



引文格式: 段湘益, 李维成, 王海元, 等. 东秦岭黄龙铺矿田碳酸岩脉型铼钼矿床成矿特征及找矿预测[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 53–73. DOI: 10.12401/j.nwg.2024045

Citation: DUAN Xiangyi, LI Weicheng, WANG Haiyuan, et al. Metallogenic Characteristics and Prospecting Prediction of Carbonatite Vein-Type Re-Mo Deposits in Huanglongpu Ore Field, East Qinling[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 53–73. DOI: 10.12401/j.nwg.2024045

东秦岭黄龙铺矿田碳酸岩脉型铼钼矿床成矿特征及找矿预测

段湘益^{1,2,3}, 李维成^{2,3}, 王海元⁴, 黄凡^{5,6}, 高海峰^{1,2}, 杨涛^{1,2}, 杨帅^{1,2},
宋公社^{2,3}, 姚富升⁴

(1. 自然资源陕西省卫星应用技术中心, 陕西 西安 710082; 2. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710000; 3. 陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068; 4. 西安华地矿业管理有限公司, 陕西 西安 710000; 5. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 6. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘要: 作为世界上唯一一处碳酸岩型钼矿床集中区, 黄龙铺钼矿田位于华北地块南缘东秦岭成矿带西段, 空间上受卢氏-马超营断裂控制。笔者在前期研究成果的基础上, 通过对黄龙铺矿田的区域地质背景、成矿特征、典型矿床等进行系统梳理与综合分析表明, 碳酸岩脉型钼成矿主要与印支期岩浆活动关系密切, 构造为其提供了有利的赋矿空间, 围岩提供了少量成矿物质, 总体形成了NW向垣头-碾子坪铼钼多金属矿(化)带与NE向西坪-秦岭沟铜钼矿(化)带, 涉及两个Ⅲ级成矿区带和两个Ⅳ级成矿区带, Re、Mo含量总体表现为正相关。成矿流体主要为中高温硅酸盐-碳酸盐-硫酸盐体系的岩浆水, 成矿物质主要来源于幔源火成岩浆, 属印支晚期成矿, 大致经历了3个主要成矿期。本研究从多角度进行找矿预测认为, 在矿田东北端向河南延伸方向及西南端的卢氏-马超营断裂两侧, 有好的钼找矿前景, 在华阳川-太子坪矿化带及矿田西北部的岩体下部, 可能存在大中型钼多金属矿床。

关键词: 铼钼矿床; 成矿特征; 找矿预测; 碳酸岩脉; 黄龙铺矿田; 东秦岭

中图分类号: P612, TD11

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0053-21

Metallogenic Characteristics and Prospecting Prediction of Carbonatite Vein-Type Re-Mo Deposits in Huanglongpu Ore Field, East Qinling

DUAN Xiangyi^{1,2,3}, LI Weicheng^{2,3}, WANG Haiyuan⁴, HUANG Fan^{5,6}, GAO Haifeng^{1,2}, YANG Tao^{1,2},
YANG Shuai^{1,2}, SONG Gongshe^{2,3}, YAO Fusheng⁴

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2024-04-07; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“中国矿产地质志”(DD20160346、DD20190379、DD20221695)、“中国矿产地质志·陕西卷”(DD20190379-21), 陕西省公益性地质调查项目“陕西省矿产地质与成矿规律综合研究”(20170302)、“陕西省地学大数据建设”(20180301)、“矿山地质环境遥感广域动态监测技术研究”(202412), 陕西省地质灾害综合防治体系建设项目“陕西省地质灾害隐患识别中心建设(二期)”、“陕西省地质灾害隐患点及风险区域识别技术研究”, 陕西省秦岭生态环境保护专项项目“秦岭卫星遥感综合监测服务平台建设与应用”联合资助。

作者简介: 段湘益(1974-), 女, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: 757193996@qq.com。

- (1. Shaanxi Satellite Application Technology Center for Natural resources, Xi'an 710082, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 3. Shan'anxi Center of Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 4. Xi'an Huadi Mining Management Co.Ltd, Xi'an 710000, Shaanxi, China; 5. MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Beijing 100037, China; 6. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Huanglongpu molybdenum ore field, situated in the western region of the East Qinling metallogenic belt on the southern margin of the North China block, represents the only concentration area of carbonatite-type molybdenum deposits worldwide, and spatially controlled by the Lushi-Machaoying fault. On the basis of previous research results, This study presents a systematic sorting and comprehensive analysis of the regional geological setting, metallogenic characteristics and typical deposits of the Huanglongpu ore field. The formation of carbonate vein-type molybdenum deposits is closely related to the magmatic activities during the Indosinian period, with the favorable structural framework providing ore-bearing spaces and the surrounding rocks contributing trace ore-forming materials. The study delineates two primary ore-forming belts, namely the NW-oriented Yuantou-Nianziping rhenium-molybdenum polymetallic ore (mineralization) belt and the NE-oriented Xiping-Qinlinggou molybdenum-copper ore (mineralization) belt, comprising two third-level ore-forming zones and two fourth-level ore-forming zones. The Re and Mo contents generally exhibit a positive correlation. The ore-forming fluid is mainly characterized as magmatic water from the medium-high temperature silicate-carbonate-sulfate system, with ore-forming materials predominantly derived from mantle-derived igneous magma during the late Indosinian period, and it has roughly gone through three main mineralization stages. This study conducts prospecting predictions from multiple perspectives, there are promising prospects for molybdenum prospecting in the northeastern end of the ore field extending toward Henan and on both sides of the Lushi-MaChaoying fault at the southwest end. Additionally, the Huayangchuan-Taiziping mineralization belt and the lower part of the rock mass in the northwest of the ore field hold potential for large and medium-sized molybdenum polymetallic deposits.

Keywords: Re-Mo deposit; metallogenic characteristics; prospecting prediction; carbonatite vein; Huanglongpu ore field; East Qinling

东秦岭-大别钼成矿带为中国 6 个重要钼成矿带之一, 目前已超过美国西部的 Climax-Hendersom 钼矿带成为世界第一大钼成矿带(李俊平等, 2011; 李毅等, 2013; 范羽等, 2014)。该成矿带内已发现了陕西华县金堆城、河南汝阳东沟、河南栾川南泥湖、河南栾川三道庄、安徽金寨沙坪沟等世界级超大型钼矿床, 矿床类型以斑岩型或斑岩-矽卡岩型为主。值得注意的是, 在东秦岭成矿带内还有一种极其重要的钼矿床类型, 即碳酸岩脉型。该类型为黄典豪先生在 20 世纪 80 年代确定, 后来也进行了充分论证与研究(黄典豪等, 1984, 1985, 1994, 2009, 2015)。碳酸岩脉型钼矿床在中国其他地区暂时未被发现, 为东秦岭成矿带所特有(黄典豪等, 2009; 范羽等, 2014), 并且主要集中在东秦岭成矿带西段的陕西黄龙铺矿田中; 在河南境内, 仅在东秦岭成矿带东段发现了黄水庵大型钼矿床。这也是世界上唯一生产碳酸岩型钼矿床的地域(Xu et

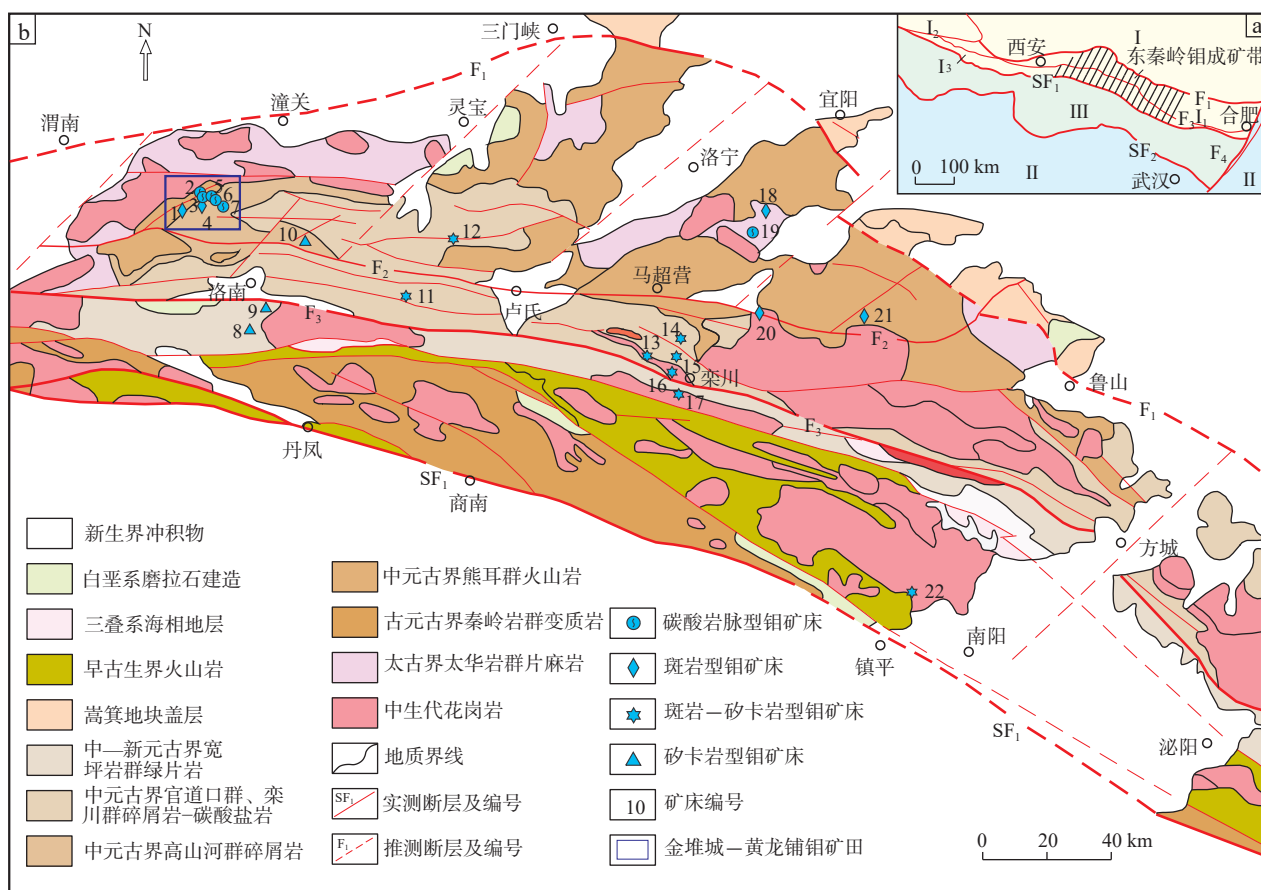
al., 2010; 许成等, 2017), 全球罕见, 不同研究者对碳酸岩(脉)型钼矿床的成矿背景、成矿年龄、成矿机制、成矿物质来源等方面进行了深入研究(侯增谦等, 2008; 许成等, 2009, 2017; 王瑞廷等, 2014; 曹晶, 2018; 付鑫宁等, 2021; 段湘益等, 2021; 王汉辉等, 2023)。近年来, 该区钼找矿进一步取得了新的突破, 新发现的矿床(如秦岭沟、碾子坪、黄水庵等)(黄典豪等, 2009; 曹晶, 2014; 樊一见等, 2017; 董王仓等, 2021)极大地拓宽了找矿思路 and 空间, 这些找矿成果为该类型钼矿床深入研究及扩大找矿范围提供了更加有力的依据。同时, 由于富含“战略性关键金属”铼, 更引起了专家们的重视(黄凡等, 2019; 陈喜峰等, 2019)。基于此, 笔者在“中国矿产地质志·陕西卷”等多个工作项目成果及前期研究成果的基础上, 结合新发现的矿床数据, 对黄龙铺矿田碳酸岩脉型铼钼多金属矿床(点)的区域地质背景、矿田成矿特征、典型矿床等进

行系统梳理与综合分析, 总结成矿规律, 探讨成矿模式, 并进行找矿预测, 旨为实现更大找矿突破提供一定的理论指导和技术支撑。

1 区域地质背景

东秦岭钼成矿带位于华北地块南缘(I)秦岭造山带后陆逆冲断褶带(I₁)(张国伟等, 2019)(图1a), 北以三门峡-宝鸡断裂(F₁)为界, 南至商丹-北淮阳复合断裂(SF₁), 西以蓝田-潼关断裂为界, 东至方城-南阳断裂(图1b)。区内经历了漫长、复杂、不同构造体制下的多旋回发展演化, 深部地质呈“立交桥”结构, 具体来说, 浅层主构造线为近EW向, 中部为流变学分带, 深部软流圈最新为近SN向(张国伟等, 2001; 陕

西省地质调查院, 2017), 印支期, 秦岭后碰撞冲断褶皱使得整体成山, 华南板块与华北板块拼合, 秦岭残余海盆关闭(陕西省地质调查院, 2017), 造就了独特而典型的地质构造面貌。地层主要由克拉通结晶基底和盖层组成, 基底岩性为太古界太华岩群(Ar₃T)片麻岩、混合岩; 盖层为古元古界秦岭岩群(Pt₁Q)变质岩, 中元古界熊耳群(Pt₂X)中基性火山岩、高山河群(Pt₂G)碎屑岩、官道口群(Pt₂G)和栾川群(Pt₂L)碎屑岩-碳酸盐岩及中—新元古界宽坪岩群(Pt_{2.3}K)绿片岩。元古代、中生代花岗岩及印支期碳酸岩脉发育。矿床(点)分布受构造控制明显。其中, 斑岩型、碳酸岩脉型、石英脉型钼矿床主要产于卢氏-马超营断裂(F₂)北附近, 如陕西金堆城、河南汝阳东沟等世界级钼矿床; 斑岩-矽卡岩型钼矿床的产出主要受控于洛南-栾



I. 华北地块; I₁. 华北地块南缘秦岭造山带后陆逆冲断褶带; I₂. 祁连造山带; I₃. 北秦岭叠瓦逆冲推覆构造带; II. 扬子地块; III. 秦岭地块; SF₁. 商丹-北淮阳复合断裂构造混杂带(商丹古板块缝合带); SF₂. 勉略-巴山-大别南缘逆冲推覆构造带(勉略古板块缝合带); F₁. 秦岭造山带北缘向北的逆冲推覆断裂带(三门峡-宝鸡断裂带); F₂. 石门-马超营逆冲断裂带; F₃. 北秦岭北缘逆冲推覆断裂带(洛南-栾川逆冲断裂带); F₄. 郯庐断裂带; 1. 金堆城; 2. 大石沟; 3. 宋家沟; 4. 石家湾; 5. 秦岭沟; 6. 西沟; 7. 碾子坪; 8. 潘河; 9. 景村; 10. 木龙沟; 11. 夜长坪; 12. 银家沟; 13. 上房沟; 14. 马圈; 15. 南泥湖; 16. 三道庄; 17. 石宝沟; 18. 雷门沟; 19. 黄水庵; 20. 鱼池岭; 21. 东沟; 22. 秋树湾

图1 东秦岭成矿带主要钼矿床分布简图(据李诺等, 2007; 张国伟等, 2019 修)

Fig. 1 Distribution diagram of main molybdenum deposits in East Qinling metallogenic belt

川断裂(F_3)与卢氏-马超营断裂(F_2),如河南栾川南泥湖、河南栾川三道庄等世界级钼矿床;矽卡岩型钼矿床主要产于洛南-栾川断裂(SF_1)南部的宽坪岩群中,如洛南潘河、洛南景村等中型钼矿床。

碳酸岩脉型钼矿床作为中国独特的一种矿床类型,仅分布在中国东秦岭成矿带内,且主要集中在东秦岭成矿带西段的陕西黄龙铺矿田中,矿床主要受卢氏-马超营断裂(F_2)控制,赋矿地层为太古界太华岩群(Ar_3T)片麻岩、中元古界熊耳群(Pt_2X)中基性变质火山岩或高山河群(Pt_2G)滨海-浅海相碎屑岩(图1)。目前,在黄龙铺钼矿田内已发现碳酸岩脉型大型钼矿床3处、中型3处、钼矿点6处(表1),另外,在成矿带东段的河南境内也发现1处大型钼矿床(黄水庵)(曹晶等,2014,2018;付鑫宁等,2021)。

2 矿田成矿特征

2.1 矿田地质特征

黄龙铺钼矿田中的碳酸岩脉型钼矿床主要赋存于太古界太华岩群(Ar_3T)片麻岩、中元古界熊耳群上亚组(Pt_2X_2)上部的变细碧岩、细碧玢岩、黑云钾长微晶片岩、绢云千枚岩、凝灰质板岩、大理岩或中元古界高山河群下亚组(Pt_2G_1)变石英砂岩、绢云板岩、泥(砂)质板岩中。矿体产于金堆城-路家街-白花岭复向斜及东坪-黄龙铺、曹家沟-石家湾、西坪-桃园、大王沟、板岔梁-蚂蚁山等背斜南翼、北翼或倾伏端。断裂发育,主要控矿构造为成矿前的NW-NNW向FB组及成矿期的NEE-NE向FC组(图2),在两组断裂交汇处形成的多个“构造框”控制着各矿段的分布范围,其次生节理、裂隙密集分布于“构造框”内,为主要容矿构造。钼成矿主要与印支期岩浆活动关系密切,岩浆活动以中元古代和中生代最强烈,主要出露中元古代片麻状花岗岩、中生代老牛山黑云二长花岗岩体(锆石U-Pb同位素年龄值223~146 Ma(陈毓川等,2014)、146.35 Ma(朱赖民等,2008)、144.5 Ma(焦建刚等,2009;陈毓川等,2014))、金堆城钾长花岗斑岩体(锆石U-Pb同位素年龄值140.95 Ma或143.7 Ma)(陈毓川等,2014)、石家湾黑云花岗闪长斑岩体(锆石U-Pb同位素年龄值141.1 Ma)(陈毓川等,2014)和文公岭石英闪长岩体($^{187}Re/^{187}Os$ 等时线年龄值194 Ma),碳酸岩、辉长岩等脉岩发育。以钼为主的放射性、稀有、稀散、稀土等多金属矿化主要与含

钼铀稀土长石石英脉、含钼铅重晶石英方解石脉、含钼铅重晶方解石英脉、含铀钼天青石英方解石脉、含钼钾长方解石英脉等碳酸岩脉有关(表2)。矿石中的金红石、氟碳铈镧矿、铅铀钛铁矿、铌钛铀矿、钇易解石、钽天青石等为该类型中特有的矿石矿物,脉石矿物以方解石为主,含量为50%~80%,富含铈、稀土元素。辉钼矿在方解石中多呈浸染状、浸染条带状构造,并交代方解石、方铅矿,导致矿石呈残余或网络状结构。

2.2 地球化学场

在熊耳群上亚组(Pt_2X_2)第一至第四岩性段中,Mo、Pb均表现为极强富集,其元素含量分别高出基性岩30~200倍与10~300倍(表3),Cu、Ag、Ba表现为相对富集,Zn、Cr、Ni、Co、V则表现相对分散,产出大石沟、宋家沟等大型钼矿床与桃园钼矿点,与化探信息对应较好。高山河群下亚组(Pt_2G_1)变石英砂岩中元素含量比砂岩高出十至百倍,Mo、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、V、Ba均表现为富集状态,其中,Mo、Pb为极强富集,其含量约高出同类砂岩30~400倍与3~40倍(表3);同岩性段从下至上,Mo、Pb含矿性逐渐减弱,而Ni、Co、V则逐渐加强。总体来说,在熊耳群上亚组(Pt_2X_2)与高山河群下亚组(Pt_2G_1)的接触区域,为Mo、Pb、Ag等主要元素成矿的有利部位。此外,由于岩层破碎程度不同,在相同区域的同一岩性中,矿化强度上也会表现出较大的差异,如高山河群碎裂状石英砂岩中Mo、Pb含量均高于非碎裂石英砂岩的90、6.5倍,说明构造破碎为矿化提供了有利的赋矿空间。

据1:20万区域地球化学异常特征数据显示,黄龙铺矿田Mo、Pb异常内、中、外浓度分带齐全(图3a),Ag、Ba、Cu异常面积大,为多元素矿致异常,异常规模的大小也较好地反映了矿田规模的大小。主成矿元素Mo的富集系数为3.09,变化系数为10.23,后期叠加系数达231.41,说明Mo元素富集、极强叠加,分布极不均匀,分异性强。从元素异常分布来看,在金堆城-黄龙铺地段,Mo元素异常主要沿NE向构造岩浆岩带呈团块状分布,局部呈NNW向面状展布,异常衬度为20.45,异常规模为3355,标准离差为64.14,矿化系数为36.03,显示区内异常规模大,异常强度高,元素分布极不均匀,集中成矿明显,区内已发现多处斑岩型、碳酸岩脉型、石英脉型钼矿床及矿(化)点。在老牛山岩体西南部,异常呈NE向串珠状展布,异常规模小、强度弱,浓度分带性较差,目前仅发现了少数

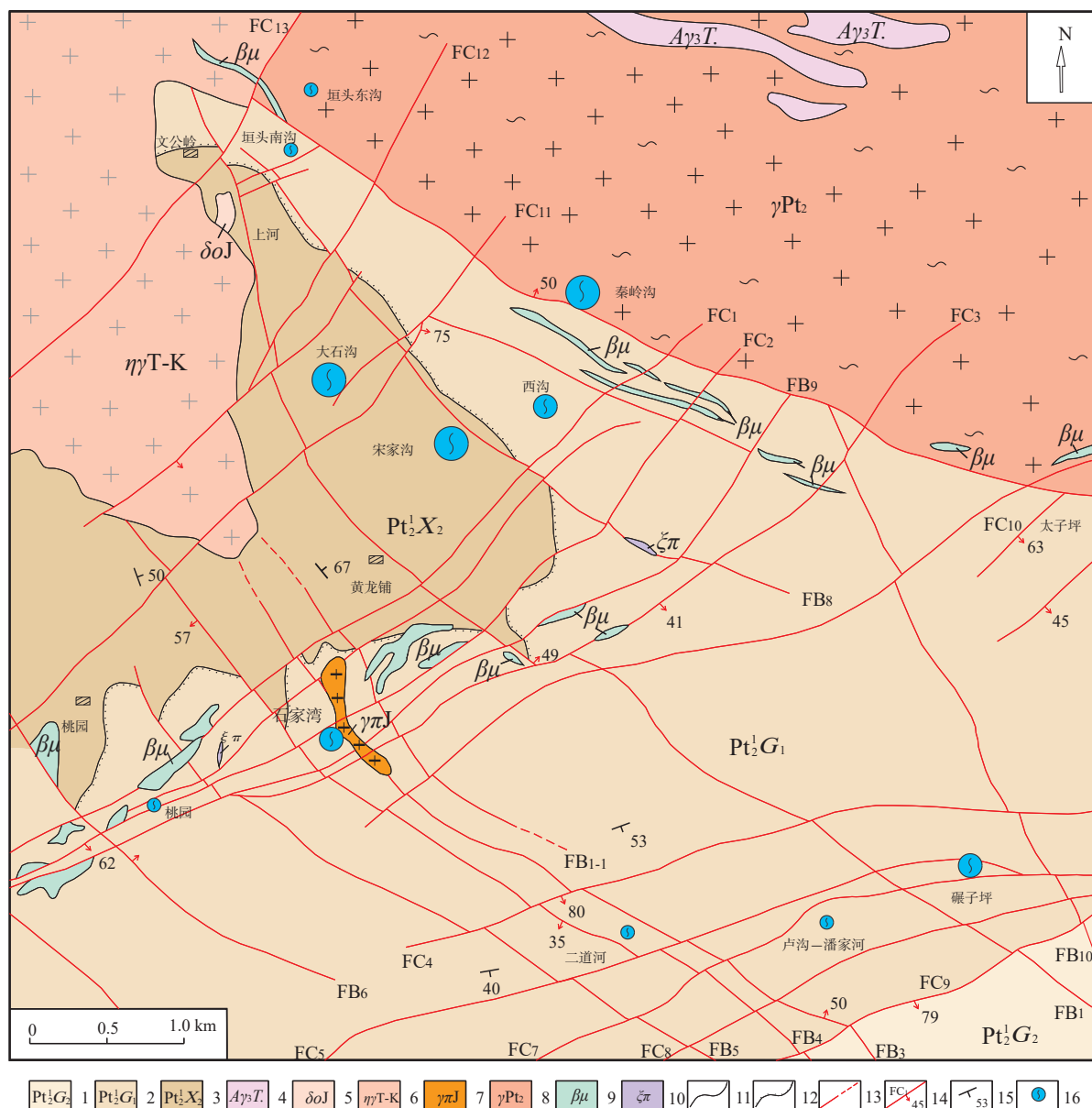
表1 东秦岭成带碳酸岩脉型钼矿床(点)基本特征表
Tab. 1 Basic characteristics of carbonate vein type Mo deposits(points) in the East Qinling mineralization belt

矿床名称	赋矿地层	碳酸岩脉类型	矿石矿物	脉石矿物	规模	品位Mo(%)	伴生矿产	同位素年龄	参考文献
洛南县大石沟钼矿	熊耳群上亚组变碧岩、绢云千枚岩、凝灰质板岩、黑云微晶片岩	天青方解石英脉、重晶石英方解石脉	黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、黄铜矿、金红石、氟碳铈镧矿、铅铀铀铁矿、钽铌铀矿、钼易解石、铜硫铅铋矿、磷钼矿、硒铋矿等	方解石、石英、斜长石、白云石、钾长石、钼天青石、重晶石、黑云母、绿泥石、锰土等	大型	0.079	铍、锶(天青石)为大型, 铅、银、硫、碲、稀土为中、型, 硒为小型	辉钼矿 Re-Os 值 (221.5±0.3) Ma、(201.53±0.68) Ma	Stein et al., 1997; 陈毓川等, 2014
洛南县石家湾钼矿(Ⅱ号)	高山河群下亚组变石英砂岩、砂质绢云板岩	钾长方解石英脉、天青方解石英脉	辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、金红石、氟碳铈镧矿、铅铀铀铁矿、黄铜矿、磷钼矿等	石英、方解石、钾长石、白云石、钼天青石、重晶石等	中型	0.104	硫为中、型, 碲、碲为小型	辉钼矿 Re-Os 值 221 Ma	黄典豪等, 1994; 陈毓川等, 2014
洛南县朱家沟钼矿	熊耳群上亚组变碧岩、玢岩夹变质凝灰岩、大理岩; 高山河群下亚组变石英砂岩、泥板岩	天青方解石英脉、重晶石英方解石脉	黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、少量闪锌矿、黄铜矿、褐铁矿、钼金红石、钛铁矿、独居石、氟碳铈镧矿等	天青石、石英、方解石、钾长石、钠长石、大型斜长石、黑云母等	大型	0.101	铅、硫为大型		
洛南县秦岭沟钼矿	太华岩群片麻岩类、片麻状花岗岩	天青方解石英脉、重晶石英方解石脉、钾长石英方解石脉	辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、黄钾铁矾、闪锌矿等	石英、方解石、钾长石、微斜长石、黑云母、重晶石、钼天青石等	大型	0.092		LA-ICP-MS 独居石 Tera-Wasserburg 年龄 (207±11) Ma	王佳营等, 2020
洛南县西沟钼矿	高山河群下亚组变石英砂岩、绢云母板岩; 熊耳群变细碧岩、基性熔岩	天青方解石英脉、重晶石英方解石脉	辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、白铅矿、氟碳铈镧矿、辉钼矿、金红石、独居石等	方解石、石英、斜长石、钾长石、钼天青石、黑云母、绿泥石等	中型	0.083	铍为中、型, 铅、硫为小型	辉钼矿 Re-Os 值 (224.6±9.1) Ma	杜芷薇等, 2020
洛南县碾子坪钼矿	高山河群下亚组变石英砂岩、泥砂板岩、绢云板岩	钾长方解石英脉	黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、氟碳铈镧矿、硫铈银矿、钼铅矿、铁钼华、黄铜矿等	石英、方解石、黑云母、钾长石、绢云母、绿泥石、萤石、重晶石等	中型	0.091			
洛南县二道河钼矿	高山河群下亚组变英砂岩、砂质绢云板岩	天青方解石英脉、钾长方解石英脉	黄铜矿、辉钼矿、方铅矿等	石英、钾长石、方解石、钼天青石、萤石等	矿点	0.034~0.129			
洛南县卢沟-潘家沟钼矿	高山河群下亚组变英砂岩、绢云母板岩	钾长方解石英脉	辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿等	钾长石、石英、高岭土、绢云母等	矿点	0.064			

续表 1

矿床名称	赋矿地层	碳酸岩脉类型	矿石矿物	脉石矿物	规模	品位Mo(%)	伴生矿产	同位素年龄	参考文献
华县桃园钼矿	高山河群下亚组石英砂岩夹绢云板岩；熊耳群变细碧岩	天青方解石英脉、重晶石英方解石脉、钾长方解石英脉	辉钼矿，次为黄铁矿、褐铁矿、黄钾铁矾、铁金红石、铀钼华、赤铁矿、黄铜矿、磁铁矿等	微斜长石、方解石、石英、黑云母、铅石等	矿点	0.041~0.096	铅、铜		
			方铅矿、辉钼矿、黄铁矿、黄铜矿、铌钛铀矿、磷钇矿等	石英、方解石、天青石、微斜长石等	矿点	0.07~0.144	铅、银、稀土	辉钼矿 Re-Os 值 (225±7.6) Ma	Song W L et al., 2015
华阴市垣头南沟钼矿	高山河群变石英砂岩夹泥板岩；片麻状黑云二长花岗岩	天青方解石英脉	黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、孔雀石、辉铜矿、辉钼矿、黄钾铁矾、铅钨等	石英、方解石、天青石、微斜长石、绢云母、黏土矿物等	矿点	0.03~0.217	铅、银		
			辉钼矿、黄铁矿、长石、方解石、方铅矿、黄铜矿、镜铁矿等	石英、方解石、长石、黑云母、绿泥石、钨、天青石等	矿点	0.134	钼、铅、稀土	辉钼矿 Re-Os 值 (212.4±2.8) Ma	袁海潮等, 2014
河南嵩县黄水庵钼矿	太华岩群石板沟组片麻岩、混合岩	含锰石英方解石脉	辉钼矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁铁矿等	石英、方解石、钾长石、萤石、硬石膏等	大型	0.082		辉钼矿 Re-Os 值 (208.4±3.6) Ma、(212.8~206.3) Ma、(213.5±2.9) Ma	黄典豪等, 2009; 曹晶, 2014; 王汉辉等, 2023

注：1.陕西省矿床数据来源于陕西省自然资源厅，2019及本次研究；2.黄水庵矿床数据来源于曹晶，2018。



1.中元古界高山河群中亚组砂质板岩、变质石英砂岩、白云岩;2.中元古界高山河群下亚组石英砂岩、砂质绢云板岩、凝灰岩、砾岩;3.中元古界熊耳群上亚组细碧岩、绢云母千枚岩、凝灰岩、黑云石英片岩夹大理岩透镜体;4.太古界太华岩群角闪黑云斜长片麻岩及混合岩;5.石英闪长岩;6.二长花岗岩;7.花岗斑岩;8.片麻状花岗岩;9.辉绿岩脉;10.正长斑岩脉;11.地质界线;12.不整合地质界线;13.实测/推测断层;14.断层编号及产状;15.地层产状;16.矿床(点)

图2 黄龙铺钼矿田地质构造图(据陕西省地质矿产局第十三地质队, 2002;董王仓等, 2021修)

Fig. 2 Geological structure map of Huanglongpu Mo ore field

脉型钼矿点。区内已发现的钼矿床主要分布在异常内带和中带,钼矿点则形成于中带和外带,与区域地球化学特征及有关研究(樊会民等,2018)相吻合。

金堆城-黄龙铺地区 1:5 万水系沉积物异常总体呈 NW 向不规则面状或椭圆状展布(图 3b), Mo、Pb 异常浓度分带清晰, 内带面积大, Pb 异常内带套合于 Mo 异常核部, Zn 异常只有中、外带显示, Cu 异常弱, 基本与元素矿化信息吻合。大石沟地区 1:1 万

土壤异常呈 NW 向带状展布, 主要由 Mo、Pb 内带及 Zn、Ag 外带组成, 梯度变化明显, Cu 异常较弱, 多元素异常套合性较好; 主成矿元素 Mo、Pb 异常强度高, 极值分别达 400×10^{-6} 和 $5\,000 \times 10^{-6}$, 基本反映了大石沟钼矿床的成矿特征。

总体来说,黄龙铺矿田以 Mo、Pb 元素异常为主,属强富集、强分异、强叠加型,异常内带面积大,梯度变化明显,Mo、Pb、Cu、Zn、Ag 等多元素异常套合性

表 2 黄龙铺钼矿田主要含矿岩脉基本特征表

Tab. 2 Basic characteristics of main ore bearing dikes in Huanglongpu Mo ore field

含矿岩脉	产出形态	脉体规模	矿体围岩	矿石矿物	脉石矿物	重要地段
含铜黄铁矿石 石英脉	细脉、网脉	长几厘米至几十 米，宽0.2～ 0.5 cm	辉绿岩、元古代 花岗岩	黄铜矿、黄铁矿为主， 少量磁铁矿	石英	桃园-秦岭沟、 二道河-碾子坪
含铜石英方解 石脉	单细脉，少量 细脉、网脉	长几米至十余米， 宽5～10 cm	辉绿岩	黄铜矿为主，其次为 磁铁矿、黄铁矿	方解石、石英， 少量黑云母、角 闪石	桃园-秦岭沟
含钼铀稀土长 石石英脉	细脉、粗脉、 网脉	长几厘米至几十 米，宽几毫米至 几十厘米	石英岩、熊耳群 火山岩	钼铀矿、辉钼矿、 氟碳铈镧为主，少量 黄铁矿	钾长石、石英为 主，其次为黑云 母、角闪石	垣头-宋家沟
含铀钼天青方 解石英脉	粗脉，个别呈 大脉	长几米至几十米， 宽一般10～20 cm， 最宽达10 m	熊耳群火山岩、 高山河群碎屑岩	辉钼矿、钼铀矿为主， 少量方铅矿、氟 碳铈镧、黄铁矿	石英为主，其次 为方解石、天青 石、钾长石	上河-宋家沟
含钼铅重晶石 英方解石脉	细脉、粗脉、 大脉	长几米至上千米， 宽几毫米至44 m	熊耳群火山岩、 高山河群碎屑岩	辉钼矿、黄铁矿、方 铅矿为主，少量钽铀 矿、氟碳铈镧、 黄铜矿	方解石、石英为 主，其次为重晶 石、钾长石、 萤石	垣头-宋家沟、 碾子坪
含铜黄铁矿石 钾长方解 石英脉	细脉、网脉	长数米至数十米， 脉宽0.2～35 cm， 个别超1.0 m	花岗斑岩、熊耳 群火山岩、高山 河群碎屑岩	黄铁矿、辉钼矿为主， 少量锡石、黄铜矿， 微量氟碳铈镧、 金红石	石英为主，其次 为钾长石、 方解石	桃园-石家湾、 二道河-碾子坪
含钼黄铁矿石 石英钾长石脉	细脉	脉宽1～5 cm，少 量分布	花岗斑岩、高山 河群碎屑岩	黄铁矿为主，少量辉 钼矿，微量氟碳铈镧、 金红石	石英、钾长石、 白云母为主，少 量萤石	石家湾、 碾子坪
含黄铁矿石石 英萤石脉	细脉	脉宽几厘米，少 量分布	高山河群碎屑岩	黄铁矿为主，少量黄 铜矿，微量辉钼矿	石英、萤石、 白云母	石家湾

表 3 黄龙铺矿田主要岩石类型微量元素浓度克拉克值表

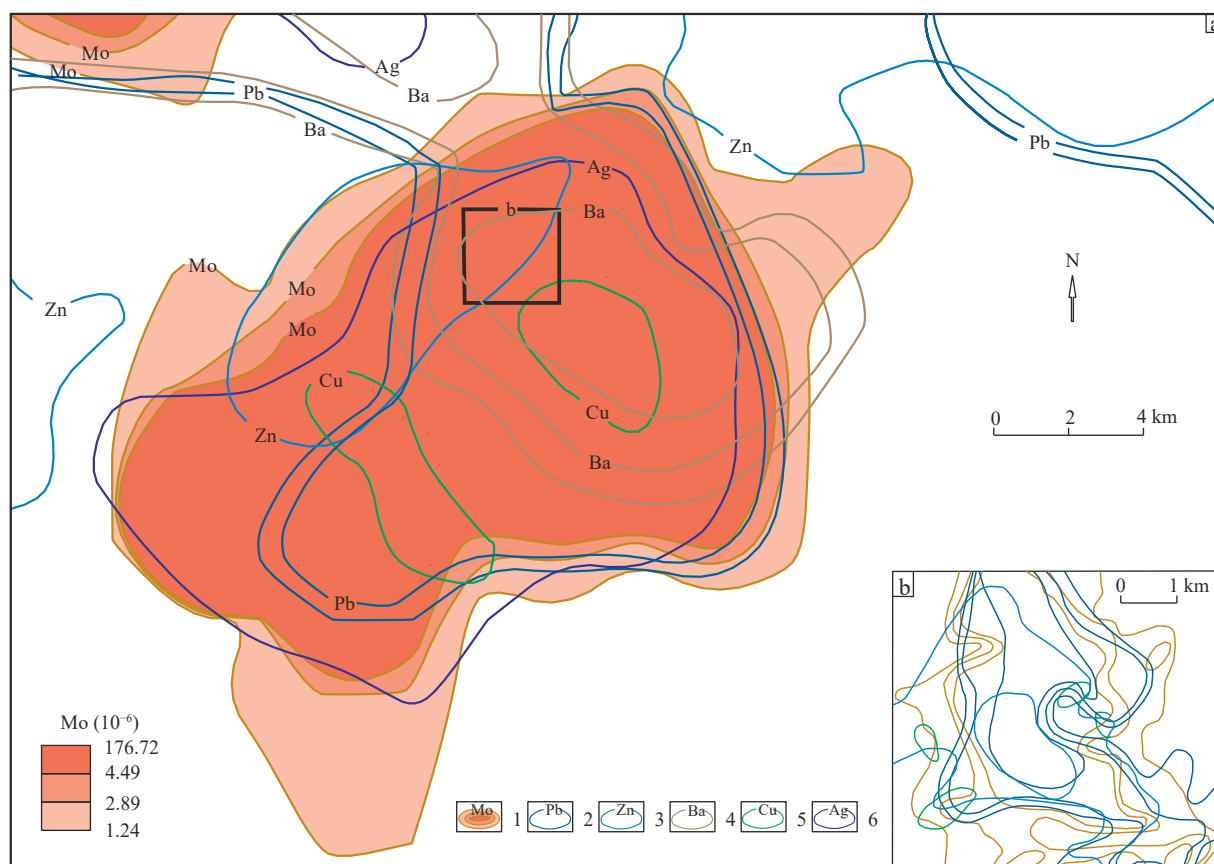
Tab. 3 Clark values of trace element concentrations of main rock types in Huanglongpu ore field

元素	地质体丰度(10 ⁻⁶)			熊耳群上亚组变细碧岩、细碧玢岩					高山河群下亚组变质石英砂岩			
	基性岩	砂岩	酸性岩	Pt ₂ ¹ X ₂ ¹	Pt ₂ ¹ X ₂ ²	Pt ₂ ¹ X ₂ ³	Pt ₂ ¹ X ₂ ⁴⁻¹	Pt ₂ ¹ X ₂ ⁴⁻²	Pt ₂ ¹ G ₁ ¹	Pt ₂ ¹ G ₁ ²⁻¹	Pt ₂ ¹ G ₁ ²⁻²	Pt ₂ ¹ G ₁ ²⁻³
Mo	1.50	0.20	1.00	92.13	52.80	66.60	176.53	34.87	401.00	151.00	81.00	32.00
Cu	87.00	0.00	20.00	1.28	1.16	0.25	1.13	0.43				
Pb	6.00	7.00	20.00	11.22	12.20	113.30	302.13	53.70	19.10	42.10	2.90	3.30
Zn	105.00	15.00	60.00	0.50	0.50	0.60	1.00	0.40	2.60	2.80	4.40	1.80
Ag	0.11	0.00	0.05	1.36	0.91	6.36	4.36	0.91				
Cr	1.50	0.20	3.00	2.90	1.00	0.80	2.10	0.90	9.50	10.00	10.50	8.60
Ni	130.00	2.00	8.00	0.30	0.25	0.30	0.20	0.30	5.60	15.70	11.30	16.00
Co	48.00	0.30	5.00	0.30	0.40	0.30	0.20	0.20	20.00	26.70	52.70	57.30
V	25.00	20.00	40.00	0.45	1.20	0.80	1.00	0.58	3.00	4.90	3.20	6.00
Ba	330.00	0.10	830.00	0.70	5.20	17.30	15.80	9.80	9 205.00	6 545.00	12 670.00	6 677.00

较好,地球化学成矿条件有利,与已成矿信息基本吻合。区内褶皱、断裂、节理、裂隙等构造及侵入岩体发育,为成矿创造了有利的条件,碳酸岩脉型钼矿床(点)均产于岩体与围岩的内、外接触带中。

2.3 地球物理场

黄龙铺矿田 1 : 50 万区域重力场表现为圈闭的重力高值区,整体呈 NEE 走向的不规则状,形成了 6 个重力高圈闭中心和 1 个重力低圈闭中心,自高值中心向



a.1 : 20 万地球化学异常; b.1 : 5 万水系沉积物异常; 1.Mo 异常及分带; 2.Pb 异常; 3.Zn 异常; 4.Ba 异常; 5.Cu 异常; 6.Ag 异常

图3 黄龙铺钼矿田地球化学异常图

Fig. 3 Geochemical anomaly map of Huanglongpu Mo ore field

WS 方向降低, 自北而南形成了重力高带、重力低带、重力高带的相间分布特征, 异常规模与矿田规模相吻合。老牛山岩体重力场异常走向 NE, 为条带状, 其布格重力异常场表现为 NE 向延伸的局部重力低异常圈闭, 有 1 个圈闭中心, 剩余重力异常场表现为 NE 向哑铃状负异常圈闭, 有两个圈闭中心。岩体东南部地层为中元古界熊耳群(Pt_2^X)中基性变质火山岩和高山河群(Pt_2^G)滨海—浅海相碎屑岩, 布格重力异常场表现为 NE 向椭圆状的局部重力高异常圈闭, 剩余重力异常场表现为 NE 向的椭圆状正异常圈闭。岩体、地层间的断裂布格重力异常场表现为相对高低异常圈闭的分界线或重力梯度带, 在剩余重力异常场表现为正负重力异常的分界线。概括而言, 区内基性与超基性岩体(脉)局部重力异常一般显示为重力高, 闪长岩类等中性岩体剩余重力异常为弱的重力高或重力低异常, 酸性花岗(斑)岩体、中酸性次火山岩一般多显示为重力低异常, 中基性变质火山岩、海相碎屑岩表现为重力高异常。

据 1 : 100 万航磁异常显示(图 4), 在基底区形成了近 EW 走向的区域磁场低值分布区, 异常强度一般

为 $-50 \sim -200$ nT, 花岗岩体处于近 NE 走向的不规则强磁异常区, 异常最大值达到 360 nT, 因岩浆源物质成分的差异性可能会导致不同地段、不同期次的岩体磁性差别较大。黄龙铺矿田 1 : 50 万 ΔT 化极磁异常总体表现为西部高、东部低, 呈椭圆状、团块状、等轴状、多峰状, 走向多变, 形成了 4 个磁力高圈闭中心和 1 个磁力低圈闭中心, 周边磁场梯度带明显。1 : 1 万磁法测量显示, 花岗岩磁法异常正负交替无规律, 以正异常为主, 火山岩中异常呈锯齿状跳跃, 梯度变化大。垂向一阶导数等值线所反映的局部异常多以串珠状出现, 走向多变, 但整体上以 NE 向为主。综合显示, 区内磁场规律不太明显, 相对来说, 超基性岩体的磁性最强, 基性岩体磁性较强, 酸性岩体磁性变化大, 基底地层磁性较弱, 变质岩会有局部高磁异常区, 断裂构造在磁场上的特征主要表现为不同磁场区的分界线、磁异常梯度带、串珠状磁异常带、线性异常带、磁异常突变带、磁异常错动带、雁行状磁异常带、放射状的异常组带等。因地区、成分磁性、蚀变种类、期次等多因素原因, 磁异常变化多样、规律也会不同,

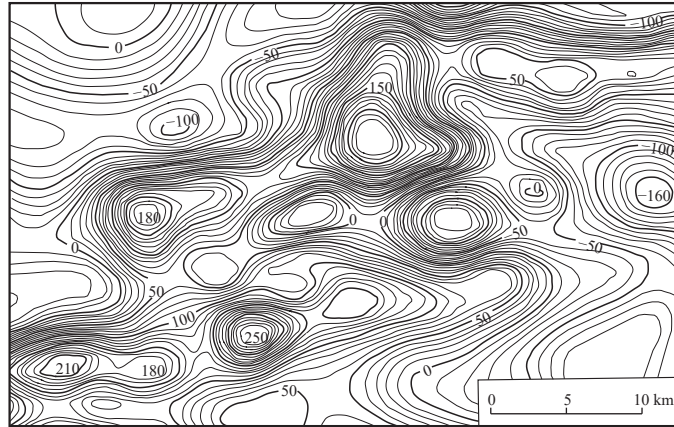


图4 黄龙铺钼矿田航磁 ΔT 等值线图(nT)

Fig. 4 Aeromagnetic ΔT contour map of Huanglongpu Mo ore field (nT)

如,蛇纹石化使超基性岩磁性增强,而碳酸岩化使其磁性减弱。

据大石沟地区 1:2 万激电测量成果,交流激电视频率异常(Ps)为 2.5% 的等值线,略呈枫叶状,Ps 值一般为 3%~4%,极大值为 6%,异常梯度宽缓,具有深源异常特征,4.5%~6.0% 地段是寻找该类型钼矿床(点)的有利地段。花岗岩地区的 Ps 值一般为 5%~13%,极大值 22.3%,比火成碳酸岩地区的 Ps 值要高,且异常连续、强大,并伴随有低电阻,表现出低电阻高极化异常的特点。

综合地球物理场特征显示,矿田西部岩体为低密、高磁,基底、盖层相对高密、弱磁,与区域上重力、磁场异常特征反映基本对应。总体而言,矿田磁异常规律性不明显,对钼成矿指导性不强,不过根据岩体、地层、断裂等磁场表现,结合重力异常、激电异常、地质条件等因素可以综合判断,在黄龙铺钼矿田中,碳酸岩脉型、石英脉型钼矿体主要形成于重力高异常、激电低异常圈闭区,斑岩型钼体则形成于重力低异常、激电高异常圈闭区。

3 典型矿床

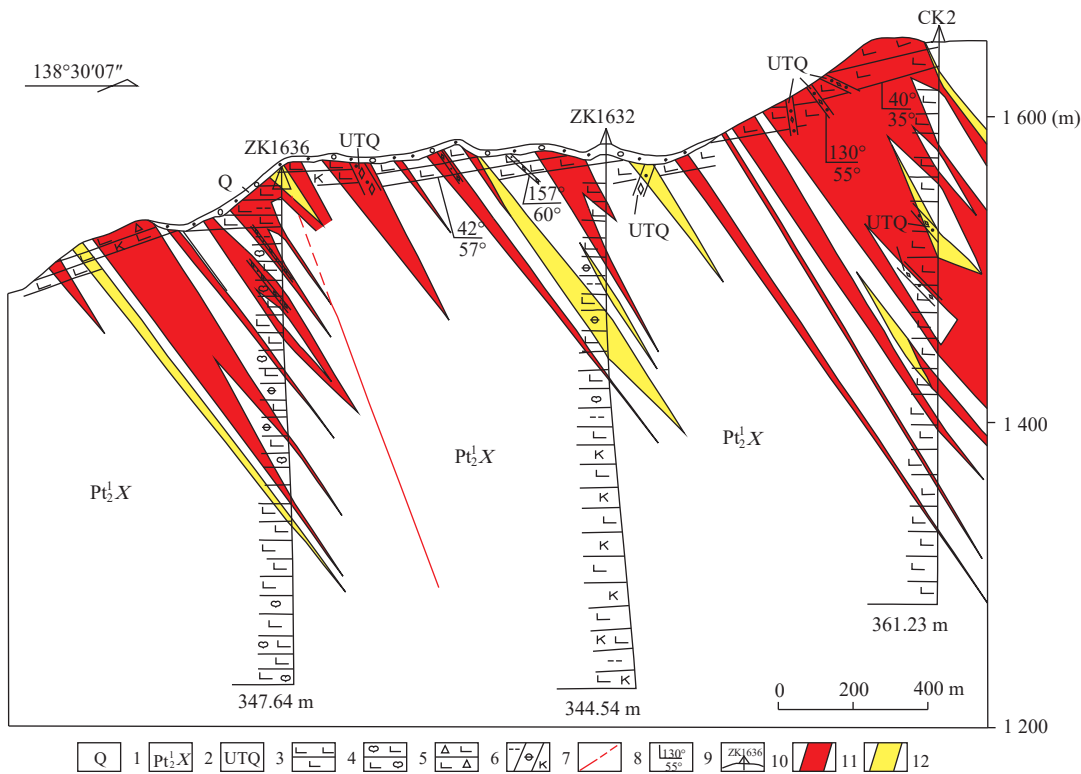
3.1 矿床地质特征

3.1.1 陕西黄龙铺大石沟钼矿床

矿床位于黄龙铺东北部,主矿种钼的矿床规模为大型,伴生矿产铌、锆(天青石)为大型,铅、银、硫铁矿(伴生硫)、稀土、碲为中型,硒为小型。赋矿围岩为中元古界长城系熊耳群上亚组($Pt_2^1X_2$)变细碧岩、细碧玢岩与高山河群下亚组($Pt_2^1G_1$)变石英砂岩、绢

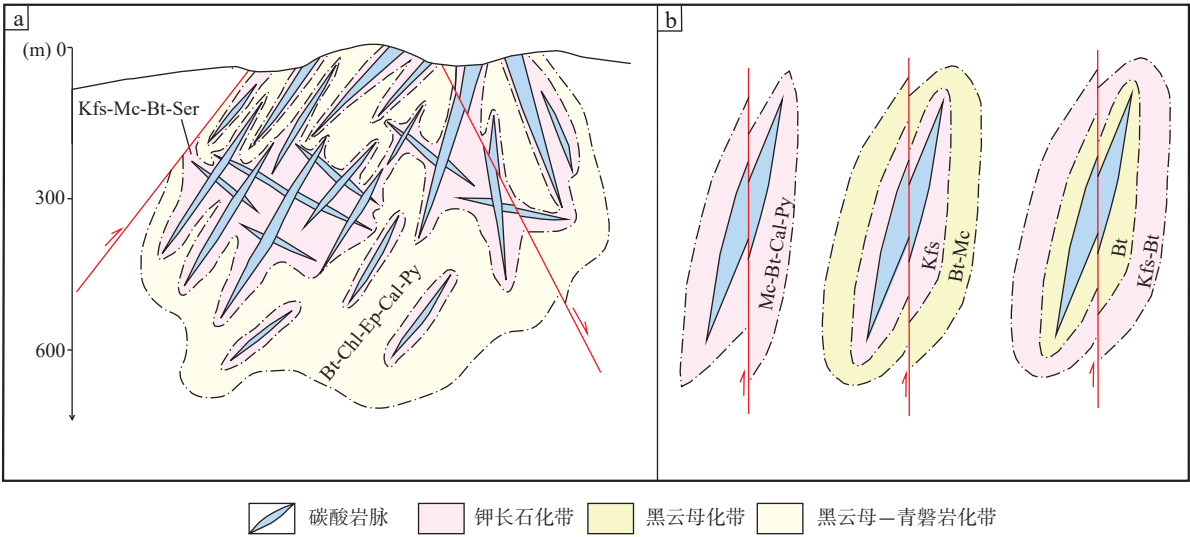
云板岩,受曹家沟-石家湾背斜、木龙沟-华阳川断裂、洛源-华阳断裂联合控制,钾长石化、黄铁矿化、黑云母化、绿泥石化、绿帘石化、青磐岩化等围岩蚀变明显,以面型蚀变为主,线型蚀变次之。钼矿带走向长度大于 1 200 m,最大宽度达 1 000 m,平均厚度约 100 m,总体形态为一厚大倾斜透镜体(图 5)。矿带内共圈定了 31 条钼矿体,矿体产于 NW 向与 NE 向断裂组成的“构造框”中,主要由含钼天青方解石英脉、重晶石方解石英脉组成,有 NE-NNE 向和 NW-NNW 向两组,在矿脉相交处易形成网脉带。其中,NE-NNE 向矿脉受张扭性断裂控制,以中-大脉为主,不规则状,分枝复合、尖灭再现现象突出;NW-NNW 向矿脉呈中-细网脉状产出,形态规则,脉壁完整,受压扭性断裂、裂隙控制明显。方解石含量占脉石矿物的 50%~70%,石英约占 28%,矿体平均品位为 Mo 0.08%,最高品位为 Mo 0.183%。钼精矿矿石品位为 Re 0.009 5%~0.064 3%,Re/Mo 值为 620×10^{-6} ~ 972×10^{-6} ,Re/Mo 平均值为 755.8×10^{-6} 。

矿石矿物主要为黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、氟碳铈镧矿、铅铀钛铁矿、钇易解石等,脉石矿物主要为方解石、石英、斜长石、钾长石、重晶石、黑云母、绿泥石、锰土等。当矿区含脉率大于 28 % 时,易形成钼矿体(带),矿体垂深超过 700 m,矿体规模达大型,可见似面型钾长石化蚀变和黑云母-青磐岩化蚀变,以钾长石-微斜长石-黑云母-绢云母(Kfs-Mc-Bt-Ser)、黑云母-绿泥石-绿帘石-方解石-黄铁矿(Bt-Chl-Ep-Cal-Py)(沈其韩,2009)等矿物组合为特征(图 6a)。当含脉率为 10 %~28 % 时,为低品位矿体、矿化体与夹石相间出现地带,钾长石化不连续,线型蚀变带明



1.第四系; 2.熊耳群; 3.碳酸岩脉; 4.细碧岩; 5.杏仁状细碧岩; 6.碎裂细碧岩; 7.黑云母化、绿帘石化、钾长石化;
8.实测、推测断层; 9.产状(上倾向, 下倾向); 10.钻孔及编号; 11.工业矿体; 12.低品位矿体

图5 大石沟钼矿床 16 号勘探线剖面图(据陕西省地质矿产局第十三地质队, 2002 修)
Fig. 5 Cross-sectional view of exploration line No. 16 of in Dashigou Molybdenum deposit



a. 面型蚀变; b. 线型蚀变
图6 大石沟钼矿床碳酸岩脉蚀变特征图

Fig. 6 Alteration characteristics of carbonate veins in Dashigou Mo Deposit

显。当含脉率小于10%时,形成单脉矿体,形态规则,矿体规模相对较小,发生钾长石化、黑云母、微斜长石等线型蚀变,蚀变宽度一般为脉宽的0.5~1.5倍,

大脉的蚀变宽度可为脉宽的2~3倍,沿脉壁两侧形成微斜长石-黑云母-方解石-黄铁矿(Mc-Bt-Cal-Py)、钾长石-黑云母-微斜长石(Kfs-Bt-Mc)、黑云母-钾

长石(Bt-Kfs)(沈其韩, 2009)等矿物组合(图 6b)。矿石具叶片-鳞片、聚片(晶)、充填-交代晶架状、他形粒状结构,脉状、细(网)脉状、浸染状、团斑状、条带状、放射状、块状构造。

3.1.2 陕西黄龙铺石家湾钼矿床

陕西黄龙铺石家湾钼矿床位于大石沟钼矿床的

西南部,有燕山期花岗斑岩型和印支期碳酸岩脉型两种矿床类型共存,均为中型,钼矿床总体规模为大型;伴生矿产中硫(硫铁矿)为中型,碲、硒为小型。碳酸岩脉型矿体隐伏于花岗斑岩型 I 号矿体南部,由 II 号矿带组成(图 7),向西延伸与桃园钼矿体相连,共圈定两条矿体。

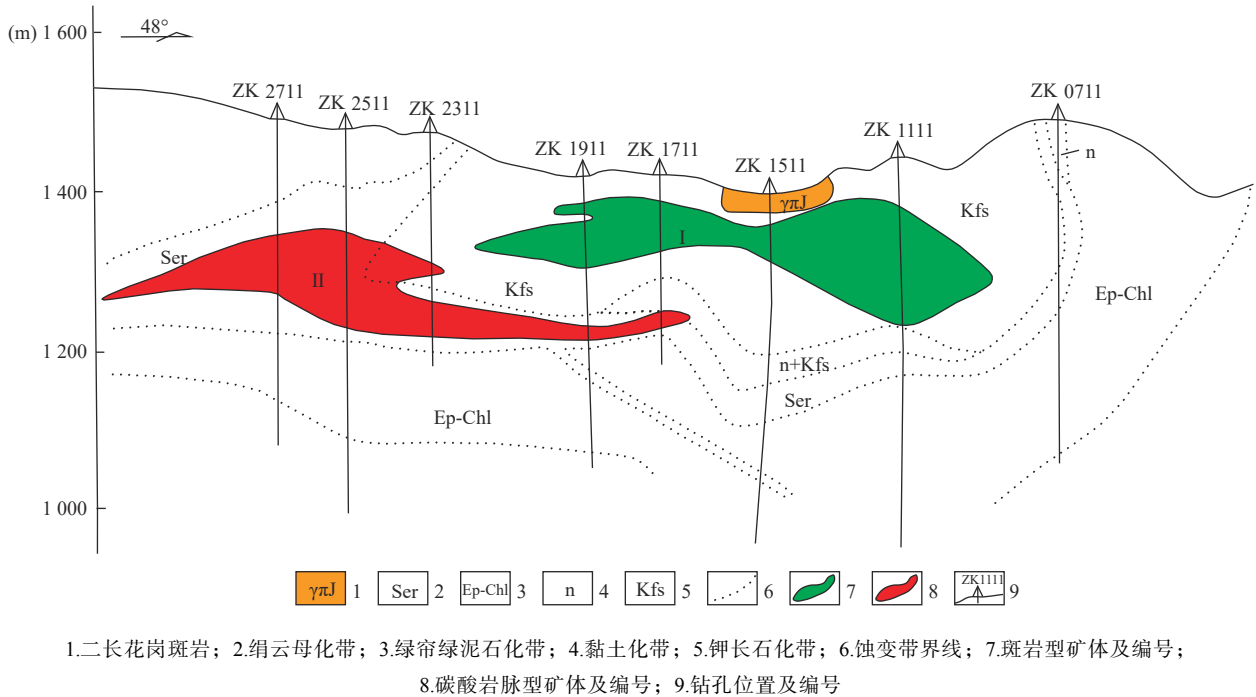


图7 石家湾矿体纵剖面及蚀变分带图(据刘云华等, 2009 修)
Fig. 7 Longitudinal profile and alteration band diagram of Shijiawan ore body

II 号钼矿带位于 FC_{10} 、 FC_1 与 FB_4 、 FB_5 组成的“构造框”内,赋存于王河沟脑-县界梁隐伏倒转背斜轴部及其两翼高山河群变石英砂岩和砂质绢云板岩中。矿体由含钼碳酸岩脉组成,单脉以中粗脉为主,呈 NE-NEE 走向,倾向 SE,倾角 $15^\circ \sim 30^\circ$,总体为向 SEE 侧伏的粗大脉状体。矿体走向最大长度为 870 m,倾向延伸达 1 000 m,厚度为 9.74~71.79 m,埋深为 42~468 m,平均品位为 Mo 0.104%,最高品位为 Mo 0.191%,呈现出北西部和中部较富、南东部和边缘较贫的变化趋势。总体来说,II 号矿带的地质特征及矿石结构、构造、矿物等与大石沟矿床基本相同。

3.2 铼、钼含量相关性

通过对黄龙铺典型矿床中辉钼矿矿石单矿物和组合样进行化学分析,铼以分散形式赋存于辉钼矿中,Re、Mo 含量具正相关性(陕西省地质矿产局第十三地质队, 1989, 2002; 刘云华等, 2009; 董王仓等, 2021)。

为进一步研究大石沟钼矿床中伴生分散元素含

量分布以及与 Re、Mo 含量的相互关系,采集矿床中未见明显矿化的碳酸岩脉、钼-铅碳酸岩矿石、尾矿砂以及围岩等 79 个样品进行分析,结果(表 4)表明,Re、Se、Cd、Te 等元素富集。在不同岩性或尾矿砂中的 Re、Mo 含量变化大,极值幅度分别为 402 倍、349 倍,但是,Re/Mo 值基本稳定在 $28.9 \times 10^{-6} \sim 669.2 \times 10^{-6}$ 。从现有数据上看,Re、Mo 含量在氧化碳酸岩中表现出相关密切程度较低,在其他类矿石、围岩及尾矿渣中表现出较高的相关程度(图 8)。

因此,在黄龙铺典型矿床中,Re、Mo 含量总体表现为正相关,Re 的含量随 Mo 含量的增加而上升。

3.3 成矿流体

对黄龙铺大石沟地区 114 个样品均一化温度进行测定(表 5),结果为 $152 \sim 352^\circ\text{C}$,59 个石英样品的爆裂温度为 $211 \sim 443^\circ\text{C}$;19 个方解石样品的爆裂温度为 $263 \sim 350^\circ\text{C}$;集中爆裂温度为 $263 \sim 315^\circ\text{C}$;方铅矿-钼天青石矿物的同位素平衡温度为 $338 \sim 427^\circ\text{C}$ 。

表 4 大石沟钼矿床分散元素含量表(10^{-6})Tab. 4 Dispersed element contents (10^{-6}) in Dashigou Mo deposit

岩 性	Re	Se	Cd	Te	Ga	Ge	In	Tl	Mo [*]	Re/Mo
碳酸岩脉	0.046	2.73	0.914	0.878	5.029	0.818	0.07	0.304	0.042	109.3
氧化碳酸岩脉	0.07	21.22	8.058	4.738	17.09	0.753	0.43	0.53	0.242	28.9
含钼碳酸岩脉	1.205	16.03	7.561	2.858	9.426	0.656	0.291	0.614	0.349	345.2
含铅碳酸岩脉	0.87	30.4	22.5	21.5	1.4	0.24	0.16	0.84	0.13	669.2
石英脉	0.016	0.07	0.03	0.022	1.14	0.8	0.01	0.12	0.004	363.6
尾矿砂	0.062	0.814	0.561	0.214	10.28	0.935	0.045	0.686	0.02	307.2
砂质绢云板岩	0.03	0.295	0.245	0.21	12.8	1.135	0.1	1.065	0.008	384.4
细碧岩	0.01	0.713	1.629	0.12	23.6	1.543	0.077	1.916	0.013	81.2
变石英砂岩	0.013	0.068	0.035	0.05	3.76	0.8	0.011	0.31	0.006	231.3
凝灰质板岩	0.003	0.087	0.09	0.038	17.6	1.337	0.062	0.947	0.001	485.7

注: 1. 测试单位为有色金属西北矿产地地质测试中心; 2. *含量为%。

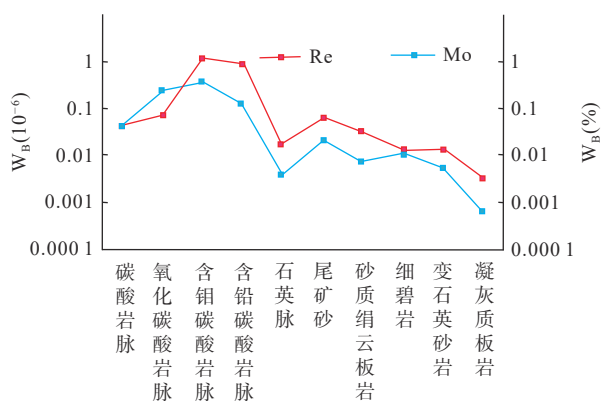


图8 大石沟钼矿床 Re、Mo 含量相关程度图

Fig. 8 Re and Mo correlation degree map of Dashigou Molybdenum deposit

对两个方解石样含液 CO_2 多相包裹体用冷冻法进行测定, 并利用 P-L-F-Collins 图解法求出含盐度分别为 6.0 (NaCl)% 和 7.4 (NaCl)%, 区内液体包裹体和气-液包裹体的含盐度为 7.4 (NaCl)%~15.7 (NaCl)% (表 5), 可见, 含液 CO_2 多相包裹体比液体和气-液包裹体的含盐度低。碳酸岩脉中石英 $\delta^{18}\text{O}$ 为 +8.05‰~+12.0‰, 水的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 +1.2‰~+6.5‰, 方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 +7.95‰~+9.5‰, 说明石英与方解石的 O 同位素组成基本相同, 岩浆水来源具重熔地壳物质成分的混合岩浆水特征。此外, 石英包裹体水的 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -59‰~-98‰, 也说明成矿流体中的水为岩浆水与大气降水的混合水。另外, 对黄龙铺北部的华阳川含液 CO_2 多相包裹体用 LinkamTHMS600 型冷-热台进行测定, 1 个方解石样中流体含盐度为 4.07 (NaCl)%~

9.59 (NaCl)%, 4 个石英样中流体含盐度为 0.43 (NaCl)%~11.05 (NaCl)% (王林均等, 2011), 说明华阳川与大石沟地区的碳酸岩流体盐度值基本相同, 推测两个地区的碳酸岩流体同源。

总体说明, 黄龙铺典型矿床的成矿期岩浆属中高温、中低盐度岩浆热流体, 成矿流体主要为硅酸盐-碳酸盐-硫酸盐体系的岩浆水, 其次为大气降水。

3.4 成矿物质来源

大石沟碳酸岩脉的方解石 ΣREE 为 $2\,564.29 \times 10^{-6}$, $\Sigma(\text{La-Eu})$ 为 $1\,908.3 \times 10^{-6}$, $\Sigma(\text{Gd-Lu, Y})$ 为 656×10^{-6} , $\Sigma(\text{La-Eu})/\Sigma(\text{Gd-Lu, Y})$ 为 2.909, δEu 为 0.93, 为近平坦型, 反映在稀土组成形式上为右倾的平滑曲线, 具碳酸岩方解石特征, 说明岩脉中的方解石为深源流体结晶产物。方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值处于标准正常(未去气和未受污染)地幔值(-5.0‰~-8.0‰), 方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 值高出标准正常(未去气和未受污染)地幔值(5.0‰~8.0‰) (Ray et al., 1999; 黄典豪等, 2009), 说明 C 同位素组成比较均一, 碳酸岩脉是深成条件下结晶作用的结果, 在形成过程中保持着地幔源区的 C 同位素特征, 可能有地下水参与。硫化矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -10.54‰~-6.69‰, 以富轻 S 同位素为特征; 硫酸盐矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 为 5.86‰~7.35‰, 则相对富重 S 同位素; 矿区全硫值 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 为 +1.0‰, 与地幔来源的 S 同位素组成(+1.0‰) (曹晶, 2018) 一致, 显示钼矿床成矿系统具有地幔来源硫的特征。采用 H-H 法计算 Pb 同位素模式年龄为 584~728 Ma, 可以推断矿石中铅来源于地幔或下地壳的富铀钍基底, 幔源岩浆可能对地壳物质进行了

表 5 典型矿床中相关参数特征表

Tab. 5 Table of eigenvalues for relevant parameters in typical deposits

类别	参数	大石沟矿床		石家湾矿床(Ⅱ号)	
		特征值	数据来源	特征值	数据来源
主要脉石矿物	方解石(%)	50~70			
	石英(%)	28			
	钾长石(%)	5			
包裹体 温度	均一化温度(℃)	152~352			
	石英样爆裂温度(℃)	211~443		251~316	董王仓等, 2021
	方解石样爆裂温度(℃)	263~350			
	方铅矿-钼天青石同位素 平衡温度(℃)	338~427			
包裹体 含盐度	CO ₂ 多相包裹体(NaCl)%	6.0~7.4	本次研究及 董王仓等, 2021		
	(气)液包裹体(NaCl)%	7.4~15.7			
矿石中同位素 特征	石英中δ ¹⁸ O值(‰)	+8.05~+12.0			
	方解石中δ ¹⁸ O值(‰)	+7.95~+9.5		+8.69~+9.48	许成等, 2009
	石英包裹体水 δD _{H₂O} 值(‰)	-59~-98			
	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb、 ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb、 ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	17.399、15.398、37.452			
	辉钼矿、黄铁矿、 方铅矿δ ³⁴ S(‰)	-8.3、-6.69、-10.54			
	钼天青石、硬石膏δ ³⁴ S(‰)	+5.86、+7.35			
	方解石δ ¹³ C(‰)	-6.7~-7.00		-6.75~-6.92	许成等, 2009
	全硫值δ ³⁴ S _{ΣS} (‰)	+1.0			
	全碳值δ ¹³ C _{ΣC} (‰)	-5.0			
	Σ(La-Eu)、 Σ(Gd-Lu、Y)(10 ⁻⁶)	1 908.3、656.0	陕西省地质矿产局 第十三地质队, 2002	907.2~1 546.4、 493.0~1 188.5	许成等, 2009;
碳酸岩脉中方 解石稀土元素 特征	Σ(La-Eu)/Σ(Gd-Lu、Y)	2.909		0.76~2.43	黄典豪等, 2009
	Eu异常δ(Eu)	0.93		0.86	

重熔。

石家湾矿床(Ⅱ号)的碳同位素组成比较均一,方解石δ¹⁸O值高出标准正常地幔值(表5)。REE特征与大石沟钼矿床相似,表现为相对富LREE,亏HREE,REE配分模式为一组向右倾的较平坦曲线(许成等, 2009),与大石沟含矿碳酸岩脉(黄典豪等, 1985)和国外所报道碳酸盐岩方解石REE球粒陨石标准化型式(Maravic et al., 1980)也基本相一致。从现有参数值来看(表5),石家湾矿床(Ⅱ号)与大石沟钼矿床的地球化学条件相同。

有学者认为,辉钼矿中的Re含量可作为成矿物质来源的示踪剂(Mao et al., 1999; 焦建刚等, 2009),从地幔→壳幔混源→地壳,矿石中的含铼量呈10倍级下降,即Re含量依次为n×10⁻⁴, n×10⁻⁵, n×10⁻⁶(焦建刚等, 2009),铼倾向富集于地幔或基性、超基性岩石中(Stein et al., 2001; 曹晶, 2018)。在黄龙铺矿田内,大

石沟碳酸岩脉型辉钼矿中Re/Mo平均值为755.8×10⁻⁶,平均品位为Mo 0.08%,石家湾斑岩型辉钼矿中Re/Mo平均值为23.5×10⁻⁶,平均品位为Mo 0.07%,金堆城斑岩型辉钼矿中Re/Mo平均值为42.6×10⁻⁶,平均品位为Mo 0.099%(陕西省地质矿产局第十三大队, 1989; 陕西省自然资源厅, 2019; 段湘益等, 2021)。可以看出,碳酸岩脉型辉钼矿床中铼的含量高出斑岩型钼矿床约10~40倍,这些特征较好地反映了地幔、壳幔混源中铼的变化情况。

综合分析可知,黄龙铺典型碳酸岩脉型钼矿床的成矿物质主要来源于幔源火成碳酸岩,很可能有少量壳源物质参加。

3.5 成矿时代

根据典型矿床中岩体(脉)的穿切关系,华力西—印支期辉绿岩脉被正长斑岩切穿,含矿碳酸岩脉穿切正长斑岩,燕山期中酸性岩体穿切含矿碳酸岩脉。初

步推断, 碳酸岩脉应早于燕山期中酸性岩浆岩形成, 其形成主要与印支期南北陆块强烈挤压碰撞及沿基底断裂带分布的基性-碱性岩浆活动有关, 与燕山期中酸性岩浆活动关系不大。

20世纪80年代末, 陕西省地质矿产局西安实验室、北京铀矿地研所、西北地勘局科研所等对碳酸岩脉中的钾长石、铅铀钨铁矿、辉钼矿等进行了不同方法的同位素年龄测定, 求得碳酸岩脉的同位素年龄值为324~204 Ma。对黄龙铺辉钼矿精矿中铼、钨分析值进行了换算, 求得Re-Os同位素年龄值为287~204 Ma(陕西省地质矿产局第十三地质队, 1989)。

据碳酸岩脉矿石中辉钼矿Re-Os同位素年龄测定, 大石沟矿区为(221.5±0.3) Ma(Stein et al., 1997)、(201.53±0.68) Ma(Mao et al., 2008; 陈毓川等, 2014), 石家湾矿区为221 Ma(黄典豪等, 1994, 2009)、222 Ma(陈毓川等, 2014)。黄龙铺矿区含钼石英方解石脉中铅铀钨铁矿U-Pb年龄测定为206 Ma(黄典豪等, 1994; 陈毓川等, 2014)。

综合判断得知, 碳酸岩脉型典型钼矿床的成矿时代为印支晚期。

4 成矿规律与成矿模式

4.1 成矿规律

华北板块与扬子板块多期次碰撞导致板块洋-陆消减俯冲造山至陆-陆俯冲碰撞造山复合及克拉通地块间大陆裂谷带形成, 在秦岭地区, 印支期秦岭海盆闭合后的伸展环境, 为碳酸岩脉型钼成矿创造了有利的区域成矿条件。矿田成矿主要与印支期岩浆活动关系密切, 构造为成矿提供了有利的赋矿空间, 围岩提供了少量的成矿物质, 总体形成了NW向垣头-碾子坪钼、铅、铜、铀、三稀(稀有、稀土、稀散)矿(化)带与NE向西坪-秦岭沟钼、铜矿(化)带, 在同一条矿(化)带内往往都是多组方向的矿脉同时出现, 在相交处则构成网脉矿(化)带。钼矿化主要与天青方解石英脉、重晶石英方解石脉等有关, 以中-粗大脉含钼性好, 细脉含钼性较差, 在多组节理裂隙纵横交错地段, 碳酸岩脉越密集, 易形成网脉状大型钼矿体, 而在单组节理裂隙地段, 形成小规模单脉状矿体。矿田中碳酸岩脉型钼矿体多呈中-粗大脉体产出, 与斑岩型钼矿床中围绕岩体分布的含钼石英细脉及细网脉截然不同。由近SN向、EW向基底断裂产生的近

NW向、NNW向、NE向、NEE向次级断裂, 为钼成矿提供了良好的导矿通道, 在两组断裂交汇处形成的多个“构造框”控制着各矿段的分布范围, 次生节理、裂隙为主要容矿构造。围岩蚀变深度大, 在碳酸岩脉汇集地段, 由脉壁向外依次发生似面型钾长石化和黑云母-青磐岩化蚀变, 形成网脉状大规模矿体; 在单脉状碳酸岩脉两侧主要发生钾长石化和黑云母化等线型蚀变, 矿体规模较小。

矿床成矿时代为印支晚期(晚三叠世)(约225~207 Ma), 涉及两个Ⅲ级成矿区带和两个Ⅳ级成矿区带, 即华北陆块南缘(小秦岭)Fe-Cu-Au-Mo-W-Pb-Zn-铝土矿-硫铁矿-萤石-煤成矿带(Ⅲ-63)金堆城-洛南冲褶带Mo-Fe-Cu-Pb-黄铁矿成矿亚带(Ⅳ-63-2)和华北陆块南缘(小秦岭)Fe-Cu-Au-Mo-W-Pb-Zn-铝土矿-硫铁矿-萤石-煤成矿带(Ⅲ-63)太华台隆Au-U-Pb-Fe-石墨蛭石成矿亚带(Ⅳ-63-1)。成矿温度211~443℃, 成矿流体属硅酸盐-碳酸盐-硫酸盐体系。矿田大致经历了硅酸盐-硫化物、碳酸岩-硫化物、硫酸岩-硫化物等3个主要成矿期, 在硅酸盐-硫化物期, 早期处于氧逸度(f_{O_2})较高的酸性环境, 形成石英、微斜长石、磁铁矿、赤铁矿、榍石和铅铀钨铁矿, 在石英-硫化物阶段则形成黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿及少量方解石、辉钼矿; 碳酸盐-硫化物期, 早期为强碱性环境, 方解石大量生成, 并对石英进行强烈交代改造, 部分LREE、Sr、Ba进入方解石结晶格架, 钼天青石、氟碳铈镧矿、独居石形成, 随着流体温度与硫逸度(f_{S_2})的增高, 流体呈弱酸或弱碱性, 黄铁矿、辉钼矿、方铅矿等硫化矿物富集; 硫酸岩-硫化物期, 流体温度与 f_{S_2} 降低, 方解石生成减慢, 辉钼矿、方铅矿等矿化减弱, 硬石膏、氟石矿物开始出现, 标志着内生矿化作用结束。

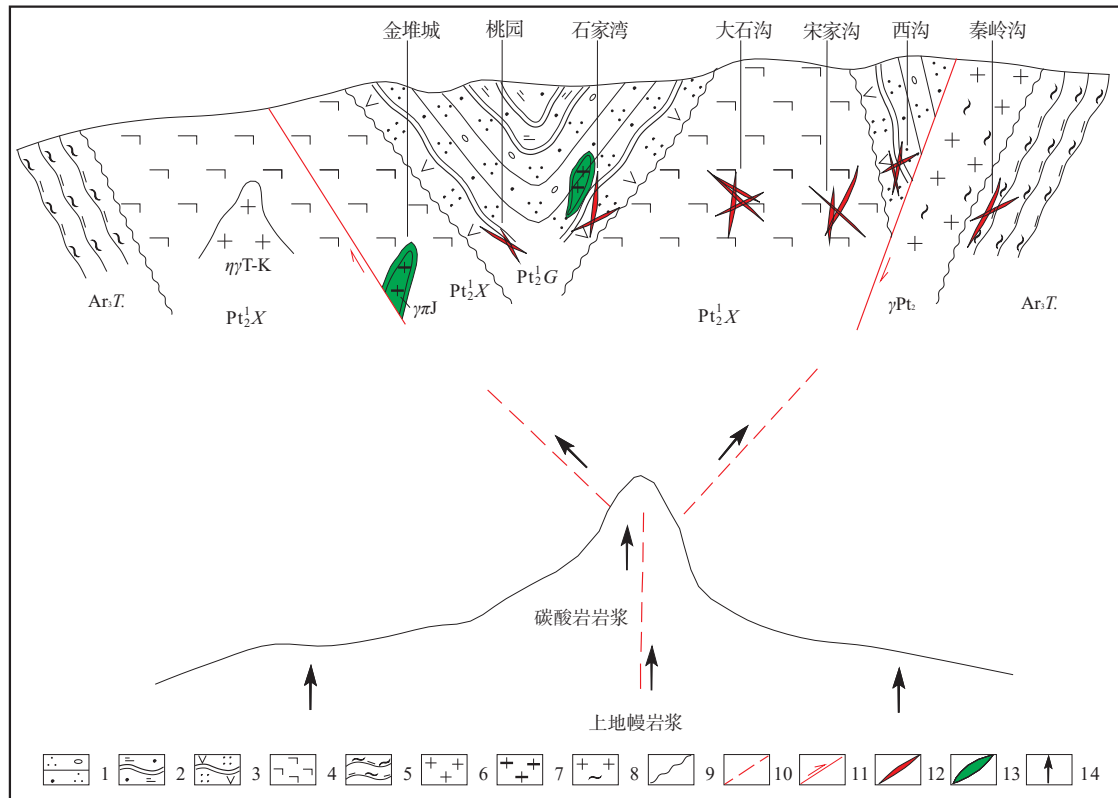
从地域上看, 在垣头-西沟、黄龙铺-秦岭沟一带, NE向含钼碳酸岩脉以中大脉为主, 分枝复合明显, 易形成网脉, 而NW向含钼碳酸岩脉则以中细脉为主, 脉壁完整。在西坪-石家湾、二道河-碾子沟地段, 含钼碳酸岩脉以NW向为主, NE向与NEE向次之, 呈中细脉状, 个别具大脉状; 表明在钼成矿期内, NW向断层更多体现出压扭性的特点, NE向断层呈现张扭性特征。从地层上看, 熊耳群($Pt_2^1X_2$)变细碧岩中以大脉为主, 中细脉次之, 高山河群($Pt_2^1G_1$)变石英砂岩、板岩中矿脉则相对减少, 一般呈中细脉产出。总体而言, 区内含脉率一般为10%~40%, 在NW向与NE向

两条矿化带的重叠区域,如大石沟、宋家沟、秦岭沟等地区的个别地段,含脉率高达80%。脉体越密集地段钼矿化越好,易形成几十米宽的大矿体,连续性好,品位变化较稳定。铼以分散形式赋存于辉钼矿中,在大石沟一带成矿最好;稀土矿化比较普遍,以小夫峪、垣头-宋家沟、驾鹿等地段最好,铀钍铅矿化主要集中在华阳川一带。

4.2 成矿模式

印支期,随着华北与扬子两大板块碰撞造山结束而转入陆内伸展期,在深层近SN向压应力作用下,黄龙铺矿田发生塑性、脆性变形,在地表浅层形成近EW向一级褶皱、近EW向基底断层及一系列NE向、NW向次级断层,压扭、张扭、错动、推移等现象明显。

富含Mo、Pb、REE等成分的硅酸盐-碳酸盐-硫酸盐溶液从地幔深处沿SN向、EW向基底断裂向上运移,并进入到其次生断裂、裂隙中形成NE-NNE向和NW-NNW向碳酸岩脉带,在次生节理、裂隙发育地段或构造结部位形成规模不等的碳酸岩脉密集区。岩浆热流体在运移过程中,同时不断萃取、重熔深部基底岩层及围岩中的成矿物质。当含矿热流体扩散运移到节理、裂隙或构造结部位时,由于物理化学条件(温度、压力、催化剂、氧逸度、硫逸度、酸碱度、梯度等)的改变,Mo、Pb、Re、Sr、REE等元素在太华岩群(Ar_3T)、熊耳群(Pt_2X_2)、高山河群(Pt_2G_1)等有利层位和构造空间结晶、沉淀、富集,形成碳酸岩脉型铼钼多金属矿床(图9)。



1.高山河群(Pt_2G)含砾石英砂岩; 2.高山河群(Pt_2G)砂质绢云板岩; 3.高山河群(Pt_2G)凝灰质板岩; 4.熊耳群(Pt_2X)细碧岩; 5.太华岩群(Ar_3T)片麻混合岩; 6.二长花岗岩; 7.花岗斑岩; 8.片麻状花岗岩; 9.不整合地质界线; 10.推测基底断裂; 11.断层、裂隙; 12.碳酸岩脉型钼矿体; 13.斑岩型钼矿体; 14.岩浆/热液流动方向

图9 黄龙铺钼矿田区域成矿模式图

Fig. 9 Regional mineralization pattern diagram of Huanglongpu molybdenum field

5 找矿预测

从广度上看,东秦岭陕西段区域钼地球化学场特征表现为高值异常,已发现矿床(点)都处于异常浓集

中心部位。与成矿有关的中基性变质火山岩、海相碎屑岩的布格重力异常场表现为重力高异常圈闭,剩余重力异常场为正异常圈闭,碳酸岩脉型钼矿体主要形成于重力高异常、激电低异常圈闭区。最近发现的碳酸岩脉型钼床(点)有向东部延伸的趋势,除熊耳群上

部与高山河群下部的接触区域外,在构造带附近的太华岩群片麻岩、混合岩中也发现了好的矿化线索,如秦岭沟、黄水庵等钼矿床。因此,黄龙铺矿田华阳川-太子坪断层(FB₉)两侧仍要重点关注,华阳川-太子坪将为钼(铅)多金属主要矿化带,综合最新钼找矿成果,在断层东北侧岩体下部的太华岩群中,很有可能还有好的碳酸岩脉型钼矿化线索,存在找到大中型钼矿床的可能;而且,在找矿过程中,应注重对隐伏断层的研究。在矿田东北部向河南延伸方向,区域成矿特征也比较明显,太华岩群与熊耳群或高山河群呈次级断层或不整合地层接触,与黄水庵钼矿地质特征有些相似,为有利的找矿预测区。另外,在矿田西南部洛南县西北部,找矿条件也比较优越,尽管目前发现的碳酸岩脉型钼矿床(点)均分布于卢氏-马超营断裂(F₂)以北,但是,黄龙铺矿田钼成矿有向F₂靠近的趋势,熊耳群、高山河群和太华岩群等有利成矿地层被F₂切错后,并不能排除在断层南侧有利部位赋矿的可能。

从深度上看,其一,在黄龙铺矿田内,似面型蚀变深度为600 m以上,目前碳酸岩脉型钼矿体的最大控制深度为700 m,从西往东,从南向北,矿体延深加大,倾角一般大于45°,钼矿体有向深部延伸的可能,或者矿体下部仍有含矿碳酸岩脉。据最新科学钻探数据(陈建立等, 2023),在东秦岭-大别成矿带深部老湾二长花岗岩体1 717.47~3 006.42 m处,发现了5层钼矿(化)体,两层钨矿化体。横向对比分析,黄龙铺矿田地表千米以下极有可能还有钼矿(化)体。其二,在矿田的西北部出露印支晚期—燕山期多次侵入岩体,其岩枝穿切含矿碳酸岩脉,说明岩体晚于碳酸岩形成,与碳酸岩脉型钼成矿没有直接关系。另外,该区有太华岩群、熊耳群零星出露。所以,在岩体下部应该存在太华岩群与熊耳群,二者可能是断层接触,也可能呈不整合界线接触。在后续工作中,很有必要对岩体底界进行确定,研究分析岩体下部有利地层的含矿性,寻找隐伏断层,探索已知矿体在岩体下部的延伸情况,进而发现新的矿层。其三,在矿田东北部出露中元古界片麻状花岗岩,现有资料显示碳酸岩脉型钼矿床(点)的形成与岩体没有直接关系,已知钼矿床(点)形成于岩体下部的太古界太华岩群中,找矿预测工作重点应该是对岩体下部的太华岩群及隐伏断层进行研究,探索成矿带中深部的成矿性。

从时间维度上看,碳酸岩脉型钼成矿与区内岩浆活动有关,碳酸岩岩浆形成于印支期,中生代岩体形

成于印支晚期—燕山期,结合岩体与碳酸岩脉的穿插关系,正长斑岩被含矿碳酸岩脉穿切,含矿碳酸岩脉被燕山期岩体穿切。初步判断,中生代岩浆活动与碳酸岩脉型钼成矿没有直接关系。另据现有资料显示,在中元古代岩体内暂未发现碳酸岩脉型钼矿体,说明该期岩浆活动可能对碳酸岩脉型钼成矿意义不大。当然,随着工作的不断深入和研究程度的不断提高,不排除碳酸岩岩浆沿岩体内的节理、裂隙上升,在中元古界岩体内有利空间进行成矿的可能。

从空间维度上看,根据地壳与岩石圈的厚度变化、重力梯度带及地幔密度分布特征显示,陕西深部地质呈近SN向展布,而地表主干构造线走向为近EW向延伸,反映陕西地表—地幔结构具有流变学分层的“立交桥”式壳幔三维结构,黄龙铺矿田内碳酸岩脉型钼矿体主要受NW向、NE向次级断裂组成的“构造框”控制。NE向含矿碳酸岩脉以中大脉为主,分枝复合明显,易形成网脉,而NW向含矿碳酸岩脉则以中细脉为主,个别具大脉状,多方向岩(矿)脉往往会相互交织、穿插,易形成富大矿体。因此,对NW向、NNW向、NE向、NEE向等多组矿脉的浅、深部特征开展多维度分析、判断,还原“立交桥”特征,将显得尤其重要,这样既能有效控制矿体分布范围,还能扩大矿床规模。

总之,根据区内碳酸岩浆的发育状况及碳酸岩脉型钼矿床的形成特征,通过从广度、深度、维度上对黄龙铺矿田进行找矿预测认为,在地表千米以下,极有可能存在多层钼矿(化)体;黄龙铺矿田东北端向河南延伸方向,以及卢氏-马超营断裂西南端的两侧,区域成矿条件比较优越,找矿前景良好,新发现矿床(点)的可能性较大;在华阳川-太子坪矿化带及矿田西北部的岩体下部,有发现大中型钼矿床的可能。

6 讨论

东秦岭-大别钼成矿带为中国重要钼成矿带之一,研究程度比较高。但一直以来,对碳酸岩成因颇有争议。有研究认为,黄龙铺钼(铅)矿床为碳酸盐型(毛景文等, 1999)、热液碳酸盐脉型(李永峰等, 2005)或脉型(Mao et al., 2008)。前人研究成果显示(黄典豪等, 1984, 1985, 1994, 2009, 2015),黄龙铺、华阳川、黄水庵等钼矿床中的碳酸岩脉方解石均以 Σ REE含量较高且富含LREE为特征,方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值均

落原始火成碳酸岩的 C、O 同位素值范围内 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 分别为 $-4\text{‰} \sim -8\text{‰}$ 、 $6\text{‰} \sim 10\text{‰}$) (Keller et al., 1995), 说明含钼碳酸岩脉为火成侵入岩, 而不是沉积岩。许成等 (2009) 认为, 黄龙铺碳酸岩富含 Sr、Ba、REE 等不相容元素, 具“初始火成碳酸岩”的 C、O 同位素组成, 特别是 Sr 含量大于 $5\,000 \times 10^{-6}$, 是所有火成碳酸岩独有的特征, 表明该岩石为火成起源, 明显区别于沉积碳酸盐岩。王林均等 (2011) 认为, 在黄龙铺钼矿田北部华阳川地区, 碳酸岩的 $\text{CaO}/(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})$ 值为 $95.8\% \sim 98.5\%$, 为方解石碳酸岩, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 分别为 $-6.6\text{‰} \sim -7.0\text{‰}$ 、 $6.4\text{‰} \sim 7.4\text{‰}$, 也均落在“初始火成碳酸岩”范围。也有研究认为, 碳酸岩是指岩石中方解石、白云石、菱铁矿等碳酸盐矿物的体积大于 50%, 二氧化硅重量小于 20% 的火成岩 (Le Maitre, 2002; 许成等, 2017; 曹晶, 2018)。而黄龙铺矿区碳酸岩脉中方解石含量为 50%~70%, 石英为 30%~50%, 微斜长石 $\leq 5\%$ (黄典豪等, 2009)。黄龙铺矿田碳酸岩脉中方解石为 50%~80%, 石英为 10%~28%, 钾长石含量约为 5%。东秦岭东部黄水庵含钼碳酸岩脉的方解石 $\geq 80\%$ 、石英 $\leq 15\%$ 、钾长石含量 $\pm 5\%$ (曹晶, 2018; 付鑫宁等, 2021)。从岩脉中的方解石、石英含量来看, 东秦岭钼成矿带东段与西段的碳酸岩成分基本相同, 符合碳酸岩的成分特征。通过综合分析, 笔者认为, 黄龙铺矿田、华阳川、黄水庵等地的碳酸岩脉性质基本相同, 具初始火成碳酸岩特征, 表明碳酸岩形成过程中同位素组成未发生明显改变, 碳酸岩属火成侵入岩, 非沉积型碳酸盐或碳酸盐岩。

碳酸岩是地表出露相对较少的幔源岩石之一, 因富含稀土元素和其他不相容元素, 如 Sr、Ba 能缓冲地壳物质的混染, 可以很好地保持地幔源区的同位素特征 (Bell et al., 1987a、1987b), 是研究地幔构造背景和地幔交代作用的“探针岩石” (许成等, 2009)。Sr-Nd 同位素作为成岩成矿过程中的重要指标, 在矿床地质研究中常利用其来示踪成矿物质来源 (DePaolo et al., 1979)。小秦岭早古生代碳酸岩中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 ($0.705\,0 \sim 0.705\,5$)、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值 ($0.705\,0 \sim 0.705\,5$) 均紧靠近 EMI 地幔端元 (王林均等, 2012), 说明早古生代小秦岭地区已具 EMI 富集地幔特征。黄龙铺北部华阳川碳酸岩中方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值接近地幔组成 EMI, 其母体应该来源于富集地幔端元 (Xu et al., 2007)。黄典豪先生根据黄龙铺、黄水庵碳酸岩中的 Sr、Nd、

Pb 同位素比值进行对比研究 (黄典豪等, 2009), 表明这两个地区的碳酸岩均可能来源于富集地幔的 EMI 源区。另据黄水庵地区最新研究成果显示, Sr-Nd 同位素组成介于 EMI 与下地壳之间并靠近 EMI 端元 (付鑫宁等, 2021), 与前述研究结论相一致。也有学者认为, 根据黄铁矿 He-Ar 同位素特征, 黄水庵碳酸岩岩浆具壳幔混源特征 (Tang et al., 2021)。因此, 笔者认为东秦岭成矿带中的碳酸岩主要来源于富集地幔的 EMI 源区, 其从地幔向地表运移过程中, 可能有少量地壳物质的熔融混染。

7 结论

(1) 黄龙铺矿田碳酸岩脉型钼矿床的赋矿围岩为太古界太华岩群 (Ar_3T) 片麻岩、中元古界熊耳群 (Pt_2X) 中基性火山岩、中元古界高山河群 (Pt_2G) 火山碎屑岩, 在熊耳群上亚组 (Pt_2X_2) 细碧岩与高山河群下亚组 (Pt_2G_1) 变石英砂岩的接触部位成矿最为有利。钼矿体主要产于 NE 向、NW 向等多组断裂组成的“构造框”内, 矿脉以含天青石或重晶石石英方解石脉为主, 成矿流体为中高温硅酸盐-碳酸盐-硫酸盐体系, 成矿物质主要来源于幔源火成碳酸岩岩浆, 属印支晚期成矿。

(2) 黄龙铺矿田东北端向河南延伸方向及西南端卢氏-马超营断裂两侧, 区域成矿条件均比较优越, 预测有好的找矿前景。在华阳川-太子坪矿化带及矿田西北部的岩体下部存在大中型钼矿的可能性, 地表千米以下极有可能赋存多层钼矿(化)体。另外, 黄龙铺矿田钼、铼、锱、稀土等多金属战略性矿产资源丰富, 矿床规模较大, 成矿条件优越, 找矿前景乐观, 具备持续为国家提供战略性矿产资源的能力。

致谢: 在成文过程中得到了董王仓正高级工程师、王满仓正高级工程师、张振凯高级工程师的大力帮助, 在此一并致以衷心的感谢。

参考文献 (References):

- 曹晶, 叶会寿, 李洪英, 等. 河南嵩县黄水庵碳酸岩型钼(铅)矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 矿床地质, 2014, 33(1): 53-69.
- CAO Jing, YE Huishou, LI Hongying, et al. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Huangshui'an carbonatite vein-type Mo(Pb) deposit in Songxian County, Henan

- Province[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(1): 53–69.
- 曹晶. 东秦岭黄水庵碳酸岩型钼矿床成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- CAO Jing. Mineralization of the Huangshui'an Carbonatite Mo Deposit in East Qinling[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- 陈建立, 郭鹏, 陈英男, 等. 基于科学钻探技术的老湾金矿带金成矿机制研究[J]. 金属矿山, 2023, 559(1): 259–268.
- CHEN Jianli, GUO Peng, CHEN Yingnan, et al. Study on Gold Mineralization Mechanism of Laowan Gold Belt Based on Scientific Drilling Technology[J]. Metal Mine, 2023, 559(1): 259–268.
- 陈喜峰, 陈秀法, 李娜, 等. 全球铼矿资源分布特征与开发利用形势及启示[J]. 中国矿业, 2019, 28(5): 7–23.
- CHEN Xifeng, CHEN Xiufa, LI Na, et al. Distribution characteristics and development & utilization status of global rhenium resources and its enlightenments[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(5): 7–23.
- 陈毓川, 王登红, 李华芹, 等. 全国成岩成矿年代谱系[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- CHEN Yuchuan, WANG Denghong, LI Huaqin, et al. Chronological Pedigree of Diagenesis and Mineralization in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- 董王仓, 李维成, 胡双全, 等. 中国矿产地质志·陕西卷[R]. 西安: 陕西省地质调查院, 2021.
- 杜芷葳, 叶会寿, 毛景文, 等. 陕西西沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 年代学和同位素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2020, 39(4): 728–744.
- DU Zhiwei, YE Huishou, MAO Jingwen, et al. Molybdenite Re-Os geochronology and isotope geochemical characteristics of Xigou molybdenum deposit in Shaanxi province and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(4): 728–744.
- 段湘益, 董王仓, 黄凡, 等. 陕西省钨钼多金属矿床时空分布规律及找矿方向[J]. 金属矿山, 2021, 544(10): 121–142.
- DUAN Xiangyi, DONG Wangcang, HUANG Fan, et al. Temporal-spatial Distribution and Prospecting Direction of W-Mo Polymetallic Deposit in Shaanxi Province[J]. Metal Mine, 2021, 544(10): 121–142.
- 樊会民, 张嘉升, 柏千惠, 等. 陕西秦巴地区地球化学分区及找矿意义[J]. 西北地质, 2018, 51(2): 75–82.
- FAN Huimin, ZHANG Jiasheng, BAI Qianhui, et al. Geochemical zoning and prospecting significance of Qinba area in Shaanxi[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(2): 75–82.
- 樊一见, 张昆, 张钊, 等. 华阴市黄龙铺秦岭沟钼矿床地质特征及找矿标志[J]. 陕西地质, 2017, 35(2): 20–26.
- FAN Yijian, ZHANG Kun, ZHANG Zhao, et al. Geological Characteristics and Prospecting Indicator of the Qinlinggou Deposit in Huanglongpu of Shaanxi[J]. Geology of Shaanxi, 2017, 35(2): 20–26.
- 范羽, 周涛发, 张达玉, 等. 中国钼矿床时空分布与成矿背景分析[J]. 地质学报, 2014, 88(4): 784–804.
- FAN Yu, ZHOU Taofa, ZHANG Dayu, et al. Spatial and Temporal Distribution and Metallogenetic Background of the Chinese Molybdenum Deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(4): 784–804.
- 付鑫宁, 唐利, 姚梅青, 等. 东秦岭黄水庵钼矿床的碳酸岩成因与地质意义: 来自痕量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素的约束[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 525–538.
- FU Xinling, TANG Li, YAO Meiqing, et al. Genesis and geological significance of the carbonatite in the Huangshui'an Mo deposit in Eastern Qinling area of China: Constraints from trace elements and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2021, 48(5): 525–538.
- 侯增谦, 田世洪, 谢玉玲, 等. 川西冕宁-德昌喜马拉雅期稀土元素成矿带: 矿床地质特征与区域成矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 145–176.
- HOU Zengqian, TIAN Shihong, XIE Yuling, et al. Mianning-Dechang Himalayan REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in eastern Indo-Asian collision zone southwest China: Geological characteristics of REE deposits and a possible metallogenic model[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(2): 145–176.
- 黄典豪, 王义昌, 聂凤军, 等. 黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床的硫、碳和氧同位素特征及成矿物质来源[J]. 地质学报, 1984, 58(3): 252–264.
- HUANG Dianhao, WANG Yichang, NIE Fengjun, et al. Isotopic Composition of Sulfur and Oxygen and Source Material of the Huanglongpu Carbonatite Vein-type of Molybdenum(Lead)Deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 1984, 58(3): 252–264.
- 黄典豪, 王义昌, 聂凤军, 等. 一种新的钼矿床类型——陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及成矿机制[J]. 地质学报, 1985, 3: 241–257.
- HUANG Dianhao, WANG Yichang, NIE Fengjun, et al. A New Type of Molybdenum Deposit—Geological Characteristics and Metal-logenic Mechanism of the Huanglongpu Carbonatite Vein-type of Molybdenum(Lead)Deposit, Shaanxi[J]. Acta Geologica Sinica, 1985, 3: 241–257.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区钼矿床的铼-钼同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 221–230.
- HUANG Dianhao, WU Chengyu, DU Andao, et al. Re-Os Isotope Ages of Molybdenum Deposits in East Qinling and Their Significance[J]. Mineral Deposits, 1994, 13(3): 221–230.
- 黄典豪, 侯增谦, 杨志明, 等. 东秦岭钼矿带内碳酸岩脉钼(铅)矿床地质-地球化学特征、成矿机制及成矿构造背景[J]. 地质学报, 2009, 83(12): 1968–1984.
- HUANG Dianhao, HOU Zengqian, YANG Zhiming, et al. Geological and Geochemical Characteristics, Metallogenetic Mechanism and Tectonic Setting of Carbonatite Vein-Type Mo(Pb)Deposits in the East Qinling Molybdenum Ore Belt[J]. Acta Geolo-

- gica Sinica, 2009, 83(12): 1968–1984.
- 黄典豪. 就若干矿床的类型、成矿物质来源及辉钼矿含铼量的地质意义等与毛景文研究员商榷[J]. 地质论评, 2015, 61(5): 990–1000.
- HUANG Dianhao. Discussion with Prof. Mao Jingwen on Types, Ore-Forming Material Source of Some Deposits and Geological Significance of Rhenium Content in Molybdenite[J]. Geological Review, 2015, 61(5): 990–1000.
- 黄凡, 王登红, 王岩, 等. 中国铼矿成矿规律和找矿方向研究[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1252–1269.
- HUANG Fan, WANG Denghong, WANG Yan, et al. Study on metallogenic regularity rhenium deposits in China and their prospecting direction[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1252–1269.
- 焦建刚, 袁海潮, 何克, 等. 陕西华县八里坡钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1159–1167.
- JIAO Jianggang, YUAN Haichao, HE Ke, et al. Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Dating for the Balipo Porphyry Mo Deposit in East Qinling, China, and Its Geological Implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(8): 1159–1167.
- 李俊平, 李永峰, 罗正传, 等. 大别山北麓钼矿找矿重大进展及其矿床地质特征研究[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(4): 576–586.
- LI Junping, LI Yongfeng, LUO Zhengchuan, et al. Geological Features of Molybdenum Deposits and Ore Prospecting in Northern Slope of the Dabie Mountain, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(4): 576–586.
- 李诺, 陈衍景, 张辉, 等. 东秦岭斑岩钼矿带的地质特征和成矿构造背景[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 186–198.
- LI Nuo, CHEN Yanjing, ZHANG Hui, et al. Molybdenum deposits in East Qinling[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 186–198.
- 李毅, 李诺, 杨永飞, 等. 大别山北麓钼矿床地质特征和地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2013, 29(1): 95–106.
- LI Yi, LI Nuo, YANG Yongfei, et al. Geological features and geodynamic settings of the Mo deposits in the northern segment of the Dabie Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(1): 95–106.
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 等. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质, 2005, 24(3): 292–304.
- LI Yongfeng, MAO Jingwen, HU Huabin, et al. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(3): 292–304.
- 刘云华, 成玉姝, 郑绪忠. 陕西省洛南县(区)黄龙铺钼矿区资源储量核查报告[R]. 西安: 陕西鑫源勘探有限责任公司, 2009.
- 毛景文, 华仁民, 李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 291–299.
- MAO Jingwen, HUA Renmin, LI Xiaobo. A preliminary study of largescale metallogenesis and large clusters of mineral deposits[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4): 291–299.
- 陕西省地质调查院. 中国区域地质志·陕西志[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- Shaanxi Institute of Geological Survey. Regional geology of China: Shaanxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- 陕西省地质矿产局第十三地质队. 陕西省洛南县黄龙铺钼矿区大石沟矿段详细普查地质报告[R]. 2002.
- 陕西省地质矿产局第十三地质队. 陕西省洛南县黄龙铺钼矿区详细普查地质报告[R]. 1989.
- 陕西省自然资源厅. 2018年度陕西省非油气矿产资源储量表[Z]. 2019.
- 沈其韩. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(5): 495–500.
- SHEN Qihan. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(5): 495–500.
- 王汉辉, 唐利, 杨勃畅, 等. 东秦岭黄水庵碳酸岩型 Mo-REE 矿床方解石地球化学特征和氟碳铈矿 U-Th-Pb 年龄及其意义[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 48–62.
- WANG Hanhui, TANG Li, YANG Bochang, et al. Geochemical Characteristics of Calcite and Bastnäsite U-Th-Pb Age of the Huangshui'an Carbonatite-hosted Mo-REE Deposit, Eastern Qinling[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 48–62.
- 王佳营, 李志丹, 张祺, 等. 东秦岭地区碳酸岩型银-铀多金属矿床成矿时代: 来自 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄的证据[J]. 地质学报, 2020, 94(10): 2946–2964.
- WANG Jiaying, LI Zhidan, ZHANG Qi, et al. Metallogenic epoch of the carbonatite-type Mo-U polymetallic deposit in east Qinling: evidence from the monazite LA-ICP-MS U-Pb and molybdenite Re-Os isotopic dating[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(10): 2946–2964.
- 王林均, 许成, 吴敏, 等. 华阳川碳酸岩流体包裹体研究[J]. 矿物学报, 2011, 31(3): 372–379.
- WANG Linjun, XU Cheng, WU Min, et al. A Study of Fluid Inclusion from Huayangchuan Carbonatite[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, 31(3): 372–379.
- 王林均, 许成, 吴敏, 等. 小秦岭碳酸岩的 Sr-Nb-Pb 同位素地球化学[J]. 矿物学报, 2012, 32(3): 370–378.
- WANG Linjun, XU Cheng, WU Min, et al. Sr-Nd-Pb Isotope Geochemistry of Lesser Qinling[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2012, 32(3): 370–378.
- 王瑞廷, 袁海潮, 孟德明, 等. 小秦岭地区金钼多金属矿成矿特征与找矿预测[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(1): 19–31.
- WANG Ruiting, YUAN Haichao, MENG Deming, et al. Metallogenic Characteristics and Exploration Prediction of Au-Mo Polymetallic Deposits in Xiaolinling Area[J]. Journal of Earth Sci-

- ences and Environment, 2014, 36(1): 19–31.
- 许成, 曾亮, 宋文磊, 等. 造山带碳酸岩起源与深部碳循环[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(2): 213–221.
- XU Cheng, ZENG Liang, SONG Wenlei, et al. Orogenic Carbonatite Petrogenesis and Deep Carbon Recycle[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(2): 213–221.
- 许成, 宋文磊, 漆亮, 等. 黄龙铺矿田含矿碳酸岩地球化学特征及其形成构造背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 422–430.
- XU Cheng, SONG Wenlei, QI Liang, et al. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatites in Huanglong-Pu Mo ore field[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2): 422–430.
- 袁海潮, 王瑞廷, 焦建刚, 等. 东秦岭华县西沟钼矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(1): 120–127.
- YUAN Haichao, WANG Ruiting, JIAO Jiangang, et al. Re-Os Isotopic Ages of Molybdenites from Xigou Mo Deposit in Huaxian of East Qinling and Their Geological Significance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(1): 120–127.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 746–768.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, DONG Yunpeng, et al. Rethinking of the Qinling Orogen[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 746–768.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUANG Xuecheng, et al. Qinling Orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. 地质学报, 2008, 82(2): 204–220.
- ZHU Laimin, ZHANG Guowei, GUO Bo, et al. U-Pb(LA-ICP-MS) Zircon Dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the East Qinling, China, and Its Metallogenic Geodynamical Setting[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(2): 204–220.
- Bell K, Blenkinsop J. Archean depleted mantle evidence from Nd and Sr initial isotopic ratios of carbonatites[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1987a, 51: 291–298.
- Bell K, Blenkinsop J. Nd and Sr isotopic composition of East African carbonatites: Implications for mantle heterogeneity[J]. *Geology*, 1987b, 15: 99–102.
- DePaolo D J, Wasserburg G J. Geochimica petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43: 615–627.
- Keller J, Hoefs J. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatites from Oldoinyo Lengai[A]. Bell K, Keller J. Carbonatites Volcanism: Oldoinyo Lengai and Petrogenesis of Natrocarbonatites. LAVCEI Proceeding in Volcanology[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 113–123.
- Le Maitre R W. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2002.
- Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W(Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta: Journal of the Geochemical Society and the Meteoritical Society*, 1999, 63: 1815–1818.
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, et al. Tectonic implication from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qingling-Dabie orogenic belt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 4607–4626.
- Maravic H V, Morteau G. Petrology and geochemistry of the carbonatite and syenite complex of Lueshe(N.F.Zaire)[J]. *Lithos*, 1980, 3(2): 159–168.
- Ray J S, Ramesh R, Paude K. Carbon isotopes in Kerquelen plume-derived carbonatites: evidence for recycled inorganic carbon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 170: 205–214.
- Stein H J, Markey R J, Morgan M J, et al. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling-Dabie molybdenum belt, Shaanxi province, China[J]. *Economic Geology*, 1997, 92(7–8): 827–835.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: how and why it works[J]. *Terra Nova*, 2001, 13: 479–486.
- Song W L, Xu C, Qi L, et al. Genesis of Si-rich carbonatites in Huanglongpu Mo deposit, Lesser Qinling orogen, China and significance for Mo mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 64: 756–765.
- Tang Li, Wagner T, Fusswinke T, et al. Magmatic-hydrothermal evolution of an unusual Mo-rich carbonatite: a case study using LA-ICP-MS fluid inclusion microanalysis and He-Ar isotopes from the Huangshui'an deposit, Qinling, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2021, 56(6): 1–18.
- Xu C, Campbell I H, Mlen C M, et al. Flat rare-earth element patterns as an indicator of cumulate processes in the Lesser Qiling carbonatites, China[J]. *Lithos*, 2007, 95: 267–278.
- Xu C, Kynicky J, Chakhmouradian A N, et al. A unique Mo deposit associated with carbonatites in the Qinling orogenic belt, central China[J]. *Lithos*, 2010, 118(1–2): 50–60.