

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.187>



大别山皇城山银矿区及外围陈棚组火山岩 U-Pb 年代学、地球化学和成矿构造背景

朱江^{1,2}, 吴昌雄³, 彭三国^{1,2}, 彭练红^{1,2}, 张闯³, 刘锦明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: 皇城山银矿床是西大别山地区代表性的浅成低温热液矿床, 受陈棚组火山机构的枝叉状裂隙构造控制。目前人们对该矿床成因、成矿时间和构造环境的理解尚不深刻, 因此对相关火山岩进行了激光等离子质谱(LA-ICP-MS)锆石U-Pb测年、元素地球化学和Sr-Nd-Hf同位素研究, 探讨了其岩石成因和构造属性。结果表明, 皇城山矿区陈棚组熔结凝灰岩及外围流纹岩锆石U-Pb年龄分别为 133.4 ± 1.5 Ma(MSWD=1.3)和 133.1 ± 0.8 Ma(MSWD=0.59), 形成于早白垩世。陈棚组火山岩在较短时间内喷发形成, 其喷发时限基本代表了皇城山银矿床形成时间。陈棚组流纹岩具高硅($\text{SiO}_2 = 73.83\% \sim 77.38\%$)、高钾($\text{K}_2\text{O} = 4.65\% \sim 9.31\%$)特征, 属于过铝质($A/\text{CNK} = 1.09 \sim 1.31$)和高钾钙碱性岩石系列。岩石具轻稀土富集, 重稀土平坦, 大离子亲石元素相对富集, Ba、Nb、Ta、P、Ti明显负异常和负Eu异常($\delta\text{Eu} = 0.33 \sim 0.88$)特点。岩石锶同位素初始比值 I_{Sr} 为 $0.708\,220 \sim 0.708\,741$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-17.2 \sim -18.5$, Nd两阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 2.32 \sim 2.43$ Ga, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为 $-22.3 \sim -26.1$, Hf两阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 2.29 \sim 2.49$ Ga。主、微量元素和Sr-Nd-Hf同位素特征共同揭示陈棚组流纹岩为扬子陆壳北缘古老地壳物质重熔演化的产物。结合区域地质特征, 陈棚组火山岩及其相关皇城山银矿床形成于大别山早白垩世加厚下地壳拆沉作用初期、挤压向伸展转化环境。

关键词: 银矿床; 火山岩; 年代学; 地球化学; Sr-Nd-Hf同位素; 大别山。

中图分类号: P588.1; P597

文章编号: 1000-2383(2018)07-2404-16

收稿日期: 2017-08-22

Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks from the Huangchengshan Volcanogenic Epithermal Silver Deposit, Dabie Orogen, China: Implications for Tectonic Setting

Zhu Jiang^{1,2}, Wu Changxiong³, Peng Sanguo^{1,2}, Peng Lianhong^{1,2}, Zhang Chuang³, Liu Jinming³

1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3. Sixth Geological Brigade, Hubei Geological Bureau, Xiaogan 432000, China

Abstract: The Huangchengshan deposit is the largest high-sulfidation epithermal silver deposit in the Western Dabie orogen. Silver mineralization characterized by argentiferous quartz veins is controlled by fractures of volcanic apparatus, and is spatially associated with volcanic rocks of Chenpeng Formation. In situ zircon U-Pb dating yielded 133.4 ± 1.5 Ma (1σ , MSWD=1.3) and 133.1 ± 0.8 Ma (1σ , MSWD=0.59) for the tuff and rhyolite from Chenpeng Formation, respectively, indicating an Early

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos.121201009000150013, 121201009000160902)。

作者简介: 朱江(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿床学、矿产普查与勘探研究。ORCID: 0000-0003-1418-7075。

E-mail: zhujiang.01@foxmail.com

引用格式: 朱江, 吴昌雄, 彭三国, 等, 2018. 大别山皇城山银矿区及外围陈棚组火山岩 U-Pb 年代学、地球化学和成矿构造背景. 地球科学, 43(7): 2404—2419.

Cretaceous volcanism. The data also suggest a syngenetic volcanicogenic epithermal mineralization age of ca. 133 Ma for the Huangchengshan silver deposit. Rhyolites of the Chenpeng Formation display high contents of SiO₂ (73.83% to 77.38%) and K₂O (4.65% to 9.31%), belonging to high-K calc-alkaline series. Their A/CNK ratios range from 1.09 to 1.31, exhibiting peraluminous characteristics. Rare earth elements show light rare earth elements (LREEs) enrichment and flat heavy rare earth elements (HREEs) patterns, with moderate negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.33 - 0.88$). They are enriched in large ion lithophile elements (LILEs), but depleted in Ba, Nb, Ta, P and Ti. These geochemical characteristics show affinity to highly fractionated granites. The rhyolites have high I_{Sr} values (0.708 220 to 0.708 741) and negative $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (-17.2 to -18.5), with two-stage Nd model ages of 2.32 to 2.43 Ga. Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are negative (-22.3 to -26.1) with calculated two-stage Hf model ages of 2.29 to 2.49 Ga. The geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic signatures suggest that the rhyolite is likely to be derived by partial melting of the ancient lower crust of the Yangtze Block. We propose that this volcanism and related Huangchengshan silver deposit formed in a transitional stage from crustal compression to extension driven by delamination of thickened lower crust during the Early Cretaceous.

Key words: silver deposits; volcanic rocks; geochronology; geochemistry; Sr-Nd-Hf isotopes; Dabie orogen.

0 引言

大别造山带北缘即北淮阳地区晚中生代火山岩广泛分布,包括陈棚组、金刚台组、响洪甸组和毛坦厂组(杜建国和张鹏,1999;李双应,2004;黄丹峰等,2010;黄皓和薛怀民,2012;李鑫浩等,2015).前人对东大别山地区晚中生代火山岩(即金刚台组、响洪甸组和毛坦厂组)开展了较多的岩石学、年代学和岩石地球化学研究(杨祝良等,1999;吴海权等,2002;黄丹峰等,2010;黄皓和薛怀民,2012;李鑫浩等,2015),但商麻断裂以西的西大别山地区晚中生代火山岩的研究较为薄弱,特别是对陈棚组火山岩的同位素年代学和地球化学研究较少(李厚民等,2007, 2008).

与火山作用有关浅成低温热液型矿床是大别造山带金银矿床的重要成因类型,包括高硫化型和低硫化型矿床(李兆鼐等,2004).前者代表性矿床为皇城山银矿床(丰耀东,2008;韩燕峰等,2010;杨梅珍等,2011;任爱琴,2013);后者代表性矿床为东溪金矿床(张定源等,2014;朱江等,2017).这些矿床均与早白垩世中性—中酸性火山活动成因关系密切(杨梅珍等,2011;任爱琴,2013;张定源等,2014;朱江等,2017).大别山地区高硫化型和低硫化型金银矿床成矿时代是否相同?二者构造环境是否一致?这些科学问题的研究尚有待深入.

皇城山银矿床地处西大别山北麓,其南紧邻龟梅区域性断裂带,查明银金属储量 353.3 t,平均品位 Ag 365 g/t,具中型规模,是区域内代表性的高硫化型浅成低温热液矿床.前人对该矿床开展了矿化蚀变和成因研究,均强调成矿与陈棚组火山活动之间存在密切成因联系(徐国风等,1989;肖从辉,1991;任爱琴,2006;杨梅珍等,2011).但该矿区火山

作用时限迄今未得到有效限定,制约了对其成矿时代和成矿构造背景的深刻理解.本文对皇城山银矿区及外围陈棚组火山岩进行精确的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素分析,限定火山作用时限和岩石成因,探讨矿床形成时代和成矿构造背景.所获得的认识有助于对大别造山带晚中生代的浅成低温热液型金银成矿的深刻理解,并对区域找矿具有指导意义.

1 地质背景

桐柏一大别造山带地处中国中部,属华北和华南两大板块拼合部位,是东秦岭造山带的东延.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(张国伟等,2001; Wu and Zheng, 2013).新元古代晚期—早中生代初期板块俯冲—碰撞的构造体制造就了桐柏一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,桐柏一大别造山带进入陆内演化阶段(张国伟等,2001; Wu and 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 SN 向构造为主、近 EW 向构造为次的动力体制大转换时期(任继舜等,1992).大别山地区在早—中白垩世先后发生了地壳加厚、下地壳垮塌拆沉、大规模幔源岩浆上涌和地壳强烈伸展,导致了大规模的岩浆活动和强烈的成矿作用(张超和马昌前,2008; 陈伟等,2013).以桐柏—晓天—磨子潭断裂(商丹缝合带的东延)为界,桐柏一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).

北淮阳晚中生代火山岩带位于大别造山带北

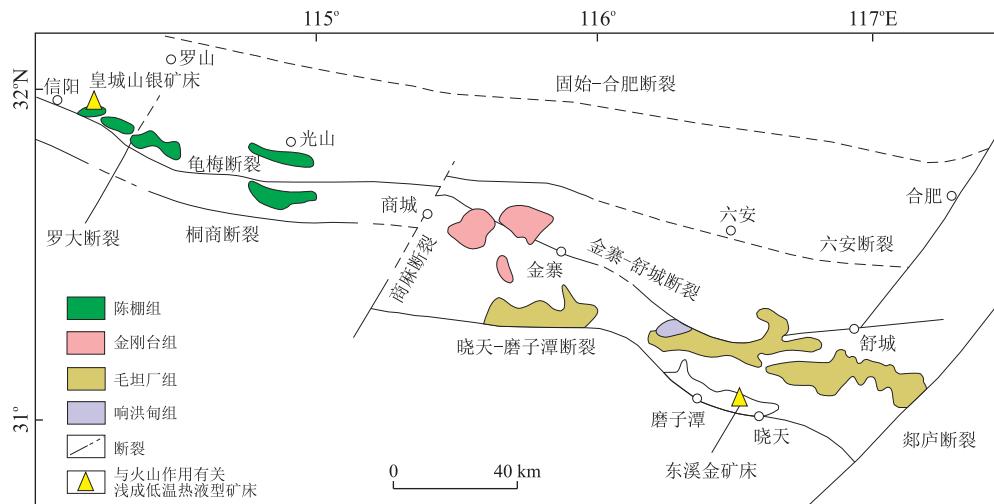


图 1 大别造山带北淮阳构造带火山岩分布及构造格架

Fig.1 Tectonic sketch of the northern Huaiyang belt showing the distribution of volcanic rocks

据李双应(2004);李鑫浩等(2015)修改

麓,长逾 330 km,宽 10~50 km,西起河南信阳,东至安徽六安,与郯庐断裂带交接(图 1).该火山岩带南、北两侧分别受晓天—磨子潭断裂和确山—合肥断裂所限,呈近东西向带状展布.其自东向西分可分为 5 个火山构造单元,包括信阳火山沉积盆地、光山—商城火山沉积盆地、金刚台火山群、霍山—舒城火山沉积盆地和晓天—磨子潭火山沉积盆地(张鹏,1998),分别出露陈棚组、金刚台组(黄丹峰等,2010;黄皓和薛怀民,2012;李鑫浩等,2015)、响洪甸组和毛坦厂组(张定源等,2014).下白垩统陈棚组出露于北淮阳火山岩带的西段,呈孤岛状零星出露于信阳市罗山县仙桥、光山县马畈、泼河一带,呈 NWW 向展布,总面积约 30 km².该火山岩系主要为一套陆相火山喷出岩和火山碎屑岩,其下部以中酸性熔岩为主,主要岩性为英安岩、流纹岩夹中酸性角砾熔岩;上部以火山碎屑岩为主,主要岩性为火山角砾岩、凝灰质角砾岩等.陈棚组火山岩呈角度不整合覆盖于上侏罗统集组之上.

2 矿床地质特征

皇城山银矿床位于龟梅断裂带北侧.银矿体产于强硅化蚀变带中,受陈棚组火山机构的叉状裂隙控制,主要赋矿围岩为早古生代斜长花岗岩和下白垩统陈棚组火山沉积岩.陈棚组火山沉积岩出露于矿区北部,主要岩性为熔结含砾浆屑凝灰岩、晶屑凝灰岩、含火山泥球岩屑晶屑凝灰岩、紫红色凝灰质泥砂岩.矿区发育 40 多条叉状火山机构裂隙,长 10 米

至 300 余米,宽一般 2~10 m,最宽 60 余米.

I 号主矿体长 500 m,宽 5~45 m,呈不规则脉状沿走向 NE37° 展布,产状近于直立,延深 600~650 m,呈向北斜插的楔形体(图 2).其平面上东宽西窄,横向向上大下小,连续性较好,局部具分支复合现象,银平均品位 Ag 365 g/t.矿化蚀变分带性明显,从中心向外依次发育强硅化带、高级泥化带(高岭石+石英)和泥化带(蒙脱石+石英).强硅化带是热液活动的中心(宽 2~5 m),以发育孔洞状石英为特征,自北东向西南逐渐变窄并尖灭,银及多金属硫化物矿物限于其中;高级泥化带一般宽 4~8 m;泥化带宽 3~10 m.

矿石中金属矿物含量低(<1%).金属硫化物主要有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉铜矿等.非金属脉石矿物主要为石英,少量粘土矿物.主要银矿物有辉银矿、少量金银矿和自然银等,辉铜矿、方铅矿和闪锌矿是主要载银矿物.矿石构造主要有孔状、浸染状、细脉浸染状和角砾状等,矿石结构主要为结晶结构、交代结构和填隙结构等.矿石结构上见黄铁矿被方铅矿和闪锌矿交代,方铅矿穿插闪锌矿,银矿物包裹于方铅矿中或呈他形粒状填隙于石英中.

3 样品岩石学特征

本次研究以皇城山银矿区及其外围的陈棚组火山岩为研究对象,主要岩性包括岩屑晶屑熔结凝灰岩和流纹岩.

岩屑晶屑熔结凝灰岩:出露于矿区北部,是 I 号

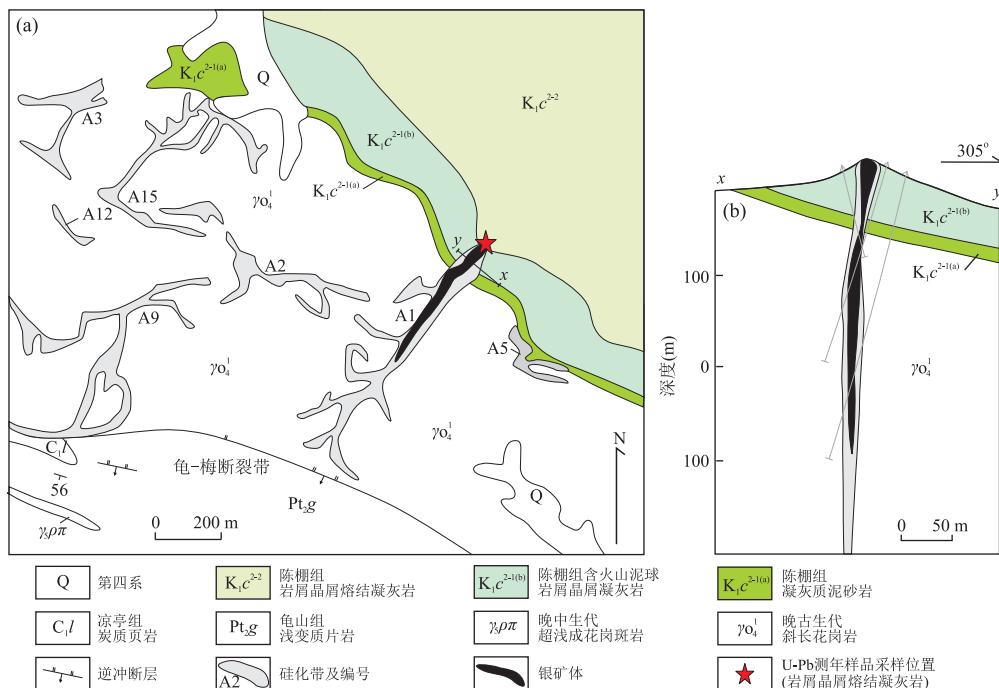


图 2 皇城山银矿区地质简图

Fig.2 Geological sketch of the Huangchengshan silver deposit

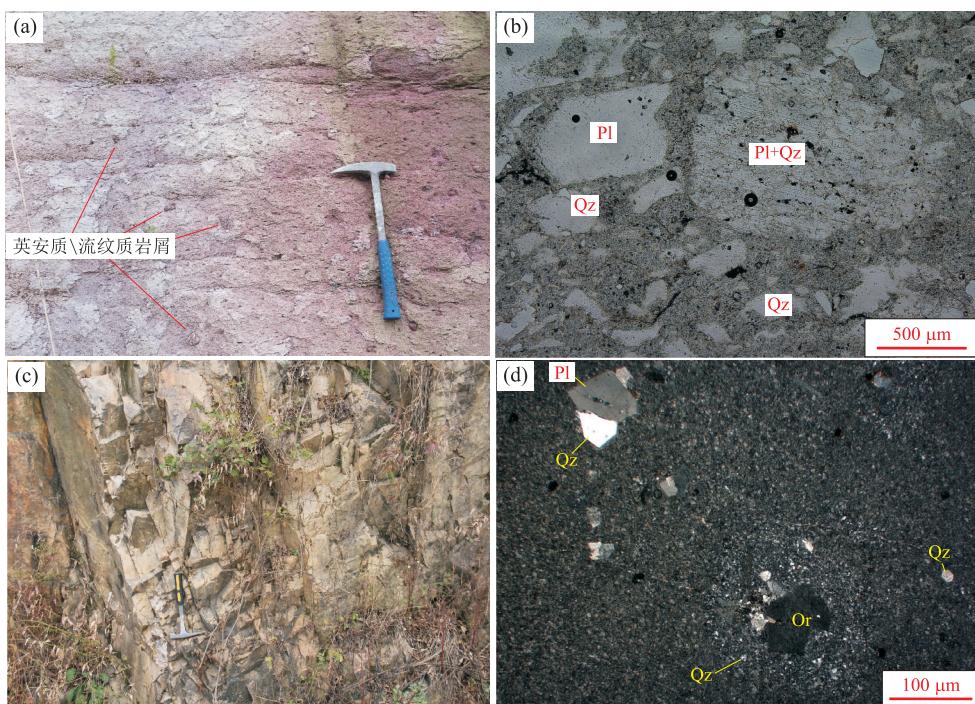


图 3 陈棚组岩屑晶屑熔结凝灰岩(a,b)和流纹岩(c,d)野外和显微照片

Fig.3 Hand specimens and Photomicrographs of the ignimbrite (a, b) and rhyolite (c, d) from the Chenpeng Formation
a. 陈棚组岩屑晶屑熔结凝灰岩野外照片, 可见火山熔岩角砾和火山沉积构造; b. 流纹岩野外照片; c. 岩屑晶屑熔结凝灰岩单偏光显微照片, 见火山沉积结构和气孔构造; d. 流纹岩正交偏光显微照片, 见斑状结构和气孔构造. Or. 正长石; Pl. 斜长石; Qz. 石英

主矿体的赋矿围岩. 本次研究采样点为矿区北部露天采坑(图 2), 地理坐标 114°15'58"E、32°02'18"N.

岩石呈浅灰色和灰褐色, 块状构造, 熔结凝灰结构(图 3). 岩屑含量一般在 10%~20%, 成分较为复

杂,以流纹质或英安质火山熔岩为主,矿物组成为石英、长石等,多呈次棱角状,粒径为 1~5 cm;晶屑含量一般在 20%~30%,主要为石英、斜长石和少量黑云母,粒径一般 0.2~3.0 mm;胶结物由火山玻璃和少量火山粉尘组成。

流纹岩:采样点位于皇城山银矿区以北约 2 km 的万家湾附近(采样中心点地理坐标 114°16'05"E、31°03'52"N).岩石地表呈灰紫色和灰白色,具流动构造和不太发育的气孔构造.显微镜下观察表明,岩石具斑状结构,斑晶为斜长石、钾长石、石英和黑云母,粒度 0.2~1.5 mm,含量为 10%~40%.基质具微晶—隐晶结构、霏细结构,主要由斜长石、钾长石和石英等微粒组成,粒度小于 0.1 mm.

4 样品及分析方法

4.1 锆石 U-Pb 同位素测定

选取 2 件火山岩样品用于锆石定年,分别为皇城山矿区赋矿岩屑晶屑熔结凝灰岩(HCS-1)和矿区外围流纹岩(D001-3),每件样品重约 7 kg.

锆石分选在广州拓岩分析技术有限公司完成,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 技术进行 U-Pb 同位素测定.可见光显微照片和阴极发光图像在武汉上谱分析科技有限责任公司实验室完成,锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 同时分析完成.激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 质谱仪为 Agilent 7500a.本次测试中采用的激光剥蚀束斑直径为 32 μm,能量密度为 10 J/cm².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.在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008).另外,激光剥蚀系统配置了一个信号平滑装置(Hu *et al.*, 2012a).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.U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500.对于与

分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu *et al.*, 2010).锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck *et al.*(1995).详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu *et al.*(2008, 2010).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 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008, 2010)完成,所给定的同位素比值和年龄的误差(标准偏差)在 1σ 水平.锆石 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算均利用 Isoplot(Ludwig, 2003)完成.

4.2 全岩地球化学分析

选取 5 件新鲜、未蚀变的流纹岩样品进行全岩主量元素和微量、稀土元素测试.测试分析在中国地质调查局武汉地质调查中心完成,主量元素分析仪器为荷兰 PW2440 型波长色散 X 荧光光谱仪,分析精度优于 3.2%.微量和稀土元素分析仪器为美国等离子质谱仪和法国 JY38S 型等离子体原子发射光谱仪,分析精度优于 4%.

4.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

选取 3 件流纹岩样品进行全岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成分析.样品制备在中国地质调查局武汉地质调查中心进行,采用常规离子交换树脂技术进行样品分离.在该单位同位素实验室德国 Finnigan 公司 MAT-261 热电离蒸发固体质谱计(TIMS)上测定 Sr、Nd 同位素.用 NBS987 和 GBW04419 标准物质对仪器和分析流程进行监控.⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比值由测得的 Rb、Sr、Sm、Nd 含量计算得出.Sr 和 Nd 同位素的分馏校正分别采用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.119 4 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9.测试期间,NBS987 标准给出的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 平均值为 0.710 34 ± 26 (2σ), GBW04419 标准给出的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 平均值为 0.512 725 ± 7 (2σ).全程 Sr 空白 < 4 ng, Nd 空白 < 1 ng.详细分析方法见 Qiao(1988).

4.4 锆石 Lu-Hf 同位素测定

锆石 Lu-Hf 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 Neptune 多接收 MC-ICP-MS 配套的 GeoLas 2005 剥蚀系统上进行.激光剥蚀所用斑束直径为 44 μm,能量为 5.3 J/cm²,剥蚀过程中氦气作载气,详细仪器条件和数据获取详见 Hu *et al.*(2012b).为了校正¹⁷⁶Lu 和¹⁷⁶Yb 对¹⁷⁶Hf 的干扰,取¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Hf = 0.026 56

和 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0.793\ 81$ (Blichert-Toft *et al.*, 1997) 为定值。采用 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb} = 1.124\ 8$ 和 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.732\ 5$ 分别对 Yb 同位素和 Hf 同位素进行指数归一化质量歧视校正 (Blichert-Toft *et al.*, 1997)。锆石标样 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 标准值为 $0.282\ 013 \pm 19$ (Hu *et al.*, 2012b)。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、Lu-Yb-Hf 同位素比值校正)采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2010) 完成。

5 测试结果

5.1 锆石 U-Pb 同位素测年

5.1.1 岩屑晶屑熔结凝灰岩(HCS-1) 显微镜和双目镜观察显示,锆石自形程度高,晶型较好,多呈长柱状或短柱状,无色—浅褐色,透明程度较好。锆石颗粒大小中等,长度 $80 \sim 200\ \mu\text{m}$ 之间,宽 $20 \sim 80\ \mu\text{m}$ 。阴极发光图像中大部分锆石具有清晰的震荡

环带(图 4)。所选择分析锆石的 Th/U 比值范围主要为 $0.34 \sim 1.07$,其稀土元素配分曲线也指示典型的岩浆锆石成因。

选取 16 颗锆石进行了 16 个测点的 LA-ICP-MS 分析(表 1),其中 4 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分散(范围在 $163 \sim 1\ 621\ \text{Ma}$),且明显老于其他数据点,可能代表了继承或俘获锆石年龄。其余 12 个数据点均位于 U-Pb 谱和线上或其附近(图 5a, 5b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中,范围为 $128 \sim 135\ \text{Ma}$,加权平均年龄为 $133.4 \pm 1.5\ \text{Ma}$ (1σ , MSWD=1.3),代表了岩屑晶屑熔结凝灰岩的成岩年龄。

5.1.2 流纹岩(D001-3) 锆石自形程度高,晶型较好,多呈长柱状或短柱状,无色—浅褐色,透明程度较好。锆石颗粒长度 $80 \sim 150\ \mu\text{m}$ 之间,宽 $20 \sim 60\ \mu\text{m}$ 。阴极发光图像(图 4)显示大部分锆石均具有清晰的震荡环带特征。锆石 Th/U 比值范围为 $1.08 \sim 2.06$,为典型岩浆成因的锆石。

选取 15 颗锆石进行了 15 个测点的 LA-ICP-MS 分析(表 1)。全部数据点均分布 U-Pb 谱和线上

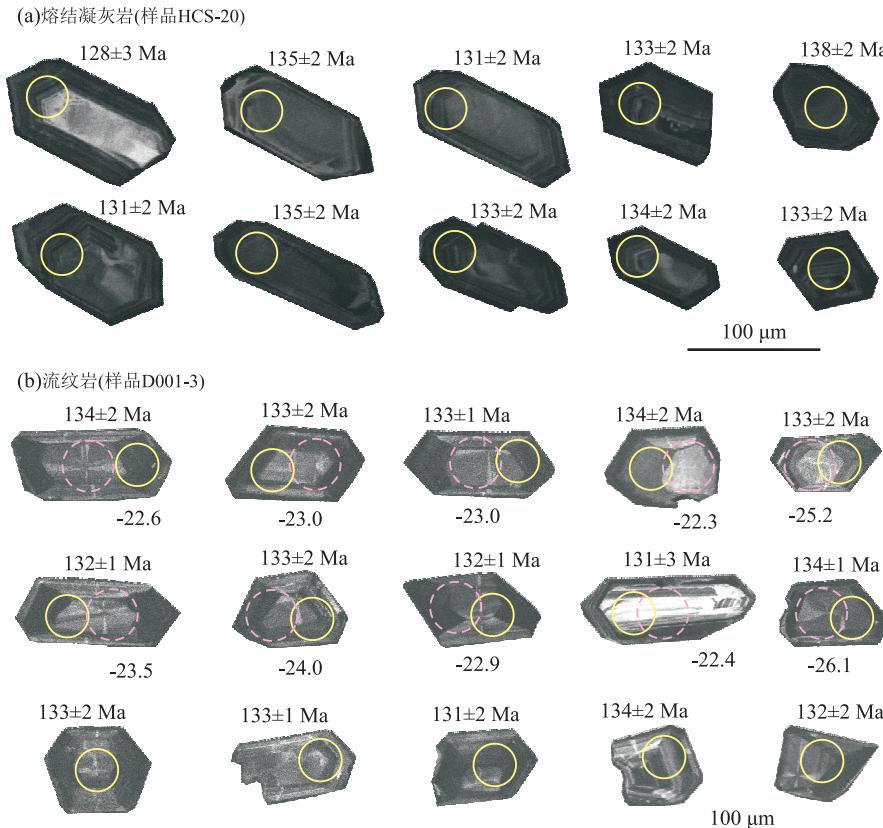


图 4 陈棚组熔结凝灰岩(a)和流纹岩(b)代表性锆石阴极发光(CL)图像

Fig.4 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons for the ignimbrite (a) and rhyolite (b) from the Chenpeng Formation

实线圆为锆石 U-Pb 测点,虚线圆为锆石 Lu-Hf 测点。图中锆石上方为测得 U-Pb 年龄,锆石下方为测得 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

表 1 陈棚组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon isotopic U-Pb data for the volcanic rocks from the Chempeng Formation

样品	元素含量 (10^{-6})						同位素比值						年龄 (Ma)			
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
HCS-20; 贫矿屑晶屑熔结凝灰岩																
HCS-20@01	43	527	550	0.96	0.0528	0.004 4	0.1491	0.014 0	0.0200	0.000 5	318	208	141	12	128	3
HCS-20@02	130	1 240	2 478	0.50	0.048 6	0.002 4	0.1442	0.007 1	0.021 6	0.000 4	127	105	137	6	138	2
HCS-20@03	53	373	1 834	0.20	0.052 2	0.003 4	0.150 5	0.009 1	0.021 1	0.000 4	292	137	142	8	135	2
HCS-20@04	197	2 082	2 847	0.73	0.052 6	0.002 2	0.155 4	0.006 5	0.021 2	0.000 3	310	92	147	6	135	2
HCS-20@05	195	1 876	3 358	0.56	0.052 4	0.002 1	0.152 8	0.006 2	0.020 9	0.000 3	303	90	144	5	133	2
HCS-20@06	171	1 716	3 413	0.50	0.047 3	0.002 0	0.136 0	0.005 9	0.020 9	0.000 4	66	88	129	5	133	2
HCS-20@07	159	1 841	1 718	1.07	0.053 2	0.002 7	0.151 7	0.007 7	0.020 7	0.000 3	338	112	143	7	132	2
HCS-20@08	195	1 821	2 937	0.62	0.050 5	0.003 7	0.145 2	0.010 3	0.020 9	0.000 3	217	166	138	9	133	2
HCS-20@09	339	2 881	4 320	0.67	0.052 4	0.003 7	0.152 4	0.010 4	0.021 1	0.000 3	304	161	144	9	134	2
HCS-20@10	22	65	1 072	0.06	0.053 8	0.004 2	0.155 3	0.011 4	0.021 2	0.000 4	361	165	147	10	135	2
HCS-20@11	221	1 228	3 188	0.39	0.047 7	0.004 0	0.134 5	0.011 0	0.020 5	0.000 3	83	186	128	10	131	2
HCS-20@12	269	1 439	4 267	0.34	0.061 3	0.008 0	0.173 2	0.022 5	0.020 5	0.000 3	649	294	162	20	131	2
HCS-20@13	768	541	1 193	0.45	0.127 0	0.003 0	5.009 4	0.167 6	0.286 0	0.007 8	2 057	42	1 821	28	1 621	39
HCS-20@14	43	96	129	0.75	0.067 9	0.004 5	0.991 8	0.069 7	0.105 4	0.002 8	866	137	700	36	646	17
HCS-20@15	686	2 113	2 191	0.96	0.072 1	0.002 4	0.601 6	0.029 5	0.058 9	0.001 9	991	67	478	19	369	11
HCS-20@16	56	437	1 372	0.32	0.049 9	0.003 4	0.177 2	0.013 1	0.025 5	0.000 6	191	153	166	11	163	4
D001-3; 流纹岩																
D001-3@01	110	924	751	1.23	0.049 5	0.001 8	0.143 9	0.005 1	0.021 0	0.000 2	169	83	136	5	134	2
D001-3@02	423	3 691	1 849	2.00	0.049 3	0.001 4	0.140 9	0.003 9	0.020 7	0.000 2	161	64	134	3	132	1
D001-3@03	118	917	663	1.38	0.049 2	0.001 8	0.141 3	0.005 1	0.020 9	0.000 3	167	82	134	5	133	2
D001-3@04	362	3 159	1 685	1.88	0.049 4	0.001 3	0.142 2	0.004 0	0.020 8	0.000 2	165	63	135	4	132	1
D001-3@05	45	378	232	1.63	0.047 3	0.003 3	0.133 7	0.008 6	0.020 5	0.000 4	65	156	127	8	131	3
D001-3@06	233	1 937	1 309	1.48	0.049 1	0.001 5	0.139 4	0.004 5	0.020 5	0.000 2	154	77	132	4	131	2
D001-3@07	224	1 871	1 191	1.57	0.047 3	0.001 8	0.134 5	0.005 0	0.020 6	0.000 3	61	89	128	4	132	2
D001-3@08	280	2 375	1 471	1.61	0.049 3	0.001 4	0.142 3	0.004 1	0.020 9	0.000 2	161	64	135	4	133	1
D001-3@09	51	417	386	1.08	0.047 2	0.002 2	0.135 0	0.005 7	0.020 9	0.000 3	58	107	129	5	134	2
D001-3@10	242	1 884	1 231	1.53	0.049 9	0.001 4	0.144 1	0.004 2	0.020 9	0.000 3	191	65	137	4	133	2
D001-3@11	286	2 526	1 574	1.60	0.049 6	0.001 5	0.143 1	0.004 3	0.020 9	0.000 2	176	77	136	4	133	1
D001-3@12	160	1 332	927	1.44	0.048 7	0.002 1	0.140 3	0.006 0	0.020 9	0.000 3	132	99	133	5	133	2
D001-3@13	225	1 949	1 224	1.59	0.047 7	0.001 3	0.138 1	0.003 8	0.021 0	0.000 2	83	65	131	3	134	1
D001-3@14	52	440	283	1.56	0.049 6	0.003 6	0.140 6	0.009 5	0.020 9	0.000 4	176	168	134	8	133	2
D001-3@15	520	4 123	1 999	2.06	0.053 0	0.003 6	0.154 2	0.010 3	0.021 1	0.000 2	330	157	146	9	135	1

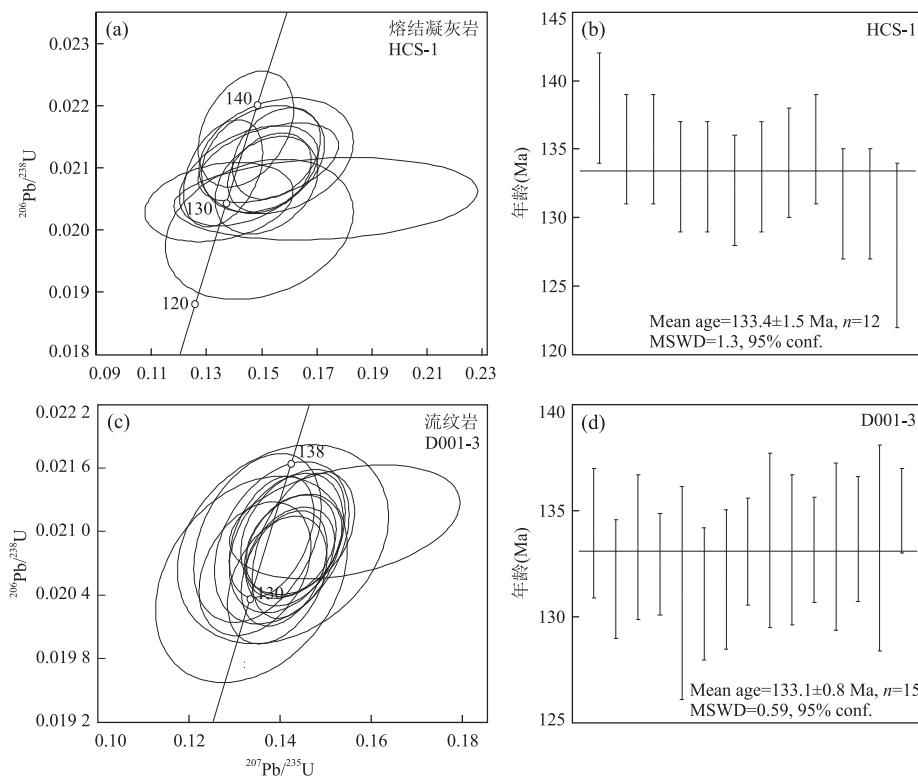


图5 陈棚组岩屑晶屑熔结凝灰岩(a,b)和流纹岩(c,d)锆石U-Pb年龄

Fig.5 U-Pb concordia diagrams and weighted mean ages for the ignimbrite (a, b) and rhyolite (c, d) from the Chenpeng Formation
岩屑晶屑熔结凝灰岩(样品HCS-1)的4颗捕获或继承锆石数据点未显示

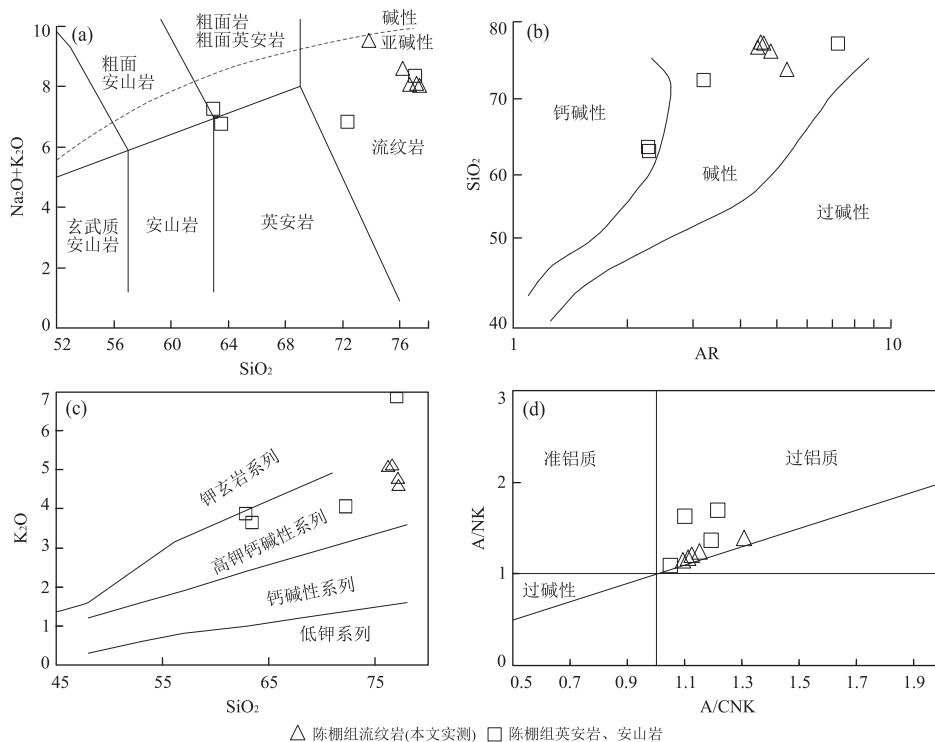


图6 陈棚组流纹岩主量元素图解

Fig.6 Major element diagrams for the rhyolite from the Chenpeng Formation

陈棚组数据依据张四清等,1:5万文殊寺幅地质图说明书,河南省地质矿产勘查开发局第3地质调查队,2001年5月

表 2 陈棚组流纹岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 2 Major elements (%), trace elements (10^{-6}) and rare earth elements (10^{-6}) of the rhyolite from the Chenpeng Formation

样号	D001-1	D001-2	D001-3	D001-4	D004-2
岩性	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩	流纹岩
SiO ₂	76.67	76.16	77.38	77.17	73.83
TiO ₂	0.11	0.14	0.12	0.12	0.06
Al ₂ O ₃	12.44	12.83	12.32	12.34	13.86
Fe ₂ O ₃	0.72	0.78	0.63	0.55	0.91
FeO	0.63	0.58	0.52	0.55	0.58
MnO	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
MgO	0.15	0.16	0.12	0.12	0.22
CaO	0.36	0.30	0.28	0.28	0.10
Na ₂ O	3.04	3.50	3.38	3.34	0.22
K ₂ O	5.05	5.10	4.65	4.77	9.31
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Total	99.25	99.61	99.46	99.29	99.13
LOI	0.48	0.11	0.24	0.41	0.55
A/NK	1.19	1.14	1.16	1.16	1.33
A/CNK	1.12	1.09	1.11	1.11	1.31
La	27.80	34.50	20.10	20.30	4.08
Ce	45.50	56.30	37.10	35.80	8.27
Pr	4.02	5.37	3.00	3.01	1.07
Nd	9.34	13.50	7.05	7.12	3.16
Sm	1.38	2.13	1.05	1.05	0.63
Eu	0.14	0.23	0.13	0.13	0.15
Gd	1.22	1.69	0.94	0.94	0.43
Tb	0.18	0.26	0.15	0.15	0.08
Dy	1.10	1.55	0.93	0.96	0.44
Ho	0.24	0.31	0.21	0.22	0.09
Er	0.78	0.98	0.67	0.72	0.30
Tm	0.15	0.17	0.13	0.13	0.06
Yb	1.12	1.24	0.98	1.02	0.54
Lu	0.17	0.17	0.14	0.15	0.09
Y	7.48	8.99	6.35	6.59	3.59
Li	4.00	2.94	2.96	9.86	15.60
Cr	13.20	4.89	4.58	15.30	4.36
Co	1.54	2.05	1.08	<1	1.20
Ni	4.46	4.85	2.98	3.13	4.53
Ga	15.20	15.90	15.10	16.00	36.60
Nb	15.40	15.50	14.20	15.30	12.80
Mo	1.20	0.77	0.39	0.48	0.44
Ta	1.34	1.44	1.26	1.33	1.18
Th	8.66	11.00	8.67	22.00	32.30
U	3.46	4.96	2.63	3.11	14.90
Cl	53.80	58.70	80.40	45.60	82.00
Ba	75.20	157.00	189.00	186.00	354.00
Hf	4.46	4.67	4.23	4.47	16.50
Pb	36.70	42.60	92.10	113.00	69.00
Rb	176.00	156.00	141.00	159.00	570.00
Sr	42.60	113.00	53.30	52.20	22.60
Zr	85.40	99.60	80.30	86.60	152.00
Cs	1.74	1.45	1.04	1.09	11.50
As	1.01	0.78	0.70	0.78	3.66
Sb	0.17	0.10	0.16	0.10	0.32
Bi	0.07	0.05	0.23	0.20	0.25
Be	3.37	1.48	1.86	2.06	2.68
V	2.51	4.51	4.18	3.66	6.41
Sc	3.66	4.61	4.53	4.17	4.92
Cu	8.46	8.29	9.48	5.79	10.20
Zn	11.20	11.00	113.00	99.60	54.30
Au	0.46	0.59	0.51	0.56	11.90
Ag	0.09	0.07	0.24	0.13	56.00
F	337.00	439.00	210.00	634.00	892.00
Σ REE	93.14	118.40	72.58	71.70	19.39
(La/Yb) _N	17.80	19.96	14.71	14.28	5.42
δ Eu	0.33	0.37	0.40	0.40	0.88
δ Ce	1.06	1.01	1.17	1.12	0.97

(图 5c, 5d), 谐和年龄为 132.9 ± 0.4 Ma (1σ , MSWD=0.69). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对集中, 范围在 131~134 Ma, 加权平均年龄为 133.1 ± 0.8 Ma (1σ , MSWD=0.59), 代表了流纹岩的成岩年龄.

5.2 岩石地球化学

5 个流纹岩样品的主量和微量元素的分析结果列于表 2.

样品主量元素具高硅 ($\text{SiO}_2 = 73.83\% \sim 77.38\%$)、高钾 ($\text{K}_2\text{O} = 4.65\% \sim 9.31\%$)、强过铝质 ($\text{A/CNK} = 1.09 \sim 1.31$) 的特征. 总碱含量 $8.03\% \sim 9.53\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 > 1 , CaO 含量较低 ($0.10\% \sim 0.36\%$), $\text{Mg}^{\#}$ 为 19~25. 碱度率 AR 范围 4.43~5.30. 在 TAS 图上全部投入流纹岩系列, 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 关系图上样品点主要落在高钾钙碱性系列(少数样品在钾玄岩系列)(图 6). 稀土元素总量相对较低 ($\Sigma \text{REE} = 19.39 \times 10^{-6} \sim 118.40 \times 10^{-6}$), 轻稀土富集, 重稀土平坦, $(\text{LREE}/\text{HREE})_N$ 为 8.56~17.78, 负 Eu 异常(或弱负 Eu 异常), $\delta \text{Eu} = 0.33 \sim 0.88$. 大离子亲石元素相对富集, 而明显亏损了 Ba、Nb、Ta、P 和 Ti, 且富集 Pb(图 7).

5.3 全岩 Sr-Nd 同位素

3 个流纹岩样品的 Sr、Nd 同位素组成列于表 3. 全岩初始 Sr 比值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.708220 \sim 0.708741$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.511517 \sim 0.511586$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -17.2 \sim -18.5$. 利用两阶段模式(Liew and Hofmann, 1988)计算出 Nd 同位素两阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 2.32 \sim 2.43$ Ga. Sr-Nd 同位素特征指示陈棚组流纹岩浆源区为古老的地壳物质.

5.4 锆石 Lu-Hf 同位素

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究基础上, 对流纹岩(样品 D001-3)中锆石进行了微区 Lu-Hf 同位素测定, 分析结果列于表 4. 10 颗锆石取得的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围分别为 0.281957~0.282063 和 0.000011~0.000108, 根据 U-Pb 年龄计算的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较为集中, 为 $-22.3 \sim -26.1$, 平均值为 -23.5 , Hf 两阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 2.29 \sim 2.49$ Ga, 平均值为 2.35 Ga.

6 讨论

6.1 岩石成因和岩浆源区

陈棚组流纹岩具有高硅 ($\text{SiO}_2 = 73.83\% \sim 77.38\%$)、高钾 ($\text{K}_2\text{O} = 4.65\% \sim 9.31\%$) 特征, $\text{A/CNK} = 1.09 \sim 1.31$ (集中于 1.11 附近), 属于过铝质

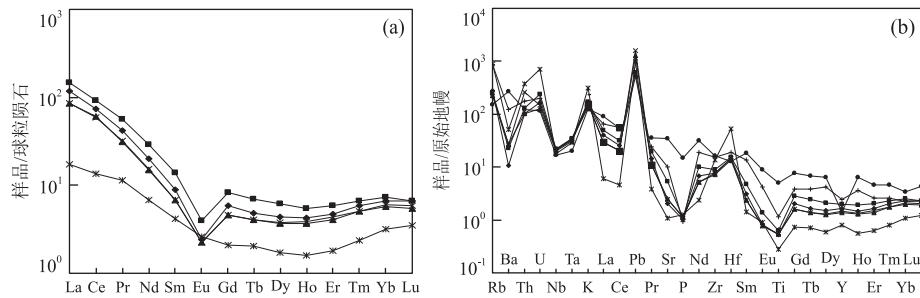


图7 陈棚组流纹岩稀土元素配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace elements diagram (b) for the rhyolite from the Chenpeng Formation

图a 标准化值据 Boynton(1984);图b 标准化值据 Sun and McDonough(1989)

表3 陈棚组流纹岩全岩Sr-Nd同位素分析结果

Table 3 Whole rock Sr-Nd isotopic data of the rhyolite from the Chenpeng Formation

样品	岩石类型	年龄(Ma)	Rb (10 ⁻⁶)	Sr (10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	I _{Sr}	Sm (10 ⁻⁶)	Nd (10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd(t)}	T _{DM2} (Ga)
D001-1	流纹岩	133	184.4	45.3	0.730 47	11.770	0.708 220	1.218	9.348	0.078 8	0.511 586	0.511 517	-18.5	2.43
D001-3	流纹岩	133	158.4	57.2	0.723 58	7.995	0.708 466	1.244	10.010	0.075 2	0.511 614	0.511 549	-17.9	2.38
D001-4	流纹岩	133	161.2	57.6	0.724 01	8.077	0.708 741	0.914	6.905	0.080 3	0.511 656	0.511 586	-17.2	2.32

注:计算过程所用参数(¹⁴⁷Sm/¹⁴³Nd)_{CHUR}=0.196 7;(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR}=0.512 638;(¹⁴⁷Sm/¹⁴³Nd)_{DM}=0.213 7;(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM}=0.513 15.

表4 陈棚组流纹岩的锆石Lu-Hf同位素LA-MC-ICP-MS原位分析结果

Table 4 LA-MC-ICP-MS zircon Lu-Hf isotopic data for the rhyolite from the Chenpeng Formation

样品点	年龄(Ma)	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	ε _{Hf(0)}	1σ	ε _{Hf(t)}	1σ	T _{DM2} (Ga)	f _{Lu/Hf}
D001-3@01	134	0.001 890	0.092 306	0.282 055	0.000 011	-25.4	0.7	-22.6	0.7	2.30	-0.94
D001-3@02	132	0.002 035	0.094 551	0.282 030	0.000 018	-26.2	0.8	-23.5	0.8	2.35	-0.94
D001-3@04	132	0.002 192	0.103 828	0.282 049	0.000 019	-25.6	0.8	-22.9	0.8	2.31	-0.93
D001-3@05	131	0.001 748	0.080 929	0.282 063	0.000 012	-25.1	0.7	-22.4	0.7	2.29	-0.95
D001-3@08	133	0.002 032	0.103 773	0.282 043	0.000 013	-25.8	0.7	-23.0	0.7	2.32	-0.94
D001-3@09	134	0.001 034	0.054 393	0.282 060	0.000 013	-25.2	0.7	-22.3	0.7	2.29	-0.97
D001-3@10	133	0.002 037	0.101 663	0.282 046	0.000 016	-25.7	0.8	-23.0	0.8	2.32	-0.94
D001-3@12	133	0.003 170	0.118 901	0.282 018	0.000 025	-26.7	1.0	-24.0	1.0	2.38	-0.90
D001-3@13	134	0.002 736	0.113 463	0.281 957	0.000 025	-28.8	1.0	-26.1	1.0	2.49	-0.92
D001-3@14	133	0.002 100	0.105 706	0.281 982	0.000 015	-27.9	0.7	-25.2	0.8	2.44	-0.94

注:测试点序号与表1测年点序号对应。

系列。据CIPW标准矿物计算,刚玉含量达1.16%~3.47%。岩石具很高K含量及高K/Na比值,普遍被理解为在部分熔融的过程中受控于源区较高的钾含量,表现了与成熟大陆地壳的亲缘性(邱检生等,2003)。其过铝质特征暗示了与S型花岗岩类的亲缘性,但不排除分异I型花岗岩类的可能。岩石REE配分曲线呈右倾斜型,反映岩石成岩过程中LREE发生过强烈分馏;负Eu异常反映成岩过程中可能经历了斜长石结晶分离。与典型S型花岗岩不同($P_2O_5 > 0.10\%$,Chappell, 1999),岩石 P_2O_5 含量明显偏低(0.02%~0.03%),并与 SiO_2 含量呈一定负相关关系,这与I型花岗岩地球化学性质具有相

似性(Chappell, 1999)。岩石具有较高的分异指数(D.I.=94~96)。镜下未见堇青石和石榴子石等过铝质特征矿物,却偶尔可见角闪石。另外,陈棚组中相对偏基性岩石(英安岩和粗安岩)多表现为准铝质和弱过铝质特征(A/CNK=0.76~1.07,杨梅珍等,2012)。结合地球化学和Sr-Nd同位素特征表明,陈棚组流纹岩成因类型可能为高分异I型花岗岩的火山相,是地壳物质重熔演化的产物。

全岩Sr-Nd同位素分析结果显示,陈棚组流纹岩具有较高($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i值(0.708 22~0.720 72),低的 ϵ_{Nd} 值(-17.2~-19.0), $T_{DM2}=2.32\sim 2.47$ Ga。锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值集中于-21.8~-23.7,平均值为

-22.94; 锆石 Hf 模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 2.26 \sim 2.37 \text{ Ma}$, 与全岩 Nd 模式年龄相近, 这些特征均反映流纹岩浆起源于古老的地壳物质的重熔, 无明显地幔物质加入。多数研究者认为大别山地区早白垩世中酸性岩是扬子地块北缘陆壳部分熔融的产物 (Huang et al., 2006; Zhao et al., 2007; 赵子福和郑永飞, 2009; 陈伟等, 2013)。陈棚组流纹岩 Sr-Nd 同位素组成与早白垩世花岗岩类同位素范围基本一致, 并与扬子北缘新元古代 TTG 型岩浆岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成极为相似 (图 8) (Zhang et al., 2008, 2009; 续海金等, 2008; 陈伟等, 2013)。综合表明, 陈棚组流纹岩起源于扬子陆壳北缘古老地壳物质的部分熔融。

6.2 陈棚组形成时代

陈棚组火山岩的年代学研究程度较低, 迄今仅有一个石英安山岩 U-Pb 同位素年龄报道 ($133.4 \pm 1.5 \text{ Ma}$, 杨梅珍等 2012)。本文研究获得陈棚组下部流纹岩和上部火山凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $133.1 \pm 0.8 \text{ Ma}$ 和 $133.1 \pm 1.5 \text{ Ma}$ 。另外, 笔者获得吴陈河地区陈棚组英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $133.2 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (σ , MSWD=0.09, 未发表)。据此可见, 陈棚组下部火山熔岩 (英安岩、流纹岩和石英安山岩) 和上部火山碎屑岩 (岩屑晶屑熔结凝灰岩) 的 U-Pb 年龄在误差范围内近于一致, 暗示陈棚

组火山岩是在较短时间内喷发形成的。

6.3 皇城山银矿床形成时代

皇城山银矿床距离付家湾火山喷发中心约 1 km, 受火山机构枝的叉状裂隙构造控制。银矿赋存于此种裂隙中, 呈上宽下窄、北东宽深、西南窄浅的楔形, 沿走向指向付家湾火山喷发中心。矿化蚀变带自北东向南西由宽变窄 (由石英大脉变为稀疏细脉), 距离火山中心愈近蚀变程度愈强, 显示了成矿与陈棚组火山活动的密切成因联系。矿区大面积发育酸性火山热液流体淋滤形成的孔洞状强硅化岩石, 成矿流体具低温 ($<200^\circ\text{C}$)、低盐度 ($<5\% \text{ Na-Cleq}$) 特征 (杨梅珍等, 2011), 导致岩石高硅蚀变所需的酸性流体可能源于岩浆挥发份在地壳浅部 ($<4 \text{ km}$) 分离出的低密度、低盐度、低金属元素含量和富 SO_2 、 H_2S 和 HCl 的蒸汽相 (Williams-Jones and Heinrich, 2005)。矿床地质特征和成因研究均反映皇城山银矿床是陈棚组火山流体的近地表淋滤作用产物 (徐国风等, 1989; 肖从辉, 1991; 任爱琴, 2006; 杨梅珍等, 2011)。因此, 陈棚组火山喷发时限 (约 133 Ma) 可以基本代表皇城山浅成低温热液型银矿床的形成时代。

皇城山矿区东南 8 km 处产有白石坡中型银矿床。与该矿床成因关系密切的花岗斑岩 SHRIMP U-Pb 年龄为 $142.0 \pm 4.3 \text{ Ma}$, 反映了白石坡银矿床的成矿时代 (李厚民等, 2007)。李厚民等 (2007) 推测皇城山和白石坡银矿床可能为同一岩浆事件的产物。但据本文研究, 陈棚组火山活动时限明显晚于白石坡花岗斑岩侵位时间 (间隔约 10 Ma), 表明上述两个银矿床可能为不同时期岩浆作用的产物。

6.4 成岩—成矿构造背景

大别山地区早白垩世大规模岩浆作用可大致分为 3 个阶段: (1) 早阶段 $>133 \text{ Ma}$ 的花岗岩具有高 Sr 低 Y 的地球化学特征, 普遍含角闪石, 被认为形成于加厚基性下地壳 ($>50 \text{ km}$) 的部分熔融; (2) 中阶段 $133 \sim 125 \text{ Ma}$ 未发生形变的花岗岩和大规模火山岩不再具有高 Sr/Y 比特征, 被认为是地壳物质在小于 35 km 下地壳发生部分熔融的产物; (3) 晚阶段 $125 \sim 110 \text{ Ma}$ 岩浆岩主要类型为霞石正长岩、正长岩和钾长花岗斑岩等, 形成于强烈的岩石圈伸展背景 (Wang et al., 2006; Xu et al., 2007; 赵新福等, 2007; 续海金等, 2008; Huang et al., 2008; 陈玲等, 2012; 陈伟等, 2013; 任志等, 2014)。大量研究表明, 大别山地区“加厚下地壳的拆沉”可能发生在 130 Ma 左右 (高山等, 1999; 张超和马昌

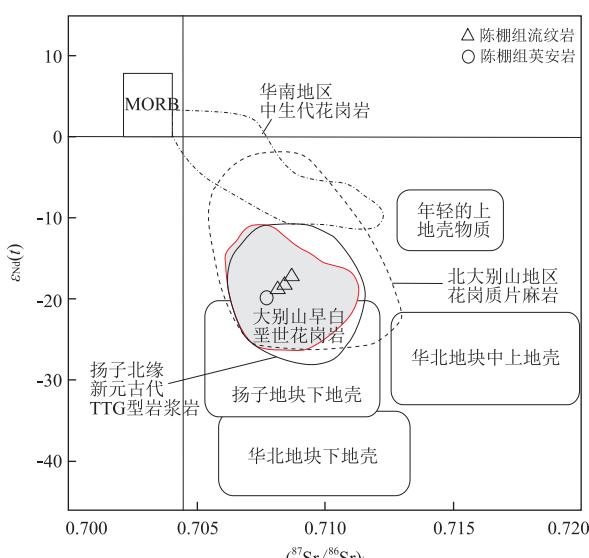


图 8 陈棚组流纹岩和英安岩全岩 Sr-Nd 同位素组成
Fig.8 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ diagram for the rhyolite from the Chenpeng Formation

底图据 John et al. (1999)、赵子福和郑永飞 (2009)、陈伟等 (2013) 修改。数据来源: 华北地块下地壳、中上地壳和扬子地块下地壳范围引自 John et al. (1999); 中生代花岗岩范围引自赵子福和郑永飞 (2009)。陈棚组流纹岩数据为本文实测, 英安岩数据引自杨梅珍等 (2012)。

表5 大别造山带北淮阳地区白垩纪火山岩年龄

Table 5 Ages of the Cretaceous volcanic rocks in the northern Huaiyang belt, Dabie orogenic belt

组名	岩性	年齡值(Ma)	测试方法	数据来源
陈棚组	石英安山岩	133.4±1.5	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	杨梅珍等(2012)
	熔结凝灰岩	133.1±1.5	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	本文
	流纹岩	133.1±0.8	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	本文
	英安斑岩	133.2±1.7	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	笔者实测,未发表
金刚台	粗安岩	129±2.0	SHRIMP 镍石 U-Pb	黄丹峰等(2010)
	正长斑岩	129.2±0.7	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	黄皓和薛怀民(2012)
	熔结凝灰岩	128.8±0.7	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	黄皓和薛怀民(2012)
	粗面安山岩	127.6±0.5	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	黄皓和薛怀民(2012)
	流纹岩	127±3.6	SHRIMP 镍石 U-Pb	黄丹峰等(2010)
	流纹英安岩	127.5±0.6	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	李鑫浩等(2015)
	英安岩	124.8±2.3	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	李鑫浩等(2015)
	安山岩	123.3±0.7	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	李鑫浩等(2015)
毛坦厂组	粗面质熔结凝灰岩	130.8±1.8	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	张定源等(2014)
	安山岩	126.7±1.4	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	朱江等(2017)
晓天组	粗面岩	126.9±1.7	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	张定源等(2014)
望母山组	粗面岩	126.7±1.4	LA-ICP-MS 镍石 U-Pb	张定源等(2014)

前,2008;陈玲等,2012;陈伟等,2013).因此,第二阶段(133~125 Ma)岩浆活动形成于造山带山根垮塌、挤压向伸展减薄转化的构造体制。陈棚组流纹岩Sr/Y比值为5.7~12.6,负Eu异常,其微量元素地球化学特征不同于早阶段加厚下地壳重熔产生的岩浆,笔者推测为下地壳物质在深度小于35 km条件下部分熔融的产物。结合区域地质和年代学数据,笔者认为陈棚组火山岩形成于加厚下地壳拆沉作用的初期、挤压向伸展转化环境。

北淮阳构造带早白垩世火山岩自西向东包括陈棚组、金刚台组、晓天组、毛坦厂组等,其形成时代主要集中于133~125 Ma(表5)。上述火山岩是早白垩世第二阶段岩浆事件的重要记录,与加厚下地壳的拆沉有关。本文研究表明,西大别地区陈棚组火山岩年龄要略早于东大别地区的晓天组和毛坦厂组。此外,陈棚组流纹岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为-21.8~-23.7,平均值为-22.94;毛坦厂组安山岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为-18.9~-21.3,平均值为-20.21(图9,图10)。因此,从西向东,火山活动时限变得略年轻;火山岩具有酸性程度逐渐降低、幔源组分逐渐增多的变化趋势(李鑫浩等,2015)。

大别山浅成低温热液型金银矿床包括高硫化型和低硫化型两种类型,分别以皇城山银矿床和东溪金矿床为代表(李兆鼐等,2004;杨梅珍等,2011;张定源等,2014;朱江等,2017)。这两个矿床分别与陈棚组和毛坦厂组火山作用成因联系密切,前者形成于挤压—伸展转化环境,后者形成于强烈拉张应力

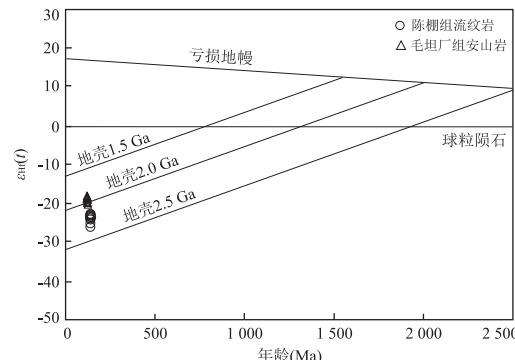
图9 陈棚组流纹岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -t图解

Fig.9 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -t vs. age diagram for the rhyolite from the Chenpeng Formation

毛坦厂组安山岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 数据为笔者实测(未发表)

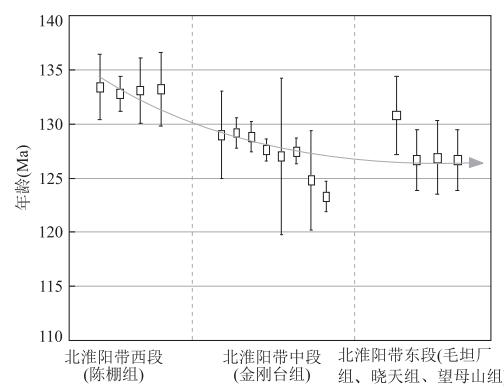


图10 北淮阳晚中生代火山岩带不同地区火山岩形成时代

Fig.10 Ages of the volcanic rocks in different tectonic units of the northern Huaiyang area, Dabie orogenic belt

年龄数据同表5

场环境。世界范围内,高硫化型和低硫化型矿床形成的区域构造环境也经常存在较大差异(江思宏等,2004);高硫化型矿床主要形成于弱挤压(或中性)应力场环境,低硫化型矿床多形成于拉张的环境(如智利和日本北部的此类型矿床;Kojima, 1999)。综上,大别山早白垩世高硫化型和低硫化型金银矿床形成于下地壳拆沉作用不同阶段的不同应力场环境。

7 结论

(1) 皇城山银矿区及外围陈棚组熔结凝灰岩和流纹岩的锆石 U-Pb 年龄分为 133.4 ± 1.5 Ma 和 133.1 ± 0.8 Ma, 误差范围内近于一致, 反映陈棚组火山岩是在早白垩世较短时间内喷发形成的。该火山作用时限基本代表了皇城山银矿床的形成年龄。岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素特征表明陈棚组流纹岩是扬子陆壳北缘古老地壳物质重熔演化的产物。

(2) 陈棚组火山岩及其相关皇城山银矿床形成于加厚下地壳拆沉初期、挤压向伸展转化环境。西大别山地区陈棚组火山岩形成时代略早于东大别山地区晚中生代火山岩。大别山地区早白垩世高硫化型和低硫化型浅成低温热液金银矿床形成于下地壳拆沉期的不同应力场环境。

致谢:野外考察过程中得到河南省第三地质矿产调查院杨泽强总工和唐相伟工程师的大力支持;撰稿过程中与武汉地质调查中心邓新、徐大良、刘浩进行了有益讨论;中国地质大学(武汉)李占轲老师、匿名审稿专家和责任编辑对论文修改提出了宝贵建议,在此衷心感谢!

References

- Blichert Toft, J., Chauvel, C., Albarède, F., 1997. Separation of Hf and Lu for High-Precision Isotope Analysis of Rock Samples by Magnetic Sector-Multiple Collector ICP-MS. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(3): 248–260. <https://doi.org/10.1007/s004100050278>
- Boynton, W. V., 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite studies. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam. 63–114.
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- And S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Hapligranites. *Lithos*, 46(3): 535–551. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00086-3)
- Chen, L., Ma, C.Q., Zhang, J.Y., et al., 2012. The First Geological Map of Intrusive Rocks in Dabie Orogenic Belt and Its Adjacent Areas (1 : 500 000) and Its Explanatory Notes. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 13–19 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W., Xu, Z.W., Li, H.C., et al., 2013. Petrogenesis and Origin of the Xinxiang Granitic Batholith in Henan Province and Its Implication for the Tectonic Evolution of the Western Dabie Area. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1510–1524 (in Chinese with English abstract).
- Du, J.G., Zhang, P., 1999. Mesozoic Volcanic Rocks in Northern Part of Dabie Orogenic Belt. *Geoscience*, 13(1): 57–65 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y.D., 2008. Structure and Facies of the Volcanic Rocks in the Shangtianti Area of the Northern Dabie Mountains. *Geology and Mineral Resources of South China*, 24(3): 79–84. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-3701.2008.03.013> (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Zhang, B.R., Jin, Z.M., et al., 1999. Delamination of the Lower Crust of the Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Science in China (Series D)*, 29(6): 532–541 (in Chinese).
- Han, Y.F., Li, Y.H., Lei, D.J., 2013. Metallogenic Series Related to Mesozoic Volcanic Rocks in Shangtianti-Huangchengshan Area, North Foot of Dabie Mountain. *Geology and Mineral Resources of South China*, 26(2): 29–35 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Z.C., Gao, S., Liu, Y.S., et al., 2008. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093. <https://doi.org/10.1039/b804760j>
- Hu, Z.C., Liu, Y.S., Gao, S., et al., 2012a. A “Wire” Signal Smoothing Device for Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry Analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 78: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.09.007>
- Hu, Z.C., Liu, Y.S., Gao, S., et al., 2012b. Improved in Situ Hf Isotope Ratio Analysis of Zircon Using Newly Designed X Skimmer Cone and Jet Sample Cone in Combination with the Addition of Nitrogen by Laser Ablation Multiple Collector ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391–1399. <https://doi.org/10.1039/c2ja30078h>
- Huang, D.F., Luo, Z.H., Lu, X.X., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Tectonic Implications of Jingangtai Volcanic Rocks in North Margin of Dabie Mountains. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F., Li, S.G., Dong, F., et al., 2008. High-Mg Adakitic Rocks in the Dabie Orogen, Central China: Implications for Foundering Mechanism of Lower Continental Crust. *Chemical Geology*, 255(1/2): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.02.014>

- Huang, H., Xue, H.M., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of Early Cretaceous Volcanic Rocks from Jingangtai Formation in Beihuaiyang Belt on the Northern Margin of the Dabie Orogen and Their Geological Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3):371—381 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2006. Melting of Subducted Continent: Element and Isotopic Evidence for a Genetic Relationship between Neoproterozoic and Mesozoic Granitoids in the Sulu Orogen. *Chemical Geology*, 229(4):227—256. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.11.007>
- Jahn, B., 1999. Crust-Mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continental Crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from Post-Collisional Mafic-Ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157(1/2):119—146. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00197-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00197-1)
- Jiang, S.H., Nie, F.J., Zhang, Y., et al., 2004. The Latest Advances in the Research of Epithermal Deposits. *Earth Science Frontiers*, 11(2):401—411 (in Chinese with English abstract).
- Kojima, S., 1999. Some Aspects Regarding the Tectonic Setting of High- and Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposits of Chile. *Resource Geology*, 49(3):175—181. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.1999.tb00044.x>
- Li, H.M., Chen, Y.C., Ye, H.S., et al., 2008. Mo, (W), Au, Ag, Pb, Zn Minerogenetic Series Related to Mesozoic Magmatic Activities in the East Qinling-Dabie Mountains. *Acta Geoscientica Sinica*, 82(11):1468—1477. <https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5717.2008.11.002> (in Chinese with English abstract).
- Li, H.M., Wang, D.H., Zhang, G., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Age of Zircons from Granitic Porphyry in the Baishipo Silver Deposit, Henan and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(6):808—813 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Y., 2004. Mesozoic Sedimentology, Basin Analysis and Tectonic Evolution in the North Margin of the Dabie Orogenic Belt, China (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Gao, X.N., Zhang, Z.H., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Volcanic Rocks from the Jingangtai Formation and Stratigraphic Comparison. *Geotectonica et Metallogenesis*, 39(4):718—728. <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2015.04.014> (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.N., Wu, R.S., Lin, B.Q., et al., 2004. Gold Deposits from the Volcanic Rocks Area in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liew, T.C., Hofmann, A.W., 1988. Precambrian Crustal Components, Plutonic Associations, Plate Environment of the Hercynian Fold Belt of central Europe: Indications from a Nd and Sr Isotopic Study. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 98(2):129—138.
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., 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 from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1/2):537—571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1/2):34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. No. 4. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Qiao, G.S., 1988. Normalization of Isotopic Dilution Analysis—A New Program for Isotope Mass Spectrometric Analysis. *Science China: Mathematics*, 31:1263.
- Qiu, J.S., Xu, X.S., Jiang, S.Y., 2003. Deep Subduction of Crust Materials and Its Implication to the Genesis of Potash-Rich Volcanic Rocks. *Earth Science Frontiers*, 10(3):191—200 (in Chinese with English abstract).
- Ren, A.Q., 2006. Geochemical Characteristics and Metallogenetic Model of the Huangchengshan Silver Deposit in Henan Province. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 30(2):133—136 (in Chinese with English abstract).
- Ren, A.Q., 2013. Mineralization Characteristics and Genesis of Huangchengshan Silver Deposit in Luoshan County, Henan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 29(3):217—226 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J.S., Chen, T.Y., Niu, B.G., et al., 1992. Tectonic Evolution of Continental Lithosphere and Ore-Forming beneath East China and Its Adjacent Areas. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ren, Z., Zhou, T.F., Yuan, F., et al., 2014. The Stages of Magmatic System in Shapinggou Molybdenum Deposit District, Anhui Province: Evidence from Geochronology and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4):1097—1116 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1):313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>

- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J.F., et al., 2006. Petrogenesis of Cretaceous Adakitic and Shoshonitic Igneous Rocks in the Lu-zong Area, Anhui Province (Eastern China): Implications for Geodynamics and Cu-Au Mineralization. *Lithos*, 89 (3/4): 424–446. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.12.010>
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., et al., 1995. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19(1): 1–23. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908x.1995.tb00147.x>
- Williams-Jones, A.E., Heinrich, C.A., 2005. 100th Anniversary Special Paper: Vapor Transport of Metals and the Formation of Magmatic-Hydrothermal Ore Deposits. *Economic Geology*, 100(7): 1287–1312. <https://doi.org/10.2113/100.7.1287>
- Wu, H.Q., Jiang, L.L., Dai, S.Q., 2002. Collation of the Mesozoic Sequences in the Huoshan-Maochang Area of Anhui. *Journal of Stratigraphy*, 26 (1): 39–45 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2013. Tectonic Evolution of a Composite Collision Orogen: An Overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu Orogenic Belt in Central China. *Gondwana Research*, 23 (4): 1402–1428. <https://doi.org/10.13039/501100002855>
- Xiao, C.H., 1991. Discuss on genesis of Huang Chengshan Silver Deposit. *Henan Geology*, 9(3): 6–9 (in Chinese).
- Xu, G.F., Shao, J.L., Zhang, H.Z., et al., 1989. On the Study of Prospecting Typomorphism of Minerals from Huang Chengshan Silver Deposit. *Modern Geology*, 3(4): 432–437 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H.J., Ma, C.Q., Ye, K., 2007. Early Cretaceous Granitoids and Their Implications for the Collapse of the Dabie Orogen, Eastern China: SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Geochemistry. *Chemical Geology*, 240(3/4): 238–259. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.018>
- Xu, H.J., Ye, K., Ma, C.Q., 2008. Early Cretaceous Granitoids in the North Dabie and Their Tectonic Implications: Sr-Nd and Zircon Hf Isotopic Evidences. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 87–103 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M.Z., Zeng, J.N., Ren, A.Q., et al., 2011. Identifying Characteristics of High-Sulfidation Epithermal Huangcheng Shan Silver Deposit in Henan Province and Their Ore-Search Implications. *Geology and Exploration*, 47 (6): 1059–1066 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M.Z., Zeng, J.N., Ren, A.Q., et al., 2012. Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology of Mesozoic Shuangqiao Volcanic Rocks in the Western Segment of Northern Dabie Mountain. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2): 133–144. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6524.2012.02.002> (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. L., Shen, J. L., Shen, W. Z., et al., 1999. Isotopic Chronology of Mesozoic Volcanic Intrusive Rocks in Beihuaiyang. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 674–680 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Ma, C.Q., 2008. Large-Scale Late Mesozoic Magmatism in the Dabie Mountain: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopes. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28 (4): 71–79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.Y., Wang, A.G., Zhang, X.D., et al., 2014. Geological Characteristics and Ore-Forming Conditions of Dongxi-Nanguanling Gold Deposit, Huoshan County, Anhui Province. *Resources Survey and Environment*, 35 (3): 202–210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Zhang, B.R., Yuan, X.C., et al., 2001. Qinling Orogenic Belt and Continent Dynamics. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, P., 1998. The Mesozoic Volcanic Activities and Their Tectonic Settings in the North Huaiyang Area. *Geology of Anhui*, 8(3): 12–17 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2008. Neoproterozoic Anatexis of Archean Lithosphere: Geochemical Evidence from Felsic to Mafic Intrusions at Xiaofeng in the Yangtze Gorge, South China. *Precambrian Research*, 163(3/4): 210–238. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.12.003>
- Zhang, S.B., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2009. Origin of TTG-Like Rocks from Anatexis of Ancient Lower Crust: Geochemical Evidence from Neoproterozoic Granitoids in South China. *Lithos*, 113(3/4): 347–368. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.024>
- Zhao, X.F., Li, J.W., Ma, C.Q., et al., 2007. Geochronology and Geochemistry of the Gubei Granodiorite, North Huaiyang: Implications for Mesozoic Tectonic Transition of the Dabie Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1392–1402 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., 2009. Remelting of Subducted Continental Lithosphere: Petrogenesis of Mesozoic Magmatic Rocks in the Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Science in China (Series D)*, 39(7): 888–909. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0134-8>
- Zhao, Z.F., Zheng, Y.F., Wei, C.S., et al., 2007. Post-Collisional Granitoids from the Dabie Orogen in China: Zircon U-Pb Age, Element and O Isotope Evidence for Recycling of Subducted Continental Crust. *Lithos*, 93(3/4): 248–272. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.03.067>
- Zhong, Z.Q., Suo, S.T., Zhang, H.F., et al., 2001. Major Constituents and Texture of the Tongbai-Dabie collisional

ogenetic Belt,*Earth Science*, 26(6): 560—567 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.3321/j.issn.1000-2383.2001.06.002>

Zhu, J., Peng, S.G., Peng, L.H., et al., 2017. Geology, Fluid Inclusion Characteristics, and U-Pb Age of the Dongxi Epithermal Gold Deposit, Anhui Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(5): 593—604. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6524.2017.05.001> (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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.地质通报,31(1): 13—19.
- 陈伟,徐兆文,李红超,等,2013.河南新县花岗岩岩基的岩石成因、来源及对西大别构造演化的启示.地质学报,87(10): 1510—1524.
- 杜建国,张鹏,1999.大别造山带北部的中生代火山岩.现代地质,13(1): 57—65.
- 丰耀东,2008.大别山北坡上天梯一带火山岩相构造.华南地质与矿产,24(3): 79—84.
- 高山,张本仁,金振民,等,1999.秦岭一大别造山带下地壳拆沉作用.中国科学(D辑),29(6): 532—541.
- 韩燕峰,李锐辉,雷大景,2010.大别山北麓上天梯—皇城山一带中生代火山岩成矿系列研究.华南地质与矿产,26(2): 29—35.
- 黄丹峰,罗照华,卢欣祥,2010.大别山北缘金刚台火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意义.地学前缘,17(1): 1—10.
- 黄皓,薛怀民,2012.北淮阳早白垩世金刚台组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.岩石矿物学杂志,31(3): 371—381.
- 江思宏,聂凤军,张义,等,2004.浅成低温热液型金矿床研究最新进展.地学前缘,11(2): 401—411.
- 李厚民,陈毓川,叶会寿,等,2008.东秦岭一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.地质学报,82(11): 1468—1477.
- 李厚民,王登红,张冠,等,2007.河南白石坡银矿区花岗斑岩中锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义.地质学报,81(6): 808—813.
- 李双应,2004.大别造山带北缘中生代沉积学、盆地分析和构造演化(博士学位论文).合肥:合肥工业大学.
- 李鑫浩,高昕宇,张忠慧,等,2015.北淮阳早白垩世金刚台组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地层对比.大地构造与成矿学,39(4): 718—728.
- 李兆鼐,毋瑞身,林宝钦,等,2004.中国火山岩地区金矿床.北京:地质出版社.
- 邱检生,徐夕生,蒋少涌,2003.地壳深俯冲与富钾火山岩成因.地学前缘,10(3): 191—200.
- 任爱琴,2006.河南省皇城山银矿床地球化学特征及成矿模
- 式.物探与化探,30(2): 133—136.
- 任爱琴,2013.河南省罗山县皇城山银矿床矿化特征和成矿作用.华南地质与矿产,29(3): 217—226.
- 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.北京:科学出版社.
- 任志,周涛发,袁峰,等,2014.安徽沙坪沟钼矿区中酸性侵入岩期次研究——年代学及岩石化学约束.岩石学报,30(4): 1097—1116.
- 吴海权,江来利,戴圣潜,2002.安徽霍山—毛坦厂地区中生代地层序的厘定.地层学杂志,26(1): 39—45.
- 肖从辉,1991.皇城山银矿床成因探讨.河南地质,9(3): 6—9.
- 徐国风,邵洁连,张慧珠,等,1989.皇城山银矿床矿物找矿标记性研究.现代地质,3(4): 432—437.
- 续海金,叶凯,马昌前,2008.北大别早白垩纪花岗岩类的 Sm-Nd 和锆石 Hf 同位素及其构造意义.岩石学报,24(1): 87—103.
- 杨梅珍,曾键年,任爱琴,等,2011.河南省皇城山高硫化型浅成低温热液型银矿床识别特征及其找矿意义.地质与勘探,47(6): 1059—1066.
- 杨梅珍,曾键年,任爱琴,等,2012.大别山北缘西段双桥中生代火山岩地球化学及锆石 U-Pb 同位素年代学.岩石矿物学杂志,31(2): 133—144.
- 杨祝良,沈加林,沈渭洲,等,1999.北淮阳中生代火山—侵入岩同位素年代学研究.地质论评,45(增刊): 674—680.
- 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.矿物岩石,28(4): 71—79.
- 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.资源调查与环境,35(3): 202—210.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,等,2001.秦岭造山带与大陆动力学.北京:科学出版社.
- 张鹏,1998.北淮阳地区中生代火山活动及其构造背景.安徽地质,8(3): 12—17.
- 赵新福,李建威,马昌前,等,2007.北淮阳古碑花岗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.岩石学报,23(6): 1392—1402.
- 赵子福,郑永飞,2009.俯冲大陆岩石圈重熔:大别—苏鲁造山带中生代岩浆岩成因.中国科学(D辑),39(7): 888—909.
- 钟增球,索书田,张宏飞,等,2001.桐柏一大别碰撞造山带的基本组成与结构.地球科学,26(6): 560—567. <https://doi.org/10.3321/j.issn.1000-2383.2001.06.002>
- 朱江,彭三国,彭练红,等,2017.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—流体包裹体和赋矿鞍山岩 U-Pb 年代学约束.岩石矿物学杂志,36(5): 593—604.