

# 陕西省黑龙口清岩沟钼-镍矿床地质特征与成因

宗静婷<sup>1,2</sup> 张复新<sup>1</sup> 郑 炜<sup>3</sup> 侯俊富<sup>1</sup>

(1.大陆动力学国家重点实验室(西北大学),西北大学地质学系,陕西 西安 710069;

2.西安文理学院资源环境系,陕西 西安 710065; 3.西北有色地勘局物探队,陕西 西安 710054)

**摘要:**北秦岭奥陶系下段庙湾组黑色岩系中,含炭质泥板泥灰岩系 Mo-Ni-Ti-Cu-Pb-Zn-P 丰度较高,勘查出钼-镍硫化物矿床,在秦岭造山带中尚属首例。矿床产于商-丹带秦岭北部弧后断陷盆地深水沉积环境之中,严格受炭质千枚岩与细晶大理岩之间的韧-脆性构造接触带控制,矿体呈构造透镜体-扁豆体状。具有较强烈的辉钼矿化-磁黄铁矿化-镍黄铁矿化-黄铁矿化-闪锌矿化,伴随石墨化-硅化-铁白云石化-方解石化蚀变。矿体中镍-钼硫化物具有共生特点。矿石类型按容矿围岩划分为炭质千枚岩型、白云岩型和细晶大理岩型,按成矿元素组合划分具有镍-钼型、钼-石墨型、镍-多金属类型。矿床属于黑色岩系为容矿的沉积预富集-变质叠加活化迁移-韧脆性构造改造和热液富集成矿的层控型后生高-中-低温热液成因。

**关键词:**黑色岩系;钼-镍矿床;成矿机制;清岩沟;北秦岭

**中图分类号:** P618.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3657(2010)05-1501-10

近两年来,西北有色地勘局物探总队在商洛市黑龙口发现清岩沟钼-镍硫化物矿床,产于北秦岭奥陶系下段庙湾组黑色岩系中,为秦岭造山带增添了新的矿床类型,矿体严格受炭质板岩与细晶大理岩之间的韧-脆性构造接触带控制,属于沉积预富集-变质叠加活化迁移-韧脆性构造改造和热液富集成矿的层控型后生高-中-低温热液成因矿床。在此,将最近研究成果介绍交流,以丰富秦岭成矿理论,深化找矿靶区地质认识,扩大区域找矿成果,开创北秦岭找矿新局面。

## 1 矿产产出地质背景

清岩沟钼-镍矿床产于北秦岭奥陶系下部庙湾组黑色岩系之中,地质构造演化和区域地球化学研究表明<sup>[1]</sup>,北秦岭至少在中元古代已拼合到华北板块上,并作为华北板块南缘活动大陆边缘的主体。至寒武纪-奥陶纪华北板块南缘已具活动大陆边缘性质,即扬子板块已开始向北向华北板块之下消减俯冲,使华北板块南缘呈现出由南向北依次从商-丹

俯冲带、秦岭杂岩为基底的岛弧火山岩与花岗岩带到二郎坪弧后边缘海盆带,构成与活动大陆边缘类似的沟、弧、盆构造体系。研究区出露的庙湾组黑色岩系,位于现代板块俯冲火山岩岛弧边缘海盆与弧后边缘海盆的过渡带上(图 1)。

研究区黑龙口-大荆地区的黑色岩系为商丹古洋盆北部火山岛弧北侧的活动陆缘的边缘海沉积,该背景下海盆边缘陆源区广泛分布有与火山岛弧有关的火山岩系与弧后盆地火山-沉积建造;沉积海盆内部及其附近同沉积构造活跃,海底热水与火山-热液沉积发育,成矿物质来源具多源性和复杂性;海盆沉积深度不一,半封闭滞留环境微生物繁盛,有利成矿物质的保存与聚集,形成以黑色岩系为容矿的沉积型及沉积-改造型各类矿床。

## 2 黑色岩系与岩石学

### 2.1 庙湾组黑色岩系组成

区内由元古宇熊耳群中部岩段的黑云斜长片岩和二云石英片岩,寒武系细晶白云岩、微晶灰岩,奥

收稿日期:2010-06-10;改回日期:2010-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(40572065)资助。

作者简介:宗静婷,1975年生,副教授,博士生,资源环境与地球化学专业;E-mail:zongjt@126.com。

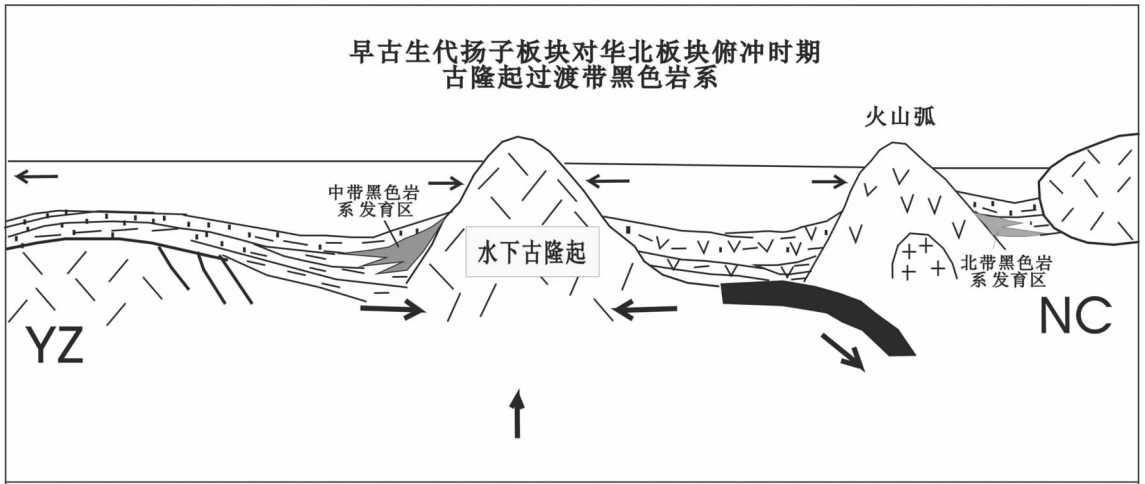


图1 秦岭北带黑色岩系产出地质构造背景与位置<sup>[2,3]</sup>

Fig.1 Geological background and position of the black rock series in North Qinling

陶系炭质绢云千枚岩、炭质千枚岩、绿泥-绢(白)云-石英千枚岩、二云母(斑点状)石英片岩组成。奥陶系下部炭质黑色岩系是本区镍-钼矿床的含矿与容矿层。前述岩石均遭受变质变形呈片岩、千枚岩系列,实际原岩为炭质板岩、砂质板岩、石英砂岩、结晶灰岩、白云质灰岩等。

商3县韩峪川清岩沟庙湾组(Om<sub>1</sub>)实测剖面(图2),地层自下而上如下:

- ①绢云炭质千枚岩夹炭质硅质岩透镜体,厚 201.33 m;
- ②石英二云千枚岩,厚 9.78 m;
- ③绢云炭质千枚岩,厚 31.42 m;
- ④浅黄绿色石英二云千枚岩,厚 83.98 m;
- ⑤绢云炭质千枚岩与含炭绢云千枚岩互层,厚 2.11 m;
- ⑥灰色片状砾岩,厚 63.60 m;
- ⑦含炭绢云千枚岩,厚 11.26 m;
- ⑧灰色片状砾岩,厚 186.03 m;

⑨灰色-浅灰绿色绢云石英千枚岩,厚 11.25 m。

庙湾组下部(Om<sub>1</sub>)向上与片状砾岩(Om<sub>2</sub>)呈渐变过渡关系,向下与寒武系碳酸盐岩类呈角度不整合或断层接触关系。

### 2.2 含矿岩石学与地球化学特征

清岩沟地区黑色岩系成矿元素分析表明,建造含 Mo-Ni-Ti-Cu-Pb-Zn-P 成矿物质丰富(表1),元素丰度高的含矿炭质岩系。岩石类型相对简单,经强烈的区域变质变形和后期强烈韧-脆性剪切构造作用叠加与改造下,丰富有机炭质参与下,大量高-中-低温金属硫化物出现,氧化-还原条件变化下,使上述成矿物质原地富集,形成变质成因的石墨-钛铁矿-金红石-磁铁矿-磷灰石化及热液型多金属硫化物的镍-钼-铜-锌-铅的矿化,矿化是沉积-变质-构造等多种地质条件控制和热液成矿作用下的产物。

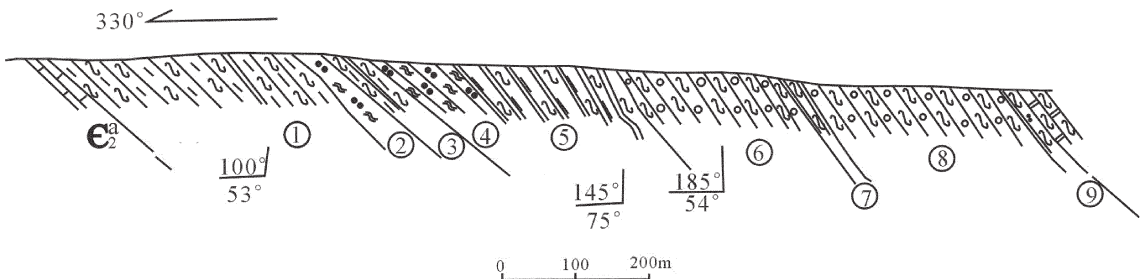


图2 黑龙江清岩沟庙湾组实测剖面

Fig.2 Measured geological section of Miaowan Formation in Qingyangou of Heilongkou

表 1 清岩沟庙湾组含矿岩石光谱半定量微量元素分析  
 Table 1 Semi-quantitative spectral analyses of trace elements in ore-bearing rocks of Miaowan Formation in Qingyangou

元素	Cu	Mo	Ni	Co	V	As	Ag
含量/ $10^{-6}$	40	1500	600	10	400	100	900
Taylor et al. 上地壳 (1985) / $10^{-6}$	25	1.5	20	10	60	1.5	0.05
元素	Pb	Zn	Cr	W	Sn	Ti	P
含量/ $10^{-6}$	900	400	150	30	8	20000	2
Taylor et al. 上地壳 (1985) / $10^{-6}$	20	71	355	2.0	5.5	3000	—

注:由西安矿产资源监督检测中心检测。

实测剖面 and 显微镜下鉴定,黑色岩系各类岩石中常量组分主要为:炭质、泥质、钙质、砂质、硫-铁质等组成以炭质板岩、泥质板岩、含炭硅质岩、泥质石英细砂岩、白云质灰岩为互层的含矿与容矿岩系。钼-镍等成矿物质主要赋存于沉积成岩成因的硫化物矿物(黄铁矿、白铁矿)和以炭质吸附状态存在于岩系中,丰富的成矿元素高于上地壳平均丰度。

### 3 矿区构造特征

工作区位于雪家沟—高家扒复式向斜褶皱北翼,矿区属于该向斜南倾的单斜构造。但清岩沟矿区地段黑色含矿岩系的产状、分布特征与区域比较显

得很不协调,明显发生了强烈变形、变位和膨大。庙湾组下部绢云炭质千枚岩在清岩沟地段平面上呈不规则的“帚”状,向北东向收敛,向西南膨大并分支,形态复杂(图 3)。东北最薄处厚度小于 50 m,中部最厚处约 500 m。但向西南方向迅速分支减薄尖灭,与东西向地层呈断层接触关系。西南部与二云石英千枚岩呈交替叠置,多见结晶灰岩、片状大理岩及白云岩构造透镜体。

清岩沟地区在承袭区域变质变形的基础上,含矿岩系在后期遭受韧-脆性剪切构造的强烈叠加作用下,变质、变形强烈,由于塑性黑色岩系物理性质的特点,致使韧性构造直观而明显,脆性断裂发育而

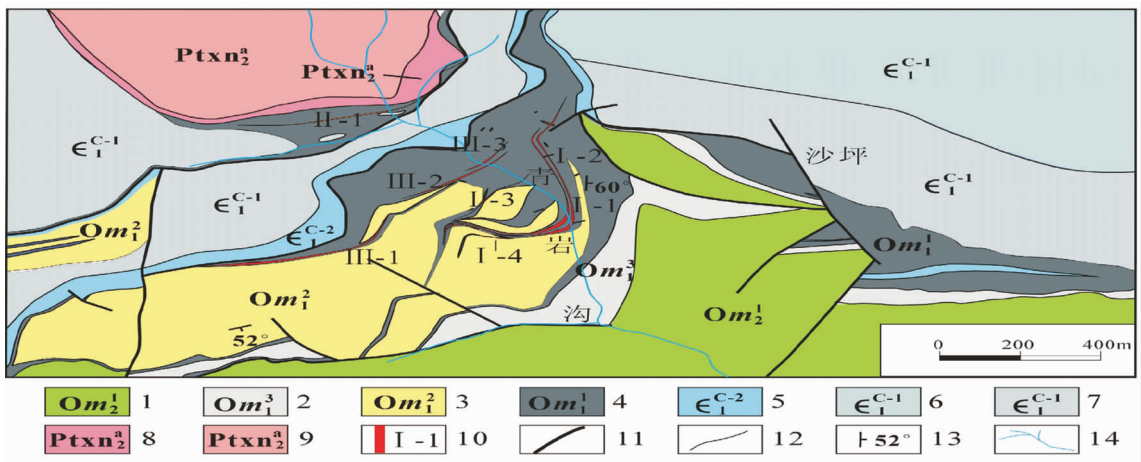


图 3 清岩沟钼-镍矿床地质图

奥陶系庙湾组:1—浅灰色-灰色片状砾岩;2—灰色-深灰色含炭质绢云石英千枚岩;3—浅灰绿色、浅灰色二云石英千枚岩;4—黑色绢云炭质千枚岩;寒武系:5—泥质(灰质)白云岩;6—灰色薄层状大理岩(夹二云千枚岩);7—灰白色细晶白云岩;元古宇熊耳群:8—深灰色黑云斜长片岩;9—灰白色二云石英片岩;10—钼矿体及其编号;11—断层;12—地质界线;13—产状;14—水系

Fig.3 Geological map of the Qingyangou Ni-Mo deposit

Ordovician Miaowan Formation: 1-Grayish-gray flake conglomerate; 2-Gray-dark gray carbonaceous sericite quartz phyllite; 3- Greenish, grayish two-mica quartz phyllite; 4-Black sericite carbonaceous phyllite. Cambrian: 5-Argillaceous (lime) dolomite; 6- Thin-layered gray marble (intercalated with two-mica phyllite); 7-Grayish fine-grained dolomite. Proterozoic Xiong'er Group: 8-Dark gray biotite plagioclase schist; 9-Grayish two-mica quartz schist; 10- Molybdenum ore body and its serial number; 11-Fault; 12-Geological boundary; 13-Attitude; 14-Water system



不明显,使矿区构造相互叠置、错综难辨。清岩沟地段庙湾组塑性黑色岩系遭受到了较强的变形、变质的改造,黑色岩系多期变形、变质的具体特征为:①含矿黑色岩系在后期韧-脆性剪切构造作用下,发生强烈的片理化,剪切带中灰岩质、白云质构造扁豆体发育,在变质-变形作用下形成片状大理岩;②北东、北西向次级脆性断裂作用下,片理化黑色岩系被切割、挤压-揉皱-膨胀、呈不规则的“帚”状(图2);③显微构造片理化, $S_1$ 、 $S_1-S_2$ 、 $S_1-S_2-S_3$ 面理组合发育,揉折变形、构造透镜体极其发育(图4-C、D);④黑云母单晶变斑、聚晶变斑及其旋转变斑在含铁质云母石英片岩中发育;⑤石墨化在炭质千枚岩、炭质板岩中普遍发育;⑥在片理化带中的构造扁豆体灰岩边缘发育片状大理岩;⑦镍-钼矿化及伴随的石墨化、硅化、白云石化、绿泥石化、方解石化主要发育在炭质千枚岩与片状大理岩-白云岩接触带及其两侧;⑧矿化作用期次与构造变形同步,显示多期、多

阶段的特征:早期阶段辉钼矿-石墨化-绢云母化、早-中期阶段磁黄铁矿-黄铁矿-镍黄铁矿化、中-晚期阶段闪锌矿-黄铜矿-硅化-白云石化、晚期阶段方铅矿-方解石化。

## 4 矿床地质

2007年以来,清岩沟黑色岩系中的钼矿异常带矿带和矿床地质研究,首次发现具有工业矿化的镍矿化(镍黄铁矿)、钼矿化(辉钼矿)作用,两者受控地质因素大体相同,成矿作用大致同期、同位,容矿岩石一致,均赋存于含炭黑色岩系之中。不同之处在于辉钼矿矿化作用范围略加广泛,镍黄铁矿化作用分布稍有局限。

### 4.1 矿体特征

矿体赋存于炭质千枚岩段再经韧-脆性剪切变形叠加的地层与构造联合控制的容矿带中,具有明显的层控-岩控与构造-热液成矿及控矿的特征。

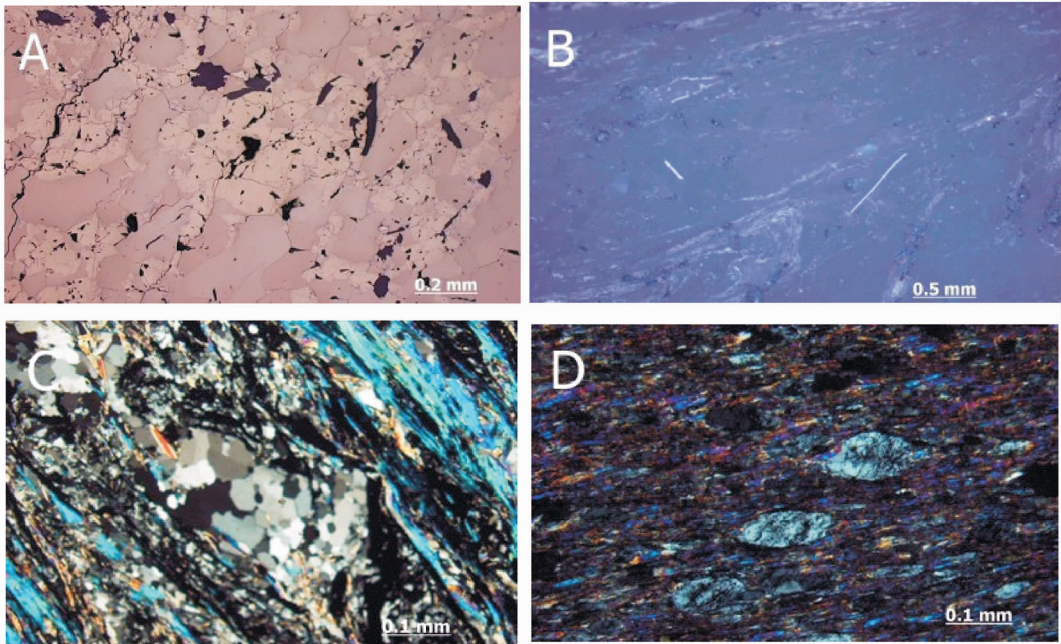


图4 不同矿石类型的电子显微镜照片

A—镍矿石中磁黄铁矿(棕黄)他形中-细粒晶与镍黄铁矿(黄白)细晶共生一起(单偏光);B—钼矿石中显微鳞片状石墨化(棕灰色)炭质千枚岩中辉钼矿微细晶片晶(白色)(单偏光);C—砂质板岩变质变形绢云-白云母(橘黄-黄-蓝)化晶片及显微石英透镜体(正交偏光);D—炭泥质板岩经剪切变形形成由微晶石英组成的显微构造眼球体,彩色为绢云母化及不透明石墨化(正交偏光)

Fig.4 Electron microscope photos of different ore types

A-Irregular crystal-fine crystal of pyrrhotite (brownish yellow) and pentlandite (white and yellow) associated with fine grains;B-Molybdenite micro-lamellate crystal (white) of micro-flake graphite (brown and gray) carbonaceous phyllite in molybdenum ore (plainlight);C-Metamorphosed and deformed sericite-muscovite (orange-yellow-blue) of lamellar and micro quartz lens of sandy slate, (crossed nicols);D-Microstructure augen body composed of microcrystalline quartz by shear deformation of carbon argillite, the colors indicating graphite sericite and opaque (crossed nicols)

镍-钼矿(化)体就位于绢云炭质千枚岩的强烈揉皱变形及膨胀部位,几组断裂交叉地段,灰质白云岩构造透镜体化并切入韧-脆性剪切变形的绢云炭质千枚岩段的接触带中及其两侧部位,构造破碎较强部位镍-钼矿化明显增强。矿体由炭质千枚岩型、白云岩型和细晶大理岩型镍-钼矿石组成,划分出 I 号、II 号和 III 号钼-镍矿带,主要工业矿体赋存于 I 号、III 号矿带中。

#### (1) I 号镍-钼矿化带

I 号钼矿化带位于矿区南部,长 896 m,包含 4 条镍-钼矿体。I-1 镍-钼矿体号和 I-2 号钼矿体平行展布,清岩沟西段向南倾,清岩沟东段东倾,倾角  $48^{\circ}\sim 65^{\circ}$ ,显然是受多组断裂构造控制所致。I-1 号镍-钼矿体长 896 m,11 个工程控制,工程间距 50~200 m。槽探控制矿体厚度 0.67~5.06 m,槽探刻槽采样钼平均品位 0.05%~0.21%。I-2 号钼矿体长 762 m,9 个槽探工程控制,间距 50~200 m。单工程见矿厚度 0.91~4.46 m,单工程钼平均品位 0.034%~0.42%。I-3 号钼矿体位于 I-2 号钼矿体以北,地表呈舒缓波状延伸,产状  $150^{\circ}\angle 65^{\circ}$ 。矿体长 210 m,2 个工程控制,工程间距 100 m,单工程见矿厚度 0.91~3.13 m,单工程钼平均品位 0.065%~0.067%。I-4 号钼矿体位于 I-1 号钼矿体以南,地表上呈北凸的弧形。矿体长 162 m,单工程见矿厚度 0.81~0.88 m,单工程钼平均品位 0.061%~0.179%。

通过钻孔 ZK301、ZK001 和 ZK801 对 I 号矿带深部勘探,见矿厚度 0.91~2.26 m,钼平均品位

0.107%~0.180%。镍-钼矿体连续性较好,有分支复合现象,但厚度和品位变化较大,向深部延伸较稳定。在 2006 年度勘查的基础上,再经 2007 年度的深化找矿勘查, I 号钼矿化带中的矿体总的规模明显增大,新发现了 I-4 号矿体。

#### (2) III 号镍-钼矿化带

地表上 III 号钼矿化带位于 I 号钼矿化带北部约 80 m,矿化带长 1250 m,北东东向展布,包含 3 条钼矿体,矿体倾向  $150^{\circ}\sim 170^{\circ}$ ,倾角  $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。各矿体大体相互平行。

III-1 号钼矿体在地表呈舒缓波状延伸。矿体长 646 m,3 个工程控制,工程间距 200 m,单工程见矿厚度 0.93~2.81 m,单工程钼平均品位 0.054%~0.136%。

III-2 号钼矿体位于 II-1 号钼矿体以北。矿体长 300 m,3 个工程控制,工程间距 100 m,单工程见矿厚度 0.33~1.89 m,单工程钼平均品位 0.054%~0.058%。

III-3 号钼矿体长 100 m,单工程控制,工程见矿厚度 0.44 m,单工程钼平均品位 0.092%。

III 号矿带矿体的矿化特征与 I 号矿带相似。但矿体规模较小,走向延伸不长,倾向厚度变化大,局部品位高且厚度大。

### 4.2 矿石类型与特征

按成矿元素可划分为 3 种类型:钼矿石型、镍-钼型及多金属镍矿石类型,其中以镍-钼矿石类型为主。再按赋矿原岩进一步划分为 10 种亚类。镍-钼型

表 2 清岩沟钼-镍矿床矿石类型划分与矿化蚀变组合  
Table 2 Ore type and alteration assemblage of the Qingyangou Mo-Ni deposit

分类	赋矿岩石分类	矿化蚀变矿物组合
镍-钼型	绢云炭质千枚岩镍-钼型	辉钼矿、镍黄铁矿、石墨、黄铁矿、白铁矿
	绢云炭质石英千枚岩镍-钼型	钛铁矿、金红石、硅化石英、白云母
	含炭灰质白云岩镍-钼型	辉钼矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、硅化石英、白云石、方解石
钼型	绢云炭质千枚岩钼型	辉钼矿、石墨、黄铁矿、白铁矿
	炭质绢云母石英千枚岩钼型	闪锌矿、硅化石英、白云母
	含炭灰质白云岩钼型	辉钼矿、磁黄铁矿、硅化石英、白云石、方解石
多金属-镍型	炭质细晶大理岩镍型	镍黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、硅化石英、白云石、方解石
	含炭灰质白云岩镍型	镍黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铁-黄铜矿、闪锌-方铅矿、石英-白云石
	绢云炭质千枚岩镍型	镍黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铁-黄铜矿、闪锌-方铅矿、石英-白云石
	含炭质二云母石英千枚岩镍型	镍黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、绿泥石

划分为 3 个亚类:绢云炭质千枚岩型、炭质绢云石英千枚岩型、含炭灰质白云岩型;钼型分为 3 个亚类:绢云炭质千枚岩型、绢云炭质石英千枚岩型、含炭灰质白云岩型;镍型分为 4 个亚类:灰质白云岩型、片状细晶大理岩型、绢云炭质千枚岩型、含炭质二云母石英千枚岩型(表 2)。主要矿石类型描述如下:

#### (1) 绢云炭质千枚岩型镍-钼矿石

镍黄铁矿-辉钼矿化主要赋存于剪切片理化的石墨-绢云-石英千枚岩中,白-绢云母(32%)鳞片、细片状集合体,集合消光的绢云母沿  $S_1$  平行排列,细片-片状白-绢云母多沿  $S_2$  片理方向发育,为韧-脆性剪切构造作用形成;石英(57%)均重结晶为多边形等轴粒状,粒径 0.05~0.2 mm,与白-绢云母组成片理;硅化石英(4%)属剪切片理化过程中的硅化,不规则不等粒状;石墨(1.5%)显微鳞片,原炭质变质变形重结晶形成,沿片理化带分布;钛铁矿(1%)细条板状平行片理分布;辉钼矿(少)细片状聚晶(图 4-B、C),粒径 0.05~0.2 mm;褐铁矿(3%)不规则粒状集合体、粉状集合体;黄铁矿(1%)中细粒自形粒状。该矿化

岩石处于矿区变形构造带中,由绢云石英片岩和炭质千枚岩两种岩层组成的变质构造层交混一体。

#### (2) 炭质绢云-石英千枚岩型含锌-钼多金属矿石

石英(38%)为千枚岩中变质变形主要矿物,与绢云母组成  $S_1$ 、 $S_2$  片理;绢云母(47%)呈鳞片与细片状;石墨+炭质(12%)微细片及粉晶;方解石(1%)他形细粒;黄铁矿(1.5%)自形、半自形细晶;辉钼矿(几片)微细片状(图 4-B);闪锌矿(少)不规则细粒;金红石+钛铁矿(0.5%)变质新生矿物;磷灰石+电气石(数粒)短柱细微晶。

#### (3) 炭质绢云石英千枚岩型磁黄铁-镍黄铁矿矿石

石英(47%)有 3 种类型:与绢云母相间组成千枚岩,粒径 0.02~0.1 mm;变质分异条带,进而构造变形透镜体化,粒径 0.05~0.6 mm;热液硅化石英。绢云母(28%)鳞片与细片状,与石英组成  $S_1$ 、 $S_2$  片理。石墨+炭质(13%)微细片及粉晶,与绢云母混合生长,或与石英混生组成构造扁豆体。磷灰石+电气石(0.5%)短柱细晶。楣石+钛铁矿(少)微细板状、细

表 3 清岩沟钼-镍矿床 PD1 坑矿石中 Mo、Ni 含量对应关系  
Table 3 The corresponding relationship of Mo and Ni in PD1 pit of the Qingyangou Mo-Ni deposit

样品编号	赋矿岩石	Mo/10 <sup>-2</sup>	Ni/10 <sup>-2</sup>	备注
YC-80	含炭白云岩型镍钼矿石	0.093	0.058	
YC-81	含炭白云岩型镍钼矿石	0.070	0.094	
YC-111	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.026	0.013	
YC-112	含炭白云岩型镍钼矿石	0.23	0.046	
YC-113	含炭白云岩型镍钼矿石	0.18	0.052	
YC-114	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.027	0.025	
YC-123	含炭白云岩型镍钼矿石	0.060	0.034	
YC-124	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.027	0.025	样品采自
YC-127	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.021	0.013	PD1 坑
YC-128	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.035	0.040	CM1 和
YC-140	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.022	0.030	CM2 穿脉
YC-141	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.037	0.033	
YC-142	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.040	0.030	
YC-143	炭质千枚岩-白云岩型镍钼矿石	0.048	0.079	
YC-150	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.019	0.056	
YC-149	含炭白云岩型镍钼矿石	0.27	0.42	
YC-154	炭质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0.027	0.25	
YC-153	含炭白云岩型镍钼矿石	1.10	1.06	



晶状。磁黄铁矿(8%)他形粒状,粒径 0.05~0.6 mm (图 4-A、B)。黄铁矿(1%)粒径 0.05~0.1 mm;黄铜矿(0.2%)他形微细粒;辉钼矿(几片)微细片状聚晶;镍黄铁矿(0.1%)他形-半自形,粒径 0.02~0.05 mm;方解石(0.5%)他形细粒。

(4)含铜-铅锌矿化白云岩型磁黄铁-镍黄铁矿矿石

白云石(86%)自形菱面体脉络状交代大理岩,粒径 0.05~0.2 mm;方解石(4%)他形不等粒状变晶镶嵌,粒径 0.1~0.8 mm;炭质(1%)粉末,部分石墨化,分布于大理岩构造形体之间,或与千枚岩中绢云母形成混生条带;白云母(1%)细片状集合体,分布于石英方解石细脉中;石英(2%)他形细脉络状,分布于方解石细脉中,0.05~1.2 mm;斜绿泥石(0.5%)细片状裂隙充填;磁黄铁矿(2%)一种为浑圆他形浸染微细粒,粒径 0.01~0.05 mm;另一种为他形脉络状细粒集合体,与黄铁矿共生一起,粒径 0.05~0.15 mm;黄铁矿(0.5%)胶状与粒状两种状态,粒径 0.05~0.8 mm;镍黄铁矿(0.1%)呈不规则微晶花絮状包含于磁黄铁矿中;闪锌矿(0.5%)他形细粒沿千枚岩与大理岩接触薄弱带充填;黄铜矿(0.3%)他形微粒;方铅矿(1%)他形粒状,充填闪锌矿粒间、交代闪锌矿或充填微裂隙中。

(5)含铅锌-镍黄铁矿化炭质二云母石英千枚岩

绢云母(47%)鳞片与细片状;石英(37%)为千枚岩中变质变形主要矿物,与绢云母组成  $S_1$ 、 $S_2$  片理化;黑云母(8%)变细斑晶,粒径 0.05~0.8 mm;石墨+炭质(4%)微细片及粉晶;方解石(1.5%)他形细粒;绿泥石(1%)微细叶片聚晶;钛铁矿(1%)条板状细晶;黄铁矿(少)半自形细粒;磁黄铁矿(少)他形粒状,粒径 0.05~0.2 mm;镍黄铁矿(少)他形-半自形微晶。

#### 4.3 矿石化学成分特征

据炭质千枚岩和含炭灰质白云岩矿石化学全分析和微量元素分析(表 3),主要有用组分为 Mo、Ni,伴生组分为 Cu、Zn、Pb、TC 等。

对 I 号镍-钼矿带 PD1 坑镍钼矿石中 Ni、Mo 含量消长关系对比如表 3,两成矿元素含量均达到工业含量,矿石品级与有机炭含量及蚀变作用强度存在直接关系,镍钼矿化强烈的地段位于强烈的韧脆性剪切构造带中,且构造石墨化炭质千枚岩与白云岩-细晶大理岩接触带上,该岩性-构造位置使三

者具有较好的同步性和正消长关系。

#### 4.4 成矿期与成矿阶段

清岩沟镍-钼矿床的成矿形成演化按照地质作用、成矿作用机理大致划分成成矿作用期,经历了沉积预富集期、变质作用成矿物质活化-转移期、构造+热液工业富集期及表生作用期,成矿阶段按照矿化蚀变矿物组合进一步划分 6 个成矿阶段(表 4)。

#### 4.5 主要工业矿物特征

(1)镍黄铁矿

镍黄铁矿(0.1%)他形-半自形,粒径 0.02~0.05 mm,呈他形细粒、不规则花絮状、微晶状包含及嵌布聚合于磁黄铁矿粒晶中,与磁黄铁矿、黄铁矿密切共生。矿石中镍除了以磁黄铁矿独立矿物存在之外,部分镍还以类质同象赋存于磁黄铁矿中,这已得到电子探针分析的证实(表 5)。镍黄铁矿的形成稍晚于辉钼矿,辉钼矿沿片理化带分布,与石墨化、硅化密切共生,形成于热液阶段的早-中期阶段,沿多组构造交汇地段富集。在片理化炭质千枚岩与细晶片状大理岩及其接触带中分布就位,呈细脉-团块状聚合、细脉-斑杂浸染分布,沉淀于早-中期阶段的韧-脆性  $S_1$ 、 $S_2$  片理的交叉结合部位。

(2)辉钼矿

辉钼矿形态呈自形微细鳞片状、微细鳞片聚晶,大小为(0.01~0.04)mm×(0.1~0.2)mm,顺韧-脆性片理化带分布,微细鳞片状辉钼矿与石墨细微片平行分布。辉钼矿化的容矿岩石主要为炭质千枚岩,即使在灰质白云岩和细晶大理岩中亦出现钼矿化,也必定是含炭质的构造带,或有强变形的炭质千枚岩夹互纹层。根据矿相显微学研究,辉钼矿紧密与变晶石墨共生一起,因此,有理由推测,沉积预富集期钼主要赋存于有机炭中。矿石中钼主要以辉钼矿独立矿物存在,但仍有少部分钼被吸附在未完全石墨化的炭质中。

辉钼矿矿化作用大致经历以下几个阶段:沉积期的炭质吸附预富集阶段,这是钼成矿的物质基础,主要赋存于炭质泥板岩和炭质碳酸盐岩中。变质作用期使含矿炭质岩系变质变形、重结晶、成分分异、新生矿物出现,所有这些变化均属于使变质原岩净化的过程,使含矿炭质岩石中钼等成矿元素活化转移出来。与此同时,有机炭质伴随区域变质作用,受热而降解,可使有机炭生成转变为  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $H_2S$  等气态和液态可溶性物质,可溶物可以萃取含

表 4 清岩沟钼-钼矿化期、成矿阶段及矿物组合  
Table 4 Mineralization periods, ore-forming stages and mineral assemblages of the Qingyangou Mo-Ni deposit

成矿作用期	成矿作用阶段	矿化蚀变作用机理	矿物组合
沉积成矿 预富集期	沉积成岩阶段	有机炭、泥质吸附钼-钼等, 金属硫化物化合钼-钼等物质基础	炭质、泥质、成岩黄铁矿、硅质
区域变质作用期 成矿物质转移	区域变质作用阶段	变质分异成分条带-变质热液形成、新生变质矿物产生变质岩石净化等, 使沉积吸附与化合的预富集金属成矿物质活化、转移	石墨、石英、斑点状磁铁矿、钛铁矿、金红石、磷灰石、白云母、斑点状黑云母
构造+热液 作用成矿期	含钼-钼硫化物 成矿阶段	早期韧-脆性剪切, 构造-热液活动进一步萃取、迁移, 高温矿化矿物沉淀	辉钼矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、毒砂、硅化石英
	铜-铅-锌多金属 成矿阶段	中期多金属硫化物在中-低温条件下矿化富集	黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、白云石、石英、绿泥石
	无矿方解石矿化阶段	晚期无矿碳酸盐热液残余	方解石、重晶石
	表生氧化作用期	钼华、孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿	

表 5 清岩沟钼-钼矿石电子探针成矿及微量元素分析 (10<sup>-2</sup>)

Table 5 Electron microprobe analyses of ores and trace elements of the Qingyangou Mo-Ni deposit

矿 物	S	Fe	Ni	Co	Pt	Au
镍黄铁矿	32.580	30.420	36.96	0.071	—	—
镍黄铁矿	32.690	30.260	36.65	0.131	0.320	—
磁黄铁矿	38.790	59.030	0.416	0.038	1.190	—
磁黄铁矿	39.060	60.020	0.446	0.080	—	—
黄铁矿	53.070	46.120	—	0.070	—	1.76
<b>黄铁矿</b>	53.160	46.270	0.019	0.081	0.258	—

注:由长安大学电子探针分析室分析。

矿岩系活化出来的钼等成矿元素。后期韧-脆性剪切构造进而叠加于含矿炭质岩石之上,除了加大强度使含矿炭质岩石的炭质石墨化,在进一步的热演化下产生足量的可溶物,使岩系中钼、硫化氢、甲烷等成矿元素进一步活化、迁移,并随着强变形的片理化扩容带的发育,使被活化出来的钼有机会与低价还原硫化物形成辉钼矿而沉淀于片理化带中。显微矿相学的研究,辉钼矿与石墨及黄铁矿紧密共生,进而证明了这一推断和分析。

## 5 黑色岩系中钼-钼成矿机制与清岩沟钼-钼矿床成因

清岩沟含钼-钼矿化产于黑色岩系之中,为 Mo、Ni、Ti、Cu、Pb、Zn、P 丰度高的含矿黑色岩系。原岩由含硫铁质-炭质泥岩、泥质粉砂-细砂岩、含铁质炭质粉砂-细砂岩质泥岩及炭质碳酸盐岩夹互层组成的

沉积岩系。岩系中 Mo、Ni 本不属同一来源,Mo 为亲上地壳与成熟度极高的长英质岩石密切共生,而 Ni 为地幔富集元素,两者是通过沉积作用从各自来源的地质单元中初步富集或聚合一起的。

含矿岩系先经早期区域变质-变形作用,岩石普遍千枚岩化,泥质、炭质、钙质变晶(黄铁矿、钛铁矿、金红石、变斑状磁铁矿、石墨、白云母、斑点及变斑状黑云母、方解石、石英变晶),粉砂-细砂石英聚合形成较大晶粒的石英变晶。岩石组分在变质变形过程中发生部分分异,形成绢云母-白云母、石墨-绢云母-方解石与黑云母-石英相对集中的条带状构造,同时有平行片理化带的石英变质细脉产生,原生沉积层理消失殆尽。这一地质作用过程,岩系中 Mo、Ni、Ti、Cu、Pb、Zn、P 丰度高的含矿元素,通过变质分异、矿物重结晶及变晶净化而发生解离与转移。

再经后期强烈的韧-脆性构造叠加,变质-变形



的黑色岩系发生多期多阶段变形改造, 石墨再次结晶长大、集合体呈揉皱变形状, 发育的  $S_1$ 、 $S_2$  片理化在强变形带同时出现, 黑云母、磁铁矿变斑多有旋转, 变质分异的石英细脉形成石香肠, 白云母石英千枚(片)岩及碳酸盐岩构造透镜体、扁豆体化, 层状黑色岩系强烈变形揉皱与膨大, 特别在变形揉皱与膨大部位的刚性与塑性构造体间, 矿化热液活动发育, 出现硫化物型的含镍、钼的矿化与蚀变, 形成辉钼矿、磁黄铁矿、黄铁矿、镍黄铁矿、毒砂、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿组合, 伴随较强烈的硅化、微细钾长石化、白云石化、绿泥石化及方解石化。工业矿体、矿化体就位于黑色岩系强烈揉皱与膨大的片理化带中, 赋存于强变形的刚性与塑性构造体接触带上。

综上所述, 清岩沟钼-钼矿床属于以黑色岩系为容矿的沉积-变质叠加-韧脆性构造改造的层控型沉积-叠加-改造的后生热液成因。

## 参考文献 (References):

- [1] 张本仁, 韩引文, 徐继峰, 等. 北秦岭新元古代前属于扬子板块的地球化学证据[J]. 高校地质学报, 1998, 4(4):369-382.  
Zhang Benren, Han Yinwen, Xu Jifeng, et al. Geochemical evidence for North Qinling Belt a part of Yangtze Plate prior to the Neoproterozoic [J]. Geological Journal of China Universities, 1998, (4):369-382(in Chinese with English abstract).
- [2] 张复新, 王立社, 侯俊富. 秦岭造山带黑色岩系与金属矿床类型及成矿系列 [J]. 中国地质, 2009, 36(3): 694-704.  
Zhang Fuxin, Wang Lishe, Hou Juntu. Black rock series, types of ore deposits and ore-forming systems in Qinling Orogenic Belt[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 690-704 (in Chinese with English Abstract).
- [3] 李政, 张复新. 陕西山阳县黑色岩系中中村-银花钒矿床地质特征[J]. 中国地质, 2009, 36(5):1099-1109.  
Li Mei, Zhang Fuxin. Characteristics of the Zhongcun-Yinhua vanadium deposit in black rock series, Shanyang County, Shaanxi Province[J]. Geology in China, 2009, 36(5):1099-1109 (in Chinese with English Abstract).
- [4] 陕西省地矿局. 陕西省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1989.  
Shaanxi Provincial Geology and Mineral Bureau. Regional geology of Shaanxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989 (in Chinese).
- [5] 陕西省国土资源厅 13 地质总队. 1:5 万区域地质图及说明书[R]. 1998.  
The Geological Corps of Land and Resources Bureau, Shaanxi Province. 1:50000 Regional Geological Map and Description [R]. 1998(in Chinese).
- [6] 张维吉, 李敬育. 陶湾群层序及时代研究 [J]. 西安地质学院学报, 1989, 11(2):1-10.  
Zhang Weiji, Li Jingyu. The study of sequence and age of Taowan Group. [J]. Xi'an Institute of Geology Journal, 1989 (2):1-10 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王作勋. 东秦岭北坡陶湾群的初步研究 [J]. 中国地质科学院地质研究所刊, 1985, 第 12 号:87-107.  
Wang Zuoxun. Preliminary study of Taowan Group of north slope of east Qinling [J]. Journal of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1985, 12:87-107(in Chinese with English Abstract).
- [8] 张秋生, 等. 中国东秦岭变质地质 [M]. 长春:吉林人民出版社, 1980:100-114.  
Zhang Qiusheng, et al. China East Qinling Metamorphic Geology [M]. Changchun: Jilin People's Press, 1980:100-114(in Chinese).
- [9] 王守仁. 陕西商县黑龙口-大荆地区陶湾群的层序和时代 [J]. 秦岭区测, 1983, (1):34-43.  
Wang Shouren. The sequence and time of Taowan Group of Heilongkou-Dajing region of Shang County of Shaanxi [J]. Qinling Area Survey, 1983, (1):34-43(in Chinese with English Abstract).
- [10] 王作勋. 东秦岭北坡陶湾群与下伏地层角度不整合的发现及其地质意义[J].地质论评, 1982, 28(3):1-10.  
Wang Zuoxun. Discovery of an angular unconformity between the Taowan Group and its underlying strata on the north slope of the eastern Qinling and its implication[J]. Geological Review, 1982, 28 (2):1-10(in Chinese with English Abstract).
- [11] 王靖华, 张复新, 于在平, 等. 秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J]. 中国地质, 2002, 29(2):192-196.  
Wang Jinghua, Zhang Fuxin, Yu Zaiping, et al. Minerogentic series of metallic ore deposits in Qinling Mountains and tectonodynamic background of the continental orogenic belts [J]. Geology in China, 2002, 29 (2):192-196 (in Chinese with English Abstract).
- [12] 侯满堂, 王党国, 杨宗让, 等. 陕西马元地区铅锌矿地质特征及找矿远景[J]. 中国地质, 2007, 34(1):101-109.  
Hou Mantang, Wang Dangguo, Yang Zongrang, et al. Geology of lead-zinc mineralization in Mayuan area of Shaanxi Province [J]. Geology in China, 2007, 34(1):101-109(in Chinese with English abstract).
- [13] 张复新, 杜孝华, 王伟涛, 等. 秦岭造山带及邻区中生代地质演化与成矿作用响应[J]. 地质科学, 2004, 39(4):486-495.  
Zhang Fuxin, Du Xiaohua, Wang Weitao, et al. Mineralization responded to Mesozoic geological evolution of Qinling orogen and its environs [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(4):486-495 (in Chinese with English abstract).
- [14] Richards M A, Duncan R A, Courtillot V E. Flood basalts and hot spot tracks: Plume heads and tails [J]. Science, 1989,246:103-107.
- [15] Girodano T H. A. Preliminary evolution of organic ligand Sand metalorganic complexing in Mississippi valley-type ore solutions [J]. Econ Geol, 1985.
- [16] Andrew P, Gize A, Barnes H L. The organic geochemistry of Tow Mississippi valley-type lead-zinc deposits [J]. Economic Geology, 1987, 82:457-470.

## Geological features and genesis of the Qingyangou molybdenum–nickel deposit in Heilongkou, Shaanxi Province

ZONG Jing–ting<sup>1,2</sup>, ZHANG Fu–xin<sup>1</sup>, ZHENG Wei<sup>3</sup>, HOU Jun–fu<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Continental Geodynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;  
2. Department of Resources and Environment, Xi'an College of Arts and Sciences, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. Geophysical Prospecting Party, Northwest Nonferrous Geological Prospecting Bureau, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** It is for the first time that a molybdenum – nickel sulfide deposit was discovered in the black rock series of the Qinling orogenic belt. The ore deposit has relatively abundant Mo–Ni–Ti–Cu–Pb–Zn–P in carbonaceous marl series, i.e., black rock series of lower Ordovician Miaowan Formation in North Qinling. The tectonic setting of the ore deposit is a deep water sedimentary environment of the back–arc rift basin along Shang–Dan fault zone in North Qinling, and the ore deposit is strictly controlled by the ductile–brittle tectonic contact zone between carbonaceous phyllite and fine–grained marble. The ore bodies assume the forms of tectonic lenses and pods. The alteration types include relatively strong molybdenitization, pyrrhotitization, pyritization and sphaleritization, associated with graphitization, silicification, ankeritization and calcitization. Nickel sulfides and molybdenum sulfides are associated with each other in the ore deposit. The ore types can be classified into carbonaceous phyllite type, dolomite type and fine–grained marble type in accordance with ore rocks, and into Ni–Mo type, molybdenum– graphite type and nickel polymetallic type in accordance with metal elements. The ore deposit is genetically of epigenetic stratabound high–medium–low temperature hydrothermal type. The ore–forming process experienced such stages as initial enrichment of useful components in black rock series, metamorphic activation migration of useful components, ductile–brittle structural transformation and hydrothermal ore enrichment.

**Key words:** black rock series; molybdenum–nickel deposit; ore–forming mechanism; Qingyangou; North Qinling

---

**About the first author:** ZONG Jing–ting, female, born in 1975, associate professor, engages in the study of resources, environment and geochemistry; E–mail: zongjt@126.com.