

文章编号 1258-7106 (2007) 01-0098-12

东天山镁铁质-超镁铁质岩带岩石特征 及铜镍成矿作用*

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

(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, 北京 100039; 3 新疆有色地勘局 704 队, 新疆 哈密 839000)

摘 要 东天山地区分布有众多镁铁质-超镁铁质岩体, 岩体成群成带状分布, 从北向南可划分为 7 个区带, 受区域性韧性剪切带和断裂构造控制。从岩相学来看, 本区含矿岩体可分为多期次侵入的复式杂岩体和单期次侵入的超镁铁质单式杂岩体, 显示出深源岩浆充分分异的特征。含矿岩体具有高镁、低碱、低钙、低铝、低钛特征, 具有较高的 $Mg^\#$ 、 m/f 和 m/s 比值, 兼具岩浆硫化物熔离作用与岩浆结晶分异作用。根据 TiO_2 - $10P_2O_5$ - $10MnO$ 图判别出本区岩浆具有拉斑玄武岩到钙碱玄武岩过渡的性质, 岩浆源具有钙碱性玄武岩浆特征, 富含含水矿物, 预示了早期俯冲洋壳对幔源岩浆的交代作用。岩体矿化分为 3 种成矿作用和 5 期成矿步骤, 且岩浆成矿作用与热液作用几乎同时进行, 岩浆分异作用提供热液来源, 而热液作用促进硫化物的饱和与熔离, 造成岩石的热液蚀变结构并对岩浆期成矿进行改造。晚期岩体隆升后, 矿体出露地表遭受氧化淋滤作用, 形成特有的地表氧化带找矿标志。

关键词: 地质学 岩石化学 岩相学 岩浆铜镍矿 镁铁质-超镁铁质岩带 东天山

中图分类号: P618.41 P618.63

文献标识码: A

Petrological characteristics and copper-nickel ore-forming processes of Early Permian mafic-ultramafic intrusion belts in East Tianshan

SUN He^{1,2}, QIN KeZhang¹, XU XingWang¹, LI JinXiang^{1,2}, DING KuiShou¹, XU YingXia^{1,2} and SAN JinZhu^{1,3}

(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 No. 704 Geological Party, Xinjiang Bureau of Ge exploration for Nonferrous Metals, Hami 839000, Xinjiang, China)

Abstract

Mafic-ultramafic intrusions in East Tianshan area are reclassified into seven belts, which are distributed as clusters and belts, with the intrusions in the same belt controlled by a regional structure. In the light of petrography, the ore-bearing intrusions must have been formed by multiple intrusion or a single intrusion, indicating a perfect magmatic evolution and fractionation. With high Mg and low alkaline, Ca, Al and Ti, the ore-bearing lithofacies show high $Mg^\#$ value and high m/f and m/s ratios. Sulfide segregation and magmatic fractionation took place simultaneously. With a TiO_2 - $10P_2O_5$ - $10MnO$ plot, the transitional nature of the primary magma from tholeiite to calc-alkaline can be identified, with most intrusions assuming the calc-alkaline trend. The intrusions of this area mostly possess hydrous minerals such as hornblende and biotite generated from alteration of pyroxenes,

* 本文得到中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-107、KZCX3-SW-137)和国家科技攻关新疆 305 项目东天山东段铜镍矿专题(2003BA612A-06-07)资助

第一作者简介 孙赫,男,1981,博士研究生,从事镁铁质-超镁铁质岩成矿作用研究;E-mail:sunhe@mail.igcas.ac.cn

收稿日期 2006-07-13;改回日期 2006-12-16。张绮玲编辑。

implying metasomatism of the mantle magma caused by the early subducting oceanic crust. The mineralization can be classified into three processes and five stages. The processes consisted of magmatic mineralization, hydrothermal mineralization, oxidation and eluviation. The five stages were successive and constituted a whole process, and in the middle magma chamber the sulfur reached saturation, with the magma experiencing pulsating intrusion as well as ore-rich magmatic intrusion at the final stage, loaded with hydrothermal mineralization, oxidation and eluviation. Magmatic mineralization occurred synchronously with hydrothermal mineralization, the magmatic stage could offer hydrothermal sources, and the hydrothermal process could be favorable to the sulfur saturation and sulfide segregation. The hydrothermal alteration structures and ores formed at the magmatic stage were reformed at the hydrothermal stage. During the uplift of the intrusions, ore bodies were subjected to oxidation and eluviation, resulting in a special kind of oxidizing alteration which can serve as indicators for prospecting in depth.

Key words: geology, petrography, petrochemistry, magmatic Cu-Ni deposits, mafic-ultramafic complex belt, East Tianshan

镁铁质-超镁铁质岩浆对 Cu、Ni、Co 及 PGE 等贵金属元素具有明显的成矿专属性,与镁铁质-超镁铁质岩浆作用有关的铜、镍、铂族元素矿床成为近年来的研究热点之一。新疆东天山是中国重要的 Cu-Au-Ni-Fe 成矿区带,20 世纪 80 年代以来,特别是“十五”期间,国家和相关部门在东天山地区实施了一系列重点找矿项目与基础地质研究,使该区的找矿实践取得了突破性进展。

哈密地区因发育众多的晚古生代镁铁质-超镁铁质杂岩及与其伴生的 Cu-Ni 矿而受到构造学家、岩石学家和矿床学家的关注(顾连兴等,1994;竺国强,1996;汪登红等,2000;毛景文等,2002;Xu et al., 2003;Qin et al., 2003)。该区各小岩体主要形成于早二叠世,而四顶黑山为大型层状杂岩体,最近徐兴旺等(2006)识别出岩体主体为早寒武世(Ar-Ar 年龄为 545 Ma)层状杂岩体,并被二叠纪辉长岩切穿。本文集中讨论二叠纪小岩体,不涉及寒武纪层状杂岩体,并重新厘定了东天山地区镁铁质-超镁铁质杂岩的分带,通过对比主要含矿岩体岩相学、岩石化学特点,探讨了本区岩体成矿特征,并总结了各岩体成矿作用的共同特点。

1 区域地质背景与镁铁质-超镁铁质岩带新的划分

研究区地层除中生界白垩系、三叠系缺失外,中元古界至新生界皆有出露。从出露面积上看,分布最广的是以石炭系为主体的上古生界,约占全区五分之三,其次是中上元古界和新生界,下古生界及中生界在区内分布比较局限。

前寒武纪地层及下古生界主要分布在沙泉子-阿齐克库都克断裂以南地段,在镜儿泉-四顶黑山一带也有出露。中元古界主要分布在中天山地区,上元古界主要分布在北山地区,总体上为一套变质碳酸盐岩-碎屑岩地层。下古生界主要出露于中南天山及北山。泥盆系集中分布于研究区中东部和西南部。石炭系大部分出露于阿齐克库都克-沙泉子断裂以北地带,总体上为一套滨海相、浅海相火山-沉积岩系,但分属不同的构造沉积相区。康古尔-黄山韧性变形带内的石炭系普遍经历了强烈的构造变形,片理化很强。二叠系主要分布于该区北部,各段岩性、岩相差异较大。中生界出露零星,主要发育一套侏罗系陆相碎屑含煤地层。新生界总体上为一套陆相碎屑沉积,广布于区内一些低洼地带。

区内主干断裂多为东西向展布。从北到南依次为康古尔-黄山深断裂(其东延为称为大草滩断裂)、苦水断裂、阿齐克库都克-沙泉子断裂、卡瓦布拉克断裂、尖山子断裂和星星峡断裂等,其中以康古尔塔格-黄山断裂带的重力、航磁异常最显著,成为控制东天山众多铜镍矿的最主要断裂带。阿齐克库都克-沙泉子断裂控制了中天山基底北缘白石泉-天宇镁铁质-超镁铁质杂岩带的产出,成为中天山老地块中镁铁质-超镁铁质岩带的导岩构造。

头苏泉-大南湖岛弧和康古尔-黄山韧性剪切带发育有一系列镁铁质-超镁铁质岩体,此岩带东西延伸 270 km,南北宽达 20~35 km,从西到东有:土墩、二红洼、香山、黄山南、黄山、黄山东以及镜儿泉地区的红石岗、黑石梁、葫芦、串珠、马碛、图拉尔根、咸水泉、四顶黑山等十多个岩体(秦克章等,2002;Qin et

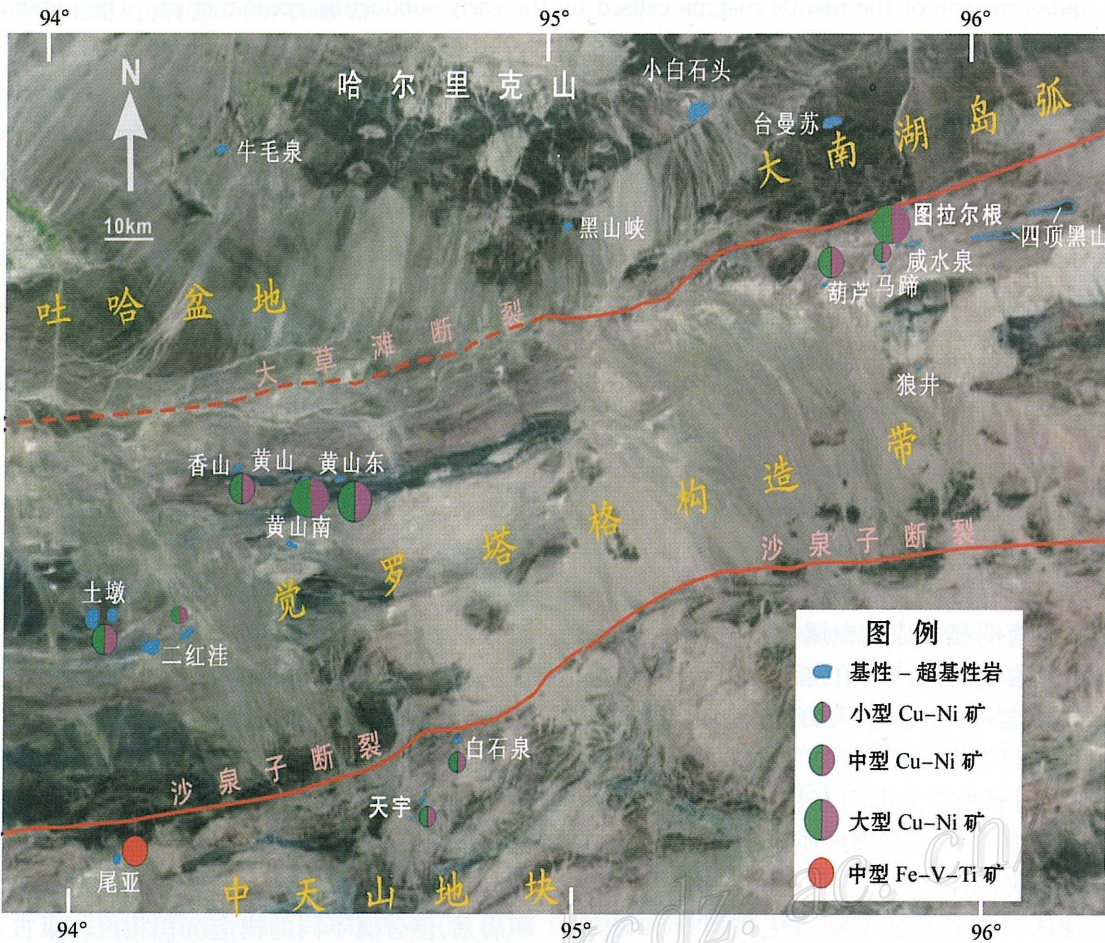


图 1 东天山东段镁铁质-超镁铁质岩带及主要铜镍矿床的分布

Fig.1 Locations of mafic-ultramafic intrusions and major Cu-Nideposits in Eastern section of Eastern Tianshan Mountain

al.,2003)。根据近几年的研究,并结合前人对东天山镁铁质-超镁铁质岩体的分布特征描述,笔者提出东天山地区镁铁质-超镁铁质岩体从北往南可分为7个区带(图1):①侵位于泥盆系头苏泉组火山岩和元古代深变质岩中的牛毛泉-黑山峡-小白石头南-台曼苏辉长岩-橄榄辉石岩带;②沿大草滩断裂带及其次级断裂侵位的图拉尔根镁铁质岩带;③葫芦-马蹄-四顶黑山超镁铁质岩带;④香山-黄山-狼井超镁铁质岩带;⑤土墩-二红洼-黄山南超镁铁质岩集中区;⑥侵位于中天山结晶基底的尾亚-白石泉-天宇镁铁质-超镁铁质岩带;⑦中天山地块在沙垄一带的阿拉塔格、池西和鸳鸯滩镁铁质-超镁铁质岩带。前5个岩带受康古尔-黄山韧性剪切带控制,后2个岩带受沙泉子-阿齐克库都克断裂带控制,各岩带具有不同的成矿潜力。在图拉尔根、葫芦、香山、黄山、黄山东、

土墩、白石泉、天宇等岩体中均发现了不同程度的铜镍硫化物矿化,有的成矿规模已经达到大型。

2 东天山主要岩浆铜镍硫化物矿床的岩相学特征

东天山主要含矿岩体都产于造山带中,且成带成群分布,但岩体规模都很小,一般岩体面积 $0.0n\sim n\text{ km}^2$ 之间(表1),具有中国典型小岩体成矿特征(汤中立,1996)。这些杂岩体大致可分为两类:多期次侵入的复式杂岩体和单期次侵入的单式小岩体。

多期次侵入的复式岩体有黄山、黄山东、香山岩体;代表单期侵入的单式岩体有图拉尔根、马蹄岩体。复式岩体和单式岩体均具有较好的岩相分带。根据杂岩体内各种岩石类型和岩性差异、穿插关系,香山杂岩体可分为3个侵入阶段、7个岩相

表 1 东天山镁铁质-超镁铁质岩带中各岩体特征

Table 1 Features of the East Tianshan mafic-ultramafic intrusion belt

	面积/km ²	形状	岩相	含矿岩相
黄山	1.71	彗星状	辉长闪长岩,角闪辉长苏长岩相,角闪二辉橄榄岩,二辉橄榄岩,角闪二辉岩	苏长岩、辉榄岩、二辉橄榄岩,岩相接触带
黄山南	4.22	透镜体	辉石角闪橄榄岩,橄榄岩,角闪辉石岩,二辉橄榄岩,角闪辉长岩,苏长岩	辉石角闪橄榄岩,橄榄岩,二辉橄榄岩
黄山北	9	透镜体,环状	辉长辉石岩,橄榄岩,闪长岩,辉长岩	橄榄岩
二红洼	7.67	不规则圆形	二辉橄榄岩,辉长苏长岩,橄榄辉长岩,辉石闪长岩,石英闪长岩	二辉橄榄岩,辉长苏长岩
土墩	0.9	不规则椭圆形	辉长岩,辉石角闪橄榄岩,橄榄角闪辉石岩	辉石角闪橄榄岩,橄榄角闪辉石岩
黄山东	2.8	菱形,透镜体	角闪橄榄辉长岩,辉石角闪辉长岩,辉长闪长岩,辉长苏长岩,橄榄辉长苏长岩相,辉石角闪橄榄岩	二辉橄榄岩、辉石岩、辉长岩,岩相接触带
香山	2.8	藕节状	角闪橄榄岩,橄榄岩,苏长岩,辉石岩,角闪辉长岩	苏长岩、辉长岩-辉石岩接触带
葫芦	0.75	透镜体,似层状	橄榄岩,辉石岩,辉橄岩	辉石岩
马蹄	0.15	马蹄形	角闪橄榄岩,角闪二辉橄榄岩,橄榄岩	角闪橄榄岩
黑石梁	0.15	长条形	橄榄角闪岩,闪长岩	
白石泉	3.2	不规则椭圆形	闪长岩,辉长岩,苏长岩,辉石岩,橄榄岩	橄榄岩,辉石岩
图拉尔根	<0.005	透镜体	辉榄岩,角闪橄榄岩,角闪辉石岩,辉长岩,橄榄辉石岩	角闪橄榄岩,橄榄辉石岩

带,分别为 第一侵入阶段的中细粒辉长岩、角闪辉长岩相、角闪橄榄辉长岩 第二侵入阶段的超镁铁岩相,包括角闪单辉橄榄岩相、辉橄岩相、单辉橄榄岩相 第三侵入阶段的辉长岩相。矿化主要与第二阶段岩浆侵入有关,矿体多位于超镁铁岩相和与镁铁岩相的接触带上。按照组合特征及相互关系,可划分为 3 个侵入阶段 8 个岩相带。第一侵入阶段形成了角闪橄榄岩相带 第二侵入阶段形成了 6 个相带,是黄山的主岩体,自下而上分别为角闪二辉橄榄岩、角闪橄榄二辉岩相,含角闪二辉岩相、角闪苏长辉长岩相、角闪辉长岩相、闪长岩相 第三阶段形成了辉长苏长岩相(慕纪录,1996),矿体往往产于镁铁岩相和不同岩相的接触带上。图拉尔根杂岩体是发育大型铜镍矿床的单式岩体,具有渐变过渡的岩相分异,包括角闪辉石岩、角闪橄榄岩、辉石橄榄岩、橄榄辉石岩和少量辉长岩,含矿岩相主要为超镁铁岩相的角闪橄榄岩和橄辉岩,成矿作用主要以贯入式为主,矿石结构多为块状、海绵陨铁状,矿体主要发育于岩体上盘,呈板状和透镜状,表现出明显的深部熔离贯入成矿特征。

由上可见,对于复式杂岩体而言,岩浆侵入呈现脉动性,矿化主要受其中一期岩浆侵入控制,在两种不同成分岩相的接触部位,由于温度和物理化学条件变化的影响促进了矿化的发育,物理化学条件变化的原因还有待进一步研究。单式岩体的矿化则主要受控于岩浆的深部分异程度和硫化物熔离程度,

并与超镁铁岩相密切相关。

3 东天山主要岩浆铜镍硫化物矿床岩石化学特征

顾连兴等(1994)将黄山-镜儿泉镁铁-超镁铁岩体定义为一种新的类别:东疆型,岩石化学以贫铝、贫碱、贫钙为特征。按照吴利仁 m/f 比值〔为 $(Mg^{2+} + Ni^{2+})/(Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn^{2+})$ 的分子比〕与基性岩浆成矿的关系, m/f 比值在 2~6.5 之间的为铁质超基性岩,与铜镍硫化物矿床有关。M. H. 戈德列夫斯基等按照侵入岩中 MgO 的含量把超基性岩浆及其结晶产物分为 3 类:①无硫化物的镁铁质岩石($MgO \leq 8\%$);②含铜镍中等镁铁质岩石($MgO 8\% \sim 30\%$)和③无硫化物的超镁铁质岩石($MgO > 30\%$)。

本区岩带总体具有高镁、贫钙、低碱、低铝特征(表 2),根据该岩带 m/f 比值的统计(表 3),均属于铁质超镁铁杂岩体。图拉尔根铜镍硫化物矿床的镁铁质-超镁铁质杂岩体 MgO 含量在 17%~30% 之间,黄山含矿岩体平均含 MgO 18.63%,黄山东含矿岩体平均含 MgO 11.50%(杨炳滨,1994),属含铜镍中等镁铁质岩石。一般 MgO 的百分含量越高,基性程度越高,镍的含量也越高,与铜的含量则没有明显的相关性。

在黄山矿区,富矿体部分产于辉长苏长岩相中,

表 2 东天山主要铜镍矿区镁铁质-超镁铁质杂岩体岩石化学成分

Table 2 Major element composition of mafic-ultramafic complexes in main Cu-Ni deposits of East Tianshan														
岩性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总和	Mg [#]
图拉尔根岩体(* 为二号岩体)														
辉长岩*	43.12	1.8	18.57	8.2	5.13	0.22	4.69	8.78	1.42	0.8	0.61	6.66	100.00	50.73
辉长岩*	44.93	2.39	18.29	6.84	4.78	0.22	4.15	8.79	3.33	1.06	1.33	3.95	100.06	52.20
辉长岩*	43.15	2.3	16.75	9.44	6.75	0.21	5.78	8.12	0.88	0.81	0.29	5.52	100.00	52.43
角闪橄榄岩	43.31	0.62	9.39	9.2	2.12	0.17	21.54	4.54	0.9	1.52	0.09	6.60	100.00	80.82
辉石角闪橄榄岩	45.01	0.65	10.78	8.36	1.20	0.2	19.47	5.25	2.54	1.26	0.11	5.17	100.00	80.74
橄辉岩	45.82	0.75	11.65	8.07	0.83	0.17	17.57	5.82	3.42	0.4	0.11	5.39	100.00	79.67
辉石橄榄岩	43.09	0.42	7.63	8.79	2.19	0.16	27.03	3.84	2.35	0.33	0.06	4.11	100.00	84.70
辉石橄榄岩	43.01	0.76	11.01	11.59	1.44	0.14	17.49	4.13	1.64	0.85	0.12	7.42	99.60	73.09
角闪橄榄岩	36.58	0.32	6.18	9.02	6.91	0.16	28.95	1.82	0.06	0.13	0.05	8.34	98.52	85.24
辉石橄榄岩	38.63	0.35	5.54	7.65	5.08	0.16	29.89	1.85	0.16	0.3	0.06	9.24	98.91	87.55
白石泉岩体														
辉长闪长岩	50.82	0.72	17.53	4.17	1.31	0.10	7.32	11.00	4.24	0.42	0.06	1.40	99.09	75.96
辉石橄榄岩	53.01	0.53	17.36	4.51	0.94	0.10	7.45	10.21	3.79	0.40	0.12	1.15	99.57	74.83
角闪辉长岩	51.27	0.47	6.71	11.35	1.16	0.22	18.69	4.55	0.41	0.78	0.12	2.71	98.44	74.77
橄榄辉石岩	49.73	0.89	14.78	8.47	0.94	0.15	8.74	10.98	2.23	0.33	0.07	1.23	98.54	65.00
辉石辉长岩岩	46.3	0.91	9.97	8.32	1.26	0.14	20.31	5.72	0.63	0.38	0.13	4.48	98.55	81.46
橄榄辉长岩	49.76	1.11	11.61	8.3	1.30	0.17	14.81	6.11	2.51	1.06	0.09	1.85	98.68	72.26
角闪辉长岩	48.67	1.76	17.43	7.02	1.37	0.13	6.88	9.42	4.44	0.65	0.16	0.97	98.90	63.82
葫芦岩体														
辉石角闪辉长岩	46.95	1	17.78	8.39	1.56	0.17	7.33	10.88	2.13	0.8	0.03	3.10	100.12	61.13
辉石角闪辉长岩	48.43	0.8	16.79	8.48	1.26	0.16	7.17	9.89	3.09	0.78	0.05	2.94	99.84	60.35
辉长闪长岩	47.69	0.9	17.29	8.44	1.41	0.17	7.29	10.43	2.61	0.79	0.04	5.36	102.42	60.86
斜长角闪辉石岩	38.7	0.27	8.58	7.21	4.54	0.16	33.09	2.28	0.23	0.07	0.06	6.75	101.94	89.20
斜长辉橄岩	38.77	0.23	5.6	6.84	3.24	0.13	29.85	3.7	0.5	0.03	0.04	6.46	98.39	88.71
斜长辉橄岩	39.85	0.08	4.7	7.4	4.46	0.16	34.32	2.02	0.5	0.02	0.03	8.02	101.56	89.30
斜长角闪橄榄岩	40.73	0.37	6.51	7.88	3.23	0.15	27.86	3.53	0.18	0.01	0.05	7.35	97.85	86.42
角闪斜长橄榄岩	39.34	0.23	5.65	7.6	3.14	0.14	32.99	0.22	0.1	0.01	0.02	9.51	98.95	88.65
斜长橄榄岩	41.22	0.1	7.4	6.21	1.94	0.12	29.1	3.59	0.5	0.02	0.02	7.45	97.67	89.40
香山岩体														
单辉橄榄岩	41.86	0.3	7.51	7.16	4.88	0.17	23.9	6.12	0.51	0.12	0.02	5.39	97.94	85.73
角闪单辉橄榄岩	43.94	0.28	7.27	7.55	5.93	0.18	25.8	6.73	0.76	0.15	0.02	2.11	100.72	86.02
角闪辉石岩	40.8	0.25	9.05	7.83	1.65	0.11	24.15	8.56	0.37	0.10	0.02	4.55	97.44	84.74
橄榄辉长岩	45.24	0.30	13.49	7.38	3.03	0.15	15.05	9.11	1.49	0.17	0.04	6.39	101.84	78.59
角闪辉长岩	46.4	0.61	17.87	3.80	3.08	0.10	9.40	8.44	3.75	0.16	0.03	7.29	100.93	81.66
角闪辉长岩	44.06	0.25	16.79	4.06	1.77	0.10	11.00	11.37	3.15	0.14	0.02	5.60	98.31	82.98
闪长岩	54.62	0.34	13.84	6.00	0.37	0.14	9.77	5.42	5.60	0.16	0.14	3.89	100.29	74.56
黄山岩体														
橄榄岩相	42.49	0.35	8.92	7.89	4.17	0.19	25.73	4.80	1.32	0.19	0.06	2.81	99.92	85.44
二辉岩相	50.56	0.49	6.24	6.79	2.45	0.17	18.15	11.95	1.15	0.32	0.07	2.45	100.79	82.79
橄榄二辉岩	47.79	0.36	3.84	8.84	1.61	0.18	25.51	8.61	0.55	0.18	0.08	5.67	103.22	83.86
辉橄岩相	39.4	0.22	2.63	9.06	4.25	0.18	36.51	1.59	0.39	0.24	0.11	4.25	98.33	87.88
辉长苏长岩相	51.87	0.76	15.93	5.06	1.91	0.14	8.10	9.17	2.93	0.74	0.14	4.66	101.41	74.24

注 常量元素含量由中科院地质与地球物理研究所元素分析实验室经 XRF 熔片法测得,Fe₂O₃ 含量为 Fe₂O₃ 总含量扣除了由 FeO 氧化形成的 Fe₂O₃ 含量得来,Fe₂O₃ 总量由 XRF 熔片法测得,FeO 含量由中科院地质与地球物理研究所元素分析实验室用滴定法测得。香山岩体部分数据来自新疆 704 队项目报告,葫芦、黄山岩体部分数据引自新疆地矿局六大队报告。Mg[#] = Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺)。

表 3 东天山含矿岩体岩石 m/f 比值

Table 3 The m/f values of ultramafic rocks in the ore-bearing complexes of East Tianshan							
岩体名称	图拉尔根	葫芦	黄山	白石泉	香山	黄山东	黄山南
变化范围	2.4~4.5	1.3~5.5	2.3~5.2	0.7~3.9	2.2~5.2	3.1~5.3	4.3~5.7
平均值	3.9	4.0	4.4	2.2	3.9	4.5	4.9
资料来源	本文	本文	本文	本文	本文	王润民等,1987	王润民等,1987

此岩相具有高铝(17.06%~19.17%)、低亚铁(2.89%~4.04%)和高钙(11.57%~13.89%)特征(顾连兴等,1994),而熔浆中 MgO、FeO 含量降低。Al₂O₃、CaO、SiO₂ 相对增加(可能有同化围岩而增加其他物质),会降低金属硫化物的溶解度,导致硫化物从硅酸盐熔浆中熔离出来(Naldrett,1999;唐红松等,1995),这也许是黄山岩体硫元素溶解度降低达到饱和,进而发生熔离的原因。香山西岩体与之类似,部分矿体也产于苏长岩和与辉石橄榄岩相的接触带中。

需要指出的是,部分烧失量较高,岩矿鉴定表明相应样品蛇纹石化、透闪石化的岩浆自变质作用较普遍,故引起含水矿物增加,从而烧失量增加。

虽然本区含富矿体的岩相存在差异,但在所有含矿岩相中均含有橄榄石、斜方辉石等含矿指示性矿物。图拉尔根岩体和白石泉岩体中橄榄石存在强烈的 Ni 亏损,指示了较好的含矿性,并且随着镁铁质-超镁铁质岩浆中矿物的正常结晶顺序,Ni 的含量在依次结晶的矿物中逐渐递减(秦克章等,2007),说明岩浆成矿过程中,Ni 的矿化富集与岩浆的演化同步进行。

此外,本区岩体含矿岩相中普遍富含角闪石和蚀变成因的黑云母(Zhou et al.,2004;孙赫等,2006),潘小菲等(2005)通过对香山岩体角闪石流体包裹体的研究,发现香山岩体原始岩浆富含 H₂O 和 CO₂,说明岩浆源具有富水特征,这可能与早期俯冲洋壳板片进入地幔源区发生交代作用有关。

根据研究区内镁铁质-超镁铁质杂岩体的岩石化学成分及相关指数(表 2),随着基性程度的降低,Fe₂O₃、TiO₂、CaO 的含量逐渐升高。从 MgO-TiO₂ 关系图来看(图 2),随着基性程度的升高,钛的含量降低,含矿性较好的岩体和岩相具有低钛特征,也说明该区含矿性与钛的含量密切相关。图拉尔根矿区一号岩体为含矿岩体,MgO 和 TiO₂ 含量分别介于 17.5~29.9 和 0.32~0.76 之间,与二号岩体相比具有明显的高镁低钛特征,显示出较好的含矿性,二号岩体以辉长岩相为主,具低镁高钛特征,含矿性较差。葫芦矿区的辉石角闪辉长岩相和闪长岩相也具有低镁高钛特征,含矿性较差。白石泉岩体落点较分散,显示出其岩浆分异演化程度较差,不利于成矿元素的富集。

矿化超镁铁质岩体具有较高的 Mg[#] 和 m/f 比值,从含矿性来看,含矿性较好的岩体具有较高的 m/f 比值(表 3)。从东天山含矿岩体的 m/f 比值

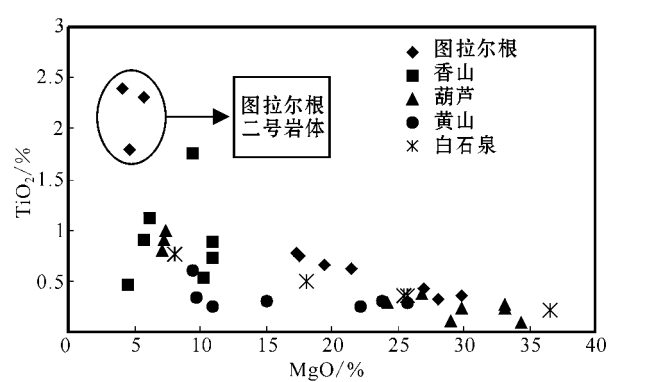


图 2 东天山主要 Cu-Ni 矿区镁铁质-超镁铁质杂岩体 TiO₂-MgO 关系图

Fig. 2 TiO₂-MgO relations of mafic-ultramafic complexes in main Cu-Ni deposits of East Tianshan

对比中可以看出,含矿岩相 m/f 平均比值大部分在 3.5~5.0 范围内,各岩体均属于铁质超基性岩,白石泉岩体平均 m/f 比值较其他岩体低,与白石泉杂岩体中中基性岩石所占比例过高有关,主要岩性为闪长岩、辉长岩、苏长辉长岩等(吴华等,2005;柴凤梅等,2006;李金祥等,2007),而超镁铁质岩相比比例较低。

根据东天山几个典型岩浆硫化物矿床的 m/f 比值和 m/s 比值(为 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+} + \text{Ni}^{2+} + \text{Mn}^{2+} + \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})/(\text{Si}^{4+} + \text{Ti}^{4+})$ 分子比,基性度)作图(图 3),来判别东天山超镁铁质岩成矿趋势。根据含矿岩相的岩石化学特点判别有利于成矿的经验成矿区域,可以看出本区高的 m/f 和 m/s 比值有利于成矿。图拉尔根矿区一号岩体为含矿岩体, m/f 和 m/s 比值分别介于 2.5~4.9 和 0.86~1.54,与葫芦、香山处于同一区域,显示出较好的含矿性,二号

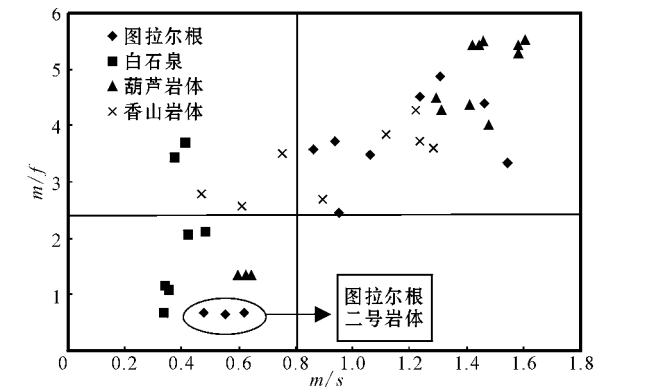


图 3 东天山主要 Cu-Ni 矿区镁铁质-超镁铁质杂岩体 m/f - m/s 图

Fig. 3 The m/f - m/s diagram of mafic-ultramafic complexes in main Cu-Ni deposits of East Tianshan

岩体以辉长岩相为主,镁含量很低,含矿性较差。葫芦矿区的辉石角闪辉长岩相和闪长岩相镁含量很低,也落于含矿性较差区域。白石泉岩体具有较低的 m/f 比值和弱基性度,落点分散,显示出其岩浆演化程度较差,显示较弱的含矿潜力。说明本区高镁和高基性度岩相可显示成矿潜力, m/f 比值介于 2.5 和 6 之间, m/s 比值大于 0.8 和 1.8 之间,是具有较好成矿潜力的区域。

不同于稳定地台中的金川式铜镍矿,东天山造山带黄山-镜儿泉铜镍矿带显示出拉斑到钙碱系列的演化趋势,笔者用 TiO_2 -10 P_2O_5 -10MnO 氧化物投图判别岩体的岩浆源区(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,呈现出从拉斑玄武岩向钙碱性玄武岩过渡的岩浆演化趋势。矿化较好的岩性和矿床多落于钙碱性岩浆区域,说明本区钙碱性岩浆源更有利于岩浆硫化物成矿。

钙碱性岩浆可能与该区经历多期复杂的俯冲碰撞和伸展运动有关。关于本区的构造特征和岩浆源性质,众多学者已有论述(顾连兴等,1994;毛景文等,2002;秦克章等,2002;Qin et al., 2003;Zhou et al., 2004;韩宝福等,2004),笔者认为东天山地区的早期俯冲增生、碰撞造山和碰撞后伸展的多种作用是造成本区幔源岩浆特点的原因,早二叠世的造山

后伸展是本区幔源岩浆大规模活动期,幔源岩浆的上侵和早期俯冲岩片的拆沉加剧造山后的伸展过程,康古尔-黄山韧性剪切带和阿齐克库都克-沙泉子断裂的发育将地幔源和浅部地壳连通起来,形成了具有钙碱性岩浆演化趋势的众多岩体。

白石泉岩体落于拉斑玄武岩区域,这与其产出构造位置有关。年代学和野外地质证据表明,白石泉杂岩体形成于晚古生代末二叠纪早期(吴华等,2005;毛启贵等,2006),其构造环境仍然存在碰撞造山期后伸展构造环境和造山期俯冲挤压环境的争论。但本区幔源岩浆无显著壳源物质混染并且受到早期俯冲洋壳板片交代,这一过程已经得到地球化学数据的证实(李金祥等,2007),说明白石泉岩体在岩浆源区性质上与产于古生代地层中的其他岩带相类似。可能由于位于中天山前寒武系基底,导致地幔受到洋壳物质交代较弱,从而显示出拉斑玄武岩演化趋势,进而有别于演化自古生代岛弧基底背景下的图拉尔根、黄山等岩体。

4 东天山含矿岩体成矿作用

对东天山地区研究程度较高的几处铜镍矿区进行总结发现,赋矿岩体无论是单式岩体还是复式岩体都经历了充分的岩浆分异,并伴有多期成矿过程。这些岩体成矿往往经历多期多种成矿作用。香山、黄山、黄山东、图拉尔根都经历了多期成矿作用。本文通过矿石特征和岩石蚀变特征,总结出东天山地区各岩体成矿一般分为 3 种成矿作用和 5 期成矿步骤。将控制岩浆硫化物成矿的作用分为岩浆成矿、热液成矿、表生作用 3 种成矿作用。从深部岩浆房到达地表赋存空间可分为 5 期成矿步骤:中部岩浆房硫化物饱和阶段、岩浆脉动涌入成矿阶段、末期矿浆贯入成矿、热液矿化叠加、地表氧化淋滤阶段。

4.1 岩浆成矿

东天山含矿岩体多为复式岩体或多岩相的单式岩体,这本身就是深源岩浆分异的一大特征。该区的矿化类型按照矿化强度和矿石结构可分为块状硫化物矿石、海绵陨铁状矿石、稠密浸染状矿石、水滴状-团斑状矿石、稀疏浸染状矿石、细脉状矿石和星点状矿石。

硫化物在中部岩浆房与硅酸岩浆熔离,在岩浆充分结晶分异之后形成富含硫化物的“晶粥”,硫化物对橄榄石、辉石进行充分的物质交换,形成交代结

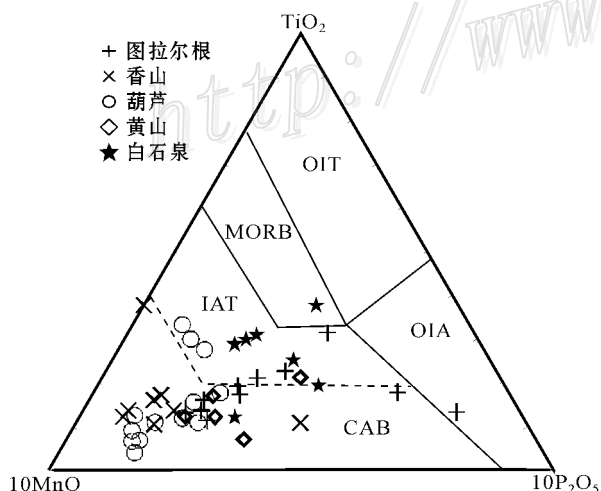


图 4 东天山主要 Cu-Ni 矿区镁铁质-超镁铁质杂岩体 TiO_2 -10 P_2O_5 -10MnO 图

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 TiO_2 -10 P_2O_5 -10MnO diagram of mafic-ultramafic

complexes in main Cu-Ni deposits of East Tianshan

OIT—Oceanic island tholeiite basalt; OIA—Oceanic island alkali basalt; MORB—Mid-oceanic ridge basalt; IAT—Island arc tholeiite basalt; CAB—Calc-alkaline basalt

构,并将橄榄石、辉石中以氧化态赋存的亲铜元素通过交代反应富集到硫化物中,反应如下:

$$\text{NiO}_{\text{橄榄石}} + \text{FeS}_{\text{硫化物}} = \text{NiS}_{\text{硫化物}} + \text{FeO}_{\text{橄榄石}}$$

反应的结果造成橄榄石、辉石中 Ni 元素的亏损,这一点可从本区含矿岩体单矿物的电子探针分析中得到证实(秦克章等,2007),含矿岩相橄榄石中的镍严重亏损。

在岩浆期成矿作用形成的矿体赋存部位往往和相应的矿化结构对应。浸染状矿化一般以似层状、盆状产出,受赋矿岩相的控制。矿浆贯入成矿就位空间不固定,往往伴随最后一次岩浆上侵就位,但不一定绝对出现在岩体底部,形态为透镜状或板状。图拉尔根矿区经过大量钻孔详查,发现大部分块状矿化位于岩体的上盘,与地层接触的部位,向下品位迅速变贫,这可能与矿浆上涌的通道有关。

在岩浆成矿期以硫化物熔离成矿为主,就地熔离作用为辅,形成浸染状、网脉状、海绵陨铁状和块状矿石,通常 $\text{Ni}/\text{Cu} > 1$ 。岩浆成矿的过程是硫化物在硅酸盐中达到饱和和发生熔离并富集成矿的过程。对于国外大型层状杂岩体,含硫化物岩浆在一定的空间内与大量的硅酸盐岩浆混合导致亲铜元素品位提高(Naldrett,1999)。引起硫化物熔离的因素有许多,包括温度、压力、氧逸度、硫逸度(Wendlandt, 1982; Naldrett, 1999; Lightfoot et al., 1997),关于控制东天山地区小岩体硫化物饱和的机制现在还不清楚,有待于进一步研究。笔者推测该区诸岩体在深部存在一个巨大的中间岩浆房,硫化物在中间岩浆房内达到饱和并进行预富集,进而硫化物与硅酸盐熔浆相互分离,受重力分异和流动分异作用在岩浆底部和流动通道中富集。

4.2 热液成矿

热液成矿期多发生在成矿作用晚期,岩浆演化的热液充填于岩相的接触带,造成强烈的蛇纹石化和透闪石化,见有网脉状黄铜矿、黄铁矿细脉穿插。热液成矿期通常以铜矿化为主。随着岩浆向上运移,压力降低,造成岩浆演化后期的挥发分大量增加,这有助于降低岩浆的粘度,使硫化物的熔离更容易进行。

图拉尔根铜镍矿的矿石具一种非常典型而又特殊的结构构造——流体角砾构造,其主要特征是在显微尺度(图 5),矿石具角砾构造,透闪石化和蛇纹石化(透闪石与蛇纹石为细晶质)的辉石橄榄岩或橄榄辉石岩呈角砾状为微晶质蛇纹石-透闪石质矿物

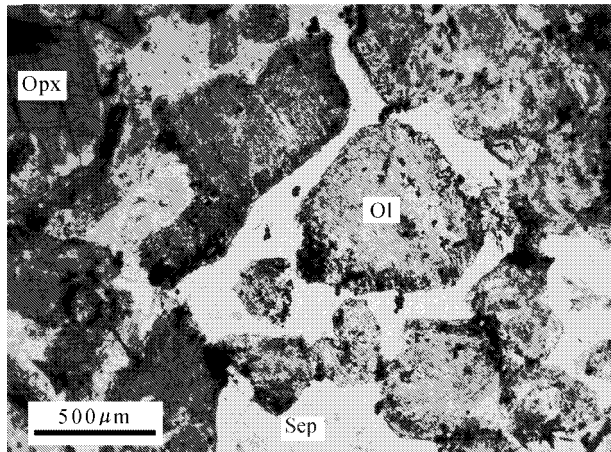


图 5 图拉尔根铜镍矿矿石的显微图片
Sep—蛇纹石 Opx—斜方辉石 Ol—橄榄石
Fig. 5 Microscopic image of ores from the Tulargen Cu-Ni deposit
Sep—serpentine Opx—orthopyroxene Ol—olivine

集合体(流体)所胶结与包绕,大量的镍黄铁矿分布于流体与角砾的接触带。这表明该矿床铜镍矿(特别是富矿体)的形成与第二期蛇纹石-透闪石质流体的活动密切相关。即使不发育这种角砾状构造但也有较强透闪石化和蛇纹石化(透闪石与蛇纹石为细晶质)的岩石,黄铁矿较少,可以推断,沿流体与角砾的接触带密集分布的镍黄铁矿是第二期流体从深部带上来的。这种含矿流体迁移通道的存在意味着其深部具发育规模较大岩浆热液流体(富矿体)的可能性。

岩浆演化热液作用往往产于岩相的接触带,造成强烈的蛇纹石化和透闪石化(图 6),硫化物交代辉石、橄榄石形成溶蚀边,往往形成网脉状黄铜矿、黄铁矿细脉穿插结构。热液成矿期通常以铜矿化为主。热液一方面改造了岩浆期形成的浸染状矿石,使金属硫化物更加富集变成斑杂状矿石;另一方面,热液形成的浸染状、细脉状硫化物叠加在岩浆期形成的矿石上,形成大量的 Co、Ni、As、Cu 的硫化物,使原生硫化物组合发生改变。气成热液作用在本区表现为各相岩石的蚀变交代和对岩浆期形成的矿体进行改造,叠加了部分浸染状、细脉状金属硫化物和伴生元素。热液成矿多发生在成矿作用后期,与岩浆成矿作用是一个连续的发展过程,气液的聚集和逸出在岩浆期就开始了,在后期逐渐加强,对矿化起到进一步富集的作用。热液成矿作用对于增加矿体的规模和储量的作用似乎不显著,但却是铜镍硫化物

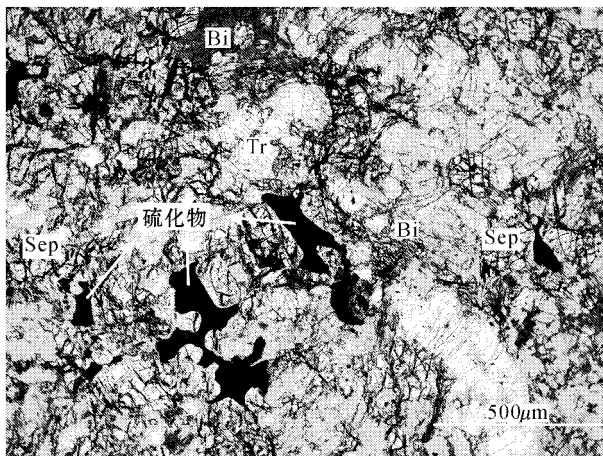


图 6 图拉尔根岩体热液交代矿化

Tr—透闪石 Sep—蛇纹石 Bi—黑云母

Fig. 6 Hydrothermal metasomatic mineralization in the

Tulargen Cu-Ni deposit

Tr—Tromolite Sep—serpentine Bi—biotite

矿床完整的成矿作用过程中的必经环节。

4.3 表生氧化阶段

表生氧化阶段是由于在原生矿体近地表氧化条件下形成次生氧化矿体,矿物组合也相应发生改变,由 Fe、Cu、Ni 的氧化物、氢氧化物、硫酸盐替代了原生硫化物组合(孙燕等,1996)。地表特征较明显,有黄钾铁矾、孔雀石化、褐铁矿化等。黄绿色、土黄色、红色粉末状、土块状铁帽往往成为寻找铜镍硫化物矿床的直接标志,铜镍硫化物细脉经地表氧化后往往形成孔雀石、褐铁矿细脉,这是贯入式矿体的指示标志。

5 结 语

东天山地区分布有众多的镁铁质-超镁铁质岩体,岩体成群成带状分布,从北向南可划分为 7 个区带,受区域性韧性剪切带和断裂构造控制。从岩相学来看,本区含矿岩体可分为多期次侵入的复式杂岩体和单期次侵入的超镁铁质单式杂岩体,显示出深源岩浆充分分异的特征。岩体具有高镁、低碱、低钙、低铝、低钛特征,含矿岩相具有较高的 $Mg^{\#}$ 、 m/f 和 m/s 比值,岩浆硫化物熔离作用与岩浆结晶分异作用同时进行。根据岩石学的构造判别图,岩浆源具有钙碱性玄武岩浆特征,富水矿物较多,指示了早期俯冲洋壳对幔源岩浆的交代作用。

岩体矿化分为 3 种成矿作用和 5 期成矿步骤,

矿石的显微结构显示在岩浆成矿作用的同时叠加了热液成矿作用,说明岩浆分异过程中演化出岩浆热液,而热液作用促进硫化物的饱和与熔离,并造成岩石的热液蚀变结构和对岩浆期成矿进行改造。随着岩体的隆升,矿体经过剥蚀出露地表,受氧化、淋蚀作用,形成地表氧化带,强烈的蛇纹石化、孔雀石化、黄钾铁矾等蚀变特征往往成为深部隐伏矿体的找矿标志。

致 谢 感谢在野外工作过程中,新疆有色地质局 704 队 and 新疆地矿局六大队领导和同行给予的大力帮助。

References

- Chai F M, Zhang Z C, Mao J W, Dong L H, Zhang Z H, Ye H S, Wu H and Mo X H. 2006. Petrography and mineralogy of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic intrusions in Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Gu L X, Chu J L, Guo J H, Liao J J, Yan Z F and Yang H. 1994. The east Xinjiang-type mafic-ultramafic complexes in orogenic environments [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 339~356 (in Chinese with English abstract).
- Han B F, Ji J Q, Song B, Chen L H and Li Z H. 2004. 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*, 49(22): 2424~2429.
- Lightfoot P C and Hawkesworth J. 1997. Flood basalts and magmatic Ni, Cu, and PGE sulphide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Traps) and West Greenland sequences [A]. In: Mahoney J J, ed. *Large igneous provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism* [M]. *Geophysical Monography* 100, American Geophysical Union. 357~380.
- Li J X, Qin K Z, Xu X W, Sun H, Cheng S L, Wu H and Mo X H. 2007. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complex in Eastern Tianshan, Xinjiang: Constraints on ore genesis and tectonic setting [J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 43~58 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Yang J M, Qu W J, Du A D, Wang Z L and Han C M. 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance [J]. *Mineral Deposits*, 21(4): 323~330 (in Chinese with English abstract).
- Mao Q G, Xiao W J, Han C M, Sun M, Yuan C, Yan Z, Li J L, Yong Y and Zhang J E. 2006. 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*, 22(1): 153~162 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Mu J L. 1996. On the characteristics and forming mechanism of the rich and shallow-seated ores in the Huangshan copper-nickel sulfide deposit, Hami, Xinjiang[J]. J. Mineral Petrol., 16(1): 58~67 (in Chinese).
- Naldrett A J. 1999. World-class Cu-Ni-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. Mineralium Deposita, 34: 227~240.
- Pan X F and Liu W. 2005. Characteristics and significance of CH₄-rich fluid inclusions from the mafic-ultramafic complex at the Xiangshan, eastern Tianshan Mountains, Xinjiang of China[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 211~218 (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Fang T H, Wang S L, Zhu B Q, Feng Y M and Yu H F. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan mountains, NW-China[J]. Xinjiang Geology, 20(4): 302~308 (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Peng X M, San J Z, Xu X W, Fang T H, Wang S L and Yu H F. 2003. Types of major ore deposits, division of metallogenic belts in eastern Tianshan, and discrimination of potential prospects of Cu-Au-Ni mineralization[J]. Xinjiang Geology, 21(2): 143~150 (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Zhang L C, Xiao W J, Xu X W, Yan Z and Mao J W. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, Northwestern China [A]. In: Mao J W, Goldfarb and Seltnann eds. Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan (London), 227~249.
- Qin K Z, Ding K S, Xu Y X, Sun H, Xu X W, Tang D M and Mao Q. 2007. Ore potential of protoliths and modes of Cu-Ni occurrence, Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits in East Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 26(1): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Su S G, Deng J F, Tang Z L, Luo Z H, Yu X Y and Li F N. 2004. Advances in mineralization associated with mafic-ultramafic igneous rocks[J]. 18(4): 454~459 (in Chinese with English abstract).
- Sun H, Qin K Z, Li J X, Xu X W, San J Z, Ding K S, Hui W D and Xu Y X. 2006. Petrographic, petro-geochemical characteristics in the Tulargen Cu-Ni-Co sulfide deposit, Eastern Tianshan, and its tectonic background[J]. Geology in China, 33(3): 606~617 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y, Mu J L and Xiao Y F. 1996. The characteristic of shallow-rich ore body in copper-nickel sulfide deposit in Xiangshan, Xinjiang[J]. J. Mineral Petrol., 16(1): 51~57 (in Chinese with English abstract).
- Tang H S and Liu Y X. 1995. Marginal mineralization effect of Cu-Ni sulfide deposits[J]. Mineral Resources and Geology, 9(48): 240~242 (in Chinese).
- Tang Z L. The main mineralization mechanism of magma sulfide deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 70(3): 237~243 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Chen Y C, Xu Z G and Lin W W. 2002. Cu-Ni-(PGE) Sulfide metallogenic series in north Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 19(2): 147~155 (in Chinese with English abstract).
- Wendlandt R F. 1982. Sulphide saturation of basalt and andesite melts at high pressures and temperature[J]. Am. Miner., 67: 877~885.
- Wu H, Li H Q, Mo X H, Chen F W, Lu Y F, Mei Y P and Deng G. 2005. Age of the Baishiquan mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 79(4): 498~502 (in Chinese with English abstract).
- Xu X W and Ma T L. 2004. Reply to the comment by Wen-Bin Zhu et al. on "Characteristics and dynamic origin of the large-scale Jiaoluo-tage ductile compressional zone in the eastern Tianshan Mountains, China" [J]. Journal of Structural Geology, 26: 2337~2340.
- Xu X W, Qin K Z, San J Z, Wang Y, Hui W D, Kang F, Mao Q, Li J X, Sun H and Ma Y G. 2006. Discovery of layered mafic-ultramafic intrusives formed in 545Ma in the Sidingheishan area, eastern Tianshan, China and its significances for tectonics and Cu-Ni mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(11): 2665~2676 (in Chinese with English abstract).
- Yang B B. 1994. The factors of controlling the magmatic Cu-Ni sulfide deposits in Northern Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 8(43): 330~333 (in Chinese).
- Zhou M F, Michael L C and Yang Z X. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, eastern Xinjiang, northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt [J]. Chemical Geology, 209: 233~257.
- Zhu G Q, Yang S F and Chen H L. 1996. Tectonic stress analysis of Huangshan Cu-Ni metallogenic belt and discussion of structural controlling rock and ore model[J]. J. Mineral Petrol., 16(1): 86~93 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 董连慧, 张作衡, 叶会寿, 吴 华, 莫新华. 2006. 中天山白石泉镁铁超镁铁质岩体岩石学与矿物学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 25(1): 1~12.
- 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 廖静娟, 严正富, 杨 浩. 1994. 造山带环境中的东疆型镁铁-超镁铁杂岩[J]. 岩石学报, 10(4): 339~356.
- 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.
- 李金祥, 秦克章, 徐兴旺, 孙 赫, 程松林, 吴 华, 莫新华. 2007. 新疆东天山白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因和构造背景的制约[J]. 矿床地质, 26(1): 43~58.
- 毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 2002. 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, 21(4): 323~330.
- 毛后贵, 肖文交, 韩春明, 孙 敏, 袁 超, 闫 臻, 李继亮, 雍 拥, 张继恩. 2006. 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, 22(1): 153~162.
- 慕纪录. 1996. 新疆哈密黄山铜镍矿床中浅富矿体特征及形成机制

- [J]. 矿物岩石, 16(1): 58~67.
- 潘小菲, 刘伟. 2005. 东天山香山镁铁-超镁铁岩中富 CH_4 流体包裹体的特征及其意义[J]. 岩石学报, 21(1): 211~218.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰. 2002. 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, 20(4): 302~308.
- 秦克章, 彭晓明, 三金柱, 徐兴旺, 方同辉, 王书来, 于海峰. 2003. 东天山主要矿床类型、成矿区带划分与成矿远景区优选[J]. 新疆地质, 21(2): 143~150.
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 孙赫, 徐兴旺, 唐冬梅, 毛骞. 2007. 东天山图拉尔根、白石泉铜镍钴矿床钴、镍赋存状态及原岩含矿性研究[J]. 矿床地质, 26(1): 1~14.
- 苏尚国, 邓晋福, 汤中立, 罗照华, 余晓艳, 李芳凝. 2004. 镁铁质-超镁铁质岩浆作用与成矿作用的新进展. 现代地质, 18(4): 454~459.
- 孙赫, 秦克章, 李金祥, 徐兴旺, 三金柱, 丁魁首, 惠卫东, 许英霞. 2006. 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[J]. 中国地质, 33(3): 606~617.
- 孙燕, 慕纪录, 肖渊甫. 1996. 新疆香山铜镍硫化物矿床浅富矿体特征[J]. 矿物岩石, 16(1): 51~57.
- 唐红松, 刘月星. 1995. 铜镍硫化物矿床的边缘成矿效应. 矿产与地质[J]. 9(48): 240~242.
- 汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 70(3): 237~243.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 林文蔚. 2000. 新疆北部 Cu-Ni-(PGE)硫化物矿床成矿系列探讨[J]. 矿床地质, 19(2): 147~155.
- 吴华, 李华芹, 莫新华, 陈富文, 路远发, 梅玉萍, 邓岗. 2005. 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, 79(4): 498~502.
- 徐兴旺, 秦克章, 三金柱, 王瑜, 惠卫东, 康峰, 毛骞, 李金祥, 孙赫, 马玉光. 2006. 东天山四顶黑山地区 545Ma 层状镁铁质-超镁铁质岩体的发现及其大地构造学和成矿学意义[J]. 岩石学报, 22(8): 569~580.
- 杨炳滨. 1994. 新疆北部岩浆型铜镍硫化物矿床控矿因素的研究[J]. 矿产与地质, 8(43): 330~333.
- 竺国强, 杨树锋, 陈汉林. 1996. 黄山铜镍矿成矿带构造控岩控矿模式初探[J]. 矿物岩石, 16(1): 86~93.

<http://www.kcdz.ac.cn/>