

西藏邦铺铅锌矿床 S、Pb、C、O 同位素组成及成矿物质来源研究

王立强¹⁾, 罗茂澄²⁾, 袁志洁³⁾, 陈 伟⁴⁾, 冷秋锋⁴⁾, 张学全⁵⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

3) 中国地质科学院, 北京 100037;

4) 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059;

5) 西藏地勘局地热地质大队, 西藏拉萨 850000

摘 要: 邦铺铅锌矿床系邦铺钼铜矿区斑岩矿化体外围形成的矽卡岩型铅锌矿床; 矿石品位较富, 成矿元素以铅锌为主, 基本不含铜。文章以矿床中主要金属硫化物为研究对象, 采用 S、Pb 同位素研究方法对矿床成矿物质来源进行探讨。结果表明, 矿石金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围较宽, 但主要集中于 $-3.7\text{‰} \sim -0.7\text{‰}$ 之间, 具塔式分布特征, 硫主要来源于岩浆; 矿石铅同位素组成稳定, 为正常普通铅, 矿石铅的高 μ 值(大于 9.58)及构造环境演化图解中样品点的分布特征指示矿石铅主要来源于上地壳物质。与驱龙外围知不拉、甲玛矽卡岩矿体对比研究发现, 3 个矿床硫均为岩浆来源; 而金属物质来源空间上则显示出一定的规律, 驱龙—甲玛—邦铺矿集区由南向北壳源物质的混染作用不断增加; 大理岩及方解石碳-氧同位素组成特征显示矿床成矿流体中碳源主要来自于岩浆, 碳酸盐岩地层提供了部分成矿物质。

关键词: 硫同位素; 铅同位素; 碳-氧同位素; 成矿物质来源; 壳源混染; 成矿流体; 邦铺

中图分类号: P618.4; P597.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.04.05

Sulfur, Lead, Carbon and Oxygen Isotope Composition and Source of Ore-forming Materials of the Bangpu Pb-Zn Ore Deposit in Tibet

WANG Li-qiang¹⁾, LUO Mao-cheng²⁾, YUAN Zhi-jie³⁾, CHEN Wei⁴⁾, LENG Qiu-feng⁴⁾, ZHANG Xue-quan⁵⁾

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

3) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

4) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

5) Geothermal and Geological Party, Tibet Bureau of Mineral Resource Exploration and Development, Lhasa, Tibet 850000

Abstract: The Bangpu Pb-Zn deposit, formed in the periphery of the porphyry mineralization body of the ore district, is a skarn deposit with relatively rich ore grade, and the ore-forming elements are dominated by lead and zinc, without copper basically. Main metal sulfides were objects of this study, and S and Pb isotopic methods were used to investigate the source of the ore-forming minerals. The results show that the $\delta^{34}\text{S}$ values of the ore metal sulfides have a wide distribution, and mainly vary in the range of $-3.7\text{‰} \sim -0.7\text{‰}$, with the characteristics of tower distribution, and that these sulfur materials were mainly derived from the magma. Lead isotopes of the ore have stable composition and are positive common lead. The high μ values (larger than 9.58) of ore lead and the

本文由国家 973 项目(编号: 2011CB403103)和国土资源地质大调查项目(编号: 1212010012005)联合资助。

收稿日期: 2012-04-16; 改回日期: 2012-05-14。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 王立强, 男, 1984 年生。博士研究生。主要从事矿床学、矿床地球化学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: wlq060301@163.com。

distribution characteristics of the data points in the evolution diagram of tectonic environment indicate that the ore lead was mainly derived from the upper crust. A comparison between this deposit and the nearby Zhibula and Jiama deposits shows that sulfur of these three deposits was exclusively derived from magma, and their metal materials show a certain regular pattern in source space, i.e., the contamination of crustal source material increased from south to north in the Qulong-Jiama-Bangpu ore district. Carbon and Oxygen isotope compositions of marble and calcite show that carbon in ore-forming fluid was mainly derived from the magma whereas the carbonate formation provided parts of other ore-forming materials.

Key words: sulfur isotope; lead isotope; carbon and oxygen isotope; source of ore-forming materials; crustal contamination; ore-forming fluid; Bangpu

冈底斯成矿带发育众多规模巨大的斑岩型矿床(唐菊兴等, 2012), 而这些斑岩型矿床外围往往伴随着不同程度的矽卡岩型矿化, 这在驱龙—甲玛—邦铺矿集区表现得尤为典型和突出。前人研究成果表明, 在驱龙斑岩型铜钼矿床外围 1~4 km 范围内发育有知不拉、绒木错拉和朗姆家果等多个矽卡岩型铜矿床(李光明等, 2005; 肖波等, 2011); 甲玛矿区矽卡岩型铜铅锌矿体亦为其深部岩浆系统与上覆碳酸盐岩地层接触交代所形成的产物(唐菊兴等, 2010)。无独有偶, 邦铺矿区隐伏斑岩型钼铜矿体南侧(不足 1 km 处)洛巴堆组地层中发育品位极富的块状和稠密浸染状铅锌矿石。本文以邦铺斑岩钼铜矿区外围铅锌矿床矿石金属硫化物 S、Pb 同位素组成以及矿床热液成因方解石和大理岩的 C、O 同位素为研究对象, 探讨其成矿物质来源; 并通过与知不拉、甲玛矿床 S-Pb 同位素的对比研究, 揭示驱龙—甲玛—邦铺矿集区矽卡岩型矿床成矿物质源区的差异, 从而进一步明确矿集区成矿规律。

1 矿床地质特征

邦铺矽卡岩型铅锌矿体位于斑岩矿化体南侧, 矿区地层以下二叠统洛巴堆组(P_1l)为主, 局部发育古近系典中组(E_1d)(图 1)。洛巴堆组主要由底部弱变质的火山角砾岩和上部杂砂岩、板岩夹灰岩和大理岩透镜体组成; 典中组岩石组合以凝灰岩为主, 局部发育少量的凝灰质板岩、凝灰质角砾岩以及晶屑凝灰岩等。矿区岩浆岩主要发育有晚白垩世—早古新世的黑云二长花岗岩以及中新世中期的石英二长斑岩体(Wang et al., 2012)。黑云二长花岗岩体以岩基形式侵位于矿区地层之中, 石英二长斑岩体呈岩枝或岩脉状产出。黑云二长花岗岩整体较为新鲜, 因遭受风化淋滤作用而发育较弱的蚀变; 石英二长斑岩体中可见斜长石蚀变而成的绿泥石和绢云母, 未见矽卡岩化的痕迹, 在矿区平硐内可见石英二长

斑岩脉体穿切大理岩体的现象。因此, 作者推测黑云二长花岗岩及石英二长斑岩与矽卡岩铅锌矿化并无重要的成因联系, 二者皆非成矿岩体。矿区构造以规模较小的断层构造和韧性变形带为主, 断层破碎带和韧性变形带中往往形成品位较富的铅锌矿石。

矿床围岩蚀变发育, 主要有矽卡岩化、大理岩

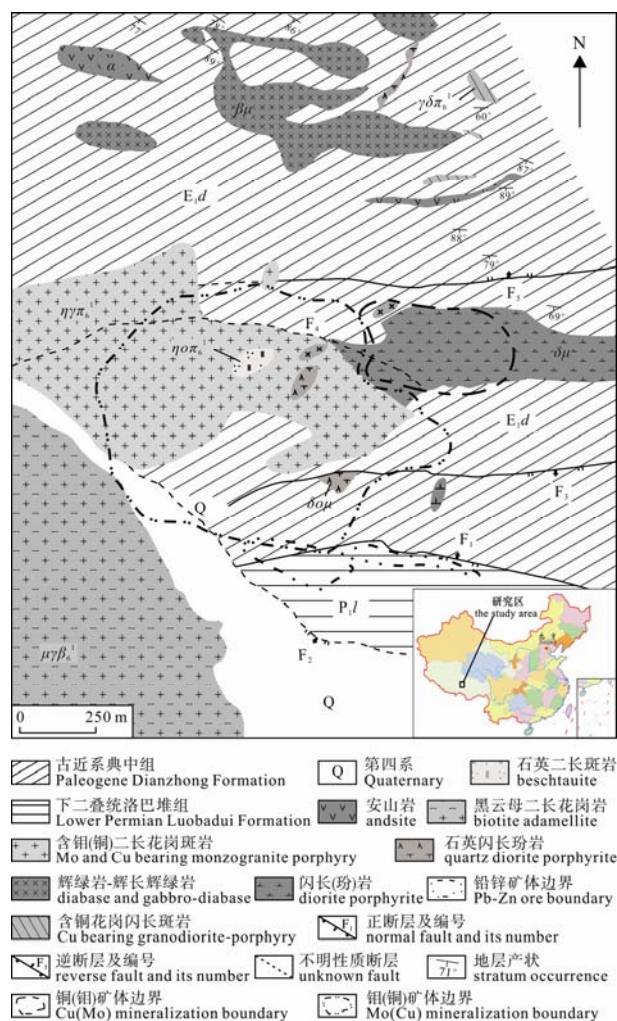


图 1 邦铺钼铜多金属矿区地质简图(据王立强等, 2011)

Fig. 1 Simplified geological map of the Bangpu Mo-Cu polymetallic area (after WANG Li-qiang et al., 2011)

化、硅化、绿帘石化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化等,与成矿关系密切的围岩蚀变主要有矽卡岩化、大理岩化和硅化。围岩蚀变具有一定的分带性,靠近北部斑岩矿体一侧蚀变以石榴子石—阳起石—透辉石矽卡岩化为主,向南逐渐过渡为阳起石—透辉石—绿帘石矽卡岩化和绿帘石—绿泥石—硅化—大理岩化。矿化亦表现出一定的空间分带性,横向上由北侧向南主要表现为磁黄铁矿+黄铁矿→黄铁矿+闪锌矿(方铅矿)→闪锌矿+方铅矿;纵向上由深到浅部亦表现为含铁矿物(磁黄铁矿和黄铁矿等)数量逐渐减少的趋势,再向上基本过渡为闪锌矿和方铅矿。

矿区铅锌矿体主要呈透镜状或似层状产于矿区矽卡岩体之中,少量产于与矽卡岩体接触的大理岩中,矿体近东西向展布,厚度变化较大,沿走向延伸逾 200 m,矿石品位较富。矿石中矿物组成较为简单,主要金属矿物有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿等,基本未见黄铜矿等含铜矿物;非金属矿物主要包括石榴子石、阳起石、透辉石、绿帘石、绿泥石、石英、方解石等。矿石结构以粒状结构、自形-半自形结晶结构等为主,次有交代结构、溶蚀结构、共结边结构等;矿石构造主要有稠密浸染状构造、块状构造、浸染状构造和脉状构造等。

2 样品采集及测试方法

文中用于 S、Pb 同位素分析测试的样品采自邦铺铅锌主矿体不同高程平硐(PD13 和 PD15)中的原生金属硫化物矿石,矿石特征见图 2;用于 C-O 同位素分析测试样品主要采自 PD15 的方解石及大理岩。分析测试步骤及方法如下:大理岩直接破碎并研磨至 200 目以下;金属硫化物和方解石单矿物由人工挑选,纯度大于 99%,研磨至 200 目以下,送实验室进行分析。样品分析测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中,硫同位素测试是将金属硫化物单矿物与氧化亚铜按一定比例研磨、混合均匀后进行氧化反应,生成 SO_2 并用冷冻法收集,然后用 MAT251 气体同位素质谱仪分析硫同位素组成,测量结果以 V-CDT 为标准,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$;铅同位素样品先用混合酸分解,然后用树脂交换法分离出铅,蒸干后用热表面动态质谱法进行铅同位素测量,仪器型号为 ISOPROBE-T,测量精度为对 1 μg 铅其 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 低于 0.05%, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 一般不大于 0.005%;碳-氧同位素样品用磷酸分解并冷冻收集纯净的 CO_2 气体,在 MAT253 质谱仪上进行测定,测定结果分别以 PDB 和 SMOW 为标准,精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

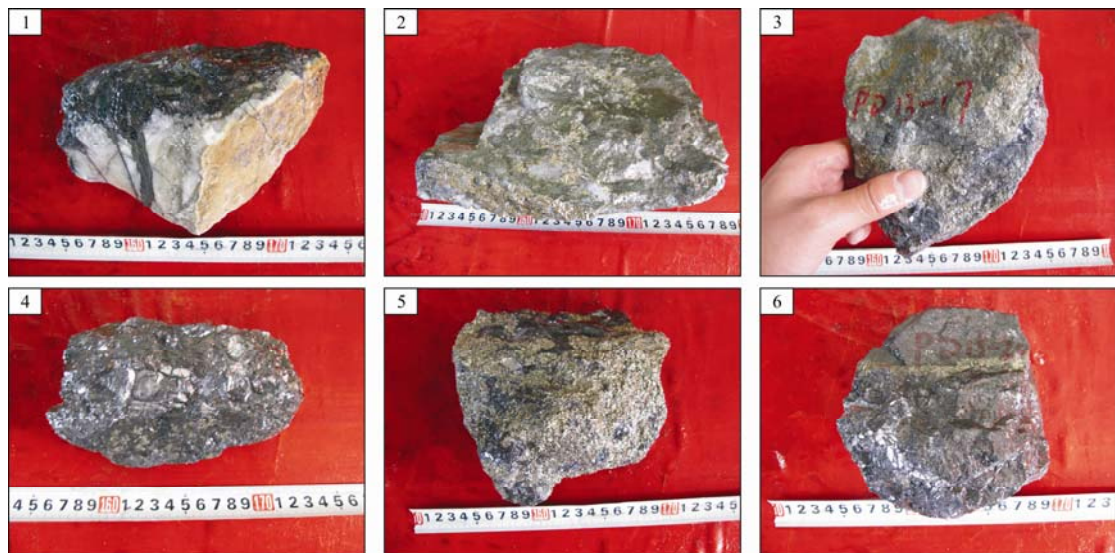


图 2 用于测试的矿石样品

Fig. 2 Ore samples used for testing

- 1-产于大理岩与矽卡岩接触面上的铅锌矿石(PD13-7); 2-产于阳起石-绿帘石矽卡岩中的浸染状黄铁矿(PD13-8); 3-矽卡岩型块状铅锌矿石伴有细粒黄铁矿(PD13-17); 4-块状矽卡岩型铅锌矿石(PD15-13); 5-自形黄铁矿伴随铅锌共同产出(PD15-17); 6-块状矽卡岩型铅锌矿石伴有黄铁矿细脉(PD15-20)
- 1-Pb-Zn ore hosted in the interface between marble and skarn (PD13-7); 2-disseminated pyrite in actinolite-epidote skarn (PD13-8); 3-skarn type massive Pb-Zn ore with fine-grained pyrite (PD13-17); 4-massive Pb-Zn ore of skarn type (PD15-13); 5-euhedral pyrite with sphalerite and galena (PD15-17); 6-skarn type massive Pb-Zn ore with pyrite veinlets (PD15-20)

3 测试结果

3.1 硫同位素组成

本次研究得到的邦铺铅锌矿区 10 件金属硫化物的 S 同位素测试结果及前人文献发表的数据一并列于表 1 中。21 件样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -5.2‰ ~ 3.2‰ 之间, 极差为 8.4‰ , 平均值为 -1.60‰ 。其中, 7 件闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -5.2‰ ~ 3.2‰ , 平均值为 -1.27‰ ; 9 件方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -4.0‰ ~ 0.6‰ , 平均值为 -2.01‰ ; 5 件黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -2.9‰ ~ 1.4‰ , 平均值为 -1.16‰ 。虽然矿床硫同位素组成变化范围较大, 但其峰值主要分布在 -3.7‰ ~ -0.7‰ 之间(图 3), 具有塔式分布特征, 表明矿床硫源仍较为单一。

前人研究资料表明, 在硫同位素分馏达到平衡的条件下, 共生硫化物(包括硫酸盐)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值按硫酸盐—辉钼矿—黄铁矿—磁黄铁矿—闪锌矿—黄铜矿—方铅矿的顺序递减(张理刚, 1985; 郑永飞等, 2000)。邦铺铅锌矿床硫同位素组成并未表现出明显的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ 富集规律, 而是显得较为杂乱, 与正常的平衡交换顺序不尽一致, 表明矿床含矿流体在成矿过程中未达到硫同位素分馏平衡。

3.2 铅同位素组成

邦铺铅锌矿床金属硫化物铅同位素组成及其以 H-H 单阶段增长模式计算的 μ 值(Holmes, 1946, 1947)见表 2。其中, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 18.741~19.625 之间, 平均值为 18.837, 极差为 0.884; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 15.645~15.824 之间, 平均值为 15.732, 极差为 0.179; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 39.212~39.854 之间, 平均值为 39.462, 极差为 0.642, 矿石硫化物铅同位素上述各比值变化范围不大, 显示出普通铅特征, 矿床铅来

自较为稳定的铅源。16 件金属硫化物铅同位素组成特征值 μ 普遍较大, 平均值为 9.68, 变化范围为 9.52~9.86。

3.3 碳-氧同位素组成

邦铺铅锌矿床中大理岩全岩及方解石碳氧同位素组成见表 3。1 件铅锌矿化大理岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值分别为 4.2‰ 和 11.9‰ ; 4 件方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值变化于 -4.9‰ ~ 4.5‰ 之间, 平均值为 2.54‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值变化于 9.9‰ ~ 12.3‰ 之间, 平均值为 11.52‰ 。

4 讨论

4.1 硫的来源

对矿床中硫的来源的讨论必须根据硫化物沉淀期间热液的总硫同位素组成加以分析(Ohmoto et al., 1979)。由于热液成矿作用过程中硫同位素分馏效应取决于体系总硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}_{\text{ΣS}}$)、氢离子浓度、离子强度、氧逸度及温度等多方面因素。因此,

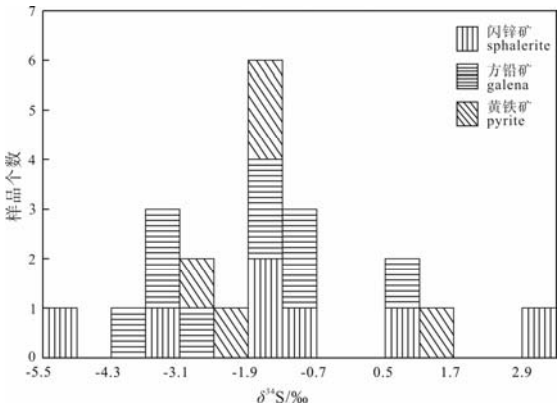


图 3 矿石硫化物硫同位素组成频率直方图
Fig. 3 Frequency histogram of $\delta^{34}\text{S}$ for ore sulfides

表 1 邦铺铅锌矿床矿石硫化物 S 同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic composition of ore sulfides from the Bangpu Pb-Zn deposit							
样品 编号	测试 对象	$\delta^{34}\text{S}$ V-CDT/‰	数据 来源	样品 编号	测试 对象	$\delta^{34}\text{S}$ V-CDT/‰	数据 来源
PD13-7	闪锌矿	-5.2	本文	BP-02	方铅矿	-1.8	臧文栓等, 2007
PD13-7	方铅矿	-3.5		BP-03	闪锌矿	-1.9	
PD13-8	黄铁矿	-2.0		BP-16	方铅矿	-1.1	
PD13-17	黄铁矿	-1.6		BP067	方铅矿	-1.5	
PD13-17	方铅矿	-2.9		BP067	闪锌矿	-1.2	周雄等, 2011
PD15-13	闪锌矿	-3.3		BP076	方铅矿	-1.0	
PD15-13	方铅矿	-3.5		BP076	闪锌矿	1	
PD15-17	方铅矿	-4.0		BP076	黄铁矿	-1.5	
PD15-17	黄铁矿	-2.9		BP138	方铅矿	0.6	
PD15-20	闪锌矿	-1.5		BP138	闪锌矿	3.2	
				BP049	黄铁矿	1.4	

表 2 邦铺铅锌矿床矿石硫化物 Pb 同位素组成
Table 2 Lead isotopic composition of ore sulfides from the Bangpu Pb-Zn deposit

样品编号	测试对象	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	数据来源
PD13-7	闪锌矿	18.774	15.725	39.403	9.67	本文
PD13-7	方铅矿	18.85	15.824	39.726	9.86	
PD13-8	黄铁矿	18.786	15.741	39.45	9.70	
PD13-17	黄铁矿	18.880	15.767	39.523	9.75	
PD13-17	方铅矿	18.741	15.693	39.279	9.61	
PD15-13	闪锌矿	18.754	15.738	39.39	9.70	
PD15-13	方铅矿	18.803	15.789	39.552	9.79	
PD15-17	方铅矿	18.821	15.789	39.605	9.79	
PD15-17	黄铁矿	18.784	15.743	39.454	9.71	
PD15-20	闪锌矿	18.798	15.74	39.465	9.70	
BP-02	方铅矿	18.774	15.645	39.212	9.52	臧文栓 等, 2007
BP-03	闪锌矿	19.625	15.711	39.854	9.58	
BP-16	方铅矿	18.775	15.658	39.314	9.54	
BP067	方铅矿	18.825	15.718	39.463	9.65	周雄等, 2011
BP076	方铅矿	18.752	15.715	39.352	9.65	
BP141	方铅矿	18.763	15.712	39.348	9.65	

表 3 邦铺铅锌矿床 C-O 同位素组成
Table 3 Carbon and oxygen isotopic composition of the Bangpu Pb-Zn deposit

样品编号	测试对象	样品产状	δ ¹³ C _{V-PDB} /‰	δ ¹⁸ O _{V-PDB} /‰	δ ¹⁸ O _{V-SMOW} /‰
PD15-2	大理岩	含铅锌矿大理岩	4.2	-18.5	11.9
PD15-4	方解石	乳白色方解石脉	4.4	-18.1	12.3
PD15-7	方解石	乳白色方解石脉	4.5	-18.8	11.5
PD15-8	方解石	灰黑色方解石脉	4.5	-18.3	12.0
LX11-24	方解石	透明方解石脉	-4.9	-20.3	9.9

由热液成矿作用形成的硫化物和硫酸盐的 δ³⁴S 值一般不等于热液总的 δ³⁴S 值(杜泽忠等, 2011; 田世洪等, 2011)。但是, 在一定的条件下可以根据矿床的矿物共生组合关系估计成矿流体的硫同位素组成(王艳娟等, 2011)。根据 Ohmoto(1972)的理论计算, 如果氧逸度较低体系中硫酸盐不能存在, 矿物组合为黄铁矿+方铅矿+闪锌矿时, 硫化物的 δ³⁴S 值可大致代表热液的总硫同位素组成。邦铺铅锌矿区野外地质调查及光薄片镜下鉴定过程中并未发现硫酸盐矿物的大量存在, 含硫矿物主要以黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等金属硫化物形式存在。因此, 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。在邦铺铅锌矿床与自然界主要硫储库的同位素组成对比图上(图 4)可以看出, 邦铺铅锌矿床硫同位素组成更多地显示出岩浆硫的特征, 推测成矿流体中硫主要来源于岩浆。

4.2 铅的来源

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经历地质作用的信息, 反映铅

的来源(王立强等, 2010), 具有高 μ 值(大于 9.58)的铅常被认为是来自 U、Th 相对富集的上部地壳物质(吴开兴等, 2002; Zartman et al., 1981)。邦铺铅锌矿床矿石铅同位素 μ 值变化范围为 9.52~9.86, 平均值为 9.68; 除样品 BP-02 和 BP-16 外, 其余样品 μ 值均高于 9.58, 显示铅源主体具有上地壳源区物质特征。

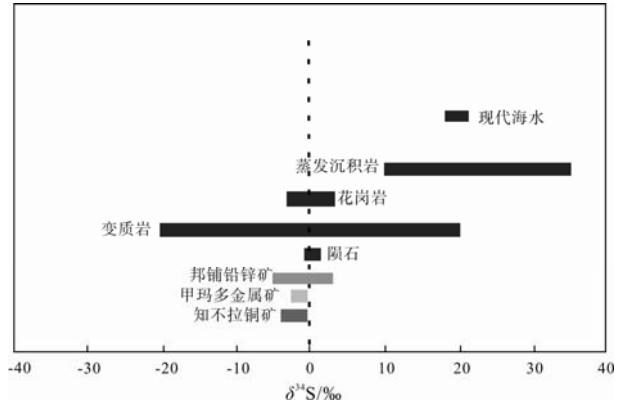


图 4 邦铺铅锌矿床硫同位素组成分布图
Fig. 4 Distribution of δ³⁴S of ore sulfides from the Bangpu Pb-Zn deposit

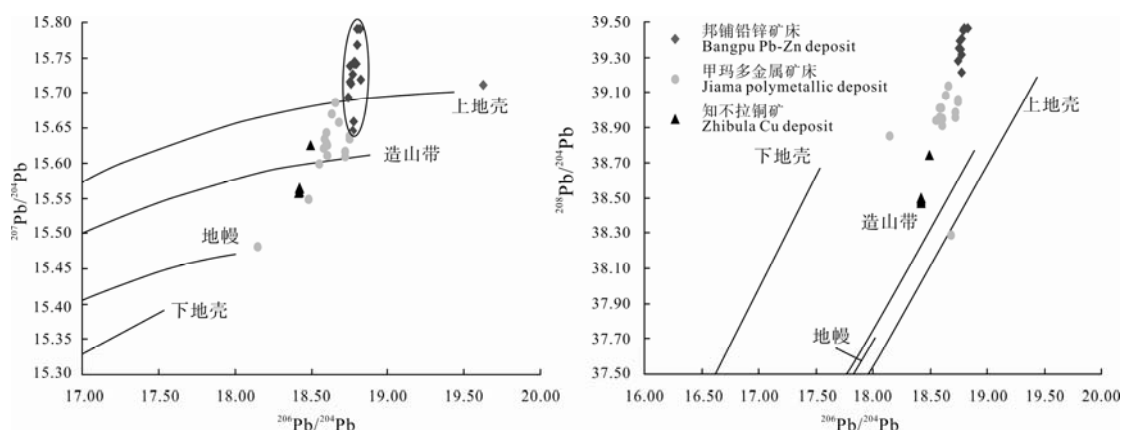


图 5 邦铺铅锌矿区矿石硫化物铅同位素构造环境演化图解(底图据 Zartman et al., 1981)

Fig. 5 Diagram showing evolutionary tectonic settings of lead isotopes in ore sulfides from the Bangpu Pb-Zn Deposit (base map after Zartman et al., 1981)

为了进一步明确邦铺铅锌矿床矿石铅的来源, 将 16 件金属硫化物铅同位素组成数据投影到 Zartman 等(1981)提出的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造演化图解上(图 5), 从图中可以观察到 2 个样品点(BP-02、BP-16)位于上地壳和造山带演化线之间, 其余样品点皆位于上地壳演化线之外。样品点的这一分布特征表明矿床铅主要来源于上地壳物质, 可能有少量幔源物质的加入, 整体上与 μ 值所反映出的地质事实相吻合。

4.3 知不拉—甲玛—邦铺矿床 S-Pb 同位素对比研究

前人对知不拉、甲玛矽卡岩矿床进行了不同程度的研究, 积累了一定量的 S、Pb 同位素数据(余宏全等, 2005; 曲晓明等, 2002; 李永胜, 2009; 周云, 2010; 姚鹏等, 2002), 为本文进行驱龙—甲玛—邦铺矿床区外围矽卡岩矿床的对比研究奠定了基础。

知不拉矿床 5 件金属硫化物(黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿) $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -3.9‰ ~ -0.1‰ 之间, 平均值为 -2.60‰ (余宏全等, 2005); 来自甲玛矽卡岩矿体的 23 件金属硫化物(辉钼矿、斑铜矿、黝铜矿、黄铜矿、方铅矿) $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -2.7‰ ~ -0.1‰ 之间, 平均值为 -1.35‰ , 其变化范围相对于知不拉和邦铺矿床较窄(曲晓明等, 2002; 余宏全等, 2005; 李永胜, 2009)。将知不拉和甲玛矽卡岩矿床硫同位素组成置于图 4 中, 可以发现 3 个矿床硫同位素组成范围以邦铺矿床最大、甲玛矿床最小, 但是 3 个矿床硫均显示岩浆来源特征。知不拉、甲玛、邦铺矽卡岩矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值分别为 -2.60‰ 、 -1.35‰ 和 -1.60‰ , 总体上, 知不拉矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值较低、邦铺居中而甲玛矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值较高, 造成 3 个矿床硫同位素

这一特征的原因可能是各矿床距各自成矿岩体位置远近不同所造成的。3 个矿床各自成矿斑岩体均以富集 $\delta^{34}\text{S}$ 为特征(孟祥金等, 2006; Qu et al., 2007; 曲晓明等, 2002; 周雄等, 2011), 因此, 距成矿岩体越近可能有更多富集重硫($\delta^{34}\text{S}$)的岩浆流体的加入, 从而导致矿石中 $\delta^{34}\text{S}$ 值较高。

知不拉 5 件金属硫化物铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 18.421~18.495 之间, 平均值为 18.437, 极差为 0.074; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 15.557~15.625 之间, 平均值为 15.574, 极差为 0.068; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 38.469~38.744 之间, 平均值为 38.536, 极差为 0.275(余宏全等, 2005); 各同位素比值变化范围很小, 表明矿床铅源较为单一。甲玛 17 件金属硫化物铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 18.150~18.752 之间, 平均值为 18.608, 极差为 0.602; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 15.480~15.686 之间, 平均值为 15.618, 极差为 0.206; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 38.288~39.740 之间, 平均值为 38.990, 极差为 1.452(李永胜, 2009; 周云, 2010; 曲晓明等, 2002; 姚鹏等, 2002); 其中 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化较大, 指示矿床铅可能具有多源性。知不拉、甲玛、邦铺单个矿床铅同位素组成变化范围较小, 但 3 个矿床铅同位素数据整体变化范围较大, 且甲玛与邦铺、知不拉与甲玛之间数据各自有所重叠, 反映出 3 个矿床成矿物质来源之间既有类似又有所差异。在 Zartman 等铅同位素构造环境演化图解上, 知不拉矿床 1 个样品点位于造山带与上地壳演化线之间, 其余 4 个样品点位于造山带与地幔演化线之间靠近造山带演化线的位置, 显示出幔源与壳源组分混合的特征, 但可能以幔源物质为主。甲玛矿床数据点整体位于

上地壳到地幔演化线之间较宽的区域内, 但多数样品点位于造山带和上地壳演化线之间, 亦反映出壳幔混源的特征, 但是壳源物质的加入较知不拉明显增多。而邦铺铅锌矿床则更多显示壳源物质组成的特征。空间上, 3 个矿床知不拉位于矿集区最南部、邦铺位于最北部, 上述各矿床铅同位素组成特征的研究表明, 3 个矿床成矿物质来源由南向北变化较大, 南部以幔源组分居多, 向北壳源组分有更明显的加入。

4.4 流体来源

在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 组成关系图解中(图 6), 1 件方解石(LX11-24)样品投影点完全位于岩浆成因区域, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值与地幔储库 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值($-5\text{‰} \sim -7\text{‰}$)相近, 表明成矿流体来源于深源岩浆流体或岩浆岩或者源自不同端元储库的流体混合并且一定混合有岩浆流体。其余包括 1 件大理岩在内的 4 件样品投影点位于海相碳酸盐岩与花岗岩之间并且明显靠近花岗岩附近较小的范围内, 表明成矿流体中碳主要来源于矿区内的岩浆, 少部分可能来自于碳酸盐岩的溶解作用。

5 结论

1) 邦铺铅锌矿床矿石硫同位素组成范围较宽, 但其 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值主要集中于 $-3.7\text{‰} \sim -0.7\text{‰}$ 之间, 具有塔式分布效应, 矿床硫来源于岩浆; 知不拉、甲玛、邦铺 3 个矿床硫同位素组成, 以知不拉矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值较低、甲玛矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值较高, 其原因可能是 3 个矿床距各自成矿岩体位置远近不同所造成的;

2) 邦铺矿床矿石铅同位素组成稳定, 显示普通铅

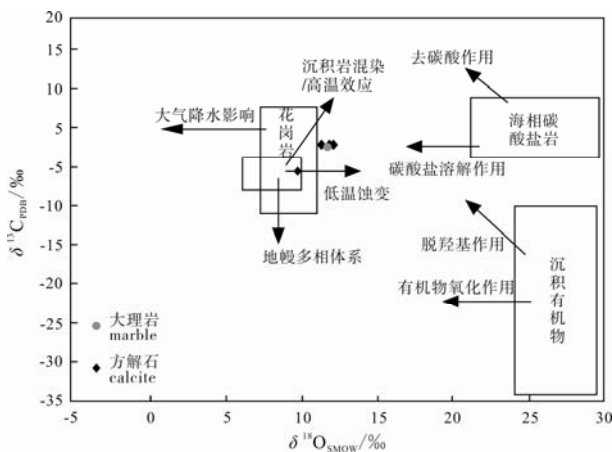


图 6 邦铺铅锌矿床 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 组成关系图 (底图据刘建明等(1998), 毛景文等(2002)修改)

Fig. 6 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ versus $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram of the Bangpu Pb-Zn deposit (modified after LIU Jian-ming et al., 1998, and MAO Jing-wen et al., 2002)

特征; 铅同位素构造环境演化图解中, 绝大多数样品点位于上地壳演化线之外, 表明成矿金属物质来源主要为上地壳, 与矿石铅高 μ 值所指示的成矿物质源区相一致;

3) 空间上, 知不拉、甲玛与邦铺 3 个矿床中, 知不拉位于驱龙—甲玛—邦铺矿集区最南部、邦铺位于最北部。铅同位素物质源区研究表明知不拉矿床成矿物质以幔源物质为主, 甲玛壳源物质混染程度有所增加, 而邦铺则以壳源物质为主, 显示出矿集区由南向北壳源物质混染程度逐步增大的规律;

4) 矿床碳-氧同位素研究表明, 矿床成矿流体中碳来源以岩浆流体为主, 矿区碳酸盐岩地层提供了部分碳质。

致谢: 野外地质调查过程中得到西藏天仁矿业公司邦铺矿区陈在元矿长及宝明矿业公司杨矿长等相关人员的大力支持; 样品采集及野外生活中得到了普次仁的热情帮助; 审稿过程中, 相关专家提出了宝贵的意见和建议, 在此一并致谢。

参考文献:

- 杜泽忠, 顾雪祥, 李关清, 章永梅, 程文斌, 景亮兵, 张兴国. 2011. 藏南拉木由塔梯(金)矿床 S、Pb 同位素组成及指示意义[J]. 现代地质, 25(5): 853-860.
- 李光明, 芮宗瑶, 王高明, 林方成, 刘波, 余洪全, 丰成友, 屈文俊. 2005. 西藏冈底斯成矿带甲玛和知不拉铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 24(5): 481-489.
- 李永胜. 2009. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及矿床成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学.
- 刘建明, 刘家军, 郑明华, 顾雪祥. 1998. 微细浸染型金矿床的稳定同位素特征与成因探讨[J]. 地球化学, 27(6): 585-590.
- 毛景文, 郝英, 丁梯平. 2002. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. 矿床地质, 21(2): 121-127.
- 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿 S、Pb 同位素组成: 对含矿斑岩与成矿物质来源的指示[J]. 地质学报, 80(4): 554-558.
- 曲晓明, 侯增谦, 李佑国. 2002. S、Pb 同位素对冈底斯斑岩铜矿带成矿物质来源和造山带物质循环的指示[J]. 地质通报, 21(11): 768-775.
- 余宏全, 丰成友, 张德全, 潘桂棠, 李光明. 2005. 西藏冈底斯中东段矽卡岩铜-铅-锌多金属矿床特征及成矿远景分析[J]. 矿床地质, 24(5): 508-520.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 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.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫佶, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495-506.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 刘英超, 宋玉财, 王富春, 薛万文. 2011. 青海玉树东莫扎拉铅锌矿床 S、Pb、Sr-Nd 同位素组成: 对成矿物质来源的指示[J]. 岩石学报, 27(7): 2173-2183.
- 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 唐菊兴, 钟康惠, 刘晓吉. 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示踪[J]. 现代地质, 24(1): 52-57.
- 王立强, 唐菊兴, 陈毓川, 罗茂澄, 冷秋锋, 陈伟, 王焕. 2011. 西藏邦铺钼(铜)矿床含矿二长花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 矿床地质, 30(2): 349-360.
- 王艳娟, 胡援越, 申俊峰, 曲凯, 殷娜, 于洪军, 马广刚. 2011. 太行山南段北洛河铁矿 S、Pb 同位素组成及其对成矿物质来源的示踪[J]. 现代地质, 25(5): 846-852.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 唐群力. 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.
- 肖波, 秦克章, 李光明, 李金祥, 陈雷, 赵俊兴, 范新. 2011. 冈底斯驱龙斑岩铜-钼矿区外围矽卡岩型铜矿的分布、特征及深部找矿意义[J]. 地质与勘探, 47(1): 43-53.
- 姚鹏, 郑明华, 彭勇民, 李金高, 栗登奎, 范文玉. 2002. 西藏冈底斯岛弧带甲玛铜多金属矿床成矿物质来源及成因研究[J]. 地质论评, 48(5): 468-478.
- 臧文栓, 孟祥金, 杨竹森, 叶培胜. 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.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 周雄, 温春齐, 张学全, 张贻, 费光春, 温泉. 2011. 西藏邦铺钼铜多金属矿床硫、铅同位素地球化学特征[J]. 地质与勘探, 48(1): 24-30.
- 周云. 2010. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿成矿流体特征及演化[D]. 成都: 成都理工大学.
- Deposit, South Tibet[J]. Geoscience, 25(5): 853-860(in Chinese with English abstract).
- HOLMES A. 1946. An estimate of the age of the Earth[J]. Nature, 157(3995): 680-684.
- HOLMES A. 1947. A revised estimate of the age of the Earth[J]. Nature, 159(4030): 127-128.
- LI Guang-ming, RUI Zong-yao, WANG Gao-ming, LIN Fang-cheng, LIU Bo, SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, QU Wen-jun. 2005. Molybdenite Re-Os dating of Jiama and Zhibula polymetallic copper deposits in Gangdese metallogenic belt of Tibet and its significance[J]. Mineral Deposits, 24(5): 481-489(in Chinese with English abstract).
- LI Yong-sheng. 2009. Geological characteristics and genesis of polymetallic copper deposit of Jiama, Tibet[D]. Beijing: China University of Geoscience(in Chinese with English abstract).
- LIU Jian-ming, LIU Jia-jun, ZHENG Ming-hua, GU Xue-xiang. 1998. Stable Isotope Compositions of Micro-disseminated Gold and Genetic Discussion[J]. Geochimica, 27(6): 585-590 (in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, HAO Ying, DING Ti-ping. 2002. Mantle Fluids Involved in Metallogenesis of Jiaodong (East Shandong) Gold District: Evidence of C, O and H Isotopes[J]. Mineral Deposits, 21(2): 121-127(in Chinese with English abstract).
- MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, LI Zhen-qing. 2006. Sulfur and Lead Isotope Compositions of the Qulong Porphyry Copper Deposit, Tibet: Implications for the sources of Plutons and metals in the Deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 80(4): 554-558(in Chinese with English abstract).
- OHMOTO H, RYE RO. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[M]//Barnes HL. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons: 509-567.
- OHMOTO H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 67(5): 551-578.
- QU Xiao-ming, HOU Zeng-qian, LI You-guo. 2002. Implications of S and Pb isotopic compositions of the Gangdise porphyry copper belt for the ore-forming material source and material recycling within the orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 21(11): 768-775(in Chinese with English abstract).
- QU Xiao-ming, HOU Zeng-qian, ZAW K, LI You-guo. 2007. Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Preliminary geochemical and geochronological results[J]. Ore Geology Reviews, 31(1-4):

References:

- DU Ze-zhong, GU Xue-xiang, LI Guan-qing, ZHANG Yong-mei, CHENG Wen-bin, JING Liang-bing, ZHANG Xing-guo. 2011. Sulfur, Lead Isotope Composition Characteristics and the Relevant Instructive Significance of the Lamuyouta Sb (Au)

- 205-223.
- SHE Hong-quan, FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, PAN Gui-tang, LI Guang-ming. 2005. Characteristics and metallogenic potential of skarn copper-lead-zinc polymetallic deposits in central eastern Gangdese[J]. *Mineral Deposits*, 24(5): 508-520(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, Dorji, LIU Hong-fei, LANG Xing-hai, ZHANG Jin-shu, ZHENG Wen-bao, YING Li-juan. 2012. Minerogenic Series of Ore Deposits in the East Part of the Gangdise Metallogenic Belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LI Feng-ji, GUO Na, QIN Zhi-peng, YAO Xiao-feng, LI Lei, WANG You, TANG Xiao-qian. 2010. Geological Features and Metallogenic Model of the Jiama Copper-Polymetallic Deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shi-hong, YANG Zhu-sen, HOU Zeng-qian, LIU Ying-chao, SONG Yu-cai, WANG Fu-chun, XUE Wan-wen. 2011. Sulfur, lead, strontium and neodymium isotope compositions of the Dongmohazhua lead-zinc ore deposit in the Yushu area, southern Qinghai: Implications for the sources of ore-forming material in the deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2173-2183(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-qiang, CHEN Yu-chuan, TANG Ju-xing, LÜ Peng-rui, LUO Mao-cheng, WANG Huan, CHEN Wei, LENG Qiu-feng. 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Intermediate-Acidic Intrusive Rocks and Molybdenite Re-Os Dating from the Bangpu Mo (Cu) Deposit, Tibet and Its Geological Implication[J]. *Acta Geologica Sinica*(In Press).
- WANG Li-qiang, GU Xue-xiang, CHENG Wen-bin, TANG Ju-xing, ZHONG Kang-hui, LIU Xiao-ji. 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): 52-57(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-qiang, TANG Ju-xing, CHEN Yu-chuan, LUO Mao-cheng, LENG Qiu-feng, CHEN Wei, WANG Huan. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of ore-bearing monzogranite porphyry in Bangpu molybdenum (copper) deposit, Tibet and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 349-360(in Chinese with English abstract).
- WANG Yan-juan, HU Yuan-yue, SHEN Jun-feng, QU Kai, YIN Na, YU Hong-jun, MA Guang-gang. 2011. Sulfur and Lead Isotope Composition and Tracing for Sources of Ore-forming Materials in Beiming River Iron Deposits, Southern Taihang Mountains[J]. *Geoscience*, 25(5): 846-852(in Chinese with English abstract).
- WU Kai-xing, HU Rui-zhong, BI Xian-wu, PENG Jian-tang, TANG Qun-li. 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).
- XIAO Bo, QIN Ke-zhang, LI Guang-ming, LI Jin-xiang, CHEN Lei, ZHAO Jun-xing, FAN Xin. 2011. Distributions and characters of Zhibula-Langmujiaguo skarn Cu deposits envioning the Qulong porphyry Cu-Mo deposit and their implications for ore-search towards the deep subsurface[J]. *Geology and Exploration*, 47(1): 43-53(in Chinese with English abstract).
- YAO Peng, ZHENG Ming-hua, PENG Yong-min, LI Jin-gao, SU Deng-kui, FAN Wen-yu. 2002. Sources of Ore-forming Materials and the Genesis of the Jiama Copper and Polymetallic Deposit in Gandise Islan-arc Belt, Xizang[J]. *Geological Review*, 48(5): 468-478(in Chinese with English abstract).
- ZANG Wen-shuan, MENG Xiang-jin, YANG Zhu-sen, YE Pei-sheng. 2007. Sulfur and lead isotopic compositions of lead-zinc-silver deposits in the Gangdise metallogenic belt, Tibet, Chian, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1393-1397(in Chinese with English abstract).
- ZARTMAN RE, DOE BR. 1981. Plumbotectonics-The model[J]. *Tectonophysics*, 75: 135-162.
- ZHANG Li-gang. 1985. The Application of the Stable Isotope to Geology [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technological Press (in Chinese).
- ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. 2000. Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Science Publishing House(in Chinese).
- ZHOU Xiong, WEN Chun-qi, ZHANG Xue-quan, ZHANG Yi, FEI Guang-chun, WEN Quan. 2011. Geochemical characteristics of sulfur and lead isotopes from the Bangpu Mo-Cu polymetallic deposit, Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 48(1): 24-30 (in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yun. 2010. Characteristic and evolution of Ore-forming fluids from Jiama Polymetallic Copper Deposit, Mozhuogongka county, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).