

文章编号: 1000-4734(2015)02-0136-11

江西冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田闪锌矿矿物化学特征及赋矿铁锰碳酸盐层成因背景制约

齐有强¹, 胡瑞忠¹, 李晓峰¹, 冷成彪¹, 刘燊¹, 武丽艳¹, 刘瑞^{1,2}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田发育 2 类矿体, 即花岗斑岩体内大脉状、细脉浸染状矿体和火山旋回内层状矿体, 引起众多学者重视。但与大脉状、细脉浸染状矿体有关的花岗斑岩与层状矿体的关系、层状矿体赋矿层铁锰碳酸盐岩层成因背景、2 类矿体间金属硫化物的成分差异等问题尚未引起足够关注。本文选取冷水坑矿田内金属储量最大的下鲍矿床, 对一条横穿花岗斑岩及层状矿体的剖面进行了重点考察研究, 对其元素含量及比值的变化特征进行深入讨论, 进而对 2 类矿体内闪锌矿矿物化学进行了对比研究。花岗斑岩及层状矿体野外接触关系清晰, 未出现渐变特征。二者元素含量及比值差异明显, 花岗斑岩具有更高的 Al、Ba、Sr、K、Na 含量, 铁锰碳酸盐岩层则具更高 Ag、Fe、Mn、Zn、Pb、Mg 含量。铁锰碳酸盐岩层元素化学特征表明其沉积成因, 并未经历规模较大的热液交代作用, 形成背景为火山-沉积有关的陆相深湖盆。对大脉矿体及层状矿体内发育的闪锌矿进行了电子探针分析, 闪锌矿总体 w(S) 32.05%~33.81%, 平均 33.02%; w(Zn) 53.51%~63.79%, 平均 59.38%; w(Fe) 变化范围较大 (2.02%~12.42%), 2 种矿体间差异显著, 层状矿体中闪锌矿 w(Fe) 含量 2.02%~7.69%, 平均 4.17%, 大脉状矿体闪锌矿 w(Fe) 8.02%~12.42%, 平均 9.49%。层状矿体赋存于铁锰碳酸盐岩层内, 但矿体内闪锌矿 Fe、Mn 含量却低于大脉状矿体中的闪锌矿。综合分析认为, 2 种矿体的 Fe、Mn、Pb、Zn 元素在成矿相关岩浆体系内, 可能经历了不同物理化学条件 (流体成分、温度、压力、pH 值等) 的影响, 造成成矿相关岩浆体系的差异。

关键词: 大脉矿体; 层状矿体; 铁锰碳酸盐岩; 闪锌矿; 冷水坑; 赣杭构造带

中图分类号: P579; P611

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2015.02.005

作者简介: 齐有强, 1982 年生, 博士, 副研究员, 地球化学专业. E-mail: qiyouqiang@vip.gyig.ac.cn

Mineral chemical characteristics of sphalerite and genetic constraints of iron and manganese carbonate in Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore deposit, Jiangxi Province, China

QI You-qiang¹, HU Rui-zhong¹, LI Xiao-feng¹, LENG Cheng-biao¹, LIU Shen¹, WU Li-yan¹, LIU Rui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China)

Abstract: The Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore deposit contains big vein ore bodies, veinlet-dissemination ore bodies and bedded ore bodies, which has attracted the attention of many many researchers. However, the relationship between two ore body types, especially the relationship between granite porphyry veins and bedded ore bodies, as well as the genesis of the iron and manganese carbonate rock formation in which the bedded ore bodies occur, and the reasons for differences in sulphide compositions between the two ore bodies remain ambiguous. This paper focuses on the Xiabao Ag-Pb-Zn ore deposit, which is the largest in the Lengshuikeng ore deposit. Samples were taken along a section that crosses the granite porphyry veins and the bedded ore body. Subsequently, the chemical characteristics of sphalerite in both ore bodies were analysed by

收稿日期: 2014-07-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB416705); 国家自然科学基金项目 (批准号: 40903018); 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室领域前沿及十二五项目群 (SKLOGD-ZY125-05); 中国科学院“西部之光”

using electron microprobe analysis. It is not the gradual feature in field contact area between granite porphyry and bedded ore body. The chemical content and ratios of various elements show obvious differences between the two ore bodies. Granite porphyry veins have higher Al, Ba, Sr, K and Na content, whereas bedded ore bodies occurring in iron and manganese carbonate have higher Ag, Fe, Mn, Zn, Pb and Mg content. The Iron and manganese carbonate rock displays chemical characteristics indicating sedimentary origin without having undergone larger-scale hydrothermal metasomatism. These findings indicate that the cause of formation is likely a volcanic-sedimentary deep-lake-basin related to the continental facies. The microprobe analysis also examined other chemical characteristics of sphalerite samples from both ore bodies. Sulphur content of sphalerite ranges from 32.05% to 33.81% with a mean of 33.02%, while the corresponding Zn content ranges from 53.51% to 63.79% with a mean of 59.38%. Iron content showed a larger range (2.02%—12.42%), exposing significant difference between the two ore bodies. The Fe content of sphalerite in the bedded ore body ranges from 2.02% to 7.69% with a mean of 4.17%. However, sphalerite in the big vein ore deposit has a much higher Fe content, ranging from 8.02% to 12.42% with mean of 9.49%. Although the bedded ore body occurs in the iron and manganese carbonate rock, the sphalerite has a much lower Fe and Mn content than that found in the big vein ore body. The elements Fe, Mn, Pb and Zn within the magmatic system with respect to the mineralization process, may have been influenced by different physical and chemical conditions (e.g. temperature, pressure, pH, and so on) resulting in mineralization differences related to the magmatic system.

Keywords: big vein ore body; bedded ore body; iron and manganese carbonate; sphalerite; Lengshuikeng; Gan-Hang tectonic belt

冷水坑银铅锌矿田位于我国江西省贵溪市, 构造上位于扬子板块与华夏板块拼接带南侧, 即赣杭构造带南翼, 武夷隆起带银多金属成矿带北段(图1)。矿田在区域上受华南褶皱系赣中南褶皱上的鹰潭-安远深大断裂及鹰潭-瑞昌断裂控制。矿田矿化以银为主, 共生铅、锌, 伴生镉、金、铜、硫、铁、锰的多金属矿田, 是我国已知最大的隐伏银矿田, 已探明的银、铅、锌储量都达到特大型规模, 具有重要的研究意义。冷水坑矿田包括银路岭、鲍家、银珠山、下鲍、银坑、营林、小源7个矿床。冷水坑矿田具有独特的成矿特色, 既有花岗斑岩内赋矿矿体(主要为大脉状、细脉浸染状矿体), 也有层状矿体(部分学者称为火山沉积-热液改造型矿床、层控叠加型、层控叠生型矿床或层状改造型矿床^[1-4])。

冷水坑矿区从发现至今, 众多学者开展了大量研究, 涉及地质特征、矿床特征、矿化特点与含矿性、围岩蚀变、成岩成矿年代学、岩石地球化学和流体包裹体等方面^[3-4,5-15]。矿床成因类型经历了“脉带型”铅锌矿、斑岩型铅锌矿、斑岩型银矿、层控叠生型银矿等几个阶段。随着研究逐渐深入, 与大脉状、细脉浸染状矿体有关的花岗斑岩与层状矿体的关系尚不清晰; 在2种产状矿体中皆产出的金属矿物(闪锌矿、方铅矿), 矿物间元素含量的异同性尚未引起足够重视。此外, 层状矿体的重要赋矿层-铁锰碳酸盐层的成因背景尚不明确, 在遭受热液改

造程度上还存在争议^[2]。

本文在详细的野外地质调查基础上, 对金属储量最大的下鲍矿床内横穿花岗斑岩及层状矿体的一条剖面进行了元素地球化学研究, 以探讨大脉状矿体赋矿围岩-花岗斑岩与层状矿体的相互关系, 进而对铁锰碳酸盐层的成因背景进行了探讨; 同时对矿田内2种矿体中广泛发育的闪锌矿进行电子探针分析, 对其矿物化学特征进行了对比研究。

1 矿田地质

1.1 地层

研究区基底地层是震旦系变质岩, 为一套巨厚的泥砂质夹火山碎屑物的复理石建造。矿区主要为上震旦统老虎塘组。盖层主要为上侏罗-下白垩统的打鼓顶组及鹅湖岭组。打鼓顶组为晶屑凝灰岩夹铁锰含矿层、安山岩、角砾安山岩及凝灰质粉砂岩、沉凝灰岩。鹅湖岭组为晶屑凝灰岩、熔结凝灰岩并夹铁锰含矿层、凝灰质粉砂岩及流纹岩。打鼓顶组(下段)及鹅湖岭组(下段)流纹质晶屑凝灰岩分别为层状型银铅锌矿的主要赋矿围岩。鹅湖岭组中段流纹岩及上段熔结凝灰岩均不含矿。研究区局部还分布有下石炭统梓山组碎屑岩, 为灰白色石英细砂岩、砂岩、砂砾岩及紫红色粉砂岩, 间夹薄层碳质页岩。第四系主要伴随河流发育。

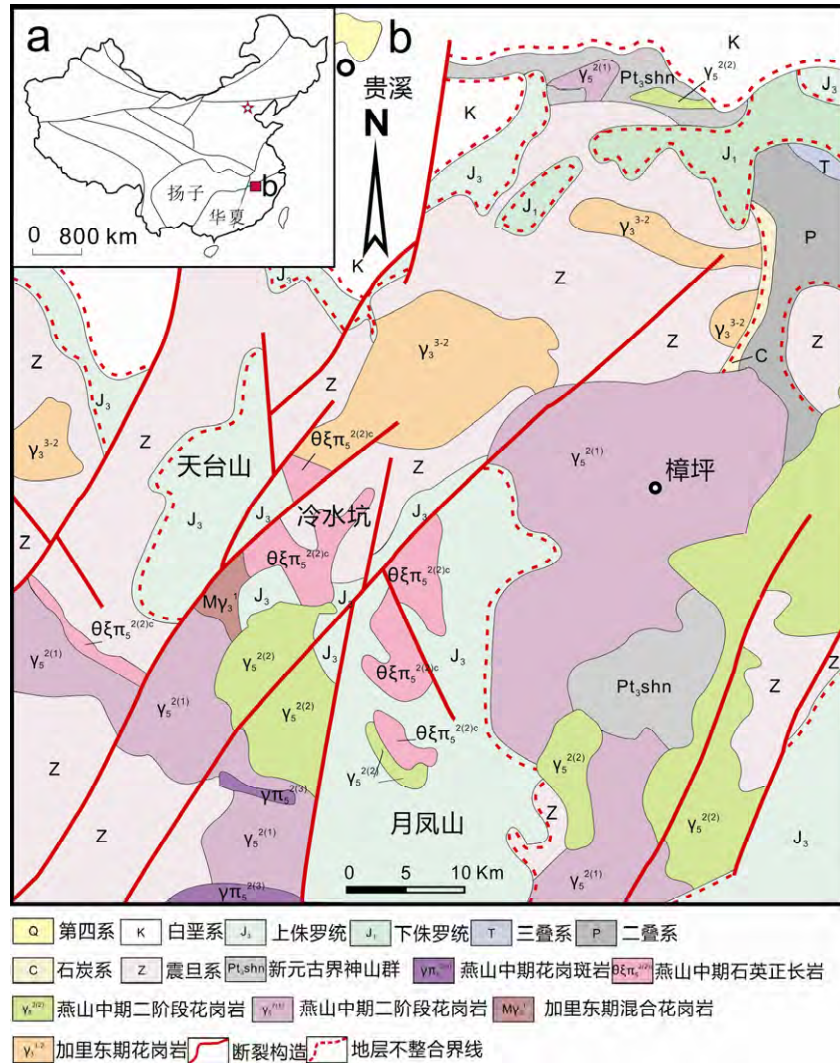


图1 冷水坑矿田大地构造背景 (a) 及区域地质图 (b) (底图修改自王长明等, 2011^[2])
 Fig. 1. Tectonic map (a) and regional geology map (b) of Lengshuikeng ore field (after Wang, et al., 2011^[2]).

1.2 构造

冷水坑矿田在区域构造上受赣杭构造带深断裂及鹰潭—安远大断裂控制。矿田范围内断裂构造发育的方向,大致有近南北、北北东、北东、北东东、近东西和北西向几组。以东北向断裂占绝对优势,主要为矿田南东侧的 F₁ 断裂和矿田中部的 F₂ 断裂 (图 2), 为矿田主要控岩控矿构造。F₁ 断裂走向北东, 倾向北西, 倾角 50°~75°。总体为逆断层, 具有先压后扭再张、以压 (扭) 为主的活动特征^[5]。F₁ 控制了区域火山盆地的边界, 是冷水坑矿田重要的导岩导矿构造。冷水坑矿田处于 F₁ 断裂的上盘 (北西盘), 到目前为止下盘 (南东盘) 尚未发现工业矿体。F₂ 断裂为区域推覆构造, 使震旦系上统变质岩被推覆至上侏罗-下白垩统火山岩之上。总体走向北东, 倾向北西。断裂产状从浅部至深部, 呈

断坪-断坡-断坪-断坡状变化。F₂ 断裂及其派生次级断裂、裂隙构造为重要容矿、储矿空间^[5]。

层间断裂破碎带主要发育在矿区深部上侏罗-下白垩统火山碎屑岩夹铁锰碳酸盐岩、硅质岩等层位中。层间断裂破碎带为区内重要的控矿储矿构造, 矿田内层状铁锰碳酸盐银铅锌矿体即赋存于其中。

1.3 岩浆岩

冷水坑矿田主要岩浆岩分布见图 2。矿田岩浆活动主要发育在加里东期、燕山中晚期, 其中以燕山中期岩浆活动最为强烈。加里东中晚期岩浆岩主要为混合花岗岩、花岗伟晶岩等。燕山中期主要为浅成-超浅成的侵入岩体, 岩性主要有花岗斑岩及石英正长斑岩。花岗斑岩与成矿关系密切, 属高钾钙碱性岩石系列 S 型花岗岩^[10], 存在绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化、硅化等多种蚀变矿化;

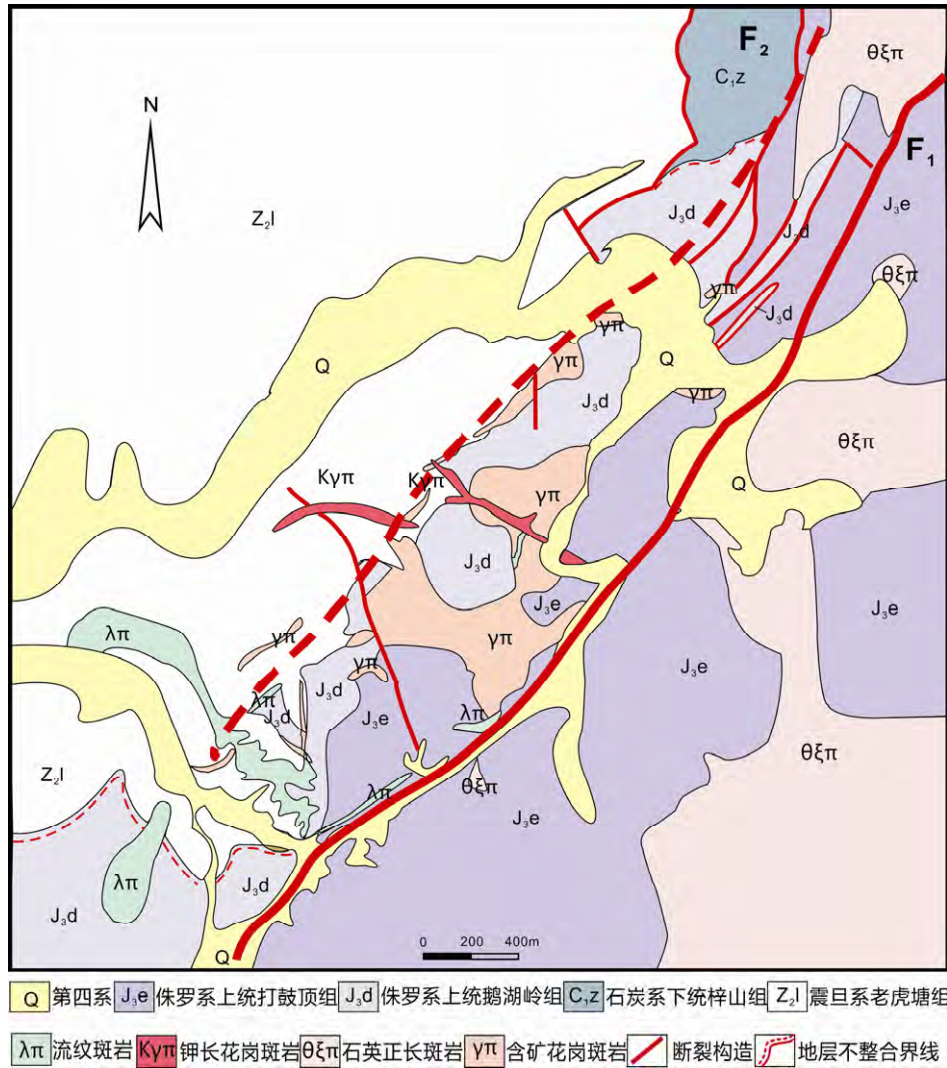


图2 冷水坑矿田区域地质图 (底图修改自王长明等, 2011^[2])
 Fig. 2. Geological sketch map of Lengshuikeng ore field (after Wang Changming et al., 2011^[2]).

石英正长斑岩出露于矿区北东部和南东部, 岩体的出露位置距矿体较远。燕山晚期则主要形成流纹斑岩和钾长花岗斑岩, 其岩体规模较小, 主要呈岩脉、岩墙、岩瘤或岩盆产出, 燕山晚期岩脉切割了较早 (燕山中期) 的岩脉。尤其流纹斑岩出露于矿区西南部, 属成矿后侵入体, 对矿体有一定破坏作用。

1.4 矿床地质

冷水坑矿田按照矿化特点与成矿作用的不同, 分为斑岩体内大脉-细脉浸染状和层状 2 种矿体。大脉-细脉浸染状矿体多在花岗斑岩及其接触带内, 与花岗斑岩的分布相依, 而层状矿化位于打鼓顶组及鹅湖岭组火山岩地层内, 隐伏在矿田深部 (图 3)。两类矿床的主要矿化特征列于表 1。

大脉-细脉浸染状矿体主要分布在银路岭、鲍家、银珠山 3 个矿区 (图 4)。从浅至深划分为银

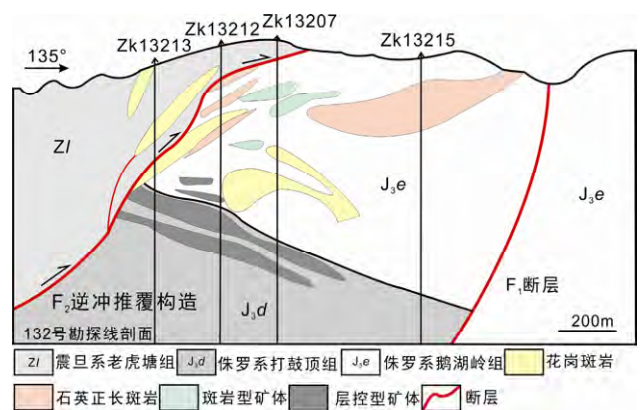


图3 冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田 132 号勘探线剖面 (据江西省地质矿产勘查开发局 912 地质队, 1997 修改)
 Fig. 3. Section map of line 132 of Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field (after 912 Geological Team, Jiangxi Provincial Bureau of Geological Exploration & Development, 1997).

表 1 冷水坑铅锌矿特征

Table 1. Characteristics of Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field

项 目	斑岩型矿床	火山沉积-热液改造型矿床
代表性矿床	银路岭、鲍家、银珠山	下鲍、银坑、营林、小源
矿床成因类型	中生代陆相火山-次火山岩型矿床	中生代陆相火山-次火山岩型矿床
成矿地质环境	武夷隆起北西部, 中生代陆相火山断陷盆地边缘, 有相对较封闭的次一级内陆湖盆	武夷隆起北西部, 中生代陆相火山断陷盆地边缘, 有相对较封闭的次一级内陆湖盆
矿床定位时间	中生代成矿	中生代成矿
矿床围岩	花岗斑岩体内带及接触带附近	火山碎屑岩-碳酸盐岩、硅质岩建造中
矿体形态	透镜状	似层状、规则透镜状
矿石类型	银铅锌矿石、铅锌矿石、铜矿石	铁锰银铅锌矿石、铁(锰)银铅锌矿石
矿石矿物	黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、螺状硫银矿、自然银	白云石、石英、碧玉
脉石矿物	石英、钾长石、斜长石、绿泥石、绢云母	铁锰碳酸盐矿物、磁铁矿、赤铁矿、闪锌矿、方铅矿、螺状硫银矿、自然银等
矿体结构	细中粒半自形、它形粒状结构, 交代结构	铁锰碳酸盐矿物的鲕状、细粒它形粒状结构、细中粒半自形、它形粒状结构, 交代结构
矿石构造	细脉浸染状、脉状构造为主	块状构造、细脉浸染状、脉状构造
围岩蚀变	面型绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化及黄铁矿化、硅化等	碳酸盐化、弱绢云母化及线型绿泥石化等蚀变
主成矿元素	Ag-Pb-Zn-Cd-Cu-Au	Ag-Pb-Zn-Cd-Au
成矿方式	次火山期后浅成-超浅成中温热液交代	火山沉积期后热液-次火山气液交代充填

铅锌矿体、铜矿体、金矿体, 以银铅锌矿体为主, 铜、金矿体零星分布。矿体呈规则透镜状产于花岗斑岩前缘带、主体带及接触带附近, 部分产于岩体近根部带及外带火山岩中, 产状与花岗斑岩产状一致, 走向北东, 倾向北西, 倾角 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ (图 3)。沿赋矿岩体倾斜方向近根部带-主体带-前缘带和水平方向的内带-接触带-外带火山岩, 依次产出绿泥石-绢云母化带中的铜矿体、绢云母-碳酸盐化-硅化带中的铅锌矿体和碳酸盐-绢云母化带中的银矿体。

层状矿体主要发育在下鲍、银坑、营林、小源 4 个矿区 (图 4)。由打鼓顶组、鹅湖岭组含铁锰碳酸盐岩层组成, 前人认为火山期后成矿热液交代叠加成矿^[2]。矿体呈似层状、透镜状产出, 产状变化与火山岩及含矿层产状变化相一致, 走向北东, 倾向南东, 倾角 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 尤以下鲍矿区的 A7 矿体最具规模 (图 3), 矿体长 $100\sim 650$ m, 倾向延伸 $70\sim 600$ m, 平均厚度 $1.0\sim 17.1$ m, 银平均品位 200×10^{-6} 左右。铁锰赋矿层是由长英质火山角砾岩、铁锰碳酸盐岩、白云岩、硅质岩组成, 夹有晶屑凝灰岩组成, 呈层状、复层状或互层状产于火山岩中, 具良好成层性及与火山岩地层整合的特点, 而与花岗斑岩内大脉-细脉浸染状矿体关系不明确。铁锰矿体的矿物组成主要为铁锰碳酸盐矿物 ($25\%\sim 80\%$)、磁铁矿 ($8\%\sim 12\%$), 其次为含水石英、白云石、碧玉等。

矿石主要呈自形晶结构、它形晶结构及压碎充填交代结构 (图 5), 以浸染状、脉状及块状构造

为主, 少量呈角砾状及条带状产出。矿石矿物主要有银矿物及银金矿物, 硫化物及氧化物 3 大类, 为辉银矿、深红银矿及自然银、自然金、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、赤铁矿等, 脉石矿物主要为石英。

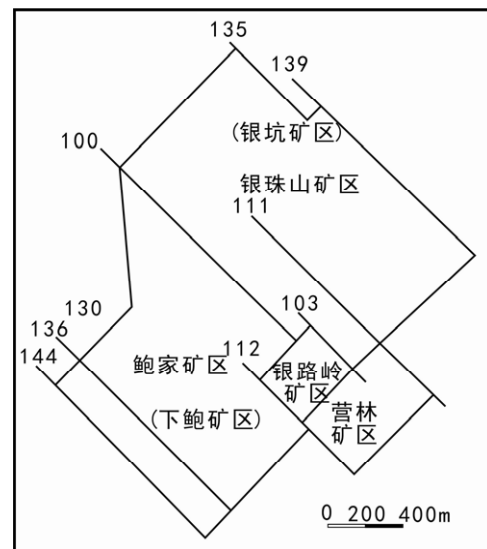


图 4 冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田矿区位置示意图 (据江西省地质矿产勘查开发局 912 地质队, 1997 修改)
Fig. 4. Sketch map of Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field (after 912 Geological Team, Jiangxi Provincial Bureau of Geological Exploration & Development, 1997).

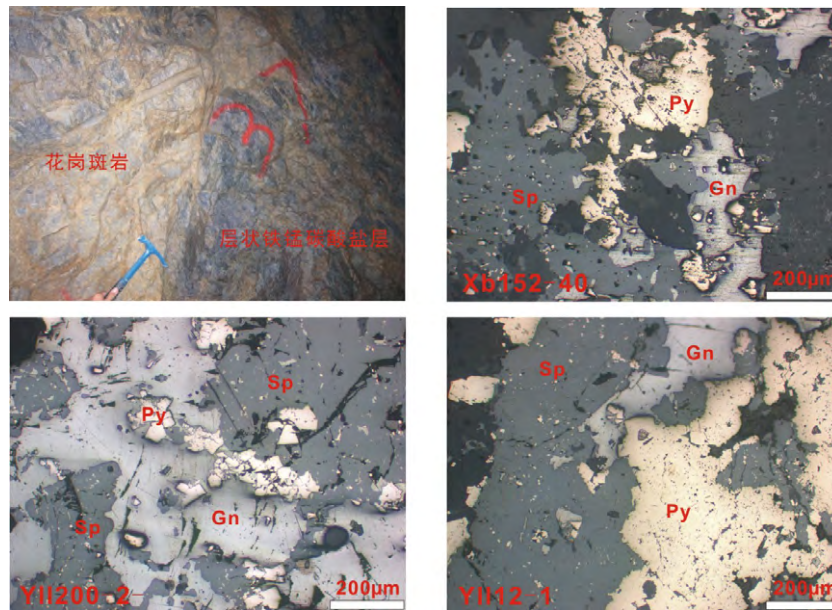
2 样品采集及分析方法

下鲍矿床作为冷水坑矿田金属储量最大的矿床, 其层状矿体与花岗斑岩在深部接触, 为探讨 2

种产状矿体间关系提供了便利条件。本文重点对下鲍矿床层状矿床中最大 A7 矿体进行考察。

在下鲍矿床 152 中段观察到, 花岗斑岩与层状

型矿体的接触界限 (图 5), 二者间接触关系清晰, 并未出现渐变特征, 层状铁锰碳酸盐岩有矿化, 但未发生夕卡岩化。为深入分析, 对 152 中段一条花



Sp-闪锌矿; Gn-方铅矿; Py-黄铁矿

图 5 冷水坑矿田花岗斑岩与层控型接触部位及矿物镜下照片

Fig. 5. Granite porphyry and stratabound type contact pictures and microscopic photos for Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field.

表 2 冷水坑银铅锌矿田下鲍矿床横穿剖面元素含量

Table 2. Elements content of samples in cross-section of Xiabao ore deposit in Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field

样品	w _B /%							w _B /10 ⁻⁶							
	Na	K	Ca	Mg	Al	Fe	Ba	La	Mn	Cr	Pb	S	Sr	Zn	Ag
L21-1	0.21	4.96	0.62	0.68	7.66	6.28	3010	80	11200	69	58	0.04	522	1100	<0.5
L21-2	0.19	4.53	0.9	0.49	7.25	6.48	2690	120	35300	95	401	0.4	439	1800	<0.5
L21-3	0.18	4.78	0.63	0.22	7.49	2.15	2940	120	18750	76	207	0.21	392	1300	0.9
L21-4	0.18	4.22	0.75	0.31	7.31	4.19	3500	80	20900	84	216	0.07	370	667	<0.5
L21-5	0.02	0.14	1.38	0.94	0.71	22.9	40	10	134500	36	15650	1.63	25	19700	51.1
L21-6	0.02	0.08	1.16	0.81	0.21	16.25	20	<10	114000	12	20200	4.59	23	32700	1765
L21-7	0.03	0.09	0.87	1.06	0.23	22.2	20	<10	68000	8	39300	5.64	12	73400	253
L21-8	0.02	0.33	1.39	1.63	0.7	15.05	30	<10	207000	38	8000	1.38	17	15000	189
L21-9	0.02	0.24	1.4	1.06	0.96	22	30	<10	135000	4	172000	1.85	20	11650	88.5
L21-10	0.02	0.15	1.37	1.21	0.56	17.45	20	<10	135500	42	8100	1.24	16	17450	94
L21-11	0.03	0.05	1.62	1.03	0.33	17.4	20	<10	170500	7	25100	3.34	25	52300	668
L21-12	0.02	0.03	0.61	1	0.05	13.55	10	<10	82500	9	15550	2.2	9	24000	935
L21-13	0.03	0.05	0.85	1.02	0.1	26.5	10	<10	89900	13	36700	5.96	18	55400	93.8
L21-14	0.04	0.4	1.06	1.16	0.84	25	30	<10	63300	12	30700	5.36	24	81300	186
L21-15	0.02	0.03	0.78	1.36	0.1	21.4	10	<10	65400	7	33400	3.2	14	51500	65.5
L21-16	0.02	0.14	1.16	1.2	0.5	21.4	20	<10	134000	18	18250	3.05	24	32800	392
L21-17	0.03	0.08	0.96	0.76	0.16	14.85	20	<10	163500	1	31100	4.29	34	57400	97.5
L21-18	0.05	0.07	0.45	0.5	0.19	24.3	10	<10	47600	<1	43300	>10.0	2	130500	47.9
L21-19	0.05	0.35	0.71	0.86	0.92	20.5	30	10	43100	1	102000	>10.0	7	109000	353
L21-20	0.04	1.15	0.54	0.55	3.08	13.8	110	20	30500	1	32500	5.64	27	43900	101
检出上限	10	10	50	50	50	50	10000	10000	100000	10000	10000	10	10000	10000	100
检出下限	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	10	0.5	5	1	0.5	0.01	0.2	0.5	0.01

岗斑岩横穿层状型矿体的近 90 m 长剖面进行考察，并均匀布点采集样品 20 件，采样位置如图 6。

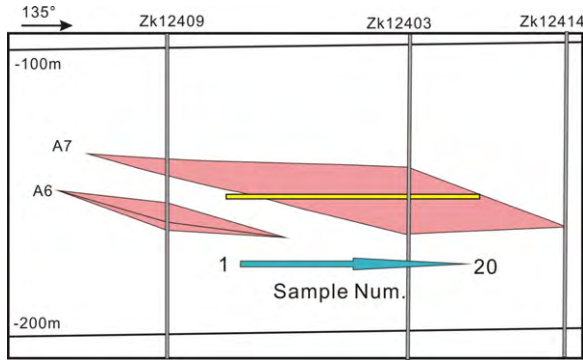


图 6 冷水坑矿田下鲍矿区 124 号勘探线剖面及采样示意图
Fig. 6. Sampling sketch map and exploration profile (No. 124) of Xiabao ore deposit, Lengshuikeng ore field.

剖面样品测试分析在澳实分析检测（广州）有限公司进行。试样先用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解，蒸干后样品用稀盐酸溶解定容，最后由电感耦合等离子体发射光谱测试。主要元素检测限见表 2。超出检测限的部分元素，使用澳实分析检测（广州）有限公司单元素原子吸收光谱分析测得。

对下鲍矿区层状矿体及银路岭矿区赋存在花岗斑岩体内的大脉矿体分别进行了矿石样品采集，磨片后进行了镜下观察（如图 5），主要构成矿物为闪锌矿、方铅矿及黄铁矿。显微镜下，方铅矿、闪锌矿呈半自形。二者相互间存在互嵌结构，核边结构（内部方铅矿、外部闪锌矿），另外闪锌矿裂隙内可

见有黄铜矿出溶结构（图 5）。

金属矿物原位测试工作在澳大利亚塔斯马尼亚大学 Cameca SX-100 型电子探针上进行，测试样品磨制成探针片后，上机前先进行喷碳处理。实验条件为 15 kV 电压，10 nA 电子束流，电子束斑为 10 μm，具体参数参见文献[16]。

3 结果与讨论

3.1 剖面元素地球化学特征

剖面研究有利于在限定空间内，通过元素及比值变化，揭示元素迁移、沉淀及赋矿围岩的成因等信息。下鲍矿体剖面元素测试结果见表 2，根据采样点位置对 Ag、Al、Ba、Fe、Sr、K、Na 及 Zn 等元素含量作图（图 7），显示花岗斑岩与层状矿体间的差异明显。花岗斑岩中具有更高含量的 Al、Ba、Sr、K 和 Na，层状矿体由于产在铁锰碳酸盐岩内，具有更高含量的 Ag、Fe、Mn、Zn、Pb 和 Mg。

为更好地示踪剖面元素地球化学特征，元素比值结合样品位置点进行作图。图 7 可见，花岗斑岩具有更高的 $w(K)$ ， $w(Na)$ 及 K/Na 。作者认为冷水坑矿田处在一个火山盆地内，有利于地表水的汇集，而在表生环境中，Na 水化能大于 K，而吸附能小于 K，因此相对于 K，Na 不易被粘土吸附，而易于溶解带入水域中，故海洋、湖盆中 Na 含量大于 K。火山盆地内产出的层状矿体具有更低的 K/Na 比值，与前人认为铁锰碳酸盐岩形成于与火山-沉积有关

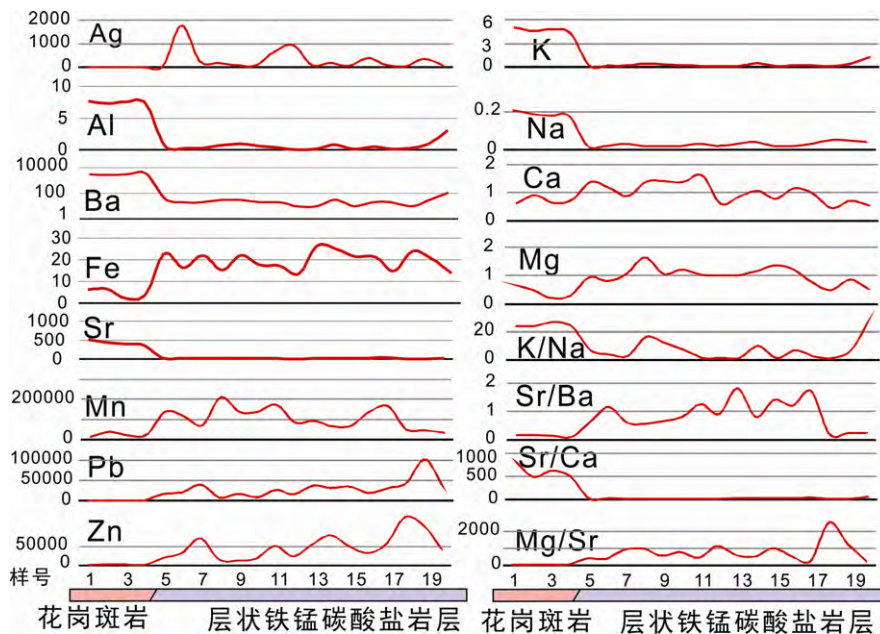


图 7 剖面采样元素含量及比值对比图

Fig. 7. Comparison diagram for element concentrations and their ratios of samples from the exploration profile.

的陆相深湖盆的认识一致^[17]。Mg 含量及 Mg/Sr 比值的剖面变化特征表明, 层状矿体具有高 w(Mg), 低 w(Sr) 特征, Mg 的富集可能主要因碳酸盐岩为铁锰碳酸盐岩, Mg²⁺ 半径 (0.66 Å) 与 Fe²⁺ (0.62 Å)、Mn²⁺ (0.64 Å) 相近, 容易替代二者位置。花岗斑岩则为岩浆演化晚阶段, Mg 含量较低。

花岗斑岩虽具有更高的 Sr、Ba 含量, 但却具有偏低的 Sr/Ba 比值。由于 Sr 的富集主要通过占据 Ca、K 的晶格位置, 而 Ba 则主要占据 K 元素位置。花岗斑岩内较高的 K 含量, 造成 Ba 相对 Sr 偏高, 同时层状矿体中碳酸盐岩总体较高的 Ca 含量, 造成 Sr 相对 Ba 偏高, 于是总体上花岗斑岩具有低 Sr/Ba, 层状矿体具有偏高的 Sr/Ba。另外, 除上述占据 K 晶格位而形成的 Ba 外, Ba 还可通过热液体系携带进来。层状矿体偏低的 Ba, 也间接指示出受热液蚀变的程度不明显。冷水坑矿田目前尚未见发育重晶石, 不同于 Red dog、金顶等经典铅锌矿床^[18], 暗示出成矿系统的 S 含量不高, 氧化还原条件可能不是成矿条件的关键控制因素。花岗岩作为岩浆演化晚阶段产物, 具有较高的 Sr 含量, 层状矿体内铁锰碳酸盐岩具有较高 Ca 含量, 造成了 Sr/Ca 比值明显的变化。

此外, 通过层状矿体内闪锌矿探针测试 w(Fe) 含量为 2.02%~7.69%) 估计 (详见下文), 表明当时成矿温度较低, 而 Sr 替代 Ca、K 的富集主要在岩浆结晶的高温阶段, 低温条件不利于 Sr 替代富集。

热液作用阶段方解石等碳酸盐矿物的 Sr 含量可达几千×10⁻⁶, 而沉积成因矿物的 Sr 含量相当低。本区层状矿体平均 Sr 含量 18.6×10⁻⁶, 与海水中的 Sr 含量 (13×10⁻⁶) 相当, 暗示层状矿体可能未经历较多的热液蚀变。与上述剖面未出现明显递变, 层状矿体较低 Ba 含量等特征相一致。可见, 层状矿体并未受到较多斑岩系统热液的影响。

通过以上剖面数据对比, 层状矿体的元素特征具有沉积特征, 产出背景可能为与火山-沉积有关的陆相深湖盆。与花岗斑岩对比显示, 层状矿体可能并未经历规模较大的热液蚀变。

野外考察中, 铁锰碳酸盐岩层与花岗斑岩接触部位未见夕卡岩化特征。据钻孔资料显示^[19], 研究区深部石炭系梓山组碎屑岩, 与花岗斑岩接触部位存在夕卡岩化特征, 而上部层位的铁锰碳酸岩层未见夕卡岩化。作者收集了近年来冷水坑矿田花岗斑岩及火山凝灰岩等定年结果^[2-3, 13, 17, 20-23] (表 3), 花

表 3 冷水坑银铅锌矿田已有的成岩成矿年龄 (Ma)

Table 3. Ages of diagenesis and mineralization of Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field

样品号	岩性	地层	方法	年龄	一组误差	MSWD	年龄	二组偏差	MSWD	参考文献
ZK15151-NL1	流纹质熔结凝灰岩	打鼓顶组	LA	160.8	1.9	0.87				
ZK15150-NL2	花岗斑岩		LA	163.6	2.1	0.56	154.3	3	0.01	
ZK12310-NL1	流纹质熔结凝灰岩	鹅湖岭下段	LA	146.6	2.2	0.113				邱骏挺等, 2013
ZK12310-NL2	花岗斑岩		LA	155.6	1.3	0.62				
ZK13504-2	F ₂ 断面		Ar-Ar 等时线	398.9	5.1	6.1				
			Ar-Ar 反等时线	397.7	6.9	4.7				
LSK-33	花岗斑岩		SHRIMP	162	2	1.4				左力艳, 2010
	花岗斑岩绢云母		Ar-Ar 等时线	162.8	1.6	0.37				
LSK-56	花岗斑岩已矿化		SHRIMP	157.6	1.3	1.2				
LSK-38	晶屑凝灰岩	鹅湖岭火山岩上部	SHRIMP	157.8	1.6	1.5				孟祥金等, 2012
LSK-39	晶屑凝灰岩	鹅湖岭火山岩上部	SHRIMP	157.2	1.5	0.72				
ZK13110-15	晶屑凝灰岩		SHRIMP	158.2	1.8	0.83				
报道	花岗斑岩		LA	155						王长明等, 2011
LSK-D7-2	晶屑凝灰岩	打鼓顶组	LA	155.1	1.2	0.48				
LSK-D6-3	晶屑凝灰岩	打鼓顶组	LA	156	1.2	0.94				孙建东, 2012
LSK-Zk13001-2	花岗斑岩		LA	146	2.6	7.3				
Y32-1	凝灰岩		SHRIMP	158	3	2.4				Yu et al., 2012
Y32-7	花岗斑岩		SHRIMP	156	3	1.7				
SH10-27	晶屑凝灰岩	打鼓顶组下段	LA	144	1	2.5				
LSK107	安山岩	打鼓顶组上段	LA	142	1	0.67	424	3	0.29	
SH10-15	层凝灰岩	鹅湖岭第一段	LA	140	1	0.56	129	1	1.08	
MD06	流纹质熔结凝灰岩	鹅湖岭第三段	LA	137	1	0.2				
LSK08	花岗斑岩		LA	158	1	1.4				Su et al., 2013
ZK12208-12	花岗斑岩		LA	157	1	0.6				
LSK24	石英正长斑岩		LA	144	1	1.9				
LSK07	钾长花岗斑岩		LA	140	1	1.9				
LSK96	流纹斑岩		LA	140	1	4				

岗斑岩年代相对集中 (156~158 Ma), 而火山凝灰岩的定年结果范围较大, 从 137~160.8 Ma, 指示火山岩的锆石来源值得在定年工作重视。

3.2 闪锌矿电子探针结果及讨论

冷水坑矿田 2 类矿体闪锌矿的电子探针结果见表 4, 可见闪锌矿的主要构成元素为 S、Zn、Fe, 其中 S 含量变化较小, 范围 32.05%~33.81%, 平均 33.02%, Zn 含量 53.51%~63.79%, 平均 59.38%, Fe 元素变化范围较大 (2.02%~12.42%), 在 2 种产状矿体中差异明显, 层状矿体闪锌矿 $w(\text{Fe})$ 2.02%~7.69%, 平均 4.17%, 大脉状矿体闪锌矿 $w(\text{Fe})$ 8.02%~12.42%, 平均 9.49%。

大脉状矿体内发育的闪锌矿具有明显高的 Fe、Mn 含量, 偏低的 Zn、Cd 含量, 且与 Zn 相关性不强, 而层状矿体中闪锌矿具有较低的 Fe、Mn 含量, 较高的 Zn、Cd, 与 Zn 负相关性好, 尤其 Fe-Zn 相关系数 (R^2) 达 0.955 (图 8)。大脉状矿体闪锌矿相对较差 Fe-Zn 相关性, 可能与其金属沉淀机制有关。由于 Fe^{2+} 与 Zn^{2+} 的地球化学性质相似, 离子半径、晶格能相近, 一般认为闪锌矿中 Fe 是以类质同象的形式置换 Zn。而且热液成因的含铁矿物具有与

闪锌矿相同的四面体构造 (四面体构造中 Fe^{2+} 与 Zn^{2+} 的半径相等, 0.074 nm), 所以, Fe^{2+} 在闪锌矿中具有异常高的交代 Zn^{2+} 的能力。Zn 与 Fe 的强烈负相关关系反映出二者间类质同象替代关系。研究显示, 闪锌矿中 Fe 含量与其成矿温度密切相关, 温度越高, Fe 含量相对越高。指示大脉状矿体的金属成矿温度要高于层状矿体。

卢燃等^[12]研究认为冷水坑矿田下鲍层状矿体成矿作用中, 金属元素的沉淀主要与含矿热液对铁锰碳酸盐岩的交代有关, 伴随着 Fe、Mn 元素迁出, Pb、Zn、Ag 等元素迁入并由于化学条件变化发生沉淀 (温度、pH 值等)^[24]。层状矿体成矿元素的迁移、沉淀机制指示在铁锰碳酸盐层内 Fe、Mn 元素与含矿热液内 Pb、Zn、Ag 元素的分离; 而在大脉状矿体形成过程中, 可能未经历 Zn、Pb 元素与 Fe、Mn 元素分离, 由此造成大脉-细脉浸染状矿体内闪锌矿 Fe、Mn 含量偏高。

层状矿体中金属元素的分异可能与火山喷发过程中, 温压条件或流体性质的差异造成的相分离 (熔体、热液) 有关, 同时指示两种成矿类型具有不同的金属元素沉淀机制, 但细节尚需进一步工作。

表 4 冷水坑银铅锌矿田 2 类矿体内闪锌矿电子探针数据 ($w_B/\%$)

Table 4. EPMA data for sphalerite of both types of ore bodies from Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field

样品号	矿物	S	Pb	Ag	Cu	Zn	Sn	Sb	As	Mn	Fe	Cd	Bi	Total
XB12-7-C2-1	sph	32.67	<0.09	<0.07	0.20	58.27	<0.03	<0.03	<0.02	<0.01	7.69	0.53	<0.27	99.35
XB12-7-C3-1	sph	32.55	<0.10	<0.06	0.71	59.06	<0.03	<0.03	<0.02	<0.01	5.88	0.55	<0.27	98.75
XB152-40B-C1-1	sph	32.93	<0.09	<0.06	0.03	62.94	<0.03	0.04	<0.02	<0.01	3.71	0.55	<0.26	100.20
XB152-40B-C1-2	sph	32.97	<0.10	<0.06	0.10	61.68	<0.03	<0.03	<0.02	0.02	4.98	0.47	<0.26	100.21
XB152-40B-C2-1	sph	32.66	<0.10	<0.06	0.03	63.42	<0.03	<0.03	<0.02	0.02	3.13	0.64	<0.27	99.91
XB152-40B-C2-2	sph	32.97	<0.09	0.09	<0.02	64.19	<0.03	<0.03	<0.02	<0.01	2.78	0.52	<0.26	100.55
XB152-40B-C3-3	sph	33.81	<0.09	<0.07	<0.02	62.21	<0.03	<0.03	<0.02	0.01	4.57	0.54	<0.26	101.15
XB152-4-C1-1	sph	32.67	<0.11	<0.07	<0.02	61.71	<0.03	0.04	<0.02	0.02	4.93	0.41	<0.26	99.78
XB152-4-C1-2	sph	32.85	<0.10	<0.06	<0.02	62.67	<0.03	<0.03	<0.02	0.02	3.85	0.50	<0.26	99.90
XB152-4-C1-3	sph	32.78	<0.10	<0.06	<0.02	62.81	<0.03	<0.03	<0.02	<0.01	3.70	0.49	0.30	100.08
XB152-4-C2-2	sph	33.07	<0.09	<0.06	<0.02	63.96	<0.03	<0.03	<0.02	<0.01	2.76	0.44	<0.27	100.23
XB152-4-C2-4	sph	32.99	<0.09	<0.06	<0.02	64.79	<0.03	<0.03	<0.02	0.02	2.02	0.48	0.29	100.58
YLL12-1-C3-1	sph	32.69	0.12	<0.06	0.03	57.18	<0.03	<0.03	<0.02	0.08	9.02	0.32	<0.27	99.45
YLL12-1-C4-1	sph	33.67	<0.08	<0.06	0.07	53.51	<0.03	<0.03	<0.02	0.06	12.42	0.36	<0.26	100.10
YLL12-1-C4-2	sph	32.84	<0.11	<0.06	0.11	57.42	0.03	<0.03	<0.02	0.07	8.45	0.43	<0.26	99.34
YLL12-1-C5-3	sph	32.86	<0.09	0.07	0.03	56.43	0.05	<0.03	<0.02	0.02	9.53	0.43	<0.26	99.42
YLL200-2-C1-3	sph	33.32	0.13	<0.06	0.13	53.76	<0.03	<0.03	<0.02	0.81	10.47	0.41	<0.26	99.03
YLL200-2-C2-3	sph	33.40	0.16	0.13	0.10	56.67	<0.02	<0.03	<0.02	0.05	8.02	0.40	<0.26	98.93
YLL200-2-C2-5	sph	32.85	<0.09	0.53	0.38	55.21	0.08	<0.03	<0.02	0.06	8.47	0.38	<0.26	97.95
YLL200-2-C3-1	sph	33.19	0.20	<0.07	0.21	57.39	<0.03	<0.03	<0.02	0.07	8.65	0.35	<0.26	100.07
YLL200-2-C3-2	sph	33.01	0.11	0.15	0.18	56.35	<0.03	<0.03	<0.02	0.29	9.44	0.40	<0.27	99.94
YLL200-2-C4-3	sph	33.62	<0.11	<0.06	0.28	54.80	0.15	<0.04	<0.02	0.45	10.42	0.35	<0.26	100.06

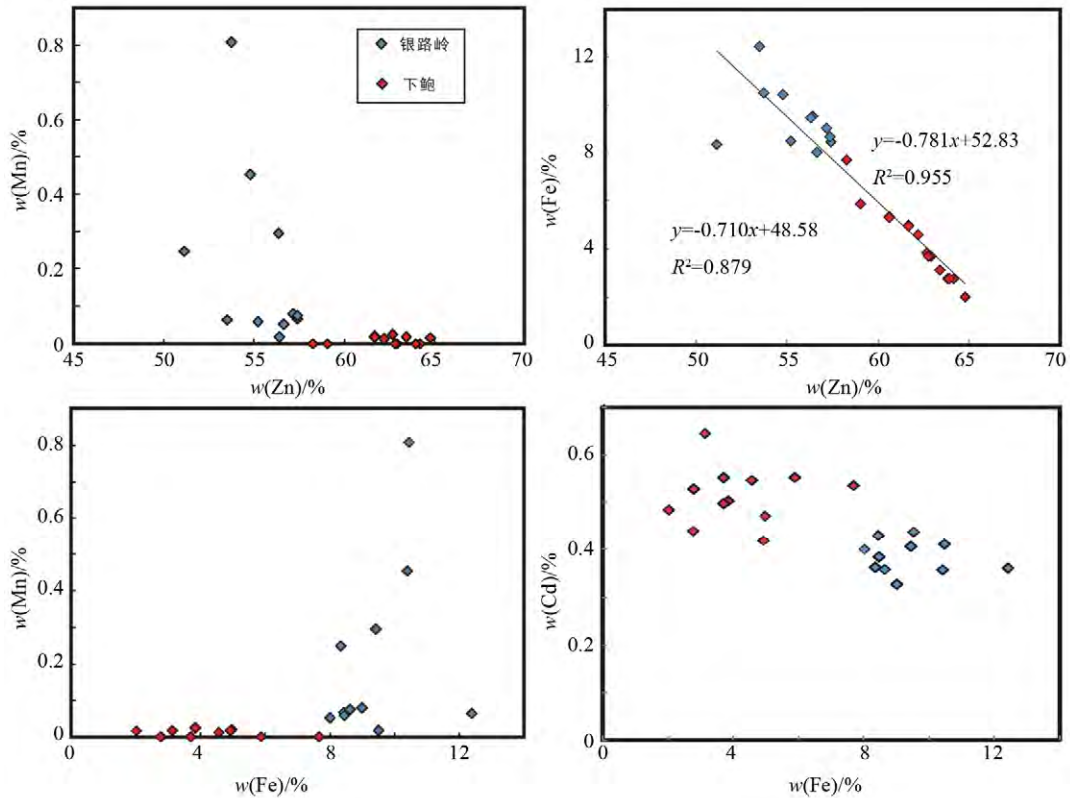


图 8 冷水坑矿田闪锌矿元素相关性图解

Fig. 8. Elements diagrams for sphalerites from Lengshuikeng ore field.

2 种产状矿体是否源自相互独立的岩浆热液成矿系统, 或是同一岩浆热液成矿系统的不同分支目前尚无定论; 岩浆热液体系中多元素的相分离机制无疑是解决此问题的关键环节。

4 结论

(1) 层状矿体元素组成具有沉积特征, 产出背景为与火山-沉积有关的陆相深湖盆。另外, 层状矿体与花岗斑岩界限明显, 且前者未出现随距离的协变关系, 暗示层状矿体可能并未经历规模较大热液蚀变;

(2) 冷水坑矿田花岗斑岩内大脉状与层状矿体

的闪锌矿探针分析对比显示, 大脉状矿体闪锌矿具有高于层状型矿体的 Fe、Mn 含量, 显示前者成矿温度高于后者。层状矿体产自铁锰碳酸盐岩内, 却具有更低的 Fe、Mn 含量, 说明 2 种成矿类型 Fe、Mn、Pb、Zn 元素在成矿相关岩浆体系内, 经历了不同物理化学条件 (流体性质、温度、压力、pH 值等), 造成岩浆体系的差异。

致谢: 感谢野外地质工作中江西省地矿局九一二大队何细荣教授级高工、周显荣高工野外考察中的热心帮助。匿名评审老师的建设性意见, 张兴春研究员在项目研究中给予的宝贵建议, 沈能平副研究员对初稿的建议在此一并感谢。

参考文献:

- [1] Mao J W, Zhang J D, Pirajno F, Ishiyama D, Su H M, Guo C L, Chen Y C. Porphyry Cu-Au-Mo-epithermal Ag-Pb-Zn-distal hydrothermal Au deposits in the Dexing area, Jiangxi province, East China—A linked ore system [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(1): 203-216.
- [2] 王长明, 徐贻赣, 吴淦国, 张达, 杨磊, 刘建光, 万浩章, 狄永军, 余心起, 何明跃, 张垚垚. 江西冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田碳、氧、硫、铅同位素特征及成矿物质来源[J]. *地学前缘*, 2011, 18(1): 179-193.
- [3] 左力艳, 侯增谦, 宋玉财, 孟祥金, 杨竹森. 冷水坑斑岩型银铅锌矿床成矿流体特征研究[J]. *地球学报*, 2009, 30(5): 616-626.
- [4] 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 刘建光, 左力艳, 杨竹森, 肖茂章. 江西冷水坑斑岩型铅锌银矿床地质特征、热液蚀变与成矿时限[J]. *地质学报*, 2009, 83(12): 1951-1967.
- [5] 刘迅, 申世亮. 江西冷水坑银铅锌矿田构造地球化学的若干问题[J]. *大地构造与成矿学*, 1991, 15(1): 41-54.

- [6] 黄振强. 冷水坑银矿田成矿条件及矿床特征[J]. 地质与资源, 1993, 2(4): 284-291.
- [7] 黄振强. 冷水坑碳酸盐型银矿床成因探讨[J]. 江西地质, 1992, 6(1): 1-9.
- [8] 徐文圻, 肖孟华, 陈民扬. 江西冷水坑银-铅-锌矿床同位素地球化学研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 370-372.
- [9] 徐文圻, 肖孟华, 陈民扬. 江西冷水坑银多金属矿床同位素地球化学研究[J]. 地质论评, 2002, 48(S1): 193-197.
- [10] 左力艳, 孟祥金, 杨竹森. 冷水坑斑岩型银铅锌矿床含矿岩系岩石地球化学及 Sr、Nd 同位素研究[J]. 矿床地质, 2008, 27(3): 367-382.
- [11] 卢燃, 毛景文, 高建京, 苏慧敏. 冷水坑矿田下鲍矿床地质特征及其成因研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(Suppl.): 241-242.
- [12] 卢燃, 毛景文, 高建京, 苏慧敏, 郑佳浩. 江西冷水坑矿田下鲍 Ag-Pb-Zn 矿床地质特征及银的赋存状态研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(1): 105-121.
- [13] 邱骏挺, 余心起, 吴淦国, 刘建光, 肖茂章. 江西冷水坑矿区构造-岩浆活动的年代学约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(3): 812-826.
- [14] 徐贻赣, 吴淦国, 王长明, 张达, 张垚垚. 江西冷水坑银铅锌矿田闪锌矿伽-铷测年及地质意义[J]. 地质学报, 2013, 87(5): 621-633.
- [15] 苏慧敏, 毛景文, 何细荣, 卢燃. 北武夷天华山盆地形成时限的约束: 来自火山岩-侵入岩的年代学证据[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(5): 745-759.
- [16] Johnson E R, Kamenetsky V S, McPhie J. The behavior of metals (Pb, Zn, As, Mo, Cu) during crystallization and degassing of rhyolites from the Okataina volcanic center, Taupo volcanic zone, New Zealand [J]. *Journal of Petrology*, 2013, 54(8): 1641-1659.
- [17] 孙建东. 江西省冷水坑银铅锌矿床同位素地质研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 63.
- [18] Kelley K D, Leach D L, Johnson C A, Clark J L, Fayek M, Slack J F, Anderson V M, Ayuso R A, Ridley W I. Textural, compositional, and sulfur isotope variations of sulfide minerals in the Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks Range, Alaska: Implications for ore formation [J]. *Economic Geology*, 2004, 99(7): 1509-1532.
- [19] 罗泽雄, 饶建锋, 罗绿川. 北武夷冷水坑矿田银铅锌矿床找矿勘查模型探讨[J]. 中国西部科技, 2011, 10(18): 3-5, 17.
- [20] 孟祥金, 徐文艺, 杨竹森, 侯增谦, 李振清, 于玉帅, 肖茂章, 何细荣, 万浩章. 江西冷水坑矿田火山-岩浆活动时限: SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄证据[J]. 矿床地质, 2012, 31(4): 831-838.
- [21] Yu X Q, Wu G G, Zhao X X, Zhang D, Di Y J, Qiu J T, Dai Y P, Li C L. New geochronological data from the Paleozoic and Mesozoic nappe structures, igneous rocks, and molybdenite in the North Wuyi area, Southeast China [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 519-533.
- [22] Su H M, Mao J W, He X R, Lu R. Timing of the formation of the Tianhuashan Basin in northern Wuyi as constrained by geochronology of volcanic and plutonic rocks [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(6): 940-955.
- [23] 左力艳, 侯增谦, 孟祥金, 杨志明, 宋玉财, 李政. 冷水坑斑岩型银铅锌矿床含矿岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1450-1456.
- [24] Gammons C H, Barnes H L. The solubility of Ag₂S in near-neutral aqueous sulfide solutions at 25 to 300°C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(2): 279-290.