



豫西崤山矿集区金矿成矿地质条件与控矿规律

刘文毅^{1,2,3}, 刘继顺^{1,2}, 何美香³, 丁云河³, 王秀全⁴, 李永峰⁵

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 河南省有色金属地质矿产局 第七地质大队, 郑州 450016;
4. 河南省有色金属地质矿产局 第一地质大队, 郑州 450016;
5. 河南省有色金属矿产探测工程技术研究中心, 郑州 450016)

摘要: 崤山地区位于河南省西部, 大地构造位置位于华北陆块南缘, 属于小秦岭-崤山-熊耳山金-银-钼多金属成矿带, 成矿地质条件有利, 但找矿效果不明显。崤山地区金矿成矿地质条件与控矿规律研究不系统, 尚未形成一套完整的成矿理论体系。对区内金矿进行成矿年代、硫同位素、铅同位素、氢氧同位素和流体包裹体研究。结果表明: 崤山地区金矿成矿物质来源主要为壳幔混合源, 以地幔为主; 成矿流体为幔源流体、大气降水和变质流体的混合流体; 成矿温度为中低温(136~379 °C, 平均 232 °C); 成矿盐度为中等盐度(0.20%~27%, 平均 8.22%); 成矿流体密度为低密度(0.65~1.13 g/cm³, 平均 0.88g/cm³); 成矿流体压力为 5~69 MPa; 成矿深度估算为 0.43~5.90 km; 成矿时代为燕山晚期。结合区内金矿的成矿地质背景、成矿物质来源及控矿规律的综合分析, 建立研究区成矿模式。

关键词: 崤山; 金矿; 控矿规律; 成矿模型

文章编号: 1004-0609(2019)-08-1756-15

中图分类号: P597.2; P612

文献标志码: A

崤山矿集区位于河南省西部, 隶属三门峡市陕县、灵宝市和洛阳市洛宁县管辖, 包含葫芦峪金矿、崤山金矿、大方山金矿、申家窑金矿、寺家沟-胡沟金矿、东岔-宽坪银(金)矿等多个矿床, 属于小秦岭-崤山-熊耳山金银钼多金属成矿带, 该成矿带中, 大型金矿床位于小秦岭和熊耳山, 而处于中间位置的崤山地区找矿工作却不理想, 目前仅探明中型金矿床两处, 小型金矿床 10 余处, 累积探明金储量更是远远低于西部秦岭地区和东部熊耳山地区。而崤山地区成矿地质条件、控矿构造、矿床类型和小秦岭以及熊耳山地区非常相似, 因此, 崤山地区找金矿潜力巨大。

多年来, 国内科技工作者在崤山地区开展了大量研究工作。除了对崤山地区单个矿床进行研究外^[1-7], 对于崤山矿集区金矿的研究, 主要集中在崤山地区重磁异常与成矿关系研究^[8]、岩体锆石定年、同位素地球化学特征及地质意义研究^[9-13]、金矿成矿年龄研

究^[14]、构造与成矿的关系研究^[15-16]、成矿地质特征、成矿规律及控矿模式探讨^[17-19]等方面。

与小秦岭、熊耳山地区较为成熟的矿床研究体系相比, 崤山地区与找矿有关的重大问题尚未得到很好的解决, 主要有矿床成因、成矿物质来源、成矿深度、成矿的物化条件以及控矿规律、成矿模式等尚不清楚。本文通过对崤山地区寺家沟金银矿床、崤山金矿等典型矿床的矿床地质特征、成矿期次、流体包裹体特征、稳定同位素特征进行研究, 探讨崤山矿集区金成矿地质特征与控矿规律。

1 区域地质

崤山地区大地构造位置位于华北陆块南缘, 经历了多期次、多阶段运动。华北陆块南缘构造带南以栾

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(201111007-2); 河南省有色金属地质矿产局科研项目(YSDK2014-04, YSDK2016-02)

收稿日期: 2018-06-22; 修订日期: 2019-01-31

通信作者: 刘继顺, 教授, 博士; 电话: 13607489990; E-mail: jsliu@csu.edu.cn

川断裂为界与北秦岭构造带相连, 北以三门峡-鲁山断裂为界与华北陆块相邻(见图 1)。

区域地层属华北地层区豫西地层分区, 其中基底岩系主要由新太古界太华岩群构成, 盖层主要由中元古界熊耳群和官道口群组成。其中, 太华岩群地层变质程度深, 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、斜长角闪岩、混合岩、变粒岩、浅粒岩以及大理岩等。熊耳群不整合在太华岩群之上, 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, 主要岩性有安山岩、玄武安山岩、英安质或流纹质斑岩、碎屑熔岩、火山角砾集块岩、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, 主要岩性有页岩、砂岩、砂泥砾岩、白云岩和泥板岩等。

崤山地区属典型的变质杂岩构造体系, 本区醒目的构造形迹为近东西向的崤山短轴隆起, 四周构成向外倾伏的宽背斜。核部由太华岩群地层组成, 翼部由熊耳群地层组成, 地层倾角在 30°~60°内变化。区内断裂构造发育, 主要包括两种类型, 即脆性断裂构造带和韧性剪切带。脆性断裂构造带主要发育在盖层熊耳群中, 以张扭性断裂为主, 压扭性为辅, 数量多达百余条, 大多数属成矿后断裂, 按展布方向可分为东西-近东西向(马超营断裂、官前断裂等)、北东向、北

西向及南北向(寺河断裂)四组。断裂规模大小不等, 长度几百米至几十公里。金矿多赋存于小岩株围岩不同方向次级断裂内。韧性剪切带主要发育在晚太古界变质结晶基底之内, 长度大于 5 km, 宽度为 5~50 m, 发育糜棱岩及构造片岩。在韧性剪切带形成过程中, 岩石受剪应力作用, 其内微量矿物质发生活化转移, 在应力弱地段(剪切面)沉淀富集成矿, 与区内金矿形成关系密切。

区域岩浆岩广泛发育, 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, 包括阜平期(张家河岩体、界岭岩体)、中条期(张家坪岩体、桂家峪岩体)、晋宁期(小河岩体)、加里东期(基性岩脉)、印支期(刘家坡岩体)、燕山期(小妹河岩体、赵家古洞岩体、后河岩体、龙卧沟岩体)和喜山期(基性岩脉), 岩石类型以花岗岩类为主, 并发育基性岩和碱性岩, 产状有岩基、岩株、岩脉(岩墙)等。

2 典型矿床地质特征

崤山地区矿床类型为中温热液脉型金矿床, 矿体类型主要为构造蚀变岩型和石英脉型。崤山地区金矿床分布如图 2 所示。

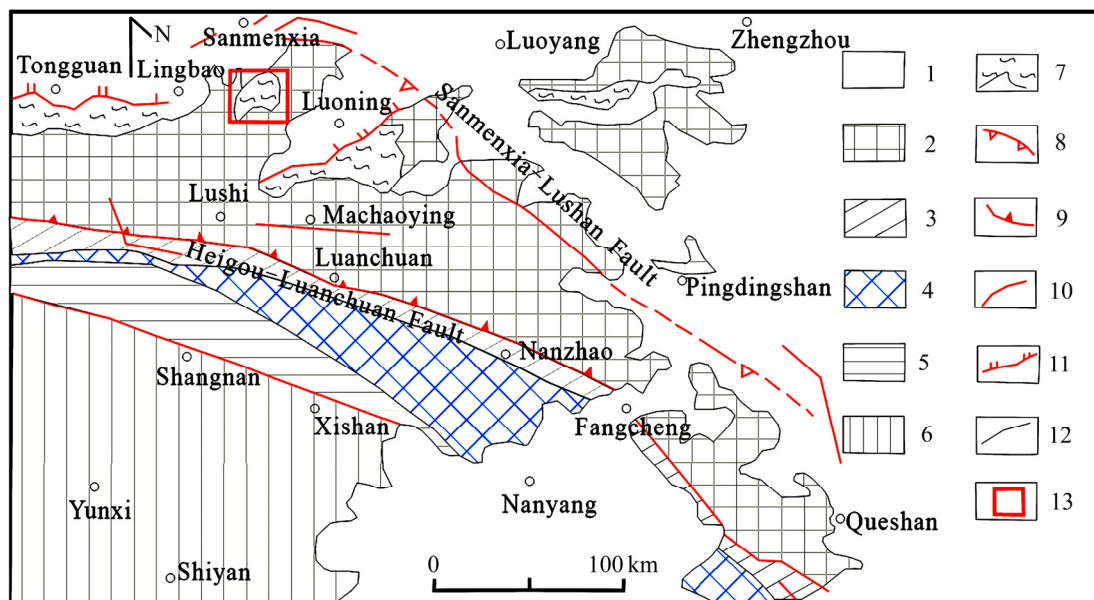


图 1 研究区大地构造位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geotectonic location of study area: 1—Quaternary; 2—North China block cover Xiong'er Group, Guandaokou Group; 3—Kuanping Group; 4—Erlangping Group; 5—Qinling Group; 6—North Qinling orogenic belt; 7—North China block basement Taihua Group; 8—Piedmont thrust fault; 9—Luanchuan thrust fault; 10—Regional fault; 11—Detachment fault; 12—Geological boundary; 13—Study area

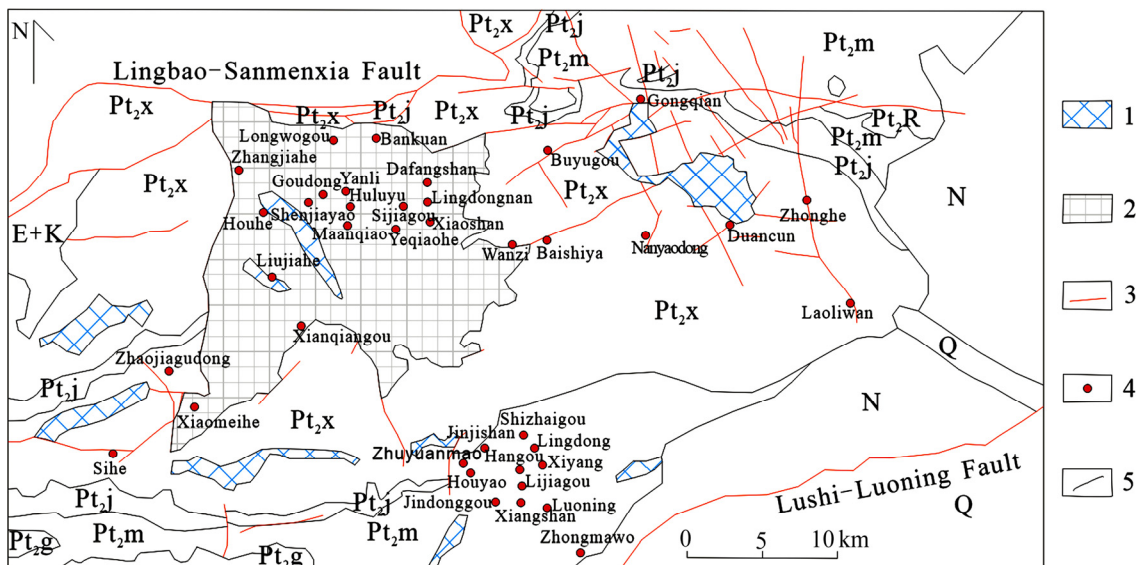


图2 崂山地区金矿床(点)分布图

Fig. 2 Distribution map of gold ore deposits(spots) in Xiaoshan area: Q—Quaternary; N—Neogene; E+K—Paleogene and Cretaceous; Pt_{2g}—Gaoshanhe Group; Pt_{2R}—Yunmengshan Group-Luoyukou Group; Pt_{2m}—Majiahe Group; Pt_{2j}—Jidanping Group; Pt_{2x}—Xushan Group; 1—Porphyritic rhyolite porphyry; 2—Taihua Metamorphic Complex of Archeozoic; 3—Fault; 4—Gold ore deposits(spots); 5—Geological boundary

2.1 构造蚀变岩型

构造蚀变岩型主要分布在崂山地区中部,其中中东部以北东向成矿构造为主(大方山金矿床、寺家沟金银矿床等),中西部以北北西向、北西向成矿构造为主(申家窑金银矿床、葫芦峪金银矿床等)。

该类型矿床为区内最重要的金矿床类型,受变质核杂岩体和拆离断层构造控制,拆离断层上下盘太华群和熊耳群均赋存,但以太华群地层赋存矿床(点)较多,地层和构造控矿特征明显,以寺家沟金银矿床最具代表性。

寺家沟矿区发育14条矿脉,共圈出17个工业矿体,分布于矿区东北部的车宝峪、温地沟、雨沟一带,严格受NE向产状平缓的压扭性断裂构造控制。矿体形态以脉状、透镜状、似层状为主,走向北东,倾向南东,倾角10°~40°,沿走向和倾向上倾角有陡缓变化。矿体长度40~1100 m,斜深30~830 m,厚度0.07~1.8 m,平均厚度较薄,具有膨大狭缩特点。矿化以Au、Ag为主,共(伴)生Pb、Zn,在倾角的陡缓变化处矿厚及品位增高,一般地厚度大金品位也高。

矿石类型主要为蚀变岩型银金多金属矿石。

矿石中金属矿物主要有黄铁矿、自然金、银金矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿,次为铜蓝、黝铜矿、赤铁矿、磁铁矿和毒砂,偶见辉银矿与深红银矿。

脉石矿物主要有石英、白云石、方解石,其次有

角闪石、斜长石、绿泥石、钾长石等。氧化矿物主要有褐铁矿、孔雀石等。

根据寺家沟矿床矿石结构、构造、矿物组合等关系,该类型成矿大致划分为3个阶段:早期石英-黄铁矿阶段,中期多金属硫化物阶段,晚期白云石/方解石-硫化物阶段。

围岩蚀变主要有硅化、钾化、绢云母化、绿泥石化、钠长石化,次生蚀变有褐铁矿化、高岭土化。寺家沟矿区北部围岩蚀变以硅化为主,蚀变强度高,伴有钠长石化,金矿化好;矿区南部围岩硅化蚀变相对较弱,伴有钾化,银矿化好。

蚀变强度越大,则围岩蚀变带宽度越大,一般金品位越高。围岩蚀变宽度一般在0.5 m以内,硅化使围岩变得致密坚硬,钠长石化使暗色围岩产生褪色现象,颜色变浅,这些现象成为良好的找矿标志。

2.2 石英脉型

石英脉型主要分布在崂山地区北部(崂山金矿床、安沟金矿床等)。

该类型矿床主要分布于崂山穹状背斜北缘,受断裂构造控制,金矿化经多阶段叠加富集,主要有石英-黄铁矿、石英-多金属硫化物、碳酸盐等3个阶段,以崂山金矿为代表。

崂山金矿矿区发育7条矿脉,圈定出19个工业矿

体,分布于矿区中部陡崖底、十里宽、放牛山一带。矿体形态以脉状、透镜状、似层状为主,走向北东,走向上呈舒缓坡状。从地表到深部矿脉走向有逐渐向东偏转的趋势。倾向南东,倾角 $13^{\circ}\sim 41^{\circ}$ 。矿脉形态严格受NE向产状平缓的压扭性断裂构造控制,无论走向上或是倾向上呈膨胀收缩现象,分支复合比较强烈。矿体长度130~1130 m,斜深60~704 m,厚度0.05~2.33 m,平均厚度较薄,矿化以Au为主。

矿石类型为3种:1)黄铁矿型矿石,主要的矿物共生组合为石英-黄铁矿、自然金-石英-黄铁矿;2)多金属型矿石,包括石英-黄铁矿-方铅矿、自然金-石英-方铅矿、自然金-黄铁矿-方铅矿及自然金-闪锌矿-黄铁矿-方铅矿;3)氧化类型矿石,包括石英-褐铁矿、石英-高岭石-白铅矿及自然金-黄铁矿-褐铁矿。

矿石主要为含金石英脉。矿石金属矿物含量约占8.45%,主要为自然金、银金矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、褐铁矿、菱铁矿、铜蓝、辉铜矿及微量的钨铅矿、黑钨矿等。脉石矿物占91.55%,其中以石英为主,其次是方解石、白云母、绿帘石、绢云母等,还有少量的磷灰石等。

根据崤山金矿床矿石结构、构造、矿物组合等关系,该类型成矿大致划分为3个阶段:早期石英-黄铁矿阶段,中期石英-多金属硫化物阶段,晚期石英-方解石-硫化物阶段。

围岩主要为混合片麻岩、浅粒岩、混合岩、斜长角闪岩及少量辉绿岩等。近矿围岩蚀变比较发育,围岩蚀变主要有黄铁矿化、硅化、方铅矿化、绢云母化、绿泥石化、绿帘石化。成矿期后的次生蚀变主要为褐铁矿化、高岭土化,是找金的重要标志。矿体直接围岩为黄铁绢英岩、糜棱岩。蚀变带宽度不等,一般为数十厘米至二、三米,主要在矿体两侧呈对称分布。横向上,由矿体到围岩,蚀变作用由强变弱;纵向上,上部蚀变作用强烈,下部蚀变作用变弱。

3 样品测试

本次工作选取申家窑、宽坪、寺家沟、崤山矿区成矿中期多金属硫化物阶段共37件新鲜矿石样品用于样品测试工作,包括氢氧同位素和包裹体成分测试(9件)、硫同位素测试(33件)和包裹体测温(10件)。

其中,单矿物(用于氢氧同位素和包裹体测试的石英、硫同位素测试的黄铁矿和方铅矿)的挑选以及包裹体制片工作由河北省廊坊区调所实验室完成。石英矿物粒度为250~420 μm ,质量大于8 g。黄铁矿和方铅

矿矿物粒度为75~420 μm ,质量大于1 g。氢氧、硫同位素测试工作由核工业北京地质研究院地质分析测试研究中心完成,包裹体成分测试及测温由中国地质科学院矿产资源研究所重点实验室完成。

氢、氧同位素测试仪器为MAT-253质谱仪。氢同位素分析采用锌还原法测定,在低温下烘干去除吸附水和次生包裹体,然后加热至600 $^{\circ}\text{C}$ 从样品中提取原生流体包裹体的水,然后用锌置换出水中的氢并对 H_2 进行质谱分析;氧同位素采用五氟化溴法测定,在500~680 $^{\circ}\text{C}$ 的真空条件下使 BrF_5 与石英反应,对产生的 O_2 进行质谱分析。氢同位素的分析精度为 1×10^{-4} ,氧同位素的分析精度为 2×10^{-4} 。

硫同位素用OMAT-251EM质谱仪测定,采用VCDT国际标准,分析精度好于 2×10^{-4} 。铅同位素用热表面电离质谱法测量,仪器型号为ISO-PROBE-T热电质谱计,测量精度 $\leq 5\times 10^{-5}$ 。

流体包裹体显微测温分析使用仪器为Linkam THMSG-600型冷热台,温度控制范围为 $-196\sim 600^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。包裹体成分分析制样过程为:将矿石手标本碎样至过250 μm 的过筛,从中挑选石英、方解石和白云石单矿物,保证矿物纯度在98%以上。其中包裹体液相分析仪器为Shimadzu HIC-SP Super离子色谱仪,爆裂温度为500 $^{\circ}\text{C}$,阳离子最低检出限为 10^{-6} ,阴离子最低检出限为 10^{-9} 。包裹体气相分析仪器为GC2010气相色谱仪,载气为He,包裹体爆裂取样温度为100~500 $^{\circ}\text{C}$ 。

4 结果及分析

4.1 成矿流体特征

1) 流体包裹体成分特征

包裹体中液相成分结果(见表1)显示:本区热液体系中阳离子成分主要为 Na^+ 、 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} ,阴离子以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,包裹体中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量很低, Na^+/K^+ 远大于1,说明成矿热液可能主要来源于地热卤水。高 SO_4^{2-} 含量说明成矿体系中富硫, Cl^-/F^- 均大于1,说明 Cl^- 是包裹体阴离子的主要成分。包裹体气相成分(见表2)中以 H_2O 为主,其次为 CO_2 ,含少量的有机质、 N_2 和 CH_4 ,高密度 CO_2 普遍存在表明有变质热液参与成矿。

流体包裹体成分研究表明,成矿溶液属于 $\text{H}_2\text{O}-\text{Na}^+(\text{Ba}^{2+}, \text{Sr}^{2+}, \text{Pb}^{2+}, \text{Zn}^{2+})-\text{Cl}^-(\text{SO}_4^{2-})-\text{CO}_2$ 体系,成矿流体来源为地热卤水。

表1 流体包裹体液相成分分析结果

Table 1 Analysis results of liquid phase composition of fluid inclusions

Sample No.	Liquid phase composition, w/%													
	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Br ⁻	Ba ²⁺	Ca ²⁺	Cu ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Pb ²⁺	Sr ²⁺	Zn ²⁺
BGT01	0.053	4.97	0.308	2.35	0	0.17	0.04	0.37	0.01	0	1.24	5.1	0.3	0.46
BGT02	0.044	2.36	0	2.07	0	0.18	0.01	0.1	0	0	1.9	1.9	0.1	0.28
BGT03	0.091	3.24	0.22	2.93	0	0.48	0.03	0.41	0.01	0	1.79	1.85	0.58	1.32
BGT07	0.038	4.51	0.055	0.44	0	0.47	0.06	0.19	0.01	0.02	1.67	0	2.38	0.24
BGT09	0.057	11.05	0.053	2.29	0.057	3.99	0.11	0.14	0.01	0.02	0.43	0	8.76	0.05
BGT15	0.028	5.19	0.054	1.17	0	2.83	0.07	0.13	0.01	0.01	0.03	1.1	2.25	0.02
BGT16	0.046	3.86	0.046	2.16	0	1.27	0.04	0.28	0.01	0.01	0.04	2.25	1.59	0.63
BGT19	0.009	10.38	0.032	1.23	0.074	4.92	0.07	0.19	0.01	0.01	0.85	0	5.44	0.25
BGT20	0.036	5.55	0.112	0.57	0	0.76	0.05	0.47	0.01	0	0.99	2	1.48	0.5

表2 流体包裹体气相成分分析结果

Table 2 Analysis results of gaseous composition of fluid inclusions

Sample No.	w(OM)/%	w(H ₂ O)/%	w(CH ₄)/%	w(CO ₂)/%	w(O ₂)/%	w(N ₂)/%	w _t ¹⁾ /%
BGT01	0.0	80	0.01	19.99	0.0	0.0	100
BGT02	6	80	0.2	13.5	0.0	0.3	100
BGT03	2	90	3	5	0.0	0	100
BGT07	4	92	0.01	3.49	0.0	0.5	100
BGT09	1	99	0	0	0.0	0	100
BGT15	2	96	0.01	1.98	0.0	0.01	100
BGT16	3	95	0.01	1.89	0.0	0.1	100
BGT19	1	80	0.5	18.5	0.0	0	100
BGT20	5	95	0	0	0.0	0	100
BGT21	3	91	0.1	5.8	0.0	0.1	100

1) w_t is total mass fraction.

2) 流体包裹体温度、盐度

通过对崞山地区10件样品中的435个原生包裹体进行研究发现:气液包裹体(LV型)数量为427个,CO₂包裹体(C型)数量为6个,富气(V型)与纯液相(L型)包裹体均只有1个。对石英矿物中的原生包裹体进行显微测温,所有均一到液相,包裹体均一法测温测试结果见表3。

从表3中可以得出,崞山地区金矿床矿石的成矿均一温度为136~379℃,平均232℃,盐度变化范围为0.20%~27%,平均8.22%。将原生包裹体分为3个阶段,与三期成矿阶段相对应。第一期为石英-黄铁矿阶段,其中原生包裹体大小2~12 μm,气液比百分数为5%~40%,次原状、规则,孤立自由分布,均一温度变化范围为149~330℃,平均温度为266℃,盐度范围0.90%~27%,平均盐度为12.05%;第二期为多金属硫化物阶段,其中原生包裹体大小2~12 μm,气液比百分数为5%~40%,多数规则,一般较规则,

孤立自由或沿生长环带分布,均一温度变化范围为144~316℃,平均219℃,盐度范围0.20%~18%,平均5.94%;第三期为方解石硫化物阶段,其中原生包裹体大小2~15 μm,气液比百分数为0.3%~60%,一般在10%左右,较规则、规则,孤立自由或沿生长环带分布,均一温度变化范围为136~379℃,平均213℃,盐度范围0.20%~16%,平均6.96%。

综上所述,崞山地区成矿温度为中低温(见图3),成矿流体盐度为中等盐度(见图4)。

3) 流体包裹体密度

流体密度是研究包裹体的一个参数,它与均一温度、盐度及均一时溶液的蒸气压都有关系^[20]。本次流体密度估算的依据是中低盐度NaCl-H₂O溶液包裹体的密度式^[21]:

$$D = A + Bt_a + Ct_a^2$$

式中: D 为盐水溶液密度, g/cm³; t_a 为均一温度, °C;

表3 包裹体测温结果

Table 3 Results of inclusion thermometry

Sample No.	Stage	Test number	Vapor liquid rate/%		$t_h/^\circ\text{C}$		Salinity/%		Freezing temperature/ $^\circ\text{C}$	
			Range	Average value	Range	Average value	Range	Average value	Range	Average value
BGT07	I	62	10-30	22.4	184-328	289	5.7-14	7.4	-10--0.1	-5.9
BGT09		45	10-30	16.2	149-290	244	0.9-27	18.1	-27-7.8	-16.6
BGT20		29	5-40	19.1	151-330	252	8.5-16.4	12.6	-12--7	-10.2
BGT03	II	37	5-30	13.9	144-315	230	0.6-12.4	5.4	-8-0	-3.5
BGT16		56	10-40	15.6	175-316	223	0.2-10.3	6.4	-6.8--0.1	-4.1
BGT19		53	5-30	12.2	145-296	207	0.5-18	5.9	-14--0.3	-5.3
BGT01	III	41	0.3-60	19.5	137-379	237	4.2-11	8.2	-7.3--4	-5.5
BGT02		36	5-40	16.2	136-347	230	1.8-8.2	3.9	-5.2--1	-3.3
BGT15		51	5-10	7.4	147-223	191	0.4-16	8.6	-12.1--0.1	-6.1
BGT21		25	5-25	13.2	147-265	195	0.2-9.6	6.0	-6.3--0.1	-3.7
Average value			0.3-60	15.6	136-379	232	0.2-27	8.22	-27-0	-6.4

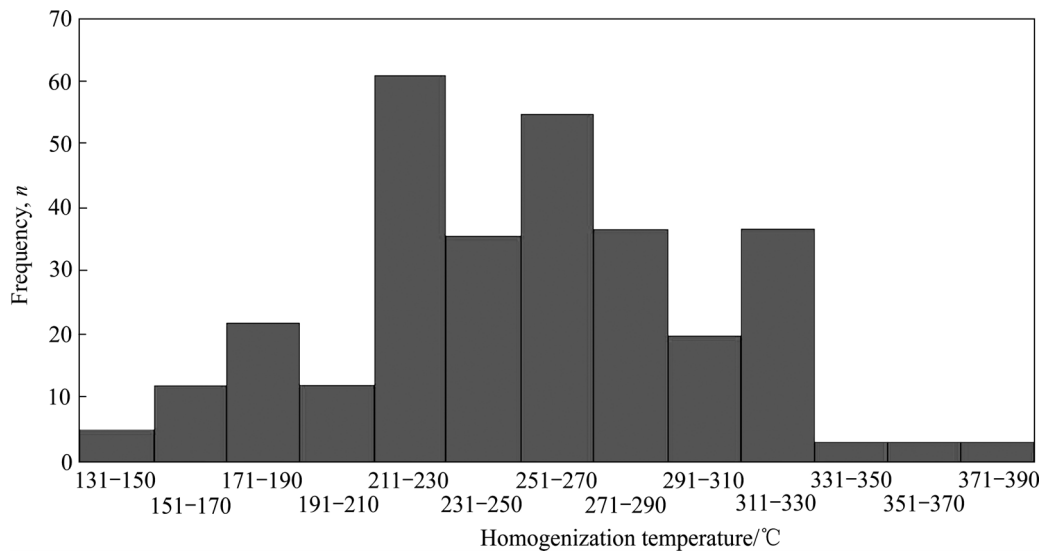


图3 流体包裹体均一温度直方图

Fig. 3 Histogram of homogenization temperatures of fluid inclusions

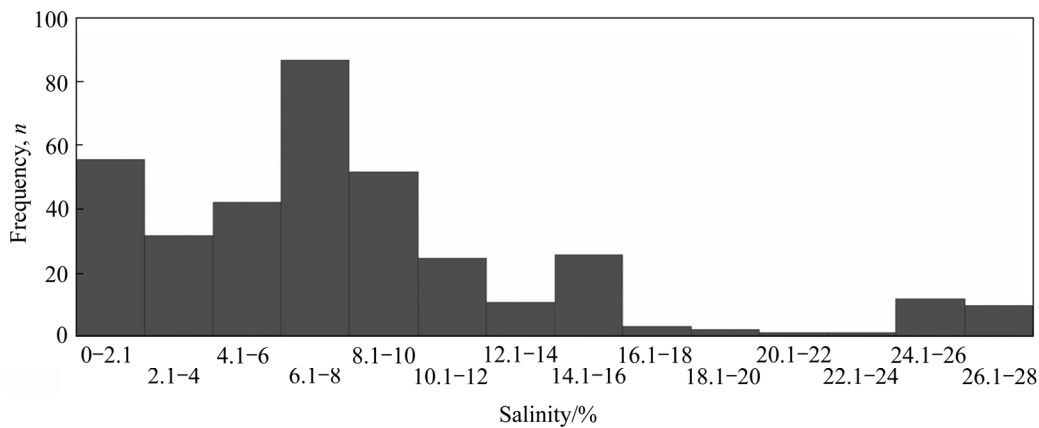


图4 流体包裹体盐度直方图

Fig. 4 Histogram of salinities of fluid inclusions

A、B、C 为无量纲参数，体系盐度为 1%~30%。

不同盐度(S)的流体对应不同的值：

$$A=0.993531+8.72147 \times 10^{-3} S-2.43975 \times 10^{-5} S^2$$

$$B=7.11652 \times 10^{-5}-5.2208 \times 10^{-5} S+1.26656 \times 10^{-6} S^2$$

$$C=-3.4997 \times 10^{-6}+2.12124 \times 10^{-7} S-4.52318 \times 10^{-9} S^2$$

运用上述方法对气液两相包裹体的密度进行计算，其成矿流体密度变化于 0.65~1.13 g/cm³，平均为 0.88 g/cm³，显示出本区流体属于低密度流体。其中，第一成矿阶段成矿流体密度范围为 0.73~1.13 g/cm³，平均为 0.88 g/cm³；第二成矿阶段成矿流体密度范围为 0.70~1.05 g/cm³，平均为 0.87 g/cm³；第三成矿阶段成矿流体密度范围为 0.65~1.12 g/cm³，平均为 0.90 g/cm³。

4) 流体包裹体压力估算

利用中低盐度 NaCl-H₂O 溶液包裹体的等容式^[21]：

$$p = a + bt + ct^2$$

式中：p 为压力，MPa；t 为温度，℃；a、b、c 为无量纲参数，不同盐度、密度下的数值不同，可以通过查表^[21]获得。由于本次包裹体为硅酸盐包裹体，硅酸盐包裹体的均一温度(t)可以近似的看作是它的形成温度(t_f)^[22]。

运用上述方法，求得崞山地区矿物包裹体的有效压力范围为 5~69 MPa。

5) 成矿深度估算

与岩浆作用有关的中温热液脉型金矿床，其一般成矿深度为 0.5~4.5 km^[23]。崞山地区太华岩群岩石密度为 2.71 g/cm³，即 p_r(静水压力)=2.71p_w(静岩压力)。根据流体力学等有关理论推算，当断层的地震破裂在相当短的时间内发生，压力降可以达到静岩压力与静水压力之差的 85%~90%以上，在地震破裂后流体压力可以骤降至非常接近静水压力。因此，在发生断层地震破裂这种断层阀模式控制的矿脉中矿物包裹体压力代表的是矿物结晶的成矿流体压力，而不是静岩压力^[24]。

如果按地震破裂的压力降为静岩压力(p_r)与静水压力(p_w)之差的 90%计算，那么矿物结晶时成矿流体压力为 p_m=p_r-(p_r-p_w)×90%，由于 p_r=2.71p_w，可计算出成矿流体压力 p_m=1.17p_w。由于静水压力梯度为 10 MPa/km，可由此计算出崞山地区矿物结晶时成矿流体的压力梯度为 11.7 MPa/km，静岩压力梯度为 27.1 MPa/km。本次成矿期流体包裹体形成压力计算结果为 5~69 MPa，以崞山地区矿物结晶时成矿流体压力梯度对成矿深度进行估算，估算出崞山地区金矿成矿期深

度为 0.43~5.90 km。对比与岩浆作用有关的热液矿床成矿深度范围 0.5~4.5 km，崞山地区金矿成矿期深度为 0.43~5.90 km 是合理的。

4.2 稳定同位素特征

1) 硫同位素特征

崞山矿集区 48 件金矿体硫同位素样品(33 件来自本次测试，15 件来自文献[25])测试研究表明：硫同位素 δ³⁴S 均为正值，黄铁矿 δ³⁴S 为 0.17%~0.566%，算术平均值为 0.312%(n=38)，方铅矿 δ³⁴S 为 0.0281%~0.255%，算术平均值为 0.1584%(n=3)，闪锌矿 δ³⁴S 为 0.11%~0.40%，算术平均值为 0.2294%(n=7)。

区内矿石含硫矿物主要为黄铁矿和方铅矿，其次为闪锌矿，矿物组合为简单的金属硫化物，未见硫酸盐矿物出现，因此，可用矿床的金属硫化物 δ³⁴S 值代表成矿流体中总硫同位素值。在崞山地区矿床 δ³⁴S 分布直方图上，具有显著的塔式分布规律(见图 5)，反映了崞山矿集区金矿具有较一致的硫源，且硫源较单一。δ³⁴S 值大多位于陨硫硫(-0.5%~0.5%)^[26]的变化范围，表明崞山地区金矿床成矿流体中的硫主要为来自地幔的陨硫硫，成矿过程中，随着成矿流体沿深大断裂向上运移，不断有地壳硫加入。因此，崞山地区金矿床成矿物质为壳幔混合源，以地幔为主。

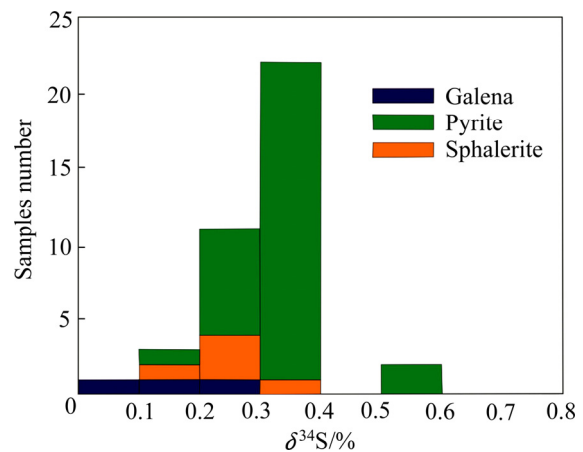


图 5 崞山地区金矿的硫同位素分布直方图

Fig. 5 Histogram of sulfur isotope distribution of gold deposits in Xiaoshan area

2) 氢氧同位素特征

氢氧同位素测试分析结果(见表 4)显示：崞山地区矿石 δD_{V-SMOW} 范围为 -9.3%~-6.6%，平均 -8.5%，δ¹⁸O_{V-SMOW} 范围为 0.85%~1.21%，平均 1.01%，δ¹⁸O_{H₂O}(其中，δ¹⁸O_{H₂O} 计算公式采用邵拥军等^[27])范围为 -0.405%~0.214%，平均 -0.018%。在崞山地区金矿成矿流体的 δD-δ¹⁸O_{H₂O} 图^[28]上(见图 6)，所有数据均落

表 4 氢氧同位素测试结果

Table 4 Test results of hydrogen and oxygen isotope

Sample No.	Mineral	$\delta D_{V-SMOW}/\%$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\%$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\%$	Homogenization temperature/ $^{\circ}C$
BGT01	Quartz	-9.3	1.21	0.210	237
BGT02	Quartz	-9.1	1.17	0.134	230
BGT03	Quartz	-9.3	1.00	-0.036	230
BGT07	Quartz	-8.7	0.99	0.214	289
BGT09	Quartz	-8.5	1.08	0.114	244
BGT15	Quartz	-8.0	0.86	-0.405	191
BGT16	Quartz	-6.6	0.97	-0.103	223
BGT19	Quartz	-8.2	0.95	-0.214	207
BGT20	Quartz	-8.7	0.85	-0.078	252

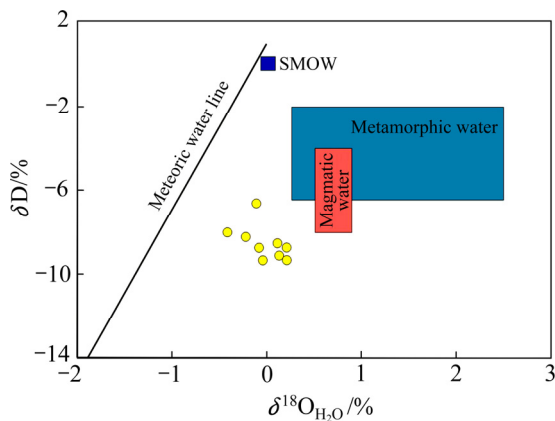


图 6 崤山地区金矿成矿流体的 $\delta D-\delta^{18}O_{H_2O}$ 图(底图据文献 [28])

Fig. 6 $\delta D-\delta^{18}O_{H_2O}$ diagram of ore-forming fluid of gold deposit in Xiaoshan area(modified from Ref.[28])

在岩浆水、变质水与大气降水线之间, 表明崤山地区金矿的氢氧同位素组成显示混合流体特性。

5 成矿规律讨论

5.1 成矿年代

据陈毓川等^[29]对全国岩金矿床资料的统计, 666 个矿床中形成于中生代的有 518 个, 占矿床数的 78%, 占金矿总储量的 75%, 这些金矿床基本上都产在中国东部。毛景文等^[30]认为中国东部最重要的成矿时期是在中生代, 中生代成矿大爆发, 尤其是燕山期。以金矿为例, 中国东部最重要的金矿类型如破碎蚀变岩型、石英脉型、变质热液型、火山-次火山热液型以及微细浸染型等, 主要形成于中生代。

崤山地区金矿床中的含金石英脉切穿了辉绿岩(同位素年龄 182~148 Ma)和燕山晚期花岗岩斑岩(同位素年龄 135~117 Ma)^[11-13]。

以往豫西金矿成矿时代研究工作显示, 崤山北部

柳树沟金矿段石英和方铅矿的 Ar-Ar 等时线年龄分别为(133±2.7) Ma 和(126±2.5) Ma^[14], 小秦岭东闯金矿存在 128.3~132.2 Ma 的成矿作用^[31], 祁雨沟金矿 4 号角砾岩筒中黄铁矿的 Rb-Sr 等时线年龄(126±11) Ma^[32]。

而小秦岭、崤山、熊耳山同属华北地台南缘华熊复合体, 其成矿地质背景、矿床地质特征等均无明显差异, 应属同期成因矿床^[14]。

综上所述可知, 崤山地区金矿成矿时代应属燕山晚期。

5.2 控矿因素

1) 地层控矿

崤山地区地层主要由核部的太华岩群结晶基底和熊耳群盖层组成。

太华岩群地层主要岩石类型为黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、角闪岩、角闪斜长片麻岩、片岩等, 一般硬且脆, 在后期构造应力的剪切、挤压、张扭作用下, 易产生断裂构造, 这些构造为后期成矿热液的运移和充填提供空间。熊耳群地层主要为火山作用形成的火山岩。

对崤山地区 1626 件岩石地球化学分析数据进行统计显示(见图 7): 太华岩群地层除 Cu 元素与地壳克拉克值相当外, 其余元素均为强富集元素, 主成矿元素 Au、Ag、Pb、Zn 为克拉克值的 2 倍以上, 前缘低温元素 As、Sb、Hg 更是达 6 倍以上, 高温元素 W、Sn、Mo、Bi 均大于 1.5 倍以上, 表明太华岩群地层含有充裕的成矿物质。

以上研究表明, 太华岩群地层是崤山地区金矿的有利赋矿围岩。

2) 构造控矿

崤山地区属典型的变质杂岩构造体系, 本区醒目的构造形迹为近东西向的崤山短轴隆起, 四周构成向外倾伏的宽背斜。核部由太华岩群地层组成, 翼部由

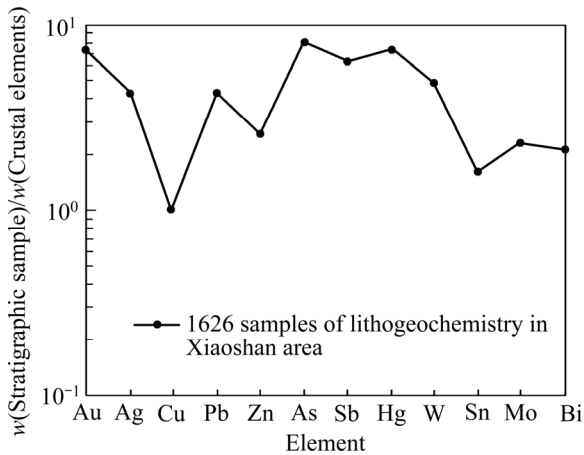


图7 地层中成矿元素富集程度
Fig. 7 Enrichment degree of ore-forming elements in stratum

熊耳群地层组成，地层倾角在 30°~60°内变化。受崂山核部隆起和熊耳群向四周滑脱作用，在崂山地区东部形成北东向的次级断裂和北北西向的拆离断层带，在崂山中部形成北西向的次级断裂和北北西向的韧性剪切带。

燕山期，携带幔源成矿物质的岩浆沿着区域的拆离断层带和韧性剪切带上侵，在上侵过程中不断萃取围岩中的成矿物质，并在浅部与地表水混合形成混合成矿流体，混合成矿流体继续沿着区域性断裂向构造带的低温低压方向运移，并在区域性断裂及其次级断裂的有利部位析出成矿，形成了崂山东部受拆离断层带及其次级断裂控制的北东向缓倾斜构造矿化带和崂山中西部受韧性剪切带及其次级断裂控制的北西向陡倾斜构造矿化体。

综上所述，区域性的拆离断层带和韧性剪切带为成矿物质运移提供了通道，拆离断层带、韧性剪切带及其发育的次级断裂也为成矿提供了场所。

3) 岩浆岩控矿

中生代，拉张构造使华北地块岩石圈减薄，大规模的岩浆上侵，在崂山中北部形成以窑院村为中心的岩基，岩浆侵入使区域构造带扩容，携带大量成矿物质的幔源流体沿韧性剪切带及拆离断层带上涌，在幔源流体运移过程中又不断萃取围岩中的成矿物质加入，随着地表水(可渗透深度 10~15 km^[33])的逐渐加入，压力释放，温度降低，造成成矿流体物理化学条件发生骤变，成矿物质在构造有利部位沉淀富集，形成金矿体。

因此，燕山期岩浆岩为崂山地区金矿成矿提供了一定的物质来源和热动力条件，本区目前发现的主要金矿矿体也多位于燕山期小岩株的周围及其 2 km 范围内。

5.3 成矿时空分布规律

崂山地区金矿类型为石英脉型和构造蚀变岩型。石英脉型、构造蚀变岩型的产出，大多与大型构造带有关，矿体不一定产于其中，但多赋存于其从属的高角度脆-韧性断裂或脆性断裂中，因而增大了深部找矿的概率。

早期成矿作用具典型的韧性剪切带特征，第一期成矿作用卷入了韧性剪切变形(细粒黄铁矿化石英脉发生褶皱与糜棱岩化)，后期叠加的构造特别发育，根据韧性剪切带构造演化与金矿化叠加复合关系图(见图8)和剪切带变形域与金矿化类型关系图^[34](见图9)，

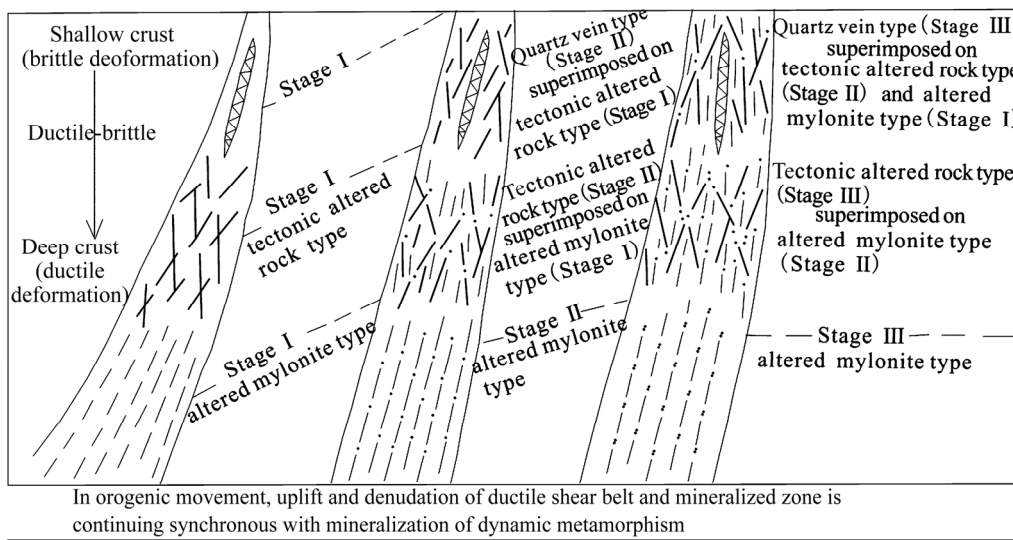


图8 韧性剪切带构造演化与金矿化叠加复合关系图(底图据文献[34])
Fig. 8 Model of relationship between structural evolution of ductile shear zone and superimposed gold mineralization (modified from Ref.[34])

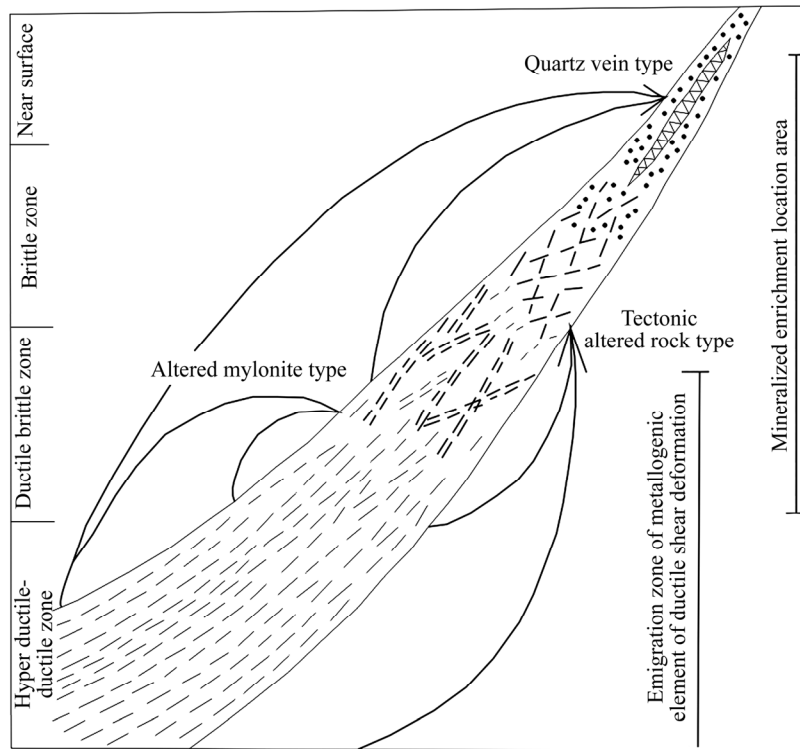


图 9 剪切带变形域与金矿化类型关系图(底图据文献[34])

Fig. 9 Map showing relationship between types of gold mineralization and shear deformation(modified from Ref.[34])

结合地表剥蚀特征深度分析,可以推断矿化类型分带。

崤山地区中浅部矿化类型主要有石英脉型、石英脉+构造蚀变岩型、石英脉+构造蚀变岩+蚀变糜棱岩型矿化,根据矿化脉组合类型,至少其深部应存在构造蚀变岩型与蚀变糜棱岩型叠加的矿化和蚀变糜棱岩型矿化,网脉状矿化蚀变与糜棱岩化叠加带剥蚀深度较大,预示在崤山地区韧性剪切带、拆离断层带及其次级断裂的中深部有较大的金矿找矿潜力。

从 BONNEMAISON 等^[35]的有关含金剪切带的概念亦可知,确认含金剪切带应该包括 3 个基本条件:

- 1) 含金剪切带是长期活动的大型构造通道;
- 2) 主岩(实际是含金建造)早于韧性剪切带形成或与韧性剪切带同时形成;
- 3) 含金剪切带产于基底岩系中,只有这样才能使得糜棱岩带成为矿液流通和矿化赋存的有利条件,从而形成含金剪切带型金矿床。

崤山地区具备上述 3 个含金剪切带型金矿床的基本条件,可以形成含金剪切带型金矿床: 1) 崤山地区区域性的韧性剪切带和拆离断层为大型构造通道(比如申家窑 01 号韧性剪切带延伸长 5430 m^[2]),宽度大,岩石破碎强烈,在其下盘发育有众多北西向、北北西向脆性高角度次级断裂,崤山东部的拆离断层带延伸达几十公里,拆离断层带的下盘太华岩群地层中发育有众多的北东向脆性缓倾斜次级断裂; 2) 太华岩群(主岩)形成于太古宙,后期经过区域变质作用形成结

晶基底,形成时代明显早于后期形成的韧性剪切带和拆离断层带; 3) 崤山地区的韧性剪切带和拆离断层带及其次级断裂均位于太华岩群地层中。

根据对流体包裹体温度、盐度的测定和压力的计算,以崤山地区静岩压力梯度对成矿深度进行估算,估算出崤山地区金矿成矿深度为 0.43~5.90 km。

综上所述可知,崤山地区在韧性剪切带、拆离断层带及其北东、北西向次级断裂带的深部具有非常大的成矿空间和找矿潜力。

5.4 成矿物质来源

崤山地区流体包裹体成分研究表明,崤山地区金矿成矿流体主要来自地热卤水,成矿溶液属于 H₂O-Na⁺(Ba²⁺, Sr²⁺, Pb²⁺, Zn²⁺)-Cl⁻(SO₄²⁻)-CO₂ 体系,成矿流体来源为地热卤水。

崤山地区硫同位素研究表明,崤山地区金矿床成矿流体中的硫主要为来自地幔的陨硫硫,成矿过程中,随着成矿流体沿深大断裂向上运移,不断有地壳硫加入。因此,崤山地区金矿床成矿物质为壳幔混合源,以地幔为主。

崤山矿集区金矿床中 21 件方铅矿样品^[1,25]铅同位素组成(w(²⁰⁶Pb)/w(²⁰⁴Pb), w(²⁰⁷Pb)/w(²⁰⁴Pb)和 w(²⁰⁸Pb)/w(²⁰⁴Pb), w 为质量分数, %)分析结果显示: w(²⁰⁶Pb)/w(²⁰⁴Pb)变化为 17.2758%~17.819%, w(²⁰⁷Pb)/w(²⁰⁴Pb)

变化为 15.112%~15.669%， $w(^{208}\text{Pb})/w(^{204}\text{Pb})$ 变化为 37.243%~37.970%，可见崤山地区矿石矿物方铅矿的铅组成较为集中，极差较小，具有单阶段铅演化特性。其 $\mu(^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 值变化为 8.0400~9.3319，平均 9.05， $\kappa(\text{Th}/\text{U})$ 值变化范围为 3.742~4.072，平均 3.86，接近地幔相应的 μ 、 κ 值，反映其铅源主要来源于地幔，同时受壳源铅不同程度的混合。

在铅同位素构造模式图中(见图 10)，矿石的铅同位素组成投影点比较集中落于地幔铅演化线上及其附近(见图 10(a))或下地壳铅演化线与造山带铅演化线之间，更靠近下地壳铅演化线一侧(见图 10(b))。

崤山地区铅同位素研究表明，崤山地区金矿成矿与区域造山作用有关，成矿物质来源于造山过程中壳幔混合源，以地幔为主。

崤山地区氢氧同位素研究表明，崤山地区金矿的氢氧同位素组成显示出混合流体的特性。

通过对崤山地区流体包裹体、氢氧硫铅同位素等特征的综合分析，认为崤山地区金矿成矿物质来源主要为壳幔混合源，以地幔为主，成矿流体为幔源流体、大气降水和变质流体的混合流体。

5.5 成矿模型

以往专家学者曾对豫西地区金属矿床的成因开展研究并建立了豫西金属矿产成矿模式^[18, 36]。综合前人研究成果，结合崤山地区金矿的成矿物质来源、成矿温度、成矿时代等特征，按照崤山地区的地层、构造、岩浆岩、矿体等要素，建立崤山地区金矿成矿模型(图 11)。

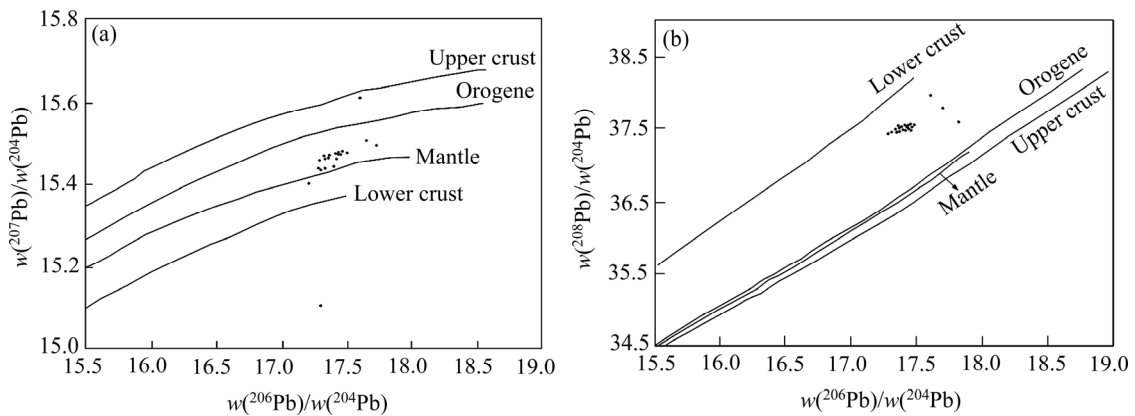


图 10 崤山地区金矿铅同位素构造模式图(底图据文献[1, 25])

Fig. 10 Lead isotopic tectonic patterns of gold deposits in Xiaoshan area: (a) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tectonic pattern diagram; (b) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ tectonic pattern diagram (modified from Ref.[1, 25])

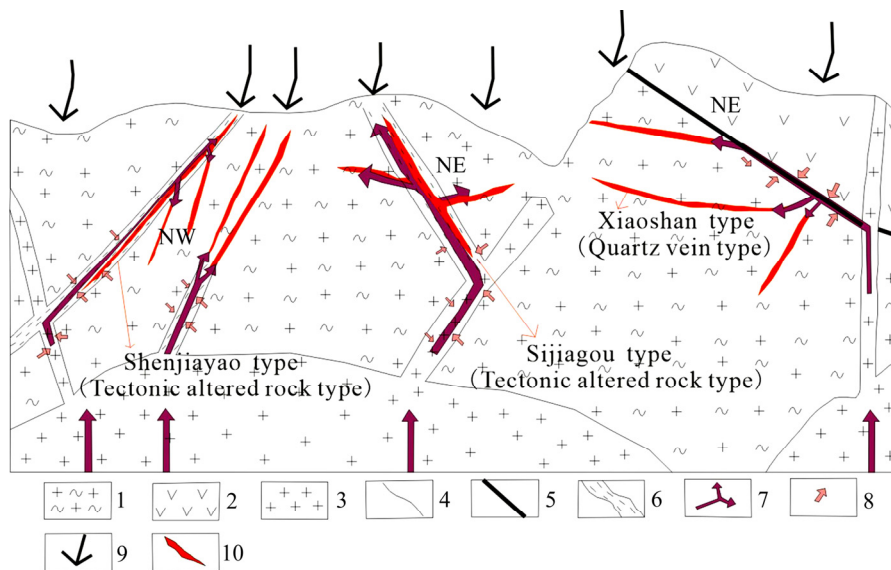


图 11 崤山地区金矿成矿模型

Fig. 11 Ore-forming model of gold deposit in Xiaoshan area: 1—Archaean Taihua Group; 2—Mesoproterozoic Xiong'er Group; 3—Yanshanian granites; 4—Geological boundary; 5—Detachment fault; 6—Ductile shear zone; 7—Migration direction of mantle-derived ore-forming fluids; 8—Migration direction of metamorphic fluid; 9—Meteoric water; 10—Ore body

太古宙火山作用形成的酸性、基性火山岩,在区域动力变质作用和混合岩化作用下,形成太华岩群结晶基底,中元古代火山活动形成熊耳群安山岩盖层。

元古代-中三叠世,本区进入扬子板块北移向华北板块俯冲、拼贴、碰撞造山的构造演化阶段^[37],大量陆壳物质随俯冲板块被带入地幔,与地幔物质发生熔融、混染。至中-新生代,拉张构造运动使岩石圈减薄,软流圈上涌^[38],在构造应力作用下,崤山核部隆起,熊耳群安山岩地层与太华岩群之间产生伸展滑脱构造,形成拆离断层,并伴随北东、北西向剪切构造作用,在崤山地区中西部的申家窑一带形成北西向的韧性剪切带和一系列北西向的次级断裂,在中东部的寺家沟一带形成北东向的韧性剪切带和一系列北东向的次级断裂,在东部崤山一带形成一系列北东向的次级断裂。

与此同时,大规模的岩浆上侵在崤山中北部形成以窑院村为中心的岩基,岩浆侵入使区域构造带扩容,携带大量成矿物质的幔源流体沿韧性剪切带及拆离断层带上涌,在幔源流体运移过程中又不断萃取围岩中的成矿物质加入,随着地表水(可渗透深度 10~15 km^[33])的逐渐加入,压力释放,温度降低,流体物理化学条件发生骤变,成矿物质在构造有利部位沉淀富集形成矿体。从而,在研究区中西部形成韧性剪切带和一系列北西向次级断裂控制的申家窑式金银矿床类型,在研究区中东部形成韧性剪切带和一系列北东向次级断裂控制的寺家沟式金银矿床类型,在研究区东部形成一系列北东向次级断裂控制的崤山式金矿床类型。

6 结论

1) 崤山地区金矿床基底为太华岩群变质岩,盖层为熊耳群火山岩。太华岩群地层是崤山地区金矿的有利赋矿围岩;区域性的拆离断层带和韧性剪切带为成矿物质运移提供了通道,拆离断层带、韧性剪切带及其发育的次级断裂为成矿提供了场所;燕山期岩浆岩为崤山地区金矿成矿提供了一定的物质来源和热动力条件。

2) 根据对成矿年代、流体包裹体、稳定同位素等特征的综合分析,认为崤山地区金矿成矿物质来源主要为壳幔混合源,以地幔为主,成矿流体为幔源流体、大气降水和变质流体的混合流体,成矿温度为中低温(136~379 °C,平均 232 °C),成矿盐度为中等盐度(0.20%~27%,平均 8.22%),计算成矿流体密度为低密

度(0.65~1.13 g/cm³,平均 0.88 g/cm³),计算成矿流体压力为 5~69 MPa,成矿期成矿深度估算为 0.43~5.90 km,成矿时代为燕山晚期。

3) 崤山地区矿床类型为中温热液脉型金矿床,矿体类型主要为构造蚀变岩型和石英脉型。从矿床(体)赋存空间位置上属韧性剪切带型金矿,在韧性剪切带、拆离断层带及其北东、北西向次级断裂带的深部具有非常大的成矿空间和找矿潜力。

4) 根据崤山地区金矿的成矿物质来源、成矿温度、成矿时代等特征,结合崤山地区的地层、构造、岩浆岩、矿体等要素,探讨了崤山地区金成矿地质特征与控矿规律,建立了崤山地区金矿成矿模型。

致谢

感谢河南省有色金属地质矿产局第一地质大队野外工作人员对本项目的支持,感谢丁云河教授、王秀全教授和李永峰教授在本文完成前给予的帮助和对相关问题的讨论,感谢两位匿名审稿专家和编辑部给予宝贵的修改意见。

REFERENCES

- [1] 陈衍景,富士谷,金持跃.半宽金矿的成因类型和成矿机制-矿物包裹体和同位素研究的启示[J].矿物学报,1992,12(4):289-298.
CHEN Yan-jing, FU Shi-gu, JIN Chi-yue. Genetic type and metallogenic mechanism of Bankuan gold deposit in special reference to the studies of fluid inclusions and isotopes in minerals[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1992, 12(4): 289-298.
- [2] 陈衍景,富士谷.申家窑金矿地质地球化学特征及成矿模式[J].地质与勘探,1992,10(4):47-52.
CHEN Yan-jing, FU Shi-gu. Mineralization model and geological-geochemical features of the Shenjiayao gold deposit[J]. Geology and Prospecting, 1992, 10(4): 47-52.
- [3] 黄自力,刘清泉,李永峰,罗正传.河南省大方山-葫芦峪金矿床流体包裹体研究[J].矿产与地质,2013,27(5):396-402.
HUANG Zi-li, LIU Qing-quan, LI Yong-feng, LUO Zheng-zhuan. Fluid inclusions of Dafangshan-Huluyv Au deposit in Henan[J]. Mineral Resources and Geology, 2013, 27(5): 396-402.
- [4] 冯昂,王占峰,米长征,徐书奎,杨林楠.河南省寺家沟金矿床地质特征及找矿方向[J].矿产与地质,2015,29(3):311-315.
FENG Ang, WANG Zhan-feng, MI Chang-zheng, XU Shu-kui, YANG Lin-nan. Geological characteristics and

- prospecting direction of Sijiagou gold deposit in Henan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2015, 29(3): 311–315.
- [5] 徐书奎. 豫西寺家沟金矿床氢氧硫同位素特征及地质意义[J]. *地质科技情报*, 2017, 36(5): 143–147.
XU Shu-kui. Hydrogen, oxygen and sulfur isotopic characteristics and geological significance of Sijiagou gold deposit, western Henan[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2017, 36(5): 143–147.
- [6] 王晓佳. 申家窑金矿床深穿透地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017: 1–73.
WANG Xiao-jia. Deep-penetrating geochemical research on Shenjiayao gold deposit[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017:1–73.
- [7] 李铁刚, 孟宪锋, 王国瑞, 肖建辉, 吴昊, 范海洋, 员晓琪. 河南崤山金矿床流体包裹体及同位素特征[J]. *矿床地质*, 2018, 37(2): 403–419.
LI Tie-gang, MENG Xian-feng, WANG Guo-rui, XIAO Jian-hui, WU Hao, FAN Hai-yang, YUAN Xiao-qi. Fluid inclusions and isotopic characteristics of Xiaoshan gold deposit in Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 2018, 37(2): 403–419.
- [8] 张林, 张录星, 杨彦峰. 崤山地区重磁异常与成矿[J]. *矿产与地质*, 2003, 17(S): 475–478.
ZHANG Lin, ZHANG Lu-xing, YANG Yan-feng. Gravity and magnetic anomaly related to metallogenesis in Xiaoshan area[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2003, 17(S): 475–478.
- [9] 崔敏利, 张宝林, 彭澎, 张连昌, 沈晓丽, 郭志华, 黄雪飞. 豫西崤山早元古代中酸性侵入岩锆石/斜锆石 U-Pb 测年及其对熊耳火山岩系时限的约束[J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1541–1549.
CUI Min-li, ZHANG Bao-lin, PENG Peng, ZHANG Lian-chang, SHEN Xiao-li, GUO Zhi-hua, HUANG Xue-fei. Zircon/baddeleyite U-Pb dating for the Paleo-proterozoic intermediate-acid intrusive rocks in Xiaoshan Mountains, west of Henan Province and their constraints on the age of the Xiong'er Volcanic Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(5): 1541–1549.
- [10] 李磊, 孙卫志, 孟宪锋, 杨小芬, 张灯堂, 冯建之. 华北陆块南缘崤山地区燕山期花岗岩类地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2635–2652.
LI Lei, SUN Wei-zhi, MENG Xian-feng, YANG Xiao-fen, ZHANG Deng-tang, FENG Jian-zhi. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of the granitoids of Xiaoshan Mountain area on the southern margin of North China Block and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(8): 2635–2652.
- [11] LIANG Tao, BAI Feng-jun, LU Ren, XU Shi-tou, CHENG Jing-liang, CHEN Li-juan. LA-ICP-MS zircons dating of Baishiya body in Xiaoshan Mountain, western Henan Province, and its geologic implications[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2013, 87(Suppl): 722–725.
- [12] 卢仁, 梁涛, 卢欣祥, 白凤军, 成静亮, 温静静. 豫西崤山龙卧沟岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 756–768.
LU Ren, LIANG Tao, LU Xin-xiang, BAI Feng-jun, CHENG Jing-liang, WEN Jing-jing. Geochronology and geochemical features of Longwogou granite in Xiaoshan Mountain, western Henan Province, and their geological implications[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 756–768.
- [13] 梁涛, 卢仁. 豫西崤山小妹河岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及地质意义[J]. *地质通报*, 2015, 34(8): 1526–1540.
LIANG Tao, LU Ren. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemical features and geological implications of Xiaomeihe rock mass in Xiaoshan Mountain, western Henan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(8): 1526–1540.
- [14] 朱嘉伟, 张天义, 薛良伟. 豫西崤山地区金矿成矿年龄的测定及其意义[J]. *地质论评*, 1999, 39(2): 418–422.
ZHU Jia-wei, ZHANG Tian-yi, XUE Liang-wei. Determination of the ore-forming age of gold deposits in Xiaoshan, Western Henan and its geological significance[J]. *Geological Review*, 1999, 39(2): 418–422.
- [15] 朱嘉伟, 张天义, 侯存顺. 崤山地区拆离滑脱构造控矿模式及其找矿意义[J]. *矿床地质*, 2001, 20(3): 265–270.
ZHU Jia-wei, ZHANG Tian-yi, HOU Cun-shun. Gold ore-controlling model of the detachment structure in Xiaoshan area, Western Henan and its ore-prospecting significance[J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(3): 265–270.
- [16] 尹维青, 李建旭. 河南崤山地区伸展滑脱作用及其与金矿的关系[J]. *矿产与地质*, 2007, 21(2): 136–140.
YIN Wei-qing, LI Jian-xu. Relationship between extension-detachment structure and metallogeny in the district of Xiaoshan, Henan province[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2007, 21(2): 136–140.
- [17] 李健. 河南崤山矿集区金矿成矿类型、成矿规律及找矿方向探讨[J]. *矿产勘查*, 2014, 5(1): 26–31.
LI Jian. Gold mineralization types, metallogenic regularity of the Xiaoshan gold deposit and prospecting target, Henan[J]. *Mineral Exploration*, 2014, 5(1): 26–31.
- [18] 宋立强, 王春永, 宋仲科, 黎斌林. 崤山矿集区金多金属矿成矿模式与成矿预测[J]. *矿产勘查*, 2015, 6(6): 715–724.
SONG Li-qiang, WANG Chun-yong, SONG Zhong-ke, LI Bin-lin. Metallogenic model and metallogenic prognosis of Xiaoshan gold polymetallic ore concentration area[J]. *Mineral Exploration*, 2015, 6(6): 715–724.

- [19] 高帅, 高喜, 高领. 河南崤山地区金矿床的三位一体成矿浅析[J]. 地质与资源, 2015, 24(6):567-571.
GAO Shuai, GAO Xi, GAO Ling. A preliminary analysis on the metallogenesis of gold deposits in Xiaoshan area, Henan province[J]. *Geology and Resources*, 2015, 24(6):567-571.
- [20] 刘斌. 中高盐度 NaCl-H₂O 包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. 地质论评, 2001, 47(6): 617-622.
LIU Bin. Density and Isochoric Formulae for NaCl-H₂O inclusions with medium and high salinity and their applications[J]. *Geological Review*, 2001, 47(6): 617-622.
- [21] 刘斌, 段光贤. NaCl-H₂O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. 矿物学报, 1987, 7(4): 345-352.
LIU Bin, DUAN Guang-xian. Density and isochoric formulae for NaCl-H₂O solution inclusions and their applications[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1987, 7(4): 345-352.
- [22] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, OU Guang-xi, SHEN Kun, ZHANG Wen-huai. *Fluid inclusions*[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [23] 张德会, 徐九华, 余心起, 李健康, 毛世德, 王科强, 李泳泉. 成岩成矿深度: 主要影响因素与压力估算方法[J]. 地质通报, 2011, 30(1): 112-125.
ZHANG De-hui, XU Jiu-hua, YU Xin-qi, LI Jian-kang, MAO Shi-de, WANG Ke-qiang, LI Yong-quan. The diagenetic and metallogenic depth: Main constraints and the estimation methods[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(1): 112-125.
- [24] 陈柏林. 从成矿构造动力学探讨脉状金矿床成矿深度[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 380-384.
CHEN Bai-lin. Calculation of metallogenic depth of lode gold deposits from mineralization structure-dynamics[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(3): 380-384.
- [25] 罗正传, 魏明君, 陈树民, 曹廷坤, 张喆, 王安. 河南大方山金矿床铅硫同位素组成及成矿物质来源研究[J]. 黄金, 2014, 35(12): 14-18.
LUO Zheng-zhuan, WEI Ming-jun, CHEN Shu-min, CAO Ting-kun, ZHANG Zhe, WANG An. Isotopic compositions of lead and sulfur in Dafangshan Gold Deposit and its ore-forming materials source[J]. *Gold*, 2014, 35(12): 14-18.
- [26] 卢欣祥, 尉向东, 董有, 于在平, 常秋玲, 张冠山, 刘树林, 叶安旺, 索天元, 晋建平. 小秦岭-熊耳山地区金矿特征与地幔流体[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
LU Xin-xiang, YU Xiang-dong, DONG You, YU Zai-ping, CHANG Qiu-ling, ZHANG Guan-shan, LIU Shu-lin, YE An-wang, SUO Tian-yuan, JIN Jian-ping. Characteristics of gold deposit and mantle fluid of Xiaolinling-Xiong'ershan area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [27] 邵拥军, 隗含涛, 郑明泓, 刘忠法, 熊伊曲, 徐卓彬, 蒋梦同. 湘东大垆铅锌矿床成矿机理[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(9): 1916-1928.
SHAO Yong-jun, WEI Han-tao, ZHENG Ming-hong, LIU Zhong-fa, XIONG Yi-qu, XU Zhuo-bin, JIANG Meng-tong. Mineralization mechanism of Dalong Pb-Zn deposit, eastern Hunan Province, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(9): 1916-1928.
- [28] TAYLOR JR H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 1974, 69: 843-883.
- [29] 陈毓川, 王登红, 林雯蔚. 中国岩金矿床成矿系列[J]. 矿床地质, 1998, 17(S): 87-92.
CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, LIN Wen-wei. Metallogenic series of rock gold deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 1998, 17(S): 87-92.
- [30] 毛景文, 华仁民, 李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 291-299.
MAO Jing-wen, HUA Ren-min, LI Xiao-bo. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits[J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18(4): 291-299.
- [31] 李强之, 陈衍景, 钟增球, 李文良, 李绍儒, 郭晓东, 金宝义. 小秦岭东沟金矿成矿作用的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年代学研究[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 122-126.
LI Qiang-zhi, CHEN Yan-jing, ZHONG Zeng-qiu, LI Wen-liang, LI Shao-ru, GUO Xiao-dong, JIN Bao-yi. ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of the ore-forming processes of the Dongchuang Gold Deposit in the Xiaoqinling District, China[J]. *Geological Review*, 2002, 48(Suppl): 122-126.
- [32] 韩以贵, 李向辉, 张世红, 张元厚, 陈福坤. 豫西祁雨沟金矿单颗粒和碎裂状黄铁矿 Rb-Sr 等时线定年[J]. 科学通报, 2007, 52(11): 1307-1311.
HAN Yi-gui, LI Xiang-hui, ZHANG Shi-hong, ZHANG Yuan-hou, CHEN Fu-kun. Single grain and cataclastic pyrite Rb-Sr isochron dating of Qiyugou gold deposit, western Henan[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2007, 52(11): 1307-1311.
- [33] 王安建, 金巍, 孙丰月, 银剑钊. 流体研究与找矿预测[J]. 矿床地质, 1997, 16(3): 278-288.
WANG An-jian, JIN Wei, SUN Feng-yue, YIN Jian-zhao. Fluid study and scientific prospecting for ore deposits[J]. *Mineral Deposits*, 1997, 16(3): 278-288.
- [34] 陈柏林, 董法先, 李中坚. 韧性剪切带型金矿成矿模式[J]. 地质论评, 1999, 45(2): 186-192.
CHEN Bai-lin, DONG Fa-xian, LI Zhong-jian. Ore-forming model of ductile shear zone type gold deposits[J]. *Geological Review*, 1999, 45(2): 186-192.
- [35] BONNEMAISON M, MARCOUX E. Auriferous mineralization in some shear-zones: A three-stage model of

- metallogenesis[J]. *Mineralium Deposita*, 1990, 25(2): 96–104.
- [36] 郭保健, 李永峰, 王志光, 叶会寿. 熊耳山 Au-Ag-Pb-Mo 矿集区成矿模式与找矿方向[J]. *地质与勘探*, 2005, 41(5): 43–47.
- GUO Bao-jian, LI Yong-feng, WANG Zhi-guang, YE Hui-shou. Type, metallogenetic regularities, mineralization model and prospecting proposal in the Xiong'ershan district[J]. *Geology and Prospecting*, 2005, 41(5): 43–47.
- [37] 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 1995, 11(2): 101–114.
- ZHANG Guo-wei, ZHANG Zong-qing, DONG Yun-peng. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen: Implications for the tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(2): 101–114.
- [38] 高山, 张本仁, 金振民, KERN H. 秦岭-大别造山带下地壳拆沉作用[J]. *中国科学(D 辑)*, 1999, 29(6): 532–541.
- GAO Shan, ZHANG Ben-ren, JIN Zhen-min, KERN H. Lower crustal delamination of Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 29(6): 532–541.

Geological ore formation conditions and ore-controlling rules in Xiaoshan gold ore district in western Henan

LIU Wen-yi^{1,2,3}, LIU Ji-shun^{1,2}, HE Mei-xiang³, DING Yun-he³, WANG Xiu-quan⁴, LI Yong-feng⁵

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. No.7 Geological Team, Bureau of Nonferrous Metals Geology and Mineral Resources of Henan Province, Zhengzhou 450016, China;
4. No.1 Geological Team, Bureau of Nonferrous Metals Geology and Mineral Resources of Henan Province, Zhengzhou 450016, China;
5. Non-Ferrous Mineral Exploration Engineering Research Center of Henan Province, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: The Xiaoshan area is located in the west of Henan Province, China, tectonically located in the southern margin of North China block, belonging to Xiaoqinling–Xiaoshan–Xiong’ershan Au-Ag-Mo polymetallic metallogenic belt. The ore-forming geological conditions are favorable, but the prospecting effect is not obvious. The study of metallogenic geological conditions and ore-controlling rules of gold deposits in Xiaoshan area is not systematic, and the metallogenic theory system is not perfect. Through the research on the metallogenic age, sulfur isotope, lead isotope, hydrogen and oxygen isotope and fluid inclusion, the results show that the metallogenic material of gold deposits in Xiaoshan area is mainly from crust-mantle mixed materials, mainly mantle. The ore-forming fluid is a mixture of mantle derived fluids, meteoric water and metamorphic fluids. The metallogenic temperature is medium low temperature (from 136 °C to 379 °C, with average value of 232 °C). The salinity of mineralization is moderate salinity (from 0.20% to 27%, with average value of 8.22%). The density of ore-forming fluid is low density (from 0.65 to 1.13 g/cm³, with average value of 0.88 g/cm³). The ore-forming fluid pressure is 5–69 MPa. The metallogenic depth is estimated to be 0.43–5.90 km. The minerogenetic epoch belongs to late Yanshanian. Based on the comprehensive analysis of metallogenic geological background, the metallogenic material source and ore controlling regularity of gold deposits in this area, the metallogenic model of the study area is established.

Key words: Xiaoshan; gold deposit; ore-controlling rule; metallogenic model

Foundation item: Project(201111007-2) supported by Nonprofit Industry Research Project of Ministry of Land and Resources, China; Projects(YSDK2014-04, YSDK2016-02) supported by the Research Project of Bureau of Nonferrous Metals Geology and Mineral Resources of Henan Province, China

Received date: 2018-06-22; **Accepted date:** 2019-01-31

Corresponding author: LIU Ji-shun; Tel: +86-13607489990; E-mail: jslu@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)