

曹亮,段其发,周云. 湖北凹子岗锌矿床 Rb-Sr 同位素测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 235-247.

Cao Liang, Duan Qifa, Zhou Yun. Rb-Sr dating of sphalerites from the Aozigang zinc deposit in Hubei Province and its geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 235-247(in Chinese with English abstract).

## 湖北凹子岗锌矿床 Rb-Sr 同位素测年及其地质意义

曹 亮 段其发 周 云

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430225)

**摘要:**凹子岗锌矿床位于黄陵背斜东部,是近年来在湘西鄂西地区发现的代表性矿床。锌矿体呈似层状-透镜状产出,赋存于灯影组二段,含矿岩性为一套角砾状泥粉晶云岩,严格受地层层位及岩性控制。文章运用闪锌矿 Rb-Sr 同位素测年方法,测得凹子岗锌矿床成矿年龄为 431~434 Ma,相当于早志留世,代表了矿床的主成矿阶段年龄。闪锌矿具有较高的 Sr 同位素初始比值(0.71119~0.71136),反映成矿物质或成矿流体由基底岩石和震旦系碳酸盐岩地层共同提供。凹子岗锌矿床早期成矿作用与早志留世的裂谷盆地伸展运动关系密切,晚期成矿作用与加里东运动关系密切,是伸展环境盆地流体运移的产物。加里东运动与黄陵周缘铅锌矿的成矿作用关系密切。凹子岗锌矿床成因类型为热液喀斯特成因,可分为深埋藏成岩成矿阶段和热液喀斯特化成矿阶段。

**关键词:**闪锌矿 Rb-Sr 定年;等时线年龄;成矿时代;凹子岗锌矿床

中图分类号:P618.43;P597+.3 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2015)01-0235-13

## Rb-Sr dating of sphalerites from the Aozigang zinc deposit in Hubei Province and its geological significance

CAO Liang, DUAN Qi-fa, ZHOU Yun

(Wuhan Center of Geological Survey, CGS, Wuhan 430255, Hubei China)

**Abstract:** The Aozigang zinc deposit lies in eastern Huangling anticline. It is a representative lead zinc deposit recently discovered in western Hubei and Hunan area. The zinc orebodies are strictly controlled by the stratigraphic horizon and lithology, and are mainly hosted in the second member of the Sinian Dengying Formation. The ore-bearing rocks occur in stratoid and lenticular forms, being a suite of brecciform micritic crystal powder dolomites. The Rb-Sr dating of sphalerite separates yielded isochron ages of 431-434 Ma for the deposit, suggesting that the deposit was formed in the early Silurian, which represents the main ore-forming epoch of the deposit. Based on a study of the source of the ore-forming material and the geological significance, the authors hold that higher initial ratios of Sr isotope (0.71119-0.71136) suggest that the metallogenic substances or ore-forming fluids came from relatively high basement rocks and relatively low Sinian carbonate layers. The early mineralization of the Aozigang zinc deposit was

收稿日期:2014-05-13;改回日期:2014-10-28

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212010632005)及地质矿产调查评价专项(1212011120790)联合资助。

作者简介:曹亮,男,1982年生,硕士,工程师,主要从事矿床研究;E-mail: okeyokok@163.com。

closely related to the Early Silurian stretching rift basin, whereas the late mineralization was closely associated with the Caledonian movement and was the product of fluid migration in a stretching basin. The mineralization of the lead–zinc deposits around the Huangling faulted dome was closely related to Caledonian movement. The Aozigang zinc deposit is genetically of hydrothermal karst type, and its formation can be divided into deep burial diagenetic ore–forming stage and hydrothermal karst metallogenic stage.

**Key words:** sphalerite Rb – Sr dating; isochron age; metallogenic epoch; Aozigang zinc deposit

**About the first author:** CAO Liang, male, born in 1982, engineer, master, mainly engages in the study of ore deposits; E-mail: okeyokok@163.com.

凹子岗锌矿床位于湘西鄂西铅锌多金属成矿区带的黄陵—神农架找矿远景区之黄陵背斜东部,该成矿区带是中国地质调查局确定的全国16处重点矿产资源调查评价地区之一。凹子岗锌矿床为近年来在湘西鄂西地区发现的具有代表性铅锌矿床,锌资源量已超过 $10 \times 10^4$  t,达中型矿床规模<sup>[1]</sup>。前人对凹子岗锌矿床的研究主要集中在矿床地质特征和找矿标志<sup>[1,2]</sup>、流体包裹体<sup>[3]</sup>方面。因以前缺少对铅锌矿床定年的有效方法,长期以来,一直未获得该锌矿床可靠的成矿年龄。精确测定矿床的形成年龄,对于正确认识矿床成因、控矿因素和总结成矿规律并指导找矿勘探工作都具有极为重要的意义<sup>[4-8]</sup>。近年来,随着同位素年代学的不断发展,直接利用矿石矿物开展同位素测年已经逐渐成熟,国内外研究者已在闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿 Rb–Sr 测年等方面取得了一系列重要进展<sup>[9-17]</sup>。本文在详细研究凹子岗锌矿床地质特征的基础上,选取主成矿阶段的闪锌矿开展 Rb–Sr 同位素定年工作,目的是确定凹子岗锌矿床的成矿时代,为成矿地质背景和成矿规律研究提供年代学制约。

### 1 区域地质背景

鄂西地区横跨秦岭造山带和扬子地块两大构造单元。大致以青峰—襄广断裂为界,以北为秦岭造山带,主要由武当山群变质岩系组成;以南属扬子地块,除黄陵和神农架断穹区有前寒武纪结晶基底出露外,主体由稳定沉积型碳酸盐岩和碎屑岩组成<sup>[18]</sup>。黄陵断穹,又称黄陵背斜,位于扬子准地台中段北部,具典型的双层结构。核部为结晶基底,由新太古—古元古代的中深变质岩系和以早新太古代花岗岩为主的岩浆岩组成。翼部为震旦系—古生界的沉积盖层,主体属一套海相含碎屑碳酸盐岩建造,呈环绕核分布,向四周倾斜(图1)<sup>[19]</sup>。

区内太古宙、元古宙、震旦纪、古生代及中生

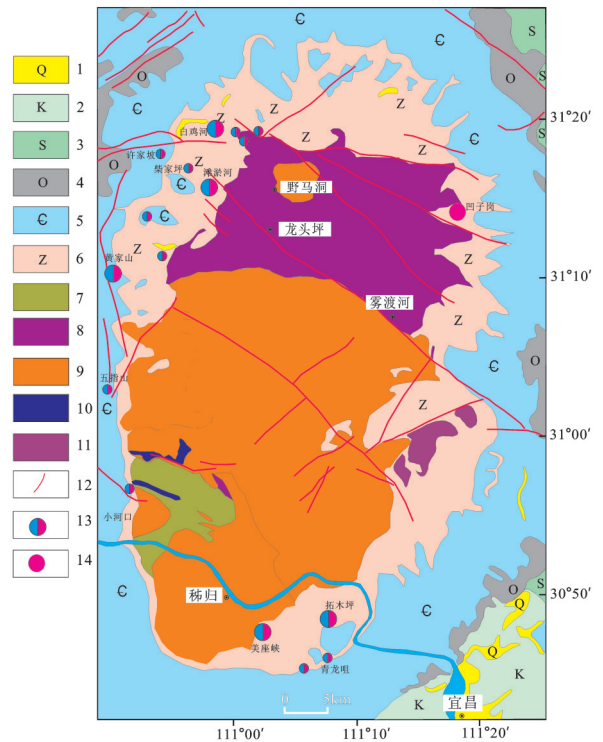


图1 黄陵断穹周缘区域地质矿产图  
 1—第四系;2—白垩系;3—志留系;4—奥陶系;5—寒武系;  
 6—震旦系;7—崆岭群变质岩;8—水月寺岩群变质岩;9—花岗岩;  
 10—基性—超基性岩;11—石英闪长岩;12—断层;13—铅锌矿床  
 (点);14—锌矿床

Fig.1 Geology and mineral resources around the Huangling faulted dome

- 1—Quaternary; 2—Silurian; 3—Silurian; 4—Ordovician;
- 5—Cambrian; 6—Sinian; 7—Kongling Group metamorphic rock;
- 8—Shuiyuesiyan Group metamorphic rocks; 9—Granite;
- 10—Mafic-ultramafic rock; 11—Quartz diorite; 12—Fault;
- 13—Lead-zinc deposit (ore spot); 14—Zinc deposit

代各时代地层发育齐全,铅锌矿主要分布于沉积盖层中。其中,震旦系上统灯影组角砾状白云岩和陡山沱组角砾状白云岩为重要含矿层位<sup>[18]</sup>。

区内断裂构造发育,主要表现为北西向,其次为近东西向,前者可以雾渡河断裂为代表,后者以

樟村坪断裂为代表,其规模宏大,且具多期活动特点,但与铅锌成矿无必然联系<sup>[18]</sup>。

区内岩浆作用主要发生于前寒武纪,黄陵断穹区岩性较复杂,从基性-超基性岩→中性岩→酸性岩都有分布,构成多个由基性-超基性侵入体-中性岩-酸性岩组成的完整岩浆演化序列<sup>[20]</sup>。从目前情况来看,区内沉积型及沉积改造型铅锌矿床与岩浆活动关系不密切。

鄂西地区经历了多期复杂的构造变动。其中燕山中晚期伸展构造所新生的南北向和北东向断裂是铅锌矿极为重要的控矿构造,而发生于燕山中晚期的伸展构造事件与(热液型)铅锌矿化关系最为

密切。在神农架断穹和黄陵断穹区有2大重要滑脱拆离带,即古一中元古代变质岩系与震旦-侏罗纪沉积盖层之间的滑脱拆离带和震旦系白云岩与寒武系灰岩之间的滑脱拆离带,铅锌矿分布于滑脱拆离带及其附近<sup>[18]</sup>。

## 2 矿床地质特征

凹子岗锌矿床位于扬子准地台黄陵断穹的东缘<sup>[2]</sup>,黄陵背斜属扬子地台鄂中褶断区的IV级构造单元,地史演化经历了基底形成与盖层发展2个阶段<sup>[1]</sup>。矿区主要出露地层为震旦系上统灯影组(图2),亦是区内含矿地层,具明显三分特点,由上而下

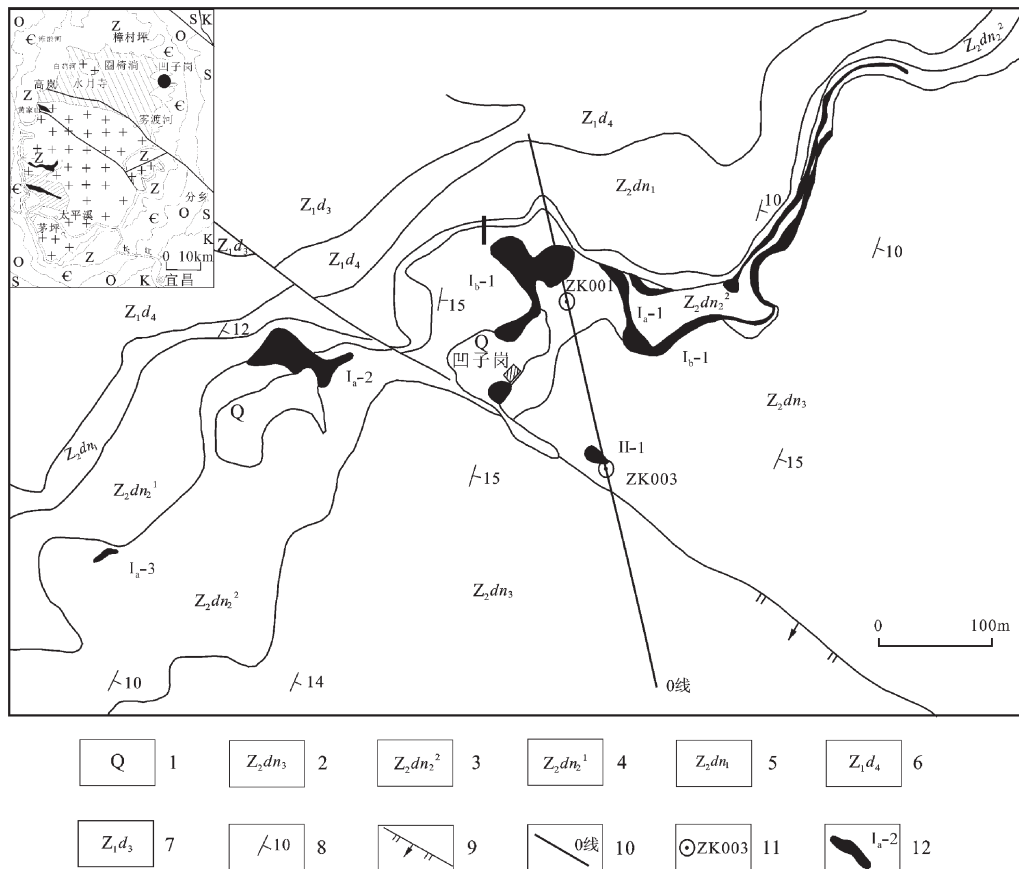


图2 凹子岗锌矿床地质略图(据文献[2]修改)

1—第四系;2—上震旦统灯影组白马沱段;3—上震旦统灯影组石板滩段上亚段;4—上震旦统灯影组石板滩段下亚段;5—上震旦统灯影组蛤蟆井段;6—下震旦统陡山沱组百果园段;7—下震旦统陡山沱组王丰岗段;8—层理产状;9—正断层;10—勘探线及其编号;11—钻孔及其编号;12—锌矿体及其编号

Fig. 2 Geological sketch map of the Aozigang zinc ore deposit(modified after reference [2])

1—Quaternary; 2—Baimatuo member of upper Sinian Dengying Formation; 3—Upper Shibantan member of upper Sinian Dengying Formation; 4—Lower Shibantan member of upper Sinian Dengying Formation; 5—Hamajing member of upper Sinian Dengying Formation; 6—Baiguoyuan member of lower Sinian Doushantuo Formation; 7—Wangfenggang member of lower Sinian Doushantuo Formation; 8—Bedding attitude; 9—Normal fault; 10—Exploration line and its serial number; 11—Drill hole and its serial number; 12—Zinc orebody and its serial number

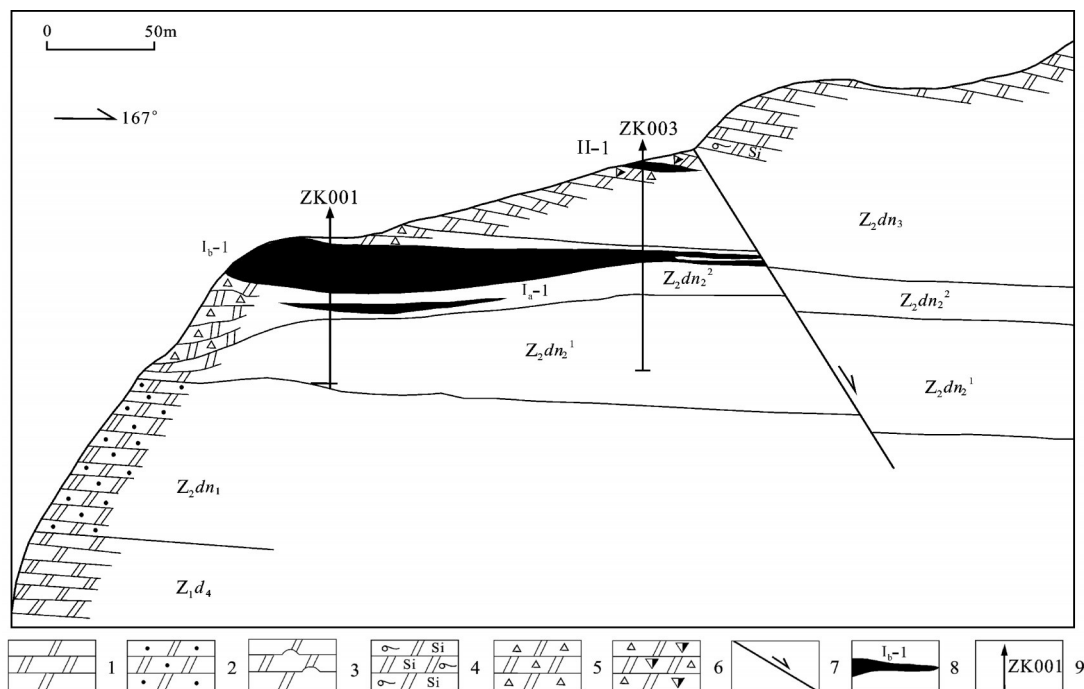


图3 凹子岗锌矿0线勘探剖面图(据文献[2]修改)

1—云岩;2—砂屑云岩;3—含燧石结核云岩;4—硅质条带云岩;5—角砾状云岩;6—角砾状闪锌矿化云岩;7—正断层;  
8—矿体及其编号;9—钻孔及其编号

Fig. 3 Geological section along No. 0 exploration line of the Aozigang zinc deposit (modified after reference [2])

1—Dolostone; 2—Dolarenite; 3—Chert nodule-bearing dolomite; 4—Siliceous banded dolomite; 5—Carneule; 6—Dolomite breccia of sphalerite;  
7— Normal fault; 8— Orebody and its serial number; 9— Drill hole and its serial number

依次划分为灯影组三段、灯影组二段、灯影组一段,各段岩性岩相及含矿性具有较大的差异<sup>[1]</sup>。

区内共圈出锌矿体5个,其中3个具有工业价值,为主要矿体,分别为Ia-1、Ia-2、Ib-1,其中Ib-1为主要工业矿体(图2~3)<sup>[2]</sup>。矿体呈似层状-透镜状产出,赋存于灯影组二段上亚段,含矿岩性为一套角砾状泥粉晶云岩,严格受地层层位及岩性控制;其中Ia-1、Ia-2为工业Zn矿体。Zn含量在1.28%~36.16%,平均品位5.76%~6.2%<sup>[1]</sup>。

矿石的矿物组合较简单,金属矿物以闪锌矿为主,次为菱锌矿,闪锌矿颜色很浅,为淡绿色及浅褐黄色;方铅矿仅见于地表裂隙中,与粗粒菱锌矿共生,明显为后期热液作用的产物。脉石矿物以白云石为主,偶见方解石、石英及团块状有机质<sup>[1]</sup>。

矿石结构构造主要为残余粒屑结构、他形-半自形粒状结构、微晶结构。矿石结构最突出的特征是矿物粒度很细,其中闪锌矿主要有2种赋存状态:一为微晶状,粒度均匀,分布于白云石粒间或沿白

云岩细层面产出(图4-d、f),二者产出较协调,可能为同时沉积形成;二为他形-半自形粒状结构,主要呈集合体分布于白云岩角砾间(图4-h),与白色白云石共生,具次生加大特征,矿物含量增加。显示为后期岩溶及矿物重结晶作用改造而成<sup>[1]</sup>。

凹子岗锌矿区矿石自然类型主要有淡绿色纹层状闪锌矿石、浅褐黄色纹层状闪锌矿石(图4-a)、星点状闪锌矿石及角砾状闪锌矿石(图4-b)。其中前二类矿石为渐变过渡关系,以角砾状、纹层状构造为主,局部见条带状、栉壳状、蜂窝状构造<sup>[1-2]</sup>。

### 3 样品特征及分析方法

#### 3.1 样品特征

凹子岗矿床金属矿物以闪锌矿为主,可分为淡绿色和浅褐黄色两种,其中绿色闪锌矿以中-细粒为主,多沿岩溶裂隙、孔洞产出,呈纹层状(图4-a)。本次用于定年的闪锌矿样品采自I矿体,13件样品均为新鲜的块状淡绿色和浅褐黄色闪锌矿矿石。

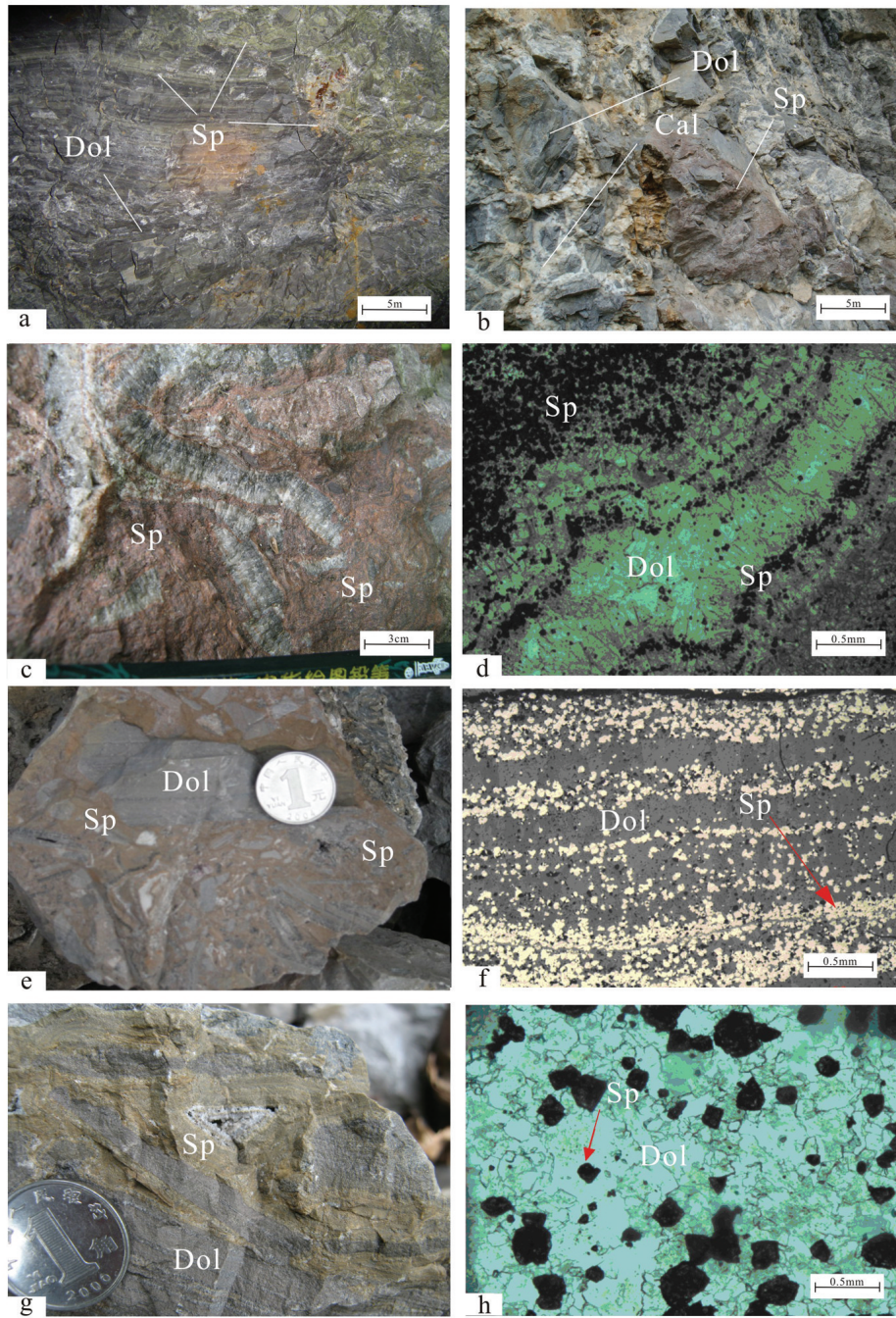


图4 凹子岗锌矿床主成矿阶段矿石样品特征

a、b—主成矿阶段矿体:a—纹层脉状淡绿色闪锌矿,b—块状浅褐黄色闪锌矿;c—浅褐黄色栉壳状构造闪锌矿矿石;  
 d—栉壳层层间富集闪锌矿,透射光;e—角砾状矿石,淡绿色闪锌矿充填胶结白云岩角砾(样品0907AZ-1),f—纹层状构造,  
 反射光;g—淡绿色闪锌矿矿石(样品0907AZ-2);h—白云石包含闪锌矿(箭头处)及二者呈镶嵌分布,透射光;  
 Sp—闪锌矿;Cal—方解石;Dol—白云岩

Fig. 4 Characteristics of the ore sample of the main metallogenic stage in the Aozigang zinc deposit

a,b—Orebody of the main metallogenic stage, a for the laminated vein light green sphalerite, b for the massive maroon sphalerite; c—Comb shell structure of sphalerite ore; d—Comb shell enrichment of sphalerite, transmitted light; e—brecciated ore, light green sphalerite filling and cementing dolomite breccia; f—Laminated structure, reflected light; g— Light green sphalerite ore samples (0907AZ-2); h—Dolomite containing sphalerite (arrow) and distributed in mosaic form, transmitted light; Sp—Sphalerite; Cal—Calcite; Dol—Dolomite

样品特征见图4-c、g,具有明显的后生成矿特点。

### 3.2 分析方法

用于测试研究的矿石矿物是硫化物,矿物未见裂痕,流体包裹体中Rb-Sr可以保持很好封闭性,增加了数据准确度<sup>[21]</sup>。样品的测试在中国地质调查局武汉地质矿产研究所完成。样品加工过程为:①将样品破碎至40~60目,在双目镜下挑纯闪锌矿至99%;②将选纯的闪锌矿单矿物用6 mol/l超纯盐酸加热清洗,再用6 mol/l超纯硝酸加热清洗,最后用超纯水清洗至中性,烘干;③将清洗后的样品放入烘箱内,在120~180℃爆裂,去除次生包裹体;④用超纯水在超声波机内清洗3~5遍,烤干备用。

称取0.1~1.0 g处理好的闪锌矿单矿物样品,置于聚四氟乙烯封闭容器中,加入适量的<sup>87</sup>Rb、<sup>84</sup>Sr混合稀释剂,用HF+HClO<sub>4</sub>在微波炉中分解样品并使其完全转化成过氯酸盐,采用阳离子交换法分离Rb和Sr。Rb、Sr同位素分析在MAT-261可调多接收质谱仪上进行。分析过程中采用国际标准样品NBS-987监控仪器工作状态,用国家一级标准物GBW-04411监控分析流程。上述标准物质的测定值分别为:NBS987的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值测定值为0.71023±5(2σ);GBW04411的Rb、Sr含量与<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值分别为249.4±0.7、159.0±0.2和0.75991±0.00008(2σ),与其证书值在测定误差范围内完全一致,表明测试数据可信可靠。<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr、<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr的测定精度分别好于2%和0.02%。全部操作均在净化实验室内进行,与样品同时测定的全流程Rb、Sr空白分别为1×10<sup>-10</sup>和2×10<sup>-10</sup>g。

等时线年龄计算采用Ludwig编写的ISOPLOT软件<sup>[22]</sup>。衰变常数λ值1.42×10<sup>-11</sup>a<sup>-1</sup>,等时线回归计算时<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr比值采用3%误差,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值采用0.03%误差。文中数据处理采用Geokit软件<sup>[23]</sup>。

## 4 测试结果

淡绿色闪锌矿和浅褐黄色的Rb、Sr含量和同位素组成测定结果见表1和表2。

如表所示,淡绿色闪锌矿矿物相Rb含量为0.2210×10<sup>-6</sup>~0.2433×10<sup>-6</sup>,Sr含量为0.724×10<sup>-6</sup>~1.334×10<sup>-6</sup>,<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr值变化不大,在0.5217~0.9363,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值为0.71440~0.71699。浅褐黄色闪锌矿硫

表1 凹子岗矿床淡绿色闪锌矿Rb-Sr同位素分析结果  
Table 1 Rb-Sr dating data for light green sphalerites from the Aozigang Zinc deposit

样号	Rb/10 <sup>-6</sup>	Sr/10 <sup>-6</sup>	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	2σ
0907AZ-1	0.2433	1.033	0.6795	0.71542	0.00004
0907AZ-2	0.2210	0.724	0.8806	0.71663	0.00007
0907AZ-3	0.2219	1.074	0.5961	0.71488	0.00015
0907AZ-4	0.2451	0.887	0.7974	0.71610	0.00007
0907AZ-5	0.2374	0.732	0.9363	0.71699	0.00007
0907AZ-6	0.2321	0.746	0.8974	0.71673	0.00001
0907AZ-7	0.2413	1.334	0.5217	0.71440	0.00017

表2 凹子岗矿床浅褐黄色闪锌矿Rb-Sr同位素分析结果  
Table 1 Rb-Sr dating data for light tawny sphalerites from the Aozigang Zinc deposit

样号	样品说明	Rb/10 <sup>-6</sup>	Sr/10 <sup>-6</sup>	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	2σ
L1	全 矿 物	0.06968	0.469	0.4287	0.7143	0.00002
L2		0.06603	1.328	0.1434	0.71227	0.00005
L3		0.0776	0.1351	1.658	0.72142	0.00019
L4		0.117	0.2004	1.686	0.72166	0.00005
L6		0.06676	0.2451	0.7859	0.7168	0.00002
L1-1		0.06564	0.2811	0.6737	0.71584	0.00003
L3-1	硫 化 物 相	0.0763	0.1395	1.579	0.72056	0.00002
L4-1		0.1143	0.1382	2.388	0.72572	0.00009
L1		0.06968	0.469	0.4287	0.7143	0.00006
L2		0.06603	1.328	0.1434	0.71227	0.00007
L3		0.0776	0.1351	1.658	0.72142	0.0002
L4		0.117	0.2004	1.686	0.72166	0.00001
L6	0.06676	0.2451	0.7859	0.7168	0.00002	
L1-1	流 体 相	0.06564	0.2811	0.6737	0.71584	0.00008
L3-1		0.0763	0.1395	1.579	0.72056	0.00004
L4-1		0.1143	0.1382	2.388	0.72572	0.00007
L1		0.01493	4.492	0.009584	0.71116	0.00001
L2		0.01224	4.4805	0.007347	0.7112	0.00001
L3		0.1675	3.622	0.01334	0.71119	0.0001
L4	0.01216	2.538	0.01381	0.71123	0.00006	
L6	0.01795	2.022	0.0256	0.71168	0.00003	
L1-1	相	0.02335	4.739	0.01421	0.71121	0.00005
L3-1		0.02164	2.717	0.02297	0.71126	0.0003
L4-1		0.04799	2.475	0.05592	0.71125	0.00009

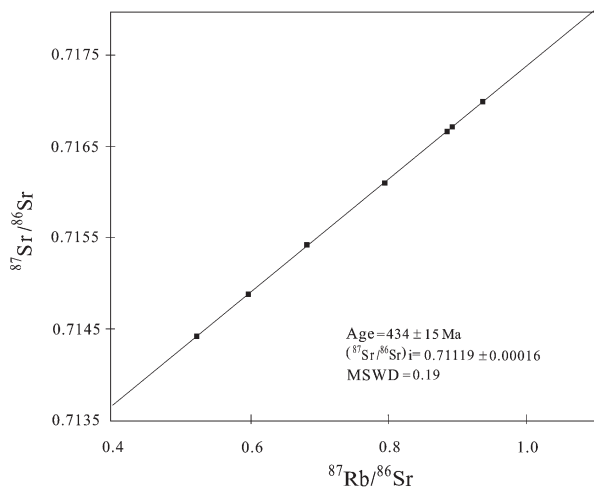


图5 凹子岗矿床淡绿色闪锌矿Rb-Sr同位素等时线  
Fig.5 Rb-Sr isochron of light green sphalerites from the Aozigang Zinc deposit

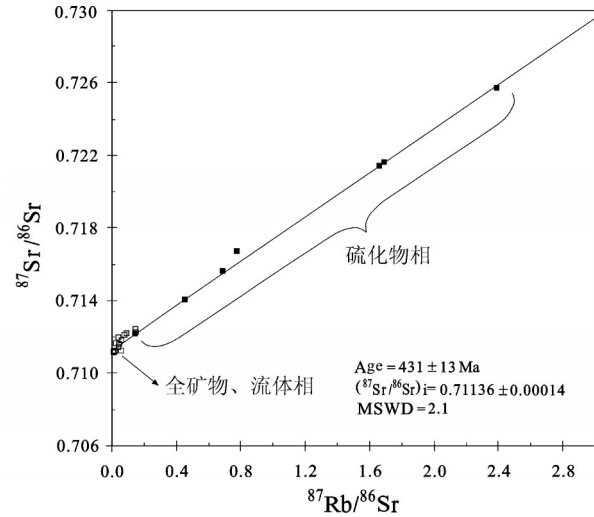


图6 凹子岗矿床浅褐黄色闪锌矿Rb-Sr同位素等时线  
Fig.6 Rb-Sr isochron of light tawny sphalerites from the Aozigang Zinc deposit

化物相Rb含量为 $0.06564 \times 10^{-6} \sim 0.117 \times 10^{-6}$ , Sr含量为 $0.1351 \times 10^{-6} \sim 1.328 \times 10^{-6}$ ,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 在0.1434~2.388,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.71227~0.72572。获得淡绿色闪锌矿等时线年龄为 $(434 \pm 15)$  Ma (MSWD=0.19) (图5),  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.71119 \pm 0.00016$ ; 浅褐黄色闪锌矿等时线年龄为 $(431 \pm 13)$  Ma (MSWD=2.1) (图6),  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.71136 \pm 0.00014$ , 地质时代都为早志留世。

## 5 讨论

### 5.1 年龄可靠性

铅锌矿床成矿时代的精确测定一直是矿床学研究的一个难点。近年来,利用矿石矿物(如闪锌矿等)或与成矿有关的脉石矿物(如萤石等)的Rb-Sr同位素体系来直接获得成矿年龄已涌现大量成功实例<sup>[9-17]</sup>。目前武汉地质矿产研究所同位素实验室的MAT-261可调多接受固体质谱计采用全溶方法和流体包裹体淋滤法先后对新疆准噶尔地区不同类型金矿床<sup>[24]</sup>、雪峰山地区金矿<sup>[25]</sup>、湘南新田岭白钨矿床<sup>[26]</sup>和川滇黔地区的跑马铅锌矿床<sup>[27]</sup>进行了Rb-Sr同位素的测定,并取得了理想的测试结果,说明了仪器的稳定性和可靠性。热液矿物Rb-Sr等时线年龄测年的基本前提是同源、同时、封闭性、一致的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 以及具有不同的 $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_i$ <sup>[28]</sup>。本次工作用于测试的淡绿色闪锌矿样品和浅褐黄色闪

矿样品采自同一矿体局部较小的范围内,为结晶较好的块状矿石,闪锌矿纯度高,且与围岩界线明显,无后期矿物穿插、交代现象又没有发育裂隙,因而很大程度上满足了测年的同时、同源、封闭性和初始比值一致性的基本前提。Rb、Sr在热液矿物中的赋存状态有3种形式:①主矿物晶格中;②固态为包裹体中;③流体包裹体中,前两种存在形式对于同位素测年的影响可以忽略,原生流体包裹体的影响也可以忽略,仅有次生包裹体需要排除<sup>[29]</sup>。由于闪锌矿形成温度较低,可能会有个别样品在去除次生包裹体的同时,损失部分的原生包裹体,其测试结果反倒比未去除包裹体前结果更不能令人满意,因为流体包裹体的存在是造成Rb/Sr初始比值变化的另一个原因,毕竟原生包裹体与成矿流体同属一个体系,去除后有可能导致整个体系的平衡破坏,为尽量避免次生包裹体的影响,实验过程中,将闪锌矿粉碎至200目以下,然后进行超声波清洗,基本可排除次生及原生包裹体的干扰<sup>[29]</sup>,而且选择结晶较好未见裂隙及致密块状闪锌矿矿石。利用 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图和 $1/\text{Rb}-^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图判别闪锌矿生长期间 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值是否保持不变,来判别所获数据的合理性<sup>[26]</sup>。本次测试结果在 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $1/\text{Rb}-^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 关系图解(图7)中显示,不同闪锌矿单矿物的Rb、Sr含量不同,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值则

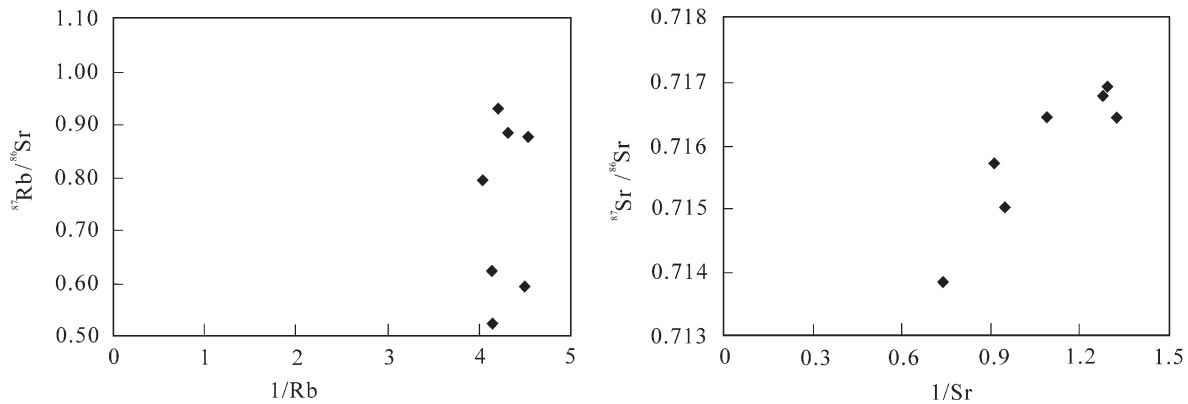


图7 凹子岗锌矿床闪锌矿  $1/Rb-^{87}Rb/^{86}Sr$  和  $1/Sr-^{87}Sr/^{86}Sr$  关系图

Fig.7 Diagrams of  $1/Rb$  versus  $^{87}Rb/^{86}Sr$  and  $1/Sr$  versus  $^{87}Sr/^{86}Sr$  of sphalerites from the Aozigang zinc deposit

相对稳定,淡绿色闪锌矿的  $1/Sr$  与  $^{87}Sr/^{86}Sr$ 、 $1/Rb$  与  $^{87}Rb/^{86}Sr$  之间不存在线性关系,说明闪锌矿生长期间( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>i</sub>值基本上保持不变<sup>[28,30]</sup>。数据点偏离拟合的程度通常用加权平均方差 MSWD 值来表征。本次试验淡绿色闪锌矿的 MSWD=0.71, 小于 1, 说明数据点离散度很低, 等时线质量很高。从图 5 可以看出, 所有的样点都落在等时线上, 说明矿石矿物形成过程中 Sr 同位素是均一的, 而且得到了很好的封闭, 并未发生与外界环境之间的 Rb、Sr 物质交换, 因此拟合的等时线年龄具有很高的精度。因此, 图 5 所给出的直线具有等时线意义。

浅褐黄色闪锌矿共 5 个样品, 部分样品重复做了 2 次, 由于 L3-1 样品的重量较小 (小于 2 mg),  $n(^{87}Rb)/n(^{87}Sr)$  较低, 引起  $^{85}Rb/^{87}Rb$  比值误差较大, 因此在等时线计算过程中将该点去除, L6 偏离等时线较远, 表现出有后期热液改造的迹象 (图 6), 说明了凹子岗锌矿后期富集作用的存在。其余 7 个测点所得到的等时线年龄为  $(431 \pm 13)Ma$ ,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.71136 \pm 0.00014$ , 显示了该闪锌矿样品  $^{87}Rb/^{86}Sr-^{87}Sr/^{86}Sr$  图表现出较好的线性关系 (图 6)。MSWD=2.1, 说明数据点离散度较低, 等时线质量较高。从图 6 可以看出, 所有的样品大部分都落在等时线上, 拟合的等时线年龄具有较高的精度, 因此, 图 6 所给出的直线也具有等时线意义。

通过对同一个矿床的 2 种不同颜色闪锌矿单矿物的 Rb-Sr 同位素测年, 所获得的数据具有很高的可信度 (95%), 凹子岗锌矿床的成矿年龄为 431~434 Ma, 形成的地质时代为早志留世。

## 5.2 成矿物质来源

$^{87}Sr/^{86}Sr$  是判断成岩成矿物质来源的重要指标, 在矿床地质研究中常利用其来示踪成矿物质来源、岩浆流体、深源流体的壳幔混染作用<sup>[31]</sup>。

计算年龄时得到的凹子岗锌矿床的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  比值为  $0.71119 \sim 0.71136$ , 明显高于地幔 ( $0.704 \pm 0.002$ ) 和赋矿白云岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值 ( $0.70875$ ) (6 个样品平均值)。众多研究表明, 地幔流体 (包括地幔去气形成的流体和幔源岩浆去气形成的流体) 的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  在 0.706 左右<sup>[32]</sup>, 这似乎排除了地幔和赋矿白云岩提供成矿物质的可能性, 暗示成矿物质来源于富放射性成因 Sr 的源区或成矿流体曾流经富放射性成因 Sr 的地质体。矿区出露地层为震旦系的碳酸盐类, 陡山沱组的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  为 0.70811, 灯影组的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  为 0.70834<sup>[33]</sup>, 均与同时期海水的 Sr 同位素组成相近。自寒武纪至现代海水的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  变化于 0.7067~0.7095, 海相碳酸盐岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  接近 0, 其 Sr 同位素组成与海水基本一致。因此, 矿区震旦系碳酸盐岩地层的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  也相对低于矿床的  $^{87}Sr/^{86}Sr$ , 这似乎又排除了矿区碳酸盐岩地层提供成矿物质的可能性, 同样暗示成矿物质来源于相对富放射性成因 Sr 的源区或成矿流体曾经流经富放射性成因 Sr 的地质体。

黄陵花岗岩基位于黄陵背斜核部, 侵入前寒武纪崆岭群, 其 4 个岩套的 Sr 同位素初始比  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$  分别为: 太平溪岩套为  $0.70491 \pm 0.000020$ , 黄陵庙岩套  $0.70650 \pm 0.000030$ , 大老岭岩套  $0.7066 \pm 0.0006$ , 脉岩套为  $(0.70613 \pm 0.0004) \sim (0.70907 \pm 0.00074)$ <sup>[34]</sup>, 也



低于凹子岗锌矿床的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ,这也排除了黄陵花岗岩基提供成矿物质的可能性。

黄陵杂岩主要分布在黄陵背斜核部,并被黄陵花岗岩基侵入而分成南、北两区。姜继圣对北区黄陵杂岩(水月寺群)系进行了Rb-Sr同位素地质年代学研究,确切的证实了黄陵及其相邻地区存在古元古代古老结晶基底,北部基底由水月寺群变质岩群组成<sup>[35]</sup>。水月寺变质岩群由富铝片岩-片麻岩及榴线英岩类、长英质岩类及镁铁质麻粒岩组成<sup>[36]</sup>。水月寺群的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 $0.7346\pm 0.0002$ <sup>[35]</sup>,大于凹子岗锌矿床的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 。可见,本区成矿物质可能来源于区域古老结晶基底岩石或成矿流体曾流经富放射性成因Sr基底岩石,即成矿物质来源于基底岩石。

同时,值得注意的是凹子岗锌矿床的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.71119)明显低于基底岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ( $0.7346\pm 0.0002$ ),很难理解其成矿物质或成矿流体仅由单一的区域基底岩石提供,成矿物质或成矿流体由相对高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 端元(基底岩石)和相对低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 端元(震旦系碳酸盐岩地层)共同提供可能更为合理。

### 5.3 地质意义

凹子岗锌矿床容矿围岩为上震旦统灯影组白云岩,矿区缺失寒武系及志留系到石炭系的沉积物,可能是地幔物质上涌导致早古生代末到晚古生代加里东期的裂前穹状隆起引起的。早古生代扬子陆块北缘总体处于伸展构造背景<sup>[37-39]</sup>,寒武-志留纪发育裂谷盆地<sup>[40]</sup>,从震旦纪(800 Ma)开始,扬子陆块向西运动,导致华南残留盆地拉张,形成复合的转换拉张型裂谷盆地系,在扬子陆块北缘形成南秦岭大陆边缘裂谷带。北大巴地区广泛出露的基性岩墙群时代为 $(439\pm 6)\text{ Ma}$ <sup>[41]</sup>和 $(431.0\pm 3.2)\text{ Ma}$ <sup>[42]</sup>,表明早志留世是裂谷盆地伸展幅度达到最大的时期。本次测试结果(431~434 Ma,早志留世)与加里东晚期地壳上隆运动后的裂陷盆地的张裂环境相对应,为加里东期构造运动后伸展作用引起的大规模流体活动的产物。这次大规模的伸展运动势必对相邻地区产生重大影响。凹子岗锌矿床位于扬子陆块北缘,其早期成矿作用与这次伸展运动吻合。

此外对黄陵背斜北部冰洞山铅锌矿的研究,采用闪锌矿Rb-Sr法测得冰洞山铅锌矿成矿年龄为 $(508\pm 14)\text{ Ma}$ ,认为区内冰洞山铅锌矿床的成矿作用与加里东期构造运动引起的大规模流体活动有

关,主成矿阶段为加里东中期。位于扬子地台北缘的马元铅锌矿,李厚民等通过对闪锌矿进行Rb-Sr等时线年龄测定,获得该矿床的成矿年龄为486 Ma左右,成矿作用可能发生于早奥陶世<sup>[43]</sup>。通过对马元铅锌矿矿石特征的研究,反映出铅锌矿的成矿环境是在一次典型的张性断裂构造活动环境中形成的<sup>[44]</sup>。加里东期运动强烈的构造热液活动,是马元铅锌矿床一次重要的成矿阶段。对于凹子岗锌矿床而言,它与冰洞山铅锌矿、马元铅锌矿都位于扬子地台北缘,年龄分别为431~434 Ma、 $(508\pm 14)\text{ Ma}$ 和486 Ma,成矿年龄都为加里东期。说明加里东期构造运动对扬子地台北缘的铅锌矿床的形成产生了重要影响,后期的构造运动或岩浆活动引起的大规模流体运移导致了该区铅锌矿床的进一步富集。加里东期运动与该地区铅锌矿的成矿作用关系密切。

加里东运动使扬子陆块经历了长期挤压隆升过程,到早泥盆世受古特提期洋拉张影响,扬子陆块处于伸展断陷构造背景,为热液成矿提供了构造驱动力,使原先封存于各类地质体的流体产生大规模运移,并逐渐演化为盆地热卤水,这种流体在向上或盆地边缘流动过程中,淋滤、萃取地质体中的成矿物质,形成富含金属元素的成矿热液。凹子岗矿床的晚期成矿是伸展环境盆地流体运移的产物。

### 5.4 矿床成因

凹子岗锌矿床是鄂西地区较为特殊的矿床,一是矿体横向延伸小而厚度大,矿体与围岩的界线肉眼难于区分,需靠化学分析确定,二是结构构造特殊,如皮壳状构造、角砾状构造特别发育,并发育手标本尺度的水平层理,三是金属硫化物和围岩蚀变单一,主要金属硫化物闪锌矿晶体细小,白云岩化具多期性。该矿床研究程度较低,邹先武等认为该矿床属沉积改造成因,并指出岩溶作用可使锌进一步富集<sup>[1]</sup>;而对邻区产于相同层位的白鸡河锌矿床成因则有热液矿床<sup>[45]</sup>和MVT矿床<sup>[46]</sup>2种不同认识;滩淤河锌矿床则为古岩溶成因,由此可见,黄陵周缘以锌矿为主的矿床,其成因较为复杂。本次工作通过综合研究认为凹子岗矿床为热液喀斯特成因,具体可分为2个阶段。

#### 5.4.1 深埋藏成岩成矿阶段

据矿石结构,细粒闪锌矿不均匀分布于残余粉

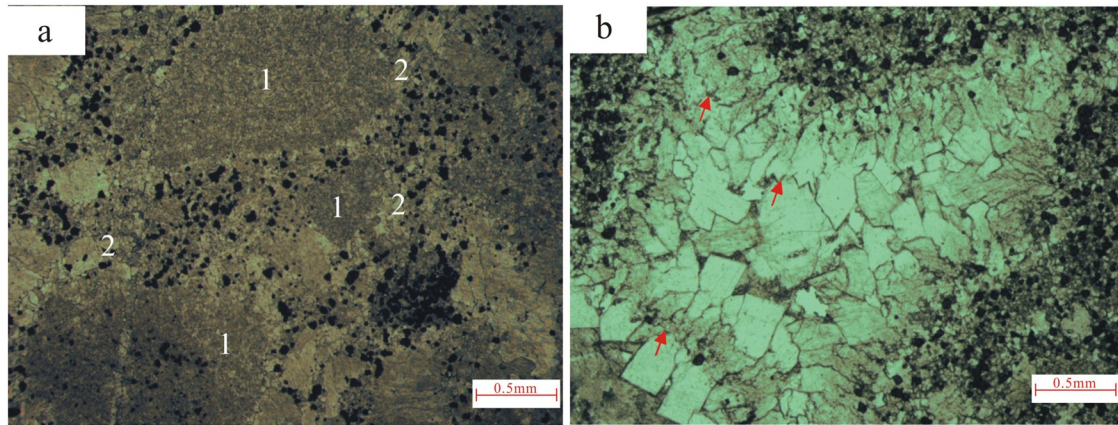


图8 凹子岗矿床闪锌矿与白云石结构特征

a—白云岩残余结构(1),白云石晶体大小悬殊(2),分布不均,闪锌矿产于结晶较粗的白云石晶粒间或产于残余白云岩的孔隙中,透射光;  
b—粗晶白云石充填溶蚀孔洞,堆积紧密,线状接触,或发育缝合线(红色箭头处),粗晶白云石晶粒间偶见闪锌矿充填,透射光

Fig. 8 Characteristics of the ore sample of the sphalerite and dolomite structure in the Aozigang Zinc deposit

a—Dolomite residual structure (1), sizes of the dolomite crystal exhibit disparity and uneven distribution (2), sphalerite from crystalline dolomite of coarser grains or produced in the pores of the residual dolomite, transmitted light

b— Coarse grained dolomite filling solution pores, close accumulation, suture line contact, well-developed suture line, sphalerite filling coarse grained dolomite, with occasional intergranular filling, transmitted light

晶白云岩之间,白云石晶粒大小悬殊,粉晶-中晶均有分布(图8-a),呈半自形或他形晶,少量为自形晶。晶体堆积紧密,呈锯齿状或线状镶嵌接触(图8-b),局部见显微缝合线构造。由于构造应力作用,白云岩遭受破碎,形成一些裂隙,热液沿裂隙灌入,使得岩石具锯齿状的组构特征。在应力作用较强烈的部位,岩石破碎成大小不等的棱角状碎块,使得岩石具有角砾状构造的组构特征。在此过程中发生了化学压实作用即压溶作用,为深埋藏成岩作用典型特征。

#### 5.4.2 热液喀斯特化成矿阶段(主成矿阶段)

在寒武纪初期,受区域性拉张断陷作用影响,一方面,在拉张作用影响下,盆地流体发生大规模的流动,从下伏基底岩石地层中携带来大量的Pb、Zn等成矿物质。另一方面研究区快速沉降为较深水的沉积盆地,灯影组再次被深埋于盆地之下,温度和压力快速升高,上下层位(牛蹄塘组、陡山沱组及其下伏地层)中的粘土矿发生转变,释放出大量的水和 $Mg^{2+}$ ,形成富含 $Mg^{2+}$ 的热液,向灯影组中运移,萃取流经地层中的Pb、Zn等成矿物质,形成热卤水,由于上覆牛蹄塘组黑色页岩的屏蔽作用,热液将不断集中到灯影组中,一方面使地层再次发生白云岩化,形成热液白云石和皮壳状、栉壳状构造,另

一方面,在有机质的参与下,这种具有较高温度( $> 120^{\circ}C$ )的热液使地层中的硫酸盐矿物发生热化学还原反应,产生 $CO_2$ 和 $H_2S$ ,形成酸性溶液;这种溶液对白云岩具有很强的溶蚀作用,形成新的热液喀斯特缝、洞、孔和角砾岩,同时, $H_2S$ 与溶液中的Pb、Zn等成矿物质结合形成硫化物矿床。

## 6 结 论

(1) 本次研究对凹子岗矿床浅绿色和淡褐色2种闪锌矿进行了Rb-Sr同位素测定,精确测定出主成矿阶段年龄为431~434 Ma,矿床形成于早志留世。

(2) 凹子岗矿床闪锌矿具有较高的Sr同位素初始比值(0.71119~0.71136),反映成矿物质或成矿流体由相对高( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )端元的基底岩石和相对低( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )端元的震旦系碳酸盐岩地层共同提供。

(3) 凹子岗矿床早期成矿作用与早志留世的裂谷盆地伸展运动关系密切,晚期成矿作用与加里东运动关系密切,成矿作用是伸展环境盆地流体运移的产物。

(4) 凹子岗矿床成因类型为热液喀斯特成因,可分为深埋藏成岩成矿阶段和热液喀斯特化成矿阶段。

**致谢:** 样品采集过程中,得到项目组的帮助,段其发研究员对文章给予了宝贵的意见和帮助,在此一并致谢!

### 参考文献(References):

- [1] 邹先武, 杨晓君, 罗林. 湖北省凹子岗锌矿床地质特征及找矿方向[J]. 华南地质与矿产, 2007, 3: 31-36.  
Zou Xianwu, Yang Xiaojun, Luo Lin. Geological characteristics and prospecting indicators of Aozigang zinc deposit, Hubei Province [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2007, 3: 31-36 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李方会, 廖宗明, 刘圣德, 等. 湖北省远安县凹子岗锌矿床基本特征[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(2): 95-99.  
Li Fanghui, Liao Zongming, Liu Shengde, et al. Basic characteristics of Aozigang Zinc Deposit in Yuan' an Country, Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2009, 23(2): 95-99 (in Chinese with English abstract).
- [3] 曹亮, 段其发, 彭三国, 等. 湖北凹子岗锌矿床流体包裹体研究[J]. 矿物学报, 2011, (Z1): 462.  
Cao Liang, Duan Qifa, Peng Sanguo, et al. Fluid inclusions of the zinc ore deposit in Ao zigang, Hubei province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011, (Z1): 462 (in Chinese with English abstract).
- [4] 程裕淇, 陈毓川, 赵一鸣, 等. 再论矿床的成矿系列问题[J]. 地球学报, 1983, 5(2): 1-64.  
Cheng Yuqi, Chen Yuchuan, Zhao Yiming, et al. Further discussion on the problems of minerogenetic series of mineral deposits[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1983, 5(2) : 1- 64 (in Chinese with English abstract).
- [5] 翟裕生, 王建平, 邓军, 等. 成矿系统时空演化及其找矿意义[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 143-150.  
Zhai Yusheng, Wang Jianping, Deng Jun, et al. Temporal-spatial evolution of metallogenic systems and its significance to mineral exploration[J]. Geoscientia, 2008, 22(2): 143-150 (in Chinese with English abstract).
- [6] 陈毓川, 王平安, 秦克令, 等. 秦岭地区主要金属矿床成矿系列的划分及区域成矿规律探讨[J]. 矿床地质, 1994, 13(4): 289-298.  
Chen Yuchuan, Wang Ping'an, Qing Keling, et al. Metallogenic series of main ore deposits and regional metallogeny in the Qinling area[J]. Mineral Deposits, 1994, 13(4): 289-298 (in Chinese with English abstract).
- [7] 毛景文, 王志良. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨[J]. 矿床地质, 2000, 19(4): 289-296.  
Mao Jingwen, Wang Zhiliang. A preliminary study on time limits and geodynamic setting of Large-scale metallogeny in east China [J]. Mineral Deposits, 2000, 19(4) : 289-296 (in Chinese with English abstract).
- [8] 毛景文, 胡瑞忠, 陈毓川, 等. 大规模成矿作用与大型矿集区[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 58-70.  
Mao Jingwen, Hu Ruizhong, Chen Yuchuan, et al. Large-Scale Metallogenesis and Large Clusters of Mineral Deposits[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 58-70(in Chinese).
- [9] Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, et al. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennissce and the genesis Mississippi Vally-type ore deposit[J]. Nature, 1990, 346(6282): 354-357.
- [10] Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, et al. Rb-Sr dating of sphalerites form Mississippi Vally type (MVT) ore deposit[J]. Cosmochim. Acta, 1993, 57(2): 417-427.
- [11] Brannon J C, Podosek F A, Mclimans R K. A Permian Rb-Sr age for sphalerite from the upper Mississippi Vally zinc-lead district, southwest Wisconsin[J]. Nature, 1992, 356: 509-511.
- [12] Brannon J C, Frank A, Podosek F A, et al. A clue to the origin of dark and light bands of the 270 Ma upper Mississippi Vally (UMV) zinc-lead district, southwest Wisconsin[J]. Abstracts with Programs-Geological Society of America, 1992, 24: 353.
- [13] Christensen J N, Halliday A N, Stephen E K, et al. Further evaluation of the Rb-Sr dating of sphalerite: The Nanisivik Precambrian MVT deposit, Baffin Island, Canada [J]. Abstracts with Programs-Geological Society of America, 1993, 25: 471.
- [14] 杨进辉, 周新华. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物Rb-Sr等时线年龄与成矿时代[J]. 科学通报, 2000, 45(14): 1547-1553.  
Yang Jinhui, Zhou Xinhua. Rb-Sr isochron age and mineralogenetic epoch of ore and gold-carrying mineral of the Linglong gold fied in the eastern Shandong Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(14): 1547-1553 (in Chinese).
- [15] 韩以贵, 李向辉, 张世红, 等. 豫西祁雨沟金矿单颗粒和碎裂状黄铁矿 Rb-Sr 等时线定年[J]. 科学通报, 2007, 52(11): 1307-1311.  
Han Yigui, Li Xianghui, Zhang Shihong, et al. Single particle and cataclastic pyrite Rb-Sr isochron dating of the Qiyugou gold deposit in the western Henan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(11): 1307-1311 (in Chinese).
- [16] 张长青, 李向辉, 余金杰, 等. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷-锶测年及地质意义[J]. 地质评论, 2008, 54(4): 532-538.  
Zhang Changqing, Li Xianghui, Yu Jinjie, et al. Rb-Sr dating of single sphalerites from the Daliangzi Pb-Zn deposit, Sichuan, and its geological significances [J]. Geological Review, 2008, 54(4): 532-538 (in Chinese with English abstract).
- [17] 郑伟, 陈懋弘, 徐林刚, 等. 广东天堂铜铅锌多金属矿床Rb-Sr等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2013, 32(2): 259-272.  
Zheng Wei, Chen Maohong, Xu Lingang, et al. Rb-Sr isochron

- age of Tiantang Cu-Pb-Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2013, 32(2): 259-272 (in Chinese with English abstract).
- [18] 龙宝林, 刘忠明. 鄂西地区铅锌矿基本特征与找矿方向[J]. *地质与勘探*, 2005, 41(3): 16-21.
- Long Baoling, Liu Zhongming. Basic characteristics and prognosis of Pb-Zn deposits in the western Hubei Province [J]. *Geology and Prospecting*, 2005, 41(3): 16-21 (in Chinese with English abstract).
- [19] 宋秀灿, 杨晓君. 湖北省黄陵断穹穹缘铅锌矿成矿条件及找矿方向[J]. *资源环境与工程*, 2004, 18(Z1): 41-47.
- Song Xiusan, Yang Xiaojun. The ore formation and ore prospecting of lead-zinc around the Huang Ling faulted dome[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2004, 18(Z1): 41-47 (in Chinese with English abstract).
- [20] 湖北省地质矿产局. 1:20万神农架幅区域地质矿产调查报告[M]. 北京:地质出版社, 1974.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province. 1:200000 Shennongjia Regional Geology and Mineral Resources Survey Report[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1974 (in Chinese).
- [21] 李紫焯, 刘晓雨, 李随民, 等. 承德牛圈银金多金属矿床硫化物 Rb-Sr 年龄和成矿物质来源分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 951-960.
- Li Ziye, Liu Xiaoyu, Li Suimin, et al. An analysis of geological age and materials source of the Niujian Ag-Au polymetallic deposit in Chengde[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 951-960 (in Chinese with English abstract).
- [22] Ludwig K R. Users manual for isoplot/Ex version 2.49: A Geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2001, No. 1a, 1-55.
- [23] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459-464.
- Lu Yuanfa. GeoKit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 2004, 33(5): 459-464 (in Chinese with English abstract).
- [24] 李华芹, 陈富文, 蔡红. 新疆西准噶尔地区不同类型金矿床 Rb-Sr 同位素年代研究[J]. *地质学报*, 2000, 74(2): 181-192.
- Li Huaqin, Chen Fuwen, Cai Hong. Study on Rb-Sr isotopic age of gold deposits in west Junggar area, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(2): 181-192 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李华芹, 王登红, 陈富文, 等. 湖南雪峰山地区铲子坪和大坪金矿成矿作用年代学研究[J]. *地质学报*, 2008, 82(7): 900-905
- Li Huaqin, Wang Denghong, Chen Fuwen, et al. Study on chronology of the Chanziping and Daping gold deposit in Xuefeng Mountains, Hunan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(7): 900-905 (in Chinese with English abstract).
- [26] 蔡明海, 韩凤彬, 何龙清, 等. 湘南新田岭白钨矿床 He, Ar 同位素特征及 Rb-Sr 测年[J]. *地球学报*, 2008, 29(2): 167-173.
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Xu Deru, et al. He, Ar isotope characteristics and Rb-Sr dating of the Xintianling skarn scheelite deposit in Southern Hunan, China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2008, 29(2): 167-173 (in Chinese with English abstract).
- [27] 蔺志永, 王登红, 张长青. 四川宁南跑马铅锌矿床的成矿时代及其地质意义[J]. *中国地质*, 2010, 37(2): 488-494.
- Lin Zhiyong, Wang Denghong, Zhang Changqing. Rb-Sr isotopic age of sphalerite from the Paoma lead-zinc deposit in Sichuan Province and its implications[J]. *Geology in China*, 2010, 37(2): 488-494 (in Chinese with English abstract).
- [28] 李文博, 黄智龙, 许德如, 等. 铅锌矿床 Rb-Sr 定年研究综述[J]. *大地构造与成矿学*, 2002, 26(4): 434-441.
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Xu Deru, et al. Rb-Sr isotopic method on zinc-lead deposits: A review[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2002, 26(4): 434-441 (in Chinese with English abstract).
- [29] 刘建明, 赵善仁, 沈洁, 等. 成矿流体活动的同位素定年方法评述[J]. *地球物理学进展*, 1998, 13(3): 46-55.
- Liu Jianming, Zhao Shanren, Shen Jie, et al. Review on direct isotopic dating of hydrothermal ore-forming processes[J]. *Progress in Geophysics*, 1998, 13(3): 46-55 (in Chinese with English abstract).
- [30] Pettke T, Diamond L W. Rb-Sr dating of sphalerite based on fluid inclusion-host mineral isochrones: A clarification of why it works[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 951-956.
- [31] 李随民, 魏明辉, 李森文, 等. 张家口梁家沟铅锌银矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 529-539.
- Li Suimin, Wei Minghui, Li Senwen, et al. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of the Liangjiagou Pb-Zn-Ag ore deposit in Chicheng County of Zhangjiakou City and their geological implications[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 529-539 (in Chinese with English abstract).
- [32] 刘丛强, 黄智龙, 李和平, 等. 地幔流体及其成矿作用[J]. *地学前缘*, 2001, 8(4): 231-244.
- Liu Congqiang, Huang Zhilong, Li Heping, et al. The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(4): 231-244 (in Chinese with English abstract).
- [33] 张自超. 我国某些元古宙及早寒武世碳酸盐岩石的锶同位素组成[J]. *地质论评*, 1995, 41(4): 349-354.
- Zhang Zichao.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  date for some middle late Proterozoic to Early Cambrian carbonate rocks in China[J]. *Geological Review*, 1995, 41(4): 349-354 (in Chinese with English abstract).

- [34] 李志昌, 王桂华, 张自超. 鄂西黄陵花岗岩岩基同位素年龄谱[J]. 华南地质与矿产, 2002, 2: 19-28.  
Li Zhichang, Wang Guihua, Zhang Zichao. Isotopic age spectrum of the Huangling granitic batholith, western Hubei[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2002, (2): 19-28 (in Chinese with English abstract).
- [35] 姜继圣. 黄陵变质地区的同位素地质年代及地壳演化[J]. 长春地质学院学报, 1986, 4: 1-11.  
Jiang Jisheng. Isotopic geochronology and crustal evolution of Huangling metamorphic terrain[J]. *Journal of Changchun College of Geology*, 1986, 4: 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [36] 熊成云, 韦昌山, 金光富, 等. 鄂西黄陵背斜地区前南华纪古构造格架及主要地质事件[J]. 地质力学学报, 2004, 10(2): 97-112.  
Xiong Chengyun, Wei Changshan, Jin Guangfu, et al. Pre-Sinian paleostructural framework and major geological events in the Huangling anticline, western Hubei[J]. *Journal of Geomechanics*, 2004, 10(2): 97-112 (in Chinese with English abstract).
- [37] 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1995, 11(2): 101-114.  
Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. Nature of main tectono-lithostratigraphic Units of the Qinling Orogen: Implications for the tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(2): 101-114 (in Chinese with English abstract).
- [38] 张成立, 高山, 张国伟, 等. 南秦岭早古生代碱性岩墙群的地球化学及其地质意义[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(10): 819-928.  
Zhang Chengli, Gao Shan, Zhang Guowei, et al. Geochemical and geological significance of Early Paleozoic alkaline rock wall in South Qinling[J]. *Science in China(Series D)*, 2002, 32(10): 819-928 (in Chinese).
- [39] 张本仁. 秦岭地幔柱源岩浆活动及其动力学意义[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 57-66.  
Zhang Benren. Magmatic activities from plume-source in the Qinling orogenic belt and its dynamic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(3): 57-66 (in Chinese with English abstract).
- [40] 黄福喜, 陈洪德, 侯明才, 等. 中上扬子克拉通加里东期(寒武一志留纪)沉积层序充填过程与演化模式[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2299-2317.  
Huang Fuxi, Chen Hongde, Hou Mingcai, et al. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Caledonian(Cambrian-Silurian) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2299-2317(in Chinese with English abstract).
- [41] 邹先武, 段其发, 汤朝阳, 等. 北大巴山镇坪地区辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 282-291.  
Zou Xianwu, Duan Qifa, Tang Chaoyang, et al. Shrimp zircon U-Pb dating and lithogeochemical characteristics of diabase from Zhenping area in North Daba Mountain[J]. *Geology in China*, 2011, 38(2): 282-291 (in Chinese with English abstract).
- [42] 王存智, 杨坤光, 徐扬, 等. 北大巴基性岩墙群地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其大地构造意义[J]. 地质科技情报, 2009, 28(3): 19-26.  
Wang Cunzhi, Yang Kunguang, Xu Yang, et al. Geochemistry and LA-ICP-MS Zircon U-Pb age of basic dike swarms in North Daba Mountains and its tectonic significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(3): 19-26 (in Chinese with English abstract).
- [43] 李厚民, 陈毓川, 王登红, 等. 陕西南郑地区马元锌矿的地球化学特征及成矿时代[J]. 地质通报, 2007, 26(5): 546-552.  
Li Houmin, Chen Yuchuan, Wang Denghong, et al. Geochemistry and mineralization age of the Mayuan zinc deposit, Nanzheng, southern Shaanxi, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(5): 546-552(in Chinese with English abstract).
- [44] 候满堂, 王党国, 高杰, 等. 陕西马元地区铅锌矿矿石特征研究[J]. 陕西地质, 2007, 25(1): 1-10.  
Hou Mantang, Wang Dangguo, Gao Jie, et al. Characteristics of lead-zinc ores in the Mayuan region of Shaanxi[J]. *Geology of Shaanxi*, 2007, 25(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- [45] 刘圣德, 廖宗明, 李方会, 等. 湖北兴山白鸡河锌矿成因分析[J]. 资源环境与工程, 2009, 23(1): 7-12.  
Liu Shengde, Liao Zongming, Li Fanghui, et al. Analysis on Genesis of Baijihe zinc deposit in Xingshan, Hubei Province[J]. *resources Environment & Engineering*, 2009, 23(1): 7-12 (in Chinese with English abstract).
- [46] 雷义均, 伍齐学, 刘圣德, 等. 鄂西震旦系灯影组白鸡河锌矿床地质特征及成因探讨[J]. 华南地质与矿产, 2007, 3: 37-42.  
Lei Yijun, Wu Qixue, Liu Shengde, et al. The discussion of geological characteristics and genesis of Baiji River stratiform zinc deposit, Dengying dolomite group of Sinian in western Hubei Province[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2007, (3): 37-42 (in Chinese with English abstract).