

北秦岭清岩沟镍-钼矿床成矿特征及成因

王立社¹, 张复新², 郑 炜³, 侯俊富⁴, 雷永孝¹, 房 波⁵, 周 燕⁵, 韩 媛¹

(1. 西安地质调查中心, 西安 710054; 2. 西北大学地质系, 西安 710069

3. 西北有色地质勘查局物化探总队, 西安 710054; 4. 中国铝业股份有限公司, 北京 100082

5. 中国石油天然气股份公司青海油田, 敦煌 736202)

[摘 要]经野外调研和室内研究发现, 位于商州市大荆镇北的清岩沟镍-钼矿床赋存于庙湾组下部黑色岩系中, 岩系由绢云斜长石英千枚岩、黑云斑点状二云母千枚岩、石墨化绢云千枚岩、白云母细晶大理岩-碳质白云岩、含石墨石英透辉透闪岩、含钛方解-石英片岩等组成, 含 Mn 、 Ni 、 Ti 、 Cu 、 Pb 、 Zn 、 P 及碳质高。宏观及微观地质特征表明, 岩石经历了区域变质变形、后期强烈韧-脆性剪切构造作用叠加、改造。正是这种地质过程导致 Mn 、 Ni 等成矿元素在沉积期形成之后, 发生迁移、沉淀, 形成硫化物型镍、钼矿化, 矿(化)体就位于岩系强烈揉皱与膨大的片理化带、赋存于强变形的刚性与塑性构造体接触带。研究表明区内的岩脉与矿化关系不明显。最后认为, 清岩沟镍-钼矿床为黑色岩系容矿的层控型沉积-变质叠加-韧脆性构造改造的后生热液成因矿床。

[关键词]秦岭 镍-钼矿床 成因 黑色岩系

[中图分类号] P618.61 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2010)05-0863-09

Wang Li-shè, Zhang Fu-xin, Zheng Wei, Hou Jun-fu, Lei Yong-xiao, Fang Bo, Zhou Yan,
Han Yuan. Metallogenic characteristics and genesis of the Qingyangou Ni-Mo deposit in the northern
Qingling mountains [J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46(5): 0863-0871.

0 前言

黑色岩系是地史发展过程中, 特定地质环境的产物。岩系中往往富集铂族 (PGE)、汞 (Hg)、硼 (B)、砷 (As)、锰 (Mn)、锑 (Sb)、金 (Au)、银 (Ag)、铅 (Pb)、磷 (P)、钡 (Ba)、铀 (U)、钼 (Mo)、钒 (V)、锌 (Zn)、铜 (Cu)、钴 (Co)、镍 (Ni) 及稀有元素, 是形成各种矿产的有利岩性 (陈华勇等, 2001; 张光弟等, 2002; 易发成等, 2004; 杨剑等, 2005; 赵百胜等, 2007), 秦岭黑色岩系是我国重要的成矿岩系之一, 近几年找矿有明显突破, 先后发现并成功勘查夏家店钒-金矿、烂木沟金矿、清岩沟镍-钼矿、鲤鱼山钼-钒矿、鲁家坪毒重石-重晶石-钡解石矿床等, 显示了秦岭黑色岩系成矿的巨大潜力, 促使专家、学者对黑色岩系相关金属矿床进行持续研究 (范德廉等, 2004; 高菊生等, 2006; 耿林等, 2007; 张复新等,

2009; 江永宏, 2009)。清岩沟镍-钼矿床是秦岭黑色岩系近几年发现的典型矿床之一, 目前该矿床已进行了普、详查, 矿床规模达小型, 研究其成矿特征及成因对后续找矿具有重要的理论和实践意义。

1 矿区地质概况

清岩沟镍-钼矿床位于陕西省商州市大荆镇以北的清岩沟。处于铁炉子断裂以北的雪家沟-高家扒复式向斜褶皱北翼, 大地构造位置属于北秦岭商丹古洋盆北部火山岛弧北侧的早古生代活动陆缘带。区域出露的地层主要为元古界熊耳群、寒武系、奥陶系、二叠系、白垩系以及第三系, 呈近东西向展布。熊耳群主要为黑云斜长片岩和二云石英片岩, 寒武系为细晶白云岩、微晶灰岩, 奥陶系为碳质绢云千枚岩、碳质千枚岩、绿泥-绢(白)云-石英千枚岩、二云母(斑点状)石英片岩。矿区地层主要为奥

[收稿日期] 2010-06-13; [修订日期] 2010-08-09; [责任编辑] 郑 杰。

[基金项目] 西北有色地质局地勘院科研项目“陕西南部黑色岩系金属矿床成矿规律及找矿预测研究” (编号: 地勘[2006]), 新疆维吾尔自治区地质勘查基金项目“新疆若羌县长沙沟岩体中段铁多金属矿普查” (编号: [2010]286) 资助。

[第一作者简介] 王立社 (1976-), 男, 博士, 助理研究员, 岩石学矿物学矿床学专业, E-mail: wlish@cgsc.cn

陶系, 是原陶湾群分解出来的部分 (王守仁, 1983), 张维吉教授在地矿部“七五”重点攻关项目研究报告中认为陶湾群是分布在华北地块与北秦岭褶皱带之间的冒地槽型沉积, 不整合在蓟县系至寒武系不同层位之上, 时代为奥陶系。根据岩性组合将其划分为 4 个岩组, 自下而上分别命名为庙湾组 Om、屈垌组 Oq、石板河组 Os 和垢神庙组 Og, 矿床附存于庙湾组黑色岩系中。

2 成矿特征

2.1 矿区岩石特征

庙湾组向下与寒武系碳酸盐岩类呈角度不整合或断层接触。清岩沟实测剖面如图 2 地层自下而上为: ① 绢云碳质千枚岩夹碳质硅质岩透镜体; ② 石英二云千枚岩; ③ 绢云碳质千枚岩; ④ 浅黄绿色石英二云千枚岩; ⑤ 绢云碳质千枚岩与含碳绢云千枚岩互层; ⑥ 灰色片状砾岩; ⑦ 含碳绢云千枚岩; ⑧ 灰色片状砾岩; ⑨ 灰色-浅灰绿色绢云石英千枚岩。向上与屈垌组 (Oq) 呈整合接触关系。

庙湾组 (Om) 下部以绢云碳质千枚岩-质千枚

岩夹白云岩-结晶灰岩为主的下岩段是黑色岩系的主要组成部分, 是清岩沟镍-钼矿床与矿化体的主要赋存层位。因此, 矿床的含矿岩石主要为: 绢云斜长石英千枚岩、黑云斑点状二云母千枚岩、石墨化绢云千枚岩、白云母细晶大理岩-碳质白云岩、含石墨石英透辉透闪岩、含钛方解-石英片岩。

① 绢云斜长石英千枚岩: 不同粒级变晶石英约 47%, 微细粒者与绢云母混生一起未被变质分异出来, 半多边等轴粒状者变质至矿物成分分异条带, 再经构造剪切形成构造扁豆体和构造透镜体; 细片、鳞片状集合体白-绢云母约 39%, 或与石英交生, 或由白绢云母集合形成纺锤体 (由剪切构造作用形成); 细片状黑云母约 3%, 大多退化向白云母过渡, 片晶被氧化铁染; 他形粒状更长石约 5%, 中度绢云母化长石轮廓可辨; 细片状绿泥石聚晶约 2%; 石墨化碳质约 0.5%, 呈微细片晶平行绢云母片理化带; 细板条状钛铁矿约 1%; 微细粒状榍石聚晶约 0.5%, 为含钛原岩变质-变形析出钛质重组形成; 电气石 (少) 微细短柱状; 褐铁矿 (约 1.5%) 不规则粒状、粉末状。

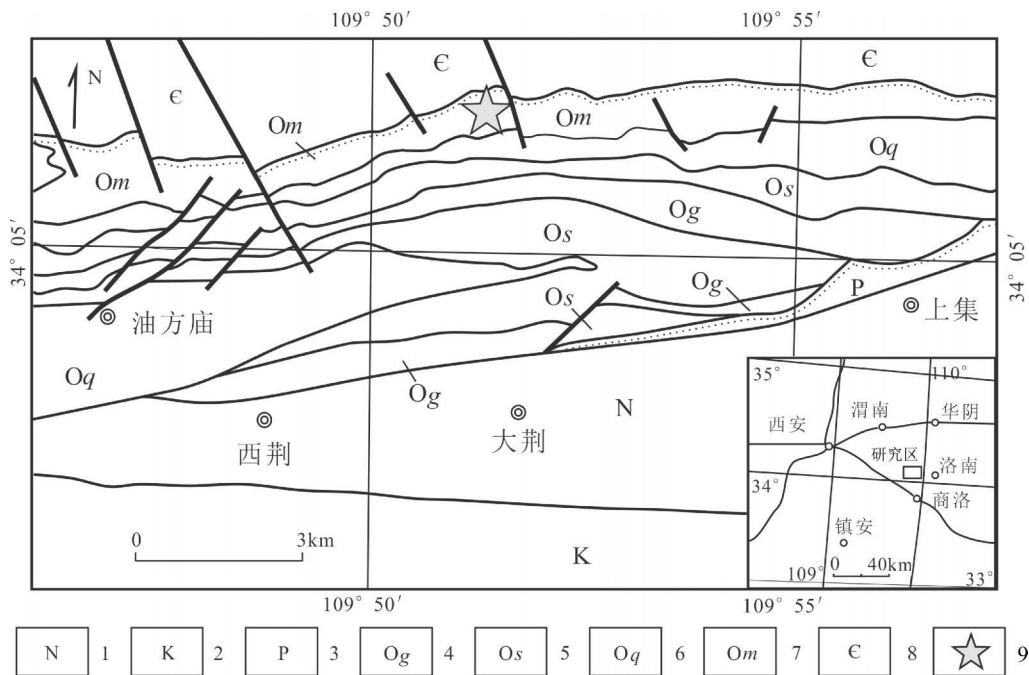


图 1 清岩沟镍钼矿床位置及地质略图 (据王立社等, 2010)

Fig 1 Sketch map showing geobgy and bcality of the Qingyangou Ni-Mo deposit (afterW ang et al , 2010)
1- 第三系; 2- 白垩系; 3- 二叠系; 4- 奥陶系垢神庙组; 5- 奥陶系石板河组; 6- 奥陶系屈垌组; 7- 奥陶系庙湾组; 8- 寒武系; 9- 矿床位置

1- Tertiary system; 2- Cretaceous system; 3- Permian System; 4- Goushenmiao Formation of Ordovician; 5- Shibanhe Formation of Ordovician; 6- Qudong Formation of Ordovician system; 7- Miaowan Formation of Ordovician system; 8- Cambrian system; 9- locality of the deposit

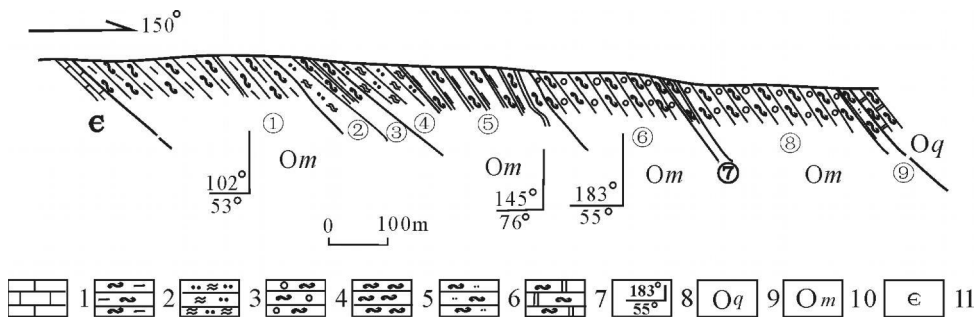


图 2 清岩沟庙湾组剖面图 (2007 年实测)

Fig 2 Geological section of the Miaowan Formation in Qingyangou

- 1- 灰岩; 2- 绢云碳质千枚岩; 3- 石英二云千枚岩; 4- 片状砾岩; 5- 含碳绢云千枚岩与绢云碳质千枚岩; 6- 绢云石英千枚岩; 7- 大理岩化千枚岩; 8- 产状; 9- 奥陶系屈垭组; 10- 奥陶系庙湾组; 11- 寒武系
- 1- limestone 2- sericite carbonaceous phyllite 3- two-mica quartz phyllite 4- sheet conglomerate 5- carbonaceous sericite phyllite and sericite carbonaceous phyllite 6- sericite quartz phyllite 7- marble phyllite 8- attitude 9- Qudong Formation of Ordovician System; 10- Miaowan Formation of Ordovician System; 11- Cambrian System

②黑云斑点状二云母千枚岩: 白 - 绢云母约 78%, 呈细片、鳞片状集合体, 沿片理平行排列; 细片状黑云母集合体约 16%, 部分聚晶沿片理化带平行分布, 与绢云母交互产出; 细叶片状绿泥石聚晶约 3%; 细板条状钛铁矿约 2%; 微细粒状榍石聚晶约 0.5%, 为含钛原岩变质 - 变形析出钛质重组形成; 微细粒柱状绿帘石约 0.5%; 微细短柱状电气石少量; 次生褐铁矿约 0.5%。

③石墨化绢云千枚岩: 绢云母约 69%, 呈鳞片状集合体与碳质混生一起变质重结晶; 约 14% 石英呈微细网脉状穿切岩石, 另有部分顺片理石英碎裂的不规则粗脉; 约有 4% 石英粉砂呈微拉长状砂状散布, 为变质粉砂残留; 石英片岩约 5%, 呈构造扁豆体; 石墨约 1.5%, 微细鳞片平行片理化带分布; 褐铁矿约 6%, 氧化析出次生淋滤脉状分布; 金红石约 0.5%, 条柱微晶; 少许黄铁矿、电气石微晶见于千枚岩及石英脉中。

④白云母细晶大理岩 - 碳质白云岩: 主要矿物组成: 白云石约 67%, 半自形微细粒镶嵌一起 (两种成因: 一为含碳质白云岩和白云岩层; 二为后生热液蚀变成分, 交代大理岩); 半自形、他形粒状方解石约 27%, 与千枚岩构成透镜体; 部分为脉状 - 团块状蚀变产物; 白云母约 2%, 细片状集合体呈变形褶皱条带; 石英约 1.5%, 为方解石 - 白云母细脉蚀变组成物, 少量碳酸盐岩中自形变晶和少量具次生加大边成岩石英; 石墨化碳质约 1.5%, 粉尘状散布白云石集合体中; 黄铁矿微细晶约 0.5%。在清岩沟一带见到原岩为含碳质白云岩 - 白云岩夹泥质灰岩经强变形变质形成白云母大理岩和碳质白云岩构造

混杂一起。

⑤含石墨石英透辉透闪岩: 纤维状聚晶透闪石约 53%; 细粒微拉长状石英集合体约 22%; 柱状交代残留透辉石约 1.5%; 细片状斜绿泥石集合体约 8%, 选择性交代透辉石; 微细片状及粉末状石墨和碳质约 6%; 鳞片状绢云母约 8%, 与变晶石英混生; 磷灰石约 1.5%, 呈短柱细晶脉状、团块状集合体; 半自形黄铁矿约 0.5%。

⑥含钛方解 - 石英片岩: 石英约 83%, 细粒他形粒状集合体, 晶粒边缘花边状接触; 方解石约 8%, 呈不规则边缘的他形粒状变晶; 白云母约 4% 细片状, 显示片理构造; 不等粒状黄铁矿约 2%; 他形细粒黄铜矿约 0.3%; 他形微细粒金红石约 0.5%, 最大 (= 0.25mm); 板条状钛铁矿约 1%; 磁黄铁矿约 0.5%; 磷灰石 (少量) 短柱状细晶。

从宏观及微观尺度观察以上各类千枚岩性已达到中 - 低变质程度, 碳质千枚岩中碳质均已石墨化, 绢 (白) 云母 - 黑云母 - 石英质岩石中多有钛铁矿、金红石、磁铁矿、磷灰石等变质矿物和斑点状变晶结构及变质分异石英香肠。变形岩石中 S₁、S₂、S₃ 片理发育, 伴随矿化蚀变强烈, 在碳质千枚岩与碳酸盐岩接触带及其两侧构造扩容带产出工业矿 (化) 体。

矿区出露绿泥石化角闪云煌岩, 多顺层侵入, 后期又被韧 - 脆性构造裹入构造带内。矿物组成为: 半自形板状钾长石约 40%, 轻度高岭土化; 似斑晶及基质细晶黑云母约 46%, 中等程度退色化; 似斑状绿泥石化角闪石约 8%; 他形细晶石英约 1%; 短柱状细晶磷灰石约 0.5%; 钛铁矿 + 榍石 (少) 暗色矿物析出物; 半自形细晶黄铁矿约 0.3%; 少量黄铜

矿星点分布。

部分煌斑岩脉由于裹入到后期韧-脆性控矿构造带中,脉岩中黑云母、角闪石暗色矿物普遍退化,释放出的铁、钛质加入到黑色岩系被改造的构造-热液之中,少量矿化热液亦循环渗透进入岩脉之中,造成煌斑岩脉中有轻度多金属硫化物矿化。矿区外围各处分布有煌斑岩脉,未见镍、钼异常,表明镍、钼成矿物质来源与岩脉无关。煌斑岩脉的展布是断裂活动和深部物质上涌的结果。

2 2 矿区构造特征

矿区处于雪家沟-高家扒复式向斜褶皱北翼,具体呈南倾的单斜构造,矿区含矿黑色岩系受构造作用影响而发生了强烈变形、变位和膨大,其产状、分布特征与区域比较显得很协调。岩系下部绢云碳质千枚岩在平面上呈不规则的“帚”状,向北东向收敛,向西南膨大分支,形态复杂(图3)。东北最薄处厚度小于50m,中部最厚处约500m。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。在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。由于

矿区叠加控矿构造强烈,构造挤压导致岩层的切入,使矿区地层层序与外围剖面有差别。

2 3 矿体特征

矿体赋存于绢云碳质千枚岩段再经韧-脆性剪切变形叠加的地层与构造联合控制的容矿带中,具明显的层控-岩控与构造-热液成矿及控矿的特征。镍-钼矿(化)体就位于绢云碳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碳质千枚岩段的接触带中及其两侧部位,较强构造破碎部位镍-钼矿化明显增强。

按矿体空间分布位置,划分出了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。

I号钼矿化带位于矿区南部,长896m,包含4条镍-钼矿体。I-I号镍-钼矿体和-II号钼矿体平行展布,矿体西段向南倾、东段东倾,倾角48°~65°,显然是受多组断裂构造控制所致。I-I号镍-钼矿体长896m、厚0.67m~5.06m、钼平均品位0.01%~0.1%;I-II号钼矿体长762m、厚0.91m~4.46m、钼平

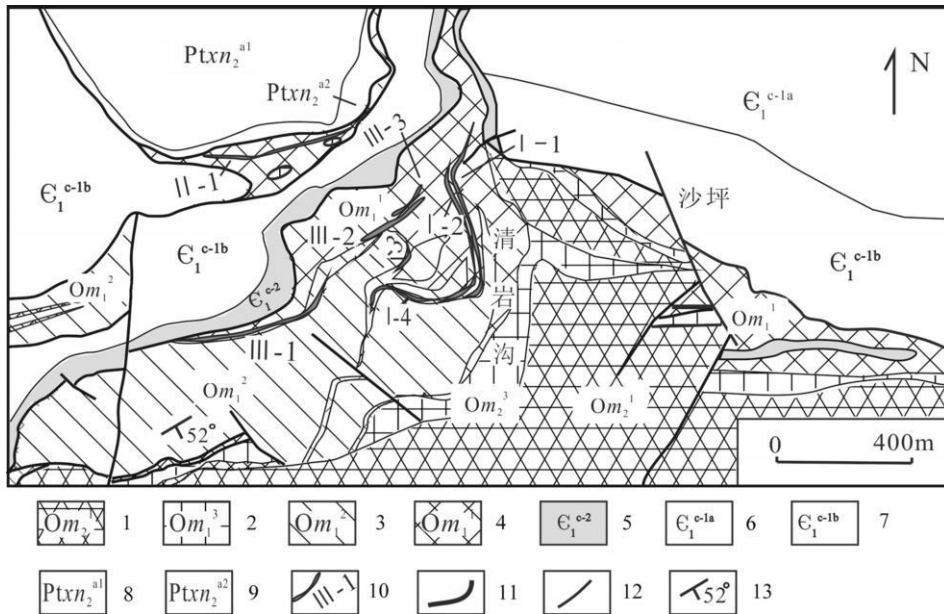


图3 清岩沟镍-钼矿地质简图(2007年实测)

Fig 3 Geological sketch of the Qingyanggou Ni-Mo deposit

奥陶系庙湾组: 1- 片状砾岩; 2- 含碳质绢云石英千枚岩; 3- 二云石英千枚岩; 4- 绢云碳质千枚岩; 寒武系: 5- 泥质(灰质)白云岩; 6- 大理岩夹二云千枚岩; 7- 细晶白云岩; 元古界熊耳群: 8- 黑云斜长片岩; 9- 二云石英片岩; 10- 矿体及编号; 11- 走滑逆冲断层; 12- 地质界线; 13- 产状

Miowan Formation of Ordovician System: 1- sheet conglomerate 2- carbonaceous sericite quartz phyllite; 3- two-mica quartz phyllite; 4- sericite carbonaceous phyllite; Cambrian System: 5- argillaceous (calcite) dolomite; 6- marble and two-mica phyllite; 7- fine-grained dolomite; Xonger Group of Proterozoic orathem 8- biotite-plagioclase schist 9- two-mica quartz schist 10- orebodies and its coding 11- strike-slip and thrust fault 12- line of geological limitation 13- attitude

均品位 0.01% ~ 0.1%; I – II号钼矿体位于 I – II号钼矿体以北, 地表上舒缓波状延伸, 产状 $150^{\circ} \angle 65^{\circ}$, 矿体长 210m, 厚 0.91m ~ 3.13m, 钼平均品位 0.01% ~ 0.1%; I – IV号钼矿体位于 I – I号钼矿体以南, 地表上呈北凸的弧形, 矿体长 162m, 厚 0.81m ~ 0.88m, 钼平均品位 0.01% ~ 0.1%。I号矿带深部勘探发现矿体厚度 0.91m ~ 2.26m, 钼平均品位 0.01% ~ 0.1%。I号矿带中镍的品位为 0.013% ~ 1.06%。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。

II号镍 – 钼矿化带位于 I号矿化带北约 80m, 矿化带长 1250m, 北东东向展布, 以钼矿化为主, 包含 3条矿体。各矿体大体平行, 矿体倾向 $150^{\circ} \sim 170^{\circ}$, 倾角 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。III – I号钼矿体长 646m, 厚 0.93m ~ 2.81m, 钼平均品位 0.01% ~ 0.1%; III – II号钼矿体长 300m, 厚 0.33 ~ 1.89m, 钼平均品位 0.01% ~ 0.1%。III – II号钼矿体长 100m, 厚约 0.44m, 钼平均品位 0.1%。II号矿带矿体的矿化特征与 I号矿带相似, 但镍含量稍低品位为 0.013% ~ 0.56%。

2.4 矿石特征

镍、钼及镍 – 钼矿石类型在几种赋矿原岩中均有出现, 主要矿石各类型组成如下:

碳质绢云石英千枚岩型镍 – 钼矿石, 处于矿区变形构造带中, 由绢云石英片岩和碳质千枚岩两种岩层组成的变质构造层交混一体。金属矿物有褐铁矿、钛铁矿、辉钼矿、黄铁矿、镍黄铁矿等金属矿物组成, 其中辉钼矿约为 1.5%, 镍黄铁矿少许。

碳质绢云 – 石英千枚岩质含锌钼多金属矿石, 金属矿物有自形、半自形细晶黄铁矿约 1.5%; 辉钼矿少量 (图 4a); 呈不规则细粒闪锌矿少许; 变质新生矿物金红石和钛铁矿约 0.5%。

碳质绢云石英千枚岩质磁黄铁 – 镍黄铁矿矿

石, 金属矿物有细晶钛铁矿; 他形粒状磁黄铁矿约 8%; 黄铁矿约 1%; 黄铜矿约 0.2%, 他形微细粒; 见几片辉钼矿微细片状聚晶; 他形 – 半自形镍黄铁矿约 0.1% (图 4b)。

含铜 – 铅锌矿化白云岩型磁黄铁 – 镍黄铁矿矿石, 金属矿物为磁黄铁矿约 2%, 一种为浑圆他形浸染微细粒, 另一他形脉络状细粒集合体, 与黄铁矿共生; 黄铁矿约 0.5%, 胶状与粒状两种状态; 镍黄铁矿约 0.1%, 呈不规则微晶花絮状被磁黄铁矿包含; 闪锌矿约 0.3%, 呈他形细粒沿千枚岩与大理岩接触薄弱带充填; 黄铜矿约 0.3%, 呈他形微粒; 方铅矿约 1%, 他形粒状, 充填闪锌矿粒间、交代闪锌矿或充填微裂隙中 (图 4c)。

含铅锌 – 镍黄铁矿化碳质二云母石英千枚岩, 钛铁矿约 1%, 条板状细晶; 黄铁矿 (少) 半自形细粒; 磁黄铁矿 (少) 他形粒状; 镍黄铁矿 (少) 他形 – 半自形。

矿石结构发育他形细粒结构 (磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿)、半自形粒状结构 (黄铁矿、毒砂)、包含结构 (磁黄铁矿 – 镍黄铁矿)、固溶体结构 (闪锌矿 – 黄铜矿)、填隙结构 (方铅矿)、充填 – 交代结构 (磁黄铁矿 – 镍黄铁矿、闪锌矿 – 黄铜矿、闪锌矿 – 方铅矿)、斑杂浸染构造、细脉浸染构造、团块状构造。

2.5 主要矿物特征及成因

辉钼矿形态呈自形微细鳞片状、微细鳞片聚晶, $\Phi = 0.01 \sim 0.04 \text{ mm} \times 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$, 顺韧 – 脆性片理化带分布, 与石墨细微片平行分布。辉钼矿化的容矿岩石主要为碳质千枚岩, 即使在灰质白云岩和细晶大理岩中亦有钼的矿化出现, 也是含碳质的构造带, 或有强变形的碳质千枚岩夹互纹层。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, 推测沉积预富集期钼主要赋存于有机碳中。矿石中钼主要以辉钼矿独立矿物存在, 但仍有少部分

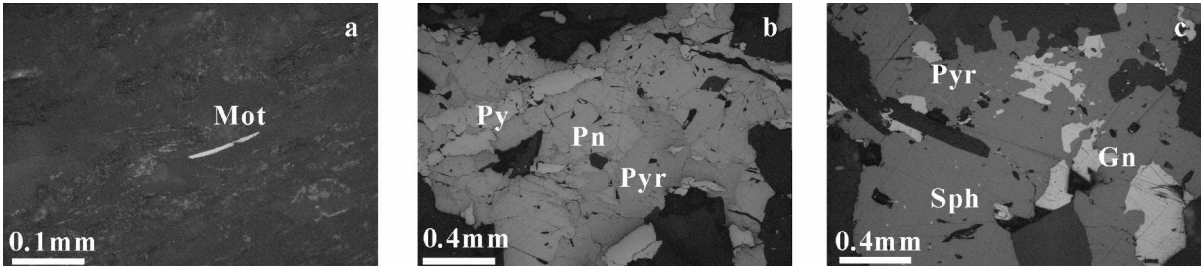


图 4 矿石中矿物显微照片

Fig 4 Microscope pictures of minerals in ores

a- 碳质绢云石英千枚岩型镍 – 钼矿石中辉钼矿; b- 碳质绢云石英千枚岩质磁黄铁 – 镍黄铁矿矿石; c- 铜 – 铅锌矿化白云岩型磁黄铁 – 镍黄铁矿矿石; Mot- 辉钼矿; Py- 黄铁矿; Pn- 镍黄铁矿; Pyr- 磁黄铁矿; Sph- 闪锌矿; Gn- 方铅矿

a- The molybdenite in the carbonaceous sericite quartz phyllite type Ni- Mo ore; b- The carbonaceous sericite quartz phyllite pyrrhotite- pentlandite ore; c- The Cu- Pb- Zn mineralized dolomite type pyrrhotite- pentlandite ore; Mot- molybdenite; Py- pyrites; Pn- pentlandite; Pyr- pyrrhotite; Sph- sphalerite; Gn- galena

钼被吸附在未完全石墨化的碳质中。

镍黄铁矿 (0.1%)他形 - 半自形, $\Phi = 0.02 \sim 0.05\text{mm}$, 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。矿石中镍除了以镍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、黄铁矿中, 与电子探针分析结果一致 (表 1)。

表 1 清岩沟镍 - 钼矿石电子探针元素分析 (10^{-2})
Table 1 Analysis of related elements data of ores
by mean of electron probe X-ray (10^{-2})

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
黄铁矿	53.160	46.270	0.019	0.081	0.258	\

注: “\”为未检测到, 西安长安大学电子探针分析室分析, 2007年。

磁黄铁矿是与镍黄铁矿最为密切的共生矿物, 一种为浑圆他形浸染微细粒 $\Phi = 0.01 \sim 0.05\text{mm}$, 其中包含微细粒镍黄铁矿; 另一种为他形脉络状细粒集合体, 与黄铁矿共生一起 $\Phi = 0.05 \sim 0.15\text{mm}$ 。形成热液阶段的早 - 中期阶段, 沿多组构造交汇地段富集。在片理化碳质千枚岩与细晶片状大理岩及其接触带中分布就位。

镍黄铁矿、磁黄铁矿与辉钼矿的形成机理相似。沉积期黑色岩系中有机碳质吸附钼、镍以及成岩黄铁矿化合的少量钼、镍, 变质作用期使含矿碳质岩系变质, 重结晶、分异、新生矿物出现, 所有这些变化使碳质岩石中钼等成矿元素活化迁移。同时, 有机碳质伴随区域变质作用, 受热而降解产生 H_2O 、 CO_2 、 N_2 、 CH_4 、 H_2S 等气、液态可溶性烃, 从而萃取含矿岩系活化出来的钼等成矿元素。在韧 - 脆性剪切构造活动过程中含矿碳质岩石的碳质石墨化, 并进一步产生可溶烃及含矿热液, 先期高温物理化学条件下被活化出来的钼有机会与低价还原硫化合形成辉钼矿而沉淀于片理化带中。辉钼矿形成, 消耗了热液中的部分硫化氢, 与有机质伴生的生、化作用产生的可溶性气、液态烃类, 完全可以提供使镍活化所需的硫 - 氢、碳 - 氢、碳 - 氧有机络阴离子团。鉴于镍黄铁矿与磁黄铁矿、黄铁矿等紧密共生, 表明镍等主要

与硫 - 氢含有机络阴离子结合运移沉淀的。因此, 镍的金属硫化物矿化大多数也赋存于含碳质黑色岩石系列中, 而少许矿化部分沿构造片理带进入低碳质或不含碳质的千枚岩中。

2.6 成矿元素化学特征

2.6.1 主要岩石类型成矿元素特征

清岩沟地区黑色岩系及矿区岩石主要成矿元素含量如表 2 在黑色岩系高碳质岩石中 Mo 、 Au 、 Ag 、 V 、 Cu 、 Pb 、 Zn 明显地高于其他岩石。碳质绢云母千枚岩 Mo 为 15.95×10^{-6} 、 Au 为 3.84×10^{-9} 、 V 为 295.7×10^{-6} 、 Cu 为 30.2×10^{-6} 、 Pb 为 39.2×10^{-6} 、 Zn 为 142.04×10^{-6} 。在西安矿产资源监督检测中心对碳质绢岩进行光谱半定量微量元素分析显示: As 为 0.01×10^{-2} 、 Cr 为 0.015×10^{-2} 、 Ni 为 0.06×10^{-2} 、 Co 为 0.001×10^{-2} 、 Ga 为 0.003×10^{-2} 、 Ba 为 0.4×10^{-2} 、 Sn 为 0.0008×10^{-2} 、 Ti 为 2×10^{-2} 、 B 为 0.01×10^{-2} , 除 Co 和 B 外均较上地壳 (Taylor, 1985)高; Mn 为 0.07×10^{-2} 、 P 为 2×10^{-2} 、 W 为 0.003×10^{-2} , 除 Mn 外均高于地壳丰度 (马逊, 1982)。

表 2 矿区主要岩石类型成矿元素含量
Table 2 Content of ore-forming elements of main types of rocks in the mining area

元素 ($\times 10^{-6}$)	Mo	V	Cu	Pb	Zn	Ag (10^{-9})	Au (10^{-9})
碳质绢云母千枚岩	15.95	295.7	30.2	39.2	142.04	0.680	3.84
二云 (绢云) 石英千枚岩	0.46	45.8	11.8	21.8	38.33	0.07	0.46
白云岩	0.49	4.1	3.3	32.4	30.43	0.126	0.54
花岗岩类	0.84	5.9	12.7	41.9	42.04	0.039	0.47
角闪斜长片麻岩	0.44	51.1	10.4	26.6	88.84	0.034	0.4
结晶灰岩	0.15	2.0	2.1	19.6	64.8	0.106	0.36
Taylor 等 上地壳 (1985)	1.5	60	25	20	71	50	1.8

资料来源: 西北有色地勘局物探队 (2006年)。

2.6.2 矿石化学成分特征

碳质千枚岩和含碳灰质白云岩矿石化学全分析和微量元素分析 (表 4)显示, 主要有用组份为 Mo 、 Ni 伴生组份为 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Tc 等。

对钼镍 - 钼矿带钼钼矿石中 Ni 、 Mo 含量测试结果 (表 5), 表明两成矿元素含量均达到工业含量, 并且二者具有较好的消长关系。矿石品级与有机碳

表 4 矿石元素分析 (10⁻²)

Table 4 Element analysis of ores

元 素	M o	Cu	Pb	Zn	TFe	N i	V ₂ O ₅	S	TC	Au [*]	Ag [*]	W [*]	P	SiO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	CaO
碳质千枚岩	0. n	0. 006	0. 08	0. 019	4. 6	0. 042	0. 08	1. 46	9. 87	0. 16	1	50	0. 7	51. 78	3. 06	12. 49	0. 23	1. 93	3. 75
灰质白云岩	0. n	0. 007	0. 13	0. 056	2. 8	0. 069	0. 05	0. 78	8. 84	0. 18	0. 9	20	0. 97	21. 44	1. 81	5. 38	0. 38	11. 28	19. 42
上地壳丰度	1. 5	25	20	71	3. 5	20	60(V)	–	–	1. 8 [*]	50 [*]	2. 0 [†]	–	66	3. 4	15. 2	3. 9	2. 2	4. 2

注: 测试数据由西北有色地质研究院提供; 上地壳微量元素 (×10⁻⁶, 化合物 (×10⁻², * (×10⁻⁶, ** 为 (×10⁻⁹。

含量及蚀变作用强度存在直接关系, 镍钼矿化好、元素含量高的地段位于强烈的韧性剪切构造带中, 石墨化碳质千枚岩与白云岩 – 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。表 6 为该矿带镍钼矿石中 M_Q Cu Pb Zn TiO₂ 含量分析结果, 从表可见 Mo 与 Cu Pb Zn Ti 含量之间消长关系不明显。镍 – 钼与铜 – 铅 – 锌并非同一成矿阶段的矿化产物, 同存于碳质岩性段的镍、钼矿化均需要较高温、强还原物理化学条件, 因此它们密切共生, 且矿化强度具有较好的消长关系; 形成石墨、辉钼矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿的矿物共生组合; 闪锌矿 – 黄铜矿 – 硅化等属于中温矿化蚀变组合。两组矿化元素矿化蚀变类型不一致、矿化共生关系与同

表 5 矿石中 M_Q Ni 含量 (10⁻²)

Table 5 Content of Mo and Ni elements of ores(10⁻²)

样品编号	赋矿岩石	M o	N i
YC- 153	含碳白云岩型镍钼矿石	1. 10	1. 06
YC- 149	含碳白云岩型镍钼矿石	0. 27	0. 42
YC- 112	含碳白云岩型镍钼矿石	0. 23	0. 046
YC- 113	含碳白云岩型镍钼矿石	0. 28	0. 059
YC- 80	含碳白云岩型镍钼矿石	0. 093	0. 058
YC- 81	含碳白云岩型镍钼矿石	0. 075	0. 094
YC- 123	含碳白云岩型镍钼矿石	0. 060	0. 034
YC- 111	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 026	0. 013
YC- 114	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 227	0. 125
YC- 124	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 027	0. 025
YC- 128	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 085	0. 040
YC- 141	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 137	0. 063
YC- 142	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 040	0. 030
YC- 143	碳质千枚岩 – 白云岩型镍钼矿石	0. 048	0. 079
YC- 150	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 039	0. 056
YC- 127	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 021	0. 013
YC- 140	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 022	0. 030
YC- 154	碳质绢云母千枚岩型镍钼矿石	0. 027	0. 25

表 6 矿石中钼、铜等元素含量 (10⁻²)

Table 6 Content of Mo Cu Pb Zn and TiO₂ of ores(10⁻²)

样 号	Mo	Cu	Pb	Zn
YC- 80	0. 093	0. 005	0. 21	0. 18
YC- 81	0. 075	0. 006	0. 13	0. 11
YC- 112	0. 23	0. 005	0. 021	0. 047
YC- 113	0. 28	0. 003	0. 016	0. 046
YC- 147	0. 064	0. 010	0. 022	0. 032
YC- 148	0. 18	0. 013	0. 025	0. 050
YC- 149	0. 27	0. 011	0. 068	0. 13
YC- 153	1. 09	0. 011	0. 13	0. 26

步性不一致, 矿化空间就位有别, 导致两组元素相关关系仅微弱同步。对于清岩沟矿床来说, 中晚期阶段的贱金属矿化较微弱, 致使 Cu Pb Zn Ti 含量均低于工业品位, 成为重要有用伴生元素。

3 清岩沟镍 – 钼矿床成因探讨

清岩沟镍 – 钼矿床产于含 M_Q Ni Ti Cu Pb Zn P 丰度高的黑色岩系中。原岩由含硫铁质碳质泥岩、泥质粉砂 – 细砂岩、含铁质碳质粉砂 – 细砂岩质泥岩及碳质碳酸盐岩夹互层组成的沉积岩系。王立社等 (2010) 通过对岩系的稀土元素地球化学及相关的微量元素参数等研究, 结合地质特征等认为该黑色岩系形成于活动陆缘一种缺氧、热液频繁、生物活动的环境。这种构造环境为成矿元素早期富集提供了有利条件 (如 Mo 为亲酸性和基性岩石元素, Ni 为亲基性 – 超基性岩元素, 两者是通过沉积作用聚合到一起的)。

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、碳质、钙质重结晶 (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 – 细砂石英聚合归并形成较大的变晶, 岩石成分在变质变形过程中发生分异, 岩石中形成绢云母、碳质 – 泥质与黑云母 – 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。这一作用过程使岩系中Mn、Ni、Ti、Cu、Pb、Zn、P等元素,通过变质分异、矿物重结晶净化而发生迁出、转移。直接矿化表现为含钛、磷质重结晶净化析出钛铁质、磷质,并重组形成钛铁矿、金红石、榍石、磷灰石等。

后经强烈的韧-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S₁、S₂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,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。表现其是控制成矿物质富集与就位的关键。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。含矿热液活动与韧-脆性剪切构造密切伴生,是成矿的直接动力来源。

综上所述,清岩沟镍-钼矿床属于以黑色岩系为容矿层控型沉积-叠加-改造的后生热液成因矿床。

致谢 野外工作得到高菊生、李建斌、任涛、樊忠平、魏密等专家的大力支持,审稿人及郑杰编辑给予了有益指导,在此一并谢过!

[References]

- Chen Hua-yong Zhang Zeng-jie 2001 The multipurpose use of mineral resource of black shale in the northwest Hunan [J]. *Geology and Exploration* 37(3): 32-35 (in Chinese with English abstract)
- Fan De-lian Zhang Tao Ye Jie 2004 Chinese black rock series and relevant ore deposits [M]. Beijing Science Publishing House 1-48 (in Chinese with English abstract)
- Gao Ju-sheng Wang Rui-ting Zhang Fu-xin Qi Ya-lin Liang Xiao-yong 2006 Geology and geochemistry of the Xijadian gold deposit in Cambrian black rock series in South Qinling [J]. *Geology in China* 33 (6): 1371-1378 (in Chinese with English abstract)
- Geng Lin Zhai Yu-sheng Peng Run-m 2007 Characteristics and resource potential of platinum group elements deposit in China [J]. *Geology and Exploration* 43(1): 1-7 (in Chinese with English abstract)
- Hou Jun-fu 2008 Metallogenic characteristics and regularities of Au-V mineralization in Lower Cambrian black rock series southern Qinling Mountain [D]. Northwest University 1-75 (in Chinese with English abstract)

- Jiang Yong-hong 2009 Study on correlation between organic matter and PGE mineralization in the black-rock-series-type Ni-Mo deposits in the Lower Cambrian in Hunan and Guizhou Provinces [J]. *Geology and Exploration*, 45(1): 1-6 (in Chinese with English abstract)
- Taylor S R Mckinnam S M. 1985 The continental crust: its composition of melts and evolution [M]. Oxford Blackwell Scientific Press 1-312
- Wang Li-she 2009 Study on the metallogenic regularity and geological-geochemistry for black rock series and related typical deposits in Qinling Mountains Shanxi [D]. Northwest University 78-99 (in Chinese with English abstract)
- Wang Li-she Hou Jun-fu Zhang Fu-xin Qin Yan Qi Ya-lin Yang Peng-fei Jin Suan-lian Fang Bo Zhou Yan 2010 Geochemical characteristics of the Miaowan Formation black rock series in North Qinling Mountain and their genetic significance [J]. *Acta Geoscientia Sinica* 31(1): 73-82 (in Chinese with English abstract)
- Yang Jian Yi Fa-chang Liu Tao Li Hu-jie 2005 Geochemical characters of the Lower Cambrian black shale series in Northern Guizhou and their original significance [J]. *Chinese Journal of Geology* 40(1): 84-94 (in Chinese with English abstract)
- Yi Fa-cheng Yang Jian Hou Lan-jie Wang Jian-zhong 2004 Origin and geochemistry of platinum group elements of Lower Cambrian black shale series in northern Guizhou [J]. *Chinese Jour Geol*, 39 (3): 367-374 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Fu-xin Wang Li-she Hou Jun-fu 2009 Black rock series types of ore deposits and ore-forming systems in Qinling orogenic belt [J]. *Geology in China* 36(3): 694-704 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Guang-di Mao Jing-wen Xiong Qun-yao 2001 The Present Situation and Prospects of Platinum Metals Resources in China [J]. *Acta Geoscientia Sinica* 22(2): 107-110 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Guang-di Li Jiu-ling Xiong Qun-yao Qi Feng Zeng Ming-gua 2002 Enrichment features and patterns of PGE metals in black shale from Zunyi area, Guizhou Province [J]. *Mineral Deposits* 21 (4): 377-386 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 陈华勇, 张增杰. 2001 湘西北黑色岩系中矿产资源的综合利用 [J]. *地质与勘探*, 37 (3): 32-35
- 范德廉, 张 焘, 叶 杰. 2004 中国的黑色岩系及其有关矿床 [M]. 北京: 科学出版社: 1-48
- 高菊生, 王瑞廷, 张复新, 齐亚林, 梁小勇. 2006 南秦岭寒武系黑色岩系中夏家店金矿床地球化学 [J]. *中国地质*, 33 (6): 1062-1072
- 耿 林, 翟裕生, 彭润民. 2007 中国铂族元素矿床特征及资源潜力分析 [J]. *地质与勘探*, 43 (1): 1-7
- 侯俊富. 2008 南秦岭下寒武统黑色岩系中金-钼成矿特征及成矿规律 [D]. 西北大学: 1-75
- 江永宏. 2009 湘、黔下寒武统黑色岩系型 Ni-Mo 矿床中有有机质与 PGE 成矿作用研究 [J]. *地质与勘探*, 45 (1): 1-6
- 王立社, 侯俊富, 张复新, 秦 艳, 齐亚林, 杨鹏飞, 金拴联, 房 波, 周燕. 2010 北秦岭庙湾组黑色岩系稀土元素地球化学特征及成因

意义 [J]. 地球学报, 31(1): 73– 82

王立社. 2009. 陕西秦岭黑色岩系及其典型矿床地质地球化学与成矿规律研究 [D]. 西北大学: 78– 99

杨 剑, 易发成, 刘 涛, 李虎杰. 2005. 黔北黑色岩系稀土元素地球化学特征及成因意义 [J]. 地质科学, 40(1): 84– 94

易发成, 杨 剑, 侯兰杰. 2004 黔北黑色岩系的铂族元素地球化学特征及成因探讨 [J]. 地质科学, 39 (3): 367– 374

张复新, 王立社, 侯俊富. 2009 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, 36(3): 695– 705

张光弟, 毛景文, 熊群尧. 2001 中国铂族金属资源现状与前景 [J]. 地球学报, 22(2): 107– 110

张光弟, 李九玲, 熊群尧, 齐 锋, 曾 明. 2002 贵州遵义黑色页岩铂族金属富集特点及富集模式 [J] 矿床地质, 21(4): 377– 386

赵百胜, 刘家军, 王建平, 翟裕生, 彭润民, 王守光, 沈存利. 2007 白云鄂博群黑色岩系微量元素地球化学特征及地质意义 [J]. 现代地质, 21(1): 87– 94

Metallogenic Characteristics and Genesis of the Qingyangou Ni– Mo Deposit

in the Northern Qinling Mountains

WANG Li– she¹, ZHANG Fu– xin², ZHENG Wei³, HOU Jun– fu⁴, LEI Yong– xiao¹,

FANG Bo⁵, ZHOU Yan⁵, HAN Yuan¹

(1 *Xi'an Geological Survey Center, Xi'an 710054* 2 *Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069*

3 *Geophysical and Geochemical team of Northwest Mining Geological Exploration bureau, Xi'an 710068* 4 *Aluminum Corporation of China*

Limital, Beijing 100082 5 *Plant of Qinghai Oilfield, PetroChina Limited Company, Dunhuang, Gansu 736202*)

Abstract Field investigations and researches suggest that the Qingyangou Ni– Mo deposit hosts in the black rock series at the lower section of the Maowan formation, which is made up of sericite– plagioclase quartz phyllite– maculose biotite– mica phyllite, graphitized sericite phyllite– muscovite– fine crystalline marble– carbonaceous dolomite– graphite– quartz– diopside– tremolite rock and calcite quartz schist. The contents of Mn, Ni, Ti, Cu, Pb, Zn, P and TOC are high in these rocks. Macroscopic and microscopic geological characteristics show the rocks have experienced regional metamorphism, and the shear tectonic process of brittle– ductile superposition and transformation in the later period. Because of this process Mo and Ni have been migrated deposited after their formation. Finally they are hosted in the schistosity zone or the contact between ductile bodies and rigid bodies which has undergone intense tectonic deformation. Studies show that the relationship between veins and mineralization in the deposit area is not obvious. Thus we consider that this deposit is a sedimentary– metamorphic– structural– hydrothermal– reformation type Ni– Mo deposit.

Key words Qinling Ni– Mo deposit, genesis, black rock series