

河南老湾金矿床成矿流体性质与同位素地球化学示踪

陈加伟, 孙保平, 李 佩, 裴满意, 任 强

(河南省地质矿产勘查开发局 第四地质勘查院, 河南 郑州 450000)

摘 要: 老湾金矿床是河南桐柏地区典型的剪切带型金矿床。流体包裹体特征显示成矿流体为中低温、低盐度的含 CO_2 的 $\text{K}^+ - \text{Na}^+ - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ 体系; 氢氧同位素研究结果显示矿床成矿早期阶段以岩浆水为主要成矿热液来源, 成矿晚期阶段以大气降水为主要热液来源; 矿石铅同位素特征显示成矿物质源区与龟山岩组、老湾花岗岩有亲缘关系, 且与花岗岩接近, 显示其深源特征, 进一步提供了成矿流体岩浆成因的证据。

关键词: 矿床特征; 成矿流体; 稳定同位素; 老湾金矿床; 河南

中图分类号: P618.51; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0713-12

The properties of ore-forming fluids and isotope geochemical tracing of the Laowan gold deposit, Henan Province

CHEN Jia-wei, SUN Bao-ping, LI Pei, PEI Man-yi and REN Qiang

(The Fourth Geological Exploration Institute, Henan Bureau of Geo-exploration and Mineral Development,
Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The Laowan gold deposit is one of the typical shear zone type gold deposits in Tongbai area, Henan Province. The characteristics of fluid inclusions suggest that the ore-forming fluid is a $\text{K}^+ - \text{Na}^+ - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ system which indicates medium-low temperature, low-salinity and CO_2 -containing nature. The study of hydrogen oxygen isotopes shows that, in the early stage of the deposit, magmatic water was dominant, and in the late stage, meteoric water was the dominant one. The authors thus hold that the Pb source of the deposit was related to the Guishan Formation Complex and the Laowan granite, and was close to the granite, showing its deep source characteristics. These results provide evidence for the magmatic origin of the ore-forming fluids.

Key words: deposit characteristics; ore-forming fluid; stable isotopes; Laowan gold deposit; Henan Province

Fund support: Project of China Geological Survey(1212011220506)

老湾金矿床是桐柏-大别金银成矿带中主要的大型剪切带型金矿床, 它由老湾矿段和上上河矿段两个部分组成。矿床成矿地质条件复杂, 前人对老湾金矿的区域地质(邵军, 1995; 张冠, 2002)、矿床地质(王爱枝等, 2008)、矿床地球化学(谢巧勤等, 2001; 王国敏等, 2004; 马宏卫等, 2007; 陈良等, 2009; 蔡新明, 2013; 寇少磊等, 2016)、控矿构造

(林锐华等, 2010)等方面进行了较为深入的研究, 而有关矿床的成矿流体来源的认识则说法不一(谢巧勤等, 2001; 杨梅珍等, 2014)。

利用同位素地球化学方法, 可以有效示踪成矿流体和物质来源(郑永飞等, 2000)。例如, 氢氧同位素可以用来判断成矿流体是来源于岩浆流体还是变质流体, 抑或大气降水(Chen *et al.*, 2004, 2009;

收稿日期: 2017-01-13; 接受日期: 2017-07-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011220506)

作者简介: 陈加伟(1986-), 男, 汉族, 硕士, 矿产工程师, 地质工程专业, 主要从事地质找矿工作, E-mail: chenjiawei2369@163.com。

周家喜等, 2012); 铅同位素可以用于示踪成矿物质的来源(蒋少涌等, 2006; 汪在聪等, 2010; 薛静等, 2011)。本文在对老湾金矿进行详细矿床地质特征研究的基础上, 利用新获得的稳定同位素及流体包裹体数据, 并结合前人已有数据, 综合分析成矿系统同位素特征及演化, 探讨了老湾金矿床成矿流体的性质及演化。

1 区域成矿背景

老湾金成矿带位于河南桐柏山北麓的松扒韧性剪切带之中(图 1)。松扒韧性剪切带是南北秦岭地层层区之间的缝合线剪切带, 也是桐柏-大别地区最重要的金成矿带。

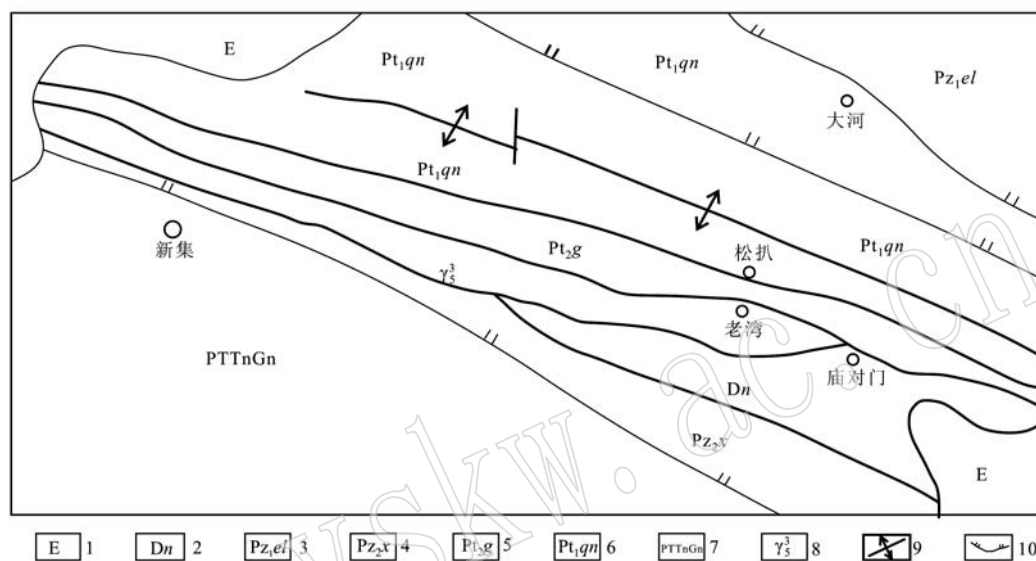


图 1 河南桐柏老湾矿区区域地质略图

Fig. 1 Sketch regional geological map of the Laowan mining area in Tongbai area, Henan Province

1—第三系; 2—南湾组; 3—二郎坪岩群; 4—肖家庙岩组; 5—龟山岩组; 6—秦岭岩群; 7—桐柏片麻杂岩; 8—燕山晚期花岗岩; 9—背斜; 10—韧性剪切带

1—Tertiary; 2—Nanwan Formation; 3—Erlangping Group Complex; 4—Xiaojiamiao Formation Complex; 5—Guishan Formation Complex; 6—Qinling Group Complex; 7—Tongbai gneiss complex; 8—late-Yanshanian granites; 9—anticline; 10—ductile shear zone

老湾金成矿带中主要出露中元古界龟山岩组(Pt_2g)地层。该地层是一套经过强烈变形、变质改造的多种构造岩块(片)形成的带状无序构造岩石单位, 其中角闪质构造岩及浅色构造片岩与矿化关系密切; 浅色构造片岩平行于区域构造线方向展布, 呈似层状或透镜状, 塑性流变比较强烈, 见有少量具变余砂状结构及大理岩透镜体分布在局部的弱应变域内, 这说明了该岩性层的原岩为陆缘碎屑岩。

矿区角闪质岩石可以分为 2 种类型: 一种原岩为基性侵入岩, 呈港湾状与围岩接触, 含有浅色构造片岩包体的脆性变形; 另一种原岩为海相基性火山岩及其碎屑岩, 常见有大理岩透镜体、斜长石晶屑, 塑性流变强烈, 片理发育。龟山岩组中金元素的变异系数大且原始丰度较高(11.17×10^{-9}) (河南省地矿厅第三地质调查队, 1993)^①, 据此可以认为, 龟

山岩组为金矿的主要含矿岩系和原始矿源层。

另外, 沿松扒断裂发育的燕山晚期花岗斑岩、钠长石英斑岩($96.8 \sim 137.0$ Ma, K-Ar 年龄)等酸性岩脉中见有斑岩型的金银矿化, 其中金元素(45.60×10^{-9})、银元素(300×10^{-9})显示出较高的丰度(张宗恒等, 2002)。在矿区南部边缘, 与金矿化关系密切的燕山期中细粒似斑状花岗岩(138.9 ± 3.3 Ma, 锆石 U-Pb 同位素年龄)(杨梅珍, 2014)呈带状沿松扒断裂分布, 其金元素和银元素的丰度和变异系数也较高。这说明金矿床的部分成矿物质是由燕山期的岩浆活动提供的, 岩浆活动在成矿后期具有叠加的成矿作用。老湾金成矿区内构造主要有走滑型网络状的韧性剪切系统以及叠加在其上面的 Riedel 剪切裂隙(图 2)(邓军, 1998)。

① 河南省地矿厅第三地质调查队, 1993. 桐柏-大别造山带(北坡)金矿地质、地球物理、地球化学找矿模型评价指标的研究。

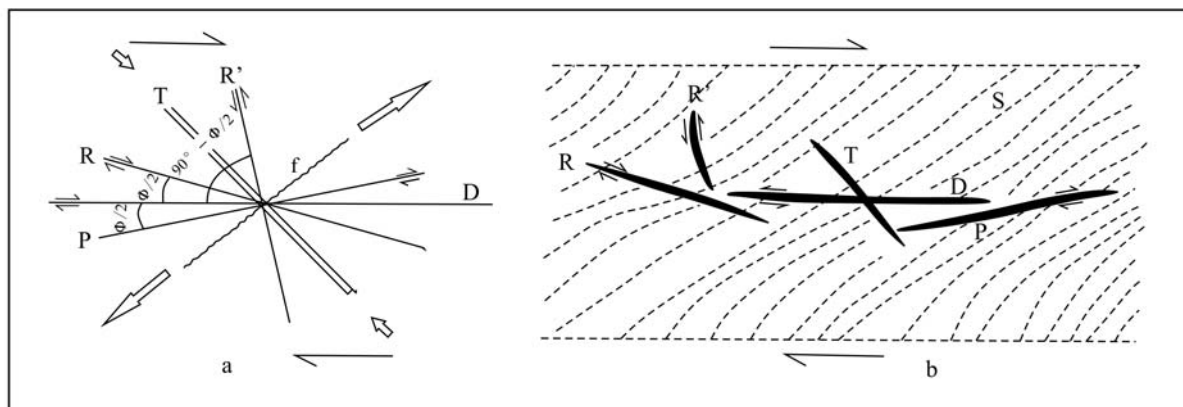


图2 桐柏老湾含Au剪切带构造矿系统中可能出现的各种容矿空间[据邓军(1998)修改]

Fig. 2 A variety of ore-hosting spaces in Au-bearing shear zone metallogenic system in the Laowan gold deposit in Tongbai area (modified after Deng Jun, 1998)

a—剪切裂隙系统; b—含矿构造蚀变带; T—沿应变椭球 XZ 面形成的张裂隙; R—同向低角度 Riedel 剪切裂隙; R'—反向高角度 Riedel 剪切裂隙; S—叶理; D—主剪切裂隙(与剪切带边界平行); f—褶皱轴面; P—P 型剪切裂隙; ϕ —内摩擦角
a—shear fracture system; b—ore-containing structural alteration zone; T—tension fissures formed along the XZ plane of the strain ellipsoid; R—low-angle Riedel shear fissures in the same direction; R'—reverse high-angle Riedel shear fissures; S—foliation; D—main shear fissures (parallel to the shear band boundary); f—axial plane of the fold; P—p type shear fissures; ϕ —internal friction angle

2 矿床地质特征

老湾金矿床位于秦岭-桐柏-大别近东西向复杂造山带的东段,介于南阳和吴城断陷盆地之间(图3a),呈NW向狭长带状展布。矿区内出露的地层是受过多次韧性剪切作用的中元古界龟山组变质岩系,也为含矿岩系,该岩系以二云石英片岩和斜长角闪岩为主,矿体主要赋存于二云石英片岩中(图3b)。

2.1 矿体特征

老湾金矿床处于老湾金矿带的中部,矿体(化)类型主要有3种,即似层状金矿体、脉状金矿体和斑岩型金矿化,主要矿化蚀变带有7条,共几十个矿体。

似层状金矿体是矿床中的主要矿化类型,占已探明总资源量的80%以上,主要分布于Riedel剪切裂隙系统的D裂隙中(图2)。该类型矿体均发育有1 km以上长度的矿化蚀变带,单矿体沿走向延伸一般在400~600 m之间,沿倾向延伸超过600 m,矿化连续较好。该类型矿体厚度在1.85~3.41 m之间,最厚处可达16 m,厚度变化系数在13%~112%之间。矿体中金的品位在 4.69×10^{-6} ~ 9.77×10^{-6} 之间,单个样品最高品位达 260×10^{-6} ,其

变化系数为81%~467%。矿体与围岩无明显的界线,呈渐变过渡关系,矿体的顶底板均为浅色的构造片岩(图4)。

脉状金矿体分布在角闪质构造岩中,矿体顶底板清晰,主要分布于Riedel剪切裂隙系统的P、T裂隙和R裂隙中(图2)。其中表现为脆性左行平移逆断层的R裂隙较发育,单个矿体沿走向可延伸300~675 m,沿倾向延伸140~240 m,厚度0.90~2.19 m,最厚处达5.49 m,呈S型陡倾,厚度变化系数在48%~86%之间;金品位一般在 6.64×10^{-6} ~ 20.67×10^{-6} 之间,品位变化系数较大,在56%~608%之间。金矿体中常伴有银矿化。另外囊状富矿体常形成于T裂隙中,但其规模较小。

在矿区北部边缘的松扒断裂中常见有斑岩型金矿化,矿化体为强烈破碎蚀变的斑岩脉,与发育在松扒断裂带内的花岗斑岩有关,主要成矿元素以银、金元素为主,同时见有铜、钨、锌、铅、钼、铋等的矿化。在矿区内已发现有中型规模的金-银矿体,并且见有规模较大的原生晕异常,具有重要的找矿意义。

2.2 矿石特征

老湾金矿床中的矿石为各种类型的构造蚀变岩,主要有蚀变角闪质黄铁矿型矿石、绢云石英黄铁矿型矿石,另有少量的长英质黄铁矿型矿石和石英硫化物型矿石。

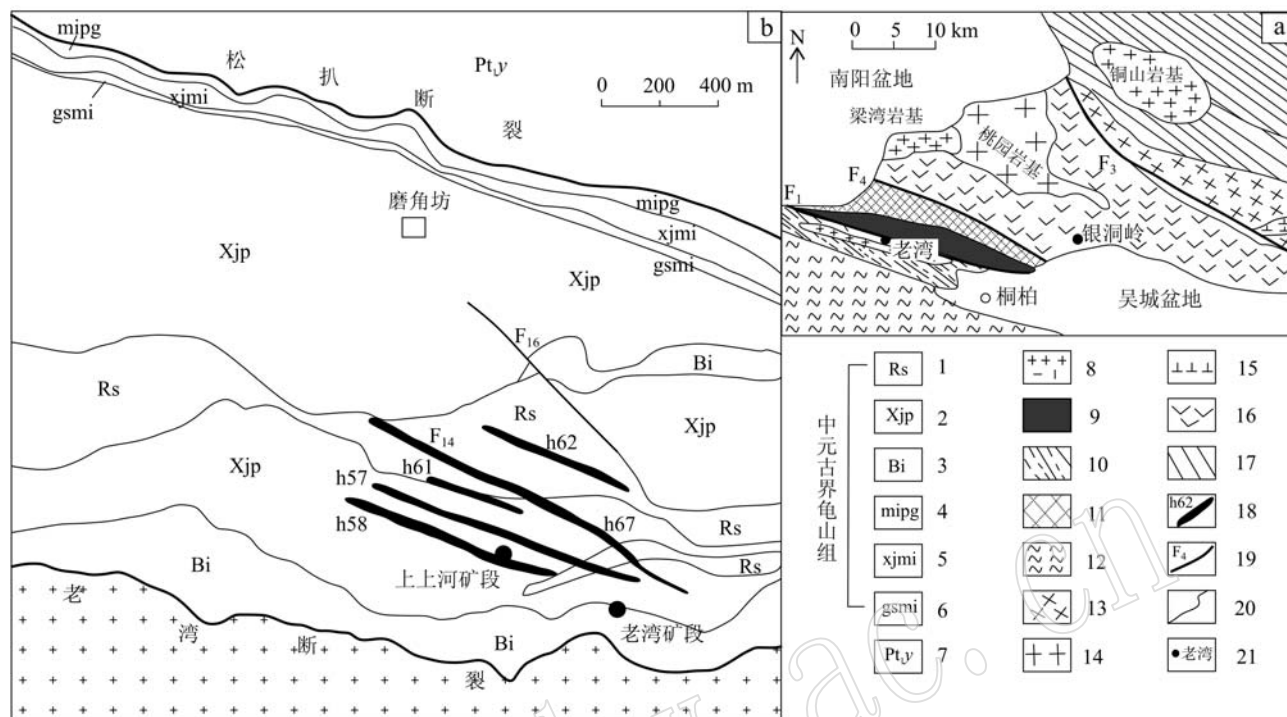


图3 老湾金矿床区域地质(a)和矿区地质简图(b)[据寇少磊等(2016)修改]

Fig. 3 Sketch geological map of the region (a) and the mining area (b) of the Laowan gold deposit, Henan Province (modified after Kou Shaolei, 2016)

1—中元古界龟山组二云石英片岩; 2—龟山组斜长角闪片岩; 3—龟山组斜长变粒岩; 4—龟山组糜棱岩化斜长角闪片麻岩; 5—龟山组斜长角闪质糜棱岩; 6—龟山组绢云糜棱岩; 7—古元古界雁岭组; 8—中生代花岗岩; 9—古生代-三叠纪地层杂积岩; 10—晚古生界信阳群; 11—元古界-古生界秦岭群; 12—新太古界-古元古界桐柏群; 13—早古生代石英闪长岩; 14—晚古生代花岗岩; 15—辉长岩; 16—新元古界-早古生界二郎坪群; 17—中-新元古界宽坪群和陶湾群; 18—金矿脉及编号; 19—断裂及编号; 20—地质界线; 21—矿床; F₁—商-丹(商南-丹凤-松扒-龟山-梅山)缝合线; F₃—瓦穴子-羊册-明港断裂; F₄—阳关-夏管断裂

1—two-mica quartz schist of Pt₂ Guishan Formation; 2—amphibolite of Guishan Formation; 3—plagioclase leptite of Guishan Formation; 4—mylonitized amphibolite gneiss of Guishan Formation; 5—amphibolite mylonite of Guishan Formation; 6—sericite mylonite of Guishan Formation; 7—Pt₁ Yanling Formation; 8—Mesozoic granite; 9—Paleozoic-Triassic strata with Proterozoic detritus; 10—Late Paleozoic Xinyang Group; 11—Proterozoic-Paleozoic Qinling Group; 12—Neo-Archean-Paleo-Proterozoic Tongbai Group; 13—Early Paleozoic quartz diorite; 14—Late Paleozoic granite; 15—gabbro; 16—Neo-Proterozoic-Early Paleozoic Erlangping Group; 17—Meso-Neo-Proterozoic Kuanping and Taowan Group; 18—gold vein and its serial number; 19—fault and its serial number; 20—geological boundary; 21—deposit; F₁—Shang-Dan (Shangnan-Danfeng-Songpa-Guishan-Meishan) geosuture zone; F₃—Waxuezi-Yangce-Minggang fault; F₄—Yangguan-Xiaguan fault

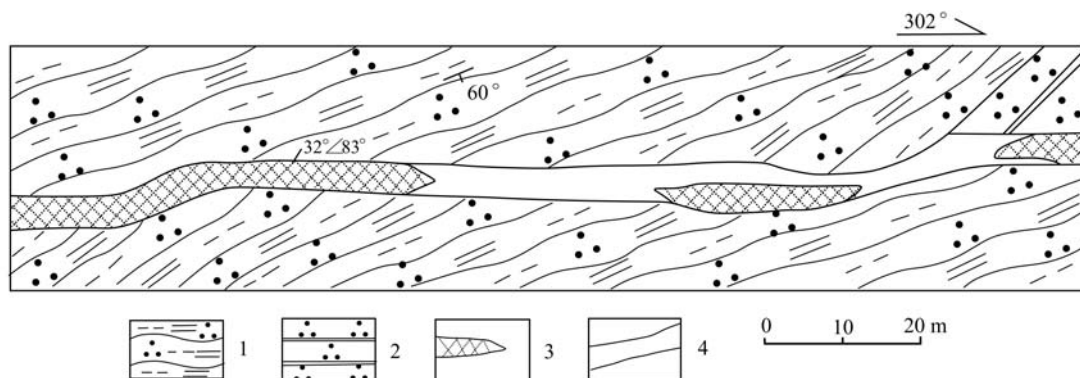


图4 h67 矿脉中矿体产出特征示意图

Fig. 4 Schematic diagram of orebody characteristics in No. 67 gold vein

1—二云石英片岩; 2—石英岩; 3—矿体; 4—矿脉

1—two-mica quartz schist; 2—quartzite; 3—orebody; 4—gold vein

蚀变角闪质黄铁矿型矿石中的非金属矿物以石英、黑云母、绢云母、斜长石、角闪石、绿泥石等为主;金属硫化物见有大量的黄铁矿,同时见有少量的辉银矿、方铅矿、斑铜矿、黄铜矿、闪锌矿。该类型矿石是碎裂岩或角闪质糜棱岩经过矿化蚀变形成的。黄铁矿多呈现为自形-半自形-他形结构,分布主要呈网脉状、浸染-稠密浸染状和团块状,是脉状矿体的主要产出矿石类型,金的品位在 10×10^{-6} 以上。

绢云石英黄铁矿型矿石中主要矿物成分为石英、绢云母及黄铁矿等,是由Ⅱ型长英质糜棱岩、千糜岩经过蚀变矿化形成的。矿石中金的品位一般在 $1 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$ 之间,常呈细脉网脉状、稠密浸染状、稀疏浸染状等构造。黄铁矿为主要的金属硫化物,并见有少量的方铅矿、车轮矿、黄铜矿、磁黄铁矿等矿物。黄铁矿常被含金的黄铜矿、方铅矿等矿物交代,形成交代结构呈自形-半自形-他形结构。该类型矿石是似层状矿体的主要矿石类型。

2.3 围岩蚀变

脉状矿体中主要有硅化、绿泥石化和黄铁矿化,该类型矿体与围岩界线较清楚,矿体周围的蚀变带较窄;似层状的矿体中主要有硅化、黄铁矿化和绢云母化等为主的围岩蚀变,该类型矿体周围有宽度较大的蚀变带,可以见到矿体与矿体周围蚀变带呈渐变过渡的关系。

硅化整体表现为3期:第1期硅化表现为岩石硅质普遍增高,有不同规模的石英团块和灰白色的石英脉;第2期硅化表现为在早期破碎的脉体和石英团块间以及脆性构造的叠加部位有较多的呈细脉状或者不规则状网脉分布的烟灰色含金石英;第3期硅化表现为有碳酸盐、石英网脉或细脉,这些脉体中微含或者不含金属硫化物。

绢云母化常见于似层状矿体之中,见到绢云母化的同时,还有黄铁矿化、硅化等蚀变现象相伴产出。绢云母化的岩石呈灰白-灰绿色,具有明显的褪色现象,绢云母呈细脉状或者鳞片几何体团块状分布。由围岩向矿体绢云母化逐渐增强,呈渐变过渡关系,其蚀变宽度小于硅化带的蚀变宽度。

黄铁矿化近地表为褐铁矿化,由外向矿体逐渐增多,黄铁矿呈细脉状或星散状分布。脉状矿体中的黄铁矿化蚀变带一般宽1~2 m,而似层状矿体中则宽几米至十几米。老湾金矿的黄铁矿化大致可分为3个蚀变期:第1期表现为呈浸染状或星散状分布的立方体粒晶,晶体自形程度较高;第2期表现为

以网脉状、细脉状分布的不等粒状晶体为主,多为中细粒;第3期呈现为细晶集合体,多呈他形-半自形。金含量较高的黄铁矿化阶段为第2期、第3期。

3 样品采集及分析测试方法

流体包裹体分析样品取自老湾金矿床(老湾矿段、上上河矿段和黄竹园矿段)石英脉型矿石。本文主要对成矿主阶段(Ⅱ)和成矿晚阶段(Ⅲ)的石英脉型样品中石英的流体包裹体进行了显微测温、物相分析和成分研究。显微测温在南京大学成矿作用国家实验室包裹体分析室完成,使用仪器为英国产 Linkam THMS 600 型冷热台,测温范围 $-196 \sim +600^{\circ}\text{C}$,升温速率一般为 $0.2 \sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,含 CO_2 包裹体在其相转变温度(如固态 CO_2 和笼合物熔化温度)附近升温速率降低为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$,水溶液包裹体在其冰点和均一温度附近升温速率为 $0.2 \sim 0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,以准确记录它们的相转变温度。流体包裹体物相分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成,使用仪器为 JEM-2100 高分辨型透射电子显微镜,其技术参数为:加速电压 $80 \sim 200 \text{ kV}$,高分辨极靴;点分辨率为 0.23 nm ;晶格分辨率为 0.14 nm ;放大倍数 $50 \sim 1\,500\,000$;样品倾斜角度, X、Y 方向 $\pm 30^{\circ}$;高压稳定性 $\leq 2 \times 10^{-6}/\text{min}$,物镜电流稳定性 $\leq 1 \times 10^{-6}/\text{min}$;EDS/NBD/CBD 模式下,束斑尺寸为 $\Phi 1 \sim \Phi 25 \text{ nm}$;EDS 的接受角度为 0.13 sr ,逸出角度为 25° ;EDS 分辨率 129 eV 。

氢氧同位素样品采集于老湾金矿床的金多金属硫化物石英脉中。石英脉破碎后,在双目镜下挑选石英单矿物。样品分析前经热盐酸清洗,然后用二次蒸馏水淋洗,放入真空干燥箱内,在 105°C 下烘干。氢氧同位素组成分析在中国地质大学(武汉)完成,使用 MAT253 型稳定同位素质谱仪完成测试。矿物中氢同位素分析是用爆裂法释放 H_2O ,碳还原法生成 H_2 ,按连续流方式进行分析,分析精度优于 $\pm 1\%$ 。硅酸盐或氧化物矿物的氧同位素分析是通过使用制样装置达到 10^{-3} Pa 真空条件下,让石英单矿物与 BrF_5 反应,使其中氧以 O_2 形式释放, O_2 在 700°C 与石墨反应转化为 CO_2 ,然后在质谱仪上测定其 $\delta^{18}\text{O}$ 值,分析精度优于 $\pm 0.2\%$,分析结果均以 SMOW 为标准。

铅同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。对矿石样品进行单矿物分选,然

后磨碎至200目。对岩石样品直接磨碎至200目。称取10~100 mg的矿物样品(样品类型不同其称样量亦不同)于聚四氟乙烯烧杯中,加入HF+HNO₃混合酸分解样品,蒸干,加入6 mol/L HCl除去溶样时带进的其他酸根离子,最后转化成HBr:HCl为1:2的混合酸介质,离心,然后通过AG-1×8(200~400目)阴离子交换柱,用5~8 mL的0.3 mol/L HBr淋洗杂质,再用5 mL 0.5 mol/L HCl将树脂转型,最后用5 mL 6 mol/L的HCl解吸Pb。铅同位素比值的测定在MAT261可调多接收质谱计上完成。

4 分析结果

4.1 流体包裹体特征

热液矿化脉体石英中含有丰富的原生和次生包裹体。原生包裹体大小一般在3~8 μm,大者达14 μm,形态以浑圆状、不规则状、长条状、近三角形为主,以纯液相、气液两相包裹体为主,偶见含CO₂两相包裹体和纯CO₂包裹体。

由流体包裹体均一温度直方图(图5a)可见,上上河矿段含金石英脉流体包裹体均一温度变化于100~420℃之间,有220~300℃和140~160℃两个

峰值,对应热液演化的早晚两个阶段。其中大部分样品均一温度低于300℃,说明成矿作用主要发生在中低温阶段。

石英爆裂温度测试结果(65件)显示,金属硫化物爆裂温度集中在170~220℃,石英爆裂温度集中在270~380℃。老湾矿段矿体中石英爆裂温度范围为285~412℃,平均为357℃,上上河矿段矿石石英爆裂温度范围为280~390℃,石英平均爆裂温度为337℃;黄竹园矿段矿石中石英平均爆裂温度为320℃。整个矿带爆裂温度显示大致相似性,平均338℃。矿物的爆裂温度往往代表成矿温度的上限值,所以总体要与均一温度上限值接近或稍高。

根据所测冰点温度,应用Hall等盐度计算公式计算出老湾金矿的盐度值分布于1.57%~14.57%(图5b),主要集中于3%~12%,平均为7.16%,属于低盐度体系。

根据流体包裹体成分测试结果(表1),并结合谢巧勤等(2003)和河南地矿三院(1990)^①测试结果可知,气相成分主要为水蒸气,其次为CO₂以及少量的CO和微量的N₂。成矿流体的液相成分中以Na⁺、K⁺为主要阳离子,这也是矿体周围绢云母化强烈的原因。阴离子主要有SO₄²⁻、Cl⁻和微量F⁻。

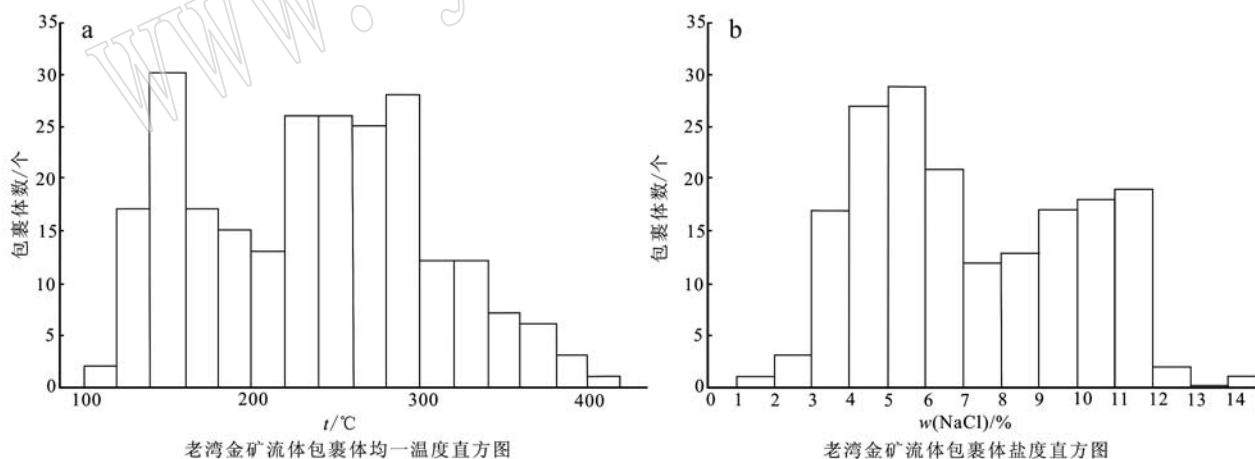


图5 上上河-彭家老庄金矿段含金石英脉石英流体包裹体均一温度和盐度特征

Fig. 5 Homogenization temperature and salinity characteristics of fluid inclusions in quartz from gold-bearing quartz vein in Shangshanghe-Pengjialaozhuang gold ore block

4.2 氢氧同位素特征

老湾金矿及主要地质体氢氧同位素组成见表2(部分数据来自谢巧勤等,2001)。从表2可以看出,老湾金矿床成矿过程中成矿流体的 δD 值为-72‰~-67‰, $\delta^{18}O$ 值为-0.7‰~2.9‰,成矿过程中 δD 呈

增加趋势, $\delta^{18}O$ 呈减小趋势。

4.3 铅同位素特征

老湾金矿带岩体、地层和矿石铅同位素组成列于表3(部分数据引自潘成荣,1999;张宏飞等,1999)。由表可知,老湾金矿带铅同位素比值具有比值较高且

① 河南地矿三院. 1990. 河南省桐柏县老湾湾仪河金矿带原生晕研究.

表 1 上上河-彭家老庄矿段流体包裹体气相和液相成分特征

Table 1 Characteristics of gas and liquid components in fluid inclusion in Shangshanghe-Pengjialaozhuang gold ore block

样号	成矿阶段	测试矿物	液相组成/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)								
			Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺ /Na ⁺	F/Cl ⁻
41	II	石英	9.53	17.00	0.07	微	0.95	24.75	4.14	1.78	0.038
42	II	石英	12.00	6.24	0.08	微	1.99	6.90	11.88	0.52	0.29
43	III	石英	22.20	30.40	0.30	微	2.09	42.80	12.42	1.37	0.49
44	III	石英	14.00	15.67	0.07	微	0.87	29.12	4.32	1.12	0.03

样号	成矿阶段	测试矿物	气相组成/($10^{-6}\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)						
			H ₂ O	CO ₂	CH ₄	CO	N ₂	CO ₂ /H ₂ O	CH ₄ /CO ₂
41	II	石英	30.466	2.083	0.013	0.024	0.047	0.060	0.070
42	II	石英	49.918	0.682	0.019	0.016	0.016	0.013	0.028
43	III	石英	73.147	1.887	0.087	0.140	0.044	0.026	0.046
44	III	石英	54.817	0.802	0.004	0.054	0.011	0.015	0.005

表 2 老湾金矿床及矿区主要地质体氢氧同位素组成

Table 2 Hydrogen-oxygen isotopes composition of the Laowan gold deposit and main geological body of the mining area

矿区	样号	样品	均一温度/℃	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物,SMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{矿物,SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水,SMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{水,SMOW}}$
老湾	H-O-1	石英(I)	348	12.20		6.34	-86.3
	H-O-2	石英(II)	256	10.25		1.15	-82.7
	H-O-3	石英(II)	256	11.79		2.69	-85.5
	Sh-1	绿帘石	278	9.2	-52	7.7	-9.4
	LW1	石英(II)	252	12.2		2.9	-71
	LW2	石英(II)	240	12.0		2.2	-72
	LW3	石英(III)	194	11.7		-0.7	-67
	LW4	石英(III)	200	11.9		-0.2	-69
上上河	H-O-4	石英(II)	252	12.31		3.0	-86.0
	H-O-5	石英(I)	338	11.73		5.44	-53.3
黄竹园	H54	石英(II)	250	12.6		3.24	-72
凉亭	LT	石英(II)	270	9.4		0.9	-72
	TC20-1	石英(III)		3.5		-6.6	-79
老湾花岗岩		全岩		5.6			
		斜长石		4.7			
		石英(1)		8.9		7.7	
		石英(2)		7.6		6.4	
		石英(3)		7.8		6.6	
		石英				-68	-68
		黑云母	800		-85		-63.7
龟山组二 云石英片岩		十字石		10.7		10.7	
		石英		11.6		9.97	-71
		白云母	600		-85		-49.1

* LW1、LW2、LW3、LW4 样品为本文实测，I、II、III代表成矿早、中、晚阶段，其他数据引自谢巧勤等(2001)。

表 3 老湾金矿带岩体、地层和矿石铅同位素组成比值

Table 3 Pb isotopic composition ratios of rock bodies, strata and ores in the Laowan gold belt

地质体	采样地点	测试矿物	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	模式年龄/Ma	资料来源
老湾金矿床	老湾	黄铁矿	17.765	15.493	38.178	482	实测
	老湾	黄铁矿	18.330	15.613	39.032	241	实测
	老湾	黄铁矿	18.693	15.614	39.855	-23	实测
	老湾	黄铁矿	17.469	15.463	37.908	688	实测
	老湾	黄铁矿	17.523	15.497	38.059	683	实测
	老湾	黄铁矿	17.553	15.605	38.098	510	潘成荣(1999)
	老湾	黄铁矿	17.559	15.438	37.741	300	潘成荣(1999)
	老湾	方铅矿	17.463	15.397	37.722	320	潘成荣(1999)
	老湾	方铅矿	17.442	15.381	37.759	609	实测
	老湾	方铅矿	17.702	15.497	37.206	556	实测
	老湾	方铅矿	17.408	15.378	37.725	631	实测
黄竹园金矿床	黄竹园	方铅矿	17.951	15.417	37.810	542	实测
	黄竹园	黄铁矿	17.686	15.540	38.540	616	实测
	黄竹园	黄铁矿	17.590	15.404	37.752	527	实测
	黄竹园	方铅矿	17.606	15.433	37.847	550	实测
凉亭金矿床	光山凉亭	黄铁矿	16.734	15.300	37.488	760	潘成荣(1999)
	光山凉亭	黄铁矿	16.734	15.330	37.598	810	潘成荣(1999)
	光山凉亭	黄铁矿	17.179	15.399	37.846	550	潘成荣(1999)
老湾花岗岩	老湾	全岩	17.797	15.457	38.443		潘成荣(1999)
	老湾	全岩	17.442	15.381	38.225		潘成荣(1999)
	老湾	全岩	17.606	15.508	38.403		潘成荣(1999)
	老湾	钾长石	17.154	15.359	37.777	—	潘成荣(1999)
	老湾	钾长石	17.103	15.363	37.716	—	张宏飞(1999)
	老湾	钾长石	17.119	15.354	37.717	—	张宏飞(1999)
	老湾	二云石英片岩	18.317	15.702	39.000	—	实测
龟山岩组	老湾	二云石英片岩	18.552	15.630	39.278	—	实测
	老湾	斜长角闪片岩	18.369	15.399	37.853	—	实测
	老湾	斜长角闪片岩	18.016	15.312	37.408	—	实测
	老湾	斜长角闪片岩	18.016	15.312	37.408	—	实测

变化范围大的特征。²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb为 17.408~18.693, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.378 ~ 15.614, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 37.206~39.855。与老湾花岗岩体的铅同位素组成比较,各矿床中的铅同位素含量均大于花岗岩体中的铅同位素的组成范围(花岗岩体中铅同位素主要为岩石铅和长石铅),其中以凉亭金矿床中的铅同位素含量最低,老湾金矿床中的铅同位素含量最高。

5 讨论

5.1 成矿流体来源

对老湾金矿床成矿流体的盐度计算并转换为压力值,可以得到其形成深度大概为 1.05 km,上上河矿段平均形成深度大概为 1.04 km,黄竹园矿段形成深度大概为 0.65 km。实际上,受断裂控制的热液矿

化中通过测定流体包裹体获得的静水压力不能等同于静岩压力,通过这种压力测试所换算出来的成矿深度不能代表矿床形成的成矿深度,因为成矿流体进入断裂裂隙中时,必然会引起体系压力的下降,因此实际成矿深度要比换算出的成矿深度要大一些,所以这些数值只能作为参考。同时这也反映了与脆性断裂控矿特点一致的浅成热液成矿体系的特点。

研究表明流体包裹体成分可以判别流体来源,尤其是 K^+/Na^+ 值,被视作流体来源的示踪参数。一般成矿流体 $K^+/Na^+ > 1$ 的矿床基本上为岩浆热液矿床(张德会,1992)。老湾金矿床的 K^+/Na^+ 值大多数都大于 1,仅有样号 42 的样品比值为 0.52 (小于 1)(表 1),这反映岩浆热液在该矿床形成过程中起主导作用,该研究成果与老湾金矿床氢氧同位素研究结论一致。

由此可以得知,老湾金成矿带中形成各矿床的成矿流体属于中低温、低盐度的含 CO_2 的 $K^+-Na^+-Cl^--SO_4^{2-}$ 体系,矿物流体包裹体成分显示成矿流体是以岩浆热液为主的混合热液。

5.2 氢氧同位素组成

通过氢氧同位素组成的数值比较,结合老湾金

矿床的矿床地质特征,认为大气降水、岩浆水和变质水的混合可能是老湾金矿床成矿流体的来源。

若假定老湾花岗岩初始岩浆水、区域中生代大气降水和变质水为老湾金矿床成矿流体中原始水类型,根据本区岩浆水的 $\delta^{18}O$ 为 $6.4\text{‰} \sim 7.7\text{‰}$, δD 为 $-68\text{‰} \sim -63.7\text{‰}$; 本区变质水的 $\delta^{18}O$ 为 $9.97\text{‰} \sim 10.7\text{‰}$, δD 为 $-71\text{‰} \sim -49.1\text{‰}$; 本区区域中生代大气降水的 $\delta^{18}O$ 为 $-11.25\text{‰} \sim -10\text{‰}$, δD 为 $-80\text{‰} \sim -70\text{‰}$ (张理刚,1989),并依据相关方程式和表 1 中的实际数据,计算并绘制出了在不同的温度条件下和不同的 W/R 值下成矿流体的 $\delta^{18}O-\delta D$ 演化曲线图(图 6)。由图 6 可见,随着温度的升高,大气降水的演化曲线和演化趋势逐渐向右偏移,大气降水中的氢氧同位素组成在高温、低 W/R 值条件下也可能演化成与岩浆水相似的氢氧同位素组成。在成矿阶段的后期,流体的 $\delta^{18}O$ 、 δD 数据点均分布于岩浆水演化线与大气降水演化线之间,与变质水演化线相距较远,这说明成矿流体与变质水有较远的亲缘性。根据数据点在图 6 中所处位置可以得知,在老湾金矿床形成的早期阶段,成矿流体以岩浆水为主,晚期阶段成矿流体则以大气降水为主。

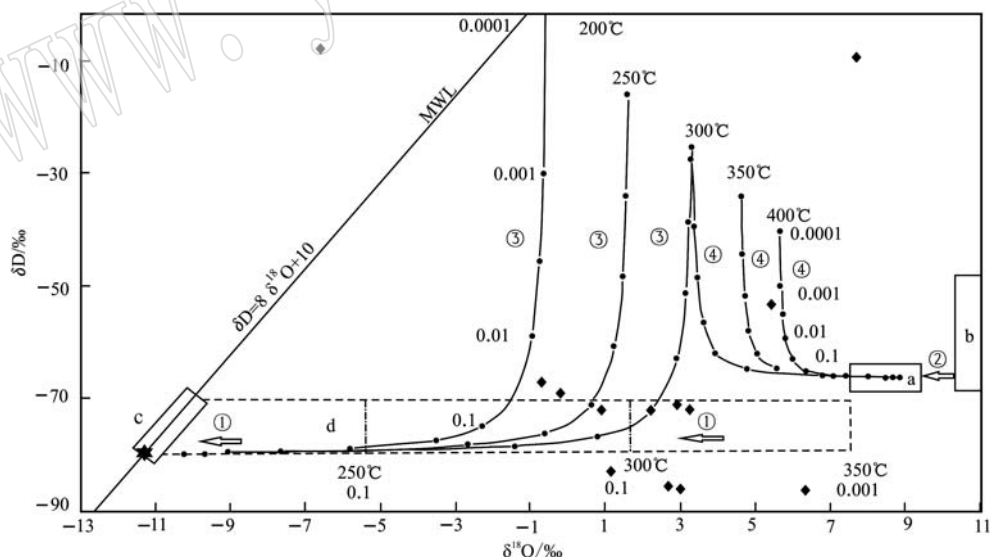


图 6 老湾金矿床成矿流体的氢氧同位素组成演化模式(据谢巧勤等,2001)

Fig. 6 Evolution model of hydrogen-oxygen isotopes composition of ore-forming fluid in the Laowan gold deposit

(after Xie Qiaoqin *et al.*, 2001)

a—本区初始岩浆水范围; b—本区变质水范围; c—区域中生代大气降水范围; d—漂移大气降水演化范围; ★—计算大气降水演化曲线的取值; ①—漂移大气降水演化趋势; ②—漂移岩浆水演化趋势; ③—演化大气降水; ④—演化岩浆水; 曲线上数据为水/岩(W/R)值; 菱形块为老湾矿床成矿流体投点

a—the range of initial magmatic water in this area; b—the range of metamorphic water in this area; c—the range of Mesozoic meteoric water in this area; d—the evolution range of drift meteoric water; ★—the value of calculating the evolution curve of meteoric water; ①—evolution trend of drift meteoric water; ②—evolution trend of drift magmatic water; ③—evolutionary meteoric water; ④—evolutionary magmatic water; the data on the curve are water/rock (W/R) ratios; the diamond-shaped block is the pour point of ore-forming fluid in the Laowan gold deposit

5.3 铅同位素来源

龟山岩组形成的构造环境为活动大陆边缘(张宗恒等, 2002), 热水沉积硅质岩的地球化学特征, 指示早期海底火山喷流作用为“矿源层”的形成提供了巨量成矿物质。谢巧勤等(1999)研究证明, 龟山岩组为一套含 Au 的海相火山-沉积建造, 其原岩形成时已具备 VMS 矿床形成的构造环境和物质基础, 为后期老湾金银成矿系统的形成奠定了物源基础, 老湾花岗岩具备了为矿床形成提供岩浆热液和热动力条件, 因此矿石铅的可能来源应是龟山岩组和花岗岩。如果矿石铅仅来源于变火山-沉积岩, 则其铅同位素投点应位于变火山-沉积岩的铅同位素的演化线上或处于其构筑的区间内; 如果矿石铅仅为岩浆热液从花岗质熔体中带出的铅组成, 则矿石铅应处于初始岩石铅(长石铅)的变化范围内; 如果矿石铅由成矿流体从已固结的花岗岩中淋滤铅组成, 则矿石铅同位素组成的变化应处于在全岩铅同位素的范围内。将表 2 中所列的各地质体铅同位素组成投点于图 7 所示的安特威尔图解中可见矿石铅、花岗岩石铅、龟山岩组铅的铅同位素组成(铅同位素平均组成)构成一条很好的直线, 因此可以确定矿石铅主要来源于老湾花岗岩和龟山岩组。

金属硫化物矿物从热液中结晶沉淀时如捕获较高质量分数的 U、Th 等放射性元素, 则 U、Th 的衰变可引起硫化物矿物铅同位素组成的变化。潘成荣(1999)结合稀土元素、微量元素和铅同位素资料, 认为导致老湾金矿床中金属硫化物同位素不平衡的主要原因是来自不同硫源硫的混合, 即提供硫源的地

质体一是含矿岩系龟山岩组, 二是老湾花岗岩, 与铅同位素具有相同来源, 这又进一步提供了成矿流体岩浆成因的证据。

6 结论

(1) 流体包裹体特征显示老湾金矿床的成矿流体为中低温、低盐度的含 CO_2 的 $\text{K}^+ - \text{Na}^+ - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ 体系。根据氢氧同位素特征并结合老湾金矿床的矿床地质特征, 认为成矿流体主要以大气降水、岩浆水为主, 和变质水亲缘关系较远, 矿床早期成矿阶段以岩浆水为主要成矿热液来源, 成矿晚期阶段以大气降水为主要热液来源。

(2) 老湾金成矿带中矿床中的铅来源与老湾花岗岩以及龟山岩组有着亲缘的关系, 表明矿石中的铅同位素为二者中铅元素的混合, 具有深部来源特征, 进一步提供了成矿流体岩浆成因的证据。

References

- Cai Xinming. 2013. Study in the chemical characters of Tongbai gold mine in Henan Province[J]. China Science and Technology Information, (8): 40~42 (in Chinese with English abstract).
- Chen Liang, Dai Lijun, Wang Tiejun, *et al.* 2009. Geochemical characteristics and genesis of the Laowan gold deposit in Henan Province[J]. Geoscience, 23(2): 277~284(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Pirajno F, Li Nuo, *et al.* 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling Orogen, Henan Province, China: Implications for ore genesis[J]. Ore Geology Reviews, 35: 245~261.
- Chen Yanjing, Pirajno F and Sui Yinghui. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver deposits and related tectonic setting[J]. Mineralium Deposita, 39: 560~575.
- Deng Jun. 1998. On ore-forming system of shear zone tectonics[J]. Geoscience, 12(4): 493~500(in Chinese with English abstract).
- Jiang Shaoyong, Yang Tao, Li Liang, *et al.* 2006. Lead and sulfur isotopic compositions of sulfurs from the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2597~2602 (in Chinese with English abstract).
- Kou Shaolei, Du Yangsong, Cao Yi, *et al.* 2016. Geology and ore-forming fluid geochemistry of Laowan gold deposit in Tongbai County, Henan Province[J]. Mineral Deposits, 35(2): 245~260 (in

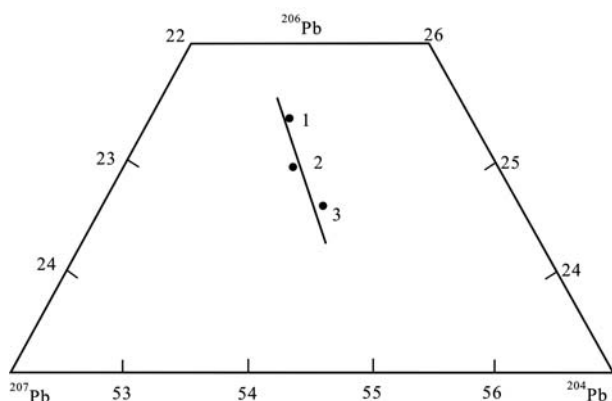


图 7 老湾金矿安特威尔图解(据沈渭洲, 1997)

Fig. 7 Atwell diagram of the Laowan gold deposit (after Shen Weizhou, 1997)

1—龟山岩组; 2—矿石; 3—花岗岩

1—Guishan Formation Complex; 2—ore; 3—granites

- Chinese with English abstract).
- Lin Ruihua, Wang Tiejun, Shi Gewu, *et al.* 2010. Structure control characteristics and genesis of Laowan gold deposit in Henan Province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, (4): 342~346(in Chinese).
- Ma Hongwei, Wu Hongwei, Qiu Shuncai, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and genesis of Laowan granite in Tongbai, Henan[J]. Mineral Resources and Geology, (1): 65~69(in Chinese with English abstract).
- Pan Chengrong. 1999. Laowan Gold Deposit and Mineralization Dynamic of Magmatic Hydrothermal in Tongbai, Henan Province, China [D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Shao Jun. 1995. Geological setting of Laowan Au-mineralization zone [J]. Journal of Precious Metallic Geology, 4 (2) : 138 ~ 146(in Chinese).
- Shen Weizhou. 1997. Isotope Geology Tutorial[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 211~245(in Chinese).
- Wang Aizhi, Zhang Xingchao and Li Jilin. 2008. Geological characteristics of the Laowan gold ore belt of Tongbai in Henan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 1: 55~58(in Chinese with English abstract).
- Wang Guomin, Zhang Zhensheng, Wang Jianming, *et al.* 2004. Geological and geochemical characteristics of the Shangshanghe gold deposit and the ore prospecting effect[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 6: 471~476(in Chinese with English abstract).
- Wang Zaicong, Liu Jianming, Liu Hongtao, *et al.* 2010. Complexity and uncertainty of tracing fluid sources by means of H-O, C, S, N isotope systems: A case study of orogenic lode gold deposits[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(5): 577~590(in Chinese with English abstract).
- Xie Qiaoqin. 1999. Geological and geochemical characteristics and tectonic settings of the Guishan Group of Tongbai in Henan Province [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 10 (5): 26~30(in Chinese with English abstract).
- Xie Qiaoqin, Pan Chengrong, Xu Xiaochun, *et al.* 2003. Geochemistry of fluid inclusions and rare earth elements from Laowan gold deposit in Henan Province[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), (1): 47~52(in Chinese with English abstract).
- Xie Qiaoqin, Xu Xiaochun and Yue Shucang. 2001. Isotopic geochemistry of hydrogen, oxygen and helium, and ore-forming fluid sources of Laowan gold deposit in Tongbai, Henan Province[J]. Chinese Journal of Geology, 36(1): 36~42(in Chinese with English abstract).
- Xue Jing, Dai Tegen, Fu Songwu, *et al.* 2011. SEDEX origin of the Panlong Lead-Zinc deposit, Wuxuan, Guangxi: REE and S isotope evidences[J]. Geotectonica et Metallogenia, 35(3): 394~403(in Chinese with English abstract).
- Yang Meizhen, Lu Jianpei, Fu Jingjing, *et al.* 2014. Magmatic hydrothermal gold and polymetallic metallogenesis related to Yanshanian magmatism of Laowan gold belt, Tongbai Mountain: Evidence from geochemistry, geochronology and ore-controlling structural geological constraints[J]. Mineral Deposits, (3): 651~666(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guan. 2002. Regional geological setting and prospecting for VHMS-type Cu-Zn deposits in Tongbai, Henan Province[J]. Mineral Deposits, (Supp. 1): 301~304(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfei, Zhang Li, Gao Shan, *et al.* 1999. Geochemical study of deep crustal composition from Yanshanian granites of northern Tongbai area[J]. Geochimica, (2): 105~112(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1989. Diagenetic Theory and Prospecting[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 121(in Chinese).
- Zhang Zongheng, Fang Guosong, Hou Haiyan, *et al.* 2002. Geological features and genesis of the Laowan gold deposit in the Tongbai region, Henan[J]. Gold Geology, (3): 20~26(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1~316(in Chinese).
- Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Zhou Guofu, *et al.* 2012. C, O isotope and REE geochemistry of the hydrothermal calcites from the Tianqiao Pb-Zn ore deposit in NW Guizhou Province, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 36(1): 93~101(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡新明. 2013. 河南省桐柏金矿带地球化学特征研究[J]. 中国科技信息, 8: 40~42.
- 陈良, 戴立军, 王铁军, 等. 2009. 河南省老湾金矿床地球化学特征及矿床成因[J]. 现代地质, 23(2): 277~284.
- 邓军. 1998. 论剪切带构造矿系统[J]. 现代地质, 12(4): 493~500.
- 蒋少涌, 杨涛, 李亮, 等. 2006. 大西洋洋中脊 TAG 热液区硫化物铅和硫同位素研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2597~2602.
- 寇少磊, 杜杨松, 曹毅, 等. 2016. 河南老湾金矿床上上河矿段矿床地质和成矿流体地球化学[J]. 矿床地质, 35(2): 245~260.
- 林锐华, 王铁军, 史革武, 等. 2010. 河南老湾金矿的构造控矿特征

- 及矿床成因[J]. 地质找矿论丛, (4): 342~346.
- 马宏卫, 吴宏伟, 邱顺才, 等. 2007. 河南桐柏老湾花岗岩地球化学特征及成因研究[J]. 矿产与地质, (1): 65~69.
- 潘成荣. 1999. 河南桐柏老湾金矿床成矿地球化学及岩浆热液成矿动力学[D]. 北京: 中国地质大学.
- 邵 军. 1995. 老湾金矿带金成矿地质背景[J]. 贵金属地质, 4(2): 138~146.
- 沈渭洲. 1997 同位素地质学教程[M]. 北京: 原子能出版社, 211~245.
- 王爱枝, 张兴超, 李吉林. 2008. 河南桐柏老湾金矿带地质特征[J]. 华南地质与矿产, 1: 55~58.
- 王国敏, 张振生, 王建明, 等. 2004. 上上河金矿床地球物理地球化学特征及找矿效果[J]. 物探与化探, (6): 471~476.
- 汪在聪, 刘建明, 刘红涛, 等. 2010. 稳定同位素热液来源示踪的复杂性和多解性评述——以造山型金矿为例[J]. 岩石矿物学杂志, 29(5): 577~590.
- 谢巧勤. 1999. 河南桐柏龟山组地质地球化学特征及成岩环境[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 10(5): 26~30.
- 谢巧勤, 潘成荣, 徐晓春, 等. 2003. 河南老湾金矿床流体包裹体及稀土元素地球化学研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), (1): 47~52.
- 谢巧勤, 徐晓春, 岳书仓. 2001. 河南桐柏老湾金矿床氢氧氮同位素地球化学及成矿流体来源[J]. 地质科学, 36(1): 36~42.
- 薛 静, 戴塔根, 付松武, 等. 2011. 广西武宣盘龙铅锌矿喷流沉积成矿作用: 稀土元素和硫同位素证据[J]. 大地构造与成矿学, 35(3): 394~403.
- 杨梅珍, 陆建培, 付静静, 等. 2014. 桐柏山老湾金矿带与燕山期岩浆作用有关的岩浆热液金多金属矿床成矿作用——来自地球化学、年代学证据及控矿构造地质约束[J]. 矿床地质, (3): 651~666.
- 张德会. 1992. 矿物包裹体液相成分特征及其矿床成因意义[J]. 地球科学, 17(6): 677~688.
- 张 冠. 2002. 河南省桐柏地区区域地质背景及铜锌矿找矿前景[J]. 矿床地质, 增刊: 301~304.
- 张宏飞, 张 利, 高山, 等. 1999. 桐柏北部燕山期花岗岩对地壳深部物质组成的地球化学示踪[J]. 地球化学, (2): 105~112.
- 张理刚. 1989. 成岩成矿理论与找矿[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 121.
- 张宗恒, 方国松, 侯海燕, 等. 2002. 河南桐柏老湾金矿床地质特征及成因探讨[J]. 黄金地质, (3): 20~26.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~316.
- 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 2012. 黔西北天桥铅锌矿床热液方解石 C、O 位素和 REE 地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 36(1): 93~101.