

新疆西天山吐拉苏铅锌矿床的成因

——年代学、流体包裹体和硫铅同位素的约束

苏 静¹, 彭义伟^{1,2}, 顾雪祥^{1,2}, 章永梅², 王佳琳², 刘瑞萍³

(1. 成都理工大学 地球科学学院 自然资源部构造成矿成藏重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘 要: 吐拉苏铅锌矿床是新疆西天山吐拉苏盆地中的代表性贱金属矿床之一。矿体赋存于晚古生代大哈拉军山组凝灰岩中,受南北向张性断裂控制。矿石中主要矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、石英和方解石,发育晶洞状、晶簇状、梳状、角砾状等代表开放空间的充填构造。赋矿凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 372.5 ± 4.3 Ma,形成于北天山洋向伊犁-中天山板块之下俯冲的背景。含矿石英中发育大量富液相水两相包裹体[均一温度和盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 分别集中于 $130 \sim 210^\circ\text{C}$ 和 $8.1\% \sim 16.9\%$ 之间],偶见富气相水两相包裹体、纯气相水包裹体和含固相子晶三相包裹体。流体包裹体和矿石组构特征综合表明,流体沸腾及其伴随的温度降低是 Pb、Zn 沉淀的重要机制。方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 范围为 $-2.2\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$,显示出岩浆硫的特征。方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 $18.208 \sim 18.264$ 、 $15.588 \sim 15.617$ 和 $37.954 \sim 38.088$,与区域上金矿床和赋矿火山岩相似,指示成矿物质来源于赋矿火山岩。综合矿床地质、流体包裹体和同位素组成特征,认为吐拉苏矿床属于中硫型浅成低温热液贱金属矿床。吐拉苏盆地今后找矿勘查既要注意在已知的铅锌矿床附近寻找低硫型浅成低温热液金矿床,同时又要注意低硫型浅成低温热液金矿床深部及其周缘也可能发育中硫型的贱金属矿化。

关键词: 成矿时代; 流体包裹体; 同位素; 中硫型浅成低温热液矿床; 吐拉苏铅锌矿床; 西天山

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)03-0379-23

Ore genesis of the Tulasu Pb-Zn deposit in the Western Tianshan, Xinjiang: Constraints from the geochronology, fluid inclusions and S-Pb isotopes

SU Jing¹, PENG Yi-wei^{1,2}, GU Xue-xiang^{1,2}, ZHANG Yong-mei², WANG Jia-lin² and LIU Rui-ping³

(1. College of Earth Sciences and MLR Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: The Tulasu Pb-Zn deposit is one of the typical base metal deposits in the Tulasu basin, Western Tianshan, Xinjiang. The outcropped orebody is hosted in the Late Paleozoic Dahalajunshan Formation tuff and controlled by the N-S trending tensional fault. The minerals in the ores mainly consist of galena, sphalerite, chalcopyrite, pyrite, quartz and calcite. The ores are characterized by the occurrence of filling textures in open space, including cave, drusy, comb and breccia textures. LA-ICP-MS U-Pb dating on zircons in ore-hosting tuff gave

收稿日期: 2022-08-24; 接受日期: 2023-04-03; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130804, 41702081), 国家重点研发计划项目(2018YFC0604003)

作者简介: 苏 静(1987-), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 627098882@qq.com; 通讯作者: 彭义伟, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事矿床学及矿床学地球化学和矿产勘查理论研究, E-mail: yiwei_peng@163.com.

weighted average age of 372.5 ± 4.3 Ma, indicating that the tuff resulted from the subduction of North Tianshan Ocean beneath the Yili-Central Tianshan Plate. A large amount of liquid-rich two-phase aqueous inclusions are developed in the ore-bearing quartz, with homogenization temperatures and salinities in the ranges of $130 \sim 210^\circ\text{C}$ and $8.1\% \sim 16.9\%$ NaCl_{eq} , respectively. In addition, vapor-rich two-phase aqueous inclusions, vapor mono-phase inclusions and daughter mineral-bearing three-phase inclusions are locally observed. Both the fluid inclusions and ore textures show that fluid boiling and subsequent temperature decrease could be the important mechanism for the Pb-Zn precipitation. Galena has narrow $\delta^{34}\text{S}$ range of $-2.2\% \sim 0.5\%$, indicating a contribution of magmatic-sourced sulfur. The $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios of galena range from 18.208 to 18.264, 15.588 to 15.617 and 37.954 to 38.088, respectively, similar to those of gold deposits and ore-hosting volcanic rocks in the region, indicating that the ore-forming metals were sourced from the Dahalajunshan Formation volcanic rocks. Based on the information from geology, fluid inclusions and isotopes, the Tulasu Pb-Zn deposit is considered to be an intermediate-sulfidation epithermal deposit. For the further prospecting in the Tulasu basin, in addition to the low-sulfidation Au deposits that may occur near the identified Pb-Zn deposits, intermediate-sulfidation base metal mineralization should also be paid attention underneath the discovered low-sulfidation Au deposit and its vicinity.

Key words: mineralization age; fluid inclusions; isotope; intermediate-sulfidation epithermal deposits; Tulasu Pb-Zn deposit; Western Tianshan

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42130804; 41702081); National Key R & D Project (2018YFC0604003)

浅成低温热液矿床指形成于陆相火山岩中、与岩浆有关的热液系统在浅部作用形成的矿床,其成矿流体多为静水压力下的低温($150 \sim 300^\circ\text{C}$)、低盐度流体,形成深度通常不超过潜水面以下 1.5 km (Lindgren, 1933; Hedenquist *et al.*, 2000),代表了斑岩成矿系统浅部的端员部分。浅成低温热液矿床是贵金属(Au-Ag)和贱金属(Pb-Zn-Cu)的主要来源。根据蚀变类型、矿物组合、矿化元素、成矿流体来源和性质及形成环境的差异,浅成低温热液矿床在早期划分为两个矿化端员:低硫型(冰长石-绢云母型)和高硫型(高岭石-明矾石型)(Bonham, 1986; White and Hedenquist, 1995; Pirajno and Bagas, 2002)。后来,Hedenquist等(2000)提出在低硫型和高硫型两个端员之间增设一种过渡型的中硫型贱金属(Pb-Zn为主)矿床。低硫型浅成低温热液矿床是由岩浆驱动的还原-近中性流体在浅表作用所形成的矿床,以发育绢云母-冰长石蚀变矿物和低硫态硫化物为典型特征,Cu含量通常较低。在空间上低硫型矿床远离火山口,与深部斑岩体相距较远。相对于低硫型矿床,高硫型浅成低温热液矿床在空间上与深部斑岩体关系更为紧密,常位于斑岩型矿化的顶部或破火山口附近。该类型矿床成矿流体中的岩浆热液组分明显增大,具有相对氧化、酸性特质($\text{pH} \leq 2$),因此常常形成高硫态的硫化物组合(黄铁

矿、硫砷铜矿/四方硫砷铜矿、黝铜矿/砷黝铜矿等)和高级泥化蚀变晕(高岭石、明矾石、迪开石、叶腊石等)(Kerrick *et al.*, 2000)。在蚀变带中心,通常发育由酸性流体淋滤而形成的多孔状石英。中硫型矿床空间上既可以发育于高硫型矿床外侧,又可以与低硫型矿床共生或伴生(常位于低硫型贵金属矿化更深的位置),主矿体赋存在古潜水面以下 $300 \sim 800\text{ m}$ 处(Camprubí and Albinson, 2007)。中硫型浅成低温热液矿床多产于挤压岛弧及陆内伸展背景下,发育一套中等硫化状态的硫化物矿物组合(黄铁矿-黝铜矿/砷黝铜矿-黄铜矿-低铁闪锌矿)以及锰碳酸盐,硫化物含量较高($5\% \sim 20\%$),富Ag和主要贱金属元素(Pb、Zn、Cu等),Ag/Au值较高(Camprubí and Albinson, 2007; Findley, 2010; Lesage *et al.*, 2013)。由于高、中、低硫型浅成低温热液矿床与斑岩型矿化具有不同的空间-成因联系,因此,对已发现的浅成低温热液矿床成因类型的精确厘定有利于成矿系统的建立和斑岩成矿系统中其他端员矿床的找矿勘查。

西天山位于中亚造山带西南侧(图1a),经历了多期显著的增生造山作用(Windley *et al.*, 1990; Xia *et al.*, 2009)。新疆西天山在晚古生代经历了北天山洋的俯冲消减作用,火山喷发和岩浆侵入活动的广泛发育形成了一系列斑岩型-矽卡岩型-浅成低

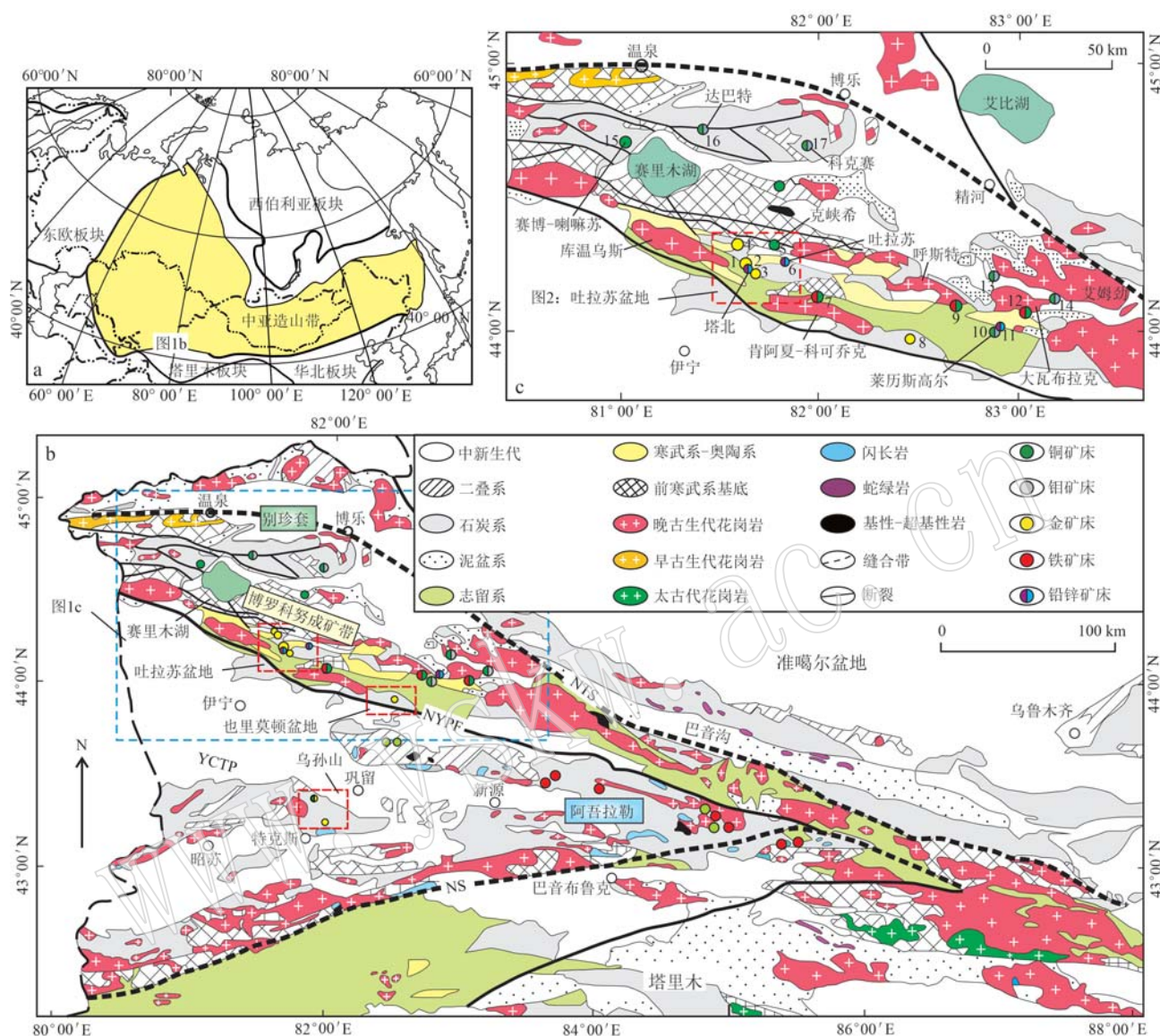


图1 中亚造山带大地构造位置图(a, 据 Long *et al.*, 2011)、中国新疆西天山区域地质图(b, 据 Tang *et al.*, 2010)和博罗科努成矿带区域矿产地质图(c, 据 Tang *et al.*, 2010)

Fig. 1 Tectonic map of the Central Asian Orogenic Belt (a, modified after Long *et al.*, 2011), regional geological map of the Chinese Western Tianshan (b, modified after Tang *et al.*, 2010) and geological map of the Boluokenu Polymetallic Metallogenic Belt showing the locations of the main deposits (c, modified after Tang *et al.*, 2010)

NS—那拉提缝合带; NTS—北天山缝合带; YCTP—伊犁-中天山板块; NYPF—伊犁板块北缘断裂; 1—阿希金矿; 2—塔北铅锌矿; 3—塔吾尔别克金矿; 4—京希-伊尔曼得金矿; 5—克峡希铜矿; 6—吐拉苏铅锌矿; 7—阔库阙科铁铜矿; 8—加曼特金矿; 9—可克萨拉铁铜矿; 10—莱历斯高尔-3571 钼铜矿; 11—七兴铅锌矿; 12—哈勒尕提铁铜矿; 13—东图津铜钼矿; 14—肯等高尔-色勒特果勒铜钼矿; 15—赛博-喇嘛苏铜矿; 16—达巴特铜钼矿; 17—科克赛铜钼矿

NS—Nalati Suture; NTS—North Tianshan Suture; YCTP—Yili-Central Tianshan plate; NYPF—North Yili Plate Fault; 1—Axi Au deposit; 2—Tabai Pb-Zn deposit; 3—Tawuerbike Au deposit; 4—Jingxi-Yelmand Au deposit; 5—Kexiaxi Cu deposit; 6—Tulasu Pb-Zn deposit; 7—Kuokuqueke Fe-Cu deposit; 8—Jiamante Au deposit; 9—Kekesala Fe-Cu deposit; 10—Lailisigao'er-3571 Mo-Cu deposit; 11—Qixing Pb-Zn deposit; 12—Halegati Fe-Cu deposit; 13—Dongtujin Cu-Mo deposit; 14—Kendengao'er-Seleteguole Cu-Mo deposit; 15—Saibo-Lamasu Cu deposit; 16—Dabate Cu-Mo deposit; 17—Kekesai Cu-Mo deposit

温热液矿床(Yakubchuk, 2004; Seltnann and Porter, 2005)。浅成低温热液金矿床集中分布在伊犁地块的南北缘,包括3个集中产地(图1b):①吐拉苏盆地中的阿希、京希-伊尔曼得和塔吾尔别克金矿床;

②也里莫顿盆地中的加曼特和小于赞金矿床; ③乌孙山地区的库茹尔铜金和博古图金矿床。其中,吐拉苏盆地中的浅成低温热液金矿床规模最大、品位最高,包括大型的阿希、京希-伊尔曼得和小型

的塔吾尔别克金矿床。近年来,在吐拉苏盆地中又陆续发现了一些铅锌矿床(点),以塔北和吐拉苏矿床为代表(图 1c、图 2)。值得注意的是,吐拉苏盆地中的金矿床和铅锌矿床均赋存于同一套陆相火山岩中。相对于金矿床,吐拉苏盆地中的铅锌矿床无论是勘查还是科学研究都未受到足够重视,其矿床成因尚不明确,制约了区域上铅锌与金矿化之间成因联系的探索。

塔北铅锌矿床位于阿希金矿床南约 500 m 处,彭义伟等(2014)和 Peng 等(2018, 2023) 对该矿床开展了地质特征和 S-Pb-C-O 同位素的研究,初步判断其属于发育较深的浅成低温热液型贱金属矿化(相对于阿希低硫型浅成低温热液 Au 矿化)。然而,位于吐拉苏盆地东侧的吐拉苏铅锌矿床的研究

目前尚浅,仅黄新等(2014)对该矿床的成矿地质条件和找矿标志开展了初步研究,并认为其属于充填交代的脉状铅锌矿床。因此,对吐拉苏铅锌矿床成因的厘定对于丰富吐拉苏盆地浅成低温热液成矿系统和进一步找矿具有重要意义。本文对吐拉苏铅锌矿床开展了系统的岩矿相鉴定、赋矿火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、流体包裹体和硫化物 S-Pb 同位素分析,旨在揭示其成岩-成矿时代、成矿流体性质、成矿物质来源、沉淀机制和矿床成因。

1 区域地质背景

吐拉苏盆地处于伊犁-中天山板块北缘(图 1b),其南北侧的界线分别为 NW-SEE 走向的伊犁

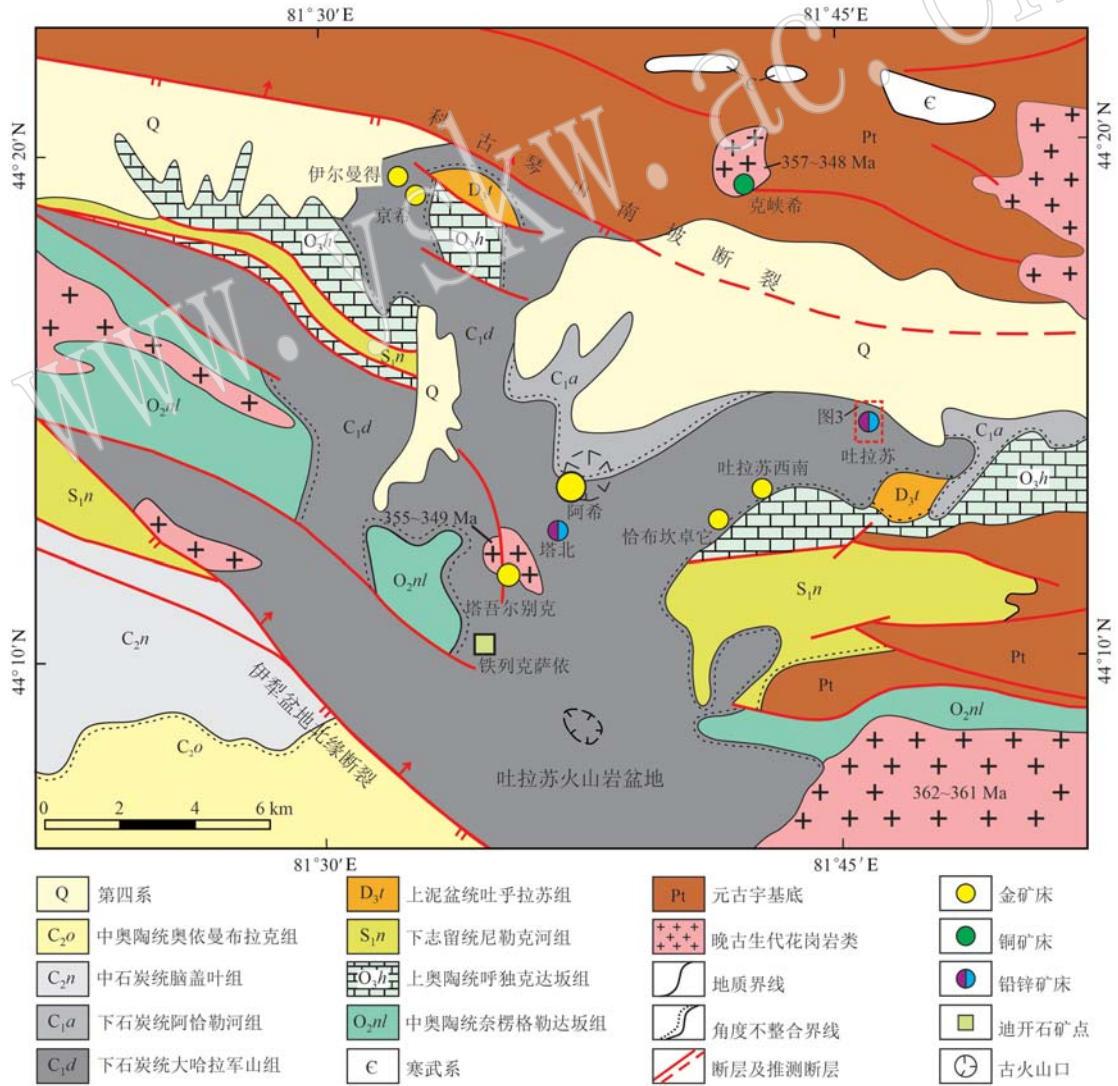


图 2 吐拉苏盆地地质图(据翟伟等, 2010 修改)
Fig. 2 Geologic map of the Tulasu Basin (modified after Zhai Wei et al. , 2010)

盆地北缘断裂和科古尔琴山南坡断裂(图2)。科古尔琴山断裂出露长80 km,对研究区地层、岩浆活动、成矿作用起着明显控制作用。伊犁盆地北缘断裂向北倾,倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$,具有压扭性质,沿断裂带形成数十米至1 km的挤压破碎带。

吐拉苏盆地基底由下部的前震旦纪浅变质岩和上部的加里东期末变质沉积岩组成。基底下部由中元古界蓟县系库木契克群(Jxk)和新元古界青白口系开尔塔斯组(Qnk)组成,均为一套浅变质的碎屑岩-碳酸盐岩建造。基底上部包括中奥陶统奈楞格勒达坂组(O_2nl)凝灰质钙质粉砂岩、上奥陶统呼独克达坂组(O_3h)灰岩夹少量长石砂岩、下志留统尼勒克河组(S_1n)的上部砂岩夹灰岩和下部火山碎屑岩及硅质岩、上泥盆统吐乎拉苏组(D_3t)石英砂岩和砂砾岩。盆地盖层包括下石炭统大哈拉军山组(C_1d)陆相中酸性火山岩建造和阿恰勒河组(C_1a)滨-浅海相碎屑岩为主的沉积建造,二者呈角度不整合接触。

大哈拉军山组是吐拉苏火山岩盆地内金铅锌矿床的主要赋矿地层(图2),由砾岩段(C_1d^1)、酸性凝灰岩段(C_1d^2)、下安山岩段(C_1d^3)、火山碎屑岩段(C_1d^4)和上安山岩段(C_1d^5)5个岩性段组成。除砾岩段和下安山岩段外,其余3个岩性段均有浅成低温热液金铅锌矿床的产出。其中,上安山岩段是阿希金矿床、塔吾尔别克金矿床和塔北铅锌矿床的重要赋矿层位,吐拉苏铅锌矿床产于火山碎屑岩段中,京希-伊尔曼得金矿床层状矿体则产于酸性凝灰岩段及其与上奥陶统呼独克达坂组灰岩之间的不整合面中(图2)。

吐拉苏盆地周缘有大量的花岗岩类侵入体出露。盆地北部的克峡希花岗岩类小岩体群(357~348 Ma)侵入至前寒武系地层中,发育斑岩型铜金矿化(薛春纪等,2013)。吐拉苏盆地南东侧的科可乔克岩体岩性主要为花岗闪长岩和二长花岗岩(363.4~362.3 Ma;顾枫华等,2017),在其与下志留统尼勒克河组沉积岩接触带中形成阔库阙科砂卡岩型铁铜矿床(彭义伟,2015;Gu *et al.*, 2022)。盆地北东侧的吐拉苏岩体由石英闪长斑岩(375.4 Ma)、辉石闪长岩(360.3 Ma)和花岗岩(305 Ma)组成(Zhang *et al.*, 2020)。盆地内部仅在塔吾尔别克金矿区有小面积花岗斑岩(349~355 Ma; Tang *et al.*, 2013;

Zhao *et al.*, 2014b)出露,并发育金矿化和绢英岩化蚀变。

2 矿床地质特征

吐拉苏铅锌矿床位于吐拉苏盆地东侧(图2),矿区出露的最老地层为上泥盆统吐乎拉苏组,岩性为砾岩与细砂岩互层(图3)。由砾岩和火山碎屑岩组成的大哈拉军山组火山岩在该区域广泛出露。第一岩性段(C_1d^1)砾岩局部少量出露,分布于矿区西南部;第四岩性段(C_1d^4)火山碎屑岩面积最广,大致沿南北向分布,主要由流纹岩组成,是主要的赋矿岩层;矿区北部和中部出露有少量安山岩,东南部出露有少量角砾流纹岩和硅化流纹岩。

吐拉苏矿区内的铅锌矿体受南北向弧形断层(F_1)控制,以陡立的石英-硫化物脉形式产出(倾角 $65^{\circ}\sim 80^{\circ}$),倾向整体向东,呈似层状、透镜状分布。矿体长约430 m,宽度变化较大(一般厚2~4 m),北端厚度较大,往南逐渐变薄,铅和锌的品位分别为2.84%~4.95%(平均3.90%)和1.15%~9.00%(平均5.10%)(黄新等,2014)。矿石中金属矿物主要为自形粗粒的方铅矿,另外含有少量黄铜矿、黄铁矿和闪锌矿;非金属矿物主要为自形粗粒石英,其次为少量方解石(图4)。矿石以发育自形-半自形晶结构,块状、浸染状、脉状、网脉状、角砾状、晶簇状等开放空间充填构造为特征(图4)。

基于矿物组合、脉体间穿插和交代(胶结)关系,成矿过程大致可分为3个阶段(图5):石英/玉髓阶段(I)、石英-硫化物阶段(II)和石英-方解石阶段(III)。第I阶段主要发育灰白色的石英或玉髓,这些石英或玉髓通常被后来形成的石英和硫化物所穿插或交代(图4c、4g)。第II阶段主要发育石英和方铅矿,其次是黄铜矿、黄铁矿和闪锌矿,方铅矿以浸染状(图4b)或脉状产出于石英中(图4c);此外,第II阶段的石英和方铅矿局部交代第I阶段的石英和蚀变围岩(图4g),或被第III阶段的石英胶结(图4h)。第III阶段发育自形粗粒状的石英,少量方解石充填于晶簇状石英的孔洞内(图4j),该阶段的石英和方解石通常交代第II阶段的石英和方铅矿碎块(图4h),或者穿插第II阶段的石英(图4i)。

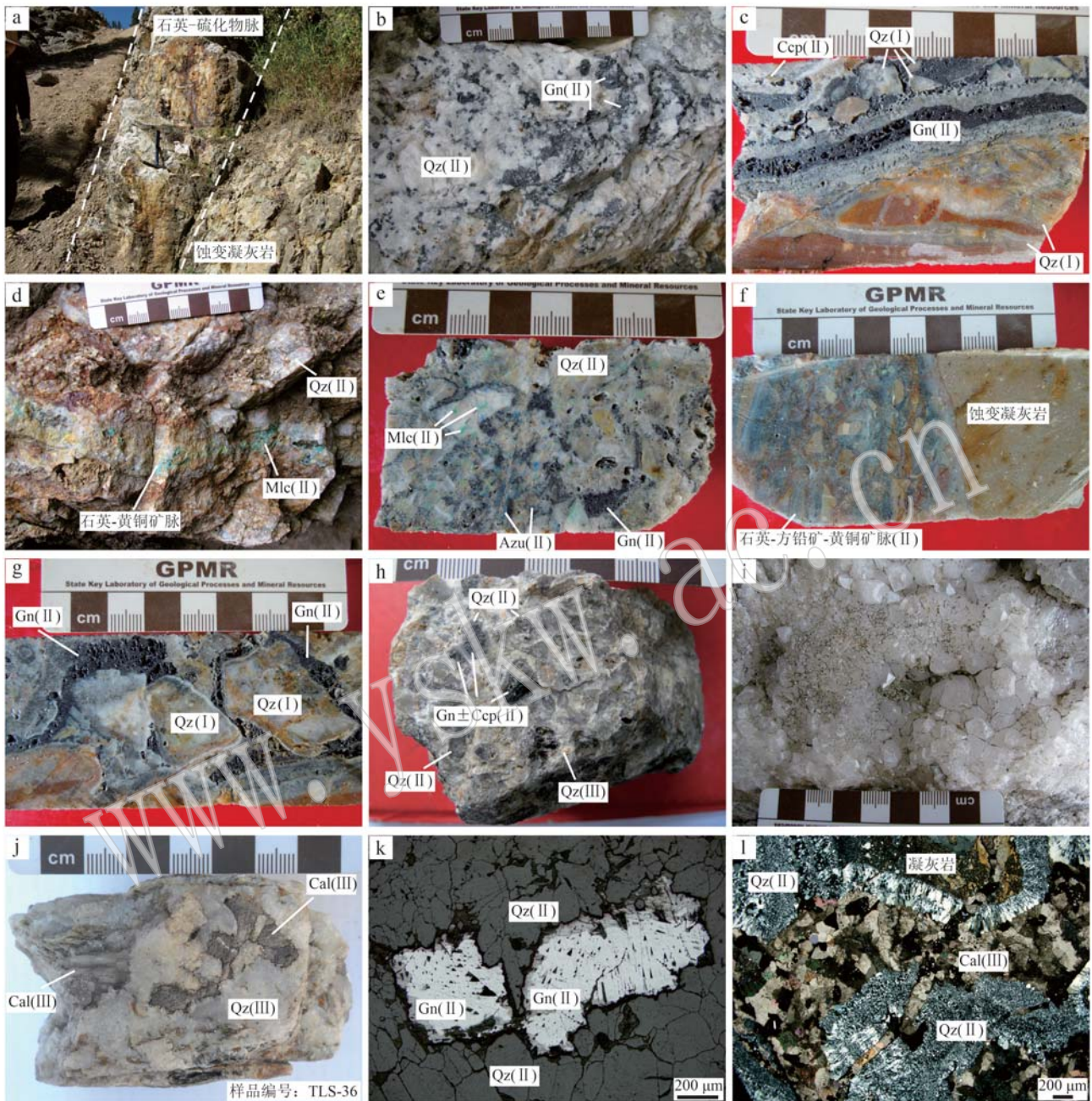


图4 吐拉苏铅锌矿床典型矿石特征

Fig. 4 Characteristics of typical ores in the Tulasu Pb-Zn deposit

a—陡立的石英-硫化物矿体; b—方铅矿在石英脉中浸染状、团块状分布; c—蚀变围岩和早阶段石英角砾被石英-方铅矿胶结; d—石英脉中黄铜矿表生过程中被氧化后形成孔雀石; e—石英-方铅矿-黄铜矿脉, 部分黄铜矿氧化成孔雀石和蓝铜矿; f—蚀变凝灰岩破碎成角砾后被石英-硫化物胶结形成角砾状构造; g—晚阶段石英环绕早阶段石英角砾生长, 然后方铅矿充填于剩余空间; h—烟灰色含硫化物石英被乳白色石英胶结; i—自形粗粒的石英单向生长形成簇状构造; j—石英-方解石脉, 其中方解石充填于石英晶洞中; k—方铅矿充填于石英晶洞中(反射光); l—凝灰岩和石英角砾同时被方解石脉胶结、穿插(正交偏光); Qz—石英; Cal—方解石; Gn—方铅矿; Ccp—黄铜矿; Mlc—孔雀石; Azu—蓝铜矿

a—quartz-sulfide orebody with steep angle; b—galena is disseminated and agglomerated in quartz vein; c—fragments of altered rocks and early-stage quartz breccia are cemented by later quartz and galena; d—chalcopyrite in quartz vein is oxidized to form malachite during supergene; e—quartz-galena-chalcopyrite vein, with chalcopyrite partially oxidized into malachite and azurite; f—altered tuff is broken into breccia and cemented by quartz and sulfides, forming breccia structure; g—the late-stage quartz grows around the early-stage quartz breccia, with galena filling in the residual space; h—smoky-gray quartz containing sulfides cemented by milky-white quartz; i—euhedral coarse-grained quartz grows undirectionally to form cluster structure; j—quartz-calcite vein, with calcite filling in quartz crystal cavity; k—galena filling in the quartz crystal cavity (reflected light); l—tuff and quartz breccia are cemented and crosscut by calcite vein (cross-polarized light); Qz—quartz; Cal—calcite; Gn—galena; Ccp—chalcopyrite; Mlc—malachite; Azu—azurite

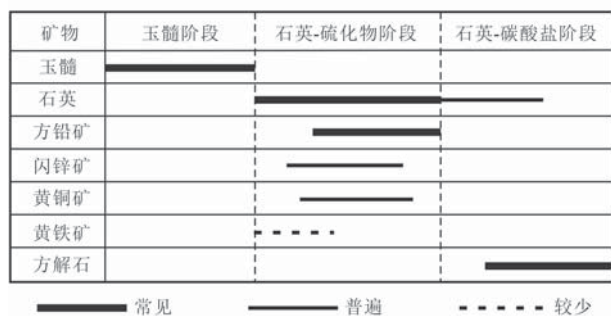


图5 吐拉苏铅锌矿床矿物生成顺序图

Fig. 5 Paragenetic sequence of ore and gangue minerals in the Tulasu Pb-Zn deposit

拍照和 U-Pb 定年。

锆石 U-Pb 同位素测定在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析室完成。实验仪器由美国产 GeoLas 193 激光剥蚀系统(LA)和美国 Thermo Fisher X Series II 型四级杆等离子质谱(ICP-MS)联机组成。由于火山岩中锆石粒径相对较小,因此激光剥蚀束斑直径选择 32 μm ,脉冲为 8 Hz。剥蚀后的锆石粉末通过 He 气作载气、Ar 气为补偿气(调节灵敏度)传送至 ICP-MS 中进行微量元素和 U-Pb 同位素的测定。锆石微量元素含量测定的外标为美国国家标准参考物质 NIST610。标准锆石 91500 和 GJ-1 分别作为定年外标和监控样品。测试过程中,测定 5 个样品点前后测定两次标准锆石 91500。样品点数据采集时间为 100 s/点,其中前 20 s 为气体背景采集时间。测试获得的离线数据采用 ICPMS-DataCal 软件进行调整和处理,数据处理过程中尽量保证样品点的数据完整和较高的谐和度; $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄为普通铅校正后的数据(Andersen, 2002); U-Pb 谐和曲线采用 Isoplot 4.15 程序进行绘制(Ludwig, 2003)。

3.2 流体包裹体

选取石英-硫化物阶段(II)的 5 件石英和石英-碳酸盐阶段(III)的 1 件方解石样品两面抛光磨制成包裹体片,具体采样位置见图 3。流体包裹体的镜下岩相学观察和冷热台显微测温在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析室完成。冷热台型号为英国产的 Linkam THMSG-600,测温范围为-196~+600℃,测试温度在 30℃ 以下和以上时的测试精度分别为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

3.3 S-Pb 同位素

用于 S-Pb 同位素分析的方铅矿采于地表的石英-硫化物脉,采样位置见图 3。由于矿石中硫化物以方铅矿为主,其他硫化物(黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿)含量较少,因此本文仅对方铅矿开展了 S-Pb 同位素测试工作。对矿石进行手工逐级破碎,过筛选出 60~80 目的方铅矿单矿物。然后人工在双目镜下挑选出不含杂质(如石英)的方铅矿单矿物(纯度 >99%),放至玛瑙钵中研磨至没有颗粒感为止(200 目以下)。

方铅矿的 S-Pb 同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。硫同位素的分析过程为:将方铅矿粉末与 Cu_2O 按一定比例研磨、混合均匀后用冷冻法收集氧化形成的 SO_2 ,将其送至 MAT251 气体同位素质谱仪进行测试。测试结果以 V-CDT 为标准,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。铅同位素分析仪器型号为 ISOPROBE-T(对 1 μg 的铅,测量精度为 $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} < 0.05\%$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \leq 0.005\%$),其测试流程为:称取适量的方铅矿粉末放入聚四氟乙烯坩埚中,加入混合酸溶样对样品进行分解,将其蒸干后再加入 HCl 溶解、蒸干,最后加入 0.5 mol/L 的 HBr 溶液溶解样品;随后 Pb 的分离过程是将溶解的样品放入预先处理好的强碱性阴离子交换树脂中,先用 0.5 mol/L 的 HBr 溶液淋洗树脂,再用 2 mol/L 的 HCl 溶液淋洗树脂,最后用 6 mol/L 的 HCl 溶液解脱,将解脱的溶液蒸干后备质谱测量。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 同位素测年

锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1,晶屑凝灰岩中锆石大多数为无色透明,整体呈短柱状,粒径较为稳定、变化不大(多介于 80~150 μm),长宽比介于 1:1~2.5:1(图 6c);Th 含量在 $104 \times 10^{-6} \sim 452 \times 10^{-6}$ 之间,U 含量在 $142 \times 10^{-6} \sim 688 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U 值介于 0.43~0.90 之间。16 个单颗粒锆石 U-Pb 年龄中,1 颗捕获锆石的 ^{206}Pb - ^{238}U 表面年龄为 524 Ma,其余 15 颗锆石具有相对集中的 ^{206}Pb - ^{238}U 表面年龄(363~385 Ma)。谐和度大于 90% 的 13 测点落在谐和线上及其附近(图 6d),其交点年龄和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 $371.4 \pm 3.8 \text{ Ma}$ (MSWD=1.3) 和 $372.5 \pm 4.3 \text{ Ma}$ (MSWD=1.4)。

表 1 吐拉苏铅锌矿床赋矿凝灰岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the host tuff from the Tulasu Pb-Zn deposit

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma		谐和度/%
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
13TLS-1-1	151	168	0.90	0.053 5	0.002 9	0.444 2	0.025 9	0.059 7	0.001 2	374	7.5	99
13TLS-1-6	452	605	0.75	0.055 8	0.002 1	0.473 7	0.018 2	0.061 1	0.001 3	382	7.6	97
13TLS-1-7	374	636	0.59	0.056 7	0.002 0	0.481 7	0.017 6	0.060 8	0.001 0	381	5.8	95
13TLS-1-10	257	462	0.56	0.056 1	0.002 2	0.482 7	0.020 4	0.061 5	0.001 2	385	7.0	96
13TLS-1-12	397	610	0.65	0.057 7	0.002 6	0.468 5	0.018 4	0.059 3	0.001 3	371	7.7	95
13TLS-1-13	282	352	0.80	0.059 0	0.003 5	0.503 2	0.029 1	0.061 2	0.000 9	383	5.6	92
13TLS-1-14	357	623	0.57	0.052 8	0.002 2	0.431 7	0.016 6	0.058 8	0.000 9	368	5.2	99
13TLS-1-15	411	688	0.60	0.064 7	0.002 7	0.537 4	0.023 2	0.059 0	0.001 1	370	6.5	83
13TLS-1-16	198	416	0.48	0.059 9	0.003 0	0.497 3	0.024 3	0.059 8	0.001 0	375	6.2	90
13TLS-1-18	314	495	0.63	0.053 7	0.002 2	0.436 6	0.016 6	0.058 3	0.000 8	365	4.7	99
13TLS-1-19	402	628	0.64	0.052 7	0.002 1	0.435 2	0.016 4	0.058 8	0.000 8	368	4.8	99
13TLS-1-20	113	142	0.80	0.057 4	0.004 5	0.454 6	0.033 5	0.057 9	0.001 4	363	8.3	95
13TLS-1-24	104	241	0.43	0.065 1	0.004 0	0.541 7	0.033 1	0.060 4	0.001 3	378	7.7	84
13TLS-1-25	204	377	0.54	0.054 2	0.002 8	0.438 4	0.021 8	0.058 7	0.000 9	368	5.8	99
13TLS-1-28	288	542	0.53	0.054 9	0.002 1	0.450 4	0.018 2	0.059 0	0.001 0	370	5.8	97

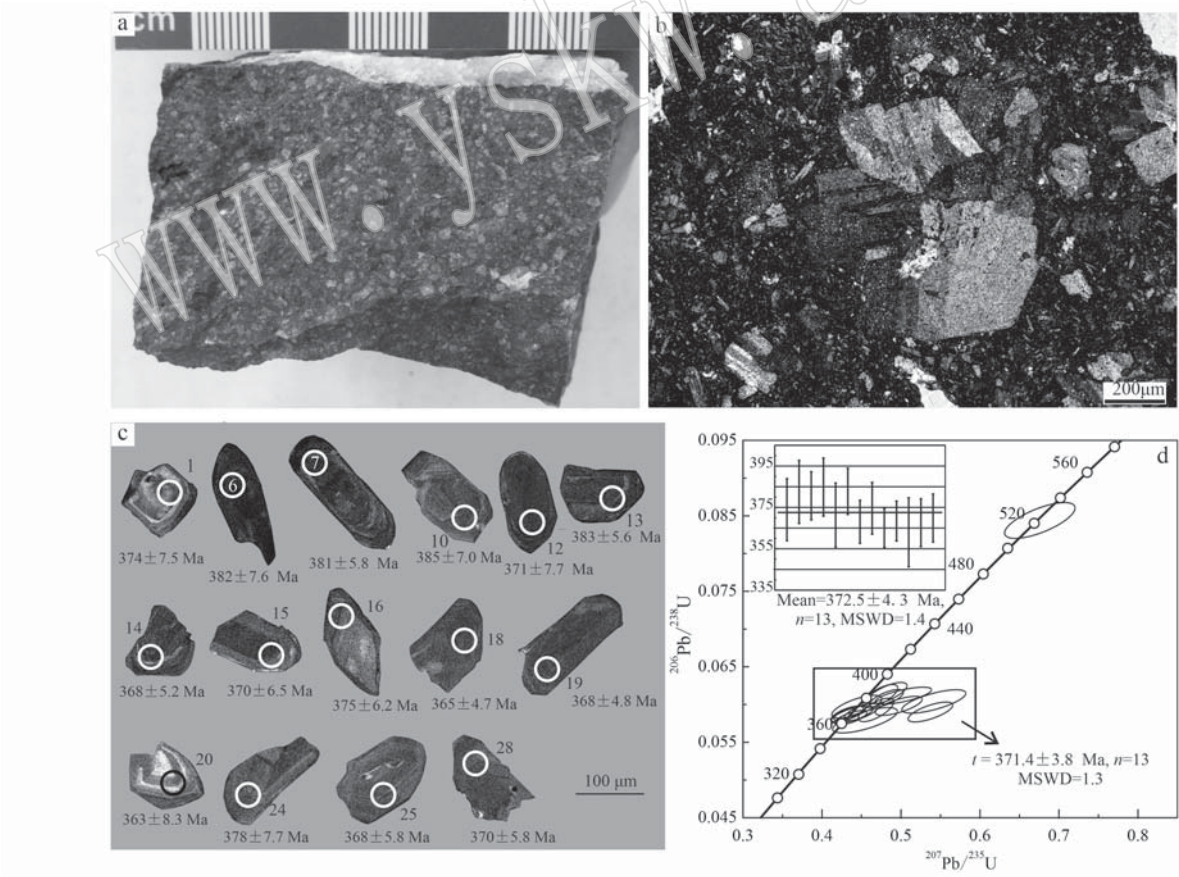


图 6 吐拉苏铅锌矿床赋矿凝灰岩手标本(a)、镜下照片(b)、锆石阴极发光照片(c)和 U-Pb 年龄(d)
Fig. 6 Hand sample(a), microscopic photo(b), Cathodoluminescence (CL) image (c) and U-Pb concordia diagram(d) of zircons from ore-hosting crystal tuff in the Tulasu Pb-Zn deposit

4.2 流体包裹体岩相学特征

室温(25℃)条件下,吐拉苏铅锌矿床石英-硫化物阶段(Ⅱ)石英和石英-碳酸盐阶段(Ⅲ)方解石中的流体包裹体以富液相水两相包裹体(L-V型;图7)为主,另外少量发育富气相水两相包裹体(V-L型;图7c)、纯气相水包裹体(V型;图7d)和含固体矿物三相包裹体(S-L-V型;图7e、7f)。大多数流体包裹体成群、星散状或独立分布(图7),也可见沿石英

生长环带生长的流体包裹体组合(图8),这些包裹体通常被认为是原生包裹体(Roedder, 1984)。少量假次生或次生包裹体沿着裂隙定向排列发育。为避免混淆假次生和次生包裹体,后续仅选择孤立状或成群分布的原生包裹体开展显微测温工作。

阶段Ⅰ的石英多为细粒或隐晶质,仅发育极少量个体较小的流体包裹体,不适于进行显微测温,因此本文暂未获得该阶段的流体包裹体数据。含矿石

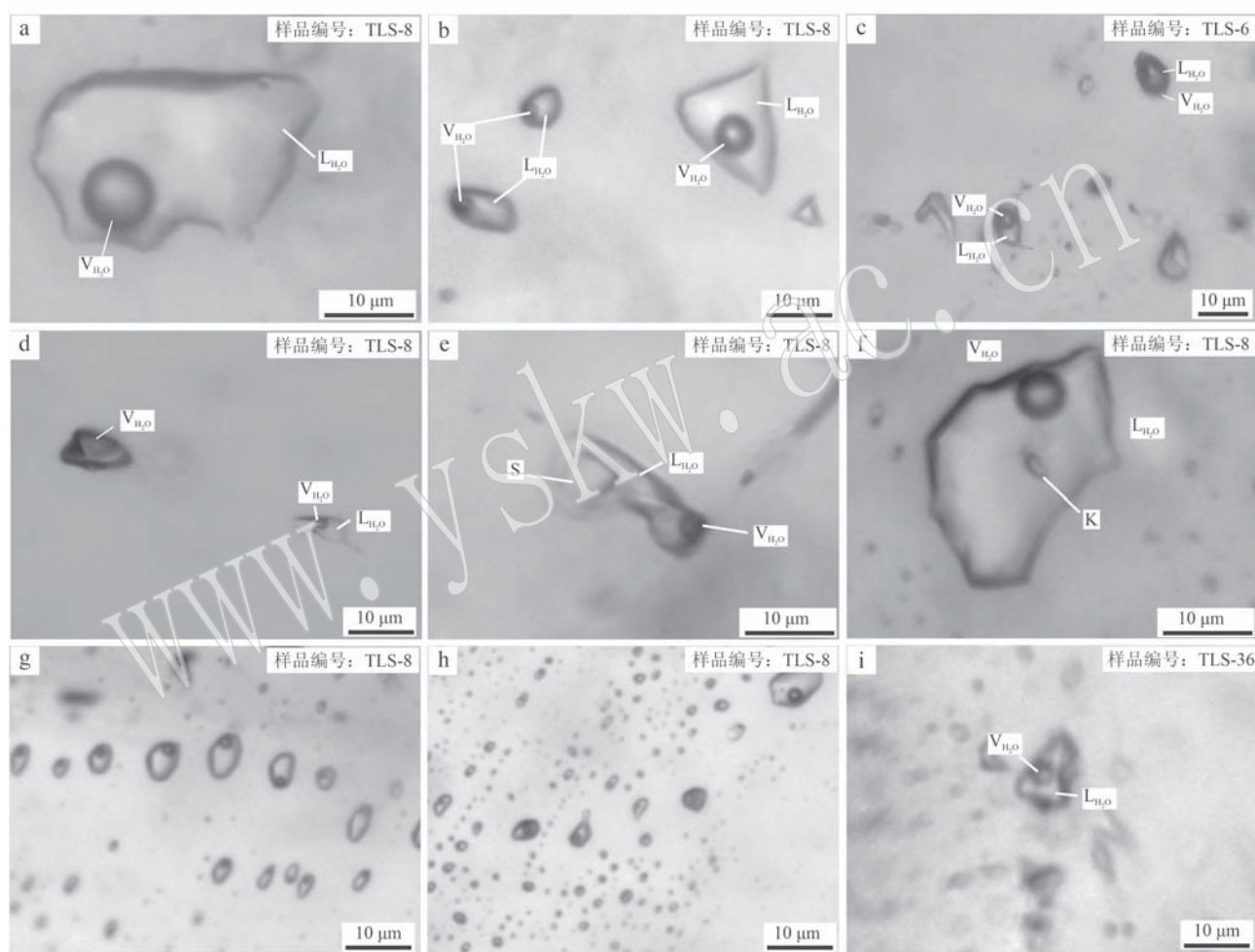


图7 吐拉苏铅锌矿床热液矿物中典型流体包裹体类型

Fig. 7 Typical fluid inclusions types in the hydrothermal minerals in the Tulasu Pb-Zn deposit

a—含矿石英(Ⅱ)中的富液相水两相包裹体;b—含矿石英(Ⅱ)中三角形和椭圆形富液相水两相包裹体;c、d—含矿石英(Ⅱ)中富液相和富气相水两相包裹体共存于同一视域中;e—含矿石英(Ⅱ)中含石盐子晶三相包裹体;f—含矿石英(Ⅱ)中含钾盐子晶三相包裹体;g、h—含矿石英(Ⅱ)中成群分布的富液相水两相包裹体;i—石英-碳酸盐阶段(Ⅲ)方解石中的富液相两相水包裹体; L_{H_2O} —液相水; V_{H_2O} —气

相水;S—石盐;K—钾盐

a—liquid-rich two-phase aqueous inclusions in the ore-bearing quartz (Ⅱ); b—triangular and oval liquid-rich two-phase aqueous inclusions in the ore-bearing quartz (Ⅱ); c, d—liquid-rich and vapor-rich two-phase aqueous inclusions within the same limited area in the ore-bearing quartz (Ⅱ); e—halite-bearing three phase fluid inclusions in the ore-bearing quartz (Ⅱ); f—sylvine-bearing three phase inclusions in the ore-bearing quartz (Ⅱ); g, h—liquid-rich two-phase aqueous inclusions with group distribution in the ore-bearing quartz (Ⅱ); i—liquid-rich two-phase aqueous inclusions in the stage Ⅲ calcite; L_{H_2O} —liquid water; V_{H_2O} —vapor water; S—halite; K—sylvine

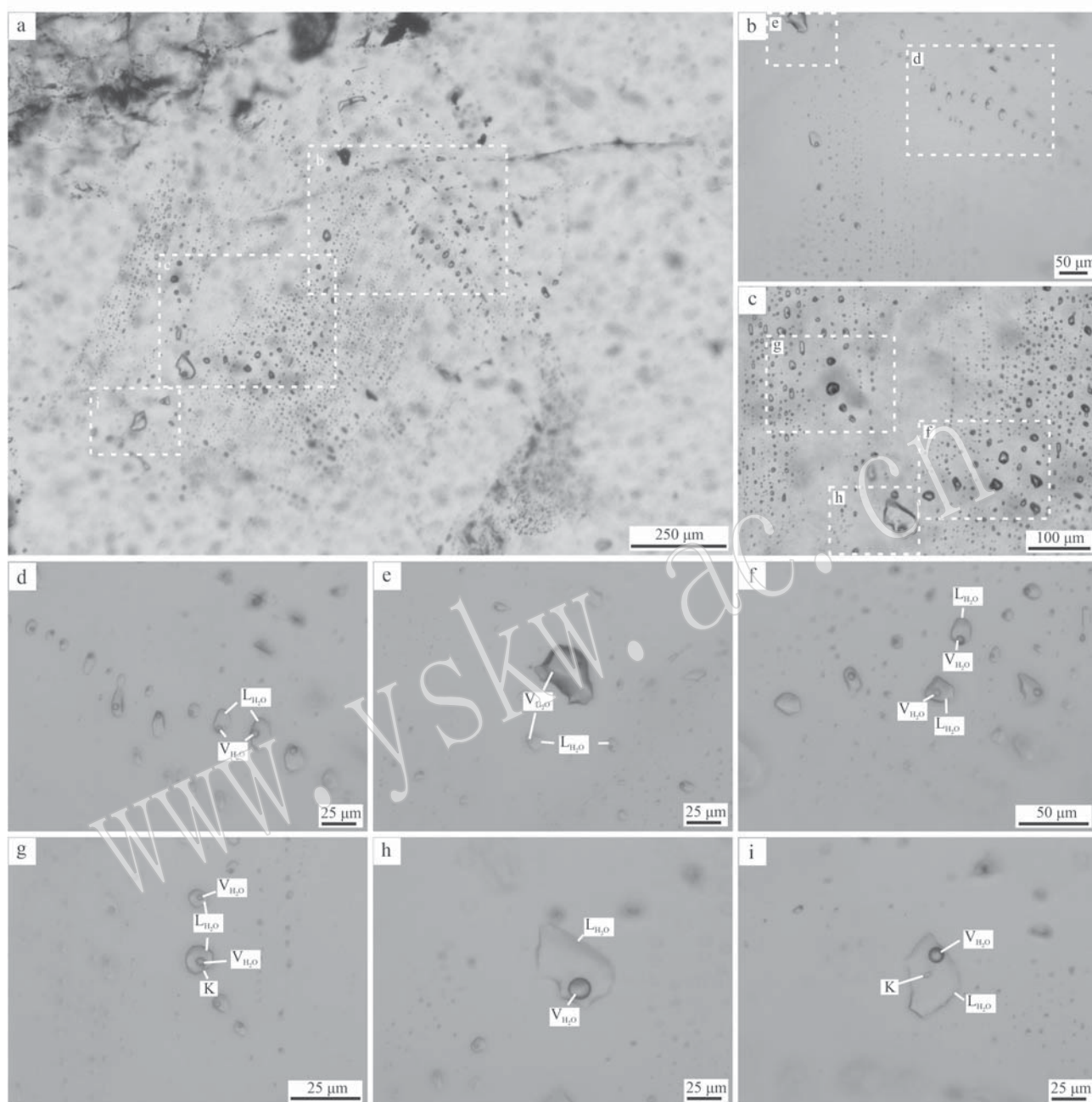


图8 吐拉苏铅锌矿床含矿石英中的流体包裹体组合

Fig. 8 Fluid inclusion assemblage in the ore-bearing quartz in the Tulasu Pb-Zn deposit

英(Ⅱ)中4类流体包裹体均有发育。其中L-V型包裹体最为发育,其气液比变化于5%~30%;形态多样,有椭圆形、不规则状、三角形等;大小不一,直径大多介于2~10 μm,最小的<1 μm,最大可达30 μm。该类包裹体加热后气泡逐渐缩小并最后消失,均一至液相。石英中V-L型包裹体偶见,并与L-V型包裹体共存于同一视域中,其气液比80%~90%,加热后气相有增大的趋势,在均一前发生爆裂,或者由于

界线模糊无法获得有效显微测温数据。另外还可见V型包裹体和L-V型包裹体共存于同一视域中(图7d)。S-L-V型包裹体由一个子矿物、液相水和气泡水组成,其中透明子矿物为立方体的浅蓝色石盐子晶(图7e)或圆形的钾盐子晶(图7f)。升温过程中,S-L-V型包裹体常常在均一前发生爆裂,仅有一个包裹体观察到钾盐子晶先消失、气泡后消失的现象。方解石中仅发育L-V包裹体(图7f),大多呈现不规

则状、椭圆状,个体相对较小,大多 4~6 μm,加热后均一至液相。

4.3 流体包裹体显微测温

吐拉苏铅锌矿床流体包裹体的显微测温结果见表 2 和图 9。L-V 型包裹体和 S-L-V 型包裹体的盐度分别根据冰点温度-盐度公式 (Potter *et al.*, 1978) 和钾盐融化温度-盐度公式 (Hall *et al.*, 1988) 计算获得。含矿石英中 L-V 型包裹体的均一

温度和冰点温度范围分别为 127~247℃ (主要介于 130~210℃之间;平均 174℃) 和 -13.0~-5.2℃ (平均-9.2℃),对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围为 8.1%~16.9% (平均 13.0%)。测得含矿石英中一个含钾盐包裹体的钾盐子晶消失温度为 216℃,气泡消失温度为 280℃,计算获得盐度为 46.8%。方解石中 L-V 包裹体的均一温度和冰点温度分别为 123~219℃ (平均 155℃),对应盐度范围为 0.4%~3.1% (平均 1.6%)。

表 2 吐拉苏铅锌矿床富液相水两相包裹体 (L-V 型) 均一温度及盐度

Table 2 Homogenization temperature and salinity of two-phase aqueous inclusions in the Tulasu Pb-Zn deposit

样号	寄主矿物/成矿阶段	均一温度/℃		冰点温度/℃		盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	
		变化范围(测定数)	均值	变化范围(测定数)	均值	变化范围(测定数)	均值
TLS-3	石英/石英-硫化物 阶段(Ⅱ)	127~217(28)	161	-10.4~-7.2(28)	-8.6	10.7~14.4(33)	12.4
TLS-8		156~194(35)	175	-13.0~-7.5(35)	-10.5	11.1~16.9(35)	14.5
TLS-6		130~247(46)	181	-12.5~-6.5(46)	-9.5	9.9~16.4(46)	13.3
TLS-1		131~195(16)	173	-8.8~-6.5(16)	-7.5	9.9~12.6(16)	11.1
TLS-37	方解石/石英-碳酸盐 阶段(Ⅲ)	156~224(5)	178	-11.1~-5.2(5)	-7.0	8.1~15.1(5)	10.3
TLS-36		123~219(20)	155	-1.8~-0.2	-0.9	0.4~3.1(20)	1.6

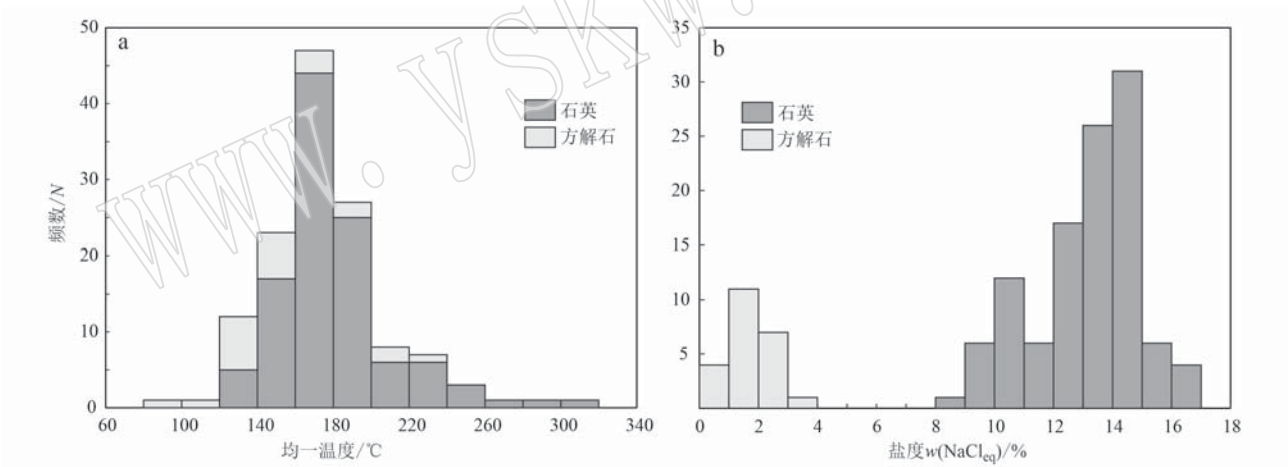


图 9 吐拉苏铅锌矿床流体包裹体均一温度(a)和盐度(b)直方图

Fig. 9 Histograms showing homogenization temperatures (a) and salinities (b) of fluid inclusions in the Tulasu Pb-Zn deposit

4.4 S-Pb 同位素组成

矿石中方铅矿的 S-Pb 同位素组成和特征见表 3、图 10 和图 11。6 件方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围为 -2.2‰~-0.5‰,平均值为 -1.3‰。6 件方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.208~18.264、15.588~15.617 和 37.954~38.088。H-H 单阶段模式年龄变化于 280~315 Ma,平均 294 Ma; μ 值的变化范围为 9.46~9.51 (平均 9.49); ω 值介于 35.50~36.02 (平均 35.77);Th/U 值介于 3.63~3.67 之间 (平均 3.65)。

5 讨论

5.1 成岩成矿时代

下石炭统大哈拉军山组火山岩 (C_1d) 在新疆西天山伊犁板块广泛分布。该组火山岩在区域地质调查建组之初被认为属于下石炭统 (新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)。大哈拉军山组火山岩是西天山十分重要的赋矿层位,包括吐拉苏-也里莫顿地区的浅成低温热液金矿床 (Zhao *et al.*, 2014a, 2014b,

表 3 吐拉苏铅锌矿床方铅矿的 S-Pb 同位素组成及其相关参数

Table 3 S-Pb isotopic compositions and characteristics parameters of galena from the Tulasu Pb-Zn deposit

样号	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	t/Ma	μ	ω	Th/U	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
TLS-4	-1.1	18.264	15.617	38.088	294	9.51	36.02	3.67	18.72	16.49
TLS-5-1	-1.0	18.246	15.599	38.014	285	9.48	35.65	3.64	17.55	14.52
TLS-5-4	-0.5	18.264	15.613	38.076	289	9.51	35.94	3.66	18.46	16.17
TLS-7	-1.6	18.254	15.600	38.038	280	9.48	35.71	3.65	17.61	15.16
TLS-9	-2.2	18.208	15.588	37.954	299	9.46	35.50	3.63	16.83	12.92
TLS-27	-1.2	18.211	15.603	37.992	315	9.49	35.78	3.65	17.81	13.93

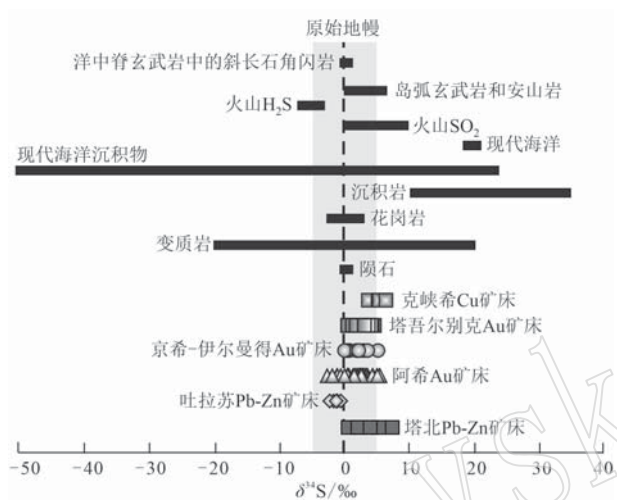


图 10 吐拉苏盆地金、铅锌矿床硫化物与其他地质储库硫同位素组成[自然界中地质储库硫同位素数据引自 Hoefs (2009)]

Fig. 10 Sulfur isotope compositions of sulfides from various types of hydrothermal deposits in the Tulasu Basin compared with natural geological settings (the ranges for natural geological settings are taken from Hoefs, 2009)

2014c; Peng *et al.*, 2017, 2021a, 2021b, 2021c; 彭义伟等, 2020)、阿吾拉勒地区的众多铁/铜矿床 (Zhang *et al.*, 2014) 以及乌孙山地区的浅成低温热液铜金矿床 (孙升升等, 2016; Yu *et al.*, 2018a, 2018b, 2022; Peng *et al.*, 2021b)。因此, 该组火山岩吸引了大量岩石学家和矿床学家的兴趣。近年来大量学者对吐拉苏盆地中该组火山岩开展了大量锆石 U-Pb 同位素定年, 获得一批时代跨度很大的年龄数据 (386~346 Ma; 表 4)。其中, 吐拉苏盆地中浅成低温热液金矿床的赋矿围岩为大哈拉军山组火山岩的上安山岩段 (C_1d^5) 和酸性凝灰岩段 (C_1d^2), 其锆石 U-Pb 年龄范围分别为 367~347 Ma 和 417~371 Ma。本文首次对吐拉苏盆地中大哈拉军山组火山岩酸性凝灰岩段 (C_1d^4) 的凝灰岩开展了锆石 U-Pb 定

年, 其喷发时代 (372.5 ± 4.3 Ma) 正好介于该组火山岩 C_1d^5 和 C_1d^2 岩性段的形成时代之间。综上所述, 吐拉苏盆地中大哈拉军山组火山岩的喷发过程具有“连续性”和“穿时性”, 主体喷发于晚泥盆世-早石炭世, 形成于北天山洋向南俯冲于伊犁-中天山板块之下的岩浆弧背景 (An *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2013)。

浅成低温热液矿床与火山、次火山热液活动密切相关, 主要形成于火山活动的间歇期或宁静期, 其成矿时代略晚于赋矿围岩或基本同时 (一般晚 0.5~1.0 Ma, 少量矿床可达 10~15 Ma; John *et al.*, 2003; Kesler *et al.*, 2004; Hennig *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010; Kirk *et al.*, 2014)。由于吐拉苏盆地中浅成低温热液金矿床缺少能够直接精确定年的热液矿物 (如冰长石), 导致吐拉苏地区金矿化时代尚无定论。目前的定年对象和方法主要包括载金黄铁矿 Re-Os、流体包裹体 Rb-Sr 或 Ar-Ar、绢英岩化安山岩 K-Ar、矿石中金红石 SIMS U-Pb 等方法, 获得变化范围较大的放射性同位素年龄 (表 5; 353~286 Ma)。在阿希金矿区, 金矿体及其赋矿大哈拉军山组火山岩 (363~356 Ma; 翟伟等, 2006; An *et al.*, 2013) 被含早石炭世维宪期生物化石 (347~331 Ma; Cohen *et al.*, 2013) 的阿恰勒河组角度不整合覆盖, 同时在阿恰勒河组底部产有含金石英脉砾石的底砾岩型矿石, 故将阿希金矿化时代限定在 356 Ma 到早石炭世维宪期 (翟伟等, 2006)。归纳起来, 吐拉苏盆地金矿化时代主要存在早石炭世和早二叠世两种观点, 分别对应北天山洋的俯冲消减过程 (Liu *et al.*, 2020) 和后碰撞的伸展环境 (An and Zhu, 2018; Zheng *et al.*, 2020)。早石炭世的年代学数据与吐拉苏盆地周边的斑岩型铜矿床 (克峡希; 357~341 Ma) 和矽卡岩型铁铜多金属矿床 (阔库阙科; 363~362 Ma) 的成岩时代较为一致 (表 4)。发表的较年轻的年龄 (312~286 Ma) 可能代表了碰撞后伸展阶段

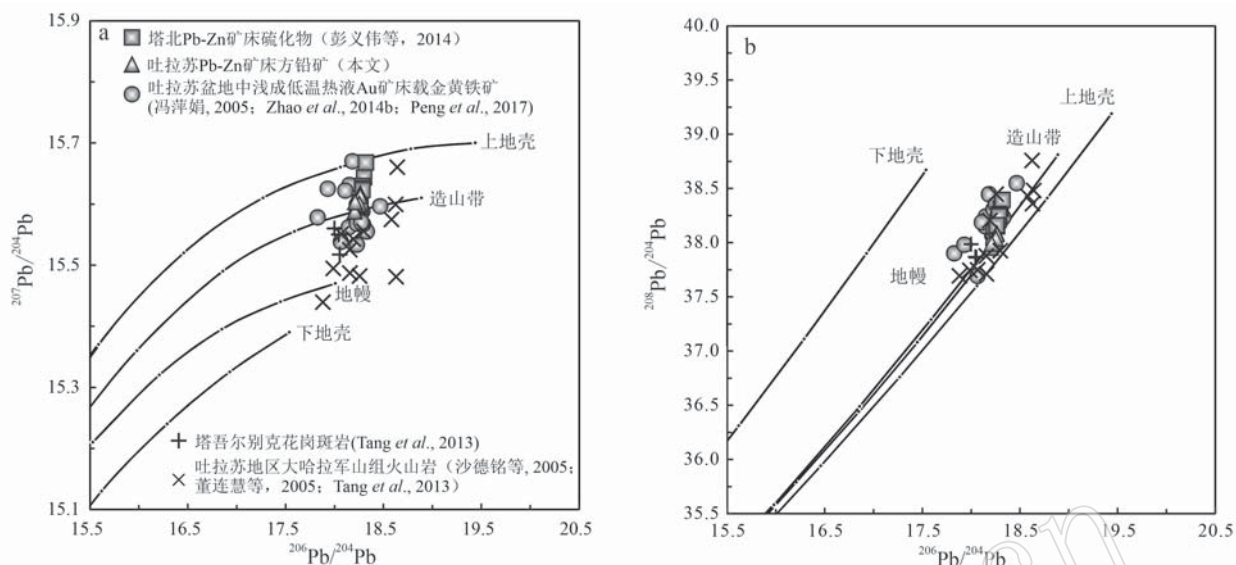


图 11 吐拉苏盆地中金、铅锌矿床硫化物及赋矿岩浆岩的铅同位素构造模式图(底图据 Zartman and Doe, 1981)

Fig. 11 Plumbotectonic model for sulfides and ore-hosting magmatic rocks from the Au and Pb-Zn deposits in the Tulasu Basin (base map after Zartman and Doe, 1981)

热液事件的改造或叠加 (Chen *et al.*, 2012)。

相对于金矿床,目前吐拉苏盆地中的浅成低温热液铅锌矿床尚无年代学资料。吐拉苏盆地中无论是浅成低温热液金矿床还是铅锌矿床,它们均赋存于大哈拉军山组火山岩中,且空间上毗邻。目前尚无直接的年龄数据证明这些铅锌矿化与区域上的金铁铜矿化属于同一构造-岩浆-热液事件的产物,但它们均与晚泥盆世-早石炭世的岩浆侵入-火山喷发活动可能具有一定联系,整体形成于晚古生代北天山洋从俯冲到碰撞的活动大陆边缘环境。关于吐拉苏铅锌矿床以及塔北铅锌矿床成矿时代的精确测定还需进一步的研究和测试(比如闪锌矿 Rb-Sr 等时线测年、方解石原位 U-Pb 定年等测试方法的尝试)。

5.2 成矿流体性质及沉淀机制

浅成低温热液矿床的流体包裹体类型通常较为单一,普遍发育水溶液包裹体。但是,与斑岩型矿床和岩体中心时空关系更为紧密的个别高硫型浅成低温热液矿床中可见 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 三相包裹体和含子晶多相包裹体 (Bodnar *et al.*, 2014; Zhong *et al.*, 2018)。浅成低温热液矿床的流体包裹体均一温度 (T_h) 范围从 $<100^\circ\text{C}$ 到 $>450^\circ\text{C}$, 其中 90% 的数据介于 $120\sim 310^\circ\text{C}$ 之间,峰值约为 $240\sim 250^\circ\text{C}$; 盐度变化从 0 到 $>40\%$, 其中 90% 的数据介于 $0\sim 17\%$ 之间,且多数 $<10\%$ (Bodnar *et al.*, 2014)。吐拉苏 Pb-Zn 矿床阶段 II 石英和阶段 III 方解石 L-V 包裹体的 T_h 主要集中于 $130\sim 210^\circ\text{C}$ (平均 174°C ; 个别可高达 247°C)

和 $110\sim 170^\circ\text{C}$ (平均 155°C), 盐度分别为 $8.1\%\sim 16.9\%$ (平均 13.1%) 和 $0.4\%\sim 3.1\%$ (平均 1.7%), 与典型浅成低温热液矿床的流体包裹体特征基本一致。从阶段 II 到阶段 III, 成矿流体整体表现出温度略微降低、盐度降低的现象。相对于吐拉苏盆地中的浅成低温热液金矿床 (翟伟等, 2007; 冯萍娟等, 2007; 彭义伟等, 2020) 和塔北铅锌矿床 (Peng *et al.*, 2023), 吐拉苏铅锌矿床主成矿阶段的成矿流体盐度明显偏高。尤其是在含石英中发现了有含石盐和钾盐子晶的三相包裹体, 盐度高达 46.8% , 表明主成矿阶段的成矿流体具有两种截然不同盐度的流体包裹体, 可能有深部岩浆热液的参与。

在浅成低温热液环境中, 流体沸腾、传导冷却、流体混合和水-岩反应是最主要的矿质沉淀机制 (Hedenquist *et al.*, 2000)。在低硫-中硫型浅成低温热液矿床中, 矿石中常常发育特征性矿物和矿石组构, 例如胶状/皮壳状石英、叶片状/格子状石英和碳酸盐矿物、多期角砾状构造, 记录了多次流体沸腾作用的发生 (Simmons and Browne, 2000; Shimizu, 2014)。相反, 梳状/晶洞状的石英通常被认为是由于晶体生长期间溶液的物理化学条件 (如温度、压力和 pH 值) 轻微波动和 SiO_2 轻微过饱和而沿着脉壁或角砾边缘缓慢结晶所形成的 (Fournier, 1985; Dong and Morrison, 1995; Simmons and Browne, 2000; Moncada *et al.*, 2012, 2017)。吐拉苏铅锌矿床的矿石以发育大量梳状和晶洞状构造为重要特

表 4 吐拉苏地区典型热液矿床的成岩成矿时代

Table 4 Ages of ore-hosting rocks and mineralization for the typical hydrothermal deposits in the Tulasu area

矿床	测试对象/岩性段	测试方法	年龄/Ma	文献来源
阿希低硫型浅成低温热液金矿床	安山岩/ C_1d^5	Rb-Sr	346±9	李华芹等, 1998
	英安岩/ C_1d^5	SHRIMP U-Pb	363.2±5.7	翟伟等, 2006
	安山岩/ C_1d^5	SHRIMP U-Pb	356.2±2.0	An <i>et al.</i> , 2013
	安山岩/ C_1d^5	SIMS U-Pb	350.8±2.7	Zheng <i>et al.</i> , 2020
	英安岩/ C_1d^5	SIMS U-Pb	351.3±3.1	Zheng <i>et al.</i> , 2020
	安山岩/ C_1d^5	SHRIMP U-Pb	351.1±1.8	Zhao <i>et al.</i> , 2020
	含金灰白色石英脉中 石英流体包裹体	Rb-Sr	340±8	李华芹等, 1998
	含金烟灰色石英脉中 石英流体包裹体	Rb-Sr	312±14	李华芹等, 1998
	碳酸盐-石英脉中石英 流体包裹体	Ar-Ar	307±31	李华芹等, 1998
	载金黄铁矿	Rb-Sr	301±29	李华芹等, 1998
	载金黄铁矿	Re-Os	299±35	An and Zhu, 2018
	绢英岩化安山岩/ C_1d^5	K-Ar	286~293	An and Zhu, 2018
	围岩中载金黄铁矿	Re-Os	353±6	Liu <i>et al.</i> , 2020
	石英脉矿石中载金黄铁矿	Re-Os	332±8	Liu <i>et al.</i> , 2020
塔吾尔别克斑岩-浅成低温热液过渡型金矿床	矿石中热液金红石	SIMS U-Pb	306.1±16.9	Zheng <i>et al.</i> , 2020
	矿石中热液金红石	SIMS U-Pb	303.8±14.6	Zheng <i>et al.</i> , 2020
	安山岩/ C_1d^5	LA-ICP-MS U-Pb	347.2±1.6	唐功建等, 2009
	安山岩/ C_1d^5	SHRIMP U-Pb	361±4	Zhao <i>et al.</i> , 2014a
	安山岩/ C_1d^5	LA-ICP-MS U-Pb	367.1±3.2	Peng <i>et al.</i> , 2017
	花岗斑岩	SHRIMP U-Pb	355.4±2.3	Zhao <i>et al.</i> , 2014a
	花岗斑岩	LA-ICP-MS U-Pb	349±2	Tang <i>et al.</i> , 2013
	闪长质细晶岩脉	LA-ICP-MS U-Pb	315.2±3.5	Peng <i>et al.</i> , 2017
	含金石英脉中石英流体包裹体	Rb-Sr	295±16	李华芹等, 2004
	花岗斑岩矿石中载金黄铁矿	Re-Os	323±11	赵晓波等, 2014
京希-伊尔曼得高硫型浅成低温热液金矿床	凝灰岩/ C_1d^2	SHRIMP U-Pb	416.7±2.6	An <i>et al.</i> , 2013
	流纹岩/ C_1d^2	SHRIMP U-Pb	386.4±9.3	安芳等, 2008
	安山玢岩/ C_1d^2	SHRIMP U-Pb	370.5±2.1	安芳等, 2014
恰布坎卓它 Au 矿床	含金硅质岩/ C_1d^4	Rb-Sr	312±46	李华芹等, 2004
吐拉苏中硫型浅成低温热液铅锌矿床	凝灰岩/ C_1d^4	LA-ICP-MS U-Pb	372.5±4.3	本文
克峡希斑岩型铜矿床	辉石闪长岩	SHRIMP U-Pb	357.2±3.0	薛春纪等, 2013
	石英闪长岩	SHRIMP U-Pb	356.4±2.2	
	花岗闪长岩	SHRIMP U-Pb	350.8±3.8	
	闪长玢岩	SHRIMP U-Pb	340.8±2.2	
阔库阙科砂卡岩型铁铜矿床	花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb	362.8±2.8	顾枫华等, 2017
	闪长岩	LA-ICP-MS U-Pb	363.4±3.7	

注: 阿希和塔吾尔别克金矿床的赋矿火山岩属于大哈拉军山组第五岩性段(C_1d^5 , 上安山岩段); 吐拉苏铅锌矿床的赋矿火山岩属于大哈拉军山组第四岩性段(C_1d^4 , 火山碎屑岩段); 京希-伊尔曼得金矿床的赋矿火山岩属于大哈拉军山组第二岩性段(C_1d^2 , 酸性凝灰岩段)。

征,方铅矿等硫化物通常充填于石英脉中心或晶洞中(图3),表明矿石中自形粗粒石英和硫化物的沉淀受控于矿液的缓慢冷却。另一方面,石英中可见L-V型和V-L型包裹体、V型包裹体共存于同一视域中(图7c、7d,图8e),且L-V型和V-L型包裹体的均一方式相反,虽然未测得V-L型包裹体的有效数据,但结合矿石中发育的角砾状构造(图4f、4h),暗示流体系统局部可能发生过沸腾作用。随着流体沸

腾作用的进行,低密度、低盐度的气相成分不断逸出,残余流体的盐度逐渐增高,形成了少量含石盐和钾盐子晶的多相包裹体。综合上述矿石组构和流体包裹体特征,本文初步推断流体沸腾及其伴随的温度降低可能是金属硫化物沉淀的重要机制。

5.3 成矿物质来源

在低氧逸度条件下,热液不会沉淀出硫酸盐矿物,形成的矿物组合可能为黄铁矿+方铅矿+闪锌矿,

表 5 吐拉苏铅锌矿床与典型浅成低温热液矿床特征对比一览表

Table 5 Comparative main characteristics of the Tulasu Pb-Zn deposit and different types of epithermal deposits

矿床类型	吐拉苏铅锌矿床	低硫型浅成低温热液矿床	中硫型浅成低温热液矿床	高硫型浅成低温热液矿床
构造环境	活动大陆边缘弧环境	陆内伸展和挤压岛弧环境	陆内伸展和挤压岛弧环境	陆内伸展和挤压岛弧环境
控矿构造	火山角砾岩筒及附近的断裂、裂隙系统	破火山口和火山穹丘系统,与火山活动中心的各种断裂关系密切	火山角砾岩筒及附近的断裂、裂隙系统	火山中心和火山穹丘系统,与区域性断裂关系密切
赋矿围岩	英安质-流纹质岩屑晶屑凝灰岩和花岗斑岩	玄武岩、安山岩、流纹岩,碱性玄武岩到粗面岩	钙碱性安山岩、流纹质英安岩、部分流纹岩	钙碱性安山岩、流纹质英安岩
矿石类型	石英脉型、火山角砾岩型、蚀变岩型和少量热液角砾岩型	石英脉型为主,蚀变岩型和热液角砾岩型	石英脉型、热液角砾岩型、火山角砾岩型和蚀变岩型	热液角砾岩型、石英脉型和硅质岩型
金属矿物	主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿,次为斑铜矿、辉铋矿等	黄铁矿、自然金、银金矿、闪锌矿、方铅矿、毒砂等	黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黝铜矿-砷黝铜矿、黄铜矿	黄铁矿、砷黝铜矿、硫砷铜矿、四方硫砷铜矿、螺状硫银矿、黄铜矿
非金属矿物	石英、方解石、绿帘石、绢云母、绿泥石等	石英、玉髓、方解石、冰长石、绢云母等	石英、绢云母、伊利石、冰长石一般不发育	石英、明矾石、重晶石、高岭石、叶腊石、迪开石等
硅酸盐脉石特征	脉状、网脉状、晶洞状、梳状、角砾状	脉状、网脉状、晶洞状、梳状、皮壳状	脉状、网脉状、皮壳状、梳状	大量细粒硅化和多孔状石英、格子状石英
碳酸盐脉石特征	成矿后期较为发育	一般少量或后期丰富,不含锰,可见少量叶片状方解石	普遍发育,包括特征的锰碳酸盐	不发育或晚期较少出现
硫化物含量 (体积分数/%)	10~15	普遍小于 2,少量达 2~10	5~20	10~90
主要金属 围岩蚀变	Pb、Zn、Cu 硅化、绢英岩化、青磐岩化、碳酸盐化	Au±Ag 冰长石化、硅化、绢英岩化、黄铁矿化、碳酸盐化、青磐岩化	Ag-Au、Zn、Pb、Cu 硅化、青磐岩化、黄铁绢英岩化、碳酸盐化	Au-Ag、Cu、As-Sb 硅化、高级泥化、泥化、青磐岩化
流体温度及盐度	130~210℃, 8.1%~16.9% $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$	150~300℃, <3.5% $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$	200~300℃, 0%~23% $w(\text{NaCl})$	119~305℃, <3.5% $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$
成矿流体来源	大气降水±岩浆水? 中性、还原	大气降水±岩浆水,中性、还原	岩浆水和大气降水,中性、还原	酸性、高氧化岩浆水
成矿物质来源	赋矿围岩(岩屑晶屑凝灰岩、流纹质凝灰岩)	赋矿围岩±岩浆热液	赋矿围岩和岩浆热液	赋矿围岩和岩浆热液
资料来源	本文	Hedenquist <i>et al.</i> , 2000; Simmons and Browne, 2000; Sililitoe and Hedenquist, 2003	Hedenquist <i>et al.</i> , 2000; Camprubi and Albinson, 2007; 宋国学等, 2015, 2018; Wang <i>et al.</i> , 2019	Hedenquist <i>et al.</i> , 2000; Sililitoe and Hedenquist, 2003; 陈衍景等, 2007

此时 $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma}$ (Ohmoto, 1972; Ohmoto and Rye, 1979)。吐拉苏铅锌矿床的矿石中金属硫化物主要为方铅矿和少量闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿,硫酸盐矿物未见,说明成矿环境具有还原性质,此时方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值能够大致代表成矿流体的总 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (Ohmoto, 1972; Ohmoto and Rye, 1979; Hoefs, 2009; Wang *et al.*, 2019)。吐拉苏铅锌矿床矿石中方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较为集中,介于-2.2‰~-0.5‰之间(平均值为-1.3‰),明显低于塔北铅锌矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,但与周缘的浅成低温热液金矿床(阿希、京希-伊尔曼得和塔吾尔别克)载金黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围较为一致(图 7),暗示它们具有相同的单一来源,即岩浆硫。吐拉苏铅锌矿床矿石中方铅矿的 Pb 同位素组成较为均一,并与塔北铅锌矿床矿石

中硫化物的 Pb 同位素组成几乎重叠,落于造山带演化曲线附近(图 8),表明两个铅锌矿床的 Pb 源具有壳幔混合的特点。吐拉苏和塔北两个铅锌矿床的 Pb 同位素组成也与盆地中浅成低温热液金矿床载金黄铁矿和大哈拉军山组火山岩的 Pb 同位素组成较为一致,表明吐拉苏盆地中的 Pb-Zn 和 Au 具有相似的成矿物质来源,即赋矿的大哈拉军山组火山岩。

5.4 矿床成因及找矿指示意义

迄今为止,吐拉苏盆地中众多的浅成低温热液金、铅锌矿床彼此之间均具有截然不同的矿化特征,可能代表了浅成低温热液成矿环境中不同端员的产物。阿希、京希-伊尔曼得和塔吾尔别克是吐拉苏盆地中目前正在开采的 3 个浅成低温热液金矿床。其中,阿希普遍被认为是典型的低硫型浅成低温热液

金矿床,载金矿物主要为黄铁矿,其次为毒砂和白铁矿,贱金属(Pb-Zn-Cu)含量极少,矿石发育典型的胶状、皮壳状、角砾状、梳状等构造,伴随绢英岩化、冰长石化、伊利石化等热液蚀变(翟伟等, 2010; 彭义伟等, 2020)。京希-伊尔曼得金矿床的矿体中心发育多孔状石英,矿体中心向外发育高级泥化蚀变(高岭石化、迪开石化等),显示成矿流体具有强酸性和氧化性,具有高硫型浅成低温热液矿床的特点(Xiao *et al.*, 2005; 彭义伟, 2015)。塔吾尔别克金矿床的赋矿围岩包括大哈拉军山组火山岩和同时代的花岗斑岩,矿石中普遍发育黄铁矿、黄铜矿和斑铜矿,以及少量黝铜矿-砷黝铜矿和闪锌矿,可能属于斑岩与浅成低温热液之间的过渡类型(彭义伟等, 2016, 2020; Peng *et al.*, 2017, 2018)。

相对于金矿床,吐拉苏盆地中的铅锌矿床由于规模较小,仅有过短暂的开采历史,研究和勘查程度偏低。对于与阿希金矿床毗邻的塔北铅锌矿床,彭义伟等(2014)和 Peng 等(2018, 2023)基于现今矿体海拔高度、矿物组合和矿石组构特征,提出其可能属于阿希低硫型浅成低温热液金矿化深部的贱金属矿化。作为吐拉苏盆地中的另一代表性铅锌矿床,吐拉苏矿床的成因及其与吐拉苏盆地中金矿床的成因联系尚未涉及。吐拉苏铅锌矿床的矿化特征与塔北铅锌矿床较为类似,例如矿体呈脉状产出、受控于大哈拉军山组火山岩中的张性断裂,矿石发育方铅矿-闪锌矿-黄铜矿±黄铁矿的矿物组合、普遍具有晶洞状-梳状-角砾状构造。在浅成低温热液成矿环境中,成矿流体由下至上运移至静岩-静水压力转换界面时通常会因为压力的骤降而发生沸腾作用。在此热液演化过程中,通常会在沸腾面以上不远处发生低硫型贵金属(Au-Ag)矿化,并形成细粒、胶状、皮壳状、叶片状(格子状)的石英(Buchanan, 1981; Christie *et al.*, 2007);相反,在沸腾面以下相对较深的裂隙系统中,成矿热液的物理化学条件相对稳定,尤其是压力处于静岩压力,因此往往会形成贱金属(Pb-Zn±Cu)矿化和自形粗粒的梳状或晶簇状石英(Christie *et al.*, 2007)。从时间的维度看,一套完整的低硫-中硫型成矿系统的成矿过程起于深部的贱金属矿化、止于浅部贵金属矿化(André-Mayer *et al.*, 2002; Christie *et al.*, 2007)。吐拉苏铅锌矿床的矿体明显受断裂控制,矿石中矿物组合主要为石英-方铅矿-闪锌矿-黄铜矿-黄铁矿,矿脉中硫化物含量普遍大于10%,矿石多具脉状、网脉状、角砾状、

晶洞状、梳状等代表开放空间充填作用的构造特征,成矿流体具有中低温、中高盐度的特点,不发育低硫型矿床中叶片状石英、冰长石、毒砂和磁黄铁矿,也未见高硫型矿床中明矾石、高岭石、硫砷铜矿、多孔状石英等特征矿物和高级泥化蚀变(表5)。同时,流体包裹体研究显示成矿流体具有中低温、中高盐度的特征,暗示除大气降水外,还可能有岩浆热液的参与。S-Pb 同位素表明成矿物质主要来源于赋矿火山岩。因此,吐拉苏铅锌矿床明显区别于典型的低硫型和高硫型矿床,具有二者的过渡特点。与典型的高、中、低硫型浅成低温热液矿床进行综合对比,吐拉苏铅锌矿床的矿体产状、赋矿岩性、热液蚀变、矿物组合、矿石组构、成矿流体等特征相对与中硫型矿床更为接近(表5),本文初步判断其应属于中硫型浅成低温热液铅锌矿床。

在晚泥盆世-早石炭世时期(375~350 Ma),北天山洋主要表现为前进式俯冲的俯冲模式,岩浆源区具有壳幔混合的特点;到了早石炭世-晚石炭世期间(350~310 Ma),北天山洋的俯冲模式转变为撤退式俯冲,岩浆源区有更多幔源物质的加入(Huang *et al.*, 2020; Xing *et al.*, 2021)。因此,晚古生代北天山洋的俯冲过程中,在吐拉苏盆地内部和周缘爆发了中酸性岩浆的喷发作用和侵入作用,伴随着浅成低温热液金铅锌、斑岩型铜和矽卡岩型铁铜矿化。不同地质体的相对关系和磷灰石裂变径迹分析表明,吐拉苏盆地古老的浅成低温热液金铅锌矿床的保存受益于成矿后晚石炭世晚期-二叠纪的巨厚沉积物的快速沉降和中新生代的缓慢剥蚀过程(顾雪祥等, 2016; Peng *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018, 2021; Zhao *et al.*, 2020)。相对于盆地内部,盆地周缘的剥蚀作用更为连续和强烈,致使大面积中酸性岩体以及深部的斑岩型铜(克峡希)和矽卡岩型铁铜(阔库阙科)矿床得以出露地表(顾雪祥等, 2016; Peng *et al.*, 2021c)。因此,吐拉苏盆地内部仍具有斑岩型或矽卡岩型铜多金属矿床的良好找矿前景。另一方面,中硫型贱金属矿床既可以是斑岩型和高硫型矿床的端员组分,又可以与低硫型贵金属矿化组成低硫-中硫型复合型矿床(André-Mayer *et al.*, 2002; Christie *et al.*, 2007; Camprubí and Albinson, 2007)。因此,找矿勘查工作同时也要注意在吐拉苏和塔北铅锌矿床附近寻找低硫型浅成低温热液金矿床,相反地在阿希低硫型浅成低温热液金矿床深部及其周缘也可能发育中硫型的贱金属矿化。近年

来,阿希金矿区金矿体开采过程中,在深部发现了铅锌矿石,且矿石中金属硫化物组合为闪锌矿-方铅矿-黄铜矿-黝铜矿/砷黝铜矿,亦是对该假说的佐证(Peng *et al.*, 2023)。

6 结论

(1) 吐拉苏铅锌矿床赋矿凝灰岩的喷发年龄为 372.5 ± 4.3 Ma,形成于晚泥盆世北天山洋向伊犁-中天山板块之下俯冲的岩浆弧背景下。

(2) 流体包裹体类型以富液相水两相包裹体为主,偶见富气相水两相包裹、纯液相水包裹体和含盐类子晶三相包裹体。主成矿阶段石英中气液两相水包裹体的均一温度和盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 分别集中于 $130 \sim 210^\circ\text{C}$ 和 $8.1\% \sim 16.9\%$ 之间;晚阶段方解石中包裹体均一温度和盐度分别为 $123 \sim 219^\circ\text{C}$ 和 $0.4\% \sim 3.1\%$ 。方铅矿 S-Pb 同位素组成特征表明成矿物质来源于赋矿火山岩。流体包裹体和矿石组构特征显示流体沸腾及其伴随的温度降低可能是铅、锌沉淀的主要机制。

(3) 吐拉苏铅锌矿床属于中硫型浅成低温热液型矿床。吐拉苏盆地今后找矿勘查既要注意在已知的铅锌矿床附近寻找低硫型浅成低温热液金矿床,同时阿希低硫型浅成低温热液金矿床深部及其周缘也可能发育中硫型贱金属矿化。

致谢 本文研究得到新疆金川矿业有限公司、国家“305”项目办公室、西部黄金伊犁分公司和伊犁正元矿业有限责任公司的大力支持;野外工作中得到阿希金矿韩建民、刘俊平、韩晨、李浩工程师以及伊犁正元矿业有限责任公司李章会和程树仁工程师的热情帮助;在此一并致谢!

References

- An Fang and Zhu Yongfeng. 2008. Study on trace elements geochemistry and SHRIMP chronology of volcanic rocks in Tulasu Basin, Northwest Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2 741~2 748 (in Chinese with English abstract).
- An F and Zhu Y F. 2018. Geology and geochemistry of the Early Permian Axi low-sulfidation epithermal gold deposit in North Tianshan (NW China)[J]. *Ore Geology Reviews*, 100: 12~30.
- An F, Zhu Y F, Wei S N, *et al.* 2013. An early Devonian to Early Carboniferous volcanic arc in North Tianshan, NW China: Geochronological and geochemical evidence from volcanic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 100~113.
- An Fang, Zhu Yongfeng, Wei Shaoni, *et al.* 2014. Geochronology and geochemistry of Shizishan sub-volcanic rocks in Jingxi Yelmand gold deposit, Northwest Tianshan: Its petrogenesis and implications to tectonics and Au-mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1 545~1 557 (in Chinese with English abstract).
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- André-Mayer A, Leroy J, Bailly L, *et al.* 2002. Boiling and vertical mineralization zoning: A case study from the Apacheta low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, southern Peru[J]. *Mineralium Deposita*, 37: 452~464.
- Bodnar R J, Lecumberri-Sanchez P, Moncada D, *et al.* 2014. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[C]// Scott S D. *Treatise on Geochemistry*, 2nd edition, 13: 119~142.
- Bonham H F J. 1986. Models for Volcanic-hosted Epithermal Precious Metal Deposits: A Review[M]. *Proceedings of International Volcanological Congress*. Hamilton, New Zealand, 13~17.
- Buchanan L J. 1981. Precious metal deposits associated with volcanic environments in the Southwest[J]. *Arizona Geological Society Digest*, 14: 237~262.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Camprubí A and Albinson T. 2007. Epithermal deposits in México-Update of current knowledge, and an empirical reclassification[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 422: 377~415.
- Chen Y J, Pirajno F, Wu G, *et al.* 2012. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 889~917.
- Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, *et al.* 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2 085~2 108 (in Chinese with English abstract).
- Christie A B, Simpson M P, Brathwaite R L, *et al.* 2007. Epithermal Au-Ag and related deposits of the Hauraki Goldfield, Coromandel volcanic zone, New Zealand[J]. *Economic Geology*, 102(5): 785~816.
- Cohen K M, Finney S C and Gibbard P L, *et al.* 2013. The ICS international chronostratigraphic chart[J]. *Episodes*, 36: 199~204.

- Dong G Y and Morrison G W. 1995. Adularia in epithermal veins, Queensland: Morphology, structural state and origin[J]. *Mineralium Deposita*, 30: 11~19.
- Dong Lianhui and Sha Deming. 2005. Paleozoic Epithermal Gold Deposits in Western Tianshan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~154 (in Chinese with English abstract).
- Feng Pingjuan. 2005. Geology Geochemistry and Genesis of Main Gold Deposits in Tlasu Area, Western Tianshan, Xinjiang, China[D]. Northwestern University (in Chinese with English abstract).
- Feng Pingjuan, Wang Juli and Ouyang Zhengjian. 2007. A discussion on gold mineralization styles of Axi and Jingxi-Yelmand gold deposits in Western Tianshan, Xinjiang: Evidence from fluid inclusions[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 37(1): 99~102 (in Chinese with English abstract).
- Findley A A. 2010. Structural, Mineralogical and Geochronological Constraints of the Miguel Auza Intermediate-sulfidation Ag-rich Polymetallic Mineralization Deposit, Zacatecas, Mexico (Unpublished MS thesis)[D]. Queen's University, Kingston, Ontario, 99.
- Fournier R O. 1985. The behavior of silica in hydrothermal solution[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2: 45~72.
- Gu Fenghua, Zhang Yongmei, Peng Yiwei, *et al.* 2017. Geochemistry, chronology and geological significance of Kuokuqueke granite in the West Tianshan Mountain, Xinjiang Autonomous region, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 37(1): 196~217 (in Chinese with English abstract).
- Gu F H, Zhang Y M, Peng Y W, *et al.* 2022. Geology, fluid inclusions and S-Pb-C-O isotopes of the Kuokuqueke Fe-Cu skarn deposit in Western Tianshan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 145: 104896.
- Gu Xuexiang, Dong Lianhui, Peng Yiwei, *et al.* 2016. Formation and evolution of the epithermal-porphyry Au polymetallic mineralization system in the Tulasu volcanic basin of the West Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 283~1 300 (in Chinese with English abstract).
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. *Economic Geology*, 83(1): 197~202.
- Hedenquist J W, Arribas R A and Gonzalez-Urien E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 245~277.
- Henning D, Lehmann B, Burgess R, *et al.* 2008. Geology, geochemistry and ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of the Cerro Millo epithermal high-sulfidation gold prospect, southern Peru[J]. *Ore Geology Reviews*, 34: 304~316.
- Hoefs J. 2009. Stable Isotope Geochemistry, sixth ed; Springer-Verlag, Berlin[M]. Germany: University of Göttingen.
- Huang H, Wang T, Tong Y, *et al.* 2020. Rejuvenation of ancient microcontinents during accretionary orogenesis: Insights from the Yili Block and adjacent regions of the SW Central Asian Orogenic Belt[J]. *Ore Geology Reviews*, 208: 103255.
- Huang Xin and Xu Zhengqiang. 2014. Metallogenic geological conditions and prospecting signs of Tuohulusu Pb-Zn deposit, Yili, Xinjiang[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 17: 39~40 (in Chinese with English abstract).
- John D A, Hofstra A H, Fleck R E, *et al.* 2003. Geological setting and genesis of the Mule Canyon low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, north-central Nevada[J]. *Economic Geology*, 98: 425~463.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, *et al.* 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 43: 1~68.
- Kesler S E, Hall C M, Russell N, *et al.* 2004. Age of the Camaguey gold-silver district, Cuba: Tectonic evolution and preservation of epithermal mineralization in volcanic arcs[J]. *Economic Geology*, 99: 869~886.
- Kirk J D, Ruiz J, Kesler S E, *et al.* 2014. Re-Os age of the Pueblo Viejo epithermal deposit, Dominican Republic[J]. *Economic Geology*, 109: 503~512.
- Lesage G, Richards J P, Muehlenbachs K, *et al.* 2013. Geochronology, geochemistry, and fluid characterization of the Late Miocene Buriticá gold deposit, Antioquia department, Colombia[J]. *Economic Geology*, 108: 1 067~1 097.
- Li Huaqin and Chen Fuwen. 2004. Isotopic Geochronology of Regional Mineralization in Xinjiang, NW China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Li Huaqin, Xie Caifu and Chang Hailiang. 1998. Study on Metallogenetic Chronology of Nonferrous and Precious Metallic Ore Deposits in North Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~264 (in Chinese with English abstract).
- Lindgren W. 1933. Mineral Deposits[M]. McGraw-Hill, New York, 930.
- Liu Xixi. 2014. Geological, Geochemical Characteristics and Genesis of the Tabei and Tulasu Pb-Zn Deposit, Xinjiang[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liu Z K, Mao X C, Ackerman L, *et al.* 2020. Two-stage gold mineralization of the Axi epithermal Au deposit, Western Tianshan, NW China: Evidence from Re-Os dating, S isotope, and trace elements of pyrite[J]. *Mineralium Deposita*, 55: 863~880.

- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronol[J]. Center Special Publication, 4: 1~70.
- Long L L, Gao J, Klemd R, *et al.* 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 126(3~4): 321~340.
- Moncada D, Baker D and Bodnar R J. 2017. Mineralogical, petrographic and fluid inclusion evidence for the link between boiling and epithermal Ag-Au mineralization in the La Luz area, Guanajuato Mining District, México[J]. Ore Geology Reviews, 89: 143~170.
- Moncada D, Mutchler S, Nieto A, *et al.* 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration[J]. Journal of Geochemical Exploration, 114: 20~35.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 67: 551~578.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulphides and carbon[M]// Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Wiley Interscience, New York, 509~567.
- Peng Yiwei. 2015. Magmatism and Au-Cu-Fe Polymetallic Mineralization System in the Tulasu Volcanic Belt, Xinjiang, NW China[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Peng Yiwei, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, *et al.* 2016. Genesis of the Tawuerbieke gold deposit in the Tulasu basin, western Tianshan: Evidence from geochronology and stable isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(5): 1 361~1 378 (in Chinese with English abstract).
- Peng Y W, Gu X X, Cheng W B, *et al.* 2018. Metallogenesis of the Late Palaeozoic Axi-Tawuerbieke Au-Pb-Zn district in the Tulasu Basin, Western Tianshan, China: Constraints from geological characteristics and isotope geochemistry[J]. Geological Journal, 53 (6): 3 030~3 050.
- Peng Y W, Gu X X, Chi G X, *et al.* 2021a. Genesis of the Nailenggele Mo-Cu-Pb-Zn polymetallic orefield in the Boluokenu Metallogenic Belt, Western Tianshan, China: Constraints from geochronology, fluid inclusions and isotope geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 129: 103940.
- Peng Y W, Gu X X, Chi G X, *et al.* 2021b. Fluid inclusions, isotopes and mineralogy of the Kuruer epithermal Cu-Au deposit, Chinese Western Tianshan: Implications for ore genesis and exploration[J]. Ore Geology Reviews, 139: 104385.
- Peng Y W, Gu X X, Chi G X, *et al.* 2021c. Genesis of the Xiaoyuzan epithermal Au deposit in the Yelimodun volcanic basin, Western Tianshan, China: Constraints from geology, geochronology, isotopes and mineralogical compositions [J]. Ore Geology Reviews, 128: 103907.
- Peng Y W, Gu X X, Lü P R, *et al.* 2017. Genesis and tectonic setting of the Late Devonian Tawuerbieke gold deposit in the Tulasu ore cluster, western Tianshan, Xinjiang, China[J]. International Geology Review, 59: 1 344~1 368.
- Peng Y W, Gu X X, Su J, *et al.* 2023. Geology, geochemistry and genesis of Tabei: A newly identified intermediate-sulphidation epithermal Pb-Zn deposit adjacent to low-sulphidation Au deposit in the Tulasu Basin, Chinese Western Tianshan[J]. Geological Journal, 58(2): 523~919.
- Peng Yiwei, Gu Xuexiang, Wang Xinli, *et al.* 2014. Ore geology and sulfur, lead, carbon and oxygen isotope composition of the Tabei Pb-Zn deposit, Yining County, Xinjiang[J]. Geoscience, 28(4): 674~685 (in Chinese with English abstract).
- Peng Yiwei, Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, *et al.* 2020. Genetic link between the Axi and Tawuerbieke gold deposits, Xinjiang Province: constraints from the fluid inclusions, S-Pb isotopes and thermoelectric characteristics of pyrite[J]. Acta Geologica Sinica, 94(10): 2 919~2 945 (in Chinese with English abstract).
- Pirajno F and Bagas L. 2002. Gold and silver metallogeny of the South China fold belt: A consequence of multiple mineralizing events[J]. Ore Geology Review, 20: 109~126.
- Potter R W I, Clyne M A and Brown D L. 1978. Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions[J]. Economic Geology, 73(2): 284~285.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions[M]. Mineral. Mineral. Soc. Am., 1~644.
- Seltmann R and Porter T M. 2005. The porphyry Cu-Au/Mo deposits of central Eurasia: 1. Tectonic, geologic & metallogenic setting and significant deposits [C]// Porter T M. Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective. PGC Publishing, Adelaide, 2: 467~512.
- Sha Deming, Jin Chengzhu, Dong Lianhui, *et al.* 2005. Study on the metallogenic geochemistry of Axi gold deposit in western Tianshan mountains[J]. Geology and Resources, 14(12): 118~125 (in Chinese with English abstract).
- Shimizu T. 2014. Reinterpretation of quartz textures in terms of hydrothermal fluid evolution at the Koryu Au-Ag deposit, Japan[J]. Economic Geology, 109: 2 051~2 065.
- Sillitoe R H and Hedenquist J W. 2003. Linkages between volcanotecton-

- ic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits[M]//Simmons SF and Graham I. Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: Rulers and witnesses of processes within the Earth. Littleton, Colo, USA: Society of Economic Geologists, 10: 315~343.
- Simmons S F and Browne P R L. 2000. Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal system: Implications for understanding low-sulfidation epithermal environments[J]. *Economic Geology*, 95: 971~1 000.
- Song Guoxue, Qin Kezhang, Li Guangming, *et al.* 2018. Basic characteristics and research progresses of intermediate sulfidation type epithermal gold poly-metallic deposits, and prospects[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 748~762 (in Chinese with English abstract).
- Song Guoxue, Qin Kezhang, Wang Le, *et al.* 2015. Type, zircon U-Pb age and Paleovolcano edifice of Zhengguang gold deposit in Duobaoshan orefield in Heilongjiang Province, NE-China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2 402~2 416 (in Chinese with English abstract).
- Sun Shengsheng, Xue Chunji, Tao Jianfeng, *et al.* 2016. H-O-S-Pb isotopic tracing and Re-Os dating of Bogutu gold deposit, western Tien Shan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 346~1 360 (in Chinese with English abstract).
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2010. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic magmatic rocks in the Lamasu-Dabate area, northwestern Tianshan (west China): Evidence for a tectonic transition from arc to post-collisional setting[J]. *Lithos*, 119(3~4): 393~411.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2013. Petrogenesis of gold-mineralized magmatic rocks of the Taerbieke area, northwestern Tianshan (western China): Constrains from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic compositions[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 113~128.
- Tang Gongjian, Wang Qiang, Zhao Zhenhua, *et al.* 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology, element geochemistry and petrogenesis of the andesites in the eastern Taerbieke gold deposit of the western Tianshan region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1 341~1 352 (in Chinese with English abstract).
- Wang L, Qin K Z, Song G X, *et al.* 2019. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification[J]. *Ore Geology Reviews*, 107: 434~456.
- Wang Y N, Cai K D, Sun M, *et al.* 2018. Tracking the multi-stage exhumation history of the western Chinese Tianshan by apatite fission track (AFT) dating: Implication for the preservation of epithermal deposits in the ancient orogenic belt[J]. *Ore Geology Reviews*, 100: 111~132.
- Wang Y N, Cai K D, Sun M, *et al.* 2021. Burial and exhumation of late paleozoic arc-related rocks in the Tulasu basin, Western Chinese Tianshan: Implication for the preservation of epithermal deposits in old orogenic belts[J]. *Gondwana Research*, 97: 51~67.
- White N C and Hedenquist J W. 1995. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration[J]. *Society of Economic Geology*, 23: 9~13.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, *et al.* 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic re-deformation of the Chinese Tien shan Range, Central Asia[J]. *Geology*, 18(2): 128~131.
- Xiao L, Hayward N, Begg G, *et al.* 2005. The Jingxi-Yelmand high-sulfidation epithermal gold deposit, Western Tianshan, Xinjiang Province, P. R China[J]. *Ore Geology Reviews*, 26(1~2): 17~37.
- Xiao W J, Windley B, Huang B C, *et al.* 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1 219~1 220.
- Xing H, Xue C, Chi G, *et al.* 2021. Petrogenesis of volcanic rocks of the Devonian-Carboniferous Dahalajunshan Formation, Western Tianshan: Implications for crustal growth in an accretionary orogen[J]. *Lithos*, 386~387: 106003.
- Xue Chunji, Wang Honggang, Zhao Xiaobo, *et al.* 2013. Kexiaxi cluster of small intrusions in the Tulasu gold mineralization district, Western Tianshan, Xinjiang, and its copper exploration prospect[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 180~194 (in Chinese with English abstract).
- Yakubchuk A. 2004. Architecture and mineral deposit settings of the Altaid orogenic collage: A revised model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 761~779.
- Yu J, Li N, Qi N, *et al.* 2018a. Carboniferous-Permian tectonic transition envisaged in two magmatic episodes at the Kuruer Cu-Au deposit, Western Tianshan (NW China) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 395~411.
- Yu J, Li N, Shu S, *et al.* 2018b. Geology, fluid inclusion and H-O-S isotopes of the Kuruer Cu-Au deposit in Western Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 100: 237~249.
- Yu J, Li N, Zhang B, *et al.* 2022. Perspective of Permian porphyry Cu-Au mineralization in Chinese Western Tianshan: Constraints from sulfide Re-Os dating and trace element study of the Kuruer deposit, Xinjiang[J]. *Ore Geology Reviews*, 142: 104707.

- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics-The model[J]. *Tectonophysics*, 75(1~2): 135~162.
- Zhai Wei, Sun Xiaoming, Gao Jun, *et al.* 2006. SHRIMP dating of zircons from volcanic host rocks of Dahalajunshan Formation in Axi gold deposit, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 399~1 404 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Wei, Sun Xiaoming, He Xiaoping, *et al.* 2007. Geochemistry of ore forming fluid and metallogenic mechanism of Axi low sulfidation gold deposit in Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(5): 659~669, 723 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Wei, Sun Xiaoming, Su Liwei, *et al.* 2010. Axi gold deposit: A Paleozoic low-sulfidation type of epithermal gold deposit in Xinjiang, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 266~285 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J B, An F, Wei S N, *et al.* 2020. Late Palaeozoic tectonic evolution of North Tianshan Orogenic Belt: Perspectives from geochronology and geochemistry of the Tulasu pluton in the Tulasu Basin[J]. *Geological Journal*, 55(6): 4 184~4 202.
- Zhang X, Klemd R, Gao J, *et al.* 2014. Metallogenesis of the Zhibo and Chagangnuoer volcanic iron oxide deposits in the Awulake Iron Metallogenic Belt, Western Tianshan orogen, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 151~172.
- Zhang Z C, Mao J W, Wang Y B, *et al.* 2010. Geochemistry and geochronology of the volcanic rocks associated with the Dong'an adularia-sericite epithermal gold deposit. Lesser Hinggan Range, Heilongjiang province, NE China: Constrains on the metallogenesis[J]. *Ore Geology Review*, 37: 158~174.
- Zhao X B, Xue C J, Chi G X, *et al.* 2014c. Epithermal Au and polymetallic mineralization in the Tulasu Basin, western Tianshan, NW China: Potential for the discovery of porphyry Cu-Au deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 60: 76~96.
- Zhao X B, Xue C J, Men Q H, *et al.* 2014b. Origin and metallogenesis of the Tawuerbieke gold deposit, western Tianshan: Insight from Re-Os geochronology and S-Pb isotopic compositions[J]. *Frontiers of Earth Science*, 21(5): 176~186.
- Zhao Xiaobo, Xue Chunji, Men Qihao, *et al.* 2014. Origin and metallogenesis of the Tawuerbieke gold deposit, western Tianshan: Insight from Re-Os geochronology and S-Pb isotopic compositions[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 176~186 (in Chinese with English abstract).
- Zhao X B, Xue C J, Selmann R, *et al.* 2020. Volcanic-plutonic connection and associated Au-Cu mineralization of the Tulasu ore district, Western Tianshan, NW China: Implications for mineralization potential in Palaeozoic arc terranes[J]. *Geological Journal*, 55(3): 2 318~2 341.
- Zhao X B, Xue C J, Symons D T A, *et al.* 2014a. Microgranular enclaves in island-arc andesites: A possible link between known epithermal Au and potential porphyry Cu-Au deposits in the Tulasu ore cluster, western Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85: 210~223.
- Zheng J H, Shen P and Li C H. 2020. Ore genesis of Axi post-collisional epithermal gold deposit, western Tianshan, NW China: Constraints from U-Pb dating, Hf isotopes, and pyrite in situ sulfur isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 117: 103~290.
- Zhong J, Chen Y J, Chen J, *et al.* 2018. Geology and fluid inclusion geochemistry of the Zijinshan high-sulfidation epithermal Cu-Au deposit, Fujian Province, SE China: Implication for deep exploration targeting[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 184: 49~65.

附中文参考文献

- 安芳, 朱永峰. 2008. 西北天山吐拉苏盆地火山岩 SHRIMP 年代学和微量元素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 24(12): 2 741~2 748.
- 安芳, 朱永峰, 魏少妮, 等. 2014. 西北天山京希-伊尔曼德金矿区狮子山次火山岩的年代学、地球化学特征及其地质、成矿意义[J]. *岩石学报*, 30(6): 1 545~1 557.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2 085~2 108.
- 董连慧, 沙德铭. 2005. 西天山地区晚古生代浅成低温热液金矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~154.
- 冯萍娟. 2005. 西天山吐拉苏地区主要金矿床地质地球化学及成因研究[D]. 西安: 西北大学.
- 冯萍娟, 王居里, 欧阳征健. 2007. 西天山阿希、京希-伊尔曼德金矿床矿化类型探讨——来自流体包裹体的证据[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 37(1): 99~102.
- 顾枫华, 章永梅, 彭义伟, 等. 2017. 新疆西天山阔库确科铁铜矿区成矿岩体地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. *矿物学报*, 37(1): 196~217.
- 顾雪祥, 董连慧, 彭义伟, 等. 2016. 新疆西天山吐拉苏火山岩盆地浅成低温热液-斑岩型金多金属成矿系统的形成与演化[J]. *岩石学报*, 32(5): 1 283~1 300.
- 黄新, 徐争强. 2014. 新疆伊犁地区托乎拉苏铅锌矿成矿地质条件及找矿标志[J]. *内蒙古石油化工*, 17: 39~40.
- 李华芹, 陈富文. 2004. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京:

地质出版社.

李华芹, 谢才富, 常海亮. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京: 地质出版社, 1~264.

刘溪溪. 2014. 新疆塔北和吐拉苏铅锌矿床地质地球化学特征及成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

彭义伟. 2015. 新疆西天山吐拉苏火山岩带岩浆作用与金铜铁多金属成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

彭义伟, 顾雪祥, 程文斌, 等. 2016. 西天山吐拉苏盆地塔吾尔别克金矿床成因探讨: 来自同位素年代学和稳定同位素证据[J]. 岩石学报, 32(5): 1 361~1 378.

彭义伟, 顾雪祥, 王新利, 等. 2014. 新疆伊宁县塔北铅锌矿床地质特征和S、Pb、C、O同位素组成[J]. 现代地质, 28(4): 674~685.

彭义伟, 顾雪祥, 章永梅, 等. 2020. 新疆阿希与塔吾尔别克金矿床的成因联系: 来自流体包裹体、S-Pb同位素和黄铁矿热电性的证据[J]. 地质学报, 94(10): 2 919~2 945.

沙德铭, 金成洙, 董连慧, 等. 2005. 西天山阿希金矿成矿地球化学特征研究[J]. 地质与资源, 14(12): 118~125.

宋国学, 秦克章, 李光明, 等. 2018. 中硫型浅成低温热液金多金属矿床基本特征、研究进展与展望[J]. 岩石学报, 34(3): 748~762.

宋国学, 秦克章, 王 乐, 等. 2015. 黑龙江多宝山矿田争光金矿床

类型、U-Pb年代学及古火山机构[J]. 岩石学报, 31(8): 2 402~2 416.

孙升升, 薛春纪, 陶剑丰, 等. 2016. 西天山博故图金矿床H-O-S-Pb同位素示踪和Re-Os法测年[J]. 岩石学报, 32(5): 1 346~1 360.

唐功建, 王 强, 赵振华, 等. 2009. 西天山东塔尔别克金矿区安山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学、元素地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, 25(6): 1 341~1 352.

新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.

薛春纪, 王洪刚, 赵晓波, 等. 2013. 新疆西天山吐拉苏金矿集区克峡希小岩体群及其铜矿找矿前景[J]. 地学前缘, 20(6): 180~194.

翟 伟, 孙晓明, 高 俊, 等. 2006. 新疆阿希金矿床赋矿围岩——大哈拉军山组火山岩SHRIMP锆石年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1 399~1 404.

翟 伟, 孙晓明, 贺小平, 等. 2007. 新疆阿希低硫型金矿床流体地球化学特征与成矿机制[J]. 地质学报, 81(5): 659~669, 723.

翟 伟, 孙晓明, 苏丽薇, 等. 2010. 新疆阿希金矿: 古生代的低硫型浅成低温热金矿床[J]. 地学前缘, 17(2): 266~285.

赵晓波, 薛春纪, 门启浩, 等. 2014. 西天山塔乌尔别克金矿成矿作用: Re-Os年龄和S-Pb同位素示踪[J]. 地学前缘, 21(5): 176~186.