

北太行紫荆关基性岩体的成因:岩石学和地球化学证据

刘 玲, 陈 斌*, 刘安坤

北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871

摘要:通过对北太行紫荆关晚中生代基性岩体的岩石学和地球化学特征研究, 讨论其岩浆源区特征及成因。结果表明, 紫荆关岩体主要由橄榄二辉石岩、角闪辉长岩和闪长岩等岩石组成。橄榄二辉石岩具有明显的堆晶结构, 可能是堆晶成因, 而角闪辉长岩和闪长岩可能是堆晶形成之后的残余岩浆的结晶。闪长岩中的斜长石显示复杂的结构和成分环带, 相对富钠的核部见富钙斜长石叠加, 后者又向富钠斜长石演化。闪长岩中的单斜辉石也显示复杂的成分环带, 主要是最边部的 MgO 含量比紧邻的内侧辉石更高。这表明在闪长岩形成过程中有新的幔源高温富镁的岩浆注入。以上各岩石类型具有类似的地球化学性质, 包括较强的稀土分异((La/Yb)_N 比值为 5.76~23.13), 高 Sr/Y 比值(50.95~146.13), 富集 K、Sr、Ba 等大离子亲石元素和 LREE, 亏损 Nb、Zr、Ti 等高场强元素和 HREE, Eu 异常不明显。都显示富集的 Sr-Nd 同位素特征, $I_{Sr} = 0.7058 \sim 0.7066$, $\epsilon_{Nd}(t) = -13.8 \sim -18.2$ 。这些特征表明紫荆关基性岩体的母岩浆来源于 EM1 型富集地幔的部分熔融。橄榄辉石岩和角闪辉长岩具有类似的 Nd 同位素成分(主要为 $\epsilon_{Nd}(t) = -15.0 \sim -16.6$), 但形成较晚的闪长岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值却比较高(-13.8~ -14.6), 也支持新的幔源岩浆在晚期的注入。

关键词: 基性岩体; 斜长石环带; Sr-Nd 同位素; 岩浆补充; 太行山。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2009)01-0165-14

收稿日期: 2008-11-09

Petrogenesis of the Zijingguan Mafic Pluton, Northern Taihang Orogen: Constraints from Petrology and Geochemistry

LIU Ling, CHEN Bin*, LIU An-kun

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Through the petrological and geochemical study carried out for the Zijingguan mafic pluton (North Taihang), this paper is to understand their magma sources and petrogenesis. The Zijingguan mafic rocks are mainly made up of olivine-bearing pyroxenites, hornblende gabbros and diorites. Cumulate textures can be seen in the olivine-bearing pyroxenites, suggesting a cumulus origin of them. Hornblende gabbros and diorites are probably crystallized products from the residual melts after the accumulation process. Plagioclases from diorites show complicated textures and compositional zoning, with relatively sodium-rich core mantled by calcium-rich plagioclase, the latter evolved to sodium-rich plagioclase towards the rim with descent of magma temperature. Similarly, clinopyroxenes from diorite show complicated compositional zoning, with the MgO abundances in the rim being slightly higher than that of immediate inner part of pyroxenes. These textures suggest that the magma chamber had experienced a process of magma recharge from the mantle source. The different rock types of the Zijingguan mafic pluton share many common geochemical features like highly fractionated REE patterns ((La/Yb)_N = 5.76 - 23.13) and high Sr/Y ratios (50.95 - 146.13), highly enriched LILE (K, Sr, Ba) and LREE, and depleted HFSE (Nb, Zr, Ti) and HREE, with minor Eu anomalies in the REE patterns. They show enriched Sr-Nd isotopic compositions, with $I_{Sr} = 0.7058 \sim 0.7066$, $\epsilon_{Nd}(t) = -13.8$ to -18.2 . These geochemical features suggest that the mafic pluton originated from partial melting of an EM1 type mantle source. Olivine-bearing pyroxenites have isotopic composition identical to that of hornblende gabbros (mostly $\epsilon_{Nd}(t) = -15$ to -16.6), while the later-crystallizing diorites have a slightly higher $\epsilon_{Nd}(t) = -13.8$ to -14.6 , which is in agreement with the model of magma recharge during magma evolution.

Key words: mafic pluton; compositional zoning of plagioclase; Sr-Nd isotopes; magma recharge; Taihang Mountains.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40625005).

作者简介: 刘玲(1985-), 女, 硕士, 主要从事岩浆作用岩石学与地球化学研究。* 通讯作者: 陈斌, E-mail: binchen@pku.edu.cn

华北克拉通自早中生代以来开始重新活化,发育了一系列的伸展盆地,产生了大规模的岩浆活动(吴福元等,2000;樊祺诚等,2001;邓晋福等,2003;路凤香等,2006).太行山地区的岩浆活动便是其中一个重要的部分.北太行地区出露有规模巨大的中生代岩浆岩带.其岩石类型复杂,以中酸性岩体为主,包括石英二长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等,也有少量的基性岩,如紫荆关基性岩体(蔡剑辉等,2003;陈斌等,2006),与中酸性岩为大致同期岩浆活动(陈斌等,2006).对于该地区的中酸性岩,前人已经对其岩石成因和构造背景有了比较深入和全面的研究(罗照华等,1997;陈斌等,2002,2006;蔡剑辉等,2003,2004;Chen and Zhai,2003;Chen *et al.*,2003;张勇等2003;陈智超等,2007),并在岩浆成因上形成了两种不同的认识:下地壳熔融模式(蔡剑辉等,2003,2004)和岩浆混合模式(陈斌等,2002,2006;陈智超等,2007).对于区内的基性岩,研究相对薄弱(常兆山等,2000;蔡剑辉等,2003,2004).本文将对比太行紫荆关基性岩体进行详细的岩石学、元素和同位素地球化学研究,以获得紫荆关基性岩体的源区特征和成因信息.

1 地质背景和岩石学特征

紫荆关基性岩体是太行山北段王安镇岩体的一部分,位于河北省紫荆关镇南部,岩体呈长条状产于紫荆关—灵山深断裂带上,侵位于前寒武纪岩石中,分布面积约为 15 km²(图 1).区内出露的其他岩石类型主要为中生代的中酸性侵入岩.陈斌等(2005)

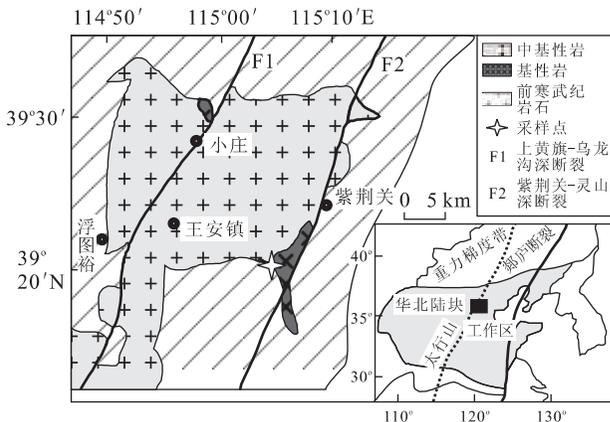


图 1 北太行紫荆关地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the relief framework in Zijingguan, northern Taihang orogen

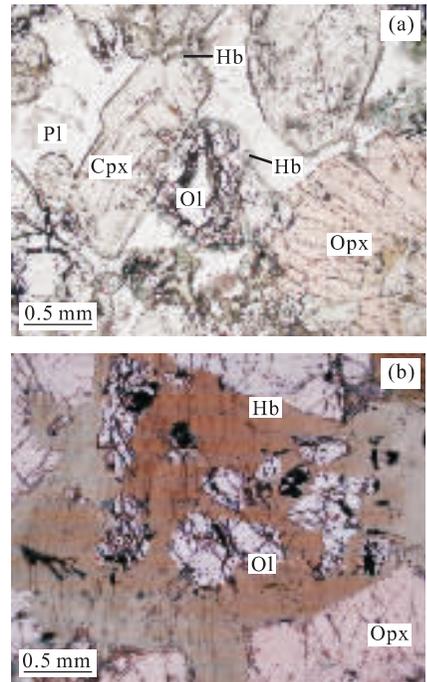


图 2 二辉石岩(ZJ017)显微照片.橄榄石和辉石具有角闪石反应边,橄榄石和辉石呈堆晶,斜长石呈他形充填(a);粗粒角闪石颗粒包裹橄榄石(b)

Fig. 2 Micrographs of pyroxenite (ZJ017), with olivine and clinopyroxene rimmed by amphibole overgrowth, and interstitial plagioclase (a), and olivine included in amphibole megacryst (b)

通过对王安镇 3 个岩体的锆石 U-Pb 定年,给出了 138~129 Ma 的年龄范围.其中,紫荆关辉长闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 138 ± 2 Ma,浮图裕东石英二长岩的锆石 U-Pb 年龄为 132 ± 2 Ma,小庄二长岩的锆石 U-Pb 年龄为 129 ± 2.6 Ma.表明紫荆关基性岩体比其周边出露的中酸性岩的形成时间稍早.

紫荆关基性岩体主要由二辉石岩、角闪辉长岩和闪长岩等 3 类岩石组成,其中以二辉石岩和角闪辉长岩为主;岩石均呈块状构造,以中粒—中粗粒为主.

二辉石岩主要由斜方辉石(10%~30%)、单斜辉石(10%~50%)和角闪石(10%~35%)组成,次要矿物有橄榄石(5%~20%)、斜长石(5%~15%)和黑云母(3%~5%)等,副矿物主要是磁铁矿.橄榄石以粒状为主,少量短柱状,发育绿色的角闪石反应边(图 2a).辉石分为大小不同的两群,小颗粒自形到半自形,也发育绿色的角闪石反应边(图 2a);大颗粒为他形,包裹橄榄石、辉石、斜长石等矿物.角闪石主要呈他形的大颗粒存在,并包裹橄榄石(图 2b)、辉石、斜长石、磁铁矿等矿物.另外,角闪石

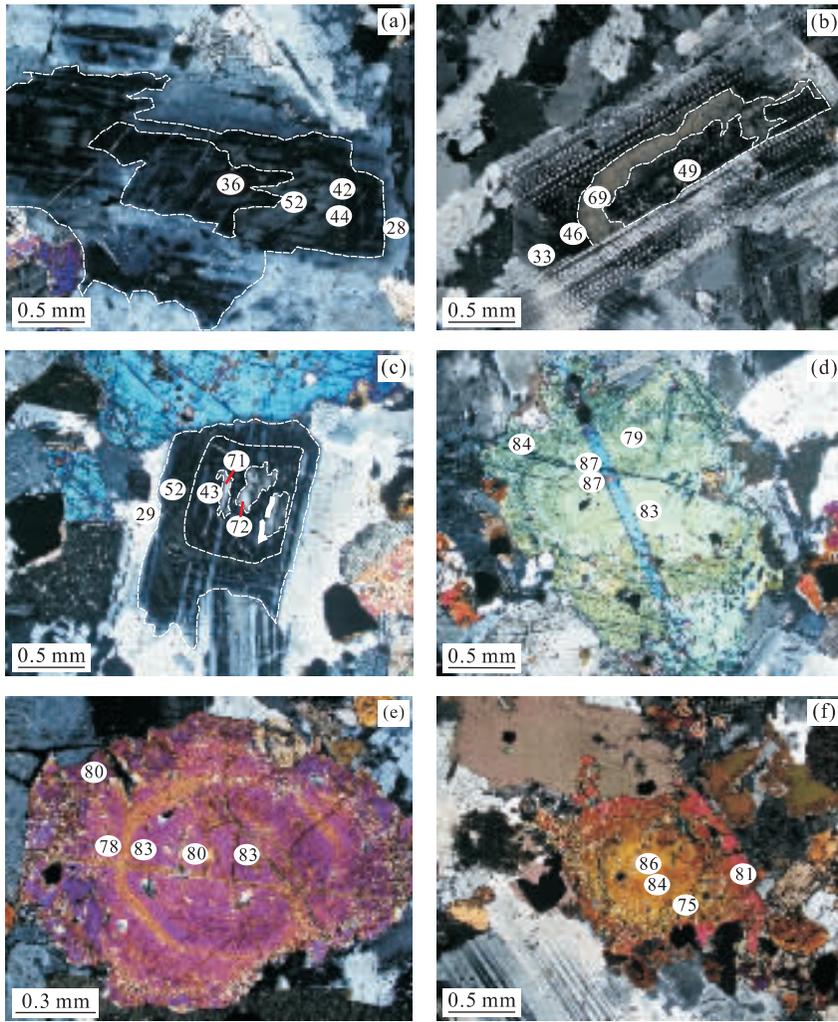


图 3 闪长岩中斜长石和单斜辉石的结构和成分环带

Fig. 3 Micrographs showing the compositional and textural disequilibrium in plagioclase and clinopyroxene crystals from diorite
a,b,c 为斜长石;d,e,f 为单斜辉石;图中圆圈内标注的数字为斜长石的 An 值或单斜辉石的 Mg#

多具有成分环带,不同的环带表现出不同的颜色,内环为棕色,外环为绿色.斜长石呈他形填隙状,发育聚片双晶或卡钠复合双晶.

角闪辉长岩主要由辉石(20%的单斜辉石和10%的斜方辉石)、角闪石(25%~40%)和斜长石(25%~50%)组成;次要矿物为黑云母(5%~15%),副矿物为磁铁矿、磷灰石、榍石等.个别样品含有很高磁铁矿(10%)和很少量云母(<1%).辉石呈半自形,包含磁铁矿、斜长石等矿物.角闪石以自形到半自形为主,常可见成分环带,不同环带之间表现出颜色差异,内环为棕色,外环为绿色.斜长石呈半自形,多发生绢云母化蚀变,有的斜长石呈他形充填于其他矿物粒间,或呈近圆形小颗粒或港湾状被其他矿物包含.

闪长岩主要由斜长石(50%~60%)以及角闪石、单斜辉石和斜方辉石组成,还含有少量黑云母、钾长

石和石英.据暗色矿物的不同,闪长岩可分为两类:一类为角闪闪长岩,主要暗色矿物为角闪石(30%),还含有少量黑云母(7%)和石英(8%),副矿物(2%)为磁铁矿和磷灰石;另一类为辉长苏长闪长岩,主要暗色矿物为单斜辉石(10%~19%)和斜方辉石(8%~20%),次要矿物为黑云母(2%~6%)和钾长石(1%~6%),副矿物为磁铁矿和磷灰石(4%~7%),部分样品可见极少量石英.斜长石以半自形板柱为主,具有结构和成分不平衡现象,表现为复杂的环带:内部可见形状不规则的早期斜长石残留,向外被成分截然不同的新的斜长石覆盖(图 3a-3c).辉石半自形为主,颗粒外围普遍发育绿色的角闪石反应边.部分样品中单斜辉石具有环带结构,表现为不同的环带具有颜色深浅差异(图 3d-3f).角闪石自形到半自形,也具有颜色环带,核部为棕色,边部为绿色.

2 实验方法

将样品制成标准电子探针薄片, 镀碳后在北京大学电子探针实验室 JXA-8100 型电子探针上进行了矿物的主要元素分析, 加速电压为 15 kV, 电流为 10 nA, 束斑直径为 1 μm , 标准样品为美国 SPI 公司的 53 种矿物。

对粉末样品进行了主量元素、微量元素以及 Sr-Nd 同位素的测定。微量元素测定在中国地质大学(北京)地学实验中心完成。样品粉末化学预处理采用两酸($\text{HNO}_3 + \text{HF}$)高压反应釜溶样方法, 分析仪器为 Agilent7500a 型等离子质谱仪。大多数元素分析的相对偏差(RSD) < 5%, 少数元素的 RSD < 10%。主量元素测试在中国科学院广州地球化学所完成, 采用 Regaku ZSX-100e XRF 仪器测定, 分析精度好于 1%。Sr-Nd 同位素分析在中国科学院地

质与地球物理研究所完成, Rb、Sr 和 REE 的分离采用离子交换柱法, Sm、Nd 的进一步分离采用稀释 HCl 的二次离子交换柱法。质谱分析采用固体热电离子质谱仪(MAT-262)。分别采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 和 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 校正测得 Nd 和 Sr 同位素比值。Nd 和 Sr 的全流程本底小于 300 pg 和 100 pg。

3 实验结果

3.1 电子探针分析及温度计算

对闪长岩中具成分和结构不平衡现象的 3 个斜长石(表 1)和具环带结构的 3 个单斜辉石(表 2)进行了电子探针分析, 并分别计算 An 值和 Mg[#] 见(图 3)。

图 3a 中斜长石具有 3 层环带, 内环为不规则熔蚀残留, An 值为 36; 中间圈层边界相对平直, 较内

表 1 紫荆关基性岩体中闪长岩的斜长石电子探针分析(%)

Table 1 Microprobe analysis data of plagioclase from diorite of the Zijinguan mafic pluton

斜长石	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total					
核	a	57.30	0.04	26.33	0.03	0.06	0.00	0.00	7.91	7.46	0.65	99.78				
核	a	53.38	0.05	29.24	0.00	0.15	0.03	0.00	11.01	5.53	0.24	99.68				
↓	a	55.54	0.04	27.18	0.06	0.16	0.05	0.01	9.38	6.47	0.29	99.19				
边	a	55.83	0.06	27.13	0.00	0.19	0.00	0.01	9.03	6.60	0.31	99.15				
	a	60.16	0.05	24.67	0.01	0.20	0.01	0.00	6.18	8.28	0.52	100.08				
核	b	55.52	0.01	27.54	0.00	0.20	0.00	0.00	9.91	5.45	0.37	99.01				
核	b	49.29	0.09	31.11	0.00	0.82	0.02	0.01	14.26	3.35	0.28	99.24				
↓	b	55.69	0.12	27.39	0.00	0.23	0.00	0.00	9.76	6.18	0.30	99.66				
边	b	59.67	0.09	25.19	0.00	0.19	0.00	0.00	7.24	7.85	0.27	100.50				
	c	49.60	0.12	31.12	0.00	0.22	0.00	0.02	14.65	3.18	0.11	99.06				
核	c	48.88	0.05	31.62	0.00	0.32	0.00	0.01	14.71	3.31	0.12	99.11				
核	c	55.78	0.03	26.91	0.00	0.16	0.03	0.19	9.18	6.45	0.33	99.06				
↓	c	54.08	0.05	28.31	0.02	0.24	0.02	0.05	10.85	5.23	0.21	99.07				
边	c	61.14	0.01	24.41	0.07	0.18	0.02	0.02	5.98	8.10	0.26	100.18				
斜长石		Cation (per 8 Oxygens)														
		Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total	An	Ab	Or
核	a	2.583	0.001	1.399	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.382	0.652	0.037	5.059	35.7	60.9	3.5
核	a	2.425	0.002	1.566	0.000	0.006	0.000	0.001	0.000	0.536	0.487	0.014	5.037	51.7	47.0	1.4
↓	a	2.524	0.001	1.456	0.002	0.006	0.000	0.002	0.001	0.457	0.570	0.017	5.036	43.8	54.6	1.6
边	a	2.534	0.002	1.452	0.000	0.007	0.000	0.000	0.001	0.439	0.581	0.018	5.034	42.3	56.0	1.7
	a	2.685	0.002	1.298	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.295	0.716	0.030	5.034	28.3	68.8	2.9
核	b	2.522	0.000	1.475	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.482	0.48	0.021	4.988	49.0	48.8	2.1
核	b	2.273	0.003	1.691	0.000	0.032	0.000	0.001	0.001	0.705	0.300	0.016	5.021	69.0	29.4	1.6
↓	b	2.518	0.004	1.460	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.473	0.542	0.017	5.023	45.8	52.5	1.6
边	b	2.655	0.003	1.321	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.345	0.677	0.015	5.024	33.3	65.3	1.4
	c	2.286	0.004	1.691	0.000	0.008	0.000	0.000	0.001	0.724	0.284	0.006	5.005	71.4	28.0	0.6
核	c	2.258	0.002	1.722	0.000	0.012	0.000	0.000	0.001	0.728	0.296	0.007	5.025	70.6	28.7	0.7
核	c	2.535	0.001	1.442	0.000	0.006	0.000	0.001	0.013	0.447	0.568	0.019	5.033	43.2	54.9	1.8
↓	c	2.465	0.002	1.521	0.001	0.009	0.000	0.001	0.003	0.530	0.462	0.012	5.005	52.8	46.0	1.2
边	c	2.714	0.000	1.277	0.002	0.007	0.000	0.001	0.001	0.284	0.697	0.015	4.999	28.5	70.0	1.5

表 2 紫荆关基性岩体中闪长岩的单斜辉石电子探针分析(%)

Table 2 Microprobe analysis data of clinopyroxene from diorite of the Zijingguan mafic pluton

单斜辉石	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total						
核	d	51.02	0.69	2.67	0.02	9.21	0.23	15.49	20.01	0.50	0.00	99.87					
↓	d	50.79	0.69	3.02	0.01	7.25	0.12	15.13	21.44	0.56	0.02	99.05					
边	d	50.83	0.78	2.97	0.05	7.76	0.16	14.78	21.07	0.83	0.02	99.26					
核	d	51.57	0.66	2.85	0.04	7.19	0.14	14.49	21.77	0.32	0.01	99.07					
↓	d	51.13	0.59	2.48	0.06	7.75	0.26	14.15	22.16	0.61	0.00	99.23					
边	e	51.00	0.71	2.47	0.10	8.98	0.20	15.27	20.03	0.63	0.00	99.43					
核	e	50.97	0.70	2.83	0.05	8.65	0.20	15.20	19.95	0.39	0.01	99.05					
↓	e	50.66	0.97	2.97	0.04	7.32	0.21	15.07	21.57	0.27	0.01	99.09					
边	e	51.88	0.73	2.69	0.08	8.56	0.21	16.20	18.42	0.38	0.01	99.17					
核	e	51.30	0.82	2.32	0.04	7.71	0.24	13.90	22.33	0.49	0.00	99.15					
↓	f	50.35	0.80	3.71	0.06	8.52	0.21	14.83	20.10	0.93	0.02	99.63					
边	f	51.08	0.66	2.52	0.03	7.09	0.21	14.46	22.65	0.39	0.00	99.10					
核	f	51.47	0.65	2.95	0.06	10.35	0.22	15.81	17.53	0.36	0.01	99.49					
↓	f	51.87	0.33	1.04	0.02	8.78	0.17	14.42	21.83	0.52	0.01	99.04					
单斜辉石	Cation (per 6 Oxygens)																
	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Total	Mg [#]	En	Fs	Wo	
核	d	1.888	0.019	0.116	0.001	0.104	0.181	0.007	0.854	0.793	0.036	0.000	4.000	46.7	9.9	43.4	82.5
↓	d	1.887	0.019	0.132	0.000	0.097	0.129	0.004	0.838	0.853	0.040	0.001	4.000	46.0	7.1	46.9	86.7
边	d	1.886	0.022	0.130	0.001	0.114	0.126	0.005	0.817	0.838	0.060	0.001	4.000	45.9	7.1	47.1	86.6
核	d	1.925	0.019	0.125	0.001	0.009	0.215	0.004	0.806	0.871	0.023	0.000	4.000	42.6	11.4	46.0	78.9
↓	d	1.907	0.017	0.109	0.002	0.087	0.155	0.008	0.786	0.885	0.044	0.000	4.000	43.0	8.5	48.5	83.5
边	e	1.895	0.020	0.108	0.003	0.104	0.175	0.006	0.846	0.798	0.045	0.000	4.000	46.5	9.6	43.9	82.9
核	e	1.904	0.020	0.125	0.001	0.055	0.215	0.006	0.846	0.799	0.028	0.000	4.000	45.5	11.6	43.0	79.7
↓	e	1.888	0.027	0.130	0.001	0.058	0.170	0.007	0.837	0.861	0.020	0.000	4.000	44.8	9.1	46.1	83.1
边	e	1.928	0.020	0.118	0.002	0.011	0.255	0.007	0.897	0.734	0.027	0.000	4.000	47.6	13.5	38.9	77.9
核	e	1.919	0.023	0.102	0.001	0.048	0.193	0.008	0.775	0.895	0.036	0.000	4.000	41.6	10.4	48.0	80.1
↓	f	1.862	0.022	0.162	0.002	0.135	0.129	0.007	0.817	0.797	0.067	0.001	4.000	46.9	7.4	45.7	86.4
边	f	1.905	0.019	0.111	0.001	0.069	0.152	0.007	0.804	0.905	0.028	0.000	4.000	43.2	8.2	48.6	84.1
核	f	1.917	0.018	0.130	0.002	0.024	0.298	0.007	0.878	0.700	0.026	0.000	4.000	46.8	15.9	37.3	74.7
↓	f	1.944	0.009	0.046	0.001	0.086	0.189	0.005	0.805	0.876	0.038	0.000	4.000	43.0	10.1	46.8	81.0

环明显富钙,所分析的 3 个点的 An 值分别为 52、44 和 42;最外环斜长石富钠,An 值为 28。图 3b 中斜长石为半自形到自形,也具有 3 层环带。内部两层环带分界清晰,均具有不规则外形。核部 An 值为 49,被富钙的斜长石(An=69)包裹,后者又被相对富钠的自形斜长石(An 为 46 和 33)包裹。图 3c 中的斜长石具有复杂的环带特征。该斜长石具有 4 层环带,核部为 3 个具有相同消光位的孤岛状残留核,认为他们原来属于同一个晶体,这些残留核具有最高的 An 值(An=71 和 72);第 2 层环带 An 值较核部降低,为 43;第 3 层为韵律环带,An 值较第 2 层有所升高(An=52);最外层 An 值又下降为 29。

3 个单斜辉石(图 3d—3f)表现出从核部到边部 Mg[#] 先降低后升高的特征。图 3d 中单斜辉石为半自形,核部 Mg[#] 为 83、87 和 87,往外先降低至 79,后又升高到 84。图 3e 中单斜辉石为他形,核部 Mg[#] 为 83、80 和 83,中间环带为 78,较核部下降,外环

Mg[#] 上升,为 80。图 3f 中单斜辉石呈半自形,核部 Mg[#] 为 86 和 84,往外先降至 75,后又升高到 81。和 Mg[#] 类似,3 颗单斜辉石的 TiO₂ 含量也表现出从内环到外环先升高后降低的特征。

利用二辉石温度计(Nehru and Wyllie, 1974)对闪长岩(表 3)和二辉石岩(表 4)的结晶温度进行了计算。二辉石岩的结晶温度为 760~901 ℃,平均值为 803 ℃;闪长岩的结晶温度为 796~982 ℃,平均值为 901 ℃,高于二辉石岩的结晶温度。

3.2 主量元素含量

主量元素数据列于表 5。二辉石岩类具有最低的 SiO₂ 含量(45.71%~47.86%)和较高的 MgO 含量(17.54%~22.72%)。角闪辉长岩 SiO₂ 含量为 47.2%~49.34%,MgO 含量较低,为 7.21%~10.19%。样品 ZJ021 因为含有很高的磁铁矿(10%),而在主量元素图上相对于其他辉长岩具有很低的 SiO₂ (40.27%)和 K₂O(0.35%),以及很高的

表 3 闪长岩结晶温度和相关电子探针分析(%)

Table 3 The crystallizing temperature and related microprobe analysis data of diorite

Sample	ZJ005		ZJ006		ZJ007		ZJ025		ZJ026	
	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx
SiO ₂	52.34	50.18	53.14	51.27	53.26	51.43	52.61	54.31	52.47	50.90
TiO ₂	1.02	0.80	0.39	0.84	0.31	0.67	0.43	0.36	0.29	0.78
Al ₂ O ₃	1.13	4.05	0.94	1.88	0.97	1.87	1.17	1.39	0.66	2.00
Cr ₂ O ₃	0.09	0.22	0.04	0.00	0.00	0.05	0.02	0.06	0.04	0.04
FeO	17.50	7.58	18.65	10.14	16.27	8.50	18.94	7.43	18.88	7.78
MnO	0.45	0.21	0.40	0.24	0.30	0.27	0.38	0.22	0.36	0.24
MgO	25.34	15.59	24.28	15.09	27.05	16.19	24.63	14.78	24.85	15.24
CaO	1.93	20.02	1.12	19.02	1.47	19.70	1.70	21.83	1.44	21.55
Na ₂ O	0.06	0.56	0.04	0.50	0.03	0.44	0.03	0.54	0.04	0.48
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00
Total	99.86	99.21	99.00	98.98	99.66	99.14	99.92	100.92	99.04	99.01
Cation (per 6 Oxygens)										
Si	1.912	1.858	1.969	1.923	1.929	1.911	1.929	1.987	1.939	1.897
Ti	0.028	0.022	0.011	0.024	0.008	0.019	0.012	0.010	0.008	0.022
Al ^{IV}	0.000	0.035	0.009	0.006	0.000	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000
Cr	0.003	0.006	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
Fe ³⁺	0.072	0.096	0.002	0.060	0.086	0.089	0.070	0.000	0.080	0.108
Fe ²⁺	0.463	0.139	0.576	0.258	0.407	0.175	0.511	0.227	0.503	0.135
Mn	0.014	0.007	0.013	0.008	0.009	0.008	0.012	0.007	0.011	0.008
Mg	1.380	0.860	1.341	0.844	1.460	0.897	1.346	0.806	1.368	0.847
Ca	0.076	0.794	0.044	0.764	0.057	0.784	0.067	0.856	0.057	0.861
Na	0.004	0.040	0.003	0.036	0.002	0.032	0.002	0.038	0.003	0.035
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Al ^{IV}	0.049	0.142	0.032	0.077	0.041	0.082	0.051	0.009	0.029	0.088
Total	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	3.992	4.000	4.000
T(°C)	956		932		982		796		839	

表 4 二辉石岩的结晶温度和相关电子探针分析(%)

Table 4 The crystallizing temperature and related microprobe analysis data of pyroxenite

Sample	ZJ008		ZJ012		ZJ016		ZJ018		ZJ020		ZJ023	
	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx	Opx	Cpx
SiO ₂	53.54	51.38	53.51	51.63	54.86	52.28	53.92	51.99	53.98	51.88	53.28	52.83
TiO ₂	0.17	0.42	0.23	0.55	0.04	0.12	0.14	0.22	0.06	0.19	0.01	0.18
Al ₂ O ₃	1.92	2.91	2.01	2.86	1.01	1.74	1.84	1.52	1.18	2.24	1.45	1.77
Cr ₂ O ₃	0.04	0.11	0.13	0.33	0.03	0.22	0.08	0.39	0.00	0.34	0.06	0.05
FeO	13.75	6.25	13.06	5.25	13.70	6.34	13.58	6.27	14.55	6.07	15.72	6.85
MnO	0.34	0.06	0.20	0.13	0.38	0.08	0.27	0.17	0.28	0.11	0.43	0.15
MgO	27.85	15.02	28.72	15.70	29.64	16.56	28.66	15.68	29.03	15.57	27.26	15.55
CaO	1.97	22.42	1.14	22.08	1.02	21.67	1.07	21.88	0.96	22.19	0.93	22.14
Na ₂ O	0.15	0.44	0.02	0.88	0.00	0.30	0.01	0.90	0.04	0.52	0.05	0.42
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.14	0.01	0.00	0.00
Total	99.73	99.01	99.02	99.41	100.68	99.31	99.58	99.02	100.22	99.12	99.19	99.94
Cation (per 6 Oxygens)												
Si	1.918	1.907	1.923	1.896	1.939	1.928	1.930	1.922	1.926	1.920	1.933	1.945
Ti	0.005	0.012	0.006	0.015	0.001	0.003	0.004	0.006	0.002	0.005	0.000	0.005
Al ^{IV}	0.000	0.035	0.008	0.019	0.000	0.004	0.008	0.000	0.000	0.017	0.000	0.021
Cr	0.001	0.003	0.004	0.010	0.001	0.006	0.002	0.011	0.000	0.010	0.002	0.001
Fe ³⁺	0.082	0.063	0.054	0.107	0.076	0.076	0.053	0.131	0.087	0.080	0.074	0.052
Fe ²⁺	0.330	0.131	0.338	0.054	0.329	0.119	0.353	0.063	0.347	0.108	0.403	0.159
Mn	0.010	0.002	0.006	0.004	0.011	0.002	0.008	0.005	0.008	0.003	0.013	0.005
Mg	1.487	0.831	1.538	0.859	1.562	0.910	1.529	0.864	1.543	0.859	1.474	0.853
Ca	0.076	0.892	0.044	0.869	0.039	0.856	0.041	0.867	0.037	0.880	0.036	0.873
Na	0.010	0.032	0.001	0.063	0.000	0.021	0.001	0.065	0.003	0.037	0.004	0.030
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000
Al ^{IV}	0.081	0.093	0.077	0.104	0.042	0.072	0.070	0.066	0.049	0.080	0.062	0.055
Total	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.009	4.000	4.000	4.000
T(°C)	780		760		901		770		797		807	

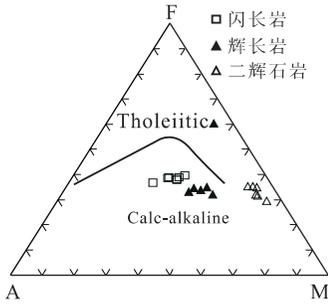


图 4 紫荆关碱性岩体的 AFM 图(Irvine and Baragar, 1971)
Fig. 4 AFM plots of the Zijinguan gabbroic rocks
A=Na₂O+K₂O; F=FeO+0.8998Fe₂O₃; M=MgO

闪辉长岩—闪长岩类(MgO=4.67%~10%)。其中辉长岩 ZJ021 因为具有特别高的 Fe₂O₃, 特别低的 Mg[#] 和 SiO₂, 以及相对低的 K₂O 和 Na₂O, 在相关图中偏离趋势线。

对二辉石岩类而言, 随着 MgO 含量的减少, Al₂O₃、CaO 呈现增加趋势, 而 TiO₂、Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、SiO₂、P₂O₅ 则没有明显演化趋势。这可能与二辉石岩中斜长石含量较高有关。对角闪辉长岩—闪长岩类而言, 随 MgO 含量的减少, SiO₂、Al₂O₃、K₂O、Na₂O、P₂O₅ 有明显增加趋势, 显然与长石及磷灰石含量不断增加有关; 而 CaO、TiO₂、Fe₂O₃ 则有明显减少趋势, 可能与铁镁矿物(辉石和角闪石)含量逐渐减少有关。

3.3 微量元素含量

微量元素变化图(表 5, 图 6)显示了与主量元素相似的趋势。二辉石岩类和辉长岩—闪长岩类样品显然不构成连续的演化趋势, 而是在 MgO=10%~17% 的范围内出现间断。随着 MgO 含量的减少, 二辉石岩类的 Ni、Co 含量逐渐减少, Sr 含量逐渐增加, Ba 含量基本保持不变。这可能与橄榄石和辉石含量的减少有关。辉长岩—闪长岩类的 Ni、Co 含量也随 MgO 的减少而逐渐减少, 而 Sr、Ba 都呈增加

Fe₂O₃ (20.28%)。闪长岩具有最高的 SiO₂ 含量(52.55%~56.01%)和最低的 MgO 含量(4.67%~7.13%)。

在 AFM 图解(图 4)上, 角闪辉长岩(ZJ021 除外)和闪长岩具有钙碱性演化趋势, 而橄榄辉石岩则由于太富铁镁而没有投在钙碱性趋势之上, 这可能与这种岩类属于堆晶成因有关(橄榄石和辉石堆晶)。

在主量元素变化图(图 5)中, 所分析的样品并不构成连续的演化趋势, 而是分成两组, 一组是二辉石岩类(MgO=17.54%~22.72%), 另外一组是角

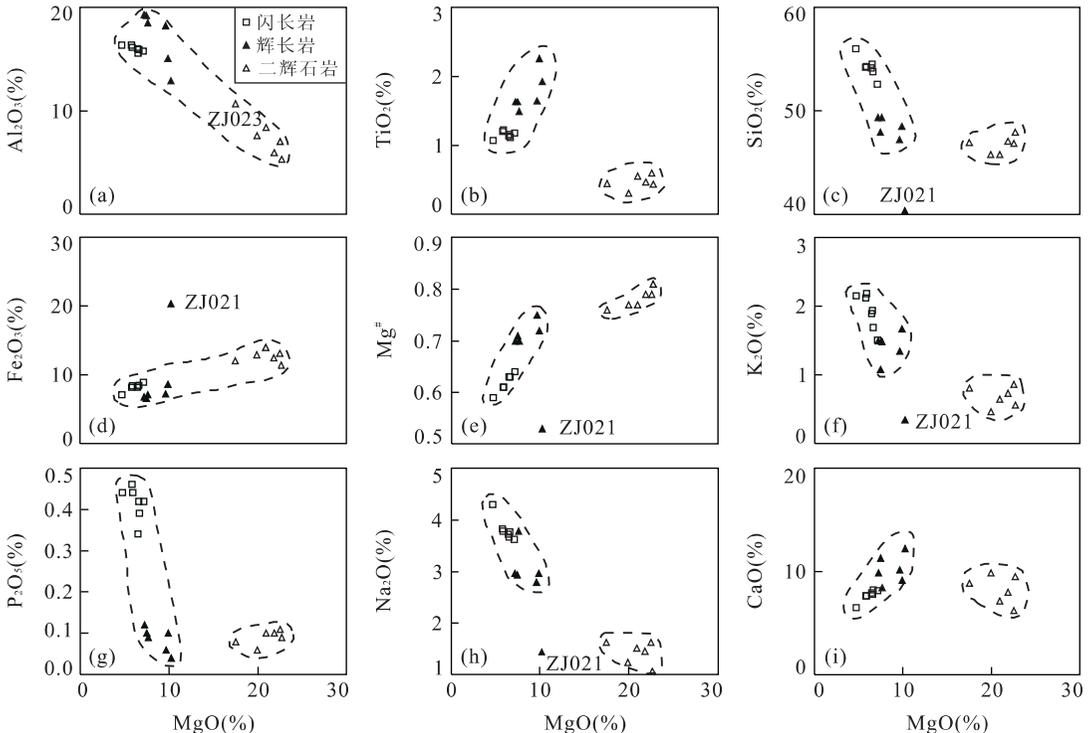


图 5 紫荆关碱性岩体的主量元素变化图

Fig. 5 Variation diagrams for major elements of the Zijinguan gabbroic rocks

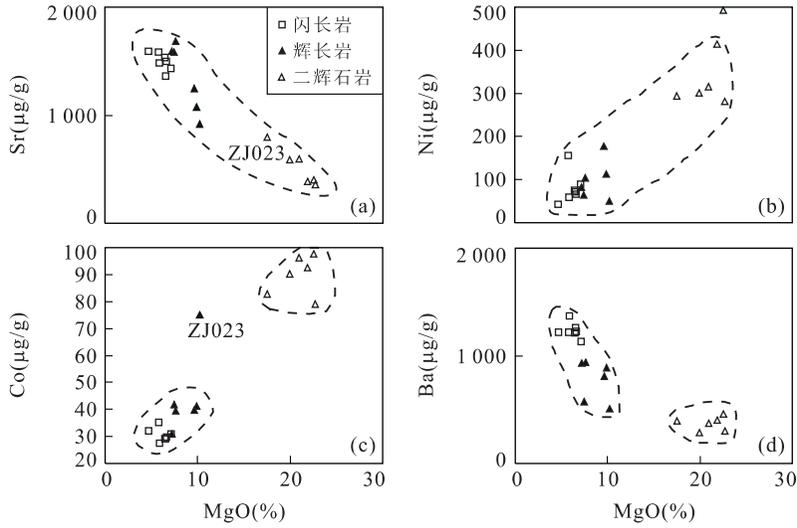


图 6 紫荆关辉长岩体的微量元素变化图

Fig. 6 Variation diagrams for trace elements of the Zijjngguan gabbroic rocks

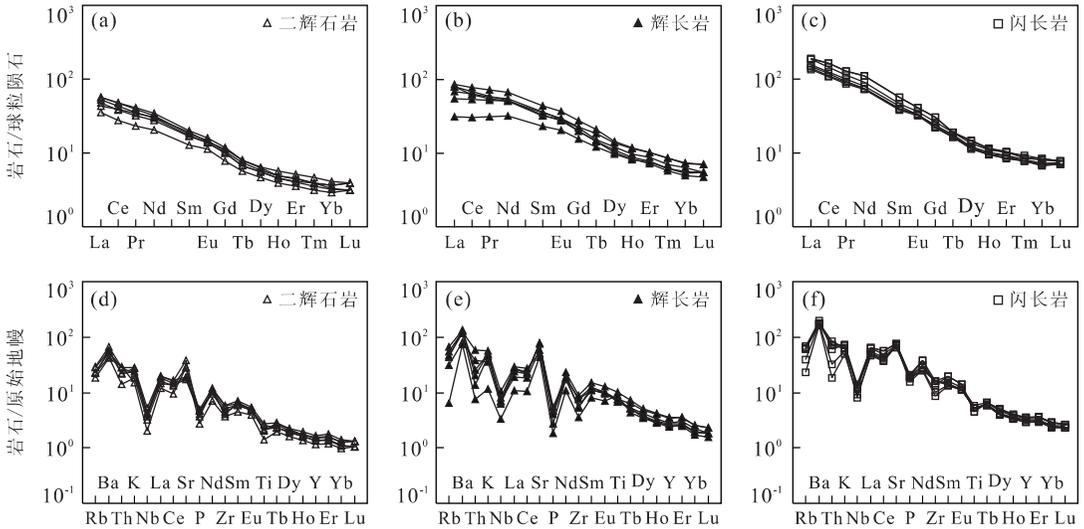


图 7 紫荆关辉长岩体的稀土元素配分型式图(图 a, b, c)和微量元素蛛网图(图 d, e, f)(球粒陨石和原始地幔值来自 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized spidergrams of the Zijjngguan gabbroic rocks

趋势. 这可能与辉石的减少而长石含量增加有关.

在球粒陨石标准化稀土元素含量图上, 二辉石岩呈平滑的“右倾型”配分型式(图 7a), 重稀土强烈亏损. 除了样品 ZJ020 具有轻微的正 Eu 异常外, 其余样品的 Eu 异常均不明显. 辉长岩也具有平滑的“右倾型”配分型式(图 7b), 但轻、重稀土含量通常比辉石岩高. 样品 ZJ021 具有相对较低的稀土总量, 可能与其较高的磁铁矿含量有关. 与二辉石岩相比, 辉长岩的轻稀土要相对平坦. 除了一个样品 ZJ014 具有轻微的正 Eu 异常外, 其余样品的 Eu 异常均不明显. 闪长岩最富集轻稀土(图 7c), 轻重稀土的分

异最强烈, 稀土总量也最高, Eu 异常不明显. 可以看出, 3 类岩石的球粒陨石标准化稀土模式类似, 只是稀土总量不同, 反映它们具有内在的成因联系.

3 类岩石的微量元素蛛网图(图 7d—7f)也显示了相似的特征, 即富集 LREE 和 K、Sr、Ba、Th 等大离子亲石元素(LILE), 亏损 HREE、P 以及 Nb、Zr、Ti 等高场强元素(HFSE). 同时, 各类岩石之间又稍有不同. 二辉石岩具有最低的微量元素含量, 辉长岩中等, 闪长岩中微量元素含量最高. 二辉石岩和闪长岩均显示了中等的 Ti 负异常, 而辉长岩 Ti 的异常不明显, 有一个样品(ZJ021)甚至出现了 Ti 的正异

常,可能与其高的磁铁矿含量有关.

3.4 全岩 Sr-Nd 同位素

同位素初始值采用 $t=138$ Ma 进行计算,不同岩性岩石之间的 Sr-Nd 同位素成分具有一定变化(表 6):二辉石岩 $I_{Sr}=0.7061\sim 0.7063$, $\epsilon_{Nd}(t)=-15.0\sim -16.6$;辉长岩 $I_{Sr}=0.7058\sim 0.7066$, $\epsilon_{Nd}(t)=-15.08\sim -18.24$;闪长岩 $I_{Sr}=0.7060\sim 0.7061$, $\epsilon_{Nd}(t)=-13.82\sim -14.63$. 可见,所有样品均显示出强烈富集的同位素特征,表明紫荆关基性岩体的母岩浆来源于富集地幔. 另外,与其他岩石类型相比,闪长岩具有较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,反映 3 类岩石并非封闭体系下的演化产物(详见下面讨论).

4 讨论

4.1 源区特征

紫荆关岩体各岩石具有类似的地球化学特征,包括较强的稀土分馏($(La/Yb)_N=5.76\sim 23.13$)、高 Sr/Y 比值(50.95~146.13)、富集 LREE 和 K、Sr、Ba 等大离子亲石元素,亏损 HREE 和 Nb、Zr、Ti 等高场强元素. 结合这些岩石类型具有密切的时间和空间关系,可以说这 3 类岩石具有密切的成因联系,可能与同一次幔源岩浆演化有关. 3 类岩石最显著的特征是富集 LREE 和大离子亲石元素,其中 Sr 的含量普遍超过 1000×10^{-6} ,Ba 含量也多数在 1000×10^{-6} 以上,并远高于地壳的相应元素含量(平均地壳 Sr 和 Ba 含量分别是 350×10^{-6} 和 260×10^{-6} ;Rudnick and Fountain, 1995). 这表明其母岩浆应该来自富集地幔的部分熔融,且石榴石可能是源区的重要残留相. 这一点也得到了这些基性岩石非常

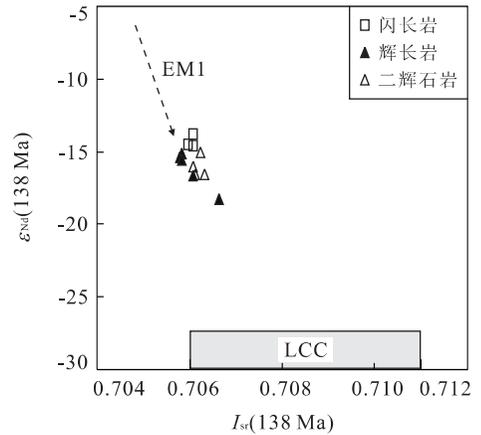


图 8 紫荆关基性岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)-I_{Sr}$ 图(EM1 地幔的位置引自 Zindler and Hart,1986)

Fig. 8 Plot of I_{Sr} vs. $\epsilon_{Nd}(t)$ for the Zijingguan mafic pluton

富集的同位素性质的支持($\epsilon_{Nd}(t)$ 值在 $-13\sim -18$ 之间). 在 $\epsilon_{Nd}(t)-I_{Sr}$ 图中(图 8),紫荆关基性岩的 Sr-Nd 同位素都显示出 EM1 型富集地幔的特征.

4.2 岩浆演化

虽然紫荆关基性岩体可能主要是同一期幔源岩浆活动的产物,但它们的同位素成分并不完全相同,反映岩浆体系的演化并不是封闭的. 在 $SiO_2-\epsilon_{Nd}(t)、I_{Sr}$ 同位素比值图上(图 9),各岩石类型的 Sr 同位素比值变化不大,主要在 $0.7058\sim 0.7067$;但 Nd 同位素比值变化明显. 二辉石岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-15.0\sim -16.6$,与大部分辉长岩的 Nd 同位素成分($\epsilon_{Nd}(t)=-15.0\sim -16.5$)完全一致. 岩相学和野外的关系表明辉石岩具堆晶结构,所以笔者认为辉石岩类可能主要从高镁的幔源基性岩浆中通过堆晶形成,橄榄石最先堆晶形成,其后是辉石的结晶,并形成橄榄辉石岩. 该岩石中常见辉石包裹浑圆的橄

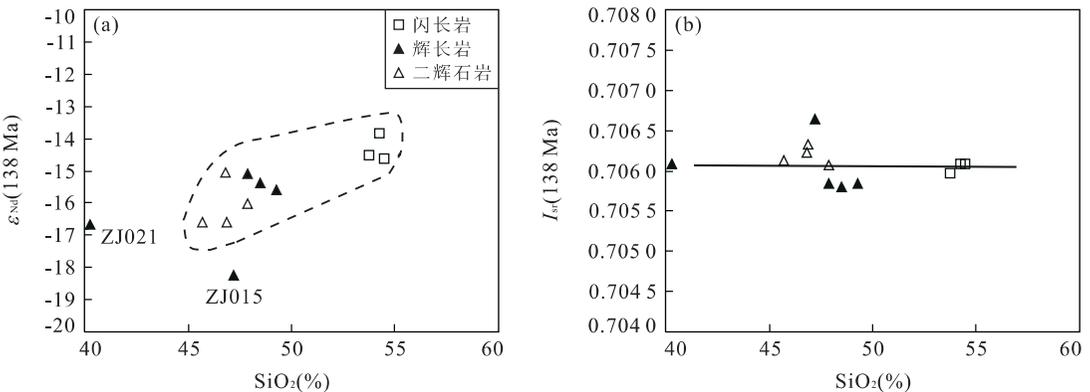


图 9 紫荆关基性岩体(a) $SiO_2-\epsilon_{Nd}(t)$ 和(b) $SiO_2-I_{Sr}(t)$ 变化图

Fig. 9 Plots of (a) SiO_2 vs. $\epsilon_{Nd}(t)$ and (b) SiO_2 vs. $I_{Sr}(t)$ for the Zijingguan mafic rocks

榄石颗粒支持这一推论。斜长石应该是较晚才形成,因此呈填隙状出现。随着岩浆的演化和橄榄二辉石岩的不断形成,岩浆体系向富水方向演化,这导致在斜长石形成的同时,角闪石也开始结晶。图 2a 可见橄榄石和辉石晶体的边部有绿色角闪石的反应边;图 2b 可见到角闪石晶体包裹橄榄石晶体,这些现象都支持上述推论。由于橄榄辉石岩的同位素成分与辉长岩完全一致,笔者认为原始幔源高镁岩浆经历橄榄辉石岩的堆晶成因之后,同时也形成了含角闪石橄榄石的辉长岩。个别辉长岩(ZJ015)具有很低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-18.2),可能与下地壳的混染有关。

然而,形成最晚的闪长岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-13.8~-14.6)明显高于其他岩石类型。从图 9a 中可见随岩浆的演化(硅增加),岩石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值呈上升趋势。闪长岩 Nd 同位素成分的变化不可能是与地壳混染有关,因为下地壳主要组成应该是太古代的岩石(Jahn *et al.*, 1987),具有更低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。笔者认为可能是在闪长岩形成同时有新的幔源岩浆注入(recharge)到体系中来,才导致岩浆体系的同位素成分发生逆转。因为据前人的研究(Chen and Zhai 2003; Chen *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2006)华北中生代富集地幔的 Nd 同位素成分可能是 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5 \sim -8$ 。新的幔源岩浆注入也得到岩石学证据的支持。

如前所述,闪长岩中的斜长石发育复杂的成分和结构不平衡现象。从图 3 可以看出,3 个斜长石的共同特点是包含一个相对富钠的斜长石内核(但图 3c 中相对富钠的斜长石内核之内还有一个富钙的斜长石,将在后面讨论),后者被明显富钙的新的斜长石包裹,而且两者界线截然。富钙的斜长石又被逐渐富钠的自形一半自形的斜长石覆盖。笔者认为从相对富钠的内核到富钙的斜长石包壳,可能与新的幔源基性岩浆注入(recharge)有关。因为新的幔源岩浆相对高温,并且富 Mg 和 Ca,其注入使得岩浆体系向基性(富钙和镁)方向演化;已经结晶的相对富钠的斜长石被熔蚀成不规则状,并作为新的斜长石生长的有利位置,这样就形成了相对富钙的斜长石叠加于其上。之后,随着岩浆体系温度逐渐降低和分离结晶作用的进行,又形成相对酸性的斜长石。从 3 个斜长石颗粒的最外环成分可见,它们具有类似的斜长石成分,其 A_n 值在 28~33 之间。图 3c 的斜长石与其他两个斜长石稍有不同,其核部见有非常富钙的斜长石残留,可能是更早期基性岩浆中结晶的斜长石残留。以上斜长石的复杂结构和成分环带表明在闪长岩形成同时有新的幔源岩浆的注入。此

外,闪长岩中的单斜辉石所发育的环带结构(图 3d-3f)也支持新的幔源岩浆注入。从图 3d-3f 可见,单斜辉石从核部到边部 MgO 和 TiO₂ 先降低后升高,最外部辉石的 Mg[#] 比紧邻的内侧辉石的 Mg[#] 稍高,这可能与新的幔源岩浆(相对富镁)的注入有关。这一模式也得到岩浆结晶温度条件计算结果的支持。从表 3 和表 4 可见,闪长岩的结晶温度(796~982 °C,平均 901 °C)高于二辉石岩的结晶温度(760~901 °C,平均 803 °C),与新的幔源高温岩浆注入的过程是一致的。

5 结论

紫荆关基性岩体具有相似的地球化学性质,高 Mg[#],富集大离子亲石元素和 LREE,亏损高场强元素和 HREE,具有富集的同位素特征,暗示他们的同源岩浆性质,并起源于 EM1 型富集岩石圈地幔的部分熔融。岩浆演化的早期以堆晶作用为主,堆晶矿物为橄榄石、辉石、角闪石等铁镁矿物,形成橄榄辉石岩。残余岩浆形成辉长岩为主的岩石类型。整个演化过程中,斜长石的分离结晶都非常有限。在岩浆演化后期,有来自富集地幔的基性岩浆的注入,闪长岩中斜长石和单斜辉石复杂的结构和成分分带,以及较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和结晶温度可能都与此有关。

References

- Cai, J. H., Yan, G. H., Chang, Z. S., et al., 2003. Petrological and geochemical characteristics of the Wang'anzen complex and discussion on its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 81-92 (in Chinese with English abstract).
- Cai, J. H., Yan, G. H., Xiao, C. D., et al., 2004. Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the Mesozoic intrusive rocks in the Taihang-Da Hinggan Mountains tectonomagmatic belt and their source region. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1225-1242 (in Chinese with English abstract).
- Chang, Z. S., Feng, Z. Y., Chen, T. L., 2000. Research on the ultramafic rocks in the Laiyuan batholith, Hebei Province. *Geology and Prospecting*, 36(3): 36-39 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Jahn, B. M., Zhai, M. G., 2003. Sr-Nd isotopic characteristics of the Mesozoic magmatism in the Taihang-Yanshan orogen, NCC, and implications for Archean lithosphere thinning. *J. Geol. Sci.*, 160: 963-970.

- Chen, B., Liu, C. Q., Tian, W., 2006. Magma-mixing between mantle-and crustal-derived melts in the process of Mesozoic magmatism, Taihangshan: Constraints from petrology and geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 140–147 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Tian, W., Zhai, M. G., et al., 2005. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Mesozoic magmatism in the Taihang Mountains and other places of the North China craton, with implications for petrogenesis and geodynamic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 13–24 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Zhai, M. G., 2003. Geochemistry of Late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, North China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle. *Geol. Mag.*, 140: 87–93.
- Chen, B., Zhai, M. G., Shao, J. A., 2002. Genesis and significance of the Mesozoic batholith in North Taihang: Major and minor elements geochemistry constraints. *Science in China (Ser. D)*, 32: 896–907 (in Chinese).
- Chen, Z. C., Chen, B., Tian, W., 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic compositions and geological significance: A case study of Mesozoic batholiths and mafic enclaves in North Taihang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 295–306 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Su, S. G., Zhao, H. L., et al., 2003. Deep processes of Mesozoic Yanshanian lithosphere thinning in North China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 41–50 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Q. C., Sui, J. L., Liu, R. X., et al., 2001. Eclogite facies garnet-pyroxenolite xenolith in Hannuoba area: New evidence of magma underplating. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523–548.
- Jahn, B. M., Auvray, B., Cornichet, J., et al., 1987. 3. 5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrology, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precambrian Res.*, 34: 311–346.
- Lu, F. X., Zheng, J. P., Shao, J. A., et al., 2006. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in Late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 86–92 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. H., Deng, J. F., Zhao, G. C., et al., 1997. Characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(3): 279–284 (in Chinese with English abstract).
- Nehru, C. E., Wyllie, P. J., 1974. Electron microprobe measurement of pyroxenes coe-existing with H₂O-undersaturated liquid in the join CaMgSi₂O₆-Mg₂Si₂O₆-H₂O at 30 kilobars, with applications to geothermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 48: 221–228.
- Rudnick, R. L., Fountain, D. M., 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Rev. Geophys.*, 33: 267–309.
- Sun, S. S., McDonough, W. E., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins. Geological Society Special Publication*, 42: 313–345.
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Zhang, G. L., et al., 2000. Deep geodynamics of Yanshan movement. *Geological Journal of China Universities*, 6(3): 379–388 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89: 89–106.
- Zhang, Y., Chen, B., Shao, J. A., et al., 2003. Geochemistry and origin of Late Mesozoic lamprophyre dykes in Taihang Mountains, North China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 29–33 (in Chinese with English abstract).
- Zindler, A., Hart, S. R., 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493–571.

附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 常兆山, 等, 2003. 王安镇岩体岩石地球化学特征及成因探讨. *岩石学报*, 19(1): 81–92.
- 蔡剑辉, 阎国翰, 肖成东, 等, 2004. 太行山—大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及物质来源探讨. *岩石学报*, 20(5): 1225–1242.
- 常兆山, 冯钟燕, 陈廷礼, 2000. 河北涿源岩基中的超镁铁质岩研究. *地质与勘探*, 36(3): 36–39.
- 陈斌, 刘超群, 田伟, 2006. 太行山中生代岩浆作用过程中的壳幔岩浆混合作用: 岩石学和地球化学证据. *地学前缘*, 13(2): 140–147.
- 陈斌, 田伟, 翟明国, 等, 2005. 太行山和华北其他地区中生代岩浆作用的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及其岩浆成因和地球动力学意义. *岩石学报*, 21: 13–24.
- 陈斌, 翟明国, 邵济安, 等, 2002. 太行山北段中生代岩基的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. *中国科学(D 辑)*, 32: 896–907.
- 陈智超, 陈斌, 田伟, 2007. 太行山北段中生代岩基及其包体锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素性质及其地质意义. 岩

石学报,23(2): 295—306.

邓晋福,苏尚国,赵海玲,等,2003. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程. 地学前缘,10(3): 41—50.

樊祺诚,隋建立,刘若新,等,2001. 汉诺坝榴辉岩相石榴辉石岩——岩浆底侵作用新证据. 岩石学报,17(1): 1—6.

路凤香,郑建平,邵济安,等,2006. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄. 地学前缘,13(2): 86—92.

罗照华,邓晋福,赵国春,等,1997. 太行山造山带岩浆活动特征及其造山过程反演. 地球科学——中国地质大学学报,22(3): 279—284.

吴福元,孙德有,张广良,等,2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报,6(3): 379—388.

张勇,陈斌,邵济安,等,2003. 华北太行晚中生代煌斑岩地球化学特征及成因探讨. 岩石矿物学杂志,22(1): 29—33.

《地球科学——中国地质大学学报》

2009 年 第 34 卷 第 2 期 要目预告

奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:成矿弱信息提取和复合信息分解.....	成秋明等
MVT 型矿床中闪锌矿结晶的 Liesegang 环带模拟.....	徐德义等
奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:综合信息集成与靶区圈定.....	成秋明等
云南个旧矿集区区域构造—岩浆演化与锡铜多金属成矿系统.....	徐启东等
三维 Kriging 方法中的变异函数套合.....	姚凌青等
基于 GIS 矿产勘查靶区优选技术.....	夏庆霖等
青海沱沱河地区遥感蚀变信息提取.....	陈建平
加权证据权模型和逐步证据权模型及其在个旧锡铜矿产资源预测中的应用.....	张生元等
矿物微观结构的多重分形.....	谢淑云等
矿井涌水量混沌特征与预测.....	杨永国等
广义自相似性原理与模型.....	曹黎等
秦岭造山带西段八方山—二里河 Pb-Zn 矿区硅质岩的微组构分析及其意义.....	李红中等
云南个旧期北山七段玄武岩中磁黄铁矿结构变化分形特征.....	李增华等
矿产资源勘查定量化表达的集成模式与关键技术.....	刘军旗等
基于 Petri 网的地质灾害事件空间复杂结构模拟与分析系统.....	邢细涛等