

广东潮安飞鹅山钨钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年

李海立¹⁾, 肖惠良^{1,2)}, 范飞鹏²⁾, 陈乐柱²⁾, 刘建雄³⁾, 陈叙涛⁴⁾

1) 中国地质科学院, 北京, 100037; 2) 南京地质调查中心, 南京, 210016;
3) 广东省佛山地质局, 广东佛山, 528000; 4) 广东省第二地质大队, 广东汕头, 515000

内容提要:广东潮安飞鹅山钨钼多金属矿床是近年来在粤东地区新发现具有重要找矿远景的矿床之一。区内燕山期岩浆活动强烈, 断裂构造活动频繁。飞鹅山钨钼多金属矿体主要赋存于燕山期花岗岩及云英岩中, 主要矿床类型有石英脉型和云英岩型两种, 石英脉型矿体主要受北东向及近南北向断裂构造控制, 云英岩型矿体则主要受云英岩化蚀变控制。本次通过对该矿床矿体中 6 个辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试分析, 获得了 Re-Os 模式年龄为 136.5~142.3Ma,¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os 等时线年龄为 142.6±6.3Ma, MSWD 的值为 1.9, 加权平均年龄为 139.4±2.2Ma, MSWD 的值为 4.0。分析结果表明该矿床的成矿时代与区域成矿事件相吻合; Re/Os 比值(>4) 及 Re 同位素含量(0.07×10⁻⁶~0.12×10⁻⁶) 指示了成矿物质来源于地壳, 矿床为燕山早期第三阶段重熔花岗岩分异演化与期后热液共同作用的产物。

关键词:Re-Os 同位素年龄; 辉钼矿; 成矿年龄; 钨钼矿床; 飞鹅山; 广东潮安

粤东地区位于中国东南沿海武夷成矿带的南段, 属环太平洋成矿域, 成矿地质条件优越, 是世界著名的钨、锡、钼、银、铜(金)多金属矿集区, 也是我国找矿勘查的重点和热点地区之一(Xiao Zhenyu et al., 1988; Yue Shucang et al., 1989; Xu Xiaochun et al., 2000), 飞鹅山钨钼多金属矿床是该区近年来新发现的矿床。区内岩浆岩广泛发育, 钨钼矿床的形成与该区中生代花岗岩密切相关。区内构造活动频繁, 主要表现为陆升和断裂活动, 中侏罗世形成许多断陷盆地, 到晚侏罗世燕山运动达到高潮, 以强烈的断裂作用和岩浆活动为特征, 断裂活动不仅使原有的深断裂带复活, 而且形成新的 NE、NW 及近南北向的深、大断裂, 沿深大断裂带形成了大面积的花岗岩侵入体, 对矿床的形成起到了决定性作用(Mao Jingwen et al., 2007; Li Xiaofeng et al., 2008; Shu Liangshu et al., 2012)。

由于飞鹅山钨钼多金属矿床尚处于找矿普查阶段, 该矿床的成矿地质特征、成矿时代、成矿规律、矿床成因和找矿标志等方面的研究尚未进行, 本次就飞鹅山钨钼多金属矿床的地质、地球化学等方面进

行研究, 旨在为飞鹅山钨钼多金属矿床进一步深入勘查评价提供决策依据。近年来, 辉钼矿 Re-Os 同位素测年技术已成为用来直接测定不同类型钼矿床和含钼矿床成矿年龄的有效方法(Du Andao et al., 2009; Li Yongfeng et al., 2004; Yao Junming, 2007; Chen Xuanhua et al., 2010; Zhang Da et al., 2010; Liang Qingling et al., 2012; Guo Chunli et al., 2014; Meng Xiangjin et al., 2012;)。辉钼矿是飞鹅山矿区的常见矿物, 辉钼矿与矿石矿物共生, 其形成时间可以代表矿床的成矿时间。本文利用辉钼矿 Re-Os 同位素定年法, 对飞鹅山钨钼多金属矿床的成矿年龄进行准确厘定, 对矿床的形成时代、成矿物质来源和形成机理进行初步探讨, 并通过与区域内其他矿床进行对比研究, 阐述其地质意义, 为指导该区找矿勘查提供科学依据。

1 区域地质背景与样品采集

飞鹅山钨钼多金属矿床地处武夷成矿带的南段, 中生代断陷火山岩盆地东南边缘, 区域性北东向莲花山深大断裂带的南东侧, 普宁-潮州断裂带的

注: 本文为广东厚婆坳铜锡多金属矿整装勘查区关键性基础地质研究之找矿预测模型与找矿预测研究之找矿预测模型构建与找矿预测研究专题(项目编号: 12120114015701)项目资助的成果。

收稿日期: 2015-07-10; 改回日期: 2015-12-06; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 李海立(1990—), 男, 硕士研究生, 矿床地球化学专业; Email: njlihai1@163.com。通讯作者: 肖惠良(1963—), 男, 研究员, 长期从事矿产勘查、矿床及矿床地球化学研究。通讯地址: 210016, 江苏省南京市秦淮区中山东路 534 号; Email: njxhliang@163.com。

北西侧(图 1)。区内出露有中生代砂泥质沉积建造及燕山期侵入岩,地层主要为三叠系、侏罗系和第四系砂泥质陆相沉积岩,侵入岩主要为燕山期二长花岗岩、黑云母花岗岩、石英二长岩和细粒花岗岩等。区域断裂构造发育:主要有北东向、北西向、近南北向及层间挤压破碎带等断裂。

矿区出露地层简单,主要有三叠系、侏罗系地层。下三叠统一上侏罗统银瓶山组(T_3-J_1y)岩性以灰黑色厚层状砂岩和泥质粉砂岩为主,粉砂质泥岩、炭质页岩次之,夹细粒石英砂岩、长石石英砂岩和泥质粉砂岩;下侏罗统金鸡组(J_1j)岩性以砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩为主,为一套海陆交互相细碎屑岩建造;下侏罗统上水龙组(J_1sl)岩性以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩夹细砂岩为主,偶夹蚀变长石砂岩,底部见厚数米至数十米的石英砂岩;下侏罗统长埔

组(J_1c)岩性为灰黑色粉砂质砂岩夹泥质粉砂岩、石英砂岩及层状蚀变长石砂岩。

矿区内燕山期岩浆活动强烈,侵入岩主要为燕山期二长花岗岩、黑云母花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩及酸性岩脉等,岩体中 W、Mo、Sn、Cu、Pb、Zn 等成矿元素含量较高(Tu Junqiao et al., 2014),为岩浆期后热液矿床的形成提供了丰富的物质来源。二长花岗岩岩体呈岩株状产出,块状构造,长石类型包括碱性长石及斜长石;花岗斑岩岩体厚 3~5m,白色,多为斑状结构,块状构造,斑晶由石英、钾长石、斜长石和黑云母等组成,自形程度高,粒径在 0.3~2mm 之间,其中钾长石呈自形板状,泥化显著,斜长石呈自形长板柱状,绢云母化黑云母呈片状集合体。此外,花岗岩脉、石英斑岩脉、闪长岩脉、闪长玢岩脉、伟晶岩脉等发育。多期多金属矿化与频繁的岩

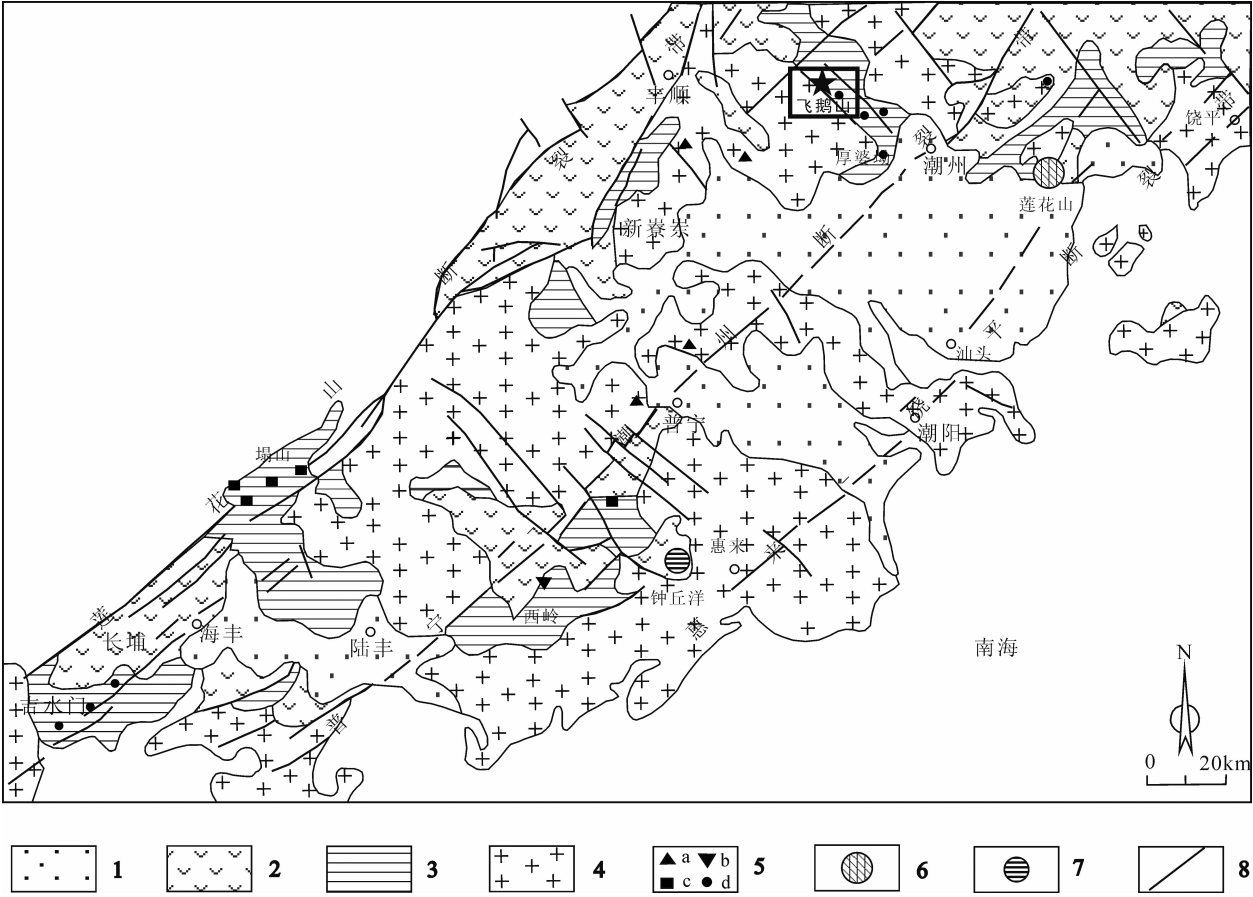


图 1 粤东地区地质简图(Xu Xiaochun et al., 1999 修改)

Fig. 1 Schematic regionalgeological map of eastern Guangdong province (modified after Xu Xiaochun et al. 1999)

1—第四系;2—晚侏罗世火山岩;3—上三叠统一下侏罗统沉积岩;4—中生代花岗岩;5—钨锡钼多金属矿床;a—云英岩型;b—石英脉型;c—硅酸盐型;d—硫化物型;6—钨矿床;7—铜矿床;8—断裂

1—Quaternary; 2—Late Jurassic volcanic rock; 3—Upper Triassic-Lower Jurassic sedimentary rock; 4—Mesozoic granite; 5—Tungsten-Tin-Molybdenum polymetallic ore deposit; a—greisen type; b—quartz vein type; c—silicate type; d—sulfide type; 6—tungsten deposit; 7—copper deposit; 8—fault

浆活动关系密切。岩体外接触带常见有角岩化和绢云母化,内带有硅化、绿泥石化、黄铁矿化和云英岩化等。蚀变矿物主要为绿泥石、水云母、绢云母、次生黑云母等,副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿等。

燕山期二长花岗岩、黑云母花岗岩和花岗斑岩、石英斑岩等岩体与成矿有关,具有高硅($\text{SiO}_2 > 71\%$),富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 7.0\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 $1.49 \sim 1.52$),Sn,W,Mo,Pb,Zn,F,Cl 等微量元素含量高等地球化学特征,同位素年龄集中于 $90 \sim 160\text{Ma}$ (Cao Jianjin et al., 1996)。区内断裂构造发育,与区域性构造具有一致性,发育北东向、北北西向、近南北向及层间挤压破碎带等断裂(图 2),其中北东向和近南北向断裂为主要的控矿和容矿构造。

飞鹅山钨钼多金属矿床矿化主要为石英脉型钨钼矿和云英岩型钨钼矿两种。石英脉型钨钼矿在空间上受近南北向断裂带控制,矿体赋存于外接触带 $1 \sim 2\text{km}$ 范围内的变质粉砂岩、砂岩及内接触带的花岗岩中,主要矿石矿物有黑钨矿、辉钼矿、锡石、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂等,脉石矿物有石英、方解石、绿泥石等,近矿围岩蚀变有硅化、绿泥石化、绢云母化等。云英岩型钨钼矿体赋存于花岗岩体顶部岩突部位的内接触带中,主要矿石矿物有黑钨矿、辉钼矿、黄铁矿、锡石、磁黄铁矿等,脉石矿物有石英、云母、萤石、黄玉等,围岩蚀变有云英岩化、硅化等。

本文所采辉钼矿样品位于一条近南北向的矿脉中,采样位置见图 2,矿物产于云英岩裂隙的石英脉中(见图 3),辉钼矿呈团块状、囊状、浸染状等产出,矿体围岩为硅化强烈的云英岩或花岗岩。采得样品后,在室内无污染环境下,首先对所采样品进行筛选碎样,保证每件样品纯度均高于 99% ,然后再用玛瑙研钵研磨至 200目 。

2 分析方法及测试结果

测试在中国地质科学院国家地质测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,其中分析方法、分离步骤、同位素稀释、等离子体质谱技术和质谱测定等与 Du Andao et al. 1993; 1994; 2004; 2009; Qu Wenjun et al., 2003; 2004; Li Chao et al., 2009; 2010; Zhou Limin et al., 2012; 等参考文献一致,其分析流程现简述如下:

(1)分解样品:准确称取 0.4g 待分析样品,通过细颈漏斗加入到 Carius 管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶,一般规格容积约 30mL)底部。缓慢加液氮到

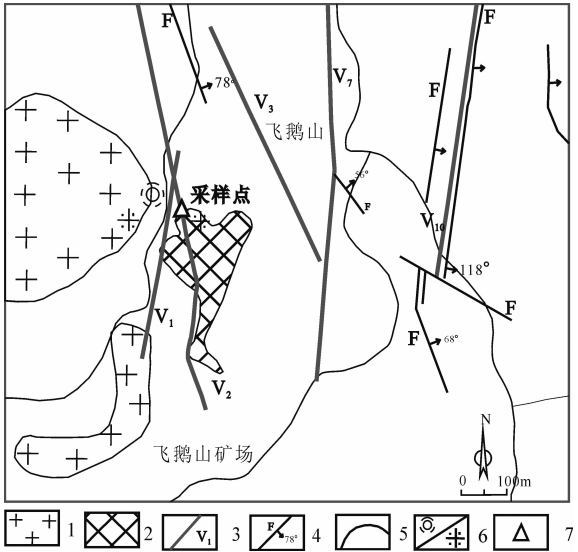


图 2 广东潮安飞鹅山矿区地质及采样位置图
(项目实测,2014 改)

Fig. 2 Geology map and molybdenite samples' locations of Fei'eshan polymetallic deposit in Chao'an Guangdong (Modified after actual measurement, 2014)

1—燕山期花岗岩;2—云英岩型钨钼多金属矿体;3—石英脉型钨钼多金属矿脉;4—断层及其产状;5—地质界线;6—硅化、云英岩化;7—采样点
1—Yanshanian granite;2—Greisen type tungsten and molybdenite polymetallic ore body;3—Granite type tungsten and molybdenite polymetallic ore veins;4—fault and its occurrence;5—geological boundaries; 6—silicification & greisenization; 7—samples' locations

有半杯乙醇的保温杯中,使成粘稠状($-50 \sim -80^{\circ}\text{C}$)。用适量超纯浓 HCl ($2 \sim 3\text{mL } 10\text{mol/L}$)通过细颈漏斗把准确称取的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 混合稀释剂转入 Carius 管底部。再依次加入适量硝酸($4 \sim 5\text{mL } 16\text{mol/L}$)和 $30\% \text{H}_2\text{O}_2$ 。当 Carius 管底溶液冻实后,用液化石油气和氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。擦净表面残存的乙醇,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 (辉钼矿)保温 24h 。取出,冷却后在底部冻实的情况下,先用细强火焰烧熔 Carius 管细管部分一点,使内部压力得以释放。

(2)直接蒸馏分离 Os:将溶好冰冻的 Carius 管在细颈处打开,蒸馏前放在冰水浴中回温后,加入相当样品溶液 1.5 倍体积左右的超纯水,把事先准备好的穿有两根 Teflon 细管(内径 0.5mm ,外径 0.9mm)的胶头套在 Carius 管的细颈部分。吸收管内装有 $1.5 \sim 5\text{mL}$ 超纯水(冰水浴)吸收蒸馏出的 OsO_4 。为了防止由于往 Carius 管内加水引起管内

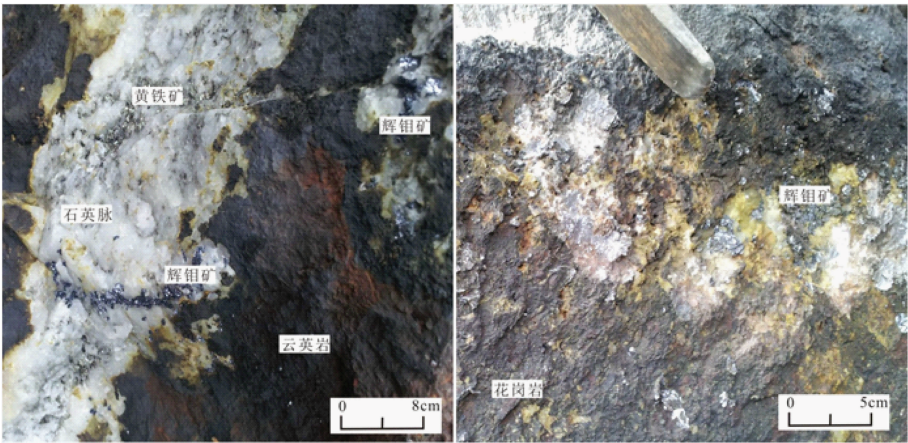


图 3 广东潮安飞鹅山矿床辉钼矿野外照片

Fig. 3 The molybdenite samples' pictures of Fei'eshan polymetallic deposit in the field in Chao'an Guangdong

溶液先热后冷而导致吸收管内溶液倒吸入 Carius 管内,先把 Teflon 排气管插入吸收管内溶液液面之上,把 Carius 管插入盖上有洞的电蒸笼中,送气管插入 Carius 管内溶液底部,气路通畅后再将排气管插进吸收管吸收液底部,电蒸笼蒸汽 100℃ 加热 40~60min。所得 OsO₄ 水吸收液可直接用于 ICPMS 测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液转入 150mL Teflon 烧杯中待分离铼。

(3)萃取分离 Re:将蒸馏残液置于电热板上,加热蒸干。加少量水,加热蒸干。重复两次以降低酸度。根据样品量加入 4~10mL 10mol/L NaOH(如果碱化后沉淀量过多,可适当增加 NaOH 用量),稍微加热,促进样品转为碱性介质。转入 Teflon 离心管中,加入 4~10mL 丙酮,振荡 1min。萃取 Re。离心后,用滴管直接取上层丙酮相到 150mL 已加有 2mL 水的 Teflon 烧杯中,在电热板上 50℃ 加热除

去丙酮,然后电热板温度升至 120℃ 加热至干,加数滴浓硝酸和 30% 过氧化氢,加热蒸干以除去残存的 Os。用数滴浓 HNO₃ 溶解残渣,用水转移到小瓶中,稀释到适当体积,用 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。

(4)质谱测定:采用美国 TJA 公司生产的电感耦合等离子体质谱仪 TJAX-seriesICP-MS 测定同位素比值。对于 Re-Os 含量很低的样品采用美国热电公司 (ThermoFisherScientific) 生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪 HR-ICP-MSElement2 进行测量。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。

所用仪器有电感耦合等离子体质谱仪 TJAX-seriesICP-MS、ThermoFisherScientific 高分辨电感耦合等离子体质谱仪 HR-ICP-MSElement 等,所得数据如下。

表 1 广东潮安飞鹅山矿区辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄数据

Table 1 Re-Os model ages for molybdenite samples from the Fei'eshan polymetallic deposit in Chao'an Guangdong

原样名	样重(g)	Re($\times 10^{-6}$)	普通 Os($\times 10^{-9}$)	^{187}Re ($\times 10^{-6}$)	^{187}Os ($\times 10^{-9}$)	模式年龄(Ma)
D1401-F-1	0.2029	0.1083 $\pm$ 0.0008	0.0074 $\pm$ 0.0001	0.0681 $\pm$ 0.0005	0.158 $\pm$ 0.0012	139.1 $\pm$ 2
D1401-F-2	0.20336	0.1037 $\pm$ 0.0008	0.0074 $\pm$ 0.0002	0.0652 $\pm$ 0.0005	0.1521 $\pm$ 0.0012	139.8 $\pm$ 2
D1401-F-3	0.2052	0.1238 $\pm$ 0.0009	0.0074 $\pm$ 0.0002	0.0778 $\pm$ 0.0006	0.1847 $\pm$ 0.0014	142.3 $\pm$ 2.1
D1404-F-1	0.20238	0.1136 $\pm$ 0.0008	0.0074 $\pm$ 0.0003	0.0714 $\pm$ 0.0005	0.1625 $\pm$ 0.0013	136.5 $\pm$ 2
D1404-F-4	0.20162	0.0724 $\pm$ 0.0005	0.0074 $\pm$ 0.0002	0.0455 $\pm$ 0.0003	0.105 $\pm$ 0.0008	138.4 $\pm$ 2
D1407-F-1	0.10118	0.1195 $\pm$ 0.0016	0.0184 $\pm$ 0.0027	0.0751 $\pm$ 0.001	0.1776 $\pm$ 0.0034	141.8 $\pm$ 3.6

表 2 广东潮安飞鹅山矿区 Re-Os 同位素测试空白水平

Table 2 Re-Os isotope age-dating blank background of Fei'eshan polymetallic deposit in Chao'an Guangdong

原样名	$m(\text{Re})(\times 10^{-9})$		$m(\text{普通Os})(\times 10^{-9})$		$m(^{187}\text{Os})(\times 10^{-9})$	
	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
BK	0.0024	0.0003	0.00036	0.00005	0.00002	0.00002

注:数据来源:国家地质实验测试中心分析报告(屈文俊,李超等)。

3 结果分析

根据实验过程、测试数据误差及空白水平分析,数据真实可靠。

测试获得的 6 件样品中 Re 和 Os 含量以及根据公式计算的模式年龄值见表 1,空白水平见表 2,Re-Os 等时线年龄和加权平均值见图 4、图 5。由表 1 可以看出:①辉钼矿的 Re 含量从 $0.072 \times 10^{-6} \sim 0.124 \times 10^{-6}$, ^{187}Os 含量从 $0.105 \times 10^{-9} \sim 0.185 \times 10^{-9}$;②辉钼矿 Re-Os 模式年龄集中在 $136.5 \sim 142.3\text{Ma}$ 范围内,结果集中一致,说明飞鹅山钨钼多金属矿床属于燕山期成矿。

辉钼矿中初始普通 Os 含量很低(Li Hongyan et al., 1996; Stein et al., 2001),可以认为所有的 ^{187}Os 均来自于 ^{187}Re 的 β^- 衰变(Roberta et al., 2009)。所以通过辉钼矿中 Re-Os 法测得的年龄值具有较高的可信度。其模式年龄计算公式如下:

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

其中 ^{187}Os :现在矿物中 ^{187}Os 的含量(mol/g); ^{187}Re :现在矿物中 ^{187}Re 的含量(mol/g);为了直观,实际上采用了质量浓度,即 $\times 10^{-9}$ 。这是因为 ^{187}Re 原子量 186.955765 和 ^{187}Os 原子量 186.955762 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。 ^{187}Re 衰变常数取 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$,相对不确定度为 1.02%。本次测试六件辉钼矿样品中 Re 总含量、 ^{187}Re 和 ^{187}Os 含量这三组数据各自差距不大,而且模式年龄值也相近。

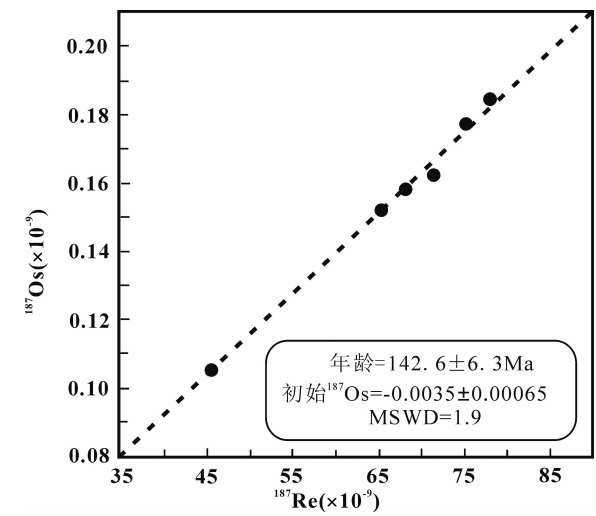


图 4 广东潮安飞鹅山矿区辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄图
Fig. 4 Re-Os isochron age of molybdenite from the Fei'eshan polymetallic deposit in Chao'an Guangdong

笔者利用 Isotope19.0 软件(Ludwig et al., 2009)对数据进行了等时线拟合(见图 3),获得等时线年龄为 $142.6 \pm 6.3\text{Ma}$,MSWD=1.9;加权平均年龄为 $139.4 \pm 2.2\text{Ma}$,MSWD=4.0(见图 4);等时线年龄、加权平均年龄及模式年龄结果集中一致,因此,该等时线年龄为飞鹅山矿床提供了一个准确的形成时限。

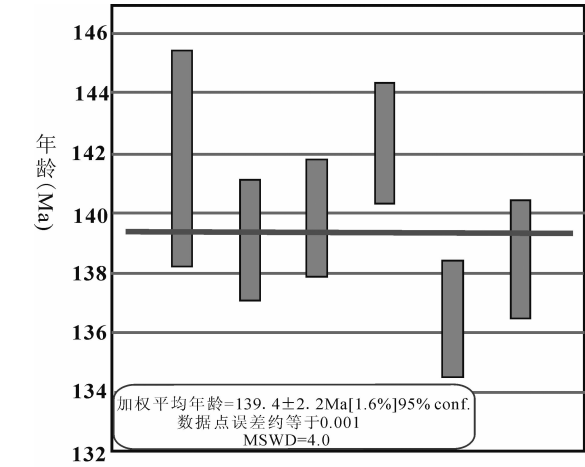


图 5 广东潮安飞鹅山矿区辉钼矿 Re-Os 模式加权平均年龄图
Fig. 5 Re-Os weighted average model ages of molybdenite from Fei'eshan polymetallic deposit in Chao'an Guangdong

4 讨论

4.1 辉钼矿 Re、Os 含量及矿床成矿物质来源

由于 Re-Os 体系封闭性好,受后期改造弱,不仅可以直接准确的测定成矿年龄。而且 Re-Os 体系是硫化物矿床形成的强有力的示踪剂。由于 Os 是高度相容元素,而 Re 是中等程度的不相容元素(Shirey et al., 1998),导致地幔与地壳的 Re/Os 比值存在较大差异,地幔 Re/Os 比值 <0.13 ,地壳的 Re/Os 比值 >1 ,而大陆地壳的 Re/Os 比值 >4 (Du Andao et al., 2009)。测试中 Re/Os 比值远大于 4,指示了其成矿物质来源于地壳。Mao Jingwen et al., (1999)通过对比国内部分辉钼矿的 Re 含量后认为从幔源、壳幔混源到壳源,Re 含量依次递降一个数量级($X \times 10^{-4} \sim X \times 10^{-6}$)。飞鹅山矿床中 Re 含量为 $0.07 \times 10^{-6} \sim 0.12 \times 10^{-6}$,指示了成矿物质来源于地壳重熔物质的特征,这与区内大规模分布的 S 型花岗岩(二长花岗岩)吻合,也与世界上其它地区的石英脉型、云英岩型矿床中较高温的(六方晶系)辉钼矿的情况是一致的。一般说来,高温型辉钼矿中 Re 的含量远低于低温型(三方晶系)辉钼矿,

两者可差 1000 倍 (Li Hongyan et al. , 1996; Wieser et al. , 2006)。并且与 I 型花岗岩有关的矿床中辉钼矿的 Re 含量要明显高于与 S 型花岗岩有关的矿床,(例如柿竹园钨锡钼铋矿床: $1.0\times 10^{-6}\sim 1.2\times 10^{-6}$ 、漳平北坑场钼矿床: $0.9\times 10^{-6}\sim 4.1\times 10^{-6}$ 、小柳沟钼矿床: $0.7\times 10^{-6}\sim 8.7\times 10^{-6}$ 等。)由此推断飞鹅山矿床的成矿物质来源以壳源为主,成矿母岩为本区燕山期二长花岗岩。这一结论与本区花岗岩多为地壳重熔作用形成的事实相吻合 (Liu Yingjun et al. , 1988)。此外,花岗岩分异演化与钨钼多金属成矿关系密切 (Chen Jun et al. , 2008; Xiao Huiliang et al. , 2013),从飞鹅山钨钼多金属矿床矿脉围岩、控矿构造、成矿物质来源、围岩蚀变以及矿脉的赋存状态来看,矿床形成于岩浆侵位后,在造岩矿物的结晶和挥发组份的向上运移和富集过程中,岩浆完成了从熔体逐渐向熔体—溶液和汽化

的过渡。随着温度、压力的降低,矿石矿物主要在岩浆晚期分异阶段伴随长石和石英晶出,或通过交代早结晶造岩矿物的方式晶出 (Xiao Huiliang et al. , 2013),逐渐富集形成钨钼多金属矿床。

4.2 区域成岩成矿时代对比

飞鹅山矿床辉钼矿等时线年龄为 $142.6\pm 6.3\text{Ma}$ 。根据前人资料的统计,认为本地区在中生代发生了三次重要的成矿事件:第一次为燕山早期第二阶段 ($180\sim 170\text{Ma}$),以 Cu、Pb、Zn 矿化为代表;第二次为燕山早期第三阶段 ($150\sim 139\text{Ma}$),以 W、Sn、Mo、Nb、Ta 等有色—稀有稀土金属的成矿为主;第三次为燕山晚期 ($125\sim 98\text{Ma}$),以 Au、Cu、Pb、Zn、Ag 为代表 (Mao Jingwen et al. , 2007; Hua Renmin et al. , 2005; Liu Peng et al. , 2015)。而飞鹅山钨钼多金属矿床成矿时代与燕山早期第三阶段的成矿事件吻合。

表 3 广东潮安飞鹅山矿区及其附近矿床的成岩成矿年代统计

Table 3 Diagenesis and mineralization ages of Fei'eshan Chao'an Guangdong and adjacent deposits statistics

矿床名称	测试对象	测试方法	成矿年龄	来源
厚婆坳钨锡矿床	矿石全岩	Rb-Sr 等时线年龄	$149.995\pm 7\text{Ma}$	Yue Shucang et al. ,1989
	二长花岗岩	Rb-Sr 等时线年龄	144.94Ma	
	与锡石共生的白云母	Ar-Ar 等时线年龄	$145.44\pm 1.88\text{Ma}$; WMSD=0.048	
莲花山钨矿床	黑云母花岗岩	Rb-Sr 等时线年龄	$137.2\pm 2.54\text{Ma}$; $r=0.99949$	Xu Xiaochun et al. ,2000
钟丘洋铜矿床	次英安斑岩	Rb-Sr 等时线年龄	$154\pm 2\text{Ma}$	Man Fasheng et al. ,1983
飞鹅山钨钼矿床	辉钼矿	Re-Os 等时线年龄	$142.6\pm 6.3\text{Ma}$; MSWD=1.9	Lu Yuanfa et al. ,1995
				本文

研究区及其邻近矿床的成岩成矿年龄统计表明,该区成岩成矿年龄时限为 $137\sim 154\text{Ma}$ (见表 3),均属燕山早期第三阶段,岩石类型包括了二长花岗岩、黑云母花岗岩、次英安斑岩及矿石全岩等。这一认识与区内大规模分布的 S 型花岗岩 (二长花岗岩) 吻合,飞鹅山矿床的成矿年龄与区内二长花岗岩的成岩年龄最接近且略晚,因而,笔者推测其成矿作用发生于二长花岗岩形成后的岩浆分异演化阶段,是岩浆及期后热液共同作用的结果,矿床成矿物质来源是地壳重熔改造的燕山期二长花岗岩分异演化的产物。

5 结论

(1)飞鹅山钨钼多金属矿床 Re-Os 同位素体系获得的 6 个辉钼矿样品的等时线年龄为 $142.6\pm 6.3\text{Ma}$,模式年龄为 $136.5\sim 142.3\text{Ma}$,加权平均年龄为 $139.4\pm 2.2\text{Ma}$ 。

(2)飞鹅山钨钼多金属矿床形成于燕山运动早期第三阶段岩浆构造活动期。辉钼矿样品中 Re/Os 比值高 (>4) 及 Re 的含量低 ($0.07\times 10^{-6}\sim 0.12$

$\times 10^{-6}$),显示飞鹅山矿床的成矿物质主要来源于地壳,为该区燕山期二长花岗岩分异演化及后期热液作用的产物。

致谢: 本文是广东厚婆坳铜锡多金属矿整装勘查区关键性基础地质研究之找矿预测模型与找矿预测研究的部分成果,在野外工作中得到了广东省地质调查局第二地质大队刘石华队长、李少彬所长的大力支持,实验测试中得到了屈文俊老师、李超老师的热情帮助,文章修改中得到了李旭平教授及其他审稿人的指导,在此一并致以衷心的感谢。

References

Cao Jianjin. 1996. Metallogenic Series of Ore Deposits and Metallogeny in the Eastern Guangdong. Journal of Sun Yatsen University (Natural Science Edition), S2: 121 ~ 124. in Chinese with English abstract.

Chen Jun, Lu Jianjun, Chen Weifeng, Wang Rucheng, Ma Dongsheng, Zhu Jinchu, Ji Junfeng. 2008 W~Sn~Nb~Ta~Bearing Granites in the Nanling Range and Their Relationship to Metallogenesis Geological Journal of China Universities, 04: 459~473. in Chinese with English abstract.

- Chen Xuanhua, Qu Wenjun, Han Shuqin, Eleonora Seitmuratova, Shi Wei, Yang Nong, Chen Zhengle, Ye Baoying, Zeng Fagang, Du Andao, Jiang Rongbao, Wang Zhihong. 2010. Re-Os Dating of Molybdenites from the Cu-Mo-W Deposits in the Balkhash Metallogenic Belt, Kazakhstan and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica* 09: 1333 ~ 1348. in Chinese with English abstract.
- Du Andao, Yin Ningwan, Sun Yali. 1993. Direct Dating of Molybdenites Using the Re-Os Geochronometer. *Chinese Science Bulletin*, 38(15): 1319 ~ 1320.
- Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, Zou Xiaoqiu, Sun Yali, Sun Dezhong, Chen Shaozhen, Qu Wenjun, 1994, A Study on the Rhenium ~ Osmium Geochronometry of Molybdenites. *Acta Geologica Sinica*. 68(4): 339 ~ 347. in Chinese with English abstract.
- Du Andao, Wu Shuqi, Sun Dezhong, Wang Shuxian, Qu Wenjun, Richard Markey, Holly Stein, John Morgan, Dmitry Malinovskiy. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: molybdenite HLP and JDC, *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28(1): 41 ~ 52.
- Du Andao, Qu Wenjun, Li Chao, Yang Gang. 2009. A Review on the Development of Re-Os Isotopic Dating Methods and Techniques. *Rock and Mineral Analysis*. 28(3): 288 ~ 304. in Chinese with English abstract.
- Guo Chunli, Li Chao, Wu Shichong, Xu Yiming, 2014 Molybdenite Re-Os Isotopic Dating of Xitian Deposit in Hunan Province and Its Geological Significance. *Rock and Mineral Analysis*. 01: 142 ~ 152. in Chinese with English abstract.
- Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Lu Jianjun. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China. *Mineral Deposits*. 24(2), 99 ~ 107. in Chinese with English abstract.
- Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao. 2009. Comprehensive Study on Extraction of Rhenium with Acetone in Re-Os Isotopic Dating. *Rock and Mineral Analysis*. 28(3): 233 ~ 238. in Chinese with English abstract.
- Li Chao, Qu Wenjun, Zhou Limin, Du Andao. 2010. Rapid Separation of Osmium by Direct Distillation with Carius Tube. *Rock and Mineral Analysis*. 29(1): 14 ~ 16. in Chinese with English abstract.
- Li Hongyan, Mao Jingwen, Sun Yali, Zou Xiaoqiu, He Hongliao, Du Andao. 1996. Re-Os Isotopic Chronology of Molybdenite in the Shizhuyuan polymetallic Tungsten Deposit, Southern Hunan. *Geological Review*. 03: 261 ~ 267. in Chinese with English abstract.
- Li Xiaofeng, Watanabe Yasushi, Hua Renmin, Mao Jingwen. 2008. Mesozoic Cu-Mo-W-Sn Mineralization and Ridge/Triple Subduction in South China. *Acta Geologica Sinica*. 82(5): 625 ~ 640. in Chinese with English abstract.
- Li Yongfeng, Mao Jingwen, Guo Baojian, Shao Yongjun, Fei Hongcai and Hu Huabin 2004. Re-Os Dating of Molybdenite from the Nannihu Mo (~W) Ore field in the East Qinling and Its Geodynamic Significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 02: 463 ~ 470.
- Liang Qingling, Jiang Sihong, Wang Shaohuai, Li Chao, Zeng Fagang. 2012. Re-Os Dating of Molybdenite from the Luoboling Porphyry Cu-Mo Deposit in the Zijinshan Ore Field of Fujian Province and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*. 07: 1113 ~ 1118. In Chinese with English abstract.
- Liu Peng, Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Wang Xiaoyu, Yao Wei, Chen Xutao. 2015. Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Characteristic of Granite from the Tiandong Tungsten ~ Sn Polymetallic Deposit in Eastern Guangdong Province and Its Significance. *Acta Geologica Sinica*. 1244 ~ 1257. in Chinese with English abstract.
- Liu Yingjun, Li Zhaolin, Dong Guoyi, Wang Dongbo, Wu Qizhi. 1988. Research on Ore-Forming Material Sources and Physicochemical conditions of Houpoao tin Deposit, Guangdong Province. *Mineral Resources and Geology*. 1(2), 40 ~ 48. in Chinese with English abstract.
- Lu Yuanfa. 1995. Geological and Geochemical Characteristics of Volcanic Type Copper Deposit in Zhongquiyang. *Mineral Resources and Geology*. 03: 145 ~ 152. In Chinese Without English abstract.
- Ludwig K. 2009. Isoplot/Ex, version 2.0; a geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Geochronology Center*.
- Wieser M E. 2006. Atomic weights of the elements 2005 (IUPAC technical report), *Pure Appl. Chem*, 78(11): 2051 ~ 2066.
- Man Fasheng, Bai Yuzhen, Ni Shoubin, Li Tong. 1983. Preliminary Isotope Studies of The Lianhuashan Tungsten Ore Deposit. *Mineral Deposits*. 04: 35 ~ 42. in Chinese with English abstract.
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Zhang Zuoheng. 1999. Re-Os isotopic dating of molybdenites in the Xiaoliugou W (Mo) deposit in the northern Qilian mountains and its geological significance. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 63: 1815 ~ 1818.
- Mao Jingwen, Du Andao, Seltmann Reimar, Yu Jinjie. 2003. Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipov Log rare metal pegmatite, central Urals, Russia. *Mineralium Deposita* 38: 251 ~ 257.
- Mao Jingwen, Holly Stein Du Andao, Zhou Taofa, Mei Yanxiong, Li Yongfeng, Zang Wenshuan, Li Jinwen. 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. *Acta Geologica Sinica*. 01: 121 ~ 131. in Chinese with English abstract.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Chen Yuchuan. 2007. Large-Scale Tungsten-Tin Mineralization in the Nanling Region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10), 2329 ~ 2338. in Chinese with English abstract.
- Meng Xiangjin, Xu Wenyi, Lv Qingtian, Qu Wenjun, Li Xianchu, Shi Dongfang, Wen Chunhua. 2012. Zircon U-Pb Dating of Ore-

- Bearing Rock and Molybdenite Re-Os Age in Shapinggou Porphyry Molybdenum Deposit, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*. 03:486~494. in Chinese with English abstract.
- Qu Wenjun, Du Andao, Li Chao. 2009. High-Precise Determination of Osmium Isotopic Ratio in The Jinchuan Copper-Nickel Sulfide Ore Samples. *Rock and Mineral Analysis*. 28(3): 219~222. in Chinese with English abstract.
- Qu Wenjun, Du Andao, Ren Jing. 2008. Influence of H_2O_2 on The Signal Intensity of Rhenium, Osmium and Re-Os Age in The Process of Dissolution for Pyrite. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 8(2): 223~226. in Chinese with English abstract.
- Qu Wenjun, Du Andao. 2003. Highly Precise Re-Os Dating of Molybdenite by ICP-MS with Carius Tube Sample Digestion. *Rock and Mineral Analysis*. 22(4): 254~262. in Chinese with English abstract.
- Roberta L. Rudnick, Richard J. Walker. 2009. Interpreting ages from Re-Os isotopes in peridotites. *Lithos*, 112:1083~1095.
- Shirey S B, Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high ~ temperature geochemistry. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 26:423~500.
- Shu Liangshu. 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*. 31(7):1035~1053. in Chinese with English abstract.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L, Schersten A. 2001. The Remarkable Re-Os Chronometer in Molybdenite: How and Why it Works. *Terra Nova*. 13: 479~486.
- Tu Junqiao. 2014. The Geochemistry Characteristics and prospecting of the Tiandong Area In Chao' an Guangdong Province. *Modern Mining*. 02: 66 ~ 67. in Chinese without English abstract. . in Chinese with English abstract.
- Xiao Huiliang, Chen Lezhu, Bao Xiaoming, Fan Feipeng, Zhou Yan, Yao Zhenghong, Wu Ling, Wu Hanyu. 2013. The Prospecting for W-Sn Polymetallic Ore Deposits in Shixing County, Guangdong. *Geological Journal of China Universities*. 02:213~219. in Chinese with English abstract.
- Xiao Zhenyu, Yue Shucang. 1988. Geological and Geochemical Comparison Between Tin and Tungsten-Related Granitoids in Coast Area of Eastern Guangdong Province. *Mineral Resources and Geology*. S1:30~38. in Chinese with English abstract.
- Xu Xiaochun, Yue Shucang. 1999. Source Material and Metallization of Tin (Tungsten, Copper) Polymetallic Deposits. *Scientia Geologica Sinica*. 01: 81 ~ 92. in Chinese with English abstract.
- Xu Xiaochun, Xie Qiaoqin, Yue Shucang. 2000. Metallogenetic mechanism of Mesozoic metallic ore deposits in eastern Guangdong area. *Journal of Hefei University of Technology*. 01:99~103. in Chinese with English abstract.
- Yao Junming, Hua Renmin, Qu Wenjun, Qi Huawen, Lin Jinfu, Du Andao. 2007. Molybdenite Re-Os Isotopic Dating of Huangshaping Lead, Zinc Tungsten and molybdenum polymetallic deposit in South Hunan Province and Its Geological Significance. *Science in China Press (D: Science of Geology)*. 04:471~477. In Chinese without English abstract.
- Yue Shucang, Lei Xinyong, Gong Changrui, Xu Xiaochun. 1989. Geochemical Studies on Tin and Tungsten Deposits and Granitoid in Eastern Guangdong. *Bull. Nanjing inst. Geol. M. R. Chinese Acad Geol. Sci*. 01: 27 ~ 41. in Chinese with English abstract.
- Zhang Da, Wu Ganguo, Liu Naizhong, Di Yongjun, Lv Liangji, Cao Wenrong. 2010. Re-Os Isotopic Age of Molybdenite from the Beikengchang Molybdenite and Polymetal Deposit in Zhangping City, Fujian Province and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*. 10: 1428 ~ 1437. in Chinese with English abstract.
- Zhou Limin, Gao Bingyu, Wang Libing, Li Chao, Qu Wenjun, Hou Zengqian, Du Andao. 2012. Improvements on the Separation Method of Osmium by Direct Distillation in Carius Tube. *Rock and Mineral Analysis*. (3): 413~418. in Chinese with English abstract.

参 考 文 献

- 曹建劲. 1996. 粤东地区金属矿床成矿系列及成矿规律探讨. *中山大学学报(自然科学版)*, S2:121~124.
- 陈骏, 陆建军, 陈卫锋, 王汝成, 马东升, 朱金初, 张文兰, 季峻峰. 2008. 南岭地区锡钨钼钽花岗岩及其成矿作用. *高校地质学报*, 04:459~473.
- 陈宣华, 屈文俊, 韩淑琴, Eleonora Seitmuratova, 施炜, 杨农, 陈正乐, 叶宝莹, 曾法刚, 杜安道, 蒋荣宝, 王志宏. 2010. 巴尔喀什成矿带 Cu-Mo-W 矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素年龄测定及其地质意义. *地质学报*, 09:1333~1348.
- 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 邹晓秋, 孙亚利, 孙德忠, 陈少珍, 屈文俊. 1994. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究, *地质学报* 68(4): 339~347.
- 杜安道, 屈文俊, 李超, 杨刚. 2009. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展, *岩矿测试* 28(3): 288~304.
- 郭春丽, 李超, 伍式崇, 许以明. 2014. 湘东南锡田辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义. *岩矿测试*, 01:142~152.
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. *矿床地质*, 24(2), 99~107.
- 李超, 屈文俊, 杜安道. 2009. 铼-钨同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究, *岩矿测试* 28(3):233~238.
- 李超, 屈文俊, 周利敏. 2010. 杜安道. Carius 管直接蒸馏快速分离钨方法研究, *岩矿测试*, 29(1): 14~16.
- 李红艳, 毛景文, 孙亚利, 邹晓秋, 何红蓼, 杜安道. 1996. 柿竹园钨多金属矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄研究. *地质论评*, 03: 261~267.
- 李晓峰, Watanabe Yasushi, 华仁民, 毛景文. 2008. 华南地区中生代 Cu-(Mo)-W-Sn 矿床成矿作用与洋岭/转换断层俯冲. *地质学报*, 82(5):625~640.
- 梁清玲, 江思宏, 王少怀, 李超, 曾法刚. 2012. 福建紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 定年及地质意义. *地质学报*, 07:1113~1118.
- 刘鹏, 程彦博, 毛景文, 王小雨, 姚薇, 陈叙涛. 2015. 粤东田东钨锡多金属矿床花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意

义. 地质学报, 89(7), 1244~1257.

刘英俊, 李兆麟, 董国仪, 汪东波, 吴启志. 1988. 广东潮安厚婆坳锡矿床成矿物质来源及物理化学条件研究. 矿产与地质, 1(2), 40~48.

路远发. 1995. 钟丘洋次火山岩型铜矿床的地质地球化学特征. 矿产与地质, 03:145~152.

满发胜, 白玉珍, 倪守斌, 黎彤. 1983. 莲花山钨矿床同位素地质学初步研究. 矿床地质, 04:35~42.

毛景文, 张作衡, 张招崇, 杨建民, 王志良, 杜安道. 1999. 北祁连山小柳沟钨矿床中辉钼矿 Re-Os 年龄测定及其意义. 地质论评, 04:412~417.

毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 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. 岩石学报, 23(10), 2329~2338.

孟祥金, 徐文艺, 吕庆田, 屈文俊, 李先初, 史东方, 文春华. 2012. 安徽沙坪沟斑岩钨矿锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄. 地质学报, 03:486~494.

屈文俊, 杜安道, 李超. 2009. 金川铜镍硫化物样品中钼同位素比值的高精度分析. 岩矿测试 28(3): 219~222.

屈文俊, 杜安道, 任静. 2008. 过氧化氢在黄铁矿的溶解过程中对钼~钨信号强度及年龄的影响研究. 分析化学, 8(2): 223~226.

屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿钼~钨地质年龄. 岩矿测试, 22(4): 254~262.

舒良树. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 2012, 31(7):1035~1053.

涂军桥. 2014. 广东潮安田东地区地球化学特征及找矿远景. 现代矿业, 02:66~67.

肖惠良, 陈乐柱, 鲍晓明, 范飞鹏, 周延, 姚正红, 武玲, 吴涵宇. 2013. 广东始兴地区钨锡多金属矿找矿实践与探索. 高校地质学报, 02:213~219.

肖振宇, 岳书仓. 1988. 粤东沿海地区锡和钨成矿花岗岩地质地球化学特征的对比. 矿产与地质, S1:30~38.

徐晓春, 谢巧勤, 岳书仓. 2000. 粤东地区中生代金属矿床的成矿机制. 合肥工业大学学报(自然科学版), 01:99~103.

徐晓春, 岳书仓. 1999. 粤东锡(钨、铜)多金属矿床的成矿物质来源和成矿作用. 地质科学, 01:81~92.

姚军明, 华仁民, 屈文俊, 戚华文, 林锦富, 杜安道. 2007. 湘南黄沙坪铅锌钨钼多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素定年及其意义. 中国科学(D辑:地球科学), 04:471~477.

岳书仓, 雷新勇, 龚昌瑞, 徐晓春. 1989. 粤东花岗岩及锡、钨矿床的地球化学研究. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 01:27~41.

张达, 吴淦国, 刘乃忠, 狄永军, 吕良冀, 曹文融. 2010. 福建漳平北坑场钨多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质学报, 10:1428~1437.

周利敏, 高炳宇, 王礼兵, 李超, 屈文俊, 侯增谦, 杜安道. 2012. Carius 管直接蒸馏快速分离钨方法的改进. 岩矿测试, (3): 413~418.

Molybdenite Re-Os Isotopic Age of Fei’eshan Tungsten and Molybdenum Polymetallic Deposit in Chao’an, Guangdong

LI Haili¹⁾, XIAO Huiliang^{1,2)}, FAN Feipeng²⁾, CHEN Lezhu²⁾, LIU Jianxiong³⁾, CHEN Xutao⁴⁾
1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 2) Nanjing Centre, China Geological Survey, Nanjing, 210016, China; 3) Guangdong Foshan Bureau of Geology, Foshan, 528000, China; 4) No. 2 Geology Party Guangdong Bureau of Geology, Shantou, 515000, China

Abstract

The Fei’eshan tungsten and molybdenum polymetallic deposit located in the eastern region of Guangdong province is a prospecting potential deposit newly discovered. Intense tectonic and magmatic activities are frequent during Yanshanian in this area. The ore bodies occur mainly in granite and greisens, which controlled by faults of NE and SN and the types of deposit contain quartz vein type and greisens type. Re-Os isotopic dating of six molybdenite samples collected from the main ore body in Fei’eshan deposit show that a) the model age is from 136.5Ma to 142.3Ma, b) the isochron age is 142.6 ± 6.3 Ma, and c) weighted average of model age is 139.4 ± 2.2 Ma. It can thus be considered that the deposit formed in the third stage of Early Yanshanian and ore-forming age is consistent with the monzonitic granite in orefield. According to the rhenium content and the ratio of rhenium and osmium of molybdenum samples, origin of the ore-forming materials of the deposit derived from the crust. Besides, through combined with some isotopic ages of other deposits in adjacent area, it can be inferred that the metallogenic materials of the Fei’eshan deposit originated from the highly evolved melting type Yanshanian granite mass.

Key words: Re-Os isochron age; molybdenite; ore-forming age; tungsten and molybdenum polymetallic deposit; Fei’eshan deposit; Chao’an Guangdong