

云南昭通毛坪铅锌矿床同位素地球化学性质研究^①申屠良义¹, 韩润生², 李波³, 邱文龙¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 有色金属矿产调查中心西南地调所, 昆明 650093;

3. 云南铜业集团公司, 昆明 650051)

摘 要:云南昭通毛坪铅锌矿床是滇东北铅锌成矿带中一个典型的中—大型矿床, 文章在分析矿区地质特征的基础上, 通过对矿床的硫、铅、碳、氢、氧五种同位素的组成特征及其地球化学性质的研究, 探讨了成矿流体的性质和来源以及矿床可能的形成方式等问题。

关键词:同位素; 地球化学; 毛坪铅锌矿床; 昭通; 云南

中图分类号:P618.4; P591 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-5663(2011)03-0211-06

0 前言

毛坪铅锌矿床位于云南省昭通市彝良县城 205° 方向, 距县城约 13.5 km, 是滇东北地区一个重要的中—大型铅锌矿床。本矿床前人曾提出多种成因模式: 如沉积改造—侧分泌层控矿床^[1~2], 沉积—改造—后生矿床^[3], “沉积—流体贯入—构造控制”层控矿床^[4~5], 沉积—热液改造矿床^[6], 热水沉积—热液叠加改造矿床^[7]等。

矿床中硫、铅、碳、氢、氧等同位素组成和变化规律的研究, 是矿床学研究的一项重要内容, 有助于解决矿床的成矿物质来源、成矿的物理化学条件以及成矿过程等一系列重要问题^[8~10]。因此, 笔者在系统总结前人研究的基础上, 重点对其硫、铅、碳、氢、氧同位素组成进行研究, 以成矿物质和成矿流体的来源及性质, 为研究矿床成因提供依据。

1 矿区地质特征

毛坪铅锌矿床位于扬子地块西南缘, 滇东北铅锌成矿带的东部, 处于 SN 向小江深断裂、近 SN 向昭通—曲靖隐伏断裂及 NW 向垭都—紫云断裂的复合部位。矿区内出露的地层主要有中、上泥盆统、石炭系、二叠系, 而缺失奥陶系和志留系, 且地层间多以假

整合接触。其中, 上泥盆统宰格组第二段(D₃zg²)、下石炭系摆佐组上段(C₁b²)及中石炭统威宁组(C₂w)分别为 I、II、III 号矿体主要的赋矿层位, 赋矿围岩主要由米黄色、灰白色粗晶白云岩及灰白色硅质灰岩组成。矿区外围广布海西晚期喷发的峨眉山玄武岩。

由于区域上小江深断裂的左行走滑, 地层在 NW—SE 构造主压应力方向下出现波状起伏, 形成一系列褶皱和断裂。矿区构造主要有 NE 向和 NW 向两组, 其中 NE 向构造由北西向南东依次排列为放马坝压扭性断裂、毛坪压扭性断裂、洛泽河压扭性断裂及猫猫山倒转背斜, 三条断裂在剖面上呈叠瓦状展布, 一定程度上破坏了矿区内 NE 向褶皱的连续性; NW 向构造以龙街断裂为代表(图 1)。区域构造与矿田构造在矿区耦合, 形成典型的“多”字型控矿构造, 为成矿提供了有利的构造背景。其中, 猫猫山倒转背斜和 NE 向毛坪断裂是矿区的主要控矿构造。

毛坪铅锌矿床主要由 I、II、III 号矿体组成, 其形态主要呈脉状、透镜状、网脉状及“似层状”。矿体走向延深大于延长, 且沿 NE 向层间断裂产出, 集中分布于猫猫山倒转背斜倾伏端和北西倒转翼。矿体骤然尖灭或膨缩现象明显, 基本与围岩界线截然可分, 局部有浸染状过渡的特征。矿石矿物主要为闪锌

① 收稿日期: 2011-02-30 作者简介: 申屠良义(1983—), 男, 浙江桐庐人, 在读硕士研究生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事有色金属矿产的找矿与勘查工作。

项目基金: 国家自然科学基金项目(40863002); 校企合作项目“会泽—昭通超大型铅锌矿床深部及外围隐伏矿找矿预测及增储研究”。

表 1 昭通毛坪铅锌矿床硫同位素组成分析结果表

Table 1 Sulfur isotopic compositions in the Maoping Pb-Zn deposit

矿物名称(样品数)		$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$							均值
闪锌矿(7)	9.62	10.55	19.3	10.8	20.9	9.85	15.33		13.76
方铅矿(6)	7.96	8.55	8.6	16.4	8.36	9.13	—		9.83
黄铁矿(6)	12.15	15.06	9.2	24.1	14.8	15.67	—		15.16

注:表中数据据文献[3]、[5]、[7]

从不同矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化来看,闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于 9.62‰~20.9‰ 范围内,极差为 11.28‰,均值为 13.76‰;方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于 7.96‰~16.4‰ 范围内,极差为 8.44‰,均值为 9.83‰;黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于 9.2‰~24.1‰ 范围之内,极差为 14.9‰,均值为 15.16‰。多数共生硫化物之间 $\delta^{34}\text{S}$ (‰) 有黄铁矿>闪锌矿>方铅矿的关系,这与硫同位素在热液矿物体系中的平衡结晶顺序^[13]相一致,属正常分馏系列,表明他们的硫同位素组成已达到平衡。

从硫同位素组成直方图(图 2)可见, $\delta^{34}\text{S}$ (‰)大致出现以 9‰ 和 15‰ 为中心的两个集中区域,即从 7.96‰~12.15‰ 和 14.8‰~24.1‰ 之间。张理刚研究认为层控矿床 $\delta^{34}\text{S}$ (‰) 介于 18‰~25‰,相当于海水来源含矿溶液的特点,而断裂系矿床则为 2.75‰~14.84‰^[1]。毛坪铅锌矿床的硫源介于此两者之间,表明可能后期热液的改造作用使硫同位素发生了变化。

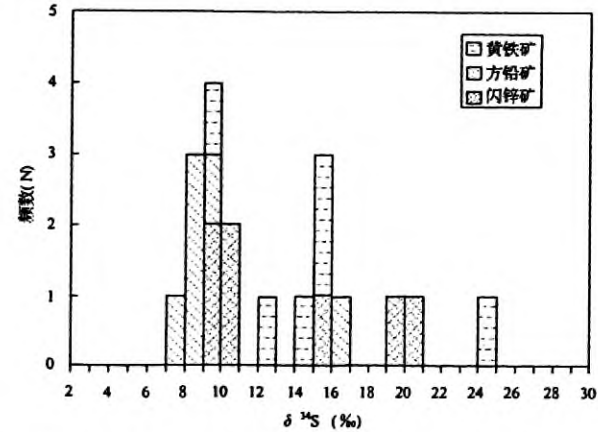


图 2 毛坪铅锌矿床硫同位素组成频率直方图

Fig. 2 Histogram showing sulfur isotopic compositions of the Maoping Pb-Zn deposit

2.2 铅同位素

矿石矿物铅同位见表 2,从表中可以看出,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值为 18.412~18.914,均值为 18.602,极

差为 0.502;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值为 15.593~15.746,均值为 15.684,极差为 0.153(较窄);而²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值为 38.561~39.176,均值为 39.044,极差 0.615(较宽)。不同矿物的铅同位素组成也有一定差异,闪锌矿铅同位素组成相对稳定,变化范围最小,其²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值分别为 18.562~18.679、15.695~15.742 和 39.020~39.168;黄铁矿的变化范围稍大,方铅矿的变化范围最大。但上述铅同位素组成极差均小于 1(最大为 0.628),说明铅来源比较稳定。

通常认为铅同位素源区特征值,尤其是 μ 值的变化能提供地质体里地质作用的信息,反映铅的来源。根据 Stacey(1975)提出幔源 $\mu=7\sim8$,壳源 $\mu>9.0$ 的划分^[14],本区的源区 μ 值介于 9.07~9.81 之间,表明为壳源。

表 2 昭通毛坪铅锌矿床铅同位素组成特征

Table 2 Lead isotopic compositions in the Maoping Pb-Zn deposit

矿物名称	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ 值
方铅矿	18.412	15.593	38.561	9.37
方铅矿	18.564	15.563	39.149	9.37
方铅矿	18.46	15.51	38.94	9.07
方铅矿	18.537	15.702	38.905	9.64
方铅矿	18.914	15.746	39.176	9.68
方铅矿	18.723	15.724	39.041	9.66
闪锌矿	18.562	15.742	39.02	9.72
闪锌矿	18.565	15.695	39.030	9.62
闪锌矿	18.679	15.728	39.168	9.7
闪锌矿	18.622	15.712	39.099	9.66
黄铁矿	18.458	15.657	38.845	9.57
黄铁矿	18.732	15.796	39.473	9.81
黄铁矿	18.595	15.727	39.159	9.69

注:表中数据据文献[3]、[5]、[7]

将矿石铅同位素数据投在 Zartman 和 Doe (1981) 的铅构造环境模式演化图^[15](图 3) 中可以发现,投影点主要集中于上地壳线附近,只有少数方

铅矿位于造山带线及地幔线附近,就此推测,本区的铅主要来源于上地壳,但存在被少量造山带铅和地幔铅混源的可能。

2.3 碳、氢、氧同位素

2.3.1 碳氧同位素

碳、氧同位素组成是示踪成矿流体来源的有效手段^[16~17]。成矿热液中的碳主要有3种可能来源:①地幔射气或岩浆来源。地幔射气和岩浆来源的碳同位素组成 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 变化范围分别为 $-5\text{‰} \sim -2\text{‰}$ 和 $-9\text{‰} \sim -3\text{‰}$ ^[18];②沉积岩中碳酸盐岩的脱气作用或含盐卤水与泥质岩相互作用。这种来源的碳同位素组成具有重碳同位素的特征,其 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 变化范围为 $-2\text{‰} \sim 3\text{‰}$,海相碳酸盐 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 大多稳定在 0.0‰ 左右^[19];③各种岩石中的有机碳。有机碳一般富集 ^{12}C ,因而碳同位素组成很低,其 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 变化范围为 $-30\text{‰} \sim -15\text{‰}$,平均为 -22‰ ^[20]。

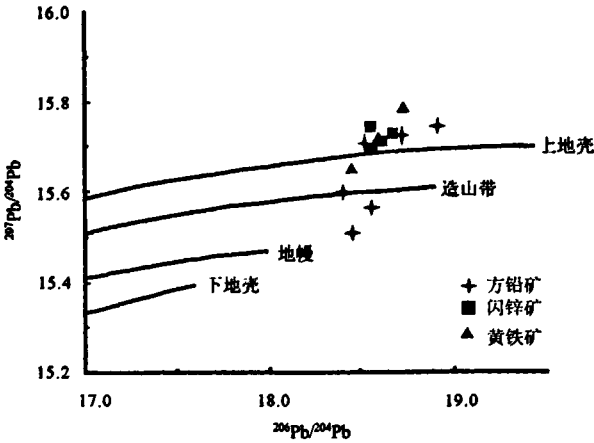


图3 毛坪铅锌矿床铅同位素组成构造模式环境图
(据 Zartman-Doe,1981)
Fig.3 lead isotopic composition diagram
of the Maoping Pb-Zn deposit
(based on Zartman-Doe,1981)

表3 昭通毛坪铅锌矿床碳、氢、氧同位素组成特征

Table 3 Carbon, hydrogen, oxygen isotopic compositions in the Maoping Pb-Zn deposit

矿物名称	$\delta^{13}C_{V-PDB}(\text{‰})$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}(\text{‰})$	$\delta^{18}O_{V-PDB}(\text{‰})$	$\delta^{18}O(\text{‰})$ (包裹体)	$\delta^{18}O_{H_2O}$ (‰)	δD_{V-SMOW} (‰)
方铅矿						-51
方铅矿				6.2		-23
方铅矿				1.8		-26
方铅矿				0.3		-62
闪锌矿						-49
闪锌矿				-9		-45
闪锌矿				-2.1		-39
闪锌矿				3.4		-37
黄铁矿				-6.8		-61
黄铁矿				-11.8		-62
黄铁矿				-7.3		-64
黄铁矿				-12.7		-42
方解石	-2.7	17.2	-13.3		8.05	-64
方解石	-1.1	18.0	-12.4		8.84	-45
方解石	-3.7	18.8	-11.7		9.64	-45
白云石	-2.8	21.4	-9.2		10.79	-35

注:碳氢氧的同位素数据来自文献[5]和[25]。水的氧同位素计算公式为: $\delta^{18}O_{V-SMOW} = 1.03086 \times \delta^{18}O_{V-PDB} + 30.86$ ^[21],计算所采用的同位素分馏方程为 $1000 \ln \alpha_{方解石-水} = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 3.39$ ^[22], $1000 \ln \alpha_{白云石-水} = 3.06 \times 10^6 T^{-2} - 3.24$ (Matthews, et al,1979)^[23]。

毛坪铅锌矿床的碳、氢、氧同位素组成特征(表3)。从表3可见,方解石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 为 $-3.7\text{‰} \sim -1.1\text{‰}$, $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 为 $17.2\text{‰} \sim 18.8\text{‰}$;白云石的

$\delta^{13}C_{V-PDB}$ 为 -2.8‰ , $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 为 21.4‰ 。根据单样品测定方解石的 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$,采用方解石-水同位素分馏方程 $1000 \ln \alpha_{方解石-水} = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 3.39$ ^[22],可求得与方解石氧同位素交换平衡时流体

包裹体水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 8.05‰~9.64‰, 平均为 8.84‰。同理根据白云石—水同位素分馏方程 $1000\ln\alpha_{\text{白云石}-\text{水}} = 3.06 \times 10^6 T^{-2} - 3.24$ [23] 可算出白云石氧同位素交换平衡时流体包裹体水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 10.79‰。将方解石和白云石流体包裹体中水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值和矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值投影到刘建明等 (1997) [24] 的 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图解 (图 4) 中, 可以看出, 方解石集中于海相碳酸盐岩区域和岩浆去气作用区域, 指示碳主要来源于海相碳酸盐岩, 并有源于深部流体碳的加入。韩润生等 (2007) 对流体包裹体的研究也显示有深部流体参与成矿 [25]。而白云石则落于海相碳酸盐岩范围内, 反映了白云岩的海相成岩环境。

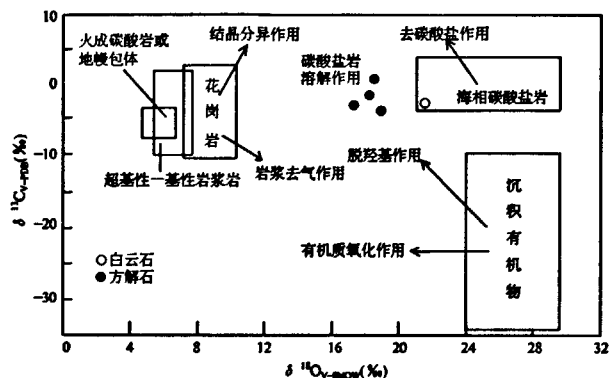


图 4 毛坪铅锌矿床 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 图解
(底图据刘建明等, 1997)

Fig. 4 Carbon versus oxygen isotopic diagram of the Maoping Pb-Zn deposit
(based on map by Liu et al., 1997)

2.3.2 氢氧同位素

成矿流体可能来自大气降水、海水、初生水、岩浆水、变质水、封存水 (包括深成热卤水和油田水) 等 [17, 26], 其氢氧同位素组成是区分不同来源流体的重要示踪剂。由本矿区矿石矿物 (方铅矿、闪锌矿、黄铁矿) 和相关岩石的氢、氧同位素组成 (表 3) 可知: 方铅矿的 δD 值为 -62‰~-23‰, 平均为 -40.5‰, 极差 -39‰, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 0.3‰~6.2‰, 平均为 2.78‰, 极差 5.9‰; 闪锌矿的 δD 值为 -49‰~-37‰, 平均为 -42.5‰, 极差 -12.0‰, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -9.0‰~3.4‰, 平均为 -2.57‰, 极差 12.4‰; 黄铁矿的 δD 值为 -64‰~-42‰, 平均为 -57.25‰, 极差 -22.0‰, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -12.7‰~-6.8‰, 平均为 -9.65‰, 极差 -5.9‰; 方解石的 δD 值为 -64.0‰~-45.0‰, 平均为 -51.33‰, 极差 -19.0‰, 其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 8.05‰~9.64‰, 平均为 8.84‰, 极差 1.59‰; 白云石的 δD 值为 -35‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 10.79‰。

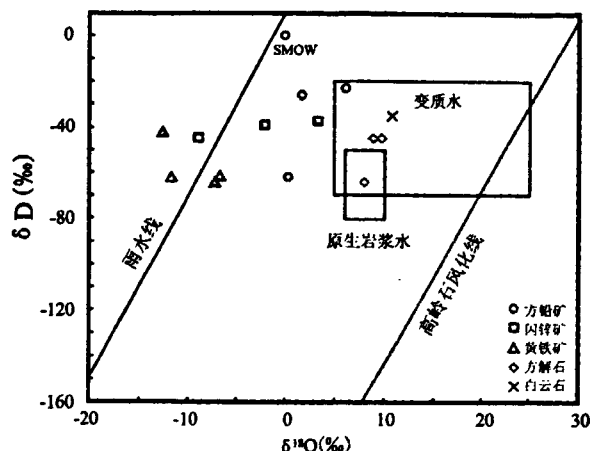


图 5 毛坪铅锌矿床 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解
Fig. 5 δD versus $\delta^{18}\text{O}$ diagram of the Maoping Pb-Zn deposit

将矿物流体包裹体中水的 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值和矿石矿物包裹体中的 $\delta^{18}\text{O}$ (包裹体) 以及方解石和白云石计算获得的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值投影到 Taylor (1979) [27] 的 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图解 (图 5) 中, 可以看出, 样品点分布较分散, 在建造水、大气降水、变质水和原生岩浆水区域内均有分布, 但大多数点落于建造水范围内。其中方解石落在变质水和原生岩浆水区域内, 推断成矿可能与交代作用以及矿区外围峨眉山玄武岩的喷发有关。白云石落在变质水区域内也显示可能与交代作用有关。矿石矿物主要落于大气降水和建造水范围内, 表明是成矿流体在向上运移过程中与下渗的大气降水混合的结果。结合该区构造及包裹体地球化学特征 [25], 该区成矿流体的形成是以构造活化变质基底为基础, 成矿流体具多源特性, 是建造水、大气降水、岩浆水和变质水的混合流体。矿床的形成可能是富含 Pb、Zn 等元素的深部流体循环上升, 并与不同性质流体混合, 淋滤、萃取围岩中的成矿元素, 最后选择有利的构造空间成矿的结果。

3 结论

毛坪铅锌矿床的硫、铅、碳、氢、氧同位素组成及其地球化学性质研究表明:

(1) 矿石中硫同位素以富重硫为特征, 主要来源于海水硫酸盐, 并有可能在一定程度上受到后期热液的改造。

(2) 矿流体中的铅来源较稳定, 主要来源于上地壳, 但存在被少量造山带铅和地幔铅混源的可能。

(3) 方解石的碳、氧同位素组成较为稳定, 显示碳主要来源于海相碳酸盐岩, 并有源于深部流体碳的加入。

(4)氢、氧同位素组成显示,成矿流体具多源性,为建造水、大气降水、岩浆水和变质水等不同性质流体的混合。

(5)矿床的形成可能是富含 Pb、Zn 等元素的深部流体循环上升,并与不同性质的流体混合,淋滤、萃取围岩中的成矿元素,最终选择有利的构造空间形成矿体。

参考文献:

- [1] 彝良地质勘探队. 云南彝良长发铜铅锌矿区补充中间地质报告书[R],1963.
- [2] 西南地质勘探公司三一四队. 云南省彝良县毛坪铅锌矿Ⅱ号矿带补充地质勘探中间地质报告[R],1989.
- [3] 柳贺昌,林开达. 滇东北铅锌银矿床规律研究[M]. 昆明:云南大学出版社,1999. 129-131.
- [4] 韩润生. 昭通毛坪铅锌矿床成矿地质条件及隐伏矿预测阶段报告[R]. 2003.
- [5] 胡彬. 云南昭通毛坪铅锌矿床地质地球化学特征及隐伏矿预测[D]. 昆明理工大学硕士学位论文,2004.
- [6] 周高明,李本禄. 云南毛坪铅锌矿床地质特征及成因初探[J]. 西部探矿工程,2005,(3):75-77.
- [7] 王超伟,李元,罗海燕,等. 云南毛坪铅锌矿床的成因探讨[J]. 昆明理工大学学报(理工版),2009,34(1):7-11.
- [8] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安:陕西科学出版社,1983:121-248.
- [9] 魏菊英,王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社,1988.
- [10] 郑淑慧,郑斯成,莫志超. 稳定同位素地球化学分析[M]. 北京大学出版社,1986.
- [11] 郑庆繁. 云南会泽矿山厂、麒麟厂铅锌矿床对流循环成矿及热水溶铜赋存块状富铅锌矿体的实践与认识[J]. 西南矿产地质,1997,11(1-2):8-16.
- [12] 陈世杰. 黔西滇东北铅锌矿床的成因探讨[J]. 贵州地质,1986,3(3):212-215.
- [13] Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. Rev. Miner,1986,16:491-559.
- [14] 赵伦山,张本伦. 地球化学[M]. 北京:地质出版社,1987.
- [15] Zartman R E and Doe B R. Plumbotectonics the model [J]. Tectonophysics,1981,75:135-162.
- [16] 郑永飞,徐宝龙,周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘,2000,47(1):34-41.
- [17] 陈骏,王鹤年. 地球化学[M]. 北京:科学出版社,2004. 116-117.
- [18] Taylor B E. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S reviews in mineralogy[A]. In: Stable isotopes in high temperature geological process[C]. Mineralogical Society of America,1986,16: 185-226.
- [19] Veizer J, Holser W T and Wilgus C K. Correlation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ secular variation[J]. Geochim. Cosmochim. Acta,1980,44: 579-588.
- [20] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Econ. Geol., 1972,67: 551-578.
- [21] Friedman I and O'Neil J R. Complication of stable isotope fractionation factors of geochemical interest [A]. In: Data of geochemistry(sixth edition) [C]. Washington D. C.; U. S. Gov. Printing Office. 1977.
- [22] O'Neil J R, Clayton R N and Mayeda T K. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. Chem. Phys., 1969, 51(12):5547-5558
- [23] Hugh R. Rollison(著). 杨学明,杨晓勇,陈双喜(译). 岩石地球化学[M]. 合肥:中国科技大学出版社,2000.
- [24] 刘建明,刘家军. 滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. 矿物学报,1997,17(4): 448-456.
- [25] 韩润生,邹海俊,胡彬等. 云南毛坪铅锌(银、铜)矿床流体包裹体特征及成矿流体来源[J]. 岩石学报(英文版),2007,023(09):2109-18.
- [26] 韩吟文,马振东. 地球化学[M]. 北京:地质出版社,2003. 248-250.
- [27] Taylor H P. Oxygen and hydrogen isotope relationships[A]. In: Barnes H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [M]. New York: John Wiley and Sons,1979:236-277.

Study on the Isotope Geochemistry of the Maoping Pb-Zn Deposit, Zhaotong, Yunnan

SHENTU Liang-yi¹, HAN Run-sheng², LI Bo³, QIU Wen-long¹

- (1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;
2. South-West Institute of Geological Survey, Geological Survey Centre of Nonferrous Metals Resources, Kunming 650093, Yunnan, China;
3. Yunnan Copper Industry (Group) Co Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: The Maoping lead-zinc deposit is a typical medium-large sized deposit in the Northeast Yunnan Pb-Zn mineralization belt. Based on analyzing geological characteristics of the deposit, this paper mainly studied the composition characteristics and geochemical nature of sulfur, lead, carbon, hydrogen and oxygen isotopic, then probed into the property and source of ore-forming fluids and how the deposit formed.

Key Words: isotope; geochemistry; the Maoping Pb-Zn deposit; Zhaotong; Yunnan