哈拉达拉辉长岩以及其中磁铁矿-辉石脉的岩石学和地球化学研究*

黄秋岳 朱永峰**

Huang QiuYue and ZHU YongFeng**

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

Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, *China*

2011-10-11 收稿, 2012-03-13 改回.

Huang QY and Zhu YF. 2012. Petrology and geochemistry of gabbro and magnetite-pyroxene vein in the Haladala mafic complex, southwestern Tianshan Mts., Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7):2199 – 2208

Abstract The Haladala mafic pluton in the southwestern Tianshan Mountains mainly consists of troctolite, olivine gabbro and gabbro. After the fractional crystallization of olivine and plagioclase, the residual magma intruded and formed gabbro. The clinopyxene (Cpx-I) in gabbro has lower concentrations of rare earth elements (REE $< 51 \times 10^{-6}$) with insignificant Eu negative anomalies. The concentrations of other trace elements (Sc, Cr etc.) in Cpx-I vary largely with a wide range of $Mg^{\#}$ (80 ~ 95, diopside-augite). The magnetite-pyroxene vein intruded into gabbro. The composition of clinopyxene (Cpx-II) in the vein is homogeneous (diopside). Compared to Cpx-I, Cpx-II has higher concentrations of REE ($> 100 \times 10^{-6}$) with obvious Eu negative anomalies. Distinct from the rapid intrusion of the later-stage Fe-rich mafic magma which formed the magnetite-pyroxene vein, the early-stage magma went through a complex evolution before its intrusion (gabbro). Besides, exsolution texture found in both Cpx-I and Cpx-II implies that the Haladala pluton underwent rapid uplift (or fast cooling) after magnetite-pyroxene vein. Gold-bearing calcite-magnetite vein, representing an episode of epithermal activity after magma process, cuts through both gabbro and magnetite-clinopyroxene vein. Further study focusing on the gold-bearing calcite-magnetite vein is of great significance to gold exploration in this region.

Key words Gabbro; Clinopyroxene; Exsolution texture; Haladala; Tianshan Mountains; Xinjiang

摘 要 西南天山哈拉达拉杂岩体主要由橄长岩、橄榄辉长岩和辉长岩组成,岩浆通过早期橄榄石和斜长石结晶分离后,残余岩浆侵位形成了辉长岩。辉长岩中单斜辉石(Cpx-I)的稀土元素含量低(REE $< 51 \times 10^{-6}$),Eu 负异常不明显,其他微量元素(如 Sc、Cr)的含量和 $Mg^{\#}$ 值(80 ~ 95)变化大(透辉石-普通辉石)。磁铁矿-辉石脉穿切辉长岩,其中单斜辉石(Cpx-II)的成分比较均一(透辉石)。与 Cpx-I 相比,Cpx-II 的稀土元素含量明显高(REE $> 100 \times 10^{-6}$),且 Eu 负异常非常显著。与晚期富 Fe 基性岩浆的快速侵位不同,辉长岩的形成经历了复杂的演化过程。Cpx-I 和 Cpx-II 均发育出溶结构,表明晚期富 Fe 基性岩浆快速侵位形成磁铁矿-辉石脉之后,哈拉达拉岩体或者经历了快速抬升(或者快速降温)的过程。岩浆过程结束后,低温热液活动形成了含金方解石-磁铁矿脉。研究这种热液脉,对本地区开展金矿找矿勘探有重要意义。

关键词 辉长岩; 单斜辉石; 出溶结构; 哈拉达拉; 天山; 新疆

中图法分类号 P588.124; P575.1

哈拉达拉岩体是新疆西南天山地区规模较大的基性杂岩体,其中辉长岩的锆石 SHRIMP 年龄为 308.3 ± 1.8Ma(薛云兴和朱永峰,2009)。我们在研究哈拉达拉基性杂岩体的辉长岩以及其中磁铁矿-辉石脉的岩石学和地球化学基础上,在不同的单斜辉石中发现了出溶结构,并在晚期热液脉中发现了自然金。本文简要报到这些新的现象,并提出今后的工作方向。

1 地质概况

西南天山地区出露不同时代的辉长岩(朱永峰等,2006;薛云兴和朱永峰,2009;郭璇和朱永峰,2011;Yang and Zhou,

* 本文受国家自然科学基金项目(41072041、41121062)和国际科技合作项目(2010DFB23390)联合资助.

第一作者简介:黄秋岳,男,1990 年生,地球化学专业

** **通讯作者**:朱永峰,男,1965 年生,教授,博士生导师,岩石学和地球化学专业,E-mail: yfzhu@pku.edu.cn

2009;Zhang *et al.*,2010)。碰撞后辉长岩体侵入到晚泥盆-石炭系火山-沉积地层中(岛弧火山岩,其中锆石 SHRIMP 年龄为 >361 ~313Ma,Zhu *et al.*,2005,2009)。哈拉达拉基性-超基性侵入体是该地区规模较大的岩体,出露于特克斯县城东北方向约 11km 处的伊什基里克山(出露面积约 20km^2),岩体呈东西向延伸(图 1a)。岩体的围岩包括下石炭统阿克沙克组和上石炭统的伊什基里克组的玄武岩、安山岩和凝灰岩夹砂岩。岩体在平面上具有岩相分带,内部为橄长岩-橄榄辉长岩,外部为辉长岩(张云孝等,2000)。NW 向断裂穿切哈拉达拉杂岩体(图 1b)。我们沿该断裂实测了地质剖面

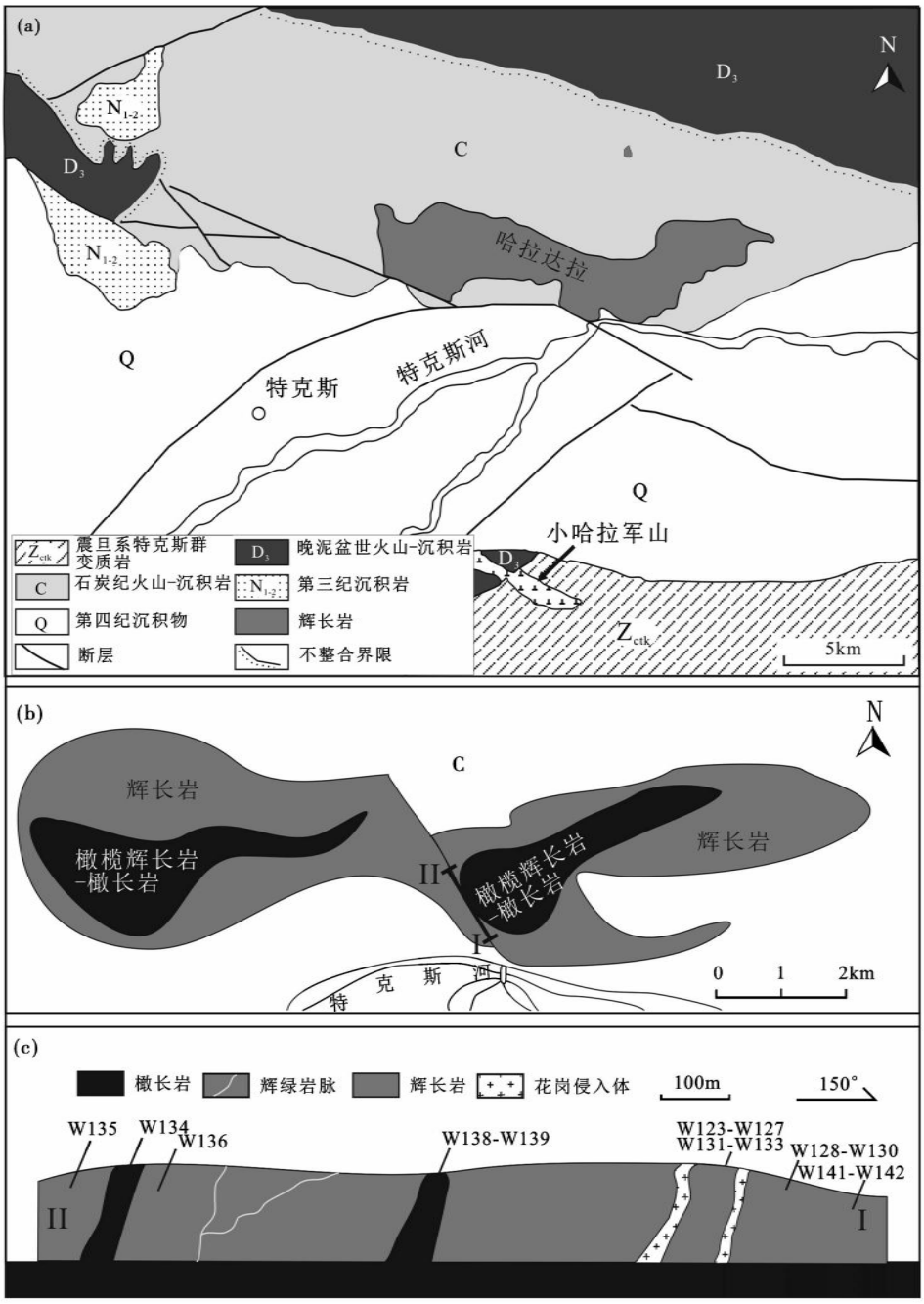


图 1 哈拉达拉岩体及邻区地质简图(a,据新疆地质矿产局,1985①)、哈拉达拉岩体岩相分带图(b,据张云孝等,2000)和显示采样位置的实测地质剖面图(c)

Fig. 1 Simplified geologic map of Haladala intrusion and its adjacent region(a), the sketch geological map showing the occurrence of the Haladala basic intrusion(b, after Zhang *et al.*, 2000) and the geological section along fault from I to II showing sample locations(c)

① 新疆地质矿产局. 1985. 1 : 20 万昭苏幅和莫合尔幅地质图

(图 1b 中 I-II 所示的位置)。所测剖面以辉长岩为主,辉石橄长岩-橄长岩在局部出现(图 1c)。在剖面北段见到辉绿岩脉穿切辉长岩的现象,岩脉宽 10cm ~ 1m,呈网脉状分布。剖面南段见到花岗质岩脉侵入。前期的研究表明,哈拉达拉岩体稀土元素配分模式与 E-MORB 相似,具有高 Rb、Cs、Ba 及 Sr 的特点,岩浆源区具有富集地幔的地球化学特征(薛云兴和朱永峰,2009)。

2 岩石学

哈拉达拉岩体主要由橄长岩、橄榄辉长岩和辉长岩组成,本文主要研究其中的辉长岩。辉长岩主要由单斜辉石(Cpx-I,25% ~45%)和斜长石(55% ~65%)组成,其中含少量黑云母、角闪石、钛铁矿和磁铁矿(图 1a)。辉长岩普遍发育辉长结构和辉长-辉绿结构。堆晶作用明显时,辉石和斜长石显著分离,在辉长岩中形成暗色部分(辉石堆晶)和浅色部分(斜长石堆晶)。单斜辉石(Cpx-I)呈半自形(0.2 ~ 1.5mm),裂理发育,局部发生绿帘石化和碳酸盐化。长柱状斜长石(0.5 ~ 1.5mm)普遍发生粘土矿物蚀变。单斜辉石与斜长石相互包裹。斜长石与单斜辉石往往搭成格架,其中充填着钛铁矿、磁铁矿、黑云母 ± 角闪石。局部磁铁矿和钛铁矿的含量高达 5%。钛铁矿(0.5mm 左右)呈半自形或他形,一般与黑云母 ± 角闪石共生(图 2c)。

辉长岩中常见磁铁矿-辉石脉(图 2a),其中的单斜辉石用 Cpx-II 表示,以区别于辉长岩中单斜辉石 Cpx-I。辉长岩还被方解石-磁铁矿细脉穿切(图 2b,d),其中一些方解石细

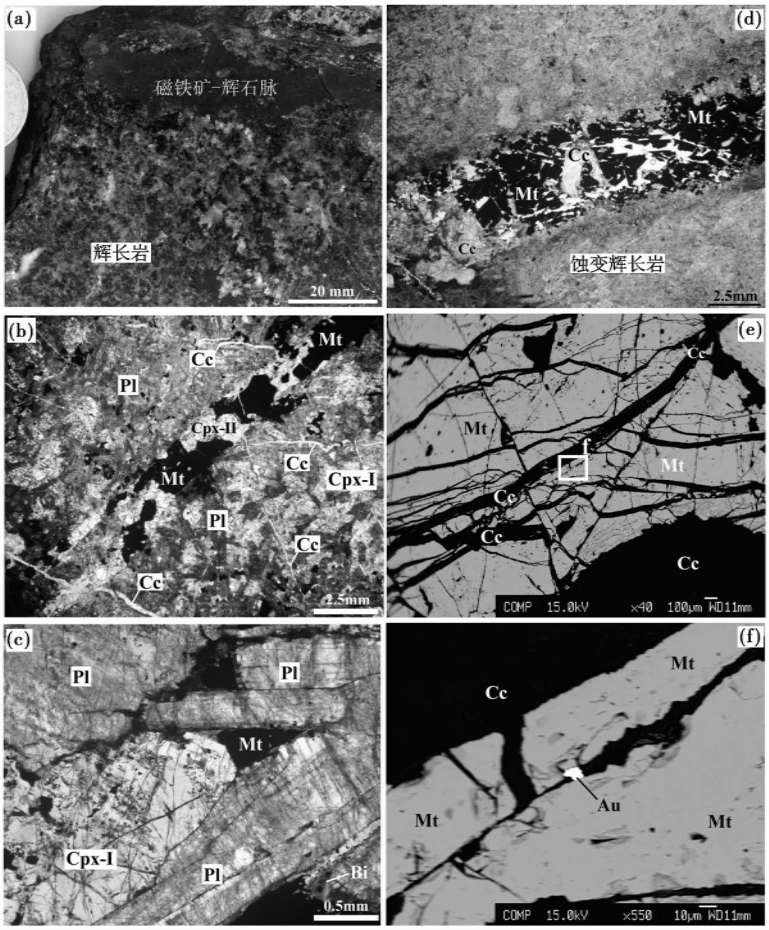


图 2 哈拉达拉辉长岩以及其中脉岩和热液脉的显微照片

(a)-辉长岩被磁铁矿-辉石脉穿插,标本照片;(b)-辉长岩中发育磁铁矿-辉石脉和细小方解石-磁铁矿脉,单偏光;(c)-斜长石和单斜辉石塔成的格架中充填着磁铁矿和黑云母,单偏光;(d-f)-穿切辉长岩的方解石-磁铁矿脉,其中含自然金:(d)为单偏光,(e,f)为背散射电子照片(BSE). Bi-黑云母;Cc-方解石;Cpx-I-辉长岩中的单斜辉石;Cpx-II-磁铁矿-辉石脉中的单斜辉石;Pl-斜长石;Mt-磁铁矿

Fig. 2 Photographs of gabbro and dykes and hydrothermal veins in Haladala

(a)-magnetite-clinopyroxene vein in gabbro, hand specimen; (b)-magnetite-clinopyroxene vein and tiny calcite-magnetite vein in gabbro, plane polarized light; (c)-gabbro texture by plagioclase and clinopyroxene with magnetite and biotite in their framework, plane polarized light; (d-f)-an auriferous calcite-magnetite vein in gabbro, (d) under plane polarized light, (e,f) are BSE. Bi-biotite; Cc-calcite; Cpx-I – clinopyroxene in gabbro; Cpx-II-clinopyroxene in magnetite-clinopyroxene vein; Pl-plagioclase; Mt-magnetite

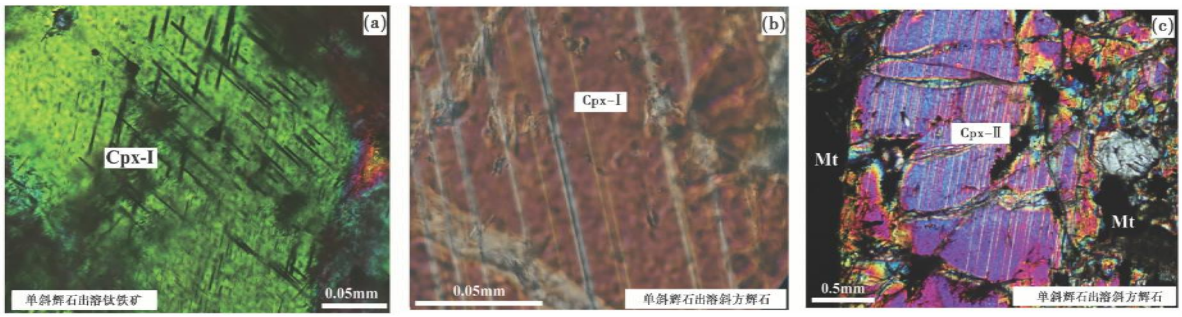


图 3 辉石出溶结构的显微照片

(a,b)-辉长岩中单斜辉石出溶两组钛铁矿(a)和一组斜方辉石片晶(b);(c)-磁铁矿-辉石脉中的单斜辉石出溶结构,出溶片晶为斜方辉石. 正交偏光

Fig. 3 Microphotos of exsolution texture in clinopyroxene

(a,b)-exsolution texture of two groups of ilmenite(a) and a group of orthopyroxene lamellae(b) in clinopyroxene in gabbro; (c)-orthopyroxene lamellae in clinopyroxene from magnetite-clinopyroxene vein. All under cross polarized light

表 1 辉长岩和磁铁矿-辉石脉中单斜辉石的代表性成分(wt%)

Table 1 Representative compositions of clinopyroxenes in gabbro and magnetite-pyroxene vein(wt%)

矿物	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-II	Cpx-II	Cpx-II	Cpx-II	Cpx-II	Cpx-II
SiO_2	54.22	52.84	50.78	52.30	52.26	49.47	54.65	52.84	54.55	53.91	53.99	53.92
TiO_2	0.32	0.43	1.29	0.90	0.69	1.56	0.19	0.64	0.21	0.34	0.23	0.21
Al_2O_3	1.31	1.79	3.26	2.19	2.88	4.25	0.72	2.27	0.65	0.68	0.70	0.70
Cr_2O_3	0.00	0.00	0.14	0.12	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03
MgO	16.00	15.34	14.09	15.33	14.72	13.48	16.10	14.96	16.26	16.30	16.08	16.23
MnO	0.09	0.18	0.18	0.21	0.16	0.20	0.18	0.19	0.22	0.21	0.23	0.15
FeO	3.72	5.25	8.21	8.05	5.63	9.57	4.12	5.17	4.73	5.02	4.85	3.97
NiO	0.02	0.01	0.00	0.05	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02
CaO	23.93	23.26	21.13	20.33	23.18	20.34	23.79	23.20	23.15	23.16	23.25	23.78
Na_2O	0.36	0.67	0.56	0.39	0.57	0.62	0.30	0.49	0.26	0.36	0.43	0.20
K_2O	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.02	0.01
Total	99.97	99.80	99.63	99.85	100.09	99.58	100.05	99.82	100.03	100.02	99.82	99.22
O=6												
Si	1.982	1.940	1.890	1.938	1.920	1.849	1.999	1.945	1.999	1.975	1.981	1.989
Ti	0.009	0.012	0.036	0.025	0.019	0.044	0.005	0.018	0.006	0.009	0.006	0.006
Al^{VI}	0.048	0.029	0.070	0.058	0.063	0.080	0.036	0.061	0.033	0.014	0.018	0.025
Al^{IV}	0.009	0.048	0.074	0.037	0.061	0.107	0.000	0.037	0.000	0.016	0.013	0.006
Cr	0.000	0.000	0.004	0.004	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
Mg	0.872	0.840	0.782	0.847	0.806	0.751	0.878	0.821	0.888	0.890	0.880	0.892
Mn	0.003	0.006	0.006	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006	0.007	0.006	0.007	0.005
Fe	0.117	0.167	0.261	0.256	0.178	0.306	0.131	0.165	0.152	0.160	0.156	0.127
Ni	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001
Ca	0.937	0.915	0.843	0.807	0.912	0.815	0.932	0.915	0.909	0.909	0.914	0.940
Na	0.025	0.048	0.040	0.028	0.040	0.045	0.022	0.035	0.018	0.025	0.030	0.014
K	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000
$Mg^{\#}$	87	90	78	78	86	77	86	85	84	88	88	87

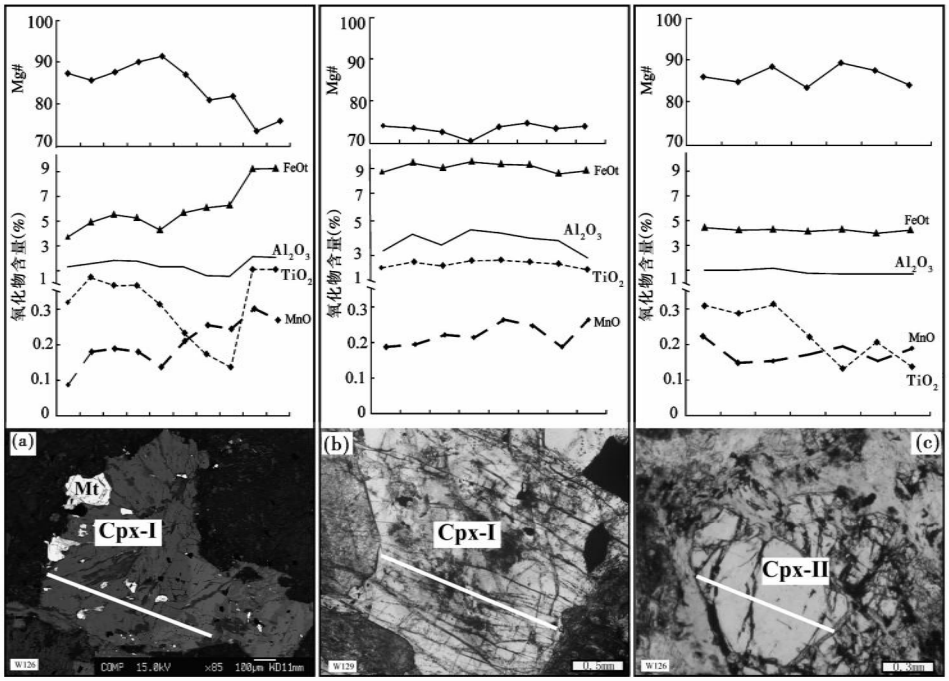


图 4　两种单斜辉石的成分变化特征

(a)-辉长岩中单斜辉石(Cpx-I)及其成分变化,BSE;(b)-辉长岩中单斜辉石(Cpx-I)及其成分变化,此单斜辉石出溶钛铁矿,单偏光;(c)-磁铁矿-辉石脉中的单斜辉石(Cpx-II)及其成分变化,单偏光

Fig. 4　The compositional variation within clinopyroxene crystals

(a)-compositional variation of clinopyroxene(Cpx-I) in gabbro, BSE image; (b)-clinopyroxene(Cpx-I) with exsolution of ilmenite in gabbro, plane polarized light; (c)-clinopyroxene(Cpx-II) in magnetite-clinopyroxene vein, plane polarized light

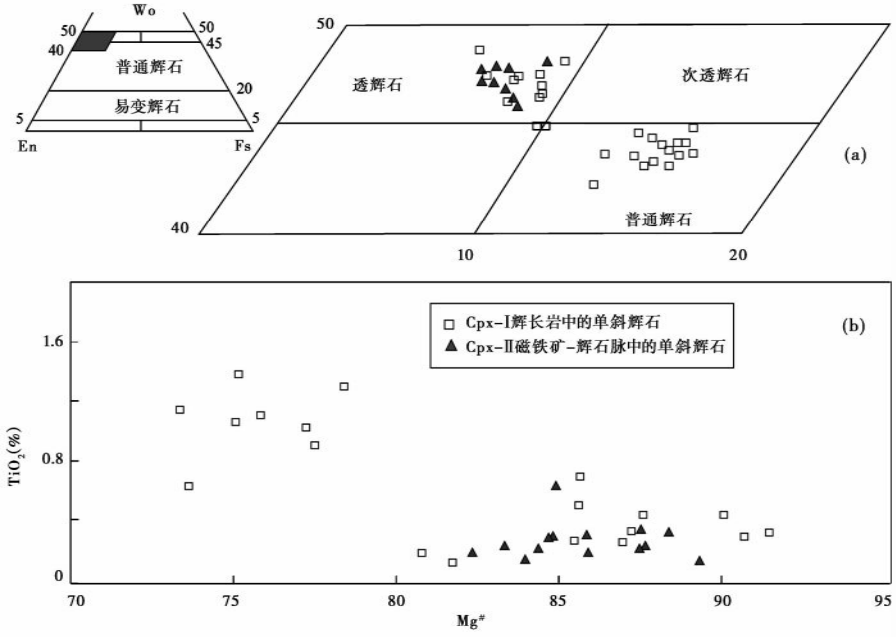


图 5　单斜辉石的成分变化特征

(a)-En-Wo-Fs 三角分类图;(b)-$Mg^{\#}$-TiO_2 图解

Fig. 5　The composition variation of the two kinds of clinopyroxene

(a)-En-Wo-Fs classification diagram; (b)-$Mg^{\#}$-TiO_2 diagram

表2 辉长岩中黑云母的电子探针分析结果(wt%)

Table 2 Representative compositions of biotite in gabbro(wt%)

矿物	Biotite										
SiO_2	35.87	35.89	35.70	35.76	35.72	36.30	34.94	35.67	35.73	35.96	37.04
TiO_2	3.91	4.04	4.18	4.56	4.17	4.70	4.34	4.35	4.72	4.71	5.56
Al_2O_3	13.84	13.56	14.04	13.68	13.97	13.90	14.16	13.28	13.31	13.43	12.75
MgO	10.87	10.86	11.06	11.12	11.27	11.35	12.17	9.77	9.59	9.29	12.32
MnO	0.10	0.11	0.10	0.13	0.09	0.09	0.11	0.10	0.07	0.11	0.02
FeO	21.06	21.47	21.75	21.03	20.47	19.71	20.21	22.53	22.24	22.43	18.15
Cr_2O_3	0.08	0.17	0.17	0.07	0.13	0.17	0.19	0.21	0.24	0.17	0.08
CaO	0.00	0.01	0.03	0.34	0.03	0.02	0.03	0.02	0.06	0.06	0.00
Na_2O	0.36	0.45	0.24	0.39	0.41	0.37	0.43	0.24	0.32	0.37	0.49
K_2O	8.55	8.58	8.01	8.36	8.40	8.95	7.56	8.62	8.80	8.91	8.64
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00
BaO	0.23	0.25	0.06	0.16	0.21	0.19	0.18	0.23	0.19	0.11	0.25
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	1.53	1.58	1.47	1.46	1.13	1.11	0.95	1.53	1.39	1.37	1.00
Total	96.41	96.95	96.80	97.05	96.01	96.85	95.30	96.57	96.66	96.93	96.30
0=22											
Si	5.70	5.70	5.67	5.68	5.67	5.76	5.55	5.66	5.67	5.71	5.88
Ti	0.47	0.48	0.50	0.54	0.50	0.56	0.52	0.52	0.56	0.56	0.66
Al^{VI}	0.29	0.23	0.29	0.24	0.29	0.36	0.19	0.15	0.16	0.22	0.27
Al^{IV}	2.30	2.30	2.33	2.32	2.33	2.24	2.45	2.34	2.33	2.29	2.12
Mg	2.57	2.57	2.62	2.63	2.67	2.69	2.88	2.31	2.27	2.20	2.92
Mn	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Fe^{2+}	2.80	2.85	2.89	2.79	2.72	2.62	2.68	2.99	2.95	2.98	2.41
Cr	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01
Ca	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
Na	0.11	0.14	0.07	0.12	0.12	0.11	0.13	0.07	0.10	0.12	0.15
K	1.73	1.74	1.62	1.69	1.70	1.81	1.53	1.75	1.78	1.80	1.75
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Total	16.00	16.06	16.04	16.11	16.04	16.20	16.00	15.85	15.89	15.93	16.18

脉不含磁铁矿。这种方解石-磁铁矿脉也穿切磁铁矿-辉石脉,方解石-磁铁矿脉代表晚期热液活动事件。这种热液脉对其周围的辉长岩产生了强烈蚀变,形成了细小的绿泥石-绿帘石-绢云母-磁铁矿集合体(图2d)。我们在晚期方解石-磁铁矿脉中发现了自然金(图2e,f)。自然金颗粒大小1~10μm,主要赋存在方解石以及方解石和磁铁矿边界。这表明,岩浆侵位之后的低温热液活动,产生了金矿成矿作用。尽管该地区还没有发现金矿,但本观察为在该地区开展金矿找矿勘探提供了有意义的线索。

上述岩石中的两种单斜辉石均发育出溶结构。Cpx-I中出溶两组钛铁矿针状晶体(图3a)和一组斜方辉石片晶(图3b),Cpx-II中出溶斜方辉石片晶(图3c)。出溶的斜方辉石片晶仅有一组,相互平行分布的斜方辉石片晶与单斜辉石的c轴方向一致,而出溶的钛铁矿针状晶体一般沿两个方向分布,其夹角受切片的方向和位置控制,每组钛铁矿晶体之间严格平行。

3 矿物化学

对辉长岩中的单斜辉石(Cpx-I)和磁铁矿-辉石脉中的单斜辉石(Cpx-II)进行电子探针分析,其成分列在表1。图4比较这两类单斜辉石的成分变化特征。辉长岩中单斜辉石的成分变化较大。例如,一个无出溶结构的单斜辉石颗粒的

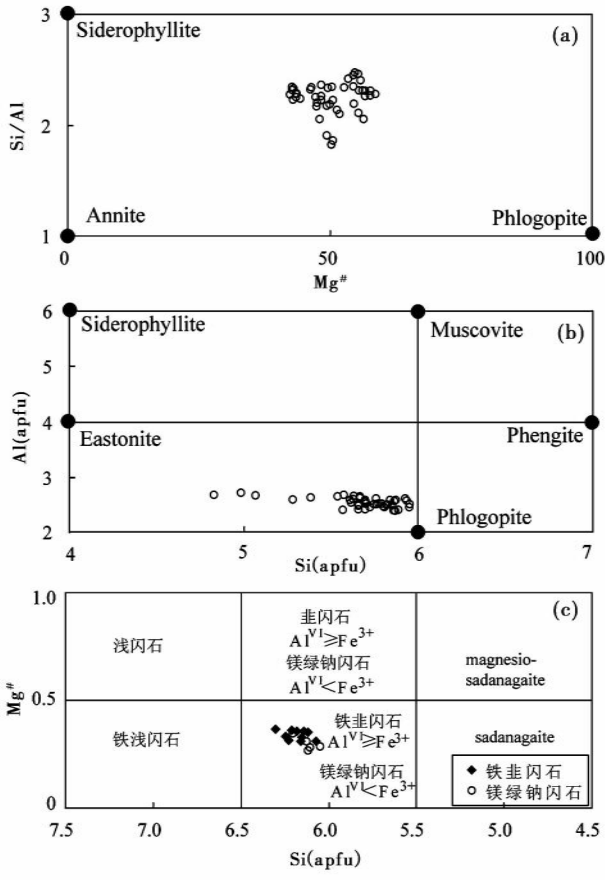


图 6 黑云母(a,b)和角闪石(c)的成分分类图

Fig. 6 Classification diagram for biotite(a,b) and amphibole(c)

$Mg^{\#}$值变化显示环带特征,从内核到边部,$Mg^{\#}$逐渐降低(图 4a),另一个出溶钛铁矿的单斜辉石颗粒的环带特征不明显,且 $Mg^{\#}$较低(<75,图 4b)。Cpx-II 的环带特征不明显,Al_2O_3 和 FeO^T 含量比较稳定(图 4c)。就成分端元而言,Cpx-I 为透辉石-普通辉石(成分变化较大),Cpx-II 为透辉石,成分比较均一(图 5a)。在 $Mg^{\#}$-TiO_2 图中(图 5b),辉长岩 Cpx-I 的 $Mg^{\#}$变化范围较大(72 ~ 93),TiO_2 含量变化范围大(0.2% ~ 1.5%)。Cpx-II 的 $Mg^{\#}$相对较高且变化范围小,TiO_2 含量低且变化范围小(除一个测点之外,均低于 0.40%)。

辉长岩中黑云母与磁铁矿共生,其成分变化范围如图 6a,b 所示。黑云母普遍含 Cl(0.95% ~ 1.6%),而不含 F(表 2)。辉长岩中的角闪石与磁铁矿和黑云母共生,其成分变化不大(图 6c),依据 Al^{VI} 与 Fe^{3+} 含量的相对关系,识别出铁韭闪石和镁绿钠闪石端元。角闪石不含 F,但其中 Cl 含量较高(3.1% ~ 4.2%,表 3)。

4 地球化学

对两种辉石进行了激光微区微量元素分析,结果列在表 4。如稀土元素配分模式所示,辉长岩 Cpx-I 与磁铁矿-辉石脉的 Cpx-II 区别明显(图 7)。相对 Cpx-I,Cpx-II 富集几乎所有稀土元素(稀土元素总量 $>100\times10^{-6}$)并显示出强烈的负 Eu 异常,而 Cpx-I 的 Eu 负异常很微弱且稀土元素总量较低($<51\times10^{-6}$)。具有如此巨大成分差异的两种单斜辉石,不可能是同一岩浆演化的产物。磁铁矿-辉石脉所代表的岩浆应该不同于辉长岩的岩浆。

5 讨论与结论

辉长岩是基性岩浆通过橄榄石和斜长石结晶分离作用(堆晶形成橄长岩和橄榄辉长岩)后,残余岩浆侵位的产物(薛云兴和朱永峰,2009)。哈拉达拉岩体中的橄长岩(主要位于岩体的中心部位)结晶早于辉长岩(主要位于岩体边部,见图 1)。辉长岩 Cpx-I 的稀土元素较低,且 Eu 负异常不明显(图 7)。与辉长岩相比,磁铁矿-辉石脉中的 Cpx-II 具有较高的稀土元素含量,且其 Eu 异常显著。这些差异表明,晚期形成岩脉的岩浆与辉长岩岩浆完全不同。这意味着,高度分异的辉长岩浆侵位后,本地区发生了另外一次基性岩浆侵入事件。晚期基性岩浆明显富 Fe,形成了大量磁铁矿和相对富 Mg、贫 Ti 的单斜辉石(辉石成分见图 5)。两种岩浆的差异也通过单斜辉石的 LA-ICPMS 分析(表 4)显示出来。辉长岩中 Cpx-I 的一些微量元素(如 Sc、Cr)变化巨大。对于单斜辉石而言,Sc 和 Cr 属于相容元素(分配系数分别为 1.7 ~ 3.2 和 34,Rollison,1993)。早结晶的单斜辉石具有相对高的 Cr 和 Sc 含量。Cpx-I 具有较大的 $Mg^{\#}$值变化范围,其 Cr、Sc 等相容元素含量的较大变化,说明辉长岩经历了复杂的岩浆演化过程,这与斜长石的结晶分离过程吻合。相反,Cpx-II 具有比较均一的化学成分。因此,哈拉达拉岩体至少是两期不同性质岩浆侵位的结果,与晚期富 Fe 基性岩浆的快速侵位不同,辉长岩的形成经历了长期的演化过程。

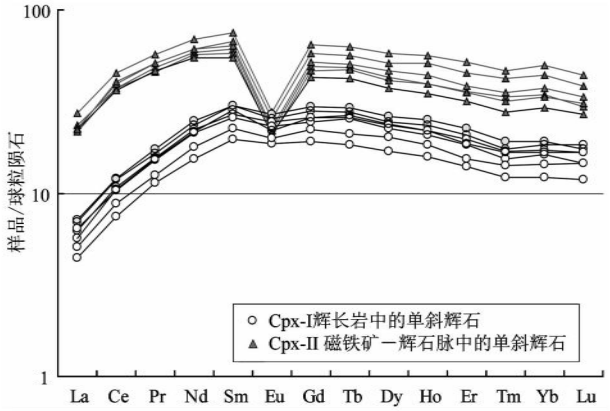


图 7 辉长岩和磁铁矿-辉石脉中两种单斜辉石的稀土元素配分图(标准化值据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized rare earth element distribution patterns for two different clinopyroxene in the Haladala pluton (normalization values after Sun and McDonough,1989)

表3 辉长岩中角闪石电子探针分析结果(wt%)

Table 3 Representative compositions of amphibole in gabbro(wt%)

矿物	amphibole									
SiO_2	38.81	38.90	38.31	38.58	38.10	38.57	38.85	39.08	39.21	37.87
TiO_2	1.48	1.80	1.50	1.17	1.50	0.94	0.87	1.09	1.48	1.57
Al_2O_3	11.34	11.03	11.31	11.86	12.15	11.58	11.15	10.82	10.58	10.27
MgO	5.97	6.18	6.00	5.25	5.15	5.54	5.31	5.71	6.29	6.09
MnO	0.20	0.17	0.24	0.14	0.20	0.13	0.18	0.13	0.15	0.18
FeO	23.00	22.50	23.22	23.95	24.08	24.05	24.35	23.95	22.00	22.54
Cr_2O_3	0.07	0.12	0.09	0.03	0.00	0.08	0.04	0.04	0.17	0.00
CaO	11.05	11.14	11.03	10.96	10.86	11.03	10.93	10.99	10.90	10.86
Na_2O	1.66	2.12	2.03	1.50	1.75	1.86	1.70	1.97	1.81	1.83
K_2O	1.86	1.84	1.90	2.54	2.33	2.05	2.12	1.72	1.63	1.70
NiO	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	3.10	3.11	3.20	3.40	3.20	3.87	4.15	4.08	3.17	3.43
Total	98.54	98.91	98.84	99.38	99.34	99.68	99.67	99.59	97.40	96.35
O=23										
Si(T)	6.18	6.20	6.12	6.16	6.07	6.16	6.23	6.25	6.31	6.21
Al^{IV}(T)	1.82	1.80	1.88	1.84	1.93	1.84	1.77	1.75	1.69	1.79
Sum(T)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al^{VI}(C)	0.31	0.28	0.24	0.39	0.36	0.33	0.33	0.28	0.31	0.20
Ti(c)	0.18	0.22	0.18	0.14	0.18	0.11	0.11	0.13	0.18	0.19
Cr(C)	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00
Fe^{3+}(C)	0.48	0.24	0.48	0.44	0.48	0.51	0.51	0.48	0.35	0.45
Mg(C)	1.42	1.47	1.43	1.25	1.22	1.32	1.27	1.36	1.51	1.49
Fe^{2+}(C)	2.58	2.77	2.62	2.76	2.73	2.70	2.76	2.73	2.61	2.64
Mn(C)	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
Sum(C)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ca(B)	1.89	1.90	1.88	1.87	1.85	1.89	1.88	1.88	1.88	1.91
Na(B)	0.11	0.10	0.12	0.13	0.15	0.11	0.12	0.12	0.12	0.09
sum(B)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na(A)	0.40	0.56	0.51	0.34	0.39	0.46	0.41	0.49	0.44	0.49
K(A)	0.38	0.38	0.39	0.52	0.47	0.42	0.43	0.35	0.34	0.35
sum(A)	0.78	0.94	0.90	0.86	0.87	0.88	0.84	0.84	0.78	0.84
Total	15.78	15.94	15.90	15.86	15.87	15.88	15.84	15.84	15.78	15.84

值得重视的是,辉长岩 Cpx-I 和磁铁矿-辉石脉中 Cpx-II 都发育出溶结构。这表明,晚期富 Fe 基性岩浆快速侵位形成磁铁矿-辉石脉之后,哈拉达拉岩体或者经历了快速抬升(压力快速下降)、或者经历了快速降温的地质过程(Zhu and Ogasawara,2002)。对出溶结构可能的地质意义还有待进一步研究。西南天山地区在碰撞后普遍经历了大规模抬升,通过剪切带将深部物质(包括榴辉岩、蓝片岩等)抬升到地壳浅部或者目前的位置(针对不同地质体,抬升速率差异大,Zhang *et al.*,2007;Zhu,2011)。

岩浆过程以及可能的抬升(和/或降温)过程之后,哈拉达拉岩体局部被低温热液活动改造,形成了方解石-磁铁矿脉。热液成因的方解石-磁铁矿脉穿切辉长岩体以及磁铁矿-辉石脉。在方解石-磁铁矿脉中发现了自然金(图2e,f)。这种含金方解石-磁铁矿脉充填在哈拉达拉岩体的脆性裂隙中。事实上,西天山地区的金矿多发育在各种热液脉中(例如布隆金矿、天格尔金矿、阿希金矿、京希-伊尔曼德金矿等,如:Rui *et al.*,2002;Yang *et al.*,2006;Zhu *et al.*,2007;陈毓川等,2008;安芳和朱永峰,2009,2010)。仔细研究这种热液脉的特征及

表 4 单斜辉石的激光微量元素分析($\times 10^{-6}$)

Table 4 Representative composition of clinopyroxene by La-ICPMS($\times 10^{-6}$)

矿物	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-I	Cpx-II	Cpx-II	Cpx-II	Cpx-II	Cpx-II	Cpx-II
Sc	173	213	204	192	178	166	169	29.5	22.5	42.5	18.3	33.8	32.7
V	437	516	474	446	414	462	456	58.5	87.0	62.9	87.6	66.9	65.8
Cr	46.1	381	174	80.9	25.8	22.7	23.5	0.94	1.29	2.77	1.78	1.42	0.94
Mn	1584	1718	1662	1670	1661	1668	1649	1185	1253	1218	1385	1200	1235
Co	44.5	45.9	46.0	44.4	44.4	42.0	40.6	14.0	14.1	14.5	14.4	13.7	13.9
Ni	45.0	48.4	46.3	42.9	40.1	45.8	44.3	34.7	28.6	37.6	19.1	33.7	33.3
Cu	0.25	0	0.23	0.22	0	0	0	0	0	0.23	0.23	0.16	0.25
Zn	44.8	46.8	43.6	42.8	43.7	49.7	47.3	20.2	22.7	22.2	22.8	18.9	18.5
Rb	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.03	0.06	0.35	0.4	0.26
Sr	30.6	32.9	33.9	33.5	33.0	31.4	31.0	49.4	51.8	66.3	52.9	49.4	48.2
Y	21.4	32.6	30.8	29.4	28.0	29.0	24.2	57.6	56.3	49.9	83.2	61.0	71.8
Zr	31.0	58.5	52.1	45.5	39.9	40.3	33.0	34.6	47.0	38.6	62.3	40.7	37.3
Nb	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01
Mo	0	0	0	0.06	0.07	0	0	0	0	0.04	0.05	0.04	0
Cs	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.05	0.01
Ba	0	0.07	0	0	0	0	0	0.05	0.06	0.31	0.52	0.65	0.53
La	1.05	1.70	1.66	1.48	1.52	1.34	1.21	5.15	5.54	5.30	6.44	5.32	5.26
Ce	4.58	7.38	7.24	6.59	6.38	6.47	5.42	23.00	22.80	22.40	27.90	24.20	24.80
Pr	1.05	1.62	1.53	1.45	1.41	1.43	1.17	4.50	4.26	4.29	5.29	4.72	4.72
Nd	7.00	11.40	10.70	10.10	9.81	9.92	8.17	26.90	26.00	25.10	31.50	27.90	27.90
Sm	2.91	4.45	4.45	3.97	3.81	4.22	3.36	9.02	8.54	8.11	11.10	9.48	9.91
Eu	1.05	1.51	1.43	1.38	1.30	1.24	1.13	1.24	1.17	1.19	1.55	1.29	1.44
Gd	3.82	5.87	5.59	5.13	4.88	5.12	4.41	9.76	9.28	8.57	12.80	10.30	11.50
Tb	0.66	1.06	1.00	0.93	0.92	0.96	0.76	1.76	1.71	1.53	2.26	1.82	2.02
Dy	4.14	6.49	6.06	5.76	5.58	5.89	4.99	10.60	10.10	9.24	14.30	11.40	12.60
Ho	0.86	1.38	1.29	1.20	1.13	1.20	1.00	2.16	2.17	1.91	3.09	2.39	2.80
Er	2.24	3.62	3.31	3.14	2.93	2.96	2.45	5.73	5.63	5.07	8.30	6.15	7.25
Tm	0.30	0.47	0.43	0.42	0.38	0.41	0.35	0.83	0.78	0.68	1.15	0.87	1.05
Yb	1.95	3.09	2.94	2.78	2.62	2.70	2.30	5.54	5.41	4.72	8.04	5.98	7.07
Lu	0.29	0.43	0.45	0.41	0.36	0.41	0.36	0.73	0.76	0.66	1.08	0.83	0.95
Hf	1.40	2.50	2.43	2.23	2.04	1.83	1.61	1.23	2.03	1.41	2.35	1.54	1.26
Ta	0.01	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0.10	0.04	0.04	0.05	0.04	0.07	0.06	0.04	0.05	0.05	0.12	0.18	0.08
Th	0	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0	0.23	0.23	0.23	0.33	0.32	0.28
U	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02
REE	31.90	50.47	48.08	44.74	43.03	44.27	37.08	106.9	104.2	98.77	134.8	112.7	119.3

其成因,对在本地区开展金矿找矿勘探有重要意义。

致谢 薛云兴和郭璇参加了早期的野外工作；电子探针分析得到中科院地质与地球物理研究所毛骞老师的协助；La-ICPMS 测试得到北京大学马芳老师的协助；在此一并表示感谢。

References

An F and Zhu YF. 2009. Geology and geochemistry of Axi gold deposit, Xinjiang. Mineral Deposits, 28(2): 143 – 156(in Chinese with English abstract)

An F and Zhu YF. 2010. Geology and geochemistry of Jingxi-Yelmand

gold deposit in Tulasu basin, North Tianshan, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2275 – 2286(in Chinese with English abstract)

Chen YC, Liu DQ, Tang YL *et al*. 2008. Mineral Resources and Mineralization System in Tianshan, China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 580(in Chinese)

Guo X and Zhu YF. 2011. Petrologic and geochemical research of Xiaohalajunshan gabbro in Southwest Tianshan Mts., Xinjiang. Earth Science Frontiers, 18(2): 180 – 190(in Chinese with English abstract)

Rui ZY, Goldfarb RJ, Qiu Y, Zhou T, Chen R, Pirajno F and Yun G. 2002. Paleozoic-Early Mesozoic gold deposits of the Xinjiang Autonomous Region, northwestern China. Mineralium Deposita, 37: 393 – 418

Rollison HR. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. New York: Longman Scientific and Technical, 1 – 352

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ(eds.). Magmatism in Oceanic Basins. Geological Society of London, Special Publication, 42: 313 – 345

Xue YX and Zhu YF. 2009. Zircon SHRIMP chronology and geochemistry of the Haladala gabbro in south-western Tianshan Mountains. Acta Petrologica Sinica, 25(6): 1353 – 1363(in Chinese with English abstract)

Yang FQ, Mao JW, Wang YT and Bierlein FP. 2006. Geology and geochemistry of the Bulong quartz-barite vein-type gold deposit in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. Ore Geology Reviews, 29: 52 – 76

Yang SH and Zhou MF. 2009. Geochemistry of the ~430Ma Jingbulake mafic-ultramafic intrusion in western Xinjiang, NW China: Implications for subduction related magmatism in the South Tianshan orogenic belt. Lithos, 113: 259 – 273

Zhang LF, Ai YL, Li XP, Rubatto D and Song B. 2007. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks. Lithos, 96: 266 – 280

Zhang YX, Li XD and Zhang J. 2000. Basic pluton and its tectonic setting in Kaladala of west Tisanshan Mountains, China. Xinjiang Geology, 18: 258 – 263(in Chinese with English abstract)

Zhang ZH, Mao JW, Wang ZL, Pirajno F and Wang YB. 2010. Geochemical and SHRIMP U-Pb age constraints on the origin of the Qingbulake mafic-ultramafic complex in the West Tianshan Mountains, Xinjiang, northwest China. Australian Journal of Earth Sciences, 57: 819 – 837

Zhu YF and Ogasawara Y. 2002. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene. International Geology Review, 44: 831 – 836

Zhu YF, Zhang LF, Gu LB, Guo X and Zhou J. 2005. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. Chinese Science Bulletin, 50: 2201 – 2212

Zhu YF, and Guo X and Zhou J. 2006. Petrology and geochemistry of a $+\varepsilon_{Nd}$ gabbro body in Baluntai region, central Tianshan Mountains, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 22: 1178 – 1192(in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Zhou J and Zeng YS. 2007. The Tianger(Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, West Tianshan, NW China: Petrographic and geochemical characteristics. Ore Geology Reviews, 32: 337 – 365

Zhu YF, Xuan G, Song B, Zhang LF and Gu LB. 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. Journal of the Geological Society, London, 166: 1085 – 1099

Zhu YF. 2011. Zircon U-Pb and muscovite $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the gold-bearing Tianger mylonitized granite, granite, Xinjiang, Northwest China: Implications for radiometric dating of mylonitized magmatic rocks. Ore Geology Reviews, 40: 108 – 121

附中文参考文献

安芳,朱永峰. 2009. 新疆阿希金矿矿床地质和地球化学研究. 矿床地质,28(2): 143 – 156

安芳,朱永峰. 2010. 新疆吐拉苏盆地京西-伊尔曼德金矿地质和地球化学特征研究. 岩石学报,26(8): 2275 – 2286

陈毓川,刘德全,唐延龄等. 2008. 中国天山矿产及成矿体系(上册). 北京:地质出版社,1 – 580

郭璇,朱永峰. 2011. 新疆西南天山小哈拉军山辉长岩体岩石学及地球化学研究. 地学前缘,18(2): 180 – 190

薛云兴,朱永峰. 2009. 西南天山哈拉达拉岩体的锆石 SHRIMP 年代学及地球化学研究. 岩石学报,25(6): 1353 – 1363

张云孝,李向东,张冀. 2000. 西天山喀拉达拉基性岩体及其构造背景. 新疆地质,18: 258 – 263

朱永峰,郭璇,周晶. 2006. 新疆中天山巴仑台地区晚石炭世 $+\varepsilon_{Nd}$ 辉长岩体的岩石学和同位素地球化学研究. 岩石学报,22: 1178 – 1192