

文章编号: 0258-7106(2009)03-0227-13

鄂东南铜绿山矿田矽卡岩型铜铁金矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义*

谢桂青^{1,2} 赵海杰¹ 赵财胜³ 李向前² 侯可军¹ 潘怀军⁴

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 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; 3 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
4 湖北省三鑫金铜有限责任公司, 湖北 大冶 435100)

摘要 鄂东南地区(斑岩-)矽卡岩型铜铁金多金属矿床是长江中下游地区金属成矿带的重要组成部分, 铜绿山矿田以成矿类型齐全和矿体规模较大为特点, 是鄂东南矿集区最重要的矿田。但目前对不同成矿元素的矽卡岩型铜铁金矿床的成矿时代、成岩成矿时差和构造背景的研究相对较少。本文利用 Re-Os 同位素定年方法对铜绿山矿田两个典型的大型铜绿山矽卡岩铜(铁金)矿床和大型鸡冠嘴矽卡岩(铜)金矿床进行了成矿时代的研究, 获得了辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄范围分别为(136.8±1.9)~(138.1±1.8) Ma 和(137.1±1.9)~(138.8±1.9) Ma, 等时线年龄分别为(137.1±1.9) Ma 和(138.2±2.2) Ma, 表明铜绿山矿田不同类型的矿床几乎同时形成; 与矿田花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(140.3±1.8) Ma 在误差范围内基本一致, 存在较短的成岩成矿时差, 该成矿时代与鄂东南地区其他矿田的(斑岩-)矽卡岩型铜钼矿床和矽卡岩型铁矿床, 以及长江中下游地区铜陵、安庆、九瑞矿集区(斑岩-)矽卡岩铜多金属矿床的形成时代基本一致。铜绿山矿田矽卡岩铜铁金矿床可能是在太平洋板块俯冲的撕裂或开天窗时, 由于玄武质岩浆底侵和岩石圈减薄导致中国东部大规模侵入岩和成矿作用产物的形成。

关键词 地球化学 辉钼矿 Re-Os 年龄 矽卡岩铜铁金矿 铜绿山矿田 鄂东南地区

中图分类号: P618.41, P618.31, P618.51 文献标志码: A

Re-Os dating of molybdenite from Tonglushan ore district in southeastern Hubei Province, Middle-Lower Yangtze River belt and its geological significance

XIE GuiQing^{1,2}, ZHAO HaiJie¹, ZHAO CaiSheng³, LI XiangQian², HOU KeJun¹
and PAN HuaiJun⁴

(1 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4 Hubei Sanxin Gold and Copper Co. Ltd., Daye 435100, Hubei, China)

Abstract

The (porphyry-)skarn Cu-Fe-Au polymetallic deposits in southeastern Hubei constitute an important component part of the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt. The Tonglushan ore district is characterized

* 本文得到国家重点基础研究课题(2007CB411407 和 2007CB411405) 国家自然科学基金(40434011 和 40402011) 中央级公益性科研院所基本科研业务费(K0816) 中国科学院地球化学研究所开放室基金(200402) 和中国博士后项目的联合资助

第一作者简介 谢桂青, 男, 1975年生, 博士, 副研究员, 从事岩石学和矿床地球化学研究。Email: guiqingxie@sohu.com

收稿日期 2009-01-04; 改回日期 2009-03-24。李德先编辑。

by various types of mineralizations and large-sized ore bodies and represents the most important economic mineral district in southeastern Hubei Province. Nevertheless, little research work has been done on the timing of various skarn deposits and the genetic association of igneous rocks with mineralization as well as the tectonic framework of these deposit. Molybdenites from the Tonglüshan skarn Cu- (Fe-Au) deposit and the Jiguanzui skarn Cu (Au) deposits yielded Re-Os model ages ranging from (136.8 ± 1.9) to (138.1 ± 1.8) Ma and from (137.1 ± 1.9) to (138.8 ± 1.9) Ma, respectively, with isochronal ages being (137.1 ± 1.9) Ma and (138.2 ± 2.2) Ma, which are considered to be reliable estimates for the timing of the Tonglüshan and the Jiguanzui deposit. These data indicate that ages of various skarn deposits are almost identical to the zircon SHRIMP U-Pb age of (140.3 ± 1.8) Ma for the related granodiorite, almost the same as ages of other (porphyry-)skarn Cu-Mo deposits and skarn Fe deposits in southeastern Hubei Province and even those of the Jiurui Cu-Au (Mo), the Anqing Cu-Fe-Mo (Au) and the Tongling Cu-Au ore districts in the Middle-Lower Yangtze River metallogenic belt. Combined with geological, geochemical and geophysical evidence, it is proposed that the skarn Cu-Fe-Au deposits in Tonglüshan constitute a part of extensive igneous rocks and corresponding skarn Cu-Fe-Au mineralization that resulted from lithospheric thinning and basaltic magma underplating, which, in turn, were triggered by the roll-back and /or window of the downgoing slab related to the subduction of Pacific plate in East China.

Key words: geochemistry, molybdenite Re-Os isotope age, Cu-Fe-Au skarn deposit, Tonglüshan ore district, southeastern Hubei Province

长江中下游铜铁多金属成矿带是中国东部最重要的有色金属基地,长期被列为矿床勘查和科技攻关的热点地区。该带自西向东依次分布有:鄂东(Fe-Cu-Au)、九瑞(Cu-Au)、安庆(Cu)、庐枞(Fe-Cu)、铜陵(Cu)、宁芜(Fe)、宁镇(Cu-Pb-Zn)等7个大型矿集区(图1),与火山岩有关的玢岩铁矿床和与侵入岩有关的(斑岩-)矽卡岩Cu-Fe-Au-Mo矿床为主(Pan et al., 1999)。前人已对长江中下游地区铜铁多金属矿床的地层、岩浆岩、构造演化和矿床地质进行了大量研究,积累了丰富的基础地质资料,并取得了许多重要认识(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992)。精确成矿时代的厘定、成岩成矿时差和构造背景的研究一直是长江中下游地区的区域矿床时空分布规律及其与岩浆事件耦合关系研究的重要内容。前人对(斑岩-)矽卡岩型铜、铁矿床的成矿时代主要通过成矿有关的岩体的K-Ar和Rb-Sr等时线法间接获得,但用该方法获得的年龄不但范围较宽而且存在很大的不确定性(周珣若等, 1994),极大地制约了对区域成矿规律的认识。辉钼矿Re-Os同位素和含钾矿物的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素定年法可以精确厘定成矿年代,利用该方法测得长江中下游地区典型的(斑岩-)矽卡岩型矿床的成矿时代为早白垩世初,并得出该区存在着区域性大规模铜铁多金属成矿事件的认识(吴良士等, 1997; Sun et al.,

2003; Mao et al., 2006; 谢桂青等 2006b; 2008c)。

鄂东南地区位于长江中下游成矿带的最西段,是中国重要的矽卡岩铜铁矿床的大型矿集区(图2)。根据矿床的空间分布、矿床组合和控矿构造,可分为10个矿田。鄂东、金山店和灵乡矿田以矽卡岩型铁矿床为主,铁山和铜绿山矿田以矽卡岩铜铁(金)矿床为主,丰山矿田以斑岩-矽卡岩铜钼金矿床为主,铜山口矿田以(斑岩-)矽卡岩铜钼矿床为主,阳新矿田以矽卡岩铜金矿床为主,龙角山矿田以矽卡岩钨铜钼矿床为主,银山-横山矿田以矽卡岩钨铜钼和脉状铅锌矿床为主(舒全安等, 1992)。其中,铜绿山矿田以矿床类型齐全且规模大为特征(图3),包括中国最大的矽卡岩铜矿床(铜绿山矽卡岩铜铁金矿床)和大型鸡冠嘴矽卡岩铜金矿床,该矿田成矿元素存在Cu-(Fe)、(Cu-Fe)-Au和(Cu)-Au的变化趋势。据已有的地质资料推测,铜绿山矿田的深部应具有很大的找矿空间,正在实施的危机矿山勘查项目分别在铜绿山和鸡冠嘴的深部取得了重要的找矿线索。本文在详细研究鄂东南铜绿山矿田铜铁金矿床特征基础上,利用辉钼矿Re-Os同位素定年方法厘定该矿田两个重要的大型铜绿山矽卡岩铜(铁)矿床和大型鸡冠嘴矽卡岩(铜)金矿床的成矿时代,并结合成矿岩体的SHRIMP锆石U-Pb年龄,讨论成岩成矿的时差。在已有岩石学、地球化学和地球物理学资料的基础上,

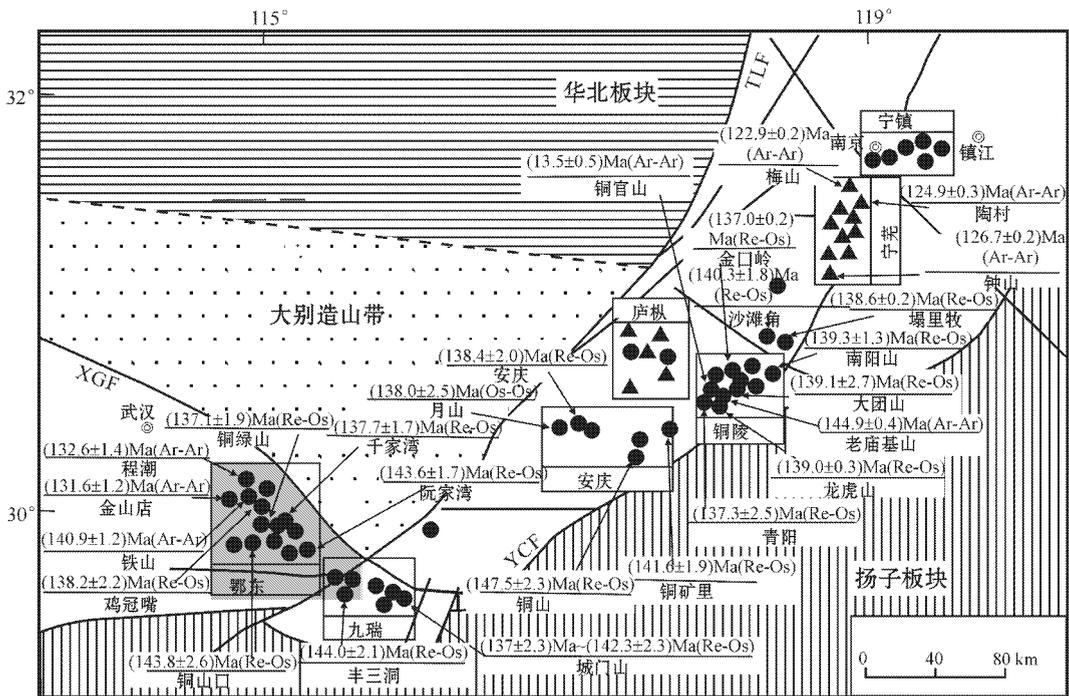


图 1 长江中下游地区地质简图(显示构造位置、典型矿床和成矿时代)

底图据 Pan et al., 1999; 成矿时代据吴良士等, 1997; Sun et al., 2003; Mao et al., 2006; 赵新福等, 2006; 谢桂青等, 2006b, 2008c; XGT—襄樊-广济断裂; YCF—阳新-常州断裂; TLF—郟庐断裂。图中灰度部分为图 2 的位置

Fig. 1 Geological sketch map of the middle-lower reaches of the Yangtze River, showing tectonic setting, typical deposits and timing of mineralization

modified from Pan et al., 1999; Wu et al., 1997; Sun et al., 2003; Mao et al., 2006; Zhao et al., 2006; Xie et al., 2006b, 2008c; XGT—Xiangfan-Guangji fault; YCF—Yangxin-Changzhou fault; TLF—Tanlu fault

探讨铜绿山矿田砂卡岩铜铁金矿床的构造背景。

1 地质背景

长江中下游地区位于扬子板块北缘,秦岭-大别造山带和华北板块南侧(图 1),西北界为襄樊-广济断裂,断裂以北为大别造山带,以南为长江中下游西段,东北界为郟庐断裂,断裂以西为大别造山带和华北板块,以东为长江中下游中东段,南界为阳新-常州断裂,以北为长江中下游地段,以南为扬子板块,内部发育沿江分布的断裂带(邻近现今长江)和北西向断裂。已有研究表明,该区构造演化大致经历了 3 个主要阶段,分别为前震旦纪基底形成阶段、震旦纪—早三叠世沉积盖层阶段、中三叠世以来的碰撞造山和造山后板内变形阶段(翟裕生等, 1992)。前震旦纪基底主要由变质奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩组合、白云母石英片岩夹角闪岩组成,与沉积盖层呈角度不整合关系,沉积盖层主要包括震旦纪碎屑岩、白云岩和硅质岩,寒武纪至三叠纪的碳酸盐

岩和细碎屑岩;第三阶段以中生代大规模岩浆活动和成矿作用为特征(常印佛等, 1991)。区域岩浆岩主要有晚中生代火山岩和 I 型花岗质岩(Pei et al., 1995),晚期发育白垩纪碱性侵入岩-火山岩,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)研究认为,长江中下游成矿带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砂卡岩和斑岩型 Cu-Mo-Au 矿床、与钙碱性钠质侵入岩有关的砂卡岩和岩浆型的 Fe-Cu-Au 矿床、与火山岩盆地中安山岩有关的玢岩铁矿床,其中前两种类型的成矿时代和成因类似,统称为斑岩-砂卡岩-层状(Manto)型 Cu-Fe-Au-Mo 矿床(Pan et al., 1999; Mao et al., 2006)。

鄂东南地区位于长江中下游最西段,处于隆起至凹陷过渡的沉积环境,以铜、铁为主要优势矿种,是长江中下游成矿带的重要组成部分(图 2)。区内地层出露齐全,除前震旦纪基底主要出露在大别山地区外,从古生代到中生代地层在该区均有发育。古生代地层主要发育于西南部位,中生代地层分布

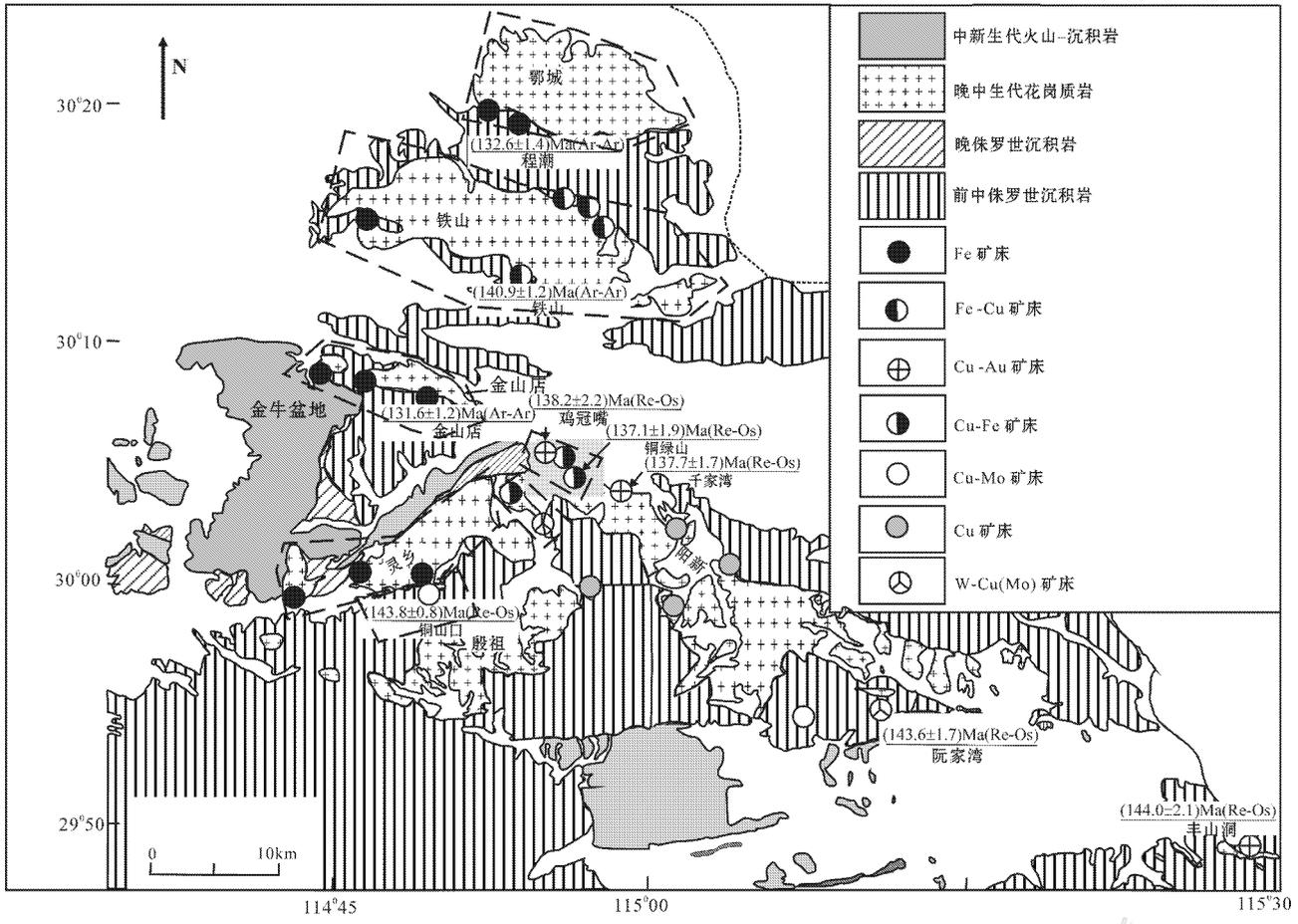


图 2 鄂东南地区地质图(显示矿床类型和成矿时代)

底图据舒全安等, 1992; 成矿时代据赵新福等, 2006; 谢桂青等, 2006b, 2008c

Fig. 2 Geological map of Southeast Hubei Province, showing types of mineral deposits and timing of mineralization modified from Shu et al., 1992; Zhao et al., 2006; Xie et al., 2006b; 2008c

较广,其中三叠纪大冶组大理岩、白云质大理岩和蒲圻组砂页岩为该区矽卡岩铁铜矿最重要的赋矿围岩 (Pan et al., 1999)。由图 2 可知,鄂东南地区发育大量的侵入岩和火山岩,面积可达 920 km²,约占全区面积的 21%,侵入岩包括 6 个大岩体,分别为鄂城(花岗岩、二长岩和石英闪长岩)、铁山(辉长岩、石英闪长岩和二长岩)、金山店(石英二长岩和闪长岩)、阳新(花岗闪长岩)、灵乡(石英闪长岩)和殷祖(花岗闪长岩)岩体,另外还有 30 多个花岗闪长斑岩和花岗斑岩等小岩体,如铜山口、丰山、阮家湾等 (Xie et al., 2008a)。大量 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年表明,该区存在两期重要的岩浆活动:早期辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长斑岩的时代集中于 152~134 Ma,晚期的花岗岩-石英二长岩、基性脉岩和火山岩的时代集中于

134~127 Ma (Xie et al., 2006a; Wang et al., 2006; Li et al., 2009)。除殷祖岩体外,其他各岩体均发育有规模不等的(斑岩-)矽卡岩铜铁金钨矿床(图 2)。根据主要成矿元素组合,鄂东南(斑岩-)矽卡岩型矿床可分为铁、铜、铁铜、铜铁和铜金 5 种类型(舒全安等, 1992),且不同岩体周围的矿床成矿元素组合不同。截至 1993 年底,在该区已发现大、中、小型矿床(点)328 个(薛迪康等, 1997)。近年在殷祖花岗闪长岩体西缘又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)。该区重要的矿床类型和典型矿床包括“大冶式”大型高品位矽卡岩型铁矿床(如铁山、程潮、金山店)、斑岩-矽卡岩复合型铜钨矿床(铜山口和丰山洞)、矽卡岩型铜金矿床(鸡笼山、鸡冠嘴)、矽卡岩型铜钨矿床(阮家湾)和中国最大的矽卡岩型铜矿床(铜绿山)(舒全安等,

1992), 这些矿床均属于与燕山期侵入岩有关的成矿系列(Zhou et al., 2000)。

2 矿床地质特征及采样位置

前人已对鄂东南地区重要的矽卡岩铜铁金多金属矿床的地层、岩浆岩、构造、矿体特征、矿物组合和蚀变分带进行了详细的研究和总结(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 舒全安等, 1992; Zhao et al., 1999; 谢桂青等, 2008b; 2008c)。本研究以铜绿山矿田铜绿山和鸡冠嘴两个典型的矽卡岩型铜铁金矿床为研究对象, 重点研究其成矿年龄和成岩成矿时差。

铜绿山矿田位于阳新岩体西北缘, 阳新岩体面积约 215 km², 呈北西向展布, 岩性主要为花岗闪长岩, 局部可见花岗斑岩和花岗闪长斑岩。铜绿山矿田发育多个矽卡岩铜铁金矿床, 包括中国最大的矽卡岩铜矿床——铜绿山矽卡岩铜(铁金) 矿床和大型鸡冠嘴矽卡岩(铜) 金矿床另外还有中型桃花嘴矽卡岩(铜铁) 金矿床、石头嘴矽卡岩铜铁矿床和小型斑岩猴头山钼矿床等(图 3)。该区地层包括早三叠世大冶组碳酸盐岩、中晚三叠世蒲圻组砂页岩、晚中生代金牛盆地火山岩的马家山组和灵乡组, 鸡冠嘴矿区-190 m 中段可见马家山组砾岩和泥岩不整合于大冶组碳酸盐岩和铜金矿体之上。岩浆岩主要为花岗闪长岩, 少量的石英闪长岩和闪长玢岩, 部分地段可见花岗闪长斑岩边缘相, 发育钠长斑岩的岩脉穿插矿体。发育有北西向、东西向和东北向断裂, 其中北西向和东西向为基底断裂, 北东向为后期断裂, 北东向断裂控制大理岩的展布和矿体的形态, 北西向和东北向断裂交汇于矿体膨大部位。铜绿山、鸡冠嘴和桃花嘴的矿体呈近平行的北东向展布(图 3)。

铜绿山矽卡岩铜铁金矿床的铜金属储量可达 109.67 万吨, 平均品位 1.71%, 铁矿石储量 0.4 亿吨, 平均品位 43.70%。矿区出露岩石主要包括花岗闪长岩、早三叠世大理岩和白云质大理岩, 矿体呈北东向展布, 呈透镜状产于岩体与大理岩的接触带或大理岩捕掳体中, 由矽卡岩型矿体组成, 发育非常完整的矽卡岩矿物组合, 磁铁矿与金云母密切共生, 铜矿与透辉石矽卡岩相关。根据矿物组合和穿插关系, 可以分为 4 个成矿阶段: 干矽卡岩阶段(以石榴子石和透辉石为主)、湿矽卡岩阶段(以绿帘石和金云母为主)、氧化物阶段(以磁铁矿与金云母为主) 和

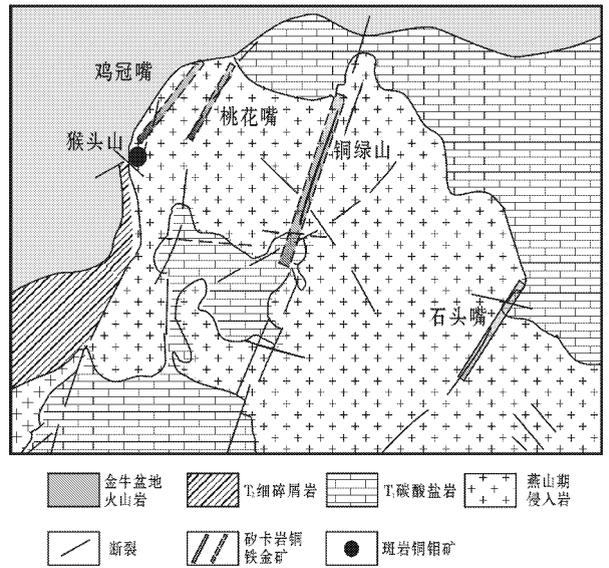


图 3 鄂东南铜绿山矿田地质图(据鄂东南大队资料简化)
Fig. 3 Geological sketch map of the Tonglüshan ore district in southeastern Hubei Province

硫化物阶段(主要为黄铁矿和黄铜矿), 其中硫化物阶段黄铜矿主要呈浸染状和细脉状, 与石英共生的硫化物规模较小, 该阶段可见到多处高品位的黄铜矿与方解石共生。辉钼矿主要发育在硫化物阶段, 呈两种产状产出, 一种呈浸染状产于含铜石榴子石透辉石矽卡岩中, 与黄铜矿共生; 另一种与石英、钾长石共生呈脉状产于矽卡岩化岩体中, 规模较小。蚀变类型主要有矽卡岩化、磁铁矿化、硫化物化和碳酸盐化, 对应于 4 个阶段的热液蚀变温度分别为 400 ~ 740 °C、340 ~ 500 °C、240 ~ 360 °C 和 150 ~ 250 °C(赵一鸣等, 1990)。金属矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、磁铁矿、辉铜矿、辉钼矿等。笔者曾对两个铜绿山南采坑西侧、产于含铜矽卡岩化花岗闪长岩中的浸染状辉钼矿(图 4a)进行了 Re-Os 模式年龄测定(谢桂青等, 2006b)。考虑到辉钼矿的两种产状, 本文补采了铜绿山北采坑中部的含铜石榴子石透辉石矽卡岩中浸染状辉钼矿(TLSB16)和南采坑东侧的弱矽卡岩化石英钾长石脉中辉钼矿脉(图 4b)(TLSB7)样品。

鸡冠嘴矽卡岩铜金矿床是鄂东南地质大队于 20 世纪 80 年代末期, 主要通过重力和磁法发现的一个大型隐伏矿床, 该矿床的铜金属量为 16.2 万吨, 平均品位 1.86%, 金储量可达 23.0 吨, 平均品位 4.13 g/t, 铁矿石量 0.014 亿吨, 平均品位 42.90%。矿区出露岩石主要包括花岗闪长岩、早三叠世碳酸盐

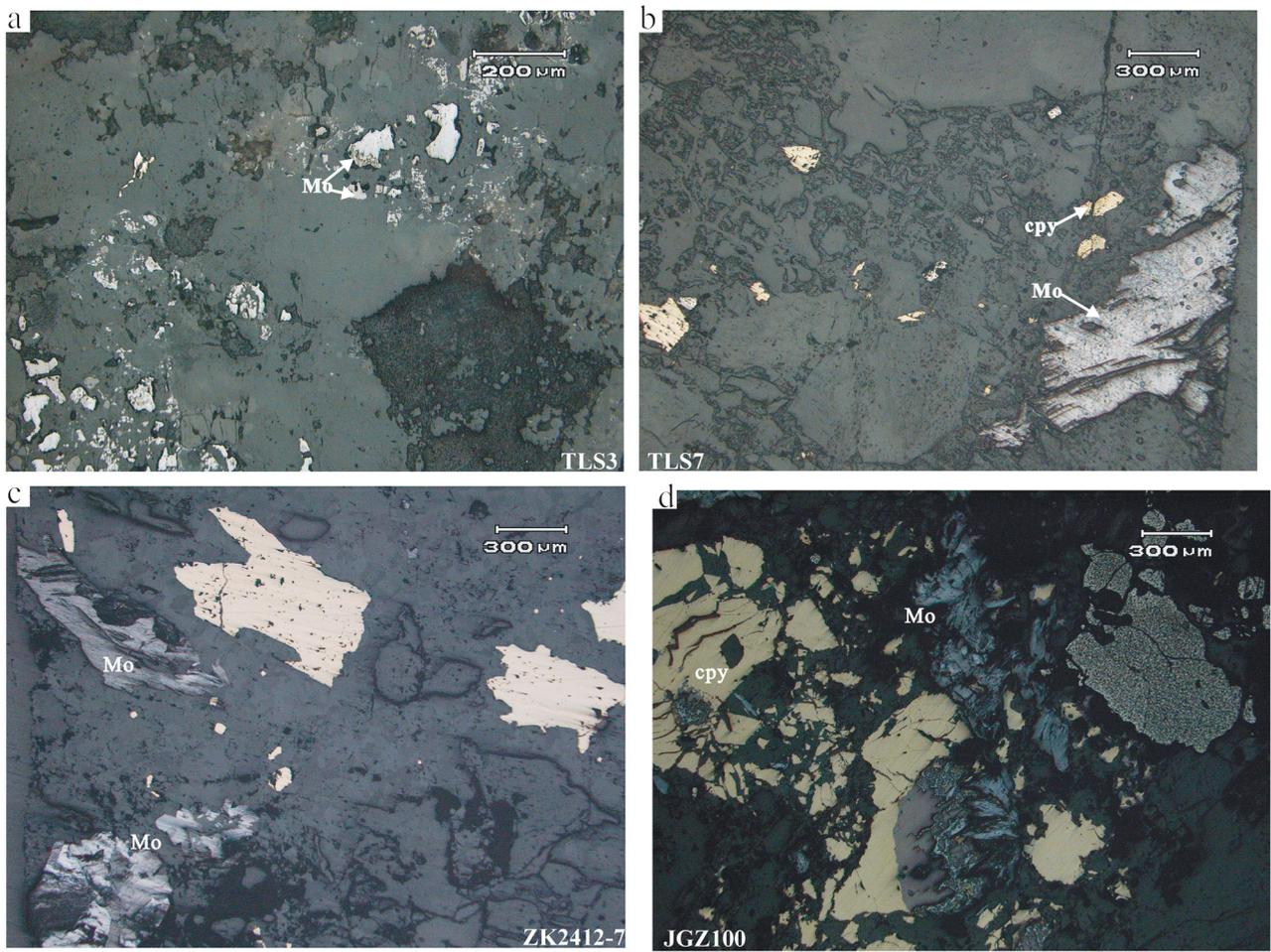


图4 鄂东南铜绿山矿床(a, b)和鸡冠嘴矿床(c, d)中辉钼矿的显微照片

Fig. 4 Molybdenite from the Tonglushan (a, b) and Jiguanzui (c, d) skarn Cu-Fe-Au deposits in southeastern Hubei Province

岩和中生代马家山组和灵乡组火山沉积岩, 矿体呈北东向展布, 长 100 ~ 670 m、平均厚度 1.85 ~ 27.22 m, 呈透镜状产于岩体与大理岩的接触带或大理岩中, -190 m 中段可见少量的铜金矿体呈细脉状产于岩体中。金属矿物以黄铜矿、黄铁矿、自然金、磁铁矿为主, 脉石矿物主要为方解石、白云石、石榴子石、透辉石、金云母、绿帘石等, 金主要赋存于黄铁矿和黄铜矿中, 蚀变主要为钠化、碳酸盐化、透辉石化、金云母化和蛇纹石化等, 其中透辉石化和金云母化与成矿密切相关。根据矿物组合, 可分为 4 个成矿阶段: 矽卡岩阶段(主要为石榴子石、透辉石、绿帘石和金云母)、磁铁矿阶段、高温硫化物阶段和中低温碳酸盐阶段(邱永进, 1995)。辉钼矿主要与石英、钾长石和硫化物共生, 呈脉状产于含铜石榴子石透辉石矽卡岩中, 部分地段构成钼矿体, 如-370 m 中的 23 线和钻孔 ZK2412, 产于高温硫化物阶段。本

文采集了钻孔 ZK2412 不同深度(ZK2412-7 和 ZK2412-9)的含铜辉钼矿化矽卡岩化花岗闪长岩(图 4c), 鸡冠嘴-420 m 中段 24 线(JGZ96)、-470 m 中段 22 线(JGZ97)和 24 线(JGZ100)(方解石、黄铜矿、钾长石和辉钼矿共生(图 4d))的样品。

3 分析方法

辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试工作在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成。分析方法参见文献(Du et al., 1995; 2004; Shirey et al., 1995), 现简述如下:

准确称取待分析样品, 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。缓慢加液氮到盛有半杯乙醇的保温杯中, 调至 -50 ~ -80 °C。将装好样的 Carius 管放到该保温杯中, 通

过长细颈漏斗把准确称取的¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底部,再加入 2 mL 10 mol/L HCl, 4 mL 16 mol/L HNO₃, 1 mL 30 % H₂O₂。当管底溶液冰冻后,用丙烷氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分,放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 200 °C,保温 24 h。在底部冷冻的情况下打开 Carius 管,并用 40 mL 蒸馏水将管中溶液转入蒸馏瓶中。于 105~110 °C 蒸馏 50 min,用 10 mL 蒸馏水吸收蒸出的 OsO₄,用于 ICPMS(等离子体质谱仪测定)测定 Os 同位素比值。

将蒸馏残液倒入 150 mL Teflon 烧杯中待分离铼。将第一次蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干,重复两次以降低酸度。加入 10 mL 5 mol/L NaOH,稍微加热,转为碱性介质。之后转入 50 mL 聚丙烯离心管中离心,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 蒸馏水的 Teflon 烧杯中。在电热板上 50 °C 加热以蒸发丙酮。加热溶液至干,加数滴浓硝酸和 30 % 过氧化氢,加热蒸干以除去残存的 Os。用数毫升 2 % 稀 HNO₃ 溶解残渣,备 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钠。

采用美国 TJA 公司生产的 TJA X-series ICPMS 测定同位素比值。对于 Re:选择质量数 185、187,用 190 监测 Os。对于 Os:选择质量数为 186、187、188、189、190、192,用 185 监测 Re。TJA X-series ICP-MS 测得的 Re、Os 和¹⁸⁷Os 全流程本底值分别为 $(0.0332 \pm 0.0005) \times 10^{-9} \sim (0.0411 \pm 0.0007) \times 10^{-9}$ 、 $(0.0000 \pm 0.0000) \times 10^{-9} \sim (0.0003 \pm 0.0000) \times 10^{-9}$ 、 $(0.0000 \pm 0.0000) \times 10^{-9} \sim (0.0002 \pm 0.0001) \times 10^{-9}$,远远小于所测样品和标样中铼、钨含量,不会影响测定结果。

本次测试过程中,两次分析了标样 HLP 的 Re 和¹⁸⁷Os 含量(见表 1)。由表 1 可知,本次测试标样的 Re、¹⁸⁷Os 的年龄与标样推荐值在误差内完全一致,表明所获得的辉钼矿 Re-Os 数据准确可靠。

4 结 果

鄂东南地区铜绿山和鸡冠嘴大型矽卡岩铜铁金矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果(见表 2)表明,铜绿山矿床中辉钼矿 Re 含量较高,变化范围为 $(261.4 \pm 2.2) \times 10^{-6} \sim (665.4 \pm 5.2) \times 10^{-6}$,辉钼矿 Re-Os 模式年龄变化较小,在 $(136.3 \pm 1.9) \sim (138.1 \pm 1.8)$ Ma 之间,与石英、钾长石和硫化物共生的辉钼矿两次分析结果的辉钼矿 Re-Os 模式年龄分别为 (136.8 ± 1.9) Ma 和 (137.8 ± 2.0) Ma,两者在误差范围内完全一致。采用 ISOPLOT 软件(Ludwig, 2003)对获得的 5 个数据进行等时线处理,获得 Re-Os 等时线年龄为 (137.3 ± 2.4) Ma, MSWD=1.3(图 5)。鸡冠嘴矽卡岩铜金矿床中辉钼矿的 Re 含量更高,变化范围为 $(425.7 \pm 3.2) \times 10^{-6} \sim (1152 \pm 10) \times 10^{-6}$,5 个辉钼矿 Re-Os 模式年龄变化范围较窄,为 $(137.1 \pm 1.9) \sim (138.8 \pm 1.9)$ Ma,采用 ISOPLOT 软件(Ludwig, 2003)对获得的 5 个数据进行等时线处理,Re-Os 等时线年龄为 (138.2 ± 2.2) Ma, MSWD=0.98(图 5)。

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重要基础资料。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,提出区域成矿时代主要集中于燕山期(170~90 Ma),其中,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 和 Fe-Cu 成矿亚系列为 160~120 Ma。

表 1 标样黄龙铺(HLP)辉钼矿的 Re-Os 测试结果和标准值

Table 1 Certificated values and analytical data of Re-Os isotopes for standard sample HLP

编号	原样品	样重/g	$\alpha(\text{Re}) \times 10^{-6}$	$\alpha(^{187}\text{Os}) \times 10^{-9}$	t/Ma
080924-11	HLP	0.01030	282.0 ± 2.3	653.7 ± 5.9	220.9 ± 3.2
081111-23	HLP	0.01064	279.7 ± 2.5	649.2 ± 5.8	221.2 ± 3.3
推荐值			283.8 ± 2.3	659 ± 14	221.4 ± 5.6

表2 鄂东南地区铜绿山矿田矽卡岩铜铁金矿床 Re-Os 同位素测试结果

Table 2 Analytical data of Re-Os isotopes for skarn Cu-Fe-Au deposits from the Tonglushan ore district in southeast Hubei Province

矿床及样号	样重/g	$\epsilon(\text{Re}) \times 10^{-6}$	$\epsilon(\text{Os}_{\text{普}}) \times 10^{-9}$	$\epsilon(^{187}\text{Re}) \times 10^{-6}$	$\epsilon(^{187}\text{Os}) \times 10^{-9}$	模式年龄/Ma
铜绿山矿床						
TLS3*	0.00151	665.4 ± 5.2	0.529 ± 0.219	418.2 ± 3.3	961.39 ± 7.96	137.8 ± 1.7
TLS4*	0.00235	305.7 ± 2.5	0.268 ± 0.210	192.1 ± 1.6	442.69 ± 3.90	138.1 ± 1.8
TLSB7**	0.00589	261.4 ± 2.2	0.0388 ± 0.0869	164.3 ± 1.4	377.6 ± 3.3	137.8 ± 2.0
TLSB7**	0.00502	263.7 ± 2.2	0.0421 ± 0.0000	165.7 ± 1.4	378.1 ± 3.1	136.8 ± 1.9
TLSB16	0.00497	432.5 ± 3.7	0.2009 ± 0.0000	271.8 ± 2.3	617.9 ± 5.0	136.3 ± 1.9
鸡冠嘴矿床						
JGZB96	0.00371	425.7 ± 3.2	0.1289 ± 0.0009	267.5 ± 2.0	619.3 ± 4.9	138.8 ± 1.9
JGZB97	0.00379	500.4 ± 3.8	0.4154 ± 0.0000	314.5 ± 2.4	718.9 ± 6.0	137.1 ± 1.9
JGZB100	0.00416	1152.0 ± 10.0	0.8888 ± 0.0000	724.0 ± 6.5	1673.5 ± 14.8	138.6 ± 2.1
ZK2412-7	0.00333	810.8 ± 6.8	0.1437 ± 0.0000	509.6 ± 4.3	1173.0 ± 10.0	138.0 ± 2.0
ZK2412-9	0.00338	785.9 ± 6.0	0.1414 ± 0.0000	494.0 ± 3.8	1138.0 ± 9.0	138.1 ± 1.9

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 = $1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Smoliar et al., 1996)；Re-Os 模式年龄按下列公式计算： $t = [\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})]/\lambda$ 。带* 样品数据据谢桂青等，2006b；带** 样品数据为同一个样品重复测试结果。

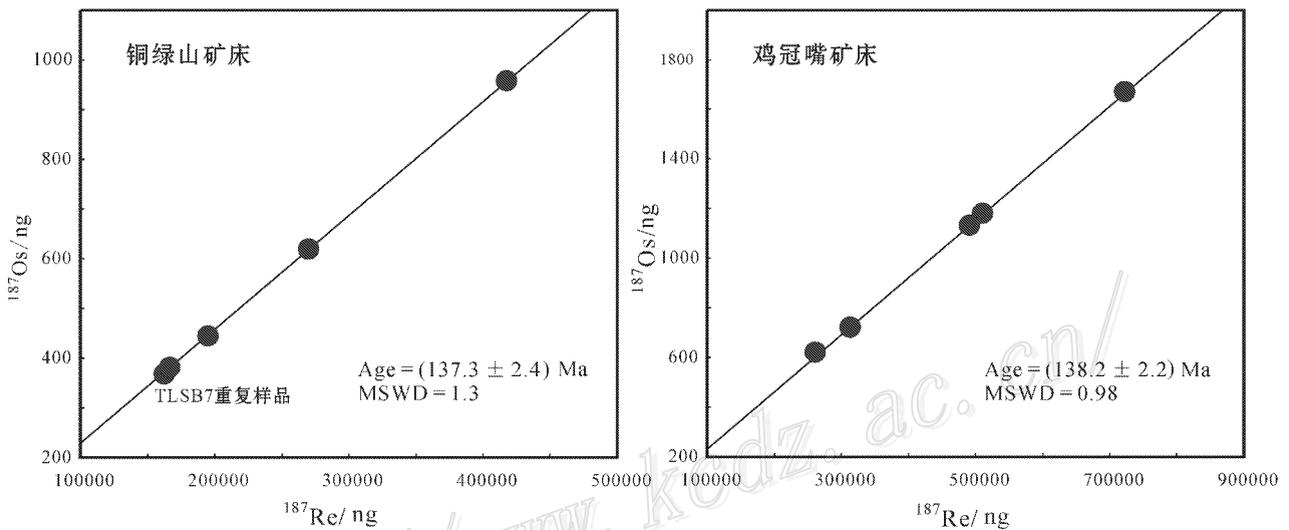


图5 鄂东南铜绿山矿田辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 5 Re-Os isochron of molybdenites from the Tonglushan ore district in southeastern Hubei Province

鄂东南铜绿山矿田大型矽卡岩铜铁金的成矿时代最初主要是通过成矿有关的岩体的 K-Ar 和 Rb-Sr 等时线法间接获得，如铜绿山矿区花岗闪长岩的全岩和黑云母 K-Ar 年龄为 157~118 Ma，范围太宽 (Pan et al., 1999)，难以精确厘定成矿时代。相比之下，辉钼矿的 Re-Os 测年要精确一些。虽然部分学者认为辉钼矿中 Re 和 Os 在低温成矿溶液中可能会发生活化 (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的侵入岩的锆石 SHRIMP 年龄和地质特征的研究均表明，辉钼矿 Re-Os 同位素体系的封闭温度较高(约 500 °C，

Suzuki et al., 1996)，不易受到后期热液、变质和构造事件的影响 (Stein et al., 2001)，因此，辉钼矿 Re-Os 年龄能够精确地代表硫化物的形成时代 (Mao et al., 2008a)。大多数情况下硅酸盐蚀变矿物的 K-Ar 年龄不能反映硫化物矿化的时间 (Selby et al., 2001)，而与成矿密切相关的蚀变含钾矿物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄则记录着成矿末期的同位素封闭时间 (Selby et al., 2002；谢桂青等，2008c)。

已有研究表明，辉钼矿 Re-Os 同位素体系容易发生失耦作用，造成样品测试结果的重见性较差 (Stein et al., 2001)，但年龄较新 (显生宙) 和颗粒较

细($< 2\text{ mm}$)的辉钼矿 Re-Os 同位素体系不存在失耦作用(Selby et al., 2004)。杜安道等(2007)也得出类似的结论,并指出等时线年龄可以消除辉钼矿的 Re-Os 同位素体系失耦作用。区域地质对比显示,鄂东南地区矽卡岩型铜铁金矿床均形成于中生代(翟裕生等,1992),本次研究的铜绿山和鸡冠嘴矽卡岩铜铁金矿床中辉钼矿颗粒较细(粒度约 $0.2\sim 1.0\text{ mm}$),对与石英、钾长石和硫化物共生的辉钼矿(TLSB7)样品进行的两次重复测试的模式年龄分别为 $(136.8\pm 1.9)\text{ Ma}$ 和 $(137.8\pm 2.0)\text{ Ma}$ (表2),在误差范围内完全一致。本次测试获得的等时线年龄为 $(137.3\pm 2.4)\text{ Ma}$ 和 $(138.2\pm 2.2)\text{ Ma}$ (图5)未受到失耦作用的影响,应代表了铜绿山和鸡冠嘴矽卡岩铜铁金矿床的成矿时代,表明两个矿床形成于同一时代,为同一成矿系统。

鄂东南地区发育大量的矽卡岩型铁铜金多金属矿床,已有研究表明,丰山洞(斑岩-)矽卡岩型铜矿床、阮家湾矽卡岩型铜钨矿床、千家湾矽卡岩型铜金矿床、铜山口(斑岩-)矽卡岩型铜钼矿床的辉钼矿 Re-Os 模式年龄分别为 $(144.0\pm 2.1)\text{ Ma}$ 、 $(143.6\pm 1.7)\text{ Ma}$ 、 $(137.7\pm 1.7)\text{ Ma}$ 和 $(142.8\pm 1.9)\text{ Ma}$ (4个样品平均值)(谢桂青等,2006b),铁山、程潮和金山店大型矽卡岩铁矿中与磁铁矿密切共生的金云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄分别为 $(140.9\pm 1.2)\text{ Ma}$ 、 $(132.6\pm 1.4)\text{ Ma}$ 和 $(131.6\pm 1.2)\text{ Ma}$ (谢桂青等,2008c),铜山口矽卡岩矿化蚀变带金云母激光阶段加热 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $(143.0\pm 0.3)\text{ Ma}$ (赵新福等,2006)。除此之外,长江中下游成矿带铜陵、安庆和九瑞矿集区的典型矽卡岩型铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄分别为 $135\sim 145\text{ Ma}$ 、 $131\sim 141\text{ Ma}$ 和 $137\sim 144\text{ Ma}$ (图1)(吴良士等,1997;Sun et al., 2003;Mao et al., 2006)。这些数据表明铜绿山矿田矽卡岩铜铁金矿床的成矿时代与鄂东南地区其他矿田的(斑岩-)矽卡岩型铜钼矿床和矽卡岩型铁矿床以及长江中下游地区铜陵、安庆、九瑞矿集区(斑岩-)矽卡岩铜多金属矿床的形成时代基本一致。若以最新地层年代表,白垩纪和侏罗纪以 $(145.5\pm 4.0)\text{ Ma}$ 为分界线(Gradstein et al., 2004)来判断,长江中下游成矿带应存在早白垩世早期区域性铜铁多金属成矿事件。

5.2 成岩成矿关系

长江中下游地区矽卡岩铜铁金矿床分布于侵入岩与碳酸盐岩的接触带,成岩成矿为同一构造岩浆

事件的产物(Pan et al., 1999;Sun et al., 2003;Mao et al., 2006)。根据前文的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄和图3可知,铜绿山矿田的矽卡岩矿体呈北东向产于侵入岩和大冶组碳酸盐岩接触带或碳酸盐岩捕虏体中,均为与侵入岩有关的成矿系统。笔者在详细研究铜绿山矿区的侵入岩的地质地球化学特征基础上,对与成矿有关的典型花岗闪长岩进行的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,结果为 $(140.3\pm 1.8)\text{ Ma}$ ($n=15$,MSWD=0.7)(谢桂青未发表资料),与铜绿山和鸡冠嘴辉钼矿等时线年龄 $(137.3\pm 2.4)\text{ Ma}$ 和 $(138.2\pm 2.2)\text{ Ma}$ 在误差范围内基本一致,表明铜绿山矿田的矽卡岩铜铁金矿床的成岩成矿存在很短的时差。

Mao等(1999)通过对比中国部分辉钼矿的 Re 含量后得出,从幔源、壳幔混源到壳源,其辉钼矿中的 Re 含量变化规律为 $n\times 10^{-4}\rightarrow n\times 10^{-5}\rightarrow n\times 10^{-6}$,即呈数量级下降;Stein等(2001)也得出类似的结论,并进一步指出变质流体参与成矿的矿床中辉钼矿的 Re 含量低于 20×10^{-6} (Stein, 2006)。由表2可知,铜绿山和鸡冠嘴矽卡岩铜铁金矿床中辉钼矿 Re 含量均较高 $(261.4\pm 2.2)\times 10^{-6}\sim (1152\pm 10)\times 10^{-6}$,与全球各地的斑岩-矽卡岩型铜钼矿床中辉钼矿的 Re 含量大致相同(Mao et al., 1999;2006;Berzina et al., 2005)。该区辉钼矿的高 Re 含量暗示了部分地幔物质参与了铜绿山矿田的矽卡岩铜铁金矿床的成矿作用。这可从硫、氢和氧同位素得到佐证,如铜绿山矿体中的黄铁矿和黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素变化范围为 $1.33\text{‰}\sim 4.36\text{‰}$ (舒全安等,1992),鸡冠嘴矿体中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素为 4.75‰ (邱永进,1995),均表明深部流体参与了成矿作用。铜绿山矿床主成矿期的石英氢同位素(-73.0‰)和氧同位素(7.10‰),表明岩浆水在成矿阶段起主导作用(Zhou et al., 2000)。另外,与成矿有关的花岗闪长岩和石英闪长岩的元素含量和 Sr-Nd 同位素地球化学特征表明,这些侵入岩源区为富集地幔(Xie et al., 2008a;谢桂青等,2008b)。结合铜绿山矿田存在较短的成岩成矿时差,可以认为源于富集地幔的岩浆在上升过程中经历了分离结晶和地壳混染,形成了铜绿山矿田花岗闪长岩,幔源岩浆分异的深部流体参与了成矿作用。

5.3 构造背景

如前文所述,铜绿山矿田的矽卡岩铜铁金矿床在时间和成因上均与花岗闪长岩密切相关,成岩成

矿形成于同一构造背景。长江中下游地区晚中生代岩浆岩是中国东部火山-侵入杂岩带的构造背景的观点存在很多的争论,焦点在于古太平洋板块俯冲是否对中国东部火山-侵入杂岩带的构造背景产生影响(汪洋等,2004),有些学者认为包括长江中下游在内的中国东部晚中生代火山-侵入岩带与古太平洋板块向西俯冲有关(Zhou et al.,2006),但有些学者则认为长江中下游地区晚中生代岩浆活动与古太平洋板块的俯冲无关(Wang et al.,2006)。包括鄂东南地区在内的长江中下游地区矽卡岩型铜铁金矿床形成于岩石圈伸展构造背景的观点被多数地质学者所接受(Zhai et al.,1996;Mao et al.,2006;谢桂青等,2008c),但对于岩石圈伸展的时限和深部过程还存在争论,焦点在于古太平洋板块俯冲对长江中下游地区的影响,应加强双峰式火山岩的年代学和地球化学特征研究。孙卫东等(2008)推测约在145~125 Ma期间,洋中脊俯冲到长江中下游,并且可能形成板片窗,是形成该成矿带及其相关岩体的主要原因。毛景文等(2008)认为晚侏罗世到早白垩世,华北与华南两大板块运动的不协调性可能暗示了在144~130 Ma之间沿长江中下游地区曾经历过俯冲板片的撕裂过程。基于以上的地质、岩石学、地球化学和地球物理学资料,可以认为铜绿山矿田矽卡岩铜铁金矿床可能是在太平洋板块俯冲的撕裂或开天窗时,由于玄武质岩浆底侵和岩石圈减薄诱导了大规模侵入岩和成矿作用产物的形成。

(1)从沉积地层和构造变形来看,长江中下游地区的前震旦纪基底形成阶段和震旦纪—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本区强烈的岩浆构造活动,同时产生一系列成矿事件(常印佛等,1991)。已有研究表明,包括长江中下游地区在内的中国东部晚中生代处于北东向古太平洋构造域(任纪舜等,1998)。由图2和图3可知,鄂东南阳新岩体呈北西向,铜绿山矿田矿体呈北东向,富矿体分布于北东向和北西向交汇处,暗示太平洋板块俯冲诱发了古老的北西向长江断裂再次活化,控制了侵入岩的产出形态(Zhou et al.,2006),后期北东向构造叠加提供了成矿空间。矽卡岩矿床的成矿元素组合、与成矿有关的岩体成分均与特定的构造背景相关,鄂东南铜绿山矿田的岩体成分和成矿元素组合暗示了它们与大陆俯冲密切相关(Meinert et al.,2005)。根据最新的胶东、东秦岭、长江中下游和

夏及邻区晚中生代侵入岩的精测年龄数据,在145~135 Ma之间,长江中下游地区发生了撕裂或开天窗,并引发大规模成岩成矿作用(毛景文等,2008)。

(2)已有研究表明,铜绿山矿田的成岩成矿形成于同一构造背景,侵入岩的年代学和成因能提供成矿构造背景的重要信息。如前文所述,鄂东南地区存在2期重要的岩浆活动,早期辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长斑岩的时代集中于152~134 Ma,晚期花岗岩-石英二长岩、基性脉岩和火山岩的时代集中于134~127 Ma。早期侵入岩具有高Sr低Y和无负铕异常($\delta E_{u}=0.84\sim 1.3$),暗示当时地壳较厚,而晚期侵入岩具有低Sr高Y和负铕异常($\delta E_{u}=0.32\sim 0.73$),表明岩石圈已明显减薄(Xie et al.,2008a;谢桂青等,2008b),同时发育中基性脉岩和火山岩(Xie et al.,2006a;Li et al.,2009)。长江中下游地区晚中生代至新生代基性岩的源区由富集地幔变为软流圈地幔(Chen et al.,2001)表明岩石圈减薄自晚中生代就已发生,新生代已完成岩石圈减薄事件,与华北地块北缘研究结果(Wu et al.,2005)类似。因此,鄂东南地区铜绿山矿田早白垩世矽卡岩铜铁金矿床的形成与岩石圈减薄事件具有明显的成因联系。

(3)从地球物理资料来看,长江中下游地区深地震反射剖面显示,中下地壳存在似层状强反射,结合重力和航磁数据,认为长江中下游地区早白垩世深部存在玄武质岩浆底侵作用(Lü et al.,2005),亦支持本文的结论。

志 谢 野外工作期间得到鄂东南地质队魏可涛、尚金刚、柯于富、胡清乐、熊继传、魏世昆、湖北三鑫金铜有限责任公司刘总工程师和地质测量科人员的大力支持和帮助,辉钼矿Re-Os同位素测试得到了杜安道研究员的大力帮助。在此一并感谢。

References

- 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. 1-363(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 Malinovsky D. 2004. Preparation and Certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC [J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28(1): 41-52.
- Du A D, Qu W J, Wang D H, Li H M, Feng C Y, Liu H, Ren J and Zeng F G. 2007. Subgrain-size decoupling of Re and ¹⁸⁷Os within molybdenite [J]. *Mineral Deposits*, 26: 572-580 (in Chinese with English abstract).
- Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, Bleeker W and Laurant L J. 2004. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian to Neogen [J]. *Episodes*, 27: 83-100.
- Li J W, Zhao X F, Zhou M F, Ma C Q, Souza de Z S and Vasconcelos P. 2009. Late Mesozoic magmatism from the Daye region, eastern China: U-Pb ages, petrogenesis, and geodynamic implications [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 157: 383-409.
- Lü Q T, Hou Z Q, Yang Z S and Shi D N. 2005. Underplating and dynamic evolution model in the lower Yangtze area: Constraints from geophysical data [J]. *Science in China (Ser. D)*, 34: 783-794.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for isoplot/3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel Berkeley [M]. *Geochronology Centre Special Publication*. 1-71.
- 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]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63, 1815-1818.
- Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zang W S, Stein H J and Zhou T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 29: 307-324.
- Mao J W, Xie G Q, Bierlein F, Qu W J, Du A D, Ye H S, Pirajno F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008a. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling Dabie orogenic belt [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72: 4607-4626.
- Mao J W, Xie G Q, Guo C L, Yuan S D, Cheng Y B and Chen Y C. 2008b. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in south China and their metallogenic settings [J]. *Geological Journal of China Universities*, 14: 510-526 (in Chinese with English abstract).
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [J]. *Econ. Geol.*, 100th Anniversary Volume: 299-336.
- 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.
- Qiu Y J. 1995. The origin and geological characteristics of the Jiguanzui Cu(Fe)Au deposit, eastern Hubei [J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 4(2): 69, 77-82 (in Chinese with English abstract).
- 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 R, 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. 2001. Re-Os geochronology and systematics in molybdenite from the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia, Canada [J]. *Econ. Geol.*, 96: 197-204.
- 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.
- Selby D and Creaser R A. 2004. Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite: Testing spatial restrictions for reliable Re-Os age determinations, and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68: 3897-3908.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank Rhenium-Osmium analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 67: 2136-2141.
- Shu Q A, Chen P L, Cheng J R, et al. 1992. *Geology of iron-copper deposits in eastern Hubei Province, China* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 1-510 (in Chinese).
- 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, Hannah J L and Scherstén A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works [J]. *Terra Nova*, 13: 479-486.
- Stein H J. 2006. Low-rhenium molybdenite by metamorphism in northern Sweden: Recognition, genesis, and global implications [J]. *Lithos*, 87: 300-327.
- 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.
- Sun W D, Ling M X, Wang F Y, Ding X, Hu Y H, Zhou J B and Yang X Y. 2008. Pacific plate subduction and Mesozoic geological event in eastern China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27: 218-225 (in Chinese with English abstract).
- 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 his-

- tory of molybdenum ore deposits [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 60 : 3151-3159.
- 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 polytyp [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 64 : 223 -232.
- Tang Y C , Wu Y C , Chu G Z , 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. 1-43 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q , Wyman D A , Xu J F , Zhao Z H , Jian P , Xiong X L , Bao Z W , Li C F and Bai Z H. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area , Anhui Province (eastern China) : Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization [J]. *Lithos* , 89 : 424-446.
- 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).
- Wu C Z , Gu L X , Ren Z W , Zhang Z H , Chen Z Y and Zhao M. 2005. Transition from plate margin to intraplate environment : Geochemistry of basalts in Paleogene Liaohe Basin , northeastern China [J]. *Science in China (Ser. D)* , 48 : 2069-2080.
- Wu L S and Zou X Q. 1997. Re-Os isotopic age study on the Chengmenshan Cu deposit in Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits* , 16 : 376-381 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q , Mao J W , Zhou S D , Ye H S , Yan Q R and Zhang Z S. 2006a. SHRIMP zircon U-Pb dating for volcanic rocks of the Dasi formation in southeast Hubei Province , Middle-Lower Reaches of the Yangtze River and its implications [J]. *Chinese Science Bulletin* , 51 : 3000-3009.
- Xie G Q , Mao J W , Li R L , Zhang Z S , Zhao W C , Qu W J , Zhao C S and Wei S K. 2006b. Timing of mineralization and geodynamic framework of Cu-Au-Mo(W) deposits from southeastern Hubei Province , China : Constraints from Re-Os molybdenite [J]. *Mineral Deposits* , 25 : 43-52 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q , Mao J W , Li R L and Bierlein F P. 2008a. Geochemistry and Nd-Sr isotopic studies of Late Mesozoic granitoids in the southeastern Hubei Province , Middle-Lower Yangtze River belt , eastern China : Petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos* , 104 : 216-230.
- Xie G Q , Li R L , Jiang G H , Zhao C S and Hou K J. 2008b. Geochemistry and petrogenesis of Late Mesozoic granitoids in southeastern Hubei Province and constraints on the timing of lithospheric thinning , Middle-Lower Reaches of the Yangtze River , eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24 : 1703-1714 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q , Mao J W , Li R L , Jiang G H , Zhao C S , Zhao H J , Hou K J and Pan H J. 2008c. ^{40}Ar - ^{39}Ar phlogopite dating of large skarn Fe deposits and tectonic framework in southeastern Hubei Province , Middle-Lower Reaches of the Yangtze River , eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 24 : 1917-1927 (in Chinese with English abstract).
- Xue D K , Ge Z X , Hu H M , et al. 1997. Metallogenic mode and prospecting model of copper-gold in southeastern Hubei Province [M]. Wuhan : China University of Geosciences Press. 1-189 (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).
- Zhai Y S , Yao S Z , Lin X D , Zhou X N , 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. 1-235 (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.
- Zhao X F , Li J W and Ma C Q. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Tongshankou Cu (Mo) deposit in the southeastern Hubei Fe-Cu Province : Implications for regional metallogeny [J]. *Acta Geologica Sinica* , 80 : 849-862 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M , Lin W W , Bi C S , Li D X and Jiang C J. 1990. Skarn deposits of China [M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-354 (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 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 system [J]. *Science in China (Ser. D)* , 43 (Supp.) : 209-218.
- Zhou X M , Sun T , Shen W Z , Shu L S and Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in south China : A response to tectonic evolution [J]. *Episodes* , 29 : 26-33.
- Zhou X R and Ren J. 1994. Mesozoic granites in the Middle-Lower Reaches of Yangtze River [J]. Beijing : Geol. Pub. House. 1-118 (in Chinese with English abstracts).

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. 1-379.
- 杜安道 , 屈文俊 , 王登红 , 李厚民 , 丰成友 , 刘 华 , 任 静 , 曾法刚. 2007. 辉钼矿亚晶粒范围内 Re 和 ^{187}Os 的共耦现象 [J]. *矿床地质* , 26 : 572-580.
- 毛景文 , 谢桂青 , 郭春丽 , 袁顺达 , 程彦博 , 陈毓川. 2008b. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境 [J]. *高校地质学报* , 14 : 510-526.
- 邱永进. 1995. 鄂东鸡冠嘴铜(铁)金矿床的地质特征及成因 [J]. *有色金属矿产与勘查* , 4 (2) : 69 , 77-82.

- 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]. 见: 任纪舜, 杨巍然. 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.
- 舒全安, 陈培良, 程建荣, 等. 1992. 鄂东铁铜矿产地质[M]. 北京: 冶金工业出版社. 1-510.
- 孙卫东, 凌明星, 汪方跃, 丁兴, 胡艳华, 周继彬, 杨晓勇. 2008. 太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27: 218-225.
- 唐永成, 吴言昌, 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. 1-243.
- 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.
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 张祖送, 赵维超, 屈文俊, 赵财胜, 魏世昆. 2006b. 鄂东南地区铜多金属矿床的成矿时代和地球动力学背景辉钼矿 Re-Os 同位素年龄[J]. 矿床地质, 25: 43-52.
- 谢桂青, 李瑞玲, 蒋国豪, 赵财胜, 侯可军. 2008b. 鄂东南地区晚中生代侵入岩的地球化学和成因及对岩石圈减薄时限的制约[J]. 岩石学报, 24: 1703-1714.
- 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 蒋国豪, 赵财胜, 赵海杰, 侯可军, 潘怀军. 2008c. 鄂东南地区大型矽卡岩型铁铜床金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄及其构造背景初探[J]. 岩石学报, 24: 1917-1927.
- 薛迪康, 葛宗侠, 胡惠民, 等. 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. 1-189.
- 杨明银, 崔彬, 魏世昆, 张万平, 李享洲. 2003. 鄂东南徐家山金矿田成因研究[J]. 地质科学情报, 22: 82-86.
- 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. 1-235.
- 赵新福, 李建威, 马昌前. 2006. 鄂东南铁铜矿集区铜山口铜(钼)矿床⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及对区域成矿作用的指示[J]. 地质学报, 80: 849-862.
- 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. 1-354.
- 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. 1-118.