赣南八仙脑破碎带型钨锡多金属矿床成矿流体和年代学研究*

丰成友[1] 王松[2] 曾载淋[3] 张德全[1] 李大新[1] 佘宏全[1]

FENG ChengYou[1], WANG Song[2], ZENG ZaiLin[3], ZHANG DeQuan[1], LI DaXin[1] and SHE HongQuan[1]

1. 中国地质科学院矿产资源研究所,国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京 100037
2. 中煤地质工程总公司,北京 100073
3. 江西省地勘局赣南地质调查大队,赣州 341000

1. *MLR Key Labaratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing* 100037, *China*
2. *China Coal Geology Engineering Corporation, Beijing* 100073, *China*
3. *South Jiangxi Geological Survey Party of JBEDGMR, Ganzhou* 341000, *China*

2011-08-01 收稿, 2011-11-25 改回.

Feng CY, Wang S, Zeng ZL, Zhang DQ, Li DX and She HQ. 2012. Fluid inclusion and chronology studies of Baxiannao mineralized fractured zone-type tungsten polymetallic deposit, southern Jiangxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1):52 – 64

Abstract Baxiannao is a typical mineralized fractured zone-type W-Sn polymetallic deposit which was discovered recently. Based on detailed petrographic observations and microthermometric studies of fluid inclusion, hydrogen and oxygen isotopes and radiometric dating, this paper studied the origin and evolution of the ore-forming fluid, ages of tungsten mineralization and petrogenesis and tectonic environment of this deposit. The results show that the fluid inclusions are mainly of H_2O-NaCl type with minor CO_2 type. The homogenization temperature peaks of low (150 ~ 170℃, 200 ~ 220℃), medium (250 ~ 270℃) and high (290 ~ 310℃) indicate multistage fluid activities. The ore-forming fluid is a type of low-salinity, low-density H_2O-CO_2-NaCl system. The δD values of fluids from fluid inclusions in quartz vary from −78‰ to −65‰, $\delta^{18}O_{H_2O}$ values of quartz from the ore change from 4.33‰ to 6.44‰, suggesting the ore-forming fluid was derived mainly from magmatic water and was mixed by meteoric water. The dating of zircon from biotite granite determined by SHRIMP yields an age of 157.2 ± 2.2Ma. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Baxiannao fractured zone-type tungsten deposit by ICP-MS yield an isochron age of 157.9 ± 1.5Ma, which is consistent with diagenetic age of biotite granite. Combined with those available from the literature, it can be concluded that tungsten mineralization occurred at the same geodynamic background that is Jurassic intraplate extensional environment during the large-scale extension period of lithosphere in southern China.

Key words Fractured zone-type tungsten deposit; Ore-forming fluid; SHRIMP zircon U-Pb dating; Molybdenite Re-Os isotopic dating; Baxiannao; Southern Jiangxi Province

摘 要 八仙脑矿床为赣南近年确认的较为典型的破碎带型钨锡多金属矿床。本文通过流体包裹体岩相学、显微测温、氢、氧同位素和年代学研究,探讨了八仙脑钨矿成矿流体来源及演化、成岩成矿时代和形成构造环境。结果表明,流体包裹体以液体包裹体为主,含少量 CO_2 包裹体,流体具低(150 ~ 170℃和 200 ~ 220℃)、中(250 ~ 270℃)和高(290 ~ 310℃)等不同的显微测温峰,显示出多期次流体活动相互叠加的特征,成矿流体为低盐度、低密度的 H_2O-CO_2-NaCl 体系。矿石中石英的 δD 为 −78‰ ~ −65‰,$\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 4.33‰ ~ 6.44‰,表明成矿流体以岩浆水为主并有大气降水的混合。利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法

* 本文受国家自然科学基金项目(40772063)、国土资源部"百人计划"项目(200809)和中国地质调查局地质调查项目(1212010561603-2)联合资助.

第一作者简介: 丰成友,男,1971 年生,博士,研究员,主要从事矿床地质、地球化学研究,E-mail:fengchy@yahoo.com.cn

和辉钼矿 Re-Os 等时线法，分别获得八仙脑矿区成矿黑云母花岗岩和破碎蚀变带中黑钨矿-石英脉的形成年龄为 157.2±2.2Ma 和 157.9±1.5Ma，成岩成矿年龄一致，均为晚侏罗世。结合区域最新研究成果，认为赣南钨矿形成于华南中生代岩石圈伸展时期的侏罗纪板内拉张环境的地球动力学背景，为同一成岩成矿系统的产物。

关键词 破碎带型钨矿；成矿流体；SHRIMP 锆石 U-Pb 测年；辉钼矿 Re-Os 同位素测年；八仙脑；赣南

中图法分类号 P618.44；P618.67；P597.3

地处南岭成矿带东段的江西省赣南地区钨锡资源丰富，黑钨矿-石英脉型、云英岩型、矽卡岩型、花岗岩型、破碎带型等矿床类型多样。其中，破碎带型为近年新发现确认，指矿体呈大透镜状、串珠状、脉状产于蚀变破碎带中并明显受断裂构造控制的可供工业开采利用的钨锡矿床，该类矿床成矿具多阶段性，矿石矿物组合复杂，矿化分带不明显，典型实例如八仙脑钨锡多金属矿、老庵里锡多金属矿等。八仙脑矿床发现于 1963 年，2002～2005 年江西省地勘局赣南地质调查大队对其进行大规模勘查，2008 年正式开采，截至目前，探获金属资源量钨 2.9 万吨、锡 2.2 万吨、铜 1.2 万吨、铅 2.0 万吨、锌 1.5 万吨、银 100 吨，平均品位为 WO_3 0.37%、Sn 0.35%、Cu 0.56%、Pb 1.26%、Zn 0.72%、Ag 66.52g/t。随着矿床勘查的深入，部分学者对其地质特征与找矿方向进行了研究（朱祥培等，2006；张庆林等，2007）。本文基于野外调研和矿床地质特征描述，详细开展了流体包裹体地球化学研究，报道了成矿花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 成矿年龄，为精细厘定矿床成岩成矿时代，探讨矿床成因和地球动力学过程提供重要依据。

1 成矿地质背景

赣南地区大地构造位置处于欧亚大陆板块与滨西太平洋板块消减带的内侧华夏板块中，在成矿带上，恰位于武夷山和南岭两大成矿带的交汇复合部位。区内地层除缺失志留系外，震旦系至第四系均有出露，震旦系-奥陶系浅变质富含钙质、泥质、炭质及砂泥质的类复理石建造构成褶皱基底，泥盆系-下三叠系为一套海陆交互相、浅海相含钙质碎屑岩、碳酸盐岩，侏罗系-白垩系主要为产于断陷盆地中的陆相红盆沉积及火山碎屑岩，其中分布广泛的震旦纪-寒武纪基底岩系及泥盆纪地层钨含量高于地壳克拉克值的几倍至几十倍，为钨锡的重要矿源层（朱焱龄等，1981）。受南岭 EW 向与武夷山 NNE 向构造带的复合控制，特别是中生代以来滨西太平洋构造域活动影响，岩浆侵入活动频繁，造成本区醒目的以 EW 向构造岩浆岩带为主干、叠加复合了 NNE-NE 向构造为主导的“三纵三横”构造格局。岩体出露众多（多达 400 余个），分布面积近 1.4 万平方千米，包括加里东、海西、印支、燕山、喜马拉雅山 5 个旋回。其中燕山旋回是本区活动的最鼎盛时期（占全区岩体总数的 70%），并具多阶段、多次成岩特点，岩性主要为酸性岩类的似斑状黑云母花岗岩、二长花岗岩、二长花岗斑岩等，以高硅（SiO_2 > 70%）、富碱（>8%）、多挥发分、高度分异演化（分异指数 DI > 90）的重熔型铝过饱和花岗岩类为特征，并富含钨、锡、钼、铋、铍等成矿元素，是本区钨多金属矿重要成矿母岩。

自 1907 年西华山钨矿最早被发现至今，在赣南共发现钨矿床（点）429 处，其中大型矿床 8 处、中型 24 处、小型 46 处，累计探明钨储量 170 万吨（曾载淋等，2007）；建有以西华山、盘古山、大吉山、岿美山为代表的“八大”钨矿山，钨精矿年产量稳定在 2 万吨左右，黑钨矿产量半个多世纪以来一直雄踞世界首位。主要矿床类型包括热液石英脉型、花岗岩型、云英岩型、矽卡岩型、层控浸染型、破碎带型、火山-次火山热液型等，以前两者分布最广、储量最大。根据成矿地质条件、矿化特征与主要分布规律，可将赣南地区划分为 3 个成矿带（诸广山东坡、于山和武夷山）、7 个远景区（集中区），而目前已发现的绝大多数大、中型矿床及矿点集中分布在诸广山东坡和于山 2 大成矿带中的 4 个成矿集中区（崇-余-犹、赣县-于都、龙南-定南-全南、兴国-宁都）内（图 1）。

2 矿床地质特征

八仙脑矿床为近年新发现的一种新类型——破碎带型钨矿，位于天门山-红桃岭矿田西南部、天门山成矿岩体向南隐伏的接触带上（图 2）。矿区出露地层主要为下寒武统牛角河组碎屑岩，其次为上震旦纪老虎塘组石英杂砂岩、板岩夹硅质岩。侵入岩产于矿区北侧，为复式岩体，倾向南，倾角 20°～65°。据野外观察，岩体由早至晚侵入的岩性分别为中细粒斑状黑云母花岗岩、细粒斑状黑云母花岗岩和花岗斑岩。中细粒斑状黑云母花岗岩呈岩株侵入于寒武系变质岩中，细粒斑状黑云母花岗岩呈小岩株、岩瘤、岩滴状侵入于早期主岩体与寒武系地层中，其内发育围岩捕虏体、顶垂体，具面型云英岩化、白云母化蚀变等。花岗斑岩呈脉状沿 NE 向断裂及构造裂隙侵入于变质岩及花岗岩中。多次构造岩浆活动强烈，形成了一系列规模较大的 NNE 向、近 EW 向、NE 向断裂构造。NNE 向断裂为区域性断裂，分布于矿区东部边缘，由千家地延伸至张天堂一带，规模巨大，宽 5～10m，带内岩石破碎、硅化强烈，矿区天门山岩体明显受该断裂控制，是区内主要控岩构造。EW 向断裂为本区破碎带型钨锡多金属矿（化）体的重要导矿和容矿构造，长 1000～5000m，宽 1～6m，总体走向 80°～100°，倾向南，倾角 50°～75°。因构造应力作用，带内构造角砾岩、碎裂岩及片理化较为发育，沿带充填有大量热液石英及碳酸盐矿物，宏观上构成规模较大的硅化石英脉条带。NE 向断裂为成矿期后构造，长介于 1000～2000m，宽为 0.5～2m，总体走向 30°～60°，倾向 SE 或 NW，倾

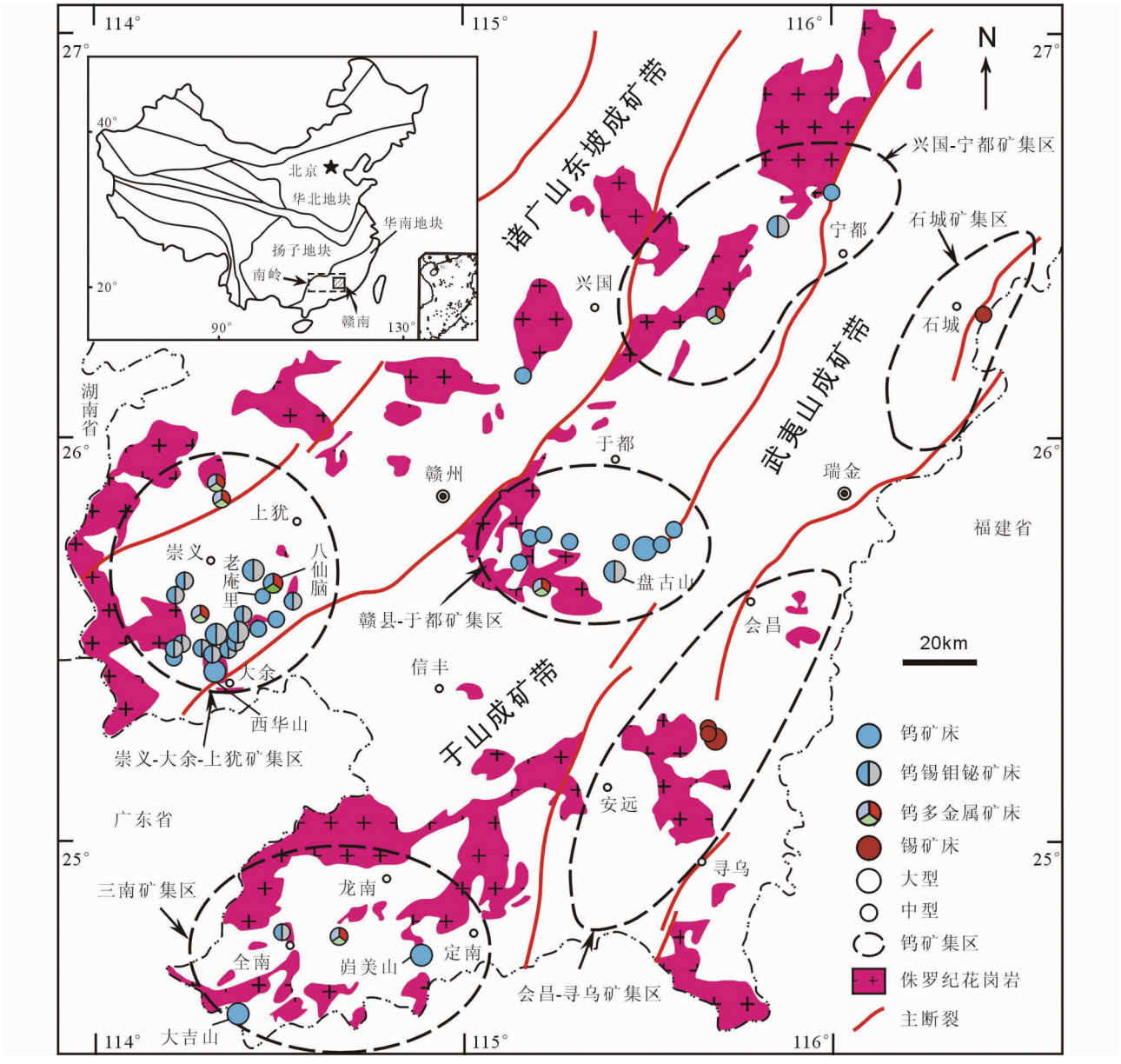


图 1 赣南钨矿成矿带、矿集区及大中型矿床分布图(据江西省地勘局赣南地质调查大队,2004①)

Fig. 1 Schematic distribution map of major large- and medium-sized tungsten-tin deposits in South Jiangxi Province

角 60°~80°,不仅切穿位移前期断裂构造,且对矿化带(体)具一定的破坏作用。

目前在矿区中部寒武系地层与天门山岩体之间 2km 范围内,已发现破碎带型钨锡多金属矿体 10 条,此外,还有石英脉型钨锡矿体 4 条(图 3)、隐伏云英岩型钨锡多金属矿体 1 条。破碎带型钨锡矿体呈东西向产于天门山岩体与岩体南侧 2km 范围内的寒武系浅变质碎屑岩中,受东西向断裂控制明显,与围岩界线清楚。已控制矿体走向长 0.5~4km,宽 0.5~5.2m,倾向 165°~195°,倾角 55°~75°,倾向上矿体连续性较好,平面上矿体呈透镜状、脉状、串珠状,具分支复合、膨大缩小、尖灭侧现等特征。地表主要为褐铁矿化构造角砾岩、碎裂状梳状石英脉和少量硅化碎裂岩。硅化、绿泥石化、碳酸盐化等蚀变较强,铁锰质含量较高,局部可见铅锌铜矿化。采坑和钻孔中常见成矿早期的长石、石英呈角砾状被多金属硫化物胶结,晚期的多金属硫化物呈条带状分布在石英脉中。产于矿区中部的 V_3 号矿脉是该矿床的主矿脉,长约 4km,宽 0.45~5.15m(平均 2.26m)。

① 江西省地勘局赣南地质调查大队. 2004. 赣南钨矿矿产资源预测评价. 1-64

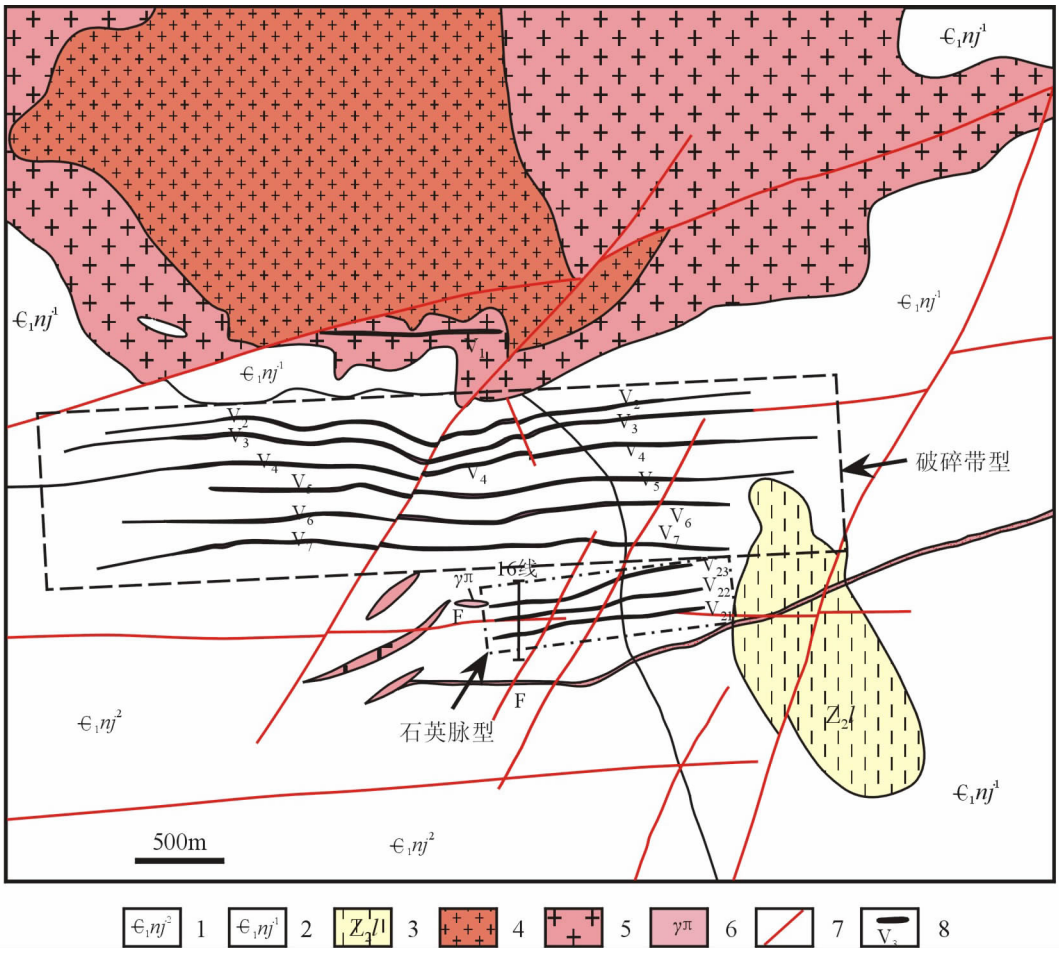


图 2　八仙脑钨锡多金属矿床地质简图(据江西地勘局赣南地质大队,2004)

1-下寒武统牛角河组上段石英杂砂岩、粉砂质板岩夹含炭板岩;2-下寒武统牛角河组下段石英杂砂岩、含炭硅质板岩、高炭板岩;3-震旦系上统老虎塘组石英杂砂岩、板岩夹硅质岩;4-细粒黑云母花岗岩;5-中细粒斑状黑云母花岗岩;6-花岗斑岩;7-断层;8-矿脉

Fig. 2　Schematic geological map of the Baxiannao W-Sn polymetallic deposit

1-metamorphic rocks of Upper Niujiaohe Formation, Early Cambrian; 2-metamorphic rocks of Lower Niujiaohe Formation, Early Cambrian; 3-Upper Sinian Laohutang Formation; 4-Early Yanshanian fined-grained biotite granite; 5-Early Yanshanian porphyritic medium to fined-grained biotite granite; 6-granitic porphyry; 7-fault; 8-orebodies

3　样品及分析测试方法

3.1　流体包裹体及氢、氧同位素测试方法

为对比起见,本文将位于八仙脑矿床西侧的老庵里破碎带型锡矿的流体包裹体研究一并讨论,样品分别采自地表白色石英脉贫矿石、坑道及钻孔多金属硫化物钨锡矿石。显微测温分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成,均一温度利用德国产 1350 型热台,精度为 ±1℃,冰点用英国产 THMS-600 型冷热台,精度为 ±0.1℃。H_2O-NaCl 包裹体的盐度是用测得的冰点通过 Bodnar (1993)的方程计算而得,对 CO_2-H_2O 包裹体,利用 CO_2 笼形物熔化温度通过 Bozzo *et al.* (1973)给出的温度-盐度关系式计算出水溶液的盐度。

用于氢、氧同位素测定的石英单矿物分离提纯是将样品破碎到 60 ~ 100 目,然后在双目镜下精选出纯度大于 99% 的石英样品,再用 1 ∶ 1 盐酸清洗,以除去矿物表面吸附物和方解石等其它矿物。石英矿物氧和流体包裹体氢同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素室 Finnigan-MAT251 质谱仪上进行,$\delta^{18}O$ 测定采用 BrF_5 法,然后用 Clayton (1972)的石英-水体系氧同位素分馏方程计算出相应的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值,δD 测定时先加热至 105℃ 去除石英颗粒表面的吸附水及次生包裹体,然后采用高真空热爆法取水、锌法制氢,分析精度分别为 ±0.2‰和 ±2‰。

石英流体包裹体气、液相成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成,取样温度 100 ~ 600℃,气相成分分析仪器为日本岛津公司 GC2010 气相色谱仪及澳大利亚 SGE 公司热爆裂炉,液相成分分析仪器为日本岛津公司 Shimadzu HIC-SP Super 离子色谱仪。

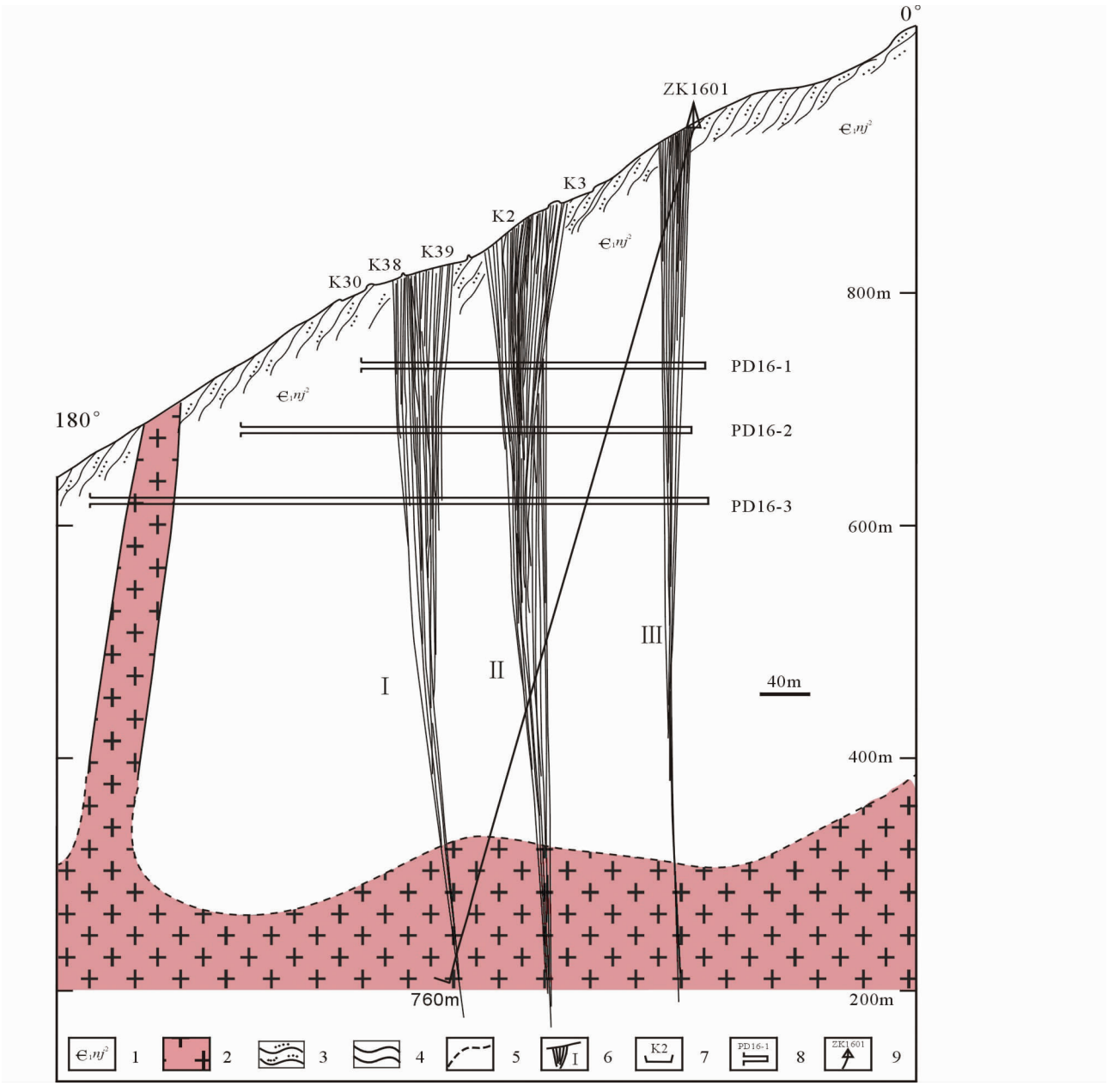


图 3 八仙脑矿区石英细脉带型钨矿化地质剖面图

剖面图见图 2 的 16 线. 1-下寒武统牛角河组上段;2-下寒武统牛角河组下段;3-变粉砂岩;4-板岩;5-隐伏花岗岩体推断顶板界线;6-石英细脉带;7-探槽;8-平硐;9-钻孔

Fig. 3 Geologic section in the Baxiannao W-Sn deposit, showing quartz veinlet-type tungsten-tin mineralization

Geologic section is line 16 in Fig. 2. 1-metamorphic rocks of Upper Niujiaohe Formation, Early Cambrian; 2-Early Yanshanian porphyritic medium to fined-grained biotite granite; 3-metamorphic siltstone; 4-slate; 5-inferred line for buried granite; 6-quartz veinlet mineralization zone; 7-trench; 8-adit; 9-diamond drill hole

3.2 锆石 SHRIMP U-Pb 分析方法

中-粗粒黑云母花岗岩样品(BXN01)采自矿区地表,地理坐标:东经 114°23′00″,北纬 25°37′12″。岩石新鲜、呈灰白色、半自形粒状结构、块状构造,主要矿物为石英(40% ~ 50%)、钾长石(20% ~30%)、斜长石(15% ~20%)、黑云母(3% ~5%),副矿物有磁铁矿、锆石、磷灰石等,多条宽 1 ~ 3cm 的黑钨矿-石英脉穿插其中,脉两侧发育云英岩化。将待测的花岗岩样品破碎后用水淘洗去粉尘,先用磁选方法除去磁铁矿等磁性矿物,再用重液粗选出锆石,最后在双目显微镜下手工精选出锆石,纯度达 99% 以上。

SHRIMP 锆石 U-Pb 测年在中国地质科学院地质研究所

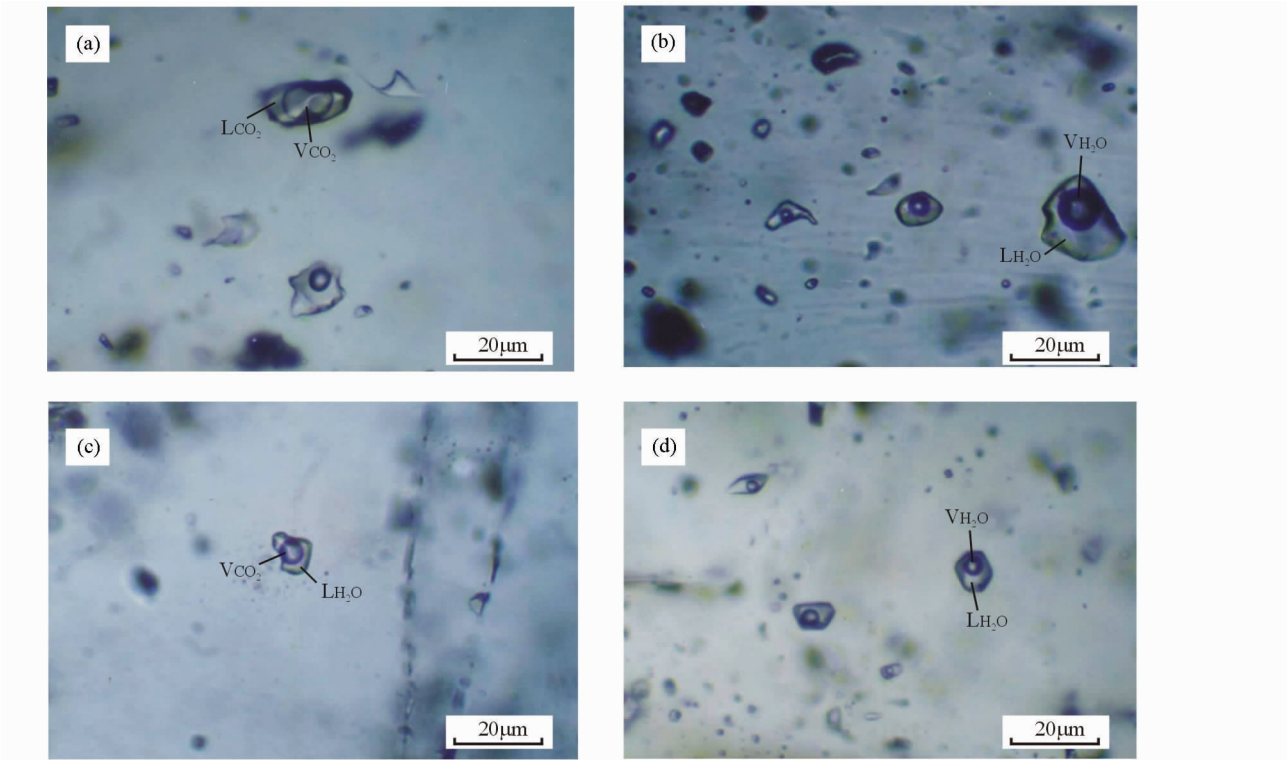


图 4 八仙脑和老庵里钨矿流体包裹体显微照片

(a, b)-BZK39-1-7; (c, d)-Lal-9. 常温,单偏光,寄主矿物为石英

Fig. 4 Fluid inclusion micro-photos of Baxiannao and Lao'anli deposits

北京离子探针中心的网络虚拟实验室,通过远程共享控制系统(SHRIMP Remote Operation System, SROS)远程控制位于澳大利亚 Curtin 理工大学的 SHRIMP II 仪器完成。将挑选好的待测锆石颗粒与标准锆石(TEM,其年龄为 417Ma)一起粘贴,制成环氧树胶样品靶,打磨抛光并使其露出中心部位,然后在北京离子探针中心进行反射光、透射光和阴极发光显微照相。为了尽量降低锆石表面和镀金过程中普通 Pb 的污染,测定过程中先用束斑扫描 5min,详细测试过程可参见宋彪等(2002)。数据处理、年龄计算采用 Ludwig SQUID 1.0 及 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2004),应用实测的^{204}Pb 校正普通铅,单个测试点的误差均为 1σ,^{206}Pb/^{238}U 年龄的加权平均值误差为 2σ、95% 置信度。因所测定样品为显生宙年轻锆石,故采用^{206}Pb/^{238}U 年龄。

3.3 辉钼矿 Re-Os 同位素分析方法

5 件辉钼矿样品均采自 PD550 采矿坑内的受破碎带控制的 V_3 黑钨矿-石英脉矿体,辉钼矿主要呈晶形较好的鳞片浸染状、团块状产出。将野外采集到的矿石样品首先粉碎过筛,再从 100 目以上的样品中用重力分离、电磁分离等方法和在实体显微镜下挑选获得辉钼矿,辉钼矿质纯,无氧化、无污染,纯度在 98% 以上。最后用玛瑙钵研磨至 200 目待测。

样品分析和测试在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室进行,分析仪器是 PQ Excell ICP-MS,Re-Os 同位素分析的原理和详细分析方法参见杜安道等(2001)、Du *et al.* (2004)。^{187}Os 为总^{187}Os,计算时的误差指其总误差,包括样品的称量误差、稀释剂标定误差、质谱测量误差和质量分馏校正误差等,置信度为 95%。模式年龄的计算误差还包括^{187}Re 衰变常数的不确定度(1.02%)。模式年龄 t 的计算公式为:$t = [\ln(1 + {}^{187}\mathrm{Os}/{}^{187}\mathrm{Re})]/\lambda$,其中 λ(^{187}Re 衰变常数) $= 1.666 \times 10^{-11}\,\mathrm{a}^{-1}$(Smoliar *et al.*, 1996)。

4 分析结果

4.1 流体包裹体及氢、氧同位素

4.1.1 流体包裹体岩相学和冷热台测试

通过对不同类型矿石中原生或假次生流体包裹体显微岩相学分析,根据室温下相态特征及气液比可分为以下四类:Ⅰ. 富液相气液两相水溶液包裹体(图 4a):个体较小(3~12μm),主要为椭圆形,其次负晶形,孤立状或线性密集分布,多为晚期低温热液捕获的包裹体。室温下有液相水溶液(L)和气相(V)两相,但气液比一般 < 10%,此类包裹体均一时为液相。Ⅱ. 略富气相气液两相水溶液包裹体(图 4b,d):个体稍大,主要为负晶形,孤立状随机分布。室温下也由液相(L)和气相(V)两相组成,气液比稍大,一般 15% ~30%,此类包裹体也均一到液相。Ⅲ. 富 CO_2 包裹体(图 4a):含量

表 1 八仙脑和老庵里钨矿石英流体包裹体特征及显微测温结果表

Table 1 Characteristics and microthermometric data of fluid inclusions in quartz from Baxiannao and Lao'anli deposits

矿床	样品号	岩性	主矿物	包裹体特征				盐度(wt% NaCleqv)		均一温度(℃)
				类型	形态	大小(m)	气液比(%)	冰点(℃)	盐度	
八仙脑	BZK39-1-7	ZK39-1 钻孔 194.7m 处,被方铅矿闪锌矿黄铜矿等胶结的黑钨矿-石英脉	石英	L	椭圆形	4~10	5	-0.1~-0.2	0.18~0.35	210~220
				L	负晶形	6~12	10	-2.8~-3.0	4.65~4.96	254~270
				V-L	负晶形	12~20	20~30	-3.4~-3.6	5.56~5.86	292~310
				纯 CO_2	椭圆形	20~30	70~80			Th_{CO_2}→L,30.7
	Bxl-3	V_2 矿脉,含锡石、黄铜矿、磁黄铁矿多金属硫化物石英脉矿石	石英	L	椭圆形	6~12	10	-0.1~-0.2	0.18~0.35	225~238
				V-L	负晶形	6~10	15	-1.6~-1.8	2.74~3.06	266~272
				V-L	负晶形	10~26	20~30	-3.0~-3.3	4.96~5.41	306~315
	Bxl-6	V_3 矿脉,EW 走向梳状硫化物-石英脉	石英	L	椭圆形	6~12	5	-0.1	0.18	150~171
				L	椭圆形	4~8	10	-1.3~-1.5	2.24~2.57	201~225
				V-L	负晶形	5~16	13	-2.2	3.71	248~255
	Bxl-12	V_7 矿脉,NW 走向白色石英脉	石英	L	椭圆形	6~10	5	-0.1~-0.2	0.18~0.35	150~178
				L	负晶形	6~8	10	-0.2~-0.3	0.35~0.53	191~204
				V-L	负晶形	6~10	13	-2.1~-2.2	3.55~3.71	251~260
	Bxl-17	含黑钨矿、黄铜矿白色石英脉	石英	L	椭圆形	6~8	5	-0.1	0.18	162~179
				L	负晶形	6~10	13	-0.2~-0.5	0.35~0.88	194~217
				V-L	负晶形	12~20	20	-1.1~-1.3	1.91~2.24	298~305
老庵里	Lal-4	多金属硫化物矿石	石英	L	椭圆形	5~10	5	-0.1~-0.2	0.18~0.35	164~171
				L	负晶形	6~12	10	-1.8~-1.9	3.06~3.23	196~210
				V-L	负晶形	8~15	15	-2.3~-2.5	3.87~4.18	258~271
				V-L	负晶形	5~10	20~30	-2.3~-2.6	3.87~4.34	292~305
	Lal-9	含少量黑钨矿白色石英脉	石英	L	椭圆形	3~8	5	-0.1	0.18	158~165
				L	负晶形	5~10	10	-1.5~-1.8	2.57~3.06	196~225
				V-L	负晶形	6~10	15	-3.3~-3.5	5.41~5.71	258~271
				CO_2	负晶形	5~12	20~30	CO_2 笼形物熔化温度 +6.5~+7.0	5.77~6.63	298~312 Th_{CO_2}→L,23.1
	Lal-13	块状闪锌矿黄铜矿石	石英	L	椭圆形	3~8	5	-0.1	0.18	144~181
				L	负晶形	4~10	10	-1.8~-2.0	3.06~3.39	210~224
				V-L	负晶形	5~12	15	-3.1~-3.8	5.11~6.16	261~274
				V-L	负晶形	4~8	20			298~301

极少,仅见于八仙脑矿床钻孔内,大小 20~30μm,椭圆形,孤立状分布,为原生包裹体,室温下呈两相($V_{CO_2}+L_{CO_2}$)。Ⅳ. CO_2-H_2O 包裹体(图 4c):不甚发育,个体大小差别大,常呈负晶形或似圆状,一般随机分布呈孤立状。

对八仙脑和老庵里两矿床石英流体包裹体显微测温结果(表 1)表明,两者具相似的流体组成,均表现出多期次流体活动相互叠加的特征。在八仙脑矿床,NaCl-H_2O 包裹体的冰点为 -3.6~-0.1℃,相应的盐度为 0.18%~5.86% NaCleqv,均一温度介于 150~315℃,可分为 2 个低温峰(150~160℃和 200~220℃)、1 个中温峰(250~270℃)和 1 个高温峰(290~310℃)(图 5a),流体密度介于 0.71~0.93g/cm^3,一件纯 CO_2 包裹体的 CO_2 均一温度为 30.7℃,对应的密度为 0.56g/cm^3;老庵里矿床的 NaCl-H_2O 包裹体的冰点介于 -3.8~-0.1℃,对应的盐度为 0.18%~6.16% NaCleqv,均一温度为 144~305℃,也可大致分为 4 个峰,包括 2 个低温峰(160~170℃和 200~220℃)、1 个中温峰(260~270℃)和 1 个高温峰(290~300℃)(图 5b),流体密度介于 0.77~0.93g/cm^3,测得 2 个 CO_2-H_2O 包裹体笼形物熔化温度为 6.5℃和 7.0℃,对应盐度为 5.77% NaCleqv 和 6.63% NaCleqv,均一温度较高(304℃和 309℃),计算的 ρ_{H_2O} 为 0.748g·cm^{-3}和 0.767g·cm^{-3}。其中 1 个包裹体 CO_2 部分均一温度为 23.1℃,对应的 $\rho_{CO_2}=0.73$g/cm^3。

在均一温度和盐度相关图解上(图 6),低盐度(0.18%~0.35% NaCleqv)流体的温度变化范围较大,且盐度不随均一温度的升高而增加,说明其代表晚期大气降水。其余包裹体的盐度与均一温度成正相关关系,很可能反映在成矿过程中存在两种不同性质流体的混合作用,早期为与钨锡矿化有关的岩浆热液,后来有与铅锌矿化有关的大气降水热液的叠加。

4.1.2 H, O 同位素组成

分别对钨锡多金属矿石、近地表 EW 走向梳状石英脉贫矿石和 NW 走向无矿石英脉进行了石英流体包裹体 H、O 同

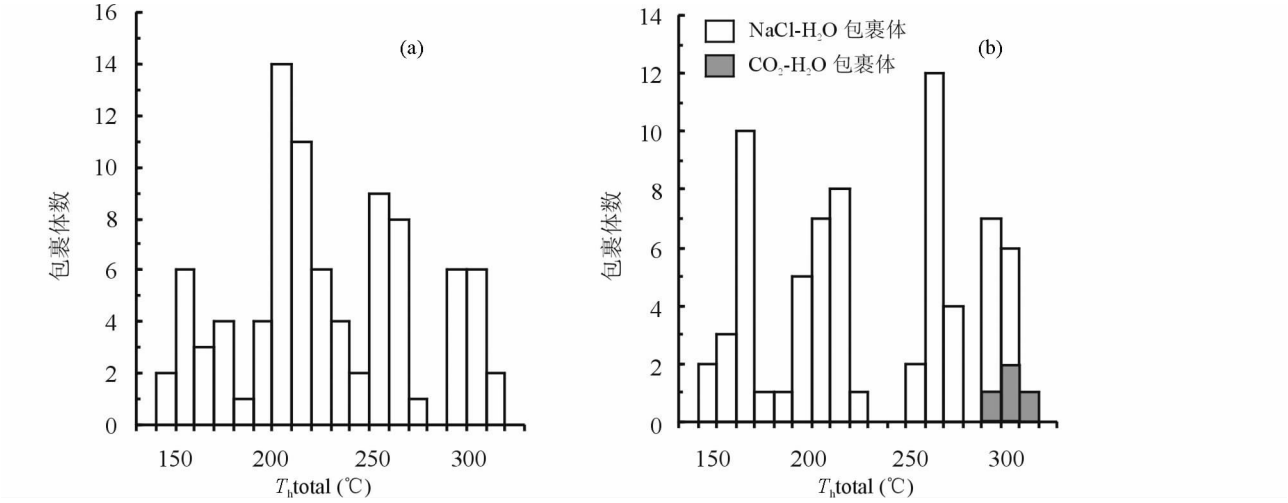


图 5 八仙脑(a)和老庵里(b)钨矿石英流体包裹体均一温度直方图

Fig. 5 Histograms showing microthermometric measurements of fluid inclusions in quartz from Baxiannao (a) and Lao'anli (b) deposits

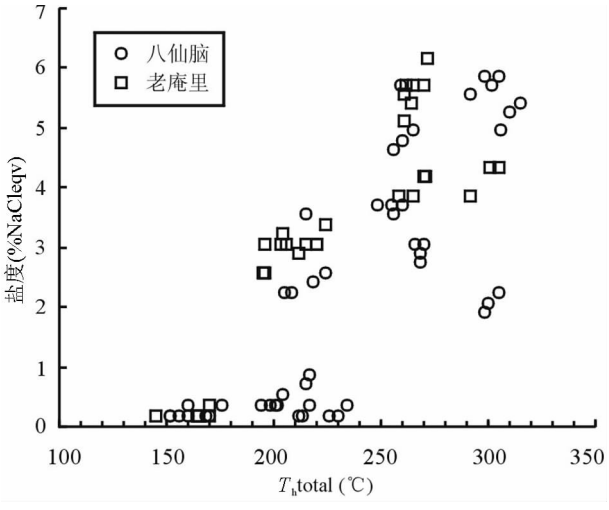


图 6 八仙脑和老庵里钨矿石英流体包裹体均一温度和盐度关系图

Fig. 6 Homogenization temperature vs salinity diagram of fluid inclusions from Baxiannao and Lao'anli deposit

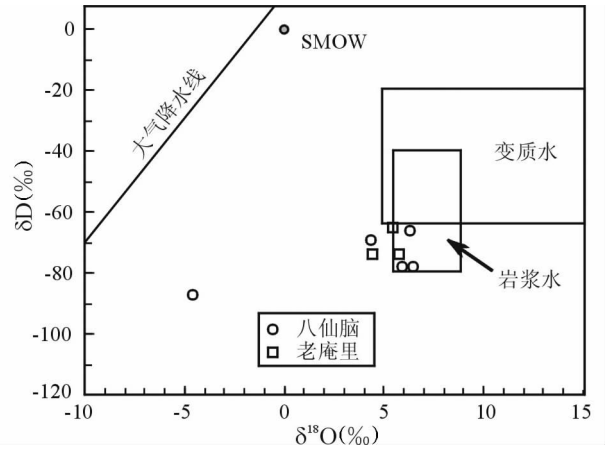


图 7 八仙脑和老庵里钨矿石英流体包裹体 δD-δ^{18}O 关系图(岩浆水和变质水范围据 Taylor,1979)

Fig. 7 δD-δ^{18}O diagram of quartz fluid inclusions from Baxiannao and Lao'anli deposits (after Taylor, 1979)

位素分析,结果见表 2。2 个矿床计 8 件样品的流体包裹体水的 δD_{H_2O} = -87‰ ~ -65‰,单矿物石英的 $\delta^{18}O_{石英}$ = 3.9‰ ~ 13.4‰,根据石英与水之间的氧同位素分馏方程(Clayton, 1972),用流体包裹体的均一温度平均值计算出的成矿流体的氧同位素 $\delta^{18}O_{H_2O}$ = -4.59‰ ~ +6.44‰。将上述结果投影到传统的成矿流体 δD-$\delta^{18}O_{H_2O}$ 关系图上(图 7)可见,钨锡多金属矿石均落在岩浆水区域,作为地表标志带的 EW 向贫矿白色石英脉位于岩浆水与大气降水之间紧邻岩浆水的部位,表明有大气降水的加入,而 1 件沿后期 NW 向裂隙充填的白色石英脉明显偏离岩浆水或变质水,而紧靠大气降水线,为典型的大气降水成因。

4.1.3 石英流体包裹体气、液相成分

流体包裹体成分是讨论流体来源的重要标志之一,本次选择八仙脑和老庵里矿床中代表性矿石进行了石英流体包裹体气、液相成分分析,结果见表 3。从中可见,气相成分中 H_2O 占绝对优势,为 79.06% ~ 95.76%,含一定量的 CO_2 (2.42% ~ 9.24%)和 N_2(1.712% ~ 11.45%),而其它成分甚微。液相成分以 Na^+ (1.44×10^{-6} ~ 2.23×10^{-6})、K^+ (0.82×10^{-6} ~ 1.60×10^{-6})、Cl^- (2.14×10^{-6} ~ 5.46×10^{-6})、SO_4^{2-} (1.48×10^{-6} ~ 2.32×10^{-6}) 为主,同时含有一定量的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、NO_3^- 等。

已有研究表明,岩浆来源成矿流体的 K^+/Na^+ 比值均大于 1,深部来源流体含有较高的 F^-、Cl^- 和较大的 F^-/Cl^- 比

表 2 八仙脑和老庵里钨矿石英流体包裹体 H、O 同位素测试结果

Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of Baxiannao and Lao'anli deposits

矿床	样品号	产状	$\delta^{18}O_{石英}$(‰)	$\delta^{18}O_{水}$(‰)	$\delta D_{水}$(‰)
八仙脑	Bxl-3	V_2 矿脉,含锡石、黄铜矿、磁黄铁矿多金属硫化物石英脉矿石	12.2	5.93	-78
	Bxl-6	V_3 矿脉,EW 走向梳状硫化物-石英脉	12.9	4.33	-69
	Bxl-12	V_7 矿脉,NW 走向白色石英脉	3.90	-4.59	-87
	Bxl-17	含黑钨矿、黄铜矿白色石英脉	13.3	6.34	-66
	BZK39-1-7	ZK39-1 钻孔 194.7m 处,被方铅矿闪锌矿黄铜矿等胶结的黑钨矿-石英脉	13.4	6.44	-78
老庵里	Lal-4	多金属硫化物矿石	12.4	5.44	-65
	Lal-9	含少量黑钨矿白色石英脉	11.4	4.45	-74
	Lal-13	块状闪锌矿黄铜矿石	12.7	5.74	-74

注:中国地质科学院矿产资源研究所同位素室测试,采用的分馏方程为 $1000\ln a_{石英-水} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.4$(Clayton,1972),$\delta^{18}O_{H_2O}$ 计算时的温度取值主要根据流体包裹体均一测温

表 3 八仙脑和老庵里钨锡多金属矿床石英流体包裹体气、液相成分分析结果

Table 3 Vapor and liquid components of quartz fluid inclusions from Baxiannao and Lao'anli deposits

样品号	产状	气相成分(%)							液相成分($\times 10^{-6}$)							
		CH_4	C_2H_2	C_2H_6	CO_2	H_2O	O_2	N_2	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Bxl-3	多金属硫化物石英脉矿石	0.0315	0.0014	0.0003	4.946	88.415	0.128	6.478	1.439	1.598	0.169	0.246	0.046	2.141	0.174	2.315
Bxl-6	EW 走向梳状硫化物-石英脉	0.0139	0.0030	0.0006	2.419	95.762	0.083	1.719	1.908	2.430	0	0.348	0.087	2.332	0.190	1.653
Lal-4	多金属硫化物矿石	0.0671	0.0031	0.0016	9.244	79.060	0.174	11.450	2.229	0.821	0.249	0.699	0.042	5.458	0.169	1.477

注:中国地质科学院矿产资源研究所杨丹测试,取样温度:100~600℃,测试仪器:气相成分为日本岛津公司 GC2010 气相色谱仪及澳大利亚 SGE 公司热爆裂炉;液相成分为日本岛津公司 Shimadzu HIC-SP Super 离子色谱仪

表 4 八仙脑钨锡多金属矿床黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果

Table 4 Zircon SHRIMP dating of biotite granite in the Baxiannao W-Sn-polymetallic deposit

测点号	$^{206}Pb_c$(%)	U($\times 10^{-6}$)	Th($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}Th}{^{238}U}$	$^{206}Pb^*$($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{207}Pb^*}{^{206}Pb^*}$	±%	$\frac{^{207}Pb^*}{^{235}U}$	±%	$\frac{^{206}Pb^*}{^{238}U}$	±%	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$年龄(Ma)
1.1	0.24	749	774	1.07	15.6	0.0509	2.7	0.1697	3.1	0.02418	1.3	154.0±2.0
2.1	1.03	343	281	0.84	7.61	0.0487	9.1	0.171	9.3	0.02551	1.5	162.4±2.4
3.1	1.67	225	87	0.40	5.05	0.0574	11	0.203	11	0.02565	1.6	163.3±2.6
4.1	0.02	269	113	0.43	5.87	0.0546	6.8	0.191	6.9	0.02542	1.5	161.8±2.4
5.1	1.00	275	205	0.77	5.99	0.0522	5.9	0.180	6.1	0.02507	1.5	159.6±2.3
6.1	0.30	1009	421	0.43	20.7	0.0484	2.6	0.1590	2.9	0.02384	1.3	151.9±2.0
7.1	0.85	448	214	0.49	9.57	0.0463	5.7	0.1575	5.8	0.02464	1.4	156.9±2.2
8.1	1.13	246	124	0.52	5.22	0.0457	11	0.154	11	0.02438	1.6	155.3±2.4
9.1	1.30	191	124	0.67	3.73	0.0559	7.6	0.173	7.8	0.02243	1.6	143.0±2.2
10.1	0.54	297	110	0.38	6.34	0.0498	4.9	0.1695	5.1	0.02468	1.4	157.2±2.2
11.1	0.91	202	116	0.59	4.32	0.0508	11	0.173	11	0.02465	2.0	157.0±3.1
12.1	0.36	335	213	0.66	6.94	0.0520	6.5	0.172	6.7	0.02402	1.4	153.0±2.2
13.1	0.24	935	302	0.33	19.8	0.0489	2.7	0.1659	3.0	0.02463	1.3	156.9±2.0
14.1	0.07	254	111	0.45	5.48	0.0544	9.1	0.188	9.3	0.02512	1.6	160.0±2.5

注:表内误差为 1σ,Pb_c 和 Pb^* 分别表示普通铅和放射性成因铅,数据用 ^{204}Pb 校正

值。2 件八仙脑矿床矿石石英流体包裹体的 K^+/Na^+ 比值均大于 1,分别为 1.11 和 1.27,显示成矿流体为岩浆热液来源。老庵里矿床的 1 件矽卡岩化多金属硫化物矿石的 K^+/Na^+ 比值较低(0.37),很可能是由于后期大气降水热液的加入或变质作用过程中水-岩交换反应所造成的。此与前述氢、氧同位素示踪结果相一致。两矿床的 F^- 含量均很低,Cl^- 含量较高,F^-/Cl^- 比值介于 0.008~0.037,没有深部来源的显示。成矿流体的低 F^-、高 Cl^- 特征与区内花岗岩浆的超酸性、高钾、过铝质、相对贫钠特征相符,实验结果表明,对于富 Cl 和贫 F 的矿化花岗岩,Cl 将富集在温度相对低(800~1000°C)和相对高压($P>0.6$GPa)条件下的成矿流体中。研究还表明,亚铝质和过碱性花岗岩能直接初溶的 Cl^- 含量

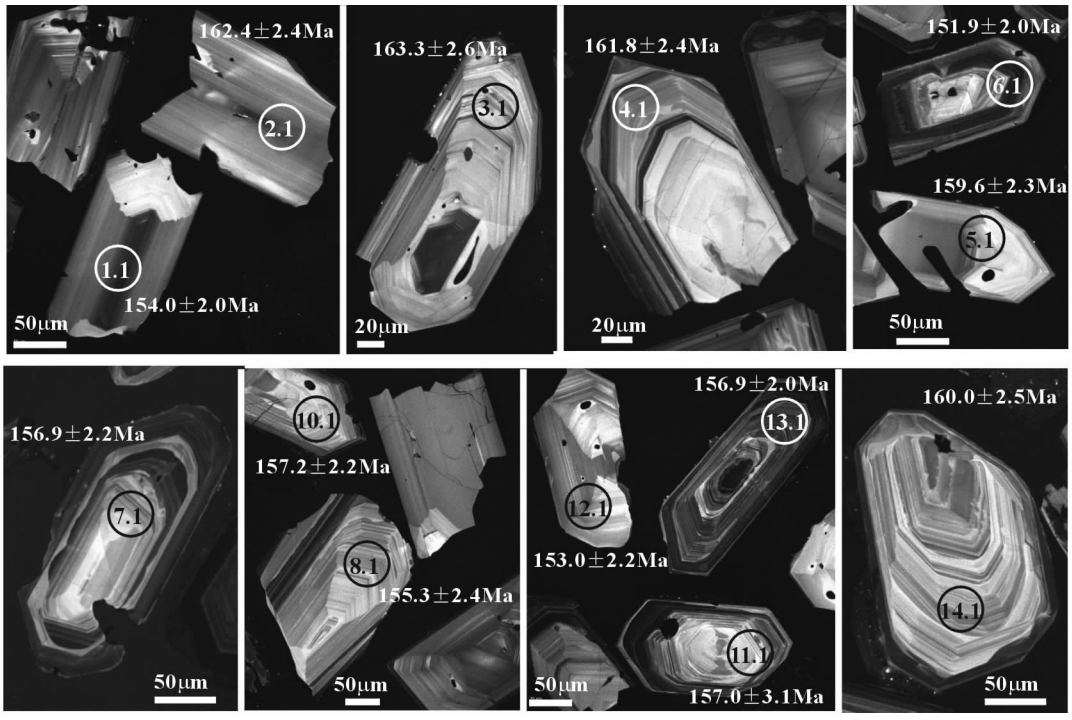


图 8　中-粗粒黑云母花岗岩中锆石的阴极发光图像及测点位置

Fig. 8　Cathodoluminescence images of zircon and site of analyzed point in the biotite granite

较高。

4.2　成矿黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年

中-粗粒黑云母花岗岩(BXN01)中的锆石主要为短柱状,长多介于 100 ~ 300μm,长宽比约 2∶1,大多数锆石具较好的锥面和柱面,在阴极发光图像(图 8)上,具有清晰的韵律环带结构,为典型的岩浆结晶锆石。分析点的 U 和 Th 含量变化范围均不大,分别介于 191×10^{-6} ~ 1009×10^{-6} 和 87×10^{-6} ~ 774×10^{-6},Th/U 比值为 0.33 ~ 1.07(表 4),表明其为典型岩浆成因(Th/U > 0.4)。在谐和曲线上(图 9),除 BXN01 9.1 分析点外,其余 13 粒锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄较集中,介于 151.9 ~ 163.3Ma,加权平均年龄为 157.2 ± 2.2Ma (MSWD = 2.5),代表该岩体的结晶年龄。

4.3　辉钼矿 Re-Os 同位素测年

八仙脑矿床辉钼矿 Re、Os 同位素分析结果列于表 5,从中可见,5 件样品的 Re 和 ^{187}Os 含量均较低,分别变化于 690.2×10^{-9} ~ 2608×10^{-9} 和 1.14×10^{-9} ~ 4.29×10^{-9},获得的 5 个模式年龄十分一致,介于 156.9 ± 2.2Ma ~ 159.4 ± 2.3Ma,加权平均年龄为 158.1 ± 1.0Ma(MSWD = 0.63)。5 个数据点构成一条很好的 ^{187}Re-^{187}Os 等时线(图 10),年龄为 157.9 ± 1.5Ma(MSWD = 1.2),十分相近的模式年龄和等时线年龄表明分析结果是可靠的。

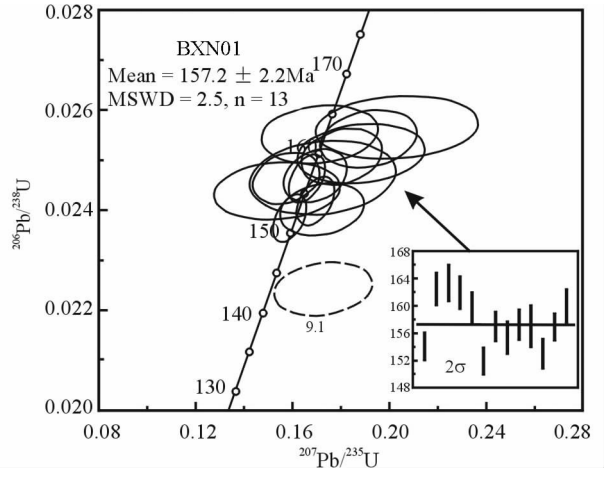


图 9　黑云母花岗岩(BXN01)中锆石 SHRIMP U-Pb 谐和图

Fig. 9　SHRIMP U-Pb concordia diagram of zircon in the biotite granite

5　讨论

5.1　成矿流体来源

由于赣南地区钨矿以黑钨矿-石英脉型为主,因此,早期即有一些学者对其开展大量流体包裹体研究(卢焕章等,1977;穆治国等,1984;李荫清等, 1988)。近年来, 随着显微冷热台和其他分析测试技术发展,对赣南地区代表性钨矿又相继开展了大量有关流体包裹体类型、均一温度和盐度、激

表 5 八仙脑钨锡多金属矿床辉钼矿的 Re-Os 同位素测试结果

Table 5 Results of Re-Os isotopic analyses of molybdenite from Baxiannao W-Sn-polymetallic deposit

样品号	样重	Re($\times10^{-9}$)		普 Os($\times10^{-9}$)		^{187}Re($\times10^{-9}$)		^{187}Os($\times10^{-9}$)		模式年龄	
	(g)	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	测定值	2σ	年龄(Ma)	2σ
BXN02	0.202	2608	20	0.0145	0.0018	1639	13	4.29	0.04	156.9	2.2
BXN03	0.300	690.2	6.5	0.0099	0.0006	433.8	4.1	1.14	0.01	158.2	2.3
BXN04	0.200	2472	19	0.0647	0.0039	1554	12	4.09	0.03	157.8	2.2
BXN05	0.101	2338	19	0.1222	0.0055	1470	12	3.88	0.03	158.1	2.3
BXN07	0.101	2279	19	0.1470	0.0024	1432	12	3.81	0.03	159.4	2.3

注:数据由国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室测试;普 Os 是按^{192}Os/^{190}Os 比值根据 Nier 值进行计算的

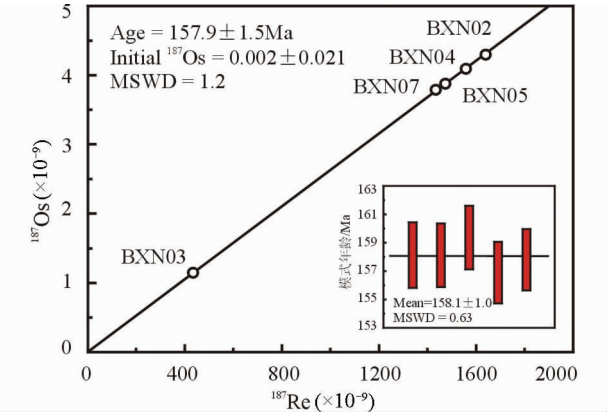


图 10 八仙脑钨矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄

Fig. 10 Molybdenite Re-Os isochron of the Baxiannao deposit

光拉曼探针成分以及氦、氩、氢、氧同位素分析测试和研究。总体上,流体包裹体以液体包裹体为主,但不同钨矿床的流体包裹体种类、成矿流体来源及成矿机制存在差异,如王旭东等(2008,2009)认为漂塘大型石英脉型黑钨矿床的主成矿阶段具明显的两期流体活动,流体组分以水溶液为主,不含或只含少量的 CO_2,He-Ar 同位素示踪表明成矿流体主要为混有部分饱和大气水的地壳流体,未见明显的幔源流体参与;王旭东等(2010)研究发现盘古山大型石英脉型钨多金属矿床成矿流体富含 CO_2,并认为以 CO_2 逸失为特征的流体不混溶作用是矿床金属沉淀的主要机制;席斌斌等(2008)在大吉山大型钨矿中识别出含 CO_2、CH_4 三相包裹体及含子矿物包裹体,提出成矿流体经历了自然冷却、不混溶作用和混合作用等演化过程;宋生琼等(2011)认为淘锡坑大型钨矿主成矿期的成矿流体为岩浆水和大气降水两种流体混和的产物;魏文凤等(2011)基于西华山钨矿 H、O 同位素模拟分析,提出该矿床成矿流体为岩浆水和大气降水的混合,早期以岩浆水为主,混有部分大气降水,晚期则以大气降水为主。

本文研究表明,八仙脑和老庵里破碎带型钨锡多金属矿床的流体包裹体类型亦以液体包裹体为主,含少量 CO_2 包裹体,两矿床流体均呈现多个低温峰(150 ~ 170℃ 和 200 ~ 220℃)、中温峰(250 ~ 270℃)和高温峰(290 ~ 310℃),显示出多期次流体活动相互叠加的特征。成矿流体盐度很低,为 0.18% ~ 6.16% NaCleqv,密度介于 0.71 ~ 0.93g/cm^3,成矿流体中阳离子以 Na^+、K^+ 为主,阴离子以 Cl^-、SO_4^{2-} 为主,气相成分为 H_2O、CO_2 和 N_2,表明成矿流体为 H_2O-CO_2-NaCl 体系。该矿床 5 件钨锡多金属矿石石英的氢、氧同位素组成为:δD 变化于 -78‰ ~ -65‰,位于正常岩浆水范围(-80‰ ~ -50‰,郑永飞和陈江峰,2000),$\delta^{18}O_{H_2O}$ 变化于 5.44‰ ~ 6.44‰,落入岩浆水区域;2 件 EW 走向含矿梳状石英脉的 δD 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 分别为 -74‰ ~ -69‰和 4.33‰ ~ 4.45‰,在成矿流体 δD-$\delta^{18}O_{H_2O}$ 关系图上位于岩浆水与大气降水之间紧邻岩浆水的部位,表明有大气降水的混入;样品 Bxl-12 为 NW 走向后期白色石英脉,其氢、氧同位素组成为典型的大气降水成因。可见,钨锡多金属成矿流体主要为岩浆水并有大气降水的混合。

5.2 成岩成矿时代及地球动力学背景

本研究获得八仙脑矿区成矿黑云母花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 157.2 ± 2.2Ma,破碎蚀变带中黑钨矿-石英脉的辉钼矿 Re-Os 模式年龄介于 156.9 ± 2.2Ma ~ 159.4 ± 2.3Ma,等时线年龄为 157.9 ± 1.5Ma,可见,八仙脑破碎带型钨矿成矿时代和黑云母花岗岩成岩时代在误差范围内十分一致,均为晚侏罗世。

八仙脑大型钨锡多金属矿床所属的天门山-红桃岭矿田是赣南地区最重要的钨锡多金属矿田之一,其中不仅出露有天门山、红桃岭、张天堂较大规模复式岩体,而且围绕复式岩体四周产有数十个不同成因类型的钨锡多金属矿床(点)。笔者近年在该矿田内获得了几组高精度成岩成矿年龄数据,有茅坪大型钨矿成矿花岗岩年龄 151.8 ± 2.9Ma,云英岩型、石英脉型辉钼矿 Re-Os 等时线年龄分别为 155.3 ± 2.8Ma 和 150.2 ± 2.8Ma;红桃岭花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 151.4 ± 3.1Ma,牛岭内带和樟斗外带石英脉型钨矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄分别为 154.9 ± 4.1Ma 和 149.1 ± 7.1Ma(丰成友等,2007a);张天堂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 156.9 ± 1.7Ma,与之相关的摇篮寨岩体型钨矿辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 155.8 ± 2.8Ma(丰成友等,2007b)。可见,成岩成矿年龄均集中在晚侏罗世,表明它们形成于同一成岩成矿系统和统一的地球动力学背景(Feng *et al.*, 2011)。

华仁民等(2005)概括总结了华南地区大规模成矿作用

时限。近年，毛景文等(2007，2008)总结提出华南地区中生代金属成矿的三个阶段，即晚三叠世(230～210Ma)、中晚侏罗世(170～150Ma)和早中白垩世(134～80Ma)。本文研究表明，天门山岩体、八仙脑破碎带型钨矿以及天门山-红桃岭钨锡多金属矿田成岩成矿时代均集中于160～150Ma之间，与包括湘南地区在内的南岭中段钨锡多金属矿床成岩成矿时代集中分布的特征(Peng *et al.*，2006；Yuan *et al.*，2007，2008，2011；彭建堂等，2008)均十分一致，同属于华南中生代第二次大规模成矿作用的产物，形成于中晚侏罗纪大陆边缘弧后伸展带的地球动力学背景(Mao *et al.*，2011)。

6 结论

八仙脑破碎带型钨锡多金属矿床流体包裹体研究表明，包裹体类型以液体包裹体为主，含少量CO_2包裹体；流体具低(150～170℃和200～220℃)、中(250～270℃)和高(290～310℃)等不同的显微测温峰，为多期次流体活动相互叠加的结果，成矿流体为低盐度、低密度的H_2O-CO_2-NaCl体系。矿石中石英的氢、氧同位素研究揭示，成矿流体来源以岩浆水为主，并有大气降水的混合。

八仙脑矿区成矿黑云母花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄为157.2±2.2Ma，破碎蚀变带中黑钨矿-石英脉的辉钼矿Re-Os等时线年龄为157.9±1.5Ma，均为晚侏罗世，成岩成矿年龄一致。结合区域最新研究成果，认为赣南钨矿形成于同一成岩成矿系统，为华南中生代岩石圈伸展时期的侏罗纪板内拉张环境下的产物。

致谢 谢奕汉研究员在流体包裹体研究中给予悉心指导；野外工作期间得到了梁景时高工、徐九发高工的大力支持；两位审稿人提出了宝贵的意见和建议；在此一并表示衷心的感谢。

References

Bodnar RJ. 1993. Revised equation and stable for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solution. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 683－684

Bozzo AT, Chen JR and Barduhn AJ. 1973. The properties of hydrates of chlorine and carbon dioxide. In: Delyannis A and Delyannis E (eds.). Fourth International Symposium on Fresh Water from the Sea, 3: 437－451

Clayton RN. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. J. Geophys. Res., 77: 3057－3607

Du AD, Zhao DY, Wang SX, Sun DZ and Liu DY. 2001. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius tube sample preparation. Rock and Mineral Analysis, 20(4): 247－252 (in Chinese with English abstract)

Du AD, Wu SQ, Sun DZ, Wang SX, Qu WJ, Markey R, Stein H, Morgan J and Malinovskiy D. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC. Geostandards and Geoanalytical Research, 28: 41－52

Feng CY, Xu JX, Zeng ZL, Zhang DQ, Qu WJ, She HQ, Li JW, Li DX, Du AD and Dong YJ. 2007a. Zircon SHRIMP U-Pb and molybdenite Re-Os dating in Tianmenshan-Hongtaoling tungsten-tin ore field, southern Jiangxi Province, China, and its geological implication. Acta Geologica Sinica, 81(7): 952－963 (in Chinese with English abstract)

Feng CY, Feng YD, Xu JX, Zeng ZL, She HQ, Zhang DQ, Qu WJ and Du AD. 2007b. Isotope chronological evidence for Upper Jurassic petrogenesis and mineralization of altered granite-type tungsten deposits in the Zhangtiantang area, southern Jiangxi. Geology in China, 34(4): 642－650 (in Chinese with English abstract)

Feng CY, Zeng ZL, Zhang DQ, Qu WJ, Du AD, Li DX and She HQ. 2011. SHRIMP zircon U-Pb and molybdenite Re-Os isotopic dating of the tungsten deposits in the Tianmenshan-Hongtaoling W-Sn ore field, southern Jiangxi Province, China, and geological implications. Ore Geology Reviews, 43(1): 8－25

Hua RM, Chen PR, Zhang WL and Lu JJ. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China. Mineral Deposits, 24(2): 99－107 (in Chinese with English abstract)

Li MQ, Ma XJ and Wei JX. 1988. Application of Fluid Inclusion in Ore Deposit Geology and Petrology. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 65－108 (in Chinese with English abstract)

Lu HZ, Shi JX, Yu CM and Xu SJ. 1977. A study on the characteristics and temperatures of formation of fluid inclusions from various types of tungsten deposits in the Nanling region. Geochimica, 3: 179－193 (in Chinese with English abstract)

Ludwig KR. 2004. Isoplot/Ex, version 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California

Mao JW, Xie GQ, Guo CL and Chen YC. 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 JW, Xie GQ, Guo CL, Yuan SD, Chen YB and Chen YC. 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 JW, Pirajno F and Nigel CN. 2011. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings: An introduction to the special issue. Ore Geology Reviews, 43: 1－7

Mu ZG, Huang FS, Chen CY and Zhen SH. 1984. Oxygen, hydrogen and carbon isotope studies of Piaotang and Xihuashan quartz-vein tungsten deposits, Jiangxi Province. In: Yu HZ (ed.). Proceedings of symposium on Tungsten Geology. Nanchang, 1981. Beijing: Geological Publishing House, 153－168 (in Chinese)

Peng JT, Zhou MF, Hu RZ, Shen NP, Yuan SD, Bi XW, Du AD and Qu WJ. 2006. Precise molybdenite Re-Os and mica Ar-Ar dating of the Mesozoic Yaogangxian tungsten deposit, central Nanling district, South China. Mineralium Deposita, 41: 661－669

Peng JT, Hu RZ, Yuan SD, Bi XW and Shen NP. 2008. The time ranges of granitoid emplacement and related nonferrous metallic mineralization in southern Hunan. Geological Review, 54(5): 617－625 (in Chinese with English abstract)

Smoliar MI, Walker RJ and Morgan JW. 1996. Re-Os ages of group IIA, IIIB, IVA, IVB iron meteorites. Science, 271: 1099－1102

Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. Geological Review, 48 (Suppl.): 26－30 (in Chinese with English abstract)

Song QS, Hu RZ, Bi XW, Wei WF and Shi SH. 2011. Hydrogen, oxygen and sulfur isotope geochemical characteristics of Taoxikeng tungsten deposit in Chongyi County, southern Jiangxi Province. Mineral Deposits, 30(1): 1－10 (in Chinese with English abstract)

Taylor HP. 1979. Oxygen and hydrogen isotope relationships. In: Barnes HL (ed.). Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. 2nd Edition. New York: Wiley. 236－277

Wang XD, Ni P, Jiang SY, Huang JB and Sun LQ. 2008. Fluid inclusion study on the Piaotang tungsten deposit, southern Jiangxi Province, China. Acta Petrologica Sinica, 24(9): 2163－2170 (in

Chinese with English abstract)
Wang XD, Ni P, Jiang SY, Zhao KD and Wang TG. 2009. Origin of ore-forming fluid in the Piaotang tungsten deposit in Jiangxi Province: Evidence from helium and argon isotopes. Chinese Science Bulletin, 54: 3338 – 3344 (in Chinese)
Wang XD, Ni P, Zhang BS and Wang TG. 2010. Fluid inclusion studies of the Pangushan quartz vein type tungsten deposit in southern Jiangxi Province. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(5): 539 – 550 (in Chinese with English abstract)
Wei WF, Hu RZ, Peng JT, Bi XW, Song SQ and Shi SH. 2011. Fluid mixing in Xihuashan tungsten deposit, Southern Jixangxi Province: Hydrogen and oxygen isotope simulation analysis. Geochimica, 40(1): 45 – 55(in Chinese with English abstract)
Xi BB, Zhang DH, Zhou LM, Zhang WH and Wang CJ. 2008. Characteristics of ore-forming fluid evolution in Dajishan tungsten deposit, Quannan County, Jiangxi. Acta Geologica Sinica, 82(7): 956 – 966 (in Chinese with English abstract)
Yuan SD, Peng JT, Shen NP, Hu RZ and Dai TM. 2007. ^{40}Ar-^{39}Ar isotopic dating of the Xianghualing Sn-polymetallic orefield in southern Hunan, China and its geological implications. Acta Geologica Sinica, 81(2): 278 – 286
Yuan SD, Peng JT, Hu RZ, Li HM, Shen NP and Zhang DL. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). Mineralium Deposita, 43:375 – 382
Yuan SD, Peng JT, Hao S, Li HM, Geng JZ and Zhang DL. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. Ore Geology Reviews, 43: 235 – 242
Zeng ZL, Zhu XP and Xu JX. 2007. Tungsten reserves of southern Jiangxi Province and prospecting outlook. China Tungsten Industry, 22(6): 16 – 18, 42 (in Chinese with English abstract)
Zhang QL, He GH and Xie G. 2007. The geological characteristics of tungsten-tin ore deposit in Baxiannao, Chongyi, Jiangxi. Resources Survey & Environment, 28(1): 40 – 45 (in Chinese with English abstract)
Zhen YF and Chen JF. 2000. Stable Isotope Geochemistry. Beijing: Science Press, 1 – 316(in Chinese)
Zhu XP, Gao GR and Liang JS. 2006. The characteristic and ore-searching direction of tungsten-tin polymetallic ore deposit of Baxiannao, Chongyi, Jiangxi. Resources Survey & Environment, 27(2): 120 – 126 (in Chinese with English abstract)
Zhu YL, Li CY and Lin YH. 1981. Geology of Tungsten Deposits in the Southern Jiangxi Province. Nanchang: Jiangxi People Publishing House, 1 – 440(in Chinese)

附中文参考文献

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-锇同位素地质年龄. 岩矿测试, 20(4): 247 – 252
丰成友, 许建祥, 曾载淋, 张德全, 屈文俊, 佘宏全, 李进文, 李大新, 杜安道, 董英君. 2007a. 赣南天门山-红桃岭钨锡矿田成岩成矿时代精细测定及其地质意义. 地质学报, 81(7): 952 – 963
丰成友, 丰耀东, 许建祥, 曾载淋, 佘宏全, 张德全, 屈文俊, 杜安道. 2007b. 赣南张天堂地区岩体型钨矿晚侏罗世成岩成矿的同位素年代学证据. 中国地质, 34(4): 642 – 650
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
李萌清, 马秀娟, 魏家秀. 1988. 流体包裹体在矿床学和岩石学中的应用. 北京: 北京科技出版社, 65 – 108
卢焕章, 施继锡, 喻茨玫, 许生蛟. 1977. 南岭地区各种类型钨矿床的气液包裹体特征和形成温度的研究. 地球化学, 3: 179 – 193
毛景文, 谢桂清, 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
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. 高校地质学报, 14(4): 510 – 526
穆治国, 黄福生, 陈成业, 郑淑蕙. 1984. 漂塘-西华山石英脉型钨矿床碳、氢、氧稳定同位素研究. 见:余鸿彰主编. 钨矿地质讨论会论文集. 南昌, 1981. 北京: 地质出版社, 153 – 168
彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 毕献武, 沈能平. 2008. 湘南中生代花岗质岩石成岩成矿的时限. 地质论评, 54(5): 617 – 625
宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26 – 30
宋生琼, 胡瑞忠, 毕献武, 魏文凤, 石少华. 2011. 赣南崇义淘锡坑钨矿床氢、氧、硫同位素地球化学研究. 矿床地质, 30(1): 1 – 10
王旭东, 倪培, 蒋少涌, 黄建宝, 孙立强. 2008. 赣南漂塘钨矿流体包裹体研究. 岩石学报, 24(9): 2163 – 2170
王旭东, 倪培, 蒋少涌, 赵葵东, 王天刚. 2009. 江西漂塘钨矿成矿流体来源的 He 和 Ar 同位素证据. 科学通报, 54: 3338 – 3344
王旭东, 倪培, 张伯声, 王天刚. 2010. 江西盘古山石英脉型钨矿床流体包裹体研究. 岩石矿物学杂志, 29(5): 539 – 550
魏文凤, 胡瑞忠, 彭建堂, 毕献武, 宋生琼, 石少华. 2011. 赣南西华山钨矿床的流体混合作用: 基于 H、O 同位素模拟分析. 地球化学, 40(1): 45 – 55
席斌斌, 张德会, 周利敏, 张文淮, 王成江. 2008. 江西省全南县大吉山钨矿成矿流体演化特征. 地质学报, 82(7): 956 – 966
曾载淋, 朱祥培, 许建祥. 2007. 赣南钨矿资源状况与资源远景展望. 中国钨业, 22(6): 16 – 18, 42
张庆林, 何桂红, 谢刚. 2007. 崇义县八仙脑钨锡矿床特征. 资源调查与环境, 28(1): 40 – 45
郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社. 1 – 316
朱祥培, 高贵荣, 梁景时. 2006. 江西崇义八仙脑钨锡多金属矿床特征及找矿方向. 资源调查与环境, 27(2): 120 – 126
朱焱龄, 李崇佑, 林运淮. 1981. 赣南钨矿地质. 南昌: 江西人民出版社, 1 – 440