

doi:10.3799/dqkx.2013.000

福建中生代钼矿的辉钼矿矿物学特征

王翠芝^{1,2}, 刘文元^{1,2}

1. 福州大学紫金矿业学院, 福建福州 350108

2. 福建省矿产资源重点实验室, 福建福州 350108

摘要: 福建中生代钼矿分布广泛, 并伴生有一定的铼。通过系统研究福建中生代钼矿基本特征, 总结出主要有斑岩型、岩浆期后热液型、火山热液型、构造角砾岩型(热液石英脉型)及少量矽卡岩型, 选择坪地、上西坑、罗卜岭、马坑等4个典型钼矿进行重点研究。在野外地质调查、岩相学的基础上, 进行了矿相学及辉钼矿矿石矿物学的系统研究, 得出福建中生代钼矿中辉钼矿的晶体形态主要表现为颗粒较大(粗到中细粒), 结晶度高, 多呈片状、鳞片状、局部板状, 多色性明显, 个别矿区辉钼矿颗粒较小, 结晶较差, 多色性不明显; 辉钼矿多型主要为2H, 少量2H+3R型、3R型; 辉钼矿矿物化学成分中微量杂质元素(包括Re含量, 一般为 $(N \sim N \times 100) \times 10^{-6}$, 并以 $(N \sim N \times 10) \times 10^{-6}$ 为主)较低。本区辉钼矿的这些矿物学特征说明其形成时的温度条件较高, 多为中高温环境, 其物源可能是壳幔混染源, 且以壳源为主; 中生代钼成矿在福建省内具普遍性, 辉钼矿中的Re作为有益的伴生元素具有一定的综合利用价值。

关键词: 福建省; 中生代; 辉钼矿; 矿物; 指示作用; 地球化学。

中图分类号: P578

文章编号: 1000-2383(2013)06-1240-13

收稿日期: 2012-12-27

Mineralogical Characteristics of Molybdenite of Mesozoic Molybdenum in Fujian Province

WANG Cui-zhi^{1,2}, LIU Wen-yuan^{1,2}

1. College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2. Fujian Key Laboratory of Mineral Resources, Fuzhou 350108, China

Abstract: Mesozoic molybdenum deposits are distributed widely in Fujian, and associated with a certain amount of rhenium. This study explores Mesozoic molybdenum deposits in Fujian. It is found by analysis of characteristics of ore petrology and mineralogy of molybdenite of typical molybnum deposits (Pingdi, Shangxikeng, Luobuling, Makeng, etc.) in Fujian Province, five types of the molybdenum deposits have been determined, including the porphyry type, the magmatic hydrothermal type, the volcanic hydrothermal type, the tectonic breccia type and a few skarn type. Our systematic field investigation and petrography study finds that the ores mainly have coarse-medium fine grain, platy texture, small amount of thick tabular texture; the ore mineral(only molybdenite) is of leaden color, obvious polychroism, 2H polymorph (a small amount of 2H+3R, 3R), low contents of impurities including Re($(N \sim N \times 100) \times 10^{-6}$, most $(N \sim N \times 10) \times 10^{-6}$), which indicates the ores formed in moderate-high temperature condition and the ore originates from crust-mantle mixed source (most crust source); Mesozoic molybdenum mineralization is of universality in Fujian province; and as a kind of accompanying elements, Re is of some comprehensive utilization value.

Key words: Fujian Province; Mesozoic; molybdenite; minerals; indication; geochemistry.

福建钼矿资源较多, 目前已知 Mo 矿产地 140 处, 多集中在中生代北西向的构造—岩浆带内。这些矿床(点)大多数沿着中生代火山断陷盆地边缘分

布, 成矿与中酸性(偏碱性)岩浆活动关系密切(刘诗光, 2005)。有关本区的区域地层、构造、岩浆岩、变质作用、成矿作用及矿床地质特征, 前人已有大量论述

基金项目: 福建省自然科学基金(No. 2010J01257); 国家自然科学基金项目(No. 41072067)。

作者简介: 王翠芝(1965—), 女, 副教授, 博士, 主要从事矿床成矿规律及矿产开发利用方向研究。E-mail: Wcuizhi@163.com

(袁忠信等, 1991; 傅树超和苏江湖, 1994; 赵国春等, 1996; 高天钧等, 1999; 傅树超, 2005, 2011), 但对矿石矿物学没有系统研究, 这影响到对本区中生代钨成矿的更加深刻的认识. 有关辉钨矿的矿物学尤其是成因矿物学研究, 国外许多学者借助辉钨矿的矿物多型、铼含量和钨同位素研究来讨论矿源及成矿机制 (Newberry, 1979a, 1979b; Mccandless *et al.*, 1993; Hauri and Hart, 1997; Selby and Creaser, 2001; Peng *et al.*, 2006; Raith and Stein, 2006; Mathur *et al.*, 2010; Qi *et al.*, 2012). 本文重点从本区几个典型钨矿床(如西北部的坪地钨矿、上西坑钨矿, 西南部上杭紫金山矿田罗卜岭铜钨矿及马坑铁矿伴生钨矿)中的主要矿石矿物(辉钨矿)的矿物学特征来反演辉钨矿形成时相关的地质条件, 以对福建中生代钨成矿提供矿物学证据.

1 区域地质及中生代钨矿概况

晚太古代以来福建经历了多期次强烈的地壳运动, 各期次运动相应形成了一系列形态、规模、方向不同的褶皱以及切割深度、性质、规模、方向不同的断裂或剪切、推滑构造. 尤其是中生代以来的断裂构造极其发育, 且常呈密集带状展布, 从而构成了一系列不同方向的断裂带, 把福建的地壳错切成许多大小不一的岩块、岩片, 以致区域性褶皱构造被强烈破坏. 其中以北北东—北东东向及北西向断裂带规模最大、最醒目, 它们奠定了福建区域构造的基本格架(图1). 福建省境内经历的多旋回、多阶段的地质构造发展历史, 各主要构造期均伴随有规模不等的岩浆活动. 印支运动以来, 本区岩浆活动与太平洋板块运动关系密切, 其岩性属活动大陆边缘的一套钙碱

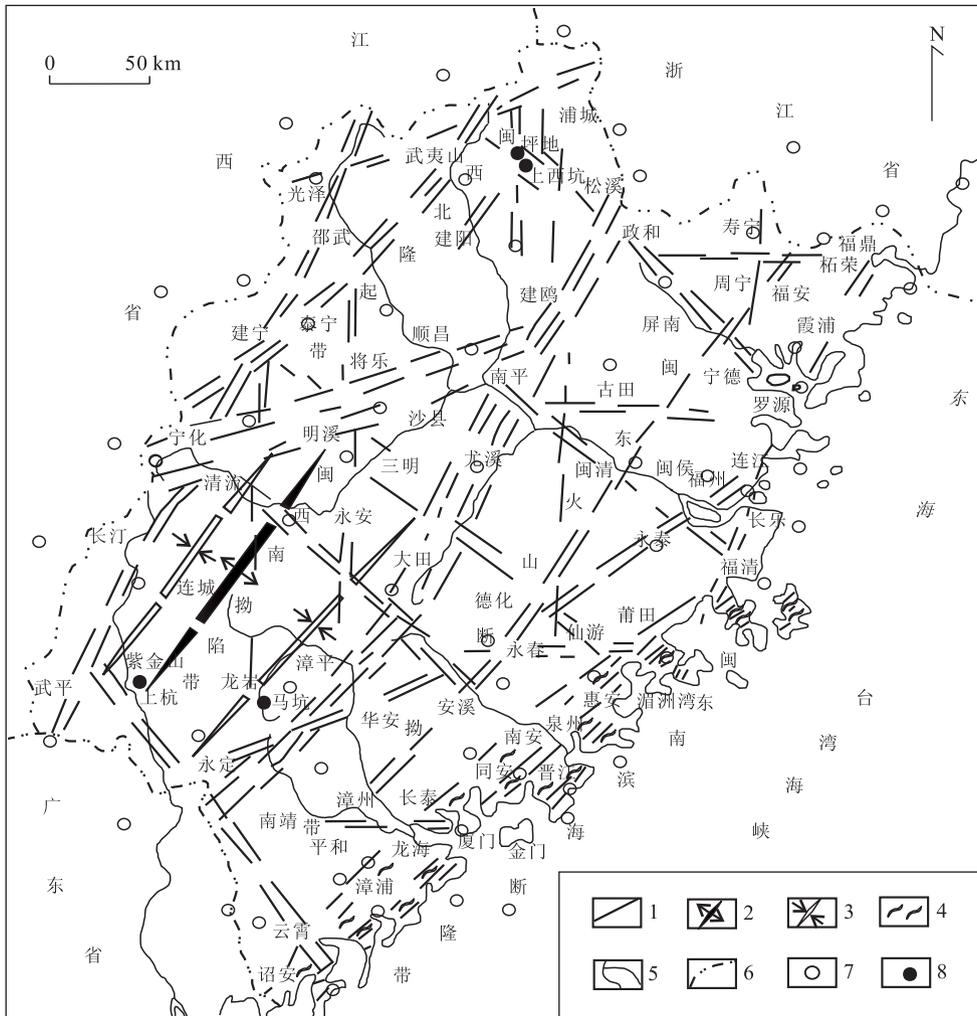


图1 福建沿海区域地质构造示意图(据1:50万福建省地质图修编, 1998)

Fig. 1 Sketch of the regional geological structure in Fujian coastal areas

1. 主要断层; 2. 背斜; 3. 向斜; 4. 片理化; 5. 主要水系; 6. 省界线; 7. 主要城镇; 8. 典型钨矿

表 1 福建中生代主要钼矿统计

Table 1 Statistics of main Mesozoic molybdenum deposits in Fujian

序号	矿床名称	矿床类型	年龄(Ma)	同位素资料来源
1	坪地钼矿	中高温热液型	102.9±1.8	本文 Re-Os 测年(另文报道)
2	上西坑钼矿	中低温热液型	102.0±1.5	本文 Re-Os 测年(另文报道)
3	罗卜岭铜钼矿	斑岩型	109.0±1.7	王登红等,2010
4	马坑铁钼矿	热液型(矽卡岩型)	130.5±0.9	邱小平,2008(内部资料)
5	福安赤路钼矿	斑岩型	105.3±1.6	张克尧等,2009
6	周宁咸格钼矿	斑岩型	102.6	王登红等,2010
7	古田三保钨钼矿	岩浆期后热液型	81.5~85.0	郑开旗,1989
8	永泰无岩坑钼矿	岩浆期后热液型	燕山晚期	谭元松,2010
9	漳平北坑场多金属矿	岩浆期后热液型	139.8±2.3~143.7±2.1	张达等,2010
10	平和钟腾铜钼矿	斑岩型	109.0±2.8	王登红等,2010
11	仙游砺山钼矿点	岩浆期后热液型	91.7±4.9	王成辉等,2009
12	宁化行洛坑钨钼矿	含钨石英脉型	156.3±4.8	张家菁,2008
13	永定山口钼矿	火山热液型	165.3±3.5	罗锦昌,2009
14	霞浦大湾钼矿	热液充填—交代型	J ₃	杨武平,2007

性岩石组合,早白垩世晚期尚有较大规模的碱性岩浆活动,且以岩浆侵入活动与火山活动密切共生为特征,除西部个别地区外,各期侵入岩均伴有不同规模的火山活动及相应的火山碎屑岩堆积,尤其燕山期岩浆活动,侵入岩和火山岩同时、同源,规模相当,演化趋势相同,岩石中钾质成分具有自东向西递增趋势。福建省构造活动复杂,岩石类型也多样,沉积岩、变质岩与燕山期火山岩各占 1/3。闽西北、闽北地区前震旦纪地层出露广泛,岩石多具有中—深区域变质和混合岩化,为后期钼成矿提供了矿源。闽西南地区晚古生代准地台型细碎屑岩—碳酸盐岩地层出露广泛,不仅是本省煤、铁、锰、石灰岩等沉积矿产的重要含矿层位,同时也为后期钼成矿提供了赋存空间。晚三叠—晚第三纪地层以陆相盆地沉积及火山喷发堆积为主,尤其是晚侏罗世—白垩纪火山岩广泛分布全省,也为本省的钼矿形成提供物源或热源,因此,本区广泛分布各种类型的中生代钼矿(表 1)。

2 辉钼矿的矿物学特征

本文重点选择闽西北隆起带的坪地中高温热液型、上西坑中低温热液型和闽西南拗陷带中的上杭紫金山矿田罗卜岭斑岩型、马坑铁矿伴生钼矿等四个不同类型的钼矿进行研究,分别从辉钼矿的形态、大小、多型、矿物化学成分、Re 含量等方面的特征来研究不同类型的钼矿中辉钼矿的矿物学特征,以便了解其与成矿的关系。

2.1 辉钼矿的形态、大小

坪地辉钼矿为中高温热液型钼矿(傅树超,

2005),有两种产状,第一种是产于侏罗纪晚期钾长花岗岩岩体“层节理”中的黄铁绢英岩中的辉钼矿(6个矿体分别为 I₁、I₂、I₃、I₄、I₅、I₇,其中 I₁ 规模最大,控制程度最高),其多呈铅灰色,半自形、他形鳞片状、片状(图 2a),结晶度较高,多色性明显,粒径较大,0.01~0.70 mm,以 0.01~0.50 mm 为主。另一种是产于钾长花岗岩及大金山组黑云变粒岩地层中南北向断裂构造角砾岩及石英脉型辉钼矿(属于 I₆ 矿体),其多呈灰黑色,颗粒相对较小,呈细小片状,自形程度较差,但个别呈厚板状,常常弯曲,多色性也比较明显(图 2b, 2c)。

上西坑钼矿主要产于大金山组黑云变粒岩地层中的南北向断裂的构造角砾岩中(受四条断裂控制,其中 F₈ 控制的 IV₁ 是本次上西坑钼矿研究的重点),辉钼矿呈灰黑色,硬度较低,呈厚板状、鳞片状、片状、六边形片状等形态。相对坪地辉钼矿,多色性较差,粒度较细(图 2d),中细粒为主,一般为 0.007~1.100 mm,细粒级(0.20~0.02 mm)占 65.69%,局部辉钼矿呈玫瑰花状、束状或团块集合体,常发生弯曲或挠曲,一组完全解理(图 2e, 2f)。

罗卜岭斑岩型铜钼矿中的辉钼矿,多呈叶片状、弯曲鳞片状,半自形—自形晶结构,粒度较粗(图 2g),一般在 0.05~0.30 mm,主要以独立颗粒形式分布在钾长石和粒状石英脉中或在石英与辉钼矿脉中呈细脉浸染状产出。

马坑铁矿伴生辉钼矿,铅灰色,易污手,多为鳞片状、叶片状或不规则板状晶体,其粒度均细小(图 2h),片径一般为 0.05~0.10 mm,乃后期热液叠加的产物。常以辉钼矿—石英细脉、微脉及纯辉钼矿短

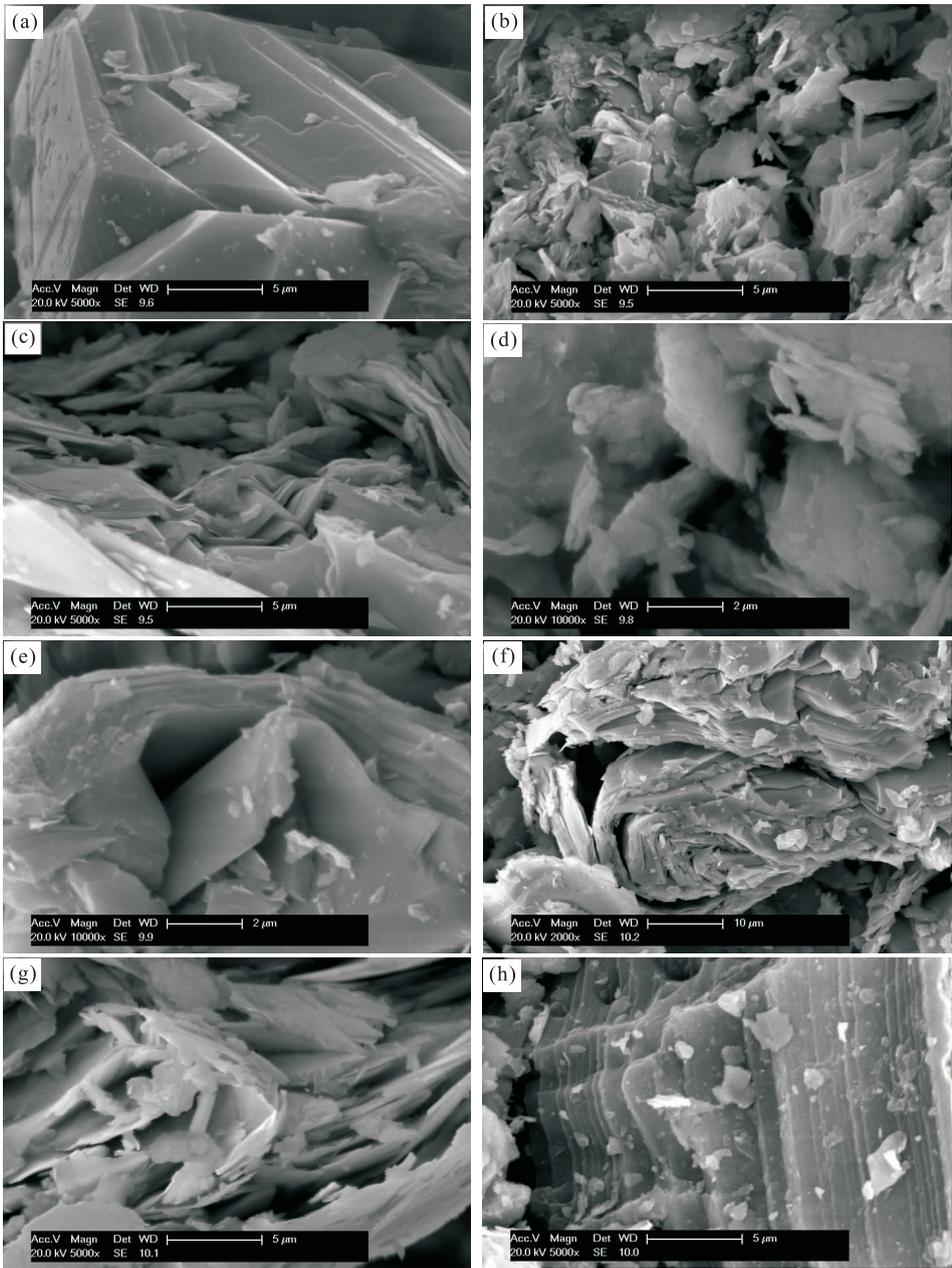


图 2 典型钼矿中辉钼矿的形态(本图为二次电子扫描图像)

Fig. 2 Shape of molybdenite in typical Mo deposits

a. 坪地 I₁ 矿体硅化岩中片状辉钼矿; b、c. 坪地 I₆ 矿体细粒及厚板状辉钼矿; d~f. 上西坑矿段 IV₁ 矿体硅化岩中细晶辉钼矿及构造角砾岩中弯曲的板状辉钼矿; g. 罗卜岭铜钼矿体中片状的辉钼矿; h. 马坑铁矿伴生钼矿体中板状辉钼矿

细脉或呈叶片状、星散状充填于铁矿石裂隙面上,亦有分布于矽卡岩蚀变围岩中的单钼矿,呈微脉、细脉、团块状产出。

2.2 辉钼矿的多型

本次研究的辉钼矿 X 粉晶衍射样品 7 件,分别采自坪地钼矿“层节理”中黄铁矿绢英岩化的 I₁ 矿体、南北向断裂蚀变构造岩中的 I₆ 矿体、钾长花岗岩裂隙中细脉状矿脉;上西坑钼矿的 IV₁ 矿体、大金

山组黑云斜长变粒岩中细脉状矿脉;上杭紫金矿田罗卜岭铜钼矿中的钼矿体;龙岩马坑铁矿伴生钼矿体中。样品先后经过重力分离、电磁分离和在双筒显微镜下挑选获得,辉钼矿纯度在 99% 以上。X 粉晶衍射在福州大学测试中心进行。粉晶衍射仪型号为 XPert Pro MPD,其主要性能参数扫描速度范围 (0.001~1.270)°/s;最小步长 0.000 1°;2θ 测量范围 0°~167°;测角仪半径可调范围 35~230 mm。该

仪器能够满足本次测试工作需要。

将研究的辉钼矿 X 粉晶衍射图中衍射峰的位置及强度与标准 2H 型和 3R 型辉钼矿的 X 粉晶衍射图中衍射峰的位置及强度对比(图 3, 2θ 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内, Jade5 软件作图, 标准卡片中 2H 型 PDF # 为 37-1492; 3R 型 PDF # 为 17-0744), 发现坪地钼矿、上西坑钼矿及紫金山罗卜岭铜钼矿中的辉钼矿的多型主要为 2H 型, 强度峰的位置及强度与标准 2H 辉钼矿完全对应, 6 个强度峰位置分别代表 6 组面网(100)、(101)、(102)、(103)、(006)和(105)的特征峰位置, 只是个别样品在局部位置稍微带有 3R 型辉钼矿晶面的峰迹, 但强度均比较小, (如 2 号样 2θ 在 41° 附近、4 号样 2θ 在 52° 附近). 另外, 辉钼矿样品中或多或少带有石英物相(2θ 在 30° 附近), 但并不影响对辉钼矿多型的判断. 而马坑铁矿中的伴生钼矿中的辉钼矿为 3R 型, 面网峰值主要集中在(006)、(004)两组上.

2.3 辉钼矿的矿物化学成分

电子探针显示(表 2), 坪地钼矿、上西坑辉钼矿、紫金山罗卜岭铜钼矿、马坑铁矿伴生钼矿中的辉钼矿的主要成分 Mo、S 均接近理论值, 而微量元素 W、Se、Re、Cu、Sn、Fe、Mn、As 等在各个矿区都有所变化. 相比而言, 坪地钼矿、上西坑辉钼矿、紫金山罗卜岭铜钼矿的辉钼矿中微量元素含量较低, 而马坑铁矿伴生钼矿中的辉钼矿的微量元素含量相对较高. 就坪地与上西坑两个相临的热液型的钼矿相比, 两个矿的辉钼矿的微量元素的种类除 W 含量相当外, 其他微量元素有明显的差别, 坪地钼矿辉钼矿中含 Cu、Sn、Fe、Mn 相对较高, 而上西坑钼矿中辉钼矿含 As、Se、Re 相对较高. 紫金山罗卜岭铜钼矿中辉钼矿相对富 W 而低 Re, 马坑铁矿伴生钼矿中的辉钼矿中相对富 As、Mn, 如图 4.

由于我们想对钼矿的铼资源进行综合评价, 因此, 特地就上述 4 个典型钼矿的不同产状的矿体中辉钼矿中的铼进行了对比研究. 坪地钼矿缓倾斜“层节理”中的辉钼矿含 Re 较低, 坪地 I₁ 矿体两个样 PDI₁₋₁₀ 和 PDI₁₋₀₇ 平均值分别为 0.010%、0.001%, 变化区间分别为 0~0.039%、0~0.006%. 坪地南北向断裂带的辉钼矿含 Re 一般稍高, I₆ 矿体为 0.010%, 变化区间为 0~0.031%; 坪地东部断裂中小矿脉样 PDZK204-1 为 0.015%, 变化区间为 0~0.042%. 上西坑南北向断裂带的 Re 含量与坪地钼矿南北向断裂带的 Re 含量相似, 3 个样 SXKIV₁₋₀₆、SXKIV₁₋₀₇、SXKIV₁₋₀₈ 平均值分别为 0.012%、0.013%、

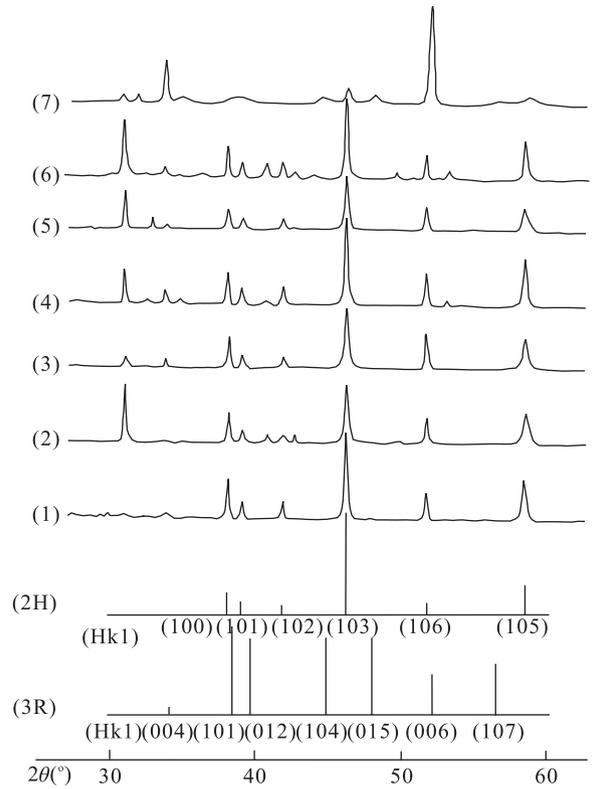


图 3 典型钼矿辉钼矿的 X 光衍射图谱与标准辉钼矿多型的峰型的对比

Fig. 3 Comparison of X-ray diffraction patterns of molybdenite of the typical molybdenum deposits with patterns of standard molybdenite polymorph

(1)~(3)坪地矿段辉钼矿; (4)~(5)上西坑矿段辉钼矿; (6)罗卜岭铜钼矿; (7)马坑铁矿辉钼矿; 2H、3R 峰位及峰值为 Jade5 软件加载的 PDF 卡片中的数据; 2H、3R 型辉钼矿的峰位及峰值为 Jade5 软件加载的 PDF 卡片中的数据; 衍射指数(hkl)数据引自文献(毛兴莉等, 1988; 王浆臻等, 2004); 数据对比时, 主要依据特征网间距 d 值来确定特征面网, $d_{hkl} = \lambda / 2 \sin \theta_{hkl}$

0.006%, 变化区间分别为 0~0.025%、0~0.027%、0~0.022%. Re-Os 同位素测试工作得到的 Re 含量特征与电子探针结果基本一致, 坪地钼矿 I₁ 矿体 Re 含量较低, 一般为 $4.091 \times 10^{-6} \sim 14.460 \times 10^{-6}$, 5 个样品平均值为 7.9348×10^{-6} ; 坪地 I₆ 矿体为 43.95×10^{-6} ; 上西坑钼矿 IV₁ 矿体中 Re 为 $2.354 \times 10^{-6} \sim 54.650 \times 10^{-6}$, 5 个样平均值 31.2632×10^{-6} . 罗卜岭铜钼矿中辉钼矿中 Re 含量也较低, 8 个电子探针点平均值为 1.42857×10^{-6} . 马坑铁矿中伴生钼矿中辉钼矿中铼含量稍高, 7 个电子探针点平均值为 115.55×10^{-6} , 比 Re-Os 同位素测年中得到的 Re 含量 18.042×10^{-6} (2008 年样品由国家地质实验测试中心测定) 及陈跃升测得辉钼矿中的 Re 含量 0.0004%~0.0026% 稍高点(陈

表 2 福建中生代典型钼矿辉钼矿电子探针结果(%)

Table 2 Electron probe microanalysis of molybdenite of typical Mesozoic molybdenum deposits in Fujian

矿床	矿体(探针点数)	W	As	Se	Re	S	Mo	Cu	Sn	Fe	Mn	Total
坪地	PDI ₁ (12)	0.016 1	0.000 1	0.002 3	0.005 9	40.148 4	59.490 3	0.022 6	0.002 9	0.069 6	0.002 5	99.850 0
坪地	PDI ₆ (15)	0.006 4	0.000 5	0.001 7	0.012 6	40.260 7	59.889 1	0.003 9	0.013 1	0.015 6	0.006 3	100.210 8
坪地	PD(27)	0.011 2	0.000 3	0.002 0	0.009 2	40.204 6	59.689 7	0.013 3	0.008 0	0.042 6	0.004 4	100.030 4
上西坑	SXKIV ₁ (12)	0.009 2	0.001 4	0.014 3	0.010 6	39.904 1	59.271 9	0.006 0	0.003 8	0.028 3	0.003 3	99.402 6
马坑	MK(7)	0.009 4	0.005 2	0.016 1	0.011 6	40.195 7	59.620 1	0.022 4	0.011 1	0.006 9	0.197 4	100.096 0
罗卜岭	LBL(8)	0.080 0	0.001 9	0.009 0	0.000 1	40.207 7	59.712 9	0.003 4	0.005 1	0.018 7	0.006 1	100.045 0
	矿床	MO+S			Re/Mo			微量元素总和				
特征值	坪地	99.86			0.000 155			0.14				
特征值	上西坑	99.77			0.000 178			0.23				
特征值	马坑	99.72			0.000 194			0.28				
特征值	罗卜岭	99.88			0.000 001 7			0.12				

注:电子探针数据由福建省矿产资源重点实验室测试,测试人:刘文元;测试时间:2011年12月。测试条件:仪器型号JXA-8230,电压20 kV,电流20 nA,束斑5 μm,标样:金属W、Re、Sn、GaAs、MoS₂、Bi₂S₃、CdSe、FeS₂、CuFeS₂、MnS。微量元素的检测限是50×10⁻⁶,有效数字为3位(小数点后),仅Re/Mo取6位。

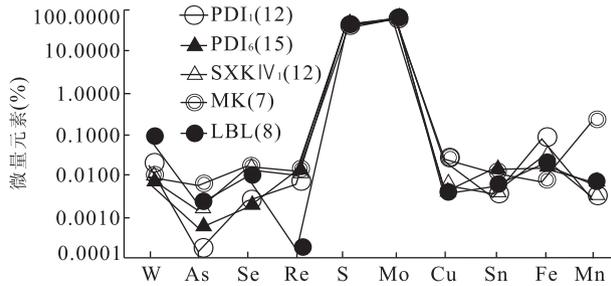


图 4 辉钼矿中微量元素曲线

Fig. 4 Trace elements of molybdenite

PDI₁(12)为坪地12个点平均值;PDI₆(15)为坪地15个点平均值;SXK(12)为上西坑12个点平均值;MK(7)为马坑7个点平均值;LBL(8)为紫金山罗卜岭8个点平均值

跃升,2009),说明马坑辉钼矿中Re的分布不太均匀。

3 辉钼矿的矿物学特征对钼矿成矿的指示作用

3.1 辉钼矿的形态、多型特征对成矿温度的指示作用

矿床形成时的温度条件对辉钼矿晶型类型、形态特征起决定性的作用,因而,从辉钼矿的形态、多型特征可以反演出辉钼矿形成时的温度条件。自然界辉钼矿有六方晶系二层型的2H及三方晶系三层型的3R两种多型,此外,还常见2H+3R混合型。毛兴莉等(1988)研究了福建沿海多种类型钼矿,认为高中温热液矿床大部分都是2H型,2H型辉钼矿一般结晶较好,颗粒较粗大,多呈片状或菊花状、团

块状集合体等形态,呈亮白-灰白多色性,非均性特别明显,强金属光泽,浅灰色条痕,晶面上偶见三角形花纹,而2H+3R型辉钼矿一般结晶较差,颗粒较细小,多呈鳞片状或粉末状,光泽较暗,非均性不明显。坪地钼矿I₁矿体矿石中辉钼矿常呈片状、鳞片状,结晶程度高,多色性明显;I₆矿体辉钼矿呈现带状,常常弯曲,结晶程度高,多色性明显;上西坑矿石特征与I₆相似,只是矿石颗粒较细。罗卜岭铜钼矿与矿区的斑岩有关,形成温度相对较高,结晶度较高,晶体呈片状。马坑铁矿的伴生钼矿是后期热液活动形成的,形成温度相对较低,形成的辉钼矿晶体较小,结晶度较差,污手。本研究的辉钼矿的这些特征,与上述前人研究的2H、3R型辉钼矿的一般特征是一致的。实验亦证明,2H型一般在900~1300℃,形成漂亮的鳞片状辉钼矿;2H+3R型一般为700~800℃,形成针状、细板状、鳞片状的辉钼矿;3R型为700~400℃辉钼矿以下形成呈似球型和细晶状分泌物的辉钼矿;400℃以下为非晶质的辉钼矿,呈致密或疏松的黑色粉末状(邵洁涟,1984)。

3.2 辉钼矿中杂质含量对辉钼矿晶型、形成温度的指示作用

2H型和3R型属同质多象变体,是同一种矿物在不同热力学条件下的产物。2H型属二层结构,每个分子中2个Mo、4个S,Mo与上下层中各1个S离子结合,配位数为6;3R型属三层结构,每个分子中3个Mo、6个S,每个Mo只能与上层(反向为下层)中各一个S离子结合,配位数为3,这种结构差异导致2H型晶体处于稳定状态,而3R处于亚稳定

表 3 不同多型的辉钼矿中化学成分对比

Table 3 Comparison of chemical composition of different polymorph molybdenite

序号	矿床名称	多型	Mo(%)	S(%)	Mo+S(%)	Re(10^{-6})	杂质(%)	杂质成分
1	大石沟	2H	58.20	37.80	96.00	381	4.00	Mn、Fe、Ti、Ce、Co、U、Ta、Nb、Sn、Zr、V、La、Yb、Lu、Cr
2	金堆城	2H	58.80	39.40	98.20	21	1.80	Fe、Ti、Mn、Co、Nb、Ce、La、Ta、Bi、W、Ca、Cr、V
3	石家湾	2H	57.90	37.50	95.40	23	4.60	Fe、Ti、Ni、Ce、La、Mn、Co、Cr、Ta、Ca、Sn、Nb、Y、V、Zr、Bi
3	石家湾	2H+3R	56.80	36.90	93.70	42	6.30	
4	南泥湖	2H	54.05	38.94	92.99	38	7.01	Fe、Re
5	马圈	2H	58.87	40.23	99.10	18	0.90	Fe、Re
6	黄背岭	2H	58.23	38.50	96.93	8	3.07	Fe、Re
7	白乃庙	3R	57.66	37.44	95.10	1 800	4.90	Fe、Re
8	三保	2H	59.60	39.88	99.48	30	0.52	Se、Te
9	紫云	2H+3R	59.01	34.20	93.21	50	6.79	Se、Te
10	坪地	2H	59.67	40.19	99.86	92	0.14	W、As、Se、Re、Cu、Sn、Fe、Mn
11	上西坑	2H	59.63	40.14	99.77	106	0.23	
12	罗卜岭	2H	59.71	40.21	99.88	1	0.12	
13	马坑	3R	59.62	40.20	99.72	116	0.28	

注:1~3. 陈福根等(1984);4~7. 韩吟文(1988);8~9. 毛兴莉等(1988);10~13. 本文.

状态. 因而,自然界中 2H 型广泛,但在中低温区多为 2H+3R. 为什么呢? 螺旋位错理论认为,晶体生长初期是无缺陷的,但随离子的不断沿晶芽的点棱面按格子构造堆积时,由于杂质元素(内应力)和热应力分布的不均匀,晶体内会产生新的特殊定向内应力,在其达到某一极限时,受该力作用的晶格沿一定剪切面位错,元素离子间存在的内应力作用,产生“螺旋状力”,进而导致 3R 形成. 一般而言,从高温到低温,由于与围岩不断物质交换,热液中杂质元素的含量和种类增多,辉钼矿的多型可从 2H 型转变成 3R 型,2H 含杂质少,3R 含杂质多(黄典豪等,1985). 另外,构造运动也会引起晶格的滑动,造成螺旋位错,导致 3R 的形成,还会影响晶体的形态,使晶体发生弯曲. 本区钼矿中的辉钼矿微量元素主要含一定的 W、Se、Re、Cu、Sn、Fe、Mn,另外,有少量 As,尤其是断裂控制的构造角砾岩中的辉钼矿杂质元素含量较高,但与其他类型的辉钼矿中微量元素总量相比并不算高(表 3),这也与一般的 2H 型辉钼矿含杂质少、3R 型的辉钼矿含杂质高的特征是稳合的.

辉钼矿成矿过程中,某些与钼离子半径、电荷相近的离子,如 Re^{4+} 、 W^{4+} 、 Ti^{4+} 、 Nb^{4+} 、 Ta^{5+} 、 Sn^{4+} 、 V^{4+} 、 Zr^{4+} 、 Fe^{3+} 可取代辉钼矿中的 Mo^{4+} ,其中 Re^{4+} 、 W^{4+} 最有可能(马晶等,2008). 铼的地球化学性质与钼十分相似,往往以类质同象形式存在辉钼矿中,其含量与辉钼矿成矿条件、矿床类型和晶体类型等有关. 前苏联各种成因类型辉钼矿的系统研究表明,在单个矿床和在同一类型的不同矿床中,铼含量总是多变的;中温条件形成的辉钼矿中铼的含量一般比高温条件形成的辉钼矿中铼含量高. 福建钼

矿铼含量相比其他地区是比较低的,这一特征符合 2H 型辉钼矿铼含量比较低的一般特征,虽已达综合利用的工业品位(地质矿产部,1987),但不是太高,且变化较大(表 4). 本区钼矿矿石成分单一、结构简单,从选矿工艺相对比较简单方面考虑,其还是具有一定的综合利用价值.

3.3 辉钼矿中铼含量对矿源的指示作用

铼是高度相容元素,钼是中等不相容元素,在地幔熔融过程中,导致地幔与地壳中铼/钼比值发生很大变化,因此,铼-钼同位素体系不仅用于进行成矿年代测定,还可以对岩石的成因、地幔演化、成矿过程进行示踪(刘桂建等,2006). Mao *et al.* (1999) 对中国各类型钼矿床中辉钼矿的铼含量进行了对比性研究,认为辉钼矿中铼含量可能指示着成矿物质的幔源、壳幔混源和壳源的属性. 碳酸岩型钼矿和斑岩铜矿的成矿物质有相当一部分来自地幔,其中的铼较高,形成的辉钼矿的铼也较高(王奖臻,2004). 反之,主要由壳源热液形成的辉钼矿的铼质量分数很低(黄典豪,1992). 统计结果显示,从幔源到壳幔混源再到壳源,矿石中辉钼矿的铼含量呈 10 倍级数下降,从与幔源到与 I 型花岗岩,再到与 S 型花岗岩有关的钼矿床,其 $w(\text{Re})$ 具有从 $\text{N} \times 10^{-4}$ 到 $\text{N} \times 10^{-5}$,再到 $\text{N} \times 10^{-6}$ 的变化趋势(周珂等,2009). 福建中生代钼矿相对其他地区的钼矿,含铼普遍较低(图 5),也可能与其成矿流体来源有关(中生代的岩浆大部分为壳幔混源,且以壳源为主).

3.4 辉钼矿的产出状态、共生组合对伴生元素 Re 含量的指示作用

毛兴莉等(1988)研究认为 2H 型主要分布于毫

表 4 福建中生代主要钼矿中辉钼矿的矿物学主要特征对比表

Table 4 Comparison of main mineralogical characteristics of molybdenite in major Mesozoic molybdenum deposits in Fujian

序号	矿床名称	成因类型	晶形	多型	形成温度(°C)	Re 含量(10 ⁻⁶)及资料来源
1	坪地钼矿	中高温热液石英脉型	片状	2H		2.354~54.65(本文)
2	上西坑钼矿	中低温热液石英脉型	鳞片状	2H		1.479~34.35(本文)
3	罗卜岭铜钼矿	斑岩型	鳞片状	2H		1.43(本文电子探针)
4	马坑铁钼矿	热液型(砂卡岩型)	鳞片状	3R		116(本文电子探针)
5	福安赤路钼矿	斑岩型	鳞片状	2H	191~224	4.277~16.174(张克尧等,2009)
6	周宁吴山底钼矿	构造蚀变带型	粉末状	2H+3R	260	
7	周宁紫云钼矿	蚀变脉型	粉末状	2H+3R	260	
8	古田香峰钨钼矿	热液石英脉型	鳞片状	2H		
9	古田三保钨钼矿	热液石英脉型	鳞片状	2H		
10	永泰犁壁坑钼矿	斑岩型	片状	2H		
11	永泰焦坑钼矿	斑岩型	鳞片状	2H		
11	永泰焦坑钼矿	热液石英脉型	片状	2H	370	
12	永泰无岩坑钼矿	岩浆期后热液型	鳞片状	2H		谭元松,2010
13	永泰犁壁坑钼矿	斑岩型	鳞片状	2H		
13	永泰犁壁坑钼矿	热液石英脉型	片状	2H		
14	漳平洛阳钼矿	斑岩型	鳞片状	2H	350	
14	漳平洛阳钼矿	热液石英脉型	细鳞状	2H+3R	200	97~168
15	漳平北坑场多金属矿	岩浆热液	它形粒状			0.996~7.062(张达等,2010)
16	平和钟腾铜钼矿	斑岩型	片状	2H		王登红等,2010
17	古田香峰钨钼矿	热液石英脉型	鳞片状	3R+2H	205	
18	仙游砺山钼矿点	热液石英脉型	粉末状	3R+2H		8.426~14.257(王成辉等,2009)
19	永春东山寨钼矿	热液型	鳞片状	2H		
20	南靖南坑钼矿点	热液型	鳞片状	2H		
21	宁化行洛坑钨钼矿	含钨石英脉	鳞片状			2.851~4.292(张家菁等,2008)
22	永定山口钼矿	细脉	浸染状			31.131~58.455(罗锦昌等,2009)
23	霞浦大湾钼矿	中高温热液型	鳞片状			杨武平,2008

注:表中除有标著引文外,其余引自毛兴莉等(1988)。

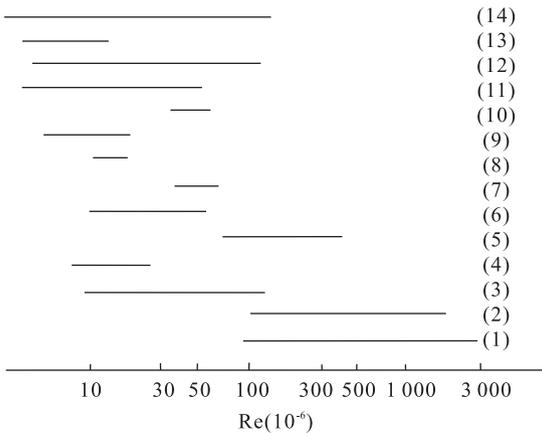


图 5 福建中生代典型钼矿中辉钼矿的铼含量与其他类型钼矿中的对比

Fig. 5 Comparison of Re content of molybdenite of Mesozoic molybdenum deposits in Fujian with others

1~6 矿床的数据引自黄典豪(1992);1. 国外斑岩型钼(钨)矿床;2. 我国斑岩型钼(钨)矿床;3. 国外斑岩钼矿床;4. 我国斑岩型钼矿床;5. 黄龙铺碳酸岩脉型钼(钨)矿床;6. 南泥湖一三道庄斑岩-砂卡岩型钼(钨)矿床;7. 北岔门铅锌矿辉钼矿;8. 福建砺山钼矿(王成辉等,2009);9. 赤路斑岩钼矿(张克尧等,2009);10. 福建省永定山口钼矿(罗锦昌等,2009);11. 坪地钼矿;12. 上西坑钼矿;13. 罗卜岭铜钼矿;14. 马坑铁钼矿;11~14 矿床数据为本文实测

米级细脉中,与高温矿物钾长石、石英、黄铁矿和萤石共生,中粗鳞片结构,产于岩浆熔离型、伟晶岩型、接触交代气成和高温热液型矿床中,其中 Re 含量相对较低;而 2H+3R 型主要分布于厘米级中粗脉内,与中低温方解石、钡天青石、方铅矿、闪锌矿、绿帘石和绿泥石等矿物伴生,其中 Re 含量相对较高。其实,辉钼矿 Re 含量的变化是由多种因素引起的。尽管 Re 在辉钼矿中含量的的高低与辉钼矿多型之间的转变没有明显的成因联系(Selby and Creaser, 2001; Peng *et al.*, 2006),但不同产出状态下辉钼矿含量出现了一定程度的重合特征,可能与一些样品产出状态的不确定性、个别共生矿物、矿床的形成温度(Terada *et al.*, 1971)和结晶物理化学条件有关(Berzina *et al.*, 2005)。因此,研究辉钼矿中 Re 含量的影响因素,既要了解辉钼矿形成时的流体中的 Mo、Re 成矿元素的含量特征,还需要结合典型矿床的特殊性全面系统地进行研究。

自然界中 Re 丰度极低,辉钼矿主要是 2H 型,并且多与黄铁矿共生。辉钼矿中 Re 的混入,有利于 2H 型向 3R 型转换。研究表明,2H 型辉钼矿中 Fe 的含量较宽,不可能对结构产生重大影响。从前

面辉钼矿中 Re 含量讨论可知,同类矿床中 Re 含量接近.各矿床中辉钼矿中的 Mo 含量均接近理论值,变化极小,同一矿床中 Re/Mo 比值变化亦很小.因此,辉钼矿中 Re/Mo 比值可反映原始成矿流体的 Re/Mo 比值.与 2H 型辉钼矿共生的黄铁矿能容纳的 Mo 较少,不足以影响成矿溶液的 Re/Mo 比值,故与黄铁矿共生的辉钼矿具 2H 型结构(韩吟文,1988).坪地、上西坑、罗卜岭等钼矿矿石中金属矿物除辉钼矿外,主要是黄铁矿,这也体现了这 3 个钼矿 2H 型辉钼矿的矿石特征与一般 2H 型辉钼矿常与黄铁矿共生的特征是一致的.马坑铁矿中的伴生钼矿为后期热液交代原铁矿石、碳酸盐岩(有大量火山岩地层)等地层的过程中形成的,热液流体成分相对复杂,造成微量元素(包括 Re)对辉钼矿中 Mo 的广泛类质同象替代现象的发生,促成 3R 型辉钼矿的形成.

有关辉钼矿产出赋存状态与伴生有益元素 Re 含量的关系,杨宗锋等(2011)统计 744 个各种产状的辉钼矿 Re-Os 的频数直方图,综合分析认为辉钼矿与白钨矿(或黑钨矿、方铅矿、闪锌矿、自然金和自然银)共生或产在长英质脉和花岗岩中可能促使其 Re 含量降低,与黄铜矿、黄铁矿和磁铁矿(或磁黄铁矿)共生或产在矽卡岩和碳酸岩中可能促使其 Re 含量升高,说明辉钼矿 Re 含量变化可能与其产出状态密切相关.辉钼矿 Re 含量显示元素亲和力(亲铜亲铁)可能与元素生成的矿物结构也有关,例如与磁铁矿共生时的辉钼矿 Re 含量显著高于与黄铁矿共生的辉钼矿 Re 含量.共生矿物同样是硫化物时,辉钼矿与黄铁矿共生时其 Re 含量又明显高于与方铅矿和闪锌矿共生的辉钼矿 Re 含量.从本次重点研究的 4 个典型钼矿来看,坪地中高温热液钼矿、罗卜岭斑岩型铜钼矿中辉钼矿多与石英脉伴生,Re 含量相对较低,而上西坑钼矿中辉钼矿多与黄铁矿、黄铜矿等硫化物伴生,马坑铁矿中的伴生钼矿体多与矽卡岩共生,这两个钼矿中的 Re 含量相对较高,这一现象与前人研究成果是一致的.

3.5 成矿时代与构造、岩浆作用的关系

东南大陆位于中国东部中生代巨型构造—岩浆岩带上,尤其是以中生代岩浆及成矿最普遍.这些构造岩浆成矿作用与中生代以来特提斯构造域向古太平洋构造域转换有直接关系.中国东南部晚三叠世—早侏罗世陆内拉张是特提斯向太平洋构造域转换的前奏(邢光福等,2002);随后伴随着中侏罗世—晚侏罗世早期古太平洋板块向欧亚板块俯冲,表现为

大规模陆内挤压,标志着构造转换开始(Wu *et al.*, 2000);晚侏罗世晚期—早白垩世古太平洋构造伸展走滑和晚白垩世的扩张裂解标志东南沿海已全面进入太平洋构造.

毛景文等总结了华南中生代金属矿床大规模成矿作用的主要时代,提出华南地区中生代主要金属矿床出现于 3 个阶段,即晚三叠世(230~210 Ma)、中晚侏罗世(170~150 Ma)和早中白垩世(134~80 Ma)(毛景文等,2007,2008).张达等重点研究了东南沿海一带中生代金属矿床成矿时代分布规律,认为东南沿海中生代金属矿床大规模成矿总体分布与华南地区比较接近,只是不同时段成矿作用的集中程度及持续时限存在差异性,主要集中在早侏罗世(200~190 Ma)、中晚侏罗世(170~150 Ma)、晚侏罗世—早白垩世(150~130 Ma)和早白垩世晚期(130~90 Ma)等 4 个成矿作用阶段(张达等,2010).这 4 个成矿作用集中阶段的形成实际上与特提斯向环太平洋构造域转换的不同阶段相对应.早侏罗世(200~190 Ma)主要为东西向的构造格局,叠加有北东向的构造变形作用.中晚侏罗世(170~150 Ma)由于太平洋板块的持续挤压,地壳加厚,形成规模较大推覆构造,同时,也形成了相应的成矿作用.晚侏罗世—早白垩世(150~130 Ma)则完成构造成矿域的转换,加厚的岩石圈出现伸展变形,出现大规模的岩浆作用与伸展空间成矿.这一时期的成矿作用在华南大陆内部及周缘地区都广泛存在(徐晓春和岳书仓,1999;吴淦国等,2004;Mao *et al.*, 2006, 2008).早白垩世晚期(130~90 Ma),则表现为持续伸展及走滑机制,形成一系列的火山—潜火山活动,并伴随着沿海地区独特的火山—潜火山热液型金属成矿作用.

浦城—宁德北西向成矿带,属于环太平洋钼成矿带中的华南褶皱系 W-Cu-Mo 成矿省的我国东南沿海钼矿区,与整个东南沿海地区乃至环太平洋地区一样,应该经历同样的构造成矿域的转换,并在转换的每一阶段都可能留下相应的成矿作用记录.本文提供的坪地钼矿、上西坑钼矿的成矿年龄,与本区所在的浦城—宁德北西向成矿带内该时代的火山—侵入岩 K-Ar 和 Rb-Sr 年龄(大多在 95~120 Ma)是一致的,且与浦城—宁德北西向成矿带东南端的福安赤路钼矿、辉钼矿的 Re-Os 同位素模式年龄为 105~106 Ma(张克尧等,2009)、中部的周宁威格钼矿(102.6 Ma,王登红等,2010)也相稳合.坪地钼矿和福安赤路钼矿作为浦城—宁德北西向成矿带的西北和东南 2 个端

元,与浦城—宁德北西向成矿带中部的上厂钼矿(刘乃忠,2005)、大林坑钼矿(刘诗光,2005)成矿都沿着中生代火山盆地边缘分布,说明浦城—宁德北西向成矿带的大规模成矿基本上是同时的。

本区南部上杭—云霄北西向成矿带也具有相同的时代特征,如上杭紫金山矿田罗卜岭铜钼矿 Re-Os 年龄为 109 Ma,平和钟腾铜钼矿 109 Ma。区域上,同构造阶段的钼矿还有更近东南沿海的砺山钼矿(91 Ma,王成辉等,2009)等,当然各地钼矿的具体成矿年龄存在一定的差别,表明其成矿作用具有一定的演化历史,从内陆到沿海,成矿年龄有逐渐减小的趋势。

以上中生代以来的成矿时代讨论表明,与大规模早白垩世晚期火山—潜火山活动相关的钼多金属成矿在福建省内应该具有普遍性,是今后进一步找矿的重要方向。

4 结论

(1)福建中生代钼矿类型主要有斑岩型、岩浆期后热液型、火山热液型、热液石英脉型(构造角砾岩型)及少量矽卡岩型。

(2)辉钼矿多型主要为 2H,少量 2H+3R 型、3R 型。斑岩型、岩浆期后热液型、火山热液型、矽卡岩型等类型钼矿中高温环境下的辉钼矿多型一般为 2H 型,而中低温环境下的热液石英脉型钼矿的辉钼矿多型多为 2H+3R 型或 3R 型。

(3)相比其他地区钼矿,福建中生代辉钼矿颗粒较大(粗—中细),结晶度高,多色性明显,多呈片状、鳞片状,局部板状,个别矿中辉钼矿颗粒较小。

(4)2H 型辉钼矿中 Re 含量较低,2H+3R 或 3R 型辉钼矿中含 Re 较高。相比其他地区,研究区辉钼矿矿物化学成分微量杂质元素及 Re 含量较低,但矿石矿物成分、结构构造相对单一,选矿工艺简单,Re 作为辉钼矿的伴生矿产资源还是有一定的综合利用价值。

(5)福建省中生代特殊构造—岩浆体系为钼矿的形成提供矿源、矿液活动通道及赋存空间,指示在福建中生代钼矿有较大的找矿潜力。

References

Berzina, A. N., Sotnikov, V. I., Economou-Eliopoulos, M., et al., 2005. Distribution of Rhenium in Molybdenite from Porphyry Mo-Cu Deposits of Russia (Siberia) and

- Mongolia. *Ore Geology Reviews*, 26(1—2): 91—113. doi:org/10.1016/j.oregeorew.2004.12.002
- Chen, F. G., Du, B. C., Wu, Q. Z., et al., 1984. Preliminary Study of Molybdenite (Polymorphic) in Shijiawan Molybdenum Ore Deposit, Shaanxi. *Geology of Shaanxi*, 2(2): 1—19 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. S., 2009. Analysis of Mineralization Group Work Ability of Skarn Molybdenum Ore and Diabase Molybdenum Ore in Makeng Iron Mine. *Modern Mining*, 478(2): 45—50 (in Chinese with English abstract).
- Fu, S. C., 2005. On Geologic Characteristics and Genesis of the Pingdi Molybdenum Deposit in Wuyishan City, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 24(3): 125—133 (in Chinese with English abstract).
- Fu, S. C., 2011. Geologic Characters and Genesis of the Pingdi Molybdenum Deposit in the Wuyishan Mountains, Fujian Province. *Geology and Exploration*, 47(2): 268—276 (in Chinese with English abstract).
- Fu, S. C., Su, J. H., 1994. Geological Characteristics of the Xiaochuan Granite-Gneiss of Jinning Period in Pucheng Area of Northern Fujian. *Geology of Fujian*, 13(4): 227—234 (in Chinese with English abstract).
- Fujian Exploration Authorities of Ministry of Geology and Mineral Resources, 1998. Instructions of Fujian Geological Map (1:500 000). Fujian Map Press, Fuzhou (in Chinese).
- Gao, T. J., Wang, Z. M., Wu, K. L., et al., 1999. Tectono-Magmatic Evolution and Mineralization of the Taiwan Strait and the Surrounding Areas. Geological Publishing House, Beijing, 105—148 (in Chinese).
- Han, Y. W., 1988. Molybdenite Polytypes and the Mechanism of Polytype Formation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 13(4): 385—394 (in Chinese with English abstract).
- Hauri, E. H., Hart, S. R., 1997. Rhenium Abundances and Systematics in Oceanic Basalts. *Chemical Geology*, 139(1—4): 185—205.
- Huang, D. H., 1992. Rhenium Content and Polytype Characteristics of Molybdenite from Molybdenum Deposits in East Qinling. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(1): 74—83 (in Chinese with English abstract).
- Huang, D. H., Wang, Y. C., Nie, F. J., et al., 1985. A New Type of Molybdenum Deposit—Geological Characteristics and Metallogenic Mechanism of the Huanglongpu Carbonatite Vein-Type of Molybdenum (Lead) Deposit, Shaanxi. *Acta Geologica Sinica*, 59: 241—257 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. J., Peng, Z. C., Yang, G., 2006. Abundance and Geo-

- logical Significance of Rhenium and Osmium in Pyrite Samples from Coals. *Earth Science Frontiers*, 13(1): 211—215 (in Chinese with English abstract).
- Liu, N. Z., 2005. On the Geologic Characteristics and Genesis of the Shuangchang Molybdenum Deposit in Pucheng County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 24(3): 141—146 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. G., 2005. On the Geologic Characteristics and Genesis of the Dalinkeng Molybdenum-Polymetallic Deposit in Songxi County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 24(3): 134—140 (in Chinese with English abstract).
- Luo, J. C., Chen, Z. H., Qu, W. J., 2009. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite from the Shankou Molybdenum Deposit in Yongding County of Fujian Province and Its Geological Significance. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 254—258 (in Chinese with English abstract).
- Ma, J., Zhang, W. Z., Li, S. B., 2008. Molybdenum Mineral Separation. The Metallurgical Industry Press, Beijing, 1—241 (in Chinese).
- Mao, J. W., Wang, Y. T., Lehmann, B., et al., 2006. 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 Metallogenic Implications. *Ore Geology Reviews*, 29(3—4): 307—324. doi: org/10. 1016/j. oregeorev. 2005. 11. 001
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Bierlein, F., et al., 2008. Tectonic Implications from Re-Os Dating of Mesozoic Molybdenum Deposits in the East Qinling-Dabie Orogenic Belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607—4626.
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 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).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510—526 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Zhang, Z. C., Zhang, Z. H., et al., 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(11—12): 1815—1818. doi: org/10. 1016/s0016-7037(99)0165-9
- Mao, X. L., Zhang, Z. S., Zheng, N. L., 1988. A Preliminary Study of Molybdenite Polymorphism in Some Mo Deposits in the Coastal Region of Fujian. *Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edition)*, 1(1): 111—116 (in Chinese with English abstract).
- Mathur, R., Brantley, S., Anbar, A., et al., 2010. Variation of Mo Isotopes from Molybdenite in High-Temperature Hydrothermal Ore Deposits. *Miner. Deposita*, 45: 43—50. doi: 10. 1007/s00126-009-0257-z
- Mccandless, T. E., Ruiz, J., Campbell, A. R., 1993. Rhenium Behavior in Molybdenite in Hypogene and Near-Surface Environments: Implications for Re-Os Geochronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 889—905. doi: org/10. 1016/0016-7037(93)90176-w
- Ministry of Geology and Mineral Resources, 1987. Reference Manual of Mineral Industry Requirements. Geological Publishing House, Beijing, 1—672 (in Chinese).
- Newberry, R. J., 1979a. Polytypism in Molybdenite (I); A Non-Equilibrium Impurity-Induced Phenomenon. *American Mineralogist*, 64: 758—767.
- Newberry, R. J., 1979b. Polytypism in Molybdenite (II); Relationships between Polytypism, Ore Deposition/Alteration Stages and Rhenium Contents. *American Mineralogist*, 64: 768—775.
- Peng, J. T., Zhou, M. F., Hu, R. Z., et al., 2006. Precise Molybdenite Re-Os and Ar-Ar Dating of the Mesozoic Yaogangxian Tungsten Deposit, Central Nanling District, South China. *Mineralium Deposita*, 41: 661—669. doi: 10. 1007/s00126-006-0084-4
- Raith, J. G., Stein, H., 2006. Variscan Ore Formation and Metamorphism at the Felbertal Scheelite Deposit (Austria): Constraining Tungsten Mineralization from Re-Os Dating of Molybdenite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152: 505—521. doi: 10. 1007/s00410-006-0118-z
- Selby, D., Creaser, R. A., 2001. Re-Os Geochronology and Systematic in Molybdenite from the Endako Porphyry Molybdenum Deposit, British Columbia, Canada. *Econ. Geol.*, 96(1): 197—204. doi: 10. 2113/gsecongeo. 96. 1. 197
- Shao, J. L., 1984. The Development of Polymorph Study of Molybdenum. *Geological Science and Technology Information*, 2: 37—44 (in Chinese).
- Tan, Y. S., 2010. Geologic Characteristics and Origin Discussion of the Wuyankeng Molybdenum Deposit in Yongtai County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 29(2): 101—106 (in Chinese with English abstract).
- Terada, k., Osaki, S., Ishihara, S., et al., 1971. Distribution of Rhenium in Molybdenites from Japan. *Geochemical Journal*, 4: 123—141.
- Wang, C. H., Wang, D. H., Chen, Z. H., et al., 2009. Geo-

- logical Characteristics and Metallogenic Epoch of the Lishan Molybdenum Deposit—A Discussion on Regional Prospecting for Mo in the Southeastern Coast of China. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(1): 63—69 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Chen, Z. H., Chen, Y. C., et al., 2010. New Data of the Rock-Forming and Ore-Forming Chronology for China's Important Mineral Resources Areas. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 1031—1040 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Z., Li, Z. Q., Liu, J. J., et al., 2004. Polymorphic Characteristics of Molybdenite from LaLa Fe-Oxide-Cu-Au-Mo-Co-REE Deposit in Sichuan Province, China. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 19(2): 96—99 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. G., Zhang, D., Cheng, B. L., et al., 2000. Post-Mesozoic Transformation of Tectonic Domain in Southeast China and Its Geodynamic Mechanism. *Journal of China University of Geosciences*, 11(3): 288—292.
- Wu, G. G., Zhang, D., Peng, R. M., et al., 2004. Study on the Evolution Regularity of Mineralization Ages in Southeastern China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 237—247 (in Chinese with English abstract).
- Xing, G. F., Yang, Z. F., Mao, J. R., et al., 2002. Characteristics of Early Jurassic Igneous Rocks on the Continental Margin of Southeastern China and Their Tectonic Significance. *Regional Geology of China*, 21(7): 384—391 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. C., Yue, S. C., 1999. Factors Controlling the Metallogenic Evolution and Time-Space Distribution of the Ore Deposits in Zhejiang-Fujian-Guangdong Coastal Areas. *Mineral Deposits*, 18(4): 373—378 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. P., 2008. On Geological Characteristics and Genesis of the Dawan Beryllium and Molybdenum Deposit in Xiapu County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 27(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. F., Luo, Z. H., Lu, X. X., 2011. Discussion on Significance of Re Content of Molybdenite in Tracing Source of Metallogenic Materials. *Mineral Deposits*, 30(4): 654—674 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Z. X., Wu, L. S., Zhang, Z. Q., et al., 1991. The Sm-Nd, Rb-Sr Isotopic Age-Dating of Mayuan Group in Northern Fujian. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 10(2): 127—132 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D., Wu, G. G., Liu, N. Z., et al., 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*, 84(10): 1428—1437 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Chen, Z. G., Wang, D. H., et al., 2008. Geological Characteristics and Metallogenic Epoch of the Xingluokeng Tungsten Deposit, Fujian Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 116(32): 92—97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. Y., Wang, J. P., Du, A. D., et al., 2009. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite from the Chilu Molybdenum Deposit in Fuan, Fujian Province. *Geology in China*, 36(1): 147—155 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. C., Sun, D. Y., He, T. X., 1996. Buffering of Metamorphic Reaction Temperature by Metamorphic Fluids in Mayuan Group, Northern Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 59—69 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, K. Q., Huang, W. X., Zhou, L. S., 1989. Geology and Geochemistry of the Sanbao Tungsten-Molybdenum Ore Deposit in Gutian County, Fujian Province. *Mineral Deposits*, 8(1): 29—38 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, K., Ye, H. S., Mao, J. W., et al., 2009. Geological Characteristics and Molybdenite Re-Os Isotopic Dating of Yuchiling Porphyry Mo Deposit in Western Henan Province. *Mineral Deposits*, 28(2): 170—184 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈福根, 杜本臣, 武清周, 等, 1984. 陕西石家湾钼矿床中辉钼矿(多型)初步研究. *陕西地质*, 2(2): 1—19.
- 陈跃升, 2009. 马坑铁矿单钼矿成矿组可采性分析. *现代矿业*, 478(2): 45—50.
- 地矿部福建地质矿产勘查开发局, 1998. 福建省地质图说明书(1:50万). 福州: 福建省地图出版社.
- 地质矿产部, 1987. 矿产工业要求参考手册. 北京: 地质出版社.
- 傅树超, 2005. 福建武夷山坪地钼矿床地质特征及成因探讨. *福建地质*, 24(3): 125—133.
- 傅树超, 2011. 福建省武夷山坪地钼矿床地质特征及成因探讨. *地质与勘探*, 47(2): 268—276.
- 傅树超, 苏江湖, 1994. 闽北浦城地区晋宁期小串花岗片麻岩地质特征. *福建地质*, 13(4): 227—234.
- 高天钧, 王振民, 吴克隆, 等, 1999. 台湾海峡及其周边地区构造岩浆演化与成矿作用. 北京: 地质出版社, 105—148.
- 韩吟文, 1988. 辉钼矿的多型及其成因初探. *地球科学——中*

- 国地质大学学报,13(4): 385—394.
- 黄典豪,1992. 东秦岭地区钼矿床中辉钼矿的铼含量及多型特征. 岩石矿物学杂志,11(1): 74—83.
- 黄典豪,王义昌,聂凤军,等,1985. 一种新的钼矿床类型——陕西黄龙铺碳酸岩脉型钼(铅)矿床地质特征及成矿机制. 地质学报,59: 241—257.
- 刘桂建,彭子成,杨刚,2006. 煤中黄铁矿的铼—钼同位素含量及其地质意义. 地学前缘,13(1): 211—215.
- 刘乃忠,2005. 福建浦城上厂钼矿床地质特征及成因初探. 福建地质,24(3): 141—146.
- 刘诗光,2005. 福建松溪大林坑钼多金属矿床地质特征及成因初探. 福建地质,24(3): 134—140.
- 罗锦昌,陈郑辉,屈文俊,2009. 福建省永定山口钼矿辉钼矿铼—钼同位素定年及其地质特征. 岩矿测试,28(3): 254—258.
- 马晶,张文钰,李枢本,2008. 钼矿选矿. 北京: 冶金工业出版社.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,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.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报,14(4): 510—526.
- 毛兴莉,张载三,郑南来,1988. 福建沿海一些钼矿床中辉钼矿多型性的初步研究. 福州大学学报(自然科学版),1(1): 111—116.
- 邵洁涟,1984. 辉钼矿多型研究的新进展. 地质科技情报,2: 37—44.
- 谭元松,2010. 福建永泰无岩坑钼矿地质特征及成因探讨. 福建地质,29(2): 101—106.
- 王成辉,王登红,陈郑辉,等,2009. 福建砺山钼矿的地质特征、成矿时代及区域找矿前景. 矿物学报,29(1): 63—69.
- 王登红,陈郑辉,陈毓川,等,2010. 我国重要矿产地成岩成矿年代学研究新数据. 地质学报,84(7): 1031—1040.
- 王奖臻,李泽琴,刘家军,等,2004. 拉拉铁氧化物—铜—金—钼—钴—稀土矿床辉钼矿的多型及标型特征. 地质找矿论丛,19(2): 96—99.
- 吴淦国,张达,彭润民,等,2004. 东南沿海成矿带矿床形成的时间演化规律研究. 地学前缘,11(1): 237—247.
- 邢光福,杨祝良,毛建仁,等,2002. 东南大陆边缘早侏罗世火成岩特征及其构造意义. 地质通报,21(7): 384—391.
- 徐晓春,岳书仓,1999. 浙闽粤滨海地区成矿演化和矿床时空分布的控制因素. 矿床地质,18(4): 373—378.
- 杨武平,2008. 福建霞浦大湾钼矿床地质特征及成因初探. 福建地质,27(1): 1—7.
- 杨宗锋,罗照华,卢欣祥,等,2011. 关于辉钼矿中 Re 含量示踪来源的讨论. 矿床地质,30(4): 654—674.
- 袁忠信,吴良士,张宗清,等,1991. 闽北麻源群 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年龄研究. 岩石矿物学杂志,10(2): 127—132.
- 张达,吴淦国,刘乃忠,等,2010. 福建漳平北坑场钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质学报,84(10): 1428—1437.
- 张家菁,陈郑辉,王登红,等,2008. 福建行洛坑大型钨矿的地质特征、成矿时代及其找矿意义. 大地构造与成矿学,116(32): 92—97.
- 张克尧,王建平,杜安道,等,2009. 福建福安赤路钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 中国地质,36(1): 147—155.
- 赵国春,孙德有,贺同兴,1996. 闽北麻源群变质流体对变质反应温度缓冲作用研究. 岩石学报,12(1): 59—69.
- 郑开旗,黄维新,周乐生,1989. 福建古田县三保钨钼矿床地质地球化学. 矿床地质,8(1): 29—38.
- 周珂,叶会寿,毛景文,等,2009. 豫西鱼池岭斑岩型钼矿床地质特征及其辉钼矿铼—钼同位素年龄. 矿床地质,28(2): 170—184.