

# 广西西大明山禄井铅锌矿床成因 ——流体包裹体、硫化物矿物化学和硫同位素约束

滕建青<sup>1</sup>, 付伟<sup>1,2</sup>, 冯洋洋<sup>1</sup>, 冯佐海<sup>1,2</sup>, 李赛赛<sup>1,2</sup>, 乐兴文<sup>3</sup>

(1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541006; 2. 广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林 541006; 3. 广西壮族自治区第四地质队, 广西 南宁 530031)

**摘要:** 禄井矿床是广西西大明山地区内一个典型的脉状铅锌矿床, 矿体赋存于寒武纪地层中, 主要受断裂构造控制。本文在详细野外调查的基础上, 通过对其流体包裹体、硫化物矿物化学和硫同位素的系统测定和分析, 探讨了成矿流体性质和矿质来源。流体包裹体研究表明, 禄井矿床主成矿阶段流体包裹体类型以富液相的气液两相包裹体和纯液相包裹体为主, 主成矿期包裹体均一温度为 237 ~ 281℃ (平均值为 256℃), 对应盐度为 3.54% ~ 12.69% (均值为 8.39%)。硫化物电子探针分析结果显示, 闪锌矿以富集 Fe、Cd、In 而贫 Mn、Ga、Ge 等元素为特征, 多属于形成温度偏高的含铁闪锌矿类型。硫化物硫同位素研究显示,  $\delta^{34}\text{S}$  值总体变化范围为 -1.9‰ ~ 4.4‰, 呈塔式分布, 均值为 1.7‰, 位于零值附近, 暗示禄井矿床硫化物的硫主要来源于岩浆。综合矿床地质、流体包裹体、硫化物矿物化学及硫同位素特征可知, 禄井矿床应归属于热液脉型铅锌矿床范畴, 在成因上与本区深部的隐伏岩体具有密切的联系, 成矿时代可能为燕山晚期。

**关键词:** 闪锌矿; 微量元素; 流体包裹体; 硫同位素; 禄井铅锌矿床; 钦杭成矿带

中图分类号: P618.4; P578.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)04-0562-13

## The genesis of the Lujing Pb-Zn deposit: Constraints from fluid inclusions, sulfide mineral chemistry and S isotopes evidence

TENG Jian-qing<sup>1</sup>, FU Wei<sup>1,2</sup>, FENG Yang-yang<sup>1</sup>, FENG Zuo-hai, LI Sai-sai<sup>1,2</sup> and LE Xing-wen<sup>3</sup>

(1. Department of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials in Guangxi, Guilin 541006, China; 3. No. 4 Geological Party of Guangxi, Nanning 530031, China)

**Abstract:** The Lujing deposit is a typical veined Pb-Zn deposit in west Damingshan area, and its orebodies are located in the Cambrian strata and strictly controlled by faults. Based on detailed field geological survey as well as analysis and interpretation of fluid inclusions, sulfide mineral chemistry and S isotope, the authors investigated ore-forming fluid properties and sources of ore-forming mineral. Petrographic observations reveal that the inclusions at stage II of Lujing deposit primarily belong to liquid-rich, single-phase aqueous fluid inclusion. Microthermometric measurements indicate that homogenization temperatures are 237 ~ 281℃ (256℃ on average), with corresponding salinities of 3.54% ~ 12.69% (8.39% on average). Electron microprobe analysis indicates that, characterized by

收稿日期: 2017-11-15; 接受日期: 2018-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41462005); 广西自然科学基金重点基金(2015GXNSFDA139029); 广西找矿突破战略行动地质矿产勘查项目(桂国土资函[2017]341号)

作者简介: 滕建青(1989-), 男, 汉族, 硕士, 从事矿床地质学方向研究, E-mail: xueshuy126@126.com。

high content of Fe, Cd and low content of Mn, Ga and Ge, sphalerites should belong to high temperature iron sphalerite. The  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfides vary from  $-1.9\text{‰}$  to  $4.4\text{‰}$  ( $1.7\text{‰}$  on average), close to zero on average, which indicates that sulfur of the sulfide was derived from the magmatic source. Based on ore-forming geological characteristics, fluid inclusions, sulfide mineral chemistry and S isotope, the authors hold that the Lujing deposit should belong to hydrothermal vein type Pb-Zn deposit, that mineralization of Lujing was closely related to the magmatism, and that the deposit was formed in late Yanshanian period.

**Key words:** sphalerite; trace elements; fluid inclusion; S isotopes; Lujing Pb-Zn deposit; Qingzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (41462005); Guangxi Natural Science Foundation (2015GXNSFDA139029); Project of Mineral Resource Exploration Breakthrough in Guangxi (2017, No. 341)

广西西大明山地区位于华南钦杭成矿带西南端(毛景文等, 2011; 周永章等, 2015), 是广西九大成矿区之一(杨斌等, 2007), 同时也是广西重要的矿产勘查区。区内发育有凤凰山大型独立银矿(李泽琴等, 1998)、弄屯大型铅锌矿床(柴明春等, 2015)和罗维中型矽卡岩型钨铋矿床(李赛赛等, 2016a)等一大批中低温矿床。区内成矿条件优越, 地层富含 Pb、Zn 等成矿元素, 特别是寒武纪地层中的 Pb、Zn 元素含量最高, 是地壳丰度值的 2~10 倍以上, 相对含量低的泥盆系的 Pb、Zn 元素含量也比地壳丰度值高出 1~3 倍以上; 区内流体活动强, 发育有高温角岩化和云英岩化等围岩蚀变作用。航磁、重力和遥感异常和深部钻孔都已证实区内发育有隐伏岩体, 地表沿裂隙和断层处也零星分布有辉绿岩脉( $\beta\mu$ )和石英斑岩脉( $\lambda\pi$ )脉, 岩石微量元素分析结果显示岩体富含成矿元素(朱革非, 1989; 麦广田, 1990; 周永峰, 1993; 李赛赛等, 2016b)。近年来发现的弄屯大型铅锌成矿就是很好的佐证, 其铅锌资源量达  $60 \times 10^5 \text{t}$ , 是目前华南地区少有的大型热液脉型铅锌矿床(柴明春等, 2015)。前人在区域地质(黄继钧, 1998, 2001)、矿床地质(陈海等, 1997; 陆建辉, 2014)、地球化学(李泽琴等, 1998; Tu *et al.*, 2013)、矿床成因(柴明春等, 2015)、隐伏岩体存在性预测(朱革非, 1989; 麦广田, 1990; 周永峰, 1993)和成矿时代(雷英凭, 2012; 李赛赛, 2016a)等方面进行了大量研究工作, 但是有关矿床成因仍存有争议。付伟等(2014)通过对区内多金属矿床特征规律总结认为, 西大明山地区大规模矿化与隐伏岩体具有密切的成因联系, 可能是一个岩浆热液驱动下的岩浆热液成矿系统。

绿井矿床位于广西西大明山矿集区东北侧, 是区内具代表性的典型铅锌矿床。它具有悠久的开采

历史, 相传从清朝乾隆年间就有人进行矿产开采。矿体严格受断裂控制, 呈脉状赋存于寒武纪地层中。绿井矿床虽然开采早, 但是对其矿床学成因研究的资料报道却是相当有限且存有争议, 有岩浆热液成因和热卤水成因两种观点。雷英凭(2012)通过对绿井与凤凰山矿床对比研究, 认为绿井铅锌矿床是岩浆期后中低温热液型矿床。杨斌等(2007)综合广西区内矿床特征, 将绿井铅锌矿床归纳为热卤水成矿系列。鉴于此, 本文综合矿物学、流体包裹体测温、硫化物矿物化学和硫同位素研究方法, 开展典型绿井铅锌矿床的成因机制研究, 以期完善区内矿床成因机制并为后期区内铅锌矿床的进一步勘查提供部分理论指导。

## 1 区域地质

广西西大明山矿集区位于华夏板块与扬子板块结合带(钦杭结合带)西南端(毛景文等, 2011)。区内地层主要发育有寒武系、泥盆系和少量的石炭系、第四系(图1)。寒武系主要为一套砂泥岩组成的复理石建造, 是区内银铅锌多金属矿的主要赋矿层位。泥盆系主要为一套碳酸盐岩建造。寒武系和泥盆系富含 Pb、Zn、Ag、Mn 等成矿元素(李泽琴等, 1998)。区内构造演化历史复杂, 先后经历了加里东期-印支期-燕山期-喜马拉雅山期多期的构造运动(黄继钧, 2001; 周维博, 2005), 形成了由一系列次级背、向斜组成的近 EW 向延伸的西大明山大型复式背斜及 EW 向、NW 向、NE 向断裂构造。复式背斜呈短轴状、穹窿状, 近 EW 向延伸, 褶皱枢纽向东、西两端倾伏, 轴面近于直立, 其核部地层为寒武系, 两翼地层为泥盆系, 呈角度不整合于寒武系之上。区内断裂发育, 根据断层与地层、断层与断层之间的相

互切割关系,判断EW向及近EW向相对形成较早,其次为NE向断层,NW向断层形成最晚。其中与成矿有关的断裂构造的走向主要是近东西向到北东向。据统计,50%的矿床和矿化点分布在距离近EW

向到NE向断裂构造0.5 km的范围内,而有75%的矿床和矿化点分布在距离近EW向-NE向断裂1 km范围内,在2~3 km范围内仅仅分布有两个矿化点(雷英凭,2012)。

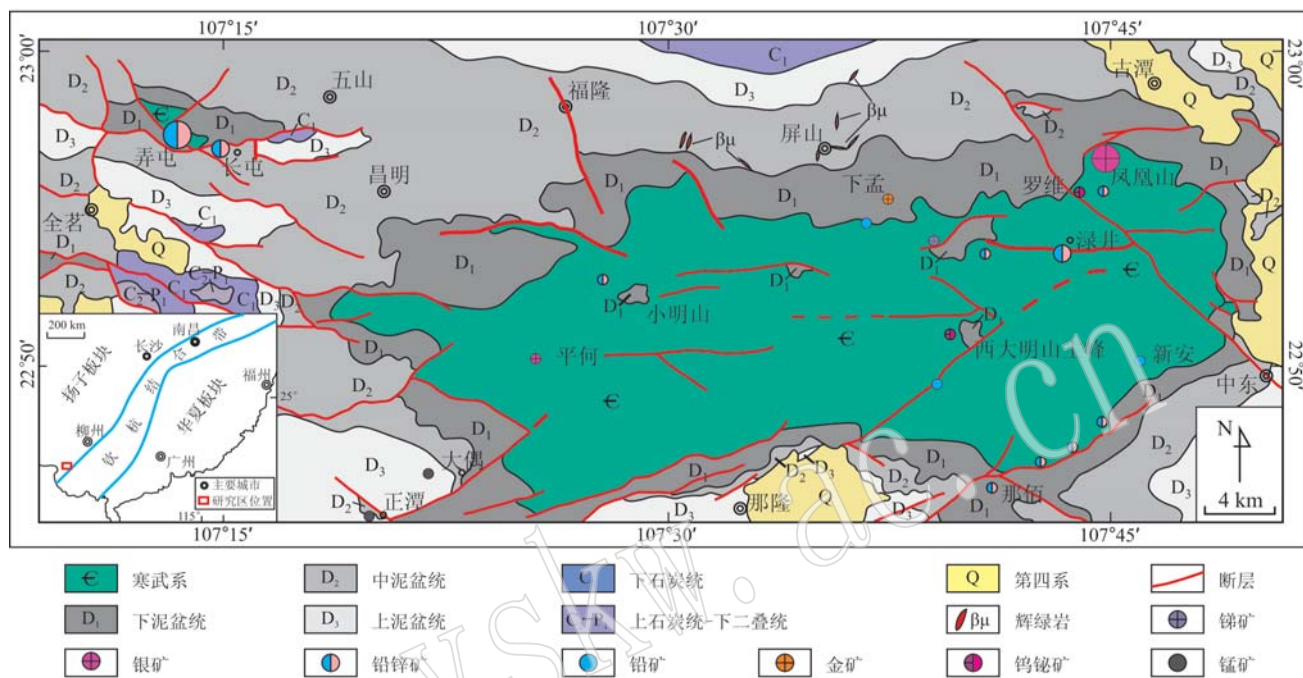


图1 广西西大明山区域地质及矿产分布图

Fig. 1 Regional geological map of Xidaming Mountain, Guangxi, showing major deposits

尽管区内岩浆岩出露甚少,仅见有少量辉绿岩脉( $\beta\mu$ )及石英斑岩脉( $\lambda\pi$ )于裂隙和断层处零星分布(李泽琴等,1998),但是前人航磁、重力和遥感等资料认为,西大明山地区应该有隐伏岩体存在(朱革非,1989;麦广田,1990;周永峰,1993;李赛赛等,2016b),具体证据可概括如下:区内1:100万重力资料内呈现出一NEE(近EW)向的低缓布格重力异常,1:5万航磁资料中出现8处磁异常,推测均由深部隐伏花岗岩体引起;区内遥感解译出环形构造影像;出露于西大明山主峰的石英斑岩脉周围发育大面积的角岩化、硅化和电气石化等围岩蚀变。此外,毗邻绿井矿床的罗维矿区深部钻探成功揭露了隐伏黑云母花岗岩闪长岩,充分验证了前人对西大明山存在隐伏岩体预测的正确性。

## 2 矿床地质

绿井铅锌矿床位于西大明山矿集区东北侧。矿区内主要出露寒武纪地层,其进一步可分为小内冲

组一段和二段(图2)。小内冲组一段( $\epsilon_1x_1$ )以中厚层状泥岩为主,夹有炭质泥岩。小内冲组二段( $\epsilon_2x_2$ )为厚层状长石石英杂砂岩夹中薄层状泥岩。区内构造极为发育,近东西向的绿井断裂走向为北东75°左右,倾向南东,倾角70°~80°,呈舒缓波状,横贯矿区,切割寒武纪地层。该断裂为西大明山东西向构造破碎带东部的一段,为主要的导矿、容矿构造。近东西向展布的绿井短轴背斜是矿区的主要褶皱构造背斜,它由寒武纪地层组成(雷英凭,2012)。

绿井矿床矿体可分为西段I、II、III、IV、V、VI、VII 7个矿体和延伸至东段的III、VI及VIII矿体。矿体由东西向绿井断裂控制。西段矿体受绿井断裂影响,矿体呈脉状近东西向平行排列产出,倾向约165°,倾角70°~80°。其中III号矿体最大,近东西走向,长1060 m,倾向南东,往倾向延展约300 m。倾角一般较陡,平均倾角73°,厚度变化大(0.56~7.28 m,平均1.75 m),矿石量178 200 t, Pb金属量7 039.49 t,平均品位0.03%~11.58%; Zn金属量10 004.23 t,平均品位0.21%~17.73%。东段矿体

矿体的产状、形态与西矿段不同。除延伸至东段的Ⅲ、Ⅵ矿体外,其余各矿体一般沿层面裂隙充填,产状平缓,矿体为短而小的凸镜状。其中Ⅷ号矿体规模较大,长250 m,宽100 m,倾向东南,倾角24°,

矿体共有铅锌矿矿石量14 496.63 t,铅金属量571.06 t,Zn金属量1 483.81 t。目前,该矿体已被采空,其余4个矿体为零星小矿体,工业意义不大(黑龙江省寰诚矿产资源评估咨询有限公司,2011)<sup>①</sup>。

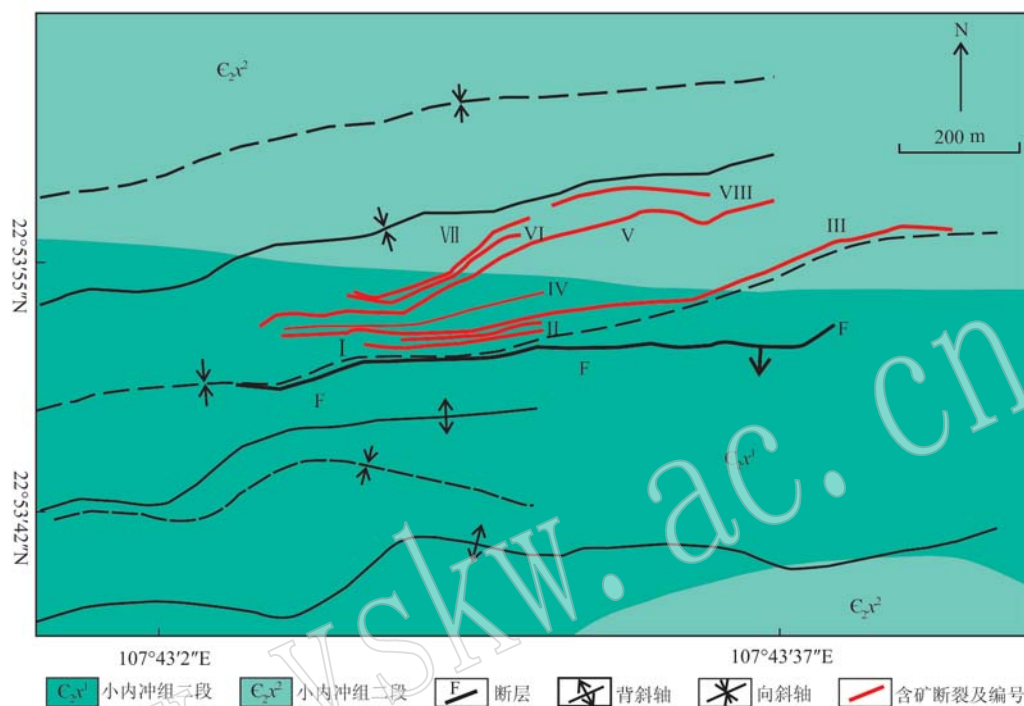


图2 绿井铅锌矿床地质简图(据涂伟,2011 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Lujiing deposit (modified after Tu Wei, 2011)

矿区围岩蚀变不发育且类型简单,局部发育有硅化、绢云母化、黄铁矿化。矿石矿物主要有黄铁矿、方铅矿和闪锌矿,铅锌之比为4:5。脉石矿物主要发育有石英和方解石。矿石结构有半自形-自形粒状结构、它形晶粒结构、共生结构(图3a)、交代结构、格状结构、镶嵌结构、包含结构/固溶体分离结构(图3b)、晶粒内部双晶结构和乳浊状结构等。矿石构造简单,发育有块状构造(图3c、3d)、条带状构造(图3e)和斑点状构造(图3f)等。

已有研究表明,该矿床经历了3个成矿阶段(涂伟,2011):①石英-黄铁矿期(Ⅰ),矿物组合为黄铁矿、石英、绢云母和黄铜矿;②石英-多金属硫化物期(Ⅱ),金属矿物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铜矿,脉石矿物主要有石英和绢云母;③碳酸盐期(Ⅲ),矿物只发育方解石而无其它矿物(图4)。

### 3 样品及分析测试方法

为能准确判断绿井矿床成矿流体的物理化学性质,本文着重选取了绿井矿床石英-多金属硫化物阶段(主成矿阶段)样品,磨成厚度为0.25~0.3 mm的双面抛光包裹体片,进行流体包裹体岩相学观察和显微测温分析。测试工作在桂林理工大学地球科学学院流体包裹体实验室进行,测试仪器为THMSG600冷/热台(Linkam公司),可测温度范围为-196~600℃,分析精度分别为±0.5℃(-120~-70℃)、±0.2℃(-70~100℃)、±2℃(100~500℃)。在加热冷却过程中,温度控制20℃/min,当临近相变变化点时,温度控制在0.2和1℃/min。盐度值根据NaCl-H<sub>2</sub>O体系包裹体冰点与盐度

① 黑龙江省寰诚矿产资源评估咨询有限公司. 2011. 广西扶绥县绿井铅锌矿采矿权评估报告书. 1~28.



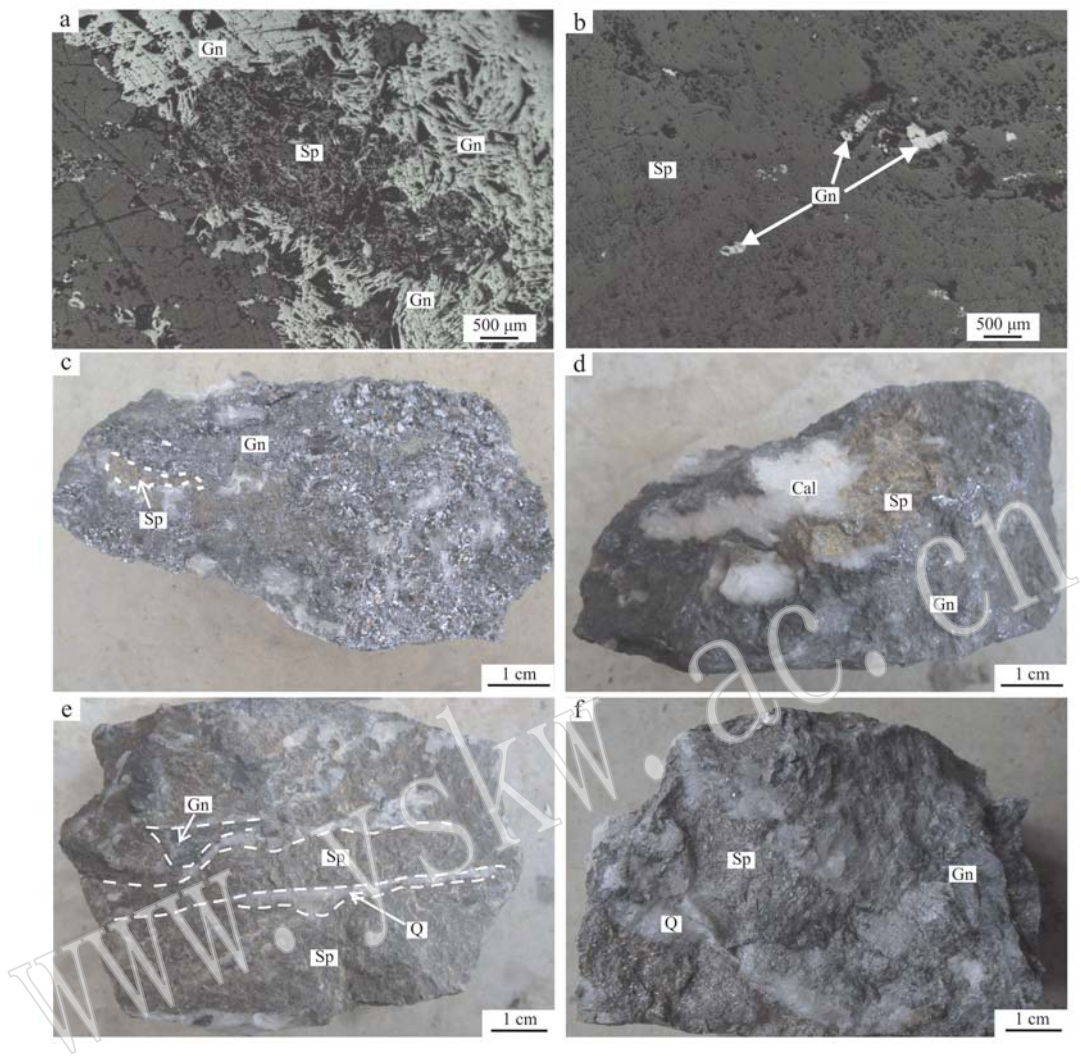


图 3 绿井铅锌矿床矿石样品及矿物组合照片

Fig. 3 3 Photographs of ore samples and mineral assemblage from the Lujing Pb - Zn deposit  
a—方铅矿与闪锌矿共存; b—方铅矿出溶于闪锌矿; c、d—致密块状矿石; e—条带状矿石; f—斑杂状矿石; SP—闪锌矿; Gn—方铅矿;  
Cal—方解石; Q—石英  
a—coexisting galena and sphalerite; b—galena exsolved from sphalerite; c, d—dense massive sphalerite and galena; e—banded sphalerite and galena; f—tactitic sphalerite and galena; Sp—sphalerite; Gn - galena; Cal—calcite; Q—quartz

矿物	石英-黄铁矿阶段	石英-多金属硫化物阶段	碳酸盐阶段
黄铁矿	<div></div>		
石英	<div></div>	<div></div>	
绢云母	<div></div>	<div></div>	
黄铜矿		<div></div>	
方铅矿		<div></div>	
闪锌矿		<div></div>	
方解石			<div></div>

图 4 绿井铅锌矿床热液期矿物共生组合

Fig. 4 Assemblage and paragenetic sequence of minerals from the Lujing Pb-Zn deposit

关系表(卢焕章等,2004)查得。

3件硫同位素分析样品同样选自绿井矿床石英-多金属硫化物主成矿期。首先将矿石样品用玛瑙研钵逐级破碎,然后过40~60目筛、清洗、烘干后在显微镜下重复挑选,保证其纯度达99%以上。之后将单矿物样品送去核工业北京地质研究院分析测试研究中心使用MAT251EM质谱仪进行硫同位素测试,测试结果使用标准为V-CDT,分析精度高于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。详细测试方法和过程为:首先将金属硫化物单矿物与氧化亚铜按一定比例研磨、混合均匀;然后进行氧化反应生成 $\text{SO}_2$ ,并采用冷冻法收集;最后通过MAT-251气体同位素质谱仪分析硫同位素组成。

硫化物矿物化学分析样品也同样采自于绿井矿床石英-多金属硫化物主成矿期。首先将矿石样品制作成矿相片,然后在光学显微镜下进行观察和鉴定,查明样品中主要金属矿物和脉石矿物的种类、结构构造以及共生关系等,并圈定待测矿物,最后对矿相片进行喷碳处理,利用电子探针(EPMA)显微分析仪对目标硫化物矿物(闪锌矿和方铅矿)进行矿物化学测试。测试工作在桂林理工大学地球科学学院电子探针实验室完成,电子探针仪器型号为日本电子(JEOL)JXA-8230,加速电压为20 kV,束流20 nA,束斑 $3.0\text{ }\mu\text{m}$ ,使用如下标准:Fe(FeS<sub>2</sub>)、Cu(Cu)、Pb(PbS)、Zn(ZnS)、S(FeS<sub>2</sub>)、As(GaAs)、Sb(Sb)、Co(Co)、Ni(Ni)等。

## 4 分析结果

### 4.1 流体包裹体特征

显微镜下显示,绿井矿床主成矿期次石英样品中流体包裹体十分发育,包裹体分布杂乱无章,定向排列组合成线性分布或孤立存在(图5a)。根据包裹体在室温下的性质、相态及加热冷却过程中的相态变化,识别出该阶段主要发育富液相的气液两相包裹体和单相水溶液包裹体。富液相水溶液包裹体在石英中大量发育,形状有椭圆形、长方形、圆形和不规则形(图5b~5d),其大小为 $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ ,气液比分布于 $10\%\sim 45\%$ 之间。单相水溶液包裹体,主要呈椭圆和不规则形,大小在 $3\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 之间(图5e)。

### 4.2 流体包裹体显微测温

主成矿期次中的气液两相包裹体测温结果见图6。在加热冷却过程中,为防止流体包裹体因温度过

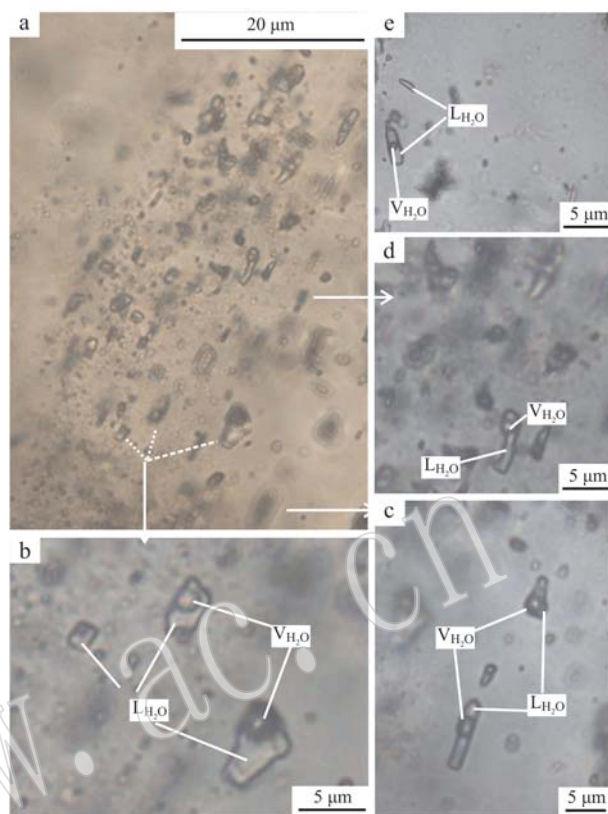


图5 绿井铅锌矿床石英-多金属硫化物阶段石英中流体包裹体显微照片

Fig. 5 Microphotographs of fluid inclusions from the Lujing Pb-Zn deposit

a—原生包裹体定向排列; b—正方形和不规则形状包裹体共存; c、d—长条形和不规则形包裹体; e—富液相包裹体和单相水溶液包裹体

a—directional arrangement of primary fluid inclusions; b—coexisting square and irregular shape liquid-rich fluid inclusions; c, d—long and irregular shape of fluid inclusions; e—liquid-rich and single-phase aqueous inclusions

高而爆裂,首先进行降温实验测定流体包裹体的冰点温度( $t_m$ ),然后加热升温测定包裹体的均一温度( $t_h$ )。原生气液包裹体测温结果显示,包裹体冰点温度介于 $-8.8\sim -2.1^\circ\text{C}$ 之间,对应盐度 $w(\text{NaCl})$ 为 $3.54\%\sim 12.69\%$ ,包裹体均一温度介于 $237\sim 281^\circ\text{C}$ 之间,平均值为 $256^\circ\text{C}$ 。

### 4.3 硫化物矿物化学特征

绿井矿床硫化物电子探针分析结果见表1。

分析结果显示,闪锌矿中Zn的质量分数为 $59.57\%\sim 64.28\%$ (平均 $62.58\%$ ),S的质量分数为 $32.30\%\sim 33.83\%$ (平均 $33.25\%$ ),与理论值(Zn 67.10%,S 32.90%,潘兆鲁,1993)相比,S的含量比

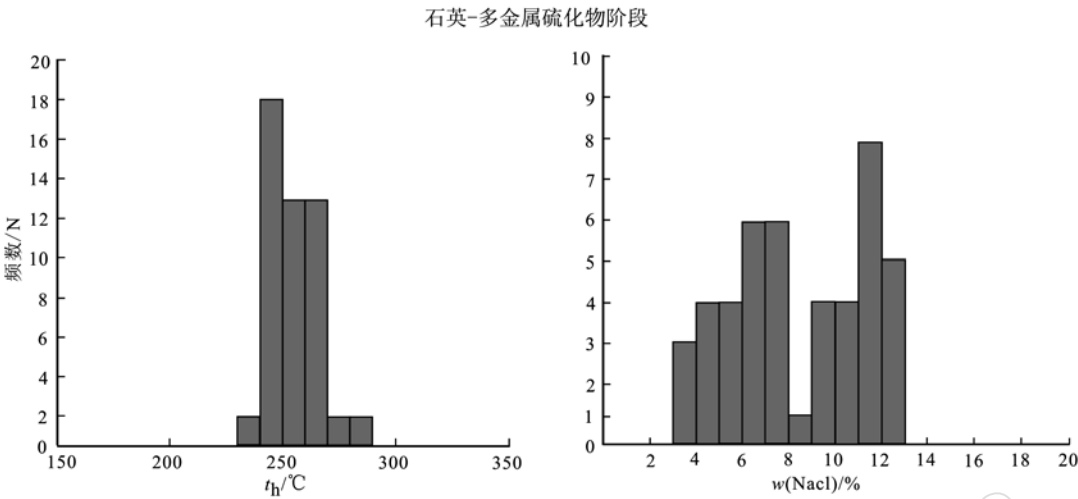


图 6 涿井铅锌矿床流体包裹体均一温度与盐度直方图  
Fig. 6 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions from the

表 1 涿井铅锌矿床闪锌矿和方铅矿电子探针成分点分析结果  $w_B/\%$   
Table 1 EPMA spots analytical results of sphalerite and galena in the Lujing Pb-Zn ore deposit

矿物	编号	Zn	Pb	Fe	Mn	Cd	Ni	Cu	S	Sb	As	Hg	Ag	Co	Ga	Ge	In	Total
闪锌矿	LJ-1-2	63.90	b. d.	1.80	0.01	0.68	b. d.	0.01	33.10	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	99.50
	LJ-1-3	64.20	b. d.	1.88	0.03	0.57	b. d.	b. d.	33.00	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	0.01	99.69
	LJ-1-4	64.28	b. d.	1.81	0.01	0.64	0.01	0.05	33.83	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	0.10	b. d.	0.04	100.67
	LJ-2-17	61.90	b. d.	5.37	b. d.	0.47	0.01	0.02	33.39	0.02	b. d.	0.02	b. d.	b. d.	n. d.	n. d.	b. d.	101.20
	LJ-2-18	63.18	b. d.	4.72	b. d.	0.45	b. d.	0.04	33.79	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	n. d.	n. d.	0.02	102.20
	LJ-2-19	61.00	b. d.	4.59	0.02	0.41	0.02	0.03	32.30	0.01	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	n. d.	n. d.	0.01	98.39
	LJ-2-21	59.57	b. d.	7.69	b. d.	0.52	b. d.	0.02	33.37	b. d.	b. d.	b. d.	0.03	b. d.	n. d.	n. d.	b. d.	101.17
方铅矿	LJ-2-8	0.02	87.80	0.05	b. d.	b. d.	0.04	b. d.	9.19	b. d.	0.06	b. d.	b. d.	b. d.	0.20	0.04	b. d.	97.16
	LJ-2-9	0.08	85.80	b. d.	0.01	0.05	b. d.	0.05	13.00	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	0.27	0	0.03	99.02
	LJ-2-10	b. d.	85.70	b. d.	b. d.	0.03	0.03	b. d.	13.00	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	b. d.	0.22	0.06	b. d.	98.76
	LJ-2-11	b. d.	86.66	0.04	b. d.	0.03	b. d.	b. d.	13.19	b. d.	b. d.	b. d.	0.03	0.01	0.19	0.02	b. d.	99.93
	LJ-2-12	0.02	87.28	0.02	b. d.	0.02	b. d.	b. d.	13.11	b. d.	b. d.	b. d.	0.02	b. d.	0.23	0.05	0.03	100.48

注: b. d. 表示低于检测线(含量 $<10^{-5}$ ); n. d. 表示未测。

较接近,Zn 的含量偏低较多。在图 7 可以看到,Fe 与 Zn 的含量呈负相关关系,推测 Fe 与 Zn 之间类质同像置换较为普遍,可能是导致闪锌矿中 Zn 含量偏低的主要原因(夏学惠, 1992; 刘铁庚等, 2010)。此外,闪锌矿还含有 Fe、Cd、In、Mn、Ag 等微量元素,其特征总体表现出以下几个方面: ① 富集 Fe、Cd、In,其中 Fe 含量为 1.80% ~ 7.69%(平均3.98%), Cd 含量为  $4\ 100\times 10^{-6}\sim 6\ 800\times 10^{-6}$ (平均  $5\ 300\times 10^{-6}$ ), In 含量为  $100\times 10^{-6}\sim 400\times 10^{-6}$ (平均  $200\times 10^{-6}$ )。② 贫 Mn、Ga、Ge,其中 Mn 含量为  $100\times 10^{-6}\sim 300\times 10^{-6}$ (平均  $180\times 10^{-6}$ ,  $n=4$ ), Ga 和 Ge 含量甚微,几乎都低于检测线。③ Zn/Cd 值变化范围为 93.97 ~ 148.78(平均 120.35,  $n=7$ ), Zn/Fe 值

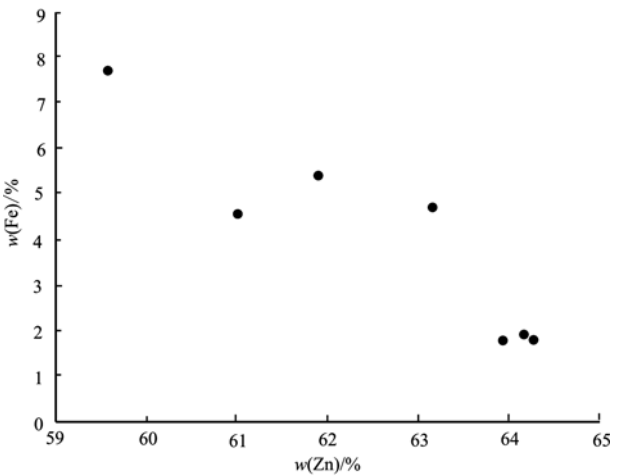


图 7 闪锌矿中 Zn 与 Fe 含量关系图  
Fig. 7 Zinc and iron content diagram in sphalerite

变化范围为 7.75 ~ 35.51 (平均 25.59,  $n = 7$ ), Zn/Mn 值变化范围为 2 140 ~ 6 428 (平均 4 986,  $n = 3$ )。

方铅矿中 Pb 的质量分数为 85.70% ~ 87.80% (平均 86.65%), S 的质量分数为 9.19% ~ 13.19% (平均 12.30%), 与理论值 (Pb 86.60%, S 13.40%, 潘兆橹, 1993) 相比, S 的含量偏低, Pb 的含量接近。此外, 方铅矿中还伴生有少量的 Fe、Mn、Zn、Cu、Ag、Cd、Ni、In 等元素。

银常与铅锌矿共/伴生, 绿井铅锌矿床主要金属矿物电子探针数据显示, 闪锌矿和方铅矿中银的含量较低, 特别是闪锌矿几乎不含银。此外, 矿床中未见有独立银矿物, 说明银元素主要呈类质同像的形式赋存于方铅矿矿物晶格中。

#### 4.4 硫同位素测试结果

S 同位素测试结果和前人数据 (涂伟, 2011) 见表 2。绿井矿床不同硫化物的 S 同位素组成基本相同,  $\delta^{34}\text{S}$  值集中在  $-1.9\text{‰}$  ~  $4.4\text{‰}$  之间。其中, 6 件闪锌矿  $\delta^{34}\text{S}$  值的变化范围为  $-0.5\text{‰}$  ~  $4.4\text{‰}$ , 均值为  $2.17\text{‰}$ ; 2 件方铅矿  $\delta^{34}\text{S}$  的变化范围  $-1.9\text{‰}$  ~  $2.1\text{‰}$ , 均值为  $-0.35\text{‰}$ 。上述结果表明,  $\delta^{34}\text{S}$  值变化范围较小, 相对较为集中, 说明 S 同位素组成较为稳定, 矿床形成时的物化环境未发生显著变化。

表 2 绿井矿床 S 同位素组成  
Table 2 S isotopic compositions of the sulfide minerals from the Lujing ore deposit

样号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	数据来源
LJ-1	闪锌矿	3.5	涂伟 (2011)
LJ-2	闪锌矿	-0.5	
LJ-2-1	闪锌矿	4.4	
LQ-11	方铅矿	-1.9	本文数据
LQ-15	方铅矿	2.1	
LQ-12	闪锌矿	2.1	
LQ-15	闪锌矿	2.3	
LQ-16	闪锌矿	1.2	

## 5 讨论

闪锌矿中微量元素含量有规律的变化与成矿温度及成因类型密切相关 (Cook *et al.*, 2009; 邹志超等, 2012; 叶霖等, 2012)。高温成因闪锌矿颜色深, 低温成因闪锌矿颜色浅 (曾永超等, 1985)。刘英俊等 (1984) 认为闪锌矿 Zn/Cd 值可以指示成矿温度,  $\text{Zn}/\text{Cd} > 500$ 、 $\text{Zn}/\text{Cd} = 250 \pm$  和  $\text{Zn}/\text{Cd} < 100$ , 分

别指示闪锌矿形成于高温、中温和低温。绿井闪锌矿颜色呈暗灰色-棕黑色, Zn/Cd 值变化范围为 93.97 ~ 148.78, 平均值为 120.35 ( $n = 7$ ), 指示绿井闪锌矿为中温条件下的产物, 这与流体包裹体测温结果一致。刘英俊等 (1984) 指出岩浆热液成因的闪锌矿富 Fe 和 Mn, 其含量分别为  $\text{Fe} > 5\%$ ,  $\text{Mn} > 1\ 000 \times 10^{-6}$ , 而层控改造成因的闪锌矿则以富 Ge、Ga 为特征, 其含量分别为  $52.3 \times 10^{-6}$  和  $159.8 \times 10^{-6}$  (平均值), 分别是岩浆热液型矿床的 45 倍和 7 倍 (曾永超等, 1985)。本文发现不同成因闪锌矿中的微量元素具有显著的差异, 层控型 (南岭地区铅锌矿床、贵州天桥)、MVT 型 (云南会泽、广东凡口) 和 SEDEX 型 (Red Dog、陕西铅硐山) 矿床产出的闪锌矿具有贫 Fe、Mn 富 Ga、Ge 的特征, 其 Zn/Fe、Zn/Mn 值较高 (地矿部地矿司南岭铅锌矿专题组, 1985; 王育民等, 1988; Kelley *et al.*, 2004; 王乾等, 2008; 李厚民等, 2009; 邹志超等, 2012), 而岩浆热液成因闪锌矿 (湖南黄沙坪) 具有富 Fe、Mn 贫 Ga、Ge 的特征, 其 Zn/Fe、Zn/Mn 值较低 (地矿部地矿司南岭铅锌矿专题组, 1985; 黄书俊等, 1987)。绿井闪锌矿富集 Fe、Cd、In 而贫 Mn、Ga 等微量元素的特征, 表明其具岩浆热液和沉积成因闪锌矿特点。综合考虑绿井闪锌矿化学成分特征, 认为绿井矿床的成矿作用与岩浆热液活动有关, 同时有围岩地层参与成矿作用。

硫同位素是判断硫化物矿床中矿化剂来源的重要途径 (Rye and Ohmoto, 1974; Ohmoto, 1986; Hoefs, 1997)。在平衡条件下, 硫化物中  $\delta^{34}\text{S}$  的富集顺序为:  $\text{Bi}_2\text{S}_3 < \text{Sb}_2\text{S}_3 < \text{Cu}_2\text{S} < \text{PbS} < \text{Cu}_5\text{FeS}_4 < \text{CuFeS}_2 < \text{ZnS} < \text{FeS}_{1-x} < \text{FeS}_2 < \text{MoS}_2$  (郑永飞等, 2000)。绿井矿床矿石中闪锌矿和方铅矿  $\delta^{34}\text{S}$  的平均值分别为  $2.17\text{‰}$  和  $-0.35\text{‰}$ , 总体上呈现  $\delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$  特征, 说明绿井矿床主成矿阶段的闪锌矿与方铅矿之间的 S 同位素分馏基本达到平衡, 暗示矿床成矿热液中硫化物是在平衡共生条件下形成的矿物组合, 沉淀于同一物化体系。在绿井矿床硫同位素直方图 (图 8) 上, 样品  $\delta^{34}\text{S}$  值集中分布于  $-1.9\text{‰}$  ~  $4.4\text{‰}$  之间, 变化范围狭窄, 具有一定的塔式分布特征, 暗示硫的来源可能相对单一。在热液矿床中, 硫化物矿物的  $\delta^{34}\text{S}$  值不一定等于成矿热液中总硫  $^{34}\text{S}_{\Sigma}$  值 (杜泽忠等, 2011; 田世洪等, 2011; 付伟等, 2013), 而是总硫值同位素组成、 $f_{\text{O}_2}$ 、pH、离子强度和温度的函数, 即  $\delta^{34}\text{S} = f(\delta^{34}\text{S}_{\Sigma}, f_{\text{O}_2}, \text{pH}, I, T)$ 。热液成因硫化物的硫同位素组成不仅与物质来源有关,

而且跟成矿流体的物理化学性质也有关(Ohmoto, 1972)。因此,判断热液硫化物沉淀时,确定热液流体中总硫值  $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{s}}$ , 是判断成矿流体中硫来源极为关键的一步。在绿井矿床中,主要的硫化物为黄铁矿、闪锌矿和方铅矿,即硫元素主要以硫化物形式出现,而未见有硫酸盐类矿物。因此,在这种低 $f_{\text{O}_2}$ 和低pH值环境下,硫化物矿物的  $\delta^{34}\text{S}$  平均值可以近似代表成矿热液中总硫  $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{s}}$  值。绿井矿床  $\delta^{34}\text{S}$  平均值为 1.7‰, 高于幔源岩浆硫(0‰)(Chaussidon *et al.*,

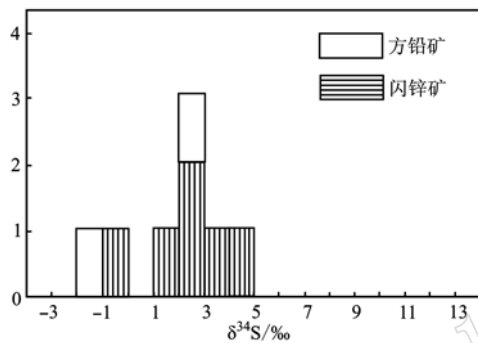


图8 绿井矿床S同位素组成直方图

Fig. 8 Sulfur isotopic compositions histogram of the Lujing ore deposit

成矿流体性质是判别矿床成因类型的重要依据(Wilkinson, 2001; 陈衍景等, 2007; 武广等, 2010)。因成矿背景及成矿流体物理化学特征的差异,MVT型、SEDEX型和热液脉型矿床流体包裹体具有各自的特征。MVT型矿床流体包裹体均一温度介于50~250℃之间,集中于90~150℃,盐度介于10%~30%之间(Leach and Sangster, 1993; 卢焕章等, 2004; Leach *et al.*, 2005)。SEDEX型矿床因其矿石矿物中流体包裹体少且小的特点(韩发等, 1999),而普遍采用与成矿关系密切的石英、方解石进行流体温度盐度的测定。Leach等(2005)综合资料发现,SEDEX型矿床成矿流体温度介于50~250℃之间,盐度介于-10%~35%之间。热液脉型铅锌型矿床成矿流体温度主要介于130~340℃之间,盐度变化于0.5%~12%之间(Beuchat *et al.*, 2004; Marchev *et al.*, 2005; Palinkas *et al.*, 2009; 李龚健等, 2013; 王祥东等, 2014)。绿井矿床流体包裹体测温结果表明,矿床主成矿期次成矿流体温度与盐度分别为237~281℃和3.54%~12.69%,具中温、中低盐度的特点,与热液脉型铅锌矿床非常类似。此外,绿井矿体主要呈脉状充填于断裂破碎

1989)和沉积物中还原硫(<0‰)(Rollinson, 1993),而低于同期海水硫酸盐(寒武纪-三叠纪  $\delta^{34}\text{S}$  值为15‰~35‰)(Claypool *et al.*, 1980),位于花岗岩  $\delta^{34}\text{S}$  值(5‰~15‰)(Ohmoto and Goldhaber, 1997)和陨石硫(-3‰~3‰)(Chaussidon and Lorand, 1990)之间,更靠近陨石硫(图9),说明矿床硫的矿化剂主要来源于深源岩浆硫,这与绿井矿床成矿流体主要来源于岩浆热液相符(涂伟, 2011)。

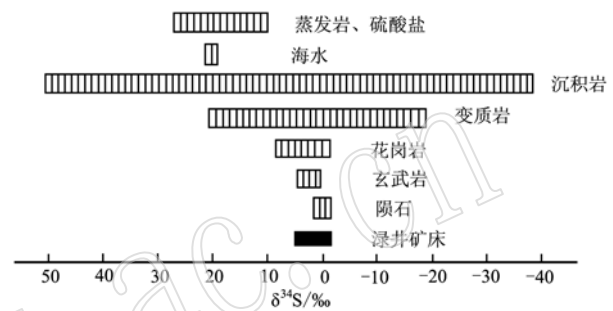


图9 硫同位素组成分布图(底图据 Ohmoto and Goldhaber, 1997; Anderson *et al.*, 1998)

Fig. 9 Distribution of sulfur isotopic compositions (base map after Ohmoto and Goldhaber, 1997; Anderson *et al.*, 1998)

带中,严格受断裂控制;矿石构造发育块状、斑点状和带状等典型热液充填矿床矿石构造,这也与国内外热液脉型铅锌矿床地质特征(Panneerselvam *et al.*, 2006; 贾敬伍等, 2014)相吻合。因此,本文认为绿井应该归属于热液脉型铅锌矿床范畴。考虑到区内隐伏花岗岩的成岩年代为98 Ma左右(付伟,未发表),推测绿井矿床矿化时代应晚于98 Ma。在燕山晚期,区内深部岩浆在侵位过程中,因温度的降低和岩浆熔体的结晶,挥发组分(Cl)和Pb、Zn等金属元素在岩浆房顶部不断聚增,内部压力不断增大。燕山期的NW-SE向挤压运动,使NW向断裂发生拉张,EW向断层局部拉张(周维博, 2005),导致热液流体在构造应力的驱动下,沿深部导矿断裂不断上移,并对寒武纪地层中的部分Pb、Zn等矿物进行交代、吸离、活化转入成矿流体,从而形成一种富含Pb、Zn等成矿物质的热液流体,继续在构造及热动力的驱动下沿深部断裂和东西向断裂等进行运移,当运移到断裂的开阔处时,由于物理化学环境的骤然变化(温度、压力、酸碱度、氧化还原环境等),使热液流体中的Pb、Zn等矿质沉淀,导致成矿作用发生,最终形成块状、条带状和脉状铅锌矿体。



## 6 结论

(1) 录井矿床铅锌矿体呈脉状填充于断裂破碎带中, 矿体产状严格受断裂控制。流体包裹体和闪锌矿微量元素研究显示, 矿床主成矿期成矿流体为中温、中低盐度流体。

(2) 矿石硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值集中于  $-1.9\text{‰} \sim 4.4\text{‰}$ , 均值为  $1.7\text{‰}$ , 位于零值附近, 指示录井矿床矿化剂硫来自于岩浆岩体系。录井矿床闪锌矿以富集 Fe、Cd、In 贫 Mn、Ga、Ge 等元素为特征, 这与岩浆成因闪锌矿微量元素特征相似。

(3) 结合矿床野外地质特征和成矿流体性质, 并在对比 MVT 型、SEDEX 型和热液脉型铅锌矿床成矿流体及矿床地质特征的基础上, 将录井矿床划归于热液脉型铅锌矿床范畴。此外, 矿床成矿作用可能与本区燕山期岩浆活动密切相关, 成矿时代应为燕山晚期。

**致谢** 野外工作得到了广西壮族自治区第四地质队龙明周、颜晓东、岳小军和李伟等地质工程师的大力协助, 包裹体分析得到了桂林理工大学地球科学学院夏志鹏老师的认真指导, 匿名审稿人提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢。

## References

- Anderson I K, Ashton J H, Boyce A J, *et al.* 1998. Ore depositional process in the Navan Zn-Pb deposit, Ireland[J]. *Economic Geology*, 93(5): 535 ~ 563.
- Beuchat S, Moritz R and Pettke T. 2004. Fluid evolution in the W-Cu-Zn-Pb San Cristobal vein? Peru: Fluid inclusion and stable isotope evidence[J]. *Chemical Geology*, 210(1): 201 ~ 224.
- Chai Mingchun, Fu Wei, Feng Zuohai, *et al.* 2015. Characteristics of ore-forming fluids of Nongtun Pb-Zn deposit in Xidaming Mountain of Guangxi and their implications for ore genesis[J]. *Mineral Deposits*, 34: 948 ~ 964(in Chinese with English abstract).
- Chaussidon M, Albarède F and Sheppard S M F. 1989. Sulphur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of microsulphide inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(2): 144 ~ 156.
- Chaussidon M and Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariège ( North-Eastern Pyrenees, France ): An ion microprobe study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54( 10): 2 835 ~ 2 846.
- Chen Hai and Deng Qionghui. 1997. Genesis of Guangxi Fenghuangshan silver deposit[J]. *Guangxi Geology*, 10(2): 37 ~ 44(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, *et al.* 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2 085 ~ 2 108(in Chinese with English abstract).
- Claypool G E, Holser W T, Kaplan I R, *et al.* 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation[J]. *Chemical Geology*, 28: 199 ~ 260.
- Cook N J, Ciobanu C L, Skinner A P W, *et al.* 2009. Trace and minor elements in sphalerite: A LA-ICPMS study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16): 4 761 ~ 4 791.
- Du Zehong, Gu Xuexiang, Li Guangqing, *et al.* 2011. Sulfur, lead isotope composition characteristics and the relevant instructive significance of the Lamuyouta Sb(Au) deposit, South Tibet[J]. *Geoscience*, 25(5): 853 ~ 860(in Chinese with English abstract).
- Fu Wei, Chai Mingchun, Yang Qijun, *et al.* 2013. Genesis of the Fozichong Pb-Zn polymetallic deposit: Constraints from fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopic evidences[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4 136 ~ 4 150(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 Deposit[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1 ~ 349(in Chinese).
- Han Fa and Sun Haitian. 1999. Metallogenic system of sedex type deposits: a review[J]. *Earth Science Frontiers*, (1): 139 ~ 142(in Chinese with English abstract).
- Hoefs J. 1997. Stable Isotope Geochemistry. 4th Edition[M]. Berlin: Springer Verlag, 1 ~ 201.
- Huang Jijun. 1998. An analysis of the ore-control role of structures in the Fenghuangshan silver deposit, Guangxi[J]. *Mineral Deposits*, 17(3): 229 ~ 239(in Chinese with English abstract).
- Huang Jijun. 2001. Structural features, stress fields and strain fields in Fenghuangshan silver mine area, Guangxi, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 7(1): 9 ~ 21(in Chinese with English abstract).
- Huang Shujun, Zeng Yongchao, Jia Guoxiang, *et al.* 1987. On the genesis of Dabaoshan polymetallic deposit in Guangdong province, China[J]. *Geochimica*, 1: 27 ~ 35(in Chinese with English abstract).
- Jia Jingwu, Zhang Hongrun and Hu Maode. 2014. The preprint in the

- study of vein Pb-Zn-Cu-Ag polymetallic epithermal deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(4): 726 ~ 746 (in Chinese with English abstract).
- Kelley K D, Leach D L, Johnson C A, *et al.* 2004. 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*, 99(7): 1 509 ~ 1 532.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, *et al.* 2005. Sediment-hosted lead-zinc-deposit: A global perspective[J]. *Econ. Geol.*, 100: 561 ~ 608.
- Leach D L and Sangster D F. 1993. Mississippi Valley-Type (MVT) lead-zinc deposits[A]. Kirkham R V, Sinclair W D, Thrope R I *et al.* Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada Special Paper[C]. Denver: U. S. Geological Survey, 40: 289 ~ 314.
- Lei Yingping. 2012. Mineral Prediction of the Xidamingshan Silver Polymetallic Ore District, Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Li Gongjian, Wang Qingfei, Zhu Heping, *et al.* 2013. Fluids inclusion constraints on the origin of the Shiduolong hydrothermal vein-type Mo-Pb-Zn deposit, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1 377 ~ 1 391 (in Chinese with English abstract).
- Li Houmin, Wang Denghong, Zhang Changqing, *et al.* 2009. Characteristics of trace and rare earth elements in minerals from some typical lead-zinc deposits of Shanxi province[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 434 ~ 448 (in Chinese with English abstract).
- Li Saisai, Feng Zuohai, Fu Wei, *et al.* 2016a. A Review on the origin of Ag-Pb-Zn polymetallic deposits in the Xidamingshan Area, Guangxi, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(4): 781 ~ 788 (in Chinese with English abstract).
- Li Saisai, Feng Zuohai, Fu Wei, *et al.* 2016b. Search for hidden rock bodies using geological, geophysical and geochemical methods: An example from the west Damingshan area of Guangxi Province[J]. *Geology and Exploration*, 52(3): 524 ~ 536 (in Chinese with English abstract).
- Li Zeqin, Dong Baolin, Lei Yingping, *et al.* 1998. Lead isotope geochemistry of turbidite-type silver deposit at Fenghuangshan, Guangxi, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(4): 473 ~ 482 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tiegeng, Ye Lin, Zhou Jiaxi, *et al.* 2010. Cd primarily isomorphously replaces Fe but not Zn in sphalerite[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(2): 179 ~ 184 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, *et al.* 1984. Geochemistry of Element[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 548 (in Chinese).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, *et al.* 2004. Fluid Inclusion[M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 487 (in Chinese).
- Lu Jianhui. 2014. Geological characteristics, metallogenic regularities and prospecting direction of Nongtun Pb-Zn deposit in Daxin, Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 28: 487 ~ 491 (in Chinese with English abstract).
- Mai Guangtian. 1990. On evolution distribution and emplacement of granites based on the regional gravitational-magnetic field in Guangxi[J]. *Geology of Guangxi*, 1: 15 ~ 23 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, *et al.* 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) Metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636 ~ 658 (in Chinese with English abstract).
- Marchev P, Kaiser-Rohrmeier M, Heinrich C, *et al.* 2005. Hydrothermal ore deposits related to postorogenic extensional magmatism and core complex formation: The Rhodope massif of Bulgaria and Greece[J]. *Ore Geology Reviews*, 27(1): 53 ~ 89.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposit[J]. *Economic Geology*, 67(5): 551 ~ 578.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposit[J]. *Reviews in Mineralogy*, 16(1): 491 ~ 559.
- Ohmoto H and Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes[A]. Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (3rd ed.) [C]. New York, Wiley, 517 ~ 611.
- Palinkas S S, Sostaric S B, Bermanec V, *et al.* 2009. Dickite and kaolinite in the Pb-Zn-Agsulphide deposits of northern Kosovo (Trepca and Cmac)[J]. *Clay Minerals*, 44(1): 67 ~ 79.
- Pan Zhaolu. 1993. Crystallography and Mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 282 (in Chinese).
- Panneerselvam K, Macfarlane A W and Salters V J M. 2006. Provenance of ore metals in base and precious metal deposits of central Idaho as inferred from lead isotopes[J]. *Econ. Geol.*, 101(5): 1 063 ~ 1 077.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. New York: Longman Scientific and Technical Limited., 1 ~ 343.
- Rye R O and Ohmoto H. 1974. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review[J]. *Economic Geology*, 69(6): 826 ~ 842.
- Tian Shihong, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2011. Sulfur, lead, strontium and neodymium isotope compositions of the Mohailaheng lead-zinc ore deposit in the Yushu area, southern Qinghai: Implications

- tions for the sources of ore-forming material in the deposit and comparison with those of Dongmohazhua lead-zinc ore deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2 709 ~ 2 720 (in Chinese with English abstract).
- Tu Wei. 2011. Characteristics and Genesis of the Luowei Silver-lead-zinc Deposit in Guangxi Provinc [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Qian, Gu Xuexiang, Fu Shaohong, *et al.* 2008. Enrichment of dispersed elements Cd, Ge and Ga in the Huize lead-zinc deposit, Yunnan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 28(4): 69 ~ 73 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiangdong, Lü Xinbiao, Mei Wei, *et al.* 2014. Characteristics and evolution of ore-forming fluids in Bairendaba Ag-Pb-Zn polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 33(2): 406 ~ 418 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yumin, Zhu Jiaao and Yu Qionghua. 1988. The Geology of Lead-Zinc Deposit, Hunan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. *Lithos*, 55(1): 229 ~ 272.
- Wu Guang, Mi Mei, Gao Fengjun, *et al.* 2010. Ore-forming fluid characteristics and genesis of silver-lead-zinc deposits in the Manzhouli area, Inner Mongolia, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 239 ~ 255 (in Chinese with English abstract).
- Xia Xuehui. 1992. Characteristics and formation conditions of sphalerite in the Dongshengmaio polymetallic polymetallic pyrite deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(4): 375 ~ 382 (in Chinese with English abstract).
- Yang Bin, Peng Shenglin, Li Shuiru, *et al.* 2007. Metallogenic series and metallogenic belt of nonferrous metals in Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 21(1): 8 ~ 11 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 316 (in Chinese).
- Zhou Weibo. 2005. Structural Characteristics of the Xidamingshan Uplift in Guangxi and Its Relationship with the Adjacent Basins (Master Report) [D]. Beijing: China University of Geosciences, 52, 67 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongfeng. 1993. The application of regional gravity to the deep geology and mineralization prognosis in Guangxi[J]. *Geology of Guangxi*, 6(2): 15 ~ 24 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yongzhang, Zheng Yi, Zeng Changyu, *et al.* 2015. On the understanding of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 1 ~ 6 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Gefei. 1989. The west Damingshan buried structures and intrusives, Guangxi Province, and their relationship with mineral resources distribution[J]. *Geology and Exploration*, 25(1): 15 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- Zou Zhichao, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, *et al.* 2012. Trace element geochemistry of the Liziping Pb-Zn deposit, the Lanping Basin, Northwest Yunnan Province, China[J]. *Geochimica*, 41(5): 482 ~ 496 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 柴明春, 付伟, 冯佐海, 等. 2015. 广西西大明山弄屯铅锌矿床的成矿流体特征及矿床成因指示意义[J]. *矿床地质*, 34(5): 948 ~ 964.
- 陈海, 邓琼慧. 1997. 广西凤凰山银矿床成因探讨[J]. *广西地质*, 10(2): 37 ~ 44.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2 085 ~ 2 108.
- 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]. 湖南: 科学技术出版社, 1 ~ 349.
- 杜泽忠, 顾雪祥, 李关清, 等. 2011. 藏南拉木由塔锦(金)矿床 S、Pb 同位素组成及指示意义[J]. *现代地质*, 25(5): 853 ~ 860.
- 付伟, 柴明春, 杨启军, 等. 2013. 广西佛子冲大型铅锌多金属矿床的成因: 流体包裹体和 H-O-S-Pb 同位素地球化学约束[J]. *岩石学报*, 29(12): 4 136 ~ 4 150.
- 付伟, 冯佐海, 李赛赛, 等. 2014. 广西西大明山 W-Bi-Pb-Zn-Ag 多金属矿集区: 一个与隐伏岩体相关的岩浆热液成矿系统? [A]. 中国地球科学联合学术年会论文集[C]. 1 879 ~ 1 881.
- 韩发, 孙海田. 1999. Sedex 型矿床成矿系统[J]. *地学前缘*, (1): 139 ~ 142.
- 黄继钧. 1998. 广西凤凰山银矿构造控矿作用分析[J]. *矿床地质*, (3): 229 ~ 239.
- 黄继钧. 2001. 广西凤凰山银矿区构造特征及构造应力场、应变场分析[J]. *地质力学学报*, 7(1): 9 ~ 21.
- 黄书俊, 曾永超, 贾国相, 等. 1987. 论广东大宝山多金属矿床的成因[J]. *地球化学*, 1: 27 ~ 35.
- 贾敬伍, 张洪瑞, 胡茂德. 2014. 脉状铅锌(铜、银)多金属热液矿床研究进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(4): 726 ~ 746.

- 雷英凭. 2012. 广西西大明山银多金属矿集区成矿预测[D]. 中国地质大学(北京).
- 李龚健, 王庆飞, 朱和平, 等. 2013. 青海什多龙热液脉型铅锌矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 29(4): 1 377 ~ 1 391.
- 李厚民, 王登红, 张长青, 等. 2009. 陕西几类重要铅锌矿床的矿物微量元素和稀土元素特征[J]. 矿床地质, 28(4): 434 ~ 448.
- 李赛赛, 冯佐海, 付伟, 等. 2016a. 广西西大明山地区银铅锌多金属矿床成因研究进展[J]. 矿物岩石地球化通报, 35(4): 781 ~ 788.
- 李赛赛, 冯佐海, 付伟, 等. 2016b. 地物化综合方法寻找隐伏岩体——以广西西大明山隐伏岩体的发现为例[J]. 地质与勘探, 52(3): 524 ~ 536.
- 李泽琴, 董宝林, 雷英凭, 等. 1998. 广西凤凰山浊积岩型银矿床铅同位素地球化学——成矿物质来源[J]. 矿物学报, 18(4): 473 ~ 482.
- 刘铁庚, 叶霖, 周家喜, 等. 2010. 闪锌矿中的Cd主要类质同象置换Fe而不是Zn[J]. 矿物学报, 30(2): 179 ~ 184.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 548.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 487.
- 陆建辉. 2014. 广西大新县弄屯铅锌矿地质特征、成矿规律及找矿方向分析[J]. 矿产与地质, 4: 487 ~ 491.
- 麦广田. 1990. 从区域重磁资料试论广西花岗岩的发育展布和定位方式[J]. 南方国土资源, 1: 15 ~ 23.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 85(5): 636 ~ 658.
- 潘兆橧. 1993. 结晶学及矿物学(下)[M]. 地质出版社, 1 ~ 282.
- 田世洪, 候增谦, 杨竹森, 等. 2011. 青海玉树莫海拉亨铅锌矿床S、Pb、Sr-Nd同位素组成: 对成矿物质来源的指示——兼与东莫扎抓铅锌矿床的对比[J]. 岩石学报, 27(9): 2 709 ~ 2 720.
- 涂伟. 2011. 广西罗维银铅锌矿床特征和成因[D]. 中国地质大学(北京).
- 王乾, 顾雪祥, 付绍洪, 等. 2008. 云南会泽铅锌矿床分散元素镉锗镓的富集规律[J]. 沉积与特提斯地质, 28(4): 69 ~ 73.
- 王祥东, 吕新彪, 梅微, 等. 2014. 内蒙古拜仁达坝银铅锌多金属矿床成矿流体特征及其演化[J]. 矿床地质, 33(2): 406 ~ 418.
- 王育民, 朱家鳌, 余琼华. 1988. 湖南铅锌矿地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 武广, 糜梅, 高峰军, 等. 2010. 满洲里地区银铅锌矿床成矿流体特征及矿床成因[J]. 地学前缘, 17(2): 239 ~ 255.
- 夏学惠. 1992. 东升庙多金属硫铁矿床闪锌矿特征及形成条件[J]. 岩石矿物学杂志, 11(4): 375 ~ 381.
- 杨斌, 彭省临, 李水如, 等. 2007. 广西有色金属成矿系列与成矿区带[J]. 矿产与地质, 21(1): 8 ~ 11.
- 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.
- 曾永超, 黄书俊, 贾国相, 等. 1985. 岩浆热液型和层控型铅锌矿床某些金属矿物的特征元素及其地质意义[J]. 矿产地质研究院学报, 3: 84 ~ 89.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 316.
- 周维博. 2005. 广西西大明山隆起构造特征及其与周缘盆地的关系(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1 ~ 79.
- 周永峰. 1993. 区域重力资料研究在广西深部地质和成矿预测中的应用[J]. 广西地质, 6(2): 15 ~ 24.
- 周永章, 郑义, 曾长育, 等. 2015. 关于钦-杭成矿带的若干认识[J]. 地质前缘, 22(2): 1 ~ 6.
- 朱革非. 1989. 广西西大明山隐伏构造、隐伏岩体及其与矿产分布的关系[J]. 地质与勘探, 25(1): 15 ~ 17.
- 邹志超, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 2012. 滇西北兰坪盆地李子坪铅锌矿床微量元素地球化学特征[J]. 地球化学, 41(5): 482 ~ 496.