

文章编号: 0258-7106(2014)03-0651-16

# 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\*

杨梅珍<sup>1,2</sup>, 陆建培<sup>2</sup>, 付静静<sup>2</sup>, 任爱琴<sup>3</sup>, 王世峰<sup>4</sup>

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 3 河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队, 河南 信阳 464000; 4 河南鑫源黄金公司, 河南 桐柏 474750)

**摘要** 老湾金矿带为桐柏山北麓一条重要的金多金属成矿带, 其内的老湾和上上河金矿床的控矿构造, 分属脆性右行走滑断裂体系中压扭性P型和张扭性R型断裂。老湾金矿床的矿脉呈右形侧列、向南相对缓倾, 以浸染状、条带状、网脉状的蚀变岩型矿化为特征。上上河金矿床的矿脉平行展布, 向北陡倾, 除浸染状蚀变岩型矿化外, 石英脉型矿化较发育。该矿带的金矿化类型与断裂构造性质具有明显的耦合关系。右行断裂控矿体系晚于韧性剪切带形成, 更晚于区域峰期变质作用, 这排除了热液成矿作用与早期区域变质和韧性剪切变形之间的成因联系。矿带矿化元素显示, 以松扒花岗斑岩脉带为中心的Mo→Cu-Pb-Zn-Ag→Au空间分带特征。矿石硫同位素较窄的变化范围和较均一的组成( $\delta^{34}\text{S}$ 值多变化在1.69‰~5.99‰), 显示单一深源岩浆硫特征。矿石与燕山期花岗岩的铅同位素的相似性, 表明它们可能源自相同的源区。含金石英脉石英流体的氢、氧同位素( $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$ 值为3.2‰~5.4‰,  $\delta\text{D}$ 值为-86.3‰~-53.5‰)显示了成矿流体的岩浆来源。花岗斑岩锆石U-Pb同位素年龄为(138.9±3.3)Ma, 与前人测得的矿脉中热液云母( $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 法)的成矿年龄基本一致。综合分析认为, 老湾金矿带金多金属成矿作用与燕山期浅成岩浆作用具有密切的时空关系和成因联系。

**关键词** 地球化学, 右行走滑断裂体系, 地质年代学, 岩浆热液成矿作用, 老湾成矿带, 桐柏山

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

## 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

YANG MeiZhen<sup>1,2</sup>, LU JianPei<sup>2</sup>, FU JingJing<sup>2</sup>, REN AiQin<sup>3</sup> and WANG ShiFeng<sup>4</sup>

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2 Faculty of Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 No. 3 Geological Survey Party, Henan Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Xinyang 464000, Henan, China; 4 Henan Xinyuan Gold Company, Tongbai 474750, Henan, China)

\* 本文得到地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(编号:GPMR201014)和河南省国土资源厅2010年度省两权价款地质矿产科技攻关资助项目(编号:2010-61-1)的资助

第一作者简介 杨梅珍,女,1965年生,博士,副教授,主要从事矿床地质教学和找矿研究。Email: ymzkitty@163.com

收稿日期 2013-07-15; 改回日期 2014-04-17。秦思婷编辑。

## Abstract

The Laowan gold belt is an important gold polymetallic metallogenic belt on the northern side of the Tongbai Mountain. Ore-controlling structures of Laowan and Shang Shanghe gold deposits within the metallogenic belt belong to compression-shear P type and tension-shear R type of brittle dextral strike-slip fault system respectively. The gold lodes of the Laowan gold deposit are characterized by the right echelon of three larger ore vein belts, relatively gently southward dip, and disseminated, stripped and veinlet altered rock-type mineralization. The gold lodes of the Shangshanghe gold deposit are characterized by the paralleled ore veins, steep northward dip, and well-developed quartz vein-type mineralization besides altered rock-type mineralization. These phenomena reveal the coupling relationship between mineralization and ore-controlling fault properties. The ore-controlling dextral strike-slip fault was formed later than the ductile shear zone and much later than peak regional metamorphism, and it precludes the genetic relationship between the hydrothermal mineralization and the regional metamorphism and ductile shear deformation. The ore-forming elements within the ore belt display Mo→Cu-Pb-Zn-Ag→Au zoning centered on Songpa granite porphyry dyke zone. The narrow range and homogeneous composition ( $\delta^{34}\text{S}$  is mostly in the range of 1.69‰~5.99‰) of  $\delta^{34}\text{S}$  values of ores reveal the deep seated magmatic sources of sulfur. The similarity of Pb isotopes of ores to those of Yanshanian granite implies that they were probably derived from the same source. The ore-forming fluid in quartz of Au-bearing quartz vein has the composition of 3.2‰~5.4‰ for  $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$  and -86.3‰~-53.3‰ for  $\delta^{18}\text{D}$ , suggesting the magmatic origin of the ore-forming fluid. The  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  age [(138.9±3.3) Ma] of granite porphyry obtained by zircon U-Pb isotope is largely coeval with the ore-forming age obtained from hydrothermal mica contained in the ore vein. It can be concluded that the gold and polymetallic metallogenesis of the Laowan gold belt had close spatial and temporal relationship and genesis link with Yanshanian high level magmatism.

**Key words:** geochemistry, brittle dextral strike-slip fault system, geochronology, magmatic hydrothermal mineralization, Laowan gold belt, Tongbai Mountain

老湾金矿带位于河南省境内,地处桐柏山北坡,为一东西长近 20 km、南北宽 1.5~2.5 km 的狭长带状区域。它是一条以 Au 元素矿化为主导,伴生 Cu、Mo、Pb、Zn、Ag 的金多金属成矿带。早在上世纪 80 年代,河南省多个地质单位就对其进行了普查和勘探,发现了老湾和上上河 2 个中型金矿床以及下黄竹园小型银铅锌多金属矿床,后来在北杨庄、九管-陡坡岩一带陆续发现了一些金矿化点。老湾金矿床自 80 年代开采以来,250~ -40 m 标高范围基本采完,最深开采到 -80 m,0 m 标高以上全部采空,目前处在停采状态;上上河金矿床正在开采中,目前已采至 -600 m 中段;下黄竹园小型银铅锌多金属矿床还处于勘探阶段,这些矿床(点)是研究金矿带金成矿作用的理想场所。对于老湾金矿带金矿床成矿作用的研究一直没有间断,但多局限于带内单个矿床的研究(刘文灿等,2003;谢巧勤等,2001;张宗恒等,2002;陈良等,2009),对金矿成矿作用的关键控矿因素认识还很模糊。本文以金矿带控矿断裂与

金矿化之间耦合关系研究为基础,开展高精度同位素年代学以及硫和氢、氧、铅同位素地球化学研究,探讨老湾金矿带金多金属成矿作用与燕山期花岗质岩浆作用的耦合关系。

## 1 成矿地质背景

老湾金矿带地处桐柏山北缘,为夹持在桐柏山北部的高压混杂岩带与秦岭群构造块体之间的狭长地带(图 1),其紧邻中生代大陆碰撞造山系统的北缘,处在桐柏造山带古生代增生块体与中生代碰撞增生带结合部位,属桐柏-大别造山带中生代缝合带——镇平-龟山-梅山区域性壳断裂带(Faure et al., 1999)的一部分。区域构造以一系列平行于桐柏造山带的北西西向纵向断裂为特征(图 1),其中,老湾金矿带的老湾和松扒断裂为龟-梅断裂( $F_4$ )的 2 个次级断裂,它们控制着较大型的花岗质岩体和大量酸性岩脉的侵位,并控制着老湾金矿带的展布。

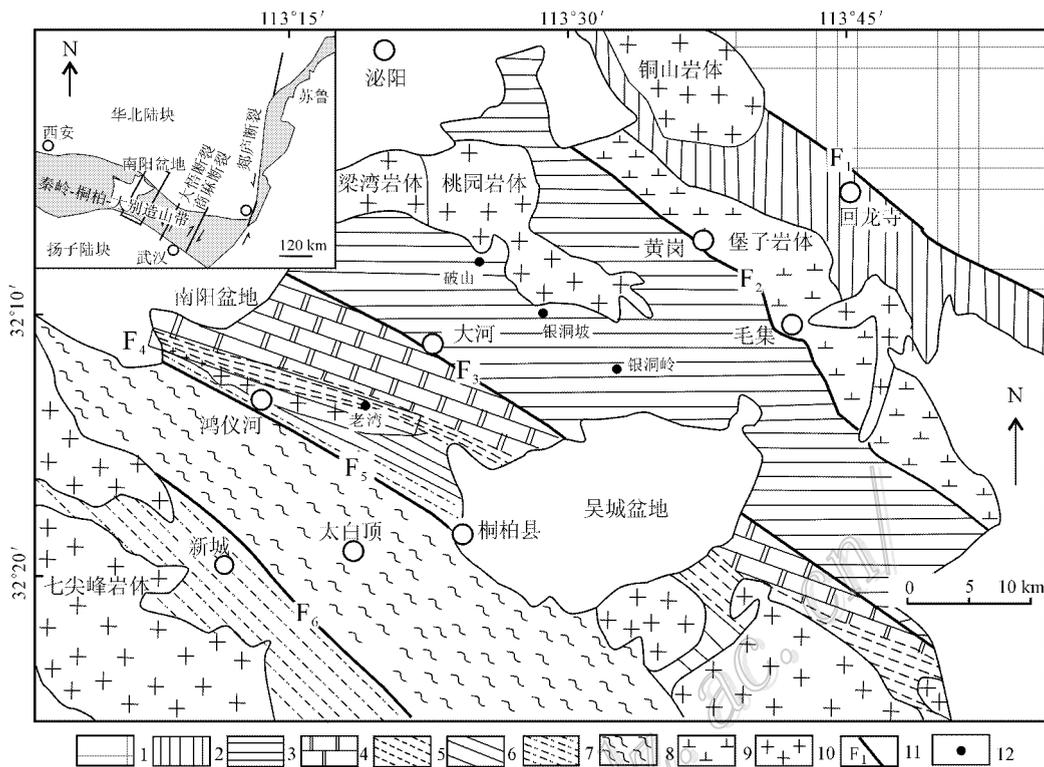


图 1 老湾金矿带区域地质略图(据河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队,1990;刘晓春等,2011 修编)  
 1—中元古界南湾岩组黑云斜长片岩、云母石英片岩;2—中元古界龟山岩组斜长角闪片岩、云母石英片岩(龟梅剪切带);3—中元古界宽坪群云母石英片岩、黑云斜长角闪片岩及石英岩、大理岩;4—中元古界二郎坪群斜长角闪片岩、变粒岩及含碳云母石英片岩及大理岩;5—古元古界秦岭群片麻岩及大理岩;6—古元古界熊耳群变火山岩系;7—中元古界—新太古界桐柏变质片麻杂岩;8—高压岩片;9—闪长岩;10—花岗岩;11—断裂;12—金、银矿床  
 F<sub>1</sub>—油房庄断裂;F<sub>2</sub>—瓦穴子断裂;F<sub>3</sub>—朱夏断裂;F<sub>4</sub>—老湾-松扒断裂(龟梅断裂);F<sub>5</sub>—桐-商断裂;F<sub>6</sub>—新城-黄陂断裂

Fig. 1 Regional geological map of Laowan gold belt (modified from Third Geological Survey Team, Henan Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, 1988; Liu et al., 2011)

1—Mesoproterozoic Nanwan formation biotite plagioclase schist and mica quartz schist; 2—Mesoproterozoic Guishan formation plagioclase hornblende schis, mica quartz schist (Gui-Mei shear zone); 3—Mesoproterozoic Kuanping Group mica quartz schist, biotite plagioclase hornblende schist, quartzite and marble; 4—Mesoproterozoic Er Langping Group plagioclase hornblende schist, granulite, carbonaceous mica quartz schist and marble; 5—Palaeoproterozoic Qinling group gneiss and marble; 6—Palaeoproterozoic Xionger Group metavolcanics; 7—Mesoproterozoic-Late Archean Tongbai metamorphic gneissic complex; 8—High pressure rock pile; 9—Diorite; 10—Granite; 11—Fault; 12—Gold-silver deposit  
 F<sub>1</sub>—You Fangzhuang fault; F<sub>2</sub>—Wa Xiezi fault; F<sub>3</sub>—Zhuxia fault; F<sub>4</sub>—Laowan-Songpa fault (Gui-Mei fault);  
 F<sub>5</sub>—Tongbai-Shangcheng fault; F<sub>6</sub>—Xincheng-Huangpi fault

中元古界二郎坪群歪头山组和信阳岩群龟山岩组为矿带内 2 个重要的金矿赋矿层位。前者岩石组合为变粒岩、含碳云母石英片岩及大理岩夹斜长角闪片岩,其原岩为含碳细碎屑岩-碳酸盐岩建造;后者以斜长角闪片岩、云母石英片岩为主,夹变粒岩,原岩为一套中基性火山岩-碎屑岩建造,均经历了绿片岩相-角闪岩相变质作用。区域岩浆活动较频繁,超基性、基性、酸性岩均有分布,尤以酸性岩最发育,以区域北部的桃园岩体(426~433 Ma,江思宏等,2009)、梁湾岩体(132.5~137 Ma,江思宏等,2009)

以及南部的老湾花岗岩体(132.5 Ma,刘翼飞等,2008)和松扒花岗岩斑岩脉带为代表(图 2),以燕山期岩浆活动最为强烈,且与区域内的金银钼多金属矿化具有密切的时空关系和成因联系。

## 2 金多金属成矿作用特征

老湾金矿带从东至西已发现北杨庄 Cu-Pb 矿化点、老湾和上上河中型金矿床、九管-陡坡岩金矿化点以及黄竹园小型银铅锌矿床等多个矿化集中地段

(图2),以老湾和上上河金矿床规模最大。区内出露中元古界龟山岩组,为一套强变形的中深变质岩系,岩石组合为(含榴)白云石英片岩、含榴含蓝晶石二云石英片岩的浅色岩系和斜长角闪片岩、斜长角闪岩深色岩系。由于经历了多期区域动力变质作用,地层的层理已发生复杂构造面理置换。龟山岩组地层早期变形表现为强烈的韧性剪切,沿走向变薄甚至尖灭,形成由浅色岩系和深色岩系互层的近似菱形的弱应变构造岩片,呈北西西向右形斜列的格局,显示右行韧性剪切性质,是贯穿桐柏-大别的龟山-梅山大型韧性剪切带在桐柏地区的表现。

区内断裂发育。北部的松扒断裂和南部的老湾断裂走向约 $285^\circ$ ,延伸稳定、规模大,分别控制着松扒花岗斑岩脉带和板状老湾花岗岩体的展布,为老湾金矿带控矿断裂带的主边界断裂,夹持在边界断裂之间的次级裂隙带为金多金属矿床的重要赋矿构造,它们共同构成脆性右行剪切断裂控矿体系。断裂多期活动明显,其中,老湾断裂表现为老湾花岗岩体侵位后由南向北的逆冲,形成沿老湾断裂断续分布的构造角砾岩带,角砾呈椭圆状,成分主要为花岗

岩和变质岩。胶结物为较松散的碎裂岩,显示最晚期构造活动。控矿断裂的多期活动表现为热液成矿期间的再活动以及成矿后的倾向滑动(矿脉壁陡倾的擦痕线理),后者对矿体影响不大。

## 2.1 金矿化特征

老湾金矿带金矿化主要集中在矿带的中东段老湾至彭家老庄一带(图2)。靠东侧老湾-盛老庄区段为老湾金矿床,西侧上上河-彭家老庄区段为上上河金矿床,两者相距约1 km。

老湾金矿床受近东西向断裂带控制。绝大部分矿体和矿石储量赋存在I~III号断裂矿化蚀变带中。I、II、III号断裂矿化蚀变带近于平行右形斜列(图2),水平间距100~150 m。总体走向为 $93^\circ$ ,在 $85^\circ\sim 95^\circ$ 间变化。产状 $175^\circ\sim 185^\circ\angle 55^\circ\sim 65^\circ$ ,较上上河金矿床断裂蚀变带明显要缓。沿走向和倾向均有波状弯曲变化特征。浅部多沿二云石英片岩与斜长角闪(片)岩地层界面发育,具有顺层特点,但深部多与斜长角闪质岩石面理斜交。每条断裂蚀变带又是由主断裂及与其平行的多条次级裂隙组成(图3b),构成宽20~70 m的断裂破碎带。I号断裂蚀变带东西

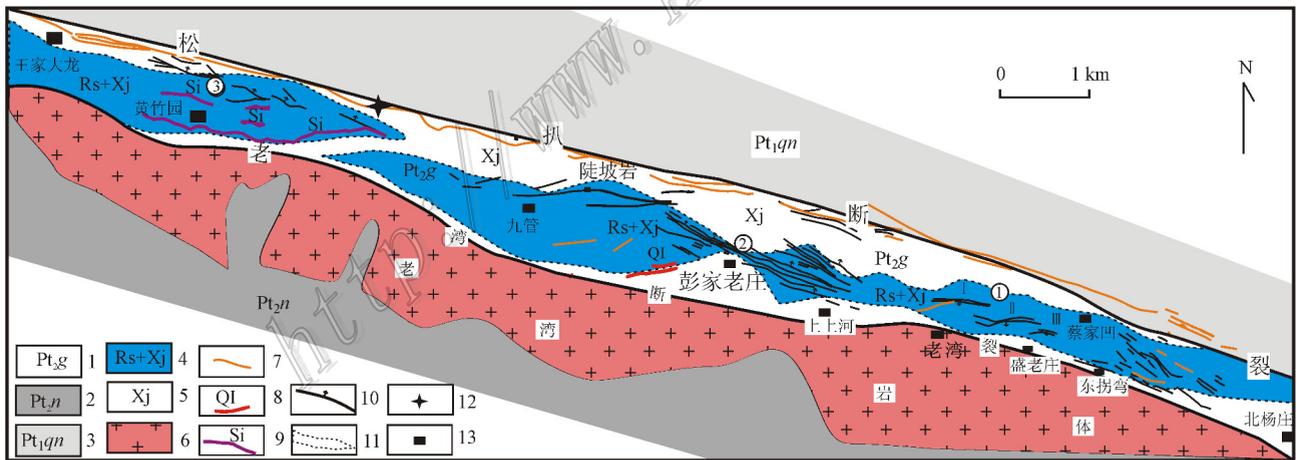


图2 老湾金矿带地质简图(据1:10 000地质图和主要矿床1:2000地质图编制)

- 1—中元古界龟山岩组; 2—中元古界南湾岩组; 3—古元古界秦岭群; 4—云母石英片岩与斜长角闪片岩互层; 5—斜长角闪(片)岩;  
6—花岗岩; 7—花岗岩斑岩脉; 8—早期无矿纯净石英脉; 9—硅化带; 10—脆性断裂矿化蚀变带及倾向; 11—不同岩性组合边界线;  
12—锆石样品采集位置; 13—村庄

①—老湾金矿床; ②—上上河金矿床; ③—黄竹园银铅锌矿床

Fig. 2 Simple geological map of Laowan gold belt(after 1:10 000 geological map 1:2000 geological maps of major deposits)

- 1—Mesoproterozoic Guishan Formation; 2—Mesoproterozoic Nanwan Formation; 3—Palaeoproterozoic Qingling Group; 4—Mica quartz schist interbedded with plagioclase hornblende schist; 5—Plagioclase amphibolite(schist); 6—Granite; 7—Granite porphyry dyke; 8—Early pure quartz veins; 9—Silicified zone; 10—Brittle fracture alteration zone and dip direction; 11—Boundary line between different lithological association;

12—Location of Zircon sample; 13—Village

①—Laowan gold deposit; ②—Shang Shanghe gold deposit; ③—Huang Zhuyuan Ag-Pb-Zn deposit

长 1700 m, 南北宽 20~70 m, 带内有 10 个金矿体。矿体平面上和剖面上平行排列(图 3b)。II 号断裂带位于该矿段中部, 东西长 1200 m, 南北宽约 50 m, 构造蚀变带内已圈定 4 个金矿体。III 号断裂带位于 II、IV 号构造蚀变带之间, 长 1800 m, 带宽 30 m, 圈定金矿体 5 个。矿体以似层状和长透镜状为主。剖面上产状变缓处矿体变厚, 矿化变强, 构造蚀变带紧闭陡倾地段矿体薄, 品位相对较低, 这是压扭性断裂控矿的一般特点。

上上河金矿床矿体产状特征和矿化类型与老湾金矿床有明显差异。矿床受数条北西西向近平行排列的断裂裂隙带控制(图 2)。该矿床已发现较大规模的含金断裂蚀变带十多条, 近平行排列组成长约 2.5 km、宽约 1 km 的矿脉带。矿化蚀变带水平间距最大达 70 m, 最小 20~30 m, 一般在 40~50 m 之间。开采结果显示, 矿脉带略呈向东收敛、向西散开的趋势(图 2)。断裂蚀变带走向 290~310°, 地表陡倾近直立, 深部向北陡倾(图 3a), 倾角一般为 65~85°(图 3a)。断裂蚀变带与变质岩片理呈 25~35° 交切关系, 其形态较简单, 走向和倾向延伸稳定, 主断

面清楚且平直, 局部呈舒缓波状变化, 分支分叉和分支复合, 或出现弯转现象。走向延长最大可达 2 km, 倾向延深达数百米, 宽度稳定, 一般 1.2 m 左右。矿体形态和产状严格受断裂控制。矿体多分布于断裂蚀变带的中间或一侧, 分布不连续, 常呈透镜状、长条状或板状产于断裂蚀变带中, 沿走向和倾向出现复脉、侧脉。在断裂走向上右形弯转的部位, 矿体往往增厚或发育石英脉型矿化, 这是右行张扭性断裂的一般特征。对于右行张扭性断裂, 其右形弯转形成张性桥构造(庄培仁, 1996)。地表露头观察, 控矿断裂将早期无石英脉右行错开近 10 m, 显示清楚的右行剪切特征。

热液蚀变均以硅化、绢云母化和较广泛的黄铁矿化为特征。老湾金矿床热液蚀变带明显较宽, 变化较大, 且与围岩界线不清楚。矿石以浸染状、细网脉状(图 4a)、条带状构造为主, 局部富矿部位出现金多金属块状矿化。浸染状和条带状构造矿化是成矿流体沿现存断裂中的劈理化带交代蚀变的结果。不规则细网脉状构造(图 4a、i)是成矿热液沿网状细小裂隙充填的结果, 这种网状裂隙是热液活动期间流

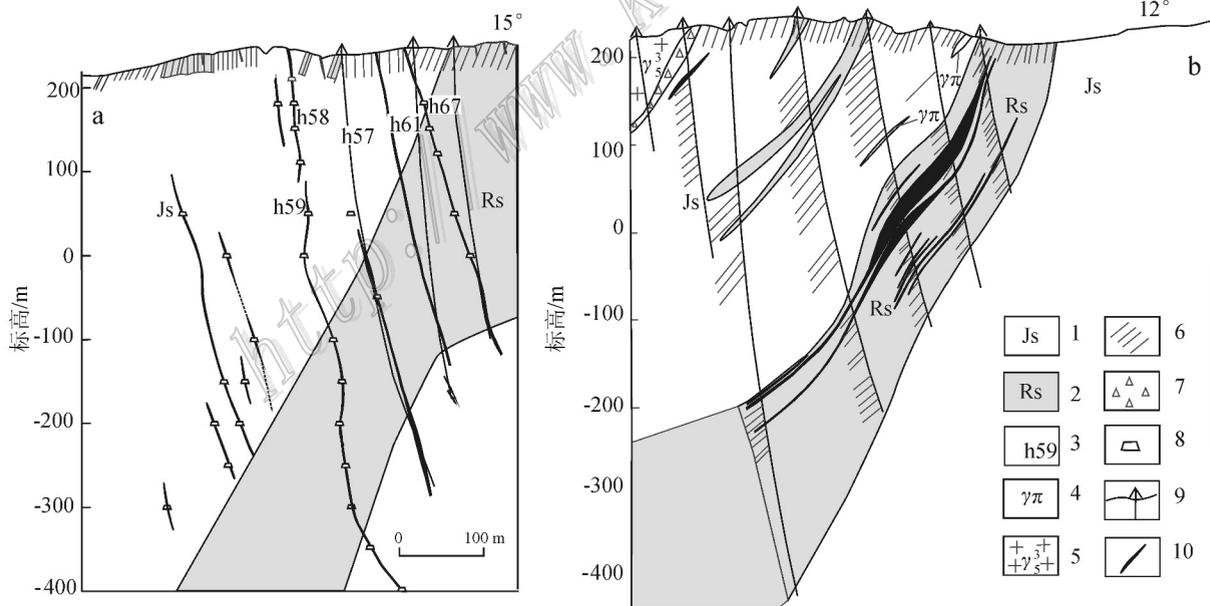


图 3 老湾金矿带典型金矿床勘探线剖面图

a. 上上河金矿床 204 号勘探线; b. 老湾金矿床 W10 线勘探线

- 1—龟山岩组角闪(片)岩; 2—云母石英片岩; 3—矿脉及编号; 4—花岗岩脉; 5—花岗岩; 6—片理; 7—角砾岩; 8—坑道工程; 9—钻孔;
- 10—蚀变岩型金矿体

Fig. 3 Geological section along exploration line of typical gold deposits in the Laowan gold belt

a. No. 204 exploration line of the Shangshanghe gold deposit; b. W10 exploration line of the Laowan gold deposit

- 1—Plagioclase amphibolite(schist)of Guishan Formation; 2—Mica quartz schist; 3—Gold lode and its serial number; 4—Granite porphyry dyke; 5—Granite; 6—Schistosity; 7—Breccia; 8—Underground tunnel; 9—Drill hole; 10—Altered rock-type gold orebody



在断裂带局部发育,但它反映了成矿流体的强烈活动,是富矿部位的重要指示。尽管各矿床的矿化类型存在差异,但其矿石矿物组成及其反映的热液成矿多阶段演化特征是一致的。主要金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿和自然金。根据矿石组构的研究(图 4),可以大致区分出(I)黄铁矿-绢云母-石英组合;(II)黄铁矿-黄铜矿-金-石英组合(图 4g);(III)黄铁矿-黄铜矿-黝铜矿-闪锌矿-方铅矿-自然金-方解石-石英组合(图 4h,i),显示出成矿主要经历了绢云母-石英-黄铁矿阶段、黄铁矿-黄铜矿-金矿化阶段以及金多金属硫化物阶段。金的沉淀集中在后 2 个阶段,显示出与铜硫化物密切的结构关系和同时沉淀的结构特征(图 4g,h),黄铜矿、黝铜矿化愈强,则金矿化愈强。成矿的多阶段性是热液脉动和同成矿构造活动的结果。电子探针分析结果显示,自然金的成色在 963~987 之间, $w(\text{Ag})$ 一般在 1.51~3.68 g/t。

## 2.2 铅锌银矿化特征

黄竹园小型铅锌银矿床是与老湾和上上河金矿床在该金矿带内同时期发现的几个重要矿床之一。其位于上上河金矿床西 7 km 处,集中在长 2 km、宽 0.8 km 的范围内,赋矿岩层为斜长角闪质岩石(角闪岩与斜长角闪片岩)和二云母石英片岩,目前该矿床仍在勘探中,且一直被认为与老湾和上上河金矿床属同一成因类型。

最新的勘探成果是圈出了 11 条矿化体和矿化破碎带。其中,较大的 4 条矿化体长 100~500 m,宽 0.5~1.5 m。根据其产状可分为 2 组:①走向为 290°左右,北倾,但产状明显较缓,一般 20~30°。与松扒主剪切带近于平行,相当于走滑剪切体系中的 Y 型裂隙,在宽 120 m 范围内组成北西向矿脉带;②产状变化较明显,走向从近东西向至北西向(305~315°),很可能为 P 型和 R 型剪切裂隙组合。矿体形态呈脉状、透镜状。矿体厚度一般在 1 m 左右,最薄 0.4 m,最厚 3.73 m。金矿化较东部的上上河和老湾金矿床弱, $w(\text{Au})$ 一般在 1~3 g/t,矿化不均匀,金储量 170.7 kg。银铅锌矿化明显较强,其中, $w(\text{Pb})$ 平均为 0.49%, $w(\text{Zn})$ 为 0.13%, $w(\text{Ag})$ 为 14.13 g/t。

蚀变以绢云母化、硅化和碳酸盐化为主,其中,绢云母化为面型蚀变(图 5a),硅化和碳酸盐化多呈脉状线性蚀变(图 5b,c)。蚀变作用的顺序为绢云母化(弥散状、线状)—硅化(脉状或团块状)—方解石化(脉状)。黄铁矿化和毒砂化伴随早期的绢云母化;硅化作用期间发生较强的闪锌矿化和铋铅硫化物矿化;最晚的方解石化伴随方铅矿和铋铅硫化物矿化。矿石主要为细网脉状蚀变岩型和块状硫化物脉型。大致可以分为 2 个组合:①绢云母+石英+黄铁矿+毒砂,为较早期蚀变岩的典型组合,其中,黄铁矿多以浸染状分布在蚀变岩中,毒砂多与石英构

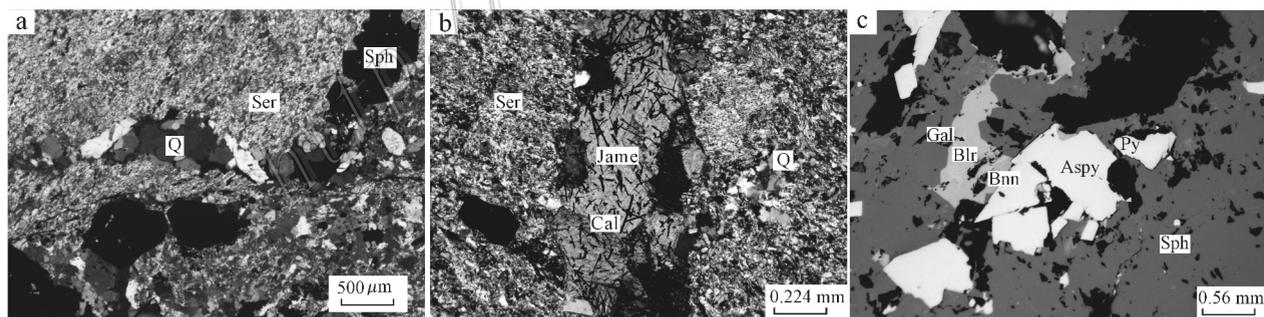


图 5 黄竹园铅锌银矿床矿石典型组构特征

a. 面状绢云母化和脉状硅化伴随闪锌矿化,单偏光; b. 脉状碳酸盐化伴随脆硫铋铅矿化,单偏光; c. 多金属硫化物矿石中毒砂和黄铁矿在闪锌矿中呈交代残余,方铅矿与车轮矿、块硫铋铅矿构成固溶体系列穿插在闪锌矿中,反射光

Q—石英; Ser—绢云母; Sph—闪锌矿; Cal—方解石; Gal—方铅矿; Py—黄铁矿; Jame—脆硫铋铅矿; Aspy—毒砂; Bnn—车轮矿; Blr—块硫铋铅矿

Fig. 5 Texture characteristics of ores in the Huangzhuyuan Pb-Zn-Ag deposit

a. Planar sericitization and vein-like sericitization followed by sphalerite mineralization, plainlight; b. Vein-like carbonatization followed by jamesonite mineralization, plainlight; c. Polymetallic sulfide ore, arsenopyrite and pyrite as replacement of residual in sphalerite, the solid solution series consisting of galena (Gal), bournonite (Bnn), boulangerite penetrating sphalerite, reflected light

Q—Quartz; Ser—Sericite; Cal—Calcite; Sph—Sphalerite; Gal—Galena; Py—Pyrite; Jame—Jamesonite; Aspy—Arsenopyrite; Bnn—Bournonite; Blr—Boulangerite

成细网脉;②石英+方解石+多金属硫化物,以硫化物细网脉和块状硫化物大脉2种形式存在。矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿及脆硫锑铅矿、块硫锑铅矿、车轮矿等锑铅硫盐矿物,有少量毒砂和黄铁矿,仅在闪锌矿中偶见少量黄铜矿和黝铜矿乳滴状出溶物。闪锌矿为贫铁浅色闪锌矿。脉石矿物主要为石英,有少量绢云母和方解石。黄竹园铅锌银矿床的矿物组合与金矿床有较大差别,前者富砷、锑、铅、锌硫化物,后者以出现较多的铜硫化物为特征。

### 2.3 热液矿化与控矿断裂的耦合关系

该金矿带的热液成矿作用与断裂之间存在明显的耦合关系,以老湾和上上河金矿床表现最为明显。老湾金矿床控矿断裂以发育弥散性密集劈理化带和主断面不清晰为特征,其热液蚀变带较宽(数米至十多米),矿体与围岩渐变过渡现象明显,以呈网脉状、条带状、浸染状构造的蚀变岩型矿化为特征,石英脉型和角砾状矿化不发育,显示具有压扭性断裂构造控矿的一般特点。

上上河控矿断裂主断面清楚,封闭性和连通性较好,其蚀变带较窄(1~2 m),且与围岩界线较清楚,以石英脉型矿化、角砾状矿化发育为特征,显示张扭性构造的一般特点。这种断裂与矿化的耦合关系,反映控矿断裂为现存构造和成矿期间同成矿活动的特征。

通过控矿断裂产状统计和性质分析,可知老湾和上上河金矿床的控矿断裂与老湾和松扒主边界断裂交角约 $15^\circ$ ,两者位移方向相同,断面倾向相反,符合Riedel右行走滑剪切体系的P型和R型剪切裂隙(朱志澄,2003;Arthur,1988)。下黄竹园控矿断裂主要以张扭性R型和压扭性P型为主。根据整个金矿带断裂发育特征,可以确立老湾金矿带控矿构造属脆性右行走滑断裂体系。

## 3 样品及分析方法

### 3.1 松扒花岗斑岩脉带锆石 U-Pb 年龄测试

在老湾金矿带采集了花岗斑岩脉样品。单矿物锆石在河北省区域地质调查队实验室,采用人工破碎和重砂淘洗以及磁选法分离,然后在双目镜下挑纯(纯度达99%)。单矿物锆石样品制靶、锆石阴极发光照相以及锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司的 Ge-

oLas 使用 2005 深紫外(DUV)193 nm UArF 准分子激光剥蚀系统,分析中采用的激光束斑直径为 24  $\mu\text{m}$ ,采用哈佛大学标准锆石 91500 作为外标校正,将分析未知点与标样进行交叉分析。使用的 ICP-MS 为 Agilent 7500a 型。采用 GLITTER 4.0 版软件进行同位素比值数据处理。锆石粒度较细,一般为 40~80  $\mu\text{m}$ ,锆石颗粒不同程度溶蚀现象或裂纹较常见,测试中应尽量避免这样的锆石。阴极发光(CL)图像(图6)均显示岩浆成因锆石的振荡环带结构特征。

锆石样品分析结果见表1。松扒花岗斑岩锆石  $\epsilon(\text{U})$ 、 $\epsilon(\text{Th})$  分别为  $3343 \times 10^{-6} \sim 120144 \times 10^{-6}$  和  $810 \times 10^{-6} \sim 21167 \times 10^{-6}$ ,显示含量高且变化大,变化可达一、两个数量级。Th/U 比值变化于 0.07~0.67,多接近于或高于 0.1,显示岩浆成因锆石特点。16 个测试点,除 1、7、9、11、12、15 测试点外,10 个点在误差范围内基本给出一致的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄,为 133~145 Ma,集中在锆石 U-Pb 谐和曲线上或附近(图7)。测试点 1、11、12、15 获得明显较小的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄,很可能与这些锆石微裂隙发育导致放射性 Pb 丢失有关。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(138.9 \pm 3.3) \text{Ma}$  (MSWD=1.2)(图7)。

### 3.2 同位素分析

采集上上河、老湾和黄竹园 3 个矿区矿石硫同位素样品 35 件(表2)。硫同位素样品分析由宜昌地质矿产研究所完成。首先将矿石样品粉碎到 40~80 目,在双目镜下挑选黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等金属硫化物,纯度在 95% 以上,再磨至 200 目。采用传统的分析测试流程,即样品按比例加入  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,然后置于马弗炉内,在 1050~1060 $^\circ\text{C}$  真空条件下反应制备  $\text{SO}_2$ ,最后在质谱仪上进行测试,测试误差均小于  $\pm 0.2\%$ 。 $\delta^{34}\text{S}$  值的相对标准为 V-CDT。分析结果见表 2。

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。测试结果见表 3。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 +  $\text{HNO}_3$  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 混合酸介质,离心,然后通过 AG-1 $\times$ 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

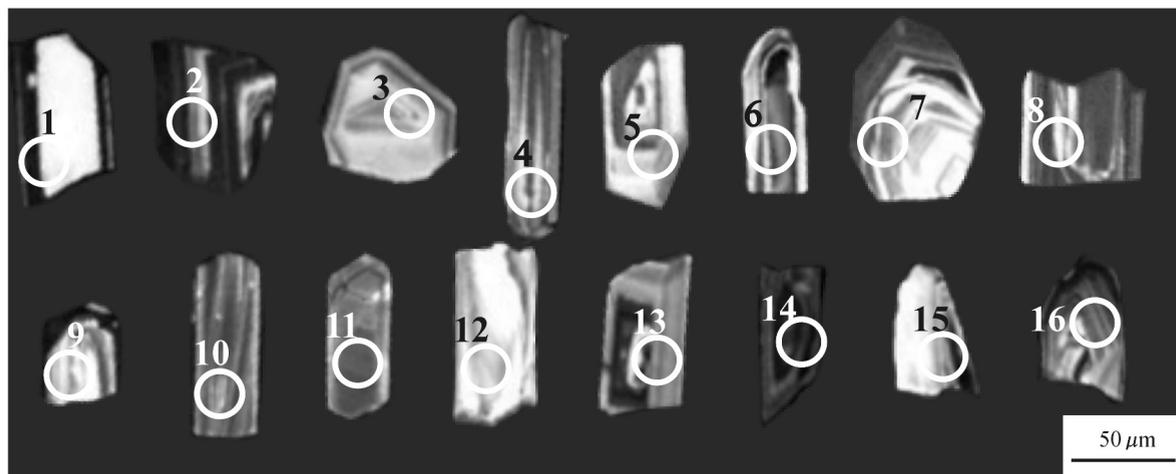


图 6 松扒花岗斑岩脉锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL image of zircons from Songpa granite porphyry

表 1 老湾金矿带松扒花岗斑岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data for Songpa granite porphyry

样品编号	$w(B)/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$t/\text{Ma}$					协和度	
	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$		比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$1\sigma$
ZK0103-01	10137	42187	0.24	0.0570	0.0025	0.0803	0.0033	0.0101	0.0002	0.0019	0.0001	78.4	3.1	64.8	1.4	38.0	1.3	0.81
ZK0103-02	11879	89194	0.13	0.0480	0.0012	0.1568	0.0048	0.0228	0.0003	0.0070	0.0002	156	4	145	2	142	3	0.98
ZK0103-03	2622	29808	0.09	0.0545	0.0015	0.1695	0.0060	0.0219	0.0003	0.0091	0.0003	156	5	140	2	183	6	0.87
ZK0103-04	2516	34203	0.07	0.0489	0.0015	0.1550	0.0098	0.0211	0.0003	0.0073	0.0002	137	9	135	2	147	22	0.91
ZK0103-05	2006	23182	0.09	0.0546	0.0016	0.1638	0.0051	0.0211	0.0002	0.0082	0.0003	154	4	135	1	165	6	0.86
ZK0103-06	21167	120144	0.18	0.0471	0.0006	0.1545	0.0030	0.0227	0.0003	0.0079	0.0001	155	3	145	2	159	2	0.99
ZK0103-07	1750	4940	0.35	0.0537	0.0020	0.5135	0.0197	0.0672	0.0008	0.0218	0.0005	421	13	420	5	436	9	0.99
ZK0103-08	4685	6966	0.67	0.0482	0.0025	0.1556	0.0094	0.0219	0.0004	0.0065	0.0002	137	8	140	3	131	4	0.95
ZK0103-09	810	5285	0.15	0.0493	0.0041	0.1549	0.0100	0.0239	0.0004	0.0085	0.0005	157	9	152	3	171	7	0.96
ZK0103-10	1293	3343	0.39	0.0619	0.0053	0.1540	0.0121	0.0208	0.0005	0.0069	0.0004	157	11	133	3	138	7	0.91
ZK0103-11	10411	39056	0.27	0.0508	0.0020	0.1139	0.0044	0.0161	0.0002	0.0027	0.0001	111	4	103	1	55.0	2.2	0.93
ZK0103-12	7794	45466	0.17	0.0546	0.0018	0.1223	0.0041	0.0158	0.0002	0.0038	0.0001	117	4	101	1	76.2	2.7	0.85
ZK0103-13	2963	6943	0.43	0.0561	0.0029	0.1867	0.0072	0.0228	0.0004	0.0068	0.0003	158	7	136	3	136	5	0.96
ZK0103-14	9531	42591	0.22	0.0575	0.0021	0.1437	0.0070	0.0169	0.0003	0.0068	0.0003	181	6	145	2	138	3	0.87
ZK0103-15	5269	23239	0.23	0.0609	0.0031	0.1488	0.0078	0.0218	0.0005	0.0039	0.0002	140	6	108	2	78.9	3.6	0.77
ZK0103-16	1507	9993	0.15	0.0503	0.0023	0.0803	0.0033	0.0101	0.0002	0.0069	0.0003	147	7	139	3	139	6	0.98

将树脂转型,最后用 5 mL 6 mol/L 的 HCl 解吸 Pb。Pb 同位素比值的测定在 MAT-261 可调多接收质谱计上完成。同位素分析样品的制备均在超净化工作柜内完成,所用试剂和水均经聚四氟乙烯对瓶或高纯石英亚沸蒸馏器亚沸蒸馏。监控 Pb 同位素比值测定的 NBS981 国际标准物质的测定值 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 为 $(0.9142 \pm 0.0005)$ ,NBS981 证书值 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 为 $(0.9146 \pm 0.0003)$ 。

氢、氧同位素样品采集于老湾和上上河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℃ 下烘干。同位素分析在宜昌地质矿产研究所同位素实验室完成。石英氧同位素分析采用  $\text{BrF}_5$  法。包裹体氢同位素分析采用爆裂法萃取水,锌法制氢,爆裂温度 550℃。质谱仪 MAT-251,氧同位素分析精度为  $\pm 0.2\%$ ,氢同位素分析精度为  $\pm 2\%$ 。测试结果见表 4。

## 4 讨论

4.1 老湾金矿成矿作用与赋矿岩石变质变形时间关系  
成矿作用与赋矿围岩透入性变形作用相对时间的关系是区分造山型和与侵入体有关金矿床的重要

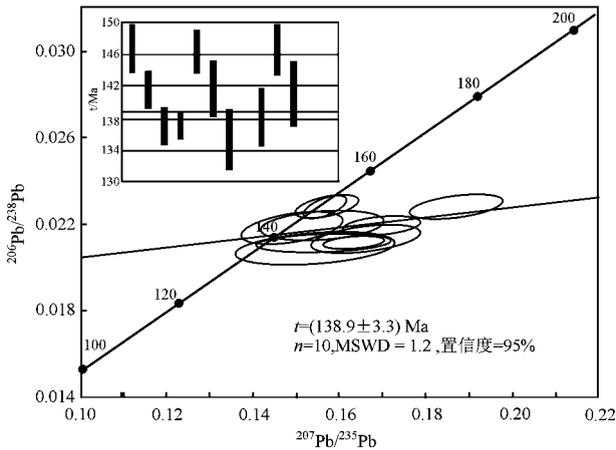


图7 松扒花岗岩斑岩脉锆石 U-Pb 谐和曲线和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄

Fig. 7 U-Pb concordia and weighted mean age plots of zircons from Songpa granite porphyry

表2 老湾金矿带矿石金属硫化物硫同位素特征表

Table 2 Sulfur isotope of ore sulfides from the Laowan gold belt

矿床及样品编号	采样位置	矿石名称	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
<b>上上河金矿床</b>				
Tz-1	Zk2/205(189 m)	蚀变岩	Py	+4.4
Tz-2	Zk3/205(276 m)	蚀变岩	Py	+3.76
Tz-3	Zk4/205(364 m)	蚀变岩	Py	+4.88
Tz-4	Zk2/209(261 m)	蚀变岩	Py	+4.46
Tz-5	Zk5/205(461 m)	蚀变岩	Py	+2.97
Tz-6(1)	h47号脉浅井	蚀变岩	Gal	+2.69
Tz-6(2)	h47号脉浅井	蚀变岩	粗粒 Py	+5.18
Tz-7	垮子冲松扒断裂	含金石英脉	Gal	+1.93
Tz-8201	Zk1/201(46 m)	蚀变岩	Py	+5.59
Tz-8204	h67西坑	含金石英脉	Py	+4.01
Tz-8206	Zk1/201(135 m)	蚀变岩	Py	+4.23
S-11(1)	h25采坑	含金石英脉	Sph	+3.33
S-11(2)	h25采坑	含金石英脉	Py	+5.44
S-12(2)	h25采坑	含金石英脉	Py	+5.78
S-13	碾子沟 h94	含金石英脉	粗粒 Py	+4.08
S-14	碾子沟	蚀变岩	细粒 Py	+5.50
S-15(1)	h67PD2 49.7 m 处	含金石英脉	Cp	+4.89
S-15(3)	h67PD2 49.7 m 处	蚀变岩	Py	+5.27
S-16	h57浅井	含金石英脉	中粗粒 Py	+3.53
S-17	h67东端	含金石英脉	粗粒 Py	+2.90
S-18	h67PD2 50 m 处	蚀变岩	细粒 Py	+4.56
S-19(1)	h67PD2 30 m 处	含金石英脉	Gal	+1.69
TZ-8202	Zk201	蚀变岩	细粒 Py	+4.26
TZ-8203	Zk1/601	蚀变岩	细粒 Py	+3.98
TZ-8205	Zk102	蚀变岩	Py	+3.63
TZ-8208	Zk2/201	蚀变岩	Py	+3.81
TZ-8210	Zk2/201	蚀变岩	Py	+3.87
TZ-8209	Zk2/201	蚀变岩	Gal	+2.78
<b>老湾金矿床</b>				
YS1		蚀变岩	Py	+5.10
YS2		蚀变岩	Py	+4.75
YS3		蚀变岩	Py	+3.05
YS5		蚀变岩	Py	-0.10
YS6		蚀变岩	Py	+5.16
<b>黄竹园铅锌矿床</b>				
YS7		蚀变岩	Py	+3.94
YRv5		蚀变岩	Py	+5.99

注:Py—黄铁矿;Gal—方铅矿;Sph—闪锌矿;Cp—黄铜矿

宏观地质证据(Groves et al., 2003)。大量事实证明,造山带型金矿床控矿构造形成于区域挤压或压剪性变形期间产生的或重新活化的构造,成矿作用与区域透入性构造组构同步或稍后(Adams et al., 2007)。与侵入体有关的成矿作用发生于透入性构造形成后或区域性压性、压扭性构造变形后的数十百万年间,一般晚于赋矿岩石透入性面理组构形成时间,相关矿化的侵入体切割透入性变形的岩石(Groves et al., 2003)。

老湾金矿带控矿断裂与围岩早期区域变质片理多呈大角度相交(如上上河金矿床)或小角度斜交(如老湾金矿床)(图3)。另外,在上上河金矿床的地表可见,由早期深层次剪切变形作用形成的沿大型补丁构造块体边部分布的石英脉被 $320^\circ$ 赋矿断裂错开(右行平移10余米)。这些纯净厚大(宽约80 cm)的无矿石英脉显示出早期构造变形相关脉体的特征。上述现象表明,金矿控矿断裂构造活动明显晚于区域深层次变质变形及较早期的韧性剪切变形作用,显示成矿流体的形成与赋矿围岩绿片岩相区域变质作用的变质脱水作用没有联系,排除了热液成矿作用与早期区域变质和韧性剪切变形之间的成因联系。老湾金矿带脆性右行走滑控矿构造体系是造山带演化晚期浅层次变形的结果,其所处的龟梅断裂带为中生代板块缝合带(Faure et al., 1999),中生代不同构造块体之间的斜向碰撞汇聚作用(傅昭仁, 1999)形成了构造块体间平行于造山带的韧性剪切带。随后的地壳垂向隆升(Xu et al., 2000)剥蚀揭顶、地壳冷却作用,导致应变逐渐硬化,促使浅层次的脆性变形和脆性右行走滑断裂形成。老湾金矿带早期右行韧性剪切和晚期右行脆性断裂的继承性演化关系,反映了该构造演化过程。高精度年代学研究表明,板块间斜向碰撞和龟梅韧性剪切变形发生在236~214 Ma间,碰撞后隆升伴随的脆性破裂发生在195~187 Ma(Xu et al., 2000)。由此推断,老湾金矿带金矿成矿作用属造山后隆升发生的浅层次的热液成矿事件,与造山型金矿床明显不同(Adams et al., 2007),可能与燕山期花岗岩岩浆作用相关联,属以岩浆活动为核心的热液成矿体系。该推论也得到了同位素年代学研究结果的支持。

#### 4.2 与燕山期岩浆活动有关的Au多金属矿化及其空间分带性

老湾金矿带在空间上存在明显的矿化元素组合

表 3 老湾金矿带岩石、矿石铅同位素组成

Table 3 Pb isotopic composition of rock and ore sulfides from the Laowan gold belt

地质体及样品编号	岩、矿石名称	测试对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
龟山岩组					
YQ6	二云石英片岩	全岩	18.317	15.702	39.000
YQ8	二云石英片岩	全岩	18.552	15.630	39.278
YR6	斜长角闪片岩	全岩	18.369	15.399	37.853
YR10	斜长角闪片岩	全岩	18.016	15.312	37.408
老湾金矿床					
YS1-Py	细脉浸染状 Py 化蚀变岩	黄铁矿	17.765	15.493	38.178
YS2-Py	条带状矿化蚀变岩	黄铁矿	18.330	15.613	39.032
YS3-Py	浸染状 Py 化蚀变岩	黄铁矿	18.693	15.614	39.855
YS5-Py	细网脉状蚀变岩	黄铁矿	17.469	15.463	37.908
YS6-Py	浸染状矿化蚀变岩	黄铁矿	17.523	15.497	38.059
上上河金矿床					
Tz-8201	蚀变岩	黄铁矿	17.553	15.605	38.098
Tz-8206	蚀变岩	黄铁矿	17.559	15.483	37.741
Tz-8204	含金石英脉	方铅矿	17.463	15.397	37.722
老-41-Gal	块状硫化物金矿石	方铅矿	17.442	15.381	37.759
h25-Gal	含金石英脉	方铅矿	17.702	15.497	37.206
Tz8211-13-Gal	含金石英脉	方铅矿	17.408	15.378	37.725
黄竹园铅锌矿床					
YPb1-Gal	块状硫化物矿石	方铅矿	17.591	15.417	37.810
Ys7-Py	浸染状矿化蚀变岩	黄铁矿	17.686	15.540	38.540
YRy5-Py	细网脉状蚀变岩	黄铁矿	17.590	15.404	37.752
YRy5-Gal	细网脉状蚀变岩	黄铁矿	17.606	15.433	37.847

表 4 老湾金矿带石英中流体的氢、氧同位素特征表

Table 4 Hydrogen and oxygen isotopes of ore fluid in quartz from the Laowan gold belt

矿床及样品编号	取样位置	均一温度/°C	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}/\text{‰}$
老湾					
H-0-1	ZK1/w1	290	-86.3	12.20	+4.9
H-0-2	过山洞竖井	295	-82.7	10.25	+3.2
H-0-3	ZK7/w4	280	-85.5	11.79	+4.1
上上河					
H-0-4	h58 脉 210 m 中段竖井	300	-86.0	12.31	+5.4
H-0-5	h67 竖井	302	-53.3	11.73	+4.9

分带性。根据元素统计分析及已有工程揭露的矿化信息,可将其大致分为:①以  $\text{Mo}$  为主的多金属矿化,以细网脉状斑岩型矿化为特征。空间上与花岗岩斑岩脉密切相伴。老湾金矿床北部矿脉已经开采出细脉-浸染状钼矿石,上上河矿床北部的磨角房一带有工业钼矿化;②以  $\text{Cu-Pb}$  伴生  $\text{Mo}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Ag}$  为主的多金属矿化,在白杨庄矿段圈定了 2 个有经济意义的铜铅矿体;③以  $\text{Pb-Zn}$  为主伴生  $\text{Ag}$ 、 $\text{Mo}$  的多金属热液脉型矿化,以黄竹园矿段为代表,圈定了多条矿化蚀变带和多个矿体;④以  $\text{Au}$  为主的受断裂控制的热液脉状和似层状矿化,石英脉和蚀变岩 2 种矿化兼有,以上上河和老湾金矿床为代表。其中,①主

要集中在矿带北部松扒断裂带中及其附近;②和③则主要发育在  $\text{Mo}$  矿化与  $\text{Au}$  矿化之间的区域, $\text{Mo}$  矿化体系外侧;④集中在金矿带南部相对远离松扒断裂。总体显示,以松扒断裂浅成岩浆活动为中心的  $\text{Mo} \rightarrow \text{Cu-Pb-Zn-Ag} \rightarrow \text{Au}$  岩浆热液体系矿化的分带性。金矿化体系相对远离岩浆活动中心,主要出现在外围; $\text{Mo}$  矿化靠近岩浆活动中心,而  $\text{Cu-Pb-Zn-Ag}$  矿化则处在这两者之间,且常互相叠加,因此, $\text{Cu-Pb-Zn-Ag}$  矿化常伴有不同程度的  $\text{Au}$ 、 $\text{Mo}$  矿化。这种矿化元素组合的分带性,基本符合与侵入体有关的岩浆热液体系金属元素的分带规律,即高温  $\text{Mo}$  富集在最靠近岩浆热液成矿体系中心,金、银等元素

则富集在相对远离岩浆热液成矿体系之处(毛景文等 2009)。因此,从矿化元素组合分带现象说明,金、银与钼铅锌铜多金属元素可能属同一岩浆热液体系,金多金属成矿作用是围绕松扒斑岩脉带发生的。

矿化特征分析结果表明,老湾金矿带金多金属成矿作用与燕山期花岗质岩浆事件发生于同一地球动力学背景,且更可能与花岗斑岩岩浆事件直接相关。南部老湾板状深成花岗岩体(形成深度 12 km, 700~800°C, 徐晓春等, 2001)的南、北两侧(包括北侧的构造角砾岩带)均无矿化异常和矿化现象。老湾金矿带热液成矿作用可能与松扒断裂带强烈的浅成岩浆活动有关。因此,地质条件稳定、延长达 16 km 的老湾金矿带,出现矿化分段现象除受控矿断裂发育的分段性影响外,可能也与沿走向存在的多个花岗斑岩岩浆活动中心有关。沿松扒断裂带分布的北西西向重力线性正异常或断续的串珠状正异常,或许是深部隐伏花岗斑岩体的反映。花岗斑岩岩浆强烈活动地段(岩浆活动中心)也是热液矿化体系发育的最有利地段。根据这一规律,老湾金矿带内的找矿工作应围绕松扒花岗斑岩带展开。

#### 4.3 与燕山期花岗质侵入体相关的热液成矿的年代学证据

松扒花岗斑岩脉锆石 U-Pb 同位素年代学结果与前人获得的石英脉晶洞充填的淡绿色白云母<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 年龄[(138.0 ± 2.0) Ma (MSWD = 0.89), 坪年龄为(138.0 ± 1.4) Ma, 张冠等 2008]一致。明显比老湾花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄[(132.5 ± 2.4) Ma, 刘翼飞等 2008]早几个百万年。桐柏山老湾金矿带与大别山地区中生代花岗质岩浆活动时间具一致性(杨梅珍等, 2011)。老湾花岗岩体侵位年龄与大别造山带峰期岩浆活动时间一致(张超等 2008),松扒花岗斑岩侵位及多金属成矿作用时间与大别造山带中生代巨量酸性岩浆活动之前的一次重要成岩成矿事件时限一致(杨梅珍等, 2011)。年代学研究结果也证实,老湾金矿带金多金属热液成矿作用与桐柏-大别造山带巨量岩浆活动之前的浅成高位岩浆活动密切相关。松扒密集花岗斑岩脉带是这种岩浆活动的重要指示。花岗斑岩的斑状结构是一种典型的不平衡结构,是岩浆体系压力快速降低、不平衡淬火、挥发分过饱和及出溶过程的重要标志(Miroslav et al., 2008),这种岩浆作用对岩浆热液成矿体系的形成具有重要意义,大多数

岩浆热液矿床与这种高位岩浆作用有关(Philip, 1997)。

#### 4.4 成矿物质及成矿流体同位素地球化学示踪

##### 4.4.1 矿石硫同位素

老湾金矿带重要矿床和矿化点的矿石金属硫化物硫同位素分析结果(表 2)显示,除个别黄铁矿样品的  $\delta^{34}\text{S}$  值为 -0.10‰ 外,总体上  $\delta^{34}\text{S}$  值呈黄铁矿 > 黄铜矿、闪锌矿 > 方铅矿的特征,表明这些硫化物与成矿流体达到了平衡,硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值基本代表流体的总体特征,可以用于示踪成矿流体来源(Kajiwara et al., 1971)。金属硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值变化于 -0.1‰ ~ +5.99‰,多数集中在 +1.69‰ ~ +5.99‰(图 8),与小秦岭杨峪峪金矿床硫同位素特征相似(+2.0‰ ~ +4.4‰, Li et al., 2011)。 $\delta^{34}\text{S}$  值相对较窄的变化范围显示,在硫化物沉淀期间具有相对稳定的物理化学条件和相对均一的流体体系。上上河、老湾和黄竹园矿石硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值的一致性,说明它们很可能来自相同的单一的流体来源。老湾金矿带各矿床金属硫化物的硫同位素与变质成因、岩浆成因硫同位素成分变化范围一致(Ohmoto et al., 1979; Beaudoin et al., 2005; Saravanan et al., 2009)表明硫源的深源成因,而不是来自浅处围岩不同成因硫的均一化作用。老湾金矿带所处的桐柏山地区区域变质作用发生在古生代(Zhai et al., 1998),比中生代白垩纪金矿化早了近 3 亿年。因此,早已脱挥发分的变质岩中的金及其他贱金属

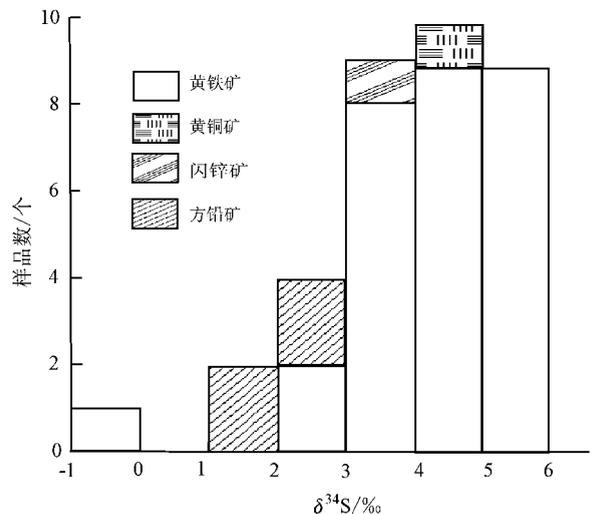


图 8 老湾金矿带矿石硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值直方图

Fig. 8 Histogram of  $\delta^{34}\text{S}$  of ore sulfide minerals from the Laowan gold belt

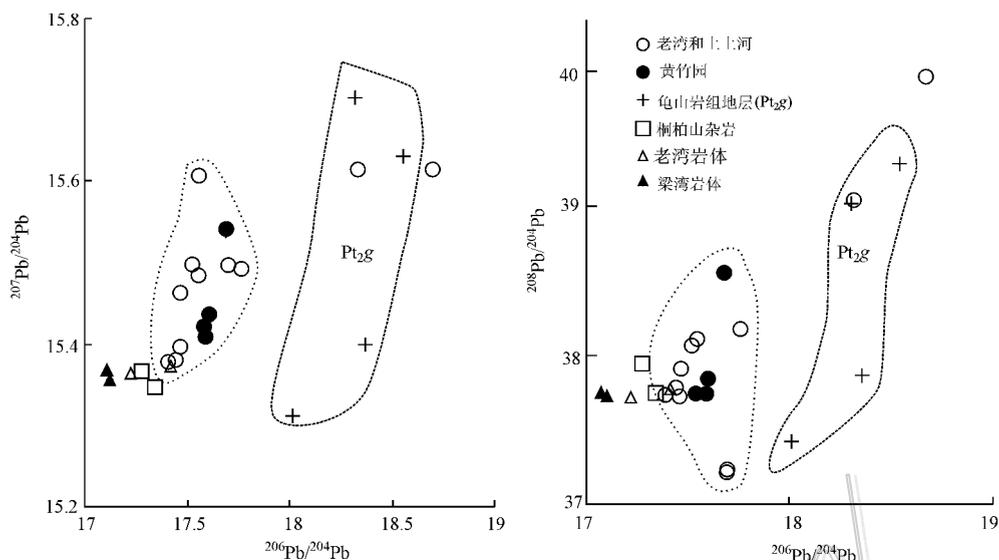


图 9 老湾金矿带矿石硫化物铅同位素图解(桐柏杂岩、老湾岩体和梁湾岩体资料据张宏飞等,1999)

Fig. 9 Diagram of Pb isotopic composition of ore sulfides from the Laowan gold belt (data of Tongbai complex rocks, Laowan and Liangwan intrusions after Zhang et al., 1999)

元素的沉淀需要外来的硫及流体。硫源的变质模式未得到已有地质、地质年代学和稳定同位素等资料的支持,老湾金矿带均一的硫同位素特征表明硫最可能是岩浆成因的。正如 Hattori 等(2001)认为的,与花岗质岩浆作用相关的大型热液矿床,其窄的  $\delta^{34}\text{S}$  值变化范围最好的解释是硫的单一岩浆来源。

#### 4.4.2 铅同位素地球化学示踪

本次研究的重点是对老湾金矿带矿石和围岩地层(表 3)以及燕山期花岗质岩体的铅同位素的对比研究,以示踪成矿物质的源区。

老湾金矿带金多金属矿床矿石铅同位素数值(表 3 和图 9)介于花岗岩与变质岩之间,但其总体组成特征更接近老湾花岗岩体。除少数样品外,多数矿石硫化物样品铅同位素与龟山岩组围岩地层具有的高  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值 ( $> 18$ ) 和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  较大变化范围的同位素特征明显不同。矿石铅同位素的组成与燕山期花岗质岩石铅同位素的相似性,表明两者很可能具有相似的源区。结合前面的讨论,成矿作用与花岗质岩浆活动时间的一致性,说明矿石中的金及贱金属可能通过花岗质岩浆作用,由地壳深处进入上部地壳富集成矿,当然更可能与浅成岩浆作用过程相联系。

#### 4.4.3 氢、氧同位素及流体性质

表 4 为老湾金矿带主矿化阶段热液石英中流体氢、氧同位素分析结果及应用石英-流体平衡公式

(Clayton et al., 1972) 计算所得成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$  值。

与金矿化有关的热液石英样品的  $\delta^{18}\text{O}$  为  $10.25\% \sim 12.31\%$ , 计算所得的主成矿阶段流体  $\delta^{18}\text{O}$  值变化于  $3.2\% \sim 5.4\%$  (表 4)。这与小秦岭地区杨砦峪金矿床 ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}$  值为  $12.4\% \sim 9.6\%$  和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$  值为  $6.0\% \sim 3.2\%$ , Li et al., 2011) 非常相近,含金石英脉的石英中,  $\delta\text{D}$  为  $-86.3\% \sim -53.3\%$  (杨砦峪金矿床的  $\delta\text{D}$  为  $-58\% \sim -81\%$ , Li et al., 2011)。与小秦岭及山东胶东地区金矿床的  $\delta^{18}\text{O}$  值基本一致,显示岩浆水特征(图 10)。因此,老湾金矿带的成矿流体为深源的,最可能为岩浆来源。

#### 4.5 老湾金矿带金多金属矿床结构模式及动力学背景

综上所述,燕山期高位岩浆作用和右行脆性断裂构造是老湾矿带金多金属成矿作用的关键控矿因素。带内的金矿床类型为受右行脆性断裂体系控制的与侵入体有关的热液型金矿床,其矿化类型为蚀变岩型兼石英脉型。图 11 显示断裂、岩浆作用与成矿之间的耦合关系和矿化空间结构。

众多研究成果表明,华北和扬子陆块碰撞之前的大洋岩石圈俯冲发生在 315 Ma。两陆块的碰撞及伴随的陆块俯冲最早开始于早二叠世(255 Ma) (刘晓春等 2011)。燕山期(135~119 Ma)沿桐柏造山

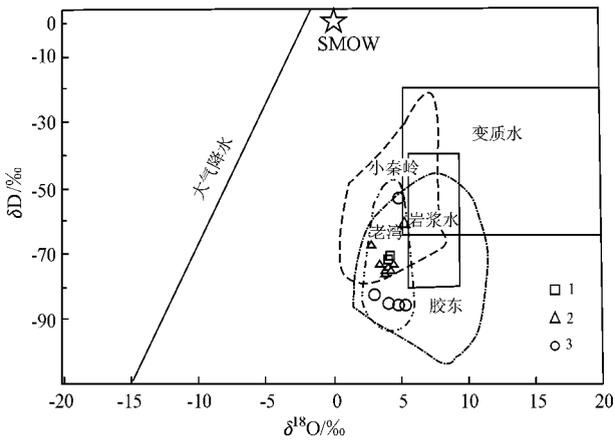


图 10 老湾金矿带成矿流体氢氧同位素组成特征

胶东和小秦岭金矿同位素数据据蒋少涌等(2009);数据1据谢巧勤等,2001;数据2据陈良等,2009;数据3为本文数据

Fig. 10 Hydrogen and oxygen isotopes of ore fluid from the Laowan gold belt

Data of Jiaodong and Xiao Qinling after Jiang et al., 2009 ;data 1 after Xie et al., 2001 ;data 2 after Chen et al., 2009 ;data 3 after this paper

带大规模花岗岩浆活动与中国东部岩石圈伸展、拆沉和软流圈上涌的深部动力学过程相关联(张旗等, 2009; Mao et al., 2003; 毛景文等, 2005)。岩石圈拆沉和软流圈上涌导致下地壳重熔和广泛的花岗质岩浆活动。花岗质岩浆为金多金属矿化提供了热量、流体、S、Au 和多金属成矿元素。地壳现存的脆性断裂体系是岩浆从深部上侵的通道和在地壳较浅部侵位的重要空间,也是岩浆热液流体循环的重要通道和金等成矿物质富集的有利场所。成矿流体由深部向上运移进入浅部脆性断裂构造裂隙带。进入断裂带的成矿流体与断裂带内的构造岩发生扩散交代而形成蚀变岩型矿化,或沿断裂裂隙空间充填而形成石英脉型矿化。金矿化及金异常分布在花岗斑岩的外围,脉状铅锌铜矿化和斑岩型钼矿化则靠近岩浆活动中心(图 11)。这种金属元素分带规律可能与元素地球化学性质和物理化学条件的梯度变化有关(毛景文等, 2009),反映出随着流体从岩浆活动中心向外运移,热液中组分的浓度和物理化学条件不断

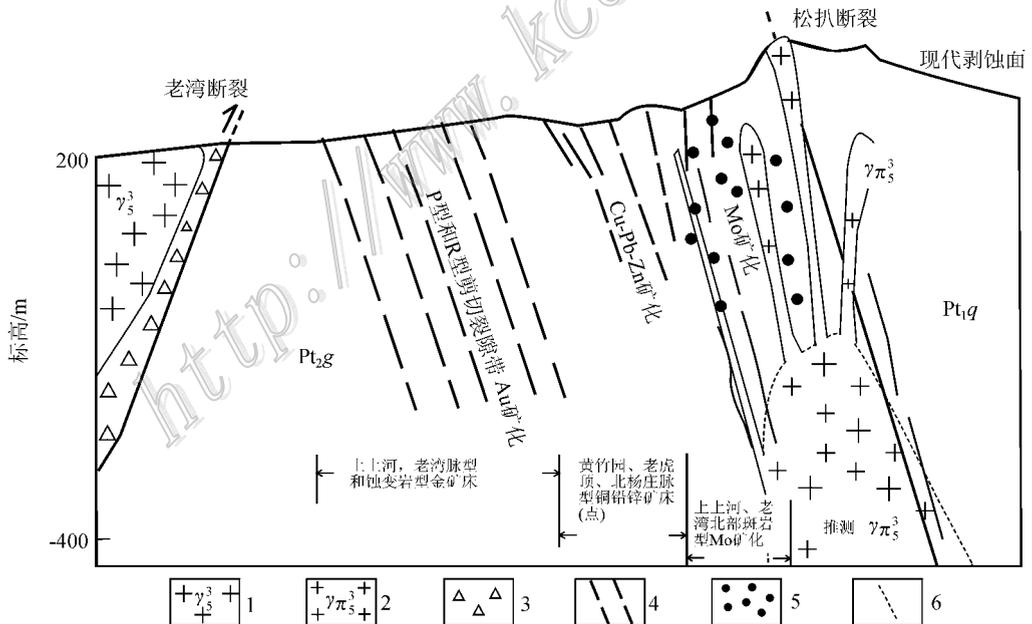


图 11 老湾金矿带矿化结构示意图

1—花岗岩; 2—花岗斑岩; 3—构造角砾岩; 4—剪裂隙带; 5—斑岩型钼矿化; 6—推测隐伏斑岩体

Pt<sub>2g</sub>—中元古界龟山组; Pt<sub>1q</sub>—新元古界秦岭群

Fig. 11 Diagram of mineralization texture of the Laowan gold belt

1—Granite; 2—Granite porphyry; 3—Tectonic breccia; 4—Shear fracture zones; 5—Porphyry-type molybdenum mineralization;

6—Inferred boundary of hidden porphyry

Pt<sub>2g</sub>—Mesoproterozoic Guishan Formation; Pt<sub>1q</sub>—Palaeoproterozoic Qinling Group

变化,造成成矿元素按照一定顺序不断从岩浆热液中结晶析出。围绕侵入体多金属矿化的空间分带性表明它们与一定的岩浆活动具有成因联系(Groves et al., 2003)。因此,老湾金矿带内受剪切裂隙构造控制的金矿床为与燕山期岩浆作用相关的岩浆热液型金矿床。

## 5 结 论

(1)老湾金矿带脆性右行走滑构造体系与成矿作用之间的耦合关系对金矿床成因提供了重要的地质约束。脆性右行走滑控矿断裂属成矿前现存构造,其形成晚于韧性剪切带,更晚于区域峰期变质作用,排除了热液成矿作用与早期区域变质和韧性剪切变形之间的成因联系。

(2)老湾金矿带以松扒花岗岩斑岩脉带为中心的Mo→Cu-Pb-Zn-Ag→Au矿化分带表明,金、银与钼铅锌铜多金属元素可能属同一岩浆热液体系,金多金属成矿作用是围绕松扒斑岩脉带发生的。

(3)矿石硫同位素较窄的变化范围和较均一的组成( $\delta^{34}\text{S}$ 值多集中在1.69‰~5.99‰)显示单一深源岩浆硫的特点。矿石铅同位素与燕山期花岗岩铅同位素的相似性表明它们很可能源自相同的源区。含金石英脉石英中流体氢、氧同位素( $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$ 值为3.2‰~5.4‰,  $\delta\text{D}$ 值为-86.3‰~-53.3‰)显示成矿流体的岩浆来源。花岗斑岩锆石U-Pb同位素年龄为(138.9±3.3)Ma,与前人对矿脉中热液云母应用 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 法获得的成矿年龄基本一致。综合分析认为,老湾金矿带金多金属成矿作用与燕山期浅成岩浆作用具有密切的时空关系和成因联系。燕山期花岗质岩浆作用为金多金属成矿提供了流体、硫及成矿金属元素,含矿的岩浆热液沿现存的脆性裂隙构造迁移、沉淀而成矿。

## 参考文献/References

陈良,戴立军,王铁军,罗平,夏国体. 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.

傅昭仁. 1999. 变质岩区构造[M]. 北京:地质出版社.

江思宏,聂凤军,方东会,刘翼飞. 2009. 河南桐柏围山城地区侵入岩年代学与地球化学特征[J]. 地质学报, 83(7): 1011-1019.

蒋少涌,戴宝章,姜耀辉,赵海香,侯明兰. 2009. 胶东和小秦岭两类不同构造环境中的造山型金矿省[J]. 岩石学报, 25(11):

2727-2738.

河南省地质矿产勘查开发局第三地质调查队. 1990. 河南省桐柏县大比例尺金矿成矿预测报告[R].

刘文灿,杜建国,张达,毛晓长. 2003. 北淮阳构造带老湾金矿区构造与成矿作用的关系[J]. 现代地质, 17(1): 8-13.

刘晓春,江博明,李三忠,崔建军,刘鑫,姜玉行,曲玮. 2011. 桐柏高压变质地体对桐柏-大别-苏鲁高压/超高压变质带构造框架和俯冲/折返机制的制约[J]. 岩石学报, 27(4): 1151-1162.

刘翼飞,江思宏,方东会,刘妍. 2008. 河南桐柏老湾花岗岩体锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 27(6): 519-523.

毛景文,谢桂青,张作衡,李晓峰,王义天,张长青,李永峰. 2005. 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, 21(1): 169-188.

毛景文,叶会寿,王瑞廷,代军治,简伟,向君峰,周珂,孟芳. 2009. 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, 28(1): 72-79.

谢巧勤,徐晓春,岳书仓. 2001. 河南桐柏老湾金矿床氢氧同位素地球化学及成矿流体来源[J]. 地质科学, 36(1): 36-42.

徐晓春,岳书仓,潘成荣,谢巧勤. 2001. 河南桐柏老湾花岗岩岩浆动力学与成矿[J]. 岩石学报, 17(2): 245-253.

杨梅珍,曾键年,任爱群,陆建培,潘思东. 2011. 河南罗山县母山铅矿床成矿作用特征及锆石LA-ICP-MS U-Pb同位素年代学[J]. 矿床地质, 30(3): 435-447.

张超,马昌前. 2008. 大别山晚中生代巨量岩浆活动的启动:花岗岩锆石U-Pb年龄和Hf同位素制约[J]. 矿物岩石, 28(4): 71-79.

张冠,李厚民,王成辉,王登红,李立兴. 2008. 河南桐柏老湾金矿白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 29(1): 45-50.

张宏飞,张利,高山,钟增球,凌文黎,张本仁. 1999. 桐柏北部燕山晚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, 28(2): 112-118.

张旗,金惟俊,李承东,王元龙. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄:与大火成岩省的关系[J]. 地学前缘, 16(2): 21-51.

张宗恒,方国松,侯海燕,马宏伟,侯万荣. 2002. 河南桐柏老湾金矿床地质特征及成因探讨[J]. 黄金地质, 8(3): 20-26.

朱志澄. 2003. 构造地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社. 190-203.

庄培仁. 1996. 断裂构造研究[M]. 北京:地质出版社. 50-112.

Adams G J, Both R A and James P. 2007. The Granites gold deposits, Northern Territory, Australia: Evidence for an early syn-tectonic ore genesis[J]. Mineralium. Deposita, 42: 89-105.

Arthur G S. 1988. Strike-slip fault[J]. Geological Society of American Bulletin, 100(11): 1666-1703.

Beaudoin G and Pitre D. 2005. Stable isotope geochemistry of the

- Archean Val-d'Or (Canada) orogenic gold vein field [J]. *Mineralium Deposita*, 40 :59-75.
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. *J. Geophys. Res.*, B77 : 3057-3067.
- Faure M, Lin W, Shu L S, Sun Y and Urs Schr er. 1999. Tectonics of the Dabieshan (E. China) and possible exhumation mechanism of ultra high-pressure rocks [J]. *Terra. Nova.*, 11(6) :251-258.
- Groves D I, Goldfarb R J, Robert F and Hart C J R. 2003. Gold deposits in metamorphic belts : Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance [J]. *Econ. Geol.*, 98 :1-29.
- Hattori K H and Keith J D. 2001. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization : Evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA [J]. *Mineralium Deposita*, 36 :799-806.
- Kajiwara Y and Krouse H R. 1971. Sulfur isotope partitioning in metallic sulfide systems [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8 : 1397-1410.
- Li J W, Li Z K, Zhou M F, Bi S J, Chen L, Qiu H N, Selby D, Cohen B and Zhao X F. 2011. The Cretaceous Yangzhaiyu lode gold deposit, North China craton : A link between Craton Reactivation and Gold Veining [J]. *Econ. Geol.*, 107 :43-79.
- Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, Yu J J and Niu B G. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas-Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits [J]. *Science in China (Series D)* (8) :838-851.
- Miroslav S, David D, Axel M and Reimar S. 2008. Textural evidence of magma decompression, devolatilization and disequilibrium quenching : An example from the Western Kru n hory/Erzgebirge granite pluton [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 155 :93-109.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulphur and carbon [A]. In : Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (2nd ed) [C]. New York : Wiley. 509-567.
- Philip A C. 1997. A review of shallow, ore-related granites : Textures, volatiles, and ore metals [J]. *Journal of Petrology*, 38(12) :1619-1633.
- Saravanan C S and Mishra B. 2009. Uniformity in sulfur isotope composition in the orogenic gold deposits from the Dharwar Craton, southern India [J]. *Mineralium Deposita*, 44 :597-605.
- Xu B, Grove M W C, Zhang L F and L S W. 2000.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology from the northwestern Dabie Shan : Constraints on the evolution of Qinling-Dabie orogenic belt, east-central China [J]. *Tectonophysics*, 322 :279-301.
- Zhai X, Day H W and Hacher B R. 1998. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, central China [J]. *Geology*, 26 :371-374.

<http://www.kcbed.com/>