

文章编号: 0258-7106(2014)01-0181-09

湘西大溶溪钨矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素定年 及其地质意义*

张龙升^{1,2} 彭建堂^{1,3,*} 胡阿香^{1,2} 林芳梅^{1,2} 张 婷^{1,2}

(1 中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 2 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 3 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘 要 湘西大溶溪钨矿床, 为雪峰隆起区内的一个中型白钨矿矿床。文章对该矿床中穿插钨矿体的含辉钼矿石英脉进行了 Re-Os 同位素年代学研究。分析结果显示, 该矿中辉钼矿的 Re-Os 同位素模式年龄为 217.0 ~ 221.1 Ma, 平均为 (219.0 ± 1.2) Ma, 其对应的等时线年龄为 (223.3 ± 3.9) Ma, 揭示其形成于晚三叠世。这些年龄数据与矿区内大神山花岗岩的侵位时间 (224.3 ± 1.0) Ma 基本吻合, 表明该区含辉钼矿石英脉的形成与花岗岩的侵位具有密切的时、空联系。考虑到该区钨矿体的形成时间介于花岗岩和含辉钼矿石英脉之间, 因此, 推断大溶溪钨矿床形成于 223 Ma 左右。该研究成果, 不仅为湘西雪峰隆起区存在多期次的钨成矿事件提供了可靠证据, 同时又进一步证实了华南地区确实存在一次区域性的与印支期花岗岩有关的成矿作用。

关键字 地球化学 辉钼矿 Re-Os 同位素定年 印支期成矿 大溶溪钨矿床 湘西

中图分类号: P618.65

文献标志码: A

Re-Os dating of molybdenite from Darongxi tungsten deposit in Western Hunan and its geological implications

ZHANG LongSheng^{1,2}, PENG JianTang^{1,3}, HU A'Xiang^{1,2}, LIN FangMei^{1,2} and ZHANG Ting^{1,2}

(1 Key Laboratory of Non-ferrous Metals Metallogenic Prediction of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2 School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3 State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract

The Darongxi tungsten deposit is a medium-sized scheelite deposit in the Xuefeng uplift area of western Hunan. Several molybdenite-bearing quartz veins cutting the tungsten-orebodies in this deposit were discovered for the first time in this study, and the Re-Os isotopic ages of molybdenites collected from this deposit were precisely determined. It is shown that Re-Os dating of eight molybdenite samples yielded ^{187}Re - ^{187}Os model ages ranging from 217.0 Ma to 221.1 Ma, with an average of (219.0 ± 1.2) Ma, which coincide well with the isochron age (223.3 ± 3.9) Ma. All the age data reveal that molybdenite-bearing quartz in the Darongxi deposit was formed during the Late Triassic. These Re-Os ages are almost consistent with the emplacement time of the Dashenshan granite (224.3 ± 1.0) Ma, and hence the authors hold that the molybdenite-bearing quartz veins were spatially

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号 40673021, 41073036)的资助

第一作者简介 张龙升, 男, 1988 年生, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业。Email: zls2320@163.com

** 通讯作者 彭建堂, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 主要从事矿床地球化学研究。Email: jtpeng@126.com

收稿日期 2013-12-20; 改回日期 2013-12-31。秦思婷编辑。

and temporally related to the granite emplacement in the Darongxi ore district. Considering that the tungsten ore bodies were formed in the time between the emplacement of granite and the formation of molybdenite-bearing quartz veins, the authors consider that the tungsten mineralization in the Darongxi deposit took place at about 223 Ma. The results obtained in this study demonstrate that there exist multi-period tungsten mineralization in western Hunan and a regional Indosinian granitic mineralization throughout South China.

Key words: geochemistry, molybdenite, Re-Os isotopic dating, Indosinian mineralization, Darongxi tungsten deposit, Western Hunan

中国是世界上钨矿储量、产量和出口量最大的国家,最主要、最重要的钨矿床多集中于华南,特别是南岭地区和湘西雪峰隆起区(冶金部南岭钨矿专题组,1985;刘英俊等,1987)。其中,南岭地区钨矿以与花岗岩类有关的脉型黑钨矿矿床、斑岩型及矽卡岩型钨矿床为典型(冶金部南岭钨矿专题组,1985)。大量的研究成果揭示该区钨矿主要集中形成于160~150 Ma (Peng et al., 2006; 彭建堂等, 2008; 毛景文等, 2009)。相比之下,湘西雪峰隆起区钨矿床的研究程度极低,该区钨矿主要为与岩浆岩无直接联系的层控石英脉型钨矿床(如沃溪金锑钨矿床、渣滓溪锑钨矿床等,涂光炽等,1987;包正相,1987)和少量与花岗岩有关的钨矿床(如大溶溪钨矿床)。尽管近年来笔者团队成功地利用白钨矿对沃溪金锑钨矿床进行了Sm-Nd同位素定年(彭建堂等,2003),但目前该区大多数钨矿的形成时间尚不清楚。

大溶溪钨矿床,为湘西雪峰隆起区东南缘大神山-沅山成矿带内的一个资源储量达4万吨以上、平均 $w(\text{WO}_3)$ 为0.49%的中型白钨矿矿床(图1)。该矿床与区内大多数白钨矿矿床一样,层控特征明显,但在空间上与大神山花岗岩关系密切。笔者在野外地质调研中,首次在大溶溪矿区发现了含辉钼矿的石英脉。众所周知,辉钼矿的Re-Os同位素体系因具有高Re含量、几乎不含普通Os、抗高温变质作用能力强等特点(Stein et al., 2001; Bingen et al., 2003; Stein, 2006),被认为是当前热液矿床定年最准确的一种方法(Stein, 2006; Mao et al., 2008; Lawley et al., 2012)。因此,本次研究欲借助辉钼矿的Re-Os同位素定年方法,初步确定大溶溪钨矿床的形成时代,为进一步深入认识该矿的矿床成因及雪峰隆起区钨矿的成矿规律奠定基础。

1 矿床地质概况

湘西大溶溪钨矿床,位于大神山花岗岩的西北

侧,受大溶溪向斜构造控制,出露的地层主要为新元古界板溪群五强溪组(Pt_3bnw)下震旦统南沱组下段(Z_{an}^1)下震旦统南沱组上段(Z_{an}^2)上震旦统陡山沱组(Z_{bd})上震旦统灯影组(Z_{bdn})和第四系(Q)(图2)。其中,下震旦统南沱组下段(Z_{an}^1)的变质砂岩层和大理岩、硅质板岩层,是矿区白钨矿最主要的赋矿层位。

矿区内发育的白钨矿矿体,包括I、II、III、IV四条矿脉。这些矿脉,主要受不同岩性接触界面附近的层间裂隙、层内间隙控制,呈层状、似层状、条带状赋存于下震旦统南沱组下段(图3)。矿石类型包括矽卡岩型钨矿石(I矿脉)和石英网脉型钨矿石(II、III、IV矿脉)。矿石具半自形-他形粒状结构、交代结构,以浸染状、细脉状构造为主。主要金属矿物有白钨矿、辉钼矿、黄铜矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铁矿等;非金属矿物有石榴子石、单斜辉石、阳起石、石英、斜长石、绿泥石、方解石等,其内白钨矿多交代单斜辉石、石榴子石等钙质矽卡岩矿物产出。围岩蚀变有矽卡岩化、硅化、角岩化和大理岩化,并以矽卡岩化、硅化与钨矿化的关系最为密切。

矿区内发现的含辉钼矿石英脉,宽度一般为10~30 cm,在I、IV矿脉及五强溪组板岩中均可见。I、IV矿脉中的石英脉,或平行、或穿插于白钨矿矿体(图4a、b),而五强溪组板岩中含辉钼矿石英脉的两侧常发育有大量的乳白色斜长石(图4c)。其中,与I矿脉中颗粒分散且极细小的辉钼矿相比,IV矿脉中辉钼矿呈亮铅灰色,自形晶鳞片状,粒度介于0.1~2 mm,主要沿石英脉体边部发育(图4d),并与黄铁矿、黄铜矿及少量的白钨矿共生(图4e)。镜下未见明显的揉皱、褶曲等变形现象(图4f)。

2 样品采集及测试

本次研究测试的辉钼矿样品均采自穿插IV矿脉和新元古界板溪群五强溪组灰黑色板岩的石英脉,

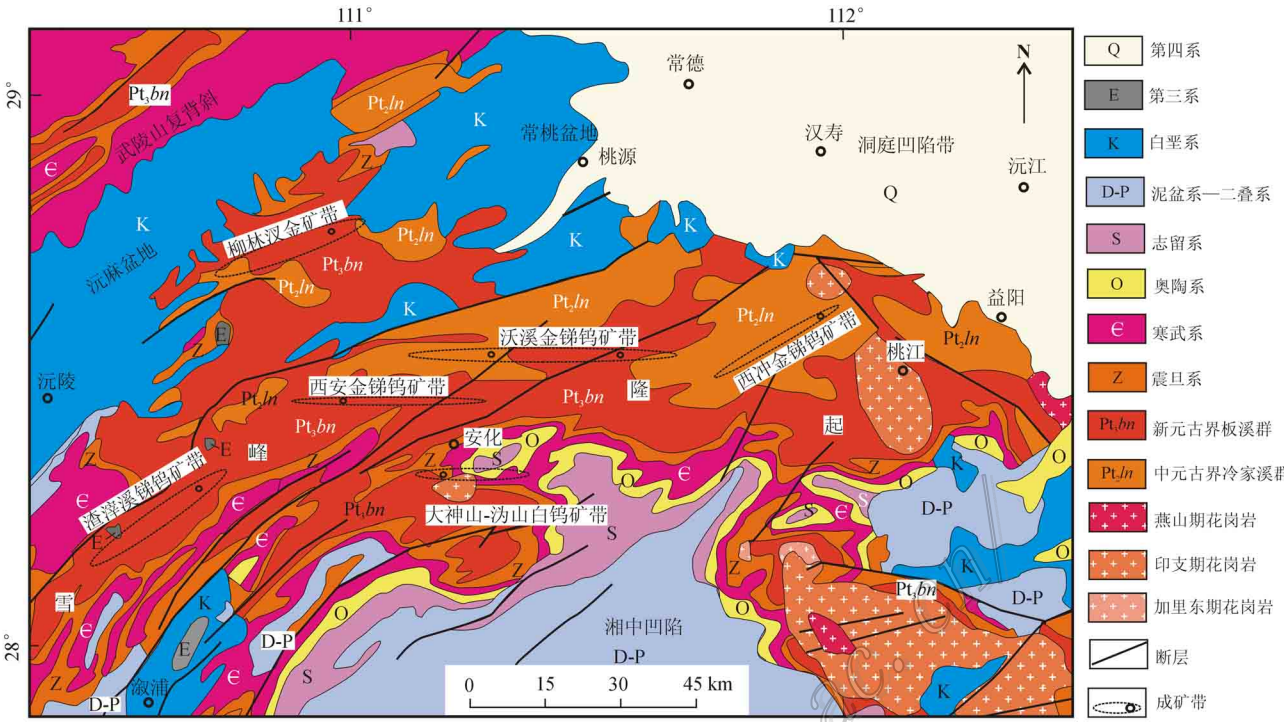


图 1 湘西层控型钨矿带地质分布图(据包正相,1987 修改)

Fig. 1 Geological map of stratabound tungsten mineralization belts in western Hunan (modified after Bao, 1987)

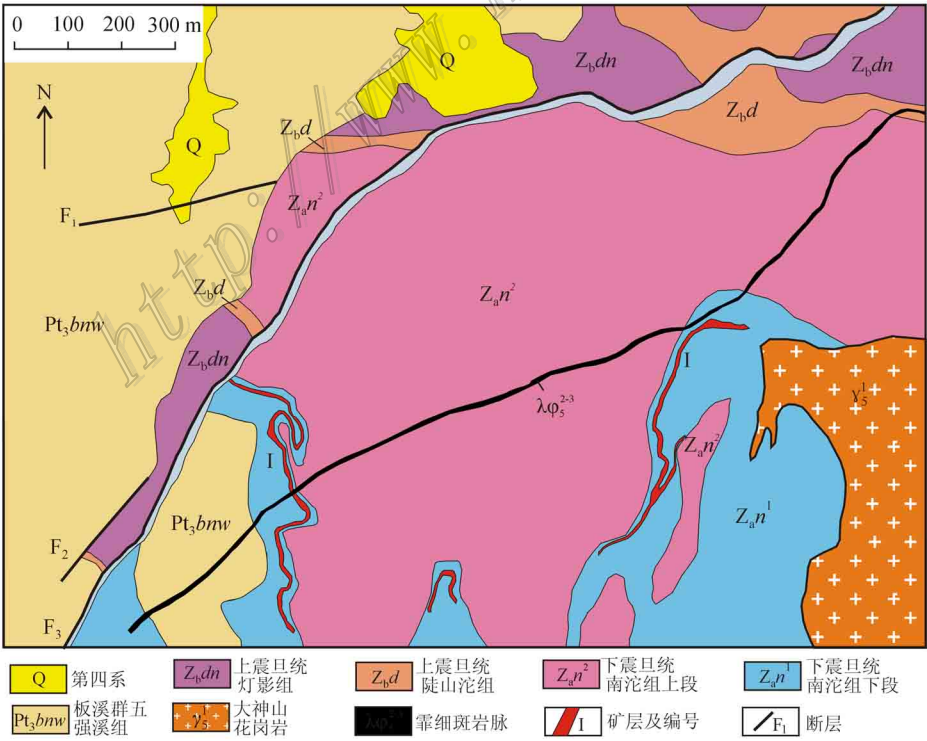


图 2 大溶溪钨矿区地质图(据张龙升等,2012)

Fig. 2 Geological map of the Darongxi tungsten deposit (after Zhang et al., 2012)

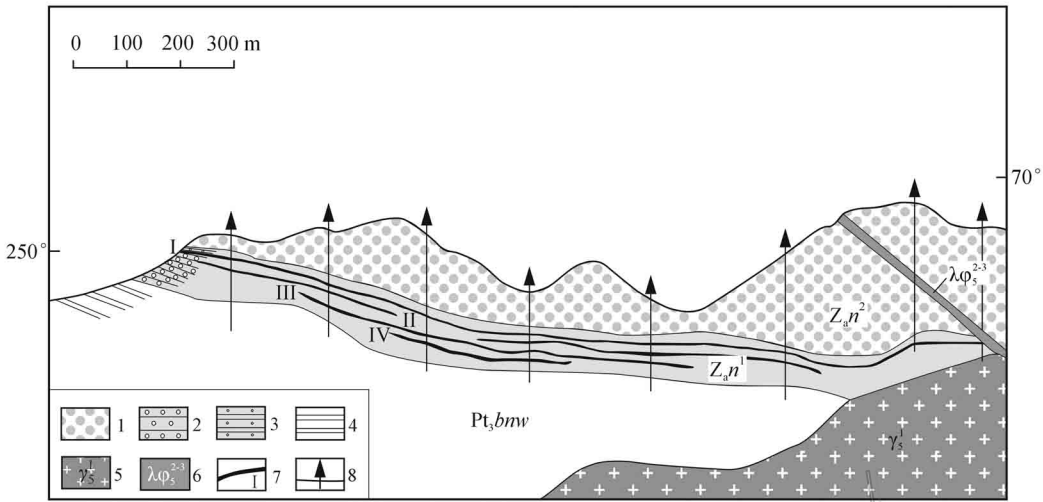


图 3 大溶溪钨矿矿体走向剖面图(据鲍正襄等,2000 修改)

1—冰碛岩; 2—变质砂岩; 3—硅质板岩; 4—板岩; 5—大神山花岗岩; 6—霏细斑岩; 7—白钨矿矿脉及其编号; 8—钻孔位置
Pt₃bmw—新太古界板溪群五强溪组; Z_an¹—下震旦统南沱组下段; Z_an²—下震旦统南沱组上段

Fig. 3 Striking profile of ore bodies in the Darongxi tungsten deposit (modified after Bao et al., 2000)

1—Tillite; 2—Metasandstone; 3—Siliceous slate; 4—Slate; 5—Dashenshan granite; 6—Felsite porphyry; 7—Scheelite ore vein and its serial number; 8—Drill hole

Pt₃bmw—Upper Archaean Banxi Group Wuqiangxi Formation; Z_an¹—Lower part of Lower Sinian Nantuo Formation;
Z_an²—Upper part of Lower Sinian Nantuo Formation

具体采样位置和地质特征见表 1。在野外系统观察和采样的基础上,选择较新鲜的辉钼矿样品,将样品粗碎并直接挑出。将挑出的辉钼矿单矿物样品置于双目镜下,剔除杂质及氧化的矿物,使其纯度达到 99% 以上,然后用研钵磨碎至 200 目。

辉钼矿的 Re-Os 同位素测试在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室完成,采用 Carius 管封闭溶样法分解样品,Re-Os 同位素分析的具体实验过程及分析方法参照 Shirey 等(1995)、杜安道等(2001)和屈文俊等(2003),简述如下。

准确称取待分析样品,通过细颈漏斗加入到 Carius 管底部,并将装好样品的 Carius 管置于温度介于 -50~-80℃、装有乙醇的保温杯内。用 2 mL 10 mol/L 的 HCl 通过细颈漏斗把准确称取的¹⁸⁵Re 和¹⁹⁰Os 混合稀释剂转入到 Carius 管底部,随后加入 4 mL 16 mol/L 的 HNO₃。待管底溶液冻实后,用液化石油气和氧气火焰加热封住 Carius 管的细颈部分。然后,把 Carius 管置于不锈钢套管内,并将套管轻放入鼓风烘箱内,待回到室温后,逐渐升温至 200℃。保温 24 h 后,取出、冷却。在底部冻实的情况下,打开 Carius 管,用约 20 mL 水将管内溶液转入蒸馏瓶中。

将蒸馏瓶连接蒸馏装置,加热微沸 30 min 后,用 5 mL 超纯水吸收蒸出的 OsO₄,并用 ICP-MS 直接测定 Os 同位素比值。之后,将蒸馏残液倒入 150 mL Teflon 烧杯中待分离 Re。

将蒸馏残液置于电热板上,加热近干,加少量水,加热近干,重复两次以降低酸度。加入 10 mL 5 mol/L 的 NaCl 稍微加热,转为碱性介质。转入 Teflon 离心管中,加入 10 mL 丙酮,震荡 1 min 萃取 Re。静置后,将丙酮相转入到 150 mL 已加有 2 mL 水的 Teflon 烧杯中,50℃ 加热除去丙酮,然后 120℃ 加热至干。加入数滴 HNO₃ 和 30% 的 H₂O₂,加热蒸干除去残留的 Os。再用数 mL 稀 HNO₃ 溶解残渣,用水转入小瓶并稀释到适当体积,以备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。

Re-Os 同位素比值的测定是由美国 TJA 公司生产的 X-series ICP-MS 完成。对于 Re,选择质量数为 185、187,用 190 监测 Os; Os,选择质量数为 186、187、188、189、190、192,用 185 监测 Re。

3 测试结果

本次测定的 8 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素组成

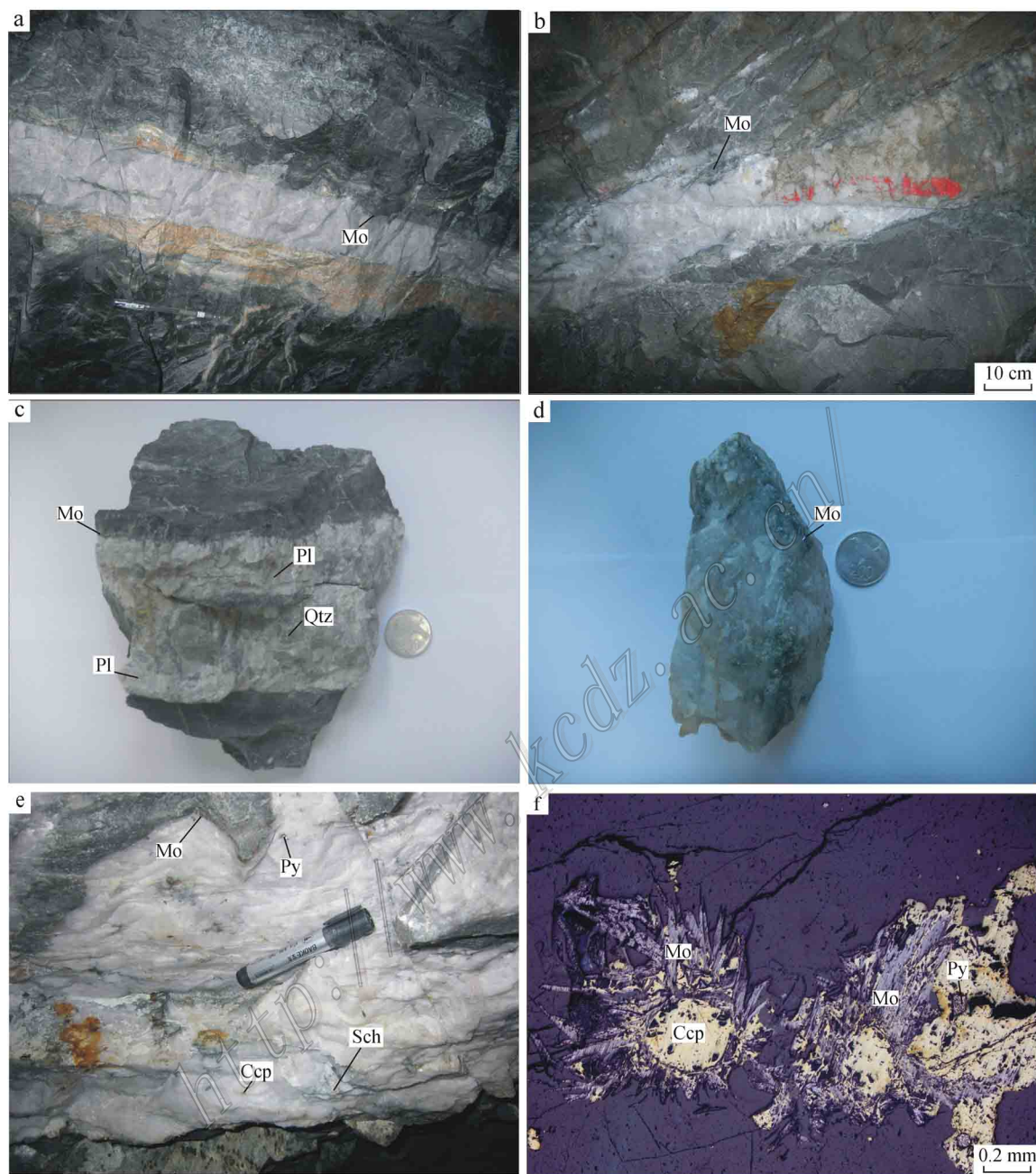


图 4 大溶溪钨矿床中发育的含辉钼矿石英脉

a. I 矿脉中含辉钼矿石英脉穿插棕红色石榴子石砂卡岩白钨矿矿体; b. IV 矿脉中发育的含辉钼矿石英脉; c. 五强溪组板岩中的含辉钼矿(Mo)的斜长石(Pl)-石英(Qtz)脉样品; d. IV 矿脉中含辉钼矿(Mo)石英脉样品; e. IV 矿脉中发育的辉钼矿(Mo)、黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)和白钨矿(Sch)的石英脉; f. IV 矿脉石英脉中辉钼矿(Mo)、黄铜矿(Ccp)和黄铁矿(Py)的镜下特征(反射光)

Fig. 4 Molybdenite-bearing quartz veins from the Darongxi tungsten deposit

a. Molybdenite-bearing quartz vein cutting garnet skarn schelite ore body of I ore vein; b. Molybdenite-bearing quartz vein in IV ore vein; c. Molybdenite-bearing plagioclase and quartz vein from slate of Wuqiangxi Formation; d. Molybdenite-bearing quartz vein sample from IV ore vein; e. Quartz vein containing molybdenite, pyrite, chalcopyrite and scheelite in IV ore vein; f. Microscope photo of molybdenite, chalcopyrite and pyrite of quartz vein in IV ore vein (reflected light)

表 1 大溶溪钨矿床中辉钼矿样品的采样位置及地质特征

Table 1 Sampling locations and geological characteristics of molybdenite samples from the Darongxi tungsten deposit			
样品编号	样品名称	采样位置	地质特征
HMK-1	含辉钼矿石英脉	290 中段 47 采场	脉宽约 18 cm 赋存于Ⅳ矿脉内
HMK-2	含辉钼矿石英脉	290 中段 44 采场	脉宽约 20 cm 赋存于Ⅳ矿脉内
HMK-3	含辉钼矿石英脉	290 中段 44 采场沿脉平巷	脉宽约 25 cm 与Ⅳ矿脉平行产出
HMK-4	含辉钼矿石英脉	290 中段 46 采场顶部	脉宽约 13 cm 与Ⅳ矿脉平行产出
HMK-5	含辉钼矿的斜长石-石英脉	230 中段Ⅳ矿脉底巷	脉宽 15 cm 沿五强溪组灰黑色板岩裂隙发育,产状平缓
HMK-6	含辉钼矿石英脉	290 中段Ⅳ长穿脉	脉宽约 30 cm 与Ⅳ矿脉平行产出
HMK-7	含辉钼矿石英脉	290 中段 46 采场沿脉	脉宽约 20 cm 赋存于Ⅳ矿脉内
DRX-74	含辉钼矿石英脉	290 中段 46 采场	脉宽 15 cm 赋存于Ⅳ矿脉内

如表 2 所示。其中,普 Os 是根据 Nier 值的 Os 同位素丰度,借助¹⁹²Os/¹⁹⁰Os 测量比计算得出的;¹⁸⁷Os 是所有¹⁸⁷Os 同位素的总量。Re、Os 含量的不确定度,是由样品和稀释剂的称量误差、稀释剂的标定误差、质谱测定的分馏校正误差和待分析样品同位素比值测量误差经计算得出;而模式年龄的不确定度计算还包括衰变常数的不确定度(1.02%)。Re-Os 同位素模式年龄 *t* 的计算公式如下:

$$t = 1/\lambda \ln[(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})] \tag{1}$$

其中,¹⁸⁷Re 的衰变常数 $\lambda = 1.666 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Smo-liar et al., 1996)。

大溶溪钨矿床中辉钼矿 $\omega(^{187}\text{Re})$ 为 $2.104 \times 10^{-6} \sim 4.447 \times 10^{-6}$, $\omega(^{187}\text{Os})$ 为 $7.66 \times 10^{-9} \sim 16.41 \times 10^{-9}$ (表 2)。根据公式(1)计算得出的辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 217.0~221.9 Ma,加权平均年龄为 $(219.0 \pm 1.2) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.95,置信度为 95%) (图 5)。同时,借助 Ludwig (2003) 开发的 ISO-PLOT 软件对 Re-Os 同位素数据进行等时线的拟合和计算,得到 8 个辉钼矿样品的等时线年龄值为 $(223.3 \pm 3.9) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.64) (图 6)。该等时线年龄与其模式年龄相当吻合,进一步证实了辉钼

矿基本不含初始普通 Os,并表明其模式年龄同样可以代表辉钼矿的形成时间。

4 讨论

4.1 钨成矿时代确定

已有的研究发现,辉钼矿晶体或粗颗粒辉钼矿样品中的 Re-Os 同位素体系可能会出现失耦现象 (Stein et al., 2001; 2003),但对成矿时代较年轻、粒度 < 2 mm 的辉钼矿而言,并不存在 Re-Os 同位素体系的失耦作用 (Selby et al., 2004)。供本次研究的辉钼矿样品,粒度较细,且相对均匀,主要集中在 0.1~2 mm,而且,其矿相学特征中未见明显的揉皱、褶曲等变形现象,暗示该区辉钼矿形成后受后期地质作用的影响较小。因此,本次测定的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄 $(223.3 \pm 3.9) \text{ Ma}$,可以准确代表大溶溪矿区含辉钼矿石英脉的形成时间。

野外地质特征显示,大溶溪矿区赋围岩以板岩、大理岩、变质砂岩为主,未见火山岩、电气石岩、钠长石岩及石膏、重晶石等出露,而在空间上紧邻大神山花岗岩。很显然,该钨矿床形成所受的区域变

表 2 大溶溪钨矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素组成

Table 2 Re-Os isotopic data of molybdenite samples collected from the Darongxi tungsten deposit										
样品编号	<i>m/g</i>	$\omega(\text{Re}) \times 10^{-6}$		$\omega(\text{普 Os}) \times 10^{-9}$		$\omega(^{187}\text{Re}) \times 10^{-6}$		$\omega(^{187}\text{Os}) \times 10^{-9}$		模式年龄/Ma
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	
HMK-1	0.10013	7.075	0.0756	0.0120	0.0046	4.447	0.0475	16.41	0.1562	221.1 ± 3.6
HMK-2	0.10049	5.883	0.0595	0.0646	0.0072	3.698	0.0374	13.56	0.1176	219.7 ± 3.4
HMK-3	0.10056	6.448	0.0758	0.0558	0.0118	4.053	0.0477	15.01	0.1287	221.9 ± 3.7
HMK-4	0.10026	3.347	0.0276	0.0696	0.0075	2.104	0.0173	7.66	0.0711	218.2 ± 3.2
HMK-5	0.10047	4.729	0.0453	0.0299	0.0045	2.972	0.0285	10.82	0.0850	218.1 ± 3.2
HMK-6	0.10014	4.398	0.0482	0.4868	0.0115	2.764	0.0303	10.04	0.1043	217.5 ± 3.7
HMK-7	0.10032	6.882	0.0693	0.0334	0.0084	4.326	0.0436	15.81	0.1501	219.0 ± 3.5
DRX-74	0.10013	3.753	0.0377	1.4526	0.0849	2.359	0.0237	8.54	0.0745	217.0 ± 3.4

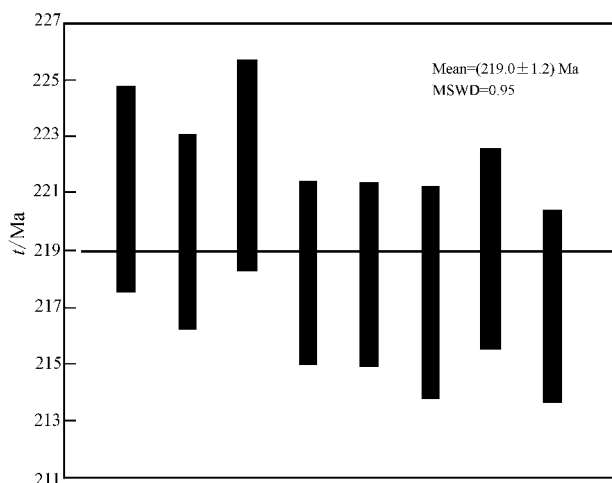


图 5 大溶溪钨矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素模式年龄图

Fig. 5 Re-Os model ages diagram of molybdenite samples from the Darongxi tungsten deposit

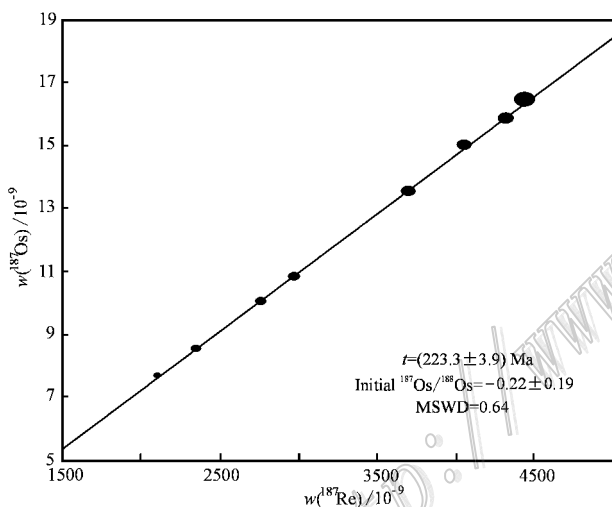


图 6 大溶溪钨矿床的辉钼矿 Re-Os 同位素等时线图

Fig. 6 Re-Os isotopic isochron of molybdenites from the Darongxi tungsten deposit

质、喷流-沉积等地质作用不明显,矿区内富含白钨矿的钙质砂卡岩形成所需的物质和能量应与大神山花岗岩的侵入有关。另外,矿区中发育的含辉钼矿石英脉大多平行或穿插白钨矿矿体,暗示钨矿体的形成时间应早于含辉钼矿石英脉。因此,理论上大溶溪钨矿床的成矿时间介于大神山花岗岩的侵位与含辉钼矿石英脉的形成之间。张龙升等(2012)借助 LA-ICP-MS 技术测得大神山花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 (224.3 ± 1.0) Ma,与本次研究测定的辉钼矿 Re-Os 等时线年龄值 (223.3 ± 3.9) Ma 基本吻合,这表明矿区含辉钼矿石英脉的形成与大神山花岗岩侵

入具有密切的时、空联系。同时,尽管在理论上花岗岩、含钨砂卡岩和含辉钼矿石英脉三者之间存在先后关系,但在当前的同位素定年技术条件下,三者之间不存在明显的时间差,即大溶溪白钨矿的成矿时代为印支晚期的晚三叠世(223 Ma 左右)。

4.2 成矿地质意义

4.2.1 对湘西钨成矿的指示意义

前人关于湘西层控型钨矿床成因类型的观点众多,主要有变质热液型(罗献林等,1984)、沉积-改造型(涂光炽等,1987;包正相,1987)、变质水和大气降水混合热液型(杨燮,1992)、同生喷流沉积型(张理刚,1985;顾雪祥等,2003)等,这些观点大多是强调成矿物质来源于含钨建造或属同生矿床。但本次研究的结果显示,大溶溪钨矿床在成矿时间上与大神山花岗岩的侵位时间非常接近,空间上亦紧邻花岗岩的西北侧;同时,矿区下震旦统南沱组下段和大神山花岗岩南侧相接触的易家湾地区的新元古界板溪群马底驿组(崔立峰等,2012),均发育有层状、似层状、条带状含白钨矿的钙质砂卡岩。这些特征表明,大溶溪钨矿床的形成与大神山花岗岩具有密切的时空和成因联系。现有的分析数据显示,大神山花岗岩的 $w(W)$ 为 $595 \times 10^{-6} \sim 849 \times 10^{-6}$ (张龙升等,2012),远高于南岭地区燕山期与钨成矿有关的花岗岩 $(1 \times 10^{-6} \sim 11.4 \times 10^{-6})$ (中国科学院贵阳地球化学研究所,1979),故大溶溪矿床的成矿物质钨很可能主要由大神山花岗岩提供。这间接反映出,湘西地区层控型钨矿床的成矿金属钨并非都来自于含钨建造。

湘西层控型钨矿床的成矿作用包括早期白钨矿矿化期和晚期硫化物矿化期(包正相,1987)。尽管湘西地区大多数层控型钨矿床缺乏可靠的成矿年龄数据,但彭建堂等(2003)成功测得沃溪金锡钨矿床的形成时间为加里东晚期[白钨矿 Sm-Nd 等时线年龄为 (402 ± 6) Ma]。此外,加里东晚期在目前被视为雪峰隆起区石英脉型金矿床最重要的成矿期,且该认识正得到越来越多年龄数据的支持(朱笑青等,2006;汪加昇等,2011)。因此,从本次年代学研究结果来看,雪峰隆起区还发生有印支晚期的钨成矿作用,说明雪峰隆起区可能存在多次的钨成矿事件。

4.2.2 华南印支期花岗岩的成矿意义

华南主要由扬子地块与华夏地块拼贴组成,该地区印支期花岗岩数量少且分散,整体呈面状分布,以岩株、岩基形式产出(周新民,2003)。

尽管该区印支期花岗岩规模不大,但最近几年的研究发现,华南确实存在与该期花岗岩有关的金属矿床(毛景文等,2008,2012),如湘南与王仙岭岩体有关的荷花坪锡多金属矿床[辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (224.0 ± 1.9) Ma,蔡明海等,2006],赣南与柯树岭岩体有关的仙鹅塘钨锡矿床[钨锡石英脉中白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (232.4 ± 2.4) Ma,刘善宝等,2008],桂东北与栗木花岗岩有关的栗木钨锡铌钽矿床[云英岩中白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 (214.1 ± 1.9) Ma、 (214.3 ± 4.5) Ma,杨峰等,2009]。值得注意的是,前人报道的形成于印支期的这些矿床大多分布于华夏地块中,而本次研究的印支期形成的大溶溪钨矿床分布于雪峰隆起区,属扬子地块。另外,前人研究也发现,处于扬子地块中的桂东北与苗儿山-越城岭岩基有关的云头界钨钼矿床亦形成于印支期[辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (216.8 ± 7.5) Ma,伍静等,2012]。这表明,华南印支期花岗岩成矿,不论在华夏地块还是扬子地块均存在,应该是一次区域性的成矿事件,并可能普遍存在于整个华南地区。但华南印支期成矿的规模、强度和找矿前景,目前尚不明朗,仍需要进一步的研究。

5 结 论

(1) 大溶溪钨矿床中辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (223.3 ± 3.9) Ma,与矿区大神山花岗岩的侵位时间 (224.3 ± 1.0) Ma相吻合。钨矿体的形成时间介于前二者之间,因此,大溶溪钨成矿的时间为印支晚期的晚三叠世(223 Ma左右)。

(2) 大溶溪矿床的成矿物质钨可能主要由大神山花岗岩提供,湘西地区层控型钨矿床的成矿金属钨可能并非都来自于含钨建造。

(3) 湘西雪峰隆起区存在多期次的钨成矿事件。

(4) 华南地区存在一次区域性的、与印支期花岗岩有关的成矿作用。

志 谢 野外工作得到湖南省辰州矿业股份有限公司湘安钨业地测科吴勇工程师、龙国才工程师、成宇工程师的热情帮助,以及二位审稿人对论文修改提出的建设性意见,在此谨表衷心的感谢!

参考文献/References

- 包正相. 1987. 湘西层控白钨矿床地质特征及其成矿作用[J]. 矿床地质, 6(4): 33-41.
- 鲍正襄, 万溶江, 包觉敏. 2000. 湖南安化大溶溪白钨矿床成矿特征及富集条件[J]. 江西地质, 14(4): 281-286.
- 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 刘国庆, 付建明, 印建平. 2006. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 测年[J]. 矿床地质, 25(3): 263-268.
- 崔立峰, 何婷菊, 孙茂茂, 鲍振襄, 包觉敏. 2012. 安化县易家湾钨矿地质矿产简介[J]. 湖南地质新进展, (9): 146-148.
- 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 孙德忠, 刘敦一. 2001. Carius 管溶样和负离子热表面电离质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 20(4): 247-252.
- 顾雪祥, Oskar S, Franz V, 刘建明, 郑明华. 2003. 湖南沃溪钨-铋-金矿床的矿石组构学特征及其成因意义[J]. 矿床地质, 22(1): 107-120.
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 李建康, 应立娟, 许建祥, 曾载淋. 2008. 赣南崇义-大余-上犹矿集区不同类型含钨石英中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 82(7): 932-940.
- 刘英俊, 马东升. 1987. 钨的地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1-232.
- 罗献林, 易诗军, 梁金城. 1984. 论湘西沃溪金铋钨矿床的成因[J]. 桂林冶金地质学院学报, (1): 21-37.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 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[J]. 高校地质学报, 14(4): 510-526.
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博, 陈毓川. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型[J]. 地质论评, 55(3): 347-354.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 王义天, 张长青, 彭慧娟, 于 森. 2012. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. 中国地质, 39(6): 1437-1471.
- 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 符亚洲, 林源贤. 2003. 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白云母 Sm-Nd 和石英 Ar-Ar 定年[J]. 科学通报, 48(18): 1976-1981.
- 彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 毕献武, 沈能平. 2008. 南岭中段(湘南)中生代花岗质岩石成岩成矿的时限[J]. 地质论评, 54(5): 617-625.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-257.
- 涂光炽, 王秀璋, 陈先沛, 张宝贵, 杨蔚华, 程景平, 樊文苓, 赵振华, 喻茨玫. 1987. 层控钨矿床的地球化学[A]. 中国层控矿床地球化学(第2卷)[M]. 北京: 科学出版社. 71-100.

- 王加昇,温汉捷,李超,丁伟,张锦让. 2011. 黔东南石英脉型金矿毒砂 Re-Os 同位素定年及其地质意义[J]. 地质学报, 85(6): 955-964.
- 伍静,梁华英,黄文婷,王春龙,孙卫东,孙亚莉,李晶,莫济海,王秀璋. 2012. 桂东北苗儿山-越城岭南西部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析[J]. 科学通报, 57(13): 1126-1136.
- 杨峰,李晓峰,冯佐海,白艳萍. 2009. 栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其地质意义[J]. 桂林工学院学报, 29(1): 21-24.
- 杨燮. 1992. 湖南沃溪金-锑-钨矿床成矿物质来源及成矿元素的共生机制[J]. 成都地质学院学报, 19(2): 20-28.
- 冶金部南岭钨矿专题组. 1985. 华南钨矿[M]. 北京:冶金工业出版社. 1-487.
- 张理刚. 1985. 湘西雪峰隆起区钨锡金矿床稳定同位素地质学[J]. 地质与勘探, 21(11): 24-28.
- 张龙升,彭建堂,张东亮,胡阿香,阳杰华. 2012. 湘西印支期大神山花岗岩的岩石学与地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 36(1): 137-148.
- 中国科学院贵阳地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类的地球化学[M]. 北京:科技出版社. 1-418.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 9(4): 556-565.
- 朱笑青,王甘露,卢焕章,吴学益,陈文益. 2006. 黔东南金矿形成时代的确定兼论湘黔加里东金矿带[J]. 中国地质, 33(5): 1092-1099.
- Bingen B and Stein H J. 2003. Molybdenite Re-Os dating of biotite dehydration melting in the Rogaland high-temperature granulites, S Norway[J]. Earth and Planetary Science Letters, 208(3-4): 181-195.
- Lawley C J M and Selby D. 2012. Re-Os geochronology of quartz-enclosed ultrafine molybdenite: Implications for ore geochronology[J]. Econ. Geol., 107: 1499-1505.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for isoplot 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication. 25-32.
- Mao J W, Xie G Q, Bierlin F, Qu W J, Du A D, Ye H S, Pirajino F, Li H M, Guo B J, Li Y F and Yang Z Q. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 72: 4606-4626.
- Peng J T, Zhou M F, Hu R Z, Shen N P, Yuan S D, Bi X W, Du A D and Qu W J. 2006. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China[J]. Mineralium Deposita, 41: 661-669.
- Selby D and Creaser R A. 2004. Macroscale NTIMS and microscale LA-MC-ICP-MS Re-Os isotopic analysis of molybdenite: Testing spatial restrictions for reliable Re-Os age determinations, and implications for the decoupling of Re and Os within molybdenite[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 68: 3897-3908.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low blank Rhenium-Osmium analysis[J]. Analytical Chemistry, 67: 2136-2141.
- Smoliar M L, Walker R J and Morgan J W. 1996. Re-Os ages of group IA, IIA, IVA and IVB iron meteorites[J]. Science, 271: 1099-1102.
- Stein H J, Markey R J, Morgan J W, Hannah J L and Scherstén A. 2001. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works[J]. Terra Nova, 13(6): 479-486.
- Stein H J, Scherstén A, Hannah J and Markey R. 2003. Sub-grain scale decoupling of Re and ¹⁸⁷Os and assessment of laser ablation ICP-MS spot dating in molybdenite[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 67(19): 3673-3686.
- Stein H J. 2006. Low-rhenium molybdenite by metamorphism in northern Sweden: Recognition, genesis, and global implications[J]. Lithos, 87: 300-327.