

湘南粤北铅锌矿床闪锌矿的标型特征及指示意义

徐接标^{1,2}, 张术根^{1,2}, 左亚飞^{1,2}, 冯雨周^{1,2}, 卢敏晨^{2,3}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 3. 江西省聚拓矿业投资有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 湘南粤北位于南岭成矿带中段, 是我国最重要的铅锌矿集区之一。本文选取湘南粤北地区 MVT 和岩浆热液型两类铅锌矿床的闪锌矿样品, 对闪锌矿的形态、结构、化学成分、硫同位素组成、流体包裹体成分等进行系统研究, 分析其成矿温度、硫的来源和成矿流体特征, 为揭示成矿作用提供可靠依据。研究表明: MVT 铅锌矿床成矿作用发生在中低温、氧化-弱还原、较低压力环境, 硫主要来源于容矿地层, 成矿流体主要来自于热卤水和沉积物变质脱水; 岩浆热液型铅锌矿床成矿作用发生在中高温、弱还原、较高压力条件下, 硫源主要以岩浆硫为主, 成矿流体早期以岩浆热液为主, 晚期为混合流体。结合矿体与岩体的形成时间、空间分布、大地构造背景, 认为岩浆热液型铅锌矿床由燕山早期(180~150 Ma)古太平洋向大陆俯冲、岩石圈加厚, 爆发大规模花岗质岩浆岩侵位, 导致铅锌成矿; MVT 铅锌矿床由燕山晚期(130~90 Ma)欧亚大陆岩石圈伸展减薄产生的岩浆热液叠加改造泥盆系的原始矿源层形成。

关键词: 湘南粤北; 闪锌矿; 标型特征; 铅锌矿床; 成矿作用

中图分类号: P618.4; P575

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0283-14

Typomorphic characteristics and indicative significance of sphalerite in Pb-Zn deposits in southern Hunan-northern Guangdong area

XU Jie-biao^{1,2}, ZHANG Shu-gen^{1,2}, ZUO Ya-fei^{1,2}, FENG Yu-zhou^{1,2} and LU Min-chen^{2,3}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Jiangxi Ju Tuo Mining Investment Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: As one of the most important Pb-Zn ore concentration areas in China, southern Hunan-northern Guangdong area is located in the middle part of the Nanling metallogenic belt. Morphology, texture, composition, $\delta^{34}\text{S}$ and composition of fluid inclusions of sphalerite from MVT and magmatic hydrothermal Pb-Zn deposits were investigated to discuss the ore-forming temperature, the source of sulfur and the ore-forming fluid, which can provide valid constraints on the mineralization. It is suggested that lead-zinc sulfides in the MVT Pb-Zn deposit were formed in the medium-low temperature, oxidative-weak reductive and lower stress environment. The sulfur was mainly derived from the ore-bearing strata, the ore-forming fluid was composed of hot brine and metamorphic dehydration of the sediments. Magmatic hydrothermal Pb-Zn deposits were formed under the medium-high temperature, weak reductive and higher stress condition. The sulfur was mainly derived from the magma, the ore-forming fluid was composed of magmatic hydrothermal solution in the early stage and mixed fluid in the late stage. Based on the formation time, spatial distribution and tectonic background of the

收稿日期: 2015-09-21; 接受日期: 2016-01-29

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2009BAB43B00)

作者简介: 徐接标(1992-), 男, 汉族, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业, E-mail: xujiebiao1992@163.com。

orebodies and the rocks, it is held that magmatic hydrothermal Pb-Zn deposits were formed by the emplacement of the large-scale granitic magmatite which was caused by subduction of the Paleo-Pacific plate to the mainland, thus the lithosphere was thickened in the Early Yanshanian period (180~150 Ma), and that MVT Pb-Zn deposits were formed after the superimposed reformation of the original Devonian source bed by the magmatic hydrothermal solution formed by the Eurasian lithospheric extension-thinning in the Late Yanshanian period (130~90 Ma).

Key words: southern Hunan-northern Guangdong area; sphalerite; typomorphic characteristics; Pb-Zn deposit; mineralization

Fund support: National Science and Technology Pillar Program during the Eleventh Five-year Plan Period (2009BAB43B00)

南岭成矿带是我国东部滨太平洋成矿带中最重要的铅锌成矿带(地矿部地矿司南岭铅锌矿专题组, 1985; 戴自希等, 2005), 湘南粤北位于其中段, 以铅锌矿床数量多、规模大、矿床类型丰富而为广大地质学家所关注, 开展了较详细的岩石地球化学(谢银财等, 2013; 祝新友等, 2013)、控矿构造(刘德利等, 2006; 梁新权等, 2009)、同位素地球化学(王晶, 2011; 祝新友等, 2012)、流体包裹体地球化学(张术根等, 2009; 黄诚等, 2013)等研究, 取得了丰硕的成果, 为探讨研究区矿床成因积累了大量宝贵的资料。然而, 目前对研究区铅锌矿床的成因机理仍然存在较大的争议, 矿床类型的划分也存在分歧, 现主要包括有以下3类划分: ① 岩浆热液型和层控型铅锌矿床(黄书俊等, 1985); ② 层控型、岩控型和复控型铅锌矿床(吴健民等, 1985); ③ 热液型、矽卡岩型、海相火山岩容矿的块状硫化物和碳酸盐岩容矿的铅锌矿床(戴自希等, 2005)。

闪锌矿是铅锌矿床最重要的矿石矿物之一, 其形成几乎贯穿铅锌硫化物成矿全过程, 蕴含丰富的成因信息(张术根等, 2009; Li *et al.*, 2014; 雷浩等, 2014)。闪锌矿有黑色、褐色、黄色等多种颜色(Gumlich and Schulz, 1966), 常为四面体、立方体和菱形十二面体(李胜荣, 2008)。晶体常数受 Fe、Mn、Cd 等类质同像替换、结晶温度及成矿压力等多种因素共同制约(Scott and Barnes, 1971; Georges, 2000)。闪锌矿硫同位素组成可以指示成矿物质的来源(Ohmoto, 1992; Roedder and Dwornik, 1998), 微量元素含量可以反映成矿温度、成矿物质来源和沉淀机制等许多重要的地质信息, 为揭示矿床成矿作用提供有效约束(Huston *et al.*, 1995; Benedetto *et al.*, 2005; Ye *et al.*, 2011)。本文采用矿相显微镜观察、X 射线衍射、电子探针分析、稳定同位素分

析、流体包裹体成分测定等技术, 通过对湘南粤北地区 MVT 和岩浆热液型两类铅锌矿床闪锌矿标型特征进行研究, 分析其成矿温度、硫的来源和成矿流体特征, 为揭示矿床成矿作用提供重要的依据。

1 地质特征概况

1.1 区域地质背景

湘南粤北位于南岭成矿带中段, 其大地构造背景位于湘桂粤海西-印支凹陷带, 为南岭东西向构造带的范畴(图1)。区内出露的地层为震旦系至第三系: 下古生界(加里东构造层)地层主要为板岩、粉砂岩、石英砂岩、页岩夹硅质页岩, 奥陶系局部则夹大理岩和火山岩夹层; 中生界和新生界地层出露较少, 岩性主要为碎屑岩, 少量泥页岩; 上古生界(海西-印支构造层)在区内出露最广, 岩性也最复杂, 主要为碳酸盐岩、碎屑岩和煤系。

湘南粤北断裂构造和褶皱构造发育, 区域构造线方向主要有3种: 一是由古老基底和岩浆岩组成的东西向隆起带, 二是北东向断裂构造带, 三是南北向断裂构造带。区内岩浆活动频繁, 从加里东期、海西期、印支期到燕山期均有岩浆侵入。由老到新, 岩浆活动的范围和强度逐步增大, 在燕山期达到高峰。岩性主要为中-酸性岩类, 产状从岩基到岩株均有。从岩浆的成因上可分为浅源重熔型和深源混熔型两个系列(黄书俊等, 1985)。

1.2 矿床矿化特征

MVT 铅锌矿床产于泥盆系的碳酸盐岩中, 尤以泥盆系中上统为主要容矿地层, 矿体形态常呈层状、似层状和透镜状, 主要沿控矿断裂及其旁侧的有利构造和岩石空间产出, 受复杂的断裂和褶皱控制。矿石组分比较简单, 矿物种类较少, 一般只有几种矿

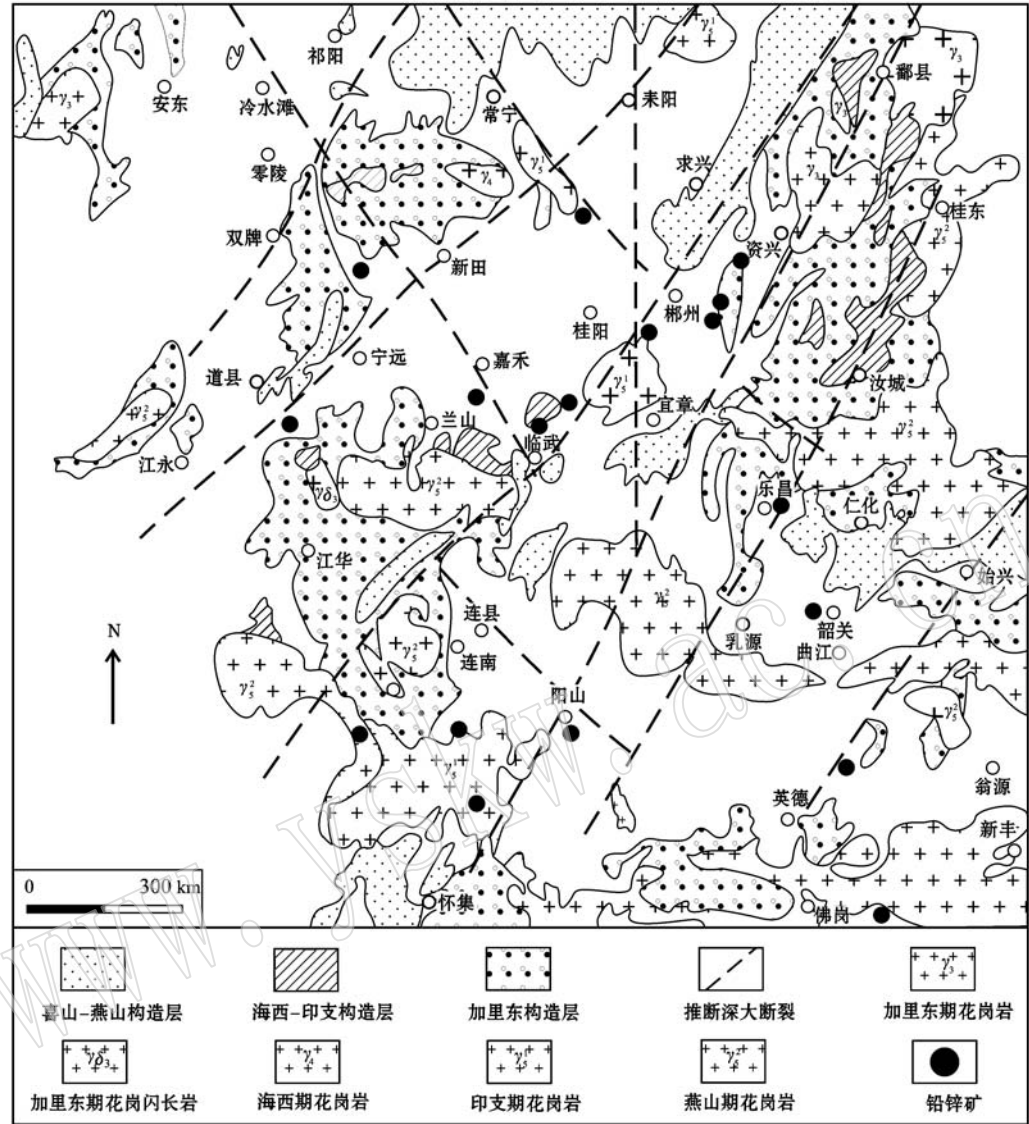


图 1 湘南粤北地区地质略图(据黄书俊等,1985)

Fig. 1 Sketch geological map of southern Hunan-northern Guangdong area (after Huang Shujun *et al.*, 1985)

物。主要金属矿物为闪锌矿和方铅矿,其中闪锌矿有黑褐色、黄褐色、棕色 3 种类型(图 2): ① 黑褐色闪锌矿,常产于泥盆系赋矿层位中,以他形粒状为主,偶见菱形十二面体半自形晶(图 3),多呈致密块状集合;② 黄褐色闪锌矿,赋存层位范围较宽,多为半自形,形态主要为菱形十二面体,部分为四面体聚形晶,常呈中细粒脉状穿插黄铁矿;③ 棕色闪锌矿,常出现在石炭系赋矿层位,主要为他形,质地比较纯净,有时呈四面体聚形半自形晶,多与方解石呈脉状穿插于较早形成的铅锌硫化物中。

岩浆热液型铅锌矿床的矿体主要赋存于酸性、中酸性小侵入体外接触带的碳酸盐岩中。矿体产状

多变,形态复杂,主要为透镜状、脉状,其次为囊状、筒柱状及其他不规则状,沿走向或倾向常具分支复合,尖灭再现等现象。矿石矿物种类较多,金属矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿,其次为毒砂、黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿等;脉石矿物主要为方解石、白云石,其次为石英、绢云母、绿泥石及少量石榴石等。闪锌矿主要有 3 种颜色,分别为铁黑色、黄褐色和浅棕色: ① 铁黑色闪锌矿,主要为半自形、他形中粒,形态常为四面体,常与方铅矿构成块状集合体或条带状;② 黄褐色闪锌矿,是本类型矿床最常见的闪锌矿,以他形中细粒为主,主要呈菱形十二面体,常被方解石、石英等脉石矿物穿插;③ 浅棕色闪

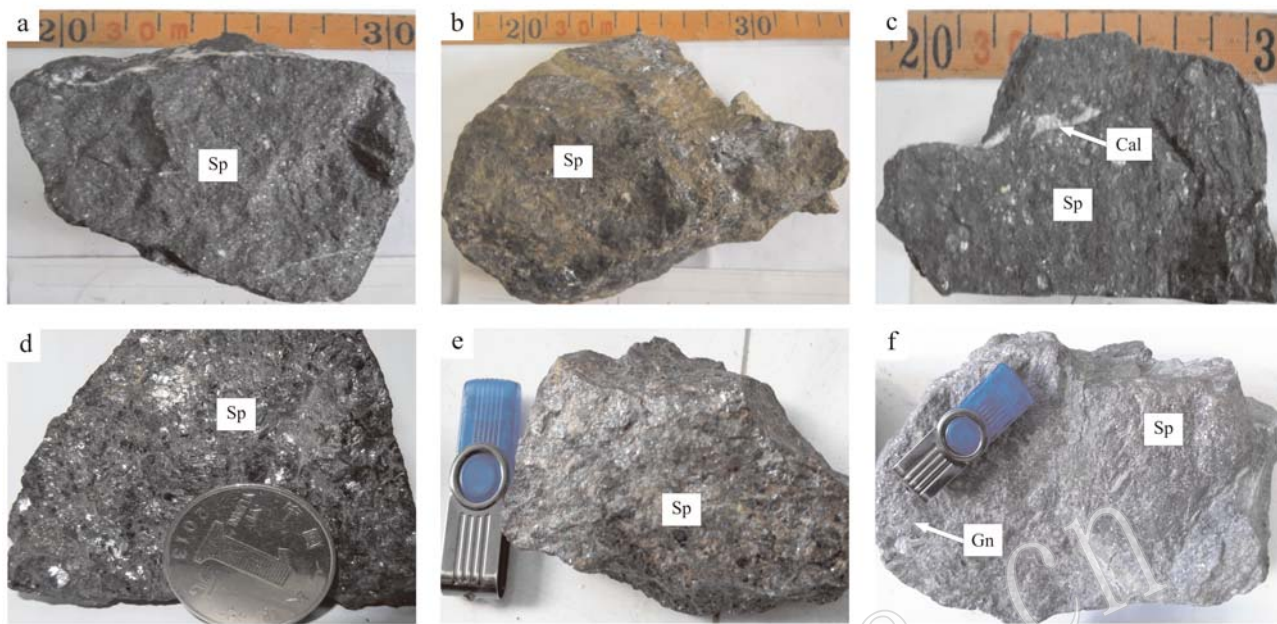


图 2 MVT 和岩浆热液型铅锌矿床各色闪锌矿

Fig. 2 Sphalerite with varied colors in the MVT and magmatic hydrothermal Pb-Zn deposits

a—MVT 铅锌矿床黑褐色闪锌矿；b—MVT 铅锌矿床黄褐色闪锌矿；c—MVT 铅锌矿床棕色闪锌矿；d—岩浆热液型铅锌矿床铁黑色闪锌矿；e—岩浆热液型铅锌矿床黄褐色闪锌矿；f—岩浆热液型铅锌矿床浅棕色闪锌矿；Sp—闪锌矿；Cal—方解石；Gn—方铅矿

a—dark brown sphalerite of MVT deposit; b—yellowish brown sphalerite of MVT deposit; c—brown sphalerite of MVT deposit; d—dark gray sphalerite of magmatic hydrothermal deposit; e—yellowish brown sphalerite of magmatic hydrothermal deposit; f—light brown sphalerite of magmatic hydrothermal deposit; Sp—sphalerite; Cal—calcite; Gn—galena

矿,在研究区内比较少见,主要为他形细粒,形态为菱形十二面体,常呈脉状和不规则团块状。

2 分析方法与结果

2.1 样品采集与测试方法

本文采用的样品来自湘南粤北铅锌矿床井下新鲜矿石,MVT 铅锌矿床样品主要采自凡口、杨柳塘、后江桥矿区,岩浆热液型铅锌矿床样品来自黄沙坪、柿竹园、宝山矿区。样品采集按照不同类型矿床不同颜色闪锌矿的原则,矿石选取矿物单一、闪锌矿含量高的样品。

先将挑选好的矿石样品制成光片,在系统岩矿镜下鉴定的基础上,选取表面光滑、颜色均一、晶形完整的闪锌矿进行电子探针分析。电子探针分析在中南大学地球科学与信息物理学院电子探针实验室完成,采用 EPMA-1720H 型电子探针,工作条件:加速电压 15.0 kV,探针电流 10.0 nA,束斑直径 1.0 μm 。然后将矿石破碎成 40~60 目,在双目镜下挑选闪锌矿,碾磨至 200 目,送至长沙矿冶研究院分析

测试中心进行 X 射线衍射晶胞参数测试,实验条件:日本理学 Dmax/2200- γ A10 型,Cu 靶 $K\alpha$ 射线,石墨单色器,4°/min,100 mA,50 kV。

硫同位素组成测定采用的测试仪器是德国产的 MAT251 质谱测试仪,测定单位是桂林地质矿产研究所。群体包裹体成分测定在中南大学地球科学与信息物理学院实验测试研究室完成,首先将样品研磨至 40~60 目,经过肉眼粗挑和双目镜精挑,挑选出纯度达到 98% 以上的单矿物。气相成分测定采用的是 Varian-3400 型气相色谱仪(美国),液相成分测定采用的是 DX-120 Lon Chromatograph 离子色谱仪(美国),灵敏度 100 mV,计算方法为面积外表法。

2.2 分析结果

2.2.1 晶胞参数

X 射线衍射图谱显示(图 4),样品虽经严格筛选,但仍有其他矿物出现。根据各类矿床闪锌矿的衍射数据,通过 unitcell 软件计算出晶胞参数(表 1)。结果表明,两类矿床的闪锌矿晶胞参数都比标准值高,其中岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿晶胞参数较高, a_0 值为 0.541 5~0.542 4,且铁黑色闪锌矿 a_0 值可

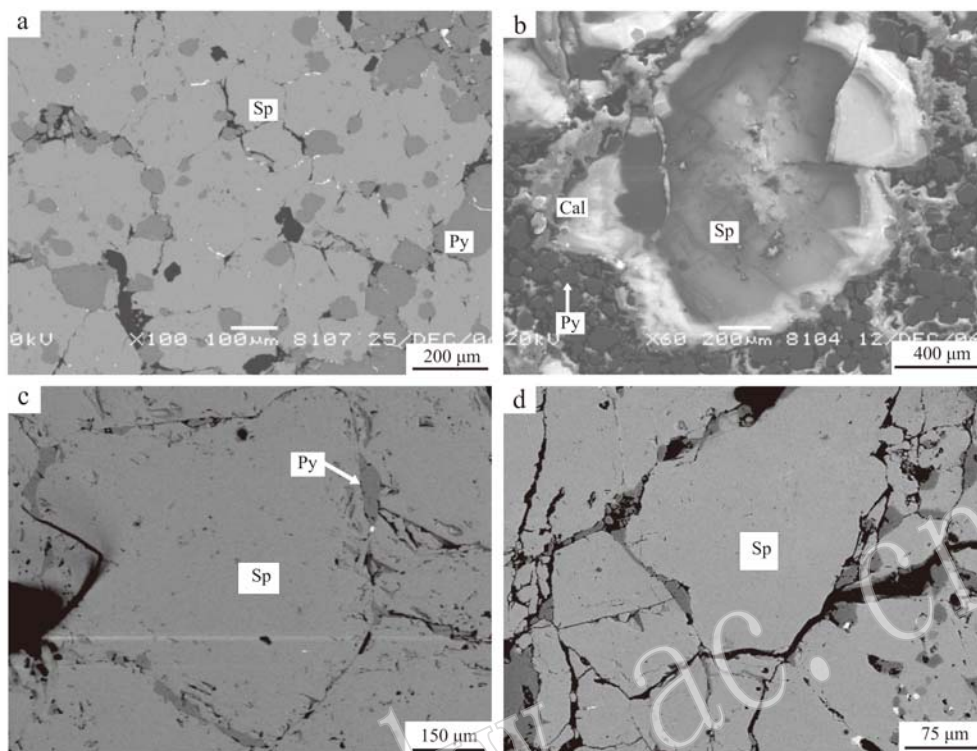


图3 MVT和岩浆热液型铅锌矿床各色闪锌矿显微照片

Fig. 3 Micrographs of sphalerite with varied colors in the MVT and magmatic hydrothermal Pb-Zn deposits

a—MVT 铅锌矿床黑褐色闪锌矿龟裂纹被黄铁矿充填(SEM); b—MVT 铅锌矿床黄褐色闪锌矿具方解石外壳(SEM); c—岩浆热液型铅锌矿床铁黑色闪锌矿被细粒黄铁矿包围(SEM); d—岩浆热液型铅锌矿床铁黑色闪锌矿的四面体习性(SEM); Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿; Cal—方解石

a—cracks of dark brown sphalerite of MVT deposit filled with pyrite (SEM microphotograph); b—yellowish brown sphalerite with calcite crust of MVT deposit (SEM microphotograph); c—dark gray sphalerite wrapped by fine pyrite of magmatic hydrothermal deposit (SEM microphotograph); d—tetrahedron of dark gray sphalerite of magmatic hydrothermal deposit (SEM microphotograph); Sp—sphalerite; Py—pyrite; Cal—calcite

达0.542 4,远大于其他颜色的闪锌矿;MVT 铅锌矿床闪锌矿晶胞参数较低, a_0 值范围为0.541 3~0.541 8,最高者为黄褐色闪锌矿。在同一类型铅锌矿床中,颜色深的闪锌矿晶胞参数通常比颜色浅的要高,但MVT 铅锌矿床中黄褐色闪锌矿晶胞参数比黑褐色的要高。

2.2.2 化学成分

闪锌矿中Zn元素含量的理论值为67.010%,S元素含量的理论值为32.990%。MVT 铅锌矿床闪锌矿的Zn含量为64.425%~66.986%(表2),与理论值比较接近,S含量为28.489%~30.057%,Fe含量为3.073%~5.062%,其中黄褐色闪锌矿的Fe含量相对较高,Mn含量百分比接近于0,Cd含量为0.120%~0.582%,Fe、Mn、Cd含量均较低,变化范围较小;岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿的Zn含量为49.097%~60.940%,比理论值较低,S含量为

32.788%~35.888%,Fe含量为4.827%~15.906%,其中铁黑色闪锌矿Fe含量超过10%,Mn含量为0~0.562%,Fe、Mn含量均比MVT矿床高,Cd含量为0~0.896%,为3类矿床最高,Mn、Cd含量百分比接近于0。

2.2.3 硫同位素组成

MVT 铅锌矿床闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为9.5‰~24.2‰(表3),分布范围较广,离差可达50‰,大部分大于15‰,从黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿,其 $\delta^{34}\text{S}$ 逐渐降低,而从黄褐色闪锌矿到棕色闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 降幅比从黑褐色闪锌矿到黄褐色闪锌矿大很多。岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-2.2‰~9.8‰,分布比较集中,铁黑色闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 最小,为-2.2‰~1.9‰,平均值为-0.3‰,黄褐色、浅棕色闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均大于铁黑色闪锌矿,且从黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿,其 $\delta^{34}\text{S}$ 逐渐升高。

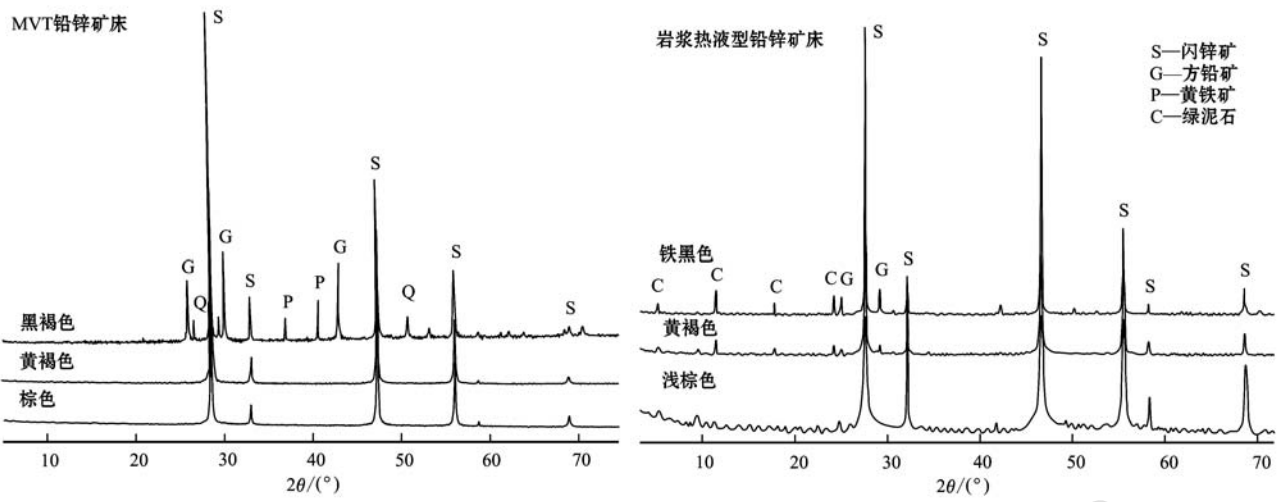


图 4 闪锌矿 X 射线粉晶衍射结果
Fig. 4 X-ray powder diffraction determination of sphalerite

表 1 闪锌矿 X 射线衍射峰 *d* 值及晶胞参数计算结果 nm

Table 1 *d* values of X-ray diffraction of sphalerite samples and calculated crystal parameters

矿床类型	MVT				岩浆热液型		标准
样号	FK-1	FK-2	TD-2	HSP-9	SZY-2	SZY-3	
颜色	黑褐色	黄褐色	棕色	铁黑色	黄褐色	浅棕色	
面网	111	3.127 5	3.128 7	3.126 4	3.131 7	3.128 2	3.124 3
	200	2.711 4	2.709 9	2.707 8	2.712 6	2.708 8	2.705 7
	220	1.914 2	1.915 3	1.913 9	1.917 7	1.915 0	1.913 3
	311	1.632 7	1.633 5	1.632 2	1.635 5	1.633 3	1.631 6
	222	1.562 9	1.563 9	1.562 4	1.565 2	1.563 9	1.562 2
	400	1.353 3	1.354 3	1.353 2	1.356 2	1.354 2	1.352 9
<i>a</i> ₀	0.541 5	0.541 8	0.541 3	0.542 4	0.541 7	0.541 5	0.541 0

表 2 MVT 和岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿的电子探针分析结果 ω_B/%

Table 2 Electron microprobe analyses of sphalerite of MVT and magmatic hydrothermal Pb-Zn deposit

矿床类型	颜色	样号	S	Mn	Cd	Fe	Zn	Total
MVT	黑褐色	FK1-1	28.489	0	0.189	4.394	65.967	99.039
		FK1-2	29.270	0.004	0.376	4.277	66.066	99.993
	黄褐色	FK2-1	29.787	0	0.335	5.062	64.425	99.609
		FK2-2	29.319	0	0.448	5.059	65.881	100.707
	棕色	TD2-1	30.057	0	0.582	3.073	66.206	99.918
		TD2-2	29.849	0.043	0.120	3.167	66.986	100.165
岩浆热液型	铁黑色	HSP9-1	35.888	0	0	15.283	49.097	100.268
		HSP9-2	35.611	0	0	15.906	49.377	100.894
	黄褐色	SZY2-1	33.865	0.370	0.896	5.527	58.591	99.249
		SZY2-2	32.788	0.363	0.807	5.524	59.959	99.441
	浅棕色	SZY3-1	33.127	0.530	0.563	4.827	60.940	99.987
		SZY3-2	33.025	0.562	0.649	5.241	60.435	99.912

2.2.4 流体包裹体成分

MVT 铅锌矿床闪锌矿包裹体液相成分中阳离子以 Na⁺、K⁺和 Ca²⁺为主(表 4),其次为 Mg²⁺,阴

离子主要为 Cl⁻和 SO₄²⁻,且 SO₄²⁻值远大于岩浆热液型铅锌矿床,F⁻含量甚微,低于仪器的灵敏度,其中黑褐色Cl⁻含量远多与其他颜色闪锌矿。气相成

表 3 MVT 和岩浆热液型铅锌矿床各色闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 %

Table 3 $\delta^{34}\text{S}$ values of sphalerite of varied colors in the MVT and magmatic hydrothermal Pb-Zn deposit

矿床类型	颜色	样品数	范围	平均值	总均值
MVT	黑褐色	6	20.2~24.2	21.9	18.8
	黄褐色	6	18.3~19.8	19.3	
	棕色	4	9.5~15.7	13.2	
岩浆热液型	铁黑色	10	-2.2~1.9	-0.3	3.1
	黄褐色	8	0.9~9.8	6.2	
	浅棕色	8	4.2~5.4	4.7	

分主要为 H_2O 和 CO_2 , 其次为 H_2 和 CH_4 , 黄褐色、棕色还含有少量烃类。岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿包裹体液相成分中阳离子主要为 Na^+ 和 Ca^{2+} , 阴离子以 SO_4^{2-} 为主, 富集顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{F}^- > \text{Cl}^-$ 。气相成分主要以 H_2O 和 CO_2 为主, 其次还有 H_2 、 CH_4 和 CO 。

3 讨论

3.1 成矿温度

闪锌矿为等轴晶系的硫化物, 晶体形态常呈四

表 4 MVT 和岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿流体包裹体气液相成分组成

Table 4 Liquid and gaseous compositions of fluid inclusions of sphalerite in the MVT and magmatic hydrothermal Pb-Zn deposit

矿床类型	颜色	液相成分(μg/g)							$n(\text{Na}^+)/$	$n(\text{Na}^+)/$	$n(\text{F}^-)/$
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	$n(\text{K}^+)$	$n(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$	$n(\text{Cl}^-)$
MVT	黑褐色	6.26	3.89	8.50	2.93	痕	69.23	488.28	2.73	0.81	\
	黄褐色	8.64	2.35	3.79	1.87	痕	5.13	482.05	6.24	2.17	\
	棕色	4.10	1.90	5.33	0.21	痕	5.39	380.6	3.67	1.25	\
岩浆 热液型	铁黑色	4.86	2.19	11.53	0.36	2.77	4.63	4.63	3.77	0.70	1.12
	黄褐色	3.29	1.14	6.30	0.60	1.26	2.16	20.14	4.90	0.79	1.09
	浅棕色	2.72	0.90	7.42	0.30	0.79	2.78	27.46	5.16	0.60	0.53

矿床类型	颜色	气相成分(μg/g)							$n(\text{H}_2 + \text{CH}_4 +$	$n(\text{CO}_2)/n(\text{H}_2\text{O})$
		CO_2	H_2	CH_4	H_2O	CO	C_2H_6	N_2	$\text{CO} + \text{C}_2\text{H}_6)/n(\text{CO}_2)$	
MVT	黑褐色	186.28	0.16	0.68	438	无	痕	痕	0.029	0.174
	黄褐色	49.98	0.44	16.75	799	无	11.11	痕	1.442	0.026
	棕色	37.19	0.15	7.33	654	无	0.07	痕	0.631	0.023
岩浆 热液型	铁黑色	79.82	0.85	1.73	246	无	无	痕	0.294	0.132
	黄褐色	68.39	1.33	1.26	578	无	无	痕	0.477	0.048
	浅棕色	54.73	0.63	0.79	462	无	无	痕	0.293	0.048

注：表中“痕”表示检测图谱中有峰值, 但是没能计算出具体数值, 原因是峰值小于灵敏度; “\”表示含量较低, 忽略不计; “-”表示研究者没有对该项目进行测定。

面体、立方体或菱形十二面体, 其中高温闪锌矿为四面体习性, 中低温闪锌矿为菱形十二面体习性(李胜荣, 2008)。闪锌矿晶体常数理论值为 $a_0 = 0.541 \text{ nm}$, 其大小受元素的类质同像替换、结晶温度、压力、Eh 值、pH 值等多种条件影响, 其中以结晶温度和类质同像替换的影响最大(Scott and Barnes, 1971; Georges, 2000)。研究表明, 闪锌矿结晶温度越高, Fe 含量越高, 晶体常数越大 (Georges, 2000; 张术根等, 2009)。这是因为温度越高, Fe、Mn 等元素越容易类质同像替换 Zn 进入闪锌矿, 而 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 的离子半径(分别为 0.63 和 0.66)大于 Zn^{2+} 的离子半径(0.60), 从而减少锌空位, 使晶体常数增大(陈建华等, 2010)。MVT 矿床闪锌矿主要为他形晶, 有时为

菱形十二面体的半自形晶, 晶体常数较小, 而且从黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿, 晶体常数先低后高再低, 说明 MVT 矿床成矿温度较低, 且从黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿, 结晶温度先增加后减少; 而岩浆热液型矿床闪锌矿通常为四面体聚形半自形晶, 晶体常数较大, 其中铁黑色闪锌矿晶体常数远大于其他颜色的闪锌矿, 说明岩浆热液型矿床成矿温度较高, 从铁黑色闪锌矿到黄褐色闪锌矿, 结晶温度下降较快, 而从黄褐色闪锌矿到浅棕色闪锌矿, 结晶温度下降较慢。

闪锌矿中微量元素的含量变化也能反映成矿的温度, 在高温条件下闪锌矿易富 Fe、Mn、In、Se 和 Sn, 而低温条件下形成的闪锌矿则相对富集 Cd、Ge、

Ga 和 Tl(刘英俊等, 1984; 李胜荣, 2008; 叶霖等, 2012)。例如云南保山核桃坪铅锌矿床闪锌矿的 Fe 含量为 2%~10%, Mn 含量为 $1\,273 \times 10^{-6} \sim 5\,115 \times 10^{-6}$ (Cook *et al.*, 2009); 云南澜沧老厂铅锌多金属矿床闪锌矿 Fe 含量为 12.2%~15.4%, Mn 含量为 $2\,626 \times 10^{-6} \sim 4\,111 \times 10^{-6}$ (叶霖等, 2012); 青海虎头崖铅锌矿床第一世代闪锌矿 Fe 含量为 6.548%~10.962%, Mn 含量为 0.059~0.341(雷浩等, 2014)。MVT 铅锌矿床闪锌矿中 Fe 含量多在 4% 左右, Mn 含量接近于 0, Cd 含量也较低, 介于中温与低温闪锌矿之间(Huston *et al.*, 1995), 这与前人包裹体测温结果一致(139~222℃, 王晶, 2011), 而从黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿, Fe 含量先增加后减少, 反映成矿温度先低后高再低; 岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿中 Fe、Mn 含量均比 MVT 矿床高, Fe 含量变化范围较宽, 铁黑色闪锌矿 Fe 含量超过 15%, 暗示成矿温度超过 350℃(刘英俊等, 1984), 而浅棕色闪锌矿 Fe 含量仅为 3%, 属于中温范畴(160~240℃, 黄诚等, 2013), 从铁黑色闪锌矿到黄褐色闪锌矿, Fe 含量下降较多, 而从黄褐色闪锌矿到浅棕色闪锌矿, Fe 含量下降较少, 反映铁黑色闪锌矿成矿温度远大于其他类型闪锌矿, 而从黄褐色闪锌矿到浅棕色闪锌矿, 成矿温度下降较少。

3.2 硫的来源

前人研究表明, 如果热液中仅存一种含硫物质(或以一种含硫物质占绝对优势, 其余含硫物质可忽略不计), 且闪锌矿与溶液中的含硫原子团的同位素相对富集系数还是很低(150~350℃ 间, 闪锌矿与 H_2S 的相对富集系数为 +0.8‰~ -0.2‰), 则闪锌

矿的硫同位素组成就可能与溶液中总的平均总硫同位素组成相似(Ohmoto, 1972)。所以, 本次样品的硫同位素分析结果基本上可以代表矿床成矿溶液的原始硫同位素组成。而成矿溶液的硫同位素组成是判断硫源的主要依据(Ohmoto, 1972, 1992)。矿床硫的来源可能有 4 种: 第 1 种是来自上地幔和深部地壳, 这种硫同位素组成与陨石硫接近, 即硫同位素组成平均值为 0~5‰; 第 2 种是来自海水硫酸盐, 硫同位素组成平均值一般大于 15‰; 第 3 种是生物成因硫, 由于生物作用强弱和 SO_4^{2-} 、 H_2S 开放或封闭体系不同, 硫同位素组成平均值变化范围较大, 并常显示出硫同位素非平衡效应; 第 4 种是混染硫, 硫同位素组成平均值常介于第 1 种与第 2 种硫之间(Ohmoto, 1992; Roedder and Dwornik, 1998)。

MVT 矿床闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 频数直方图呈波浪状(图 5), 显示硫源较为复杂(Roedder and Dwornik, 1998), 黑褐色、黄褐色闪锌矿 $\delta^{34}S$ 值都大于 15‰, 这与南岭地区泥盆-石炭纪海水硫酸盐接近(张术根, 1998), 说明硫主要来自容矿地层, 棕色闪锌矿 $\delta^{34}S$ 值大部分小于 15‰, 且从黄褐色到棕色闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 降幅比从黑褐色到黄褐色闪锌矿大很多, 反映成矿晚期有部分 $\delta^{34}S$ 显著较低的流体参与成矿(张术根等, 2009; 王晶, 2011); 岩浆热液型矿床闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 值集中在 0~5‰, 具有陨石硫的特点(Ohmoto, 1992), 与该地区岩浆岩的硫同位素值接近(2.3‰~17.5‰, 祝新友等, 2012), 频数直方图呈塔式分布, 可见矿床硫同位素组成均一化程度较高, 硫源可能主要来自地壳深部重熔岩浆, 成矿中晚期部分闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 大于 5‰, 说明受到部分地层的影响。

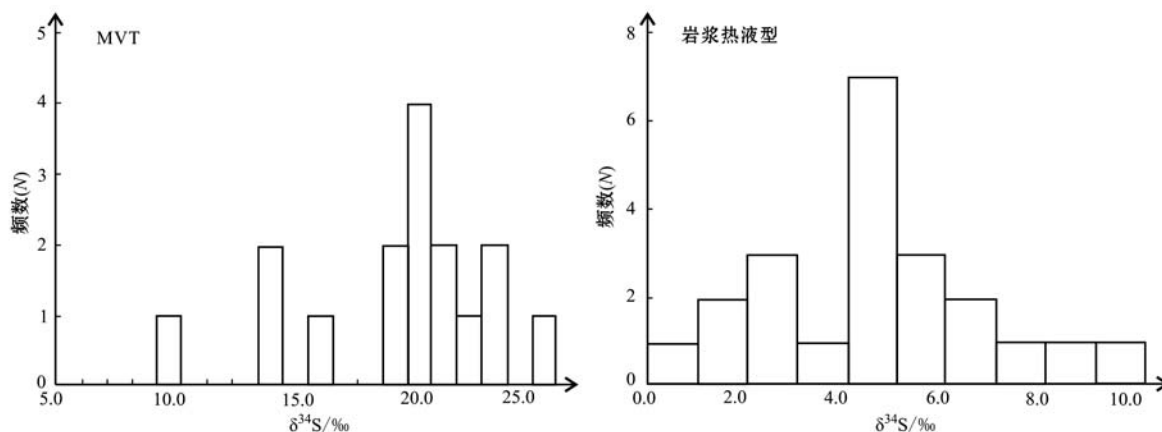


图 5 MVT 和岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿 $\delta^{34}S$ 频数直方图

Fig. 5 Frequency histogram of $\delta^{34}S$ values of sphalerite in the MVT and magmatic hydrothermal Pb-Zn deposits

3.3 成矿流体特征

MVT 矿床成矿流体中阳离子含量相对变化较大, Na^+/K^+ 的比值从黑褐色到棕色呈现了由低到高再到低的变化特点, 表明成矿流体中 K^+ 离子含量高不利于铅、锌等矿质的沉淀。阴离子中以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主, F^- 的含量几乎可以忽略不计, 黑褐色和黄褐色闪锌矿的 SO_4^{2-} 的浓度明显的比棕色闪锌矿要高, 表明此阶段的 HS^- 、 S^{2-} 的活动度大, 有利于大量的 Pb、Zn、Fe 等金属矿质沉淀, 并被大量消耗, 所以棕色闪锌矿的 SO_4^{2-} 浓度明显降低。MVT 铅锌矿床闪锌矿流体包裹体经历了从 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 型到 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 型再到 $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 型的变化, $n(\text{Na}^+)/n(\text{K}^+)$ 大于 1, $n(\text{F}^-)/n(\text{Cl}^-)$ 远小于 1, 与热卤水成分相似(Roedder, 1984)。气相成分以富 CO_2 和 H_2O 为特征, 黄褐色和棕色闪锌矿包裹体中还含有少量的烃类, 反映成矿流体中含有机质沉积建造水; 岩浆热液型矿床铁黑色闪锌矿流体包裹体为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$ 型, $n(\text{Na}^+)/n(\text{K}^+)$ 大于 1, $n(\text{F}^-)/n(\text{Cl}^-)$ 大于 1, 说明成矿流体可能不是单一的来源(Roedder, 1984), 黄褐色和浅棕色闪锌矿流体包裹体为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 型, $n(\text{Na}^+)/n(\text{K}^+)$ 大于 1, $n(\text{F}^-)/n(\text{Cl}^-)$ 小于 1, 说明成矿流体为非岩浆热液(Roedder, 1984)。

$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比值与构造差异应力、流体的压力成正比, 压力和温度越大, CO_2 在水中的溶解度越高(Chi *et al.*, 2007)。MVT 矿床黑褐色闪锌矿包裹体的 $n(\text{CO}_2)/n(\text{H}_2\text{O})$ 值较高, 远大于黄褐色和棕色闪锌矿的 $n(\text{CO}_2)/n(\text{H}_2\text{O})$ 值, 黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿 $n(\text{CO}_2)/n(\text{H}_2\text{O})$ 值逐渐减小, 成矿压力逐渐降低, 且从黑褐色闪锌矿到黄褐色闪锌矿压力降低的幅度要大于黄褐色闪锌矿到棕色闪锌矿; 岩浆热液型矿床铁黑色闪锌矿包裹体 $n(\text{CO}_2)/n(\text{H}_2\text{O})$ 值较高, 远高于黄褐色和浅棕色闪锌矿包裹体的 $n(\text{CO}_2)/n(\text{H}_2\text{O})$ 值, 说明铁黑色闪锌矿成矿压力远大于黄褐色和浅棕色闪锌矿成矿压力, 黄褐色和浅棕色闪锌矿成矿压力大致相当。

还原参数 R 可用来反映成矿的环境, $R = n(\text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{CO} + \text{C}_2\text{H}_6)/n(\text{CO}_2)$ (还原性气体)/ $n(\text{CO}_2)$ (氧化性气体), R 值越高, 表明成矿环境还原程度越高(徐晓春等, 2005)。MVT 矿床黑褐色闪锌矿包裹体 R 值为 0.029, 显示该阶段为较强氧化环境, 黄褐色闪锌矿 R 值为 1.442, 反映成矿为弱还原环境, 棕色闪锌

矿 R 值为 0.631, 说明成矿发生在弱氧化的环境, 从黑褐色到棕色, 氧化性由强变弱再变强; 岩浆热液型矿床闪锌矿包裹体 R 值的范围为 0.293~0.624, 显示为弱还原成矿环境, 且成矿从铁黑色到浅棕色, R 值逐渐减小, 说明氧化性逐渐增强。

包裹体中 CH_4 、 H_2 的存在指示成矿流体处于还原条件, CH_4 、 H_2 可以使流体氧逸度降低, 导致 SO_4^{2-} 转化为 S^{2-} , 从而形成金属硫化物, 沉淀下来(Heinrich, 2005; 黄世武等, 2010)。根据前人的研究表明, 这种含 CH_4 的流体主要有两种来源: ① 来源于还原条件的地球深部(潘小菲等, 2005; 黄世武等, 2010); ② 来自沉积物的变质脱水作用(武广等, 2007; 石英霞等, 2009)。流体包裹体气相成分表明, MVT 铅锌矿床成矿流体中除了含 CH_4 、 H_2 外, 还含 C_2H_6 、 N_2 等有机质成分, 指示含有机质的沉积物参与了成矿作用, 而深部岩浆或地幔缺乏含有机质的沉积物(武广等, 2007)。包裹体中 CO_2 含量较高, 矿床内围岩蚀变以方解石化、白云石化和菱铁矿化为主, 这也与变质脱水反应的地质事实吻合($2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + \text{CO}_2$, 石英霞等, 2009)。此外, 根据 MVT 矿床闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值显示硫源可能来自泥盆系碳酸盐岩, 闪锌矿晶体常数较小、成矿温度较低, 因此, 推测 MVT 铅锌矿床成矿流体可能来自富含有机质的沉积物变质脱水作用, 成矿流体中 CH_4 可能来自沉积物的变质脱水作用; 岩浆热液型铅锌矿床流体中 CH_4 、 CO_2 含量较低, H_2 含量较高, 且几乎不含 C_2H_6 、 N_2 等有机质。矿床中闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 0~5‰, 与该地区岩浆岩的硫同位素值接近(祝新友等, 2012), 指示硫源可能主要来自地壳深部重熔岩浆, 而且岩浆热液型矿床闪锌矿晶体常数较大、成矿温度较高, 因此, 推断岩浆热液型铅锌矿床成矿流体主要来自岩浆热液, 流体中的 CH_4 可能来自深部岩浆或地幔(潘小菲等, 2005)。

4 成矿作用

4.1 MVT 铅锌矿床

MVT 铅锌矿床产在泥盆系碳酸盐岩中, 矿体形态常呈“瓜”、“藤”、“叶”等复杂形态, 主要沿控矿断裂和岩石裂隙产出, 矿区虽未见成规模的岩浆岩, 但可见小规模岩脉和岩株被中晚期铅锌硫化物矿脉穿插(张术根等, 2009)。矿石组分比较简单, 矿物种类较少, 矿床中可见数量不一的沉积-成岩期的黄铁

矿、闪锌矿和方铅矿,矿物具后生改造作用特征。矿床闪锌矿的晶体常数和 Fe、Mn、Cd 等含量表明,MVT 矿床形成温度不高,属于中低温的范畴(Huston *et al.*, 1995),且从黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿,结晶温度先增加后减少;矿床闪锌矿硫同位素组成表明,黑褐色和黄褐色闪锌矿的硫源来自泥盆系碳酸盐岩,从黄褐色闪锌矿到棕色闪锌矿有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{‰}}$ 显著较低的流体参与成矿;根据闪锌矿流体包裹体成分分析,成矿流体经历了 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 型到 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 型再到 $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 型的变化,含有机质的沉积物参与了成矿作用,成矿流体主要来自自热卤水和沉积物的变质脱水,从黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿,压力逐渐降低,氧化性由强变弱再变强。据 MVT 矿床高精度岩体年龄数据可知,矿区内辉绿岩侵位于 120~90 Ma,属于燕山晚期岩浆活动产物,相当于铅锌硫化物成矿作用中晚期(邱小平, 1991; 祝新友等, 2013; 韩英, 2013)。在空间上,岩浆岩体内残留部分矿体,还明显被中晚期铅锌硫化物矿脉穿插切割(张术根等, 2009; 祝新友等, 2013)。

综上所述,推断湘南粤北地区 MVT 铅锌矿床经历了两个阶段:第一阶段为沉积-成岩成矿阶段,初步形成原始矿源层,在局部地段经活化分配形成初步矿体,从而形成黑褐色闪锌矿。这阶段成矿作用主要为沉积-成岩作用,碳酸盐岩与铅锌成矿关系密切。碳酸盐岩作为容矿地层,控制着矿体的形态。矿床成矿温度较低,形成的闪锌矿晶体常数和 Fe、Mn 含量相对较低,硫同位素组成指示硫源来自泥盆系碳酸盐岩。碳酸盐岩中含有机质的沉积物发生变质脱水,产生的还原性气体使系统氧逸度降低, SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} , 导致铅锌硫化物沉淀;第二阶段为岩浆热液叠加改造阶段,燕山晚期岩浆活动产生的热量使得围岩和原始矿源层发生破裂变形,岩浆热液携带矿液沿着这些裂隙上侵,并萃取原始矿源层和围岩中的成矿物质,经含有机质的碳酸盐岩还原,含矿质的混合热液在构造有利部位沉淀,从而形成黄褐色闪锌矿和棕色闪锌矿。

4.2 岩浆热液型铅锌矿床

岩浆热液型铅锌矿床主要产于酸性、中酸性小侵入体外接触带的碳酸盐岩中。矿体产状多变,形态复杂,主要为透镜状、脉状、囊状和筒柱状,沿走向或倾向常具分支复合,尖灭再现等现象。矿石组分复杂,最多可达 80 余种矿物。矿区出露的岩浆岩种

类较多,其中与铅锌矿床有成因联系的花岗斑岩、花岗闪长斑岩和石英斑岩等属于燕山早期的产物(156~158 Ma, 谢银财等, 2013; 155~160 Ma, 原垭斌等, 2014),时间上早于铅锌硫化物成矿作用(谢银财等, 2013; 毛景文等, 1995),在空间上,花岗斑岩、石英斑岩常被铅锌矿脉斜切。岩浆热液型铅锌矿床闪锌矿的晶体常数和 Fe、Mn 含量较高,表明岩浆热液型矿床形成温度较高,属于中高温的范畴(刘英俊等, 1984; 叶霖等, 2012),且铁黑色闪锌矿晶体常数和 Fe 含量远大于其他类型闪锌矿,Fe 含量甚至超过了 15%,暗示铁黑色闪锌矿的结晶温度超过 350℃(刘英俊等, 1984);矿床闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值比较集中于 0~5‰,硫同位素组成均一化程度较高,推断硫源可能主要来自地壳深部重熔岩浆,成矿中晚期部分闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值增大,反映可能受到了地层的影响;铁黑色闪锌矿流体包裹体为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$ 型,成矿流体为以岩浆热液为主,黄褐色和浅棕色闪锌矿流体包裹体为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 型,成矿流体为多来源的混合流体;铁黑色闪锌矿成矿压力远大于黄褐色和浅棕色闪锌矿成矿压力,而黄褐色和浅棕色闪锌矿成矿压力大致相当,从铁黑色到浅棕色,氧化性逐渐增强。

综上所述,认为湘南粤北地区岩浆热液型铅锌矿床由燕山早期岩浆作用形成,地壳深部重熔岩浆沿地壳软弱部位上侵,经岩浆结晶分异作用,岩浆中铅、锌、硫等成矿物质趋于初步富集,随着温度的下降以及 CH_4 、 H_2 等还原性气体降低系统的氧逸度,铅锌硫化物发生沉淀,形成铁黑色闪锌矿,此时期形成的铁黑色闪锌矿结晶温度很高,因此闪锌矿的晶体常数和 Fe 含量相对较高,成矿流体为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$ 型;在岩浆作用晚期,岩浆热液在上升运移过程中,随着岩浆的冷却以及其他混合源成矿流体的加入,在适当的物理化学条件下,沉淀出铅锌矿体,形成黄褐色和浅棕色闪锌矿,因此黄褐色和浅棕色闪锌矿较铁黑色闪锌矿结晶温度较低,晶体常数和 Fe 含量也较低, $\delta^{34}\text{S}$ 值增大,成矿流体由 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$ 型变为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ 型,成矿压力骤减,氧化性逐渐增强。

4.3 湘南粤北地区燕山期成矿作用

南岭地区铅锌成矿作用大致可以分为 6 期,其中最重要的为燕山期成矿期(地矿部地矿司南岭铅锌矿专题组, 1985)。湘南粤北位于南岭成矿带中段,铅锌金属储量可观,为我国重要的铅锌金属矿集

区。其中,MVT 和岩浆热液型作为湘南粤北地区最重要的两种矿床类型,已陆续发现凡口、黄沙坪、大宝山、柿竹园等大型、超大型的铅锌矿床,已成为华南乃至全国重要的铅锌矿床类型。湘南粤北地区各类型铅锌矿床在空间分布上大致呈北东向,多产于控矿断裂和岩石破碎带等有利构造,矿床的产状和形态严格受构造控制,湘南粤北地区自中生代以来,岩浆活动频繁而持久,花岗质岩体广泛分布,而与铅锌成矿有关的岩浆岩,年龄大致集中于 180~150 Ma 和 130~90 Ma(表 5),因此,湘南粤北地区铅锌成矿作用主要发生于燕山早期和燕山晚期。

湘南粤北地区地处华南地块中部,中侏罗世以来受古太平洋板块俯冲-弧后伸展和陆内深部构造的影响,形成了北东向断裂构造以及陆相盆地与花岗质火山-侵入岩相间的盆山体系(舒良树等,

2006)。华南板块、华北地块与印支地块大约在 240~220 Ma 碰撞拼接,连为一体(舒良树等,2004),此后相当长一段时间内南岭地区很少有岩浆活动;直至到 180 Ma 左右,南岭地区出现了爆发式成矿,毛景文等(2007)认为南岭地区大规模的花岗岩侵位和爆发式成矿为古太平洋从南东向北西俯冲导致华南地块整体加厚,在大陆边缘弧后陆内于 165~150 Ma 形成一系列裂谷带或伸展带,因此在北东向断裂和东西向古基底断裂的交汇部位往往是岩浆活动和成矿作用的汇集处;150~130 Ma,南岭地区的火山活动和岩浆侵位相对较少,很少有成矿作用出现(毛景文等,2007);130 Ma 之后,古太平洋停止向华南板块俯冲,取而代之的是向北北东方向走滑,欧亚大陆岩石圈出现大规模伸展,南岭地区又进入了地球动力学活跃期,岩浆活动和成矿作用随即而来。

表 5 湘南粤北铅锌矿区与成矿有关的岩浆岩年龄数据

Table 5 Age of magmatic intrusions associated with Pb-Zn mineralization in southern Hunan-northern Guangdong area

矿床类型	矿区	测试方法	岩性	成岩年龄/Ma	数据来源
MVT	凡口	硬绿泥石 K-Ar 法	辉绿岩	97	邱小平, 1991
		锆石 SHRIMP U-Pb	辉绿岩	122.6~90.3	祝新友等, 2013
		锆石 SHRIMP U-Pb	辉绿岩	92.2~86.8	韩英, 2013
岩浆热液型	黄沙坪	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	英安斑岩	158.5±0.9	原垭斌等, 2014
		锆石 LA-ICP-MS U-Pb	二长花岗斑岩	155.2±0.4	
		锆石 LA-ICP-MS U-Pb	石英斑岩	160.8±1.0	
		锆石 LA-ICP-MS U-Pb	花岗斑岩	150.1±0.4	艾昊, 2013
		锆石 LA-ICP-MS U-Pb	花斑岩	150.2±0.4	
		锆石 LA-ICP-MS U-Pb	石英斑岩	155.3±0.7	
	宝山	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	花岗闪长斑岩	156~158	谢银财等, 2013
		锆石 SHRIMP U-Pb	花岗闪长斑岩	158±2	路远发等, 2006
	水口山	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	花岗闪长岩	156.0±1.0	左昌虎等, 2014
		锆石 SHRIMP U-Pb	花岗闪长岩	163±2	马丽艳等, 2006

5 结论

(1)晶胞参数和化学成分表明,MVT 铅锌矿床闪锌矿成矿温度较低,介于中温与低温之间,黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿,成矿温度先升高后下降;岩浆热液型铅锌矿床成矿温度较高,铁黑色闪锌矿成矿温度超过 350℃,黄褐色和浅棕色闪锌矿达到中温闪锌矿范畴。

(2)硫同位素组成表明,MVT 铅锌矿床硫主要来自泥盆系碳酸盐岩,晚期有岩浆硫加入;岩浆热液型铅锌矿床硫主要来自地壳深部重熔岩浆,晚期受

到地层的影响。

(3)流体包裹体成分特征表明,MVT 铅锌矿床成矿流体主要来自热卤水和沉积物变质脱水,从黑褐色闪锌矿到棕色闪锌矿,压力逐渐降低,氧化性先增强后减弱;岩浆热液型铅锌矿床成矿流体早期以岩浆热液为主,晚期为多来源的混合流体,成矿压力逐渐降低,氧化性逐渐增强。

(4)岩浆热液型铅锌矿床由燕山早期(180~150 Ma)古太平洋向大陆俯冲、岩石圈加厚,爆发大规模花岗质岩浆岩侵位,导致铅锌成矿;MVT 铅锌矿床由燕山晚期(130~90 Ma)欧亚大陆岩石圈伸展减薄产生的岩浆热液叠加改造泥盆系的原始矿源层

形成。

致谢 本文实验分析过程得到中南大学刘建平老师、钱丽华博士的热心帮助;中南大学彭建堂教授提出了宝贵的修改意见;在此一并表示衷心的感谢!

References

- Ai Hao. 2013. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope compositions of ore-related granites from Huangshaping polymetallic deposit of Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 32(3): 545~563(in Chinese with English abstract).
- Benedetto D F, Bernardini G P, Costagliola P, *et al.* 2005. Compositional zoning in sphalerite crystals[J]. *American Mineralogist*, 90: 1 384~1 392.
- Chen Jianhua, Zeng Xiaoqin, Chen Ye, *et al.* 2010. First-principle theory calculations of electronic structure of sphalerite with vacancy and impurity[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 20(4): 765~771(in Chinese with English abstract).
- Chi Guoxiang, Xue Chunji, Lai Jianqing, *et al.* 2007. Sand injection and liquefaction structures in the Jingding Zn-Pb deposit, Yunnan, China: Indicators of an overpressured fluid system and implications for mineralization[J]. *Economic Geology*, 102(4): 739~743.
- Cook N J, Ciobanu C L, Pring A, *et al.* 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16): 4 761~4 791.
- Dai Zixi, Cheng Jifu and Bai Ye. 2005. Distribution and Potentiality of Lead and Zinc Resources in the World[M]. Beijing: Seismological Press, 1~387(in Chinese with English abstract).
- Geology and Mineral Resources Division of the Ministry of Nanling Lead-Zinc Theme Group. 1985. The Metallogenic Regularity of Nanling Lead-Zinc Deposits[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1~349(in Chinese with English abstract).
- Georges B. 2000. Acicular Sphalerite Enriched in Ag, Sb and Cu embedded within color-banded sphalerite from the Kokanee Range, British Columbia, Canada[J]. *Canada Mineralogist*, 38: 1 387~1 398.
- Gumlich H E and Schulz H J. 1966. Optical transitions in ZnS type crystals containing cobalt[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 27(1): 187~195.
- Han Ying. 2013. Ore-forming mechanism and metallogenetic model of Fankou Lead-zinc deposit in Guangdong province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology(in Chinese with English abstract).
- Heinrich C A. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study[J]. *Mineralium Deposita*, 39: 864~889.
- Huang Cheng, Li Xiaofeng, Wang Lifa, *et al.* 2013. Fluid inclusion study of the Huangshaping polymetallic deposit, Hunan Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4 232~4 244(in Chinese with English abstract).
- Huang Shiwu, Zhang Lianchang, Li Keqing, *et al.* 2010. CH₄-containing fluid inclusion study of the Taipingchuan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1 386~1 396(in Chinese with English abstract).
- Huang Shujun, Zeng Yongchao, Jia Guoxiang, *et al.* 1985. Geochemical zoning pattern and discussion of some issues of southern Hunan and northern Guangdong regional lead-zinc deposits[J]. *Mineral Resources and Geology*, (4): 81~97(in Chinese with English abstract).
- Huston D L, Sie S H, Suter G F, *et al.* 1995. Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Part I, Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite: comparison with $\delta^{34}\text{S}$ values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems[J]. *Economic Geology*, 90: 1 167~1 196.
- Lei Hao, Wang Zhilin, Lu Anhuai, *et al.* 2014. A typomorphic study of sphalerite from Hutouya Pb-Zn deposit in Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(5): 924~936(in Chinese with English abstract).
- Li Nan, Deng Jun, Yang Liqiang, *et al.* 2014. Paragenesis and geochemistry of ore minerals in the epizonal gold deposits of the Yangshan gold belt, West Qinling, China[J]. *Mineralium Deposita*, 49(4): 427~449.
- Li Shengrong. 2008. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~346(in Chinese with English abstract).
- Liang Xinquan and Wen Shunü. 2009. Characteristics of strike-slip structures and metallogenetic model of the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(4): 556~566(in Chinese with English abstract).
- Liu Deli, Liu Jishun, Guo Jun, *et al.* 2006. Ore-controlling structure in Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province[J]. *Mineral Deposits*, 25(2): 183~190(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming and Li Zhaolin. 1984. Element Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~548(in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa, Ma Liyan, Qu Wenjun, *et al.* 2006. U-Pb and Re-Os isotope geochronology of Baoshan Cu-Mo polymetallic ore deposit in Hunan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2 483~2 492(in Chinese with English abstract).

- Ma Liyan, Lu Yuanfa, Mei Yuping, *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite from Shuikoushan ore-field, Hunan province and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2 475~2 482(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Li Hongyan and Pei Rongfu. 1995. Nd-Sr isotopic and petrogenetic studies of the Qianlishan granite stock, Hunan province [J]. *Mineral Deposits*, 14(3): 235~242(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, *et al.* 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 329~2 338(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67: 551~578.
- Ohmoto H. 1992. Systematics of sulfur and carbon in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67: 551~579.
- Pan Xiaofei and Liu Wei. 2005. Characteristics and significance of CH₄-rich fluid inclusions from mafic-ultramafic complex at the Xiangshan, eastern Tianshan Mountains, Xinjiang of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 211~218(in Chinese with English abstract).
- Qiu Xiaoping. 1991. Researches on ore-forming tectonic dynamics of Fankou lead-zinc ore deposits, Guangdong [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, (23): 57~72(in Chinese with English abstract).
- Roedder E and Dwornik E J. 1998. Sphalerite Color Banding: Lack of correlation with Iron Content, Pine Point, Northwest Territories, Canada[J]. *American Mineralogists*, 53: 1 523~1 529.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions[J]. *Reviews in Mineralogy*, 12: 337~359.
- Scott S D and Barnes H L. 1971. Sphalerite Geothermometry and Geobarometry[J]. *Economic Geology*, 66: 653~669.
- Shi Yingxia, Li Nuo and Yang Yan. 2009. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Sandaozhuang Mo-W deposit in Luanchuan county, Henan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2 575~2 587(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu and Wang Dezi. 2006. A comparison study of basin and range tectonics in the Western North America and Southeastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, *et al.* 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 23: 876~884(in Chinese with English abstract).
- Wang Jing. 2011. Genetic mineralography and genetic mineralogy study on Fankou Pb-Zn ore deposit in Guangdong province[D]. Changsha: Central South University(in Chinese with English abstract).
- Wu Guang, Sun Fengyue, Zhao Caisheng, *et al.* 2007. Fluid inclusion study on gold deposits in northwestern Erguna metallogenic belt, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2 227~2 240(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianmin, Zhao Huachen, Zhang Shengyan, *et al.* 1985. Comparative research and the discussion of mineralization mechanism of the three types of lead-zinc deposit, southern Hunan and northern Guangdong [J]. *Mineral Resources and Geology*, (4): 55~69(in Chinese with English abstract).
- Xie Yincui, Lu Jianjun, Ma Dongsheng, *et al.* 2013. Origin of granodiorite porphyry and mafic microgranular enclave in the Baoshan Pb-Zn polymetallic deposit, southern Hunan Province: Zircon U-Pb chronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4 186~4 214(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun, Xie Qiaolin, Lu Sanming, *et al.* 2005. Fluid inclusion characteristics of copper deposits on the western border of Lanping basin, Yunnan province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 25(2): 170~176(in Chinese with English abstract).
- Ye Lin, Cook N J, Ciobanu C L, *et al.* 2011. Trace and minor element in sphalerite from base metal deposits in South China: a LA-ICPMS study[J]. *Ore Geology Review*, 39: 188~217.
- Ye Lin, Gao Wei, Yang Yulong, *et al.* 2012. Trace elements in sphalerite in Laochang Pb-Zn polymetallic deposit, Lancang, Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1 362~1 372(in Chinese with English abstract).
- Yuan Yabin, Yuan Shunda, Chen Changjiang, *et al.* 2014. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the granitoids in the Huangshanping mining area and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 64~78(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shugen, Ding Cungen, Li Minggao, *et al.* 2009. A genetic mineralogical study of sphalerite in the Fankou Pb-Zn ore district[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(4): 364~374(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shugen. 1998. An analysis of geothermal fluid mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 17(1): 91~96(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Liu Shenbo, *et al.* 2013. Metallogenetic age of Mississippi Valley Type Pb-Zn deposit in Fankou, Guangdong: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating of diabase[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 167~177(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Wang Yanli, *et al.* 2012. Sulfur and lead isotope constraints on ore formation of the Huangshaping W-Mo-Bi-Pb-Zn polymetallic ore deposit, Hunan Province, South China[J].

Acta Petrologica Sinica, 28(12): 3 809~3 822(in Chinese with English abstract).

Zuo Changhu, Lu Rui, Zhao Zengxia, *et al.* 2014. Characterization of Element Geochemistry, LA-ICP-MA Zircon U-Pb Age, and Hf Iso-
tope of Granodiorite in the Shuikoushan Deposit, Changning, Hun-
nan Province[J]. Geological Review, 60(4): 811~823(in Chinese
with English abstract).

附中文参考文献

- 艾 昊. 2013. 湖南黄沙坪多金属矿床成矿斑岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素制约[J]. 矿床地质, 32(3): 545~563.
- 陈建华, 曾小钦, 陈 晔, 等. 2010. 含空位和杂质缺陷的闪锌矿电子结构的第一性原理计算[J]. 中国有色金属学报, 20(4): 765~771.
- 戴自希, 盛继福, 白 冶. 2005. 世界铅锌资源的分布与潜力[M]. 北京: 地震出版社, 1~387.
- 地矿部地矿司南岭铅锌矿专题组. 1985. 南岭地区铅锌矿床成矿规律[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1~349.
- 韩 英. 2013. 广东凡口铅锌矿床成矿机制与成矿模式[D]. 昆明: 昆明理工大学.
- 黄 诚, 李晓峰, 王立发, 等. 2013. 湖南黄沙坪多金属矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 29(12): 4 232~4 244.
- 黄世武, 张连昌, 李克庆, 等. 2010. 得尔布干成矿带太平川铜铅矿床含 CH₄ 流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 26(5): 1 386~1 396.
- 黄书俊, 曾永超, 贾国相, 等. 1985. 湘南、粤北区域铅锌矿床地球化学分带模式及若干问题的讨论[J]. 矿产与地质, (4): 81~97.
- 雷 浩, 王智琳, 鲁安怀, 等. 2014. 青海虎头崖铅锌矿床闪锌矿化学成分特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 33(5): 924~936.
- 李胜荣. 2008. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1~346.
- 梁新权, 温淑女. 2009. 广东凡口铅锌矿床的走滑构造及成矿模式[J]. 大地构造与成矿学, 33(4): 556~566.
- 刘德利, 刘继顺, 郭 军, 等. 2006. 广东凡口铅锌矿床控矿构造型式[J]. 矿床地质, 25(2): 183~190.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1~548.
- 路远发, 马丽艳, 屈文俊, 等. 2006. 湖南宝山铜-钼多金属矿床成岩成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2 483~2 492.
- 马丽艳, 路远发, 梅玉萍, 等. 2006. 湖南水口山矿区花岗闪长岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(10): 2 475~2 482.
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富. 1995. 湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究[J]. 矿床地质, 14(3): 235~242.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2 329~2 338.
- 潘小菲, 刘 伟. 2005. 东天山香山镁铁-超镁铁岩中富 CH₄ 流体包裹体的特征及其意义[J]. 岩石学报, 21(1): 211~218.
- 邱小平. 1991. 广东凡口铅锌矿床成矿构造动力研究[J]. 中国地质科学院院报, (23): 57~72.
- 石英霞, 李 诺, 杨 艳. 2009. 河南省栾川县三道庄钨钼矿床地质和流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 25(10): 2 575~2 587.
- 舒良树, 王德滋. 2006. 北美西部与中国东南部盆岭构造对比研究[J]. 高校地质学报, 12(1): 1~13.
- 舒良树, 周新民, 邓 平, 等. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 23: 876~884.
- 王 晶. 2011. 广东凡口铅锌矿床成因矿相学及成因矿物学研究[D]. 长沙: 中南大学.
- 武 广, 孙丰月, 赵财胜, 等. 2007. 额尔古纳成矿带西北部金矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 23(9): 2 227~2 240.
- 吴健民, 赵化琛, 张生炎, 等. 1985. 湘南粤北三类铅锌矿床的对比性研究与成矿作用机理探讨[J]. 矿产与地质, (4): 55~69.
- 谢银财, 陆建军, 马东升, 等. 2013. 湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩及其暗色包体成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 29(12): 4 186~4 214.
- 徐晓春, 谢巧勤, 陆三明, 等. 2005. 滇西兰坪盆地西缘铜矿床矿物流体包裹体研究[J]. 矿物学报, 25(2): 170~176.
- 叶 霖, 高 伟, 杨玉龙, 等. 2012. 云南澜沧老厂铅锌多金属矿床闪锌矿微量元素组成[J]. 岩石学报, 28(5): 1 362~1 372.
- 原垠斌, 袁顺达, 陈长江, 等. 2014. 黄沙坪矿区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(1): 64~78.
- 张术根, 丁存根, 李明高, 等. 2009. 凡口铅锌矿区闪锌矿的成因矿物学特征研究[J]. 岩石矿物学杂志, 28(4): 364~374.
- 张术根. 1998. 地热流体成矿作用分析[J]. 矿床地质, 17(1): 91~96.
- 祝新友, 王京彬, 刘慎波, 等. 2013. 广东凡口 MVT 铅锌矿床成矿年代——来自辉绿岩锆石 SHRIMP 定年证据[J]. 地质学报, 87(2): 167~177.
- 祝新友, 王京彬, 王艳丽, 等. 2012. 湖南黄沙坪 W-Mo-Bi-Pb-Zn 多金属矿床硫铅同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 28(12): 3 809~3 822.
- 左昌虎, 路 睿, 赵增霞, 等. 2014. 湖南常宁水口山 Pb-Zn 矿区花岗闪长岩元素地球化学, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. 地质论评, 60(4): 811~823.