

新疆东天山阿奇山铅锌矿床成矿物质来源及 矿床成因*

邓莉明¹, 杨永强^{2**}, 李智¹, 张小军³

(1 新疆维吾尔自治区国土资源规划研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 3 新疆地质调查院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要 阿奇山铅锌矿床位于新疆东天山成矿带西段, 是近年来新发现的矿床。矿体赋存于下石炭统雅满苏组第四岩性段中, 受地层控制, 以细脉状和浸染状矿化类型为主。测试结果显示: 矿石硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布在 -1.6‰ ~ -7.3‰ 之间, 具塔式分布效应, 估算成矿流体的总硫同位素值 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 约为 -4.15‰ , 具岩浆硫的特征。14 件矿石围岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值的变化范围分别为 18.112~18.427、15.553~15.646 和 37.980~38.441; 根据铅构造模式图解及参数综合分析, 表明铅来自于壳幔物质混合。通过对阿奇山铅锌矿床地质特征、成矿物质来源研究, 认为阿奇山铅锌矿床可能属于火山热液型矿床。

关键词 地球化学; 硫、铅同位素; 成矿物质来源; 矿床成因; 阿奇山铅锌矿; 新疆东天山

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Sources of ore-forming materials and genesis of Aqishan Pb-Zn deposit in East Tianshan Mountains, Xinjiang

DENG LiMing¹, YANG YongQiang², LI Zhi¹ and ZHANG XiaoJun³

(1 Xinjiang Uygur Autonomous Region Land and Resource Planning Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

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

3 Xinjiang Geological Survey Institute, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract

The Aqishan Pb-Zn deposit was newly discovered in the East Tianshan metallogenic belt. The Pb-Zn orebodies are controlled by strata and hosted in the fourth member of Lower Carboniferous Yamansu Formation, with the major type being veinlet-disseminated and disseminated mineralization. The $\delta^{34}\text{S}$ values of sulfide minerals in the deposit range from -1.6‰ to -7.3‰ and exhibit a tower distribution. Estimated $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ values of the ore-forming hydrothermal system are around -4.15‰ , suggesting characteristics of sulfur from magmatic source. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of 14 samples from orebody and wall rocks vary in ranges of 18.112~18.427, 15.553~15.646 and 37.980~38.441. Based on tectonic pattern and related parameters of lead isotope, the authors hold that the lead of the ore was mainly derived from mixture of crust materials. An analysis of geological features and source of ore-forming materials shows that the Aqishan Pb-Zn deposit may belong to the volcanic hydrothermal ore deposit.

Key words: geochemistry, sulfur and lead isotope, source of ore forming material, ore genesis, Aqishan Pb-Zn deposit, Xinjiang, East Tianshan Mountains

* 本文得到覆盖区成矿成晕机理与找矿技术项目(编号: 12120113088900)资助

第一作者简介 邓莉明, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事矿床学与矿床地球化学研究。Email: 466345827@qq.com

** 通讯作者 杨永强, 男, 1965 年生, 博士后, 教授, 主要从事矿床地球化学和勘查教学和研究。Email: yangyongq@cugb.edu.cn

收稿日期 2018-01-02; 改回日期 2018-04-26。张绮玲编辑。

东天山成矿带是中国重要的成矿带之一(仇银江等,2015;陈毓川等,2009);该区域大地构造位于古亚洲洋南缘,是西伯利亚板块与塔里木板块的聚合地区。在长期的演化过程中经历了极其复杂的裂解和拼合,具有多样的构造环境(秦克章等,2002)。形成了多处剪切带型金矿(陈文等,2007),斑岩型铜矿(芮宗瑶等,2002),海相火山岩型铁、铜矿床(李厚民等,2014;陈刚,2008)等(图1);多年来经过地质工作者的不懈努力,目前该区域内已发现有20多种矿产,主要矿产地约100多处,其中大型矿床近30处(陈毓川等,2009)。

新疆东天山阿奇山铅锌矿床位于东天山成矿带

西段,大地构造上位于阿奇山-雅满苏岛弧带西段,阿奇山-雅满苏岛弧带是一个近NE向的古生代岛弧带,该岛弧带北以雅满苏断裂带为界,南以阿其克库都克-沙泉子断裂为界,岛弧带内发育一套石炭系一二叠系火山岩-海陆相沉积岩(苏春乾等,2009;罗婷,2013),且岩浆岩非常发育,其中又以花岗岩类分布最为广泛,成矿作用与岩浆活动密切相关(周涛发等,2010)。阿奇山铅锌矿床是新疆地质调查院于2013年通过对该区域进行1:50 000化探异常查证后新发现的矿床。前人仅对该矿床所在区域做过火山岩(罗桂昌等,1999;李彦林等,2010;苏春乾等,2009;罗婷,2013;王雯等,2016)、花岗岩岩体等(朱

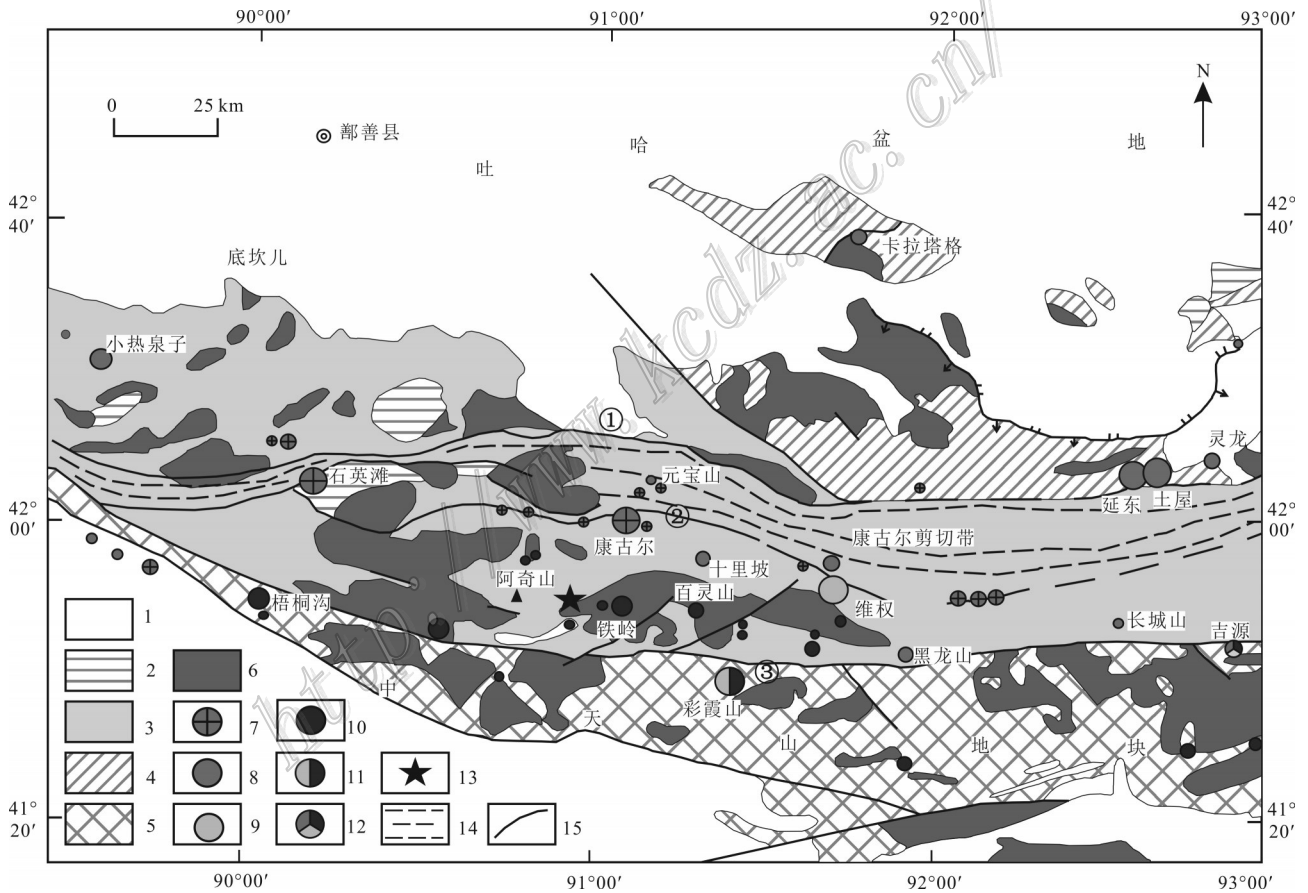


图1 东天山构造格架于矿床分布图(据王京彬等,2006修编)

- 1—中生代沉积地层;2—二叠纪陆相火山-沉积岩系;3—石炭纪火山-沉积岩系;4—奥陶纪—泥盆纪火山-沉积岩系;5—前寒武纪变质岩;
- 6—花岗岩类;7—金矿床;8—铜矿床;9—银矿床;10—铁矿床;11—铅锌矿床;12—多金属矿床;13—阿奇山铅锌矿床位置;
- 14—剪切带;15—断裂:①—康古尔断裂;②—雅满苏断裂;③—阿其克库都克-沙泉子断裂

Fig. 1 Map of the tectonic framework and deposit distribution of East Tianshan Mountains (modified after Wang et al., 2006)
 1—Mesozoic and Cenozoic sedimentary rocks; 2—Permian volcanic rocks and sedimentary rocks; 3—Carboniferous volcanic rocks and sedimentary rocks; 4—Ordovician and Devonian volcanic rocks and sedimentary rocks; 5—Precambrian metamorphic rocks; 6—Granitoids; 7—Gold deposit; 8—Copper deposit; 9—Silver deposit; 10—Iron deposit; 11—Lead-zinc deposit; 12—Polymetallic deposit; 13—Location of Aqishan Zn-Pb deposit; 14—Shear zone; 15—Fault: ①—Kangguer fault belt; ②—Yamansu fault belt; ③—Achikkuduk-Shaquanzi fault belt

增伍等,2006;吴昌志等2006;田明明等,2014;韩琼等,2017)方面的研究。对阿奇山铅锌矿床,前人进行过矿区地质、岩石地球化学、矿床成因等方面的研究(夏冬等,2018;仇银江等,2016),但对于阿奇山铅锌矿床硫、铅同位素,以及成矿物质来源缺乏系统的研究。本文在系统的野外及室内工作基础上,查明阿奇山铅锌矿床的地质特征,以钻孔采样为主,对矿石及围岩样品中单矿物进行硫、铅同位素研究,以示踪成矿物质来源并探讨其矿床成因。

1 矿区地质特征

1.1 地层

矿区出露地层为上石炭统雅满苏组(C_{1y})和下石炭统太古土布拉克组(C_{2tg}),二者呈不整合接触(图2)。

雅满苏组(C_{1y})分为4个岩性段:第一岩性段(C_{1y}^1)岩性以流纹质凝灰岩为主,夹少量生物碎屑灰岩及凝灰质砂岩、熔结凝灰岩,为一套酸性火山碎

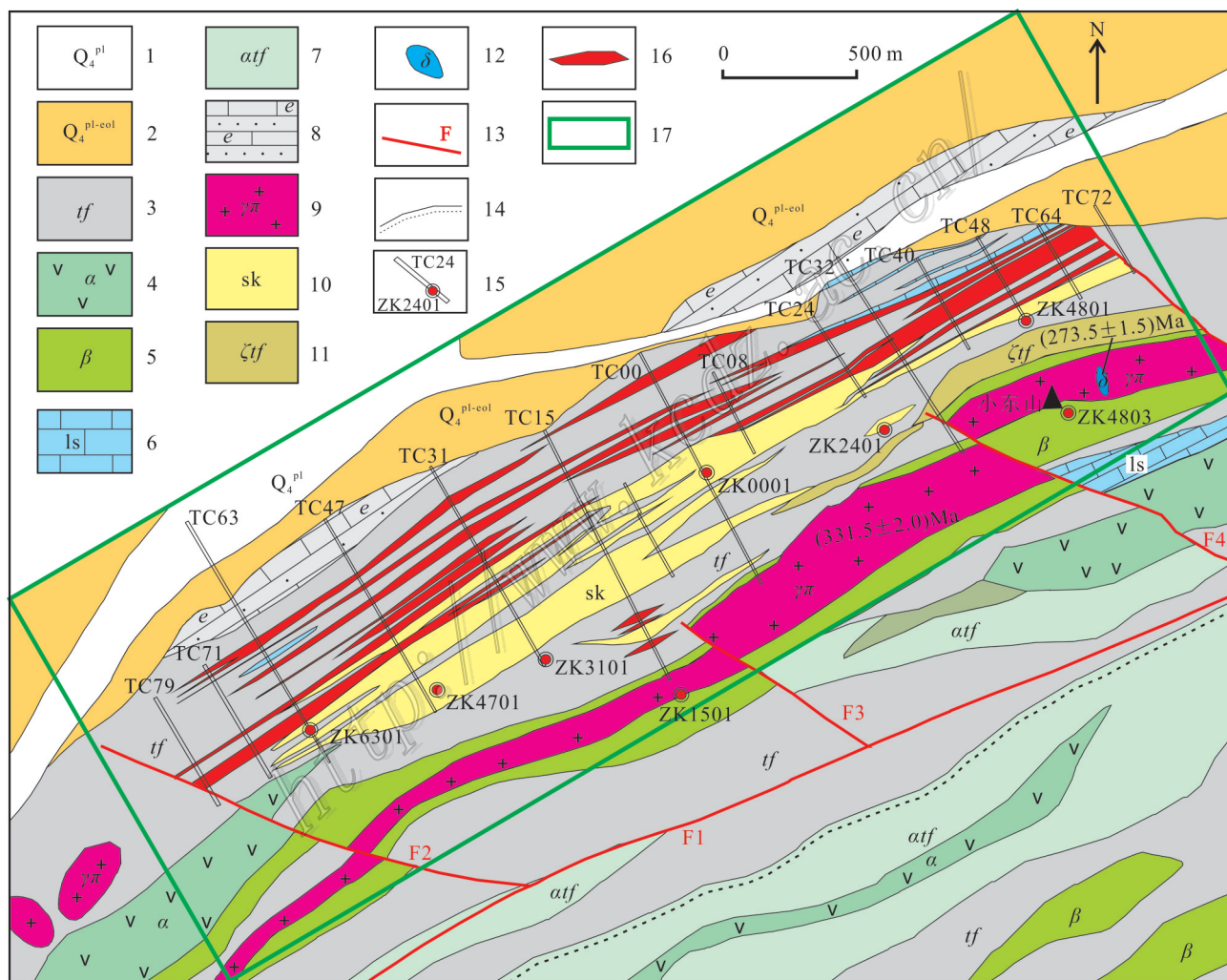


图2 阿奇山铅锌矿地质简图(据田江涛等,2014修编)

- 1—第四系洪积物;2—第四系风积物;3—凝灰岩;4—安山岩;5—玄武岩;6—灰岩;7—安山质凝灰岩;8—砂岩灰岩互层加凝灰岩(含生物碎屑灰岩);9—黄铁矿化花岗斑岩;10—砂卡岩;11—英安质凝灰岩;12—辉绿岩脉;13—断层;
14—不整合接触界线;15—探槽钻孔及编号;16—矿体;17—矿区范围

Fig.2 Simplified geological map of Aqishan Pb-Zn deposit(modified after Tian et al., 2014)

- 1—Quaternary pluvial substance; 2—Quaternary Aeolian; 3—Tuff; 4—Andesite; 5—Basalt; 6—Limestone; 7—Andesitic tuff;
8—Sandstone interbedded with limestone; 9—Pyrite granite porphyry; 10—Skarn; 11—Dacitic tuff; 12—Diabase dyke;
13—Fault; 14—Unconformable contact; 15—Location of Drill hole and Trench; 16—Orebody; 17—Mining area

屑岩组合夹少量沉积岩;第二岩性段(C_{1y}^2)岩性以(中)酸性火山碎屑岩为主,夹少量酸性熔岩及正常沉积岩;第三岩性段(C_{1y}^3)以沉积岩类为主,下部为长石砂岩、鲕粒状灰岩;上部为凝灰质砂岩夹生物屑灰岩、泥晶灰岩、酸性火山碎屑岩;第四岩性段(C_{1y}^4)岩性主要以火山岩及碎屑沉积岩为主,包括火山碎屑沉积岩和一些正常沉积岩,火山岩仅作为夹层产出,包括透镜状安山质凝灰岩、凝灰岩、英安岩、含角砾玄武岩等(图3),最底部为一层河口相高密度碎屑流沉积砾岩。

下石炭统土古土布拉克组(C_{2tg}),下部为灰色砾岩、砂岩;中部为中-酸性火山岩,上部为杏仁状玄武岩、安山岩和流纹岩等基性-酸性火山岩。

1.2 构造

矿床位于阿奇山背斜南翼,矿区地层以单斜构造的形式产出,均为南倾,倾角 $35^\circ\sim 65^\circ$ 之间,产状稳定;发育有1条NE向主断层和3条NW向次生断层,3条NW向断层切穿地层和黄铁矿化花岗斑岩以及断层两盘的移动方向,推断断层为左旋平移断层性质,断距约100~300 m。野外实测剖面以及岩芯编录发现矿区的断层对矿体的控制不明显。

1.3 岩浆岩

矿区岩体规模均较小,除小东山前一个顺层侵入的黄铁矿化花岗岩体出露面积较大外,其余岩体均呈脉状产出,岩性有花岗斑岩、辉绿岩、安山玢岩

和钠长斑岩(图2,由于岩体规模较小,图面仅标注花岗斑岩和辉绿岩脉)。

前人测得小东山东北侧约30 m处辉绿岩脉锆石U-Pb年龄为 (237.5 ± 1.9) Ma(待刊资料);夏冬等(2018)对阿奇山铅锌矿床成因进行研究时获得小东山花岗斑岩体锆石U-Pb年龄为 (331.5 ± 2.0) Ma(图2)。

1.4 小东山火山机构

小东山火山机构位于矿区西南部(图2),前人通过1:5000地质剖面测量对该火山机构进行详细解剖,发现该火山机构含多个火山口,且火山口展布与阿其克库都克断裂带平行(NE向),火山活动受其控制(陈岳龙等,2015)。通过地质剖面实测,揭示该火山机构岩性主要有安山岩、安山玢岩、黄铁矿化花岗斑岩、英安质熔结凝灰岩、玄武岩、玄武安山岩和绿帘石化灰岩与砂岩(图3),其中花岗斑岩和玄武岩中黄铁矿化广泛发育。

该火山机构的地质特征以及展布形态,指示小东山火山机构与阿奇山铅锌矿床的形成有密切联系。

1.5 矿体特征及围岩蚀变

矿体主要产于雅满苏组第四岩性段(C_{1y}^4)中(图3),围岩主要有石榴子石砂卡岩,石榴子石化凝灰岩、凝灰岩、灰岩等。矿体主要赋存于石榴子石砂卡岩、石榴子石阳起石砂卡岩、石榴子石透辉石砂卡岩中,其次为蚀变角砾凝灰岩、蚀变凝灰岩以及蚀变纹层状凝灰岩中。矿体受地层产状控制明显,产出

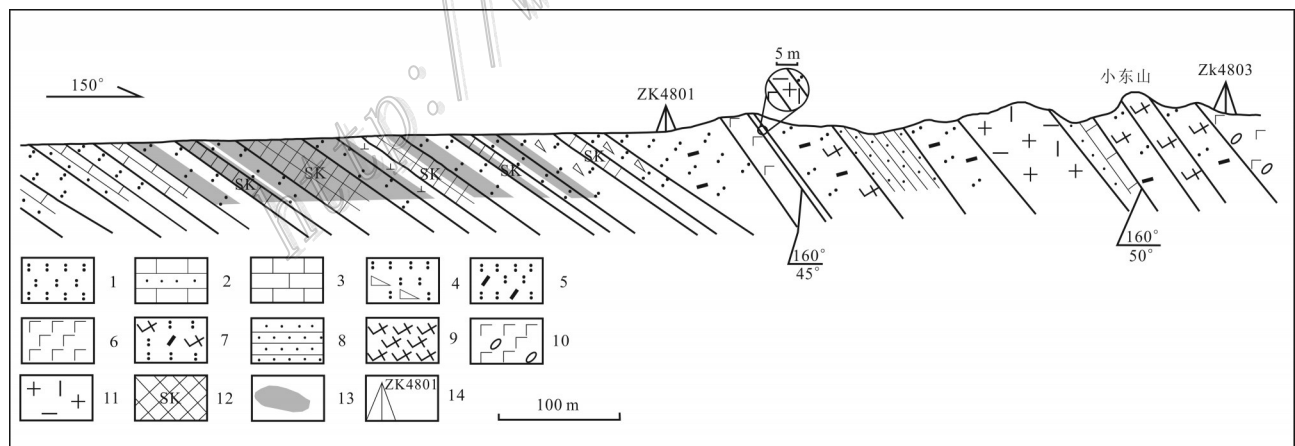


图3 阿奇山铅锌矿床48号勘探线剖面简图(实测)

- 1—凝灰岩;2—灰岩砂岩互层;3—灰岩;4—含角砾凝灰岩;5—晶屑凝灰岩;6—玄武岩;7—英安质熔结凝灰岩;
- 8—细砂岩;9—英安岩;11—黄铁矿化花岗斑岩;12—砂卡岩;13—矿体;14—钻孔位置及编号

Fig. 3 Geological section along No.48 exploration line in the Aqishan Zn-Pb deposit

- 1—Tuff; 2—Limestone interbedded with sandstone; 3—Limestone; 4—Breccia tuff; 5—Crystal tuff; 6—Basalt; 7—Dacitic fused tuff;
- 8—Fine-grained sandstone; 9—Dacite; 11— Pyritized granite-porphry; 12—Skarn; 13—Orebody;
- 14—Location of drill hole and its number

形态连续,呈层状、似层状、网脉状。地表圈定矿体42条,深部发现隐伏矿体13条,单矿体长度100~1740 m,视厚度为2~68.17 m,Zn品位为0.60%~2.77%,Pb品位为0.30%~0.77%;其中10、12、8、和6号矿体规模最大,这4条矿体的铅锌金属资源量占到阿奇山铅锌矿床总金属储量的一半以上(夏冬等,2015)。

矿床金属矿物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿等;次要金属矿物为镜铁矿、毒砂、赤铁矿等。矿石结构主要为他形粒状结构、交代溶蚀结构、包含结构、固溶体分离结构、骸晶结构、充填结构等(图5c~f),一般黄铁矿的结晶程度较高,黄铜矿和闪锌矿都以他形填充在黄铁矿、石榴子石等矿物的晶体间隙中(图5c~f)。矿石的构造主要有脉状、网脉状、条带状、浸染状(图5g~j),其中以细脉状构造和浸染状构造最为明显。矿区的围岩蚀变主要以小东山黄铁矿化花岗斑岩体为中心向周围发育,蚀变程度依次减弱,以矽卡岩化、绿泥石化和绿帘石化规模最广泛,同时发育有阳起石化、透闪石化等。

2 样品及分析方法

本次试验样品分别采自阿奇山铅锌矿钻孔

ZK4803、ZK4801、ZK4701、ZK2401和围岩。将采集的矿石样品破碎,过筛后留下40~60目的样品,在双目镜下挑选金属硫化物单矿物,纯度高于98%,送实验室进行分析测试。围岩样品直接送实验室进行分析测试。本次处理后样品的硫、铅同位素分析均在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。

硫同位素测试是将200目的金属硫化物单矿物与 Cu_2O (氧化剂)在高温真空条件下反应,使金属硫化物单矿物中的S被氧化成为 SO_2 ,然后在真空的条件下用冷冻法收集 SO_2 气体;利用MAT251气体同位素质谱仪分析硫元素的组成,测试得到的结果以V-CDT为标准,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。铅同位素的测试是将样品先用混合酸溶解,再用树脂交换法分离出铅,在相对湿度40%、室内温度 20°C 的条件下,依据GB/T17672—1999《岩石中铅铋钨同位素测定方法》,在ISOPROBE—T热电离质谱仪测定铅同位素的组成,测试结果用国际标样NBS981校正,其测量误差为 2σ 。

3 测试结果

硫同位素测试结果及收集数据显示(表1)阿奇山铅锌矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围为 -1.6‰ ~

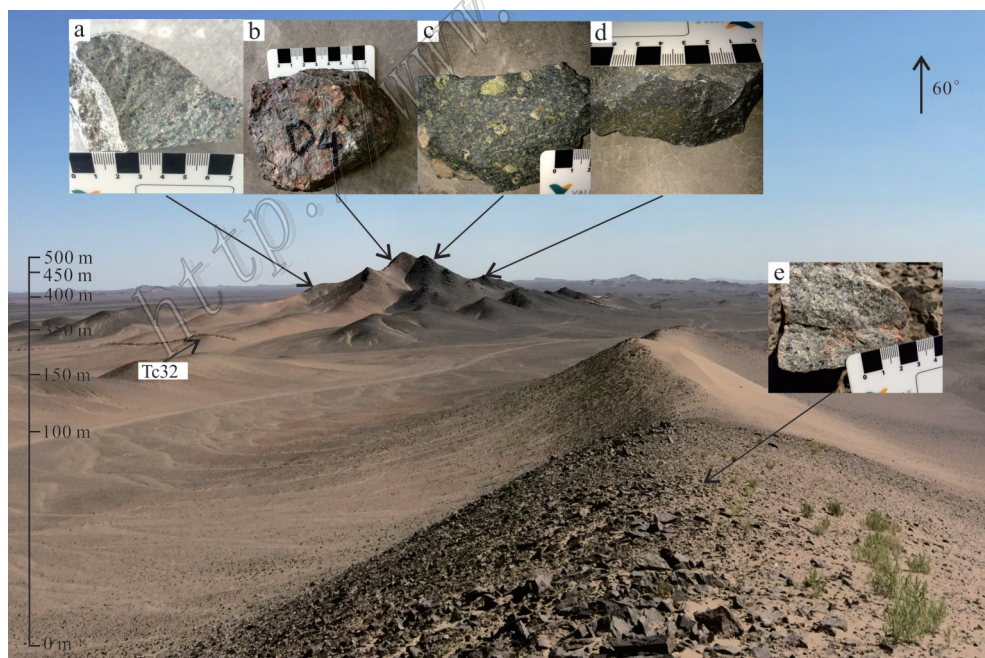


图4 小东山火山机构宏观特征及采样位置

a. 黄铁矿化花岗斑岩;b. 安质熔结凝灰岩;c. 玄武岩;d. 玄武安山岩;e. 黄铁矿化花岗斑岩

Fig. 4 Macroscopic characteristics of Xiaodongshan volcanic apparatus

a. Pyritized granite porphyry; b. Dacitic fused tuff; c. Basalt; d. Basalt andesite; e. Pyritized granite porphyry

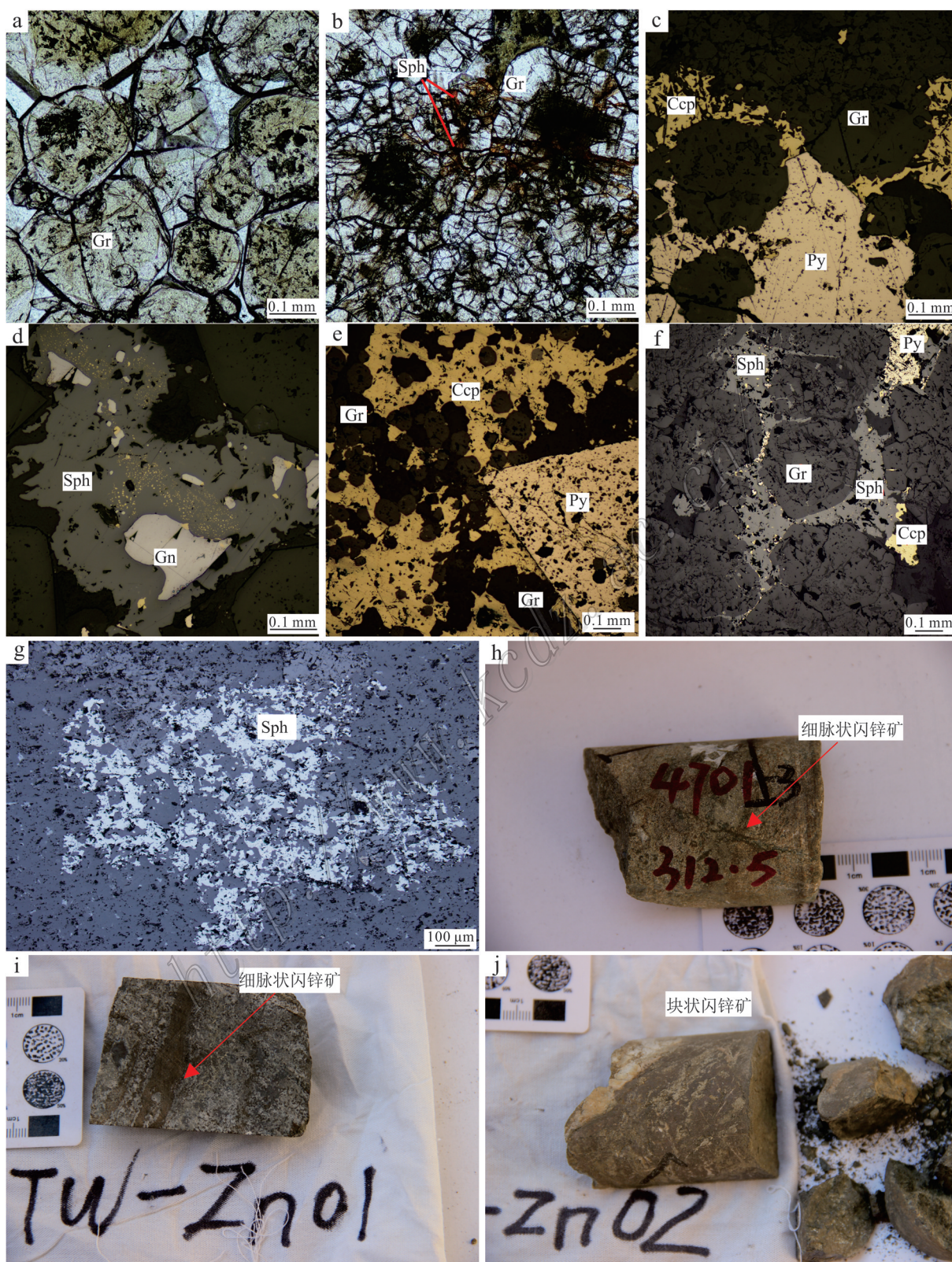


图 5 阿奇山铅锌矿矿石围岩镜下特征

a. 石榴子石矽卡岩镜下特征(3101-1,透射光);b. 石榴子石矽卡岩裂隙中发育有闪锌矿(4701-1,透射光);c. 黄铁矿、黄铜矿填充于石榴子石晶体缝隙间(4803-2,反射光);d. 闪锌矿和方铅矿溶蚀结构(4801-2,反射光);e, f. 黄铜矿、闪锌矿发育在石榴子石晶体缝隙间(4803-2,4701-2,反射光);g. 浸染状铅锌矿;h. 细脉状铅锌矿;i. 网状铅锌矿;j. 块状铅锌矿

Gr—石榴子石; Sph—闪锌矿; Gn—方铅矿; Cu—黄铜矿; Py—黄铁矿

Fig. 5 Thin section of ores and wall rocks from Aqishan Pb-Zn deposit

- a. Microphotographs of garnet of garnet skarn(3101-1, transmissive light); b. Sphalerite from the fracture of garnet skarn(4701-1, transmissive light); c. Pyrite and chalcopyrite in the middle of garnet(4803-2, reflected light); d. Sphalerite and galena developing exsolution texture (4801-2, reflected light); e, f. Pyrite and sphalerite in the middle of garnet (4803-2, 4701-2, reflected light); g. Disseminated Pb-Zn orebody; h, i. Veined Pb-Zn orebody; j. Massive Pb-Zn orebody
Gr—Garnet; Sph—Sphalerite; Gn—Galena; Cu—Chalcopyrite; Py—Pyrite

-7.3‰。变化范围较小。其中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-1.6‰~-7.3‰,平均为-4.5‰;黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-1.7‰~-5.7‰,平均值为-3.7‰;一件闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-4.0‰,一件方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-3.8‰。铅锌成矿系统内 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ (图6),成矿系统内不同硫化物的硫同位素分馏基本达到平衡。

铅同位素测试结果及计算参数见表2。张乾等(2000)研究表明当只拥有数个矿石铅同位素组成数据时,无法得知矿石与围岩、岩浆岩及矿区其他地质实体铅同位素组成的关系,也就无法准确判断铅的来源。因此,为准确判断铅的来源共采取了14件矿石及围岩样品进行铅同位素的测试分析。本次测试8件矿石样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在18.113~18.257之间,平均值为18.115,极差为0.114; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在15.553~15.646之间,平均值为15.588,极差为0.093; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在37.98~38.282,平均值

为38.094,极差为0.302;2件花岗斑岩样品, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在18.112~18.145之间,平均值为18.128,极差为0.033; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在15.569~15.76之间,平均值为15.573,极差为0.007; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在38.05~38.165之间,平均值为38.085,极差为0.16;1件闪长岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.265, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.56, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为38.119;1件玄武岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为18.238, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.642, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为38.245;2件地层全岩样品(石榴子石矽卡岩) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在18.422~18.427之间,平均值为18.425,极差为0.005; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在15.599~15.619之间,平均值为15.609,极差0.02; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化在38.28~38.441,平均值为38.361,极差为0.161。数据显示矿石金属硫化物铅同位素组成变化范围较小,显示正常矿石铅的特征。

表1 阿奇山铅锌矿金属硫化物硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic composition of ore sulfides from the Aqishan Pb-Zn deposit

序号	采样位置	样品编号	岩性	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	数据来源
1	ZK4803 225 m	4803-1(1)	花岗斑岩内黄铁矿脉	黄铁矿	-5.0	本文
2	ZK4803 429 m	4803-2(1)	浸染状铅锌矿石	黄铁矿	-1.6	
3	ZK4803 429 m	4803-2(cu)	浸染状铅锌矿石	黄铜矿	-1.7	
4	ZK4803 165 m	4803-3(1)	细脉状铅锌矿石	黄铁矿	-3.9	
5	ZK4803 435 m	4803-5	网脉状铅锌矿石	黄铁矿	-4.6	
6	ZK4803 337 m	4803-6	花岗斑岩内黄铁矿脉	黄铁矿	-2.3	
7	ZK4803 528 m	4803-8	浸染状铅锌矿石	黄铁矿	-6.2	
8	ZK4803 351 m	4803-10	细脉状铅锌矿石	黄铁矿	-2.0	
9	ZK4801 212 m	4801-1	浸染状铅锌矿石	黄铁矿	-3.3	
10	ZK4701 312 m	4701-3	细脉状铅锌矿石	黄铁矿	-4.3	
11	ZK2401 195 m	twzn02-1	网脉状铅锌矿石	黄铁矿	-7.3	
12	ZK2401 308.5 m	twzn02-2	脉状铅锌矿石	闪锌矿	-4.0	
13		ZK4830-13		黄铁矿	-3.5	张少博,2017
14		ZK4803-29-1		黄铁矿	-3.6	
15		ZK4803-29-2		黄铜矿	-4.9	
16		ZK4803-32		黄铜矿	-3.5	
17		ZK4803-40-1		黄铜矿	-5.4	
18		ZK4803-40-2		黄铁矿	-6.4	
19		ZK48303-43		黄铜矿	-5.7	
20		X140921-12-8		方铅矿	-3.8	

注:本文硫同位素测试单位为核工业北京地质研究院分析测试中心。

表 2 阿奇山铅锌矿床金属硫化物、全岩铅同位素组成及相关参数

Table 2 Pb isotope composition and parameters of ore sulfide and wall rocks from the Aqishan Pb-Zn deposit

样品号	样品名称	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	t/Ma	μ	ω	Th/U	Δα	Δβ	Δγ
4803-1(2)	黄铁矿	18.257	15.568	38.007	239	9.42	35.28	3.62	70.14	16.28	24.56
4803-3(2)	黄铁矿	18.162	15.607	38.174	355	9.51	36.86	3.75	73.81	19.40	34.18
4803-5	黄铁矿	18.127	15.574	38.046	341	9.44	36.20	3.71	70.58	17.17	30.07
4803-8	黄铁矿	18.116	15.553	37.980	323	9.40	35.79	3.68	68.53	15.71	27.52
480-10	黄铁矿	18.128	15.562	38.018	325	9.42	35.97	3.70	69.42	16.31	28.64
4701-3	黄铁矿	18.158	15.610	38.168	361	9.51	36.88	3.75	74.10	19.63	34.30
4801-1	黄铁矿	18.182	15.646	38.282	387	9.58	37.57	3.80	77.61	22.12	38.53
TWZN02(1)	闪锌矿	18.113	15.584	38.082	362.6	9.47	36.53	3.73	71.54	17.94	32.03
TW-PY01	花岗斑岩	18.112	15.576	38.165	331.6	9.45	36.81	3.77	68.98	17.25	32.9
TW-Pb05	花岗斑岩	18.145	15.569	38.050	331.6	9.43	36.08	3.7	70.92	16.8	29.79
TW-Pb06	闪长岩	18.265	15.560	38.119	237.5	9.4	35.63	3.67	70.49	15.75	27.52
TW-PY02	石榴子石砂卡岩	18.427	15.599	38.280	105.1	9.46	35.78	3.66	73.39	17.92	28.19
TW-Pb03	石榴子石砂卡岩	18.422	15.619	38.441	153.5	9.5	36.64	3.73	75.33	19.35	33.76
TW-PY03	玄武岩	18.238	15.642	38.245	342.4	9.57	37.06	3.75	66.39	20.95	29.51

注:测试单位为核工业北京地质研究院分析测试中心,误差范围<2σ;μ=²³⁸U/²⁰⁴Pb;ω=²³²Tu/²⁰⁴Pb;μ,ω参数均由GeoKit软件(路远发,2004)计算所得,其中α=²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb,β=²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb,γ=²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb;Δα=(α/am(t)-1)×1000,Δβ=(β/βm(t)-1)×1000,Δγ=(γ/γm(t)-1)×1000,am(t)、β/βm(t)和γm(t)为t时地幔值。

4 讨论

4.1 硫的来源

阿奇山铅锌矿床硫化物 δ³⁴S 值变化范围为 -1.6‰~-7.3‰,变化范围较小,且呈塔式分布(图 6),指示硫的来源单一。讨论矿床中硫源时,必须以硫化物沉积期间的总硫同位素组成作为依据;热液系统中硫化物沉淀时,硫同位的组成受到热液的总硫同位素组成、离子强度、温度、f(O₂)以及 pH 值等因素影响,其中 f(O₂)和 pH 值是最主要的控制因素(Ohmoto, 1972)。依据 Ohmoto (1972)的理论计算,在高氧逸度条件下,主要以 SO₄²⁻存在时,可能的矿物组合为硫酸盐+方解石,此时 δ³⁴S≈δ³⁴S_{ΣS};在中氧

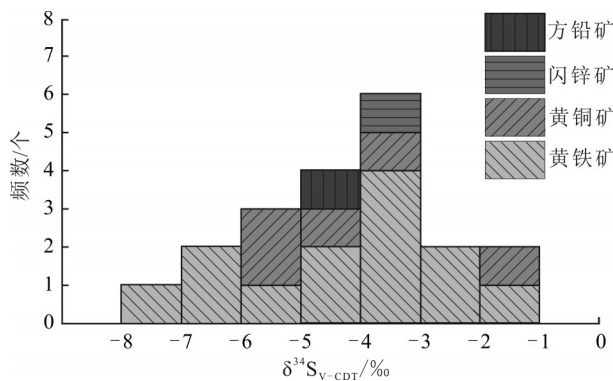


图 6 阿奇山铅锌矿床矿石硫化物硫同位素组成频率直方图
Fig. 6 Sulfur isotopic histogram of the Aqishan Pb-Zn deposit

逸度条件下,当硫化物同硫酸盐共存时,有 δ³⁴S_{硫酸盐} < δ³⁴S_{ΣS}, δ³⁴S_{硫化物} < δ³⁴S_{ΣS};在低氧逸度条件下,硫酸盐不能存在,可能的矿物组合为黄铁矿、方铅矿和闪锌矿,此时 δ³⁴S_{硫化物}≈δ³⁴S_{ΣS}。而阿奇山铅锌矿矿石中硫化物矿物组合较为单一(黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿和方铅矿),未见其他硫酸盐矿物,指示成矿期氧逸度较低,因此,硫同位素特征值的平均值(-4.15‰)可大致代表阿奇山铅锌矿床成矿流体中总硫同位素组成(δ³⁴S_{ΣS})。阿奇山铅锌矿床硫化物 δ³⁴S 值变化范围较小且均为负值(表 1),这一特征明显不同于海相或蒸发沉积地层中的硫酸盐(显生宙海水硫酸盐的 δ³⁴S 在 15‰~20‰)(Claypool et al., 1980)和沉积岩(δ³⁴S 值多为变化范围较大的负值,郑永飞等,2000)以及 δ³⁴S 值变化范围较大的细菌还原硫(BSR)(周家喜等,2010);而具有热化学还原硫(TSR, δ³⁴S 值在 -5‰~20‰)、幔源硫(δ³⁴S 值在 0~±3‰)(Ohmoto et al., 1979)、壳源岩浆硫(花岗岩的 δ³⁴S 值在 -4‰~9‰)(郑永飞等,2000)的特征。前人对热化学还原硫源的矿床进行研究(周家喜等,2010;向世红等,2012;薛伟等,2012),认为其硫源均来源于海相硫酸盐的热化学还原,但通过地质填图和钻探工作,矿区内未发现海相硫酸盐,无法提供热化学还原的物质条件,因此热化学还原硫源可能并非阿奇山铅锌矿床的硫源。经过分析认为,阿奇山铅锌矿床硫源主要来自深源岩浆硫,而 δ³⁴S 表现出较小的负值,可能是成矿流体在运移的过程中加入

了围岩硫或生物硫(王辉等,2015)。

4.2 铅的来源

铅元素不仅从矿源岩中浸取时不会产生同位素分馏,而且在转移进入成矿热液并随之迁移沉淀的过程中,其同位素组成一般也不会发生变化(沈渭州,1987),因此,研究矿物铅同位素的组成可以有效的判断矿床中成矿物质的来源。一般认为 μ 值大于9.58通常被认为是来自于U、Th相对富集的上地壳,而铅同位素 μ 值小于9.58通常被认为来自于上地幔(吴开兴等,2002)。阿奇山铅锌矿床铅同位素 μ 值相对集中(9.42~9.58),所测样品 μ 值均低于9.58。多数样品铅同位素 ω 值低于平均地壳的 ω 值(36.84),但也有3件样品高于平均地壳 ω 值(36.84)。同时,样品的Th/U比值变化于3.62~3.80之间,平均值为3.71,介于地幔值(5.48)和地壳值(约为3.47)之间(李龙飞等,2001),指示了阿奇山铅锌矿床源具有壳幔混源铅特征。此外,在Zartman(1981)的铅构造演化图解(图7)中,矿石铅的投影点绝大多数落于造山带演化线上及其附近,有个别样品接近上地壳演化线,显示出造山带铅的特征,这与区域晚石炭世末期古亚洲洋闭合并发生造山运动地质背景相符。

朱炳泉等(1998)为了消除时间对铅同位素示踪结果的影响,将3种同位素表示成了与同时代地幔的相对偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$,根据不同类型岩石铅的资料和已知成因类型矿石铅资料,提出了不同成因类型

的 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 变化范围和成因分类图解。计算得到阿奇山铅锌矿床矿石和围岩铅与同时代地幔的相对偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ (表2),并投影到 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成分成因图解(图8)中。矿石和围岩样品均投到地壳与地幔混合的俯冲带铅(岩浆作用)范围内,且靠近造山带铅范围,这一特征同Zartman铅构造模式图中样品的分布特征一致。铅同位素的特征值揭示了阿奇山铅锌矿床成矿物质来源具有壳幔混合特征,并与岩浆活动密切相关。

4.3 矿床成因浅析

阿奇山铅锌矿床为一新发现矿床,研究资料较为欠缺,因此,对于阿奇山铅锌矿床的成因仍有争议。仇银江等(2015)依据阿奇山-雅满苏-沙泉子带成矿规律和阿奇山铅锌矿床地质特征,认为阿奇山矿床为VMS型铅锌(铜)矿床。夏冬等(2018)依据矿床地质特征、成矿物质来源以及成矿时代,认为阿奇山铅锌矿床是与小东山黄铁矿化花岗斑岩体相关的火山沉积-热液叠加改造型铅锌矿。也有学者依据围岩蚀变类型,矿体产出形态等因素认为阿奇山铅锌矿床为矽卡岩型或层控矽卡岩型矿床(学者讨论结果)。

前人研究表明石炭纪东天山正处于后造山板内伸展、拉张环境(罗婷,2013;毛景文等,2002),在此地质背景下小东山火山机构可能是在晚石炭世后造山板内拉张环境下,软流圈物质上涌致使壳幔物质迅速熔融,造成小东山火山机构基性-酸性火山岩并存以及花岗斑岩顺层侵入的现状。同时成矿流体伴随岩浆

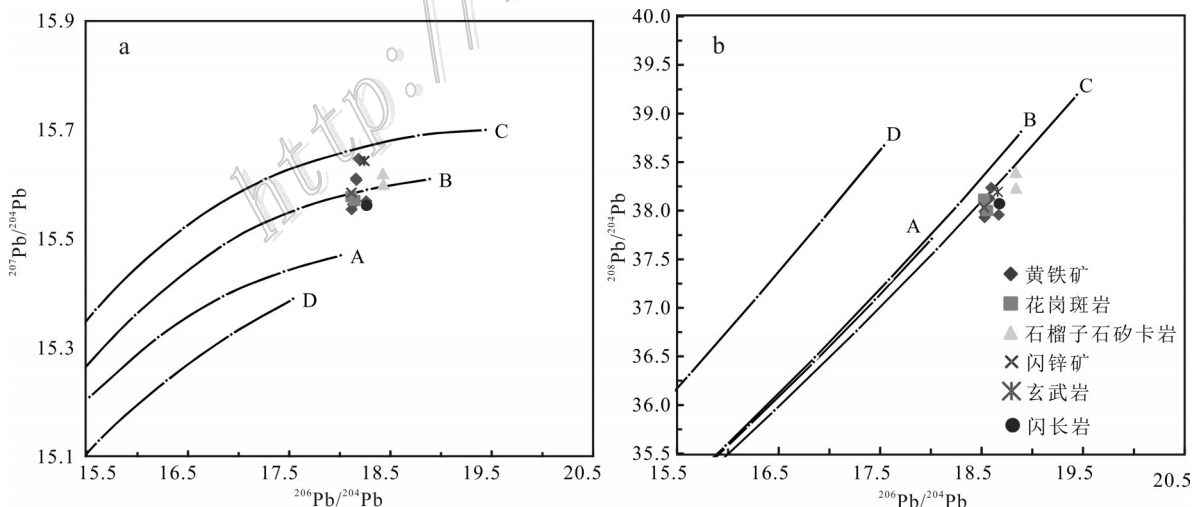


图7 阿奇山铅锌矿床矿石铅同位素构造模式图(据Zartman et al., 1981)

A—地幔;B—造山带;C—上地壳;D—下地壳

Fig. 7 Diagrams showing evolutionary tectonic settings of ore and rock lead isotopes from Aqishan Zn-Pb deposit (after Zartman et al., 1981)

A—Mantle; B—The orogenic belt; C—The upper crust; D—The lower crust

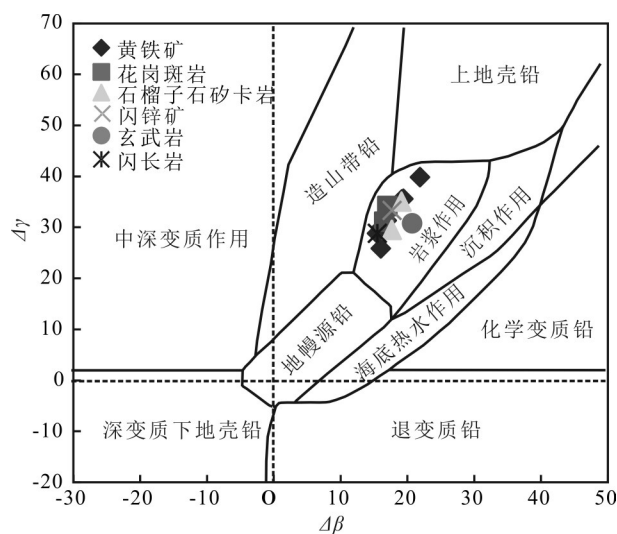


图8 阿奇山铅锌矿床铅同位素 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解

Fig. 8 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ diagram for genetic classification based on Pb isotope compositions of the Aqishan Pb-Zn deposit

活动,顺着上石炭统雅满苏组地层贯入,致使矿体受地层控制明显,并形成了以细脉状、浸染状为主的矿化类型,指示阿奇山铅锌矿床的形成与小东山火山机构密切相关。此外,在矿相学方面,阿奇山矿床的铅锌矿物主要以填充、交代为主,发育于石榴子石的晶体间隙中(图5b~f),石榴子石的形成早于热液交代作用;矿石硫、铅同位素分析结果显示, $\delta^{34}\text{S}$ 具有岩浆硫特征,铅源为壳幔混合铅,并与岩浆活动有密切联系。综上所述,笔者认为阿奇山铅锌矿床可能为火山热液型矿床。

5 结论

(1) 阿奇山铅锌矿床金属硫化物同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.6‰ ~ -7.3‰ 之间,峰值介于 -3‰ ~ -4‰ ,成矿系统内 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$,分馏基本平衡,为深源岩浆硫,而 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 表现出较小的负值,可能是成矿流体在运移的过程中加入了围岩硫或生物硫。

(2) 阿奇山铅锌矿 14 件矿石围岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值的变化范围分别为 18.112~18.427、15.553~15.646 和 37.980~38.441,变化范围较小,指示矿床中围岩和矿石的铅源单一;根据铅构造模式图解及参数综合分析,矿石和围岩铅同时具有幔源和壳源的特征,阿奇山铅锌矿床成矿物质来源于壳幔混合物,并与岩浆活动密切相关。

(3) 通过矿床地质特征、成矿物质来源、矿化蚀变信息,认为阿奇山铅锌矿床与小东山火山机构密切相关,可能为火山热液型矿床。

致谢 由衷感谢匿名审稿人对本文提出的宝贵意见和建议,使笔者受益匪浅。野外工作期间得到新疆地质调查院杨屹、辛江、夏冬、张小军和刘超工程师的大力帮助和支持,在此一并致谢。

References

- Chen G. 2008. The mineralization characteristics and prospecting indicator of LinYun copper deposit, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 26(4): 356-362(in Chinese with English abstract).
- Chen W, Zhang Y, Qin K Z, Wang L Q, Wang Y T and Liu X Y. 2007. Study on the age of the shear zone-type gold deposit of East Tianshan, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 2007-2016(in Chinese with English abstract).
- Chen Y C, Liu D Q, Ying L J, Wang D H and Tang Y L. 2009. A comparative study of Jueluotage metallogenic belt and south altay metallogenic belt in Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 28(1): 1-5(in Chinese with English abstract).
- Chen Y L, Bao C and Li Z. 2015. Work program of investigation and evaluation on copper polymetallic-Research on volcanic rocks and typical mineral deposit of Aqishan, East Tianshan Mountains, Xinjiang[R]. Beijing: China University of Geosciences. Unpublished report.7-17(in Chinese).
- Claypool G E, Holser W T, Kaplan I R, Sakai H and Zak I. 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation[J]. Chemical Geology, 28:199-260.
- Han Q, Zhao T Y, Zheng J H, Li P, Tang Z, Sun Y F and Liu X. 2017. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of granodiorite from the Bailinshan rock body in the Eastern Tianshan Mountains and its geological significance[J]. Xinjiang Geology, 35(4): 435-445(in Chinese with English abstract).
- Li H M, Ding J H, Li L X and Yao T. 2014. The genesis of the skarn and the genetic type of the Yamansu iron deposit, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2477-2489(in Chinese with English abstract).
- Li L F, Zheng Y F and Zhou J B. 2001. 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).
- Li Y L, Yang Z J and Mao G L. 2010. Volcanic rocks and structures in Aqishan area of Shanshan County, Xinjiang[J]. Geology of Shanxi, 28(1): 46-51(in Chinese with English abstract).
- Lu Y F. 2004. Geokit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 33(5): 459-464(in Chinese with English abstract).
- Luo G C, Yang X K and Chen H B. 1999. Establish of Lower Carboniferous Aqishan Formation in Jueluotage zone of Xinjiagn[J]. Jour-

- nal of Xi'an Engineering University, 21(s1): 39-44(in Chinese with English abstract).
- Luo T. 2013. Geochronology, geochemistry of volcanic rocks from the Yamansu Formation in the Eastern Tianshan, Xinjiang: Implication for the closure of the Paleo-Tianshan Ocean[D]. Supervisor: Liao Q A. Wuhan: China University of Geosciences. 44-52(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Yang J M, Han C M and Wang Z L. 2002. Metallogenic systems of polymetallic copper and gold deposits and related metallogenic geodynamic model in Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 27(4): 413-424(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Econ. Geol., 67: 551-578.
- Ohmoto H. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Barnes R D. Geochemistry of hydrothermal ore deposit[M]. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons. 509-567.
- Qin K Z, Fang T H, Wang S L, Zhu B Q, Feng Y M, Yu H F and Xiu Q Y. 2002. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in Eastern Tianshan Mountains, NW-China[J]. Xinjiang Geology, 20(4): 302-307(in Chinese with English abstract).
- Qiu Y J, Tian J T and Li T. 2016. Analysis of geological characteristics of the Fe-Pb-Zn deposits in Jueluotage metallogenic belt, Eastern Tianshan[J]. Mineral Exploration, 7(6): 882-890(in Chinese with English abstract).
- Qiu Y J and Zhang Y H. 2015. Present status of mineral deposit system of metallogenic belt and problems remained in Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Global Geology, 34(3): 625-635(in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Wang L S, Wang Y T and Liu Y L. 2002. Discussion on metallogenic epoch of Tuwu and Yandong porphyry copper deposits in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 21(1): 16-22(in Chinese with English abstract).
- Shen W Z. 1987. Stable isotope geology[M]. Beijing: Atomic Energy Press. 226-230(in Chinese).
- Su C Q, Jiang C Y, Xia M Z, Wei W and Pan R. 2009. Geochemistry and zircons SHRIMP U-Pb age of volcanic rocks of Aqishan Formation in the Eastern Tianshan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 901-915(in Chinese with English abstract).
- Tian J T, Yang Y, Xia D, Tang Y, Liu C, Zhang X J, Xin J, Li D H, Li T and Wang C. 2014. Prospective investigation on copper-lead-zinc deposit of Aqishan, East Tianshan Mountains, Xinjiang[R]. Urumqi: Xinjiang Geological Survey. Unpublished report. 86-133(in Chinese).
- Tian M M, He J G, Zhang S and Gao H L. 2014. The Lithochemical characteristics and tectonic environment of Archie mountain granite pluton, Xinjiang[J]. Uranium Geology, 30(1): 14-21(in Chinese with English abstract).
- Wang H, Feng C Y, Li D X, Li C, Ding T Z and Zhou J H. 2015. Molybdenite Re-Os geochronology and sulfur Isotope geochemistry of the Saishitang copper deposit, Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 89(3): 487-497(in Chinese with English abstract).
- Wang J B, Wang Y W and He Z J. 2006. Ore deposits as a guide to the tectonic in the East Tianshan Mountains, NW China[J]. Geology in China, 33(3): 461-467(in Chinese with English abstract).
- Wang W, Xia F, Chai F M, Wu S J, Li Q, Geng X X and Meng Q P. 2016. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Yamansu Formation in Eastern Tianshan Mountains and their tectonic implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(5): 768-790(in Chinese with English abstract).
- Wu C Z, Zhang Z Z, Khin Zaw, Fernando Della-Pasque, Tang J H, Zheng Y C, Wang C S and San J Z. 2006. Geochronology, geochemistry and tectonic significances of the Hongyuntan granitoids in the Qoltag area, Eastern Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1121-1131(in Chinese with English abstract).
- Wu K X, Hu R Z, Bi X W, Peng J T and Tang Q L. 2002. Ore lead isotope as a tracer for ore-forming material sources: A Review[J]. Geology-Geochemistry, 30(3): 73-81(in Chinese with English abstract).
- Xia D, Peng, Y X, Zhu Z X, Wang J L, Luo Z H, Xin J and Yang Y. 2018. Geology, geochemistry and genesis of the Aqishan Pb-Zn (Cu) deposit in Shanshan County, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 54(1): 41-51(in Chinese with English abstract).
- Xia D, Wang J L, Zhang X J, Yang Y, Liu C, Xin J, Tian J T, Li T, Xia J X, Cao J Y, Fan L S, Hu Z P, Ma H C and Zang Y X. 2015. Investigation and evaluation on copper polymetallic of Aqishan, East Tianshan Mountain, Xinjiang[R]. Urumqi: Xinjiang Geological Survey. Unpublished report. 264p(in Chinese).
- Xiang S H, Cao J H, Xue C J, Zhang X, Li Y F, Li B Q and Wang X Y. 2012. S and Pb Isotope constraints on the ore-forming material sources of the Pb-Zn-Ag Ore deposit in Northern Neixiang, Henan Province[J]. Geoscience, 26(3): 464-470(in Chinese with English abstract).
- Xue W, Xue C J, Li H J, Chi G X and Zeng R. 2012. Sources of the ore-forming material of the Baiyangping poly-metallic deposit in Lanping Basin, Northwestern Yunnan: Constraints from C, H, O, S and Pb isotope Geochemistry[J]. Geoscience, 26(4): 663-672(in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics: The model[J]. Tectonophysics, 75: 135-162.
- Zhang Q, Pan J Y and Shao S X. 2000. An interpretation of ore lead sources from lead isotope compositions of some ore deposit in China[J]. Geochimica, 29(3): 231-237(in Chinese with English abstract).
- Zhang S B. 2017. Geochemical characteristics and genesis of the Aqishan Pb-Zn deposit, Eastern Tianshan, Xinjiang[D]. Supervisor: Chen Y L. Beijing: China University of Geosciences. 35-42(in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F and Chen J F. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 232-240(in Chinese).
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou G F, Jin Z G, Li X B, Ding W and Gu J. 2010. Sources of the ore metals of the Tianqiao Pb-Zn deposit in Northwestern Guizhou Province: Constraints from S, Pb isotope and REE geochemistry[J]. Geological Review, 56(4): 513-524(in

Chinese with English abstract).

- Zhou T F, Yuan F, Zhang D Y, Fan Y, Liu S, Peng M X and Zhang J S. 2010. Geochronology, Tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage Area, Eastern Tianshan, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 478-492(in Chinese with English abstract).
- Zhu B Q. 1998. Theory and application of isotope system in geosciences[M]. Beijing: Seismological Press. 216-235(in Chinese).
- Zhu Z W, Mao G L, Wu L Y and Yin C F. 2006. Definition and significance of the carboniferous Huiyu island arc granite in the Aqishan area, Eastern Tianshan[J]. Geology of Shanxi, 24(1): 21-35(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈刚. 2008. 新疆凌云铜矿成矿特征及找矿标志[J]. 新疆地质, 26(4): 356-362.
- 陈文, 张彦, 秦克章, 王清利, 王义天, 刘新宇. 2007. 新疆东天山剪切带型金矿时代研究[J]. 岩石学报, 23(8): 2008-2014.
- 陈毓川, 刘德全, 应立娟, 王登红, 唐延龄. 2009. 新疆觉罗塔格成矿带与南阿尔泰成矿带的对比研究[J]. 矿床地质, 28(1): 1-5.
- 陈岳龙, 包创, 李兆. 2015. 新疆东天山阿奇山一带铜多金属矿调查评价: 阿奇山地区火山岩及典型矿床研究工作方案[R]. 北京: 中国地质大学. 内部报告. 7-17.
- 韩琼, 赵同阳, 郑加行, 李平, 唐智, 孙耀峰, 刘鑫. 2017. 东天山百灵山岩体花岗岩长岩 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 新疆地质, 35(4): 435-445.
- 李厚民, 丁建华, 李立兴, 姚通. 2014. 东天山雅满苏铁矿床矽木岩成因及矿床成因类型[J]. 地质学报, 88(12): 2477-2489.
- 李龙飞, 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, (1): 61-68.
- 李彦林, 杨志军, 毛归来. 2010. 新疆鄯善县阿奇山一带火山岩特征及构造意义[J]. 陕西地质, 28(1): 46-51.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459-464.
- 罗桂昌, 杨兴科, 程红宾. 1999. 新疆觉罗塔格地区下石炭统阿奇山组的确立[J]. 西安工程学院学报, 21(s1): 39-44.
- 罗婷. 2013. 东天山觉罗塔格带雅满苏组火山岩年代学、地球化学特征及对古天山洋闭合的启示[D]. 导师: 廖群安. 武汉: 中国地质大学. 44-52.
- 毛景文, 杨建明, 韩春明, 王志良. 2002. 东天山同多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型[J]. 地球科学, 27(4): 413-424.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. 新疆地质, 20(4): 302-307.
- 仇银江, 田江涛, 李涛. 2016. 东天山觉罗塔格成矿带铁铅锌矿床成矿地质特征分析[J]. 矿产勘查, 7(6): 882-890.
- 仇银江, 张元厚. 2015. 新疆东天山成矿带成矿系统研究现状及存在问题[J]. 世界地质, 34(3): 625-635.
- 芮宗瑶, 王龙生, 王义天, 刘玉琳. 2002. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床地质时代讨论[J]. 矿床地质, 21(1): 16-22.
- 沈渭洲. 1987. 稳定同位素地质[M]. 北京: 原子能出版社. 226-230.
- 苏春乾, 姜常义, 夏明哲, 魏巍, 潘荣. 2009. 北天山东段阿奇山组火山岩的地球化学特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 25(4): 901-915.
- 田江涛, 杨屹, 夏冬, 唐毅, 刘超, 张小军, 辛江, 李大海, 李涛, 王成. 2014. 新疆鄯善阿奇山一带铜铅锌矿远景调查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质调查院. 内部报告. 86 页.
- 田明明, 何建国, 张松, 高洪雷. 2014. 新疆阿奇山花岗岩体岩石地球化学特征及其形成构造环境[J]. 铀矿地质, 30(1): 14-21.
- 王辉, 丰成友, 李大新, 李超, 丁天柱, 周建厚. 2015. 青海赛什塘铜矿床辉钨矿 Re-Os 年代学及硫同位素地球化学研究[J]. 地质学报, 89(3): 487-497.
- 王京彬, 王玉往, 何志军. 2006. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. 中国地质, 33(3): 461-467.
- 王雯, 夏芳, 柴凤梅, 吴生军, 李强, 耿新霞, 孟庆鹏. 2016. 东天山石炭纪雅满苏组火山岩特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 35(5): 768-790.
- 吴昌志, 张尊忠, Khin Zaw, Fernando Della-Pasque, 唐俊华, 郑远川, 汪传胜, 三金柱. 2006. 东天山觉罗塔格红云滩花岗岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1121-1131.
- 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.
- 夏冬, 彭玉旋, 朱志新, 王君良, 罗照华, 辛江, 杨屹. 2018. 新疆鄯善县阿奇山铅锌(铜)矿床地质地球化学与成因探讨[J]. 地质与勘探, 54(1): 41-51.
- 夏冬, 王君良, 张小军, 杨屹, 刘超, 辛江, 田江涛, 李涛, 夏建勋, 曹江宇, 范磊善, 胡尊平, 马宏超, 张玉欣. 2015. 新疆东天山阿奇山一带铜多金属矿调查评价[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质调查院. 内部报告. 264 页.
- 向世红, 曹继虎, 薛春纪, 张旭, 李永峰, 李丙奇, 王新宇. 2012. 河南内乡北部铅锌银矿床成矿物质来源的 S、Pb 同位素制约[J]. 现代地质, 26(3): 464-470.
- 薛伟, 薛春纪, 李洪军, 池国祥, 曾荣. 2012. 滇西北兰坪盆地白秧坪多金属矿床成矿物质来源: C、H、O、S 和 Pb 同位素制约[J]. 现代地质, 26(4): 663-672.
- 张乾, 潘家永, 邵树勋. 2000. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. 地球化学, 29(3): 231-237.
- 张少博. 2017. 新疆东天山阿奇山铅锌矿地球化学特征及成因(硕士学位论文)[D]. 导师: 陈岳龙. 北京: 中国地质大学(北京), 35-42.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1-247.
- 周家喜, 黄志龙, 周国富, 金中国, 李晓彪, 丁伟, 谷静. 2010. 黔西北赫章天桥铅锌矿床成矿物质来源: S、Pb 同位素和 REE 制约[J]. 地质论评, 56(4): 513-524.
- 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建慎. 2010. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. 岩石学报, 26(2): 478-492.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京: 地震出版社. 216-235.
- 朱增伍, 毛归来, 吴丽云, 尹翠芬. 2006. 东天山阿奇山地区石炭纪汇宇岛弧花岗岩的厘定及意义[J]. 陕西地质, 24(1): 21-35.