

塔西南缘铅锌矿硫同位素特征及硫的来源探讨

游富华^{1,2}, 张正伟¹, 程 远³, 沈能平¹, 朱笑青¹, 肖加飞¹,
张中山^{1,2}, 周灵洁^{1,2}

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 河南省有色金属地质矿产局 第五地质大队, 郑州 450016

摘要:通过塔西南缘铅锌矿带金属硫化物(方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿)的硫同位素测试研究,结果显示 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围在 $-38.3\text{‰} \sim 24.0\text{‰}$, 具双峰式分布, 推测两种或两种以上流体相混合是导致矿床硫同位素组成变化的主要原因, 一类硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 $-6\text{‰} \sim 6\text{‰}$, 组成的矿石呈细粒、草莓状结构及浸染状构造; 另一类硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中在 $-32\text{‰} \sim -24\text{‰}$, 组成的矿石呈粗粒、脉状或角砾状构造。两种流体受构造应力和压实作用的影响, 沿着断裂或岩石的裂隙运移并相混合, 发生热化学硫酸盐还原反应, 产生的 HS^- 与 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 结合形成闪锌矿、方铅矿, 在有利部位沉淀成矿。硫主要来源于海水硫酸盐。

关键词:铅锌矿床; 硫同位素特征; 硫源; 塔西南缘

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2011)04-0449-09

Sulfur Isotope Characteristics and the Source of Sulfur for Discussion in the Lead-Zinc Ore Belt of the Southwestern Margin of Tarim, Xinjiang

YOU Fu-hua^{1,2}, ZHANG Zheng-wei¹, CHENG Yuan³, SHEN Neng-ping¹,
ZHU Xiao-qing¹, XIAO Jia-fei¹, ZHANG Zhong-shan^{1,2}, ZHOU Ling-jie^{1,2}

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. No. 5 Geology Team, Henan Provincial Non-ferrous Metals Geological and Mineral Resources Bureau, Zhengzhou 450016, Henan, China

Abstract: The research of sulfur stable isotope of lead and zinc ore belt in southwestern margin of Tarim platform shows the values of $\delta^{34}\text{S}$ distributed widely with a range of from -38.3 to 24.0 per mil and distributed as bimodal, which may resulted from the mixing of at least two fluid phases. The values of $\delta^{34}\text{S}$ are divided into two markedly different types, one fluid's $\delta^{34}\text{S}$ value concentrates between -6 and 6 per mil and the corresponding sulfide ores are fine granules with framboidal or disseminated textures; while the other's concentrates between -32 and -24 per mil and the corresponding sulfide ores are coarse granules with vein and brecciated structures. Driven by tectonic stress and compaction, these two types of fluids migrated along fault or rock fracture. They mixed and the thermochemical sulfate reduction reaction happened to produce HS^- , which reacted with Zn^{2+} and Pb^{2+} to form sphalerite or galena. The metallogenic fluid precipitated at favored sites to be ore deposits. Therefore, the main material source of the ore sulfur is the seawater sulfate.

Key words: lead-zinc deposit; characteristic of sulfur isotope; sulfur source; southwestern margin of Tarim

收稿日期: 2010-10-20 收到, 2011-03-18 改回

基金资助项目: 国家自然科学基金资助项目(41073042, 40903021); 中国科学院创新项目(KZCX2-YW-107-6); 矿床地球化学国家重点实验室自主研究基金资助课题

第一作者简介: 游富华(1984—), 男, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: yfh_02104526@163.com, 13959498298.

通讯作者: 张正伟。E-mail: zhangzhengw@hotmail.com.

塔里木地台西南缘是碳酸盐岩型铅锌成矿带和重点找矿区之一,近半个世纪以来,陆续发现了多个赋存在沉积岩中的铅锌矿床,以铁克里克、塔木、阿拉尔恰、卡拉牙斯卡克、阿巴列克、乌苏里克、吐洪木列克及卡兰古矿床为典型代表,矿床主要赋存在泥盆系-石炭系的特定层位中^[1]。众多学者对该区矿床成因提出了不同的观点,在20世纪50年代,认为该铅锌矿带是属岩浆期后热液型铅锌矿床;进入21世纪,大多数学者认为这类铅锌矿床特征与MVT型铅锌矿床相类似^[1~5];近几年,甚至有学者认为是海底热卤水喷流成矿^[6];有的认为是受地层与构造联合控制的中低温热液脉状铅锌矿床^[7]。张正伟等

认为用沉积-改造的观点解释矿床成因比较切合找矿实际需要^[8]。硫是Cu、Pb、Zn等元素沉淀形成硫化物矿床的主要矿化剂,硫同位素是示踪硫的来源最有效的方法,也是推断成矿物质来源和成矿过程的主要依据之一^[9],而成矿物质来源是解决矿床成因类型的关键之一,所以硫的来源对硫化物矿床中物质来源的研究起到重要的作用。本文在前人的研究基础上系统对该区铅锌矿带金属硫化物硫同位素进行研究,为该铅锌矿带硫源提供新的数据。

1 区域地质背景及矿床概述

研究区是沿着克孜勒陶-库斯拉甫断裂和塔木-卡兰古断裂展布(图1),主要为泥盆系-石炭系沉积的厚层碎屑岩和碳酸盐岩建造^[10]。主体构造为NNW向的区域性大断裂,总体走向NW335°,倾向南西,断面产状变化大,常为高角度逆冲^[2]。区内绝大多数铅锌矿床均分布在断裂旁侧,受中亚塔拉斯-费尔干纳走滑断层的影响,该区域性大断裂不仅是制约矿带空间展布的主要因素,也是主要控制矿田(床)分布的重要条件^[6]。区域上自北向南有铁克里克、塔木-卡拉牙斯卡克、阿巴列克及卡兰古-吐洪木列克等四个等间距分布的铅-锌矿化集中区^[6,8]。

铅锌矿化主要发生在上泥盆统奇自拉夫组(D₃q)的紫红色石英砂岩、中泥盆统克孜勒陶组(D₂k)的灰白色石英砂岩夹钙质灰岩、下石炭统的克里塔格组(C₁k)的白云质灰岩、下石炭统卡拉巴西塔克组(C₁k₁)的深灰色白云质灰岩以及下石炭统霍什拉甫组(C₁h)的碎屑岩^[11]。铅锌矿体形态呈多样性,主要有层状、似层状、脉状和透镜状,富矿体多受控于局部的断裂构造。金属矿物以方铅矿、闪锌矿为主,黄铜矿、孔雀石、黄铁矿次之,少量毒砂、赤铁矿、磁铁矿、砷镍矿、斑铜矿、蓝铜矿等;非金属矿物以白云石为主,方解石次之,少量石英、沥青及石膏等。广泛发育硅化、绿泥石化、白云石化及方解石化。白云石化为主,大体可分为两类,一类为区域性的白云石化,灰白色,分布范围大,呈自形-半自形晶,这类白云石化岩石并无任何矿化现象^[3];另一类为灰岩的白云石化,其导致岩石孔隙度增大,有利于含矿溶液的流通和富集成矿。区内的角砾岩多种,根据角砾的形态特征和接触关系可分为同生角砾、后生角砾、坍塌角砾和断层角砾^[12]。角砾多为碳酸盐岩,少量为石英,与后期形成的金属硫化物构成胶结物。矿石中有大量的球形草莓状结构、胶结结构、溶蚀结构,并普遍呈浸染

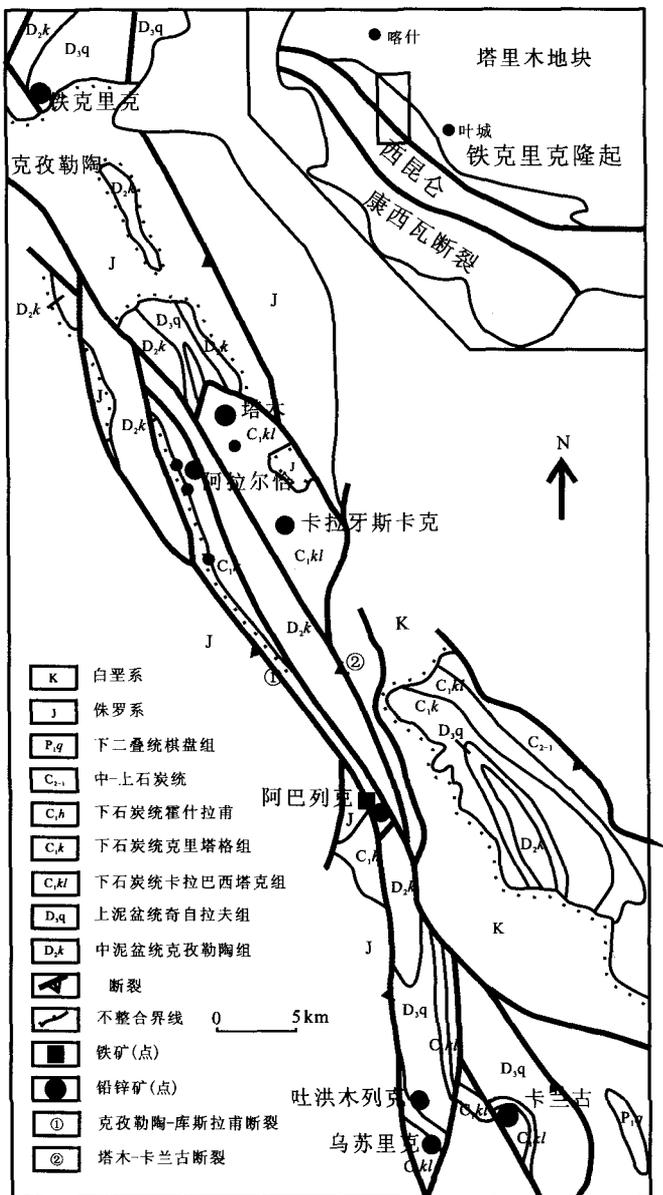


图1 塔西南缘铅锌矿带地质矿产简图

Fig. 1 The sketch map of geology and mineral resources of the lead-zinc ore belt in the southwest margin of Tarim

状构造、角砾状构造、脉状构造。矿物成分较单一，方铅矿有早期细粒浸染状分布和晚期中-粗粒脉状分布；闪锌矿存在多种颜色，可分为早期深色闪锌矿与晚期浅色闪锌矿，颜色的差异反映闪锌矿形成的温度不同。区内除了在卡兰古及阿巴列克矿区出现小规模辉绿岩脉外，尚未发现有其它侵入岩和火山岩分布。

2 同位素分析方法

用于本次分析的样品采自铁克里克、塔木、阿拉尔恰、卡拉牙斯卡克、阿巴列克、乌苏里克、吐洪木列克及卡兰古等铅锌矿床中的浸染状矿石、角砾状矿石、脉状矿石及块状矿石。对方铅矿、黄铁矿和黄铜矿进行单矿物分选，矿物经破碎至40~80目，然后在双目镜下严格挑选，再用玛瑙钵研磨至200目以下备用。共选出67件样品，其中方铅矿50件，黄铜矿14件，黄铁矿3件。

硫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完成。采用连续硫同位素质谱仪CF-IRMS测定(EA-IsoPrime, EA; Euro3000, IRMS; GVinstruments), 测定数据采用相对国际硫同位)标准CDT(Canyon Diablo Troilite)值表示, 硫同位素标准物GBW04414 (Ag_2S , $\delta^{34} S_{CDT} = -0.07 \pm 0.13\%$)、GBW04415 (Ag_2S , $\delta^{34} S_{CDT} = 22.15 \pm 0.14\%$), 测试误差小于 $\pm 0.2\%$ (2σ)。

3 分析测试结果

本次研究加上前人对该区的硫同位素测试得出的数据, 系统对研究区的硫化物(方铅矿Cu、黄铜矿Cp、黄铁矿Py、闪锌矿S_{PH})进行了硫同位素分析(表1), 得出硫化物的 $\delta^{34}S$ 值范围在 -38.3% ~ 24% , 存在两个主频区间, -13.6% ~ 24.0% 和 -38.3% ~ -12.0% ; 金属硫化物之间的硫同位素值存在差异(图2), 大体上 $\delta^{34}S_{Sph} > \delta^{34}S_{Gn} > \delta^{34}S_{Py} > \delta^{34}S_{Cp}$, 说明大部分硫化物矿物对存在同位素达到平衡, 少部分硫化物矿物对同位素未达到平衡状态。各个矿床之间的硫同位素值也存在差异(图3), 铁克里克矿区金属硫化物 $\delta^{34}S$ 值范围较窄, 有正值也有负值, 集中在 -8.5% ~ 8.0% , 平均值为 -1.2% , 同一硫化物的 $\delta^{34}S$ 值变化较大, 其中方铅矿 $\delta^{34}S$ 值 -9.0% ~ -7.0% 以及 5.0% ~ 8.0% , 几乎以零值为中心轴的对称区域; 塔木矿区金属硫化物 $\delta^{34}S$ 值变化小, 多数为正值, 在 -1.8% ~ 10.2% , 平均值在 5.4% , 方铅矿的 $\delta^{34}S$ 值为 4.0% ~ 5.0% , 闪锌矿的 $\delta^{34}S$ 值在 7.0% ~ 8.0% , 闪锌矿、方铅矿矿物对硫同位素 $\delta^{34}S_{Sph} > \delta^{34}S_{Gn}$; 阿拉尔恰矿区金属硫化物 $\delta^{34}S$ 值变化小, 均为正值, 在 3.4% ~ 6.0% , 平均值在 4.8% ; 卡拉牙斯卡克矿区金属硫化物 $\delta^{34}S$ 值变化较大, 均为负值, 在 -32.6% ~ -12.0% , 平均值在 -21.0% ; 阿巴列克矿区金属硫化物 $\delta^{34}S$ 值变化

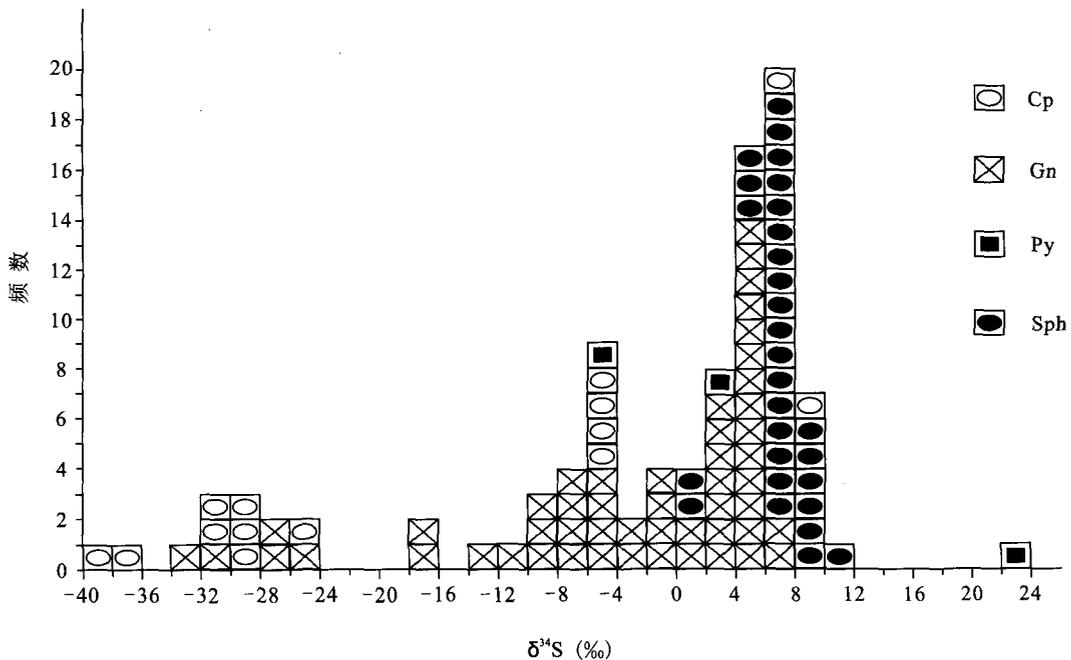


图2 塔西南缘铅锌矿带硫化物硫同位素直方图

Fig. 2 The histogram of sulfur isotope determinations in the southwest margin of the Tarim basin lead-zinc ore belt

小,除 ABLK-708 的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 24.0‰外,其余为负值,在-38.3‰~24.0‰,平均值在-25.5‰,乌苏里克和吐洪木列克矿区金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化大,几乎为负值,范围在-27.4‰~2.5‰,平均值为-7.1‰,其中 THMLK-N915 样品为上泥盆统奇自拉夫组的紫红色砂岩中的方铅矿矿石,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-27.4‰;卡兰古矿区金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化

小,均为负值,在-13.6‰~-5.5‰,平均值在-8.9‰,KLGX-905 样品为含炭质较高的碳酸盐岩,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-13.6‰;对上述硫化物的粒度进行分析统计,细粒与粗粒的硫化物的硫同位素在整体上并没有存在明显的差异,可能是选择测试分析的样品主要是采自后期热液改造形成的样品。

本文对吐洪木列克矿区 THMLK-N907 样品中

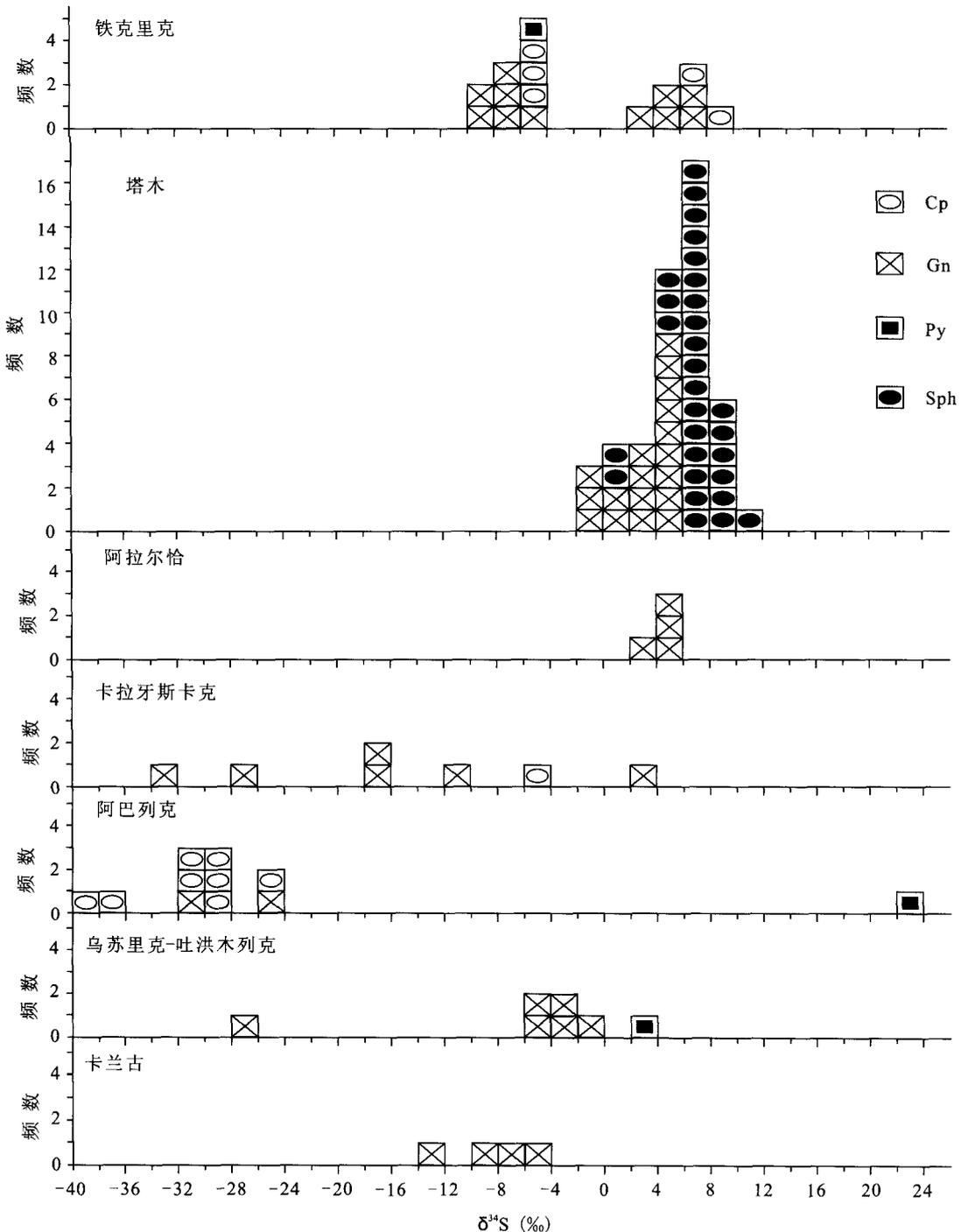


图3 塔西南缘各矿床不同硫化物的硫同位素直方图

Fig. 3 The histogram of sulfur isotope determinations of the different sulfides from each deposit in the southwest margin of Tarim Basin

的黄铁矿与方铅矿硫同位素测试,得出黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为2.5‰,方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-3.8‰,根据同位素地质测温原理^[13],可得出成矿温度为185~200℃,与前人在该区流体包裹体测温基本一致^[3],同时也说明其同位素分馏基本达到平衡。

4 分析讨论

4.1 硫同位素特征

祝新友等^[3]主要对浸染状、斑点状的硫化物矿石进行硫同位素测试,对黄铁矿硫化物测试较多。本文主要对角砾状、脉状及块状硫化物矿石进行测试分析,含少量的浸染状矿石,从测试的结果看,得出的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围广,各矿区之间的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围相近,但对黄铁矿所测 $\delta^{34}\text{S}$ 值有很大差别,前人测试黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为负值,相对应的结构构造为草莓状结构,主要为早期形成的,而本次测试来自不同矿区的三件黄铁矿样品,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化大,为-5.7‰、2.5‰、24.0‰。

该矿带的金属硫化物硫同位素组成及其分布显示出明显的规律性,与含矿岩性及矿石组构特征存在密切关系。具有极低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的矿石,主要产于碎屑岩中。由于碎屑岩的孔隙率和渗透率较好(中粗碎屑岩),化学性质上较稳定,有利于溶液的环流,使粘土吸附的Ni、Zn、Co等元素解析并较长期地保留在溶液中^[14]。顶板的含炭质泥岩,一方面起阻挡层的作用从而形成圈闭,另一方面起还原作用,有利于成矿。具有较高的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的矿石,主要产于白云岩化的碳酸盐岩以及碳酸盐岩与细碎屑岩的接触带附近,白云岩化的碳酸盐岩与不纯的细碎屑岩具有极大的孔隙和渗透能力,碳酸盐岩化学性质不稳定,在水溶液作用下很容易分解,所以不是好的矿源岩,而是较好的储矿场所^[14],但是这为形成白云石和方解石提供了丰富的 CO_3^{2-} ,也使得溶液呈酸性,并富含氧。郑天佑等通过简易的实验,发现在白云岩化碳酸盐岩中Pb的活化转移率高达52%。具有极低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的硫化物组成的矿石均具有分散、细粒、胶结结构以及球形草莓状等结构的特点。而那些热液活动更加明显,并且矿石呈现出结晶较好、粗粒,多呈溶蚀交代结构、脉状构造及角砾状构造,其硫化物组成 $\delta^{34}\text{S}$ 值较高^[11]。

4.2 硫的来源

前人研究发现矿区含矿建造中有钡-钾长石,Ba含量较高,没有出现大量的重晶石^[15]。存在合理的解释为Ba的异常高是原化学沉积形成的 BaSO_4 在地质演变过程中分解, SO_4^{2-} 被还原成低

价硫,进入黄铁矿等矿物中,Ba则发生迁移或进入长石中。同时Ba含量较高,被认为是蒸发岩的一个证据^[16],说明当时存在蒸发环境,而使岩层中出现硫酸盐析出。

本区铅锌矿带的矿石中硫酸盐矿物少见,硫几乎都是以硫化物的形式出现,因此可以认为硫化物的硫同位素组成能够代表成矿流体的硫同位素组成^[17],下面对硫的来源的讨论基于这一前提。

硫酸盐的还原作用存在三种不同机制:①生物作用还原(BSR)机制;②有机质中硫的热降解机制;③热化学还原(TSR)机制^[18]。

在反应部位,反应主要发生在气液接触带^[19]或者水岩接触面^[20]。本文中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏正时(+24.0‰),发生硫酸盐的热还原反应,此反应在地下深处发生,一般受热温度大于100℃,此过程不发生很强的同位素分馏作用^[21],形成的硫化物中硫同位素偏重。当黄铁矿硫同位素偏负时矿石出现草莓状结构、自形结构、固溶体分离结构、骸晶结构以及溶蚀交代结构,对具有特别负值的硫一般被认为是源自海水硫酸盐的细菌还原,这些硫化物常见草莓状、球粒状等结构佐证了这种观点。本文中黄铁矿呈草莓状结构,源自海水硫酸盐的细菌还原作用。说明黄铁矿的硫同位素具有热化学还原硫和细菌还原硫的复合特征。在矿区中还发现有少量沥青及含有机碳的泥质岩,说明成矿过程中有有机质的参与。有机质不仅可以与铅、锌发生强烈的配合作用,而且可以吸附大量的游离铅、锌离子^[22],是矿化不同阶段的还原剂及 CO_2 和有机酸的来源。据流体包裹体研究^[23]证实有烃类有机化合物烷、烯、炔等存在,有机质或生物细菌还原碳酸盐岩中的硫酸盐岩,产生还原硫,为该铅锌矿带铅、锌等硫化物的沉淀创造条件。

研究区铅锌矿带 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围大,与陨石的的存在显著偏差,应不可能来自幔源硫或岩浆硫。闪锌矿、方铅矿矿物对硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{Sph}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{Gn}}$,说明大多数共生的闪锌矿和方铅矿是在同位素达到平衡的条件下沉淀的,一些矿物对出现 $\delta^{34}\text{S}_{\text{Gn}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{Cp}}$,说明部分矿物对同位素未达到平衡状态,可能是不同成矿阶段的硫同位素组成反映的硫源是变化的。硫同位素组成具双峰式分布,这种分布规律表明成矿作用过程中可能存在两种不同性质、不同来源的含矿热液。由这两种不同性质的流体相互混合形成该区的铅锌矿床^[1, 2, 5, 12, 15]。以阿巴列克、卡拉牙斯卡克矿床为代表的矿床,具有极低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,具有还原性的含矿热液,热液温度较低,处于相对封闭

的体系,海水硫酸盐在还原细菌参与的下,能够产生足够的 H_2S ,从而为亲硫金属元素的沉淀富集提供取之不尽的“粘合剂”。一些富含 S、Fe 的热液活动稍早,在生物或细菌的还原作用下形成一些草莓状或球粒状结构的硫化物,表现为富轻硫。以塔木、阿拉尔恰及乌苏里克等矿床为代表的矿床,具有相对较高的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,贫硫且富含金属离子并具有氧化性的含矿热液,热液温度较高,处于相对开放的体系,主要发生海水硫酸盐的热化学还原反应,此时形成的硫化物表现为重硫。在海西期和喜马拉雅期的逆冲推覆构造的影响下形成断裂及褶皱构造作用^[4]和碳酸盐岩-碎屑岩建造压实作用,共同产生的压力和热异常会使得流体沿断裂构造系统循环,运移过程中萃取围岩中的金属元素并形成早期矿物。还原性含矿热液在两种主要驱动力作用下上升运移在较浅部位与以氯的络合物、硫酸盐或硫代硫酸盐方式携带了 Pb、Zn 等金属离子的流体相遇,发生热化学硫酸盐还原反应,导致围岩中的热化学硫酸盐还原平衡状态被打破,产生的 HS^- 与 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 结合形成闪锌矿、方铅矿,在成矿有利部位(如破碎带和角砾岩带)沉淀成矿并导致围岩进一步溶蚀,从而形成脉状^[12]。

5 结 论

通过对塔西南缘铅锌矿带主要金属硫化物硫同位素组成及特征分析,得出以下几点结论:

(1) 该铅锌矿带金属硫化物的硫同位素组成与含矿岩性及矿石组构存在密切关系,产于粗碎屑岩中的矿石,具分散、细粒结构、球形草莓状结构、胶结结构及浸染状构造的特点,其金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有极低值;产于白云岩化碳酸盐岩中或接触带附近的矿石,具较好晶形、粗粒,多呈脉状构造及角砾状构造特点,其金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值偏正。

(2) 硫同位素组成分布特征,显示硫主要来源于海水硫酸盐的细菌还原硫和热化学还原硫。

(3) 成矿过程可能存在两种性质不同的含矿热液,还原性热液在生物细菌的参与下形成早期硫化物,并与富含金属的氧化热液在海西期和喜马拉雅期的逆冲推覆及压实作用影响下,沿断裂或岩石裂隙运移并发生混合,发生热化学硫酸盐还原反应,产生的 HS^- 与 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 结合形成闪锌矿、方铅矿,在有利部位(如破碎带和角砾岩带)沉淀成矿。

致 谢:野外工作期间得到新疆克州亚星矿产资源集团有限公司门广谦总工程师,铁克里克铅铜

矿床张辉工程师,阿克陶县桂新矿业开发有限公司塔木锌铅矿床刘杰总经理、张正顺工程师,阿巴列克铜铅矿床选厂李福良厂长及新疆大学杨向荣副教授等同志的支持和帮助;室内分析测试得到中国科学院地球化学研究所安宁老师的帮助,在矿物挑选过程得到格西硕士的帮助,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献 (References):

- [1] 祝新友,汪东波,王书来. 新疆阿克陶塔木-卡兰古铅-锌带矿床地质和硫同位素特征[J]. 矿床地质,1998,17(3):205-213. Zhu Xinyou, Wang Dongbo, Wang Shulai. Geology and sulfur isotope geochemistry of the Tamu-Kalangu lead-zinc deposits, Akto county, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 1998, 17(3): 205-213. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王书来,祝新友,汪东波. 塔里木西南缘 MVT 型铅锌矿床流体包裹体研究[J]. 矿产与地质,2001,15(4):238-242. Wang Shulai, Zhu Xinyou, Wang Dongbo. The fluid inclusion in MVT lead-zinc deposit in southwest margin of Tarim[J]. Mineral Resources and Geology, 2001, 15(4): 238-242. (in Chinese with English abstract)
- [3] 祝新友,汪东波,王书来. 新疆塔木-卡兰古 MVT 铅锌矿带地质特征[J]. 有色金属矿产与勘查,1997,6(4):202-207. Zhu Xinyou, Wang Dongbo, Wang Shulai. Geological characteristics of the Tamu-Kalangu MVT Pb-Zn belt, Xinjiang[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 1997, 6(4): 202-207. (in Chinese with English abstract)
- [4] 匡文龙,古德生,刘继顺,刘文伟. 西昆仑地区密西西比河谷型矿床的流体包裹体特征研究[J]. 有色矿冶,2005,21(2):1-5. Kuang Wenlong, Gu Desheng, Liu Jishun, Liu Wenwei. Probe into fluid inclusions characteristics of MVT deposit, Western Kunlun district in Xinjiang (China) [J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2005, 21(2): 1-5. (in Chinese)
- [5] 匡文龙,刘继顺,朱自强,刘石华. 西昆仑地区卡兰古 MVT 型铅锌矿床成矿作用和成矿物质来源探讨[J]. 大地构造与成矿学,2002,26(4):423-428. Kuang Wenlong, Liu Jishun, Zhu Ziqiang, Liu Shihua. Metallogenesis of Kalangu MVT type lead-zinc deposit and sources of minerogenetic materials in western Kunlun[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2002, 26(4): 423-428. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡庆雯,朱红英,周圣华. 新疆塔木-卡兰古铅-锌(铜)矿带区域控矿条件[J]. 矿产与地质,2007,21(5):551-554. Hu Qingwen, Zhu Hongying, Zhou Shenghua. Regional ore-controlling conditions of the Tamu-Kalangu Pb-Zn(Cu) ore zone, Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(5): 551-554. (in Chinese with English abstract)
- [7] 袁波. 新疆西昆仑卡兰古、塔木铅锌矿地质特征和矿化富集规律研究[D]. 长春:吉林大学,2007:1-84. Yuan Bo. Study of geological characteristics and enrichment regularities of mineralization of Kalangu, Tamu lead-zinc deposits, west Kunlun, Xinjiang province[D]. Changchun: Jilin

- University, 2007: 1-84. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张正伟, 彭建堂, 肖加飞, 朱笑青, 沈能平, 张中山, 游富华. 塔西南缘沉积岩层控型铅-锌矿带区域构造控矿作用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(4): 318-329.
Zhang Zhengwei, Peng Jiantang, Xiao Jiafei, Zhu Xiaoqing, Shen Nengping, Zhang Zhongshan, You Fuhua. Regional metallotectonics of the lead-zinc deposits zone in southwestern margin of the Tarim plate[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(4): 318-329. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈永清, 黄静宁, 卢映祥, 夏庆霖, 孙明祥, 李建荣. 中缅毗邻区金腊 Pb-Zn-Ag 多金属矿田元素、稳定同位素和流体包裹体地球化学[J]. 地质科学, 中国地质大学学报, 2009, 34(4): 585-594.
Cheng Yongqing, Huang Jingning, Lu Yingxiang, Xia Qinglin, Sun Mingxiang, Li Jianrong. Geochemistry of elements, sulphur-lead isotopes and fluid inclusions from Jinla Pb-Zn-Ag poly-metallic ore field at the joint Area across China and Myanmar border[J]. Earth Science, 2009, 34(4): 585-594. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙海田, 李纯杰, 李锦平, 吴海. 新疆昆仑式火山岩型块状硫化物铜矿床及成矿地质环境[J]. 矿床地质, 2004, 23(1): 82-92.
Sun Haitian, Li Chunjie, Li Jinping, Wu Hai. Kunlun type volcanic-hosted massive copper sulfide deposits in Xinjiang and their ore-forming tectonic environments[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(1): 82-92. (in Chinese with English abstract)
- [11] 祝新友, 汪东波, 王书来. 新疆塔里木盆地西南缘铅锌矿找矿潜力分析[J]. 有色金属矿产与勘查, 1999, 8(6): 413-416.
Zhu Xinyou, Wang Dongbo, Wang Shulai. Potential for prospecting of lead-zinc deposits on the Western margin of Tarim basin in Xinjiang[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 1999, 8(6): 413-416. (in Chinese with English abstract)
- [12] 杨向荣, 彭建堂, 胡瑞忠, 戚华文, 刘荣. 新疆塔木铅锌矿成矿流体特征与矿床成因[J]. 地球化学, 2009, 38(6): 536-548.
Yang Xiangrong, Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Qi Huawen, Liu Shen. Fluid characteristic and ore genesis of Tamu lead and zinc ore deposit, Xinjiang[J]. Geochimica, 2009, 38(6): 536-548. (in Chinese with English abstract)
- [13] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-316.
Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. The stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000, 1-316. (in Chinese)
- [14] 涂光炽. 中国层控矿床地球化学(第三卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 1-388.
Tu Guangchi. Geochemistry of stratabound ore deposits in China (Volume III)[M]. Beijing: Science Press, 1988, 1-388. (in Chinese)
- [15] 杨向荣. 塔里木西南缘塔木铅锌矿床特征与成因[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009: 1-128.
Yang Xiangrong. Characteristics and genesis of Tamu Zinc-Lead ore deposit, Southwest Margin of Tarim, China[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009: 1-128. (in Chinese with English abstract)
- [16] 阎月华, 吴毅. 内蒙千里山太古代蒸发岩石: 常量元素、微量元素及硫同位素证据[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 531-38.
Yan Yuehua, Wu Yi. Archean evaporites of the North China Craton: Evidence on Inajor and trace elements and S-isotope [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(4): 531-38. (in Chinese with English abstract)
- [17] Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon Barnes, H. L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits[M]. New York: Willey Interscience, 1979: 509-567.
- [18] 张长青, 余金杰, 毛景文, 芮宗瑶. 密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 195-210.
Zhang changqing, Yu jinjie, Mao jingwen, Rui zongyao. Advances in the study of Mississippi Valley-type deposits[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(2): 195-210. (in Chinese with English abstract)
- [19] Machel H G. Comment on "The effects of thermochemical sulfate reduction upon formation water salinity and oxygen isotopes in carbonate gas reservoirs"[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1998, 62(2): 337-341.
- [20] Worden R H, Smalley P C, Oxtoby N H. Reply to the comment by Machel H G. on "The effects of thermochemical sulfate reduction upon formation water salinity and oxygen isotopes in carbonate gas reservoirs"[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1998, 62(2): 343-346.
- [21] 解庆林, 马东升, 刘英俊. 层控矿床中还原态硫的形成机制[J]. 地质地球化学, 1996, 4: 35-38.
Xie Qinglin, Ma Dongsheng, Liu Yingjun. The formation mechanism of reduced sulfur in the strata-bound deposit[J]. Geology-Geochemistry, 1996, 4: 35-38. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张长青, 余金杰, 毛景文, 于航, 李厚民. 四川赤普铅、锌矿床生物标志化合物特征研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 832-848.
Zhang Changqing, Yu Jinjie, Mao Jingwen, Yu Hang, Li Houmin. Research on the biomarker from Chipu Pb-Zn deposit, Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 832-848. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王书来, 汪东波, 祝新友, 王京彬, 彭省临. 新疆塔木-卡兰古铅锌矿床成矿流体地球化学特征[J]. 地质地球化学, 2002, 30(4): 34-39.
Wang Shulai, Wang Dongbo, Zhu Xinyou, Wang Jingbin, Peng Shenglin. Ore-fluid geochemistry of Tamu-Kala Pb-Zn deposit in Xinjiang[J]. Geology-Geochemistry, 2002, 30(4): 34-39. (in Chinese with English abstract)