组 5-石炭系 6-蓟县系 7-东炭窑井单元细粒二云母二长花岗岩; 8-反修山单元中粒似斑状黑云母二长花岗岩 9-红旗泉单元中细粒黑云母花岗岩闪长岩; 10-断层及其编号; 11-地质界线; 12-混合岩化花岗岩; 13-取样点; 14-钻孔及其编号

单元则最晚。野马泉岩体与石炭纪地层呈侵入接触关系,而与侏罗纪地层则呈角度不整合接触,结合该岩体的单颗粒锆石定年数据(266.7~290.6 Ma),野马泉岩体的成岩时代应为海西期。

## 2 同位素地球化学特征

### 2.1 Pb同位素

野马泉岩体 11 个样品的 Pb 同位素组成测定结果列于表 1,长石铅的构造模式示于图 2。由表 1 可见,该岩体花岗岩类的 Pb 同位素组成较均一, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 值的变化范围为 18.2710~19.4552; <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值的变化范围为 15.6199~15.6784;

<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值的变化范围为 38.0163~39.8651。在三组铅同位素比值中,有两组(<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)与造山带铅相当,另有一组(<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)与下地壳铅相当,表明该岩体的部分成岩物质可能源自下地壳;由图 2 可见,野马泉花岗岩类和辉绿(脉)岩的 Pb 同位素组成,在反映构造环境的 <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 图解中的投影点,均落在造山带演化线上及其下方,远离上地壳线,指示该花岗岩杂岩体侵位的地质构造背景为造山带环境,成岩物质具有壳幔混源特征。造山运动包括地层的褶皱和变质、花岗岩类的侵位、板块碰撞和俯冲(潜浸)等地质事件,其结果可对原有陆壳进行改造或生成

表 1 野马泉花岗岩类和辉绿(脉)岩的铅同位素组成  
Table 1 Lead isotope compositions of granites and diabase from Yemaquan

岩石	样号	性质	Pb / $10^{-6}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
花岗闪长岩	I-18	钾长石	17.4	$18.5142 \pm 0.0004$	$15.6318 \pm 0.0003$	$38.2797 \pm 0.0008$
	I-19	钾长石	14.3	$18.4881 \pm 0.0003$	$15.6323 \pm 0.0002$	$38.2775 \pm 0.0008$
	G-3	钾长石	12.1	$18.9021 \pm 0.0005$	$15.6647 \pm 0.0005$	$38.4198 \pm 0.0014$
黑云母二长花岗岩	I-10	钾长石	24.9	$18.5931 \pm 0.0003$	$15.6334 \pm 0.0002$	$38.3799 \pm 0.0006$
	I-13	钾长石	30.8	$19.0746 \pm 0.0003$	$15.6595 \pm 0.0002$	$38.6112 \pm 0.0006$
	III-3	钾长石	26.7	$18.8981 \pm 0.0003$	$15.6424 \pm 0.0004$	$38.639 \pm 0.0013$
	X-3	钾长石	24.0	$19.1561 \pm 0.0008$	$15.6772 \pm 0.0007$	$39.8651 \pm 0.0020$
二云母二长花岗岩	I-20	钾长石	19.9	$19.4552 \pm 0.0005$	$15.6784 \pm 0.0004$	$38.3767 \pm 0.0010$
	II-13	钾长石	52.2	$18.2710 \pm 0.0005$	$15.6199 \pm 0.0005$	$38.0163 \pm 0.0014$
	A-3	钾长石	43.2	$19.3293 \pm 0.0005$	$15.667 \pm 0.0004$	$38.4394 \pm 0.0009$
辉绿岩	II-8	斜长石	20.2	$18.4783 \pm 0.0007$	$15.6239 \pm 0.0006$	$38.3319 \pm 0.0017$
标样	Pb-std	-	-	$16.8935 \pm 0.0005$	$15.4315 \pm 0.0005$	$36.5116 \pm 0.0010$
地幔铅*	-	-	-	18.10	15.42	37.7
造山带铅*	-	-	-	18.66	15.62	38.8
上地壳铅*	-	-	-	19.33	15.72	39.08
下地壳铅*	-	-	-	17.27	15.23	38.57
华南同熔型花岗岩平均值	-	-	-	18.00	15.50	38.15
华南改造型花岗岩平均值	-	-	-	18.73	15.701	38.70

注 \*据 B. R. Dae 等, 1983 样品由南京大学成矿作用国家重点实验室采用德国产 FINNIGAN TRITON 型表面热电离同位素质谱仪测试。

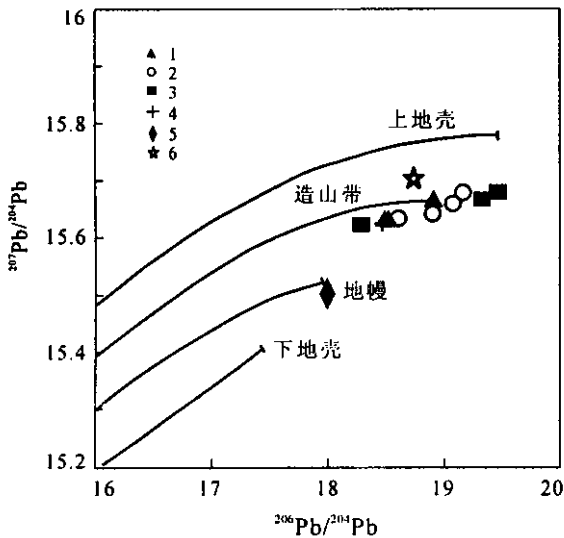


图 2 野马泉花岗岩类和辉绿(脉)岩铅同位素构造模式图(据 Zartman, 1981, 1988)

Fig. 2 The plumbio tectonic diagram of granites and diabase from Yemaquan (after Zartman, 1981, 1988)

- 1-第 I 侵入阶段中-中细粒黑云母花岗闪长岩 2-第 II 侵入阶段中-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩 3-第 III 侵入阶段细粒二云母二长花岗岩 4-辉绿(脉)岩 5-华南同熔型花岗岩 6-华南改造型花岗岩

新的陆壳。世界上大部分巨大花岗岩岩基都形成在地壳活动带边缘 (Sheppard, 1986; Zartman 等, 1981)。

由图 2 还可见野马泉花岗岩类的 Pb 同位素投影点介于华南平均同熔型花岗岩和平均陆壳改造型花岗岩的投影位置之间(南京大学地质系, 1981)。

## 2.2 Sr 同位素

野马泉岩体中 11 个花岗岩类岩石样品和 1 个辉绿(脉)岩的全岩 Rb、Sr 同位素组成测定结果列于表 2 和图 3。由表 2 可见, 由侵入早阶段至晚阶段, 花岗岩类岩石的 Rb 含量逐渐增高, 其含量( $\times 10^{-6}$ )均值由 102.57→142.50→239.13, 而 Sr 含量则逐渐降低, 其含量( $\times 10^{-6}$ )均值由 468.28~271.93, 271.93~155.68,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值逐渐增大, 其均值由 0.7678~1.8375, 1.8375~8.1870,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值逐渐增大, 其均值由 0.711705~0.71568, 0.71568~0.754935。

野马泉花岗岩的初始锶同位素比值 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ) 范围为 0.7071~0.7358, 其中第 I 侵入阶段中-中细粒黑云母花岗闪长岩为 0.7080~0.7093, 第 II 侵入阶段中-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩为 0.7071~0.7100, 第 III 侵入阶段细粒二云母二长花岗岩为 0.7149~0.7358。辉绿(脉)岩为 0.7064。按徐克勤(1984)的划分, 幔源型花岗岩的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ) 小于 0.705, 同熔型花岗岩的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ) 小于 0.710, 陆壳改造型花岗岩的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ) 大于 0.710(徐克勤, 1984)。由表 2 和图 3 可得出以下认识:

(1) 野马泉花岗岩质杂岩体第 I、II 侵入阶段属典型的同熔型花岗岩。其 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ) 大都小于 0.710, 仅有一个样品值达 0.7100; 在图 3 中的投影点均位于“玄武岩源区”之上和“大陆壳生长线”之下

表 2 野马泉花岗岩类和辉绿(脉)岩的全岩 Rb、Sr 同位素成分测定结果  
Table 2 Rb and Sr isotope compositions of granites and diabase from Yemaquan

岩石	样号	Rb /10 <sup>-6</sup>	Sr /10 <sup>-6</sup>	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	t/Ma	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub>	ε <sub>Sr</sub>
花岗岩闪长岩	G-3	106.30	565.50	0.5527	0.711523	290	0.7093	72.1932
	I-8	105.60	543.20	0.5623	0.710959		0.7087	63.6211
	I-19	99.98	563.70	0.5361	0.710623		0.7084	60.3848
	Q-22	98.40	200.70	1.4200	0.713716		0.7080	52.5115
似斑状黑 云母二长 花岗岩	I-10	130.20	387.40	0.9738	0.710961	278	0.7071	41.6992
	I-13	188.10	213.40	3.6130	0.722993		0.7087	64.3201
	III-3	147.90	241.20	1.8580	0.715226		0.7079	52.6003
	X-3	103.80	245.70	0.9052	0.713559		0.7100	82.4468
二云母二 长花岗岩	A-3	298.70	128.70	10.2340	0.759656	267	0.7208	235.6666
	I-20	238.50	71.05	12.3450	0.782716		0.7358	449.2631
	II-13	180.20	267.30	1.9820	0.722434		0.7149	152.2230
辉绿(脉)岩	II-8	19.41	280.80	0.2056	0.707030	200	0.7064	30.9609

注:样品由南京大学现代分析中心同位素质谱室测试,测得美国 NBS987 锶同位素标样的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.710224±8。

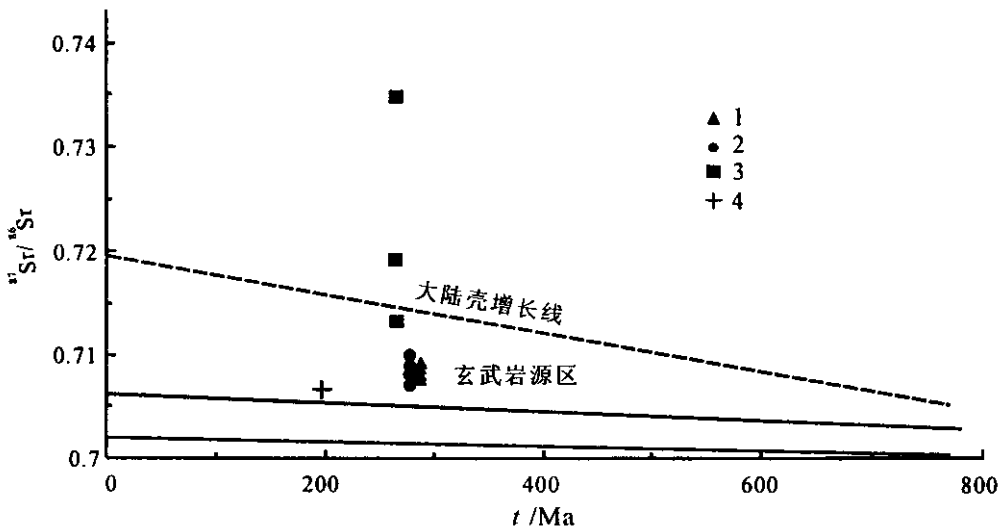


图 3 野马泉花岗岩类岩石的成岩年龄(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>图解

Fig. 3 The diagenetic age(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> diagram of granites from Yemaquan

1-第 I 侵入阶段中-中细粒黑云母花岗岩闪长岩; 2-第 II 侵入阶段中-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩;  
3-第 III 侵入阶段细粒二云母二长花岗岩; 4-辉绿(脉)岩

的范围内。

(2) 第 III 侵入阶段细粒二云母二长花岗岩属陆壳改造型(或 S 型)花岗岩,其在图 3 中的投影点均位于“大陆壳生长线”上方范围内。该阶段二长花岗岩中出现石榴子石、原生白云母等强铝过饱和矿物和电气石,与其初始锶同位素比值特征相吻合。

(3) 三个侵入阶段花岗岩类岩石的投影点,在图 3 中形成一条由“玄武岩源区”穿过“大陆壳增长线”的趋向线,表明由第 I 侵入阶段至第 III 侵入阶段,岩石中混入的上地壳物质数量逐渐增多,以至于演化至第 III 侵入阶段细粒二云母二长花岗岩时,岩石的大部分特征已与陆壳改造型或 S 型花岗岩的相似。 万方数据

(4) 辉绿岩(脉)的(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值与源自地幔的岩石值相近。

### 2.3 Nd 同位素

表 3 列出了野马泉花岗岩类岩石和辉绿(脉)岩的全岩 Sm、Nd 同位素成分分析结果。由表 3 可见,初始钕同位素组成(ε<sub>Nd</sub>)在该岩体不同侵入阶段花岗岩类中有以下变化特征:

(1) 所有花岗岩类的 ε<sub>Nd</sub> 值均为负值,(-0.9970~-8.9556),表明花岗质岩浆与上地壳物质发生明显混染。辉绿(脉)岩的 ε<sub>Nd</sub> 为低正值(4.83769),表明成岩物质来源于亏损地幔。

(2) 由第 I 侵入阶段至第 III 侵入阶段,花岗岩类岩石的 ε<sub>Nd</sub> 值逐渐减小(负值的绝对值增大),由第 I

表 3 野马泉花岗岩类和辉绿(脉)岩的全岩 Sm、Nd 同位素成分分析结果

Table 3 Sm and Nd isotope compositions of granites and diabase from Yemaquan

岩石	样号	Sm /10 <sup>-6</sup>	Nd /10 <sup>-6</sup>	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	年龄 /Ma	ε <sub>Nd</sub>	t <sub>DM</sub> /Ma
花岗岩闪长岩	G-3	6.005	26.03	0.1395	0.512349		-3.5584	1772
	I-8	4.288	20.85	0.1249	0.512341		-3.1828	1505
	I-19	4.297	19.92	0.1298	0.512399	290	-2.2291	1488
	Q-22	4.950	25.32	0.1181	0.512304		-3.6575	1459
似斑状黑 云母二长 花岗岩	I-10	3.823	16.89	0.1308	0.512467		-0.9970	1386
	I-13	1.496	7.01	0.1326	0.512287		-4.5747	1739
	III-3	3.095	14.51	0.1261	0.512209	278	-5.8664	1745
	X-3	3.047	15.47	0.1179	0.512225		-5.2628	1577
二云母二 长花岗岩	A-3	1.264	4.05	0.1603	0.512249		-7.3750	2670
	I-20	2.315	8.68	0.1612	0.512157	267	-8.1780	2977
	II-13	1.803	7.91	0.1365	0.512074		-8.9556	2223
辉绿(脉)岩	II-8	3.806	12.04	0.1861	0.512872	200	4.8377	1871

注:①样品由南京大学现代分析中心同位素质谱室测试,测得美国 Lajoll 钕同位素标准 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.511860 ± 6;

$$② t_{DM} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[ 1 + \frac{(\frac{143}{144}Nd/\frac{144}{144}Nd)_m - (\frac{143}{144}Nd/\frac{144}{144}Nd)_{DM} - [(\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd)_m - (\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd)_c] e^{\lambda t} - 1}{(\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd)_c - (\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd)_{DM}} \right]$$

式中  $(\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd)_{DM} = 0.2136$ ,  $(\frac{143}{144}Nd/\frac{144}{144}Nd)_{DM} = 0.513151$ ,  $(\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd)_c = 0.118$ ,  $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} a^{-1}$ , 角标 *m* 代表样品测定值; *t* 代表岩石结晶年龄。

侵入阶段 -2.2291 ~ -3.6575 (均值 -3.1570), 第 II 侵入阶段 -0.9970 ~ -5.8664 (均值 -4.1752), 第 III 侵入阶段 -7.3750 ~ -8.9556 (均值 -8.1695) 表明由早侵入阶段至晚侵入阶段,混入该花岗岩类岩石中的上地壳物质的数量逐渐增多。  
(3) 将野马泉第 I、II、III 侵入阶段花岗岩类全岩的 ε<sub>Nd</sub>、ε<sub>Sr</sub> 值投入 ε<sub>Nd</sub> - ε<sub>Sr</sub> 图解中(图 4), 其中第 I、II 侵入阶段花岗岩类岩石样品的投影点落入该图的

I-型花岗岩类范围内,其成岩物质具有壳幔混源特征,而第 III 侵入阶段花岗岩类岩石样品的投影点落入该图的 S-型花岗岩类范围附近。由于该图是 McCalloch 等(1982)研究澳大利亚东南部古生代花岗岩类岩石时,根据这些岩石的 ε<sub>Nd</sub>、ε<sub>Sr</sub> 值绘制的,数值域有限,因此,野马泉第 III 侵入阶段花岗岩类岩石投影点虽落在澳大利亚东南部古生代 S-型花岗岩类的范围外侧,但仍属于壳源 S-型花岗岩类范畴,其成岩物质具有壳源特征。

(4) 在 3 个阶段侵入的花花岗岩类岩石中,第 I 侵入阶段中-中细粒黑云母花岗闪长岩具有相对最大的 ε<sub>Nd</sub> 值、最小的 Nd 模式年龄 (t<sub>DM</sub> 值为 1460 ~ 1770 Ma) 和最小的初始锶同位素比值,表明该阶段侵入花岗闪长岩的源区中有较多的下地壳或地幔组分。第 III 侵入阶段细粒二云母二长花岗岩具有最大的 ε<sub>Nd</sub> 值、最老的 Nd 模式年龄 (2220 ~ 2980 Ma) 和最大的初始锶同位素比值,表明该花岗岩主要源自上地壳物质,其中可能包括部分重熔的第 I、II 侵入阶段花岗岩类岩石。第 II 侵入阶段二长花岗岩的 ε<sub>Nd</sub> 值、Nd 模式年龄,介于第 I 侵入阶段中-中细粒黑云母花岗闪长岩和第 III 侵入阶段细粒二云母二长花岗岩的之间,表明它的源区中的下地壳(或地幔)物质与上地壳物质的数量比例,也介于第 I、III 阶段侵入花岗岩类的之间,其中可能包括部分重熔的第 I 阶段侵入花岗闪长岩。

(5) 较晚阶段侵入岩中包含部分重熔的较早阶段侵入岩,例如第 II 侵入阶段二长花岗岩中包含部

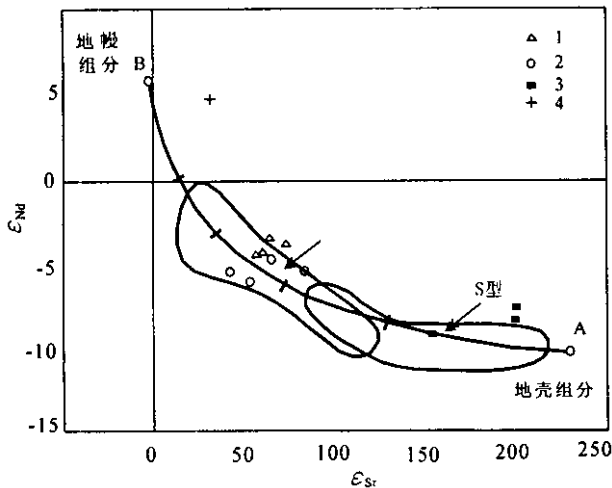


图 4 野马泉花岗岩类的 ε<sub>Nd</sub> - ε<sub>Sr</sub> 图解 (据 McCalloch 等, 1982)

Fig. 4 The ε<sub>Nd</sub> - ε<sub>Sr</sub> diagram of granites from Yemaquan (after Mcalaloch et al., 1982)

1-第 I 侵入阶段中-中细粒黑云母花岗闪长岩; 2-第 II 侵入阶段中-中粗粒似斑状黑云母二长花岗岩; 3-第 III 侵入阶段细粒二云母二长花岗岩; 4-辉绿(脉)岩

分重熔的第Ⅰ阶段侵入花岗闪长岩,第Ⅲ侵入阶段细粒二云母二长花岗岩中包含部分重熔的第Ⅰ、Ⅱ阶段花岗岩类岩石等,是造成三个侵入阶段花岗岩类岩石的化学成分由早阶段至晚阶段呈有规律线性变化的原因之一。花岗质岩浆的结晶分异是造成这种有规律线性变化的另一个重要原因。

### 3 讨论和结论

(1)野马泉岩体属同期不同阶段的产物,第Ⅰ、Ⅱ侵入阶段花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为0.708~0.710, $\epsilon_{\text{Nd}}$ 为-2.229~-5.866,且在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造模式图上其投影点落在造山带演化线附近,在 $\epsilon_{\text{Nd}}-\epsilon_{\text{Sr}}$ 图解中,其投影点落入Ⅰ-型花岗岩类范围内,具有Ⅰ-型花岗岩类的特征,其成岩物质为壳幔混合来源。第Ⅲ侵入阶段的岩石成因类型为S-型,其 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为0.7149~0.7358, $\epsilon_{\text{Nd}}$ 为-7.3750~-8.9556,另外,该阶段岩石含黑电气石、原生白云母和石榴子石等富铝矿物,也指示其成岩物质具有壳源特征。

(2)三个侵入阶段岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 分别为0.7080~0.7093、0.7071~0.7100和0.7149~0.7358;由第Ⅰ至第Ⅲ侵入阶段 $\epsilon_{\text{Nd}}$ 值逐渐减小(负值的绝对值增大),由-2.2291~-3.6575减小为-0.9970~-5.8664,再减小为-7.3750~-8.9556,表明由早至晚侵入阶段,混入岩石中的上地壳物质的数量逐渐增多,直至第Ⅲ侵入阶段岩石显示陆壳改造型或S-型花岗岩的主要特征。

(3) $\text{Nd}$ 模式年龄( $t_{\text{DM}}$ )研究资料表明,野马泉花岗岩类的上地壳源岩,最可能是北山地区的长城系、蓟县系、震旦系、志留系等变质岩。该岩体侵位的地球动力学环境是北山陆内碰撞造山带,主要在碰撞结束后侵位生成,与发生在北山地区乃至全甘肃省范围的金塔造山运动(晚石炭世—早二叠世)有关,侵位发生在该造山运动末期。造山带断裂构造

不仅引起上地壳物质(包括部分早阶段侵入已固结花岗岩类岩石)的减压局部重熔,而且驱动深部花岗质岩浆上侵,并与重熔岩浆混合、结晶分离,从而形成其化学成分连续线性演化的不同侵入阶段的花岗岩类。因此,在生成不同花岗岩类岩石过程中,早期同熔型中酸性花岗质岩浆曾经历了结晶分离、与重熔的部分上地壳物质和野马泉早阶段侵入花岗岩类岩石的岩浆混合等复杂的作用过程。

参加该项成果研究的还有:王驹、金远新、徐健、张芳荣、肖晓林等。

### 参考文献

- 葛肖红,刘俊来. 1999. 北祁连造山带的形成和背景. 地学前缘, 6(4): 223~229.
- 甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志中华人民共和国地质专报,第19号. 北京:地质出版社.
- 南京大学地质系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系. 北京:科学出版社.
- 穆治国,刘驰,黄宝玲等. 1994. 甘肃北山古生代造山带地壳演化的同位素和稀土元素地球化学特征. 北京大学学报(自然科学版), 30(2): 202~213.
- 穆治国,刘驰,黄宝玲等. 1992. 甘肃北山地区同位素定年与构造岩浆热事件. 北京大学学报(自然科学版) 28(4): 486~497.
- 徐克勤. 1984. 花岗岩地质与成矿. 南京:江苏科技出版社.
- 左国朝. 1990. 北山地区早古生代板块构造特征. 地质科学(4): 305~314.
- 左国朝,李茂松等. 1996. 甘蒙北山地区早古生代岩石圈形成与演化. 兰州:甘肃科学技术出版社.
- McCalloch M T, Chappell B W. 1982. Nd isotopic characteristics of S- and I-type granites. Earth Planet. Sci. Lett. 58: 51~64.
- Sheppard S M F. 1986. Igneous rocks: III isotopic case studies of magmatism in Africa, Eurasia and oceanic islands. In: Valley, J. W., Talyor Jr. H. P., O Neil J R. (eds.), Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes. Reviews in Mineralogy, 16, Mineralogical Society of America. BookCrafters Inc., Chelsea, Michigan, 48118.
- Zartman R E, Dae B R. 1981. Plumbotectonics—the model. Tectonophysics, 75: 135~162.