

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.01.011

# 内蒙古中部镁铁质-超镁铁质岩带铜镍成矿潜力探讨

党智财<sup>1,2</sup>, 付超<sup>1,2,\*</sup>, 李俊建<sup>1,2</sup>, 田杰鹏<sup>1,3</sup>, 何江涛<sup>1,3</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局华北地质科技创新中心, 天津 300170;  
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:**华北陆块北缘是中国铜镍(铂)硫化物矿床的重要成矿区带之一。近年来,在位于该成矿带的内蒙古中部先后发现多处铜镍矿床(点),空间上构成一条重要的镁铁质-超镁铁质岩成矿带。为了探讨该镁铁质-超镁铁质岩带内额布图、温更、克布、黄花滩及小南山等赋矿岩体的成矿潜力,笔者通过搜集和研究国内外典型铜镍硫化物矿床数据,建立有利成矿信息评价指标,并指导评价本区岩体的成矿潜力。研究认为,额布图、温更和克布岩体从矿物和岩石地球化学及岩浆分异演化等方面分析,具有较好的成矿地质条件,指示较好的成矿潜力;而黄花滩、小南山岩体从目前地球化学资料分析,成矿潜力相对较弱。

**关键词:**镁铁质-超镁铁质岩;铜镍硫化物矿床;成矿潜力;内蒙古中部

中图分类号:P612

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)01-0142-14

## Discussion on the Copper and Nickel Metallogenic Potentiality of Mafic-Ultramafic Rocks in Central Inner Mongolia

DANG Zhicai<sup>1,2</sup>, FU Chao<sup>1,2,\*</sup>, LI Junjian<sup>1,2</sup>, TIAN Jiepeng<sup>1,3</sup>, HE Jiangtao<sup>1,3</sup>

(1. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. North China Center for Geoscience Innovation, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The northern margin of North China Craton is an important metallogenic belts of Cu, Ni (Pt) sulfide deposits. Recently many Cu-Ni deposits (or ore occurrences) have been discovered in central Inner Mongolia spreading as a mafic-ultramafic belt. In order to explore the metallogenic potentiality in Erbutu, Wengeng, Kebu, Huanghuatan and Xiaonanshan in the belt, this paper summarized and analyzed the data of the typical Cu-Ni ore-bearing intrusions. It is suggested that ore-bearing intrusions in Erbutu, Wengeng and Kebu have good geological ore-forming conditions in aspects of the mineral, the petrology and the magmatic differentiation, indicating preferable metallogenic potentiality. Whereas ore-bearing intrusions in Huanghuatan and Xiaonanshan do not show much metallogenic potentiality.

收稿日期:2020-12-08;修回日期:2021-05-21;网络发表日期:2021-12-06;责任编辑:许英

基金项目:中国地质调查局项目“华北地区区域成矿规律研究与总结”(DD20190379-31),国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项(2016YFC0600107,2018YFC0603805-1)联合资助。

作者简介:党智财(1989-),男,工程师,主要从事区域成矿学研究及矿产勘查工作。E-mail:dangzhicai@163.com。

\* 通讯作者:付超(1986-),男,高级工程师,主要从事区域成矿规律研究与矿产勘查工作。E-mail:fuchao@cugb@163.com。

**Keywords:** mafic-ultramafic rocks; sulfide deposits; metallogenic potentiality; central Inner Mongolia

铜、镍和铂族等金属因在钢铁、军工、航天、机械制造、通讯器材、医疗和化工等领域应用广泛而备受青睐。赋存于镁铁质-超镁铁质岩内的岩浆型铜镍(铂)硫化物矿床作为铜、镍和铂族等金属元素主要来源,其所蕴藏的镍、铂资源储量分别占现今世界 60%和 90%以上,铜资源储量约占世界的 5.5% (Song et al., 2011; 汤中立等,2006)。

华北陆块北缘是中国铜镍(铂)硫化物矿床的重要成矿区带之一(吕林素等, 2007),已发现有著名的红旗岭、赤柏松、漂河川等大-中型铜镍硫化物矿床。近年来,在内蒙古中部镁铁质-超镁铁质岩带先后发现多处铜镍矿床(点)(额布图、达布逊、特颇格

日图、温更、克布、黄花滩和小南山等),空间上构成一条重要的岩浆成矿带(图 1)(Dang et al., 2014; 党智财等, 2016, 2018; 古艳春, 2012; 韩宝福等, 2004; 三金柱等, 2010; 孙涛等, 2010; Mao et al., 2008; Zhang et al., 2008; Zhao et al., 2016; Xue et al., 2016; Lu et al., 2019; 赵磊等, 2011; 党智财等, 2019; Peng et al., 2013)。笔者拟通过已有岩石地球化学数据,分析和总结该镁铁-超镁铁质岩地球化学特征,并与典型铜镍硫化物矿床对比研究,探讨内蒙古中部地区镁铁质-超镁铁质岩带内额布图、温更、克布、黄花滩及小南山等赋矿岩体的含矿性,以期为进一步找矿勘查工作提供指示信息。

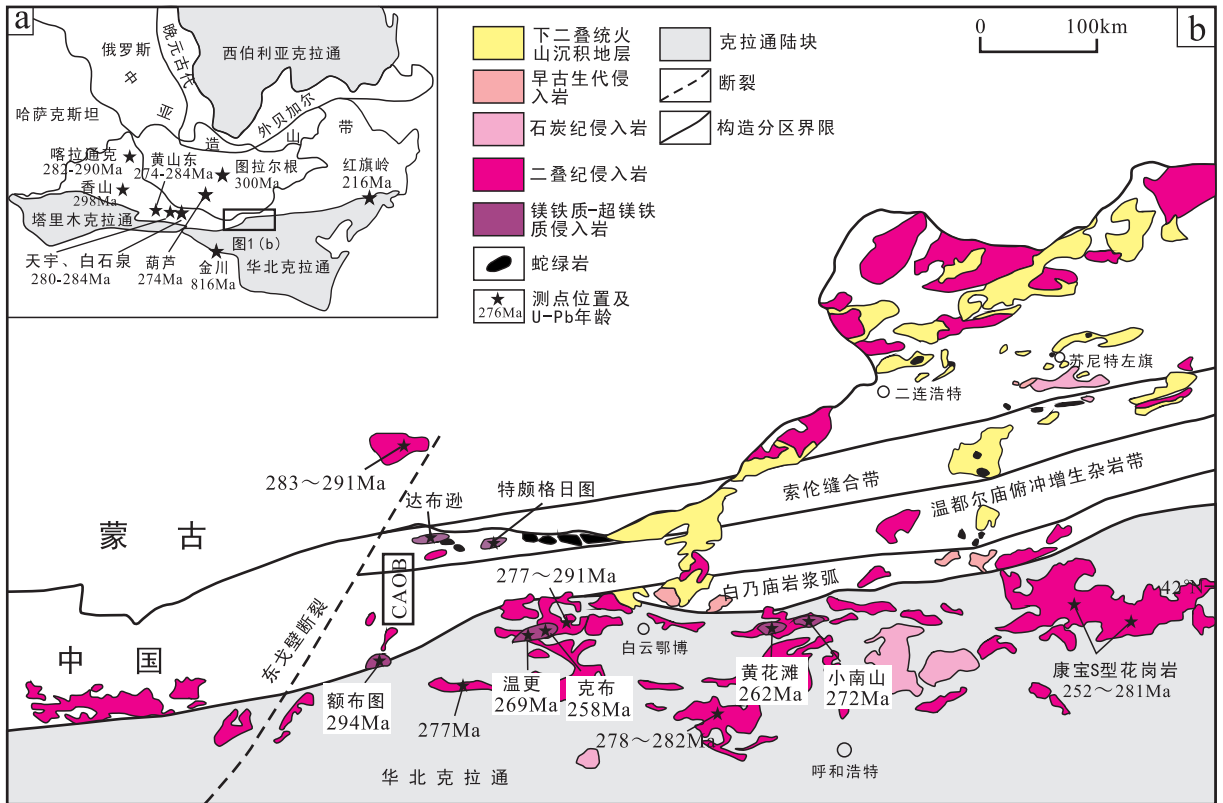


图 1 内蒙古中部地区地质简图(据党智财等改,2019)

Fig. 1 Simplified geological map of the central Inner Mongolia (After Dang et al., 2019)

### 1 区域地质概况

内蒙古中部地区位于华北陆块北缘西段,构造单元属于温都尔庙增生杂岩带和白云鄂博缘裂谷

(李俊建等, 2015; 潘桂棠等, 2009)。区内出露地层主要为上太古界色尔腾山岩群和中-上元古界渣尔泰山群、白云鄂博群等变质岩系,奥陶系包儿汉图群海相中基性火山熔岩、火山碎屑岩、粉砂岩及大理岩,志留纪徐尼乌苏组和西别河组海相、滨浅海相碎

屑岩、生物碎屑岩、结晶灰岩等,石炭纪本巴图组、阿木山组、酒局子组海相火山碎屑岩,二叠纪苏吉组、寿山沟组、大红山组、包特格组、哲斯组火山岩建造、滨浅海相碎屑岩、杂砂岩、砂岩、板岩等,白垩纪李三沟组、固阳组、白女羊盘组砂砾岩、砂岩、砂质泥岩、页岩、泥灰岩等及新生界陆相碎屑沉积物等(郝美珍等,2018;王树庆等,2019;内蒙古自治区地质矿产局,1991;王楫,1992)。

研究区构造活动强烈,主要为断裂构造,发育多条北东或东西向深大断裂,两侧派生次一级北东东向和北西向断裂,控制侵入岩体的分布(图1)。区内岩浆岩发育,岩石类型从超镁铁质岩→镁铁质岩→中性岩→长英质岩均有发育。其中,与铜镍成矿

作用有关的主要为晚古生代镁铁质-超镁铁质岩。镁铁-超镁铁质岩主要沿围岩地层侵入,局部侵入到岩体中,呈岩株、岩脉状,少数岩基分布于深大断裂两侧,区内镁铁质-超镁铁质岩呈带状广泛分布,东西长约400 km,南北宽约30 km。

额布图、克布、黄花滩、小南山岩体主要侵入于上太古界色尔腾山岩群和中-上元古界渣尔泰山群、白云鄂博群等变质岩系地层中;温更岩体侵入于华力西晚期闪长岩体内。这些镁铁质-超镁铁质岩体形成时代主要集中在294~258 Ma(表1),应属于中一晚二叠世后碰撞伸展体制下幔源岩浆活动的产物(党智财等,2019)。

表1 内蒙古中部地区镁铁质-超镁铁质岩形成时代表

Tab.1 Isotopic ages of mafic-ultramafic rocks on the middle segment of the central Inner Mongolia

岩体名称	测年方法	年龄值(Ma)	资料来源
额布图	SHRIMP 锆石 U-Pb	294.2±2	Peng, et al., 2013
温更	SHRIMP 锆石 U-Pb	269±8	赵磊等,2011
温更	SHRIMP 锆石 U-Pb	272±8	赵磊,2008
克布	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	258±2	党智财等,2018
黄花滩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	262±2	党智财等,2019
小南山	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	272.7±2	党智财等,2016

## 2 各岩体地质特征及含矿性

内蒙古中部地区各赋矿镁铁质-超镁铁质岩体形态相对复杂,各岩体地质特征见表2。岩体产状变化较大,规模偏小,一般长约几十米至一二百米,宽约几米至二三十米。

额布图镁铁质-超镁铁质岩体:岩性主要为橄榄辉石岩、辉石橄榄岩和辉闪岩等镁铁质-超镁铁质岩。岩体地表出露形态呈不规则长条状,长约200 m,宽为75~115 m。赋矿岩体为橄榄辉石岩和辉石橄榄岩。镍矿体呈透镜体状、近水平状产出;单工程Ni含量为0.20%~3.70%,平均为0.6077%,Co含量为0.015%~0.0209%,平均为0.0139%;局部见有夹层,一般厚度1 m,个别达4 m,Ni含量为0.15%~0.19%,镍矿储量为6563t。

温更镁铁质-超镁铁质岩体:岩性为橄榄岩、橄榄辉长岩、角闪辉长岩、辉长岩和斜长岩等。岩体地表出露面积约30 km<sup>2</sup>,呈近椭圆形产出。横剖面上,岩体两侧向中心倾斜,呈似盆状,纵剖面呈漏斗状,边缘倾斜较缓,向中心逐渐变陡。橄榄岩为主要赋矿岩体,出露范围较小,与辉长岩、橄榄辉长岩及角闪辉长岩呈渐变过渡关系。探槽和钻孔资料揭示,温更岩体Ni含量为0.09%~0.24%,Co含量为0.014%~0.020%;部分钻孔可见工业矿体,Ni含量可达0.063%~1.49%,Co含量为0.013%~0.156%,矿体宽度大于180 m<sup>①</sup>。

克布镁铁质-超镁铁质岩体由辉长岩相带和橄榄岩相带组成,出露面积约45 km<sup>2</sup>。其中,辉长岩相为该岩体的主要相带,普遍发育磁黄铁矿、黄铁矿化,局部还有铜矿化,矿化富集地段可形成矿石,但品位偏低;橄榄岩相为本区最主要的赋矿岩石,呈似

① 苏茂荣,樊永刚,赵军,等. 内蒙古自治区乌拉特中旗克布地区铜镍矿调查评价报告,呼和浩特:内蒙古地调院,2014.

层状产于辉长岩体;橄榄岩相多未出露地表,隐伏在 20 m 以下或更深;矿体与赋矿岩体之间呈渐变关系,无明显界线。矿床以富 Ni 为主,伴生 Cu、Co; Ni 品位为 0.31%, 伴生 Cu: 0.14% ~ 0.46%、Co: 0.02%<sup>①</sup>。

黄花滩镁铁质-超镁铁质岩体:岩性为辉长岩和辉长闪长岩,形态似椭球状,东西长约 5 km,南北宽

约 3 km;岩体多向北倾斜,倾向为 20°,倾角为 60°~75°。矿体主要分布于辉长闪长岩与片麻岩接触带附近,呈似层状、透镜状或囊状产出;矿体断续长约 1 300 m,走向为 290°;矿床以富 Cu、Ni 为主,伴生 Pt、Pd、Os、Au 等元素。Cu 品位为 0.98% ~ 3.55%, Ni 品位为 0.1% ~ 1.43% (梁有彬等, 1998)。

表 2 内蒙古中部地区镁铁-超镁铁质岩地质特征表

Tab. 2 Features of Cu-Ni (PGE) ore-bearing mafic-ultramafic intrusions in the middle segment of the central Inner Mongolia

矿床(点)	面积(km <sup>2</sup> )	形态	岩性	含矿岩性	主成矿元素	伴生元素
额布图	0.06	透镜状、近水平状	辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、辉闪岩	辉石橄榄岩、橄榄辉石岩	Ni	Co
温更	30	不规则椭圆形	橄榄岩、橄榄辉长岩、辉长岩、角闪辉长岩	橄榄岩	Ni	Co
克布	45	似层状、透镜状、树枝状	辉长岩、斜长橄榄岩	辉长岩、斜长橄榄岩	Ni	Cu、Co
黄花滩	0.2	透镜状、脉状、扁豆状	辉长闪长岩、角闪辉长岩	辉长闪长岩、角闪岩	Cu、Ni	Pt、Pd、Os、Au
小南山	0.12	似层状、透镜状	辉长岩	辉长岩	Cu、Ni	Pt、Pd、Os、Au

小南山镁铁质-超镁铁质岩体:岩性为辉长岩,呈不规则的脉状沿北东向和北西向断裂产出,地表长 200~750 m,宽 20~100 m;岩石普遍发育次闪石化、绿泥石化、黝帘石化、绢云母化和碳酸盐化等蚀变现象。小南山铜镍矿体主要赋存在辉长岩底板及其下盘泥灰岩中,可分为辉长岩型矿体和泥灰岩型矿体;小南山矿床以富 Cu、Ni 为主,伴生 Pt、Pd、Os、Au 等元素;Cu 平均品位为 0.46%, Ni 平均品位为 0.64% (江思宏等, 2003)。

### 3 有利成矿信息评价

#### 3.1 主量元素评价标志

##### 3.1.1 岩石 MgO 含量标志

MgO 是相容组分,原生岩浆中 MgO 含量的高低与部分熔融程度有关,而幔源岩浆中铜、镍和铂族元素含量的高低受其部分熔融程度及幔源地球化学特征等因素的控制(宋谢炎等, 2009; 张照伟等, 2021)。部分熔融程度较高时,地幔橄榄岩中大部分 S 和 Cu、Ni 成矿元素可以溶解进入岩浆,是铜镍成矿作用的首要条件(Barnes et al., 2005; 王亚磊

等, 2012)。另外, MgO 含量也是地幔分熔温度的重要标志。地幔的分熔温度对岩浆的含矿性有重要影响,分熔温度过高或过低都不利于铜镍硫化物的形成。A·P·哈利契夫研究认为, MgO 含量为 8%~30% 时,是形成铜镍硫化物矿床的有利条件。

额布图镁铁质-超镁铁质岩 MgO 含量为 25.1%~33.2%, 平均为 28.38%; 温更辉长岩 MgO 含量为 4.15%~22.12%, 平均为 11.13%; 克布镁铁质-超镁铁质岩 MgO 含量为 8.42%~30.83%, 平均为 21.50%; 黄花滩镁铁质岩 MgO 含量为 4.71%~6.32%, 平均为 5.52%; 小南山辉长岩 MgO 含量为 9.58%~18.74%, 平均为 13.52%。据此分析,额布图、温更、克布和小南山岩体具有形成铜镍硫化物矿床的有利条件,而黄花滩岩体 MgO 含量偏低,不利于铜镍硫化物的形成。

##### 3.1.2 岩石 $m/f$ 值的判别标志

$m/f$  是表示岩体中 Mg、Fe 含量的相对大小,可作为判别地幔部分熔融及含矿性评价的重要标志(汤中立等, 2006)。吴利仁对中国镁铁质-超镁铁质岩研究认为,  $m/f$  值为 2~6.5 是铜镍硫化物成矿有利区,中国典型大中型铜镍矿床赋矿岩石的  $m/f$

① 苏茂荣,樊永刚,赵军,等. 内蒙古自治区乌拉特中旗克布地区铜镍矿调查评价报告,呼和浩特:内蒙古地调院, 2014.

值见表3。其中,额布图岩体  $m/f$  值为 3.57~4.44;温更岩体  $m/f$  值为 0.83~3.54;克布岩体  $m/f$  值为 2.92~3.54;黄花滩岩体  $m/f$  值为 0.96~1.21;小南山岩体  $m/f$  值为 1.66~2.87。其中,额

布图、温更和克布为铁质镁铁质-超镁铁质岩处于有利铜镍硫化物矿床成矿范围,而黄花滩、小南山岩体为铁质镁铁质岩,与典型铜镍硫化物矿床具有一定的差异。

表3 中国典型铜镍硫化物矿床赋矿岩石中 MgO 含量与  $m/f$  值表

Tab. 3 MgO and  $m/f$  values of ore-bearing rocks in typical Cu-Ni sulfide deposits

项目	图拉尔根	黄山	黄山东	香山	喀拉通克	金川	额布图	温更	克布	黄花滩	小南山
MgO(%)	4.15~29.89	8.1~36.51	5.96~31.11	2.2~5.2	8.2~20.37	24.27~31.56	25.1~33.2	9.58~18.74	8.42~30.83	4.71~6.32	9.58~18.74
$m/f$	2.4~4.5	2.3~5.2	1.54~5.04	3.9	1.30~2.96	1.78~4.61	3.57~4.44	0.83~3.54	2.92~1.54	0.96~1.21	1.66~2.87

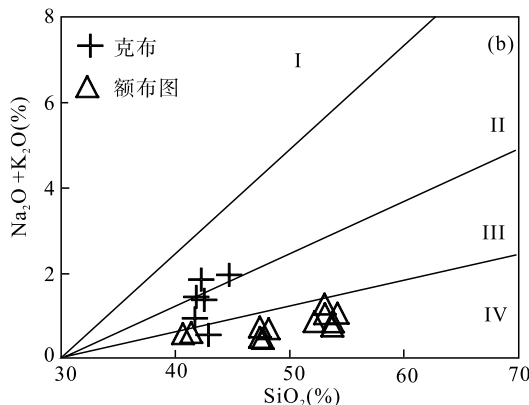
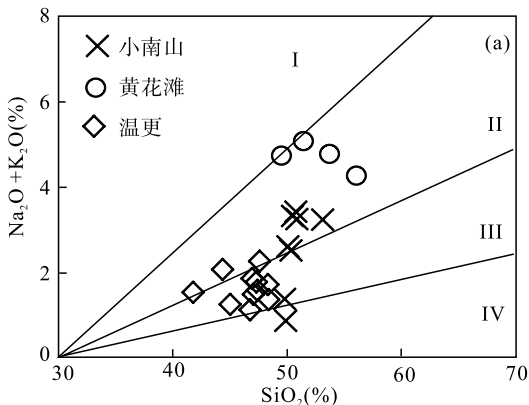
注:表中喀拉通克数据据柴凤梅,2006;黄山东据孙涛,2009;金川据杨合群等,2012;小南山、黄花滩、克布和额布图岩体据党智财,2015;其他岩体据孙赫等,2007。

3.1.3 岩石碱度和铝度标志

中国含铜镍硫化物岩体的岩石含碱度( $Na_2O+K_2O$ )变化范围为 0.2%~4%,酸度为 40%~56%。中国典型铜镍硫化物矿床  $Na_2O+K_2O-SiO_2$  数据图解中(图2)黄山东、黄山、葫芦岩体样品多数落于碱质区(II),部分落于贫碱质区(IV);喀拉通克岩体主要落于碱质区(II),少部分落于强碱质区(赵晓健,2012);金川及外围岩体样品主要落于贫碱质区(IV)、弱碱质区(III)和碱质区(II);西井、小口子及野茛岩体主要位于贫碱质区(IV)(汤中立等,2006)。在  $SiO_2-Al_2O_3$  图解中(图3),黄山东、葫芦及喀拉通克岩体大部分落于低铝质区(II);黄山东大部分样品落于贫铝质区(III),部分落于低铝质区(II)(赵晓健,2012);金川、野茛里、西井、小口子等岩体大部分落于低铝质区(II),部分落于贫铝质区

(III)。低铝、贫铝区岩石类型对成矿有利。实验证明,熔离过程中  $Al_2O_3$  使熔体结晶温度升高,岩浆流动性差,硫化物不易富集(汤中立等,2006)。综合分析可见,碱质区(II)、弱碱质区(III)、贫碱质区(IV)(图2)和低铝质区(II)、贫铝质区(III)(图3)应属于铜镍硫化物矿床有利成矿区。

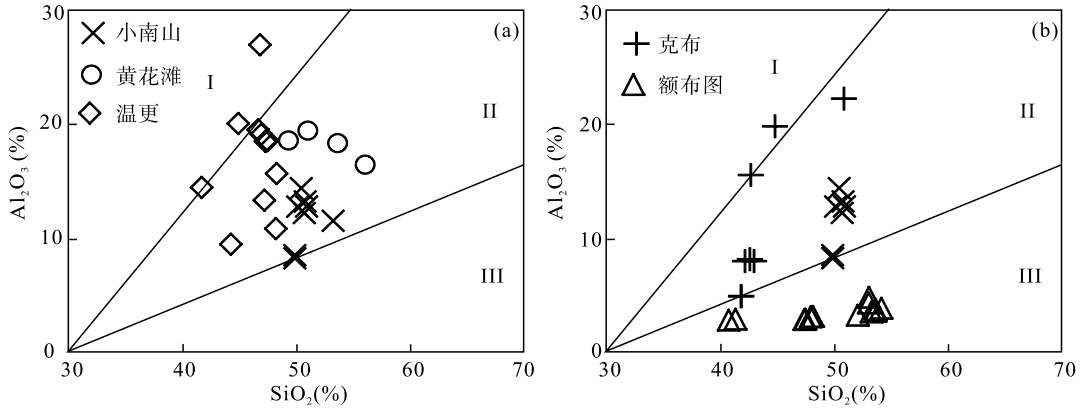
在  $Na_2O+K_2O-SiO_2$  图解中(图2),额布图、温更、克布、黄花滩和小南山岩体样品主要落于贫碱质区(IV)、弱碱质区(III)和碱质区(II);  $SiO_2-Al_2O_3$  图解中(图3),额布图镁铁质-超镁铁质岩主要落于贫铝质区(III);温更、克布、黄花滩和小南山等岩体样品主要落入低铝质区(王倩,2010;赵磊,2009;Peng et al., 2013;党智财等,2019)。以上2个图解显示,4个矿区镁铁质-超镁铁质岩样品均落在铜镍硫化物矿床有利的成矿区。



I. 强碱质区; II. 碱质区; III. 弱碱质区; IV. 贫碱质区

图2  $Na_2O+K_2O-SiO_2$  图(据李文渊,1996)

Fig. 2 Plot of  $Na_2O+K_2O$  vs.  $SiO_2$  (After Li Wenyuan, 1996)



I. 铝质区; II. 低铝质区; III. 贫铝质区

图 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> 变异图 (据李文渊, 1996)

Fig. 3 Plot of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. SiO<sub>2</sub> (After Li Wenyuan, 1996)

### 3.2 微量元素评价标志

稀土元素因其为不活泼的痕量元素,在蚀变及变质过程中影响较小,在评价铜镍硫化物矿床含矿性方面也是一项重要的衡量指标。中国典型铜镍硫化物矿床赋矿镁铁质-超镁铁质岩的 REE 总量相对中等或较低,轻稀土相对富集,重稀土相对亏损,REE 曲线右倾。(La/Yb)<sub>N</sub>、LREE/HREE 值相对较大,表现较为充分的岩浆分异作用,弱或无 Eu 异常(表 4)。额布图、温更、克布和小南山赋矿镁铁质-超镁铁质岩的稀土总量中等或偏低,黄花滩赋矿镁铁质岩稀土总量相对较高(表 4)。5 个岩体稀土元

素球粒陨石标准化分配曲线表现为轻、重稀土分馏相对明显,轻稀土相对富集、重稀土亏损的右倾型,与典型铜镍硫化物矿床赋矿岩体的稀土配分模式较为相似(图 4)。微量元素方面,额布图、温更、克布、黄花滩和小南山等赋矿岩体具有与典型铜镍硫化物矿床相似的微量元素配分曲线,基本表现为富集大离子亲石元素(Rb、Sr、Ba),亏损高场强元素(Nb、Ta),适度亏损 Zr、Hf、Ti 等特征(图 4)。

从稀土、微量元素元素特征分析,除黄花滩岩体外,其他几个岩体具有与典型铜镍硫化物矿床相似的特征。

表 4 中国典型铜镍硫化物矿床及研究区内岩体稀土元素特征表

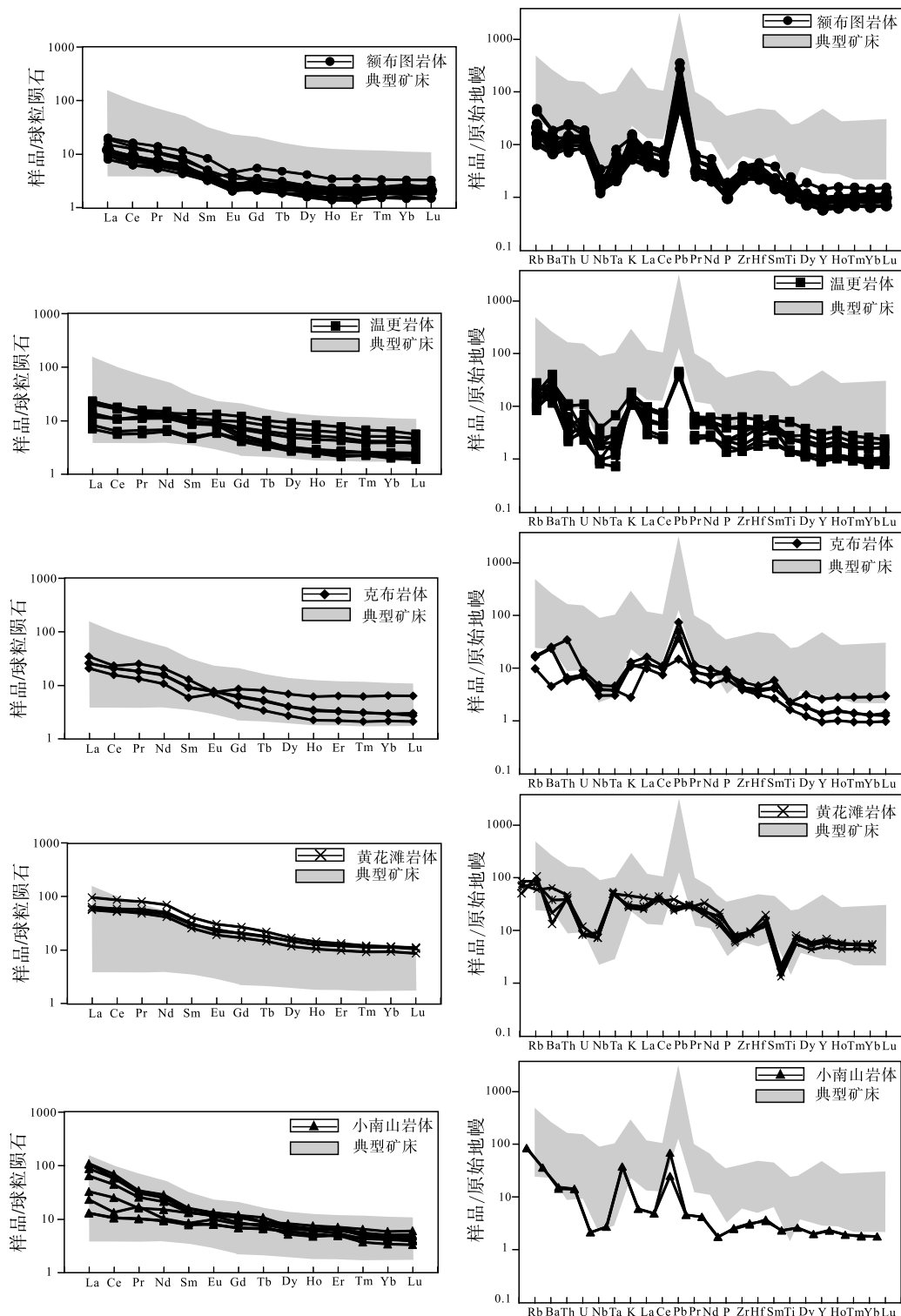
Tab. 4 REE composition of ore-bearing rocks from typical Cu-Ni sulfide deposits and the studying intrusions

典型矿床	喀拉通克	力马河	金川	黄山东	图拉尔根	白石泉	额布图	温更	克布	黄花滩	小南山
ΣREE(10 <sup>-6</sup> )	54.45~	68.97~	17.63~	10.01~	99.90~	20.89~	14.23~	15.17~	13.30~	109.85~	28.08~
	124.49	170.78	45.36	32.79	464.38	33.99	35.27	38.71	56.02	176.91	126.31
LREE/HREE	4.82~7.95	6.97~10.49	4.23~7.42	1.72~3.62	1.31~7.68	3.97~7.17	4.45~7.61	2.44~8.83	3.55~8.59	5.83~7.92	3.30~15.96
(La/Yb) <sub>N</sub>	4.28~8.71	8.01~16.26	3.04~7.49	0.90~2.50	2.47~23.36	3.25~5.64	3.43~8.31	1.84~9.53	2.47~9.64	4.97~8.82	3.03~31.67
δEu	0.83~1.23	0.76~0.95	0.65~1.14	1.03~2.46	0.77~0.95	0.80~1.33	0.56~1.30	0.96~1.35	1.00~1.59	0.86~0.97	0.95~1.10

注:表中数据来源:喀拉通克据 Zhang et al., 2009;力马河据李莹,2010;金川据胡彦强,2012;黄山东据柴凤梅,2006;图拉尔根据孙赫,2009;白石泉据毛启贵等,2006;额布图据 Peng et al., 2013;温更据赵磊,2008;克布、黄花滩、小南山据党智财等,2019。

另外,Se 属亲硫的不活泼元素,当岩浆中硫达到饱和时,易进入硫化物熔体中,且在蚀变过程中不易变化。因此,Se/S 值对于岩浆中硫的饱和状态及是否有硫的散失具有指示意义(Lorand et al., 2001)。大量研究表明,大部分岩浆型铜镍硫化物矿床的 Se/S 值为 50 × 10<sup>-6</sup> ~ 930 × 10<sup>-6</sup> (Maier et

al., 1999;柴凤梅等,2006;唐冬梅等,2009)。额布图、克布、黄花滩和小南山赋矿镁铁质-超镁铁质岩 Se/S 值分别为 59 × 10<sup>-6</sup> ~ 270 × 10<sup>-6</sup>、60 × 10<sup>-6</sup> ~ 316 × 10<sup>-6</sup>、47 × 10<sup>-6</sup> ~ 1 428 × 10<sup>-6</sup> 和 140 × 10<sup>-6</sup> ~ 283 × 10<sup>-6</sup> (表 5)。由此可知,额布图、克布和小南山岩体的母岩浆经历了硫化物的饱和及熔离作用过



(图中数据来源同表 4)

图 4 研究区内镁铁质-超镁铁质岩稀土元素球粒陨石标准化 (标准值据 Taylor et al., 1985) 和微量元素原始地幔标准化 (标准值据 McDonough et al., 1995) 配分图解

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace elements spider diagrams of the mafic-ultramafic intrusion in the central Inner Mongolia

表 5 额布图镁铁质-超镁铁质岩微量元素含量表  
Tab. 5 Trace elements abundance of Erbutu mafic-ultramafic intrusion

岩石(样号)	S( $10^{-2}$ )	Cu( $10^{-6}$ )	Ni( $10^{-6}$ )	Co( $10^{-6}$ )	Se( $10^{-6}$ )	Se/S( $10^{-6}$ )
蚀变基性岩(D5TW1)	1.05	193	1 090	125	0.62	59.05
辉石角闪岩(D8b1)	0.01	21.1	47.4	36.3	0.027	270.00
斜方辉石岩(D17b1)	0.6	198	5 630	120	0.69	115.00
方辉橄榄岩(D19b1)	0.87	391	3 050	177	0.95	109.20
方辉辉橄榄岩(D20b1)	1.78	612	13 300	172	1.99	111.80

注:白石泉、黄山东据柴凤梅,2006;金川据 Gang et al,1992;王生伟等,2006;白马寨据王生伟等,2006;其他据党智财,2015。

程;黄花滩部分岩石样品的 Se/S 值偏高,可能经历了较弱的硫化物熔离作用过程或发生过 S 的散失现象,指示成矿作用相对较弱。

### 3.3 橄榄石、斜方辉石等矿物评价标志

铜镍硫化物富集成矿作用主要是岩浆中 S 达到饱和和发生硫化物熔离作用,萃取岩浆中 Cu、Ni、PGE 等成矿元素。因此,准确判别岩浆在演化和运移过程中是否发生硫化物熔离作用形成先期预富集的岩浆,能够为成矿预测提供有利证据。岩石中橄榄石 Ni 含量严格受岩浆组分和硫化物熔离作用的控制。硫不饱和情况下,Ni 可以类质同像形式替代 Mg 进入橄榄石晶格中。然而,Ni 在橄榄石与硅酸盐岩浆间的分配系数(约为 7)远小于其在硫化物熔体与硅酸盐岩浆间的分配系数(300~1000)(李士彬等,2008),岩浆中 S 一旦达到饱和,Ni 就会优先与 S 结合形成不混溶的硫化物,导致橄榄石中 Ni 含量明显降低。因此,可以通过橄榄石中 Ni 含量的变化来探讨岩浆是否发生过硫化物熔离作用。

橄榄石 Fo-NiO 图解表明(图 5)(王倩,2010;党智财,2015),额布图、温更和克布绝大部分样品均落在正常范围之外,说明其岩浆在深部可能发生了硫化物的熔离作用(Naldrett et al., 1989)。Naldrett(1999)研究认为,未分异的饱和硫化物岩浆中橄榄石 Ni 含量应为 0.25%,该值说明岩体未发生硫化物熔离作用,只有橄榄石中 Ni 贫化至 0.22%以下,才说明岩体发生过不同程度的分异作用,橄榄石中 Ni 含量越低,对成矿作用越有利。额布图镁铁质-超镁铁质岩中橄榄石 Ni 含量为 0.08%~0.22%,平均为 0.13%;温更岩体中橄榄石 Ni 含量为 0%~0.12%,基本不含 Ni;克布镁铁质-超镁铁质岩体中橄榄石 Ni 含量为 0.00%~0.12%,平均为 0.07%。3 个岩体中橄榄石的 Ni 含

量均小于 0.22%,显示岩体发生过不同程度的硫化物熔离作用(表 6)。此外,硫化物不饱和的岩浆中结晶橄榄石 MgO 与 NiO 呈明显的正相关关系(Naldrett, 1984)。而温更、克布和额布图岩体中橄榄石 MgO-NiO 相关性较差(图 6),指示了岩浆发生过硫化物的熔离作用。

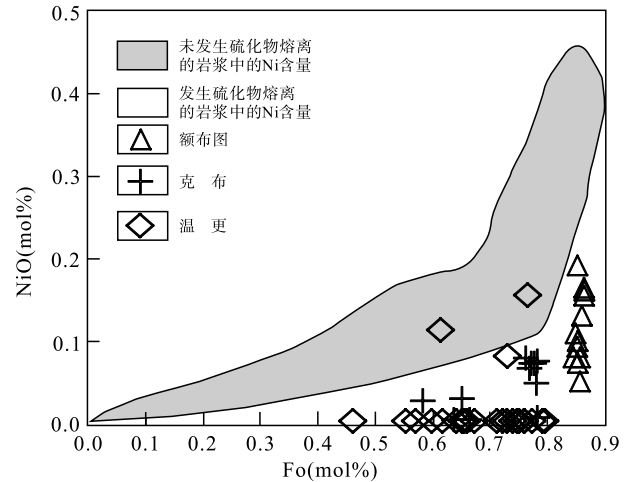


图 5 橄榄石的 Fo-NiO 图解(底图据 Simpkin et al., 1970)  
Fig. 5 Diagram of Fo vs. NiO of olivine (After Simpkin et al., 1970)

Naldrett(1999)和秦克章等(2007)研究表明,全球范围内大多数岩浆型铜镍硫化物矿床基本赋存在含斜方辉石的镁铁质-超镁铁质岩中,且只有当橄榄石与斜方辉石共存,两者牌号 Fo 与 En 较为相近的情况下,才对成矿更为有利。如白石泉赋矿岩石中橄榄石 Fo 为 78~85,斜方辉石 En 为 81~84;喀拉通克赋矿岩石中橄榄石 Fo 为 74~79,斜方辉石 En 为 71~79(柴凤梅等,2006);图拉尔根赋矿岩石中橄榄石 Fo 为 82~84,斜方辉石 En 为 81.7(秦克章等,2007);金川赋矿岩石中橄榄石 Fo 为 84~86,



表6 中国典型铜镍硫化物矿床及研究区岩体中橄榄石的NiO含量表(%)

Tab. 6 NiO contents in Olivine from typical Cu - Ni sulfide deposits and the studying intrusions(%)

图拉尔根	黄山	黄山东	香山	喀拉通克	金川	额布图	温更	克布
0.1~0.22	0.05~0.22	0~0.13	0~0.29	0.07~0.16	0.036~0.25	0.08~0.22	0~0.12	0~0.12

注:图拉尔根据孙赫,2009;黄山据毛亚晶等,2014;香山据夏明哲,2009;黄山东和喀拉通克据柴凤梅,2006;金川据陈列猛等,2009;温更据王倩,2010;克布和额布图据党智财,2015。

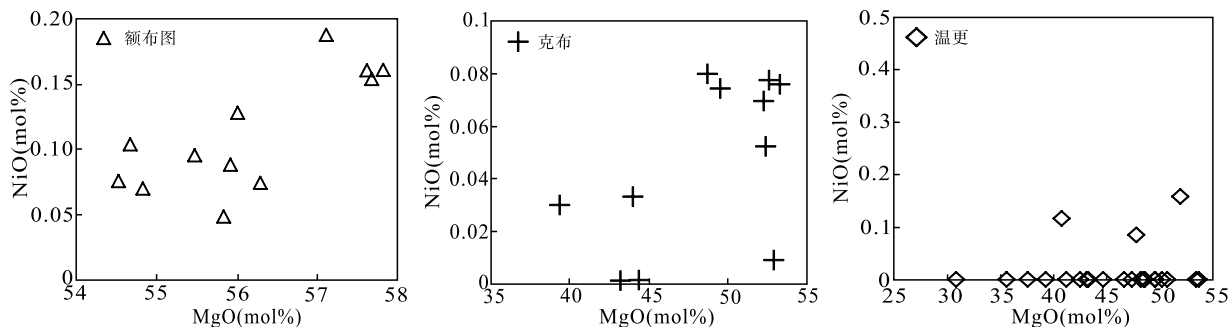


图6 橄榄石的MgO - NiO图解

Fig. 6 Plot of MgO vs. NiO of olivine

斜方辉石  $En$  为 81~82(陈烈猛等,2008,2009)。额布图、温更和克布岩体均发育斜方辉石与橄榄石。其中,额布图橄榄辉石岩中橄榄石  $Fo$  为 86~87,斜方辉石  $En$  为 86~89;温更橄榄辉石岩中橄榄石  $Fo$  值为 55~78,斜方辉石  $En$  为 63~76 和 93~99;克布斜方辉石岩中橄榄石  $Fo$  值为 76~78 和 58~65,斜方辉石  $En$  为 77~78 和 59~60。由此看出,额布图、温更和克布岩体中橄榄石和斜方辉石的  $Fo$ 、 $En$  值都基本一致,与全球范围内大多数典型铜镍硫化物矿床具有相似性,指示较好的成矿潜力。

### 3.4 岩浆分异程度标志

岩浆分异程度是衡量岩浆在形成过程中是否经历了较为完善的熔离(分异)作用的重要标志。岩浆分异作用越彻底、完善,杂岩体越表现出明显的超镁铁质岩-镁铁质岩-中性岩的岩相分带特征,其含矿性越好(Irvine,1975; Lightfoot et al, 1997; 刘月星等,1998;姜常义等,2012;秦克章等,2012;Naldret, 2009);反之,岩浆分异演化不彻底,形成单一的镁铁质-超镁铁质岩,含矿性一般不好。世界上大型铜镍硫化物矿床均赋存于分异程度较高的岩体中,是含矿岩浆多期侵位或单期侵入多期次侵位并经历流动分异作用的结果。

额布图、温更和克布岩体具有良好的岩浆分异作用特征。其中,额布图镁铁质-超镁铁质岩主要由辉石橄榄岩、橄榄辉石岩和辉闪岩组成,表现出较为

充分的岩浆分异特征;温更岩体可见橄榄辉长岩、橄长岩、辉长岩组合,岩浆分异作用明显;克布镁铁质-超镁铁质岩体主要由辉长岩相带和橄榄岩相带组成,2个岩相带中又可分为多种岩石亚类,也具有充分的岩浆分异作用特征。

小南山辉长岩为单式熔离分异岩体,未发育其他中基性岩体,分异程度相对较弱;黄花滩岩体为辉长岩-辉长闪长岩组合,分异作用相对较弱,这2个矿区岩体基性程度偏低,未发现与此相关的基性程度较高的超镁铁质岩。总体上,小南山和黄花滩岩体在岩石组合及分异程度上与典型铜镍硫化物矿床具有一定的差异性。

## 4 结论

(1)额布图、温更和克布岩体在矿物、岩石主、微量元素特征及岩浆分异程度方面具有与典型铜镍硫化物矿床相似的特征,表现出较好的成矿地质条件,指示成矿潜力较好。

(2)黄花滩岩体在主、微量元素特征方面与典型铜镍硫化物矿床具有一定的相似性,但其差异性也比较明显。赋矿辉长岩及辉长闪长岩  $MgO$  含量偏低,指示母岩浆部分熔融程度相对较低,不利于地幔源区内铜镍等成矿元素进入母岩浆。 $Se/S$  值表明,黄花滩岩体可能经历了较弱的硫化物熔离作用过程

或发生过 S 的散失现象。从目前地球化学资料分析,黄花滩岩体成矿潜力相对较弱。

(3)小南山岩体在主、微量元素特征方面显示,具有找寻岩浆型铜镍硫化物矿床的潜力,但小南山岩体岩浆分异程度一般,只见有辉长岩等镁铁质岩发育成矿。岩石基性度相对偏低,目前未发现有镁铁质-超镁铁质岩石组合,与典型铜镍硫化物矿床相比具有一定的差异性。从目前地球化学资料分析,小南山岩体成矿潜力相对较弱。

## 参考文献(References):

柴凤梅,张招崇,毛景文,等. 新疆哈密白石泉含铜镍镁铁-超镁铁质岩体铂族元素特征[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 124-127.

CAI Fengmei, ZHANG Zhaochong, MAO Jingwen, et al. Platinum group elements geochemistry of Baishiquan mafic-ultramafic intrusives in central Tianshan block, Xinjiang [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(2): 124-127.

陈烈猛,宋谢炎, Danyushevsky, 等. 金川 I 岩体橄榄石 Ni-MgO 相互关系及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3369-3378.

CHEN Liemeng, SONG Xieyan, Danyushevsky, et al. Correlation between Ni and MgO contents of olivine in Segment I of the Jinchuan intrusion, NW China, and its geological implication [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(12): 3369-3378.

陈烈猛,宋谢炎,聂晓勇,等. 甘肃金川 II 号岩体辉石化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 88-96.

CHEN Liemeng, SONG Xieyan, NIE Xiaoyong, et al. Mineral chemistry and geological significance of pyroxene from segment II of the Jinchuan intrusion, Gansu province [J]. Mineral Petrol, 2008, 28(1): 88-96.

党智财,李俊建,付超,等. 内蒙乌拉特中旗克布镁铁质-超镁铁质岩年代学、矿物学和岩石地球化学[J]. 地质学报, 2018, 92(2): 278-297.

DANG Zhicai, LI Junjian, FU Chao, et al. Geochronological, Mineralogical and Geochemical Studies of the Kebu Mafic-ultramafic Intrusion in Urad Middle Banner, Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(2): 278-297.

党智财,李俊建,赵泽霖,等. 内蒙古四子王旗地区小南山辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].

地质通报, 2016, 35(4): 583-592.

DANG Zhicai, LI Junjian, ZHAO Zelin, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the gabbro from Xiaonanshan, Siziwang Banner, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(4): 583-592.

党智财,李俊建,付超,等. 内蒙古乌拉特中旗克布镁铁质-超镁铁质岩年代学、矿物学和岩石地球化学[J]. 地质学报, 大地构造与成矿学, 2019, 43(3): 303-321.

DANG Zhicai, LI Junjian, FU Chao, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of mafic-ultramafic intrusions in the middle segment of Inner Mongolia and its geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(3): 303-321.

党智财. 内蒙古中部地区镁铁质-超镁铁质岩岩石学、地球化学、年代学及含矿性评价[D]. 北京,中国地质科学院, 2015.

DANG Zhicai. Petrology, geochemistry, ages and ore-bearing property evaluation of the mafic-ultramafic intrusions, the middle segment of Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2015.

古艳春. 内蒙古乌拉特中旗文更地区基性-超基性岩岩石地球化学特征及构造意义[D]. 北京,中国地质大学, 2012.

GU Yanchun. Geochemistry and tectonic significance of mafic-ultramafic rocks of Wengeng region in Urad Middle Banner of the Inner Mongolia[D]. Beijing, China University of Geosciences, 2012.

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(22): 2324-2328.

HAN Baofu, JI Jianqing, SONG Biao, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in Karatungk and Huangshan, Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 49(2): 2324-2328.

郝美珍,赵永岗,张顺,等. 白云鄂博超大型 Nb-Fe-REE 矿床主矿体形态变化及深部找矿方向的探讨[J]. 地质调查与研究, 2018, 41(3): 167-175.

HAO Meizhen, ZHAO Yonggang, ZHANG Shun, et al. Study on the variation of the main ore body form and deep prospecting direction of the giant Bayan Obo Nb-Fe-REE iron ore deposit [J]. Geological Survey and Research, 2018, 41(3): 167-175.

胡彦强. 金川 IV 号含矿岩体岩浆演化与成矿作用[D]. 西安:长安大学, 2012.

HU Yanqiang. Magmatic evolution and mineralization of the

- segment IV ore-bearing rock body of Jinchuan Nickel-Copper sulfide deposit [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- 黄再兴, 王治华, 常春郊, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗成矿带多金属成矿规律与找矿方向[J]. 地质调查与研究, 2013, 36(3): 205-212.
- HUANG Zaixing, WANG Zhihua, CHANG Chunjiao, et al. Prospecting direction and metallogenic regularities of the polymetallic deposit in Dong Ujimqin Banner metallogenic belt, Inner Mongolia [J]. Geological Survey and Research, 2013, 36(3): 205-212.
- 姜常义, 凌锦兰, 赵彦锋, 等. 镁铁-超镁铁质岩体含矿性评价指标体系-应用于寻找岩浆硫化物矿床[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 51-60.
- JIANG Changyi, LING Jinlan, ZHAO Yanfeng, et al. Ore-bearing potential evaluation index system of mafic and ultramafic intrusions—used to search for magmatic sulfide deposits [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 51-60.
- 李锦铁, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(4): 584-605.
- LI Jinyi, ZHANG Jin, YANG Tiannan, et al. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian orogenic region and its adjacent areas [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(4): 584-605.
- 李俊建, 张锋, 任军平, 等. 中蒙边界地区构造单元划分[J]. 地质通报, 2015, 34(4): 636-662.
- LI Junjian, ZHANG Feng, REN Junping, et al. Tectonic units in China-Mongolia border area and their fundamental characteristics [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(4): 636-662.
- 李士彬, 胡瑞忠, 宋谢炎, 等. 硫化物熔离对岩浆硫化物含矿岩体中橄榄石 Ni 含量的影响-以金川岩体为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(2): 147-151.
- LI Shibin, HU Ruizhong, SONG Xieyan, et al. Sulfide separation control in Ni content of olivine in bearing-ore intrusion of magma deposit: An example from Jinchuan intrusion[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(2): 147-151.
- 李文渊. 中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学[M]. 西安: 西安地图出版社, 1996: 1-125.
- LI Wenyuan. Metallogenic series and geochemistry of nickel-copper sulfide deposits in China [M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 1996: 1-125.
- 李莹. 攀西地区力马河镁铁-超镁铁质岩体的岩石学和地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- LI Ying. Studies of petrology and geochemistry on the Limahemafic-ultramafic intrusion in Panxi district, SW China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010.
- 梁有彬, 刘同有, 宋国仁. 中国铂族元素矿床[M]. 北京, 冶金工业出版社, 1998: 17-21.
- LIANG Youbin, LIU Tongyou, SONG Guoren. Platinum-group elements deposits in China [M]. Beijing, Metallurgical Industry Press, 1998: 17-21.
- 刘月星, 唐红松, 吴厚泽. 中国铜镍硫化物矿床类型及控矿条件[J]. 矿产与地质, 1998, 12(2): 85-90.
- LIU Yuexing, TANG Hongsong, WU Houze. 1998. Types and ore-control factors of Cu-Ni sulfide deposits in China [J]. Mineral Resources and Geology, 1998, 12(2): 85-90.
- 吕林素, 刘珺, 张作衡, 等. 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, 2007, 23(10): 2561-2594.
- LV Linsu, LIU Jun, ZHANG Zuoheng, et al. Temporal-spatial distribution and geodynamic settings of magmatic Ni-Cu (PGE) sulfides deposits in China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10): 2561-2594.
- 马娟, 彭斌. 内蒙古特颇格日图超基性岩体特征及成矿潜力研究[J]. 地质调查与研究, 2009, 33(3): 175-180.
- MA Juan, PENG Bin. Characteristics of the tepogeritu ultrabasic rock bodies and its metallogenic potentiality in Inner Mongolia [J]. Geological Survey and Research, 2009, 33(3): 175-180.
- 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅, 等. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用—以黄山铜镍矿床为例[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1575-1594.
- MAO Yajing, QIN Kezhang, TANG Dongmei, et al. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of eastern Tianshan, Xinjiang: Exemplified by the Huangshan Ni-Cu deposit [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1275-1594.
- 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 province: constraints on the closure of the Paleo-Asian

- Ocean [J]. *Acta Petrological Sinica*, 2006, 22(1): 153-162.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 556-628.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region. Regional geology of Inner Mongolia Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 556-628.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造分区[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.
- PAN Guitang, XIAO Qinghui, LU Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China [J]. *Geology In China*, 2009, 36(1): 1-28.
- 秦克章, 丁奎首, 许英霞, 等. 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, 2007, 26(1): 1-14.
- QIN Kezhang, DING Kuishou, XU Yingxia, et al. Ore potential of protoliths and modes of Co-Ni occurrence in Tulargen and Baishiquan Cu-Ni-Co deposits, East Tianshan, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(1): 1-14.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 等. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 3027-3035.
- SAN Jinzhu, QIN Kezhang, TANG Zhongli, et al. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulargen large Cu-Ni district and its geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 3027-3035.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 287-305.
- SONG Xieyan, HU Ruizhong, CHEN Liemeng. Geochemical natures of copper, nickel and PGE and their significance for the study of origin and evolution of mantle-derived magmas and magmatic sulfide deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 287-305.
- 孙赫, 秦克章, 徐兴旺, 等. 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, 2007, 26(1): 98-107.
- SUN He, QIN Kezhang, XU Xingwang, et al. Petrological characteristics and copper-nickel ore-forming processes of Early Permian mafic-ultramafic intrusion belts in East Tianshan [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(1): 98-107.
- 孙赫. 东天山镁铁-超镁铁岩铜镍硫化物矿床通道式成矿机制与岩体含矿性评价研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2009.
- SUN He. Ore-forming Mechanism in conduit system and ore-bearing property evaluation for mafic-ultramafic complex in Eastern Tianshan, Xinjiang [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- 孙涛. 黄山东铜镍矿成矿作用与成矿深部过程研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- SUN Tao. Mineralization and deep-process of Huangshandong Nickel-Copper deposit, East Tianshan [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- 孙涛, 钱壮志, 汤中立, 等. 新疆葫芦铜镍矿床锆石 U-Pb 年代学、铂族元素地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3339-3349.
- SUN Tao, QIAN Zhuangzhi, TANG Zhongli, et al. Zircon U-Pb chronology, platinum group element geochemistry characteristics of Hulu Cu-Ni deposit, East Xinjiang, and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(11): 3339-3349.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国超大型铜镍铂岩浆硫化物矿床预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-205.
- TANG Zhongli, QIAN Zhuangzhi, JIANG Changyi, et al. Chinese Nickel-Copper (PGE) sulfide deposits and metallogenic prognosis [J]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-205.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 等. 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, 2009, 83(5): 680-697.
- TANG Dongmei, QIN Kezhang, SUN He, et al. PGE geochemical characteristics of Tianyu Magmatic Cu-Ni Deposit: implications for magma evolution and sulfide segregation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(5): 680-697.
- 王楫, 李双庆, 王保良. 狼山-白云鄂博裂谷系[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992: 1-132.
- WANG Ji, LI Shuangqing, WANG Baoliang. Langshan-Baiyunobo rift system [M]. Beijing: Peking University Publishing in House, 1992: 1-132.
- 王倩. 内蒙古乌拉特中旗温更 A 区镁铁质-超镁铁质岩体成因及岩浆源区讨论[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
- WANG Qian. Petrogenesis and magma source of Wengeng A mafic-ultramafic Intrusion, Inner Mongolia, China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 等. 云南白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学及其对矿床成因的制约[J]. 地质学

- 报, 2006, 80(4): 1475-1486.
- WANG Shengwei, SUN Xiaoming, SHI Guiyong, et al. Platinum group elements (PGE) geochemistry of Baimazhai Ni-Cu sulfide deposit and its constraint on the ore genesis [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(4): 1475-1486.
- 王树庆, 胡晓佳, 赵华雷. 内蒙古苏左旗洪格尔地区新发现晚石炭世碱性花岗岩[J]. *地质调查与研究*, 2019, 42(2): 81-85.
- WANG Shuqing, HU Xiaojia, ZHAO Hualei. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences [J]. *Geological Survey and Research*, 2019, 42(2): 81-85.
- 王亚磊, 李文渊, 张照伟, 等. 金川铜镍硫化物矿床成矿物质深部预富集过程探讨[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 321-330.
- WANG Yalei, LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, et al. The preconcentration process of metal in the deep magma chamber of Jinchuan Ni-Cu sulphide deposit [J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 321-330.
- 夏明哲. 新疆东天山黄山岩带镁铁-超镁铁质岩石成因及成矿作用[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- XIA Mingzhe. The Mafic-ultramafic intrusions in the Huangshan Reion Eastern, Xinjiang: Petrogenesis and mineralization implication[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- 杨合群, 赵国斌, 任华宁, 等. 金川超大型铜镍矿床与超基性小岩体的同源分异关系 [J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 155-164.
- YANG Hequn, ZHAO Guobin, REN Huaning et al. The Homologous differentiation relationship between Jinchuan super-large Cu-Ni deposit and small ultrabasic intrusion [J]. *Northwestern Geology*, 2012, 45(4): 155-164.
- 杨振军. 桂北清明山铜镍硫化物矿床地质地球化学特征及找矿预测[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- YANG Zhenjun. Geological, geochemical characteristics and prospecting prediction of Qingmingshan Cu-Ni sulfide deposit in Northern Guangxi, China [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 中国西北地区岩浆铜镍矿床地质特点与找矿潜力[J]. *西北地质*, 2021, 54(1): 82-99.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Geological characteristics and prospecting potential of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in Northwest China [J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 82-99.
- 赵磊, 吴泰然, 罗红玲, 等. 内蒙古乌拉特中旗温更辉长岩类的岩石学、地球化学特征及其构造意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 44(2): 201-211.
- ZHAO Lei, WU Tairan, LUO Hongling, et al. Petrology, geochemistry and tectonic implications of the Wengeng gabbros in Wulatezhongqi area, Inner Mongolia [J]. *Acta Scientiarum Natuazlium Universitatis Pekinesis*, 2018, 44(2): 201-211.
- 赵磊, 吴泰然, 罗红玲. 内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(10): 3072-3081.
- ZHAO Lei, WU Tairan, LUO Hongling. SHRIMP U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of the Beiqigetao gabbros in Urad Zhongqi area, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 3072-3081.
- 赵磊. 华北板块北缘中段晚古生代镁铁-超镁铁岩的岩石地球化学特征及其构造意义[D]. 北京: 北京大学, 2008.
- ZHAO Lei. Geochemistry and Tectonic Implications of the Late Palaeozoic mafic-ultramafic rocks belt on the middle segment of the northern margin of the North China Plate [D]. Beijing: Peking University, 2008.
- 赵晓健. 新疆吐尔库班套镁铁质-超镁铁质岩体地球化学特征及成矿潜力分析[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- ZHAO Xiaojian. Geochemical Characteristics and Ore-forming Potential of the Turkubantao Mafic-Ultramafic Complex, Xinjiang [D]. Xi'an: Chang'an University, China, 2012.
- Barns Sarahjane, Lightfoot Peter C. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ, Richards Jp (eds.) [J]. *Economic Geology 100th anniversary volume*, 2005: 179-213.
- Gang Chai, Naldrett A J. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, northwest China [J]. *Economic Geology*, 1992, 87: 1475-1495.
- Hoatson Dean M, Jaireth Subhash, Jaques Alynton. Nickel sulfide deposits in Australia: characteristics, resources, and potential [J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29: 177-241.
- Irvine T N. Cry stallisation sequence of the Muskox Intrusion and other layered intrusions; II Origin of the chro-

- motite layers and similar deposits of other magmatic ores [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1975, 39: 991-1008.
- Lightfoot Peter C, Hawkesworth Chris J. Flood basalts and magmatic Ni, Cu and PGE sulfide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Trap) and West Greenland sequences [A]. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). *Large igneous province* [C]. Washington DC: American Geophysical Union, 1997, 357-380.
- Lorand Jeanpierre, Alard Olivier. Platinum-group element abundances in the upper mantle: new constraints from in situ and whole-rock analyses of Massif Central xenoliths (France) [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, 65 (16): 2789-2806.
- Lu Yiguan, Leshner C M, Deng Jun. Geochemistry and genesis of magmatic Ni-Cu-(PGE) and PGE-(Cu)-(Ni) deposits in China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 107: 863-887.
- Maier W D, Barnes S J. The origin of Cu sulfide deposits in the Curaca valley, Bahia, Brazil: evidence from Cu, Ni, Se, and platinum-group element concentrations [J]. *Econ. Geol.*, 1999, 94 (2): 165-183.
- Mao Jingwen, Pirajno Franco, Zhang Zuoheng, et al. A review of the Cu-Ni sulfide deposits in the Chinese Tianshan and Altay Orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 184-203.
- Naldrett A J, Duke J M, Lightfoot P C, et al. Quantitative modeling of the segregation of magmatic sulfides: an exploration guide [J]. *Bull Can Inst Metall*, 1984, 77: 46-57.
- Naldrett A J. *Magmatic sulphide deposits* [M]. New York: Oxford Univ. Press, 1989: 1-186.
- Naldretta J. World-class Ni-Cu-PGE deposits; Key factors in their genesis [J]. *Mineralium Deposit*, 1999, 34: 227-240.
- Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits. In: Li CS and Ripley EM (ed.) [A]. *New Developments in Magmatic Ni-Cu and PGE Deposit* [C]. Geological Publishing House, Beijing, 2009: 1-26.
- Peng Runmin, Zhai Yusheng, Li Chusi, et al. The Erbutu Ni-Cu deposit in the central Asian orogenic belt: A Permian magmatic sulfide deposit related to boninitic magmatism in an arc setting [J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 1879-1888.
- Simkin T, Smith J V. Minor element distribution in olivine [J]. *Journal of Geology*, 1970, 78: 304-325.
- Xue Shengchao, Qin Kezhang, Li Chusi, et al. Geochronological, Petrological and geochemical constraints on Ni-Cu sulfide mineralization in the Poyi ultramafic-troctolitic intrusion in the Northeast rim of the Tarim craton, Western China [J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 1465-1484.
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Chai Fengmei, et al. Geochemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions, northern Xinjiang, northwest China: implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits [J]. *Economic Geology*, 2009, 104: 185-203.
- Zhang Zuoheng, Mao Jingwen, Du Andao, et al. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 204-217.
- Zhao Yun, Xue Chunji, Zhao Xiaobo, et al. Origin of anomalously Ni-rich parental magmas and genesis of the Huangshannan Ni-Cu sulfide deposit, Central Asian Orogenic Belt, Northwestern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 77: 57-71.