

doi: 10.12029/gc20180308

王文元, 高建国, 刘心开, 侂阳霞, 陈欣彬. 2018. 滇中荒田铅锌矿床 Rb-Sr 同位素年代学与 C-O-S-Pb 同位素地球化学特征[J]. 中国地质, 45(3): 528-543.

Wang Wenyuan, Gao Jianguo, Liu Xinkai, Nong Yangxia, Chen Xinbin. 2018. Rb-Sr isotopic geochronology and C-O-S-Pb isotope geochemical characteristics of the Huangtian Pb-Zn deposit, Central Yunnan[J]. Geology in China, 45(3): 528-543(in Chinese with English abstract).

滇中荒田铅锌矿床 Rb-Sr 同位素年代学 与 C-O-S-Pb 同位素地球化学特征

王文元¹ 高建国¹ 刘心开^{1,2} 侂阳霞¹ 陈欣彬¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国建筑材料工业地质勘查中心云南总队, 云南 昆明 650118)

摘要:滇中荒田铅锌矿床赋存于下二叠统碳酸盐岩与上二叠统峨眉山玄武岩接触界面上, 矿体主要呈似层状、透镜状产出。矿石矿物组合以闪锌矿、方铅矿为主, 脉石矿物以石英、方解石、白云石为主。热液方解石 C、O 同位素组成表明荒田铅锌矿床成矿流体中 CO₂ 的碳具有多元性, 主要来源于幔源与海相碳酸盐岩的混合碳; 硫化物硫同位素组成表明荒田铅锌矿床硫以岩浆硫为主, 可能混有其他硫源(可能包括地层硫酸盐), 铅同位素表明赋矿围岩、玄武岩和燕山期花岗岩均有可能为成矿提供了成矿物质, 是多源混合后的产物; 闪锌矿 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 (83.2±3.4) Ma, 指示荒田铅锌矿床形成于晚燕山期, 荒田铅锌矿床成矿动力学背景可能与右江褶皱带在中生代末期发生了大规模的岩石圈伸展有关。而晚二叠世海相喷发火山岩对矿区铅锌矿床的形成起了重要的盖层、赋矿层及矿化作用。综上, 荒田铅锌矿床成矿流体中的不同组分来源不同, 矿床类型为沉积-改造型矿床。

关键词:矿床地质特征; 矿床地球化学; 多元混合成矿流体; 沉积-改造型矿床; 荒田铅锌矿床
中图分类号: P618.42-43; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)03-0528-16

Rb-Sr isotopic geochronology and C-O-S-Pb isotope geochemical characteristics of the Huangtian Pb-Zn deposit, Central Yunnan

WANG Wenyuan¹, GAO Jianguo¹, LIU Xinkai^{1,2}, NONG Yangxia¹, CHEN Xinbin¹

(1. Department of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;
2. Yunnan Branch, China National Geological Exploration Center for Building Material Industry, Kunming 650118, Yunnan, China)

Abstract: The Huangtian Pb-Zn deposit occurs along the contact zone between the carbonate rocks of lower Permian and Emeishan basalt of upper Permian. Orebodies are mainly bedded and lenticular in form. The ore minerals are mainly sphalerite and galena, whereas the gangue minerals are quartz, calcite and dolomite primarily. The composition of C and O isotopes of the hydrothermal calcite indicates that the carbon of CO₂ in the ore-forming fluid is pluralistic, mainly from the mixed carbon of the mantle source and the marine carbonate rocks. The sulfur isotope composition of sulfide indicates that the sulfur in the lead-zinc deposit is

收稿日期: 2016-05-21; 改回日期: 2017-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272111)资助。

作者简介: 王文元, 男, 1991 年生, 硕士生, 主要从事矿床地质研究; E-mail: 1573529014@qq.com。

通讯作者: 高建国, 男, 1954 年生, 博士生导师, 主要从事矿产地质与勘查; E-mail: 335150686@qq.com。

dominated by magmatic sulfur and may be mixed with other sulfur sources (possibly including formation sulfate). The lead isotopes indicate that the metallogenic material mainly came from the surrounding rock. The lead isotopes indicate that the metallogenic material mainly came from the surrounding rock, basalt and Yanshanian granite, which is the product of multisource mixing. Isochron age of Rb-Sr isotope is (83.2 ± 3.4) Ma, indicating the formation of the lead-zinc deposit in the late Yanshanian period. The metallogenic dynamic background of the Huangtian Pb-Zn deposit might have been related to the large-scale lithospheric extension of the Youjiang fold belt at the end of Mesozoic. The Late Permian marine eruption volcanic rocks played an important role in the formation of lead and zinc deposits in the aspect of cover and ore-bearing layer and mineralization. All the geochemical information suggests that the source of ore-forming metals and fluids of the Huangtian Pb-Zn deposit was mixed product. The type of the deposit is sedimentary and reformed deposit.

Key words: ore deposit geological characteristics; geochemistry of ore deposits; multivariate mixed ore-forming fluid; sedimentary-transformation type ore deposit; Huangtian Pb-Zn deposit

About the first author: WANG Wenyan, male, born in 1991, master candidate, engages in the study of mineral deposits; E-mail: 1573529014@qq.com.

Fund support: Supported by National Science of Foundation of China(No.41272111).

1 引言

滇中铅锌成矿区地处扬子地块西南缘,为川—滇—黔成矿域的重要组成部分,其大地构造位置处于全球两大构造域:环太平洋构造域和特提斯构造域的结合部位,具有十分良好的成矿地质背景和形成大型、超大型矿床的地质条件(图1)。滇中地区地质背景复杂,矿产资源丰富,广泛分布有铁、铜、铅锌金等矿床,滇中铅锌成矿区内发育有铅锌矿床(点)100余处,其中大型铅锌矿床1个(建水荒田铅锌矿床)、中型铅锌矿床1个(建水苏租—幕阳铅锌矿床)。

荒田铅锌矿床是滇中成矿区产于接触界面上典型的大型铅锌矿床。荒田铅锌矿区位于云南省建水县城西南约33 km处。矿体赋存于下二叠统茅口组(P₁m)、栖霞组(P₁q)碳酸盐岩与上二叠统峨眉山玄武岩组(P₂β)玄武岩之间玄武质、灰质角砾层。滇中碳酸盐岩中荒田铅锌矿床由于缺乏同位素地球化学联合示踪研究,前人对该矿床成矿物质来源的认识不尽相同,因此对矿床成因归属存在分歧。主要有5种成因观点:(1)中低温热液矿床(火山期后或与岩浆作用有关)(周伟家等,2010;舒培华等,2012);(2)火山气液型多金属矿床(李国武等,1998);(3)气液充填交代型铅锌矿(许东等,2009;郑晓军等,2015);(4)MVT-沉积改造型(沈晓丽,2013);(5)火山沉积改造型矿床(孟志勇,2013)。前人对区域上燕山期花岗岩对于荒田铅锌矿床影响认识不足。因此,本次研究针对荒田铅锌矿床C-O-S-

Pb-Rb-Sr同位素地球化学特征,以揭示该矿床成矿物质来源、成矿时代,为探讨该成矿机制和矿床成因提供多元同位素地球化学资料。

2 区域及矿床地质概况

矿区处于华南褶皱系滇东南褶皱带个旧断褶东西延部位,北西与扬子准地台建水台隆毗邻,南西接扬子准地台哀牢山断块,为三大I级构造单元衔接-过渡部位。

区域地层缺失寒武系—志留系和白垩系,其他时代地层均有出露。最老地层为元古宙哀牢山群角闪岩相深变质岩,分布于区域南西侧。泥盆系—下二叠统主要为海相沉积,其中泥盆系以台地相碳酸盐岩为主夹滨海碎屑岩;石炭系为一套浅海碳酸盐岩沉积;二叠系下部以碳酸盐岩为主夹少量黏土质碎屑岩,上部为一套海相火山喷发的基性岩系。中生代地层分布最广,为浅海相的碎屑岩、碳酸盐岩,向上过渡为滨海—沼泽相含煤砂泥质沉积;新生界古近—新近系发育山间盆地磨拉石相沉积,第四系以残坡积、洪冲积为主。区内褶皱构造以北西向他达—荒田—新寨复背斜为主体,断裂构造为北西—南东向和北东—南西向两组断层,并以前者最为发育,为本区成矿与控矿构造。区内岩浆活动以华力西期海相—陆相玄武质熔岩为主,局部夹有酸性喷发岩,同时还有次火山相的基性—超基性岩,以基性喷发岩最为发育,早期早石炭世开始局部延续到晚石炭世;晚期在早二叠统茅口中晚期以酸性花

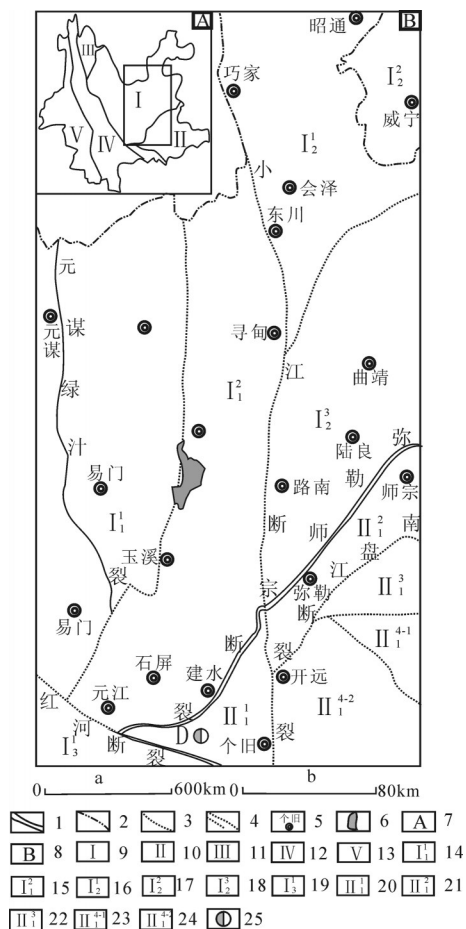


图1 滇中铅锌成矿区大地构造位置图

(修改自秦德先,1998)

1—一级大地构造单元界线;2—省界构造分区;3—二、三级大地构造单元界线;4—断裂及名称;5—地理点;6—湖水;7—云南省构造分区图;8—滇中及邻区构造分区图;9—扬子准地台;10—华南褶皱系;11—松潘—甘孜褶皱系;12—唐古拉—昌都—兰坪—思茅褶皱系;13—冈底斯—念青唐古拉山褶皱系;14—泸定—米易—武定—石屏隆断束;15—江舟—昆明台褶束;16—滇东北台褶束;17—威宁—水城台褶束;18—滇东台褶束;19—点苍山—哀牢山断褶束;20—个旧褶断束;21—罗平—师宗褶断束;22—丘北—广南褶束束;23—西畴拱褶;24—薄竹山拱褶;25—荒田铅锌矿床

Fig.1 Tectonic location of the metallogenic area in central Yunnan (modified from Qin Dexian,1998)

1-The boundary of the first level tectonic unit; 2-Provincial tectonic division; 3-The boundary of the two or three grade tectonic units; 4-Fracture and name; 5-Geographical points; 6-Lake; 7-The zoning map of Yunnan Province; 8-The zoning map of the middle and the adjacent areas of Yunnan; 9-Yangtze ground platform; 10-Southern China fold system; 11-Songpan-Ganzi fold system; 12-Changdu-Lanping-Tanggula Simao fold system; 13-Gangdisi-Nianqingtanggula Mountain fold system; 14-Luding Miyi-Wuding-Shiping faulted uplift beam; 15-Jiangzhou-Kunming platform fold; 16-Northeast Yunnan platform fold; 17-Weining-Shuicheng fold; 18-Yunnan-Dongtai fold; 19-Diancangshan-Ailaoshan fault zone; 20-Gejiu fold broken bundles; 21-Luoping-Shizong fold broken bundle; 22-Qiubei-Guangnan fold beam; 23-Xichou arched fold; 24-Bozhushan arch fold; 25-Huangtian lead-zinc deposit

花岗岩侵入。区域内沿着北西到南东向分布大中型铅锌银多金属矿床(图2)。

矿区内主要出露地层有下二叠统栖霞组、茅口组和玄武岩组,局部见第四系残坡积、洪冲积物。总体构造呈一倾向南西的波状起伏单斜,隶属他达—荒田—新寨复背斜南西翼的次级构造,由于北东侧 F_1 逆冲断层牵制,形成一系列轴向北西—南东的次级褶皱和后期形成的北西—南东向、南北向平移正断层,东西向正断层。次级褶皱控制了矿体的赋存部位。岩浆岩类型单一,为一套海相—陆相基性火山喷发岩及后期沿断裂、裂隙侵入的基性次火山岩脉(图3)。

矿区范围内发现矿体16个,其中 V_1 为主矿体(图3), $V_2\sim V_5$ 为次要矿体, $V_6\sim V_{16}$ 为更次要矿体。矿体赋存于 P_1m^2 灰岩与 $P_1\beta^{2-1}$ 碳酸盐化玄武岩间的玄武质、灰质角砾岩中($P_1\beta^1$),呈似层状、透镜状产出,矿体富集部位在背斜两翼和向斜核部,其产出形态规模严格受地层、岩性和褶皱构造的控制(云南省地质矿产局第三地质大队,1993)(图4)。

矿石矿物组合以闪锌矿、方铅矿为主,次为砷硫锑铅矿、黄铁矿(氧化后为菱锌矿、异极矿、白铅矿);脉石矿物以石英、方解石、白云石为主,次为重晶石(图5)。矿石结构以半自形—他形细粒结构为主,构造以(细脉)浸染状、斑杂状、角砾状为主,其角砾状构造为矿石的一种特殊构造类型,在各矿体中均有分布,纵横方向上各矿石构造类型呈渐变关系。近矿围岩蚀变主要有碳酸盐化、硅化、重晶石化、黄铁矿化、叶腊石化、绿泥石化、绢云母化及大理岩化,其中以前四者最普遍,与成矿关系密切。

经野外观察及室内对矿石结构,矿物穿插交代关系等研究,将矿床分为两个成矿期:即热液硫成矿期、表生期,详细特征见图6。

3 矿床地球化学特征

3.1 样品及分析方法

样品采自于荒田铅锌矿床矿区坑道及钻孔岩芯,样品新鲜。方解石样品为热液成矿期的Ⅲ成矿阶段热液方解石,硫化物为热液成矿期Ⅲ成矿阶段的硫化物。碳酸盐矿物的C、O同位素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MF-IRMS法在Iso-Prime质谱仪上完成,本方法

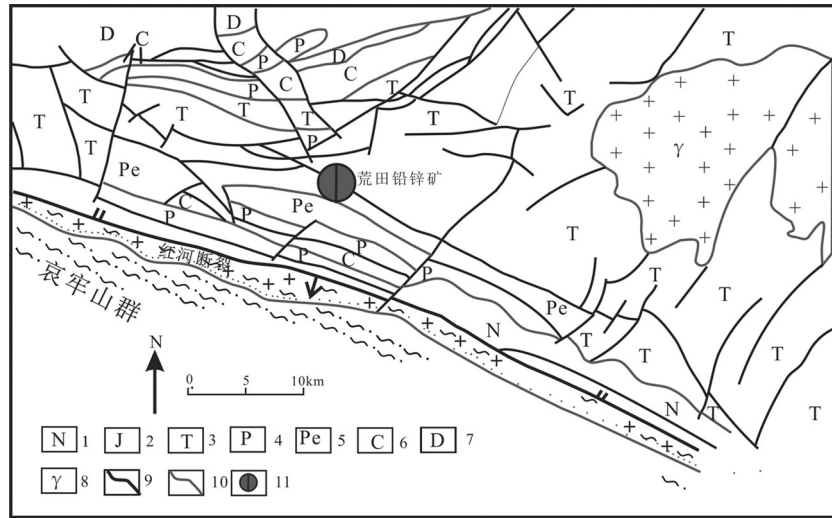


图2 荒田铅锌矿床区域地质简图(据云南省地质矿产局第二地质大队, 1993)

1—古近—新近系; 2—侏罗系; 3—三叠系; 4—二叠系; 5—二叠系玄武岩组; 6—石炭系; 7—泥盆系; 8—花岗岩; 9—断层; 10—地质界线; 11—铅锌矿床

Fig. 2 Geological sketch map of the Huangtian lead-zinc deposit (after No. 2 Geological Party, Yunnan Bureau of Geology and Mineral Exploration, 1993)

1— Palaeogene—Neogene; 2—Jurassic; 3—Triassic; 4—Permian; 5—Permian basalt group; 6—Carboniferous; 7—Devonian; 8—Granite; 9—Fault; 10—Geological boundary; 11—Lead-zinc silver deposit

用国标 GBW04405、GBW04406 做内标, $\delta^{13}\text{C}$ 以 PDB 为标准, $\delta^{18}\text{O}$ 以 SMOW 为标准, 分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ (2σ)。硫同位素组成分析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 EA-IRMS 法在连续流质谱仪上完成。本方法用国标 GBW04415 和 04414, Ag_2S 做内标, 以 CDT 为标准, 分析精度 $\pm 0.2\text{‰}$ (2σ)。铅同位素样品测试工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行, 用热表面电离质谱法进行铅同位素测量, 仪器型号为 JY/T004-1996, 对 $1\ \mu\text{g}$ 的铅 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测量精度 $\leq 0.005\%$, NBS981 标准值 (2δ): $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.1681 \pm 0.0008$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.91464 \pm 0.00033$, $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.059042 \pm 0.000037$ 。Rb-Sr 化学分离与质谱测试在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。测定方法和仪器参数参见陈福坤等(2005)和李秋立等(2006), 测量时采用指数率对 Sr 同位素比值进行质量分馏校正, 校正参数 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.37521$ 。Sr 同位素比值采用保守外精度误差 0.05‰ 。

3.2 碳、氧同位素地球化学特征

碳酸盐岩中荒田铅锌矿床方解石 C、O 同位素组成(表 1)相对均一, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 变化范围为 -3.92‰ ~

0.77‰ , 极差为 4.49‰ , 平均值为 -1.19‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 变化范围为 12.03‰ ~ 19.63‰ , 极差为 4.98‰ , 均值 16.22‰ 。

本文分析了荒田碳酸盐岩型铅锌矿床成矿流体中 CO_2 的碳主要来源。仿照毛景文(2003)等将 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值及其周边矿床方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 投影在图 7 上, 从中可以看出荒田铅锌矿床方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 介于花岗岩与海相重碳酸盐岩区域范围, 碳具有多元性。

本文采用刘家军(2004)建立的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 底图(图 8), 可以看出碳氧同位素在 C 的三大地球流体来源中的变化范围, 这三大来源主要是海相碳酸盐岩、岩浆-地幔源、沉积有机物源; 从中也可以看出, 从成矿流体产生 C 时(12 种过程)其碳、氧同位素的变化趋向(毛景文等, 2003)。例如, 从沉积有机物源经有机质氧作用生成的 C 其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 将低于其源区, 而且结晶分异程度越高, 这一差异越大。荒田铅锌矿床样品数据点(图 8)清楚地表明, 本区矿石中脉石矿物方解石的 C、O 同位素组成集中于岩浆碳酸岩与海相碳酸盐岩之间的范围内, 有 1 个样品落在沉积物混染作用或高温分异作用区, 亦可用沉积物混染作用或高温分异作用来解释。根据沈晓丽(2013)等通过对荒田铅锌矿床成矿温度研究认为

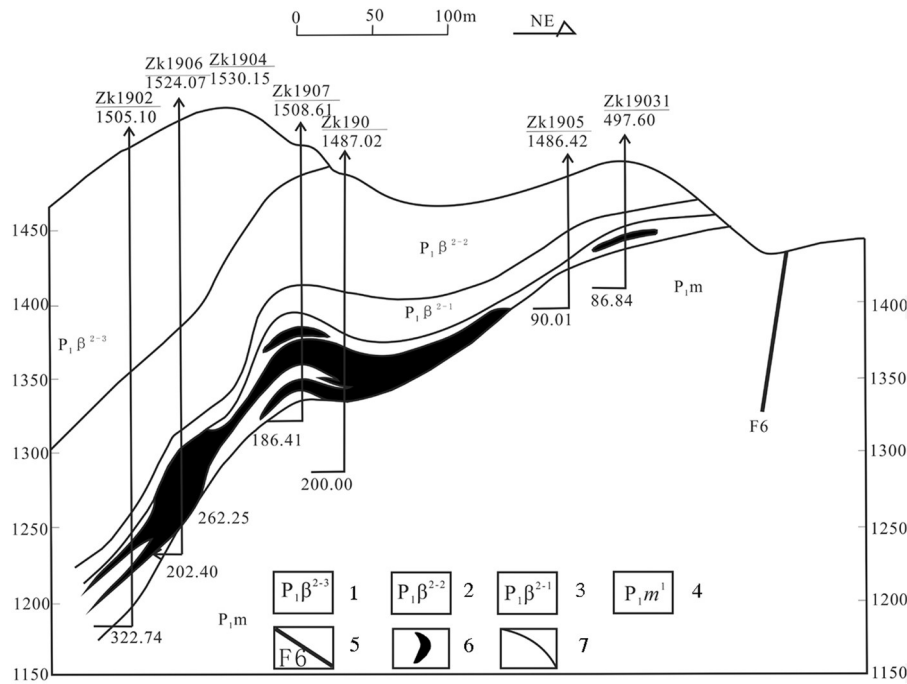


图4 荒田铅锌矿矿区19线勘探剖面图

(修改自徐云端,2014)

- 1—下二叠统:杏仁状夹块状玄武岩;2—下二叠统:致密块状夹杏仁状玄武岩;3—下二叠统:碳酸盐化玄武岩;4—下二叠统:茅口组灰岩;
- 5—实测、推测断层及编号;6—矿体露头及编号;7—地层界线

Fig.4 Geological section along No. 19 exploration line in the Huangtian deposit

(modified from Xu Yunduan,2014)

- 1—Lower Permian: almond shaped basalt intercalated with massive basalt; 2—Lower Permian massive basalt intercalated with almond shaped basalt;
- 3—Lower Permian: carbonated basalt; 4—Lower Permian: limestone of Maokou Formation; 5—Measured, inferred fault and serial number;
- 6—Orebody; 7—Stratigraphic boundary

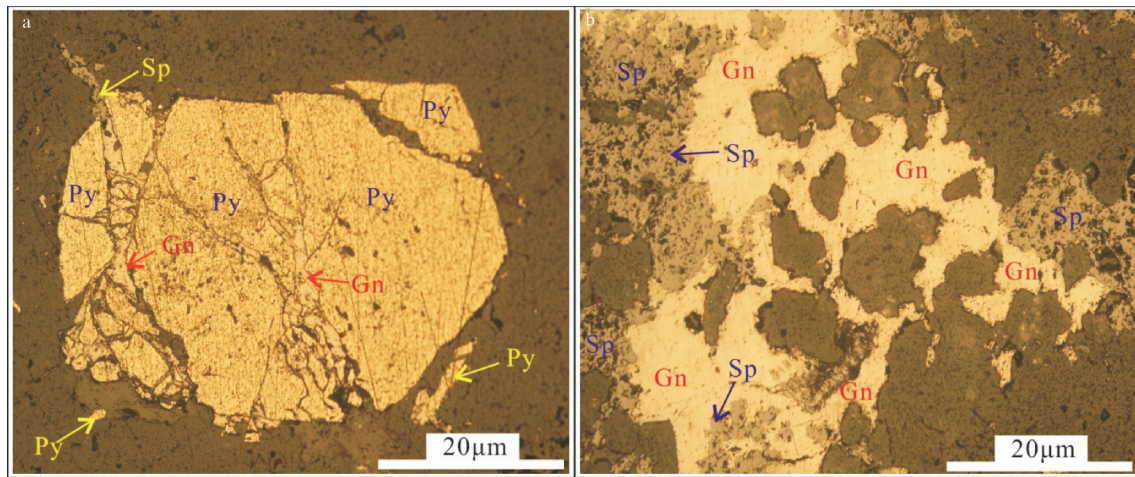


图5 荒田铅锌矿矿石矿物镜下特征

- a—方铅矿(Gn)、闪锌矿(Sp)沿黄铁矿(Py)颗粒内的裂隙交代,呈交叉结构,黄铁矿碎块是可以拼合的,表明Sp+Gn成矿形成一次张性构造环境;
- b—方铅矿(Gn)、闪锌矿(Sp)沿透明矿物的粒间及孔隙交代

Fig.5 The characteristics of ore minerals in the Huangtian Pb-Zn deposit

- a—Galena and sphalerite along the fissure of metasomatic pyrite particles within the structure of a cross; b—Galena and sphalerite along the intergranular pore and transparent mineral metasomatic formation

成矿期与成矿阶段	热液成矿期					表生氧化期
	I成矿阶段	II成矿阶段	III成矿阶段	IV成矿阶段	V成矿阶段	
石英	●	●	●		●	
绢云母		●				
方解石		●	●		●	●
白云石			●		●	
重晶石					●	
菱铁矿	●					
黄铁矿	●	●	●		●	
黄铜矿						
闪锌矿	●		●		●	
方铅矿			●		●	
硫锑铅矿			●			
车轮矿			●			
辉铜矿			●			
砷硫锑铅矿				●		
菱锌矿						●
异极矿						●
白铅矿						●
铅矾						●
水铅矿						●
褐铁矿						●
主要结构及构造	含矿硅质流体,沿裂隙充填,对角砾进行胶结	热液对围岩及含矿岩石进行改造,热液由酸性硅化-绢云母化在碳酸盐岩作用下发生中碱性叶腊石化和碳酸盐化,并有少量自形细粒黄铁矿形成	自形-半自形,细中粒方铅矿-闪锌矿-硫锑铅矿-车轮矿、辉铜矿,与脉石、石英、白云石,等形成浸染状、斑杂状矿体,为矿区内的主要成矿期	砷硫锑铅矿呈脉状,局部穿插于闪锌矿中	自形粒状重晶石,少量他形闪锌矿,少量自形方铅矿,少量他形黄铁矿,少量重晶石	粗粒状重晶石,皮壳状构造,产出次生白铅矿-水锌矿-异极矿-褐铁矿

图6 荒田铅锌矿床成矿阶段划分
(修改自徐云端,2014)

Fig.6 The division of the metallogenic stage of the Huangtian Pb-Zn deposit
(modified from Xu Yunduan,2014)

表1 荒田铅锌矿床碳氧同位素组成

Table1 Carbon and oxygen isotope composition analyses in the Huangtian Pb-Zn deposit

样品编号	矿物	$\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰}$
12-HT-QL-1360-21		0.77	12.03
12-HT-QL-1360-26	方解石	-1.05	19.63
12-HT-QL-1360-29		-3.29	17.01

平均值为4.81‰。总体显示各矿物硫同位素组成特点为黄铁矿>闪锌矿>方铅矿,符合共生硫化物的硫同位素分馏规律。据此,可以得出结论:成矿物质沉淀时达到同位素平衡,分馏阶段较单一。

荒田铅锌矿床原生矿物的组成较为简单,矿石矿物最主要为方铅矿、闪锌矿和黄铁矿,脉石矿物以石英、方解石、白云石为主,重晶石较少。由于重晶石等硫酸盐矿物较少,硫化物的 $\delta^{34}S$ 值基本可以代表成矿流体的总硫同位素组成(Ohmoto., 1972),

即 $\delta^{34}S_{S\approx S} \approx \delta^{34}S$ 硫化物,因此荒田铅锌矿床可以利用矿石中硫化物的S同位素组成来示踪成矿流体中S的来源(Ohmoto, 1972)。

岩浆热液环境中形成的硫化物 $\delta^{34}S$ 值一般较低,Hoefs(2015)认为绝大多数岩浆热液矿床S同位素变化范围为:-3‰~+1‰,而荒田铅锌矿床 $\delta^{34}S$ 与岩浆硫 $\delta^{34}S$ 接近,但是荒田铅矿床的 $\delta^{34}S$ 范围更大,部分要高于岩浆硫,由于研究区发现的地层有硫酸盐,张长青等(2008)通过研究认为二叠纪海相碳酸盐的 $\delta^{34}S$ 为11‰,而该区域大笑铅锌矿床、鲁鲁铅锌矿床中硫化物的硫来源于地层硫酸盐的热化学还原作用;由此,笔者认为荒田铅锌矿床硫以岩浆硫为主,可能混有其他硫源(包括地层硫酸盐)。

3.4 铅同位素地球化学特征

荒田碳酸盐岩型铅锌矿床中矿物及岩石的铅同位素组成(表3)显示:方解石与矿石 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 的

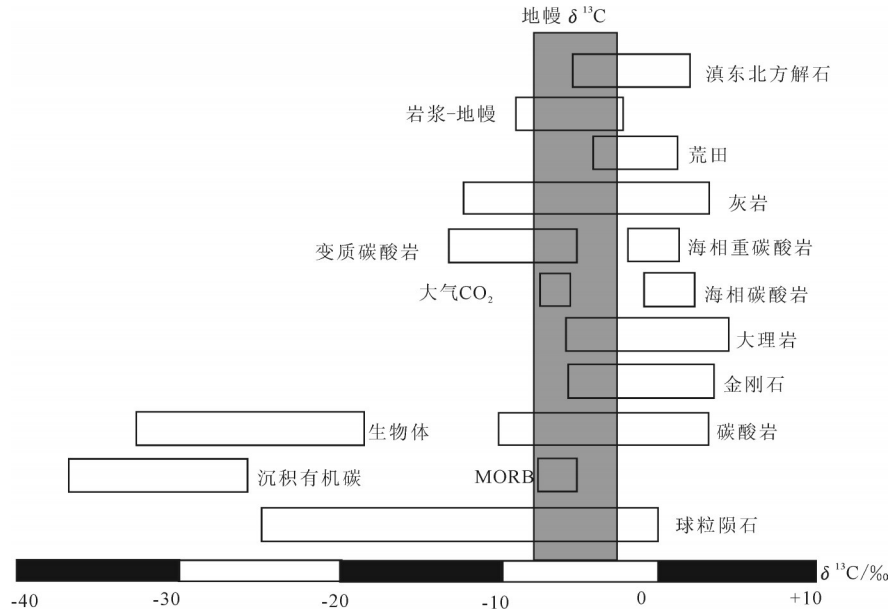


图7 荒田铅锌矿床方解石碳同位素组成(底图据毛景文等,2003,会泽数据引自黄智龙,2004a)

Fig.7 Carbon isotope composition of calcite of the Huangtian Pb-Zn deposit (base map after Mao Jingwen, 2003, The Huize date after Huang Zhilong,2004a)

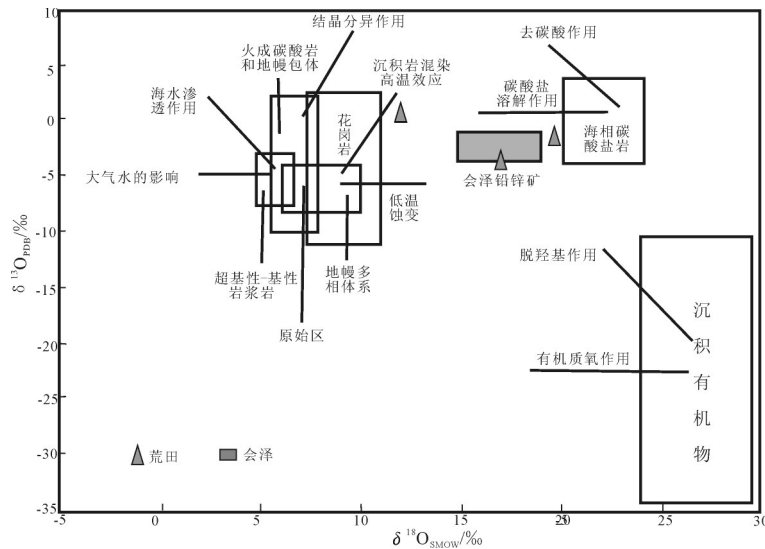


图8 荒田铅锌矿床方解石的 $\delta^{13}C_{PDB}-\delta^{18}O_{SMOW}$ 组成图(底图据刘家军等,2004,会泽数据引自黄智龙,2004a)

Fig.8 $\delta^{13}C_{PDB}-\delta^{18}O_{SMOW}$ composition of calcite of the Huangtian Pb-Zn deposit (base map after Liu Jiajun, 2004, the data of Reshuitang, Suzu-Muyang and Huamuqing are unpublished data. The Huize data after Huang Zhilong 2004a)

变化范围为18.136~18.610,均值为18.486;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb为15.603~15.870,均值为15.745;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb为38.320~39.360,均值为38.938(表3);样品的 ω 值变化范围为36.45~42.609,均值为:39.88695;Th/U的变化范围为3.67~4.07,均值为3.919; μ 值变化范围在9.270~9.860,均值为9.50535。样品 μ 值均<9.81(现

代海洋沉积物的 μ 值)。

铅同位素可以示踪Pb的来源,也能够被用来判别与铅关系密切的硫化物矿石的Zn、Cu、Fe等成矿物质的来源。全方位对比矿石、岩浆铅和围岩铅同位素从而判断矿石铅同位素的来源是一种重要方法(张乾等,2000)。川—滇—黔Pb-Zn-Ag多金属

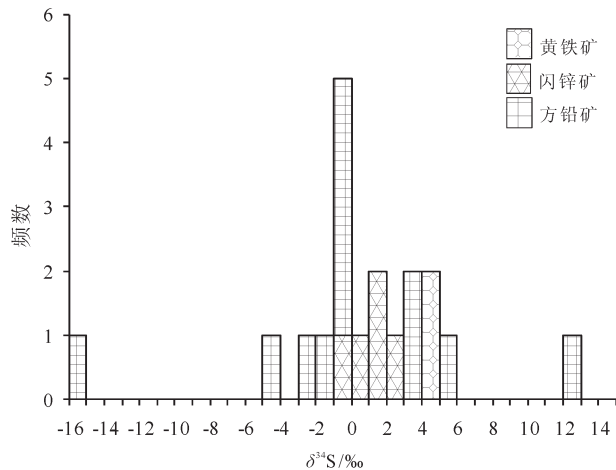


图9 荒田铅锌矿床硫同位素分布直方图

Fig.9 Sulfur isotopic histogram of the Huangtian Pb-Zn deposit

成矿域绝许多铅锌矿床赋存于不同时代的碳酸岩地层的粗晶白云岩、白云质灰岩中,区域分布大面积峨眉山玄武岩,柳贺昌等通过研究认为川滇黔成矿域成矿物质碳酸盐岩地层和玄武岩提供(柳贺昌等, 1999; 黄智龙等, 2004a), 如李连举等(1999)则认为上震旦统、下寒武统、中上泥盆统和石炭系是区域重要的矿源层; 胡耀国(1999)认为成矿物质主要来源于区域基底岩石; 李国武等(1998)通过对荒田铅锌矿床研究认为荒田铅锌矿床成矿物质可能具有多种来源。

区域上栖霞—茅口组地层 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 18.189~18.759; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.609~16.522, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.493~38.542, 峨眉山玄武岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围为 18.340~18.380; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.670~15.720; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.520~38.640(肖宪国等, 2012), 可见硫化物、赋矿围岩、峨眉山玄武岩的具有类似的同位素变化范围, 表明赋矿围岩和峨眉山玄武岩均有可能为成矿提供成矿物质。前已述及, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 组成相对均一, 可能本矿床在成矿流体在成矿之前存在均一化过程。据 Zartman et al. (1981) 的铅同位素构造模式图解(图 10), 可见投影点在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上, 主要投影在上地壳演化曲线之上和地壳与造山带演化曲线之间, 上地壳和造山带演化线之间, 可能显示在成矿作用中, 各金属硫化物的金属成矿物质可能为地壳深部的同一岩浆源区产物。直线的斜率

表2 荒田铅锌矿床硫同位素组成

Table 2 Sulfur isotopic composition of the Huangtian Pb-

Zn deposit

样品号	样品名称	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	数据来源
荒-1	方铅矿	3.8	
荒-2	方铅矿	-15.4	
12HT-QL-1360-26	方铅矿	-1.29	
12HT-QL-1360-27	方铅矿	-0.24	
12HT-QL-1360-30	方铅矿	-0.96	
12HT-QL-1360-31	方铅矿	-0.06	本文
12HT-QL-1360-35	方铅矿	12.96	
12HT-QL-1360-36	方铅矿	-2.13	
12-HT-QL-1360-33	闪锌矿	0.78	
12-HT-QL-1360-27	闪锌矿	1.08	
12-HT-QL-1360-36	闪锌矿	-0.05	
12-HT-QL-1360-31	闪锌矿	1.2	
B1363	黄铁矿	4.78	
B1363	黄铁矿	4.84	
NG0634	方铅矿	-0.75	
NG1425	闪锌矿	2.95	徐云端, 2014
XD009	方铅矿	-4.51	
HT25-2	方铅矿	3.58	
C0948	方铅矿	5.10	

比较大, 显示该直线可能不是铅同位素的演化曲线, 推测是上地壳和上地幔铅两端源组分所组成的混合线。因此, 起初, 该深源岩浆源区形成可能是因为洋壳俯冲作用而有幔源成分的加入, 其后, 区域性构造岩浆演化作用使该深源岩浆源区逐渐成熟, 并在早中生代向上侵位于上地壳深部的造山带根部, 在燕山晚期构造岩浆演化而重熔产生。而区域上燕山期花岗岩钾长石铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围为 18.359~18.415; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.613~15.64, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.723~38.741(於崇文等, 1988)。区域上花岗岩钾长石与研究区矿物铅同位素组成成分相似。铅是多源混合后的产物, 铅可能与燕山期花岗岩存在联系。这些 Pb 同位素组成特征表明, 本区成矿物质可能由赋矿地层、燕山期花岗岩和峨眉山玄武岩提供, 区域上不同时代碳酸盐地层可能提供了部分成矿物质。

表3 荒田铅锌矿床铅同位素组成
Table 3 The lead isotope composition of the Huangtian Pb-Zn ore deposit

序号	样号	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	t/Ma	μ	ω	Th/U	数据来源
1	12HT-Q1-1360-21	方解石	18.512	15.626	38.496	125	9.500	36.450	3.710	本文
2	12-HT-QL-1360-35	方铅矿	18.313	15.617	38.553	259	9.510	37.690	3.840	
3	荒-1	矿石	18.136	15.779	38.346	570	9.860	39.400	3.870	
4	荒-2	矿石	18.392	15.603	38.57	184	9.470	37.190	3.800	
5	C0948	方铅矿	18.420	15.641	38.824	211	9.54	38.43	3.90	徐云端, 2014
6	NG0634	方铅矿	18.401	15.645	38.737	229	9.55	38.22	3.87	
7	荒田 PD2	方铅矿	18.61	15.86	39.36	340	9.626	42.416	4.05	李国武等, 1998
8	荒田 PD1	方铅矿	18.58	15.86	39.36	361	9.629	42.609	4.07	
9	荒田 PD1	方铅矿	18.59	15.85	39.34	342	9.608	42.348	4.06	
10	荒田 PD1	方铅矿	18.57	15.82	39.24	320	9.551	41.721	4.02	
11	荒田 PD2	方铅矿	18.59	15.84	39.32	330	9.588	42.153	4.05	
12	回新	方铅矿	18.59	15.84	39.34	342	9.608	42.348	4.05	
13	荒田 PD2	闪锌矿	18.54	15.77	39.13	282	9.458	40.917	3.99	
14	荒田 PD2	砷铅矿	18.43	15.67	38.70	240	9.278	38.749	3.85	
15	荒田 PD2	闪锌矿	18.59	15.87	39.31	366	9.647	42.440	4.05	
16	荒田 PD2	闪锌矿	18.47	15.67	38.32	210	9.273	36.920	3.67	
17	荒田 PD1	闪锌矿	18.58	15.78	39.13	265	9.473	40.770	3.96	
18	荒田 PD1	方铅矿	18.44	15.67	38.81	228	9.270	39.112	3.89	
19	荒田 ZK-5	玄武岩	18.34	15.72	38.64	368	9.385	39.565	3.88	
20	荒田 ZK-5	玄武岩	18.38	15.67	38.52	277	9.283	38.291	3.8	

3.5 Rb-Sr同位素地球化学特征

热液矿物中Rb-Sr主要赋存在矿物晶格中,或赋存在固态微包体、流体包裹体中,随着测试技术的发展,自从Rb-Sr等时线法成功的运用于MVT铅锌矿床定年、众多学者对Rb-Sr定年法进行了大量的研究,证明了Rb-Sr法对铅锌矿床定年的有效性(Christensen et al., 1995; Chen et al., 2009; 祁进平等, 2009; 郑伟等, 2013; 石得凤等, 2013)。同理,许多学者们也运用Rb-Sr对研究区周边铅锌矿床进行了大量的研究(张长青等, 2005, 2008; 蔺志永等, 2010; 田世洪等, 2010; 周家喜, 2011; 张云新等, 2014)。

本次在荒田铅锌矿床中采集5件闪锌矿样品进行测试,荒田闪锌矿单矿物Rb、Sr含量存在一定的变化(表4): $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化范围分别为0.2795~5.441和(0.711057±13)~(0.717193±10)。由ISOPLOT软件计算,研究区7件闪锌矿的初始值

($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i为(0.71079±0.00013),等时线年龄为(83.2±3.4) Ma(图11)。

本次对荒田铅锌矿床硫化物闪锌矿单矿物铷锶同位素进行测定,前人在研究 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的二元混合体系时提出,一组参加等时线拟合的样品,通过对它们的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\text{Sr}^{-1}$ 、 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}-\text{Rb}^{-1}$ 作图,可以判断是否是混合线,当两者为正相关时,为混合线,二者非正相关时,而获得的等时线年龄能代表成矿阶段的成矿年龄(刘玉平等, 2007; 陶琰等, 2010; 黄华等, 2014; 李随民等, 2014)。本次将荒田铅锌矿床单矿物铷锶同位素的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 Sr^{-1} 、 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 、 Rb^{-1} 作图(图12),由图可知荒田铅锌矿床各要素之间不存在相关性。因此,可以认为硫化物闪锌矿Rb-Sr所拟合的直线具有等时线意义。本次获得荒田铅锌矿床成矿年龄为(83.2±3.4) Ma。刘玉平等(2007)测定都龙老君山花岗岩形成年龄为:(92.9±1.9) Ma;程彦博等(2009)研究表明白沙冲和北炮台岩体分别形

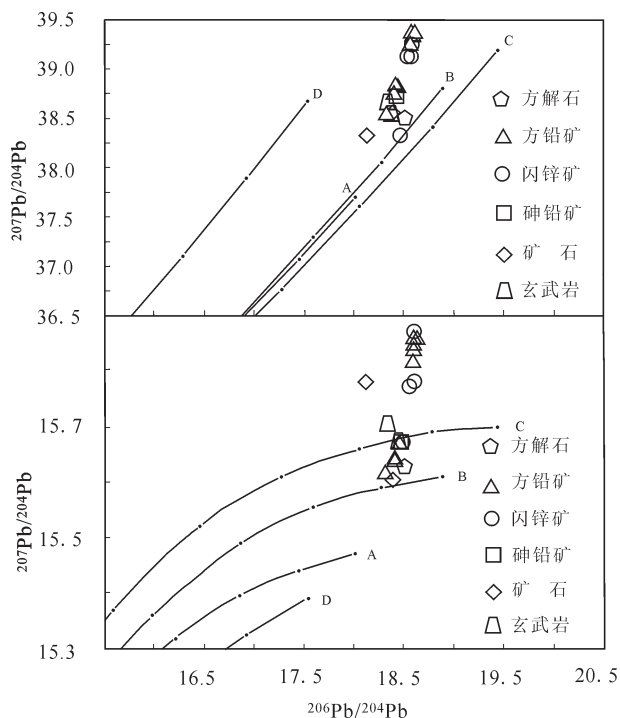


图10 荒田铅锌矿床铅同位素图解(底图据 Zartman, 1981; A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳)

Fig.10 The lead isotope histogram of the Huangtian Pb-Zn ore deposit (base map after Zartman,1981) (A-Mantle; B-Orogenic; C-Upper Crust; D-Lower Crust)

表4 荒田铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素组成
Table 4 The Rb-Sr isotope composition of calcite from the Huangtian Pb-Zn ore deposit

编号	矿物	Rb($\mu\text{g/g}$)	Sr($\mu\text{g/g}$)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
C66		1.237	3.954	0.9182	0.711981 \pm 12
C69		1.401	3.128	1.327	0.712246 \pm 9
C72	闪锌矿	1.953	2.432	2.369	0.713082 \pm 12
C80		0.1406	1.485	0.2795	0.711057 \pm 13
C100		1.792	0.9738	5.441	0.717193 \pm 10

成于(77.4 \pm 2.5) Ma 和(82.8 \pm 1.7) Ma, 可见前人获得年代学数据与本次取得的年代学数据在误差范围内是一致的。因此, 本次取得的成矿年代学数据可靠, 其年龄基本可以代表矿床的成矿年龄。而本次取得的年代学数据误差较大, 可能是矿床本身的规模较小等因素造成。

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 是判断成岩成矿物质来源的重要指标, 在矿床地质研究中, 常利用其来示踪成矿物质来

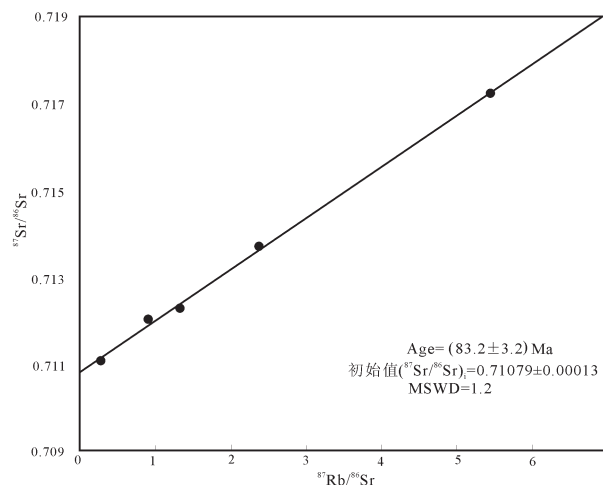


图11 荒田铅锌矿床闪锌矿 Rb-Sr 同位素等时线图
Fig.11 Rb-Sr isotope isochron of sphalerite from the Huangtian Pb-Zn ore deposit

源, 经本次测定荒田铅锌矿床闪锌矿单矿物颗粒的铷锶同位素的初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为: (0.71079 \pm 0.00013), 暗示了成矿物质应来源于相对富放射性成因 Sr 的源区或成矿流体曾经流经富放射性成因 Sr 的地质体。而峨眉山玄武岩铷锶同位素初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 的变化范围为: 0.703932~0.707818(张招崇等, 2003), 地幔铷锶同位素的初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 (0.704 \pm 0.002), 扬子地块西南缘各时代沉积的碳酸盐岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 为 0.707256~0.72017(张自超, 1995; 潘忠华, 1996), 燕山期花岗岩铷锶同位素初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 的变化范围为 0.6858~0.7251(李肖龙等, 2011), 由以上可知研究区内典型碳酸盐岩型铅锌矿床的闪锌矿较地幔和峨眉山玄武岩有更多放射性成因 Sr。而研究区内各时代沉积碳酸盐岩、燕山期花岗岩中均含有较多放射性成因的 Sr, 说明研究区典型铅锌矿床成矿物质可能来自于赋矿碳酸盐岩、燕山期花岗岩或者成矿流体曾经流经这些富放射性成因 Sr 的地质体。结合本次对典型碳酸盐岩型铅锌矿床单矿物颗粒闪锌矿铷锶同位素测年学取得的年代学数据和区域地质资料, 可知荒田铅锌矿床成矿物质则可能来自于燕山期花岗岩和赋矿碳酸盐岩, 或者流经这些富放射性成因的 Sr。

荒田铅锌矿床位于弥勒—师宗断裂和红河断裂夹持的部位, 紧邻右江褶皱带, 矿区以东约 20 km 的渣腊附近出露燕山期花岗岩体(龙岔河岩体和神山水

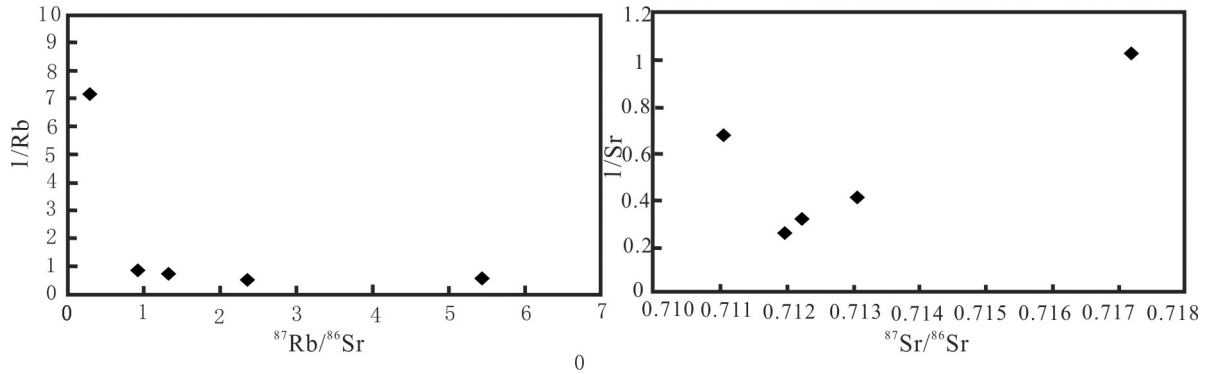


图12 荒田铅锌矿床闪锌矿 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\text{Sr}^{-1}$ 、 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}-\text{Rb}^{-1}$ 关系图
Fig.12 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-\text{Sr}^{-1}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}-\text{Rb}^{-1}$ diagrams of sphalerite from the Huangtian Pb-Zn ore deposit

岩体)。通过荒田稀土元素和C-O-S-Pb同位素地球化学特征研究认为荒田铅锌矿床成矿物质来源可能部分来自燕山期花岗岩,而荒田铅锌矿区以张性为主兼具扭性的断裂构造为主,反映了一种以区域拉张为主的伸展剪切变形机制,属燕山晚期构造作用的产物。程彦博等(2009)研究认为云南个旧锡多金属矿田的龙岔河似斑状花岗岩形成于 $(81.2\pm 1.4)\sim(83.2\pm 1.4)$ Ma。杨宗喜(2009)认为右江褶皱带在中生代末期发生了大规模的岩石圈伸展,而且该伸展事件与区内大规模成岩成矿事件密切相关,是区内大规模成岩成矿事件的动力学背景。因此,荒田铅锌矿床成矿动力学背景可能与右江褶皱带在中生代末期发生了大规模的岩石圈伸展有关。

4 成矿作用讨论

矿体赋存于下二叠统茅口组(P_1m)、栖霞组(P_1q)碳酸盐岩与上二叠统峨眉山玄武岩组($P_2\beta$)接触带部位。玄武岩以溢流相为主的含橄榄玄武岩、致密块状玄武岩及杏仁状玄武岩。底部玄武质、灰质角砾岩为矿区主要含矿层位,该套晚二叠世海相喷发火山岩对矿区铅锌矿床的形成起了重要的盖层(玄武岩)和赋矿层(玄武质、灰质角砾岩)作用。据坑道采集的771件玄武岩样,344件灰岩样品测试分析资料统计(表5),玄武岩铅、锌背景值均高于或略高于地壳丰度值,反映玄武岩有提供成矿物质的可能性,灰岩中铅的背景值较高,是地壳丰度值的6.93倍,锌的背景值低于地壳丰度值,说明矿体中有一部分铅来自较老的地层,间接反映了矿区铅同位素的组成特征。

晚二叠世早期,滇东南印支期沉降带西缘发生了强烈的拉张沉陷。在此过程中该区经历了基性火山喷发-沉积不同阶段,同时也带来了部分成矿物质。

该区南东部为燕山期花岗岩岩体,著名的个旧锡钨铅锌多金属矿床与该岩体密切相关,已证实沿岩体向外具有明显的金属分带性。从Rb、Sr年代法等时线年龄为 (83.2 ± 3.4) Ma判断,该区受到燕山运动时花岗岩侵入作用影响。在花岗岩体侵入过程中产生巨大的驱动力,导致玄武岩与碳酸盐岩接触界面之间产生摩擦与滑动,在二者的接触界面上形成了玄武质、灰质角砾岩层。角砾岩层是矿体的赋存层位,其岩性、厚度与矿化关系密切,玄武质为主的角砾岩中,铅锌主要沿角砾边缘充填形成星点、细脉-网脉、团块状铅锌矿石,矿化不均匀,铅锌品位低,铅含量相对较高;灰质为主的角砾岩中,以锌矿化为主,铅锌呈胶结物,部分交代角砾形成矿化均匀,品位高的块状、角砾状、斑杂、浸染状铅锌矿石(图13),厚度0~113.77 m。

热液方解石C-O同位素反映成矿流体中的 CO_2 的碳具有多元性,主要来源于幔源与海相碳酸盐岩的混合碳。硫化物S同位素分析结果说明,荒

表5 荒田铅锌矿床围岩中铅、锌背景值
Table 5 Background values of lead and zinc in surrounding rock in the Huangtian Pb-Zn deposits

地层岩性	样数	Pb/ 10^6	富集系数	Zn/ 10^6	富集系数	资料来源
玄武岩	771	54.66	4.56	141.56	1.51	
灰岩	344	83.14	6.93	81.42	0.87	徐云端, 2014
地壳丰度值		12		94		

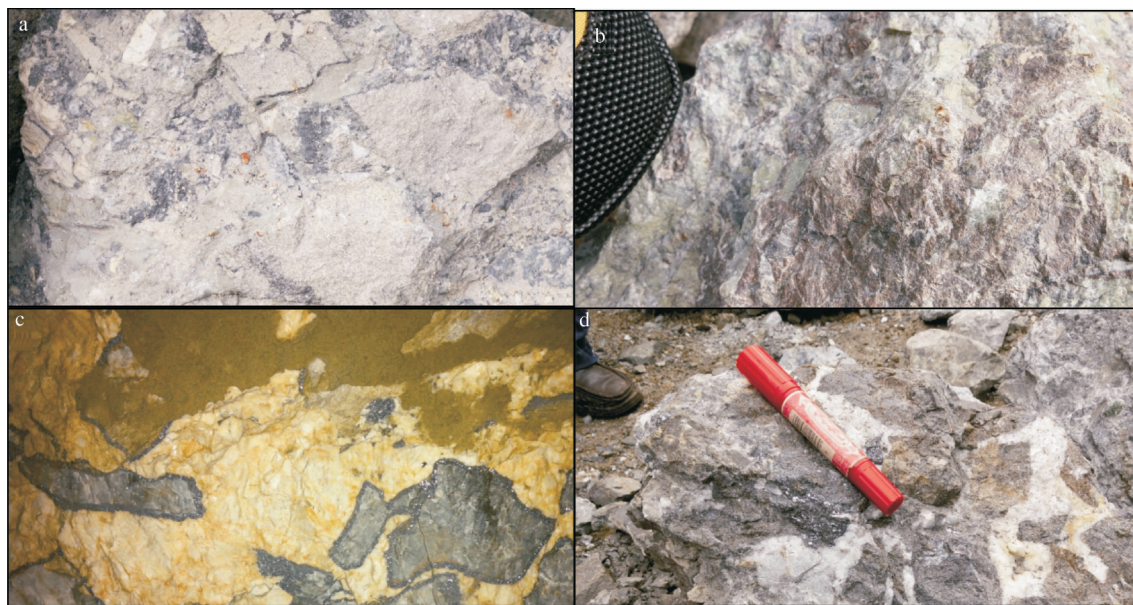


图13 荒田铅锌矿床角砾岩型矿石构造

(徐云端,2014)

a—25家老坑角砾岩型铅矿石(角砾为凝灰岩,胶结物为方铅矿、凝灰质);b—25家老坑角砾岩型锌矿石(角砾为绿泥石、绿帘石化凝灰岩,胶结物为闪锌矿);c—苍台2403坑角砾岩型铅矿石(角砾为碳酸岩,边缘包有一层方铅矿;胶结物主要为白云石);d—苍台矿段角砾岩型铅锌矿石(角砾为闪锌矿(褐色)、方铅矿(铅灰色)混杂在一起;胶结物主要为方解石)

Fig.13 Breccia type ore structure of the Huangtian Pb-Zn ore deposit

(modified from Xu Yunduan,2014)

a—25 old pit breccia lead ores (breccia comprising tuff, cements are galena and tuff); b—25 old pit breccia type zinc ore (breccia comprising chlorite and epidotization tuff, cements comprising sphalerite); c—Cangtai 2403 pit breccia ores (breccia carbonate rocks, the edge of the package with a layer of galena; The cement is mainly dolomite; d—Cangtai breccia type lead-zinc ore (breccia comprising sphalerite (brown) and galena (gray) mixed together; the main cementing material is calcite)

田铅锌矿床硫以岩浆硫为主,可能混有其他硫源(可能包括地层硫酸盐)。

Pb同位素组成证实,成矿流体中的金属物质可能由赋矿地层、燕山期花岗岩、二叠纪玄武岩提供,区域上不同时代碳酸盐地层可能提供了部分成矿物质。由锶同位素可知荒田铅锌矿床成矿物质则可能来自于燕山期花岗岩和赋矿碳酸盐岩,或者流经这些富放射性成因的Sr。因此,荒田铅锌矿床成矿流体中不同组分来源不同,Rb-Sr同位素进行测试荒田铅锌矿床5件闪锌矿的初始值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)为(0.71079±0.00013),等时线年龄为(83.2±3.4) Ma,结合成矿流体包裹体研究成果(徐云端,2014),可将该区成矿作用概括为:早二叠世碳酸盐岩沉积后伴随滇东南及区域性大范围基性火山喷发-沉积岩及成矿物质在接触界面上相对富聚,在燕山期花岗岩体侵入的巨大驱动力作用下导致接触界面岩石破碎形成角砾岩层,被后期混合含矿流体胶结成矿,矿床类型为沉积-改造型矿床。

5 结 论

荒田铅锌矿床C-O-S-Pb-Rb-Sr同位素研究表明,成矿流体中的CO₂的碳具有多元性,主要来源于幔源与海相碳酸盐岩的混合碳。荒田铅锌矿床硫以岩浆硫为主,可能混有其他硫源(可能包括地层硫酸盐)。本区成矿物质可能由赋矿地层、燕山期花岗岩和峨眉山玄武岩提供,区域上不同时代碳酸盐地层可能提供了部分成矿物质;Rb-Sr等时线年龄为(83.2±3.4) Ma,为晚燕山期年龄。

通过矿床地质和矿床地球化学研究证实成矿物质具有多源性。

致谢:中国科学院地球化学研究所周家喜副研究员在成文过程给予了指导,审稿专家及责任编辑对论文提出了宝贵修改意见,在此表示衷心的感谢。

References

Chen Fukun, Li Qiuli, Li Chaofeng, Li Xianghui, Wang Xiuli, Wang

- Fang. 2005. Prospect of high precision mass spectrometer in isotope geochemistry[J]. *Geoscience*, 30(6): 639–645 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Pirajno F, Li N, Cuo D S, Lai Y. 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe hosted gold deposit, Qinling organ, Henan Province, China: Implications for ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 35: 245–261.
- Cheng Yanbo, Mao Jingwen, Xie Guiqing, Chen Maohong, Yang Zongxi. 2009. Zircon U–Pb dating of granites in Gejiu superlarge tin polymetallic orefield and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 297–312 (in Chinese with English abstract).
- Christensen J N, Halliday A N, Vearncombs I R, Kesler S E. 1995. Testing models of Mississippi valley–type lead–zinc deposits and their implications for episodic basin dewatering and deposit genesis[J]. *Economic Geology*, 90: 877–884.
- Gao Jianguo, Luo Jiangping. 1999. Contrasting analysis on the ore forming process of east and west orebody of Huili Pb–Zn deposit, Sichuan[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, (1): 94–100 (in Chinese).
- Gemmell J B, Sharpe R, Jonasson I R, Herzig P M. 2004. Sulfur isotope evidence for magmatic contributions to submarine and subaerial gold mineralization: Conical seamount and the Ladolam gold deposit, Papua New Guinea[J]. *Economic Geology*, 99: 1711–1725.
- Hu Yaoguo. 1999. Occurrence of Silver, Source of Mineralized Substances and Ore–forming Mechanism of Yinchangpo Silver–Polymetallic Deposit, Guizhou Province, China[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Huang Hua, Zhang Changqing, Zhou Yunman, Xie Huafeng, Liu Bo, Xie Yongfu, Dong Yuntao, Yang Chunhai, Dong Wenwei. 2014. Rb–Sr isochron age of Jinchanghe Fe–Cu–Pb–Zn polymetallic deposit in Yunnan Province and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 33(1): 123–136 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhilong, Chen Jin, Han Runsheng. 2004a. Geochemistry and Ore Genesis of Huize Super–large Lead–zinc Deposit, Yunnan Province: Concurrently Discuss the Relationship between Emeishan Basalt and Lead–zinc Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–187 (in Chinese).
- Huang Zhilong, Li Wenbo, Chen Jin, Xu deru, Han Ruansheng, Liu Congqian. 2004b. Carbon and oxygen isotope geochemistry of the Huize superlarge Pb–Zn ore deposits in Yunnan Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(1): 53–59 (in Chinese with English abstract).
- Jochen Hoefs. 2015. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. Berlin: Springer International Publishing Switzerland.
- Li Guowu, Yang Guangbin, Yang Xueguang. 1998. Sulfur and lead isotopic characteristics of volcanogenic silver polymetallic mineralization zone in the Huangtian–Xidong area, Jianshui, Yunnan and their geological implications[J]. *Geology–Geochemistry*, 26(4): 21–26 (in Chinese with English abstract).
- Li Lianju, Liu Hongtao, Liu Jishun. 1999. A discussion on the source bed of Pb–Zn–Ag deposits in northeast Yunnan[J]. *Mineral Exploration* (in Chinese).
- Li Qiuli, Chen Fukun, Wang Xiuli, Li Xianghui, Li Chaofeng. 2006. Dating with ultra low background chemical processes and single particle mica Rb–Sr isochrone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 321–325 (in Chinese).
- Li Suimin, Wei Minghui, Li Senwen, Li Ziye, Li Yuhong, Han Yuchou, Li Yongfeng. 2014. Rb–Sr and Sm–Nd isochron ages of the Liangjiagou Pb–Zn–Ag ore deposit in Chicheng County of Zhangjiakou city and their geological implications[J]. *Geology in China*, 41(2): 529–539 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Wang Yinxi. 2004. Age of the giant Huize Zn–Pb deposits determined by Sm–Nd dating of hydrothermal calcite[J]. *Geological Review*, 50(2): 189–195 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaolong, Mao Jingwen, Cheng Yanbo. 2011. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Baishachong and Beipaotai granitic stocks in Gejiu, Yunnan Province, Southwest China[J]. *Geological Review*, 57(6): 838–850 (in Chinese with English abstract).
- Lin Zhiyong, Wang Denghong, Zhang Changqing. 2010. Rb–Sr isotopic age of sphalerite from the Paoma lead–zinc deposit in Sichuan Province and its implications[J]. *Geology in China*, 37(2): 488–496 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hechang, Lin Wenda. 1999. Regularity Research of Pb–Zn–Ag Ore Deposits North–east Yunnan Province[M]. Kunming: Yunnan University Press(in Chinese).
- Liu Jiajun, He Mingqin. 2004. Oxygen and carbon isotopic geochemistry of Baiyangping silver–copper polymetallic ore concentration area in Lanping basin of Yunnan Province and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 23(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yiping, Li Zhengxiang, Li Huimin, Guo Liguoguo, Xu Wei, Ye Lin, Li Chaoyang, Pi Daohui. 2007. U–Pb geochronology of cassiterite and zircon from the Dulong Sn–Zn deposit: Evidence for Cretaceous large–scale granitic magmatism and mineralization events in southeastern Yunnan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 967–976 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Wang Zhiliang, Li Houmin, Wang Chenyu, Chen Yuchuan. 2003. Carbon and oxygen isotope components in the Permian basalt–hosted copper deposit in Ludian area, Yunnan: Implication for the mineralization process[J]. *Geological Review*, 49(6): 610–615 (in Chinese with English abstract).
- Meng Zhiyong. 2013. An analysis of the genesis of Huangtian Pb–Zn deposit in Jianshui, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 32(4): 426–428 (in Chinese with English abstract).
- Pan Zhonghua, Fan Delian. 1996. Isotope geochemistry of vein fluorite and barite deposits in southeast Sichuan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 127–136 (in Chinese with English abstract).
- Qi Jinping, Song Yaowu, Li Shuangqing, Chen Fukun. 2009. Single–grain Rb–Sr isotopic composition of the Xigou Pb–Zn–Ag deposit, Luanchuan, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25

- (11): 2843–2854 (in Chinese with English abstract).
- Qin Dexian, Gao Jianguo, Tian Yulong. Geological Study of Lead-Zinc Deposit in Yunan[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1998(in Chinese).
- Shen Xiaoli. 2013. Research on the Permian Mafic Magma Mineralization in Honghe Prefecture, Yunnan Province[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Shi Defeng, Zhang Shugen, Han Shili, Xu Zhongfa. 2013. Isotope geochemistry of Dingjiashan Pb–Zn deposit in central Fujian Province and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2(5): 1003–1010 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematic of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Econ. Geol., (67): 551–579.
- Shu Peihua, Yang Jun, Zhang Yantao. 2012. A new viewpoint of the genesis of Xiadong Pb–Zn–Ag multimetallic deposit In Jianshui[J]. Yunnan Geology, 31(4): 453–455 (in Chinese with English abstract).
- Tao Yan, Hu Ruizhong, Zhu Feilin, Ma Yansheng, Ye Lin, Cheng Zengtao. Ore-forming age and the geodynamic background of the Hetanping lead–zinc deposit in Baoshan, Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(6): 1760–1772 (in Chinese with English abstract).
- Tian Shihong, Yang Zhusen, Hou Zengqian, Liu Yingchao, Gao Yanguang, Wang Zhaolin, Song Yucai, Xue Wanwen, Lu Haifeng, Wang Fuchun, Su Aina, Li Zhenzhen, Wang Yinxi, Zhang Yubao, Zhu Tian, Yu Changjie, Yu Yushuai. 2010. Rb–Sr and Sm–Nd isochron ages of Dongmohazhua and Mohailaheng Pb–Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications[J]. Mineral Deposits, 28(6): 747–758 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xianguo, Huang Zhilong, Zhou Jiayi, Li Xiaobiao, Jin Zhongguo, Zhang Luanwei. 2012. Source of metallogenic materials in the Shaojiwan Pb–Zn deposit in northwest Guizhou Province, China: An evidence from Pb isotopic composition[J]. Acta Mineralogica Sinica (in Chinese with English abstract).
- Xu Dong, Jiang Chengxing, Wang Jianfei. 2009. The prospecting potentiality of Pb–Zn–Ag deposit in the area from Dalengshan of Shiping to Xiadong of Jianshui in Yunnan[J]. Yunnan Geology, 28(3): 243–249 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yunduan. 2014. Yunnan Jianshui County Huangtian–Xiadong Lead–zinc Metallogenic Belt Metallogenic Regularity and Prospecting Target Area Forecast[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Yang Zongxi. 2009. Geology, Geochemistry and Genesis of Kafan Copper Deposit in Gejiu, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Yu Chongwen, Tang Yuanjun, Shi Pingfang. 1988. Dynamic System of the Formation of Ore Deposits in the Old Tin Polymetallic Ore Deposit in Yunnan[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1–304 (in Chinese).
- The Second Geological Brigade of Geological and Mine of Yunnan Province. 1993. A Survey Geological Report of Lead–zinc Mine in Huangtian of Jianshui County of Yunnan Province[R]. (in Chinese).
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics– the model[J]. Tectonophysics, 75: 135–162.
- Zhang Zhaosui, Wang Fusheng. 2003. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of Emeishan basalt Province and discussion on their source region[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 28(4): 431–439 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zichao. 1995. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data for some Middle–Late Proterozoic to Early Cambrian carbonate rocks in China[J]. Geological Review, 41(4): 349–354 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changqing. 2008. The Genetic Model of Mississippi Valley–Type Deposits in the Boundary Area of Sichuan, Yunnan and Guizhou Provinces, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changqing, Mao Jingwen, Liu Feng. 2005. K–Ar dating of altered clay minerals from Huize Pb–Zn deposit in Yunnan Province and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 24(3): 317–324 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changqing, Li Xianghui, Yu Jinjie. 2008. Rb–Sr dating of single sphalerites from the Daliangzi Pb–Zn deposit, Sichuan, and its geological significances[J]. Geological Review, 54(4): 532–538 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Pan Jiayong, Shao Shuxun. 2000. An interpretation of ore lead sources from lead isotopic compositions of some ore deposits in China[J]. Geochemica, 29(3): 231–238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunxin, Wu Yue, Tian Guang, Sheng Liang, Zhou Yunman, Dong Wenwei, Ceng Rong, Yan Xinchao, Zhang Changqing. 2014. Mineralization age and the source of ore-forming material at Lehong Pb–Zn deposit, Yunnan Province: Constraints from Rb–Sr and S isotopes system[J]. Acta Mineralogica Sinica, (3): 305–311 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Wei, Chen Maohong, Xu Lingang, Zhao Haijie, Ling Shibin, Wu Yue, Hu Yaoguo, Tian Yun, Wu Xiaodong. 2013. Rb–Sr isochron age of Tiantang Cu–Pb–Zn polymetallic deposit in Guangdong Province and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 32(2): 259–272 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiaojun, Liu Mingyong. 2015. Geological characteristics and prospecting criteria of Huangtian Lead–zinc deposit in South of Yunnan Province[J]. Value Engineering, 34(16): 188–191 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiayi. 2011. The Dispersed Elements and Zinc Isotopic Geochemistry of the Lead and Zinc Deposit in the Northwest of Guizhou Province[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiawei, Chen Fengyan, Tan Zhaobo, Li Weizhong. 2010. The factor of ore control of Huangtian Pb–Zn deposit in Jiangshui, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 29(1): 41–44 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈福坤, 李秋立, 李潮峰, 李向辉, 王秀丽, 王芳. 2005. 高精度质谱计

- 在同位素地球化学的应用前景[J]. 地球科学, 30(6): 639-645.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 陈懋弘, 杨宗喜. 2009. 与云南个旧超大型锡矿床有关的花岗岩锆石U-Pb定年及意义[J]. 矿床地质, 28(3): 297-312.
- 高建国, 罗江平. 1999. 会理铅锌矿床东西矿体成矿对比分析[J]. 昆明理工大学学报, (1): 94-100.
- 胡耀国. 1999. 贵州银厂坡银多金属矿床银的赋存状态、成矿物质来源与成矿机制[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 黄华, 张长青, 周云满, 谢华锋, 刘博, 谢永富, 董云涛, 杨春海, 董文伟. 2014. 云南保山金厂河铁铜铅锌多金属矿床Rb-Sr等时线测年及其地质意义[J]. 矿床地质, 33(1): 123-136.
- 黄智龙, 陈进, 韩润生. 2004a. 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.
- 黄智龙, 李文博, 陈进, 许德如, 韩润生, 刘丛强. 2004b. 云南会泽超大型铅锌矿床C、O同位素地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 28(1): 53-59.
- 李国武, 杨光斌, 杨学广. 1998. 云南建水荒田一虾洞火山岩型银多金属矿带的硫、铅同位素特征及其地质意义[J]. 地质地球化学, 26(4): 21-26.
- 李连举, 刘洪滔, 刘继顺. 1999. 滇东北铅、锌、银矿床矿源层问题探讨[J]. 有色金属矿产与勘查, 8(6): 333-339.
- 李秋立, 陈福坤, 王秀丽, 李向辉, 李潮峰. 2006. 超低本底化学流程和单颗粒云母Rb-Sr等时线定年[J]. 科学通报, 51(3): 321-325.
- 李随民, 魏明辉, 李森文, 李紫焯, 李玉红, 韩玉丑, 李永峰. 2014. 张家口梁家沟铅锌银矿床Rb-Sr、Sm-Nd等时线年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 41(2): 529-539.
- 李文博, 黄智龙, 王银喜. 2004. 会泽超大型铅锌矿田方解石Sm-Nd等时线年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 50(2): 189-195.
- 李肖龙, 毛景文, 程彦博. 2011. 云南个旧白沙冲和北炮台花岗岩岩石学地球化学研究及成因探讨[J]. 地质论评, 57(6): 838-850.
- 蒯志永, 王登红, 张长青. 2010. 四川宁南跑马铅锌矿床的成矿时代及其地质意义[J]. 中国地质, 37(2): 488-494.
- 柳贺昌, 林文达. 1999. 滇东北铅锌银矿床规律研究[M]. 昆明: 云南大学出版社.
- 刘家军, 何明勤. 2004. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质, 23(1): 1-10.
- 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 郭利果, 徐伟, 叶霖, 李朝阳, 皮道会. 2007. 都龙锡锌矿床锡石和锆石U-Pb年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件[J]. 岩石学报, 23(5): 967-976.
- 毛景文, 王志良, 李厚民, 王成玉, 陈毓川. 2003. 云南鲁甸地区二叠纪玄武岩中同位素的碳氧同位素对成矿过程的指示[J]. 地质论评, 49(6): 610-615.
- 孟志勇. 2013. 云南建水荒田铅锌矿床成因分析[J]. 云南地质, 32(4): 426-428.
- 潘忠华, 范德廉. 1996. 川东南脉状萤石-重晶石矿床同位素地球化学[J]. 岩石学报, 12(1): 127-136.
- 祁进平, 宋要武, 李双庆, 陈福坤. 2009. 河南省栾川县西沟铅锌银矿床单矿物铷-锶同位素组成特征[J]. 岩石学报, 25(11): 2843-2854.
- 秦德先, 高建国, 田毓龙. 滇中铅锌矿地质研究[M]. 昆明: 云南科学技术出版社. 1998.
- 沈晓丽. 2013. 云南省红河州南部二叠纪基性岩浆成矿作用的研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 石得凤, 张术根, 韩世礼, 徐忠发. 2013. 闽中丁家山铅锌矿床同位素地球化学及其地质意义[J]. 矿床地质, 2(5): 1003-1010.
- 舒培华, 杨俊, 张艳韬. 2012. 建水虾洞铅锌银多金属矿床成因新解[J]. 云南地质, 31(4): 453-455.
- 陶琰, 胡瑞忠, 朱飞霖, 马言胜, 叶霖, 程增涛. 2010. 云南保山核桃坪铅锌矿成矿年龄及动力学背景分析[J]. 岩石学报, 26(6): 1760-1772.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 刘英超, 高延光, 王召林, 宋玉财, 薛万文, 鲁海峰, 王富春, 苏媛娜, 李真真, 王银喜, 张玉宝, 朱田, 俞长捷, 于玉帅. 2010. 玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床Rb-Sr和Sm-Nd等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(6): 747-758.
- 肖宪国, 黄智龙, 周家喜, 李晓彪, 金中国, 张伦尉. 2012. 黔西北筲箕湾铅锌矿床成矿物质来源: Pb同位素证据[J]. 矿物学报, (2): 294-299.
- 许东, 蒋成兴, 王建飞. 2009. 云南石屏大冷山一建水虾洞铅锌银矿找矿远景[J]. 云南地质, 28(3): 243-249.
- 徐云端. 2014. 云南建水县官厅荒田一虾洞铅锌成矿带成矿规律及找矿靶区预测[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 杨宗喜. 2009. 云南个旧卡房铜矿地质地球化学与矿床成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 於崇文, 唐元骏, 石平方. 1988. 云南个旧锡-多金属成矿区内生成矿作用的动力学体系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-304.
- 云南省地质矿产局第二地质大队. 1993. 云南省建水县荒田铅锌矿区详查地质报告[R].
- 张招崇, 王福生. 2003. 峨眉山玄武岩Sr-Nd-Pb同位素特征及其矿源探讨[J]. 地球科学, 28(4): 431-439.
- 张自超. 1995. 我国某些元古宙及早寒武世碳酸盐岩石的银同位素组成[J]. 地质论评, 41(4): 349-354.
- 张长青. 2008. 中国滇黔交界地区密西西比型(MVT)铅锌矿床成矿模型[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 张长青, 毛景文, 刘峰. 2005. 云南会泽铅锌矿床粘土矿物K-Ar测年及其地质意义[J]. 矿床地质, 24(3): 317-324.
- 张长青, 李向辉, 余金杰. 2008. 四川大梁子铅锌矿床单颗粒闪锌矿铷-锶测年及地质意义[J]. 地质论评, 54(4): 532-538.
- 张乾, 潘家永, 邵树勋. 2000. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. 地球化学, 29(3): 231-238.
- 张云新, 吴越, 田广, 申亮, 周云满, 董文伟, 曾荣, 杨兴潮, 张长青. 2014. 云南乐红铅锌矿床成矿时代与成矿物质来源: Rb-Sr和S同位素制约[J]. 矿物学报, 34(3): 305-311.
- 郑伟, 陈懋弘, 徐林刚, 赵海杰, 凌世彬, 吴越, 胡耀国, 田云, 吴晓东. 2013. 广东天堂铜铅锌多金属矿床Rb-Sr等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 32(2): 259-272.
- 郑晓军, 刘明勇. 2015. 滇南荒田铅锌矿床地质特征及找矿标志[J]. 价值工程, 34(16): 188-191.
- 周家喜. 2011. 黔西北铅锌成矿区分散元素及锌同位素地球化学[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 周伟家, 陈凤艳, 谭兆波, 李维忠. 云南建水荒田铅锌矿控矿因素[J]. 云南地质, 2010, 29(1): 41-44.