



山西义兴寨金矿田成矿机理研究: 来自同位素和流体包裹体的证据

彭南海^{1,2}, 邵拥军^{1,2}, 刘忠法^{1,2}, 汪 程^{1,2}

(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)

摘 要: 山西繁峙县义兴寨金矿田位于晋东北地区 NW 向中生代构造岩浆活动带中。以义兴寨、辛庄金矿床为研究对象, 分析本区关键控矿因素、成矿物质来源、成矿流体来源及其演化, 进而开展矿田成矿机理的研究。结果表明: 本区构造具有多期活动的特征, 规模较大的 NW 向区域性张性大断裂为本区的控岩、导矿及配矿构造, 次级 NNW 向压-张扭性断裂裂隙为容矿构造, 不同形式、不同级别的构造是成矿最重要的控制因素。S、Pb、H、O 同位素组成及微量元素地球化学特征表明, 岩浆活动为本区提供了成矿物质及成矿流体。流体包裹体特征及宏观地质特征表明, 成矿过程中成矿流体发生了沸腾作用, 引起 CO₂、H₂S 等的逸失, 含金络合物稳定性遭受破坏, 导致 Au 的大规模沉淀, 流体的沸腾是矿质沉淀的主要机制。

关键词: 义兴寨金矿田; 关键控矿因素; 成矿物质; 成矿流体; 演化; 成矿机理

中图分类号: P611.1

文献标志码: A

山西省繁峙县义兴寨金矿田位于恒山山脉中段南麓^[1-2], 为山西省五台山—恒山重要的金矿床密集区内的典型矿田, 义兴寨金矿床和辛庄金矿床为矿田内规模较大的矿床, 二者均产于太古代绿岩带内, 含金矿体主要以脉状等形式产于 NW、NNW 向断裂内, 同时也显示出与燕山期岩浆活动存在较为密切的成因联系, 具独特的地质特征, 长期以来一直是地质学者研究的热点对象。前人利用主量元素、微量元素、稀土元素、流体包裹体及电子探针分析等手段及测试结果, 对义兴寨矿田的地球化学特征^[3-5]、成矿流体特征^[6-7]、成矿地质条件^[8-10]、黄铁矿及载金矿物矿物学特征^[11-15]、控矿因素及矿床成因^[16-18]、成矿模式^[19]等方面进行了研究, 提出了太古宙地体出露区脉金矿床矿源层的岩浆作用预富集模式, 但对于岩浆是成矿物质的直接提供者, 还是在其活动过程中萃取的地层中的成矿物质, 目前并没有统一认识。纵观前人研究成果, 关于本区成矿机理方面的综合研究明显不足, 尤其是关于金在何种物理化学条件下沉淀、何种因素控制金沉淀等方面的研究成果较少。成矿机理的研究有助于掌握金运移过程中物理化学条件的变化及引起金沉淀的控制因素。本文作者以义兴寨金矿和辛庄金矿为依

托, 在详细的野外地质调研基础上, 重新划分了本区成矿阶段, 查清了关键控矿因素, 结合成矿物质来源、成矿流体来源及演化等方面的研究资料, 对本矿田的成矿机理进行了研究, 丰富了产于华北绿岩带内金矿床的成矿理论, 也有利于指导下一步勘探及深边部找矿工作。

1 矿田地质特征

义兴寨矿田位于山西陆台五台隆起北部义兴寨—伯强构造岩浆活动带上, 是中生代陆内造山带作用集中发育地区, 属于华北陆块金矿成矿域的五台—吕梁成矿带^[20-21]。矿田主要出露太古界地层, 岩性主要为黑云角闪斜长片麻岩, 局部夹薄层状浅粒岩。按主要构造方位, 矿田内断裂构造形迹可划分为 4 种类型, 分别为 NW 向张扭性断裂构造、NNW 向压-张扭性断裂构造以及北东向和北东东向压扭性断裂构造(见图 1), 其中, NW 向深大断裂控制了中生代岩体的产出和构造-岩浆成矿带的展布。矿田出露岩浆岩主要为燕山期中酸性岩浆岩, 燕山期超浅成岩浆侵入活动与

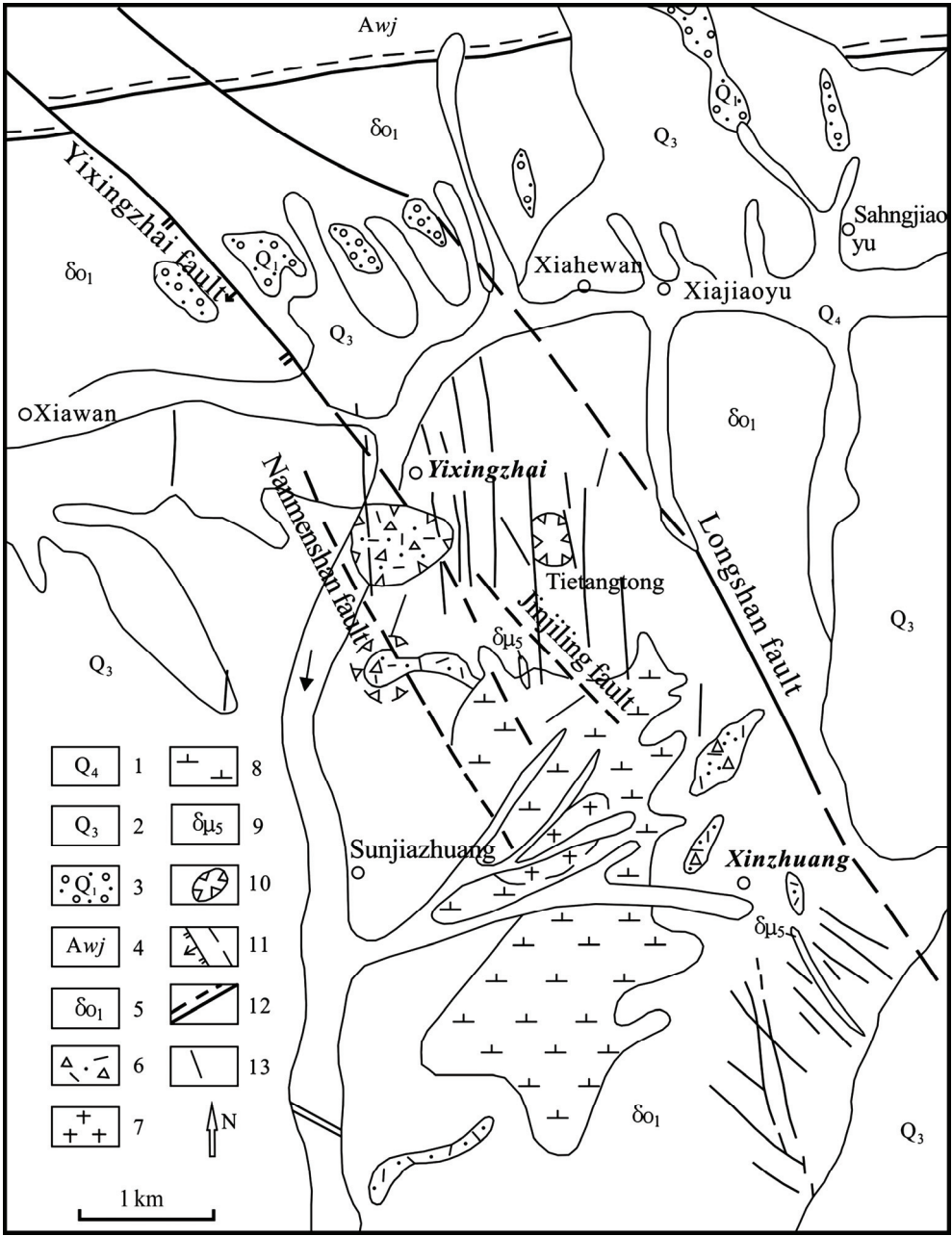


图1 义兴寨金矿田地地质简图^[22]: 1—第四系冲洪积; 2—黄土、亚粘土; 3—砂砾夹粘土层; 4—金岗库组火山沉积硅铁建造; 5—五台期斜长片麻岩夹浅粒岩; 6—超浅成相侵入岩; 7—似斑状花岗岩; 8—孙家庄闪长杂岩体; 9—闪长玢岩脉; 10—隐爆角砾岩筒; 11—实测或推测断层; 12—初脆性剪切带; 13—次级断裂

Fig. 1 Geological sketch map of Yixingzhai gold ore field^[22]: 1—Alluvial-diluvial of Quaternary; 2—Loess, loam; 3—Gravel and clay layer; 4—Volcanic sedimentary ferrosilicon formations of Jingangku group; 5—Plagioclase gneiss and leptite of Wutai stage; 6—Ultra shallow intrusion; 7—Porphyritic granite; 8—Diorite complex body of Sunjiazhuang; 9—Diorite porphyry; 10—Crypto-explosive breccia pipe; 11—Measured or presumed faults; 12—Ductile-brittle shear zones; 13—Secondary faults

成矿关系密切，而且伴随着不同的燕山期岩体的成岩过程，带来了多期的成矿流体活动。测年结果显示^[8]，岩浆的演化和成岩系列从早到晚、从南到北依次为：浅成相中酸性闪长杂岩(包括石英二长闪长岩和石英

闪长岩)—浅成相花岗斑岩—超浅成相或次火山岩相酸性岩和酸性脉岩(长石石英斑岩、石英岩、石英斑岩脉和霏细岩脉等)。矿田内超浅成侵入岩主要为霏细岩脉，具富钾特征，铝饱和度 ACKN 平均值为 1.44，

大于 1.1, 在花岗岩成因系列 $w(\text{Na}_2\text{O})-w(\text{K}_2\text{O})$ 图解(见图 2)上, 岩体投影点落入“S”型花岗岩范围内。岩体富集 Au 等成矿元素, 与成矿关系密切。

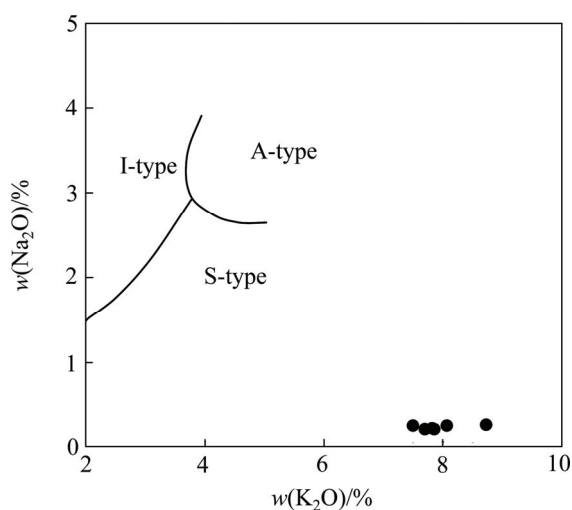


图 2 花岗岩成因系列 $w(\text{Na}_2\text{O})-w(\text{K}_2\text{O})$ 图解(据参考文献 [23])

Fig. 2 $w(\text{Na}_2\text{O})-w(\text{K}_2\text{O})$ diagram of granite from Yixingzhai gold ore field (Modified from Ref. [23])

义兴寨金矿和辛庄金矿是矿田内规模较大的代表性矿床, 二者分别位于孙家庄闪长杂岩体西北部 and 东南部, 矿床地质特征十分相似。矿体均受 NW 向、NNW 向及近 SN 向断裂带控制; 含金矿脉按控矿构造的性质、特征、产状及金矿体的成因类型可分为 3 大类, 分别为受较大规模 NW 向张扭性断裂构造控制产出的构造蚀变岩型金矿和受 NNW 向压-张扭性断裂构造控制产出的多金属硫化物石英脉型金矿以及受隐爆角砾岩筒控制产出的不规则状隐爆角砾岩型金矿。三者在控矿构造、蚀变分带、矿化类型以及产出特征等方面表现出明显的差异, 体现了矿区范围内主要的金矿化类型的本质特征。含金石英脉带走向主要为 NNW355°, 次为 NW325°, 主要分布于河湾火山颈-铁塘碛角砾岩筒间及其附近, NNW 走向的脉带总体呈北行的“入”字型左行雁行排列, 其中 5 号脉带似领头雁, 脉带主要伴生矿产有钼、银、铜、铅、锌、硫等。矿石类型主要以含金多金属硫化物石英脉型和构造蚀变岩型为主, 角砾岩型和矽卡岩型次之。与金矿化关系密切的金属硫化物主要为黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿, 脉石矿物主要为石英和方解石。矿石结构以粒状结构、交代残余结构、交代溶蚀结构、共结边结构、镶边结构以及固溶体分离结构等为主(见图 3)。矿石构造以条带状构造、脉状构造、

角砾状构造、浸染状构造及晶芽状构造为主。与金、银矿化关系密切的围岩蚀变有硅化、绢云母化、黄铁绢英岩化, 次为绿泥石化、碳酸盐化及高岭土化。依据野外宏观观察矿物间的穿插关系及显微镜下鉴定本区成矿作用可以分为石英-黄铜矿-黄铁矿阶段、石英-多金属硫化物和石英-碳酸盐阶段。

2 控矿因素

1) 构造: NW 向义兴寨断裂和龙山断裂控制了本区岩浆活动, 是成矿物质、成矿流体运移的通道, 对岩体就位、成矿物质的聚集起到了明显的控制作用, 控制了矿田、矿床的产出, 是本区主要的控岩、导矿和配矿构造。次级 NNW 向压-张扭性断裂构造为本区最主要的容矿构造, 是成矿物质沉淀的主要场所, 控制着金矿体的空间展布, 同时也控制着含金石英脉带的规模大小(见图 3)。

2) 中酸性岩浆岩: 对本区 8 件霏细岩样品金的含量进行统计, 其平均含量为 11.55×10^{-9} (酸性岩浆岩中金的地壳克拉克值为 1.6×10^{-9})^[19], 说明岩体中成矿元素金的含量普遍较高, 具有提供成矿元素 Au 的巨大潜力。S、Pb、H、O 同位素测试结果(见表 1 和 2)显示, 燕山期岩浆侵入活动与成矿作用关系密切, 岩浆活动带来了大量的成矿物质、成矿流体以及热能, 为矿床的形成提供了物质基础和热动力, 是矿床形成的决定性因素。

3) 赋矿围岩: 华北陆台太古宙绿岩带地层是具有高金丰度背景的最古老原生含金建造, 而且金容易活化^[24]。本区赋矿围岩主要为五台群金刚库组地层黑云角闪斜长片麻岩和石英斜长浅粒岩, 二者金的含量分别为 49.83×10^{-9} 、 9.52×10^{-9} , 具有高的 Au 背景值, 为本区成矿提供了初始矿源层。另外, 赋矿围岩内各种脆性断裂以及层间破碎带, 为成矿流体的运移和成矿物质的沉淀提供有利的容矿空间。

4) 隐爆角砾岩筒: 隐爆角砾岩筒围岩主要为黑云角闪斜长片麻岩, 岩筒主要由矽卡岩化隐爆角砾岩以及残留灰岩组成, 热液蚀变及金属硫化物矿化叠加现象明显。角砾岩筒内裂隙和不规则洞穴极其发育, 是后期成矿元素沉淀良好的容矿空间, 控制着矿田内角砾岩型矿体及矽卡岩型矿体的产出。

5) 接触界面: 主脉带与围岩接触部位以及构造蚀变岩与围岩接触部位岩石通常较为破碎、微裂隙发育, 控制着晚期富金硫化物石英脉的产出。

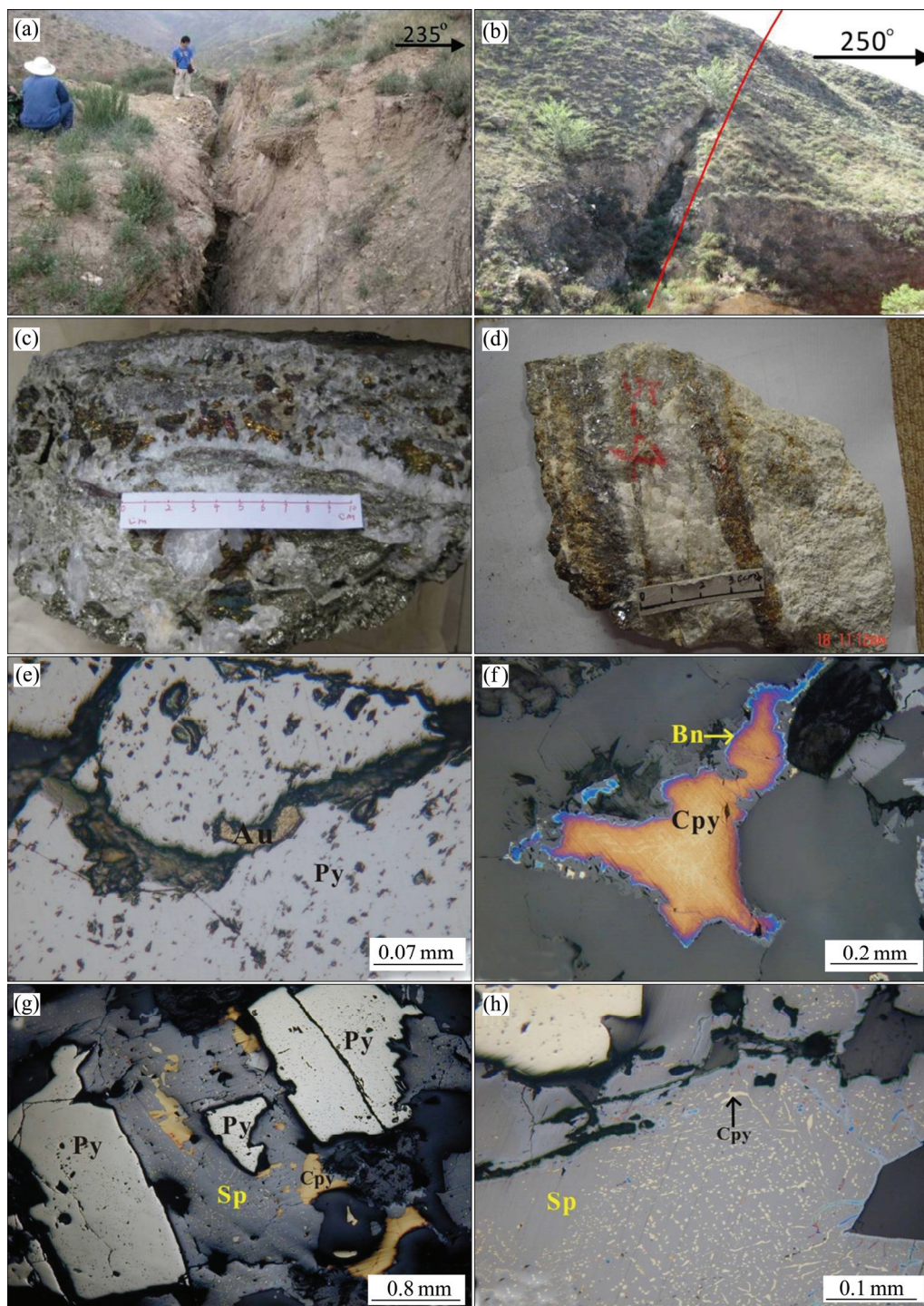


图3 义兴寨矿田典型矿石结构(Au—自然金; Py—黄铁矿; Cpy—黄铜矿; Sp—闪锌矿; Bn—斑铜矿): (a) 6号脉带地表出露形迹; (b) 7号脉带地表出露形迹; (c) 硫化物和石英细脉互成条带; (d) 条带状石英黄铁矿黄铜矿斑铜矿矿石; (e) 黄铁矿中沿裂隙发育的自然金; (f) 蓝铜矿沿斑铜矿边部交代, 呈镶边结构; (g) 黄铜矿—闪锌矿固溶体沿黄铁矿裂隙交代, 呈交代残余结构; (h) 黄铜矿出溶物与闪锌矿呈固溶体分离结构

Fig. 3 Field trace of the ore vein and typical ore fabric of Yixingzhai gold ore field (Au—Native gold; Py—Pyrite; Cpy—Chalcopyrite; Sp—Sphalerite; Bn—bornite): (a) Distribution of No.6 quartz vein belt; (b) Distribution of No.7 quartz vein belt; (c) Band of sulfide and quartz fine veins; (d) Banded structure quartz-pyrite-chalcopyrite- bornite ore; (e) Natural gold in fracture of pyrite; (f) Azurite metasomatized bornite presented frill texture; (g) Solid solution of chalcopyrite-sphalerite metasomatized pyrite presented replacement remnant texture; (h) Exsolution texture of chalcopyrite and sphalerite

3 样品采集及测试方法

本研究选取本区矿石中 6 件金属硫化物(黄铁矿、方铅矿)为测试对象。样品经粉碎、挑选等处理, 选取纯净单矿物(>95%)进行硫、铅同位素分析测试, 测试工作在核工业北京地质研究院分析测试中心分析完成。硫同位素组成由 MAT-251 质谱仪测定, 采用标准为国际标准 VCDT, 分析精度为 $\pm 0.2 \times 10^{-3}$; 铅同位素样品溶解、分离后, 在相对湿度 36%、室温 20 ℃ 的条件下, 根据标准 GB/T 17672—1999《岩石中铅锶钼同位素测定方法》, 利用英国 GV 公司生产的 ISOPROBE-T 热电离质谱仪进行铅同位素比值测量, 测量结果用国际标样 NBS981 进行校正, 测量误差在 2σ 以内。测试结果列于表 1 和表 2。

表 1 义兴寨金矿田矿石硫、铅同位素组成

Table 1 Sulfur and lead isotopic compositions of Yixingzhai gold ore field

Sample number	Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}/10^{-3}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Th/U	μ	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
XZ102	Pyrite	0.9	16.748	15.273	36.646	3.77	9.05	-3.33	-15.39
XZ103-1	Pyrite	3.6	16.939	15.317	36.784	3.73	9.11	-0.45	-11.68
XZ103-2	Galena	0.1	16.716	15.295	36.709	3.82	9.11	-1.89	-13.69
XZ104	Pyrite	2.0	16.882	15.285	36.697	3.72	9.05	-2.54	-14.02
XZ206	Galena	-0.3	16.71	15.288	36.683	3.81	9.09	-2.35	-14.39
715-1-I-STM-B5	Pyrite	1.6	16.744	15.274	36.632	3.76	9.06	-3.26	-15.76

表 2 义兴寨金矿田氢氧同位素组成

Table 2 Hydrogen, Oxygen isotopic compositions of Yixingzhai gold ore field

Sample number	Mineral	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}/10^{-3}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/10^{-3}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{w}}/10^{-3}$	Homogenization temperature/℃	Data source
XZ201	Quartz	-75	9.5	3.60	329.74	This paper
XZ102	Quartz	-103.6	15.1	7.66	285.13	
XZ203	Quartz	-97.6	15.7	5.13	218.70	
XZ204	Quartz	-98.5	15.2	3.91	206.45	
XZ104	Quartz	-98.3	12.7	3.54	245.60	
XZ103	Quartz	-109.4	14.7	7.16	282.74	
92Y73B	Quartz	-66	12.6	5.24	295	Ref. [3]
92Y73C	Quartz	-65	12.4	4.70	290	
92Y35	Quartz	-72	14.1	4.72	250	
92Y35 B	Quartz	-70	12.6	6.50	340	
92Y34	Quartz	-74	15.7	3.63	200	
89W2	Quartz	-70	13.9	-1.87	150	
89W16	Quartz	-56	13.6	-2.17	150	
92Y75	Calcite	-69	13.6	-2.17	150	

对各成矿阶段石英脉中的 6 件石英单矿物进行了氢、氧同位素分析测试, 样品筛分粒度 0.85 μm 左右, 纯度大于 99.5%, 测试工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成, 测试仪器为 MAT251EM 质谱仪。氢同位素误差为 0.2×10^{-3} , 氧同位素误差为 2×10^{-3} , 测试结果见表 2。

本研究中按成矿阶段的先后顺序选择样品磨制测温片, 采用均一法测温。测温工作主要在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进行, 显微测温研究采用英国产 Linkam THMSG600 型地质用冷热台。测温范围为-196~600 ℃; 30~600 ℃ 范围内测试精度为 ± 1 ℃, -196~30 ℃ 范围内, 测试精度为 ± 0.1 ℃。在测温过程中, 温度升降变化速率控制在 5~10 ℃/min, 在接近气相或液相消失前, 温度变化速率控制在 0.1~1 ℃/min 之间。测试结果见表 3。

表 3 义兴寨矿田流体包裹体显微测温结果统计表

Table 3 Microthermometric data of fluid inclusions for Yixingzhai gold ore field

Stage	Sample number	Mineral	Freezing temperature/°C(N)	Homogenization temperature/°C(N)	Salinity(w/%, NaCl _{eq}) (average value)	Density/(g·cm ⁻³)
Quartz-pyrite stage	XZ19	Quartz	-3.2-- -6.1(10)	215.7-360.3(10)	5.28-10.47(7.71)	0.66-0.91
	XZ33	Quartz	-2.5-- -7.8(10)	166.6-267.5(10)	4.20-11.59(7.49)	0.85-0.96
Quartz-polymetallic sulfide stage	XZ27	Quartz	-2.7-- -8.7(10)	176.4-244.4(10)	4.51-12.67(8.70)	0.89-0.95
	XZ103	Quartz	-4.6-- -12.9(12)	216.2-315.8(12)	7.35-17.17(14.00)	0.78-0.98
	D008-4	Quartz	-4.8-- -13.3(10)	248.3-334.2(10)	7.64-17.56(12.70)	0.76-0.92
Carbonate stage	Y002	Quartz	-4.8-- -6.3(6)	152.6-265.2(4)	2.08-9.68(5.20)	0.93-0.94

4 测试结果及讨论

4.1 成矿物质来源

义兴寨金矿田所测的硫化物黄铁矿⁺、方铅矿⁺的 S 同位素组成见表 1，其中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为 $0.9\times 10^{-3}\sim 3.6\times 10^{-3}$ ，极差为 2.5×10^{-3} ，平均值为 1.93×10^{-3} ；方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为 $-0.3\times 10^{-3}\sim 0.1\times 10^{-3}$ ，极差为 0.4×10^{-3} ，平均值为 -0.2×10^{-3} 。金属硫化物 S 同位素组成整体变化较小。矿石中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值(1.93×10^{-3})>方铅矿(-0.98×10^{-3})。大量实验结果表明，当硫同位素达到平衡时，硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值应该按黄铁矿、闪锌矿⁺、黄铜矿⁺、方铅矿⁺、辉锑矿⁺、 S^{2-} 的顺序依次递减^[25-26]，据此判定本区硫同位素分馏可能基本达到了平衡，硫化物的 S 同位素组成可以近似代表成矿溶液总硫的 S 同位素组成。

矿田内矿石硫同位素组成在 $-0.3\times 10^{-3}\sim 3.6\times 10^{-3}$ 之间，均值 1.32×10^{-3} ，与国内岩浆热液矿床的硫同位素值 1.68×10^{-3} 十分接近；在自然界中不同地质体硫同位素组成图中(见图 4)，本区硫同位素组成落入火成岩硫同位素组成范围内，说明本区矿石与岩浆岩可能具有相同的硫源。罗军燕(2009)^[12]通过对本区矿石硫同位素研究也得出了相似结论，认为形成本区岩体和矿石的硫为同一来源，本区成矿与燕山期岩浆活动具有成因联系。本区矿石硫同位素组成同样也落入变质岩同位素组成范围内，因此，也不排除片麻岩地层硫参与成矿的可能性。

同时，从图 5 中可以看出，矿石硫同位素塔式效应较不明显，这反映了大气降水的参与，因为当矿床形成较浅时，大气降水使硫同位素分馏作用和成矿流体与外界的交流作用增强，从而造成硫同位素的塔式效应不明显^[26]。

义兴寨金矿田所测的硫化物黄铁矿⁺、方铅矿⁺的 Pb

同位素组成见表 1。其中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 16.710~16.939，极差为 0.229，平均值为 16.790； $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 15.273~15.317，极差为 0.044，平均值为 15.289； $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 36.632~36.784，极差为 0.152，平均值为 36.692。硫化物 Pb 同位素比值极差均在 1×10^{-3} 以内，变化范围小，指示义兴寨金矿田具有稳定的 Pb 同位素来源。

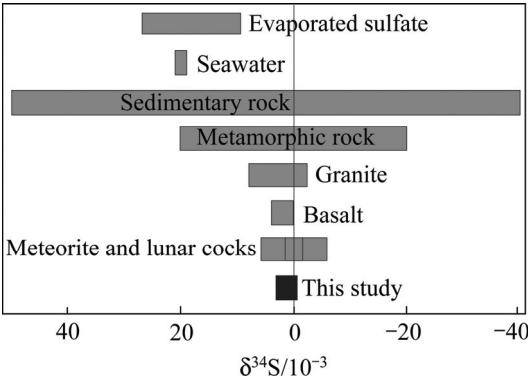


图 4 义兴寨金矿田矿石硫同位素组成范围
Fig. 4 Sulfur isotopic range in nature of Yixingzhai gold ore field

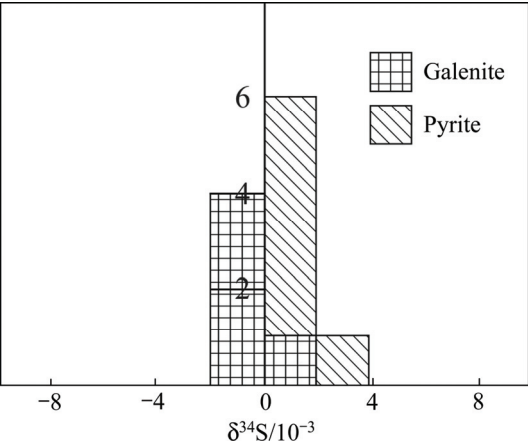


图 5 义兴寨金矿田矿石硫同位素组成分布图
Fig. 5 Distribution map of sulfur isotopic range compositions of Yixingzhai gold ore field

利用 Geokit 程序^[27](路远发, 2004)计算出辛庄金矿床矿石硫化物铅同位素相关参数, 结果见表 2。矿石铅 μ 值介于 9.05~9.11 之间, 高于地幔铅的 μ 值(8~9), 矿石铅的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 比值变化于 3.72~3.81 范围, 与地壳的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (约为 4)基本相当, 这种高 μ 值、 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 比值的铅同位素表明成矿物质可能是来源于地壳, 同时矿石铅的 μ 值均小于 9.58, 反映在流体演化过程混入了低放射性成因的深源铅^[28]。

在矿石铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 铅构造模式图(图 6(a))中, 样品点位于下地壳铅增长线附近; $\Delta\beta$ — $\Delta\gamma$ 成因分类图解(图 6(b))中, 样品均落入深变质铅范围内。铅同位素组成表明, 本区 Pb 主要来源于下地壳。本区与成矿关系密切的岩浆岩为“S”型花岗岩类岩石, 为地壳重熔的产物, 因此, 本区矿石铅与岩浆岩铅来源一致并不矛盾, 矿石 Pb 同位素可能与岩浆岩为同一来源。25 件片麻岩地层的 Au 元素含量统计结果显示, 本区片麻岩地层中 Au 的平均含量为 49.83×10^{-9} , 远大于 4×10^{-9} (黎彤值, 1976)^[30], 片麻岩地层也具有提供成矿物质的能力。

综上所述, 本区成矿物质铅来源较复杂, 岩浆活动和地层均可能参与了成矿。

4.2 成矿流体来源及演化

表 2 中 δD 为石英中包裹体直接测定的水值, $\delta^{18}\text{O}_w$ 是根据 CLAYTON^[31]有关石英—水体系中氧同位素分

馏方程: $1000\ln \alpha_{q-w} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.4$ 以及对应的包裹体均一温度计算而来。从表 2 中可见, 成矿早、中期石英的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 值介于 3.54×10^{-3} ~ 7.66×10^{-3} 之间, 靠近 Sheppard(1986)界定的岩浆水氧同位素组成 (5.5×10^{-3} ~ 9.5×10^{-3})^[32]; 成矿晚期石英、方解石的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 值为 -2.175×10^{-3} ~ -1.87×10^{-3} , 具有大气降水的氧同位素组成特征, 反应随着成矿作用的进行混入的大气降水成分明显增多。在 δD — $\delta^{18}\text{O}_w$ 图解中(见图 7)中, 样品的投影点都位于岩浆水与大气降水之间, 靠近岩浆水, 但有向大气降水线靠近的趋势; 在自然界氧同位素组成分布图上(见图 8), 本区氧同位素组成与花岗岩和大气降水重叠, 表明本区氧同位素组成与花岗岩和大气降水的氧同位素组成有密切的成因联系。因此, 本区氢、氧同位素组成表明, 本区成矿流体来源于岩浆水, 成矿后期具有大气降水与岩浆水混合特点。

成矿流体的 Na^+/K^+ 及 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比值可以作为判别流体来源的标志^[33-35], 一般情况下, 岩浆热液 Na^+/K^+ 小于 1.00^[34], 气相成分 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比值小于 0.50^[35]。由测试结果计算得知, 本区各成矿阶段石英—黄铜—黄铁矿阶段以及石英—多金属硫化物阶段成矿流体中的 Na^+/K^+ 比值介于 0.40~0.61, 平均值为 0.51, 均小于 1.00, 具岩浆热液特征, 说明成矿流体主要来源于岩浆水; 碳酸盐阶段成矿流体中的 $\text{Na}^+/\text{K}^+ = 1.31$, 大于 1.00。义兴寨金矿田主成矿阶段气相成分 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$

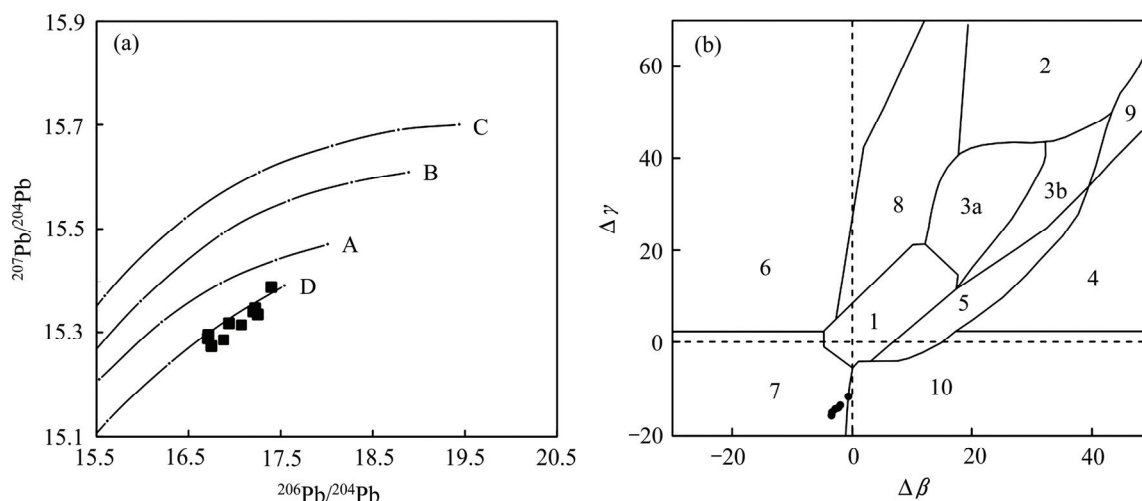


图 6 义兴寨金矿田铅同位素 $\Delta\beta$ — $\Delta\gamma$ 成因分类图解^[29]: A—地幔(Mantle); B—造山带(Orogene); C—上地壳(Upper Crust); D—下地壳(Lower Crust). 1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用; 3b—沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

Fig. 6 $\Delta\beta$ — $\Delta\gamma$ diagram of genetic classification of ores of Yixingzhai gold ore field^[29]: A—Mantle; B—Orogene; C—Upper Crust; D—Lower Crust. 1—Mantle-derived; 2—Upper crust; 3—Mantle and upper crust mixed subduction zone (3a—Magmatism, 3b—Sedimentation); 4—Chemistry sediments; 5—Hydrothermal sediments on seafloor; 6—Middle to deep metamorphism; 7—Deep metamorphism lower crust; 8—Orogenic belt; 9—Upper crust of old shale; 10—Retrogressive metamorphism

比值为 0.09~0.28, 均小于 0.50; 而晚期碳酸盐阶段气相成分 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比值为 1.49, 远大于 0.50, 指示成矿晚期混有大量的外界流体。由以上分析可知, 义兴寨金矿田成矿流体来源于岩浆水, 随着成矿作用的进行, 到成矿晚期混有大量的外界流体, 转变为混合水。

流体包裹体测温结果显示(见表 3), 石英-黄铜矿-黄铁矿阶段成矿流体温度平均值为 285 $^{\circ}\text{C}$ 、石英-多金属硫化物阶段成矿流体温度平均值为 238 $^{\circ}\text{C}$ 、碳

酸盐阶段成矿流体温度平均值为 187 $^{\circ}\text{C}$, 随着成矿作用的进行成矿温度呈下降趋势。但盐度具有先升高后降低的趋势, 石英-多金属硫化物阶段盐度最高, 该阶段盐度的升高可能是流体沸腾作用引起的。本区引爆角砾岩筒及角砾岩型矿石发育是流体发生沸腾的主要表征。隐爆造成的急剧减压沸腾, 可以促使残留液相的盐度进一步升高^[36]。

5 成矿机理

对该矿田不同成矿阶段的脉石矿物进行了流体包裹体液相成分进行了测试(见表 4), 包裹体液相成分 $\text{Na}^+/\text{K}^+ < 1$, 说明成矿流体中富含 K^+ , 与侵入体中 $\text{Na}_2\text{O} < \text{K}_2\text{O}$, 岩石为钾质岩石的特征一致, 揭示了成矿流体与岩浆的内在联系; 本区阴离子 SO_4^{2-} 含量较高, 导致 SO_4^{2-} 含量较高的原因可能是由于早期高温岩浆水混入了硫酸盐型热卤水所引起的, 也可能是流体在演化过程中发生了氧化作用。

流体包裹体气相成分富含 CO_2 , 但 Au 与 CO_2 之间的化学键并不强, 因此, CO_2 搬运 Au 的能力并不强, 但 CO_2 具有调节成矿流体 pH 值的作用^[41], 可能影响着 H_2S 的溶解度, 在地壳深部, 富含 CO_2 的流体也相对富含 H_2S ^[42]。 Au 与 H_2S 的化学键较强, 可形成 AuHS 或 AuHS_2 络合物^[43], 因此, 富 CO_2 的成矿流体具有较强的吸金能力。

本区经历了多期构造运动, 燕山期以断裂构造为主导形式, 形成了区域性的切割较深的 NW 向深大断裂, 早期成矿流体经历构造活动, 特别是断裂构造活动, 使压力骤然释放, 导致成矿流体沸腾而引起二氧化碳等挥发分散失, 同时也引起本区控制角砾岩型矿体及矽卡岩型矿体的角砾岩筒的形成。

早期中高温、中等盐度成矿流体在断裂裂隙内运移的过程中与围岩发生热能的传递, 温度降低, 随着温度的降低, 反应式(1)向右发生反应生成 H_2S ^[44], 形成 AuHS_2 络合物, 引起 Au 的溶解度增大。随着成矿流体向上运移, 流体温度及压力急剧降低, 使原始均一流体发生沸腾作用, 引起 CO_2 、 H_2S 气体的挥发逸失, 导致成矿流体 pH 值升高, 温度降低, 使承载 Au 的络合物的稳定性遭受破坏, Au 溶解度也大大降低, 引起 Au 的沉淀。 CO_2 的减少引起反应式(2)的向左进行, 消耗了大量 H^+ , 产生了大量的 S^{2-} , 这就促进了 S^{2-} 与 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 等金属阳离子的结合, 生成黄铜矿、黄铁矿、方铅矿和闪锌矿等金属硫化物。随着成矿过程的进行, 外界流体混入成分显著

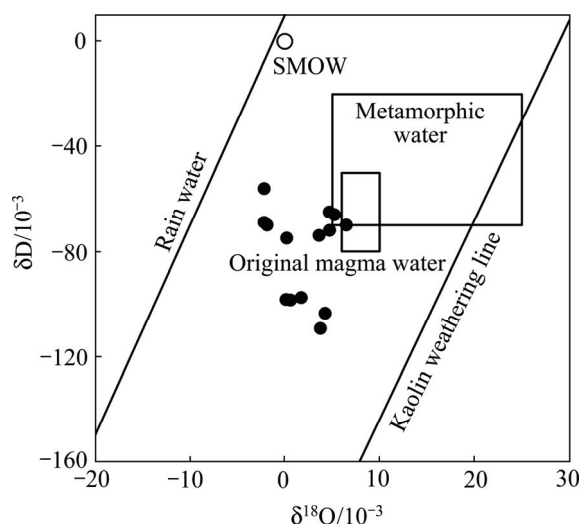


图 7 义兴寨金矿田石英 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_w$ 图解

Fig. 7 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_w$ diagram of ore-forming fluids of Yixingzhai gold ore field

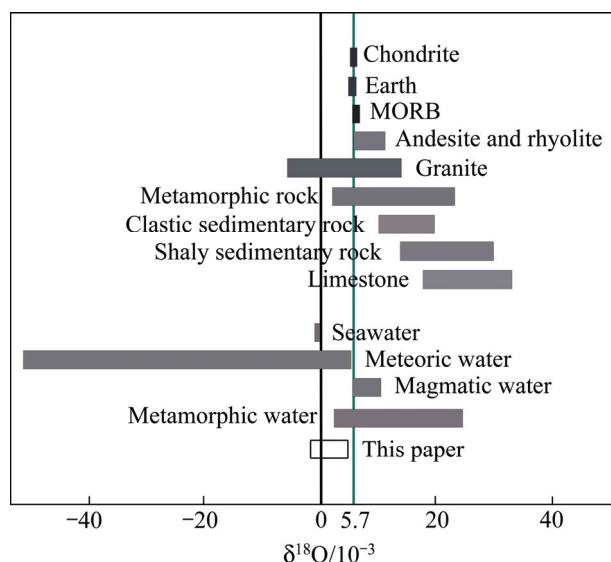
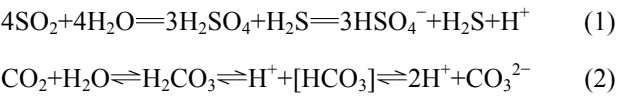


图 8 义兴寨金矿田氧同位素组成分布图(数据引自本文和文献[37-40])

Fig. 8 Distribution map of hydrogen, oxygen isotopic compositions of Yixingzhai gold ore field (Dates from this paper and references [37-40])

增加, 成矿流体的温度、盐度进一步降低, 金属矿物络合程度较低, 以生成大量方解石、石英和金属硫化物为主, 成矿趋于结束。由此可见, 成矿流体的沸腾作用是导致金沉淀的重要因素。



大量热液蚀变矿物卸载完成以后, 晚期残留的成矿流体分异完全, 形成了含金石英熔融体, 一部分沿

隐爆角砾岩筒边部的环状裂隙、放射状裂隙和内部发育的不规则状虚脱空间就位, 形成受隐爆角砾岩筒控制产出的不规则状隐爆角砾岩型和矽卡岩型金矿体, 其余大部分含金石英熔融体沿岩浆热力接触带体系范围内有利的构造裂隙充填就位, 形成了延伸较远、相对较窄的受 NNW 向压-张扭性断裂构造控制产出的多金属硫化物石英脉型金矿体和延伸较短、相对较宽、局部富集的 NW 向张扭性断裂构造控制产出的构造蚀变岩型金矿体。其成矿机理示意图如图 9 所示。

表 4 义兴寨金矿田流体包裹体气液相成分分析结果

Table 4 Gas and liquid composition of fluid inclusions in Yixingzhai gold field

Composition		XZ102	XZ103	XZ104	XZ201	XZ203	XZ204	D004-1
		Quartz	Quartz	Quartz	Quartz	Quartz	Quartz	Calcite
Liquid phase/ 10^{-6}	F ⁻	0.031	0.023	0.059	0.053	0.081	0.074	0.019
	Cl ⁻	0.171	0.113	0.624	0.314	0.715	0.548	0.152
	SO ₄ ²⁻	0.792	0.918	2.137	1.253	1.407	1.294	1.891
	Na ⁺	1.047	1.132	0.821	0.593	0.924	0.721	1.256
	K ⁺	1.924	2.013	1.785	1.305	1.513	1.800	0.961
	Mg ²⁺	1.015	1.241	1.973	2.141	2.901	1.924	—
	Ca ²⁺	4.209	4.398	5.129	5.814	6.230	5.096	6.723
Gas phase/ 10^{-6}	H ₂	1.654	1.986	1.917	2.974	1.538	1.247	0.470
	CH ₄	23.713	12.879	20.670	34.113	25.135	20.635	18.125
	CO ₂	309.582	105.702	336.433	263.742	412.693	307.671	166.526
	C ₂ H ₂	—	—	—	5.085	3.954	3.005	—
	C ₂ H ₆	—	—	—	7.149	4.192	3.192	—
	H ₂ O	1110	1144	2606	1339	1489	1692	112
Characteristic value	Na ⁺ /K ⁺	0.54	0.56	0.46	0.45	0.61	0.40	1.31
	CO ₂ /H ₂ O	0.28	0.09	0.13	0.20	0.28	0.18	1.49

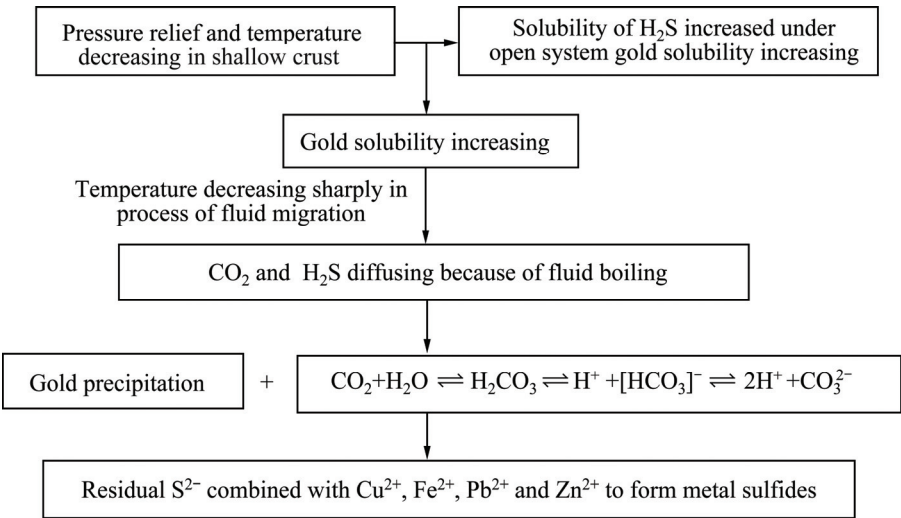


图 9 义兴寨金矿田成矿机理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of metallogenetic mechanism

6 结论

1) 燕山期多期次岩浆活动为本区带来了大量的成矿物质和成矿流体,是成矿的首要因素。不同形式、不同级别的构造控制了本区岩浆活动、矿田展布、矿床定位及矿体的形态和规模,是矿田内成矿的重要控制因素。较大规模的NW向张性断裂和次一级的NNW向压-张扭性断裂裂隙控制了矿床和主要矿体的形成和定位,是最主要的控岩控矿构造。

2) 由S、Pb同位素和微量元素地球化学特征分析可知,本区成矿物质具有多源性,燕山期岩浆活动带来了主要成矿物质,太古代片麻岩地层提供了部分成矿物质。

3) H-O同位素组成表明,本区成矿流体主要来源于岩浆流体,后期有大气降水的参与。石英-多金属硫化物阶段由于成矿流体的沸腾,导致成矿流体温度和盐度呈先升高后降低的趋势,密度呈增加的趋势。

4) 岩浆分异的原始均一成矿流体运移至前地表时,由于压力和温度的快速降低,引起了成矿流体的沸腾作用,CO₂、H₂S等挥发分逸失,成矿流体pH值升高,使富含成矿元素的络合物稳定性降低,导致金属硫化物和金的大规模沉淀。

REFERENCES

- [1] 叶 荣, 赵伦山, 沈镛立, 王振海, 诸惠燕. 义兴寨金矿成矿作用地质地球化学动力学研究[J]. 现代地质, 1997, 11(1): 58-65.
YE Rong, ZHAO Lun-shan, SHEN Yong-li, WANG Zhen-hai, ZHU Hui-yan. Study on geological-geochemical dynamics of ore-formation of Yixingzhai gold deposit[J]. Geosciences, 1997, 11(1): 58-65.
- [2] 叶 荣, 涂光焱, 赵伦山, 沈镛立, 罗 丽. 山西义兴寨金矿床金矿物颗粒的产出及其成矿动力学意义[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 278-282.
YE Rong, TU Guang-zhi, ZHAO Lun-shan, SHEN Yong-li, LUO Li. Modes of occurrence of Au-mineral particles in Yixingzhai Gold Deposit and their metallogenic dynamic significance[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(3): 278-282.
- [3] 李双保, 李俊建. 山西恒山义兴寨脉金矿田成矿地球化学特征[J]. 前寒武纪研究进展, 1997, 20(2): 1-20.
LI Shuang-bao, Li Jun-jian. Characteristic of metallogenic geochemistry of Yixingzhai gold mine field, Hengshan Mt., Shanxi Province[J]. Progress in Precambrian Research, 1997, 20(2): 1-20.
- [4] 叶 荣, 赵伦山, 沈镛立. 山西义兴寨金矿床地球化学研究[J]. 现代地质, 1999, 13(4): 415-418.
YE Rong, ZHAO Lun-shan, SHEN Yong-li. Geochemistry features of Yixingzhai gold deposit in Shanxi Province[J]. Geoscience, 1999, 13(4): 415-418.
- [5] 赵晓霞, 刘忠法, 张普斌, 刘清泉, 张 宇, 张建国. 山西辛庄金矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(11): 4374-4380.
ZHAO Xiao-xia, LIU Zhong-fa, ZHANG Pu-bin, LIU Qing-quan, ZHANG Yu, ZHANG Jian-guo. Geological and geochemical characteristics and cause analysis of Xinzhuang gold deposit, Shanxi Province[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(11): 4374-4380.
- [6] 杨红英, 王建国, 周 军. 山西义兴寨金矿流体包裹体的特征及意义[J]. 贵金属地质, 1995, 4(3): 177-183.
YANG Hong-ying, WANG Jian-guo, ZHOU Jun. characteristics and significance of fluid inclusion of Yixingzhai, Shanxi[J]. Geological Precious Metals, 1995, 4(3): 177-183.
- [7] 路英川, 葛良胜, 申 维, 王治华, 郭晓东, 王 梁, 周传芳. 山西省义兴寨金矿流体包裹体特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(1): 83-93.
LU Ying-chuan, GE Liang-sheng, SHEN Wei, WANG Zhi-hua, GUO Xiao-dong, WANG Liang, ZHOU Chuan-fang. Feature of fluid inclusion and its significance in Yixingzhai gold deposits, Shanxi Province[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1995, 4(3): 176-183.
- [8] 景淑慧. 山西省繁峙县义兴寨金矿床成矿地质条件及成矿规律的研究[M]. 太原: 山西省地质矿产局, 1985: 1-15.
JING Shu-hui. Study of metallogenic geological conditions and metallogenic regularity of Yixingzhai gold ore deposit in Fanshi County, Shanxi Province[M]. Taiyuan: Shanxi Provincial Bureau of Geology and mineral resources, 1985: 1-15.
- [9] 景淑慧. 山西省繁峙县义兴寨金矿成矿条件及成矿物质来源讨论[C]// 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所文集, 1986, 13: 126-134.
JING Shu-hui. On minerogenetic conditions and ore source of Yixingzhai gold ore deposit in Fanshi County, Shanxi Province[C]// Chinese Academy of Geological Sciences, Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, 1986, 13: 126-134.
- [10] 景淑慧. 繁峙义兴寨金矿的成矿条件[J]. 山西地质, 1992, 7(1): 51-64.
JING Shu-hui. The mineralization conditions of Fanshi Yixingzhai gold deposit[J]. Shanxi Geology, 1992, 7(1): 51-64.
- [11] 姜绍飞, 杜振国, 刘之洋. 义兴寨金矿黄铁矿的标型特征及成因意义[J]. 矿产与地质, 1995, 3(9): 203-207.
JIANG Shao-fei, DU Zhen-guo, LIU Zhi-yang. The typomorphic

- characteristic and causes significance of pyrite on Yixingzhai gold deposit[J]. *Mineral Products and Geology*, 1995, 3(9): 203–207.
- [12] 罗军燕. 山西省繁峙县义兴寨金矿床成因矿物学研究及成矿预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009: 1–138.
- LUO Jun-yan. Genetic mineralogy and ore prediction of Yixingzhai gold deposit, Fanshi County, Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009: 1–138.
- [13] 李成禄, 李胜荣, 罗军燕, 张聚全, 宋继叶. 山西繁峙义兴寨金矿床金矿物特征研究[J]. *中国地质*, 2011, 38(1): 119–128.
- LI Cheng-lu, LI Sheng-rong, LUO Jun-yan, ZHANG Ju-quan, SONG Ji-ye. Characteristics of gold-bearing minerals in the Yixingzhai gold deposit, Fanshi County, Shanxi Province[J]. *Geology in China*, 2011, 38(1): 119–128.
- [14] 李成禄, 李胜荣, 曲 晖, 罗军燕, 张聚全, 宋继叶. 山西繁峙义兴寨金矿黄铁矿成因矿物学特征及稳定同位素研究[J]. *矿物岩石*, 2013, 33(1): 1–7.
- LI Cheng-lu, LI Sheng-rong, QU Hui, LUO Jun-yan, ZHANG Ju-quan, SONG Ji-ye. Pyrite typomorphic characteristics and stable isotope studies of Yixingzhai gold deposit in Fanshi County Shanxi Province, China[J]. *J Mineral Petrol*, 2013, 33(1): 1–7.
- [15] 王启旺, 孙立新, 周安朝, 张爱绒. 义兴寨金矿床黄铁矿矿物学特征及其含金性研究[J]. *太原理工大学学报*, 2013, 44(1): 47–50.
- WANG Qi-wang, SUN Li-xin, ZHOU An-chao, ZHANG Ai-rong. Research on the mineralogical characteristics and gold-bearing propertical of the pyrite in Yixingzhai gold oredeposit[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2013, 44(1): 47–50.
- [16] 郑 镐, 何志军, 刘悟辉, 刘忠法, 刘清泉, 郑明泓, 徐 桃. 义兴寨金矿床地质特征及成矿控制因素分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2009, 40(3): 833–838.
- ZHENG Di, HE Zhi-jun, LIU Wu-hui, LIU Zhong-fa, LIU Qing-quan, ZHENG Ming-hong, XU Tao. Analysis on geological characteristics and ore-controlling factors of Yixingzhai gold ore deposit[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2009, 40(3): 833–838.
- [17] 贾永山, 戈全厚. 山西省义兴寨金矿床地质特征及成因探讨[J]. *黄金*, 1994, 15(10): 12–16.
- JIA Yong-shan, GE Quan-hou. Geologic feature and genesis approach of Yixingzhai gold deposit of Shanxi Province[J]. *Gold*, 1994, 15(10): 12–16.
- [18] 刘清泉. 山西辛庄金矿床地质特征、矿床成因及找矿预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 1–98.
- Liu Qing-quan. Research on geological features, genesis and prognosis of the Xinzhuang gold deposit in Shanxi Province[D]. Changsha: Central South University, 2011: 1–98.
- [19] 赵晓霞, 刘忠法, 戴塔根, 刘清泉, 张 宇. 山西辛庄金矿床成矿模式分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(5): 1948–1954.
- ZHAO Xiao-xia, LIU Zhong-fa, DAI Ta-gen, LIU Qing-quan, ZHANG Yu. Metallogenic model of Xinzhuang gold deposit, Shanxi province[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(5): 1948–1954.
- [20] 邵拥军, 李永峰, 张贻舟, 胡荣国. 山西省义兴寨金矿床定位规律及找矿方向[J]. *矿床地质*, 2006, 25(Sup): 479–482.
- SHAO Yong-jun, LI Yong-feng, ZHANG Yiz-hou, HU Rong-guo. The locating regularity and prospecting target for Yixingzhai gold deposit, Shanxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(sup): 479–482.
- [21] 李成禄. 山西省繁峙县义兴寨石英脉型金矿成因矿物研究与深部预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009: 1–91.
- LI Cheng-lu. Genetic mineralogy and depth prospecting prediction of Yixingzhai quartz vein type gold deposit in Fanshi County, Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009: 1–91.
- [22] 陈 平, 陈俊明. 山西主要成矿区带成矿系列及成矿模式[M]. 山西科学出版社, 1996: 143–148.
- CHEN Ping, CHEN Jun-ming. Metallogenic model of the main metallogenic belt in Shanxi[M]. Shanxi Science and Technology Publishing House, 1996: 143–148.
- [23] COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, CHAPPELL B W. Nature and origin of a type granites with particular reference to Southeastern Australia[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80(2): 189–200.
- [24] 沈保丰, 骆 辉. 华北陆台太古宙绿岩带金矿的成矿特征[J]. *华北地质矿产杂志*, 1994, 9(1): 87–96.
- SHEN Bao-feng, LUO Hui. The metallogenetic characteristics of gold deposits of the Archean greenstone belts in North China platform[J]. *Jour Geol and Min Res North China*, 1994, 9(1): 87–96.
- [25] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1–316.
- ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1–316.
- [26] 胡荣国. 青海省果洛龙洼金矿地质地球化学特征及矿床成因研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 1–85.
- HU Rong-guo. Research on geological-geochemical characteristics and genesis of the Guolulongwa gold deposit in Qinghai Province[D]. Changsha: Central South University, 2011: 1–98.
- [27] 路远发. GeoKit: 一个用于 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459–464.
- LU Yuanfa. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft

- Excel[J]. *Geochemica*, 2004, 33(5): 459–464.
- [28] 彭建堂, 胡瑞忠, 苏文超. 扬子地块南缘锑矿床中矿石铅的组成及其地质意义[J]. *地质地球化学*, 2000, 28(4): 43–47.
- PENG Jian-tang, HU Rui-zhong, SU Wen-chao. Lead isotopic composition of ores in the Antimony deposits at the southern margin of the Yangtze massif and its geological implications [J]. *Geology-Geochemistry*, 2000, 28(4): 43–47.
- [29] 朱炳泉, 李献华, 戴檀谟. 地球科学中同位素体系理论与应用—兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1–330.
- ZHU Bing-quan, LI Xian-hua, DAI Tong-mo. System theory application of isotopes in the earth sciences: On the Chinese mainland crust-mantle evolution[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1–330.
- [30] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学*, 1976(3): 167–174.
- LI Tong. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. *Geochemica*, 1976(3): 167–174.
- [31] CLAYTON R N, O'NEIL J R, MAYEDA T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77: 3057–3067.
- [32] SHEPPARD S M F. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. *Rev in Mineral*, 1986: 165–183.
- [33] 卢焕章, 李秉伦. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 12–46.
- LU Huan-zhang, LI Bing-lun. The inclusion geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 12–46.
- [34] WHITE D E. Diverse origins of hydrothermal ore fluids[J]. *Economic Geology*, 1974, 69: 954–973.
- [35] 林文通. 热液的温度、压力和化学组份对矿床成矿作用的影响[C]// 金银矿产选集. 长春: 冶金工业部长春黄金研究所, 1996, 16: 18–34.
- LIN Wen-tong. The effect of temperature, pressure and chemical composition of the hydrothermal solution on the mineralization of the deposit[C]// *Gold and Silver Mineral Anthology*. Changchun: Changchun Gold Research Institute of Ministry of metallurgical industry, 1996, 16: 18–34.
- [36] 肖建新, 顾连兴, 倪培. 安徽铜陵狮子山铜-金矿床流体多次沸腾及其与成矿的关系[J]. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(3): 199–206.
- XIAO Jian-xin, GU Lian-xing, NI Pei. Multi-episode fluid boiling in the Shizishan copper-gold deposit at Tongling, Anhui Province: Its bearing on ore-formation[J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(3): 199–206.
- [37] TAYLOR H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposit[J]. *Econ Geol*, 1974, 69: 843–883.
- [38] ONUMA N, CLAYTON R N, MAYEDA T K. Oxygen isotope cosmo thermometer[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1972, 36: 169–188.
- [39] SHEPPARD S M F. The Cornubian Batholith, SW England: D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ studies of kaolinite and other alteration minerals[J]. *J Geol Soc Lond*, 1977, 133: 573–591.
- [40] GRAHAM C M, HARMON R S. Stable isotope evidence on the nature of crust-mantle interactions[C]// HAWKESWORTH C J, NORRIS M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich: Shiva, 1983: 20–45.
- [41] PHILLIPS G N, EVANS K A. Role of CO_2 in the formation of gold deposits[J]. *Nature*, 2004, 429: 860–863.
- [42] CHI G, LIU Y, DUBE B. Relationship between CO_2 -dominated fluids, hydrothermal alterations, and gold mineralization in the Red Lake greenstone belt, Canada[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24: 504–516.
- [43] 卢焕章. CO_2 流体与金矿化: 流体包裹体的证据[J]. *地球化学*, 2008, 37(4): 321–328.
- LU Huan-zhang. Role of CO_2 fluid in the formation of gold deposits: Fluid inclusion evidences[J]. *Geochemica*, 2008, 37(4): 321–328.
- [44] 刘学龙, 李文昌, 尹光侯. 云南格咱岛弧斑岩-矽卡岩铜、钼(金)矿床成矿系统[J]. *中国地质*, 2012, 39(4): 1007–1022.
- LIU Xue-long, LI Wen-chang, YIN Guang-hou. The metallogenic system of porphyry-skarn type Cu, Mo(Au) polymetallic deposits in Geza island arc of Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 2012, 39(4): 1007–1022.

Metallogenic mechanism of Yixingzhai gold ore field in Fanshi county, Shanxi province: Evidences from isotopes and fluid inclusion

PENG Nan-hai^{1,2}, SHAO Yong-jun^{1,2}, LIU Zhong-fa^{1,2}, WANG Cheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor

Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geoscience and InfoPhysics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Yixingzhai gold ore field is located in NW-trending Mesozoic tectonic magmatic belt of the northeast region in Shanxi province. Key ore control factors, ore-forming materials, ore-forming fluid source and its evolution were studied relied on Yixingzhai and Xizhuang gold deposits. Based on these, the metallogenic mechanism of this gold ore field was studied. The results show that structures in this area have multi-phase activities characteristics, the regional NW-trending tensional fractures are the ore-transmitting structure, the secondary NW-trending tensional fractures are the ore distribution structure and the NNW-trending compressive-tensional-shearing fractures are the ore hosting structure. Different forms and different levels of structures are the most important controlling factors of mineralization. Isotopic compositions of S, Pb, H, O and trace element geochemical characteristics show that the magmatic activity of Yanshanian is the first factor of mineralization, providing massive ore forming material and ore forming fluid. The characteristics of fluid inclusions and macroscopic geological features indicate that the ore-forming fluid occurred boiling in the major metallogenic stage, which caused the loss of CO₂, H₂S and so on, and the stability of the gold complex was destroyed, which resulted in the large-scale precipitation of Au. The boiling action of ore-forming fluid is the main mechanism of ore material precipitation.

Key words: Yixingzhai gold ore field; key ore control factor; ore-forming material; ore-forming fluid; evolution; metallogenic mechanism

Foundation item: Project supported by the Innovation-driven Plan in Central South University, China

Received date: 2016-02-24; **Accepted date:** 2016-06-20

Corresponding author: LIU Zhong-fa; Tel: +86-13574886497; E-mail: liuzf61521@csu.edu.cn

(编辑 何学锋)