

桂西北丹池成矿带 He、Ar 同位素特征 及其矿床成因指示

蔡明海,李晔,彭振安,胡志成,胡鹏飞,肖俊杰

广西大学资源环境与材料学院,广西南宁,530004

内容提要:桂西北丹池成矿带是我国南方重要的有色金属矿业基地。本文对成矿带内芒场矿田马鞍山 Pb-Zn 矿和大山 Sn-Zn 矿、大厂矿田铜坑 Sn 多金属矿、五圩矿田箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿等 4 个主要矿床矿石黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素进行了研究。结果表明,丹池成矿带内典型矿床成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}=0.79\sim 5.32\text{ Ra}$,介于地壳流体($0.01\sim 0.05\text{ Ra}$)与地幔流体($6\sim 9\text{ Ra}$)特征值之间, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=273\sim 351$,接近或略高于大气 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 特征值(295.5),不同矿床成矿流体中均有幔源组分的参与,地幔流体参与成矿作用是一个区域性事件。结合区内泥盆纪喷流沉积作用、燕山晚期花岗质岩体及构造特征等综合研究认为,参与成矿作用的地幔组分主要来自壳-幔相互作用过程中沿 NW 向深大断裂上升的深源地幔流体,丹池成矿带内成岩、成矿作用是燕山晚期同一构造-热事件产物,矿床成因属后生热液充填-交代成矿。

关键词:He-Ar 同位素;地幔流体;Sn 多金属矿床;丹池成矿带;桂西北

丹池成矿带是位于桂西北南丹-河池一带呈 NW 向展布的 Sn 多金属成矿带。在长约 100 km、宽约 30 km 范围内自北而南产出有芒场、大厂和五圩三个矿田,主要矿床有芒场矿田马鞍山 Pb-Zn 矿和大山 Sn-Zn 矿,大厂矿田铜坑 Sn 多金属矿、龙头山 Sn 多金属矿、拉么 Zn-Cu 矿和茶山 W-Sb 矿,五圩矿田箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿和三排洞 Pb-Zn 多金属矿等(图 1)。据现有资料统计,区内累计探明金属量为 Sn 151.23 万 t、Zn 787.89 万 t、Pb 201.41 万 t、Sb 47.13 万 t。

前人在区内开展了大量地质研究,但一些与成矿有关的问题并没有得到很好解决,这些问题主要包括对大厂矿田层状/似层状和块状锡多金属矿体的成因以及区内参与成矿作用的地幔组分来源等存在不同认识。前者主要有燕山晚期岩浆热液充填-交代成矿(Chen Yuchuan et al., 1993; Fu et al., 1993; Wang Denghong et al., 2004; Guo Jia et al., 2018)和泥盆纪同生喷流沉积成矿(Han Fa et al., 1997; Jiang Shaoyong et al., 1999; Qin Dexian et

al., 2002; Fan Delian et al., 2004; Zhao Kuidong et al., 2007; Yan Yongfeng et al., 2013)之争;后者有源自泥盆纪喷流地幔流体(Zhao Kuidong et al., 2002, 2007, Zhao Kuidong, 2005)和沿 NW 向深大断裂上升的地幔流体(Cai Minghai et al., 2004a, 2007)等不同解释。近年来,Guo Jia et al. (2018)采用锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 法获得大厂矿田铜坑 92 号似层状矿和龙头山 100 号块状矿的成矿年龄为 $91.2\pm 1.8\sim 93.0\pm 1.4\text{ Ma}$,其与拉么 Zn-Cu 矿 Re-Os 成矿年龄($90.0\pm 1.1\text{ Ma}$, Zhao Hai et al., 2018)以及龙箱盖花岗岩体的成岩年龄 $91\sim 96\text{ Ma}$ (Cai Minghai et al., 2006; Li Huaqin et al., 2008; Liang Ting et al., 2011)基本一致,从年代学方面进一步论证了区内岩浆热液后生充填-交代成矿。

稀有气体尤其是 He-Ar 同位素化学性质稳定,在地壳和地幔储库中具有极不相同的同位素组成,能较好地识别出地壳流体中是否有幔源组分的加入,因此稀有气体同位素在示踪成矿流体方面得到了广泛应用(Stuart et al., 1995; Hu Ruizhong et

注:本文为广西自然科学基金项目(编号 2020GXNSFAA159128)资助的成果。

收稿日期:2020-05-15;改回日期:2020-07-02;网络发表日期:2020-08-24;责任编辑:毕献武;责任编辑:黄敏、李曼。

作者简介:蔡明海,男,1965 年生。研究员,主要从事区域成矿规律和找矿预测研究。E-mail:gxdcxmh@163.com。

引用本文:蔡明海,李晔,彭振安,胡志成,胡鹏飞,肖俊杰. 2021. 桂西北丹池成矿带 He、Ar 同位素特征及其矿床成因指示. 地质学报, 95(12): 3758~3767. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020272.

Cai Minghai, Li Ye, Peng Zhen'an, Hu Zhishu, Hu Pengfei, Xiao Junjie. 2021. He and Ar isotope characteristics and their genetic implications for the Sn-polymetallic deposits in the Danchi metallogenic belt, northwestern Guangxi. Acta Geologica Sinica, 95(12): 3758~3767.

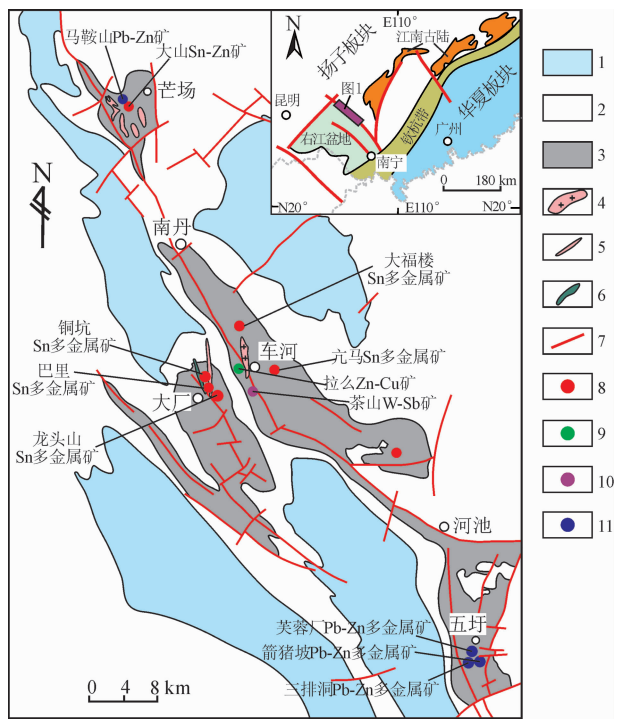


图 1 桂西北丹池成矿带地质图

Fig. 1 Geological map of the Nandan-Hechi metallogenetic belt in northwestern Guangxi

1—三叠系—二叠系灰岩和碎屑岩;2—石炭系灰岩;3—泥盆系灰岩—碎屑岩—硅质岩;4—白垩纪黑云母花岗岩;5—岗斑岩脉;6—闪长玢岩脉;7—断裂;8—Sn 多金属矿;9—Zn-Cu 矿;10—W-Sb 矿;11—Pb-Zn 多金属矿

1—Triassic-Permian limestone and clastic rock; 2—Carboniferous limestone; 3—Devonian limestone, clastic rock and silicite; 4—Cretaceous biotite granite; 5—granite porphyry dike; 6—diorite porphyry dike; 7—fault; 8—Sn-polymetallic deposit; 9—Zn-Cu deposit; 10—W-Sb deposit; 11—Pb-Zn-polymetallic deposit

al. , 1999, 2012; Burnard et al. , 1999, 2004; Li Zhaoli et al. , 2007; Wu Liyan et al. , 2011; Zhai Wei et al. , 2012; Wei Wenfeng et al. , 2019; Song Shengqiong et al. , 2019)。本文在大厂矿田铜坑矿床上部锡多金属矿 He-Ar 同位素研究(Cai Minghai et al. , 2004a, 2007)基础上, 补充了芒场矿田马鞍山 Pb-Zn 矿和大山 Sn-Zn 矿, 大厂矿田铜坑下部新发现的 Zn-Cu 矿, 五圩矿田箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿, 以及部分赋矿地层中原生黄铁矿的 He、Ar 和 S 同位素研究, 从区域尺度探讨了丹池成矿带幔源组分参与成矿特征及其来源, 为深入研究区内成矿作用和深部构造环境提供了新资料。

1 成矿地质背景

丹池成矿带位于江南古陆与右江盆地结合部位, 分布范围大致与 NW 向丹池褶皱断裂带相吻合

(图 1)。

丹池褶皱断裂带是在前泥盆纪基底之上发展而成, 主要经历了海西-印支期(D_1-T_2)断裂拗陷和沉积, 印支期(T_2)挤压褶皱和 NW 向断裂逆冲, 以及燕山晚期(K_2)的伸展剪切、岩浆侵位和 Sn 多金属成矿的作用过程(Cai Minghai et al. , 2004b)。

区内基底岩系为中—新元古界四堡群和丹洲群一套浅变质碎屑岩夹火山岩, 上覆有泥盆系—三叠系, 缺失侏罗系和白垩系。出露地层自上而下分别为三叠系—二叠系碎屑岩、碳酸盐岩, 石炭系碳酸盐岩和泥盆系碎屑岩、碳酸盐岩、硅质岩, 总厚度超过 7000 m。其中, 泥盆系为主要赋矿层位。

NW 向褶皱和断裂为区域主干构造, NE、SN 及 EW 向构造叠加其上(图 1)。其中, NW 向构造主要包括由芒场背斜、龙箱盖背斜和五圩背斜等组成的丹池大背斜, 以及一系列 NW、NNW 向断裂组成的丹池大断裂, 二者联合组成丹池褶皱断裂带, 控制了成矿带产出。

丹池成矿带内的岩浆岩以侵入岩为主, 出露于芒场和大厂两地。地表仅见有呈岩枝产出的黑云母花岗岩(大厂龙箱盖)以及花岗斑岩脉和闪长玢岩脉(芒场、大厂), 工程揭露在大厂和芒场均见有隐伏岩体。年代学研究表明, 区内侵入岩均为燕山晚期(88~116 Ma)岩浆活动产物(Cai Minghai et al. , 2006; Li Huaqin et al. , 2008; Liang Ting et al. , 2011; Yuan Jintao, 2019)。

2 典型矿床简介

2.1 马鞍山 Pb-Zn 矿床

马鞍山 Pb-Zn 矿床是北部芒场矿田的一个中型矿床, Pb+Zn 金属量 40.01×10^4 t。矿体呈脉状、似层状产于芒场背斜 NW 倾伏端, 赋矿围岩为下泥盆统塘丁组(D_1t)钙质泥岩、粉砂岩夹石英砂岩, 控矿构造为 NW-NNW 向断裂和顺层破碎带。

脉状矿体长 100~500 m、厚 0.3~3.4 m, 含 Pb 0.7%~3.6%、Zn 1.5%~5.1%, 局部含 Sn 0.1%~0.5%。矿石中金属矿物有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、毒砂、辉锑矿和锡石等, 非金属矿物有石英、方解石等。似层状矿体分布在脉状矿体两侧, 长 300~800 m、厚 5.2~17.5 m, 含 Pb 0.1%~5.0%、Zn 0.4%~9.6%。矿石中金属矿物有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、脆硫锑铅矿等, 非金属矿物有石英、方解石等。

2.2 大山 Sn-Zn 矿床

大山 Sn-Zn 矿床是芒场矿田规模最大的一个大型矿床,金属量 Sn 2.2×10^4 t、Zn 82.6×10^4 t,该矿床长期处于非正常开采状态。矿体呈脉状、似层状产于芒场背斜核部,赋矿围岩为下泥盆统塘丁组(D_1t)钙质泥岩、粉砂岩夹石英砂岩,控矿构造为 NW-NNW 向断裂和顺层破碎带。

脉状矿体长 180~500 m、厚 0.1~1.5 m,含 Sn 0.2%~1.1%、Zn 1.5%~3.4%。矿石中金属矿物有锡石、毒砂、闪锌矿、黄铁矿等,非金属矿物有石英、方解石等。似层状矿体分布在脉状矿体下部,长 300~750 m、厚 2.5~6.3 m,含 Sn 0.1%~0.3%、Zn 1.8%~2.3%。矿石中金属矿物有锡石、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、黄铜矿等,非金属矿物有石英、方解石等。

2.3 铜坑 Sn 多金属矿床

铜坑矿 Sn 多金属矿床是中部大厂矿田规模最大的一个超大型矿床,产于大厂背斜核部,龙箱盖花岗质岩体西南侧,由上部 Sn 多金属矿(Sn 68×10^4 t、Pb 34×10^4 t、Zn 238×10^4 t、Sb 27×10^4 t)和下部新近勘查发现的 Zn-Cu 矿(Zn 212×10^4 t、Cu 8×10^4 t)组成。

上部 Sn 多金属矿由脉状和似层状矿体组成。其中,脉状矿体赋矿围岩为上泥盆统同车江组(D_3t)泥岩、粉砂岩和五指山组(D_3w)扁豆灰岩,受 NE 向断裂控制。矿体长 50~300 m、厚 0.15~1.5 m,含 Sn 1.1%~2.1%、Zn 2.7%~8.3%,矿石中金属矿物有锡石、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、脆硫锑铅矿等,非金属矿物有石英、方解石和电气石等。似层状矿体主要有产在上泥盆统五指山组(D_3w)细条带硅质灰岩中的 91 号和榴江组(D_3l)硅质岩中 92 号矿体,受顺层破碎带控制。矿体长 1030~1130 m,厚 16~26 m,含 Sn 0.3%~1.5%、Zn 2.1%~3.1%。矿石中金属矿物有锡石、磁黄铁矿、黄铁矿、

闪锌矿、毒砂及脆硫锑铅矿等,非金属矿物有石英、方解石和电气石等。

下部 Zn-Cu 矿体由顺层交代的层纹状矿化和沿裂隙充填的细网脉状矿化组成,总体呈似层状产出,主要矿体有 94、95 和 96 号等,赋矿围岩为中泥盆统罗富组(D_2l)钙质泥岩、泥灰岩和粉砂岩。矿体长 2235~2737 m,厚 3.5~5.5 m,含 Zn 3.0%~5.8%、Cu 0.1%~0.3%。矿石中主要金属矿物有闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿和毒砂等,非金属矿物有方解石、石英及少量石榴子石、硅灰石、透闪石、绿泥石、绢云母等。

2.4 箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿床

箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿床是南部五圩矿田规模最大的一个大型矿床,金属量 Pb 9.6×10^4 t、Zn 32.7×10^4 t、Sb 16.2×10^4 t。矿体产于五圩背斜核部,赋矿围岩为下泥盆统塘丁组(D_1t)钙质泥岩、泥砂粉砂岩、粉砂岩夹砂岩,控矿构造为 NNW 向断裂和顺层破碎带。矿体呈脉状和似层状产出,其中,脉状矿体为矿区勘查和开采的主体,似层状矿目前仅发现有一些找矿线索。脉状矿体长 50~300 m,厚 0.2~2.4 m,含 Pb 0.2%~5.8%、Zn 0.8%~5.3%、Sb 0.3%~17.89%,局部含 Sn 0.1%~0.5%。矿石中金属矿物有黄铁矿、铁闪锌矿、辉锑矿、脆硫锑铅矿和少量锡石,非金属矿物有石英、方解石、白云石、绢云母等。

3 取样分析及结果

3.1 取样和分析

本次用于 He、Ar、S 同位素测试的矿石样品采自矿山正在作业的坑道,地层样品则采自远离矿区的新修公路边。具体采样位置和样品特征见表 1。

将采集样品手工破碎至 40~60 目,经淘洗、烘干后在显微镜下挑选出纯净的黄铁矿。样品分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作

表 1 桂西北丹池成矿带取样位置及样品特征

Table 1 Samples distribution and its characteristics from the Nandan-Hechi metallogenetic belt in northwestern Guangxi			
序号	样品编号	取样位置	黄铁矿样品特征
1	M1702	马鞍山 380 中段 501 号 Pb-Zn 矿脉	呈浸染状分布,浅黄色、粒径 0.5~1.0 mm,矿物组合:闪锌矿-方铅矿-黄铁矿
2	M1706	大山 530 标高 13 号 Sn-Zn 矿脉	呈浸染状分布,浅黄色、粒径 0.2~1.0 mm,矿物组合:锡石-闪锌矿-黄铁矿-磁黄铁矿
3	D1728	铜坑 305 中段 94 号 Zn-Cu 矿体	呈浸染状分布,浅黄色、粒径 1.5~2.5 mm,矿物组合:黄铁矿-毒砂-闪锌矿-黄铜矿
4	D1732	铜坑 305 中段 94 号 Zn-Cu 矿体	呈浸染状分布,浅黄色、粒径 0.5~2.0 mm,矿物组合:黄铁矿-毒砂-闪锌矿-黄铜矿
5	D1734	铜坑 305 中段 95 号 Zn-Cu 矿体	呈浸染状分布,浅黄色、粒径 1~2 mm,矿物组合:黄铁矿-毒砂-闪锌矿-黄铜矿
6	W1701	箭猪坡 180 中段 7 号 Pb-Zn 多金属矿脉	呈浸染状分布,浅黄色、粒径 0.2~1.5 mm,矿物组合:闪锌矿-黄铁矿-脆硫锑铅矿
7	W1702	箭猪坡-30 中段 6 号 Pb-Zn 多金属矿脉	呈浸染状分布,浅黄色、粒径 0.5~1.2 mm,矿物组合:闪锌矿-黄铁矿-脆硫锑铅矿
8	D1706	远离矿体(>1 km)的新建公路边	D_3l 硅质岩中原生黄铁矿,呈浅黄色,草莓状、团块状和结核状产出,粒径<0.1 mm

用与资源评价重点实验室完成。

He、Ar 分析采用压碎法,操作流程为:①先将样品用丙酮在超声波中清洗 20 min,烘干;②真空中 120℃去气 24 h;③压碎样品,释放出气体;④释放出的气体经海绵钛泵、锆铝泵、活性碳液氮冷阱 4 级纯化,活性气体均被去除,氩、氙被冷冻,纯净的 He 和 Ne 进入分析系统;⑤进入分析系统的 He、Ne 经加液氮的钛升华泵再次纯化去掉微量 H₂、Ar;⑥于-78℃释放 Ar,进行 Ar 同位素分析;⑦根据压碎后通过 160 目(0.100 mm)的样品重量,计算样品的氦氩含量。测试仪器为乌克兰产 MI1201IG 惰性

气体同位素质谱仪。³He 用电子倍增器接收,⁴He 用法拉第杯接收。分辨率:电子倍增器为 1200,法拉第杯为 760。使用标准为大气,³He/⁴He=1.4×10⁶。S 同位素测试以 Cu₂O 作氧化剂制样,在 MAT251EM 质谱计上完成,采用国际标准 CDT,分析精度为±0.2%。

3.2 分析结果

本次 8 件黄铁矿样品 He、Ar 及 S 同位素测试结果见表 2。表中一并列出了 Cai Minghai et al. (2004a)对铜坑矿床上部锡多金属矿体 6 件黄铁矿样品(DC6、DC7、DC43、DC44、DC45、DC46)的测试数据。

表 2 桂西北丹池成矿带黄铁矿样品 He、Ar 和 S 同位素测试结果

Table 2 He, Ar and S isotopic data of pyrite samples from the Nandan-Hechi metallogenetic belt in northwestern Guangxi										
样号	⁴ He/(×10 ⁻⁶ cm ³ STP/g)	⁴⁰ Ar/(×10 ⁻⁷ cm ³ STP/g)	³ He/ ⁴ He/(×10 ⁶)	R/Ra	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	地幔 He (%)	⁴⁰ Ar* (%)	⁴⁰ Ar*/ ⁴ He	F ⁴ He	δ ³⁴ S(‰)
M1702	1.47	18.97	1.73±0.20	1.24	316±1	18.83	6.45	0.004	1480	-4.8
M1706	2.96	12.07	1.40±0.12	1.00	349±1	15.12	15.33	0.005	5171	0.0
DC6*	6.71	18.74	1.61±0.09	1.15	283±1	17.44	/	/	6123	-3.9
DC7*	2.75	4.84	1.64±0.27	1.17	273±1	17.75	/	/	9372	-3.1
DC43*	1.03	2.17	4.12±0.37	2.94	305±1	45.06	3.11	0.003	8747	-6.0
DC44*	1.77	6.93	2.99±0.56	2.14	327±1	32.72	9.63	0.005	5046	-3.9
DC45*	1.55	4.30	2.27±0.33	1.62	283±1	24.69	/	/	6164	-4.7
DC46*	1.72	2.12	2.19±0.17	1.56	286±1	23.76	/	/	14020	-2.8
D1728	2.33	1.58	2.24±0.17	1.60	339±1	24.38	12.83	0.006	30206	0.1
D1732	4.06	4.43	2.59±0.19	1.85	351±1	28.24	15.81	0.004	19437	0.4
D1734	3.69	1.13	1.17±0.06	0.79	349±1	11.88	15.33	0.004	68861	0.5
W1701	0.03	0.47	7.45±2.81	5.32	320±4	81.79	7.66	0.255	1234	5.5
W1702	0.10	3.68	4.30±1.26	3.07	300±1	47.07	1.50	0.015	492	1.1
D1706	1.30	1.25	2.05±0.41	1.46	345±1	22.22	14.35	0.011	21680	-5.8

注: * 据 Cai Minghai et al., 2004a; F⁴He = (⁴He/³⁶Ar)_{样品}/(⁴He/³⁶Ar)_{大气}, 其中, (⁴He/³⁶Ar)_{大气} = 0.1655; ⁴⁰Ar(%) = $\frac{(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}})_{\text{样品}} - 295.5}{(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}})_{\text{样品}}} \times 100$; 地幔 He(%) = (R_{样品} - R_{地壳})/(R_{地幔} - R_{地壳}), 其中, R_{地幔} 取大陆岩石圈地幔的平均值 6.5 Ra, R_{地壳} 取地壳岩石的平均产率 0.02 Ra 岩石(Stuart et al., 1995)。

从表 2 中可以看出,本次 7 件矿石样品(马鞍山 Pb-Zn 矿、大山 Sn-Zn 矿、铜坑矿床下部 Zn-Cu 和箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿)⁴He 为(0.03~4.06)×10⁻⁶ cm³ STP/g、³He/⁴He=0.79~5.32 Ra(Ra=1.4×10⁻⁶,为大气 He 同位素比值),⁴⁰Ar 为(0.47~18.97)×10⁻⁷ cm³ STP/g、⁴⁰Ar/³⁶Ar = 300~349, δ³⁴S=-4.8‰~5.5‰。1 件地层中原生黄铁矿样品(D1706)⁴He 为 1.30×10⁻⁶ cm³ STP/g、³He/⁴He = 1.46 Ra,⁴⁰Ar 为 1.25×10⁻⁷ cm³ STP/g、⁴⁰Ar/³⁶Ar = 345,δ³⁴S‰=-5.8。

4 讨论

4.1 He-Ar 同位素示踪

研究表明,热液矿床硫化物中的稀有气体主要存在于矿物流体包裹体内,黄铁矿等硫化物对 He

具有较低扩散系数和良好保存能力,在包裹体被圈闭后不会发生明显丢失(Stuart et al., 1995; Baptiste et al., 1996; Hu Ruizhong et al., 1998; Burnard et al., 1999; 2004)。矿物形成后其中³He/⁴He 比值的变化主要取决于矿物中 Th、U 及 Li 的含量。研究区内黄铁矿 U(0.4×10⁻⁶~0.6×10⁻⁶)和 Th(0.1×10⁻⁶~1.0×10⁻⁶)含量较低(Han Fa et al., 1997),且黄铁矿为不含 Li 矿物,因此本次测试的黄铁矿中流体包裹体稀有气体组成基本可以代表成矿流体的初始组成。

热液流体中稀有气体主要有三种来源,且不同来源的 He、Ar 同位素组成及其特征比值具有显著差别(Simmons et al., 1987; Stuart et al., 1995; Hu Ruizhong et al., 1999; Burnard et al., 1999): ①大气或大气饱和水(ASW),大气饱和水在一定温压条

件下与大气处于平衡,因而与大气有相似的同位素组成,其中³He/⁴He=1 Ra(Ra 代表大气 He 的³He/⁴He 比值,为 1.4×10^{-6}),⁴⁰Ar/³⁶Ar=295.5;②地幔流体,具有高³He 特征,³He/⁴He 特征值一般为6~9 Ra,Ar 以放射性⁴⁰Ar 为主,⁴⁰Ar/³⁶Ar>40000;③地壳放射成因流体,³He/⁴He 特征值≤0.1 Ra(绝大多数情况下介于0.01~0.05 Ra 之间),⁴⁰Ar/³⁶Ar≥45000,壳源成因的岩浆流体具有与其相似的 He 和 Ar 同位素组成。

4.1.1 He 同位素

丹池成矿带成矿流体(不包括地层样品)的³He/⁴He 比值介于0.79~5.32 Ra 之间(表2),远高于地壳放射成因流体³He/⁴He 特征值(0.01~0.05 Ra),但低于地幔流体特征值(6~9 Ra),反映成矿流体中有幔源 He 的加入。其中,箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿床的 W1701 样品³He/⁴He 比值高达5.32 Ra,主要显示了地幔 He 特征。在³He/⁴He-⁴⁰Ar/³⁶Ar 图解上,样品投影点均分布在地壳与地幔区域之间,显示出地幔流体、地壳流体和饱和大气水的混合特征(图2)。

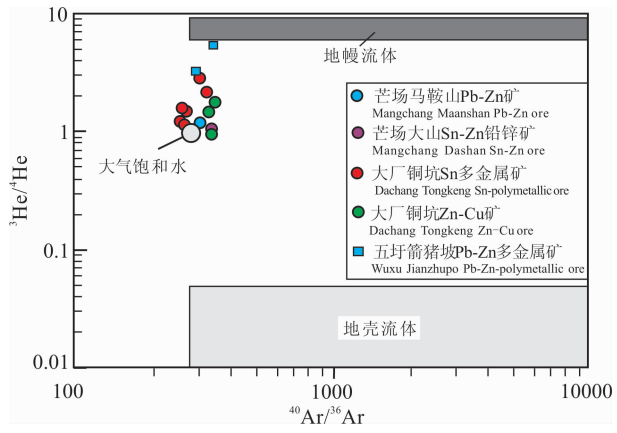


图2 桂西北丹池成矿带黄铁矿成矿流体³He/⁴He-⁴⁰Ar/³⁶Ar 图解

Fig. 2 Plot of ³He/⁴He Vs. ⁴⁰Ar/³⁶Ar of fluid in pyrite from the Nandan-Hechi metallogenetic belt in northwestern Guangxi

稀有气体在低温水溶液中的溶解度随质量数的减小而降低(Simmons et al., 1987; Burnard et al., 1999),质量数最小的 He 在水溶液中的溶解度最低,所以饱和大气水中的 He 对成矿流体 He 影响较小。大气 He 的影响通常用参数 F⁴He 来判断(Kendrick et al., 2001)。若样品为大气 He,则 F⁴He=1。本次样品的 F⁴He 值为492~68861(表2),远大于1,说明样品中大气 He 的影响也可忽略

不计。由此可见,区内成矿流体中的 He 主要来自地壳和地幔两个端元。

根据壳幔二元体系的 He 含量公式(Kendrick et al., 2001)计算,丹池成矿带成矿流体中地幔 He 所占比例为11.88%~81.79%,平均29.90%(表2),说明成矿流体中的 He 部分来自地幔,但大多数主要源自地壳端元。

4.1.2 Ar 同位素

丹池成矿带成矿流体的⁴⁰Ar/³⁶Ar为273~351(表2),均接近或略高于大气⁴⁰Ar/³⁶Ar特征值(295.5)(Stuart et al., 1995),反映成矿流体具有大气饱和水端元 Ar 同位素特征,且存在部分壳源或幔源的放射成因⁴⁰Ar*。应用 Kendrick et al. (2001)计算公式求出的放射性成因⁴⁰Ar* 比率为3.11%~15.81%(表2),大气 Ar 的贡献率为84.19%~96.89%,说明成矿流体中有大气饱和水的参与。

成矿流体的⁴⁰Ar*/⁴He 比值较低,除一个样品(W1701)为0.255外,其余为0.003~0.015(表2),远低于地壳岩石典型的⁴⁰Ar*/⁴He 比值(0.2)(Stuart et al., 1995),表明成矿流体中获得的放射性⁴He 比⁴⁰Ar* 多。

综上所述,丹池成矿带不同矿田、不同矿床成矿流体中均有幔源组分不同程度的参与,成矿流体可能为地幔流体、壳源成因花岗质岩浆热液和饱和大气水三者的混合流体。

4.2 地幔组分来源

基于成矿地质背景的分析,丹池成矿带成矿流体中的幔源组分可能主要有以下来源:①燕山晚期花岗质岩浆;②泥盆纪海底喷流作用;③燕山晚期壳-幔相互作用过程中从深大断裂上升的地幔流体。

4.2.1 花岗质岩浆对幔源组分贡献

丹池成矿带内的侵入岩主要有燕山晚期的花岗质岩体和花岗斑岩脉、闪长玢岩脉。其中,岩脉明显切割了 Sn 多金属矿体和 Zn-Cu 矿体,属成矿后产物。因此,讨论燕山晚期岩浆作用是否提供了成矿中的幔源组分应针对与成矿时空关系密切的花岗质岩体。

丹池成矿带内的花岗质岩体中未见有暗色包体。岩石富硅(SiO₂ 72.62%~73.73%)、富铝(Al₂O₃ 13.73%~13.95%)、富碱(Na₂O+K₂O 6.84%~8.40%, K₂O>Na₂O), A/CNK 为1.10~1.36,稀土元素 Eu 亏损明显(δEu=0.14~0.36),球粒陨石配分曲线为右倾斜“V”型,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 初始值为0.7110、全岩 δ¹⁸O=9‰~12.96‰(Chen

Yuchuan et al. , 1993); $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -10.0 \sim -7.8$ 、 $T_{\text{DM2}} = 1.5 \sim 1.7 \text{ Ga}$ 。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -9.9 \sim -3.9$ 、锆石 $\delta^{18}\text{O} = 7.0\text{‰} \sim 8.9\text{‰}$ (Guo Jia, 2019)。地质特征、岩石地球化学及 Sr、Nd、O 和 Hf 同位素组成等共同表明,区内花岗岩主要为元古宙地层(四堡群、丹洲群)局部重熔形成的高分异 S 型花岗岩。

地壳部分熔融会产生大量⁴He,因此,S 型花岗岩难以生成高³He/⁴He 比值流体。Burnard et al. (2004)研究了葡萄牙 Panasqueira 钨铜锡矿床 He 同位素组成,也认为高³He/⁴He 比值成矿流体并不源自与成矿时空关系密切的 S 型 Panasqueira 花岗岩,地壳熔融形成的花岗岩浆热液不可能有如此高的³He/⁴He 比值。Zhao Kuidong et al. (2002)和 Cai Minghai et al. (2004a)分别对大厂矿田与龙箱盖花岗岩有关的萤石样品和茶山 W-Sb 矿中的黄铁矿样品进行了 He 同位素研究,其³He/⁴He 比值分别为 0.7 Ra 和 0.78 Ra,可能代表了区内花岗岩的 He 同位素组成。Ballentine et al. (2002)研究认为,流体中³He/⁴He 比值>0.1 Ra 就能证明成矿流体中含有幔源流体。因此,尽管不能完全排除龙箱盖花岗岩岩浆中混入有地幔组分,但其难以衍生出高³He/⁴He 比值(0.79~5.32 Ra,平均 1.96 Ra)的成矿流体。由此可见,燕山晚期的花岗质岩体不可能是丹池成矿带成矿流体中幔源组分的主要贡献者。

4.2.2 泥盆纪海底喷流对幔源组分贡献

前人对丹池成矿带的沉积地层进行了大量研究,依据硅质岩的地质特征、标志性矿物(冰长石、电气石)和地球化学特征等认为榴江组(D₃l)硅质岩属喷流沉积成因(Chen Hongde et al. , 1989; Zhou Yongzhang, 1990; Han Fa et al. , 1997; Jiang Shaoyong et al. , 1999),表明上泥盆统榴江组沉积过程中发生有海底喷流事件。本次测得榴江组硅质岩中原生黄铁矿³He/⁴He=1.46 Ra,也表明在喷流作用中有地幔流体产生。Zhao Kuidong (2005)依据大厂矿田层状、块状锡矿体³He/⁴He 比值(1.6~2.9 Ra)以及 He-S 同位素的相关性等特征认为区内幔源组分主要来自泥盆纪海底喷流与海水的混合。

从整个丹池成矿带来看,除大厂矿田 92 号矿体赋存于喷流成因的硅质岩外,其他矿床(体)的赋矿围岩分别为下泥盆统塘丁组(D₁t)、中泥盆统罗富组(D₂l)、上泥盆统五指山组(D₃w)和同车江组(D₃t),而这些沉积层位中并不存在喷流事件。He 同位素研究表明,赋存于塘丁组中的马鞍山 Pb-Zn 矿

(1.24 Ra)、大山 Sn-Zn(1.00 Ra)、箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿(3.07~5.32 Ra)和罗富组(D₂l)的 Zn-Cu 矿(0.79~1.85 Ra)均有地幔流体参与成矿,且空间上从北部芒场矿田→中部大厂矿田→南部五圩矿田,地幔 He 所占比例(平均值)分别为 16.98%、25.10%和 64.43%,呈逐渐增加的规律性变化。由此可见,丹池成矿带幔源组分参与成矿并非局限于大厂矿田的似层状和块状 Sn 多金属矿,而是一个区域性事件。

在 He-S 同位素关系图上(图 3),区内不同矿床样品的投影点并非沿添加海水(addition of sea water)或添加孔隙水(addition of pore water)的曲线演化,没有很好地显示出海底喷流幔源流体的演化特征(Stuart et al. , 1994),也表明泥盆纪海底喷流不可能是成矿流体中幔源组分的主要贡献者。

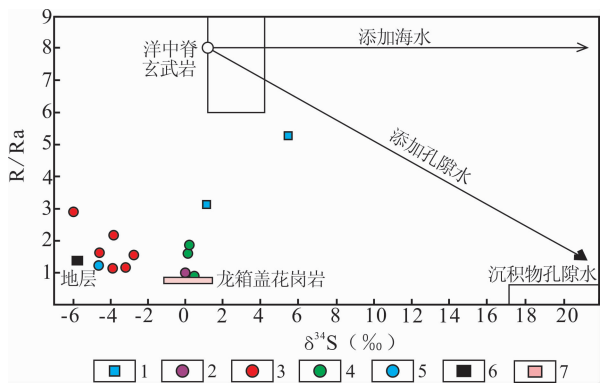


图 3 桂西北丹池成矿带黄铁矿流体 R/Ra- $\delta^{34}\text{S}$ 图解 (底图据 Stuart et al. , 1994)

Fig. 3 Plot of $R/Ra-\delta^{34}\text{S}$ of fluid in pyrite from the Nandan-Hechi metallogenetic belt in northwestern Guangxi (basic map after Stuart et al. , 1994)

- 1—马鞍山 Pb-Zn 矿; 2—大山 Sn-Zn 矿; 3—铜坑矿床上部 Sn 多金属矿; 4—铜坑矿床下部 Zn-Cu 矿; 5—箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿; 6—泥盆系地层; 7—龙箱盖花岗岩
- 1—The Maanshan Pb-Zn deposit; 2—the Dashan Sn-Zn deposit; 3—Sn-polymetallic orebodies in the upper Tongkeng deposit; 4—Zn-Cu orebodies in the lower Tongkeng deposit; 5—the Jianzhupo Pb-Zn deposit; 6—Devonian stratum; 7— Longxianggai granite

丹池成矿带成矿作用发生在燕山晚期(Wang Denghong et al. , 2004; Guo Jia et al. , 2018; Zhao Hai et al. , 2018)。因此,在成矿作用过程中,早先泥盆纪喷流产生的地幔组分可以再次活化参与成矿,并对赋存于喷流成因岩石中矿体的 He 同位素组成产生一定影响。大厂矿田铜坑矿床榴江组硅质岩中的 92 号似层状 Sn 多金属矿的³He/⁴He=1.6~2.5 Ra (Zhao Kuidong et al. , 2002; Cai Minghai

et al., 2004a), 地幔 He 平均 26.90%, 分别高于上部同车江组和五指山组中的脉状 Sn 多金属矿 ($^3\text{He}/^4\text{He} = 1.15 \sim 1.56 \text{ Ra}$ 、地幔 He 平均 19.65%; Cai Minghai et al., 2004a), 以及下部罗富组中的 Zn-Cu 矿 ($^3\text{He}/^4\text{He} = 0.79 \sim 1.85 \text{ Ra}$ 、地幔 He 平均 21.50%; 表 2), 显示榴江组硅质岩中早期喷流形成的幔源组分可能有部分被活化参与成矿, 导致了 92 号矿体中幔源组分参与程度的增高。正是因为有部分早先喷流组分在后期被活化参与了成矿, 使得这部分有叠加影响的矿体其地球化学特征显示出了喷流沉积矿床的某些特点, 这也可能是导致大厂矿田似层状矿体成因争论的一个主要原因。

上述分析表明, 区内幔源组分参与成矿并非只局限于有泥盆纪喷流事件发生的大厂矿田, 而是一个区域性事件。泥盆纪海底喷流形成的幔源组分在燕山晚期成矿作用可能有部分被活化并参与成矿, 导致了以喷流成因岩石为赋矿围岩的矿体中地幔组分参与程度增高, 但海底喷流作用不是丹池成矿带成矿流体中幔源组分的主要来源。

4.2.3 燕山晚期壳-幔作用对幔源组分贡献

地壳中幔源稀有气体与挥发分往往是地幔发生部分熔融和幔源岩浆侵入地表的反映 (Ballentine et al., 2002; Hu Ruizhong et al., 2009; Chen Jun et al., 2013)。Burnard et al. (2004) 也认为葡萄牙 Panasqueira 钨铜锡矿床成矿流体的高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 (4.6~5.4 Ra) 是 S 型 Panasqueira 花岗岩冷凝结晶后深部幔源岩浆结晶释放的流体成矿结果。但另一种情况是矿区并没有出露幔源或典型的壳幔混合岩浆岩, 深部工程也未揭露到隐伏的该类岩体, 地幔深处熔融产生的地幔流体则是通过大型构造上升参与成矿。如 Du Letian (1996) 总结了地壳流体与地幔流体间的关系, 提出拆离断层系统是地幔流体 (HACONS 流体) 在地壳范围内的散发通道; Xue Chunji et al. (2003) 对云南金顶和白秧坪矿床研究表明, 地幔流体很可能是伴随一些大型构造上升至浅部并混合了部分地壳流体而成矿。Li Xiaofeng et al. (2009) 研究认为, 德兴金山金矿床黄铁矿流体包裹体中含 ^3He 稍高的原因可能是地幔组分流体沿赣东北深大断裂上升参与成矿作用的结果。Pang Yaqing et al. (2019) 对粤北诸广南部铀矿田研究表明, 棉花坑等铀矿床产在与 SN 向基地断裂沟通的 NNW 向断裂中, 受地幔流体影响比较大, 而受 NE 向断裂控制的蕉坪等矿床主要受大气降水的影响。

目前丹池成矿带内工程所揭露到的隐伏岩体

(芒场和大厂) 均为地壳重熔的高分异 S 型花岗岩, 尽管不能完全排除其成岩过程中有少量地幔组分的混入, 但其难以衍生出高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的成矿流体。研究表明, 华南西部晚白垩世处于伸展的构造背景中 (Chen Maohong et al., 2009; Liu Shen et al., 2010; Cheng Yanbo et al., 2013; Yan Danping et al., 2005; Liu Yan et al., 2015), 在地壳或岩石圈伸展的构造背景下引发的壳-幔相互作用导致了地幔局部熔融从而产生地幔流体, 深部地幔流体可通过大型构造上升参与成矿作用。

深部幔源流体上升加入到成矿流体应具备一定的地质前提, 即要求发育有深达下地壳或地幔的深大断裂作为运移通道。重力资料表明, 丹池成矿带内 NW 向断裂的影响在加里东构造面、结晶基底面及莫氏面上均有较明显反映, 而其他方向断裂 (如 NE、SN 和 EW 向) 仅在加里东基底构造面有所反映, 表明区内 NW 向断裂影响深度可能达到了上地幔, 是丹池成矿带深部幔源流体上升的通道 (Cai Minghai et al., 2004b)。

综上所述, 丹池成矿带内参与成矿的幔源组分其主要来源不是燕山晚期高分异的 S 型花岗岩和泥盆纪的海底喷流作用, 而是沿 NW 向深大断裂上升的深部地幔流体。

4.3 矿床成因解释

He-Ar 同位素研究表明, 丹池成矿带不同矿田、不同矿床成矿流体中均有幔源组分的参与, 成矿流体可能为地幔流体、壳源岩浆热液和饱和大气水三者的混合流体。丹池成矿带地幔流体参与成矿是一个区域性事件, 形成于燕山晚期华南西部壳-幔相互作用的深部构造背景。燕山晚期地壳或岩石圈伸展、壳-幔相互作用的动力学机制导致了区内成岩、成矿事件的发生, 地幔局部熔融产生的深源地幔流体沿 NW 向深大断裂上升参与成矿作用, 而浅表部表征该期伸展事件的一套张剪性构造系统 (包括早期 NW 和 NNW 向逆冲断裂的张性改造、NE 向张扭性断裂、顺层滑动破碎带等) 控制了矿体的产出。由于控矿构造样式的不同, 分别形成了似层状、脉状等不同产状的矿体。因此, 丹池成矿带成岩、成矿作用是同一构造-热事件产物, 成矿与燕山晚期壳-幔作用的深部构造背景及花岗质岩浆活动有关, 属后生热液充填-交代成矿。

5 结论

(1) 丹池成矿带马鞍山 Pb-Zn 矿床、大山 Sn-Zn

矿床、铜坑 Sn 多金属矿床和箭猪坡 Pb-Zn 多金属矿床黄铁矿流体包裹体³He/⁴He 比值为 0.79~5.32 Ra, 平均 1.96 Ra, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值为 273~351, 表明区内不同矿床成矿流体中均有幔源组分参与, 幔源组分参与成矿是一个区域性事件, 且参与的强度自北而南逐渐增高。

(2) 丹池成矿带成矿流体中的幔源组分主要来自燕山晚期壳-幔相互作用过程中沿 NW 向深大断裂上升的深部地幔流体, 泥盆纪海底喷流作用和燕山晚期高分异的 S 型花岗岩对幔源组分的贡献有限。

(3) 丹池成矿带燕山晚期地壳或岩石圈伸展、壳-幔相互导致了区内成岩、成矿事件发生, 成岩、成矿作用属同一构造-热事件产物, 矿床成因为后生热液充填-交代成矿。

致谢:审稿专家对本文提出了宝贵修改意见, 在此表示衷心感谢!

References

Ballentine C J, Burgess R, Marty B. 2002. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47(1): 539~614.

Baptiste P J, Fougère Y. 1996. Abundance and isotopic composition of helium in hydrothermal sulfides from the East Pacific Rise at 13°N. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 87~93.

Burnard P G, Polya D A. 2004. Importance of mantle derived fluids during granite associated hydrothermal circulation: He and Ar isotopes of ore minerals from Panasqueira. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(7): 1607~1615.

Burnard P G, Hu Ruizhong, Turner G, Bi Xianwu. 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 1595~1604.

Cai Minghai, Mao Jingwen, Liang Ting, Franco Pirajno, Huang Huilan. 2007. The origin of the tongkeng-changpo tin deposit, Dachang metal district, Guangxi, China: clues from fluid inclusions and He isotope systematics. *Mineral. Deposita*, 42: 613~626.

Cai Minghai, He Longqing, Liu Guoqing, Wu Decheng, Huang Huiming. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusive rocks in the Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi, and their geological significance. *Geological Review*, 52(3): 409~414 (in Chinese with English abstract).

Cai Minghai, Mao Jingwen, Liang Ting, Wu Fuxin. 2004a. Helium and Argon isotopic components of fluid inclusions in Dachang tin-polymetallic deposit and their geological implications. *Mineral Deposits*, 23(2): 225~231 (in Chinese with English abstract).

Cai Minghai, Liang Ting, Wu Decheng, Huang Huiming. 2004b. Structural feature and its control of mineralization of the Nandan-Hechi metallogenic belt in Guangxi Province. *Geology and Exploration*, 40(6): 5~10 (in Chinese with English abstract).

Chen Hongde, Zeng Yunfu. 1989. Depositional characteristics and genesis of upper Devonian silicites in Danchi basin, Guangxi. *Minerals and Rocks*, 9(4): 22~29 (in Chinese with English abstract).

Chen Jun, Wang Rucheng, Zhu Jinchu, Lu Jianjun, Ma Dongsheng. 2013. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China. *Science China: Earth Sciences*, 56: 2045~2055.

Chen Maohong, Zhang Wei, Yang Zongxi, Lu Gang, Hou Kejun, Liu Jianhui. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb age and Hf isotopic composition of Baiceng ultrabasic dykes in Zhenfeng County, southwestern Guizhou Province. *Mineral Deposits*, 28(3): 240~250 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Huang Minzhi, Xu Jue, Hu Yunzhong, Tang Shaohua, Li Yinqing, Meng Lingku. 1993. *Tin Deposits of Dachang*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Spandler C. 2013. Petrogenesis and geodynamic implications of the Gejiu igneous complex in the western Cathaysia block, South China. *Lithos*, 175: 213~229.

Du Letian. 1996. The relationship between crust fluids and mantle fluids. *Earth Science Frontiers*, 3(3~4): 172~180 (in Chinese with English abstract).

Fan Delian, Zhang Tao, Ye Jie, Pašava J, Kribek B, Dobes P, Varrin I, Zak K. 2004. Geochemistry and origin of tin-polymetallic sulfide deposits hosted by the Devonian black shale series near Dachang, Guangxi, China. *Ore Geology Reviews*, 24: 103~120.

Fu Minglu, Kwak T A P, Mernagh T P. 1993. Fluid inclusion studies of zoning in the Dachang tin-polymetallic ore field, People's Republic of China. *Economic Geology*, 88: 283~300.

Guo Jia. 2019. Tin mineralization events and fertility of granitoids in the Youjiang basin, South China: the Gejiu and Dachang Sn-polymetallic districts as examples. p.H.D thesis of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).

Guo Jia, Zhang Rongqing, Sun Weidong, Ling Mingxing, Hu Yongbin, Wu Kai, Luo Ming, Zhang Lichuan. 2018. Genesis of tin-dominant polymetallic deposits in the Dachang district, South China: insights from cassiterite U-Pb ages and trace element compositions. *Ore Geology Reviews*, 95: 863~879.

Han Fa, Zhao Rusong, Shen Jianzhong, Hutchinson R W, Jiang Shaoyong, Chen Hongde. 1997. *Geology and Origin of Ores in the Dachang Tin-polymetallic ore Field*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Jiang Guohao, Chen Hongwei, Peng Jiangtang, Qi Youqiang, Wu Liyan, Wei Wenfeng. 2012. Mantle-derived noble gases in ore-forming fluids of the granite-related Yaogangxian tungsten deposit, southeastern China. *Mineralium Deposita*, 47(6): 623~632.

Hu Ruizhong, Burnard P G, Bi Xianwu, Zhou Meifu, Peng Jiangtang, Su Wenchao, Zhao Junhong. 2009. Mantle-derived gaseous components in ore-forming fluids of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi Province, China: evidence from He, Ar and C isotopes. *Chemical Geology*, 266(1~2): 86~95.

Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Turner G, Burnard P G. 1999. Helium and argon isotopic geochemistry of gold mineralizing fluid of Ailaoshan gold mineralization belt. *Science in China (Series D)*, 29(4): 321~330 (in Chinese).

Hu Ruizhong, Burnard P G, Turner G, Bi Xianwu. 1998. Helium and Argon isotope systematics in fluid inclusions of Machangqing copper deposit in West Yunnan Province, China. *Chemical Geology*, 146(1~2): 55~63.

Jiang Shaoyong, Han Fa, Shen Jianzhong, Palmer M. R. 1999. Chemical and Rb-Sr, Sm-Nd isotopic systematics of tourmaline from the Dachang Sn-polymetallic ore deposit, Guangxi Province, P R China. *Chem. Geol.*, 57: 49~67.

Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A D, Turner G. 2001. Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphyry mineralization fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 2651~2668.

Li Huaqin, Wang Denghong, Mei Yuping, Liang Ting, Chen Zhenyu, Guo Chunli, Ying Lijuan. 2008. Lithogenesis and mineralization chronology study on the Lamo Zinc-Copper

- polymetallic ore deposit in Dachang orefield, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 912~920 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Yi Xiankui, Zhu Heping. 2009. Source of ore-forming fluids in Jinshan gold deposit of Dexing County: constraints from microstructures and stable isotopes. *Mineral Deposits*, 28(1): 43~52 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhaoli, Hu Ruizhong, Yang Jingsui, Peng Jiantang, Li Xiaomin, Bi Xianwu. 2007. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China. *Lithos*, 97(1~2): 161~173.
- Liang Ting, Wang Denghong, Hou Kejun, Li Huaqin, Huang Huiming, Cai Minghai, Wang Dongming. 2011. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of Longxianggai pluton in Dachang of Guangxi and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1624~1636 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shen, Su Wenchao, Hu Ruizhong, Feng Caixia, Gao Shan, Coulson I M, Wang Tao, Feng Guangying, Tao Yan, Xia Yong. 2010. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of alkaline ultramafic dykes from southwest Guizhou Province, SW China. *Lithos*, 114: 253~264.
- Liu Yan, Hu Kai, Han Shanchu, Sun Zehang. 2015. Structural evolution of the Youjiang basin and its controlling effects on the formation of Carlin-type gold deposits. *Geological Journal of China Universities*, 21(1): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Pang Yaqing, Fan Honghai, Gao Fei, Wu Jianyong, Xie Xiaozhan. 2019. Helium and argon isotopic compositions of fluid inclusions and tracing to the source of ore-forming fluids for the southern Zhuguang uranium ore field in northern Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 35(9): 2765~2773 (in Chinese with English abstract).
- Qin Dexian, Hong Tuo, Tian Yulong, Chen Jianwen. 2002. Ore Geology and Technical Economy of No.92 Orebody of the Dachang Tin Deposit, Guangxi. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Simmons S F, Sawkins F J, Schulter D J. 1987. Mantle-derived helium from two Peruvian hydrothermal ore deposits. *Nature*, 329: 429~432.
- Song Shengqiong, Pan Lichuan, Wei Wenfeng. 2019. He and Ar isotopes of ore-forming fluids in the Taoxikeng tungsten deposit, southern Jiangxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 35(1): 243~251 (in Chinese with English abstract).
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P. 1995. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Ar isotopes in fluid inclusions from DaeHwa W-Mo mineralisation, South Korea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 4663~4673.
- Stuart F M, Turner G, Duckworth R C. 1994. Helium isotopes as tracers of trapped hydrothermal fluids in ocean-floor sulfides. *Geology*, 22: 823~826.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Chen Wen, Sang Haiqing, Li Huaqin, Lu Yuanfa, Chen Kaili, Lin Zhimao. 2004. Dating the Dachang giant tin-polymetallic deposit in Nandan, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 132~138 (in Chinese with English abstract).
- Wei Wenfeng, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Jiang Guohao, Yan Bing, Yin Runsheng, Yang Jiehua. 2019. Mantle-derived and crustal He and Ar in the ore-forming fluids of the Xihuashan granite-associated tungsten ore deposit, South China. *Ore Geology Reviews*, 105: 605~615.
- Wu Liyan, Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Bi Xianwu, Jiang Guohao, Chen Hongwei, Wang Qiaoyun, Liu Yayin. 2011. He and Ar isotopic compositions and genetic implications for the giant Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo deposit, Hunan Province, South China. *International Geology Review*, 53(5~6): 677~690.
- Xue Chunji, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Yang Jianmin, Yang Weiguang, Zeng Rong. 2003. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, No rthwest Yun-nan, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(8): 789~800.
- Yan Daping, Zhou Meifu, Wang Yan, Wang Changliang, Zhao Taiping. 2005. Structural styles and chronological evidences from Dulong-Song Chay tectonic dome: earlier spreading of South China sea basin due to late Mesozoic to early Cenozoic extension of South China block. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(4): 402~412 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yongfeng, Liu Chenming, Qin Dexian, Jiang Kai. 2013. Geological characteristics and metallogenic significance of the Devonian intermediate-basic volcanic rocks in the Dachang deposit, Guangxi Zhuang Autonomous Region. *Chin. J. Geochem*, 32: 110~118.
- Yuan Jintao. 2019. Geochemical characteristics and petrogenesis of magmatic rocks in Mangchang orefield, Danchi metallogenic belt. A Dissertation Submitted to Guangxi University for Degree of master (in Chinese with English abstract).
- Zhai Wei, Sun Xiaoming, Wu Yunshan, Sun Yanyan, Hua Renmin, Ye Xianren. 2012. He-Ar isotope geochemistry of the Yaoling-Meiziwo tungsten deposit, North Guangdong Province: constraints on Yanshanian crust-mantle interaction and metallogenesis in SE China. *Chin Sci Bull*, 57: 1150~1159.
- Zhao Hai, Su Wenchao, Xie Peng, Shen Nengping, Cai Jiali, Luo Ming, Li Jie, Bao Zhian. 2018. Re-Os dating of molybdenite and in-situ Pb isotopes of sulfides from the Lamo Zn-Cu deposit in the Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi, China. *Acta Geochim*, 37(3): 384~394.
- Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Ni Pei, Ling Hongfei, Jiang Yaohui. 2007. Sulfur, lead and helium isotopic compositions of sulfide minerals from the Dachang Sn-polymetallic ore district in South China: implication for ore genesis. *Mineralogy and Petrology*, 89: 251~273.
- Zhao Kuidong. 2005. Isotope geochemistry and genetic models of two types of tin deposits: case studies from the Dachang and the Furong tin deposits. Mester's thesis of Nanjing University (in Chinese with English abstract).
- Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Xiao Hongquan, Ni Pei. 2002. Helium isotopic evidence of metallogenic fluids of the Dachang tin-polymetallic deposit. *Chinese Science Bulletin*, 47(8): 632~635 (in Chinese).
- Zhou Yongzhang. 1990. On sedimentary geochemistry of siliceous rocks originated from thermal water in Nandan-Hechi basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(3): 75~83 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 吴德成, 黄惠明. 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义. *地质论评*, 52(3): 409~414.
- 蔡明海, 毛景文, 梁婷, 吴付新. 2004a. 广西大厂锡多金属矿床氦、氩同位素特征及其地质意义. *矿床地质*, 23(2): 225~231.
- 蔡明海, 梁婷, 吴德成, 黄惠明. 2004b. 广西丹池成矿带构造特征及其控矿作用. *地质与勘探*, 40(6): 5~10.
- 陈洪德和曾允孚. 1989. 广西丹池盆地上泥盆统硅质岩沉积特征及成因讨论. *矿物岩石*, 9(4): 22~29.
- 陈懋弘, 章伟, 杨宗喜, 陆刚, 侯可军, 刘建辉. 2009. 黔西南白层超基性岩墙锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成研究. *矿床地质*, 28(3): 240~250.
- 陈毓川, 黄民智, 徐钰, 胡云中, 唐绍华, 李荫清, 孟令库. 1993. 大厂锡矿地质. 北京: 地质出版社.
- 杜乐天. 1996. 地壳流体与地幔流体间的关系. *地学前缘*, 3(3~4): 172~180.
- 韩发, 赵汝松, 沈建忠, Hutchinson R W, 蒋少涌, 陈洪德. 1997. 大厂锡多金属矿床地质及成因. 北京: 地质出版社.
- 郭佳. 2019. 华南右江盆地锡成矿事件与花岗岩锡成矿能力——以个旧和大厂锡多金属矿区为例. 中国科学院大学博士学位论文.

胡瑞忠, 毕献武, Turner G, Burnard P. 1999. 哀牢山金矿带金成矿流体 He 和 Ar 同位素地球化学. 中国科学(D辑), 29(4): 321~330.

李华芹, 王登红, 梅玉萍, 梁婷, 陈振宇, 郭春丽, 应立娟. 2008. 广西大厂拉么锌铜多金属矿床成岩成矿作用年代学研究. 地质学报, 82(7): 912~920.

李晓峰, 易先奎, 朱和平. 2009. 德兴金山金矿床成矿流体来源: 小尺度构造和同位素地球化学证据. 矿床地质, 28(1): 43~52.

梁婷, 王登红, 侯可军, 李华芹, 黄惠明, 蔡明海, 王东明. 2011. 广西大厂笼箱盖复式岩体的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 27(6): 1624~1636.

刘寅, 胡凯, 韩善楚, 孙泽航. 2015. 右江盆地构造和演化及对卡林型金矿床的控制作用. 高校地质学报, 21(1): 1~14.

庞雅庆, 范洪海, 高飞, 吴建勇, 谢小占. 2019. 粤北诸广南部铀矿田流体包裹体的氦氩同位素组成及成矿流体来源示踪. 岩石学报, 35(9): 2765~2773.

秦德先, 洪托, 田毓龙, 陈建文. 2002. 广西大厂锡矿 92 号矿体矿

床地质与技术经济. 北京: 地质出版社.

宋生琼, 潘力川, 魏文凤. 2019. 赣南陶钨坑钨矿床 He-Ar 同位素地球化学研究. 岩石学报, 35(1): 243~251.

王登红, 陈毓川, 陈文, 桑海清, 李华芹, 路远发, 陈开礼, 林枝茂. 2004. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代. 地质学报, 78(1): 132~138.

颜丹平, 周美夫, 王焰, 汪昌亮, 赵太平. 2005. 都龙-Song Chay 变质穹隆体变形与构造年代——南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据. 地球科学, 30(4): 402~412.

苑金涛. 2019. 广西丹池成矿带芒场锡多金属矿成岩成矿研究. 广西大学硕士学位论文.

赵葵东. 2005. 华南两类不同成因锡矿床同位素地球化学及成矿机理研究. 南京大学博士学位论文.

赵葵东, 蒋少涌, 肖红权, 倪培. 2002. 大厂锡多金属成矿流体来源的 He 同位素证据. 科学通报, 47(8): 632~635.

周永章. 1990. 丹池盆地热水硅质岩的沉积地球化学特征. 沉积学报, 8(3): 75~83.

He and Ar isotope characteristics and their genetic implications for the Sn-polymetallic deposits in the Danchi metallogenic belt, northwestern Guangxi

CAI Minghai*, LI Ye, PENG Zhenan, HU Zhishu, HU Pengfei, XIAO Junjie
School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China
* Corresponding author: gxd.xcmh@163.com

Abstract

The Danchi metallogenic belt in northwestern Guangxi is an important non-ferrous metal mining base in south China. He and Ar isotopes of fluid inclusions trapped in pyrite from the Ma'anshan Pb-Zn deposit and the Dashan Sn-Zn deposit of the Mangchang ore field, the Tongkeng Sn-polymetallic deposit of the Dachang ore field, and the Qianzhupo Pb-Zn polymetallic deposit of the Wuxu ore field have been studied in this paper. The results indicate that the $3\text{He}/4\text{He}$ values (0.79~5.32 Ra) of the ore-forming fluid are between those of crustal fluid (0.01~0.05 Ra) and mantle fluid (6~9 Ra); the $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ values (273~349) are close to or slightly higher than the atmospheric eigenvalue (295.5). He and Ar isotopes show that mantle fluid was involved in the mineralization in the area, and the ore-forming fluid was a mixture of mantle fluid, crust-sourced magmatic fluid and saturated atmospheric water. Based on the comprehensive study of Devonian exhalative deposition, granitic intrusion and tectonic characteristics, it is concluded that mantle fluid involved in mineralization is a regional event in the area. Mantle fluid is mainly derived from mantle components rising along NW deep faults during the crust-mantle interaction. The diagenesis and mineralization of Danchi metallogenic belt are the products of the same tectonic-thermal event in the Late Yanshanian period, and belong to the epigenetic hydrothermal filling-metasomatic mineralization.

Key words: He; Ar isotopes; mantle fluid; Sn-polymetallic deposit; northwestern Guangxi