

doi:10.3799/dqkx.2012.102

新疆阿尔泰东南缘哈拉乔拉镁铁质岩体 地球化学特征与地质意义

夏昭德^{1,2}, 姜常义^{1,2}, 卢荣辉^{1,3}

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054
2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西西安 710054
3. 四川华源矿业勘查开发有限责任公司, 四川成都 610072

摘要: 哈拉乔拉镁铁质岩体位于新疆阿尔泰造山带东南缘, 主要岩石类型有辉长岩、辉长苏长岩、含长辉石岩、橄榄辉长岩和橄长岩。哈拉乔拉岩体具有低 TiO_2 (0.09%~1.28%)、低碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=0.37\%\sim0.78\%$)的特点, 属于拉斑玄武岩系列; 富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素(Nb、Ta 等), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 $-2.62\sim-0.78$, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 为 $37.49\sim45.28$ 。元素地球化学和 Nd-Sr 同位素组成表明, 岩浆源区为被消减板片交代改造过的富集型岩石圈地幔。原生岩浆为高镁拉斑玄武岩浆, 岩浆演化过程中主要发生了橄榄石、单斜辉石以及斜长石的分离结晶/堆晶, 后期有钛铁矿的析出。

关键词: 哈拉乔拉; 镁铁质; 原生岩浆; 岩浆演化; 岩石圈地幔; 岩石学; 地球化学。

中图分类号: P59 文章编号: 1000-2383(2012)05-0937-10 收稿日期: 2011-11-09

Geochemical Characteristics and Geologic Implications of Halaqiaola Mafic Intrusion, Southeast Altai, Xinjiang

XIA Zhao-de^{1,2}, JIANG Chang-yi^{1,2}, LU Rong-hui^{1,3}

1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China
3. Sichuan Huayuan Mining Exploitation Limited Liability Company, Chengdu 610072, China

Abstract: Halaqiaola mafic intrusion lies in the southeast margin of the Altai orogenic belt in Xinjiang, northwestern China. The main rock types are gabbros, gabbro norite, plagioclase-bearing pyroxenite, olivine gabbro and troctolite. Halaqiaola intrusion has low contents of TiO_2 (0.09%–1.28%) and alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=0.37\%\sim0.78\%$), and belongs to tholeiitic series; the intrusion is rich in large ion lithophile elements and light rare earth elements and depleted in high field elements (such as Nb, Ta). The $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ and the $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ values range from -2.62 to -0.78 and 37.49 to 45.28 respectively. Element geochemistry and Nd-Sr isotopic composition shows that the magma was derived from the dehydration of subducted plate and metasomatised enriched lithosphere mantle. The primary magma of the intrusion is basaltic magma. During the process of magma evolution, the primary magma has experienced fractional crystallization of olivine, clinopyroxene and plagioclase, with ilmenite-precipitation in the late period.

Key words: Halaqiaola; mafic; primary magma; magma evolution; lithosphere mantle; petrology; geochemistry.

新疆东北部镁铁—超镁铁质岩带主要位于额尔齐斯褶皱带、东天山北部、中天山东段和塔里木板块东北部。额尔齐斯褶皱带中岩体主要有喀拉通克镁

铁质岩体群, 其含有重要的镍铜硫化物岩浆矿床。近年来, 在距喀拉通克铜镍矿 20 余 km 的青河哈拉乔拉村以南发现了有铜镍矿化的镁铁质岩体。胡忠德

(2009)通过岩体地质特征、岩石化学特征及物探、化探成果,对岩体的成矿条件进行了讨论. 目前对哈拉乔拉岩体的岩石地球化学和岩体成因缺少系统的研究,本文选取该岩体为研究对象,以揭示其岩浆源区特征和岩浆演化过程.

1 地质概况

哈拉乔拉镁铁质岩体位于阿尔泰山东南麓,西伯利亚古板块阿尔泰陆缘活动带中,南邻可可托海—二台断裂(张招崇等,2005;周刚等,2005;张元元等,2007)(图 1a). 区内地层出露面积不大,主要为奥陶统哈巴河群中亚群(O₂₋₃)的一套浅变质岩,岩性有灰绿色薄层状变质粉砂岩、细砂岩、千枚岩、绢云母绿泥石片岩,以及第三系渐新世陆相橄榄玄武岩(E₃)和华里西中期的花岗岩(图 1b).

哈拉乔拉镁铁质杂岩体出露在哈拉乔拉村居民地南,北侧被第三系渐新世陆相基性喷发橄榄玄武岩所掩盖,地表形态呈心状,向南尖灭,岩体长轴近南北向,南北长约 2 km,东西最宽处 1.2 km,分布面积约 1.6 km². 岩体侵入于哈巴河群中亚群的变质粉砂岩、黑云母片岩中. 哈拉乔拉岩体岩相分带较清楚,地表出露的主要是辉长岩、橄榄辉长岩和含长辉石岩. 其中辉长岩在岩体南部出露厚度较大,东部较小,出露面积占岩体总面积的 70%;橄榄辉长岩和含长辉石岩出露于岩体中心部位偏西位置,占岩体总面积的 30%. 该岩体的锆石 U-Pb 年龄为 413 Ma

(内部资料),岩体形成时代属下泥盆统.

2 岩相学及矿物晶体化学特征

辉长岩:灰绿、墨绿色,辉长结构、块状构造. 岩石主要由普通辉石(35%~45%)、斜长石(35%~40%)、角闪石(5%~10%)等组成(表 1). 辉石多发生次闪石化、阳起石化. 斜长石为拉—倍长石,常见绿泥石、绿帘石化、绢云母化;金属矿物可见磁铁矿、磁黄铁矿、钛铁矿等,总含量<5%.

辉长苏长岩:灰绿、墨绿色,辉长结构、块状构造. 岩石主要由普通辉石(25%~35%)、紫苏辉石(25%~35%)、斜长石(35%~40%)等组成. 辉石多发生次闪石化、阳起石化. 斜长石为拉—倍长石,常见绿泥石、绿帘石化、绢云母化,金属矿物可见磁铁矿、磁黄铁矿、钛铁矿等(图 2d),总含量<5%.

含长辉石岩:灰黑色,岩石主要由单斜辉石(40%~50%)和斜方辉石(35%~45%)组成,并含有少量斜长石(<5%),辉石多发生次闪石化、阳起石化. 斜长石为拉—倍长石,常见绿泥石、绿帘石化、绢云母化.

橄榄辉长岩:灰、灰褐、灰绿色,具包含结构、反应边结构、辉长结构. 岩石主要由圆粒状橄榄石(10%~20%)、单斜辉石(30%~40%)、拉长石(40%~50%)以及少量磁黄铁矿等组成(图 2b,2c).

橄长岩:灰褐色,包橄结构(图 2a),岩石主要由橄榄石(20%~25%)、斜长石(70%~75%)及少量

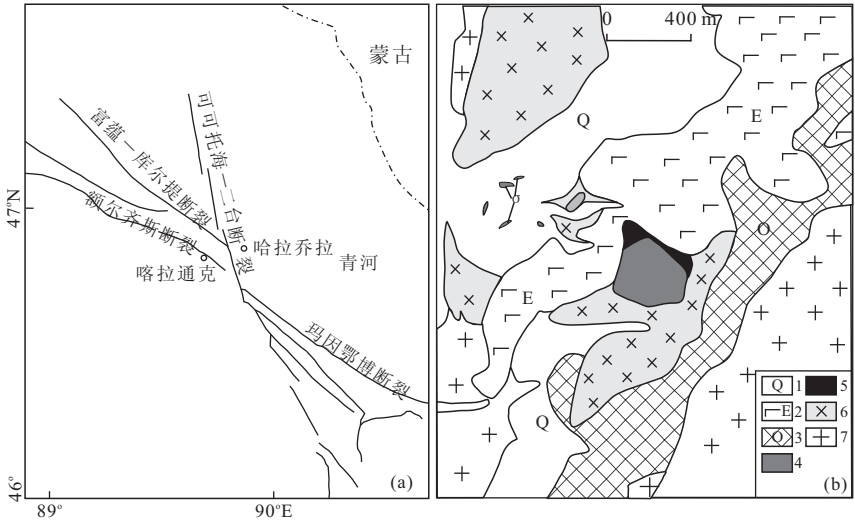


图 1 哈拉乔拉构造位置(据张元元等,2007)及岩体地质图(胡忠德,2009)

Fig. 1 Tectonic location of Halaqiaola and Geological map of Halaqiaola intrusion

1. 第四系;2. 第三系橄榄玄武岩;3. 哈巴河中亚群;4. 橄榄辉长岩;5. 辉石岩;6. 辉长岩;7. 花岗岩

表 1 哈拉乔拉岩体中橄榄石、辉石电子探针分析数据(%)

Table 1 Electron microprobe analytical data of olivines and pyroxenes of Halaqiaola intrusion (%)

No.	岩石名称	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	NiO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	端员组成	矿物种属
HL-05-6	橄榄 辉长岩	Ol	38.91	0.01	0.01	0.00	21.73	0.30	39.74	0.00	0.02	0.01	0.02	100.74	For ₇₇ Fa ₂₃	贵橄榄石
HL-05-8		Ol	38.17	0.00	0.00	0.03	23.79	0.36	37.61	0.00	0.03	0.00	0.00	100.00	For ₇₄ Fa ₂₆	贵橄榄石
HL-05-2		Ol	38.17	0.01	0.00	0.04	21.53	0.07	38.55	0.00	0.03	0.02	0.00	98.43	For ₇₄ Fa ₂₆	贵橄榄石
HL-05-3		Ol	37.95	0.00	0.01	0.00	21.31	0.12	39.21	0.00	0.00	0.04	0.01	98.65	For ₇₄ Fa ₂₆	贵橄榄石
HL-02-1	橄长岩	Ol	38.85	0.02	0.01	0.03	19.88	0.20	38.74	0.00	0.03	0.32	0.07	98.15	For ₇₈ Fa ₂₂	贵橄榄石
HL-02-5		Ol	38.55	0.00	0.00	0.00	20.47	0.18	38.50	0.00	0.02	0.05	0.02	97.78	For ₇₇ Fa ₂₃	贵橄榄石
HL-02-6		Ol	39.59	0.00	0.01	0.02	18.96	0.16	39.67	0.01	0.05	0.00	0.00	98.46	For ₇₉ Fa ₂₁	贵橄榄石
HL-05-3	橄榄 辉长岩	Cpx	51.95	0.20	2.88	0.05	6.27	0.28	14.71	0.00	16.29	0.15	0.00	92.77	En ₄₉ Fs ₁₂ Wo ₃₉	普通辉石
HL-05-1		Cpx	49.96	0.28	3.16	0.02	5.11	0.06	14.28	0.00	23.47	0.08	0.00	96.43	En ₄₂ Fs ₈ Wo ₅₀	透辉石
HL-05-4		Cpx	48.11	0.34	3.73	0.01	6.29	0.00	14.43	0.02	21.01	0.20	0.02	94.16	En ₄₄ Fs ₁₁ Wo ₄₅	透辉石
HL-02-4	橄长岩	Cpx	43.85	0.22	10.99	0.00	6.82	0.12	15.48	0.00	12.11	1.24	0.18	90.99	En ₅₅ Fs ₁₄ Wo ₃₁	普通辉石
HL-02-7		Cpx	46.21	0.09	11.68	0.00	7.53	0.05	16.36	0.00	12.55	1.36	0.15	95.99	En ₅₅ Fs ₁₄ Wo ₃₀	普通辉石
HL-14-6	含长 辉石岩	Cpx	44.94	0.00	14.43	0.03	9.69	0.20	15.74	0.00	7.76	1.48	0.25	94.51	En ₅₉ Fs ₂₀ Wo ₂₁	普通辉石
HL-14-7		Cpx	45.39	0.06	13.98	0.00	10.24	0.10	14.13	0.00	8.61	1.62	0.19	94.32	En ₅₄ Fs ₂₂ Wo ₂₄	普通辉石
HL-14-8		Cpx	45.10	0.12	15.02	0.00	10.64	0.09	13.73	0.00	8.60	1.75	0.20	95.25	En ₅₃ Fs ₂₃ Wo ₂₄	普通辉石
HL-05-5	橄榄	Opx	53.14	0.00	2.58	0.00	13.33	0.08	26.98	0.00	0.40	0.02	0.01	96.54	En ₇₈ Fs ₂₁ Wo ₁	古铜辉石
HL-05-1	辉长岩	Opx	51.91	0.00	2.32	0.00	13.72	0.32	26.10	0.00	0.22	0.05	0.02	94.67	En ₇₇ Fs ₂₃	古铜辉石
HL-18-3	辉长岩	Opx	52.97	0.00	1.98	0.00	16.79	0.17	20.10	0.04	0.34	0.08	0.01	92.48	En ₆₈ Fs ₃₁ Wo ₁	紫苏辉石
HL-09-1	辉长 苏长岩	Opx	52.47	0.14	1.38	0.04	20.03	0.08	22.77	0.02	1.15	0.01	0.01	98.11	En ₆₆ Fs ₃₂ Wo ₂	紫苏辉石

注:本数据由长安大学成矿动力学实验室采用 JXI-8100 型电子探针分析,电流 1.0×10^{-8} ,电压 15 kV。端元计算公式: $Fo=Mg/(Mg+Fe)\times 100$, $Fa=Fe/(Mg+Fe)\times 100$; $Wo=Ca/(Ca+Mg+Fe)\times 100$, $En=Mg/(Ca+Mg+Fe)\times 100$, $Fs=Fe/(Ca+Mg+Fe)\times 100$ (式中 Mg、Fe、Ca 都为分子数)。

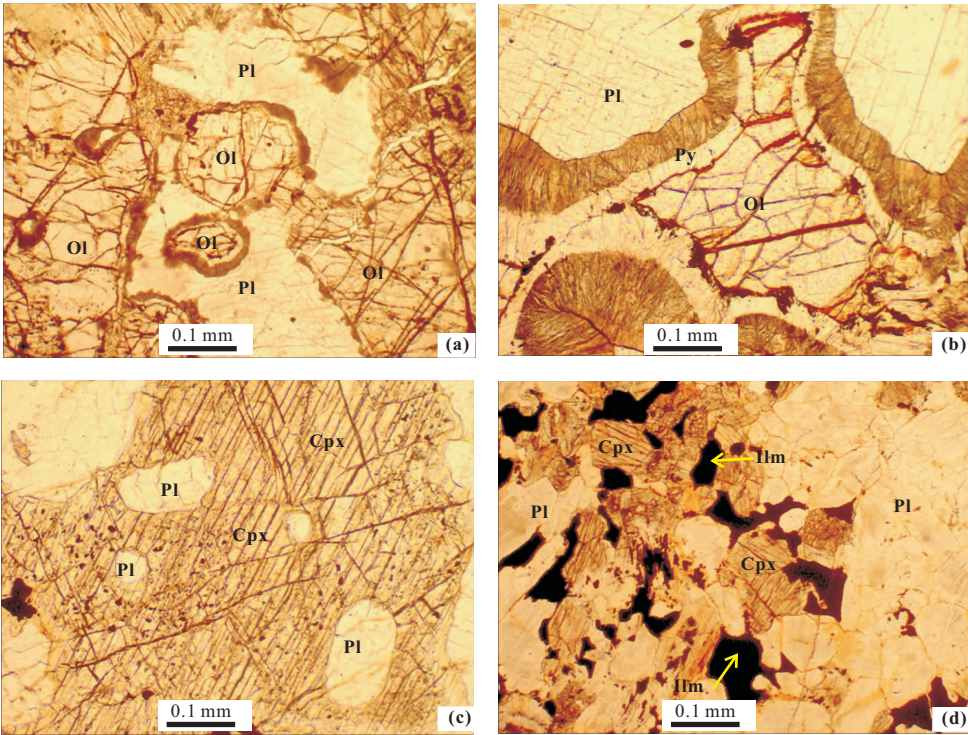


图 2 岩石显微照片

Fig. 2 Photomicrographs for rocks

a. 橄长岩中的包橄结构与反应边结构,单偏光;b. 橄榄辉长岩中反应边结构,单偏光;c. 橄榄辉长岩中的含长结构,单偏光;d. 辉长苏长岩中的后期结晶的钛铁矿,单偏光

表 2 哈拉乔拉岩体的岩石化学组成(%)
Table 2 Petrochemical composition (%) of Halaqiaola intrusion

Sample	岩石名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Mg [#]	m/f
HL-02	橄长岩	43.68	0.14	19.47	9.33	0.15	12.83	13.06	0.35	0.02	0.02	0.53	99.58	0.73	2.75
HL-12		43.61	0.1	18.67	10.09	0.15	15.26	10.12	0.34	0.05	0.03	1.09	99.51	0.75	3.02
HL-13		43.64	0.12	18.64	9.92	1.14	15.1	10.13	0.38	0.07	0.02	1.47	99.63	0.75	3.04
HL-03	橄榄辉长岩	42.85	0.09	22.47	8.63	0.13	10.72	12.58	0.36	0.07	0.02	1.67	99.59	0.71	2.48
HL-10		43.82	0.11	23.28	7.84	0.12	10.23	12.52	0.46	0.08	0.05	1.05	99.56	0.72	2.6
HL-05		44.51	0.14	20.68	8.02	0.13	10.62	13.94	0.35	0.03	0.03	1.19	99.64	0.73	2.64
HL-09	辉长苏长岩	44.84	1.02	20.13	13.78	0.18	6.92	10.43	0.71	0.07	0.06	1.42	99.56	0.5	1
HL-08		43.89	1.28	17.86	15.14	0.2	7.46	12.42	0.62	0.06	0.06	0.69	99.68	0.5	0.98
HL-17	辉长岩	45.57	0.68	18.72	12.62	0.17	9.74	9.59	0.61	0.05	0.05	1.7	99.5	0.61	1.54
HL-16		44.97	0.27	16.93	10.26	0.15	12.62	11.27	0.44	0.06	0.02	2.51	99.5	0.71	2.46
HL-18		45.66	0.68	18.57	12.61	0.17	9.88	9.56	0.53	0.09	0.05	1.71	99.51	0.61	1.56
HL-14	含长辉石岩	42.58	0.22	15.64	10.8	0.14	17.42	8.04	0.53	0.1	0.04	4.04	99.55	0.76	3.22
HL-15		42.33	0.21	13.21	11.52	0.16	19.53	7.14	0.46	0.1	0.05	4.94	99.65	0.77	3.38

注:本数据由西北大学大陆动力学实验室采用 X 荧光光谱仪(3080E)分析.

单斜辉石(<5%)组成,其中橄榄石的 Fo 为 77~79,属贵橄榄石.

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素地球化学

哈拉乔拉岩体岩石的 SiO₂ 含量为 42.33%~45.66%,多属超基性岩类. MgO(6.92%~19.53%)、Fe₂O₃^T(7.84%~12.61%)、CaO(7.14%~13.94)和 Al₂O₃(13.21%~23.28%)含量变化大(表 2).除两件样品的 TiO₂ 含量大于 1 外,其余样品的 TiO₂ 为 0.09%~0.68%. Na₂O、K₂O、P₂O₅、MnO 含量都很低.含长辉石岩、橄长岩、橄榄辉长岩样品的 m/f 值($m/f=(\text{Mg}^{2+}+\text{Ni}^{2+})/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}+\text{Mn}^{2+})$ 原子数比值)介于 2.48~3.38 之间,属铁质超基性岩(吴利仁,1963),对形成铜镍矿有利.此外,辉长苏长岩和辉长岩样品的 m/f 为 0.98~2.46,多小于 2,多属铁质基性岩.在 SiO₂-FeO_T^{*}/MgO 图解(图 3)上,样品均位于拉斑玄武岩系列区.

3.2 稀土微量元素地球化学

稀土元素总量为 $6.42\times10^{-6}\sim21.37\times10^{-6}$,为球粒陨石的 2~5 倍. $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.74\sim4.44$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=1.43\sim2.78$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.98\sim1.71$,相对富集轻稀土元素,亏损重稀土元素, $\delta\text{Eu}=1.04\sim2.28$,多具有较明显的正铕异常(表 3,图 4).在微量元素蛛网图上,相对富集大离子亲石元素而亏损高场强元素,具有较明显的 Nb、Ta、Zr、Hf、P 负异常.各岩类中,从橄长岩、橄榄辉长岩到含长辉石岩,再到辉长岩、辉长苏长岩,稀土

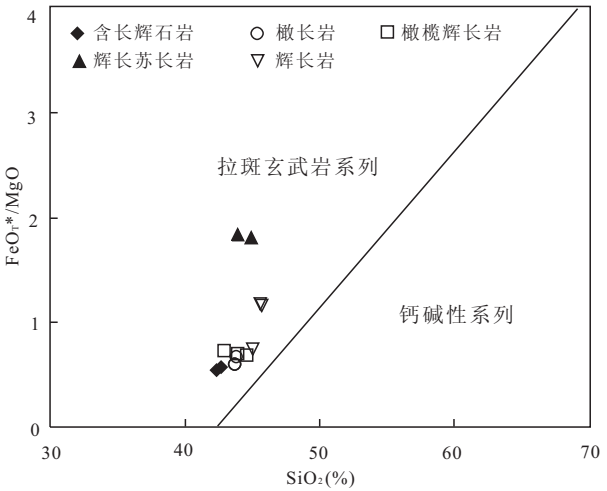


图 3 SiO₂-FeO_T^{*}/MgO 图解(Miyashiro, 1974)
Fig. 3 SiO₂ vs. FeO_T^{*}/MgO diagram

元素、微量元素含量有增加的趋势(图 4).

3.3 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学

哈拉乔拉岩体中橄榄辉长岩、辉长苏长岩和辉长岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 -2.39、-0.78、-2.62; $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值分别为 37.49、45.28、44.98.从这些数据来看,该岩体的 Nd、Sr 同位素组成变化较小(表 4),而且数据点在 Nd-Sr 同位素相关图(图 5)上均位于第四象限,显示出 Nd、Sr 同位素的富集特征.

橄榄辉长岩、辉长苏长岩和辉长岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值变化组成 18.033~18.276, 15.491~15.587, 37.874~38.304.样品的 U/Pb、Th/Pb 比值低($\text{U}/\text{Pb}=0.02\sim0.08$, $\text{Th}/\text{Pb}=0.04\sim0.13$),岩体形成后放射成因 Pb 同位素积累少, Pb 同位素的测试值与其

表 3 哈拉乔拉岩体的稀土微量元素数据(10^{-6})

Table 3 Rare earth elements and trace elements abundances data of Halaqiaola intrusion

Sample	HL-02	HL-12	HL-13	HL-03	HL-10	HL-05	HL-09	HL-08	HL-17	HL-16	HL-18	HL-14	HL-15
岩石名称	橄长岩			橄榄辉长岩			辉长苏长岩			辉长岩		含长辉石岩	
Sc	22.39	12.36	13.8	8.98	9.12	26.59	32.17	43.69	25.55	30.81	27.46	12.84	14.48
V	78.03	60.6	67.06	52.59	53.55	89.29	462.4	568.6	387.9	32.95	394.6	88.11	87.58
Cr	416.4	379.9	356.9	284.2	276.7	450.5	76.34	47.76	238.6	159.7	253.4	384.3	484
Mn	1305	1280	1262	1112	1014	1095	1667	1757	1522	400	1464	1260	1461
Co	69.43	83.01	81.47	64.42	65.64	63.11	57.88	62.8	70.31	17.24	72.65	86.48	91.35
Ni	85.78	232.6	226.4	119.6	159.1	86.45	54.84	63.84	131.6	31.51	149.8	243.9	275
Cu	74.94	20.74	29.36	55.02	134.2	101.3	71.18	111.9	145.9	15.38	125.4	45.6	49.81
Zn	57.52	72.92	74.16	60	51.49	50.78	138.5	140.4	108.6	15.11	108	84.58	88.03
Rb	2.4	2.45	2.72	2.44	2.55	1.52	2.95	2.16	2.22	1.08	2.36	1.82	2.61
Sr	248.1	238	242.6	281.8	305.8	269	342.4	316.3	278.8	192.3	269.1	168.2	83.44
Y	2.08	1.55	1.85	1.31	1.84	2.02	3.77	6.53	2.45	2.85	3.81	3.16	3.28
Zr	6.39	5.34	7.04	4.69	11.06	5.54	12.91	18.59	8.19	2.88	10.95	14.28	15.16
Nb	0.27	0.3	0.35	0.31	0.55	0.2	1.16	1.51	0.8	0.05	0.85	0.75	0.79
Cs	0.1	0.16	0.14	0.1	0.11	0.04	0.19	0.1	0.25	0.09	0.31	0.17	0.21
Ba	42.41	26.03	23.26	80.48	72.01	30.41	87.82	134.3	43.28	32.63	53.7	23.06	25.98
Hf	0.18	0.17	0.22	0.15	0.28	0.17	0.39	0.59	0.25	0.11	0.36	0.41	0.42
Ta	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.08	0.09	0.06	0.01	0.06	0.05	0.05
Pb	1.31	1.27	1.23	2.14	8.15	1	2.85	6.97	2.05	0.38	2.23	1.33	1.17
Bi	0.11	0.06	0.07	0.24	0.56	0.02	0.14	0.16	0.08	0.03	0.05	0.18	0.31
Th	0.19	0.26	0.28	0.26	0.45	0.15	0.35	0.29	0.27	0.22	0.29	0.6	0.56
U	0.07	0.1	0.09	0.18	0.16	0.05	0.18	0.16	0.11	0.08	0.12	0.18	0.21
La	0.92	0.98	1.11	1.06	1.58	0.84	2.74	2.66	1.77	1.06	2.02	2.02	2.03
Ce	2.1	2.16	2.5	2.24	3.33	1.92	5.69	6.21	3.6	2.08	4.75	4.46	4.6
Pr	0.28	0.27	0.33	0.28	0.4	0.25	0.7	0.86	0.42	0.33	0.64	0.58	0.63
Nd	1.4	1.23	1.46	1.25	1.71	1.31	3.11	4.4	1.76	1.63	2.96	2.59	2.76
Sm	0.35	0.28	0.37	0.27	0.38	0.36	0.71	1.17	0.4	0.46	0.68	0.64	0.68
Eu	0.23	0.16	0.18	0.21	0.25	0.24	0.6	0.69	0.29	0.24	0.35	0.24	0.25
Gd	0.46	0.39	0.41	0.36	0.5	0.47	0.91	1.44	0.52	0.6	0.83	0.71	0.79
Tb	0.08	0.06	0.07	0.05	0.07	0.08	0.13	0.23	0.08	0.1	0.13	0.11	0.12
Dy	0.48	0.32	0.39	0.27	0.39	0.44	0.76	1.43	0.47	0.63	0.79	0.67	0.7
Ho	0.1	0.07	0.08	0.06	0.08	0.09	0.17	0.31	0.11	0.13	0.17	0.14	0.14
Er	0.29	0.21	0.24	0.17	0.25	0.26	0.53	0.88	0.35	0.38	0.51	0.4	0.43
Tm	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04	0.04	0.08	0.12	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06
Yb	0.26	0.23	0.26	0.17	0.24	0.25	0.56	0.83	0.43	0.41	0.55	0.4	0.41
Lu	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.09	0.13	0.07	0.06	0.09	0.06	0.06
ΣREE	7.02	6.42	7.47	6.43	9.24	6.58	16.77	21.37	10.32	8.14	14.53	13.08	13.63
δEu	1.75	1.46	1.41	2.08	1.71	1.77	2.28	1.61	1.96	1.39	1.43	1.1	1.03
(La/Yb) _N	2.45	2.86	2.93	4.17	4.55	2.3	3.35	2.17	2.82	1.77	2.51	3.39	3.39
(La/Sm) _N	1.63	2.18	1.86	2.42	2.59	1.45	2.4	1.42	2.79	1.45	1.86	1.98	1.87
(Gd/Yb) _N	1.47	1.37	1.29	1.69	1.72	1.52	1.32	1.4	0.98	1.19	1.22	1.42	1.57

注:本数据由长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室采用 X7 型 ICP-MS 分析, $\delta\text{Eu}=2\text{Eu}_\text{N}/(\text{Sm}_\text{N}+\text{Gd}_\text{N})$, Eu_N 、 Sm_N 、 Gd_N 等为球粒陨石标准化数值, 据 McDonough and Sun(1995)。

初始值之间偏差小。在图 6 上, 铅同位素组成位于 MORB 范围内或其附近, 表明该岩体的 Pb 同位素组成具有 MORB 亲和性。

4 讨论

4.1 原生岩浆与分离结晶

$\text{Mg}^\#$ ($\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$) 是鉴别原生岩浆的重要标志之一。Green(1975)认为, 与地幔橄榄岩平衡的原生岩浆的 $\text{Mg}^\# = 0.63 \sim 0.73$; Sato(1977)指出原生岩浆的 $\text{Ni} = 235 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$; Frey

et al. (1978)认为, $\text{Mg}^\# = 0.68 \sim 0.73$; Hess(1992)认为 $\text{Mg}^\# > 0.68$, $\text{Ni} = 300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ 。该岩体有 5 件样品的 $\text{Mg}^\# = 0.71 \sim 0.73$, 这 5 件样品的 MgO 平均值为 11.4%, 表明形成该岩体的岩浆为高镁的拉斑玄武质岩浆, 但这几件样品的 Ni 含量 ($31.51 \times 10^{-6} \sim 159.1 \times 10^{-6}$) 普遍偏低, 这可能是由于其源区中含有相当数量的再循环洋壳物质。

哈拉乔拉岩体岩石中的包橄结构、反应边结构、含长结构以及辉长结构等, 表明岩浆结晶过程中橄榄石是最早结晶的矿物, 辉石、斜长石在其后结晶, 部分斜长石结晶早于辉石(图2)。在图7上, 橄长

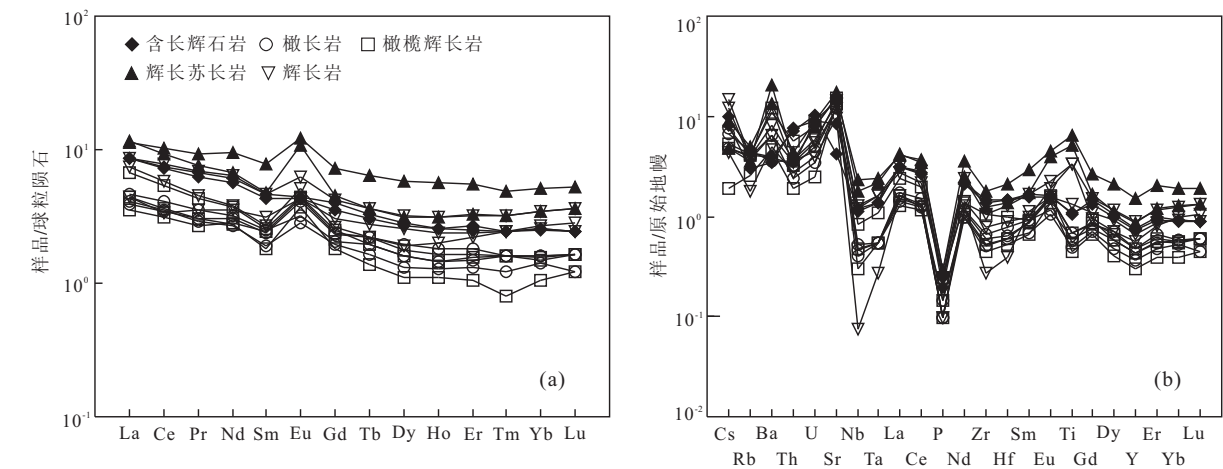


图 4 (a)球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线图(球粒陨石标准化值据 McDonough and Sun,1995);(b)原始地幔标准化的多元素配分曲线图(原始地幔标准值据 McDonough and Sun,1995)

Fig. 4 (a) Chondrite-normalized REE patterns; (b) PM-normalized trace elements spider diagram

表 4 哈拉乔拉岩体 Nd-Sr-Pb 同位素数据

Table 4 The isotopic compositions of Nd, Sr and Pb for Halaqiaola intrusion

Sample	岩石名称	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	⁽⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i		ε _{Sr} (<i>t</i>)	
HL-003	橄榄辉长岩	0.025 1	0.706 8	0.706 7		37.49	
HL-017	辉长岩	0.023	0.707 3	0.707 2		44.98	
HL-008	辉长苏长岩	0.019 8	0.707 3	0.707 2		45.28	
Sample	岩石名称	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	⁽¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i		ε _{Nd} (<i>t</i>)	
HL-003	橄榄辉长岩	0.132 8	0.512 3	0.512 0		−2.39	
HL-017	辉长岩	0.1364	0.512 3	0.512 0		−2.62	
HL-008	辉长苏长岩	0.161 6	0.512 5	0.512 1		−0.78	
Sample	岩石名称	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	⁽²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	⁽²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i	⁽²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) _i
HL-003	橄榄辉长岩	18.033	15.491	37.874	17.639 4	15.469	37.693 5
HL-017	辉长岩	18.276	15.507	37.933	18.015 5	15.492 8	37.740 9
HL-008	辉长苏长岩	18.26	15.587	38.304	18.149 2	15.580 9	38.242 4

注:计算参数: $\lambda(\text{Sr})=1.42\times10^{-11}\text{ a}^{-1}$, $\lambda(\text{Nd})=0.654\times10^{-11}\text{ a}^{-1}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{UR}}=0.704\ 5$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{UR}}=0.512\ 638$, $t=274\ \text{Ma}$.
HD 样品由中国科学院广州地球化学研究所采用 MC-ICP-MS 法分析.

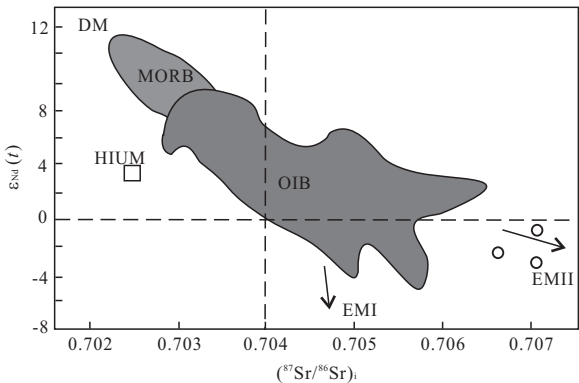


图 5 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ – $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 相关图(据 Zindler and Hart,1986)

Fig. 5 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of the intrusion

岩、橄榄辉长岩和含长辉石岩样品的 MgO 与 SiO₂ 成明显的负相关关系,MgO 与 FeO、Ni、Co 成明显

的正相关关系,反映了岩浆演化过程中主要发生了橄榄石的分离结晶. MgO 与 CaO、Al₂O₃、Na₂O 呈明显的负相关性反映了单斜辉石或斜长石的结晶作用. CaO 与 Al₂O₃ 的相关性较好地反映了单斜辉石的结晶,因为单斜辉石的晶出可以导致岩浆中 CaO 和 CaO/ Al₂O₃ 比值的降低(Geist *et al.* , 1998). 岩石样品的 δEu 均大于 1,表明存在斜长石的聚集或堆晶作用. 在图 6 上,辉长苏长岩和辉长岩样品的 MgO 与 FeO、TiO₂ 呈负相关关系,反映了岩浆结晶过程中有钛铁矿的析出,这与岩相学的观察是一致的(图 2d). 岩相学和地球化学特征表明,哈拉乔拉岩体在岩浆演化过程中早期有橄榄石的结晶,其后主要是单斜辉石和斜长石的分离结晶/堆晶,后期有钛铁矿的析出.

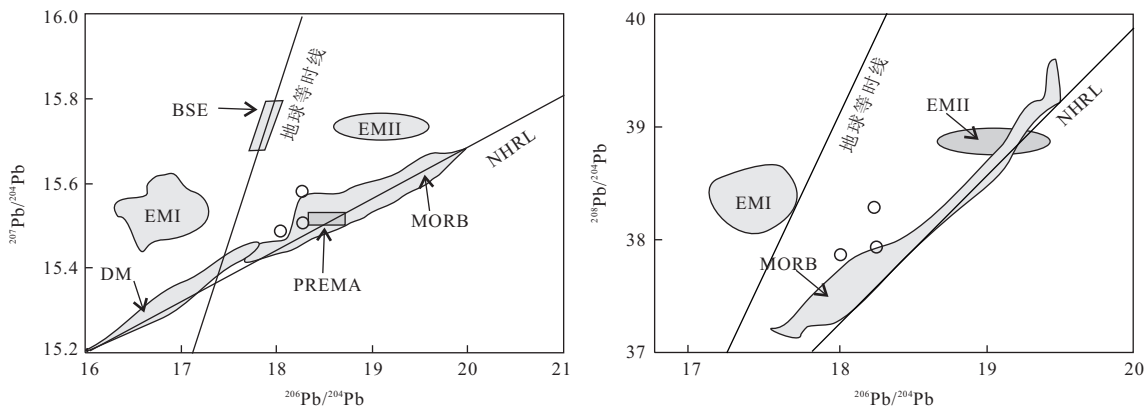


图 6 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 相关图(据 Zindler and Hart, 1986; Allègre *et al.*, 1988)

Fig. 6 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ of the intrusion

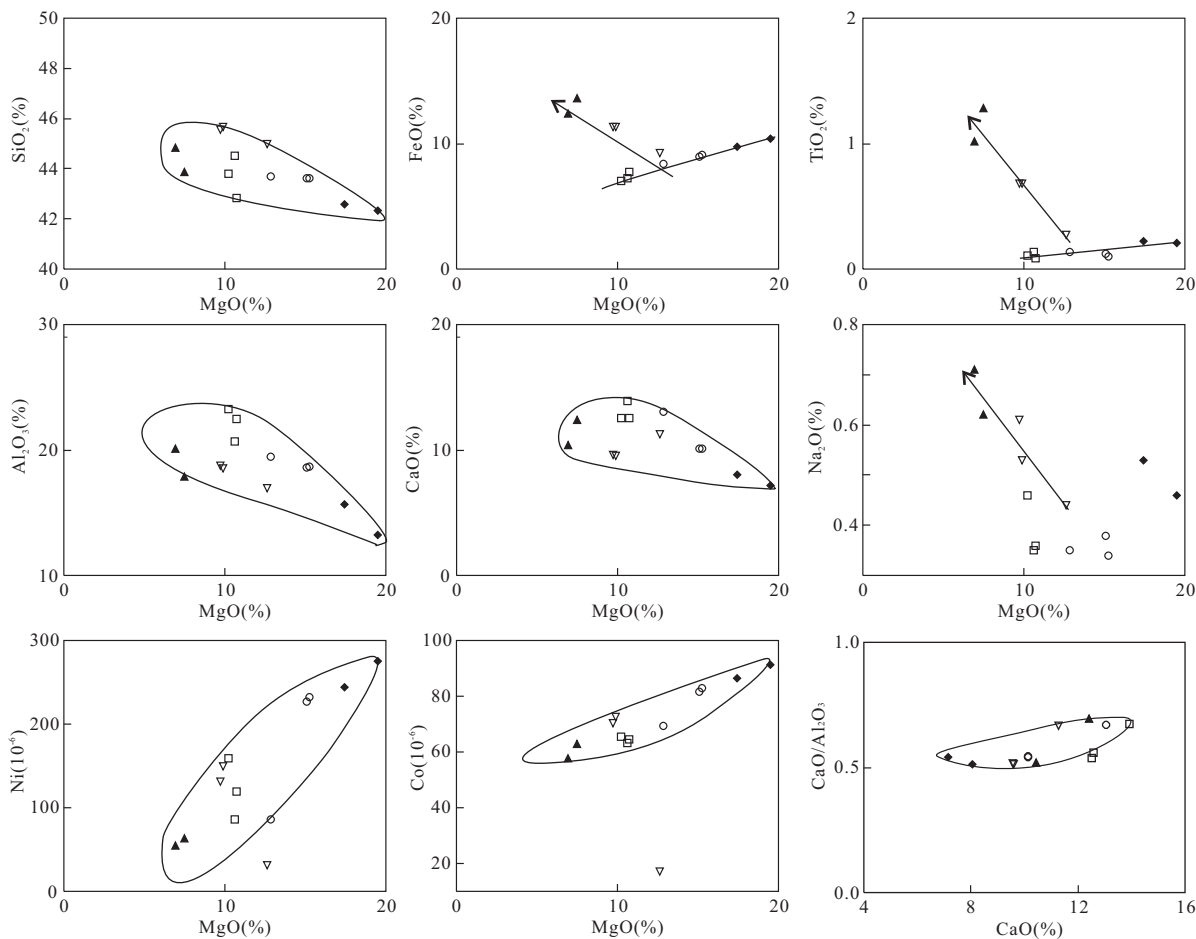


图 7 MgO 与其他氧化物及微量元素相关图解

Fig. 7 Other oxides and trace elements versus MgO of the intrusion

4.2 同化混染与源区性质

一般来说,总分配系数相同或很相近的元素比值不会因结晶作用而改变. 因此,根据总分配系数相同或很相近、对同化混染作用又敏感的元素比值(例如 Ce/Pb 、 Th/Yb 、 Nb/Ta 、 Ta/Yb 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ti}/$

Yb 、 Zr/Nb 等)间的协变关系,可以用来检验同化混染作用的存在与否,并判断混染程度(Campbell and Griffiths, 1993; Baker *et al.*, 1997; Macdonald *et al.*, 2001). Th/Yb - Ce/Pb 、 Nb/U - Ta/Yb 、 Th/Zr - TiO_2/Yb 相关性均较弱,表明岩浆演化过程中同

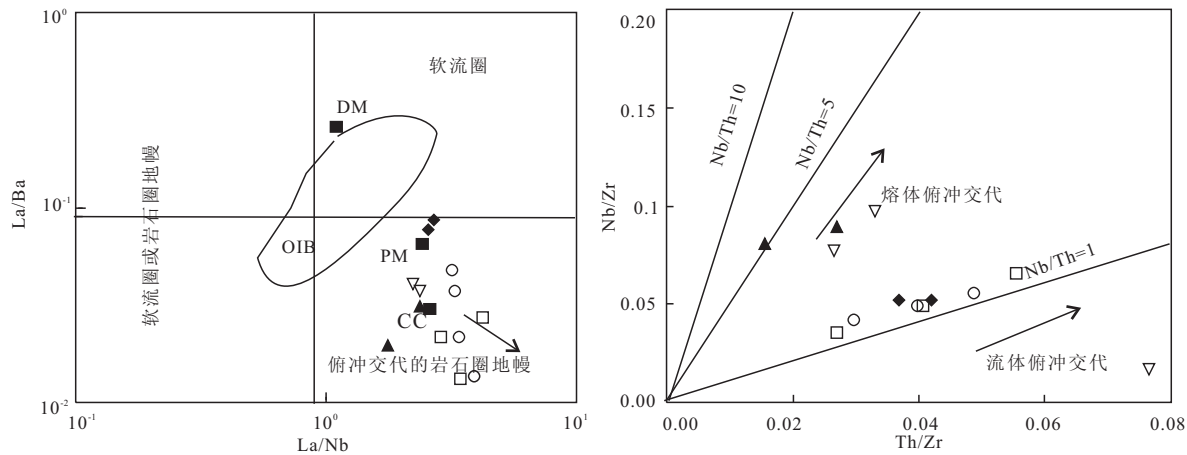


图 8 La/Ba-La/Nb 以及 Nb/Zr-Th/Zr 图解(据 Woodhead *et al.* , 2001)
Fig. 8 La/Ba vs. La/Nb and Nb/Zr-Th/Zr relation

化混染作用弱。

Nb 与 U、Ce 与 Pb 具有相似的总分配系数,因此,Nb 与 U、Ce 与 Pb 在地幔部分熔融过程中不发生明显分异,可以反映岩浆源区的地球化学特征. 洋中脊玄武岩(MORB)和洋岛玄武岩(OIB)的 Nb/U 比值 47 ± 10 ,原始地幔中 Nb/U 比值约为 34,大陆地壳的 Nb/U 比值(约 9~12). 典型地幔的 Ce/Pb 比值(25 ± 5)和地壳 Ce/Pb 比值(<15)(Sun and McDonough, 1989; Hofmann, 1988). 哈拉乔拉岩体样品的 Nb/U 值为 0.59~9.20; Ce/Pb 值为 0.41~5.41,这些特征显示出地壳物质的印记,但在相关元素比值构成的直角坐标图上,往往没有明显的趋势性变化规律. 这种特征反映了源区的性质而非地壳混染作用的结果,这是因为同化混染作用的本质属性之一是化学不均匀性,受到不同混染程度的岩浆具有不同的元素比值. 因此,不同批次、受混染程度不同的岩浆在上述元素比值构成的直角坐标图上自然就会表现出协变关系. 因交代作用而富集的岩石圈地幔,其源区必然存在化学不均匀性. 但是,在同一部位同期生成的岩浆,会因为低熔组分的优先萃取作用和在岩浆源区及上升通道中的混合作用而达到化学上的均匀性. 此外,基于同样的原因,若为同化混染,大离子亲石元素的微量元素配分曲线会产生不规则波动;若为源区富集,则微量元素配分曲线相对平滑且大体平行,本区岩石显示出这种特征(姜常义等,2007). 此外,同位素地球化学方面,哈拉乔拉岩体的 Nd、Sr 同位素组成变化较小且均位于第四象限,这应该反映了源区性质,说明其源区属富集型地幔. 由于该岩体的同化混染作用较弱,其陆壳物质印记应源自于源区富集.

哈拉乔拉岩体岩石化学组成部分属拉斑玄武岩系列,样品富集大离子亲石元素和轻稀土元素、有明显的 Nb、Ta 亏损, $(Nb/La)_N$ 比值介于 0.24~0.56,远小于 1, Th/Ta (3.31~37.33)、Th/Nb (0.30~4.87) 比值较高,表明地幔源区含有被消减板片脱水 和/或部分熔融而交代的地幔楔物质 (Wilson, 1989; Elliott *et al.* , 1997). 由于 La、Ba、Th、Zr 和 Nb 具有相近的分配系数,分离结晶作用不会影响岩浆中 La/Nb、La/Ba、Ba/Nb 比值,而且岩浆演化过程中发生的同化混染作用不是十分强烈,因此,这些元素对比值的显著不同可以指示源区特征 (Woodhead *et al.* , 2001). La/Ba-La/Nb 以及 Nb/Zr-Th/Zr 之间的关系指示岩浆源区存在交代改造的富集型岩石圈地幔 (图 8). 同时,初始 Sr、Nd 同位素组成变化范围小而且均属富集型,所以哈拉乔拉岩体的地幔源区为被交代改造的富集型岩石圈地幔.

5 结论

(1)哈拉乔拉岩体主要由辉长岩、辉长苏长岩、含长辉石岩、橄榄辉长岩、橄长岩组成. 岩石化学组成属拉斑玄武岩系列. 岩石普遍富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损不相容元素,具有明显的 Nb、Ta 异常. (2)岩体的 Nd、Sr 同位素组成属富集型. 元素地球化学和 Nd、Sr 同位素地球化学证明,岩浆源区为被消减板片交代改造过的富集型岩石圈地幔. (3)原生岩浆为高镁拉斑玄武质岩浆. 岩浆演化过程中主要发生了橄榄石、单斜辉石以及斜长石的分离结晶/堆晶,后期有钛铁矿的析出.

References

- Allègre, C. J., Lewin, E., Dupré, B., 1988. A coherent crust-mantle model for the uranium-thorium-lead isotopic system. *Chemical Geology*, 70 (3): 211—234. doi: 10.1016/0009-2541(88)90094-0
- Baker, J. A., Menzies, M. A., Thirlwall M. F., et al., 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana'a Yemen; implications for plume-lithosphere interaction and polybaric melt hybridization. *Journal of Petrology*, 38 (10): 1359—1390. doi:10.1093/ptro/38.10.1359
- Campbell, I. H., Griffiths, R. W., 1993. The evolution of the mantle's chemical structure. *Lithos*, 30 (3—4): 389—399. doi:10.1016/0024-4937(93)90047-G
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., et al., 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B7): 14991—15019. doi:10.1029/97JB00788
- Frey, F. A., Green, D. H., Roy, S. D., 1978. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from south eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal of Petrology*, 19(3): 463—513. doi:10.1093/petrology/19.3.463
- Geist, D., Naumann, T., Larson, P., 1998. Evolution of Galápagos magmas: mantle and crustal fractionation without assimilation. *Journal of Petrology*, 39 (5): 953—971. doi:10.1093/ptro/39.5.953
- Green, D. H., 1975. Genesis of Archean peridotitic magmas and constraints on Archean geothermal gradients and tectonics. *Geology*, 3(1): 15—18. doi: 10.1130/0091-7613(1975)3<15:GOAPMA>2.0.CO;2
- Hess, P. C., 1992. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalts. In: Morgan, J. P., Blackman, D. K., Sinton, J. M., eds., *Mantle flow and melt generation at mid-ocean ridges. Geophysical Monograph, American Geophysical Union*, 71: 67—102.
- Hofmann, A. W., 1988. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297—314. doi:10.1016/0012-821X(88)90132-X
- Hu, Z. D., 2009. The character of Halaqiaola ultrabasic complex and its copper-nickel deposits formation conditions in Qinghe, Xinjiang. *Xinjiang Nonferrous Metals*, (Suppl. 1): 5—7 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. Y., Qian, Z. Z., Jiang, H. B., et al., 2007. Petrogenesis and source characteristics of low-Ti basalts and picrites at Binchuan-Yongsheng-Lijiang region, Yunnan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (4): 777—792 (in Chinese with English abstract).
- Macdonald, R., Rogers, N. W., Fitton, J. G., et al., 2001. Plume-Lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift, East Africa. *Journal of Petrology*, 42(5): 877—900. doi:10.1093/petrology/42.5.877
- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995. The composition of the earth. *Chemical Geology*, 120: 223—253. doi:10.1016/0009-2541(94)00140-4
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rocks series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321—355. doi:10.2475/ajs.274.4.321
- Sato, H., 1977. Nickel content of basaltic magmas: identification of primary magmas and a measure of the degree of olivine fractionation. *Lithos*, 10(2): 113—120. doi: 10.1016/0024-4937(77)90037-8
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication, London*, 42: 313—345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Wilson, M., 1989. *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London.
- Woodhead, J. D., Hergt, J. M., Davidson, J. P., et al., 2001. Hafnium isotope evidence for 'conservative' element mobility during subduction zone processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 331—346. doi:10.1016/S0012-821X(01)00453-8
- Wu, L. R., 1963. Metallogenetic specialization of basic-ultrabasic rocks, China. *Geoscience*, 1: 29—41 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Y., Guo, Z. J., Liu, C., et al., 2007. Geochemical characteristics and geologic implications of Cenozoic basalts, east Altai, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (7): 1730—1738 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. C., Yan, S. H., Chen, B. L., et al., 2005. Middle Devonian picrites of south margin of Altay orogenic belt and implications for tectonic setting and petrogenesis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30 (3): 289—297 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, G., Zhang, Z. C., Yang, W. P., et al., 2005. Metabasic rock on the south side of Mayin'ebo fault in the south margin of Altay mountains, Xinjiang, and its geological implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 738—746 (in Chinese with English abstract).
- Zindler, A., Hart, S. R., 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493—571. doi: 10.1146/annurev. ea. 14.050186.002425

附中文参考文献

胡忠德,2009. 新疆青河县哈拉乔拉超基性杂岩体的特征及铜镍成矿条件分析. 新疆有色金属(增刊 1):5—7.

姜常义,钱壮志,姜寒冰,等,2007. 云南宾川—永胜—丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质. 岩石学报,23(4):777—792.

吴利仁,1963. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性. 地质科学,1:29—41.

张元元,郭召杰,刘畅,等,2007. 新疆阿尔泰东部新生代玄武

岩的地球化学特征与地质意义. 岩石学报, 23(7): 1730—1738.

张招崇,闫升好,陈柏林,等,2005. 阿尔泰造山带南缘中泥盆世苦橄岩及其大地构造和岩石学意义. 地球科学——中国地质大学学报,30(3):289—297.

周刚,张招崇,杨文平,等,2005. 新疆阿尔泰山南缘玛音鄂博断裂南侧变质基性岩的发现及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报,30(6):738—746.