

粤西石炭铜钼矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义

赵海杰^{1,2} 郑 伟³ 余长发³ 胡耀国⁴ 田 云⁵

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 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; 3. 中国地质大学, 北京 100083; 4. 广东省地质调查院, 广东 广州 510080; 5. 广东省有色金属地质局, 广东 广州 510080)

摘要:粤西阳春盆地石炭铜钼矿床发育有氧化型铜及矽卡岩型铜钼矿体, 矽卡岩型矿体在成因上与石炭花岗闪长岩相关。本文通过对辉钼矿化石英脉中的辉钼矿进行 Re-Os 同位素定年, 结果显示, 5 件辉钼矿化石英脉获得较一致的模式年龄, 介于 $(104 \pm 1.5) \text{Ma}$ ~ $(104.6 \pm 1.5) \text{Ma}$ 之间, 加权平均值为 $(104.34 \pm 0.66) \text{Ma}$, 对应的等时线年龄为 $(104.1 \pm 1.3) \text{Ma}$, 略晚于成矿相关的花岗闪长岩的侵入年龄 $(107 \pm 0.72 \text{Ma})$, 表明成矿作用发生在早白垩世晚期。结合已有的研究成果认为, 石炭矽卡岩型铜钼矿床形成滞后于阳春盆地内侏罗纪铜铁矿床近 50 Ma, 是华南白垩纪大规模成矿作用的一部分, 其与区内侏罗纪铜铁矿床形成不同的构造背景, 石炭铜钼矿床形成于岩石圈伸展拉张的背景。

关键词:辉钼矿; Re-Os 同位素定年; 铜铁矿床; 夕卡岩; 石炭

中图分类号: P618.41; P618.65; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)06-1604-10

钦—杭结合带不仅在华南大地构造格局中占有重要地位, 同时也是中国重要的铜多金属成矿带^[1]。粤西云开地区位于钦—杭成矿带南西段及其附近, 是一个以元古宙混合岩、混合花岗岩为核心的古隆起, 构造—岩浆活动强烈, 成矿条件优越, 具有众多的大型—超大型矿床, 这些矿床矿化元素及类型多样^[2], 成矿规律复杂。随着近几年找矿工作的开展, 区内呈现出中生代断陷盆地控矿特征, 大部分矿床(点)集中发育白垩纪或白垩纪—新近纪盆地内及其边缘, 表现出以盆地为中心形成一系列矿集区, 包括阳春盆地^[3]。阳春盆地是一个在印支期复向斜基础上发育而成的北东向的局部断陷盆地^[3], 目前盆地周边已发现矿床(点)50 余处, 包括石炭大型铜矿床、芒鹅岭中型铁铜矿床、鸚鵡岭中型锡钨铜铅锌多金属矿床以及茶地中型铅锌矿床等, 矿化元素为 Cu、Fe、Pb、Zn、W、Sn 等^[4], 矿床类型有斑岩型、矽卡岩型、构造蚀变岩型、热液脉型等^[2]。

石炭矿床位于阳春盆地的北西, 地理坐标为东经: $111^{\circ}38'37''$, 北纬: $22^{\circ}10'22''$, 是一处老矿山, 具有几十年的开采历史, 过去主要开采对象为氧化型铜矿体, 原生矿体并不占主要部分。随着氧化型矿体的资源枯竭, 原生矿体就成为危机矿山的接替资源。自广东有色地质局在该区深部及周边开展找矿工作以来, 发现该矿区深部及外围具有很好的找矿远景, 现在的找矿重点转移为矽卡岩型铜钼矿体, 原生矿床平均品位: Cu: 0.91%, Mo: 0.21%, 伴生组分 Ag: 12.52 g/t, TFe: 11.20%, S: 2.33% (原生铜矿—100 m 标高以上探明金属量为 3.7 万 t)。尽管矿床的找矿勘查工作已取得重要进展, 但矿区的地质工作程度较低。前人研究多集中于矿化相关花岗闪长岩地球化学特征^[3,5], 涉及矿床特征的资料较少^[6-8]。关于矿床的成岩成矿年代学研究, 花岗闪长岩的年龄存在 126 Ma(U-Pb)、99~101 Ma(⁴⁰Ar-³⁹Ar)^[8]等 3 个数据, 而成矿年龄数据为 89 Ma^[9], 可见两者相差很大。鉴

收稿日期: 2012-11-05; 改回日期: 2012-11-08

基金项目: 国家重点科学基金项目(40930419)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(2012CB416704)和中国地质调查局项目(1212011120831)联合资助。

作者简介: 赵海杰, 女, 1982 年生, 博士, 助理研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: zhaohaijie_610@163.com。

于精确的成矿年龄数据是总结区域成矿规律及探讨地球动力学背景的必要条件,因此在详细研究矿床地质特征的基础上,利用 Re-Os 同位素厘定矿床成矿年龄,并初步探讨矿床形成的动力学背景。

1 成矿地质背景

粤西阳春盆地处于吴川—四会深断裂中段的东南侧,大地构造位置处于东亚大陆新华夏系第二隆起带的西南端,面积约 2 028 km²。盆地内及其周边基底为寒武系浅变质复理石砂页岩,盖层为上古生界浅海相碎屑岩、砂页岩、碳酸盐岩和海陆交互相含煤地层。其中,中上泥盆统、石炭系和二叠系是盆地内出露的主要地层,最上部侏罗系碎屑岩零星分布。该盆地内及周边发育中生代大小岩体约 30 余个,岩性为中酸性-酸性,以及少量偏基性的二长岩。这些岩

体多为铜、铁、铅、钨、钨锡矿化的成矿母岩。蔡明海^[2]将阳春盆地单独划分为新兴—阳春铜、铅、钨、锡成矿带,属于桂东—粤西地区 6 个成矿带之一。成矿带内与成矿作用关系密切的岩体较集中地分布在盆地两侧边缘地带的吴川—四会断裂内,并受北西向、东西向构造带的复合部位控制,如石炭岩体沿北东向与北西向断裂及石炭—石根向斜轴的复合部位侵入。

20 世纪 80 年代,前人对区内侵入岩做过大量的研究工作,并划分出两类花岗岩:一类是以黑云母花岗岩为主的壳源重熔型花岗岩,如鸚鵡岭黑云母花岗岩等;另一类是以花岗闪长岩或二长花岗岩为主的同熔型中酸性花岗岩和少量偏基性的二长岩,包括石炭花岗闪长岩,岗尾二长花岗岩、马山二长岩等。两类花岗岩具有不同的成矿专属性,前者伴有 W-Sn 矿化(“小南山—锡山型”),后者伴有 Fe-Cu

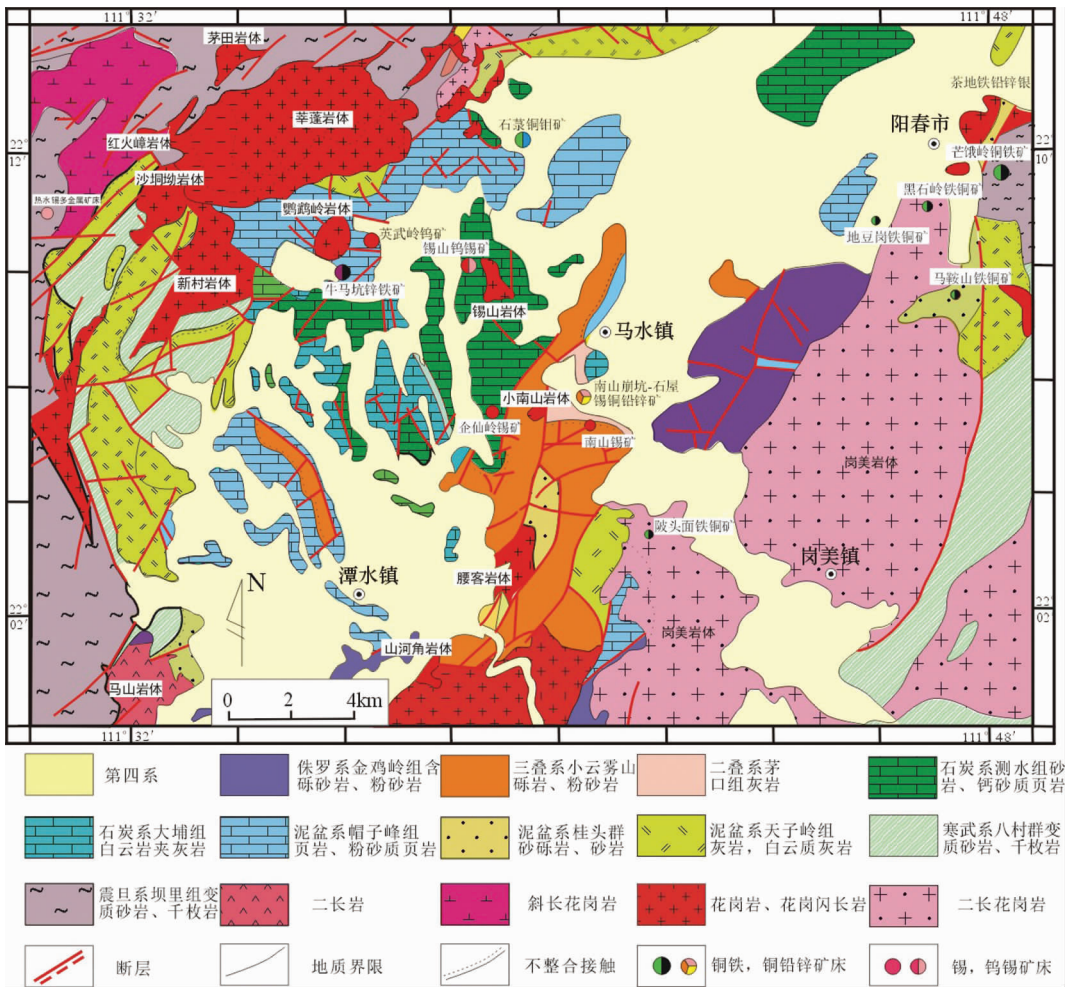


图 1 广东阳春盆地地质矿产图(修改自广东阳春地区地质矿产图)

Fig.1 Geological and mineral resources map of Yangchun basin

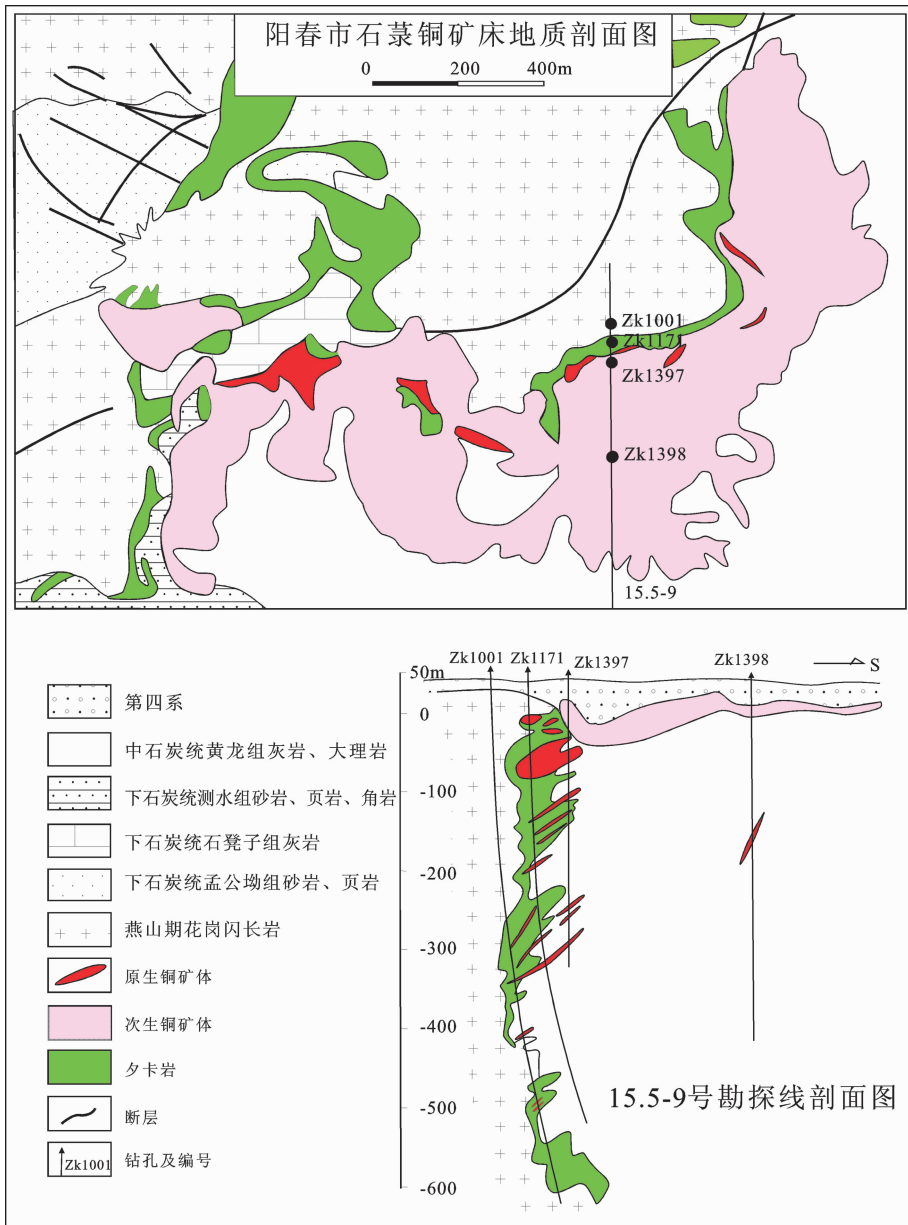


图2 石垌铜钼矿床地质及典型剖面图

Fig.2 Geological sketch map and typical sections of the Shilu Cu-Mo deposit

矿化(“岗尾—石垌型”)^[5,10-11]。

2 矿床地质特征

石垌矿区出露的地层主要为石炭系与第四系(图2)。石炭系广泛出露于石垌岩体的东、南及西南面,为连续沉积的灰岩及砂页岩类,自下而上分别为下石炭统孟公坳组砂岩、页岩;石磴子组灰岩;测水组砂岩、页岩和角岩;梓门桥组和中石炭系黄龙组白云岩和灰岩等,岩层总厚度大于1 614 m。第四系为一套厚度几米到几十米的洪-残积沉积物,是矿

床氧化型铜矿的主要赋矿层位。

矿区 NE 至 NNE 向压扭性断裂构造构成本区基本构造格架,规模较大,其次为具张扭性质 NW-NWW 向断裂组。两组构造的复合交汇部位是岩体的有利侵位空间。石垌—石根向斜是区内主要的褶皱构造,其轴向以 NE-NEE 为主,地层倾角一般为 30°~50°,轴部为中石炭系黄龙组,两翼往外依次是下石炭系梓门桥组、测水组、石磴子组、孟公坳组^[7]。

与成矿关系密切的是石垌花岗闪长岩,呈小岩株出露在矿区的中部和北部,平面上呈北东延伸,向

南东突出的不规则状椭圆形,面积为 4.7 km²,侵入中—上石炭统白云岩及白云质灰岩(图 2),剖面上岩体为近直立的筒状,与围岩层理接触角度大,局部岩体多呈舌状、枝状侵入围岩。石炭花岗岩闪长岩的主要矿物为钾长石(10%~15%)、斜长石(45%~55%)、石英(15%~25%)、普通角闪石(3%~10%)和黑云母(10%~20%)。地球化学成分为:SiO₂=62.72%,K₂O=2.23%~2.99%,K₂O/Na₂O=0.7~0.9,属于酸性-偏中性的钙碱系列岩石^[9]。

矿区内的铜钼矿体赋存于矽卡岩及邻近的矽卡岩化大理岩中,呈不规则带状环绕石炭岩体断续分布(图 2)。根据地质报告记录,已探明的原生矿体共有 115 个,按形态特征及产出位置将矿体主要分为

接触带矿体和界面矿体。其中,接触带矿体共 86 个,呈不规则板状、长条状、透镜状、囊状、不规则状产出。其中规模最大的为 112 号矿体,由多个矿体群组成,环绕石炭山东西两侧分布,矿体平均厚度为 33.71 m,主要是铜矿石,局部为钼矿石及铜钼矿石,铜品位介于 0.3%~1.3%,最高可达 11.15%;钼多为 0.01%~0.06%,个别可达 0.178%,并伴有 Ag、Au 矿化。界面矿体包括 21 个,为层状、似层状、透镜状,为铜钼矿石。铜平均品位为 0.95%,钼平均品位为 0.1%,并伴生银。

矿床中金属矿物主要为黄铜矿和辉钼矿,相应的原生矿石主要有铜矿石、铜钼矿石及少量的铜铁矿石(图 3-a、b、c、d)。按黄铜矿产出方式及矿物组

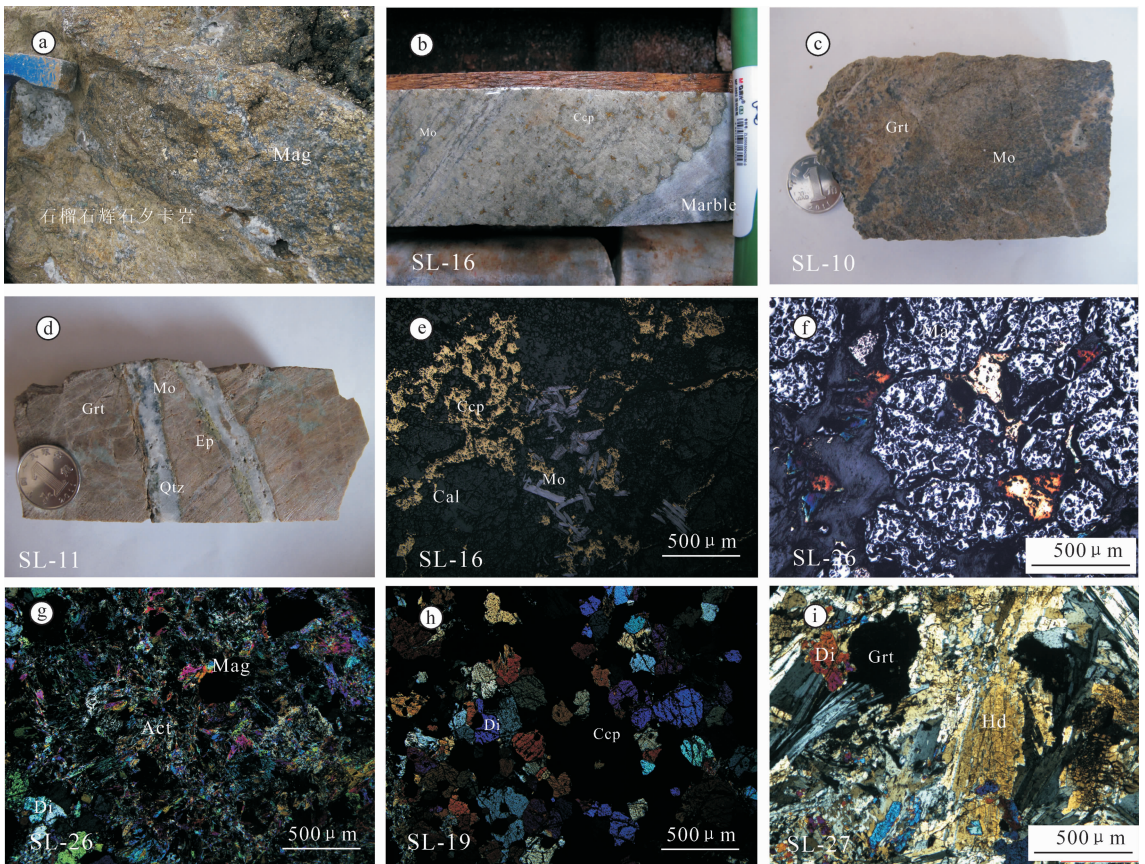


图 3 石炭矿床典型矿石及矽卡岩矿物组合

A—黄铜矿、磁铁矿交代石榴石辉石矽卡岩形成铜铁矿石;b—辉石矽卡岩中的浸染状黄铜矿化和细脉状辉钼矿;c—辉钼矿交代石榴石矽卡岩形成浸染状钼矿石;d—石榴石矽卡岩中的辉钼矿化石英脉,脉壁伴有绿帘石化;e—交代辉石和方解石的黄铜矿和辉钼矿集合体;f—磁铁矿颗粒间发育含银矿物;g—阳起石颗粒间发育磁铁矿;h—黄铜矿充填在自型的透辉石颗粒间;i—含少量石榴石颗粒的辉石矽卡岩(钙铁辉石和透辉石)

Fig.3 Photographs of typical ores and skarn mineral association

a-Chalcopyrite and magnetite replacing garnet pyroxene skarn, forming Cu-Fe ore; b-Chalcopyrite in dissemination and molybdenite in vein occurring in pyroxene skarn; c-Molybdenite replacing garnet skarn, forming disseminated Mo ores; d-Garnet skarn with molybdenite and epidotization in quartz vein; e-Chalcopyrite and molybdenite assemblages replaced by pyroxene and calcite; f- Ag-bearing minerals developed among magnetite; g-Actinolite replaced by magnetite; h-Chalcopyrite developed among diopside grains; i-Pyroxene skarn with hedenbergite, diopside and minor garnet.Mag:Magnetite; Ccp: Chalcopyrite; Mo: Molybdenite; Grt: Garnet; Ep: Epidote; Qtz: Quartz; Cal: Calcite; Act: Actinolite; Di: Diopside; Hd: Hedenbergite

合主要可分为两类：一种为黄铜矿呈浸染状嵌布在矽卡岩中，常伴有浸染状或细脉状辉钼矿发育形成铜钼矿石(图 3-b,c);另一种黄铜矿产在石英脉中，呈团块状，基本无其他金属矿物相伴生。辉钼矿除了与黄铜矿产在矽卡岩矿石中外，在矽卡岩中的石英脉的两壁可见到呈脉状发育(图 3-d);此外，还可见到辉钼矿呈浸染状发育在矽卡岩中，交代矽卡岩矿物形成团块状钼矿石(图 3-c)，无其他金属矿物。矿床中金属矿物除了主要的黄铜矿和辉钼矿外，还可见到黄铁矿、磁铁矿、斑铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿，显微镜下可见到含银矿物充填磁铁矿颗粒间(图 3-f)。脉石矿物主要为石榴子石、透辉石、钙铁辉石、方解石、阳起石、石英、白云石、绿帘石、绿泥石、透闪石等矿物(图 3-g,h,i)。可见，石碁矿床的金属矿物和矽卡岩矿物比较发育，种类多样。

矿区主要的围岩为碳酸盐岩和砂页岩，石碁岩体的侵位导致两种岩性地层发生了强烈的变质重结晶作用，分别形成矽卡岩和角岩。矿区围岩蚀变的种类繁多，常见的为矽卡岩化、硅化、蛇纹石化、碳酸盐化、绿泥石化、绿帘石化等。与大多数夕卡岩矿床成矿阶段一样，石碁矿床成矿作用可分为 2 期 4 个阶段，即矽卡岩期和热液硫化物期。其中，矽卡岩期包括早期无矿阶段和磁铁矿阶段，热液硫化物期包括石英多金属硫化物阶段和碳酸盐阶段。磁铁矿阶段

和石英多金属硫化物阶段都存在黄铜矿和辉钼矿化，为成矿的主要阶段。

3 辉钼矿样品及分析方法

本次用于 Re-Os 同位素分析的 6 件辉钼矿样品采自钻孔岩心及石碁露天采坑。样品采样位置及描述见表 1 和图 2。其中，5 件样品中辉钼矿发育在矽卡岩和结晶大理岩中的石英脉两侧，辉钼矿呈团块状和薄膜状细小鳞片状集合体分布。1 件样品中辉钼矿呈浸染状产在石榴石矽卡岩中。样品经过样品经粉碎至 60~80 目，在双目镜下分选至纯度达 99%以上，并用玛瑙钵研磨至 200 目，保证辉钼矿颗粒细小，单颗粒 0.05~0.1 mm，避免大颗粒辉钼矿中由于 Re 和 Os 的失偶而引起的测年误差^[12-13]，单矿物的分选工作在廊坊科大地质服务有限公司完成。

辉钼矿样品的测试在国家地质实验中心 Re-Os 同位素实验室完成。分析方法和流程主要有样品的分解、Os 的蒸馏分离、Re 的萃取分离、质谱测定 4 个步骤，详细流程见有关文献^[14-15]。测试中 Re、Os 和 ¹⁸⁷Os 的空白水平分别为 4.2×10^{-6} 、 0.18×10^{-6} 和 0.01×10^{-6} ，为了保证实验结果的可靠性，同时对实验标准物质 GBW04435 (HLP) 中的 Re、Os 进行了测定，测试结果见表 2。辉钼矿的标准样品给出的模式年龄值为 220.7 Ma，校正后的值为 221.4 Ma。辉钼

表 1 辉钼矿样品描述

Table 1 Description of the molybdenite samples

编 号	采样位置	描述描述	矿物组合	照片
SL-7	22°10'18", 110°38'45'	矽卡岩中的黄铁矿、辉钼矿化石英脉，脉宽约 6 cm，产状 240°<15°	石榴石，石英，辉钼矿，黄铜矿、黄铁矿	
SL-10	ZK7402, 193m	红褐色石榴石矽卡岩，浸染状辉钼矿化	石榴子石，辉钼矿、石英	图 3-c
SL-11	ZK4501, 363m	透辉石石榴石矽卡岩中的两条石英脉，其中一条脉中伴有辉钼矿化	石榴石，绿泥石，绿帘石，石英，辉钼矿	图 3-d
SL-25	22°10'20' , 110°38'40'	大理岩中石英脉壁上的薄膜状辉钼矿	方解石，石英，黄铁矿	
SL-30	22°10'16", 110°38'47"	蚀变的花岗闪长岩与石榴石透辉石矽卡岩接触带处辉钼矿化石英脉，石英脉产状 35°<80°	石榴石，绿泥石，绿帘石，石英，辉钼矿	
SL-31	22°10'18", 111°38'44"	大理岩中石英-辉钼矿脉	方解石，石英，辉钼矿	

表 2 实验标准物质 GBW04435 HLP 测定值及标准值

Table 2 Certified values and analytical data of Re-Os isotopes for standard sample HLP

编号	原样名	样重 (g)	$w_{(Re)} (\mu g \cdot g^{-1})$		$w (^{187}Os) (ng \cdot g^{-1})$		模式年龄 Ma	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
120209-19	HLP	0.01001	262.0	2.1	606.4	5.1	220.7	3.1
	GBW04435 (HLP)		283.8	6.2	659.0	14.4	221.4	5.6

表 3 石炭铜钼矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素测试结果

Table 3 Re-Os isotopic data of molybdenites from the Shilu copper-molybdenite deposit

原样名	样重/g	$w(Re) (\mu g \cdot g^{-1})$		$w(\text{普 Os}) (ng \cdot g^{-1})$		$w(^{187}Re) (\mu g \cdot g^{-1})$		$w(^{187}Os) (ng \cdot g^{-1})$		模式年龄/Ma	
		测定值	2 δ	测定值	2 δ	测定值	2 δ	测定值	2 δ	测定值	2 δ
SL-30	0.01033	108.1	0.80	0.2572	0.12	67.94	0.52	117.8	1	104.0	1.5
SL-31	0.01058	85.18	0.63	0.0253	0.11	53.54	0.40	93.12	0.93	104.3	1.5
SL-7	0.01018	218.9	0.16	2.8523	0.14	137.59	0.10	239.3	2.1	104.3	1.5
SL-11	0.01034	536.1	0.45	0.2237	0.04	33.69	0.28	58.75	0.54	104.6	1.5
SL-25	0.01026	121.4	0.97	0.1715	0.07	76.28	0.61	132.97	1.1	104.5	1.5
SL-10	0.01055	60.24	0.52	0.0066	0.02	37.86	0.32	79.7	0.6	126.2	1.8

矿的模式年龄计算采用公式 $t = [\ln (1 + ^{187}Os / ^{187}Re)] / \lambda$, 其中衰变常数 λ 值为 $1.666 \times 10^{-11} / a^{16}$ 。

4 测试结果

从石炭辉钼矿样品详细的分析结果(表 2)可以看出,1 件辉钼矿呈浸染状产出的样品 (SL-10) 中 Re 的含量为 60.24×10^{-6} , 略低于其他石英脉型样品辉钼矿 Re 的含量 ($(85.18 \pm 0.63) \times 10^{-6} \sim (218.90 \pm 0.16) \times 10^{-6}$), 两种产状辉钼矿中 Re 含量变化均与斑岩矽卡岩 Cu、Mo 系统 Re 丰度相当^[7]。1 件矽卡岩中的辉钼矿模式年龄为 $(126.2 \pm 1.8) Ma$, 远高于石英脉中辉钼矿的 Re-Os 模式年龄,; 其余 5 件石英-辉钼矿的样品模式年龄一致, 为 $(104 \pm 1.5) Ma \sim (104.6 \pm 1.5) Ma$ 。用 ISOPLOT 软件对所获得的 5 件石英辉钼矿数据进行等时线计算, 取 ^{187}Re 衰变常数 $1.666 \times 10^{-11} a^{-1}$, 得到的等时线年龄为 $(104.1 \pm 1.3) Ma$, 与单样品辉钼矿的模式年龄几乎一致, 5 件石英辉钼矿样品的加权平均值为 $(104.34 \pm 0.66) Ma$ 。初始 ^{187}Os 值为 $(200 \pm 1.2) \times 10^{-6}$ (图 4), 为阳春石炭矽卡岩型铜钼矿床提供了一个高精度的矿床形成时代, 表明该矿床形成于早白垩世晚期。

5 讨论

5.1 石炭矿床的成矿时代

石炭矿床矽卡岩矿体产在侵入岩与石炭系碳酸

盐岩的接触带上, 并环绕岩体分布(图 2), 说明矿体与花岗闪长岩密切相关, 故成矿作用与相关岩体的侵入时间近于同时, 或略滞后。然而, 前人获得的成岩 $(122 \pm 1 Ma)$ 与成矿年龄 $(89 Ma)$ 相差很大^[9-10], 且由于测试方法的局限可信度不高。于津生等^[8]获得了石炭岩体中黑云母、钾长石和斜长石三种矿物非常一致的 $^{39}Ar-^{40}Ar$ 坪年龄 $(99 \sim 101) Ma$, 认为 $100 Ma$ 代表了石炭岩体的形成年龄, 但李献华^[3]认为 $100 Ma$ 坪年龄可能代表了后期热扰动事件年龄。本次通过 5 件呈脉状产出的辉钼矿 Re-Os 同位素测试, 获得较一致的等时线年龄和模式年龄的加权平均值, 分别为 $(104.1 \pm 1.3) Ma$ 和 $(104.34 \pm 0.66) Ma$ 。1 件浸染状矽卡岩型矿石的模式年龄为 $(126.2 \pm 1.8) Ma$, 大于 5 件辉钼矿化石英脉的相应值, 与矽卡岩型矿石被后期石英辉钼矿脉穿切的地质事实相吻合。但是, 作为与同一岩体有关的成矿作用, 两期矿化作用存在 $20 Ma$ 的时差显然不甚合理。本次获得的浸染状矽卡岩型矿石的模式年龄与前人获得石炭岩体侵入年龄 $(122 \pm 1 Ma)$ ^[9] 相近, 这是否说明区内存在与另一个岩体 (约 $120 Ma$) 有关的两期钼矿化作用? 还是测试结果存在误差, 需要进一步研究。5 件辉钼矿化石英脉获得较一致的 Re-Os 等时线年龄和模式年龄, 与石炭花岗闪长岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄 $(107 \pm 0.72 Ma)$ 相近 (另文发表)。因此, 笔者认为本次获得辉钼矿的 (104.1 ± 1.3)

Ma 的等时线年龄可以代表石棗铜钼矿床的形成年龄,说明矿区成岩成矿作用均发生在早白垩世晚期。

5.2 区内成岩成矿作用

阳春盆地是粤西云开地区多金属矿床(点)的集中发育地区之一,即发育了钨锡多金属矿床,又存在铜铁、铅锌等元素矿化,矿化多与区内大规模的岩浆作用密切相关,而不同金属元素矿化的时间关系不明确。

20 世纪 80 年代,前人将阳春盆地内与矿床有关的岩体分为“岗尾—石棗”型和“小南山—锡山型”。石棗花岗闪长岩与区内马山二长岩体,岗尾、轮水黑云二长花岗岩体,黑石岗花岗闪长岩体等被统归为与铁铜矿化有关的 I 型花岗岩。但是李献华等^[9]对比分析了石棗岩体和马山岩体、岗尾岩体的地球化学特征,发现他们在岩石化学演化趋势上存在显著的差异,故认为将这些岩体笼统的划分成“岗尾—石棗”型,不能反映出岩体之间的差异。从成岩成矿时代上,马山岩体角闪石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $(163.6\pm 2.0)\text{Ma}$,岗尾岩体的 Rb-Sr 同位素年龄为 $(154\pm 1)\text{Ma}$,与二者有关的芒鹅岭、坡头面、地豆岗等铜铁矿床的成矿时间应与其相近,推测铜铁矿形成于中晚侏罗世,属于华南中侏罗世岩浆活动大爆发 $(160\sim 150\text{Ma})$ ^[18-19]的一部分。本文所获得的石棗铜钼矿辉钼矿样品的 Re-Os 等时线年龄为 $(104.1\pm 1.3)\text{Ma}$,而成矿相关的花岗闪长岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为 $(107\pm 0.72)\text{Ma}$ (另文发表),属于早白垩世,与位于其北东方向的天堂矽卡岩型铜铅锌矿床年龄相近,其闪锌矿的 Rb-Sr 等时线年龄为 $(97.87\pm 0.96)\text{Ma}$ (据郑伟,未发表资料)。从年代学角度看,石棗铜钼矿床、天堂铜铅锌矿均滞后于区内铜铁矿床约 50 Ma,且属于华南白垩纪矿化的一部分。因此,笔者认为作为华南地区侏罗纪和白垩纪花岗岩的组成部分,区内铜钼、铜铅锌矿床与铜铁矿化相关的花岗岩具有不同的地球化学特征及构造背景。

尽管中侏罗世 $(150\sim 160\text{Ma})$ 是华南地区大规模的钨锡矿化爆发期^[20-23],然而,根据现有的资料,阳春盆地及其邻区的钨锡矿床可能更集中于晚白垩世。如阳春脉状锡矿为 76Ma ^[8],银岩斑岩锡矿 90Ma ^[9],罗定盆地北东缘的大金山石英脉型钨锡矿辉钼矿的 Re-Os 加权平均年龄为 $(82.5\pm 3.1)\text{Ma}$ (余长发,未发表资料)。中侏罗世本区形成了一系列伴有铜铁矿化的花岗岩,如岗尾 $(154\pm 1\text{Ma})$ 和马山岩体

$(163.6\pm 2.0\text{Ma})$,与其有关的包括芒鹅岭、坡头面、地豆岗、黑石岗铁铜矿床。尽管这些矿床缺乏精确的年龄,但是根据相关岩体的年龄可以推测其是中侏罗世的产物。在盆地的北部新发现了此时期的圆珠顶大型斑岩铜钼矿床,其辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 $(155.6\pm 3.4)\text{Ma}$ ^[24]。此后,晚白垩世时,区内又形成了包括石棗铜钼、天堂铜(钼)铅锌矿床等多金属矿床(Rb-Sr 等时线年龄为 $(97.87\pm 0.96)\text{Ma}$,据郑伟,未发表资料)。由此可见,区内不同矿化元素形成的时间从早到晚为:铜铁-铜(钼)铅锌-钨锡,多种矿化元素在本区集中发育可能说明区内经历了强烈的壳幔相互作用,且在这个过程中与矿化有关的花岗岩从偏中性到酸性演化。

5.3 成矿背景

粤西地区远离太平洋板块向欧亚大陆板块的俯冲带,但晚中生代以来该地区的岩石圈动力学演化仍受控于这两大板块的相互作用。那么,具体是什么样的地球动力学背景形成了粤西白垩纪石棗铜钼矿床。宏观上,135 Ma 之后,由于太平洋板块向华南板块俯冲的板片运动方向发生改变,导致华南地区大规模的岩石圈伸展,相应的绝大多数不同来源的矿产资源聚集在火山盆地和断陷盆地内^[1]。区域上,粤西白垩纪断陷盆地发育,如罗定盆地,阳春盆地、怀集盆地等,也是多金属矿产的聚集地。地层学上,区内白垩系陆相沉积地层普遍沿基底发生滑覆作用,如罗定盆地下白垩统沿基底接触面由南向北滑覆。岩石学方面,李献华等^[25]认为粤北地区侵位于 $103\sim 110\text{Ma}$ 的基岩脉为整个东南地区早白垩世晚期 $(105\pm 5\text{Ma})$ 张性环境的证据。侵入岩除与石棗矿床相关的花岗闪长岩外,德庆二长花岗岩岩体的锆石 U-Pb 年龄为 $(99\pm 2)\text{Ma}$,调村花岗闪长岩的 U-Pb 年龄为 $(104\pm 3)\text{Ma}$ ^[26],白岗花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(106.4\pm 0.7)\text{Ma}$ ^[27]。此外,区内同期火山岩也有发育,包括马鞍山和周公顶流纹英安岩,锆石 U-Pb 同位素年龄分别为 $(100\pm 1)\text{Ma}$ 。这些侵入-火山岩与浙闽沿海同期中酸性火成岩有相似的地球化学特征,说明均形成于一致的伸展环境^[27]。李献华等^[9]厘定出区内中侏罗世马山、岗尾岩体属于板内钾玄质侵入岩,表明该区自侏罗纪发生了软流圈地幔上涌、岩石圈伸展和裂谷作用。粤北南雄断裂带拉伸剥离正断层活动开始于早白垩世 $(117.3\pm 2.7\text{Ma})$,强烈的伸展变形韧性剪切发生在早白垩世末—晚白垩

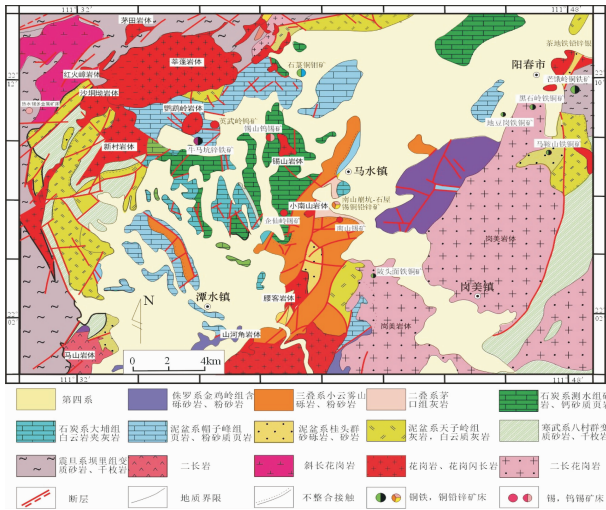


图 4 石垌铜钼矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素等时线图
Fig.4 Re-Os isochron diagram of molybdenites from the Shilu deposit in western Guangdong Province

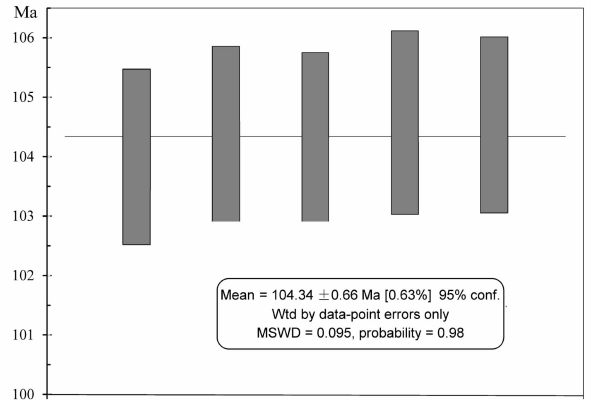


图 5 石垌铜钼矿床辉钼矿的 ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os 年龄加权平均图
Fig.5 Weighted average of ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os model age of molybdenites from the Shilu deposit in western Guangdong Province

世初(94.6±0.4 Ma),为判断白垩纪岩石圈伸展作用提供了断裂活动的热年代学制约^[2]。蔡明海等^[3]认为云开地区中生代岩石圈构造经历了 201~ 277 Ma 之间的碰撞挤压、154~ 163 Ma 之间由挤压到伸展的构造转换及 80~120 Ma 之间拉张伸展 3 个阶段的构造演化过程。可见,岩石圈的拉张伸展环境是包括粤西在内的整个华南地区白垩纪的地球动力学背景^[18-19,29-30],说明拉张环境有利于岩体的侵位和矿床的形成。

致谢:在野外工作期间得到广东有色金属地质局相关人员的大力支持与协助,审稿人对本文提出了建设性的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

参考文献 (References):

[1] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5):636-658.
Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, et al. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5):636-658(in Chinese with English abstract).

[2] 蔡明海, 战明国, 彭松柏, 等. 云开地区中生代成矿地质背景及成矿动力学机制研究[J]. 矿床地质, 2002, 21(3):254-269.
Cai Minghai, Zhan Mingguo, Peng Songpai, et al. Study of Mesozoic metallogenic geological setting and dynamic mechanism in Yunkai area[J]. Mineral Deposit, 2002, 1(3):254-269 (in Chinese with English abstract).

[3] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义-I. 岩石学和同位素地质年代学[J]. 地球化学, 2000, 29

(6):513-520.
Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Ying, et al. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: I. Petrology and isotope geochronology[J]. Geochimica, 2000, 29 (6):513-520 (in Chinese with English abstract).

[4] 吴剑, 曾小华. 广东省阳春市南山崩坑—石屋铅锌铜锡矿床地质特征[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(3):201-208.
Wu Jian, Zeng Xiaohua. Geological characteristics of Nanshan Bengkeng-Shiwu lead-zinc-copper-tin deposit in Yangchun City, Guangdong Province [J]. Resources Environment and Engineering, 2011, 25 (3):201-208 (in Chinese with English abstract).

[5] 马大铨, 赵子杰, 林惠坤. 广东阳春盆地岗尾-石垌花岗岩类中包体的岩石特征及其成因 [J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所刊, 1985, 10:59-72.
Ma Daquan, Zhao Zijie, Lin Huikun. Petrologic features and genesis of xenoliths in Gangwei and Shilu type granitoids from Yangchun basin, Guangdong Province [J]. Bulletin of the Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1985, 10:59-72 (in Chinese with English abstract).

[6] 张兴奇. 阳春石垌(钼)矿床成因类型及成矿作用的探讨[J]. 化学工程与装备, 2008, 10:62-65.
Zhang Xingqi. The discussion on genetic type and mineralization of Shilu Cu-Mo deposit in Yangchun basin [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2008, 10:62-65 (in Chinese with English abstract).

[7] 孙宝德, 湛厚成, 成功. 广东阳春石垌铜矿地质特征与成矿规律 [J]. 西部探矿工程, 2008, 5:106-109.
Sun Baode, Chen Houcheng, Chen Gong. Geological characteristics and metallogenic regularity of Shilu copper deposit, Yangchun in Guangdong Province [J]. West-China Exploration Engineering,

- 2008, 5:106-109(in Chinese with English abstract).
- [8] 于津生, 桂训唐, 李培忠. 广东阳春盆地花岗岩类同位素、微量元素地球化学研究[J]. 广东地质, 1988, 13:1-10.
- Yu Jinsheng, Gui Xuntang, Li Peizhong. The research on isotope and trace element geochemistry of granitoids in Yangchun basin, Guangdong Province [J]. Guangdong Geology, 1988, 13:1-10 (in Chinese with English abstract).
- [9] 翟裕生, 邓军, 李晓波等. 区域成矿学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999, 122-125.
- Zhai Yusheng, Deng Jun, Li Xiaobo et al. Essentials of Metallgeny [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1999:122-125 (in Chinese with English abstract).
- [10] 赵子杰, 马大铨, 林惠坤, 等. 广东阳春地区两类花岗岩类的铷-锶、氧同位素组成及其成因探讨[J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 1985, 10:89-97.
- Zhao Zijie, Ma Dashuan, Lin Huikun, et al. Rb-Sr and O isotope characterisitc and genesis of two tpye granites in Yangchun distict, Guangdong province [J]. Bulletin of the Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1985, 10:89-97(in Chinese with English abstract).
- [11] 浦志伟. 华南成矿带阳春断陷盆地岩浆岩岩石化学数据的统计分析及其成因解释[J]. 地质论评, 1988, 34(6):544-551.
- Pu Zhiwei. A statistical analysis of the petrochemical data of the magmatic rocks in the Yangchun downfoulted of the south China metallogenic belt and their genetic interppetation [J]. Geological Reviews. 1988, 34 (6):544-551 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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 Nova, 2001,13:479-486.
- [13] 李超, 杜安道, 屈文俊. 大颗粒辉钨矿 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, Du Andao, Ju Wenjun. Decoupling of Re and Os and migration model of ^{187}Os in coarse-grained molybdenite[J]. Mineral deposit, 2009, 28(5):707-712.
- [14] Shirey SB and Walker RJ. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis [J]. Analytical Chemistry, 67: 2136-2141.
- [15] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, et al. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC1[J]. Geostand Geoanal. Res., 2004, 28:41-52.
- [16] Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites [J]. Science. 1996, 271:1099-1102.
- [17] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shannxi Province, China[J]. Economic Geology, 1997, 92:827-835.
- [18] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2329-2338.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(10):2329-2338(in Chinese with English abstract).
- [19] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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, 2008, 14(4):510-526.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4):510-526(in Chinese with English abstract).
- [20] 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 等. 华南地区中生代主要金矿床模型[J]. 地质论评, 2009, 55(3):347-354.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Cheng Yanbo, et al. Mineral deposit models of Mesozoic ore deposits in South China [J]. Geological Review, 2009, 55(3):347-354(in Chinese with English abstract).
- [21] Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, et al. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tinpolymetallic deposit (Hunan, South China) [J]. Mineralium Deposita, 2008, 43:375-382.
- [22] Yuan S D, Peng J T, Hao S, et al. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43: 235-242.
- [23] 袁顺达, 张东亮, 双燕, 等. 湘南新田岭大型钨钼矿床辉钨矿 Re-Os 同位素测年及其地质意义 [J]. 岩石学报, 2012, 28(01): 28-37.
- Yuan Shunda, Zhang Dongliang, Shuang Yan, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Xintianling giant tungsten-molybdenum deposit in southern Hunan Province, China and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(1):27-38 (in Chinese with English abstract).
- [24] 钟立峰, 夏斌, 刘立文, 等. 粤西-桂东成矿带园珠顶铜钨矿床成矿年代学及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 29(3):395-404.
- Zhong Lifeng, Xia Bin, Liu Liwen, et al. Metallogenic geochronology of Yuanzhuding Cu-Mo deposit in western Guangdong-eastern Guangxi metallogenic belt and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 29(3):395-404(in Chinese with English abstract).
- [25] 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. 地球化学, 1997, 26(2):14-31.
- Li Xianhua, Hu Ruizhong, Rao Bing. Geochronology and geochemistry of cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China [J]. Geochimica, 1997, 26 (2):14-31 (in Chinese with English abstract).
- [26] 耿红燕, 徐夕生, Reilly S Y O', 等. 粤西白垩纪火山-侵入岩岩浆活动及其地质意义[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(7):601-617.
- Geng Hongyan, Xu Xisheng, Reilly S Y O', et al. The Cretaceous volcanic and intrusion in Western Guangdong Province, and their

- geological implication[J]. *Science in China(D Series)*, 2006, 36(7): 601-617.
- [27] 高剑峰, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 粤西连阳复式岩体的地球化学特征及其成因研究[J]. *岩石学报*, 2005, 21(6):1645-1656.
Gao Jianfeng, Ling Hongfei, Sheng Weizhou, et al. Geochemistry and petrogenesis of Liangyang granite composite, west Guangdong province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(6):1645-1656(in Chinese with English abstract).
- [28] 李出安, 邹和平. 广东南雄断裂带 Ar-Ar 年龄及其地质意义. *中山大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(1):129-137.
Li Chuan, Zou Heping. The Ar-Ar Age of the Nanxiong Fault Zone in Guangdong Province and Their Geological Significance[J]. *Acta Scientiarum Naturalium University Sunyatseni*, 2011, 50(1): 129-137(in Chinese with English abstract).
- [29] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. *地质前缘*, 2004, 11(1):45-55.
Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, et al. Mesozoic large-scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1):45-55.
- [30] 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 等. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. *矿床地质*, 2007, 26(2): 139-152.
Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, et al. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(2):139-152(in Chinese with English abstract).

Re-Os dating of molybdenite from the Shilu Cu(Mo) deposit in western Guangdong Province and its geological implications

ZHAO Hai-jie^{1,2}, ZHENG Wei³, YU Zhang-fa³, HU Yao-guo⁴, TIAN Yun⁵

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Guangdong Geological Survey, Guangdong, Guangzhou 510080, China; 5. Guangdong Nonferrous Metal Geological Bureau, Guangdong, Guangzhou, 510080, China)

Abstract: Located in Yangchun basin of western Guangdong Province, the Shilu deposit has developed oxidized Cu and skarn Cu-Mo ore bodies. The skarn ore body genetically is associated with the Shilu granodiorite. Direct Re-Os dating of molybdenite collected from the skarn ore bodies in the Shilu deposit was carried out to better understand the age of mineralization. The results show that the five molybdenite samples from quartz-vein-type ore have ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os model ages ranging from (104±1.5) Ma to (104.6±1.5)Ma, with an average of (104.34±0.66) Ma and an isochron age of (104.1±1.3)Ma, consistent with the age of the related granodiorite (107±0.72Ma), which implies that the mineralization took place in the early Cretaceous. Based on previous studies, it is suggested that the Shilu skarn Cu-Mo deposit was formed later than 50Ma when the Jurassic Cu-Fe deposits in Yanchun basin were generated, thus belonging to the large-scale Cretaceous mineralization in South China. It was formed in a lithosphere extension tectonic setting, which was different from the setting of the Jurassic Cu-Fe deposits in this area.

Key words: molybdenite; Re-Os isotopic dating; copper-molybdenum deposit; skarn; Shilu

About the first author: ZHAO Hai-jie, female, born in 1982, doctor, assistant researcher, majors in mineralogy, petrology and mineral deposits; E-mail: zhaohaijie_610@163.com.