

文章编号 10258-7106(2006)01-0043-10

# 鄂东南地区 Cu-Au-Mo-(W)矿床的成矿时代及其成矿地球动力学背景探讨: 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄\*

谢桂青<sup>1,2,3</sup>, 毛景文<sup>1,2</sup>, 李瑞玲<sup>3</sup>, 张祖送<sup>4</sup>, 赵维超<sup>5</sup>, 屈文俊<sup>6</sup>, 赵财胜<sup>2</sup>, 魏世昆<sup>4</sup>

(1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 3 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002; 4 湖北省鄂东南地质队, 湖北 大冶 435100; 5 河南灵宝黄金股份公司, 河南 灵宝 472500; 6 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**摘 要** 鄂东南地区 Cu-Au-Mo-(W)矿床是长江中下游地区金属成矿带的重要组成部分。本文利用 Re-Os 同位素定年方法对该地区 5 个典型矿床(丰山洞铜钼金银多金属矿床、阮家湾钨铜钼矿床、千家湾铜金矿床、铜绿山铜铁钼多金属矿床和铜山口铜钼矿床)进行了成矿时代的研究, 获得其辉钼矿 Re-Os 同位素年龄分别为  $(144.0 \pm 2.1) \text{ Ma}$ 、 $(143.6 \pm 1.7) \text{ Ma}$ 、 $(137.7 \pm 1.7) \text{ Ma}$ 、 $(137.8 \pm 1.7) \sim (138.1 \pm 1.8) \text{ Ma}$  和  $(143.5 \pm 1.7) \sim (142.3 \pm 1.8) \text{ Ma}$ , 代表各矿床的成矿时代。研究结果表明, 鄂东南矿集区内的 Cu-Au-Mo-(W)矿床与铜陵、安庆、九瑞矿集区内的矿床几乎是同时形成的, 成矿时代可能主要集中于  $(140 \pm 5) \text{ Ma}$ , 相当于晚侏罗世-早白垩世。在综合已有的岩石学、地球化学和地球物理学资料的基础上, 笔者认为, 这一成矿事件的深部动力学过程可能是处于中国东部南北向印支期构造域向北东向古太平洋构造域大转折的背景下, 与软流圈上涌和玄武质岩浆底侵而导致壳幔同熔有关。

**关键词** 地质学; Re-Os 同位素年龄; 辉钼矿; Cu-Au-Mo-(W)矿床; 地球动力学背景; 鄂东南地区

**中图分类号** P618.41; P618.51; P597+.3

**文献标识码** A

## Metallogenic epoch and geodynamic framework of Cu-Au-Mo-(W) deposits in Southeastern Hubei Province: Constraints from Re-Os molybdenite ages

XIE GuiQing<sup>1,2,3</sup>, MAO JingWen<sup>1,2</sup>, LI RuiLing<sup>3</sup>, ZHANG ZuSong<sup>4</sup>, ZHAO WeiChao<sup>5</sup>, QU WenJun<sup>6</sup>, ZHAO CaiSheng<sup>2</sup> and WEI ShiKun<sup>4</sup>

(1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3 Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, Guizhou, China; 4 Southeastern Hubei Geological Party of Hubei Province, Daye 435100, Hubei, China; 5 Lingbao Gold Co. Ltd., Lingbao 472500, Henan, China; 6 National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

### Abstract

Cu-Au-Mo-(W) deposits in southeastern Hubei Province constitute one of the important areas in the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt. Re-Os ages for molybdenite provide constraints on the ore-forming epoch of Late Mesozoic Cu-Au-Mo-(W) mineralization. Molybdenites from the Fengshangdong Cu-Mo-Au-Ag deposit, the Ruanjiawan W-Cu-Mo deposit, the Qianjiawan Cu-Au deposit, the Tonglushan Cu-Fe-Au-Mo deposit and the Tongshanko Cu-Mo deposit yield ages of  $(144.0 \pm 2.1) \text{ Ma}$ ,  $(143.6 \pm 1.7) \text{ Ma}$ ,  $(137.7 \pm 1.7) \text{ Ma}$ ,  $(137.8 \pm 1.7) \sim (138.1 \pm 1.8) \text{ Ma}$  and  $(143.5 \pm 1.7) \sim (142.3 \pm 1.8) \text{ Ma}$ , representing the metallogenic epoch of each deposit. The results indicate that the Cu-Au-Mo-(W) deposits in the southeastern Hubei metallogenic belt and the Tonglushan, Qianjiawan, Ruanjiawan and Fengshangdong metallogenic belts were formed at the same time, with the metallogenic epoch possibly concentrated in  $(140 \pm 5) \text{ Ma}$ , corresponding to the Late Jurassic-Early Cretaceous. On the basis of the integrated petrology, geochemistry and geophysics data, we suggest that the deep dynamic process of this metallogenic event may be related to the subduction of the Indian Plate under the Eurasian Plate, and the upwelling of the asthenosphere and the partial melting of the mantle.

\* 本文得到国家自然科学基金重点基金(40434011)、国家自然科学基金青年基金(40402011)、中国地质调查局项目(200310200081)、中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室基金(GPM40504)、中国科学院创新项目(KZCX3-SW-125)、中国科学院地球化学研究所开放研究实验室基金(200402)和中国博士后项目联合资助

第一作者简介 谢桂青,男,1975年生,博士,主要从事岩石学和成矿地球动力学背景研究。E-mail: guiqingxie@sohu.com

收稿日期 2005-04-28; 改回日期 2005-09-12。

Ma,  $(137.8 \pm 1.7) \sim (138.1 \pm 1.8)$  Ma and  $(143.5 \pm 1.7) \sim (142.3 \pm 1.8)$  Ma, respectively. These data and other highly precise isotopic ages available for Cu-Fe-Au polymetallic deposits in the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt such as molybdenite Re-Os ages and mica  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  ages in the literature demonstrate that Cu-Au-Mo-(W) deposits in Tongling, Anqing, Jiurui and eastern Hubei ore cluster areas were formed at ca.  $(140 \pm 5)$  Ma, reflecting an important ore-forming episode in this belt. Previous petrological and geophysical data as well as metallogenic ages and their relation to the magmatism and geodynamic framework indicate that largescale Cu-Au-Mo-(W) deposits were developed during the tectonic transformation from the NS-trending compressional regime to NE-trending extension, which resulted from asthenospheric upwelling and basaltic magma underplating in the Late Jurassic-Early Cretaceous period in East China.

**Key words:** geology, Re-Os isotope age, molybdenite, Cu-Au-Mo-(W) deposit, geodynamic framework, southeastern Hubei Province

长江中下游地区是中国东部中生代大规模成矿的重要地区之一,是一个重要的 Cu、Au 和 Fe 成矿带。该区由西向东依次分布有鄂东南、九瑞、安庆、庐枞、铜陵和宁芜-宁镇等大型矿集区。除了庐枞和宁芜-宁镇矿集区主要发育玢岩铁矿以外,其余 4 个矿集区主要发育与侵入岩有关的 Cu-Au-Mo-(Fe) 矿。前人对长江中下游地区的矿床分布、地质特征、成矿过程和成矿作用进行了大量的研究,积累了丰富的基础资料,取得了许多重要认识。最近,对该地区的九瑞东部、安庆-贵池、铜陵和宁芜-宁镇等大型矿集区内一些 Cu-Au-Mo-Fe 矿床,利用辉钼矿 Re-Os 和含钾矿物  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法精确厘定了成矿时代。结果表明,矽卡岩-斑岩 Cu-Au-Fe-Mo 矿床与层控矽卡岩 Cu-Au-Mo 矿床主要形成于晚侏罗世末—早白垩世初(吴良士等,1997;Sun et al., 2003;毛景文等, 2004)。

鄂东南地区位于长江中下游成矿带的西段,包括鄂东南矿集区和九瑞矿集区西部,产有铜山口大型斑岩铜-钼矿床、铜绿山大型矽卡岩铜-金-银矿床、阮家湾大型矽卡岩-层控钨-铜-钼矿床、程潮和铁山大型矽卡岩铁矿床等,以铜、铁为主要优势矿种,成矿类型齐全,能很好反映长江中下游地区内铁和铜两个成矿亚序列及两大成矿系列间的配套规律(常印佛等,1991;翟裕生等,1992)。但迄今为止,对鄂东南地区铜多金属矿床精确时代的研究仍为空白,其中许多矿床的成矿时代是根据成岩时代间接推测的。这些矿床的精确成矿时代是否与长江中下游九瑞、安庆、铜陵等大型矿集区具同时性,以及反映了什么样的构造环境等等一系列科学问题,尚未完全解决。本文详细研究了鄂东南地区铜多金属矿床的特征后,利用 Re-Os 同位素方法测定了该区 5 个典

型的铜-金和铜-钨(钼)矿床的辉钼矿同位素组成,获得了精确的成矿年龄,并结合以前的工作,探讨了长江中下游地区区域性成矿事件的地球动力学背景。

## 1 区域地质背景

长江中下游地区位于扬子克拉通北缘、秦岭-大别造山带和华北克拉通的南侧。出露的地层除了零星的前震旦纪变质基底外,主要包括:震旦纪碎屑岩、白云岩和硅质岩,寒武纪至三叠纪的海相碳酸盐岩等及侏罗纪—白垩纪陆相火山岩夹碎屑岩。其中,石炭纪、二叠纪和早三叠世碳酸盐岩是 Cu-Au-Mo 矿床的主要围岩。已有的研究表明,该区构造演化大致经历了 3 个主要阶段:前震旦纪基底形成阶段,震旦纪—早三叠世沉积盖层形成阶段,中三叠世以来的碰撞造山和造山后板内变形阶段(常印佛等, 1991;翟裕生等,1992)。其中的第 3 阶段以大量中生代岩浆岩和大规模成矿作用为特征。中生代大规模岩浆作用主要包括两大岩石系列(Pei et al., 1995),即高钾钙碱性侵入岩及亚碱性-碱性侵入岩-火山岩,前者主要是闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩,为 I 型或磁铁矿型花岗质岩石(Ishihara, 1977; Pei et al., 1995);后者主要为闪长玢岩、安山岩、英安岩和流纹岩(Zhang et al., 2003)。此外,该地区还发育晚白垩世碱性侵入岩-火山岩,主要包括石英正长岩、正长岩、石英二长岩、碱性花岗岩和响岩(唐永成等,1998)。Zhai 等(1996)经研究后认为,长江中下游成矿带于燕山期大规模成矿,主要包括 3 种类型:与钙碱性钾质侵入岩有关的矽卡岩型和斑岩型 Cu-Mo-Au 矿床,与钙碱性钠质侵入岩有关的矽卡岩型和岩浆型 Fe-Cu-Au 矿床,与火山岩盆地中安山岩

有关的玢岩铁矿。其中前 2 类的形成时代相同且成因类似,统称为斑岩-矽卡岩-层控 Cu-Au-Mo-(Fe) 矿床 (Pei et al., 1999 ;毛景文等, 2004 ;Xie et al., 2005 )。

鄂东南地区的构造演化和岩浆作用类似于长江中下游地区。其岩浆作用以侵入活动时间延续长、岩体规模大、岩石类型及组合较全为特征(毛建仁等, 1990)。该地区是长江中下游成矿带的重要组成部分,截至 1993 年底,在该区已发现大、中、小型矿床(点) 328 个,包括 3 处大型铁矿、2 处大型铜铁矿、2 处铜金矿、1 处大型金矿和 1 处大型铜钼矿(薛迪康等, 1997)。最近,在殷祖花岗闪长岩体西缘发现了徐家山金矿田,如张海、美人尖、西山金矿床(点)(杨明银等, 2003);同时,金牛火山岩盆地内也有铜、铅、锌等矿化点(与湖北地质四队周少东交流)。这些均表明鄂东南地区具有良好的找矿前景。

## 2 矿床地质特征和采样位置

### 2.1 矿床地质特征

本次工作在详细研究了鄂东南地区铜多金属矿床的特征后,充分考虑到矿床类型和空间分布,有目的地选择了 5 个具代表性的 Cu-Au-Mo-(W) 矿床为研究对象,自东向西依次为丰山洞铜钼金银多金属矿床、阮家湾铜钼矿床、千家湾铜金矿床、铜绿山铜铁金钼多金属矿床和铜山口铜钼矿床(图 1)(Pei et al., 1999)。其中,丰山洞、阮家湾、铜绿山和铜山口矿床都是长江中下游成矿带中重要的大型矿床。鄂东南地区产有大量铜多金属矿床,关于这些矿床详细的地质背景、地层、岩浆作用和构造等,请参见有关文献(常印佛等, 1991 ;翟裕生等, 1992 ;Zhai et al., 1996 ;薛迪康等, 1997 ;Pei et al., 1999 ;Zhao et al., 1999)。本文仅简述所涉及的矿床的地质特征。

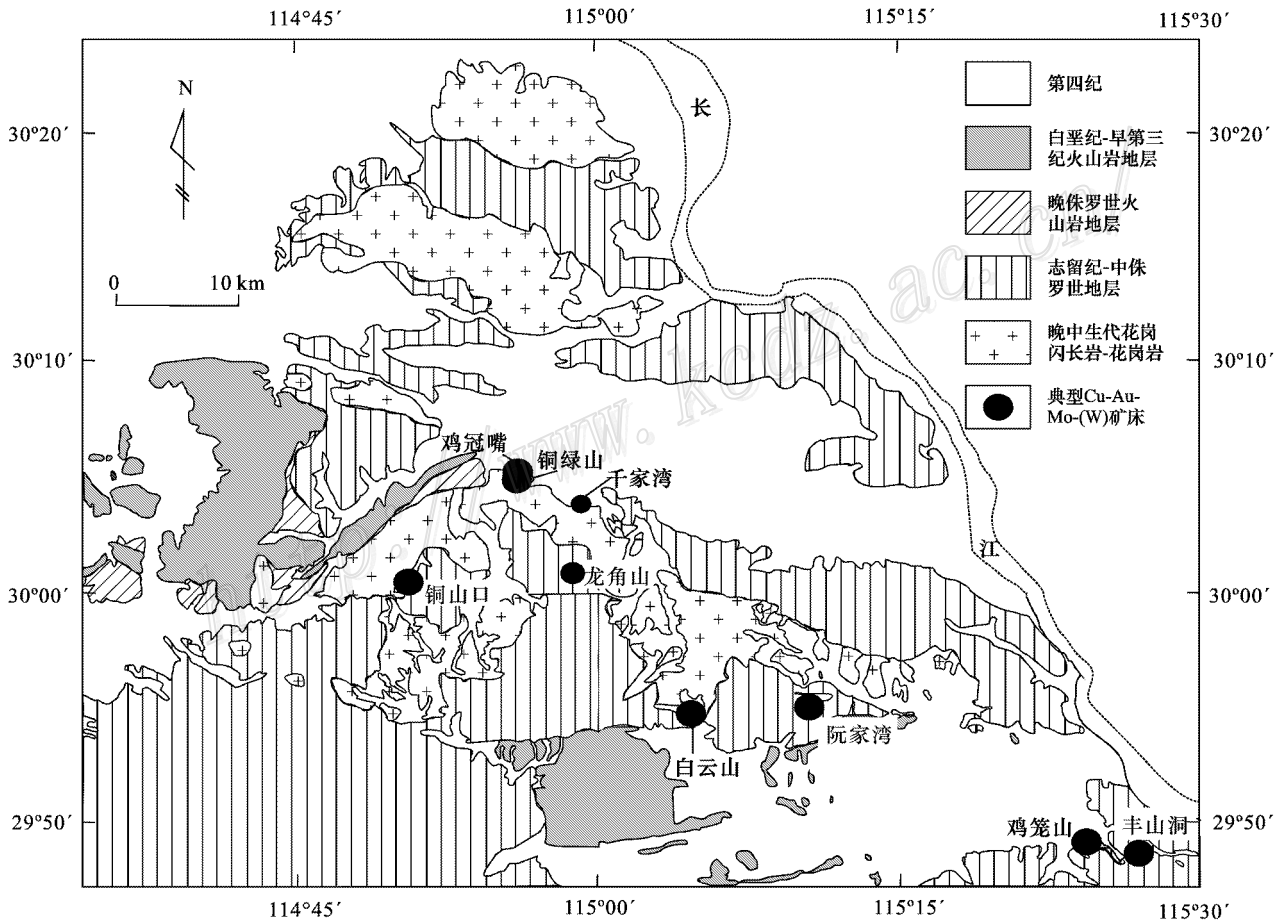


图 1 鄂东南地区晚中生代 Cu-Au-Mo-(W) 矿床分布图  
(据 1:20 万武汉、蕲春、瑞昌和通山幅矿产图简化)

Fig. 1 Distribution map of Late Mesozoic Cu-Au-Mo-(W) deposits in southeastern Hubei Province

**丰山洞矿床** 位于九江-瑞昌矿集区的西侧。矿区出露岩石主要为燕山期花岗闪长斑岩和三叠纪沉积碳酸盐岩。矿体主要产于花岗闪长斑岩内部和接触带附近,由斑岩型、矽卡岩型和层控型矿体组成,以矽卡岩型矿化为主。蚀变类型主要为钾化、硅化、绢云母化和矽卡岩化。金属矿物组合主要为黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿、磁铁矿、斑铜矿,还有少量的方铅矿、闪锌矿、赤铁矿等。

**阮家湾矿床** 是鄂东南地区唯一含钨的大型铜和钼矿床,其钨含量[( $w(\text{WO}_3)$ )]高达 0.248%~0.4%。矿区出露岩石主要为燕山期花岗闪长斑岩、奥陶纪碳酸盐岩和志留纪页岩和砂岩。该矿床位于阳新岩体南缘接触带。矿体主要分布于地层与岩体的接触带内,主要为矽卡岩型和层控型。金属矿物组合为黄铜矿、白钨矿、辉钼矿、黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿和闪锌矿。

**千家湾矿床** 是鄂东南矿集区内典型的小型铜金矿床。矿区出露岩石包括花岗闪长岩、闪长岩及早二叠世和早三叠世碳酸盐岩,其中,黑云母闪长岩与成矿关系密切。该矿床位于阳新岩体北缘接触带。矿体主要受控于岩体与围岩的接触带及背斜轴部,主要为矽卡岩型。金属矿物组合为黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿和黄铁矿,局部富集浸染状辉钼矿。

**铜绿山矿床** 是鄂东南矿集区内最大的铜多金属矿床。矿区出露岩石包括花岗闪长岩、早三叠世大理岩和白云质大理岩、中-晚三叠世泥岩和泥质板岩。大部分矿体呈透镜状产于接触带或石英二长闪长岩中的碳酸盐岩包体内,主要为矽卡岩型。蚀变类型有矽卡岩化、磁铁矿化、石英-硫化物化和碳酸盐化,对应于这 4 个阶段热液蚀变的温度分别为 400~740℃、340~500℃、240~360℃和 150~250℃(赵一鸣等,1990)。金属矿物组合为黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、磁铁矿、辉铜矿、辉钼矿等。主成矿期石英的  $\delta\text{D}$  值(−73.0‰)和  $\delta^{18}\text{O}$  值(7.10‰)表明岩浆水在成矿阶段起主导作用(Zhou et al., 2000)。

**铜山口矿床** 是鄂东南矿集区内典型的大型斑岩铜钼矿床。矿区出露岩石主要为花岗闪长斑岩、下二叠统白云岩和灰岩等。矿体主要分布于接触带和花岗闪长斑岩中,为接触交代型和斑岩型。蚀变类型包括钾长石化、绢云母化、硅化和矽卡岩化等。金属矿物组合为黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿等。主成矿期石英的  $\delta\text{D}$  值(−57.1‰~−74.0‰)和  $\delta^{18}\text{O}$  值(3.49‰~6.17‰)表明岩浆水在成矿阶段起主导作

用(Zhou et al., 2000)。

## 2.2 采样位置

**FSD4 样品** 采于丰山洞矿床北采石场的斑岩型矿体。辉钼矿主要沿裂隙产于花岗闪长斑岩型矿石内,部分辉钼矿呈浸染状分布于花岗闪长斑岩内部,与黄铜矿、黄铁矿等硫化物共生。

**YJW4 样品** 采于阮家湾矿床西采坑矿石采场的矽卡岩矿体。辉钼矿主要沿裂隙产于矽卡岩矿石内,与方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和白钨矿共生。

**QJW1 样品** 采于千家湾矿床的矽卡岩矿体(由鄂东南地质队前总工魏世昆提供)。辉钼矿呈浸染状分布于矽卡岩矿石内,与黄铜矿等硫化物共生。

**TLS3 和 TLS4 样品** 采于铜绿山矿床西侧矿石堆放场的矽卡岩矿体。辉钼矿主要沿裂隙产于矽卡岩矿石内,部分辉钼矿呈浸染状分布。

**TSK5 和 TSK10 样品** 分别采于铜山口矿区的钾化及绢云母化蚀变带。辉钼矿主要呈脉状和浸染状分布于斑岩型矿石内,与黄铜矿、黄铁矿等硫化物共生。

## 3 分析方法

上述样品经分离、挑选后,辉钼矿纯度达 99%。其 Re-Os 同位素的化学分离和等离子体质谱仪(ICP-MS)测试均在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。分析方法详见有关文献(Du et al., 1995; 2004; Shirey et al., 1995)现简述如下。

准确称取适量的辉钼矿样品,通过长细颈漏斗加入到 Carius 管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶)底部。同时,将液氮缓慢加入到有半杯乙醇的保温杯中,调节温度到 −50~−80℃。将已装好样品的 Carius 管放入该保温杯中,通过长细颈漏斗再将准确称取的  $^{185}\text{Re}$  和  $^{190}\text{Os}$  混合稀释剂加入到 Carius 管底部,然后再加入 4 ml 的 10 mol/l HCl 和 4 ml 的 16 mol/l  $\text{HNO}_3$ 。等 Carius 管底部的溶液冰冻后,用丙烷燃气火焰将 Carius 管的细颈部分加热封好。将其放入两端有带孔螺旋帽的不锈钢套管内。将此套管轻轻放入鼓风烘箱内,待回升到室温后,再逐渐升温到 230℃,保温 12 h。

在底部冷冻的情况下,打开 Carius 管,用 40 ml 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。于 105~110℃条件下蒸馏 50 min,用 10 ml 水吸收蒸出的  $\text{OsO}_4$ 。此水吸收液经适当稀释后,应用 ICP-MS 测定其 Os 同位素

比值。将蒸馏残液倒入 150 ml Teflon 烧杯中置于电热板上,加热烘干。为了降低酸度,需在近干时再加入少量水,如是两次后再加热近干。加入 10 ml 5 mol/l NaOH,稍微加热,转为碱性介质。转入 50 ml 聚丙烯离心管内,经离心,取上清液转入 120 ml Teflon 分液漏斗中。加入 10 ml 丙酮,振荡 5 min,萃取 Re。静止分相,弃去水相。加 2 ml 5 mol/l NaOH 溶液到分液漏斗中,振荡 2 min,洗去丙酮相中的杂质。弃去水相,排丙酮到 150 ml 已加有 2 ml 水的 Teflon 烧杯中。在电热板上,用 50℃ 加热以蒸发丙酮。加热溶液至干。加入数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢,加热蒸干以除去残存的钨。用数毫升稀 HNO<sub>3</sub> 溶解残渣,稀释到硝酸浓度为 2%。应用 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。如含铼溶液中盐量超过 1 mg/ml,需采用阳离子交换柱除去钨。

对 Re 和 Os 的测定,均使用美国 TJA 公司生产的 TJA PQ EXCELL ICP-MS 进行,分别选择质量数 185、187 和 186、187、188、189、190、192,同时,Re 和 Os 的监测分别用质量数 185 和 190。用 TJA PQ EXCELL ICPMS 测得的 Re、Os 和<sup>187</sup>Os 的空白值分别为(0.011±0.001)×10<sup>-9</sup>、(0.0002±0.0000)×10<sup>-9</sup>和(0.00011±0.00003)×10<sup>-9</sup>。

为了保证测试结果的可靠性,在本次测试过程

表 1 实验标准物质 JDC 辉钼矿的 Re-Os 测试结果和标准值

| Table 1    Certificated values and analytical data of<br>Re-Os isotope for standard sample molybdenite ( JDC ) |     |         |                     |                                    |              |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|---------|---------------------|------------------------------------|--------------|--|
| 编号                                                                                                             | 原样名 | 样重/g    | Re/10 <sup>-6</sup> | <sup>187</sup> Os/10 <sup>-6</sup> | <i>t</i> /Ma |  |
| 050317-22                                                                                                      | JDC | 0.05124 | 17.34±0.12          | 25.38±0.15                         | 139.6±1.7    |  |
| 050317-23                                                                                                      | JDC | 0.03158 | 17.32±0.14          | 25.22±0.13                         | 138.9±1.8    |  |
| GBW04436                                                                                                       | JDC |         | 17.39±0.32          | 25.46±0.6                          | 139.6±3.8    |  |

表 2 鄂东南地区 Cu-Au-Mo( W )矿床 Re-Os 同位素测试结果  
Table 2    Analytical data of Re-Os isotope for Cu-Au-Mo( W ) deposits in southeast Hubei Province

| 矿床  | 样号    | 样重/g    | Re/10 <sup>-6</sup> | Os <sub>岩</sub> /10 <sup>-9</sup> | <sup>187</sup> Re/10 <sup>-6</sup> | <sup>187</sup> Os/10 <sup>-9</sup> | <i>t</i> /Ma |
|-----|-------|---------|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------|
| 丰山洞 | FSD4  | 0.00151 | 436.5±3.6           | 0.640±0.220                       | 274.4±2.2                          | 659.20±7.37                        | 144.0±2.1    |
| 阮家湾 | YJW4  | 0.01804 | 24.80±0.20          | 0.053±0.018                       | 15.59±0.13                         | 37.34±0.28                         | 143.6±1.7    |
| 千家湾 | QJW1  | 0.00165 | 334.9±2.7           | 0.586±0.201                       | 210.5±1.7                          | 483.28±4.28                        | 137.7±1.7    |
| 铜绿山 | TLS3  | 0.00151 | 665.4±5.2           | 0.529±0.219                       | 418.2±3.3                          | 961.39±7.96                        | 137.8±1.7    |
| 铜绿山 | TLS4  | 0.00235 | 305.7±2.5           | 0.268±0.210                       | 192.1±1.6                          | 442.69±3.9                         | 138.1±1.8    |
| 铜山口 | TSK5  | 0.00317 | 224.3±1.7           | 0.304±0.104                       | 141.0±1.1                          | 334.60±3.1                         | 142.3±1.8    |
| 铜山口 | TSK10 | 0.00303 | 203.6±1.7           | 0.211±0.110                       | 128.0±1.1                          | 306.27±2.3                         | 143.5±1.7    |

注 Re、Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测量的分馏校正误差、待分析样品同位素比值测量误差,置信水平 95%; 模式年龄的不确定度还包括衰变常数的不确定度(1.02%),置信水平 95%。 $\lambda(^{187}\text{Re 衰变常数})=1.666\times10^{-11}/\text{a}$ (Smoliar et al., 1996)。Re-Os 模式年龄按下列公式计算: $t=[\ln(1+^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]/\lambda$ 。

中,同时两次分析了实验标准物质 JDC 的 Re、Os 和<sup>187</sup>Os。测试结果和 JDC 样品的标准值(GBW04436)见表 1。由表 1 可见,本次测试结果相当可靠,因而,所获得的辉钼矿 Re-Os 数据亦相当精确。

4 测试结果

鄂东南地区铜金钼多金属矿床 Re-Os 同位素测试结果列于表 2。由表 2 可知,诸矿床中辉钼矿的 Re 含量较高且变化较大,为 24.80×10<sup>-6</sup>~665.4×10<sup>-6</sup>,与同类型矿床的 Re 含量相当(Stein et al., 1997)。这可能与幔源物质参与成矿(Mao et al., 1999; Stein et al., 2001)和/或岩浆系统的物理化学条件(Berzina et al., 2005)有关。这些辉钼矿样品给出了相近的 Re-Os 模式年龄,为(137.7±1.7)~(144.0±2.1)Ma(表 2),其中,铜山口和铜绿山矿床各 2 件辉钼矿的模式年龄在误差范围内完全吻合。

5 讨论和结论

5.1 成矿时代

矿床的精确测年是建立矿床模型和反演成矿地球动力学背景的基础。以往确定鄂东南地区金属矿床的成矿时代都是利用岩体的 K-Ar 和 Rb-Sr 等时线年龄来推定的。但岩体的 K-Ar 和 Rb-Sr 等时线年龄范围相对较宽,如:铜山口花岗斑岩的全岩和黑云母 K-Ar 年龄为 150~122 Ma,铜绿山矿区花岗闪长岩和闪长岩的全岩和黑云母 K-Ar 年龄为 157~

118 Ma, 丰山洞花岗闪长斑岩的全岩和黑云母 K-Ar 年龄为 149~138 Ma (Pan et al., 1999)。翟裕生等 (1992) 系统总结了长江中下游地区的成矿作用和成矿系列, 提出成矿时代主要集中于燕山期 (170~90 Ma), 矽卡岩型-斑岩型 Cu-Mo-Au 成矿亚系列为 170~130 Ma, 矽卡岩型铁矿 Fe 及 Fe-Cu 成矿亚系列为 160~120 Ma, 玢岩铁矿成矿亚系列为 130~90 Ma。另外, 由于中深成相侵入体埋藏深度较大, 以及蚀变作用的影响, 岩体的 K-Ar 和 Rb-Sr 等时线年龄的结果存在很大的误差, 如鄂城花岗岩的 K-Ar 法年龄为 114 Ma, Rb-Sr 年龄为 125 Ma, 铁山石英二长岩的 K-Ar 法年龄为 132 Ma, Rb-Sr 年龄为 117 Ma (周珣若等, 1994)。迄今, 鄂东南地区燕山期岩体较为精确的年龄较少, 仅周珣若等 (1994) 测定了铁山石英二长岩和阳新英云闪长岩内角闪石的  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  坪年龄, 分别为  $(133.4 \pm 0.4) \text{ Ma}$  和  $(135.9 \pm 0.5) \text{ Ma}$ , 反等时线年龄分别为  $(133.6 \pm 0.9) \text{ Ma}$  和  $(135.7 \pm 0.7) \text{ Ma}$ 。

由表 2 可知, 鄂东南地区 5 个铜多金属矿床的 7 件辉钼矿样品的 Re-Os 模式年龄为  $(137.7 \pm 1.7) \text{ Ma}$ ~ $(144.0 \pm 2.1) \text{ Ma}$ , 非常接近。其中, 丰山洞、阮家湾和千家湾矿石中辉钼矿的 Re-Os 模式年龄分别为  $(144.0 \pm 2.1) \text{ Ma}$ 、 $(143.6 \pm 1.7) \text{ Ma}$  和  $(137.7 \pm 1.7) \text{ Ma}$ , 铜山口矿石中 2 件辉钼矿的 Re-Os 模式年龄为  $(142.3 \pm 1.8) \text{ Ma}$  和  $(143.5 \pm 1.7) \text{ Ma}$ , 铜绿山矿石中 2 件辉钼矿的 Re-Os 模式年龄为  $(137.8 \pm 1.7) \text{ Ma}$  和  $(138.1 \pm 1.8) \text{ Ma}$ 。由此可见, 本次测定的 Re-Os 模式年龄略高于相关岩体的角闪石  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄 (周珣若等, 1994)。这种现象类似于长江中下游铜陵矿集区的 Cu-Au-Mo 矿、东秦岭地区的金堆城钼矿、捷克 Bohemian 地区的剪切带金矿、阿拉斯加 Tintina 金矿带内的 Fon Knox 和 Pogo 金矿以及蒙古最大的 Erdenet 和 Tsagaan 斑岩 Cu-Mo 矿 (Stein et al., 1997; Watanabe et al., 2000; Selby et al., 2002; 毛景文等, 2004)。

虽然部分学者认为辉钼矿中的 Re 和 Os 有可能在低温成矿溶液中发生活化 (Suzuki et al., 2000), 但大量的辉钼矿 Re-Os 年龄测定, 以及对与成矿密切相关侵入岩的锆石 SHRIMP 年龄和地质特征的研究, 均认为辉钼矿 Re-Os 同位素年龄能精确地代表其成矿时代 (Stein et al., 1997; 1998; 2001; Watanabe et al., 2000; Selby et al., 2001a; 2001b; Selby et al., 2002)。在大多数情况下, 硅酸盐蚀变矿物的 K-

Ar 和  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄不能反映硫化物矿化的时间 (Selby et al., 2001b),  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄记录着成岩或成矿末期的同位素封闭时间 (Selby et al., 2002)。Suzuki 等 (1996) 对比研究了日本 18 个矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及由其他方法测得的年龄, 结果表明, 脉状矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素年龄均比蚀变矿物 K-Ar 年龄大 3~12 Ma, 可能与后期蚀变事件或较慢的冷却速度有关。这是因为辉钼矿 Re-Os 同位素体系封闭温度相对较高 (约 500℃), 而 K-Ar 同位素体系相对较低。最近的初步工作显示, 阳新花岗闪长岩和铜山口花岗闪长斑岩的锆石 SHRIMP 年龄为 140 Ma 左右 (与李健威个人交流), 与此次测定的 Re-Os 模式年龄在误差范围内基本上是一致的。同时, 本文所获之铜山口 2 件辉钼矿的 Re-Os 模式年龄在误差范围内完全吻合。因此, 本次测定的辉钼矿 Re-Os 模式年龄能精确代表成矿时代, 丰山洞、阮家湾、千家湾、铜绿山和铜山口铜多金属矿床的成矿时代分别为  $(144.0 \pm 2.1) \text{ Ma}$ 、 $(143.6 \pm 1.7) \text{ Ma}$ 、 $(137.7 \pm 1.7) \text{ Ma}$ 、 $(137.8 \pm 1.7) \text{ Ma}$  和  $(138.1 \pm 1.8) \text{ Ma}$ 、 $(142.3 \pm 1.8) \text{ Ma}$  和  $(143.5 \pm 1.7) \text{ Ma}$ 。

在长江中下游地区, 除庐枞和宁芜矿集区主要发育玢岩铁矿外, 其他矿集区形成了大量的铜、金、钼、钨等多金属矿床。最近, 对宁芜玢岩铁矿内与成矿密切相关的蚀变矿物钠长石和金云母进行了  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  法年龄测定, 其成矿时代集中于  $(122.9 \pm 0.2) \sim (126.7 \pm 0.2) \text{ Ma}$ , 相当于早白垩世 (Yu et al., 2004)。由表 3 可知, 铜陵、安庆、九瑞和鄂东南矿集区的成矿时代基本是一致的, 主要集中于  $(140 \pm 5) \text{ Ma}$ , 其成矿时代分别为 135~145 Ma、137~141 Ma、137~144 Ma 和 138~144 Ma。由此可见, 长江中下游大型矿集区内的铜、金、钼、钨等多金属矿床几乎是同时形成的。

## 5.2 成矿地球动力学背景

上述结果表明, 长江中下游地区晚侏罗世末—早白垩世初  $(140 \pm 5) \text{ Ma}$  存在一期区域性大规模铜、金、钼、钨等多金属矿的成矿事件, 该成矿事件的地球动力学背景如何? 最近, 在对我国北方中生代矿床的分布特征和时代进行系统研究的基础上, 认为成矿时间主要集中于 190~160 Ma、140 Ma 左右和 125~110 Ma 左右, 其地球动力学背景分别为后碰撞造山过程、构造体制大转折晚期和岩石圈大规模快速减薄 (Mao et al., 2003; 毛景文等, 2005)。虽

表 3 长江中下游大型矿集区 Cu-Au-Mo- ( W ) 矿床同位素年龄精确数据  
Table 3 Precise age data of the Cu-Au-Mo- ( W ) deposits in Middle-Lower Yangtze ore cluster area

| 矿集区 | 矿床名称 | 样品特征              | 年龄/Ma       | 测试方法和备注                                                              | 资料来源             |
|-----|------|-------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------|------------------|
| 鄂东南 | 铜山口  | 钾化带和绢云母化蚀变带中辉钼矿   | 142.9       | 2 个 Re-Os 模式年龄平均值,其范围为 ( 143.5 ± 1.73 )-( 142.3 ± 1.79 ) Ma          | 本文               |
|     | 铜绿山  | 矽卡岩矿石中辉钼矿         | 138.0       | 2 个 Re-Os 模式年龄平均值,其范围为 ( 137.8 ± 1.67 )-( 138.1 ± 1.75 ) Ma          | 本文               |
|     | 千家湾  | 矽卡岩矿石中辉钼矿         | 138         | Re-Os 同位素模式年龄                                                        | 本文               |
|     | 阮家湾  | 花岗闪长斑岩中辉钼矿        | 144         | Re-Os 同位素模式年龄                                                        | 本文               |
| 九瑞  | 丰山洞  | 花岗闪长斑岩中辉钼矿        | 144         | Re-Os 同位素模式年龄                                                        | 本文               |
|     | 城门山  | 石英脉中辉钼矿           | 141         | 5 个样品 Re-Os 等时线年龄,模式年龄范围为 139.3~144.2 Ma                             | 吴良士等,1997        |
|     |      | 石英斑岩中浸染状辉钼矿       | 137         | 6 个样品 Re-Os 等时线年龄,模式年龄范围为 136.4~144.0 Ma                             | 吴良士等,1997        |
|     |      | 斑岩钼矿石中的辉钼矿        | 142         | Re-Os 同位素模式年龄                                                        | 毛景文等,2004        |
| 安庆  | 安庆   | 网脉状矿体中辉钼矿         | 138.3       | 5 个 Re-Os 模式年龄平均值,其范围为 ( 134.7 ± 2.3 )-( 142.6 ± 1.7 ) Ma            | 毛景文等,2004        |
|     | 铜矿里  | 矿石中辉钼矿            | 141.6       | 5 个 Re-Os 模式年龄平均值,其范围为 ( 139.4 ± 2.2 )-( 143.7 ± 1.6 ) Ma            | 毛景文等,2004        |
|     | 月山   | 地下 110 m 1 号矿脉辉钼矿 | 138         | 为 Os-Os 同位素模式年龄                                                      | Sun et al., 2003 |
| 铜陵  | 青阳   | 矽卡岩和石英脉中辉钼矿       | 137.3       | 2 个 Os-Os 模式年龄结果平均值,其范围为 ( 136.4 ± 2.5 )-( 138.1 ± 2.5 ) Ma          | Sun et al., 2003 |
|     | 沙滩角  | 矿石中辉钼矿            | 140.3       | 6 个 Re-Os 模式年龄平均值,其范围为 ( 136.9 ± 2.2 )-( 142.8 ± 1.6 ) Ma            | 毛景文等,2004        |
|     | 南阳山  | 矿石中辉钼矿            | 139.3       | 7 个 Re-Os 同位素模式年龄平均值,其范围为 ( 136.9 ± 2.1 )-( 141.1 ± 0.5 ) Ma         | 毛景文等,2004        |
|     | 大团山  | 2 号矿钼矿体中辉钼矿       | 139         | 6 个样品 Re-Os 等时线年龄,其模式年龄为 ( 138.0 ± 3.2 )-( 140.8 ± 2.0 ) Ma          | 毛景文等,2004        |
|     | 龙虎山  | 闪长岩中辉钼矿           | 138         | 为 Os-Os 模式年龄,该样品的 Re-Os 同位素模式年龄为 ( 139.02 ± 0.34 ) Ma                | Sun et al., 2003 |
|     | 金口岭  | 矽卡岩化矿石中辉钼矿        | 137         | 6 个样品 Re-Os 素等时线年龄,模式年龄为 136.8~137.4 Ma                              | 蒙义峰等,2004        |
|     | 冬瓜山  | 硫化物石英脉中辉钼矿        | 137.4       | Re-Os 同位素模式年龄                                                        | 蒙义峰等,2004        |
|     | 小铜官山 | 与黄铜矿共生的铬云母团块      | 135.5       | 为 <sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar 坪年龄,等时线年龄为 ( 137.68 ± 2.75 ) Ma | 蒙义峰等,2004        |
|     | 老庙基山 | 与黄铜矿等共生的铬云母       | 144.9       | 为 <sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar 坪年龄,等时线年龄为 ( 150.25 ± 3.00 ) Ma | 蒙义峰等,2004        |
|     | 塌里牧  | 蚀变花岗闪长岩中辉钼矿       | 138.6       | Re-Os 同位素模式年龄                                                        | 曾普胜等,2004        |
|     | 铜官山  | 矽卡岩矿石中金云母         | 144.9 ± 0.4 | <sup>40</sup> Ar- <sup>39</sup> Ar 坪年龄                               | 曾普胜等,2004        |

然长江中下游成矿带位于扬子克拉通北缘,但其地球动力学背景类似于华北克拉通( Li et al., 2003 )。因此,该成矿带于晚侏罗世末—早白垩世初( 140 ± 5 ) Ma 的区域性成矿可能是在中国东部 NS 向印支期构造域向 NE 向古太平洋构造域的大转折晚期形成的( 毛景文等, 2004 )。

从沉积地层和构造变形来看,该地区经历了前震旦纪基底形成阶段和震旦纪至早三叠世沉积盖层形成阶段,一直相对稳定,直至中三叠世以来的碰撞造山和造山后板内变形诱发了该区强烈的岩浆构造活动,同时发生一系列成矿事件( 常印佛等, 1991 ; 翟

裕生等, 1992 ; Zhai et al., 1996 ; Zhao et al., 1999 ; Chen et al., 2001 )。大量研究表明,扬子克拉通与华北克拉通在中三叠世( 238~218 Ma )时发生碰撞拼合,并形成超高压变质岩带( Ames et al., 1993 ; 1996 ; Li et al., 2003 )。此后,开始陆内造山作用。最近,中国东部的地质编图、精确定年、地热和盆地的研究,均表明在中侏罗世末到早白垩世初( 163~136 Ma ),中国东部经历了南北向印支期构造域向北东向古太平洋构造域的大转折( 任纪舜等, 1998 ; 牛宝贵等, 2003 ; Li et al., 2004 ; 付明希等, 2004 ),且华北东部中生代中期地表热流调整可能为晚侏罗世—早

白垩世,而相对应的深部构造-热过程则发生于中侏罗世晚期(160 Ma)(付明希等,2004)。由此可见,长江中下游地区晚侏罗世末—早白垩世初( $140 \pm 5$ ) Ma)的区域成矿事件可能形成于构造体制大转折晚期的背景下,但其深部的地质过程不清楚。

综合已有的资料来看,长江中下游地区内多数中酸性侵入岩具有类埃达克(adakite)地球化学特征,暗示该地区晚侏罗世末—白垩纪存在较厚的地壳(Xu et al., 2002; Wang et al., 2003)。岩石学和地球物理资料均表明,晚侏罗世以来,该地区存在明显的玄武质岩浆底侵作用(Lü et al., 2005),可能导致地壳增厚(Wang et al., 2003)。后来,由于重力失稳和/或华北板块与华南板块相对逆时针旋转(Zhao et al., 1987),导致较厚岩石圈底部快速垮塌,软流圈上涌诱发了下地壳重熔作用;同时,玄武质岩浆底侵作用加强,使得玄武质岩浆与中-新元古代下地壳重熔的岩浆混合(Chen et al., 2001),沿断裂带和不同深度的滑脱构造面(Wu et al., 2003)形成了晚侏罗世末—早白垩世的大规模岩浆活动,并伴有大规模的成矿事件。此过程中,存在强烈的壳幔作用,岩石学上表现为花岗闪长岩-花岗岩体内存在大量的地幔岩包体和角闪石巨晶(Qin et al., 2003)。Wang等(2004)认为,中酸性岩浆是否与地幔橄榄岩反应是形成大规模成矿的关键,成矿与热的地幔上涌有关。同时,必须指出,长江中下游地区的燕山期侵入岩是中国东部晚中生代大规模岩浆活动的重要组成部分,成矿作用与侵入岩密切相关。对大规模岩浆活动的构造背景的认识还存在很大争论,焦点在于古太平洋俯冲作用对其的影响(汪洋等,2004)。晚侏罗世末—早白垩世初该地区是否处于弧后伸展构造背景,需进行更为深入的探讨。因此,本文虽已厘定了长江中下游大型矿集区存在一期重要的晚侏罗世末—早白垩世初( $140 \pm 5$ ) Ma)的区域性成矿事件,但对其成矿地球动力学背景仍须进一步研究。

**致谢** 在野外工作期间,得到鄂东南地质队熊继传总工、李享洲和湖北省地质四队罗总、周少东、李健桥及湖北地质调查院杨明银总工的大力支持和帮助;在室内工作和论文撰写期间,曾得益于与盛继福、杜安道、李健威、杨竹森和李建康的深入讨论;文章最终定稿得益于审稿者和编辑部提出的宝贵意见。在此一并致谢。

## Reference

- Ames L., Tilton G. R. and Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 21: 339~342.
- Ames L., Zhou G. and Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean cratons, central China[J]. *Tectonics*, 15: 472~489.
- Berzina A. N., Sotnikov V. I., Economou-Eliopoulos M. and Demetrios G. E. 2005. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia[J]. *Ore Geology Reviews*, 26: 91~113.
- Chang Y. F., Liu X. P. and Wu C. Y. 1991. The copper-iron belt of the Lower and Middle Reaches of the Changjiang River[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 363p (in Chinese with English abstract).
- Chen J. F., Yan J., Xie Z., Xu X. and Xing F. M. 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in eastern China: constraints on sources[J]. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26: 719~731.
- Du A. D., He H. L., Yin N. W., Zou X. Q., Sun Y. L., Sun D. Z., Cen S. Z. and Qu W. J. 1995. A study of the Rhenium-Osmium geochronology of molybdenites[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 8: 171~181.
- Du A. D., Wu S. Q., Sun D. Z., Wang S. X., Qu W. J., Markey R., Stein H., Morgan J. and Malinovskiy D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: molybdenite HLP and JDC[J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28(1): 41~52.
- Fu M. X., Hu S. B. and Wang J. 2004. Mesozoic thermal regime inversion in eastern North China Block and its tectonic implication[J]. *Science in China (Series D)*, 34: 514~520 (in Chinese).
- Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks[J]. *Mining Geology*, 27(5): 293~305.
- Li S. G. and Yang W. 2003. Decoupling of surface and subsurface sutures in the Dabie orogen and a continent-collisional lithospheric-wedging model: Sr-Nd-Pb isotopic evidences of Mesozoic igneous rocks in eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48: 831~838.
- Li Z., Liu S. F., Zhang J. F. and Wang Q. C. 2004. Typical basin-fill sequences and basin migration in Yanshan, North China—response to Mesozoic tectonic transition[J]. *Science in China (Series D)*, 47: 181~192.
- Lü Q. T., Hou Z. Q., Yang Z. S. and Shi D. N. 2005. Underplating in the middle-lower Yangtze valley and model of geodynamic evolution: constraints from geophysical data[J]. *Science in China (Series D)*, 34: 783~794.
- Mao J. R., Su Y. X. and Chen S. Y. 1990. Intermediate-acid intrusion in the middle-lower reaches of Yangtze River and relevant mineralization[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 191p (in Chinese).
- Mao J. W., Zhang Z., Zhang Z. and Du A. D. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W-(Mo) deposit in the northern Qilian Mountains and its geological significance[J]. *Geochimica et*

*Cosmochimica Acta*, 63, 1815~1818.

- Mao J W, Wang Y T, Zhang Z H, Tu J J and Niu B G. 2003. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in the North China and adjacent areas: implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. *Sciences in China (Series D)*, 33, 838~851.
- Mao J W, Stein H J, Du A D, Zhou T F, Mei Y X, Li Y F, Zang W S and Li J W. 2004. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River belt and its implications for mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78: 121~131 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 169~188 (in Chinese with English abstract).
- Meny Y F, Yang Z S, Zeng P S, Xu W Y and Wang X C. 2004. Tentative temporal constraints of ore-forming fluid systems in Tongling metallogenic province[J]. *Mineral Deposits*, 23: 271~280 (in Chinese with English abstract).
- Niu B G, He Z J, Song B and Ren J S. 2003. SHRIMP dating of Zhangjiakou Formation volcanic rock and its importance significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(2): 140~141 (in Chinese).
- Pan Y and Dong P. 1999. The Lower Changjiang (Yangzi / Yangtze River) metallogenic belt, east China: Intrusion and wall rock-hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 15: 177~242.
- Pei R F and Hong D W. 1995. The granites of South China and their metallogeny[J]. *Episodes*, 18: 77~86.
- Qin X L, Du Y S, Lee H K, Yin J W and Guo X F. 2003. Fe-Ti oxide and Fe-Cu sulfide exsolution in amphibole cumulate xenoliths from granodiorite in Tongling, Anhui Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2626~2634.
- Ren J S, Niu B G, He Z J, Xie G L and Liu Z G. 1998. Tectonic framework and geodynamics evolution of eastern China [A]. In: Ren J S and Yang W Y, ed. *Composition, structure, evolution and environment of continental lithosphere of China* [M]. Beijing: Atomic Energy Press. 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Selby D and Creaser R A. 2001a. Re-Os geochronology and systematic-sim molybdenite from the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia, Canada[J]. *Econ. Geol.*, 96: 197~204.
- Selby D and Creaser R A. 2001b. Late and Mid Cretaceous mineralization in the Northern Canadian Cordillera: constraints from Re-Os molybdenite dates[J]. *Econ. Geol.*, 96: 1461~1467.
- Selby D, Creaser R A, Hart C J R, Rombach C S, Thompson J F H, Smith M T, Bakke A and Goldfarb R J. 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[J]. *Geology*, 30: 791~794.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 67: 2136~2141.
- Smoliar M I, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites[J]. *Science*, 271: 1099~1102.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Du A and Sun Y. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shaanxi Province, China[J]. *Econ. Geol.*, 92: 827~835.
- Stein H J, Sundblad K, Markey R, Morgan J W and Motuza G. 1998. Re-Os ages for Archean molybdenite and pyrite, Kuittila-Kiviso, Finland and Proterozoic molybdenite, Kabeliai, Lithuania: Testing the chronometer in a metamorphic and metasomatic setting[J]. *Mineralium Deposita*, 33: 329~345.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L and Schersten A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 13: 479~486.
- Sun W, Xie Z, Chen J, Zhang X, Chai Z F, Du A D, Zhao J S, Zhang C H and Zhou T F. 2003. Os-Os dating of copper and molybdenum deposits along the Middle and Lower reaches of the Yangtze River, China[J]. *Econ. Geol.*, 98: 175~180.
- Suzuki K, Kagi H, Nara M, Takano B and Nozaki Y. 2000. Experimental alteration of molybdenite: evaluation of the Re-Os system, infrared spectroscopic profile and polytype[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 223~232.
- Suzuki K, Shimizu H and Masuda A. 1996. Re-Os dating of molybdenites from ore deposits in Japan: Implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and the cooling history of molybdenum ore deposits [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 3151~3159.
- Tang Y C, Wu Y C, Chu Z G, Xing F M, Wang Y M, Cao F Y and Chang Y F. 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along Changjiang area of Anhui Province [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 243p (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao Z H and Xu J F. 2003. Petrogenesis and metallogenesis of the Yanshanian adakite-like rocks in the Eastern Yangtze Block [J]. *Science in China (Series D)*, 46 (Supp.): 164~176.
- Wang Q, Zhao Z H, Bao Z W, Xu J F, Liu W, Li C F, Bai Z H and Xiong X L. 2004. Geochemistry and petrogenesis of the Tongshankou and Yinzu adakitic intrusive rocks and the associated porphyry copper-molybdenum mineralization in southeast Hubei, east China[J]. *Resource Geology*, 54: 137~152.
- Wang Y, Deng J F and Ji G Y. 2004. A perspective on the geotectonic setting of early Cretaceous adakite-like rocks in the Lower Reaches of Yangtze River and its significance for copper-gold mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 297~314 (in Chinese with English abstract).
- Watanabe Y and Stein H J. 2000. Re-Os ages for the Erdenet and Tsagaan Suvarga porphyry Cu-Mo deposits, Mongolia, and tectonic implications[J]. *Econ. Geol.*, 95: 1537~1542.
- Wu G G, Zhang D and Zang W S. 2003. Study of tectonic layering motion and layering mineralization in the Tongling metallogenic cluster

- [J]. Science in China (Series D), 46: 852~863.
- Xie G Q, Mao J W and Zhao C S. 2005. Mineralizing pulses and geodynamic setting of Cu-Fe-Au polymetallic deposits in the Lower Yangtze valley, east-central China [A]. In: Mao J W and Bierlein F P, ed. Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge [M]. Heidelberg: Springer. 1201~1204.
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q and Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. Geology, 30: 1111~1114.
- Xue D K, Ge Z X and Hu H M. 1997. Metallogenic mode and prospecting model of copper-gold in southeastern Hubei Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 189p (in Chinese).
- Yang M Y, Cui B, Wei S W, Zhang W P and Li Y Z. 2003. Genesis of Xujiashan gold orefield in southeastern Hubei Province [J]. Geological Science and Technology Information, 22: 82~86 (in Chinese with English abstract).
- Yu J J and Mao J W. 2004.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of albite and phlogopite from porphyry iron deposits in the Ningwu basins in east-central China and its significance [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 78: 435~442.
- Zeng P S, Yang Z S, Meng Y F, Pei R F, Wang Y B, Wang X C, Xu W Y, Tian S H and Yao X D. 2004. Temporal-spatial configuration and mineralization of Yanshanina magmatic fluid systems in Tongling ore concentration area, Anhui Province [J]. Mineral Deposits, 23: 298~309 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, Zhou X R, Wan T F, Jin F Q and Zhou Y G. 1992. Fe-Cu (Au) metallogeny of the Middle-Lower Changjiang region [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 235p (in Chinese).
- Zhai Y S, Xiong Y Y, Yao S Z and Lin X D. 1996. Metallogeny of copper and iron deposits in the Eastern Yangtze Carton, east-central China [J]. Ore Geology Review, 11: 229~248.
- Zhang Q, Jian P, Liu D Y, Wang Y L, Qian Q, Wang Y and Xue H. 2003. SHRIMP dating of volcanic rocks from Ningwu area and geological implication [J]. Science in China (Series D), 33: 830~837.
- Zhao X and Coe R S. 1987. Palaeomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China [J]. Nature, 327: 141~144.
- Zhao Y M, Lin W W, Bi C S, Li D X and Jing C J. 1990. Skarn deposits of China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 354p (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Zhang Y N and Bi C S. 1999. Geology of gold-bearing skarn deposits in the middle and lower Yangtze River Valley and adjacent regions [J]. Ore Geology Review, 14: 227~240.
- Zhou X R and Ren J. 1994. Mesozoic granites in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 118p (in Chinese with English abstracts).
- Zhou T F, Yuan F, Yue S C, Liu X D and Zhao Y. 2000. Two series of copper-gold deposits in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area (MLRYA) and the hydrogen, oxygen, sulfur and lead isotopes of their ore-forming hydrothermal systems [J]. Science in China (Series D), 43 (Supp.): 209~218.

## 附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴昌言. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带 [M]. 北京: 地质出版社. 379 页.
- 付明希, 胡圣标, 汪集. 2004. 华北东部中生代热体制转换及其构造意义 [J]. 中国科学 (D 辑), 34: 514~520.
- 毛建仁, 苏郁香, 陈三元. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿 [M]. 北京: 地质出版社. 191 页.
- 毛景文, Stein H, 杜安道, 周涛发, 梅燕熊, 李永峰, 藏文栓, 李进文. 2004. 长江中下游地区铜金矿 Re-Os 年龄精测及其对成矿作用的指示 [J]. 地质学报, 78: 121~131.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长表, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次和相应的地球动力学环境 [J]. 岩石学报, 21: 169~188.
- 蒙义峰, 杨竹森, 曾普胜, 徐文艺, 王训成. 2004. 铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定 [J]. 矿床地质, 23: 271~280.
- 牛宝贵, 和政军, 宋彪, 任纪舜. 2003. 张家口群火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义 [J]. 地质通报, 22(2): 140~141.
- 任纪舜, 牛宝贵, 和政军, 谢广连, 刘志刚. 1998. 中国东部的构造格局和动力演化 [A]. 任纪舜, 杨巍然, 主编. 中国东部岩石圈结构与构造岩浆演化 [M]. 北京: 原子能出版社. 1~12.
- 唐永成, 吴昌言, 储国正, 邢凤鸣, 王永敏, 曹奋扬, 常印佛. 1998. 安徽沿江地区铜金多金属矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社. 243 页.
- 汪洋, 邓晋福, 姬广义. 2004. 长江中下游地区早白垩世埃达克质岩的大地构造背景及其成矿意义 [J]. 岩石学报, 20(2): 297~314.
- 吴良士, 邹晓秋. 1997. 江西城门山铜矿床 Re-Os 同位素年龄研究 [J]. 矿床地质, 16: 376~381.
- 薛迪康, 葛宗侠, 胡惠民. 1997. 鄂东南铜金矿床成矿模式与找矿模型 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 189 页.
- 杨明银, 崔彬, 魏世昆. 2003. 鄂东南徐家山金矿田成因研究 [J]. 地质科学情报, 22: 82~86.
- 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 裴荣富, 王彦斌, 王训成, 徐文艺, 田世洪, 姚孝德. 2004. 安徽铜陵矿集区燕山期岩浆流体系统时空结构与成矿 [J]. 矿床地质, 23: 298~319.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周永桂. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律 [M]. 北京: 地质出版社. 235 页.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 李大新, 蒋崇俊. 1990. 中国矽卡岩矿床 [M]. 北京: 地质出版社. 354 页.
- 周珣若, 任进. 1994. 长江中下游中生代花岗岩 [M]. 北京: 地质出版社. 118 页.