

广西大厂锡多金属矿床 S、Pb 同位素组成 对成矿物质来源的示踪

梁婷¹⁾, 王登红²⁾, 蔡明海³⁾, 陈振宇²⁾, 郭春丽²⁾, 黄惠民⁴⁾

1) 长安大学成矿作用及其动力学实验室, 西安, 710054; 2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037;

3) 广西大学资源与环境学院, 南宁, 530004; 4) 柳州华锡集团有限责任公司, 广西柳州, 545006

内容提要:为了查明广西大厂锡多金属矿床成矿物质来源, 本文对不同类型、不同产状矿体的硫、铅同位素的组成进行分析和对比研究。结果表明: 大厂不同类型或产状的矿体, 其成矿物质来源是相同的; 硫同位素特征显示, 锌铜矿体为典型的岩浆硫来源, 锡矿体为混合硫来源, 硫同位素比值的变化与成矿过程和环境有关, 反映深部来源成矿流体在由下向上的运移过程中, 有围岩组分的加入。铅同位素特征表明, 铅的来源主要为与岩浆作用有关的壳源铅, 但也有上地壳及壳幔混合来源的铅参与。

关键词: 成矿物质来源; 硫、铅同位素; 成矿过程; 大厂锡多金属矿床

广西大厂锡多金属矿床是我国重要的锡多金属基地, 研究程度较高、研究成果也颇多, 但在对矿床成因的认识上还存在分歧(蔡明海, 2006a; 王登红, 2004; 陈毓川, 1985, 1993; 章振根, 1976; 李锡林等, 1981; 张平, 1983; 叶绪孙, 1985; 梁珍庭等, 1985; 蔡宏渊等, 1983; 韩发等, 1997; 秦德先, 2002; 曾允孚等, 1982; 涂光炽, 1984, 1987; 陈骏, 1988; 丁悌平, 1988)。硫、铅同位素组成是衡量成矿物质来源的重要标志, 前人做了大量的测试分析, 共同的认识是: 矽卡岩型锌铜矿的成矿物质以岩浆来源为主, 而对于锡矿体尤其是层状锡矿体中成矿物质的来源, 存在着成矿物质来源于岩浆热液(陈毓川, 1993; 徐文炘, 1995)、围岩地层(韩发, 1997; 冼柏琪, 1984; 张哲儒, 1989; 高计元, 1999)或者岩浆和地层混合等不同认识。本文是在前人大量研究成果的基础上, 补充测定近年新开采地段或新发现矿体的代表性样品, 根据矿床的纵向分带特征, 从整体上, 通过对大厂不同类型矿体硫、铅同位素组成的对比研究, 重新探讨成矿物质来源, 为研究矿床成矿机制提供新资料。

1 地质概况

大厂锡多金属矿田位于南丹—河池(丹池)

NW 向褶皱断裂带的中段。矿田内褶皱紧闭, 断裂构造发育, 岩浆活动强烈, 围绕笼箱盖花岗岩体可划分为 3 个矿带: 东带以大福楼、亢马锡(锌)矿床为代表; 中带以拉么锌-铜矿、茶山钨-铋-铅矿为代表; 西带主要包括长坡-铜坑、巴黎-龙头山的高峰两个锡多金属矿区(蔡明海, 2006a), 是大厂主要的锡多金属矿产地, 也是本次研究的主要对象。

出露地层主要由泥盆系和石炭系碎屑岩-硅质岩-碳酸盐岩组成, 厚约 2500m。主要赋矿地层为泥盆系, 岩性自下而上为: 中泥盆统下部纳标组(D_2^n)黑色泥岩、页岩, 在龙头山一带为生物礁灰岩, 厚约 800m; 中泥盆统上部罗富组(D_2^l)粉砂岩、泥岩夹泥质灰岩, 厚约 480m; 上泥盆统下部榴江组(D_3^l)硅质岩, 含钙质结核, 厚 40~220m; 上泥盆统中部五指山组(D_3^w), 底部为宽条带灰岩, 向上依次为细条带灰岩、“小扁豆”灰岩和“大扁豆”灰岩, 厚 120~180m; 上泥盆统上部同车江组(D_3^t)泥灰岩及底部黑色页岩, 厚 350~450m。矿田构造以 NW 向的龙箱盖背斜和龙箱盖断裂以及与之平行的大厂背斜、大厂断裂为主。

区内岩浆岩主体出露于矿田中部的龙箱盖地区, 地表分布面积仅 0.5km², 经钻孔和坑道揭露, 地表出露的岩体向下成为一个巨大的隐伏岩株, 并延

注: 本文为中国地质调查局“我国西部重要成矿区带矿产资源潜力评估”项目(编号 200420190004)、“全国重要矿产和区域成矿规律研究”项目(编号 1212010633903), 国家危机矿山接替资源勘查项目(编号 200545022)的成果。

收稿日期: 2008-01-30; 改回日期: 2008-03-20; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 梁婷, 女, 1967 年生。副教授, 从事岩石和矿床学的教学和科研工作。通讯地址: 710054, 西安市雁塔路 126 号长安大学资源学院; 电话: 029-82339100; Email: liangt@chd.edu.cn。

位于拉么与长坡-铜坑之间的矽卡岩型锌铜矿体主要赋存于 D_2^2 的钙质泥岩、泥灰岩中泥盆统罗富组的钙质泥岩、泥灰岩中,矿体以层状、似层状产出,主要由 94 号、95 号、96 号三个矿体组成,以目前新发现的 96 号矿体的规模最大,矿体的控制长度大于 1600m,厚度 2.4~32.28m, Cu 平均品位 0.08%~0.11%, Zn 平均品位 2.23%~8.15%, Sn 平均品位 0.04%~0.22%。矿物组成较为简单,矿石矿物主要为闪锌矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿、黄铁矿等,脉石矿物主要为钙铁榴石、透辉石、透闪石、硅灰石、符山石、绿帘石、绿泥石、方解石等。该矿体由铜坑矿深部 305 中段向东北方向经大树脚一直可以延伸到拉么锌铜矿。

高峰矿区 100 号矿体赋存于中泥盆统纳标组礁灰岩的礁盖层与礁体之间接触带和深部礁灰岩中的断裂带内。按照矿体产出部位,主要产于大厂背斜轴部礁骨架灰岩内,矿体形态上呈不规则狭长“带状”、“舌状”展布,总体上呈向西突出的新月形,局部呈厚大的透镜状体(图 2)。矿体分为上下两部分,0m 水平以上为 100 号矿体,矿体延长达 1240m,厚度 7~25m,中心部位厚达 33m,平均厚度 14.46m。矿体产状 $340^{\circ}\sim 70^{\circ}\angle 38^{\circ}\sim 80^{\circ}$;0m 水平以下为 105 号矿体,是 100 号矿体的深部延伸,目前开采到海拔-180m,产状发生明显的变化,但矿体的延伸不详。

按照矿体的产出特征和矿物的共生组合,将大厂锡多金属矿床划分为两个主要成矿期,即矽卡岩型锌铜矿体成矿期和锡矿体成矿期。

2 样品及测试方法

大厂矿床的硫、铅同位素,前人做了大量的工作(韩发等,1997;陈毓川等,2003;秦德先等,2002;丁悌平,1988,1997;高计元,1999)。本次搜集了文献中报道的闪锌矿硫同位素数据 74 件、铅同位素数据 50 件,并从新发现矿段或矿体中选择硫同位素样品 5 件、铅同位素样品 13 件进行了补充测试。其中,闪锌矿的硫同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成。样品以 Cu_2O 作氧化剂制备测试样品,用 MAT-251 质谱仪测定,采用 VCDT 国际标准,分析精度好于 $\pm 0.2\%$ 。铅同位素分析在中国地质科学院地质研究所同位素室完成。人工选取新鲜的矿石和岩石,破碎过筛,硫化物是在双目镜下人工挑选,纯度 98%。在玛瑙研钵中磨到 < 200 目。根据样品采用不同的酸溶液溶解,全岩采用 $HF + HNO_3$,硫化物采用 HNO_3 或 HCl 等,然后过阴离子

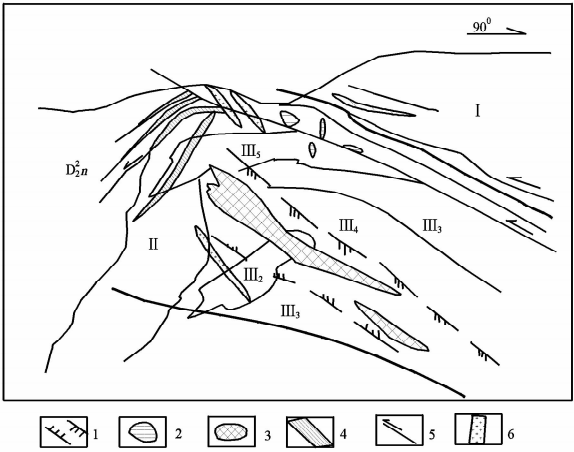


图 2 礁灰岩中 100 号矿体横向剖面图
(据刘缔珍,1987)

Fig. 2 Cross profile map of No. 100 orebody in the reef limestone(after Liu Dizhen, 1987)

1—细脉、微细脉;2—鸡窝状矿体;3—缓倾斜似层状矿体;4—裂隙脉状矿体;5—压性断裂;6—花岗斑岩墙; I—盆地相; II—礁前相; III₂—下部礁核相; III₃—礁坪相; III₄—泻湖相; III₅—上部礁骨架
1—Stringer; 2—henhouse orebody; 3—lower slope stratabound orebody, 4—stockworks orebody; 5—compression fault; 6—granite porphyry dike; I—basin facies; II—reef front facies; III₂—lower reef core facies; III₃—reef flat facies; III₄—lagoon facies; III₅—upper reef skeleton

交换树脂提取 Pb, 蒸干后以 1% HNO_3 稀释, 备质谱测试。所用的仪器为英国 Nu Instrument HR 公司生产的高分辨多接受器等离子质谱仪(MC-ICPMS)上进行。在测定样品之前, 用 NBS981 标准校准仪器, 测定过程中, 随时测定 NBS981 来监测仪器, 样品的测定条件和 NBS981 相同, 每一组数据由 20 个扫描构成, Hg 干扰通过测定 202 扣除。NBS981 长期测定结果为年 $^{208}Pb/^{206}Pb$ 为 2.1674 ± 0.0004 , $^{207}Pb/^{208}Pb$ 为 0.91478 ± 0.00018 , $^{206}Pb/^{204}Pb$ 为 16.9402 ± 0.0007 , $^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 15.4966 ± 0.0030 , $^{208}Pb/^{204}Pb$ 为 $36.7155 \pm 0.012(\pm 2\sigma)$ 。

3 硫同位素地球化学

对 79 件闪锌矿样品 S 同位素数据统计表明(表 1):

(1)长坡-铜坑锡矿体中闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 为 2.6‰~ -7.9‰, 平均为 -3.43‰, 其中层状矿体中条带状矿石中闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 值为 2.6‰~ -7.5‰, 平均

表 1 大厂不同类型矿体中闪锌矿的硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotope composition of Sphalerite of different orebodies in Dachang deposit

矿体		样号	采样位置	$\delta^{34}\text{S}(\text{‰})$	资料来源	
脉状	0 号脉	Dch-22	长坡 595 中段 2 号线,黄铁矿-闪锌矿-硫盐-锡石	-2.8	陈毓川等(1993)	
		Dch-23	长坡 595 中段 4 号线,黄铁矿-闪锌矿-硫盐-锡石	-5		
		Dch-24	长坡 595 中段 1 号线,黄铁矿-闪锌矿-硫盐-锡石	-7.1		
		Dch-34	长坡 550 中段 2 号线,黄铁矿-闪锌矿-锡石脉	-3.7		
		Dch20-1	长坡 635 中段,闪锌矿-黄铁矿粗晶体	-4.3		
		DC38	长坡 685 中段,硫化物、硫盐、锡石、方解石、石英	-3.8	韩发等(1997)	
		DC43	长坡 595 中段,硫化物、硫盐、锡石、方解石、石英	-3.4		
		DC29	长坡 550 中段,硫化物、硫盐、锡石、方解石、石英	-7.9		
	DC50	长坡 505 中段,硫化物、硫盐、锡石、方解石、石英	-2.9			
	38 号脉	Dch-14	长坡 685 中段,粗晶黄铁矿-闪锌矿-方解石	-8.2	陈毓川等(1993)	
		Dch-15	长坡 685 中段,粗晶闪锌矿-黄铁矿	-9.3		
		Dch21-2	长坡 635 中段,黄铁矿-锡石-方解石	-2.7		
		Dch25-2	长坡 595 中段 3 号线,黄铁矿-闪锌矿-硫盐	-3.7		
		Dch38-2	长坡 505 中段 4 号线 38 号脉,闪锌矿-黄铁矿-锡石	-4.4		
		Dch-1	长坡 505 中段 0 号线,闪锌矿-磁黄铁矿	-3.9		
Dch32-1		长坡 505 中段 0 号线,黄铁矿-闪锌矿	-7.2			
DC7	长坡 550 中段,大脉状矿石	-9.0	丁悌平(1988)			
75 号	Dch18-1	635 中段 0 号线,脆硫锑铅矿-锡石-黄铁矿-闪锌矿	-4.6	陈毓川等(1993)		
	DC51	505 中段,条带状黄铁矿	-3.7	韩发等(1997)		
91 号矿体	层状矿体	DT1-4	铜坑 405 中段,闪锌矿沿层交代灰岩	-1.9	陈毓川等(1993)	
		DT-6	铜坑 405 中段,闪锌矿-毒砂沿层交代灰岩	0.7		
		DT-5	铜坑 405 中段,方解石-闪锌矿-锡石-毒砂沿层交代	-0.1		
		T8833	铜坑 405 中段 18 号穿脉,条带状闪锌矿	-6.5	韩发等(1997)	
	脉状矿体	D T11	铜坑,405 中段,硫化物-锡石脉	-7.3	丁悌平(1997)	
		D T19	铜坑,405 中段,毒砂-石英脉	-2.2		
92 号矿体	层状矿体	Dch-30	长坡 550 中段 2 号线,黄铁矿	-5.3	陈毓川等(1993)	
		Dch-45	长坡 358 中段,黄铁矿-硫盐-方解石-锡石	-1.2	丁悌平(1997)	
		DT 32	铜坑,595 中段,硫化物结核	-3.2		
		DC-15	长坡 550 中段,条带状黄铁矿	-1.6	韩发(1997)	
		B-81	455 中段 17 号穿脉,黄铁矿闪锌矿矿石	1.66		
		CHP39	505 中段 10 号线,致密块状矿石	-4.3		秦德先等(2002)
		CHP75	505 中段 12~14 号穿脉,致密块状矿石	-0.1		
		CHP57	505 中段 16~18 号穿脉,致密块状矿石	-5.1		
	DCH17-47	455 中段 17 号穿脉,致密块状矿石	1.4			
	网脉状、 细脉状 矿石	B-84	455 中段 8 号穿脉,脉状多金属硫化物矿石	-2.68	韩发等(1997)	
		DC3	长坡 550 中段,硫化物-锡石脉	-4.6		
DC10		长坡 550 中段,硫化物脉	+2.3			
小扁豆	条带状矿石	DT9029	铜坑 446 中段 22 号穿脉,条带状闪锌矿	+2.6	韩发等(1997)	
灰岩		DT905	铜坑 405 中段 18 穿脉,条带状闪锌矿	-3.4		
宽条带灰岩		T8816	铜坑,405 中段 28 号穿脉,条带状闪锌矿	-6.8		丁悌平(1997)
		T1	铜坑 405 中段 22-1 穿脉,条带状矿石	+1.1		
		DC34	长坡 685 中段,条带状矿石	-2.3		
		DT9	铜坑 405 中段,条带状矿石	-5.9		
		DT10	铜坑 405 中段,条带状矿石	-7.5		
裂隙脉矿化			DC 35	长坡 685 中段,硫化物-硫盐-方解石脉	-3.1	韩发等(1997)
	DT31		铜坑 595 中段,锡石-石英-硫化物脉	+1.3		
	DT44		铜坑 685 中段,硫化物-硫盐-方解石脉	-5.4		
	DT47		铜坑 685 中段,硫化物-硫盐-方解石脉	-2.8		
	DT50		铜坑 685 中段,硫化物-硫盐-方解石脉	-1.4		
		DT-9	595 中段,黄铁矿-毒砂-锡石脉	-5	陈毓川等(1993)	
		DCH-37-2	505 中段(围岩),黄铁矿闪锌矿-锡石	-5.3		
		DCH-37-2	505 中段(围岩),黄铁矿闪锌矿-锡石	-2.1		
	DCH-37-2	505 中段(围岩),黄铁矿闪锌矿-锡石	-1.6			

续表 1

矿体		样号	采样位置	$\delta^{34}\text{S}\text{‰}$	资料来源
100 号矿体	540 水平	G924	磁黄铁矿+闪锌矿+黄铁矿+毒砂	+8.0	韩发等(1997)
		G929	磁黄铁矿+闪锌矿+黄铁矿+毒砂+锡石	+8.4	
		G9211	磁黄铁矿+闪锌矿+毒砂	+9.8	
		G9214	磁黄铁矿+闪锌矿+黄铁矿+毒砂±锡石	+10.4	
		G9224	磁黄铁矿+闪锌矿+黄铁矿±锡石	+10.0	
		G9226	磁黄铁矿+闪锌矿+黄铁矿+毒砂+锡石	+10.1	
		DC-G-7	闪锌矿+磁黄铁矿+ 毒砂+锡石	+7.3	
		DC-G-8	磁黄铁矿+闪锌矿+脆硫锑铅矿	+7.3	
		DC-G-11-1	磁黄铁矿+闪锌矿+黄铁矿	+7.5	
	450 水平	DC-G-28	磁黄铁矿+闪锌矿+ 黄铁矿+毒砂+脆硫锑铅矿+锡石	+9.6	
		DC-G-28-1	磁黄铁矿+闪锌矿+毒砂	+9.4	
		DC-G-31	磁黄铁矿+闪锌矿+ 黄铁矿+脆硫锑铅矿+锡石	+10.9	
		DC-G-33-1	磁黄铁矿+毒砂+黄铁矿+闪锌矿+脆硫锑铅矿+锡石	+9.1	
		DC-G-33-2	磁黄铁矿+毒砂+黄铁矿+脆硫锑铅矿+闪锌矿+锡石	+11.9	
		DC-G-35	磁黄铁矿+脆硫锑铅矿+闪锌矿+ 黄铁矿+毒砂	+12.5	
	75 水平	GF75-1	磁黄铁矿+脆硫锑铅矿+闪锌矿+ 黄铁矿+毒砂+锡石	12	本文
	120 水平	GF-6	磁黄铁矿+脆硫锑铅矿+闪锌矿+ 黄铁矿+毒砂+锡石	11.1	
锌铜矿体	拉么	L-2	650 中段 1 号矿体	-1.6	陈毓川等（1993）
		L-3	530 中段 0 矿体	0.1	
		L-7	500 中段 3 矿体	0.5	
		L-11	530 中段 5 矿体	1.6	
		L-12	530 中段 1 矿体	0.4	
		L-20	500 中段	2.5	
		LM560-3	560 中段块状锌铜矿体	-2.4	
	大树脚	ZK1507-16	785 米处 96 号锌铜矿体	-4.3	
铜坑深部	DTK355-2	铜坑 355 中段 96 号锌铜矿体	-6.1		

为-2.29‰,脉状矿体为 2.3‰~-9.3‰,平均为-4.11‰。总体上,层状与脉状矿体的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围基本一致(图 3),说明它们可能具有相同的来源。

(2)长坡-铜坑锡矿体的分布由下到上具有明显的分带性。统计结果显示,不同矿体间 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变

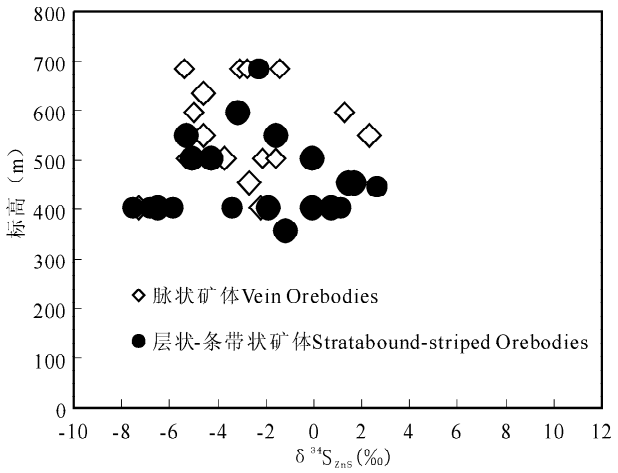


图 3 层状-条带状矿体与脉状矿体中闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成

Fig. 3 Sulfur isotope composition of Sphalerite of Stratabound-striped and vein orebodies

化也具有一定的规律性,由下部 92 号网脉状-似层状矿体到上部大脉状矿体(图 4),或者在单一矿体中,如 92 号矿体,不同标高闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值(图 5),均显示由下部向上部, $\delta^{34}\text{S}$ 值降低的变化规律。同时,无论层状-条带状矿体由深部硅质岩中 92 号矿体→宽条带灰岩中层状矿体→细条带灰岩中的 91 号矿体→层面脉状矿体→大脉状,还是脉状矿体由小扁豆灰岩中矿体→细裂隙脉矿体→大脉状矿体, $\delta^{34}\text{S}$ 值也是趋于降低的(图 6)。

(3)矽卡岩型锌铜矿体中闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为-6.1‰~0.1‰,平均为-1.03‰,与龙箱盖黑云母花岗岩一致(何海州,1996), $\delta^{34}\text{S}$ 值从矿体的下部到上部是降低的(图 7)。同时,由近龙箱盖花岗岩体的拉么锌铜矿(LM560-3)→向南西至大树脚 96 号锌铜矿体(ZK1507-16)→再向西至铜坑深部的 96 号矿体(DTK355-2),其闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 呈现降低趋势(图 8)。

(4)100 号矿体以块状矿石为主,硫同位素组成与长坡-铜坑锡矿体和锌铜矿体显著不同。 $\delta^{34}\text{S}$ 均以正值出现,17 个闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 7.3‰~12.5‰,大多数在 8.1‰~10.1‰,平均 9.72‰,远高于前两者,但 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化是一致的,即由深部到

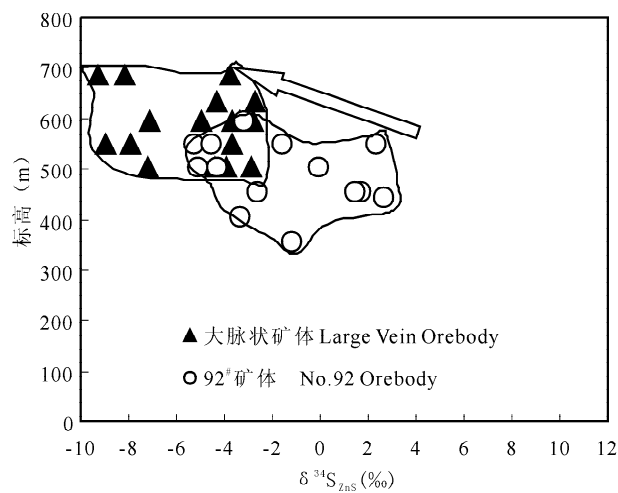


图 4 铜坑不同标高闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 组成
Fig. 4 Sulfur isotope composition of Sphalerite of different height in Tongkeng deposit

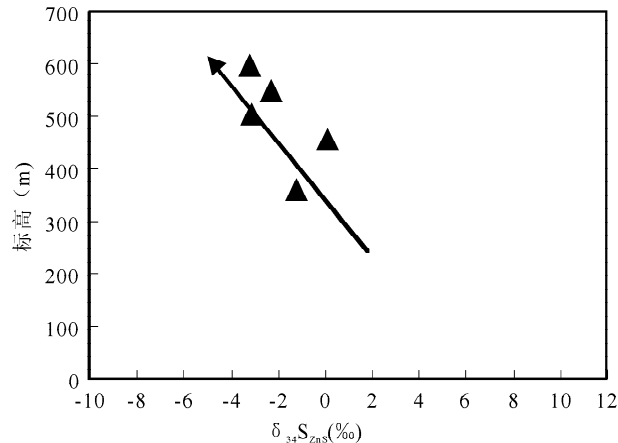


图 5 92 号矿体中闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 随高度的变化
Fig. 5 Variation with height of $\delta^{34}\text{S}$ values of sphalerite in No. 92 orebody

浅部, $\delta^{34}\text{S}$ 值是降低的(图 9)。

综上所述,矿床中不同类型矿体的硫同位素组成,从数据本身来看,似乎并不完全相同,但是从赋矿地层或矿体的空间分布上对比, $\delta^{34}\text{S}$ 值显示出的变化规律却是一致的,即:从矿床的下部到上部, $\delta^{34}\text{S}$ 值是趋于减少的(图 10)。这样的变化规律反映了成矿物质自下而上的运移过程。

4 铅同位素地球化学

对本次测定的结果(表 2)和文献资料中 50 件样品的统计结果显示:

龙箱盖花岗岩全岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的变化范围为 19.462 ~ 20.02, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.75 ~

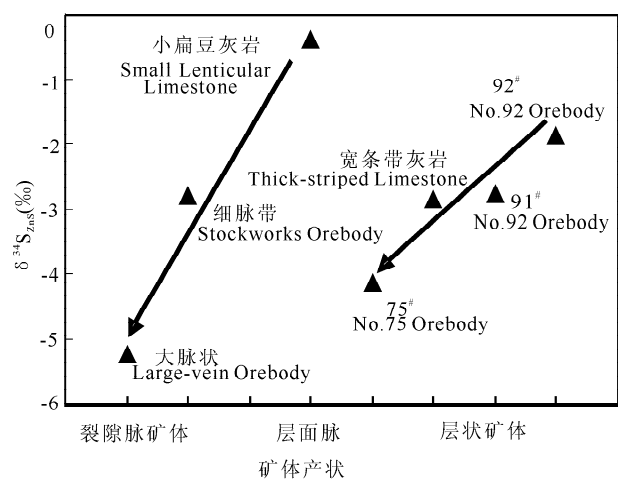


图 6 不同矿体中闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 变化趋势
Fig. 6 Variation trend of $\delta^{34}\text{S}$ values of sphalerite in different orebodies

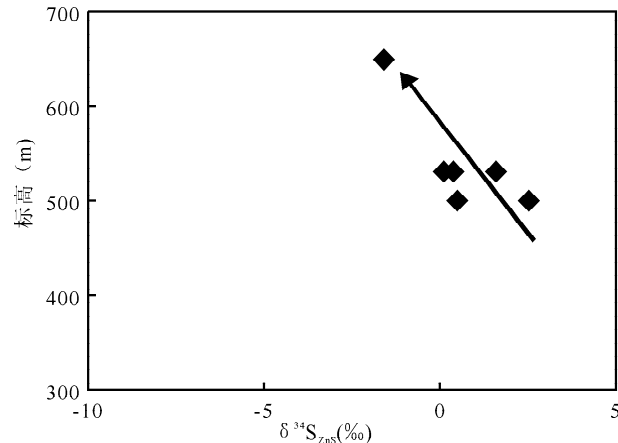


图 7 拉么锌铜矿体中闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 随高度的变化
Fig. 7 Variation of $\delta^{34}\text{S}$ values of phalerite with height in Lamo zinc-copper orebody

15.788, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 39.076 ~ 39.241, 计算得出的特征参数 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 Th/U 分别为 9.68 ~ 9.71、33.04 ~ 37.40 和 3.29 ~ 3.74; 其中钾长石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 18.345 ~ 18.403, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.964 ~ 16.1, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.739 ~ 39.315, 特征参数 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 Th/U 分别为 10.19 ~ 10.48、38.41 ~ 43.91 和 3.55 ~ 4.17; 东岩墙花岗斑岩、西岩墙闪长玢岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围分别为 18.975 和 18.801, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 15.685 和 15.69, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 38.762 和 38.808。特征参数 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 Th/U 分别为 9.59、35.69、3.60 和 9.59、36.71、3.70。相比而言,黑云母花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值高于后两者,说明

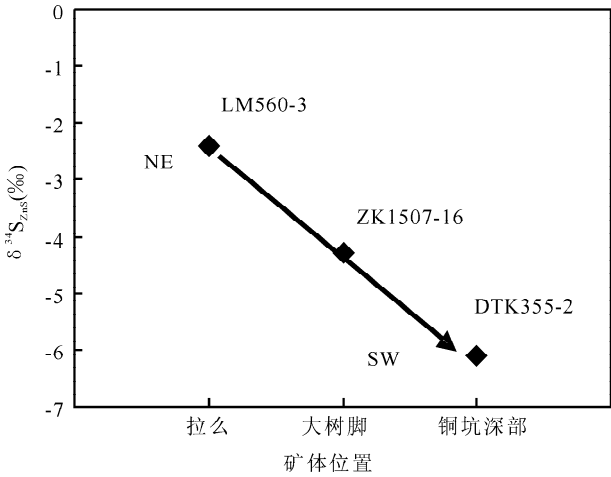


图 8 从 NE 到 SW 方向锌铜矿体中闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 变化趋势

Fig. 8 Variation trend of $\delta^{34}\text{S}$ values of sphalerite from NE to SW in zinc-copper orebody

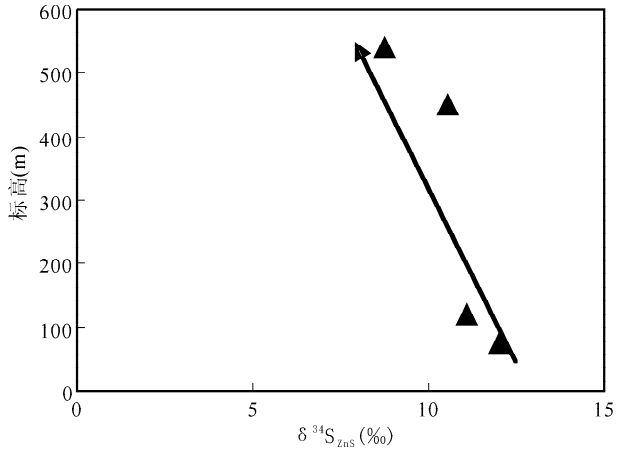


图 9 100 号矿体闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 随高度的变化

Fig. 9 Variation of $\delta^{34}\text{S}$ values of sphalerite with height in the No. 100 orebody

表 2 大厂矿床不同矿体的铅同位素组成及相关参数

Table 2 Lead isotope composition and characteristic parameters of different orebodies in the Dachang deposit

样品号	采样地点及样品名称				对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
LM-1	拉么 560 中段,电气石细粒花岗岩				全岩	19.462	15.755	39.076	0.809
LM-2	拉么 560 中段中粒含斑黑云母花岗岩					19.106	15.75	39.241	0.824
LM-3	拉么 560 中段,粗粒黑云母花岗岩					20.02	15.788	39.124	0.789
TK455-26	铜坑 505m 中段。190 号块状矿石				闪锌矿	18.537	15.7269	38.8616	0.8484
GF-75-3	75 中段				闪锌矿	18.6413	15.7379	38.9976	0.844245
GF-6	100-150 中段之间				闪锌矿	18.694	15.7364	39.0185	0.841788
LM560-2	拉么条带状锌铜矿石				闪锌矿	18.5152	15.7072	38.9385	0.848344
LM560-3	拉么块状锌铜矿石				闪锌矿	18.5052	15.7056	38.9509	0.848709
ZK1507-23	大树脚 96 号锌铜矿体				闪锌矿	18.5537	15.714	38.9893	0.846943
ZK1507-16	大树脚 96 号锌铜矿体				闪锌矿	18.45	15.6816	38.7849	0.849949
DTK355-2	铜坑 355 中段锌铜矿				闪锌矿	18.4966	15.7146	38.9173	0.849593
DTK305-1	铜坑 305 中段含矿化砂卡岩				全岩	18.7503	15.7188	39.1192	0.83832
样号	t(Ma)	$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$	$^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$	Th/U	V1	V2	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
LM-1	-409	9.68	35.07	3.51	91.96	94.02	121.40	27.44	42.85
LM-2	-150	9.69	37.40	3.74	86.87	74.83	100.89	27.15	47.25
LM-3	-790	9.71	33.04	3.29	107.28	121.32	153.56	29.63	44.12
TK455-26	232	9.70	38.76	3.87	80.31	62.06	85.96	26.61	47.27
GF-75-3	171	9.71	38.83	3.87	81.74	62.89	87.24	27.06	48.24
GF-6	132	9.70	38.61	3.85	80.68	63.27	87.22	26.79	47.06
LM560-2	223	9.66	39.01	3.91	80.99	59.26	84.02	25.29	48.97
LM560-3	229	9.66	39.10	3.92	81.42	58.86	83.85	25.21	49.54
ZK1507-23	204	9.67	39.06	3.91	81.78	59.79	84.76	25.65	49.49
ZK1507-16	239	9.62	38.50	3.87	76.75	57.96	81.43	23.69	45.52
DTK355-2	246	9.68	39.10	3.91	81.66	59.87	84.70	25.88	49.39
DTK305-1	69	9.66	38.53	3.86	79.95	61.49	85.66	25.38	47.02

注:计算参数: $a_0=9.307$, $b_0=10.294$, $c_0=29.746$, $\lambda(^{238}\text{U})=1.55125\times 10^{-10}\text{a}^{-1}$, $\lambda(^{235}\text{U})=9.8485\times 10^{-10}\text{a}^{-1}$, $\lambda(^{232}\text{Th})=4.9475\times 10^{-10}\text{a}^{-1}$,地球年龄 $t=44.3\times 10^8\text{a}$ (据 Doe,1974)

岩浆活动由早期到晚期,放射性成因的铅含量降低。长坡—铜坑矿床不同产状矿体中铅同位素的组

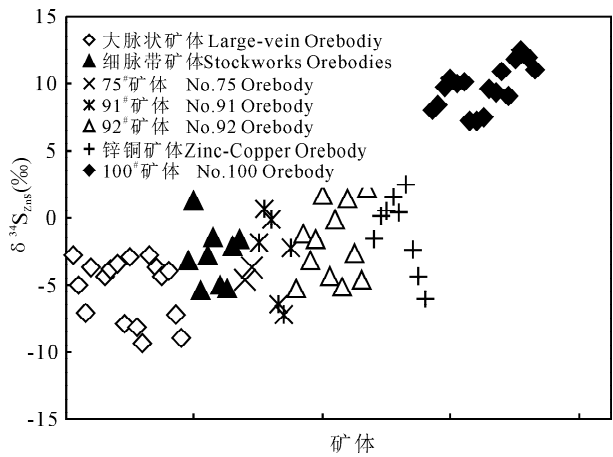


图 10 大厂矿床不同矿体中 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化

Fig. 10 Variation trend of $\delta^{34}\text{S}$ values of the different orebodies in Dachang deposit

成是相似的。矿床上部大脉状矿体中硫化物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为 18.482~18.73, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.689~15.937, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.365~39.393,特征参数 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 Th/U 分别为 9.63~10.09、38.37~42.54、3.85~4.09;细裂隙脉状矿体的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为 18.525~18.675, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.693~15.792, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.795~39.050;特征参数 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 Th/U 分别为 9.63~9.82、37.77~39.91、3.86~3.93,与大脉状矿体一致;层状-条带状矿体的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为 18.05~18.549, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.58~15.762, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.56~38.948,特征参数 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 Th/U 分别为 9.09~9.77、36.49~39.38、3.75~4.14,与大脉状、细裂隙脉状矿体也基本一致;矿床中矽卡岩型锌铜矿体 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为 18.45~18.7503, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.6816~15.7188, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.7849~39.1192,特征参数 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 Th/U 分别为 9.62~9.68、38.50~39.10、3.86~3.92;100 号矿体中块状矿石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为 18.6~18.721, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.64~15.775, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.148~39.148,特征参数 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 、 Th/U 分别为 9.52~9.77、37.53~39.35、3.80~3.90。

将岩石和矿石矿物的铅同位素组成投影到 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 11、图 12)中,可见矿体的铅同位素组成(除了丁悌平(1988)年测定的四个采自层状锡矿体的

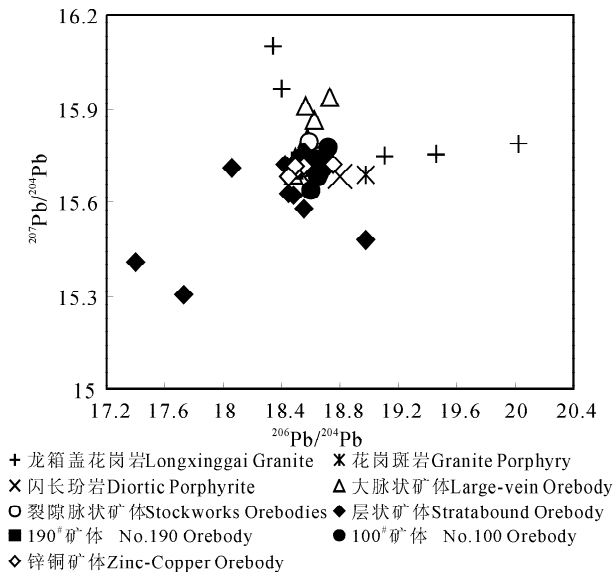


图 11 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解

Fig. 11 Diagram of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

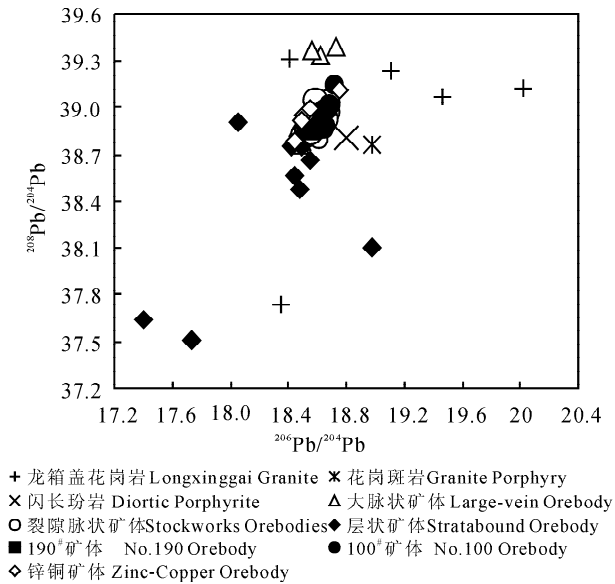


图 12 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解

Fig. 12 Diagram of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

样品外),其他矿体(包括长坡-铜坑脉状、层状-条带状锡矿体、龙头山 100 号锡矿体以及拉么矽卡岩型锌铜矿体)的投影点相对集中,并呈现一定的线性关系,暗示他们可能具有相同的来源或演化历史,龙箱盖花岗岩体全岩放射性成因铅的含量高于其中钾长石铅的含量,可能与全岩样品中强烈的次生变化有关。

5 讨论

在热液矿床中,由于热液成矿作用中固-液相间

的同位素分馏,热液形成的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般并不等于热液总的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,而是总硫同位素组成、 $f\text{O}_2$ 、pH、离子强度和温度的函数。即 $\delta^{34}\text{S} = f(\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}, f\text{O}_2, \text{pH}, I, T)$, 并且这种影响在高温 ($> 400^\circ\text{C}$) 和中—低温 ($< 300^\circ\text{C}$) 条件下是不同的。因此,热液矿物的硫同位素组成不仅取决于源区物质的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,而且取决于含硫物质在热液中迁移和矿物沉淀时的物理化学条件(Ohmoto, 1972; 韩吟文, 2003)。热液总硫的同位素组成表示为: $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = \delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}} \times \chi_{\text{H}_2\text{S}} + \delta^{34}\text{S}_{\text{HS}^-} \times \chi_{\text{HS}^-} + \delta^{34}\text{S}_{\text{S}^{2-}} \times \chi_{\text{S}^{2-}} + \delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4^{2-}} \times \chi_{\text{SO}_4^{2-}} + \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{SO}_4} \times \chi_{\Sigma\text{SO}_4}$ 。式中 $\chi_{\text{H}_2\text{S}}$ 为溶液 H_2S 相对于总硫的摩尔分数,即 $\chi_{\text{H}_2\text{S}} = n(\text{H}_2\text{S}) / n(\Sigma\text{S})$ 。在大厂矿区主要的矿石矿物为硫化物,硫元素主要以硫化物形式出现,基本上未见有硫酸盐类矿物。根据上述公式,可以认为大厂闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以近似地代表成矿流体中的总硫同位素值。

矿床中硫来源是多样的,大致可以分为三类,即地幔硫、地壳硫、混合硫(韩吟文, 2003)。徐文忻(1995)根据 600 多件样品硫同位素数据统计,把我国锡矿床硫源分为岩浆来源、岩浆和地层的混合来源,指出典型岩浆硫来源矿床的溶液全硫同位素组成为 $-2\text{‰} \sim +6\text{‰}$; 混合来源硫 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 较大,一般大于 $+12\text{‰}$, $\delta^{34}\text{S}_i$ 有较大的正值,变化范围较大。

本次测定的长坡-铜坑矿床的矽卡岩型锌铜矿体中闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-6.1\text{‰} \sim 0.1\text{‰}$, 平均为 -1.03‰ , 与龙箱盖黑云母花岗岩的 -1.0‰ 一致(何海州, 1996), 矿体中的硫为岩浆硫来源。锡矿体

中,无论是层状还是脉状矿体,闪锌矿的硫同位素变化范围是基本一致的,从 $2.6\text{‰} \sim -7.9\text{‰}$, 平均 -3.43‰ , 而龙头山 100 号矿体中闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $7.3\text{‰} \sim 12.5\text{‰}$, 大多数在 $8.1\text{‰} \sim 10.1\text{‰}$, 平均 9.72‰ , 二者差别较大,难以理解为单一来源。但对比分析发现,长坡-铜坑锡矿体位置上远离龙箱盖隐伏岩体,在层位中位于矽卡岩型锌铜矿体之上,与锌铜矿相比,轻硫富集。 $\delta^{34}\text{S}$ 值由龙箱盖花岗岩 $\rightarrow$ 矽卡岩型锌铜矿 $\rightarrow$ 铜坑锡多金属矿体是降低的,重硫减少,轻硫富集,这种变化趋势与不同类型或产状的矿体中或单一矿体内部的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化是一致的,说明物质来源与锌铜矿体一样,与下部隐伏岩体有关。同位素组成的变化反映了成矿物质在由下向上运移的过程中,由于成矿的物理、化学条件的变化,导致轻、重同位素存在分馏效应。成矿早期矽卡岩型锌铜矿阶段以岩浆硫为主,锡矿形成阶段可能有地层硫的加入,为混合硫。同时,也表明,矿床成矿系列中各成因类型间的内在联系跟成矿的整个历史过程有关,表面上并不相同的一些特征(如 $\delta^{34}\text{S}$) 是有其历史原因的,它们是各个阶段的产物,但本质上与统一的成矿作用有关。由此推测,如果在铜坑的深部找矿,找到矽卡岩型及云英岩型、高温气化热液型的可能性较大,此时如有闪锌矿,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值可能高于长坡-铜坑锡矿体。100 号矿体重硫富集的原因则很可能是由于礁灰岩中的微晶石膏提供了硫之故(陈毓川, 1993)。

不同类型不同产状矿体中铅同位素组成相近,说明他们具有相同的来源或演化历史。Doe 和

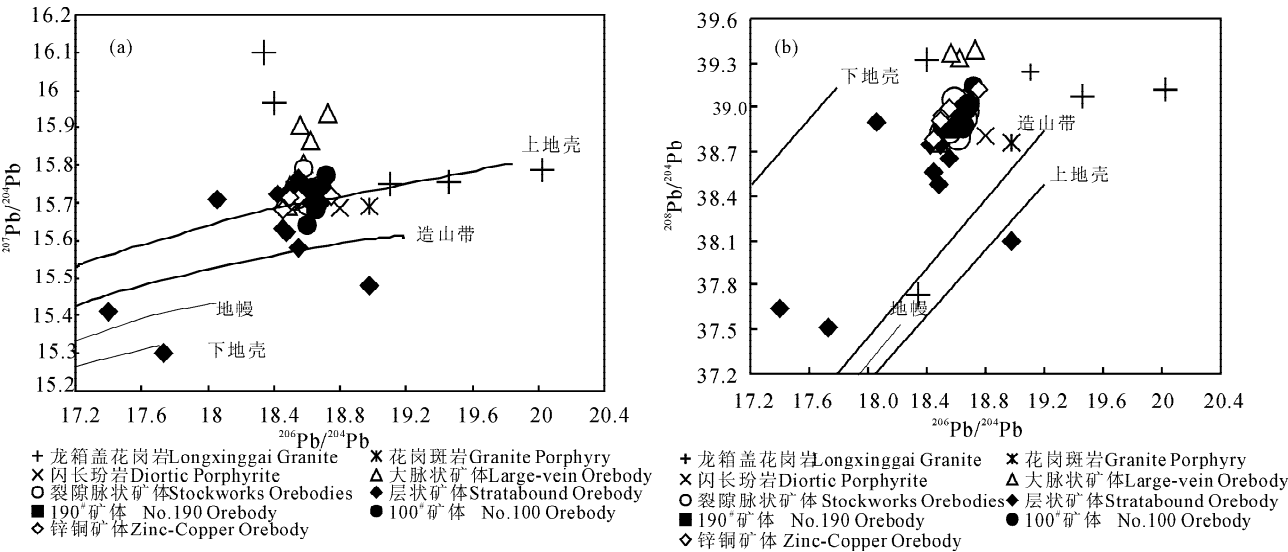


图 13 大厂矿床铅同位素构造模式图
Fig. 13 Plumbotronics model of lead isotope in Dachang deposit

Zartman(1979,1981)在研究世界上各类矿床大量铅同位素数据的基础上,提出把铅同位素与地质环境和时间联系起来的构造模式,根据同位素比值投影点的分布特征及与不同地质单元平均演化曲线的关系判断成矿物质的来源。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 13a)上,不同矿体中硫化物的数据主要落在上地壳,部分落在上地壳与造山带演化曲线之间; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(图 7. 13b),数据落在下地壳与造山带演化曲线之间,表明矿体中铅主要为地壳来源,但也有地幔组分的加入。

朱炳泉(1998)根据不同成因类型岩石铅资料和已知成因的矿石铅资料,给出了不同成因类型矿石矿物的 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 变化范围图解(图 14)。该模式消除了时间因素的影响,理论上比那些全球性的演化模式有更好的示踪意义(郑明华,2001)。将大厂不同类型矿体的铅同位素数据投影到图 14 中可见,除了丁梯平(1988)测定的三个采自层状矿体的样品投影到造山带铅和幔源铅范围外,其它几乎所有的样品均落入到上地壳铅和上地壳和地幔混合的俯冲铅范围,表明矿床中铅主要与岩浆作用有关,来自上地壳及地壳与地幔混合的源区。

按照单阶段演化模式计算的模式年龄,59 件样品中矿石矿物的模式年龄变化较大,锡矿体硫化物的模式年龄在 39~342Ma 之间,100 号锡矿体在 93~172Ma,锌铜矿体中闪锌矿的模式年龄为 239~246Ma,矽卡岩全岩模式年龄为 69Ma,岩体中钾长石的模式年龄为 590~765Ma,其余样品显示负模式年龄。矿石与岩体等在模式年龄上的较大差异,也从另一个角度反映铅同位素的组成并非是正常铅,铅可能是混合来源。

6 结论

大厂矿区不同类型矿体的硫的主要来源是相同的,而且,同位素值的变化与成矿过程密切相关,具体表现为由龙箱盖花岗岩体→矽卡岩型锌铜矿体→锡多金属矿体 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有逐渐降低的趋势,这种变化与 $\delta^{34}\text{S}$ 值在同一类型或同一产状矿体中的变化是一致的,反映了相同来源的成矿流体在自下而上迁移的过程中硫同位素的演化机制是一致的,并且是有规律性的,即:大厂矿床中的硫早期以岩浆硫源为主,后期为混合硫源。这种规律性的变化,与矿物的分带、成矿元素的分带规律也是一致的,因而对于地质找矿也是具有指导意义的。龙头山(高峰)100 号矿体中重硫富集的原因,很可能是地层重硫的贡

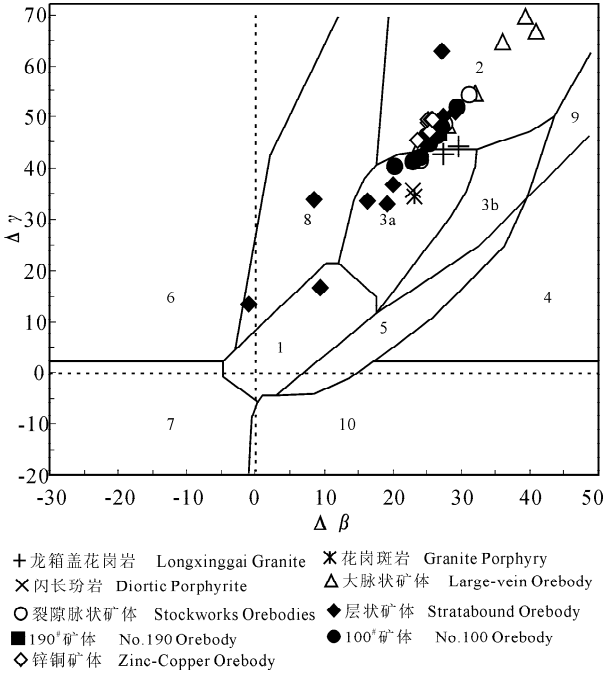


图 14 铅同位素的 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解 (朱炳泉,1998)

Fig. 14 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ genetic schematic diagram of the lead isotopes (after Zhu Bingquan et al., 1998)

1—地幔源铅;2—上地壳铅;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
1—mantle-derived;2—upper crust;3—mantle and upper crust mixed subduction zone (3a—magmatism, 3b—sedimentation); 4—chemistry sediments; 5—hydrothermal sediments on the seafloor; 6—middle to deep metamorphism; 7—deep metamorphism lower crust;8—orogenic belt;9—upper crust of old shale;10—retrogressive metamorphism

献造成的(陈毓川,1993)。不同类型或不同产状矿体中的铅同位素也是基本一致的,即以壳源为主,但也有幔源铅的参与。

参 考 文 献

陈毓川,黄民智,徐钰,艾永德,李祥明,唐绍华,孟令库. 1985. 大厂锡石-硫化物多金属矿带地质特征及成矿系列. 地质学报, 59(3): 228~240.
陈毓川,黄民智,徐钰,胡云中,唐绍华,李荫清,孟令库. 1993. 大厂锡矿地质. 北京:地质出版社, 69~340.
蔡明海,何龙清,刘国庆,吴德成,黄惠民. 2006a. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义. 地质论评, 52(3): 409~414.
蔡宏渊,张国林. 1983. 试论广西大厂锡多金属矿床海底火山热泉(喷气)成矿作用. 矿产地质研究院学报, 1(4): 13~21.
陈俊. 2000. 锡的地球化学. 南京:南京大学出版社, 1~292.
丁梯平,彭子成,黎红. 1988. 南岭地区几个典型矿床的稳定同位素研

究.北京:科学技术出版社.

丁梯平.1997.中国某些特大型矿床的同位素地球化学研究.地球学报-中国地质科学院院报,18(4):373~381.

高计元.1999.大厂锡石多金属硫化物矿床铅同位素演化及其矿床成因的意义.地质地球化学,27(2):38~43.

韩发,赵汝松,沈建忠,Hutchinson R W,蒋少涌,陈洪德.1997.大厂锡多金属矿床地质及成因.北京:地质出版社,65~157.

何海洲,叶绪孙.1996.广西大厂矿田矿质来源研究.广西地质,9(4):33~41.

韩吟文,马振东.2003.地球化学.北京:地质出版社,1~258.

李锡林,章振根.1981.大厂矿田分散元素分布特征及地球化学.地质与勘探,(7):19~25.

梁珍庭,苏登华.1985.广西大厂锡矿田成矿模式.广西地质,2(1):1~11.

刘锦珍.1987.广西矿田生物礁灰岩中锡-多金属矿床特征及控矿条件探讨.锡矿地质讨论会论文集.北京:地质出版社,123~133.

秦德先,洪托,田毓龙,陈健文.2002.广西大厂锡矿 92 号矿体矿床地质与技术经济.北京:地质出版社,31~132.

涂光炽.1984.锡和铅锌成矿作用的若干问题.地质与勘探,(3):7~10.

叶绪孙.1985.大厂锡多金属矿田成矿规律与成矿预测.地质与勘探,(5):1~7.

王登红,陈毓川,陈文,桑海清,李华芹,路远发,陈开礼,林枝茂.2004.广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代.地质学报,78(1):132~137.

洗柏琪.1984.试论广西锡矿的成矿条件与分布规律.地质学报,1:50~61.

徐文忻.1995.我国锡矿床的同位素地球化学研究.矿产与地质,45

(1):1~11.

涂光炽.1987.广西大厂矿床成因并兼论锡石硫化物矿床形成条件.锡矿地质讨论会论文集.北京:地质出版社,105~109.

曾允孚,王正英,田洪钧.1982.广西大厂龙头山矿区矿床成因新探.成都地质学院学报,(3):15~26.

张平.1983.长坡锡矿床成矿规律与隐伏矿体的找矿勘探.地质与勘探,(3):30~34.

张哲儒,白振华,章振根,严云秀.1989.大厂矿田成矿条件及硫同位素体系的热力学分析.地球化学,3:79~88.

章振根,李锡林,陈国墨.1976.广西某矿田磁黄铁矿的研究及其区别特征.地球化学,(1):54~63.

郑明华,张寿庭,刘家军,龙训荣,宋谢炎著.2001.西南天山穆龙套型金矿床产出地质背景与成矿机制.北京:地质出版社,84~89.

朱炳泉.1998.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.

Burnard P G, Hu R Z, Turner G. 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan Gold deposits, Yunnan Province, China. Geochim. Cosmochim. Acta, 63:1595~1604.

Doe B R, Zartman R E. 1979. Plumbotectonics, the Phanerozoic. In: Barnes H L, ed., Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York: Wiley Interscience, 22~70.

Ohmoto H. 1972. Systematic of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Economic Geology, 67:551~578.

Marty Jambon A, Sano Y. 1989. Helium isotope and CO₂ in volcanic gases of Japan. Chemical Geology, 76:25~40.

Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics-the model. Tectonophysics, 75:135~162.

Sulfur and Lead Isotope Composition Tracing for the Sources of Ore-Forming Material in Dachang Tin-Polymetallic Orefield, Guangxi

LIANG Ting¹⁾, WANG Denghong²⁾, CAI Minghai³⁾, Chen Zhenyu²⁾, GUO Chunli²⁾, HUANG Huimin⁴⁾
1) Lab of metallogenesis and dynamic, Chang'an university, Xi'an 710054; 2) Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing, 100037; 3) College of Resources and Environment, Guangxi University, Guangxi Nanning, 530004; 4) Liuzhou Huaxi Co. Ltd., Guangxi Liuzhou, 545006

Absract

To discern the material sources of the Dachang tin-polymetallic deposit, this paper analyzes and compares sulfur and lead isotope data of the orebodies with different mineralization types or occurrences from the deposit. The results indicate that the orebodies with different type and occurrence originated from the same source. Sulfur isotopic evidence indicates that Zn—Pb orebodies are typical magmatic sulfur in origin, Sn orebodies in mixed origin. Change of sulfur isotopic ratios is related to ore—formed process and environment, reflecting that there was a foreign components from country rock involving mineralization during the movement of deep-derived ore-forming fluid from low to upper. Lead isotope data indicate that lead originates mainly from the crust-derived magmatism but doesn't exclude involvement of Pb from the igneous intrusion.

Key words: source of ore-forming material; sulfure and lead isotope; metallogenic process; Dachang tin-polymetallic deposit