

· 能源与矿产资源 ·

小秦岭金钼多金属矿集区西部区域地质地球化学特征、成矿模式与找矿方向

王瑞廷^{1,2,3}, 秦西社³, 袁海潮^{1,3}, 丁坤², 王磊³, 毛景文^{4,5}

WANG Ruiting^{1,2,3}, QIN Xishe³, YUAN Haichao^{1,3}, DING Kun², WANG Lei³, MAO Jingwen^{4,5}

1. 陕西省矿产资源综合利用工程技术研究中心, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

3. 西北有色地质矿业集团有限公司, 陕西 西安 710054;

4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

5. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

1. *Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mineral Resources in Shaanxi Province, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

2. *Faculty of Geosciences and Resources, Chang'an University, Xi'an, 710054, Shaanxi, China;*

3. *Northwest Geological and Mining Group Co. Ltd. for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

4. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

5. *Faculty of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

摘要:小秦岭金钼多金属矿集区地质构造复杂,构造岩浆活动强烈,金、钼、银等化探异常连片成带分布,综合异常众多,成矿条件良好。小秦岭矿集区西部岩石地球化学分析表明,区内小岩体酸度较高、中等富碱,主要为高钾钙碱性系列,存在一定程度的壳幔物质混合。大花岗岩基主要沿EW向与NE向2组构造交汇部位上侵,小斑岩体主要受次级构造的控制,常在花岗岩基外带一定范围内或小岩体内及其周围成矿,地层、构造和岩浆活动三者是关键性的控矿因素。结合金、钼矿床地质特征、成矿规律、成矿机制分析等,提出了该区金矿床的构造岩浆活化成矿模式,总结了钼矿床成矿模式;依据区域矿化富集规律和找矿实践,建立了系统的区域找矿模型,并在此基础上,指出下一步找矿靶区和找矿方向。

关键词:小秦岭矿集区;地球化学特征;矿床类型;成矿模式;找矿模型;找矿方向

中图分类号:P618.51;P618.65 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2021)04-0531-14

Wang R T, Qin X S, Yuan H C, Ding K, Wang L, Mao J W. Regional geochemistry, metallogenetic model and ore prospects of the western Xiaoqinling Au-Mo polymetallic ore-concentrated area, China. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 531-544

Abstract: The Xiaoqinling Au-Mo polymetallic ore-concentrated area with complex structure and active magmatism is characterized by continuous zones of Au-Mo-Ag geochemical anomalies and ideal metallogenetic conditions. The small plutons in the area belongs to the high potassium calc-alkaline series, with relatively high acidity and moderately rich alkali, and there is a certain degree of crust-mantle mixing material involved in them. The large granite plutons are mainly emplaced on the intersection of EW-trending and NE-trending structures. While, subject to the strata-structure-magmatism united control, the small mineralized porphyries controlled by secondary structures are distributed around the large granite plutons or within small intrusives. The metallogenetic model of tectono-magmatic

收稿日期:2019-05-01;修订日期:2020-05-09

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项经费课题《陕西秦岭地区与小岩体有关的铜钼多金属矿成矿背景与找矿预测研究》(编号:201111007-3)、“十二五”国家科技支撑计划项目《陕西秦岭地区主要矿集区铅、银、铜、金综合勘查技术研究》(编号:2011BAB04B05)

作者简介:王瑞廷(1969-),男,博士生导师,教授级高工,从事矿床地质、地球化学研究和找矿勘查工作。E-mail: wrtyf@163.com

activation is drawn from combination of geology, metallogenic regularity and mechanism etc. of Au-Mo deposits. Based on the regional mineralization regularity and prospecting practice, the systematic regional prospecting model is established, and ore prospects are outlined.

Key words: Xiaolinling ore-concentrated area; geochemistry; deposit type; metallogenic model; prospecting pattern; ore prospects

小秦岭矿集区是中国黄金和钼的主要生产基地之一,金储量和产量仅次于胶东,目前已发现含金石英脉 1200 余条,提交金金属储量约 800 t,建设大中型矿山十余座,为中国第二大黄金生产基地。提交钼金属储量近 400×10^4 t,建成世界著名的金堆城钼矿山等^[1-3],是中国钼业的重要选冶加工基地。小秦岭矿集区经历长期多阶段地质演化,地层以太古宇太华群和元古宇为主,构造-岩浆活动发育,特别是印支期—燕山期酸性岩浆侵入活动强烈^[3-10],“热隆”、动热再造成矿作用显著,金、钼、钨、稀土等成矿条件优越,产出葫芦沟(大型)、陈耳(大型)、潼关、东桐峪、文峪、杨寨峪、东闯、桃园、大湖等众多金矿床(点)和金堆城(超大型)、黄龙铺、石家湾、文公岭、秦岭沟、木龙沟、桃家坪等钼矿床。近年来,又陆续发现了西沟、八里坡钼矿床等,引起了地学界的广泛关注^[2-36]。尽管有学者将小秦岭金矿床归为变质热液成因,但目前普遍认为金矿床的形成与同构造花岗岩浆热液活动或碰撞造山作用有密切联系^[1-11, 23, 37-41],通常分为石英脉型、构造蚀变岩型等。该区钼矿床主要为斑岩型、石英脉型。本文在前人研究的基础上,结合区内典型矿床分析和近年地质找矿进展,从小秦岭矿集区西部区域地球化学特征综合研究入手,探讨其金、钼矿床成矿模式,建立区域找矿模型,并据此指出进一步的找矿方向。

1 区域地质背景

小秦岭矿集区位于华北克拉通南缘华山—熊耳山隆起区,隶属于太华地块,为华北克拉通与秦岭微板块的交界地带,即铁炉子—栾川断裂以北、小秦岭山前断裂(太要断裂)以南地区,处于秦岭造山带后陆逆冲褶断带西段的中生代逆冲推覆构造区。该区地质历史上经历了多期次的构造运动及地壳活化,形成了较复杂的构造格局。由黑沟、马超营、曲里—栾川、固始—明港—羊册—方城等断裂构成的华北克拉通南缘断裂带次级构造发育,形态复杂,伴有多次岩浆活动,尤以燕山期最活跃,对区内的有色、贵金属矿床形成具有重要的控制作用。该矿集区金矿田构造格架可概括为“两断裂夹一褶皱”,

即南北 2 条边界大断裂围限的小秦岭复式褶皱区域。在褶皱背景上又发育多期韧性剪切带和断裂构造(图 1)。金矿田的北部围限断裂为太要—故县断裂,追踪多组先成断裂而成转折状,向北倾。据研究,该断裂是一条大型的韧性剪切带,在长期抬升过程中遭受了脆—韧性及脆性变形作用叠加,断裂上盘降幅大于 1200 m,其深部产状变缓,呈铲型断裂^[1-2, 15],在断裂下降盘,被黄土掩盖的太华群断块中,经钻探证实仍有金矿脉分布。由此看来,断裂的大规模差异升降应在成矿期之后。金矿田南部围限断裂为小河断裂,断裂面南倾。断裂带宽数十至数百米,断裂带内被糜棱岩、碎裂岩、角砾岩、断层泥等,以及大量辉绿岩脉、正长斑岩脉、花岗斑岩脉及伟晶岩脉充填。而钼矿区主要分布于小河断裂与石门—马超营断裂之间。小秦岭金钼矿集区内的断裂和褶皱构造十分发育,断裂按走向可分为 NWW 向、NW 向、NNW 向、NNE 向等,以 EW 向、NE 向、NW 向为主的韧性剪切断裂导岩控矿,绝大多数为成矿前发育的断裂,其中一部分为多期次活动的断裂。区内太要断裂、朱家沟断裂、马超营断裂皆具逆冲推覆特征。依据小秦岭矿集区以糜棱岩类为标志的韧性剪切带特征,一般将其划分为区域韧性剪切带和含矿韧性剪切带^[14]。

小秦岭矿集区现今地质构造复杂,主要表现为燕山期强烈的逆冲推覆作用所产生的多层次逆冲推覆构造系统^[1, 5]。以巡马道—朱家沟断裂为界,可将小秦岭矿集区分为 2 个构造区。该断裂以北为太华隆起,主要分布太古宇太华群;以南的豫西断陷西部,发育中元古界熊耳群、官道口群等。

东秦岭造山带是一条晚古生代—印支期的碰撞造山带,按照板块运动学原理,其深部结构形态应该呈现出岩石圈加厚、拥有巨厚山根的特征,但事实上,现今的深部结构形态是平缓的莫霍面和上拱的软流圈,表明东秦岭造山带从印支期碰撞以来经历了巨大的岩石圈减薄过程^[15, 17, 25, 27]。这一地质作用对于小秦岭矿集区的成矿作用具有重要影响。小秦岭地区岩浆岩发育,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

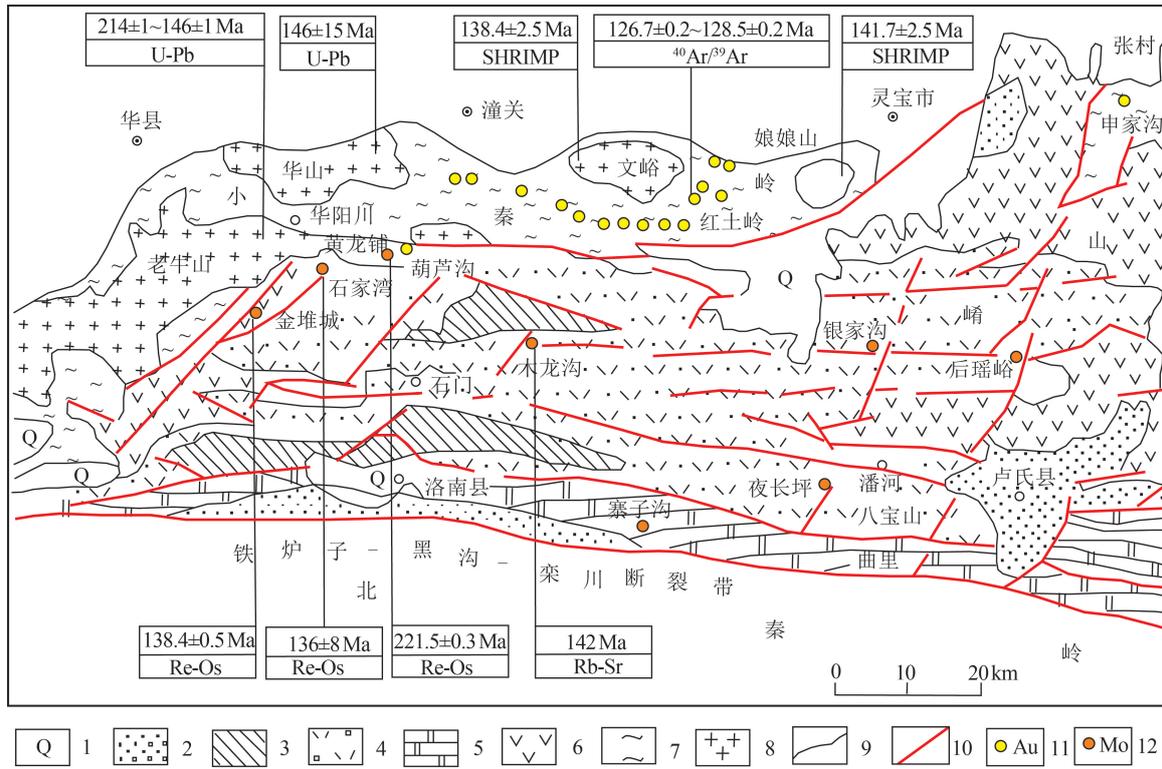


图 1 小秦岭矿集区区域地质及金钼矿床分布简图(据参考文献[3,5]修改;成岩、成矿时代据参考文献[4-5,42-45])

Fig. 1 Regional geological map showing distribution of Au-Mo polymetallic deposits in Xiaozhiling ore-concentrated area

- 1—第四系;2—古近系-新近系;3—寒武系;4—新元古界官道口群;5—新元古界栾川群;6—中元古界熊耳群;
- 7—太古宇太华群;8—花岗岩;9—地质界线;10—断层;11—金矿床;12—钼矿床

演化历史,发育阜平期、吕梁期、晋宁期、加里东期、印支期、燕山期和喜山期岩浆岩。岩石类型以花岗岩类为主,多为钾长花岗岩、似斑状二长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩等,构成不等粒-斑状-似斑状结构系列,还发育基性岩和碱性岩,产状有岩基、岩株、岩脉(岩墙)、岩枝等。该区中生代经历了早期以挤压构造体制为主的陆间碰撞阶段和晚期以伸展构造体制为主的陆内演化阶段,遭受了强烈的构造活动变迁,构成一个完整的岩石圈构造演化幕式,即挤压隆升→松弛转折→伸展隆升→重力垮塌的连续动力学转换过程^[5,7]。区内于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,沿着秦岭造山带北缘发生了大规模拆离滑脱、逆冲推覆及块断、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,表现为大面积的花岗岩浆侵入形成中深成壳源型(或浅源深成型)花岗岩类(重熔型)的大岩基,以及大量来源较深、高侵位的浅成-超浅成相(深源浅成型)小型花

岗斑岩和花岗闪长斑岩体(同熔型)^[38],该类小岩体形成深度浅、温度高,有利于成矿。部分学者认为,有些岩基与小岩体也具有同源性质^[25,31-32],即均为深源浅成型。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、娘娘山岩体等,是太古宙太华群高级变质岩系经部分熔融的产物。这些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。老牛山杂岩体主要岩性为黑云母二长花岗岩、石英闪长岩等,岩体富碱,多数岩石 K_2O 含量高于 Na_2O ,主体岩性属铝饱和和钙碱性岩系,岩体中粗粒黑云母二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 214±1 Ma,中粒-中粗粒和细粒-中细粒黑云母二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 152±1 Ma、146±1 Ma,目前认为其由印支期和燕山期花岗质岩石组成^[45]。华山岩体主要岩石类型有中粗粒含斑黑云二长花岗岩、中细粒黑云二长花岗岩和中细粒角闪二长花岗岩,化学成分也富碱, Na_2O 含量略高于 K_2O ,属准铝或铝

饱和钙碱性到偏碱性的岩石系列,其锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为 146 ± 15 Ma^[5]。文峪、娘娘山岩体属于 I 型花岗岩,其黑云母二长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 成岩年龄分别为 138.4 ± 2.5 Ma 和 141.7 ± 2.5 Ma,略早于本区拆离伸展活动的时限^[46]。此外,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^[5,47]。在盖层岩系中主要发育各类花岗斑岩小岩体,其中多与钼(钨)、金的成矿关系密切。小秦岭矿集区西部钼矿床(点)围绕岩体边缘或沿深大断裂带呈 NE 向展布(图 2),说明

钼成矿与晚中生代岩体和断裂构造关系密切。

对距金堆城超大型钼矿床西南约 7 km 的八里坡钼矿床的成岩成矿年代学研究表明,八里坡岩体二长花岗斑岩的单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄为 155.9 ± 2.3 Ma,其钼矿中辉钼矿的 ICP-MS Re-Os 同位素等时线年龄为 156.3 ± 2.2 Ma,二者年龄一致,表明成岩与成矿同时形成^[48]。八里坡斑岩体与东秦岭南泥湖、上房沟等斑岩体成岩年龄基本一致,早于金堆城钼矿床成矿年龄,说明八里

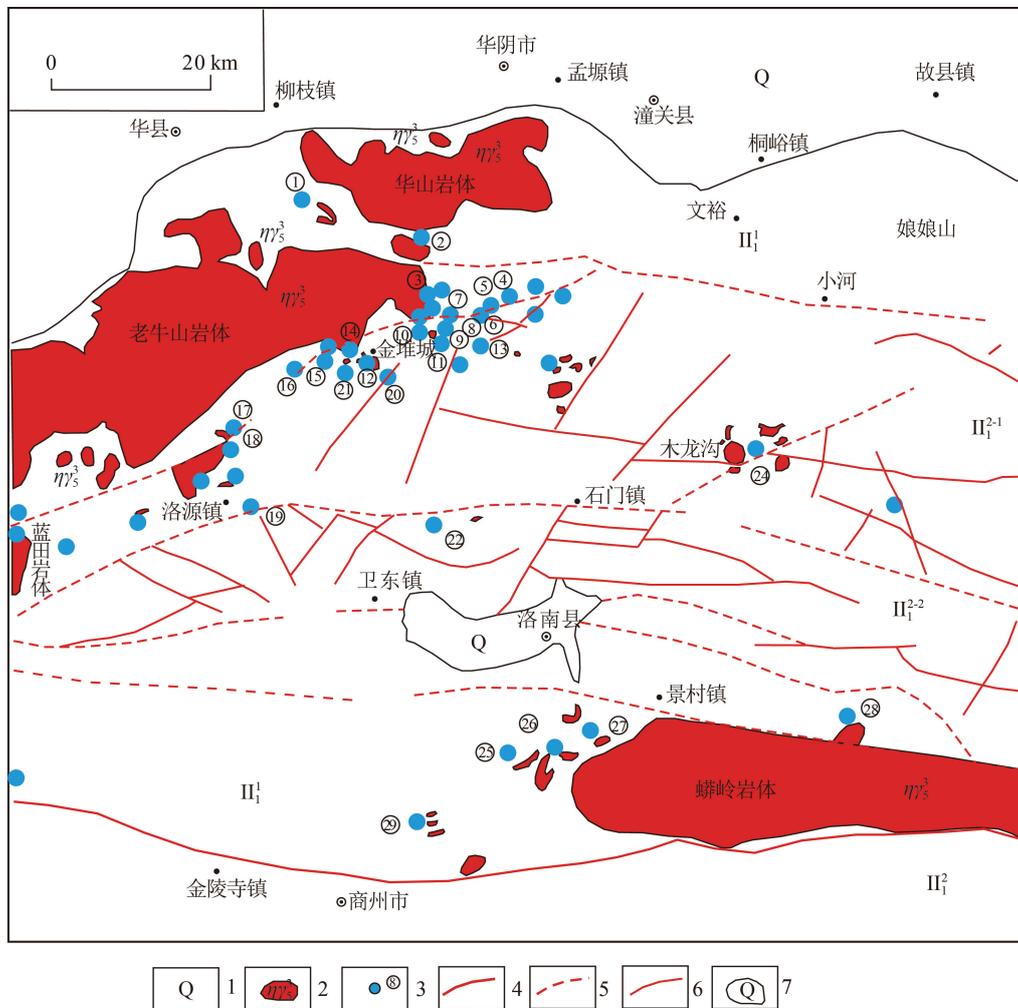


图 2 小秦岭矿集区西部钼矿床(点)分布图

Fig. 2 Distribution of molybdenum deposits in the western Xiaolinling ore-concentrated area

1—第四系坡积物;2—燕山期岩体;3—矿床(点)位置及编号(①—麦糠窑矿床;②—西沟矿床;③—文公岭矿点;④—碌碡沟矿点;⑤—水草坪矿点;⑥—太子坪矿点;⑦—大石沟矿床;⑧—宋家沟矿床;⑨—石家湾矿床;⑩—桃园矿床;⑪—双庙矿床;⑫—金堆城矿床;⑬—二道河矿床;⑭—张家院矿点;⑮—东坪东沟脑矿点;⑯—八里坡矿床;⑰—短沟岔矿点;⑱—角落岔矿床;⑲—洛源周家沟矿床;⑳—西马路沟矿床;㉑—木子沟脑矿床;㉒—李家洼矿床;㉓—黑山周家沟矿床;㉔—木龙沟矿床;㉕—桃花坪矿床;㉖—火链沟矿床;㉗—寺沟矿床;㉘—南长沟矿点;㉙—南台沟矿点);4—深大断裂带;5—推测断裂带;6—一般断层;7—地质界线;II₁¹—太华隆起;II₁²⁻¹—金堆城凹陷;II₁²⁻²—金堆城凹陷南部区;II₂¹—纸房-永丰褶皱束;II₂²—太白-商县褶皱束

坡斑岩体可能是新一期成岩成矿作用,形成于燕山运动的A幕,产出于东亚构造体制转变初期的地球动力学背景^[33, 48-49],具有重要的成岩成矿意义。

2 区域地球化学特征

小秦岭矿集区金、银、钼等元素化探异常成带分布,金、钼矿床(点)密集。通过对小秦岭西部地区 Au、Ag、Pb、Mo、Cu、Zn、As、Sb、Bi、Hg 十个元素的分散流成果统计,全区富 Mo(平均 2.3×10^{-6})、Au(平均 7×10^{-9})、Pb(平均 67×10^{-6}) 等元素,Cu、Hg 相对较贫。初步认为,小秦岭西部地区是高 Au、Ag、Mo、Pb、Bi,低 Hg(Cu)、Sb、As、Zn 的地球化学场,也是亲硫亲铁的地球化学场,但是不同地段地质体的地球化学场特征有差异。太华群表现出高 Au、Ag、Pb、Zn 的地球化学场,熊耳群则显示出高 Mo、Ag、Au、Pb、Bi、Zn 等多元素地球化学场。整体上,各元素在仙峪-太子坪形成近 N-S 向低背景值带,在仙峪-太子坪以西形成高 Ag、Mo、Pb、Bi 的地球化学场,以东为高 Au(Ag、Pb)的地球化学场;西岔沟-金罗斑-大月坪轴向断裂以北为高 Au 的地球化学场,以南为高 Au、Ag、Pb 的地球化学场;中部孙家沟断裂与迴马坪-朱家沟断裂之间形成高 Ag(Pb)的地球化学场;西南部灞源-迴马坪则为高 Au、Ag、Mo、Pb、Bi 的地球化学场,受 NE 向构造影响,形成了太子坪-驾鹿-岳王庙 NE 向 Au、Ag、Mo、Pb 高背景带,而且 Mo 浓度从南西向北东逐步降低,可能指示成矿流体从南西向北东方向活动。受地层、构造、岩浆岩“三位一体”的综合控制,Au 区域地球化学异常场主要呈 NE 向、EW 向展布,在洛源-金堆-驾鹿-潼峪一带呈 NE 向展布,有分段富集规律,大致相间 5~6 km。金主要富集于 NE 向、EW 向断裂中,钼主要富集于 NW 向、EW 向断裂中^[5]。

2.1 地球化学异常特征

小秦岭矿集区西部地区目前共获得元素分散流综合异常 80 个,其中以 Au 为主的异常 57 个、以 Ag 为主的异常 35 个、以 Mo 为主的异常 11 个、以 Pb 为主的异常 20 个,可分为坝塬-太要 Au、Ag、Pb 与皇甫峪-文峪 Au 及华阳川-火龙关-大硐沟-八套脑 Ag、Mo、Au 三条异常带。它们主要分布于太华隆起区和其南部的黄龙铺-洛南凹陷区,少数位于隆起区内的断裂带中(图 3)。金堆城-桃园-

石家湾-黄龙铺-华阳川-港子街-小夫峪-八里坡一带呈现以笔尖山-黄龙铺为中心的等轴状多元素地球化学异常区,直径约 14 km,异常强度大,分带明显,由中心向外,异常元素依次为 Cu、Zn-Pb、Ag、Mo-As、Hg 等,包含多个矿致异常(如源-1、翁-3、翁-4、华-2 等),反映出火山活动中心区的特征。下文分葫芦沟、岳王庙、金堆城和西沟 4 个典型矿区简要论述。

(1) 葫芦沟金矿区

葫芦沟金矿区属于 NE 向展布的坝塬-太要 Au、Ag、Pb 异常带,该带长 75 km,宽 10 km,由 19 个分散流异常组成,异常规模大、类型多、浓度高。带内北部的高浓度 Au 异常是葫芦沟金矿床所在的驾鹿金矿田(即南部太子坪-葫芦沟推覆构造金矿带)的反映。元素组合一般为 Au、Ag、Mo、Pb、Zn 和 Au、Ag、Mo,异常规模大、衬度高,指示了成矿元素的活化、迁移与富集。异常展布方向与洛南-潼关断裂束及同方向基底断裂构造方向一致。区内金的化探分散流异常明显,找矿效果良好。当初发现葫芦沟金矿床时,几个金矿化强的主干探槽均位于分散流异常带中心,有效地指明了矿体赋存部位。在 120 号勘探线附近获得一个规模较大且形态完整的金分散流异常,经探矿工程验证,与金矿体的对应关系较好^①。

(2) 岳王庙金矿区

岳王庙金矿区位于太华群断裂蚀变带中,以含金石英脉与含金破碎蚀变体同等发育为特征。该区属皇甫峪-文峪 Au、Ag、Pb 多元素异常带中的岳王庙-王家坪 Au、Ag、Pb、Hg 异常富集地段,元素组合为 Au、Ag、Pb、Hg、W、Bi、Mo。根据勘查经验总结,对于小秦岭矿集区的金矿,在太华群或太华群与高山河组过渡部位出现的 Au 异常,特别是面积大于等于 1 km^2 的 Au(Ag)异常或 Au-Ag-Pb(Cu、Hg)等综合异常往往为矿致异常。

(3) 金堆城钼矿区

金堆城钼矿区属于区域上 NE 向展布的坝塬-太要 Au、Ag、Pb 异常带中的金堆城-黄龙铺 Au、Ag、Pb、Bi、Mo 异常区,主要有以 Ag、Mo 为主的 27、36 号异常,以 Au 为主的 37、41 号异常,以 Cu 为主的 35 号异常和以 Bi 为主的 19、26、33、34 号异常等。该区中部的 36 号异常呈面状分布,面积约 20 km^2 ,其高浓度 Mo 异常中心与金堆城钼矿床相

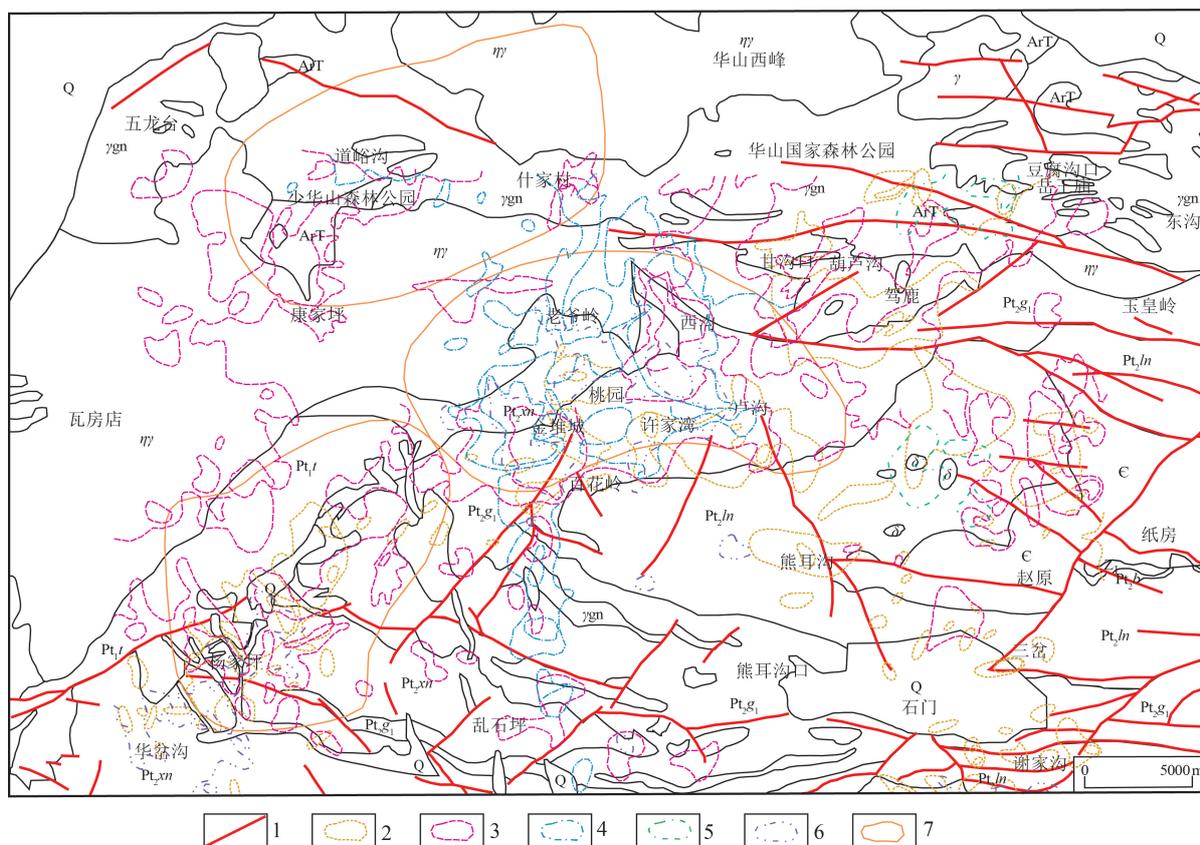


图3 小秦岭矿集区西部化探综合异常示意图

Fig. 3 Schematic map of geochemical anomalies in the western Xiaolinling ore-concentrated area

Q—第四系;C—寒武系灰岩夹少量白云岩;Z₁—震旦系罗圈组石英砂岩;Pt_{2b}—青白口系白木沟组炭质板岩;Pt_{2ln}—蓟县系洛南群泥质白云岩夹少量粉砂质板岩;Pt_{2g1}—蓟县系高山河组白云质石英砂岩;Pt_{2xn}—长城系熊耳群安山岩夹安山玄武岩;Pt_{1t}—长城系铁铜沟组石英岩夹石英片岩;ArT—太古宙黑云斜长片麻岩;ηγ—二长花岗岩;δ—闪长岩;γ—花岗岩斑岩;γgn—花岗片麻岩;1—断裂;2—金异常;3—银异常;4—钼异常;5—铅异常;6—锌异常;7—成矿有利区

对应。

(4) 西沟钼矿区

西沟钼矿区内有 15 个次生晕异常。其中 2、3 号异常为北区寻找以 Mo 为主的多元素异常。

2 号异常分布于区内北西部麦糠窑一带,姜家院—小夫峪花岗岩体西侧,呈 EW 向转 SE 向带状分布,长 3800 m,宽 900~1200 m,元素组合为 Mo、Pb、Ag、Ba、Mn,在该矿化带已发现有 Mo-IX 矿化带。麦糠窑一带的次生晕异常具有多个同心圆状浓集、面状分布的异常特征,西北有色地质勘查局 712 总队已于异常北侧圈出矿带(体)^②。

3 号异常位于 2 号异常东侧构峪—阴司台一带,主要集中于姜家院—小夫峪花岗岩体北东侧外接触带,呈 SE 向椭圆状分布,长 2600 m,宽 1000~2500 m,元素组合为 Mo、Pb、Ag、Ba (Mn),在该异

常中已发现有铅、钼矿化蚀变。

2.2 岩体地球化学特征

小秦岭西部地区从花岗岩基到小岩体 Au、Ag、W、Bi、Mo 含量逐渐升高,燕山期中酸性小岩体中 Mo、W、Bi、Au、Ag 明显富集,一般 $Mo > 100 \times 10^{-6}$,并形成斑岩型钼矿床;岩脉中 Au 含量较高,辉绿岩脉为 20.6×10^{-9} ,云煌岩脉为 28.7×10^{-9} ,说明燕山期岩浆活动对金、钼成矿十分有利^[5]。大的花岗岩基主要受 EW 向与 NE 向 2 组构造交汇部位的控制。中酸性小斑岩体主要受次级构造的控制,常分布在大岩基附近 3~10 km 内向外突出的前缘,或呈港湾状弯曲的内侧。

小秦岭矿集区西部小岩体岩石偏酸性(表 1),与钼、金矿化关系密切,如金堆城、八里坡、石家湾等岩体均为成矿岩体。

主量元素地球化学分析表明,小秦岭矿集区西部小岩体具有较宽的酸、碱度变化范围($\text{SiO}_2 = 69.92\% \sim 78.14\%$, 平均 73.19% ; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.57\% \sim 10.41\%$, 平均 8.45%), 酸度较高, 中等富碱; TiO_2 ($0.04\% \sim 0.22\%$, 平均 0.15%)、 Al_2O_3 ($11.18\% \sim 15.74\%$, 平均 13.89%) 含量较低, 相对高钾 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.05 \sim 1.13$, 平均 0.60), 以过铝质为主 ($\text{A}/\text{CNK} = 0.96 \sim 1.16$, 平均 1.04)。 SiO_2 - K_2O 图解中八里坡岩体为高钾钙碱性系列, 金堆城岩体落入钾玄岩系列, 石家湾岩体介于两者之间(图 4)。岩体均以 I 型花岗岩为主, 可见 I-A 过渡型。

小秦岭矿集区西部小岩体稀土元素总量较低

($\sum \text{REE} = 39.42 \times 10^{-6} \sim 145.97 \times 10^{-6}$, 平均 90.87×10^{-6}), 呈现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损 ($\text{LREE}/\text{HREE} = 3.23 \sim 19.78$, 平均 9.63 ; $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 2.53 \sim 34.12$, 平均 12.12); Eu 异常区间较大, 正负异常均有, 以弱负 Eu 异常为主 ($\delta \text{Eu} = 0.37 \sim 1.69$, 平均 0.79); Ce 异常区间较大, 也以弱负 Ce 异常为主 ($\delta \text{Ce} = 0.74 \sim 1.10$, 平均 0.90); 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线显示向右陡倾型式(图 5-a)。

小秦岭矿集区西部小岩体微量元素特征显示, 相对富集 Rb 、 K 、 Sr 等大离子亲石元素(LILEs)和 La 、 Ce 等轻稀土元素(LREEs), 相对亏损 Nb 、 Ta 、 P 、 Ti 等高场强元素(图 5-b), 表明其源区以地壳物质为

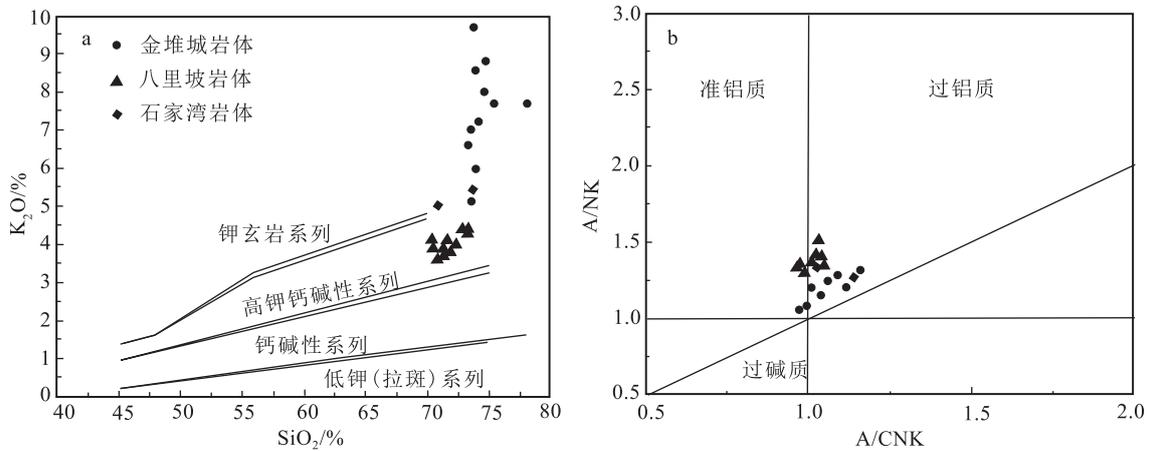


图 4 小秦岭矿集区西部小岩体 SiO_2 - K_2O (a) 与 A/CNK - ANK 图解(b)

Fig. 4 SiO_2 - K_2O (a) and A/CNK - ANK (b) diagrams of small intrusives in the western Xiaolinling ore-concentrated area

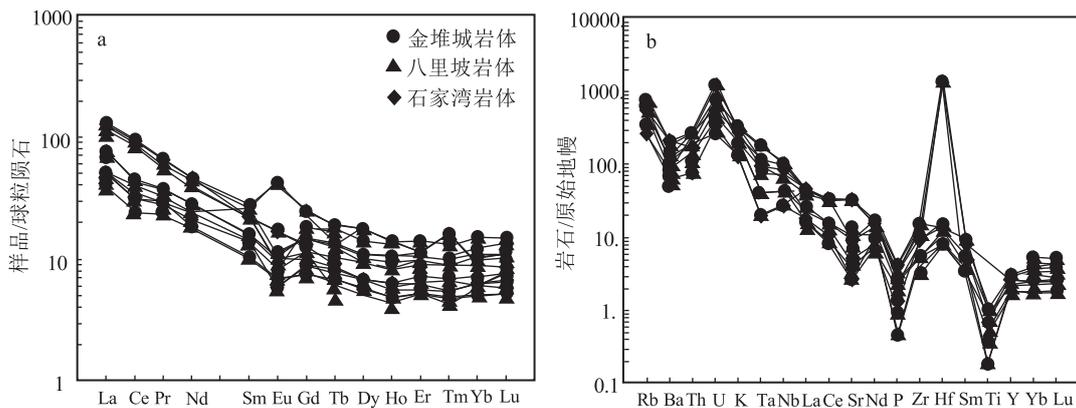


图 5 小秦岭矿集区西部小岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

(标准化数据参考文献[50])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element patterns(b) of small intrusives in the western Xiaolinling ore-concentrated area

主,并存在一定程度的壳幔物质混合。

3 成矿模式

小秦岭矿集区地质演化复杂,岩浆活动频繁,断裂、褶皱构造发育,岩石变质程度深,混合岩化普遍,成矿环境良好。宏观上,金(银)矿床分布于受大型脆-韧性剪切带控制的绿岩带中,受NE向次级断裂、张性转压扭性断裂或多期活动的断裂构造、NE向与EW向交汇构造控制,多期活动的富碱岩体对成矿有利,地表常分布石英脉和蚀变体,或出露有碱性岩脉及辉绿岩脉,金矿床类型以含金石英脉型和构造蚀变岩型为主,糜棱岩型、爆破角砾岩型、斑岩型次之,除金矿外,有时形成银、铅、钼的独立矿体或与金共生;钼矿床分布于花岗岩基周边中酸性小岩体内及其接触带附近,受印支期(210~220 Ma)和燕山期(110~145 Ma)岩浆活动控制,并以后者为主,亦受NW、NE向2组构造控制,其中NE向构造是主要的导岩、导矿构造,NE向构造是脉型钼矿床的主要控矿构造,地表可见钾化、硅化、绢英岩化、青磐岩化、绿泥石化等蚀变,钼矿床类型以斑岩型和斑岩-矽卡岩型为主,斑岩-爆破角砾岩型、石英-碳酸岩脉型次之。燕山期花岗岩体附近多有金、钼矿床产出。

3.1 金矿成矿模式

关于小秦岭矿集区金矿的成矿时代和机制,早期认为是太古宙绿岩带型;20世纪80年代提出燕山期碰撞造山末期成矿理论^[26,51];90年代初提出燕山期伸展构造成矿模式及碰撞造山成矿模式,并获普遍认同^[22,26-27,37,39,52-54]。薛良伟等^[11]研究认为,小秦岭石英脉型金矿的形成过程可分为2个重要的阶段。第一阶段在张性应力环境下形成韧性剪切带,温度较高、深度较大;第二阶段构造应力发生反转,由张性状态转变为压性,形成脆性逆断层叠加在韧性剪切带上,含矿流体在挤压作用下向构造薄弱部位集中,沉淀富集形成石英脉金矿床。一些学者还提出,太华群为矿源层、脆韧性剪切带是成矿空间、燕山期花岗岩岩浆期后热液提供热动力的“三位一体”成矿机制^[15],以及早期深变质条件下存在金预富集作用^[5]等认识。本文以葫芦沟构造蚀变岩型金矿床为例进行讨论。

葫芦沟金矿床的形成与地层、构造、岩浆等因素密切相关,显示了该金矿床多来源、多阶段的多

因复成特征。一方面,金等矿质主要源于太华群,部分源于岩浆岩,大岩基(体)的地球化学研究表明,其源区物质以壳源物质为主,可能与太古宙太华群相似,印支期有年轻地幔物质的贡献^[45]。热液水为混合水,亦显示了多来源性。另一方面,控矿条件复杂,控矿构造具有多期次、多种作用性质、多方向和多级别的特点;其热源既有燕山期岩浆岩,又有构造运动的热动力。所以,该金矿床成矿模式可概括为:来自地幔和下地壳的成矿物质在热能驱动下形成含矿热流体向上部地壳迁移,在中生代晚期碰撞造山期后的陆内伸展构造体制下,深熔花岗岩的侵位导致成矿流体进一步运移、富集,由于金的亲硫、亲铁地球化学性质和物理、化学条件的改变,依次形成石英、黄铁矿、方铅矿,并先后就位于区内的岩石破碎带、构造断裂带和岩石层间滑动破裂带中,在封闭-半封闭的深部塑性-半塑性构造环境中,形成蚀变岩型金矿,随着成矿地质构造环境的改变,在开放-半开放的浅部脆性构造环境中,形成破碎-脉型金矿,矿化作用均以强烈的蚀变交代和充填为特征。已有研究表明,该矿床以燕山期(128 Ma)成矿为主^[47]。金成矿依序主要分为石英-黄铁矿阶段、石英-多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐3个阶段。成矿以第二阶段为主。

区内石英脉型金矿(如陈耳金矿等)多以单脉产出,脉体和成矿热液就位于早期的韧性剪切带后期脆韧性变形叠加而形成的张性扩容空间,成矿流体的活动晚于构造带的形成^[5]。

结合区内其他金矿床的研究进展^[30-31],小秦岭矿集区主要类型金矿床成矿演化过程可概括为:古-中元古代均匀分布在新太古界及深部的金形成初始的矿化集中区(矿源区),随着构造演化沿小秦岭EW向深大断裂形成早期韧性剪切带;经过区域变质-混合岩化作用使部分金活化迁移,在混合花岗岩中金得到初步富集;燕山期由于陆块下插生成改造重熔型及同熔型花岗岩,产生的岩浆热液在天水的渗透作用下形成大量混合型含金热水溶液,向上运移并成矿,总体上具有2期成矿特征。金矿床既受太华群基底和特定构造控制,具有特定的成矿元素组合(Au-Ag-As-Pb-Hg),同时又受印支期或燕山晚期构造-岩浆改造作用控制,多数矿床的最终就位主要受区域晚期构造-岩浆活动控制,即区内基底和构造控制特定区域成矿类型,晚期构造

岩浆活动控制具体成矿部位与找矿地段。

根据秦岭造山带的地质构造环境、岩浆演化过程、已发现重要矿床的成矿、控矿主导因素等,综合分析对比国内外同类金矿床的成矿规律后,总结出华北克拉通南缘的大陆边缘活动带形成金矿的“构造岩浆活化”成矿模式,多期次动热再造是金成矿的主导因素,也是该成矿模式的核心。晋宁期秦岭由垂向增生、扩张裂谷构造机制转变为以侧向运动与增生为主的板块构造体制,地壳底层发生规模较大的幔源基性岩浆底侵作用^[55],在这一过程中金得到初始富集。印支期的构造岩浆活动使部分金活化富集而先期成矿。燕山期的陆内俯冲造山作用,沿着褶皱作用形成的层滑剥离面、地层不整合面等发生大范围以挤压收缩为主的逆冲推覆,强烈的 NE 向构造岩浆活动对区内 EW 向的基底构造进行了全面地改造和动热再造,并形成一系列 EW、NE-NNE 向韧性-脆性剪切断裂带和大规模花岗质岩浆侵入,使初始富集的金及部分来自中酸性花岗质小岩体与基性岩脉的金通过含矿热流体的碱质交代、构造蚀变、充填贯入等在花岗岩基外带一定范围内的构造交汇部位成矿(如葫芦沟金矿等)。各种挤压推覆构造、张性断裂与压扭性-韧性复合带、剪滑断裂及旁侧张剪性断裂裂隙是金富集沉淀的有利空间。

3.2 钼矿成矿模式

小秦岭矿集区西部钼矿床的地质特征、成矿机理、矿化规律、控矿条件、成矿时代等研究成果众多^[56-63],依据近年一些新的资料认识和找矿进展,其成矿模式可概括描述为:印支期古特提斯洋关闭,秦岭造山带由主造山期板块构造的全面碰撞闭合转入陆内构造演化阶段,发育陆内造山逆冲推覆、块断平移走滑和花岗质岩浆活动。在华北和扬子克拉通碰撞晚期出现局部伸展,于张性断裂和拆离断层内形成该区脉型钼矿床(如黄龙铺钼矿等)。中侏罗世古太平洋板块开始向欧亚大陆俯冲,秦岭发生陆内俯冲作用,区内岩浆主要沿 NNE 向或 NE 向断裂与先期形成的近 EW 向或 NWW 向断裂的交汇部位快速上侵定位,形成大的花岗岩基和中小型斑岩体^[7,55]。这期间,由于岩石圈伸展、拆沉作用、软流圈热侵蚀作用等,多样性的花岗质岩浆带动成矿物质由深部向浅部运移和富集,经过强烈的分异演化作用,导致在岩浆演化的晚期,富含硅质、

碱质、挥发组分和矿质的岩浆在岩体或其内外接触带通过构造地球化学障、减压降温、流体混合等机制^[64]形成斑岩型钼多金属矿床(如金堆城钼矿等)。

总之,小秦岭矿集区西部金钼成矿作用发育,地层、构造和岩浆活动三者相互作用、共同演化,构成了完整的控矿系统和成矿系列。

4 区域找矿模型与找矿方向

对矿集区成矿规律、控矿因素、找矿标志的总结研究奠定了建立找矿模型的基础。找矿模型是针对特定类型矿床系统整理出的一套描述或反映其基本成矿特征的信息集合,一般分为经验模型(或称描述性模型)和概念模型(或称理论性模型)。区域找矿模型的核心是经验模型与概念模型的交叉及融合,其以找矿为宗旨,以局部普查与预测工作为重点,系统归纳一套显示成矿特征和找矿标志的参数^[69-70],反映成矿规律,是矿产勘查工作的实际指导,具有实践性和代表性^[10,28,71-72]。根据区内成矿模式研究、找矿标志总结和勘查工作经验,建立了小秦岭矿集区斑岩型钼矿和构造蚀变岩型金矿的区域找矿模型(表 2)。根据该找矿模型,预测了峪耳沟-曹家沟、桃园-百花岭 Au、Ag、Mo 多金属找矿靶区等,并认为小秦岭矿集区深部找矿潜力很大。全国危机矿山接替资源找矿专项之一的陈耳金矿深部勘查和金堆城超大型钼矿床深部勘探、西沟钼矿床普详查地质工作成果已证明了这一点。近年陈耳金矿已获得金资源储量 17.7 t,平均品位 20.4×10^{-6} ,深部矿石变富,前景可观;金堆城超大型钼矿床北露天采坑深部探矿估获(331+332+333)钼资源量约 100×10^4 t,新增钼资源量约 35×10^4 t,在岩体下盘围岩中近 600 m 范围内皆有钼矿体出露,矿体控制标高由原来的 840 m 延深到 200 m 左右,整个矿体的控制深度达 1000 m 左右,累计获得钼资源量约 150×10^4 t;西沟钼矿床经地质普查、详查估获(331+332+333)钼资源量约 10×10^4 t,钼平均品位 0.094%;这些均达大型矿床规模。目前,小秦岭金矿田西部采矿最大斜深为 1400 m,垂深为 1200 m,一般采深在 600~800 m,据此推断小秦岭金矿田内矿床向深部还有较大的延展空间,有较好的找矿远景。结合区内已有地质研究成果与矿产勘查资料^[1-4,73-75],本次研究测算,区内继续向深部 1500 m 以浅金潜在资源量尚有约 500 t。

表1 小秦岭矿集区西部小岩体元素地球化学特征
Table 1 Elements geochemical characteristics of small intrusives in the western Xiaoling ore-concentrated area

| 岩体 | 金堆城岩体 | | | | | | | | | | 八里坡岩体 | | | | | | | | | | 石家湾岩体 | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|--------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|-------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|-------|-------|--------------------------|--|--|--|--|-----------------------|
| | 花岗岩 ^[66] | | | | | 钾长花岗岩 ^[65] | | | | | 斑斑岩 ^[65] | | | | | 粗粒钾长花岗岩 ^[66] | | | | | 花岗斑岩 ^[66] | | | | | 似斑状二长花岗岩 ^[67] | | | | | 钾长花岗岩 ^[68] |
| SiO ₂ | 72.89 | 74.06 | 73.71 | 73.1 | 73.16 | 74 | 73.2 | 74.41 | 78.14 | 74.22 | 72.87 | 69.98 | 70.72 | 69.92 | 73.76 | 73.11 | 73.64 | 71.62 | 70.80 | 71.11 | 69.87 | 71.02 | 71.95 | 73.04 | 70.52 | | | | | | |
| TiO ₂ | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.08 | 0.16 | 0.2 | 0.15 | 0.04 | 0.04 | 0.11 | 0.13 | 0.22 | 0.21 | 0.21 | 0.11 | 0.1 | 0.11 | 0.14 | 0.16 | 0.16 | 0.21 | 0.15 | 0.12 | 0.19 | 0.22 | | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 13.12 | 12.5 | 12.94 | 12.26 | 12.79 | 13 | 12.6 | 13.04 | 11.18 | 12.71 | 14.01 | 15.02 | 14.93 | 15.46 | 13.74 | 14.24 | 14.15 | 14.81 | 15.53 | 15.22 | 15.74 | 15.13 | 14.54 | 13.95 | 14.71 | | | | | | |
| TFeO | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2.1 | 1.99 | 1.62 | 1.97 | 2.3 | 2.33 | 2.65 | 2.36 | 1.86 | - | - | | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ | 1.89 | 1.2 | 0.98 | 1.31 | 1 | 1 | 1.21 | 0.8 | 0.53 | 1.34 | 1.65 | 2.18 | 2.05 | 1.93 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.85 | 1.15 | | | | | | |
| FeO | - | - | - | - | - | 0.8 | 0.79 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0.57 | 1.02 | | | | | | |
| MnO | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.1 | 0.09 | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.1 | 0.09 | 0.07 | 0.1 | 0.11 | 0.07 | 0.09 | 0.13 | 0.12 | 0.16 | 0.14 | 0.1 | 0.02 | 0.03 | | | | | | |
| MgO | 0.13 | 0.07 | 0.3 | 0.06 | 0.28 | 0.3 | 0.37 | 0.13 | 0.1 | 0.21 | 0.24 | 0.38 | 0.33 | 0.28 | 0.33 | 0.25 | 0.23 | 0.3 | 0.34 | 0.36 | 0.46 | 0.34 | 0.25 | 0.34 | 0.54 | | | | | | |
| CaO | 0.73 | 0.66 | 0.9 | 0.56 | 0.7 | 1 | 1.08 | 0.51 | 0.52 | 0.98 | 1.21 | 2.38 | 2.43 | 2.15 | 1.7 | 1.76 | 1.73 | 2.11 | 2.37 | 2.18 | 2.74 | 2.2 | 1.77 | 0.71 | 1.81 | | | | | | |
| Na ₂ O | 1.49 | 1.36 | 1.53 | 0.54 | 1.18 | 2.2 | 1.63 | 0.78 | 1.19 | 1.23 | 3.75 | 4.16 | 4.26 | 4.41 | 3.36 | 3.43 | 3.44 | 3.67 | 3.97 | 3.7 | 3.72 | 3.97 | 3.58 | 3.15 | 3.42 | | | | | | |
| K ₂ O | 6.97 | 7.93 | 7.18 | 9.87 | 8.46 | 6 | 6.61 | 8.77 | 7.7 | 7.58 | 5.09 | 3.94 | 3.76 | 4.15 | 4.31 | 4.41 | 4.43 | 4.1 | 3.98 | 4.24 | 3.85 | 4 | 4.51 | 5.36 | 5 | | | | | | |
| P ₂ O ₅ | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | 0.05 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.05 | 0.07 | 0.11 | | | | | | |
| 烧失量 | 1.85 | 1.29 | 1.71 | 1.28 | 1.2 | 1.5 | 2.08 | 1.11 | 0.68 | - | - | 0.8 | 0.61 | 0.69 | 0.82 | 0.48 | 0.83 | 0.66 | 0.61 | 0.88 | 0.86 | 0.85 | 0.86 | 0.88 | 0.93 | | | | | | |
| 总计 | 99.26 | 99.25 | 99.47 | 99.12 | 99 | 100.1 | 99.85 | 99.65 | 100.11 | 98.46 | 99.06 | 99.25 | 99.46 | 99.31 | 99.76 | 100.06 | 99.85 | 101.27 | 102.97 | 102.93 | 104.04 | 102.98 | 101.72 | 99.13 | 99.46 | | | | | | |
| K ₂ O+Na ₂ O | 8.46 | 9.29 | 8.71 | 10.41 | 9.64 | 8.2 | 8.24 | 9.55 | 8.89 | 8.81 | 8.84 | 8.1 | 8.02 | 8.56 | 7.67 | 7.84 | 7.87 | 7.77 | 7.95 | 7.94 | 7.57 | 7.97 | 8.09 | 8.51 | 8.42 | | | | | | |
| Na ₂ O/K ₂ O | 0.21 | 0.17 | 0.21 | 0.05 | 0.14 | 0.37 | 0.25 | 0.09 | 0.15 | 0.16 | 0.74 | 1.06 | 1.13 | 1.06 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.90 | 1.00 | 0.87 | 0.97 | 0.99 | 0.79 | 0.59 | 0.68 | | | | | | |
| A/CNK | 1.16 | 1.04 | 1.09 | 0.97 | 1.03 | 1.09 | 1.07 | 1.11 | 1 | 1.06 | 1.01 | 0.97 | 0.96 | 0.99 | 1.03 | 1.05 | 1.04 | 1.03 | 1.03 | 1.04 | 1.03 | 1.02 | 1.04 | 1.14 | 1.03 | | | | | | |
| A/NK | 1.31 | 1.16 | 1.26 | 1.06 | 1.15 | 1.29 | 1.28 | 1.21 | 1.09 | 1.24 | 1.2 | 1.35 | 1.35 | 1.32 | 1.35 | 1.37 | 1.35 | 1.41 | 1.43 | 1.43 | 1.53 | 1.39 | 1.35 | 1.27 | 1.33 | | | | | | |
| La | 21.50 | 12.00 | 18.20 | 10.30 | 16.40 | 27.00 | 25.90 | 9.08 | 12.21 | 29.69 | 27.46 | 31.10 | 30.00 | 35.20 | 8.25 | 10.82 | 8.20 | 16.04 | 20.25 | 17.57 | 26.47 | 18.41 | 12.49 | 38.30 | 39.30 | | | | | | |
| Ce | 36.20 | 19.30 | 27.10 | 14.90 | 27.70 | 53.00 | 55.60 | 19.20 | 25.78 | 55.08 | 52.54 | 58.00 | 56.28 | 62.60 | 14.90 | 16.46 | 13.73 | 27.76 | 35.52 | 31.56 | 50.86 | 32.56 | 21.76 | 56.00 | 61.80 | | | | | | |
| Pr | 4.47 | 2.66 | 3.59 | 2.15 | 3.38 | 5.30 | 5.30 | 2.39 | 2.95 | 5.69 | 5.30 | 6.32 | 6.15 | 7.05 | 1.93 | 2.33 | 1.87 | 3.43 | 4.31 | 3.87 | 5.62 | 3.94 | 2.75 | 6.71 | 7.20 | | | | | | |
| Nd | 16.40 | 10.00 | 13.20 | 8.52 | 13.10 | 19.00 | 18.40 | 10.90 | 10.86 | 20.18 | 18.89 | 21.52 | 21.02 | 23.46 | 8.73 | 10.07 | 8.26 | 14.94 | 18.46 | 16.92 | 24.33 | 16.93 | 11.97 | 22.20 | 24.30 | | | | | | |
| Sm | 3.34 | 2.10 | 2.39 | 1.57 | 2.39 | 4.00 | 3.98 | 3.98 | 2.44 | 4.14 | 3.71 | 3.39 | 3.32 | 3.52 | 1.57 | 1.72 | 1.56 | 2.49 | 2.98 | 2.89 | 4.03 | 2.87 | 2.11 | 3.50 | 3.87 | | | | | | |
| Eu | 0.47 | 0.33 | 0.54 | 0.39 | 0.58 | 2.50 | 2.38 | 0.47 | 0.46 | 0.66 | 0.66 | 1.00 | 1.05 | 1.08 | 0.42 | 0.44 | 0.41 | 0.68 | 0.80 | 0.77 | 0.99 | 0.78 | 0.58 | 0.66 | 0.78 | | | | | | |
| Gd | 3.18 | 1.81 | 2.45 | 1.52 | 2.06 | 5.10 | 5.05 | 3.74 | 2.37 | 2.99 | 3.10 | 2.65 | 2.67 | 2.69 | 1.89 | 1.91 | 1.73 | 2.75 | 3.30 | 3.14 | 4.46 | 3.18 | 2.36 | 2.55 | 2.60 | | | | | | |
| Tb | 0.50 | 0.30 | 0.38 | 0.25 | 0.33 | 0.50 | 0.71 | 0.64 | 0.40 | 0.48 | 0.52 | 0.33 | 0.34 | 0.32 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.26 | 0.30 | 0.29 | 0.44 | 0.29 | 0.22 | 0.45 | 0.45 | | | | | | |
| Dy | 2.90 | 1.71 | 2.36 | 1.46 | 1.71 | 4.50 | 4.52 | 3.54 | 2.49 | 2.43 | 2.74 | 1.74 | 1.77 | 1.64 | 1.21 | 1.21 | 1.22 | 1.59 | 1.78 | 1.75 | 2.79 | 1.77 | 1.36 | 2.08 | 2.30 | | | | | | |
| Ho | 0.58 | 0.36 | 0.46 | 0.28 | 0.34 | 0.80 | 0.78 | 0.74 | 0.52 | 0.48 | 0.60 | 0.33 | 0.33 | 0.30 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 0.27 | 0.30 | 0.29 | 0.48 | 0.30 | 0.24 | 0.38 | 0.41 | | | | | | |

表2 小秦岭矿集区西部钼金多金属矿床综合找矿模型

Table 2 Comprehensive exploration model for Mo-Au deposits in western Xiaoqinling ore-concentrated area

| 方法标志 | 成矿类型 | 斑岩型钼矿 | 构造蚀变岩型金矿 |
|------|------------|--|---|
| 构造位置 | | 近 NNE 向和 NWW 向断裂的交会部位 | NE 向次级断裂与 EW 向构造交会部位 |
| 成矿时代 | | 燕山期(140~135 Ma) | 印支期—燕山期(220~130 Ma) |
| 容矿岩石 | | 花岗岩、花岗闪长斑岩、石英二长斑岩、安山(玢)岩 | 黑云斜长片麻岩 |
| 赋矿位置 | | 斑岩体内、外接触带或围岩中 | 含金构造破碎蚀变带及混合岩化发育区 |
| 容矿构造 | | 侵入斑岩体和接触带 | NE 向构造破碎带 |
| 地质模型 | 矿物特征 | 矿石矿物主要为黄铁矿、辉钼矿、白钨矿、磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿,脉石矿物主要为石英、钾长石、斜长石、钙铁榴石、富铁透闪石、白云石、角闪石、金云母、萤石等 | 矿石矿物以黄铁矿为主,脉石矿物主要有钾长石、石英、斜长石、绿泥石、绢云母等 |
| | 矿石结构与构造 | 片状、放射状、自形-半自形粒状、镶嵌状等结构;浸染状、网脉状、细脉浸染状、块状、条带状构造 | 他形-半自形/自形晶粒状结构、压碎结构;浸染状、角砾状构造 |
| | 蚀变及矿化类型 | 钾化、硅化、碳酸盐-沸石化、金云母-阳起石化、透闪石化、青磐岩化等,具有一定的分带性;钾化带多发育于斑岩体、角岩中,伴随有辉钼矿化及黄铁矿化;硅化带分布范围广,在岩体顶部和边缘最强烈,常形成硅化外壳,与钼矿化关系密切 | 钾化、硅化、黄铁矿化、褐铁矿化、绢云母化为主,绿泥石化、碳酸盐化次之。金矿与前者关系密切 |
| 物探模型 | 重、磁异常 | 重力低或呈相对重力低;弱磁异常,岩体内异常低缓,接触带附近磁异常较强、梯度陡。 NE 向、NW 向交汇排列的航磁异常反映岩体的空间展布形态 | 重力高与重力低过渡的梯度带或梯度带两侧的等值线转弯处;正负磁异常梯度带旁侧的低正磁异常,航磁化极后的南北梯度带附近 |
| | 激电异常 | 低电阻率、高充电率(10%~18%)异常 | 低电阻率、高充电率异常 |
| 化探模型 | 1:5 万分散流异常 | Au、Ag、Mo、Pb、Bi、Zn 多元素组合异常 辉钼矿、白钨矿等自然重砂异常 | 面积>1 km ² 的 Au、Ag、Pb、Hg(Cu) 多元素组合异常 |
| | 1:1 万次生晕异常 | 以 Mo、Pb 为主,或伴有 Au、Ag 组合异常 | 以 Au、Ag、Pb、Hg 为主,或伴有 Cu、Mo 的组合异常, Au>5×10 ⁻⁹ |
| | 原生晕异常 | Mo≥100×10 ⁻⁶ ~200×10 ⁻⁶ ,指示钼矿化体;Mo≥300×10 ⁻⁶ ,指示钼矿体 | Au <10×10 ⁻⁹ ,指示金矿化异常体, Au>10×10 ⁻⁹ ,指示金矿化体 |

采用这一区域找矿模型,通过对区内地质、化探、物探、遥感异常信息的系统分析,在 NE 向或 EW 向基底断裂带、小岩体与已知矿床(区)周边及深部开展金、钼多金属综合勘查工作,加强验证、反馈,有望取得新的找矿突破。

5 结论

小秦岭金钼多金属矿集区经历了漫长的地质历史演化,壳幔活动强烈,物质组成复杂,成矿条件良好,金、钼等成矿作用发育,构造、岩浆控矿特征明显。区域上金、钼、银等化探异常连片成带分布,

且异常与矿化吻合性好。区内以燕山期成岩成矿为主,该期中酸性小岩体主要为高钾钙碱性系列,存在一定程度的壳幔物质混合,其空间分布决定了金、钼矿(化)体的定位,找矿潜力较大,这已为近期金堆城钼矿、西沟钼矿、陈耳金矿深部及外围等的勘查成果所证实。以区域地质矿产调查为基础,通过典型矿床对比研究总结出成矿规律、建立找矿标志组合、开展找矿潜力分析、筛选评价异常、优选预测靶区、进行勘查验证的工作流程和综合找矿模型对于该区找矿具有重要的现实指导意义。关于该区矿化类型、成矿物质来源等的认识,目前还不太一

致,仍需进一步深入研究,以更好地服务深部找矿工作,切实支撑、推动新一轮找矿突破的实现。

致谢:对审稿专家提出的宝贵意见表示衷心感谢。感谢参与研究工作的团队成员。

参考文献

- [1] 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,1996:123-146.
- [2] 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,1996:1-244.
- [3] 王瑞廷,袁海潮,孟德明,等.小秦岭地区金钼多金属成矿特征与找矿预测[J].地球科学与环境学报,2014,36(1):19-31.
- [4] Mao J W, Goldfarb R J, Zhang Z, et al. Gold deposits in the Xiaolinling-Xiong'er shan Region, Qinling Mountains, Central China [J]. Mineralium Deposita, 2002, 37(3): 306-325.
- [5] 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,2005:121-175.
- [6] 毛景文,谢桂青,张作衡,等.中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J].岩石学报,2005,21(1):169-188.
- [7] 毛景文,叶会寿,王瑞廷,等.东秦岭中生代钨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.
- [8] 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: 51-78.
- [9] 毛景文,周振华,丰成友,等.初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J].中国地质,2012,39(6):1437-1471.
- [10] 毛景文,张作衡,裴荣富,等.中国矿床模型概论[M].北京:地质出版社,2012:1-560.
- [11] 薛良伟,石铨曾,尉向东,等.小秦岭石英脉型金矿的反转成矿机制[J].科学通报,1998,49(2):203-206.
- [12] 尚瑞均,严阵.秦巴花岗岩[M].武汉:中国地质大学出版社,1988:35-116.
- [13] 吴根耀.燕山运动和中国大陆晚中生代的活化[J].地质科学,2002,37(4):453-461.
- [14] 白万成,卿敏.小秦岭金矿田构造演化与金矿成矿作用[J].黄金地质,2000,6(2):1-8.
- [15] 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,2009:1-266.
- [16] 姚书振,丁振举,周宗桂,等.秦岭造山带金属成矿系统[J].地球科学,2002,27(5):599-604.
- [17] 张正伟,朱炳泉,常向阳,等.东秦岭钨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.
- [18] 谢才富,熊成云,胡宁,等.东秦岭造山带“两阶段双带”区域成矿模式[J].地质科技情报,2004,23(2):77-81.
- [19] 张本仁,骆庭川,高山,等.秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1994:257-311.
- [20] 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.
- [21] 王靖华,张复新,于在平,等.秦岭金属矿床成矿系列与大陆造山带构造动力学背景[J].中国地质,2002,29(2):192-196.
- [22] 陈衍景,富士谷.豫西金矿成矿规律[M].北京:地震出版社,1992:1-209.
- [23] 张进江,郑亚东,刘树文.小秦岭金矿田中生代构造演化与矿床形成[J].地质科学,2003,38(1):74-84.
- [24] 张正伟,张中山,董有,等.东秦岭钨矿床及其深部构造约束[J].矿物学报,2007,27(3/4):372-378.
- [25] 朱赖民,张国伟,李彝,等.与秦岭造山有关的几个关键成矿事件及其矿床实例[J].西北大学学报(自然科学版),2009,39(3):381-391.
- [26] 胡受奚,林潜龙.华北与华南古板块拼合带地质与成矿[M].南京:南京大学出版社,1988:236-442.
- [27] 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.
- [28] 陈毓川,朱裕生,孙文珂,等.中国矿床成矿模式[M].北京:地质出版社,1993:1-102.
- [29] 黄凡,陈毓川,王登红,等.中国钨矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J].中国地质,2011,38(5):1111-1134.
- [30] 王成辉,王登红,黄凡,等.中国金矿集区及其资源潜力探讨[J].中国地质,2012,39(5):1125-1142.
- [31] 燕建设,牛树银,冯建之,等.小秦岭地区构造控矿作用分析[J].中国地质,2013,40(2):538-548.
- [32] 胡海珠,李诺,邓小华,等.秦岭地区印支期钨矿化特征及找矿前景[J].中国地质,2013,40(2):549-565.
- [33] 袁海潮,焦建刚,李小东.东秦岭八里坡钨矿床地球化学特征与深部成矿预测[J].地质与勘探,2009,45(4):35-41.
- [34] 冯延清,钱壮志,张江江,等.东秦岭燕山中酸性小岩体成矿规律[J].地球科学与环境学报,2014,36(1):128-140.
- [35] 张宗清,张国伟,刘敦一,等.秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M].北京:地质出版社,2006:227-232.
- [36] 张复新,杜孝华,王伟涛,等.秦岭造山带及邻区中生代地质演化与成矿作用响应[J].地质科学,2004,39(4):486-495.
- [37] 陈衍景,陈华勇,刘玉林,等.碰撞造山过程内生矿床成矿作用的研究历史和进展[J].科学通报,1999,44(16):1681-1689.
- [38] 卢欣祥,于在平,冯有利,等.东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景[J].矿床地质,2002,21(2):168-178.
- [39] 石铨曾,秦国群,周旭,等.豫西后造山阶段的剥离伸展构造与金矿化[J].河南地质,1993,11(1):27-36.
- [40] 王义天,毛景文.碰撞造山作用期后伸展体制下的成矿作用——以小秦岭金矿集中区为例[J].地质通报,2002,21(8/9):562-566.
- [41] 范宏瑞,谢奕汉,赵瑞,等.豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体复式运移成矿作用[J].岩石学报,2003,19(2):260-266.
- [42] 黄典豪,吴澄宇,杜安道,等.东秦岭地区钨矿床的铼-钨年龄及其地质意义[J].矿床地质,1994,13(3):221-230.
- [43] 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, Shanxi Province China[J]. Economic Geology, 1997, 92: 827-835.
- [44] 王义天,毛景文,卢欣祥,等.河南小秦岭金矿区 Q875 脉中深部矿

- 化蚀变岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其意义[J]. 科学通报, 2002, 47(18): 1427-1431.
- [45] 齐秋菊, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 华北地块南缘老牛山杂岩体时代、成因及地质意义——锆石年龄、Hf 同位素和地球化学新证据[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 279-301.
- [46] 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.
- [47] 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): 12-17.
- [48] 焦建刚, 袁海潮, 何克, 等. 陕西华县八里坡钼矿床 U-Pb 和铀钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1159-1166.
- [49] 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): 203-220.
- [50] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [C] // Saunders A D. Magmatism in the Oceanic Basins. Special Publication of Geological Society of London, 1989, 42: 313-346.
- [51] 栾世伟, 曹殿春, 方耀奎, 等. 小秦岭金矿床地球化学[J]. 矿物岩石, 1985, 5(2): 2-7.
- [52] 陈衍景, 富士谷, 陈泽铭, 等. 论豫西金矿成矿模式和找矿方向[J]. 地质科技情报, 1991, 10(4): 63-67.
- [53] 王志光, 崔毫, 徐孟罗, 等. 华北地块南缘地质构造演化与成矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 1-255.
- [54] 陈衍景, 郭光军, 李欣. 华北克拉通花岗绿岩地体中生代金矿床的成矿地球动力学背景[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(1): 35-40.
- [55] 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: 117-159.
- [56] 范宏瑞, 谢奕汉, 赵瑞, 等. 小秦岭含金石英脉复式成因的流体包裹体证据[J]. 科学通报, 2000, 45(5): 537-541.
- [57] 卢欣祥, 尉向东, 于在平, 等. 小秦岭—熊耳山地区金矿的成矿流体特征[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 377-385.
- [58] 王义天, 毛景文, 叶安旺, 等. 小秦岭地区中深部含金石英脉的同位素地球化学特征及其意义[J]. 矿床地质, 2005, 24(3): 270-279.
- [59] 李厚民, 叶会寿, 毛景文, 等. 小秦岭金(钼)矿床辉钼矿-钼-钨定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 417-424.
- [60] 李诺, 孙亚莉, 李晶, 等. 小秦岭大湖金钼矿床辉钼矿钼钨同位素年龄及印支期成矿事件[J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 810-816.
- [61] 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.
- [62] 高昕宇, 赵太平, 高剑峰, 等. 华北陆块南缘小秦岭地区早白垩世埃达克质花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和元素地球化学特征[J]. 地球化学, 2012, 41(4): 303-325.
- [63] 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.
- [64] 王京彬, 邹滔, 王玉往, 等. 中国钼多金属矿床的组合类型、成矿作用和成矿谱系[J]. 矿床地质, 2014, 33(3): 447-470.
- [65] 焦建刚, 钱壮志, 王勇茗, 等. 华县西沟地区花岗岩体地球化学及成矿潜力[J]. 地质找矿论丛, 2007, 22(4): 270-276.
- [66] 李洪英, 毛景文, 王晓霞, 等. 陕西金堆城钼矿区花岗岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1536-1550.
- [67] 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.
- [68] 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗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.
- [69] 范永香, 阳正熙. 成矿规律与成矿预测[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 108-186.
- [70] 施俊法, 唐金荣, 周平, 等. 世界找矿模型与矿产勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-72.
- [71] 裴荣富. 中国矿床模式[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 242-279.
- [72] 阳正熙. 矿产资源勘查学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-178.
- [73] 方维萱, 李亚林, 黄转莹. 小秦岭地区金矿床成矿构造地球化学动力学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 155-162.
- [74] 方维萱. 小秦岭含金石英脉矿物地球化学研究[J]. 地质与勘探, 1996, 32(3): 40-45.
- [75] 方维萱. 陕西小秦岭地区断裂构造地球化学特征[J]. 地质与勘探, 1990, 26(12): 40-43.
- ①西北有色地质勘查局 712 总队. 陕西省洛南县葫芦沟金矿地质详查报告. 1992: 1-89.
- ②西北有色地质勘查局 712 总队. 陕西省华县西沟钼矿地质普查报告. 2003: 1-97.