

# 滇东北茂租大型铅锌矿床成矿物质来源及成矿机制

周家喜<sup>1</sup>, 黄智龙<sup>1</sup>, 高建国<sup>2</sup>, 王涛<sup>3</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;  
2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;  
3. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059

**【摘要】** 茂租铅锌矿床地处扬子地块西缘,是川滇黔铅锌成矿域内赋存于震旦系灯影组白云岩中大型铅锌矿床的典型代表。其工业矿体呈似层状、脉状和不规则状。热液方解石和矿石硫化物(闪锌矿、方铅矿和黄铁矿)是主要矿物,其形成贯穿整个成矿过程。在矿床地质特征解析基础上,获得了热液方解石 C-O 同位素和矿石硫化物 S-Pb 同位素数据,结果表明热液方解石  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值变化范围较窄,分别为  $-3.73\% \sim -1.95\%$  和  $+13.80\% \sim +14.95\%$ ,在  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  与  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  图上介于海相碳酸盐岩和原生碳酸岩范围间,呈弱负相关趋势,表明成矿流体中的  $\text{CO}_2$  主要由海相碳酸盐岩溶解作用形成,并存在幔源和有机  $\text{CO}_2$  加入;硫化物  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$  值介于  $+13.35\% \sim +15.37\%$ ,暗示成矿流体中的硫是海相硫酸盐岩热化学还原的产物,而含硫有机质热降解也有贡献;硫化物 Pb 同位素组成稳定,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值范围,分别为  $18.129 \sim 18.375$ ,  $15.644 \sim 15.686$  和  $38.220 \sim 38.577$ ,位于上地壳和造山带 Pb 演化线之间,落入基底岩石(昆阳群和会理群)Pb 同位素组成范围内,表明成矿物质具有壳源特征,主要由基底岩石提供。综合各类地质-地球化学信息,认为茂租铅锌矿床成矿流体中不同组分来源不同,具有“多来源混合”特征,其成矿机制可以用“流体混合”模式来解释。

**【关键词】** C-O-S-Pb 同位素;成矿物质和流体来源;流体混合;茂租大型铅锌矿床

中图分类号:P595;P597;P611 文献标识码:A

文章编号:1001-6872(2012)03-0062-08

## 0 引言

茂租铅锌矿床位于云南省东北部,距离巧家县城约 48 km,是川滇黔铅锌成矿域内赋存于震旦系灯影组白云岩中大型铅锌矿床的典型代表<sup>[1]</sup>。但有关该矿床的地质-地球化学研究,还十分有限,主要

集中在矿床地质<sup>[2]</sup>、地球化学<sup>[3,4]</sup>和地球物理及成矿预测<sup>[5]</sup>等方面。由于缺乏多元同位素地球化学信息约束,对该矿床成矿物质来源的认识还存在差异,导致对矿床成因的归属存在分歧,主要有 4 种成因观点:(1)MVT 型<sup>[2,3]</sup>; (2)沉积-改造型<sup>[6]</sup>; (3)与峨眉山玄武岩浆活动有关的岩浆期后中低温热液型<sup>[1]</sup>; (4)热水喷流-沉积改造型<sup>[2,4]</sup>。

收稿日期:2012-05-13; 改回日期:2012-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41102055,41272111,41102053);中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-Q04-05)

作者简介:周家喜,男,30岁,副研究员(博士),矿物学、岩石学和矿床学专业,研究方向:元素和同位素地球化学。

同位素是示踪成矿物质来源的有效方法之一<sup>[7]</sup>,但单一同位素数据可能得出与地质事实不符的结论<sup>[8]</sup>,而多元同位素联合示踪体系已被广泛应用于矿床学研究<sup>[8]</sup>,并在矿床成因判别中扮演重要角色。热液方解石和矿石硫化物(闪锌矿,方铅矿和黄铁矿)是茂租铅锌矿床中最为主要矿物,它们的形成贯彻整个成矿过程。因而研究热液方解石 C-O 同位素和硫化物 S-Pb 同位素,可提供成矿物质来源与演化等方面的重要信息。本次研究针对茂租铅锌矿床 C-O-S-Pb 同位素地球化学特征,以揭示该矿床成矿物质来源,为探讨该矿床成矿机制提供多元同位素地球化学信息约束。

## 1 地质背景及矿床地质特征

位于扬子地块西南缘的川滇黔接壤区是我国重要的铅、锌、锗、银等生产基地之一,区内已发现矿床(点)500 余处(柳贺昌和林文达<sup>[1]</sup>,1999 统计为 400 余处)。滇东北铅锌成矿区是川滇黔铅锌成矿域的重要组成部分之一,发育包括会泽超大型铅锌矿床在内的若干大中型矿床<sup>[9]</sup>。除白垩系缺失外,区内地层发育自震旦系至第四系,其中震旦系灯影组岩性主要为含磷白云岩和硅化白云岩,是区域内主要的含矿层位之一;寒武系底部为磷块岩及砂岩和砂页岩,中部为泥质砂岩夹或互层碳酸盐岩,上部为泥质碎屑岩和泥砂质白云岩;奥陶系为砂页岩、砂泥岩及泥质灰岩;志留系主要为泥砂岩及泥砂质碳酸盐岩;泥盆系底部为砂岩、页岩及碳酸盐岩,中部为泥砂岩、泥砂质碳酸盐岩及白云质灰岩,上部为灰岩及白云岩,是区域内重要的含矿层位之一;石炭系主要为白云岩、灰岩及硅质碳酸盐岩,发育有会泽超大型铅锌矿床,是区域内又一重要含矿层位;二叠系为灰岩及峨眉山玄武岩,并发育煤层;三叠系主要为砂岩、泥岩、页岩及碎屑岩,是主要的煤系地层;老第三系和第四系由残坡积物组成<sup>[9,10]</sup>。区内构造极为发育,以 NS 向为主,形成左列式“多字型”构造<sup>[10,11]</sup>,主要构造有安宁河断裂带、小江断裂带、昭通—曲靖隐伏断裂带和垭都—紫云断裂带及 NE 向次级断裂<sup>[10,11]</sup>。区内岩浆发育,以二叠纪峨眉山玄武岩分布最为广泛。

茂租铅锌矿位于川滇黔铅锌成矿域中北部,滇东北铅锌成矿区西北部,地处扬子板块西缘之昆阳裂谷东部<sup>[2,4]</sup>,北侧金沙江、西边茂租逆断层、南东缘臭水井断层所夹持的楔形区域内(图 1A)。该区地壳结构复杂、构造活动频繁、岩浆活动强烈,具有

十分有利的成矿地质背景和形成大型—超大型矿床的地质条件。矿区出露地层主要为上震旦统灯影组( $Z_2d$ )、下寒武统筇竹寺组( $\epsilon_1q$ )、沧浪铺组( $\epsilon_1c$ )和龙王庙组( $\epsilon_1l$ )及中寒武统( $\epsilon_2$ )和下二叠统峨眉山玄武岩( $P_1\beta$ ),其中震旦系上统灯影组上段( $Z_2d^2$ )是该矿床最主要的赋矿层位。矿区构造以 NE 向断裂为主,代表性的有茂租逆断层、臭水井断裂和大岩碛断层等(图 1B),这些断裂具有多期次活动的特点,与成矿关系密切<sup>[2]</sup>。二叠系下统峨眉山玄武岩,广泛分布于茂租逆断层以西及干树林向斜南部大跨山一带(图 1)。

该矿床工业矿体以似层状、陡倾脉状和不规则状矿团三种形态产出,其中似层状矿体最为主要(图 2),并表现为上、下两个矿层。矿石矿物种类简单,金属矿物主要有闪锌矿、方铅矿,还可见少量黄铁矿、黄铜矿等。脉石矿物以白云石、方解石、萤石为主,次为磷灰石、燧石、重晶石、石英及少量粘土。闪锌矿呈无色、浅黄色、棕黄色、棕色,半透明,结晶好,一般呈五角形、等边形或不规则粒状、散点状及脉状分布在白云岩中,粒度一般在 0.01 mm~1.5 mm,最大可达 3.6 mm,具环带结构;方铅矿呈铅灰色、钢灰色不规则粒状及脉状,其粒度一般 0.1 mm~1.4 mm,最大可达 4 mm,主要嵌布在白云石、方解石和石英中,常与闪锌矿相互交错或相互包裹,也有极细粒(0.01 mm~0.033 mm)方铅矿包裹在闪锌矿中;黄铁矿呈不规则状与闪锌矿和方铅矿共生,或呈立方体状压碎结构脉状充填,或他形细粒状分布在碳质页岩或呈乳滴状固溶体分解物包含于闪锌矿集合体和闪锌矿边缘间隙中,粒度一般 0.023 mm~0.23 mm;方解石呈团块状或脉状与矿石矿物共生或充填在其中<sup>[2]</sup>。

原生矿石结构以粒状、胶状、镶嵌、斑状等为主,构造以块状、斑点状、浸染状、脉状和网脉状;氧化矿石还可见到胶状构造、土状构造,有时还可见到皮壳状、乳滴状构造。围岩蚀变主要有硅化、黄铁矿化、萤石化、重晶石化、碳酸盐化、方解石化及褐铁矿化等,其中黄铁矿化、萤石化、方解石化为近矿蚀变<sup>[2,3]</sup>。

## 2 样品来源及分析方法

本次研究所选取的矿石样品主要来自上矿层,尽量选择具有代表性的多矿物共生标本。在野外详细的地质观察和室内显微镜下鉴定的基础上,挑选具有代表性的主成矿期热液方解石及共生硫化物,

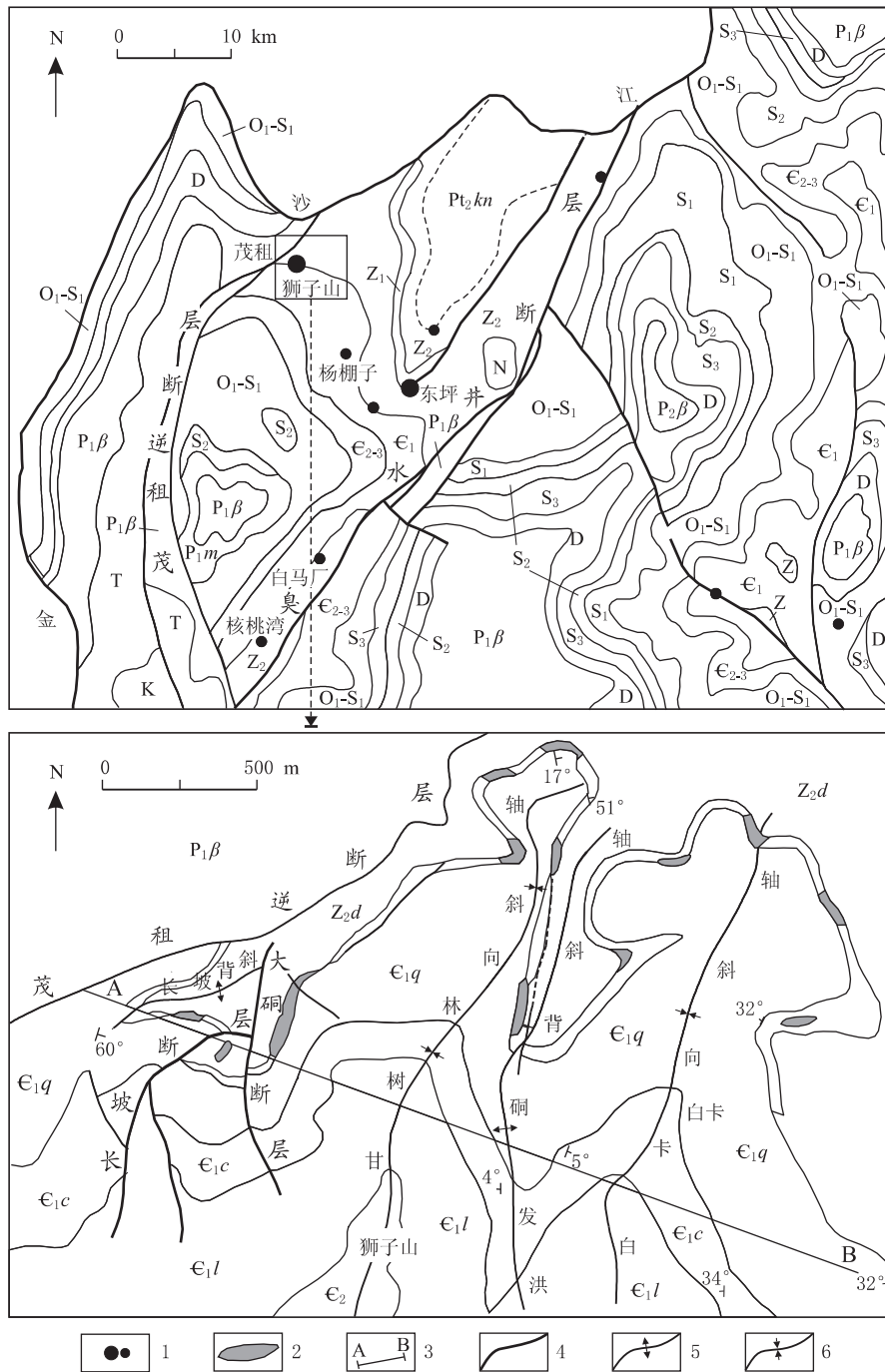


图 1 A: 茂租铅锌矿床区域地质略图(据贺胜辉等, 2006<sup>[2]</sup>修改); B: 茂租铅锌矿床地质略图(据刘文周, 2009<sup>[3]</sup>修改)  
 N. 晚第三系; K. 侏罗系; T. 三叠系; P<sub>1β</sub>. 下二叠统峨眉山玄武岩组; P<sub>1m</sub>. 下二叠统茅口组; D. 泥盆系; S<sub>3</sub>. 上志留统; S<sub>2</sub>. 中志留统;  
 S<sub>1</sub>. 下志留统; O<sub>1-S1</sub>. 下奥陶统至下志留统; ε<sub>2-3</sub>. 中上寒武统; ε<sub>1</sub>. 下寒武统; Z. 震旦系; Z<sub>2</sub>. 上震旦系; Z<sub>1</sub>. 下震旦系; Pt<sub>2kn</sub>. 中元古界  
 昆阳群; Z<sub>2d</sub>. 上震旦统灯影组白云岩; ε<sub>1q</sub>. 下寒武统筇竹寺组黑色页岩; ε<sub>1c</sub>. 下寒武统沧浪铺组砂泥质页岩; ε<sub>1l</sub>. 下寒武统龙王庙组  
 泥质灰岩、白云岩; ε<sub>2</sub>. 中寒开统粉砂岩; 1. 铅锌矿床; 2. 矿体; 3. 剖面线; 4. 断层; 5. 背斜; 6. 向斜

Fig. 1 A: Sketch showing regional geology of the Maozu Pb-Zn deposit; B: Sketch geological map of the Maozu Pb-Zn deposit

进行方解石 C-O 同位素组成和硫化物 S-Pb 同位素组成分析。方解石 C-O 同位素组成在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 采用 100% 磷酸法, 在连续流动质谱上分析, 分析精度为 ±0.2‰; 硫化物 S 同位素组成在采用 EA-IRMS 法, 在该实验室连续流动质谱仪上测定, 相对误差小于 0.2‰; 硫化物 Pb 同位素组成在核工业北京地质

研究院完成测试, 为 Isoprobe-T 型 TIMS, 对 1 μg 的铅 <sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 测量精度 ≤ 0.005%。

### 3 结 果

#### 3.1 C-O 同位素组成

茂租铅锌矿床热液方解石 C-O 同位素组成结

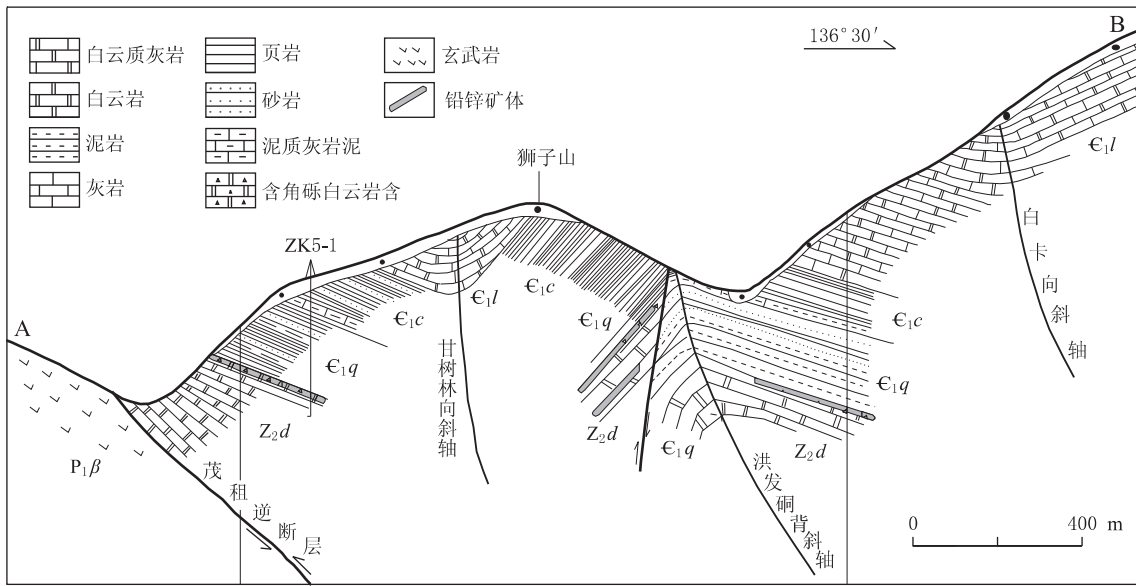


图 2 茂租铅锌矿区 A-B 剖面示意图(据贺胜辉等,2006<sup>[2]</sup>修改)

Fig. 2 Sketch showing the A-B cross section of the Maozu Pb-Zn deposit

果列于表 1。由表 1 可见方解石 C-O 同位素组成相对均一,其  $\delta^{13}C_{PDB}$  值和  $\delta^{18}O_{SMOW}$  值分别为  $-3.73\text{‰}$  ~  $-1.95\text{‰}$  和  $+13.80\text{‰}$  ~  $+14.95\text{‰}$ 。在  $\delta^{13}C_{PDB}$  与  $\delta^{18}O_{SMOW}$  图上(图 3),全部样品集中于原生碳酸岩与海相碳酸盐岩之间,其范围与会泽<sup>[12]</sup>相似,与天桥<sup>[13]</sup>相近。

表 1 茂租铅锌矿床热液方解石 C-O 同位素组成  
Table 1 C and O isotopic compositions of hydrothermal calcite from the Maozu Pb-Zn deposit

编号	矿物	$\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰}$
MZ-17	热液方解石	-3.18	+13.80
MZ-38	热液方解石	-1.95	+14.14
MZ-39	热液方解石	-3.73	+14.95

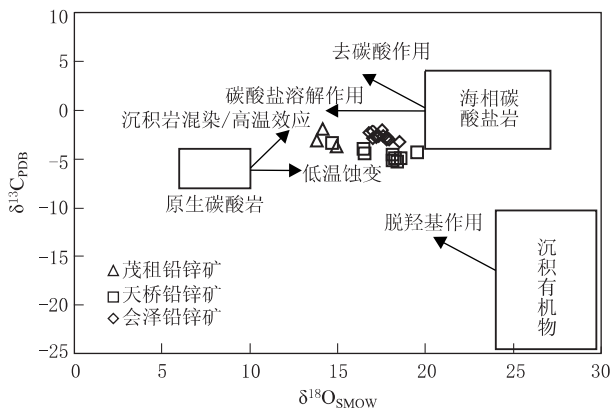


图 3 茂租铅锌矿床方解石  $\delta^{13}C_{PDB}$  与  $\delta^{18}O_{SMOW}$  图解(底图据刘家军等,2004<sup>[14]</sup>(会泽据 Huang Z L, et al, 2010<sup>[12]</sup>;天桥据周家喜等,2012<sup>[13]</sup>)

Fig. 3  $\delta^{13}C_{PDB}$  vs  $\delta^{18}O_{SMOW}$  diagram of hydrothermal calcite from Maozu Pb-Zn deposit

### 3.2 S 同位素组成

茂租铅锌矿床硫化物(闪锌矿和方铅矿)S 同位素组成及前人分析成果一并列于表 2。本文结果显示,茂租大型铅锌矿床硫化物富集<sup>34</sup>S,其  $\delta^{34}S_{CDT}$  值

介于  $+13.35\text{‰}$  ~  $+15.37\text{‰}$ ,与会泽和天桥硫同位素组成相似<sup>[15,16]</sup>,均与地层沉积岩中石膏的硫同位素组成相近( $\delta^{34}S_{CDT}$  值为  $+15\text{‰}$ <sup>[1]</sup>),比沉积重晶石( $+30.35\text{‰}$ )明显低<sup>[2]</sup>,这均与前人分析结果相一致<sup>[1,3]</sup>。虽然全部样品显示不同硫化物间  $\delta^{34}S_{CDT}$  值变化范围部分重叠(图 4),但同标本中有  $\delta^{34}S_{闪锌矿} > \delta^{34}S_{方铅矿}$ (如 M-8-1 和 M-8-2)特征<sup>[1]</sup>,表明茂租铅锌矿床成矿流体中硫同位素分馏达到了热力学平衡<sup>[9,17]</sup>。

表 2 茂租铅锌矿床硫化物 S 同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic compositions of sulfides from the Maozu Pb-Zn deposit

编号	对象	$\delta^{34}S/\text{‰}$	来源
MZ-5	浅黄色闪锌矿	+13.35	[1]
MZ-11	棕黄色闪锌矿	+13.54	
MZ-21	方铅矿	+15.37	
MZ-37	方铅矿	+14.21	
M-12	沉积黄铁矿	-10.50	
M-11	闪锌矿	+13.94	[1]
M-8-2	闪锌矿	+11.50	
M-8-1	方铅矿	+8.84	
M-3	黄铁矿	+19.86	[3]
M-2	沉积重晶石	+30.35	
M-1	闪锌矿	+10.67	
M-2	方铅矿	+11.93	

### 3.3 Pb 同位素组成

茂租铅锌矿床硫化物 Pb 同位素组成结果及前人分析成果列于表 3。本次分析数据表明,茂租铅锌矿床硫化物(闪锌矿和方铅矿)Pb 同位素组成稳定,2 件闪锌矿样品的  $^{206}Pb/^{204}Pb$ ,  $^{207}Pb/^{204}Pb$  和  $^{208}Pb/^{204}Pb$  值范围,分别为  $18.260 \sim 18.375$ ,  $15.655 \sim 15.686$  和  $38.396 \sim 38.577$ ; 2 件方铅矿样品的  $^{206}Pb/^{204}Pb$ ,  $^{207}Pb/^{204}Pb$  和  $^{208}Pb/^{204}Pb$  值范围,分别为  $18.129 \sim 18.162$ ,  $15.644 \sim 15.658$  和  $38.220 \sim$

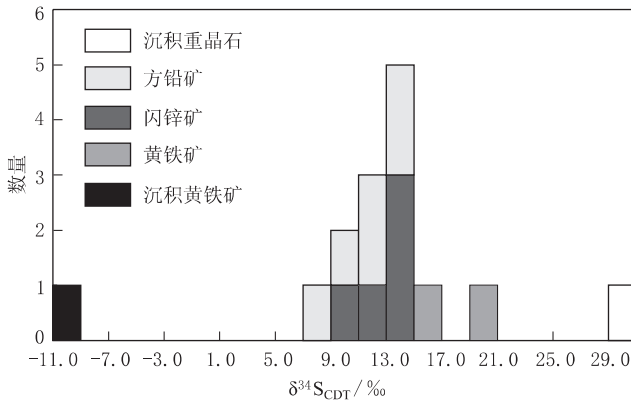


图4 茂租铅锌矿床硫同位素直方图  
沉积黄铁矿和重晶石硫同位素组成据柳贺昌等,1999<sup>[1]</sup>  
Fig. 4 S isotopic compositions histogram of the Maozu  
Pb-Zn deposit

38.372, 它们与区域上其它铅锌矿床相似<sup>[15,16]</sup>。茂租铅锌矿床不同硫化物间(闪锌矿和方铅矿)及不同颜色闪锌矿间(浅黄色和棕黄色)Pb同位素组成不存在明显差异(表3),说明它们具有相同的成矿物质来源,且在成矿过程中没有发生显著变化。

表3 茂租铅锌矿床硫化物Pb同位素比值及参数  
Table 3 Pb isotopic ratios and parameters of sulfides from  
Maozu Pb-Zn deposit

编号	对象	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	来源	
MZ-11	浅黄色闪锌矿	18.375	15.686	38.577	[1]	
MZ-5	棕黄色闪锌矿	18.260	15.655	38.396		
MZ-34	方铅矿	18.162	15.644	38.272		
MZ-36	方铅矿	18.129	15.658	38.220		
I-104	方铅矿	17.980	15.470	38.010		
MT-Pb2	方铅矿	18.109	15.629	38.161		
MT-Pb1	方铅矿	18.220	16.626	38.377		
M-6	方铅矿	18.128	15.587	38.068		
M-9	方铅矿	18.147	15.621	38.171		
M-13	方铅矿	18.305	15.641	38.434		
M-3	方铅矿	18.191	15.643	38.306		
M-11	方铅矿	18.444	15.746	38.858		
M-1	方铅矿	18.154	15.632	38.216		[3]
M-2	方铅矿	18.124	15.628	38.176		

## 4 讨 论

### 4.1 CO<sub>2</sub> 来源及形成机制

热液矿物的C-O同位素组成是指示热液来源与演化行之有效的方法<sup>[18]</sup>。通常,成矿热液中的碳有三大主要来源,即慢源岩浆、海相碳酸盐岩以及沉积物中的有机碳。前人对三大碳源经历不同地质作用过程,所产生的C-O同位素组成变化趋势,在 $\delta^{13}C_{PDB}$ 与 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 图解上做了注释<sup>[14]</sup>。例如,原生碳酸岩经历低温蚀变,会导致形成的矿物中富集<sup>18</sup>O,而 $\delta^{13}C$ 值不会发生显著变化;同样海相碳酸盐岩经历溶解作用(即去CO<sub>2</sub>作用),则会导致形成的矿物亏损<sup>18</sup>O,而 $\delta^{13}C$ 值也不会发生显著变化。由表1

和图3可知,茂租铅锌矿原生矿石中热液方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 $-3.73\text{‰} \sim -1.95\text{‰}$ 和 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值 $+13.80\text{‰} \sim +14.95\text{‰}$ ,变化均相对较小,在 $\delta^{13}C_{PDB}$ 与 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 图解(图3)上,介于海相碳酸盐岩和原生碳酸岩之间,并呈弱的负相关变化趋势,且与会泽和<sup>[12]</sup>天桥<sup>[13]</sup>热液方解石C-O同位素组成范围部分重叠。有学者认为这种负相关关系,表明其形成与岩浆去气作用存在密切关系<sup>[12]</sup>;也有学者解释为受有机质脱羟基作用影响的海相碳酸盐岩溶解作用的结果<sup>[13]</sup>。

对茂租铅锌矿床热液方解石流体包裹体测温结果显示,其均一温度相对较低(均值约为202℃)<sup>[1-4]</sup>,基本可以排除原生碳酸岩经高温分异作用为热液方解石提供主要碳源;由于热液方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值变化范围较窄(表1),且明显高于沉积物有机质的碳同位素组成,故也可排除沉积物有机质为热液方解石提供主要碳源,但由于热液方解石 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值和 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值间的弱负相关趋势,不能排除沉积有机物脱羟基作用的影响。此外,与会泽和天桥相比,茂租更靠近原生碳酸岩范围(图3)。因此,笔者认为茂租铅锌矿床热液方解石碳源主要由海相碳酸盐岩溶解作用形成,并受慢源岩浆去气作用影响,而沉积物中有机质的脱羟基作用也有贡献,特别是沉积有机物(还原剂)在海相硫酸盐热化学还原过程中形成的有机CO<sub>2</sub>(见后文),参与了热液方解石的形成,并造成沉淀的方解石较海相碳酸盐岩亏损<sup>13</sup>C<sup>[19]</sup>。

### 4.2 硫来源及形成机制

茂租铅锌矿床硫化物(闪锌矿、方铅矿和黄铁矿)均相对富集重硫同位素,其硫化物 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值介于 $+8.84\text{‰} \sim +19.86\text{‰}$ 之间(表2,图4),与慢源岩浆硫( $-3.0\text{‰} \sim +3.0\text{‰}$ )明显不同<sup>[20]</sup>;前人研究了赋矿地层岩石中沉积黄铁矿和重晶石的S同位素组成<sup>[1]</sup>,获得的 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值分别为 $-10.50\text{‰}$ 和 $+30.35\text{‰}$ (表2),认为沉积成因黄铁矿具有生物成因硫源特征,而重晶石等海相硫酸盐可能为沉积黄铁矿与热液硫化物提供了主要硫源<sup>[1,2]</sup>。此外,区域多个时代地层沉积岩中普遍发育膏盐层,其 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值在 $+15\text{‰}$ 左右<sup>[1]</sup>,与包括茂租铅锌矿床在内的川滇黔铅锌成矿域内若干矿床硫化物S同位素组成均相近<sup>[15,16,21]</sup>,表明成矿流体中的还原硫主要来自海相硫酸盐。这与世界范围内众多硫化物富集重硫同位素的铅锌矿床,其硫主要来自海相硫酸盐的还原是一致的<sup>[22,23]</sup>。

目前有3种主要观点来解释这一来源的机制问



题<sup>[23]</sup>,如细菌硫酸盐还原作用(BSR)、热化学硫酸盐还原作用(TSR)和含硫有机质热降解作用(SOD)。本次分析和前人研究结果表明<sup>[1,3]</sup>,茂租铅锌矿床矿石硫化物普遍富集重硫同位素(+8.84‰~+19.86‰),且矿床达到大型规模(Pb+Zn金属资源量超过100Mt),这需要大量还原态硫。而BSR通常发生在相对低温条件(小于120℃)、不可能产生大量还原态硫、且形成还原态硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有较大的变化范围;同时,流体包裹体均一温度<sup>[1~4]</sup>(集中在150℃~270℃之间,均值约为202℃)和硫同位素平衡温度(170℃~350℃,计算公式为 $\Delta^{34}\text{S}=\delta^{34}\text{S}_a-\delta^{34}\text{S}_b=A \times 10^6/T^2$ ,式中A取值参见Czamanske and Rye<sup>[24]</sup>,1974)均高于细菌存活温度<sup>[25]</sup>。因此,可以排除BSR是茂租铅锌矿床还原硫来源的主要机制。TSR发生在相对高温条件(大于150℃)、能产生大量还原态硫、且形成还原态硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相对稳定<sup>[26]</sup>,并可以使海相硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 值降低10‰~15‰<sup>[27]</sup>,这与本研究结果十分吻合( $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值集中在+8‰~+15‰之间;沉积重晶石 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为+30.35‰,石膏 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 值为+15‰)。因此,TSR是应该是茂租铅锌矿床还原硫形成的主要机制。此外,当温度大于50℃,含硫有机质(如石油等)可受热分解,产生 $\text{H}_2\text{S}$ <sup>[23]</sup>,尽管本区尚未有由SOD产生还原态硫的报道,而C-O同位素研究结果表明,有机质在TSR过程起到还原剂作用<sup>[19]</sup>,所以含硫有机质热降解作用也可能是还原硫的又一来源来源。

#### 4.3 成矿金属来源

在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上(图5),大部分样品落入上地壳Pb

演化线和造山带Pb演化线之间,少部分落入上地壳范围。与区域基底岩石(昆阳群和会理群)、震旦系灯影组白云岩、泥盆至二叠系碳酸盐岩和二叠系峨眉山玄武岩Pb同位素组成相比,大部分硫化物样品落入基底岩石范围,少部分落入到基底岩石与灯影组白云岩、碳酸盐岩和玄武岩分布区内,表明Pb源较为复杂。

由于包括茂租铅锌矿床在内的川滇黔铅锌成矿区内绝大部分铅锌矿床赋存于地层碳酸盐岩中,区域上有大面积峨眉山玄武岩分布和基底岩石(昆阳群和会理群)出露。因此,多数学者认为成矿物质由基底岩石、碳酸盐岩和峨眉山玄武岩共同提供,但对它们的贡献程度有不同认识:1)由沉积岩(碳酸盐岩)主要提供<sup>[15]</sup>;2)主要来自前寒纪基底岩石<sup>[28]</sup>;3)峨眉山玄武岩不仅提供了部分成矿物质,还是主要的热动力源<sup>[8]</sup>。

前已述及,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上(图5),全部样品呈线性分布特征,且大部分样品落入基底岩石Pb同位素组成范围内,与震旦系灯影组白云岩和峨眉山玄武岩Pb同位素组成分布范围存在明显不同,表明茂租铅锌矿床成矿流体中金属主要由基底岩石提供,并有少量来自震旦系灯影组白云岩、泥盆—二叠系碳酸盐岩和峨眉山玄武岩。对峨眉山玄武岩与成矿的关系,笔者认为峨眉山玄武岩浆活动时限(约260Ma)与区域铅锌成矿时代(约200Ma)相差超过50Ma<sup>[29,30]</sup>,说明峨眉山玄武岩浆活动与铅锌成矿没有直接的成因联系,但不能排除成矿流体活化峨眉山玄武岩中的部分成矿金属,即大气降水或层间水下渗过程中活化了峨眉山玄武岩中的部分成矿金

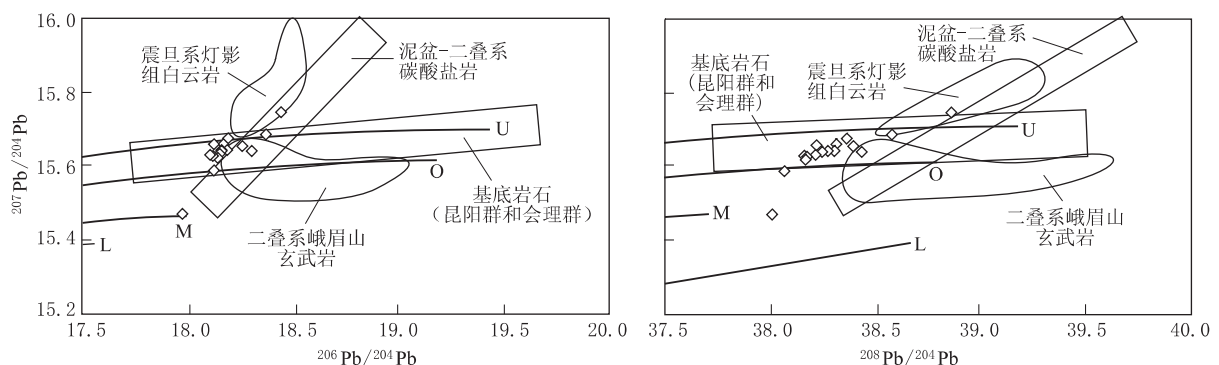


图5  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图(底图据文献[32])

U, 上地壳; O, 造山带; M, 地幔; L, 下地壳; 震旦系灯影组白云岩、泥盆—二叠系碳酸盐岩、二叠系峨眉山玄武岩和基底岩石Pb同位素数据转引自文献[8~10, 15~16, 21]

Fig. 5 Diagram of  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  vs  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

属,特别是成矿元素铋<sup>[31]</sup>。

#### 4.4 成矿机制

有关铅锌矿床成矿元素迁移—沉淀机制,目前

有三种主要观点来解释<sup>[33]</sup>:1)混合模式,即成矿金属以卤化物络合物或有机络合物形式迁移,在适合的空间与另一富含还原态硫的流体相互混合后,发

生金属硫化物沉淀;2)还原模式,即含成矿金属(以氯化物络合物和/或有机络合物和/或硫代硫酸盐的形式进行迁移)的流体,在富含有机质的成矿部位还原硫酸盐,引起硫化物的沉淀,其中硫酸盐可以随成矿流体一起迁移而来,也可以是成矿部位的硫酸盐被就地还原;3)共同迁移模式,即成矿金属以硫化物络合物的形式进行迁移,在成矿部位由于流体  $f_{O_2}$  和 pH 值等的变化,造成还原态硫的浓度降低,使金属硫化物沉淀下来。

茂租铅锌矿床石英和方解石 H-O 同位素揭示成矿流体中的  $H_2O$  主要为变质水,并受到大气降水的影响<sup>[1,34]</sup>;热液方解石 C-O 同位素反映成矿流体中的  $CO_2$  主要为流体溶解海相碳酸盐岩形成,并有幔源岩浆去气和有机质脱羟基作用形成  $CO_2$  加入;硫化物 S 同位素分析结果说明,成矿流体中 S 主要为海相硫酸盐热化学还原的产物,并存在含硫有机质热降解的贡献;硫化物 Pb 同位素组成证实,成矿流体中的金属物质主要来自基底岩石,震旦系灯影组白云岩、泥盆—二叠系碳酸盐岩和峨眉山玄武岩也提供部分成矿物质。因此,茂租超铅锌矿床成矿流体中不同组分来源不同,结合成矿流体包裹体研究成果<sup>[1~4]</sup>(成矿流体为  $Ca^{2+}-Na^+-Cl^- -F^-$  型),将该矿床成矿过程描述为,约 200 Ma<sup>[30,31]</sup>(茂租铅锌矿床热液方解石 Sm-Nd 等时线年龄为 194 Ma,另文探讨),扬子板块与周边地体(兰坪-思茅地块、义

敦弧等)发生碰撞<sup>[11]</sup>,导致本区形成大量逆冲推覆褶皱构造(冲断褶皱构造),驱动来自基底岩石以氯化物络合物形成携带大量成矿金属的变质水流体,沿着区域性深大断裂贯入冲断褶皱构造体系中,与淋滤峨眉山玄武岩中部分成矿金属和下二叠统梁山组沉积有机质,并沿途还原不同时代地层沉积岩中海相硫酸盐的大气降水或层间水发生流体混合,伴生物理、化学等成矿条件的改变,金属硫化物沉淀形成具有工业价值的矿体<sup>[31]</sup>。

## 5 结 语

茂租铅锌矿床成矿流体中不同组分来源不同。方解石  $\delta^{13}C_{PDB}$  值和  $\delta^{18}O_{SMOW}$  值,分别为  $-3.73\% \sim -1.95\%$  和  $+13.80\% \sim +14.95\%$ ,表明成矿流体中的  $CO_2$  主要为成矿流体溶解海相碳酸盐岩形成的无机  $CO_2$ ;硫化物富集重硫同位素,其硫化物  $\delta^{34}S_{CDT}$  值介于  $+8.84\% \sim +19.86\%$  之间,表明成矿流体中 S 主要为海相硫酸盐热化学还原的产物;硫化物 Pb 同位素组成相对稳定,大部分样品落入上地壳和造山带 Pb 演化线间的基底岩石(昆阳群和会理群)Pb 同位素组成分布范围内,表明成矿金属主要为基底岩石提供。C-H-O-S-Pb 数据和流体包裹体研究成果表明,该矿床成矿机制可以用“流体混合”模式来解释。

## 参考文献

- [1] 柳贺昌,林文达.滇东北铅锌银矿床规律研究[M].昆明:云南大学出版社,1999,1-468.
- [2] 贺胜辉,荣惠峰,尚卫,等.云南茂租铅锌矿床地质特征及成因研究[J].矿产与地质,2006,20(4-5):397-402.
- [3] 刘文周.云南茂租铅锌矿床地质地球化学特征及成矿机制分析[J].成都理工大学学报:自然科学版,2009,36(5):480-486.
- [4] 陈启良.滇东北渔户村组富铅锌矿成矿地质特征及找矿标志[J].地质与勘探,2002,38(1):22-26.
- [5] 高航校,任小华,郭健,等.茂租铅锌矿床地质地球物理特征及矿体预测研究[J].矿产与地质,2011,25(2):152-157.
- [6] 廖文.滇东、黔西铅锌金属区硫、铅同位素组成特征与成矿模式探讨[J].地质与勘探,1984,(1):1-6.
- [7] 张旭,李胜荣,卢晶,等.山东招远金翅岭金矿床 H-O-He-Ar 同位素组成及其对成矿流体示踪的研究[J].矿物岩石,2012,32(1):40-47.
- [8] 黄智龙,陈进,韩润生,等.云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因-兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系[M].北京:地质出版社,2004,1-145.
- [9] Han R S, Liu C Q, Huang Z L, et al. Geological features and origin of the Huize carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag) District, Yunnan, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31: 360-383.
- [10] 韩润生,陈进,黄智龙,等.构造成矿动力学及隐伏矿定位预测-以云南会泽超大型铅锌(银、锗)矿床为例[M].北京:科学出版社,2006,1-170.
- [11] 张志斌,李朝阳,涂光炽,等.川滇黔接壤区铅锌矿床产出的大地构造演化背景及成矿作用[J].大地构造与成矿学,2006,30(3):343-354.
- [12] Huang Z L, Li X B, Zhou M F, et al. REE and C-O isotopic geochemistry of calcites from the world-class Huize Pb-Zn deposits, Yunnan, China; implication for the ore genesis [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2010, 84(3): 597-613.
- [13] 周家喜,黄智龙,周国富,等.黔西北天桥铅锌矿床热液方解石 C、O 同位素和 REE 地球化学[J].大地构造与成矿学,2012,36(1):93-101.
- [14] 刘家军,何明勤,李志明,等.云南白秧坪银铜多金属矿集区同位素组成及其意义[J].矿床地质,2004,23(1):1-10.
- [15] 李文博,黄智龙,张冠.云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb-S-C-H-O-Sr 同位素制约[J].岩石学报,2006,22(10):2567-2580.
- [16] 周家喜,黄智龙,周国富,等.黔西北赫章天桥铅锌矿床成矿物质来源: S-Pb 同位素和 REE 制约[J].地质论评,2010,56(4):513-524.
- [17] Zhou J X, Huang Z L, Zhou G F, et al. Sulfur isotopic compositions of the Tianqiao Pb-Zn ore deposit, Guizhou Province, China; implications for the source of sulfur in the ore-forming fluids [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2010, 29(3): 301-306.
- [18] Spangenberg J, Fontbote, L, Sharp Z D. Carbon and oxygen isotope study of hydrothermal carbonates in the zinc-lead deposits of the San Vicente district, central Peru; a quantitative modeling on mixing processes and  $CO_2$  degassing [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133(1-4): 289-315.
- [19] 张水昌,师燕华,何坤,等.硫酸盐热化学还原作用的启动机制研究[J].岩石学报,2012,28(3):739-748.
- [20] Chaussidon M, Albarède F, Sheppard S M F. Sulfur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulphide inclusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 92: 144-156.
- [21] 金中国.黔西北地区铅锌矿控矿因素、成矿规律与找矿预测[M].北京:冶金工业出版社,2008,1-108.
- [22] Anderson I K, Ashton J H, Boyce A J, et al. Ore depositional processes in the Navan Zn+Pb deposit, Ireland [J]. *Economic Geology*, 1998,

- 93:535-563.
- [23] Basuki N I, Taylor B E, Spooner E T C. Sulfur isotope evidence for thermo-chemical reduction of dissolved sulfate in Mississippi valley type zinc-lead mineralization, Bongara area, northern Peru [J]. *Economic Geology*, 2008, 103:183-799.
- [24] Czamanske G K, Rey R O. Experimentally determined sulfur isotope fractionation between sphalerite and galena in the temperature 600 to 275 [J]. *Economic Geology*, 1974, 69:17-25.
- [25] Jorgenson B B, Isaksen M F, Jannasch H W. Bacterial sulfate reduction above 100 °C in deep sea hydrothermal vent sediments [J]. *Science*, 1992, 258:1 756-1 757.
- [26] Ohmoto H, Kaiser C J, Geer K A. Systematics of sulphur isotopes in recent marine sediments and ancient sediment-hosted base metal deposits [C]. In: Herbert H K and Ho S E (Editors), *Stable isotopes and Fluid Processes in Mineralisation* [M]. Geol. Dep. Univ. Extens. Univ. Western Australia, 1990, 23:70-120.
- [27] Machel H G. Relationships between sulphate reduction and oxidation of organic compounds to carbonate diagenesis, hydrocarbon accumulations, salt domes, and metal sulphide deposits [J]. *Carbonates Evaporites*, 1989, 4:137-151.
- [28] Zhou C X, Wei C S, Guo J Y, et al. The source of metal in the Qilinchang Pb-Zn deposit, northeastern Yunnan, China; Pb-Sr isotope constraints [J]. *Economic Geology*, 2001, 96:583-598.
- [29] Zhou J X, Huang Z L, Zhou G F, et al. The trace elements and rare earth elements geochemistry of sulfide minerals of the Tianqiao Pb-Zn ore deposit, Guizhou province, China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2011, 85(1):189-199.
- [30] 鲍森, 周家喜, 黄智龙, 等. 铅锌矿床定年方法及川滇黔铅锌成矿域年代学进展[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3):391-396.
- [31] Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, et al. Constraints of C-O-S-Pb isotopic compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China. *Ore Geology Reviews*, under review.
- [32] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics-the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75:135-162.
- [33] Sangster D F. Mississippi valley-type lead-zinc. In: *Geology of Canadian Mineral Deposit* [M]. Types O R, Sinclair E W D, Thorpe R I. Eds. Geological Survey of Canada, *Geology of Canada*, 1996, 8:253-261
- [34] 郭春影, 张文钊, 葛良胜, 等. 氢氧同位素体系成矿流体示踪若干问题[J]. *矿物岩石*, 2011, 31(1):41-47.

## SOURCES OF ORE-FORMING METALS AND FLUIDS, AND MECHANISM OF MINERALIZATION, MAOZU LARGE CARBONATE-HOSTED LEAD-ZINC DEPOSIT, NORTHEAST YUNNAN PROVINCE

ZHOU Jia-xi<sup>1</sup>, HUANG Zhi-long<sup>1</sup>, GAO Jian-guo<sup>2</sup>, WANG Tao<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and  
Technology, Kunming 650093, China;

3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** The Maozu Pb-Zn deposit, a typical large Pb-Zn deposit in Sichuan-Yunnan-Guizhou Pb-Zn metallogenic province, is located on the western margin of Yangtze Block and hosted in the dolomite of Dengying Formation of Upper Sinian. The industrial ore-bodies are stratiform-like, vein and irregular shaped. Hydrothermal calcite and sulfide (sphalerite, galena and pyrite) are the main gangue and ore minerals, which were formed throughout the ore-forming process. C-O isotopic compositions of hydrothermal calcites, S-Pb isotopic compositions of sulfides were analyzed in this paper. It was showed that  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  values of hydrothermal calcites varied in a narrow range of  $-3.73\%$  to  $-1.95\%$  and  $+13.80\%$  to  $+14.95\%$ , respectively. All the samples are plotted into the field between the marine carbonate and mantle in the diagram of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  vs  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ , and show a weak negative correlation, implicating that the  $\text{CO}_2$  in the ore-forming fluids were mainly produced by dissolution of marine carbonate, and contributed by organic and mantle  $\text{CO}_2$ .  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$  values of sulfides separates range from  $+13.35\%$  to  $+15.37\%$ . It shows that the reduced sulfur in the ore-forming fluids is the production of thermo-chemical sulfate reduction, and added by thermal degradation of sulfur-bearing organic matter.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  ratios of sulfide separates have a narrow range of 18.129 to 18.375, 15.644 to 15.686 and 38.220 to 38.577, respectively, which lies in the region between Upper Crust and orogenic Pb area, and plots into the field of basement rocks (Kunyang and Huili Groups), indicating that the crust source features of ore-forming metals mainly supplied by basement rocks. All the geological and geochemical information show that the source of ore-forming metals and fluids of the Maozu Pb-Zn deposit is mixed product and the mechanism of mineralization could be explained by "fluids mixing" model.

**Key words:** C-O-S-Pb isotopes; source of ore-forming metals and fluids; fluids mixing; Maozu large Pb-Zn deposit

ISSN 1001-6872(2012)03-0062-08; CODEN:KUYAE2

**Synopsis of the first author:** Zhou Jiaxi, male, 30 years old, an associate professor of mineralogy, petrology and economic geology. Now he is engaged in the research of element and isotope geochemistry.