



江西永平十字头钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义

邵拥军^{1,2}, 彭南海^{1,2,3}, 汪 程^{1,2}, 张 宇⁴, 刘忠法^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100012;
4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要: 江西永平十字头钼矿床为钦杭成矿带北东段上新近发现的一个斑岩型钼矿床, 钼矿体主要赋存于似斑状黑云母花岗岩体与周潭组混合岩系的外接触带中, 受岩体和构造控制。本文对该矿床石英–硫化物脉中的辉钼矿进行了 Re-Os 同位素测年, 获得辉钼矿 Re-Os 模式年龄为(156.9±2.2) Ma ~ (158.5±2.4) Ma 之间, 加权平均值为(158±1) Ma, 等时线年龄为(158.0±2.5) Ma。十字头钼矿床中辉钼矿的 Re 含量为 65.05×10^{-6} ~ 150.20×10^{-6} , 指示该矿床的成矿物质来源具有壳幔混源的属性。对比本区成岩与成矿的年龄, 并结合该矿床的地质特征及地球化学特征, 认为本区成矿与似斑状黑云母花岗岩有密切的亲缘关系, 二者属于相同地球动力学背景下同一地质–构造–岩浆事件的产物。结合前人对钦杭带北东段的研究成果, 认为钦杭北东段存在 172~145 Ma 和 140~130 Ma 两期钼的成矿事件。两期成矿事件的时限与华南地区中晚侏罗世和白垩世两大成矿高峰期一致, 它们分别是对 Izanagi 板块向欧亚大陆之下低角度俯冲有关的弧后局部伸展和 Izanagi 俯冲板块沿 NE 方向快速走滑的响应。

关键词: 十字头钼矿床; 辉钼矿; Re-Os 同位素测年; 成矿年龄; 成岩成矿关系; 成矿动力学背景

文章编号: 1004-0609(2018)-12-2598-12

中图分类号: P611.1

文献标志码: A

钦杭结合带是华南地区一条最重要也是最具找矿潜力的多金属成矿带^[1~4], 在大地构造上属于扬子与华夏两个古陆块于新元古代碰撞拼接所形成的古板块结合部位^[5]。该带成矿时代集中, 矿床规模巨大, 矿化分布密集, 储量分布集中, 矿床类型齐全, 伴生组分多样^[6]。近年来, 在钦杭带北东段发现了一系列的钼矿床^[7~22], 预示在钦杭带北东段及其邻区还有发现钼矿床的巨大潜力。

十字头钼矿床是钦杭成矿带新近发现的一个斑岩型钼矿床^[6], 2006 年 3 月至 2014 年 12 月, 江西铜业集团地勘工程有限公司对永平矿区十字头钼矿先后开展了找矿验证、普查和详查工作, 已探明钼的储量为 76569.37 t, 平均品位为 0.0769%。众多专家学者在矿床地质特征^[23~24]、成矿流体^[25]、成矿物质来源^[25~27]、成岩时代^[28~31]、关键控矿因素^[23~24, 32]和矿床成因^[24~25, 33]等方面进行了大量研究, 但是这些结论缺乏精确的成矿年龄的限制, 使得从时间角度去对比该矿

床成岩与成矿的关系, 以及进一步讨论成矿的动力学背景变得无据可依。

近年来, 辉钼矿 Re-Os 同位素测年体系被认为是直接测定金属矿床成矿年龄的有效手段, 已广泛应用于国内外各类矿床成矿年代学的研究^[34~37]。辉钼矿中 Re 的含量也能指示矿床的成矿物质来源^[37~39]。本文通过对江西永平十字头钼矿床中辉钼矿单矿物的 Re-Os 同位素的研究, 试图精确测定成矿年龄, 厘定成矿物质来源, 查明成岩与成矿的关系, 探讨区域构造运动对成矿的制约, 为矿床成因的深入研究提供年代学的证据, 进一步为后续的深边部找矿工作提供理论支撑。

1 地质背景概况

研究区地处扬子板块与华夏板块的拼接地带, 定位于近东西向的萍乡–广丰深断裂与北北东向安远–

基金项目: 中南大学创新驱动计划项目(2015CX008)

收稿日期: 2016-12-27; 修订日期: 2018-07-11

通信作者: 邵拥军, 教授, 博士; 电话: 13973149482; E-mail: shaoyongjun@126.com

鹰潭大断裂结合部位^[6], 是中国南方钦杭成矿带北东段的重要成矿部位, 具有独特而又优越的成矿大地构造背景^[40–41]。

矿区地层由褶皱变质基底及上覆沉积盖层组成(见图1), 构成本区的褶皱变质基底的上元古界周潭组地层(Jxzt)的岩性主要为一套混合岩系, 该岩系的原岩主要为浅海相泥质岩-碎屑岩, 局部夹中基性火山岩。上覆盖层底部的中石炭统叶家湾组(C₂y)是一套含有火山-碎屑沉积岩夹层的碎屑岩和碳酸盐岩, 分布于钼矿床的西部; 盖层中部的石炭系上统船山组-二叠系下统茅口组(C₂c-P₁m)地层出露于叶家湾组东侧, 其岩性主要为含有燧石团块的灰岩, 局部为大理岩; 二叠系下统车头组(P₁c)地层出露于石炭系上统船山组-二叠系下统茅口组地层的东侧, 主要岩性为硅质岩和粉砂质泥岩。十字头钼矿床处于近东西向的萍乡-广丰深断裂与北北东向安远-鹰潭大断裂结合部位, 定位于天排山倒转背斜东翼内的次级打字坪倒转向斜及

北北东向逆冲断层F₁、F₄、F₅之间。区域内近东西向东乡-广丰深断裂、南北向大断裂与F₁逆冲断层互相之间形成了一个从深部至浅部的良好通道, 非常有利于岩浆和含矿热液的运移, 前两者为导矿构造和深部控岩构造, 后者则为配矿构造和浅部控岩构造^[42]。F₁、F₄、F₅断层和岩浆的多期次活动作用形成的次级断裂、节理以及复式背斜的层间滑脱部位, 为该矿床的容矿构造^[42]。燕山早期第二阶段形成的十字头-火烧岗岩体为本区主要的侵入岩, 与钼矿床的形成关系密切^[42], 其岩性为似斑状黑云母花岗岩, 分布于矿区东南部, NNE向和NW向两组断层控制了岩体的侵位及其形态、产状, 岩体主要侵位于上元界周潭组(Jxzt)混合岩组中, 其次为中石炭系上统叶家湾组中(C₂y)。矿区岩脉主要为花岗斑岩脉和石英斑岩脉, 二者分布于矿区西南部, 呈北东走向, 局部可见花岗斑岩脉切穿石英斑岩脉。此外, 在十字头岩体附近的围岩中还零星分布有花岗闪长斑岩、石英闪长岩、闪长玢岩及

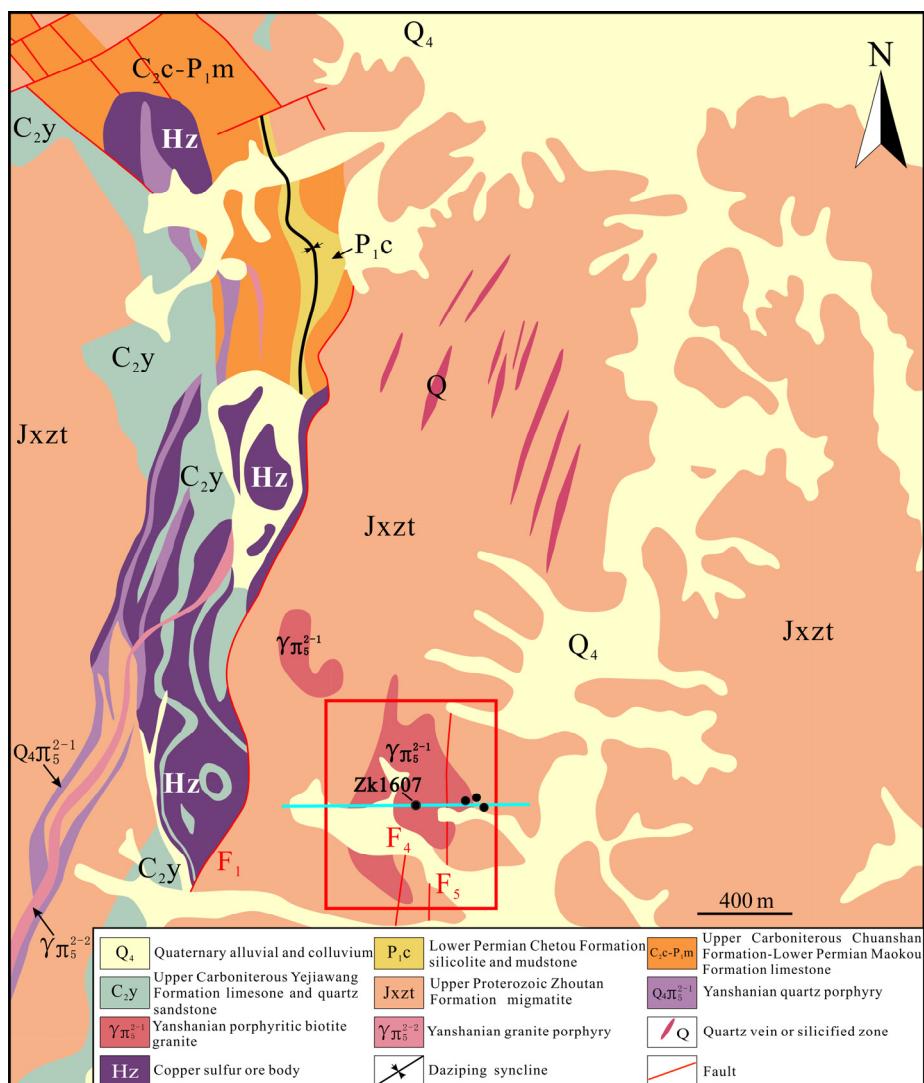


图1 江西永平十字头钼矿床地质图(据1:20000 地质图修改)

Fig. 1 Geological map of Shizitou molybdenum deposit in Yongping, Jiangxi (Modified from 1:20000 geological map)

煌斑岩等。

本区钼矿体主要分布于十字头似斑状黑云母花岗岩体的外接触带,产于上元古界周潭岩组混合岩系中,在岩体的凹部及中深部也有厚大的钼矿体产出(见图2)。矿化类型主要呈细脉状集中产出,矿带形态比较复杂,矿化连续性较差,总体呈不规则的带状。各含矿带均呈近北北西向展布,倾向东,倾角30°~60°。矿带分支较多,矿带边界多呈不规则的支叉状,尤其是远离的地段和矿带南、北两端分支尤为发育,导致矿带厚度显著减少。钼矿体从浅部至深部,从远离接触带到近接触带存在厚度增大、品位增高的变化规律。

十字头钼矿主要的原生矿石类型可以划分7种(见图3):1)浸染状辉钼矿矿石;2)团块状辉钼矿矿

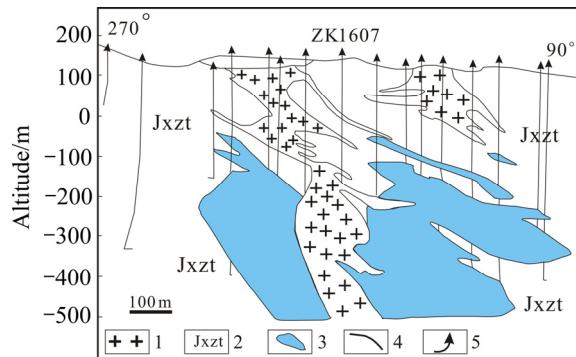


图2 十字头钼矿床剖面示意简图(据文献[27]修改)

Fig. 2 Sketch sections of Shizitou molybdenum deposit (Modified from Ref. [27]): 1—Porphyritic biotite granite; 2—Upper Proterozoic Zhoutan Formation migmatite; 3—Molybdenum ore body; 4—Geological boundary; 5—Drill hole

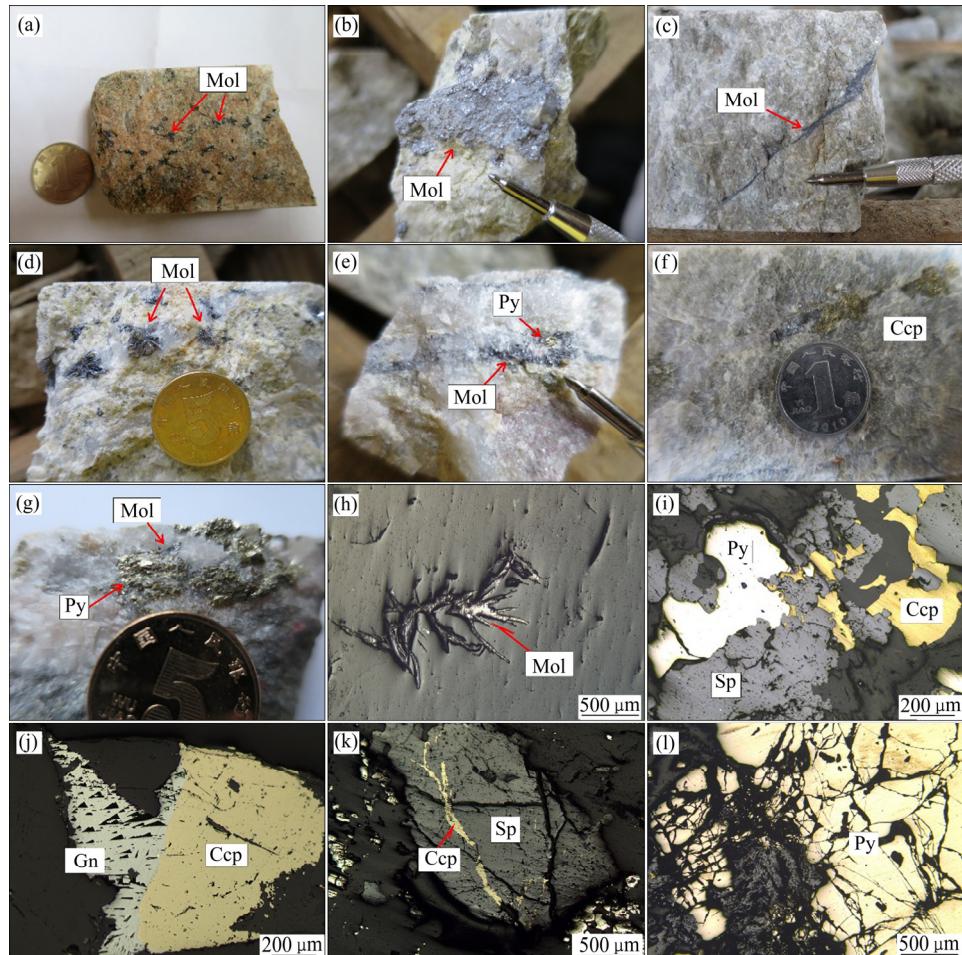


图3 十字头钼矿床原生矿石类型及特征结构照片:(a) 浸染状辉钼矿矿石;(b) 团块状辉钼矿矿石;(c) 细脉状辉钼矿矿石;(d) 脉状石英-辉钼矿矿石;(e) 脉状石英-黄铁矿-辉钼矿矿石;(f) 脉状石英-黄铜矿-辉钼矿矿石;(g) 脉状石英-碳酸盐岩-黄铁矿-辉钼矿矿石;(h) 他形束状的辉钼矿;(i) 闪锌矿交代黄铜矿, 黄铜矿交代黄铁矿;(j) 方铅矿与黄铜矿呈共结边结构产出;(k) 闪锌矿中含黄铜矿脉;(l) 黄铁矿呈碎裂结构; Mol—辉钼矿; Py—黄铁矿; Sp—闪锌矿; Ccp—黄铜矿; Gn—方铅矿
Fig. 3 Primary ore types and structures of Shizitou molybdenum deposit: (a) Disseminate molybdenite ores; (b) Crumbly molybdenite ores; (c) Veinlet type molybdenite ores; (d) Vein type quartz-molybdenite ores; (e) Vein type quartz-pyrite-molybdenite ores; (f) Vein type quartz-chalcopyrite-molybdenite ores; (g) Vein type quartz-carbonate rock-pyrite-molybdenite ores; (h) Allotriomorphic beam-like molybdenite; (i) Sphalerite replacing chalcopyrite, chalcopyrite replacing pyrite; (j) Galena and chalcopyrite occur in the eutectic texture; (k) Galena containing chalcopyrite veins; (l) Pyrite clastic texture; Mol—Molebdenite; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite; Ccp—Chalcopyrite; Gn—Galena

石; 3) 细脉状辉钼矿矿石; 4) 脉状石英-辉钼矿矿石; 5) 脉状石英-黄铁矿-辉钼矿矿石; 6) 脉状石英-黄铜矿-辉钼矿矿石; 7) 脉状石英-碳酸盐岩-黄铁矿-辉钼矿矿石。金属矿物以辉钼矿为主, 黄铁矿、黄铜矿次之, 方铅矿、闪锌矿含量较少; 非金属矿物主要为石英, 次为少量的方解石、钾长石、绿泥石、绢云母、绿帘石。矿石结构主要为交代结构(见图 3(i))、脉状结构(见图 3(k))、固溶体分离结构、共结边结构(见图 3(j))、碎裂结构(见图 3(l))、粒状结构、充填结构等, 其中以粒状结构较为常见, 可见黄铁矿自形结构、辉钼矿他形片状结构(见图 3(h))、黄铜矿他形粒状结构等。矿石构造主要以细脉状构造、网脉状构造为主(见图 3(c)、(d)、(e)、(f)、(h)), 也可见薄膜状构造、浸染状构造(见图 3(a))、团块状构造(见图 3(b))。十字头钼矿床中的围岩蚀变主要为钾化、硅化、绢云母化、泥化、青磐岩化、碳酸盐化, 其中硅化与绢云母化蚀变与本区钼成矿的关系最为密切。根据十字头钼矿床中各脉间的相互穿插关系及含矿脉中的矿物组合, 将十字头钼矿床成矿作用划分为一期(岩浆热液期)三阶段(石英-辉钼矿阶段、石英-多金属硫化物阶段和石英-碳酸盐-多金属硫化物阶段)。

2 样品的采集及测试方法

2.1 样品的采集

本次用于 Re-Os 同位素分析的 5 件石英脉型矿石样品均采于十字头钼矿床。矿石矿物均以辉钼矿为主。辉钼矿为钢灰色细鳞片状集合体, 主要呈浸染状或不规则团块状分布于石英脉中, 也有少量的对称分布于脉的两壁。其中样品 YJ007-9 还含有少量的黄铜矿, 脉石矿物均为石英, 脉宽多为 8~10 mm 左右, 各样品采集点和野外描述详见表 1。

2.2 样品处理及测试

将矿石样品粉碎至 0.3~0.45 mm(40~60 目)后, 在

表 1 Re-Os 同位素测试样品特征表

Table 1 Re-Os isotopic features of tested samples

Sample No.	Analysis	Mineral	Description	Sampling point
YJ007-9			Vein-type quartz-chalcopyrite-molybdenite ore	-70m middle S5 tunnel
YZ014			Vein-type quartz-molybdenite ore	ZK1623 drilling core 579.3m
YZ018	Re-Os Isotope	molybdenite	Vein-type quartz-molybdenite ore	ZK1625 drilling core 779.53m
YZ041			Vein-type quartz-molybdenite ore	ZK1606 drilling core 507.09m
YZ022			Vein-type quartz-molybdenite ore	ZK1625 drilling core 748.00m

双目境下手工挑选质纯、无氧化、无污染的辉钼矿单矿物。在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素室采用 Carius 管封闭溶样分解样品, 测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪(TJA X-series ICPMS)。Re 和 Os 含量的不确定度包括样品和稀释剂的称量误差、稀疏剂的标定误差、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 测试结果

十字头钼矿床 5 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素测试结果见表 2。5 件样品的 Re 含量变化范围为 $(65.06 \pm 0.48) \times 10^{-6}$ ~ $(150.20 \pm 1.7) \times 10^{-6}$ 。李超等^[43]通过大量数据统计发现, 辉钼矿中普遍含有普通 Os, 如果¹⁸⁷Os 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 5 件辉钼矿样品中¹⁸⁷Os 与普 Os 的比值为 172~1047, 均大于 20(见表 2), 其模式年龄(*t*)按照: $t = 1 / \{ \lambda \ln [1 + w(^{187}\text{Os}) / w(^{187}\text{Re})] \}$ 计算即可(λ 为¹⁸⁷Re 衰变常数, $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$)。辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 $(156.9 \pm 2.2) \text{ Ma}$ ~ $(158.5 \pm 2.4) \text{ Ma}$ 之间, 加权平均值为 $(158 \pm 1.0) \text{ Ma}$ (见图 4(a))。采用 ISOPLOT 软件对 5 件辉钼矿的测试数据进行等时线拟合, 获得 Re-Os 等时线年龄为 $(158.0 \pm 2.5) \text{ Ma}$ (见图 4(b))。

4 讨论

4.1 成矿时代

辉钼矿 Re-Os 同位素体系的封闭性较好, 不易遭受后期改造, 据此特点可以用来测定矿床的形成年龄^[44~46]。但辉钼矿 Re-Os 同位素体系容易发生失耦作用, 造成样品测试结果会在一定范围内波动, 测试结果的重现性较差^[44]。年龄较新(显生宙)、粒径 < 2 mm 且粒度均匀的辉钼矿, 其 Re-Os 同位素体系不易发生失耦作用^[47]。此次测试的样品中辉钼矿的粒径较细

表2 十字头钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 2 Molybdenite Re-Os isotopic data of Shizitou molybdenum deposit

Sample ID	$w(\text{Re})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		$w(\text{normal Os})/(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$		$w(^{187}\text{Re})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		$w(^{187}\text{Os})/(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$		Model age/Ma	
	Tested value	σ	Tested value	σ	Tested value	σ	Tested value	σ	Tested value	σ
YZ014	150.2	1.7	0.3686	0.1168	94.38	1.04	248.8	1.5	158	2.5
YZ018	75.7	0.74	0.7293	0.1667	47.58	0.46	125.4	0.8	158	2.4
YZ041	65.05	0.48	0.4113	0.0774	40.89	0.3	107	0.7	156.9	2.2
YJ007-9	137.4	1.1	0.2162	0.0882	86.37	0.7	226.3	1.3	157.1	2.2
YZ022	88.73	0.77	0.15	0.0525	55.77	0.49	147.4	1.1	158.5	2.4

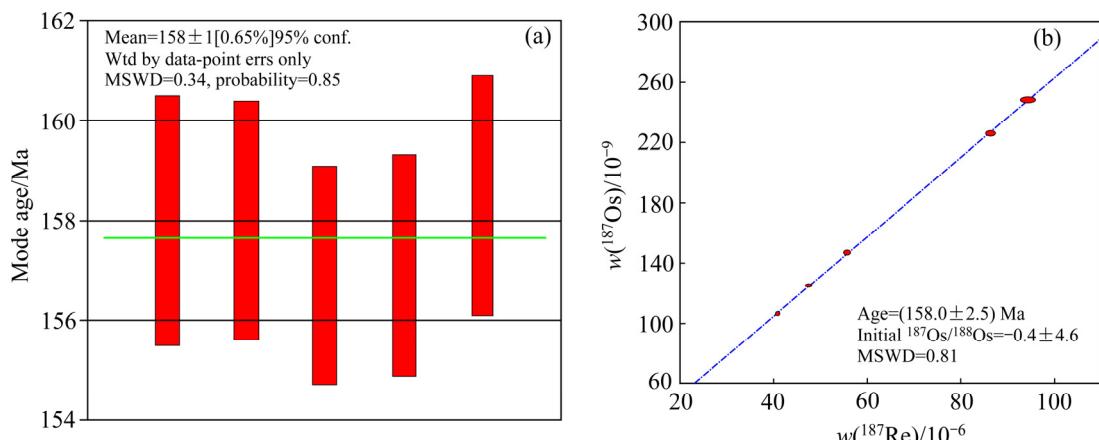


图4 十字头钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄加权平均值及等时线年龄图

Fig. 4 Weighed mean Re-Os isotopic model age(a) or ischrone age(b) of molybdenite of Shizitou molybdenum deposit

(0.3~0.45mm), 且粒度较均匀, 认为该辉钼矿样品中 Re-Os 同位素体系不易发生失耦作用, 测试结果的可靠性较高。5 件辉钼矿 Re-Os 模式年龄在(156.9±2.2) Ma~(158.5±2.4) Ma 之间, Re-Os 同位素体系等时线年龄为(158.0±2.5) Ma, 这与加权平均年龄(158±1) Ma 在误差允许范围内高度一致。杜安道等^[48]认为 Re-Os 同位素体系等时线年龄与加权平均年龄在误差允许范围内一致时, Re-Os 同位素体系等时线年龄可以代表真实年龄。基于此, 认为十字头钼矿床的成矿年龄为(158.0±2.5) Ma。

近年来, 越来越多的高精度或比较高精度放射性同位素测试矿石和相关岩石数据出现^[7~22], 使钦杭成矿带北东段及其邻区钼矿床的时间分布规律初步显现出比较清楚的轮廓。钦杭成矿带北东段及其邻区钼矿床的成矿时间的范围为 172~130 Ma, 在时间上并非连续成矿, 而是呈现出两个较清楚的成矿阶段(见图 5)。钦杭成矿带北东段及其邻区第一阶段钼矿床成矿时间的范围为 172~145 Ma, 其成矿高峰期为 160~150 Ma, 相当于毛景文等^[49~51]和华仁民等^[52]提出的包括钦杭带在内的华南地区中晚侏罗世的成矿高峰期; 第二阶段的成矿时间范围为 140~130 Ma, 与毛景文等^[49~51]

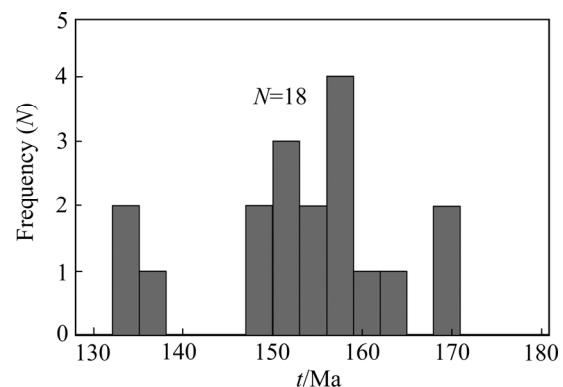


图5 钦杭带北东段中生代钼矿床的时间分布图解

Fig. 5 Temporal distribution diagram of Mesozoic molybdenum deposit in northeastern section of Qing-Hang metallogenic belt

和华仁民等^[52]提出的华南地区白垩世的成矿高峰期对应。钦杭成矿带北东段及其邻区钼矿床的高精度年龄数据, 不仅准确刻画了大规模成矿作用的时间, 而且使探讨地球动力学演化成为可能。

4.2 成岩成矿关系

基于对十字头钼矿的矿床地质特征、地球化学特

征资料的收集, 表明钼的成矿作用与区内岩浆活动有着密切的关系, 主要表现在以下几个方面。

4.2.1 岩体和矿体的空间关系

十字头钼矿体主要围绕十字头岩体分布, 二者具有密切的空间位置关系(见图2)。岩体内部存在厚大钼矿体, 可与外接触带的钼矿层连接成一体, 形成十字头钼矿床中规模最大的钼矿体。岩体凹部更是钼矿体聚集的有利部位, 往往可产出较厚大的钼矿体。从钼矿体埋深情况看, 矿床北部埋深较浅, 往南矿体埋深逐渐加大。这一现象, 显然是受到了岩体侧伏影响, 将钼矿体底板朝岩体侧伏方向牵引下移的结果。

4.2.2 成岩成矿时间差

全伟^[31]由锆石的LA-ICP-MS U-Pb定年获得本区似斑状黑云母花岗岩²⁰⁶Pb/²³⁸U 谱和年龄为(162±2) Ma, 与丁昕等^[29]通过锆石离子探针(SIMS) U-Pb 定年研究获得永平十字头-火烧岗花岗质岩体的侵位年龄(160±2.3) Ma 基本一致, 似斑状黑云母花岗岩的成岩时间与十字头钼矿床的成矿时间 158 Ma 接近, 暗示本区成岩与成矿在时间上具有紧密的联系。

4.2.3 成矿物质来源

Re 与 Os 在地幔和地壳间具有明显的分馏效应, 首先 Re 易于从地幔分配到岩浆液相中, 属于不相容元素, 而 Os 强烈趋向于保持在地幔中, 属于高度相容元素, 因此, Re-Os 同位素体系能灵敏的指示成矿过程地壳物质的混入程度^[39]。矿床内辉钼矿中 Re 的含量会随成矿物质来源深度的变化而变化, 从幔源→壳幔混合源→壳源, 相应的 Re 含量逐次呈数量级降低, 成矿物质为地幔来源的矿石中的辉钼矿 Re 含量范围($n \times 10^2$) 10^{-6} ; 壳幔混合源的 Re 含量为($n \times 10^1$) 10^{-6} ; 而成矿物质为壳源的钼矿床, 辉钼矿中 Re 含量一般为($n \times 10^0$) 10^{-6} ^[37-38]。十字头钼矿床中辉钼矿的 Re 含量为 $65.05 \times 10^{-6} \sim 150.20 \times 10^{-6}$, 平均值为 103.42×10^{-6} (见表2), 与成矿物质为壳幔混源的辉钼矿的特征较一致, 指示该矿床的成矿物质来源具有壳幔混源的属性。

十字头钼矿床中 8 件金属硫化物的³⁴S_{V-CDT} 变化范围为 $+2.30 \times 10^{-3} \sim +4.24 \times 10^{-3}$, 平均值为 $+3.24 \times 10^{-3}$ ^[42], 与十字头似斑状黑云母花岗岩的³⁴S_{V-CDT} 值 ($+2.20 \times 10^{-3} \sim +4.7 \times 10^{-3}$)^[53]接近, 而与本区叶家湾组地层的³⁴S_{V-CDT} 值 ($-19.4 \times 10^{-3} \sim +8.4 \times 10^{-3}$) 及混合岩的³⁴S_{V-CDT} 值 ($-0.3 \times 10^{-3} \sim +4.5 \times 10^{-3}$) 存在区别^[41], 表明成矿物质可能主要由十字头似斑状黑云母花岗质岩浆提供。似斑状黑云母花岗岩中岩浆锆石 Hf 同位素组成的示踪结果显示, 本区岩体的成岩物质来源于下地壳与亏损地幔的混合, 且地壳端元可能为该区中元

古代基底地层重熔的产物^[23, 31], 暗示由似斑状黑云母花岗质岩浆提供的成矿物质可能具有壳幔混合来源的属性。综上所述, 十字头钼矿床的成矿金属元素主要由具有壳幔混合来源特征的似斑状黑云母花岗质岩浆提供, 这与辉钼矿中 Re 元素的示踪结果耦合。

基于空间、时间及成矿物质来源的角度分析十字头钼矿床的成矿作用与成岩作用的关系, 认为成岩与成矿作用可能是连续的岩浆作用过程, 二者属于相同地球动力学背景下同一地质-构造-岩浆事件的产物, 具有密切的成因联系。

4.3 成矿动力学背景

华南板块在印支期地处华北地块与印支地块之间, 三大板块于 240~220 Ma 碰撞对接连成一体^[51]。华南地区前侏罗纪的大地构造演化主要受特提斯构造体制和印支期挤压造山事件的控制^[54-56], 华南地块受南北边缘碰撞造山事件和俯冲增生事件的远程影响^[3], 导致区域地壳受近南北向挤压而增厚^[57-58]。华南地区迄今为止还未发现成矿时代为三叠纪的钼矿床, 但毛景文等^[51]认为华南三叠纪的 W-Sn-Nb-Ta 成矿事件(239~214 Ma)与后碰撞花岗岩有密切关系, 与成矿有关的花岗质岩石主要为以二云母花岗岩为代表的过铝质花岗岩, 为加厚地壳重熔的产物。

自燕山期以来, 华南地区处于太平洋构造域、古亚洲洋构造域以及特提斯洋构造域影响范围的交汇处^[59]。华南板块在早侏罗世(205~180 Ma)曾经历过一个比较宁静时期, 很少有火山活动和岩浆侵入^[60]。MARUYAMA 等^[61]及万天丰等^[62]指出进入侏罗纪以来, Izanagi 板块朝 NW 方向运移, 俯冲到欧亚大陆之下, 但 Izanagi 板块向大陆俯冲的确切时间还尚未解决。毛景文等^[3]根据华南金属矿产形成最早时间及其动力学特点, 推测 Izanagi 板块于 175 Ma 左右沿 NW 方向向欧亚大陆之下低角度俯冲, 中国东部大陆边缘由于受伊泽奈奇板块向北西俯冲逐渐成为活动大陆边缘, 沿钦杭古板块焊接带发生俯冲板片重熔, 与此同时, 大陆地壳不断加厚, 在弧后地区出现一系列 NE 向岩石圈伸展带和深大断裂。赣南的双峰式火山-侵入杂岩(158~179 Ma)^[63]和 A-型花岗岩或碱性侵入岩(165~173 Ma)^[64]以及 GILDER 等^[65]提出从杭州经江西、湖南至十万大山(钦杭带)存在一个低 t_{DM} 和高 ε_{Nd} 的花岗岩带, 均表明钦杭带北东段在中侏罗纪的为一个岩石圈伸展带。华南板块在中生代发生了岩石圈的局部伸展-拉张-减薄作用^[60, 66], 由此触发了深部地幔活动, 促使幔源物质沿断裂通道向陆缘伸展区上涌、底侵^[67]: 1) 当底侵的幔源物质仅只提供热量导致增厚

古老下地壳物质或新底侵下地壳物质的部分熔融时, 即形成钦杭成矿带北东段及其邻区具有壳源特征的花岗质岩浆及钼矿床, 例如: 江西金溪熊家山钼矿床^[13]。2) 底侵的幔源物质不仅提供热量并同熔地壳物质形成花岗岩浆, 其中部分花岗岩质岩浆在演化后期发生了强烈的熔体-流体相互作用, 最终导致了与壳幔混源花岗岩有关的钼成矿作用, 例如: 赣北昆山钨钼铜矿床^[9]、赣南张家地钼钨矿床^[21]、赣中麻鸡嶂钼钨多金属矿床^[11]和十字头钼矿床等。综上所述, 钦杭带北东段 172~145 Ma 期间的钼矿床可能形成于与 Izanagi 板块向欧亚大陆低角度俯冲有关的弧后局部伸展的背景下^[68~70]。

GOLDFARB 等^[71]和 MAO 等^[72]提出 Izanagi 板块的运动方向于 135 Ma 左右发生转向, 由原来的斜向俯冲转向几乎平行大陆边缘运动, 俯冲板片沿 NE 方向快速走滑, 导致中国东部大陆全面伸展。钦杭带北东段在 137~132 Ma 期间形成的钼矿床可能是对 Izanagi 俯冲板块沿 NE 方向快速走滑的响应。

5 结论

1) 江西永平十字头钼矿床形成于(158.0±2.5) Ma 以前, 形成时间相当于中晚侏罗世的成矿高峰期。

2) 十字头钼矿床的成矿物质主要由具有壳幔混合来源属性的似斑状黑云母花岗质岩浆提供。十字头似斑状黑云母花岗岩与本区成矿有着密切的亲缘关系, 二者属于相同地球动力学背景下同一地质-构造-岩浆事件的产物。

3) 钦杭成矿带北东段及其邻区在中生代存在两期钼的成矿事件, 第一期为 172~145 Ma, 第二期为 140~130 Ma, 它们分别是对 Izanagi 板块向欧亚大陆之下低角度俯冲有关的弧后局部伸展和 Izanagi 俯冲板块沿 NE 方向快速走滑的响应。

REFERENCES

- [1] 杨明桂, 梅勇文. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 1997(3): 52~59.
YANG Ming-gui, MEI Yong-wen. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou-Hangzhou paleoplate juncture[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 1997(3): 52~59.
- [2] 杨明桂, 黄水保, 楼法生. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 528~543.
- [3] YANG Ming-gui, HUANG Shui-bao, LOU Fa-sheng. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area[J]. Geology in China, 2009, 36(3): 528~543.
- [4] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 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 Jing-wen, CHEN Mao-hong, YUAN Shun-da, GUO Chun-li. 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.
- [5] 徐德明, 蔡志永, 龙文国, 张鲲, 王磊, 周岱, 黄皓. 钦杭成矿带的研究历史和现状[J]. 华南地质与矿产, 2012, 28(4): 277~289.
XU De-ming, LIN Zhi-yong, LONG Wen-guo, ZHANG Kun, WANG Lei, ZHOU Dai, HUANG Hao. Research history and current situation of Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt, South China[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2012, 28(4): 277~289.
- [6] 易万亿, 杨庆坤. 钦杭成矿带金属矿产时空分布特征[J]. 有色金属, 2013, 65(9): 33~39.
YI Wan-yi, YANG Qing-kun. Spatial-temporal characteristics of the metallic ore in Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt[J]. Nonferrous Metals, 2013, 65(9): 33~39.
- [7] NI Pei, WANG Guo-guang, CAI Yi-tao, ZHU Xiao-ting, YUAN Hui-xiang, HUANG Bao, DING Jun-ying, CHEN Hui. Genesis of the Late Jurassic Shizitou Mo deposit, South China: Evidences from fluid inclusion, H-O isotope and Re-Os geochronology[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 81(P2): 871~883.
- [8] 魏娟娟, 狄永军, 魏英文, 张达, 罗平, 罗国辉, 秦峰晓, 董越, 杨秋, 陈杰. 北武夷王坞矿区花岗岩与钼矿的关系: 来自锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年的证据[J]. 现代地质, 2016, 3(1): 59~68.
WEI Juan-juan, DI Yong-jun, WEI Ying-wen, ZHANG Da, LUO Ping, LUO Guo-hui, QIN Xiao-feng, DONG Yue, YANG Qiu, CHEN Jie. Relationship between granophyre and molybdenum ore of Wangwu mining district in North Wuyi region: Evidences from zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating[J]. Geoscience, 2016, 3(1): 59~68.
- [9] 邱骏挺, 余心起, 吴淦国, 屈文俊, 狄永军, 张达, 罗平, 杜安道. 北武夷篁碧矿区逆冲推覆构造及其与钼、铅-锌成矿作用关系[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 243~255.
QIU Jun-ting, YU Xin-qi, WU Gan-guo, QU Wen-jun, DI Yong-jun, ZHANG Da, LUO Ping, DU An-dao. Research on the nappe structure and its relevance to the mineralization in the Huangbi deposit, North Wuyi, Southeast China[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 243~255.
- [10] 张明玉, 丰成友, 李大新, 王辉, 周建厚, 叶少贞, 汪国华.

- 赣北大湖塘地区昆山 W-Mo-Cu 矿床侵入岩锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年代学及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(3): 503–516.
- ZHANG Ming-yu, FENG Cheng-you, LI Da-xin, WANG Hui, ZHOU Jian-hou, YE Shao-zhen, WANG Guo-hua. Geochronological study of the Kunshan W-Mo-Cu deposit in the Dahutang area, Northern Jiangxi province and its geological significance[J]. Geotectonica et Metallogenesis, 2016, 40(3): 503–516.
- [10] 张志辉, 张 达, 吴淦国, 罗 平, 陈锡华, 狄永军, 吕良冀. 赣北梅子坑钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 吉林大学学报, 2013, 43(6): 1851–1863.
- ZHANG Zhi-hui, ZHANG Da, WU Gan-guo, LUO Ping, CHEN Xi-hua, DI Yong-jun, LÜ Liang-ji. Re-Os isotopic age of molybdenite from deposit in Northern Jiangxi province and the Meizikeng molybdenite its geological Significance[J]. Journal of Jilin University, 2013, 43(6): 1851–1863.
- [11] 宋凯林. 赣中麻鸡嶂钼多金属矿特征及辉钼矿 Re-Os 年龄[D]. 抚州: 东华理工大学, 2014: 1–63.
- SONG Kai-lin. Geological features and molybdenite Re-Os Age of Majizhang Molybdenum and tungsten Bailanggou, the Center of Jiangxi province[D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2014: 1–63.
- [12] 曾载淋, 刘善宝, 邓茂春, 黄 凡, 陈毓川, 赖志坚, 屈文俊. 江西广昌新安钼矿床地质特征及其铼–锇同位素测年[J]. 岩矿测试, 2011, 30(2): 144–149.
- ZENG Zai-lin, LIU Shan-bao, DENG Mao-chun, HUANG Fan, CHEN Yu-Chuan, LAI Zhi-jian, QU Wen-jun. Geological characteristics and Re-Os dating of the Xin'an molybdenum deposit in Jiangxi province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2011, 30(2): 144–149.
- [13] 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 刘建光, 屈文俊, 杨竹森, 左力艳, 万禄进, 肖茂章. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其 Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 2007, 81(7): 946–957.
- MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, DONG Guang-yu, LIU Jian-guang, QU Wen-jun, YANG Zhu-seng, ZOU Li-yan, WAN Lu-jin, XIAO Mao-zhang. The geological characteristics and Re-Os isotope age of molybdenite of the Xiongjishan molybdenum deposit, Jiangxi province[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(7): 946–957.
- [14] 张 勇, 潘家永, 马东升, 刘国奇, 韦新亚, 张雷雷, 马崇军, 杨春鹏. 江西修水县莲花芯 Cu -Mo-W 矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 2016, 35(4): 867–880.
- ZHANG Yong, PAN Jia-Yong, MA Dong-Sheng, LIU Guo-Qi, WEI Xin-Ya, Zhang Lei-Lei, Ma Chong-Jun, YANG Chun-Peng. Re-Os isotope dating of molybdenite from Lianhuaxin Cu-Mo-W deposit in Xiushui county of Jiangxi province and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2016, 35(4): 867–880.
- [15] 张家菁, 吴木森, 陈郑辉, 刘善宝, 李立兴, 邱良明, 吴 烽, 黄安杰, 祝平俊. 江西省上饶县金竹坪钼多金属矿床成矿年代学研究[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 228–232.
- ZHANG Jia-jing, WU Mu-sen, CHEN Zheng-hui, LIU Shan-bao, LI Li-xing, QIU Liang-ming, WU Bin, HUANG An-jie, ZHU Ping-jun. Geochronologic study on the Jinzhuping molybdenum-polymetallic deposit from Shangrao of Jiangxi province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(3): 228–232.
- [16] 胡开明, 唐增才, 孟祥随, 周汉文, 董学发, 杜 雄, 陈忠大. 浙西大铜坑斑岩型钨钼矿床成岩成矿年代学[J]. 地球科学, 2016, 41(9): 1435–1450.
- HU Kai-ming, TANG Zeng-cai, MENG Xiang-sui, ZHOU Han-wen, DONG Xue-fa, DU Xiong, CHEN Zhong-da. Chronology of petrogenesis porphyry W-Mo and mineralization of Datongkeng deposit in West Zhejiang[J]. Earth Science, 2016, 41(9): 1435–1450.
- [17] ZENG Qing-dong, WANG Yong-bin, ZHANG Song, LIU Jian-ming, QIN Ke-zhang, YANG Jin-hui, SUN Wei-dong, QU Wen-jun. U-Pb and Re-Os geochronology of the Tongcun molybdenum deposit and Zhilingtou gold-silver deposit in Zhejiang province, Southeast China, and its geological implications[J]. Resource Geology, 2012, 63(1): 99–109.
- [18] 唐增才, 董学发, 胡文杰, 孟祥随, 荣一萍. 浙西闲林岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 884–892.
- TANG Zeng-cai, DONG Xue-fa, HU Wen-jie, MENG Xiang-sui, RONG Yi-ping. SHRIMP zircon U-Pb dating of Xianlin granodiorite rock in Western Zhejiang and their geological significance[J]. Geoscience, 2014, 28(5): 884–892.
- [19] 张建芳, 陈美君, 解怀生, 龚瑞君, 祝必贤, 汪隆武, 许兴苗. 浙西北漓渚地区与岩浆岩有关铁多金属矿床类型、成矿时代及找矿前景[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(4): 647–657.
- ZHANG Jian-fang, CHEN Mei-jun, XIE Huai-sheng, GONG Rui-jun, ZHU Bi-xian, WANG Long-wu, XU Xing-miao. Metallogenic types, age and prospecting potential of iron polymetallic deposits associated with igneous rocks at Lizhu district, Northwestern Zhejiang province[J]. Geotectonica et Metallogenesis, 2015, 39(4): 647–657.
- [20] 黄安杰, 温祖高, 刘善宝, 刘消清, 刘献满, 张家菁, 施光海, 刘战庆. 江西乐平塔前钨钼矿中辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(4): 496–504.
- HUANG An-jie, WEN Zu-gao, LIU Shan-bao, LIU Xiao-qing, LIU Xian-man, ZHANG Jia-jing, SHI Guang-hai, LIU Zhan-qing. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Taqian W-Mo deposit in Leping county, Jiangxi province and its geological implications[J]. Acta Petrologica Mineralogica, 2013, 32(4): 496–504.

- [21] 丰成友, 曾载淋, 屈文俊, 刘俊生, 李海潘. 赣南兴国县张家地钼钨矿床成岩成矿时代及地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(3): 709–724.
FENG Cheng-you, ZENG Zai-lin, QU Wen-Jun, LIU Jun-Sheng, LI Hai-Pan. A geochronological study of granite and related mineralization of the Zhangjiadi molybdenite-tungsten deposit in Xingguo county, Southern Jiangxi province, China, and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(3): 709–724.
- [22] 许建祥, 曾载淋, 李雪琴, 刘俊生, 陈郑辉, 刘善宝, 郭春丽, 王成辉. 江西寻乌铜坑嶂钼矿床地质特征及其成矿时代[J]. 地质学报, 2007, 81(7): 924–928.
XU Jian-xiang, ZENG Zai-lin, LI Xue-qin, LIU Jun-sheng, CHEN Zheng-hui, LIU Shan-bao, GUO Chun-li, WANG Cheng-hui. Geological characteristics and mineralization age of the Tongkengzhang molybdenum deposit in Xunwu County, South Jiangxi province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(7): 924–928.
- [23] 朱碧, 蒋少涌, 丁昕, 姜耀辉, 倪培, 顾连兴. 江西永平铜矿区花岗岩热液蚀变与岩石成因: 矿物化学、元素地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1900–1916.
ZHU Bi, JIANG Shao-Yong, DING Xin, JIANG Yao-hui, NI Pei, GU Liang-xin. Hydrothermal alteration and petrogenesis of granites in the Yongping copper deposit, Jiangxi province: Constraints from mineral chemistry, element geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(8): 1900–1916.
- [24] 陈小惠. 江西永平十字头钼矿床控矿因素及成因探讨[J]. 江西有色金属, 2009, 23(3): 5–7.
CHEN Xiao-hui. On the ore-controlled factors and causes of Yongping Shizitou molybdenum deposit[J]. *Jiangxi Nonferrous Metals*, 2009, 23(3): 5–7.
- [25] 陈军军. 永平铜多金属矿床地质与地球化学特征[D]. 北京: 中国地质大学, 2015: 1–55.
CHEN Jun-jun. Geochemistry characteristic of Yongping copper-polymetallic deposit in Jiangxi province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015: 1–55.
- [26] 黄生龙, 华嵘辉, 秦志刚. 永平铜硫(钨)矿区扩大寻找隐伏钼矿床的前景[J]. 铜业工程, 2009(2): 10–19.
HUANG Sheng-long, HUA Rong-hui, QIN Zhi-gang. Prospect of searching latent moly deposit in Yongping Cu-S (tungsten) mine area[J]. *Copper Engineering*, 2009(2): 10–19.
- [27] 文浩, 龚晓可. 江西铅山永平十字头钼矿区深部找矿前景分析[J]. 有色金属科学与工程, 2013, 4(4): 91–95.
WEN Hao, GONG Xiao-ke. Analysis of the deep ore prospecting potential in Shizitou molybdenum area[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2013, 4(4): 91–95.
- [28] 任建国. 江西永平矿区构造成矿作用及矿床成因探讨[J]. 江西铜业工程, 1994(3): 35–40.
REN Jian-guo. Study on tectonic mineralization and ore genesis in Yongping mining area, Jiangxi province[J]. *Jiangxi Copper Engineering*, 1994(3): 35–40.
- [29] 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 顾连兴, 姜耀辉. 江西武山和永平铜矿含矿花岗质岩体锆石 SMS U-Pb 年代学研究[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 383–389.
DING Xin, JIANG Shao-yong, NI Pei, GU Lian-xing, JIANG Yao-hui. Zircon SMS U-Pb geochronology of host granitoids in Wushan and Yongping copper deposits, Jiangxi province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(3): 383–389.
- [30] 吴远震. 永平天排山铜硫矿成因的认识[J]. 铜业工程, 2007(4): 10–12.
WU Yuan-zheng. Understanding on formation of Tianpaisan copper-sulfur mine in Yongping[J]. *Copper Engineering*, 2007(4): 10–12.
- [31] 全伟. 江西永平铜钼矿床十字头岩体成因分析[D]. 长沙: 中南大学, 2015: 1–88.
QUAN Wei. Petrogenesis of Shizitou granites in Yongping Cu-Mo deposit, Jiangxi province[D]. Changsha: Central South University, 2015: 1–88.
- [32] 徐国才. 江西铅山杨林斑岩型钼矿床地质特征[J]. 矿产与地质, 2012, 26(5): 388–394.
XU Guo-cai. Geological characteristics of Yanglin porphyry Mo deposit in Qianshan, Jiangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2012, 26(5): 388–394.
- [33] 李晓峰, WATANABE Yasushi, 屈文俊. 江西永平铜矿花岗质岩石的岩石结构、地球化学特征及其成矿意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2353–2365.
LI Xiao-feng, WATANABE Y, QU Wen-jun. Textures and geochemical characteristics of granitic rocks in the Yongping climax-type Cu-Mo deposit, Jiangxi, Southeastern China, and their alteration, mineralization and tectonic regime[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2353–2365.
- [34] MAO J W, DU A D, SELTMANN R, YU J J. Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, Central Urals, Russia[J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38: 251–257.
- [35] 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, ZHOU T F. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenetic implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29: 307–324.
- [36] MAO J W, XIE G Q, BIERLEIN F. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 4607–4626.

- [37] STEIN H J, MARKEY R J, MORGAN J W, DU A D, SUN Y. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt, Shannxi province, China[J]. *Economic Geology*, 1997, 92(7): 827–835.
- [38] MAO J W, ZHANG Z C, ZHANG Z H. 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.
- [39] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 117–131.
- CHEN Yu-long, YANG Zhong-fang, ZHAO Zhi-dan. Isotopic geochronology and geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005: 117–131.
- [40] 杨明桂, 王昆. 江西省地质构造格架及地壳演化[J]. 江西地质, 1994, 8(4): 239–251.
- YANG Ming-gui, WANG Kun. The geological tectonic framework and the crust evolution in Jiangxi province[J]. *Geology of Jiangxi*, 1994, 8(4): 239–251.
- [41] 杜灵通. 江西永平铜矿成矿物质来源及矿床成因分析[J]. 资源环境与工程, 2005, 19(1): 4–11.
- DU Ling-tong. Sources of ore-forming material and genesis analysis of Yongping copper deposit, Jiangxi[J]. *Resources Environment and Engineering*, 2005, 19(1): 4–11.
- [42] 汪程. 江西永平十字头钼矿床成矿作用分析[D]. 长沙: 中南大学, 2016: 1–83.
- WANG Cheng. Metallogenic mechanism of Shizitou Mo deposit, Yongping, Jiangxi province, China[D]. Changsha: Central South University, 2016: 1–83.
- [43] 李超, 屈文俊, 杜安道, 周利敏. 含有普通铼的辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 702–708.
- LI Chao, QU Wen-jun, DU An-dao, ZHOU Li-min. Study on Re-Os isotope in molybdenite containing common Os[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 702–708.
- [44] STEIN H J, MARKEY R J, MORGAN J W. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. *Terra Nova*, 2001, 13(6): 479–486.
- [45] SELBY D, CREASER R A. Late and Mid-Cretaceous mineralization in the Northern Canadian Cordillera: Constraints from Re-Os molybdenite dates[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(6): 1461–1467.
- [46] SELBY D, CREASER R A. Re-Os geochronology and systematics in molybdenite from the Endako Porphyry Molybdenum deposit, British Columbia, Canada[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(1): 197–204.
- [47] SELBY D, CREASER RA. Macro scale NTIMS and micro scale 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.
- [48] 杜安道, 屈文俊, 王登红, 李厚民, 丰成友, 刘华, 任静, 曾法刚. 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 An-dao, QU Wen-jun, WANG Deng-hong, LI Hou-min, FENG Cheng-you, LIU Hua, REN Jing, ZENG Fa-gang. Subgrain-size decoupling of Re and ^{187}Os within molybdenite[J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(5): 572–580.
- [49] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 45–55.
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, LI Xiao-feng, ZHANG Chang-qing, MEI Yan-xiong. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 45–55.
- [50] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 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 Jing-wen, XIE Gui-qing, GUO Chun-li, CHEN Yu-chuan. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanning region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2329–2338.
- [51] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 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 Jing-wen, XIE Gui-qing, GUO Chun-li, YUAN Shun-da, CHENG Yan-bo, CHEN Yu-chuan. 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.
- [52] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[J]. 矿床地质, 2005, 24(2): 99–107.
- HUA Ren-min, CHEN Pei-rong, ZHANG Wen-lan, LU Jian-jun. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China[J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(2): 99–107.
- [53] 刘迅, 黄震. 江西永平铜矿田构造及地球化学特征[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1993: 9–51.
- LIU Xun, HUANG Zheng. Structures and geochemical characteristics of Yongping copper ore field, Jiangxi[J]. *Bulletin of the Institute of Geomechanics Cags*, 1993: 9–51.
- [54] 周新民, 李显武. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩形成的构造岩浆模式[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 273–295.
- ZHOU Xin-min, LI Wu-xian. Tectonic magma pattern of Late Mesozoic granitic volcanic-intrusive complex in South Eastern China[M]. Beijing: Science Press, 2002: 273–295.
- [55] 徐夕生, 谢昕. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 318–334.

- XU Xi-sheng, XIE Xin. Late Mesozoic-Cenozoic basaltic rocks and crust-mantle interaction, SE China[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(3): 318–334.
- [56] 舒良树, 周新民, 邓平, 余心起. 南岭构造带的基本地质特征[J]. 地质论评, 2006, 52(2): 251–265.
- SHU Liang-shu, ZHOU Xin-min, DENG Ping, YU Xin-qi. Principal geological features of Nanling tectonic belt, South China[J]. Geological Review, 2006, 52(2): 251–265.
- [57] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1–204.
- REN Ji-shun, CHEN Ting-yu, NIU Bao-gui, LIU Zhi-gang, LIU Feng-ren. Tectonic evolution and mineralization of the continental lithosphere in Eastern China and its adjacent areas[M]. Beijing: Science Press, 1990: 1–204.
- [58] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚. 从全球看中国大地构造—中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1–50.
- REN Ji-shun, WANG Zuo-xun, CHEN Bing-wei. A brief description of China and its neighboring regions from the perspective of global tectonics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1–50.
- [59] 徐磊. 钦-杭结合带(东段)多期次构造变形与成矿作用关系[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- XU Lei. Multi-stages structural deformation and its influence on the metallogenesis in the east part of the Qinzhou-Hangzhou structural belt[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [60] ZHOU X M, SUN T, SHEN W Z, SHU L S, NIU Y L. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. Episodes, 2006, 29: 26–33.
- [61] MARUYAMA S, SENO T. Orogeny and relative plate motion: Example of the Japanese islands[J]. Tectonophysics, 1986, 127: 305–329.
- [62] 万天丰, 朱鸿. 中国大陆及邻区中生代亲生代大地构造与环境变迁[J]. 现代地质, 2002, 16(2): 107–120.
- WAN Tian-feng, ZHU Hong. Tectonics and environment change of Meso-Cenozoic in China continent and its adjacent areas[J]. Geoscience, 2002, 16(2): 107–120.
- [63] CHEN P R, HUA R M, ZHANG B T, LU J J, FAN C F. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: Petrological constraints and geodynamic settings[J]. Science in China (Series D), 2002, 45(8): 755–768.
- [64] LI X H, CHEN Z G, LIU D Y, LI W X. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from Southern Jiangxi province, SE China: Age, origin and tectonic significance[J]. International Geology Review, 2003, 45: 898–921.
- [65] GILDER S A, GILL J, COE R S. Isotopic and paleo-magmatic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China[J]. Journal of Geophysics Research, 1996, 101 (B7): 13137–16154.
- [66] WANG G G, NI P, ZHAO K D, WANG X L, LIU J Q, JIANG S Y, CHEN H. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China: Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization[J]. Lithos, 2012, 150: 135–154.
- [67] MAO J W, CHENG Y B, CHEN M H, PIRAJNO F. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings[J]. Mineralium Deposita, 2013, 48(3): 267–294.
- [68] JIANG Y H, JIANG S Y, ZHAO K D. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlshan granites and mafic dikes, Southeast China: Implication for a back-arc extension setting [J]. Geological Magazine, 2006, 143: 457–474.
- [69] 谢银财. 湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩成因及成矿物质来源研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- XIE Yincai. Genesis of the granodiorite porphyry and sources of metallogenic materials in the Baoshan Pb-Zn polymetallic deposit, Southern Hunan Province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [70] 全伟, 邵拥军. 湘东南茶陵地区锡田岩体成因分析. 南方金属, 2014(6): 13–21.
- QUAN Wei, SHAO Yong-jun. Petrogenesis of Xitian granite mass, Chaling, Southeastern Hunan[J]. Southern Metals, 2014(6): 13–21.
- [71] GOLDFARBL R J, HART C, DAVIS G, GROVES D. East Asian gold: Deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons[J]. Economic Geology, 2007, 102(3): 341–345.
- [72] MAO J W, WANG Y T, LI H M, PIRAJNO F, ZHANG C Q, WANG R T. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics[J]. Ore Geology Reviews, 2008, 33: 361–381.

Re-Os isotopic chronology and geological significance of molybdenites in Shizitou molybdenum deposit, Yongping, Jiangxi province, China

SHAO Yong-jun^{1,2}, PENG Nan-hai^{1,2,3}, WANG Cheng^{1,2}, ZHNAG Yu⁴, LIU Zhong-fa^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Non-ferrous Metals and Geological Environment Monitoring(Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China;
2. School of Geo-sciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. China Non-ferrous Metals Geological Survey, Beijing 100012, China;
4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The Shizitou Mo deposit in Yongping, Jiangxi is a recently discovered important deposit in the eastern section of the Qin-Hang metallogenic belt. The Mo deposit mainly occurs in the outer contact zone between the porphyryaceous biotite granite and the Zhoutan group migmatite, and is mainly controlled by the rock body and structures. Re-Os dating of molybdenite gives a model age of (156.9 ± 2.2) Ma– (158.5 ± 2.4) Ma, with a weighed mean age of (158 ± 1) Ma, and gives an isochron age of (158.0 ± 2.5) Ma. The Re content of the molybdenite is 65.05×10^{-6} – 150.20×10^{-6} , indicating that the ore-forming materials have mantle-crust mixed features. Based on the comparison between the ore-forming age and the rock-forming age of the deposit area, and by looking into the geological features and geochemical features of the deposit, it is concluded that the ore-forming process of the area is closely linked with the porphyryaceous biotite granite rock body, and that both the deposit and the rock body are products of the same geological-tectonic-magmatic event under the same dynamic background. Based on previous studies in the northeastern section of the Qinhang metallogenic belt, it is believed that two episodes of Mo ore-forming events at 172–145 Ma and 140–130 Ma have occurred in the northeastern section of the Qinhang metallogenic belt. The time of the two episodes of ore-forming events corresponds with the two ore-forming peak periods in late Jurassic and Cretaceous, in response to the back-arc partial extension associated with the low-angle subduction of the Izanagi plate beneath the Eurasia plate and the quick NE striking slipping of the Izanagi subduction plate.

Key words: Shizitou molybdenum deposit; molybdenite; Re-Os isotopic chronology; metallogenic age; metallogenic-diagenetic relationship; metallogenic dynamic setting

Foundation item: Project(2015CX008) supported by the Innovation-driven Plan of Central South University

Received date: 2016-12-27; **Accepted date:** 2018-07-11

Corresponding author: SHAO Yong-jun; Tel: +86-13973149482; E-mail: shaoyongjun@126.com

(编辑 何学锋)