

文章编号: 0258-7106 (2013) 02-0223-21

新疆北部幔源岩浆矿床的类型、时空分布及成矿谱系*

王玉往^{1,2}, 王京彬^{1,2}, 李德东¹, 龙灵利¹, 唐萍芝², 石煜³, 高一菡⁴

(1 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2 中色地科矿产勘查股份有限公司, 北京 100012;

3 中国地质大学, 北京 100083; 4 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要 新疆北部与幔源岩浆有关的矿床种类齐全, 成矿环境复杂, 时代和类型繁多, 在中国乃至世界颇具特色。主要矿床类型包括铬铁矿矿床、钒钛磁铁矿矿床、铜镍硫化物矿床、铂族元素(PGE)矿床、铜镍-钒钛铁复合矿床、含钴磁铁矿矿床、玄武岩自然铜矿床、热液型钴-多金属矿床, 以及非金属矿床等。按照含矿地质体的类型, 可分为 6 种类型: 蛇绿岩型、层状杂岩型、小侵入体型、阿拉斯加型、浅成岩型和喷出岩型。这些幔源岩浆矿床可划分为 3 个成岩成矿系列: 铜镍系列、钛铁系列和铬铁系列。钛铁系列以碱性层状岩体型钒钛磁铁矿、铁磷矿为代表, 岩石具有明显的富 Fe 特征, 属于碱性富铁质的高钛玄武岩系列; 铜镍系列以小侵入体型铜镍矿、阿拉斯加型铜镍-PGE 矿为代表, 岩石属于铁质的拉斑玄武岩-钙碱性系列; 铬铁系列主要为蛇绿岩型铬铁矿, 岩石具富 Mg 贫 Fe 特征, 属于镁质系列。3 个系列的岩浆都具有亏损地幔源特征, 可能都与地幔柱活动有关。岩浆源区富含相应的成矿元素, 是形成 3 个系列矿床相应成矿地质体的主要条件。3 个系列矿床的成矿机制可分为深部熔离/岩浆分异、就地分凝、岩浆贯入、岩浆热液等过程。根据各系列矿床之间存在的紧密联系, 建立了与幔源岩浆作用有关的 3 个系列矿床综合模式: 亏损地幔部分熔融产生的幔源岩浆在上升过程中发生熔离/分异, 分离为 3 个系列, 由于外部物质加入在地壳深部发生分异和熔离, 在不同深度富集形成铬铁矿、钒钛磁铁矿和铜镍硫化物矿床, 临近地表时流体富集和分离成含矿流体, 分别形成浅成岩型磁铁矿和喷出岩型自然铜矿。新疆北部各类幔源岩浆矿床从早到晚主要产于 3 期构造阶段/构造类型: 大陆裂解期、板块俯冲期、碰撞/后碰撞造山期(又分 3 个阶段: 碰撞后伸展阶段、幔柱叠加造山阶段、后碰撞结束阶段)。

关键词 地质学 幔源岩浆矿床 成矿类型 成矿系列 成矿谱系 构造环境 新疆北部

中图分类号 P612

文献标志码 A

Types, temporal-spatial distribution and metallogenic lineage of ore deposits related to mantle-derived magma in northern Xinjiang

WANG YuWang^{1,2}, WANG JingBin^{1,2}, LI DeDong¹, LONG LingLi¹, TANG PingZhi²,
SHI Yu³ and GAO YiHan⁴

(1 Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2 Sino Tech Metals Exploration Co. Ltd, Beijing 100012, China; 3 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract

Mantle-derived magmatic ore deposits in northern Xinjiang are composed of chromite deposits, copper-nickel sulfide deposits, platinum group elements (PGE) deposits, Cu-Ni~V-Ti-Fe composite deposits, cobalt-bearing magnetite deposits, basalt-hosting native copper deposits, hydrothermal cobalt-polymetallic deposits and

* 本文得到国家自然科学基金项目(41030424)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(2007CB411304, 2002CB409806)的联合资助
第一作者简介 王玉往, 1965 年生, 男, 博士, 研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 矿床学与矿床地球化学、火成岩岩石学研究方向。

Email: wyw@cncnm.com

收稿日期 2012-03-15; 改回日期 2013-02-07。秦思婷编辑。

non-metallic deposits. According to types of ore-bearing magmatic bodies, these ore deposits can be classified into six types, i.e., ophiolite type, layered intrusion type, minor intrusion type, Alaska type, hypabyssal type and extrusive rock type. These mantle-derived magmatic ore deposits can be divided into three series, namely, copper-nickel, vanadium-titanium and ferrochrome series. Magmatic sources of these three series show significantly different features: the copper-nickel series with relatively abundant mafic tholeiitic basalts is significantly enriched in Cu, Ni and Co; the vanadium-titanium series with iron-rich alkali basalts is enriched in V, Ti and Fe; the ferrochrome series with magnesia-rich tholeiitic basalts is enriched in Cr. Therefore, the magmatic sources that had rich ore-forming elements and formed magmatic bodies constituted the main ore-forming conditions for these three series. The ore-forming mechanism of the three series can be divided into deep magmatic liquation and magmatic differentiation, in-situ liquation, ore magma injection and magmatic hydrothermal processes. Based on the close relationships between these series, we can construct the integrated metallogenic model of the ore deposits related to mantle-derived magma. Mantle-derived magma from depleted mantle partial melting source might have experienced melt segregation and/or fractionation processes during their ascent, resulting in the association of these three series with different ore deposits. The external material that participated in the magmatic evolution in the deep crust could form chromite, vanadium-titanium magnetite and copper-nickel sulfide deposits at different depths. When the evolved magma reached somewhere near the surface, they might combine with enriched fluid and ore-bearing fluid to form subvolcanic magnetite and extrusive native copper deposits. The tectonic setting or tectonic stages of the ore deposits associated with mantle-derived magma in North Xinjiang can be classified into three types as follows: i) the continental rift stage, which yielded copper-nickel deposits related to minor intrusions and iron-phosphate deposits associated with alkaline layered intrusions; ii) the plate subduction stage, which yielded ophiolite-associated chromite deposits and Alaska type copper-nickel-PGE deposits; iii) collision or post-collision orogenic stage, which can be divided into three sub-stages/processes: the post-collision stretching process yielded the basalt-associated native copper deposits, the mantle plume superimposition orogenic process yielded copper-nickel deposits related to minor intrusions and copper-nickel-vanadium-titanium-iron composite deposits related to layered intrusions, and the collision termination or cratonization process yielded hypabyssal Co-bearing magnetite deposits and vanadium-titanium magnetite deposits associated with small layered intrusions.

Key words: geology, mantle-derived magmatic deposit, mineralization type, metallogenic series, metallogenic lineage, tectonic setting, northern Xinjiang

幔源岩浆一般指来自地幔(主要是上地幔)的岩浆。幔源岩浆矿床意指与地幔源(广义的,包括地幔岩浆和地幔岩)有直接关系的矿床,其成矿物质主要来自地幔,主要包括与镁铁质-超镁铁质杂岩体有关的各类矿床,也包括部分与镁铁质-超镁铁质火山-次火山岩相关的矿床。新疆北部(塔里木盆地北缘以北地区,大致北纬 40° 以北)镁铁质-超镁铁质杂岩和火山岩发育,成矿环境复杂,时代和类型繁多。前人不仅从矿床基本特征、含矿岩石特征、成矿机制、矿床成因、成矿动力学背景等开展了多方面深入研究,积累了大量资料,而且在某些重要矿床类型的共同特征、矿床对比与演化等方面也进行了总结和探讨,如对豆荚状铬铁矿矿床(张弛等,1975;巩志超等,

1987;李行,1987;魏文中等,1987;郝梓国,1988;梅厚钧,1995;鲍佩声等,1999)、铜镍硫化物矿床(王润民等,1987;1991;汪有标,1990;李先梓等,1991;汤炳滨,1994;李承德等,1996;廖启林等,1999;汪登红等,2000;汪玉往等,2004;汪玉往,2009;毛景文等,2006;柴凤梅,2006;孙赫等,2007;吕林素等,2007;王京彬等,2008;初振利,2010;Wang et al., 2011)、钒钛磁铁矿矿床(王玉往等,2005;2006a;王玉往,2009)、玄武岩自然铜矿床(董连慧等,2003;袁峰等,2007;2008;2010)等。

一方面,幔源岩浆矿床作为有成因联系的一系列矿床,在岩浆来源、成矿机制和成矿专属性上具有密切联系,具有相关的成矿系列、成矿谱系特征(王

玉往等, 2006d; Wang et al., 2008; 王京彬等, 2008; 王玉往, 2009); 另一方面, 新疆北部这些矿床分布广泛, 自南向北分布于不同的构造单元: 塔里木北缘、中天山地块、北天山、西准噶尔、东准噶尔造山带、阿尔泰山南缘等, 跨越时间较长(最老的为兴地 2 号铜镍矿, 760 Ma, Cao et al., 2011; 最新的为库卫钛铁矿, 47 Ma, 赵莉等, 2006), 其时空分布和演化特征具有一定的规律。因此, 有必要将新疆北部这一系列矿床作为整体来研究, 不仅为深入理解新疆北部构造历史和构造-岩浆-成矿演化特征提供依据, 而且有助于提高对北疆地区成矿规律的认识, 以科学指导找矿部署和找矿预测。

1 新疆北部幔源岩浆矿床的类型及主要特征

新疆北部幔源岩浆矿床类型较多, 主要有铬铁矿矿床、钒钛磁铁矿矿床、铜镍硫化物矿床、铂族元

素(PGE)矿床、铜镍-钒钛铁复合型矿床、含钴磁铁矿矿床、玄武岩自然铜矿床、热液型钴-多金属矿床以及非金属矿床(如蛭石、石棉、滑石、蛇纹岩等), 由于篇幅所限, 本文暂不讨论非金属矿床, 其余矿床分布见图 1。按照含矿地质体的类型, 这些矿床可分为 6 种类型: 蛇绿岩型、层状杂岩型、小侵入体型、阿拉斯加型、浅成岩型和喷出岩型。

1.1 蛇绿岩型-岩浆型铬铁矿、热液型 Co 多金属矿、金矿

新疆北部分布多条蛇绿岩带, 自北向南主要有科克森套-布尔根、扎河坝-阿尔曼台、洪古勒楞、卡拉麦里、达拉布特、玛依勒、巴尔雷克、唐巴勒、巴音沟(北天山或依连哈比尔尕)、干沟-康古尔、中天山南缘(卡瓦布拉克-库米什-榆树沟-古洛沟-米斯布拉克)等(肖序常等, 1992; 曹荣龙, 1994; 王宗秀等, 2003; Wang et al., 2003; Xiao et al., 2008; 2009; 董连慧等, 2010)。各蛇绿岩带均与断裂带复合, 并多分布于断裂上盘(张弛等, 1975), 与主断裂延伸方

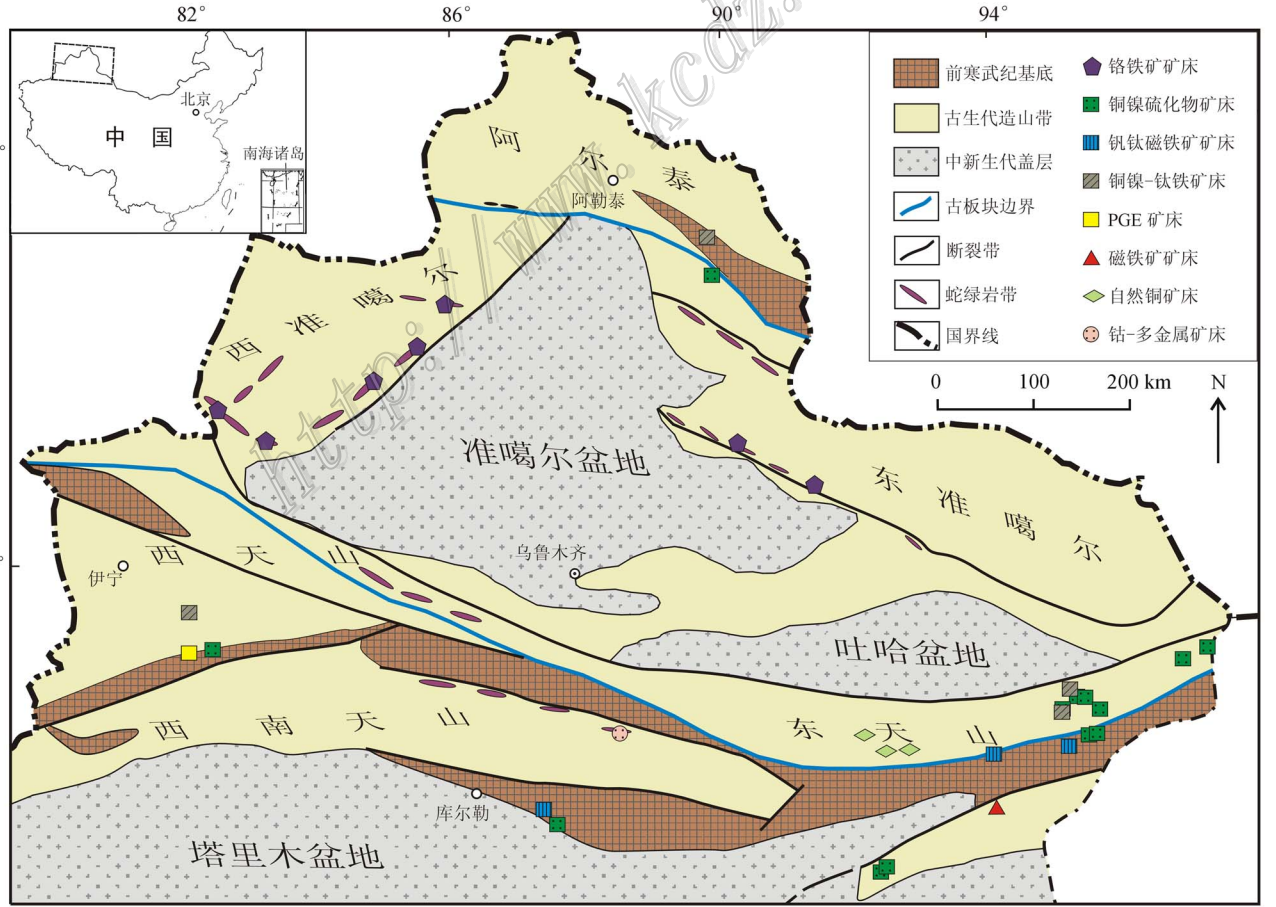


图 1 新疆北部主要幔源岩浆矿床分布图
Fig. 1 The distribution of mantle-derived magmatic deposits in North Xinjiang

向一致,长数十 km 至数百 km,一般宽数 km 至十余 km。本区蛇绿岩出露均不完整,层序亦不连续,多表现为蛇绿混杂岩特征,其中的镁铁质-超镁铁质岩体相对发育,岩体长从数十、数百 m 至十余 km,宽从数 m 至 1 km。可分为纯橄岩-单辉杂岩型、纯橄岩-斜辉辉橄岩型、斜辉辉橄岩型、斜辉辉橄岩-橄橄岩型和含长超基性杂岩型等,超镁铁质岩以斜辉辉橄岩和斜辉橄橄岩为主,其次为二辉橄橄岩和纯橄岩,有时可见辉橄岩和辉石岩,常发育蛇纹石化、滑石化、碳酸盐化和硅化。其 m/f 值(镁铁系数, $m/f = (Mg^{2+} + Ni^{2+}) / (Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn^{2+})$, 为原子数比值)均在 6.6 以上,多介于 8~11 之间,属于镁质超基性岩。按铝饱和系数($Al' = Al^{3+} / (2Ca^{2+} + K^{+} + Na^{+})$)可分为高铝型($Al' > 1$)和低铝型($Al' < 1$) (张弛,1981)。北疆地区蛇绿岩主要形成于显生宙,同位素定年数据可从新元古代末(洪古勒楞蛇绿岩 Sm-Nd 等时线年龄 (625 ± 25) Ma,黄建华等,1995)到早石炭世(巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩的锆石 SHRIMP 年龄 324.7 Ma,徐学义等,2005)。其产出构造环境主要为弧后盆地和洋中脊(详见后述)。

与蛇绿岩有关的矿床主要是产于超基性岩中的豆荚状铬铁矿矿床,另外,亦有后期热液作用形成的钴多金属矿床(如库米什铜花山钴铜矿,中型,伊献端等,1983)、金矿床(如萨尔托海 I 号金矿,小型,周美付,1987),以及较弱的铜镍矿化。

豆荚状铬铁矿矿床主要产于西准噶尔达拉布特蛇绿岩带,分布有萨尔托海、鲸鱼等中、小型矿床,其他尚有洪古勒楞、唐巴勒、清水(东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩带)等小型矿床多处。该类矿床与国内外同类型矿床一样,多产于 Moho 面以下的地幔橄橄岩中,含矿岩石主要为纯橄橄岩、斜方辉橄橄岩,少数矿床部分矿体产于堆积岩中(如洪古勒楞的含长纯橄橄岩、橄橄岩)。含矿超镁铁质岩多属于富铝型(矿石以 $w(Al_2O_3) > 20\%$ 、 $w(Cr_2O_3) < 45\%$ 为特征,铬尖晶石 $Cr' < 60$),属地幔橄橄岩-橄橄岩-橄橄辉长岩组合,即 PTG 系列(鲍佩声等,1997),少数属于富铬型(如唐巴勒)。

萨尔托海铬铁矿已探明储量 229.8 万 t,是目前新疆最大、全国第二大铬铁矿矿床(朱训,1999)。其含铬铁矿岩体为新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩带中最大的一个蛇绿混杂岩岩块,岩块全长 22.5 km,最宽处 2 km,最窄处不足 100 m,总面积 19.5 km²。辉长岩 Sm-Nd 等时线年龄为 (395 ± 1.2) Ma(张弛等,

1992)。超镁铁质岩主要由贫辉斜辉橄橄岩组成,并含有透镜状、条带状纯橄橄岩、斜辉橄橄岩或二辉橄橄岩,以及部分含长斜辉橄橄岩和辉长岩-橄橄岩分凝体。岩体中已发现大小矿体 500 余个,成带成群、分段集中分布,构成南、中、北 3 个矿带。单个矿体小者多呈囊状、形似土豆,大者多为不规则的透镜体和豆荚体,长可达 150 余 m,厚 10 余 m。矿体有贯入式和分凝式 2 种,前者以致密块状矿石为主,围岩多为斜辉辉橄橄岩,接触界线截然,个别矿体亦贯入到岩体围岩中;后者以浸染状矿石为主,围岩多为纯橄橄岩,接触界线呈迅速过渡关系,矿体外缘常见包裹有数 cm 厚的绿泥石壳(郝梓国,1988)。

1.2 层状杂岩型

新疆北部层状杂岩型岩体较多,可进一步分为碱性杂岩型和亚碱性杂岩型 2 类。

1.2.1 碱性杂岩型:钒钛磁铁矿-铁磷矿

该类岩体主要分布在中天山地块及旁侧,并集中分布于 2 个地区。

东天山地区尾亚-雅满苏一带,如尾亚、1073 高地南西等,岩体规模较小(多 1~3 km²),产有钒钛磁铁矿矿床,以尾亚中型钒钛磁铁矿为代表。含矿岩系以橄橄辉长岩、角闪辉长岩组合为主,含辉石橄橄岩、斜长岩、正长岩-石英正长岩等特征岩石组合,岩体以富钛($w(TiO_2)$ 多 $> 2\%$)、富铁、富碱(主要是富钠)为特征,稀土元素表现为明显的正铕异常($\delta Eu > 1.2$),属富铁质(m/f 均小于 1.2)碱性玄武岩系列(王玉往等,2005)。尾亚矿区位于中天山尾亚环形复式岩体的北侧,矿区主要发育含钒钛磁铁矿的基性-超基性杂岩,主要侵入岩有角闪辉长岩、橄橄辉长岩、黑云母角闪斜长岩、角闪辉橄橄岩、石英正长岩等,其中的辉长岩类发育韵律层。该区同位素测年资料较多,但与地质事实相矛盾(李华芹等,2005; Zhang et al., 2005; 王京彬等, 2006a; 王玉往等, 2008),较为合理的定年应为:正长岩的锆石 U-Pb 年龄 (246 ± 6) Ma(Zhang et al., 2005)、辉长岩的黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄 (248.6 ± 1.7) Ma(未发表数据)。矿床分 5 个矿化区段,矿体皆产于碱性辉长岩类岩体中,在空间上呈雁行式排列。矿床可分为 3 个矿化阶段:岩浆结晶分凝阶段(形成似层状、浸染状和块状的钒钛磁铁矿矿体或矿石)、贯入阶段(形成贯入式块状钒钛磁铁矿矿体或矿石)和岩浆热液阶段(形成伟晶状钒钛磁铁矿和硫化物矿石)(王玉往等, 2005)。

库鲁克塔格地区,主要沿兴地断裂带(南侧)分布,如卡乌留克塔格、奥尔塘、大西沟、且干布拉克等,岩体出露面积 $1 \sim 5 \text{ km}^2$,主要岩石类型有辉石岩、辉长岩、斜长岩、透辉石岩、黑云母透辉石岩等,普遍伴有正长岩类,一些岩体还产出岩浆碳酸岩(如且干布拉克),岩石以富铁、富磷为特征,与东天山尾亚地区不同,其稀土元素为无铕异常(δEu 值接近1),岩石属铁质的碱性玄武岩系列(夏学惠等,2008),且干布拉克杂岩体年龄为 $802 \sim 818 \text{ Ma}$ [全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $(802 \pm 52) \text{ Ma}$,孙宝生等,2007;碳酸岩斜锆石 TIMS 年龄为 $(810 \pm 6) \text{ Ma}$,Zhang et al.,2007;金云母岩金云母 Ar-Ar 年龄为 $(812 \pm 1.2) \text{ Ma}$,Zhang et al.,2007;辉石岩锆石 U-Pb 年龄为 $(818 \pm 11) \text{ Ma}$,Lu et al.,2008]。该类岩体以产有岩浆型铁磷矿为特征,且干布拉克还产有超大型蛭石矿。大西沟磷矿床是近年来发现的特大型铁磷矿床,含矿杂岩体长约 2.1 km ,最宽约 900 m ,主要岩性为斜长岩,次为辉石角闪岩,岩体富碱质(尤其富钠, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 最高可达 4.56%),属钠质偏碱性岩系列。铁磷矿体主要赋存在杂岩体的蚀变斜长岩中,共圈出5个较大矿体,矿体多呈似层状、透镜状,矿石以浸染状构造为主,主要有磁铁矿、磷灰石、钛磁铁矿、微量钛铁矿,伴生钛、矾(夏学惠等,2010)。

1.2.2 亚碱性杂岩型:铜镍—钒钛铁矿

新疆北部这类岩体主要见于东、西天山地区,目前已发现有香山、牛毛泉、土墩南、哈拉达拉等岩体,成岩时代多集中在早二叠世,岩体面积 $2.8 \sim 22 \text{ km}^2$,韵律构造发育。另外,阿尔泰地区的库卫岩体可能也属于该类岩体(Liao et al.,2010)。岩石组合为超基性-基性-中性岩类,以出现浅色的闪长岩或淡色辉长岩为特点。岩石的 $w(\text{SiO}_2)$ 在 $37.17\% \sim 54.48\%$ 之间,兼具有碱性系列、钙碱性系列和拉斑玄武岩系列特征,但以亚碱性系列为主。该类岩体以发育铜镍-钒钛铁复合型矿化为特色,岩石中金属矿物氧化物(钛铁矿、磁铁矿)、硫化物(黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿,有时有镍黄铁矿)共存和共生。含矿岩石组合、岩石化学特征与典型铜镍硫化物矿床、钒钛磁铁矿矿床相比,具有重叠和过渡特征,如镁铁指数(m/f)既有小于2.0的铁质岩石,也有介于2.0~6.5的镁铁质岩石,碱金属含量、全铁含量、 $w(\text{TiO}_2)$ 变化范围均较大,与同酸度岩石相比,既有典型钒钛铁矿化岩石的特征,也有典型铜镍矿化岩石的特征;

铁镁比值(FeO^*/MgO)和镁铁指数(m/f)、 α_{Si} (岩浆酸度) [$\alpha_{\text{Si}} = (\text{Si} \times 100)/(\text{Si} + \text{Ti} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$,为原子数百分比]和碱钙富集度(calc/m) [钙碱富集度, $\text{calc}/\text{m} = (\text{Ca} + \text{Al} + \text{Na} + \text{K}) \times 100/(\text{Mg} + \text{Ca} + \text{Al} + \text{Na} + \text{K})$,为原子数百分比]也有一致的复合/过渡特征(王玉往等,2010)。东天山康古尔-黄山地区的香山西岩体为该含矿岩体的典型代表。

香山西岩体为香山杂岩体的一部分,其镁铁质-超镁铁质岩可分为铜镍系列和钛铁系列,前者岩石组合为超镁铁质岩(辉石岩和辉橄岩)-韵律状橄辉长岩-蚀变角闪辉长岩,后者岩石组合为钛铁辉长岩-含钛角闪辉长岩-淡色辉长岩(王玉往等,2009)。香山西岩体分别产有中型钛铁矿床和小型铜镍矿床,目前已圈定4条铜镍矿体和9条钛铁矿体,铜镍矿多呈脉状、透镜状产于灰绿色角闪辉长岩、灰绿色蚀变辉长岩,以及二者的接触带中,钒钛磁铁矿矿体则呈脉状、透镜状、似层状产于灰绿色和灰白色角闪辉长岩中的含浸染状钛铁矿辉长岩中,矿体与围岩界线不清(王玉往等,2006b)。在香山西岩体69线可见铜镍矿脉穿插钛铁矿体,反映铜镍矿化可能晚于钛铁矿化。淡色辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 $(283 \pm 3) \text{ Ma}$ (李德东等,2012),形成于早二叠世。

1.3 小侵入体型:铜镍矿

小侵入体型岩体是指含铜镍矿的小型(多 $<10 \text{ km}^2$,绝大多数 $<5 \text{ km}^2$)深成侵入岩(区别于与磁铁矿化有关的浅成岩型),一般具有深部分异、多期侵入和成群成带分布特征,可呈单相或多相。岩石组合以辉石橄辉岩-辉石岩-橄辉长岩-苏长岩-辉长岩-闪长岩为主,苏长岩较常见。岩石以拉斑玄武岩系列为主,有些为钙碱性系列(如喀拉通克),主要为铁质的镁铁质-超镁铁质杂岩(m/f 值在 $0.5 \sim 6$,绝大多数岩体的 m/f 值 >2 ,Wang et al.,2011)。该类岩体主要产有铜镍硫化物矿床。

新疆北部该类含矿岩体较多,大致分布在5个成矿集中区(简称矿集区)或成矿带:

喀拉通克矿集区 位于阿尔泰山南缘东准噶尔北缘。矿区约 12.5 km^2 ,已发现含矿岩体11个,各种同位素年龄集中在 $280 \sim 298 \text{ Ma}$ (王润民等,1991;赵昌龙,1991;张作衡等,2005;韩春明等,2006)。目前在1、2、3、7号岩体均发现工业矿化,并分别命名为1、2、3、7矿区。其中以1号岩体矿化最佳,已探明 Cu 为 23.2 万 t ,Ni 为 15.4 万 t ,矿石平

均品位分别为 1.4% 和 0.88%。2、3 号岩体为隐伏岩体,推测 1、2、3 号岩体在 300 m 以下可能连成一体(袁林等,1991;田战武,2007),且由西(1 号)向东(3 号)岩体酸性增大。主要含矿岩体由黑云角闪橄榄苏长岩相(中心相)、黑云角闪苏长岩相和辉长辉绿岩相(边缘相)组成,岩体上部还发育闪长岩(浅色辉长岩)相。

代表矿床为喀拉通克 1 号矿床。含矿岩体呈不规则透镜状,横剖面呈楔状,出露面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 。主要工业矿体有 2 种:一种为不规则状矿体,规模较大,主要由晚期岩浆就地熔离的稀疏-稠密浸染状矿石组成,岩浆期后热液形成的细脉浸染状矿石次之,主要分布于岩体下部基性程度较高的岩相中;另一种为似脉状矿体,分布于岩体的中下部,由熔离贯入的致密块状矿石和少量角砾状矿石组成(王润民等,1991)。矿化可分为岩浆熔离和矿浆贯入 2 个成矿阶段。

黄山-图拉尔根成矿带 目前是新疆探明的最大铜镍硫化物成矿带,东部有新发现的图拉尔根大型铜镍硫化物矿床(三金柱等,2007),西部有红岭矿床,中部有黄山、黄山东、黄山南、香山、二红洼和土墩等大、中型矿床。该矿带长约 300 km,宽 20~35 km,呈 NEE 向展布,沿康古尔塔格大断裂分布。含矿岩体多呈东西向拉长的扁豆状或透镜状,出露面积小,一般 $2\sim 6 \text{ km}^2$,岩体通常分异程度较高,主要岩石类型为闪长岩、辉石闪长岩、云母角闪辉长苏长岩、角闪橄榄辉长岩、角闪辉石岩和斜长云母橄榄岩及少量辉石岩、辉橄岩和橄橄榄岩。岩体多具垂向、对称分带特征。各岩相都以含有富羟基矿物角闪石(或黑云母)为特征。岩石化学均属铁质系列,其中,超镁铁质岩的 m/f 值为 $2.3\sim 3.00$,镁铁质岩的 m/f 值多为 $0.96\sim 2.11$ (王玉往等,2004)。

黄山东是该成矿带中最大且具有代表性的矿床。含矿岩体位于地表,呈拉长的菱形体,面积 2.8 km^2 ,侵位于下石炭统干墩群。岩体边部见穿插围岩层面和同化混染现象,剖面呈漏斗状。该含矿岩体为同源同期多阶段侵位的复式岩体,各阶段岩石组成为:第一阶段侵入形成闪长岩相(闪长岩、石英闪长岩)、角闪辉长岩相(角闪橄榄辉长岩、角闪辉长岩)和辉长苏长岩相(角闪辉长苏长岩);第二阶段侵入形成超镁铁质岩相(斜长角闪二辉橄橄榄岩、辉石角闪橄橄榄岩)。矿化主要产于深色橄橄榄辉长苏长岩、斜长角闪二辉橄橄榄岩和辉石角闪橄橄榄岩中。矿体在

剖面上呈条带状和透镜状,产状与岩体或岩相带大致相同,已圈定工业矿体 20 个。矿石一般呈海绵陨铁结构,浸染状构造,此外还有叶片、火焰状、结状、反应边及压碎结构,块状、半块状、斑杂状、角砾状、脉状等构造(郝钢力等,1988)。

白石泉-天宇矿集区 位于哈密市东南约 170 km,隶属中天山地块北缘,已发现有白石泉、天宇、天香 3 个矿床和矿点。

白石泉为该区代表性矿床。白石泉矿区已发现 20 个大小不等的镁铁质-超镁铁质岩体,最大的岩体仅为 0.8 km^2 。岩体形态较为复杂,中部出露为闪长岩相,呈长轴为近 NE-SW 向的似椭圆状,超基性岩体多呈脉状产于闪长岩中部及边部。根据各岩相的穿插关系可划分为 2 个侵入阶段共 7 个岩相带(柴凤梅等,2006)。其中,第一侵入阶段为白石泉岩体出露的主体部分,约占总面积的 90%,包括闪长岩相、辉长岩相、辉长苏长岩相,三者之间没有明显的界线,辉长苏长岩和细晶黑云母苏长岩为主要的岩石类型。目前已经发现铜镍硫化物矿体 14 个,多为条带状、脉状,其中 5 个为地表氧化矿体、9 个为盲矿体,前者主要分布在矿区中部闪长岩体边部,后者主要分布在南部规模相对较大的超镁铁质岩体中。含矿岩石遭受了较强的片理化和蚀变,与矿化有关的辉石岩普遍遭受纤闪石化、绿泥石化、绢云母化。矿石以稀疏浸染状为主,主要矿石矿物为黄铜矿、镍黄铁矿、自然铜、黄铁矿和辉铜矿等(吴华等,2005)。

坡北矿集区 位于罗布泊东北的北山裂谷带。该岩带沿 NEE 向白地洼深大断裂南、北两侧分布,由 20 多个镁铁质-超镁铁质岩体组成,长 16 km,宽 8 km(杨甲全等,2002),已发现有坡一、坡十、罗东、红石山等铜镍硫化物矿床和矿点。含矿岩体分相明显,从中心向外依次为橄橄榄岩、辉石岩和辉橄岩、橄橄榄辉长岩和辉长苏长岩,矿化主要与橄橄榄岩有关。

坡十矿床目前为一小型矿床。含矿岩体东西长约 2 km,南北宽 1.6 km,面积约 3.2 km^2 ,平面呈一椭圆状,主要有(含矿的)斜长二辉辉石岩、斜长橄橄榄岩、橄橄榄岩以及橄橄榄辉长苏长岩、橄橄榄辉长岩、辉长岩。目前已圈定 9 个矿体,其中 5 个为隐伏矿体,主要产于二辉(角闪)橄橄榄岩中下部或底部,形态与岩体底部形态基本相似,呈弧形或近似盆状产出。矿石以星散浸染状-稀疏浸染状为主,少量稠密浸染状构造,局部可见块状构造(属底部熔离型矿体及脉状贯入型镍矿脉)。矿石结构主要为自形-半自形粒

状,局部具海绵陨铁结构(毛景文等,2006;苏本勋等,2009;颜炜等,2011)。

以上4个铜镍矿集区/成矿带的研究较为深入,积累了大量地质地球化学资料,综合前人的同位素测年结果,其成岩成矿年龄集中在300~280 Ma(毛景文等,2006;汪京彬等,2008)。

兴地河矿集区 位于库鲁克塔格南带兴地河断裂带南侧,由4个岩体组成,断续长33 km。杂岩体主要由辉长岩、辉石岩和橄榄岩类组成,均侵入于古元古界变质岩中。其中,辉长岩类是组成各岩体的主要岩石,主要包括橄榄苏长辉长岩、苏长辉长岩和辉长岩。I号岩体辉长岩 Sm-Nd 等时线年龄为 (731 ± 31) Ma(Cao et al., 2011), II号岩体辉长岩锆石 SHRIMP 年龄为 (760 ± 6) Ma(Cao et al., 2011)。目前在杂岩体中均发现铜镍硫化物矿化与矿点,但仅兴地 II 号岩体为具工业价值铜镍矿床。

兴地 II 号杂岩体 平面上呈椭圆状,出露面积约10 km²,是一个以基性岩为主伴有超基性岩的多期侵入的杂岩体,可划分为3个侵入期次,3个岩相带12个亚相带,从早到晚为辉石岩相带-橄榄岩相带-辉长岩相带(袁英霞等,2002)。岩石具有拉斑玄武岩系列特征,属铁质系列镁铁质-超镁铁质岩($m/f = 0.92 \sim 5.74$,多数 >2 ,袁英霞等,2002;夏昭德等,2009)。岩体中已圈出9个矿体,主要含矿岩石为橄榄岩类,包括二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩、含长二辉橄榄岩、斜长单辉橄榄岩,局部有纯橄岩和二辉岩,其次为辉长岩类(辉长苏长岩和暗色辉长苏长岩)。矿石具有浸染状和海绵状构造,矿石、矿化岩石和无矿岩石呈渐变过渡关系(杨合群等,1997)。

1.4 阿拉斯加型:PGE矿、含PGE铜镍矿

阿拉斯加型岩体特指岛弧(或俯冲)环境下形成的环状杂岩体。新疆北部这类岩体较少,西天山伊犁地块南部那拉提山脊一带的菁布拉克岩体,可能是一个较为典型的阿拉斯加型含矿岩体。

菁布拉克镁铁质-超镁铁质岩带由多个大小不等的侵入体组成,菁布拉克是其中最大的一个。菁布拉克岩体侵位于古元古界变质岩系内,地表呈SE向眼球状或压扁的椭圆状,面积2.4 km²。该岩体分异良好,可划分为4个岩相带,各岩相基本呈环状分布,由边部向中心依次为次闪石化辉石闪长岩-辉长岩带-橄榄辉长岩-次闪石化辉石岩带-单辉橄榄岩带和辉石岩-橄榄辉长岩带。主要赋矿岩体为橄榄辉长岩、橄榄岩和辉石岩,矿石类型有浸染状和致密

块状,主要有浸染状黄铜矿、浸染状磁黄铁矿、浸染状镍磁黄铁矿、伟晶状磁黄铁矿、条带状铜镍矿石和团块状镍磁黄铁矿矿石(倪守斌等,1994)。岩体的 $w(\text{TiO}_2)$ 较低,高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等相对亏损,大离子亲石元素 Rb、K、Ba、Sr 等富集,指示了岛弧岩浆的特点(张作衡等,2006)。杂岩体中闪长岩锆石 SHRIMP 年龄为 (434.4 ± 6.2) Ma(张作衡等,2007),邻区长阿吾子岩体辉长岩辉石 Ar-Ar 年龄为 (439.4 ± 26.7) Ma(郝杰等,1993),均与南天山洋俯冲时间(Gao et al., 1998;杨天南等,2006)吻合。一般认为,阿拉斯加型杂岩体主要对PGE矿具有成矿专属性(Nixon et al., 1997),菁布拉克岩体虽无伴生PGE资源量资料,但其有用组分中Pt达0.58 g/t,菁布拉克西的恰干萨依铂矿更是新疆北部发现的唯一成型的岩体型独立铂矿点(1:20区调报告,莫合尔幅)。

1.5 浅成岩型:(钴)磁铁矿

该类矿床目前仅发现磁海铁矿一处。磁海矿床位于新疆东部,北距雅满苏约90 km,为一以Fe为主、伴生有益组分Co、Ni、Cu的大型矿床。尽管关于磁海铁矿的成因类型、成矿机制争议较大,但普遍认为与辉绿岩有关(张明书等,1980;汪可南等,1992;薛春纪等,2000;王玉往等,2006c;唐萍芝,2010)。矿区地处塔里木北缘北山造山带,由磁海、磁南、磁西3个矿段组成,并以磁海矿段为主体。矿区主体为华力西期辉长岩为主的杂岩体,大面积被新生界盖层覆盖,见有橄榄辉长岩、辉绿辉长岩、闪长岩、橄长岩等,并出露震旦系平头山群(片岩、大理岩、石英岩),杂岩体西南部出露下二叠统中基性火山岩、火山碎屑岩。3个矿段分别位于杂岩体的东北、南、西部,主要为由辉绿岩侵入产生的矽卡岩-热液矿化。磁海矿段已发现铁矿体73条,主要矿体有5条,矿体沿走向彼此平行排列构成矿体群。单个矿体形态主要呈脉状、扁豆状,受构造裂隙控制明显,矿体群主要产于辉绿岩中,主要围岩为黑云母辉绿岩,其次为石榴子石透辉石矽卡岩。矿石主要呈浸染状、角砾状和条带-条纹状构造,其次有脉状、网脉状、斑点状、团块状及斑杂状等。矿石矿物以磁铁矿为主,含磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿以及辉砷钴矿等硫化物。与铁矿有关的辉绿岩 Rb-Sr 等时线年龄为 (268 ± 7) Ma(薛春纪等,2000),锆石 U-Pb 年龄为 (254.6 ± 4.5) Ma(未发表数据),指示为中-晚二叠世形成,其岩石地球化学特征表现为铁质钙碱性系列(唐萍芝等,2010)。

1.6 喷出岩型:玄武岩自然铜矿

该类型矿床主要分布于东天山觉罗塔格地区马头滩至长城山一带,主要在十里坡、黑龙峰、长城山、东尖峰等地。赋矿地层为马头滩组,为一套火山岩-火山碎屑岩建造,自然铜赋矿层位主要的岩石类型为杏仁状玄武岩、辉石安山岩、凝灰岩、火山角砾岩、凝灰质砂岩等。玄武岩、玄武质凝灰岩、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 (307 ± 4) Ma 和 (309.1 ± 3.7) Ma,属于晚石炭世玄武岩为低 Ti 的大陆拉斑玄武岩, Sr、Nd 同位素特征显示玄武岩源于亏损地幔(袁峰等, 2007; 2010)。

以十里坡小型矿床最具代表性。矿化主要产于蚀变凝灰岩中,杏仁状玄武岩中亦可见到少量的自然铜,含自然铜的玄武质凝灰岩具残余凝灰结构,具硅化、斜黝帘石化、绿泥石化、碳酸盐化等蚀变。自然铜呈他形粒状,星点浸染状产出,粒径 $0.01 \sim 0.15$ mm。金属矿物均为自然铜,未见其他原生铜矿物。成矿以火山活动间歇期的同生火山热液成矿作用为主(Yuan et al., 2008)。

2 成岩成矿系列部分

在系统整理上述各类矿床含矿岩系地质与地球化学资料的基础上(表 1),提取出幔源岩浆矿床主要特征参数,主要包括岩石组合系列、镁铁比值(m/f 值)、钙碱富集度(calc/m 值)和酸度(α_{Si} 值)等,并结合岩浆源特征(主要是 I_{Sr} 和 ϵ_{Nd} 值),将这类幔源岩浆矿床划分为钛铁系列、铜镍系列、铬铁系列等 3 个成岩成矿系列(图 2)。

2.1 钛铁系列

以碱性层状岩体型钒钛磁铁矿、铁磷矿为代表,岩石组合为辉橄岩-橄辉长岩-辉长岩-苏长岩-斜长岩,含矿岩石一般为(橄辉)辉长岩、苏长岩类,岩石具明显的富 Fe 特征。硅-碱图(图 2a)中,主要投于碱性区域, m/f 值较低($0.63 \sim 0.78$),属于富铁质系列(图 2b);钙碱富集度较高(calc/m 值在 $79.60\% \sim 88.16\%$),属于碱钙系列范围(图 2c);酸度较高($\alpha_{\text{Si}} = 42.38\% \sim 47.30\%$),属于碱性富铁质的高钛玄武岩系列; $\text{FeO}^* - \text{MgO} - \text{CaO}$ 图(图 2d)中,数据点位于铁钙区域,含矿岩浆来源于亏损地幔或近于原始地幔。浅成岩型磁铁矿和亚碱性层状岩体型的铜镍-钒钛铁复合型矿化,则为与铜镍系列的过

渡类型,岩石以亚碱性系列为主, m/f 值、钙碱富集度等均具有铜镍系列和钛铁系列的双重特征,但总体偏向钛铁系列,其酸度值(α_{Si})、稀土元素特征、正的 Sr、Eu 异常等,以及岩石的 Fe、V、Ti、Ni 等含量等特点更接近钛铁系列。这类过渡类型的数据点在上述 4 幅图中也表现出了过渡的性质。

2.2 铜镍系列部分

以小侵入体型铜镍矿、阿拉斯加型铜镍 PGE 矿为代表,侵入岩的岩石组合为橄辉岩、辉橄岩、橄辉长岩、苏长岩、辉长岩、淡色辉长岩类,含矿岩石一般为辉橄岩和苏长岩,其次为辉长岩。在含矿岩系地球化学图解(图 2)中位于钛铁系列和铬铁系列之间的过渡部位(部分与上述 2 个系列重叠):岩石属于拉斑玄武岩-钙碱性系列的铁质岩石,在硅-碱图(图 2a)中,数据点多数落入亚碱性区域,部分落入碱性区域; m/f 值中等($1.02 \sim 4.99$),多属于铁质系列(图 2b);钙碱富集度较高(其 calc/m 值范围约在 $25.11\% \sim 80.16\%$ 之间,多数约在 $40\% \sim 70\%$ 之间);酸度较大(α_{Si} 值位于 $38.10\% \sim 50.74\%$),主要为偏镁的铁质拉斑玄武岩系列(图 2c),含矿岩系明显富集 Cu、Ni、Co,在 $\text{FeO}^* - \text{MgO} - \text{CaO}$ 三角图中,数据点主要位于中部区域(图 2d)。喷出岩型(玄武岩)自然铜矿的 α_{Si} 多数在 $43\% \sim 48\%$ 之间。但其岩浆岩组合单一,即大陆拉斑玄武岩。从上述四个图中的投点来看,自然铜矿的玄武岩数据虽略偏向钛铁系列,但其 Sr、Nd 同位素以及稀土元素特征更接近铜镍系列,因此总体属于铜镍系列。

2.3 铬铁系列

主要为蛇绿岩型铬铁矿。含矿岩石组合一般为纯橄岩、方辉橄岩、二辉橄岩,有时有少量橄辉长岩,含矿岩石一般为纯橄岩,其次为方辉橄岩;含矿岩浆来源于上地幔,一般具有强烈亏损的地幔橄辉岩特征(ϵ_{Nd} 值一般 $> +8$),具有富 Mg 贫 Fe 特征,其橄辉石中镁橄辉石分子数(F_o 值)较高。在硅-碱图(图 2a)中,数据点主要位于碱性区域; m/f 值多数 > 8 ,属于镁质系列(图 2b);钙碱富集度小,酸度值也较小,在 $\text{calc}/m - \alpha_{\text{Si}}$ 图(图 2c)中属于偏镁系区域;在 $\text{FeO}^* - \text{MgO} - \text{CaO}$ 图(图 2d)中,数据点明显靠近 MgO 一端,表现出富镁特征。

3 个系列的岩浆都具有亏损地幔源区特征,可能都与地幔柱活动有关(详见后述),但亏损程度明显不同,铬铁系列岩石具有强烈亏损特征(LREE、LILE 弱亏损, La/Sm 比值和 Rb/Yb 比值多 < 1 , Os/

表 1 新疆北部幔源岩浆矿床含矿岩系特征
Table 1 Ore-bearing rocks features of mantle-derived magmatic deposits in northern Xinjiang

矿床类型	含矿岩系特征	含矿岩石组合	岩石系列	(m/f)比值	微量元素 w(B)/10 ⁻⁶	稀土元素特征	PCF 特征	橄榄石特征	岩浆(及岩浆源)特征	代表矿床	资料来源
蛇绿岩型铬铁矿	出露面积一般为几 km ² 到几十 km ² 。包含 2~4 个岩相, 岩体为冷侵位	橄辉岩-橄长岩-橄辉辉长岩-单辉辉石岩-辉长岩; 纯橄岩-透辉岩(斜长)橄辉岩-橄辉辉石岩-辉石岩-辉长岩	拉斑玄武岩系列	6.6~12.1, 多介于 8~11	Ni: 1572~2279(A); Ti: 0~180(A); Fe: 53233~58858(A); Cr: 2600~3558(A)	B-ΣREE 为 (31.06~60.26) × 10 ⁻⁶ , 几乎不显示 Eu 异常, 轻稀土元素配分曲线右倾, 轻稀土相对富集	Fe: 86.32~95.70; Ni: 943 × 10 ⁻⁶ ~208 × 10 ⁻⁶	Fe: 86.32~95.70 × 10 ⁻⁶	D: 37~184 km; T: 876.2~1340°C; I _S : 0.7048; ε _g : >+8	萨尔托海, 唐巴勒, 洪古勒楞	魏文中等 (1987), 鲍佩声等 (1997)
碱性层状杂岩型钼钽铁磷矿	出露面积 1.4 km ² 。具有 2~3 个岩相, 岩体为冷侵位	角闪辉橄岩、黑云角闪橄辉辉长岩、黑云角闪辉长岩、橄辉辉石岩、霞辉岩、黑云母辉长斜长岩	碱性系列	0.63~0.78	Ni: 200(A), 18.6~24.8(B); Cu: 20(A), 43.1(B); V: 40(A), 136~793.5(B); Ti: 130~520(A), 20~1250(B); Fe: 15700~16400(B); P: 1560~2330(B); Cr: 200(A); P: 786(B)	B-ΣREE 为 (67.73~470.05) × 10 ⁻⁶ , Eu 轻度负异常, 轻稀土元素高度富集	Fe: 56.45~56.74	Fe: 56.45~56.74	D: 9~10 km; T: 1009~1296°C; kgf(O ₂): -5.62~-7.43; ε _g 为: +0.271~-2.606; I _S : 0.7033~0.7071	尾亚	王玉住等 (2005)
亚碱性层状杂岩型铜镍-钼钽铁矿	出露面积 1.6~22 km ² , 可分为 2 个岩相。岩体为热侵位	斜长方辉橄岩、二辉橄辉岩、单辉橄辉岩、橄辉辉长岩、辉长岩等	拉斑玄武岩-钙碱性系-列(铜镍), 碱性系-列(铁)	1.24~5.06	Ni: 259~1164(A), 27.1~614.6(B); Cu: 292~596(A), 245(B); V: 65.7~115(A), 146~848(B)	A-ΣREE 为 (7.73~19.54) × 10 ⁻⁶ , Eu 为弱负异常, δEu 多小于 1; B-ΣREE 为 (29.6~62.6) × 10 ⁻⁶ , 轻稀土元素富集, δEu 多 >1	ΣPCF 为 6.93~49.38	Fe: 81.68~86	D: 20~80 km; T: 1024~1335°C; kgf(O ₂): -7.42~-12.38;	香山西, 哈拉达	王玉住等 (2009); 林锦富等 (1996)
小岩体铜镍矿	出露面积 0.1~3.2 km ² , 以岩墙、岩体或岩脉形式产出。岩体为热侵位	苏长岩-辉长岩、橄辉辉石岩-二辉橄辉岩-纯橄辉岩及与溢流玄武岩相当的侵入体、科马提岩等。	拉斑玄武岩-钙碱性系-列, 以拉斑玄武岩系-列为主	1.02~4.99	Ni: 21765(A), 275~3201(B); Cu: 8415(A), 250~2873(B); V: 143.3(A), 40~2000(B); Ti: 100~800(B); Cr: 403.5(A)	A-ΣREE 为 (3.83~33.99) × 10 ⁻⁶ , 具有轻微 Eu 负异常; B-ΣREE 为 (27.91~81.64) × 10 ⁻⁶ , Eu 异常不明显	ΣPCF 为 2.30 × 10 ⁻⁹ ~78.34 × 10 ⁻⁹	Fe: 64~85; Ni: 472 × 10 ⁻⁶ ~2281 × 10 ⁻⁶	T: 1175~1300°C; ε _g : 为 +6.09~+13.27; I _S : 0.702312~0.70748	喀拉通克 1 号, 黄山, 东, 白石泉, 天字, 红石山	倪志耀 (1991); 柴凤梅 (2006); 苏本勋等 (2009); 唐冬梅等 (2006)
阿拉斯加型铜镍矿	空间上呈向斜盆状, 面积 2.4 km ² , 可分 4 个岩相, 岩体为冷侵位	闪长岩、辉石岩、橄辉辉石岩、橄辉辉石岩-浅色辉长岩、深色辉长岩、橄辉辉长岩和辉绿岩	钙碱性系列为主	辉石岩和辉长岩为 2.01~2.18, 苏长岩为 1.55~1.93	Ni: 54.7~180(B); Cu: 22.9~54.3(B); V: 108~131(B)	A-ΣREE 为 (14.55~27.88) × 10 ⁻⁶ , δEu 为 0.72~0.84; B-ΣREE 为 16.54 × 10 ⁻⁶ , 总量低, 曲线较平缓, 轻稀土元素微富集, δEu 为 0.68~1.38, 多数 >1, 微弱正异常	ΣPCF 为 0.707~0.704	ε _g 为 +3.7~+6.4; I _S : 0.7037~0.704	普布拉克	张作衡等 (2006)	
浅成岩型磁铁矿	多呈岩株, 岩床形式出现, 具有分带特征, 岩体为冷侵位	橄辉辉长岩、辉长岩、辉长辉绿岩、辉绿岩、辉绿岩等	钙碱性系列	1.1~4.3		B-ΣREE 为 (3.09~22.3) × 10 ⁻⁶ , δEu 为 3.16~4.41, 稀土元素分馏较弱, 分布型式为轻稀土元素略富集型		I _S 为 0.70785~0.7137	磁海	唐萍芝等 (2010); 赵王社 (2000)	
玄武岩型自然铜矿	面积约 30 km ² , 以层状火山岩出露	玄武岩、杏仁状玄武岩、辉石安山岩、凝灰岩、火山角砾岩等	拉斑玄武岩-钙碱性系-列	0.19~0.66, 均小于 1		B-轻稀土元素富集的右倾配分模式, ΣREE 为 (83.86~174.62) × 10 ⁻⁶		I _S 为 0.70424~0.70447; ε _g : +3.296~+7.674	十里坡	袁峰等 (2010)	

注: 稀土元素; A-辉橄岩类; B-辉长岩类。岩浆(及岩浆源)特征: D-岩浆/矿体侵位深度; T-结晶温度。

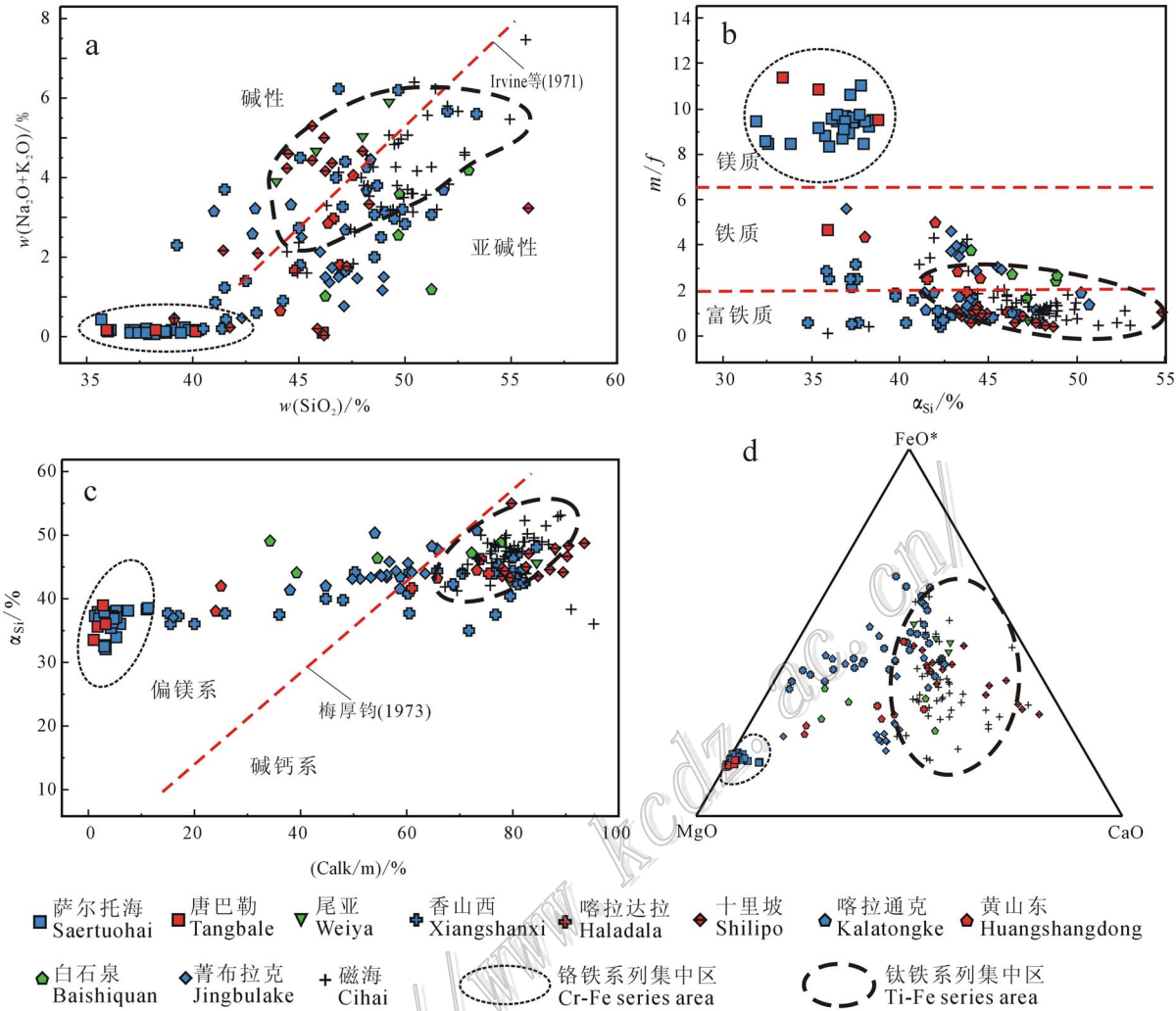


图 2 新疆北部主要幔源岩浆矿床含矿岩系地球化学图解

a. 硅-碱图; b. α_{Si} - m/f 图; c. Ca/m - α_{Si} 图; d. MgO - FeO^* - CaO 图

Fig. 2 Geochemical diagrams of host rocks from mantle-derived magmatic deposits in northern Xinjiang
a. Silicon versus alkali diagram; b. α_{Si} versus m/f diagram; c. $Calk/m$ versus α_{Si} diagram; d. MgO - FeO^* - CaO diagram

Pd 比值多 > 1 , ϵ_{Nd} 值多 $> +8$ 等), 钛铁系列岩石亏损最弱(或不亏损)(ϵ_{Nd} 值最低, 可在 $-2 \sim +3$ 之间; Os/Pd 比值多 < 0.2 ; La/Sm 比值和 Rb/Yb 比值多在 $1 \sim 4$ 之间), 而铜镍系列介于二者之间(但由于地壳物质同化混染较强, La/Sm 值和 Rb/Yb 值常高于钛铁系列)。3 个系列岩石的特点可能与地幔部分熔融程度有关, 一般认为, 铬铁系列或蛇绿岩系列是地幔高度部分熔融的产物(部分熔融程度可达 $30\% \sim 48\%$, 鲍佩声等, 1999); 铜镍系列岩石的部分熔融程度较低, 在 $10\% \sim 20\%$ (孙赫等, 2008); 而钛铁系列最低, 且干布拉克碱性辉长岩体的部分熔融程度极

低($< 5\%$, 董显扬等, 1995), 比一般钒钛磁铁矿矿床($5\% \sim 15\%$)(如河北大庙, 叶东虎, 1989; 周永昶等, 1989; 四川红格, 四川省地质矿产局攀西地质大队, 1987)还低。岩浆特征方面, 铬铁系列岩浆房最深, 具有低氧逸度特征; 钛铁系列最浅, 氧逸度最高, 铜镍系列介于二者之间。作为含矿岩体(或成矿地质体), 岩石中成矿元素的背景值明显偏高, 铜镍硫化物矿床含矿岩系明显富集 Cu、Ni、Co, 钒钛磁铁矿矿床富集 V、Ti 和 Fe, 铬铁矿矿床富集 Cr。可见岩浆源区富含相应的成矿元素是形成 3 个系列矿床相应成矿地质体的主要条件。

3 成岩成矿机制及矿床就位

3.1 铜镍系列

铜镍硫化物矿床的成矿机制研究较为深入,目前认为主要是岩浆熔离作用(Li et al., 1993; 汤中立等, 1995; 2007; Naldrett, 1999; 2004)。新疆北部这类矿床也不例外,其标志主要有斑杂状构造、豆状构造、珠滴状结构构造等(王润民等, 1987; 1991; 李承德等, 1996; 王玉往, 2009)。

大量铜镍硫化物矿床的研究实例表明,硫化物的熔离是由于富硫化物的液相和岩浆失去平衡而产生不混熔作用,引起液态不混熔作用的原因是硫在岩浆中的饱和状态(Rad'ko, 1991; Brugmann et al., 1993; Naldrett et al., 1993)。分离结晶作用是岩浆矿床形成的主要方式之一,新疆北部铜镍硫化物矿床也不例外,在许多铜镍硫化物矿床中,含矿岩石的 $Mg^{\#}$ 值明显偏离65%~72%的原始岩浆范围,橄榄石中 Fo 值偏低,均说明岩浆上升过程中存在橄榄石的分离结晶作用,而橄榄石中 Ni 的含量明显偏低,则说明橄榄石的分离结晶伴随了硫化物的熔离作用(Wang et al., 2011)。除分离结晶外,岩浆混合、外来硫的加入和岩浆与富 Si 围岩的同化混染,都是促使硫化物从硅酸盐熔体中熔离的重要原因(Ripley, 1981; Grinenko, 1985; Leshner et al., 1993; 刘凤山, 1993; Naldrett et al., 1993; Lightfoot et al., 1997; Naldrett, 1999; Li et al., 2000; 苏尚国等, 2004; 唐冬梅等, 2009a; 2009b; 苏本勋等, 2009; 2011)。来自 Sr 、 Nd 、 O 、 Pb 、 Os 等同位素,以及微量元素的证据表明,北疆地区铜镍硫化物矿床的岩浆受到了地壳物质不同程度的污染(Wang et al., 2011)。

在岩浆硫化物矿床中,地壳物质加入或者增加 Si 、 Fe 含量必然降低 Mg 的含量和降低 S 在岩浆中的溶解度,或者由于 K 、 Na 的加入,使岩浆碱度增加而导致硫的活度增加,从而有利于形成硫化物熔浆。

关于矿床的就位,新疆北部铜镍硫化物矿床大多存在就地熔离和深部熔离-贯入2种就位方式,并发育后期热液叠加成矿作用(王玉往等, 2004; Wang et al., 2004; 孙赫等, 2007; 2009; 王玉往, 2009),以岩浆熔离型的浸染状矿化为主。近年来,部分学者提出新疆北部有些铜镍矿(如图拉尔根等)具有‘通道式’成矿特征(三金柱等, 2007; 孙赫等, 2006; 刘平等, 2010),即含矿岩体作为岩浆通道,铜镍硫化物

矿体主要沉淀于通道壁及通道转折处(凹洼底部)。

玄武岩自然铜矿的成矿机制研究相对较少。该类矿床一般认为是火山热液活动的产物,但铜沉淀的机制有所不同。美国基维诺超大型自然铜矿和川滇黔地区的玄武岩自然铜矿均被认为是有机质(油气)还原作用导致硫化物还原而沉淀形成的自然铜矿(Ho et al., 1990; Mauk et al., 1992; 李厚民等, 2004; 张乾等, 2008)。东天山自然铜矿带有机质研究表明不存在强烈的后期有机质叠加,除自然铜外,未见其他原生铜矿物(袁峰等, 2008)。因此,东天山延绵上百 km 的自然铜矿化带的形成机制应以火山活动间歇期的同生火山热液成矿作用为主,矿体就位主要为火山喷发沉积和火山热液引起的浸染状矿化。

3.2 钛铁系列

钒钛磁铁矿矿床也普遍存在浸染状矿体和矿浆贯入式矿体2种就位方式,如攀枝花(李文臣, 1992)、大庙(孙静等, 2009)、尾亚(王玉往等, 2005)等。浸染状矿体一般均为层状,发育明显的韵律层特征,被认为是就地分离结晶作用的产物(McBirney et al., 1990; Cawthorn, 1996; 卢纪仁等, 1988; 王玉往等, 2005; 孙静等, 2009),而贯入式矿体则被认为是由深部分异形成,并可能有分离结晶作用(Zhou et al., 2005)和不混熔作用(宋谢炎等, 1994; 张正阶等, 1996)等形式。新疆北部尾亚地区钒钛磁铁矿和库鲁克塔格地区的铁磷矿均发育层状构造特征,尾亚矿床还发育典型的贯入式矿化,与国内外大多数同类矿床的成矿机制和就位方式相似。

然而,基性幔源岩浆中虽然含有足量的铁,但绝大部分铁存在于硅酸盐中,要产生足量含钒、钛的氧化铁,需要有足够的氧与之结合,因而需要较高的氧逸度(Snyder et al., 1993; Toplis et al., 1995)。在3个系列中,该系列的岩浆氧逸度最高(表1),这可能是产生氧过饱和的有利条件之一。在各类幔源岩浆矿床中,该类矿床以富 P_2O_5 为显著特征(表1),库鲁克塔格地区矿床中磷灰石为主要矿种。因为幔源岩浆中磷的含量非常低,如未亏损的地幔源区 $w(P)$ 仅为 387×10^{-6} ,上地幔为 170×10^{-6} (Anderson, 1983),因此,磷可能是外来加入的。尾亚地区所处的中天山地块中的元古界卡瓦布拉克群(Ptk)和寒武系西大山组均为富磷地层,暗示其在岩浆上升过程中可能同化了围岩地层中的含磷层位。磷在成矿过程中可能起到关键作用。Zhou等(2005)和宋谢

炎等(1994; 1999)对攀西地区钒钛磁铁矿研究表明,磷的加入是氧化物熔体不混熔的主要原因。矿区附近元古界地层(如卡瓦布拉克群、兴地塔格群)均富含厚层大理岩、白云岩层,镁、钙的加入使之与岩浆中硅酸盐结合形成单斜辉石,从而使大量的铁游离出来,与氧结合形成磁铁矿,因此,该区矿床的形成可能与含矿岩浆同化围岩中镁、钙有关。

对含钴磁铁矿矿床的成矿机制,前人研究相对较少,需进一步深入研究。从磁海矿床的矿体和矿石类型特征看,矿体为不规则脉状贯入辉绿岩、砂卡岩中,局部可呈条带状,围岩多砂卡岩化,总体应为岩浆期后热液交代充填成矿(薛春纪等,2000;唐萍芝,2010),侵入体的围岩蓟县系平头山群的长英质片岩和大理岩为矿液沉淀提供了有利环境。矿体和矿石类型中有相当一部分为贯入的铁矿浆成分,也不排除有深部岩浆分异的可能(赵玉社,2000;王玉往等,2006c;唐萍芝,2010)。由此可见,该类铁矿的形成与钒钛磁铁矿矿床有很大相似之处,即岩浆房上升过程中发生(很可能也是由于硅酸盐和碳酸盐的加入)岩浆分异,形成铁矿浆和产生成矿流体,在有利构造部位(如岩体侵入接触带)就位的结果。矿床的就位方式以热液交代充填为主,其次为矿浆贯入。

3.3 铬铁系列

关于蛇绿岩型铬铁矿的成因,人们对上部堆晶岩中的层状、似层状铬铁矿基本上认为属岩浆分异/分凝形成,但对 Moho 面以下的豆荚状铬铁矿的成因争议较大。仅就西准噶尔地区的富铝型铬铁矿(萨尔托海)就有:早期的深部分异(张弛等,1975;郝键,1986;周美付等,1994)或岩浆熔离(王恒升等,1983),随后的部分熔融模式(鲍佩声等,1990)、岩石(方辉橄橄榄岩)/熔体(母岩浆)反应模式(Zhou et al., 1997),以及熔融-再造模式(即富铬矿浆与基性熔体发生再平衡)(鲍佩声等,1997;鲍佩声,2009)等观点。近年来,杨经绥课题组(杨经绥等,2004;2007;2010)提出(西藏等地)豆荚状铬铁矿可能来自地幔柱的认识,实际上侧面支持了岩浆成因的观点。不论母岩浆的形成机制怎样,仅从铬铁矿体就位机制来看,该类矿石中出现大量的条带状、豆状构造更像是铜镍硫化物矿床岩浆熔离的特征。

不论是岩浆熔离还是矿浆/熔体再平衡,西准噶尔地区蛇绿岩的岩石地球化学特征均反映出(后来)岩浆过程中存在地壳物质的混染(郝梓国,1988;雷

敏等,2008;辜平阳等,2011)。萨尔托海地区铬铁矿中以明显富 B 为特征,矿石中 $w(B)$ 为 $5 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$,主要区间在 $15 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$,普遍高于围岩背景的 B(王玉山,1990);近矿围岩(褐色岩石)较远矿围岩(暗色岩石)B、Cl、S 等矿化剂含量高(魏文中等,1987),暗示在成矿过程中岩浆同化了围岩中的 B、Cl、S 等元素。由此看来,这类豆荚状铬铁矿的形成可能与幔源岩浆上侵到海底,吸收了海水中的 B 等元素有关。

新疆北部铬铁矿的矿化类型以浸染状矿体/矿石为主,另外还存在堆晶岩中的层状矿体(如洪古勒楞)以及贯入式矿体,后者甚至可穿入非超基性岩中(如萨尔托海,张弛等,1975;王恒升等,1983;周美付等,1994)。西准噶尔地区的铬铁矿(蛇绿岩)虽形成于洋中脊(白文吉等,1991;雷敏等,2008)或弧后盆地(郝梓国,1988),但矿床最终随超基性岩残片定位于缝合带中(定位前已成矿)。

4 各类型矿床之间的相互联系

矿床类型之间的相互联系是建立成矿谱系的关键。新疆北部这套幔源岩浆矿床类型之间,在成矿特征和成因机制上均存在一定联系。

4.1 铜镍硫化物与钒钛磁铁矿矿床相互过渡

铜镍硫化物矿床和钒钛磁铁矿矿床之间可形成复合型或过渡型矿床,典型实例是新疆的香山西矿床(Wang et al., 2005;王玉往等,2006a;2006b;2009),其钛铁系列的淡色辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 283 Ma(李德东等,2012),与香山铜镍矿床年龄(285 Ma,秦克章等,2002)基本一致,进一步证实两者基本同时,属典型的过渡型或复合类型。这类矿床中,铜镍硫化物矿体与钛铁矿体共生,含矿岩石有两套(即铜镍系列和钒钛系列),但为同时、同位、甚至同源产物(王玉往等,2009;肖庆华等,2010)。

4.2 玄武岩自然铜矿床与铜镍硫化物矿床同源

东天山地区十里坡自然铜矿化带与黄山-图拉尔根铜镍矿带毗邻,铜镍硫化物矿床与自然铜矿的含矿岩石具有相似的稀土元素、微量元素和亏损地幔源区(王京彬等,2008)。玄武岩的地球化学特征表明,玄武质岩浆形成后在岩浆房和上升至地表过程中没有发生明显的分离结晶作用和地壳物质混染,而与玄武岩对应的地幔橄橄榄岩平衡原生岩浆演化的高镁岩浆的产物,可能为东天山地区与铜镍硫化物成

矿有关的基性-超基性岩(袁峰等,2010),指示玄武岩自然铜矿床为铜镍硫化物矿床的喷出相产物。

4.3 钒钛磁铁矿床与次火山岩型磁铁矿矿床之间的关系

磁海铁矿的岩石组合为辉绿岩-辉长岩-橄榄辉长岩型,其中辉绿岩为磁海铁矿的成矿母岩(见前述),而矿区中部的辉长岩体局部钛铁矿富集可达工业品位。矿区北部的 M1598 磁异常,经钻探验证为含钛铁矿的辉长岩引起: $w(\text{TiO}_2)$ 一般在 3%~4%,最高可达 5.96%, $w(\text{TFe})$ 在 11%~14%,为一钛铁矿点(西北地质勘探局,1999)。

另外,矿区辉长岩中发育镍钴矿化(张明书等,1980),磁海、磁南矿段矿石中含有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿等硫化物,矿床的伴生钴元素含量较高,可达综合利用,推测这类铁矿可能与铜镍系列矿床存在联系或过渡,从其岩石系列来看,亦与亚碱性层状杂岩型的铜镍-钒钛铁复合型矿床类似。

4.4 铬铁矿矿床与钒钛磁铁矿矿床之间的联系

世界上铬铁矿矿床主要有 2 种,即层状铬铁矿和蛇绿岩型(即豆荚状)铬铁矿,前者与钒钛磁铁矿基本共生,属同期不同‘层位’分异结晶的韵律层,如南非 Bushveld 岩体、四川的红格岩体等。蛇绿岩型铬铁矿中豆荚状铬铁矿常与堆晶岩中的层状、似层状岩体在空间上伴生,如洪古勒楞等,其层状岩体赋存于含长纯橄岩-含长异剥橄岩-橄长岩-辉长辉绿

岩层序,为岩浆分异形成(鲍佩声等,1999),岩石组合和形成机制均与层状杂岩体铬铁矿(如 Bushveld, Great Dyke 等, Hulbert et al., 1985; Wilmes, 1989; Kruger, 2005)一致(白文吉等,1991 梅厚钧,1995)。

5 成矿谱系及成矿模式

矿床谱系指成矿多样性的某种规律性序列的表现。成矿谱系研究主要是发现和确立一组矿床之间的共同特征和其中各矿床之间的内在联系。建立完整的成矿模式离不开矿源、成矿机制和矿体就位 3 个要素,而成矿谱系的成矿模式还需要有不同矿床类型之间的内在联系。基于以上 4 个方面,笔者建立了如下新疆北部幔源岩浆矿床成矿谱系模式。

新疆北部与幔源岩浆有关的 3 个系列矿床分别属于地幔岩类不同阶段、不同深度深部熔融、演化,分不同级次上侵和就位的产物。按照矿床之间的关系,建立与幔源岩浆作用有关的 3 个系列矿床综合模式:亏损的地幔柱上侵到岩石圈地幔,导致岩石圈地幔部分熔融产生幔源岩浆,在上升过程中发生熔离/分异,分离为 3 个系列,由于外部物质加入到地壳深处发生分异和熔离,在不同深度富集形成铬铁矿、钒钛磁铁矿和铜镍硫化物矿床,临近地表时流体富集和分离成含矿流体,分别形成浅成岩型磁铁矿和喷出岩型自然铜矿(图 3)。

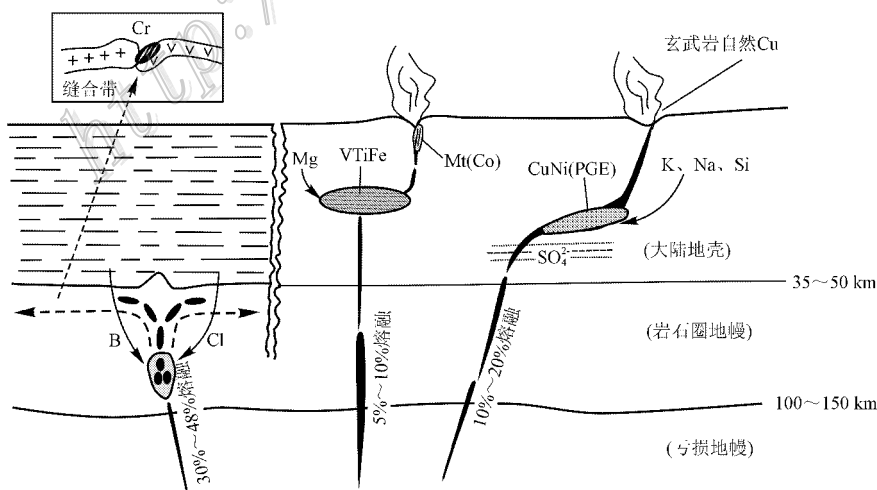


图 3 新疆北部幔源岩浆矿床谱系综合成矿模式

Fig. 3 Integrated metallogenic model of mantle-derived magmatic deposit lineage in northern Xinjiang

6 各类型矿床的构造环境及构造演化特征

关于上述各类幔源岩浆矿床的构造环境,前人已开展过不同程度的研究,总的来看,从早到晚主要产于以下 3 期构造阶段/构造类型中。

6.1 大陆裂解期

主要形成小岩体型铜镍矿和碱性层状杂岩型铁磷矿,以库鲁克塔格地区为代表。库鲁克塔格地块作为塔里木地块的一部分被认为是 Rodinia 超大陆裂解的产物(何国琦等,1994;Li et al.,1999)。Rodinia 超大陆形成于 Grenville 造山期(1.3~1.0 Ga, Hoffman,1991),存在于 1000~700 Ma 期间(Rogers et al.,2003),其裂解过程可能存在 2 次大的裂谷事件(峰值在 750 Ma 左右和 615 Ma 左右,李江海,1998)。库鲁克塔格地块保留有太古界变质岩基底(胡霭琴等,1995;李锦轶等,2006),新元古界发育双峰式岩浆活动(邓兴梁等,2008),发育陆内裂谷双峰式火山岩[(607±18) Ma~(755±15) Ma,展新忠,2010]、基性岩墙群(可分为早、中、晚 3 个时段:830~800 Ma、790~740 Ma 和 650~630 Ma,王飞,2011)和花岗岩(花岗岩脉(798±7) Ma,邓兴梁等,2008),反映出这一时期塔里木北缘处于陆内裂谷的构造环境,并可能受深部地幔柱活动的影响(Xu et al.,2005;王飞,2011)。且干布拉克等碱性层状杂岩(802 Ma,孙宝生等,2007)和兴地等小侵入体(760 Ma,Cao et al.,2011)即分别是裂谷早期和中期活动的产物(图 4a)。

6.2 板块俯冲期

主要形成蛇绿岩型铬铁矿和阿拉斯加型铜镍-PGE 矿。

新疆北部分布有大小十余条蛇绿岩带,主要形成于显生宙,同位素定年记载的时代从新元古代末(洪古勒楞)到早石炭世(巴音沟)。除巴音沟蛇绿岩存在异义之外,大多数蛇绿岩均为板块活动阶段的产物。蛇绿岩型铬铁矿可分为富铝型和富铬型,前者被认为产于洋中脊环境,后者多为岛弧环境(鲍佩声等,1990;1992)。然而,对新疆北部产铬铁矿蛇绿岩的构造环境争议极大,但总体上认为主要产于弧后盆地和洋中脊 2 种构造环境。其中“最老”的洪古勒楞蛇绿岩,可能为新元古代形成,蛇绿岩 Sm-Nd 等时线年龄为(625±25) Ma(黄建华等,1995),被认

为与东准噶尔阿尔曼台蛇绿岩带相连接,属 MOR 型蛇绿岩(白文吉等,1991;Wang et al.,2003;Xiao et al.,2008),产有洪古勒楞富铝型铬铁矿。唐巴勒也是较老的蛇绿岩之一,形成于早寒武世 MOR 环境,同位素年龄为 523~508 Ma(Kwon et al.,1989;Xiao et al.,1994),产有唐巴勒、萨雷诺海等富铬型铬铁矿。达拉布特蛇绿岩带是新疆最主要的铬铁矿矿带,蛇绿岩年龄 391~395 Ma(张弛等,1992;辜平等,2009),形成于中泥盆世,产有萨尔托海、鲸鱼等富铝型铬铁矿,曹荣龙(1994)和雷敏等(2008)认为是洋中脊型,而辜平等(2009)和张继恩等(2009)则认为属(弧后盆地)消减带型。东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩是新疆北部另一条铬铁矿带,可能形成于晚泥盆世—早石炭世,辉长岩锆石年龄 336~342 Ma(Jian et al.,2005),属岛弧或弧前盆地(Wang et al.,2003;Xiao et al.,2008)环境,产有清水等铬铁矿点(图 4b)。另外,近年来的研究表明,蛇绿岩型豆荚状铬铁矿的形成也可能与(超级)地幔柱活动有直接关系(张旗,1995;杨经绥等,2010)。

阿拉斯加型铜镍 PGE 矿见于西天山菁布拉克矿带,为南天山洋俯冲的产物。南天山洋俯冲发生在志留纪(416 Ma)之前(李锦轶等,2006),上志留统巴音布鲁克组发育岛弧型火山岩(Gao et al.,1998),菁布拉克岩体(434 Ma,张作衡等,2007)亦具有岛弧岩浆特征。

6.3 碰撞/后碰撞造山期

该期又分 3 个阶段

碰撞后伸展阶段 新疆北部大致在晚石炭世(约 325~299 Ma),以蛇绿岩消失(王京彬等,2006b)、广泛的 D/C 不整合(夏林圻等,2008)、出现钉合岩体(韩宝福等,2010)、高压蓝片岩(高俊等,2006)等一系列特征为标志,各洋盆相继闭合进入板块拼贴、陆-陆碰撞阶段(但各构造单元进入碰撞阶段的时间有一定差异)。以碱性岩和富碱花岗岩出现为标志,在陆-陆碰撞之后随即产生构造松弛和局部伸展进入后碰撞阶段。在晚石炭世晚期(大约 307~318 Ma,袁峰等,2007),由于碰撞后松弛阶段产生局部拉伸,形成类似双峰式火山岩组合(东天山马头滩组大陆拉斑玄武岩-流纹岩),产出了十里坡自然铜矿化带(图 4c)。

幔柱叠加造山阶段 在早二叠纪早期(大约 299~285 Ma),新疆北部产出了跨构造单元的小岩体型铜镍矿和亚碱性层状岩体型铜镍-钒钛复合型矿床

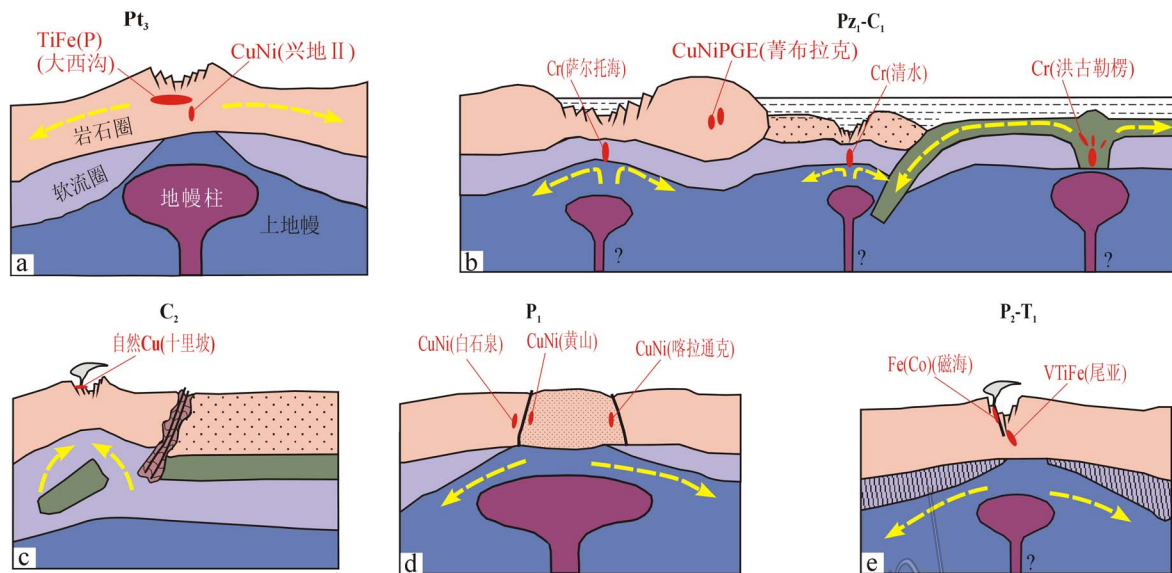


图 4 新疆北部幔源岩浆矿床构造演化示意图

a. 大陆裂解期; b. 板块俯冲期; c~e. 碰撞/后碰撞造山期, 其中 c. 碰撞后伸展阶段; d. 幔柱叠加造山阶段; e. 后碰撞结束(或克拉通化)阶段

Fig. 4 Sketch map showing tectonic evolution of mantle-derived magmatic deposits in northern Xinjiang

a. Continental rift stage; b. Plate subduction stage; c~e. Collision or post-collision orogenic stage, which can be divided into three sub-stages/processes; c. Post-collision stretching process; d. Mantle plume superimposition orogenic process; e. Collision termination or cratonization process

(王玉往, 2009; 王玉往等, 2010)。这 2 类幔源岩浆矿床含矿岩浆源自亏损地幔源区(岩石具有正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值), 与区域上早二叠世双峰式火山岩(邢秀娟等, 2004; 谭绿贵等, 2006)、中基性岩脉(徐芹芹等, 2008)等一致, 时间上与塔里木大火成岩省(陈汉林等, 1997; 厉子龙等, 2008; 余星等, 2009; 张传林等, 2010)响应, 表现出地幔柱活动特征(毛景文等, 2006; 王京彬等, 2008; Qin et al., 2011), 应属于地幔柱活动叠加在了后碰撞造山带上(图 4d)。

后碰撞结束(或克拉通化)阶段 在晚二叠世—早三叠世早期(大约 250 Ma 前后), 新疆北部进入后碰撞结束阶段, 整体上以挤压调整为主, 大规模走滑和韧性剪切活动发育(黄山剪切带糜棱岩 Ar-Ar 年龄集中在 246~247 Ma, 陈文等, 2007)。部分地区, 如新疆东部, 出现局部伸展, 发育双峰式岩浆活动, 早期尚有零星的中晚二叠世陆相酸性火山岩喷发(北山地区), 磁海矿区(268~255 Ma)的辉长岩-橄长岩-辉绿岩组合亦显示拉张环境(唐萍芝等, 2010); 晚期则表现为小规模富碱酸性岩浆侵入活动, 如东天山地区土墩钾长花岗岩体(246 Ma, 周涛发等, 2010)、尾亚石英正长岩体(Zhang et al., 2005)

和碱性层状岩体(尾亚矿床 248.6 Ma, 本文)侵入活动(图 4e)。该阶段岩浆活动的动力学机制尚不清楚, 有可能受到峨眉山幔柱(玄武岩主喷发期为 257~259 Ma, 宋谢炎等, 2001)和西伯利亚地幔柱(主期玄武岩喷发年龄 250~251 Ma, Sharma, 1997)的远程力学效应影响。该期幔源岩浆活动与幔柱叠加阶段不同, 亏损地幔特征不明显($\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值有正有负, 表 1), 岩石系列也从钙碱性系列演化为碱性系列。

从上述幔源岩浆矿床的形成时代和构造背景演化来看, 具有以下主要特征: ① 主体表现为拉张性质的构造环境; ② 在空间分布上, 不同类型和时代的基性-超基性岩体/岩带具有继承性和“同位性”, 但矿床具有独立成带和“转换成矿”特征。如额尔齐斯蛇绿岩带(科克森套-乔夏哈拉-布尔根)为泥盆纪形成(吴波等, 2006; 王玉往等, 2011), 与二叠纪喀拉通克小侵入体型铜镍矿带毗邻, 但蛇绿岩中尚未发现铬铁矿; 又如, 西准噶尔地区蛇绿岩带赋存有许多中、小型铬铁矿矿床, 同时二叠纪基性脉岩群也相对发育, 但至今未发现有小侵入体型铜镍矿和浅成岩型磁铁矿。这种具备成岩条件却未发现相应矿化的地区均值得开展“缺位”找矿。

7 主要结论

(1) 新疆北部幔源岩浆矿床,包括铬铁矿矿床、钒钛磁铁矿矿床、铜镍硫化物矿床、铂族元素(PGE)矿床、铜镍-钒钛铁复合型矿床、含钴磁铁矿矿床、玄武岩自然铜矿床、热液型钴-多金属矿床,以及非金属矿床等,按照含矿地质体的类型,可分为6种类型:蛇绿岩型、层状杂岩型、小侵入体型、阿拉斯加型、浅成岩型和喷出岩型。

(2) 这类幔源岩浆矿床可划分为3个成岩成矿系列:铜镍系列、钛铁系列和铬铁系列。铜镍系列包括小侵入体型铜镍硫化物矿床、阿拉斯加型铜镍PGE矿床和喷出岩型玄武岩自然铜矿床,钛铁系列包括碱性层状杂岩型钒钛磁铁矿和铁磷矿床,铬铁系列主要指蛇绿岩型矿床、钴-多金属矿床等,而与亚碱性层状杂岩有关的铜镍-钒钛铁复合型矿床属于铜镍系列和钛铁系列的复合类型,浅成岩型含钴磁铁矿矿床总体属于钛铁系列,但与铜镍系列有过渡。3个系列的岩浆源具有明显差异:铜镍系列主要为偏镁的铁质拉斑玄武岩系列,含矿岩系明显富集铜、镍、钴,钒钛系列为富铁质的碱性玄武岩系列,富集钒、钛和铁,铬铁系列为富镁质的拉斑玄武岩系列,富集铬。因此,岩浆源区富含相应的成矿元素,形成相应的成矿地质体是3个系列矿床的主要成矿条件。

(3) 3个系列矿床的成矿机制可分为深部熔离/岩浆分异、就地分凝、岩浆贯入、岩浆热液等过程,各系列矿床之间存在紧密联系:如铜镍硫化物与钒钛磁铁矿矿床相互过渡,玄武岩自然铜矿床与铜镍硫化物矿床同源,钒钛磁铁矿与次火山岩型磁铁矿矿床的共生,豆荚状铬铁矿与层状铬铁矿共生,等等。根据矿床之间的关系,建立与幔源岩浆作用有关的3个系列矿床综合模式:亏损地幔部分熔融产生的幔源岩浆在上升过程中发生熔离/分异,分离为3个系列,由于外部物质加入在地壳深处发生分异和熔离,在不同深度富集形成铬铁矿、钒钛磁铁矿和铜镍硫化物矿床,临近地表时流体富集和分离成含矿流体,分别形成浅成岩型磁铁矿和喷出岩型自然铜矿。

(4) 上述各类幔源岩浆矿床从早到晚主要产于以下3期构造阶段/构造类型中:①大陆裂解期,主要形成小岩体型铜镍矿和碱性层状杂岩型铁磷矿,以库鲁克塔格地区为代表。②板块俯冲期,主要形

成蛇绿岩型铬铁矿和阿拉斯加型铜镍-PGE矿。③碰撞/后碰撞造山期,又分3个阶段:碰撞后伸展阶段,主要形成玄武岩自然铜矿;幔柱叠加造山阶段主要形成小侵入体型铜镍矿和亚碱性层状岩体型铜镍-钒钛复合型矿床;后碰撞结束(或克拉通化)阶段主要形成浅成岩型(Co)磁铁矿和钒钛磁铁矿矿床。

志 谢 感谢审稿人对本文提出的修改意见和建议。

参考文献/References

- 白文吉,周美付. 1991. 新疆洪古勒楞蛇绿岩套中堆积杂岩的地球化学特征及成因[J]. 中国地质科学院院报,24:63-78.
- 鲍佩声,王希斌,郝梓国,彭根永,张让民,陈清植,杨廷辉. 1990. 对富铝型豆荚状铬铁矿矿床成因的新认识——以新疆萨尔托海铬铁矿矿床为例[J]. 矿床地质,9(2):97-111.
- 鲍佩声,王希斌,郝梓国,彭根永. 1992. 阿尔卑斯超镁铁岩的演化及上地幔的局部熔融[J]. 地质学报,66(3):227-244.
- 鲍佩声,王希斌. 1997. 富铝型豆荚状铬铁矿矿床的成矿模式[J]. 地球学报,18(1):25-39.
- 鲍佩声,王希斌,彭根永. 1999. 中国铬铁矿床[M]. 北京:科学出版社,98-142.
- 鲍佩声. 2009. 再论蛇绿岩中豆荚状铬铁矿的成因——质疑岩石/熔体反应成矿说[J]. 地质通报,28(12):1741-1761.
- 曹荣龙. 1994. 新疆北部蛇绿岩及基性-超基性杂岩[J]. 新疆地质,12(1):25-31.
- 柴凤梅. 2006. 新疆北部三个与岩型 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研究(博士论文)[D]. 北京:中国地质大学(北京),154页.
- 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.
- 陈 文,张 彦,秦克章,王清利,王义天,刘新宇. 2007. 新疆东天山剪切带型金矿床时代研究[J]. 岩石学报,23(8):2007-2016.
- 陈汉林,杨树锋,董传万,贾承造,魏国齐,汪振国. 1997. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的确定及大地构造意义[J]. 地球化学,26(6):77-87.
- 初振利. 2010. 新疆铜镍矿床成矿规律和成矿预测研究(硕士论文)[D]. 昆明:昆明理工大学,92页.
- 邓兴梁,舒良树,朱文斌,马东升,王 博. 2008. 新疆兴地断裂带前寒武纪构造-岩浆-变形作用特征及其年龄[J]. 岩石学报,24(12):2800-2808.
- 董连慧,胡建卫,刘 拓,屈 迅,桑少杰,崔 彬,和志军,白光宇. 2003. 新疆东天山地区首次发现自然铜矿化带[J]. 矿床地质,2(2):1.
- 董连慧,朱志新,屈 迅,王克卓,赵同阳. 2010. 新疆蛇绿岩带的分布、特征及研究新进展[J]. 岩石学报,26(10):2894-2904.
- 董显扬,李 行,叶良知. 1995. 中国超镁铁质岩[M]. 北京:地质出版社,329页.

- 高俊,龙灵利,钱青,黄德志,苏文,Reiner K. 2006. 南天山晚古生代还是三叠纪碰撞造山带[J]. 岩石学报,22(5):1049-1061.
- 巩志超,李行. 1987. 新疆西准噶尔地区基性超基性岩生成地质背景及区域成矿特征一、基性超基性岩生成背景[J]. 西北地质科学, (4):3-47.
- 辜平阳,李永军,张兵,佟丽莉,王军年. 2009. 西准达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年[J]. 岩石学报,25(6):1364-1372.
- 辜平阳,李永军,王晓刚,张洪伟,王军年. 2011. 西准噶尔达尔布特 SSZ 型蛇绿杂岩的地球化学证据及构造意义[J]. 地质论评,57(1):36-44.
- 韩宝福,郭召杰,何国琦. 2010. “缝合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限[J]. 岩石学报,26(8):2233-2246.
- 韩春明,肖文交,赵国春,屈文俊,毛启贵,杜安道. 2006. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素研究及其地质意义[J]. 岩石学报,22(1):163-170.
- 郝钢力,张永珍. 1988. 新疆黄山东硫化铜镍矿床特征[J]. 新疆地质,6(4):16-28.
- 郝键. 1986. 试谈新疆铬铁矿床成因类型的划分[J]. 新疆地质,4(2):70-76.
- 郝杰,刘小汉. 1993. 南天山蛇绿混杂岩形成时代及大地构造意义[J]. 地质科学,28(1):93-95.
- 郝梓国. 1988. 新疆西准噶尔地区蛇绿岩与豆荚型铬铁矿床的成因研究(博士论文)[D]. 北京:中国地质科学院. 140 页.
- 何国琦,李茂松,刘德权,唐延龄,周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社. 437 页.
- 胡霏琴,张国新,李启新,张前锋,胡树荣,范嗣昆,郭陀珠. 1995. 新疆北部主要地质事件同位素年表[J]. 地球化学,24(1):20-31.
- 黄建华,吕喜朝,朱星南,帕拉提·阿不都卡迪尔. 1995. 北准噶尔洪古勒楞蛇绿岩研究的新进展[J]. 新疆地质,13(1):20-30.
- 颌炜,宋谢炎,晁晓勇,程松林. 2011. 新疆坡十铜镍硫化物含矿岩体岩浆源区特征及构造背景探讨[J]. 地学前缘,18(3):189-200.
- 雷敏,赵志丹,侯青叶,张宏飞,许继峰,陈岳龙,张本仁,刘希军. 2008. 新疆达拉布特蛇绿岩带玄武岩地球化学特征:古亚洲洋与特提斯洋的对比[J]. 岩石学报,24(4):661-672.
- 李承德,慕纪录,竺国强. 1996. 新疆哈密黄山东成矿带浅富矿成因与成矿规律[M]. 成都:成都科技大学出版社. 204 页.
- 李德东,王玉往,王京彬,王莉娟,龙灵利,廖震. 2012. 新疆香山杂岩体的成岩与成矿时序[J]. 岩石学报,28(7):2103-2112.
- 李华芹,陈富文,路远发,杨红梅,郭敬,梅玉萍. 2005. 新疆东部印支期成岩成矿年代学新证据[J]. 地质学报,79(2):264-275.
- 李厚民,毛景文,张长青,许虹,陈毓川. 2004. 滇黔交界地区玄武岩铜矿有机质的组成、结构及成因[J]. 地质学报,78(4):519-526.
- 李江海. 1998. 前寒武纪的超大陆旋回及其板块构造演化意义[J]. 地学前缘,5(增刊):141-151.
- 李锦轶,何国琦,徐新,李华芹,孙桂华,杨天南,高立明,朱志新. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报,80(1):148-168.
- 李文臣. 1992. 攀枝花钒钛磁铁矿床地质及其成因[J]. 地质与勘探, (1):18-21.
- 李先梓,李行,洛长义,师占义,王懿圣,杨星,陆瑶,罗玉鹏,苏犁,李文明,魏贵安. 1991. 新疆铂族元素成矿地质条件及找矿方向研究[A]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所文集[C]. 33:1-93.
- 李行. 1987. 新疆西准噶尔地区基性超基性岩生成地质背景及区域成矿特征五、成岩成矿作用机制及模式[J]. 西北地质科学, (4):104-131.
- 厉子龙,杨树锋,陈汉林,Langmuir C H,余星,林秀彬,励音骐. 2008. 塔西南玄武岩年代学和地球化学特征及其对二叠纪地幔柱岩浆演化的制约[J]. 岩石学报,24(5):959-970.
- 廖后林,戴塔根,刘悟辉,胡云锋,邱冬生. 1999. 北疆铜镍找矿的初步探讨[J]. 有色金属矿产与勘查,8(4):193-197.
- 林锦富,邓燕华. 1996. 新疆哈拉达层状基性岩体的含矿性[J]. 桂林工学院学报,16(3):252-264.
- 刘凤山. 1993. 铜镍硫化物矿床成矿理论的新进展[J]. 地质科技情报,12(2):77-81.
- 刘平平,秦克章,苏尚国,三金柱,唐冬梅,苏本勋,孙赫,肖庆华. 2010. 新疆东天山图拉尔根大型铜镍矿床硫化物珠滴构造的特征及其对通道式成矿的指示[J]. 岩石学报,26(2):523-532.
- 卢纪仁,张承信,张光第,顾光先,刘玉书,黄与能. 1988. 攀西地区钒钛磁铁矿床的成因类型[J]. 矿床地质,7(1):1-13.
- 吕林素,刘瑑,张作衡,谢桂青. 2007. 中国岩浆型 Ni-Cu-(PGE)硫化物矿床的时空分布及其地球动力学背景[J]. 岩石学报,23(10):2561-2594.
- 毛景文,Franco P,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晚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.
- 梅厚钧. 1995. 蛇绿岩铬矿床的分布与成因及中国铬矿床的类型[J]. 岩石学报,11(增刊):42-61.
- 倪守斌,满发胜,陈江峰. 1994. 新疆焉布拉克基性超基性岩带的 Sm-Nd 同位素年龄[J]. 岩石矿物学杂志,13(3):227-231.
- 倪志耀. 1991. 新疆哈密黄山东镁铁-超镁铁杂岩体中橄榄石的化学成分及其岩石学意义[J]. 矿物岩石,11(3):40-47.
- 秦克章,方同辉,王书来,朱宝清,冯益民,于海峰,修群业. 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.
- 三金柱,惠卫东,秦克章,孙赫,徐兴旺,梁光河,魏俊瑛,康峰,肖庆华. 2007. 新疆哈密图拉尔根全岩矿化岩浆铜-镍-钴矿床地质特征及找矿方向[J]. 矿床地质,26(3):307-316.
- 四川省地质矿产局攀西地质大队. 1987. 四川红格钒钛磁铁矿床成矿条件及地质特征[M]. 北京:地质出版社. 220 页.
- 宋谢炎,马润则,王玉兰,张正阶. 1994. 攀枝花层状侵入体韵律层理及岩浆演化特征[J]. 矿物岩石, (4):37-45.
- 宋谢炎,王玉兰,张正阶,马润则. 1999. 层状侵入体韵律层理形成过程的定量模拟——以四川攀枝花层状岩体为例[J]. 地质学报,73(1):37-46.
- 宋谢炎,侯增谦,曹志敏,卢纪仁,汪云亮,张成江,李佑国. 2001. 峨眉大火成岩省的岩石地球化学特征及时限[J]. 地质学报,75

- (4) 498-506.
- 苏本勋, 秦克章, 孙 赫, 唐冬梅, 肖庆华, 曹明坚. 2009. 新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征: 对同化混染和结晶分异过程的启示[J]. 岩石学报, 25(4) 873-887.
- 苏本勋, 秦克章, 唐冬梅, 邓 刚, 肖庆华, 孙 赫, 卢鸿飞, 代玉财. 2011. 新疆北山地区坡十镁铁-超镁铁岩体的岩石学特征及其对成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 27(12) 3627-3639.
- 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[J]. 现代地质, 18(4): 454-459.
- 孙宝生, 黄建华. 2007. 新疆且干布拉克超基性岩-碳酸岩杂岩体 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(7) 1611-1616.
- 孙 赫, 秦克章, 李金祥, 徐兴旺, 三金柱, 丁奎首, 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 赫, 秦克章, 徐兴旺, 李金祥, 丁奎首, 许英霞, 三金柱. 2007. 东天山镁铁质-超镁铁质岩带岩石特征及铜镍成矿作用[J]. 矿床地质, 26(1) 198-209.
- 孙 赫, 秦克章, 李金祥, 徐兴旺, 三金柱, 丁奎首, 惠卫东, 许英霞. 2008. 地幔部分熔融程度对东天山镁铁质-超镁铁质岩铂族元素矿化的约束: 以图拉尔根和香山铜镍矿为例[J]. 岩石学报, 24(5) 1079-1086.
- 孙 赫, 唐冬梅, 秦克章, 范 新, 肖庆华, 苏本勋. 2009. 亲铜元素的地球化学行为研究进展及其在岩浆硫化物矿床中的应用[J]. 地质论评, 55(6) 840-850.
- 孙 静, 杜维河, 王德忠, 李 健, 徐国新, 韩玉丑. 2009. 河北承德大庙黑山钒钛磁铁矿床地质特征与成因探讨[J]. 地质学报, 83(9) 1344-1364.
- 谭理贵, 周涛发, 袁 峰, 范 裕, 岳书仓. 2006. 新疆萨吾尔地区二叠纪火山岩地球动力学背景[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 9(7) 868-873.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社. 304 页.
- 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.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙 赫, 漆 亮, 肖庆华, 苏本勋. 2009a. 东疆天宇岩浆 Cu-Ni 矿床的铂族元素地球化学特征及其对岩浆演化、硫化物熔离的指示[J]. 地质学报, 83(5) 680-697.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙 赫, 苏本勋, 肖庆华, 程松林, 李 军. 2009b. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约[J]. 岩石学报, 25(4): 817-831.
- 唐萍芝. 2010. 新疆磁海铁矿床地球化学特征(硕士论文)[D]. 昆明: 昆明理工大学. 65 页.
- 唐萍芝, 王京彬, 王玉往, 龙灵利. 2010. 新疆磁海铁矿区镁铁-超镁铁岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球化学, 39(6) 542-552.
- 田战武. 2007. 新疆喀拉通克铜镍矿成矿预测研究[D]. 西安: 长安大学. 59 页.
- 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.
- 王 飞. 2011. 新疆北部前寒武纪基性岩的年代学和地球化学特征及地质意义(硕士论文)[D]. 南京: 南京大学硕士学位论文. 69 页.
- 王恒升, 白文吉, 王炳熙, 柴熠楚. 1983. 中国铬铁矿及其成因[M]. 北京: 科学出版社. 227 页.
- 王京彬, 王玉往. 2006a. 新疆尾亚钒钛磁铁矿矿床成矿年龄探讨[J]. 矿床地质, 25(增刊) 309-312.
- 王京彬, 徐 新. 2006b. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J]. 地质学报, 80(1) 23-31.
- 王京彬, 王玉往, 周涛发. 2008. 新疆北部后碰撞与幔源岩浆有关的成矿谱系[J]. 岩石学报, 24(4) 743-752.
- 王可南, 姚慧慧. 1992. 中国铁床床综论[M]. 北京: 冶金工业出版社. 46-269.
- 王润民, 刘德权, 殷定泰. 1987. 新疆哈密土墩-黄山一带铜镍硫化物矿床成矿控制条件及找矿方向的研究[J]. 矿物岩石, (1) 1-178.
- 王润民, 赵昌龙. 1991. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床与矿产[M]. 北京: 地质出版社. 319 页.
- 王有标. 1990. 新疆铜镍硫化物矿床的基本地质特点[J]. 新疆地质, 8(4) 306-321.
- 王玉山. 1990. 新疆萨尔托海铬铁矿的地球化学晕特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 10(4) 66-74.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 方同辉. 2004. 新疆哈密黄山地区铜镍硫化物矿床的稀土元素特征及意义[J]. 岩石学报, 20(4) 935-948.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 秦全新, 彭晓明, 惠卫东. 2005. 新疆尾亚钒钛磁铁矿——一个岩浆分异-贯入-热液型复成因矿床[J]. 矿床地质, 24(4) 349-360.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟. 2006a. 东天山地区两类钒钛磁铁矿型矿床含矿岩石对比[J]. 岩石学报, 22(5) 1425-1436.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 彭晓明, 惠卫东, 秦全新. 2006b. 岩浆铜镍矿与钒钛磁铁矿的过渡类型——新疆哈密香山西矿床[J]. 地质学报, 80(1) 61-73.
- 王玉往, 沙建明, 程 春. 2006c. 新疆磁海铁(钴)矿床磁铁矿成分及其成因意义[J]. 矿床地质, (增刊) 321-324.
- 王玉往, 王京彬. 2006d. 与镁铁-超镁铁质岩石有关的矿床类型[J]. 中国地质, 33(3) 656-665.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利. 2008. 新疆尾亚含矿岩体锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(4): 781-792.
- 王玉往. 2009. 新疆北部与后碰撞镁铁-超镁铁质杂岩有关的成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京). 140 页.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利. 2009. 新疆香山铜镍钛铁矿区两个镁铁-超镁铁岩系列及特征[J]. 岩石学报, 25(4) 888-900.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利, 唐萍芝, 廖 震, 张会琼. 2010. Cu-Ni-VTiFe 复合型矿化镁铁-超镁铁杂岩体岩相学及岩石地球化学特征: 以新疆北部为例[J]. 岩石学报, 26(2) 401-412.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 龙灵利, 唐萍芝, 廖 震, 张会琼. 2011. 新疆吐尔库班套蛇绿混杂岩的发现及其地质意义[J]. 地学前缘, 18(3) 151-165.
- 王宗秀, 周高志, 李 涛. 2003. 对新疆北部蛇绿岩及相关问题的思考和认识[J]. 岩石学报, 19(4) 683-691.

- 魏文中,董显扬,曾河清,高纪璞. 1987. 新疆萨尔托海超基性岩体及铬铁矿床的地质特征和成因[J]. 西北地质科学, (2) 37-154.
- 吴波,何国琦,吴泰然,李会军,罗红玲. 2006. 新疆布尔根蛇绿混杂岩的发现及其大地构造意义[J]. 中国地质, 33(3) 476-486.
- 吴华,李华芹,莫新华,陈富文,路远发,梅玉萍,邓刚. 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.
- 西北地质勘探局. 1999. 新疆哈密市磁海铁矿Ⅱ期露天采区地质勘探报告[R].
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,李向民,马中平. 2008. 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J]. 西北地质, 41(4) 1-68.
- 夏学惠,谭云基,武奕立,李忠彦,袁家忠,郝国庆. 2008. 新疆库鲁克塔格地区铁磷矿成矿条件及找矿预测[J]. 化工矿产地质, 30(2) 91-98.
- 夏学惠,袁家忠,郝国庆,梁中朋. 2010. 新疆大西沟杂岩体地球化学及铁磷矿床特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4) 879-885.
- 夏昭德,石福品,胡秀军,姜常义. 2009. 新疆库鲁克塔格地区兴地Ⅱ号镁铁-超镁铁质岩体的地球化学特征与岩石成因[J]. 岩石学报, 25(4) 805-816.
- 肖庆华,秦克章,唐冬梅,苏本勋,孙赫,三金柱,曹明坚,惠卫东. 2010. 新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物——矿相学、锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 26(2) 503-522.
- 肖序常,唐耀庆,冯益民,朱宝清,李锦轶,赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京:地质出版社. 169页.
- 邢秀娟,周鼎武,柳益群,郝建荣. 2004. 吐哈盆地及周缘早二叠世火山岩地球化学特征及大地构造环境探讨[J]. 新疆地质, 22(1) 50-55.
- 徐芹芹,李建清,韩宝福,朱美妃,储著银,周晶. 2008. 新疆北部晚古生代以来中基性岩脉的年代学、岩石学、地球化学研究[J]. 岩石学报, 24(5) 977-996.
- 徐学义,马中平,夏林圻,王彦斌,李向民,夏祖春,王立社. 2005. 北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩锆石 SHRIMP 测年及其意义[J]. 地质论评, 51(5) 523-527.
- 薛春纪,姬金生,杨前进. 2000. 新疆磁海铁(钴)矿床次火山热液成矿学[J]. 矿床地质, 19(2) 156-164.
- 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(5) 330-333.
- 杨合群,洛长义,朱宝清,罗玉鹏,张开春. 1997. 新疆兴地含铜镍基性超基性侵入体地质特征及成矿条件[J]. 西北地质科学 18(2) 43-53.
- 杨甲全,钟莉,邓刚. 2002. 北山地区坡北1号、10号基性-超基性岩体成矿预测及找矿方向[J]. 新疆地质, 20(3) 214-218.
- 杨经绥,白文吉,方青松,顾秉刚,戎合,陈松永. 2004. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿中发现超高压矿物柯石英[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 29(6) 651-660.
- 杨经绥,白文吉,方青松,孟繁聪,陈松永,张仲明,戎合. 2007. 极地乌拉尔豆荚状铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群[J]. 中国地质, 34(5) 950-952.
- 杨经绥,巴登珠,徐向珍,李兆丽. 2010. 中国铬铁矿床的再研究及找矿前景[J]. 中国地质, 37(4) 1141-1150.
- 杨天南,李锦轶,孙桂华,王彦斌. 2006. 中天山早泥盆世陆弧:来自花岗质糜棱岩地球化学及 SHRIMP-U/Pb 定年的证据[J]. 岩石学报, 22(1) 41-48.
- 叶东虎. 1989. 河北省承德市黑山钒钛磁铁矿床, 钒钛磁铁-磷灰石矿床地质特征即成矿机理[R]. 河北省地矿局第四地质大队. 335页.
- 伊献端,朱生英. 1983. 新疆铜花山钴-多金属矿床地质特征及成因类型探讨[J]. 西北地质, (3) 18-27.
- 余星,陈汉林,杨树峰,厉子龙,王清华,林秀斌,徐岩,罗俊成. 2009. 塔里木盆地二叠纪玄武岩的地球化学特征及其与峨眉山大火成岩省的对比[J]. 岩石学报, 25(6) 1492-1498.
- 袁峰,周涛发,范裕,谭绿贵,David C, Sebastien M, 王庆民,王卫江. 2007. 新疆东天山十里坡自然铜矿化区马头滩组玄武岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄及其意义[J]. 岩石学报, 23(8) 1973-1980.
- 袁峰,周涛发,张达玉,范裕,刘帅. 2008. 东天山自然铜矿化带矿石的有机质特征及其意义[J]. 岩石学报, 24(12) 2701-2712.
- 袁峰,周涛发,张达玉,范裕,刘帅,彭明兴,张建滇. 2010. 东天山自然铜矿化带玄武岩的起源、演化及成岩构造背景[J]. 岩石学报, 26(2) 533-546.
- 袁林,肖森宏,战新志. 1991. 新疆喀拉通克矿区二、三号硫化铜镍矿床及其外围地区的中基性岩体含矿性研究[J]. 矿物岩石地球化学通讯, (3) 193-195.
- 袁英霞,潘朝霞,钱玉珍. 2002. 新疆库鲁克塔格兴地Ⅱ号岩体铜镍含矿性评价[J]. 新疆地质, 20(1) 49-52.
- 展新忠. 2010. 新疆库鲁克塔格地区新元古代—早寒武世火山岩地质地球化学特征及其构造意义(学位论文)[D]. 乌鲁木齐:新疆大学. 70页.
- 张弛,乌统旦,鲁友直,王广瑞. 1975. 新疆含铬超基性岩成矿因素初步探讨[J]. 地质学报, (2) 152-161.
- 张弛. 1981. 新疆蛇绿岩某些地质特征[J]. 地质论评, 27(4) 307-314.
- 张弛,黄萱. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨[J]. 地质论评, 38(6) 509-524.
- 张旗. 1995. 中国蛇绿岩研究概述[J]. 岩石学报, 11(增刊) 1-9.
- 张乾,王大鹏,范良伍,朱笑青,张正伟. 2008. 滇黔相邻地区峨眉山玄武岩型自然铜-辉铜矿床的成矿规律及成矿前景分析[J]. 地质与勘探, 44(2) 8-13.
- 张传林,周刚,王洪燕,董永观,丁汝福. 2010. 塔里木和中亚造山带西段二叠纪大火成岩省的两类地幔源区[J]. 地质通报, 29(6) 779-794.
- 张继恩,肖文交,韩春明,毛后贵,敖松坚,郭谦谦. 2009. 西准噶尔野鸭沟地区褶皱冲断构造的特征及意义[J]. 地质通报, 28(12): 1894-1903.
- 张明书,张建中,郭介人,陈书章,金浩甲,李世强. 1980. 磁海式铁矿地质特征初步研究[J]. 地质与勘探, (8) 25-32.
- 张正阶,宋谢炎,王玉兰,马润则. 1996. 席状岩浆房中的岩浆冷却及动力稳定性[J]. 岩石学报, 12(1) 1-16.
- 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.
- 张作衡, 王志良, 毛景文, 柴凤梅, 杨富全, 杨建民. 2006. 西天山菁布拉克基性杂岩体的地球化学特征[J]. 地质学报, 80(7): 1006-1016.
- 张作衡, 王志良, 王彦斌, 左国朝, 王龙生, 吕林素. 2007. 新疆西天山菁布拉克基性杂岩体闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4): 353-360.
- 赵莉, 张招崇, 闫升好, 周刚, 陈柏林, 柴凤梅. 2006. 新疆阿尔泰库卫岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 25(3): 194-202.
- 赵昌龙. 1991. 喀拉通克 1 号铜镍硫化物矿床研究[J]. 新疆地质, 9(3): 195-211.
- 赵玉社. 2000. 新疆磁海铁矿床地质特征及矿床成因[J]. 西北地质, 33(1): 31-38.
- 周美付. 1987. 新疆托里萨 1 金矿床的地质特征及成因研究[J]. 地质找矿论丛, 2(3): 20-30.
- 周美付, 白文吉. 1994. 对豆荚状铬铁矿床成因的认识[J]. 矿床地质, 13(3): 242-249.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. 岩石学报, 26(2): 478-502.
- 周永昶, 袁朝. 1989. 大庙斜长岩杂岩体及铁磷矿的稀土元素地球化学研究[J]. 长春地质学院学报, 19(1): 43-52, 84.
- 朱训. 1999. 中国矿情(第二卷)[M]. 北京: 科学出版社. 312-331 页.
- Anderson D L. 1983. Chemical composition of the mantle[J]. Journal of Geophysical Research, 88 (Supp.): 41-52.
- Brugmann G E, Naldrett A J, Asif M, Lightfoot P C, Gorbachev N S and Fedorenko V A. 1993. Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian Traps in the Noril'sk Region, Russia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 2001-2018.
- Cao X F, Gao X, Lv X B, Qin Q, Liu S T, Chen C, Guo R Q, Zhang B and Hu Q T. 2011. Sm-Nd geochronology and geochemistry of a Neoproterozoic gabbro in the Kuluketage block, north western China [J]. International Geology Review, Doi: 10. 1080/00206814. 2011. 639946.
- Cawthorn R G. 1996. Layered Intrusions[M]. Netherlands. 519p.
- Gao J, Li M S, Xiao X C, Tang Y Q and He G Q. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China [J]. Tectonophysics, 287: 213-231.
- Grinenko L N. 1985. Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbro-dolerite intrusions of the northwest Siberian platform [J]. International Geology Review, 695-708.
- Ho E S, Meyers P A and Mauk J L. 1990. Organic geochemical study of mineralization in the Keweenaw Nonesuch Formation at White Pine, Michigan [J]. Organic Geochemistry, 16(1-3): 229-234.
- Hoffman P F. 1991. Did the breakup of Laurentia turn Gondwanaland insideout [J]. Science, 252: 1409-112.
- Hulbert L J and Von G G. 1985. Textural and compositional features of chromite in the lower and critical zones of the Bushveld Complex south of Potgietersrus [J]. Econ. Geol., 80: 872-895.
- Jian P, Lui D Y, Shi Y R and Zhang F Q. 2005. SHRIMP dating of SSZ ophiolites from northern Xinjiang Province, China: Implications for generation of oceanic crust in the Central Asian Orogenic Belt [A]. In: Sklyarov E V, ed., Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: North-eastern segment. Guidebook and Abstract Volume of the Siberian Workshop IGCP-480 [C]. IEC SB RAS, Irkutsk, 246p.
- Kruger F J. 2005. Filling the Bushveld Complex magma chamber: Lateral expansion, roof and floor interaction, magmatic unconformities, and the formation of giant chromitite, PGE and Ti-V-magnetite deposits [J]. Mineralium Deposita, 40: 451-472.
- Kwon S F, Tilton G R, Coleman R G and Feng Y. 1989. Isotopic studies bearing on the tectonics of the west Junggar region, Xinjiang, China [J]. Tectonics, 8: 719-729.
- Leshner C M and Campbell I H. 1993. Geochemical and fluid dynamic controls on the composition of Komatiite-hosted nickel sulphide ores in Western Australia [J]. Econ. Geol., 88: 804-816.
- Li C S and Naldrett A J. 1993. Sulfide capacity of magma: A quantitative model and its application to the formation of the sulfide ores at Sudbury [J]. Econ. Geol., 88: 1253-1260.
- Li C S, 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: 771-779.
- Li Z X, Li X H, Kinny P D and Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China [J]. Earth Planetary Science Letters, 173: 171-181.
- Liao Z, Wang Y W and Wang J B. 2010. Geochemistry of the Kuwei mafic complex in the Altay orogen, Xinjiang [J]. Proceedings of The International Conference for the 34th Session of IGC, 139.
- 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. In: Mahoney J J, ed. Large Igneous Provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism [M]. Geophysical Monography 100, American Geophysical Union, 357-380.
- Lu S N, Zhao G C, Wang H C and Hao G J. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review [J]. Precambrian Research, 160: 77-93.
- Mauk J L and Hieshima G B. 1992. Organic matter and copper mineralization at White Pine, Michigan, USA [J]. Chemical Geology, 99: 189-211.
- McBirney A R and Naslund H R. 1990. The differentiation of the Skaergaard intrusion [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 104(2): 235-240.
- Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V A, Doherty W and Gorbachev N S. 1993. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk Region, USSR, with implication for origin of the Ni-Cu ores [J]. Econ. Geol., 87: 975-1004.

- Naldrett A J. 1999. World class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 34 : 227-240.
- Naldrett A J. 2004. *Magmatic Sulfide Deposits*[M]. Berlin: Springer, 727p.
- Nixon G T, Hammack J L, Ash C H, Cabri L J, Case G, Connelyy J N, Heaman L M, Alafamme J H G, Nuttall C, Paterson W P E and Wong R H. 1997. Geology and platinum-group-element mineralization of Alaskan-type ultramafic-mafic complexes in British Columbia[J]. *British Columbia Ministry of Employment and Investment, Bulletin* 93. 141.
- Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, Tang D M, Li X H, Sun H, Xiao Q H and Liu P P. 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu bearing mafic-ultramafic intrusion in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. *American Journal of Science*, 311(3): 237-260, doi: 10.2475/03.2011.03.
- Radko V V. 1991. Model of dynamic differentiation of intrusive traps in the northwestern Siberian platform, Soviet Union[J]. *Geol. and Geophys.*, 32(7): 70-77.
- Ripley E M. 1981. Sulphur isotopic abundances of the Dunka Road Cu-Ni deposit, Duluth complex, Minnesota[J]. *Econ. Geol.*, 76: 619-620.
- Rogers J J W and Santosh M. 2003. Supercontinents in Earth history[J]. *Gondwana Research*, 6(3): 357-368.
- Sharma M A. 1997. Siberian traps[A]. In: Mahoney J J, ed. *Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism*[C]. American Geophysical Union, *Geophysical Monography* 100, 273-295.
- Snyder D, Carmichael I S E and Wiebe R A. 1993. Experimental study of liquid evolution in a Fe-rich, layered mafic intrusion: Constrains of Fe-Ti oxide precipitation on the $T-f(\text{O}_2)$ and $T-P$ paths of tholeiitic magmas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(1): 73-86.
- Toplis M J and Carroll M R. 1995. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems[J]. *Journal of Petrology*, 36(5): 1137-1170.
- Wang Y W, Wang J B and Wang L J. 2004. REE characteristics of the Kalatongke Cu-Ni deposit, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*. 78(2): 396-403.
- Wang Y W, Wang J B and Wang L J. 2005. Rock factors for paragenetic Cu-Ni sulfide deposit and vanadic titanomagnetite deposit: Case study of the Xiangshanxi deposit, Xinjiang, China[A]. In: Mao J W and Frank P B, eds. *Mineral deposit research: Meeting the global challenge. Proceeding of the 8th Biennial SGA meeting, Beijing, China*[C]. Springer. Volume 2, 1351-1354.
- Wang Y W, Wang J B, Wang L J and Long L L. 2008. Metallogenic series related to mafic complex of Permian in North Xinjiang: Post-collisional stage or mantle plume result[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 801-808.
- Wang Y W, Wang J B, Wang L J, Long L L, Liao Z, Zhang H Q and Tang P Z. 2011. Problems of PGE metallogenesis related to mafic-ultramafic complexes in North Xinjiang, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2(2): 187-198.
- Wang Z H, Sun S, Li J L, Hou Q L, Qin K Z, Xiao W J and Hao J. 2003. Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang, China: Geochemical and geochronological constraints from the ophiolites[J]. *Tectonics*, 22, 1014, doi: 10.1029/2002TC001396.
- Wilmes J. 1989. The geology of the Bushveld Igneous Complex, the largest repository of magmatic ore deposits in the world[J]. *Econ. Geol.*, 84(4): 966.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, Sun M, Lin S F, Chen H L, Li Z L, Li J L and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 102-117.
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Sun S and Li J L. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Science (Geol Rundsch)*, 98: 1189-1217.
- Xiao X C, Tang Y Q, Wang J and Zhao M. 1994. Tectonic evolution of the Northern Xinjiang, NW China: An introduction to the tectonics of the southern part of the Paleo-Asian Ocean[A]. In: Coleman R G, ed. *Reconstruction of the Paleo-Asian Ocean. Proceeding of the 29th International Geological Congress, Part B*[C]. VSP, Utrecht, 6-25.
- Xu B, Jian P, Zheng H F, Zou H B, Zhang L F and Liu D Y. 2005. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of northwest China: Implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations[J]. *Precambrian Research*, 136(2): 107-123.
- Yuan F, Zhou T F and Zhang D Y. 2008. Genesis of the native copper mineralization in Eastern Tianshan[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: A1066.
- Zhang C L, Li X H, Li Z X, Lu S N, Ye H M and Li H M. 2007. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Quruqtagh of northeastern Tarim Block, western China: Geochronology, geochemistry and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 152: 149-169.
- Zhou M F and Robinson P T. 1997. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits[J]. *Econ. Geol.*, 92: 259-262.
- Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, Keays R R, Zhang C J and Malpas J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichan Province, SW China[J]. *Journal of Petrology*, 46(11): 2253-2280.
- Zhang Z Z, Gu L X, Wu C Z, Li W Q, Xi A H and Wang S. 2005. Zircon SHRIMP dating for the Weiya pluton, eastern Tianshan: Its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 481-490.