



# 东昆仑夏日哈木铜镍矿床Ⅱ号岩体年代学、地球化学及其意义\*

杜 玮<sup>1,2</sup> 姜常义<sup>1,2</sup> 凌锦兰<sup>3</sup> 周 伟<sup>4</sup> 夏明哲<sup>1,2</sup> 夏昭德<sup>1,2</sup>

(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 中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 7101993; 4 陕西核工业集团公司, 陕西 西安 710100)

**摘 要** 夏日哈木超大型镍矿床位于东昆仑造山带昆中岛弧带内, 其Ⅱ号岩体主要由辉长岩和少量辉石岩组成, 局部可见孔雀石、镍华、褐铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等矿化。岩石主量元素化学特征具低硅( $w(\text{SiO}_2) = 48.12\% \sim 50.18\%$ )、低钛( $w(\text{TiO}_2) = 0.47\% \sim 0.73\%$ )、高镁( $w(\text{MgO}) = 13.15\% \sim 19.59\%$ )的特征, 属亚碱性系列岩石,  $m/f$  值为 3.14~3.88, 属铁质超基性岩类。岩石稀土、微量元素标准化配分模式具一致性, 表现为轻稀土元素弱富集的右倾型, 并具有富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的特征。辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究表明, 岩体形成年龄为  $(424.1 \pm 4.6) \text{ Ma}$ , 属志留纪。笔者对夏日哈木Ⅰ号、Ⅱ号岩体的主要地质特征进行了对比, 认为二者同源, 结合区域构造及Ⅰ号岩体形成的构造背景, 认为Ⅱ号岩体形成于岛弧环境。

**关键词** 地球化学 构造环境 SHRIMP U-Pb 年龄 镁铁质-超镁铁质岩 夏日哈木铜镍矿床 东昆仑  
中图分类号: P618.41, P618.63 文献标志码: A

## Zircon SHRIMP U-Pb geochronology, geochemistry and implications of No. Ⅱ intrusion in Xiarihamu Cu-Ni deposit, East Kunlun Mountains

DU Wei<sup>1,2</sup>, JIANG ChangYi<sup>1,2</sup>, LING JinLan<sup>3</sup>, ZHOU Wei<sup>4</sup>, XIA MingZhe<sup>1,2</sup> and XIA ZhaoDe<sup>1,2</sup>

(1 College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Sino Shannxi Nuclear Industry Group Geological Survey Co., Ltd., Xi'an 7101993, Shaanxi, China; 4 Shaanxi Nuclear Group, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

### Abstract

The Xiarihamu super large nickel deposit is located in the island arc zone in the middle part of the western segment of the East Kunlun orogenic belt. The No. Ⅱ intrusion is mainly composed of gabbro and pyroxenite with mineralization such as limonite, pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite. Major element values of Xiarihamu No. Ⅱ intrusion show sub-alkalic series and are characterized by low  $\text{SiO}_2$  content (48.12% ~ 50.18%) and low  $\text{TiO}_2$  content (0.47% ~ 0.73%), but high  $\text{MgO}$  content (13.15% ~ 19.59%). The  $m/f$  ratios of the rocks range from 3.14 to 3.88, falling into the range of ferrous-ultramafic rocks. LREE-rich trace elements patterns are enriched in LILE and relatively depleted in HFSE (Nb, Ta, Ti). Zircon SHRIMP U-Pb dating of gabbro yielded  $(424.1 \pm 4.6) \text{ Ma}$ , suggesting it formed in Silurian. In this paper, the geological characteristics

\* 本文得到中国地质调查局地质矿产调查专项(编号: 1212011121089)中央高校基本科研业务费项目(编号: 310827172004、310827173401、310827171003)和国家自然科学基金资助项目(编号: 41102045)的联合资助

第一作者简介 杜 玮, 女, 1991年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: xaduwei@163.com

收稿日期 2016-10-07; 改回日期 2017-01-03。赵海杰编辑。

between Xiarihamu No. I and No. II intrusions were compared, which shows the same comagmatic evolution for No. I and No. II intrusions. Combined with regional tectonic evolution and structural setting of No. I intrusion, the authors conclude that No. II intrusion was formed in an island arc setting.

**Key words:** geochemistry, tectonics setting, SHRIMP-U-Pb age, mafic-ultramafic intrusion, Xiarihamu Cu-Ni deposit, East Kunlun Mountains

夏日哈木镍矿床是由青海省第五地质矿产勘查院于2011年发现的超大型矿床,也是东昆仑地区首次发现的镍矿。李世金等(2012)、杜玮等(2014, 2015)、王冠等(2014)、奥踪(2014)和姜常义等(2015)对矿区成矿的I号镁铁质-超镁铁质岩体的特征、岩体年代学、岩石地球化学、矿床地质特征与成因等方面做了有关研究,取得了不少进展,但II号岩体研究程度相对较低。本次研究采用锆石SHRIMP U-Pb法对II号岩体进行了年代学研究,并

结合岩石地球化学特征,以期厘定夏日哈木I号、II号岩体的时代归属及相互关系,并进一步约束成岩成矿时代。本次研究不但有助于提高夏日哈木镍矿床的研究程度,同时可为东昆仑地区镍矿的成矿作用及区域构造演化的研究提供重要资料。

### 1 区域地质背景

青海夏日哈木镍矿床位于昆中带内(图1a)(李

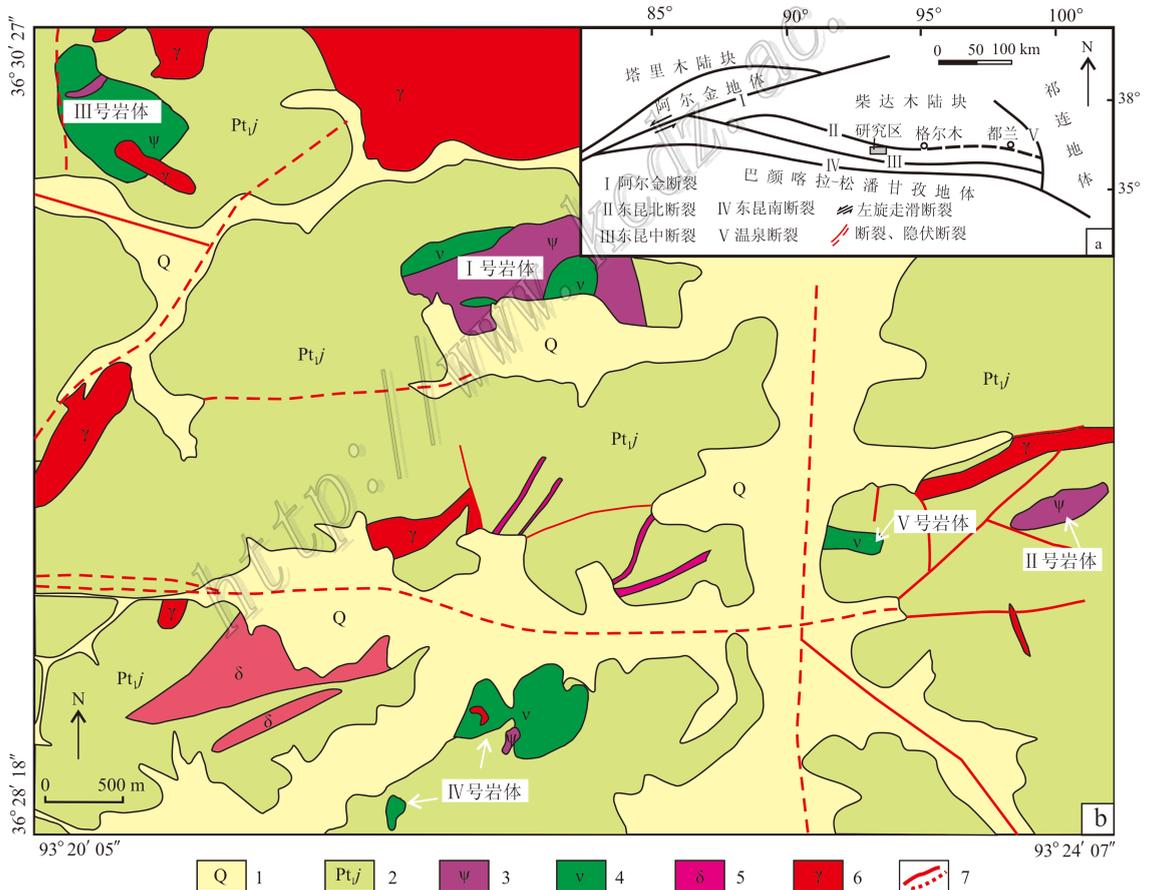


图1 夏日哈木镍矿床大地构造略图(a)及岩体地质图(b)(据张雪亭等,2007;李世金等,2012 修编)  
 1—第四纪冲积物; 2—古元古界金水口岩群白沙河组; 3—超镁铁质岩石; 4—镁铁质岩石; 5—早二叠世闪长岩; 6—晚三叠世花岗岩;  
 7—断层

Fig. 1 Sketch geotectonic map (a) and geological map (b) of the Xiarihamu No. II nickel deposit (modified after Zhang et al., 2017; Li et al., 2012)

1—Quaternary alluvium; 2—Baishahe Formation of Palaeoproterozoic Jinshui Kou Group; 3—Ultramafic rocks; 4—Mafic rocks; 5—Early Permian diorite; 6—Late Triassic granite; 7—Fault

世金等,2012)。姜春发等(1992)、刘增轶等(2003)、李荣社等(2008)和范丽琨等(2009)对青海省境内的东昆仑造山带在早古生代期间的构造格局与演化历史的观点大体相同。东昆仑造山带从北向南以昆北、昆中和昆南 3 条岩石圈断裂为界,划分为昆北带、昆中带和昆南带。在早古生代期间,昆北带的构造属性为弧后盆地,昆中带为岛弧带,昆南带为古洋盆(张雪亭等,2007)。

东昆仑造山带早古生代岛弧带主要发育角闪岩相-麻粒岩相的古元古界金水口岩群和以早古生界为主的花岗岩体 2 类地质体。区域性断裂以近东西向为主,北北西向、北东向断裂次之。区内岩浆活动强,从元古宙到中生代间歇性火山喷发与岩浆侵入频繁交替,其中,以晚元古界和古生代的中-酸性侵入岩为主(袁万明等,2000)。

夏日哈木矿区内出露有 5 个镁铁质-超镁铁质岩体,均侵位于古元古界金水口群白沙河岩组中,其中 I 号和 II 号岩体与镍矿床有关,本文重点对 II 号岩体展开研究。

## 2 岩体特征及岩相学

夏日哈木镍矿床 II 号岩体位于夏日哈木矿区东侧,围岩为金水口群片麻岩。岩体呈 NEE 向展布,走向约 75°,长约 550 m,宽 50~240 m,岩体出露面积约 0.15 km<sup>2</sup>(王冠,2004)。岩体主要由辉长岩相岩石(暗色辉长岩、辉长岩)组成,其次含少量辉石岩相岩石(含单斜辉石岩),二者渐变过渡,辉长岩中

可见二长花岗岩的捕虏体。地表岩石普遍发育透闪石化、蛇纹石化和碳酸盐化蚀变,局部可见孔雀石、镍华、褐铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等矿化。

辉长岩岩石主要发育包辉结构、堆晶结构、辉长结构。暗色辉长岩主要为辉长结构,也见包辉结构。辉石(85%)多为单斜辉石,偶见斜方辉石。单斜辉石多为半自形短柱状,发生较强的次闪石化,成纤维状、针状集合体,蚀变多为阳起石化,偶有透闪石化,少部分辉石颗粒发生黑云母化。其中,被斜长石包裹的、构成包辉结构的辉石较为自形,短柱状,蚀变较弱,仅在边部有次闪石化。斜长石(10%~15%)多为半自形板条状,粒径 2.0~3.5 mm,聚片双晶清晰,普遍有弱的绢云母化和钠黝帘石化,有的大颗粒者双晶不明显且包裹着颗粒较小的、较为自形的辉石,构成包辉结构。不透明矿物(1%~2%)主要为磁黄铁矿、磁铁矿等,它们生长于造岩矿物的粒间。

辉长岩中主要呈辉长结构,局部可见堆晶结构,斜长石作为填隙相,单斜辉石构成堆晶相。偶见大颗粒斜长石包裹辉石,构成包辉结构(图 2a)。辉石(55%~60%)多为半自形短柱状,粒径 2~3 mm 左右,普遍发生强烈的次闪石化(图 2b)。斜长石(40%~45%)多为半自形板条状,粒径 1.5~2.5 mm,具强烈的钠黝帘石化(图 2c)。

## 3 分析方法

### 3.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年

锆石 SHRIMP U-Pb 分析在中国地质科学院北

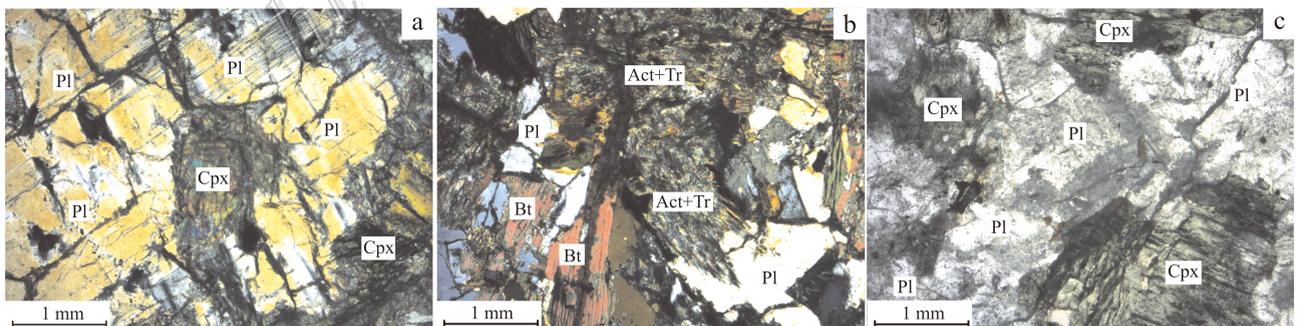


图 2 夏日哈木 II 号岩体岩石显微照片

a. 辉长岩包辉结构,斜长石包裹辉石; b. 辉石次闪石化; c. 斜长石钠黝帘石化

Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Act—阳起石; Tr—透闪石

Fig. 2 Microphotographs of rocks from No. II intrusion in the Xiarihama ore district

a. Pyroxene wrapped in plagioclase in gabbro; b. Amphibolization of pyroxene; c. Saussuritization of plagioclase

Cpx—Clinopyroxene; Pl—Plagioclase; Bt—Biotite; Act—Actinolite; Tr—Tremolite

京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成。详细分析流程参见文献(William et al., 1987; Compston et al., 1984; Ireland et al., 1998; 刘敦一等, 2003)。应用标准锆石 TEM(417 Ma)进行元素分馏校正, 标准锆石 SL13(年龄: 572 Ma,  $w(U):^{238}\mu\text{g/g}$ )标定样品的 U, Th 和 Pb 含量(Black et al., 2003; Williams et al., 1998)。数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序(Ludwig et al., 1999; 2001), 应用实测 $^{204}\text{Pb}$ 校正锆石中的普通铅。单个数据点的误差均为  $1\sigma$ , 采用年龄为  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 其加权平均值为 95% 的置信度。

### 3.2 主量、稀土及微量元素

样品元素地球化学分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。主量元素分析采用日本岛津顺序扫描 LAB CENTER XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪完成, XRF 熔片法依据国家标准 GB/T14506.28-1993, 元素分析误差小于 5%。微量元素分析采用美国 X7 型电感耦合等离子体质谱仪测定。Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Nb、Ta、REE(除

Lu)等元素分析误差优于 5%, 其他低浓度元素分析误差 5%~10%。

## 4 地球化学特征

### 4.1 主量元素地球化学特征

夏日哈木 II 号岩体辉长岩样品取自地表露头, 其主量元素组成见表 1。其  $w(\text{SiO}_2)$  为 48.12%~50.18%,  $w(\text{TiO}_2)$  较低, 为 0.47%~0.73%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  变化大, 为 8.26%~13.64%,  $w(\text{TF}_2\text{O}_3)$  介于 7.20%~10.78%,  $w(\text{MgO})$  介于 13.15%~19.59%;  $\text{Mg}^\#$  介于 0.76~0.80,  $m/f$  为 3.14~3.88, 属铁质系列, 并处于有利于形成镍矿的数值范围(吴利仁, 1963)。在硅碱图(图 3a)中, 所有样品都位于亚碱性区域; 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{FeO}/\text{MgO}$  图(图 3b)中, 辉长岩样品位于钙碱性系列区; 而在 AFM 图(图 3c)中, 样品均位于堆晶镁铁质-超镁铁质岩区域, 反映了岩石的堆晶成因。

表 1 夏日哈木 II 号岩体主量元素组成

Table 1 Major element data for Xiarihamu No. II intrusion

样号	$w(B)/\%$												$\text{Mg}^\#$	$m/f$
	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TF}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	烧失量	总和		
2-1	48.12	0.64	10.48	10.45	0.16	18.34	5.87	1.11	0.09	0.07	5.14	100.47	0.78	3.42
2-2	49.21	0.47	8.26	9.84	0.14	19.59	4.99	5.10	0.48	0.04	2.45	100.57	0.80	3.88
2-3	50.18	0.58	10.72	9.06	0.14	16.73	6.56	1.40	0.39	0.08	2.40	98.24	0.79	3.60
2-4	49.96	0.54	13.64	7.20	0.12	13.15	8.83	2.00	0.31	0.05	2.54	98.34	0.78	3.55
2-5	50.13	0.73	9.93	10.78	0.13	17.30	5.63	1.47	0.56	0.07	3.52	100.25	0.76	3.14

注: 比值单位为 1。

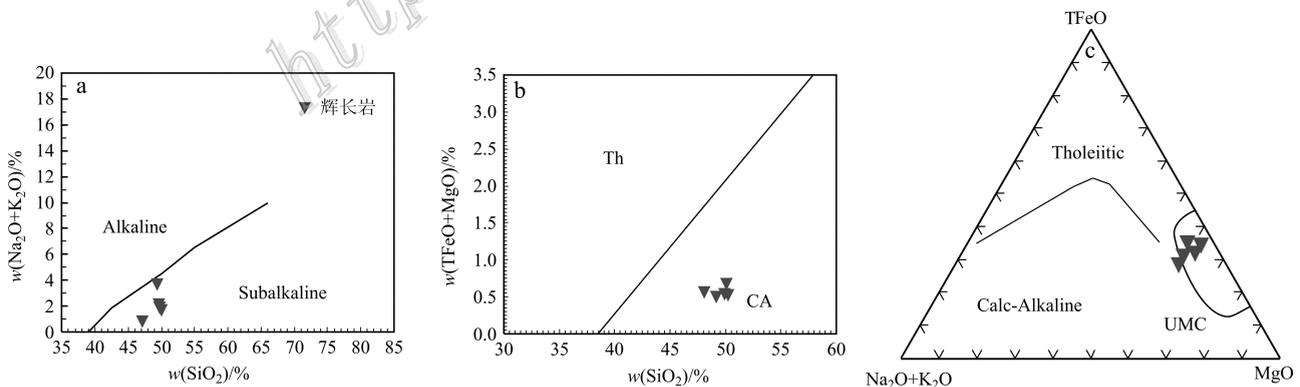


图 3 夏日哈木 II 号岩体  $\text{SiO}_2$ - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  图解(a)、 $\text{SiO}_2$ - $\text{TFeO}/\text{MgO}$  图解(b)和 AFM 图解(c)

Th—拉斑系列; CA—钙碱性系列; UMC—镁铁质-超镁铁质堆晶岩

Fig. 3  $\text{SiO}_2$ - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  diagram (a),  $\text{SiO}_2$ - $\text{TFeO}/\text{MgO}$  diagram (b) and AFM diagram (c) of Xiarihamu No. II intrusion

Th—Tholeiitic series; CA—Calc-alkaline series; UMC—Mafic-ultramafic cumulate

### 4.2 稀土元素、微量元素地球化学特征

夏日哈木 II 号岩体的稀土、微量元素组成见表 2。从表中可以看出,辉长岩的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $33.8 \times 10^{-6} \sim 61.97 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $49.2 \times 10^{-6}$ ,略高于 I 号岩体辉长岩相岩石的稀土元素总量(平均值为  $16.74 \times 10^{-6}$ ,杜玮,2015)。球粒陨石标准化配分曲线(图 4a)为轻稀土弱富集的右倾型( $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.87 \sim 2.27$ ,平均为 1.98 ( $\text{La}/$

$\text{Yb})_N = 2.34 \sim 3.86$ ,平均为 3.18 ( $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.15 \sim 1.56$ ,平均为 1.39; $\delta\text{Eu} = 0.27 \sim 0.34$ ,平均为 0.31)。表明轻、重稀土元素之间分馏作用较强,而轻、重稀土元素内部的分馏作用较弱,在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 4b)中,夏日哈木 I 号、II 号岩体不同岩石类型的微量元素配分曲线变化一致,具富集大离子亲石元素( $\text{Th}$ 、 $\text{U}$ ),亏损高场强元素  $\text{Nb}$ 、 $\text{Ta}$ 、 $\text{Ti}$  的特征。

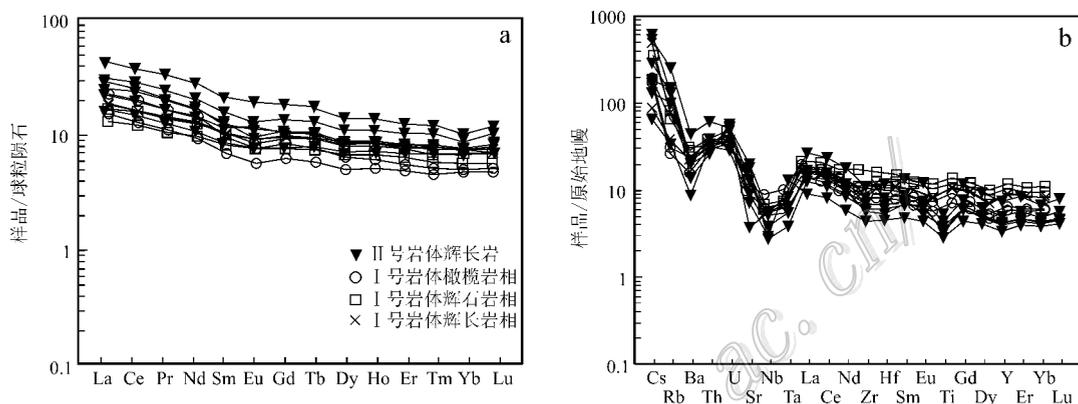


图 4 夏日哈木 I 号、II 号岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized element spider diagrams (b) of Xiarihamu No. I and No. II intrusions

表 2 夏日哈木 II 号岩体稀土、微量元素组成( $\mu\text{B}/10^{-6}$ )

Table 2 Trace element data for Xiarihamu No. II intrusion( $\mu\text{B}/10^{-6}$ )

组分	辉长岩					组分	辉长岩				
	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5		2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Sc	24.5	27.93	31.94	33.7	33.35	La	7.35	4.67	8.33	6.56	8.88
Cr	2375.16	2654.81	2110.5	1308.1	2237.06	Ce	17.91	10.93	19.02	14.94	21.43
Co	58.92	71.33	61.57	47.1	91.43	Pr	2.41	1.45	2.46	2	2.88
Ni	1852.04	934.94	929.53	452.36	1792.96	Nd	9.99	6.14	10.14	8.55	12.01
Cu	183.3	159.47	119.6	78.76	142.62	Sm	2.46	1.62	2.37	2.24	2.98
Zn	133.71	107.89	103.91	81.85	146.76	Eu	0.69	0.56	0.81	0.85	0.93
Ga	13.04	10.87	12.57	14.05	13.13	Gd	2.77	1.98	2.73	2.68	3.45
Rb	16.08	63.44	62.18	48.71	70.7	Tb	0.5	0.37	0.48	0.49	0.61
Sr	60.05	116.48	210.28	289.44	143.73	Dy	2.81	2.26	2.72	2.84	3.48
Y	14.02	11.76	13.5	14.47	17.36	Ho	0.63	0.51	0.6	0.63	0.77
Zr	58.38	36.61	47.7	51.83	69.12	Er	1.72	1.43	1.6	1.72	2.1
Nb	3.01	1.57	2.79	1.51	2.05	Tm	0.26	0.22	0.25	0.25	0.32
Cs	1.6	14.76	7.05	3.22	4.37	Yb	1.62	1.43	1.55	1.59	1.83
Ba	46.43	74.35	106.83	113.3	118.43	Lu	0.26	0.23	0.25	0.25	0.32
Hf	1.59	1.07	1.27	1.42	1.94	$\Sigma\text{REE}$	51.39	33.8	53.29	45.59	61.97
Ta	0.2	0.4	0.17	0.12	0.17	$\delta\text{Eu}$	0.27	0.31	0.32	0.34	0.29
Pb	3.02	4.71	6.84	6.42	10.28	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	1.93	1.87	2.27	1.89	1.93
Th	2.12	1.7	1.71	2.04	2.49	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	3.26	2.34	3.86	2.95	3.48
U	0.77	0.9	0.86	0.46	0.59	$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	1.41	1.15	1.46	1.39	1.56

注:此值单位为 1。

## 5 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

用于锆石 U-Pb 定年的样品来自 II 号岩体的辉长岩。挑选的锆石多呈无色透明, 阴极发光(CL)图像(图 5)显示锆石呈宽板状, 长约 150~200  $\mu\text{m}$ , 具振荡环带结构。SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果见表 3 和图 6。锆石的 Th、U 含量均较高, 分别为  $139 \times 10^{-6} \sim 1908 \times 10^{-6}$ ,  $349 \times 10^{-6} \sim 1325 \times 10^{-6}$ 。所测锆石的 Th/U 比值为 0.44~1.49, 均  $>0.3$ , 且变化范围小, 说明它们是从同一岩浆中结晶形成的, 属岩浆锆石(Claesson et al., 2000)。锆石的 U-Pb 年龄可以代表辉长岩的形成时代。

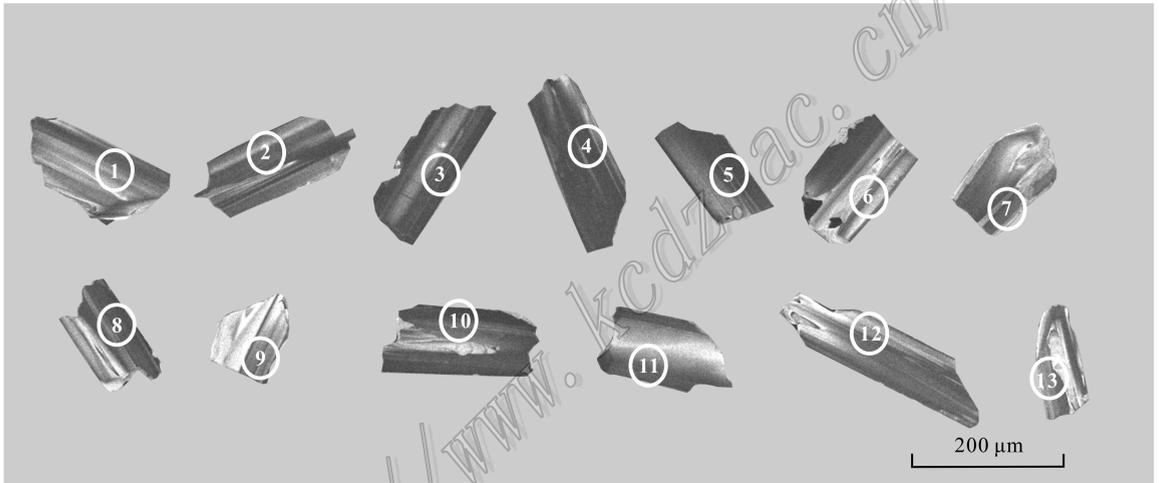


图 5 夏日哈木 II 号岩体辉长岩锆石阴极发光图像

Fig. 5 CL images of zircons from gabbro in Xiarihamu No. II intrusion

表 3 夏日哈木 II 号岩体辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果

Table 3 SHRIMP Zircons U-Pb isotope dating results of gabbro in Xiarihamu No. II intrusion

测点	$\tau_w(\text{B})/10^{-6}$			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\tau_w(^{206}\text{Pb}^*)/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}/\text{Ma}$
	$^{206}\text{Pb}_c$	U	Th						
XIA2-1	0.00	492	457	0.96	28.6	0.056(1.6)	0.519(2.6)	0.068(2.0)	421.5 $\pm$ 8.3
XIA2-2	0.04	1050	1245	1.22	62.1	0.055(1.4)	0.523(2.4)	0.069(2.0)	428.9 $\pm$ 8.3
XIA2-3	0.29	985	1115	1.17	57.5	0.054(1.6)	0.504(2.5)	0.068(2.0)	422.7 $\pm$ 8.2
XIA2-4	0.24	1325	1908	1.49	79.9	0.055(1.3)	0.534(2.4)	0.070(2.0)	436.2 $\pm$ 8.4
XIA2-5	0.21	548	558	1.05	32.2	0.053(2.0)	0.500(2.8)	0.068(2.0)	426.0 $\pm$ 8.3
XIA2-6	0.00	298	191	0.66	17.5	0.056(2.5)	0.527(3.2)	0.068(2.1)	426.2 $\pm$ 8.5
XIA2-7	0.00	739	838	1.17	43.4	0.055(1.5)	0.516(2.5)	0.068(2.0)	425.7 $\pm$ 8.3
XIA2-8	0.00	1117	1489	1.38	66.0	0.056(1.2)	0.532(2.4)	0.069(2.0)	428.8 $\pm$ 8.3
XIA2-9	0.12	208	139	0.69	12.1	0.052(3.9)	0.490(4.5)	0.068(2.1)	423.2 $\pm$ 8.7
XIA2-10	0.03	435	220	0.52	25.2	0.058(1.7)	0.534(2.7)	0.067(2.0)	420.5 $\pm$ 8.3
XIA2-11	0.02	338	190	0.58	19.3	0.055(3.5)	0.500(4.0)	0.066(2.1)	414.4 $\pm$ 8.3
XIA2-12	0.14	607	661	1.13	36.1	0.055(2.2)	0.523(3.0)	0.069(2.0)	431.3 $\pm$ 8.5
XIA2-13	0.02	349	149	0.44	19.6	0.056(2.3)	0.502(3.1)	0.065(2.1)	408.6 $\pm$ 8.2

注: 误差为  $1\sigma$ ,  $\text{Pb}_c$  和  $\text{Pb}^*$  分别代表普通铅和放射成因铅; 普通 Pb 用  $^{204}\text{Pb}$  校正; 括号内数字代表误差。

夏日哈木 II 号岩体辉长岩 13 个锆石颗粒的分析表现出较为一致的谐和年龄, 13 个测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于  $(408.6 \pm 8.2) \text{ Ma} \sim (436.2 \pm 8.4) \text{ Ma}$ , 构成非常集中的主锆石群, 加权平均结果为  $(424.1 \pm 4.6) \text{ Ma}$  ( $n = 13$ ,  $\text{MSWD} = 0.74$ ) (图 6), 这一年龄代表辉长岩的结晶年龄, 为志留纪。

## 6 讨论

### 6.1 AFC 过程

在岩浆演化和侵位过程中, 同化混染和结晶分异往往同时出现, 即 AFC 过程(DePaolo et al., 1981; Halama et al., 2004)。岩相学及地球化学特征表明夏

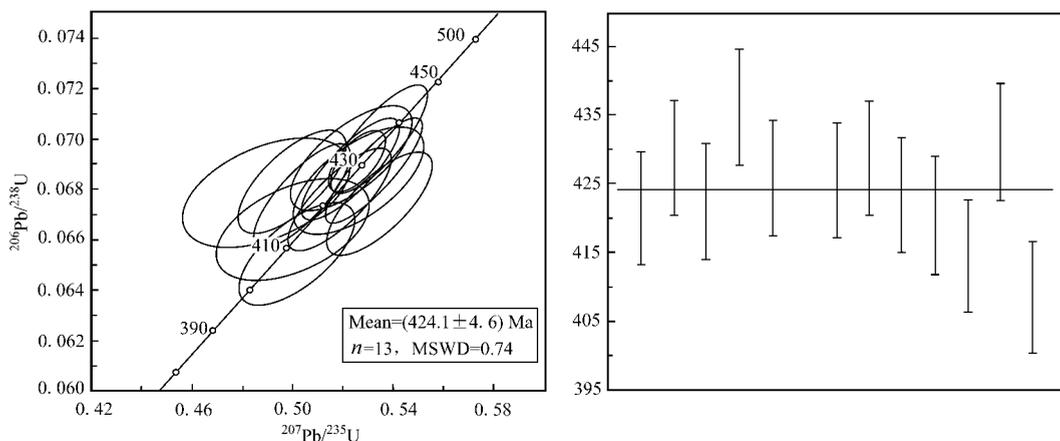


图 6 II 号岩体辉长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagram and weighted average age diagram for gabbro in Xiarihamu No. II intrusion

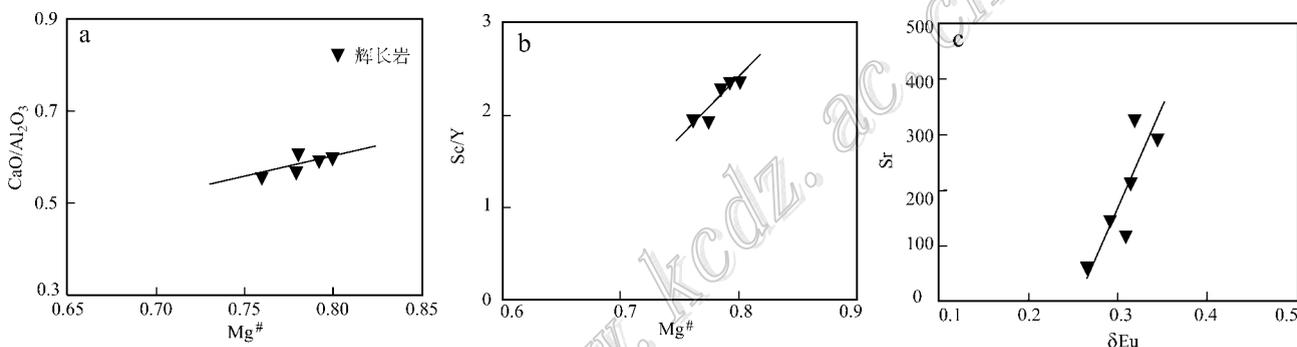


图 7 夏日哈木 II 号岩体分离结晶判别图

Fig. 7 Discriminant diagram of fractional crystallization of Xiarihamu No. II intrusion

日哈木 I 号岩体发育堆晶结构, 并且橄榄石和斜方辉石的分离结晶作用占据主要地位(姜常义, 2014; 杜玮, 2015)。

岩相学特征方面, 夏日哈木 II 号岩体主要由辉长岩相岩石组成, 且发育堆晶结构, 堆晶相主要为单斜辉石。通常, 若存在相当数量单斜辉石的分离结晶作用, 则  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Sc}/\text{Y}$  值与  $\text{Mg}^\#$  值正相关 (Späth et al., 2001)。样品  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Sc}/\text{Y}$  值与  $\text{Mg}^\#$  值之间的正相关性(图 7a、b), 表明岩浆演化过程中经历了单斜辉石的分离结晶作用。而  $\delta\text{Eu}$  与  $\text{Sr}$  的正相关性(图 7c), 说明发生了斜长石的分离结晶作用 (Stanley et al., 1989)。

从元素地球化学角度来看, 总分配系数相同或很近的元素比值在岩浆结晶过程中不会改变。因此, 根据总分配系数相同或很相近、对同化混染作用敏感的元素对比值(如  $\text{Ce}/\text{Pb}$ 、 $\text{Th}/\text{Yb}$ 、 $\text{Nb}/\text{Yb}$ 、 $\text{La}/\text{Yb}$  等)之间的协变关系可以验证同化混染作用的有

无 (Campbell et al., 1993; Baker, 1997; Madonald et al., 2001)。本区样品  $\text{La}/\text{Yb}$ - $\text{Ce}/\text{Yb}$  元素比值呈现正相关性(图 8a), 说明有同化混染作用的存在, 而  $\text{Ce}/\text{Pb}$ - $\text{Th}/\text{Zr}$ 、 $\text{Nb}/\text{Ce}$ - $\text{Nb}/\text{U}$  元素比值不具有相关性(图 8c、d), 说明总体混染强度不高。通常认为  $\text{La}/\text{Sm}$  比值指示了地壳物质的混染 (Lassiter et al., 1997) 本次 5 件样品的  $\text{La}/\text{Sm}$  比值为 1.87~2.27, 暗示陆壳物质混染的程度较低。另外, 岩石具有较高的  $\text{Mg}^\#$  值 ( $\text{Mg}^\# = 0.76 \sim 0.80$ ), 同样显示出岩浆侵位过程中陆壳物质混染十分有限。

结合地球化学特征, 说明夏日哈木 I 号和 II 号岩体来自于同一源区, 在岩石组合方面具有互补性, 岩浆演化过程中分异明显, I 号岩体主要经历了橄榄石和斜方辉石的分离结晶作用, II 号岩体主要经历了单斜辉石和斜长石的分离结晶作用。I 号岩体富集超镁铁质组分, 而 II 号岩体富集镁铁质组分, 这主要由它们各自分离结晶/堆晶矿物的差异造成的。

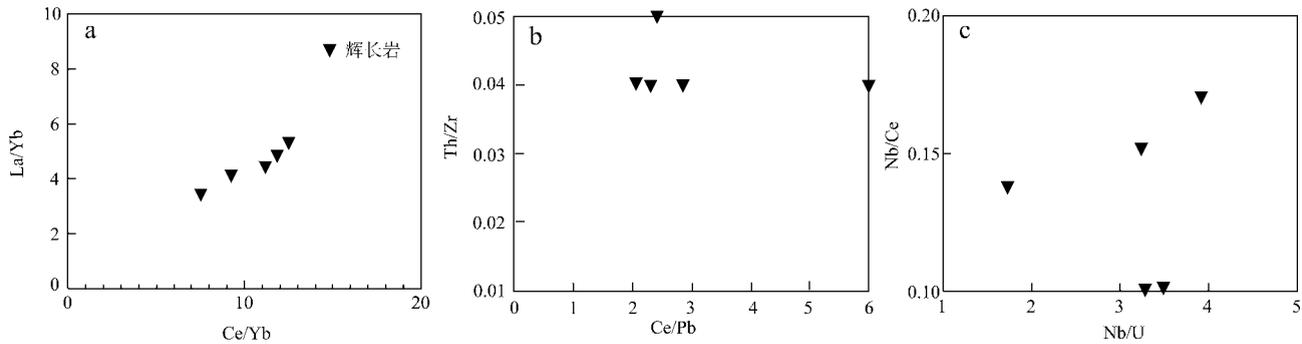


图8 夏日哈木Ⅱ号岩体同化混染作用判别图

Fig. 8 Plots of selected trace elements for checking contamination of Xiarihamu No. II intrusion

并且在形成过程中均经历了一定程度的地壳混染。

## 6.2 岩浆源区

研究表明,夏日哈木Ⅰ号岩体的 Sr-Nd 同位素显示具有 EMⅡ 富集的趋势(姜常义等,2015),而岩体的橄榄岩相和辉石岩相岩石中含有角闪石,表明岩体的形成可能与俯冲环境有关。而俯冲板片对源区的改造主要通过蚀变洋壳(镁铁质物质)或者是俯冲带沉积物的流体/熔体与地幔楔的相互作用来实现的(Tian et al., 2011; Sajona et al., 2000)。

夏日哈木Ⅱ号岩体岩石样品具有强烈的 Nb、Ta 负异常,可能有 2 种成因,一种是地壳混染,因为上地壳存在明显的 Nb、Ta 亏损;另一种是源区经历了俯冲过程中的流体交代作用(Stolz et al., 1996)。但样品高场强元素的亏损无法用地幔端元与地壳的同化混染来解释,而是代表岩浆的地幔源区特征。样品均具有相对较高的 Th/Yb 比值(1.10~1.36),在 Nb/Yb-Th/Yb 图解(图 9a)中,投点均明显偏离 MORB-OIB 演化线,暗示其源区明显受到俯冲组分的影响。微量元素比值(Ba/Th、Th/Nb、Ba/La、Th/Yb、Nb/Zr 和 Th/Zr)可以有效地识别含水流体或俯冲带沉积物,各类岩石具有相对稳定的 Th/Nb 比值,变化范围较大的 Ba/Th 比值(图 9b),在 Nb/Zr-Th/Zr 图解(图 9c)中,样品显示俯冲流体交代趋势。以上特征指示有含水流体进入地幔源区(Woodhead et al., 2001)。

如前所述,夏日哈木Ⅰ号(数据参见杜玮等,2015)和Ⅱ号岩体都属于亚碱性系列,岩石都属于镁铁-超镁铁质堆晶岩,这与岩相学观察一致,且岩性互补。Ⅱ号岩体的辉长岩样品和Ⅰ号岩体辉长岩相岩石主量元素组成相近, Mg<sup>#</sup>(Ⅰ号 Mg<sup>#</sup> 为 0.80~0.86)和 m/f(Ⅰ号 m/f 为 3.88~6.30)具有较为

一致的变化范围。二者各类岩石的稀土元素总量均较低,且具有非常一致的配分曲线,为轻稀土元素弱富集的右倾型,表现为轻、重稀土元素之间分馏作用较强,而轻、重稀土元素内部的分馏作用较弱,具富集大离子亲石元素,亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 的特征。岩相学与岩石地球化学特征表明二者具有同源性,且具备岛弧环境的地球化学特征(Grauch, 1989; Балашов et al., 1972)。结合 Th/Yb-La/Ba 之间的关系(图 9d)及Ⅰ号岩体 Sr、Nd 同位素属富集型地幔范畴(姜常义等,2015)指示了夏日哈木Ⅰ号和Ⅱ号岩体均来源于被流体交代改造的富集岩石圈地幔。

## 6.3 构造背景认识

已有的研究表明,东昆仑早古生代洋盆在早寒武世之前就已打开,蛇绿岩的形成时代为 509~522Ma(Yang et al., 1996; 陆松年,2002; 冯建赞等,2010)。此后,原特提斯洋向北俯冲,位于东昆仑中清水泉-可可沙-科科可特一线发育的岛弧型中酸性侵入岩(515~427Ma,张亚峰等,2010; 朱云海等,2002),可能就是对该时期洋壳俯冲事件的响应。东昆仑地区在晚寒武世—中志留世期间,转化为沟-弧-盆地体系,并具有多岛小洋盆的特点(姜春发等,1992; 刘增轶等,2003; 李荣社等,2008; 张雪亭等,2007; 殷鸿福等,1997),昆南带为古洋盆,昆中带主体为岛弧,昆北带具弧后盆地的性质。刘战庆等(2011)、李荣社等(2008)、陈能松等(2002)分别依据区域地质和变质作用方面的研究成果论证了巴颜喀拉地块与东昆仑造山带在晚志留世碰撞拼合,原特提斯洋盆关闭。多数学者认为牦牛山组磨拉石建造是早古生代造山作用结束的标志(Pan et al., 1996; 许志琴等,2007; 李荣社等,2007; 张雪亭等,2007)。近年来,陆露等(2010)和张耀玲等(2010)在东昆仑牦牛山

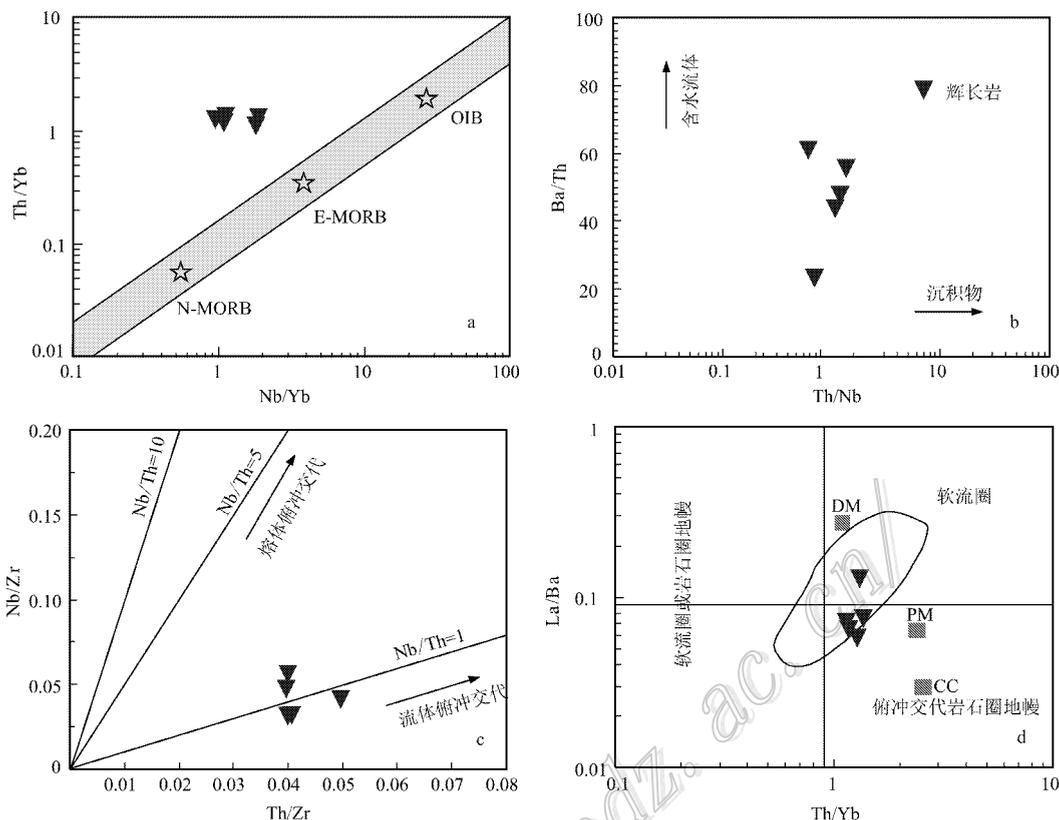


图 9 II 号岩体 Th/Nb-Ba/Th (a)、Th/Zr-Nb/Zr (b)、Nb/Yb-Th/Yb (c) 和 Th/Yb-La/Ba (d) 图解

Fig. 9 Th/Nb-Ba/Th (a), Th/Zr-Nb/Zr (b), Nb/Yb-Th/Yb (c) and Th/Yb-La/Ba (d) diagrams of Xiarihamu No. II intrusion

组下部层序中发现了多层流纹岩,获得的 4 组锆石 U-Pb 年龄为 400~423 Ma。

前已论述,夏日哈木 I、II 号岩体岩性互补,且具有显著 Nb、Ta、Ti 元素负异常的岛弧环境地球化学信息,另外,II 号岩体取得的辉长岩年龄为(424.1 ± 4.6)Ma,考虑其误差范围,并结合夏日哈木 I、II 号岩体同源性,笔者认为 II 号岩体亦形成于岛弧环境。另外,结合柴达木地块周缘发现的含镍矿岩体获取的成矿年龄(牛鼻子梁岩体(367.0 ± 2.0)Ma;尕秀雅平东岩体(423.0 ± 4.95)Ma;夏日哈木 I 号岩体(439.1 ± 3.0)Ma)都形成于志留纪—泥盆纪。因此,中古生代也就成为中国继新元古界、二叠纪之后新确定的第三个镍矿主成矿期(宋忠宝,2014)。

## 7 结 论

(1)夏日哈木 II 号岩体主要由辉长岩相岩石(暗色辉长岩、辉长岩)组成,其次含少量的辉石岩相岩石(含长单辉辉石岩)。局部可见孔雀石、镍华、褐

铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等矿化。

(2)夏日哈木 II 号岩体辉长岩的锆石 SHRIMP 锆石 U-Pb 加权平均年龄为(424.1 ± 4.6)Ma,属志留纪。柴达木地块周缘镍矿主要形成于志留纪—泥盆纪。中古生代是与新元古界、二叠纪并列的镍矿主成矿期。

(3)夏日哈木 II 号岩体各类岩石主量元素总体显示出低硅、低钛、高镁、贫碱的特征;岩石稀土、微量元素标准化配分模式具一致性,表现为轻稀土元素弱富集的右倾型,富集 LREE 和 LILE,相对亏损 HFSE(Nb、Ta、Ti)。

(4)通过对夏日哈木 I 号、II 号岩体的主要地质特征、地球化学特征的对比,认为二者同源,岩性互补。结合区域构造演化及 I 号岩体形成的构造背景研究,认为 II 号岩体形成于岛弧环境。

志 谢 诚挚感谢青海省第五地质矿产勘查院和夏日哈木项目组在野外工作期间以及北京离子探针中心任鹏给予的帮助。匿名审稿人对本文提出了

宝贵的意见。在此深表感谢！

## References

- Ao C. 2014. Study on geological characteristics and genesis of Xiarihamu Nickel deposit, Qinghai Province ( Master degree theses [ D ] ). Supervisor : Sun F Y. Changchun : Jilin University. 1-73 ( in Chinese with English abstract ).
- Baker J A. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism Sana 'a Yemen : Implications for plume-lithosphere interaction and polybaric melt hybridization [ J ]. *Journal of Petrology*, 38( 10 ): 1359-1390.
- Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1 : A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [ J ]. *Chemical Geology*, 200( 1/2 ): 155-170.
- Campbell I H and Griffiths R W. 1993. The evolution of the mantle 's chemical structure [ J ]. *Lithos*, 30( 3 ): 389-399.
- Chen N S, He L, Wang G C, Zhang K X and Sun M. 2002. The precise restriction of the Paleozoic metamorphic peak and the thrust structure deformation in the Eastern Kunlun orogenic belt [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 47( 8 ): 628-631 ( in Chinese ).
- Claesson V S, Vetrin T and Bayanova H D. 2000. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonate dyke, Kola peninsula, Russia : A record of geological evolution from the Archean to the Paleozoic [ J ]. *Lithos*, 51( 1 ): 95-108.
- Compston W, Williams I S and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 89( B ): 525-534.
- DePaolo D J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractional crystallization [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 53( 2 ): 189-202.
- Du W, Ling J L, Zhou W, Wang Z X, Xia Z D, Xia M Z, Fan Y Z and Jiang C Y. 2014. Geological characteristics and genesis of Xiarihamu nickel deposit in East Kunlun [ J ]. *Mineral Deposits*, 33( 4 ): 713-726 ( in Chinese with English abstract ).
- Du W. 2015. Study on the mafic-ultramafic rocks of Xiarihamu Nickel Mining area in East Kunlun ( master degree theses ) [ D ]. Supervisor : Jiang C Y. Xi 'an : Chang 'an University. 1-105 ( in Chinese with English abstract ).
- Fan L K, Cai Y P, Liang H C and Li H L. 2009. Characteristics and evolution of the geodynamics in the eastern Kunlun [ J ]. *Geological Survey and Research*, 33( 3 ): 181-186 ( in Chinese with English abstract ).
- Feng J Y, Pei X Z, Yu S L, Ding S P, Li R B, Sun Y, Zhang Y F, Li Z C, Chen Y X, Zhang X F and Chen G C. 2010. The discovery of the mafic-ultramafic mélange in Kekesha area of Dulan County, East Kunlun region, and its LA ICP-MS zircon U-Pb age [ J ]. *Geology in China*, 37( 1 ): 28-38 ( in Chinese with English abstract ).
- Grauch R I. 1989. Rare earth elements in metamorphic rocks : Geology and mineralogy of the rare earth elements [ J ]. *Reviews in Mineralogy*, 21( 8 ): 147-168.
- Halama R, Marks M, Brüggmann G, Siebel W, Wenzel T and Markl G. 2004. Crustal contamination of mafic magmas : Evidence from a petrological, geochemical and Sr-Nd-Os-O isotopic study of the Proterozoic Isortoq dike swarm, South Greenland [ J ]. *Lithos*, 74( 3 ): 199-232.
- Ireland T R and Gibson C M. 1998. SHRIMP monazite and zircon geochronology of high-grade metamorphism in New Zealand [ J ]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16 : 149-167.
- Jiang C F, Yang J S and Feng B G. 1992. Opening-closing structure of the Kunlun Mountains [ M ]. Beijing : Geological Publishing House. 154-168 ( in Chinese ).
- Jiang C Y, Ling J L, Zhou W, Du W, Wang Z X, Fan Y Z, Song Y F and Song Z B. 2015. Petrogenesis of the Xiarihamu Ni-bearing layered mafic-ultramafic intrusion, East Kunlun : Implication for its extensional island arc environment [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 31( 4 ): 1117-1136 ( in Chinese with English abstract ).
- Lassiter J C and Depaolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts : Chemical and isotopic constraints [ M ]. Washington : American Geophysical Union. 335-355.
- Li R S, Ji W H and Yang Y C. 2008. Kunlun Mountains and its adjacent area geology [ M ]. Beijing : Geological Publishing House. 15-309 ( in Chinese ).
- Li R S, Ji W H, Zhao Z M, Chen S J, Meng Y, Yu P S and Pan X P. 2007. Progress in the study of the early Paleozoic Kunlun orogenic belt [ J ]. *Geological Bulletin of China*, 26( 4 ): 373-382 ( in Chinese with English abstract ).
- Li S J, Sun F Y, Gao Y W, Zhao J W, Li L S and Yang Q A. 2012. The theoretical guidance and the practice of small intrusions forming large deposits—The enlightenment and significance for searching breakthrough of Cu-Ni sulfide deposit in Xiarihamu, East Kunlun, Qinghai [ J ]. *Northwestern Geology*, 45( 4 ): 185-191 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu D Y, Jian P, Zhang Q, Zhang F Q, Shi Y R, Shi G H, Zhang L Q and Tao H. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia : Evidence for the early Paleozoic subduc-

- tion[ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 77( 3 ): 317-327( in Chinese with English abstract ).
- Liu Z Q , Pei X Z , Li R B , Li Z C , Chen G C , Chen Y X , Gao J M , Liu C J , Wei F H , Wang X L and Zhang G . 2011 . Early Paleozoic intermediate-acid magmatic activity in Bairiqiete area along the Buqingshan tectonic melange belt on the southern margin of East Kunlun : Constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry[ J ]. *Geology in China* , 38( 5 ): 1150-1167 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Z Y , Ren J Q and Yang Y Z . 2003 . Gold deposit in Qinghai[ M ]. Beijing : Geological Publishing House . 1-27( in Chinese ).
- Lu L , Wu Z H , Hu D G , Barosh P J , Hao S and Zhou C J . 2010 . Zircon U-Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains[ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 26( 4 ): 1150-1158 ( in Chinese with English abstract ).
- Lu S N . 2002 . Precambrian geology of the northern Qinghai-Tibet plateau [ M ]. Beijing : Geological Publishing House . 1-125 ( in Chinese ).
- Ludwig K R . 1999 . Using isoplot/EX , version 2 , a geochronological toolkit for Microsoft Excel[ M ]. Berkeley : Berkeley Geochronological Center Special Publication . 1-47 .
- Ludwig K R . 2001 . Squid 1.02 : A user manual[ M ]. Berkeley : Berkeley Geochronological Center Special Publication . 1-219 .
- Madonald R , Rogers N W and Fitton J G . 2001 . Plume-lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift , East Africa[ J ]. *Journal of Petrology* , 42( 5 ): 877-900 .
- Pan Y S , Zhang Y Q , Chen T E , Zhou W M , Xu R H , Wang D A , Xie Y W and Luo H . 1996 . Feature and evolution of the early Paleozoic geology in Kunlun MTs[ J ]. *Science in China ( Series D )* , 26( 4 ): 302-307 .
- Sajona F G , Maury R C , Pubellier M , Leterrier J and Bellon H . 2000 . Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting , Central Mindanao , Philippines[ J ]. *Lithos* , 54 : 173-206 .
- Song Z B . 2014 . The establishment of the third major nickel metallogenic stages in China[ J ]. *Mineral Deposits* , 33( 4 ): 885-886( in Chinese ).
- Späth A , Le Roex A P and Opiyo-Akech N . 2001 . Plume-lithosphere interaction and the origin of continental rift-related alkaline volcanism : The Chyulu Hills Volcanic Province , southern Kenya[ J ]. *Journal of Petrology* , 42( 4 ): 765-787 .
- Stanley C R and Russell J K . 1989 . Petrologic hypothesis testing with pearce element ratio diagrams : Derivation of diagram axes[ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 103( 1 ): 78-89 .
- Stolz A J , Jochum K P , Spettel B and Hofmann A W . 1996 . Fluid-and melt-related enrichment in the subarc mantle : Evidenced from Nb/Ta variations in island-arc basalts[ J ]. *Geology* , 24( 7 ): 587-590 .
- Tian L , Castillo P R , Hilton D R , Hawkins J W and Hanan B B . 2011 . Major and trace element and Sr-Nd isotope signatures of the north Lau lavas : Implications for the composition and dynamics of the back-arc mantle[ J ]. *Journal of Geophysical Research* , 116 .
- Wang G , Sun F Y , Li B L , Li S J , Zhao J W , Ao Z and Yang Q A . 2014 . Petrography , zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the mafic-ultramafic intrusion in Xiarihamu Cu-Ni deposit from East Kunlun , with implications for geodynamic setting[ J ]. *Earth Science Frontiers* , 21( 6 ): 381-401( in Chinese with English abstract ).
- Wang G . 2014 . Metallogenesis of nickel deposits in eastern Kunlun orogenic belt , Qinghai Province ( Doctor degree theses ) [ D ]. Supervisor : Sun F Y . Changchun : Jilin University . 1-200( in Chinese with English abstract ).
- Williams I S and Claesson S . 1987 . Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes , Scandinavian Caledonides , II . Ion microprobe zircon U- Pb[ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 97 : 205-217 .
- Williams I S . 1998 . U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[ A ]. Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes[ C ]. Canada : University of Alberta . 7 : 1-35 .
- Woodhead J D , Hergt J M , Davidson J P and Eggins S M . 2001 . Hafnium isotope evidence for conservative element mobility during subduction zone processes[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters* , 192( 3 ): 331-346 .
- Wu L R . 1963 . Metallogenic specialization of basic-ultrabasic rocks , China[ J ]. *Geoscience* , 4( 1 ) : 29-41( in Chinese with English abstract ).
- Xu Z Q , Qi X X , Yang J S , Ji S C , Li H B and Chen F Y . 2007 . Senses and timings of two kinds of shear in the Kangxiwar strike-slip shear zone , West Kunlun , and their tectonic significance[ J ]. *Geological Bulletin of China* , 26( 10 ): 1252-1261( in Chinese with English abstract ).
- Yang J S , Robinson P T and Jiang C F . 1996 . Ophiolites of the Kunlun Mountains , China and their tectonic implications[ J ]. *Tectonophysics* , 258( 1 ): 215-231 .
- Yin H F and Zhan K X . 1997 . Characteristics of the eastern Kunlun orogenic belt[ J ]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* , 22( 4 ) 339-342( in Chinese with English abstract ).
- Yuan W M , Mo X X , Yu X H and Luo Z H . 2000 . The Record of indosinian tectonic setting from the granotoid of eastern Kunlun Mountain[ J ]. *Geological Review* , 46( 2 ) 203-211( in Chinese ).

- Zhang X T and Yang S D. 2007. The plate tectonic research- the specification of 1:1 million tectonic map in Qinghai Province [ M ]. Beijing: Geological Publishing House. 1-178 ( in Chinese ).
- Zhang Y F, Pei X Z, Ding S P, Li R B, Feng J B, Sun Y, Li Z C and Chen Y X. 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of quartz diorite at the Kekesha area of Dulan County, eastern section of the East Kunlun orogenic belt, China and its significance [ J ]. Geological Bulletin of China, 29( 1 ): 79-85 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Y L, Hu D G, Shi Y R and Lu L. 2010. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic significance of Maoniushan Formation volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, China [ J ]. Geological Bulletin of China, 29( 11 ): 1614-1618 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhu Y H, Zhang K X and Wang G C. 2002. Ophiolite magmatic rocks and tectonic magmatic evolution in the Eastern Kunlun compound orogenic belt [ M ]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 104-105 ( in Chinese ).
- Балашов Ю А, Кременецкий А А and Швец БМ. 1972. Геохимически критерии ридольдокембрийских амфиболитов [ J ]. Геохимия, 11: 1358-1371 ( in Russian ).
- ### 附中文参考文献
- 奥琮. 2014. 青海东昆仑夏日哈木镍矿矿床地质特征及成因研究 [ D ]. 导师: 孙丰月. 长春: 吉林大学. 1-73.
- 陈能松, 何蕾, 王国灿, 张克信, 孙敏. 2002. 东昆仑造山带早古生代变质峰期和逆冲构造变形年代的精确限定 [ J ]. 科学通报, 47( 8 ): 628-631.
- 杜玮, 凌锦兰, 周伟, 王子玺, 夏昭德, 夏明哲, 范亚洲, 姜常义. 2014. 东昆仑夏日哈木镍矿床地质特征与成因 [ J ]. 矿床地质, 33( 4 ): 713-726.
- 杜玮. 2015. 东昆仑夏日哈木镍矿区镁铁-超镁铁质岩石研究 [ 硕士学位论文 ] [ D ]. 导师: 姜常义. 西安: 长安大学. 1-105.
- 范丽琨, 蔡岩萍, 梁海川, 李宏录. 2009. 东昆仑地质构造及地球动力学演化特征 [ J ]. 地质调查与研究, 33( 3 ): 181-186.
- 冯建, 裴先治, 于书伦, 丁仁平, 李瑞保, 孙雨, 张亚峰, 李佐臣, 陈有, 张晓飞, 陈国超. 2010. 东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 [ J ]. 中国地质, 37( 1 ): 28-38.
- 姜常义, 凌锦兰, 周伟, 杜玮, 王子玺, 范亚洲, 宋艳芳, 宋忠宝. 2015. 东昆仑夏日哈木镁铁质-超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景 [ J ]. 岩石学报, 31( 4 ): 1117-1136.
- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵. 1992. 昆仑开合构造 [ M ]. 北京: 地质出版社. 154-168.
- 李荣社, 计文化, 赵振明, 陈守建, 孟勇, 于浦生, 潘小平. 2007. 昆仑早古生代造山带研究进展 [ J ]. 地质通报, 26( 4 ): 373-382.
- 李荣社, 计文化, 杨永成. 2008. 昆仑山及邻区地质 [ M ]. 北京: 地质出版社. 15-309.
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 赵俊伟, 李连松, 杨启安. 2012. 小岩体成大矿理论指导与实践——青海东昆仑夏日哈木铜镍矿找矿突破的启示及意义 [ J ]. 西北地质, 45( 4 ): 185-191.
- 刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克浅色岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据 [ J ]. 地质学报, 77( 3 ): 317-327.
- 刘增轶, 任家琪, 杨永征. 2003. 青海金矿 [ M ]. 北京: 地质出版社. 1-27.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 陈国超, 陈有, 高景民, 刘成军, 魏方辉, 王学良, 张刚. 2011. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石 U-Pb 测年及岩石地球化学证据 [ J ]. 中国地质, 38( 5 ): 1150-1167.
- 陆露, 吴珍汉, 胡道功, Barosh P J, 郝爽, 周春景. 2010. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义 [ J ]. 岩石学报, 26( 4 ): 1150-1158.
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探 [ M ]. 北京: 地质出版社. 1-125.
- 宋忠宝. 2014. 中国第三个镍主要成矿期的确立 [ J ]. 矿床地质, 33( 4 ): 885-886.
- 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 李世金, 赵俊伟, 奥琮, 杨启安. 2014. 东昆仑夏日哈木铜镍矿镁铁质-超镁铁质岩体岩相学、锆石年代学、地球化学及构造意义 [ J ]. 地学前缘, 21( 6 ): 381-401.
- 王冠. 2014. 东昆仑造山带镍矿成矿作用研究 [ D ]. 长春: 吉林大学.
- 吴利仁. 1963. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性 [ J ]. 地质科学, 4( 1 ): 29-41.
- 许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 嵇少丞, 李海兵, 陈方远. 2007. 西昆仑康西瓦韧性走滑剪切带的两类剪切指向、形成时限及其构造意义 [ J ]. 地质通报, 26( 10 ): 1252-1261.
- 殷鸿福, 张克信. 1997. 东昆仑造山带的一些特点 [ J ]. 地球科学-中国地质大学学报, 22( 4 ): 339-342.
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 罗照华. 2000. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录 [ J ]. 地质论评, 46( 2 ): 203-211.
- 张雪亭, 杨生德. 2007. 青海省板块构造研究 1:100 万青海省大地构造图说明书 [ M ]. 北京: 地质出版社. 1-178.
- 张亚峰, 裴先治, 丁仁平, 李瑞保, 冯建, 孙雨, 李佐臣, 陈有. 2010. 东昆仑都兰县可可沙地区加里东期石英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义 [ J ]. 地质通报, 29( 1 ): 79-85.
- 张耀玲, 胡道功, 石玉若, 陆露. 2010. 东昆仑造山带牦牛山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [ J ]. 地质通报, 29( 11 ): 1614-1618.
- 朱云海, 张克信, 王国灿. 2002. 东昆仑复合造山带蛇绿岩、岩浆岩及构造岩浆演化 [ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社. 104-105.