

## 曲仁盆地北缘铅锌硫化物矿床关键控矿因素及成矿系统

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:** 曲仁中生代断陷盆地北缘地区出露上古生界碳酸盐岩建造, 其内已发现超大型凡口铅锌矿床, 并在凡口矿区西侧见杨柳塘、红珠冲等铅锌矿床、西岗寨、罗村黄铁矿矿床等, 东侧见铁屎岭等铁矿点。通过综合分析研究区硫化物矿床地质矿化特征、区域水文地球化学环境和成矿流体驱动、传输和汇聚机制, 融合递进成矿论与成矿系统论思想, 认为研究区自元古宙主要经历了三大构造演化阶段及多种构造体制的转化, 导致了多期构造热事件和岩浆侵入活动发生, 为盆地北缘金属元素的大规模富集成矿创造了条件。按成矿时间先后将凡口式铅锌硫化物成矿划分为两个成矿系统, 即印支期包括压缩驱动、近东西向褶皱、层间滑动构造、沉积成岩期黄铁矿和地层硫储体、碳酸盐岩含水层等关键控矿因素的黄铁矿热液成矿系统; 燕山早期包括热膨胀驱动、NE、NW 向断裂构造、基底碎屑岩含水层、壳源重熔型花岗质岩浆、古地热异常等关键控矿因素的铅锌热液成矿系统。凡口式铅锌硫化物矿床是这两个成矿系统在时间和空间上的继承、叠加和改造的结果。

**关键词:** 曲仁盆地北缘; 铅锌硫化物矿床; 关键控矿因素; 成矿系统

中图分类号: P618.4; P611.1

文献标志码: A

## Key ore-controlling factors and metallogenic system of lead-zinc sulfide deposits in northern margin of Quren basin

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

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,  
Central South University, Changsha 410083, China;  
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The northern margin of Quren Mesozoic faulted basin outcrops Paleozoic carbonate formation, in which Fankou large lead-zinc deposit was discovered. Meanwhile, Yangliutang, Hongzhucong lead-zinc deposits and Xigangzai, Luocun pyrite deposits were discovered in the westward of Fankou mine, and Tieshiling iron points were discovered in the eastward of Fankou mine. Through comprehensively analyzing the geological and mineralization characteristics of these sulphide deposits in this area, the regional hydrogeochemical environment, forming fluid driving, transmission and aggregation mechanism, by fusing progressive mineralization and metallogenic system theory, the study suggests that this research area had mainly undergone three large tectonic evolution stages since Proterozoic and the conversion of a variety of tectonic regime. All those resulted in the multi-period structure thermal events and magma intrusion activities, and created the conditions of the metal elements enrichment and mineralization in large scale. Fankou-type lead-zinc sulfide mineralization in this area can be chronologically divided into two metallogenic systems, one of which is Indosinian pyrite hydrothermal mineralization system controlled by key factors of compression driver, the EW fold, interlayer sliding structure, sedimentary diagenetic pyrite and sulfur storage body in carbonate Aquifer. The other one is Early Yanshanian lead-zinc sulfide hydrothermal mineralization system controlled by key factors of thermal expansion

driver, NE, NW faults, clastic basement aquifer, crust remelting type granitic magmatism and ancient geothermal anomaly. Fankou-type lead-zinc sulfide deposit is formed because of inheritance, superimposition and alteration of combined the two metallogenic systems.

**Key words:** northern margin of Quren basin; lead-zinc sulfide deposit; key ore-controlling factors; metallogenic system

曲仁盆地北缘紧邻近诸广山-九峰花岗岩带,南缘为大东山-贵东花岗岩带,东缘被仁化-韶关断裂带穿切,西缘紧邻郴州-怀集断裂带<sup>[1]</sup>,位于此次研究区盆地北缘的凡口、杨柳塘、罗村等地集中分布着铅锌硫化物矿床和黄铁矿矿床(点)。自 20 世纪 80 年代以来,关于研究区上述矿床的成因观点主要有海底热泉喷流堆积<sup>[2-4]</sup>、沉积-成岩-成岩后改造富集<sup>[5]</sup>、矿源层固结交代两期成矿<sup>[6]</sup>、多因复成<sup>[7-9]</sup>等。这些观点的分歧主要集中在成矿物质来源(特别是金属来源)、热能来源、成矿流体来源及其驱动、传输和汇聚驱动机制、矿化定位机制认识方面。本文作者将递进成矿论与成矿系统论思想进行融合,探索曲仁盆地北缘递进成矿过程对应的关键控矿因素和成矿系统,以期在研究区找到其他的凡口式铅锌硫化物矿床。

## 1 研究区地质矿化特征

### 1.1 基本地质概况

曲仁盆地为中生代断陷盆地,其北缘边界见前泥盆纪地层分布,内部见晚古生代和中、新生代地层。盆地北缘内已知的硫化物矿床矿体主要赋存于中上泥盆统至下石炭统地层中,其中以凡口为代表的铅锌硫化物矿床的矿体集中分布在上泥盆统余田桥组和锡矿山组地层,少量铅锌矿体在于下石炭统及中上石炭统壶天群底部;以西岗寨为代表的黄铁矿矿床矿体主要赋存于下石炭统石磴子组,部分见于上泥盆统余田桥组和锡矿山组地层。

在印支期,盆地北缘因受近南北向区域应力场及边界条件制约,郴州-怀集和吴川-四会断裂所夹持地段发生压缩变形<sup>[10-11]</sup>,发育近东西向短轴状宽展型褶皱,形成复式向斜,发育的次级褶皱有西北部西岗寨-西瓜地-红珠冲“S”褶皱,形成乐昌向斜,东部以凡口矿区为中心形成的曲仁等轴向斜<sup>[12]</sup>。地壳演化至燕山期,研究区所在地壳受热膨胀程度达到顶峰,深部地壳强烈上拱、破裂并引起块断变形,先期切割盆地基底的北东和北北向断裂复活,并伴随发育近东西、近南北和北北东向断裂。

硫化物矿床内均未见呈规模的酸性岩浆岩,离矿区最近的花岗岩体为诸广山燕山期黑云母花岗岩岩体。但在铅锌矿床内常见沿燕山期近南北向断裂、北西向或近东西向断裂充填的中基性脉岩,而黄铁矿矿床内几乎未见中基性脉岩。

### 1.2 矿床矿化特征

研究区铅锌矿床矿体主要呈似层状、透镜状、楔板状、脉状和不规则状分布<sup>[13-14]</sup>,杨柳塘铅锌矿床的矿体形态组合相对凡口矿床简单些,多为似层状、透镜状<sup>[15]</sup>。矿化底界为沉积旋回底部的碎屑岩-碳酸盐岩过渡界面,矿体均就位在该界面的上覆碳酸盐岩层位。黄铁矿矿床的黄铁矿矿体更靠近界面底部,铅锌矿床的黄铁矿矿体以该界面为矿化底界,但黄铁铅锌矿体、铅锌矿体在更远的部位也见分布。

区内主要金属矿物具有明显的多世代特征,其中闪锌矿可分为 3 个世代:第一世代为黑褐色和以黑褐色为主的杂色环带状闪锌矿,第二世代为黄褐色和以黄褐色为主的杂色环带状闪锌矿,第三世代为浅棕色闪锌矿<sup>[16-18]</sup>。黄铁矿可分为 4 个世代:第一世代均为致密微粒集合体,是沉积成岩期产物;第二世代为黄铁矿矿石的组成主体;第三世代黄铁矿主要是第二世代黄铁矿受到高温热能加热、发生重结晶或再生长而形成,少量第三世代黄铁矿是直接由铅锌成矿热液结晶而成,与第二世代黄铁矿没有继承及改造关系;第四世代黄铁矿分布量最少,受燕山中晚期中基性脉岩侵入活动影响呈细脉或网脉状充填在矿体及近矿围岩的断裂裂隙中。矿区围岩蚀变类型主要为白云石化、方解石化、菱铁矿化以及硅化,有时还可见绿泥石化、绢云母化、蛇纹石化以及粘土化<sup>[19]</sup>。

根据研究区各矿床的矿石结构构造、矿物共生组合、矿物形成世代、矿化围岩蚀变及其时空分布特征,确定盆地北缘凡口式铅锌硫化物矿床经历了 4 个成矿期,分别为沉积成岩黄铁矿成矿期,印支期黄铁矿热液成矿期、燕山早期铅锌矿热液成矿期及燕山中晚期铅锌矿热液成矿期,其中黄铁矿主矿体形成于印支期黄铁矿热成矿期,铅锌矿体和铅锌黄铁矿矿体主要形成于燕山早期铅锌热液成矿期。

## 2 成矿物质来源

以具代表性的凡口铅锌矿床作为重点解剖对象,讨论研究区铅锌硫化物矿床成矿金属物质来源、硫和铅同位素组成及成矿流体来源特征。

### 2.1 成矿金属物质来源

与粤北全区泥盆系、石炭系地层比较,矿区赋矿地层中的 Pb、Zn 成矿元素得到明显富集,但从远离矿体的正常地层到近矿围岩, Pb、Zn 含量具有随矿化叠加而形成扩散晕,而近矿围岩 Pb、Zn 元素没有出现“亏损”。在赋矿地层中 Fe、S 与 Pb、Zn、Ag 之间几乎没有相关性,但在矿石中 Fe 与 Hg、Zn 显示负相关性,说明 Pb、Zn 等成矿金属元素不是直接从赋矿地层获取<sup>[20-21]</sup>。

从矿区控矿断裂的构造地球化学特征研究中得知:断裂破碎带的成矿金属元素含量自深部向浅部逐渐降低;从远矿地层到近矿围岩再到控矿断裂破碎带, Pb、Zn 含量逐渐增高, Pb、Zn 线性相关度也逐渐增高。故可推断 Pb、Zn 金属成矿元素由含矿流体携带,自深部盆地基底向浅部盖层沿控矿断裂向上运移。

### 2.2 硫同位素组成

矿区黄铁矿的硫同位素  $\delta^{34}\text{S}$  组成范围虽宽( $-8.8 \times 10^{-3} \sim 26.55 \times 10^{-3}$ ),但“塔式效应”仍较明显。赋矿地层中所见多为沉积相第一世代黄铁矿,所含硫显示地层硫特征。矿石中黄铁矿大部分与第一世代黄铁矿有相似的  $\delta^{34}\text{S}$  组成特征,而产于中基性脉岩中的矿石所含黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值接近零或为负值,说明研究区黄铁矿矿化所需硫主要由赋矿层中沉积相黄铁矿和硫储体提供,中基性岩浆在成矿晚期提供了部分硫。矿区闪锌矿的硫同位素  $\delta^{34}\text{S}$  组成范围为  $9.5 \times 10^{-3} \sim 24.2 \times 10^{-3}$ ,其众值与黄铁矿硫同位素组成相似,呈地层硫特征。第二世代闪锌矿  $\delta^{34}\text{S}$  值则略小于第一世代闪锌矿,而第三世代闪锌矿  $\delta^{34}\text{S}$  值远小于第一、第二世代闪锌矿(见图1)。这些特征表明铅锌热液成矿晚期明显有来自地壳深部或地幔(硫同位素组成平均值为  $0 \sim 5 \times 10^{-3}$ )的外源硫参与成矿。结合矿区中基性脉岩的侵入时代、与矿体之间分布关系,推测中基性脉岩参与了铅锌成矿晚期第三世代铅锌矿、第四世代黄铁矿的生成过程。

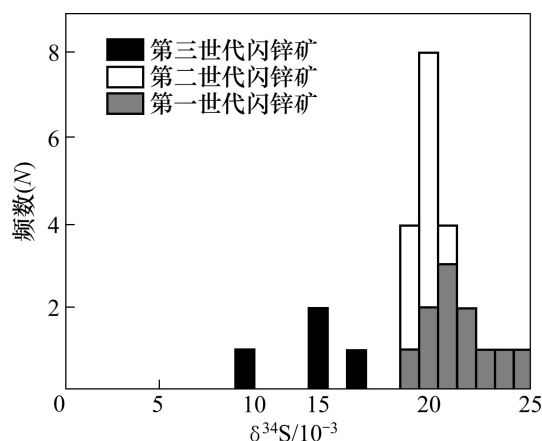


图1 凡口矿区3个不同世代闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成直方图

Fig. 1 Sulfur isotopic composition histogram of sphalerite in three generations, Fankou

### 2.3 铅同位素组成

当矿区赋矿围岩、铅锌硫化物矿石(包括铅锌黄铁矿矿石和铅锌矿石)及中基性脉岩样品的铅同位素组成投入在  $\Delta\gamma-\Delta\beta$  成因分类图解中时,发现赋矿围岩铅位于上地壳源铅区域内,中基性脉岩铅位于岩浆作用铅区域,矿石铅既有位于上地壳源铅和岩浆作用铅区域内,也有个别靠近岩浆作用铅与沉积作用铅区域边界(见图2)。

以上结果说明成矿金属物质铅主要由上地壳和壳源重熔型岩浆热液提供。在该研究区上地壳包括盆地碳酸盐岩层和盆地基底浅变质碎屑岩层,前面已经证明碳酸盐岩赋矿层不是金属成矿物质的直接来源,所以推断盆地基底浅变质碎屑岩层是重要的铅来源。

### 2.4 流体源

矿区闪锌矿流体包裹体的  $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  值主要落在岩浆水和变质水重叠区及其右侧变质水范围<sup>[20-21]</sup>,氧同位素组成具有从第一世代到第三世代闪锌矿逐渐相对富集轻同位素的趋势,并且该矿区热液成因碳酸盐矿物的氧同位素组成和成岩(准同生)期碳酸盐矿物氧同位素组成分别换算成对应流体的氧同位素组成后,成矿流体与成岩流体有很大差别<sup>[22]</sup>。这些特征表明铅锌成矿流体并非单纯盆地源流体,而是同时有低盐度、低  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的流体参与。由此可推断,铅锌成矿热液应为深度演化的地层建造水和岩浆水所构成的混合热流体。

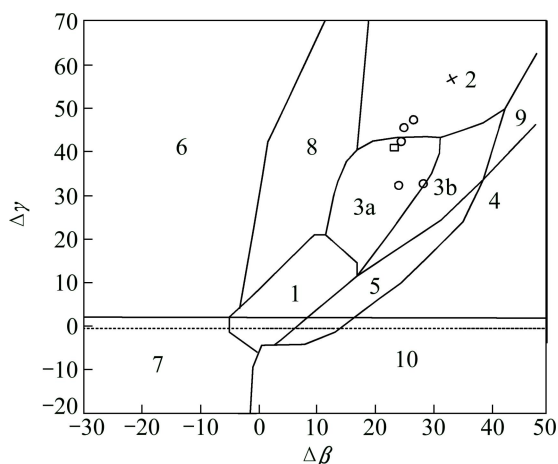


图2 铅同位素  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  成因分类图解<sup>[1]</sup>: 1—地幔源铅; 2—上地壳源铅; 3—上壳与地幔混合的俯冲带铅(3a: 岩浆作用; 3b: 沉积作用); 4—化学沉淀型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质下地壳铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅; ○—矿石; ×—围岩; □—中基性脉岩

Fig. 2  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  genetic classification graphic of lead isotope<sup>[1]</sup>: 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; ○—Ore; ×—Wall rock; □—Intermediate-basic dikes

### 3 水文地球化学特征

由于研究区铅锌硫化物矿床的热液成矿事件中混合成矿流体中包括地层建造水, 故了解曲仁盆地碳酸盐岩地层和盆地浅变质碎屑岩地层对应的两个含水系统中地下水所含的成矿物质及其同位素的分布、迁移、汇聚特征和规律, 即研究区水文地球化学特征对掌握矿床成因和成矿系统具有重要作用。

#### 3.1 水文地质单元分割

曲仁盆地北缘地段由基底浅变质碎屑岩含水系统和盖层碳酸盐岩含水系统共同构成了一个以孔隙承压水、裂隙孔隙层间承压水为主的水文地质单元。在印支期, 沿廊田—花坪一线发育的北西向断裂密集带将研究区分割成两个次级水文地质单元, 西部杨柳塘—罗村地区属于一个次级水文地质单元、东部的凡口—铁石岭—麻塘—羊角山地区属于另一个次级水文地质单元。

到燕山早期, 以北西向西岗寨—红珠冲构造密集带为界, 原印支期西部水文地质单元又被分割成两个次级水文地质单元, 杨柳塘和罗村矿区分别位于这两个次级水文地质单元中; 以近南北向和北西向构造密集带为界, 原印支期东部水文地质单元被分割成石塘、麻塘、大渡岭、和仁化以东 4 个水文地质单元(见图 3)。

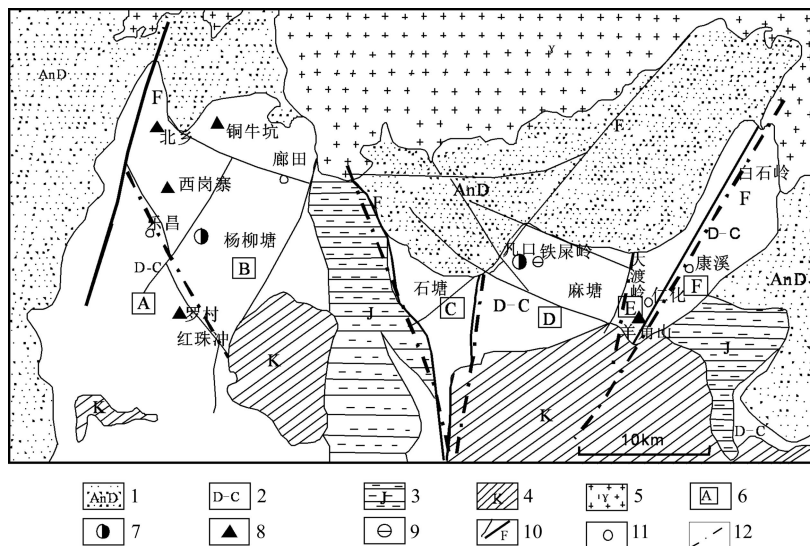


图3 燕山早期粤北曲仁盆地北缘水文地质单元划分图: 1—前泥盆系; 2—泥盆系—石炭系; 3—侏罗系; 4—白垩系; 5—花岗岩; 6—水文地质单元编号; 7—铅锌矿; 8—硫铁矿; 9—菱铁矿; 10—断层; 11—城市; 12—水文地质单元界线

Fig. 3 Hydrological geological unit division map of early Yanshanian in northern margin of Quren basin: 1—Pre Devonian; 2—Devonian-Carboniferous; 3—Jurassic formation; 4—Cretaceous; 5—Granite; 6—Number of hydrology geology unit; 7—Lead zinc deposit; 8—Pyrite deposit; 9—Siderite deposit; 10—Fault; 11—City; 12—Boundary line of hydrology geology unit

### 3.2 水文地质地球化学特征

在印支期,盆地中泥盆统东岗岭阶泥质粉砂岩、粉砂质页岩、泥炭质页岩等岩层构成的相对隔水层使得基底碎屑岩含水系统和碳酸盐岩含水系统相对隔离<sup>[23]</sup>,且此时间隙性活动的北东向、北西向断裂仍未复活,两个含水系统不能被导通,故印支期黄铁矿成矿流体只能来自盆地碳酸盐岩含水系统。上泥盆统余田桥组、锡矿山组、下石炭统各组和中上石炭统壶天群之间或各地层内部存在多个由岩石岩性、组构特征差异引起的变异界面。当研究区受近南北向压缩驱动和褶皱构造热事件作用时,泥盆-石炭系地层的变异界面处形成的层间滑动构造带及其特定的岩性组合成为碳酸盐岩含水系统中成矿流体的运移通道和卸载、就位场所,沉积成岩期黄铁矿和硫储体成为热液成矿的“硫障”。由于此时期盆地北缘的东部和西部属于不同的水文地质单元,故杨柳塘、罗村、凡口等矿区的黄铁矿矿体的产出形态和规模因赋矿地层和构造分布特征稍有不同而存在差异。

地壳演化至燕山早期,先期北西向和北东向断裂构造复活,导通了基底浅变质碎屑岩含水系统和碳酸盐岩含水系统,同时地壳深部岩石高度热膨胀,部分发生熔融作用形成壳源重熔型花岗质岩浆<sup>[24-25]</sup>,并与基底含水层中的含矿热液共同朝北东向、北西向断裂构造带迁移、汇合成为混合型铅锌含矿热液后,继续沿构造带上移到达盆地盖层含水层。因罗村与杨柳塘被西岗寨-红珠冲北西向断裂分割位于不同的水文地质单元,其中罗村、西岗寨分布黄铁矿矿床,而位于北西向断裂和北东向断裂交汇地带的杨柳塘和红珠冲地区分别见中型铅锌矿床和铅锌矿点。石塘所处的水文地质单元被近南北向断裂与凡口、铁尿岭所在的水文地质单元分割开,凡口地区对应的盖层含水层中混合铅锌含矿热液未能运移至石塘所处的碳酸盐岩含水层,也就未能发生铅锌矿化作用。

## 4 成矿流体驱动、传输和汇聚机制

曲仁盆地北缘凡口式铅锌硫化物矿床所经历的黄铁矿热液成矿期和铅锌矿热液成矿期两个热液成矿期对应的成矿流体驱动、传输和汇聚机制各有不同,但后者一定程度上受前者成矿流体传输、汇聚及富集成矿特征影响。

### 4.1 印支期黄铁矿热液成矿期

#### 4.1.1 驱动机制

在印支期,由于曲仁盆地北缘的地台构造层固结

程度仍然较低,刚性特征仍较差,地槽构造层与地台构造层的界面以及地台构造层内部的地层变异界面更易受到压缩变形,发育形成层间滑动构造。同时地台构造层碳酸盐岩含水系统中的流体受该压缩驱动影响,被加热升温成含矿热液,并依压力梯度和地热梯度向层间滑动构造带推动。故印支期成矿流体传输以压缩驱动机制为主,地热梯度和压力梯度是重要辅助机制。

#### 4.1.2 传输、汇聚机制

成矿系统是由成矿物质、流体、能量、运移通道和空间基本要素构成,在成矿过程中,这些要素都是在不断演化发展的<sup>[26]</sup>。当印支期全区性层间滑动构造活动逐渐增强,地层变异界面一侧中的灰岩的物理化学性质发生明显变化,如化学活性增强,易发生岩溶作用,层间滑动构造带内虚脱空间得以扩大,且因灰岩物理特性为脆性,更易产生裂隙,是成矿流体良好的传输通道。变异界面的另一侧是活性相对差的页岩、石英砂岩等,是成矿过程中很好的阻隔层。当来自深部的热能缓慢升高,地热增温出现异常,在地热梯度和压力梯度驱动下,赋存于盆地碳酸盐岩含水系统中含矿热液沿着岩石裂隙、孔隙传输通道向静压力及地热相对低的层间滑动构造活动带作汇聚式运移<sup>[27]</sup>,沿途交代赋矿层中沉积成岩期黄铁矿、与赋矿层岩石发生水/岩交换反应,获取还原态硫,使得热液中的低价铁离子能和 $\text{HS}^-$ 结合成配位化合物,在层间滑动构造带的虚脱空间、岩性差异界面处结晶析出黄铁矿,并逐渐沉淀、富集成黄铁矿矿体。

### 4.2 铅锌矿热液成矿期

#### 4.2.1 驱动机制

在燕山早期特定的动力背景约束下,强烈地壳活动产生了大量热能,促使基底深部部分壳体重熔形成花岗质岩浆,并使基底深部岩石脆/韧性转换界面上移,于是基底碎屑岩含水层的含矿热液被向上排挤,并和重熔型花岗质岩浆热液在压力梯度和地热梯度驱动下朝复活的北东和北西向构造带迁移。故驱动燕山早期铅锌含矿流体运移的主要是热膨胀驱动,同时,构造驱动、基底深部岩石脆/韧性转换界面上移驱动、地热梯度和压力梯度也是流体运移驱动的重要补充机制。

#### 4.2.2 传输、汇聚机制

基底深部浅变质碎屑岩重熔过程中从固态中释放出来的挥发性物质,可促使Pb、Zn等成矿金属物质从围岩中分离、进入岩浆热液<sup>[28]</sup>。该含矿岩浆热液沿先期北东向构造薄弱带向上迁移,一部分未能达到碳

酸盐岩赋矿层,在盆岭转换带的交汇部位形成壳源重熔型花岗岩,但另一部分含矿岩浆热液在岩石脆/韧性转换界面上移驱动、压力和地热梯度驱动的共同作用下,和基底碎屑岩含水层中的铅锌含矿热液混合,故可推知深部混合铅锌含矿热液中金属成矿物质的最初来源为基底碎屑岩含水层。

赋存于盆地基底碎屑岩含水层的混合型铅锌含矿热液进入盆地碳酸盐岩含水层之前,因为盆地基底围岩主要为化学性质较稳定的碎屑岩,介于地槽构造层与地台构造层界面的地台构造层下部也多为石英细砂岩、粉砂岩,故该混合含矿热液不会因与围岩发生水/岩交换反应而显著改变化学成分和物理化学性状,能够稳定地到达碳酸盐岩赋矿层,并继续在赋矿层中的北东向、北西向及其旁侧次级断层、与其连通的局域层间滑动构造带中传输。

而碳酸盐岩层围岩灰岩具酸性缓冲作用,混合含矿热液呈中性、弱碱性,有机组分含量极低,其所含金属成矿元素以氯离子配位化合物形式运移,故当含矿流体在层间滑动构造虚脱空间、断层构造带、岩性组构变异界面处与沉积成岩期硫储体和印支期热液期黄铁矿相遇时可获取还原态硫并形成水溶配位化合物,其中大部分被卸载、沉淀和富集,最终形成铅锌黄铁矿矿体。少部分配位化合物随含矿热液继续沿北东向、北西向断层及层间滑动带运移,但因这些配位化合物对环境极为敏感,故短距离迁移后就卸载沉淀,形成脱离黄铁矿矿体就位空间的小规模铅锌矿体。

可见铅锌热液成矿作用与前期黄铁矿沉积成岩作用、黄铁矿热液成矿作用紧密相关,彼此之间具有继承、叠加、改造关系。

## 5 关键控矿因素

### 5.1 黄铁矿热液成矿期关键控矿因素

#### 5.1.1 沉积成岩期黄铁矿及硫储体

从棋梓桥晚期开始,粤北地区海盆内藻类植物空前发育,使得北东向伸展的水下凹地沦为含丰富生物有机质的礁滩障壁后凹地,在这里,海水对流强度降低,水体密度和还原程度增高,作为水体优势组分的低价铁和还原态硫及其有机质部分可直接从海水析出沉淀<sup>[29]</sup>,形成沉积相黄铁矿。在成岩阶段,沉积期间未能直接成为黄铁矿沉淀析出的可溶含铁物种、含硫物种进一步活化,通过交代作用成为黄铁矿沉淀析出。剩下继续赋存于碳酸盐沉积岩层的硫储体和沉积成岩期黄铁矿共同为热液期黄铁矿矿化提供还原态硫。

#### 5.1.2 印支期褶皱变形、全区性层间滑动构造

印支期构造应力变化是黄铁矿成矿流体在地壳中运动的主要外在因素,总体为挤压紧闭而局部拉张减压的构造环境能促使成矿流体运移和有利成矿。研究区地台构造层受压缩驱动作用而形成褶皱变形,局部存在岩性变异界面的岩层被拉张、错动,在岩性变异界面处发生层间滑动,形成地层间压力相对减少的虚脱空间,即在局部内形成了减压的构造环境,这为含矿热液的聚集和沉淀提供了有利成矿条件。

#### 5.1.3 静压力差

在盆地堆积物的下沉和压实过程中,盆地各部位的沉降幅度和岩相差异造成不同的静压力差<sup>[30-31]</sup>,促使层间水向压力小的方向转移。所以在曲仁盆地铅锌铁硫化物矿床多分布在其静压力差相对较大的北缘,且相对围岩,各类构造破碎带、断裂面、岩石空隙、孔隙处具有更大的静压力差,形成压力梯度也更大,能协助含矿热液完成定向迁移和汇聚。

#### 5.1.4 盆地碳酸盐岩含水系统

盆地中上泥盆统至下石炭统碳酸盐岩层是曲仁盆地北缘黄铁矿矿体的主要赋矿层,这些碳酸盐岩层中的灰岩、泥质岩等是很好的含水层,碳酸盐岩含水层的沉积岩相古地理环境、地层岩石的组构、物质组成、裂/孔隙的类型和状态等特征构成该项关键控矿要素的具体内容。

### 5.2 铅锌矿热液成矿期的关键成矿要素

#### 5.2.1 先期北东向、北西向构造薄弱带

燕山早期研究区地幔具高峰值的热能转换为动力驱动,自加里东期和海西期就存在且间歇性活动的北东向、北西向断裂复活,它们既切割基底地槽构造层,也贯穿地台构造层的泥盆系和石炭系地层,成为混合含矿热液重要的传输通道和汇聚空间,在整个铅锌热液成矿过程中起着承上启下的关键成矿作用。

#### 5.2.2 盆地基底碎屑岩含水系统和碳酸盐岩含水系统

盆地基底碎屑岩含水层是铅锌成矿流体的重要来源,燕山早期部分基底深部壳体发生重熔形成花岗质岩浆后脱离并向上侵入基底碎屑岩母岩,与基底碎屑岩含水层中流体共同被加热、混合成为铅锌含矿热液。而碳酸盐岩层中金属成矿物质的原始浓集程度比基底碎屑岩层低很多,故所提供的金属成矿物质只占铅锌热液成矿中所需成矿物质小部分,来自碳酸盐岩层的热液期黄铁矿和硫储体是矿化剂硫的主要来源,基底碎屑岩层和深部壳源重熔型花岗质岩浆只供少部分硫。

## 5.2.3 热膨胀驱动和古地热增温异常驱动

燕山早期地壳深部受热膨胀程度达到顶峰,因此引起的断裂构造事件、岩浆热事件以及盆地古地热增温异常是基底碎屑岩含水层的混合铅锌含矿热液向浅部碳酸盐岩含水层传输、汇聚的重要推动力,故热膨胀驱动和古地热增温异常驱动是该成矿期的关键控矿

因素之一。

## 5.2.4 燕山早期壳源重熔型花岗质岩浆

燕山早期以基底碎屑岩为母岩的重熔型花岗质岩浆沿区域性北东向断裂带强烈上涌,产生的热能是盆地基底碎屑岩含水层中的成矿物质活化和运移的因素之一,同时也是混合含矿热液的来源之一,提供了少

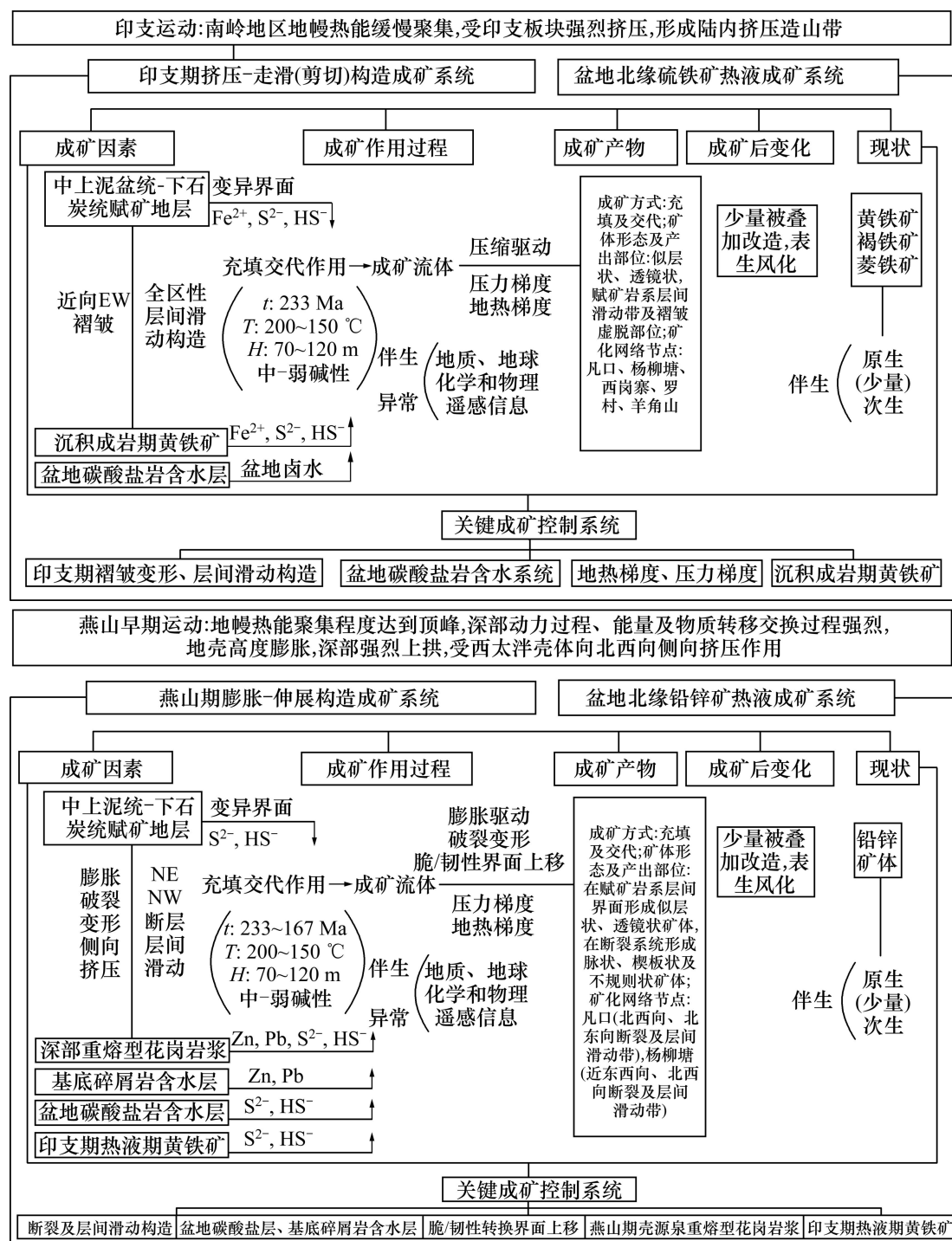


图4 曲仁盆地北缘凡口式铅锌硫化物矿床关键控矿因素及成矿系统

Fig. 4 Key ore-controlling factors and metallogenic system of Fankou-type lead-zinc sulphide deposit in northern margin of Quren basin

部分的 Pb、Zn 等成矿金属元素和矿化剂硫。

## 6 结论

由于广泛的覆盖层、多期次的岩浆活动和构造变形及成矿作用叠加,使得盆地北缘地质成矿结构极为复杂,有效把握研究区铅锌硫化物矿床成因机制较为困难,故本文将递进成矿论与成矿系统论思想融合,认为从成矿时间先后可将曲仁盆地北缘铅锌铁硫化物成矿划分为两个成矿系统,即印支期黄铁矿热液成矿系统和燕山期铅锌矿热液成矿系统。研究区分布的铅锌硫化物矿床具有多成矿构造阶段、多成矿物质(包括流体)源区类型、多成矿作用方式、多控矿因素组合类型、多成因类型的特征<sup>[32]</sup>。

1) 多成矿构造阶段:该成矿系统包括海西期沉积成岩期硫储体形成构造阶段、印支期以压缩驱动为主要机制的热液黄铁矿成矿构造阶段和燕山早期以热膨胀驱动为主要机制的热液铅锌成矿阶段。

2) 多成矿物质(包括流体)源区类型:在海西期,泥盆-石炭系特定岩相古地理环境形成的富硫、富有机质、以碳酸盐岩为主的地层组合是沉积成岩期硫储体和黄铁矿的直接硫源,也为热液型黄铁矿矿床和铅锌矿床提供了硫源。在印支期,黄铁矿成矿流体的主要源区是盆地碳酸盐岩含水层。在燕山早期,铅锌硫化物矿床的成矿流体的主要源区是基底碎屑岩含水层,少部分来自基底深部的岩浆热液和赋矿碳酸盐岩含水层;硫源区主要是印支期黄铁矿矿层及其所在的泥盆-石炭系特定岩相古地理环境形成的硫储体。

3) 多控矿因素组合类型:包括两种成矿控制因素组合类型,其一为沉积成岩期控制因素组合,其二为热液交代充填成矿控制因素组合。沉积成岩期的控制因素组合为海西期赋矿层沉积的岩相古地理环境和压实流体的运动特征。印支期黄铁矿热液成矿期的控矿因素组合为褶皱变形及层间滑动构造、碳酸盐岩含水系统及其内存在的碎屑岩-碳酸盐岩岩性界面、古地热和压力梯度和沉积成岩期黄铁矿和硫储体。在燕山早期铅锌热液成矿期的控矿因素组合为热膨胀驱动、断裂变形及层间滑动构造、古地热增温异常、深部脆/韧性转换界面上移、基底碎屑岩含水系统、碳酸盐岩含水系统及其内存在的碎屑岩-碳酸盐岩岩性界面、印支期黄铁矿和沉积成岩期硫储体。

4) 多成矿作用方式:沉积成矿作用、成岩交代成矿作用主要出现于沉积成岩期黄铁矿矿化和硫储体形成过程中。在印支期主要受压缩驱动制约,盆地源

成矿流体汇聚于层间滑构造带和岩性界面有利成矿地段,在特定水文地质地球化学单元内,以热液充填交代成矿作用方式,形成黄铁矿矿体。而燕山早期的铅锌硫化物矿床的成矿作用方式则是以热膨胀驱动为主要驱动机制,以古地热增温异常驱动、压力梯度和地温梯度驱动、深部岩石脆/韧性转换带上移为辅助驱动机制,使来自深部的混合型铅锌含矿热液沿北东向和北西向断裂、层间滑动带及岩性界面等传输通道,在特定水文地质地球化学单元内,成矿热液叠加-改造印支期黄铁矿矿体而形成铅锌矿体、铅锌黄铁矿矿体。

## REFERENCES

- [1] 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: 46-72.  
ZHANG Shu-gen, YAO Cui-xia, YANG Han-zhuang, YUAN Gui-qiang. Key metallogenic control system and metallogenic prediction research on Fankou type lead-zinc sulfide ore deposits in northern Guangdong district[M]. Changsha: Central South University Press, 2013: 46-72.
- [2] 陈学明,邓 军,翟裕生. 凡口铅锌矿床地球化学特征及成矿作用分析[J]. 地质地球化学, 1999, 27(1): 6-14.  
CHEN Xue-ming, DENG Jun, ZHAI Yu-sheng. Geological and geochemical characteristics of Fankou Pb-Zn deposits and its metallogenic analysis[J]. Geology Geochemistry, 1999, 27(1): 6-14.
- [3] 陈学明,邓 军,沈崇辉,兰景志. 凡口超大型铅锌矿床成矿流体的物理特征和地球化学特征[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2000, 25(4): 438-442.  
CHEN Xue-ming, DENG Jun, CHEN Cong-hui, LAN Jing-zhi. Geophysical and geochemical features of ore-forming fluid in Fankou super-large lead-zinc deposit[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(4): 438-442.
- [4] 邓 军,陈学明,方 云,程小久,杨立强,孙忠实,王建平. 粤北盆地流体系统及其矿化特征[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 95-102.  
DENG Jun, CHEN Xue-ming, FANG Yun, CHEN Xiao-jiu, YANG Li-qiang, WANG Jian-ping, SUN Zhong-shi. Characteristics of Late Paleozoic fluid system of the Yuebei sedimentary basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 95-102.
- [5] 赖应箴. 沉积物演化与某些层控矿床的形成[J]. 矿床地质, 1988, 7(1): 42-53.  
LAN Ying-jian. The evolution of sedimentary materials and the formation of certain sorts of stratabound deposits[J]. Mineral Deposits, 1988, 7(1): 42-53.
- [6] 陈耀钦,曾波夫. 试论凡口大型层控铅锌矿床的地质特征及矿床成因[J]. 沉积学报, 1984, 2(3): 34-47.

- CHEN Yao-qin, ZENG Bo-fu. Geological characteristics and genesis of huge strata-bound lead-zinc deposit of Fankou, Guangdong[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1984, 2(3): 34-47.
- [7] 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.
- [8] 王力, 彭省临, 龙永珍, 舒广龙. 广东凡口铅锌矿多成因复成成矿作用[J]. 桂林工学院学报, 2003, 23(2): 149-152.
- WANG Li, PENG Shen-lin, LONG Yong-zhen, SHU Guang-long. Polygenetic compound mineralization of Fankou Pb-Zn ore deposit, Guangdong[J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 2003, 23(2): 149-152.
- [9] 张术根, 马国秋, 刘瑞第. 凡口铅锌矿东矿带成矿规律与成矿预测研究[R]. 长沙: 中南大学, 2001: 83-102.
- ZHANG Shu-gen, MA Guo-qiu, LIU Rui-di. East metallogenic regularity and metallogenic belt Prediction of Fankou Pb-Zn ore deposit[R]. Changsha: Central South University, 2001: 83-102.
- [10] 许志琴, 杨经绥, 李化启, 王瑞瑞. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. 岩石学报, 2012, 28(6): 1697-1706.
- XU Zhi-qin, YANG Jing-sui, LI Hua-qi, WANG Rui-rui. Indosinian collision-orogenic system of Chinese continent and its orogenic mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(6): 1697-1709.
- [11] DAVID L L, DWIGHT B, MICHAEL T L, DAVID T S, GHISLAIN D M, JOYCE B. Mississippi valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36(6): 49-53.
- [12] 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(7): 96-104.
- LIN Shui-lin. Metallogenic 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(7): 96-104.
- [13] 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: 45-51.
- ZHANG Shu-gen, ZHANG Mu-yi, LIU Shen-bo. The deep, peripheral edge metallogenic prediction and Prospecting of Fankou Pb-Zn ore deposit[R]. Changsha: Central South University, 2009: 45-51.
- [14] 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 metallogenic model of the Fankou lead-zinc deposit, Guangdong province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(4): 556-566.
- [15] 王增润, 陈子龙. 广东乐昌杨柳塘铅锌矿床成矿作用分析[J]. 中南矿冶学院学报, 1986(6): 6-12.
- WANG Zeng-run, CHEN Zi-long. Analysis of the mineralization of the lead-zinc ore deposits in Yangliutang, Lechang, Guangdong[J]. *Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy*, 1986(6): 6-12.
- [16] 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.
- [17] 蔡锦辉, 罗俊华, 徐遂勤, 刘慎波, 陈尚周. 广东凡口铅锌矿成因探讨[J]. 华南地质与矿产, 2011, 27(1): 1-7.
- CAI Jing-hui, LUO Jun-hua, XU Sui-qin, LIU Shen-bo, CHEN Shang-zhou. Ore genesis research of Fankou lead-zinc deposit, Guangdong province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2011, 27(1): 1-7.
- [18] 翟丽娜, 蔡锦辉, 刘慎波. 广东凡口铅锌矿床成矿地质特征及资源预测[J]. 华南地质与矿产, 2009(2): 37-41.
- ZHAI Li-na, CAI Jing-hua, LIU Shen-bo. Concentrates rule and ore body predicting of Fankou lead-zinc mine, Guangdong[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2009(2): 37-41.
- [19] 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, WNAG Jing-bin, LIU Shen-bo. Metallogenic 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.
- [20] 张术根, 周建普, 黄满湘, 樊钟衡. 广东凡口铅锌(银)矿床成矿流体来源研究[J]. 矿产与地质, 2002, 16(4): 199-202.
- ZHANG Shu-gen, ZHOU Jian-pu, HUANG Man-xiang, FAN Zhong-heng. The origin of ore-forming fluid of Fankou Pb, Zn(Ag) deposit, Guangdong[J]. *Mineral resources and geology*, 2002, 16(4): 199-202.
- [21] ZHANG Shu-gen, ZHOU Jian-pu, HUANG Man-xiang, FAN Zhong-heng, et al. Geological and geochemical study on the genesis of Fankou Pb-Zn deposit[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2001, 25(1): 125-131.
- [22] 吴延之, 黄生文. 广东凡口铅锌矿床主要金属矿物的表型特征及其成因意义[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1987, 7(1/2): 1-10.
- WU Yan-zhi, HUANG Sheng-wen. The typomorphic peculiarities of the main ore minerals of Fankou lead-zinc deposit, Guangdong, and their genetic significance[J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 1987, 7(1/2): 1-10.
- [23] MARK P, JEFF P R, SHEMIN G, GRANT G. Basin-scale hydrogeologic modeling[J]. *Reviews of Geophysics*, 1996, 34: 61-87.
- [24] 汪洋. 再论南岭侏罗纪“铝质”A型花岗岩的成因及其对古

- 地温线的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(3): 365–381.
- WANG Yang. Petrogenesis of the Jurassic aluminous A-type granites in the Nanling area, South China and its constraint on Paleo-geo therm[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(3): 365–381.
- [25] 谭俊, 魏俊浩, 李艳军, 李闫华, 鄢云飞. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩成矿的有关问题[J]. 地质论评, 2007, 53(3): 349–362.
- TAN Jun, WEI Jun-hao, LI Yan-jun, LI Yan-hua, YAN Yun-fei. Some reviews on diagenesis and metallogeny of the Mesozoic crustal remelting granitoids in the Nanling region[J]. Geological Review, 2007, 53(3): 349–362.
- [26] 翟裕生, 彭润民, 邓军, 王建平. 成矿系统分析与新类型矿床预测[J]. 地学前缘, 2000, 7(1): 123–132.
- ZHUAI Yu-sheng, PENG Run-min, DENG Jun, WANG Jian-ping. Metallogenic system analysis and new-type ore deposits forecast[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1): 123–131.
- [27] 谭凯旋, 谢焱石, 赵志忠, 王岳军. 构造流体成矿体系的反应–输运–力学–耦合模型和动力学模拟[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 312–320.
- TAN Kai-xuan, XIE Yan-shi, ZHAO Zhi-zhong, WANG Yue-jun. A coupled reaction-transport-mechanical model for tectonic-fluid-mineralization system and dynamic simulation[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 312–320.
- [28] 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.
- [29] 苏晶文, 胡凯, 李颀. 粤北凡口超大型铅锌矿有机质成矿地球化学特征[J]. 高校地质学报, 2005, 11(1): 58–66.
- SUN Jing-wen, HU Kai, LI Kuang. Characteristics of organic mineralization and organic matter in the Fankou Pb-Zn deposit, north Guangdong province, south China[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(1): 58–66.
- [30] 池国祥, 薛春纪. 成矿流体动力学的原理、研究方法及应用[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 1–18.
- CHI Guo-xiang, XUE Chun-ji. Principles, methods and applications of hydrodynamic studies of mineralization[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 1–18.
- [31] CHI G X, SAVARD M M. Basinal fluid flow models related to Zn-Pb mineralization in the southern margin of the Maritimes Basin, eastern Canada[J]. Economic Geology, 1998, 93(6): 896–910.
- [32] 陈国达. 关于多因复成矿床的一些问题[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(3): 199–201.
- CHEN Guo-da. Problems on polygenetic compound deposit[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24(3): 199–201.

(编辑 何学锋)