

DOI: 10.12401/j.nwg.2022031

新疆西天山阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床成因 ——来自流体包裹体和同位素的证据

苏静^{1,2}, 顾雪祥^{1,2,3,*}, 彭义伟^{1,2,3}, 沈宇凡¹, 舒志平¹, 梁清栋⁴, 王春山⁴, 陈曦⁵

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学自然资源部构造矿产成藏重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局七〇三队, 新疆 伊犁 835000; 5. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要: 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床位于新疆西天山乌孙山脉西南缘, 矿体产于下石炭统阿克沙克组灰岩中, 其产状整体与地层基本一致。由于矿体具有层控特征, 矿区地表和深部未见侵入岩体, 导致该矿床与岩浆作用的关系尚不清楚。成矿过程大致可分为 4 个阶段: 石榴子石-辉石阶段(I)、阳起石-黑柱石阶段(II)、石英-方解石-多金属硫化物阶段(III)和碳酸盐阶段(IV)。阶段 II 阳起石与阶段 III 石英、方解石和闪锌矿主要发育气液两相水包裹体(L-V 型)以及少量单相液相水包裹体(L 型)。阶段 II 中阳起石 L-V 型包裹体均一温度和盐度分别为 278~425 °C 和 2.1~13.0 wt.% NaCl eqv, 阶段 III 热液矿物中 L-V 型包裹体均一温度和盐度分别为 162~342 °C 和 0.5~9.0 wt.% NaCl eqv。流体包裹体和 C-H-O 同位素组成特征显示, 初始成矿流体主要为岩浆水, 后期大气降水逐渐混入, 导致成矿温度和盐度的降低以及矿物质的沉淀。矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大(-7.57‰~1.30‰), Pb 同位素具有壳幔混合特征。综合矿床地质、流体包裹体和同位素特征, 推断阿尔恰勒属于远端矽卡岩型 Pb-Zn-Cu 矿床, 其成矿物质具有深部岩浆和地层的混源特征。矿区内矿体由南侧浅部的 Pb-Zn 矿化逐步过渡到北侧深部的 Cu±Zn 矿化, 暗示矿区北部深部可能存在隐伏的含矿岩体及接触带铜矿体。

关键词: 流体包裹体; 同位素; 远端型矽卡岩矿床; 阿尔恰勒; 西天山

中图分类号: P611; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0081-18

Genesis of the Arqiale Pb-Zn-Cu Deposit in the Western Tianshan, Xinjiang: Evidence from Fluid Inclusions and Isotopes

SU Jing^{1,2}, GU Xuexiang^{1,2,3,*}, PENG Yiwei^{1,2,3}, SHEN Yufan¹, SHU Zhiping¹,
LIANG Qingdong⁴, WANG Chunshan⁴, CHEN Xi⁵

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-08-20; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金项目“新疆西天山北缘晚古生代斑岩-矽卡岩型铜钼铁多金属成矿与岩浆-热液作用过程”(42130804), “斑岩成矿系统中次浅成低温热液型矿床成矿机制研究: 以新疆加曼特和小于赞金矿床为例”(41702081), 成都理工大学珠峰研究计划项目“青藏高原及周缘矿产资源成矿规律、勘探及开发利用”(2020ZF11407)联合资助。

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: 顾雪祥(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事矿床学及矿床地球化学教学与相关研究。E-mail: xuexiang_gu@cugb.edu.cn。

- (1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, MLR, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Geological Team 703 of the Xinjiang Bureau of Nonferrous Metals, Yili 835000, Xinjiang, China; 5. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: The Arqiale Pb–Zn–Cu deposit is located in the southwestern margin of the Wusun Mountain in the Western Tianshan, Xinjiang Province. The orebodies occur in the limestone of Lower Carboniferous Akeshake Formation and are generally consistent with the strata in occurrence. Considering that the orebodies are stratabound and no magmatic rocks are identified in the orefield, whether the deposit is related to magmatism remains controversial. Ore-forming process can be divided into four stages, including garnet-pyroxene stage (I), actinolite-ilvaite stage (II), quartz-calcite-polymetallic sulfide stage (III) and carbonate stage (IV). Two types of inclusions have been identified in the actinolite from stage II and quartz, calcite and sphalerite from stage III, including the two-phase aqueous inclusions (L–V type) and mono-phase liquid aqueous inclusions (L type). The L–V type inclusions in actinolite have homogenization temperatures and salinities ranging from 278 °C to 425 °C and 2.1 wt.% NaCl eqv to 13.0 wt.% NaCl eqv, respectively. By contrast, the L–V type inclusions in stage III hydrothermal minerals have homogenization temperatures and salinities ranging from 162 °C to 342 °C and 0.5 wt.% NaCl eqv to 9.0 wt.% NaCl eqv, respectively. Fluid inclusions and C–H–O isotopic compositions indicate that the initial ore-forming fluids were mainly source from magmatic water, with increasing input of meteoric water with time, leading to the decrease of temperatures and salinities, as well as the precipitation of ore-forming materials. The $\delta^{34}\text{S}$ ratios of sulfides in the ores have a wide range (–7.57‰~1.30‰), and the Pb isotopic compositions have the characteristics of crust–mantle mixing. Combined evidence from geology, fluid inclusions and S–Pb–C–H–O isotopes indicate that the Arqiale Pb–Zn–Cu deposit belongs to the distal skarn type deposit, with the ore-forming materials sourcing partially from the magmatic rocks at depth and partially from the strata. The orebodies in the ore field gradually transit from Pb–Zn orebodies at shallow in the south to Cu ± Zn orebodies at depth in the north, implying that the concealed causative intrusions and skarn Cu orebodies in the contact zone may occur in the deep part in the north of the mining area.

Keywords: fluid inclusions; S–Pb isotope; Distal skarn deposit; Arqiale; Western Tianshan

碳酸盐岩赋矿的贱金属(Pb–Zn±Cu)矿床主要包括密西西比河谷型(MVT)、沉积喷流型(SEDEX)和岩浆热液型3种(Ehya, 2014; Rajabi et al., 2015; Boveiri Konari et al., 2017)。这类矿床受控于层间破碎带或不整合面, 矿石组成简单, 围岩蚀变弱, 矿化深度浅, 矿体连续产出并往往与地层产状一致, 整体具有“层控”的特点(Zaw et al., 2007; Zhu et al., 2017)。MVT型矿床主要产于沉积盆地边缘或沉积基底突起部位的碳酸盐岩地层中, 该种矿床常形成于挤压造山运动的扩张环境中, 断层起重要控矿作用, 一般与岩浆活动无关(Wang et al., 2014)。SEDEX型矿床主要产于被动大陆边缘或断陷盆地中, 围岩以碳酸盐岩为主, 且矿体具有“上层下脉”的特征(Leach et al., 2010)。岩浆热液型矿床主要为远接触带的矽卡岩型贱金属

矿床或碳酸盐岩交代型贱金属矿床。这类矿床通常形成于碳酸盐岩与中酸性侵入体的复杂交代作用(Meinert et al., 2005)。大多数矽卡岩发现于侵入体内外接触带, 称为近端型矽卡岩。但在某些情况下, 岩浆热液可沿断层或层间破碎带迁移相当远的距离, 在合适的位置发育矽卡岩及矿体, 称为远端型矽卡岩。通常, 在近端附近常产出温度较高的Fe–Cu型矽卡岩, 远端产出温度较低的Zn–Pb型矽卡岩(Vezzoni et al., 2016)。

新疆西天山伊犁地块伊什基里克成矿带在下石炭统地层中发育一系列的Au、Pb–Zn–Cu和Cu矿床(图1)(高俊等, 2009; Xu et al., 2013)。阿尔恰勒Pb–Zn–Cu矿床位于伊什基里克成矿带西侧的乌孙山地区(图1c), 矿体呈层状-似层状赋存于下石炭统阿克苏

床成因,为矿区和区域的找矿勘查提供理论支撑。

1 区域地质背景

西天山位于中亚造山带南缘(图 1a),是全球重要的矿产资源基地,常以 88°E 将其划分为西天山和东天山(Glorie et al., 2011; Xiao et al., 2013)。新疆西天山由南向北可分为 4 个地块:南天山褶皱带、中天山地块、伊犁地块和北天山岛弧带(图 1b)。伊什基里克成矿带位于伊犁地块西南缘,出露地层由老到新分别为下石炭统大哈拉军山组(C_1d)中酸性火山岩与阿克沙克组(C_1a)浅海相碳酸盐岩、上石炭统伊什基里克组(C_2y)陆相中酸性火山岩、下二叠统乌郎组(P_1w)陆相火山岩夹少量碎屑岩、上二叠统铁木里克组(P_2t)山麓—河流堆积红色磨拉石建造和侏罗系下中统水西沟群(J_{1-2sh})灰绿色—黄绿色碎屑岩。石炭系构成了成矿带的主体地层,与上覆地层呈角度不整合接触关系(图 1c)。

伊什基里克成矿带主体为轴向近东西向的复式背斜,构造活动频繁,乌孙山断裂位于背斜核部,主体为下石炭统大哈拉军山组,向两翼地层依次变新,分别为下石炭统阿克沙克组、上石炭统、二叠系和侏罗系(图 1c)。近东西走向的乌孙山断裂为区域内的主干断裂,控制着区内岩浆活动和矿床的空间展布。此外,区域还发育一系列规模较小的南北向的次级张性断裂,与近东西向乌孙山主干断裂共同控制着区域内的矿床分布,尤其是南北向的分支断裂与东西向的主干断裂的复合部位是成矿的最有利地段,如库茹尔 Cu-Au 矿床、库勒 Mo 矿床、博古图 Au 矿床、卡拉萨伊 Au 矿床、北山 Cu 矿床和阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床(图 1c)。

区域内岩浆活动活跃,以晚古生代的中酸性侵入岩为主,沿乌孙山断裂近东西向分布。晚泥盆世—早石炭世花岗岩类主要包括钾长花岗岩和花岗闪长岩(363~342 Ma)(李永军等, 2007, 2008; 朱志敏等, 2012; Bao et al., 2018; Su et al., 2018; Dai et al., 2019),主要侵位于下石炭统大哈拉军山组,形成于晚古生代南天山洋向伊犁—中天山板块之下北向俯冲背景下。晚石炭世(311~306 Ma)的辉绿岩形成于南天山洋与伊犁—中天山板块同碰撞时期(高俊, 1993; Long et al., 2011; Lin et al., 2015)。二叠纪岩体(292~264 Ma)主要包括二长花岗岩和石英钠长斑岩,侵位于上石炭统伊什基

里克组,形成于后碰撞背景下(李永军等, 2007; Yu et al., 2018)。

2 矿床地质特征

阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床位于伊什基里克成矿带西南缘,昭苏县西北 30 km 处。矿区出露地层为下石炭统大哈拉军山组(C_1d)和下石炭统阿克沙克组(C_1a)(图 2)。下石炭统大哈拉军山组位于矿区南部,走向东西,向北倾向,下部岩性为岩屑晶屑凝灰岩和英安岩等,上部岩性为安山岩和安山质凝灰岩等。下石炭统阿克沙克组位于矿区北部,走向东西,向北倾向,下部岩性为砂岩、灰岩和杂砂岩等,上部岩性为灰岩、生物碎屑灰岩和钙质砂岩等,含有丰富的生物化石(珊瑚、腕足类等);该地层不整合覆盖于大哈拉军山组之上,其灰色厚层状灰岩是重要的赋矿岩性。

矿区位于乌孙山复式褶皱北翼,总体为单斜地层,整体倾向北北西。区域内主要有 4 条构造,分别是北东东向的 F_1 和 F_2 、北北西向的 F_3 和 F_4 (图 2)。区域内构造活动丰富,其中 F_2 是成矿前的断裂,倾向北西,被 F_3 和 F_4 错断(图 3); F_1 、 F_3 和 F_4 是成矿后的断裂,在不同程度上穿切矿体。 F_1 与 F_3 规模较小,断裂宽度约 1~2 m。 F_4 为矿区的主要断裂,规模最大,约 20 m,将矿体分割为东西两部分。

阿尔恰勒矿区仅在矿区北部和南部见到少量辉绿岩脉和辉长闪长岩,侵入于大哈拉军山组火山岩中,岩脉为灰绿色,岩体呈褐绿色,岩石致密块状。矿区内辉长闪长岩和辉绿岩岩脉锆石年龄为(343±6) Ma(Dai et al., 2019)和(311.3±2.3) Ma(Lin et al., 2015)。

阿尔恰勒矿床南部地表浅部以铅锌矿体为主,西北深部以铜矿体为主。通过野外实地调查,目前矿区主要有 5 个矿体,分别编号为 I~V 号。I、II 号矿体位于 F_4 西侧,III、IV 和 V 号矿体和一些小型体位于 F_4 东侧。其中 I 号矿体是阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床中最大的一个矿体,赋存于北东—南西走向的阿克沙克组灰岩中,呈层状、透镜状产出(图 4a),部分切穿地层(图 4b)。该矿体倾向北北东,倾角为 65°。它沿走向延伸约 220 m,平均宽度为 12 m。矿体的 Pb、Zn、Cu 和 Ag 的平均品位分别为 2.41%、7.24%、2.07% 和 47 g/t。

阿尔恰勒矿区矿石包括地表浅部的铅锌矿石和深部的铜矿石(图 3),通常呈块状、脉状、浸染状和不规则状产出(图 4c~图 4f)。矿石中金属矿物主要为

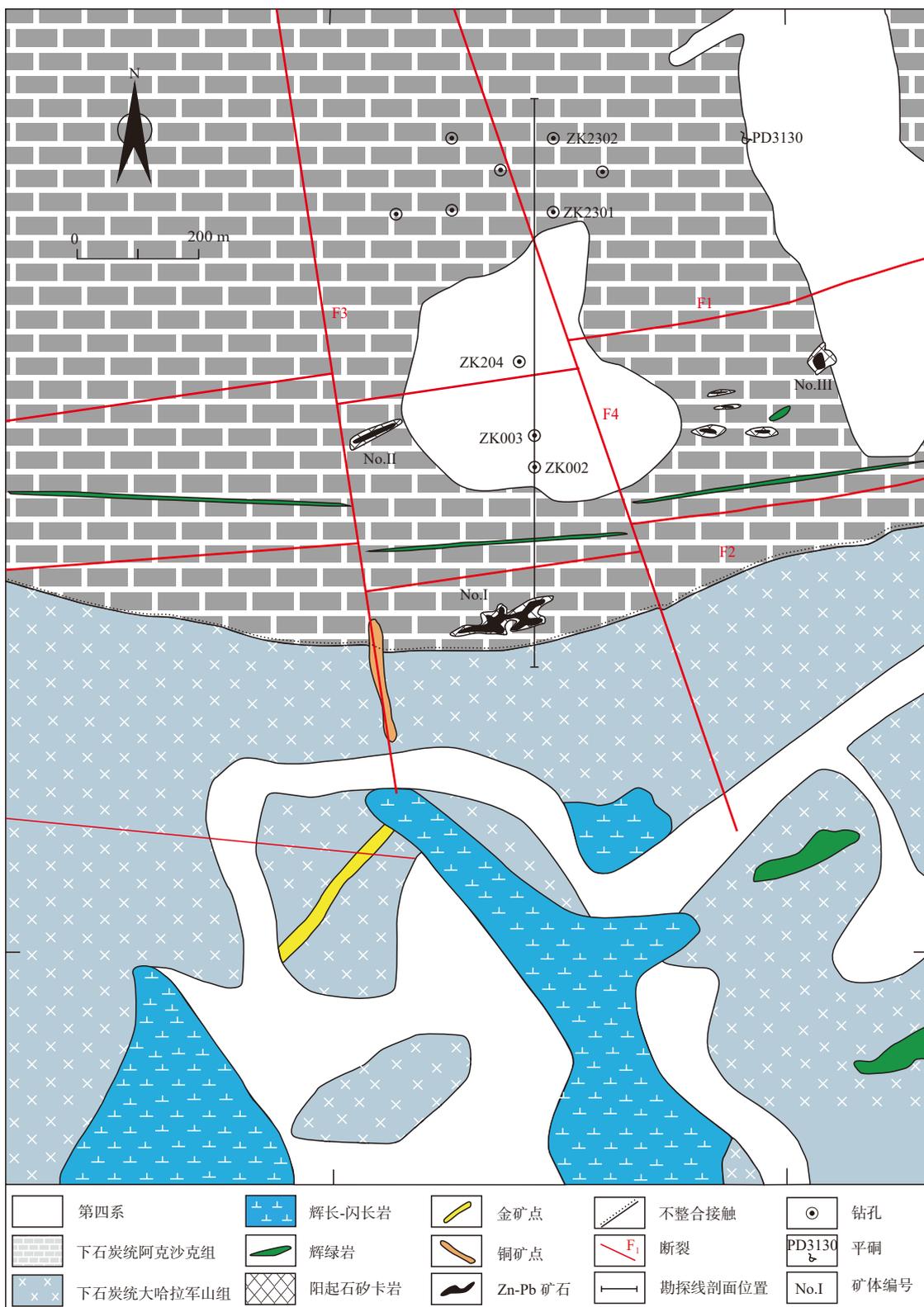


图 2 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿区地质图(据 Dai et al., 2019)

Fig. 2 Sketch geological map of the Arqiale Zn-Pb-Cu deposit

闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和黄铜矿(图 4、图 5)。黄铁矿多为中粗粒的自形-半自形晶,在矿石中通常呈稀

疏浸染状或浸染状分布,常被黄铜矿交代和包含(图 5b),被闪锌矿和方铅矿交代(图 5d)。黄铜矿常

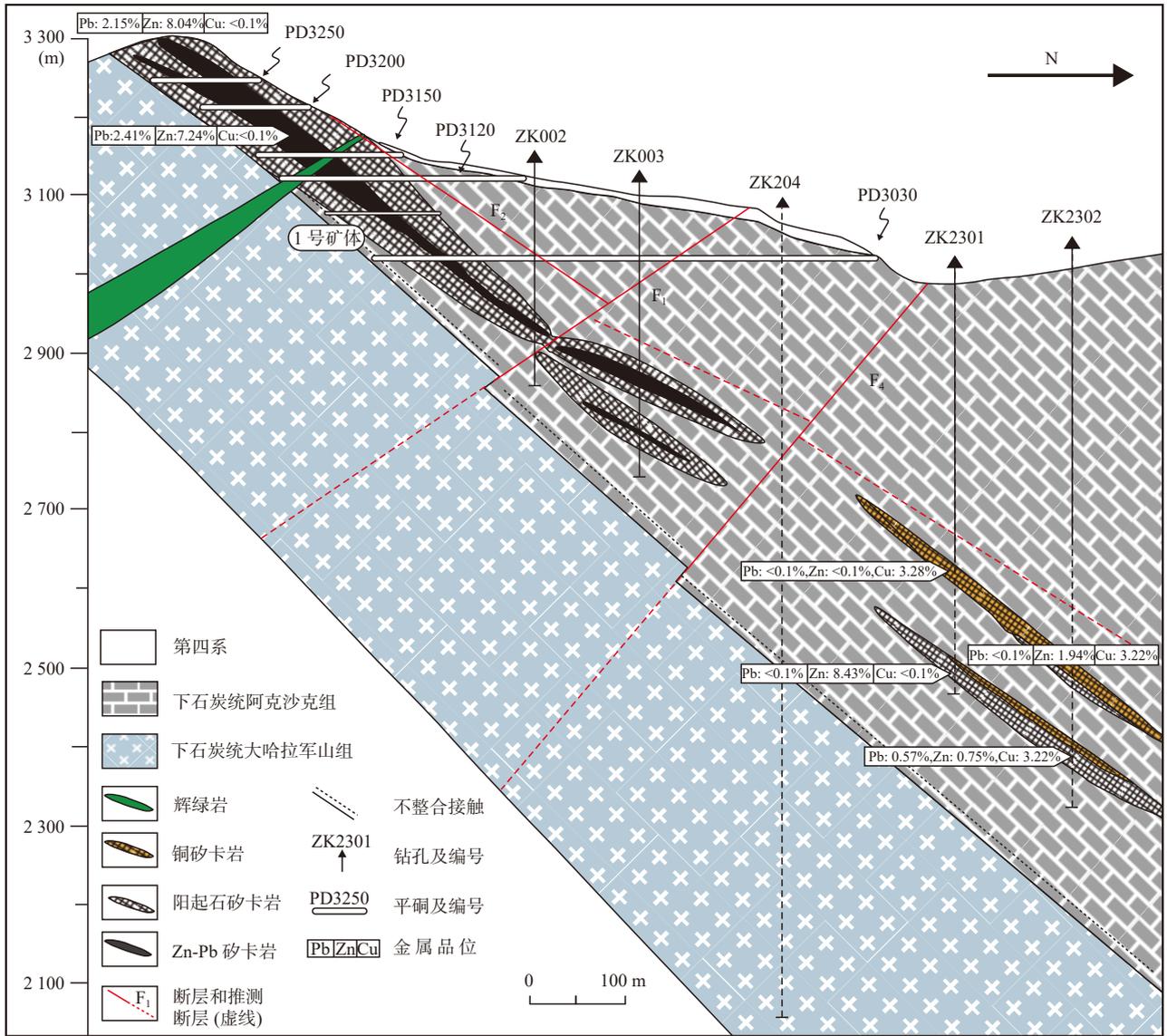


图3 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床 3 号勘探线剖面图(据 Dai et al., 2019 修改)

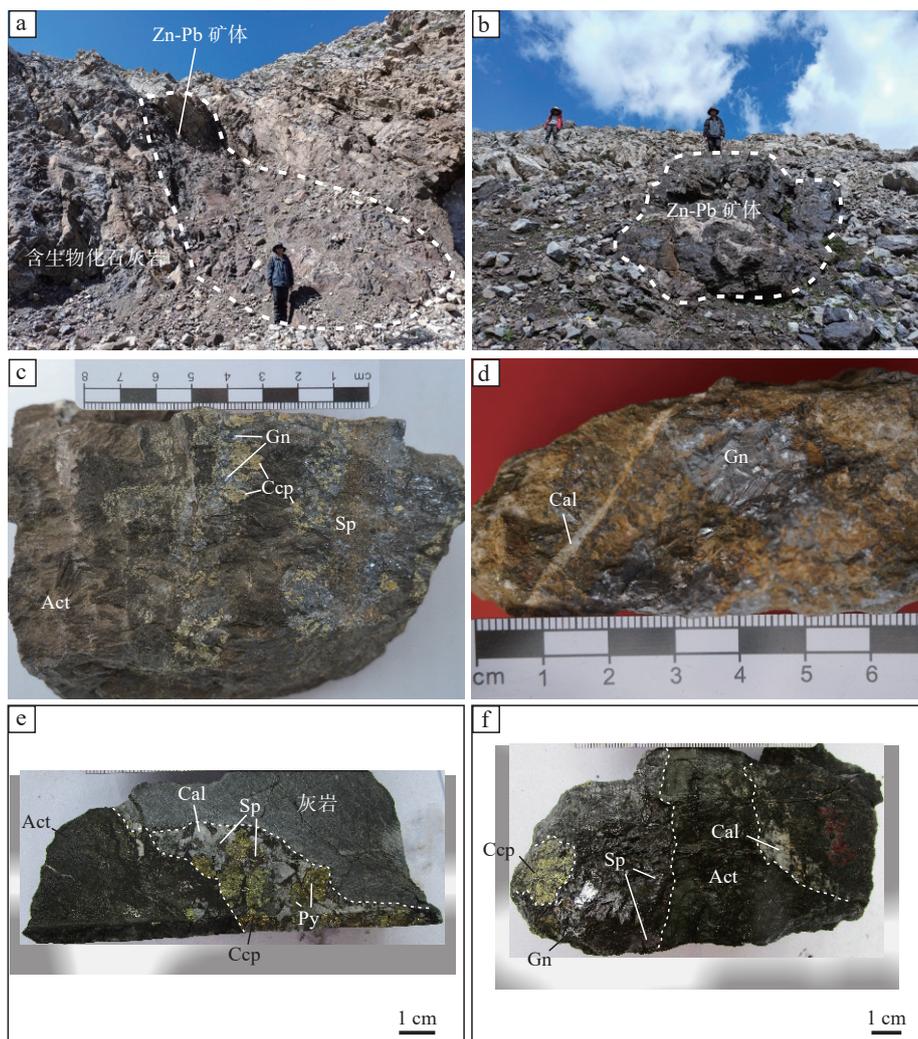
Fig. 3 The geological profile of exploration line 3 of the Arqiale Zn-Pb-Cu deposit

为粗粒的他形晶体,常交代黄铁矿(图 5b)及被闪锌矿和方铅矿交代(图 5c~图 5d)。随探勘工作的进行,在矿区北西部深部发现大量黄铜矿,常穿插或交代阳起石(图 4c、图 4e~图 4f)。闪锌矿自形程度较低,常与方铅矿一同产出,交代黄铁矿和黄铜矿(图 5c)或被方铅矿交代(图 5e),透射光下闪锌矿呈棕红色(图 5h)。方铅矿常呈粗粒的自形-半自形结构(图 4d),常交代早期硫化物,局部可见揉皱结构(图 5d)。

矿石中非金属矿物主要为石榴子石、辉石、阳起石、黑柱石、方解石和石英等(图 4c~图 4f、图 5f~图 5i)。石榴子石大部分石晶型完整,中粗粒自形产出,主要有同心环带结构或振荡环带结构(图 5i、图 5k),常被阳起石和硫化物交代(图 5a、图 5f),在部

分石榴子石粒间可见黄铜矿填充(图 5a)。辉石镜下较少见,一般与石榴子石共生,部分被方解石交代。阳起石通常呈针状或放射状(图 4c、图 5g),常被金属矿物、方解石和石英交代(图 4c、图 5g~图 5h)。方解石是矿石中主要的脉石矿物,常交代早期的砂卡岩矿物,如石榴子石和阳起石等(图 5f~图 5g)。石英发育较少,常交代或包含早期砂卡岩矿物(图 5f)。围岩蚀变类型多样,主要有阳起石化、碳酸盐化和硅化。阳起石化发育广泛,与 Pb-Zn-Cu 矿化空间上关系密切,是矿区勘探与采矿工作的重要找矿标志。碳酸盐化表现为方解石呈脉状产于矿石内部;硅化表现为石英脉穿切矿体,常与硫化物共生。

基于矿物组合、矿石组构、脉体穿插关系和围岩



a. 砂卡岩层状矿体, 与赋矿灰岩产状基本一致; b. 砂卡岩矿体穿切赋矿灰岩层理; c. 阳起石被黄铜矿-方铅矿-闪锌矿脉穿插;
d. 方铅矿矿石被方解石细脉穿插; e. 方解石-硫化物(黄铜矿、闪锌矿和黄铁矿)脉沿着灰岩与阳起石砂卡岩接触带产出;
f. 方解石-硫化物(黄铜矿、方铅矿和闪锌矿)脉穿切早阶段阳起石; Act. 阳起石; Ilv. 黑柱石; Qz. 石英; Cal. 方解石;
Ccp. 黄铜矿; Py. 黄铁矿; Gn. 方铅矿; Sp. 闪锌矿

图 4 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床矿体露头及典型矿石特征

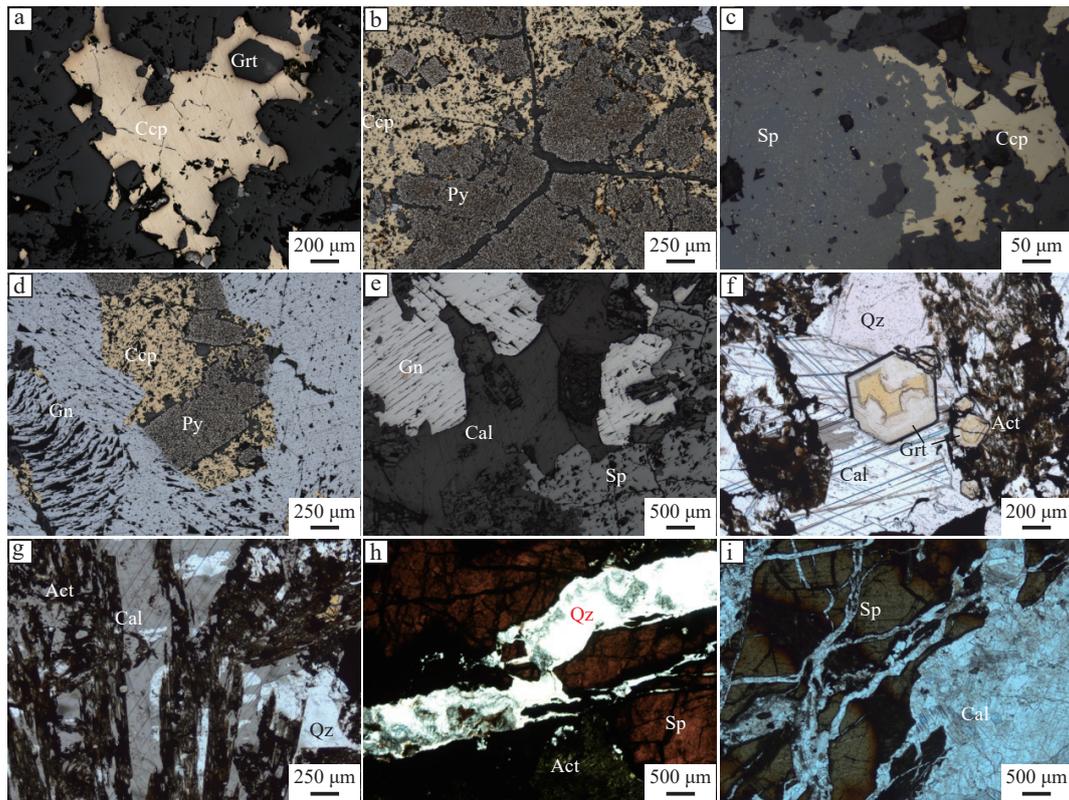
Fig. 4 Outcrop of orebodies and typical ores in the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

蚀变类型, 可将成矿过程分为 4 个阶段: 石榴子石-辉石阶段(I)、阳起石-黑柱石阶段(II)、石英-方解石-多金属硫化物阶段(III)和碳酸盐阶段(IV)。阶段 I 主要发育石榴子石和少量辉石, 这类无水硅酸盐矿物常被阳起石交代, 或被黑柱石切断; 阶段 II 主要发育阳起石、黑柱石等含水硅酸盐矿物, 多被金属硫化物交代, 局部被方解石细脉穿切。阶段 III 为阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床的主成矿阶段, 其中的石英、方解石和金属硫化物紧密共生。阶段 IV 以发育大量的方解石脉, 填充于裂隙中, 部分穿切早期金属硫化物和砂卡岩矿物。

3 样品采集与分析方法

3.1 流体包裹体

笔者选取阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床平硐和岩心的代表性矿石磨制包裹体片, 然后进行流体包裹体岩相学和显微测温工作。在切制包裹体片时, 为使所测的样品与成矿流体的关系更为密切, 样品以阶段 II 的阳起石和阶段 III 方解石、石英及闪锌矿作为观察对象, 将矿石样品送至河北廊坊尚艺岩矿有限公司, 磨制成 100 μm 左右两面抛光的包裹体片。



a. 自形石榴子石被黄铜矿包含和交代; b. 自形-半自形黄铁矿被黄铜矿交代; c. 两个世代的黄铜矿, 第一世代黄铜矿大片产出、并被闪锌矿交代, 第二世代黄铜矿呈乳滴状产出于闪锌矿中; d. 半自形黄铁矿被黄铜矿和方铅矿交代, 黄铜矿被方铅矿交代; e. 方铅矿交代闪锌矿, 二者粒间充填有方解石; f. 砂卡岩期的石榴子石和阳起石被晚期石英和方解石胶结和交代; g. 放射状阳起石被方解石和石英交代; h. 红棕色闪锌矿被石英细脉穿切, 部分闪锌矿破碎成角砾被石英胶结; i. 闪锌矿被晚期方解石细脉穿插; Grt. 石榴子石; Act. 阳起石; Qz. 石英; Cal. 方解石; Ccp. 黄铜矿; Py. 黄铁矿; Sp. 闪锌矿; Gn. 方铅矿

图5 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床矿石显微组构特征

Fig. 5 Microfabric characteristics of ore in the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

流体包裹体的均一温度、冰点温度分析测试在成都理工大学地球科学学院资源勘查工程系流体包裹体实验室完成。在镜下观测过程中, 将阶段Ⅱ阳起石和阶段Ⅲ方解石、石英及闪锌矿中的流体包裹体根据不同类型、分布特征及形态特征进行分类和圈定。将已圈定好的典型包裹体片用丙酮溶胶泡去胶水, 将包裹体片分解成合适大小, 选取颗粒较大, 形态完整, 便于观察的流体包裹体放置 Linkam THMS G600 冷热台进行显微测温分析。该冷热台温度测定范围为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 显示温度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 均一温度测定误差为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冰点测定误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测试过程中, 升降速率保持在 $0.5\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 之间, 相变点附近速率降为 $0.2\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

3.2 C-O 同位素

笔者选取矿石中的热液方解石、赋矿灰岩和大理岩开展了 C-O 同位素分析测试。首先, 挑选出代

表性样品粉碎至 40~60 目, 在双目镜下挑选纯度高 ($\geq 99\%$) 的样品, 超声波浴中清洗后放至玛瑙研钵中磨成 200 目以上粉末。C-O 同位素分析在北京科荟检测技术有限公司完成。仪器为美国热电公司的 253 plus、Gas Bench。色谱柱(熔硅毛细管柱: 规格为 Poraplot Q, 25 m*0.32 mm)温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。称量约 $100\text{ }\mu\text{g}$ 绝对量方解石单矿物样品加入到 12 ml 反应瓶中, 实验过程中使用 18 个为标样(分别为 NBS18、IAEA-603、GBW04405 和 GBW04416)。采用高纯氦气进行排空处理, 时间为 600 s, 流速 $100\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ 。排空后加入 5 滴 100% 无水磷酸后置于 $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热盘中反应并平衡(方解石反应及平衡时间大于 4 小时)。样品与磷酸反应且平衡后的 CO_2 气体经过 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的熔硅毛细管柱, 与其他杂质气体分离, 进入到稳定气体同位素-质谱仪进行测定, 测试精度高于 0.1%。

4 测试结果

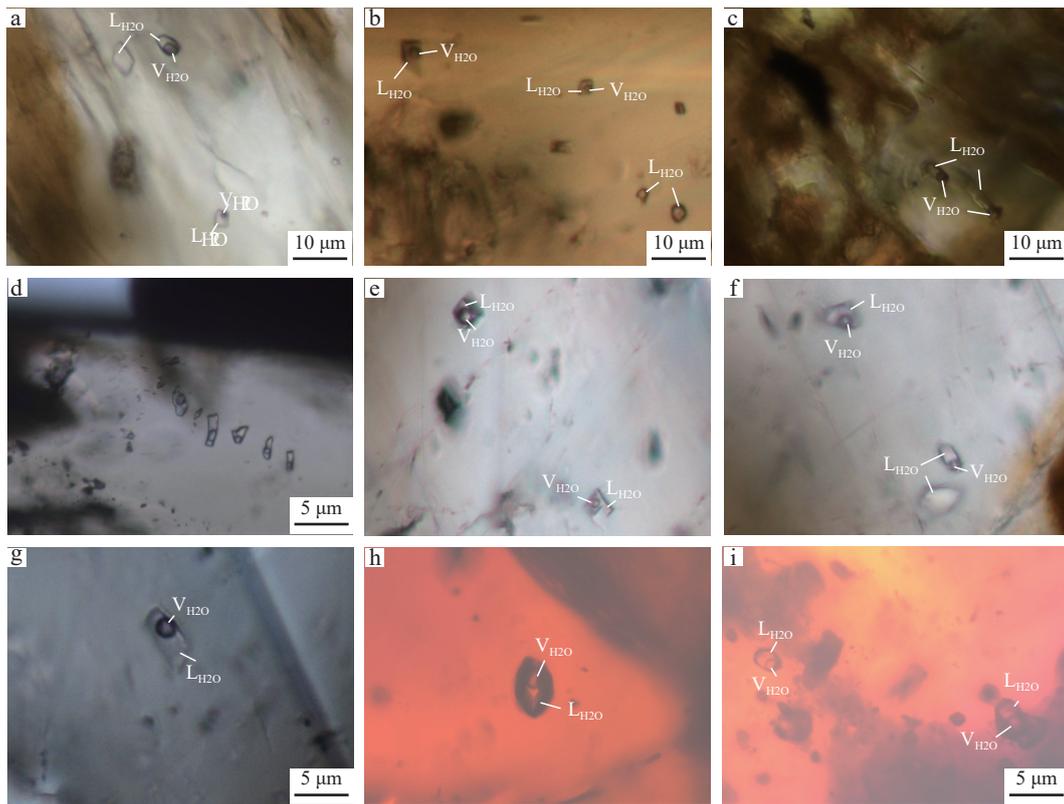
4.1 流体包裹体岩相学

阶段 II 和阶段 III 热液矿物中的流体包裹体较为发育, 以原生包裹体为主, 次生与假次生包裹体较少。根据阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床流体包裹体在室温条件下不同相态的组分与比例, 可将其划分为富液相两相盐水包裹体(L-V 型)和纯液相水溶液包裹体(L 型)。

阶段 II 阳起石中的 L-V 型包裹体气液比为 15%~36%, 大小为 5~17 μm , 包裹体呈黄色, 气泡颜色较黑, 形态多为长条状、椭圆状和圆状, 常成群分布(图 6a~图 6c); L 型包裹体数量较少, 大小为 3~

10 μm , 包裹体颜色为无色, 呈近圆状分布于 L-V 型包裹体附近。

阶段 III 富含 L-V 型包裹体的宿主矿物多样, 包括方解石、闪锌矿和石英。方解石中流体包裹体气液比为 12%~42%, 大小为 7~20 μm , 多聚集产出, 形态为柱状、椭圆状或长条状(图 6d~图 6f); 闪锌矿中流体包裹体气液比为 17%~38%, 大小为 7~15 μm , 呈星散状分布, 多为不规则状(图 6h~图 6i); 石英中流体包裹体数量较少, 气液比为 20%~35%, 大小为 10~15 μm , 数量较少, 孤立出现, 形态为近椭圆状(图 6g)。3 种宿主矿物的 L-V 型流体包裹体加热后均一至液相。L 型包裹体数量较少, 仅在方解石中发现, 大小为 7~12 μm , 包裹体颜色为无色透明, 呈椭圆状分布于 L-V 型包裹体附近。



a. 阳起石中 L-V 型和 L 型流体包裹体共存于一个视域中; b. 阳起石 L 型包裹体分布于 L-V 型包裹体附近; c. 阳起石中长条状 L-V 型包裹体; d. 方解石中成群分布的 L-V 型流体包裹体; e. 方解石中的负晶形 L-V 型流体包裹体; f. 方解石中 L-V 型和 L 型流体包裹体; g. 石英中孤立分布的 L-V 型流体包裹体; h. 闪锌矿中孤立分布的 L-V 型流体包裹体; i. 闪锌矿中星散状分布的 L-V 型流体包裹体

图 6 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床阶段 II 和阶段 III 流体包裹体镜下照片

Fig. 6 Microscopic images of fluid inclusions in stage II and III of the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

4.2 显微测温结果

本次流体包裹体实验中, 共对阶段 II 和阶段 III 的 205 个流体包裹体进行均一温度、冰点温度分析, 据

公式计算出盐度和密度(刘斌等, 1999; Hall et al., 1988)。阳起石、石英、方解石和闪锌矿中流体包裹体测试结果如表 1、图 7 和图 8。

表 1 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床气液两相水流体包裹体显微测温结果

Tab. 1 Temperature measurement results of two-phase aqueous inclusions from the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

成矿阶段	宿主矿物	包裹体类型(数量)	冰点温度(°C)	均一温度(°C)	盐度(wt.% NaCl eqv)	密度(g/cm ³)
阶段 II	阳起石	L-V(84)	-9.1~-1.2	278~425	2.1~13.0	0.6~0.9
	闪锌矿	L-V(7)	-5.4~-2.6	226~265	4.3~8.4	0.8~0.9
阶段 III	方解石	L-V(111)	-5.8~-0.3	162~311	0.5~9.0	0.7~1.0
	石英	L-V(3)	-5.4~1.8	230~342	3.1~8.1	0.7~0.9

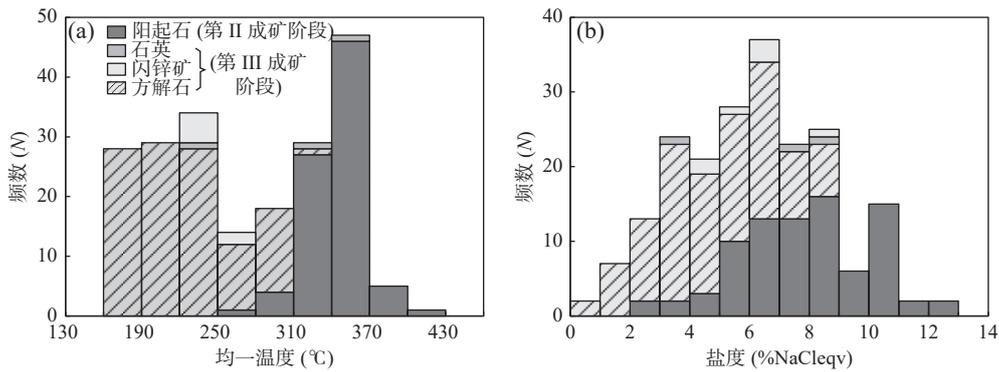


图 7 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床阶段 II 及阶段 III 均一温度(a)和盐度直方图(b)

Fig. 7 (a) Histogram of homogenization temperature and (b) salinity of stage II and III fluid inclusions in the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

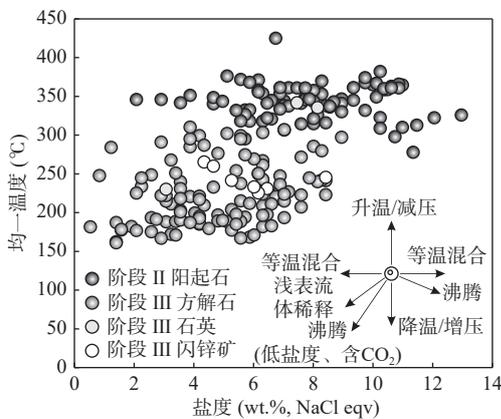


图 8 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床流体包裹体均一温度-盐度散点图(据 Wilkinson, 2001)

Fig. 8 Scatter diagram of homogenization temperatures-salinities of fluid inclusions in the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

阶段 II 阳起石中 L-V 型包裹体均一温度和冰点温度变化范围分别为 278.1~425.1 °C 和 -9.1~-1.2 °C, 对应盐度为 2.1~13.0 wt.% NaCl eqv., 密度为 0.6~0.9 g/cm³。阶段 III 方解石、闪锌矿及石英中 L-V 型包裹体均一温度范围在 161.5~310.6 °C、225.6~265.5 °C 和 230.4~342.1 °C, 冰点温度分别为 -5.4~-2.6 °C、-5.8~-0.3 °C 和 -5.4~1.8 °C, 对应盐度分别为 0.5~9.0 wt.% NaCl eqv.、4.3~8.4 wt.% NaCl eqv. 和 3.1~8.1

wt.% NaCl eqv., 密度分别为 0.7~1.0 g/cm³、0.8~0.9 g/cm³ 和 0.7~0.9 g/cm³。

4.3 C-O 同位素组成

阿尔恰勒 3 件热液方解石、6 件灰岩和 3 件大理岩的 C-O 同位素分析结果列于表 2。方解石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 、 $\delta^{18}O_{V-PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值范围分别为 -2.8‰~0.4‰、-26.6‰~-16.8‰ 和 3.5‰~13.6‰。灰岩的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 、 $\delta^{18}O_{V-PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值范围分别为 0.3‰~2.5‰、-23.5‰~-13.3‰ 和 6.7‰~17.1‰。大理岩的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 、 $\delta^{18}O_{V-PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值范围分别为 -0.3‰~2.0‰、-22.3‰~-20.8‰ 和 7.9‰~9.5‰。

5 讨论

5.1 成矿流体性质及来源

流体包裹体特征显示, 不同阶段的成矿流体特征随着成矿过程的进行而发生变化。阶段 II 包裹体均一温度变化范围为 278.1~425.1 °C, 盐度为 2.1~13.0 wt.% NaCl eqv., 密度为 0.6~0.9 g/cm³; 阶段 III 成矿流体的均一温度变化范围为 161.5~342.1 °C, 盐度为 0.5~9.0 wt.% NaCl eqv., 密度为 0.7~1.0 g/cm³; 指示阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床成矿流体早期为中高温、中低

表 2 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床热液方解石、灰岩和大理岩 C-O 同位素组成

Tab. 2 C-O isotopic compositions of hydrothermal calcite, limestone and marble from the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

样号	样品名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	资料来源	
AE-46	方解石	0.4	-20.6	9.6	本文	
AE-75-2	方解石	-0.6	-16.8	13.6		
AE-95	方解石	-2.8	-26.6	3.5		
AE-107	含化石灰岩	2.1	-13.3	17.1		
AE-108	含化石灰岩	2.5	-19.8	10.5		
AE-109	含化石灰岩	2.1	-14.6	15.9		
AE-42	不含化石灰岩	0.5	-23.5	6.7		
AE-50	不含化石灰岩	0.6	-20.7	9.5		
AE-54	不含化石灰岩	0.3	-14.3	16.2		
AE-58	大理岩	0.8	-22.1	8.1		
AE-61	大理岩	-0.3	-20.8	9.5		
AE-63	大理岩	2.0	-22.3	7.9		
A6	方解石	0.4	-26.0	4.1		Dai et al., 2019
A10	方解石	0.9	-18.3	12.0		
A19	方解石	0.1	-25.8	4.3		
A20	方解石	-0.2	-26.4	3.7		
A22	方解石	0.3	-22.3	7.9		
A32	方解石	0.1	-25.4	4.7		
A39	方解石	0.2	-24.8	5.4		
A46	方解石	0.6	-19.5	10.8		
A47	方解石	0.5	-19.7	10.6		
A48	方解石	0.8	-19.2	11.1		
A49	方解石	0.7	-18.6	11.7		
A50	方解石	0.9	-19.0	11.3		
A51	方解石	0.6	-19.0	11.3		
A55	方解石	0.1	-25.5	4.6		
A61	方解石	-0.9	-26.7	3.4		
A73	方解石	1.1	-23.8	6.4		
AE-75-1	方解石	-0.9	-25.4	4.8	Peng et al., 2022	
AE-84	方解石	-1.9	-22.5	7.7		
AE-112	方解石	-2.4	-26.1	4.0		
AE-115	方解石	-1.0	-24.0	6.2		
AE-120	方解石	-2.6	-26.9	3.2		

盐度和低密度特征, 晚期为低中温、低盐度和低密度特征(图 8)。流体包裹体特征与典型的 SEDEX 型矿床有较大差别(均一温度和盐度为 60~280 °C 和 4~23 wt% NaCl 之间; Leach et al., 2004), 如爱尔兰 Silvermines 矿床(Samson et al., 1987)、印度 Daira 矿床(牛佳等, 2017)和广西盘龙 Pb-Zn 矿床(张海坤等, 2020), 温度变化范围较小, 整体 < 300 °C。相比之下,

从阶段 II 到阶段 III 的温度变化与矽卡岩型矿床更相似, 如滇西芦子园 Pb-Zn 矿床(邓明国等, 2018)、湖南康家湾 Pb-Zn 矿床(李永胜等, 2021)和西藏蒙亚啊矿床(牛旭宁, 2019), 矽卡岩期温度变化在 300~700 °C, 石英-硫化物期在 100~500 °C(Shu et al., 2021)。

前人研究表明, 阶段 II 阳起石中流体包裹体的 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值范围分别为 -45.0‰ ~ -53.1‰ 和

0.5‰~9.3‰(李俊明, 2019), 整体与岩浆水的 H-O 同位素组成相近(李俊明, 2019; Dai et al., 2019; Sheppard, 1986); 阶段 III 石英中流体包裹体的 δD_{H_2O} 和 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值范围分别为 -98.7‰~80.7‰和 -6.0‰~-0.6‰(代俊峰, 2019), 低于原始岩浆水的 H-O 同位素值。在 δD - δO 图解中(图 9a), 阳起石样品点位于原生岩浆水区域内及左侧, 石英样品点落于岩浆水与大气降水线之间。本文及前人测得的矿石中热液方解石的 $\delta^{13}C_{V-PDB}$ 值范围为 -2.8‰~1.1‰(平均为

-0.2‰), 与岩浆或地幔以及海相碳酸盐岩范围相近; 方解石的 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值在 3.2‰~13.6‰(平均为 7.3‰), 变化范围相对较宽, 整体符合岩浆或地幔来源(图 9b)。较宽的 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 变化范围可能是由于大气降水的加入, 导致 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 同位素发生负向漂移。从图 9b 可以看出, 赋矿灰岩样品点位于花岗岩和海相碳酸盐岩之间, 大理岩样品整体位于花岗岩区域, 很可能是由于赋矿灰岩和大理岩与成矿热液发生水-岩反应过程中产生了 $\delta^{18}O$ 同位素交换作用。

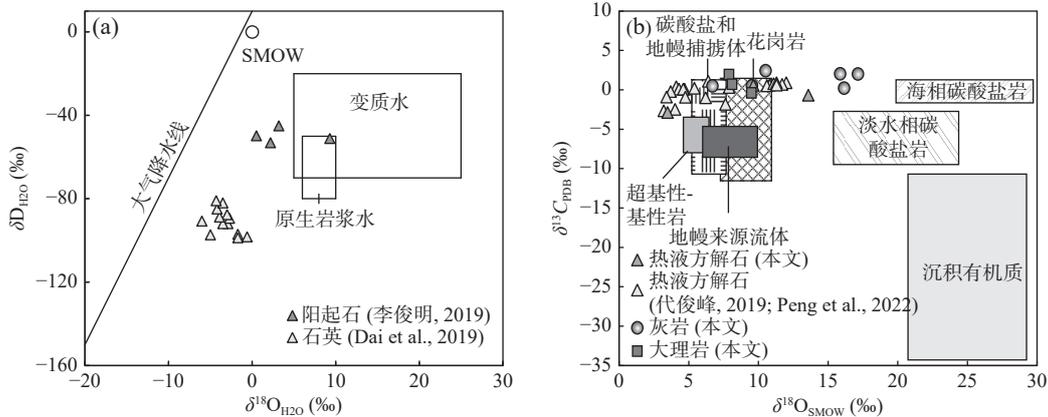


图 9 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床成矿流体 H-O 同位素图解(底图 a 据 Taylor, 1974)和方解石-灰岩-大理岩的 C-O 同位素图解(底图 b 据 Hedenquist et al., 1994)

Fig. 9 (a) δD_{H_2O} versus $\delta^{18}O_{H_2O}$ diagram of the ore-forming fluids and (b) $\delta^{13}C$ versus $\delta^{18}O$ isotopic diagram of calcite, limestone and marble from the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

流体包裹体和成矿流体 C-H-O 同位素特征综合表明, 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床的初始成矿流体为深部隐伏岩体分泌的岩浆热液, 随着成矿作用的进行, 大气降水逐渐混入, 成矿流体的温度和盐度逐渐降低。从温度-盐度谐和图(图 8)中可以看出, 盐度和温度整体呈正相关关系, 即盐度随着温度的降低而降低, 表现出浅表流体稀释的趋势, 亦体现了岩浆热液与大气降水混合的特点。

5.2 成矿物质来源

前人对热液矿床的研究发现, 成矿热液中 S 主要有 3 种不同的来源: ①地幔硫或岩浆硫, $\delta^{34}S$ 变化范围较小, 总体在 $0\pm 3\%$ (Chaussidon et al., 1990)。②壳源硫, $\delta^{34}S$ 变化范围很大, 受海相硫酸盐或生物成因影响(温春齐等, 2009)。③混合硫, 受多种来源影响, 具有混合的特征(Rollinson, 1993)。阿尔恰勒矿床矿石中金属硫化物主要为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿, 并未发现与其共生的硫酸盐矿物, 表明成矿时成矿环境为还原条件, 此时硫化物的 $\delta^{34}S$ 值大致能够代表成矿流体的总 $\delta^{34}S$ 值(Ohmoto, 1972; Ohmoto et al., 1979;

Hoefs, 1997)。因此, 可以依据该矿床主成矿阶段 III 矿石中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值来进行成矿流体中硫源的示踪。阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床矿石中的硫化物原位 S 同位素分析显示, 矿石中硫化物相对富集轻硫(-7.57‰~-5.63‰)(表 3); 矿石中硫化物单矿物的 $\delta^{34}S$ 值范围为 -7.10‰~1.30‰(平均为 -1.56‰)(表 3)(Dai et al., 2019)。本文及文献中的 S 同位素频数直方图显示出 2 个峰值: -3‰~2‰和 -4‰~-8‰(图 10a)。与自然界中一些重要的地质储库的 S 同位素值进行对比, 前者与地幔或岩浆岩 $\delta^{34}S$ 范围类似, 后者与沉积硫化物的 $\delta^{34}S$ 值范围相符(图 10b)(Meinert et al., 2005)。阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床的 $\delta^{34}S$ 值具有“两段式”的特征, 表明成矿流体中的硫具有多来源的特征。其中, 零值附近的 $\delta^{34}S$ 值反应有岩浆硫或地幔硫的贡献。原位的轻 $\delta^{34}S$ 值明显低于典型岩浆热液型的 Pb-Zn 矿床, 如小兴安岭二股 Fe-Zn 矿床(2.4‰~4.6‰)(Zhao et al., 2021), 加拿大麦肯齐古尔希 Cu-Ag 矿床(4.6‰~9.1‰)(Massawe et al., 2022), 西藏洞中拉 Pb-Zn 矿床(2.1‰~3.9‰)(Sun et al., 2020), 与

表 3 阿尔恰勒 Pb–Zn–Cu 矿床矿石中硫化物 S 同位素组成

Tab. 3 Sulfur isotopic compositions of sulfides in the ores from the Arqiale Pb–Zn–Cu deposit

样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$	资料来源	样品号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\text{‰})$	资料来源
AECcp-1	黄铜矿	-5.63	Peng et al., 2022	A31-2	闪锌矿	0.70	Dai et al., 2019
AECcp-2	黄铜矿	-5.81		A45	闪锌矿	-7.00	
AECcp-3	黄铜矿	-5.56		A52	闪锌矿	-4.10	
AECcp-4	黄铜矿	-6.18		A53	闪锌矿	-6.80	
AESpy-1	闪锌矿	-6.43		A54	闪锌矿	0.70	
AESpy-2	闪锌矿	-6.03		A60-2	闪锌矿	-6.70	
AESpy-3	闪锌矿	-5.92		A63	闪锌矿	0.70	
AESpy-4	闪锌矿	-7.12		A82	闪锌矿	1.10	
AEPy-1	黄铁矿	-7.13		A56	黄铜矿	-0.10	
AEPy-2	黄铁矿	-7.57		A69	黄铜矿	1.20	
AEPy-3	黄铁矿	-7.47		A105	黄铜矿	0.90	
AEPy-4	黄铁矿	-6.66		A91	黄铜矿	-2.60	
A1-1	方铅矿	-0.50		A113	黄铁矿	-0.40	
A2	方铅矿	-1.10		A112	黄铁矿	0.60	
A7-1	方铅矿	-1.10	A115	黄铁矿	0.20		
A9-1	方铅矿	-0.90	AQL01	方铅矿	1.30		
A23	方铅矿	-0.80	AQL02	方铅矿	-4.70		
A31-1	方铅矿	-1.50	AQL07	方铅矿	-3.70		
A60-1	方铅矿	-7.10	AQL16	方铅矿	-2.60		
A1-2	闪锌矿	0.90	AQL01	闪锌矿	-4.20		
A4	闪锌矿	0.80	AQL02	闪锌矿	-0.10		
A7-2	闪锌矿	0.50	AQL07	闪锌矿	-2.50		
A9-2	闪锌矿	0.80	AQL16	闪锌矿	-2.20		

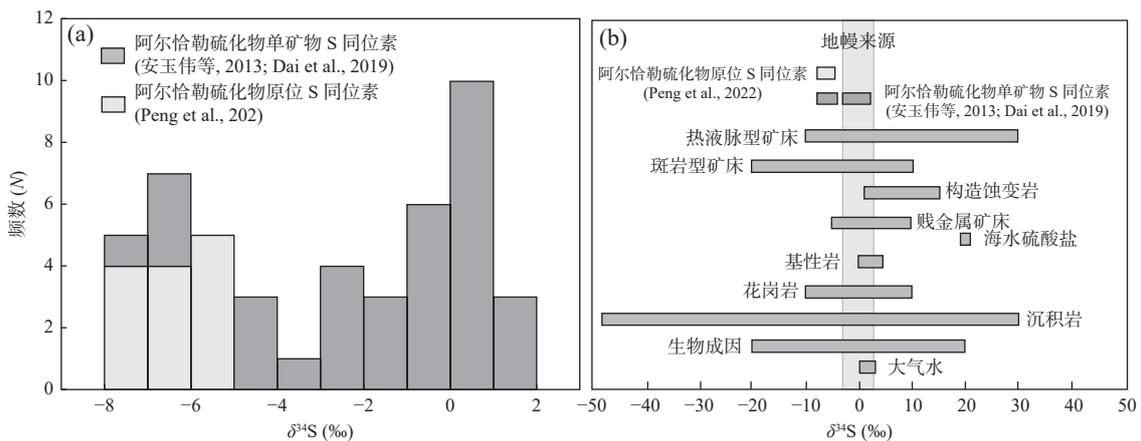


图 10 阿尔恰勒 Pb–Zn–Cu 矿 S 同位素直方图(a)和其他 S 同位素储库对比(b)(其他储库据 Hoefs, 2009)

Fig. 10 (a) Histogram of the sulfur isotopic compositions of sulfides from the Arqiale Pb–Zn–Cu deposit and (b) compare with other sulfur isotope reservoirs

SEDEX 型矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布较宽的特征也有较大差异 (-8‰~30‰)(Leach et al., 2010)。由此推测,阿尔恰勒矿床成矿流体中除岩浆硫的贡献外,亦有部分地层硫的加入(Claypool et al., 1980)。

Pb 同位素在运移和沉淀过程中,物理化学条件的变化几乎不会引起其变化,因此 Pb 同位素是追踪矿床中金属矿床成矿物质来源的有力证据(Zartman et al., 1981)。阿尔恰勒 Pb–Zn–Cu 矿床方铅矿的原位 Pb 同

位素变化范围较小(表 4), 放射成因铅较低, μ 值(9.40~9.41)高于地幔原始 μ 值范围, 但明显低于地壳铅($\mu=9.58$)(Zartman et al., 1981); ω 值(35.36~35.46)低于地壳平均值(36.84)(Doe et al., 1979), Th/U 值(3.64~3.65)与地幔值(3.45)较为接近(Zartman et al., 1981)。在 Pb 构造演化图解上(图 11), 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床矿石硫化物样品的投点于上地壳与地幔演化曲线之间, 暗示矿石铅具有壳幔混合特征。另外, 在 Pb 构造演化图解中, 样品点总体上呈线性关系, 并具有混合铅高斜率的特征, 证明不同端元的 Pb 流体混合是引起 Pb 同位素线性分布的重要原因之一(Andrew et al., 1984), 进一步表明了成矿物质的来源

具有多样性。

综合流体包裹体和 C-H-O-S-Pb 同位素组成特征, 笔者推测阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床的成矿物质部分来源于深部隐伏的侵入岩体, 部分来源于大气降水循环对流过程中萃取的地层中的成矿元素。

5.3 矿床成因及找矿启示

碳酸盐岩赋矿的贱金属矿床成因的确定, 尤其是查明其是否与岩浆作用有关, 对进一步的找矿勘查工作具有重要理论指导意义。前人将阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床归为 SEDEX 型矿床(安玉伟等, 2012; 秦来勇等, 2012; 朱焯, 2018), 其最主要的地质证据是基于矿体受阿克沙克组灰岩控制, 呈层状产出, 且矿物

表 4 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床矿石中硫化物 Pb 同位素组成

Tab. 4 Pb isotope compositions of sulfides of ores from the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

样号	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	来源
AE-81-13	方铅矿	18.267	15.567	38.065	9.41	35.46	3.65	
AE-81-14	方铅矿	18.266	15.566	38.059	9.41	35.42	3.64	
AE-81-15	方铅矿	18.262	15.561	38.049	9.40	35.36	3.64	Peng et al., 2022
AE-81-16	方铅矿	18.269	15.567	38.062	9.41	35.43	3.64	
AE-81-17	方铅矿	18.266	15.565	38.058	9.41	35.41	3.64	
A2	方铅矿	18.290	15.643	38.294	9.56	36.98	3.74	
A7-1	方铅矿	18.277	15.628	38.242	9.53	36.70	3.73	
A9-1	方铅矿	18.298	15.650	38.314	9.57	37.09	3.75	
A23	方铅矿	18.305	15.656	38.338	9.59	37.21	3.76	
A31-1	方铅矿	18.227	15.552	37.996	9.39	35.25	3.63	
A60-1	方铅矿	18.318	15.659	38.348	9.59	37.21	3.76	
A1-1	闪锌矿	18.286	15.635	38.282	9.55	36.88	3.74	
A1-2	闪锌矿	18.272	15.614	38.201	9.51	36.43	3.71	
A4	闪锌矿	18.282	15.633	38.262	9.54	36.80	3.73	
A7-2	闪锌矿	18.300	15.651	38.319	9.58	37.11	3.75	
A31-2	闪锌矿	18.273	15.610	38.190	9.50	36.34	3.70	
A45	闪锌矿	18.295	15.615	38.204	9.51	36.32	3.70	
A52	闪锌矿	18.270	15.592	38.134	9.46	35.96	3.68	Dai et al., 2019
A53	闪锌矿	18.285	15.613	38.204	9.50	36.36	3.70	
A54	闪锌矿	18.266	15.599	38.159	9.48	36.14	3.69	
A60-2	闪锌矿	18.324	15.667	38.365	9.61	37.32	3.76	
A63	闪锌矿	18.990	15.600	38.491	9.41	33.79	3.48	
A82	闪锌矿	18.473	15.723	38.720	9.70	38.49	3.84	
A56	黄铜矿	18.314	15.670	38.381	9.61	37.47	3.77	
A69	黄铜矿	18.287	15.577	38.068	9.43	35.45	3.64	
A105	黄铜矿	18.308	15.668	38.372	9.61	37.45	3.77	
A91	黄铜矿	18.300	15.651	38.317	9.58	37.10	3.75	
A113	黄铁矿	21.518	15.946	38.182	10.79	28.83	2.59	
A112	黄铁矿	18.319	15.647	38.331	9.57	37.02	3.74	
A115	黄铁矿	18.310	15.579	38.070	9.43	35.36	3.63	

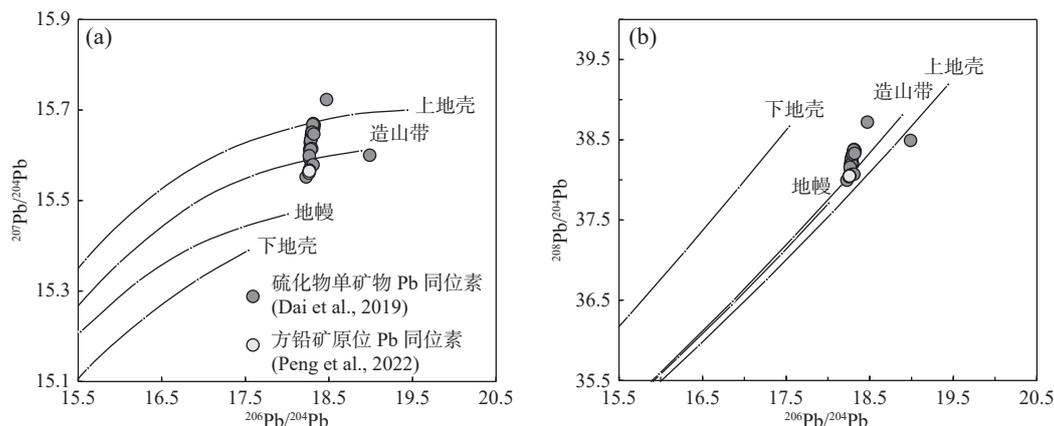


图 11 阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床矿石中硫化物 Pb 同位素模式图(底图据 Zartman et al., 1981 修改)

Fig. 11 Tectonic model map of Pb isotope of sulfides of ores from the Arqiale Pb-Zn-Cu deposit

组合以闪锌矿和方铅矿为主。然而,笔者通过野外地质调查发现,阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床矿体虽然整体顺层产出(图 4a),但依然发现少量矿体切层现象(图 4b)。另外,在采集的样品中矿石矿物除闪锌矿和方铅矿,还普遍发育黄铁矿和黄铜矿,脉石矿物发育一套典型的矽卡岩矿物组合,例如石榴子石、辉石、阳起石和黑柱石等。从矿石组构角度看,矿石以浸染状构造、角砾状构造和交代结构为主,并未发现 SEDEX 型矿床中典型的条带状和纹层状矿石(Xu et al., 2019)。

流体包裹体和 H-O 同位素特征表明,成矿流体性质不同于典型的 SEDEX 矿床,随成矿过程发生了较大的变化,且早期以岩浆流体为主,晚期与大气降水发生了广泛的流体混合作用(图 8)。流体混合可能是阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床主要的矿质沉淀机制。阿尔恰勒矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大(-7.57‰~1.30‰),其中硫化物原位和单矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 -7.57‰~-5.63‰(平均为 -6.49‰)和 -7.10‰~1.30‰(平均为 -1.56‰),与沉积喷流型 Pb-Zn 矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围相差较大(以重硫为主,主要为 -5‰~+15‰)(Leach et al., 2005)。

因此,综合阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床的矿化地质特征、流体包裹体和 S-Pb-H-O 同位素组成,笔者推断该矿床更符合岩浆热液型矿床的特征。矿区内未发现与成矿相关的岩浆岩(Serguei et al., 2019),可能是目前所勘探查明的矿体尚未接近真正的矿化中心。矿石中发育的少量中细粒自形石榴子石和辉石以及大量粗粒自形阳起石和黑柱石,暗示阿尔恰勒 Pb-Zn-

Cu 矿床可能为远离岩体中心和接触带的远端型矽卡岩矿床(Chen et al., 2017)。

深部中酸性岩浆侵入过程中,含矿热液在岩浆房顶部不断聚集,压力不断增大,最后压力释放过程中热液流体沿构造裂隙或层间破碎带运移至下石炭统阿克沙克组灰岩中,与围岩发生接触交代作用,形成典型的高温干矽卡岩矿物,如石榴子石、辉石等。随着成矿温度和盐度的降低,中高温、中低盐度的成矿流体进一步与阿克沙克组含生物灰岩发生水岩反应,形成大量阳起石、黑柱石等含水矽卡岩矿物,并交代早期的石榴子石等矿物(Deer et al., 2013)。随着水-岩反应的持续进行,外部来源流体(大气降水)沿断裂下渗受岩浆热烘烤后循环上升,萃取地层中的成矿元素,并与岩浆热液发生混合,导致成矿流体降温和稀释,最终引起闪锌矿、方铅矿和黄铜矿在有利部位沉淀富集成矿,并在靠近岩体中心的深部位置形成 Cu±Zn 矿体,在浅部位置逐渐过渡为 Pb-Zn 矿体。

在完整的近端-远端矽卡岩成矿系统中,成矿流体由深部至浅部会发生物理化学条件和成分的规律性变化,因此常常会导致热液蚀变和矿化元素的空间分带现象(Meinert et al., 2005)。近年来的找矿勘查工作显示,阿尔恰勒矿床由矿区南部浅表的 Pb-Zn 矿体向北部深部逐渐过渡为连续产出、形态产状稳定的厚大 Cu±Zn 矿体,同时矿体中石榴子石含量逐渐增多、Zn+Pb 含量逐渐变小,暗示矿区北部深部的矿体更加靠近隐伏的成矿岩体。因此,矿区北部的深部是找矿勘查的有利地段,甚至有望找到岩体与地层之间的接触带矽卡岩矿体。

6 结论

(1)阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床初始成矿流体为深部隐伏岩体分泌的岩浆热液,随着成矿作用的进行,循环大气降水逐渐混入,使得成矿流体降温和稀释,导致闪锌矿、方铅矿和黄铜矿的沉淀富集成矿。

(2)阿尔恰勒矿床矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大(-7.57‰~1.30‰),显示出岩浆硫和地层硫的混合特征;矿石 Pb 同位素显示壳幔混源的特点;成矿物质主要来源于隐伏的岩浆岩,同时地层亦提供了部分成矿物质。

(3)阿尔恰勒 Pb-Zn-Cu 矿床属于与岩浆作用有关的远端型矽卡岩型矿床。矿区内由南向北,矿体由浅部的 Pb-Zn 矿体逐渐过渡为北部深部的 Cu±Zn 矿体,同时石榴子石的含量逐渐增加,暗示矿区北部深部是有利的找矿地段,甚至有望找到隐伏的矽卡岩带和接触带矿体。

致谢:野外工作中得到了新疆维吾尔自治区有色地质勘查局七〇三队的大力支持和帮助,成文过程中编辑部匿名审稿老师对文章提出的宝贵建议,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- 安玉伟,莫江平,王夏杰.新疆阿尔恰勒铅锌矿成因和找矿前景[J].*矿床地质*,2012,S1:247-248.
- AN Yuwei, MO Jiangping, WANG Xiajie. Genesis and prospecting prospect of the Arqiale Pb-Zn deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2012, S1: 247-248.
- 安玉伟,王夏杰.新疆阿尔恰勒铅锌矿成矿模式[J].*矿产与地质*,2013,27(2):102-105.
- AN Yuwei and WANG Xiajie. Metallogenic model of Aeqiale Pb-Zn deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2013, 27(2): 102-105.
- 代俊峰.新疆天山晚古生代岛弧环境矽卡岩型铅锌成矿作用[D].北京:中国地质大学(北京),2019,1-170.
- DAI Junfeng. Skarn type lead-zinc mineralization in Late Paleozoic island arc environment, Xinjiang, Tianshan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019, 1-170.
- 邓明国,陈伟,王学武,等.滇西芦子园远程矽卡岩 Pb-Zn-Fe(Cu)多金属矿床流体包裹体初探及矿床成因探讨[J].*岩石学报*,2018,34(05):1239-1257.
- DENG Mingguo, CHEN Wei, WANG Xuewu, et al. Fluid inclusion and ore genesis of the Luziyuan distal skarn Pb-Zn-Fe (-Cu) poly-metallic deposit, West Yunnan, SW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(05): 1239-1257.
- 高俊.西南天山板块构造及造山运动动力学[D].北京:中国地质科学院,1993,1-90.
- GAO Jun. Plate tectonics and geodynamics of orogenesis of the Southwest Tianshan Mountains[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1993, 1-90.
- 高俊,钱青,龙灵利,等.西天山的增生造山过程[J].*地质通报*,2009,28(12):1804-1816.
- GAO Jun, QIAN Qing, LONG Lingli et al. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1804-1816.
- 胡耀华.西天山伊什基里克西段矿床成因类型及找矿方向探讨[J].*新疆有色金属*,2016,S1:1-4.
- HU Yaohua. Discussion on genetic types and prospecting direction of the Western Section of Yishijilik deposit in western Tianshan mountains[J]. *Xinjiang Non-ferrous Metals*, 2016, S1: 1-4.
- 李俊明.新疆昭苏县阿尔恰勒铅锌矿床成矿流体研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.
- LI Junming. Study on Ore-Forming Fluids of the Arqiale Lead-Zinc Deposit in Zhaosu, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- 李永军,庞振甲,栾新东,等.西天山特克斯达坂花岗岩基的解体及钼找矿意义[J].*大地构造与成矿学*,2007,31(4):435-440.
- LI Yongjun, PANG Zhenjia, LUAN Xindong, et al. Distribution of Tekesidaban granitic batholith and its significance for Mo prospecting, Western Tianshan Mountains[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(4): 435-440.
- 李永军,辜平阳,庞振甲,等.西天山特克斯达坂库勒萨依序列埃达克岩的确立及钼找矿意义[J].*岩石学报*,2008,24(12):2713-2719.
- LI Yongjun, Gu Pingyang, PANG Zhenjia, et al. Identification of the adakite rocks of Kulesayi series and its significance of Mo prospecting in the Tekesidaban of western Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(12): 2713-2719.
- 李永胜,张帮禄,公凡影,等.湖南康家湾大型隐伏铅锌矿床成因探讨:流体包裹体、氢氧同位素及硫同位素证据[J].*岩石学报*,2021,37(6):1847-1866.
- LI Yongsheng, ZHANG Banglu, GONG Fanying, et al. Genesis of the giant Kangjiawan lead-zinc ore deposit in Hunan Province: Evidences from fluid inclusion, H-O and S isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(6): 1847-1866.
- 刘斌,沈昆.流体包裹体热力学[M].北京:地质出版社,1999,1-289.
- LIU Bin and SHEN Kun. Fluid inclusion thermophysics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999, 1-289.
- 牛佳,郑义,周永章,等.桂中盘龙铅锌矿流体包裹体特征及其对钦杭成矿带热水喷流-改造成矿作用的指示[J].*岩石学报*,2017,33(3):753-766.
- NIU Jia, ZHENG Yi, ZHOU Yongzhang, et al. A fluid inclusions study of the Panlong lead-zinc deposit and its implication for

- genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(3): 753–766.
- 牛旭宁. 西藏蒙亚啊铅锌矿床成因与找矿方向研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- NIU Xuning. The genesis and prospecting direction of the Mengyaa Pb-Zn Deposit in Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing). 2019.
- 秦来勇, 莫江平, 徐庆鸿, 等. 新疆阿尔恰勒铅锌矿床地质特征及找矿潜力分析[J]. *矿产勘查*, 2012, 3: 319–324.
- QIN Laiyong, MO Jiangping, XU Qinghong, et al. Geological characteristics and prospecting potential analysis of Arqiale Pb-Zn deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Exploration*, 2012, 3: 319–324.
- 魏虎, 张英宁. 新疆伊什基里克西段铜多金属成矿地质条件及找矿方向[J]. *新疆地质*, 2013, 31: 172–178.
- WEI Hu, ZHANG Yingning. Ore-Forming Conditions and Exploration Direction of Copper-Polymetallic Deposits in the West Yishijilike Region, Xinjian[J]. *Xinjiang Geology*, 2013, 31: 172–178.
- 温春齐, 多吉. 矿床研究方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2009, 1–230.
- WEN Chunqi and DUO Ji. Methods of deposit research[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2009, 1–230.
- 张海坤, 胡鹏, 曹亮, 等. 印度尼西亚戴里 Sedex 型铅锌矿集区成矿流体特征及成矿物质来源: 流体包裹体及同位素地球化学证据[J]. *地质科技通报*. 2020, 39(03): 170–177.
- ZHANG Haikun, HU Peng, CAO Liang, et al. Characteristics of mineralization fluids and mineralization material sources of the Sedex type Dairi Pb-Zn ore concentration area in Indonesia: Evidence from fluid inclusions and isotopic geochemistry[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 170–177.
- 朱焯. 新疆昭苏县阿尔恰勒铅锌矿地质特征及找矿预测[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
- ZHU Ye. Geological Features and Ore-Prospecting Prediction of Aeqiale Lead-Zinc Deposit in Zhaosu County, Xinjiang[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.
- 朱志敏, 赵振华, 熊小林. 西天山特克斯北中酸性火成岩地球化学特征及成因意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2145–2157.
- ZHU Zhimin, ZHAO Zhenhua, XIONG Xiaolin. Geochemistry and geodynamics of intermediate-acid igneous rocks in northern Tekesi[J]. *Western Tianshan Mountains. Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2145–2157.
- Andrew A, Godwin C I, Sinclair A J. Mixing line isochrons: A new interpretation of galena lead isotope data from southeastern British Columbia[J]. *Economic Geology*, 1984, 79(5): 919–932.
- Boveiri Konari M, Rastad E, Peter J M. A sub-seafloor hydrothermal syn-sedimentary to early diagenetic origin for the Gushfil Zn-Pb-(Ag-Ba) deposit, south Esfahan[J]. *Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Abhandlungen*, 2017, 194(1): 61–90.
- Bao Z H, Cai K D, Sun M, et al. Continental crust melting induced by subduction initiation of the South Tianshan Ocean: Insight from the Latest Devonian granitic magmatism in the southern Yili Block, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2018, 153: 100–117.
- Chaussidon M, Lorand J P. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariege (North-Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(10): 2835–2846.
- Chen F C, Deng J, Shu Q H, et al. Geology, fluid inclusion and stable isotopes (O, S) of the Hetaoping distal skarn Zn-Pb deposit, northern Baoshan block, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 913–927.
- Claypool G E, Holser W T, Kaplan L R, et al. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation[J]. *Chemical Geology*, 1980, 28: 199–260.
- Dai J F, Xue C J, Chi G X, et al. Geological, geochronological and geochemical characteristics and genesis of the Arqiale skarn Zn-Pb deposit, Western Tianshan, Northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 106: 79–96.
- Deer W A, Howie R A, Zussman J. An Introduction to the Rock Forming Minerals[J]. 3rd Edition. Longman, London:London the Mineralogical Society, 2013: 150–151.
- Doe B R, Zartman R E. Plumbotectonics: The phanerozoic. In: Barnes H L (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley and Sons, 1979, 22–70.
- Ehya F. The Paleozoic Ozbak-Kuh carbonate-hosted Pb-Zn deposit of East Central Iran: isotope (C, O, S, Pb) geochemistry and ore genesis[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2014, 108: 123–136.
- Gao J, Long L, Klemm R, et al. Tectonic evolution of the South Tianshan Orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98: 1221–1238.
- Glorie S, De Grave J, Buslov M M, et al. Formation and Palaeozoic evolution of the Gorny-Altai-Mongolia Suture Zone (South Siberia): Zircon U/Pb Constraints on the igneous record[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 465–484.
- Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. *Economic Geology*, 1988, 83(1): 197–202.
- Hedenquist J W, Lowenstern J B. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 1994, 370: 519.
- Hoefs J. Stable isotope geochemistry. sixth edition ed[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009, 285.
- Hoefs J. Stable isotope geochemistry[M]. Berlin: Springer-Verlag. 1997.
- Leach D L, Bradley D C, Huston D, et al. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 593–625.
- Leach D L, Marsh E, Emsbo P, et al. Nature of hydrothermal fluids at

- the shale-hosted Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks Range, Alaska[J]. *Economic Geology*, 2004, 99: 1449–1480.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, et al. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective[J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005: 561–607.
- Long L, Gao J, Klemd R, et al. 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*, 2011, 126(3–4): 321–340.
- Lin L, Qian Q, Wang Y, et al. Gabbroic pluton in the Dahalajunshan Formation volcanic rocks from northern Zhaosu, Western Tianshan: Age, geochemistry and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31: 1749–1760.
- Massawe R J, Lentz D R. Petrogenesis and U–Pb (titanite) age of Cu–Ag skarn mineralization in the McKenzie Gulch area, northern New Brunswick, Canada[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, 232: 106902.
- Meinert L D, Dipple G M, Nicolesu W. World skarn deposits. In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ, and Richards JP (eds.) [J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005: 299–336.
- Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes H L [J]. *Geochemistry of Hydrothermal Deposits*, 1979, 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons: 509–611.
- Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67: 551–578.
- Peng Y W, Zou H, Leon B, et al. A newly identified Permian distal skarn deposit in the Western Tianshan, China: New evidence from geology, garnet U–Pb geochronology and S–Pb–C–H–O isotopes of the Arqiale Pb Zn Cu deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 143: 104754.
- Rollinson H R. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Harlow[M]. Longman Scientific and Technical Press, 1993, 306–308.
- Rajabi A, Rastad E, Canet C, et al. The Early Cambrian Chahmir shale-hosted Zn–Pb deposit, Central Iran: an example of vent-proximal SEDEX mineralization[J]. *Mineralium Deposita*, 2015, 50: 571–590.
- Samson I M and Russell M J. Genesis of the Silvermines zinc lead-barite deposit, Ireland: Fluid inclusion and stable isotope evidence[J]. *Economic Geology*, 1987, 82: 371–394.
- Serguei G S, Sergey G K, Svetlana S D, et al. Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of the Sinyukhinskoe Cu–Au skarn deposit, Russian Altai, SW Siberia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 112: 103039.
- Sheppard S M F. Characterization and isotopic variations in natural waters[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1986, 16: 165–183.
- Shu Q H, Chang Z S, Mavrogenes J. Fluid compositions reveal fluid nature, metal deposition mechanisms, and mineralization potential: an example at the Haobugao Zn–Pb skarn [J]. *China Geology*, 2021: 49.
- Sun G T, Zhou J X, Luo K, et al. New insights into the hydrothermal evolution of skarn deposits: A case study of the Dongzhongla Pb–Zn deposit in Tibet, SW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 191: 104215.
- Su W B, Cai K D, Sun M, et al. Carboniferous volcanic rocks associated with back-arc extension in the western Chinese Tianshan, NW China: Insight from temporal-spatial character, petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 2018, 310–311: 241–254.
- Taylor H P. The Application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 1974, 69: 843–883.
- Vezzoni S, Dini A, Sergio Rocchi S. Reverse telescoping in a distal skarn system (Campiglia Marittima, Italy) [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 77: 176–193.
- Wang C M, Deng J, Carranza E J M, et al. Nature, diversity and temporal-spatial distributions of sediment-hosted Pb–Zn deposits in China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 56: 327–351.
- Wilkinson J J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits [J]. *Lithos*, 2001, 55(1–4): 229–272.
- Xiao W, Windley B F, Allen M B, et al. Paleozoic Multiple Accretionary and Collisional Tectonics of the Chinese Tianshan Orogenic Collage [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1316–1341.
- Xu R, Lia W C, Deng M G, et al. Genesis of the superlarge Luzyuan Zn–Pb–Fe–Cu distal skarn deposit in western Yunnan (SW China): Insights from ore geology and C–H–O–S isotopes [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 109: 944–955.
- Xu X Y, Wang H L, Li P, et al. Geochemistry and geochronology of Paleozoic intrusions in the Nalati (Narati) area in western Tianshan, Xinjiang, China: implications for Paleozoic tectonic evolution [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 33–62.
- Yu J, Li N, Qi N, et al. 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*, 2018, 153: 395–411.
- Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics: The model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 175(1–2): 135–162.
- Zaw K, Peters S G, Cromie P, et al. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31: 3–47.
- Zhao C T, Sun J G, Chu X L, et al. Metallogeny of the Ergu Fe–Zn polymetallic deposit, central Lesser Xing’an Range, NE China: Evidence from skarn mineralogy, fluid inclusions and H–O–S–Pb isotopes [J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 135: 104227.
- Zhu X Y, Zhen S M, Cheng X Y, et al. The sulfur-lead isotope geochemistry of MVT Pb–Zn deposits in Devonian system in South China [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2017, 91: 213–231.