

广西五圩矿田成矿温度变化及找矿方向分析

陈玲^{1,2}, 黄文婷¹, 伍静^{3*}, 张健^{1,2},
梁华英¹, 林书平^{1,2}, 邹银桥^{1,2}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广西大学 资源与冶金学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 五圩矿田位于丹池锡多金属成矿带的南东端, 发育一系列 Zn-Sb-Hg-As 矿床, 具有良好找矿潜力。本文分析了五圩矿田八达 Zn-Sb 矿床、芙蓉厂 Sb 矿床及箭猪坡 Zn-Sb-Pb-Ag 矿床包裹体组成及均一温度和闪锌矿微量元素组成。八达矿床闪锌矿 6 个分析点 Fe 含量在 0.13%~0.27% 之间, 平均为 0.20%, Zn/Cd 比值在 81~158 之间, 平均 103; 箭猪坡矿床闪锌矿 37 个分析点 Fe 含量在 1.18%~7.70% 之间, 平均为 3.61%, 27 个分析点 Zn/Cd 比值在 158~383 之间, 平均 249。箭猪坡矿床闪锌矿的 Fe 含量和 Zn/Cd 比值比八达矿床的高, 显示前者形成温度较高; 矿床矿化石英及闪锌矿流体包裹体测温结果显示: 芙蓉厂矿床的成矿温度主要集中于 160~200 °C, 八达矿床的成矿温度集中于 190~240 °C, 箭猪坡矿床的成矿温度集中于 240~320 °C。闪锌矿微量元素特征及成矿流体包裹体均一温度表明, 从五圩矿田芙蓉厂矿床、八达矿床至其 SSE 方向的箭猪坡矿床, 成矿温度逐渐增高。成矿流体包裹体富含 CO₂、CH₄、沥青质等有机物且均一温度最高达 350 °C 等, 表明五圩矿田成矿流体主要来源于盆地热卤水及混合部分高温流体。这表明五圩矿田深部存在一个高温热源, 其中心位置应位于箭猪坡矿床的 SSE 方向, 而不是过去认为的 NNW 方向区域, 今后应注意箭猪坡矿床 SSE 主向背斜轴部深部找矿工作。

关键词: 微量元素; 流体包裹体; 闪锌矿; 找矿方向; 广西五圩矿田

中图分类号: P59; P612 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)06-0546-10

Ore-forming temperature variation and prospecting target of the Wuxu ore field in Guangxi

CHEN Ling^{1,2}, HUANG Wen-ting¹, WU Jing^{3*}, ZHANG Jian^{1,2}, LIANG Hua-ying¹,
LIN Shu-ping^{1,2} and ZOU Yin-qiao^{1,2}

1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: The Wuxu ore field is tectonically located in the southeast of the Nandan-Hechi tin polymetallic metallogenic belt, and is characterized by a series of Zn-Sb-Hg-As deposits, showing good prospecting potential. We have analyzed composition and temperature of inclusions and composition of trace elements in sphalerites from the Bada Zn-Sb deposit, the Furongchang Sb deposit and the Jianzhupo Zn-Sb-Pb-Ag deposit in the Wuxu ore field. It is found that the Fe content of sphalerites (for 6 samples) from the Bada deposit ranges from 0.13% to 0.27% with an average of about 0.20%, and the Zn/Cd ratios range from 81 to 158 with an average of about 103; the Fe content of sphalerites (for 37 samples) from the Jianzhupo deposit ranges from 1.18% to 7.70% with an average of about 3.61%, and the Zn/Cd ratios rang from 158 to 383 with an average of 249. The Fe content and Zn/Cd ratios of sphalerites from the Jianzhupo deposit are higher than those from the Bada deposit, showing that the former was formed at higher temperatures. The homogeneous temperature of fluid inclusions in mineralized quartz and sphalerites of the ore deposits shows that the Furongchang deposit, the Bada deposit and the Jianzhupo

收稿日期(Received): 2015-05-12; 改回日期(Revised): 2015-07-16; 接受日期(Accepted): 2015-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(41372084); 广西壮族自治区八桂学者专项资金

作者简介: 陈玲(1989-), 女, 博士研究生, 矿床学专业。E-mail: cling890821@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): WU Jing, E-mail: 417534291@qq.com, Tel: +86-771-3232200

deposit were mainly formed in the temperature ranges of 160 °C to 200 °C, 190 °C to 240 °C and 240 °C to 320 °C, respectively. The sphalerite Fe content and Zn/Cd ratios and homogeneous temperature of ore-forming fluid inclusions all show that the mineralization temperature increases from the Furongchang deposit to the Bada deposit and to the Jianzhupo deposit in the Wuxu ore field. The ore-forming fluid inclusions of the three analyzed deposits in the Wuxu ore field are characterized by enrichment of CO₂, CH₄, asphaltene and other organics, suggesting that the ore-forming fluids were derived mainly from formation brine. Some high homogeneous temperature fluid inclusions (up to 350 °C) were found in some of the deposits, suggesting that high temperature fluid was involved in the formation of the deposits in the Wuxu ore field and that the mineralization of the Wuxu ore field was triggered by high temperature sources that occurred in the deep localities of the ore field. Based on that the mineralization temperature increases systematically from the Furongchang deposit in the northwest to the Jianzhupo deposit in the southeast, it is reasonable to conclude that the heat sources that resulted in the mineralization of the Wuxu ore field were located in the southeastern domain of the Jianzhupo deposit and that the anticline axis in the southeastern domain of the Jianzhupo deposit could be the future prospecting target.

Key words: fluid inclusion; sphalerite; prospecting target; the Wuxu ore field in Guangxi

0 引 言

五圩矿田 Pb、Zn、Sb、Ag、As、Hg 等金属矿床发育, 形成铅锌锑多金属矿集区, 引起国内外矿床学界的广泛关注^[1-7]。五圩矿田位于丹池成矿带南部, 其 NW 侧大厂矿田及 SE 侧的大明山矿集区都发现了与岩浆活动有关矿化^[8-14], 因此, 五圩矿田内

虽然未见岩浆岩出露, 但很多学者都认为五圩矿田的形成与岩浆作用有关^[15-21], 并根据航磁资料等推测隐伏岩体位于箭猪坡矿床 NNW 一带(图 1b)。但推测隐伏岩体一带矿床以 Hg-Sb 为主(图 1b), 显示相对更低温矿化元素组合特征, 和推测隐伏岩体没对应关系。本文通过五圩矿田三个矿床流体包裹体测温及闪锌矿微量元素分析, 探讨五圩矿田热源中心, 为该矿田的深部找矿提供理论依据。

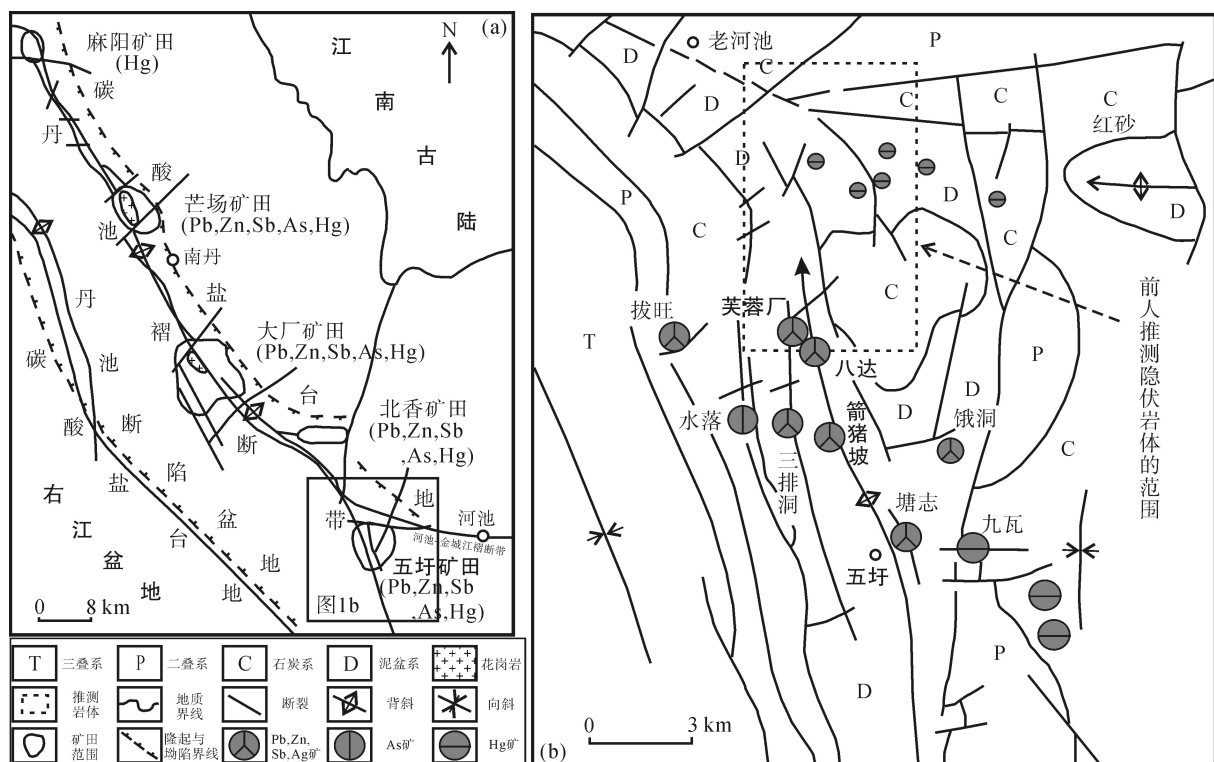


图 1 丹池成矿带构造地质示意图(a)^[21-22]和五圩矿田矿床分布图(b)^[16]

Fig.1 Sketch maps showing the structural geology of the Nandan-Hechi metallogenic belt (a)^[21-22] and the distribution of deposits in the Wuxu ore field (b)^[16]

1 矿田地质特征

五圩矿田位于江南古陆西南缘,右江裂陷盆地东北部边缘, NW 向丹池褶段带与 EW 向河池-金城江褶段带复合部位南侧,河池市西南 20 km 的五圩乡内(图 1a)。区内出露地层从中泥盆统纳标组至中三叠统,其中赋矿围岩主要是中上泥盆统碳质泥岩、泥灰岩夹砂岩,部分泥岩受构造动力作用,发生轻微变质形成板岩。矿田主干构造格架由 NNW 向展布的五圩背斜及一系列 NNW 向的压扭性断裂组成^[23]。五圩背斜两翼地层产状变化大,东翼地层倾角较缓(20°~50°),层间破碎带不发育、西翼地层倾角较陡(60°~85°),层间破碎带发育。矿田内断裂构造主要有 NNW、NE 和 EW 向三组,以 NNW 向断裂最为发育(图 1b)。

五圩矿田主要矿床有水落(As、Hg)、芙蓉厂(Sb、Pb、Zn)、三排洞(Pb、Zn、Sb、Ag)、八达(Zn、Sb)、箭猪坡(Pb、Zn、Sb、Ag)、塘志(Sb)和九瓦(Hg)等。矿床主要分布于五圩背斜西翼轴部,东翼矿化相对较差。五圩矿田主要矿床矿化主要呈脉状充填于断裂破碎带中,成群出现,平行展布。箭猪坡 Zn-Sb-

Pb-Ag 矿床矿化最强,达大型规模。其矿体主要呈陡倾斜脉状产于中泥盆统纳标组泥岩、泥灰岩夹砂岩。一条主矿脉两侧往往发育有 2~3 条平行产出的小矿脉,组成一个脉组,若干脉组形成脉群。单脉或脉组延深有限,一般 50~450 m,但由多个脉组所组成的脉群则有较大延深(> 800 m)。矿脉沿走向尖灭再现、沿倾向尖灭侧现且呈“前列式”展布。走向上,矿体产出标高往南降低^[20]。野外考察发现,箭猪坡矿床经历了多阶段矿化,据穿插关系,箭猪坡矿床矿化可分为下述三个阶段:(1)块状锌锑矿化阶段。该阶段矿化主要发现于 160~190 中段,沿约 330°走向破碎带充填,主要形成块状闪锌矿及辉锑矿的特富矿体,该矿化闪锌矿颗粒相对较粗,而辉锑矿颗粒相对较细,脉石矿物很少;(2)黄铁矿-石英阶段。该矿化阶段分布范围不大,在 190 中段见黄铁矿-石英脉穿过块状闪锌矿-锑矿,而其又被辉锑矿/脆硫锑铅矿-碳酸盐矿化脉穿插。该矿化阶段主要金属矿物为粒度较粗黄铁矿,见少量辉锑矿,脉石矿物主要为石英,含少量碳酸盐(图 2a 和 2b);(3)辉锑矿/脆硫锑铅矿-闪锌矿-碳酸盐阶段。该矿化阶段主要充填于近南北向破碎带中,主要矿物为辉锑矿、闪锌矿及粉红色方解石,见少量石英及黄铁矿,矿化规模

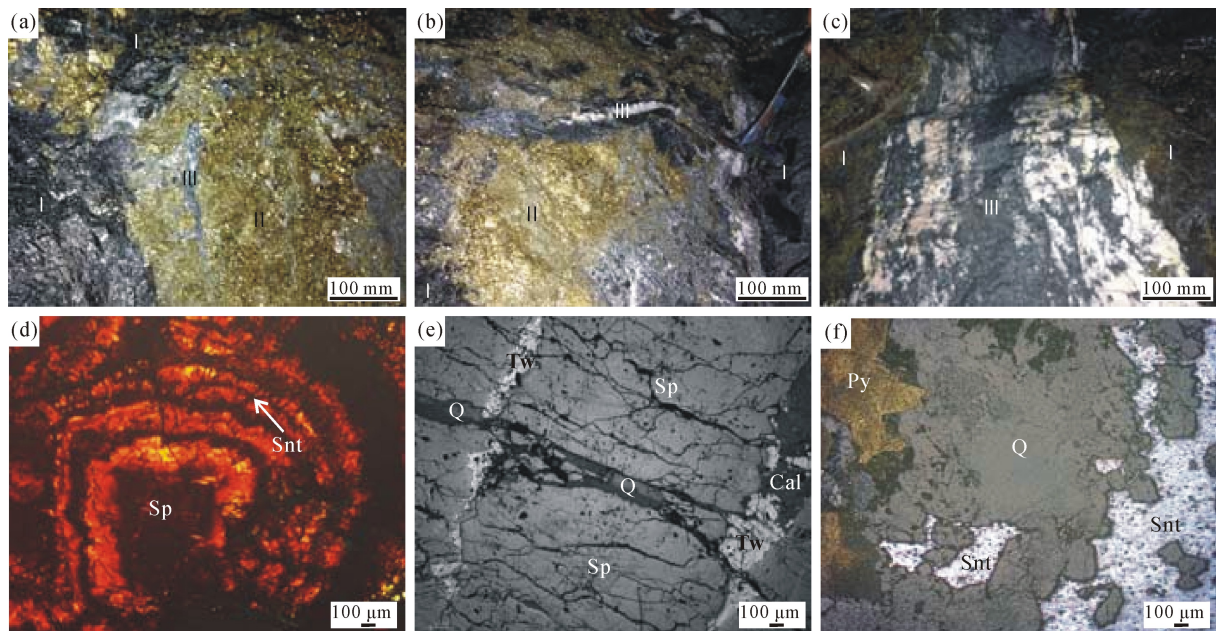


图 2 五圩矿田矿石野外及镜下显微照片

Fig.2 Field photos of the Wuxu ore field and micrographs of ore samples

(a) 箭猪坡矿床黄铁矿-石英脉(II)穿过块状锌锑富矿体(I),黄铁矿-石英脉中见晚期小锑矿脉(III);(b) 箭猪坡矿床 190 中段黄铁矿-石英脉(II)穿过块状锌锑富矿体(I),而被辉锑矿/脆硫锑铅矿-闪锌矿-碳酸盐脉(III)穿插;(c) 箭猪坡矿床 160 中段辉锑矿/脆硫锑铅矿-闪锌矿-碳酸盐脉()穿过块状锌锑富矿体(I);(d) 箭猪坡矿床 160 中段特富矿体闪锌矿呈明暗相间的环带构造,其中含树枝状辉锑矿;(e) 八达矿床特硫锑铅矿±碳酸盐穿插闪锌矿,两者又被晚期石英脉穿插;(f) 芙蓉厂矿床石英-黄铁矿-辉锑矿脉。Sp-闪锌矿;Snt-辉锑矿;Tw-特硫锑铅矿;Py-黄铁矿;Q-石英;Cal-碳酸盐类。

较大,分布较广。在160中段见其穿过第一阶段富锌锑矿化(图2c)。箭猪坡矿床金属矿物成分较复杂,以硫化物为主,并出现大量的硫酸盐矿物,主要有深色闪锌矿、辉锑矿、辉锑铅矿、硫锑铅矿、脆硫锑铅矿、毒砂、黄铁矿、锡石、黝铜矿、含银锑黝铜矿、水锑铅矿等^[18,19,24,25];脉石矿物主要有石英、碳酸盐类矿物(方解石、白云石、菱锰矿等)等。矿石结构主要有他形粒状结构、自形-半自形粒状结构、交代结构、双晶结构、针状结构、环带结构等(图2d),矿石构造主要有脉状、块状、条带状、浸染状等。围岩蚀变较弱,矿脉与围岩的接触部位几乎无蚀变,与成矿关系较密切的主要有硅化、碳酸盐化及黄铁矿化等。

八达 Zn-Sb 矿床矿化主要呈脉状产于中泥盆统纳标组泥岩、泥灰岩夹砂岩。金属矿物主要有浅色闪锌矿、特硫锑铅矿及方铅矿,脉石矿物主要有石英、碳酸盐类矿物(如方解石)等(图2e)。矿石结构主要呈他形粒状结构、交代结构,矿石构造主要呈脉状、块状等。围岩蚀变较弱,与成矿关系较密切的主要有碳酸盐化及硅化等。

芙蓉厂 Sb 矿床矿化主要呈脉状产于中泥盆统纳标组泥岩、泥灰岩夹砂岩。金属矿物主要有辉锑矿(图2f)、辉锑铅矿、脆硫锑铅矿、黄铁矿及少量浅色闪锌矿等,脉石矿物主要有石英、碳酸盐类矿物等。矿石结构主要有他形粒状结构、交代结构等,矿石构造主要有脉状、浸染状、块状等。围岩蚀变较弱,与成矿关系较密切的主要有硅化及黄铁矿化等。

2 样品及分析方法

芙蓉厂矿床分析样品采自辉锑矿-黄铁矿-石英矿脉,地理坐标为24°35'59.4"N, 107°51'43.39"E;八达矿床分析样品采自锑矿-闪锌矿-碳酸盐脉,地理坐标为24°35'26.31"N, 107°51'37.62"E;箭猪坡矿床分析样品分别采自7号矿脉380中段闪锌矿-锑矿-碳酸盐脉(地理坐标为24°35'10.78"N, 107°53'0.5"E)、250中段闪锌矿-锑矿-黄铁矿-碳酸盐脉、190中段及160中段闪锌矿-锑矿-方铅矿特富矿体、59号矿脉-30中段锑矿-闪锌矿-碳酸盐脉(四个中段的地理坐标都为24°35'4.4"N, 107°53'12.4"E)和300号勘探线ZK300孔约700米处的锑矿-闪锌矿细脉。

闪锌矿的化学成分分析在中山大学测试中心JEOL JXA8800R型电子探针仪上完成。分析所采用

的工作条件为:加速电压20 kV,电子束流20 nA,激光束径1 μm,分析误差优于3%。使用美国标样委员会提供的标样对测试结果进行校正。

在显微镜下挑选出包裹体丰富且含不同类型形状规则的流体包裹体进行激光拉曼光谱和显微测温分析。流体包裹体的激光拉曼测试在中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室完成,使用的仪器为精巧型多功能全自动显微激光拉曼光谱仪(HORIBA-JY Xplora)。拉曼分析的实验条件为:固体激光器532 nm/50~100 mW,光栅1800线,共聚焦针孔300 μm,光栅狭缝100 μm,观测物镜×100,曝光时间10~20 s,扫描波数范围100~4000 cm⁻¹。受限于激光的穿透性,较深包裹体无法测量。当用激光拉曼分析矿物(尤其是金属矿物)中包裹体的成分时应尽量选择靠近表面的包裹体。具体分析方法见文献[26]。

流体包裹体的显微测温工作在中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室完成,使用 Linkam THMSG600 型冷热台,测温范围为-196~600 °C,以美国 FLUID INC 公司的合成包裹体标定冷热台温度。测试精度: -100~25 °C 时为±0.1 °C, 25~400 °C 时为±1 °C, 大于 400 °C 时为±2 °C。具体分析方法见文献[27]。

3 分析结果

3.1 闪锌矿化学成分分析

五圩矿田八达矿床和箭猪坡矿床闪锌矿主要元素含量特征见表1。八达矿床6个分析点Zn含量在64.97%~66.49%之间,平均为65.77%;S含量在32.78%~33.52%之间,平均为33.19%;Fe含量在0.13%~0.27%之间,平均为0.20%;Zn/Cd比值在81~158之间,平均103。箭猪坡矿床37个分析点Zn含量在57.06%~65.52%之间,平均为61.80%;S含量在33.05%~35.62%之间,平均为33.85%;Fe含量在1.18%~7.70%之间,平均为3.61%;27个分析点Zn/Cd比值在158~383之间,平均249。从八达矿床到其SSE向的箭猪坡矿床,闪锌矿Fe含量及Zn/Cd比值增加(图3)。

3.2 流体包裹体地球化学特征分析

3.2.1 流体包裹体类型和特征

本文主要开展了五圩矿田芙蓉厂矿床、八达矿

表1 五圩矿田闪锌矿电子探针分析结果(%)
Table 1 EPMA analysis results (%) of sphalerites from the Wuxu ore field

样号	采样地点	Fe	S	Zn	Cd	Total	Zn/Cd	样号	采样地点	Fe	S	Zn	Cd	Total	Zn/Cd
BD-8-3-1		0.26	33.22	65.56	0.81	100.3	81	190-1-4-4		4.37	33.64	61.29	0.32	99.87	193
BD-8-3-2		0.13	32.78	65.98	0.55	99.65	121	190-1-4-5	箭猪坡矿床	4.39	34.29	60.90	0.24	100.4	258
BD-8-3-3		0.14	33.52	66.49	0.42	101.1	158	190-1-4-6	190中段特富	4.46	33.63	60.21	0.19	99.71	310
BD-8-7-5	八达矿床	0.16	33.12	66.15	0.70	100.3	95	190-1-4-7	矿体	3.74	33.48	61.94	0.26	99.55	240
BD-8-7-6		0.23	33.16	64.97	0.79	99.53	83	平均值		4.30	34.08	60.33	0.25	99.84	244
BD-8-7-7		0.27	33.34	65.44	0.78	100.5	84	160-1-4-1	箭猪坡矿床	4.05	33.35	61.44	0.22	99.31	279
平均值		0.20	33.19	65.77	0.68	100.23	103	160-1-4-2	160中段特富	4.09	33.45	61.31	0.19	99.41	328
380-3-1-4		1.29	33.95	65.12	b.d.l.	100.40	-	160-1-4-3		3.76	33.83	61.84	0.19	99.90	332
380-3-1-5		1.47	33.91	65.52	b.d.l.	101.00	-	160-1-4-4		4.52	33.05	60.77	0.21	99.04	292
380-3-1-6	箭猪坡矿床	1.28	33.73	64.56	b.d.l.	99.80	-	160-1-4-5		4.45	33.39	61.14	0.26	99.40	237
380-3-1-7	380中段	1.18	33.62	65.03	b.d.l.	99.94	-	160-1-4-6		4.22	33.48	61.46	0.19	99.45	322
380-3-1-8		1.40	33.76	64.75	b.d.l.	100.10	-	平均值		4.18	33.42	61.33	0.21	99.42	298
380-3-1-9		1.32	33.76	63.62	0.20	99.18	313	-30-1-8-3	箭猪坡矿床	3.45	33.83	62.43	-	99.83	-
平均值		1.32	33.79	64.77	0.20	100.07	313	-30-1-8-4	-30中段	3.61	33.99	61.65	-	99.79	-
250-2-4-5		2.79	33.72	63.04	0.33	99.97	194	-30-1-8-6		3.48	33.90	62.03	-	99.82	-
250-2-4-6		2.43	33.94	61.20	0.39	98.23	158	-30-1-8-10		3.37	34.26	62.27	-	99.93	-
250-2-4-9		2.87	33.62	62.85	0.25	99.71	257	-30-1-8-14		3.54	33.84	62.42	-	99.90	-
250-2-4-11	箭猪坡矿床	2.65	34.62	61.64	0.16	100.3	383	平均值		3.49	33.96	62.16	-	99.85	-
250-2-4-12	250中段	2.41	33.34	63.55	0.30	99.74	210	300-700-1		6.56	33.73	58.85	0.22	99.56	265
250-2-4-1		3.13	33.68	62.59	0.33	99.87	188	300-700-3	箭猪坡钻孔	5.72	33.93	59.56	0.25	99.84	236
250-2-4-2		3.64	35.62	60.04	0.28	100.1	213	300-700-4	ZK300-700m	3.49	34.35	61.86	0.35	100.3	178
平均值		2.85	34.08	62.13	0.29	99.70	229	300-700-6		2.84	33.18	63.30	0.30	99.87	210
190-1-4-1		4.35	34.16	60.29	0.30	99.70	202	300-700-13		6.85	34.45	58.42	0.32	100.2	180
190-1-4-2	见右	4.25	33.31	60.56	0.25	99.31	240	300-700-16		7.70	33.85	57.06	0.28	99.05	205
190-1-4-3		4.31	34.78	60.16	0.21	100.5	289	平均值		5.53	33.92	59.84	0.29	99.81	212

注: b.d.l.表示低于检测限;“-”表示没有数据。

表2 五圩矿田流体包裹体温度和盐度测定结果
Table 2 Microthermometric and salinity data for fluid inclusions from the Wuxu ore field

采样位置	寄主矿物	包裹体类型	大小(μm)	气/液比(%)	均一相	t _h (°C)		NaCl(%)	
						范围(测定数)	峰值(区间)	范围(测定数)	峰值(区间)
芙蓉厂矿床	石英	气液两相+CO ₂ 三相	3~15	5~25	L,个别V	135~286(36)	160~200	1.43~11.15(33)	4.0~5.0
八达矿床	闪锌矿	气液两相	3~22	5~20	L	163~238(21)	190~240	8.55~9.08(6)	8.0~10.0
箭猪坡矿床	石英+闪锌矿	气液两相+CO ₂ 三相	3~15	5~45	L	123~349(142)	240~320	1.43~13.63(68)	5.0~6.0, 7.0~8.0, 9.0~10.0, 12.0~13.0

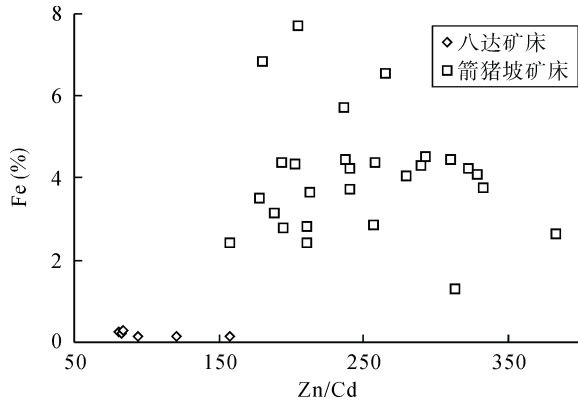


图 3 五圩矿田八达矿床和箭猪坡矿床闪锌矿 Fe-Zn/Cd 关系图

Fig.3 Diagram showing the relationship between Fe contents and Zn/Cd ratios of sphalerites from Bada deposit and Jianzhupo deposit, Wuxu ore field

床和箭猪坡矿床闪锌矿和石英包裹体分析。矿床包裹体发育, 多为暗色 CO₂ 三相包裹体和气液两相包裹体。

芙蓉厂矿床石英包裹体发育, 包裹体长径为 3~15 μm, 形态主要为多边形或不规则形, 呈孤立或

群状分布。依据室温下原生包裹体的物理相态可分为: (1) 气液两相包裹体, 气液比为 10%~40%; (2) 富气相包裹体, 气液比 > 50%, 同一视域可见上述两类包裹体; (3) CO₂ 三相包裹体, 由气相 CO₂、液相 CO₂ 和液相水组成, 气液比为 5%~30% (图 4a)。

八达矿床闪锌矿包裹体较发育。包裹体长径为 3~22 μm, 形态主要为长条形或不规则形, 呈孤立或星散状分布。依据室温下原生包裹体的物理相态可分为: (1) 气液两相包裹体, 气液比为 10%~50% (图 4b); (2) CO₂ 三相包裹体, 由气相 CO₂、液相 CO₂ 和液相水组成, 气液比为 5%~15%; (3) 含子矿物三相包裹体, 由气相、液相和子矿物相组成, 见透明和不透明子矿物, 气液比为 15%~25%。

箭猪坡矿床石英和部分闪锌矿包裹体很发育。包裹体长径为 3~30 μm, 形态主要为椭圆形或长条形, 部分包裹体整体或部分发黑。原生包裹体呈孤立或群状分布。依据室温下原生和假次生包裹体的物理相态可分为: (1) CO₂ 三相包裹体, 由气相 CO₂、液相 CO₂ 和液相水组成, 气液比为 5%~30% (图 4c);

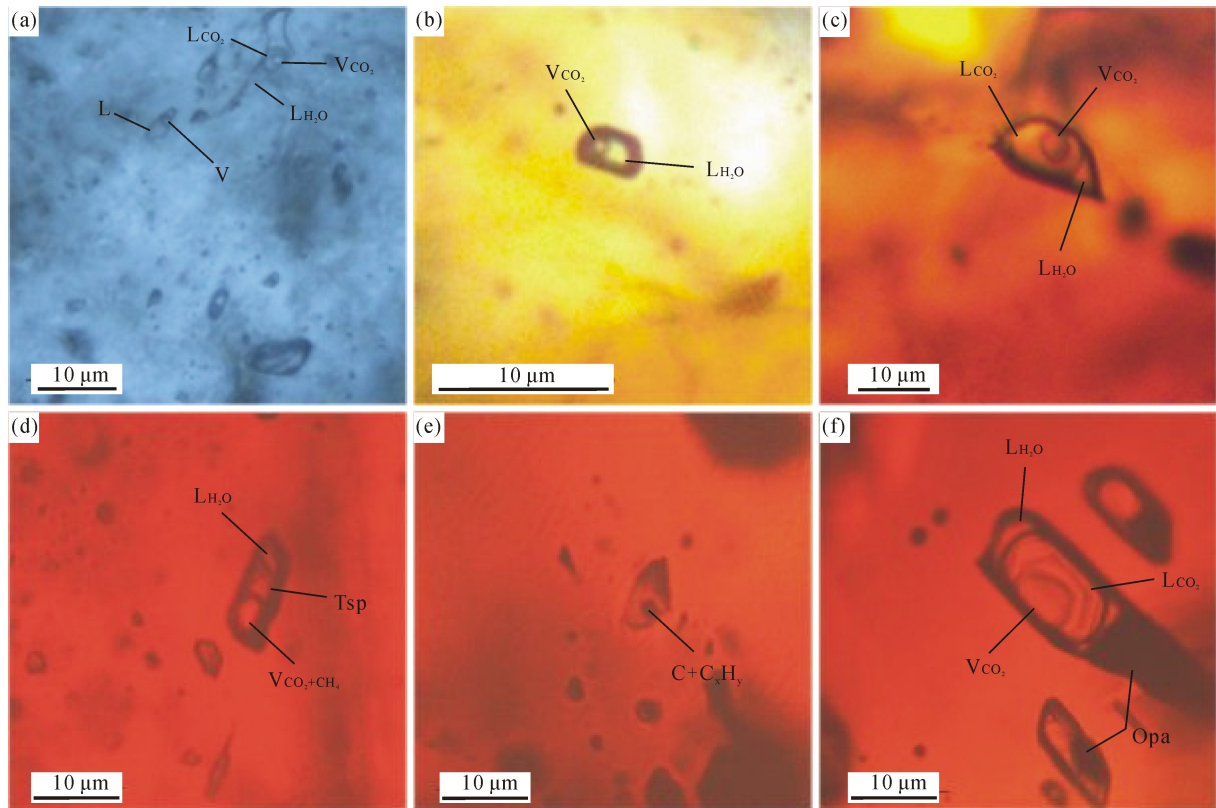


图 4 五圩矿田流体包裹体显微照片

Fig.4 Micrographs of fluid inclusions from the Wuxu ore field

(a) 芙蓉厂矿床石英中 CO₂ 三相包裹体和气液两相包裹体; (b) 八达矿床闪锌矿中气液两相包裹体; (c) 箭猪坡矿床 160 中段闪锌矿中 CO₂ 三相包裹体; (d) 箭猪坡矿床 ZK300-700m 闪锌矿中含透明子矿物三相包裹体; (e) 箭猪坡矿床 -30 中段闪锌矿中部分发黑的气液两相包裹体; (f) 箭猪坡矿床 ZK300-700m 闪锌矿中含不透明子矿物 CO₂ 三相包裹体。Opa-不透明子矿物; Tsp-透明子矿物。

(2) 含子矿物 CO_2 三相包裹体, 由气相 CO_2 、液相 CO_2 、液相水和子矿物组成, 见不透明和透明子矿物, 气液比为 5%~30% (图 4d 和 4f); (3) 气液两相包裹体, 气液比为 5%~45% (图 4e)。

3.2.2 激光拉曼光谱分析

五圩矿田八达矿床和箭猪坡矿床闪锌矿中包裹体的液相成分主要为水, 含少量 C_2H_6 等液态碳氢化合物; 气相成分主要为 CO_2 , 含少量 CH_4 等气相碳氢化合物; 部分暗色包裹体中含石墨和沥青质等有机物^[28-30] (图 5)。

3.2.3 显微测温分析

本研究对五圩矿田芙蓉厂矿床、八达矿床和箭

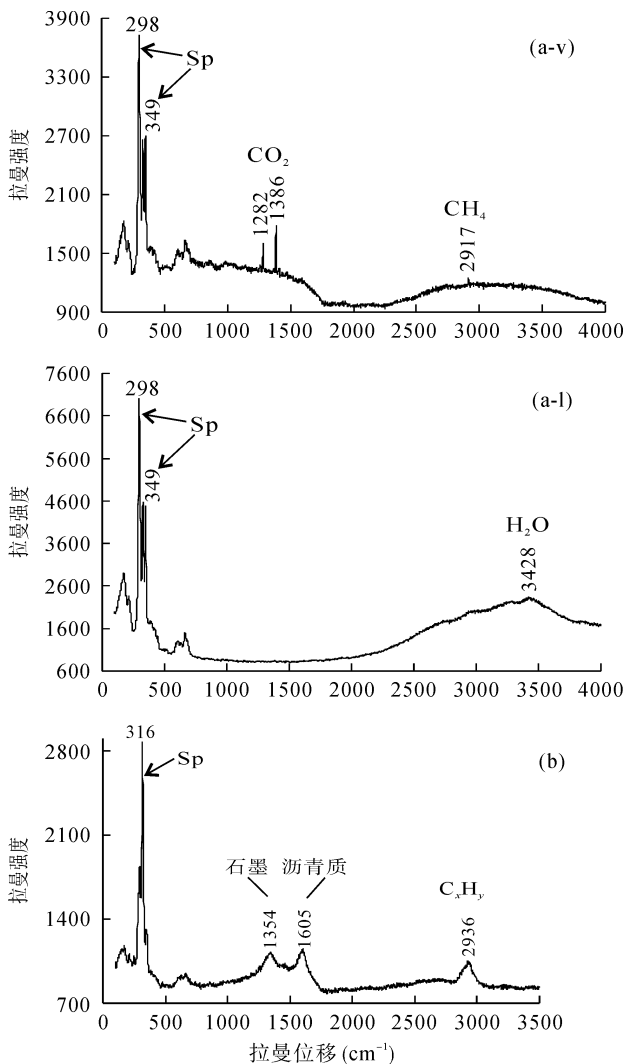


图 5 五圩矿田流体包裹体激光拉曼谱图

Fig.5 Laser Raman spectra of fluid inclusions from the Wuxu ore field (a-v) 箭猪坡矿床 ZK300-700m 闪锌矿中气液两相包裹体(图 3d)气相激光拉曼光谱图; (a-l) 箭猪坡矿床 ZK300-700m 闪锌矿中气液两相包裹体(图 3d)中液相激光拉曼光谱图; (b) 箭猪坡矿床-30 中段闪锌矿中部分发黑的气液两相包裹体(图 3e)中液相激光拉曼光谱图。Sp-闪锌矿。

猪坡矿床闪锌矿和石英中的原生 CO_2 三相包裹体和气液两相包裹体进行了均一温度测定(表 2)。芙蓉厂矿床石英中包裹体的均一温度变化较大, 在 135~286 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 在均一温度-频率直方图上有 3 个峰值, 分别是 170 $^{\circ}\text{C}$ 、230 $^{\circ}\text{C}$ 和 270 $^{\circ}\text{C}$ 。其中, 大多数集中于 160~200 $^{\circ}\text{C}$ 。八达矿床闪锌矿中包裹体的均一温度在 163~238 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 在均一温度-频率直方图上峰值集中于 190~240 $^{\circ}\text{C}$ 。箭猪坡矿床闪锌矿和石英中包裹体的均一温度在 123~349 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 在均一温度-频率直方图上峰值集中于 240~320 $^{\circ}\text{C}$ (图 6)。

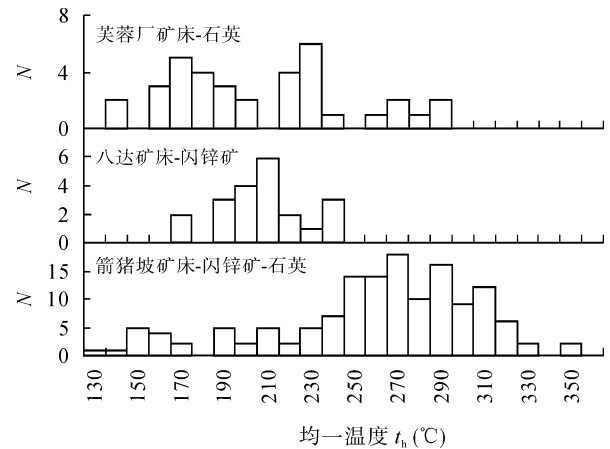


图 6 五圩矿田流体包裹体均一温度直方图

Fig.6 Histograms showing homogenization temperatures of fluid inclusions from the Wuxu ore field

4 讨论

4.1 成矿温度变化分析

前人的研究表明, 闪锌矿的 Fe、Cd 含量及 Zn/Cd 比值可用来指示热液矿床的形成温度^[31-34]。闪锌矿的 Fe 含量及 Zn/Cd 比值越高, 形成温度则越高。五圩矿田八达矿床闪锌矿的 Fe 平均含量为 0.20%, Zn/Cd 平均比值为 103; 箭猪坡矿床闪锌矿的 Fe 平均含量为 3.61%, Zn/Cd 平均比值为 249。箭猪坡矿床闪锌矿的 Fe 含量和 Zn/Cd 比值比八达矿床的高, 表明箭猪坡矿床的形成温度高于八达矿床的。

本研究测得芙蓉厂矿床、八达矿床和箭猪坡矿床流体包裹体的均一温度主要分别集中于 160~200 $^{\circ}\text{C}$ 、190~240 $^{\circ}\text{C}$ 和 240~320 $^{\circ}\text{C}$, 表明五圩矿田从芙蓉厂矿床、八达矿床至其 SSE 方向的箭猪坡矿床成矿温度增高。五圩矿田闪锌矿微量元素特征及成矿流体包裹体均一温度均表明, 从五圩矿田芙蓉厂矿床、八达矿床至其 SSE 方向的箭猪坡矿床, 成矿温度逐渐

增高。

4.2 成矿流体来源分析

本研究测得五圩矿田成矿流体包裹体富含 CO₂、CH₄、沥青质等有机物, 而五圩矿田一带寒武系及泥盆系地层中富含有机质。这说明五圩矿田成矿流体主要来源于地层水或盆地热卤水。我们测得的流体包裹体均一温度表明, 箭猪坡矿床部分包裹体均一温度大于 300 °C, 最高温度可达 349 °C (图 6)。前人工作表明, 与盆地热卤水或循环的大气降水有关矿床的成矿温度多小于 300 °C^[35], 箭猪坡矿床部分包裹体均一温度较高, 在 300~350 °C 之间, 表明五圩矿田有深部高温流体参与了成矿。五圩矿田高温流体既可能和岩浆作用有关, 也可能和变质作用有关。华南地区变质作用多发生在加里东期以前^[36], 虽然目前还没有该矿区矿床形成时代, 但矿田主要矿床产于泥盆系至二叠系地层中, 成矿应发生在加里东期之后; 丹池成矿带北部大厂矿床和燕山晚期岩浆作用(约 90 Ma)^[14]有关, 丹池成矿带南部大明山钨矿也和燕山期岩浆活动有关^[11]。五圩矿田北部大厂矿田和南部大明山矿床都和燕山期岩浆活动有关, 五圩矿田发育高盐度流体包裹体(最高可达 13.6%), 且箭猪坡矿床深部见 Sn 矿化^[21]。这初步支持五圩矿田成矿作用和区内深部岩浆活动有关。

4.3 找矿靶区分析

箭猪坡矿床部分流体包裹体温度较高, 显示矿田深部发育高温热源。前人据航磁异常提出五圩矿田隐伏岩体位于箭猪坡矿床 NNW 一带(图 1b)。五圩矿田箭猪坡矿床 NNW 一带矿床以 Hg-Sb 矿化为主, 显示相对更低温的矿化元素组合特征, 不支持五圩矿田箭猪坡矿床 NNW 一带深部发育隐伏岩体。五圩矿田矿床多位于背斜轴部, 相距不大, 相对低温元素组合矿床主要产于泥盆—石炭系地层中, 而一些相对高温元素组合矿床如拔旺 Pb-Zn-Ag 则产于石炭—二叠系地层中(图 1), 因此, 元素组合差异应不是剥蚀深度差异所致。此外, 箭猪坡矿床垂向上 500 多 m 深度内矿物组合及成矿温度(大多数位于 270~310 °C)变化都不大, 表明矿床成矿温度垂向变化不大, 因此, 即使剥蚀深度有一定的差异, 其温度也变化不大。这进一步表明五圩矿田箭猪坡矿床 NNW 一带矿床形成温度较低。

我们测得闪锌矿微量元素特征及成矿流体包裹

体均一温度表明, 从五圩矿田芙蓉厂矿床、八达矿床至其 SSE 向的箭猪坡矿床, 成矿温度逐渐增高。这表明五圩矿田热源中心应位于箭猪坡矿床的 SSE 方向, 而不是其 NNW 方向区域。前人工作表明, 箭猪坡矿床矿体向南侧伏^[20], 也支持五圩矿田成矿热源中心位于箭猪坡矿床 SSE 方向。考虑到背斜轴部加断裂带为有利于成矿流体聚集的低压区, 因此, 今后的找矿工作应注意箭猪坡矿床 SSE 向背斜轴部一带。

5 结 论

(1) 五圩矿田成矿温度主要在 160~300 °C 之间, 成矿流体富有机质, 显示成矿流体以盆地热卤水或建造水为主, 部分成矿温度大于 300 °C, 最高可达约 350 °C, 表明高温流体参与五圩矿田成矿作用。

(2) 五圩矿田成矿温度从北西的芙蓉厂、八达到南东的箭猪坡逐渐增高, 成矿热源位于箭猪坡矿床 SSE 一带, 而不是过去提出的 NNW 一带, 今后应注意箭猪坡矿床 SSE 主向背斜轴部一带深部找矿工作。

野外工作中得到了五吉矿业公司玉启红总工、广西有色总公司何国朝高工及其团队的大力帮助; 闪锌矿电子探针、包裹体测温和激光拉曼光谱分析得到了赵文霞教授、刘德汉研究员、申家贵高级工程师的热心帮助; 两位评审专家对本文提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] Jankovic S, Mozgova N N, Borodaev Y S. The complex antimony-lead/zinc deposit at Rujevac/Yugoslavia: Its specific geochemical and mineralogical features [J]. Mineral Deposit, 1977, 12: 381-392.
- [2] 张国林, 姚金炎, 谷相平. 中国锑矿床类型及时空分布规律[J]. 矿产与地质, 1998, 12(5): 306-312.
Zhang Guo-lin, Yao Jin-yan, Gu Xiang-ping. Time and spatial distribution regularities and deposit types of antimony in China [J]. Mineral Resour Geol, 1998, 12(5): 306-312 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李关清. 西藏扎西康锑铅锌多金属矿床元素地球化学和同位素地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010.
Li Guan-qing. Element and isotope geochemistry of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn polymetallic deposit, Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [4] 朱黎宽. 西藏扎西康铅锌锑多金属矿床地质特征及流体包裹体研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
Zhu Li-kuan. Studies on geological characteristics and fluid

- inclusions in the Zhaxikang lead-zinc-antimony polymetallic deposit, South Tibet, China [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王永磊, 陈毓川, 王登红, 徐珏, 陈郑辉, 梁婷. 中国锑矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1366-1378.
Wang Yong-lei, Chen Yu-chuan, Wang Deng-hong, Xu Jue, Chen Zheng-hui, Liang Ting. The principal antimony concentration areas in China and their resource potentials [J]. Geol China, 2013, 40(5): 1366-1378 (in Chinese with English abstract).
- [6] 代鸿章, 程文斌, 李关清, 陈翠华, 张兴国, 朱黎宽. 藏南扎西康 Pb-Zn-Sb-Ag 多金属矿床典型矿物标型研究[J]. 矿物学报, 2014, 34(1): 72-82.
Dai Hong-zhang, Cheng Wen-bin, Li Guan-qing, Chen Cui-hua, Zhang Xing-guo, Zhu Li-kuan. A study on the typomorphic characteristics of typical mineral from Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag polymetallic deposit in southern Tibet [J]. Acta Mineral Sinica, 2014, 34(1): 72-82 (in Chinese with English abstract).
- [7] 梁婷, 王登红, 蔡明海, 黑欢, 黄惠明, 郑阳. 桂西北矿集区锡多金属矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2443-2463.
Liang Ting, Wang Deng-hong, Cai Ming-hai, Hei Huan, Huang Hui-ming, Zheng Yang. Metallogenic regularity of tin polymetallic deposit from northwestern ore concentration area, Guangxi [J]. Acta Geol Sinica, 2014, 88(12): 2443-2463 (in Chinese with English abstract).
- [8] 黄民智, 原森民. 广西丹池锡多金属成矿带的带状分布及演化模型[J]. 现代地质, 1995, 9(4): 488-494.
Huang Min-zhi, Yuan Sen-min. Zonality and evolution models of Danchi tin-polymetallic ore belt, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China [J]. Geoscience, 1995, 9(4): 488-494 (in Chinese with English abstract).
- [9] 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 吴德成, 黄惠明. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质评论, 2006, 52(3): 409-414.
Cai Ming-hai, He Long-qing, Liu Guo-qing, Wu De-cheng, Huang Hui-ming. SHRIMP zircon U-Pb dating of the intrusive rocks in the Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi and their geological significance [J]. Geol Rev, 2006, 52(3): 409-414 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李水如, 魏俊浩, 邓军, 谭俊. 广西大明山矿集区钨多金属矿床类型及控矿因素与找矿标志[J]. 中国钨业, 2007, 22(6): 19-24.
Li Shui-ru, Tan Jun, Deng Jun. Ore types of tungsten poly-metallic deposits and prospecting indications [J]. China Tungsten Ind, 2007, 22(6): 19-24 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李水如, 王登红, 梁婷, 屈文俊, 应立娟. 广西大明山钨矿成矿时代及其找矿前景分析[J]. 地质学报, 2008, 82(7): 873-879.
Li Shui-ru, Wang Deng-hong, Liang Ting, Qu Wen-jun, Ying Li-juan. Metallogenic epochs of the Damingshan tungsten deposit in Guangxi and its prospecting potential [J]. Acta Geol Sinica, 2008, 82(7): 873-879 (in Chinese with English abstract).
- [12] 梁婷. 广西大厂长坡-铜坑锡多金属矿床成矿机制[D]. 西安: 长安大学, 2008.
Liang Ting. Study on the metallogenic mechanism of Changpo-Tongkeng tin-polymetallic deposit, Dachang, Guangxi [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [13] 范森葵. 广西大厂锡多金属矿田地质特征、矿床模式与成矿预测[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Fan Sen-kui. The geological characteristics, genesis and metallogenic prediction of Dachang tin-polymetallic ore field, Guangxi [D]. Changsha: Central South University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [14] 梁婷, 王登红, 侯可军, 李华芹, 黄惠明, 蔡明海, 王东明. 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[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1624-1636.
Liang Ting, Wang Deng-hong, Hou Ke-jun, Li Hua-qin, Huang Hui-ming, Cai Ming-hai, Wang Dong-ming. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of Longxianggai pluton in Dachang of Guangxi and its geological significance [J]. Acta Petrol Sinica, 2011, 27(6): 1624-1636 (in Chinese with English abstract).
- [15] 徐新煌, 蔡建明, 陈洪德, 刘文周, 李孝全, 王香成. 广西丹池矿带锡-多金属矿床地质地球化学特征及成矿作用[J]. 成都地质学院学报, 1991, 18(4): 12-25.
Xu Xin-huang, Cai Jian-ming, Chen Hong-de, Liu Wen-zhou, Li Xiao-quan, Wang Xiang-cheng. Geological and geochemical characteristics and mineralizing process of the Dan-chi tin-polymetallic mineralized belt, Guangxi [J]. J Chengdu Colleg Geol, 1991, 18(4): 12-25 (in Chinese with English abstract).
- [16] 蔡建明, 徐新煌, 李保华. 五圩多金属矿田包裹体地球化学特征研究[J]. 成都理工学院学报, 1995, 22(1): 69-77.
Cai Jian-ming, Xu Xin-huang, Li Bao-hua. A study of the geochemical characteristic of inclusions in the Wuxu polymetallic ore field [J]. J Chengdu Inst Technol, 1995, 22(1): 69-77 (in Chinese with English abstract).
- [17] 蔡建明, 徐新煌, 刘文周. 广西五圩矿田多金属矿床的成矿特征及物质来源[J]. 矿物岩石, 1995, 15(3): 63-68.
Cai Jian-ming, Xu Xin-huang, Liu Wen-zhou. Metallogenic characteristics and the source of ore-forming materials of the polymetallic deposits in the Wuxu ore field [J]. J Mineral Petrol, 1995, 15(3): 63-68 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王瑞湖. 桂中凹陷周缘铅锌锡多金属矿床的界面成矿与找矿预测研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
Wang Rui-hu. Study on the metallogenesis in the geological surface of Pb-Zn-Sn polymetallic deposits and their prospecting prognosis in the middle Guangxi depression [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王东明. 广西丹池成矿带锑矿成矿特征及成因探讨[D]. 西安: 长安大学, 2012.

- Wang Dong-ming. A study on the characteristic and origin of the antimony deposit in Danchi metallogenic belt, Guangxi [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [20] 蔡明海, 赵广春, 郑阳, 王显彬, 郭腾飞, 刘虎. 桂西北丹池成矿带控矿构造样式[J]. 地质与勘探, 2012, 48(1): 68-75. Cai Ming-hai, Zhao Guang-chun, Zheng Yang, Wang Xian-bin, Guo Teng-fei, Liu Hu. Ore-controlling structural styles of the Nandan-Hechi metallogenic belt in Northwestern Guangxi [J]. Geol Explor, 2012, 48(1): 68-75 (in Chinese with English abstract).
- [21] 梁婷, 王登红, 蔡明海, 范森葵, 余阳先, 韦可利, 黄惠明, 郑阳. 桂西北丹池成矿带主要金属矿床成矿特征及成矿规律[J]. 矿床地质, 2014, 33(6): 1171-1192. Liang Ting, Wang Deng-hong, Cai Ming-hai, Fan Sen-kui, Yu Yang-xian, Wei Ke-li, Huang Hui-ming, Zheng Yang. Metallogenic characteristics and ore-forming regularity of metallic deposits along Nandan-Hechi metallogenic belt in northeastern Guangxi [J]. Mineral Deposits, 2014, 33(6): 1171-1192 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王思源, 潘其云, 赵兴元, 魏鹏寿, 卫冰洁, 辛建荣, 罗学常, 刘刚. 芒场层控型锡多金属矿[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1990: 1-218. Wang Si-yuan, Pan Qi-yun, Zhao Xing-yuan, Wei Peng-shou, Wei Bing-jie, Xin Jian-rong, Luo Xue-chang, Liu Gang. Mangchang Strata-Bound Tin-multimetal Deposits [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1990: 1-218 (in Chinese with English abstract).
- [23] 章程. 广西河池五圩矿田构造应力场划分及力源探讨[J]. 广西地质, 2000, 13(2): 7-10. Zhang Cheng. Study on the stages and force sources of tectonic stress field in Wuxu ore area, Hechi city, Guangxi [J]. Guangxi Geol, 2000, 13(2): 7-10 (in Chinese with English abstract).
- [24] 张如柏, 龚夏生, 张玉玉, 王自友. 广西五圩锡矿床的水锡铅矿及其物种归属[J]. 矿物学报, 1999, 19(4): 459-464. Zhang Ru-bo, Gong Xia-sheng, Zhang Yu-yu, Wang Zi-you. Bindheimite from the antimony ore deposit oxidization zone, Wuxu, Guangxi [J]. Acta Mineral Sinica, 1999, 19(4): 459-464 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王自有, 王型珍. 广西五圩锡矿床中含银锑黝铜矿[J]. 矿物岩石, 2000, 20(2): 5-7. Wang Zi-you, Wang Xing-zhen. Ag-antimony fahlore from antimony ore deposit of Wuxu, Guangxi [J]. J Mineral Petrol, 2000, 20(2): 5-7 (in Chinese with English abstract).
- [26] 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 闵育顺, 周秦, 程鹏, 申家贵. 固体有机质拉曼光谱参数计算样品热演化程度的方法与地质应用[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1228-1241. Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, Min Yushun, Zhou Qin, Cheng Peng, Shen Jiagui. Sample maturation calculated using Raman spectroscopic parameters for solid organics: methodology and geological applications [J]. Chinese Sci Bull, 2013, 58(13): 1228-1241 (in Chinese).
- [27] Jiang Y H, Niu H C, Bao Z W, Li N B, Shan Q, Yang W B. Fluid evolution of the Tongkuangyu porphyry copper deposit in the Zhongtiaoshan region: Evidence from fluid inclusions [J]. Ore Geol Rev, 2014, 63: 498-509.
- [28] Frezzotti M L, Tecce F, Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis [J]. J Geochem Explor, 2012, 112: 1-20.
- [29] Burke E A J. Raman microspectrometry of fluid inclusions [J]. Lithos, 2001, 55: 139-158.
- [30] 刘德汉, 卢焕章, 肖贤明. 油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 2007: 1-267. Liu De-han, Lu Huan-zhang, Xiao Xian-ming. Petroleum Inclusions and Its Application in Petroleum Exploration and Development [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2007: 1-267 (in Chinese).
- [31] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1-548. Liu Ying-jun, Cao Li-ming, Li Zhao-lin, Wang He-nian, Chu Tong-qing, Zhang Jing-rong. Element Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-548 (in Chinese).
- [32] 刘铁庚, 叶霖, 周家喜, 王兴理. 闪锌矿中的 Cd 主要类质同象置换 Fe 而不是 Zn [J]. 矿物学报, 2010, 30(2): 179-184. Liu Tie-geng, Ye Lin, Zhou Jia-xi, Wang Xing-li. Cd primarily isomorphously replaces Fe but not Zn in sphalerite [J]. Acta Mineral Sinica, 2010, 30(2): 179-184 (in Chinese with English abstract).
- [33] 刘铁庚, 叶霖, 周家喜, 邵树勋. 闪锌矿的 Fe、Cd 关系随其颜色变化而变化[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1457-1468. Liu Tie-geng, Ye Lin, Zhou Jia-xi, Shao Shu-xun. The variation of Fe and Cd correlativity in sphalerites with the variation of the mineral color [J]. Geol China, 2010, 37(5): 1457-1468 (in Chinese with English abstract).
- [34] 袁波, 毛景文, 闫兴虎, 吴越, 张锋, 赵亮亮. 四川大梁子铅锌矿成矿物质来源与成矿机制: 硫、碳、氢、氧、锶同位素及闪锌矿微量元素制约[J]. 岩石学报, 2014, 30(1): 209-220. Yuan Bo, Mao Jing-wen, Yan Xing-hu, Wu Yue, Zhang Feng, Zhao Liang-liang. Sources of metallogenic materials and metallogenic mechanism of Daliangzi ore field in Sichuan province: Constraints from geochemistry of S, C, H, O, Sr isotope and trace element in sphalerite [J]. Acta Petrol Sinica, 2014, 30(1): 209-220 (in Chinese with English abstract).
- [35] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第1卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1-354. Tu Guang-zhi. Stratabound Ore Deposit Geochemistry of China (Vol. 1) [M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-354 (in Chinese).
- [36] 钟铿, 李志才, 李明声. 广西区域地质梗概[J]. 广西地质, 1984, 1(1): 20-30. Zhong Keng, Li Zhi-cai, Li Ming-sheng. Regional geological synopsis of Guangxi province [J]. Guangxi Geol, 1984, 1(1): 20-30 (in Chinese).