

安徽东溪浅成低温热液型金矿床成矿流体 特征和形成时代

——流体包裹体和赋矿安山岩 U-Pb 年代学约束

朱 江^{1,2}, 彭三国^{1,2}, 彭练红^{1,2}, 雷天赐^{1,2}, 龚银杰^{1,2}, 刘兴平³

(1. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心,
湖北 武汉 430205; 3. 湖北省地质局 第六地质大队, 湖北 孝感 432000)

摘 要: 安徽东溪金矿床位于桐柏-大别造山带北淮阳构造带的中生代晓天火山盆地中, 是桐柏-大别成矿带具有代表性的浅成低温热液金矿床。金矿体以含金方解石脉和方解石-石英脉形式产出, 受 NW 向断裂控制, 赋矿围岩为毛坦厂组安山质火山岩。该矿床热液成矿过程由早到晚可分为粗晶方解石阶段和方解石-石英阶段。早、晚阶段方解石中流体包裹体十分发育, 主要类型有纯液相、纯气相和富液二相流体包裹体。早阶段流体包裹体均一温度范围为 128~172℃, 冰点温度介于 -0.7~+23.4℃ 之间, 盐度为 0.35%~0.92%; 晚阶段流体包裹体均一温度范围为 105~160℃, 冰点温度介于 -0.5~+9.1℃ 之间, 盐度为 0.18%~0.52%。成矿流体从早阶段演化到晚阶段, 温度和盐度具有小幅度的降低趋势。岩浆热液和加热循环的大气降水的混合可能是引起金属元素富集、沉淀的主要机制, 该矿床是地表浅部热液对流系统的产物。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素研究表明, 赋矿安山岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $126.7 \pm 1.4 \text{ Ma}$ (1σ , $\text{MSWD}=0.95$), 代表了其火山作用时限。结合矿床地质特征认为, 东溪金矿床成矿时间可能与安山岩喷发时限基本一致。该矿床形成于早白垩世陆壳强烈伸展和岩石圈地幔上涌的动力学背景。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; 流体包裹体; 东溪金矿床; 早白垩世; 大别山地区

中图分类号: P597^{+.3}; P588.14⁺⁴

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0593-12

Geology, fluid inclusion characteristics, and U-Pb age of the Dongxi epithermal gold deposit, Anhui Province

ZHU Jiang^{1,2}, PENG San-guo^{1,2}, PENG Lian-hong^{1,2}, LEI Tian-ci^{1,2}, GONG Yin-jie^{1,2}
and LIU Xing-ping³

(1. Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 3. No. 6 Geological Party, Hubei Geological Bureau, Xiaogan 432000, China)

Abstract: The Dongxi gold deposit is an important epithermal gold deposit in the Tongbai-Dabie orogenic belt, central China, with reserve of >5 tons(t) Au. It belongs to a suite of low-sulfidation epithermal systems associated with the volcanism. Gold mineralization is hosted in the Early Cretaceous andesite, and consists primarily of auriferous calcite-quartz veins that are confined to the NW-trending faults. The mineralization process is composed of two stages, i. e., coarse grained calcite veins (Stage I) and quartz + calcite veins (Stage II). Primary fluid inclusions in calcite include three types: monophase vapor, monophase liquid, and two-phase liquid-rich

收稿日期: 2016-11-18; 接受日期: 2017-04-20

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011220515, 121201009000150013)

作者简介: 朱 江(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 从事矿床学、矿产普查与勘探研究, E-mail: zhujiang.01@foxmail.com。

inclusions. The early-stage fluid inclusions have low homogenization temperature ($128\sim 172^{\circ}\text{C}$) and low salinity (0.35% to 0.92%), while the late-stage fluid inclusions have homogenization temperatures of $105\sim 160^{\circ}\text{C}$ and salinities of $0.18\%\sim 0.92\%$. The temperatures and salinities of ore-forming fluids tend to decrease progressively. The ore-forming fluid seems to be the mixture of the magmatic and meteoric components. The crystallization age of the ore-bearing andesite has been fixed at $126.7\pm 1.4\text{ Ma}$ (1σ , $\text{MSWD}=0.95$) according to U-Pb analysis of zircons by LA-ICP-MS. The Dongxi deposit might have been formed in a lithospheric extension and mantle upwelling setting, which provided abnormally high heat and fluid fluxes necessary for gold mineralization.

Key words: U-Pb zircon age; fluid inclusions; Dongxi gold deposit; Early Cretaceous; Dabiehsan area

Fund support: China Geological Survey (1212011220515, 121201009000150013)

桐柏-大别造山带属东秦岭造山带的东延,是我国重要的金、银、铜、铁、钼等多金属成矿带。区内大中型矿床密布,产有老湾金矿床(杨梅珍等, 2014)、东溪金矿床(张定源等, 2014)、破山银矿床(江思宏等, 2009)、刘山岩铜矿床(Zhu *et al.*, 2016)、沙坪沟钼矿床(黄凡等, 2011)、汞洞冲铅锌矿床(李厚民等, 2008)等。浅成低温热液型金银矿床是桐柏-大别地区金银矿床的重要成因类型, 主要与早白垩世火山-次火山作用关系密切, 包括高硫化型和低硫化型两种亚类型, 代表矿床分别为河南皇城山银金矿床和安徽东溪金矿床(彭三国等, 2013)。区内强烈的早白垩世构造岩浆活动与钼金成矿吸引着地学界广泛关注(任纪舜等, 1992; 杨泽强, 2007; 彭三国等, 2013; 杨梅珍等, 2014)。

东溪金矿床地处桐柏-大别造山带北淮阳构造带的晓天火山盆地, 探明金储量 5 吨, 具中型规模。矿体以含金方解石脉和石英-方解石脉形成产出, 赋矿围岩为毛坦厂组安山质火山岩。前人对该矿床地质特征开展了初步研究(张定源等, 2014), 但关于其成因和成矿机制研究(如火山作用时限、成矿流体性质、成矿时代和成矿构造环境等问题)较为薄弱, 在一定程度上制约了对东溪金矿床成因和区域金银成矿规律的认识。本文在详细野外观察基础上, 对东溪金矿床流体包裹体和赋矿安山岩 U-Pb 同位素开展了详细研究, 以期对其成矿流体性质、成矿时代和成矿构造环境提供约束。

1 区域地质背景

桐柏-大别造山带地处中国中部, 是东秦岭造山带的东延, 为华北和华南两大板块拼合部位。由太古宙至早中生代, 该区域经历了多期次、多阶段的碰

撞-扩张-聚合的演化过程, 发育多期成矿事件(Chen *et al.*, 2009; Wu & Zheng, 2013)。新元古代晚期一早中生代初期板块俯冲-碰撞的构造体制造就了桐柏-大别造山带的基本构造格局(张国伟等, 2001)。三叠纪后, 华北和华南板块拼合, 桐柏-大别造山带进入陆内演化阶段(张国伟等, 2001; Wu & Zheng, 2013)。早白垩世, 受环太平洋构造域的影响, 中国中东部进入以 NNE 至近 NS 向构造为主、近 EW 向构造为次的动力体制大转换时期, 大量近 NS 向断裂形成, 并与早期 NW 向深大断裂构成大别山地区格子状构造系统(任继舜等, 1992)。大别山地区在早中白垩世处于伸展的构造背景, 软流圈地幔上涌导致了大规模的岩浆活动和强烈的成矿作用。以桐柏-晓天-磨子潭断裂(商丹缝合带的东延)为界, 桐柏-大别造山带可分为北淮阳构造带和大别构造带两个构造单元(张国伟等, 2001; 钟增球等, 2001)。

东溪金矿床产于北淮阳构造带中生代晓天火山岩盆地边缘(图 1), 紧邻桐柏-磨子潭断裂。该火山岩盆地长约 40 km, 宽 2~8 km, 出露面积约 200 km^2 。其基底变质岩系包括新太古界-古元古界大别群杂岩、下古生界佛子岭群和上古生界梅山群, 主要岩性有黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩, 夹少量浅粒岩和二长片麻岩以及条带状混合片麻岩。火山岩盖层主要为下白垩统毛坦厂组和晓天组等, 呈似层状分布, 厚 100~230 m。毛坦厂组分布最为广泛, 主要岩性为安山岩、粗面安山岩、安山质角砾岩和安山质凝灰岩。该火山岩盆地东、西两端分别出露早白垩世托儿岭杂岩体和凌家冲杂岩体, 岩性主要为花岗二长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩、闪长岩等。两个杂岩体侵位时限为 132~129 Ma(内部资料, 未发表), 稍早于毛坦厂组火山岩盖层。

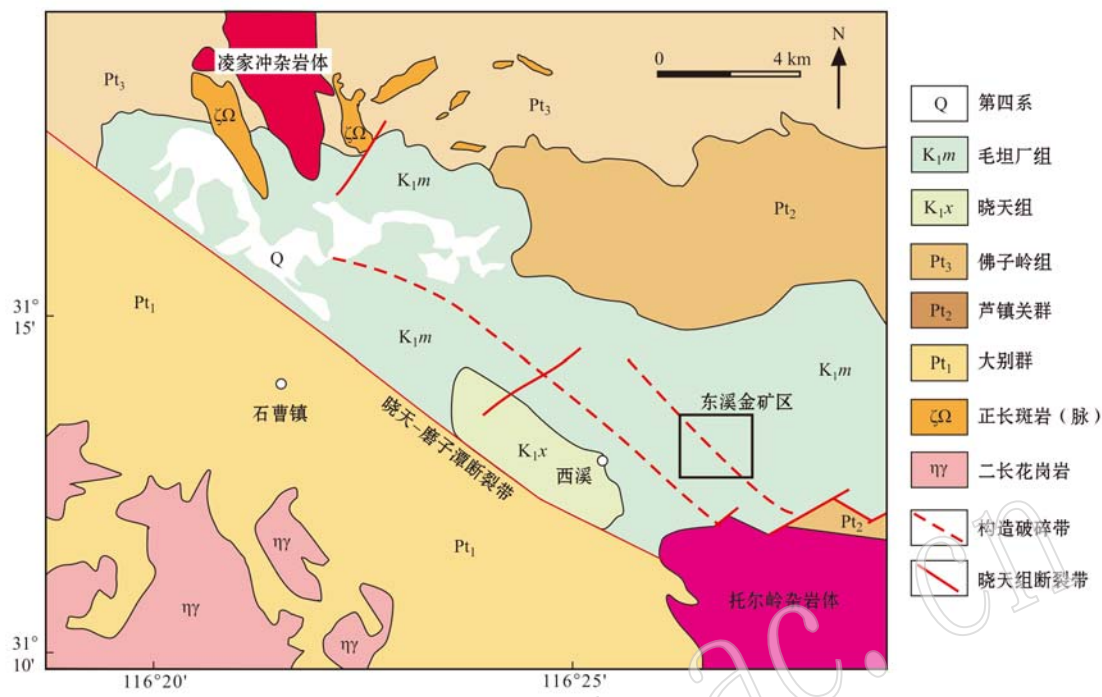


图 1 东溪金矿床及晓天火山盆地地区地质简图(据张定源等,2014)

Fig. 1 Geological map of the Xiaotian volcanic basin (modified after Zhang Dingyuan *et al.*, 2014)

2 矿床地质特征

金矿体产在早白垩世毛坦厂组火山岩中(图 2), 赋矿围岩主要为安山岩、安山质凝灰岩和安山质火

山角砾岩等。矿区地层总体呈缓倾的 NE 向单斜构造, 断裂构造发育, 褶皱不明显。主要断裂构造有 NW 和 NE 向两组。其中 NW 向构造带是矿区的主要控矿构造, 走向 300°~315°, 具有以扭性为主、张性次之的张扭性构造性质。

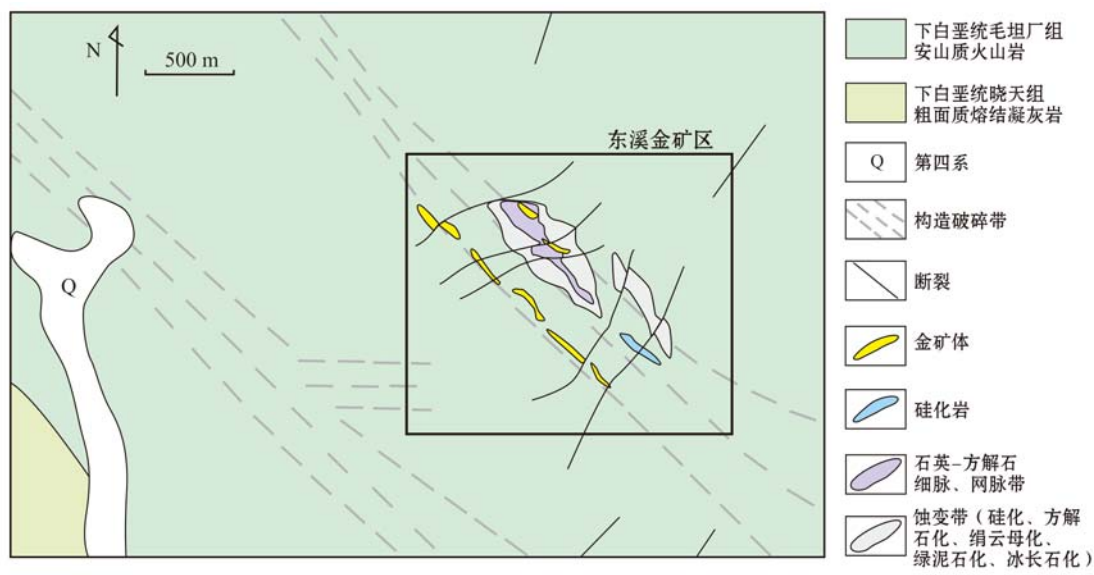


图 2 东溪金矿区地质图[据张定源等(2014)修改]

Fig. 2 Geological map of the Dongxi gold deposit (modified after Zhang Dingyuan *et al.*, 2014)

金矿体以含金方解石脉和方解石-石英脉产出,受NW向构造破碎带控制。已圈定矿体25个。矿体平面形态多呈不规则脉状或小透镜状,具明显的分枝、复合及膨大、缩小的特征,延深不大。主矿体为1号、3号、6号,均以大脉状石英-方解石脉产出。3号矿体规模最大,长223.5 m,平均厚1.89 m,最大延深72 m;1号矿体呈不规则脉状,长171.0 m,平均厚2.46 m,最大延深46 m;6号矿体呈脉状,长170.0 m,平均厚1.71 m,最大延深75 m。矿石Au平均品位11.99 g/t。

金属矿物主要有自然金、银金矿、金银矿、自然银以及褐铁矿、赤铁矿、磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿,还有少量的方铅矿、闪锌矿。脉石矿物以石英和方解石为主,含少量长石、黑云母、角闪石、泥绿石。金以银金矿、自然金和金银矿的形式产出,以银金矿为主(约占金、银矿物61.5%),自然金次之。金矿物主要赋存于载金矿物的显微裂隙和晶间缝隙中,少部分呈包裹体的形式存在于方解石和黄铁矿中。围岩蚀变为碳酸盐化、硅化、冰长石化、绢云母化、青磐岩化等。

据野外和镜下观察,东溪金矿床的热液成矿过程由早到晚可分为粗晶方解石阶段和方解石-石英阶段(图3)。粗晶方解石阶段以形成结晶颗粒粗大的方解石脉(含少量石英)为特征,晶径可达1~5 cm;方解石-石英阶段以形成中细粒含石英方解石脉和含方解石石英脉为特征,局部发育梳状张性构造。井下可见1号主矿体中晚阶段方解石-石英细(网)脉穿插早阶段粗晶方解石脉(图3b)。由地表而深部依次发育伊利石化碎裂岩、具梳状张性构造的含冰长石石英-方解石细(网)脉、以粗晶方解石为主的方解石脉。方解石-石英阶段是金主成矿阶段。

3 样品描述及分析方法

3.1 流体包裹体显微测温

选取早、晚两个成矿阶段的矿石样品进行了流体包裹体研究。其中粗晶方解石阶段样品5件,方解石-石英阶段样品5件(其测温片制片过程中尽量选择石英和方解石共生部位)。先将样品磨制成厚度约为0.3 mm的测温片进行岩相学和流体包裹体观察,然后选择有代表性的流体包裹体进行显微测温。

流体包裹体显微测温在武汉地质调查中心的流

体包裹体实验室进行,所用仪器为LinkamTHMSG600冷/热台。升温 and 降温速率控制 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm$,当接近相变温度时,升温速率降低为 $1.0\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;降温过程中,在相变点附近降温速率控制为 $0.3\sim 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。均一温度和冰点温度的测定误差分别为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年

用于锆石 U-Pb 同位素测年的样品(14DX)为东溪金矿床内赋矿安山岩(图3f)。样品重约7 kg,采样位置为北纬 $31^{\circ}13'12.07''$ 、东经 $116^{\circ}27'10.15''$ 。锆石分选在河北区域地质矿产调查研究所完成,原岩样品经常规粉碎、磁选和重选,得到纯度较高的锆石,然后在双目镜下经人工挑选出纯度在99%以上的锆石。在双目镜下对锆石进行分类,挑选晶形完好、未蚀变的锆石颗粒制成样品靶,对锆石进行了透射光、反射光和阴极发光照相。选择样品靶中环带结构发育较好、裂隙较少的锆石,采用LA-ICP-MS方法进行U-Pb同位素测定。可见光显微照片、阴极发光图像和同位素测定在中国地质大学(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GeoLas 2005, ICP-MS为Agilent 7500a,激光光斑为 $32\mu\text{m}$ 。标准锆石为91500和GJ-1。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入ICP之前通过一个T型接头混合。每个时间分辨分析数据包括大约20~30 s的空白信号和50 s的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Th-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMS-DataCal(V3.0)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同Liu等(2008, 2010)。

4 测试结果

4.1 流体包裹体岩相学特征和显微测温结果

东溪金矿床石英中流体包裹体不发育,且粒径一般小于 $3\mu\text{m}$ 。早、晚阶段的方解石中流体包裹体都十分发育(图4),主要类型包括:①纯液相流体包裹体(L型),形状为椭圆形、不规则状和米粒状等,大小为 $2\sim 8\mu\text{m}$,与L+V型包裹体共存,在方解石内呈小群分布,约占包裹体总量的10%;②富液二相流体包裹体(L+V型),形状为四边形、长方形、多边形、不规则状和米粒状等,大小为 $2\sim 20\mu\text{m}$,气液比多为10%~20%,分布多为自由分布或集群分布,

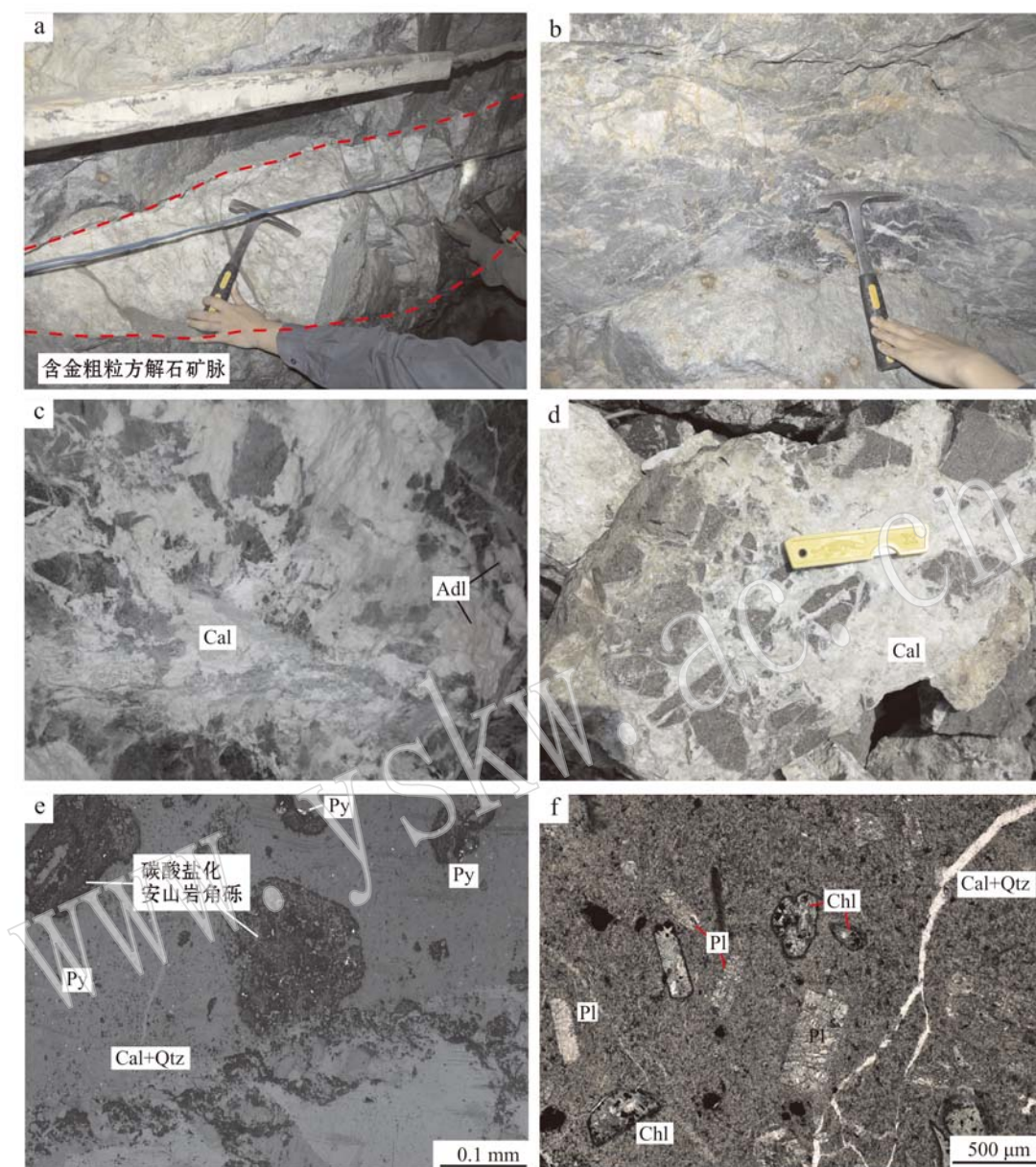


图 3 东溪金矿床矿化特征、矿石及赋矿安山岩照片

Fig. 3 Photographs and microphotographs illustrating features of mineralization and ore-bearing andesite in the Dongxi gold deposit

a—粗晶方解石阶段形成的含金方解石大脉; b—早阶段粗晶方解石脉被晚阶段方解石-石英细(网)脉穿插; c—矿体边缘的方解石化和冰长石化; d—粗晶方解石脉中包裹安山质火山岩角砾, 火山岩角砾又被方解石-石英细脉穿插, 且细脉中可见梳状张性构造; e—主成矿阶段矿石, 黄铁矿呈稀疏浸染状或星点状分布于方解石和火山岩角砾中; f—赋矿安山岩(样品 14DX)镜下特征; Adl—冰长石; Chl—绿泥石; Cal—方解石; Pl—斜长石; Py—黄铁矿; Qtz—石英

a—gold-bearing coarse-grained calcite vein formed in the early stage; b—early stage calcite vein intruded by late stage quartz and calcite stockwork; c—calcification and adularization within the edge of the orebody; d—brecciated andesite cemented by coarse-grained calcite, and intruded by quartz and calcite stringer vein; e—disseminated pyrite in quartz and calcite; f—microphotographs of the ore-bearing andesite (Sample 14DX); Adl—adularia; Chl—chlorite; Cal—calcite; Pl—plagioclase; Py—pyrite; Qtz—quartz

约占包裹体总量的 60%; ③ 纯气相流体包裹体(V 型), 形状为米粒状、四边形、椭圆形、不规则状等, 大

小为 2~10 μm ; 分布多为小群分布或定向分布, 约占包裹体总量的 30%。

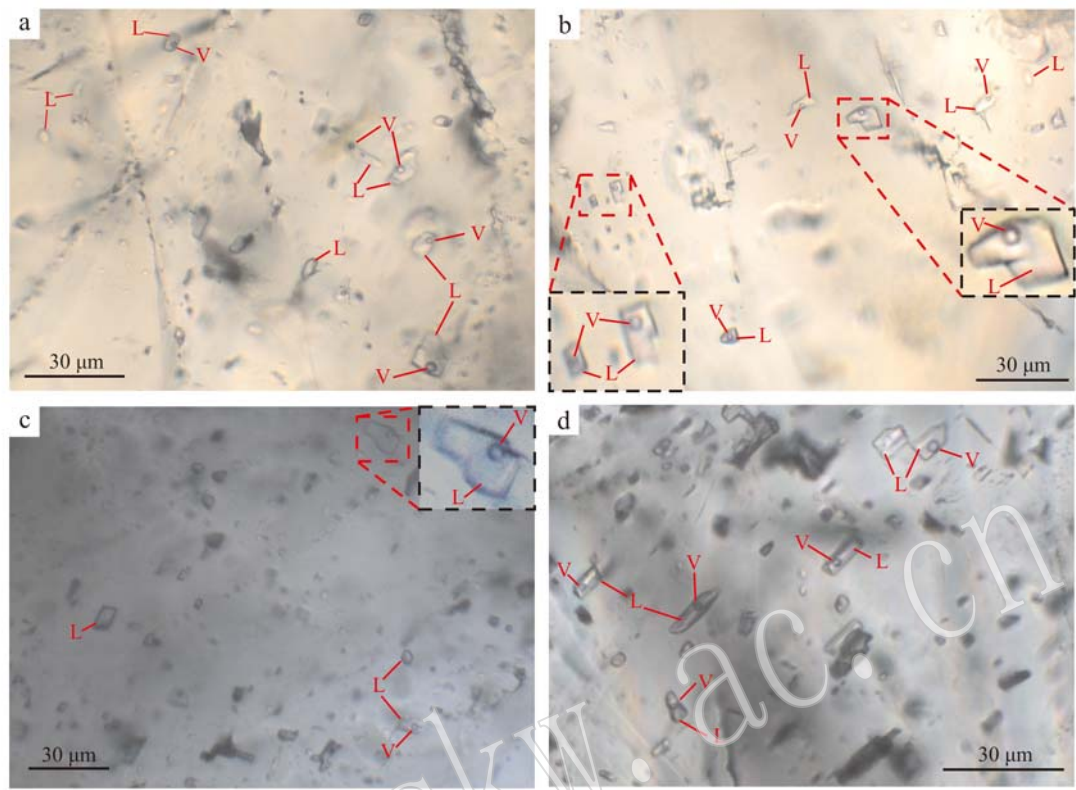


图 4 东溪金矿床方解石中流体包裹体显微照片

Fig. 4 Photomicrographs showing petrographic characteristics of fluid inclusions
a, b—粗晶方解石阶段方解石中流体包裹体; c, d—方解石-石英阶段方解石中流体包裹体
a, b—fluid inclusions in early stage calcite; c, d—fluid inclusions in late stage calcite

对不同阶段的方解石中流体包裹体进行了显微测温研究,结果列于表 1 和图 5。

早阶段(粗晶方解石阶段)方解石中流体包裹体均一温度(t_h)范围在 128~172℃,主要集中在 140~162℃;水溶液的初熔温度(t_{eu})为 -23~-21℃,属 NaCl-H₂O 体系;冰点温度(t_m)为 -0.7~+23.4℃。根据所测得的冰点温度由 Bodnar (1983)的方程计算得出 H₂O 溶液包裹体(L+V 型)盐度[$\omega(\text{NaCl})/\%$,下同]为 0.35%~0.92%。所测得的正值冰点温度反映了亚稳定状态流体包裹体,并与成矿流体属于低温、低盐度体系有关。

晚阶段(方解石-石英阶段)方解石中流体包裹体均一温度范围在 105~160℃,主要集中在 120~

150℃;水溶液的初熔温度为 -23~-21℃,属 NaCl-H₂O 体系;冰点温度为 -0.5~+9.1℃,计算得出 H₂O 溶液包裹体(L+V 型)盐度为 0.18%~0.52%。

4.2 锆石 U-Pb 同位素测年

对挑选出的锆石在双目镜及偏光显微镜下进行了观察。锆石自形程度高,晶型很好,多呈短柱状或长柱状。锆石颗粒较大,长多在 200~400 μm 之间,宽 100~200 μm ,呈无色-浅褐色,透明程度较好。阴极发光图像显示绝大多数锆石均具有清晰的单期生长的同心环带(图 6)。锆石 Th/U 值范围为 1.11~2.43。上述特征共同指示了单一的岩浆锆石成因(吴元保等,2004)。

表 1 东溪金矿床流体包裹体显微测温结果
Table 1 Microthermometric data for fluid inclusions in the Dongxi gold deposit

热液成矿阶段	测温矿物	包裹体类型	$t_m/^\circ\text{C}$	$t_h/^\circ\text{C}$		$\omega(\text{NaCl})/\%$
				范围	峰值	
粗晶方解石阶段	方解石	富液二相	-0.7~+23.4 ($n=35$)	128~172 ($n=49$)	140~162 ($n=42$)	0.35~0.92 ($n=20$)
方解石-石英阶段	方解石	富液二相	-0.5~+9.1 ($n=32$)	105~160 ($n=49$)	120~150 ($n=39$)	0.18~0.52 ($n=15$)

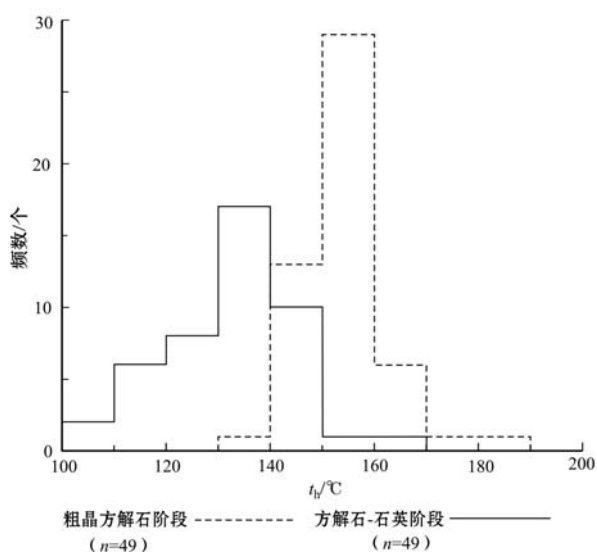


图5 东溪金矿床方解石中流体包裹体均一温度直方图
Fig. 5 Histograms of homogenization temperatures of fluid inclusions in calcites from the Dongxi gold deposit

对样品(14DX)进行了15个锆石点的LA-ICP-MS分析,结果见表2和图7。大部分数据点投影落于U-Pb谐和线附近。其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对集中,范围集中在122~133 Ma,加权平均值为 126.7 ± 1.4 Ma (1σ , MSWD=0.95),代表了东溪金矿床赋矿安山岩的结晶年龄。

5 讨论

5.1 成矿流体性质

东溪金矿床不同成矿阶段的方解石中流体包裹体研究表明,早阶段流体温度介于128~172℃之间,峰值为140~162℃,盐度为0.35%~0.92%;晚阶段流体温度介于105~160℃之间,峰值为120~150℃,盐度为0.18%~0.52%。成矿流体具低温、低盐度特征。早、晚阶段流体盐度变化较小,范围在

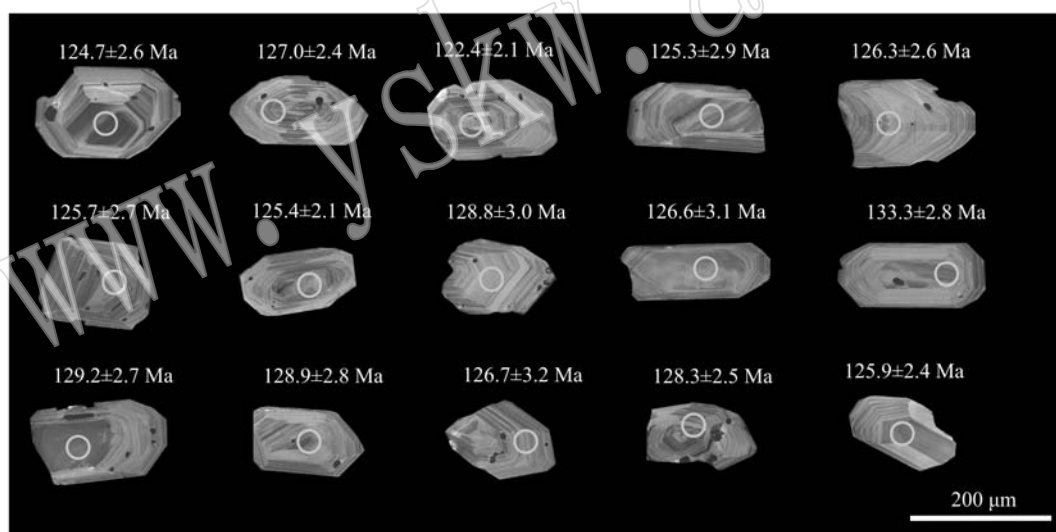


图6 东溪金矿床赋矿安山岩锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL images of zircons from the andesite in the Dongxi gold deposit

0.18%~0.92%。成矿流体从早阶段演化到晚阶段,温度和盐度均有降低趋势(图8)。流体包裹体类型主要为纯液相、纯气相和富液二相,二相包裹体气液比多为10%~20%,观察证据不支持该热液系统中发育流体不混溶或沸腾作用。加热循环的大气降水对流可能是引起金属元素富集、沉淀的主要机制。

东溪金矿床蚀变组合为冰长石化-碳酸盐化-绢云母化,矿石脉石矿物以方解石和石英为主,其低温、低盐度的流体性质暗示成矿流体以大气降水成

分为主。矿床地质特征、矿化蚀变和成矿流体性质共同揭示,东溪金矿床与典型的低硫化型浅成低温热液金矿床(Bonham, 1986)相似。

5.2 成矿时代和成矿地质背景

本文研究获得东溪金矿床赋矿安山岩的成岩年龄为 126.7 ± 1.4 Ma。这与晓天火山盆地内毛坦厂组安山质角砾凝灰岩(130.8 ± 1.8 Ma)、粗面质熔结凝灰岩(126.9 ± 1.7 Ma)和望母山组粗面岩(126.7 ± 1.4 Ma)成岩时间(张定源等, 2014)基本一致,共

表 2 东溪金矿赋矿安山岩样品(14DX)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测定结果
Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of the ore-bearing andesite from the Dongxi gold deposit

点号	$w_B/10^{-6}$				同位素比值				同位素年龄/Ma							
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
1	38.9	655	449	1.46	0.055 0	0.003 2	0.144 6	0.008 6	0.019 5	0.000 4	409.3	163.9	137.2	7.6	124.7	2.6
2	31.5	505	400	1.26	0.054 1	0.004 8	0.139 5	0.010 3	0.019 9	0.000 4	376.0	201.8	132.6	9.2	127.0	2.4
3	80.0	1 435	591	2.43	0.053 3	0.003 4	0.141 4	0.009 1	0.019 2	0.000 3	342.7	146.3	134.3	8.1	122.4	2.1
4	44.4	708	458	1.54	0.060 9	0.004 1	0.161 7	0.010 5	0.019C6	0.000 3	635.2	145.2	152.2	9.1	125.4	2.1
5	22.0	311	266	1.17	0.071 8	0.007 9	0.184 8	0.016 9	0.019 8	0.000 4	988.9	224.8	172.2	14.5	126.3	2.6
6	21.1	294	254	1.16	0.068 6	0.005 6	0.192 1	0.015 1	0.020 9	0.000 4	887.0	173.1	178.4	12.9	133.3	2.8
7	29.2	431	333	1.29	0.070 0	0.006 3	0.187 1	0.014 8	0.020 3	0.000 4	927.8	186.0	174.1	12.6	129.2	2.7
8	34.4	466	381	1.22	0.054 2	0.004 2	0.147 7	0.011 3	0.020 1	0.000 4	388.9	177.8	139.9	10.0	128.3	2.5
9	22.9	309	277	1.11	0.058 9	0.005 1	0.157 3	0.013 3	0.020 2	0.000 5	561.1	187.9	148.3	11.7	128.8	3.0
10	24.1	323	282	1.15	0.061 3	0.005 7	0.167 2	0.014 6	0.020 2	0.000 4	650.0	201.8	157.0	12.7	128.9	2.8
11	19.4	306	245	1.25	0.072 2	0.006 3	0.184 3	0.013 8	0.019 9	0.000 5	992.3	177.8	171.8	11.9	126.7	3.2
12	24.8	386	298	1.30	0.054 3	0.004 0	0.144 8	0.010 5	0.019 6	0.000 5	383.4	164.8	137.3	9.3	125.3	2.9
13	34.9	550	366	1.50	0.057 4	0.004 8	0.153 2	0.011 8	0.019 7	0.000 4	505.6	178.7	144.8	10.4	125.7	2.7
14	25.9	386	326	1.19	0.059 9	0.004 8	0.161 7	0.013 4	0.019 7	0.000 4	611.1	172.2	152.2	11.7	125.9	2.4
15	23.9	373	309	1.21	0.061 7	0.004 6	0.166 9	0.012 7	0.019 8	0.000 5	661.1	161.1	156.7	11.0	126.6	3.1

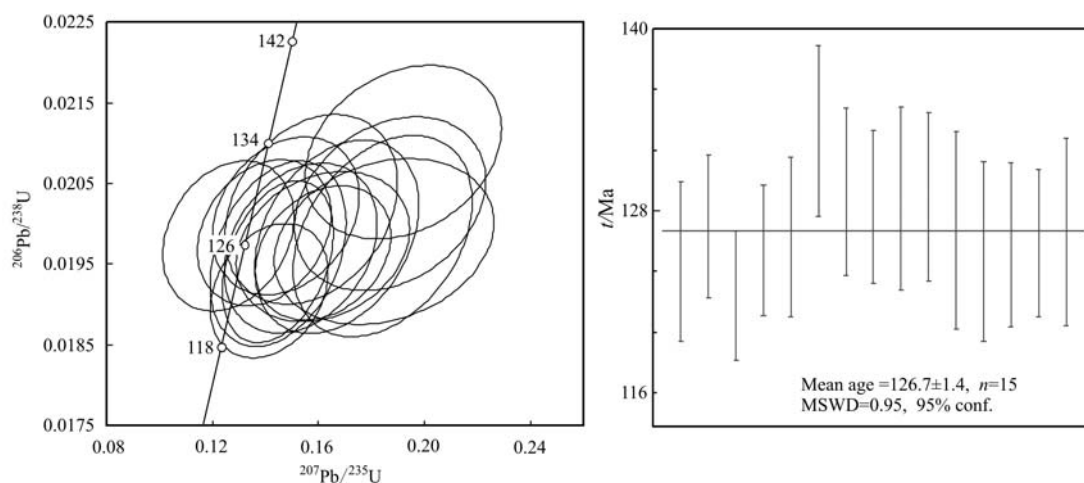
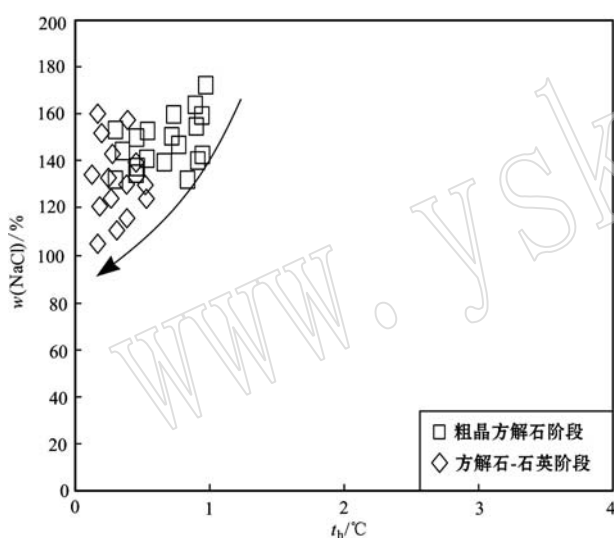
图7 东溪金矿床赋矿安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄图Fig. 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age histogram of the andesite from the Dongxi gold deposit

图8 东溪金矿床流体包裹体均一温度-盐度关系图

Fig. 8 Relationship between salinities and homogenization temperatures of fluid inclusions

同揭示该火山盆地的火山喷发主时限应该在 126 Ma 左右。对于以火山岩为容矿围岩的浅成低温热液矿床而言,成矿作用一般略晚于火山作用,二者时间间隔在数百万年之内(李兆鼎等, 2004)。以美国内华达州的 Midas 金银矿床为例,其火山岩喷发时限为 15.4 Ma,金矿床成矿时间为 15.2 Ma,成岩-成矿时间间隔不超过 0.5 Ma(Leavitt *et al.*, 2004)。综上,笔者认为东溪金矿床成矿时间与赋矿安山岩喷发时间接近(126.7 ± 1.4 Ma),形成于早白垩世。

早白垩世构造-岩浆-成矿事件是武当-桐柏-大别成矿带时代最新、规模巨大的一次构造热事件,可

能与中生代中国东部地球动力学大调整相关(毛景文等, 2003a, 2003b)。区域内该期次成矿事件以强烈的钼、金银、铅锌成矿为特色,空间上主要分布在南阳盆地以东的北淮阳构造带和大别构造带,成矿时间范围在 140~105 Ma,矿床成因类型包括岩浆热液型金银钼矿床、与火山-次火山作用有关金银铅锌矿床和斑岩-矽卡岩型钼多金属矿床等,代表性矿床有老湾金矿床(杨梅珍等, 2014)、沙坪沟钼矿床(黄凡等, 2011)、东溪金矿床(张定源等, 2014)、白云金矿床(曹正琦, 2016)等。成矿作用主要与早白垩世中酸性岩浆活动关系密切。大别造山带早白垩世岩浆岩研究表明:140~130 Ma 形成的钙碱性和高钾钙碱性中酸性岩主要与加厚下地壳重融有关;130~110 Ma 形成的富硅富钾的呈岩株、岩脉产出的花岗岩、正长岩类是陆壳强烈伸展、岩石圈地幔上涌环境产物(陈玲等, 2012)。北淮阳构造带早白垩世岩浆活动可进一步分为 140~133 Ma、133~126 Ma 和 125~110 Ma 的 3 个阶段,分别对应下地壳重熔、岩石圈拆沉减薄和岩石圈持续伸展的构造环境(赵新福等, 2007;王爱国等, 私人通讯)。综上,认为东溪金矿床形成于岩石圈拆沉、减薄和软流圈上涌的动力学背景。

大别造山带早白垩世不同阶段的构造-岩浆活动具有不同特色的成矿响应。① 岩浆热液型脉状金银矿床成矿时间多集中于 140~130 Ma,如老湾金矿床绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 138.0 ± 1.4 Ma(张冠等, 2008; 杨梅珍等, 2014),黑龙潭金矿床石英中流体包裹体 Rb-Sr 年龄为 132.6 ± 2.7 Ma(待发

表),白云金矿床绢云母 Ar-Ar 年龄为 128 Ma(曹正琦, 2016); ② 钼成矿时间主要集中在 130~105 Ma, 如千鹅冲钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 127.8 ± 0.87 Ma(杨梅珍等, 2010), 大银尖钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 122.4 ± 7.2 Ma(罗正传等, 2010), 天目沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 121.6 ± 2.1 Ma(杨泽强, 2007), 汤家坪钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 113.1 ± 7.9 Ma(杨泽强, 2007), 沙坪沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 113.21 ± 0.53 Ma(黄凡等, 2011; 陈红瑾等, 2013)。东溪金矿床的成矿时间要稍晚于大别山早白垩世岩浆热液型脉状金银矿床的成矿峰期(140~130 Ma)。对此, 笔者认为, ① 140~130 Ma 期间的构造-岩浆作用形成于挤压向伸展转换环境, 有利于岩浆热液型金银成矿作用发生(如老湾金矿床、湖北黑龙潭金矿床、白云金矿床等); ② 130~105 Ma 期间强烈的构造-岩浆作用发生在岩石圈强烈伸展背景, 更有利于斑岩型、与火山-次火山作用有关金银铅锌钼成矿(如东溪金矿床、汞洞冲铅锌矿床、沙坪沟钼矿床等)。

6 结论

(1) 东溪金矿床早阶段成矿流体温度介于 128~172℃ 之间, 盐度为 0.35%~1.52%; 晚阶段成矿流体温度介于 105~160℃ 之间, 盐度为 0.18%~0.92%, 成矿流体具有低温、低盐度特征。流体系统从早阶段演化到晚阶段, 温度和盐度有小范围降低趋势。加热循环的大气降水对流可能是引起金属元素富集、沉淀的主要机制。

(2) 东溪金矿床赋矿安山岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 126.7 ± 1.4 Ma (MSWD=0.95), 代表了其火山作用时限。该矿床成矿时间与火山喷发时限接近, 形成于早白垩世岩石圈拆沉减薄和软流圈地幔上涌的动力学背景。

(3) 大别造山带早白垩世不同阶段的构造-岩浆活动具有不同特色的成矿响应。140~130 Ma 主要发育岩浆热液型脉状金银矿床, 130~105 Ma 期间以浅成低温热液型金银矿床、斑岩型钼矿床为成矿特色。

致谢 野外考察过程中得到南京地质调查中心王爱国教授级高工和鲍晓明的支持; 撰稿过程中同

武汉地质调查中心邓新、刘浩、徐大良进行了有益的讨论; 审稿专家对论文修改提出了宝贵建议, 在此致以衷心感谢。

References

- Bodnar R J. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids [J]. *Economic Geology*, 78: 535~542.
- Bonham H F Jr. 1986. Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits: A review [A]. *International Volcanological Congress, Symposium [C]*. New Zealand: Hamilton, 13~17.
- Cao Zhengqi. 2016. Late Mesozoic Dikes and Ore-controlling Structures of the Dawu Region, Hubei Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1~108 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hongjin, Chen Yanjing, Zhang Jing, *et al.* 2013. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics of the bearing intrusion from the Shapinggou molybdenum deposit, Jinzhai County, Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 131~145 (in Chinese with English abstract).
- Chen Ling, Ma Changqian, Zhang Jinyang, *et al.* 2012. The first geological map of intrusive rocks in Dabie orogenic belt and its adjacent areas and its explanatory notes [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 13~19 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Pirajno Franco, 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.
- Huang Fan, Wang Denghong, Lu Sanming, *et al.* 2011. Molybdenite Re-Os isotopic age of Shapinggou Mo deposit in Anhui Province and Mesozoic Mo ore-forming stages in East Qinling-Dabie Mountain region [J]. *Mineral Deposits*, 30(6): 1 039~1 057 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Sihong, Nie Fengjun, Fang Donghui, *et al.* 2009. Geochronology of major gold and silver deposits in Weishancheng area, Tongbai County, Henan Province [J]. *Mineral Deposits*, 28(1): 63~72 (in Chinese with English abstract).
- Leavitt E D, Spell T L, Goldstrand P M, *et al.* 2004. Geochronology of the Midas low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, Elko County, Nevada [J]. *Economic Geology*, 99: 1 665~1 686.
- Li Houmin, Chen Yuchuan, Ye Huishou, *et al.* 2008. Mo, (W), Au,

- Ag, Pb, Zn minerogenetic series related to Mesozoic magmatic activities in the East Qinling-Dabie mountains[J]. Acta Geoscientica Sinica, 82(11): 1 468~1 477(in Chinese with English abstract).
- Li Zhaonai, Wu Ruishen, Lin Baoqin, *et al.* 2004. Gold Deposits from the Volcanic Rocks Area in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~233(in Chinese).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 51: 537~571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257: 34~43.
- Luo Zhengchuan, Li Yongfeng, Wang Yitian, *et al.* 2010. The molybdenite Re-Os age of Dayinjian molybdenum deposit in the northern margin of the Dabie Mountain, Xinxian area, Henan, China and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 29(9): 1 349~1 354 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Xiaofeng, Zhang Zuoheng, *et al.* 2003a. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic epithermal gold deposits in East China[J]. Geological Journal of China Universities, 9(4): 620~637(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, *et al.* 2003b. 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), 33(4): 289~299 (in Chinese).
- Peng Sanguo, Long Baolin, Li Shutao, *et al.* 2013. Metallogenic Characteristics and Ore Prospecting in the Wudang-Tongbai-Dabie Belt, China[M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1~204(in Chinese).
- Ren Jishun, Chen Tingyu, Niu Baogui, *et al.* 1992. Tectonic Evolution of Continental Lithosphere and Ore-forming Beneath East China and Its Adjacent Areas[M]. Beijing: Science Press, 1~230(in Chinese).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China[J]. Gondwana Research, 23: 1 402~1 428.
- 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, 26(3): 289~295 (in Chinese with English abstract).
- Yang Meizhen, Zeng Jiannian, Qin Yongjun, *et al.* 2010. LA-ICP-MS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for Qian'echong porphyry-type Mo deposit in Northern Dabie, China, and its geological significance[J]. Geological Science and Technology Information, 29(5): 35~45(in Chinese with English abstract).
- Yang Zeqiang. 2007. Re-Os isotopic ages of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County, Henan and their geological significance[J]. Mineral Deposits, 26(3): 289~295 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dingyuan, Wang Aiguo, Zhang Xiaodong, *et al.* 2014. Geological characteristics and ore-forming conditions of Dongxi-Nanguanling gold deposit, Huoshan county, Anhui Province[J]. Resources Survey and Environment, 35(3): 202~210(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guan, Li Houmin, Wang Chenghui, *et al.* 2008. ^{40}Ar - ^{39}Ar age of muscovite from the Laowan gold deposit in Henan and its significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(1): 45~50(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continent Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 1~855(in Chinese).
- Zhao Xinfu, Li Jianwei, Ma Changqian, *et al.* 2007. Geochronology and geochemistry of the Gubei granodiorite, north Huaiyang: Implications for Mesozoic tectonic transition of the Dabie orogeny[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1 392~1 402(in Chinese with English abstract).
- Zhu Jiang, Peng Sanguo and Peng Lianhong. 2016. U-Pb dating of hydrothermal zircons from the Neoproterozoic Liushanyan VMS Cu-Zn deposit, central China: Evidence for a Triassic deformation event[J]. Resource Geology, 66(3): 227~239.
- Zhong Zengqiu, Suo Shutian, Zhang Hongfei, *et al.* 2001. Major constituents and texture of the Tongbai-Dabie collisional orogenic belt[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 26(6): 560~567(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹正琦. 2016. 湖北大悟地区晚中生代脉岩及控矿构造研究[D]. 武汉: 中国地质大学博士学位论文, 1~108.
- 陈红瑾, 陈衍景, 张静, 等. 2013. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿含矿岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 29(1): 131~145.
- 陈玲, 马昌前, 张金阳, 等. 2012. 首编大别造山带侵入岩地质图 1:50 万及其说明[J]. 地质通报, 31(1): 13~19.
- 黄凡, 王登红, 陆三明, 等. 2011. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿辉钼矿 Re-Os 年龄——兼论东秦岭-大别山中生代钼成矿作用期次划分[J]. 矿床地质, 30(6): 1039~1057.
- 江思宏, 聂凤军, 方东会, 等. 2009. 河南桐柏围山城地区主要金银矿床的成矿年代学研究[J]. 矿床地质, 28(1): 63~72.
- 李厚民, 陈毓川, 叶会寿, 等. 2008. 东秦岭-大别地区中生代与岩浆活动有关钼(钨)金银铅锌矿床成矿系列[J]. 地质学报, 82(11): 1468~1477.
- 李兆鼎, 毋瑞身, 林宝钦, 等. 2004. 中国火山岩地区金矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~233.
- 罗正传, 李永峰, 王义天, 等. 2010. 大别山北麓河南新县地区大银尖钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 地质通报, 29(9): 1349~1354.
- 毛景文, 李晓峰, 张作衡, 等. 2003a. 中国东部中生代浅成热液金矿的类型、特征及其地球动力学背景[J]. 高校地质学报, 9(4): 620~637.
- 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 2003b. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学(D 辑), 33(4): 289~299.
- 彭三国, 龙宝林, 李书涛, 等. 2013. 武当-桐柏-大别成矿带成矿地质特征与找矿方向[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~204.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 1992. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1~203.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 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, 33(3): 651~666.
- 杨梅珍, 曾键年, 覃永军, 等. 2010. 大别山北缘千鹅冲斑岩型钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义[J]. 地质科技情报, 29(5): 35~45.
- 杨泽强. 2007. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 26(3): 289~295.
- 张定源, 王爱国, 张晓东, 等. 2014. 安徽省霍山县东溪-南关岭金矿地质特征与成矿条件[J]. 资源调查与环境, 35(3): 202~210.
- 张冠, 李厚民, 王成辉, 等. 2008. 河南桐柏老湾金矿白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义[J]. 地球学报, 29(1): 45~50.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1~855.
- 赵新福, 李建威, 马昌前, 等. 2007. 北淮阳古碑花岗岩闪长岩侵位时代及地球化学特征: 对大别山中生代构造体制转换的启示[J]. 岩石学报, 23(6): 1392~1402.
- 钟增球, 索书田, 张宏飞, 等. 2001. 桐柏-大别碰撞造山带的基本组成与结构[J]. 地球科学, 26(6): 560~567.