

# 新疆哈密黄山东铜镍硫化物矿床成岩成矿作用<sup>\*</sup>

胡沛青, 任立业, 傅飘儿, 张铭杰<sup>\*\*</sup>, 李晓亚, 秦宏毅

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要** 黄山东铜镍硫化物矿床赋存于橄榄岩、苏长岩、辉长岩和闪长岩组成的镁铁-超镁铁质杂岩体中, 赋矿岩体包含至少 4 套岩石组合。不同类型岩石微量元素和稀土元素原始地幔标准化配分模式指示, 该矿床明显亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素和 Cr 元素, 富集 Sr 及大离子亲石元素 ( $(La/Yb)_N = 1.08 \sim 2.70$ ,  $\delta Eu = 0.50 \sim 2.57$ ); 含矿岩石 Cu/Pd 比值和 Ti/Pd 比值大于原始地幔值, 表明不同类型岩石是高镁玄武质岩浆在深部分异结晶演化的产物。根据橄榄石和全岩化学组成可估算出母岩浆 MgO 含量约为 12%。成矿岩浆深部演化过程中, 富硅的地壳混染组分和外来流体的加入可能促成了岩浆中的硫饱和, 深部熔离的不混溶硫化物珠滴被上升岩浆携带, 富集在橄榄岩和苏长岩的底部。

**关键词** 地质学; 成矿作用; 成岩作用; 镁铁-超镁铁质岩体; 铜镍硫化物矿床; 黄山东; 新疆

中图分类号 P618.41 P618.63

文献标志码 A

## Petrogenetic and ore-forming processes of Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in Hami, Xinjiang

HU PeiQing, REN LiYe, FU PiaoEr, ZHANG MingJie, LI XiaoYa and QIN HongYi

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (MOE), Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

### Abstract

The Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit is hosted by mafic-ultramafic rocks composed of peridotite, norite, gabbro and diorite in at least four intrusive rock assemblages. Mineral chemistry and whole-rock major and minor elements, REE and PGE compositions suggest that primitive mantle-normalized trace element patterns show significant depletion of such high field strength elements as Nb, Ta, Zr and Th as well as Cr, and enrichment of Sr and some large ion lithophile elements;  $(La/Yb)_N = 1.08 \sim 2.70$  and  $\delta Eu = 0.50 \sim 2.57$ . The Cu/Pd and Ti/Pd ratios of ore-bearing rocks are higher than the values of primitive mantle. The above evidence indicates that different types of rocks were produced by fractional crystallization of a high MgO basaltic magma at depth. The MgO content of the parental magma is estimated to be 12% on the basis of olivine and whole-rock compositions. Sulfide saturation in the ore-forming magma might have been induced in the deep chamber by Si-rich crustal contamination and exotic fluids. Immiscible sulfide droplets segregated at depth were carried by ascending magma and concentrated at the bottom of peridotite and norite.

**Key words:** geology, ore-forming process, petrogenesis, mafic-ultramafic rocks, Ni-Cu sulfide deposit, Huangshandong, Xinjiang

岩浆型铜镍硫化物矿床是 Cu、Ni 及铂族元素(PGE)资源的重要矿床类型(Naldrett, 2004; Barns et al., 2005; 汤中立等, 1995)。中国镍储量的 86%、铂族金属储量的 95%、铜储量的 11.9%都来自与镁铁-超镁铁质岩有关的岩浆型铜镍硫

化物矿床(汤中立等, 1995)。新疆阿尔泰和东天山地区镁铁-超镁铁质岩带是造山带环境岩浆型铜镍硫化物矿床的典型成矿带, 赋存有喀拉通克、黄山东、镜儿泉、土墩和白石泉等大型铜镍硫化物矿床。其中, 黄山东铜镍硫化物矿床含矿岩相

<sup>\*</sup> 本文为国家自然科学基金(40772058、40534020、40873005 和 40273009)、国家科技支撑计划(2006BAB01B08, 2006BAB01A01)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-04-0980)和国家大学生创新性实验计划资助成果

第一作者简介 胡沛青, 女, 1972 年生, 博士, 副教授, 矿床地球化学专业。Email: hupq@lzu.edu.cn

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 张铭杰, 男, 博士, 教授, 地球化学专业。Email: mjzhang@lzu.edu.cn

收稿日期 2009-09-28; 改回日期 2009-11-26。李德先编辑。

从橄榄岩到闪长岩发育完整,矿石储量大,对认识本地区特殊构造环境下铜镍硫化物矿床的成矿岩浆性质、演化和成矿控制因素具有重要的研究价值。

黄山东铜镍硫化物矿床位于土墩-黄山-镜儿泉镁铁-超镁铁质岩带。已有研究表明,含矿岩体中橄榄苏长岩锆石 SHRIMP 年龄为 $(274 \pm 3)$  Ma(韩宝福等,2004),硫化物 Re-Os 年龄为 $(282 \pm 20)$  Ma(毛景文等,2002),含矿苏长岩和辉长岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 $7.8 \sim 9.0$ 之间(Zhou et al.,2004;韩宝福等,1998),但对该矿床成矿岩浆性质、母岩浆组成、成矿控制因素等方面并未做深入研究。本文通过对黄山东铜镍硫化物矿床含矿岩体不同岩相样品的岩石学、主量元素、微量元素及铂族元素地球化学特征的分析,进而探讨其成矿母岩浆的性质、组成和成矿因素。

1 地质背景

黄山东铜镍硫化物矿床大地构造位置处于塔里木板块与哈萨克斯坦-准噶尔板块活动大陆边缘交连带(图 1a),中亚造山带东天山的东段(Zhou et al.,2004;王润民等,1987)。含矿镁铁-超镁铁质岩体侵位于下石炭统干墩群变余含铁粉

砂岩、板岩及生物碎屑灰岩中(图 1c),呈透镜状,近东西向分布,长 3.5 km,中间宽 1.2 km,面积约 2.8 km<sup>2</sup>,岩体剖面呈漏斗形(图 1b)。

含矿镁铁-超镁铁质岩体为一复式岩体,岩相分异好,主要由橄榄岩、二辉橄榄岩、辉石岩、橄长岩、苏长岩、辉长岩和闪长岩组成。地表由岩体中心向北依次出露角闪辉长岩、橄榄辉长岩、橄榄岩、角闪辉长岩和闪长岩。根据野外产状结合钻井资料可区分出 4 套岩石组合:① 岩体核部含矿橄榄岩-辉长岩组合:从下向上主要为橄榄岩、橄榄辉长岩和角闪辉长岩,各岩相之间渐变接触,是岩体的主要组成部分,橄榄岩局部含有硫化物珠滴;② 中部含矿橄榄岩-辉长岩组合:辉长岩与上覆核部橄榄岩呈明显的侵入接触,与下部橄榄岩呈渐变接触,橄榄岩下部均赋存有大量的硫化物矿体;③ 底部赋矿苏长岩:与上覆角闪辉长岩呈明显的侵入接触关系;④ 边部闪长岩。

主要造岩矿物有橄榄石、斜方辉石、角闪石及斜长石。橄榄石主要赋存于辉石橄榄岩、橄榄苏长岩及橄长岩中,橄长岩中橄榄石呈半自形粒状或浑圆状堆积晶产出,苏长岩和橄长岩中橄榄石自形程度低,被斜长石晶体所包裹。斜方辉石主要赋存于辉长苏长岩、角闪辉长岩、橄榄辉长岩及辉石橄榄岩

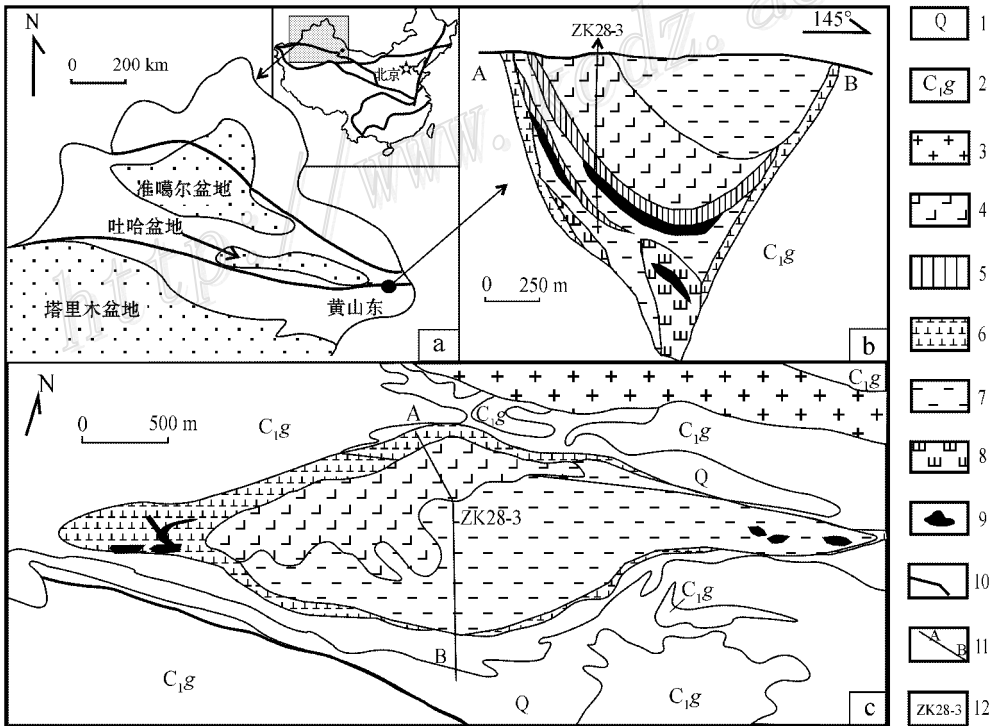


图 1 黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体区域地质示意图(a)、剖面简图(b)和岩体地质图(c)

1—第四系;2—下石炭统干墩组;3—晚古生界花岗岩;4—橄榄辉长岩;5—橄榄岩;6—闪长岩;7—角闪辉长岩;8—苏长岩;9—矿体;10—断层;11—剖面;12—钻孔及编号

Fig. 1 Simplified regional geological map (a), geological profiles (b) and geological map of the mafic-ultramafic intrusion (c) of the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit

1—Quaternary; 2—Lower Carboniferous Gandun Formation; 3—Late Paleozoic granite; 4—Peridotite gabbro; 5—Gabbro; 6—Diorite; 7—Hornblende gabbro; 8—Norite; 9—Ore bodies; 10—Fault; 11—Section; 12—Location and serial number of borehole

中,呈半自形-自形的板柱状,具包橄结构和含长结构,边缘常有蚀变。单斜辉石主要分布于角闪辉长岩和辉长苏长岩中,呈大小不一的短柱状,具次闪石化和绿泥石化,可见角闪石反应边。角闪石在橄榄岩和辉长岩中为棕色,细粒( $<1\text{ mm}$ ),呈半自形至他形晶充填于橄榄石、辉石和斜长石之间。斜长石见于闪长岩和辉长岩中,呈自形长柱状,1~2 mm 左右,基性程度高,多为拉长石。

黄山东铜镍硫化物矿床矿体主要赋存于岩体内 2 套橄榄岩-辉长岩组合的底部,以及岩体底部的苏长岩中,赋矿岩石以二辉橄榄岩和辉石岩为主。矿石以浸染状为主,含少量的块状矿石(Zhou et al., 2004)。矿石矿物以磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿等金属硫化物为主,次要矿物有黄铁矿、紫硫镍矿、马基诺矿、白铁矿、闪锌矿、针镍矿、墨铜矿、方硫镍矿和方黄铜矿等。

## 2 样品与分析方法

### 2.1 样品

本文样品采自黄山东铜镍硫化物矿床地表和地下采矿场,在含矿岩体的不同岩相段系统采集未蚀变的橄榄岩、苏长岩、辉长岩和辉石岩等代表性样品 45 件,分别进行光薄片切制和偏光显微镜岩相学研究,根据显微岩相学观察,选择无蚀变的典型样品 17 件,在无污染的条件下破碎用于分析测试。

### 2.2 分析方法

主量元素分析采用 AXIOS-PW4400 型 X 荧光光谱仪,在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,XRF 熔片法按国家标准 GB/T 14506.28-993。仪器功率:铑靶端窗 X 光管 4 kW,样品浓度范围: $10^{-6}\sim 10^{-2}$ ,相对误差为 0.05%。

微量元素分析在长安大学成矿作用及动力学开放实验室采用美国 X-7 型 ICP-MS 测定。稀土元素样品用  $\text{Na}_2\text{O}_2$  熔融,分离富集后用 ICP-MS 测定。Sc、Cr、Co、Ni、Ga、Pb、Th、U、Nb、Ta、Hf 样品经  $\text{Na}_2\text{O}_2$  熔融后,水提酸化,用 ICP-MS 测定。

铂族元素分析由国家地质测试中心采用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 测定。首先将待测样品与碳酸钠、硼酸钠、硼砂、玻璃

粉、硫磺、面粉混合,倒入坩埚中,然后,加入适量的稀释剂在 1 150℃ 高温炉内熔融,将熔体倒入铁模中冷却后取出钼扣,用 HCl 溶解钼扣滤出不溶物,在封闭溶样器中用王水溶解滤渣,最后在 ICP-MS 上测定 Pt、Pd、Rh、Ir、Ru 和 Os,全流程空白值为 Os、Ir、Ru、Pd 为  $0.3\times 10^{-9}$ ,Pt、Rh 为  $0.06\times 10^{-9}$ 。

单矿物成分分析在美国印第安纳大学采用 CAMECA-SX50 型电子探针仪器完成。主量元素测试加速电压 15 kV,束电流 20 nA,束斑直径为  $1\text{ }\mu\text{m}$ ,计数时间 20 s。对 Cr、Ti、V、Ni 等微量元素束电流为 100 nA,计数时间 50 s,检测限为  $80\times 10^{-6}$ 。

## 3 测试结果分析

### 3.1 主要矿物化学组成

斜方辉石以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$  为主要成分,平均含量( $w_B/\%$ )分别为 55.3、27.69、13.86、1.74 和 1.39,含有少量的 Mn、Ti、Cr、Na 和 K,顽火辉石(En)含量介于 75.00%~76.15%之间,属古铜辉石(表 1)。

单斜辉石以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主要成分,平均含量( $w_B/\%$ )分别为 52.58、12.37、13.32、20.14 和 1.04,含少量的 Mn、Ti、Cr、Na 和 K,En 含量介于 34.91%~36.97%之间,属普通辉石和透辉石。

### 3.2 主量元素

对黄山东铜镍硫化物矿床不同类型岩石全岩主量元素进行了烧失量和硫化物校正,计算为 100% 氧化物组成,结果列于表 2。硫化物校正根据 Li 等(2001)、Barnes 等(2005)及 Tao 等(2008)的计算方法完成。

从表 2 可以看出,黄山东铜镍硫化物矿床 2 类岩石主量元素组成中  $\text{SiO}_2$ (48.68%~53.02%)、 $\text{MgO}$ (5.28%~15.48%)和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (7.44%~20.85%)含量较高, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 与  $\text{TiO}_2$  含量较低,分别为 1.9%~3.6%和 0.25%~3.88%, $\text{Mg}^\#$  介于 0.44~0.77 之间,平均 0.69。2 类岩石  $\text{MgO}/\text{TFe}$  比值介于 0.43~1.91 之间,平均值为 1.355。

结合前人资料(Zhou et al., 2004;王润民等,1987;柴凤梅,2006),主量元素氧化物与  $\text{MgO}$  含量相关性(图 2)表

表 1 黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体辉石电子探针分析结果( $w_B/\%$ )

| Table 1 Chemical compositions of pyroxene from ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit( $w_B/\%$ ) |      |                |                         |              |                       |              |              |                |                      |              |                         |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------|-------------------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|----------------|----------------------|--------------|-------------------------|-------|
| 样品号                                                                                                                                          | 矿物名称 | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{MnO}$ | $\text{FeO}$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{CaO}$ | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 顽火辉石  |
| YKS12-a                                                                                                                                      | 斜方辉石 | 55.25          | 1.67                    | 27.48        | —                     | 0.3          | 14.11        | 0.16           | —                    | 1.06         | 0.07                    | 75.65 |
| YKS12-b                                                                                                                                      | 斜方辉石 | 55.46          | 1.53                    | 28.16        | 0.01                  | 0.31         | 13.51        | 0.2            | —                    | 1.48         | 0.08                    | 76.15 |
| YKS12-c                                                                                                                                      | 斜方辉石 | 55.14          | 2.01                    | 27.44        | 0.01                  | 0.24         | 13.97        | 0.3            | 0.01                 | 1.63         | 0.1                     | 75.00 |
| HSD-2-A                                                                                                                                      | 单斜辉石 | 52.75          | 1.25                    | 12.7         | 0.26                  | 0.33         | 12.99        | 0.31           | —                    | 19.72        | 0.02                    | 36.97 |
| HSD-2-B                                                                                                                                      | 单斜辉石 | 52.46          | 1.02                    | 12.36        | 0.21                  | 0.38         | 13.97        | 0.24           | 0.01                 | 19.88        | —                       | 35.62 |
| HSD-2-C                                                                                                                                      | 单斜辉石 | 52.53          | 0.85                    | 12.05        | 0.22                  | 0.38         | 12.99        | 0.21           | 0.01                 | 20.81        | 0.025                   | 34.91 |

表 2 黄山东铜镍硫化物矿床不同类型岩石全岩主量元素组成(  $w_B/\%$  )

| Table 2 Major element compositions of whole rock samples from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit( $w_B/\%$ ) |      |                  |                                |                                |       |       |                   |                  |      |                               |                  |         |                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------|------------------|------|-------------------------------|------------------|---------|-----------------|
| 样品号                                                                                                               | 岩石名称 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO   | CaO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MnO  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | MgO/TFe | Mg <sup>#</sup> |
| HSD-1                                                                                                             | 辉长岩  | 51.17            | 20.85                          | 6.35                           | 6.37  | 10.62 | 3.31              | 0.31             | 0.11 | 0.12                          | 0.80             | 1.00    | 0.64            |
| HSD-2                                                                                                             | 辉长岩  | 48.68            | 17.14                          | 12.19                          | 5.28  | 8.68  | 3.44              | 0.41             | 0.18 | 0.13                          | 3.88             | 0.43    | 0.44            |
| HSD-34a                                                                                                           | 辉长岩  | 49.75            | 17.48                          | 7.84                           | 10.15 | 11.63 | 2.38              | 0.10             | 0.14 | 0.04                          | 0.49             | 1.29    | 0.70            |
| HSD-39                                                                                                            | 辉长岩  | 50.21            | 19.96                          | 6.81                           | 9.56  | 9.97  | 2.95              | 0.13             | 0.13 | 0.03                          | 0.25             | 1.40    | 0.72            |
| YKS-18                                                                                                            | 辉长岩  | 53.02            | 7.44                           | 9.96                           | 14.08 | 13.70 | 0.78              | 0.08             | 0.16 | 0.10                          | 0.69             | 1.41    | 0.72            |
| YKS-1                                                                                                             | 苏长岩  | 52.74            | 14.23                          | 7.01                           | 13.36 | 9.47  | 2.25              | 0.23             | 0.13 | 0.05                          | 0.51             | 1.91    | 0.77            |
| YKS-5                                                                                                             | 苏长岩  | 51.90            | 11.79                          | 9.85                           | 15.48 | 8.57  | 1.28              | 0.46             | 0.16 | 0.05                          | 0.46             | 1.57    | 0.74            |
| YKS-12                                                                                                            | 苏长岩  | 52.75            | 11.96                          | 8.69                           | 15.46 | 8.53  | 1.54              | 0.36             | 0.15 | 0.06                          | 0.51             | 1.78    | 0.76            |
| YKS-14                                                                                                            | 苏长岩  | 50.75            | 14.12                          | 10.28                          | 13.28 | 8.75  | 1.79              | 0.34             | 0.13 | 0.05                          | 0.50             | 1.29    | 0.70            |
| YKS-16                                                                                                            | 苏长岩  | 51.55            | 19.37                          | 5.83                           | 8.59  | 10.86 | 2.83              | 0.36             | 0.09 | 0.05                          | 0.47             | 1.47    | 0.73            |

注 :Mg<sup>#</sup> = Mg/( Mg + Fe ),以 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 代表 TFe。

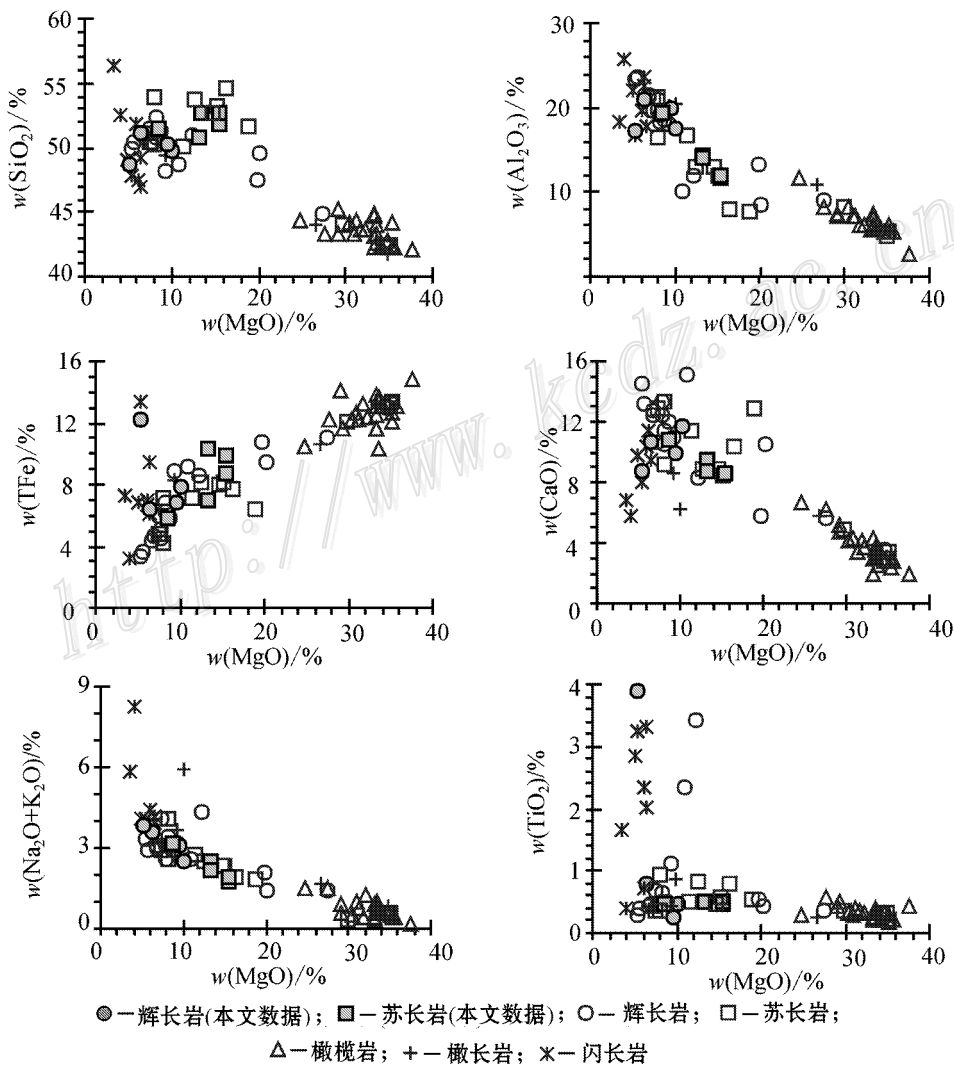


图 2 黄山东铜镍硫化物矿床全岩主量元素与 MgO 相关图  
图中其他数据来自文献 Zhou 等 , 2004 ; 王润民等 , 1987 ; 柴凤梅 , 2006

Fig. 2 Plots of major elements versus MgO content of different types of rocks from the Huangshandong Cu-Ni sulfide  
other data in the figures from Zhou et al. , 2004 ; Wang et al. , 1987 ; Chai , 2006

明,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{TiO}_2$  等氧化物含量随  $\text{MgO}$  的降低总体呈增加趋势,  $\text{TFe}$  含量随  $\text{MgO}$  含量的降低逐渐减少, 显示出玄武岩浆分异结晶系统的变化特征。

3.3 微量元素

黄山东铜镍硫化物矿床微量元素分析结果见表 3。原始地幔标准化配分模式图(图 3)表明, 不同类型岩石微量元素配分模式与黄山铜镍硫化物矿床相似, 主要富集  $\text{Rb}$ 、 $\text{Ba}$ 、 $\text{K}$  等大离子亲石元素(LILEs)和  $\text{Sr}$  元素, 但亏损  $\text{Cr}$  等相容元素及  $\text{Th}$ 、 $\text{Nb}$  和  $\text{Ta}$  等高场强元素(HFSEs)。U 和  $\text{Th}$  显示从不同程度亏损到弱富集。 $\text{Nb/Ta}$  比值 11.50~15.80, 平均值 13.6;  $\text{Zr/Hf}$  比值 28.65~42.24, 平均值 35.45, 介于原始地幔( $\text{Nb/Ta}=17.39$ ,  $\text{Zr/Hf}=36.25$ , Sun et al., 1989)和地壳值(11 和 33, Taylor et al., 1995)之间。成矿元素  $\text{Cu}$ 、 $\text{Ni}$  及  $\text{Co}$  和

V 等相容元素含量较高, 明显富集  $\text{Cu}$  和  $\text{Ni}$  在  $w(\text{MgO})$  为 8%~15% 的范围内呈现较大波动, 与苏长岩密切相关(图 4)。

结合前人资料(柴凤梅, 2006; Zhou et al., 2004), 黄山东铜镍硫化物矿床稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )介于  $10.01 \times 10^{-6}$ ~ $155.94 \times 10^{-6}$  之间, 从辉长岩( $12.79 \times 10^{-6}$ ~ $155.94 \times 10^{-6}$ )、苏长岩( $23.34 \times 10^{-6}$ ~ $24.70 \times 10^{-6}$ ), 到橄榄岩( $10.01 \times 10^{-6}$ ~ $18.73 \times 10^{-6}$ )逐步降低, 稀土元素原始地幔标准化配分曲线(图 5)表明, 该矿床轻稀土元素富集( $\text{La/Yb}$ )<sub>N</sub> 比值介于 1.08~2.70 之间, 与黄山铜镍硫化物矿床相近(1.14~3.65; 傅飘儿等, 2009), 小于金川矿床(2.58~8.84; 焦建刚等, 2006)和喀拉通克铜镍硫化物矿床(4.5~12.7; 冉红彦等, 1994)。 $\delta\text{Eu}$  变化较大, 介于 0.50~2.57 之间, 平均值为 1.28。

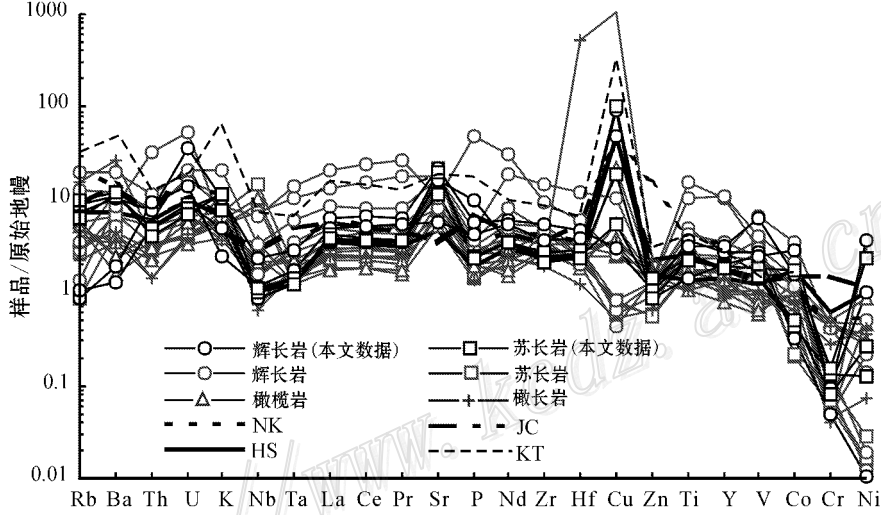


图 3 黄山东铜镍硫化物矿床微量元素原始地幔标准化配分图

灰色图示数据来自文献 Zhou 等, 2004; 王润民等, 1987; 柴凤梅, 2006; NK—Noril'sk (Arndt et al., 2003); JC—金川(汤中立等, 1995); HS—黄山(傅飘儿等, 2009); KT—喀拉通克(张招崇等, 2003); 原始地幔 PM 数据采用文献 Sun et al., 1989

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element patterns of the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit

data of gray illustration from Zhou et al., 2004; Wang et al., 1987; Chai, 2006; NK—Noril'sk (after Arndt et al., 2003); JC—Jinchuan (after Tang et al., 1995); HS—Huangshan (after Fu et al., 2009); KT—Kalatongk (after Zhang et al., 2003); PM—Primitive mantle, data from Sun et al., 1989

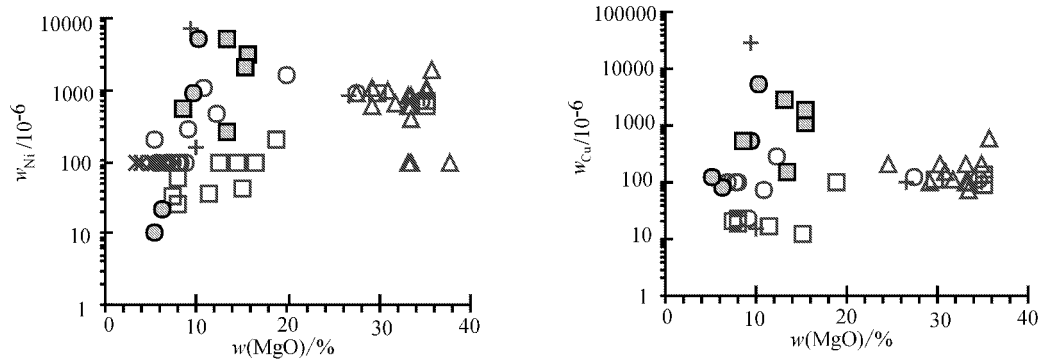


图 4 黄山东铜镍硫化物矿床中 Cu、Ni 元素与  $\text{MgO}$  相关性图(图例及数据引用同图 2)

Fig. 4 Cu, Ni and  $\text{MgO}$  content of rocks from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit (illustration and data same as Fig. 2)

表 3 黄山东铜镍硫化物矿床不同类型岩石全岩微量元素组成(  $w_B/10^{-6}$  )

| Table 3 Trace element compositions of whole rock samples from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit( $w_B/10^{-6}$ ) |      |       |        |      |      |       |      |       |       |       |       |       |        |       |       |        |        |                          |                          |                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|--------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 样品号                                                                                                                    | 岩石类型 | Rb    | Ba     | Th   | U    | Nb    | Ta   | Sr    | Zr    | Hf    | Y     | V     | Cr     | Co    | Ni    | Cu     | Zn     |                          |                          |                         |
| HSD-1                                                                                                                  | 辉长岩  | 4.78  | 72.87  | 0.66 | 0.75 | 1.64  | 0.12 | 456.6 | 60.41 | 1.43  | 12.46 | 219.2 | 153    | 35.67 | 21.65 | 82.84  | 52.64  |                          |                          |                         |
| HSD-2                                                                                                                  | 辉长岩  | 6.33  | 107.90 | 0.68 | 0.26 | 4.43  | 0.35 | 453   | 64.46 | 1.57  | 12.24 | 180.9 | 12.91  | 48.37 | 9.96  | 121.4  | 98.00  |                          |                          |                         |
| HSD-34                                                                                                                 | 辉长岩  | 0.42  | 30.10  | 0.09 | 0.04 | 0.39  | 0.03 | 444.3 | 10.89 | 0.38  | 6.39  | 210.5 | 67.64  | 146.5 | 4969  | 5208   | 72.81  |                          |                          |                         |
| HSD-39                                                                                                                 | 辉长岩  | 1.47  | 47.74  | 0.07 | 0.03 | 0.23  | 0.02 | 488.1 | 9.18  | 0.3   | 4.52  | 155.5 | 187.3  | 76.1  | 870.1 | 510.9  | 48.22  |                          |                          |                         |
| YKS-2                                                                                                                  | 辉长岩  | 0.83  | 16.26  | 0.26 | 0.02 | 0.42  | 0.03 | 199.8 | 20.92 | 0.69  | 8.15  | 165.5 | 629.7  | 822   | 17343 | 3966   | 43.58  |                          |                          |                         |
| YKS-3                                                                                                                  | 辉长岩  | 0.69  | 9.02   | 0.44 | 0.19 | 0.62  | 0.05 | 350.4 | 27.37 | 0.81  | 9.15  | 205.4 | 299.6  | 312   | 7890  | 2582   | 42.68  |                          |                          |                         |
| YKS-4                                                                                                                  | 辉长岩  | 0.77  | 19.78  | 0.57 | 0.22 | 0.76  | 0.06 | 268   | 32.73 | 1.03  | 11.65 | 326.9 | 294    | 209.6 | 5490  | 1789   | 48.10  |                          |                          |                         |
| YKS-18                                                                                                                 | 辉长岩  | 0.55  | 13.70  | 0.79 | 0.29 | 0.84  | 0.07 | 120.1 | 40.5  | 1.21  | 14.66 | 513   | 301.7  | 170.9 | 2165  | 1366   | 66.23  |                          |                          |                         |
| HS36*                                                                                                                  | 辉长岩  | 2.22  | 84.00  | 0.66 | 0.36 | 4.65  |      | 219   | 108   |       | 49.9  | 340   | 150    |       | 1040  | 72     | 64.00  |                          |                          |                         |
| HSD-55                                                                                                                 | 辉石岩  | 2.85  | 52.65  | 0.54 | 0.25 | 0.76  | 0.06 | 142.7 | 30.41 | 0.93  | 8.9   | 145.6 | 1846   | 221.9 | 3750  | 41400  | 155.10 |                          |                          |                         |
| YKS-1                                                                                                                  | 苏长岩  | 4.11  | 80.18  | 0.42 | 0.19 | 0.73  | 0.05 | 417.4 | 26.52 | 0.75  | 8.19  | 117.6 | 411.3  | 46.85 | 265.1 | 153.5  | 52.67  |                          |                          |                         |
| YKS-5                                                                                                                  | 苏长岩  | 10.55 | 88.18  | 0.59 | 0.25 | 0.84  | 0.06 | 154   | 33.26 | 0.94  | 8.34  | 133.6 | 603    | 188   | 3025  | 1062   | 71.45  |                          |                          |                         |
| YKS-12                                                                                                                 | 苏长岩  | 10.24 | 68.45  | 0.49 | 0.22 | 0.85  | 0.06 | 210.3 | 40.23 | 1.05  | 9.09  | 144.1 | 647    | 114.8 | 2079  | 1913   | 71.02  |                          |                          |                         |
| YKS-14                                                                                                                 | 苏长岩  | 5.63  | 77.91  | 0.41 | 0.17 | 0.78  | 0.06 | 246.7 | 29.82 | 0.88  | 8.81  | 152.4 | 493    | 193.9 | 5014  | 2848   | 73.17  |                          |                          |                         |
| YKS-16                                                                                                                 | 苏长岩  | 6.23  | 86.50  | 0.35 | 0.15 | 0.79  | 0.05 | 423.9 | 23.73 | 0.73  | 8.16  | 120.2 | 252.9  | 55.33 | 557   | 520.7  | 43.81  |                          |                          |                         |
| D1-9*                                                                                                                  | 苏长岩  | 3.57  | 46     | 0.44 | 0.14 | 10.6  | 0.08 | 374   | 45.4  | 0.99  | 10.6  | 305   | 216    | 40    | 35    | 16     | 46.10  |                          |                          |                         |
| D2-32*                                                                                                                 | 橄榄岩  | 3.57  | 17     | 0.37 | 0.12 | 1.51  | 0.09 | 145   | 48.1  | 0.97  | 6.21  | 58    | 1368.5 | 107   | 573   | 71     | 85.40  |                          |                          |                         |
| D1-34*                                                                                                                 | 橄榄岩  | 2.41  | 27.8   | 0.21 | 0.07 | 0.85  | 0.06 | 109   | 31.1  | 0.56  | 3.59  | 48.3  | 1573   | 140   | 1848  | 600    | 80.60  |                          |                          |                         |
| 样品号                                                                                                                    | 岩石类型 | La    | Ce     | Pr   | Nd   | Sm    | Eu   | Gd    | Tb    | Dy    | Ho    | Er    | Tm     | Yb    | Lu    | ΣREE   | δEu    | (La/ Yb) <sub>N</sub> ** | (La/ Sm) <sub>N</sub> ** | (Gd/ Yb) <sub>N</sub> * |
| HSD-1                                                                                                                  | 辉长岩  | 4.45  | 11.59  | 1.74 | 8.03 | 2.13  | 1.28 | 2.55  | 0.44  | 2.53  | 0.55  | 1.47  | 0.22   | 1.32  | 0.21  | 38.51  | 1.68   | 2.27                     | 1.31                     | 1.56                    |
| HSD-2                                                                                                                  | 辉长岩  | 4.82  | 12.19  | 1.81 | 8.3  | 2.19  | 1.62 | 2.63  | 0.44  | 2.56  | 0.55  | 1.48  | 0.22   | 1.34  | 0.21  | 40.36  | 2.06   | 2.43                     | 1.38                     | 1.61                    |
| HSD-34                                                                                                                 | 辉长岩  | 1.5   | 3.79   | 0.63 | 3.3  | 1.03  | 0.67 | 1.37  | 0.23  | 1.41  | 0.31  | 0.8   | 0.11   | 0.68  | 0.1   | 15.93  | 1.72   | 1.49                     | 0.92                     | 1.76                    |
| HSD-39                                                                                                                 | 辉长岩  | 1.36  | 3.28   | 0.51 | 2.57 | 0.76  | 0.74 | 1.02  | 0.17  | 0.95  | 0.2   | 0.56  | 0.08   | 0.51  | 0.08  | 12.79  | 2.57   | 1.80                     | 1.13                     | 1.63                    |
| YKS-2                                                                                                                  | 辉长岩  | 1.58  | 4.56   | 0.78 | 4.01 | 1.27  | 0.51 | 1.68  | 0.29  | 1.81  | 0.38  | 1.04  | 0.15   | 0.89  | 0.14  | 19.09  | 1.07   | 1.20                     | 0.78                     | 1.54                    |
| YKS-3                                                                                                                  | 辉长岩  | 2.35  | 6.11   | 0.95 | 4.7  | 1.42  | 0.67 | 1.87  | 0.33  | 1.99  | 0.42  | 1.12  | 0.16   | 0.99  | 0.15  | 23.23  | 1.26   | 1.60                     | 1.04                     | 1.6                     |
| YKS-4                                                                                                                  | 辉长岩  | 2.96  | 7.94   | 1.28 | 6.31 | 1.89  | 0.83 | 2.41  | 0.43  | 2.55  | 0.54  | 1.43  | 0.21   | 1.24  | 0.19  | 30.21  | 1.19   | 1.61                     | 0.99                     | 1.63                    |
| YKS-18                                                                                                                 | 辉长岩  | 3.46  | 9.41   | 1.52 | 7.47 | 2.25  | 0.6  | 2.91  | 0.52  | 3.12  | 0.68  | 1.79  | 0.26   | 1.63  | 0.25  | 35.87  | 0.72   | 1.43                     | 0.97                     | 1.49                    |
| HS36*                                                                                                                  | 辉长岩  | 14.51 | 42.7   | 7.36 | 41   | 11.03 | 1.83 | 11.3  | 1.64  | 10.35 | 2.12  | 5.67  | 0.76   | 5.01  | 0.66  | 155.94 | 0.50   | 2.08                     | 0.85                     | 1.87                    |
| HSD-55                                                                                                                 | 辉石岩  | 2.72  | 7.08   | 1.09 | 5.26 | 1.52  | 0.52 | 1.91  | 0.33  | 1.99  | 0.43  | 1.13  | 0.16   | 1     | 0.15  | 25.29  | 0.93   | 1.83                     | 1.13                     | 1.63                    |
| YKS-1                                                                                                                  | 苏长岩  | 2.9   | 6.85   | 1    | 4.65 | 1.29  | 0.68 | 1.61  | 0.28  | 1.66  | 0.36  | 0.98  | 0.15   | 0.94  | 0.15  | 23.50  | 1.44   | 2.08                     | 1.41                     | 1.38                    |
| YKS-5                                                                                                                  | 苏长岩  | 2.85  | 6.87   | 1.02 | 4.69 | 1.29  | 0.44 | 1.68  | 0.28  | 1.72  | 0.39  | 1.05  | 0.16   | 1.03  | 0.16  | 23.63  | 0.91   | 1.87                     | 1.39                     | 1.35                    |
| YKS-12                                                                                                                 | 苏长岩  | 2.63  | 6.8    | 1.05 | 4.96 | 1.41  | 0.55 | 1.8   | 0.31  | 1.9   | 0.41  | 1.16  | 0.17   | 1.1   | 0.17  | 24.42  | 1.06   | 1.61                     | 1.17                     | 1.36                    |
| YKS-14                                                                                                                 | 苏长岩  | 2.46  | 6.38   | 0.99 | 4.75 | 1.39  | 0.58 | 1.82  | 0.31  | 1.89  | 0.41  | 1.11  | 0.16   | 1.03  | 0.16  | 23.44  | 1.11   | 1.61                     | 1.11                     | 1.46                    |
| YKS-16                                                                                                                 | 苏长岩  | 2.64  | 6.6    | 1.01 | 4.8  | 1.32  | 0.66 | 1.71  | 0.29  | 1.71  | 0.37  | 1.01  | 0.15   | 0.93  | 0.14  | 23.34  | 1.34   | 1.91                     | 1.26                     | 1.57                    |
| D1-9*                                                                                                                  | 苏长岩  | 2.54  | 6.75   | 1.02 | 5.14 | 1.51  | 0.89 | 1.67  | 0.3   | 1.99  | 0.4   | 1.17  | 0.16   | 1.01  | 0.15  | 24.70  | 1.72   | 1.08                     | 1.09                     | 1.37                    |
| D2-32*                                                                                                                 | 橄榄岩  | 2.45  | 6.18   | 0.85 | 3.88 | 0.98  | 0.34 | 1.03  | 0.18  | 1.11  | 0.23  | 0.65  | 0.1    | 0.65  | 0.1   | 18.73  | 1.04   | 2.70                     | 1.62                     | 1.31                    |
| D1-34*                                                                                                                 | 橄榄岩  | 1.28  | 3.19   | 0.44 | 2.03 | 0.51  | 0.22 | 0.59  | 0.1   | 0.63  | 0.13  | 0.39  | 0.06   | 0.38  | 0.06  | 10.01  | 1.23   | 2.42                     | 1.62                     | 1.28                    |

带 \* 样品数据源于文献 Zhou et al. 2004 ;柴凤梅 ,2006。 \* \* 单位为 1。

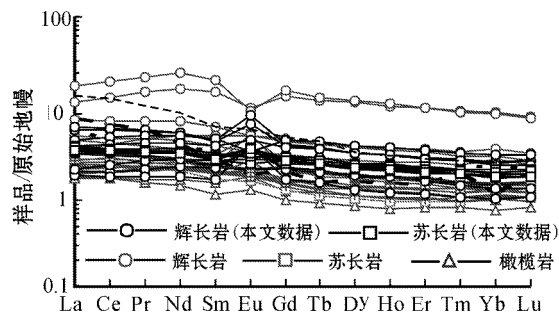


图 5 黄山东铜镍硫化物矿床稀土元素原始地幔标准化配分图

灰色数据来自文献 Zhou 等, 2004 ;王润长等, 1987 柴凤梅, 2006

Fig. 5 Primitive mantle-normalized REE patterns from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit

data of gray illustration from Zhou et al. , 2004 ; Wang et al. , 1987 ; Chai , 2006

3.4 铂族元素

黄山东铜镍硫化物矿床铂族元素(PGE)分析结果见表 4 ,铂族元素总量变化较大 ,介于  $4.13\times 10^{-9}\sim 178.82\times 10^{-9}$  之间。在 PGE 原始地幔标准化配分模式图中(图 6),不同类型岩石的配分曲线基本相似 ,PPGE 富集 ,IPGE 亏损 ,Ru 相对富集 ,与喀拉通克和黄山铜镍硫化物矿床相似 ,不同于金川克拉通边缘成矿体系和 Noril'sk 大火成岩省成矿体系。

Ir 与 Os、Ru、Rh 正相关 ,与 Pt 及 Pd、Cu 相关性不明显。Cu/(Ni+Cu) 比值(0.19~0.48),Pt/(Pt+Pd) 比值(0.31~0.68),与拉斑玄武岩成因岩浆矿床的变化范围(分别为 0.25~0.59 和 0.28~0.72)一致 (Pt+Pd)/(Ru+Ir+Os) 比值介于 2.67~72.12 之间 ,Cu/Pd 比值( $2.3\times 10^5\sim 5.8\times 10^5$ , 平均  $3.1\times 10^5$ )和 Ti/Pd 比值( $1.8\times 10^5\sim 17.1\times 10^5$ , 平均  $6.7\times 10^5$ )大于原始地幔岩浆 (Cu/Pd 比值为 6 500 ,Ti/Pd 比值  $3\times 10^5$  ,Maier et al. , 1998)。Ni/Cu 比值为 0.95~4.37, 平均为 2.04 ,Pd/Ir 比值小于 100 (HSD-34a 除外)。

表 4 黄山东铜镍硫化物矿床 PGE 元素分析结果(  $w_B/10^{-9}$  )

| Table 4 PGE compositions of whole rock samples from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit ( $w_B/10^{-9}$ ) |      |       |      |      |      |      |      |      |       |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| 样品号                                                                                                           | 岩石类型 | Ni    | Os   | Ir   | Ru   | Rh   | Pt   | Pd   | Cu    | 总量     |
| HSD-34a                                                                                                       | 橄辉岩  | 4969  | 0.06 | 0.04 | 0.42 | 0.06 | 21   | 16.5 | 5208  | 38.08  |
| HSD-39                                                                                                        | 辉长岩  | 870.1 | 0.14 | 0.08 | 0.32 | 0.07 | 1.74 | 1.78 | 510.9 | 4.13   |
| YKS-2                                                                                                         | 辉长岩  | 17343 | 4.1  | 2.67 | 2.31 | 2.7  | 7.5  | 16.7 | 3966  | 35.98  |
| YKS-13                                                                                                        | 辉长岩  |       | 6.82 | 7.44 | 4.53 | 8.98 | 17   | 15.5 |       | 60.27  |
| YKS-18                                                                                                        | 辉长岩  | 2165  | 0.19 | 0.1  | 0.29 | 0.14 | 3.64 | 2.38 | 1366  | 6.74   |
| YKS-5                                                                                                         | 苏长岩  | 3025  | 0.75 | 0.46 | 0.49 | 0.61 | 10.2 | 4.7  | 1062  | 17.21  |
| YKS-12                                                                                                        | 苏长岩  | 2079  | 0.13 | 0.1  | 0.38 | 0.18 | 13.1 | 7.63 | 1913  | 21.52  |
| YKS-14                                                                                                        | 苏长岩  | 5014  | 0.39 | 0.33 | 0.39 | 0.54 | 19.4 | 11.3 | 2848  | 32.35  |
| YKS-24                                                                                                        | 块状矿石 |       | 60.4 | 36.5 | 45.3 | 19.3 | 9.81 | 7.51 |       | 178.82 |

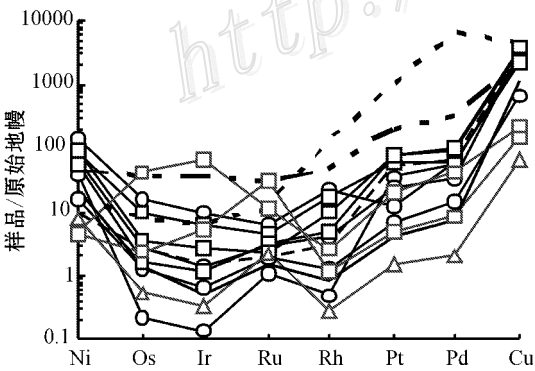


图 6 黄山东铜镍硫化物矿床 100% 硫化物 PGE 原始地幔标准化配分图

NK 和 JC 矿床数据来自文献 Barnes et al. 2005 ; Su et al. 2008 ; 图例和其他数据引用同图 3

Fig.6 Primitive mantle-normalized PGE patterns of the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit on a 100% sulfide basis

( data of Noril'sk and Jinchuan deposits from Barnes et al. , 2005 ; Su et al. , 2008 ; illustration and data same as Fig. 3 )

4 讨论

4.1 成矿岩浆类型

黄山东铜镍硫化物矿床含矿岩体根据岩石空间分布、接触关系和岩性组合特征 ,分为中部和核部橄辉岩、辉长岩 ,底部苏长岩及边部闪长岩 4 套岩石组合。不同岩石组合辉长岩和苏长岩(  $w(\text{MgO})$  为 8%~15% )的 TFe、CaO、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  等主量元素含量具不同的演化趋势(图 2),在岩石地球化学特征方面表现为 U-Th 亏损程度和铷异常等特征的不同(图 3、5) ,揭示含矿岩体不同岩石组合为不同期次岩浆侵位的产物。

不同类型岩石的主量元素含量随 MgO 含量呈玄武岩浆分异结晶规律性变化特征(图 2),微量元素和稀土元素原始地幔配分模式相似(图 3、5)。玄武岩浆体系部分熔融或分离结晶过程中 ,分配系数相近的强不相容元素对比值基本保持恒定 (Saunders et al. , 1988),可用来判别岩浆源区特征 ,同源岩浆样品在强不相容元素对比值图解中应分布在同一相关直线上。分配系数相近的 Ta/Yb-Nb/Y 和 Zr/Nb-Hf/Nb 强不相容元素对比值图解(图 7)显示 ,黄山东样品均落在相关系

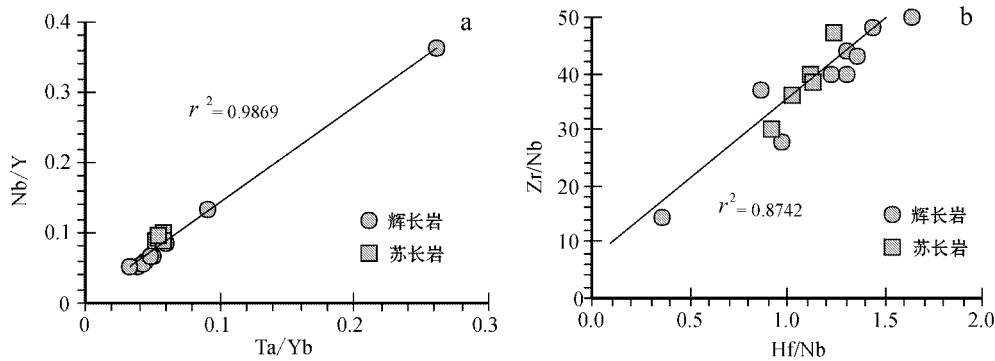


图 7 Ta/Yb-Nb/Y (a) 和 Hf/Nb-Zr/Nb (b) 相关图  
Fig. 7 Plots of Ta/Yb-Nb/Y (a) and Hf/Nb-Zr/Nb (b)

数很高的同一直线上。上述特征表明黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体不同类型岩石为同源岩浆的产物。

黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体 Cu/(Ni + Cu) 比值 (0.19~0.48) 和 Pt/(Pt + Pd) 比值 (0.31~0.68) 位于拉斑玄武质岩浆成因矿床的范围 (分别为 0.25~0.59 和 0.28~0.72) 内, 高于科马提岩岩浆矿床的分布范围 (分别为 0.04~0.06 和 0.36~0.38) (Naldrett, 1999; 汤中立, 1995) 表明成矿母岩浆为拉斑玄武质岩浆。含矿镁铁-超镁铁岩体中橄榄岩微量元素具有近平坦的原始地幔标准化配分模式, 分配系数接近 1 的微量元素 (如 Zn 等) 含量略高于原始地幔 (1.74 倍)  $\epsilon_{Nd}(t)$  值介于 7.8~9.0 之间 (Zhou et al., 2004; 韩宝福等, 1998), Zr/Y 比值较低 (1.7~5.27) 指示成矿母岩浆源于软流圈地幔 (Sato et al., 2007)。

黄山东铜镍硫化物矿床未发现冷凝边及与岩浆通道密切相关的镁铁质岩墙, 故不能直接确定母岩浆成分。根据橄榄石-熔体平衡原理, 采用岩体中橄榄石最高的 Fo 值 (84.7, 倪志耀, 1991) 计算母岩浆的 MgO/FeO 比为 1.3 ( $K_{Ol-Melt}^D = 0.3 \pm 0.03$ ) 结合橄榄石堆晶岩中 MgO 和 FeO 含量, 推算出该岩体母岩浆的 MgO 约为 12%, 即黄山东铜镍硫化物矿床成矿母岩浆为高 MgO 玄武质岩浆, 这与 Pd/Ir 与 Ni/Cu 比值图解投点于高 MgO 玄武岩区的结果一致 (图 8)。

4.2 岩浆作用

黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体同一岩石组合中不同岩相间渐变接触, 矿物组成和岩石结构呈渐变过渡关系, 化学组成  $SiO_2$ 、 $K_2O + Na_2O$ 、 $Al_2O_3$  和 CaO 等随 MgO 呈系统连续变化, 揭示成矿岩浆就地结晶分异特征。另一方面, 橄榄岩、辉长岩和苏长岩微量元素配分模式均表现 Cr 负异常 (图 3) 部分辉长岩和苏长岩具有钕负异常 (图 5), 表明成矿岩浆可能经历了铬铁矿及斜长石的分离结晶作用。

不同类型岩石亏损 Nb 和 Ta, 富集 Sr, 表明存在地壳物质的混染。上、下地壳与原始地幔等不同端元的  $Sm/Nd$  和  $Nb/Ta$  等分配系数接近的强不相容元素比值具有明显的差异, 黄山东铜镍硫化物矿床  $Sm/Nd$  比值和  $Nb/Ta$  比值分别变化于 0.26~0.32 和 11.5~15.8 之间, 介于原始地幔 (0.33,

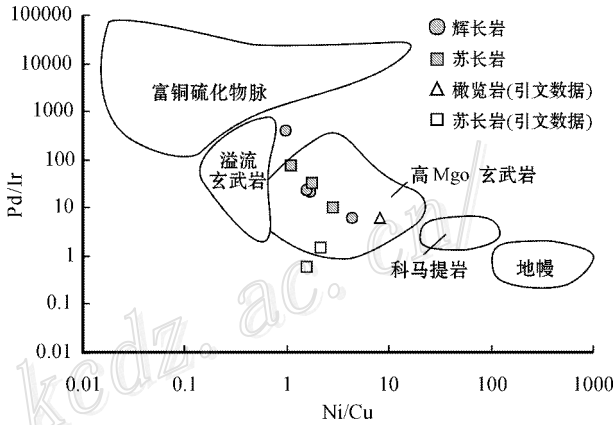


图 8 黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁质岩体 Ni/Cu-Pd/Ir 特征 (据 Chai et al., 1992)

Fig. 8 Plot of Ni/Cu-Pd/Ir ratios from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit (after Chai et al., 1992)

17.83) (Sun et al., 1989) 和地壳 (0.17, 0.83) (Taylor et al., 1995; Gao et al., 1998) 之间 (图 9), 且  $Th/Nb$ 、 $Th/Ta$  和  $La/Nb$  平均值 (分别为 0.55、7.24 和 3.55) 具有大陆地壳特征, 揭示成矿玄武质岩浆受到了地壳物质的混染。

黄山东铜镍硫化物矿床微量元素和稀土元素配分模式不同于 Noril'sk 和 Bushveld 等板内铜镍硫化物矿床 (图 3 和 5),  $Ti/Y$  比值 (278~45) 指示板块边缘环境 (Pearce et al., 1977),  $Ta/Hf$  比值 (0.08) < 1、 $Th/Hf$  比值 (0.48) > 0.3、 $La/Nb$  比值 (3.55) > 2 和  $Nb/Zr$  比值 (平均值 0.03) < 0.04 进一步指示汇聚板块边缘的特征。Nb 和 Ta 亏损,  $Ta \times Th/Hf^2$  (平均值 0.04) > 0.035,  $La \times Nb/Zr^2$  (平均值 0.0027) > 0.002 显示岛弧岩浆特征 (汪云亮等, 2001; 武莉娜等, 2003)。黄山东铜镍硫化物矿床橄榄苏长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄确定岩体形成时间为 (274 ± 3) Ma (韩宝福等, 2004), 所在中亚造山带西段古生代经历了板块碰撞和古亚州洋闭合, 东天山地区在早二叠世时已完成了俯冲碰撞并进入板内演化阶段 (毛景文等, 2002; 韩春明等, 2006; 李金祥等, 2007), 结合上述地质

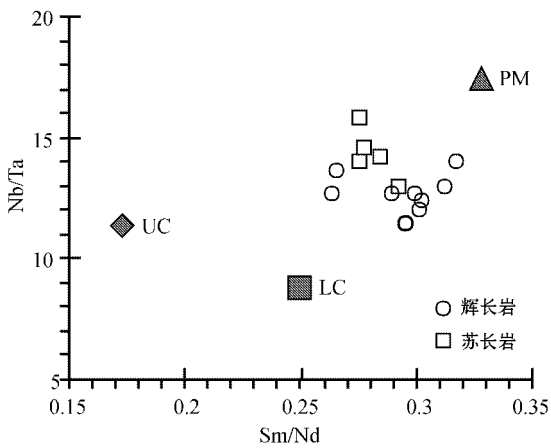


图9 黄山东铜镍硫化物矿床镁铁岩体 Sm/Nd-Nb/Ta 相关图

PM—原始地幔 (Sun et al., 1989); LC—下地壳 (Taylor et al., 1995); UC—上地壳 (Gao et al., 1998)

Fig. 9 Plot of Sm/Nd-Nb/Ta ratios from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit

PM—Primitive mantle, data from Sun et al., 1989; LC—Lower crust, data from Taylor et al., 1995; UC—Upper crust, data from Gao et al., 1998

和地球化学资料推断,黄山东铜镍硫化物矿床成矿构造环境可能为碰撞后的拉张环境,其源区有早期俯冲的地壳或拆沉的地壳组分。

#### 4.3 成矿作用

岩浆铜镍硫化物矿床成矿的关键是硅酸盐岩浆中硫饱和,促使硫化物与硅酸盐岩浆熔离,亲铜元素在硫化物熔体中富集 (Naldrett, 1999; 2004)。岩浆快速冷却、岩浆混合、结晶分异作用、外来硫的加入或地壳混染均可造成硫饱和 (Naldrett, 1999; Li et al., 2000, 2001, 2005)。黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁岩体分异较好、结晶矿物粒度大及微量元素组成特征等揭示,不同类型岩石为同源岩浆结晶分异的产物,据此可排除岩浆快速冷却、岩浆混合对硫饱和的贡献。另一方面,含矿岩体中 Cu/Pd 比值 (平均  $3.1 \times 10^5$ ) 和 Ti/Pd (平均  $6.7 \times 10^5$ ) 比值均大于原始地幔岩浆 (Cu/Pd = 6 500, Ti/Pd =  $3 \times 10^5$ ) (Maier et al., 1998),证实岩浆经历了硫化物熔离作用。矿体主要赋存于橄榄岩-辉长岩组合的底部和苏长岩的底部,橄榄岩局部含有硫化物珠滴,表明岩浆分异结晶作用对硫化物熔离的贡献较小。

微量元素组成特征揭示成矿岩浆演化过程中存在地壳物质混染,在  $w(\text{MgO})$  为 8%~15% 范围内,岩石的  $\text{SiO}_2$  含量明显增加,同时 Cu、Ni 等成矿元素也出现剧增的特征,据此推断富硅的地壳混染组分的加入可能是导致硫化物熔离富集成矿的主要因素。另一方面,Ir 含量与 Os、Ru 和 Rh 含量正相关,与 Pt、Pd、Cu 含量不相关性等特征指示铂族元素聚集可能受热液作用的影响,而 Pd/Ir 比值 < 100 可排除后期

变质热液交代作用的影响 (Maier et al., 1998),存在外来流体的加入。因此,成矿岩浆演化过程中富硅的地壳混染组分和  $\text{CO}_2$  主导的外来流体的加入可能导致黄山东铜镍硫化物矿床成矿的主要控制因素 (Hu et al., 2009),壳源混染组分和  $\text{CO}_2$  主导的外来流体可能与早期俯冲或拆沉有关。

## 5 结 论

根据黄山东铜镍硫化物矿床含矿镁铁-超镁铁岩体中 4 套岩石组合主量元素、微量元素和铂族元素组成分析计算结果初步认为:

(1) 含矿镁铁-超镁铁岩体不同类型岩石组合主量元素含量随 MgO 含量呈岩浆结晶分异规律性变化,在 MgO 含量约 8%~15% 的范围内出现大幅度变化,为同源高 MgO (约 12%) 斑状玄武质岩浆多期侵位的产物。

(2) 成矿岩浆在深部岩浆房可能经历了铬铁矿和斜长石的分离结晶作用和壳源物质混染作用,随后分期上侵就地分异结晶。

(3) 硫化物熔离发生在岩浆侵位前,地壳混染、富硅组分和外来流体的加入是成矿的主要控制因素。

志 谢 特将本文献给翟裕生教授从事地质工作 60 年暨 80 华诞。李楚思教授携兰州大学的同事和弟子很自豪地以这种独特的方式祝贺翟裕生院士 80 华诞,感谢博士生导师翟老师多年来的指导与关怀。在本文完成过程中,钱壮志、姜常义、孟广路、李刚柱、许涛、刘燕学、陶琰和何克参与样品采集和实验分析工作,汤中立院士、Chusi Li, Anthony J. Naldrett, Edward M. Ripley 给予了指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

## References

- Arndt N T, Czamanske G. K, Walker R J, Chauvel C and Fedorenko V A. 2003. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Thalakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits [J]. *Econ. Geol.*, 98: 495-515.
- Barnes S J and Lightfoot P C. 2005. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents [J]. *Econ. Geol.*, 100: 179-213.
- Chai F M. 2006. Comparison on petrologic geochemistry of three mafic-ultramafic intrusions associated with Ni-Cu sulfide deposits in northern Xinjiang (dissertation for Doctor degree [D]). Beijing: China University of Geoscience. 118-119 (in Chinese with English abstract).
- Chai G and Naldrett A J. 1992. The Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma [J]. *Petrology*, 33(2): 277-303.
- Fu P E, Hu P Q, Zhang M J, Jia Y Q, Tang Z L and Li W Y. 2009. Petrogenesis of Huangshan Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang [J].

- Geochimica, 38(5):432-448 (in Chinese with English abstract).
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y W, Zhao Z D and Hu Y K. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in east China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 62(11):1959-1975.
- Han B F, He G Q, Wang S G and Hong D W. 1998. Postcollisional mantle-derived magmatism and vertical growth of the continental crust in north Xinjiang[J]. Geological Review, 44(4):396-406 (in Chinese with English abstract).
- Han B F, Ji J Q, Song B, Chen L H and Li Z H. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb age and geology of Kalatongke-Huangshan mafic-ultramafic complex, Xinjiang, China[J]. Chinese Science Bulletin, 49(22):2324-2328 (in Chinese).
- Han C M, Xiao W J, Cui B, Mao Q G, Zhang J E and Ao S J. 2006. Major types and characteristics of late Paleozoic copper deposits in north Xinjiang, northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 80(1):74-89 (in Chinese with English abstract).
- Hu P Q, Zhang M J, Li C, Tang Z L, Li W Y and Fu P E. 2009. Metallogenic magmatism of Huangshan Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang, west China[A]. Proceedings of Xi'an international Ni-Cu (Pt) deposit symposium[C]. Northwest Geology, 42(Supp.):86-88 (in Chinese).
- Jiao J G, Yan H Q, Qian Z Z, Liu R P and Li J J. 2006. Geochemical characteristics of typical mafic-ultramafic rocks in Longshou Mountains[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 26(1):49-56 (in Chinese with English abstract).
- Li C, Lightfoot P C, Amelin Y and Naldrett A J. 2000. Contrasting petrological and geochemical relationships in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada: Implications for ore genesis[J]. Econ. Geol., 95(4):771-779.
- Li C, Maier W D and De Waal S A. 2001. Magmatic Ni-Cu versus PGE deposits: Contrasting genetic controls and exploration implication[J]. South African Journal of Geology, 104:205-214.
- Li C and Ripley E M. 2005. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magma at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits[J]. Mineralium Deposita, 40:218-230.
- Li J X, Qin K Z, Xu X W, Sun H, Chen G S, Wu H and Mo X H. 2007. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complex in east Tianshan, Xinjiang: Constraints on ore genesis and tectonic setting[J]. Mineral deposits, 26(1):43-57 (in Chinese with English abstract).
- Maier W D, Barnes S J and De Waal S A. 1998. Exploration for magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits: A review of recent advances in the use of geochemical tools, and their application to some south African ores[J]. South African Geology, 10(3):237-253.
- Mao J W, Yang J M, Qu W W, 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).
- Naldrett A J. 1999. World-class Cu-Ni-PGE deposits: Key factors in their genesis[J]. Mineralium Deposita, 34(3):227-240.
- Naldrett A J. 2004. Magmatic sulfide deposits[J]. Springer Berlin, 128:303-311.
- Ni Z Y. 1991. Chemical composition and petrologic significance of olivines in Huangshandong mafic-ultramafic complex in Hami, Xinjiang, China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 13(1):55-66 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A and Gale G H. 1977. Identification of ore-deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks[J]. Geological Society, London, Special Publication, 7(1):14-24.
- Ran H Y and Xiao S H. 1994. Trace element abundances and tectonic environment of the host intrusion of Kalatongke Cu-Ni deposit[J]. Geochimica, 23(4):392-401 (in Chinese with English abstract).
- Sato M, Shuto K and Yagi M. 2007. Mixing of asthenospheric and lithospheric mantle-derived basalt magmas as shown by along-arc variation in Sr and Nd isotopic compositions of Early Miocene basalts from back-arc margin of NE Japan arc[J]. Lithos, 96:453-474.
- Saunders A D, Norry M J and Tarney J. 1988. Origin of MORB and chemically depleted mantle reservoirs: Trace element constraints[J]. Journal of Petrology (Special Lithosphere Issue), 425-445.
- Su S G, Li C, Zhou M F, Ripley E M and Qi L. 2008. Controls on variations of platinum-group element concentration in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China[J]. Mineralium Deposita, 43:609-622.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. In Saunders and Norry M J, eds. Magmatism in the Ocean Basins[M]. London: Geological Society. 313-345.
- Tang Z L and Li W Y. 1995. Metallogenic model of Jinchuan Cu-Ni deposit and geological characteristics[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 14-209 (in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Li C, Song X Y and Ripley E M. 2008. Mineralogical petrological and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China[J]. Mineralium Deposita, 43(7):849-872.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. Rev. Geophys., 33:241-265.
- Wang R M, Liu D Q and Ying D T. 1987. The conditions of controlling metallogeny of Cu, sulphide ore deposit and the orientation of finding ore Hami, Xinjiang, China[M]. Minerals and Rock, 7(1):1-152 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y L, Zhang C J and Xiu S Z. 2001. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. Acta Petrologica Sinica, 17(3):413-421 (in Chinese with English abstract).
- Wu L N, Wang Z C and Wang Y L. 2003. On the application of La, Nb and Zr in identifying the tectonic settings[J]. Journal of East China Geological Institute, 26(4):333-348 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Yan S H, Chen B L, He L X, He Y S and Zhou G. 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit[J]. Acta Petrologica et Mine-

ralogica, 22(3):217-224( in Chinese with English abstract ).

Zhou M F, Michael L C, Yang Z X, Li J W and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu( PGE ) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, eastern Xinjiang, north-west China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt[ J ]. Chemical Geology, 209( 3-4 ): 233-257.

## 附中文参考文献

柴凤梅. 2006. 新疆北部三个与岩浆 Ni-Cu 硫化物矿床有关的镁铁-超镁铁质岩的地球化学特征对比[ 博士学位论文 ] D]. 北京: 中国地质大学. 118-119.

傅飘儿, 胡沛青, 张铭杰, 贾元琴, 汤中立, 李文渊. 2009. 新疆黄山铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程[ J ]. 地球化学, 38( 5 ): 432-448.

韩宝福, 何国琦, 王式洸, 洪大卫. 1998. 新疆北部后碰撞幔源岩浆活动与陆壳纵向生长[ J ]. 地质论评, 44( 4 ): 396-406

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.

韩春明, 肖文交, 崔 彬, 毛启贵, 张继恩, 敖松坚. 2006. 新疆北部晚古生代铜矿床主要类型和地质特征[ J ]. 地质学报, 80( 1 ): 74-89.

焦建刚, 闫海卿, 钱壮志, 刘瑞平, 李晶晶. 2006. 龙首山岩带典型

镁铁-超镁铁质岩体岩石地球化学特征[ J ]. 矿物岩石, 26( 1 ): 49-56.

李金祥, 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 ): 43-57.

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.

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

冉红彦, 肖森宏. 1994. 喀拉通克含矿岩体的微量元素与成岩构造环境[ J ]. 地球化学, 23( 4 ): 392-401.

汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物矿床模式及地质特征对比[ M ]. 北京: 地质出版社. 14-209.

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, 7( 1 ): 1-152.

汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[ J ]. 岩石学报, 17( 3 ): 413-421.

武莉娜, 王志畅, 汪云亮. 2003. 微量元素 La, Nb, Zr 在判别大地构造环境方面的应用[ J ]. 华东地质学院学报, 26( 4 ): 333-348.

张招崇, 闫升好, 陈柏林, 何立新, 何永胜, 周 刚. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[ J ]. 岩石矿物学杂志, 22( 3 ): 217-224.

http://www.kcdz.com