

粤北大宝山多金属矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义

王 磊¹ 胡明安² 屈文俊³ 陈开旭¹ 龙文国¹ 杨 振²

(1.国土资源部武汉地质矿产研究所,湖北 武汉 430223;2.中国地质大学资源学院,湖北 武汉 430074;
3.国家地质测试中心,北京 100037)

摘要:对粤北大宝山多金属矿床次英安斑岩(样品 ZK5803)中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为(174.6±1.5) Ma (MSWD=0.7), 与矿区花岗闪长斑岩的形成年龄基本一致;3 个斑岩型和矽卡岩型钨钼矿石辉钼矿 Re-Os 模式年龄为(163.2±2.3) Ma(样品 CD-30)、(165.2±2.4) Ma(样品 DB-18)和(163.4±2.4) Ma(样品 CD-38),与层状铜铅锌矿中辉钼矿 Re-Os 模式年龄(164.7±3.0) Ma 基本一致;上述 4 个样品给出的加权平均年龄为(164.0±2.5) Ma (MSWD=0.16);该成矿年龄与南岭地区其他钨多金属矿床形成时间一致,同属于华南地区中生代第二阶段成矿作用。矿床地质特征、流体包裹体氢氧同位素($\delta^{18}\text{O} = -3.75\text{‰} \sim -7.0\text{‰}$, $\delta\text{D} = -50.7\text{‰} \sim -56.1\text{‰}$)和矿石硫化物硫同位素($\delta^{34}\text{S} = -2.00\text{‰} \sim 3.00\text{‰}$)资料表明,该矿床为与矿区次英安斑岩和花岗闪长斑岩有成因联系的岩浆期后热液矿床。矿区各类矿床应为同一期成矿事件的产物,不同于前人认为的存在加里东期海底喷流沉积和燕山期叠加成矿,或燕山期两期成岩成矿的观点。结合岩石微量元素图解和前人研究结果,推测其成矿动力学背景为南岭地区后造山伸展环境。

关键词:次英安斑岩;锆石;辉钼矿;LA-ICP-MS U-Pb 定年;Re-Os 定年;大宝山多金属矿床
中图分类号:P597.73;P618.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)01-0029-14

斑岩铜系统可以孕育一些分布广泛的矿化类型,包括以侵入岩为中心的斑岩矿床、随着围岩依次有矽卡岩型、碳酸盐交代型以及沉积岩型金矿床^[1]。在同一个斑岩成矿系统中,可以出现上述几种不同矿化类型的组合,如美国犹他州 Bingham 地区^[2-3], 秘鲁 Yanacocha 地区^[4-5], 老挝 Sepon 地区^[6], 马来西亚 Bau 地区^[7-8], 以及加拿大大不列颠哥伦比亚 MAX 斑岩 Mo 矿床及外围的 W 和 Pb-Zn-Ag 矿化^[9]等。中国粤北及邻区却少有上述斑岩系统中出现的多种矿化类型,主要为一些矽卡岩型和石英脉型多金属矿床、低温热液金银矿床^[10],如窑岗仙、师姑山和石人嶂为石英脉型 W-Sn 矿床、柿竹园为矽卡岩型和石英脉型 W-Sn-Bi-Mo、黄沙坪为矽卡岩型 Pb-Zn-W-Mo、将军寨为石英脉型 W-Sn-Mo,宝山为矽卡岩型和石英脉型 Cu-Mo-Pb-Zn-

Ag 矿床等。但大宝山矿床是一个例外,包括层状-似层状 Cu-Pb-Zn、热液脉型 Cu-Pb-Zn、斑岩型 Mo(W)、矽卡岩型 Mo-W、层状菱铁矿和风化淋滤型铁帽等矿床^[11-16]。目前该矿床仍然缺乏精确的成岩成矿资料,且矿床成因存在争论,还没有一个合理的成矿模式^[17]。

前人已对该矿床的矿化特征、控矿因素、矿床地球化学、成矿机制和成矿模式等展开过研究,并取得了一些重要的成果^[11-16,18-25]。随着研究的深入,其成因目前主要存在加里东期海底喷流沉积和燕山期叠加成矿^[21,24],以及燕山期两期成矿^[12,14-15]的观点。加里东期海底喷流沉积成矿主要是针对层状-似层状铜铅锌矿,这主要与矿区次英安斑岩形成时代存在加里东期^[21]和燕山期^[12,14-15]的争议有关。本文采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法和辉钼矿 Re-Os 法对矿

收稿日期:2011-04-15;改回日期:2011-07-11

基金项目:国土资源部危机矿山接替资源找矿项目(220644088)、钦杭成矿带(西段)基础地质调查综合研究项目(1212011085416)共同资助。

作者简介:王磊,男,1981年生,博士,助理研究员,从事大地构造和矿床学研究;E-mail:cugleiwang@gmail.com。

区次英安斑岩和斑岩型-矽卡岩型钼钨矿进行了定年,并结合已有的高精度年代学数据,厘清了其成岩成矿时代;在综合分析矿床地质和已有 H-O、S 同位素资料的基础上,讨论了层状铜铅锌多金属矿床的成因及其成矿动力学背景。

1 矿区地质特征

大宝山多金属矿床位于吴川—四会断裂带与近东西向大东山—贵东构造岩浆岩带的交汇部位(图1-a)。矿区出露的地层主要有寒武系浅变质砂页岩及板岩,中下泥盆统桂头群砂砾岩及砂页岩,中泥盆统东岗岭组灰岩、上泥盆统天子岭组灰岩和下侏罗统兰塘群砂页岩。区内构造以褶皱和断裂为主。褶皱

主要为大宝山向斜,由两列近 SN 断裂控制,轴向 NNW 为主,延长约 2 km。轴部为东岗岭组地层,东翼较陡,倾角 60~70°,西翼略缓,倾角 40~50°,呈不对称的狭长形产出。断裂主要有近东西向船肚—大宝山断裂(F₁),北东—南北向九曲岭断裂(F_{2a},F_{2b})和徐屋断裂(F₃),以及北北西向的大宝山断裂(F₄)、丘坝断裂(F₅)。这些褶皱和断裂控制了矿区岩浆岩和矿体的产出。

矿区主要出露次英安斑岩和花岗闪长斑岩(图1-b)。次英斑岩体分布于九曲岭—大宝山—徐屋一带,沿 NNW 弧形构造、NE 构造侵入,在地表以大宝山顶为转折端,南端呈 NNW 延伸,北段转向近 SN 向,岩体长约 3 000 m,宽 100~500 m。次英安斑

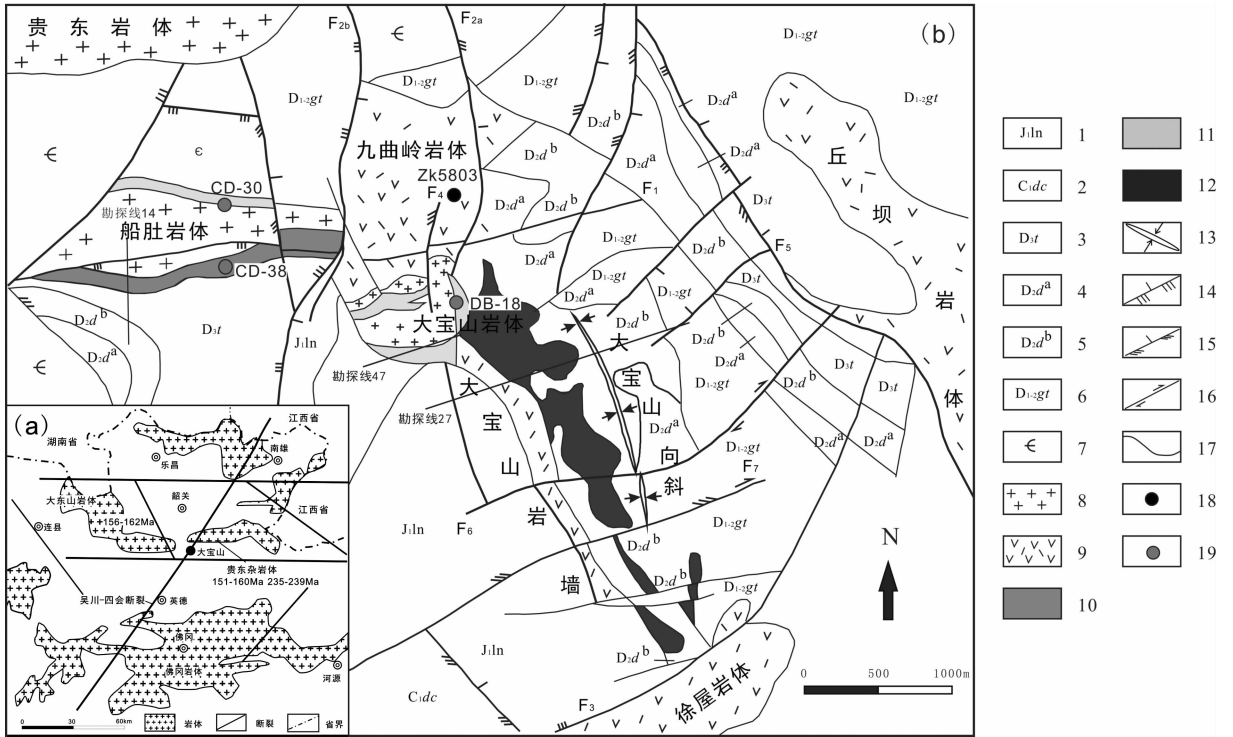


图1 大宝山多金属矿区地质略图(据文献^[19,21]修改)

- 1—下侏罗统兰塘群砂页岩;2—下石炭统测水组碳酸盐岩-碎屑岩;3—上泥盆统天子岭组灰岩;4—中泥盆统东岗岭组上亚组砂页岩;5—中泥盆统东岗岭组下亚组灰岩;6—中下泥盆统桂头群砂砾岩及砂页岩;7—寒武系浅变质砂页岩;8—花岗闪长斑岩;9—次英安斑岩;10—矽卡岩型钼钨矿;11—斑岩型钼(钨)矿;12—褐铁矿铁帽;13—大宝山向斜;14—压性冲断裂;15—压扭性断裂;16—扭性断裂;17—地质界线;18—锆石 U-Pb 定年样品采样点;19—辉钼矿 Re-Os 定年样品

Fig.1 Sketch geological map of the Dabaoshan polymetallic deposit (modified after references ^[19,21])

- 1—Lower Jurassic Lantang Formation (clastic rock); 2— Lower Carboniferous Ceshui Formation (carbonate rock to clastic rock); 3—Upper Devonian Tianziling Formation (limestone); 4—Upper Middle Devonian Donggangling Formation (sandstone and shale); 5—Lower Middle Devonian Donggangling Formation (limestone); 6—Lower-Middle Devonian Guitou Formation (sandstone and shale); 7—Cambrian (epimetamorphic sandstone and shale); 8—Granodioritic porphyry;
- 9—Subdacitic porphyry; 10—Skarn-type Mo-W ore body; 11—Porphyry-type Mo (W) ore body; 12—Gossan;
- 13—Dabaoshan syncline; 14—Compresso-thrust fault; 15—Compresso-shear fault; 16—Shear fault; 17—Geological boundary;
- 18—Zircon U-Pb dating sample; 19—Molybdenite Re-Os dating sample

岩主要由中性斜长石(10%~35%)、石英(4%~21%)和黑云母(3%~9%),以及 40%~85%的基质组成^[12,14-15];岩石具脱玻结构、斑状结构、流动构造;全岩 K-Ar 年龄为 166~163 Ma^[12],Rb-Sr 等时线年龄为 (195.5±11.0) Ma^[15],而单颗粒锆石 U-Pb 稀释法获得的年龄为 (441±19) Ma^[21]。花岗闪长斑岩主要分布于大宝山顶附近及矿区西部船肚地区,即船肚花岗闪长斑岩体和大宝山花岗闪长斑岩体,它们原本连为一体,沿船肚—大宝山断裂侵入,后被九曲岭断裂错断成两段^[9],在大宝山处侵入于次英安斑岩中。花岗闪长斑岩主要由斜长石(50%~65%)、正长石(7%~22%)、石英(9%~35%)和黑云母(2%~14%)组成^[12,14-15];岩石为斑状结构、块状构造;K-Ar 年龄为 101~97 Ma^[12],全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 (155±23) Ma^[15],而笔者采用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 法获得的年龄为 (175.8±1.5) Ma 和 (175.0±1.7) Ma^[27]。在副矿物组合上次英安斑岩和花岗闪长斑岩均有磁铁矿、钛铁矿、锆石、磷灰石和榍石等^[12,14-15]。

2 矿化与改造

矿区矿化主要为 Cu-Pb-Zn 和 Mo-W 矿化,相应形成了 Cu-Pb-Zn 和 Mo-W 矿床^[12,14-15]。与次英安斑岩有关的层状-似层状铜铅锌矿主要产于大宝山次英安斑岩墙东侧的泥盆纪东岗岭组地层中。矿体呈层状、似层状、透镜状和脉状分布(图 1-b,图 2-c)。矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和菱铁矿。层状铜铅锌矿中与矿石矿物共生的石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 (168.7±5.7)

Ma^[15],单个辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 (164.7±3.0) Ma^[28]。与花岗闪长斑岩有关的钼钨矿床主要为斑岩型钼(钨)矿和矽卡岩型钼钨矿。斑岩型钼(钨)矿主要产于大宝山和船肚花岗闪长斑岩与围岩的内外接触带上(图 1-b,图 2-a);矽卡岩型钼钨矿主要产于船肚花岗闪长斑岩体南部与天子岭组灰岩接触交代的石榴子石矽卡岩带中(图 1-b,图 2-b)。矿石矿物主要为辉钼矿、白钨矿、辉铋矿和黄铁矿。石英-辉钼矿-黄铁矿脉中流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为 (136.3±6.2) Ma,被解释为 Mo-W 矿化年龄^[15]。此外,由 Cu-Pb-Zn 和 Mo-W 矿化作用形成的原生硫化物(黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿,方铅矿和辉钼矿等)经过风化淋滤作用形成矿区主采场上部的铁帽。

矿床围岩主要遭受云英岩化和矽卡岩化,蚀变矿物主要为钾长石、石英、绢云母、石榴子石、透辉石、透闪石、阳起石、绿泥石和绿帘石。空间上自西南向南,从北往南,围岩蚀变有逐步减弱的趋势。

3 样品及分析方法

用于锆石 U-Pb 定年的次英安斑岩样品(ZK5803)采集于大宝山矿区 ZK5803 钻孔 680~700 m 处(图 1-b,图 3-a),该样品蚀变较为强烈,具硅化、辉钼矿化、绿泥石化。锆石分选在河北省廊坊市诚信地质服务公司完成。在测试之前,先在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室进行透射、反射光拍照,并利用 JEOL JXA-8100 型电子探针锆石进行阴极发光(CL)照相。

锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质大学地质过

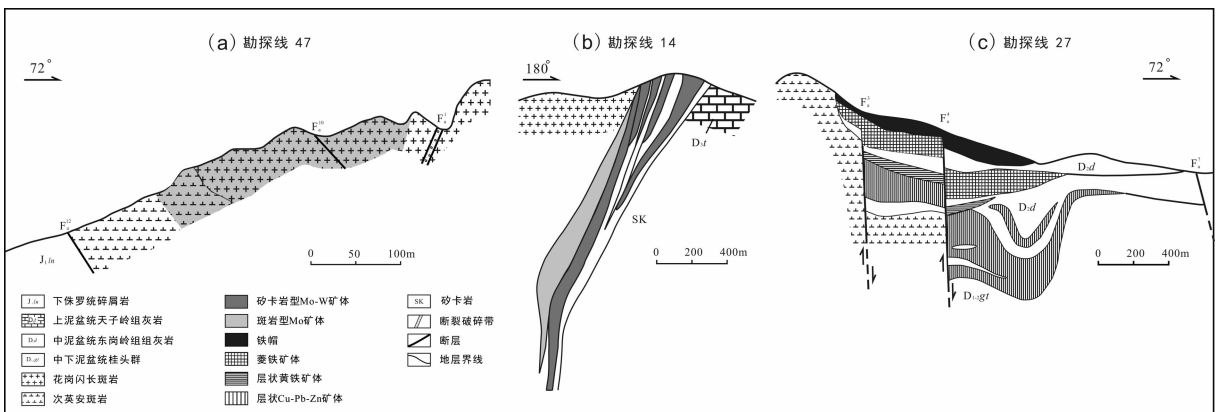


图 2 大宝山多金属矿床勘探线 47 线、14 线和 27 线剖面图(据文献[19]修改)

Fig.2 Geological sections along No.47, 14 and 27 exploration lines in the Dabaoshan polymetallic deposit (modified after reference[19])

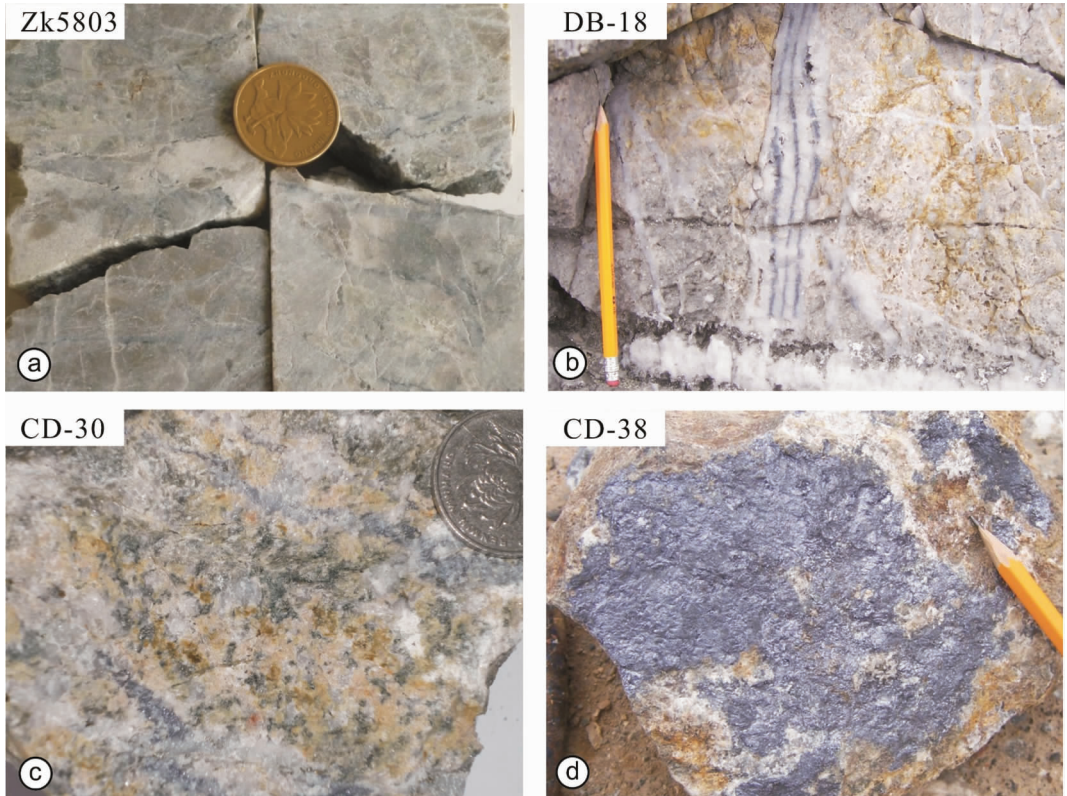


图3 大宝山矿区次英安斑岩和典型辉钼矿矿石照片
Fig.3 Photographs of typical subdacitic porphyry and porphyry- and skarn-type molybdenite ores in the Dabaoshan polymetallic deposit

程与矿产资源国家重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)进行,详细的实验原理及流程见文献[29]。实验中采用氦气作为载气以提高气溶胶运输到质谱仪的效率,并且减少气溶胶沉积在消融部位及运输管的周围^[30-31]。U、Th 和 Pb 含量采用 ²⁹Si 为内标,NIST610 作为外标。样品测试过程中采用束斑直径为 32 μm,每个分析点由 30 s 空白和 40 s 采集信号组成。²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 和 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 比值采用 Macquarie University 的 GLITTER 4.0 软件计算得出,校正采用 91500 标准锆石作为外标,并按照 Andersen^[32]的 ComPbCon#3-151 程序对其进行了普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 Ludwig^[33]的 Isoplot 软件完成。此次我们将 GJ01 作为未知年龄锆石进行了测试,拟合的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(597.9±5.9) Ma (2σ,MSWD=0.67,n=13)。

用于分选辉钼矿进行 Re-Os 定年的样品共 3 件,分别采自大宝山主采场和船肚地区北接触带 20 mm 宽左右的石英-辉钼矿-黄铁矿脉(样品 DB-18 和 CD-30。图 3-b,c)以及船肚地区南接触带的

矽卡岩钼矿石(样品 CD-38,图 3-d)。石英-辉钼矿-黄铁矿脉位于石英-绢云母带,辉钼矿一般呈细粒(<0.1 mm)鳞片状集合体与脉平行产出;矽卡岩钼矿石中辉钼矿呈鳞片状散布于石榴子石和透辉石矽卡岩中。辉钼矿的分选由河北省廊坊市诚信地质服务公司完成,采用重力和磁浮选进行矿物的分离,并在双目镜下进行辉钼矿的挑纯,挑选的用于测试的辉钼矿纯度达 99%以上。

Re-Os 同位素分析在国家地质测试中心 Re-Os 同位素实验室采用 ICP-MS(TJA X-series)进行,详细分析流程见 Shirey and Walker^[34],Markey et al.^[35]和 Du et al.^[36-37]。本次实验所采用的辉钼矿标准样品 GBW04436 (JDC)给出的模式年龄值为(138.2±2.0) Ma 和(139.6±1.9) Ma,校正后的平均值为(139.6±3.8) Ma。空白样 Re 含量为 93.9×10⁻⁹和 35.6×10⁻⁹,Os 含量为 0.14×10⁻⁹和 0.04×10⁻⁹。辉钼矿模式年龄采用计算公式 $t = [\ln(1 + ^{187}\text{Os}/^{187}\text{Re})] / \lambda$,λ 为 ¹⁸⁷Re 的衰变常数,计算模式年龄时采用的 λ 值为 1.666×10⁻¹¹a⁻¹^[38]。

4 结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

次英安斑岩样品 ZK5803 中锆石晶体长 60~200 μm , 长宽比为 1.5: 1~2.5: 1。阴极发光(CL)图像揭示锆石存在明显的核-边结构。一部分锆石边具有清楚的振荡环带, 为典型的岩浆锆石; 一部分锆石晶形发育较好, 无明显的岩浆环带; 还有某些锆石颗粒的边部有窄的无分带或弱分带的边, 具热液蚀变锆石的特征(图 4)。

对样品 ZK5803 中的 23 颗锆石进行了 27 个点的测年, 结果列于表 1 及图 5。15 个分析点位于岩浆环带较清楚的锆石区域, 在谐和图上分为两个年龄群(15 号分析点(151 \pm 3) Ma 偏离谐和线较远, 未在统计之列)。第一年龄群 7 个分析点锆石岩浆环带清楚, Th 和 U 的含量变化范围分别为(78~396) $\times 10^{-6}$ 和(163~583) $\times 10^{-6}$, 对应的 Th/U 比值为 0.21~1.22, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(442 \pm 7)~(393 \pm 6) Ma, 其加权平均值为(412.0 \pm 3.4) Ma (MSWD=8.3); 第二年龄群 7 个分析点锆石岩浆环带较为模糊, Th 和 U 的含量变化范围分别为(80~1 673) $\times 10^{-6}$ 和(230~1 987) $\times 10^{-6}$, 对应的 Th/U 比值为 0.27~0.84, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(155 \pm 3)~(177 \pm 3) Ma; CL 图像显示, 一些锆石分析点(如 22 号点)处于发黑的部位(图 4), 这

些锆石可能受到热液流体作用的影响, 使获得的年龄值偏低^[39], 进而与成矿时代较为一致。因此, 这 7 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(155 \pm 3~177 \pm 3 Ma) 可能既包括岩体的结晶年龄, 也包括一些受到热液活动影响的锆石年龄, 其上限值 177~175 Ma 更能代表其真实侵入年龄, 上限 3 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为(174.6 \pm 1.5) Ma (MSWD=0.7)。

另外 12 个分析点的 Th 和 U 的含量变化范围分别为(54~408) $\times 10^{-6}$ 和(92~747) $\times 10^{-6}$, 对应的 Th/U 比值为 0.10~1.03。其中分析点 4 位于继承锆石核部, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(307 \pm 5) Ma; 5、6、10、11、12、14、16、20 和 24 号分析点锆石晶形较好, 剥蚀点位于无岩浆环带的锆石边部, 6、16、24 号分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 754~643 Ma, 其余 5 个分析点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2 698~1 264 Ma。

4.2 辉钼矿 Re-Os 年龄

辉钼矿 Re-Os 同位素分析及相关计算结果见表 2。3 件辉钼矿样品 Re 和 ^{187}Os 含量变化范围分别为(64.65~102.4) $\times 10^{-6}$ 和(110.6~177.2) $\times 10^{-6}$ 。2 件石英英脉型辉钼矿矿石样品 Re-Os 模式年龄分别为(163.2 \pm 2.3) Ma 和(165.2 \pm 2.4) Ma, 1 件矽卡岩型矿石样品为(163.4 \pm 2.4) Ma。利用 Isoplot 软件计算的 3 个辉钼矿样品 Re-Os 模式年龄加权平均值为(163.9 \pm 1.3) Ma (MSWD=0.81)(图 6)。这些模式年

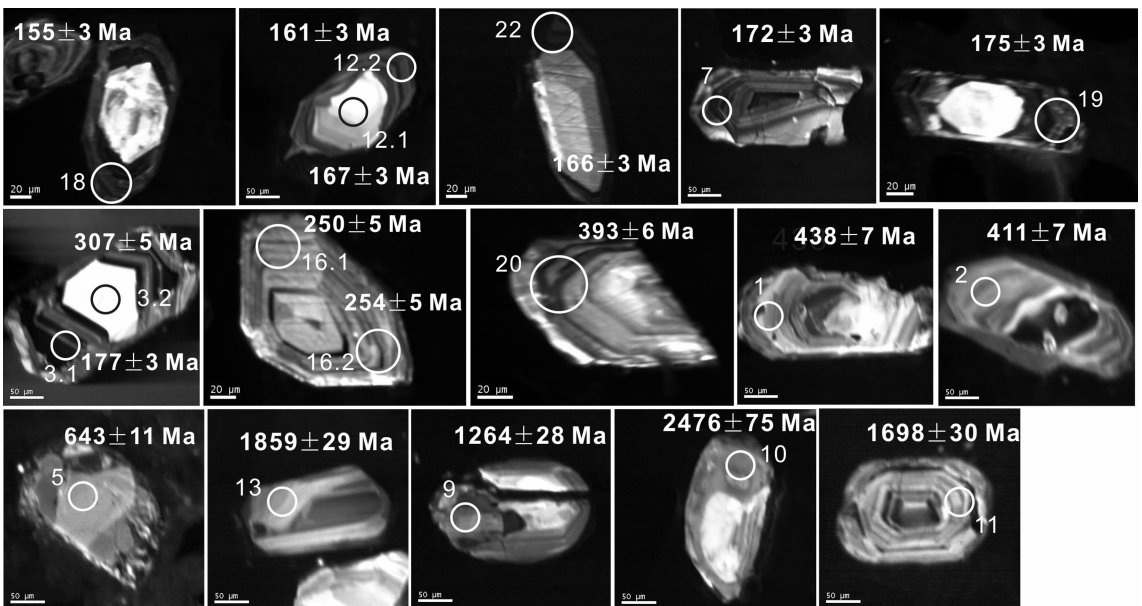


图 4 次英安斑岩(样品 ZK5803)中锆石阴极发光图像

Fig.4 Cathodoluminescence images of zircons from subdacitic porphyry (sample ZK5803)

表 1 次英安斑岩(样品 ZK5803)锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb analytical data of zircons from subvolcanic porphyry (sample ZK5803)

点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值及误差										年龄及误差/Ma					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$
ZK5803.14	171	642	0.27	0.05	0.0031	0.17	0.0098	0.02	0.0005	0.01	0.0004	151	3	157	9	165	8	253	95
ZK5803.18	360	1296	0.28	0.06	0.0026	0.18	0.0083	0.02	0.0004	0.01	0.0001	155	3	172	7	153	2	413	110
ZK5803.12.2	534	1874	0.28	0.05	0.0059	0.18	0.0204	0.02	0.0005	0.01	0.0004	161	3	168	18	160	8	262	260
ZK5803.22	121	340	0.36	0.05	0.0030	0.19	0.0104	0.03	0.0005	0.01	0.0003	166	3	181	9	166	7	383	86
ZK5803.12.1	80	230	0.35	0.05	0.0031	0.18	0.0108	0.03	0.0005	0.01	0.0001	167	3	168	9	167	3	181	144
ZK5803.7	480	1437	0.33	0.05	0.0025	0.20	0.0085	0.03	0.0005	0.01	0.0001	172	3	186	7	170	3	373	106
ZK5803.19	1673	1987	0.84	0.08	0.0029	0.30	0.0105	0.03	0.0005	0.01	0.0002	175	3	267	8	169	5	1174	43
ZK5803.3.1	441	1472	0.30	0.05	0.0023	0.20	0.0083	0.03	0.0005	0.01	0.0001	177	3	189	7	176	3	341	102
ZK5803.16.1	58	107	0.55	0.05	0.0046	0.28	0.0245	0.04	0.0008	0.01	0.0002	250	5	251	19	250	4	267	205
ZK5803.16.2	81	151	0.53	0.06	0.0030	0.35	0.0163	0.04	0.0007	0.02	0.0005	254	5	302	12	319	10	692	69
ZK5803.6	107	151	0.71	0.06	0.0024	0.36	0.0144	0.04	0.0008	0.01	0.0004	279	5	315	11	280	7	586	54
ZK5803.3.2	116	747	0.15	0.05	0.0021	0.36	0.0127	0.05	0.0008	0.02	0.0003	307	5	313	9	306	5	364	91
ZK5803.20	251	383	0.66	0.06	0.0023	0.51	0.0191	0.06	0.0011	0.02	0.0006	393	6	419	13	399	11	564	52
ZK5803.8	396	500	0.79	0.06	0.0023	0.53	0.0203	0.06	0.0012	0.02	0.0005	398	7	432	13	396	10	617	51
ZK5803.21	198	163	1.22	0.06	0.0029	0.50	0.0244	0.06	0.0012	0.02	0.0006	399	7	413	17	388	12	495	75
ZK5803.17.1	333	583	0.57	0.06	0.0023	0.53	0.0200	0.07	0.0011	0.02	0.0006	408	7	431	13	405	11	556	52
ZK5803.2	78	368	0.21	0.06	0.0026	0.50	0.0214	0.07	0.0012	0.02	0.0003	411	7	412	14	410	6	422	106
ZK5803.1	332	485	0.68	0.06	0.0015	0.55	0.0148	0.07	0.0012	0.02	0.0004	438	7	445	10	432	9	478	31
ZK5803.17.2	247	496	0.50	0.06	0.0024	0.55	0.0228	0.07	0.0012	0.02	0.0007	442	7	444	15	451	13	454	61
ZK5803.5	68	677	0.10	0.06	0.0017	0.88	0.0243	0.1	0.0018	0.03	0.0009	643	11	643	13	631	18	644	31
ZK5803.15	408	633	0.64	0.06	0.0076	0.95	0.1132	0.11	0.0026	0.03	0.0006	669	15	677	59	668	11	701	272
ZK5803.23	62	111	0.56	0.07	0.0031	1.16	0.0510	0.12	0.0023	0.04	0.0013	754	13	784	24	778	26	871	61
ZK5803.19	181	312	0.58	0.08	0.0023	2.46	0.0685	0.22	0.0038	0.07	0.0016	1256	20	1259	20	1334	30	1264	28
ZK5803.11	251	245	1.03	0.10	0.0032	4.01	0.1218	0.28	0.0051	0.08	0.0021	1590	26	1637	25	1627	39	1698	30
ZK5803.13	213	323	0.66	0.11	0.0034	5.22	0.1581	0.33	0.0060	0.09	0.0024	1852	29	1855	26	1797	45	1859	30
ZK5803.10	54	92	0.59	0.16	0.0070	9.17	0.3529	0.41	0.0080	0.11	0.0021	2217	37	2355	35	2186	38	2476	75
ZK5803.4	144	319	0.45	0.19	0.0041	12.85	0.2941	0.5	0.0086	0.14	0.0028	2630	37	2669	22	2674	50	2698	18

表 2 大宝山多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素测试结果
Table 2 Re-Os data of molybdenite from the Dabaoshan polymetallic deposit

样号	样重/g	Re/ 10^{-6}		普 Os/ 10^{-9}		$^{187}\text{Re}/10^{-6}$		$^{187}\text{Os}/10^{-9}$		模式年龄 / Ma	
		测定值	2 σ	测定值	2 σ	测定值	2 σ	测定值	2 σ	测定值	2 σ
CD-30	0.03093	64.65	0.49	0.0519	0.0264	40.63	0.31	110.6	0.9	163.2	2.3
DB-18	0.03017	102.4	0.9	0.0538	0.0186	64.33	0.55	177.2	1.5	165.2	2.4
CB-38	0.03006	64.86	0.56	0.5574	0.1308	40.77	0.35	111.2	1.0	163.4	2.4

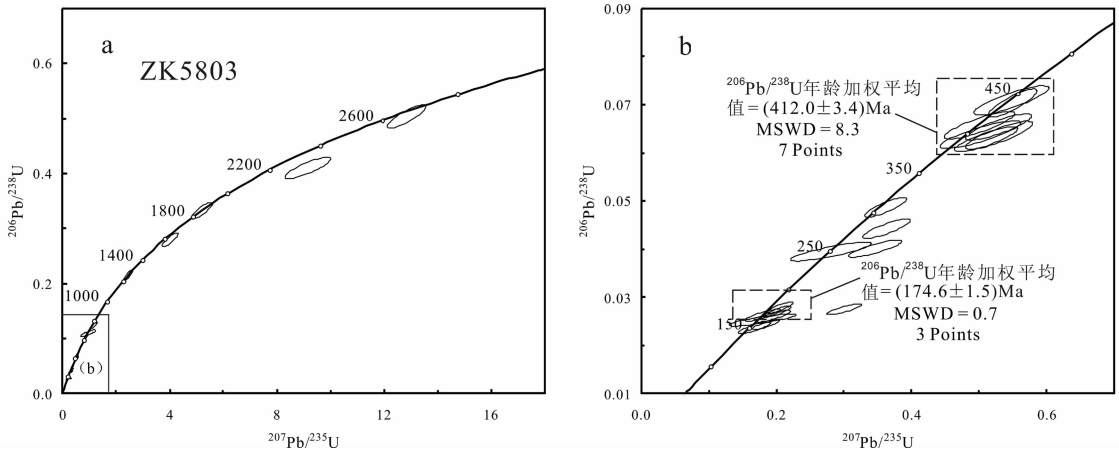


图 5 次英安斑岩(样品 ZK5803)中锆石 U-Pb 谐和图

Fig.5 U-Pb concordia diagram of zircons from subdacitic porphyry (sample ZK5803)

龄均与毛景文等^[28]所获得的层状 Cu-Pb-Zn 矿中辉钼矿 Re-Os 模式年龄(164.7±3.0 Ma)在误差范围内一致。上述年龄显示了很好的重现性(图 6),说明测试的辉钼矿模式年龄是可靠的。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

笔者及前人测试的大宝山多金属矿床中石英-辉钼矿脉和黄铜矿-黄铁矿脉中流体包裹体均一温度分别为 250~380°C 和 280~410°C^[14-15]。辉钼矿中 Re-Os 同位素体系的封闭温度约为 500°C^[40],不同矿物中 K-Ar 和 Rb-Sr 同位素体系的封闭温度在 400°C 及以下。锆石中 U-Pb 体系封闭温度>750°C,形成后 Pb 的扩散封闭温度可以高达 900°C^[41]。因此,笔者认为,矿物沉淀后辉钼矿的 Re-Os 同位素体系仍然保持封闭,而全岩和黑云母的 K-Ar 和 Rb-Sr 同位素体系可能遭受了破坏。锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄能更准确地限定大宝山矿床的成岩成矿时代。笔者已发表的大宝山矿区花岗闪长斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 (175.8±1.5) Ma

(MSWD=0.037)和 (175.0±1.7)Ma(MSWD=0.41)^[27],要老于前人采用黑云母 K-Ar 和全岩 Rb-Sr 等时线法获得的花岗闪长斑岩年龄,K-Ar 和 Rb-Sr 年龄可能反映了后期热液活动的影响。

次英安斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果表明,其侵位年龄为(174.6±1.5) Ma (MSWD=0.7),并记录了一些受到热液活动影响的锆石年龄(155±3)~(167±3) Ma。样品中(412.0±3.4) Ma (MSWD=8.3)应为捕获锆石的年龄,可能代表该地区存在隐伏加里东期岩浆活动;葛朝华等^[21]报道的(441±19) Ma 年龄应为此类继承或捕获锆石年龄。因此,矿区次英安斑岩与花岗闪长斑岩侵入年龄基本一致,均为 175 Ma。

辉钼矿 Re-Os 定年结果表明,矿区斑岩型和矽卡岩型钨钼矿床的辉钼矿 Re-Os 模式年龄为(163.2±2.3) Ma、(165.2±2.4) Ma 和 (163.4±2.4) Ma,加权平均年龄(163.9±1.3) Ma 与单个样品的模式年龄非常一致,且与毛景文等^[28]报道的层状铜铅锌矿的 Re-Os 模式年龄值(164.7±3.0) Ma 一致,拟合的加权平均年龄为(164.0±2.5) Ma(MSWD=0.16)。

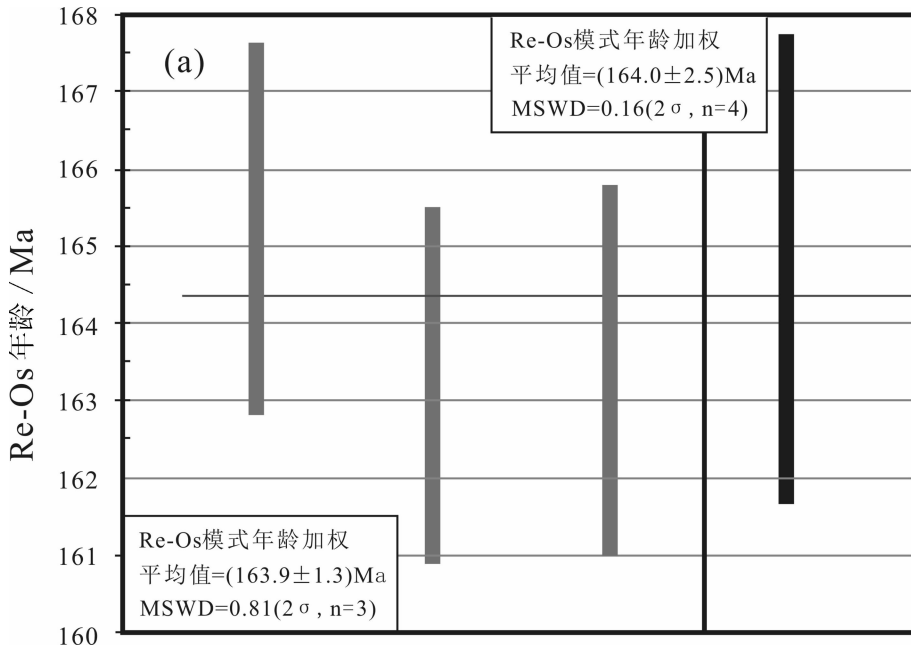


图 6 大宝山多金属矿床辉钼矿 Re-Os 模式年龄值

直方柱表示 95% 的置信度 (2σ), 最右边的黑色直方柱为毛景文等^[20]测试层状铜铅锌矿体样品辉钼矿 Re-Os 年龄

Fig.6 Re-Os model ages of molybdenite in the Dabaoshan polymetallic deposit

Data collected from two quartz-vein-type samples and ore-bearing skarn ore samples; the black line indicating the sample measured by Mao et al.^[20]; bars showing 95% confidence level (2σ)

说明矿区各类矿床形成时代均为 165 Ma 左右。

5.2 矿床成因的指示

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄结果显示, 矿区次英安斑岩形成年龄为 (174.6 ± 1.5) Ma, 与花岗闪长斑岩年龄 (175.8 ± 1.5) Ma 和 (175.0 ± 1.7) Ma 基本一致。另外, 矿区斑岩型钼(钨)矿辉钼矿 Re-Os 模式年龄为 (163.2 ± 2.3) Ma 和 (165.2 ± 2.4) Ma, 矽卡岩型钼钨矿为 (163.4 ± 2.4) Ma, 层状铜铅锌矿为 (164.7 ± 3.0) Ma, 各类矿床的成矿时代在误差范围内基本一致, 应为同一次成矿事件的产物。也就是说, 整个大宝山矿区仅经历了一次成岩和一次成矿作用。不同于前人研究认为的存在多期成矿, 即由加里东期海底喷流沉积和燕山期叠加成矿^[21,24], 以及燕山期两期成矿的观点^[12,14-15]。

此外, 矿区与次英安斑岩相关的铜铅锌矿石的石英流体包裹体中 δD_{H_2O} 值为 -50.7‰ , 与花岗闪长斑岩相关的钨钼铋石英脉的石英中 δD_{H_2O} 值为 -56.1‰ ^[14-15], 表明成矿过程中成矿流体为岩浆水以及部分大气水的混合。收集的大宝山多金属矿床 238 个不同产状矿体中矿石硫同位素数据表明 (图 7), 不同类型矿体的硫化物 $\delta^{34}S$ 均主要集中在

$-2.00\text{‰} \sim 3.00\text{‰}$, 分布范围比较集中, 呈明显的塔式分布, 区别于泥盆纪地层中黄铁矿样品 $\delta^{34}S$ ($-5.00\text{‰} \sim 5.00\text{‰}$) 的值, 图 7-a), 显示出深源岩浆硫特征。矿床地质特征也表明, 在次英安斑岩与灰岩接触部位, 围岩主要蚀变类型包括矽卡岩化、透闪石-阳起石化、绿泥石化、碳酸盐化等具有明显热液接触交代作用形成的蚀变特征。因此, 层状-似层状铜铅锌矿应为 Sillitoe^[1]提出的离斑岩铜系统最近的矽卡岩型矿床, 整个大宝山多金属矿床是一个与次英安斑岩和花岗闪长斑岩有成因联系的岩浆期后热液矿床, 各类矿化可能属同一斑岩成矿系统。

5.3 成矿动力学背景

毛景文等^[44]在广泛地质调查和同位素年龄数据的基础上, 将华南地区中生代主要金属矿产成矿分为 3 个阶段, 即晚三叠世 (230~210 Ma)、中晚侏罗世 (170~150 Ma) 和早白垩世 (134~80 Ma)。晚三叠世矿化组合为 W-Sn-Nd-Ta; 中晚侏罗世矿化组合进一步分为 170~160 Ma 斑岩-矽卡岩型铜矿和 160~150 Ma 与花岗岩有关的 W-Sn 多金属矿床。白垩纪矿化主要集中在 100~90 Ma, 矿化组合主要为浅成低温热液型 Cu-Au-Ag 矿床和与花岗岩有关的

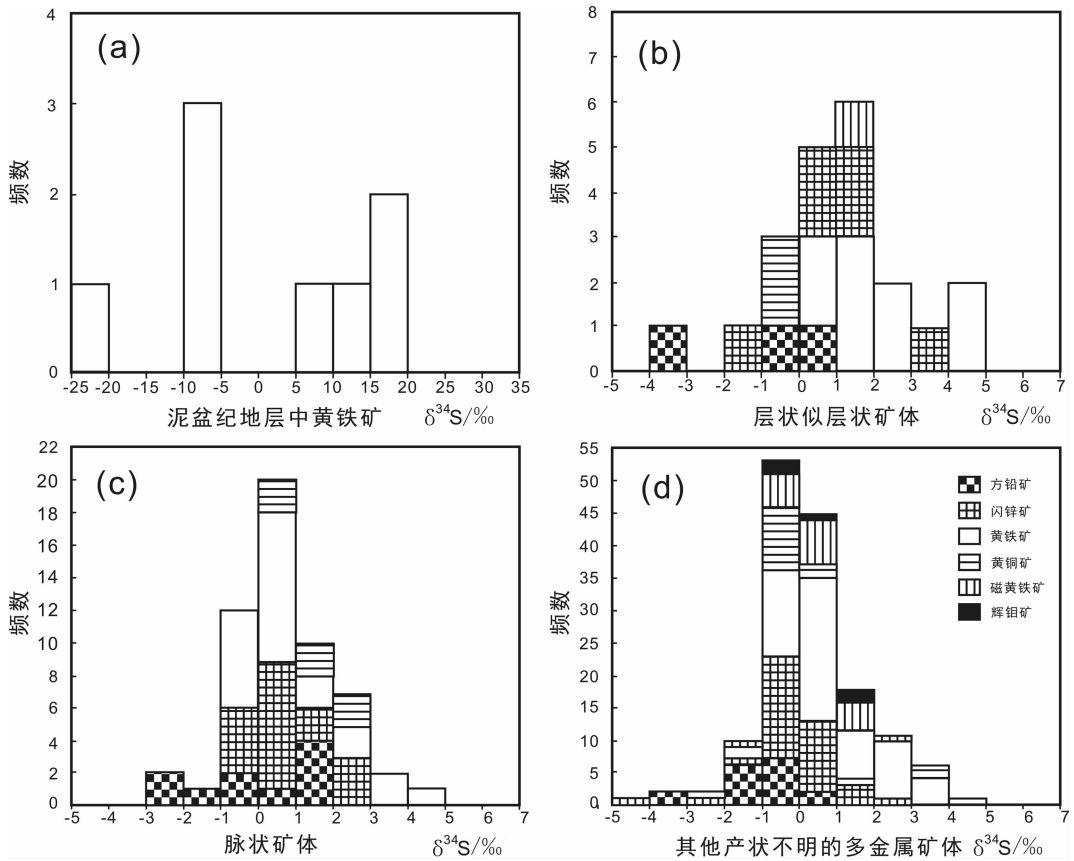


图 7 大宝山多金属矿床矿石硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 直方图(数据引自文献[11-13, 21, 24-25, 42-43])

Fig.7 Histogram of $\delta^{34}\text{S}$ isotopic data of sulfides from the Dabaoshan polymetallic deposit (data collected from references [11-13, 21, 24-25, 42-43])

W-Sn-Cu 多金属矿床。华南地区大量的矿床同位素年代学数据见毛景文等^[45]和彭建堂等^[46]的文献。彭建堂等^[46]对湘东南地区 W-Sn-Mo 成岩成矿时代统计结果表明, 其成岩成矿时代为 162~148 Ma, 主要集中在 160~150 Ma。晚三叠世形成的钨锡矿床, 如湘南荷花坪锡多金属矿床和广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿床, 其辉钼矿 Re-Os 年龄分别为 $(224.0 \pm 1.9) \text{ Ma}$ ^[47]和 $(213.3 \pm 2.9) \text{ Ma}$ ^[48]。此外, 粤北连平地区钨锡多金属矿床的成岩成矿时代研究还表明, 140 Ma 左右南岭地区也有大型钨锡多金属矿床的形成^[49]。笔者测试的大宝山多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄和毛景文等^[28]测试的单个辉钼矿的模式年龄 (~165 Ma) 表明, 大宝山多金属矿床与南岭地区其他钨锡多金属矿床成矿时间一致, 同属于毛景文等提出的华南地区中生代第二阶段成矿事件(170~150 Ma)。

自 20 世纪 90 年代以来, 有众多学者先后对华

南地区中生代大规模成岩成矿作用背景进行研究及讨论, 目前的主导观点认为华南地区在中生代经历了多期的岩石圈伸展作用, 最早可能始于早侏罗世 (190~180 Ma)^[44, 50-51], 伸展背景的证据为在华南内部发现了大量 180~170 Ma 铁镁质岩浆岩和 A 型花岗岩^[52-54]。但是其伸展机制目前还存在争议^[44, 55-56]。Li and Li^[53]在锆石 U-Pb 及综合构造、年代学和沉积相研究的基础上, 提出了华南地区中生代低角度板块俯冲模型; 毛景文等^[44]认为华南地区大规模的花岗岩侵入及相关的爆发式成矿形成于 Izanagi 板块的俯冲引起的弧后伸展背景; Chen et al.^[56]则认为始于印支期的后造山伸展伴随铁镁质岩浆侵入是华南地区大规模侏罗纪花岗质岩浆形成的诱因。

此外, 已报道的大东山岩体锆石 U-Pb 年龄和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 165~155 Ma^[57-59]。地球化学特征和区域构造演化表明, 大东山岩体形成于后造

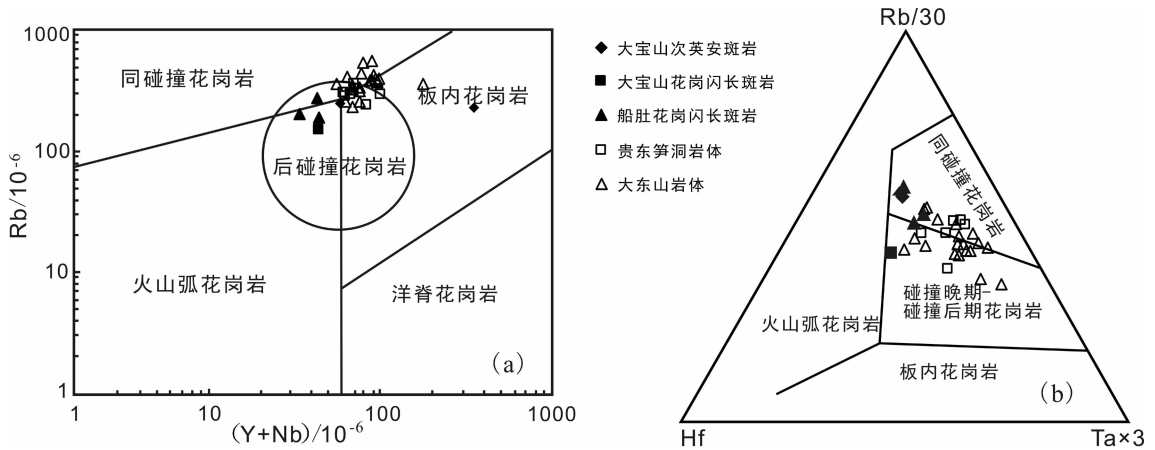


图8 大宝山多金属矿床岩体微量元素 Y+Nb-Rb(a)和 Rb/30-Hf-Ta×3(b)图解
(底图据文献[62], 贵东岩体数据据[61, 63-64], 大东山岩体数据据[58])

Fig.8 Geochemical diagram of Y+Nb-Rb (a) and Rb/30-Hf-Ta×3 (b) in the Dabaoshan polymetallic deposit
(diagram after reference [62], Data of Guidong complex from reference [61,63-64], data of Dadongshan pluton from reference [58])

山伸展环境^[58]。徐夕生等^[60]研究表明贵东杂岩体是印支期(239.0~235.8 Ma)—燕山期(160~151 Ma)多期次岩浆侵入的复式杂岩体,形成于晚造山至造山后的拉张环境。这一结论也得到了岩石化学、微量元素和同位素图解研究结果的支持^[61]。在(Y+Nb)-Rb构造判别图解(图8-a)上,矿区两类岩体除1个次英安斑岩样品点落入板内花岗岩外,其余点全部落入后碰撞花岗岩区域。贵东岩体和大东山岩体的大部分数据点也落在后碰撞花岗岩区域,其余点位于后碰撞花岗岩与同碰撞花岗岩和板内花岗岩的过渡区域。在Rb/30-Hf-Ta×3图解(图8-b)上,矿区两类岩体一部分落入同碰撞花岗岩区域,一部分落入碰撞晚期-碰撞后期花岗岩区域。贵东岩体、大东山岩体与大宝山矿区岩体类似,主要位于同碰撞花岗岩和碰撞晚期-碰撞后期花岗岩过渡区域。因此,位于大东山及贵东岩体之间的大宝山矿床,其岩体及相关的矿化也应形成于后造山伸展环境。

6 结论

锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年结果表明,大宝山多金属矿床与成矿密切相关的岩浆作用发生在早侏罗世晚期(~175 Ma),斑岩型、矽卡岩型钨钼矿和层状铜铅锌矿的成矿作用发生在中侏罗世(~165 Ma),与南岭地区其他钼多金属矿床成矿时间一致,同属于华南地区中生代第二阶段成矿作用事件;矿床地质特征、流体包裹体 H-O 同位素和矿石

硫化物 S 同位素指示矿区各类矿床为与次英安斑岩和花岗闪长斑岩有成因联系的岩浆期后热液矿床,层状-似层状铜铅锌矿应为离成矿斑岩最近的矽卡岩型矿床,可能属于同一斑岩成矿系统;成矿动力学背景适值南岭地区后造山伸展环境。

致谢: 感谢毛景文研究员在矿床成因方面的认识、李建威教授在锆石 U-Pb 年龄解释上的指导;感谢地质过程与矿产资源国家重点实验室郑曙高级工程师和胡兆初副研究员在阴极发光照相和锆石 U-Pb 同位素分析中的帮助,以及广东省大宝山矿业有限公司在野外工作中的大力协助;感谢审稿专家和编辑对本文提出的修改意见。

参考文献(References):

- [1] Sillitoe R. H. Porphyry Copper Systems [J]. *Economic Geology*, 2010, 105:3-41.
- [2] Babcock R. C., Ballantyne G. H., Phillips C. H. Summary of the geology of the Bingham district [J]. *Arizona Geological Society Digest*, 1995, 20:316-335.
- [3] Cunningham C. G., Austin G. W., Naeser C. W., et al. Formation of a paleothermal anomaly and disseminated gold deposits associated with the Bingham Canyon porphyry Cu-Au-Mo system, Utah [J]. *Economic Geology*, 2004, 99:789-806.
- [4] Love D. A., Clark A. H., Glover J. K. The lithologic, stratigraphic, and structural setting of the giant Antamina copper-zinc skarn deposit, Ancash, Peru [J]. *Economic Geology*, 2004, 99:887-916.
- [5] Redwood S. D. Geology and development history of the Antamina copper-zinc skarn deposit, Peru [J]. *Society of Economic Geologists*

- Special Publication, 2004, 11:259-277.
- [6] Smith S, Olberg D, Manini T. The Sepon gold deposits, Laos: Exploration, geology, and comparison to Carlin-type gold deposits in the Great Basin[C]//Steininger R C, Vikre P G. Window to the world. Symposium proceedings, v. 2:Reno/Sparks, Geological Society of Nevada, 2005:899-915.
- [7] Percival T J, Radtke A S, Bagby W C. Relationships among carbonate-replacement gold deposits, gold skarns, and intrusive rocks, Bau mining district, Sarawak, Malaysia [J]. Mining Geology, 1990, 40: 1-16.
- [8] Sillitoe R H, Bonham H F. Sediment-hosted gold deposits: Distal products of magmatic-hydrothermal systems[J]. Geology, 1990, 18: 157-161.
- [9] Lawley C J M, Richards J P, Anderson R G, et al. Geochronology and geochemistry of the MAX porphyry Mo deposit and its relationship to Pb-Zn-Ag mineralization, Kootenay Arc, Southeastern British Columbia, Canada [J]. Economic Geology, 2010, 105:1113-1142.
- [10] Zaw K, Peters S G, Cromie P, et al. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China [J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31:3-47.
- [11] 刘孝善, 周顺之. 广东大宝山中泥盆世火山岩与层状菱铁矿、多金属矿床成矿机制分析 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 1985, 21(2): 348-360.
- Liu Xiaoshan, Zhou Shunzhi. On the occurrence of middle Ordovician volcanics and analysis of ore-forming mechanism of siderite polymetallic ore deposit from Dabaoshan, Qujiang County, Guangdong Province [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1985, 21(2):348-360(in Chinese with English abstract).
- [12] 刘娟群, 杨世义, 张秀兰, 等. 粤北大宝山多金属矿床成因的初步探讨[J]. 地质学报, 1985, 1:47-60.
- Liu Gouqun, Yang Shiyi, Zhang Xiulan, et al. A preliminary study of the genesis of the Dabaoshan polymetallic deposit in north Guangdong[J]. Acta Geologica Sinica, 1985, 1(1):47-60(in Chinese with English abstract).
- [13] 罗年华. 广东宝山多金属矿床地质地球化学特征及成因探讨 [J]. 桂林冶金地质学院学报, 1985, 5(2):183-195.
- Luo Nianhua. The geological and geochemistry features and the origin of Dabaoshan polymetallic deposit in Guangdong Province [J]. Journal of Guilin College of Geology, 1985, 5 (2):183-195(in Chinese with English abstract).
- [14] 汤吉方, 刘家齐, 傅太安, 等. 粤北大宝山及其外围地区多金属矿床成矿地质条件、构造控岩控矿规律及隐伏矿[C]//南岭地质矿产文集(3). 北京:地质出版社, 1992:1-67.
- Tang Jifang, Liu Jiaqi, Fu Tai'an, et al. Ore-forming conditions, the regularities of rock-and ore-control structures for the polymetallic deposits and prediction for the concealed deposits in Dabaoshan and adjacent regions, northern Guangdong Province[C]//Reports of scientific research of geology and mineral resources in Nanling. Beijing:Geological Publishing House, 1992:1-67 (in Chinese with English abstract).
- [15] 蔡锦辉, 刘家齐. 粤北大宝山多金属矿床矿物包裹体特征研究及应用[J]. 矿物岩石, 1993, 13(1):33-40.
- Cai Jinhui, Liu Jiaqi. Research and its application of the inclusions characteristics in the Dabaoshan polymetallic deposit, north Guangdong [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1993, 13(1): 33-40(in Chinese with English abstract).
- [16] 蔡锦辉, 刘家齐. 粤北大宝山多金属矿区岩浆岩的成岩时代[J]. 广东地质, 1993, 8(2):45-52.
- Cai Jinhui, Liu Jiaqi. The age of the magmatic rocks of Dabaoshan polymetallic ore field in north Guangdong[J]. Guangdong Geology, 1993, 8(2):45-52(in Chinese with English abstract).
- [17] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用[J]. 矿床地质, 2005, 24(3):193-205.
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, et al. Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(3): 193-205(in Chinese with English abstract).
- [18] 邱世强. 关于大宝山林状多金属矿床成因的初步探讨[J]. 地质论评, 1981, 27(4):333-340.
- Qiu Shiqiang. A preliminary study on the genesis of the Dabaoshan stratiform polymetallic deposit[J]. Geological Review, 1981, 27(4): 333-340(in Chinese with English abstract).
- [19] 庄明正. 大宝山多金属矿床矿床类型及成矿作用探讨[J]. 地质与勘探, 1983, 8:9-16.
- Zhuang Mingzheng. Genetic types and ore-forming processes of the Dabaoshan polymetallic ore district [J]. Geology and Prospecting, 1983, 8:9-16 (in Chinese).
- [20] 葛朝华, 韩发. 大宝山铁-多金属矿床的海相火山热液沉积成因特征[J]. 矿床地质, 1986, 5(1):1-10.
- Ge Chaohua, Han Fa. Submarine volcanic hydrothermal sedimentary origin of the Dabaoshan iron and polymetallic sulfide deposit [J]. Mineral Deposits, 1986, 5 (1):1-12 (in Chinese with English abstract).
- [21] 葛朝华, 韩发. 广东宝山矿床喷气-沉积成因及地球化学特征 [M]. 北京:北京科学技术出版社, 1987:1-111.
- Ge Chaohua, Han Fa. Submarine Volcanic Hydrothermal Sedimentary Origin and Geological Geochemical Characteristics of the Dabaoshan Deposit in Guangdong Province [M]. Beijing: Science and technology Publishing House, 1987:1-111(in Chinese with English abstract).
- [22] 姚德贤, 曾令初. 论大宝山矿床成因[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1994, 33(3):91-100.
- Yao Dexian, Zeng Lingchu. On genesis of Dabaoshan mineral deposits [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1994, 33(3): 91-100(in Chinese with English abstract).
- [23] 王联魁, 覃慕陶, 刘师先, 等. 吴川—四会断裂带铜金矿控矿条件和成矿预测[M]. 北京:地质出版社, 2001.

- Wang Liankui, Qin Mutao, Liu Shixian, et al. Copper and Gold Ore—Controlling Conditions of the Wuchuan-Sihui Fracture Belt and Metallogenic Prognosis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 1-169(in Chinese with English abstract).
- [24] 宋世明, 胡凯, 蒋少涌, 等. 粤北大宝山多金属矿床成矿流体的 He-Ar-Pb-S 同位素示踪[J]. 地质找矿论丛, 2007, 22(2): 87-99.
- Song Shiming, Hu Kai, Jiang Shaoyong, et al. The He-Ar-Pb-S isotope tracing on ore-forming fluid in Dabaoshan polymetallic deposit, north Guangdong [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2007, 22(2): 87-92(in Chinese with English abstract).
- [25] 徐文忻, 李衡, 陈民扬, 等. 广东大宝山多金属矿床成矿物质来源同位素证据[J]. 地球学报, 2008, 29(6): 684-690.
- Xu Wenxin, Li Heng, Chen Mingyang, et al. Isotope evidence of material sources of the Dabaoshan polymetallic deposit [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29: 684-690 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王殿宝, 梁继官, 林雁. 大宝山多金属矿铜铅锌矿床成因探讨[J]. 大宝山科技, 2006, 1: 10-13.
- Wang Dianbao, Liang Jiguan, Lin Yan. A study on the genesis of the Dabaoshan Cu-Pb-Zn deposits [J]. Dabaoshan Science & Technology, 2006, 1: 10-13(in Chinese).
- [27] 王磊, 胡明安, 杨振, 等. 粤北大宝山矿区花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(2): 175-185.
- Wang Lei, Hu Min'gan, Yang Zhen, et al. Geochronology and its geological implications of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granodiorite porphyries in Dabaoshan polymetallic ore deposit [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(2): 175-185(in Chinese with English abstract).
- [28] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 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 Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in south China [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11 (1): 45-55 (in Chinese with English abstract).
- [29] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser geochronology ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(3): 353-370.
- [30] Eggins S M, Kinsley L P J, Shelley J M M. Deposition and elemental fractionation processes during atmospheric pressure laser sampling for analysis by ICP-MS [J]. Applied Surface Science, 1998, 127/129: 278-286.
- [31] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. Chemical Geology, 2004, 211: 47-69.
- [32] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- [33] Ludwig K R. ISOPLLOT 3: a geochronological toolkit for Microsoft excel [M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication 4, 2003: 74.
- [34] Shirey S B, Walker R J. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis [J]. Analytical Chemistry, 1995, 67: 2136-2141.
- [35] Markey R, Stein H, Morgan J. Highly precise Re-Os dating for molybdenite using alkaline fusion and NTIMS [J]. Talanta, 1998, 45: 935-946.
- [36] Du A D, Wang S X, Sun D, et al. Precise Re-Os dating of molybdenite using Carius tube, NTIMS and ICP-MS [C]// Piestrzynski, A. et al. Mineral Deposits at the beginning of the 21st Century. Balkema, Rotterdam, 2001: 405-407.
- [37] Du A D, Wu S Q, Sun D Z, et al. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: molybdenite HLP and JDC [J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 2004, 28: 41-52.
- [38] Smoliar M I, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and VIB iron meteorites [J]. Science, 1996, 271: 1099-1102.
- [39] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49 (16): 1589-1604.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. Genetic mineralogy of zircon and its constraint on the interpretation of U-Pb zircon ages [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16): 1589-1604(in Chinese).
- [40] Suzuki K, Shimizu H, Masuda A. Re-Os dating of molybdenite from ore deposits in Japan: implication for the closure temperature of the Re-Os system for molybdenite and cooling history of molybdenite ore deposits [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(16): 3151-3159.
- [41] Ireland T R, Williams I S. Considerations in Zircon Geochronology by SIMS [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 215-241.
- [42] 陈好寿. 粤北大宝山层状多金属矿床的铅、硫、氧同位素地球化学研究 [J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 1985, 10: 111-124.
- Chen Haoshou. The study of lead, sulfur and oxygen isotope in Dabaoshan stratiform polymetallic deposit, north Guangdong Province [J]. Journal of Yichang institute of geology and mineral resources, 1985, 10: 111-124(in Chinese with English abstract).
- [43] 韩友科. 大宝山铜多金属硫化物矿床硫同位素分馏机理探讨[J]. 宜昌地质矿产研究所所刊, 1986, 12: 55-63.
- Han Youke. A discussion on the sulfur-isotope fractionation mechanism of the Dabaoshan copper polymetallic sulfide deposit in Guangdong Province [J]. Journal of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, 1986, 12: 55-63 (in Chinese with English abstract).
- [44] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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 Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their

- metallogenic settings [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14:510-526(in Chinese with English abstract).
- [45] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 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 Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, et al. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: metallogenic ages and corresponding geodynamic process[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10):2329-2338(in Chinese with English abstract).
- [46] 彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 等. 湘南中生代花岗岩质岩石成岩成矿的时限[J]. *地质论评*, 2008, 54(5):617-625.
- Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Yuan Shunda, et al. The time ranges of granitoid emplacement and related nonferrous metallic mineralization in Southern Hunan[J]. *Geological Review*, 2008, 54(5): 617-625(in Chinese with English abstract).
- [47] 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 等. 湘南荷花坪钨多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 测年[J]. *矿床地质*, 2006, 25(3):263-268.
- Cai Minghai, Chen Kaixu, Qu Wenjun, et al. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Hehuaping tin-polymetallic deposit, southern Hunan Province [J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(3): 263-268(in Chinese with English abstract).
- [48] 邹先武, 崔森, 屈文俊, 等. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿 Re-Os 同位素定年研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(4):837-844.
- Zhou Xianwu, Cui Shen, Qu Wenjun, et al. Re-Os isotope dating of the Liguifu tungsten-tin polymetallic deposit in Dupangling area, Guangxi[J]. *Geology in China*, 2009, 36(4):837-844(in Chinese with English abstract).
- [49] 付建明, 李祥能, 程顺波, 等. 粤北连平地区钨锡多金属矿床成矿时代研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(6):1331-1339.
- Fu Jianming, Li Xiangneng, Chen Shunbo, et al. Metallogenic ages of tungsten-tin polymetallic deposits in Lianping area northern Guangdong Province [J]. *Geology in China*, 2009, 36(6):1331-1339(in Chinese with English abstract).
- [50] Ding X, Chen P R, Chen W F, et al. Single zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Weishan granite (Hunan, South China) and its petrogenetic significance[J]. *Science in China, (series D)*, 2006, 49: 816-827.
- [51] Li X H, Li Z X, Li W X, et al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 2007, 96: 186-204.
- [52] Li X H, Chen Z G, Liu D Y. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: age, origin, and tectonic significance [J]. *International Geology Review*, 2003, 45: 898-921.
- [53] 王强, 赵振华, 简平, 等. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(3):795-808.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Jian Ping, et al. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China: constraints for late-Mesozoic tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3):795-808(in Chinese with English abstract).
- [54] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29:26-33.
- [55] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300 km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model [J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179-182.
- [56] Chen C H, Lee C Y, Shinjo R. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China? Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts[J]. *Lithos*, 2008, 106:83-92.
- [57] 张敏, 陈培荣, 张文兰, 等. 南岭中段大东山花岗岩体的地球化学特征和成因 [J]. *地球化学*, 2003, 32(6):529-539.
- Zhang Ming, Chen Peirong, Zhang Wenlan, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Dadongshan granite pluton in mid Nanling range [J]. *Geochimica*, 2003, 32(6):529-539(in Chinese with English abstract).
- [58] 马铁球, 柏道远, 邝军, 等. 南岭大东山岩体北部 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及地球化学特征 [J]. *地球化学*, 2006, 35(4):346-358.
- Ma Tieqiu, Bai Daoyuan, Guang Jun, et al. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating and geochemical characteristics of the granites in north Dadongshan pluton, Nanling mountains [J]. *Geochimica*, 2006, 35(4):346-358(in Chinese with English abstract).
- [59] 黄会清, 李献华, 李武显, 等. 南岭大东山花岗岩的形成时代与成因: SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学 [J]. *高校地质学报*, 2008, 14(3):317-333.
- Huang Huiqing, Li Xianhua, Li Wuxian, et al. Age and origin of the Dadongshan granite from the Nanling range: SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(3):317-333(in Chinese with English abstract).
- [60] 徐夕生, 邓平, S. Y. O'Reilly, 等. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义 [J]. *科学通报*, 2003, 48(12): 1328-1334.
- Xu Xisheng, Deng Ping, S. Y. O'Reilly. Single zircon laser ablation ICPMS U-Pb dating of Guidong complex (SE China) and its petrogenetic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(12):1328-1334(in Chinese).
- [61] 李建红, 卫三元, 梁良, 贵东岩体地质地球化学特征及其形成的构造环境识别 [J]. *铀矿地质*, 2004, 20(6):321-329.
- Li Jianhong, Wei Sanyuan, Liang Liang, et al. Geologic-geochemical characteristics of Guidong granitic massif and recognition of geo-tectonic environment at the time of its emplacement[J]. *Uranium Geology*, 2004, 20:321-329(in Chinese with English abstract).
- [62] Pearce J A. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 1996,

19:120-125.

[63] 凌洪飞, 沈渭洲, 邓平, 等. 粤北笋洞花岗岩的形成时代、地球化学特征与成因[J]. 岩石学报, 2003, 20(3):413-424.

Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, et al. Age, geochemistry and petrogenesis of the Sundong granite, north Guangdong province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 20 (3):413-424 (in Chinese with English abstract).

[64] 张展适, 华仁民, 刘晓东. 贵东花岗杂岩体的稀土元素特征及与铀成矿关系[J]. 中国稀土学报, 2005, 23(6):749-756.

Zhang Zhanshi, Hua Renming, Liu Xiadong, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements of Guidong granitic complex and their relationship with uranium mineralization[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2005, 23 (6):749-756 (in Chinese with English abstract).

Zircon LA-ICP-MS U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Dabaoshan polymetallic deposit in northern Guangdong Province and its geological implications

WANG Lei¹, HU Ming-an², QU Wen-jun³, CHEN Kai-xu¹, LONG Wen-guo¹, YANG Zhen²

(1. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Wuhan 430223, Hubei, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China)

Abstract: LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from subdacitic porphyry samples yielded a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 174.6 ± 1.5 Ma (MSWD=0.7) in the Dabaoshan polymetallic deposit of northern Guangdong Province. Re-Os dating of three molybdenite samples from porphyry and skarn ores yielded consistent model ages from 163.2 ± 2.3 Ma to 165.2 ± 2.4 Ma. These ages are consistent with the molybdenite Re-Os model age (164.7 ± 3.0 Ma) measured by Mao et al. for the stratiform Cu-Pb-Zn ore body, and they can yield a weighted mean of 164.0 ± 2.5 Ma (MSWD=0.16). These data imply that Mo-W and Cu-Pb-Zn mineralization in the ore district are products of the same mineralization event, which coincides closely with the event of Mo-polymetallic mineralization elsewhere in the Nanling region and corresponds to the second episode of Mesozoic metallogenesis in South China. Geological data, together with stable isotopic data of fluid inclusions ($\delta^{18}\text{O} = -3.75\text{‰} \sim 7.0\text{‰}$, $\delta\text{D} = -50.7\text{‰} \sim -56.1\text{‰}$) and ore sulfides ($\delta^{34}\text{S} = -2.00\text{‰} \sim 3.00\text{‰}$), suggest that the Dabaoshan ore deposit is a magmatic hydrothermal ore deposit associated with the granodioritic porphyry and the subdacitic porphyry. This is different from previous studies which argue for the existence of superimposition of multiple mineralization events comprising Caledonian exhalative deposition and Yanshanian superimposed mineralization or two Yanshanian mineralization stages. Based on geochemical diagrams of Y+Nb-Rb and Rb/30-Hf-Ta \times 3 in combination with previous studies, the authors suggest that the Dabaoshan polymetallic deposit is related to post-collisional lithosphere extension in the Nanling region of South China.

Key words: subdacitic porphyry; zircon; molybdenite; LA-ICP-MS U-Pb dating; Re-Os dating; Dabaoshan polymetallic deposit

About the first author: WANG Lei, male, born in 1981, doctor, assistant researcher, engages in the study of tectonics and mineral deposits; E-mail: cugleiwang@gmail.com.