

# 凡口铅锌矿床海底热泉喷溢成矿的 物理化学环境\*

陈学明 邓 军 翟裕生

(中国地质大学, 北京)

**提 要:** 凡口铅锌矿是发育于碳酸盐岩建造中的海底喷溢沉积矿床, 以“一大二富三集中”的特点和典型的地质地球化学特征吸引着中外矿床地质工作者。叠层状矿体发育于同沉积断裂的旁侧, 矿层与灰岩呈沉积接触关系。矿石具沉积碎屑结构, 黄铁矿、闪锌矿具外生特征。稀土元素组成和硫同位素组成反映矿床与同生作用有关。铅同位素组成具有壳源和地下壳来源铅的特征。矿区主要矿层经历海底热泉喷溢沉积—成岩的演化。

**关键词:** 海底热泉 元素分布 稀土组成 同位素 包裹体 凡口铅锌矿床

凡口铅锌矿是我国著名的超大型层控矿床之一, 矿层厚达数十米, Pb、Zn 品位是金顶铅锌矿的数倍, Ag、Hg、Ga、Ge 等都分别达到大型矿床规模, 具有重要的理论意义和经济意义。

凡口铅锌矿位于曲仁盆地北侧。盆地外缘出露前泥盆纪变质岩系, 构成本区褶皱基底; 内缘近东西走向的晚古生代碎屑岩和碳酸盐岩覆盖在加里东不整合面上, 硫化物矿体主要赋存在中上泥盆统灰岩中, 叠层状矿体发育于同沉积断裂的旁侧, 矿层与灰岩呈沉积接触关系。矿石具沉积碎屑结构, 黄铁矿、闪锌矿具外生特征, 是我国极具特色的发育于碳酸盐岩建造的海底热泉喷溢沉积矿床 (朱上庆等, 1992)<sup>[1]</sup>, 具有一系列介于内生和外生矿床的地质特征。

## 1 矿化元素在围岩中的分布

Pb、Zn 等元素在矿区地层中的含量比区域地层高数倍<sup>[4]</sup>。在矿区内部越靠近矿层, 成矿元素含量越高。矿层与围岩界线清晰, 无蚀变矿化现象, 围岩中矿化元素异常分布与矿层呈平行整合关系。与底板围岩相比, 顶板近矿围岩受到酸性热泉的影响更明显。在热泉活动间竭, 由于海水受矿化元素毒化, 一般底栖生物无法生存; 海水仍偏酸性, SiO<sub>2</sub> 发生沉淀, 而 CaCO<sub>2</sub> 的沉淀受到扼制 (表 1)。

在矿区内部和外围, 各时代地层 Pb、Zn 概率分布特征表明, 主要含矿层位为天子岭组和东岗岭组灰岩 (占全区储量的 80% 以上)。Pb、Zn 概率曲线呈现 2~ 3 个成因总体 (图 1), 而多数弱含矿层位和无矿层位则只具有一个 (沉积) 成因总体 (图 2), 说明主要含矿层位 (如 D<sub>3</sub>t<sup>1</sup>、D<sub>3</sub>t<sup>2</sup>、D<sub>3</sub>t<sup>3</sup>) 受热泉成矿作用的影响更加明显。

\* 地矿部“中国若干超大型矿床成矿背景和找矿预测”的部分成果 (项目编号: 8502213), 并得到国家攀登预选项目 (95-预-39) 资助

陈学明, 男, 1943 年生, 博士, 副教授, 矿床学专业。邮政编码: 100083  
1997-11-13 收稿, 1998-04-22 修改回

表 1 矿体顶底板围岩岩性及化学成分 (%)

Table 1. Lithologic and chemical composition of hanging and lying wall rocks

产 状	样品数	颜 色	生物情况	SiO <sub>2</sub>	CaO	S	Pb	Zn
矿层底板	7	灰白色	生物发育	25.00	23.65	0.90	0.05	0.01
离矿层顶面 30 cm	11	灰白色	较发育	28.10	25.65	0.99	0.03	< 0.01
离矿层顶面 15 cm	14	灰黑色	生物稀少	32.30	10.48		0.20	< 0.01
矿层顶板 0~ 5 cm	14	灰黑色	无生物	39.30	2.23	1.95	3	2
条带状矿石夹层	6	灰黑色	无生物	38.00	5.69	5.65	2	1

注: 中国地质大学化分室分析

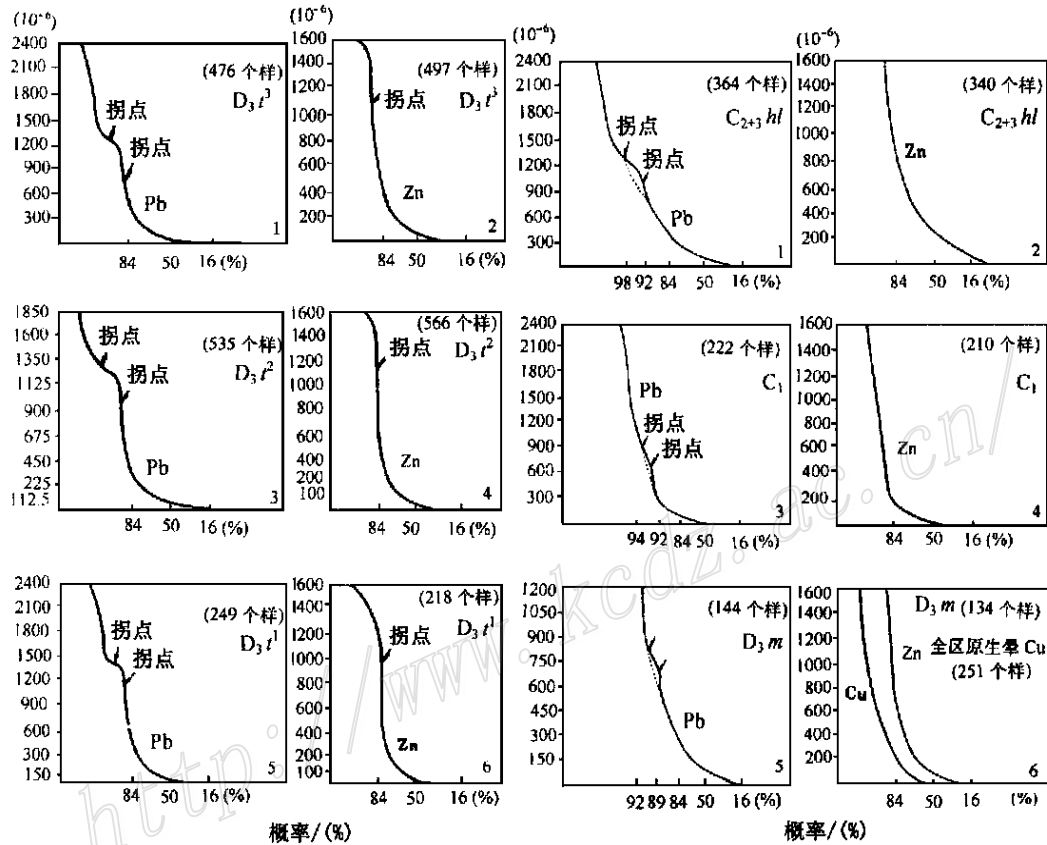


图 1 主要含矿地层 Pb、Zn 概率曲线

图 2 次要含矿层 Pb、Zn 概率曲线

Fig. 1. Probability curves of Pb and Zn in ore-bearing strata.

Fig. 2. Probability curves of Pb and Zn in less important ore-bearing strata.

## 2 成矿元素在矿体中分布

矿区内- 80 m 中段 Sh5 号矿体的 Zn、Pb 和 Zn/Pb 趋势面出现封闭式凹陷 (图 3), 与此同时, 在其附近的 Zn、Pb 趋势面呈现封闭式隆起。这里不仅是 Zn、Pb 的高品位区, 而且是

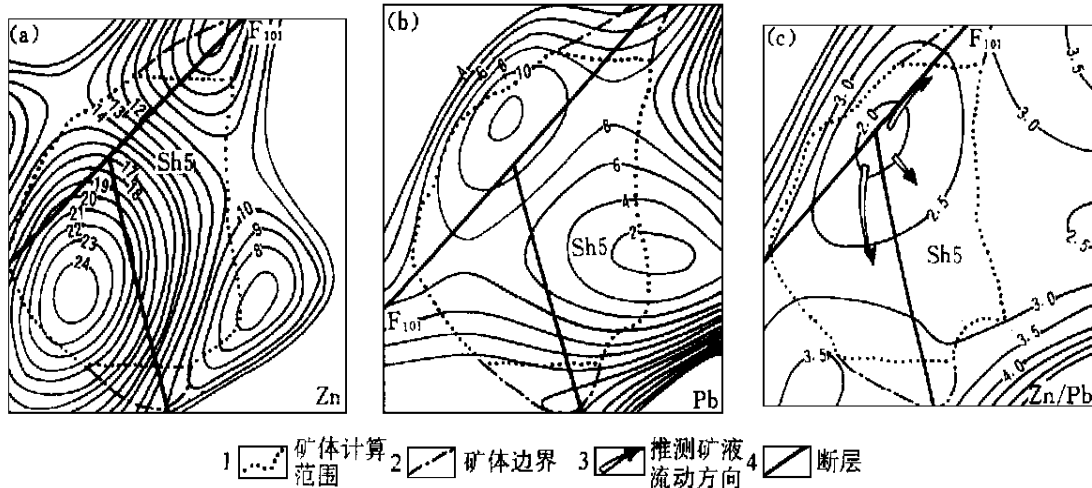


图3 凡口铅锌矿床-80 m中段 Sh5号矿体 Pb、Zn 趋势面分布图

Fig. 3. Pb-Zn trend surface map of Sh5 orebody at -80 m level of the Fankou lead-zinc deposit.

1—Calculation limits of orebody; 2—Boundary of orebody; 3—Inferred migration direction of ore fluids; 4—Fault.

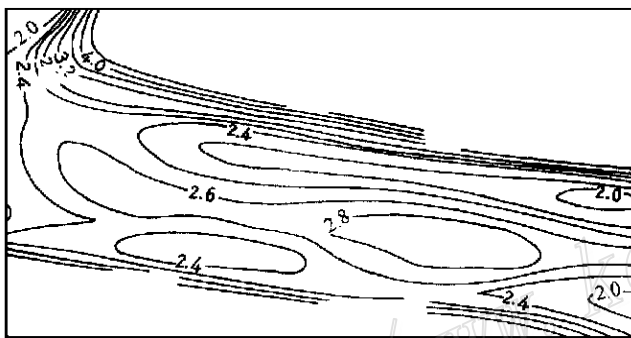


图4 -120 m中段 Zn/Pb 比值趋势面分布图

Fig. 4. Trend surface map of distribution of Zn/Pb ratios at -120 m level.

黄铁矿爆裂温度较高的地段,因此,该部位很可能是矿液的喷溢点。在-120 m中段,远离断裂喷口的 Sh6号矿体的 Zn/Pb 比值五次趋势(图4)为略有起伏的曲面,没有明显的高值区和低值区。这表明成矿溶液没有明显的流动方向,而可能沿各组同生断裂喷出后融汇成面状流动。

### 3 微量元素在主要硫化物中的分布

#### 3.1 黄铁矿

矿体中黄铁矿一般为它形或半自形,滚圆程度较高。Co、Ni含量低( $5 \times 10^6 \sim 70 \times 10^6$ ), Co/Ni比值0.5~1.04; S/Se比值达 $(17 \sim 51) \times 10^5$ 。具沉积成因黄铁矿特征。

#### 3.2 闪锌矿

闪锌矿多为浅棕色,颗粒边缘有程度不同的磨蚀,部分闪锌矿的结晶核心为生物碎片。化学成分以低 Fe (2%~3.9%)、Mn (0.025%), 高 Cd ( $1440 \times 10^{-6}$ )、Ga ( $113 \times 10^{-6}$ )、Ge ( $132 \times 10^{-6}$ )、Hg ( $753 \times 10^{-6}$ ), 贫 In ( $4.1 \times 10^{-6}$ ) 为特征。反映成矿温度较低。

#### 4 稀土元素组成特征

凡口矿区各种地质体稀土元素的组成如表 2 所列。上泥盆统灰岩 ( $38.41 \times 10^{-6}$ )、下石炭统灰岩 ( $70.74 \times 10^{-6}$ ) 和中上石炭统壶天群白云岩 ( $12.74 \times 10^{-6}$ ) 的稀土总量明显低于粤北地区泥盆系 ( $92.43 \times 10^{-6}$ ) 和石炭系 ( $125.08 \times 10^{-6}$ ) 的含量。这与 Pb、Zn 在区域和矿区地层中的含量恰恰相反, 可见稀土总量与 Pb、Zn 含量可能有不严格的反比关系。酸性热泉溶液对碱性的稀土元素的析出有扼制作用, 碱性更强的轻稀土比重稀土更易富集。因而矿石中轻稀土与重稀土之比值较大 (LR/HR 为 11~13); 而在围岩碳酸盐岩中比值较小 (LR/HR 为 5~9)。单矿物硫化物中稀土总量很低, 且随着晶出早晚顺序 (黄铁矿—闪锌矿—方铅矿) 而降低, 矿石中稀土元素主要与胶结物中的泥质、硅质和碳酸盐物质有关。

表 2 凡口矿区稀土元素 ( $10^{-6}$ ) 组成特征

Table 2. REE compositions in the Fankou ore district

元 素	灰 岩	灰 岩	白云岩	通道矿石	层状矿石	黄铁矿	闪锌矿	方铅矿	辉绿岩
	D <sub>4t</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2+3ht</sub>	矿 <sup>-81</sup>	矿 <sup>-160</sup>	Py	Sph	Gn	F-β
Lg	7.96	13.7	1.33	3.625	1.510	0.578	0.120	0.190	13.15
Ce	14.40	30.34	3.37	6.074	3.556	0.999	0.265	0.278	29.91
Pr	1.68	2.95	0.63	0.408	0.230	0.104	0.034	0.041	3.46
Nd	7.20	13.28	3.47	1.682	0.825	0.394	0.176	0.141	16.19
Sm	1.82	2.66	1.05	0.329	0.164	0.069	0.052	0.050	3.95
Eu	0.50	0.57	0.57	0.061	0.020	0.009	0.006	< 0.002	1.35
Gd	1.71	2.35	1.00	0.325	0.141	0.093	0.061	0.043	4.02
Tb	< 0.3	0.38	< 0.3	0.048	0.020	0.020	0.007	0.010	0.52
Dy	1.26	1.6	0.46	0.295	0.114	0.166	0.069	0.054	3.65
Ho	0.26	0.45	0.10	0.057	0.025	0.045	0.011	0.012	0.81
Er	0.54	0.92	0.11	0.154	0.051	0.109	0.029	0.021	1.69
Tm	< 0.1	0.13	< 0.1	0.022	0.010	0.019	0.005	0.003	0.26
Yb	0.58	1.03	0.15	0.177	0.083	0.173	0.046	0.026	1.89
Lu	< 0.1	0.12	< 0.1	0.026	0.013	0.028	0.006	0.003	0.20
ΣREE	38.41	70.74	12.74	13.18	6.76	2.81	0.877	0.874	81.05
ΣLR/ΣHR	6.92	8.77	4.49	11.03	13.79	3.30	2.79	4.08	5.22
La/Yb	13.72	13.30	0.87	20.48	18.19	3.34	2.61	7.30	6.96
δEu	0.94	0.75	1.84	0.62	0.43	0.38	0.36	0.14	1.13
δCe	0.79	0.96	0.76	0.88	1.14	0.80	0.86	0.63	0.91
Sm/Nd	0.25	0.20	0.30	0.20	0.20	0.18	0.30	0.35	0.24
Eu/Sm	0.27	0.21	0.54	0.19	0.12	0.13	0.12	0.04	0.34
Gd/Eu	3.42	4.12	1.75	5.33	7.05	10.33	10.17	2.15	2.98

注: 中国地质科学院岩矿测试技术研究所分析

不同矿体稀土总量有所不同, 在热液通道中形成的矿石的稀土总量 ( $13.2 \times 10^{-6}$ ) 比层状矿体 ( $6.8 \times 10^{-6}$ ) 高一倍。这是显而易见的, 因为海水中稀土含量仅为  $0.0n \times 10^{-9}$ , 含矿热泉与之混合后, 稀土元素的含量自然也会降低。

矿石与单矿物硫化物相比, 稀土总量、轻重稀土元素比值和  $La/Yb$  比值也有差异, 反映硫化物结晶期至矿石胶结物沉淀时溶液的 pH 逐渐升高, 这与矿物共生组合特征相一致。

3种单矿物的稀土元素组成大体相似,  $Eu$  亏损明显, 轻重稀土分异程度 ( $\Sigma LR/\Sigma LH$ ,  $La/Yb$ ) 较低。但在稀土总量、轻重稀土分异程度、 $Eu$  和  $Ce$  异常及  $Gd/Eu$  比值等都有所区别, 反映成矿早、中、晚阶段溶液浓度和物理化学条件的改变。

凡口矿石的稀土元素组成与辉绿岩明显不同, 反映凡口成矿物质来源与辉绿岩有区别。

## 5 同位素组成

### 5.1 硫同位素

凡口矿床围岩和矿石中硫化物的硫同位素组成明显不同。矿石中硫化物以具有  $\delta^{34}S$  较大正值为特征, 其众值在  $15\% \sim 25\%$  之间。黄铁矿、闪锌矿和方铅矿众值依次降低 (图5), 分别为  $20\%$ 、 $19\%$  和  $17\%$ , 与本区同时代的重晶石的  $\delta^{34}S$  值 ( $23\% \sim 24\%$ ) 相近, 表明矿石的硫可能主要来源于海水硫酸盐。围岩 (灰岩) 中黄铁矿的  $\delta^{34}S$  值, 以分散和无明显众值为特征, 其  $\delta^{34}S$  值在  $-15\% \sim +28\%$  之间。相比之下, 沉积硫化物矿体最集中的中上泥盆统黄铁矿  $\delta^{34}S$  值略为集中, 其不大明显的众值与矿体硫化物的众值较接近。

### 5.2 铅同位素

主要矿体硫化物铅同位素组成较集中, 为单阶段正常铅, 其中  $^{206}Pb/^{204}Pb$  为  $18.446 \sim 18.208$ ,  $^{207}Pb/^{204}Pb$  为  $15.820 \sim 15.552$ ,  $^{208}Pb/^{204}Pb$  为  $38.972 \sim 38.114$ 。矿石  $\mu$  值为  $9.90 \sim 9.39$ ,  $\omega$  值为  $40.19 \sim 37.00$ ,  $k_3$  为  $4.12 \sim 3.81$ 。在  $^{207}Pb/^{204}Pb$ - $^{206}Pb/^{204}Pb$  坐标图 (图6) 上, 投影范围比铅源主要来自于地层的红岩矿更深, 比铅源与岩浆有关的大宝山矿浅。凡口矿铅源可能主要来自上地壳, 部分来自下地壳。

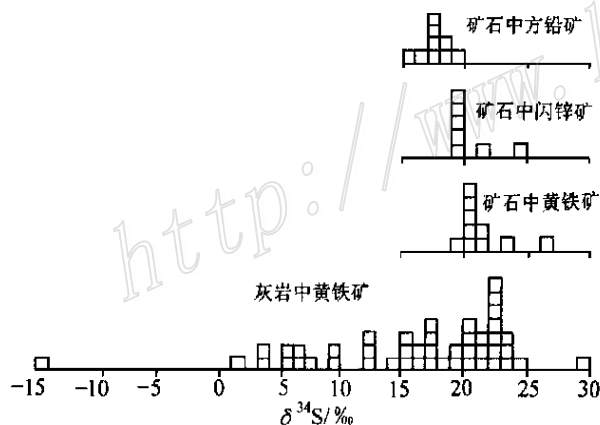


图5 凡口铅锌矿床硫同位素组成直方图

Fig. 5. Histogram showing sulfur isotopic composition of the Fankou lead-zinc deposit.

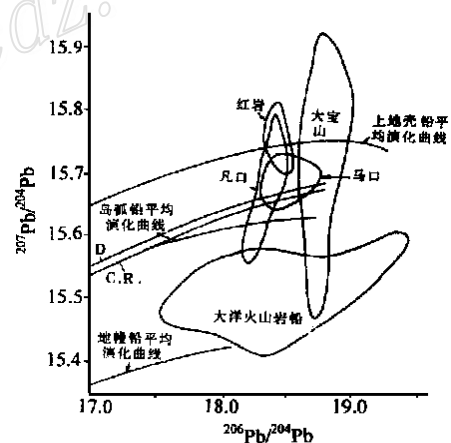


图6 粤北泥盆系层控矿床铅同位素组成坐标图

Fig. 6. Lead isotopic composition of Devonian stratabound deposits in northern Guangdong.

## 6 矿物包裹体测温

矿石中包裹体少而小, 分布不均匀, 闪锌矿中包裹体  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ , 方解石中包裹体  $3\sim 10\ \mu\text{m}$ , 少数达  $30\ \mu\text{m}$ 。绝大多数部分为气液两相包裹体, 但气相部分仅占包裹体的  $1\%\sim 10\%$ 。显示浅成中低温矿床的特征。

矿石中粒度较细的黄铁矿爆裂温度为  $190\sim 240^\circ\text{C}$  (校正温度  $140\sim 190^\circ\text{C}$ ), 较粗的黄铁矿爆裂温度为  $150\sim 310^\circ\text{C}$  (校正温度  $110\sim 255^\circ\text{C}$ ), 脉状闪锌矿爆裂温度  $200\sim 290^\circ\text{C}$  (校正温度  $150\sim 240^\circ\text{C}$ ), 矿石中脉石矿物方解石均一温度  $50\sim 117^\circ\text{C}$ , 平均为  $80^\circ\text{C}$ 。可见, 成矿温度变化范围较大, 但基本连续。温度上限为  $220\sim 255^\circ\text{C}$ , 下限  $110\sim 140^\circ\text{C}$ , 残余溶液温度  $50\sim 110^\circ\text{C}$ 。

在垂直方向上, 深部 ( $-200\ \text{m}$  中段) 至浅部 ( $0\ \text{m}$  中段) 各层位矿石测温结果无明显差别 (图7), 说明不同时期的矿化温度基本上是稳定的。在水平方向上, 不同矿段、不同部位的测温结果有较明显的变化。最高测温点的位置正是同生断裂旁侧、热泉长期活动的地点。远离热泉喷口的地方温度较低。

## 7 成矿作用分析

随着中泥盆世海侵扩大和盆地边缘继承性断裂活动的加剧, 深部循环热液沿同生断裂向海底喷溢, 偏酸性的热液与偏碱性的海水混合, 硫化物发生结晶沉淀。硫化物堆积体在底水作用和构造作用下, 沿海底地形发生滑塌流动, 形成各种形态的同生沉积组构, 活动在水/沉积物界面以下的成矿热液, 形成各种成岩特征的组构。

酸性含矿热泉与海水混合后, 造成底层海水 pH 值的降低, 从而阻碍了海水中碳酸钙的沉淀, 使含矿热泉活动带附近正常海相碳酸盐沉积大大减少, 因此形成脉石物质含量很低的富矿石堆积, 周围灰岩的厚度也大大减少。与此同时, 当富含碳酸钙的混合有含矿热泉的海水运移到外面与正常碱性海水相遇时, 由于 pH 升高, 使过饱和的碳酸钙迅速大量沉淀, 同时促使钙质底栖生物大量发育, 碳酸盐沉积物和生物滩在卤水池外围构筑“堤坝”, 形成障壁, 防止喷溢到海底卤水池的含矿溶液不至于大量流失, 并能保持相对稳定的物理化学环境, 沉积出厚度较大的似层状、楔状硫化物矿体, 形成“一大二富三集中”的凡口式矿床。泥盆纪末至石炭纪初, 本区地壳运动性质发生变化, 同生断裂停止活动, 海底热泉沉积矿化结束。随

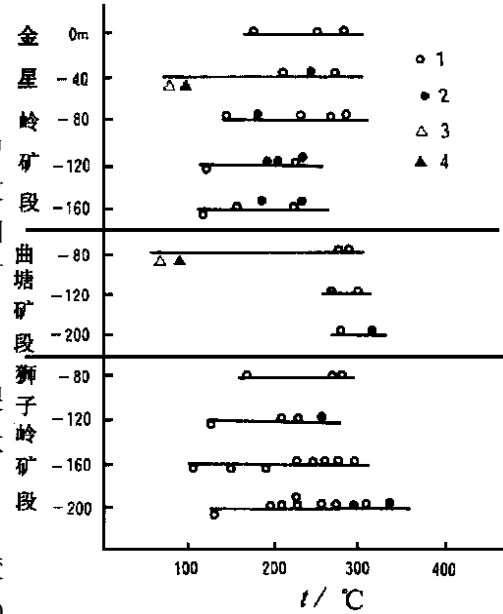


图7 包裹体温度分布图

1- 闪锌矿; 2- 黄铁矿; 3- 方解石; 4- 方铅矿; 横线以上为爆裂温度、横线以下为均一温度

Fig. 7. Temperature distribution of fluid inclusions in minerals.

1- Sphalerite; 2- Pyrite; 3- Calcite; 4- Galena.

Above the horizontal line are decrepitation temperatures; below it are homogenization temperatures.

后, 石炭纪碳酸盐沉积在晚泥盆世硫化物矿体之上, 覆盖并保护了已形成的矿层。

### 参 考 文 献

- 1 朱上庆, 池三川主编. 层控矿床及找矿. 北京: 地质出版社, 1992, 68~ 87.
- 2 陈学明. 金属硫化物矿石中同沉积组构的成因鉴别. 矿床地质, 1996, 15(1):16~ 20.
- 3 陈学明. 粤北地区层控矿床的构造演化成矿模式和找矿预测. 北京: 地质出版社, 1992, 15~ 27.
- 4 於崇文. 南岭地区区域地球化学. 北京: 地质出版社, 1987, 68~ 92.
- 5 曾元孚, 沈德麒, 池三川等. 南岭泥盆系层控矿床. 北京: 地质出版社, 1987, 13~ 299.
- 6 Sangster D F. Short course in sediment-hosted stratiform lead-zinc deposits, Geological survey of Canada, 1983, 120 ~ 126.

## THE PHYSICAL AND CHEMICAL ENVIRONMENT OF THE FANKOU LEAD-ZINC DEPOSIT FORMED BY SUBMARINE HOT-SPRINGS

Chen Xueming, Deng Jun and Zhai Yusheng

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

**Key words:** submarine hot-spring, distribution of elements, REE composition, isotopic composition, fluid inclusion

### Abstract

The Fankou lead-zinc deposit, a very important stratabound deposit in northern Guangdong, is a sedimentary-accumulative deposit of ore-bearing hot spring. The host rock is Upper-Middle Devonian and Lower Carboniferous limestone. The ore-bearing hot water circulated at the deep level was exhaled along contemporaneous faults onto the sea floor, followed by the precipitation of metallic sulfides to form orebodies on both sides of the contemporaneous faults. The mineralization and the precipitation of carbonate are developed simultaneously, and there is no intersection between the bedding orebodies and the veinlike orebodies. Some water worn structures are observed on both the top surface and the floor of the orebodies, and collapse structures are found within the orebodies. Due to the influence of the ore-bearing acidic hot spring, S, Pb, Zn, Fe<sup>2+</sup> and SiO<sub>2</sub> contents of limestone in the apical plate of the orebodies increase evidently, while CaO content decreases. Semirounded pyrite gravels are observed in the limestone of the apical plate.

Mineral composition is simple, and the granularity of the metallic sulfides are very fine, with 80% of them smaller than 0.1~ 0.2 mm. Metallic minerals are mainly pyrite, sphalerite and galena, whereas gangue minerals include quartz, calcite, clay, dolomite etc.. Many pyrite and sphalerite grains underwent precipitation-stirring or removal-redeposition.  $\Sigma$ REE values of ores are lower than those of limestone, and  $\Sigma$ REE values of pyrite from ores are lower than those of sphalerite.

(下转接 276 页 to be continued on p. 276)

**THE GENESIS OF THE MIAOZI WITHERITE-  
BARYTOCALCITE-BARYTODOLOMITE  
DEPOSIT IN WANYUAN CITY,  
SICHUAN PROVINCE**

Tang Juxing, Lin Wendi, Gao Derong and Mu Jilu  
(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

**Key words:** Miaozi barium deposit, exhalative hydrothermal sedimentation, witherite-barytocalcite-barytodolomite

**Abstract**

Based on systematic studies, the authors have reached the conclusion that the Miaozi barium deposit belongs to witherite-barytocalcite-barytodolomite type of exhalative hydrothermal sedimentary origin. The typical assemblage of exhalative cherts is witherite (barytocalcite, barytodolomite) + cherts + siliceous slate + carboniferous slate + limestone and the typical fabrics include brecciated, stockwork, fumarolic, massive, laminated and striped structures. The barium deposit was formed in a stillwater basin on the continental margin of northern Yangtze platform at Early Cambrian Maidiping time. Ore minerals consist of witherite, barytocalcite and barytodolomite. The formation of orebodies is also closely connected with organic and early diagenetic activities. The evidence of lithochemistry, trace elements and REE geochemistry of ore-bearing sequence suggests that exhalative cherts and witherite are of exhalative hydrothermal sedimentary origin in a low energy, anoxic and highly reduced environment.

(上接第 246 页 continued from p. 246)

$\delta^{34}\text{S}$  of sulfides from ores are 15‰ ~ 25‰, showing a marine sulfate origin. Lead isotopic constituents of ores are of simple crustal origin with  $\mu 9.90 \sim 9.39$  and monostage model age of  $310 \times 10^6$  a, which is equivalent to the period of the Paleozoic sedimentary basin.

The authors hold that the acidic ore-bearing hot spring water erupted along the contemporaneous fault prevented  $\text{CaCO}_3$  in the sea water around it from crystallo-precipitation, leading to the formation of a "V"-shaped trough. This "V"-shaped trough not only caused the high-density ore-forming solution to stay in it for a long time but also prevented the crystalloprecipitated sulfides on the sea floor from large-scale sea current washing. Therefore, this "V"-shaped trough is indispensable for the formation of such massive sulfide deposits as the Fankou lead-zinc deposit.