

东天山图拉尔根铜镍钴硫化物矿床岩相、岩石地球化学特征及其形成的构造背景

孙 赫^{1,2} 秦克章¹ 李金祥^{1,2} 徐兴旺¹ 三金柱¹
丁奎首¹ 惠卫东³ 许英霞^{1,2}

(1. 中国科学院矿产资源重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2. 中国科学院研究生院地球科学院, 北京 100039; 3. 新疆有色地质勘查局 704 队, 新疆 哈密 839000)

摘要:新疆图拉尔根铜镍钴矿产于康古儿塔格—黄山韧性剪切带的北东段,是由硫化物深部熔离成矿为主兼就地熔离、热液叠加成矿多重作用形成的半隐伏矿床。1号岩体以全岩矿化为特征,可分为4个岩相:角闪橄榄岩、辉石橄榄岩、角闪辉石岩、辉长岩。岩性具有单期岩浆多次脉动上涌成矿特征。岩体m/f值为3.1~4.8,属于铁质超镁铁岩类,且具有低钛、低碱、低Al₂O₃特征,与黄山—镜儿泉镁铁质—超镁铁质杂岩带岩石化学特征相似。由稀土元素配分曲线和微量元素、过渡族元素蛛网图可知1号和2号岩体具有同源性,并具有互补性,预示2号岩体深部成矿潜力很大,虽然其地表辉长岩矿化微弱。根据横穿1号和2号岩体的大地电磁测深剖面图可以看出两个岩体在深部具有同一个岩浆通道,也验证了两岩体属于同一岩浆来源。较低的La/Sm(<2)和Th/Ta值(4.6)表明成矿岩浆为地幔来源,岩体就位时很少受到地壳的混染。

关键词:东天山;图拉尔根Cu-Ni矿;脉动成矿;岩相特征;地球化学;碰撞造山晚期弛张背景

中图分类号:P594.1,P618.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2006)03-0606-12

1 引言

新疆图拉尔根矿区系新疆有色地质勘查局704队在实施国家地质调查项目中,于2001年秋在检查化探异常时发现孔雀石化,2002年开始槽探评价发现的一处岩浆铜镍钴矿床^[1]。中国科学院地质与地球物理研究所承担国家“十五”科技攻关305项目“东天山东段大型铜矿床靶区优选与隐伏矿定位预测”专题,2002年伊始该专题组与新疆有色地质勘查局704队联合开展成矿规律研究与成矿预测,取得了显著进展^①。在构造位置上图拉尔根矿区与土墩、香山、黄山、黄山东、镜儿泉、葫芦等铜镍矿同受康古儿塔格—黄山韧性剪切带控制,具有全岩矿化和小岩体成大矿的特点。成矿方式为深部熔离—贯入型、岩浆就地熔离型和局部的热液叠加成矿,其中深部熔离—贯入型为主要的成矿方式。图拉尔根杂岩体分为1号和2号岩体。1号岩体构成该矿床的主体,含矿性较

好。地表长约740m,宽20~60m,东段(18线~9线)浅,西段(13线~27线)深,全矿区均厚119m;东段延伸:地表至250m以下,西段顶板100~400m,底板400~740m(未完全控制),实际延伸大于310余米。整个杂岩体东缓西陡,产状变化复杂。矿体平均品位Ni 0.5%,Cu 0.30%,Co 0.03%。目前实际控制储量约为:镍12万t,铜8万t,钴0.9万t,规模已到大型。

该矿床位于黄山—镜儿泉镁铁质—超镁铁质杂岩带的北东段,处于吐哈微板块和塔里木板块的结合部位,大地构造演化史比较复杂。有关该镁铁质—超镁铁质杂岩大地构造背景的争论有4种看法:蛇绿岩型^[2~3]、弧后拉张^[4~5]、碰撞造山晚期伸展^[6~9]及俯冲造山阶段^[10~11]。笔者根据图拉尔根镁铁—超镁铁质杂岩体岩石类型特征、成矿元素、主量元素、微量元素和稀土元素的分析,研究了成矿元素的分布规律,部分主量元素与成矿元素的相关性,稀土元素和微量元素对岩浆分异和来源的指示意义,与国内同类矿床进行对比,揭示本矿床

收稿日期:2006-05-08;改回日期:2006-05-11

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-137)与国家“十五”科技攻关新疆305项目(2003BA612A-06-07)资助。

作者简介:孙赫,男,1981年生,硕博连读研究生,研究方向为镁铁质—超镁铁质岩成矿作用;E-mail:sunhe@mail.iggcas.ac.cn。

① 秦克章,等.东天山东段大型铜矿床靶区优选与隐伏矿定位预测.中国科学院地质与地球物理研究所,2005.

的成岩成矿特点以及 1 号、2 号岩体的相互关系,并对其形成的大地构造背景进行了讨论。

2 矿区地质特征

图拉尔根杂岩体的矿区地层(图 1)为中上石炭统(C₂₋₃)的一套细碧角斑质的海相火山碎屑岩建造,岩石动力变质特征明显,挤压片理发育,糜棱岩化强烈,糜棱岩所特有的眼球状构造发育。区域性的黄山—镜儿泉北部韧性剪切带为其北界与下覆地层呈断层接触。黄山—镜儿泉深大断裂以北为中泥盆统大南湖组(D₂d)的一套片理化的粗砂岩、含砾凝灰砂岩等火山沉积建造。该套地层总体与区域性断裂走向一致而呈北东—南西向展布,岩石片理化强烈。

矿区整体位于东天山康古儿塔格—黄山韧性剪切带的东段,该断裂控制东天山大部分镁铁—超镁铁岩体的走向和分布,如土墩、香山、黄山、黄山东、葫芦铜镍矿床,成为东天山岩浆铜镍矿带的导岩导矿构造。

沿 NEE 走向的黄山—镜儿泉北韧性剪切带位于矿区北

部,是平行于康古儿塔格—黄山深大断裂的次级断裂,是控制岩体就位和制约成矿就位空间的储岩储矿构造,产状较陡(124°∠65°)。岩浆侵入以华力西期为主,岩性有花岗闪长岩、斜长花岗岩及由单辉橄岩、角闪橄岩、辉长岩等组成的基性超基性杂岩体。花岗闪长岩在南部呈岩基状产出,斜长花岗岩呈脉状产出。区内基性超基性岩呈脉状透镜状产出,具有带状分布的特点。

3 含矿岩体的基本特征

图拉尔根杂岩体分为 1 号岩体(南部)和 2 号岩体(北部)。2 号岩体位于 1 号岩体西北约 1 km 处,岩性主要为角闪辉长岩,从地表看含矿性较差。1 号岩体为矿床的主体,研究程度较高,含矿性较好。

1 号岩体地表长约 740 m,宽 20~60 m,岩体地表出露面积不足 0.005 km²,东段(18 线~9 线)矿体厚度为 31~88 m,均厚 60 m,西段(13 线~27 线)矿体厚度 96~260 m,均厚 178 m,全矿区均厚 119 m;东段延伸:地表至 250 m 以下,西段顶板

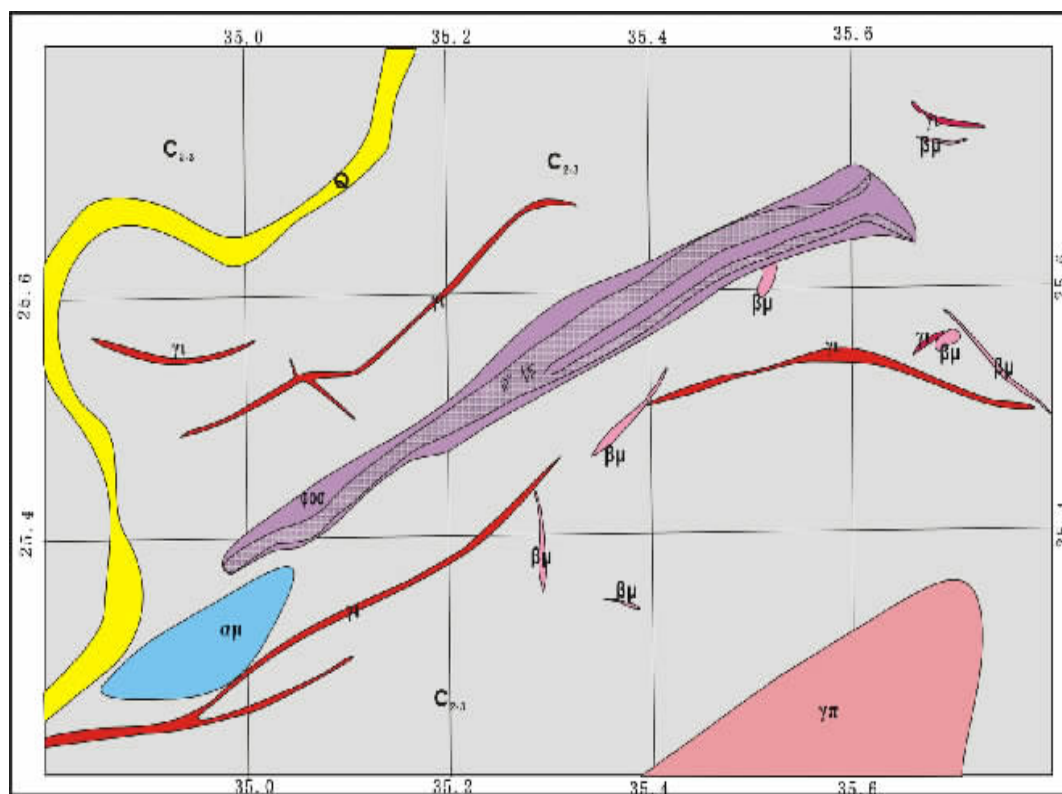


图 1 新疆图拉尔根镁铁质—超镁铁质 1 号杂岩体地质略图(根据新疆有色地质勘查局 704 队地质图改绘)

C₂₋₃—中上石炭统英安质凝灰岩;Q—第四系沉积;γπ—花岗细晶岩脉;γπ—花岗斑岩;αμ—安山玢岩;βμ—闪长玢岩;φφσ—角闪橄岩

Fig. 1 Geological sketch map of the No. 1 mafic-ultramafic complex in Tulargen, Xinjiang (modified after the 704 Geological Party,

Xinjiang Geosurvey Bureau for Nonferrous Metals)

C₂₋₃—Mid-Upper Carboniferous dacitic tuff; Q—Quaternary deposits; γπ—granite—aplite dike;

γπ—granite porphyry; αμ—andesite porphyrite; βμ—diorite porphyrite; φφσ—hornblende peridotite

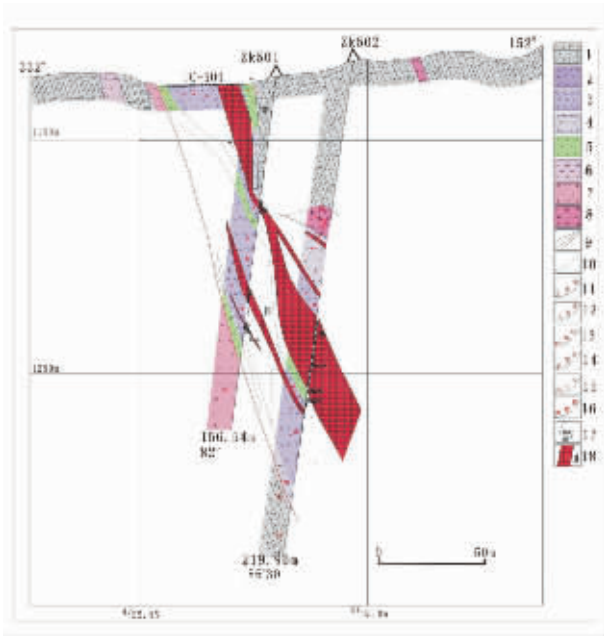


图2 图拉尔根铜镍矿 P-5 线剖面图

(根据新疆有色地质勘查局 704 队剖面图改绘)

- 1—糜棱岩化角砾晶屑凝灰岩;2—角闪紫苏橄榄岩;3—角闪橄榄岩;4—角闪辉石岩;5—辉长岩;6—闪长岩;7—霏细斑岩;8—斜长细晶岩;9—实测推测地质界线断层;10—相变线;11—蛇纹石化;12—黏土化;13—黄铁矿化;14—硅化;15—黄铁绢云母化;16—褐铁矿化;17—地质产状;18—铜镍矿体及编号

Fig. 2 Geological profile P-5 of the Tulargen Cu-Ni-Co deposit (modified after the 704 Geological Party, Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals)

- 1-Mylonitized crystal brecciole;2-Hornblende-hypersthene peridotite; 3-Hornblende peridotite;4- Hornblende pyroxenite; 5-Gabbro;6-Diorite;7-Felsite porphyry;8-Plagioclase aplite; 9-Geological boundary fault, measured and inferred;10-Facies change line;11-Serpentinization;12-Argillization;13-Pyritization; 14-Silicification;15-Pyrite-sericitization;16-Limonitization; 17-Attitude;18-Cu-Ni orebody and number

100~400 m,底板 400~740 m(未完全控制),实际延伸 310 余米,全矿区平均延伸 280 m。岩体向深部延伸较深而且变宽变大,呈巨大透镜体状,属于半隐伏岩体(图 2),西段岩体规模有待于进一步探测。

岩体地表蚀变强烈,主要为蛇纹石化、透闪石化、石棉化、绢云母化、碳酸盐化等,地表见孔雀石化。1 号岩体主要由角闪橄榄岩、角闪辉石岩和橄榄辉石岩组成,局部有辉长岩出露,所有含矿岩相都具有富棕色角闪石特征,反映出洋壳俯冲带入大量含水水源。造岩矿物中,橄榄石以贵橄榄石(Fo)为主,Fo 含量为 82.0%~84.9%。Ni 含量随着橄榄石中的 Fo 值增加而增加,含量为 0.11%~0.18%,这是因为 Ni²⁺与

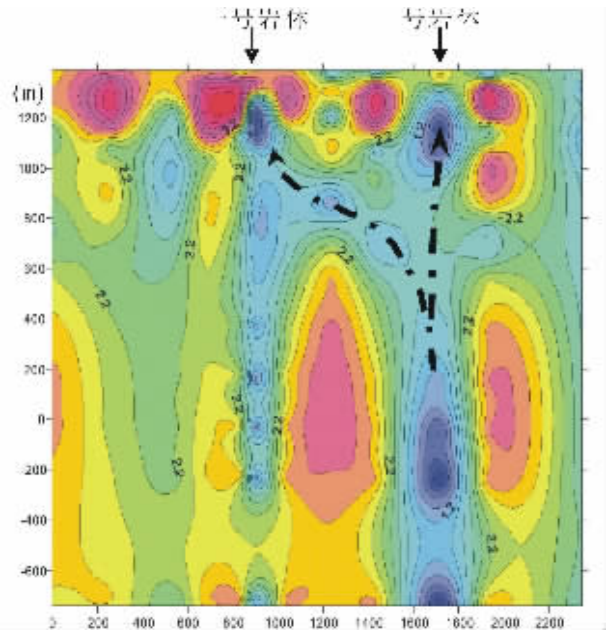


图3 图拉尔根矿区 P-5 线大地电磁测深剖面

Fig. 3 Magnetotelluric (MT) sounding section along line P-5 in the Tulargen Cu-Ni-Co deposit

Mg²⁺完全类质同象,Ni²⁺极易进入 Fo 中替代 Mg²⁺。

岩性从中心向外依次为角闪橄榄岩相、橄辉岩相、角闪辉石相和辉长岩相。这种模式可能反映了岩浆上侵时的脉动特征,即分期涌入式就位。从钻孔岩心来看(图 2),岩相呈渐变过渡,但基性-中性岩相局部出露,1 号岩体基性岩相的缺失可能与构造活动有关,因为 2 号岩体地表主要出露辉长岩相,推测深部可能与 1 号岩体具有同源性和同一构造通道。根据大地电磁测深图像(图 3)可以看出 1 号与 2 号岩体的岩浆通道在深部相连,说明 1 号、2 号岩体具有相同的岩浆起源,1 号岩体中基性岩相的缺失是由于分异后期的基性岩相进入 2 号岩体通道就位形成大量的辉长岩相,进而可以推测,在 2 号岩体深部会出现橄榄岩相等超基性岩相,但无论从 1 号和 2 号岩体的关系还是 1 号岩体岩相过渡关系来看,图拉尔根杂岩体为分期涌入入侵的单式岩体。

矿化类型分为星点状矿化、稀疏浸染状矿化、稠密浸染状矿化、海绵陨铁网状矿化、水滴状、团斑状矿化、细脉状矿化和块状矿化等。块状矿化和海绵陨铁特富矿体主要产在角闪橄榄岩相中,辉石橄榄岩和角闪橄榄岩含矿性次之,为稠密浸染状矿化和稀疏浸染状矿化。块状矿化就位空间不确定,多位于岩体上部,局部位于岩体下部,且矿体具有多层性特征,反映多次贯入成矿特征。铜矿化具有脉状构造,反映岩浆期后热液叠加作用的特征。就矿化机制来看,以深部熔离-贯入成矿作用为主,兼就地熔离成矿作用和岩浆期后热液叠加成矿作用,因此构成了本矿区成矿的主要特征。

表 1 图拉尔根 1 号和 2 号岩体成矿元素含量 (10^{-6})
Table 1 Contents of ore-forming elements (10^{-6}) in the Tulargen Nos. 1 and 2 intrusions

样号	岩性	Co	Ni	Cu
4TTW-1	辉长岩	34.76	3.87	53.20
4TTW-5	辉长岩	26.22	3.53	48.87
4TTW-4	辉长岩	46.80	21.05	92.78
T801-26	橄榄辉石岩	127.74	927.47	487.71
T801-95	角闪橄榄岩	66.78	582.54	69.28
T502-81	角闪橄榄岩	76.32	1600.22	422.56
T502-16	辉石橄榄岩	109.68	816.99	173.85
T502-18	橄辉岩	112.49	925.56	211.99
T502-19	辉石角闪橄榄岩	66.072	411.12	32.11
T1201-34	角闪橄榄岩	158.47	1718.70	634.30
T1201-64	辉石橄榄岩	222.26	3245.95	2493.49
T1201-80	辉石橄榄岩	145.73	1919.83	1213.08

4 矿石矿物及成矿元素特征

矿石矿物为磁黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿、紫硫镍矿和辉砷钴矿。矿石中主要成矿元素为 Cu、Ni 和少量的 Co。Ni 主要以镍黄铁矿和紫硫镍矿的单矿物形式存在,少量以类质同象替代的形式赋存于磁黄铁矿中。Cu 主要以黄铜矿单矿物形式存在。一部分 Co 以辉砷钴矿形式存在,另一部分以类质同象的形式赋存于镍黄铁矿、紫硫镍矿和磁黄铁矿中。镍黄铁矿呈微细的包裹物被包含于磁黄铁矿的晶粒中,极少量粒度可达 $100\ \mu\text{m}$,且与后者形成定向的连生。除上述外,还可观察到镍黄铁矿大量交代磁黄铁矿的现象,表明形成晚于磁黄铁矿,由此看出本矿床中众多的微细镍黄铁矿是早先结晶磁黄铁矿的出熔产物。

根据岩体中成矿元素含量(表 1),2 号岩体取样全部为辉长岩,成矿元素含量极低,因为 1 号和 2 号岩体同属于一期岩浆演化产物,说明 Ni、Cu 等成矿元素在岩浆演化早期进入橄榄岩等超镁铁岩相,含量随着基性程度的降低而降低。1 号岩体全岩矿化, Ni/Cu 比值为 1.3~12.8,平均值为 4.6,以 Ni 矿化为主。Co 和 Ni 的相关系数为 0.92,呈很好的正相关关系。在镍黄铁矿和磁黄铁矿等矿物结晶时,Co 以正二价离子进入早期结晶矿物晶胞替代 Fe、Ni 离子。从表 1 可以看出,成矿元素的含量主要与岩性有关而与深度关系不大。

5 岩石化学特征

图拉尔根 1 号岩体(表 2)SiO₂ 含量总体较低(36.58%~45.82%),平均含量为 42%。具有低碱(0.2%~3.8%)和低 Ti 含量特征,TiO₂ 最高含量为 0.76%,平均值为 0.52%。Al₂O₃ 含量很低,平均含量为 8.7%。K₂O 和 CaO 含量很低,分别为

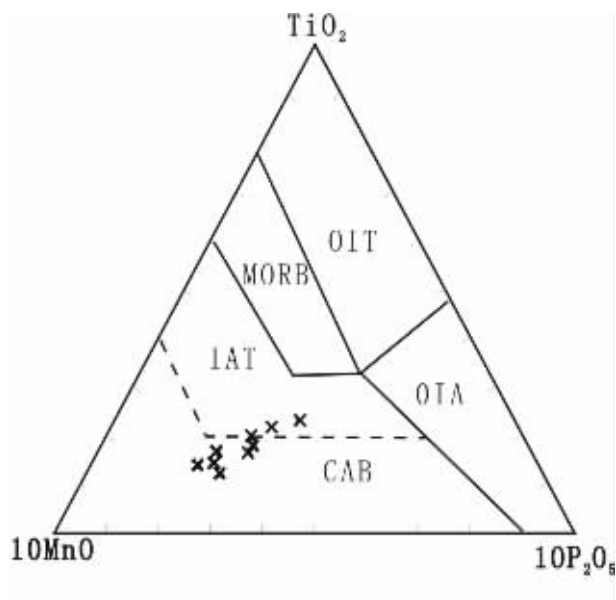


图 4 图拉尔根 1 号岩体 TiO₂-10P₂O₅-10MnO 图
OIT—大洋岛屿拉斑玄武岩; OIA—大洋岛屿碱性玄武岩;
MORB—洋中脊玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩;
CAB—钙碱性玄武岩

Fig. 4 TiO₂-10P₂O₅-10MnO diagram
of the Tulargen No.1 intrusion

OIT—oceanic island tholeiite basalt; OIA—oceanic island alkali-basalt;
MORB—mid-oceanic ridge basalt; IAT— island arc tholeiite basalt;
CAB—calc-alkaline basalt

0.13%~1.52%和 1.82%~5.82%,平均值分别为 0.59%和 3.8%,具低钾、贫钙特征。MgO 含量为 17.5%~29.9%,Mg# 为 69~81,平均值为 76.7,m/f 比值 3.1~4.8,平均值为 3.9,属于铁质超基性岩类(铁质超基性岩 m/f>6.5;铁质超基性岩 m/f=2~6.5;富铁质超基性岩 m/f=0.5~2;铁质基性岩 m/f=0.5~2;富铁质基性岩 m/f<0.5^[2])。与同处于黄山镜儿泉镁铁-超镁铁质杂岩带上分布的同类岩浆铜镍矿对比,黄山岩体从角闪橄榄岩→橄辉岩→苏长岩→闪长岩,K₂O 含量为 0.23%~0.59%,TiO₂ 含量为 0.06%~0.82%,含量随着基性程度的降低而升高;同样葫芦岩体表现出与图拉尔根岩体更为相似的岩石化学特征,超镁铁岩相(角闪橄榄岩)含 Al₂O₃ 和 CaO 分别为 3.1%~6.9%和 1.8%~4.7%,TiO₂ 为 0.14%~0.26%,顾连兴等^[4]将这一岩带分布的镁铁-超镁铁岩归类为东疆型镁铁超镁铁杂岩。从岩石化学成分上来看,本杂岩体与东疆型杂岩体十分相似。

由于镁铁-超镁铁岩的 SiO₂ 含量较低,不宜用 AFM 图解确定岩石的构造产出环境,而利用 TiO₂-10P₂O₅-10MnO 三项氧化物投图可以判别其大致构造环境(图 4)。样品大部分落于钙碱性玄武岩区内,少数落在岛弧拉斑玄武岩区域,表明图拉尔根杂岩体是闭合板块边缘岩浆演化的产

表 2 图拉尔根 1 号岩体岩石化学组成(%)

Table 2 Petrochemical composition (%) of the Tulargen No.1 intrusion

	T801-26m	T801-95m	T502-191m	T502-180m	T502-163m	T502-81m	T1201-64m	T1201-34m	T1201-80m
	橄榄辉石岩	角闪橄榄岩	辉石角闪橄榄岩	橄辉岩	辉石橄榄岩	角闪橄榄岩	辉石橄榄岩	角闪橄榄岩	辉石橄榄岩
SiO ₂	43.31	45.01	45.82	43.09	41.49	43.01	36.58	38.63	41.44
TiO ₂	0.62	0.65	0.75	0.42	0.31	0.76	0.32	0.35	0.49
Al ₂ O ₃	9.39	10.78	11.65	7.63	7.33	11.01	6.18	5.54	8.69
TFe ₂ O ₃	12.33	10.48	9.79	11.95	11.61	14.3	16.92	13.57	13.57
MnO	0.17	0.2	0.17	0.16	0.17	0.14	0.16	0.16	0.17
MgO	21.54	19.47	17.57	27.03	28.34	17.49	28.15	29.89	23.52
CaO	4.54	5.25	5.82	3.84	3.08	4.13	1.82	1.85	4.08
Na ₂ O	0.9	2.54	3.42	2.35	1.32	1.64	0.06	0.16	0.36
K ₂ O	1.52	1.26	0.4	0.33	0.34	0.85	0.13	0.3	0.18
P ₂ O ₅	0.09	0.11	0.11	0.06	0.07	0.12	0.05	0.06	0.09
LOI	5.16	4.4	4.53	3.15	6.03	6.62	9.14	9.24	6.61
TOTAL	99.57	100.15	100.03	100.01	100.09	100.07	99.51	99.75	99.2
Ni (10 ⁻⁶)	582.54	927.47	411.12	925.57	816.99	1600.22	3245.95	1718.70	1919.83
Mg#	75.87	76.98	76.36	80.28	81.46	68.77	74.97	79.86	75.73
m/f	3.44	3.91	3.47	4.57	4.83	2.98	4.33	4.82	3.12
M. F	222.60	175.15	153.64	238.23	211.51	239.78	302.64	264.43	248.69
M/F	4.21	4.19	3.92	5.54	7.25	2.72	5.62	7.03	4.67

注: Mg# = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺); m/f = (Mg²⁺ + Ni²⁺) / (Fe²⁺ + Fe³⁺ + Mn²⁺) (据吴利仁^[12])。

物,具有偏向钙碱性岩浆演化趋势。

在超镁铁-镁铁杂岩岩浆分异时, Ni 和 Mg 往往以类质同象的形式进入硅酸盐矿物结晶相,因此 Mg 含量的高低通常可以指示熔体中成矿元素 Ni 含量的高低。根据 D.R. Haughton 等的实验,镁铁质熔浆中亚铁含量是控制硫溶解度的主要成分,因此常量元素铁的含量高低,一般可表示熔体溶解携带矿化元素 S 的能力大小,而溶度积 [Ni²⁺] · [S²⁻] 的大小关系到形成 NiS 组分的能力大小。考虑到 Ni 与 Mg, S 与 Fe 的关系,用镁铁积来表征岩浆形成硫化镍组分的能力,镁铁积用来表示, M.F 指岩石中 Si、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K 7 种元素的原子总数换算为 100 时, Mg 原子数和 Fe 原子数百分比的乘积。根据含矿样品中 Ni 含量和镁铁积作出的协合曲线(图 5) 显示出 M.F 与岩石中镍矿化程度有极好的正相关性,一方面说明岩浆深部分异程度越彻底,还原性越强,氧逸度越低,就越有利于 Ni 元素的富集;另一方面也预示了有些基性程度偏低的镁铁质岩石具有较高成矿潜力的可能性,如喀拉通克岩体赋矿岩性为苏长岩、橄榄苏长岩类,含有较高的 FeO (9%~13%) 往往代表了低的氧逸度环境,表明高的 FeO 含量有利于铜镍硫化物的富集。

6 稀土元素与微量元素地球化学特征

根据图拉尔根岩体样品的稀土元素分析(表 3), 利用球

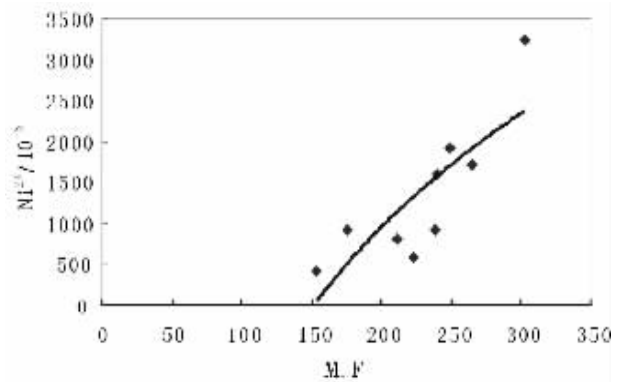


图 5 图拉尔根 1 号含矿岩体 M.F-Ni 图解

Fig. 5 M.F-Ni diagram of the Tulargen No.1 mineralized intrusion

粒陨石标准化作出稀土元素配分曲线(图 6)。图拉尔根两个岩体的稀土配分形式相差不大,具有同源特征,相对 1 号岩体, 2 号岩体稀土总量略高。1 号岩体样品轻稀土元素富集, (La/Yb)_N 为 2.9~27.5, 平均值为 6.5, 与国内同类矿床相比, 金川该比值为 5.30, 红旗岭 1 号为 2.60, 黄山东为 1~2, 喀拉通克为 6.3~8.5, 力马河为 11.0^[13], 可以看出图拉尔根与金川和喀拉通克岩体的 (La/Yb)_N 相似, 表现出岩浆充分分异的特征。

表 3 图拉尔根杂岩体稀土元素组成 (10^{-6})
Table 3 REE (10^{-6}) composition of the Tulargen complex

注:由中国科学院地质与地球物理研究所微量元素分析实验室分析;Eu=2Eu_N/(Sm+Gd)_N。

表 4 图拉尔根岩体微量元素组成 (10^{-6})
Table 4 Trace element (ppm) composition of the Tulargen complex

注: 由中国科学院地质与地球物理研究所微量元素分析实验室分析; $s_{\text{r}^*} = 2 \text{ Sr} / (\text{Ce} + \text{Nd})_{\text{N}_0}$ 。

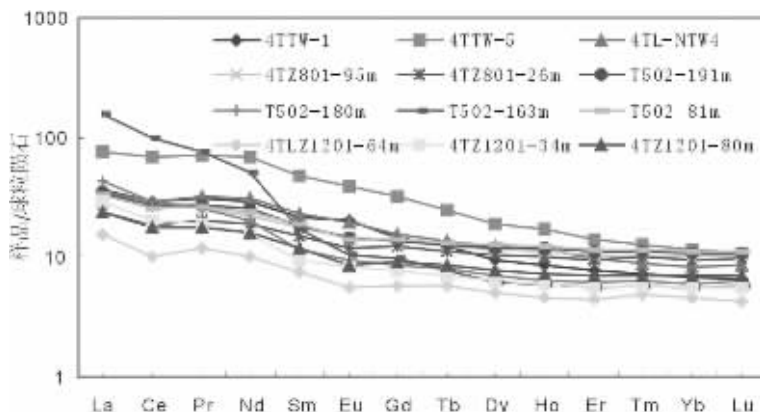


图 6 图拉尔根杂岩体稀土元素配分曲线
(样品号名称与表 3 相同)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns for the Tulargen complexes
(the sample symbols same as those in the Table 3)

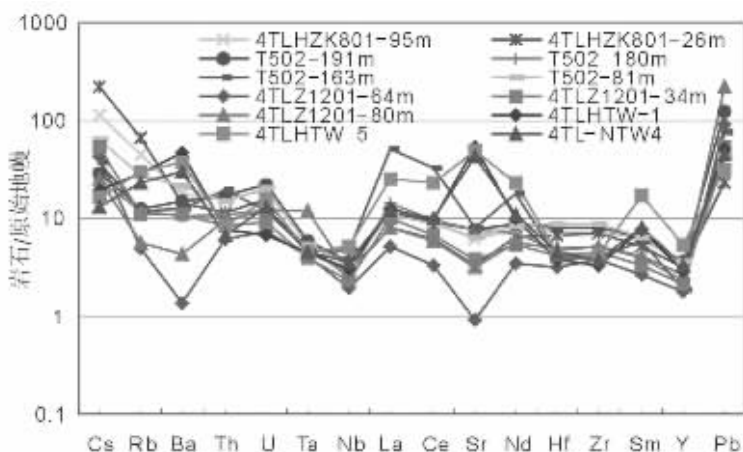


图 7 图拉尔根杂岩体微量元素蛛网图解(原始地幔数据 McDonough, 1989, 样品号名称与表 4 相同)

Fig. 7 Trace element spidergram for the Tulargen complex (primitive mantle data from McDonough,
the sample symbols same as those in the Table 4)

表 5 图拉尔根岩体与各类玄武岩和喀拉通克岩体微量元素对比

Table 5 Comparison of trace elements between the Tulargen intrusion and various types
of basalt and Kalatongke intrusion

	大陆裂谷拉斑玄武岩	洋脊拉斑玄武岩	岛弧拉斑玄武岩	岛弧钙碱玄武岩	喀拉通克 2 号岩体	图拉尔根 1 号岩体
TiO ₂ /10 ⁻²	1.5 ~ 3.2	0.75 ~ 2.23	0.54 ~ 0.99	0.7	0.21 ~ 0.94	0.32 ~ 0.76
K ₂ O/10 ⁻²	0.66	0.14	0.4	1.06	0.81 ~ 3.28	0.13 ~ 1.52
Na ₂ O/K ₂ O	3 ~ 6	10 ~ 15	4 ~ 6	2	1.26 ~ 2.01	0.12 ~ 2.17
Rb/10 ⁻⁶	31	0.2 ~ 5.0	3 ~ 10	14	10 ~ 40	3.1 ~ 42
Sr/10 ⁻⁶	350	70 ~ 150	100 ~ 200	550	57 ~ 150	19 ~ 165
K/Rb	176	1000	1000	400 ~ 500	415 ~ 731	297 ~ 510
(La/Yb) _N	10	1 ~ 2	1 ~ 2	6 ~ 8	6.51 ~ 8.51	平均 6.55
资料来源	Condie ^[14]	涂光炽等 ^[23]		Perfit et ^[26]	冉红彦 ^[13]	本文

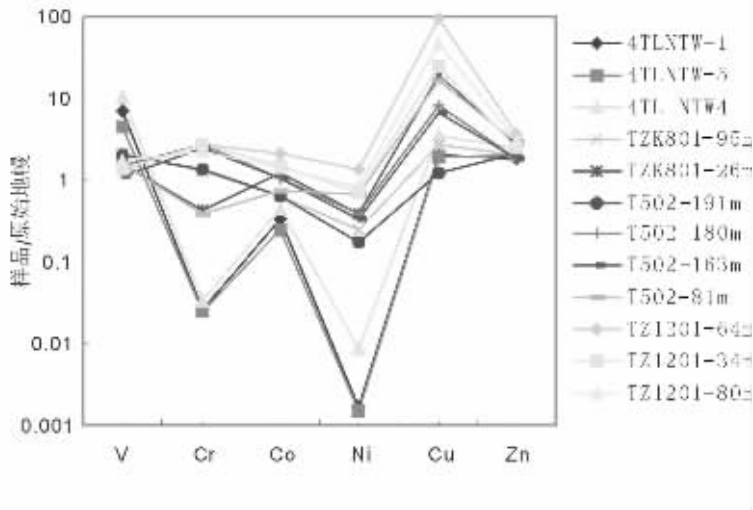


图8 图拉尔根杂岩体原始地幔标准化(Bougault, 1974)过渡元素蛛网图
(样品符号名称与表4相同)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized spidergram for transitional elements of the Tulargen complex
(after Bougault, 1974, the sample symbols same as those in the Table 4)

LREE/HREE 为 3.5~20.7, 平均值为 6.0, Eu 负异常不明显, 为 0.8~1.0, 由于 Eu 往往在岩浆演化早期易替代 Ca^{2+} 进入斜长石导致亏损, 所以 Eu 的配分形式可能预示着斜长石未在岩浆演化早期结晶出来。

从图7可见, 图拉尔根1号岩体和2号岩体的微量元素(表4)分配形式基本上成互补形状, 考虑到1号岩体岩相系列的缺失, 2号岩体很可能是1号岩体演化后期的演化岩相, 深部具有共同的岩浆通道, 这也与大地电磁测深图像(图3)的指示意义相互验证, 这一点前面已有叙述。1号岩体 Sr^* 平均值为 0.62, 表现为岩浆演化过程中长石类矿物很少结晶, 2号岩体 Sr^* 平均值为 3.95, 较1号岩体 Sr 明显富集, 表明岩浆演化晚期斜长石开始结晶。Ba 较1号岩体富集, 反应了 LILE 在岩浆演化晚期富集。Th/Ta 平均值为 4.6, 与原始地幔的 Th/Ta 值 2.2^[14] 相比, Th 轻微富集, 表明岩体在就位的过程中很少受到地壳混染, 与地幔 Th/Ta 比值相接近。通常认为高 La/Sm (>4.5) 值指示了地壳物质的混染^[15], 由表4可知, 绝大部分样品的 La/Sm 小于 2, 也说明在成矿过程中很少受到地壳物质的混染。

微量元素含量及分布形式受控于岩浆体系, 不同的构造环境又发育不同的岩浆体系, 因此笔者通过对比讨论岩体就位的构造环境, 比如洋中脊拉斑玄武岩以亏损大离子亲石元素、富 LREE 为特征; 岛弧拉斑玄武岩以低钾低钛、平坦型稀土配分为特征; 而岛弧钙碱玄武岩则具有高钾低钛、高 Sr 含量、富 LREE、亏损高场强元素的特征^[15]。从图7可以看出本区岩体具有 Nb、Ta 相对于 Th、La 亏损, 这归结为有来自消减带物质的加入^[16]。从表5可以看出图拉尔根含矿岩体产出环境与喀拉通克、岛弧钙碱玄武岩相似, 具有类似岛弧钙碱

表6 图拉尔根 PGE (10^{-9}) 含量

Table 6 PGE content (10^{-9}) of mafic-ultramafic rocks in the Tulargen Cu-Ni-Co deposit

样品名称	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Pd/Ir	Σ PGE
矿化角闪橄榄岩	0.04	0.11	0.31	1.48	2.07	48.56	4.02
致密块状辉石橄榄岩 (有硫化物)	0.13	0.08	0.26	1.21	1.60	12.60	3.27
透闪石化辉石橄榄岩	0.15	0.06	0.15	0.61	0.97	6.44	1.94

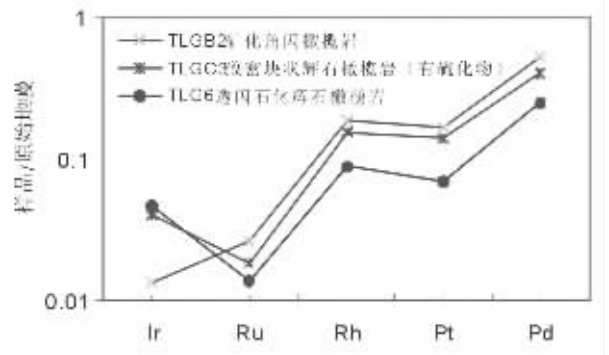


图9 图拉尔根铂族元素原始地幔标准化图解

Fig. 9 Primitive mantle-normalized PGE patterns for mafic-ultramafic rocks in the Tulargen Cu-Ni-Co deposit

玄武岩属性。

考虑到过渡族元素在岩浆中的亲和性质不同, 2号岩体以辉长岩为主, 相容元素明显亏损, 不相容元素相对富集, 而超镁铁质岩为主的1号岩体相容元素富集, 不相容元素亏

损。在岩浆结晶分异早期过渡族元素的 Cr、Ni、Co 更趋于富集在早期结晶相,如橄榄石相,不相容元素 V 相对富集于熔体相,从而造成曲线配分形式的互补性(图 8),也说明 1 号和 2 号岩体的同源特征。

7 铂族元素特征

从表 6 可以看出,含矿岩体的铂族元素含量总和较低,Pt、Pd 相对富集。根据图 9 铂族元素呈现左倾配分形式,这与 Ir 在地幔部分熔融期间趋于相容,而 Pd 组趋于不相容有关,说明岩浆深部演化比较充分。在俯冲带往往显示右倾模式^[7],这是因为流体相会造成 Pt、Pd 等相对易搬运的 PGE 元素迁移造。本区 PGE 分布的左倾形式表明本区岩体不是在大洋俯冲阶段形成。

8 结论与讨论

综上所述,图拉尔根 1 号岩体具有低钙、低钛、低碱和低镁特征。岩体规模小,全岩矿化,品位较高,主要成矿机制为脉动式深部熔离贯入成矿兼就地熔离成矿和局部热液叠加成矿。岩体向深部延伸较深,且在深部膨大,具有很好的找矿前景。

图拉尔根发育的两个岩体虽然岩相与含矿性不同,但具有相似的稀土元素配分模式,表明两个岩体具有相同的岩浆源区和通道,从大地电磁测深图像上可以得到印证。微量元素和过渡族元素配分形式的互补特征可以解释含矿岩体岩相的不完整,并从另一角度说明岩浆分异极其充分的特点。通过前述分析表明图拉尔根岩体的侵位很少受到来自壳源的混染,且具有类似岛弧钙碱性岩浆演化特点。

在区域位置上本区位于黄山—镜儿泉杂岩带的东段,对这一杂岩带的成因认识一直在争论。早期学者认为黄山—镜儿泉杂岩带为蛇绿岩带,是洋壳消减俯冲的标志^[8]。顾连兴等^[9]将此岩带命名为东疆型镁铁—超镁铁岩,此岩带在北侧大洋向南俯冲过程中,在弧后盆地拉张环境下侵位,并认为弧后盆地在中石炭世末至晚石炭世初闭合,黄山—镜儿泉杂岩带侵位在弧后盆地闭合之前,在大洋俯冲阶段形成。朱文斌等^[10]的观点与顾连兴等^[9]的观点相似,根据双峰式火山岩、沉积特征和断裂特征认为是此杂岩带为早石炭—中石炭世弧后伸展的产物,但未形成真正的洋壳,后因弧后盆地的闭合造成现在的混染岩带。白云来^[11]认为此杂岩带为蛇绿岩型,形成于有限洋壳环境,时代为泥盆纪或更早,在石炭纪吐哈板块和中天山基底碰撞活动中就位。秦克章等^[6-7]将东天山显生宙以来的大地构造演化划分为洋壳扩张、俯冲岛弧、弧后盆地、碰撞造山和造山后伸展 5 个阶段,厘定黄山—香山镁铁岩带为早二叠世造山期后伸展环境下地幔上侵产物。韩宝福等^[12]认为黄山—镜儿泉镁铁质—超镁铁质杂岩带与碰撞造山后期地幔岩石圈的拆沉有关。吴华等^[13]认为东天山地区在石炭纪晚期的碰撞造山之后,在晚石炭世—早二叠世的后碰撞伸展阶段发生

后碰撞幔源岩浆上侵。毛其贵等^[14]推断白石泉岩体形成于岛弧或活动陆缘环境,是在洋壳俯冲过程中通过断裂通道上侵,进而推断古亚洲洋在早二叠世仍存在俯冲,但区域岩浆作用与沉积记录并不支持该阶段仍存在俯冲作用。笔者认为图拉尔根杂岩体形成于岛弧—弧后盆地碰撞造山晚期的弛张伸展环境。众所周知,钙碱性火成岩组合发育于挤压造山带(岛弧、活动大陆边缘、陆陆碰撞带及陆内碰撞造山带)^[15],结合沿黄山—镜儿泉杂岩带分布的同类型矿床的定年,香山岩体的形成时代(285±1.2) Ma^[6],黄山东 Re—Os 等时线年龄为(282±20)Ma^[23],陈世平等^[19]测得新疆葫芦铜镍矿床的 Re—Os 等时线年龄为(283±13)Ma,黄山东岩体黑云母橄榄苏长岩的 SHRIMP 锆石 U—Pb 年龄为(274±3)Ma^[8],显示在早二叠世有一次大规模的幔源岩浆侵入,在这一时期,大洋俯冲已经停止,而转为碰撞造山晚期的弛张伸展阶段,岩体系岩石圈地幔拆沉,地幔部分熔融上涌,在松弛减薄的地壳深部侵位。由于碰撞造山作用,早期俯冲岩片拆沉进入地幔源区熔融,形成类似于岛弧的钙碱性岩浆,岩浆源区可能继承了岛弧钙碱性岩浆演化趋势。

结合前述的岩石化学和地球化学分析,图拉尔根杂岩体类似于顾连兴等^[9]所定义的东疆型镁铁—超镁铁岩,但本区岩体具有钙碱玄武岩岩浆演化趋势,区别于弧后拉张环境下的东疆型镁铁—超镁铁岩,后者具有拉斑玄武岩特征。毛其贵等^[14]将黄山—镜儿泉镁铁—超镁铁质杂岩带归类为产于岛弧或活动陆缘的阿拉斯加型。阿拉斯加型镁铁岩主要是拉斑质的,部分是碱性的,地球化学特征以富 Fe 质最为明显,具有堆晶结构,没有具变质组构的橄榄岩。主要产出含钛磁铁矿,极少产出岩浆铜镍硫化物矿床^[21]。与之相对比,黄山—镜儿泉杂岩体带显示出钙碱性而非拉斑性岩浆演化趋势^[5,9],研究显示图拉尔根杂岩体同样显示钙碱性岩浆演化趋势,且具有低 Al 特征,这也与阿拉斯加型岩体特征不符,从另一个方面也说明了黄山—镜儿泉杂岩带并非产于俯冲阶段的岛弧环境,而是形成于造山晚期的弛张伸展阶段,地幔部分熔融上涌,在地壳松弛薄弱部位上侵深部熔离成矿。

致谢:感谢新疆有色地质勘查局 704 队康峰工程师等对野外工作的大力支持。

参考文献(Reference):

- [1] 三金柱,田斌,雷军文,等.新疆东天山新发现图拉尔根全岩矿化岩浆铜镍矿床[J].矿床地质,2003,(3):270.
San Jinzhu, Tian Bin, Lei Junwen, et al. The discovery of magmatic Cu—Ni deposit of Tulargen with whole—rock mineralization at eastern Tianshan, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2003, (3): 270 (in Chinese).
- [2] 闫文元.天山东段早石炭世岛弧型火山岩特征及其矿产[J].新疆地质, 1985, 3 (2): 49-58.
Yan Wenyuan. Characteristics of island arc type volcanics of Early—Middle Carboniferous and their mineral resources in the eastern

- Tianshan [J]. *Xinjiang Geology*, 1985, 3 (2):49~58(in Chinese with English abstract).
- [3] 白云来. 新疆哈密黄山—镜儿泉镍铜成矿系统的地质构造背景[J]. *甘肃地质学报*, 2000, 9(2):426~433.
- Bai Yunlai. Geotectonic settings of Huangshan—Jing'erquan nickel-copper metallogenic system in Hami, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Gansu*, 1997, 9(2):426~433(in Chinese with English abstract).
- [4] 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 等. 造山带环境中的东疆型镁铁—超镁铁杂岩. *岩石学报*, 1994, 10(4):339~356.
- Gu Lianxing, Chu Jianlin, Guo Jichun, et al. The east Xinjiang-type mafic-ultramafic complexes in orogenic environments [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10 (4):339~356 (in Chinese with English abstract).
- [5] 朱文斌, 马瑞士, 王赐银. 论新疆东部黄山—镜儿泉杂岩带的构造属性[J]. *地质科学*, 1996, 31(1):22~32.
- Zhu Wenbin, Ma Ruishi, Wang Ciyin. Tectonic attribute of Huangshan—Jing'erquan complex in eastern Xinjiang, China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1996, 31 (1):22~32. (in Chinese with English abstract).
- [6] 秦克章, 方同辉, 王书来, 等. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. *新疆地质*, 2002, 20(4):302~308.
- Qin Kezhang, Fang Tonghui, Wang Shulai, et al. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan mountains, NW-China [J]. *Xinjiang Geology*, 2002, 20(4):302~308 (in Chinese with English abstract).
- [7] Qin K, Zhang L, Xiao W, et al. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, Northwestern China [A]. In: Mao, Goldfarb, Seltman (eds.). *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan* (London), 2003, 227~249.
- [8] 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 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* 2004, 49(2):2324~2328.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, et al. SHRIMP zircon U—Pb ages of Kalatongke No.1 and Huangshandong Cu—Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, north Xinjiang, and geological implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(22):2424~2429
- [9] 吴华, 李华芹, 莫新华, 等. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性—超基性岩的形成时代及其地质意义[J]. *地质学报*, 2005, 79(4):498~502.
- Wu Hua, Li Huaqin, Mo Xinhua, et al. Age of the Baishiquan mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79 (4):498~502 (in Chinese with English abstract).
- [10] Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implication for the continental growth of central Asia [J]. *American Journal of Science*, 2004, 304:370~395.
- [11] 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性—超基性岩体锆石 U—Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1):153~162.
- Mao Qigui, Xiao Wenjiao, Han Chunming, et al. Zircon U—Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan, Xinjiang: constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1):153~162 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吴利仁. 论中国基性、超基性岩成矿专属性[J]. *地质科学*, 1963, 1:29~41.
- Wu Liren. Mineralization specificity for mafic-ultramafic rocks in China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1963, 1:29~41 (in Chinese).
- [13] 冉红彦, 肖森宏. 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*, 1994, 23(4):392~401.
- Ran Hongyan, Xiao Senhong. Trace element abundances and tectonic environment of the host Intrusion of Kalatongke Cu—Ni deposit [J]. *Geochimica*, 1994, 23(4):392~401 (in Chinese with English abstract).
- [14] Condie XC. Plate tectonic and crustal evolution [M]. New York: Pergamon Press, 1982.
- [15] Lassiter J C, Depaolo D J. Plume/Lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: chemical and isotope constraints [A]. Mahoney J. *Large Igneous Provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism. geophysical monography, American Geophysical Union*, 1997, 335~355.
- [16] 张旗, 钱青, 王焰. 造山带火成岩地球化学研究 [J]. *地质前缘*, 1999, 6 (3):113~120.
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Yan. Geochemical study on igneous rocks of orogenic Belts [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(3):113~120 (in Chinese with English abstract).
- [17] Naldrett AJ, Hoffman EL, Green AH, et al. The composition of Ni—sulfide ores, with particular reference to their content of PGE and Au [J]. *Canadian Mineralogist*, 1979, 17:403~415.
- [18] 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等. 火成岩构造组合与壳幔成矿系统 [J]. *地质前缘*, 1999, 2:259~270.
- Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, et al. Igneous petro-tectonic assemblage and crust—mantle metallogenic system [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 2:259~270 (in Chinese with English abstract).
- [19] 陈世平, 王登红, 屈文俊, 等. 新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿时代 [J]. *新疆地质*, 2005, 23(3):230~233.
- Chen Shiping, Wang Denghong, Qu Wenjun, et al. Geological features and ore formation of the Hulu Cu—Ni sulfide deposit, eastern Tianshan, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 2005, 23(3):230~233 (in Chinese with English abstract).
- [20] Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, et al. Major types, characteristics and geodynamic mechanism of upper Paleozoic copper deposits in northern Xinjiang, northwestern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 28(3):308~328.
- [21] 张旗, 张魁武, 李达周. 横断山区镁铁—超镁铁岩 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- Zhang Qi, Zhang Kuiwu, Li Dazhou. Mafic-ultramafic rocks in Hengduan mountains Region [M]. Beijing: Science Press, 1992. 131~

- 161(in Chinese with English abstract).
- [22] 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 等. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义[J]. 矿床地质, 2002, 21(4): 323~330.
- Mao Jingwen, Yang Jianmin, Qu Wenjun, et al. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(4): 323~330(in Chinese with English abstract).
- [23] 涂光炽, 欧阳自远, 朱炳泉. 地球化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 208~265.
- Tu Guangchi, Ouyang Ziyuan, Zhu Bingquan. Geochemistry[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984. 208~265(in Chinese with English abstract).
- [24] Perfit M R. Chemical characteristics of island arc basalts: implications for mantle sources[J]. Chem Geol, 1980, 30: 256~277.

Petrographic and geochemical characteristics of the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide Deposit, East Tianshan, Xinjiang, and its tectonic setting

SUN He^{1,2}, QIN Ke-zhang¹, LI Jin-xiang^{1,2}, XU Xing-wang¹,
SAN Jin-zhu³, DING Kui-shou¹, HUI Wei-dong³

- (1. Key Lab of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. 704 Geological Party, Xinjiang Geoexploration for Nonferrous Metals, Hami 839000, Xinjiang, China)

Abstract: The Tulargen Cu-Ni-Co deposit, lying in the northeastern segment of the Kangurtag-Huangshan ductile shear zone, is a semi-hidden deposit formed mainly by deep-level liquation of sulfide, combined with in-situ liquation and hydrothermal superimposition. Intrusion No.1 is characterized by whole-rock mineralization and can be divided into four rock facies: hornblende peridotite, pyroxene peridotite, hornblende pyroxenite and gabbro. The rocks show the features of repeated pulsatory magmatic upwelling and ore formation in a single phase. The m/f ratio of the intrusion varies from 3.1 to 4.8, falling into the range of ferrous-ultramafic rocks. The intrusion is featured by low Ti, low total alkalis and low Al₂O₃, similar to the petrochemical characteristics of the Huangshan-Jing'erquan mafic-ultramafic complex. The REE distribution patterns and trace element and transition element spidergrams indicate that the No.1 and No.2 mafic-ultramafic intrusions in the Tulargen ore district are comagmatic and supplementary, implying that the deep part of the No.2 intrusion has a great ore potential though gabbro of the No.2 intrusion shows weak mineralization at the surface. According to the MT section across both the No.1 and No.2 intrusions, it is clear that they share only one magma conduit at depth and originated from the same magma source. Lower La/Sm (<2) and Th/Ta (4.6) ratios suggest a mantle origin of the ore magma and little contamination with crustal material during the emplacement of the intrusion.

Key words: East Tianshan; Tulargen Cu-Ni-Co deposit; pulsating mineralization; Petrography; geochemistry; extensional setting at the late stage of collisional orogeny

About the first author: SUN He, male, born in 1981, doctoral candidate of economic geology, engages in the study of mafic-ultramafic metallogeny; E-mail: sunhe@mail.jggcas.ac.cn.