

文章编号: 0258-7106(2009)05-0673-14

新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程*

贾志永¹, 张铭杰^{1**}, 汤中立¹, 李文渊², 任立业¹, 胡沛青¹

(1 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要 喀拉通克铜镍硫化物矿床3个主要含矿镁铁质岩体的主量元素、微量元素和铂族元素组成分析及母岩浆组成估算结果表明:3个岩体中不同类型岩石的主要氧化物含量的变化具玄武质岩浆结晶分异的特征,在MgO含量为10%~15%区间,SiO₂含量迅速增高,微量元素和稀土元素原始地幔标准化配分模式相似,具Nb和Ta亏损,K、Sr富集的特征。与1号和2号岩体相比,3号岩体中大离子亲石元素及轻稀土元素相对富集,(La/Yb)_N介于6.8~9.2之间,δEu显示轻微负异常,在460 m深度表现出Cu-Ni等成矿元素与SiO₂含量同时剧变的特征,铂族元素配分模式与2号岩体相似。上述结果显示,3个岩体可能是同源岩浆不同期次的产物,原始岩浆为高镁玄武岩浆。成矿岩浆演化过程中经历的岩浆分离结晶作用和富硅地壳组分混染可能是成矿岩浆硫饱和及硫化物熔离的主要诱因。

关键词 地球化学;成矿作用;岩浆作用;镁铁质岩体;铜镍硫化物矿床;喀拉通克;新疆

中图分类号:P618.41;P618.63

文献标志码:A

Petrogenesis of Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang

JIA ZhiYong¹, ZHANG MingJie¹, TANG ZhongLi¹, LI WenYuan², REN LiYe¹ and HU PeiQing¹

(1 Key Lab of Western China's Environmental Systems (MOE), Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2 Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract

Three main ore-bearing mafic intrusions in the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit of Xinjiang were investigated for major element, trace element and platinum group element (PGE) compositions. MgO content of the parent magma was estimated by Fo values of the olivine and chemical compositions of the whole rock. The results show that different types of rocks in the three intrusions show a systematical variation of major oxides with decreasing MgO contents, which is characteristic of basaltic magma crystallization, whereas SiO₂ contents display rapid increase in the MgO contents range of 10%~15%. The three intrusions exhibit similar Primitive Mantle (PM)-normalized distribution patterns of trace elements and rare earth elements, and significant Nb and Ta-depletion. The No. 3 intrusion is enriched in large ion lithophile elements (LILEs) and LREEs with the (La/Yb)_N ranging from 6.8 to 9.2, relative to the No. 1 and No. 2 intrusions, and shows a slight negative anomaly of δEu. The No. 3 intrusion shows a simultaneous content variation between SiO₂ and Cu-Ni as well as some other ore-forming elements at the depth of about 460 m, and exhibits similar PM-normalized distribution patterns of PGE to the No. 2 intrusion. It is inferred that the three mafic intrusions in the Kalatongke Cu-Ni

* 本文得到国家自然科学基金(40772058, 40534020, 40873005和40772062), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-04-0980), 国家科技支撑计划(2006BAB01B08, 2006BAB01A01)的联合资助

第一作者简介 贾志永,男,1985年生,硕士研究生,矿床地球化学专业。Email: jiazhy07@lzu.cn

** 通讯作者 张铭杰, Email: mjzhang@lzu.edu.cn

收稿日期 2009-03-02; 改回日期 2009-08-19。许德焕编辑。

sulfide deposit were probably formed by different stages of intrusions derived from the same source, and that their parent magma with MgO contents of about 9.3wt% underwent crystallization differentiation, crustal contamination and addition of a Si-rich oxide component. The main factors responsible for sulfur oversaturation and sulfide segregation might have been the addition of a Si-rich oxide component and the fractional crystallization.

Key words: geolchemistry, mineralization, magmatism, mafic intrusion, Cu-Ni sulfide deposit, Kalatongke, Xinjiang

岩浆型铜镍硫化物矿床是源于地幔的大型岩浆事件的产物,成矿岩浆地幔超临界流体对巨量成矿元素的运移和聚集具有重要作用(Zhang et al., 2005, 2007; 2008; 张铭杰等, 2000; 王京彬等, 2006; 毛景文等, 2006),是赋存 Cu、Ni 及铂族元素(PGE)资源的重要矿床类型(Naldrett, 2004),是中国镍储量(86%)、铂族金属储量(95%)和铜储量(11.9%)的重要来源(汤中立等, 2006)。新疆喀拉通克是新疆最大的铜镍硫化物矿床,且具有高品位特征,对其开展深入的解剖研究,对于认识阿尔泰和东天山地区镁铁质-超镁铁质岩浆矿床的形成过程和成矿背景具有重要意义。

在喀拉通克铜镍硫化物矿区产出约 11 个镁铁质岩体,其中的 1 号、2 号和 3 号岩体赋存有铜镍硫化物矿体。前人对这 3 个岩体进行了系统研究,获得 1 号岩体苏长岩内锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄为 (287 ± 5) Ma(韩宝福等, 2004),1 号和 2 号岩体中铜镍硫化物矿石的 Re-Os 同位素等时线年龄分别为 (282.5 ± 4.8) Ma 和 (290.2 ± 6.9) Ma(张作衡等, 2005),认为该矿床含矿镁铁质岩体的原始岩浆为含水的高镁拉斑玄武岩浆(王润民等, 1991; 柴凤梅, 2006),起源于亏损的软流圈地幔,岩浆在上升过程中遭受了地壳物质的混染(李华芹等, 1998; 张招崇等, 2003; 韩宝福等, 2004; Song et al., 2009; Zhang et al., 2009)。该矿床可能形成于碰撞造山后的伸展构造环境(冉红彦等, 1994; 张招崇等, 2003; 张作衡等, 2005; Song et al., 2009),或与地幔柱作用有关(毛景文等, 2006; Zhang C L et al., 2008)。而对 3 号岩体则尚未进行过系统的研究,这在一定程度上限制了对喀拉通克岩体和矿床成因的全面认识。本文试图对 3 号岩体的 2 个钻孔的岩芯,从岩相空间变化、岩石的主量和微量及铂族元素等方面进行分析,并与 1 号和 2 号成矿岩体的地球化学资料进行对比,以探讨成矿岩浆的来源和演化以及成矿的控制因素。

1 地质背景

喀拉通克铜镍硫化物矿床位于中亚造山带阿尔泰地区准噶尔褶皱带的北缘,含矿镁铁质岩体侵位于下石炭统南明水组中上段的沉凝灰岩、含碳沉凝灰岩地层中(汤中立等, 2007)。根据岩体侵位的背斜构造,可将 11 个镁铁质岩体分为南、北 2 个岩带(图 1),南岩带长约 4 km,宽约 100~300 m,总体走向约为 310° ,1 号、2 号和 3 号岩体即位于该带内(图 1),其中,1 号岩体有小部分出露地表,而 2 号和 3 号岩体则均为隐伏岩体。岩体规模较大、基性程度高。

喀拉通克矿区的 1 号和 2 号岩体可分为辉绿辉长岩、橄榄苏长岩、苏长岩和闪长岩等 4 个岩相,诸岩相之间呈渐变过渡关系。其中,橄榄苏长岩为主要的含矿岩相。

3 号岩体的岩相分带比较明显,自上而下分为闪长岩相、辉长苏长岩相和苏长岩相(图 2),诸岩相间呈渐变过渡关系。相邻岩相之间形成过渡岩石类型,如闪长岩与辉长苏长岩间的过渡岩石类型为辉石闪长岩。闪长岩相位于岩体的中上部,主要由闪长岩、黑云闪长岩和石英闪长岩组成,常见自形-半自形粒状结构,约占整个岩体的 60%,矿化微弱,为不含矿相。辉长苏长岩相和苏长岩相位于岩体的中下部,以角闪辉长岩和角闪苏长岩为主,具辉长结构,占整个岩体的 40%左右。辉长苏长岩和苏长岩与矿化关系密切,其底部产有由浸染状贫矿石组成的似层状矿体。

这些镁铁质岩石的主要造岩矿物为橄榄石、辉石和斜长石。橄榄石是橄榄苏长岩及橄榄辉绿辉长岩的主要造岩矿物之一,呈半自形-他形粒状,粒度约为 1~3 mm,多呈反应残余包含于辉石中。斜方辉石主要分布于苏长岩、橄榄苏长岩以及辉绿辉长岩中,以古铜辉石为主,多呈半自形-自形柱粒状,粒度一般在 0.5~2 mm 之间,具包橄结构和含长结

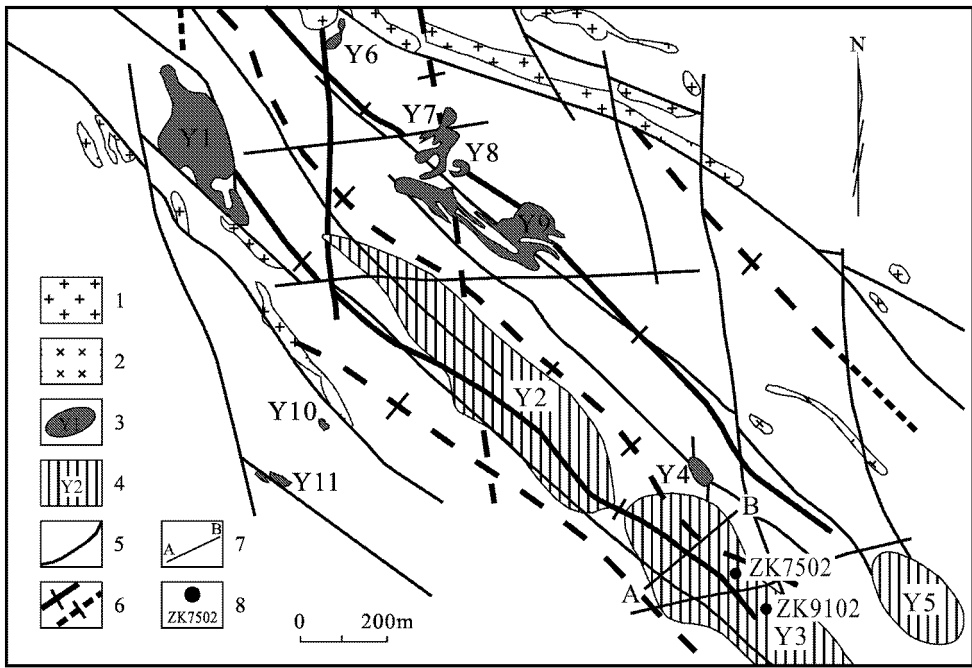


图 1 喀拉通克铜镍硫化物矿床岩体地质图(据 Yan 等, 2003 修改)

1—花岗斑岩;2—辉绿辉长岩;3—镁铁质岩体及编号;4—投影在地表的镁铁质岩体及编号;5—断裂;6—背斜和向斜;
7—图 2 的位置;8—钻孔岩芯采样位置及编号

Fig. 1 Geological sketch map of the mafic intrusions in the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit(modified from Yan et al., 2003)

1—Granitic porphyry; 2—Diabase-gabbro; 3—Mafic intrusive body and serial number; 4—Surface projection of mafic intrusive body and serial number; 5—Fault; 6—Anticline and syncline; 7—Section location of Fig. 2; 8—Location and serial number of core sampling

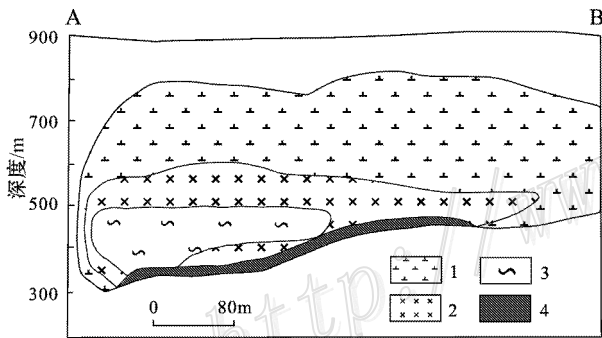


图 2 喀拉通克矿区 3 号岩体纵投影图(据王润民等, 1991)

1—黑云闪长岩;2—辉长苏长岩;3—角闪苏长岩;4—浸染状矿石
Fig. 2 Vertical projection of the No. 3 intrusion in the Kalatongke ore district(from Wang et al., 1991)
1—Biotite diorite; 2—Gabbro-norite; 3—Hornblende norite; 4—Disseminated ore

1 号岩体赋存有大型铜镍硫化物矿床, 2 号和 3 号岩体赋存有中型铜镍硫化物矿床(张招崇等, 2003; 汤中立等, 2007)。矿床具有上贫下富的特征; 主要矿石矿物为磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿、黄铁矿和磁铁矿, 以磁黄铁矿为主, 矿石类型主要为块状和浸染状, 其 Ni 和 Cu 的平均品位为 0.8% 和 1.3%, 储量分别为 0.25 Mt 和 0.42 Mt(刘德权等, 2005)。

2 样品与分析方法

研究样品主要采自 3 号岩体 2 个钻孔的岩芯, 同时, 在 1 号和 2 号岩体采集对比样品, 以开展对比研究。将样品切成光薄片进行岩石学和矿相学分析, 选择新鲜样品进行矿物成分的电子探针分析和岩石化学分析。样品在无污染条件下破碎, 用去离子水和超声波反复清洗、烘干, 再用玛瑙研钵研磨成 200 目的粉末, 搅拌均匀后分样, 进行主量元素、微量元素及铂族元素(PGE)分析。

电子探针分析在印第安纳大学采用 CAMECA-

构。单斜辉石主要分布在辉绿辉长岩中, 以普通辉石为主, 部分为透辉石, 多呈半自形-他形柱粒状, 粒度大小不等, 较小的为 0.5~1 mm, 较大的为 2~3 mm。斜长石在橄榄苏长岩中为拉长石, 在闪长岩中则为中长石。

SX50 电子探针完成,分析条件:15 kV 加速电压,25 nA 束流,20 s 计数时间(分析单矿物主量元素);分析微量元素 Cr、Ti、Ni 则用 100 nA 束流和 50 s 计数时间,其检测极限约为 1×10^{-4} 。

主量元素分析在中国科学院贵阳地球化学研究所采用 AXIOS-PW4400 型 X 射线荧光光谱仪完成,用 LiB_4O_7 做熔剂熔片,样品浓度范围 (1×10^{-6})~100% 相对误差 0.05%。S 含量在兰州大学分析测试中心采用 VarioEL2-CHNS 型元素分析仪测定,经 1 800 °C 高温燃烧后进入 850 °C 的金属铜进行还原,最后测定 S,全程用 He 做载气,标样黄酸 ($\text{C}_6\text{H}_7\text{NO}_3\text{S}$) 的 S 为 18.5%。

微量元素分析在长安大学采用 Thermo-X7 型 ICP-MS 完成。样品经高纯硝酸和氢氟酸酸化后用 ICP-MS 测定。

PGE 的分析在国家地质实验测试中心采用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 完成。将待测样品与碳酸钠、硼酸钠、硼砂、玻璃粉、硫磺、面粉混合后倒入坩埚中,加入适量的钨稀释剂,在 1 150 °C 高温炉内熔融,将熔体倒入铁模中,冷却后取出钨扣,用 HCl 溶解钨扣,滤出不溶物,在封闭溶样器中用王水溶解滤渣,最后在 ICP-MS 上测定 Pt、Pd、Rh、Ir、Ru 和 Os,全流程空白值 Os、Ir、Ru 和 Pd 为 0.3×10^{-6} ,Pt 和 Rh 为 0.06×10^{-6} 。

3 结果

3.1 主量元素

喀拉通克铜镍硫化物矿床含矿镁铁质岩体不同类型岩石的全岩主量元素分析结果列于表 1,橄榄石的电子探针分析结果列于表 2。对全岩主要氧化物进行了 LOI 和硫化物校正,计算为 100% 氧化物组成,硫化物校正根据 Li 等(2001)、Barnes 等(2005)及 Tao 等(2008)的计算方法来完成。

该矿床的岩石化学数据经过校正为 100% 氧化物组成,具有如下特征。3 号岩体的 SiO_2 含量(54.54%~62.93%)高于 1 号和 2 号基性岩体($\text{SiO}_2=43.53\% \sim 51.08\%$),为中基性岩体; MgO 和 Al_2O_3 含量(分别为 2.84%~16.12%和 9.48%~18.43%)则低于 1 号和 2 号岩体($\text{MgO}=6.57\% \sim 20.46\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=10.52\% \sim 18.82\%$),且变化较大。这 3 个岩体的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 和 TiO_2 含量分别为 2.31%~6.47%和 0.54%~1.33%; $\text{Mg}^\#$ 介于 0.38~0.73 之间,平均为 0.58。在 MgO 与主要氧化物及成矿元素含量相关图(图 3)中,随着 MgO 含量的减少, SiO_2 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 、 Al_2O_3 和 CaO 等的含量呈系统增加趋势,但在 MgO 含量为 10%~15% 区间内, SiO_2 含量的变化较大,具有迅速增高的趋势

表 1 喀拉通克铜镍硫化物矿床镁铁质岩体主要氧化物分析结果

Table 1 Compositions of major elements from mafic intrusions in the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit

编号	岩石	$w(B)\%$											深度/m	
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI		合计
KT1-5	Nrt	45.41	1.03	15.09	14.07	0.14	10.10	6.65	2.51	1.25	0.43	2.21	96.69	650
KT1-13	Nrt	49.12	1.27	18.09	9.26	0.13	6.32	7.34	3.70	1.49	0.36	2.13	97.08	710
KT1-14	Nrt	48.45	1.18	17.78	9.08	0.13	7.07	6.88	3.31	1.81	0.50	2.59	96.18	710
KT2-3	Nrt	36.60	0.99	9.38	18.47	0.14	13.14	4.46	1.29	1.16	0.29	15.09	100.99	510
KT2-6	Nrt	42.87	0.78	14.68	18.23	0.16	7.84	6.41	2.70	1.22	0.29	3.32	95.18	510
KT2-7	Nrt	42.53	1.11	11.25	16.66	0.16	14.41	5.16	1.44	0.96	0.35	4.95	94.02	510
KT2-8	Nrt	40.25	0.82	9.21	19.21	0.16	17.91	4.37	1.29	0.74	0.27	5.12	94.22	510
KT3-1	Drt	55.38	1.22	16.89	8.46	0.13	2.74	5.54	3.74	2.50	0.59	1.75	97.18	224.3
KT3-3	Drt	53.95	1.07	16.51	9.57	0.12	2.94	6.60	3.61	1.82	0.71	1.65	96.90	278
KT3-6	Drt	53.07	0.76	17.75	8.96	0.14	4.25	6.96	3.42	1.70	0.23	1.78	97.22	356
KT3-10	Drt	53.83	0.51	8.86	10.83	0.19	15.06	3.72	1.66	1.63	0.22	2.75	96.50	462
KT3-14	Nrt	51.51	0.54	10.07	16.10	0.16	10.04	3.30	2.17	1.90	0.24	3.44	96.05	515
KT3-33	Drt	54.63	0.59	12.22	8.52	0.16	9.71	6.90	2.44	1.74	0.22	3.04	97.13	393.2
KT3-35	Drt	54.75	0.61	10.90	9.40	0.16	11.43	3.99	2.38	2.03	0.28	2.69	95.93	443
KT3-38	Drt	53.87	0.70	12.01	11.73	0.16	8.75	3.94	2.45	2.17	0.36	3.33	96.15	460

注:KT1、KT2 和 KT3 分别表示 1 号、2 号和 3 号岩体;Nrt—苏长岩;Drt—闪长岩。

表 2 喀拉通克铜镍硫化物矿床含矿镁铁质岩体内橄榄石的电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of olivine from mafic intrusions in the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit

编号	$\Sigma(B) \%$							$\alpha(\text{Fo}) \%$	$\text{Ni}/10^{-6}$
	SiO_2	MgO	FeO	MnO	CaO	NiO	合计		
KT1-10	38.6	35.74	24.28	0.67	0.23	0.2	99.73	72.09	1541
KT1-10	38.6	35.89	24.43	0.73	0.11	0.2	99.95	71.88	1548
KT1-10	38.74	36.12	23.82	0.69	0.2	0.2	99.78	72.64	1572
KT1-10	38.56	35.94	23.93	0.81	0.22	0.2	99.66	72.37	1564
KT1-10	38.53	35.93	24.16	0.77	0.21	0.19	99.79	72.18	1493
KT1-10	38.81	36.16	24.06	0.67	0.14	0.21	100.05	72.4	1627
KT1-10	38.72	35.75	23.88	0.76	0.18	0.17	99.46	72.29	1328
KT1-9	38.62	37.25	23.4	0.39	0.15	0.18	99.99	73.77	1376
KT1-9	38.58	37.29	23.31	0.38	0.17	0.17	99.9	73.9	1352
KT1-9	38.78	37.56	23.1	0.45	0.09	0.19	100.18	74.07	1501
KT1-9	38.52	35.25	25.42	0.45	0.1	0.18	99.91	70.93	1423
KT1-9	38.31	35.89	24.55	0.39	0.06	0.19	99.38	72.01	1478
KT1-9	38.99	37.03	23.58	0.44	0.1	0.2	100.32	73.42	1533
KT1-9	39.31	37.87	22.24	0.39	0.12	0.19	100.11	75.02	1478
KT2-8	39.11	39.85	20.89	0.44	0.16	0.16	100.61	77.08	1289
KT2-8	38.99	38.73	20.86	0.36	0.18	0.16	99.27	76.68	1226
KT2-8	39.09	40.2	20.23	0.37	0.12	0.15	100.16	77.81	1171
KT2-8	39.97	42.5	17.56	0.26	0.16	0.22	100.66	81.13	1706
KT2-8	39.76	41.13	18.8	0.3	0.13	0.17	100.3	79.48	1344
KT2-8	39.84	41.95	17.86	0.24	0.14	0.22	100.23	80.66	1698
KT2-8	40.02	42.59	17.27	0.31	0.17	0.23	100.56	81.39	1776

注：KT1-10 为方辉橄榄岩，KT1-9 为橄长岩，KT2-8 为黑云角闪橄榄苏长岩。

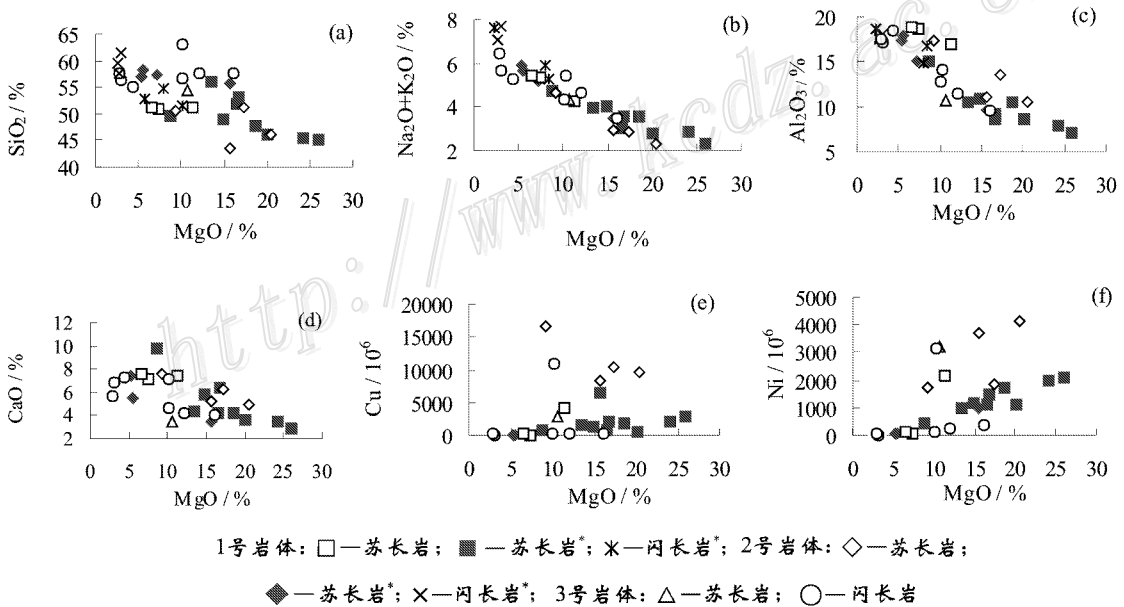


图 3 喀拉通克矿区镁铁质岩体全岩主要氧化物和成矿元素含量与 MgO 相关性

* 数据引自潘长云等,1994;张招崇等,2003;Song et al.,2009;其余数据为本文

Fig. 3 Plots of major oxides and ore-forming elements versus MgO contents from mafic intrusions in the Kalatongke ore district

* Data from Pan et al., 1994; Zhang et al., 2003; Song et al., 2009; other data from this paper

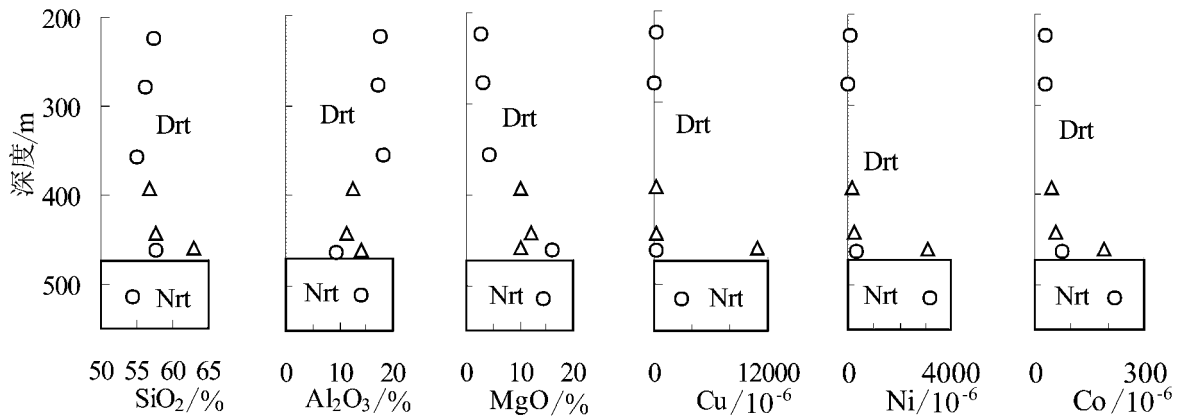


图 4 喀拉通克矿区 3 号岩体主要氧化物及成矿元素与深度的相关性

Drt—闪长岩；Nrt—苏长岩；○—ZK7502 钻孔；△—ZK9102 钻孔

Fig. 4 Plots of major oxides and ore-forming elements versus depth of No.3 intrusion in Kalatongke ore district

Drt—Diarite；Nrt—Norite；○—Drill hole ZK7502；△—Drill hole ZK9102

(图 3a), Cu 和 Ni 等成矿元素在 MgO 含量相应的区间内, 具有相似的变化规律。

3 号岩体的钻孔岩芯揭示, 从上往下, 岩石类型依次为闪长岩、辉长苏长岩和苏长岩, 主要氧化物和成矿元素的含量随深度呈规律性变化(图 4), SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量呈系统增加趋势, 在 460 m 左右深处, SiO₂ 含量迅速增加, MgO 含量随深度减小而逐渐减少。Cu、Ni 等成矿元素的含量在 460 m 深度以上, 含量较低, 在 460 m 左右深度, 含量迅速增加, 与

SiO₂ 含量的变化相对应。

橄榄石的 F_O 介于 70.93 % ~ 81.39 % 之间, 属贵橄榄石, 较地幔橄榄岩中橄榄石的 F_O (90.8 %) (Dick et al., 1984) 低, 也低于金川岩体中橄榄石的 F_O (78.5 % ~ 86.19 %) (汤中立等, 1995)。

3.2 微量元素

喀拉通克铜镍硫化物矿床含矿镁铁质岩体的微量元素分析结果列于表 3。在原始地幔标准化配分模式图(图 5)中, 3 号岩体与 1 号和 2 号岩体具有相

表 3 喀拉通克铜镍硫化物矿床镁铁质岩体微量元素分析结果 (w_B/10⁻⁶)

Table 3 Trace element compositions of mafic intrusions in the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit (w_B/10⁻⁶)

岩石	KT1-3	KT1-5	KT1-6	KT1-9	KT1-10	KT1-11	KT1-13	KT1-14	KT1-27	KT2-2b	KT2-3	KT2-5
Rb	1.33	18.97	4.47	5.94	1.90	13.08	24.17	25.03	5.60	9.98	23.58	17.20
Ba	31.54	329.60	142.00	134.60	11.86	217.60	416.90	509.60	129.90	214.60	224.60	309.50
Th	0.20	0.65	0.30	0.30	0.04	0.68	0.59	0.72	0.32	0.53	0.60	0.56
U	0.08	0.26	0.13	0.13	0.04	0.23	0.23	0.29	0.13	0.34	0.25	0.22
Nb	2.19	5.46	2.28	2.44	0.95	4.63	5.91	6.50	2.42	3.92	5.77	5.55
Ta	0.12	0.30	0.13	0.13	0.03	0.26	0.33	0.37	0.14	0.24	0.34	0.33
Sr	126.60	591.60	304.20	288.20	17.29	334.80	794.60	862.10	282.00	391.10	260.00	464.70
Zr	38.27	103.40	54.56	45.87	6.85	98.81	113.00	129.40	52.01	105.10	126.90	131.20
Hf	0.88	2.31	1.22	1.09	0.17	2.20	2.50	2.76	1.19	2.30	2.69	2.71
Y	6.41	14.17	7.74	6.55	0.67	12.23	14.57	14.31	6.95	12.22	15.90	15.84
V	91.86	118.80	93.16	110.90	143.30	112.50	137.80	127.40	105.50	132.90	134.60	131.90
Cr	702.80	388.00	506.00	1012.00	403.50	705.40	180.40	172.70	976.50	425.60	732.00	444.00
Co	312.5	111.1	225	340.2	690	387	43	40.03	443.1	120	131.2	150.2
Ni	10000	2138	6960	8526	21765	9340	98.7	77.47	10245	1807	3702	2037
Cu	25496	4266	5255	17814	8415	10040	151.3	110.5	17031	43060	8195	13910
Zn	146.20	114.40	107.00	185.60	396.70	164.90	77.44	78.59	188.20	321.90	139.20	132.80
La	4.86	12.13	5.21	5.13	0.53	10.61	10.82	12.67	5.55	8.22	10.93	11.44
Ce	11.99	29.37	12.78	12.35	1.47	25.36	26.25	30.06	13.35	20.47	27.00	28.08

续表 3
Continued Table 3

	KT1-3	KT1-5	KT1-6	KT1-9	KT1-10	KT1-11	KT1-13	KT1-14	KT1-27	KT2-2b	KT2-3	KT2-5
岩石	Nrt	Nrt	Nrt	Trc	Pdt	Nrt	Nrt	Nrt	Nrt	Nrt	Nrt	Nrt
Pr	1.73	4.06	1.81	1.73	0.20	3.48	3.63	4.04	1.86	2.83	3.72	3.86
Nd	7.51	17.23	7.87	7.26	0.81	14.66	15.43	16.93	7.91	12.09	15.91	16.27
Sm	1.64	3.62	1.79	1.58	0.17	3.08	3.42	3.64	1.74	2.71	3.52	3.66
Eu	0.62	1.32	0.79	0.62	0.07	1.08	1.51	1.53	0.64	1.05	1.23	1.40
Gd	1.80	4.02	2.09	1.77	0.18	3.34	3.90	4.02	1.85	3.11	4.01	4.16
Tb	0.27	0.58	0.31	0.27	0.03	0.50	0.59	0.59	0.28	0.49	0.62	0.63
Dy	1.39	3.09	1.70	1.44	0.14	2.61	3.22	3.10	1.49	2.67	3.41	3.41
Ho	0.29	0.64	0.36	0.30	0.03	0.55	0.67	0.65	0.31	0.55	0.72	0.71
Er	0.78	1.70	0.95	0.81	0.09	1.47	1.78	1.75	0.82	1.50	1.91	1.91
Tm	0.11	0.24	0.14	0.12	0.01	0.22	0.26	0.26	0.12	0.22	0.28	0.28
Yb	0.67	1.50	0.87	0.76	0.09	1.36	1.60	1.58	0.78	1.36	1.77	1.68
Lu	0.11	0.24	0.14	0.12	0.01	0.22	0.25	0.25	0.12	0.22	0.27	0.27
Ba/V*	0.3	2.8	1.5	1.2	0.1	1.9	3.0	4.0	1.2	1.6	1.7	2.3
(La/Yb) _N *	5.2	5.8	4.3	4.8	4.2	5.6	4.9	5.8	5.1	4.3	4.4	4.9
δEu*	1.10	1.06	1.25	1.14	1.23	1.03	1.27	1.22	1.09	1.11	1.00	1.10
ΣREE	33.8	79.7	36.8	34.3	3.8	68.5	73.3	81.1	36.8	57.5	75.3	77.8
	KT2-6	KT2-7	KT2-8	KT3-1	KT3-3	KT3-9	KT3-10	KT3-14	KT3-33	KT3-35	KT3-38	
岩石	Nrt	Nrt	Nrt	Drt	Drt	Drt	Drt	Nrt	Drt	Drt	Drt	
Rb	17.30	16.87	9.93	30.63	26.08	18.39	32.78	40.44	31.98	42.84	48.28	
Ba	406.80	245.30	184.50	585.50	450.70	314.30	330.50	455.20	457.40	575.00	608.90	
Th	0.52	0.55	0.46	3.16	2.63	1.80	1.33	2.13	1.80	2.16	2.12	
U	0.27	0.23	0.20	1.29	0.88	0.66	0.47	0.67	0.61	0.74	0.72	
Nb	5.27	5.93	4.68	8.56	6.17	5.24	4.70	6.31	5.14	6.44	8.14	
Ta	0.31	0.35	0.28	0.49	0.36	0.30	0.26	0.35	0.29	0.36	0.44	
Sr	724.10	368.50	285.40	569.20	648.70	238.10	245.00	322.00	374.50	332.80	363.60	
Zr	107.60	121.60	95.32	164.00	89.71	99.80	67.56	92.71	108.00	98.68	132.40	
Hf	2.33	2.59	2.10	4.35	2.41	2.47	1.72	2.27	2.60	2.44	3.10	
Y	12.94	14.54	13.54	24.30	17.00	12.51	9.83	10.81	12.83	12.00	12.75	
V	87.69	132.70	101.10	167.80	192.60	138.00	112.00	105.60	128.60	115.40	115.90	
Cr	313.60	715.40	1049.00	148.90	6.12	865.50	920.40	742.30	494.60	686.00	1489.00	
Co	121.5	130.5	225.5	28.29	31.05	69.6	73.86	218.9	48.88	59.96	189.8	
Ni	1699	1857	4123	67.03	9.1	289.4	351.5	3201	144.4	254.5	3135	
Cu	16530	10370	9651	224.7	86.85	195	271.2	2873	175.8	220.8	10910	
Zn	142.60	178.50	139.30	100.60	108.50	114.40	117.50	97.31	94.54	182.00	118.30	
La	8.80	9.68	8.78	24.08	21.07	14.03	12.15	15.84	14.02	17.53	18.72	
Ce	21.60	23.64	22.02	55.91	47.28	30.10	25.98	33.32	30.85	36.30	39.82	
Pr	2.98	3.29	3.13	7.35	5.98	3.78	3.18	4.04	3.89	4.38	4.88	
Nd	12.83	14.03	13.40	30.22	23.95	14.98	12.35	15.27	15.46	16.62	18.46	
Sm	2.90	3.19	3.05	6.39	4.84	3.06	2.45	2.94	3.15	3.17	3.49	
Eu	1.24	1.17	1.03	1.98	1.53	0.96	0.79	0.96	1.07	1.05	1.22	
Gd	3.40	3.62	3.46	6.88	5.16	3.41	2.78	3.13	3.60	3.59	3.88	
Tb	0.51	0.56	0.54	1.00	0.72	0.48	0.38	0.43	0.52	0.48	0.52	
Dy	2.79	3.12	2.93	5.24	3.69	2.65	2.07	2.28	2.75	2.57	2.70	
Ho	0.59	0.65	0.61	1.09	0.75	0.56	0.43	0.47	0.58	0.53	0.56	
Er	1.61	1.78	1.67	2.90	2.00	1.56	1.19	1.31	1.59	1.44	1.52	
Tm	0.23	0.26	0.24	0.41	0.28	0.23	0.18	0.19	0.23	0.21	0.23	
Yb	1.45	1.63	1.49	2.56	1.75	1.48	1.15	1.26	1.48	1.37	1.46	
Lu	0.23	0.26	0.23	0.39	0.27	0.24	0.19	0.20	0.23	0.21	0.23	
Ba/V*	4.6	1.8	1.8	3.5	2.3	2.3	3.0	4.3	3.6	5.0	5.3	
(La/Yb) _N *	4.4	4.3	4.2	6.8	8.6	6.8	7.6	9.0	6.8	9.2	9.2	
δEu*	1.21	1.05	0.97	0.91	0.94	0.91	0.93	0.97	0.97	0.95	1.02	
ΣREE	61.2	66.9	62.6	146.4	119.3	77.5	65.3	81.6	79.4	89.5	97.7	

注：Trc—橄长岩；Pdt—橄辉岩；其余缩写同表 1；* 单位为 1。

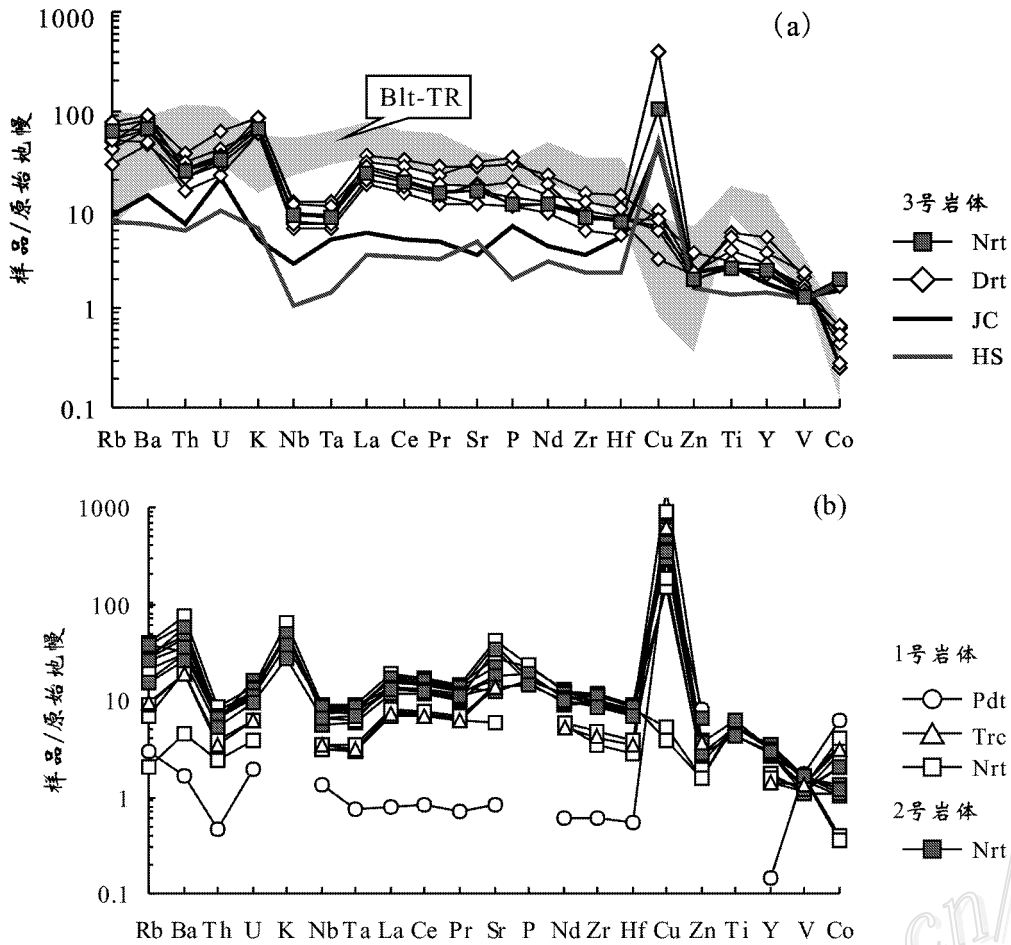


图5 喀拉通克矿区镁铁质岩体的微量元素原始地幔标准化配分图

a. 3号岩体; b. 1号和2号岩体; Blt-TR—塔里木盆地二叠纪玄武岩, 数据引自杨树峰等, 2005; JC—金川岩体, 数据引自汤中立等, 1995; HS—黄山岩体, 数据引自傅飘儿等, 2009; 原始地幔的数据引自 Sun et al., 1989; Drt—闪长岩; Nrt—苏长岩; Pdt—橄榄岩; Trc—橄长岩

Fig. 5 Primitive mantle-normalized patterns of trace elements from mafic intrusions in the Kalatongke ore district

a. No. 3 mafic intrusion; b. No. 1 and No. 2 mafic intrusions; Blt-TR—Permian basalt in Tarim basin, data from Yang et al., 2005; JC—Jinchuan intrusion, data from Tang et al., 1995; HS—Huangshan intrusion, data from Fu et al., 2009; Primary Mantle data from Sun et al., 1989; Drt—Diorite; Nrt—Norite; Pdt—Peridotite; Trc—Troctolite

似的特征, Rb、K 和 Sr 等大离子亲石元素 (LILEs) 富集, Th、Nb 和 Ta 等高场强元素 (HFSEs) 相对亏损, 与该地区其他含矿镁铁质-超镁铁质岩体相类似 (傅飘儿等, 2009), 而与塔里木盆地二叠纪玄武岩 (杨树峰等, 2005) 不同。但与 1 号和 2 号岩体相比, 3 号岩体中大离子亲石元素 (LILEs) 的富集程度更高, 如 Ba/V 比值 (2.3~5.3) 较高 (1 号和 2 号岩体的 Ba/V 比值为 0.1~4.6), 亏损 Ni 和 Co 等亲铁元素, 部分样品中 Cu 较富集。

稀土元素原始地幔配分模式 (图 6) 指示出, 该矿区内不同类型的岩石均为轻稀土元素富集。不同类型岩石的稀土元素总量 (ΣREE) 为 $(3.8 \sim 146.4) \times$

10^{-6} , 从闪长岩 $[(65.3 \sim 146.4) \times 10^{-6}]$ 、苏长岩 $[(33.8 \sim 81) \times 10^{-6}]$ 、橄长岩 (34.3×10^{-6}) 到橄榄岩 (3.8×10^{-6}) 逐步降低, 即 REE 的丰度随岩石基性程度的增高而降低 (表 3)。3 号岩体的特征是: ΣREE $(65.3 \sim 146.4) \times 10^{-6}$ 高于 1 号和 2 号岩体 $[\Sigma\text{REE} = (3.8 \sim 81.1) \times 10^{-6}]$, 轻、重稀土元素分馏明显, 轻稀土元素的富集程度较高 (La/Yb)_N 比值 (6.8~9.2) 明显高于 1 号和 2 号岩体 (4.2~5.8) 以及黄山岩体 (1.1~3.7) (傅飘儿等, 2009), 与金川岩体 (2.6~8.8) (焦建刚等, 2006) 相类似; δEu (0.91~0.97) (样品 KT3-38 的 $\delta\text{Eu} = 1.02$) 低于 1 号和 2 号岩体 (0.97~1.27)。

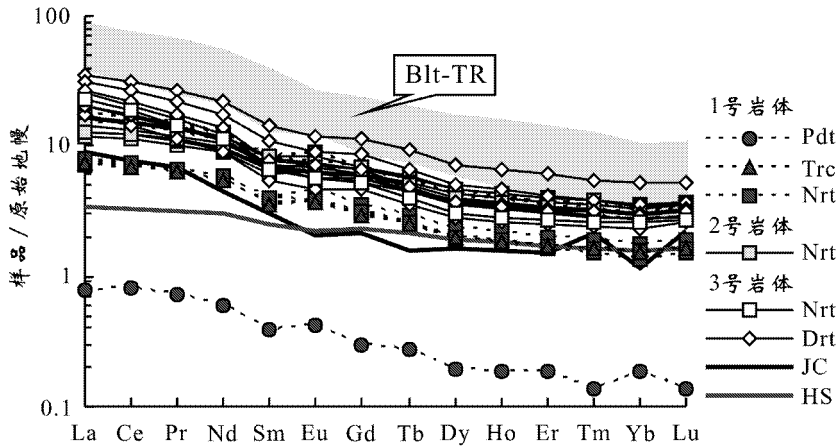


图 6 喀拉通克矿区镁铁质岩体的稀土元素原始地幔标准化配分图
缩写同图 5

Fig. 6 Primitive mantle-normalized patterns of REE from mafic intrusions in the Kalatongke ore district
Abbreviations as for Fig. 5

表 4 喀拉通克铜镍硫化物矿床 PGE 分析结果 ($w_B/10^{-9}$)

Table 4 Compositions of PGE of the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit ($w_B/10^{-9}$)

编号	KT1-1	KT1-2	KT1-3	KT1-7	KT1-8	KT1-9	KT1-10	KT2-2a	KT2-2b	KT2-5	KT2-6	KT3-9	KT3-38
岩石	M-ore	M-ore	D-ore	M-ore	M-ore	D-ore	D-ore	D-ore	M-ore	D-ore	D-ore	Drt	D-ore
Ni*			9980			8496	21645	1767		1992	1669	280.35	3126.35
Os	4.05	8.19	4.63	1.11	2.29	8.37	1.5	0.82	0.68	0.67	0.21	0.23	0.41
Ir	3.22	4.98	2.85	0.75	0.95	4.96	1.32	0.53	1.19	0.36	0.14	0.07	0.23
Ru	4.06	9.6	3.25	4.23	1.86	7.11	2.69	1.1	7.75	0.8	0.34	0.55	0.69
Rh	3.14	5.18	1.8	0.93	1.42	7.11	1.76	2.06	3.26	0.37	0.25	0.04	0.29
Pd	33.9	39.7	18.2	394	176	7.11	51.9	225	336	32.6	50.8	1.22	49.2
Pt	45.1	31.3	133	722	147	7.11	151	518	10.2	343	68.6	1.5	58
Cu*			25496			7.11	8415	43060		13910	16530	195	10910

注 M-ore 和 D-ore 分别表示块状矿石和浸染状矿石;其余缩写同表 1; * 单位为 10^{-6} 。

3.3 铂族元素

喀拉通克矿床的铂族元素分析结果见表 4。3 号岩体硫化物矿石的铂族元素含量 ($\Sigma PGE = 108.8 \times 10^{-9}$) 低于 1 号岩体 ($93.5 \sim 1123.0 \times 10^{-9}$, 平均为 340.0×10^{-9}) 和 2 号岩体 ($120.3 \sim 747.5 \times 10^{-9}$, 平均为 401.2×10^{-9}), 也低于金川岩体 ($\Sigma PGE = 538.8 \times 10^{-9}$) (王瑞廷等 2004)。块状矿石的铂族元素含量 [$\Sigma PGE = (93.5 \sim 1123.0) \times 10^{-9}$, 平均 478.5×10^{-9}] 高于浸染状矿石 [$\Sigma PGE = (108.8 \sim 361.1) \times 10^{-9}$, 平均 243.0×10^{-9}]。不含矿闪长岩的铂族元素含量极低, 其 ΣPGE 仅为 3.6×10^{-9} 。

在 PGE 原始地幔标准化配分模式图 (图 7) 中, 不同类型矿石的 PGE 配分曲线与原始地幔相比, IPGE 部分亏损, PPGE 较为富集。1 号岩体中硫化

物矿石的 PGE 配分模式与金川铜镍硫化物矿床的相似。2 号和 3 号岩体中硫化物矿石的 IPGE 含量较低, 其配分模式与黄山铜镍硫化物矿床的相似。3 号岩体的 $(Pt + Pd) / (Ru + Ir + Os + Rh)$ 比值为 66.2 ± 1 , 1 号岩体的 $(Pt + Pd) / (Ru + Ir + Os + Rh)$ 比值为 $2.5 \sim 27.9$ (样品 KT1-7 为 159.0), 2 号岩体的 $(Pt + Pd) / (Ru + Ir + Os + Rh)$ 比值为 $127.0 \sim 170.7$ (样品 KT2-2a 为 26.9)。

Ir 与 Os, Ru, Rh 呈正相关, 而与 Pt, Pd 及 Cu 的相关性不明显, 可能是受到了后期热液作用的影响。Cu/Pd 比值 ($1 \sim 4.3 \times 10^5$, 平均 3.7×10^5) 和 Ti/Pd 比值 ($2.5 \sim 34.9 \times 10^5$, 平均 8.1×10^5) 大于原始地幔岩浆 (Cu/Pd = $6 \sim 500$, Ti/Pd = 3×10^5) (Maier et al., 1998)。

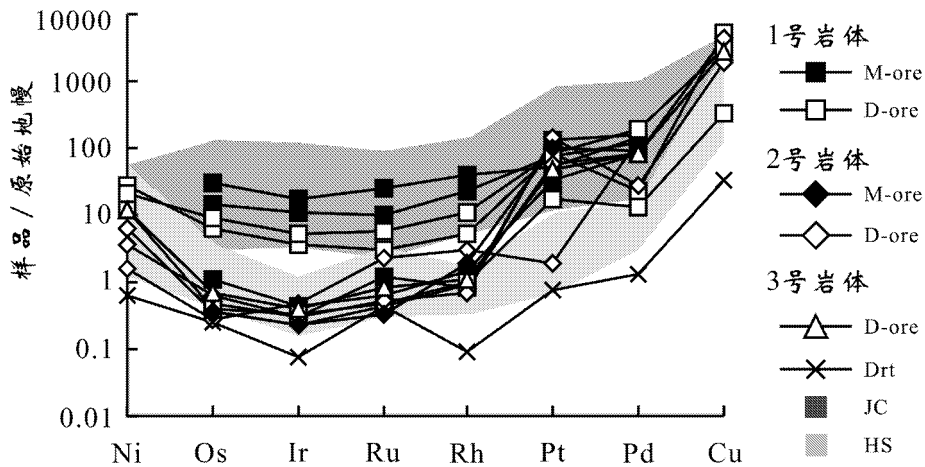


图7 喀拉通克矿区镁铁质岩体的100%硫化物PGE原始地幔标准化配分图

D-ore—浸染状矿石; M-ore—块状矿石; 其余缩写同图5

Fig. 7 Primitive mantle-normalized patterns of PGE in recalculated 100% sulfides from mafic intrusions in the Kalatongke ore district

D-ore—Disseminated ore; M-ore—massive ore; other abbreviations as for Fig. 5

4 讨论

4.1 成矿岩浆类型

喀拉通克矿床3号岩体与1号和2号岩体具有相似的微量元素及稀土元素配分模式,一般来说,配分系数接近的2个强不相容元素的比值在分离结晶和部分熔融作用过程中变化很小,在强不相容元素对的比值图解中,同一岩浆源区的样品分布在同一相关直线上(Saunders et al., 1988)。喀拉通克矿区3个岩体的样品(除橄榄岩样品KT1-10外)在Ta/

Yb-Nb/Y和Hf/Nb-Zr/Nb图解中,均落在相关系数很高的同一直线上(图8),而且,Nb/Ta和Sm/Nd等微量元素对的比值变化较小(图9),指示出1号、2号和3号含矿镁铁质岩体是由同源岩浆分异形成的。其岩石内矿物的连续结晶顺序为:橄榄石(斜长石)→斜方辉石→单斜辉石→角闪石(斜长石)→黑云母,这也反应出同源岩浆结晶分异演化的特点。

3号岩体的大离子亲石元素、轻稀土元素比1号和2号岩体富集,其 δE_{u1} 具轻微负异常,Ni和Co等亲铁元素亏损,3号岩体硫化物矿石的铂族元素配分模式与2号岩体的相似,而与1号岩体则明显不同,

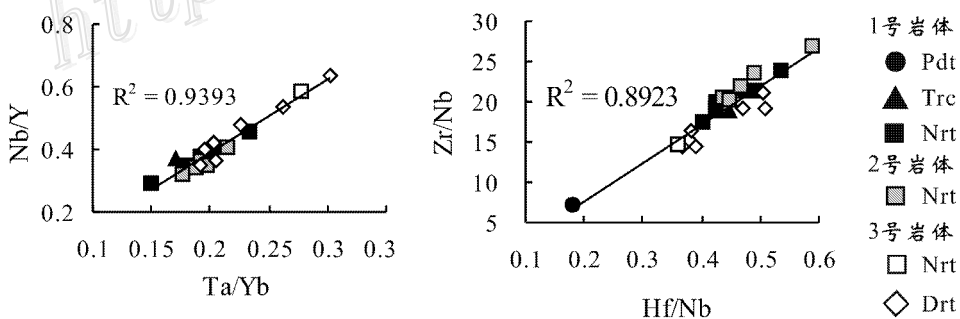


图8 喀拉通克矿区镁铁质岩体的Ta/Yb-Nb/Y和Hf/Nb-Zr/Nb相关图
缩写同图5

Fig. 8 Plots of Ta/Yb versus Nb/Y and Hf/Nb versus Zr/Nb from mafic intrusions in the Kalatongke ore district
Abbreviations as for Fig. 5

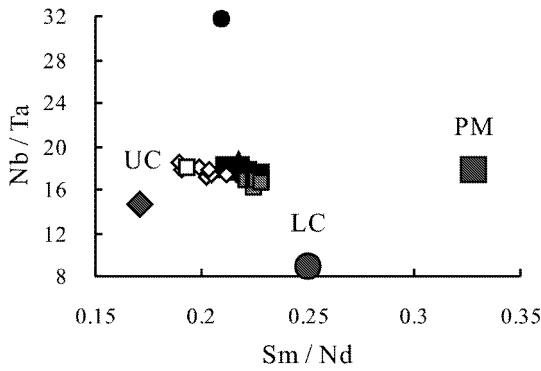


图 9 喀拉通克矿区镁铁质岩体的 $Sm/Nd-Nb/Ta$ 相关图
PM—原始地幔,数据引自 Sun et al., 1989; LC—下地壳,数据引自 Taylor et al., 1995; UC—上地壳,数据引自 Gao et al., 1998;
图例同图 8

Fig. 9 Plot of Sm/Nd versus Nb/Ta from mafic intrusions in the Kalatongke ore district
PM—Primary Mantle, data from Sun et al., 1989; LC—Lower crust, data from Taylor et al., 1995; UC—Upper crust, data from Gao et al., 1998; Legend as for Fig. 8

如 2 号与 3 号岩体的 $(Pt + Pd)/(Ru + Ir + Os + Rh)$ (分别为 127.0~170.7, 66.2) 高于 1 号岩体 (2.5~27.9), 1 号和 2 号岩体的 δE_{u} 表现为轻微正异常, 表明喀拉通克矿区的 3 个岩体可能是不同期次形成的。这 3 个岩体的形成年龄分别为 (282.5 ± 4.8) Ma~ (287 ± 5) Ma (1 号岩体) (290.2 ± 6.9) Ma (2 号岩体), 299.1 Ma (3 号岩体) (王润民等, 1991; 韩宝福等, 2004; 张作衡等, 2005), 依次增高, 从另一侧面证明了 1 号、2 号和 3 号岩体可能是同源岩浆不同期次的产物。

1 号岩体橄榄岩样品的微量元素具有近于平坦的原始地幔标准化配分模式 (图 5), 配分系数接近 1 的微量元素 (如 Zn 等) 的含量略高于原始地幔, 该岩体较低的 Zr/Y 比值 (5.28~10.38) 指示出原始岩浆源自于软流圈地幔 (Sato et al., 2007), 1 号和 2 号岩体的 Nd 同位素组成 $(\epsilon Nd(t) = 6.2 \sim 8.5)$ (张招崇等, 2006; Song et al., 2009; Zhang et al., 2009) 也支持这一推论。

由于喀拉通克矿区的侵入体缺乏冷凝边及相关的镁铁质岩墙, 无法直接推算其母岩浆的成分, 因此, 采用橄榄石的成分来估算母岩浆的成分 (Chai et al., 1992)。岩体中橄榄石的 F_o 值为 81.39 (表 2) 根据橄榄石-熔体平衡原理推算出其母岩浆的 MgO/FeO 重量比为 0.8096 ($KDOI-Melt = 0.3 \pm$

0.03)。利用黑云角闪橄榄苏长岩 (样品 KT1-13、KT2-8) 的平均 FeO 含量 (11.5%) 估算出原始岩浆中 MgO 的含量为 9.3%, 即喀拉通克含矿岩体的原始岩浆可能是 MgO 含量为 9.3% 的高镁玄武质岩浆。

4.2 岩浆作用

喀拉通克矿区的成矿岩浆在上升侵位过程中, 可能经历了岩浆结晶分异作用和同化混染作用。1 号、2 号和 3 号岩体不同岩相的矿物组成、岩石结构呈渐变过渡关系, SiO_2 、 $K_2O + Na_2O$ 、 Al_2O_3 和 CaO 等与 MgO 呈系统连续变化, 具有就地结晶分异的特征。 $Mg^{\#}$ 普遍较低 (平均 0.58), 表明岩浆演化过程中可能存在橄榄石和辉石的分离结晶作用。3 号岩体的 δE_{u} 具轻微负异常, 表明其成矿岩浆可能经历了斜长石微弱的分离结晶作用, 而 1 号和 2 号岩体的 δE_{u} 具轻微正异常。上述特征表明, 喀拉通克铜镍硫化物矿床的成矿岩浆经历了结晶分异演化。

在 MgO 含量为 10%~15% 范围内, 这 3 个岩体的 SiO_2 含量具有迅速增高的特征, 在 460 m 左右深处, 3 号岩体的 SiO_2 含量也明显增高。其原由可能是富硅组分的混入, 或是在玄武质岩浆结晶过程中辉石等矿物的晶出, 但后一因素难以引起全岩组分中 SiO_2 含量的剧变, 因此推断, 在该矿区成矿岩浆的演化过程中存在富硅组分的混入。对于上、下地壳和原始地幔等不同的端元而言, 其配分系数接近的强不相容元素的比值, 如 Sm/Nd 、 Nb/Ta 等, 具有明显的差异。喀拉通克岩体的 Sm/Nd 比值为 0.19~0.23, 平均 0.21, 介于原始地幔 (0.33) 与上地壳 (0.17) 之间, Nb/Ta 比值为 16.33~18.77 (橄榄岩样品 KT1-10 除外, 为 31.67), 平均 17.61, 介于原始地幔 (17.83) 与上地壳 (14.71) 之间, 指示出其岩浆具有地壳物质混染的特征 (图 8)。这得到了喀拉通克矿区 1 号和 2 号岩体的 $\delta^{18}O$ 值 (5.4~10.6) (张招崇等, 2006) 的支持。

4.3 成矿作用

形成岩浆型铜镍硫化物矿床的关键在于, 成矿岩浆中硫饱和促使硫化物熔体从硅酸盐岩浆中熔离出来 (Naldrett, 1999; 2004)。促使幔源成矿岩浆中硫饱和的因素 (Naldrett, 1999; Li et al., 2000; 2001; 2005) 主要有: ① 岩浆快速冷却 随岩浆温度降低, 硫的溶解度随之降低, 进而硫达到饱和; ② 岩浆混合 成分差异较大的岩浆发生混合可改变硫的饱和曲线, 使硫进入饱和区; ③ 岩浆分离结晶 成矿岩

浆随橄榄石、辉石等造岩矿物的大量晶出,岩浆中的硫浓度不断增高而达到饱和;④外来硫的加入,岩浆因同化富硫围岩而使其硫含量增高,导致硫饱和;⑤富Si围岩的混染,富含SiO₂的物质的加入可降低岩浆中硫的溶解度。

喀拉通克矿区1号、2号和3号含矿镁铁质岩体分异较好,结晶粒度大、不同岩相间为渐变关系,表明其具有完整的同源岩浆结晶分异的特征,据此可排除岩浆快速冷却、岩浆混合等因素在喀拉通克矿床成矿作用中的贡献。成矿元素Cu、Ni等的含量随MgO含量的降低而减少(图3),表明橄榄石、辉石及长石的分离结晶可能是导致成矿岩浆中硫达到饱和的一个重要因素。另一方面,该矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ (-1.02‰~+1.9‰)变化很小,接近于0,显示出岩浆硫的特点(王润民等,1991;邹海洋等,2001)。成矿岩浆在上升侵位过程中遭受了明显的地壳物质的混染,大量斜方辉石的晶出、SiO₂含量在MgO含量为10%~15%区间内迅速增加,均指示出有富硅组分的加入,再结合岩石结晶类型、硫化物聚集深度以及Cu-Ni等成矿元素的变化,都表明,富硅组分的加入是引发硫饱和及硫化物熔离的重要因素。

5 结 论

(1)喀拉通克铜镍硫化物矿床的3个岩体可能是同源高镁(MgO=9.3%)玄武质岩浆不同期次侵入的产物。不同岩体的微量元素及稀土元素的配分模式相似,而分异程度则有别;3号岩体的PGE配分模式与2号岩体的相似。

(2)成矿岩浆的演化经历了岩浆分离结晶作用及富硅地壳组分的混染,这可能是导致成矿岩浆硫饱和以及硫化物熔离的主要诱因。

志 谢 钱壮志、姜常义、孟广路、刘燕学、陶琰和何克参与了样品采集及实验分析工作;在野外考察、样品采集、实验分析和论文撰写等方面得到了印第安纳大学Chusi Li教授的全面指导,在此一并表示衷心感谢。

References

Barnes S J and Lightfoot P C. 2005. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum

group element contents[J]. *Economic Geology*, 100:179-213.

Chai F M. 2006. Comparison on petrologic geochemistry of three mafic-ultramafic intrusions associated with Ni-Cu sulfide deposits in northern Xinjiang (dissertation for Doctor degree [D]). Supervisor: Mao J W and Zhang Z C. Beijing: China University of Geoscience. 118-119 (in Chinese with English abstract).

Chai G and Naldrett A J. 1992. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma[J]. *Petrology*, 33(2): 277-303.

Dick H J B and Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lava[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86: 54-76.

Fu P E, Hu P Q, Zhang M J, Jia Y Q, Tang Z L and Li W Y. 2009. Petrogenesis of Huangshan Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang[J]. *Geochimica* (in Chinese with English abstract) (in press).

Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y W, Zhao Z D and Hu Y K. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959-1975.

Han B F, Ji J Q, Song B, Chen L H and Li Z H. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb age and geology of Kalatongke-Huangshan mafic-ultramafic complex, Xinjiang, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2324-2328 (in Chinese).

Jiao J G, Yan H Q, Qian Z Z, Liu R P and Li J J. 2006. Geochemical characteristics of typical mafic-ultramafic rocks in Longshou Mountain[J]. *Mineral Petrol.*, 6(1): 49-56 (in Chinese with English abstract).

Li C and Ripley E M. 2005. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magma at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposit[J]. *Mineralium Deposita*, 40: 218-230.

Li C, Lightfoot P C, Amelin Y and Naldrett A J. 2000. Contrasting petrological and geochemical relationships in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada: Implications for ore genesis[J]. *Econ. Geol.*, 95(4): 771-779.

Li C, Maier W D and De Waal S A. 2001. Magmatic Ni-Cu versus PGE deposits: Contrasting genetic controls and exploration implication[J]. *South African Journal of Geology*, 104: 205-214.

Li H Q, Xie C F, Chang H L, Cai H, Zhu J P and Zhou S. 1998. Geochronology for metallogenesis of nonferrous-precious metals in Northern Xinjiang[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 202-220 (in Chinese).

Liu D Q, Tang Y L and Zhou R H. 2005. Copper deposits and nickel deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 360p (in Chinese).

Maier W D, Barnes S J and De Waal S A. 1998. Exploration for magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits: A review of recent advances in the use of geochemical tools, and their application to some south African ores[J]. *South African Journal of Geology*, 101(3): 237-253.

Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, Chai F M, Yan J M, Wu H, Chen S P, Cheng S L and Zhang C Q. 2006. Late Variscan post-collisional

- Cu-Ni sulfide deposits in East Tianshan and Altay in China : Principal characteristics and possible relationship with mantle plume[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 925-942 (in Chinese with English abstract).
- Naldrett A J. 1999. World-class Cu-Ni- PGE deposits : key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 34 : 227-240.
- Naldrett A J. 2004. Magmatic sulfide deposits[J]. Berlin : Springer , 128 : 303-311.
- Pan C Y , Wang R M and Zhao C L. 1994. Geochemistry characteristics and their relationship to the metallogeny of ore-bearing rockbody No. Y1 , at Kalatongke Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10 (3): 261-274 (in Chinese with English abstract).
- Ran H Y and Xiao S H. 1994. Trace element abundances and tectonic environment of the host intrusion of Karatungk Cu-Ni deposit[J]. *Geochimica*, 23 : 392-401 (in Chinese with English abstract).
- Sato M , Shuto K and Yagi M. 2007. Mixing of asthenospheric and lithospheric mantle-derived basalt magmas as shown by along-arc variation in Sr and Nd isotopic compositions of Early Miocene basalts from back-arc margin of NE Japan arc[J]. *Lithos*, 96 : 453-474.
- Saunders A D , Norry M J and Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs : Trace element constraints [J]. *Journal of Petrology (Special Lithosphere Issue)*, 415-445.
- Song X Y and Li X R. 2009. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu- (PGE) sulfide deposit , NW China : Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in a postcollisional environment[J]. *Mineralium Deposita*, 44 : 303-327.
- Su S G , Li C , Zhou M F , Ripley E M and Qi L. 2008. Controls on variations of platinum-group element concentration in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit , Western China[J]. *Mineralium Deposita*, 43 : 609-622.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implications for mantle composition and processes [A]. In : Saunders A D and Norry M J , ed. *Magmatism in the ocean basins*[C]. *Geological Society Special Publication*, 42 : 313-345.
- Tang Z L and Li W Y. 1995. Metallogenic model of Jinchuan Cu-Ni deposit and geological characteristics[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 14-209 (in Chinese).
- Tang Z L , Qian Z Z and Jiang C Y. 2006. Cu-Ni- (PGE) sulfide deposit and metallogenic prognosis in China[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 3 (in Chinese).
- Tang Z L , Yan H Q , Jiao J G and Pan Z X. 2007. Regional metallogenic controls of small-intrusion-hosted Ni-Cu (PGE) ore deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 92-103 (in Chinese with English abstract).
- Tao Y , Li C , Song X Y and Ripley E M. 2008. Mineralogical petrological and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores , SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 43(7): 849-872.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Rev. Geophys.*, 33 : 241-265.
- Wang J B , Wang Y W and He Z J. 2006. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains , NW China[J]. *Geology in China*, 33(3): 461-469 (in Chinese with English abstract).
- Wang R M and Zhao C L. 1991. Kalatongke Cu-Ni sulfide No. 1 ore deposit in Xinjiang[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 298p (in Chinese).
- Wang R T , Mao J W , He Y , Wang D S and Tang Z L. 2004. Geochemical characteristics of platinum group elements in Jinchuan super-large sulfide copper-nickel deposit , Jinchuan city , Gansu Province , China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 279-286 (in Chinese with English abstract).
- Yan S H , Zhang Z C , Wang D H , Chen B L , He L X and Zhou G. 2003. Kalatongke magmatic Cu-Ni sulfide deposit[A]. In : Mao J et al. , eds. *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*[C]. London : IAGOD Guidebook Series , 10 : 131-152.
- Yang S F , Chen H L , Yi D W , Li Z L , Dong C W , Jia C Z and Wei G Q. 2005. Geological process of early to middle Permian magmatism in Tarim basin and its geodynamic significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 504-511 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C L , Li X H , Li Z X , Ye H M and Li C N. 2008. A Permian layered intrusive complex in the Western Tarim Block , northwestern China : Product of a Ca. 275 Ma mantle plume[J]?. *Journal of Geology*, 116 : 269-287.
- Zhang M J , Hu P Q , Niu Y L and Su S G. 2007. Chemical and stable isotopic constraints on the nature and origin of volatiles in the subcontinental lithospheric mantle beneath eastern China[J]. *Lithos*, 96 : 55-66.
- Zhang M J , Hu P Q , Zheng P , Wang X B and Li L W. 2005. The occurrence modes of H₂ in mantle-derived rock[A]. In : Mao J , Bierlein F P , eds. *Mineral deposit research*[C]. New York : Springer , Chapter 1-19 , 73-76.
- Zhang M J , Niu Y L and Hu P Q. 2008. Volatiles in the mantle lithosphere : Modes of occurrence and chemical compositions[A]. In : Anderson J E and Coats R W , eds. *The lithosphere : Geochemistry , geology and geophysics*[C]. New York : Nova Science Publishers , 171-211.
- Zhang M J , Wang X B and Li L W. 2000. Composition of mantle fluid [J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 401-412 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C , Mao J W , Chai F M , Yan S H , Chen B L and Pirajno F. 2009. Geochemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions , northern Xinjiang , NW China : Implications for the genesis of the magmatic Ni-Cu sulfide deposit [J]. *Econ. Geol.*, 104(2): 185-203.
- Zhang Z C , Yan S H , Chen B L , He L X , He Y S and Zhou G. 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 217-224 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C , Yan S H , Chen B L , He L X , He Y S , Zhou G and Chai F

- M. 2006. Sr, Nd and O isotope geochemistry of the mafic-ultramafic complexes in the south margin of Altay orogenic belt and discussion on their sources [J]. *Geological Review*, 52(1):38-42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z H, Chai F M, Du A D, Zhang Z C, Yan S H, Yang J M, Qu W J and Wang Z L. 2005. Re-Os dating and ore-forming material tracing of the Karatungk Cu-Ni sulfide deposit in northern Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4):285-293 (in Chinese with English abstract).
- Zou H Y, Dai T G and Hu X Z. 2001. Geological characteristics and prognosis of the Karatungk Cu-Ni deposit, Xinjiang [J]. *Geology-Geochemistry*, 29(3):70-75 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柴凤梅. 2006. 新疆北部三个与岩浆 Ni-Cu 硫化物矿床有关的镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征对比[博士论文] D]. 导师:毛景文,张招崇. 北京:中国地质大学. 118-119.
- 傅飘儿,胡沛青,张铭杰,贾元琴,汤中立,李文渊. 2009. 新疆黄山铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程[J]. *地球化学(待刊)*.
- 韩宝福,季建清,宋 彪,陈立辉,李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 49(22):2324-2328.
- 焦建刚,闫海卿,钱壮志,刘瑞平,李晶晶. 2006. 龙首山岩带典型镁铁-超镁铁质岩体岩石地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 26(1):49-56.
- 李华芹,谢才富,常海亮,蔡 红,朱家平,周 肃. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京:地质出版社. 202-220.
- 刘德权,唐延龄,周汝洪. 2005. 中国新疆铜矿床和镍矿床[M]. 北京:地质出版社. 360页.
- 毛景文, Pirajno F, 张作衡, 柴凤梅, 杨建民, 吴 华, 陈世平, 程松林, 张长青. 2006. 天山-阿尔泰东部地区海西期后碰撞铜镍硫化物矿床:主要特点及可能与地幔柱的关系[J]. *地质学报*, 80(7):925-942.
- 潘长云,王润民,赵昌龙. 1994. 新疆喀拉通克 Y1 含矿岩体的岩石化学特征及其与成矿的关系[J]. *岩石学报*, 10(3):261-274.
- 冉红彦,肖森宏. 1994. 喀拉通克含矿岩体的微量元素与成岩构造环境[J]. *地球化学*, 22(4):392-401.
- 汤中立,李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物矿床模式及地质特征对比[M]. 北京:地质出版社. 14-209.
- 汤中立,钱壮志,姜常义. 2006. 中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京:地质出版社. 3.
- 汤中立,闫海卿,焦建刚,潘振兴. 2007. 中国小岩体镍铜(铂族)矿床的区域成矿规律[J]. *地学前缘*, 14(5):92-103.
- 王京彬,王玉往,何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. *中国地质*, 33(3):461-469.
- 王瑞廷,毛景文,赫 英,王东生,汤中立. 2004. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征[J]. *大地构造与成矿学*, 28(3):279-286.
- 王润民,赵昌龙. 1991. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床[M]. 北京:地质出版社. 298页.
- 杨树峰,陈汉林,翼登武,厉子龙,董传万,贾承造,魏国齐. 2005. 塔里木盆地早-中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义[J]. *高校地质学报*, 11(4):504-511.
- 张铭杰,王先彬,李立武. 2000. 地幔流体组成[J]. *地学前缘*, 7(2):401-412.
- 张招崇,闫升好,陈柏林,何立新,何永胜,周 刚,柴凤梅. 2006. 阿尔泰造山带南缘镁铁质-超镁铁质杂岩体的 Sr, Nd, O 同位素地球化学及其源区特征探讨[J]. *地质论评*, 52(1):38-42.
- 张招崇,闫升好,陈柏林,何立新,何永胜,周 刚. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(3):217-224.
- 张作衡,柴凤梅,杜安道,张招崇,闫升好,杨建民,屈文俊,王志良. 2005. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测年及成矿物质来源示踪[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(4):285-293.
- 邹海洋,戴塔根,胡祥昭. 2001. 喀拉通克铜镍硫化物矿地质特征及找矿预测[J]. *地质地球化学*, 29:70-75.