冀北甲山正长岩的矿物学、地球化学及 Sr-Nd 同位素特征

杨富全[1]，吴 海[2]，刘晓文[2]，夏浩东[2]，马伯永[3]，邓会娟[2]，左文[4]

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所，北京 100037；2. 国土资源部 实物地质资料中心，河北 燕郊 065201；
3. 中国地质科学院 地质研究所，北京 100037；4. 中国地质大学 水资源与环境学院，北京 100083)

摘要：甲山岩体形成于早白垩世晚期，可划分为3个单元。电子探针分析结果表明，碱性长石主要为Na-正长石和歪长石，少量为正长石；角闪石主要为钙角闪石中的铁浅闪石，少数为铁角闪石和铁阳起石；单斜辉石属钙铁辉石和普通辉石。化学成分上，该岩体富Si、全碱、全Fe、REE、Th、Ga、Nb、Zr、Hf，贫Mg、Ba、Sr、Ti、Cr、Co、Ni、V等过渡元素亏损，富轻稀土，中等铕负异常，具有A型花岗岩的特点。甲山正长岩的$N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$初始比值I_{Sr}=0.701 41~0.707 41，$\varepsilon_{Nd}(t)$值为-2.27~-5.58，表明岩浆为富集的大陆岩石圈地幔部分熔融形成。岩石圈的拆沉和减薄作用是引发岩石圈地幔部分熔融的原因之一，岩石圈地幔的富集作用可能发生在中元古代晚期。

关键词：正长岩；锶-钕同位素组成；地球化学；岩石成因；甲山；冀北

中图分类号：P588.1；P584　　文献标识码：A　　文章编号：1000-8527(2005)04-0522-09

Mineralogy, Geochemical and Sr and Nd Isotopic Characteristics of the Jiashan Syenite in Northern Hebei

YANG Fu-quan[1], WU Hai[2], LIU Xiao-wen[2], XIA Hao-dong[2], MA Bo-yong[3], DENG Hui-juan[2], ZUO Wen-zhe[4]

(1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*;
2. *National Geological Samples Center, Ministry of Land and Resources, Yanjiao, Hebei* 065201, *China*;
3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*;
4. *School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The Jiashan pluton was emplaced in the late Early Cretaceous, which can be divided into three rock units. The analytical results of electron-microprobe show that the alkali feldspars are mainly Na-orthoclase and anorthoclase, with minor orthoclase; the amphiboles of the Jiashan pluton are ferro-edenite with minor ferrohornblende and ferro-actinolite; and the clinopyroxene includes hedenbergite and augite. Geochemically the Jiashan syenite is rich in Si, alkalis, Fe, REE, Th, Ga, Nb, Zr and Hf, poor in Mg, Ba, Sr and Ti, and depleted in transition elements such as Cr, Co, Ni, and V, and is enriched in light REE with a moderate Eu negative anomaly, which show that the Jiashan syenite belong to an A-type granite. The $^{87}Sr/^{86}Sr$ initial ratios of the rock ranging from 0.701 41 to 0.707 41 and the $\varepsilon_{Nd}(t)$ values of -2.27 to -5.58 indicate that the magma was derived from partial melting of an enriched subcontinental lithospheric mantle. Delamination or lithospheric thinning probably caused the partial melting of the enriched subcontinental lithospheric mantle. Nd depleted mantle model age implys that mantle enrichment beneath Yanshan area may occur in the late Mesoproterozoic.

Key words: syenite; Sr-Nd isotopic composition; geochemistry; petrogenesis; Jiashan; northern Hebei

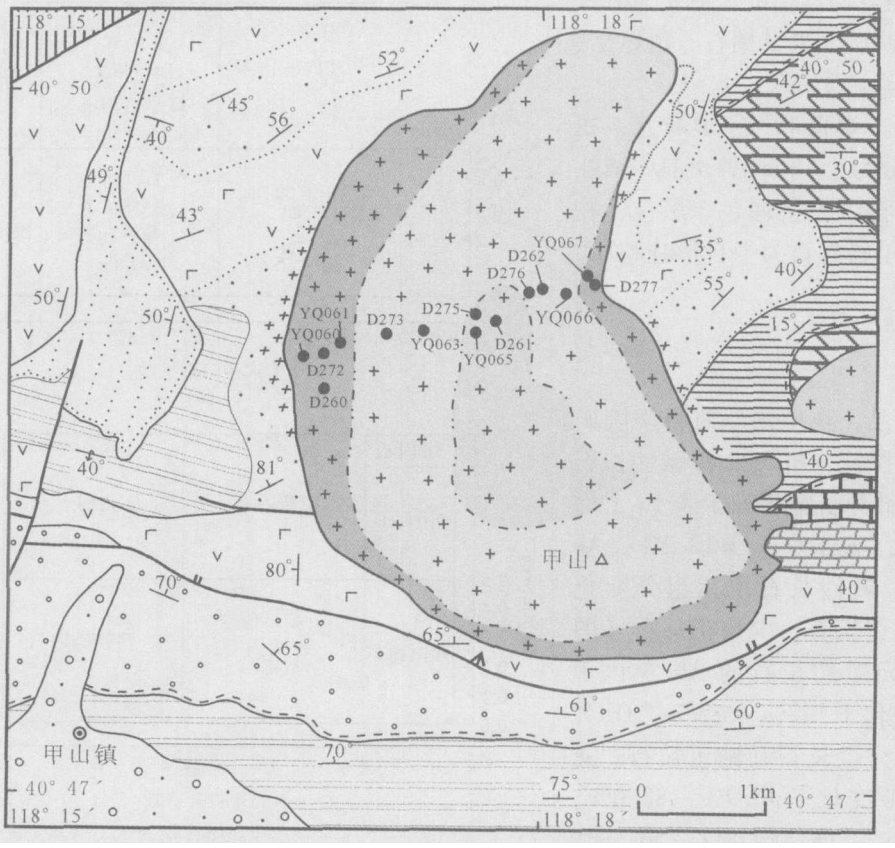
收稿日期：2005-05-22；改回日期：2005-09-28；责任编辑：楼亚儿。
基金项目：国家自然科学重点基金项目（40132020）；国土资源部国土资源大调查项目（DKD2001008）。
作者简介：杨富全，男，副研究员，1968年出生，矿物学、岩石学、矿床学专业，主要从事基础地质、岩石化学和矿床地球化学的研究工作。

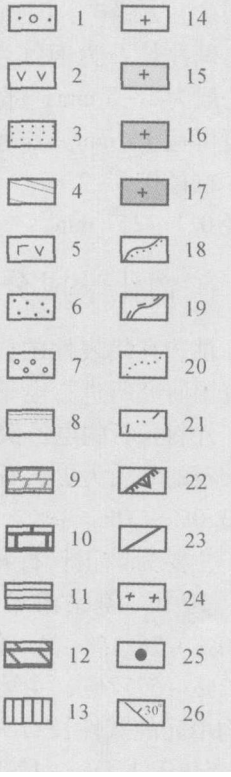
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

燕山造山带位于华北板块北缘，中生代陆内造山强烈[1-3]，岩浆活动异常发育，近年来倍受地质界的关注[4-9]。甲山岩体位于燕山陆内造山带的东段，承德逆掩岩片的东侧。岩体为 A型花岗岩形成于造山晚期岩石圈伸展的环境下，是区域晚侏罗世的挤压缩短和地壳增厚转变为早白垩世的伸展和岩石圈减薄的早期记录[10]。本文重点对造岩矿物进行了电子探针分析，通过岩石地球化学、Sm-Nd、Rb-Sr同位素测定，探讨甲山正长岩的岩石成因及发生的动力学背景。

1　地质背景

甲山正长岩体位于河北省承德县甲山镇附近，构造上位于平泉—古北口断裂[1]南侧，紧邻“未名逆冲断层”[11]。岩体南侧为下板城盆地，发育三叠系到中侏罗统地层，在晚侏罗世发生强烈褶皱变形。西侧紧邻 Davis等[11]确定的逆冲岩片，认为逆冲位移至少为的 40~ 45 km[2]，逆冲断层的时代为晚侏罗世 (161~ 132 Ma)。岩体南北向长 5 km，东西向最宽 3.8 km，平面上为不规则椭圆形，出露面积约 14 km^2 (图 1)，岩体侵入的最新地层为下侏罗统南大岭组，并侵入承德县逆冲断层中。全岩 K-Ar年龄为 (94.94 ±2.25) Ma[12]，锆石 U-Pb等时线年龄为 (113 ±2) Ma[2-3]，时代为早白垩世晚期。按岩石谱系单位划分原则将甲山岩体划分为 3个单元[12]，从早到晚依次为姜家湾单元分布于岩体最外侧，龙潭沟单元分布在岩体内侧，龙潭南沟单元出露于岩体中心。龙潭沟单元与姜家湾单元之间没有截然的侵入界线，但在十几厘米范围内岩石矿物成分及结构快速变化，为涌动型侵入接触关系。龙潭南沟单元与龙潭沟单元呈涌动型侵入接触关系，二者之间有清晰的岩性界面，成分上发生突变，由不含包体到含大量包体，结构上由粗粒结构快速变为似斑状结构，暗色矿物条带、长石斑晶平行接触面分布，指示龙潭南沟单元侵入时间稍晚。





1. 第四系；2. 中侏罗统髫髻山组；3. 中侏罗统九龙山组；4 下侏罗统下花园组；5. 下侏罗统南大岭组；6. 南大岭组中砂岩、粉砂岩、页岩；7. 下三叠统杏石口组；8. 中三叠统二马营组；9. 下奥陶统冶里组；10. 寒武系；11. 青白口系；12. 蓟县系；13. 长城系；14. 正长岩；15. 龙潭南沟单元；16 龙潭沟单元；17. 姜家湾单元；18. 角度不整合界线；19. 平行不整合界线；20. 岩性界线；21. 涌动型侵入接触界线；22. 正断层；23 性质不明断层；24. 角岩化；25. 采样点；26. 产状

图 1　冀北甲山岩体地质图 (据文献 [10])

Fig. 1　Geological map of Jiashan pluton in northern Hebei

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 岩石学特征

姜家湾单元 (KJ) 的岩石学特征为: 岩性为粗中粒含角闪辉石正长岩, 粗中粒半自形粒状结构。主要矿物成分: 碱性长石 (70% ~ 80%)、普通角闪石 (5% ~ 10%)、单斜辉石 (5% ~ 10%)、斜长石 (5%)和石英 (< 5%)。龙潭沟单元 (KL)的岩石学特征为: 岩性为粗粒角闪石英正长岩, 粗粒半自形粒状结构, 块状构造。矿物成分: 碱性长石 (62% ~ 85%)、普通角闪石 (5% ~ 10%)、单斜辉石 (4% ~ 7%)、斜长石 (2% ~ 5%)和石英 (5% ~ 8%)。龙潭南沟单元 (KLn)的岩石学特征为: 岩性为似斑状角闪石英正长岩, 块状构造, 似斑状结构, 斑晶 (30%)以碱性长石为主, 少量为斜长石和单斜辉石。基质具中细粒半自形粒状结构, 主要矿物成分: 正长石 (45% ~ 50%)、角闪石 (5% ~ 10%)、石英 (5% ~ 7%)、单斜辉石 (3% ~ 5%)、斜长石 (5%)和少量黑云母。

3个单元的副矿物组合基本相似, 主要为磁铁矿、锆石、磷灰石、钛铁矿, 少量榍石、磷钇矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿。

碱性长石为肉红色, 半自形—它形粒状, 粒径一般为 2~ 5 mm, 部分为 5~ 8 mm, 斑晶中碱性长石可达 15 mm。普通角闪石呈绿色、黑色, 柱状, 粒径 0.5~ 2 mm。单斜辉石为半自形柱粒状, 粒径 0.1~ 2.7 mm。

3 矿物化学成分

挑选有代表性的样品, 在中国地质科学院矿产资源研究所进行电子探针分析。22件碱性长石和 1件斜长石的电子探针分析结果列于表 1。1件斜长石的基质为更长石, 成分为 An= 12.2%, Ab = 83.0%, Or= 4.8%。碱性长石端元组分变化大, 主要为钠正长石和歪长石, 少量正长石 (图 2)。其中, 姜家湾单元碱性长石的 Ab变化于 40.0% ~ 78.1%, An变化于 1.2% ~ 7.9%, Or为 17.2% ~ 57.7%, 主要为歪长石和钠正长石。龙潭沟单元的碱性长石 Ab变化于 46.9% ~ 83.0%, An变化于 1.8% ~ 12.2%, Or为 4.8% ~ 50.3%, 长石分类图解中主要落在钠正长石区, 少量为歪长石。龙潭南沟单元斑晶中碱性长石 Ab变化大, 为 26.3% ~ 79.5%, An变化于 0.6% ~ 6.5%, Or为 0.6% ~ 76.5%。长石分类图解中落在钠正长石、正长石和歪长石区。基质中碱性长石的端员组分 Ab变化大, 为 22.9% ~ 76.3%, An变化于 0.6% ~ 3.2%, Or为 17.8% ~ 72.7%, 主要为正长石和钠正长石, 个别为歪长石。

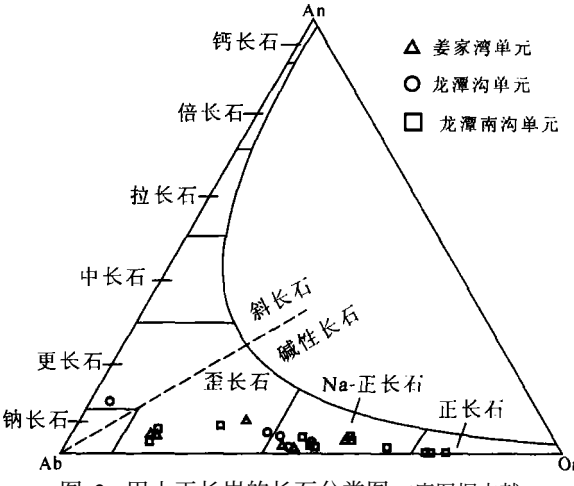
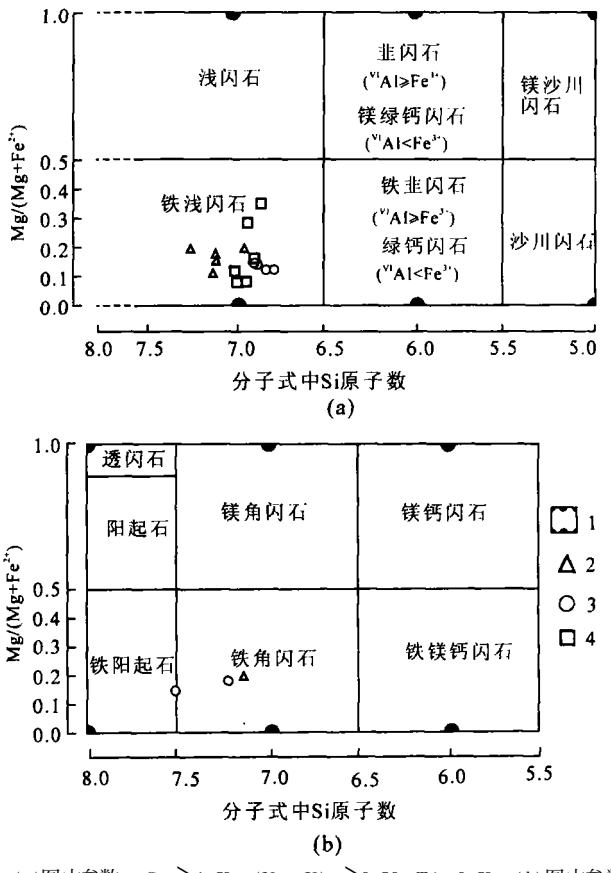


图 2 甲山正长岩的长石分类图 (底图据文献 [13])

Fig 2 Classification of the feldspars from Jiashan syenite



(a)图中参数: $Ca_B \geqslant 1.50$ $(Na+K)_A \geqslant 0.50$ $Ti < 0.50$ (b)图中参数: $Ca_B \geqslant 1.50$ $(Na+K)_A < 0.50$ $Ca_A < 0.50$ 1. 表示端员组分位置; 2 姜家湾单元; 3. 龙潭沟单元; 4 龙潭南沟单元

图 3 甲山正长岩的角闪石分类图 (底图据文献 [14])

Fig. 3 Classification of the amphiboles from Jiashan syenite

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　甲山岩体中碱性长石的电子探针分析结果、阳离子系数及端员组分 (w_B/%)

Table 1　Electron microprobe analyses, ion proportion and the end member of K-feldspars from Jiashan pluton (w_B/%)

单元	样号	点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	NiO	总量
KJ	D260	1	65.99	0.00	18.84	0.25	0.00	0.00	0.43	6.09	7.47	0.00	0.00	99.07
		2	66.84	0.00	19.44	0.02	0.00	0.19	0.91	8.92	2.82	0.09	0.18	99.41
		3	65.80	0.08	18.71	0.15	0.00	0.03	0.24	5.88	7.67	0.00	0.00	98.56
	D277	1	64.85	0.00	18.83	0.17	0.00	0.03	0.75	4.59	9.32	0.00	0.00	98.54
		2	67.78	0.00	19.60	0.35	0.00	0.07	0.85	8.62	2.97	0.00	0.00	100.24
		3	65.65	0.14	20.22	0.16	0.02	0.03	1.50	6.41	5.53	0.05	0.00	99.71
KLn	D261	1*	65.25	0.07	19.41	0.24	0.00	0.02	0.85	4.69	9.61	0.00	0.00	100.14
		2**	64.47	0.06	18.24	0.34	0.14	0.00	0.15	3.44	11.99	0.00	0.00	98.83
		3**	65.08	0.00	18.73	0.08	0.00	0.04	0.07	3.51	12.06	0.00	0.00	99.57
		4**	65.55	0.07	18.84	0.28	0.02	0.08	0.45	5.54	8.39	0.00	0.00	99.22
		5*	65.00	0.00	18.35	0.07	0.00	0.03	0.08	2.97	12.78	0.00	0.00	99.28
		6*	65.49	0.02	18.42	0.13	0.10	0.07	0.24	3.76	10.85	0.00	0.00	99.08
	D275	1**	67.22	0.00	19.62	0.45	0.01	0.22	0.51	8.83	2.82	0.00	0.00	99.68
		2**	65.45	0.03	18.80	0.16	0.00	0.08	0.34	5.29	8.28	0.00	0.00	98.43
		3**	65.57	0.03	19.07	0.35	0.02	0.05	0.61	4.38	9.25	0.00	0.00	99.33
		4*	67.23	0.00	19.80	0.25	0.06	0.05	1.05	8.13	2.74	0.00	0.00	99.31
		5*	66.23	0.09	19.50	0.19	0.02	0.17	0.25	7.18	4.87	0.08	0.00	99.67
		6*	65.34	0.00	18.78	0.25	0.00	0.08	0.66	5.23	7.44	0.00	0.00	97.78
KL	D262	1	66.24	0.07	19.62	0.16	0.00	0.07	0.92	6.13	6.50	0.00	0.00	99.71
		2	66.97	0.06	20.82	0.24	0.00	0.10	2.20	8.76	0.73	0.00	0.12	100.00
	D273	1	65.81	0.18	19.39	0.14	0.00	0.06	0.87	6.04	7.10	0.00	0.00	99.59
		2	66.43	0.02	19.28	0.03	0.06	0.05	0.66	5.52	8.49	0.00	0.00	100.54
		3	66.01	0.05	19.24	0.22	0.05	0.08	0.35	5.93	7.58	0.00	0.00	99.51

单元	样号	点号	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Cr	Ab	An	Or	矿物
KJ	D260	1	2.994	0.000	1.007	0.009	0.000	0.000	0.021	0.536	0.432	0.000	52.7	2.1	45.2	钠正长石
		2	2.977	0.000	1.020	0.001	0.000	0.025	0.043	0.770	0.160	0.030	78.1	4.7	17.2	歪长石
		3	3.004	0.003	1.007	0.006	0.000	0.002	0.012	0.520	0.447	0.000	52.7	1.2	47.1	钠正长石
	D277	1	2.980	0.000	1.020	0.007	0.000	0.002	0.037	0.409	0.546	0.000	40.0	3.3	57.7	钠正长石
		2	3.007	0.000	1.025	0.013	0.000	0.005	0.040	0.742	0.168	0.000	77.0	4.5	18.5	歪长石
		3	2.960	0.005	1.074	0.006	0.001	0.002	0.072	0.560	0.318	0.002	57.5	7.9	34.6	歪长石
KLn	D261	1*	2.948	0.002	1.034	0.009	0.000	0.001	0.041	0.411	0.554	0.000	38.8	3.6	57.6	钠正长石
		2**	2.970	0.002	0.990	0.013	0.005	0.000	0.007	0.307	0.705	0.000	26.3	1.1	72.6	正长石
		3**	2.970	0.000	1.008	0.003	0.000	0.003	0.003	0.311	0.702	0.000	26.7	0.6	72.7	正长石
		4**	2.977	0.002	1.008	0.011	0.001	0.005	0.022	0.488	0.486	0.000	47.7	1.8	50.5	钠正长石
		5*	2.985	0.000	0.993	0.003	0.000	0.002	0.004	0.264	0.749	0.000	22.9	0.6	76.5	正长石
		6*	3.007	0.001	0.997	0.005	0.004	0.005	0.012	0.335	0.636	0.000	32.7	1.3	66.0	钠正长石
	D275	1**	2.992	0.000	1.029	0.017	0.000	0.015	0.024	0.762	0.160	0.000	79.5	2.7	17.8	歪长石
		2**	3.000	0.001	1.016	0.006	0.000	0.005	0.017	0.470	0.484	0.000	46.9	1.8	51.3	钠正长石
		3**	2.997	0.001	1.027	0.013	0.001	0.003	0.030	0.388	0.539	0.000	39.1	3.2	57.5	钠正长石
		4*	3.021	0.000	1.048	0.009	0.002	0.003	0.051	0.708	0.157	0.000	76.3	5.7	18.0	歪长石
		5*	2.977	0.003	1.033	0.007	0.001	0.011	0.060	0.626	0.279	0.003	63.4	6.5	30.1	歪长石
		6*	3.021	0.000	1.023	0.010	0.000	0.006	0.033	0.469	0.439	0.000	48.4	3.5	48.1	钠正长石
KL	D262	1	2.989	0.002	1.043	0.006	0.000	0.005	0.044	0.536	0.374	0.000	54.7	4.8	40.5	歪长石
		2	2.980	0.002	1.092	0.009	0.000	0.015	0.105	0.756	0.041	0.000	83.0	12.2	4.8	更长石
	D273	1	2.972	0.006	1.032	0.005	0.000	0.004	0.042	0.529	0.409	0.000	52.5	4.4	43.1	钠正长石
		2	2.977	0.001	1.018	0.001	0.002	0.003	0.032	0.480	0.485	0.000	46.9	2.8	50.3	钠正长石
		3	2.984	0.002	1.025	0.008	0.002	0.005	0.017	0.520	0.437	0.000	51.9	1.8	46.3	钠正长石

注：表中 TFeO为全铁；* 为斑晶；** 为基质。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 甲山正长岩中角闪石的电子探针分析结果、阳离子系数及端员组分 (w_B/%)

Table 2 Electron microprobe analyses, ion proportion and the end member of amphibole from Jiashan syenite (w_B/%)

单元	样号	点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	NiO	总量
KJ	D260	1	44.44	1.15	3.97	30.24	0.59	3.41	9.61	1.82	1.06	0.06	0.00	96.35
		2	44.22	1.17	4.08	30.47	0.75	3.16	9.60	2.13	1.03	0.02	0.00	96.63
		3	45.21	1.14	3.87	29.34	0.54	3.52	9.30	2.23	1.03	0.06	0.00	96.24
	D277	1	44.43	1.25	4.76	29.98	0.81	2.88	10.31	1.93	1.00	0.24	0.00	97.59
		2	44.19	0.96	4.79	31.24	0.89	2.01	10.33	1.84	0.81	0.13	0.05	97.24
		3	43.21	1.63	5.52	27.94	0.66	3.69	10.58	1.73	1.33	0.45	0.04	96.78
KLn	D261	1	43.78	1.00	5.95	24.57	0.78	6.32	11.10	1.88	1.07	0.00	0.00	96.45
		2	43.46	1.42	6.16	27.24	0.76	4.53	10.83	2.24	1.20	0.05	0.00	97.89
		3	43.28	1.43	7.02	25.18	0.72	5.20	10.89	1.86	1.21	0.00	0.02	96.81
	D275	1	42.82	1.47	5.64	28.96	0.76	3.22	10.60	1.93	1.16	0.00	0.00	96.56
		2	44.16	1.20	5.73	28.07	0.49	4.03	11.10	1.94	1.15	0.22	0.05	98.14
		3	43.01	1.18	5.73	28.68	0.63	3.26	10.63	1.82	1.20	0.00	0.07	96.21
KL	D262	1	42.29	1.45	6.28	29.32	0.65	2.62	10.82	2.11	1.29	0.06	0.08	96.97
		2	42.50	1.26	5.98	29.76	0.63	2.95	10.84	1.75	1.46	0.05	0.10	97.28
		3	41.90	1.49	6.25	30.02	0.63	2.45	10.72	1.99	1.28	0.21	0.09	97.03
	D273	1	46.92	0.75	2.96	30.19	0.91	2.87	10.84	0.94	0.71	0.01	0.07	97.17
		2	42.03	1.46	5.93	30.43	0.55	2.33	10.56	1.86	1.23	1.24	0.06	97.68
		3	45.75	1.16	3.85	30.92	0.74	3.03	9.54	2.27	0.91	0.10	0.05	98.32

单元	样号	点号	TSi	TAl	TFe^{3+}	总T	CAl	CCr	CFe^{3+}	CTi	CMg	CFe^{2+}	CMn	总C	BCa	BNa	总B	ANa	AK	总A	总离子数	种属
KJ	D260	1	7.141	0.751	0.108	8.000	0.000	0.008	0.480	0.139	0.817	3.476	0.080	5.000	1.655	0.345	2.000	0.222	0.217	0.439	15.439	铁角闪石
		2	7.119	0.774	0.107	8.000	0.000	0.003	0.407	0.142	0.758	3.558	0.102	5.000	1.656	0.344	2.000	0.321	0.212	0.532	15.532	铁浅闪石
		3	7.264	0.732	0.004	8.000	0.000	0.008	0.346	0.138	0.843	3.592	0.073	5.000	1.601	0.399	2.000	0.296	0.211	0.507	15.507	铁浅闪石
	D277	1	7.112	0.888	0.000	8.000	0.009	0.030	0.209	0.151	0.687	3.805	0.110	5.000	1.768	0.232	2.000	0.367	0.204	0.571	15.571	铁浅闪石
		2	7.133	0.867	0.000	8.000	0.044	0.017	0.257	0.117	0.484	3.961	0.122	5.000	1.787	0.213	2.000	0.363	0.167	0.529	15.529	铁浅闪石
		3	6.959	1.041	0.000	8.000	0.006	0.057	0.118	0.197	0.886	3.645	0.090	5.000	1.826	0.174	2.000	0.366	0.273	0.639	15.639	铁浅闪石
KLn	D261	1	6.926	1.074	0.000	8.000	0.035	0.000	0.245	0.119	1.491	3.006	0.105	5.000	1.882	0.118	2.000	0.458	0.216	0.674	15.674	铁浅闪石
		2	6.890	1.110	0.000	8.000	0.040	0.006	0.114	0.169	1.071	3.497	0.102	5.000	1.840	0.160	2.000	0.528	0.243	0.771	15.771	铁浅闪石
		3	6.858	1.142	0.000	8.000	0.168	0.000	0.120	0.170	1.228	3.217	0.097	5.000	1.849	0.151	2.000	0.420	0.245	0.665	15.665	铁浅闪石
	D275	1	6.938	1.062	0.000	8.000	0.014	0.000	0.162	0.179	0.778	3.762	0.104	5.000	1.840	0.160	2.000	0.447	0.240	0.686	15.686	铁浅闪石
		2	7.011	0.989	0.000	8.000	0.082	0.028	0.000	0.143	0.954	3.727	0.066	5.000	1.888	0.112	2.000	0.485	0.233	0.718	15.718	铁浅闪石
		3	6.978	1.013	0.000	8.000	0.083	0.000	0.119	0.144	0.789	3.777	0.087	5.000	1.850	0.150	2.000	0.423	0.249	0.672	15.672	铁浅闪石
KL	D262	1	6.889	1.111	0.000	8.000	0.094	0.008	0.000	0.178	0.636	3.395	0.090	5.000	1.889	0.111	2.000	0.555	0.268	0.823	15.823	铁浅闪石
		2	6.876	1.124	0.000	8.000	0.016	0.006	0.186	0.153	0.712	3.840	0.086	5.000	1.879	0.121	2.000	0.428	0.301	0.729	15.729	铁浅闪石
		3	6.823	1.177	0.000	8.000	0.021	0.027	0.130	0.182	0.595	3.958	0.087	5.000	1.870	0.130	2.000	0.498	0.266	0.764	15.764	铁浅闪石
	D273	1	7.505	0.495	0.000	8.000	0.062	0.001	0.099	0.090	0.684	3.939	0.123	5.000	1.858	0.142	2.000	0.149	0.145	0.294	15.294	铁阳起石
		2	6.789	1.128	0.083	8.000	0.000	0.158	0.206	0.177	0.561	3.822	0.075	5.000	1.828	0.172	2.000	0.410	0.253	0.664	15.664	铁浅闪石
		3	7.232	0.717	0.051	8.000	0.000	0.012	0.369	0.138	0.714	3.668	0.099	5.000	1.616	0.384	2.000	0.312	0.184	0.495	15.495	铁角闪石

注：表中 TFeO 为全铁；分子式中离子系数以 23个氧原子计算。

18件代表性角闪石的电子探针分析数据见表 2。根据 Leake[14]分类 (图 3)，甲山岩体中角闪石主要为钙角闪石中的铁浅闪石，少数为铁角闪石和铁阳起石。铁浅闪石的化学成分为 $w(Al_2O_3)$ = 3.87% ~ 7.02%，$w(FeO + Fe_2O_3)$ = 24.57% ~ 31.24%，$w(MgO)$ = 2.01% ~ 6.32%，$w(CaO)$ = 9.30% ~ 11.10%，$w(Na_2O)$ = 1.73% ~ 2.24%。3个单元角闪石的种类略有差别，姜家湾单元主要为铁浅闪石，个别为铁角闪石；龙潭沟单元主要为铁浅闪石，少数为铁角闪石和铁阳起石；龙潭南沟单元均为铁浅闪石。

18件单斜辉石的电子探针分析结果见表 3。甲山正长岩的单斜辉石属钙铁辉石和普通辉石 (图 4)。钙铁辉石的组分变化范围较小：Wo为 45.951% ~ 47.269%，En 变化于 11.390% ~ 18.010%，Fs为 35.151% ~ 42.499%。普通辉石的组分变化较大，Wo为 27.671% ~ 44.426%，En变化于 5.821% ~ 23.766%，Fs变化于 33.556% ~ 66.314%。姜家湾单元主要为钙铁辉石，少量为普通辉石；龙潭沟单元以普通辉石为主，钙铁辉石次

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　甲山正长岩中辉石的电子探针分析结果、阳离子数及端员组分 (w_B/%)

Table 3　Electron microprobe analyses, ion proportions and the end members of the representative clinopyroxenes from Jiashan syenite (w_B/%)

单元	样号	点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	NiO	总量
KJ	D260	1	48.91	0.41	0.57	23.33	0.82	3.84	20.91	0.43	0.02	0.03	0.06	100.33
		2	49.46	0.40	0.68	20.83	0.88	4.98	21.41	0.41	0.03	0.08	0.00	101.16
		3	48.59	0.40	0.60	23.08	0.80	3.81	20.80	0.43	0.05	0.12	0.05	101.73
	D277	1	49.05	0.97	2.11	22.64	0.77	5.41	17.15	0.92	0.03	0.23	0.07	100.35
		2	49.54	0.22	0.52	22.48	0.86	4.00	21.09	0.46	0.04	0.13	0.03	101.37
		3	49.35	0.40	0.53	22.97	1.14	3.65	20.68	0.56	0.00	0.01	0.03	102.32
KLn	D261	1	50.13	0.08	0.30	19.70	0.90	5.95	21.60	0.31	0.05	0.11	0.00	100.13
		2	49.23	0.25	0.31	20.20	1.03	5.96	21.10	0.29	0.08	0.01	0.04	100.50
		3	50.47	0.17	0.27	20.28	0.93	5.90	21.37	0.23	0.00	0.07	0.08	102.77
	D275	1	48.96	0.39	0.72	23.70	0.96	4.26	19.83	0.40	0.02	0.15	0.06	100.45
		2	48.90	0.34	1.14	22.77	0.75	4.93	19.48	0.21	0.03	0.46	0.03	101.04
		3	48.58	0.38	0.64	23.42	1.06	4.10	19.81	0.37	0.04	0.10	0.03	101.53
KL	D262	1	48.73	0.38	0.93	21.90	0.87	4.47	20.98	0.53	0.00	0.10	0.07	99.96
		2	49.63	0.59	1.12	19.67	0.70	5.84	21.22	0.39	0.02	0.01	0.00	101.19
		3	49.78	0.63	1.90	18.46	0.66	7.60	18.99	0.84	0.24	0.00	0.00	102.10
	D273	1	50.00	0.10	0.66	31.92	0.92	2.12	11.33	0.55	0.08	0.45	0.00	99.13
		2	49.72	0.31	1.25	33.13	1.28	1.76	11.40	0.59	0.45	0.00	0.06	101.95
		3	49.21	0.16	1.31	32.20	1.19	1.77	10.88	0.71	0.60	0.18	0.07	101.28

单元	样号	点号	TSi	TAl	M_1Al	M_1Ti	M_1Fe^{2+}	M_1Cr	M_1Mg	M_1Ni	M_2Fe^{2+}	M_2Mn	M_2Ca	M_2Na	M_2K	总离子数	Wo	En	Fs	矿物
KJ	D260	1	1.973	0.027	0.000	0.012	0.754	0.001	0.231	0.002	0.034	0.028	0.904	0.034	0.001	3.999	46.352	11.844	41.804	钙铁辉石
		2	1.979	0.021	0.011	0.012	0.678	0.003	0.297	0.000	0.019	0.030	0.918	0.032	0.002	3.998	47.269	15.298	37.432	钙铁辉石
		3	1.972	0.028	0.000	0.012	0.751	0.004	0.230	0.002	0.032	0.027	0.904	0.034	0.003	3.997	46.482	11.847	41.627	钙铁辉石
	D277	1	1.954	0.046	0.053	0.029	0.585	0.007	0.324	0.002	0.169	0.026	0.732	0.071	0.002	3.998	39.871	17.630	42.499	普通辉石
		2	1.992	0.008	0.017	0.007	0.732	0.004	0.240	0.001	0.024	0.029	0.909	0.036	0.002	3.998	46.990	12.400	40.610	钙铁辉石
		3	1.991	0.009	0.016	0.012	0.751	0.000	0.219	0.001	0.024	0.039	0.894	0.044	0.000	4.000	46.379	11.390	42.231	钙铁辉石
KLn	D261	1	1.994	0.014	0.008	0.002	0.640	0.003	0.353	0.000	0.023	0.030	0.921	0.024	0.003	3.997	46.990	18.010	41.084	钙铁辉石
		2	1.975	0.015	0.000	0.008	0.631	0.000	0.356	0.001	0.032	0.035	0.907	0.023	0.004	3.996	45.951	17.938	37.432	钙铁辉石
		3	2.002	0.013	0.013	0.005	0.673	0.002	0.349	0.003	0.023	0.031	0.908	0.018	0.000	4.000	46.424	17.952	41.672	钙铁辉石
	D275	1	1.973	0.034	0.008	0.012	0.775	0.005	0.256	0.002	0.078	0.033	0.856	0.031	0.001	3.999	44.134	13.006	42.860	普通辉石
		2	1.972	0.054	0.026	0.010	0.768	0.015	0.296	0.002	0.115	0.026	0.842	0.016	0.002	3.998	43.615	15.265	41.121	普通辉石
		3	1.977	0.031	0.008	0.012	0.777	0.003	0.249	0.001	0.068	0.037	0.864	0.029	0.002	3.998	44.426	12.700	42.875	普通辉石
KL	D262	1	1.961	0.044	0.006	0.011	0.687	0.003	0.268	0.000	0.024	0.030	0.904	0.041	0.000	4.000	46.734	13.640	39.617	钙铁辉石
		2	1.972	0.052	0.024	0.018	0.654	0.000	0.346	0.000	0.042	0.024	0.903	0.030	0.001	3.999	46.892	17.956	35.151	钙铁辉石
		3	1.950	0.088	0.038	0.019	0.554	0.000	0.444	0.000	0.105	0.022	0.797	0.064	0.012	3.998	42.697	23.766	33.556	普通辉石
	D273	1	2.102	0.033	0.033	0.003	1.122	0.015	0.133	0.000	0.306	0.033	0.510	0.045	0.004	3.996	28.380	7.389	64.231	普通辉石
		2	2.055	0.061	0.061	0.010	1.145	0.000	0.108	0.002	0.323	0.045	0.505	0.047	0.024	3.976	28.053	5.821	66.126	普通辉石
		3	2.064	0.065	0.065	0.005	1.129	0.006	0.111	0.002	0.314	0.042	0.489	0.058	0.032	3.968	27.671	6.016	66.314	普通辉石

注：表中 TFeO为全铁。

之；龙潭南沟单元为钙铁辉石和普通辉石。

4　地球化学特征

甲山岩体 3个单元的主量元素分析结果表明[10]，甲山岩体在化学成分上具有富硅、富碱、富铁、富铝、贫钛、贫镁的特点，从早单元到晚单元，SiO_2含量明显增加（平均含量分别为 62.47%、65.27%、65.48%），K_2O+Na_2O含量则逐渐减少（平均为 11.03%、10.60%、10.28%）。里特曼指数 σ明显减少，表明 3个单元为在成分上具亲缘关系的演化序列，从碱性向酸碱性演化。岩石碱性指数（AKI）变化于 0.85～0.98，多数样品的 $w(K_2O)>w(Na_2O)$，在 $w(K_2O)-w(Na_2O)$图解[16]（图略）上 3个单元均位于 A型花岗岩区。

甲山岩体各单元的稀土元素最显著的特征是稀土元素总量较高，$w(\Sigma REE)=237.86\times10^{-6}$～$450.38\times10^{-6}$；$w(LREE)/w(HREE)$为 6.05～10.97，$w(La)_N/w(Sm)_N=3.71$～5.94，轻稀土明显富集，具有中等明显的负铕异常（$\delta(Eu)=0.36$

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

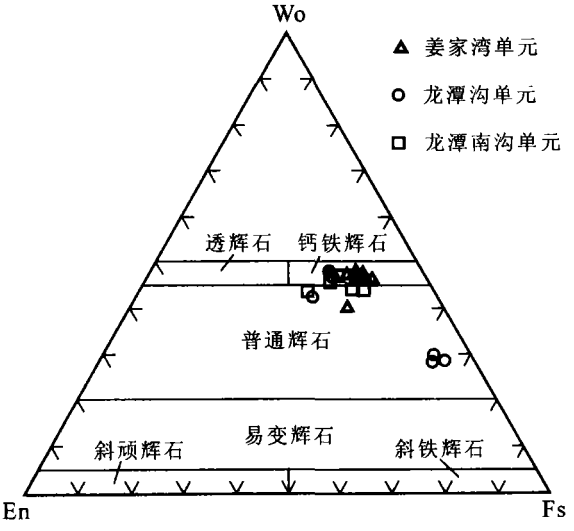


图 4 甲山正长岩中辉石分类图 (底图据文献 [15])

Fig. 4 Classification of the clinopyroxenes from Jiashan syenite

~ 0.70)。在稀土配分图上显示出曲线右倾、且LREE富集和 Eu负异常的特征(图 5)。3个单元的稀土元素配分曲线相似, 稀土元素之间的分异接近, 且集中在一个很狭小的区域内, 反映它们具有相同的源区性质, 是同源岩浆演化的产物[17]。

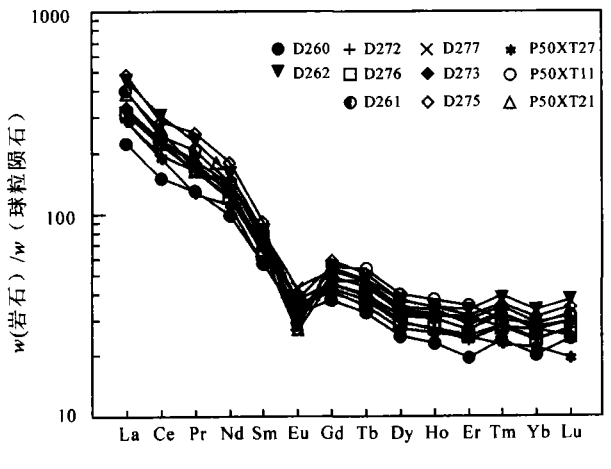


图 5 甲山正长岩的稀土元素配分模式 (据文献 [10])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of the Jiashan syenite

微量元素分析结果显示, 甲山岩体的 Ba、Sr和 Cr、Co、Ni、V等过渡元素亏损, 而高场强元素如 Nb、Zr、Hf含量较高, 具有 A型花岗岩的特征[18]。Ga含量高, $w(Ga)/w(Al)$为 315×10^{-6} ~ 360×10^{-6}, 在 Whalen等[19]提出的多种判别图上均落在 A型花岗岩区。岩体形成于造山晚期岩石圈伸展的环境下, 与地幔上涌有关, 表明区域晚侏罗世的挤压缩短和地壳增厚转变为早白垩世的伸展和岩石圈减薄, 暗示中国东部的岩石圈减薄应从早白垩世开始[10]。

5 Sr、Nd同位素

5.1 分析方法

岩石的 Sm-Nd、Rb-Sr同位素测定在中国地质科学院地质研究所完成。将 0.5 g粉末样品 (小于200目) 置于低压密封溶样杯中, 加入 $HF+HNO_3$溶解, 待样品完全溶解后, 蒸干, 用 HCl溶解。样品分为两部分: 一份用于含量测定, 另一份用于 Nd和 Sr比值测定。含量分析采用同位素稀释法分析在 MAT-261固体同位素质谱计上测定。Nd和 Sr同位素分析过程如下: 样品加入 $HClO_4$, 蒸干, 用阳离子交换柱分离, 收集 REE和 Sr, 蒸干, 再通过 HDEHP交换柱分离, 收集 Nd, 蒸干, 在同位素质谱计上测定。Nd和 Sr同位素比值测定分别采用 $N(^{146}Nd)/N(^{144}Nd)=0.7219$和 $N(^{86}Sr)/N(^{88}Sr)=0.1194$进行质量分馏校正, 分析流程空白实验本底: Sm、Nd均为 5×10^{-11} g, Rb、Sr均为 10^{-9} ~ 10^{-10} g。标样测定结果: J.M. Nd$_2O_3$, $^{143}Nd/^{144}Nd=0.511\ 125\pm8$ (2σ); GBW 04419, $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512\ 725\pm10$ (2σ); NBS987SrCO$_3$, $^{87}Sr/^{86}Sr=0.710\ 25\pm2$ (2σ)。计算参数: $\lambda_{Rb}=1.41\times10^{-11}/a$, $\lambda_{Sm}=6.54\times10^{-12}/a$, $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{UR}=0.512\ 638$, $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{UR}=0.1967$。

5.2 分析结果及讨论

甲山岩体各单元的 Sr、Rb、Sm和 Nd同位素分析结果列于表 4。甲山正长岩的 $w(Sr)$为 61.89×10^{-6} ~ 190.2×10^{-6}, $w(Rb)$为 140.4×10^{-6} ~ 283.6×10^{-6}。$w(Sm)/w(Nd)$值较低 (0.1013 ~ 0.1166), $N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd)$变化小 (0.512 286 ~ 0.512 456), 且 $\varepsilon_{Nd}(t)$值变化不大, 显示它们的岩浆源区相同[20]。

甲山正长岩的 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$初始比值 I_{Sr}=0.701 41 ~ 0.707 41, 平均为 0.703 79, 落在现代大洋玄武岩的 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$初始比值范围内 (0.702 ~ 0.706)[21]。$\varepsilon_{Nd}(t)$值较高, 为 -2.27 ~ -5.58, 平均为 -4.06, 在 $(N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr))_i$-$\varepsilon_{Nd}(t)$图解中 (图 6), 投点位于未分异地幔和 EM I范围之间, 近水平方向分布, 与地幔排列方向斜交。投点远离华北上地壳和下地壳, 表明岩浆来自 EM I型富集的大陆岩石圈地幔源区。在 $\varepsilon_{Nd}(t)-(1/w(Nd))\times1\ 000$图解中, $\varepsilon_{Nd}(t)$与 $(1/w(Nd))\times1\ 000$略具正相关性, 表明岩浆以结晶分异为主, 地壳同化混染的影响很小。甲山正

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　甲山正长岩的 Sr和 Nd同位素组成

Table 4　Sr and Nd isotopic compositions of the Jiashan syenite

单元号	样号	w(Rb) /10⁻⁶	w(Sr) /10⁻⁶	$N(^{87}Rb)/N(^{86}Sr)$	$N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$	I_{Sr}	w(Sm) /10⁻⁶	w(Nd) /10⁻⁶	$N(^{147}Sm)/N(^{144}Nd)$	$N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd)$	$\varepsilon_{Nd}(t)$	T_{DM} /Ma
KJ	D260						8.822	46.153	0.115 6	0.512 360±9	-4.25	1 226
KJ	D272	140.4	61.89	6.566	0.712 666±13	0.702 12	8.603	48.186	0.108 0	0.512 456±7	-2.27	1 234
KJ	D277	171.7	92.40	5.380	0.710 049±14	0.701 41	9.909	51.388	0.116 6	0.512 379±9	-3.40	1 118
KL	D262	116.9	132.20	2.559	0.711 514±15	0.707 41	11.032	65.857	0.101 3	0.512 325±10	-4.73	1 001
KL	D276	183.7	190.20	2.797	0.709 121±15	0.704 63	10.086	54.572	0.111 8	0.512 421±10	-3.01	1 216
KL	D273	187.3	89.90	6.033	0.713 121±13	0.703 43	12.767	69.172	0.111 6	0.512 335±8	-4.68	1 204
KLn	D261	164.9	162.10	2.946	0.710 803±13	0.706 07	10.468	59.142	0.107 1	0.512 286±6	-5.58	1 090
KLn	D275	283.6	142.70	5.755	0.710 692±14	0.701 45	9.994	54.369	0.111 2	0.512 340±8	-4.58	1 209

注：样品由唐索寒、王进辉分析；锆石 U-Pb法测定岩体侵位年龄 t= 113 Ma。

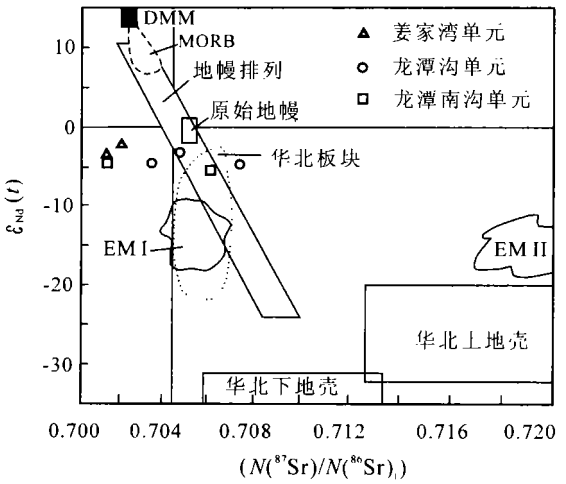


图 6　甲山正长岩的 I_{Sr} - $\varepsilon_{Nd}(t)$关系图（底图据文献 [22-26]）

Fig 6　$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ vs $\varepsilon_{Nd}(t)$ diagram for the Jiashan syenite

长岩的 Sr、Nd同位素比值变化范围较小，反映了在岩浆形成或上升过程中受到地壳物质的混染程度低。区域上的千层背、山海关、窟窿山和响山 A型花岗岩也起源于岩石圈地幔①。侏罗纪—白垩纪八达岭基性岩形成于 EM I型富集大陆岩石圈地幔[26]。华北地区中生代基性岩及新生代玄武岩中地幔岩包体的地球化学研究已经表明，中生代华北板块下的岩石圈地幔为 EM I型[23-25]。甲山岩体各单元的 Nd同位素亏损地幔模式年龄差别不大，变化于 1 001~1 234 Ma，表明燕山造山带岩石圈的富集作用可能发生在中元古代晚期，与钱青等[25]认为华北和大别—苏鲁造山带岩石圈的富集作用主要发生在早—中元古代的结论基本一致。

6　岩石成因讨论

中国东部大陆岩石圈在中生代发生了强烈的岩石圈减薄作用和构造格架的重大转折事件[27]，华北燕山期岩浆活动广泛发育，对于其构造环境和动力学背景有多种解释。赵越等[28]、郑亚东等[2]将燕山构造—岩浆岩带形成与太平洋—欧亚板块的相互作用相联系。邵济安等[29]、李伍平等[8]和张旗等[7]则认为燕山地区中生代岩浆的形成和演化与板内的底侵作用有关，而与太平洋板块俯冲无直接的成因联系。目前多数学者认为大陆岩石圈地幔在中生代发生拆沉对诱发岩浆活动有至关重要的影响[6, 25-26]。甲山岩体形成于陆内伸展作用环境下，Rb-Sr、Sm-Nd同位素表明岩浆为富集的大陆岩石圈地幔部分熔融形成，中生代华北地区岩石圈的拆沉和减薄作用可能是引发岩石圈地幔部分熔融的重要原因。华北板块受到周边板块俯冲和碰撞作用的影响，导致了区域构造应力场变化，造成岩石圈拆沉、去根、不均匀拉伸和减薄，导致中国东部形成一系列盆地[30]，同时诱发大陆岩石圈地幔部分熔融形成岩浆[8]，这些岩浆在上升过程中发生了分离结晶作用，但受到围岩混染作用的影响较小。

7　结　论

(1)甲山岩体形成于早白垩世晚期，可划分为 3个单元，岩石学、主量元素、稀土元素和微量元素特征表明 3个单元具有同源岩浆演化的特征。岩体为 A型花岗岩，岩体形成于造山晚期岩石圈伸展的环境下，与地幔上涌有关，说明区域晚侏罗世的挤压缩短和地壳增厚转变为早白垩世的伸展和岩石圈减薄，暗示中国东部的岩石圈减薄应从早白垩世开始。

(2)电子探针分析结果表明：甲山岩体碱性长

①李伍平．燕山造山带中生代火山岩地球化学特征及其地球动力学背景．中国科学院广州地球化学研究所博士后研究工作报告．2002.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

石主要为钠正长石和歪长石，少量正长石；角闪石主要为钙角闪石中的铁浅闪石，少数为铁角闪石和铁阳起石；单斜辉石属钙铁辉石和普通辉石。

(3)甲山正长岩的 $w(^{87}Sr)/w(^{86}Sr)$初始比值 I_{Sr} = 0.701 409～0.707 405，平均值为 0.703 79，$\varepsilon_{Nd}(t)$值为 -2.27～-5.58，表明岩浆为富集的大陆岩石圈地幔部分熔融形成。甲山正长岩的 Nd同位素亏损地幔模式年龄表明燕山造山带岩石圈的富集作用可能发生在中元古代晚期。岩石圈的拆沉和减薄作用是引发岩石圈地幔部分熔融的原因之一。

撰写本文时，得到赵越研究员和王立本研究员的指导，在此表示诚挚的谢意。

参考文献:

[1] 赵越．燕山地区中生代造山运动及构造演化 [J]．地质论评，1990，36(1)：1-13.

[2] 郑亚东，Davis G A，王琮，等．燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题 [J]．地质学报，2000，74(4)：289-302.

[3] Davis G A，Zheng Y，Wang C，et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt，with emphasis on Hebei and Liaoning provinces，northern China [J]. Geological Society of America Memoir，2001，194：171-197.

[4] 赵越，张拴宏，徐刚，等．燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件 [J]．地质通报，2004，23(9-10)：854-863.

[5] 牟保磊，阎国翰．燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义 [J]．地质学报，1992，66(2)：108-120.

[6] 邓晋福，赵海玲，莫宣学，等．中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙 [M]．北京：地质出版社，1996．33-37.

[7] 张旗，赵太平，王焰，等．中国东部燕山期岩浆活动的几个问题 [J]．岩石矿物学杂志，2001，20(3)：273-280.

[8] 李伍平，李献华，路凤香，等．辽西早白垩世义县组火山岩的地质特征及其构造背景 [J]．岩石学报，2002，18(2)：193-204.

[9] 刘红涛，翟明国，刘建明，等．华北克拉通北缘中生代花岗岩：从碰撞后到非造山 [J]．岩石学报，2002，18(4)：433-448.

[10] 杨富全，吴海，刘晓文，等．冀北承德甲山正长岩——燕山陆内造山带岩石圈减薄的早期记录 [J]．地质论评，2003，49(5)：474-485.

[11] Davis G A，Wang C，Zheng Y，et al. The enigmatic Yinshan fold and thrust belt of northern China：New views on its intraplate contractional styles [J]. Geology，1998，26：43-46.

[12] 杨富全，李彦．河北甲山正长岩体的岩石谱系单位划分及地球化学特征 [J]．西安地质学院学报，1997，19(1)：43-47.

[13] 北京大学地质系岩矿教研室．光性矿物学 [M]．北京：地质出版社，1979．180-182.

[14] Leake B E，Woolley A R，Arps C E S，et al. Nomenclature of amphiboles：report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association，Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. American Mineralogist，1997，82：1019-1037.

[15] Morimoto N，Fabries J，Ferguson A K，et al. Nomenclature of pyroxenes [J]. Mineralogical Magazine，1988，52：535-550.

[16] Collins W J，Beams S D，White A J R，et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology，1982，80：189-200.

[17] 赵欣，喻学惠，莫宣学，等．滇西新生代富碱斑岩及其深源包体的岩石学和地球化学特征 [J]．现代地质，2004，18(2)：217-228.

[18] Whalen J B，Jenner G A，Longstaffe F J，et al. Geochemical and isotopic (O，Nd，Pb and Sr) constraints on A-type granite petrogenesis based on the Topsails igneous suite，Newfoundland Appalachians [J]. Journal of Petrology，1996，37：1463-1489.

[19] Whalen J B，Currie K，Chappell B W. A-type granites：geochemical characteristics，discrimination and petrogenesis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology，1987，95：407-419.

[20] 王涛，郑亚东，刘树文，等．中蒙边界亚干变质核杂岩糜棱状钾质花岗岩——早中生代收缩与伸展构造体制的转换标志 [J]．岩石学报，2002，18(2)：177-186.

[21] Faure G. Principles of Isotope Geology [M]. New York：John Wiley and Sons，1986．567.

[22] Zindler A，Hart S R. Chemical geodynamics [J]. Annual Review Earth and Planetary Sciences，1986，14：493-571.

[23] 陈义贤，陈文寄，周新华，等．辽西及邻区中生代火山岩一年代学、地球化学和构造背景 [M]．北京：地质出版社，1997．218-254.

[24] Jahn B M，Wu F Y，Lo C H，et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust：geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex，central China [J]. Chemical Geology，1999，157：119-146.

[25] 钱青，钟孙霖，李通艺，等．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 [J]．岩石学报，2002，18(3)：275-292.

[26] Guo F，Fan W，Wang Y，et al. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China Block：constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle [J]. Physics and Chemistry of the Earth (A)，2001，26：759-771.

[27] 杨进辉，朱美妃，刘伟，等．胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因 [J]．岩石学报，2003，19(4)：692-700.

[28] 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.

[29] 邵济安，刘福田，陈辉，等．大兴安岭-燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系 [J]．地质学报，2001，75(1)：56-63.

[30] 徐贵忠，蔡燕杰，周瑞，等．山东胶莱盆地形成的动力学条件及其与金成矿作用的相关性讨论 [J]．现代地质，2004，18(1)：8-16.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net