

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2018.01.007

引用格式:赵宇浩,姚仲友,戚学祥,等. 云南维西大宝山铜矿⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及成矿物质来源[J]. 华东地质,2018,39(1):50-58.

云南维西大宝山铜矿⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学 及成矿物质来源

赵宇浩¹,姚仲友¹,戚学祥²,王天刚¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016; 2. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037)

摘要: 云南大宝山铜矿是雪龙山成矿带规模较大的浅成中低温热液型铜矿床。文章通过对该矿区黄铜矿+石英+方解石+菱铁矿矿脉中白云母进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年,获得白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 法年龄为 26 ± 2.5 Ma,代表大宝山铜矿的年龄;H、O 同位素分析结果表明成矿流体是以大气降水为主并含有部分岩浆水的建造水;S 同位素分析结果表明,主要金属矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-5.4\text{‰} \sim +1.3\text{‰}$,表明成矿物质主要来源于深部岩浆;C 同位素分析结果表明成矿流体主要来源于岩浆—地幔,并受大气降水影响。根据围岩蚀变及围岩中 Cu 丰度等特征,推断大宝山铜矿成矿物质主要来源于深部岩浆,成矿流体为岩浆水与大气降水的混合物。

关键词: 成矿时代;成矿物质;铜矿;大宝山;云南

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2018)01-050-09

雪龙山成矿带位于哀牢山—金沙江构造带北部,经历了印支地块与中甸地块俯冲碰撞、新生代韧性走滑剪切变形和隆升等多期构造运动,形成长约 40 km、宽约 2~6 km 的 NW 向深变质变形带^[1-2]。云南维西大宝山铜矿是雪龙山成矿带中规模较大的浅成中低温热液型铜矿床,前人通过地质调查、化探测量和矿产普查等工作,初步查明了大宝山铜矿的地质特征、矿体分布及主要矿体规模、形态、产状和矿石类型等^[3-5],但该矿床的研究程度仍较低,对成矿时代与成矿物质来源方面的研究仍较少。本文通过对大宝山铜矿成矿晚期的白云母进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年及稳定同位素分析,探讨该矿床成矿时代及成矿物质来源,为该区找矿勘查提供依据。

1 区域地质概况

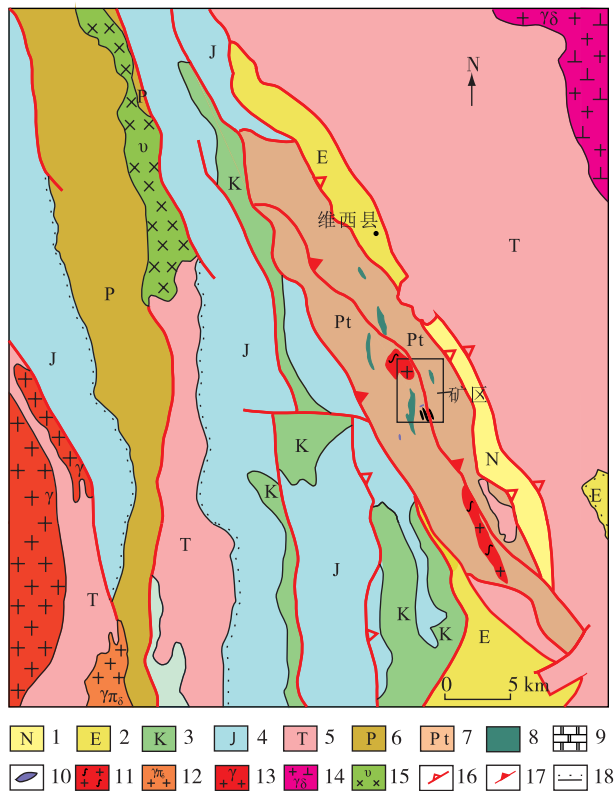
雪龙山成矿带由高绿片岩相—角闪岩相的雪

龙山岩群变质岩组成^[1-2]。成矿带两侧出露的地层有二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系及新近系(图 1)。其中,二叠系主要出露于成矿带西侧,主要为下部夹薄层灰岩和砾岩透镜体的碎屑岩和上部复理石韵律发育的碎屑岩夹火山岩;三叠系分布于成矿带东侧和西侧,缺失下部地层,中部为板岩、变质粉砂岩夹大理岩、英安岩和中厚层复成分砾岩,上部为中厚层含陆屑泥晶粉晶灰岩并夹薄层泥质粉砂岩页岩;侏罗系主要分布于成矿带西侧,为韵律发育的岩屑砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩和具有平行层理的厚层状细砂岩夹钙质砾岩;白垩系分布在成矿带西侧,为韵律发育的石英细砂岩、粉砂岩、水云母泥岩;古近系分布于成矿带西侧,为薄中层粉砂岩、泥岩、泥灰岩和石英砂岩,局部为块状复成分砾岩;新近系出露于成矿带东部部分地区,为中薄层石英砂岩、薄层粉砂质泥岩、泥岩夹细砂岩和中厚层砾岩、砂岩和夹煤线的泥岩^{①②}。

* 收稿日期:2017-01-06 修订日期:2017-05-04 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“青藏高原东南缘大型构造带与资源效应(编号:1212011121266)”、“海上丝绸之路大洋洲和南美洲矿产资源潜力评价(编号:DD20160110)”项目联合资助。

第一作者简介:赵宇浩,1989 年生,男,助理工程师,主要从事矿床地质研究。



1. 新近系;2. 古近系;3. 白垩系;4. 侏罗系;5. 三叠系;6. 二叠系;7. 雪龙山岩群变质岩;8. 斜长角闪岩;9. 大理岩;10. 闪长岩脉;11. 花岗质糜棱岩;12. 喜山期花岗岩斑岩;13. 燕山期花岗岩;14. 印支期花岗闪长岩;15. 印支期辉长岩;16. 正断层;17. 逆断层;18. 不整合界线。

图1 雪龙山成矿带区域地质图(据资料①②修编)

Fig. 1 Regional geological map of the Xuelongshan metallogenic belt

区内侵入岩主要为印支期花岗岩、辉长岩及花岗闪长岩,燕山期花岗岩和喜山期花岗斑岩。二叠系—白垩系均有火山岩分布,主要为英安岩、流纹岩、凝灰岩、火山角砾岩、细碧岩和玄武岩^{①②}。

雪龙山成矿带已发现铁矿、铜矿、铜银矿、铜汞矿、铅锌矿、银多金属矿、汞矿、锑矿、白钨矿等50多个矿床,大多分布于三叠系—白垩系,少量分布于雪龙山岩群变质岩系中,成因类型有沉积—改造层控型矿床、浅成中低温热液型矿床等。

2 矿区地质特征

矿区主要出露高绿片岩相—角闪岩相雪龙山岩群变质岩,其形成时代为早元古代^③,总体呈NNW向带状展布,岩石类型主要为长英质糜棱岩、

片岩、片麻岩、斜长角闪岩及少量大理岩。矿区内褶皱多为规模较小的不对称褶皱构成的复式背向斜,呈NNW向延伸。断层由近SN向展布的2条断裂带、破碎带及少量近EW向次级构造带组成。岩浆岩主要以岩体和岩脉产出,花岗岩主要分布于矿区西北部和南部,发生糜棱岩化变形;岩脉为新生代花岗岩脉和闪长岩脉(图2)。

大宝山铜矿矿体呈脉状产于构造破碎带中,分南部和北部2个矿脉群^[6]。北部矿脉群规模较大,有5条矿脉,长度为1000~2000 m,厚为0.50~11.92 m,总体走向近SN,局部随破碎带转为近EW向,倾向为170°~355°,倾角为5°~43°。规模最大的矿脉长约2 km,厚度为0.52~1.66 m,平均厚度为0.92 m,在矿区内总体走向近SN,在南段走向转为近EW向,北段变为NW向,倾向为188°~310°,倾角为10°~38°。南部矿脉群有10条矿脉,规模较大的矿脉有5条,矿脉长400~600 m,厚度为0.57~1.99 m,矿脉总体走向NE,倾向290°~350°,倾角为11°~56°。其中规模最大的矿脉长约600 m,厚度为0.78~1.30 m,平均厚度为1.10 m,呈向西北突出的弧形,倾向为305°~310°,倾角为11°~30°(图2)。

含矿岩石主要为长英质糜棱岩,由长石、石英和少量白云母、黑云母变晶组成,个别围岩含少量片状石墨和粒状石榴石变晶。其中,长石具有较强的绢云母化(高岭土化);石英多被拉长呈条带状定向展布,白云母和黑云母呈片状定向分布,与石英条带构成面理(图3a),黑云母发生绿泥石化(图3b)。矿化蚀变主要有碳酸盐化、硅化和黄铁矿化,碳酸盐化主要为方解石+菱铁矿,呈细脉状(0.1~0.5 mm)分布于糜棱岩中(图3c),硅化主要为石英,呈脉状分布,黄铁矿呈星点状、浸染状分布(图3d),蚀变分带不明显。

矿石类型主要有:(1)辉铜矿+黄铜矿脉,主要由辉铜矿和黄铜矿组成,呈他形粒状集合体,构成团块状(图4a);(2)辉铜矿+黄铜矿+方解石+菱铁矿脉,辉铜矿和黄铜矿呈他形粒状集合体,方解石和菱铁矿晶型较差,呈他形—半自形粒状(图4b);(3)黄铜矿+石英+方解石+菱铁矿脉,黄铜矿呈团块状,石英晶型较小,但结晶良好,自形粒状,方解石和菱铁矿晶型较大,他形—半自形粒状(图4c);(4)辉铜矿+石英+方解石+菱铁矿脉,辉铜矿为他形粒状集合体,石英呈自形粒状,方解

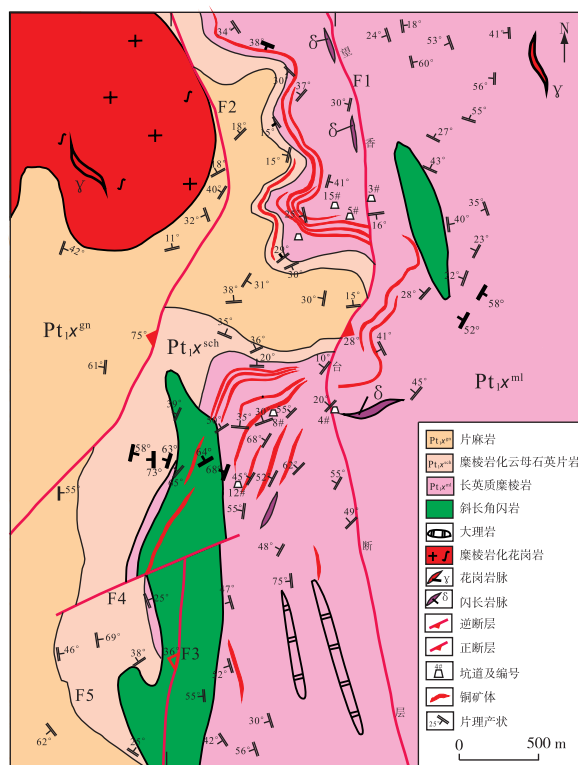
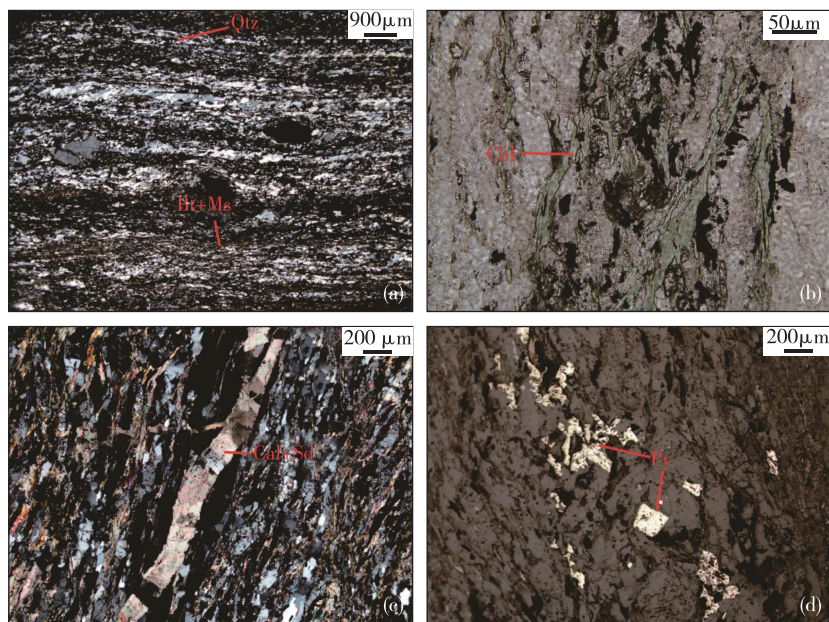


图2 云南维西大宝山铜矿矿区地质图(据资料③修编)

Fig. 2 Geological map of the Dabaoshan Copper ore deposit in Weixi County, Yunnan



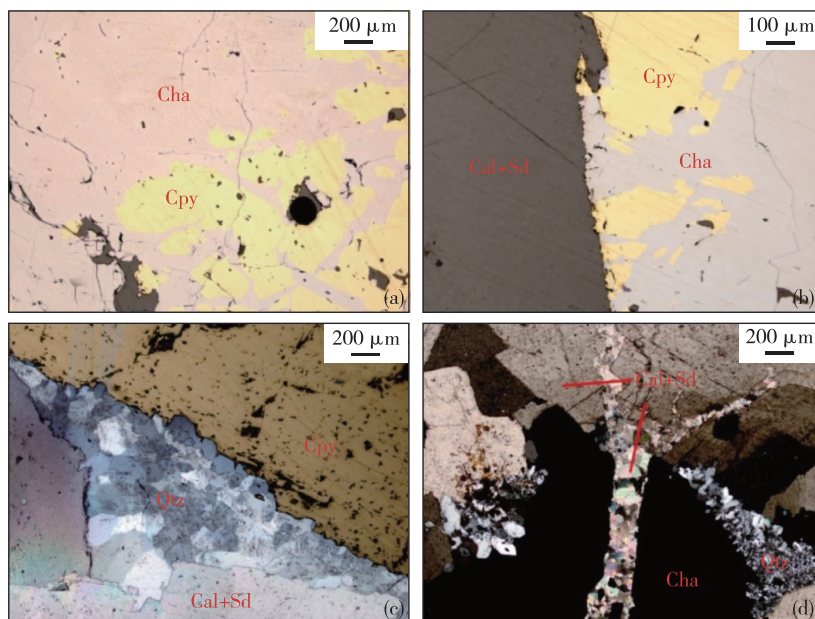
(a). 长石碎斑和定向排列的长条状石英、黑云母及白云母变晶(正交偏光);(b). 黑云母绿泥石化(正交偏光);(c). 方解石细脉(正交偏光);(d). 星点状、浸染状黄铁矿化(正交偏光);Qtz. 石英;Bt. 黑云母;Ms. 白云母;Chl. 绿泥石;Cal. 方解石;Sd. 菱铁矿;Py. 黄铁矿。

图3 大宝山铜矿围岩显微结构

Fig. 3 Photomicrographs of wall rocks in the Dabaoshan Copper ore deposit

石和菱铁矿分两期,早期为晶型较差的他形一半自形粒状,晚期晶型较好且呈脉状分布的方解石

+菱铁矿穿插到早期形成的方解石+菱铁矿中(图 4d)。



(a). 辉铜矿+黄铜矿脉(正交偏光);(b). 辉铜矿+黄铜矿+方解石+菱铁矿脉(正交偏光);(c). 黄铜矿+石英+方解石+菱铁矿脉(正交偏光);(d). 辉铜矿+石英+方解石+菱铁矿脉(正交偏光); Cha. 辉铜矿; Cpy. 黄铜矿; Cal. 方解石; Sd. 菱铁矿; Qtz. 石英。

图 4 大宝山铜矿典型矿石镜下特征

Fig. 4 Microscopic features of representative ores in the Dabaoshan Copper ore deposit

3 测试方法

3.1 白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测试方法

选纯的白云母(纯度 $>99\%$)经超声波清洗后在中国原子能科学研究院完成中子照射,在中国地质科学院地质研究所 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 实验室完成同位素测试。质谱分析在多接收稀有气体质谱仪 Helix MC 上进行,用 ISOPLOT 程序计算坪年龄及反等时线^[7],坪年龄误差为 2σ ,详细的实验流程参见文献^[8]和文献^[9]。

3.2 稳定同位素测试方法

石英、方解石及硫化物(黄铁矿、黄铜矿和辉铜矿)单矿物分选在河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成,氢、氧、硫同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成。石英单矿物氢、氧同位素分析所用仪器为 MAT 253EM 质谱仪。氢同位素分析用爆裂法获取包裹体中的水,由锌法制氢,分析精度达 $\pm 2\%$;氧同位素用 BrF_5

法^[10]测定石英中氧同位素的组成,分析精度达 $\pm 0.2\%$ 。硫化物硫同位素分析所用仪器为 MAT 251 EM 质谱仪,以 Cu_2O 作氧化剂制样,分析精度达 $\pm 0.2\%$ 。方解石 C、O 同位素分析在国家地质测试实验中心完成,测试方法采用 DZ/T0184.17-1997 碳酸盐矿物或岩石中 C、O 同位素组成的磷酸法,所用测试仪器为 MAT-253 质谱仪。

4 测试结果

4.1 白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测年结果

白云母样品(编号 11QWH-48)的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法阶段升温加热分析结果见表 1。采用 Isoplot3.0 软件进行数据处理并作坪年龄谱图和反等时线年龄图(图 5),通过实验得到 $700\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 累计 12 个升温温度段的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄值,获得的总气体年龄为 27.0 Ma 。 ^{39}Ar 在 $0\% \sim 0.41\%$ 释放区域内获得较小的年龄,在 $96.11\% \sim 100\%$ 释放区域存在 2 个较大年龄,待趋于稳定后,在 $29.77\% \sim$

96.11%释放区域呈现1条平坦的Ar-Ar坪年龄谱图(图5a),坪年龄为 26.2 ± 0.36 Ma, MSWD=1.8,对应的温度区间为 $880\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,140\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应的 ^{39}Ar 释放量为66.3%,表明样品K和放射性 ^{40}Ar 分布均匀,自矿物生成后保持良好的封闭状态^[11]。对参与坪年龄计算阶段的数据进行 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 等时线拟合处理,构成良好的反等时线(图

5b),反等时线年龄为 26.0 ± 2.5 Ma (MSWD=5.9, $n=6$),误差范围内与坪年龄一致,表明年龄可信。反等时线在纵轴上的截距显示样品 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 初始比值为311 Ma,与大气氩初始比值(295 Ma)在误差范围内一致,表明样品的坪年龄受过剩氩影响较小,且无明显的氩丢失。

表1 大宝山铜矿矿脉中白云母(样品11QWH-48) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段加热分析结果

Table 1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ heating dating results of muscovites (sample 11QWH-48) from the ore-bearing veins in the Dabaoshan Copper ore deposit

T/ ℃	($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	($^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) _m	$^{40}\text{Ar}/\%$	F	$^{39}\text{Ar}/10^{-14}\text{ mol}$	$^{39}\text{Ar}(\text{累积量})/\%$	年龄/ Ma	$\pm 1\sigma/\text{Ma}$
700	18.320 0	0.053 7	0.000 0	0.029 3	13.33	2.441 1	0.15	0.41	18.0	4.5
780	7.876 7	0.015 0	0.000 0	0.016 3	43.62	3.435 9	1.48	4.43	25.24	0.39
820	4.525 8	0.002 9	1.523 3	0.013 8	83.46	3.781 8	3.37	13.61	27.8	1.1
850	3.911 2	0.000 8	0.000 0	0.013 1	93.48	3.656 4	5.94	29.79	26.85	0.29
880	3.856 5	0.000 6	0.000 0	0.013 1	95.38	3.678 3	11.01	59.76	27.01	0.28
920	3.867 9	0.001 5	0.000 0	0.013 8	88.55	3.425 2	1.21	63.19	25.16	0.55
960	3.910 9	0.001 3	0.000 0	0.013 5	90.29	3.531 1	1.34	66.83	25.94	0.59
1 020	4.055 5	0.001 7	0.000 0	0.013 1	87.44	3.546 2	1.39	70.63	26.05	0.58
1 080	3.950 2	0.001 0	0.000 0	0.013 3	92.54	3.655 5	5.60	85.88	26.84	0.30
1 140	4.294 5	0.002 5	0.000 0	0.013 6	82.52	3.543 7	3.75	96.11	26.03	0.39
1 200	203.815 9	0.672 7	6.262 6	0.141 4	2.67	5.479 4	1.30	99.65	40.1	2.3
1 300	1981.210 0	6.668 8	0.000 0	1.284 5	0.53	10.563 7	0.13	100.00	77	46

注:下标 m 代表样品中测定的同位素比值,总气体年龄=27.0 Ma, $F=^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$ 。

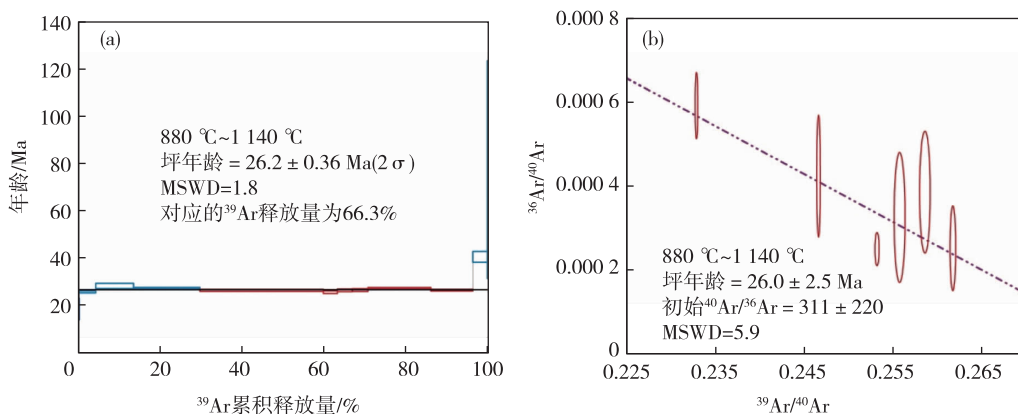


图5 大宝山铜矿矿脉中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄谱图(a)和反等时线年龄图(b)

Fig. 5 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age (a) and inverse isochron diagram (b) of the muscovites from ore-bearing veins of the Dabaoshan Copper ore deposit

4.2 氢、氧同位素分析结果

石英中流体包裹体的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值可代表成矿流体的氢同位素组成^[12-13],石英矿物沉淀冷凝后,气液包裹体水中的氧与周围二氧化硅中的氧发生同

位素再平衡交换,导致所测包裹体水的氧同位素组成无法反映原始成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值^[14]。所以,通过测定石英中的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值,再根据 Taylor (1974)^[15]的石英—水分馏方程($1\,000 \ln a_{\text{石英-水}} =$

$3.57 \times 10^6 \text{ T}^{-2} - 2.73$) 换算得到成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值。矿区成矿平均温度通过测定样品中流体包裹体的均一温度获得。

大宝山铜矿脉石及矿石矿物氢、氧同位素组成结果为北矿区石英中流体包裹体氢同位素值 ($\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$) 为 $-92\text{‰} \sim -164\text{‰}$, 平均值为 -127.6‰ ; 氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$) 为 $+7.3\text{‰} \sim +11.7\text{‰}$, 平均值为 $+9.9\text{‰}$ 。根据石英—水分馏方程算出成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-0.9\text{‰} \sim +4.3\text{‰}$, 平均值为 $+2.1\text{‰}$ 。南矿区石英中流体包裹体氢同位素值 ($\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$) 为 $-92\text{‰} \sim -167\text{‰}$, 平均值为 -135.6‰ , 氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$) 为 $+8.1\text{‰} \sim +12.6\text{‰}$, 平均值为 $+8.5\text{‰}$, 根据石英—水分馏方程换算出成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-4.4\text{‰} \sim +2.5\text{‰}$, 平均值为 -1.6‰ 。

此外,通过 MAT-253 质谱仪测定的大宝山铜矿矿脉中方解石 O 同位素组成,发现北矿区矿脉中方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $-1.928 \sim +1.69$, 平均值为 $+0.114$; 南矿区矿脉中方解石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $+5.8 \sim +6.2$, 平均值为 $+6.0$ 。

4.3 硫同位素分析结果

脉石及矿石中主要金属矿物(黄铁矿、黄铜矿和辉铜矿)硫同位素测试结果表明,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-12.8\text{‰} \sim +1.3\text{‰}$, 平均值为 -4.16‰ ; 黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-3.9\text{‰} \sim -4.3\text{‰}$, 平均值为 -4.1‰ ; 辉铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-3\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$, 平均值为 -4.5‰ 。

4.4 碳同位素分析结果

已有研究表明,当矿脉中无石墨与方解石共生时,方解石(或流体包裹体中 CO_2) 的碳同位素组成可近似作为成矿热液的总碳同位素组成^[16]。由于矿区和方解石共生的矿物中不含石墨,因此矿脉中方解石的碳同位素组成可近似看作成矿热液总碳同位素组成。

大宝山铜矿矿脉中方解石碳同位素分析结果表明北矿区矿脉中方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-1.9 \sim -1.6$, 平均值为 -1.76 ; 南矿区矿脉中方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-4.1 \sim -4.0$, 平均值为 -4.05 。

5 讨 论

5.1 成矿时代

矿区西北部发育糜棱岩化花岗岩,对其进行锆

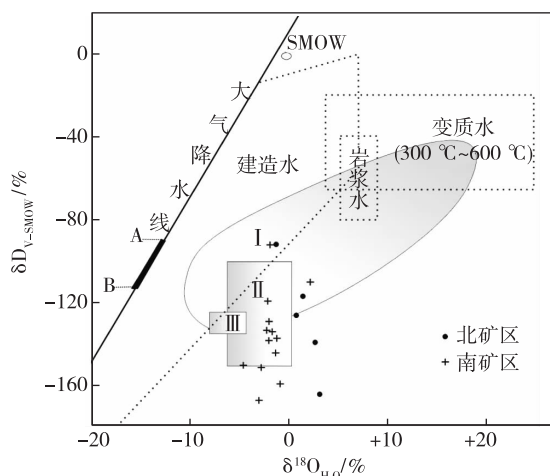
石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,测试结果表明其原岩形成时代为 $28.2 \pm 0.3 \text{ Ma}$ 。大宝山铜矿矿脉受顺糜棱面理发育的脆韧性断裂带控制,说明成矿作用形成于雪山构造带隆升到浅部构造层次,构造变形由韧性变形向脆性变形转换,晚于糜棱岩化花岗岩形成时代。因此,28.2 Ma 构成成矿时代的上限。

白云母样品采自大宝山铜矿南矿区 12# 坑道内黄铜矿+石英+方解石+菱铁矿脉中,据野外观察,其形成于自形的石英之间,结晶良好,呈集合体状,未受构造变形影响,表明其不是长英质糜棱岩中的云母,而是与黄铜矿、石英等矿物同时结晶形成,其年龄代表了成矿时代。白云母(编号 11QWH-48)结晶后,⁴⁰Ar/³⁹Ar 体系保持封闭,未受后期热事件影响,测年结果可靠。由于反等时线年龄不受初始氩的影响,一般认为年龄值更可靠,因此 $26.0 \pm 2.5 \text{ Ma}$ 可代表白云母的结晶年龄,即大宝山铜矿成矿时代,与糜棱岩化花岗岩锆石 U-Pb 年龄吻合。

5.2 成矿物质来源

从 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解(图 6)可知,大宝山铜矿的样品分布于大气降水线右侧区域,多数落于建造水区域及其附近,远离岩浆水和变质水范围,与秘鲁 Casapalca 银铅锌铜脉状矿床成矿晚期以大气降水为主并含有少量岩浆热液^[17]及西藏玉龙铜钼矿床成矿后水云母化阶段以大气降水为主的成矿流体氢氧同位素组成^[18]相近。大宝山铜矿成矿流体氧同位素发生明显“ O^{18} 漂移”,与成矿围岩为长英质糜棱岩有关,“ O^{18} 漂移”是大气降水成矿热液显著特点之一,以上均表明成矿流体是以大气降水为主要补给源的建造水^[19]。在其他条件一致的情况下,温度越高,“ O^{18} 漂移”越显著^[13]。从图 6 可以看出,由北矿区至南矿区,成矿热液“ O^{18} 漂移”逐渐减少。在南、北矿区岩浆岩及围岩一致的情况下,北矿区主要成矿阶段的热液温度高,大气降水与围岩具有强烈的氧同位素平衡交换;南矿区主要成矿阶段的热液温度低,与围岩氧同位素平衡交换轻微且范围小。

前人对大宝山铜矿周边地区金满、白龙厂、水泄、西萨等矿床中矿石样品进行 S 同位素测试,结果显示 $\delta^{34}\text{S}$ 主要分布于 $-22\text{‰} \sim +10\text{‰}$, 集中于 $-6\text{‰} \sim +6\text{‰}$, 认为 S 可能来源于深部岩浆,同时又有生物成因等多来源性质^[21]。大宝山铜矿所有辉



I. 三江中段(燕山期、喜山期)区域流体氢氧同位素组成^[20]; II. 秘鲁 Casapalca 银铅锌铜脉状矿床成矿晚期流体氢氧同位素组成^[17]; III. 西藏玉龙铜矿床成矿后水云母化阶段成矿流体氢氧同位素组成^[18]; A、B. 哀牢山(燕山期、喜山期)区域大气降水氢氧同位素组成^[20]; 变质水、岩浆水、大气降水和 SMOW 氢氧同位素数据引自文献^[15]; 建造水氢氧同位素数据引自文献^[19]。

图 6 大宝山铜矿成矿流体 $\delta D_{V-SMOW}-\delta^{18}O_{H_2O}$ 图解

Fig. 6 δD_{V-SMOW} vs. $\delta^{18}O_{H_2O}$ diagram of ore-forming fluids in the Dabaoshan Copper ore deposit

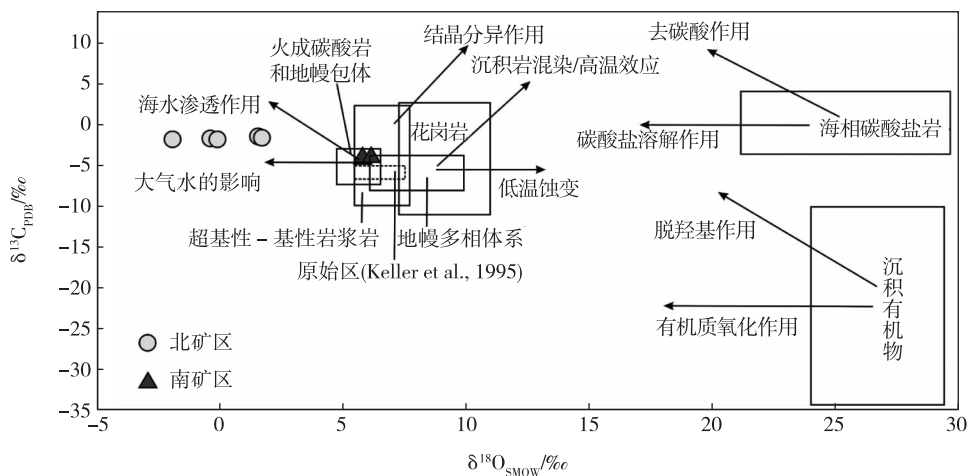


图 7 大宝山铜矿中方解石碳氧同位素值分布(底图据文献^[22])

Fig. 7 Carbon and oxygen isotope distribution of calcites in the Dabaoshan Copper ore deposit

综上, H、O 同位素研究表明成矿流体是以大气降水为主并含有部分岩浆水的建造水; S 同位素研究表明其主要来源于深部岩浆; C、O 同位素研究表明成矿流体主要来源于岩浆—地幔来源, 并受大气降水影响。

铜矿、黄铜矿及大部分黄铁矿样品 $\delta^{34}S$ 值集中于 $-5.4\text{‰} \sim +1.3\text{‰}$, 与以上脉状铜矿床 $\delta^{34}S$ 分布范围一致, 且硫同位素组成呈塔式分布, 表明 S 主要来源于深部岩浆。

在 $\delta^{13}C_{PDB}-\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 同位素值分布图上(图 7), 大宝山铜矿脉中方解石样品部分分布于岩浆—地幔来源区, 部分分布于岩浆—地幔来源区受大气水影响的趋势线与海水渗透作用趋势线之间。雪龙山于印支晚期后处于陆相环境, 不可能有海水渗透, 因此认为矿脉中组成方解石的 C、O 主要来源于岩浆—地幔来源, 并受到大气降水的强烈影响。南北矿区 C、O 同位素值不同, 这可能与南矿区矿脉中方解石 C、O 同位素受到附近大理岩的影响有关。

大宝山铜矿围岩蚀变范围较小, 矿脉两侧蚀变带宽度多在 1 m 范围内, 个别地段几乎没有, 对于平均厚度多在 1 m 以上的矿脉而言, 围岩不可能提供全部的成矿物质^[6]。前人研究表明, 雪龙山岩群变质岩系的 Cu 的丰度仅为 41.5×10^{-6} ^[23], 远小于地壳中 Cu 的丰度值 (63×10^{-6})^[24]。此外, 区域范围内沉积盖层(上三叠统一白垩统)中 Cu 的丰度更低 ($(1 \sim 36.8) \times 10^{-6}$)^[25], 说明它们不可能为该铜矿提供主要物质来源。

6 结 论

大宝山铜矿黄铜矿+石英+方解石+菱铁矿矿脉中白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄为 26.0 ± 2.5 Ma, 代表大宝山铜矿的年龄。同位素分析结果表明, 大宝

山铜矿成矿物质主要来源于深部岩浆,成矿流体主要为岩浆水与大气降水的混合物。

注释

- ① 云南省地质矿产局. 1:20万维西幅矿产图及区域地质调查报告. 1985.
- ② 云南省地质矿产局第三地质大队. 1:5万托枝、河西幅地质图及区域地质调查报告. 1995.
- ③ 贵州省有色地质矿产勘查院. 维西县 1:1万大宝山矿区地质图及铜矿普查报告. 2007.

参考文献

- [1] Leloup P H, Kienast J R. High-temperature metamorphism in a major strike-slip shear zone: the Ailao Shan-Red River, People's Republic of China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 118 (1/4): 213-234.
- [2] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1/4): 3-10.
- [3] 苏之良. 云南省维西县雪龙山变质岩带铜多金属成矿地质条件与成矿预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005: 1-75.
- [4] 成连华, 杨松, 向洪流. 云南省维西县大宝山铜(银)矿床地质—矿化特征及其综合找金潜力[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(2): 152-154.
- [5] 董家龙, 杨松, 曾桂强. 云南维西大宝山铜矿床地质—物探找矿研究与成矿预测[J]. *矿产与地质*, 2008, 22(4): 357-363.
- [6] 赵宇浩, 戚学祥, 唐贯宗, 等. 云南维西大宝山铜矿PGE和微量元素地球化学特征及其成因意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2171-2183.
- [7] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003: 70.
- [8] 陈文, 张彦, 金贵善, 等. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 867-872.
- [9] 张彦, 陈文, 陈克龙, 等. 成岩混层(I/S)Ar-Ar 年龄谱型及³⁹Ar核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区P-T界线粘土岩为例[J]. *地质论评*, 2006, 52(4): 556-561.
- [10] Clayton R N, Mayeda T K. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1963, 27(1): 43-52.
- [11] 周九龙, 罗照华, 贺怀宇, 等. 河北大庙铁矿床黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 110-117.
- [12] 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 299-320.
- [13] 周龙全, 李光来, 唐傲, 等. 赣南地区石英脉型钨矿成矿流体特征[J]. *华东地质*, 2016, 37(2): 136-146.
- [14] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用——金属活化热液成矿作用及找矿[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985: 54-120.
- [15] Taylor H P, Jr H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 1974, 69(6): 843-883.
- [16] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67(5): 551-578.
- [17] Rye R O, Sawkins F J. Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies on the Casapalca Ag-Pb-Zn-Cu Deposit, Central Andes, Peru[J]. *Economic Geology*, 1974, 69(2): 181-205.
- [18] 芮宗瑶, 黄崇轲, 徐钰, 等. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿带含矿斑岩与非含矿斑岩的鉴别标志[C]//地质矿产部青藏高原地质文集编委会. 青藏高原地质文集. 北京: 地质出版社, 1983: 159-176.
- [19] 徐仕海, 顾雪祥, 唐菊兴, 等. 兰坪盆地三类主要铜银多金属矿床的稳定同位素地球化学[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24(4): 309-316.
- [20] 徐启东, 莫宣学. 三江中段特提斯阶段区域流体的性质与状态[J]. *岩石学报*, 2000, 16(4): 639-648.
- [21] 刘家军, 李朝阳, 潘家永, 等. 兰坪—思茅盆地砂页岩中铜矿床同位素地球化学[J]. *矿床地质*, 2000, 19(3): 223-234.
- [22] 刘家军, 何明勤, 李志明, 等. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. *矿床地质*, 2004, 23(1): 1-10.
- [23] 叶庆同, 胡云中. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌矿成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-246.
- [24] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学*, 1976(3): 167-174.
- [25] 杨松, 董家龙, 张振亮, 等. 云南兰坪—维西地区铜矿床成矿地质条件研究[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(6): 640-644.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite and source of ore-forming materials in the Dabaoshan Copper ore deposit, Weixi County, Yunnan

ZHAO Yu-hao¹, YAO Zhong-you¹, QI Xue-xiang², WANG Tian-gang¹

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;*

2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: The Dabaoshan Copper ore deposit is a large-sized epithermal-mesothermal hydrothermal deposit in the Xuelongshan metallogenic belt, Yunnan Province. In this study, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite from ore-bearing veins containing chalcopyrite-quartz-calcite-siderite was carried out to yield a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of 26 ± 2.5 Ma, representing the age of the Dabaoshan Copper ore deposit. H and O isotopic analysis results show that the ore-forming fluids were dominated by meteoric water as well as minor amount of magmatic formation water. S isotopic analysis shows that the $\delta^{34}\text{S}$ values of the main metal minerals range from -5.4‰ to $+1.3\text{‰}$, suggesting that the ore-forming materials mainly derived from deep magma. C, H and O isotopic results also indicate that the ore-forming fluids sourced mainly from mantle magma, which was influenced by meteoric water. According to the alteration and Cu abundance of wall rocks, it can be inferred that the ore-forming material of the Dabaoshan copper ore deposit might derive from deep magma and ore-forming fluids were the mixture of magmatic water and meteoric water.

Key words: mineralization age; ore-forming material; Copper ore deposit; Dabaoshan; Yunnan