

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*

杜芷葳^{1,2}, 叶会寿^{2**}, 毛景文², 孟芳³, 曹晶¹, 王鹏¹, 魏征¹, 丁建华²

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 中国地质大学珠宝学院, 北京 100083)

摘要 西沟钼矿床是东秦岭黄龙铺地区近些年新发现和勘查的碳酸岩脉型钼矿床。钼矿体主要赋存于新太古界太华群变质岩内的石英方解石碳酸岩脉中, 呈脉状、似层状或透镜状产出。辉钼矿主要呈浸染状、薄膜状、团块状分布于石英方解石碳酸岩脉中, 成矿有关的围岩蚀变有钾长石化、硅化、黄铁矿化、萤石化、硬石膏化等。为查明西沟钼矿床的成矿时代、成矿物质来源、成矿机制、确定矿床类型, 文章开展了辉钼矿 Re-Os 同位素测年, 同位素地球化学分析。6 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素测年结果, 模式年龄为(222.3±3.4)Ma~(226.6±3.7)Ma; 加权平均年龄为(225.1±1.4)Ma; 等时线年龄为(224.6±9.1)Ma, 表明该矿床形成于晚三叠世。硫化物和硫酸盐的 S 同位素组成、重晶石和方解石 Sr-Nd 同位素组成及方解石 C-O 同位素组成均指示: 西沟钼矿的成矿物质可能主要来源于地幔。根据其和华北陆块南缘其他碳酸岩型钼矿床地质特征、成矿时代和成矿物质来源等对比, 确定西沟钼矿床属碳酸岩型脉状矿床。成矿作用发生于扬子板块与华北板块碰撞造山的后碰撞伸展环境, 由于软流圈物质上涌诱发富集岩石圈地幔发生低程度部分熔融, 所形成的碳酸质流体携带钼等成矿物质上升, 在 NW-NWW 向深断裂带沉积富集成矿。

关键词 地球化学; 碳酸岩脉型矿床; 辉钼矿 Re-Os 定年; S-Sr-Nd-C-O 同位素组成; 西沟钼矿床; 东秦岭
中图分类号: P618.65 **文献标志码:** A

Molybdenite Re-Os geochronology and isotope geochemical characteristics of Xigou molybdenum deposit in Shaanxi Province and its geological significance

DU ZhiWei^{1,2}, YE HuiShou², MAO JingWen², MENG Fang², CAO Jing¹, WANG Peng¹,
WEI Zheng¹ and DING JianHua²

(1 School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 College of Gemology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The Xigou molybdenum deposit is a carbonate dyke molybdenum deposit in the Huanglongpu orefield of eastern Qinling. It was discovered and explored in recent years. The molybdenum orebodies mainly occur in the quartz calcite carbonate veins with the host rocks being the Neoproterozoic Taihua Group. Molybdenite is mainly disseminated, thin-film and lump-like form in the quartz calcite carbonate veins. The host rocks have experienced such alterations as K-feldspar alteration, silicification, pyritization, fluoritization, and anhydrite alteration. The

* 本文得到中国地质科学院矿产资源研究所项目(编号:YYWT-201713)、国家自然科学基金(编号:41972094)和全国矿产资源潜力动态评价项目(编号:DD20190193)联合资助

第一作者简介 杜芷葳,女,1995年生,硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: Duzhiwei2399@163.com

** 通讯作者 叶会寿,男,1964年生,研究员,长期从事矿床研究与资源勘查工作。Email: yehuishou@163.com

收稿日期 2020-04-20; 改回日期 2020-07-03。秦思婷编辑。

Re-Os isotope dating of six molybdenite samples shows that six model ages range from (222.3 ± 3.4) Ma to (226.6 ± 3.7) Ma, the weighted mean age is (225 ± 1.4) Ma and the isochron age is (224.6 ± 9.1) Ma, indicating that the deposit was formed in the Late Triassic. S isotopic composition of sulfide and sulfate, Sr-Nd isotopic composition of barite and calcite and C-O isotopic composition of calcite collectively imply that the ore-forming material of the Xigou molybdenum deposit may have mainly come from the mantle. The Xigou molybdenum deposit is a carbonate vein deposit according to its geological characteristics, metallogenic age and metallogenic material source in comparison with other carbonate molybdenum deposits in the Eastern Qinling.

Key words: geochemistry, carbonate vein deposit, molybdenite Re-Os dating, S-Sr-Nd-C-O isotopic compositions, Xigou molybdenum deposit, Eastern Qinling

东秦岭地区是中国主要的钼矿化集中区,已查明的钼矿资源储量达900万吨以上,为中国乃至全球最大的钼矿带(Mao et al., 2011)。迄今为止发现了许多大中型钼矿床,主要有金堆城钼矿、黄龙铺钼矿、大石沟钼矿、石家湾钼矿、雷门沟钼矿、东沟钼矿、南泥湖钼矿、石宝沟钼矿、鱼池岭钼矿等(朱广彬等, 2005; 李永峰等, 2006; 焦建刚等, 2009; 2010a; 2010b; 陈衍景, 2010; 张娟等, 2013; 李金宝等, 2013; 叶会寿等, 2006a; 2006b)。东秦岭地区钼矿床的成矿时代大致可以分为三叠世(230~210 Ma)、晚侏罗世—早白垩世(145~140 Ma)、早白垩世(132~110 Ma)3期,其中,三叠纪钼矿床以石英方解石碳酸岩型脉状矿床为主,侏罗纪—白垩纪钼矿床以斑岩和矽卡岩型钼矿床为主。

陕西黄龙铺地区发育有黄龙铺碳酸岩型钼矿床、金堆城和石家湾斑岩型钼矿床等,已对它们开展了矿床地质特征、矿床地球化学、成矿背景、矿床成因等研究,取得了一系列的成果(许成等, 2009; 宋文磊等, 2009; 赵海杰等, 2010; 李洪英等, 2016),对找矿勘查起到了重要的指导作用。近年来,黄龙铺地区找矿取得了重大进展,勘探发现了西沟中型钼矿床和华阳川特大型铀钼矿床。对西沟钼矿床开展了矿床地质、控矿因素及成矿潜力的研究(焦建刚等, 2007; 王勇茗等, 2006; 袁海潮等, 2014; 代军治等, 2018),取得了初步成果,但在矿床类型、成矿时代、成矿物质来源、矿床成因、区域成矿规律等方面存在争议。本次工作在野外矿床地质调查研究基础上,应用辉钼矿 Re-Os 同位素测年法对西沟钼矿床的成矿年龄进行精确测定,并运用同位素地球化学方法对西沟钼矿床的成矿物质来源进行示踪,然后与东秦岭地区黄龙铺钼(铅)矿床和黄水庵钼(铅)矿床等碳酸岩型钼矿床进行对比,从而确定矿床类型、成矿时代、成矿物

质来源和矿床成因,为今后寻找同类型的矿床提供有益借鉴。

1 区域地质概况

黄龙铺地区位于东秦岭钼矿带的西段,地处华北陆块南缘。区域上,华北陆块南缘分布于近EW向黑沟-栾川区域性断裂带以北地区,出露的地层主要有新太古界太华群、中元古界熊耳群与官道口群、新元古界陶湾群等,其中,西沟钼矿出露于新太华群片麻岩中。

区域构造主要有近EW向和NNE向2组,呈格子状产出,在2组断裂构造的交汇处控制了侏罗纪—白垩纪中酸性小岩体分布。区内岩浆活动强烈,发育的岩体主要有中生代老牛山、华山、娘娘山等花岗岩基,金堆城、石家湾等晚侏罗世—早白垩世花岗岩斑岩体,此外还有众多的岩脉,成矿地质条件优越。

2 矿床地质

西沟钼矿床位于老牛山岩体与华山岩体所夹持的EW向长廊中,出露的地层主要为新太古界太华群角闪黑云斜长片麻岩,呈单斜构造,多为北倾;出露的岩体主要有山神庙黑云二长花岗岩岩体,雪花沟花岗斑岩岩体等。区内断裂构造发育,以近EW向为主,其次为NE向和NW向。其中,近EW向构造主要有3条剪切带,即王沟-庙上剪切带(F_1)、冰冷沟-苍家坪剪切带(F_2)以及阴司台-南台剪切带(F_3),为区内主要的控矿构造带,控制了区内岩体和部分石英方解石碳酸岩脉的分布(图2)。

西沟钼矿床在南、北矿带中圈出了矿化带4条,含工业矿体59条,其中,以Mo-I、Mo-II、Mo-III、

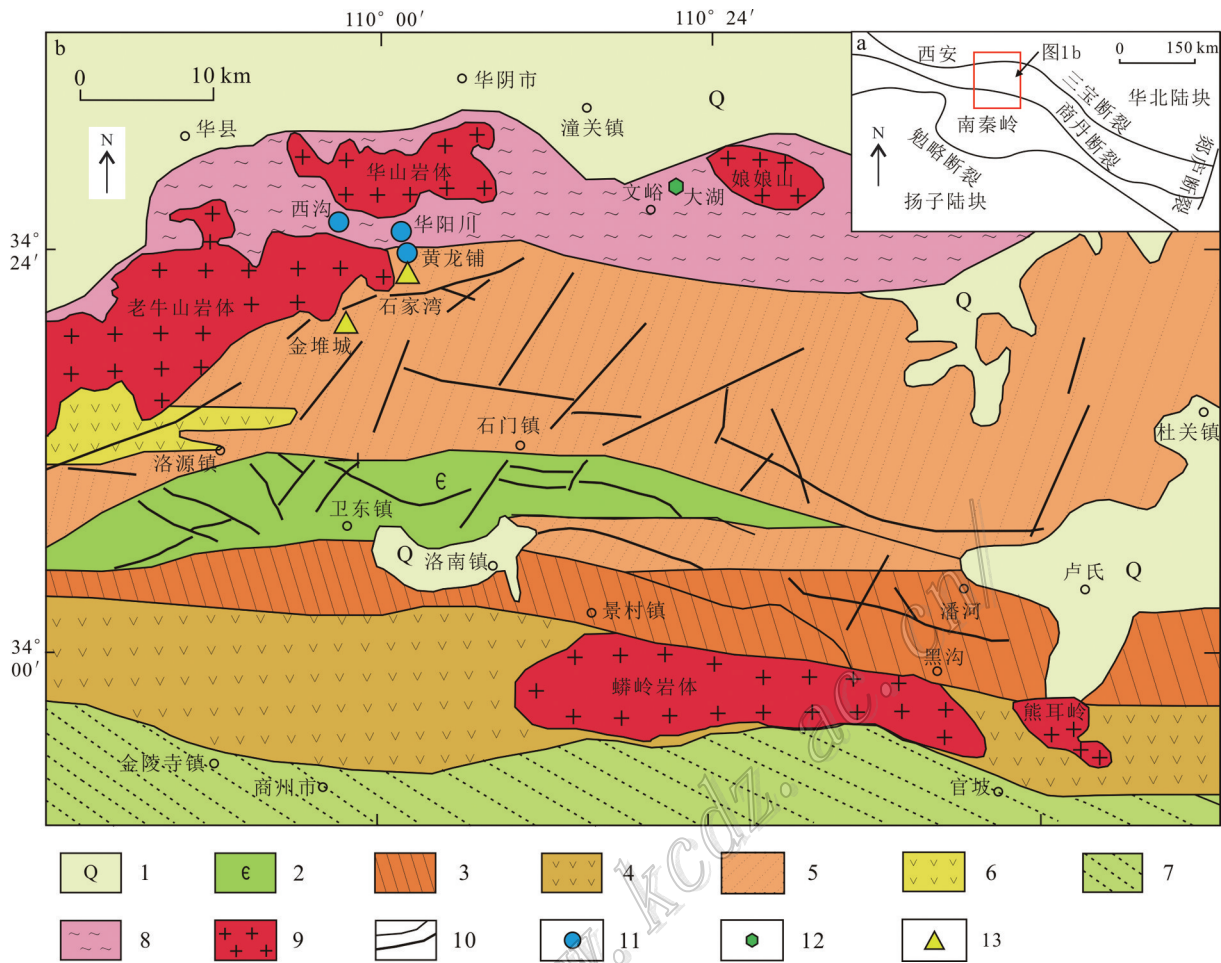


图1 秦岭造山带构造简图(a)和西沟钼矿区域地质略图(b)(据Mao et al., 2009)

1—第四系沉积物;2—寒武系碳酸盐岩;3—新元古界陶湾群大理岩;4—中-新元古界宽坪群绿片岩;5—中元古界官道口群大理岩;6—中元古界熊耳群火山岩;7—古元古界秦岭群变质岩;8—太古界太华群片麻岩;9—中生代花岗岩;10—断裂或地质界线;11—碳酸岩型矿床;12—石英脉型矿床;13—斑岩型矿床

Fig. 1 Structural map of the Qinling orogenic belt (a) and schematic geological map of the Xigou molybdenum deposit (b) (after Mao et al., 2009)

1—Quaternary sediments; 2—Cambrian carbonate rock; 3—Marble of Taowan Group in Neoproterozoic; 4—Greenschist of Kuanping Group in the Middle-Neoproterozoic; 5—Marble of Guandaokou Group in Middle Proterozoic; 6—Volcanic rocks of Xiong'er Group in Mesoproterozoic; 7—Lower Proterozoic metamorphic rocks of Qinling Group; 8—Gneiss of Taihua Group, Archean; 9—Mesozoic granite; 10—Fault or geological boundaries; 11—Carbonate type deposit; 12—Quartz vein type deposit; 13—Porphyry deposit

Mo-IX矿体为主。Mo-IX矿体严格受近NW向断裂构造控制,产状总体与构造一致,但局部也可见脉体相互交错的现象(图3)。矿体长2800 m,厚度为3.50~13.82 m,钼品位为0.077%~0.171%。伴生组分主要有硫、铅、银等。矿体主要由石英脉型、长石-石英脉型、石英-方解石脉型和蚀变片麻岩型辉钼矿矿石组成,含矿脉体一般呈扁豆状产出,具有明显的分支复合、尖灭侧现、尖灭再现现象。矿石矿物主要为辉钼矿、黄铁矿,其次为方铅矿、磁铁

矿,还有少量黄铜矿等。辉钼矿主要呈他形-半自形晶结构,主要有细脉状浸染状、团块状构造、薄膜状构造。方铅矿主要呈半自形-自形晶粒状结构,主要有团块状构造、脉状构造。赋矿围岩为角闪斜长片麻岩,近矿围岩蚀变主要有硅化、绿帘石化、钾长石化、碳酸盐化、绢云母化等,其中,硅化、钾长石化与钼矿化关系密切。

根据矿脉穿切关系和矿物共生组合等特征,将热液成矿期划分为4个阶段,即钾长石-石英阶段

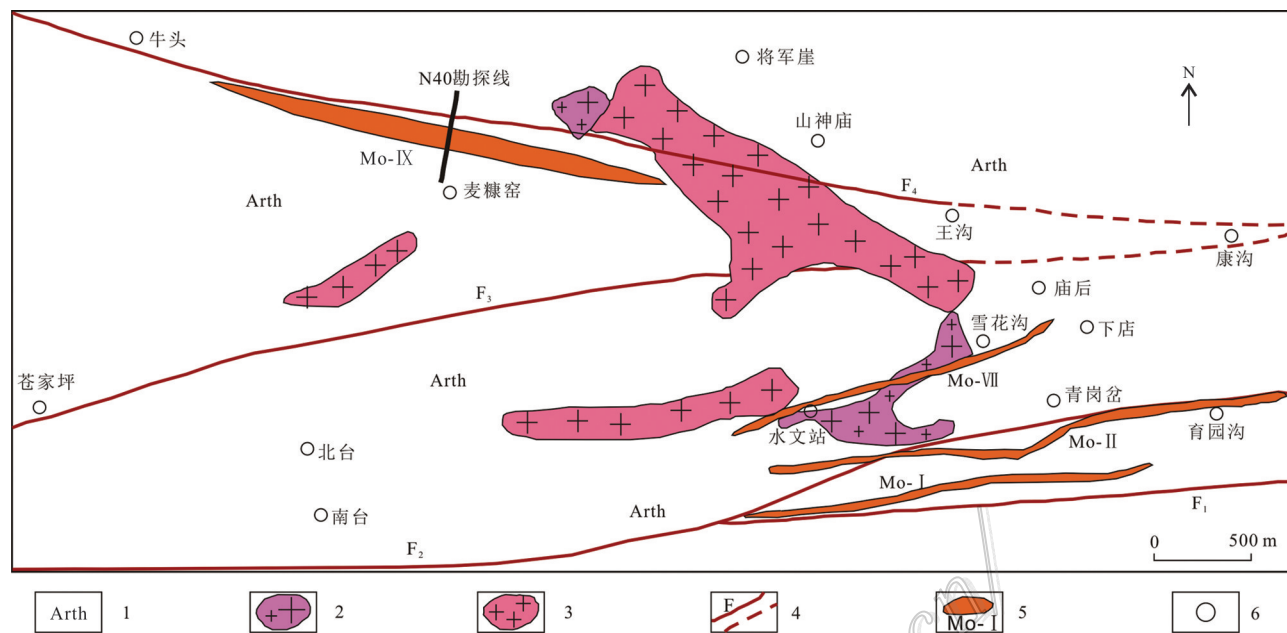


图2 西沟钼矿床矿区地质图(据袁海潮等,2014)

1—新太古界太华群片麻岩;2—花岗斑岩;3—黑云二长花岗岩;4—实测及推测剪切带;5—矿带及编号;6—地名

Fig. 2 Geological map of the Xigou molybdenum deposit (after Yuan et al., 2014)

1—Gneiss of Taihua Group, Neoproterozoic; 2—Granite porphyry; 3—Biotite monzonitic monzogranite; 4—Measured shear zone and inferred shear zone; 5—Ore zone and its serial number; 6—Place name

(I)、石英-碳酸岩阶段(II)、硫化物阶段(III)和硫酸盐阶段(IV)。

钾长石-石英阶段(I):主要形成含黄铁矿、重晶石、钾长石的石英脉。金属矿物为黄铁矿,脉石矿物主要为石英,其次为重晶石、钾长石。石英呈乳白色,颗粒较大。黄铁矿多呈自形的立方体,粒径大者可达1 cm以上,可见立方体黄铁矿被后期辉钼矿脉切过而发生破碎。重晶石颜色为淡绿色,多呈团块状或不规则状。

石英-碳酸岩阶段(II):主要形成石英方解石脉及含重晶石方解石脉。几乎不含金属矿物,脉石矿物主要有石英、方解石,其次为重晶石。石英呈烟灰色,方解石呈肉粉色,重晶石呈淡绿色。

硫化物阶段(III):为主成矿阶段,主要形成辉钼矿脉及黄铁矿细脉,金属矿物以黄铁矿和辉钼矿为主,少量的方铅矿、闪锌矿等。辉钼矿呈浸染状、薄膜状或团块状产出,黄铁矿呈团块状、细脉状或浸染状产出,方铅矿分布于方解石粒间或沿方解石裂隙充填。

硫酸盐阶段(IV):为成矿晚阶段,出现沸石和硬石膏等。

3 样品采集及分析测试

3.1 Re-Os 同位素年代学

用于Re-Os同位素测年的6件辉钼矿样品均采自西沟钼矿床Mo-IX矿带的PD1608坑道XII-4和XII-5主钼矿体,辉钼矿呈细脉浸染状、薄膜状分布于含重晶石石英方解石脉裂隙中。辉钼矿单矿物样品分离在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。矿石样品经粉碎、分离、粗选和精选,获得了纯度>98%的辉钼矿单矿物。辉钼矿颗粒细小,单颗粒粒径为0.03~0.10 mm,这样可以避免大颗粒辉钼矿由于Re、Os失偶而引起的测年误差。单矿物晶体新鲜、无氧化、无污染,符合测试要求。

辉钼矿的Re-Os同位素分析测试工作在国家地质测试中心Re-Os同位素实验室完成,采用Carius管封闭溶样分解样品。Re-Os同位素分析原理及详细分析流程参考文献(杜安道等,1994;2009;2012;屈文俊等,2003;2008;2009;李超等,2009a;2009b;2010)。采用美国TJA公司生产的TJAX-series电感

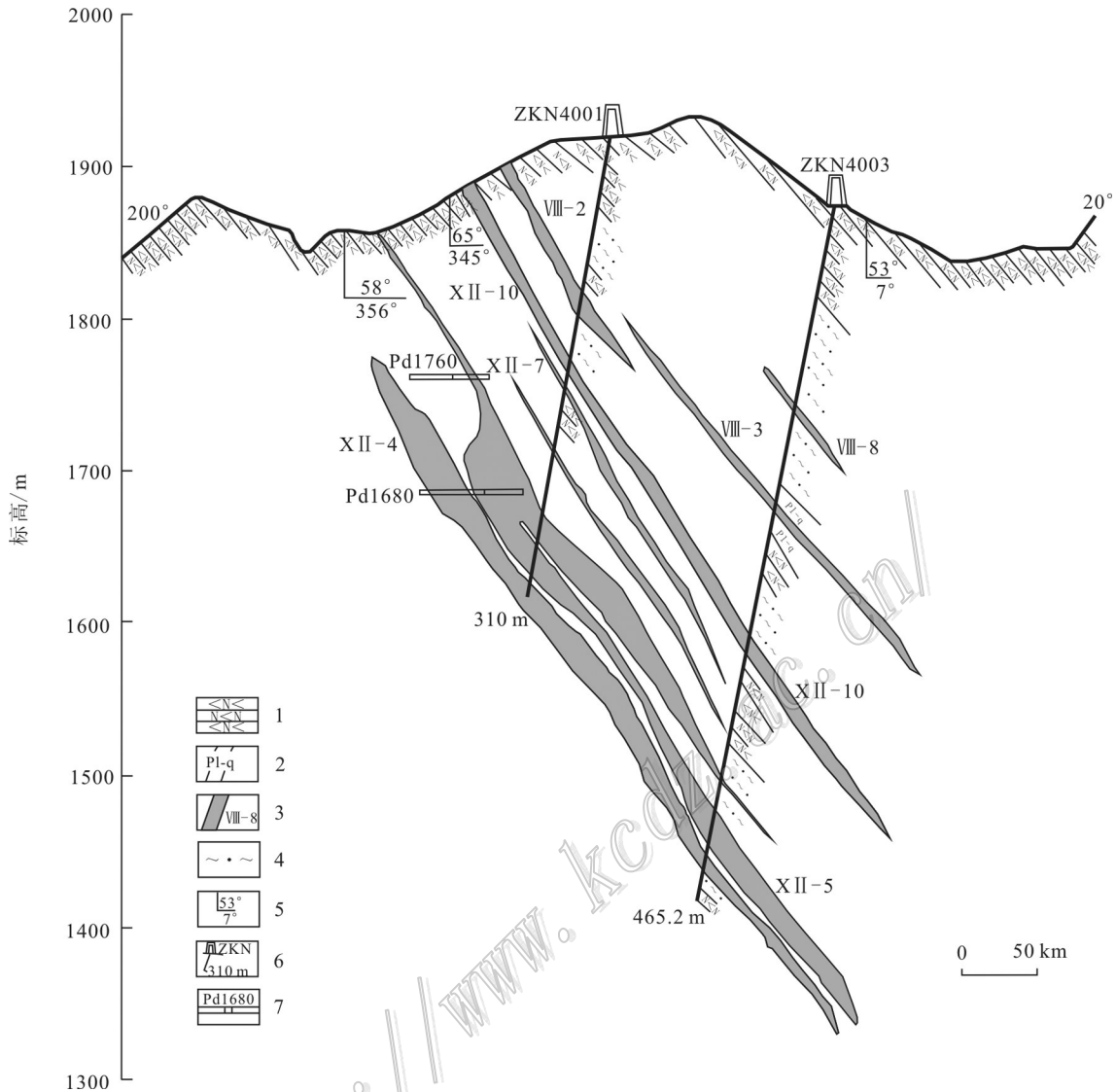


图3 西沟钼矿床N40勘探线剖面(据袁海潮等,2014)

1—角闪斜长片麻岩;2—长石石英脉;3—钼矿体位置及编号;4—蚀变带;5—产状;6—钻孔位置、编号及孔深;7—坑道位置及编号

Fig. 3 Geological section along No. 40 exploration line of the Xigou molybdenum deposit (after Yuan et al.,2014)

1—Hornblende-plagioclase gneiss; 2—Feldspar quartz vein; 3—Molybdenum ore location and serial number; 4—Alteration belt; 5—Attitude; 6—Drill hole location, serial number and depth; 7—Tunnel location and serial number

耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司)测定同位素比值。对于 Re, 选择质量数 185、187, 用质量数 190 监测 Os; 对于 Os, 选择质量数 186、187、188、189、190、192, 用质量数 185 监测 Re。TJAX-series ICP-MS 测得 Re-Os 和 ¹⁸⁷Os 含量(质量分数, 下同)空白值分别为 0.0024 ng(不确定度 0.0003)、0.000 36 ng(不确定度 0.000 05)和 0.000 02 ng(不确定度 0.000 02), 远小于所测样品和标样中 Re、Os 含量, 因此对实验结果的影响可忽略不计。

3.2 同位素地球化学分析

用于 S 同位素分析测试的 22 个样品(含辉钼矿 8 件, 黄铁矿 9 件, 方铅矿 3 件, 重晶石 2 件)采自于西沟钼矿床 PD1608 坑道 XII-4 和 XII-5 主矿体中。单矿物样品分离在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。测试在中国地质科学院矿产资源研究所完成, 所使用的仪器型号为 MAT 251, 仪器编号 3708, 检测方法参考《硫化物中硫同位素组成的测定》。

用于 Sr-Nd 同位素分析的 5 件方解石, 1 件重晶

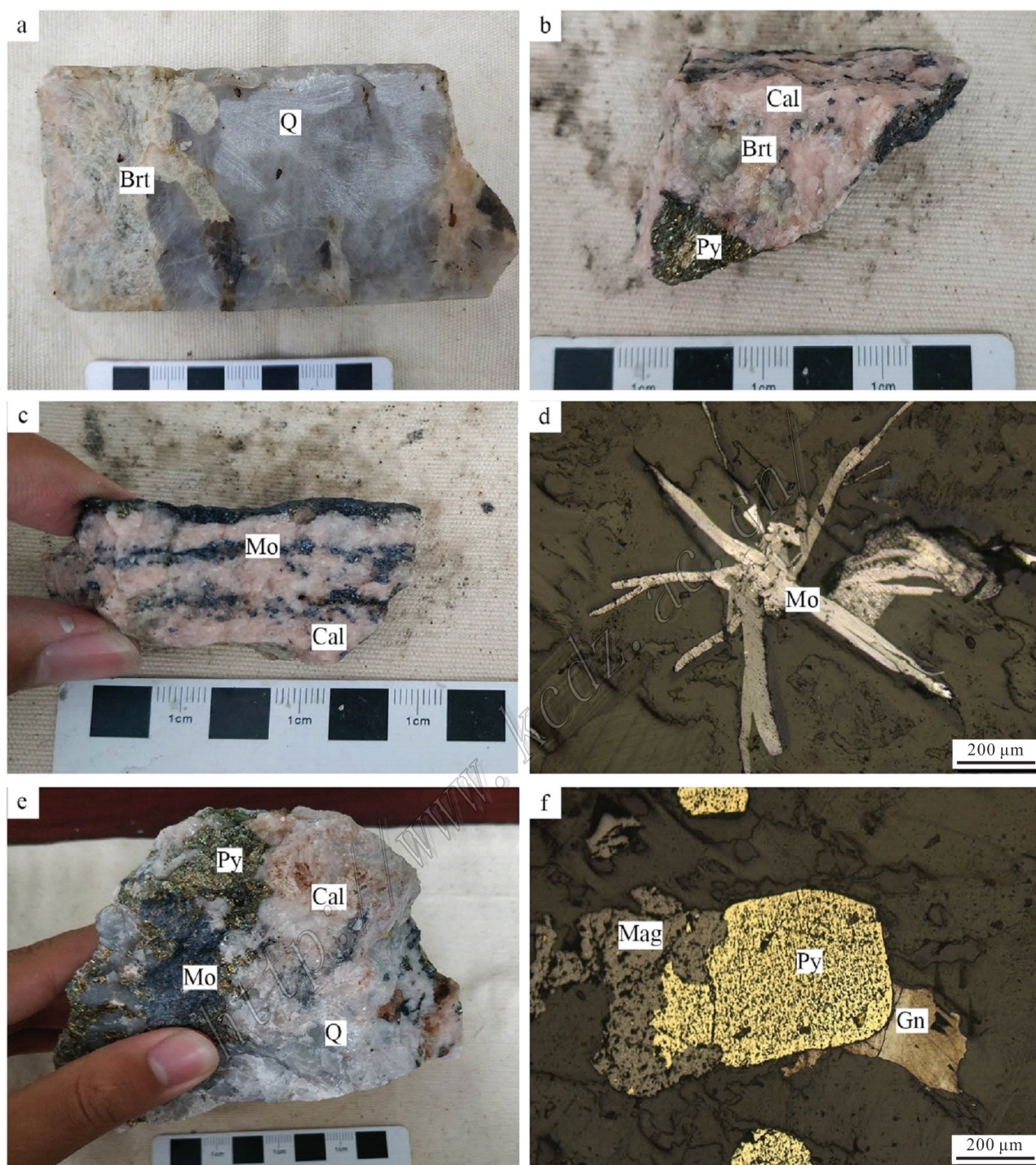


图 4 西沟钼矿床不同矿化阶段矿物组合

a. 第一阶段乳白色石英脉; b. 第二阶段含重晶石方解石脉; c. 第三阶段辉钼矿细脉切穿第二阶段方解石脉; d. 第三阶段叶片状辉钼矿; e. 第三阶段黄铁矿、辉钼矿共生; f. 第三阶段硫化物特征

Q—石英; Brt—重晶石; Cal—方解石; Py—黄铁矿; Mo—辉钼矿; Mag—磁铁矿; Gn—方铅矿

Fig. 4 Mineral assemblages in different mineralization stages of the Xigou molybdenum deposit

a. The first stage milky quartz vein; b. Barite calcite veins in the second stage; c. The third stage molybdenite vein cutting through the calcite vein of the second stage; d. Leaf molybdenite of the third stage; e. Intergrowth of pyrite and molybdenite in the third stage; f. Third-stage sulfide characteristics

Q—Quartz; Brt—Barite; Cal—Calcite; Py—Pyrite; Mo—Molybdenite; Mag—Magnetite; Gn—Galena

石样品采自西沟钼矿床的PD1608坑道主矿体,测试在核工业北京地质研究院完成,Sm-Nd测试所使用的仪器型号为ISOPROBE-T,仪器编号为7734,检测方法参考《岩石中铅、铋、钨同位素测定方法》;Rb-Sr测试所使用的仪器型号为PHOENIX,仪器编号为9444,检测方法参考《岩石矿物铷锶等时年龄测定》。

用于C-O同位素分析的5件方解石样品来自西沟钼矿床的PD1608坑道的主矿体,测试在中国地质科学院矿产资源研究所完成,采用100%磷酸法,所使用的仪器型号为MAT 253,仪器编号为8633,检测方法参考《碳酸盐矿物或岩石中碳、氧同位素组成的磷酸法测定》。

4 测试结果

4.1 Re-Os同位素年代学

西沟钼矿床辉钼矿样品Re-Os同位素测试结果见表1,本次测得的辉钼矿中的普Os含量很低,接近于零,表明辉钼矿形成时几乎不含 ^{187}Os ,其中, ^{187}Os 由 ^{187}Re β衰变而来,说明所获得的模式年龄能准确的反映矿化年龄。模式年龄计算所用公式为: $t=1/\lambda[\ln(1+^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]$,其中,衰变常数 $\lambda=1.666\times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ (Smoliar et al., 1996)。

6件样品的模式年龄介于 $(222.3\pm 3.4)\text{Ma}$ ~ $(226.6\pm 3.7)\text{Ma}$;加权平均年龄为 $(225.1\pm 1.4)\text{Ma}$ (MSWD=0.82)(图5b)。利用Isoplot软件(Ludwig, 2009)对6组数据进行 ^{187}Re - ^{187}Os 等时线拟合,线性关系很好,获得等时线年龄为 $(224.6\pm 9.1)\text{Ma}$ (MSWD=1.4)(图5a)。

4.2 S同位素组成

西沟钼矿床22件样品硫同位素分析结果见表2和图6。其中,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -8.4‰ ~ -6.8‰ ,平均值 -7.4‰ ,辉钼矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -8.1‰ ~ -6.7‰ ,

平均值 -7.4‰ ,方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -12‰ ~ -6.8‰ ,平均值 -9.1‰ ,重晶石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $+4.4\text{‰}$ ~ $+5.1\text{‰}$,平均值 $+4.75\text{‰}$ 。

张理刚(1985)认为,共生硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值按硫酸盐、辉钼矿、黄铁矿、磁黄铁矿和闪锌矿、黄铜矿、方铅矿的顺序依次递减,而在西沟钼矿床中, $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫酸盐}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{辉钼矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$,说明该矿床的主要硫化物沉淀于同一物理化学条件体系之中,且不同矿物之间的硫同位素分馏基本达到了平衡。

4.3 Sr-Nd同位素组成

西沟钼矿Rb、Sr含量, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值结果见表3。西沟钼矿Rb、Sr含量变化范围较大, $w(\text{Rb})$ 为 $0.038\sim 1.890\ \mu\text{g/g}$, $w(\text{Sr})$ 为 $7403\sim 129\ 949\ \mu\text{g/g}$ 。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值 $0\sim 0.0007$ 。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化较小,分布在 $0.705\ 36\sim 0.705\ 46$ 。

将西沟钼矿Sm、Nd含量, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$ 比值和 $t_{\text{DM}}(\text{Ga})$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$ 数据和黄水庵、华阳川、黄龙铺碳酸岩型矿床的Sr-Nd同位素数据一并列入表3。西沟钼矿Sm、Nd含量变化范围较大, $w(\text{Sm})$ 分布在 $0.31\sim 61.90\ \mu\text{g/g}$, $w(\text{Nd})$ 分布在 $6.0\sim 151.0\ \mu\text{g/g}$ 。 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值分布在 $0.0307\sim 0.2477$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$ 比值分布在 $0.511\ 81\sim 0.512\ 03$, $t_{\text{DM}}(\text{Ga})$ 分布在 $-3.68\sim 48.24$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 在 $-10.5\sim -6.2$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值分布在 $-15.3129\sim -5.8911$ 。

4.4 C-O同位素组成

西沟钼矿床的5件方解石样品C-O同位素分析结果及黄龙铺钼(铅)矿、黄水庵钼(铅)矿的C-O同位素分析结果一并列入表4。西沟钼矿床的全部样品中,方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -6.6‰ ~ -6‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $+7.7\text{‰}$ ~ $+7.9\text{‰}$,变化范围较小。

黄龙铺钼(铅)矿床中方解石的C-O同位素组成比较稳定, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -7‰ ~ -6.6‰ ,平均值 -6.7‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $+8.5\text{‰}$ ~ $+9.5\text{‰}$,平均值约 $+9.0\text{‰}$ 。黄

表1 西沟钼矿床辉钼矿Re-Os同位素组成

Table 1 Re-Os isotopic composition of molybdenite in the Xigoumolybdenum deposit

样品编号	m/g	$w(\text{Re})/(\text{ng/g})$		$w(\text{C 普Os})/(\text{ng/g})$		$w(^{187}\text{Re})/(\text{ng/g})$		$w(^{187}\text{Os})/(\text{ng/g})$		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
B1/PD1680	0.02035	69431	619	0.0823	0.0423	43639	389	161.9	1.5	222.3	3.4
B5/PD1680	0.02091	63005	696	0.0789	0.0203	39600	437	149.6	1.6	226.3	3.9
B8/PD1680	0.02018	60106	704	0.0593	0.0410	37778	443	141.9	1.2	225.0	3.8
B10/PD1680	0.02078	57882	638	0.0396	0.0418	36380	401	137.6	1.2	226.6	3.7
B13/PD1680	0.02027	88417	793	0.0749	0.0193	55572	498	209.7	1.8	226.1	3.3
B14/PD1680	0.02061	63987	494	0.0188	0.0211	40217	311	151.0	1.3	225.0	3.2

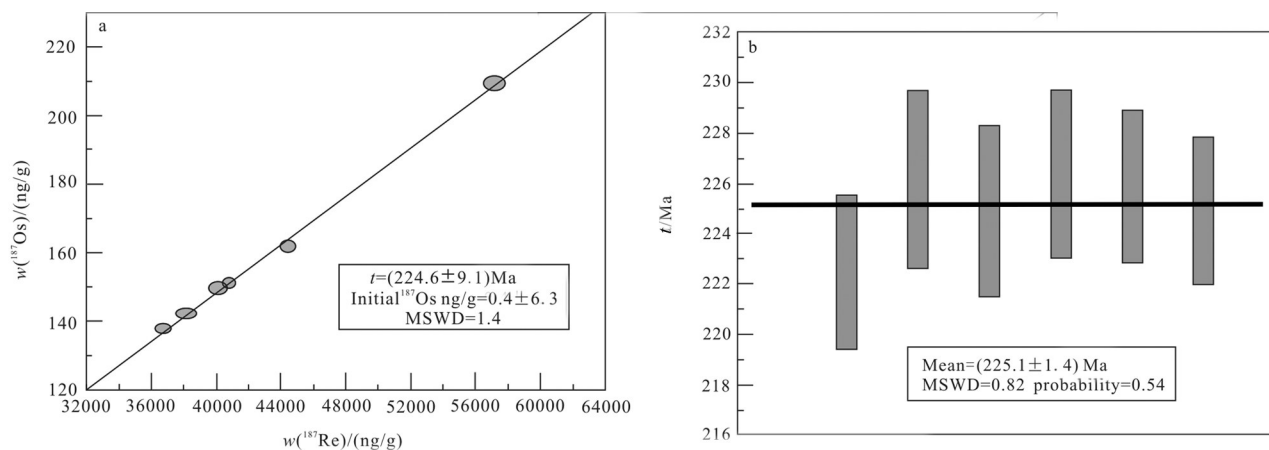


图 5 西沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄(a)和加权平均年龄(b)

Fig. 5 Re-Os isotopic isochron age (a) and weighted mean age (b) of molybdenite in the Xigou molybdenum deposit

表 2 西沟钼矿床 S 同位素组成

Table 2 S isotopic compositions of the Xigou molybdenum deposit

样品编号	测试矿物	矿物组合	成矿阶段	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
B9/PD1680	黄铁矿	Q+Py	I	-7.6
B10-1/PD1680	黄铁矿	Q+Py	I	-8.1
B12-1/PD1680	黄铁矿	Q+Py	I	-7.1
B12-2/PD1680	黄铁矿	Q+Py	I	-8.4
B13/PD1680	黄铁矿	Q+Py+Brt	I	-6.9
B13/PD1680	重晶石	Q+Py+Brt	I	4.4
B1/PD1680	辉钼矿	Q+Cal+Py+Mo	III	-8
B1/PD1680	黄铁矿	Q+Cal+Py+Mo	III	-7.6
B2/PD1680	辉钼矿	Q+Cal+Py+Mo+Brt	III	-6.7
B2/PD1680	重晶石	Q+Cal+Py+Mo+Brt	III	5.1
B2/PD1680	黄铁矿	Q+Cal+Py+Mo+Brt	III	-7.1
B3/PD1680	方铅矿	Q+Cal+Py+Gn	III	-12
B5/PD1680	辉钼矿	Q+Cal+Py+Mo	III	-6.9
B5/PD1680	黄铁矿	Q+Cal+Py+Mo	III	-6.6
B7/PD1680	辉钼矿	Q+Cal+Py+Mo	III	-8.1
B7/PD1680	黄铁矿	Q+Cal+Py+Mo	III	-6.8
B8/PD1680	辉钼矿	Q+Cal+Py+Mo	III	-7.3
B10-1/PD1680	辉钼矿	Q+Cal+Mo+Gn	III	-7.8
B10-2/PD1680	方铅矿	Q+Cal+Mo+Gn	III	-8.6
B12-2/PD1680	方铅矿	Q+Cal+Mo+Gn	III	-6.8
B13/PD1680	辉钼矿	Q+Cal+Py+Mo	III	-7.2
B14/PD1680	辉钼矿	Q+Cal+Mo	III	-7.5

注:Q—石英;Cal—方解石;Py—黄铁矿;Mo—辉钼矿;Gn—方铅矿;Brt—重晶石。

水庵钼(铅)矿床所分析样品表现出变化范围非常窄的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值(-5.3‰~-4.7‰)和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值(+7.1‰~+8.2‰)。

5 讨论

5.1 成矿时代

辉钼矿 Re-Os 同位素体系是目前认为最合适的

用于金属矿床直接定年的方法(Stein et al., 2001), 因为辉钼矿富集 Re(10^{-6} 级), 而普 Os 含量极低(接近于零), 即辉钼矿中的 Os 完全是放射成因的 ^{187}Os 。国内外已有很多成功的案例(Mao et al., 2008)。因此, 应用 Re-Os 同位素体系测定辉钼矿形成年龄能为相关矿床的形成时代, 以及区域成矿作用和构造演化提供高精度的年代学制约。

本次分析的西沟钼矿床中辉钼矿的 $w(\text{普 Os})$ 很

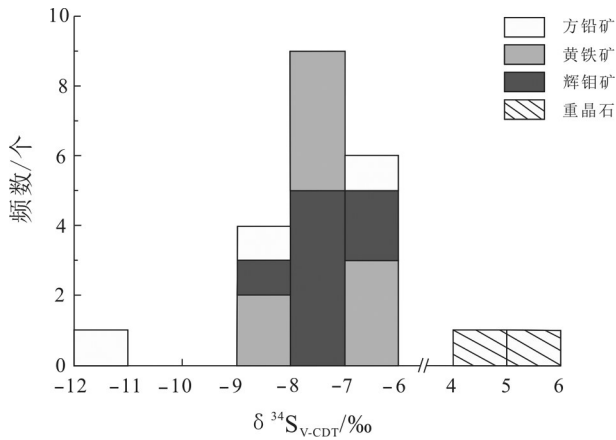


图6 西沟钼矿床硫同位素分布直方图
Fig. 6 Histogram of sulfur isotopic compositions in the Xigou molybdenum deposit

低,变化范围为 $(0.0188 \pm 0.0211) \times 10^{-9} \sim (0.0823 \pm 0.0423) \times 10^{-9}$, 而 $w(\text{Re})$ 高,变化范围介于 $(57\ 882 \pm 638) \times 10^{-6} \sim (88\ 417 \pm 793) \times 10^{-6}$, Re-Os 模式年龄为 $(222.3 \pm 3.4)\text{Ma} \sim (228.2 \pm 3.4)\text{Ma}$, 其加权平均年龄 $((225.1 \pm 1.4)\text{Ma})$ 与等时线年龄 $((224.6 \pm 9.1)\text{Ma})$ 在

误差范围内一致,表明辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄可以代表辉钼矿的形成年龄。由于本次用于 Re-Os 同位素测年的样品均为该矿床的主要矿石类型,因而辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄 $((224.6 \pm 9.1)\text{Ma})$ 可以直接代表该矿床的形成年龄。

根据本次研究所测数据,限定西沟钼矿床的形成年龄为 225 Ma 左右,成矿时代为晚三叠世。

Mao 等(2008)根据 15 个钼矿床的成矿年龄数据,并与相应的构造事件对应,提出在东秦岭-大别地区存在 3 个钼成矿作用峰期,即印支期的 242~215 Ma 和燕山期的 148~138 Ma 以及 131~112 Ma。后 2 期钼矿化主要与侏罗纪-白垩纪中酸性花岗斑岩体有密切的时空联系(卢欣祥等, 2002; Mao et al., 2011), 属斑岩型钼矿床,是东秦岭-大别地区最为重要的大规模成矿事件。近些年来,陆续发现一些三叠纪矿床,如小秦岭大湖辉钼矿床 Re-Os 年龄为 215.4~255.6 Ma(李厚民等, 2007; 李诺等, 2008)、马家洼金(钼)矿床 Re-Os 年龄为 232.5~268.4 Ma(王义天等, 2010)、黄龙铺钼(铅)矿床(辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 221 Ma(黄典豪等, 1984;

表3 西沟钼矿床、华阳川矿床、黄龙铺钼(铅)矿床及黄水庵钼(铅)矿床 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions in the Xigou molybdenum deposit, the Huayangchuan deposit, the Huanglongpu molybdenum (lead) deposit and the Huangshui'an molybdenum (lead) deposit

矿床	样品编号	岩性	$w(\text{B})/10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$w(\text{B})/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$	t_{DM}/Ga	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	数据来源
			Rb	Sr			Sm	Nd						
西沟钼矿床	B6/1680-CM32	重晶石	0.053	129949	0	0.70544	0.31	6.0	0.0307	0.511853	0.511807829	1.08	-10.5	本文
西沟钼矿床	B4/1680-CM32	方解石	0.075	7766	0	0.70537	30.7	108.0	0.1719	0.512286	0.512032956	3.13	-6.2	
西沟钼矿床	B2/PD1680	方解石	0.038	9860	0	0.70545	26.1	75.2	0.2103	0.512207	0.511898044	34.18	-8.8	
西沟钼矿床	B3/PD1680	方解石	0.038	7403	0	0.70536	61.9	151.0	0.2477	0.512336	0.511971077	-3.68	-7.4	
西沟钼矿床	B5/PD1680	方解石	1.890	8279	0.0007	0.70546	22.8	65.3	0.2106	0.512221	0.511910188	48.24	-8.6	
西沟钼矿床	B13/PD1680	方解石	0.045	7804	0	0.70544	26.3	78.3	0.2031	0.512225	0.511926001	12.88	-8.2	
华阳川矿床	HYC-7					0.70496			0.1561	0.512277		1.47	-5.9	王林均等, 2012
华阳川矿床	HYC-10					0.7053			0.1229	0.512196		1.53	-6.6	
华阳川矿床	HYC-13					0.70501			0.1428	0.512247		1.49	-6.1	
华阳川矿床	HYC-14					0.70495			0.126	0.512151		1.61	-7.5	
华阳川矿床	HYC-20					0.70525			0.1547	0.512341		1.37	-4.6	
黄龙铺钼(铅)矿床	DSG-01					0.0003	0.70539		0.1439	0.512280		1.46	-5.8	
黄龙铺钼(铅)矿床	DSG-02					0.0003	0.70547		0.183	0.512287		1.51	-6.5	
黄龙铺钼(铅)矿床	DSG-03					0.0003	0.70512		0.1305	0.512027		1.81	-10.1	
黄水庵钼(铅)矿床	HS08-01	方解石	0.099	4701		0.7058	26.1	152.4	0.1034	0.511762			-14.6	黄典豪等, 2009
黄水庵钼(铅)矿床	HS08-02	方解石	0.095	8406		0.7059	17.5	90.8	0.1167	0.511875			-12.8	
黄水庵钼(铅)矿床	HS08-05	方解石	0.081	4526		0.7059	28.5	169.2	0.1019	0.511756			-14.7	
黄水庵钼(铅)矿床	HS08-06	方解石	0.068	1169		0.7059	18.2	97.2	0.1136	0.512076			-8.7	
黄水庵钼(铅)矿床	HS08-25	方解石	0.156	5229		0.7058	25.5	141.8	0.1087	0.511874			-12.6	

表 4 西沟钼矿床、黄龙铺钼(铅)矿床及黄水庵钼(铅)矿床 C-O 同位素组成

Table 4 C-O isotopic compositions in the Xigou molybdenum deposit, the Huanglongpu molybdenum (lead) deposit and the Huangshuian molybdenum (lead) deposit

矿床(点)	样品编号	测试对象	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	资料来源
西沟钼矿床	B4/1680-CM32	方解石	-6.0	7.8	本文
西沟钼矿床	B2/PD1680	方解石	-6.0	7.8	
西沟钼矿床	B3/PD1680	方解石	-6.6	7.9	
西沟钼矿床	B5/PD1680	方解石	-6.1	7.9	
西沟钼矿床	B13/PD1680	方解石	-6.1	7.7	
黄龙铺钼(铅)矿床	HD8021	方解石	-6.6	9.1	黄典豪等,1984
黄龙铺钼(铅)矿床	HD8195	方解石	-6.8	8.6	
黄龙铺钼(铅)矿床	HD8114	方解石	-6.7	9.3	
黄龙铺钼(铅)矿床	HD8117	方解石	-6.8	8.9	
黄龙铺钼(铅)矿床	HD8014	方解石	-7.0	8.5	
黄龙铺钼(铅)矿床	HD8154	方解石	-6.7	9.0	
黄龙铺钼(铅)矿床	HD8159	方解石	-6.6	9.5	
黄龙铺钼(铅)矿床	HD8215	方解石	-6.6	9.0	
黄水庵钼(铅)矿床	PXG-B4	方解石	-5.3	7.8	曹晶,2018
黄水庵钼(铅)矿床	PXG-B32	方解石	-5.1	7.4	
黄水庵钼(铅)矿床	PXG-B36	方解石	-4.7	8.0	
黄水庵钼(铅)矿床	PXG-B42	方解石	-4.9	7.1	
黄水庵钼(铅)矿床	PXG-B46	方解石	-5.0	7.1	
黄水庵钼(铅)矿床	PXG-B49	方解石	-5.1	8.2	

Stein et al., 1997); 以及近期发现的西沟钼矿床 ($(222.3 \pm 3.4) \text{ Ma} \sim (228.2 \pm 3.4) \text{ Ma}$) 和华阳川钼铅矿床: 熊耳山地区黄水庵钼(铅)矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 $(208.4 \pm 3.6) \text{ Ma}$ (曹晶, 2018) 和嵩县南部 13 个石英脉型钼矿床, 辉钼矿 Re-Os 年龄为 230~242 Ma (高阳, 2011), 因此, 东秦岭三叠纪钼具有寻找大型钼矿床的潜力。

5.2 同位素组成特征及成矿物质来源

硫是绝大多数矿床中最重要成矿元素之一, 因而判断硫的来源可以为解决成矿物质来源及矿床成因等问题提供重要依据。一般认为硫的储库有 3 种 (Rollinson, 1993): 即幔源或深源硫 ($\delta^{34}\text{S}=0 \pm 3\text{‰}$)、海水硫 ($\delta^{34}\text{S}=+20\text{‰}$)、地壳硫; 地壳硫来源复杂, 同位素值变化大, 主要以较大的负值为特征 (图 7)。

各种矿物从成矿热液中沉淀是由于溶液本身的物理化学条件发生了变化所引起, 由于同位素分馏效应, 含硫热液矿物中的硫同位素组成不仅取决于热液中原始硫同位素组成, 还受到沉淀时温度、压力、pH 值、氧逸度等因素的控制 (Ohmoto, 1972)。因此, 为了研究硫的来源, 不能简单地将热液矿物硫同位素组成的分布特点与硫源相联系, 而应依据硫化

物沉淀期间热液的总硫同位素组成来判断。

西沟钼矿床中的硫化物明显富集 ^{32}S 而具有负的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($-12\text{‰} \sim -6.6\text{‰}$), 硫酸盐相对富集 ^{34}S , 具有正的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($+4.4\text{‰} \sim +5.1\text{‰}$)。硫化物和硫酸盐的值均偏离了地幔的硫同位素值 ($+1\text{‰}$, Ohmoto et al., 1979)。Pinckney 等 (1972) 提出, 在一定温度条件下, 从成矿热液中同时沉淀出的矿物与剩余溶液之间处于同位素平衡时, 矿物的硫同位素组成可看作成矿温度和总硫同位素组成的函数。如果有 2 个以上矿物对是从化学成分和同位素组成均一而温度变化的热液中晶出, 相关样品的 $\Delta^{34}\text{S}_{\text{A-B}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{A}}$ 与 $\delta^{34}\text{S}_{\text{B}}$ 的关系图上应构成一条直线, 该直线在 $\delta^{34}\text{S}$ 轴上的截距为沉淀出这些矿物的成矿热液的总硫同位素组成。这种方法的原理是依据同位素数据本身进行判断, 前提是体系处于封闭状态。封闭体系条件下的热力学交换, 共生矿物的 $\Delta^{34}\text{S}$ 值对应平衡分馏。

根据以上理论, 现选择实验测得的共生的重晶石和黄铁矿的硫同位素组成作图 (图 8), 斜率大小指示体系中硫酸盐与硫化物的相对比例。获得热液总硫同位素组成约为 $+1\text{‰}$, 所以推测西沟钼矿床的成矿物质来源可能是地幔。

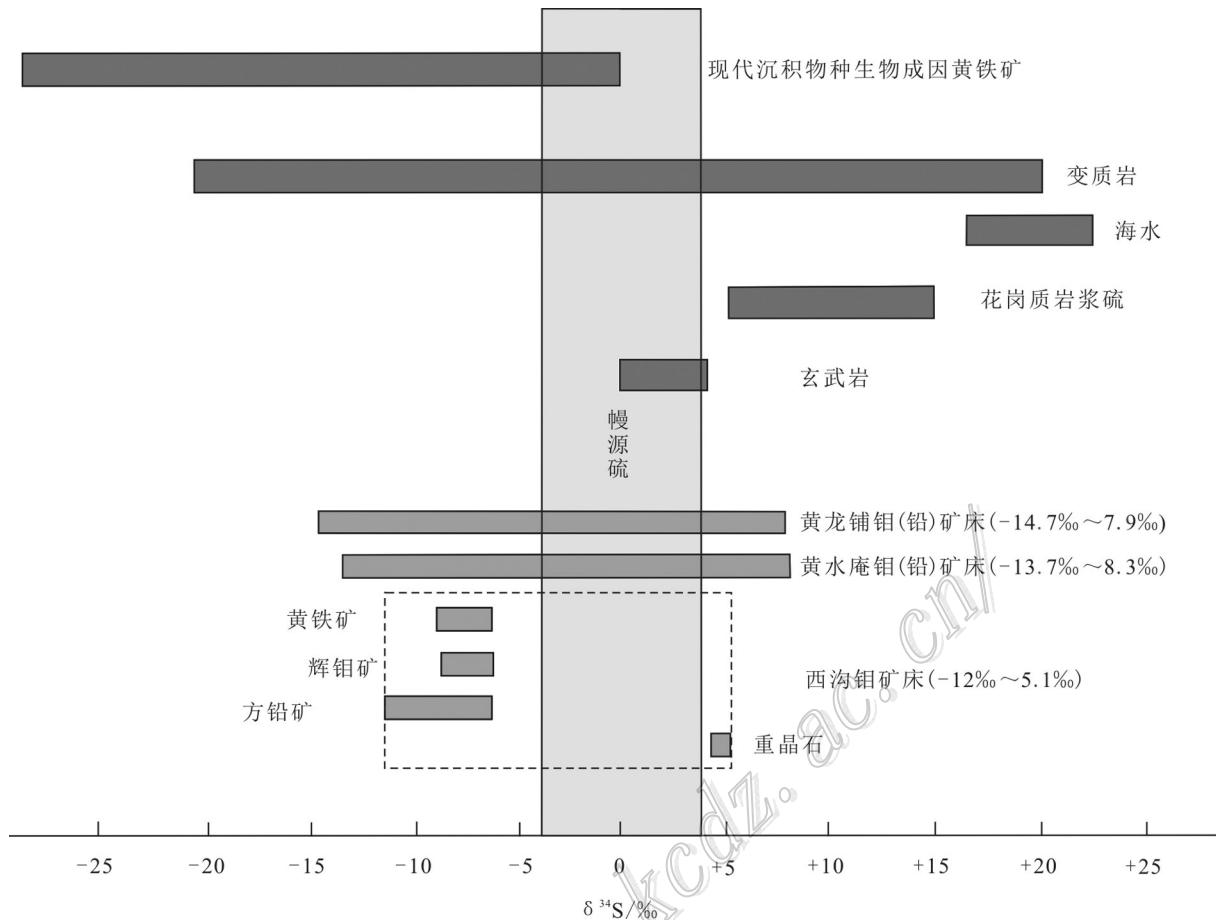


图7 S同位素分布规律(黄龙铺钼(铅)矿床数据引自黄典豪等,1984;黄水庵钼(铅)矿床数据引自曹晶,2018)

Fig. 7 Distribution of sulfur isotopes (Huanglongpu molybdenum (lead) deposit data after Huang et al., 1984; Huangshui'an molybdenum (lead) deposit data after Cao, 2018)

大量研究表明,C-O同位素组成是示踪成矿流体中C来源的有效方法之一(王华云,1993;毛健全等,1998;张启厚等,1999;毛德明,2000;周家喜等,2012;Zhou et al., 2013a; 2013b)。从表4可以看出,该区域的西沟钼矿床、黄龙铺钼(铅)矿床及黄水庵钼(铅)矿床的 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成较为均一,介于 $-7\text{‰}\sim-4.7\text{‰}$,由于区域内矿床中基本上未见碳酸盐矿物与石墨共生,因此,其碳酸岩的碳同位素组成可近似看作是成矿流体的总碳同位素组成(卢欣祥等,2002)。在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解(图9)中,西沟钼矿床及黄龙铺钼(铅)矿床、黄水庵钼(铅)矿床的方解石C-O同位素组成均落在初始火成碳酸岩的碳($-8\text{‰}\sim-4\text{‰}$)、氧同位素($6\text{‰}\sim 10\text{‰}$)组成范围内。由此可见,这些矿床方解石的C和O同位素组成特点反映了它们具有相同的来源及 $\delta^{13}\text{C}$ 值与碳酸岩方解石的相一致。

所以,成矿流体的C-O同位素组成特征指示西沟钼矿床的成矿物质与黄龙铺、黄水庵钼(铅)矿床的成矿物质一样均来自于地幔。

Sr-Nd同位素作为成岩成矿过程中重要指标,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)。由表3可知,西沟钼矿床、华阳川和黄龙铺岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值集中在 $-10.1\sim-4.6$,具有明显的负值特征,但比扬子陆块下地壳、华北陆块上下地壳的初始Nd要高,显示其岩浆来源有幔源物质的加入。东秦岭地区三叠纪碳酸岩中的方解石C、O同位素非常稳定,均落在“初始火成碳酸岩”范围之内,说明未受到次生过程的影响(许成等,2009)。而西沟及华阳川、黄龙铺岩体的Sr-Nd同位素都紧靠EM I地幔端元(图10),这个特征表明华北板块南缘在三叠纪就已经出现了EM I富集地幔的特征。经过前

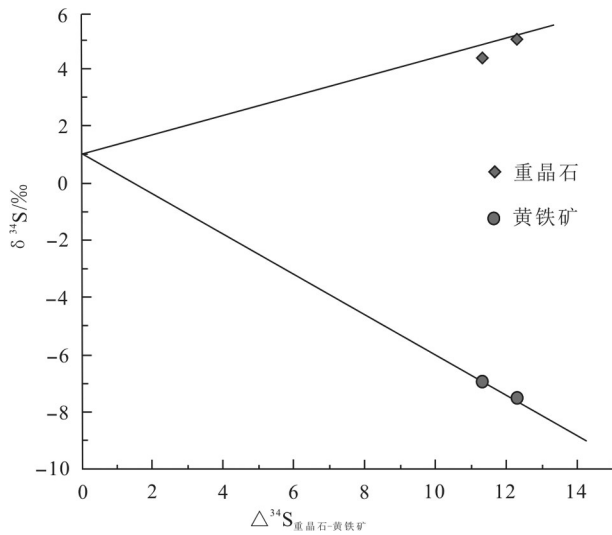


图 8 西沟钼矿床黄铁矿和重晶石的 $\Delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{34}\text{S}$ 关系图
Fig. 8 Diagram of $\Delta^{34}\text{S}$ - $\delta^{34}\text{S}$ for pyrite and barite in the Xigou molybdenum deposit

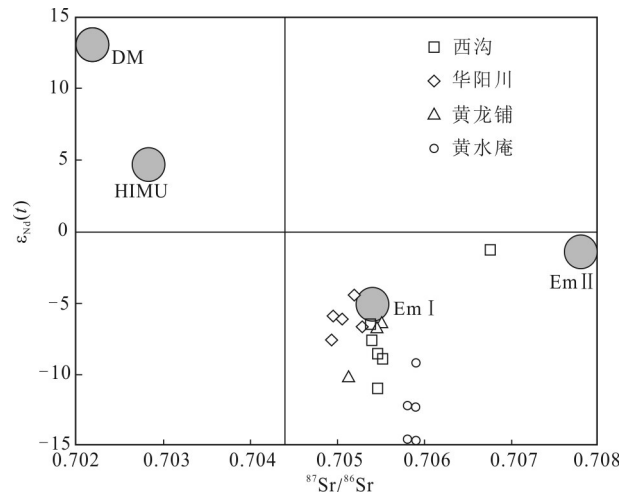


图 10 西沟钼矿床 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图 (DM、HIMU、EM1、EM2 地幔端元值据 DePaolo, 1979)
Fig. 10 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ diagram of the Xigou molybdenum deposit (end element values of DM, HIMU, EM1 and EM2 after DePaol., 1979)

人多年的研究总结,富集地幔 EM I 的起源可能有以下 4 个方面:① 来自于幔源物质(岩石圈地幔或者软流圈)的热侵蚀;② 洋壳物质的俯冲交代;③ 造山阶段地壳物质的俯冲混合;④ 造山后的下地壳拆层作

用(Rollison, 1993)。本区三叠纪的碳酸岩型钼矿有相似的 Sr-Nd 同位素组成和较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,表明其可能具有相同的源区,源区物质主要来自于幔源物质的热侵蚀。

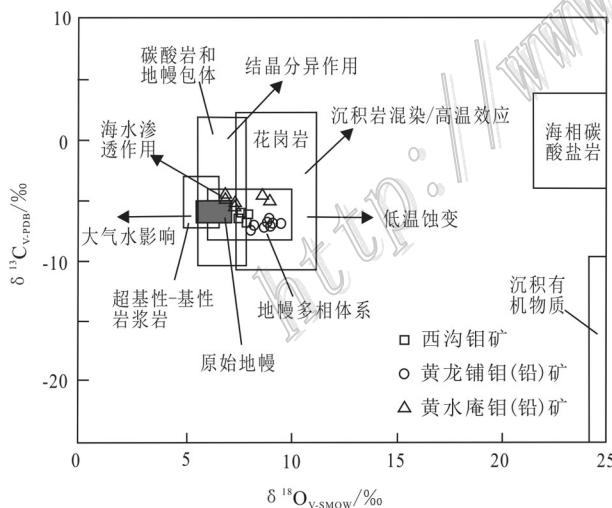


图 9 西沟钼矿样品 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ vs. $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解(底图引自刘建明等, 1997; 黄龙铺钼(铅)矿床数据引自许成等, 2009; 黄水庵钼(铅)矿床数据引自曹晶, 2018)

Fig. 9 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ vs. $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram of the Xigou molybdenum sample (base map modified after Liu et al., 1997) (Huanglongpu molybdenum (lead) deposit data after Xu et al., 1984; Huangshui'an molybdenum (lead) deposit data after Cao, 2018)

综上所述,西沟钼矿的 S、C-O 及 Sr-Nd 同位素组成均指示西沟钼矿床的成矿物质来源是地幔。

5.3 成矿作用与成矿机制

经对比可知,西沟钼矿床与黄龙铺、黄水庵钼(铅)矿床等矿床的矿化类型相似,成矿时代均为晚三叠世,成矿物质均来自于地幔(表 5),因此,可以将西沟钼矿床划为碳酸岩型脉状钼矿床。

秦岭造山带是扬子板块与华北板块经历了长期复杂的构造演化,于三叠纪中晚期全面碰撞对接拼合,并由此转入陆内构造演化阶段(李曙光等, 1990; Ames et al., 1993; 张国伟等, 2001; Zhang et al., 2002; Xie et al., 2004)。前人通过大别超高压变质带的年代学研究,证明了三叠纪碰撞造山的峰期大致在 242~227 Ma 之间(Ames et al., 1993; Chavagnac et al., 1996; Hacker et al., 1998; Zheng et al., 2007)。弓虎军等(2009)在研究了南秦岭地体东江口花岗岩之后提出,秦岭造山带由挤压向伸展的构造体制转变发生在 220 Ma 左右。因此,可基本确定在 220 Ma 以前秦岭地区的碰撞造山作用已经结束,并转入后碰撞的伸展环境。

表5 西沟与黄龙铺、黄水庵矿床特征对比

Table 5 Comparisons of characteristics between Xigou, Huanglongpu and Huangshui deposits

对比项目	西沟钼矿床	黄龙铺钼(铅)矿床	黄水庵钼(铅)矿床
成矿时代	(224.6±9.1)Ma	(221.5±0.3)Ma	(208.4±3.6)Ma
矿床规模	中型	大型	大型
赋围岩及时代	新太古界太华群角闪黑云斜长片麻岩	中元古界熊耳群安山岩及高山河组碎屑岩	新太古界太华群角闪斜长片麻岩
控矿构造	主要受走向近EW、倾向北的韧性剪切带及断层控制	主要受走向NE、倾向SE的一组张性断裂构造控制	主要受NE向、近SN向、NW向3组断裂构造控制
围岩蚀变	钾长石化、硅化、黄铁矿化、萤石化、硬石膏化等	黑云母化、绿帘石化、黄铁矿化、碳酸盐化、硬石膏化、沸石化	钾长石化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、萤石化
矿体形态	脉状	脉状	脉状
矿石矿物组合	主要为黄铁矿、辉钼矿,其次为方铅矿、磁铁矿,还有少量黄铜矿	主要有黄铁矿、方铅矿和辉钼矿	主要形成方铅矿、辉钼矿
成矿物质来源	幔源	幔源	幔源
矿床类型	碳酸岩型脉状矿床	碳酸岩型脉状矿床	碳酸岩型脉状矿床
资料来源	本文	黄典豪等,2009	曹晶,2018

关于秦岭造山带三叠纪岩石圈地幔的性质,张成立等(2007)在研究了南秦岭基性岩脉后认为,秦岭造山带岩石圈地幔从新元古代到早古生代一直保持着相对亏损的特征;秦江峰(2010)在研究了秦岭造山带晚三叠世花岗岩后提出,该带在晚三叠世时期具有富集地幔的特征,并将秦岭地区岩石圈地幔发生明显交代富集的时间限定在晚古生代到三叠纪这段时间内,并认为这种富集地幔的形成是由于勉-略洋壳在晚古生代—中生代早期向北俯冲过程中,源于玄武质洋壳和大洋沉积物的流体与上覆的地幔楔橄榄岩发生了富集反应。

本文测得的西沟钼矿床的成矿年龄为(222.3±3.4)Ma~(226.6±3.7)Ma,结合前人研究成果认为,该矿床形成于扬子板块与华北板块碰撞造山的后碰撞伸展阶段,软流圈上涌诱发了上覆富集岩石圈地幔发生低程度部分熔融,形成了碳酸质流体,碳酸岩流体富含挥发分、低粘度、低密度的特性(杨学明等,1998),使其能够不受周围物质混染而快速迁移至地表形成了碳酸岩脉。

西沟钼矿床的成矿过程可概括如下:在成岩-成矿过程中,首先是钾长石-石英阶段,形成含黄铁矿、重晶石、钾长石的石英脉,是一种氧逸度较高的酸性环境。然后是石英-碳酸岩阶段,主要形成石英碳酸岩脉,此阶段几乎不形成金属矿物。接着是硫化物阶段,主要形成辉钼矿脉及黄铁矿细脉,在成矿流体沸腾、硫逸度较高的条件下,黄铁矿、方铅矿和辉钼矿等相继形成,黄铁矿呈团块状或浸染状产出,方铅

矿分布于方解石粒间或沿方解石裂缝充填,辉钼矿呈浸染状、薄膜状或团块状产出,或充填于方解石、石英的不规则裂缝内。随后在硫酸盐阶段,随着硫逸度和温度降低,氧逸度增高,硬石膏、沸石的出现,标志着内生矿化作用终止。

6 结论

(1) 西沟钼矿床形成年龄为225 Ma左右,成矿时代为晚三叠世。

(2) 西沟钼矿的S、C-O及Sr-Nd同位素组成均指示西沟钼矿床的成矿物质来源于地幔。

(3) 西沟钼矿床的矿床类型应与黄龙铺钼(铅)矿床、黄水庵钼(铅)矿床一样均为碳酸岩型脉状矿床。可能的成矿机制为秦岭造山带发生走滑作用导致软流圈物质上涌,诱发了上覆富集岩石圈地幔发生低程度部分熔融,所形成的碳酸岩流体携带成矿物质上升,在合适的地段沉淀、富集,最终形成了西沟钼矿床。

References

- Ames L, Tilton G R and Zhou G Z. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 21: 339-343.
- Cao J. 2018. Mineralization of Huangshui: a carbonatite Mo deposit in the East Qinling (doctoral thesis)[D]. Supervisor: Mao J W. Beijing: China University of Geoscience. 1-106(in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- Chavagnac V and Jahn B M. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications[J]. *Chemical Geology*, 133: 29-51.
- Chen Y J. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, Central China[J]. *Geology in China*, 37(4): 854-865.
- Dai J Z, Qian Z Z, Gao J S, Li W Y, Gao Y and Li C W. 2018. Geological and geochemical characteristics of the Xigou Mo deposit in Huaxian County, Shanxi Province: Constraint for its metallogenesis[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(4): 705-713(in Chinese with English abstract).
- Du A D, He H L, Yin N W, Zou X Q, Sun Y L, Sun D Z, Chen S Z and Qu W J. 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 68(4): 339-347(in Chinese with English abstract).
- Du A D, Qu W J, Li C and Yang G. 2009. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 288-304(in Chinese with English abstract).
- Du A D, Qu W J, Wang D H and Li C. 2012. Re-Os and its application in economic geology[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-182(in Chinese).
- DePaolo D J and Wasserburg G J. 1979. Geochimica petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43: 615-627.
- Gao Y. 2011. Geology, geochemistry and genesis of Qianfanling quartz-vein Mo deposit in Songxian County, western Henan Province (masters thesis) [D]. Supervisor: Mao J W. Beijing: China University of Geoscience. 1-82(in Chinese with English abstract).
- Gong H J, Zhu L M, Sun B Y, Li B, Guo B and Wang J Q. 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Dongjiangkou granitic pluton and its mafic enclaves in the South Qinling terrain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3029-3042(in Chinese with English abstract).
- Hacker B R, Ratschbacher L and Webb L. 1998. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultra high-pressure Qinling-Dabie orogen, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215-230.
- Huang D H, Wang Y C, Nie F J and Jiang X J. 1984. Isotopic composition of sulfur, carbon and oxygen and source material of the Huanglongpu carbonatite vein-type of molybdenum(lead) deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 58(3): 252-264(in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Hou Z Q, Yang Z M, Li Z Q and Xu D X. 2009. 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 Geologica Sinica*, 83(12): 1968-1984(in Chinese with English abstract).
- Jiao J G, Qian Z Z, Wang Y M, Yuan H C, Han J M and Liu R P. 2007. Geochemistry and metallogenetic potentiality of granite in Xigou area, Huaxian, Shanxi Province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 22(4): 270-276(in Chinese with English abstract).
- Jiao J G, Yuan H C, He K, Sun T, Xu G and Liu R P. 2009. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for Balipo porphyry Mo deposit in East Qinling[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1159-1166(in Chinese with English abstract).
- Jiao J G, Tang Z L, Qian Z Z, Yuan H C, Yan H Q, Sun T and Li X D. 2010a. Metallogenetic mechanism, magma source and zircon U-Pb age of Jinduicheng granitic porphyry, East Qinling[J]. *Journal of Earth Science*, 35(6): 1011-1022(in Chinese with English abstract).
- Jiao J G, Yuan H C, Liu R P, Li X D and He K. 2010b. Litho geochemical characteristics of Balipo molybdenum deposit and its prospecting significance, Huaxian, Shanxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3538-3548(in Chinese with English abstract).
- Keller J and Hoefs J. 1995. Stable isotope characteristics of recent natrocarbonatites from oldinyo Lengai[J]. *Carbonatite Volcanism*, 4: 113.
- Li C, Qu W J and Du A D. 2009a. Decoupling of Re and Os and migration model of in coarse-grained molybdenite[J]. *Mineral Deposits*, 28(5): 707-712(in Chinese with English abstract).
- Li C, Qu W J and Du A D. 2009b. Comprehensive study on extraction of rhenium with acetone in Re-Os isotopic dating[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 233-238(in Chinese with English abstract).
- Li C, Qu W J, Zhou L M and Du A D. 2010. Rapid separation of osmium by direct distillation with curius tube[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 29(1): 14-16(in Chinese with English abstract).
- Li H M, Ye H S, Mao J W, Wang D H, Chen Y C, Qu W J and Du A D. 2007. Re-Os dating of molybdenites from Au(Mo) deposits in Xiaqingling gold ore district and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 417-424(in Chinese with English abstract).
- Li H Y, Yang L, Ke C H, Wang X Y and Liu S T. 2016. Geochemistry of diabase dyke in Jinduicheng Mo deposit, eastern Qinling and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 35(5): 1099-1114(in Chinese with English abstract).
- Li N, Lai Y, Lu Y H and Guo D S. 2008. Study of fluid inclusions and ore genetic type of the Qiyugou gold deposit, Henan[J]. *Geology in China*, 35(6): 1230-1239(in Chinese with English abstract).
- Li J B, Wang X X, Tong Y, Ke C H and Yang Y. 2013. Spatio-temporal distributions of mesozoic granite plutons and molybdenum deposits in East Qinling and their dynamic implication[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(4): 49-61(in Chinese with English abstract).
- Li S G and Zhang Z Q. 1990. Nd isotopic composition and evolution of the upper mantle in the archaean of North China, constraints on the mantle of the heterogeneity unmetasomatic continental lithosphere[J]. *Geochimica*, 4: 277-285(in Chinese).

- Li Y F, Mao J W, Liu D Y, Wang Y B, Wang Z L, Wang Y T, Li X F, Zhang Z H and Guo B J. 2006. SHRIMP Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os datings for the Leimengou porphyry molybdenum deposit, western Henan and its geological implication[J]. *Geological Review*, 52(1): 122-131(in Chinese with English abstract).
- Liu J M, Liu J J and Gu X X. 1997. Basin fluids and their related ore deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(4): 341-352(in Chinese with English abstract).
- Lu X X, Li M L, Wang W, Yu Z P and Shi Y Z. 2002. Indosinian movement and metallogenesis in Qinling orogenic belt[J]. *Mineral Deposites*, 27(6): 762-773(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K. 2009. Isoplot/Ex, version 2.0: A geochronological toolkit for Micros of Excel[C]. Geochronology Center.
- Mao D M. 2000. Oxygen and carbon isotope in Guizhou Tianqiao Pb-Zn deposit[J]. *Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition)*, 29(2): 8-11(in Chinese with English abstract).
- Mao J Q, Zhang Q H and Gu S Y. 1998. Structural evolution of Shuicheng fault depression and study of lead-zinc deposits[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press. 104-129(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qu W J, Du A D, Ye H S, Pirajod F, Li H M, Guo B J, Lie Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1): 4607-4626.
- Mao J W, Ye H S, Wang R T, Dai J Z, Jian W, Xiang J F, Zhou K and Meng F. 2009. Mineral deposit model of Mesozoic porphyry Mo and vein-type Pb-Zn-Ag ore deposits in the eastern Qinling, Central China and its implication for prospecting[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 72-79(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Pirajod F, Xiang J F, Gao J J, Ye H S, Li Y F and Guo B J. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings[J]. *Ore Geology Reviews*, 43: 264-293.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes and ore genesis[J]. *Econ. Geol.*, 69(6): 551-578.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*[C]. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons. 509-567.
- Pinckney D M and Rafter T A. 1972. Fractionation of sulphur isotopes during ore deposition in the Upper Mississippi Valley zinc-lead district[J]. *Econ. Geol.*, 67: 315-328.
- Qin J F. 2010. Petrogenesis and geodynamic implications of the Late-Triassic granitoids from the Qinling Orogenic Belt (doctoral thesis) [D]. Supervisor: Lai S C. Xi'an: Northwestern University. 236p(in Chinese with English abstract).
- Qu W J and Du A D. 2003. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with carius tube sample digestion[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 22(4): 254-262(in Chinese with English abstract).
- Qu W J, Du A D and Ren J. 2008. Influence of H_2O_2 in the signal intensity of Rhenium, Osmium and Re-Os age in the process of dissolution for pyrite[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 8(2): 223-226(in Chinese with English abstract).
- Qu W J, Du A D and Li C. 2009. High-precise determination of Os miumisotopic ratio in the Jinchuan copper-nickel sulfide ore samples[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 219-222(in Chinese with English abstract).
- Rollison H R. 1993. *Petrochemistry*[M]. China University of Science and Technology Press. 2000: 167-205.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group II A, III A, IV A and VI B iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099-1109.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Du A and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China[J]. *Econ. Geol.*, 92(7-8): 827-835.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah L and Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 13(6): 479-486.
- Song W L, Xu C, Wang L J and Qi L. 2009. Primary study on the origin of carbonated dyke type molybdenum deposit in Huanglongpu, Shaanxi Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 150-151(in Chinese with English abstract).
- Wang H Y. 1993. Geochemistry of Pb-Zn mineralization in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 10(4): 272-290(in Chinese).
- Wang L J, Xu C, Wu M, Song W L and Tang H F. 2012. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of Lesser Qinling[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 32(3): 370-378(in Chinese with English abstract).
- Wang Y M. 2006. Molybdenum ore controlling factors, metallogenic types and metallogenic potential in Xigou area, Hua County, Shaanxi Province (masters thesis) [D]. Supervisor: Qian Z Z. Xi'an: Chang An University. 63p(in Chinese with English abstract).
- Wang Y T, Ye H S, Ye A W, Li Y G, Shuai Y, Zhang C Q and Dai J Z. 2010. Molybdenite Re-Os age and its significance of quartz vein type gold molybdenum deposit in Majiawa, North margin of Xiaolinling mountains[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 140-145(in Chinese with English abstract).
- Xie Z, Zheng Y F, Jahn B, Balleve M, Chen J F, Gautier P, Gao T S, Gong B and Zhou J B. 2004. Sm-Nd and Rb-Sr dating of pyroxene-granitite from North Dabie in eastern Central China: Problem of the isotope disequilibrium due to retrograde metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 206: 137-158.
- Xu C, Song W L, Qi L and Wang L J. 2009. Geochemical characteristics and tectonic setting of ore-bearing carbonatites in Huanglongpu Mo ore field[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 422-430(in Chinese with English abstract).
- Yang X M, Yang X Y and LeBas M J. 1998. Geological and geochemical characteristics of carbonatites and implication for tectonic settings[J]. *Advances in Earth Science*, 13(5): 44-53(in Chinese with English abstract).

- Ye H S, Mao J W, Li Y F, Guo B J, Zhang C Q, Liu J, Yan Q R and Liu G Y. 2006a. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication[J]. *Journal of Geological*, 80(7): 1078-1088(in Chinese with English abstract).
- Ye H S, Mao J W, Li Y F, Yan C H, Guo B J, Zhao C S, He C F, Zheng R F and Chen L. 2006b. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag deposits in Nannihu Ore field, western Henan Province[J]. *Geoscience*, 20(1): 165-174(in Chinese with English abstract).
- Yuan H C, Wang R T, Jiao J G, Li W Y, Liu W Q and Tan W. 2014. Re-Os isotopic ages of molybdenites from Xigou Mo deposit in Huaxian of East Qinling and their geological significance[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 36(1): 120-126(in Chinese with English abstract).
- Zhang C L, Gao S, Yuan H L, Zhang G W, Yan Y X, Luo J L and Luo J H. 2007. Early Paleozoic mantle properties in South Qinling: Sr-Nd-Pb isotopic evidence from ultramafic, mafic dikes and volcanic rocks[J]. *Science in China(Series D)*, 37(7): 857-865(in Chinese with English abstract).
- Zhang G W et al. 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press. 729(in Chinese).
- Zhang J, Chen Y J, Shu G M, Zhang F X and Li C. 2002. Compositional study of minerals within the Qinlingliang granite, southwestern Shanxi Province and discussions on the related problems[J]. *Science in China (Series D)*, 45: 662-672.
- Zhang J, Ye H S, Shi M C and Meng F. 2013. Metallogenic process of the Yuchiling Mo deposit in East Qinling-constrains from fluid inclusions[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(7): 1113-1128(in Chinese with English abstract).
- Zhang L G. 1985. Hydrogen, oxygen, sulfur and carbon isotope geochemistry of the Lianhuashan porphyry type tungsten deposit[J]. *Mineral Deposits*, 4(1): 54-63(in Chinese with English abstract).
- Zhang Q H and Gu S Y. 1999. Geochemical study on Qingshan lead-zinc deposit in Shuicheng, Guizhou Province[J]. *Geochemistry*, 27(1): 15-20(in Chinese).
- Zhao H J, Mao J W, Ye H S, Hou K J and Liang H S. 2010. Chronology and petrogenesis of Shijiawan granite porphyry in Shanxi Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Mineral Deposites*, 29(1): 143-157(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Gao T S and Wu Y B. 2007. Fluid flow during exhumation of deeply subducted continental crust Zircon U-Pb age and O-isotope studies of a quartz vein with in ultra high pressure eclogite[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(2): 267-283.
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou G F and Zeng Q S. 2012. C-O Isotope and REE geochemistry of the hydrothermal calcites from the Tianqiao Pb-Zn ore deposit in NW Guizhou Province, China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(1): 93-101.
- Zhou J X, Huang Z L, Gao J G and Yan Z F. 2013a. Geological and C-O-S-Pb-Sr isotopic constraints on the origin of the Qingshan carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China[J]. *International Geology Review*, 55: 904-916.
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, Li X B and Jin Z G. 2013b. Constraints of C-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 77-92.
- Zhu G B, Liu G F, Yao X N and Yang Z J. 2005. Metallogeny and mineral resource propecying in the Pb-Zn-Ag-Au-Mo polymetallic ore belt of eastern Qingling[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 27(1): 44-52(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹晶. 2018. 东秦岭黄水庵碳酸岩型钼矿床成矿作用研究(博士学位论文)[D]. 导师:毛景文. 北京:中国地质大学. 1-106.
- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. *中国地质*, 37(4): 854-865.
- 代军治, 钱壮志, 高菊生, 李伍义, 高毅, 李长卫. 2018. 陕西华县西沟钼矿地质、地球化学特征及其对矿床成因的制约[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 37(4): 705-713.
- 杜安道, 何红寥, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. *地质学报*, 68(4): 339-347.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. *岩矿测试*, 28(3): 288-304.
- 杜安道, 屈文俊, 王登红, 李超. 2012. 铼-钨法及其在矿床学中的应用[M]. 北京:地质出版社. 1-182.
- 高阳. 2011. 豫西嵩县前范岭石英脉型钼矿床地质地球化学与成因研究(硕士论文)[D]. 导师:毛景文. 北京:中国地质大学. 1-82.
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 李犇, 郭波, 王建其. 2009. 南秦岭地体东江口花岗岩及其基性包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 25(11): 3029-3042.
- 黄典豪, 王义昌, 聂凤军, 江秀杰. 1984. 黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床的硫、碳、氧同位素组成及成矿物质来源[J]. *地质学报*, 58(3): 252-264.
- 黄典豪, 侯增谦, 杨志明, 李振清, 许道学. 2009. 东秦岭钼矿带内碳酸岩脉型钼(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*, 83(12): 1968-1984.
- 焦建刚, 钱壮志, 王勇茗, 袁海潮, 韩俊民, 刘瑞平. 2007. 华县西沟地区花岗岩体地球化学及成矿潜力[J]. *地质找矿丛论*, 22(4): 270-276.
- 焦建刚, 袁海潮, 何克, 孙涛, 徐刚, 刘瑞平. 2009. 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*, 83(8): 1159-1166.
- 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 袁海潮, 闫海卿, 孙涛, 徐刚, 李小东. 2010a. 东秦岭金堆城花岗岩斑岩体的锆石 U-Pb 年龄、物质来源及成矿机制[J]. *地球科学*, 35(6): 1011-1022.
- 焦建刚, 袁海潮, 刘瑞平, 李小东, 何克. 2010b. 陕西华县八里坡钼矿床岩石地球化学特征及找矿意义[J]. *岩石学报*, 26(12): 3538-3548.

- 李超,杜安道,屈文俊. 2009a. 大颗粒辉钼矿 Re-Os 同位素失耦现象及 ^{187}Os 迁移模式研究[J]. 矿床地质, 28(5): 707-712.
- 李超,屈文俊,杜安道. 2009b. 铼-钼同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究[J]. 岩矿测试, 28(3): 233-238.
- 李超,屈文俊,周利敏,杜安道. 2010. Carius管直接蒸馏快速分离钼方法研究[J]. 岩矿测试, 29(1): 14-16.
- 李洪英,杨磊,柯昌辉,王修缘,刘素彤. 2016. 东秦岭金堆城钼矿床辉绿岩地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 35(5): 1099-1114.
- 李厚民,叶会寿,毛景文,王登红,陈毓川,屈文俊,杜安道. 2007. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钼定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 26(4): 417-424.
- 李金宝,王晓霞,童英,柯昌辉,杨阳. 2013. 东秦岭中生代花岗岩体、钼矿床分布的时空规律及其动力来源[J]. 地球科学与环境学报, 35(4): 49-61.
- 李诺,赖勇,鲁颖淮,郭东升. 2008. 河南祁雨沟金矿流体包裹体及矿床成因类型研究[J]. 中国地质, 35(6): 1230-1239.
- 李曙光,张宗清. 1990. 华北太古代上地幔钼同位素组成、演化及对该区岩石圈地幔不均一性的制约[J]. 地球化学, 4: 277-285.
- 李永峰,毛景文,刘敦一,王彦斌,王志良,王义天,李晓峰,张作衡郭保健. 2006. 豫西雷门沟斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 52(1): 122-131.
- 刘建明,刘家军,顾雪祥. 1997. 沉积盆地中的流体活动及其成矿作用[J]. 岩石矿物学杂志, 16(4): 341-352.
- 卢欣祥,李明立,王卫,于在平,时永志. 2002. 秦岭造山带的印支运动及印支期成矿作用[J]. 矿床地质, 27(6): 762-773.
- 毛德明. 2000. 贵州赫章天桥铅锌矿床围岩的氧-碳同位素研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 29(2): 8-11.
- 毛健全,张启厚,顾尚义. 1998. 水城断陷构造演化及铅锌矿研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社. 104-129.
- 毛景文,叶会寿,王瑞廷,代军治,简伟,向君锋,周珂,孟芳. 2009. 东秦岭中生代铅铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J]. 地质通报, 28(1): 72-79.
- 秦江锋. 2010. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩类成因机制及深部动力学背景(博士学位论文)[D]. 导师: 赖绍聪. 西安: 西北大学. 1-236.
- 屈文俊,杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钼地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-262.
- 屈文俊,杜安道,任静. 2008. 过氧化氢在黄铁矿的溶解过程中对铼-钼信号强度及年龄的影响研究[J]. 分析化学, 8(2): 223-226.
- 屈文俊,杜安道,李超. 2009. 金川铜镍硫化物样品中钼同位素比值的高精度分析[J]. 岩矿测试, 28(3): 219-222.
- 宋文磊,许成,王林均,漆亮. 2009. 陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼矿床成因初探[J]. 矿物学报, 29(S1): 250-251.
- 王海云. 1993. 贵州铅锌矿的地球化学特征[J]. 贵州地质, 10(4): 272-290.
- 王林均,许成,吴敏,宋文磊,唐红峰. 2012. 小秦岭碳酸岩的 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学[J]. 矿物学报, 32(3): 370-378.
- 王义天,叶会寿,叶安旺,李永革,帅云,张长青,代军治. 2010. 小秦岭北缘马家洼石英脉型金钼矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及其意义[J]. 地学前缘, 17(2): 140-145.
- 王勇茗. 2006. 陕西华县西沟地区钼矿控矿因素、成矿类型及成矿潜力(硕士学位论文)[D]. 导师: 钱壮志. 西安: 长安大学. 63页.
- 许成,宋文磊,漆亮,王林均. 2009. 黄龙铺钼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, 25(2): 422-430.
- 杨学明,杨晓勇,LeBas M J. 1998. 碳酸岩的地质地球化学特征及其大地构造意义[J]. 地球科学进展, 13(5): 44-53.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,郭保健,张长青,刘珺,闫全人,刘国印. 2006a. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 80(7): 1078-1088.
- 叶会寿,毛景文,李永峰,燕长海,郭保健,赵财胜,何春芬,郑裕芬,陈莉. 2006b. 豫西南泥湖矿田钼钨及铅锌银矿床地质特征及其成矿机理探讨[J]. 现代地质, 20(1): 165-174.
- 袁海潮,王瑞廷,焦建刚,李伍义,刘文庆,谭雯. 2014. 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, 36(1): 120-126.
- 张成立,高山,袁洪林,张国伟,晏云翔,罗静兰,罗金海. 2007. 南秦岭早古生代地幔性质: 来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素证据[J]. 中国科学(D辑), 37(7): 857-865.
- 张国伟,等著. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社. 1-729.
- 张娟,叶会寿,史美超,孟芳. 2013. 东秦岭鱼池岭斑岩型钼矿床成矿作用过程——来自成矿流体的约束[J]. 地质通报, 32(7): 1113-1128.
- 张理刚. 1985. 莲花山斑岩型钨矿床的氢、氧、硫、碳和铅同位素地球化学[J]. 矿床地质, 4(1): 54-63.
- 张启厚,顾尚义. 1999. 贵州水城青山铅锌矿床地球化学研究[J]. 地质地球化学, 27(1): 15-20.
- 赵海杰,毛景文,叶会寿,侯可军,梁慧山. 2010. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗岩的年龄及岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约[J]. 矿床地质, 29(1): 143-157.
- 周家喜,黄智龙,周国富,曾乔松. 2012. 黔西北天桥铅锌矿床热液方解石 C-O 同位素和 REE 地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 36(1): 93-101.
- 朱广彬,刘国范,姚新年,杨振军. 2005. 东秦岭铅锌银金钼多金属成矿带成矿规律及找矿标志[J]. 地球科学与环境学报, 27(1): 44-52.