

西藏轮郎铅锌矿床 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪

唐攀¹, 唐菊兴², 冷秋锋³, 郑文宝², 林彬², 唐晓倩⁴

(1. 成都理工大学, 四川成都 610059; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 西藏华钰矿业股份有限公司, 西藏拉萨 850000; 4. 中矿联资源储量评审咨询中心, 北京 100044)

摘要: 轮郎矽卡岩型铅锌矿床位于冈底斯斑岩铜矿带北侧的铅锌银成矿带。本文基于该矿床成矿地质条件, 对矽卡岩型矿石中主要的金属矿物闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿和黄铁矿的 S、Pb 同位素特征进行研究, 进一步探讨了矿床成矿物质来源, 并与区域矿产特征进行对比。结果显示, 矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-2.3\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$, 平均值为 1.46‰ , 其频率直方图具有塔式分布特征, 具幔源硫特征。矿石矿物的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $18.179 \sim 18.692$, 平均值为 18.543 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $15.588 \sim 15.802$, 平均值为 15.687 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $38.532 \sim 39.305$, 平均值为 38.900 ; μ 值在 $9.44 \sim 9.83$ 之间, 具有上地壳与地幔混合的造山带铅特征。轮郎矿床 S、Pb 同位素特征与冈底斯成矿带北亚带矽卡岩型矿床类似。成矿物质主要来源于念青唐古拉结晶基底片麻岩, 部分来自造山带幔源物质。

关键词: 轮郎铅锌矿; S、Pb 同位素; 矽卡岩; 冈底斯; 西藏

中图分类号: P597; P588.31⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)06-1045-10

S, Pb isotope composition and source tracing of ore-forming materials in the Lunlang lead-zinc deposit, Tibet

TANG Pan¹, TANG Ju-xing², LENG Qiu-feng³, ZHENG Wen-bao², LIN Bin² and TANG Xiao-qian⁴

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. Tibet Huayu Mining Development Co., Ltd., Lhasa 850000, China; 4. China Mining Association, Beijing 100044, China)

Abstract: The Lunlang skarn-type lead-zinc deposit is located in the lead-zinc-silver metallogenic belt on the north side of the Gangdise porphyry copper ore belt. Based on the ore-forming geological conditions, the authors systematically studied the S, Pb isotopic composition characteristics of sphalerite, galena, pyrrhotite and pyrite in the ore, and investigated the sources of the ore-forming materials in comparison with the characteristics of regional mineral resources. It is shown that the $\delta^{34}\text{S}$ values of the minerals vary in the range of $-2.3\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$ with an average of 1.46‰ , and the $\delta^{34}\text{S}$ histogram is distributed approximately in a tower shape, which indicates a mantle source. The $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios are between 38.532 and 39.305 (38.900 on average), the $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios are between 15.588 and 15.802 (15.687 on average), the $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios are between 18.179 and 18.692 (18.543 on average), and the μ values are between 9.44 and 9.83 , suggesting that Pb was

收稿日期: 2016-07-20; 接受日期: 2016-10-21

基金项目: 公益性行业专项(201511022-02, 201511017); 国家自然科学基金项目(41302060); 中国地质科学院基本科研业务费(YYWF201608)

作者简介: 唐攀(1989-), 男, 博士研究生, 现从事矿床勘查与评价工作; 通讯作者: 冷秋锋(1986-), 男, 博士, 主要从事矿床学和固体矿产勘查与评价研究工作, E-mail: lengqiufeng9@126.com。

derived from a orogenic belt whose source was composed of the upper crust and the mantle. S, Pb isotopic characteristics of the Lunlang deposit are identical with those of other skarn deposits in northern subbelt of the Gangdise metallogenic belt. The ore-forming materials of the Lunlang deposit was mainly derived from materials of Nyainqentanglha basement gneiss, and partly from the mantle.

Key words: Lunlang skarn-type lead-zinc deposit; S, Pb isotope; skarn; Gangdise; Tibet

Fund support: Public Science and Technology Research Funds Projects (201511022-02, 201511017); Natural Science Foundation of China (41302060); Basic Research Fund of Chinese Academy of Geological Sciences (YYWF201608)

冈底斯成矿带是位于雅鲁藏布江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间的世界级铜多金属成矿带。冈底斯东段先后经历了班公湖-怒江古特提斯洋壳向南俯冲、雅鲁藏布江新特提斯洋形成、雅鲁藏布江新特提斯洋壳向北俯冲消亡、印度大陆与拉萨地块陆陆碰撞等构造发展演化历程,形成了错综复杂的构造格局,主体表现为区域性东西向压性断裂、褶皱和南北向张性断裂带以及北东、北西向走滑断裂(杨德

明等,2001)。在拉萨地块中部形成的一条东西延长大约 350 km 的中新世构造-岩浆-成矿带(侯增谦等,2005)(图 1)。该带由北向南又可细分为北冈底斯、中冈底斯与南冈底斯亚带,亚带内成矿各具特色。近年来,冈底斯造山带矿产勘查评价工作取得了重大进展,冈底斯亚成矿带中段南部找矿效果突出,已发现并评价了多个规模巨大的矿集区,包括:雄村铜金矿集区,厅宫-冲江铜矿集区,甲玛-驱龙-

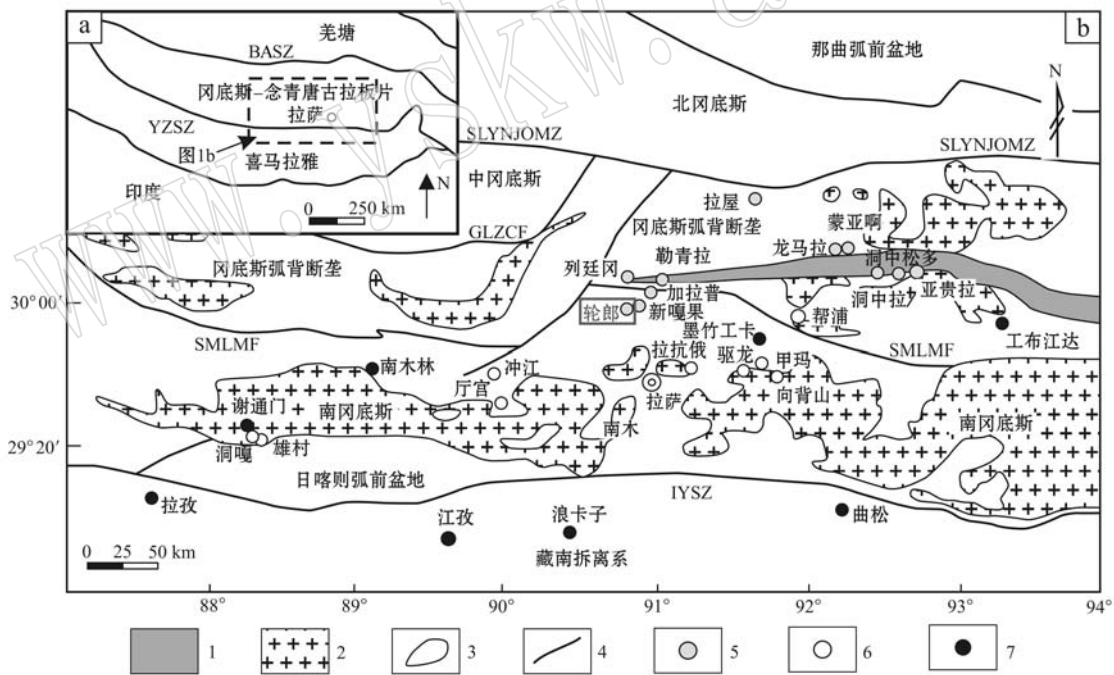


图 1 西藏大地构造简图(a)和冈底斯地区构造单元划分及矿产分布图(b, 据程文斌等, 2010; 唐菊兴等, 2012 修编)

Fig. 1 Tectonic map (a) of Tibet and geological unit division and mineral distribution of Gangdise region (b, modified after Cheng Wenbin *et al.*, 2010; Tang Juxing *et al.*, 2012)

1—中二叠统标志层; 2—岩浆岩; 3—地质界线; 4—断层; 5—矽卡岩型铅锌多金属矿床; 6—斑岩型铜(钼)多金属矿床; 7—地名; BASZ—班公湖-怒江缝合带; IYSZ—雅鲁藏布江缝合带; GLZCF—噶尔-隆格-扎日南木错-错麦断裂带; SLYNJOMZ—狮泉河-拉果错-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿岩带; SMLMF—沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂

1—Middle Permian marker bed; 2—magmatite; 3—geological boundary; 4—fault; 5—skarn-type Pb-Zn polymetallic deposit; 6—porphyry Cu (Mo) polymetallic deposit; 7—town; BASZ—Bangong Co-Salween River suture zone; IYSZ—Yarlung Zangbo River suture zone; GLZCF—Gaer-Longgeer-Zharinanmucuo-Cuo main fault zone; SLYNJOMZ—Siquanhe-Laguocuo-Yongzhu-Namucuo-Jiali ophiolite zone; SMLMF—Shamolei-Maila-Luobadui-Milasha fault

邦铺铜钼多金属矿集区等, 成为中国重要的斑岩铜矿带(唐菊兴等, 2012)(图 1)。随后, 在冈底斯成矿带北缘发现了较多的以铁铅锌矿化为主的矿床(矿化点), 如勒青拉、普琼朗、新嘎果、轮郎、加拉普、列廷冈等, 它们构成了一条与南缘的斑岩铜矿带平行分布的矽卡岩型铁铅锌多金属成矿带(图 1)。但是, 对该带的成矿作用及成矿背景还缺乏深入的研究。轮郎铅锌矿位于西藏林周县, 是该成矿带典型矿床之一。本文通过对轮郎矿床的金属硫化物矿石硫铅同位素研究, 探讨矿床的成矿物质来源, 为矿床成因的研究以及该成矿带的完善提供重要依据。

1 矿床地质概况

轮郎矿区大地构造位置处于西藏南冈底斯中段北部, 洛巴堆-米拉山断裂南侧。

矿区出露地层简单, 主要为下白垩统楚木龙组(K_1ch)、塔克拉组(K_1t)及第四系(图 2)。下白垩统楚木龙组(K_1ch)主要分布在矿区南部, 总体呈近东西向展布, 倾向为 $175^\circ \sim 185^\circ$, 倾角 $54^\circ \sim 70^\circ$, 岩性为

灰白色石英砂岩夹深灰色板岩。下白垩统塔克拉组(K_1t)在矿区广泛分布, 地层倾向为 $340^\circ \sim 10^\circ$, 倾角 $45^\circ \sim 68^\circ$, 岩性组合为砂岩、泥灰岩和灰岩, 局部见有板岩和泥岩。第四系较为发育, 主要为冲洪积物和残坡积物。

矿区处在一个大背斜的北翼, 靠近轴部的地方。矿区地层总体表现为向北倾的单斜构造。地层倾角介于 $45^\circ \sim 65^\circ$ 之间。控矿构造主要为近东西向的层间滑动和存在背斜中的张性裂隙构造, 它们控制着矿体的形成和分布, 是沟通含矿溶液运移的通道, 也是交代作用最强烈和矿质沉淀的场所。

矿区主要发育有 I-1、I-2E、I-2W、II-1、II-2、III-1 和 III-2 七个矿体, 总体呈层状, 似层状或透镜状赋存于塔克拉组地层灰岩条带边部, 含矿岩性主要为硅化-矽卡岩化大理岩和矽卡岩(图 2)。矽卡岩主要为石榴子石矽卡岩, 矿物成分主要为石榴子石、透辉石、透闪石、绿泥石、石英、方解石等。矿体产状明显受灰岩条带控制, 走向为南西(III-1、I-2W)、南东(III-2)和近东西向(I-1、I-2E、II-1、II-2)(图 2), 倾角较陡, 在 $45^\circ \sim 73^\circ$ 之间。矿体走向长 $120 \sim 500$

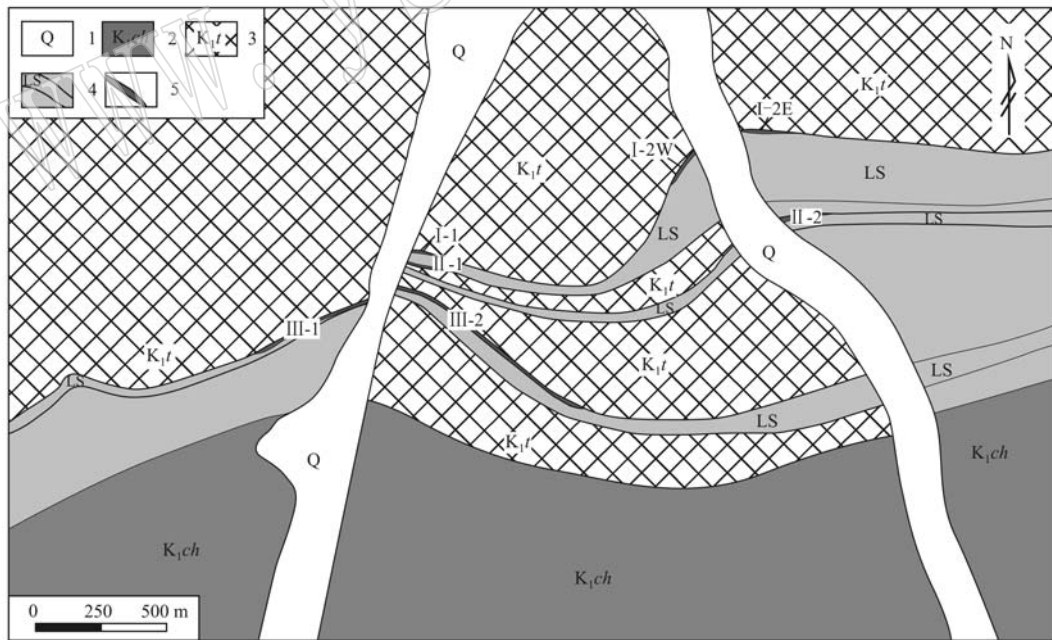


图 2 轮郎铅锌矿床地质图(据宋克金等, 2006^① 修编)

Fig. 2 Geological map of the Lunlang lead-zinc deposit (modified after Song Kejin *et al.*, 2006^①)

1—第四系; 2—下白垩统楚木龙组; 3—下白垩统塔克拉组; 4—塔克拉组中的灰岩; 5—矽卡岩矿体

1—Quaternary; 2—Chumulong Formation; 3—Takela Formation; 4—limestone in Takela Formation; 5—skarn ore

① 宋克金, 李震, 高钦, 等. 2006. 西藏自治区林周县轮郎矿区铅锌矿普查报告.

m, 向下延深 50~150 m, 厚度 2.0~13.5 m。矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿和磁黄铁矿等, 次生矿物为少量的孔雀石、蓝铜矿和褐铁矿等。成矿元素主要为铅锌, Pb+Zn 平均品位约为 4.42%, 伴生银平均品位约为 18.86 g/t。矿石组构较简单, 主要金属矿物的方铅矿和闪锌矿呈中粒他形结构, 他形闪锌矿中发育乳滴状黄铜矿固溶体形成固溶体分离结构; 矿石构造主要为浸染状构造、块状构造、条带状构造及脉状构造。轮郎矿床成矿期次可分为矽卡岩期和石英-硫化物期。矽卡岩期主要形成各种硅酸盐矿物, 根据矿物共生组合及矿物生成的先后顺序, 又将本期划分为干矽卡岩阶段(主要为石榴子石和透辉石)、湿矽卡岩阶段(主要为阳起石和绿帘石)和氧化物阶段(主要为石英、磁黄铁矿和绿帘石)。石英-硫化物期可分为以石英、绿泥石、黄铁矿、方铅矿和闪锌矿为主的早期硫化物阶段和主要

为方解石、石英和方铅矿的晚期硫化物阶段。

2 样品分析测试方法

本次 S、Pb 同位素分析样品采自平硐和钻孔内矽卡岩型矿石, 主要采集矽卡岩型块状、浸染状、稠密浸染状矿石中的磁黄铁矿、闪锌矿和方铅矿等(图 3)。新鲜的样品经粉碎、清洗、干燥后, 在双目镜下分别挑至 99% 纯度的单矿物分析样。S、Pb 同位素测定在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行。硫同位素由 MAT-251 同位素质谱仪进行测定, 采用 VCDT 国际标准, 分析精度为 $\pm 0.2\%$; 铅同位素比值利用 ISOTOPE-T 热电离质谱仪测定, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值误差小于 0.05%。



图 3 轮郎铅锌矿床矿石照片

Fig. 3 Ore in the Lunlang lead-zinc deposit

3 测试结果

3.1 S 同位素

轮郎矿区硫化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化于 -2.3% ~ 4.1% 之间, 平均值为 1.46(表 1)。其中, 5 件闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -2.3% ~ 4.1% , 平均值 0.08%; 3 件磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 1.3% ~ 3.9% , 平均值为 2.7%; 2 件方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 2.5% ~ 2.7% , 平均值为 2.6%; 1 件黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 2.4%。冈底斯成矿带北亚带其他矽卡岩矿床 S 同位素组成见表 1, 其中, 勒青拉矿床硫化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -11.58% ~ -7.18% , 新嘎果矿床硫

化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -5.0% ~ 2.1% , 蒙亚啊矿床硫化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 4.9% ~ 6.4% , 亚贵拉矿床硫化物矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 0.69% ~ 6.70% 。

3.2 Pb 同位素

轮郎矿区硫化物矿石铅同位素比值比较稳定, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.532~39.305, 平均值为 38.900; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.588~15.802, 平均值为 15.687; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.179~18.692, 平均值为 18.543。铅同位素组成特征值 μ 普遍较小, 变化范围为 9.44~9.83, 平均值 9.62(表 2)。冈底斯成矿带北亚带其他矽卡岩矿床 Pb 同位素组成见表 2, 其中, 勒青拉矿床硫化物矿石的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.305~38.797,

表1 轮郎铅锌矿床和冈底斯成矿带北亚带矽卡岩矿床S同位素组成

Table 1 Sulfur isotope from the Lunlang lead-zinc deposit and skarn deposits in northern subbelt of the Gangdise metallogenic belt

矿床	样品编号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	资料来源
轮郎	PD4440(2)	黄铁矿	2.4	本文
	PD4380(2)	磁黄铁矿	1.3	
	PD2(2)	磁黄铁矿	2.9	
	ZK2003-603	磁黄铁矿	3.9	
	PD4380(2)	方铅矿	2.7	
	PD4380(3)	方铅矿	2.5	
	PD4380(3)	闪锌矿	4.1	
	PD2(2)	闪锌矿	-0.3	
	PD4-1(2)	闪锌矿	-2.3	
	PD2(1)	闪锌矿	-1.4	
	PD4380-1(2)	闪锌矿	0.3	
勒青拉		方铅矿、闪锌矿	-11.58~-7.18	张林奎等,2008
新嘎果		白铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿	-5.0~2.1	程文斌,2011;臧文栓等,2007
列廷冈		白铁矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿	-6.9~-2.0	杨毅,2015
拉屋		磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿	-5.5~3.5	杜欣等,2004;连永军等,2010;崔玉斌等,2010
龙玛拉		方铅矿、闪锌矿、黄铜矿	1.6~3.6	付强等,2012
蒙亚啊		磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿	4.9~6.4	王立强等,2010
亚贵拉		黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿	0.69~6.70	罗雪,2010;连永军等,2009;高明等,2010
洞中拉		磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿	2.2~5.8	费光春等,2011;高一鸣,2010

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.545~15.649, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.225~18.610; 新嘎果矿床硫化物矿物的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.504~38.951, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.561~15.671, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.505~18.644; 蒙亚啊矿床硫化物矿物的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.976~39.255, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.641~15.732, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.618~18.688; 亚贵拉矿床硫化物矿物的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 39.006~39.362, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.673~15.738, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.528~19.773。

4 讨论

4.1 硫的来源

在硫化物金属矿床中,硫元素对成矿物质富集和沉淀成矿过程中具有重要的作用,其同位素也可以提供矿化剂来源的重要信息(Rye and Ohmoto, 1974; Ohmoto, 1986; Hoefs, 1997)。研究表明,共生硫化物(包括硫酸盐)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在硫同位素分馏达到平衡的条件下, $\delta^{34}\text{S}$ 硫酸盐 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 辉钼矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 磁黄铁矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 黄铜矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿(郑永飞等,2000)。轮郎矿床金属硫化物硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 磁黄铁矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 方铅矿 $>$

$\delta^{34}\text{S}$ 黄铁矿 $>$ $\delta^{34}\text{S}$ 闪锌矿(表1、图4),与平衡顺序不一致,表明它们之间或者处于同位素不平衡状态,或者是不同阶段的产物,或者是不同温度下形成的(郑永飞等,2000)。本矿区磁黄铁矿和黄铁矿主要形成于氧化物阶段,而方铅矿和闪锌矿主要形成于早期硫化物阶段,这可能是造成与平衡顺序不一样的原因。Ohmoto(1972)研究得出,如果氧逸度较低体系中硫酸盐不存在,并且矿物组合为黄铁矿+方铅矿+闪锌矿时,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可大致代表热液的总硫同位素组成。矿区矿物组合,主要为磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等,并未发现硫酸盐矿物,这也反映出成矿热液中不同价态硫之间以及不同成矿阶段的硫同位素分离都比较弱(姜军胜等,2015)。因此,轮郎矿床热液体系中总硫同位素组成与金属硫化物的硫同位素组成大体一致。

轮郎矿床矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化较窄,峰值集中于2‰~3‰之间,具有明显的塔式分布特征(图4、图5)。另外,矿区未发现硫酸盐矿物(石膏等),表明硫来源源较为单一。轮郎矿区金属硫化物矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为1.46‰,与我国与岩浆活动有关的铅锌矿床(-5.0‰~5.0‰)相似(陈好寿等,1994),并且与岩浆硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值($0 \pm 3\text{‰}$)相似(Ohmoto, 1986),反映矿床硫源与岩浆作用有关。

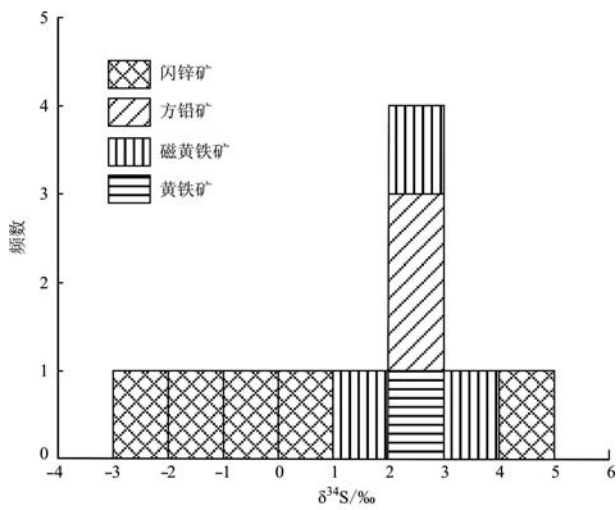


图 4 轮郎铅锌矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 频率直方图

Fig. 4 Histogram showing $\delta^{34}\text{S}$ values of the Lunlang lead-zinc deposit

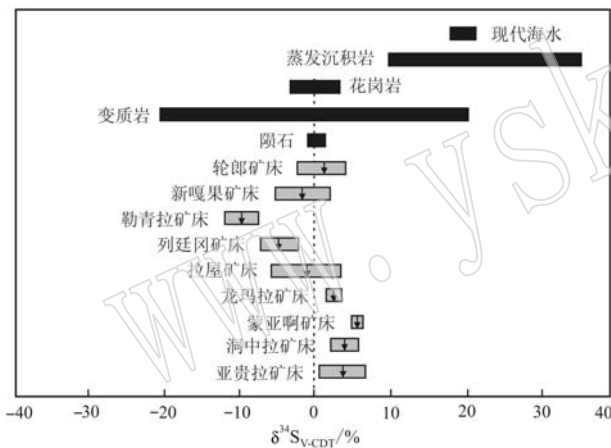


图 5 轮郎铅锌矿床与冈底斯成矿带北亚带矽卡岩型铅锌多金属矿床 S 同位素组成分布(图中箭头表示矿床 S 同位素平均值)

Fig. 5 Distribution of $\delta^{34}\text{S}$ values of the Lunlang lead-zinc deposit and skarn-type Pb-Zn polymetallic deposits in northern subbelt of the Gangdise metallogenic belt (arrow showing the mean values of $\delta^{34}\text{S}$)

4.2 铅的来源

铅同位素性质不活泼,受外界环境影响很小,即在矿质运移和沉淀过程中几乎不发生分馏作用,矿物形成时环境中 U-Th-Pb 特征决定其组成特征,铅同位素组成广泛应用于各种矿床的研究中,是示踪成矿物质来源最直接、最有效的一种方法(李龙等,2001;姜军胜等,2015)。轮郎矿床矿石铅同位素比值均一,变化范围很小(表 2),显示其铅具有较稳定

的普通铅特征。铅同位素特征值 μ 可以反映铅的来源,提供地质体经历地质作用的信息(王立强等,2010), μ 值 >9.58 的铅通常被认为是来自相对富集 U、Th 的上部地壳物质(Zartman and Doe, 1981; 吴开兴等,2002)。轮郎矿床矿石铅同位素源区特征值 μ 为 $9.44\sim 9.83$,平均值 9.62 ,说明铅源具有上地壳源区的特征。

朱炳泉(1998)研究表明, $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 能消除时间的影响,因此,可以利用铅同位素特征值 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 对成矿物质来源进行示踪。轮郎矿床矿石铅同位素投于 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解上,显示其具有上地壳与地幔混合的俯冲带铅特征,并具有相对富集上地壳铅特征(图 6)。轮郎矿床金属硫化物矿石铅同位素组成投于 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}-^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化图解上(图 7),显示大部分数据点位于上地壳,与念青唐古拉结晶基底物质铅同位素组成(Gariépy *et al.*, 1985)类似,少部分数据点位于造山带附近。冈底斯北缘发育广泛的前寒武纪片麻岩结晶基底(胡道功等,2005;朱弟成等,2008)。因此,轮郎矿床成矿物质主要来源于念青唐古拉结晶基底片麻岩,部分来自造山带幔源物质。

4.3 与区域成矿对比

西藏冈底斯斑岩-矽卡岩型铜多金属成矿带是中国近年发现的一条重要铜矿带,总体上呈近东西向展布,东至墨竹工卡县甲玛,西至谢通门县洞嘎,长约 400 km,宽近 50 km(侯增谦等,2001;曲晓明等,2001)。其中,雄村-洞嘎斑岩铜金矿集区,厅宫-冲江斑岩铜矿集区和甲玛-驱龙-邦铺斑岩-矽卡岩铜铅多金属矿集区已取得重大找矿突破。随后在冈底斯北缘发现一系列的矽卡岩型 Pb-Zn-Cu-Fe 矿床,比如,蒙亚啊-亚贵拉铅锌多金属矿集区、列廷冈-新嘎果-勒青拉铅锌铁多金属矿集区,该成矿带的成矿作用及成矿背景还缺乏深入的研究。

由图 5 可知,冈底斯成矿带北亚带矽卡岩铅锌多金属矿床(蒙亚啊、亚贵拉、洞中拉、龙马拉)硫同位素值($\delta^{34}\text{S}$)较大,均为正值;而冈底斯成矿带北亚带矽卡岩铅锌铁多金属矿床(勒青拉、列廷冈、新嘎果)硫同位素值($\delta^{34}\text{S}$)较小,其中列廷冈和勒青拉硫同位素($\delta^{34}\text{S}$)均为负值,富轻硫,显示生物硫的特征。勒青拉矿床出露生物碎屑灰岩(含有丰富的蜓和腕足类化石),硫受到围岩大量混染造成硫同位素($\delta^{34}\text{S}$)较低(张林奎等,2008)。轮郎矿床矿石矿物硫同位素特征与冈底斯成矿带北亚带矽卡岩铅锌铁多金属矿床类似,特别是新嘎果矿床;部分闪锌矿富轻

表 2 轮郎铅锌矿床和冈底斯成矿带北亚带矽卡岩矿床 Pb 同位素比值及特征参数表
Table 2 Lead isotope data from the Lunlang lead-zinc deposit and skarn deposits in northern subbelt of the Gangdise metallogenic belt

矿床	样品编号	样品名称	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	资料来源
轮郎	PD4440(2)	黄铁矿	38.979	15.715	18.612	9.67	本文
	PD4380(2)	磁黄铁矿	38.974	15.712	18.615	9.66	
	PD2(2)	磁黄铁矿	38.953	15.707	18.609	9.65	
	ZK2003-603	磁黄铁矿	38.703	15.592	18.505	9.44	
	PD4380(2)	方铅矿	39.305	15.802	18.692	9.83	
	PD4380(3)	方铅矿	38.911	15.695	18.597	9.63	
	PD4380(3)	闪锌矿	38.918	15.696	18.600	9.63	
	PD2(2)	闪锌矿	38.995	15.715	18.627	9.67	
	PD4-1(2)	闪锌矿	38.532	15.588	18.179	9.47	
	PD2(1)	闪锌矿	38.602	15.607	18.307	9.49	
	PD4380-1(2)	闪锌矿	39.026	15.726	18.629	9.69	
勒青拉	花岗岩长岩、方铅矿、闪锌矿		38.305~38.797	15.545~15.649	18.225~18.610	9.38~9.54	张林奎等,2008
新嘎果	白铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿		38.504~38.951	15.561~15.671	18.505~18.644	9.38~9.58	程文斌等,2010; 臧文栓等,2007
列廷冈	白铁矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿		38.495~39.215	15.579~15.778	18.256~18.711	9.40~9.82	杨毅,2015
拉屋	黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿		38.673~39.997	15.52~15.798	18.465~19.535	9.30~9.75	程文斌,2011; 唐菊兴未刊数据
龙玛拉	方铅矿、闪锌矿、黄铜矿		39.160~39.176	15.711~15.717	18.649~18.657	9.66~9.67	付强等,2012
蒙亚啊	磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿		38.976~39.255	15.641~15.732	18.618~18.688	9.52~9.69	程顺波等,2008; 王立强等,2010
亚贵拉	方铅矿、黄铁矿		39.006~39.362	15.673~15.738	18.528~19.773	9.59~9.71	张哨波等,2009
洞中拉	黄铜矿、闪锌矿、方铅矿		39.049~39.430	15.690~15.802	18.615~18.764	9.62~9.83	费光春等,2011; 高一鸣,2010

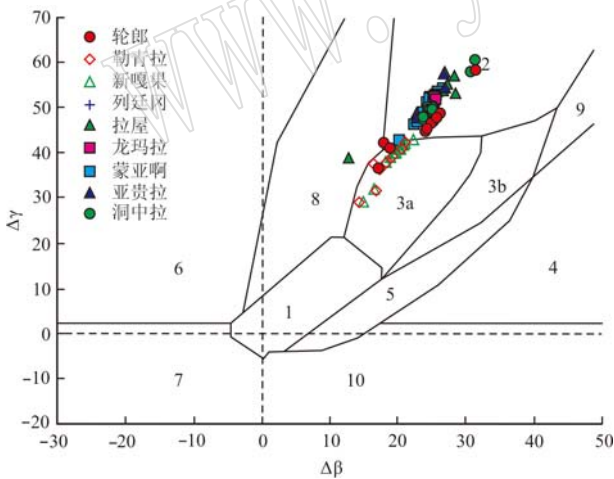


图 6 轮郎铅锌矿床与冈底斯成矿带北亚带矽卡岩矿床铅同位素 $\Delta\gamma - \Delta\beta$ 成因分类图解(据朱炳泉,1998)

Fig. 6 Plot of $\Delta\gamma - \Delta\beta$ of Pb isotope from the Lunlang lead-zinc deposit (after Zhu Bingquan, 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(a 岩浆作用, b 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 source; 2—upper crust source; 3—subduction source composed of upper crust and mantle (a magmatism, b sedimentation); 4—chemical sedimentary source; 5—subocean hydrothermal sedimentary source; 6—mesometamorphism source; 7—hypometamorphism lower crust source; 8—orogenic belt source; 9—upper crust source in ancient shale area; 10—retrograde metamorphism source

硫,可能受到围岩混染造成的。

冈底斯成矿带北亚带矽卡岩铅锌多金属矿床(蒙亚啊、亚贵拉、洞中拉、龙玛拉、拉屋)铅同位素 μ 特征值(9.3~9.83,均值 9.65)比矽卡岩铅锌铁多金属矿床(列廷冈、勒青拉、新嘎果、轮郎)铅同位素 μ 特征值(9.26~9.83,均值 9.51)大,而轮郎矿床铅同位素 μ 与列廷冈类似(表 2)。图 6 显示,冈底斯成矿带北亚带矽卡岩铅锌多金属矿床(蒙亚啊、亚贵拉、洞中拉、龙玛拉、拉屋)铅同位素投于 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 图解上的上地壳区域;而矽卡岩铅锌铁多金属矿床(勒青拉、新嘎果)投于上地壳与地幔混合的俯冲带铅(岩浆作用)区域。轮郎矿床和列廷冈矿床类似投于上地壳和上地壳与地幔混合的俯冲带铅(岩浆作用)区域。

程文斌等(2010)研究表明,冈底斯成矿带北亚带的以勒青拉、新嘎果为代表的矽卡岩型铅锌铁多金属矿床具有明显的造山带特征,是由于碰撞过程中俯冲板片和念青唐古拉结晶基底活化形成矿物质造成的;而以蒙亚啊、洞中拉和亚贵拉为代表的矽卡岩型铅锌多金属矿床具有上地壳的特征,与念青唐古拉群基底片麻岩一致(图 7),指示其成矿物质来

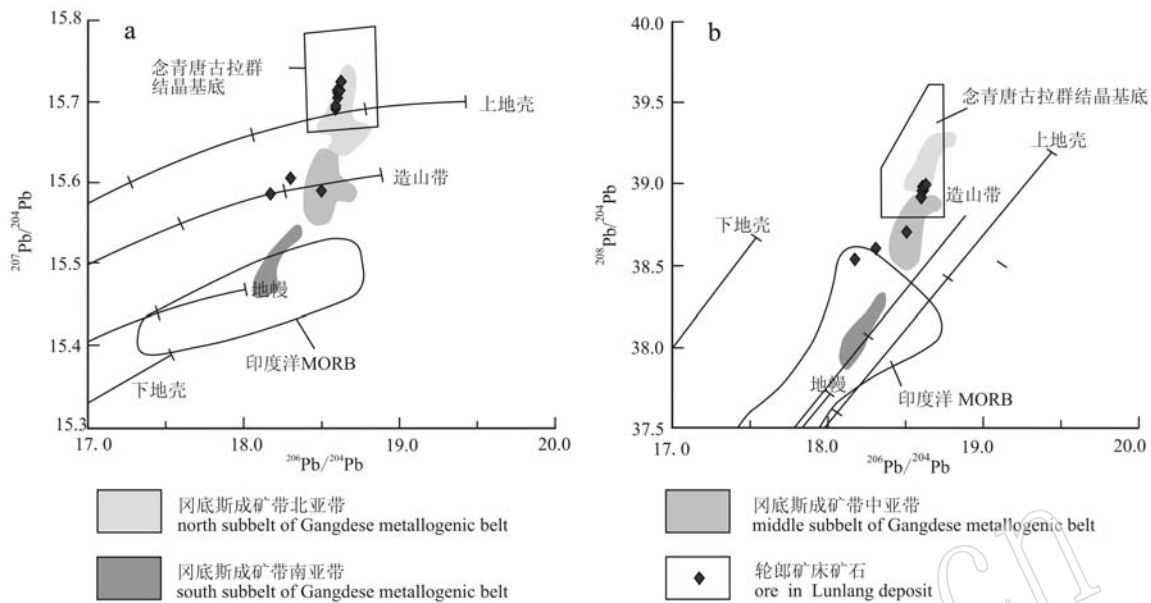


图 7 轮郎矿床 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a)和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b)的构造环境演化图 (据 Zartman and Doe, 1981; 阴影区域据程文斌等, 2010; 念青唐古拉群结晶基底区域据 Garićy *et al.*, 1985; 印度洋 MORB 据 Sun, 1980)

Fig. 7 Diagram showing evolutionary tectonic setting for $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) of ore lead isotope from the Ga'erqiong deposit (base map after Zartman and Doe, 1981; shade area after Cheng Wenbin *et al.*, 2010; Nyainqentanglha basement area after Garićy *et al.*, 1985; Indian Ocean MORB after Sun, 1980)

源于陆-陆碰撞阶段念青唐古拉结晶基底片麻岩。杨毅(2015)研究表明,冈底斯北缘典型矿床矽卡岩型铁多金属矿床(以列廷冈、加拉普、勒青拉和新嘎果为代表)铅同位素指示成矿物质来源具有壳幔混源的特点,而矽卡岩型铅锌矿床(蒙亚啊、洞中拉和亚贵拉为代表)铅同位素指示成矿物质来源更偏向壳源物质。轮郎矽卡岩型铅锌矿床铅同位素和列廷冈类似,具有上地壳(与念青唐古拉群基底片麻岩一致)和造山带的特征,但轮郎矿床以上地壳为主。因此,冈底斯成矿带北亚带矽卡岩铅锌铁多金属矿床(列廷冈、加拉普、勒青拉、新嘎果、轮郎)成矿物质来源于陆-陆碰撞过程中念青唐古拉结晶基底片麻岩和幔源物质混染,而矽卡岩铅锌多金属矿床(蒙亚啊、亚贵拉、洞中拉、龙玛拉、拉屋)成矿物质来源于念青唐古拉结晶基底片麻岩。

5 结论

(1) 轮郎矿床金属硫化物矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -2.3% ~ 4.1% , 平均值为 1.46% , 其频率直方图具有塔式分布特征, 指示其 S 同位素具有幔源特征。

(2) 轮郎矿床金属硫化物矿石 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.532 ~ 39.305 , 平均值为 38.900 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为

15.588 ~ 15.802 , 平均值为 15.687 ; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.179 ~ 18.692 , 平均值为 18.543 ; 铅同位素组成特征值 μ 变化范围为 9.44 ~ 9.83 , 平均值 9.62 。具有上地壳与地幔混合的造山带铅特征, 与冈底斯成矿带北亚带矽卡岩型矿床类似。成矿物质主要来源于念青唐古拉结晶基底片麻岩, 部分来自造山带幔源物质。

致谢 感谢西藏夕瑞德矿业有限公司提供了大量资料, 并为作者的野外工作提供了帮助, 感谢项目其他成员的支持与帮助!

References

- Chen Haoshou, Zhou Su, Wei Lin, *et al.* 1994. Mineralization Chronology and Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Cheng Shunbo, Pang Yinchun and Cao Liang. 2008. The genesis of Mengya'a skarn-type lead-zinc deposit, Tibet [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 24(3): 50~56 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Wenbin. 2011. Studies on typical skarn deposits in Gangdise-Nyainqentanglha metallogenic belt, Tibet (Dissertation for Doctor Degree) [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).

- Cheng Wenbin, Gu Xuexiang, Tang Juxing, *et al.*. 2010. Lead isotope characteristics of ore sulfides from typical deposits in the Gangdese-Nyainqentanglha metallogenic belt: Implications for the zonation of ore-forming elements[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3 350 ~ 3 362(in Chinese with English abstract).
- Cui Yubin, Zhao Yuanyi and Lü Lina. 2010. C-H-O-S isotopic characteristics of Lawu skarn Pb-Zn polymetallic deposit, Tibet and its geological significance[J]. *Mineral Deposit*, 29(S1): 423 ~ 424 (in Chinese).
- Du Xin, Liu Juntao and Wang Yapin. 2002. Geological character and ore genesis of the Lawu copper-lead-zinc polymetallic ore deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 18: 410 ~ 449(in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Duo Ji, Wen Chunqi, *et al.*. 2011. S, Pb and Sr isotopic compositions for tracing sources of ore-forming materials in Dongzhongla lead-zinc deposit in Tibet[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 31(4): 52 ~ 57(in Chinese with English abstract).
- Fu Qiang, Zheng Yuanchuan and Huang Kexian. 2012. Sulfur and lead isotopic compositions of Longmala polymetallic deposit, Tibet and its geological significance[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 26 ~ 30(in Chinese with English abstract).
- Gao Ming, Zhang Shaobo and Yue Guili. 2010. Geology and genesis of the Yaguila lead-zinc deposit in Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30(2): 97 ~ 102(in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming. 2010. The geological characteristics of Gongbujiangda and Sharang polymetallic ore deposit, Tibet and regional metallogenesis (Dissertation for Doctor Degree)[D]. Beijing: Chinese Academy Sciences(in Chinese with English abstract).
- Gariépy C, Allégre C J and Xu R H. 1985. The Pb-isotope geochemistry of granitoids from the Himalaya-Tibet collision zone implication for crustal evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 74: 220 ~ 234.
- Hoefs J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. 4th ed. Berlin: Springer-Verlag, 119 ~ 120.
- Hou Zengqian, Meng Xiangjin, Qu Xiaoming, *et al.*. 2005. Copper ore potential of adakitic intrusives in Gangdese porphyry copper belt: constraints from rock phase and deep process[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 108 ~ 121(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Huang Wei, *et al.*. 2001. Gangdese porphyry copper belt is expected to become the second "Yulong" copper belt[J]. *Chinese Geology*, 28(10): 27 ~ 29(in Chinese).
- Hu Daogong, Wu Zhenhan, Jiang Wan, *et al.*. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP ages and Nd isotopes study on Nyainqentanglha group, Tibet[J]. *Science in China (Series D)*, 35(1): 29 ~ 37(in Chinese).
- Jiang Junsheng, Zheng Youye, Gao Shunbao, *et al.*. 2015. Genesis of Chazangcuo Cu-Pb-Zn deposit, Tibet: constraints from C-H-O-S-Pb isotope geochemistry[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(6): 1 006 ~ 1 016(in Chinese with English abstract).
- Li Long, Zheng Yongfei and Zhou Jianbo. 2011. Dynamic model for Pb isotope evolution in the continental crust of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 61 ~ 68(in Chinese with English abstract).
- Lian Yonglao, Cao Xinzhi, Yan Changhai, *et al.*. 2009. Geological characteristics and genesis of Yaguila lead-zinc deposit in the Gongbujiangda county of Tibet province[J]. *Geology and Exploration*, 45(5): 570 ~ 576(in Chinese with English abstract).
- Lian Yonglao, Cao Xinzhi, Yan Changhai, *et al.*. 2010. Exhalative sedimentary genesis of Lawu lead-zinc deposit in Dangxiong county copper of Tibet[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 40(5): 1 042 ~ 1 065(in Chinese with English abstract).
- Luo Xue. 2010. Geological geochemistry characteristics genesis of Yaguila lead-zinc polymetallic deposit in the Gongbujiangda county of Tibet province (Dissertation for Master Degree)[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67: 551 ~ 578.
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16(1): 491 ~ 559.
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Huang Wwei. 2001. Is Gangdese porphyry copper belt the second "Yulong" copper belt? [J]. *Mineral Deposit*, 20(4): 355 ~ 366(in Chinese with English abstract).
- Rye R O and Ohmoto H. 1974. Sulfur and carbon isotope and ore genesis: A review[J]. *Economic Geology*, 69(6): 827 ~ 842.
- Sun S S. 1980. Lead isotope study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and islands arcs[J]. *Phil. Trans. R. Soc. London. Ser. A*, 297: 409 ~ 445.
- Tang Juxing, Duo Ji, Liu Hongfei, *et al.*. 2012. Minerogenetic series of ore deposits in the east part of the Gangdise metallogenic belt [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393 ~ 420(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, *et al.*. 2010. Sulfur and lead isotope composition and tracing for the sources of ore-forming materials in the Mengya' a Pb-Zn deposit, Tibet[J]. *Geoscience*, 24(1): 52 ~ 58(in Chinese with English abstract).
- Wu Kaixin, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, *et al.*. 2002. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review[J]. *Geology Geochemistry*, 30(3): 73 ~ 81(in Chinese with English abstract).
- Yang Deming, Li Cai and Wang Tianwu. 2001. Features and genesis of the north-south-trending tectonic belt in the eastern sector of the Gangdese Mountains, Tibet[J]. *Regional Geology of China*, 20(4): 392 ~ 397(in Chinese with English abstract).
- Yang Yi. 2015. The study on geological characteristics of Lietinggang iron polymetallic deposit, Tibet and metallogenic regularity of typical deposits in the north Gangdese metallogenic belt (Dissertation for Doctor Degree)[D]. Chengdu: Chengdu University of Tech-

nology(in Chinese with English abstract).

- Zang Wenshan, Meng Xiangjin, Yang Zhushen, *et al.* 2007. Sulfur and lead isotopic compositions of lead-zinc-silver deposits in the Gangdese metallogenic belt, Tibet, China, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1393~1397(in Chinese with English abstract).
- Zartman R and Doe B. 1981. Plumbotectonics: the model[J]. *Tectonophysics*, 75(1~2): 135~162.
- Zhang Linkui, Fan Wenyu and Gao Dafa. 2008. Geology and genesis of Leqingla Pb-Zn polymetallic deposit in the Linzhou country, Tibet [J]. *Geology and Prospecting*, 44(5): 10~16(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shaobo, Gao Ming, Yue Guoli, *et al.* 2009. Geological characteristics and brief origin analysis of Yaguila lead-zinc deposit in Xizang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(4): 297~301(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. *Stable Isotopes*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Zhu Bingquan. 1998. *Theory and Application of Isotope System in Earth Science-Crust-Mantle Evolution of Continent in China*[M]. Beijing: Science Press: 220~230(in Chinese).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Wang Liqun, *et al.* 2008. Spatial-temporal distribution and tectonic setting of Jurassic magmatism in the Gangdise belt, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 458~466(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈好寿, 周 雨, 魏 琳, 等. 1994. 成矿作用年代学及同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 程文斌. 2011. 西藏冈底斯-念青唐古拉成矿带典型矽卡岩矿床研究 [D]. 北京: 中国地质大学.
- 程文斌, 顾雪祥, 唐菊兴, 等. 2010. 西藏冈底斯-念青唐古拉成矿带典型矿床硫化物 Pb 同位素特征——对成矿元素组合分带性的指示[J]. *岩石学报*, 26(11): 3350~3362.
- 程顺波, 庞迎春, 曹 亮. 2008. 西藏蒙亚啊矽卡岩铅锌矿床的成因探讨[J]. *华南地质与矿产*, 24(3): 50~56.
- 崔玉斌, 赵元艺, 吕立娜. 2010. 西藏拉屋矽卡岩型铜铅锌多金属矿床碳、氢、氧、硫同位素特征及意义[J]. *矿床地质*, 29(S1): 423~424.
- 杜 欣, 刘俊涛, 王亚平. 2004. 西藏拉屋铜铅锌多金属矿床地质特征及成因分析[J]. *矿产与地质*, 18: 410~449.
- 费光春, 多 吉, 温春齐, 等. 2011. 西藏洞中拉铅锌矿床 S, Pb, Sr 同位素组成对成矿物质来源的示踪[J]. *矿物岩石*, 31(4): 52~57.
- 付 强, 郑远川, 黄克贤. 2012. 西藏龙马拉多金属矿床硫、铅同位素组成及其地质意义[J]. *有色金属(矿山部分)*, 64(4): 26~30.
- 高 明, 张少波, 岳国利. 2010. 西藏亚贵拉铅锌矿床地质特征及成因浅析[J]. *沉积与特提斯地质*, 30(2): 97~102.
- 高一鸣. 2010. 西藏工布江达县亚贵拉-沙让多金属矿床地质特征及区域成矿研究 [D]. 北京: 中国地质科学院.
- 侯增谦, 孟祥金, 曲晓明, 等. 2005. 西藏冈底斯斑岩铜矿带埃达克岩质斑岩含矿性: 源岩相变及深部过程约束[J]. *矿床地质*, 24(2): 108~121.
- 侯增谦, 曲晓明, 黄 卫, 等. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带[J]. *中国地质*, 28(10): 27~30.
- 胡道功, 吴珍汉, 江 万, 等. 2005. 西藏念青唐古拉岩群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素研究[J]. *中国科学 D 辑*, 35(1): 29~37.
- 李 龙, 郑永飞, 周建波. 2001. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. *岩石学报*, 17(1): 61~68.
- 罗 雪. 2010. 西藏工布江达县亚贵拉铅锌多金属矿床地质地球化学特征与成因浅析[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 连永牢, 曹新志, 燕长海, 等. 2009. 西藏工布江达县亚贵拉铅锌矿床地质特征及成因分析[J]. *地质与勘探*, 45(5): 569~575.
- 连永牢, 曹新志, 燕长海, 等. 2010. 西藏当雄县拉屋铜铅锌多金属矿床喷流沉积成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(5): 1042~1065.
- 姜军胜, 郑有业, 高顺宝, 等. 2015. 西藏查藏错铜铅锌矿床成因: C-H-O-S-Pb 同位素制约[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 40(6): 1006~1016.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄 卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带? [J]. *矿床地质*, 20(4): 355~366.
- 唐菊兴, 多 吉, 刘鸿飞, 等. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. *地球学报*, 33(4): 393~410.
- 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 等. 2010. 西藏蒙亚啊铅锌矿床 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的[J]. *现代地质*, 24(1): 52~58.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 2002. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. *地质地球化学*, 30(3): 73~81.
- 杨德明, 李 才, 王天武. 2001. 西藏冈底斯东段南北向构造特征与成因[J]. *中国区域地质*, 20(4): 392~397.
- 杨 毅. 2015. 西藏列廷冈铁多金属矿床地质特征及冈底斯北缘成矿规律研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 臧文栓, 孟祥金, 杨竹森, 等. 2007. 西藏冈底斯成矿带铅锌银矿床的 S、Pb 同位素组成及其地质意义[J]. *地质通报*, 26(10): 1393~1397.
- 张林奎, 范文玉, 高大发. 2008. 西藏林周县勒青拉铅锌多金属矿床地质特征及成因[J]. *地质与勘探*, 44(5): 10~16.
- 张哨波, 高 明, 岳国利, 等. 2009. 西藏亚贵拉铅锌矿床地质特征及成因浅析[J]. *矿产与地质*, 23(4): 297~301.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. *稳定同位素地球化学*[M]. 北京: 科学出版社.
- 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*[M]. 北京: 科学出版社, 220~230.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 2008. 西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境[J]. *地质通报*, 27(4): 458~466.