

文章编号:1672-6561(2014)01-0019-13

小秦岭地区金钼多金属矿成矿特征与找矿预测

王瑞廷^{1,2}, 袁海潮³, 孟德明¹, 王磊³, 马文平³

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北有色地质勘查局地质勘查院, 陕西 西安 710054; 3. 西北有色地质勘查局 712 总队, 陕西 咸阳 712000)

摘要:小秦岭地区是中国重要的金钼矿产基地。以构造-岩浆-成矿系统为指导,综合研究认为区内金钼多金属矿床可分为印支期—燕山期与重熔型花岗岩浆侵入活动有关的金(钼)矿床成矿系列和与深源浅成型花岗岩、碱性岩有关钼(金钨)矿床成矿系列。金(钼)矿床类型主要包括石英脉型、构造蚀变岩型、糜棱岩型、爆破角砾岩型和复合型等,以前两者为主;钼(金钨)矿床类型主要包括斑岩型、斑岩-矽卡岩型、斑岩-爆破角砾岩型、石英-碳酸岩脉型和构造蚀变岩型等,也以前两者为主。该区三叠世以来共发生过3次岩浆侵入活动,每次都伴有不同程度的钼金矿化作用,并分别对应于不同的钼金矿化高峰期。钼的成矿作用分为印支期(210~220 Ma)和燕山期早白垩世早期(140~145 Ma)、早白垩世中晚期(110~138 Ma);金的成矿作用分为印支期(约220 Ma)和燕山期早白垩世中晚期(约130 Ma);钼、金成矿在印支期和燕山期早白垩世中晚期叠合,而在燕山期早白垩世早期分离。整体上,区内岩体与断裂构造控矿特征明显,燕山期金钼成矿作用强烈发育。该区娃娃沟—峪耳沟、峪耳沟—曹家沟、太子坪—葫芦沟—荒地沟与文公岭北坡等地区为金钼多金属矿的有利找矿靶区,并应特别重视中酸性小岩体的含矿性评价。

关键词:金钼矿床;成矿特征;中酸性岩体;印支期—燕山期;找矿标志;找矿预测;小秦岭地区
中图分类号:P588.3 **文献标志码:**A

Metallogenic Characteristics and Exploration Prediction of Au-Mo Polymetallic Deposits in Xiaoqinling Area

WANG Rui-ting^{1,2}, YUAN Hai-chao³, MENG De-ming¹, WANG Lei³, MA Wen-ping³

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Geological Exploration Institution, Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. No. 712 Geological Team, Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: Xiaoqinling area is an important Au-Mo mineral base in China. Based on the tectonic-magmatic-metallogenic system, the Au-Mo polymetallic deposits in Xiaoqinling area can be divided into two metallogenic series: Au (Mo) deposits related to remelting granite magmatic intrusion, and Mo (Au-W) deposits related to deep-hypabyssal granites and alkaline rocks in Indosinian-Yanshanian. The main types of Au (Mo) deposits include quartz vein, structural altered rock-host, mylonite, explosive breccia, composite rock, etc., and the first two types are predominant. The main types of Mo (Au-W) deposits include porphyry, porphyry-skarn, porphyry-explosive breccia, quartz-carbonate vein, structural altered rock-host, etc., and the first two types are also predominant. There are three magmatic intrusion activities accompanied by different degrees of Mo-Au

收稿日期:2014-02-28

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项项目(201111007-3);“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAB04B05)

作者简介:王瑞廷(1969-),男,陕西杨凌人,西北有色地质勘查局地质勘查院教授级高级工程师,理学博士,E-mail:wrttyf@163.com。

mineralization since Triassic, corresponding to three different peaks of Mo-Au mineralization. Mo mineralization epoch includes Indosinian (210-220 Ma), the early stage of Early Cretaceous (140-145 Ma) and the middle-late stage of Early Cretaceous (110-138 Ma) in Yanshanian; Au mineralization epoch includes Indosinian (about 220 Ma) and the middle-late stage of Early Cretaceous in Yanshanian (about 130 Ma); Mo and Au mineralizations coincide in Indosinian and the middle-late stage of Early Cretaceous in Yanshanian, but separate in the early stage of Early Cretaceous in Yanshanian. Characteristics of intrusion and fault tectonic ore-controlling are obvious, and Au-Mo mineralization in Yanshanian is strong in Xiaoqinling area as a whole. The favorable prospecting targets for Au-Mo polymetallic in Xiaoqinling area are Wawagou-Yu'ergou, Yu'ergou-Caojiagou, Taiziping-Hulugou-Huangdigou and the northern slope of Wengongling, and the ore-bearing potential evaluation of intermediate-acid small intrusion should be paid attention to.

Key words: Au-Mo deposit; metallogenic characteristic; intermediate-acid intrusion; Indosinian-Yanshanian; indicator for deposit; exploration prediction; Xiaoqingling area

0 引言

小秦岭地区是中国金、钼的重要矿产地,也是秦岭成矿带地质研究、勘查找矿的主要工作区之一,面积约 2 000 km²。在过去的几十年里,通过持续的地质工作相继发现了金堆城、南泥湖、三道庄、上房沟等超大型钼矿床,黄龙铺、石家湾、西沟、雷门沟、木龙沟等大中型钼矿床,以及潼峪、葫芦沟、陈耳、文峪、杨砦峪等大中型金矿床,提交钼金属储量超过 350×10⁴ t,金金属储量约 800 t^[1-3],成为中国第二大黄金产出集中地。同时,众多研究者也对区内乃至东秦岭基础地质及其金属矿产开展了大量的岩石学、构造地质学、地球化学、地质年代学、成矿学和矿床学等方面的研究,并在其形成和演化上获得了若干重要进展,进一步明确了区内变质基底的属性、岩浆期次、成岩成矿条件、矿化类型、矿床分布规律等^[4-11]。基于此,笔者通过深入调查分析和综合研究,以小秦岭陕西段为主,总结区内有关金、钼多金属矿床的成矿特征,提出其勘查标志,进行找矿靶区预测,为推动区内成矿理论研究和实现找矿突破提供依据和支撑。

1 区域地质背景

1.1 地 层

小秦岭地区大地构造上隶属于华北地台南缘华山—熊耳山隆起区,属太华地块,为华北地台与秦岭微板块的交界地带,由太华台拱和金堆城台凹 2 个次级单元组成,南以铁炉子—三要—黑沟—栾川断裂与北秦岭构造带毗邻,北以小秦岭山前断裂(太要—故县断裂)为界(图 1)。

区内出露的地层主要为太古界太华群深变质火山—沉积岩系、中元古界长城系熊耳群浅变质中性—中酸性火山岩系、蓟县系官道口群滨海相碳酸盐岩建造、上元古界青白口系栾川群浅海相碎屑岩—碳酸盐岩和碱性火山岩建造、下古生界陶湾群滨海及潮坪相碳酸盐岩建造,另外还零星出露震旦系、寒武系、白垩系和面积的新生代地层。根据岩石的变形—变质特征和空间产出关系,可将本区的岩石划分为基底和盖层两部分,太华群构成了本区的结晶基底岩系,其他地层组成盖层。钼金多金属矿产在基底与盖层中都有显示。太华群地层变质程度深,属中深变质的角闪岩相,局部达麻粒岩相,岩石组成主要为各种片麻岩、混合岩、斜长角闪岩、变粒岩、浅粒岩、大理岩以及磁铁矿石岩等。熊耳群不整合在太华群之上,以陆相喷发火山岩为主,同时伴有河湖相喷发的火山岩建造,变质程度较低,为绿片岩相,岩性主要有玄武安山岩、安山岩、英安质或流纹质斑岩、火山角砾集块岩、碎屑熔岩、集块岩和沉凝灰岩等。官道口群为一套碎屑岩、化学沉积岩石组合,属于三角洲相—滨海相—浅海相沉积的产物,主要岩性有砂岩、页岩、白云岩、砂泥砾岩和泥板岩等。栾川群主要由碳硅质板岩、含砾石英砂岩、石英岩、大理岩和白云质大理岩等组成。寒武系岩性以砂岩和白云岩为主,属碎屑—化学沉积产物。白垩系为一套红色岩系,岩性为紫红色粉砂质隐晶灰岩、含砾灰质白云岩、粉砂质黏土岩夹灰色砂砾岩及岩屑砂岩^[12]。

1.2 构 造

本区地处华北克拉通南缘与秦岭造山带相接地带,中生代以前为华北克拉通的组成部分,具有典型的克拉通边缘特征;在中—新生代经历了秦岭造山

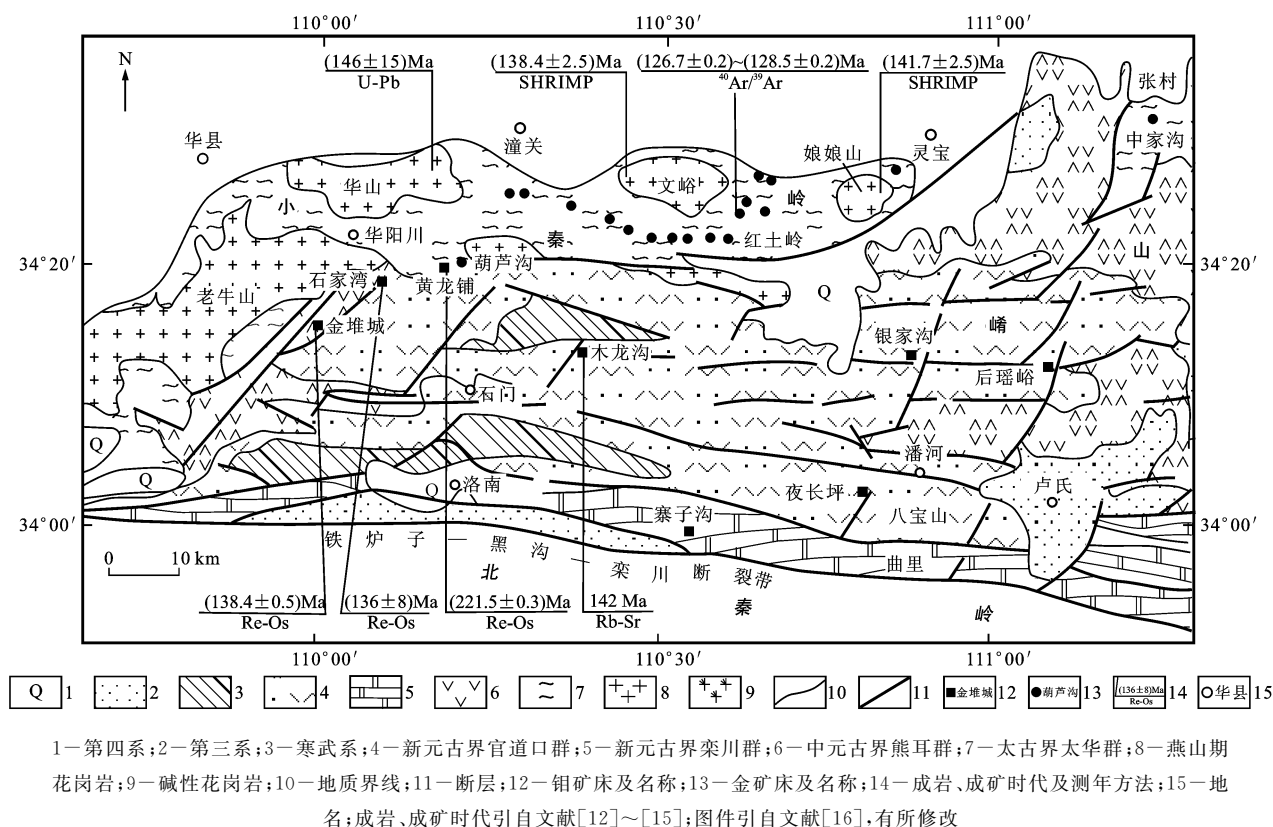


图 1 小秦岭地区区域地质及金钼矿床分布

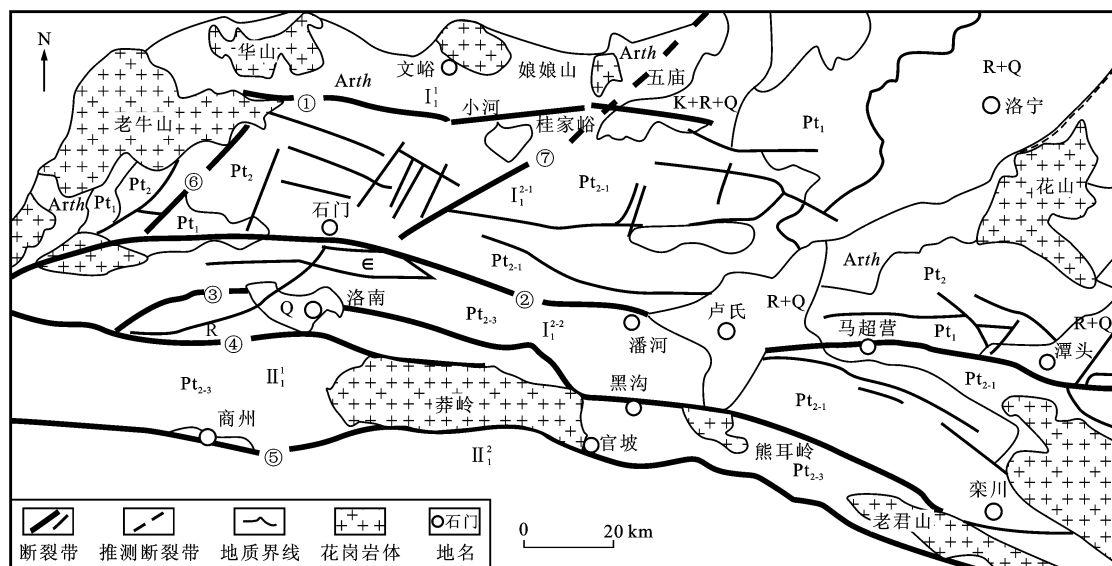
Fig. 1 Regional Geological Map and Distribution of Au-Mo Deposits in Xiaoqinling Area

带陆内造山运动后,成为秦岭造山带的北缘组成部分^[17]。由于受板块边界深断裂和秦岭褶皱带长期活动的影响,区内构造形态复杂,断裂与褶皱均较发育,区域构造格架为近 EW 向与 NNE 向 2 组构造相互交织成的格子状,燕山期中酸性小侵入体及金、钼矿床通常位于这两组断裂交汇部位。

小秦岭基底岩石区南、北两侧分别以 2 条大型韧性断裂带为界与盖层区相接,奠定了小秦岭的基本构造格架。其北侧为太要—故县断裂带,呈近 EW 向波状展布,整体产状向北陡倾。南侧为巡马道—小河断裂带(即朱家沟断裂),在走向上自西而东的变化大致为 NE—近 EW—NEE,长大于 150 km,断面倾向南或 SE,倾角超过 60° 。上述 2 条断裂带早期表现为中深层次的韧性剪切变形,中期为中上层次的脆脆性变形,晚期被浅层次的脆性变形叠加而形成角砾岩带。在基底内部,断裂构造广泛发育,正是这些断裂控制了小秦岭金矿床的产出和分布,同时也控制了脉岩的展布。断裂走向以近 EW 向为主,规模最大,其次为 NW 向、NE 向和近 SN 向(图 2)。该类断裂的形成和发育直接受到南北边界断裂带构造演化的控制,其规模不等,但都具有类似的早、中、晚 3 期变形活动特征。同时,小秦岭由上

基底岩系构成了老鸦岔一大月坪复式背斜构造,整体呈 EW 向($100^{\circ}\sim 280^{\circ}$)展布,轴部位于大月坪—老鸦岔娘娘山一带,北翼地层产状相对较缓,南翼地层倾角较陡。背斜长度大于 90 km,宽约 15 km。复式背斜向东、西两端围合倾没,叠置覆盖在由下基底岩系所形成的穹窿之上,构成上叠式双层褶皱系统^[18]。复式背斜由一系列次级褶皱组成,自北向南依次为五里村背斜、七树坪向斜、老鸦岔背斜和庙沟向斜。

小秦岭南部的盖层区主要发育一些宽缓的弯滑褶皱和断裂。其中,褶皱构造主要发育在盖层区的南部,呈 EW 向展布,自北向南依次为路家街向斜、石门背斜和孤山村向斜。盖层区内深断裂带普遍发育,自北而南发育 3 条长 150~200 km 的深断裂带(除作为北侧边界的朱家沟断裂带以外),分别为洛源—石门—马超营断裂带、上楼村—灵口街—庙子断裂带、铁炉子—黑沟—栾川断裂带。这些断裂带近 EW 向展布,具有长期活动的特征。其他断裂构造主要表现为脆性变形,发育碎裂岩和构造角砾岩,按走向可以分为近 EW 向、近 SN 向、NE 向和 NW 向等 4 组。近 EW 向断裂为盖层区主要方向的断裂,NNE 向、NE 向断裂和 NW 向断裂相伴而生,其



Arth—太古界太华群;Pt₁—早元古界铁铜沟组;Pt₂—中元古界长城系(熊耳群);Pt₂₋₃—中元古界蓟县系及新元古界青白口系、震旦系;
 ∈—寒武系;K—白垩系;R—第三系;Q—第四系;I—华北地台;I₁¹—太华隆起;I₁²⁻¹—金堆城凹陷区北部;I₁²⁻²—金堆城凹陷南部;
 II—秦岭褶皱带;II₁¹—纸房—永丰褶皱束;II₁²—太白—商县褶皱束;①为巡马道—小河—尖山断裂(即朱家沟断裂);②为洛源—
 石门—潘河—马超营断裂;③为上楼村—灵口街—庙子断裂;④为铁炉子—三要—黑沟—栾川断裂;⑤为商县—葫芦沟—皇台
 断裂;⑥为蓝田张家坪—洛源断裂;⑦为朱阳断裂

图2 小秦岭地区区域地质构造略图

Fig. 2 Geological Structure Sketch Map of Xiaolinling Area

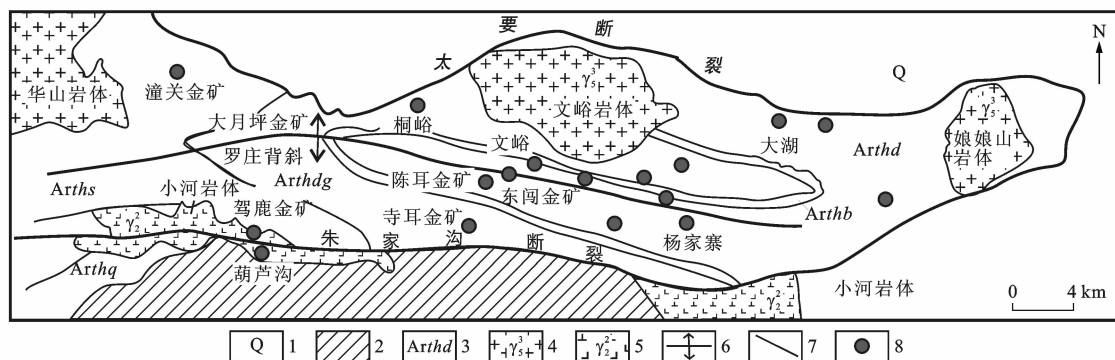
中 NNE 向构造是燕山期叠置在 EW 向构造带之上的主导构造,在地壳浅部表现为 NNE 向的断裂近等间距“行列式”分布,控制了 NNE 向展布的中新生代沉积盆地分布。

1.3 岩浆岩

小秦岭地区岩浆岩广泛发育,岩浆侵入活动频繁、强烈,并伴有火山喷发作用,岩浆作用贯穿本区整个地质演化历史,出露有阜平期 TTG 质(云英闪长岩、奥长石花岗岩和花岗闪长岩)侵入杂岩、吕梁期张家坪岩体、晋宁期小河花岗岩、燕山期华山花岗岩等,产状多为岩基、岩株、岩脉(岩墙)等。总体上,区内岩浆岩以印支期—燕山期为主,岩性多属花岗岩类,且大都分布在 NE 向断裂和 EW 向深大断裂的交汇部位,显示出断裂构造的控制作用。这是因为区内侏罗纪发生区域构造体制转换,伸展体制下的构造运动表现为沿秦岭造山带北缘发生了大规模拆离滑脱、逆冲推覆以及块断、平移构造运动,并伴有强烈的、以酸性岩浆为主的、壳幔同熔成因的岩浆活动,导致花岗质岩浆大面积侵入形成中深成壳源型花岗岩类的大岩基,以及大量来源较深、高侵位的浅成—超浅成相小型花岗斑岩和花岗闪长斑岩体。侵位于小秦岭地区较大的花岗岩体主要有老牛山、华山、文峪、娘娘山等岩体。这些中生代岩体在小秦岭的

基底岩石区中自西而东分布,出露规模依次变小,岩性以黑云母二长花岗岩为主,见少量黑云母花岗岩。

老牛山花岗岩体主要岩石类型为黑云母二长花岗岩,岩体的岩石化学成分特点是富碱,多数岩石的 K₂O 含量高于 Na₂O,主体岩性属铝饱和钙碱性岩系,岩体锆石 U-Pb 年龄为(146.35±0.55)Ma^[19]。华山岩体主要岩石类型有中粗粒含斑黑云母二长花岗岩、中细粒黑云母二长花岗岩和中细粒角闪二长花岗岩,岩石化学成分特点也是富碱,其 Na₂O 含量略高于 K₂O,属准铝或铝饱和钙碱性—偏碱性的岩石系列,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(146±15)Ma^[20]。文峪、娘娘山岩体岩性均为黑云母二长花岗岩,表现为高硅、高铝、富碱、低钛的特征,属偏铝质和钙碱性系列,其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为(138.4±2.5)、(141.7±2.5)Ma^[21]。同时,区内沿洛南—卢氏—栾川—汝阳一带发育燕山期中酸性斑岩类小侵入体^[12];在盖层岩系中主要发育各类花岗斑岩小岩体,其中大量与钼(钨)的成矿关系密切。该区金矿主要分布于距离花岗岩体 2~7 km 的范围内(图 3),表明成矿也与中酸性岩体紧密相关。总之,印支期—燕山期岩浆活动与该区钼、钨、金、铜、银、铅、锌等金属矿产的形成关系密不可分。



1—第四系沉积物;2—中元古界碎屑岩和碳酸岩;3—太古界太华群变质岩(Arthd 为大月坪组,Arthb 为板石山组,Arthdg 为洞沟组,Arths 为三官庙组,Arthq 为秦仓沟组);4—早白垩世花岗岩;5—中元古代花岗岩;6—背斜;7—断裂带;8—金矿床;

图件引自文献[22],有所修改

图3 小秦岭地区金矿田矿产地质略图

Fig. 3 Geological Sketch Map of Au Deposits in Xiaolinling Area

2 金钼多金属矿成矿特征

小秦岭地区金钼多金属矿的成矿作用发育,岩浆、构造控矿特征明显,构造-岩浆作用不仅控制了金属矿产形成,而且为矿体定位提供了储存空间。导矿-储矿系统中构造岩浆活动作为成矿作用统一整体的组成部分,直接参与了金、钼的成矿作用。依据区内主要的金钼多金属矿床(点)成矿机制和控矿因素,其典型金属矿床成矿系统可以归为印支期—燕山期中酸性岩浆热液金钼多金属成矿系统,相应形成与重熔型花岗岩浆侵入活动有关的金(钼)矿床成矿系列和与深源浅成型花岗岩、碱性岩有关的钼(金钨)矿床成矿系列。

2.1 与重熔型花岗岩浆侵入活动有关的金(钼)矿床成矿系列

印支期—燕山期与重熔型花岗岩浆侵入活动有关的金(钼)矿床成矿系列,即中生代与造山作用有关的金矿床成矿系列,以早白垩世与S型花岗岩有关的金多金属矿床成矿亚系列为主。其主要金(钼)矿床类型包括石英脉型、构造蚀变岩型、糜棱岩型、爆破角砾岩型和复合型等,以前两者为主。小秦岭地区已发现含金石英脉与含金构造蚀变带1200余条,预测潜在金资源量大于1200t(其中,陕西境内700余条),尚有400t以上的金资源潜力有待探明^[1-3,23]。

(1)石英脉型金(钼)矿床有陈耳、刘家沟、王排沟、东闯、文峪、Q401、桃园、大湖、泉家峪、马家洼等,均属于造山型金(钼)矿床。陈耳金矿床的Q507、Q9709、Q9503、Q555、Q2009、Q2008、Q9201等10余条含金石英脉体均赋存于EW—NWW向断裂内,这些矿脉提供了矿山绝大多数工业储量,已

累计探明金储量约25t。该组断裂是其主要的含矿构造,一般长200~3000m,宽0.5~5m,南倾,倾角35°~55°。大湖金钼矿石中6件辉钼矿的Re-Os同位素等时线年龄为 (218 ± 41) Ma(误差类型为 2σ ,平均标准权重偏差(MSWD)为38),加权平均年龄为 (234 ± 18) Ma(误差类型为 2σ ,MSWD值为23),3个辉钼矿样品的Re-Os同位素模式年龄分别为 (223.0 ± 2.8) 、 (223.7 ± 2.6) 、 (232.9 ± 2.7) Ma;泉家峪金钼矿石中2个辉钼矿样品的Re-Os同位素模式年龄分别为 (129.1 ± 1.6) 、 (130.8 ± 1.5) Ma^[24-25]。这些年龄数据表明,该区金的成矿作用不仅发生于燕山期,而且还发生在印支期。与金堆城、黄龙铺等典型钼矿床不同,大湖和泉家峪矿床中辉钼矿Re含量很低,可能表明其成矿物质来自壳源^[24]。马家洼金钼矿床位于小秦岭北缘,矿体发育在由近EW向脆韧性断裂构造带控制的石英脉中,对该矿床辉钼矿样品进行的Re-Os同位素年代学研究表明,模式年龄为232.5~268.4Ma,等时线年龄为 (232 ± 11) Ma,即金、钼成矿作用时代为早、中三叠世。马家洼石英脉型金钼矿床是区域伸展体制下构造-流体成矿事件的产物,Re-Os同位素组成特征指示了成矿物质主要来源于地壳^[26]。

(2)构造蚀变岩型金矿床有葫芦沟、洛源、上官、青岗坪等。葫芦沟金矿床产于太华群基底与高山河组沉积层间的推覆构造带中,位于EW向朱家沟断裂(近EW向葫芦沟推覆构造)与NE向太子坪—上坪(回马坪)断裂交汇部位。矿区内破碎蚀变带严格受NE—NEE向断裂带控制,以含金构造破碎蚀变带为主要含金地质体,目前已发现20余条破碎蚀变带,其中含金性较好者有12条,矿床已达中型规

模。成矿物质来自于太华群地层。

(3) 糜棱岩型金矿床有潼峪 Q8701、蒿岔峪 Q440、东桐峪 Q01 等。矿体产于太华群岩石中,沿不同方向韧性剪切带发育,以发育规模较小的石英脉扁豆体及矿化初糜岩和构造片岩为特征^[2]。

(4) 爆破角砾岩型金矿床为祁雨沟、店房等,该类型金矿化受爆破角砾岩体内的构造裂隙及破碎带控制,主要产出在角砾岩的胶结物中。

(5) 复合型金矿床以岳王庙为代表,以含金石英脉与含金破碎蚀变体同等发育为特征。

中生代以来,秦岭地区发生了大规模陆内造山作用,在印支期曾发生重要的岩浆-成矿事件,但被燕山期造山作用所改造或破坏。印支末期—燕山早期伴随着陆壳重熔型花岗岩浆侵位,来自太华群古老变质基底的金、银等多金属成矿物质经历多期变质成矿作用和韧性剪切成矿作用,最终在该期岩浆热液成矿作用的主导下而成矿。区内含金石英脉多赋存在太古代太华群变质岩系内规模相对较小的断裂构造带中,金矿床集中分布于 NE 向及 EW 向地幔隆起区和区域性断裂围限的地区,常显示高布伽重力和高航磁异常,地球化学场以富集 Au、Ag、Pb、Mo、W、Bi、Hg 等元素为特征^[2,27],并主要围绕燕山期花岗岩体周围呈近 EW 或 NE 向延伸。因此,在小秦岭矿田太古宙老基底岩系中的脆韧性断裂构造带内寻找印支期和燕山期石英脉型金(钼)矿床,仍是一个好的找矿方向。

2.2 与深源浅成型花岗岩、碱性岩有关的钼(金钨)矿床成矿系列

印支期—燕山期与深源浅成型花岗岩、碱性岩有关的钼(金钨)矿床成矿系列,以晚侏罗世—早白垩世与 I 型花岗斑岩有关的钼(金钨)银铅锌成矿亚系列、早白垩世晚期与铝质 A 型花岗岩有关的钼铅锌成矿亚系列为主。其主要钼(金钨)矿床类型包括斑岩型、斑岩-矽卡岩型、斑岩-爆破角砾岩型、石英-碳酸岩脉型和构造蚀变岩型等,以前两者为主,斑岩型、斑岩-矽卡岩型矿床所提供的钼储量约占区内 85%。其含钼岩浆岩主要是富硅、钾,而贫铁、镁、钙的花岗斑岩,只有黄龙铺和黄水庵钼矿床为碳酸岩脉含矿。在成矿时间上,除黄龙铺和西沟钼矿床形成于 210~220 Ma 以外,其余与花岗斑岩有关的钼矿床均形成于 110~160 Ma。在构造背景上,结合秦岭造山带构造演化分析,黄龙铺矿床形成于弧后伸展背景,而其他矿床及其成矿斑岩皆形成于陆-陆碰撞体制^[28]。

(1) 斑岩型钼矿床有金堆城、石家湾、八里坡、石窑沟、汤家坪、南台等。成矿岩体均属碰撞型或陆壳深熔型花岗岩类,岩石以高硅、富碱为特征,属钙碱性系列,具斑状结构。含矿斑岩体出露面积一般小于 1 km²,形态复杂,多呈小岩株、岩筒或岩枝状,与围岩侵入接触关系明显,矿化率较高,具有小岩体成大矿的特征。金堆城大型斑岩钼矿床北部的老牛山黑云二长花岗岩和金堆城含矿斑岩的激光探针单颗粒 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年表明,老牛山黑云母二长花岗岩和金堆城含矿斑岩锆石加权平均年龄值分别为 (146.35±0.55)、(140.95±0.45) Ma,与前人多次获得的金堆城钼矿床的辉钼矿 Re-Os 模式年龄 ((127±7)~(141±4) Ma) 上限值一致,显示成矿与成岩同时或略滞后于岩体,成岩成矿发生于侏罗纪—白垩纪的同一成岩成矿系统中,岩体的形成和钼矿化的发生处于侏罗纪—白垩纪挤压—伸展转变期,对应的地球动力学背景为华北板块与扬子板块碰撞造山后的陆内造山和伸展过程^[19]。经最近几年金堆城深部钻探工作,发现成矿深度较大,矿体在 350 m 标高以上基本连续、品位稳定、形态规整,初步估算在其深部还可新增钼资源量 45×10⁴ t,全矿床规模有望超过 150×10⁴ t。石家湾钼矿体主要分布于石家湾花岗斑岩外接触带的围岩中,花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究表明,其年龄为 (139.9~145.6) Ma,加权平均年龄为 (141.4±0.6) Ma (MSWD 值为 1.00),侵位于早白垩世,与辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄 (138 Ma) 相近;岩浆源区以下地壳为主,有地幔物质的混入。石家湾花岗斑岩与区内金堆城花岗斑岩及老牛山花岗岩三者可能来源于同源母岩浆,均形成于地壳物质的部分熔融^[29]。采用 LA-ICP-MS 法获得八里坡斑岩体单颗粒锆石 U-Pb 同位素成岩年龄为 (155.9±2.3) Ma,采用 ICP-MS 法测得其矿石中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 (156.3±2.2) Ma;2 种方法获得的年龄一致,表明晚侏罗世成岩与成矿同时形成^[30-31]。八里坡似斑状二长花岗岩体与东秦岭南泥湖、上房沟等斑岩体成岩年龄一致,早于金堆城钼矿床成矿年龄,但均为燕山期成矿事件的反映。八里坡钼矿已达中型,依据钻探工程分析认为,岩体西南深部具有较好的钼钨找矿潜力。河南省境内的石窑沟大型钼矿的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 (135.2±1.8) Ma,成矿物质主要来自于下地壳^[32];汤家坪大型钼矿的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 113 Ma^[33];汝阳东沟超大型钼矿 A 型花岗斑岩体的

成岩年龄为 (112 ± 2.7) Ma, 辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 $(115.5 \pm 1.7) \sim (116.5 \pm 1.7)$ Ma^[34]。该类钼矿成矿作用常发生于 110~138 Ma, 为东秦岭钼多金属成矿的第 3 次主成矿期, 矿化强烈, 矿床规模大。

(2) 斑岩-矽卡岩型钼矿床有南泥湖—三道庄、上房沟、夜长坪、木龙沟、黑山等, 前两者处于中国 6 个超大型钼矿床的第二位和第三位。南泥湖含矿斑岩的成岩年龄为 (157.1 ± 2.9) 、 $(145.2 \pm 1.5) \sim (146.7 \pm 1.2)$ Ma, 辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 (141.8 ± 2.1) Ma, 等时线年龄为 (146.0 ± 1.1) Ma, 其 Re-Os 同位素特征表明南泥湖钼(钨)矿的成矿物质来源以下地壳成分为主, 但混有少量地幔组分; 三道庄钼矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 $(144.5 \pm 2.2) \sim (145.0 \pm 2.2)$ Ma, 平均为 (145.0 ± 2.2) Ma; 上房沟钼矿体发育于花岗斑岩体的隆起部位, 含矿斑岩的成岩年龄为 (157.6 ± 2.7) Ma, 6 件样品的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 (141.5 ± 7.8) Ma, Re-Os 模式年龄为 $(143.8 \pm 2.1) \sim (145.8 \pm 2.1)$ Ma, 平均值为 (144.8 ± 2.1) Ma, 成矿时代为早白垩世^[12,35-36]。该钼成矿带内的燕山期成矿花岗岩小岩体及大岩基应为扬子克拉通北缘中生代向华北克拉通 A 型俯冲的地壳物质在碰撞后伸展构造环境下部分熔融的产物, 并可能有部分地幔物质参与。成矿小岩体是花岗岩大岩基高度分异演化的结果, 花岗岩大岩基结晶分异导致其中挥发分的过饱和、挥发分对正在固结的岩浆体中成矿元素的淋滤是小岩体成矿的关键^[37]。此类钼矿成矿作用集中发生于 140~145 Ma, 对应于东秦岭钼多金属成矿的第 2 次主成矿期, 矿化强度和规模均大。

(3) 斑岩-爆破角砾岩型钼矿床有雷门沟、鱼池岭、石门沟、秋树湾、南台等。采用 ICP-MS 法测定的雷门沟大型斑岩型钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 (132.4 ± 1.9) Ma, 雷门沟花岗斑岩体的 SHRIMP 锆石微区 U-Pb 同位素年代学研究表明, 其 U-Pb 年龄为 $(129.1 \pm 3.0) \sim (138.4 \pm 2.3)$ Ma, 加权平均值为 (136.2 ± 1.5) Ma^[38]。鱼池岭超大型钼矿的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄为 (131.2 ± 1.4) Ma^[39]。该类钼矿床为东秦岭钼多金属第 3 次主成矿期的产物。

(4) 石英-碳酸岩脉型钼矿床有黄龙铺、西沟、大石沟、纸房等。黄龙铺钼矿形成于 220 Ma 左右^[14,28], 黄龙铺碱性花岗斑岩和辉绿岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 (131 ± 1) 、 (129 ± 2) Ma, 形

成于早白垩世; 构造环境判别分析表明, 两类岩体均形成于大陆板块内部伸展环境, 与此时东秦岭岩石圈发生大规模减薄作用相耦合^[40]。西沟钼矿床形成于 210 Ma 左右。大湖金矿床深部新发现了石英脉型钼矿床, 查明钼资源储量已达中型, 6 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素模式年龄为 $(215.4 \pm 5.4) \sim (255.6 \pm 9.6)$ Ma, 等时线年龄为 (218 ± 41) Ma (误差类型为 2σ , MSWD 值为 38), 加权平均年龄为 (234 ± 18) Ma (误差类型为 2σ , MSWD 值为 23), 表明钼矿化发生在印支期^[25]。沙坡岭钼矿床位于华北克拉通南缘东秦岭钼矿带东段, 是新近发现的赋存于太古宇太华群变质岩中的细脉浸染型钼矿床。该矿床 1 个辉钼矿样品的 Re-Os 同位素模式年龄为 (126.8 ± 1.7) Ma, 表明沙坡岭钼矿形成于燕山期^[41]。该类钼矿成矿作用多发生于 210~220 Ma, 为东秦岭钼多金属成矿的第 1 次主成矿期, 矿化不强, 矿床较小。

(5) 构造蚀变岩型钼矿床有桃园、竹园沟、莫沟、姚冲等。竹园沟钼矿的辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 $(119.6 \pm 2.2) \sim (122.2 \pm 2.3)$ Ma, 平均为 (120.9 ± 2.3) Ma^[42]。该类钼矿床也是东秦岭钼多金属第 3 次主成矿期的产物。

2.3 金钼多金属成矿作用

研究区内三叠世以来共发生过 3 次岩浆侵入活动(表 1), 每次都伴有不同程度的钼金矿化作用, 并分别对应于东秦岭—大别地区 3 期中酸性岩浆活动和钼金矿化的高峰期^[29,33,43]。该区钼的成矿作用分为印支期(210~220 Ma, 第 1 期)和燕山期早白垩世早期(140~145 Ma, 第 2 期)、早白垩世中晚期(110~138 Ma, 第 3 期); 金的成矿作用与构造-热液事件关系密切, 可分为印支期(约 220 Ma, 第 1 期)和燕山期早白垩世中晚期(约 130 Ma, 第 3 期); 钼金成矿既有叠合, 又有分离。依据目前的研究资料^[44-45], 总体上金钼成矿作用在燕山期强烈发育。

中生代以来, 由于秦岭发生广泛强烈的陆内俯冲和逆冲推覆构造运动, 区内大量深源岩浆物质沿“行列式”构造结点上升侵位, 形成小斑岩体。这些深源物质富含 Mo、Au、Ag、Pb 等成矿元素和闪石类、云母类等富水矿物。岩浆在上升过程中吸收低熔组分的同时也萃取地层中的部分成矿金属元素和流体, 从而使其化学成分更富 Al、K, 而贫 Ti、Na, 有助于 Mo、Au、Ag、Pb 等成矿元素在岩浆结晶过程中不被晶体化学分散, 而趋于在岩浆期后残余流体相中浓集成矿, 也使得地层中某些成矿金属元素由

表 1 东秦岭主要钼矿床成岩、成矿年龄
Tab. 1 Diagenetic and Metallogenic Ages of
Main Mo Deposits in East Qinling

岩体名称	成岩年龄/ Ma	成岩年龄 测试方法	成矿年龄/ Ma	成矿年龄 测试方法	资料来源
金堆城	143.70±3.00	LA-ICP-MS	138.4±0.5	Re-Os	[14]、[46]
石家湾	141.44±0.59	LA-ICP-MS	138.0±8.0	Re-Os	[15]、[29]
黄龙铺	131.00±1.00	SHRIMP	221.5±3.0	Re-Os	[14]、[28]
八里坡	155.90±2.30	LA-ICP-MS	156.3±2.2	Re-Os	[30]
汤家坪	140.00±4.30	LA-ICP-MS	113.1±7.9	Re-Os	[47]
南泥湖	146.70±1.20 149.56±0.36	LA-ICP-MS	141.8±2.1	Re-Os	[35]、[36]
上房沟	157.60±2.70 135.38±0.29	LA-ICP-MS	144.8±2.1	Re-Os	[35]、[37]
三道庄	145.20±1.50	LA-ICP-MS	145.0±2.2	Re-Os	[35]、[36]
雷门沟	136.20±1.50	SHRIMP	132.4±1.9	Re-Os	[38]
秋树湾	146.46	LA-ICP-MS	147.0±4.0	Re-Os	[48]、[49]
东沟	112.00±1.00	SHRIMP	116.0±1.7	Re-Os	[34]
鱼池岭	127.00±1.40	SHRIMP	131.2±1.4	Re-Os	[12]、[39]
沙坡岭	132.00±1.60	SHRIMP	126.8±1.7	Re-Os	[12]、[41]
大湖			218.0±41.0	Re-Os	[25]

注:成岩年龄测试矿物为锆石,成矿年龄测试矿物为辉钼矿。

于巨大的热能及流体作用而转入岩浆;围岩矿源层亦逐渐为成矿热流体补给了大量成矿金属元素,导致成矿热流体数量增多和成矿物质富集,再加上构造活化富集作用提高了成矿作用强度并扩大了成矿作用空间,最终形成印支期—燕山期金钼多金属矿床,如金堆城、南泥湖、上房沟超大型钼矿床,东沟超大型铅金矿床,陈耳、文峪大型金矿床等。在空间上,形成以中酸性小岩体为中心,由内向外依次出现斑岩型钼矿→斑岩—矽卡岩型钼矿→脉型钼(金)矿→石英脉型金矿或银铅锌矿的分布规律;在成矿期次上,由早到晚出现钼金→钼→钼金的演化旋回;在矿物组成上,由以辉钼矿为主,渐变为钼(金)矿伴生黄铜矿直至以黄铁矿(脉型金矿的载金矿物)为主,表明成矿温度由高到低。总之,岩体与断裂构造是控制区内金钼多金属成矿的重要因素。

3 找矿预测

3.1 成矿带划分

小秦岭金钼多金属矿床(点)与印支期—燕山期中酸性小花岗岩体在时间、空间上关系极为密切,构造控矿特征明显。根据目前的研究成果和勘查资料,小秦岭(陕西境内)矿集区西段可分为 3 个成矿

带,且均具有一定的找矿潜力,即:①沿青岗坪—金堆城断裂展布的灞源—金堆城铜、金、钨、钼多金属成矿带;②金堆城—黄龙铺—驾鹿钼金银多金属成矿带;③娃娃沟—峪耳沟金、锰、银多金属成矿带。

综合研究认为,在灞源—金堆城成矿带西段着重寻找金、银、铜矿床,在东段还应注意寻找钨、钼等伴生矿产;在金堆城—黄龙铺—驾鹿钼金银多金属成矿带除寻找主导的钼、金矿产外,还应注意寻找金、银矿化的叠加;在娃娃沟—峪耳沟成矿带应着重寻找金、银、优质锰矿资源。

3.2 找矿标志

通过区内成矿特征和成矿模式研究,总结提出了典型金钼矿床的勘查标志。根据对葫芦沟金矿床成矿模式的研究,提出该类矿床的找矿标志为:①砖红色钾长石化、硅化、绢云母化、黄铁矿化、碳酸盐化等围岩蚀变;②燕山期花岗岩内部及其外接触带;③Au、Ag、Mo、Pb 等化探组合异常,异常表现为水平分带和垂直分带;④剥离断层、韧性剪切带附近,尤其是绿片岩相韧性或脆性剪切带;⑤区域变质、混合岩化和花岗岩化;⑥沿高山河组或熊耳群不整合面(许多地方实际表现为推覆构造)上、下盘产生次级断裂构造,金矿化区常位于 NE 向断裂构造的上盘围岩。

依据对金堆城钼矿床成矿模式的深入研究,提出该类矿床的找矿标志包括:①燕山期富钼的中酸性小斑岩体;②邻近斑岩体发育的矽卡岩(带);③中生代活化的近 EW 向断裂带;④富钼的高背景围岩及氧化带铁帽中的姜黄色铁钼华(Ferrimolybdate);⑤斑岩和围岩中发育的脉状或网脉状硅化和钾化、或存在绢英岩化及青磐岩化等蚀变;⑥呈现物探磁异常和化探钼、钨等元素异常。

3.3 找矿预测

依据小秦岭矿集区典型金钼矿床成矿特征及其勘查标志,在本次研究及分析前人工作的基础上,提出该区 6 处找矿预测靶区,其中 3 处金的有利找矿靶区为:娃娃沟—峪耳沟金、银(锰)多金属矿预测靶区,峪耳沟—曹家沟金、银、锰多金属矿预测靶区和太子坪—葫芦沟—荒地沟金矿预测靶区。

娃娃沟—峪耳沟金、银(锰)多金属矿预测靶区位于金堆城钼矿床南部、路家街向斜西翘起端的北翼。出露地层为蓟县系高山河组中下部的含火山凝灰质的陆源碎屑岩,下伏熊耳群火山岩,NE 向断裂发育。Au、Ag、Cu、Mn 等多元素分散流异常范围大、浓度高、浓集中心明显且扣合性较好。已发现娃

娃沟金矿点和娃娃沟、东木子沟银矿点,含锰地层延长大于2 km。该区金、银、锰矿化与沉积和中低温热液成矿作用有关,可与河南鲁山县大晒山磁铁矿型金矿和洛宁县铁炉坪银铅矿对比,成矿条件优越。该区除具有寻找金银矿的条件外,还具有寻找优质锰矿的条件。

峪耳沟—曹家沟金、银、钼多金属矿预测靶区位于金堆城钼矿床的东北部,是娃娃沟—曹家沟多金属成矿带的西延。出露地层主要为熊耳群安山岩等。NE、NW向断裂发育且在此交汇。Au、Ag、Cu、Mo分散流异常范围大、浓度高,已发现桃园金矿和薛沟金矿点。在薛沟金矿点南侧和路家沟一带分别有较好的金、银异常,应是下步主要的勘查靶区。

太子坪—葫芦沟—荒地沟金矿预测靶区位于金堆城—驾鹿金、银、钼多金属成矿预测区,沿高山河组底部与熊耳群及太华群的过渡带分布,与NE向Au(Ag)高背景地球化学场吻合,受过渡带及NE向断裂构造带控制明显,其驾鹿地区局部还有狭长的激电异常带。其中,驾鹿矿田预测区西从太子坪经水草坪、回马坪、葫芦沟、驾鹿,东到荒地沟,长约10 km,明显反映出葫芦沟金矿床向东、西两段均有延伸。因此,太子坪—葫芦沟—荒地沟成矿带找矿空间较大,除已知的葫芦沟金矿床外,北侧的寺沟及南侧的太子坪—荒地沟地段均对寻找金矿有利。

3处钼的有利找矿靶区为:文公岭北坡钼、铅、银多金属矿预测靶区、西沟钼、铅、银多金属矿预测靶区和金堆城—黄龙铺深部及外围钼、银、金矿预测靶区。

文公岭北坡钼、铅、银多金属矿预测靶区位于黄龙铺背斜北翼靠近倾伏端几个成矿带的交汇处,地质构造条件复杂,构造流体改造和岩浆流体叠加成矿作用相互交错,成矿作用复杂。该区出露岩石为熊耳群安山岩、高山河组石英砂岩夹薄层凝灰质板岩、砂质板岩,并有燕山期花岗小斑岩体。区内分散流异常以Mo、Pb为主,伴有Ag、Bi、Zn等,面积约9 km²,异常元素Mo含量(质量分数,下同)一般为 $(10\sim 200)\times 10^{-6}$,Pb一般为 $100n\times 10^{-6}$,最高为 $3\,140\times 10^{-6}$,异常区有含矿石英脉带出露,其中n为小于3.14的值;南坡已有小型钼、铅、银矿床被发现和开采,具有一定的找矿潜力。

西沟钼、铅、银多金属矿预测靶区位于东秦岭钼成矿带北亚带西段,东起垣头,经华阳川、港子街,西止太平峪马家沟。区内出露地层主要为太华群,断裂构造发育,岩浆活动强烈,南、北分别有燕山期老

牛山、华山等花岗岩岩基;此外,矿区内尚分布有众多花岗岩、花岗闪长岩、花岗细晶岩、花岗伟晶岩、云斜煌斑岩等脉岩。经1:50 000分散流化探及测量,在区内圈定出翁-1号异常,该异常东西长10 km,南北宽5 km,元素组合为Pb、Ag、Bi、Mo、Cu;经1:10 000沟系次生晕加密后,在该异常中进一步划分出15个异常。异常区内已发现数条钼矿(化)带及铜、铅等矿化点,显示出较好的找矿前景。该区东部麦糠窑一带,成矿地质条件更为优越。钼异常长3 000 m,宽1 200~1 400 m,面积3.6~4.2 km²;异常浓度高且变化稳定,形态规整,连续性好,各元素重合性好。元素组合为Mo、Pb、Ag、Ba、Mn,组合比较复杂,Mo含量为 $(5\sim 10)\times 10^{-6}$,最大为 500×10^{-6} ,Pb含量为 $(200\sim 350)\times 10^{-6}$,最大为 $83\,000\times 10^{-6}$,Ba含量为 $(1\,000\sim 2\,500)\times 10^{-6}$,最大为 $10\,000\times 10^{-6}$;异常范围内有麦糠窑天青石和磷钼矿床及铅锌矿点,具有良好的找矿潜力。这已被最近几年的勘查工作所初步证实,西沟钼矿已圈定了十几条钼矿体。另外,根据资料综合分析,西沟钼矿区深部可能存在隐伏岩体,还具有进一步探索斑岩型矿化的条件。

金堆城—黄龙铺深部及外围钼、银、金矿预测靶区位于金堆城—黄龙铺预测区高山河组与熊耳群的过渡带部位,构造活动显著,钼的成矿条件、找矿条件良好;同时,目前少数地段还发现金矿(化)体,而且该区有可能发展成为一个金、银、钼(铅)多金属矿田;并且该区与斑岩体有关的矿床,大家一般只重视钼的查找,伴生的其他元素均未做深入工作,共生、伴生矿种的找矿前景不明朗。金堆城周边就有银、锰、铅锌、金等多种矿化信息,复脉型矿体中还伴有稀有元素和铀等,这些过去均未引起重视。比如金堆城南部的金、银异常面积大,浓度高,已有银矿体被发现,显示出较好的找矿潜力。

3.4 找矿方向

在小秦岭地区垂向上,金矿化的深度可达3.8~5.9 km,花岗岩侵位深度为6~8 km^[23],而目前大多数金矿体控制深度仅约2 km,因此,葫芦沟、陈耳等金矿床深部仍有较大的找矿潜力。同时,依据从上到下不同深度金矿化类型有从石英脉型→构造蚀变岩型→糜棱岩型的变化趋势,认为小秦岭地区深部成矿空间还很大。近期在金堆城钼矿床深部,经钻探验证发现矿体较连续且具变富、变厚的趋势,表明深部找矿潜力巨大。

在进一步勘查工作中,要切实加强综合研究,特别要重视地质勘查项目中的集成研究和老点新评;

通过地质、物化探等资料的系统分析研究,优选靶区、靶位;在岩体、构造及成矿分析的基础上,整体规划,分区部署,联合攻关,综合勘查,这样区内的找矿工作才能有大的突破。

4 结 语

(1)小秦岭地区金钼多金属矿床可分为印支期—燕山期与重熔型花岗岩浆侵入活动有关的金(钼)矿床成矿系列和与深源浅成型花岗岩、碱性岩有关的金(钼)矿床成矿系列。金(钼)矿床主要类型包括石英脉型、构造蚀变岩型、糜棱岩型、爆破角砾岩型和复合型等,以前两者为主。钼(金钼)矿床主要类型包括斑岩型、斑岩-矽卡岩型、斑岩-爆破角砾岩型、石英-碳酸岩脉型和构造蚀变岩型等,也以前两者为主。

(2)该区三叠世以来共发生过 3 次岩浆侵入活动,每次都伴有不同程度的钼金矿化作用,并分别对应于不同的钼金矿化高峰期。区内钼的成矿作用分为印支期(210~220 Ma,第 1 期)和燕山期早白垩世早期(140~145 Ma,第 2 期)、早白垩世中晚期(110~138 Ma,第 3 期);金的成矿作用与构造-热液事件关系密切,可分为印支期(约 220 Ma,第 1 期)和燕山期早白垩世中晚期(约 130 Ma,第 3 期),钼、金成矿在第 1 期及第 3 期叠合,而在第 2 期分离。整体上,燕山期金钼成矿作用强烈发育。

(3)区内金钼多金属成矿与中生代花岗岩体关系密切,构造控矿特征明显。钼的成矿物质主要来自下地壳,有少量地幔物质参与;金的成矿物质多来自于太华群,也有岩浆岩的贡献。

(4)小秦岭地区地质工作程度较高,矿床(点)分布众多,但还是具有广阔的找矿前景。娃娃沟—峪耳沟、峪耳沟—曹家沟、太子坪—葫芦沟—荒地沟与文公岭北坡等地区为金钼多金属矿的有利找矿靶区,特别应重视对小岩体含矿性的评价。

参考文献:

References:

- [1] 黎世美,瞿伦全,苏振邦,等.小秦岭金矿地质和成矿预测[M].北京:地质出版社,1996.
LI Shi-mei, QU Lun-quan, SU Zhen-bang, et al. The Geology and Metallogenic Prediction of the Gold Deposit in Xiaolinling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [2] 王 相,唐荣扬,李 实,等.秦岭造山与金属成矿[M].北京:冶金工业出版社,1996.

WANG Xiang, TANG Rong-yang, LI Shi, et al. Qinling Orogeny and Metallogenesis [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.

- [3] 谭兴华,王 磊,王瑞廷.小秦岭金矿区深部找矿研究——以陈耳金矿为例[J].西北地质,2012,45(3): 72-80.
TAN Xing-hua, WANG Lei, WANG Rui-ting. Study on Mineral Exploration in Depth of Xiaolinling Gold Deposit Region—A Case of Chen'er Gold Ore Deposit [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(3): 72-80.
- [4] 胡正国,钱壮志.小秦岭地质构造新认识[J].地质论评,1994,40(4):289-295.
HU Zheng-guo, QIAN Zhuang-zhi. A New Idea of Geological Tectonics in the Xiaolinling Region [J]. Geological Review, 1994, 40(4): 289-295.
- [5] 卢欣祥,尉向东,董 有,等.小秦岭—熊耳山地区金矿时代[J].黄金地质,1999,5(1):11-16.
LU Xin-xiang, WEI Xiang-dong, DONG You, et al. The Metallogenic Epoch of Gold Deposits in Xiaolinling-Xiong'ershan Region [J]. Gold Geology, 1999, 5(1): 11-16.
- [6] 卢欣祥,罗照华,黄 凡,等.秦岭—大别山地区钼矿类型与矿化组合特征[J].中国地质,2011,38(6): 1518-1535.
LU Xin-xiang, LUO Zhao-hua, HUANG Fan, et al. Mo Deposit Types and Mineralization Assemblage Characteristics in Qinling-Dabie Mountain Area [J]. Geology in China, 2011, 38(6): 1518-1535.
- [7] 张正伟,朱炳泉,常向阳,等.东秦岭钼矿带成岩成矿背景及时空统一性[J].高校地质学报,2001,7(3): 307-315.
ZHANG Zheng-wei, ZHU Bing-quan, CHANG Xiang-yang, et al. Petrogenetic-metallogenetic Background and Time-space Relationship of the East Qinling Molybdenum Ore Belt, China [J]. Geological Journal of China Universities, 2001, 7(3): 307-315.
- [8] 李厚民,陈毓川,叶会寿,等.东秦岭—大别地区中生代与岩浆活动有关钼(钨)金银铅锌矿床成矿系列[J].地质学报,2008,82(11):1468-1477.
LI Hou-min, CHEN Yu-chuan, YE Hui-shou, et al. Mo, (W), Au, Ag, Pb, Zn Mineralogical Series Related to Mesozoic Magmatic Activities in the East Qinling-Dabie Mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(11): 1468-1477.
- [9] 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 Yong-feng, MAO Jing-wen, HU Hua-bin, et al.

- Geology, Distribution, Types and Tectonic Settings of Mesozoic Molybdenum Deposits in East Qinling Area [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(3): 292-304.
- [10] MAO J W, XIE G Q, PIRAJNO F, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous Granitoid Magmatism in Eastern Qinling, Central-eastern China: SHRIMP Zircon U-Pb Ages and Tectonic Implications [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2010, 57(1): 51-78.
- [11] 焦建刚, 韩俊民, 钱壮志, 等. 华县西沟地区钼矿地质与成矿潜力 [J]. 地球科学与环境学报, 2007, 29(3): 245-251.
- JIAO Jian-gang, HAN Jun-min, QIAN Zhuang-zhi, et al. Geology and Metallogenic Potentiality of Molybdenum Mine in Xigou Area, Huaxian County, Shaanxi Province [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(3): 245-251.
- [12] 毛景文, 李晓峰, 张荣华, 等. 深部流体成矿系统 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2005.
- MAO Jing-wen, LI Xiao-feng, ZHANG Rong-hua, et al. The Metallogenic System of Deep Fluids [M]. Beijing: China Land Publishing House, 2005.
- [13] MAO J W, GOLDFARB R J, ZHANG Z W, et al. Gold Deposits in the Xiaoqinling-Xiong'ershan Region, Qinling Mountains, Central China [J]. Mineralium Deposita, 2002, 37(3/4): 306-325.
- [14] STEIN H J, MARKEY R J, MORGAN J W, et al. Highly Precise and Accurate Re-Os Ages for Molybdenite from the East Qinling Molybdenum Belt, Shaanxi Province, China [J]. Economic Geology, 1997, 92(7/8): 827-835.
- [15] 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义 [J]. 矿床地质, 1994, 13(3): 221-230.
- HUANG Dian-hao, WU Cheng-yu, DU An-dao, et al. Re-Os Isotope Ages of Molybdenum Deposits in East Qinling Area and Their Significance [J]. Mineral Deposits, 1994, 13(3): 221-230.
- [16] 范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国, 等. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用 [J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 260-266.
- FAN Hong-rui, XIE Yi-han, ZHAI Ming-guo, et al. A Three-stage Fluid Flow Model for Xiaoqinling Lode Gold Metallogenesis in the Henan and Shaanxi Provinces, Central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(2): 260-266.
- [17] 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 Guo-wei, ZHANG Ben-ren, YUAN Xue-cheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [18] 胡正国, 钱壮志, 闫广民, 等. 小秦岭拆离-变质杂岩核构造与金矿 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.
- HU Zheng-guo, QIAN Zhuang-zhi, YAN Guang-min, et al. Removed-metamorphic Complex Core Structure and Gold Deposits in Xiaoqinling Area [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1994.
- [19] 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 Lai-min, ZHANG Guo-wei, 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.
- [20] 崔海峰. 小秦岭燕山期构造特征及其演化 [D]. 西安: 西北大学, 2003.
- CUI Hai-feng. Tectonic Characteristics and Evolutions of Yanshanian in Xiaoqinling Area [D]. Xi'an: Northwest University, 2003.
- [21] 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 等. 小秦岭文峪和娘娘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义 [J]. 地质科学, 2010, 45(1): 167-180.
- WANG Yi-tian, YE Hui-shou, YE An-wang, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Ages and Their Significances of the Wenyu and Niangniangshan Granitic Plutons in the Xiaoqinling Area, Central China [J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(1): 167-180.
- [22] 聂凤军, 江思宏, 赵月明. 小秦岭地区文峪和东闯石英脉型金矿床铅及硫同位素研究 [J]. 矿床地质, 2001, 20(2): 163-173.
- NIE Feng-jun, JIANG Si-hong, ZHAO Yue-ming. Lead and Sulfur Isotopic Studies of the Wenyu and the Dongchuang Quartz Vein Type Gold Deposits in Xiaoqinling Area, Henan and Shaanxi Provinces, Central China [J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2): 163-173.
- [23] 冯建之, 岳铮生, 肖荣阁, 等. 小秦岭深部金矿成矿规律与成矿预测 [M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- FENG Jian-zhi, YUE Zheng-sheng, XIAO Rong-ge, et al. Metallogenic Regularity and Prediction for Gold Deposit in the Deep of Xiaoqinling Area, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [24] 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨定年及其地质意义 [J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 417-424.
- LI Hou-min, YE Hui-shou, MAO Jing-wen, et al. Re-Os Dating of Molybdenites from Au(-Mo) Deposits in

- Xiaoqinling Gold Ore District and Its Geological Significance[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(4): 417-424.
- [25] 李 诺, 孙亚莉, 李 晶, 等. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿铼钼同位素年龄及印支期成矿事件[J]. *岩石学报*, 2008, 24(4): 810-816.
- LI Nuo, SUN Ya-li, LI Jing, et al. Molybdenite Re-Os Isotope Age of the Dahu Au-Mo Deposit, Xiaoqinling and the Indosinian Mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(4): 810-816.
- [26] 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 等. 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*, 2010, 17(2): 140-145.
- WANG Yi-tian, YE Hui-shou, YE An-wang, et al. Re-Os Age of Molybdenite from the Majiawa Au-Mo Deposit of Quartz Vein Type in the North Margin of the Xiaoqinling Gold Area and Its Implication for Metallogeny[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 140-145.
- [27] 栾世伟, 陈尚迪. 小秦岭金矿主要控矿因素及成矿模式[J]. *地质找矿论丛*, 1990, 5(4): 1-14.
- LUAN Shi-wei, CHEN Shang-di. Main Ore-controlling Factors and Metallogenic Model of Gold Deposits in Xiaoqinling Area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1990, 5(4): 1-14.
- [28] 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 Yan-jing, ZHANG Hui, et al. Molybdenum Deposits in East Qinling[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 186-198.
- [29] 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗斑岩的年代学及岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 143-157.
- ZHAO Hai-jie, MAO Jing-wen, YE Hui-shou, et al. Chronology and Petrogenesis of Shijiawan Granite Porphyry in Shaanxi Province: Constrains from Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Compositions[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(1): 143-157.
- [30] 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): 1159-1166.
- JIAO Jian-gang, YUAN Hai-chao, 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): 1159-1166.
- [31] 焦建刚, 袁海潮, 刘瑞平, 等. 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*, 2010, 26(12): 3538-3548.
- JIAO Jian-gang, YUAN Hai-chao, LIU Rui-ping, et al. Lithogeochemical Characteristics of Balipo Molybdenum Deposit and Its Prospecting Significance, Huaxian, Shaanxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(12): 3538-3548.
- [32] 高亚龙, 张江明, 叶会寿, 等. 东秦岭石窑沟斑岩钼矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 年龄[J]. *岩石学报*, 2010, 26(3): 729-739.
- GAO Ya-long, ZHANG Jiang-ming, YE Hui-shou, et al. Geological Characteristics and Molybdenite Re-Os Isotopic Dating of Shiyagou Porphyry Molybdenum Deposit in the East Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(3): 729-739.
- [33] MAO J W, XIE G Q, BIERLEIN F, et al. Tectonic Implications from Re-Os Dating of Mesozoic Molybdenum Deposits in the East Qinling-Dabie Orogenic Belt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(18): 4607-4626.
- [34] 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等. 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*, 2006, 80(7): 1078-1088.
- YE Hui-shou, MAO Jing-wen, LI Yong-feng, et al. 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]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(7): 1078-1088.
- [35] 李永峰, 毛景文, 白凤军, 等. 东秦岭南泥湖钼(钨)矿田 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质论评*, 2003, 49(6): 652-659.
- LI Yong-feng, MAO Jing-wen, BAI Feng-jun, et al. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenites in the Nannihu Molybdenum (Tungsten) Orefield in the Eastern Qinling and Its Geological Significance[J]. *Geological Review*, 2003, 49(6): 652-659.
- [36] 向君峰, 毛景文, 裴荣富, 等. 南泥湖—三道庄钼(钨)矿的成岩成矿年龄新数据及其地质意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(2): 458-473.
- XIANG Jun-feng, MAO Jing-wen, PEI Rong-fu, et al. New Geochronological Data of Granites and Ores from the Nannihu-Sandaozhuang Mo (W) Deposit[J]. *Geology in China*, 2012, 39(2): 458-473.
- [37] 包志伟, 曾乔松, 赵太平, 等. 东秦岭钼矿带南泥湖—上房沟花岗斑岩成因及其对钼成矿作用的制约[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2523-2536.
- BAO Zhi-wei, ZENG Qiao-song, ZHAO Tai-ping, et al. Geochemistry and Petrogenesis of the Ore-related Nannihu and Shangfanggou Granite Porphyries from East Qinling Belt and Their Constraints on the Molyb-

- denum Mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2523-2536.
- [38] 李永峰, 毛景文, 刘敦一, 等. 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*, 2006, 52(1): 122-131.
- LI Yong-feng, MAO Jing-wen, LIU Dun-yi, et al. SHRIMP Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Datings for the Leimengou Porphyry Molybdenum Deposit, Western Henan and Its Geological Implication[J]. *Geological Review*, 2006, 52(1): 122-131.
- [39] 周珂, 叶会寿, 毛景文, 等. 豫西鱼池岭斑岩型钼矿床地质特征及其辉钼矿铼-钨同位素年龄[J]. *矿床地质*, 2009, 28(2): 170-184.
- ZHOU Ke, YE Hui-shou, MAO Jing-wen, et al. Geological Characteristics and Molybdenite Re-Os Isotopic Dating of Yuchiling Porphyry Mo Deposit in Western Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(2): 170-184.
- [40] 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西黄龙铺地区碱性花岗斑岩及辉绿岩的年代学与地球化学: 岩石成因及其构造环境示踪[J]. *中国地质*, 2010, 37(1): 12-27.
- ZHAO Hai-jie, MAO Jing-wen, YE Hui-shou, et al. Geochronology and Geochemistry of the Alkaline Granite Porphyry and Diabase Dikes in Huanglongpu Area of Shaanxi Province: Petrogenesis and Implications for Tectonic Environment[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 12-27.
- [41] 苏捷, 张宝林, 孙大亥, 等. 东秦岭东段新发现的沙坡岭细脉浸染型钼矿地质特征、Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 2009, 83(10): 1490-1496.
- SU Jie, ZHANG Bao-lin, SUN Da-hai, et al. Geological Features and Re-Os Isotopic Dating of Newly Discovered Shapoling Veinlet-disseminated Mo Deposit in the Eastern Section of East Qinling Mountains and Its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(10): 1490-1496.
- [42] 黄凡, 罗照华, 卢欣祥, 等. 河南汝阳地区竹园沟钼矿地质特征、成矿时代及地质意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(11): 1704-1711.
- HUANG Fan, LUO Zhao-hua, LU Xin-xiang, et al. Geological Characteristics, Metallogenic Epoch and Geological Significance of the Zhuyuangou Molybdenum Deposit in Ruyang Area, Henan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(11): 1704-1711.
- [43] 毛景文, 叶会寿, 王瑞廷, 等. 东秦岭中生代钼铅锌银多金属矿床模型及其找矿评价[J]. *地质通报*, 2009, 28(1): 72-79.
- MAO Jing-wen, YE Hui-shou, WANG Rui-ting, et al. 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*, 2009, 28(1): 72-79.
- [44] 谭满堂, 姚书振, 何谋春, 等. 小秦岭东沟金矿构造控矿规律及矿化趋势分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(2): 225-234.
- TAN Man-tang, YAO Shu-zhen, HE Mou-chun, et al. Structural Controls on Gold Mineralization and Its Implications in Ore Prospecting for the Dongchuang Gold Deposit in the Xiaoqinling District[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2013, 37(2): 225-234.
- [45] 强山峰, 毕诗健, 邓晓东, 等. 豫西小秦岭地区秦南金矿床热液独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义[J]. *地球科学*, 2013, 38(1): 43-56.
- QIANG Shan-feng, BI Shi-jian, DENG Xiao-dong, et al. Monazite U-Th-Pb Ages of the Qinnan Gold Deposit, Xiaoqinling District: Implications for Regional Metallogensis and Tectonic Setting[J]. *Earth Science*, 2013, 38(1): 43-56.
- [46] 焦建刚, 汤中立, 钱壮志, 等. 东秦岭金堆城花岗斑岩体的锆石 U-Pb 年龄、物质来源及成矿机制[J]. *地球科学*, 2010, 35(6): 1011-1022.
- JIANG Jian-gang, TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, et al. Metallogenic Mechanism, Magma Source and Zircon U-Pb Age of Jinduicheng Granitic Porphyry, East Qinling[J]. *Earth Science*, 2010, 35(6): 1011-1022.
- [47] 杨泽强. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. *矿床地质*, 2007, 26(3): 289-295.
- YANG Ze-qiang. Re-Os Isotopic Ages of Tangjiaping Molybdenum Deposit in Shangcheng County, Henan and Their Geological Significance[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(3): 289-295.
- [48] 伏雄. 河南秋树湾铜(钼)矿床成因探讨[J]. *矿产与地质*, 2003, 17(3): 233-236.
- FU Xiong. Genesis of Qiushuwan Copper(Molybdenum) Deposit of Henan Province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2003, 17(3): 233-236.
- [49] 郭保健, 毛景文, 李厚民, 等. 秦岭造山带秋树湾铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2341-2348.
- GUO Bao-jian, MAO Jing-wen, LI Hou-min, et al. Re-Os Dating of the Molybdenite from the Qiushuwan Cu-Mo Deposit in the East Qinling and Its Geological Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2341-2348.