

(12)75-32

2000年第28卷第4期  
Vol. 28, No. 4, 2000地质地球化学  
GEOLOGY-GEOCHEMISTRY

75

都龙锡锌多金属矿床成矿物质来源  
的同位素示踪\*刘玉平<sup>1)</sup> 李朝阳<sup>1)</sup> 谷团<sup>2)</sup> 王金良<sup>3)</sup>

1) (中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放实验室 贵阳 550002)

2) (辽河油田勘探开发研究院 盘锦 124010)

3) (都龙锡矿生产管理科 马关 663701)

P618.4

P597

**摘要** 本文通过对都龙锡锌多金属矿床的铅、铋、硫同位素地球化学特征的系统研究,揭示该矿床成矿物质具有多来源的特点;成矿金属主要来源于基底前寒武系变质岩和老君山花岗岩;硫主要来源于中寒武世热水沉积期还原的海水硫酸盐和深部岩浆房,同时,燕山期老君山花岗岩为后期叠加成矿作用提供了硫源,变质围岩也提供了一部分成矿物质。矿石中单矿物的物-铋等时线年龄为 $(76.7 \pm 3.3) \times 10^6$ a,反映矿床明显受到燕山晚期岩浆热液作用的叠加。

**关键词** 锡锌多金属矿床 同位素地球化学特征 成矿物质来源 云南都龙

**第一作者简介** 刘玉平 男 1971年生 助理(博士) 主要从事矿床地球化学研究

都龙锡锌多金属矿床位于云南省马关县境内,大地构造处于越北地块、华南褶皱系、扬子地块、哀牢山褶皱系等几大构造单元接合部位的滇东南褶皱带老君山穹隆构造之南部,是一个以锡、锌为主,伴生铅、铜、铁、银、镉、铟等多种元素的超大型矿床。对该矿床的研究中,岩浆热液成因的观点曾长期占据上风<sup>[1~3]</sup>。但近期的研究则多倾向属于多成因复成矿床,其中热水沉积作用占有重要地位,区域变质和岩浆热液活动则分别起到了改造、叠加作用<sup>[4~7]</sup>。本文旨在根据都龙锡锌多金属矿床的铅、铋、硫同位素地球化学特征,来探讨成矿物质来源这一成因研究中的重要问题。

## 1 矿床地质特征

都龙锡锌多金属矿床赋存于中、浅变质的中寒武统田蓬组( $\epsilon_2t$ )第二段至第四段片岩、大理岩夹似层状矽卡岩中。矿体主要呈似层状、透镜状、囊状及网脉状,与围岩产状基本一致(图1),在平面上呈南北向带状分布,在剖面上显示叠瓦状排列特征。

矿床矿石类型主要为锡石硫化物矽卡岩型矿石,在主矿带外围还发育了硫化物碳酸盐型矿石和硫化物萤石石英脉型矿石。金属矿物主要为铁闪锌矿、磁黄铁矿、锡石、磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿和毒砂,脉石矿物主要为石英、绿泥石、角闪石(阳起石-透闪石系列为主)、透辉石、绿帘石、绢云母、斜长石等。变晶结构、交代结构和固溶体出溶结构广泛发育,在一些矽卡岩型矿石中还可以见到变余胶状结构。矿石构造主要为纹层状一条带状构造、块状构造、片状一片麻状构造、斑点状一斑杂状构造、浸染状构造和脉状一网脉状构造。

马关—都龙大断裂呈弧型展布于矿床北东侧,矿区内主要的控矿构造为马关—都龙断裂的一系列南北向的次级断裂。燕山期S型老君山复式花岗岩的主体出露于矿床以北,其向南延伸的隐伏花岗岩脊发育于主矿带之下,矿区内还出露多条花岗斑岩脉。在隐伏花岗岩脊和花岗斑岩脉附近,脉状矿体穿切似层状、透镜状矽卡岩型矿体,且使后者的矿化增强,主要表现为锡石和黄铜矿的含量有所增加。

## 2 样品分析方法

对都龙锡锌多金属矿床主要的矿石和围岩进行了较系统的采样。先人工选取新鲜部分,单矿物样经粉碎、粗选、蒸馏水冲洗后在双目镜下挑选 60

1999年11月8日收稿,2000年7月19日改回。

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号:49633110)、“攀登计划”项目(编号:A30-15)和中关村地区联合测试基金(批准号:96K51J51-321)共同资助。

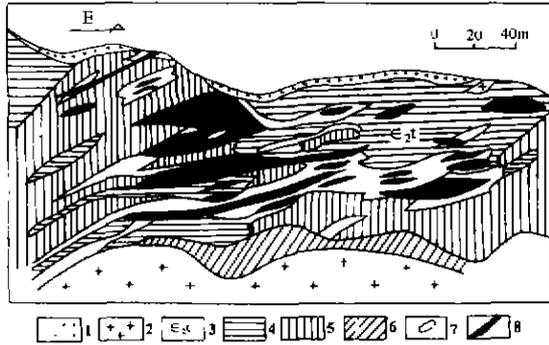


图1 都龙锡锌多金属矿床113号勘探线地质剖面图  
(据西南有色地勘局317队资料改编<sup>①</sup>)

Fig. 1. The No. 113 geological section of the Dulong tin-zinc polymetallic deposit.  
1. 第四系; 2. 燕山期花岗岩; 3. 中寒武统田蓬组第二段;  
4. 片岩; 5. 大理岩; 6. 片麻岩; 7. 砂卡岩; 8. 矿体。

~80目的纯净部分;岩(矿)石样则粉碎至200目,所得的单矿物样和岩(矿)石样进行同位素测定。

铅同位素主要由地质矿产部宜昌地质矿产研究所在MAT-261质谱仪上完成,用于监控铅同位素测定的NBS981标准六次实测平均值<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb为0.91395±0.00011,三份实验全流程空白平均为

Pb  $1.2 \times 10^{-8}$ ; Rb、Sr同位素测定由中国科学院地质研究所在VG-354质谱仪上完成,用于监控Rb、Sr同位素测定的NBS987标准平均值<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr为0.710346±15,全实验流程本底为Rb为 $5 \times 10^{-10}$ ,Sr为 $2 \times 10^{-10}$ ;硫同位素测定由地质矿产部矿床地质研究所在MAT-230C质谱仪上完成, $\delta^{34}$ S以CDT为标准,分析精度为±0.2‰。

### 3 同位素地球化学特征及成矿物质来源

#### 3.1 铅同位素

都龙矿床围岩和硫化物的铅同位素分析结果见表1和图2。矿石、花岗岩和花岗片麻岩的铅同位素组成均较稳定,并彼此十分接近。而大理岩、片岩的铅同位素组成变化范围均较大,且两者表现出较好的线性相关特点(尤其是排除龙哈组LDL-82号样品时)。结合含矿地段大理岩、片岩呈指状交错,大理岩中含有较多泥质组分的地质事实,本文推断这种线性关系说明存在着铅同位素的混合机制。

表1 都龙锡锌多金属矿床围岩和矿石的铅同位素组成

Table 1. Lead isotopic analyses of ores and wall rocks from the Dulong tin-zinc polymetallic ore deposit

类别	样品编号	测定对象	铅同位素组成(1 $\sigma$ 绝对误差)			模式年龄		资料来源
			<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	(10 <sup>6</sup> a)	$\mu$	
花岗片麻岩	Stp-1	长石	18.763±0.001	15.693±0.001	38.832±0.001	92	10.00	本文
	DLG-30		18.434±0.001	15.644±0.001	38.514±0.001	235	9.87	
花岗岩	LDL-57		18.404±0.001	15.674±0.001	38.869±0.001	318	10.01	
	LDL-56		18.533±0.001	15.738±0.001	39.127±0.001	349	10.26	
花岗斑岩	LJS-5		18.662±0.001	15.708±0.001	39.025±0.001	197	10.09	
	YX-4		18.623±0.001	15.760±0.001	39.187±0.001	328	10.33	
	ZK83049-56		18.538±0.001	15.675±0.001	38.902±0.001	221	9.98	
	ZK83049-56		黄铁矿	18.625±0.001	15.704±0.001	38.986±0.001	216	
片岩	ZP-8		19.032±0.005	15.760±0.004	39.931±0.009	35	10.24	
	ZP-29		20.665±0.041	15.782±0.030	42.688±0.084	-	10.12	
	P13-1	18.918±0.032	15.670±0.026	39.667±0.067	-	9.87		
大理岩	ZP-21	18.330±0.002	15.627±0.001	38.605±0.005	278	9.82		
	P12-1*	17.744±0.005	15.513±0.004	38.057±0.010	491	9.47		
	P12-2*	18.658±0.008	15.681±0.005	39.219±0.016	145	9.97		
	P13-2*	17.314±0.005	15.496±0.005	37.808±0.010	788	9.95		
	LDL-82*	18.349±0.009	15.449±0.010	38.016±0.019	-	9.04		
	LDL-103	18.481±0.002	15.653±0.002	38.865±0.006	218	9.89		
矿石	LDL-76	磁黄铁矿	18.524±0.002	15.679±0.002	38.951±0.016	240	10.00	
	LDL-76	铁闪锌矿	18.527±0.029	15.694±0.029	39.043±0.070	268	10.06	
	LDL-90	铁闪锌矿	18.533±0.018	15.685±0.013	39.126±0.033	245	10.02	
	LDL-95	铁闪锌矿	18.474±0.010	15.652±0.009	38.848±0.023	222	9.89	
	LDL-25	黄铜矿	18.560±0.020	15.771±0.018	39.226±0.049	393	10.40	
	LDL-102	闪锌矿	18.515±0.005	15.717±0.005	39.082±0.015	322	10.17	
	LDL-104	方铅矿	18.473±0.004	15.655±0.004	38.873±0.010	229	9.90	
	LDL-105	黄铁矿	18.495±0.0009	15.679±0.0003	38.946±0.002	261	10.00	

\* 由中国科学院地球化学研究所彭建华测定,其余样品由地矿部宜昌地质所同位素室测定。 $\mu$ 值和模式年龄采用Stacey和Kramers两阶段模式<sup>[8]</sup>,用ISOPLLOT软件<sup>[9]</sup>计算。

① 西南有色地质勘探局317队,云南省马关县都龙矿区曼家寨矿段勘探报告,1991。(下同)

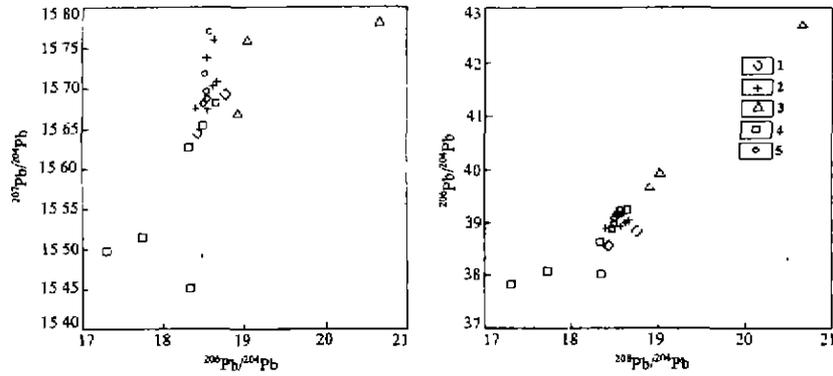


图 2 都龙锡锌多金属矿床围岩和硫化物的铅同位素组成图解

Fig. 2. Lead isotopic compositions of wall rocks and ores from the Dulong tin-zinc polymetallic deposit.

1. 花岗片麻岩; 2. 花岗岩; 3. 片岩; 4. 大理岩; 5. 矿石。

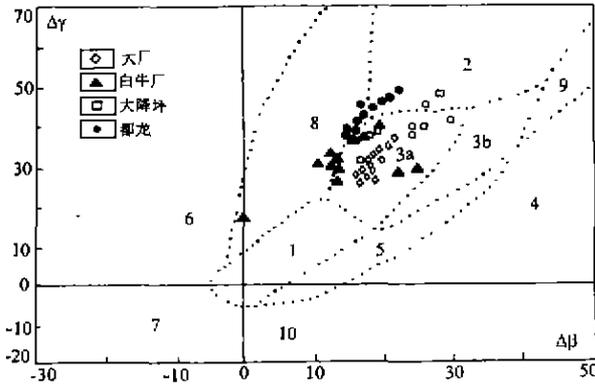


图 3 都龙锡锌多金属矿床矿石铅  $\Delta\beta - \Delta\gamma$  成因分类图解

Fig. 3. Ore lead  $\Delta\beta - \Delta\gamma$  genetic types of the Dulong tin-zinc polymetallic deposit.

1. 地幔源铅; 2. 上地壳源铅; 3. 上地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. 中深变质作用铅; 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。

该矿床中矿石和围岩的铅同位素多属于高  $\mu$  值铅, 除两个大理岩的  $\mu < 9.5$  外, 其余样品的  $\mu$  值都为 10 左右。矿石铅两阶段模式年龄为  $222 \times 10^6 \text{a} \sim 393 \times 10^6 \text{a}$ , 平均为  $282 \times 10^6 \text{a}$ , 低于含矿地层年龄, 但这组年龄值却与老君山地区区域变质作用时代(自海西期至印支期, 其中印支期达到变质高峰)一致<sup>[10]</sup>, 在一定程度上反映了区域变质作用的成矿意义。

铅同位素是示踪矿床成矿金属来源的有力工

具。根据 Zartman 图解<sup>[11]</sup>, 该矿床矿石铅同位素组成投影于上地壳演化线附近, 表明矿石铅的来源较浅。有研究<sup>[12,13]</sup>表明, 绝大多数 Sedex 型矿床中的铅同位素组成投影在 Stacey 和 Kramers 平均增长曲线附近, 且一般位于该曲线上方。本矿床的矿石铅也具有这一特征, 结合矿石中变余胶状结构、纹层状一条带状构造等沉积成因的组构, 暗示了热水沉积作用在成矿过程中具有重要意义。

由矿石铅同位素  $\Delta\beta - \Delta\gamma$  成因分类图解<sup>[14]</sup>可见(图 3), 该矿床矿石铅投影在上地壳源铅区和造山带铅区内。而作为对比的大厂、白牛厂和大降坪<sup>[15-17]</sup>等三个 Sedex 型矿床, 它们的投影范围大致处于海底热水作用铅区与都龙矿床之间。这四个矿床形成过程中热水沉积体系的岩石组合特征<sup>[18-21]</sup>、热水沉积作用后所经历的地质作用的改造和叠加等因素, 可能制约着它们的矿石铅与海底热水活动铅的偏离程度。通过与围岩铅同位素组成对比, 可见矿石铅基本处于花岗片麻岩、田蓬组变质岩铅和花岗岩铅之间(图 2), 反映矿石铅可能是围岩铅混合的产物。尤其是基底前寒武系变质岩中的花岗片麻岩<sup>[22]</sup>和老君山花岗岩, 与该矿床矿石具有非常相似的铅同位素组成特征, 它们可能就是矿石铅的主要源区。

综上所述, 本文认为都龙锡锌多金属矿床的铅具有多源特点。其中矿石铅主要来源于中寒武世田蓬期深循环海水流经的基底前寒武系变质岩和燕山期老君山花岗岩, 并在热水沉积成矿阶段和区域变质阶段受到围岩铅的混染。

表2 都龙锡锌多金属矿床的铷、锶同位素组成

Table 2. Rb-Sr isotopic composition of the Dulong tin-zinc polymetallic ore deposit

类别	样号	测试对象	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}^*$	$^{87}\text{Rb}$	$^{86}\text{Sr}$	Rb/Sr	资料来源	
花岗岩	LDL-30	全岩	598.684	107.211	16.181600	0.744232 $\pm$ 20	1.943780	0.120123	5.584	本文	
	LDL-46		367.201	17.360	61.555800	0.788205 $\pm$ 33	1.922210	0.019368	21.152		
	LDL-56		562.621	59.010	27.665700	0.758190 $\pm$ 16	1.826690	0.066027	9.534		
片岩	ZP-8	408.602	41.844	28.379700	0.774469 $\pm$ 70	1.326630	0.046746	9.765			
	PI3-1	173.611	18.294	27.635100	0.794869 $\pm$ 70	0.563673	0.020397	9.490			
大理岩	ZP-21	全岩	10.606	156.906	0.195559	0.728079 $\pm$ 31	0.034434	0.176079	0.068		
	LDL-82		13.582	608.504	0.064464	0.709922 $\pm$ 24	0.044098	0.684075	0.022		
	LDL-102		39.597	722.540	0.158312	0.712390 $\pm$ 23	0.128562	0.812078	0.055		
矿石	LDL-72	石英	1.775	0.693	7.409080	0.725019 $\pm$ 53	0.005763	0.000778	2.561		[23]
	LDL-76(2)	闪锌矿	34.551	0.787	128.668000	0.857438 $\pm$ 99	0.112177	0.000872	43.902		
	LDL-76(3)	石英	167.348	6.705	72.767600	0.806588 $\pm$ 40	0.543337	0.007467	24.959		
	LDL-77	石英	53.680	0.594	268.400000	1.004910 $\pm$ 82	0.174285	0.000649	90.370		
	LDL-78	石英	51.702	0.665	230.792000	0.966600 $\pm$ 81	0.168188	0.000729	77.898		
	LDL-102	闪锌矿	0.241	1.265	0.550543	0.714179 $\pm$ 17	0.000783	0.001422	0.191		
	LDL-104	方铅矿	0.031	0.233	0.386476	0.712633 $\pm$ 50	0.000161	0.0001262	0.133		
	LDL-129(2)	石英	5.479	58.664	0.269834	0.713928 $\pm$ 20	0.017789	0.065924	0.093		

测试者:中国科学院地质研究所乔广生。 \*  $2\sigma$ 绝对误差。

3.2 铷-锶同位素

该矿床较为系统的 Rb-Sr 同位素研究成果尚未见报道。为消除矿石全岩样品中所含碎屑组分可能带来的影响,本文采用 8 个硫化物和石英

的龙哈组大理岩 LDL-82 号样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709922$ ,与含矿的田蓬组大理岩在锶同位素组成上存在显著差别,而与寒武纪海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值( $\approx 0.7092$ )非常接近<sup>[24,25]</sup>,则表明两套大理岩的 Rb-Sr 同位素体系受成矿作用的影响程度存在很大的差别,体现了矿化具有明显的层控特征。

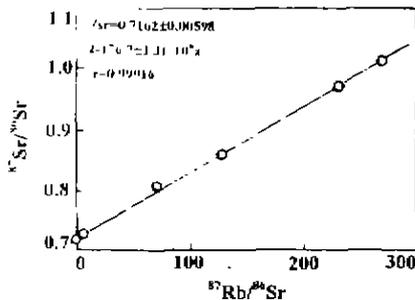


图4 都龙锡锌多金属矿床的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图解

Fig. 4.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  diagram of the Dulong tin-zinc polymetallic deposit.

单矿物的 Rb-Sr 同位素组成(表2)来构筑 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图解,由此获得了一条  $t = (76.7 \pm 3.3) \times 10^6 \text{a}$ ,  $I_{\text{Sr}} = 0.71620 \pm 0.00598$ ,  $\gamma = 0.99916$ 的等时线(图4)。而三个弱蚀变花岗岩(第一期岩相)样品,获得了一条  $t = (66.9 \pm 5.0) \times 10^6 \text{a}$ ,  $I_{\text{Sr}} = 0.7302 \pm 0.00267$ ,  $\gamma = 0.99756$ 的参考等时线。其  $I_{\text{Sr}}$ 与老君山岩体第二期岩相  $I_{\text{Sr}} = 0.732$ 一致<sup>[3]</sup>,反映样品所遭受的蚀变对其同位素体系的扰动较小。而变质岩的线性关系较差,反映其同位素组成未达到均一化。但田蓬组之上

的龙哈组大理岩 LDL-82 号样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709922$ ,与含矿的田蓬组大理岩在锶同位素组成上存在显著差别,而与寒武纪海水  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值( $\approx 0.7092$ )非常接近<sup>[24,25]</sup>,则表明两套大理岩的 Rb-Sr 同位素体系受成矿作用的影响程度存在很大的差别,体现了矿化具有明显的层控特征。

该矿床矿石单矿物的 Rb-Sr 等时线年龄  $t = (76.7 \pm 3.3) \times 10^6 \text{a}$ ,与蚀变花岗岩的 Rb-Sr 等时线年龄,以及矿石中云母等蚀变矿物的 K-Ar 年龄所反映的岩浆热液作用的年代吻合<sup>①</sup>。该年龄与矿石-单矿物的 Rb-Sr 等时线年龄  $t = (75.0 \pm 5.6) \times 10^6 \text{a}$  完全一致<sup>[23]</sup>,表明矿石在全岩尺度上发生了锶同位素均一化,体现了较强烈的岩浆热液活动的叠加。相比而言,同属于老君山成矿区但受岩浆热液作用影响较小的新寨锡矿床和南秧田钨矿床的 Rb-Sr 等时线年龄分别为  $(243.2 \pm 34.9) \times 10^6 \text{a}$  和  $(214.3 \pm 15.6) \times 10^6 \text{a}$ <sup>[23]</sup>,结合前述矿石铅同位素模式年龄的特征,这两个矿床的 Rb-Sr 等时线年龄反映了印支运动变质作用在区域成矿中具有重要意义。

该矿床矿石类样品所获得的  $I_{\text{Sr}} = 0.71620 \pm 0.00598$ ,而南秧田矿床和新寨矿床的  $I_{\text{Sr}}$  分别为  $0.7159 \pm 0.00083$ ,  $0.7236 \pm 0.00157$ <sup>[23]</sup>,这种区域性的一致,暗示了三者锶同位素具有相同的源区。这组比值既明显区别于老君山花岗岩的  $I_{\text{Sr}}$ ,又不同于寒武纪海水的锶比值,而与大陆古老硅铝质岩石的锶比值( $0.720 \pm 0.005$ )吻合<sup>[26]</sup>。而

区域上最可能具有这种锶比值特征的源区为基底前寒武系变质岩。因此,Rb-Sr 同位素地球化学特征,呼应了基于铅同位素地球化学特征作出的基底前寒武系变质岩是成矿金属重要源区的推断,同时反映了岩浆热液活动在成矿中具有不可忽视的作用。

3.3 硫同位素

表 3 为都龙锡锌多金属矿床硫化物的硫同位

素组成。 $\delta^{34}\text{S}$  值变化范围为  $-1.5\text{‰} \sim +8.3\text{‰}$ , 极差为  $9.8\text{‰}$ , 平均为  $+1.8\text{‰}$ , 具有一定的塔式效应,并向正值偏移(图 5)。结合流体包裹体测温结果和矿石中硫化物占绝对优势的矿物组合特征<sup>[4]</sup>,硫化物的硫同位素组成大致可以代表成矿流体的硫同位素组成。另外,随沉积层序向上(铜街、曼家寨和辣子寨为  $\text{E}_{2t_2}$ ,岩冲为  $\text{E}_{2t_2} \sim \text{E}_{2t_3}$ ,水洞厂为  $\text{E}_{2t_3} \sim \text{E}_{2t_4}$ ),硫同位素组成表现出逐步增大的趋势。

表 3 都龙锡锌多金属矿床的硫同位素组成

Table 3. The sulfur isotopic composition of the Dulong tin-zinc polymetallic deposit

矿段	样号	测定矿物	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	资料来源	矿段	样号	测定矿物	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	资料来源
铜街	T <sub>1</sub> -1	磁黄铁矿	0.6	转引自文献[2]	曼家寨	5901-1	磁黄铁矿	0.8	转引自文献[2]
	都硫 5	铁闪锌矿	2.6			2701-1	磁黄铁矿	0.4	
	都硫 6	铁闪锌矿	1.6			1101-1	磁黄铁矿	-0.7	
	A1005-1	铁闪锌矿	1.2			都硫 7	铁闪锌矿	-1.5	
	A1010	黄铁矿	2.2			都硫 8	铁闪锌矿	1.0	
	A1028	黄铁矿	3.8			都硫 10	铁闪锌矿	2.7	
	A1005-3	铁闪锌矿	1.0			都硫 11	黄铜矿	0.6	
	A1005-2-2	磁黄铁矿	1.0			LDL-16	铁闪锌矿	0.5	
辣子寨	都硫 S	铁闪锌矿	0.4	本文	LDL-25	黄铜矿	0.9	本文	
	L1-1	铁闪锌矿	1.8		LDL-64(1)	黄铁矿	3.5		
	L1-2	磁黄铁矿	1.8		LDL-64(2)	闪锌矿	2.8		
	LDL-95	铁闪锌矿	0.7		LDL-64(3)	方铅矿	0.9		
水洞厂	LDL-102	闪锌矿	7.5	本文	全区平均 $\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$			1.8	
	LDL-104	方铅矿	8.3						

测试者:地质科学院矿床地质研究所白瑞梅。

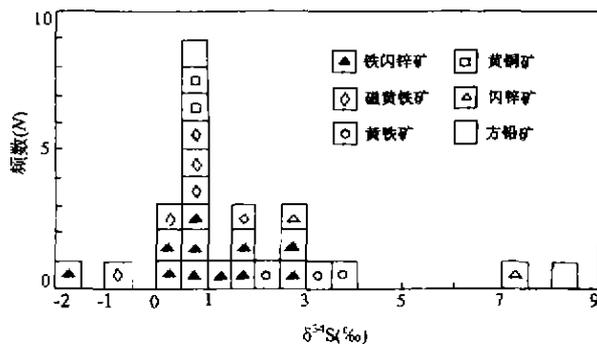


图 5 都龙矿床硫同位素组成直方图

Fig. 5. Histogram of sulfur isotopic composition.

将  $\delta^{34}\text{S}$  值接近零作为判别成矿物质来源于老君山花岗岩的依据之一<sup>[1-3]</sup>,不能很好地解释该矿床中保留了大量的沉积和变质成因标志。对现代海底热水沉积体系和众多的古代热水沉积矿床的研究表明,深部岩浆房是引起热水循环的根本机制。因此, $\delta^{34}\text{S}$  值接近零暗示硫也有可能来自深部岩浆房。另外,地壳岩石和海水硫酸盐的还原作用,均可以产生近于零的  $\delta^{34}\text{S}$  值<sup>[27]</sup>,变质作用也可使离散的硫同位素组成发生一定程度的

均一化。

不同地区、不同地质环境下,现代海底热水体系形成的硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值变化于  $2.5\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$  之间,平均为  $(4.7 \pm 1.1)\text{‰}$ ,与块状硫化物矿床(包括 VMS 型和 Sedex 型)硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值十分接近。本区矿石中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值,与上述的这些特征值基本一致。研究表明,Sedex 型矿床硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值变化范围较大,且与同时期海水的硫同位素组成有一定的相关关系,平均存在约  $17\text{‰}$  的差值<sup>[28]</sup>。这有力地证明,硫主要来源于同时期海水硫酸盐。目前普遍认可的解释是:海水硫酸盐与下伏岩石的含铁组分发生反应而产生无机还原作用<sup>[27,29,30]</sup>。据 317 队资料,矿区外围不含矿地段的田蓬组 ( $\text{E}_{2t}$ ) 第二段至第四段的片岩中顺层产出的沉积成因的细粒黄铁矿曾获得达到  $+21\text{‰}$  的  $\delta^{34}\text{S}$  值<sup>①</sup>,与矿床中硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  平均值之差约为  $19\text{‰}$ ,十分接近  $17\text{‰}$  这一特征值。

另外,在矿床范围内不同地层层位中的矿体间,块状硫化物矿床硫同位素组成具有分组现象<sup>[12,31]</sup>。如前文所述,该矿床的硫同位素组成随

沉积层序向上而表现出逐步增大的趋势,与这种分组现象十分相似。本文认为,都龙矿床硫同位素组成的上述特征,反映了深部岩浆房和海水硫酸盐这两种不同源区所提供的硫,在热水沉积作用中可能存在动态的混合过程,总体上表现出随层序向上深部岩浆源硫所占比例逐步减少的趋势。

综上所述,尽管经历了变质作用和岩浆热液作用的叠加,但该矿床的硫同位素组成仍然保留了 Sedex 型矿床的一些特征,其硫应主要来源于热水沉积期间深部岩浆房和海水硫酸盐(两者可能存在混合机制)。当然,燕山期岩浆热液作用也有不容忽视的贡献,并且可能在区域变质作用下发生了一定程度的同位素均一化。

#### 4 结论

(1) 矿石和围岩的铅同位素地球化学特征表明矿石铅属于多源铅,主要来源于基底前寒武系变质岩和老君山花岗岩,含矿田蓬组变质岩也提供了一定的铅。

(2) 由矿石单矿物铷-锶等时线年龄为  $(76.7 \pm 3.3) \times 10^6 \text{a}$ , 反映矿床明显受到了花岗岩岩浆热液作用的叠加。而  $I_{\text{Sr}} = 0.71620 \pm 0.00598$  则与大陆壳古老硅铝质岩石的锶比值一致,表明锶主要来源于基底前寒武系变质岩。综合铅、锶同位素研究,本文认为成矿金属主要来源于基底前寒武系变质岩和老君山花岗岩。

(3) 硫同位素地球化学特征表明,硫主要来源于热水沉积期间深部岩浆房和海水硫酸盐,老君山花岗岩也提供了部分硫。

(4) 同位素地球化学特征反映了都龙锡锌多金属矿床的成矿物质具有多来源的特点,这与该矿床的形成经历了热水沉积、变质改造和岩浆热液叠加等几个阶段是吻合的。

野外工作和资料调研中,得到了云南省冶金厅、都龙锡矿、西南有色地勘局及其所属 317 队等单位的大力支持和帮助。在本文的完成过程和野外工作中,得到了战新志研究员、曾志刚研究员、冉清昌博士后的多方面帮助,在此一并致谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 宋焕斌、金世昌,滇东南都龙锡矿的控矿因素及区域找矿方向。云南地质,1987,6(4):298~304。
- [2] 宋焕斌,云南东南部都龙锡石-硫化物型矿床的成矿特征。矿床地质,1989,8(4):29~38。
- [3] 忻建刚、袁奎荣,云南都龙隐伏花岗岩的特征及其成矿作用。桂林冶金地质学院学报,1993,13(2):121~129。
- [4] 刘玉平,一个受后期改造和热液叠加的块状硫化物矿床—都龙超大型锡锌多金属矿床。矿物岩石地球化学通报,1998,17(1):22~24。
- [5] 刘玉平、李朝阳、王金良,都龙锡锌多金属矿床热水沉积成矿作用的确定。见:中国科学院地球化学研究所等编,资源环境与可持续发展——庆祝涂光炽院士从事革命及地学工作六十周年暨八十华诞。北京:科学出版社,1999,128~130。
- [6] 周建平、徐克勤、华仁民等,滇东南喷流沉积块状硫化物特征与矿床成因。矿物学报,1998,18(2):158~168。
- [7] 周建平、徐克勤、华仁民等,个旧等锡矿中沉积组构的发现与矿床成因新探。自然科学进展,1999,9(5):419~422。
- [8] Stacey J. S. and Kramers J. D., Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet Sci. Letters*, 1975, 26:207~221.
- [9] Ludwig K. R., ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic isotope data (Ver. 2.90). *US Geological Survey Open-File Report*, 1996, 91(445):1~47.
- [10] 云南省地质矿产局,云南省区域地质志(中华人民共和国地质矿产部专报—区域地质,第 21 号)。北京:地质出版社,1990,407~408,523~524。
- [11] Zartman R. E. and Doe B. R., Plumbotectonics-The model. *Tectonophys*, 1981, 75:135~162.
- [12] Large D. E., Sediment-hosted submarine exhalative lead-zinc deposits: a review of their geological characteristics and genesis. In: Wolf K H ed. *Handbook of stratabound and stratiform ore deposits*. Elsevier, Amsterdam, 1981, 9:469~508.
- [13] 韩发、孙海田, Sedex 型矿床成矿系统。地学前缘,1999,6(1):139~162。
- [14] 朱炳泉等,地球科学中同位素体系理论与应用—兼论中国大陆壳幔演化。北京:科学出版社,1998,216~235。
- [15] 韩发、赵汝松、沈建忠等,大厂锡多金属矿床地质及成因。北京:地质出版社,1997,108~157。

- [16] 高子英,云南主要铅锌矿床的铅同位素特征. 云南地质, 1997, 16(4):359~367.
- [17] 陈多福、马绍刚、董维权等,广东大降坪黄铁矿床的铅、铋同位素及金属成矿物质来源探讨. 矿床地质, 1998, 17(3):215~223.
- [18] Chen J. H., Wasserburg G. J., The U-Th-Pb systematics in hot springs on the Pacific Rise at 210 and Guaymas Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(11):2467~2479.
- [19] Zierenberg R. A., Koski R. A., Morton J. L. et al., Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough. *Economic Geology*, 1993, 88(8):2069~2098.
- [20] Halbach P., Hansmann W., Koppel V. et al., Whole-rock and sulfide lead-isotope data from the hydrothermal JADE field in the Okinawa back-arc trough. *Mineralium Deposita*, 1977, 32(1):70~78.
- [21] Baumann A., Lead and strontium isotopes in metalliferous and calcareous pelitic sediments of the Red Sea axial trough. *Mineral Deposita*, 1994, 29(1):81~93.
- [22] 张世涛、冯明刚、吕伟,滇东南南温河变质核杂岩解析. 中国区域地质, 1998, 17(4):390~397.
- [23] Liu Yuping, Li Chaoyang, Zeng Zhigang, The metallogenic epoch and ore-forming metal source of some large and super-large deposits in Laojunshan, Yunnan—Evidence from Rb-Sr isotopic studies. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (Supplement 2):30~32.
- [24] Burke W. H., Denison R. E., Hetherington E. A., et al., Variation of seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  throughout Phanerozoic time. *Geology*, 1982, 10(10):516~519.
- [25] Denison R. E., Koepnick R. B., Burke W. H., Construction of the Cambrian and Ordovician seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  curve. *Chemical Geology*, 1998, 152(3-4):325~340.
- [26] G. 福尔,同位素地质学原理,潘曙兰,乔广生译. 北京:地质出版社,1983:103.
- [27] Ohmoto H., Rye R. O., Isotopes of Sulfur and Carbon. In: Barnes H. L. ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: John Wiley and Sons, 1979, 509~567.
- [28] Sangster D. F., Sulfur and lead isotopes in strata-bound deposits. In: Wolf K. H. ed. *Handbook of stratabound and stratiform ore deposits*. Elsevier, Amsterdam, 1976, 2:219~266.
- [29] Rye R. O., Ohmoto H., Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: a review. *Economic Geology*, 1974, 69:826~842.
- [30] Shanks W. C., III, Bischoff J. L., Ore transport and deposition in the Red Sea geothermal system: a geochemical model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41:1507~1509.
- [31] Lusk J., Examination of volcanic-exhalative and biogenic origins for sulfur in the stratiform massive sulfide deposits of New Brunswick. *Economic Geology*, 1973, 67(1):169~183.

## ISOTOPIC CONSTRAINTS ON THE SOURCE OF ORE-FORMING MATERIALS OF DULONG Sn-Zn POLYMETALLIC DEPOSIT, YUNNAN

Liu Yuping Li Chaoyang

(Open Research Laboratory of Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

Gu Tuan

(Institute of Exploration and Development, Bureau of Liaohe Oil Field, Panjin 124010)

Wang Jinliang

(Section of Production Management, Dulong Tin Mine, Maguan 663701)

**Abstract**

Isotopic characteristics of the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit suggested that there should be several sources of its ore-forming material. Ore-forming metals may be mostly derived from pre-Cambrian metamorphic rocks and Laojunshan granite. Ore-forming sulfur may stem chiefly from seawater sulfate and Laojunshan granite. Regional metamorphism also offered some ore-forming material. The Rb-Sr isochron age indicated that this deposit had been superimposed by magmatic hydrothermalism in the late stage of the Yanshanian period.

**Key words:** Sn-Zn polymetallic deposit; isotope geochemistry; source of ore-forming material; Dulong; Yunnan