

## 粤北曲仁盆地北缘凡口式 MVT 铅锌矿床的 地球化学特征

姚翠霞<sup>1,2</sup>, 张术根<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;  
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083)

**摘要:** 粤北曲仁碳酸盐岩盆地北缘聚集的铅锌硫化物矿床地质矿化特征相比于其他 MVT 矿床, 具有成矿特殊性。为了确定该类矿床成矿流体和物质的来源以及成矿作用过程, 对研究区矿床地层、断裂构造地球化学特征、稀土元素、硫铅同位素和流体包裹体特征进行系统研究。结果表明: 地层、构造以及稀土元素研究结果显示该类铅锌硫化物矿床经历了黄铁矿矿化与铅锌矿化两个成矿作用过程, 前者与赋矿层灰岩的物源联系更紧密, 后者的成矿金属物质并非直接来自赋矿层灰岩, 而是由通过东北、北西向断裂向上运移的盆地深部流体提供, 且局部受到中基性岩浆侵入活动轻微改造; 矿石及相关地质体同位素地球化学特征显示铅主要来自盆地基底碎屑岩层, 部分来自盆地深部壳源重熔型花岗质岩浆, 少部分来自盆地碳酸盐岩层, 而硫主要为地层硫, 小部分为壳源岩浆硫; 闪锌矿流体包裹体气液相成分、盐度和温度结果显示铅锌热液成矿期古地热高异常, 盆地基底碎屑岩含水系统及燕山期岩浆热液参与铅锌成矿。综合矿床地球化学特征可知, 粤北曲仁盆地北缘凡口式 MVT 铅锌矿床属于两期热液叠加-改造热液型铅锌矿床。

**关键词:** 凡口式 MVT 铅锌矿床; 地球化学特征; 成矿流体; 成矿物质来源; 成矿作用过程

中图分类号: P618.42; P618.43

## Geochemistry of Fankou-type MVT lead-zinc sulphide deposit in northern margin of Quren basin, Guangdong Province, China

YAO Cui-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Shu-gen<sup>1,2</sup>, WANG Chao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Metallogenesis 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)

**Abstract:** Compared with other MVT deposits, the lead-zinc sulfide deposits gathering in the north margin of Quren carbonate basin, Guangdong Province, China, have mineralization particularity. The deposit strata and fault structure geochemistry, rare earth elements (REE), sulphur isotope, lead isotope and fluid inclusion geochemistry were discussed for understanding the source of the ore-forming metal, fluids and the mineralization processes in Fankou-type lead-zinc deposit. The strata, fault structure and REE results show that this type deposit experiences pyrite and lead-zinc mineralization processes, the former gets closer provenance contact with limestone, while ore metal of the latter does not come directly from ore-hosting carbonate rocks, but gets from basin deep fluid transferred up by NE, NW faults, and is slightly modified by intermediate-basic magmatism. Lead and sulphur isotope geochemistry of ores and related geological samples shows that lead comes mainly from basement clastic formation, partly from crust remelting type granitic magma, little from carbonate rocks; sulphur is mainly from carbonate rocks, only a litter from crustal magma.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAB43B00)

收稿日期: 2013-08-08; 修订日期: 2013-11-05

通信作者: 张术根, 教授, 博士; 电话: 13808429627; E-mail: zhangshugen@163.com

Sphalerite fluid inclusions components, salinity and temperature results reveal that lead-zinc hydrothermal mineralization exists ancient geothermal anomaly, and basement clastic aquifer and Yanshanian granite are involved in lead-zinc mineralization. Fankou-type MVT lead-zinc deposit in this research area can be classified as two-hydrothermal superimposition-transformation lead-zinc deposit after geochemical characteristics of ore deposits being analyzed synthetically.

**Key words:** Fankou-type MVT lead-zinc deposit; geochemistry; ore-forming fluid; ore-metal source; metallogenesis

国内外许多碳酸盐岩盆地, 从下古生界到中生界碳酸盐岩, 在盆地边缘出现为数众多、成簇聚集的铅锌硫化物矿床(点), 我国粤北地区曲仁碳酸盐岩盆地北缘就是重要的铅锌硫化物矿床产区, 其内有著名的超大型凡口铅锌矿床和大中型杨柳塘铅锌矿床等。系统对比研究表明, 这些铅锌矿床既与MVT铅锌矿床有许多共同点, 如: 产于无明显岩浆活动的碳酸盐岩盆地边缘, 围岩蚀变强度低, 矿物组合简单, 显示热液成因特征, 矿区没有与成矿直接关联的中酸性岩体, 断裂构造发育且为重要的控矿因素, 金属成矿物质和矿化剂硫为壳源特性<sup>[1-2]</sup>等, 但又有其成矿特殊性, 如: 研究区见独立的黄铁矿矿床, 同时在铅锌矿床见到几乎不含铅锌硫化物的黄铁矿矿体、黄铁矿型铅锌矿体以及富含块状黄铁矿矿石残留体的铅锌矿体; 矿区常见硅化现象, 偶见中基性脉岩与矿体穿插<sup>[3-4]</sup>; 该区域地洼演化阶段形成的强烈构造变形和岩浆活动对研究区铅锌矿床各成矿阶段有重要控制作用<sup>[5-7]</sup>, 故可将曲仁盆地北缘铅锌硫化物矿床称为凡口式MVT铅锌硫化物矿床。本文作者通过对该类铅锌矿床含矿岩系和断裂构造地球化学特征、稀土微量元素、铅、硫同位素组成特征及闪锌矿流体包裹体特征的综合研究, 以便了解铅锌成矿不同过程所对应的成矿流体和物质来源特性、不同成矿过程以及之间的继承、改造及叠加作用关系。

## 1 区域地质构造背景

曲仁盆地区域构造型相复杂, 褶皱、断裂等构造变形产物发育, 是多次地壳运动、多个构造系统继承、干扰、限制、叠加的综合产物。加里东运动使盆地北缘前泥盆系地层北西向紧闭线状褶皱变形强烈, 印支运动在此基础上叠加泥盆系至下三叠统地层发育的近东西向短轴状宽展型褶皱构造, 使得南岭地区再度成为陆内挤压造山带, 形成挤压造山型盆岭构造系统。到燕山期时, 强烈造山运动导致自海西期就存在间隙性活动的北东和北西向断裂复活, 并伴有近南北向、北北西向、北北东向及近东西向断裂发育<sup>[8-9]</sup>, 同时在

山岭地段及盆岭转换部位, 以盆地基底浅变质碎屑岩为母岩的重熔型花岗岩类岩浆多次侵入活动为主导的岩浆活动很强烈, 在盆地北缘形成大规模九峰—诸广山复式花岗岩岩基(见图1)。

## 2 矿床地质概况

曲仁盆地北缘出露寒武纪八村群, 为一套浅变质的造山带细碎屑岩, 是曲仁盆地基底组成主体地层。盆地北缘覆盖层组成主体是上古生界地层, 岩性主要为碳酸盐岩, 其次为碎屑岩, 是区内铅锌、黄铁矿矿床聚集地, 除凡口超大型铅锌矿床外, 在凡口矿区西侧有杨柳塘中型铅锌矿床, 西岗寨、罗村中小型黄铁矿矿床, 东侧有铁屎岭、羊角山等小型黄铁矿矿床(点)。

铅锌矿床发育多期断裂构造, 大规模北西西向或北西向断裂形成或活跃于成矿前的晚古生代, 使得矿区下石炭统和部分上泥盆统缺失, 成为铅锌成矿作用的上部边界; 成矿期断裂主要为燕山早期复活的北东向断裂, 具右行压扭特点, 北北东向断裂多错断矿体和地层, 为成矿后构造, 矿体多位于北东和北北东断裂或断裂两侧<sup>[10]</sup>。

铅锌矿床主要见黄铁矿矿体、铅锌矿体及铅锌黄铁矿矿体, 大规模的矿体主要呈似层状和不规则状, 就位于碎屑岩—碳酸盐岩过渡界面的上覆碳酸盐岩层位, 只是黄铁矿矿化更靠近底部, 铅锌黄铁矿体、铅锌矿体可在相同矿段较浅部的碳酸盐岩部位分布。规模相对较小的矿体多呈透镜状和脉状, 其中透镜状矿体多产于层间滑动面, 脉状矿体多沿低次序断裂充填交代而成, 部分脉状矿体依附似层状、透镜状或不规则矿体, 少数孤立脉状矿体见于锡矿山组、下石炭统及中上石炭统地层。黄铁矿矿床中黄铁矿矿体的倾向和倾角与地层基本一致, 矿体倾角为5°~10°, 几乎全部呈单层延展, 分布于中、上泥盆统岩性界面靠近碳酸盐岩一侧。铅锌矿床中矿石主要呈块状, 金属矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿, 少量黄铜矿、毒砂和黝铜矿等, 脉石矿物主要为方解石、白云石和少量

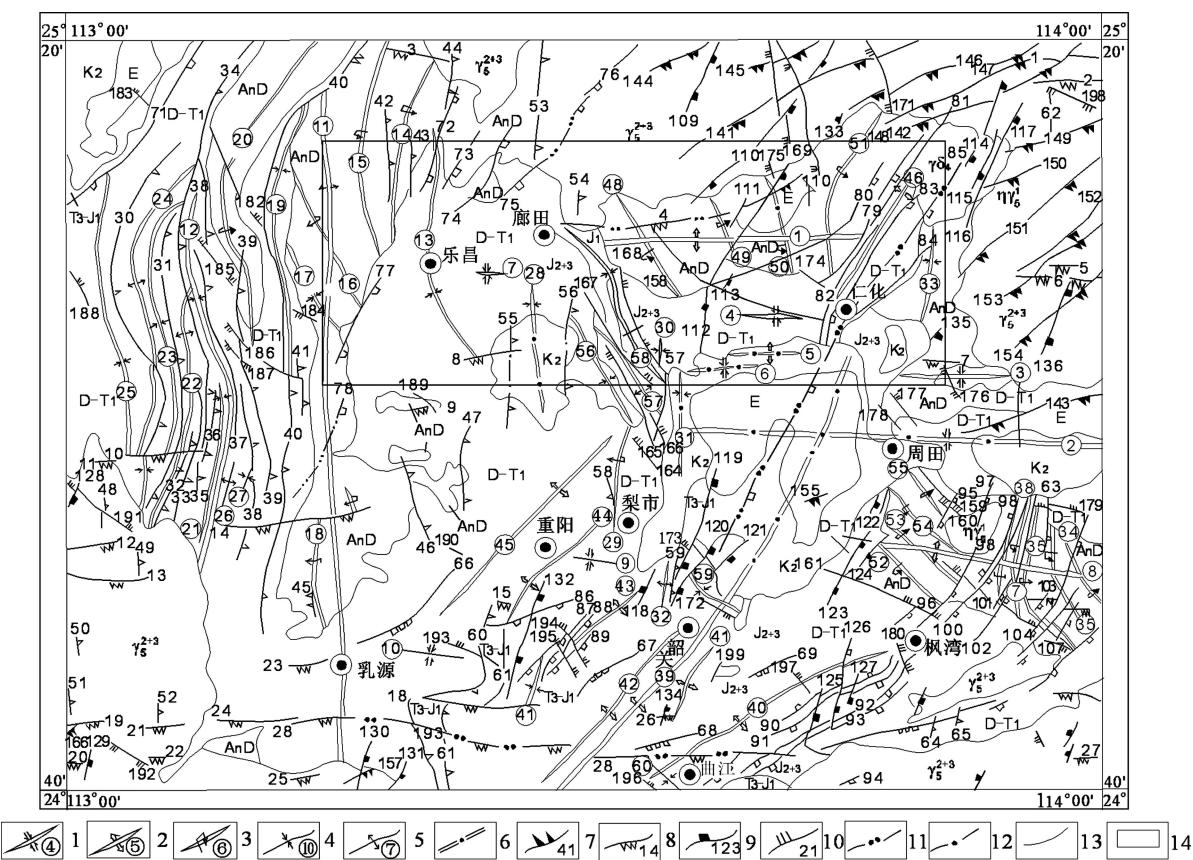


图1 粤北曲仁盆地的区域构造纲要图(据1:200 000韶关幅修改): 1—隐伏向斜及编号; 2—隐伏背斜及编号; 3—倒转向斜及编号; 4—向斜及编号; 5—背斜及编号; 6—轴线; 7—逆冲推覆断层及编号; 8—构造窗及编号; 9—推覆断层及编号; 10—正断层及编号; 11—隐伏断层; 12—推断断层; 13—岩体界限; 14—曲仁盆地北缘研究区界线

**Fig. 1** Regional tectonic outline map of Quren basin in northern Guangdong Province, China (after 1:200 000 Shaoguan geological map): 1—Concealed syncline and code; 2—Concealed anticline and code; 3—Rewind syncline and code; 4—Syncline and code; 5—Anticline and code; 6—Axis and code; 7—Overthrust fault and code; 8—Tectonic window and code; 9—Thrust fault and code; 10—Normal faults and code; 11—Concealed fault; 12—Presumed fault; 13—Rock boundaries; 14—Study area boundaries of Quren basin

石英<sup>[11]</sup>。闪锌矿广泛发育环带结构, 常见乳滴状黄铜矿, 深杂色环带核部富含立方体黄铁矿, 为早期黄铁矿被交代、改造后的残留物, 外壳被不规则粒状黄铁矿环绕, 可被自形石英穿插; 而浅杂色环带核心富含不规则状方解石和石英自形晶粒, 属于赋矿岩层被交代的残留物, 外壳被方解石环绕, 无石英穿插。

研究区内各矿区均不发育酸性岩浆岩, 但见沿近南北向、北西向或近东西向断裂充填的燕山中晚期中基性脉岩, 少量与矿体存在穿插关系, 而黄铁矿矿区几乎未见到中基性脉岩。硫化物矿床围岩蚀变既有MVT矿床常见的碳酸盐岩化, 包括方解石化、白云石化、菱铁矿化及重晶石化, 又有硅化, 绿泥石化和绢云母化。

研究区聚集的铅锌硫化物矿床类型属于与盆地卤

水作用有关的层控中低温热液型, 其地质矿化特征与MVT矿床有许多相似之处, 又具显著特色, 可称为凡口式MVT铅锌硫化物矿床<sup>[12]</sup>。

### 3 矿床地球化学特征

#### 3.1 含矿岩系地球化学特征

利用广东地矿局地质研究所数据和2001年由中南大学地质研究所和凡口铅锌矿组成的联合项目组于凡口矿区深部零号穿脉取样分析结果, 对D<sub>3s</sub>、D<sub>3x<sup>a</sup></sub>、D<sub>3x<sup>b</sup></sub>层位部分元素进行R型相关聚类(选取最长距离法, 1-Pearson相关系数距离测度方法), 获得其分类谱系图(见图2)。

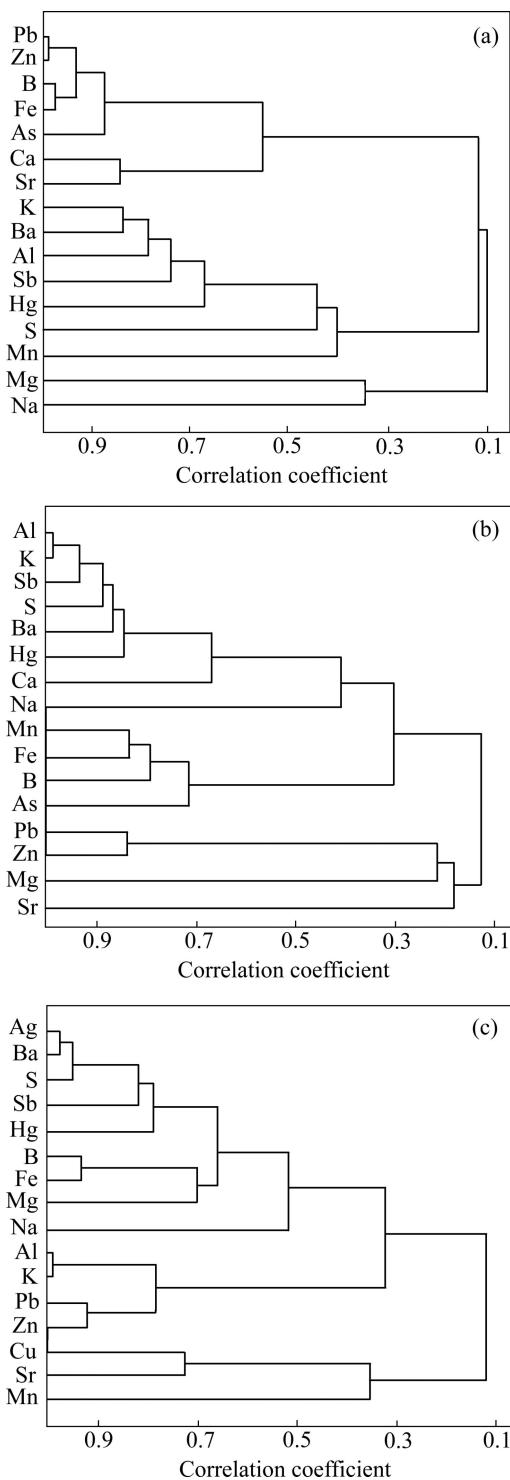


图 2 凡口矿区赋矿层位主要元素分类谱系图: (a) D<sub>3S</sub>; (b) D<sub>3X<sup>a</sup></sub>; (c) D<sub>3X<sup>b</sup></sub>

Fig. 2 Main elements classification pedigree graphs of ore-bearing strata in Fankou deposit: (a) D<sub>3S</sub>; (b) D<sub>3X<sup>a</sup></sub>; (c) D<sub>3X<sup>b</sup></sub>

从图 2 中可发现, 无论地层层位如何, S-Sb-Hg-Ba、Fe-B、Al-K 和 Pb-Zn 都是高度相关组合, Pb-Zn 组合与 S 为低度相关; 在 D<sub>3S</sub> 层位, S-Sb-Hg-Ba

组合与 B-Fe-Mg 组合为中高度相关。Al-K 高度相关与地层中黏土矿物有密切联系, S-Sb-Hg-Ba-Ca 高度相关反映它们属于地层元素, 它们与 Pb-Zn 呈低度相关则说明铅锌矿化富集应该是沉积成岩期后热液活动的产物。Pb-Zn 组合与 Fe-B 组合在 D<sub>3X<sup>b</sup></sub> 层位为高度相关, 在 D<sub>3X<sup>a</sup></sub> 和 D<sub>3S</sub> 层位中却为低度相关; Pb-Zn 和 As 组合以及 Ca-Sr 组合在 D<sub>3X<sup>b</sup></sub> 层位均为高度相关, 但在 D<sub>3X<sup>a</sup></sub> 层位为低度相关, 这些特征反映铅锌硫化物矿床主要经历了铅锌矿化和黄铁矿矿化这两个矿化阶段, 但两者之间存在一定物源继承关系。

### 3.2 断裂构造地球化学特征

凡口狮岭矿段-360 m 中段 N11 穿脉和-400 m 中段 N8 穿脉均基本无矿体分布或矿化规模小, 但直接揭露了 F<sub>3</sub> 北东向断裂和 F<sub>102</sub> 北北东向断裂, F<sub>3</sub> 断裂既是控矿构造、同成矿期成矿构造, 又为印支-燕山期构造活动同期产物, F<sub>102</sub> 断裂则错断矿区全部地层和北东向矿体, 在该地段进行剖面元素含量测试的系统采样, 并将部分元素含量沿剖面绘制成分布曲线(见图 3)。从图 3 中可看出, 成矿元素 Pb、Zn 在成矿后活动

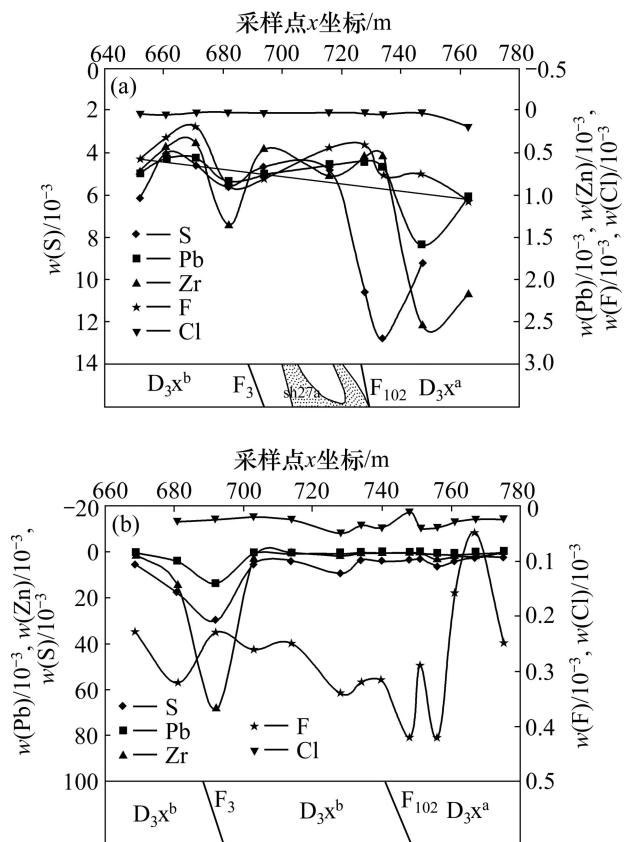


图 3 构造剖面部分元素含量变化曲线

Fig. 3 Content change curves of part elements in structural section: (a) 360 m, middle north vein 11; (b) 400 m, middle north vein 8

断裂面上含量亏损，断裂带内部含量虽有局部相对富集或相对亏损，但平均含量水平差异较小，而在断裂带上盘围岩则强烈富集，但随远离断裂带向正常围岩，元素含量又逐渐降低，这些特征说明 Pb、Zn 在断裂带上盘的富集既不是断裂带内部活化迁移的结果，也不是从围岩向断裂带活化迁移的结果，应是由含矿热液从控矿断裂向旁侧扩散迁移叠加的结果。

S 元素的分布曲线则较复杂，在-360 m 中段 N11 穿脉，断裂带上盘含量亏损，在断裂带内部总体上强烈富集，向下盘围岩富集程度又趋降低，当断裂带内部 S 高度富集时，Pb、Zn 也相对富集。在-400 m N8 穿脉，断裂带上盘围岩相对富集，下盘围岩相对亏损，断裂带内部含量介于上、下盘围岩之间。可见，硫的构造地球化学行为特性是影响其分布曲线的重要因素之一，但硫来源与铅锌来源之间的差别也是决定其分布曲线明显不同的重要原因，也就是说，铅锌成矿作用中硫来源与铅锌来源存在差异。

### 3.3 黄铁矿化学组成分析

在矿区黄铁矿矿石多见块状、条带块状构造，但也见角砾状、负角砾状构造，胶结物在铅锌矿床主要为闪锌矿、方铅矿及方解石集合体，黄铁矿矿床则多为方解石粗晶集合体，说明主要黄铁矿矿体比铅锌矿体较早形成。黄铁矿与闪锌矿及其他矿物的共生组合主要有：1) 第一世代黄铁矿孤立组合；2) 第二世代黄铁矿-第一世代闪锌矿-黄铜矿-磁黄铁矿组合；3) 第二世代闪锌矿-磁黄铁矿-黄铜矿-石英-(第二世代方铅矿，晚期局部)组合；4) 第三世代黄铁矿-第三世代闪锌矿(较晚晶出部分)-第三世代方铅矿-淡红银矿-辉银矿-方解石(较早晶出部分)组合。依此选取研究区前 3 个世代黄铁矿进行化学组分含量测试及相关比值计算(见表 1 和 2)，分析黄铁矿不同矿化过程的化学组成变化特征及其与铅锌热液矿化作用关系。

与黄铁矿理想成分比较，所测黄铁矿化学组成具有如下突出特点。

表 1 黄铁矿部分化学组分含量

Table 1 Part chemical component contents of pyrites

矿区	世代	w/10 <sup>-2</sup>				w/10 <sup>-6</sup>					
		Fe	S	As	Sb	Ga	Ge	Se	Te	Co	Ni
罗村	三	44.24	50.90	0.0347	0.0280	1.20	1.54	3.21	0.40	<0.1	2.80
	二	44.72	51.90	0.069	0.0034	2.40	1.67	2.26	0.54	<0.1	1.18
杨柳塘	三	41.88	49.50	0.37037	0.0110	9.54	1.61	0.84	0.15	<0.1	1.81
	二	44.12	51.50	0.270	0.0058	2.18	1.35	1.31	0.16	1.28	3.94
凡口	三	43.76	50.20	0.460	0.0043	31.36	1.41	1.61	0.30	1.06	1.83
	二	44.30	51.70	0.092	0.0026	0.78	0.89	4.13	0.11	0.70	6.32
	一	32.43	46.40	0.060	0.0038	132.8	79.8	5.17	0.12	<0.1	1.62

表 2 黄铁矿部分化学组分的含量比值

Table 2 Part chemical component content ratio of pyrites

矿区	世代	质量比					
		Fe/S	S/As	Ga/Ge	S/Se	Se/Te	Co/Ni
罗村	三	0.869	0.018852	0.779	158 566.98	8.025	<0.0357
	二	0.862	0.075217	1.437	229 646.02	4.185	<0.0847
杨柳塘	三	0.907	0.145588	5.925	589 285.71	5.600	<0.0552
	二	0.857	0.013919	1.615	393 129.77	8.188	0.3249
凡口	三	0.872	0.010913	22.241	311 802.14	5.367	0.5792
	二	0.857	0.056196	0.876	125 181.60	37.545	0.1108
	一	0.699	7.733300	1.664	89 748.55	43.083	<0.0617

测试单位：中南大学地球科学与信息物理学院；测试时间：2010 年 10 月。

1) 各矿区的第一、第二世代黄铁矿的 Fe/S 值均小于 Fe/S 标准值(0.871), 即均富硫; 第三世代黄铁矿的 Fe/S 值在凡口矿区为 0.872, 轻微亏硫, 在杨柳塘矿区其值为 0.907, 强烈亏硫, 而在罗村矿区其值为 0.869, 轻度富硫。可见, 铅锌矿床中的第一、第二世代黄铁矿与黄铁矿矿床相似均富硫, 铅锌矿床中的第三世代黄铁矿 Fe/S 值则低于黄铁矿矿床的, 推测铅锌含矿热液与前期生成的黄铁矿矿体发生了叠加改造作用, 主要生成第一、二世代的闪锌矿和方铅矿, 并沿第二世代黄铁矿边缘生长呈环状结构的第三世代黄铁矿, 还有少量第二世代黄铁矿因受热发生重结晶而形成呈三晶嵌连结构的第三世代黄铁矿。故在铅锌矿化过程中大量  $S_2^{2-}$  被转移、挥发或被氧化成  $SO_4^{2-}$ , 用于形成第三世代黄铁矿的  $S_2^{2-}$  相对前两个世代明显减少, Fe/S 值相应升高。

2) 黄铁矿从第二世代到第三世代, 在黄铁矿矿床中 As、Ga 和 Ge 含量以及 Ga/Ge 和 S/Se 比值轻微降低, 在铅锌矿床中则显著升高; 在罗村和杨柳塘 Se/Te 比值升高, 在凡口则显著降低, 说明铅锌矿床中的第三世代黄铁矿含有铅锌成矿热液中来自非碳酸盐岩层的 As、Ga 和 Ge 等元素, 而黄铁矿矿床中的第三世代黄铁矿的形成过程中几乎未受到铅锌含矿热液影响, 直接由第二世代黄铁矿重结晶形成。

### 3.4 稀土微量元素特征

#### 3.4.1 稀土元素特征

根据科研课题“MVT 型铅锌矿深部勘查技术与找矿示范研究”的研究成果, 将粤北曲仁盆地北缘铅锌硫化物矿床黄铁矿矿石、铅锌黄铁矿矿石与赋矿围岩灰岩、白云岩、燕山一期花岗岩和中基性脉岩岩石稀土元素含量进行比较, 得知它们的球粒陨石标准化配分曲线均为轻稀土富集、重稀土亏损右倾型, 但黄铁矿矿石和铅锌黄铁矿矿石的稀土元素总量偏低, 重稀土段曲线右倾程度明显较低, 且 Ce 和 Eu 出现不同程度的异常<sup>[13]</sup>。

当分别以赋矿层白云岩、灰岩、中基性脉岩、燕山一期和四期花岗岩样品稀土元素含量进行标准化配分时, 相对两类矿石的球粒陨石标准化配分模式, 以白云岩、燕山四期花岗岩样品为标准化的配分模式没有明显改变, 而以赋矿层灰岩、燕山一期花岗岩和中基性脉岩为标准化的配分模式有显著变化, 它们的轻稀土段曲线平坦化且有轻微左倾趋势, 重稀土段配分曲线明显波动, 这表明白云岩化和燕山四期花岗质岩浆侵入活动未对铅锌成矿作用产生明显影响或贡献,

而赋矿层灰岩、燕山一期花岗岩和中基性脉岩与矿化作用存在物源关系, 且燕山一期花岗质岩浆和燕山中晚期中基性脉岩侵入热事件为铅锌成矿过程提供了热能。

#### 3.4.2 微量元素特征

微量元素 Y/Ho、Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值在同一热液体系中稳定, 但当体系受到干扰变化时, 如发生热液活动和交代作用时, 这些元素对会发生明显分异, 表现为不同样品之间同一元素对的比值有较大的变化范围。当对该研究区的矿石和岩石微量元素进行测试, 计算 Y/Ho、Zr/Hf 和 Nb/Ta 比值变化范围后发现: 铅锌硫化物矿床黄铁矿矿石的元素对比值变化范围大于黄铁矿矿床的黄铁矿矿石的元素对比值变化范围; 凡口铅锌矿床的铅锌黄铁矿矿石的元素对比值变化范围大于杨柳塘的铅锌黄铁矿矿石的元素对比值变化范围, 也大于铅锌矿床的黄铁矿矿石、中基性脉岩和赋矿层白云岩的元素对比值变化范围。可见, 铅锌矿化和黄铁矿矿化分属两个时期的矿化作用, 铅锌成矿热液并非来源于赋矿层白云岩和中基性脉岩, 应来自盆地更深部非碳酸盐岩层, 推断基底浅变质碎屑岩层是铅锌热液主要源区。

### 3.5 同位素地球化学特征

#### 3.5.1 铅同位素

凡口铅锌矿床不同赋矿层位的矿石、围岩灰岩和中基性脉岩铅同位素数据见表 3。

从表 3 可知, 随矿化层位增高, 除矿化规模显著较小的产于锡矿山组上部和下石炭统的铅锌矿石外, 矿石铅的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  和  $^{207}Pb/^{204}Pb$  平均值呈一定规律性降低, 反映成矿金属物质铅的主要源区并不是盆地碳酸盐岩赋矿层。当将表 3 中相关数据投影至  $^{207}Pb/^{204}Pb$ — $^{206}Pb/^{204}Pb$  关系图(见图 4(a))中, 矿石和围岩样品集中投影于上地壳演化线上方, 中基性脉岩靠近上地壳演化线; 在  $^{208}Pb/^{204}Pb$ — $^{206}Pb/^{204}Pb$  关系图(见图 4(b))中, 样品集中于造山带和下地壳之间, 但见余田桥组的矿石铅位于上地壳和造山带之间, 表明铅来源较为复杂, 并且造山构造活动对铅同位素的混合作用产生了影响。当投影于在  $\Delta\gamma-\Delta\beta$  成因分类图解(见图 5)<sup>[14]</sup>中时, 发现赋矿围岩铅落在上地壳源铅区域内, 中基性脉岩铅位于岩浆作用铅区域内, 矿石铅既有落于上地壳源铅和岩浆作用铅两个区域, 还有部分矿石铅靠近岩浆作用铅与上地壳铅区域的边界及其与沉积作用的边界。故推断成矿物质铅主要源区应为上地壳深部基底浅变质碎屑岩层, 燕山一期花岗质岩浆和燕山中晚期中基性岩浆在不同成矿阶段也提供了铅。

表3 凡口矿区各赋矿围岩、矿石及中基性脉岩铅同位素组成特征值

Table 3 Lead isotopic composition of ores, ore-hosting rock and intermediate-basic dike rock

层位	样品	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
$C_1$	铅锌 矿石	18.325–18.577 (18.451)	15.631–15.797 (15.714)	38.758–39.087 (38.9225)	65.42–80.07 (72.745)	19.89–30.72 (25.305)	39.87–48.70 (44.285)
	铅锌黄铁矿 矿石	18.36–18.446 (18.4055)	15.668–15.820 (15.744)	38.715–39.322 (39.0185)	67.74–72.45 (70.095)	22.31–32.22 (27.265)	38.71–55.00 (46.855)
$D_3x^c$	铅锌黄铁矿 矿石	18.266–18.520 (18.393)	15.570–15.814 (15.692)	38.056–38.923 (38.4895)	61.99–76.75 (69.37)	15.91–31.83 (23.87)	21.03–44.30 (32.665)
	铅锌黄铁矿 矿石	18.375–18.463 (18.419)	15.690–15.745 (15.692)	38.796–38.946 (38.871)	68.32–73.44 (70.88)	23.74–27.33 (25.535)	40.89–44.91 (42.9)
$D_3s$	铅锌 矿石	18.383–8.847 (18.615)	15.668–15.866 (15.767)	38.131–38.829 (38.48)	68.79–95.77 (82.28)	22.31–35.22 (28.765)	23.05–41.77 (32.41)
	$D_3x^-$ 围岩	18.23–18.86 (18.545)	15.64–15.84 (15.74)	38.83–39.76 (39.295)	59.87–96.50 (78.185)	20.47–45.26 (32.865)	41.74–66.85 (54.295)
	中基性脉岩	18.57–18.65 (18.610)	15.60–15.76 (15.68)	38.65–38.96 (38.805)	79.66–84.31 (81.985)	17.87–28.31 (23.09)	36.97–45.29 (41.13)

表中括号内数据为对应范围值的平均值; 测试单位: 核工业北京地质研究所分析测试研究中心。 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$  和  $\Delta\gamma$  分别是铅同位素比值  $\alpha(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 、 $\beta(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$  和  $\gamma(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$  与同时代地球原始铅同位素相对千分偏差值, 即:  $\Delta\alpha=[\alpha-\alpha_0(t)]/\alpha_0(t) \times 1000$ ;  $\Delta\beta=[\beta-\beta_0(t)]/\beta_0(t) \times 1000$ ;  $\Delta\gamma=[\gamma-\gamma_0(t)]/\gamma_0(t) \times 1000$ 。

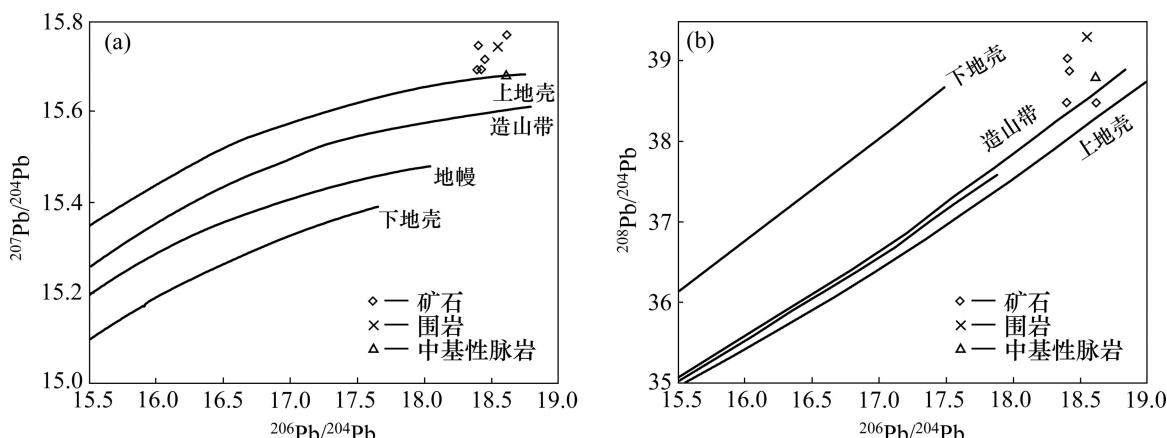


图4 凡口铅锌矿床铅同位素组成Zartman Doe图

Fig. 4 Zartman Doe diagrams of lead isotopic composition in Fankou lead-zinc deposit

### 3.5.2 硫同位素组成特征

凡口和杨柳塘铅锌矿床中硫化物矿物的硫同位素  $\delta^{34}\text{S}$  集中于  $15 \times 10^{-3} \sim 22 \times 10^{-3}$ , 塔式效应明显(图6), 显示海水硫酸盐硫源特征, 与赋矿泥盆系地层硫相似, 大体有  $\delta^{34}\text{S}_{\text{Py}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{Sp}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{Gn}}$  的特点, 这些特征表明铅锌矿床各硫化物矿物主体具有相同的硫源区, 即地层硫。

分布于黄铁矿矿石、铅锌黄铁矿矿石和赋矿围岩中黄铁矿对应  $\delta^{34}\text{S}$  值分布具有一定差异: 铅锌黄铁矿矿石中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值跨度大, 有少量甚至低于

$5 \times 10^{-3}$ , 高于  $26 \times 10^{-3}$ ; 黄铁矿矿石中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值则总体相对集中, 没有低于  $5 \times 10^{-3}$  的样品; 赋矿围岩中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值则集中于  $15 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3}$ 。块状矿石中闪锌矿  $\delta^{34}\text{S}$  值从第一到第三世代呈减小趋势, 但从第二到第三世代的降低幅度远大于从第一到第二世代的降低幅度, 且第三世代闪锌矿  $\delta^{34}\text{S}$  最高值也低于  $17 \times 10^{-3}$ , 说明铅锌矿化过程中, 明显有硫值偏低的深部壳体或壳源岩浆参与成矿。结合燕山早、晚期岩浆的侵入活动时间和矿体之间的分布关系特征, 可推断燕山早期重熔型花岗质岩浆参与了铅锌热

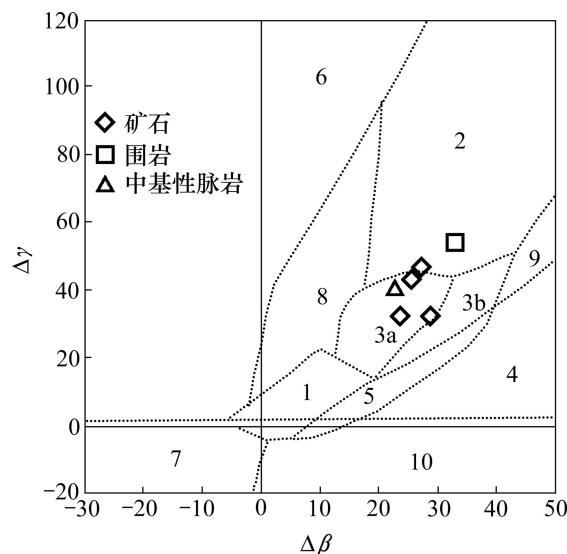


图5 铅同位素 $\Delta\gamma$ — $\Delta\beta$ 成因分类图解: 1—地幔源铅; 2—上地壳源铅; 3—上壳与地幔混合的俯冲带铅(3a: 岩浆作用; 3b: 沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质下地壳铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

**Fig. 5**  $\Delta\gamma$ — $\Delta\beta$  genetic classification graph of lead isotope: 1—Mantle source lead; 2—Upper crust source lead; 3—Subduction source lead (3a: magmatism; 3b: deposition); 4—Chemical precipitation lead; 5—Submarine hydrothermal activities lead; 6—Moderate metamorphosed lower crust lead; 7—Deep metamorphosed lower crust lead; 8—Orogenic belt lead; 9—Ancient shale upper crust lead; 10—Retrogressive metamorphism lead

液成矿作用, 但不排除燕山中晚期中基性脉岩对晚期铅锌成矿有局部轻微改造作用。

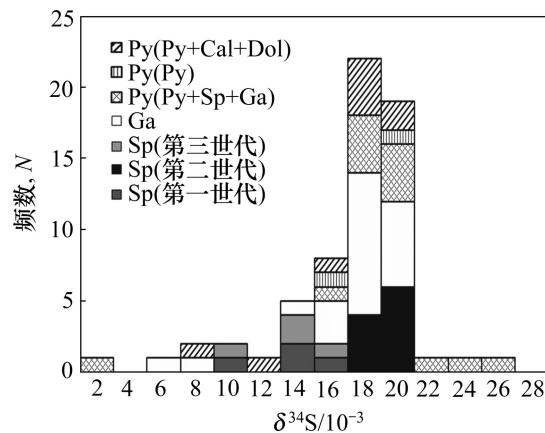


图6 不同硫化物矿物硫同位素频数直方图

Fig. 6 Frequency histogram of  $\delta^{34}\text{S}$  for minerals

### 3.6 成矿流体特征

#### 3.6.1 闪锌矿流体包裹体成分特征

选择凡口铅锌矿床中结晶程度较高、晶体颗粒相对较粗、裂隙较不发育的黑褐色第一世代闪锌矿、棕褐色第二世代闪锌矿和浅棕色第三世代闪锌矿各2件、共6件样品进行闪锌矿流体包裹体液气相成分测试, 所得数据及相关参数列于表4。

从包裹体液相成分组成来看, 闪锌矿流体包裹体主要属于 $\text{Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Cl}^-$ 型,  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 比值从第一世代到第二世代, 呈减小趋势, 但从第二世代到第三世代, 又趋于增大。推测从第一世代到第二世代, 闪锌矿成矿温度逐渐降低、成矿流体中成矿物质含量随之降低, 且成矿流体与围岩发生相互作用会生成少量绢云母和绿泥石等蚀变矿物, 使流体中 $\text{K}^+$ 离子含量比例降低。由于燕山中晚期部分中基性岩浆侵入至铅锌主矿体, 带来少量热能和成矿物质, 促使生成第三世代闪锌

表4 铅锌矿床闪锌矿流体包裹体气、液相成分数据

Table 4 Gas and liquid components of sphalerite fluid inclusions in Fankou deposit

世代	$w/10^{-6}$										质量比		
	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{K}/\text{Na}$	$\text{Ca}/\text{Mg}$	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$
一	5.962	7.896	6.809	2.145	28.877	670.313	141.009	0.644	10.972	597	0.755	3.174	0.236
一	3.892	6.258	8.503	2.934	69.234	488.284	186.278	0.162	0.682	438	0.622	2.898	0.425
二	2.984	5.221	6.652	0.892	6.236	609.565	82.129	0.171	3.641	1031	0.572	7.457	0.080
二	2.347	8.637	3.792	1.866	5.129	482.047	49.976	0.441	16.745	799	0.272	2.032	0.063
三	1.895	4.101	5.331	0.211	5.392	380.6	37.191	0.145	7.326	654	0.462	25.265	0.057
三	4.592	8.033	3.059	1.215	89.349	231.622	58.479	0.342	21.723	752	0.572	2.517	0.078

测试单位: 中南大学地球科学与信息物理学院; 测试时间: 2011年3月26日。

矿，故第三世代闪锌矿的  $K^+$ 离子含量比例又略有增大。包裹体中阴离子以  $SO_4^{2-}$  和  $Cl^-$  为主，第三世代闪锌矿  $SO_4^{2-}$  的浓度明显比第一、第二世代闪锌矿  $SO_4^{2-}$  的浓度低，反映了第三世代闪锌矿与第一、第二世代闪锌矿成矿条件的不同。

在 O-H-C 体系气相组分中富  $CO_2$ 、贫  $CO$ 、 $H_2$  及  $CH_4$ 。 $CO_2$  含量从第一到第三世代呈减小趋势，但从第一到第二世代减小的幅度大于从第二到第三世代减小的幅度。构造差异应力和流体的压力与  $CO_2/H_2O$  比值呈正比例关系， $CO_2/H_2O$  比值逐渐变小，即  $CO_2$  在水中的溶解度降低，说明成矿流体压力和温度逐渐减小，成矿活动强度也随之降低<sup>[15]</sup>，也就是说，从铅锌成矿早期到成矿晚期，成矿压力、成矿温度及矿化强度逐渐降低。

### 3.6.2 闪锌矿流体包裹体氢、氧同位素组成

已有资料显示，凡口矿区闪锌矿流体包裹体氢、氧同位素组成范围落在岩浆水和变质水的重叠区及其旁侧变质水的范围，据此可推知凡口矿区铅锌成矿热液与被强烈改造的深部沉积建造有关，为包括建造水和岩浆水的多源混合流体，流体应主要来自深部的基底浅变质碎屑岩含水层，但还有少量岩浆热液参与成矿，铅锌成矿流体的加热驱动与燕山早期岩浆热事件有关。

### 3.6.3 闪锌矿流体包裹体测温

凡口铅锌矿床第二和第三世代闪锌矿流体包裹体测得的均一温度范围为 138.6~221.5 °C(未经压力校正)，从第二世代到第三世代，均一温度呈降低趋势。且根据手标本和显微镜观察，选择部分彼此连生、无明显交代、穿插现象的第一、第二世代闪锌矿与方铅矿样品测定闪锌矿和方铅矿的硫同位素组成，计算出闪锌矿和方铅矿的硫同位素平衡分馏温度在 100~310 °C 之间，故可认为第一、第二世代闪锌矿和方铅矿是在中高-中低温环境下形成，而第二世代到第三世代闪锌矿和方铅矿则具有中低温成矿特征。

若按我国沉积盆地的地热梯度 0.032~0.042 °C/m 计算，研究区内地层厚度小于 1 000 m 的矿区靠正常地热梯度难以达到所测得的闪锌矿成矿流体温度<sup>[16~17]</sup>，这表明在铅锌成矿期该研究区存在古地热异常，推测此现象是由于褶皱构造、层间滑动构造和断裂构造的贯穿和引导作用，深部壳源重熔型岩浆得以沿北东向复活断裂构造上侵带来热能而引起<sup>[18]</sup>。

根据测得的闪锌矿流体包裹体冷冻温度 -1.4~ -6.7 °C，以  $NaCl-H_2O$  体系计算，得到的盐度只有 2.41%~10.11%( $NaCl_{equiv}$ )，明显低于赋存于碳酸盐岩层

的典型 MVT 铅锌矿床成矿流体盐度(10~30% ( $NaCl_{equiv}$ ))<sup>[19]</sup>。这说明凡口式铅锌硫化物矿床与典型的 MVT 铅锌矿床的成矿流体相比，除盆地碳酸盐岩含水系统和碎屑岩含水系统中的循环热卤水参与成矿外，低盐度的深部壳源花岗岩浆热液也是流体来源之一。

### 3.6.4 热液方解石碳氧同位素组成

凡口矿床围岩灰岩的碳氧同位素值基本集中在  $\delta^{13}C=(0\pm2)\times10^{-3}$  和  $\delta^{18}O=18.0\times10^{-3}\sim20.5\times10^{-3}$ ，属于典型的海相沉积范围之内，形成于矿化阶段的中期方解石的  $\delta^{13}C_{V-PDB}$  值小于  $-4.0\times10^{-3}$ ， $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  大部分在  $17.0\times10^{-3}$  附近，明显小于沉积碳酸盐岩的，显示成矿物质主要不是来自碳酸盐围岩<sup>[20]</sup>。同时，从泥盆纪正常灰岩、矿化灰岩到矿化灰岩中硫化物中的中期方解石， $\delta^{13}C$  值逐渐降低，从  $0.1\times10^{-3}$  降到  $-0.6\times10^{-3}$  以下，进入岩浆成因的碳同位素组成范围<sup>[20]</sup>，说明主成矿期成矿流体可能与岩浆热液来源有关。

## 4 结论

1) 曲仁盆地北缘，除较广泛分布的第一世代沉积成岩期黄铁矿外，铅锌硫化物矿床主要经历了两期硫化物热液成矿期，即印支期黄铁矿热液成矿期和燕山早期铅锌黄铁矿成矿期。印支期黄铁矿成矿期，仅出现黄铁矿矿化，形成黄铁矿矿床，到了燕山早期铅锌成矿期，造山运动强烈，北东向断裂复活，深部铅锌成矿物质随热液上涌至碳酸盐岩层，叠加并改造黄铁矿矿体，发生了铅锌黄铁矿矿化、铅锌矿化以及黄铁矿矿化作用。

2) 燕山中晚期，铅锌主矿体已基本形成，但铅锌矿区局部受到中基性脉岩的轻微改造作用，生成少量第三世代的闪锌矿、方铅矿和第四世代黄铁矿等矿物。

3) 印支期黄铁矿成矿期的成矿物质来自盆地碳酸盐岩层，燕山早期铅锌成矿期的成矿物质则主要来自盆地基底碎屑岩层，燕山早期重熔型花岗岩浆也是重要提供者之一。到了燕山中晚期的铅锌成矿期，中基性岩浆提供了部分成矿物质。

4) 印支期黄铁矿矿体的金属成矿物质铁和矿化剂硫均来自赋矿层灰岩；燕山早期铅锌成矿期的 Pb、Zn 等金属成矿物质来自基底浅变质碎屑岩层和燕山期壳源重熔型花岗岩，矿化剂硫则主要继承于地层硫和先期黄铁矿矿体中硫，花岗岩浆可能也提供少量硫；燕山中晚期中基性脉岩为晚期铅锌黄铁矿矿化提

供金属成矿物质, 矿化剂硫主要继承于前期矿体和地层, 少量为中基性脉岩携带的硫。

## REFERENCES

- [1] 张长青, 余金杰, 毛景文, 蔡宗瑶. 密西西比型(MVT)铅-锌矿床研究进展[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 195–210.  
ZHANG Chang-qing, YU Jin-jie, MAO Jing-wen, RUI Zong-yao. Advances in the study of Mississippi valley-type deposit[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(2): 195–210.
- [2] BRADLEY D, LEACH D. Tectonic controls of Mississippi valley-type lead zinc mineralization in orogenic forelands[J]. Mineralium Deposita, 2003, 38: 652–667.
- [3] 张术根, 张木毅, 刘慎波. 凡口铅锌矿深、边部及外围成矿预测与找矿研究[R]. 长沙: 中南大学, 2009: 21–23.  
ZHANG Shu-gen, ZHANG Mu-yi, LIU Shen-bo. The deep, peripheral edge metallogenetic prediction and Prospecting of Fankou Pb-Zn ore deposit[R]. Changsha: Central South University, 2009: 21–23.
- [4] 张术根, 姚翠霞, 杨汉壮, 袁桂强. 粤北凡口式铅锌硫化物矿床关键成矿控制系统及成矿预测研究[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013: 55–64.  
ZHANG Shu-gen, YAO Cui-xia, YANG Han-zhuang, YUAN Gui-qiang. Key metallogenetic control system and metallogenetic prediction research on Fankou type lead-zinc sulfide ore deposits in northern Guangdong district[M]. Changsha: Central South University Press, 2013: 55–64.
- [5] 孙同文, 付广, 吕延防, 赵荣. 断裂疏导流体的机制及疏导形式探讨[J]. 地质评论, 2012, 58(6): 1081–1090.  
SUN Tong-wen, FU Guang, LÜ Yan-fang, ZHAO Rong. A discussion on fault conduit fluid mechanism and fault conduit form[J]. Geological Review, 2012, 58(6): 1081–1090.
- [6] 梁新权, 温淑女. 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, 2009, 33(4): 556–566.  
LIANG Xin-quan, WEN Shu-nü. Characteristics of strike-slip structures and metallogenetic model of the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(4): 556–566.
- [7] 李水林. 粤北曲江构造盆地北缘铅锌矿集中区成矿控制因素及找矿靶区选择[J]. 大众科技, 2007, 95: 96–104.  
LIN Shui-lin. Metallogenetic controlling factors and prospecting target selection of lead-zinc ore concentration area in the northern margin of Qujiang tectonic basin, northern Guangdong district[J]. Popular Science and Technology, 2007, 95: 96–104.
- [8] 汪礼明. 广东凡口超大型铅锌矿田成矿学研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006: 65–72.  
WANG Li-ming. Metallogeny of Fankou superlarge Pb-Zn ore field, Guangdong Province[D]. Changsha: Central South University, 2006: 65–72.
- [9] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 2007, 52(9): 981–991.  
LI Xian-hua, LI Wu-xian, LI Zheng-xiang. Genetic type and tectonic significance of the early Yanshan granites in the Nanling region[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9): 981–991.
- [10] 刘德利, 刘继顺, 郭军, 周余国, 韩海涛. 广东凡口铅锌矿床控矿构造型式[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 184–190.  
LIU De-li, LIU Ji-shun, GUO Jun, ZHOU Yu-guo, HAN Hai-tao. Ore-controlling structure in Fankou lead-zinc deposit, Guangdong Province[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(4): 184–190.
- [11] 祝新友, 王京彬, 刘慎波. 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, 2013, 87(2): 167–177.  
ZHU Xin-you, WANG Jing-bin, LIU Shen-bo. Metallogenesis age of Mississippi valley type Pb-Zn deposit in Fankou, Guangdong: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating of diabase[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 167–177.
- [12] 张术根, 丁存根, 李明高, 刘慎波. 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, 2009, 28(4): 364–374.  
ZHANG Shu-gen, DING Cun-gen, LI Ming-gao, LI Shen-bo. A study on some genetic mineralogical properties of sphalerite in the Fankou Pb-Zn ore district[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2009, 28(4): 364–374.
- [13] 张术根, 姚翠霞. 曲仁盆地北缘凡口式铅锌硫化物矿床稀土元素特征[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2683–2692.  
ZHANG Shu-gen, YAO Cui-xia. RE element characteristics of Fankou-type lead-zinc sulfide deposit in northern margin of Quren basin[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2683–2692.
- [14] 姚翠霞, 张术根, 王超. 曲仁盆地北缘铅锌硫化物矿床关键控矿因素及成矿系统[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2557–2566.  
YAO Cui-xia, ZHANG Shu-gen, WANG Chao. Key ore controlling factors and metallogenetic system of leadzinc sulfide deposits in northern margin of Quren basin[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(9): 2557–2566.
- [15] CHI G X, XUE C J, LAI J Q. 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, 2007, 102(4): 739–743.
- [16] 邓军, 陈学明, 沈崇辉, 杨立强. 粤北晚中生代盆地压实流体的性状[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(3): 149–154.  
DENG Jun, CHEN Xue-ming, SHEN Cong-hui, YANG Li-qiang. The characteristics of later paleozoic compaction fluid system of north-Guangdong sedimentary basin[J]. Bulletin of Mineralogy,

- Petrology and Geochemistry, 2000, 19(3): 149–154.
- [17] SMITH J W. A sulfur isotope geothermometer for the trisulfide system galena-sphalerite-pyrite[J]. Chem Geol, 1977, 19: 83–90.
- [18] BASUKI N I, SPOONER E T C. A review of fluid inclusion temperatures and salinities in Mississippi valley-type Zn-Pb deposits: Identifying thresholds for metal transport[J]. Exploration and Mining Geology, 2004, 11: 1–17.
- [19] 刘英超, 侯增谦, 杨竹森, 田世洪, 宋玉财, 杨志明, 王召林, 李政. 密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床: 认识与进展[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 253–264.
- LIU Ying-chao, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, TIAN Shi-hong, SONG Yu-cai, YANG Zhi-ming, WANG Zhao-lin, LI
- Zheng. Some insights and advances in study of Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(2): 253–264.
- [20] 梁业恒, 孙晓明, 陆红锋. 粤北凡口超大型铅锌矿热液方解石流体包裹体特征和C-O-Sr同位素组成[J]. 矿床地质, 2009, 28(Z5): 79–88.
- LIANG Ye-heng, SUN Xiao-ming, LU Hong-feng. Fluid inclusions and C-O-Sr isotopic compositions of hydrothermal calcite in Fankou super large scale Pb-Zn deposit[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(Z5): 79–88.

(编辑 陈卫萍)