胡正华, 王先广, 李永明, 等. 长江中下游九瑞矿集区宝山铜多金属矿床辉钼矿Re−Os年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 585−596.
Hu Zhenghua, Wang Xianguang, Li Yongming, et al. Re−Os age of molybdenite from the Baoshan copper polymetallic deposit in the Jiurui ore concentration area along the middle−lower Yangtze River region and its geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(2): 585−596(in Chinese with English abstract).

长江中下游九瑞矿集区宝山铜多金属矿床辉钼矿Re−Os年龄及其地质意义

胡正华[1,2] 王先广[3] 李永明[2] 刘善宝[4] 张家菁[5] 陈毓川[4] 曾庆权[2] 王艺云[1] 蒋金明[2]
聂龙敏[2] 雷天浩[2] 胡文洁[2] 张芳荣[2] 吴施金[2] 沙 珉[2] 龚良信[2] 谢瑞丰[2] 文亮先[2]

(1.成都理工大学, 四川 成都 610059; 2.江西省地质调查研究院, 江西 南昌 330000; 3.江西省国土资源厅, 江西 南昌 330025;
4.中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 5.江西省国土资源厅执法监察总队, 江西 南昌 330025)

提要：九瑞地区斑岩−矽卡岩型矿床是长江中下游地区Cu−Au−Mo(Fe)多金属成矿带的重要组成部分, 宝山铜多金属矿床是江西省实施找矿突破战略以来, 在九瑞矿集区界首—大桥背斜核部新发现的首个中型以上斑岩−矽卡岩型铜多金属矿床。本文利用辉钼矿Re−Os同位素定年方法对宝山矿床进行了成矿时代的研究, 获得了6件辉钼矿Re−Os同位素模式年龄为(147.2±3.6) Ma~(150.5±2.7) Ma, 加权平均年龄为(148±1) Ma, MSWD=1.03。6件样品其等时线年龄为(148.6±2.6) Ma, MSWD=1.9, 代表了宝山矿床的成矿时代, 与九瑞矿集区其他斑岩−矽卡岩型铜多金属矿床(武山、城门山、湖北丰山洞、鸡笼山、宋家冲、邓家山、通江岭)以及长江中下游地区鄂东南、铜陵矿集区斑岩−矽卡岩铜多金属矿床的形成时代高度一致, 它们均为中国东部EW特提斯构造域向NE古太平洋构造域大转折背景下, 软流圈上涌和玄武质岩浆底侵而导致壳幔同熔所引起的燕山期花岗质岩浆岩活动的产物。

关 键 词: 辉钼矿; Re−Os同位素; 成矿年龄; 宝山; 九瑞矿集区
中图分类号: P597;P618.41 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000−3657(2015)02−0585−12

Re−Os age of molybdenite from the Baoshan copper polymetallic deposit in the Jiurui ore concentration area along the middle−lower Yangtze River region and its geological significance

HU Zheng−hua[1, 2], WANG Xian−guang[3], LI Yong−ming[2], LIU Shan−bao[4], ZHANG Jia−jing[5], CHEN Yu−chuan[4], ZENG Qing−quan[2], WANG Yi−yun[1], JIANG Jin−ming[2], NIE Long−min[2], LEI Tian−hao[2], HU Wen−jie[2], ZHANG Fang−rong[2], WU Shi−jin[2], SHA Min[2], GONG Liang−xin[2], XIE Rui−feng[2], WEN Liang−xian[2]

收稿日期: 2014−11−26; **改回日期**: 2015−01−22
基金项目: 江西省地质勘查基金(20090208−2)、中央地勘基金(2013360010)、国土资源部公益性行业专项(201411035)、江西省地质勘查基金(矿[2012]01−06)联合资助。

作者简介: 胡正华, 男, 1985年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床勘查与研究; E−mail: hucdut@qq.com。
通讯作者: 刘善宝, 男, 1970年生, 研究员, 主要从事矿床勘查与研究; E−mail: Liubaoshan7002@163.com。

(1. *Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059*, Sichuan, China;* 2. *Jiangxi Institute of Geological Survey, Nanchang* 330000*, Jiangxi, China; 3. Department of Land and Resources of Jiangxi Province, Nanchang* 330025*, Jiangxi, China;* 4. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037*, China;* 5. *Law Enforcement and Supervision Office of Department of Land and Resources of Jiangxi Province, Nanchang* 330025*, Jiangxi, China)*

Abstract: Porphyry−skarn deposits in Jiurui area constitute an important part of the middle−lower Yangtze River Cu−Au−Mo (Fe) polymetallic ore belt. Since the implementation of the prospecting breakthrough strategy, the Baoshan deposit has been the first medium−size porphyry−skarn copper polymetallic deposit discovered at the core of Jieshou−Daqiao anticline in Jiurui area. In this paper, molybdenite Re−Os dating was used to study the mineralization time of the Baoshan deposit and, as a result, six molybdenite Re−Os model ages of 147.2±3.6 Ma to 150.5±2.7 Ma and weighted average age of 148±1 Ma (MSWD=1.03) were obtained. These six molybdenite Re−Os model ages yielded an isochron age of 148.6±2.6 Ma (MSWD=1.9), which represents the ore−forming age of the Banshan deposit. The ore− forming age of the Baoshan deposit is similar to ages of other porphyry− skarn type copper polymetallic deposits in Jiurui area (e.g., Wushan, Chengmenshan, Fengshandong of Hubei, Jilongshan, Songjiachong, Dengjiashan and Tongjiangling), as well as in Tongling and southeastern Hubei areas within the middle−lower Yangtze River region. All of them are products of granitic magma activities related to the crust−mantle syntexis resulting from the upwelling asthenosphere and the underplating basaltic magma in the Yanshanian period.

Key words: molybdenite; Re−Os isotope; ore−froming age; Baoshan; Jiurui area

About the first author: HU Zheng− hua, male, born in 1985, doctor candidate, mainly engages in the study and exploration of mineral deposits; E−mail: hucdut@qq.com.

About the corresponding author: LIU Shan− bao, male, born in 1970, senior researcher, mainly engages in the study and exploration of mineral deposits; E−mail: Liubaoshan7002@163.com.

长江中下游成矿带是中国东部最主要的Cu−Au−Mo−Fe多金属成矿带之一，位于扬子克拉通北缘、秦岭—大别造山带和华北克拉通之南。带内矿床以矿集区形式产出，自西向东又可分为鄂东南(Fe−Cu)、九瑞(Cu−Au−Mo(Fe))、安庆—贵池(Cu)、铜陵(Cu−Au)、庐枞(Fe−Cu)、宁芜(Fe)和宁镇(Cu−Fe−Pb−Zn)矿集区。7大矿集区沿长江呈近东西−北东向弧形展布于阳兴—常州大断裂与襄樊—广济大断裂、郯庐大断裂间的长江断裂带内，其中，九瑞矿集区位于成矿带构造转折端[1−3](图1)。九瑞矿集区地质工作始于20世纪30年代，大规模地质工作于50年代以后，有多家单位进行了区域地质、矿产、物化探调查、矿产勘查工作，至60—90年代已发现武山铜矿、城门山铜钼矿、金鸡窝铜矿、洋鸡山金矿以及东雷湾、铜岭、丁家山、宋家冲、邓家山、通江岭等一批铜矿床(点)(图2)。前人对九瑞地区矿床分布、矿床地质、成矿过程和成矿作用进行了大量研究，积累了丰富的基础地质资料并取得了许多重要认识[1−16]。找矿突破战略实施以来，江西省国土资源厅对九瑞矿集区找矿工作进行统一协调，统一部署、系统推动整装勘查，已在武山、城门山外围、金鸡窝、通江岭、宝山等矿区取得了较为显著的找矿成果。宝山铜矿床为九瑞矿集区首个在背斜核部新发现的中型以上规模斑岩−矽卡岩型铜多金属矿床。因此，宝山铜矿床勘查成果的及时归纳总结以及相关研究性工作的开展，对宝山矿区、九瑞矿集区下一步找矿工作的开展具有极强的可究性、必要性及价值性。目前李永明等[15]对宝山、仙姑台土壤地球化学找矿进行了深入探讨；陈志洪等[7]对宝山岩体进行了LA ICP−MS 锆石U−Pb测年，厘定了宝山岩体的形成时代，但由于宝山岩体为复式岩体[17]，且陈志洪等[7]并未给出确切的取样位置，很难确定其所测岩体是否为宝山铜矿成矿岩体的形成年龄。为此，笔者根据近年来一直参与九瑞宝山铜矿床的矿产勘查与研究工作基础，对宝山矿床的地质特征、区域成矿因素进行了深入研究，试图从对宝山铜多金属矿地质特征进行深入剖析的同时，结合辉钼矿Re−Os同位素测年，精确厘定此矿床成矿时限，并进一步探讨九瑞矿集区花岗岩与铜多金属成矿作用关系，以期推动宝山矿区、九瑞矿集区下阶

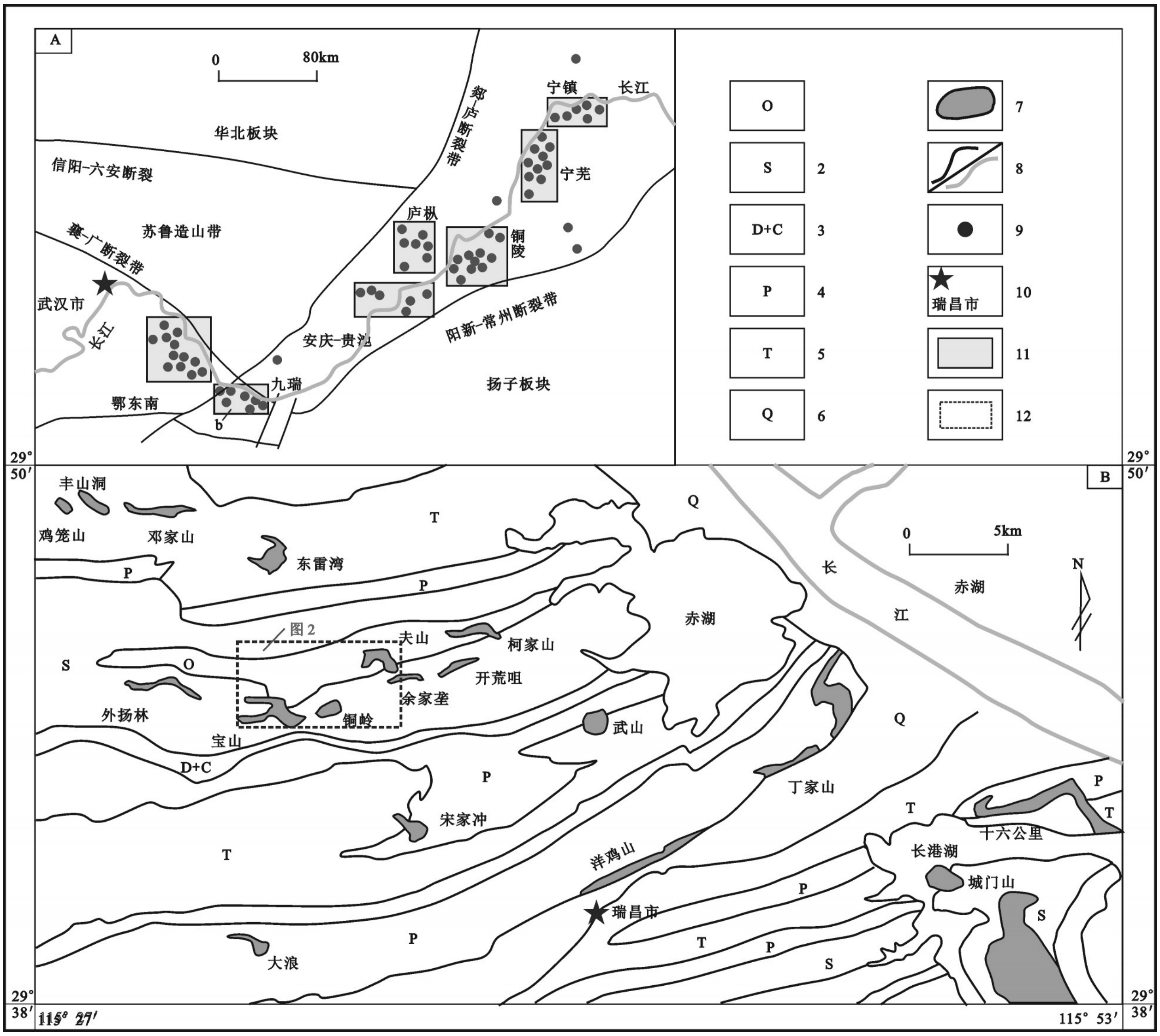

图1 长江中下游九瑞矿集区地质简图(据文献[11])
A—长江中下游构造简图; B—九瑞矿集区地质简图;
1—奥陶系; 2—志留系; 3—泥盆系、石炭系; 4—二叠系; 5—三叠系; 6—第四系; 7—岩体; 8—地质界线/河流; 9—矿床(点)位置;
10—城市位置及名称; 11—矿集区; 12—宝山矿区位置
Fig. 1 Geological map of the Jiurui ore concentration area in the middle-lower Yangtze River region (modified after reference [11])
A−Structure diagram of the middle-lower Yangtze River region; B. Geological map of the Jiurui ore concentration area;
1−Ordovician; 2−Silurian; 3−Devonian, Carboniferous; 4−Permian; 5−Triassic; 6−Quaternary; 7−Intrusive body; 8−Geological boundary;
9−Loation and name of ore deposit; 10−Lication and name of city; 11−Ore concentration area; 12−position of the Baoshan ore district

段找矿突破工作的进展。

1 区域地质特征

九瑞矿集区位于扬子板块北缘, 下扬子断裂拗陷带的西段, 南北分别与江南造山带、大别造山带毗邻, 处于构造转折部位[7, 9](图2)。区域地层可分为基底与盖层, 基底主要由中元古界双桥山群变质砂岩、千枚岩组成; 盖层从震旦系至第四系, 除了中泥盆统、下石炭统、上三叠统、侏罗系外均有出露[6, 9, 10]。奥陶系地层岩性以白云质灰岩、白云岩为主; 志留系为泥岩夹砂质页岩和砂岩夹粉砂岩; 上泥盆统五通组为含砾石英砂岩, 上石炭统黄龙组为白云岩、灰岩, 二叠系和三叠系为碳酸盐岩; 第四纪松散沉积物分布于中—东南部江河湖滨(图2)。其中, 石炭系、二叠系和三

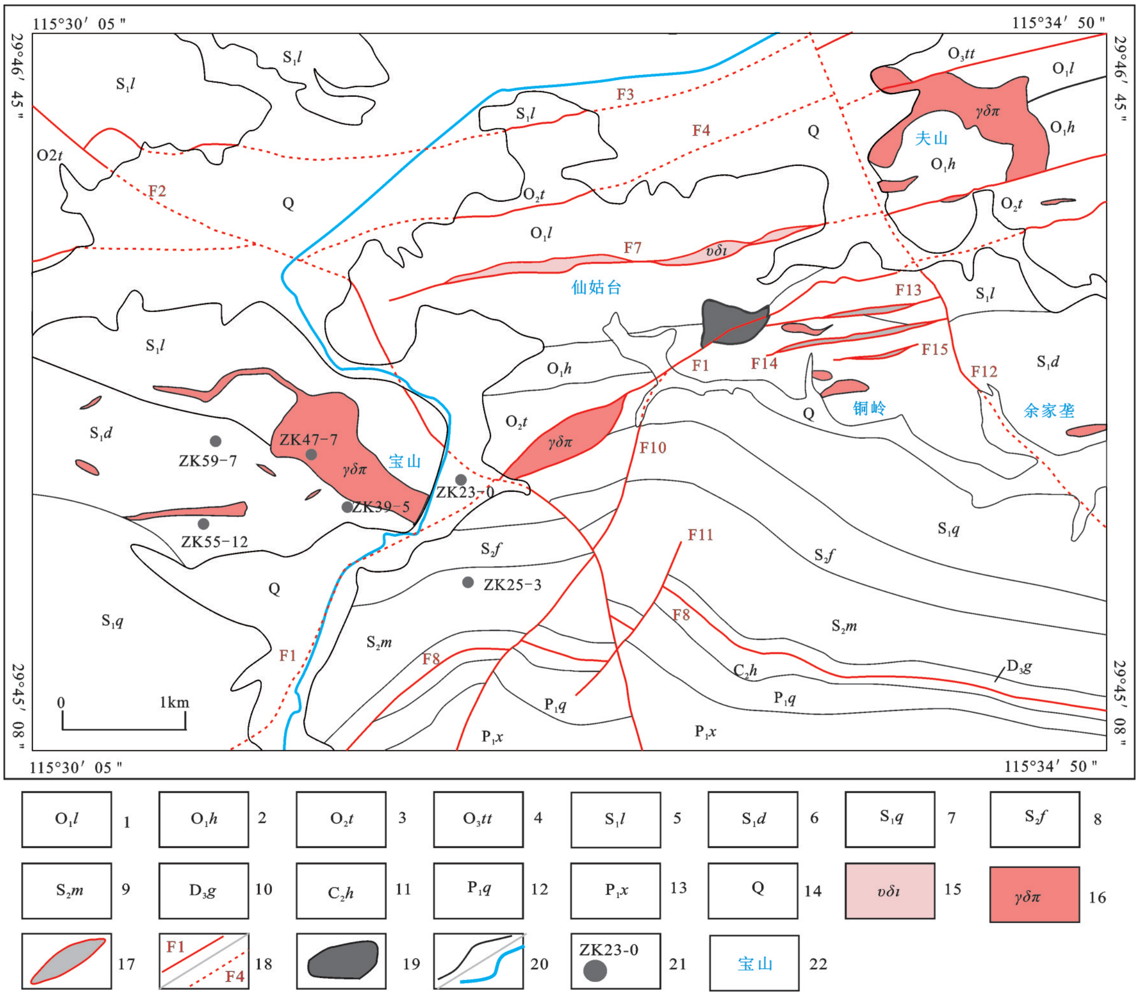

图2 宝山矿区地质简图及辉钼矿采样位置图

1—下奥陶统仑山组; 2—下奥陶统红花园组; 3—中奥陶统汤山组; 4—上奥陶统汤头组; 5—下志留统犁树窝组; 6—下志留统殿背组; 7—下志留统清水组;8—中志留统坟头组; 9—中志留统茅山组; 10—上泥盆统观山组; 11—上石炭统黄龙组; 12—下二叠统栖霞组; 13—下二叠统小江边组; 14—第四系; 15—斜长细晶岩; 16—花岗闪长斑岩; 17—构造破碎带; 18—实测/推测断层及编号; 19—铜岭褐铁矿; 20—地质界线/河流; 21—采样及钻孔位置; 22—岩体名称

Fig. 2 Geological map of the Baoshan ore district and sampling sites for molybdenite

1–Lower Ordovician Lunshan Formation; 2–Lower Ordovician Honghuayuan Formation; 3–Middle Ordovician Tangshan Formation; 4–Upper Ordovician Tangtou Formation; 5–Lower Silurian Lishuwo Formation; 6–Lower Silurian Dianbei Formation; 7–Lower Silurian Qingshui Formation; 8– Silurian Fentou Formation; 9–Middle Silurian Maoshan Formation; 10–Upper Devonian Guanshan Formation; 11–Upper Carboniferous Huanglong Formation; 12–Lower Permian Qixia Formation; 13–Lower Permian Xiaojiangbian Formation; 14–Quaternary; 15–Plagioclase aplite; 16–Granodiorite porphyry; 17–Tectonic fracture zone; 18–Measured / inferred fault and its serial number; 19–Tongling limonite; 20–Geological boundary / river; 21–sampling and drilling position; 22–Name of rock body

叠系碳酸盐岩是Cu-Au-Mo-Fe多金属矿化的主要围岩; 黄龙组与五通组的接触面是层状块状硫化物型矿床的重要赋矿建造[1, 3, 4]。区内发育6个NEE向平行排列同等发育的背向斜紧密相间的雁列式线型褶皱, 自南至北依次为: 长山—城门湖背斜→乌石街—赛湖向斜→坳下—丁家山背斜—横立山—黄桥向斜→界首—大桥背斜→邓家山—通江岭向斜[6, 9, 10]。奥陶系、志留系组成背斜构造的核部, 泥盆系—二叠系分布在背、向斜构造的翼部, 三叠系则组成向斜构造的核部。区内断裂构造十分发育, 主要为NW-NNW和NE-NNE向2组, 控制着燕山期岩浆活动和矿床分布, 尤其是两组构造的交汇部位构成的菱

形网络结点, 是九瑞矿集区内的主要控岩控矿构造[8, 10]。九瑞矿集区岩浆活动比较频繁, 在本区分布最广且与内生金属成矿密切相关的仅为燕山期岩浆岩[16]。燕山期岩浆活动具多期次、多中心、多类型的特征, 岩浆经历了由闪长岩→石英闪长玢岩→花岗闪长斑岩→石英斑岩的演化, 活动集中在(138.2±1.8) Ma至(149.2±2.7) Ma [3, 4, 7, 14]。与矿集区内多金属矿化有关的岩浆岩为高钾钙碱性侵入岩系列, 属于I型或磁铁矿型花岗质岩类[1–8], 部分学者称其为埃达克质岩石[18]。已有研究者根据岩脉沿地层间不整合面及层内薄弱面贯入式侵位而形成与组成复式褶皱带的地层的走向方向相一致的特征, 进而自南向北划分出6个NEE岩浆岩亚带: ①沙河街—狮子山花岗闪长斑岩–石英闪长玢岩亚带, ②长山—城门山—十六公里花岗闪长斑岩–石英闪长玢岩亚带; ③坳下—丁家山石英闪长玢岩–花岗闪长斑岩亚带; ④宋家湾—武山花岗闪长斑岩亚带; ⑤宝山—大桥花岗闪长斑岩亚带; ⑥邓家山—通江岭花岗闪长斑岩亚带[6]。著名的城门山、武山两大铜矿床分别位于第②、④亚带; 洋鸡山金矿、丁家山铜矿产于第③亚带; 宝山铜多金属矿床伴位于第④亚带。

2　矿区及矿床地质特征

2.1　矿区地质特征

宝山矿区位于九瑞矿集区北西部, 属瑞昌市夏畈镇与南阳乡管辖。区内出露的地层由老到新有奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系及第四系(图3)。地层走向总体为北东东, 倾向以界首—大桥背斜核部为界, 其南侧地层总体倾向南—南西, 倾角25°~45°; 北侧地层总体倾向北—北东, 倾角50°~70°, 局部倒转。奥陶系呈北东东—南西西向分布于矿区中北部, 构成宝山—大桥背斜核部; 志留系在矿区南、北侧均有出露, 以南侧为主; 石炭系、泥盆系、二叠系分布于矿区南部。

宝山矿区奥陶系为灰色厚层状灰质白云岩、白云质、白云质灰岩, 自老至新可划分为4个组, 即仑山组(O_1l)、红花园组(O_1h)、汤山组(O_2t)、汤头组(O_3tt); 志留系为泥质粉砂岩、细砂岩、页岩, 局部角岩化, 由老至新划分为5个组, 即梨树窝组(S_1l)、殷背组(S_1d)、清水组(S_1q)、坟头组(S_2f)、茅山组(S_2m)。泥盆系、石炭系在宝山矿区均只出露一个组, 分别为上泥盆统组观山组(D_3g)(原“五通组”)与上石炭统黄龙组(C_2h)。观山组(D_3g)为石英砂岩、含砾砂岩、长石石英砂岩夹砂质页岩, 其与下覆地层志留系茅山组(S_3m)呈平行不整合接触关系。黄龙组(C_2h)与观山组呈断层(F8)接触。二叠系仅出露栖霞组(P_1q)和小江边组(P_2x)。栖霞组(P_1q)灰黑色含沥青质、泥质和燧石条带灰岩; 小江边组(P_2x)灰黑色瘤状灰岩、钙质页岩及炭质页岩夹灰岩。其中与成矿密切相关的为志留系梨树窝组(S_1l)、殷背组(S_2d), 奥陶系汤山组、汤头组, 泥盆系观山组(D_3g), 石炭系黄龙组(C_2h)。

矿区褶皱、断裂构造发育。界首—大桥背斜横穿矿区; 区内断裂根据走向可分为3组: NEE向(包括近EW向)、NE向(包括NNE向)、NW向断裂, 其中NE向F1断裂与NW向断裂F2交汇处为本区成矿有利位置。

区内岩浆活动受北东及近东西向构造控制, 在宝山村一带由下而上为由南向北呈“Y”字型上侵。宏

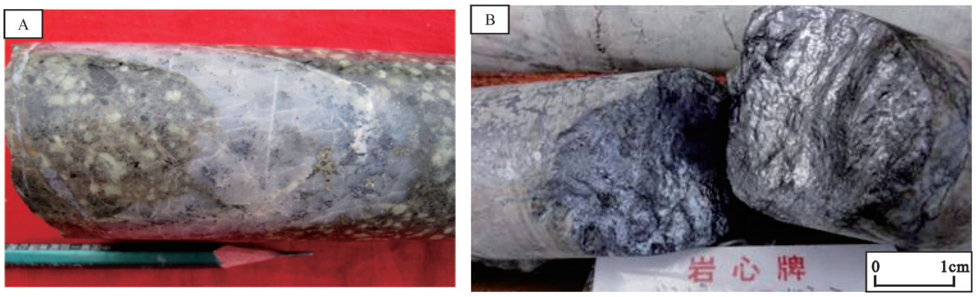

图3　典型钼矿化矿石照片

A—ZK23–0/104.4花岗斑岩中辉钼矿–石英; B—ZK47–7/890矽卡岩中的稠密浸染状辉钼矿矿石

Fig.3　Photographs of molybdnite

A–ZK23–0/104.4 Molybdnite-quartz from granite porphyry; B–ZK47–7/890 Densely disseminated molybdenite ores from skarn

观上主要呈岩脉、岩瘤、岩株、岩墙产出; 形成2条近于平行的北东向构造岩浆岩带。一条为位于宝山—大桥背斜核部的“仙姑台—夫山”构造岩浆岩带, 包括仙姑台岩体、夫山岩体; 另一条为位于背斜南翼的“宝山—铜岭”构造岩浆岩带, 沿志留系与奥陶系地层之间发育北东向滑脱断裂(F1)侵位, 自西至东依次包括外杨林岩体、宝山岩体、铜岭岩体。仙姑台岩体为斜长细晶岩。宝山、铜岭及夫山岩体均为花岗闪长斑岩; 其中宝山岩体为复式岩体。

2.2 矿床地质特征

2.2.1 矿体特征

矿体主要以细脉浸染状、脉状金属硫化物石英脉的形式赋存于斑岩、矽卡岩中, 呈似层状、透镜状产出, 少量以金属硫化物石英脉的形式赋存于构造破碎带、角岩, 呈透镜状产出。各主要矿体的形态、产状和规模等特征见表1。

2.2.2 矿石类型

根据矿石构造进行分类主要有脉状、细脉浸染状矿石, 次要类型为角砾状与块状矿石。

依据矿区主要有用矿物及组合对矿石进行分类, 主要类型有: 黄铜矿矿石、黄铜矿-辉钼矿-矿石、辉钼矿矿石、自然金矿石等; 次要类型为: 黄铜矿-黄铁矿矿石、辉钼矿-黄铁矿等。

根据矿石有用组分进行分类主要有铜矿石、钼矿石、铅锌矿石、铜(钼)矿石或钼(铜)矿石、铜金矿石等。

金属矿物以黄铜矿、辉钼矿、自然金、辉银矿、黄铁矿为主, 次为铜蓝、孔雀石、蓝矾、赤铜矿、磁铁矿、褐铁矿、针铁矿等; 非金属矿物以长石、石英、角闪石、石榴子石、透辉石、蛇纹石、绿泥石为主, 次为绿帘石、透闪石、黑云母、钾长石、绢云母等。

2.2.3 围岩蚀变

矿区蚀变种类较多, 自岩体至围岩显示出钾长石化→青磐岩→黄铁绢云岩化→蛇纹石、石榴子石、透辉石矽卡岩化→角岩化的蚀变特征, 硅化贯穿于整个过程。与成矿关系密切相关的以钾长石化、矽卡岩化、硅化为主, 次为角岩化。

岩浆的侵位导致热接触围岩蚀变形成汤头组、汤山组碳酸盐岩大理岩化, 梨树窝组、清水组、殿组砂页岩发生角岩化。其中矽卡岩化根据矿物组合主要可分为石榴子石矽卡岩化、透辉石矽卡岩化、蛇纹石矽卡岩化。钾化以钾长石化为主, 常以钾长石+石英+黄铜矿+黄铁矿矿物组合形式产出于石英细脉两侧。

3 样品采集与辉钼矿Re-Os同位素测年

3.1 样品采集及测试

本次用于Re-Os同位素分析的1件斑岩型矿石(ZK23-0/104.4)和5件矽卡岩矿石均采自宝山矿区(图3)。其中, 矽卡岩型矿石的主要金属矿物为辉钼矿和黄铜矿及少量黄铁矿, 辉钼矿呈细脉-浸染状-稠密浸染状分布于矽卡岩型矿石内; 斑岩型矿石的主要金属矿物为辉钼矿, 少量黄铜矿、黄铁矿, 辉钼矿呈浸染状分布于石英脉内。2类矿石中的辉钼矿均为钢灰色细鳞片、微细粒状(表2)。

测试样品经破碎至60~80目后, 在双目镜下挑选用于同位素年龄测试的辉钼矿单矿物, 样品纯度大于98%。辉钼矿同位素年龄测试由中国地质科学院国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室完成, 测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪TJA PQ-EXCELL ICP-MS。采用Carius管封闭溶样分解样品, 同位素样品的化学处理过程和测试流程详见有关文献[19]。

3.2 测试结果

宝山矿区6件辉钼矿样品的Re-Os同位素测试结果列于表3。测试结果显示, 6件辉钼矿样的Re

表1 宝山铜多金属矿各主要矿体形态产状和规模一览

Table 1 Shapes and sizes of various orebodies in the Baoshan Cu polymetallic ore deposit

矿体编号	矿体特征		产状		矿体规模		共/伴生元素	矿体类型
	形态	矿体最厚/m	走向	倾向	走向延长/m	倾向延伸/m		
Cu5	似层状	16.56	NE	SE	>1000	500	Au、Ag、Mo、Zn、S	斑岩型
Cu9	似层状	16.56	NWW	NNE	>1100	500	Ag、Mo、S	矽卡岩型
Cu10	似层状	16.56	NWW	NNE	>800	500	Ag、Mo、S	矽卡岩型
Cu12	似层状	17.1	NWW	NNE	>600	350	Ag、S	斑岩型
Cu13	似层状	41	NWW	NNE	>600	350	Ag、S	斑岩型
Cu22	似层状、透镜状	15.15	NWW	NNE	>600	400	Ag、Mo、S	斑岩型
Mo1	似层状、透镜状	6.1	NWW	NNE	>500	300	Cu、S	矽卡岩型

表2 宝山铜多金属矿辉钼矿Re−Os同位素样品特征

Table 2 Characteristics of Re-Os isotopic samples of molybdenite from the Baoshan copper polymetallic deposit

样品编号*	赋存岩性	产状	形态	矿物组合
ZK23−0/104.4	花岗闪长斑岩	浸染状分布于石英脉中	微细粒	辉钼矿+(黄铁矿)+石英
ZK39−5/256.2	矽卡岩	浸染状	细鳞片状	辉钼矿+黄铜矿(黄铁矿)
ZK25−3/788.8	矽卡岩	浸染状	细鳞片状	辉钼矿
ZK47−7/890	矽卡岩	稠密浸染状	微细粒	辉钼矿+(黄铜矿、黄铁矿)
ZK55−12/928	矽卡岩	浸染状	微细粒	辉钼矿+黄铜矿
ZK59−7/820	矽卡岩	浸染状	微细粒	辉钼矿+黄铜矿(黄铁矿)

注: *样品编号为钻孔号/采样位置的孔深(m)。

表3 宝山铜多金属矿辉钼矿Re−Os同位素测试结果

Table 3 Re−Os isotopic data for molybdenites from the Baoshan Cu polymetallic deposit

样号	样重/g	ω(Re)/(μ g/g)		ω(普 Os)/(ng/g)		ω(^{187}Re)/(μ g/g)		ω(^{187}Os)/(ng/g)		模式年龄/Ma	
		测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ
ZK23−0/104.4	0.00 250	142.32	1.13	3.975	0.171	89	1	220.97	1.56	148.1	2.1
ZK39−5/256.2	0.00 215	158.90	1.76	0.2369	0.0 587	100	1	245.20	1.47	147.2	2.4
ZK25−3/788.8	0.00 198	112.80	1.01	1.960	0.306	71	1	176.99	1.72	149.7	2.5
ZK47−7/890	0.00 247	452.25	5.99	1.094	0.121	284	4	713.69	4.91	150.5	2.7
ZK55−12/928	0.00 122	661.82	5.50	0.4966	0.6 091	416	3	1027.64	6.52	148.1	2.1
ZK59−7/820	0.00 236	617.41	12.96	2.9409	0.1 896	388	8	952.96	7.82	147.2	3.6

注: 1.ω(普Os)是根据原子量表和同位素丰度表, 通过^{192}Os/^{190}Os测量比计算得出, ω(^{187}Os)是^{187}Os同位素总量; 2.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%; 3.因为辉钼矿铼含量较高, 几乎不含非放射成因的^{187}Os, 故用样品的铼、锇含量按照下列公式直接计算模式年龄(t): t=1/λ[ln(1+^{187}Os/^{187}Re)], 其中λ(^{187}Re衰变常数)=1.666×10^{-11}a^{-1}, 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%; 4.在计算模式年龄或作^{187}Re−^{187}Os等时线时^{187}Re和^{187}Os的单位应该是质量摩尔浓度, 即mol/g, 为了直观, 实际上采用了质量分数, 即ng/g, 这是因为^{187}Re相对原子质量186.955 765和^{187}Os相对原子质量186.955 762非常接近, 无论采用什么单位得到的模式年龄或等时线年龄的差别都将小于千万分之一, 远远小于目前年龄测定的不确定度范围2%; 5.测试人: 李超。

含量均普遍较高, 在(112.8±1.01) μg/g~(661.82±5.50) μg/g, 平均值为357.58 μg/g。1件斑岩型矿石中辉钼矿模式年龄为(148.1±2.1) Ma; 5件矽卡岩型矿石中辉钼模式年龄为(147.2±3.6) Ma~(150.5±2.7) Ma(表3)。斑岩型矿石与矽卡岩型矿石模式年龄相近, 采用ISOPLOT软件对6件辉钼矿Re−Os数据进行等时线拟合, 获得其Re−Os等时线年龄为(148.6±2.6) Ma, MSWD=1.9(图4−A)。

4 讨 论

4.1 成矿时代

大量的辉钼矿Re−Os年龄测定, 以及与成矿密切相关侵入岩的锆石SHRIMP年龄和地质特征的研究表明, 辉钼矿Re−Os同位素年龄能精确地代表其成矿时代[20−28]。但近年有学者提出部分辉钼矿可能因辉钼矿在低温成矿溶液中发生活化, 而产生失耦现象以致不能得到准确的地质年龄或有意义的地质年龄信息[19, 22−30], 失耦现象主要是由于^{187}Os在辉钼矿中的迁移引起的[29], 失耦的程度随辉钼矿年龄的增加和颗粒度的增大而更加明显, 地质年龄年轻的自然细颗粒样品的失耦现象不明显[18]。杜安道等[19]与李超等[30]结合实验发现长年龄和大颗粒的辉钼矿失耦现象较为明显, 提出了“多取样, 细磨碎”(粒径<0.1 mm), 以克服失耦现象对Re−Os同位素年龄影响。本次采取的6件辉钼矿Re−Os测试样品的粒径均较小(0.03~0.2 mm)且经过了细磨后, 辉钼矿

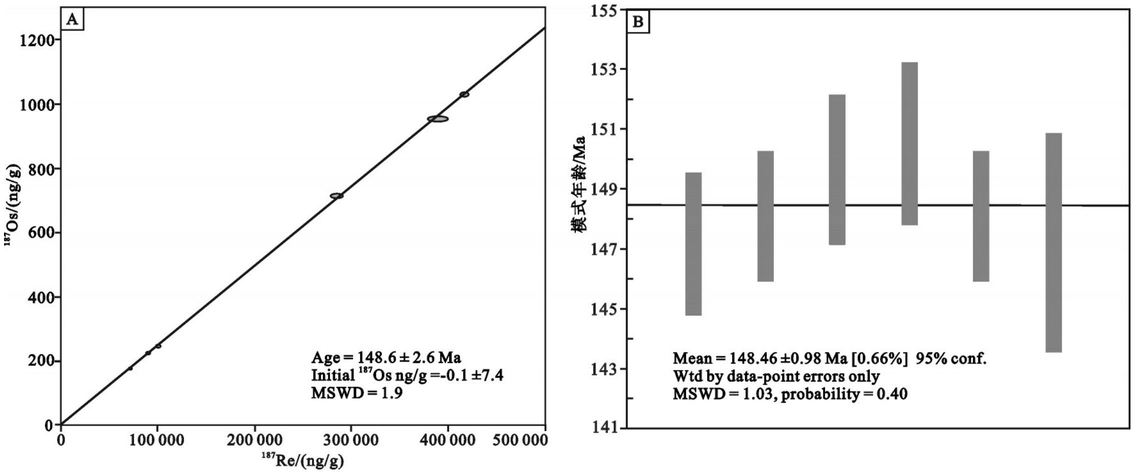

图4 宝山铜多金属矿辉钼矿 Re-Os加权平均年龄和等时线年龄
A—等时线年龄; B—加权平均年龄
Fig.4 Molybdenite Re-Os mean ages and isochron age of the Baoshan copper polymetallic deposit
A-Isochron age; B-Mean age

粒径均<0.1mm。李超等[31]通过大量数据统计发现，辉钼矿中普遍含有普通Os，如果^{187}Os与普Os的比值小于20，则需要考虑普通Os对Re-Os模式年龄影响。本次测试的6件辉钼矿样品中^{187}Os与普Os的比值为55~2069(均大于20，表3)，其模式年龄(t)按照：$t=1/\lambda[\ln(1+{}^{187}\mathrm{Os}/{}^{187}\mathrm{Re})]$，其中$\lambda$(^{187}Re衰变常数)$=1.666\times10^{-11}\mathrm{a}^{-1}$计算即可。斑岩型矿石辉钼矿模式年龄((148.1±2.1) Ma)与矽卡岩型矿石模式年龄((147.2±3.6)~(150.5±2.7) Ma)相近。经计算6件样品的模式年龄均比较年轻，为(147.2±3.6)~(150.5±2.7) Ma，其加权平均年龄为(148±1) Ma，MSWD=1.03(图4-B)；等时线年龄为(148.6±2.6) Ma，MSWD=1.9(图4-A)。6件样品的模式年龄与等时线年龄在误差范围内二者一致。辉钼矿Re-Os等时线年龄，较模式年龄具有更大的可靠性，这是因为在一个大的空间范围内取了多个样品，如果存在着严重的失耦现象，就不可能得到一条相关性很好的等时线；如果能形成一条很好的等时线，则表明失耦现象不明显，就能更准确地反映该矿的形成时代[19, 20, 29, 30-31]。综上分析认为，宝山矿区6件辉钼矿样品等时线年龄代表宝山铜多金属矿床的成矿时代为(148.6±2.6) Ma。

武山铜矿床含铜蚀变花岗闪长斑岩和含铜矽卡岩中辉钼矿Re-Os等时线年龄为(146.4±2.6) Ma[14]；城门山石英脉中辉钼矿等时线年龄为(141±3) Ma[10]。九瑞矿集区自北西至南东矿床成矿时代渐年轻，宝山矿床，(147.2±3.6)~(150.5±2.7) Ma→武山矿床，(144.0±1.8)~(145.7±2.0) Ma→城门山矿床，139.3~144.2 Ma，显示出九瑞矿集区岩浆据侵位成矿事件自北西往南东演化的趋势。

4.2 成岩成矿的关系

晚侏罗—早白垩世古太平洋板块或Izanagi板块向欧亚大陆俯冲过程[1, 2]，导致中国东部岩石圈构造体制由EW向特提斯构造域向NE向太平洋构造造域的大转折，直到135 Ma左右主应力场显示为近EW向[32-33]。由于俯冲板片撕裂，诱发软流圈沿裂开处上涌，以底劈形式侵位，发生强烈的壳幔相互作用[1, 7, 34]。在此期间(140±5) Ma，长江中下游地区岩石圈仍然表现为地幔隆升，矿化及有关岩体大多数沿NE—EW向与NNE向断裂的交汇部位形成和定位，也就是毛景文等[5]所提出的中生代第二期大规模成矿，并从西向东出现了鄂东南、九瑞、安庆—贵池、铜陵等花岗岩集中区和与之有关的铜多金属矿化区，例如：鄂东南的铜绿山铜铁金矿床、阮家湾铜钨矿床、千家湾铜金矿床、铜山口铜钼矿床的辉钼矿；九瑞矿集区的城门山铜钼矿床、武山铜矿床、东雷湾铜矿床、鸡笼山金铜矿；铜陵地区铜官山铜矿床、凤凰山铜矿床[1, 3, 6, 35-40]。宝山的矽卡岩矿体呈北

东向赋存于宝山花岗闪长斑岩体和奥陶系汤头组、汤山组碳酸盐岩接触带或碳酸盐岩捕掳体中,而且自花岗闪长斑岩至奥陶系碳酸盐岩表现出,钾长石化→青磐岩→黄铁绢云岩化→蛇纹石、石榴子石、透辉石矽卡岩化的蚀变特征,这与典型斑岩-矽卡岩型矿床的蚀变特征相似[41-48],指示出宝山花岗闪长斑岩为成矿母岩。因此,九瑞矿集区于(148.6±2.6) Ma成矿的宝山铜多金属矿床应是古太平洋板块或Izanagi板块向欧亚大陆俯冲引起导致中国东部岩石圈构造体制由EW向特提斯构造域向NE向太平洋构造域的大转折进而诱发壳幔同熔的产物。

本文前面已阐明宝山铜多金属矿床的成矿时代为(148.6±2.6) Ma, MSWD=1.9,而陈志洪等[7]采用LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素法测得宝山岩体的结晶年龄为(143.6±1.2) Ma,较成矿时代明显偏小。楼法生等[17]通过对宝山矿区开展系统的勘查工作后指出宝山岩体为复式岩体,岩体侵位具有多期侵位特征,与成矿密切相关的为早期花岗闪长斑岩,晚期不含矿花岗闪长斑岩超覆于早期花岗闪长斑岩岩体之上,并在地表出露。陈志洪等[7]锆石U-Pb样品采自地表,且未给出宝山岩体确切的取样位置,据此推断陈志洪[7]所测得岩体年龄为宝山矿床形成之后的晚期岩体。

5 结 论

(1)宝山矿床自花岗闪长斑岩至奥陶系碳酸盐岩具钾长石化→青磐岩→黄铁绢云岩化→蛇纹石、石榴子石、透辉石矽卡岩化的蚀变特征,与典型斑岩-矽卡岩型矿床的蚀变特征相似,表明宝山花岗闪长斑岩为宝山铜多金属矿床的成矿母岩。矿体主要以细脉-浸染状、脉状金属硫化物石英脉的形式赋存于斑岩、矽卡岩,呈似层状、透镜产出,矿床属斑岩-矽卡岩型。

(2)宝山铜多金属矿床的6件辉钼矿样品的Re-Os等时线年龄为(148.6±2.6) Ma, MSWD=1.9。宝山矿床成矿时代属于长江中下游Cu-Au-Mo(Fe)多金属成矿的高峰期(140±5) Ma,是华南地区中生代中生代第二期大规模成矿作用高峰期的产物。

致谢: 本文系集体劳动成果,成文过程得到了江西省地质调查研究院总工程师楼法生教授级高工,江西省地质调查研究院地质勘查所唐峰林、刘细元教授级高工悉心指导与帮助,匿名审稿专家及编辑部杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此深表谢意。

参考文献(References):

[1] 毛景文, Stein H, 杜安道, 等. 长江中下游地区铜金(钼)矿Re-Os年龄测定及其对成矿作用的指示[J]. 地质学报, 2004, 78(1): 121-131.

Mao Jingwen, Stein H, Du Andao, et al. Molybdenite Re-Os precise dating for molybdenite from Cu-Au-Mo deposits in the middle and lower reaches of Yangtze River Belt and its implications for mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 121-131(in Chinese with English abstract).

[2] Mao Jingwen, Wang Yitian, Lehmann B, et al. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River Valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 2006, 29: 307-324.

[3] 杨明桂, 王发宁, 曾勇, 等. 江西北部金属成矿地质特征[M]. 北京: 大地出版社, 2004: 36-102.

Yang Minggui, Wang Faning, Zeng Yong, et al. Geological Characteristics of Northern Metal Mineralization in Jiangxi[M]. Beijing: China Land Press, 2004: 36-102(in Chinese with English abstract).

[4] 包家宝, 汤树清, 余志庆. 江西铜矿地质[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2002: 3-15.

Bao Jiabao, Tang Shuqing, Yu Zhiqing. Copper Deposit, Jiangxi[M]. Nanchang: Science Technology Press of Jiangxi, 2002: 3-15(in Chinese with English abstract).

[5] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J].中国科学(D辑), 2003, 33(4): 289-299.

Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, et al. Geodynamic setting of Mesozoic large-scale mineralization in the north China and adjacent area: Implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. Science in China(Series D) , 2003, 33(4): 289-299(in Chinese with English abstract).

[6] 黄修保, 裴荣富, 梅燕雄, 等. 江西九瑞坳下—丁家山地质特征及找矿前景分析[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 531-542.

Hang Xiubao, Pei Rongfu, Mei Yanxiong, et al. Analysis of geological characteristics and ore-search prospect of the Aoxia-Dingjiashan, Jiujiang-Ruichang area in Jiangxi province[J]. Geologyand Prospecting, 2011, 47(4): 531-542(in Chinese with English abstract).

[7] 陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 等. 长江中下游成矿带九瑞矿集区含矿

(Cu−Au)岩体的锆石U−Pb定年及其地质意义[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1146−1158.

Chen Zhihong, Xing Guangfu, Guo Kunyi, et al. Zircon U−Pb ages of ore− bearing granitic bodies in the Jiujiang− Ruichang metallogenic district of the mineralization belt of the middle−lower reaches of the Yangtze River and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1146− 1158(in Chinese with English abstract).

[8] 蒋少涌, 李亮, 朱碧, 等. 江西武山铜矿区花岗闪长斑岩的地球化学和Sr−Nd−Hf同位素组成及成因探讨[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1679−1690.

Jiang Shaoyong, Li Liang, Zhu Bi, et al. Geochemical and Sr−Nd−Hf isotopic compositions of granodiorite from the Wushan copper deposit in Jiangxi Province and their implications for petrogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1679− 1690 (in Chinese with English abstract).

[9] 季绍新, 王文斌, 邢文臣, 等. 江西九瑞地区两个成矿系列的铜矿床[J]. 矿床地质, 1989, 8(2): 14−24.

Ji Shaoxin, Wang Wenbin, Xing Wenchen, et al. Copper deposits of two metallogenic series in Jiurui Area, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 1989, 8(2): 14−24(in Chinese with English abstract).

[10] 吴良士, 邹晓秋. 江西城门山铜矿铼−锇同位素年龄研究矿床地质, 1997, 16(4): 376−381.

Wu Liangshi, Zou Xiaoqiu. Re− Os isotopic age study of the Chengmenshan copper deposit, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 1997, 16(4): 376− 381(in Chinese with English abstract).

[11] Pan Yuanming, Dong Ping. The lower Changjiang(Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion and wall rock− hosted Cu− Fe− Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. Ore Geology Reviews, 1999, 15: 177−242.

[12] Sun Weidong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng, et al. Os− Os dating of copper and molybdenum deposits along the middle and lower reaches of the Yangtze river, China[J]. Economic Geology, 2003, 98: 175−180.

[13] 蒋少涌, 孙岩, 孙明志, 等. 长江中下游成矿带九瑞矿集区叠合断裂系统和叠加成矿作用[J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2751−2761.

Jiang Shaoyong, Sun Yan, Sun Mingzhi, et al. Reiterative fault systems and super imposed mineralization in the Jiurui metallogenic cluster district, middle and lower Yangtze River mineralization belt, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (9): 2751−2767(in Chinese with English abstract).

[14] 李进文, 李旭辉, 裴荣富, 等. 江西武山铜矿南矿带辉钼矿Re−Os同位素年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 801−807.

Li Jingwen, Li Xuhui, Pei Rongfu, et al. Re− Os age of molybdenite from the southern ore zone of the Wushan copper deposit, Jiangxi Province, and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 801−807(in Chinese with English abstract).

[15] 李永明, 沙元成, 龚良信, 等. 江西省瑞昌市仙姑台铜多金属矿区土壤地球化学测量找矿效果[J]. 地质调查与研究, 2014, 37 (3): 203−211.

Li Yongming, Sha Yuancheng, Gong Liangxin, et al. Prospecting effect of soil geochemical survey from the Xiangutai copper polymetallic deposit in Ruichang city of Jiangxi Province[J]. Geological Survey and Research, 2014, 37(3): 203− 211(in Chinese with English abstract).

[16] 文春华, 徐文艺, 钟宏, 等. 九瑞矿集区城门山斑岩型钼铜矿床流体包裹体研究[J]. 地质学报, 2012, 86(10): 1604−1620.

Wen Chunhua, Xu Wenyi, Zhong Hong. Fluid inclusion study of the Chengmenshan porphyry Mo− Cu deposit in the Jiujiang−Ruichang district[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(10): 1604−1620(in Chinese with English abstract).

[17] 楼法生, 李永明, 王先广, 等. 江西省瑞昌市宝山−夫山铜多金属矿调查评价地质报告[R]. 南昌: 江西省地质调查研究院, 2014 .

Lou Fasheng, Li Yongming, Wang Xianguang, et al. The Investigation and Evaluation of Geological Report of Baoshan−Fushan Copper Polymetallic Deposit in Ruichang, Jiangxi[R]. Nanchang: Jiangxi Institute of Geological Survey, 2014(in Chinese).

[18] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造−成矿意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 236−244.

Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, et al. The characteristics and tectonic− metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17 (2): 236−244(in Chinese with English abstract).

[19] 杜安道, 屈文俊, 王登红, 等. 辉钼矿亚晶粒范围内Re和^{187}Os的失耦现象[J]. 矿床地质, 2007, 26(5): 572−580.

Du Andao, Qu Wenjun, Wang Denghong, et al. Subgrain− size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(5): 572− 580(in Chinese with English abstract).

[20] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. The remarkable Re−Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. Terra Nova1, 2001, 3: 479−486.

[21] Stein H J, Schersten K, Hannah J L, et al. Subgrain− Scale

decoupling of Re and ^{187}Os and assessment of laser ablation ICP−MS spot dating in molybdenite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(19): 3673−3686.

[22] Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Zhang Zuoheng, et al. 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, 1999, 63(11/12): 1815−1818.

[23] Selby D, Creaser R A, Hart C J R, et al. Absolute timing of sulfide and gold mineralization: A comparison of Re−Os molybdenite and Ar−Ar micamethods from the Tintina gold belt, Alaska[J]. Geology, 2002, 30(9): 791−794.

[24] 黄勇, 唐菊兴, 丁俊, 等. 西藏雄村斑岩铜矿床辉钼矿 Re−Os 同位素体系[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 302−311.

Huang Yong, Tang Juxing, Ding Jun, et al. The Re−Os isotope system of the Xiongcun porphyry copper−gold deposit, Tibet[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 302−311(in Chinese with English abstract).

[25] 陈超, 王宝德, 牛树银, 等. 河北木吉村铜(钼)矿床辉钼矿 Re−Os 年龄及成矿流体特征[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1889−1901.

Chen Chao, Wang Baode, Niu Shuyin, et al. Re−Os dating of molybdenite from the Mujicun Cu (−Mo) deposit in Hebei Province and characteristics of the ore−forming fluids[J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1889−1901(in Chinese with English abstract).

[26] 李靖辉. 河南嵩县大石门沟钼矿床辉钼矿 Re−Os 同位素年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1364−1374.

Li Jinghui. Re−Os isotopic dating of molybdenites from the Dashimengou molybdenum deposit in Songxian County, Henan Province, and its geological significance[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1364−1374(in Chinese with English abstract).

[27] 薛怀民, 马芳, 关海燕, 等. 怀宁盆地火山岩的年代学、地球化学及与长江中下游其他火山岩盆地的对比[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 694−714.

Xue Huaimin, Ma Fang, Guan Haiyan, et al. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks in Huaining basin in comparison with other basins in the middle−lower Yangtze region[J]. Geology in China, 2013, 40(3): 694−714(in Chinese with English abstract).

[28] 周小栋, 郭坤一, 陈国光, 等. 宁芜北部脉状铜矿床地质与成矿流体特征研究[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1622−1633.

Zhou Xiaodong, Guo Kunyi, Chen Guoguang, et al. Geological and ore−forming fluid characteristics of vein type copper deposits in northern Ningwu area[J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1622−1633(in Chinese with English abstract).

[29] Selby D, Creaser R A. 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]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68(19): 3897−3908.

[30] 李超, 屈文俊, 杜安道. 大颗粒辉钼矿 Re−Os 同位素失耦现象及^{187}Os迁移模式研究[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 707−712.

Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao. Decoupling of Re and Os and migration model of ^{187}Os in coarse−grained molybdenite[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 707−712(in Chinese with English abstract).

[31] 李超, 屈文俊, 杜安道, 等. 含有普通锇的辉钼矿 Re−Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(2) : 702−708.

Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao, et al. Study on Re−Os isotope in molybdenite containing common Os[J].Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(2): 702−708(in Chinese with English abstract).

[32] 邢光福, 卢清地, 陈荣, 等. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比[J]. 地质学报, 2008, 82(4): 451−463.

Xing Guangfu, Lu Qingdi, Chen Rong, et al. Study on the ending time of late Mesozoic tectonic regime transition in south China—Comparing to the Yanshan Area in north China[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(4): 451−463(in Chinese with English abstract).

[33] 牛宝贵, 和政军, 宋彪, 等. 张家口组火山岩 SHRIMP 定年及其重大意义[J]. 地质通报, 2003, 22(2): 140−141.

Niu Baogui, He Zhengjun, Song Biao, et al. SHRIMP dating of the Zhangjiakou volcanic series and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(2): 140−141(in Chinese with English abstract).

[34] 杜杨松, 李学军. 安徽铜陵典型矿区岩石包体研究及其岩浆−成矿作用过程探讨[J]. 高校地质学报, 1997, 3(2): 171−182.

Du Yangsong, Li Xuejun. Enclaves in the typical mining districts of Tongling, Anhui and their implication to the process of magmatism metallogeny[J]. Geological Journal of China Universities, 1997, 3(2): 171−182(in Chinese with English abstract).

[35] 谢桂青, 赵海杰, 赵财胜, 等. 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[J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 227−239.

Xie Guiqing, Zhao Haijie, Zhao Caisheng, et al. Re−Os dating of molybdenite from Tonglushan ore district in southeastern Hubei province, middle−lower Yangtze River belt and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 227−239(in Chinese with English abstract).

[36] 谢桂青, 毛景文, 李瑞玲, 等. 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[J]. 矿床地质, 2006, 25(1): 43−52.

Xie Guiqing, Mao Jingwen, Li Ruilin, et al. Timing of mineralization and geodynamic frame work of Cu−Au−Mo−(W) deposits in southeastern Hubei province, China: Constraints from Re−Os molybdenite ages[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(1): 43−52(in Chinese with English abstract).

[37] 王建, 谢桂青, 陈风河, 等. 鄂东南地区鸡笼山矽卡岩金矿床的辉钼矿Re−Os同位素年龄及其构造意义[J]. 地质学报, 2014, 88(8): 1539−1548.

Wang Jian, Xie Guiqing, Chen Fenghe, et al. Re−Os dating of molybdenite from the Jilongshan skarn Au deposit in southeast Hubei Province, middle−lower Yangtze River belt and its tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(8): 1539−1548 (in Chinese with English abstract).

[38] 梅燕雄, 毛景文, 李进文, 等. 安徽铜陵大团山铜矿床层状矽卡岩矿体中辉钼矿Re−Os年龄测定及其地质意义[J]. 地球学报, 2005, 26(4): 327−331.

Mei Yanxiong, Mao Jingwen, Li Jinwen, et al. Re−Os dating of the molybdeite occurring in stratiform skarn orebody in the Datuanshan Cu ore deposit, Anhui Province, and its geological significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(4): 327−331 (in Chinese with English abstract).

[39] 蒙义峰, 杨竹森, 曾普胜, 等. 铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 271−280.

Meng Yifeng, Yang Zhushen, Zeng Pushen, et al. Tentative temporal constraints of ore-forming fluid systems in Tongling metallogenic province[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3): 271−280 (in Chinese with English abstract).

[40] 曾普胜, 杨竹森, 蒙义峰, 等. 安徽铜陵矿集区燕山期岩浆流体系统时空结构及成矿[J].矿床地质, 2004, 23(3): 298−309.

Zeng Pusheng, Yang Zhushen, Meng Yifeng, et al. Temporal−spatial configuration and mineralization of Yanshanian magmatic fluid systems in Tongling ore concentration area, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3): 298−309(in Chinese with English abstract).

[41] 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 等. 西藏甲玛铜多金属矿矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 2010, 31(4): 495−506.

Tang Juxing, Wang Denghong, Wang Xiongwu, et al. Geological features and metallogenic model of the Jiama copper−polymetallic deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31 (4): 495−506(in Chinese with English abstract).

[42] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 2010, 105: 3−41.

[43] Sillitoe R H. Metallogenic and regulatory inequalities around the northern Pacific rim: Implications for discovery[J]. Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication, 2013, 17: 1−16.

[44] Richards J P. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(11): 911−916.

[45] Seltmann R, Porter T M, Pirajno F. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: A review[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 79 (Part B): 810−841.

[46] Mathur R, Ruiz J, Casselman M J, et al. Use of Cu isotopes to distinguish primary and secondary Cu mineralization in the Canariaco Norte porphyry copper deposit, northern Peru[J]. Miner Deposit, 2012, 47: 755−762.

[47] Pekalam, Asael D, Butler I B, et al. Experimental study of Cu isotope fractionation during the reaction of aqueous Cu(Ⅱ) with Fe(Ⅱ) sulphides at temperatures between 40 and 200℃ [J]. Chemical Geolgy, 2011, 289: 31−38.

[48] Jowitt S M, Mudd G M, Weng Z H. Hidden mineral deposits in Cu−dominated porphry−skarn systems: How resource reporting can occlude important mineralization types within mining camps[J]. Economic Geology, 2013, 108(5): 1185−1193.