

doi:10.3799/dqkx.2011.030

浙西南毛断铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年代学及地质意义

李艳军¹, 魏俊浩¹, 伍刚¹, 谭俊¹, 蒋永建¹, 付乐兵¹, 屈文俊², 楼望平³, 谢常才³

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037

3. 浙江省第七地质大队, 浙江丽水 323000

摘要: 毛断铅锌多金属矿床位于浙西南江山—绍兴断裂和政和—大埔断裂间的隆起区, 为区内代表性的铅锌多金属矿床之一。应用 Re-Os 同位素定年方法对该矿床 5 件辉钼矿样品进行了成矿时代测定, 获得辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄为 $(138.6 \pm 2.0) \text{Ma} \sim (140.0 \pm 1.9) \text{Ma}$, 等时线年龄为 $137.7 \pm 2.7 \text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.7$), 模式年龄加权平均值为 $139.0 \pm 0.8 \text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.5$)。该年龄与毛断隐伏岩体成岩时代相吻合, 表明成矿与成岩关系密切。辉钼矿 Re-Os 年龄的精确厘定, 表明毛断铅锌多金属矿床为早白垩世初期华南岩石圈伸展背景下的产物。同时结合前人同时代的 W、Mo、Pb、Zn 等矿床的研究成果指出 $140 \pm 7 \text{Ma}$ 可能为华南另一重要的成矿时限。

关键词: 辉钼矿; 地质年代学; 伸展背景; 武夷山成矿带; 铅锌多金属矿床; 浙江。

中图分类号: P618.6; P597

文章编号: 1000-2383(2011)02-0289-10

收稿日期: 2010-03-07

Re-Os Dating of Molybdenite from the Maoduan Lead-Zinc Polymetallic Deposit in Southwestern Zhejiang Province and Its Geological Significance

LI Yan-jun¹, WEI Jun-hao¹, WU Gang¹, TAN Jun¹, JIANG Yong-jian¹,
FU Le-bing¹, QU Wen-jun², LOU Wang-ping³, XIE Chang-cai³

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China

3. No. 7 Geological Team of Zhejiang Province, Lishui 323000, China

Abstract: The Maoduan lead-zinc polymetallic deposit, located in uplift area between the Jiangshan-Shaoxing and Zhenghe-Dabu deep faults in southwestern Zhejiang Province, is one of typical lead-zinc polymetallic deposits in this region. Re-Os dating of 5 molybdenite separated from the Maoduan lead-zinc polymetallic deposit gave model ages from $138.6 \pm 2.0 \text{Ma}$ to $140.0 \pm 1.9 \text{Ma}$. These data yielded an isochron age of $137.7 \pm 2.7 \text{Ma}$ with $\text{MSWD}=0.7$, and a weighted average model age of $139.0 \pm 0.8 \text{Ma}$ ($\text{MSWD}=0.5$). This result is in good agreement with the Maoduan concealed monzogranite, indicating that Pb-Zn polymetal mineralization was related to granite crystallization. According to the precise Re-Os ages we have reported and previous studies, we interpret the Maoduan Pb-Zn deposit formed in an extensional setting related to lithospheric extension during the Early Cretaceous in South China. Meanwhile, we also point out that $140 \pm 7 \text{Ma}$ may be another important time range of tungsten-molybdenite-lead-zinc polymetallic mineralization in South China.

Key words: molybdenite; geochronology; extensional setting; Wuyishan metallogenic belt; lead-zinc polymetallic deposit; Zhejiang Province.

基金项目: 教育部创新团队发展计划 (No. IRT0755).

作者简介: 李艳军 (1982-), 男, 博士研究生, 主要从事矿床地球化学及成矿规律与成矿预测研究工作. E-mail: liyanjun21023@163.com

华南东部的武夷山成矿带是我国重要的铅锌多金属成矿带之一。区内铅锌多金属矿床众多,分布广泛,典型代表如北武夷地区的冷水坑(左力艳, 2008)、闽中“梅仙式”丁家山、峰岩、水吉和外洋等(丰成友等, 2007)、浙江治岭头(陈好寿和徐步台, 1996; 濮为民等, 2008)等 10 多个大-中型铅锌多金属矿床。矿床成因类型主要有斑岩型、喷流沉积-热液改造型、热液脉型、接触交代型 4 种,最近又发现了隐爆角砾岩型(濮为民等, 2008)。已有的年代学数据表明,区域内铅锌多金属矿床大多与晚侏罗世一早白垩世的岩浆活动有关(陈好寿和徐步台, 1996; 丰成友等, 2007; 左力艳, 2008; 张家菁等, 2009a)。除冷水坑矿床外,其余铅锌多金属矿床的成岩成矿时代、成矿流体及成矿物质来源等方面的研究远不及武夷山成矿带中同时代的 W-Sn-Mo 矿床(郭春丽等, 2007; 李晓峰等, 2007; 张家菁等, 2008)透彻,相关方面还有待深入研究。

浙西南龙泉地区位于武夷山成矿带的北东段,区内分布有众多的铅锌多金属矿床(点),代表性的有乌岙、小梅、南弄、银场、毛断等矿床(李春忠和吕新前, 2006)。前人对于区内矿床成因观点主要有岩浆热液型(徐外生等, 1987)、变质热液型(朱安庆和张永山, 2002)和沉积变质-热液叠加型(许金坤等, 1989; 李春忠和吕新前, 2006),但所有观点都缺乏精确的年代学证据。对区内铅锌多金属矿床迄今未见高精度的成矿年代学数据报道,在一定程度上制约了矿床成因研究和找矿工作。为此,本文在矿床地质学、矿石学研究基础上,选取毛断铅锌多金属矿床为研究对象,首次应用辉钼矿 Re-Os 定年方法厘定了该矿床的成矿时代,并探讨了其对矿床成因的制约及成矿构造背景。

1 成矿地质背景

毛断铅锌多金属矿床位于华南东部浙西南龙泉市境内,大地构造属华夏地块前陆推覆褶皱隆起带(毛建仁, 1994)。其北以江山-绍兴断裂与下扬子克拉通为界,南面临东南沿海褶皱带(图 1a、1b),构造位置特殊。区域内地层主要出露前寒武纪变质岩系和少量的侏罗纪-白垩纪火山-沉积岩。前寒武纪变质岩系大致可划分为上、下两套岩石组合,下部单元为八都群,上部单元为龙泉群或马面山群(胡雄健等, 1991)。八都群变质岩主要岩性为黑云斜长片麻岩、变粒岩、黑云片岩和少量斜长角闪岩等,经历了

角闪岩相中高温区域变质作用和较强烈的混合岩化作用,其锆石 LA-ICPMS 或 SHRIMP U-Pb 年龄为 1 766~1 850 Ma(Li, 1997; Xiang *et al.*, 2008),为古元古代的产物。龙泉群以变基性火山岩和变粒岩为主,另有少量石英岩和大理岩,原岩为一套较完整的火山-沉积建造(靳松等, 2008a, 2008b),岩石锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 710 Ma(向华, 2008),同岩性的马面山群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 721~818 Ma(Li *et al.*, 2005; Wan *et al.*, 2007),形成于新元古代。前寒武纪变质岩系源区物质可能由太古代地壳物质重熔再循环所形成(Xiang *et al.*, 2008),且经历了印支期造山变质作用(陈多福等, 1998; Li and Li, 2007; 汪相等, 2008; Xiang *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2009)。构造主要为北东向、北北东向的断裂构造带,典型的有丽水-余姚断裂带和龙泉-遂昌韧性剪切带,控制了区内中生代岩浆岩和矿床的分布。区内岩浆岩主要有古元古代和中生代两期,前者主要为片麻状花岗岩及花岗闪长岩,以淡竹、三枝树、下际、里庄等片麻状花岗质岩体为代表,锆石 LA-ICPMS 或 SHRIMP U-Pb 年龄为 1 832~1 888 Ma(Li and Li, 2007; 汪相等, 2008; Liu *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2009);后者主要为沿北东向区域构造分布的众多的中酸性小岩体及少量的中基性脉岩。

毛断铅锌多金属矿区内出露地层有下元古界和下侏罗统(图 1c)。古元古代八都群泗源组(Pt_1s)为一套变火山岩系,根据岩性由下往上可分 5 个岩性段:第一段以混合岩化为主的含榴黑云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩,普遍经受区域混合岩化作用,形成条带状混合岩,局部出现片麻状混合岩,具较强绿泥石化、绢云母化等;第二段岩性为黑云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩,粒度较细,夹绿帘绿泥石层,蚀变以绿泥石化、绢云母化、弱阳起石化、硅化为主;第三段以黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、黑云钾长片麻岩为主,局部具弱混合岩化;第四段岩性主要为黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩,夹绿帘绿泥石层,粒度较第二段大;第五段以黑云二长片麻岩、黑云斜长片麻岩为主,底部具较强的混合岩化现象,总体蚀变弱。八都群大岩山组(Pt_1d)主要岩性为二云片岩、二云石英片岩等,蚀变弱,产状总体较为平缓,整合覆盖在泗源组之上。早侏罗世枫坪组(J_1f)与八都群变质岩呈断层和不整合接触,岩性主要为石英砂岩、长石石英砂岩等。矿区内断裂构造发育,以 NE 和 NW 向为主,其次为近 NS 向和近 EW 向(图 1c)。NE 向

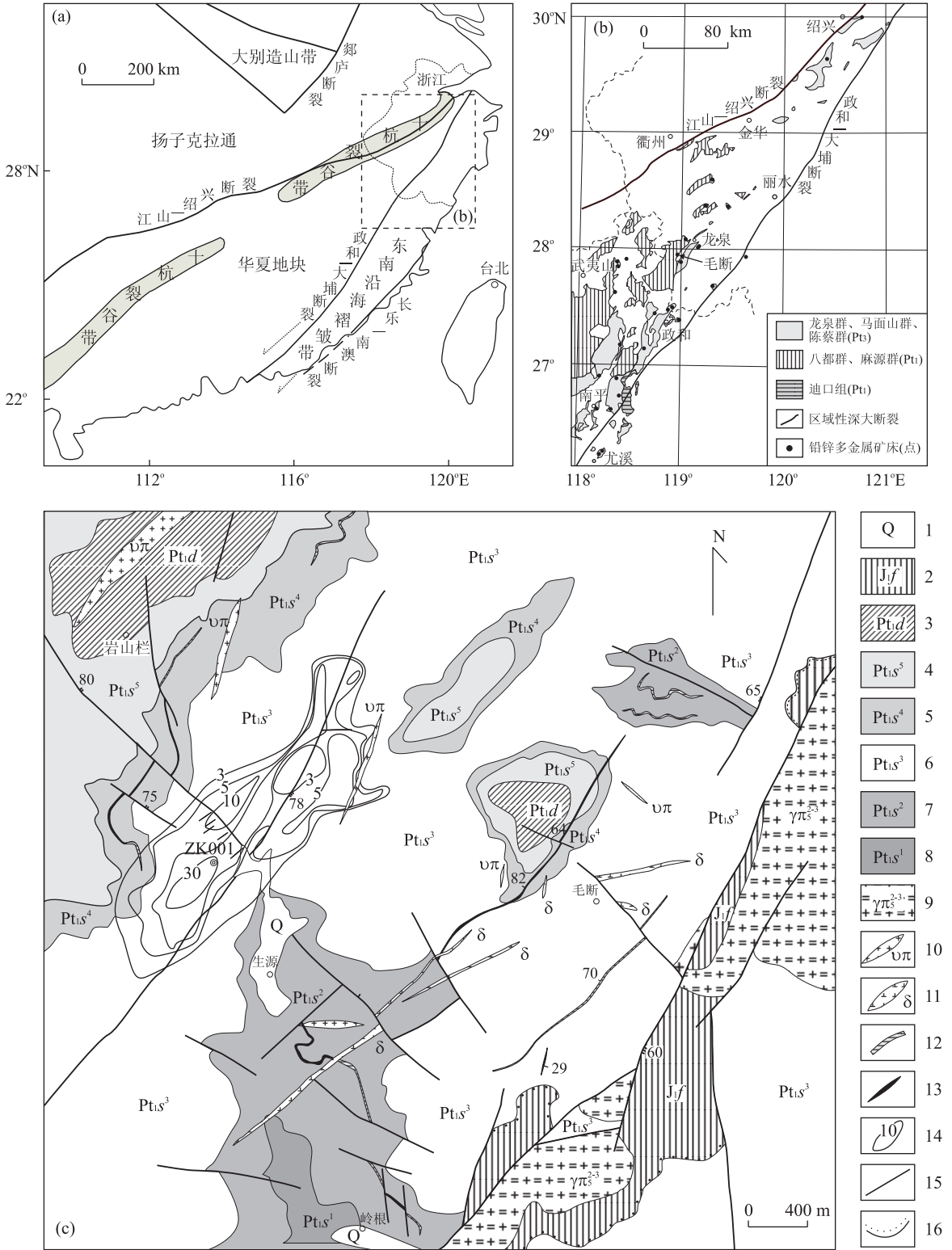


图 1 浙西南大地构造位置简图(a)、地质简图(b)及毛断铅锌多金属矿床地质图(c) (a、b、c 分别据王强等(2005)、李春忠和吕新前(2006)、浙江省地质调查(2005)浙江遂昌—庆元地区金银铅锌多金属矿调查评价成果报告修改)

Fig. 1 Sketch maps showing tectonic location of southwestern Zhejiang Province (a), simplified geological map of southwestern Zhejiang Province (b), and geological map of the Maoduan lead-zinc polymetallic deposit (c)

1. 第四系; 2. 早侏罗世枫坪组; 3. 古元古代八都群大岩山组; 4. 古元古代八都群四源组第五岩性段; 5. 古元古代八都群四源组第四岩性段; 6. 古元古代八都群四源组第三岩性段; 7. 古元古代八都群四源组第二岩性段; 8. 古元古代八都群四源组第一岩性段; 9. 二长花岗(斑)岩; 10. 霏细斑岩脉; 11. 闪长玢岩脉; 12. 矿化带; 13. 矿(化)体及编号; 14. Mo 异常等值线(10^{-6}); 15. 断层; 16. 不整合界线

断裂总体走向 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 倾角为 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$, 为主要的控矿构造; NW 向断裂总体走向 $310^{\circ}\sim 330^{\circ}$, 近直立, 局部为含矿构造; 近 NS 向和近 EW 向断裂形成较晚, 切穿矿化带。矿区岩浆岩主要为岭根二长花岗斑岩体和毛断隐伏二长花岗岩体, 后期发育霏细斑岩脉和闪长玢岩脉。岭根二长花岗斑岩体从边缘向内部可以划分为边缘相、中间相和中央相 3 个相态。前两者为斑状结构, 但基质边缘相为显微文象结构, 中间相为隐晶结构; 中央相为似斑状结构, 基质为细粒花岗结构。岩石各相态矿物组成相似, 主要为石英 ($40\%\sim 45\%$)、斜长石 ($30\%\sim 35\%$)、钾长石 ($25\%\sim 30\%$)、少量的角闪石 ($2\%\sim 3\%$) 和黑云母 ($1\%\sim 2\%$)。毛断隐伏二长花岗岩为浅肉红色, 似斑状结构, 块状构造。似斑晶主要为石英 ($10\%\sim 15\%$)、斜长石 ($10\%\sim 15\%$)、钾长石 ($20\%\sim 25\%$), 另有少量黑云母 ($1\%\sim 2\%$) 和角闪石 ($2\%\sim 3\%$), 基质为细粒花岗结构, 主要矿物组成为石英 ($20\%\sim 25\%$)、斜长石 ($10\%\sim 15\%$) 和钾长石 ($20\%\sim 25\%$), 副矿物为锆石、榍石、磷灰石和磁铁矿等。

2 矿化特征

毛断多金属矿区共发现 9 个铜、铅、锌、钼多金属矿化带, 已圈出 11 个矿(化)体, 呈似层状、透镜状赋存于八都群北东向和北西向断裂中, 产状严格受断裂构造控制。矿石类型有磁黄铁矿多金属矿石、石英—辉钼矿矿石和石英—方铅矿矿石 3 种, 且辉钼矿化主要分布于毛断隐伏岩体(钻孔 ZK001 揭露)的顶部, 岩体中也可见石英—辉钼矿细脉, 铅锌矿化分布于外围(图 1c)。矿石矿物以磁黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿为主, 另可见铜兰和孔雀石。脉石矿物以石英、白铁矿、黄铁矿为主, 次为阳起石、绿帘石、绿泥石和绢云母等。矿石结构主要有脉状交代结构、交代残余结构、港湾状交代结构、固溶体分离结构等; 矿石构造主要为块状构造和浸染状构造。近矿围岩蚀变发育, 以阳起石化和硅化为主, 次为绿帘石化、绿泥石化和绢云母化, 无明显的蚀变界线。根据矿物组合、结构构造、矿物生成顺序及流体包裹体测温, 毛断矿区可划分为热液成矿期和表生期两个成矿期, 前者进一步划分为磁黄铁矿—白铁矿阶段、石英—辉钼矿阶段和铜铅锌多金属硫化物阶段 3 个成矿阶段。第一阶段主要形成磁黄铁矿和白铁矿, 蚀变矿物绿帘石流体包裹体均一温度为

$265.1\sim 389.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均值为 $339.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($N=40$); 第二阶段主要形成石英和辉钼矿, 石英流体包裹体均一温度为 $220.1\sim 383.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均值为 $293.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($N=66$); 第三阶段主要为铜铅锌矿化, 形成黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿和方铅矿, 流体包裹体均一温度为 $169.9\sim 374.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($N=57$), 表现为双峰特征, 两正态分布区间均值分别为 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 样品采集及分析方法

5 件测试的辉钼矿样品均取自矿区钼异常区内不同石英脉型辉钼矿脉中, 脉宽 $2\sim 5\text{ cm}$, 一般为 3 cm 左右, 延长 $0.5\sim 5\text{ m}$, 矿物组成主要为石英和辉钼矿, 另有少量的黄铁矿等。辉钼矿呈鳞片状产出, 大者为 $(1\sim 3)\text{ mm}\times(1\sim 3)\text{ mm}$, 小者为 $(0.5\sim 1)\text{ mm}\times(0.5\sim 1)\text{ mm}$ 。将野外采集的矿石样品在双目镜下反复挑选出辉钼矿单矿物, 辉钼矿无氧化、无污染, 纯度达 99% 以上, 并在玛瑙钵中研磨至大小 0.1 mm 左右供测试用。

样品分析在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室进行, 采用 Carius 管封闭溶样分解样品 (Shirey and Walker, 1995)。测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS。样品测试经历了分解样品、蒸馏分离 Os、萃取分离 Re 和质谱测定 4 个过程或流程, 具体过程及要求见杜安道等 (1994, 2001)、Shirey and Walker (1995) 和 Du *et al.* (2004)。模式年龄按下式计算:

$$t = \frac{1}{\lambda} \left[\ln \left(1 + \frac{{}^{187}\text{Os}}{{}^{187}\text{Re}} \right) \right],$$

其中 λ (${}^{187}\text{Re}$ 衰变常数) $= 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Smoliar *et al.*, 1996)。

4 分析结果

本次实验全流程空白水平 Re 为 0.0411×10^{-9} , 普 Os 为 0.0003×10^{-9} , ${}^{187}\text{Os}$ 为 0.0002×10^{-9} (表 1), 远远小于所测样品中 Re、Os 含量, 因此不会影响实验中 Re、Os 含量的准确测定。本次实验标准物质 GBW04435 (HLP) 两次测试结果 Re 分别为 279.7×10^{-6} 和 283.6×10^{-6} , ${}^{187}\text{Os}$ 为 649.2×10^{-9} 和 654.20×10^{-9} , 模式年龄为 $221.2 \pm 3.3\text{ Ma}$ 和 $219.8 \pm 3.3\text{ Ma}$, 均与推荐值一致 (表 1), 说明实验分析条件良好, 所获得的测试数据质量可靠。

表 1 实验全流程空白水平及标准物质 HLP 测定值

Table 1 Certificated values of Re-Os isotope for total procedure blank value and standard sample HLP

	样号	Re		Os _普 (10 ⁻⁹)		¹⁸⁷ Os(10 ⁻⁹)		模式年龄(Ma)	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
全流程空白水平	081006-19	0.025 2	0.001	0.000 1	0.000 0	0.000 1	0.000 0		
	081111-24	0.041 1	0.007	0.000 3	0.000 0	0.000 2	0.000 1		
标准物质测定值	GBW04435	279.7	2.5			649.2	5.8	221.2	3.3
	GBW04435	283.6	2.4			654.0	6.4	219.8	3.3
推荐值	GBW04435	283.8	6.2			659.0	14	221.4	5.6

注:全流程空白水平 Re 含量单位为 10⁻⁹;标准物质测定值和推荐值 Re 含量单位为 10⁻⁶.

表 2 浙西南毛断铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素组成

Table 2 Re-Os isotopic compositions of molybdenites from the Maoduan lead-zinc polymetallic deposit, southwestern Zhejiang Province

编号	样号	样重(g)	Re (10 ⁻⁹)	Os _普 (10 ⁻⁹)	¹⁸⁷ Re(10 ⁻⁹)	¹⁸⁷ Os(10 ⁻⁹)	模式年龄(Ma)
081119-19	Mo-2	0.150 28	3 093±24	0.000 2±0.000 0	1 944±15	4.582±0.041	139.6±2.0
081125-7	Mo-6	0.150 33	3 498±28	0.001 3±0.002 8	2 199±17	5.135±0.041	140.0±1.9
081029-10	Mo-4-2	0.050 02	4 118±33	0.000 9±0.000 7	2 589±21	5.963±0.054	138.1±2.0
081119-20	Mo-3	0.150 36	3 570±31	0.000 0±0.000 0	2 244±19	5.190±0.045	138.7±2.0
081119-21	Mo-4	0.150 58	4 001±35	0.000 1±0.000 0	2 515±22	5.814±0.049	138.6±2.0
081119-22	Mo-5	0.150 22	7 856±59	0.000 1±0.000 0	4 938±37	11.420±0.100	138.7±2.0

注:测试者为中国地质科学院国家地质测试中心屈文俊、曾法刚.表内误差为 2σ.

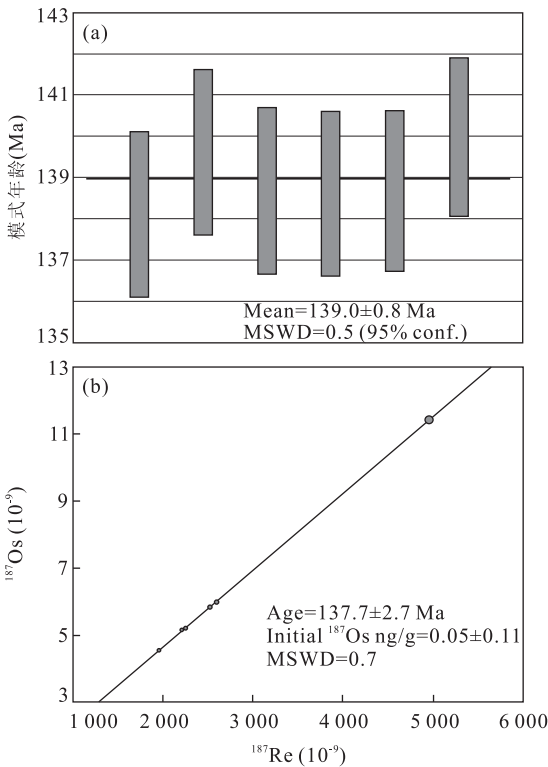


图 2 毛断铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄加权平均(a)及等时线年龄图解(b)

Fig. 2 Re-Os weighted average model ages (a) and isochron age (b) of molybdenite from the Maoduan lead-zinc polymetallic deposit

5 件样品共 6 次测试分析及计算结果列于表 2. 辉钼矿的 Re、¹⁸⁷Os 含量均比较接近,分别为 $3.093 \times 10^{-6} \sim 7.856 \times 10^{-6}$ 和 $4.582 \times 10^{-9} \sim 11.420 \times 10^{-9}$,且总体上¹⁸⁷Re 和¹⁸⁷Os 比较协调.普 Os 含量远远低于¹⁸⁷Os,其模式年龄代表成矿年龄.辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 $(138.6 \pm 2.0) \text{ Ma} \sim (140.0 \pm 1.9) \text{ Ma}$,加权平均年龄为 $139.0 \pm 0.8 \text{ Ma}$ (MSWD=0.5)(图 2a).平行样 Mo-4-2 与 Mo-4 的 Re-Os 同位素含量基本一致,表明测试数据精确可靠.6 次分析数据组成一条很好的等时线,其斜率代表等时线年龄为 $137.7 \pm 2.7 \text{ Ma}$ (MSWD=0.7)(图 2b).由等时线获得的¹⁸⁷Os 初始值为 $(0.05 \pm 0.11) \times 10^{-9}$,接近 0,表明辉钼矿形成时几乎不含¹⁸⁷Os,符合 Re-Os 同位素体系模式年龄计算条件(蒋少涌等,2000).等时线年龄与模式年龄加权平均值在误差范围内一致,表明 139 Ma 为毛断铅锌多金属矿床的成矿时代.这是浙西南龙泉地区首例关于早白垩世初期成矿事件的报道.

5 讨论

5.1 对矿床成因的制约

浙西南地区分布有众多的铅锌多金属矿床(点),由于缺乏精确的成矿年代学数据的制约,矿床

表 3 华南晚侏罗世末期—早白垩世初期成矿事件统计

Table 3 Mineralization ages of ore deposits from the end of Late Jurassic to Early Cretaceous in South China

矿床	测试对象	测试方法	成矿时代(Ma)	资料来源	地区
铜坑埠钨矿床	辉钨矿	Re-Os 等时线	133.8±0.65	许建祥等,2007	南武夷
金竹坪钨铅锌多金属矿床	辉钨矿	Re-Os 等时线	135.5±5.7	张家菁等,2009a	北武夷
行洛坑外围石英脉型钨矿床	石英	流体包裹体 Rb-Sr 等时线	147.5±2.9	张家菁等,2008	中武夷
锯板坑钨锡多金属矿床	蚀变绢云母	Ar-Ar	P:139.2±1.5 L:143.6±3.9	付建明等,2009	南岭
茅坪石英脉型钨锡矿床	辉钨矿	Re-Os 模式年龄	141.4±2.2	曾载淋等,2009	
八仙脑钨多金属矿床			133—147	曾载淋等,2009	
大吉山钨矿床	蚀变绢云母	Ar-Ar	L:144.0±0.7 L:146.9±1.1	张文兰等,2006	
冶岭头铅锌金多金属矿床	石英	流体包裹体 Rb-Sr 等时线	139.7±3.9	陈好寿和徐步台,1996	
毛断铅锌多金属矿床	辉钨矿	Re-Os 模式年龄 加权平均	139.0±0.8	本文	浙西南

注:P为 Ar/Ar 坪年龄;L为 Ar/Ar 等时线年龄.

成因方面的研究大多据同构造带中的闽中地区“梅仙式”铅锌矿床推断,致使区内矿床成因观点多样,代表性观点有岩浆热液型(徐外生等,1987;中国地质科学院矿产资源研究所,2007)、变质热液型(朱安庆和张永山,2002)和沉积变质—热液叠加型(许金坤等,1989;李春忠和吕新前,2006).近年来,武夷山成矿带中相继报道了一些与中生代岩浆活动有关的铅锌多金属矿床,如冷水坑斑岩型铅锌矿床(左力艳,2008)、金竹坪钨铅锌多金属矿床(张家菁等,2009a)、新村钨铅锌多金属矿床(韩胜康,2008)和冶岭头铅锌金多金属矿床(陈好寿和徐步台,1996)等,甚至作为“梅仙式”典型代表的水吉和八外洋铅锌多金属矿区内也发现了 127~151 Ma 与成矿有关的岩浆活动(丰成友等,2007),这较大程度上揭示了中生代岩浆活动对区内铅锌多金属成矿的贡献.

毛断铅锌多金属矿床为浙西南地区众多的中—小型矿床之一,前人认为其为沉积变质—热液叠加型铅锌多金属矿床(浙江省地质调查院,2005.浙江遂昌—庆元地区金银铅锌多金属矿调查评价成果报告),但至今缺乏精确的年代学和同位素示踪方面的证据.前已叙述了毛断铅锌多金属矿区辉钨矿 Re-Os 模式年龄加权平均值为 139.0±0.8 Ma(MSWD=0.5),为早白垩世初期的产物.Selby *et al.* (2002)研究表明,辉钨矿的 Re-Os 年龄代表了硫化物的形成时代,并可用来对成岩成矿成因关系提供年代学制约.毛断铅锌多金属矿床成矿年龄与毛断隐伏二长花岗岩体的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代 140.0±1.6 Ma(本人未发表数据)在误差范围内一致,这为该矿床与毛断隐伏花岗岩体具有成因关系提供了年代学方面的证据.

上述流体包裹体均一温度表明该矿床为中高温矿床,5件辉钨矿、闪锌矿、方铅矿和磁黄铁矿的 S 同位素变化为 3.43‰~4.77‰,极差为 1.34‰,平均值为 4.36‰(本人未发表数据),硫同位素组成符合岩浆流体的硫同位素组成特征.矿石硫化物铅同位素组成为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.317 \sim 18.372$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.663 \sim 15.727$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.696 \sim 38.893$,与毛断岩体的铅同位素组成一致(本人未发表数据).上述 S-Pb 同位素资料从物质组成的角度,提供了毛断铅锌多金属矿床与毛断隐伏花岗岩体有成因关系的佐证.因此,上述研究综合表明毛断铅锌多金属矿床为中高温岩浆热液矿床.

华南大规模的成矿作用峰值集中于 230~210 Ma、170~150 Ma 和 100~90 Ma 三个阶段(毛景文等,2008),晚侏罗世末期—早白垩世初期的成矿事件很少报道.近年来,随着华南矿床学研究程度的进一步加深,逐渐也有该时代的成矿事件报道(表 3),如浙西南的冶岭头铅锌金多金属矿床(陈好寿和徐步台,1996)和本文的毛断铅锌多金属矿床、北武夷山地区的金竹坪钨铅锌多金属矿床(张家菁等,2009a)、中南武夷山地区的铜坑埠钨矿床(许建祥等,2007)、行洛坑外围石英脉型钨矿床(张家菁等,2008)、南岭地区大吉山钨矿床(张文兰等,2006)、茅坪石英脉型钨锡矿床(曾载淋等,2009)、锯板坑钨锡多金属矿床(付建明等,2009)等都是该时期的成矿事件.这些年代学数据的报道表明 140±7 Ma 可能为华南另一重要的成矿时限.

5.2 成矿构造背景

华南中生代发生大规模的成岩成矿作用(毛景

文等,2008),且成岩成矿时差较小或无时差(郭春丽等,2007;彭建堂等,2008;左力艳,2008),具有一致的构造背景.华南晚侏罗世-早白垩世分布有大量的 A 型花岗岩(王强等,2005;Li *et al.*, 2007a),少数甚至与同时代的 I 型或高演化的 I 型花岗岩组成 I-A 型杂岩体(Li *et al.*, 2007a);同时,区内还发育同时代的板内性质的玄武岩和流纹岩的双峰式组合的火山岩(陈培荣等,1999;Chen *et al.*, 2002);此外还发育有具伸展背景的基性岩(Chen *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2008). A 型花岗岩、双峰式火山岩及伸展背景的基性岩的发现,无疑表明华南晚侏罗世-早白垩世为伸展构造背景.且伸展可能始于早侏罗世(约 190 Ma)(吴淦国等,2000; Li and Li, 2007; Li *et al.*, 2007b),并可主要归并为 180~155 Ma、145~125 Ma 和 110~75 Ma 三个阶段(谢桂青,2003).

毛断铅锌多金属矿床位于华南东部,成矿时代为 139.0 ± 0.8 Ma,属于谢桂青(2003)所划分的第二伸展阶段,显示该矿床可能形成于伸展背景.同时,浙西南及其邻区发育同时代的鹅湖岭组碱性火山岩(锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 138.0 ± 2.4 Ma,张家菁等,2009b)和苏村碱性岩体(钾长石 Ar-Ar 年龄为 133.4 ± 0.2 Ma,王强等,2005),也表明该时期浙西南地区处于伸展构造背景下.因此,毛断铅锌多金属矿床为早白垩世初期岩石圈伸展背景下的产物.

6 结论

毛断铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 137.7 ± 2.7 Ma(MSWD=0.7),模式年龄加权平均值为 139.0 ± 0.8 Ma(MSWD=0.5),形成于早白垩世初期.该年龄与毛断隐伏岩体的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代 140.0 ± 1.6 Ma 相吻合,表明成矿与成岩关系密切.辉钼矿 Re-Os 年龄的精确厘定,表明毛断铅锌多金属矿床为早白垩世初期华南岩石圈伸展背景下的产物.同时结合前人同时代的 W、Mo、Pb、Zn 等矿床研究成果指出 140 ± 7 Ma 可能为华南另一重要的成矿时限.

致谢:论文得到了匿名审稿专家及编辑部老师建设性的修改意见,野外工作中浙江省第十一地质大队给予了极大的帮助,在此一并表示感谢.

References

- Chen, C. H., Lee, C. Y., Shinjo, R., 2008. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China?: constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts. *Lithos*, 106(1-2): 83-92. doi:10.1016/j.lithos.2008.06.009
- Chen, D. F., Li, X. H., Pan, J. M., et al., 1998. Metamorphic newly produced zircons, shrimp ion microprobe U-Pb age of amphibolite of Hexi Group, Zhejiang and its implications. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(4): 396-400 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. S., Xu, B. T., 1996. Metallogenic time of gold-silver deposits in Zhejiang Province. *Chinese Science Bulletin*, 41(12): 1107-1110 (in Chinese).
- Chen, P. R., Hua, R. M., Zhang, B. T., et al., 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: petrological constraints and geodynamic settings. *Science in China (Ser. D)*, 45(8): 755-768. doi:10.1007/BF02878432
- Chen, P. R., Kong, X. G., Wang, Y. X., et al., 1999. Rb-Sr isotopic dating and significance of early Yanshanian bimodal volcanic-intrusive complex from South Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 378-383 (in Chinese with English abstract).
- Du, A. D., He, H. L., Yin, N. W., et al., 1994. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites. *Acta Geologica Sinica*, 68(4): 339-347 (in Chinese with English abstract).
- Du, A. D., Wu, S. Q., Sun, D. Z., et al., 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: molybdenites HLP and JDC. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 41-52. doi:10.1111/j.1751-908X.2004.tb01042.x
- Du, A. D., Zhao, D. M., Wang, S. X., et al., 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius tube sample preparation. *Rock and Mineral Analysis*, 20(4): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- Feng, C. Y., Feng, Y. D., Zhang, D. Q., et al., 2007. Sulfur and lead isotope tracing for sources of ore-forming material and ore-forming age of the Meixian-style (Pb-Zn-Ag) deposits in the Central Fujian Rift, Southeast China. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 906-916 (in Chinese with English abstract).
- Fu, J. M., Li, X. N., Cheng, S. B., et al., 2009. Metallogenic ages of tungsten-tin polymetallic deposits in Lianping area, northern Guangdong Province. *Geology in China*, 36(6): 1331-1339 (in Chinese with English abstract).

- Guo, C. L., Wang, D. H., Chen, Y. C., et al., 2007. Precise zircon SHRIMP U-Pb and quartz vein Rb-Sr dating of Mesozoic Taoxikeng tungsten polymetallic deposit in southern Jiangxi. *Mineral Deposits*, 26(4): 432—442 (in Chinese with English abstract).
- Han, S. K., 2008. On the geologic characteristics and genesis of the Xincun molybdenum, lead and zinc polymetallic deposit in Yongding County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 4: 352—360 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. J., Xu, J. K., Tong, C. X., et al., 1991. Precambrian geology in southwestern Zhejiang. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Jiang, S. Y., Yang, J. H., Zhao, K. D., et al., 2000. Re-Os isotope tracer and dating methods in ore deposits research. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 36(6): 669—677 (in Chinese with English abstract).
- Jin, S., Zhang, L., Zhong, Z. Q., et al., 2008a. Geochemical characteristics and geological implications for the Neoproterozoic meta-sedimentary rocks of the Cathaysia Block in Zhejiang and Fujian Provinces. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 764—774 (in Chinese with English abstract).
- Jin, S., Zhang, L., Zhong, Z. Q., et al., 2008b. Geochemical characteristics of the Neoproterozoic metavolcanic rocks in Zhejiang and Fujian Provinces and its geological significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1): 97—105 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. Z., Lü, X. Q., 2006. Metallogenic characteristics and prospecting direction of “stratabound” polymetallic deposits in metamorphic basement, southwestern Zhejiang. Academic Seminar Proceedings of Geological Society of Zhejiang Province, 44—49 (in Chinese).
- Li, W. X., Li, X. H., Li, Z. X., 2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia block of South China and its tectonic significance. *Precambrian Research*, 136(1): 51—66. doi: 10. 1016/j. precamres. 2004. 09. 008
- Li, X. F., Watanabe, Y., Qu, W. J., 2007. Textures and geochemical characteristics of granitic rocks in the Yongping climaxtype Cu-Mo deposit, Jiangxi, southeastern China, and their alteration, mineralization and tectonic regime. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2353—2365 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., 1997. Timing of the Cathaysia Block formation: constraints from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. *Episodes*, 30: 188—192.
- Li, X. H., Li, Z. X., Li, W. X., et al., 2007a. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from Central Guangdong, SE China: a major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1—2): 186—204. doi: 10. 1016/j. lithos. 2006. 09. 018
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007b. On the genetic classification and tectonic implications of the early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873—1885. doi: 10. 1007/s11434-007-0259-0
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300 km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179—182. doi: 10. 1130/G23193A. 1
- Liu, R., Zhou, H. W., Zhang, L., et al., 2009. Paleoproterozoic reworking of ancient crust in the Cathaysia block, South China: evidence from zircon trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 54(9): 1543—1554. doi: 10. 1007/s11434-009-0096-4
- Mao, J. R., 1994. The Mesozoic-Canozoic magmatism and geodynamics of crustal and mantle evolution in Southeast China continent. *Volcanology & Mineral Resources*, 15(2): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510—526 (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. T., Hu, R. Z., Yuan, S. D., et al., 2008. The time ranges of granitoid emplacement and related nonferrous metallic mineralization in southern Hunan. *Geological Review*, 54(5): 617—625 (in Chinese with English abstract).
- Pu, W. M., Lei, Y. H., Zeng, L., et al., 2008. Geological characteristics of concealed explosion Pb-Zn deposit in Zhilingtou area. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 60(6): 20—24 (in Chinese with English abstract).
- Selby, D., Creaser, R. A., Hart, C. J. R., et al., 2002. Absolute timing of sulfide and gold mineralization: a comparison of Re-Os molybdenite and Ar-Ar mica methods from the Tintina gold belt, Alaska. *Geology*, 30(9): 791—794. doi: 10. 1130/0091-7613(2002)030<0791: ATOSAG>2. 0. CO;2
- Shirey, S. B., Walker, R. J., 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis. *Analytical Chemistry*, 67(13): 2136—2141. doi: 10. 1021/ac00109a036
- Smoliar, M. I., Walker, R. J., Morgan, J. W., 1996. Re-Os

- ages of group IIA, IIIA, IVA, and IVB iron meteorites. *Science*, 271(5252): 1099—1102. doi: 10. 1126/science. 271. 5252. 1099
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Xu, M. H., et al., 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in northwestern Fujian, Cathaysia block, China; tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units. *Gondwana Research*, 12(1—2): 166—183. doi: 10. 1016/j. gr. 2006. 10. 016
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China; constraints for Late-Mesozoic tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795—808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Chen, J., Luo, D., 2008. Study on petrogenesis of zircons from the Danzhu granodiorite and its geological implications. *Geological Review*, 54(3): 387—398 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Cawood, P. A., et al., 2008. Sr-Nd-Pb isotopic constraints on multiple mantle domains for Mesozoic mafic rocks beneath the South China block hinterland. *Lithos*, 106(3—4): 297—308. doi: 10. 1016/j. lithos. 2008. 07. 019
- Wu, G. G., Zhang, D., Chen, B. L., et al., 2000. Transformation of Mesozoic tectonic domain and its relation to mineralization in southeastern China; an evidence of southwestern Fujian Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 390—396 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, H., 2008. Phanerozoic metamorphism of Precambrian metamorphic basement in southwestern Zhejiang (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, 1—56 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, H., Zhang, L., Zhou, H. W., et al., 2008. U-Pb zircon geochronology and Hf isotope study of metamorphosed basic-ultrabasic rocks from metamorphic basement in southwestern Zhejiang; the response of the Cathaysia block to Indosinian orogenic event. *Science in China (Ser. D)*, 51(6): 788—800. doi: 10. 1007/s11430—008—0053—0
- Xie, G. Q., 2003. Late Mesozoic mafic dikes (body) from southeastern China; geological and geochemical characteristics and its geodynamics—a case of Jiangxi Province. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang (in Chinese).
- Xu, J. K., Zhou, T. M., Xia, A. N., et al., 1989. The characteristics of the mineralization and the genesis of Wuaopoly metallic ore deposit, Southwest Zhejiang. *Mineral Resources and Geology*, 3(4): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. X., Zeng, Z. L., Li, X. Q., et al., 2007. Geological characteristics and mineralization age of the Tongkengzhang molybdenum deposit in Xunwu County, South Jiangxi Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 924—928 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. S., Liu, C. M., Zhou, J. F., et al., 1987. Geochemical characteristics of the Wuaopoly Pb-Zn deposit and its genesis. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 11(6): 443—455 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. H., Wang, L. J., O'Reilly, S. Y., et al., 2009. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia block, China. *Precambrian Research*, 174(3—4): 347—363. doi: 10. 1016/j. precamres. 2009. 08. 009
- Zeng, Z. L., Zhang, Y. Z., Zhu, X. P., et al., 2009. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Maoping tungsten-tin deposit in Chongyi County of southern Jiangxi Province and its geological significance. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 209—214 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Q., Chen, Z. H., Wang, D. H., et al., 2008. Geological characteristics and metallogenic epoch of the Xingluokeng tungsten deposit, Fujian Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 92—97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Q., Wu, M. S., Chen, Z. H., et al., 2009a. Geochronologic study on the Jinzhuping molybdenum-poly-metallic deposit from Shangrao of Jiangxi Province. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 228—232 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. Q., Shi, G. H., Tong, G. S., et al., 2009b. Geochemistry and geochronology of copper and polymetal-bearing volcanic rocks of the Erhuling Formation in Xujiadun, Zhejiang Province. *Acta Geologica Sinica*, 83(6): 791—799 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. L., Hua, R. M., Wang, R. C., et al., 2006. New dating of the Dajishan granite and related tungsten mineralization in southern Jiangxi. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 956—962 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, A. Q., Zhang, Y. S., 2002. Main ore-forming specialty and spectrum in Zhejiang Province. *Geology of Zhejiang*, 2: 28—35 (in Chinese).
- Zuo, L. Y., 2008. Research on mineralization of the Lengshuikeng porphyry silver-lead-zinc deposit in Jiangxi

Province, China (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 1—143 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈多福,李献华,潘晶铭,等,1998.浙江景宁鹤溪群斜长角闪岩变质新生锆石特征、离子探针(SHRIMP)U-Pb年龄及地质意义. *矿物学报*,18(4):396—400.
- 陈好寿,徐步台,1996.浙江主要金银矿床的成矿时代. *科学通报*,41(12):1107—1110.
- 陈培荣,孔兴功,王银喜,等,1999.赣南燕山早期双峰式火山—侵入杂岩的 Rb-Sr 同位素定年及意义. *高校地质学报*,5(4):378—383.
- 杜安道,何红蓼,殷宁万,等,1994.辉钼矿的铼—钼同位素地质年龄测定方法研究. *地质学报*,68(4):339—347.
- 杜安道,赵敦敏,王淑贤,等,2001. Carius 管溶样—负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼—钼同位素地质年龄. *岩矿测试*,20(4):247—252.
- 丰成友,丰耀东,张德全,等,2007.闽中梅仙式铅锌银矿床矿质来源的硫、铅同位素示踪及成矿时代. *地质学报*,81(7):906—916.
- 付建明,李祥能,程顺波,等,2009.粤北连平地区钨锡多金属矿床成矿时代研究. *中国地质*,36(6):1331—1339.
- 郭春丽,王登红,陈毓川,等,2007.赣南中生代淘锡坑钨矿区花岗岩锆石 SHRIMP 年龄及石英脉 Rb-Sr 年龄测定. *矿床地质*,26(4):432—442.
- 韩胜康,2008.福建永定新村钨铅锌多金属矿床地质特征及成因探讨. *福建地质*,4:352—360.
- 胡雄健,许金坤,童朝旭,等,1991.浙西南前寒武纪地质.北京:地质出版社.
- 蒋少涌,杨竞红,赵葵东,等,2000.金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究. *南京大学学报(自然科学)*,36(6):669—677.
- 靳松,张利,钟增球,等,2008a.浙闽地区华夏地块新元古代变沉积岩地球化学特征及其地质意义. *地球科学——中国地质大学学报*,33(6):764—774.
- 靳松,张利,钟增球,等,2008b.浙闽地区新元古代变火山岩系岩石地球化学特征及其地质意义. *矿物岩石*,28(1):97—105.
- 李春忠,吕新前,2006.浙西南变质基底“层控”多金属矿成矿特征及找矿方向.2006年浙江省地质学会学术交流会论文集,44—49.
- 李晓峰,Watanabe, Y., 屈文俊,2007.江西永平铜矿花岗岩质岩石的岩石结构、地球化学特征及其成矿意义. *岩石学报*,23(10):2353—2365.
- 毛建仁,1994.中国东南大陆中生代岩浆作用与壳幔演化

动力学. *火山地质与矿产*,15(2):1—11.

- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2008.华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. *高校地质学报*,14(4):510—526.
- 彭建堂,胡瑞忠,袁顺达,等,2008.湘南中生代花岗质岩石成岩成矿的时限. *地质论评*,54(5):617—625.
- 濮为民,雷英华,曾亮,等,2008.治岭头地区隐爆型铅锌矿床地质特征. *有色金属(矿山部分)*,60(6):20—24.
- 王强,赵振华,简平,等,2005.华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. *岩石学报*,21(3):795—808.
- 汪相,陈洁,罗丹,2008.浙西南淡竹花岗岩闪长岩中锆石的成因研究及其地质意义. *地质论评*,54(3):387—398.
- 吴淦国,张达,陈柏林,等,2000.中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系—以闽西南地区为例. *地球科学——中国地质大学学报*,25(4):390—396.
- 向华,2008.浙西南前寒武纪变质基底岩系显生宙变质作用研究(学位论文).武汉:中国地质大学,1—56.
- 谢桂青,2003.中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探—以江西省为例.贵阳:中国科学院地球化学研究所.
- 许金坤,周天苗,夏安宁,等,1989.浙西南乌岙多金属矿床成矿特征与成因. *矿产与地质*,3(4):1—9.
- 许建祥,曾载淋,李雪琴,等,2007.江西寻乌铜坑钨矿床地质特征及其成矿时代. *地质学报*,81(7):924—928.
- 徐外生,刘崇民,周俊法,等,1987.乌岙铅锌矿床地球化学特征及其成因的讨论. *物探与化探*,11(6):443—455.
- 曾载淋,张永忠,朱祥培,等,2009.赣南崇义地区茅坪钨锡矿床铼—钼同位素定年及其地质意义. *岩矿测试*,28(3):209—214.
- 张家菁,陈郑辉,王登红,等,2008.福建行洛坑大型钨矿的地质特征、成矿时代及其找矿意义. *大地构造与成矿学*,32(1):92—97.
- 张家菁,吴木森,陈郑辉,等,2009a.江西省上饶县金竹坪钨多金属矿床成矿年代学研究. *岩矿测试*,28(3):228—232.
- 张家菁,施光海,童贵生,等,2009b.浙江徐家墩鹅湖岭组含铜多金属矿火山岩的地球化学与年代学. *地质学报*,83(6):791—799.
- 张文兰,华仁民,王汝成,等,2006.赣南大吉山花岗岩成岩与钨矿成矿年龄的研究. *地质学报*,80(7):956—962.
- 朱安庆,张永山,2002.浙江省主要成矿系列和成矿谱系. *浙江国土资源*,2:28—35.
- 左力艳,2008.江西冷水坑斑岩型银铅锌矿床成矿作用研究(学位论文).北京:中国地质科学院,1—143.