

云南金顶铅锌矿床地质特征 及成因初探

白嘉芬 王长怀 纳荣仙

(云南省地质矿产局实验室)

云南金顶铅锌矿床为我国目前最大的铅锌矿床，与铅锌伴生的银、镉、铊等亦具有较大工业意义。此外，伴生的天青石、石膏等亦具经济价值。

一、矿区地质概况^①

矿区位于兰坪-思茅坳陷带北端，弥沙河断裂带与澜沧江断裂带所夹持的南北向断裂带中，坳陷宽约60公里。金顶矿区位于盆地中部，由中生代—新生代地层组成的复式向斜轴部附近，沱江大断裂西侧一个穹窿体之中（图1）。

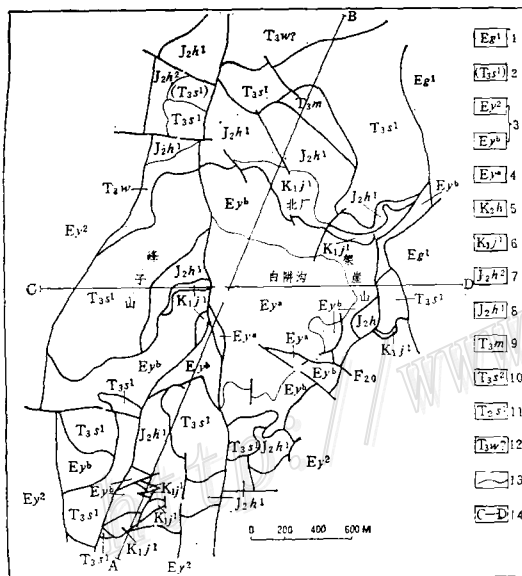


图1 兰坪金顶铅锌矿区地质略图

1—古郎组下段；2—岩块及其时代；3—云龙组上段；E_y²为不含矿部分，E_y^b为含矿部分；4—12—参见图2；13—地层界线；14—剖面位置

Fig. 1. Diagrammatic geological map of the Jinding lead-zinc deposit at Lanping, Yunnan Province.

1—lower portion of the Gulang Formation;
2—sedimentary rock and its age; 3—upper portion of the Yunlong Formation; E_y² refers to barren part and E_y^b to ore-bearing part;
4—12: See Fig. 2; 13—boundary of strata;
14—section line.

(一) 矿区地层

可分为外来系统及原地系统两部分（图2、图3）。外来系统为一套倒转地层，由三叠系上统、侏罗系及少部分白垩系下统组成。原地系统由白垩系上统及古新统云龙组等组成。两套地层之间为断层F₂所分隔。

① 本部分内容主要引自云南省地质矿产局三大队资料。



图2 兰坪金顶铅锌矿区地层柱状图

Fig. 2. Stratigraphic column of the Jinding lead-zinc deposit.

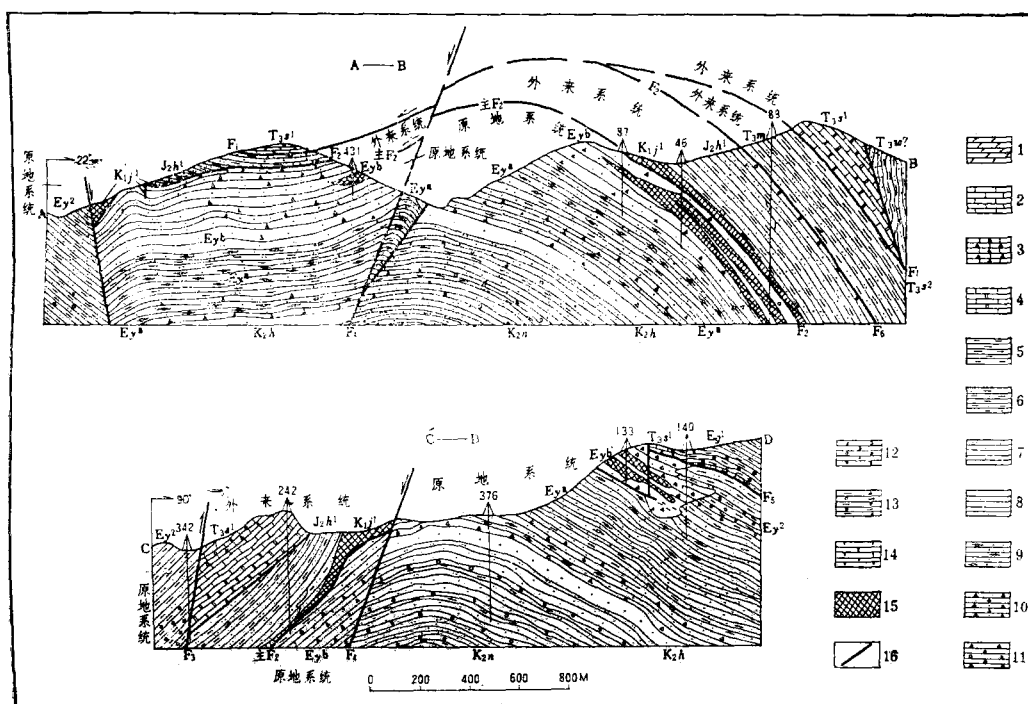


图3 兰坪金顶铅锌矿地质剖面图

1—泥灰岩；2—灰岩；3—砾屑灰岩；4—白云质灰岩；5—泥岩；6—泥质粉砂岩；7—粉砂岩；8—细砂岩；9—层纹状砂岩；10—砂质砾屑灰岩；11—角砾岩；12—砾岩；13—泥砾岩；14—石膏岩；15—铅锌矿体；16—断层

Fig. 3. Geological section of the Jinding lead-zinc deposit at Lanping.

1—marl; 2—limestone; 3—fragmental breccia limestone; 4—dolomitic limestone; 5—argillaceous rock; 6—argillaceous siltstone; 7—siltstone; 8—fine-grained sandstone; 9—laminated sandstone; 10—sandy fragmental breccia limestone; 11—breccia; 12—conglomerate; 13—gompholite; 14—gypsum rock; 15—lead-zinc orebody; 16—fault.

外来系统（自上而下）

(1) 上三叠系三合洞组 (T_{3s}): 下为深灰色灰岩夹沥青灰岩，中部为泥质灰岩，上部系紫红色泥岩夹灰白色砂岩。厚度为400米。

(2) 上三叠系麦初箐组 (T_{3m}): 黑—灰黑色含碳质页岩、粉砂岩，化石甚多。厚180米。

(3) 中侏罗系花开左组 (J_2h): 紫红色泥岩夹灰色砂岩。厚500米。

(4) 早白垩系景星组 (K_1j^1): 上部为灰色厚层细粒石英砂岩，下为灰色含砾屑（钙质角砾）细砂岩夹粉砂岩。该组为矿区的主要含矿层。厚度大于65米。

原地系统

为正常层序，由老第三系云龙组 (E_y) 含盐地层组成。上部 E_y^b 为灰色夹紫红色砾屑灰岩、含砾屑细—中粒砂岩，为该区主要含矿层位，厚250—500米。下部 E_y^a 为紫灰—紫红色砂岩，常见花斑条带，厚300米，与下伏晚白垩系虎头寺组 (K_2h) 之长石石英砂岩为不整合接触。而矿区外围则广泛出露云龙组上部 (E_y^2) 之砖红色含盐地层。

(二) 矿区构造

区域性南北向构造自古生代活动；燕山期活动加剧，产生了近南北向的断陷盆地，形成了中生代的含盐沉积；喜山期构造活动极为强烈，由东西的水平推复作用造成矿区一系列水平推复断层。在盆地边缘，因推复体前缘的崩塌、滑落，在老第三纪含盐地层中见有较多的、大小不等的上覆地层的岩块、砾屑。此时由于南北向构造的继续活动，加之东西向构造的影响，形成了长轴略呈北北东向的穹窿构造。其长约4公里，宽约3公里，向北东方向倾没。穹窿顶部地层产状平缓，翼部较陡，东西两侧均以南北向断裂为界。由于后期南北向、北北西向断裂影响，而使矿区构造复杂化。

(三) 矿区岩石

本区含矿岩石为一套海相、海陆交互相以及陆相的碳酸盐岩、碎屑岩及其过渡性岩石。

1. 碎屑岩类：为该矿床的主要含矿岩石。根据岩石结构、构造、矿物成分又可分为砂岩、粉砂岩、泥岩。其中砂岩又可细分为：

① 钙质石英砂岩 为该区主要含矿岩石，分布于 K_1j^1 层位中。岩石呈细粒结构，灰色块状。碎屑主要由石英、长石、云母类矿物组成。胶结物主要为方解石，有的颗粒较大，构成连生胶结。此外尚有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿等金属硫化物聚集成斑点状，构成基底或孔隙式胶结。碎屑石英粒度为0.15—0.25毫米，以半滚圆状为主，分选较好，石英边缘有的被交代溶蚀成港湾状。该岩石中的重矿物主要有锆石、电气石及磷灰石，其次为褐铁矿、金红石等。该岩石中能見到成岩后生硅化现象，但不普遍，表现为硅质交代方解石胶结物。此类岩石与 Ey^b 层有过渡现象，其特征是砂屑减少，钙屑增多，而分选变差。钙质石英砂岩，由于分选性好，粒度中等均匀，并为钙质胶结，对该矿床形成起着极其重要的作用。

② 含长石石英砂岩 主要分布于 K_2h 地层中。

③ 细粒石英砂岩 于 J_2h 地层中常见。

④ 铁质砂岩 在区内多分布于 J_2h 、 K_2h 、 Ey^b 等地层中，岩石以紫红、砖红色为主，分选较差。

2. 砾屑灰岩-砾屑砂岩类：此类岩石亦为该矿床的主要含矿岩石，分布于 Ey^b 地层中。其岩石结构、构造、岩性及厚度变化均较大。自东向西、自北向南厚度逐渐变薄，砾屑逐渐变少而小，最后为砂岩或粉砂岩所取代。根据砾屑（指石灰岩内碎屑）与石英所占比例，将该类岩石进一步划分为砾屑灰岩、含砂质砾屑灰岩、砂质砾屑灰岩、砾屑砂岩、含砾屑砂岩等类型。该类岩石不具层理，而呈角砾状构造。角砾一般为深灰色，大者达数十米，小至0.1厘米，分选极差，多呈角砾至半角砾状，系未经搬运或短距离搬运而成。胶结物为灰—浅灰色方解石。石灰岩碎屑主要由粉晶或泥晶方解石组成，并含有褐黑色沥青质。一般沥青含量^①为0.01—0.25%。对含沥青最高的一件样品进行了沥青族组分分析，其沥青质含量达47.96%，微量有机元素分析，含C 85.03%、H 9.14%、N 0.5%、S 3.69%、O 1.62%。在三叠系、白垩系及老第三系中，均含有一定量的沥青质。有机质的存在说明该矿床是在 Eh 值不高，水的循环受到限制的还原条件下形成的。

3. 碳酸盐岩类：可分为石灰岩、生物碎屑灰岩及白云岩类。

① 滇黔桂石油指挥部科研所测定。

上述各类岩石的化学成分列于表1。从表1看出,与同类岩石克拉克值相比,金顶矿区各类岩石主要化学成分有如下特点:(1)CaO、Al₂O₃含量偏高,MgO含量偏低。CaO/MgO比值高(除泥岩外);(2)砂岩中SiO₂较克拉克值明显偏低,灰岩及泥岩中SiO₂含量均较高;(3)泥岩中Fe₂O₃与FeO一般均较低,而砂岩和灰岩中较高。

表1 金顶矿区主要岩石平均化学成分表

岩类	氧化物含量 样数	主 要 氧 化 物 含 量 (%)								备 注
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	
泥 岩	3	64.12	17.77	2.12	2.03	1.01	1.74	0.84	3.45	云南省地质矿产局 实验室孔宪英分析
粉砂岩	4	63.89	10.03	3.07	1.24	7.44	1.32	0.57	2.31	
砂 岩	8	59.79	7.04	2.74	1.07	12.97	1.32	0.30	1.39	
砾屑灰岩	3	31.94	2.58	1.80		32.73	0.90	0.13	0.59	
石灰岩	3	11.72	2.4	1.51	0.37	45.71	0.71		0.66	
白云岩	2	22.23	1.76	2.31	0.57	28.31	8.71		0.31	
砂 岩	克拉克值 (一九二四年)	78.33	4.77	1.07	0.30	5.50	1.16	0.25		
泥 岩		58.10	15.40	4.02	2.45	3.11	2.44	0.65		
灰 岩		5.19	0.81	0.54		42.57	7.89	0.06		

二、矿床地质特征

该铅锌矿床自东向西可分为架崖山,北厂、峰子山三个主要含矿段(图1)。共有矿体一百余个,而北厂矿段占有2/3,架崖山矿段次之。矿体围绕穹窿核心呈不规则的环带分布,北西翼保存较好,东南翼残缺不全。按空间及层位,铅锌矿体主要发育在白垩系下统与老第三系构造接触面上下的K₁^j与E₃^y两套地层中。K₁^j为上含矿带,E₃^y为下含矿带。上含矿带位于钙质胶结的分选好的灰色细粒石英砂岩中,矿化均匀稳定,几乎全层矿化。矿体呈层状、似层状产出。其中I、II号矿体长达1000米以上,延深数百米,呈走向近东西,倾向北,倾角30度延伸。地表产状较缓,深部变陡。金属矿物多呈浸染斑点状产出,铅:锌=1:3。下含矿带赋矿岩石为一套含膏盐陆相沉积,其岩相变化剧烈,东部的砾屑灰岩与岩块带中矿体常成群出现。矿体多呈透镜状、筒柱状及不规则状产出,最大的VII号矿体南北长约700米,宽约300米,垂厚数十米,铅:锌=1:4。金属矿物沿节理、裂隙充填交代。这类砾屑灰岩型矿体除含铅、锌外,常含黄铁矿、白铁矿、天青石、石膏,它们有时可构成单独的工业矿体。

本矿床矿石类型根据含矿岩性分为砂岩型及砾屑灰岩型,且以前者为主。矿区氧化带发育,氧化深度可达100米以上。根据氧化程度又可分为氧化矿、混合矿及硫化矿。氧化矿品位高于硫化矿,并占总储量的40%。

矿床垂直分带明显,上部富铅,下部富锌,且略具水平分带。从东部架崖山矿段—中部北厂矿段—西部峰子山矿段,铅、锌比依次为1:7.8—1:4.9—1:0.3,显示东部高锌,西部高铅的特点。

原生矿石的矿物成分简单,以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿为主。脉石矿物以方解石、石英为主,天青石、石膏次之。氧化矿石的矿物成分较复杂,以褐铁矿、菱锌矿、水锌矿为主。

矿石结构构造:砂岩型矿石结构较简单,主要以金属矿物胶结砂屑而成的胶结结构为主,次有溶蚀交代结构、鲕状结构;矿石构造以浸染斑点状为主,块状次之。而砾屑灰岩型矿石的结构构造较复杂,主要为交代溶蚀结构、胶状同心环带结构、乳滴状结构、似文象结构;常见的构造有网脉状构造、角砾状构造、条带状构造等。

根据矿石结构构造及矿物之间的相互关系,该矿区主要矿物成矿期可分为三期,即沉积期、改造期及表生期。矿物生成顺序见表2。

表2 主要矿物生成顺序表

时 期	沉积期	改造期	表生期
方解石	—	—	—
石英	—	—	—
天青石	—	—	—
重晶石	—	—	—
闪锌矿	—	—	—
方铅矿	—	—	—
黄铁矿	—	—	—
白铁矿	—	—	—
赤铁矿	—	—	—
石膏	—	—	—
铅矾	—	—	—
白铅矿	—	—	—
菱锌矿	—	—	—
水锌矿	—	—	—
褐铁矿	—	—	—
异极矿	—	—	—

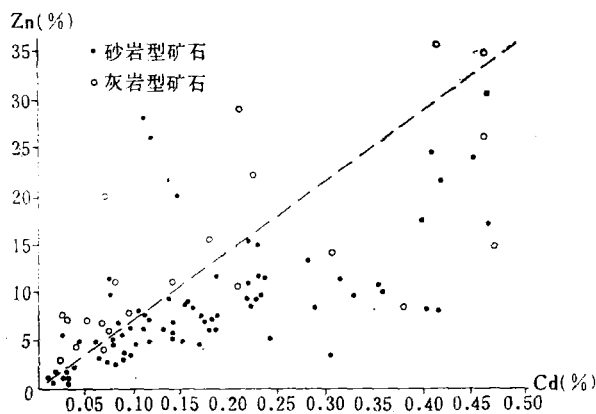


图4 砂岩型矿石与灰岩型矿石镉与锌相关图解

Fig. 4 Cadmium versus zinc diagram for ore of sandstone type and ore of limestone type.

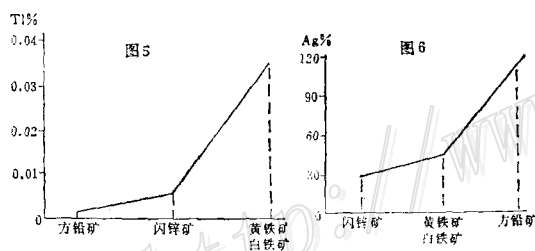


图5 铊在硫化物中的平均含量

Fig. 5. Average thallium content of the sulfides.

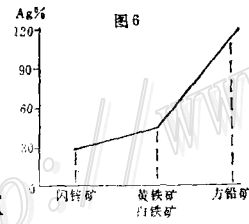


图6 银在硫化物中的平均含量

Fig. 6. Average silver content of the sulfides.

铊 主要富集于黄铁矿、白铁矿中,其含量为0.0055—0.087%;闪锌矿中铊的含量为0.0006—0.016%;方铅矿中含铊最低(图5)。

银 各种硫化物中普遍含银,但主要以辉银矿及自然银显微包体及类质同象方式富集于方铅矿中(图6)。

矿石化学成分及有益伴生元素:该矿床矿石中除铅、锌外,尚有镉、铊、银、硫、锑、钼等有益伴生元素,其中银、镉和铊等具有较大的工业价值。

镉 主要以类质同象形式进入闪锌矿晶格中(硫镉矿含量极少)。一般闪锌矿色越深,含镉量越高。铅锌矿石平均含镉0.1%,最高达3.26%,锌与镉成正相关关系(图4)。从图4可看出,砂岩型矿石中闪锌矿的镉含量高于灰岩型闪锌矿。

三、矿床成因初探

关于兰坪铅锌矿床的成因，一直存在着两种不同的观点。一种认为它是热液充填交代矿床，另一种则认为它是沉积矿床。通过多年工作，我们认为它属沉积-改造的层控矿床。其理由如下：

(一) 该矿床受地层及岩性控制。矿体呈层状、似层状赋存于 K_1j^1 及 Ey^b 层位中，特别是 K_1j^1 几乎全层矿化。含矿岩石均为分选好的灰色细粒钙质石英砂岩和灰色砾屑灰岩。

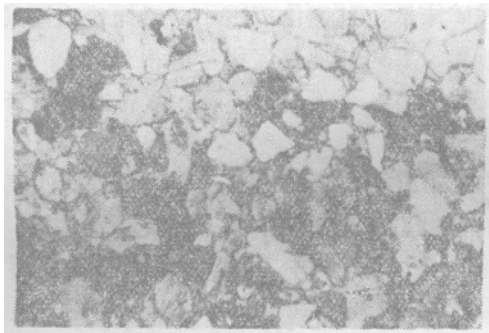
(二) 矿石矿物成分简单。原生矿石的金属矿物以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿为主。脉石矿物以方解石、石英为主，次为天青石、石膏等。

(三) 矿石中保存了如下沉积结构：

1. 胶结结构：见于砂岩型矿石中，石英砂粒之间被闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等金属矿物所胶结，金属硫化物少时则构成充填式或孔隙式胶结，多时则形成基底式胶结（照片1）。

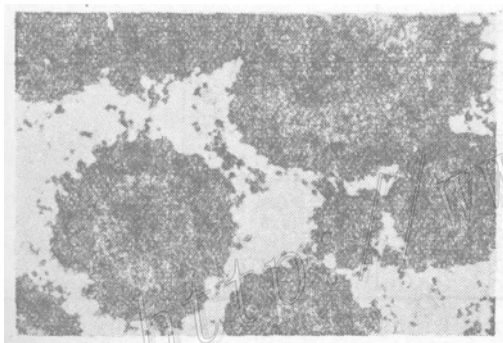
2. 鲕状结构：在矿石中见闪锌矿呈同心鲕状结构，鲕粒由不同颜色的闪锌矿所构成（照片2）。鲕粒大小一般在0.3—0.6毫米之间。

3. 生物结构：主要见于黄铁矿，比较有意义的是草莓状黄铁矿，其粒度极小（5—20 μ ）（照片3）。



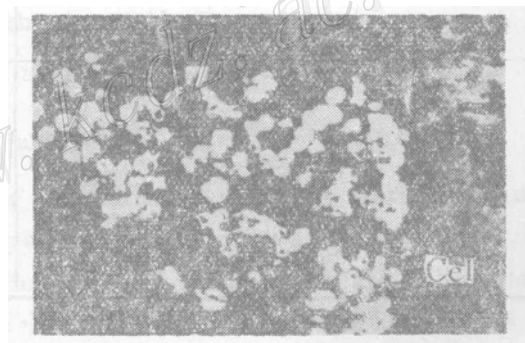
照片 1

含铅锌钙质石英砂岩，胶结物为闪锌矿、方铅矿（黑色）及方解石（-） $\times 30$



照片 2

鲕状结构：鲕粒环带由透明度不同的闪锌矿所组成，鲕粒间为方解石（-） $\times 38$



照片 3

生物结构：草莓状黄铁矿分布于天青石（Cel）中 光片 $\times 75$

(四) 灰岩中的矿体虽在一定的层位内多呈透镜状产出，但形态变化很大，富矿往往赋存在穹窿顶部 F_2 断层两侧的有利岩性中，说明矿化富集受构造和岩性的双重控制。在灰岩型矿石中常见溶蚀交代结构、同心环带结构、乳滴状结构以及网脉状、胶状、条带状构造，具有显著的后期充填交代特征。

(五) 矿石中微量元素: 根据 20 件矿石标本分析^①, 一般 $Sr > Ba$, $Sr/Ba = 0.5-3$; Mn 在矿石中的含量比较高, 在 $0.1-0.4\%$ 之间; 有机碳含量均在 0.1 左右, 个别可达 0.47% 。上述数据均反映了沉积矿床的特征。

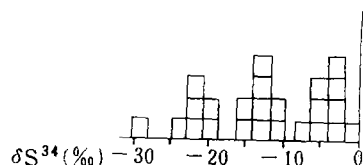


图 7 金顶铅锌矿床硫同位素组成

(每个小方格代表一个分样图)

Fig. 7. Constitution of the sulfur isotope in the lead-zinc deposit in Jinding area.

(六) 硫同位素组成特征: 26 件样品 (主要是闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿) 的分析结果^②, δS^{34} 值全为负值, 变化范围为 -1.71 — -30.43% , 相对富集轻硫, 具有以生物作用为主的沉积矿床特征 (图 7)。

(七) 铅同位素特征: 据 34 件铅同位素样品分析结果^③, Pb^{206}/Pb^{204} 比值均在 18.5 以下, 平均值为 18.355 ; Pb^{208}/Pb^{204} 比值一般为 38.4 , 个别为 37.80 ; Pb^{207}/Pb^{204} 比值为 15.40 。这些数据表明铅同位素组成属正常铅范围, 一般比密西西比式矿床低, 且变化范围小。铅同位素模式年龄为 $22-82$ 百万年, 大体与地层沉积年龄相当。

(八) 包裹体特征: 方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、石英、方解石、天青石、石膏等的包裹体测定结果表明:

(1) 包裹体类型主要以气、液两相为主, 其中气相占 30% , 液相占 70% 。而单一的气相或液相及多相包体少见。包裹体大小一般在 $5-10\mu$ 之间, 个别可达 50μ 以上。

(2) 包裹体测温 (爆裂法及均一法) 结果为 $140-354^\circ C$, 其中方铅矿、闪锌矿主要形成于 $280-350^\circ C$ 之间, 而天青石、石英、石膏形成温度为 $140-280^\circ C$ 之间。

(3) 用冷冻法对矿床中的方解石、天青石中包裹体的含盐度进行了测定 (表 3), 结果为 $5.05-14.6 \text{ wt}\% \text{ NaCl}$ 。镜下个别可见 NaCl 的子矿物相。

表 3 包裹体盐度测定结果表

编 号	层 位	产 状	矿物名称	wt% NaCl	平均wt% NaCl
yn 12	Ey ^b	灰岩型矿石	方解石	5.05—10	7.0
yn 12-2	Ey ^b	天青石脉	天青石	6.6—9.5	7.5
yn 29	Ey ^b	方解石	方解石	5.1—9.65	7.4
yn 52	Ey ^b	早期天青石结核	天青石	14.6	14.6
yn 73	Ey ^b	方解石脉	方解石	7.4	7.4

包裹体盐度由中国科学院地球化学研究所俞茨致测定。

(4) 该矿区 33 件样品 (方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、石英、天青石等) 包裹体气相色谱分析结果表明, 矿物包体中一般含 CO_2 在 $0.01-0.7\%$ 之间, 而方铅矿、闪锌矿、黄铁矿中者含 CO_2 在 0.2% 以上, 说明含矿热水溶液富含 CO_2 。包裹体中 H_2O 的含量变化范围稍大, 为 $0.08-1.21\%$, 一般在 $0.1-0.3\%$, 含 H_2O 最高者为石英和节壳状的天青石。包裹体的

① 云南省地质矿产局实验室孔宪英测定。

② 引用云南省地质矿产局三大队资料。

③ 云南省地质科学研究所薛晓峰测定。

CO₂ 含量, 棕色闪锌矿高于米色闪锌矿, 白色天青石高于灰色天青石。包裹体中 H₂O 的含量, 米色闪锌矿高于棕色闪锌矿, 但不同颜色的天青石中 H₂O 的含量几乎相等。另外, 不同颜色的方解石铁含量不同, CO₂ 及 H₂O 的含量则相差不大。

综上所述, 该矿床是由早期沉积成岩(成矿)作用与后期(含矿)地下热水叠加改造所形成, 属同生沉积后期改造的层控铅锌矿床。

作者在工作中得到云南省地质矿产局第十一地质队、中国科学院地球化学研究所、石油部滇桂黔石油指挥部研究所以及云南省地质科学研究所等单位的大力协助和支持, 在此仅致谢意。

参 考 文 献

- [1] K. H. Wolf 主编 1978 层控矿床和层状矿床 第一卷 地质出版社
- [2] E. J. 佩蒂庆, P. E. 波特, R. 西弗 1977 砂和砂岩 科学出版社
- [3] H. 布拉特, G. V. 米德顿, R. C. 穆雷 1978 沉积岩成因 科学出版社
- [4] B. R. Doe 1970 铅同位素地质 科学出版社
- [5] Thacker, J. L. and Anderson, K. H., 1977, The geologic setting of the Southeast Missouri lead district—regional geologic history, structure and stratigraphy. *Econ. Geol.*, Vol. 72, No. 3, pp. 339-348.
- [6] Sweeney, P. H., Harrison, E. D. and Bradley, M., 1977, Geology of the Magmost Mine, Viburnum Trend, Southeast Missouri. *Econ. Geol.*, Vol. 72, No. 3, pp. 365-371.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE JINDING LEAD -ZINC DEPOSIT IN YUNNAN WITH A SPECIAL DISCUSSION ON ITS GENESIS

Bai Jiafeng, Wang Changhuai and Na Rongxian

(Central Laboratory, Geological Bureau of Yunnan Province)

Abstract

The Jinding lead-zinc deposit lies in the northern part of west Yunnan Mesozoic-Cenozoic depression. The strata are composed of two systems, i. e., autochthonous system and allochthonous one; the former refers to sediments of Upper Cretaceous time and Paleocene Yunlong Formation and the latter sediments of Upper Triassic, Jurassic and Lower Cretaceous times. Structurally, the whole mining area comprises an arch with the long axis trending NNE.

From east to west, the deposit can be divided into three major ore-bearing members: Jayashan, Beichang and Fengzishan. Sandstone in Lower Cretaceous Jinxing Formation (K_{1j}) was overall mineralized, making up a thick bedded lead-zinc ore body. This deposit has an apparent vertical zoning with the upper part enriched in lead and the lower part in zinc; horizontally, it also

shows an indistinct zoning with the east part enriched in zinc and the west part in lead. The ores might be grouped into sandstone type and limestone type, the former type possessing sedimentary oolitic, cemented and strawberry-like structures, while the latter type assuming metasomatic, corroded, concentric, gel, stockwork and banded structures; the ore minerals are mainly sphalerite, galena, pyrite; the vein minerals are composed chiefly of quartz, calcite and secondarily of gypsum, celestite and some others.

Trace elements in the ores are characterized by $Sr > Ba$, $Sr:Ba = 0.5-3$, $Zn:Cd = 25-30$, $Mn = 0.1-0.4\%$ and $C = 0.1-0.47\%$. Besides lead and zinc, the contents of such ore-forming elements as silver, cadmium and thallium in the country rocks are several times or even tens of times higher than the contents of these elements in the normal sedimentary rocks of the same types.

Temperatures of inclusions contained in ore and vein minerals as determined by homogenization and decrepitation methods are $160-334^{\circ}\text{C}$, and freezing determination shows that salinities of mineral inclusions are $7.4-14.6\text{ wt}\%$ NaCl; microscopic studies have identified submineral facies of NaCl; spectrographic analysis of trace gases shows that inclusions generally have $0.01-0.78\%$ CO_2 and $0.08-1.21\%$ H_2O with celestite possessing the highest quantities of water.

Lead isotopic modal ages are $22-83\text{ m. y.}$, approximately corresponding to ages of the strata; δS^{34} values vary in the range $-1.71--30.43\%$, characterized by concentration of light sulfur.

These data have led the authors to believe that the Jinding lead-zinc deposit is the product of early sedimentary—diagenesis and mineralization acted upon afterwards by late ore-bearing hydrothermal fluids, belonging hence to stratabound lead-zinc deposits of sedimentation plus late transformation type.

(continued from p.83)

forming temperature in order of $360-300-270-170^{\circ}\text{C}$ from the interior of the intrusive mass outward. This also reflects the migration direction of ore solutions.

The results obtained indicate that a comparatively correct solution to this problem may be found by means of an integrated investigation using a variety of methods.

A study of this problem enables us to further understand metallogenic mechanism, ore zonation, ore enrichment regularity and ore distribution tendency, thus having great significance in mineral exploration, especially in prediction of orebodies at depth.