



新疆阿尔泰铁木尔特铅锌矿床稳定同位素组成特征^{*}

耿新霞¹ 杨富全¹ 杨建民¹ 郭正林² 郭旭吉² 黄承科² 刘 锋¹,
柴凤梅³ 张志欣¹

(1 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;

2 新疆维吾尔自治区有色地勘局 706 地质队, 新疆 阿勒泰 836500; 3 新疆大学地质与勘查工程学院,
新疆 乌鲁木齐 830046)

摘 要 新疆阿尔泰山南缘克兰盆地中的铁木尔特中型铅锌矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组上亚组第二岩性段, 容矿岩石为大理岩、绿泥石英片岩、变质质粉砂岩、矽卡岩。矿床经历了喷流沉积期、叠加改造期和表生期。喷流沉积期硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中于 $-27.8\text{‰} \sim -16.0\text{‰}$, 峰值为 -26.0‰ , 少量 $1.7\text{‰} \sim 3.4\text{‰}$, 表明硫主要来自细菌还原海水硫酸盐及岩浆活动。氢、氧同位素组成表明, 叠加改造期石英和方解石的 δD 变化于 $-122\text{‰} \sim -61\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 变化于 $9.5\text{‰} \sim 10.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-5.8\text{‰} \sim 4.8\text{‰}$, 表明叠加改造期成矿流体具有多来源特征, 是岩浆水、大气降水和变质水的混合产物。铁木尔特铅锌矿床在成因类型上为 VMS 型, 矿床形成后又经历了叠加改造。

关键词 地球化学 铅锌矿 稳定同位素 成矿机制 铁木尔特 阿尔泰

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Stable isotope characteristics of Tiemurte Pb-Zn deposit in Altay, Xinjiang

GENG XinXia¹, YANG FuQuan¹, YANG JianMin¹, GUO ZhengLin², GUO XuJi², HUANG ChengKe²,
LIU Feng¹, CHAI FengMei³ and ZHANG ZhiXin¹

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 No. 706 Geological Party, Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals, Altay, Xinjiang 839000, China; 3 College of Geology and Prospecting Engineering Program, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China)

Abstract

Lying in Kelang basin on the southern margin of Altay, the Tiemurte medium-size lead-zinc deposit occurs in 2nd lithological member of Upper Silurian-Lower Devonian Kangbutiebao Formation, with the host rocks being marble, chlorite quartz schist, calcareous argillaceous siltstone and skarn. The ore deposit has experienced three evolutionary periods, i. e., sedimentary exhalative period, superposed reforming period and hypergenic period. The $\delta^{34}\text{S}$ values of the sedimentary exhalative period range mainly from -27.8‰ to -16.0‰ with the peak value being -26.0‰ and a few values varying from 1.7‰ to 3.4‰ , suggesting that the ore-forming fluid was mainly derived from the mixed fluid of meteoric water and magmatic water. In the sedimentary exhalative period, δD values of quartz and calcite are from -122‰ to -61‰ , $\delta^{18}\text{O}$ values change from 9.5‰ to 10.9‰ , and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values vary from -5.8‰ to 4.8‰ , implying that the ore-forming fluid was probably the mixture of

^{*} 本文为国家重点基础研究发展计划项目(编号 2007CB411302)中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(编号 K0924)国家科技支撑计划重点项目(编号 2006BAB07B02-05 2006BAB07B07-02)国土资源大调查项目(编号 J212010786006)共同资助

第一作者简介 耿新霞,女,1979 年生,在读博士研究生,矿产普查与资源评价专业。Email gengxinxia0536@sina.com

收稿日期 2010-01-10。改回日期 2010-10-15。张绮玲编辑。

magmatic water, meteoric water and metamorphic water. The Tiemurte lead-zinc deposit belongs to VMS type subjected to superposed reformation.

Key words: geochemistry, lead-zinc deposit, stable isotope, ore-forming mechanism, Tiemurte, Altay

新疆阿尔泰山南缘是中国重要的有色金属成矿带之一,已发现的铜、铅和锌矿床主要分布在阿舍勒、冲乎尔、克兰和麦兹 4 个火山-沉积盆地中,代表性矿床有阿舍勒大型铜锌矿床(阿舍勒盆地)、克因布拉克中型铜锌矿床(冲乎尔盆地)、可可塔勒大型铅锌矿床(麦兹盆地)、塔拉特中型铅锌矿床(克兰盆地)、铁木尔特中型铅锌矿床(克兰盆地)、大东沟中型铅锌矿床(克兰盆地)等(秦克章,1998a;1998b;王京彬等,1998;王登红等,2002;申茂德等,2003;郭正林等,2007;刘敏等,2008)。铁木尔特中型铅锌矿床是克兰盆地中十分重要的矿床,该矿床于 1984 年被新疆有色地勘局 706 队发现,近年来,多数学者认为该矿床为 VMS 型或 VMS 型+后期叠加改造型矿床(王京彬等,1998;刘秀明等,1999;郭正林等,2007),主要是从地质特征、地球化学、流体包裹体等方面对铁木尔特铅锌矿进行了研究(王京彬等,1998;万博等,2006;徐九华等,2008;2009),而硫、氢、氧同位素方面的资料相对缺乏。笔者在前人工作的基础上,对铁木尔特铅锌矿床的地质特征进行了详细描述,分析测试了矿区典型样品的氢、氧和硫同位素组成,并探讨了成矿流体和成矿物质来源及成矿机制,以期为探讨矿床成因及寻找同类矿床有所帮助。

1 区域成矿背景

铁木尔特中型铅锌矿床位于阿勒泰市东约 10 km 处(图 1)。在大地构造上属于西伯利亚板块的南阿尔泰晚古生代活动陆缘的克兰泥盆纪—石炭纪弧后盆地,其北与喀纳斯-可可托海古生代岩浆弧相接(何国琦等,2004),克兰盆地内已发现有托莫尔特铁矿、铁木尔特铅锌矿、阿巴宫铁矿、塔拉特铅锌矿、恰夏铅锌矿、恰夏铁铜矿、萨热阔布金矿等。

铁木尔特中型铅锌矿床位于克兰盆地内,矿区及周围出露地层为中-上志留统库鲁木提群($S_{2-3}kl$)、上志留统一下泥盆统康布铁堡组($(S_3-D_1)k$)、中泥盆统阿勒泰镇组(D_2a) (Chai et al., 2009)。库鲁木提群主要岩性为条带状混合岩、砂线黑云斜长片麻岩、十字石红柱石绿泥石二云母片岩夹变钙质砂岩、

砂岩等。康布铁堡组与下伏库鲁木提群呈断层接触,下亚组主要岩性为(黑云、二云)石英片岩、千枚岩、变流纹岩、变英安斑岩、变凝灰岩、变(凝灰)火山角砾岩。上亚组为变流纹岩、变凝灰岩、变熔结凝灰岩夹片麻岩、绿泥黑云片岩、大理岩薄层或透镜体。阿勒泰镇组与下伏康布铁堡组呈整合接触,局部为断层接触,为一套浅海相陆源碎屑岩,主要岩性为变质砂岩、粉砂岩、钙质粉砂岩等,夹基性火山岩、火山碎屑岩、硅质岩和碳酸盐岩。

区域构造呈 NW 向,以阿勒泰复式向斜为主体,发育次级褶皱。阿勒泰复式向斜轴向 NW-SE,轴长约 50 km,轴面倾向 NE,倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$,NE 翼倒转,SW 翼正常。SW 缘的阿克巴斯套断裂为控盆断裂,控制着泥盆系的分布,阿巴宫断裂和克因宫断裂在铁木尔特地区则控制康布铁堡组的分布,NE 缘以克因宫断裂为界与中-上志留统库鲁木提群断层接触,SW 缘以阿巴宫断裂为界与阿勒泰镇组接触。断裂构造是克兰火山-沉积盆地重要的生长断层和火山通道。

区域侵入岩以花岗岩为主,其时代有中-晚奥陶世(刘锋等,2009)、二叠纪(如喇嘛昭岩体时代为 $(279 \pm 9) Ma$;王涛等,2005)、三叠纪(如将军山,245 Ma;王中刚等,1998)和侏罗纪(如尚可兰,181~177 Ma;王登红等,2002)。

2 矿床地质特征

2.1 含矿岩系

矿区出露地层为上志留统一下泥盆统康布铁堡组,铅锌矿体赋存于上亚组(图 2),为一套中酸性-酸性(以酸性为主)火山碎屑岩夹正常沉积岩组成,依据岩性可以分为 3 个岩性段:第一岩性段为变流纹质晶屑凝灰岩、变流纹质凝灰岩等;第二岩性段是矿区内铅、锌、金等元素的主要含矿岩系,以正常的浅海相粘土质沉积和碳酸盐沉积为主,含有少量的安山质-英安质-流纹质火山碎屑岩。主要岩性组合为大理岩、铁锰质大理岩、变钙质砂岩、绿泥石英片岩、变流纹质晶屑凝灰岩、变钙质粉砂岩、变凝灰质粉砂岩,夹黑云母片岩和变流纹岩;第三岩性段为一套近火山口相流纹质火山碎屑沉积建造,主要岩性为流

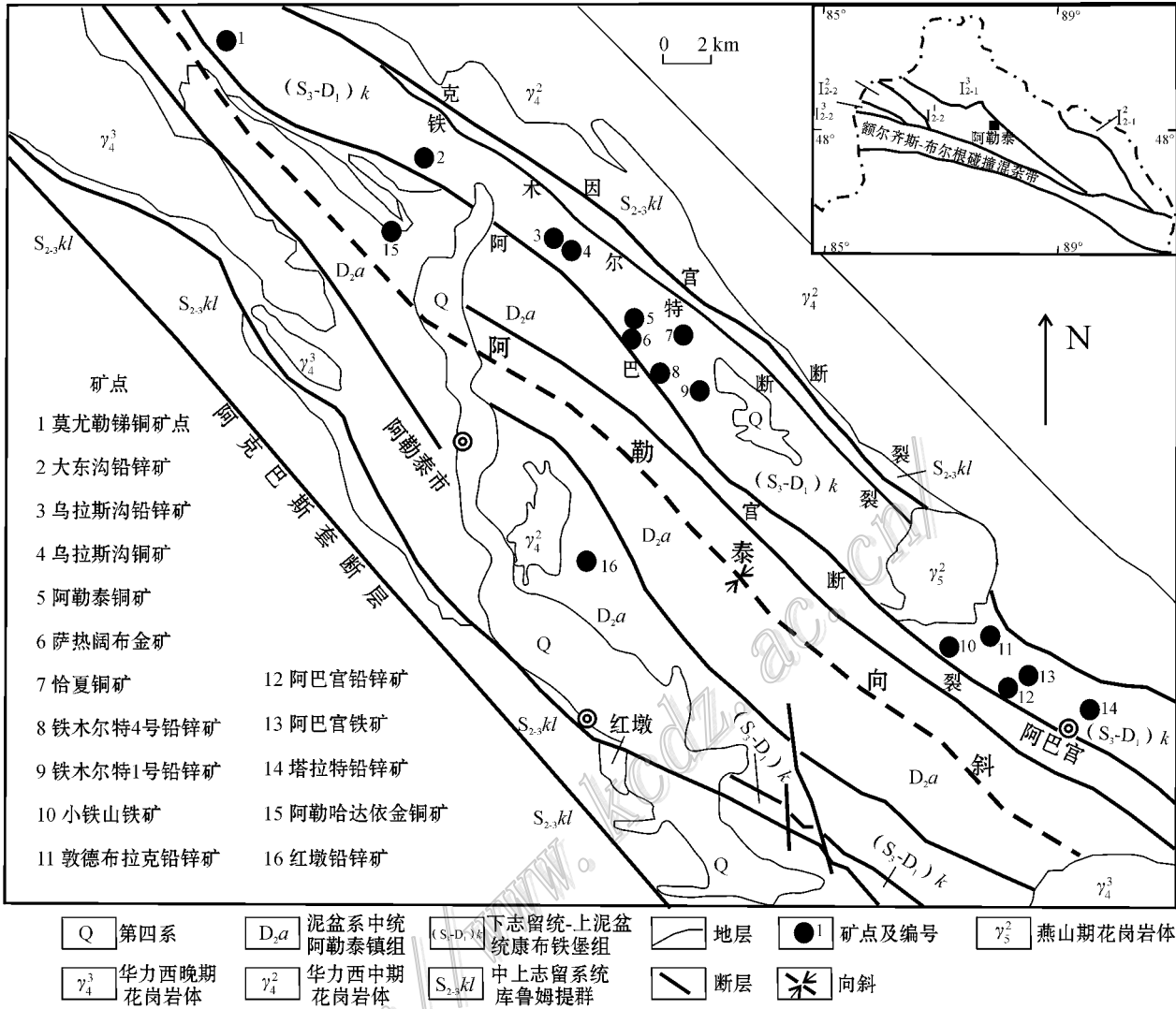


图 1 铁木尔特铅锌矿区域地质矿产略图(据新疆有色 706 地质队 2003 ;大地构造图据何国琦等 2004)

Fig. 1 Simplified regional geological and mineral resources map of the Tiemurte Pb-Zn ore district (geological map modified after No. 706 Geological Party , Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals , 2003 ; regional tectonic units modified after He et al. , 2004)

纹质晶屑凝灰岩。铅锌矿体主要赋存于大理岩及绿泥石英片岩、变钙质粉砂、砂卡岩中 ,矿体形成于两次火山喷发间隙期间 ,受火山洼地中碳酸盐沉积层位的控制(焦学军等 2005)。

2.2 矿体及矿石特征

目前已查明矿区有 4 个铅锌矿体(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ号)及 1 个金矿体(Ⅴ号)(表 1、图 2)。Ⅰ号矿体形态较简单 ,地表为透镜状 ,向深部在 1 256 m 中段其平面形态变为脉状 ,剖面上为分枝的板状 ,矿体总体产状与围岩产状基本一致。Ⅰ号矿体依据有用组分和产状的不同分为 4 个相邻分支矿体 ,包括 2 个铅

锌矿体(Ⅰ-1、Ⅰ-3)、1 个铜铅锌矿体(Ⅰ-2)和 1 个铜矿体(Ⅰ-4)。Ⅱ号矿体形态为似层状-透镜状 ,赋矿围岩为大理岩 ,与地层产状基本一致(图 3)。Ⅲ号矿体形态为似层状-透镜状 ,深部为多层分枝状 ,赋矿围岩为大理岩。Ⅳ号矿体在地表仅见薄层矿化。

矿石的构造类型主要有块状、条带状、纹层状、浸染状、细脉-浸染状、细脉状、角砾状构造(图 4)。矿石结构有自形、半自形、他形粒状、填隙、交代、共边、包含、固溶体分离等结构(图 5)。上述结构构造特征反映了同生沉积的特点 ,并伴有同时期的交代填充作用。矿石中主要金属矿物(图 4A~4G)有方

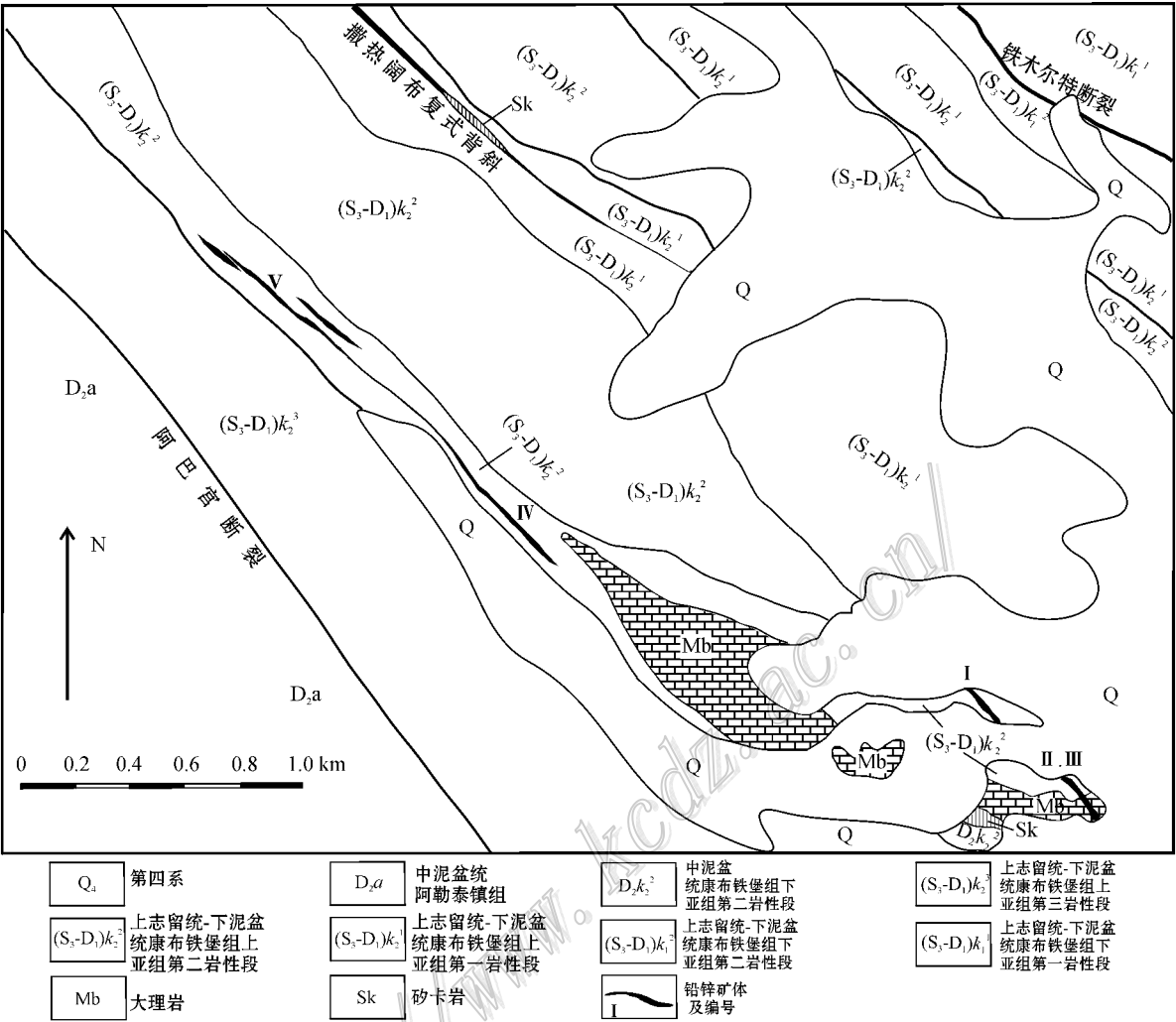


图 2 铁木尔特铅锌矿区地质略图(据新疆有色 706 地质队, 2008^①修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Tiemurte Pb-Zn ore district(geological map modified after No. 706 Geological Party , Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals , 2008)

表 1 铁木尔特铅锌矿床主要矿体特征表^①

Table 1 Features of main iron ore bodies in the Tiemierte Pb-Zn deposit

矿体编号	规模/m			产状		平均品位(质量分数)	形态
	长	厚度	斜深	倾向	倾角		
I	150	18.53	432	44~48°	49~60°	Cu 0.41% ,Pb 3.34% ,Zn 5.36% ,Ag 96×10 ⁻⁶	透镜状
I-1	>150	17.21		45~47°	54~60°	Pb 4.43% ,Zn 7.29% ,Ag 46.74×10 ⁻⁶	透镜状
I-2	>75	8.44		47~51°	49~58°	Cu 1.24% ,Pb 3.18% ,Zn 4.24% ,Ag 64.98×10 ⁻⁶	透镜状
I-3	>75	3.19		44~47°	51~58°	Pb 2.05% ,Zn 4.09% ,Ag 33.54×10 ⁻⁶	似脉状
I-4	>50	3.21		47~50°	49~58°	Cu 1.5%	脉状
II	150	8.78	305	约 36°	约 70°	Pb 0.73% ,Zn 1.25%	似层状-透镜状
III	75~100	10.74	200	约 39°	约 68°	Pb 1.36% ,Zn 1.28%	似层状-透镜状

① 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 地质队. 2008. 新疆阿勒泰市铁木尔特铅锌矿普查 2007 年度总结报告.

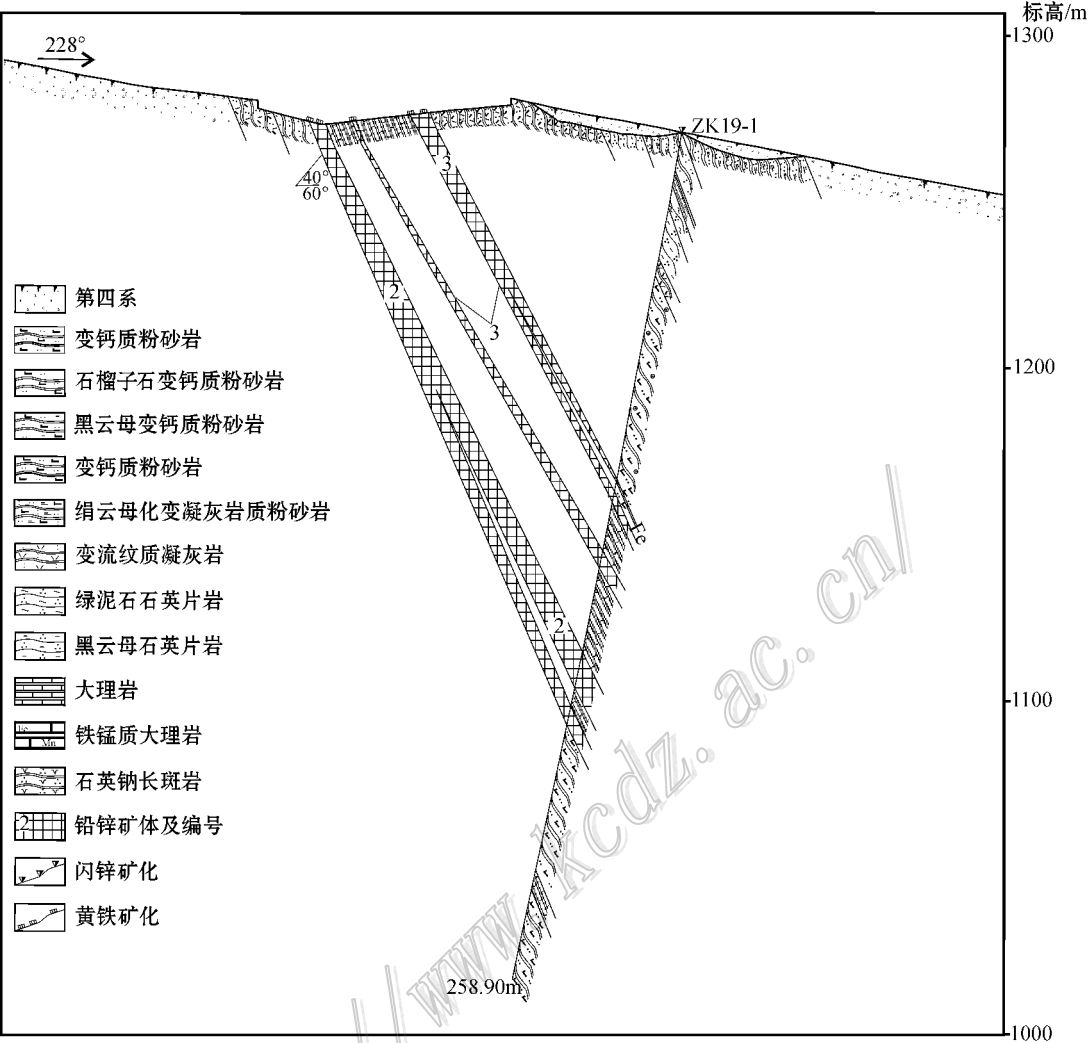


图 3 铁木尔特铅锌矿 19 勘探线剖面图(据新疆有色 706 地质队 2008^①)

Fig. 3 Geological section along No. 19 exploration line of the Tiemurte Pb-Zn deposit (after No. 706 Geological Party , Xinjiang Geoexploration Bureau for Nonferrous Metals , 2008)

铅矿、闪锌矿、黄铜矿、斑铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、磁铁矿、辉铜矿、辉铋矿、自然铋、毒砂、非金属矿物(图 4F~4I)主要有方解石、石英、长石,其次有绿泥石、阳起石、透闪石、石榴子石、角闪石、绿帘石、重晶石和萤石等。

I 号矿体的主要有用组分为铅、锌、铜,伴生有用组分是银。矿石中铜平均品位(质量分数,下同) 0.41%,铅平均品位 3.34%,锌平均品位 5.36%,伴生银品位 33.96×10^{-6} 。II 号矿体平均品位: Pb 为 0.73%, Zn 为 1.25%。III 号矿体平均品位: Pb 为 1.36% Zn 为 1.28%。

2.3 围岩蚀变

围岩蚀变主要有硅化、矽卡岩化和黄铁矿化。硅化至少有 3 种:第一种多见于西段地表,由白色和浅肉红色石英组成,硅化一般处于断裂带及其两侧内,是多期断裂活动的产物;第二种硅化表现为矿体中石英呈浸染状或细脉状,与黄铁矿、黄铜矿、方铅矿构成沉积条带或块状构造;第三种矿体中的硅化主要呈石英细脉、方解石石英细脉、黄铁矿黄铜矿石英脉等,切穿早期的沉积条带,与铜矿化关系最密切。矽卡岩化主要矿物组合为透闪石、阳起石、石榴子石、角闪石、绿泥石、绿帘石等。矽卡岩化不均匀,

① 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 地质队. 2008. 新疆阿勒泰市铁木尔特铅锌矿普查 2007 年度总结报告.

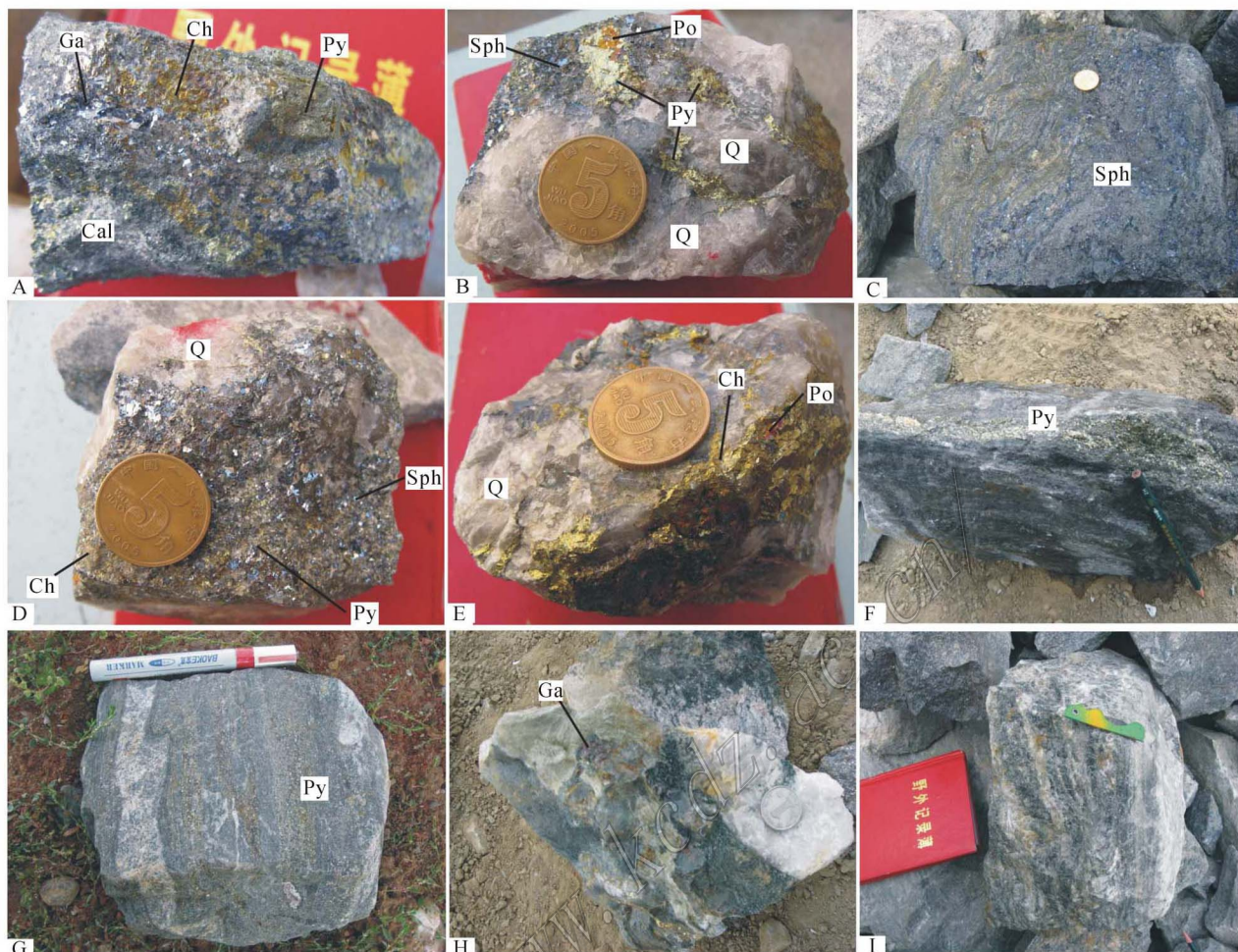


图 4 铁木尔特铅锌矿岩、矿石标本

A. 方铅矿闪锌矿黄铁矿块状矿石; B. 含方铅矿黄铜矿黄铁矿石英脉; C. 纹层状黄铁矿方铅矿矿石; D. 含石英的粗粒方铅矿闪锌矿矿石;
E. 含石英的磁黄铁矿黄铜矿矿石; F. 脉状黄铁矿矿石; G. 条带状黄铁矿矿石; H. 含方铅矿石英的石榴子石砂卡岩; I. 含石榴子石
条带状方铅矿矿石; Ga—方铅矿; Ch—黄铜矿; Py—黄铁矿; Sph—闪锌矿; Po—磁黄铁矿; Cal—方解石; Q—石英

Fig. 4. Pictures of lead-zinc ore in the Tiemurte Pb-Zn deposit

A. Galena-sphalerite-pyrite massive ore; B. Galena-bearing pyrite-chalcopyrite quartz vein; C. Laminated pyrite-galena ore; D. Coarse-grained
quartz-bearing sphalerite-galena ore; E. Quartz-bearing pyrrhotite-chalcopyrite ore; F. Veinlike pyrite ore; G. Banded pyrite ore; H. Galena-
bearing quartz-garnet skarn; I. Banded garnet-bearing galena ore

很少见到成片成带的砂卡岩,而常以薄层(厚 3~5 cm)分布于碳酸盐岩中,并伴有铜矿化。黄铁矿化是矿区常见的蚀变类型,黄铁矿有自形至他形粒状、胶状和脉状等形态,与方铅矿、闪锌矿和黄铜矿关系复杂,既有被包裹,也有切穿后者等现象。

2.4 成矿阶段划分

依据矿化类型、矿物组合、矿石组构特征、穿插关系及产状等,可将铁木尔特铅锌矿的成矿过程划分为喷流沉积期、叠加改造期和表生氧化期 3 个成矿期。矿区在晚志留世—早泥盆世经历了强烈的火山作用,经过 3 个阶段形成康布铁堡组:第一阶段形

成火山碎屑岩;第二阶段主要形成凝灰岩、沉凝灰岩、化学沉积岩,是铅、锌、金、铜的主成矿期,在铁木尔特铅锌矿成矿过程中称为喷流沉积期;第三阶段以形成远火山相流纹质凝灰岩为主,后期辉绿岩脉的侵入在矿体附近形成砂卡岩,并伴有铜矿化,叠加于喷流沉积形成的矿体之上或单独成矿,在铁木尔特铅锌矿成矿过程中称为叠加改造期。

喷流沉积期是铅锌矿主要成矿期,矿体受火山喷发中心控制,成矿中心为块状硫化物矿体,边部为条带状-浸染状矿体(姜俊,2003)。喷流沉积期主要形成块状、稠密浸染状、条带状和纹层状矿石,主要

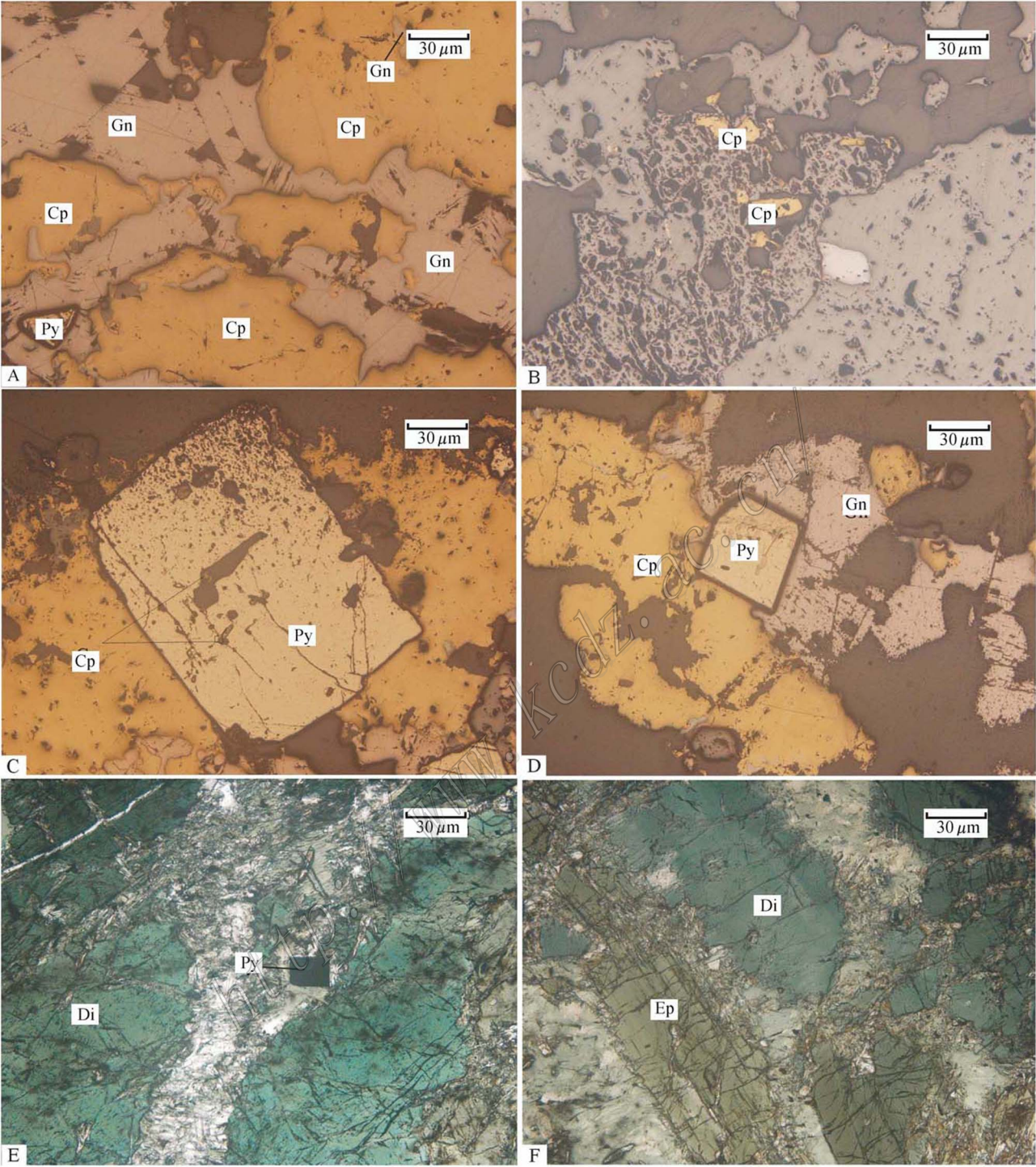


图 5 铁木尔特铅锌矿样品显微镜下照片

A. 黄铜矿交代方铅矿; B. 黄铜矿交代闪锌矿; C. 乳滴状黄铜矿分布于自形黄铁矿中; D. 自形黄铁矿交代黄铜矿和方铅矿;
E. 黄铁矿分布于透辉石砂卡岩中(正交偏光镜下); F. 透辉石绿帘石化砂卡岩; Gn—方铅矿; Cp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Di—透辉石; 绿帘石
Fig. 5 Microphotographs of samples from the Tiemurte Pb-Zn deposit
A. Galena cut and replaced by chalcopyrite; B. Sphalerite cut and replaced by chalcopyrite; C. Milk-droplet chalcopyrite occurring in euhedral crystal pyrite; D. Chalcopyrite and galena cut and replaced by euhedral crystal pyrite; E. Pyrite occurring in diopside skarn (crossed nicols); F. Diopside-epidote skarn

矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、重晶石、方解石、石英、少量黄铜矿、萤石等。金属矿物组合有方铅矿-闪锌矿、黄铁矿-方铅矿-闪锌矿、方铅矿-黄铁矿-黄铜矿、黄铁矿-黄铜矿-闪锌矿、黄铁矿-黄铜矿。

叠加改造期是铜主要成矿期(图 4B、4E),含铜的石英脉呈脉状或透镜状分布于石榴子石绿泥片岩中或含铜石英脉斜切浸染状黄铁矿、层状闪锌矿中(徐九华等 2009)。该阶段主要形成含铜矽卡岩、含黄铜矿黄铁矿石英脉、含铜石英脉、方解石脉,常见这些细脉穿切早期条带状、条纹状和块状方铅矿闪锌矿矿石。矽卡岩矿物组合为石榴子石、透闪石、阳起石、角闪石、绿泥石、绿帘石等(图 4F、4H、4I)。

表生氧化期在地表形成褐铁矿化、孔雀石化,其中铜以孔雀石、铜蓝的形式存在,铅主要以铅矾的形式存在,而锌基本已流失。

3 稳定同位素特征

3.1 样品及分析方法

喷流沉积期 25 件硫化物用于测试硫同位素的样品,叠加改造期 2 件方解石及 12 件石英的氢和氧同位素样品均采于 I、II 号矿体的坑道中。

挑选新鲜纯净的黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿、石英和方解石单矿物样品,纯度达 99% 以上。硫化物样品以 Cu₂O 作为氧化剂制样,释放 SO₂ 进行硫同位素测试。

氧同位素分析方法为 BrF₅ 法(Clayton et al., 1963),首先将纯净的石英样品分别与 BrF₅ 反应 15 h 萃取氧。分离出的氧进入 CO₂ 转化系统,温度为 700℃,时间为 12 min,最后收集 CO₂(Mao et al., 2002)。

氢同位素分析采用爆裂法,其测试程序为:加热石英和方解石包裹体样品使其爆裂,释放挥发分,提取水蒸气,然后在 400℃ 条件下使水与锌反应产生氢气,再用液氮冷冻后,收集到有活性碳的样品瓶中(Coleman et al., 1982)。

方解石的氧同位素分析步骤如下。首先在 25℃ 条件下,使方解石与磷酸反应释放 CO₂(McCrea, 1950)。用中国的国家一级碳酸盐碳、氧同位素参考物质 GBW04416 和 GBW04417 作为工作标准,GBW04416 的 δ¹³C_{PDB} 和 δ¹⁸O_{PDB} 值分别为 1.61‰ 和 -11.59‰,GBW04417 的 δ¹³C_{PDB} 和 δ¹⁸O_{PDB} 值分别为 -6.06‰ 和 -24.12‰。方解石样品的 δ¹⁸O_{PDB} 值直接从 CO₂ 测得(Mao et al., 2008)。在转变

δ¹⁸O_{PDB} 与 δ¹⁸O_{SMOW} 时,使用 Friedman 等(1977)的方程: δ¹⁸O_{SMOW} = 1.03086 δ¹⁸O_{PDB} + 30.86。

硫、氢和氧同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室进行,同位素样品用 MAT 253 EM 质谱计进行测试。硫同位素的测试精度为 ±0.2‰,氧、氢同位素的分析精度的为 ±0.2‰。硫同位素以 VCDT 为标准,氢、氧同位素以 VSMOW 为标准。

3.2 测试结果

喷流沉积期 25 件硫化物硫同位素测试结果见表 2,测试的 δ³⁴S 值均为负值,δ³⁴S 值变化于 -27.8‰ ~ -16.0‰ 之间,峰值为 -26‰(图 6)。矿区具富集轻硫的特点。

14 件叠加改造期的氢、氧同位素测试结果见表 3。12 件石英样品中 δD 值变化于 -122‰ ~ -79‰,平均值为 -99.5‰,δ¹⁸O_{SMOW} 值变化于 9.2‰ ~ 10.9‰。采用所测得的石英样品中流体包裹体均一温度平均值,利用石英-水分馏方程式: 1 000 lnα_{石英-水} = 3.38 × 10⁶ T⁻² - 3.40(Clayton et

表 2 铁木尔特铅锌矿喷流沉积期硫同位素测试结果
Table 2 Sulfur isotope composition of the sedimentary exhalative period in the Tiemurte Pb-Zn deposit

序号	岩性	矿物	δ ³⁴ S _{VCDT} /‰
1	块状黄铁矿黄铜矿矿石	黄铜矿	-27.6
2	条带状黄铁矿黄铜矿矿石	黄铜矿	-26.4
3	块状方铅矿黄铜矿黄铁矿矿石	黄铜矿	-26.1
4	黄铜矿黄铁矿石英脉	黄铜矿	-25.6
5	黄铜矿斑铜矿化石英脉	黄铜矿	-23.3
6	块状黄铜矿闪锌矿方铅矿矿石	黄铜矿	-18.1
7	黄铜矿化石铅石化石英脉	方铅矿	-22.9
8	块状黄铁矿方铅矿闪锌矿矿石	方铅矿	-16.0
9	块状黄铁矿方铅矿闪锌矿矿石	方铅矿	-24.8
10	块状黄铁矿方铅矿矿石	方铅矿	-27.8
11	块状黄铁矿闪锌矿矿石	方铅矿	-25.3
12	块状黄铜矿闪锌矿方铅矿矿石	方铅矿	-18.4
13	黄铜矿化黄铁矿化闪锌矿化石英脉	黄铁矿	-24.5
14	块状黄铁矿闪锌矿矿石	黄铁矿	-24.9
15	块状黄铁矿方铅矿矿石	黄铁矿	-27.1
16	块状黄铁矿闪锌矿矿石	黄铁矿	-26.8
17	块状方铅矿黄铜矿黄铁矿矿石	黄铁矿	-25.3
18	浸染状黄铁矿化石英脉	黄铁矿	-25.0
19	块状黄铁矿方铅矿矿石	磁黄铁矿	-26.5
20	条带状黄铁矿黄铜矿矿石	磁黄铁矿	-26.7
21	块状黄铁矿闪锌矿矿石	闪锌矿	-23.9
22	块状黄铜矿黄铁矿闪锌矿矿石	闪锌矿	-20.9
23	块状黄铁矿方铅矿闪锌矿矿石	闪锌矿	-23.0
24	块状黄铁矿闪锌矿矿石	闪锌矿	-25.6
25	块状黄铜矿闪锌矿方铅矿矿石	闪锌矿	-17.6

表 3 铁木尔特铅锌矿叠加改造期氢、氧同位素测试结果

Table 3 Hydrogen and oxygen isotopic data of superposed reforming stage in the Tiemurte Pb-Zn deposit

序号	样品名称	矿物	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{\text{水}}/\text{‰}$	$t_h/^\circ\text{C}$
1	石英黄铜矿矿石	石英	-109	10.0	3.1	299
2	石英黄铜矿矿石	石英	-109	9.6	-0.9	220
3	石英黄铁矿黄铜矿矿石	石英	-112	10.2	-2.8	181
4	黄铜矿化黄铁矿化石英脉	石英	-88	9.7	3.2	312
5	石英脉	石英	-83	9.9	2.6	288
6	黄铜矿化石英脉	石英	-103	9.5	4.8	372
7	黄铁矿化石英脉	石英	-92	10.7	3.0	279
8	含方解石的石英脉	石英	-109	9.2	2.2	298
9	黄铜矿石英方解石脉	石英	-95	10.1	-5.8	145
10	黄铁矿化石英脉	石英	-122	10.9	-2.0	182
11	黄铜矿石英脉	石英	-79	10.4	-1.3	200
12	石英脉	石英	-93	10.7	2.8	275
13	硅化黄铜矿化黄铁矿化透辉石砂卡岩	方解石	-61	9.5	4.8	314
14	含方解石的石英脉	方解石	-71	9.7	4.3	290

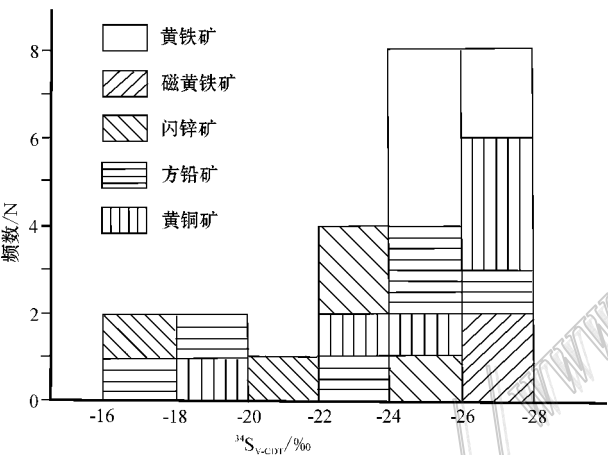


图 6 铁木尔特铅锌矿喷流沉积期硫同位素直方图

Fig. 6 Histogram of sulfur isotopes of sedimentary exhalative stage in the Tiemurte Pb-Zn deposit

al., 1972), 计算出流体的 $\delta^{18}O_{\text{水}}$ 值变化于 $-5.8\text{‰} \sim -4.8\text{‰}$, 平均值 0.74‰ 。

2 件叠加改造期方解石的 δD_{SMOW} 变化范围较小, 介于 $-71\text{‰} \sim -61\text{‰}$ 。 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值介于 $9.5\text{‰} \sim 9.7\text{‰}$ 。使用方解石-水分馏方程 $1000 \alpha = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 3.39$ (O'Neil et al., 1969) 和同一样品方解石中流体包裹体均一温度平均值, 计算出流体的 $\delta^{18}O_{\text{水}}$ 值为 $4.3\text{‰} \sim 4.8\text{‰}$ 。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

不同硫化物的硫同位素含量略有差别(图 6), 6

件黄铜矿 $\delta^{34}S$ 值介于 $-27.6\text{‰} \sim -18.1\text{‰}$, 平均 -24.5‰ ; 6 件方铅矿 $\delta^{34}S$ 值介于 $-27.8\text{‰} \sim -16\text{‰}$, 平均 -22.5‰ ; 6 件黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 $-27.1\text{‰} \sim -24.5\text{‰}$, 平均 -25.6‰ ; 2 件磁黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 -26.7‰ 和 -26.5‰ ; 5 件闪锌矿 $\delta^{34}S$ 值介于 $-25.6\text{‰} \sim -17.6\text{‰}$, 平均 -22.2‰ 。 $\delta^{34}S_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}S_{\text{方铅矿}} > \delta^{34}S_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}S_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}S_{\text{磁黄铁矿}}$, 表明喷流沉积期不同金属硫化物的硫同位素并没有达到同位素平衡, 且不同金属矿物的硫同位素值差异较小, 表明硫元素的来源相似。

由于热力学效应, 共生矿物组合中不同矿物的硫同位素组成不尽相同, 个别矿物的硫同位素特征并不能代表热液总硫同位素组成, 因此需要对不同硫化物的硫同位素进行分析。本次获得不同硫化物的 $\delta^{34}S$ 值非常相近(表 2), 喷流沉积期在 $-27.8\text{‰} \sim -16\text{‰}$ 之间, 差值为 11.8‰ , 平均值为 -24.0‰ , 峰值为 -26‰ , 推断热液总硫值在 $-24\text{‰} \sim -26\text{‰}$ 。

一般认为原始地幔源硫同位素组成几近均一, 其 $\delta^{34}S$ 变化很小 ($0\text{‰} \sim 3\text{‰}$), 即使在高温的内生条件下, 地幔源硫形成硫化物的 $\delta^{34}S$ 值偏离陨石值一般不超过 $\pm 10\text{‰}$; 沉积岩中的硫同位素 $\delta^{34}S$ 值变化大, 现代沉积物中的 $\delta^{34}S$ 值变化范围是 $-28\text{‰} \sim 4\text{‰}$; 变质岩来源的 $\delta^{34}S$ 值总的变化范围是 $-20\text{‰} \sim 20\text{‰}$, 变化大小受原岩成分及变质过程影响; 海水或海相硫酸盐硫其 $\delta^{34}S$ 值较高, 在 20‰ 左右。由海水硫酸盐还原形成的硫化物的 $\delta^{34}S$ 值变化范围较大, 主要取决于形成环境和还原程度, 如开放环境、封闭环境等。在铁木尔特铅锌矿床硫同位素对比图(图

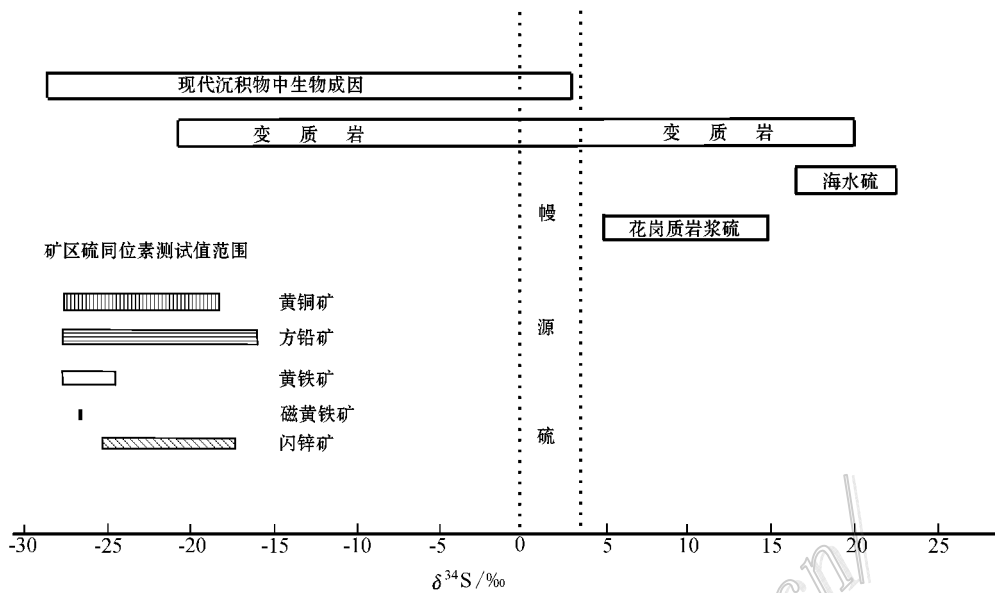


图 7 铁木尔特铅锌矿床硫同位素对比图(据刘锋 2009 转引自前人资料)

Fig. 7 Comparisons of sulfur isotopes in the Tiemurte Pb-Zn deposit(after Ph. D. thesis by Liu Feng , 2009)

7)上,铁木尔特铅锌矿的喷流沉积期硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值集中于 $-16.0\text{‰}\sim-27.8\text{‰}$ 之间,显著富集轻硫,落在“现代沉积物中生物成因硫”范围内。在氧化条件下,由于硫酸盐细菌还原作用的巨大动力学效应,导致沉积物中的硫化物具有较大的负 $\delta^{34}\text{S}$ 值($-30\text{‰}\sim-10\text{‰}$)。根据本文中的硫同位素组成特征,推断喷流沉积期矿石中的硫主要来自较高氧化条件下的海水硫酸盐细菌还原硫,同时表明早期成矿经历了沉积作用。王京彬等(1998)获得喷流沉积期在矿体下盘形成的星散状和细脉浸染状硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 1.7‰ 和 3.4‰ ,接近陨石硫,表明硫来自岩浆活动。此外,矿体局部可见“黑烟囱”(新疆有色706地质队,2008)^①,证实部分硫元素来自火山喷发作用。综上所述,喷流沉积期硫主要来自海水硫酸盐细菌还原硫,少量来自岩浆。

4.2 成矿流体来源——氢、氧同位素示踪

表 3 所示,14 件叠加改造期石英和方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-5.8\text{‰}\sim4.8\text{‰}$, δD 为 $-122\text{‰}\sim-61\text{‰}$,在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解中(图 8)2 件方解石样品点落在变质水及边界附近,12 件石英样品落在岩浆水左下方与大气降水线之间,并向大气降水方向偏移。氢和氧同位素表明,铁木尔特铅锌矿叠加改造期成矿流体具有多来源特征,是岩浆水、循环的大气降水和变

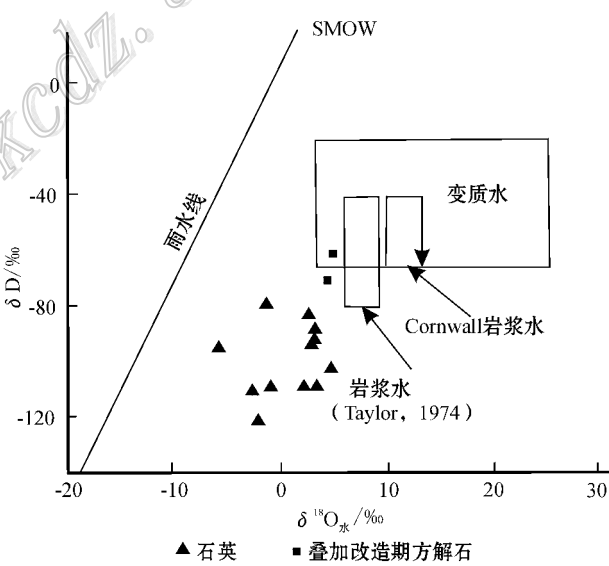


图 8 铁木尔特铅锌矿 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解(据 Rollinson , 1993)

Fig. 8 δD versus $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ diagram of the Tiemurte Pb-Zn deposit(after Rollinson , 1993)

质水的混合。

4.3 成矿作用探讨

铁木尔特铅锌矿赋存于康布铁堡组第二岩性段,层控性明显,矿体的分布受火山喷发中心控制;矿区发育热水沉积岩,如硅质岩、重晶石,矿石的构造具有条带状、条纹状、块状、浸染状、角砾状等典型

① 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 地质队. 2008. 新疆阿勒泰市铁木尔特铅锌矿普查. 2007. 年度总结报告.

喷流沉积特征,在矿体中又发现了“黑烟囱”^①。喷流沉积期硫化物硫同位素表明,硫来源于深海硫酸盐还原硫及岩浆硫,这些特征表明铁木尔特铅锌矿具有VMS型矿床特征。铅锌矿体形成后又经历了叠加改造,如辉绿岩脉、钠长斑岩脉的侵入,在矿体附近形成矽卡岩,矿区地层和矿体经历了区域变质作用,铜矿化叠加于喷流沉积形成的铅锌矿体之上或单独成矿,其成矿过程简述如下:

早于415 Ma,古亚洲洋板块向北俯冲到阿尔泰微大陆之下,由于板块的俯冲作用,在麦兹、克兰和冲乎尔等地形成一系列陆缘拉张断陷盆地(Wang et al., 2006),在其中形成了康布铁堡组以流纹岩为主,含少量玄武岩的火山熔岩、火山碎屑岩和正常沉积岩组合。克兰陆缘拉张断陷盆地火山作用强烈,经历了2个亚旋回和3个阶段,晚志留世—早泥盆世第一亚旋回构成康布铁堡组下亚组。第二亚旋回分为3个阶段,第一阶段形成火山碎屑岩,早期以热水沉积为主,中期以火山爆发作用为主,晚期以溢流作用为主;第二阶段火山活动相对较弱,以凝灰岩、沉凝灰岩和化学沉积岩为主,该阶段是矿区内金、铜、铅、锌的主要成矿期。该阶段的成矿流体主要为受热循环的海水,海水沿盆地边缘的断裂下渗,在此过程中,海水与火山岩围岩发生了物质和同位素交换。海水中 SO_4^{2-} 被还原成 S^{2-} , H_2O 被热解, CO_2 被还原形成 CH_4 (陈毓川等,1996;牛贺才等,2006),同时海水循环过程中萃取了部分成矿物质。被加热的水到达一定深度后在岩浆房热源驱动下回返,与上升的岩浆热液混合,形成了含矿热液。含矿热液沿裂隙向上运移,在海底热水喷口中喷出(矿体局部可见“黑烟囱”^①),温度较高的含矿热液与温度相对较低的海水混合,物理化学条件剧变,导致铅锌等金属元素沉淀,在海底低洼处形成浸染状、条带状、条纹状和块状硫化物矿石,形成VMS型铅锌矿体,这一阶段正处于火山喷发间歇期。矿床形成后又发生了第三阶段的火山作用,主要形成远火山口相的流纹质凝灰岩。

叠加改造期是铜主要成矿期。VMS型铅锌矿体形成后,辉绿岩脉、钠长斑岩脉等侵入,在矿体附近的灰岩中形成矽卡岩,并伴有铜矿化,叠加于喷流沉积形成的矿体之上。之后又经历了区域变质作用,在矿体变形的同时,导致细粒矿物颗粒重结晶,

局部成矿物质重新迁移,形成含铜石英细脉,明显切穿层状铅锌矿石、浸染状黄铁矿化蚀变岩。氢和氧同位素表明,该期成矿流体复杂,具有多来源。徐九华等(2008,2009)认为区域变质作用形成含铜石英脉的流体主要为碳质流体,其均一温度为243~412℃,这种区域变质作用形成的碳质流体在克兰盆地具有普遍性,如在大东沟铅锌矿区形成含铜石英脉、黄铁矿石英脉和石英脉,在萨热阔布则形成了金矿床。

5 结 论

(1)铁木尔特中型铅锌矿床赋存于上志留统一下泥盆统康布铁堡组中,容矿岩系为大理岩、绿泥石英片岩、变钙质粉砂岩、矽卡岩。矿体呈似层状和透镜状。矿体中主要围岩蚀变有硅化、矽卡岩化和黄铁矿化。矿床的形成经历了喷流沉积期、叠加改造期和表生期,其中喷流沉积期是铅锌矿主要成矿期,叠加改造期是铜成矿的主要时期。

(2)本次测定铁木尔特铅锌矿硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值集中于-27.8‰~-16.0‰之间,前人获得矿体下盘星散状和细脉浸染状硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为1.7‰和3.4‰,表明喷流沉积期的硫主要来自细菌还原海水硫酸盐,少量来自岩浆。

(3)叠加改造期的石英和方解石的 δD 值为-122‰~-61‰, $\delta^{18}\text{O}$ 变化于9.5‰~10.9‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 为-5.8‰~4.8‰,表明叠加改造期的成矿流体具有多来源特征,是岩浆水、大气降水(或建造水)和变质水的混合。

志 谢 野外工作期间得到铁木尔特矿山领导的支持与帮助;室内稳定同位素的测试由国土资源部同位素实验室万德芳研究员、罗续荣工程师等完成,并得到悉心指导与帮助,在此一并表示感谢。

References

- Chai F M, Mao J W, Dong L H, Yang F Q, Liu F, Geng X X and Zhang Z X. 2009. SHRIMP zircon geochronology of the metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang and its implications[J]. Gondwana Research, 16: 198-200.

① 新疆有色706队. 2008. 大队新疆阿勒泰市铁木尔特铅锌矿普查年度总结报告.

- Chen Y C, Ye Q T, Feng J, Mou C L, Zhou L R, Wang Q M, Huang G Z, Zhuang D Z and Ren B S. 1996. Ore-forming conditions and metallogenic prognosis of the Ashele copper-zinc metallogenic belt, Xinjiang, China[J]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-330(in Chinese).
- Clayton R N and Mayeda T K. 1963. The use of bromine pentafluoride in the extraction of oxygen from oxides and silicates for isotopic analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27: 43-52.
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research*, 77: 3057-3067.
- Coleman M L, Sheppard T J, Durham J J, Rouse J E and Moore G R. 1982. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 54: 993-995.
- Friedman I and O'Neil J R. 1977. Complication of stable isotope fractionation factors of geochemical interest in data of geochemistry[A]. In: Fleischer M, ed. *Geological Professional Paper*. U. S. Geological Survey[C]. 6th ed. 440.
- Geng X X, Yang F Q, Yang J M, Huang C K, Liu F, Chai F M and Zhang Z X. 2010. Geological significance and fluid inclusions of the Tiemurte Pb-Zn deposit, Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 695-706(in Chinese with English abstract).
- Guo Z L, Guo X J, Wang S L and Qin K Z. 2007. Characteristics and Pb-Zn, Fe and Au exploration potentials of Maize Devonian volcano-sedimentary basin on southern margin of Altay[J]. *Mineral Deposits*, 26(1): 128-138(in Chinese with English abstract).
- He G Q, Cheng S D, Xu X, Li J Y and Hao J. 2004. An introduction to the explanatory text of the map of tectonics of Xinjiang and its neighbouring areas[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-65(in Chinese with English abstract).
- Jiang J. 2003. Genesis and wallrock alteration of the Keketale Pb-Zn deposit in Aertai, Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 17(6): 679-734(in Chinese with English abstract).
- Jiao X J, Ma Z M, Guo X J and Zhang L C. 2005. Devonian volcano-sediments and mineralization of Kelang basin in southern Altay mountains[J]. *Northwestern Geology*, 38(3): 21-27(in Chinese with English abstract).
- Liu F, Yang F Q, Mao J W, Chai F M, Geng X X and Guo Z L. 2009. Study on chronology and geochemistry for Abagong granite in Altay orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1416-1425(in Chinese with English abstract).
- Liu M, Zhang Z H, Wang Y Q and Guo X J. 2008. Geology and stable isotope geochemistry of the Dadonggou Pb-Zn ore deposit, Altay, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1504-1513(in Chinese with English abstract).
- Liu X M, Wu Z L and Li F. 1999. A discussion on metallization of hydrocarbon Alkali fluids hydrothermal fluids in Tiemurte polymetallic deposit[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 24(1): 145-149(in Chinese).
- Mao J W, Wang Y, Ding T, Chen Y, Wei J and Yin J. 2002. Dashuiguoguo tellurium deposit in Sichuan Province, China: S, C, O, and H isotope data and their implications on hydrothermal mineralization[J]. *Resource Geology*, 52: 15-23.
- Mao J W, Wang Y T, Li H M, Pirajno F, Zhang C Q and Wang R T. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics[J]. *Ore Geology Reviews*, 33: 361-381.
- McCrea M. 1950. The isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale[J]. *J. Chem. Phys.*, 18: 849-857.
- Niu H C, Yu X Y, Xu J F, Shan Q, Chen F R, Zhang H X and Zheng Z P. 2006. Late Paleozoic volcanism and associated metallogenesis in the Altay area, Xinjiang, China[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-184(in Chinese).
- O'Neil J R, Clayton R N and Mayada T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates[J]. *Chemistry Geophysics*, 51: 5547-5558.
- Qin K Z, Wang J B, Zhang J H and Deng J N. 1998a. Metallogenic conditions for the Keketale-style large-scale Pb-Zn deposit on the southern margin of Altay, Xinjiang[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 7(2): 65-74(in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Zhang J H and Wang J B. 1998b. Prospecting criteria for large-scale Pb-Zn deposit in Keketale multital ore belt, Altay, Xinjiang[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 7(3): 136-141(in Chinese with English abstract).
- Rollinson H B. 1993. Using geochemical data: Evolution, presentation, interpretation[M]. New York: Longman Scientific & Technical. 270-343.
- Sánchez-espasa J A, Velasco F, Boyce A J, et al. 2003. Source and evolution of ore-forming hydrothermal fluids in the northern Iberian pyrite belt massive sulphide deposits(SW Spain): Evidence from fluid inclusions and stable isotopes[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 519-537.
- Shen M D, An Y C and Ma Z M. 2003. Structural evolution and metallogenic of Devonian Kelan basin in the South Margin of Altay Mountains, Xinjiang[J]. *Xinjiang Non-Ferrous Metals*, 4(4): 2-6(in Chinese with English abstract).
- Wan B and Zhang L C. 2006. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallic metallogenic belt on the southern margin of Altay, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 145-152(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Chen Y C, Xu Z G, Li T D and Fu X J. 2002. Mineralogic series and regularity of mineralization in the Altai metallogenetic Province, China[M]. Beijing: Atomic Press. 1-493(in Chinese).
- Wang J B, Qin K Z, Wu Z L, Hu J H and Ding J N. 1998. Volcanic exhalative sedimentary lead-zinc deposits in the South Margin of Altay Mountains, Xinjiang[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-210(in Chinese).
- Wang S L, Guo Z L, Wang Y W and Mao Z L. 2005. Geological characteristics of Pb-Zn deposits in Devonian volcanic-sedimentary basins in the south margin of Altay mountain: Case study of Keketale Pb-Zn deposit, Xinjiang, China[J]. *Geology and Prospecting*, 41(6): 27-

33(in Chinese with English abstract).

Wang T, Hong D W, Jahn B M, Tong Y, Wang Y B, Han B F and Wang X X. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. The Journal of Geology, 114: 735-751.

Wang T, Hong D W, Tong Y, Han B F and Shi Y R. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 640-650(in Chinese with English abstract).

Wang Z G, Zhao Z H and Zou T R. 1998. Geochemistry of the granitoids in Alta[M]. Beijing: Science Press. 1-152(in Chinese).

Xu J H, Shan L H, Ding R F, Hart C J, Wang L L and Wei X F. 2008. Carbonic fluid inclusion assemblages and their geological significance at the Tiemurte lead-zinc deposit, Altai[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(9): 2094-2104(in Chinese with English abstract).

Xu J H, Lin L H, Wang L L, Chu H X, Wei X F and Chen D L. Deformation, metamorphism and carbonic fluids in VMS deposits of Kelan Basin, Altai[J]. Mineral Deposits, 28(5): 585-598(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈毓川, 叶庆同, 冯京, 牟传龙, 周良仁, 王全明, 黄光昭, 庄道泽, 任秉琛. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测[M]. 北京: 地质出版社. 1-330.

耿新霞, 杨福全, 杨建民, 黄承科, 刘锋, 柴凤梅, 张志欣. 2010. 新疆阿尔泰铁木尔特铅锌矿床流体包裹体研究及地质意义[J]. 岩石学报, 26(3): 695-706.

郭正林, 郭旭吉, 王书来, 秦克章. 2007. 阿尔泰南缘麦兹泥盆纪火山-沉积盆地成矿特点及其铅、锌、铁、金找矿潜力分析[J]. 矿床地质, 26(1): 128-138.

何国琦, 成守德, 徐新, 李锦轶, 郝杰. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2500000)说明书[M]. 北京: 地质出版社. 1-65.

姜俊. 2003. 阿尔泰可可塔勒铅锌矿床围岩蚀变及成因[J]. 矿产与地质, 17(6): 679-734.

焦学军, 马忠美, 郭旭吉, 张连昌. 2005. 阿尔泰山南缘克朗盆地泥盆

纪火山沉积与矿产[J]. 西北地质, 38(3): 21-27.

刘锋, 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 耿新霞, 郭正林. 2009. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩体年代学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 25(6): 1416-1425.

刘锋. 2009. 新疆阿尔泰阿巴宫-蒙库一带铁矿床成矿作用与成矿规律研究[博士论文][D]. 补充 ?? 英文

刘敏, 张作衡, 王永强, 郭旭吉. 2008. 新疆阿尔泰大东沟铅锌矿床地质特征及稳定同位素地球化学研究[J]. 地质学报, 82(11): 1504-1513.

刘秀明, 吴志亮, 李峰. 1999. 铁木尔特多金属矿床烃碱流体-热水成矿作用[J]. 昆明理工大学学报, 24(1): 145-149.

牛贺才, 于学元, 许继峰, 单强, 陈繁荣, 张海祥, 郑作平. 2006. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿[M]. 北京: 地质出版社. 1-184.

秦克章, 王京彬, 张进红, 邓吉牛. 1998a. 阿尔泰山南缘可可塔勒式大型铅锌矿床的成矿条件分析[J]. 有色金属矿产与勘查, 2(2): 65-74.

秦克章, 张进红, 王京彬. 1998b. 阿尔泰可可塔勒多金属矿带大型矿床的找矿评价标志[J]. 有色金属矿产与勘查, 2(3): 136-141.

申茂德, 安银昌, 马忠美. 2003. 新疆阿尔泰山南缘克朗泥盆纪火山盆地构造演化与成矿[J]. 新疆有色金属(4): 2-6.

万博, 张连昌. 2006. 新疆阿尔泰山南缘泥盆纪多金属成矿带 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学与构造背景探讨[J]. 岩石学报, 22(1): 145-152.

王登红, 陈毓川, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社. 1-493.

王京彬, 秦克章, 吴志亮. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社.

王涛, 洪大卫, 董英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. 岩石学报, 21(3): 640-650.

王中刚, 赵振华, 邹天人, 等. 1998. 阿尔泰花岗岩类地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1-152.

徐九华, 单立华, 丁汝福, Hart C J, 王琳琳, 卫晓峰. 2008. 阿尔泰铁木尔特铅锌矿床的碳质流体组合及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(9): 2094-2104.

徐九华, 林龙华, 王琳琳, 褚海霞, 卫晓峰, 陈栋梁. 2009. 阿尔泰克朗盆地 VMS 矿床的变形变质与碳质流体特征[J]. 矿床地质, 28(5): 585-598.