



引文格式: 杨虹, 彭义伟, 顾雪祥, 等. 新疆西天山阿希低硫型浅成低温热液金矿床碳酸盐矿物形成过程及其成矿启示[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 308–327. DOI: 10.12401/j.nwg.2025023

Citation: YANG Hong, PENG Yiwei, GU Xuexiang, et al. The Formation Process and Metallogenic Implications of Carbonate Minerals in the Axi Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposit in the Western Tianshan, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 308–327. DOI: 10.12401/j.nwg.2025023

新疆西天山阿希低硫型浅成低温热液金矿床碳酸盐矿物形成过程及其成矿启示

杨虹¹, 彭义伟^{1,*}, 顾雪祥², 韩建民³, 魏征³, 刘俊平³, 宋明伟¹, 张焱¹, 陈曦⁴

(1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 西部黄金股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 601069; 4. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要: 新疆西天山阿希金矿床是赋存于陆相火山岩中的低硫型浅成低温热液金矿床。该矿床成矿过程分为石英-绢云母-黄铁矿(I)、石英-黄铁矿(II)、石英-多金属硫化物-碳酸盐(III)、碳酸盐-石英(IV)和碳酸盐(V)5个阶段。碳酸盐矿物是金矿石中除石英外最主要的非金属矿物, 其组构与成分特征记录了成矿物质来源及成矿流体演化信息。笔者对阶段II皮壳状石英中自形粗粒白云石(Dol-I)、阶段III叶片状白云石(Dol-II)、阶段IV脉状白云石(Dol-III)和阶段V脉状方解石(Cal-IV)开展了岩相学观察、阴极发光拍摄、电子探针和C-O同位素分析。结果显示: Dol-I由白云石(Dol-Ia)和铁白云石(Dol-Ib)组成, 二者的FeO含量(0.31%~0.68%、14.17%~14.66%)差异显著; Dol-II和Dol-III的FeO含量(0.63%~1.48%、1.57%~3.89%)相似, 均属含铁白云石。Dol-III和Cal-IV的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 均值分别为3.05‰、2.48‰, 与海相碳酸盐的碳同位素组成相似, 表明流体中碳可能源自矿区基底灰岩; 二者的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 均值为15.72‰和15.68‰, 呈负向漂移, 可能是循环大气降水萃取赋矿大哈拉军山组火山岩所致。阶段II皮壳状矿石从脉壁向中心分别形成平行的含载金硫化物的石英微条带、梳状石英、胶状结构“球状”石英和Dol-I, 表明它是成矿流体经历多次流体沸腾作用后, 酸性气体逸失和硫化物大量沉淀的碱性条件下的产物。阶段III中Dol-II呈叶片状发育在烟灰色隐晶质石英中, 表明它是流体初始沸腾过程中从非平衡过饱和热液体系中直接析出的产物。阶段IV中Dol-III呈自形粗粒的白云石脉穿切早期矿脉, 它是在浅地表成矿环境稳定的条件下缓慢结晶形成的。阶段V中Cal-IV呈自形粗粒分布于成矿系统边缘, 在温压降低的条件下, 由热液中 CO_2 、 H_2S 逸失以及 HCO_3^- 解离产生的 CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 结合所形成。综合碳酸盐矿物组构学、主量元素和同位素地球化学特征, 笔者认为流体沸腾是阿希金矿床阶段II、阶段III矿质富集沉淀的关键机制。

关键词: 碳酸盐矿物; 组构学特征; 主量元素; 碳氧同位素; 阿希金矿床; 新疆西天山

中图分类号: P57

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0308-20

收稿日期: 2024-11-23; 修回日期: 2025-02-20; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130804、41572062、41702081), 成都理工大学珠峰科学研究计划项目(80000-2024ZF11426)

联合资助。

作者简介: 杨虹(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: yhong1009@163.com。

*通讯作者: 彭义伟(1987-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事矿床学教学与相关研究。E-mail: pengyiwei15@cdut.edu.cn。

The Formation Process and Metallogenic Implications of Carbonate Minerals in the Axi Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposit in the Western Tianshan, Xinjiang

YANG Hong¹, PENG Yiwei^{1,*}, GU Xuexiang², HAN Jianmin³, WEI Zheng³, LIU Junping³,
SONG Mingwei¹, ZHANG Yan¹, CHEN Xi⁴

- (1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
3. Western Region Gold Co., Ltd., Urumqi 601069, Xinjiang, China; 4. School of Geoscience and Technology,
Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: The Axi gold deposit in the western Tianshan of Xinjiang is a low-sulfidation epithermal gold deposit hosted in continental volcanic rocks. The ore-forming process of this deposit can be divided into five stages: quartz-sericite-pyrite (I), quartz-pyrite (II), quartz-polymetallic sulfide-carbonate (III), carbonate-quartz (IV), and carbonate (V). Carbonate minerals, apart from quartz, are the most important non-metallic minerals in gold ores. Their textural and compositional characteristics record information about the source of ore-forming materials and the evolution of ore-forming fluids. In this paper, petrographic observations, cathodoluminescence photography, electron probe analysis, and C-O isotope analysis were carried out on the euhedral coarse-grained dolomite (Dol-I) in the stage II crustiform quartz, the bladed dolomite (Dol-II) in stage III, the vein dolomite (Dol-III) in stage IV, and the vein calcite (Cal-IV) in stage V. The results show that Dol-I is composed of dolomite (Dol-Ia) and ankerite (Dol-Ib), with significant differences in FeO content (0.31%–0.68% and 14.17%–14.66%). The FeO contents of Dol-II and Dol-III (0.63%–1.48% and 1.57%–3.89%) are similar, and both belong to iron-bearing dolomite. The average $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ values of Dol-III and Cal-IV are 3.05‰ and 2.48‰ respectively, which are similar to the carbon isotope composition of marine carbonates, indicating that the carbon in the fluid may be derived from the limestone in the basement of the mining area. The average $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values of the two are 15.72‰ and 15.68‰, showing a negative shift, which may be due to the extraction of the volcanic rocks of the Dahalajunshan Formation hosting the ore by circulating meteoric water. In stage II, the crustiform ore formed parallel quartz micro-bands containing gold-bearing sulfides, comb quartz, colloform “spherical” quartz, and Dol-I from the vein wall to the center, indicating that it is a product of alkaline conditions after the ore-forming fluid experienced multiple episodes of fluid boiling, loss of acidic gases, and massive sulfide precipitation. In stage III, Dol-II developed as bladed crystals in smoky gray cryptocrystalline quartz, indicating that it is a product of direct precipitation from a non-equilibrium supersaturated hydrothermal system during the initial boiling of the fluid. In stage IV, Dol-III occurs as euhedral coarse-grained dolomite veins cutting through early-stage veins, formed by slow crystallization under stable shallow-surface mineralization conditions. In stage V, Cal-IV occurs as euhedral coarse-grained crystals distributed at the edges of the mineralization system, formed by the combination of CO_3^{2-} and Ca^{2+} generated by the dissociation of HCO_3^{-} due to the loss of CO_2 and H_2S from the hydrothermal fluid under decreasing temperature and pressure conditions. Based on the comprehensive analysis of the textures, major elements, and isotopic geochemistry of carbonate minerals, this study concludes that fluid boiling is a key mechanism for the enrichment and precipitation of ore-forming materials in stages II and III of the Axi gold deposit.

Keywords: carbonate minerals; textural and structural characteristics; major elements; carbon and oxygen isotopes; axi gold deposit; Western Tianshan Xinjiang

碳酸盐矿物作为重要的脉石矿物,广泛存在于各类热液矿床中,并在成矿过程中扮演着关键角色(Gor-

czyk et al., 2020; Qiu et al., 2023)。在沉积喷流型(SEDEX)和密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床中,碳酸

盐矿物的溶解和再结晶过程可为成矿提供 Ca、Mg 等元素并促进硫化物形成,成矿后碳酸盐充填胶结成矿空间,有利于矿石保存(梁峰等, 2016; 谭茂等, 2022; Zhang et al., 2024); 卡林型金矿中碳酸盐矿物具有较高的化学反应活性,通过水岩反应使矿质元素高效沉淀为矿床提供成矿元素和成矿空间(丁坤等, 2020; Xie et al., 2022); 造山型金矿内碳酸盐矿物能够调节流体的酸碱度、氧化还原电位和温度等物理化学性质促使矿质富集沉淀(张涛等, 2023; Wang et al., 2024); 浅成低温热液金矿床中叶片状/格子状碳酸盐矿物指示流体沸腾过程中流体的 pH 值上升,造成金的硫氢络合物分解和沉淀(彭义伟等, 2020)。目前,对碳酸盐矿物的研究主要聚焦于流体包裹体、主微量元素、稳定同位素(C、O、Sr、Pb)分析和 U-Pb 测年,为研究成矿系统热液的演化过程和厘定矿床的成矿时代提供了重要信息(Carrillo-Rosúa et al., 2021; Mottram et al., 2024; 王天齐等, 2024)。

阿希金矿床是新疆西天山吐拉苏盆地中典型的低硫型浅成低温热液金矿床(贾斌等, 1999; 翟伟等, 2006; Li et al., 2023a)。矿石中石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 范围是 2.6‰~8.1‰,指示成矿流体可能来源于岩浆热液(Dong et al., 2018)。石英单矿物 H-O 同位素值较低($\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}=-98\text{‰}\sim-116\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=-0.55\text{‰}\sim 1.65\text{‰}$),表明成矿流体可能来源于循环大气降水(翟伟等, 2007),流体包裹体具有低温、低盐度的特征(张作衡等, 2007; An et al., 2018),综合说明成矿物质主要来自赋矿大哈拉君山组火山岩和基底岩石(翟伟等, 2007)。矿脉中出现了叶片状碳酸盐/石英,矿物中发育液相、富液相和富气相气液两相包裹体,表明矿床发生流体沸腾作用(安芳等, 2009; Liu et al., 2018; Peng et al., 2018; An et al., 2018)。然而,被认为是流体沸腾产物的富气相包裹体在阿希金矿床较为少见,因此流体沸腾对金富集沉淀机制的作用,值得进一步深入研究。前人重点对阿希金矿床中载金硫化物开展了主微量元素和 S-Pb 同位素等研究,探讨了成矿物质来源、成矿流体演化和金富集沉淀机制等(毛先成等, 2018; Zhang et al., 2018; Li et al., 2024)。作为矿石中重要的贯通性热液矿物,阿希金矿床中碳酸盐矿物和石英均记录了重要的成矿信息。矿石中石英组构类型丰富,基本涵盖了低硫型矿床中所有原生(块状玉髓、胶状、皮壳状、梳状等)、重结晶(马赛克、羽毛状等)和交代组构(格子状、叶片状等)(Peng et al., 2018; Liu et al., 2018; 彭义

伟等, 2020)。碳酸盐矿物同样结构多样,包括皮壳状、叶片状、梳状和脉状(彭义伟等, 2020)。因此,碳酸盐矿物和石英在不同阶段的矿石中所呈现的组构特征及矿化类型具有显著时空演化规律,是解译低硫型矿床成矿物质来源和沉淀机制的理想研究对象。

笔者在野外地质调查和岩矿相鉴定的基础上,聚焦矿床中不同成矿阶段的碳酸盐矿物、石英等贯通性热液矿物,厘清矿物生成顺序,划分成矿阶段,并开展组构学、电子探针和 C-O 同位素分析,旨在精细刻画碳酸盐矿物的组成因和形成过程,揭示成矿物质来源及成矿流体演化过程,讨论碳酸盐矿物对矿质富集沉淀的启示,以丰富和完善低硫型矿床成矿理论,为相关矿床和区域找矿提供理论支撑。

1 区域地质背景

吐拉苏盆地位于新疆西天山造山带北缘,形成于北天山洋南向俯冲至伊犁地块之下的大陆弧背景中(图 1a)(董连慧等, 2001; 朱志新等, 2011; 顾雪祥等, 2016)。区域地层由前寒武系、奥陶系—泥盆系的岩石基底和下石炭统大哈拉军山组火山岩、阿恰勒河组碎屑岩的盖层组成(高俊等, 2009; Peng et al., 2022)。基底由变质程度不同的两个构造层组成,下部为前震旦系浅变质岩,由中元古界蓟县系库木契克群(Jxk)灰岩、钙质砂岩和新元古界青白口系开尔塔斯组(Qnk)泥质岩、白云岩及大理岩组成;上部为加里东期末变质沉积岩,包括中奥陶统奈楞格勒达坂组(O_2n)凝灰质钙质粉砂岩、上奥陶统呼独克达坂组(O_3h)灰岩夹细碎屑岩、下志留统尼勒克河组(S_1n)碳酸盐岩夹碎屑岩、上泥盆统吐拉苏组(D_3t)石英砂岩和砂砾岩(图 1b)。盖层主要为下石炭统大哈拉军山组(C_1d)陆相钙碱性-中酸性火山岩、火山碎屑岩和不整合覆盖于其上的阿恰勒河组(C_1a)砾岩、砂岩、泥岩、生物灰岩等(图 1b)。大哈拉军山组自下而上主要由砾岩段、酸性凝灰岩段、下安山岩段、火山碎屑岩段和上安山岩段 5 个岩性段组成(Tang et al., 2013; 顾雪祥等, 2014; 彭义伟等, 2016)。

区域断裂构造在整体上呈 NWW、NW 走向的分布态势,南北分别以伊犁盆地北缘断裂和科古琴山南坡断裂为界限。区域岩浆活动强烈,泥盆纪—石炭纪中酸性侵入岩和火山岩均广泛出露。盆地北部克峡希一带出露的花岗岩由辉石闪长岩、石英闪长岩、花

岗闪长岩和闪长斑长岩组成, 侵入时代为 357~348 Ma(薛春纪等, 2013)。塔吾尔别克金矿区出露有面积不到 1 km² 的花岗斑岩体, 侵入时代为 355~349 Ma (Tang et al., 2013; Zhao et al., 2014)。大哈拉军山组火山岩喷发于 417~347 Ma 的泥盆纪至早石炭世(Tang et al., 2013; Zhao et al., 2014; 彭义伟等, 2016), 其中发育一系列浅成低温热液金矿床, 如阿希、京希-伊尔曼德和塔吾尔别克金矿等(图 1a)(Chen et al., 2012; 顾雪祥等, 2016; Wang et al., 2018)。

2 矿床地质特征

阿希金矿床位于吐拉苏盆地中部, 代表了新疆西天山规模最大、品位最富的低硫型浅成低温热液金矿床。矿区地层主要是大哈拉军山组第五岩性段(C₅d⁵)和阿恰勒河组(C₄a)(图 2a)。受古火山机构影响, 矿区断裂构造主要发育了一系列环形和放射状断裂, 控制着矿体的分布(鲍景新等, 2002; 沙德铭等, 2003; 翟

伟等, 2010)。其中规模最大的是 I 号矿体, 具有多期次活动特点, 矿体总长大于 1 000 m, 厚约 11~15 m, 延伸 300~450 m, 呈似板状, 局部直立或倒转, 上陡下缓, 向深部变薄乃至分叉尖灭。I 号矿体平均品位 5.57 × 10⁻⁶, 其资源量占矿床总资源量的 90% 以上(沙德铭等, 2005; Chen et al., 2012)。矿床蚀变具有明显带状分布, 从中心的石英矿脉向外依次为硅化、黄铁绢英岩化和青磐岩化(图 2b)(Liu et al., 2018, 2020; Zhang et al., 2018)。

阿希金矿床的矿石按照氧化程度划分为氧化型与原生型两类。氧化型矿石是表生期原生矿石在历经不同程度的氧化淋滤作用后所形成的。原生矿石可分为 3 种类型: ①石英脉型矿石(图 3c~图 3g), 主要由烟灰色石英、玉髓和载金硫化物组成。②蚀变岩型矿石(图 3b), 由近矿围岩经强烈硅化、绢云母化以及黏土化蚀变交代形成, 常被烟灰色石英脉穿插。③角砾岩型矿石(图 3a), 由石英脉型矿石与蚀变岩型矿石经过构造活动破碎后形成的, 常被晚期脉石矿物

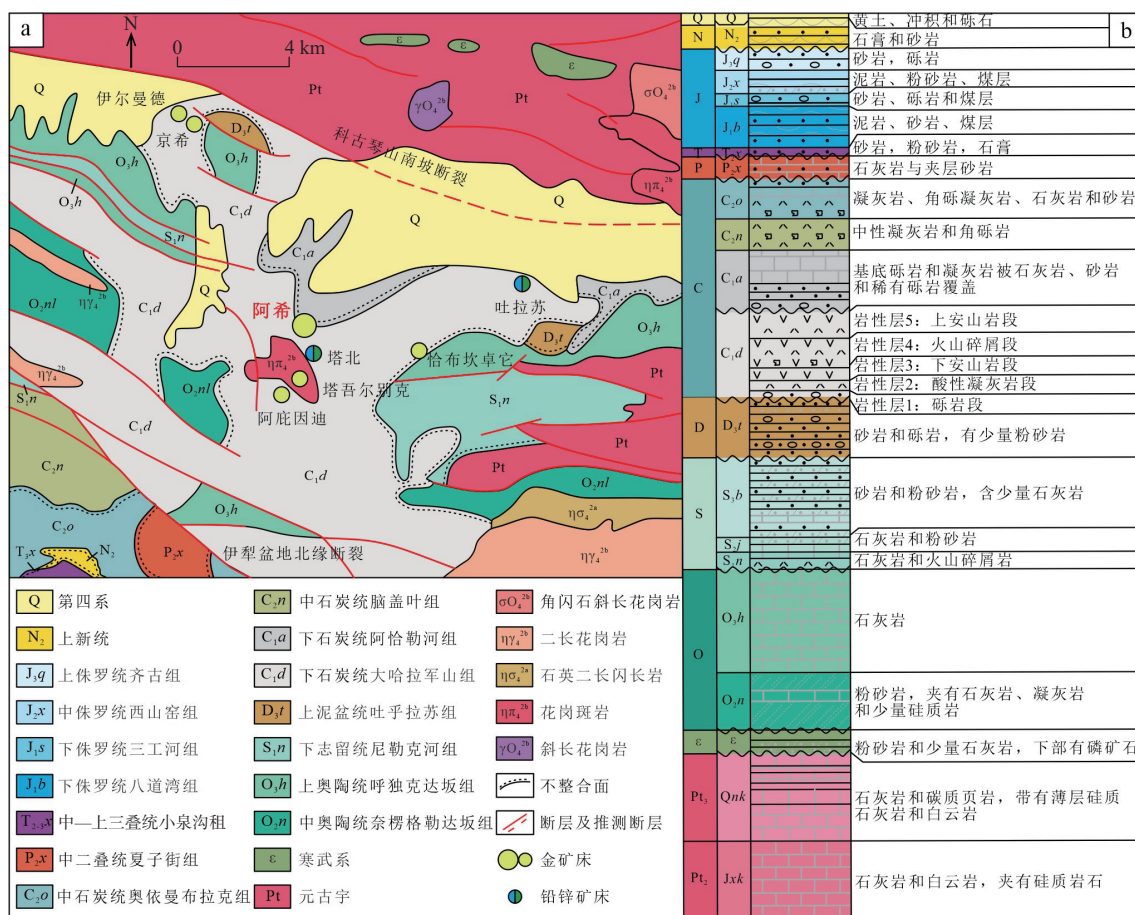


图1 吐拉苏盆地区域地质图(a)和地层柱状图(b)(据 Zhao et al., 2014; Li et al., 2023b 修改)

Fig. 1 (a) Regional geological map and (b) stratigraphic columnar section of the Tulasu Basin

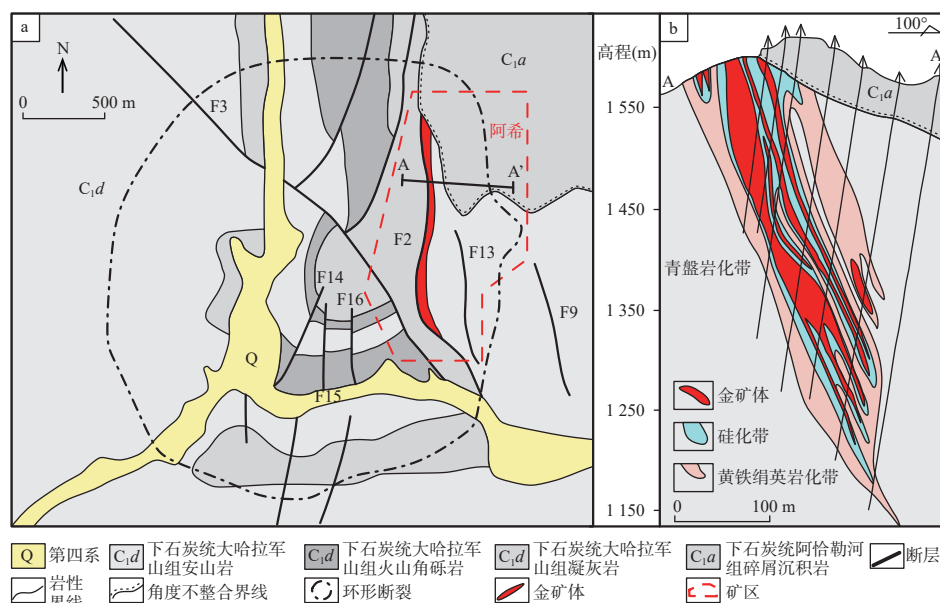
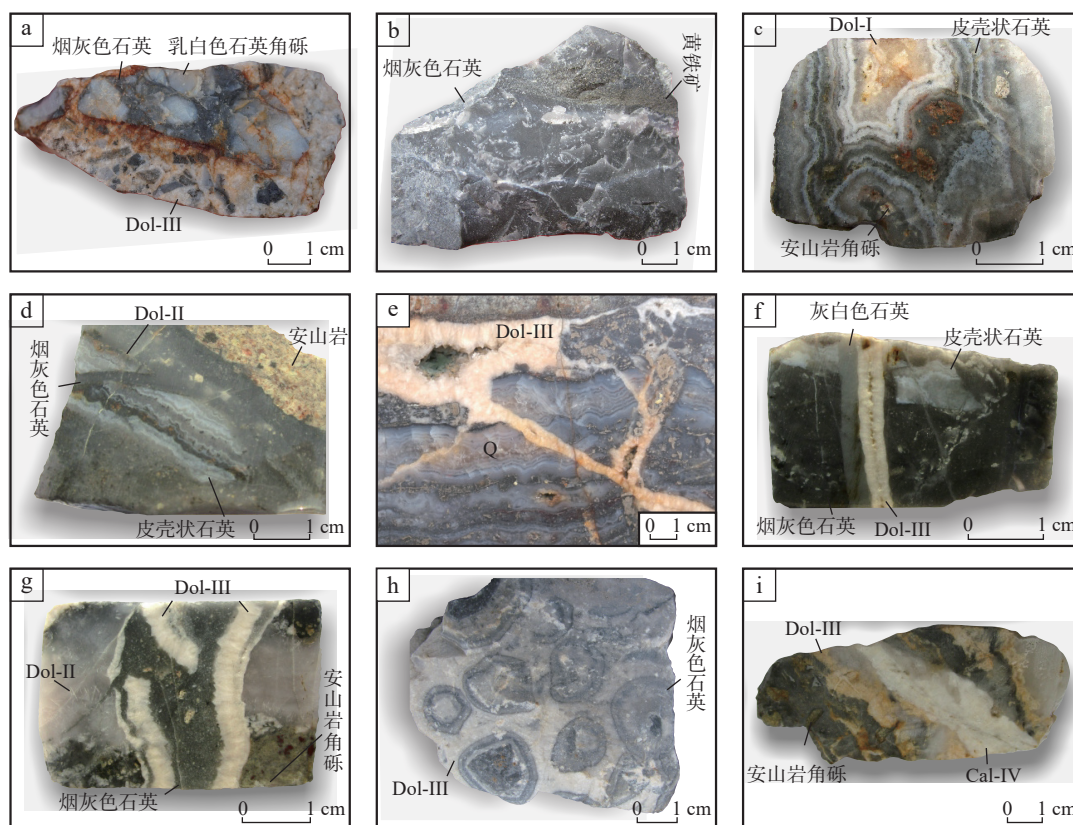


图2 阿希金矿床地质简图(a)和 A-A'勘探线剖面图(b) (董连慧等, 2005; Zhai et al., 2009)

Fig. 2 (a) Simplified geological map and (b) cross-section of the A-A' prospecting line of the Axi deposit



a. 角砾岩型矿石, 乳白色石英常被破碎成角砾被烟灰色石英胶结, 两者同时被 Dol-III 胶结; b. 石英岩型矿石, 烟灰色石英中发育的浸染状细粒黄铁矿; c. 皮壳状矿石, 皮壳状石英沿围岩角砾顺层生长, Dol-I 在皮壳状石英脉中心晶洞处生长; d. 皮壳状矿石, 含有 Dol-II 的烟灰色石英脉明显穿切皮壳状石英; e. 皮壳状矿石, 皮壳状矿石被 Dol-III 明显穿切; f. 皮壳状石英呈角砾状被烟灰色石英脉穿插, 二者同时被晚期灰白色石英脉和 Dol-III 穿切; g. 石英岩型矿石, 含 Dol-II 的石英角砾被 Dol-III 穿插, 两者同时被烟灰色石英穿切; h. 鸡冠状矿石, 脉状白云石环绕石英角砾生长; i. Dol-III 穿插早期石英角砾, 两者同时被 Cal-IV 穿切

图3 阿希金矿床不同类型矿石样品照片

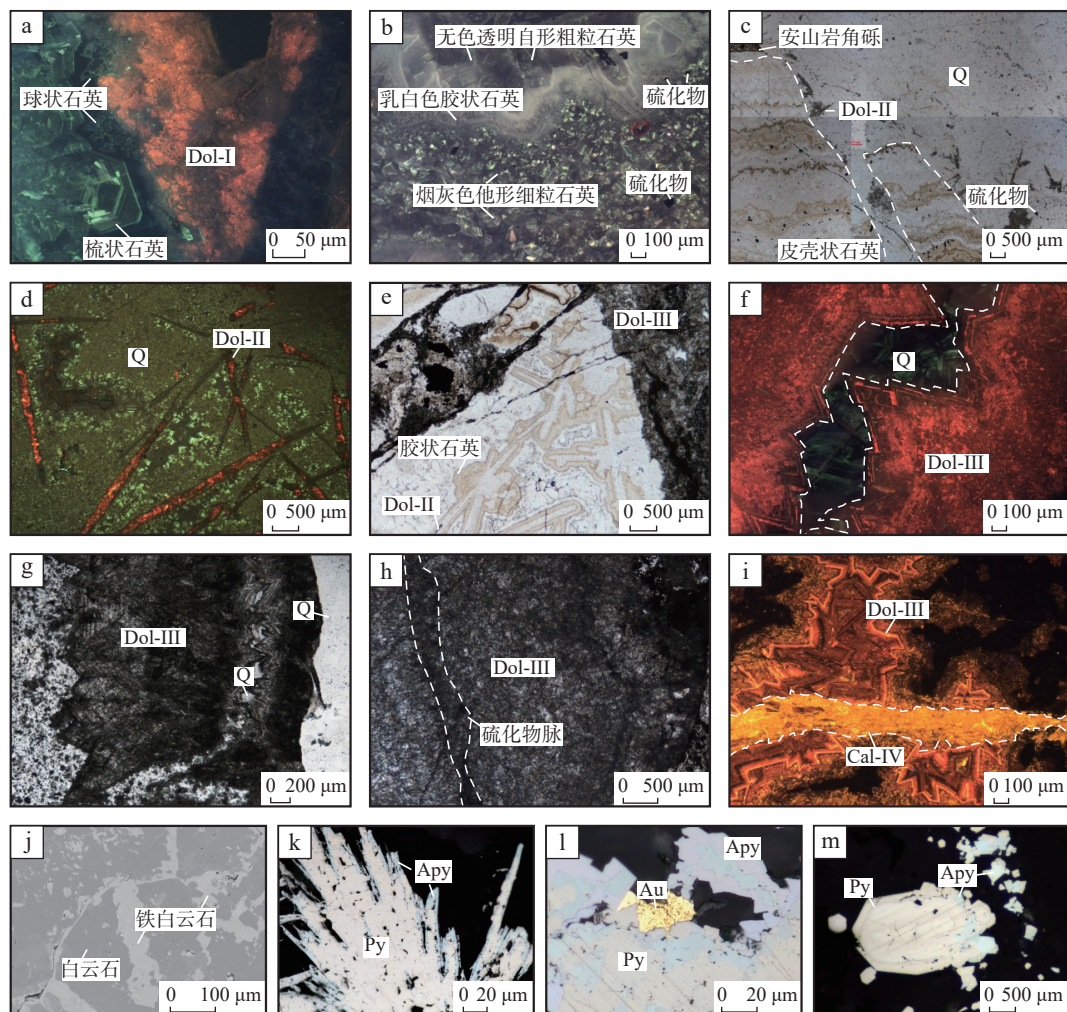
Fig. 3 Photographs of different types of ore samples from the Axi deposit

胶结。矿石的典型结构包括胶状、玉髓状、叶片状和“球状”结构等(图 4a~图 4i)。矿石的典型构造主要有脉状、浸染状、角砾状、皮壳状和梳状构造等(图 3a~图 3i)。其中,皮壳状矿石、叶片状/格子状白云石以及多期角砾状矿石是低硫型浅成低温热液金矿床特有的矿石组构。矿石中金属矿物主要有黄铁矿、毒砂、白铁矿、闪锌矿和黄铜矿等(图 4k~图 4m);非金属矿物主要为石英、玉髓、白云石、方解石、绢云母、绿泥石等(图 4a~图 4j)。自然金或银金矿主要产于黄铁矿粒间及裂隙中(图 4l),少量产于黄铁矿与毒

砂粒间(魏佳林等, 2014; 徐伯骏等, 2014; 毛先成等, 2018)。

根据矿物组构、矿物共生组合以及脉体间的相互穿插、交代关系,阿希金矿床的热液成矿过程可划分为 5 个成矿阶段:石英-绢云母-黄铁矿阶段(I)、石英-黄铁矿阶段(II)、石英-多金属硫化物-碳酸盐阶段(III)、碳酸盐-石英阶段(IV)和碳酸盐阶段(V)(图 5)。

石英-绢云母-黄铁矿阶段(I):其典型特征是围岩中广泛发育石英-绢云母±黄铁矿细脉,与金矿化无关。该阶段安山岩中的角闪石和斜长石斑晶常被交



a. 皮壳状石英中心晶洞处发育的梳状石英、胶状结构的“球状”石英和 Dol-I(阴极发光); b. 皮壳状石英脉中顺层生长的烟灰色他形细粒石英、乳白色胶状石英和无色透明自形粗粒石英(阴极发光); c. 皮壳状石英被含 Dol-II 的烟灰色石英脉穿插(单偏光); d. Dol-II 和他形细粒石英(阴极发光); e. Dol-II 被胶状石英交代, 两者同时被 Dol-III 穿插(单偏光); f. Dol-III 和其中间位置发育的石英(阴极发光); g. Dol-III 穿插他形细粒石英中, 中间发育更晚期的粗粒石英(单偏光); h. 含硫化物细脉的白云石胶结物(单偏光); i. Cal-IV 穿插脉状白云石(阴极发光); j. Dol-I 中的铁白云石和白云石(背散射图像); k. 针状/放射状硫化物集合体分布在皮壳状石英中(反射光); l. 硫化物集合体粒间的自然金(反射光); m. 烟灰色石英中的粗粒柱状黄铁矿, 毒砂环绕黄铁矿生长或呈浸染状分布(反射光); Dol. 白云石; Cal. 方解石; Q. 石英; Py. 黄铁矿; Apy. 毒砂; Au. 自然金

图4 阿希金矿床碳酸盐矿物的物质组成和显微组构

Fig. 4 Material composition and microtexture of carbonate minerals in the Axi deposit

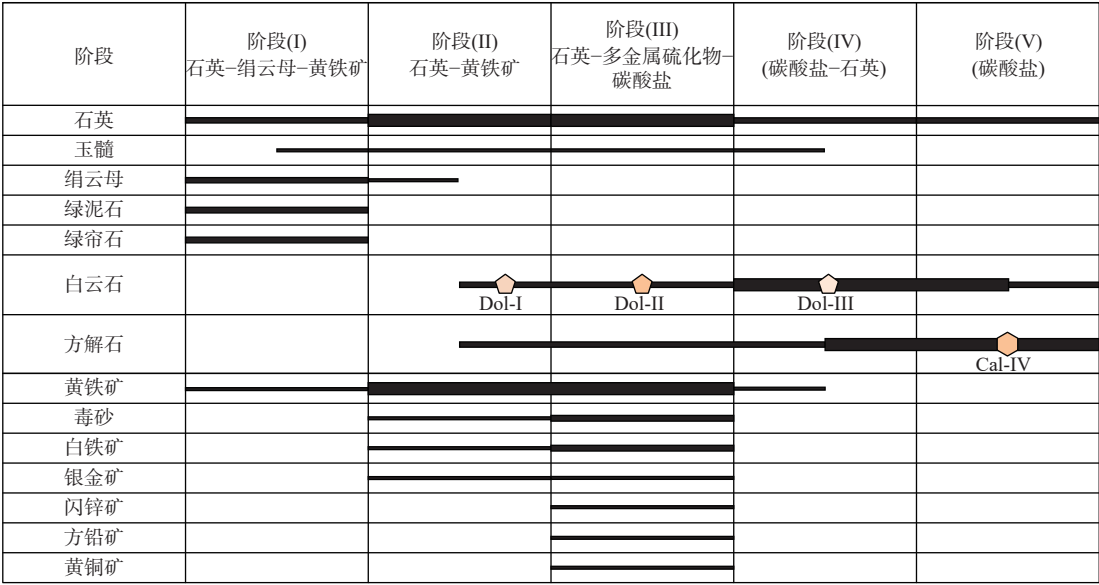


图5 阿希金矿床成矿阶段及矿物生成顺序

Fig. 5 Metallogenic stages and mineral formation sequence of the Axi deposit

代,形成石英和少量细粒黄铁矿(图 3a、图 3b)。此阶段形成的乳白色石英常被碎成角砾被后期烟灰色石英胶结(图 3a),两者可同时呈角砾状被晚期碳酸盐±石英脉穿插(图 3f~图 3h)。

石英-黄铁矿阶段(II):该阶段是角砾化作用和断裂活动的主要阶段,以发育大量皮壳状石英为特征(图 3c~图 3e、图 4b、图 4c),金矿化较好。其中,黄铁矿和毒砂等硫化物形成针状/放射状硫化物集合体,主要分布在皮壳状石英中的他形细粒石英微条带中(图 4k、图 4l)。该阶段在皮壳状石英中心晶洞发育呈自形粗粒结构的白云石(Dol-I)(图 3c、图 4a)。

石英-多金属硫化物-碳酸盐阶段(III):该阶段是角砾化作用和断裂活动的次要阶段,以发育烟灰色石英-多金属硫化物±碳酸盐为典型特征,为金的主要成矿阶段。烟灰色隐晶质石英脉常穿切皮壳状石英(图 3d、图 4c),其中发育了叶片状白云石(Dol-II)(图 3d、图 4c~图 4e)和粗粒柱状黄铁矿,毒砂环绕黄铁矿生长或呈浸染状分布于石英中(图 4m)。

碳酸盐-石英阶段(IV):主要发育贫矿的碳酸盐矿物±石英脉,以形成大量石英、碳酸盐矿物和少量载金硫化物为特征。该阶段形成的碳酸盐矿物、灰白色石英常胶结早期的烟灰色石英±安山岩角砾,或穿切早阶段的石英-硫化物脉(图 3e~图 3h),其中脉状白云石(Dol-III)呈梳状穿切皮壳状石英(图 3e~图 3h、图 4f~图 4h)。

碳酸盐阶段(V):其典型特征是发育无矿化的自

形粗粒方解石(Cal-IV),常以细脉状穿切早阶段蚀变围岩±碳酸盐±石英±多金属硫化物脉,或以充填形式出现在早期矿物留存的空腔位置(图 3i、图 4i)。

3 样品采集及分析方法

3.1 样品采集

样品主要取自阿希金矿床的露天采坑和平硐。笔者选取 4 种典型的碳酸盐矿物,用于岩矿鉴定、电子探针和 C-O 同位素分析。它们分别是石英-黄铁矿阶段(II)的皮壳状石英中自形粗粒白云石(Dol-I)、石英-多金属硫化物-碳酸盐阶段(III)的叶片状白云石(Dol-II)、碳酸盐-石英阶段(IV)的脉状白云石(Dol-III)、碳酸盐阶段(V)的脉状方解石(Cal-IV)。

3.2 测试方法

光学显微阴极发光在成都理工大学地球与行星科学学院阴极发光实验室使用 LEICA DM 2700P 和阴极发光 CITL8200 MK-5CL 显微镜进行的。在 10 kV 和 250 μA 的工作条件下观测,使用徕卡相机系统在 1~6 s 的曝光时间下采集 CL 图像。所观测的矿物主要为白云石、方解石和石英。

电子探针成分分析和背散射图像在西南石油大学地球科学与技术学院电子探针实验室中进行并完成。所采用的实验仪器为 JEOL-JXA-8230。具体工作条件如下:加速电压为 15 kV,加速电流为 10 nA,束斑直径则为 10 μm。所有测试数据均进行了 ZAF 校正

处理。所分析的矿物为白云石、方解石, 分析元素包括 Na、Mg、Mn、Ca、Fe、Sr、K、P、Si、Al 和 Ba。

碳氧同位素分析在北京科荟测试技术有限公司完成, 测试仪器为 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 ℃。首先, 把白云石和方解石的样品进行破碎处理, 过筛分选, 在双目镜下挑选出 60 目的单矿物。其次, 使用玛瑙研钵把单矿物研磨至 200 目, 称取约 100 μg 的绝对量, 将其放入到 12 ml 的反应瓶中。随后用高纯氦气(氦气纯度为 99.999%, 流速是 100 ml/min)对反应瓶进行 600 s 的排空处理, 排空完成后, 添加 5 滴 100% 的无水磷酸, 再将其放置在 72 ℃ 的加热盘上, 促使样品与磷酸发生反应并达到平衡状态。最终样品与磷酸反应且平衡后产生的 CO₂ 气体, 会通过 70 ℃ 的熔硅毛细管柱, 和其他杂质气体分离, 进入稳定气体同位素质谱仪来进行测定。 $\delta^{13}\text{C}$ 以 PDB 为标准, $\delta^{18}\text{O}$ 分别以 PDB 和 SMOW 为标准, 测试精度均高于 0.1‰。

4 分析结果

4.1 碳酸盐矿物主量元素地球化学特征

不同阶段碳酸盐矿物电子探针分析结果见表 1 和图 6: Dol-I 的 FeO 含量变化范围较大, 可进一步划分为白云石(Dol-Ia)和铁白云石(Dol-Ib)。Dol-Ia 的 FeO 含量较低, 为 0.31%~0.68%, Dol-Ib 较高, 为 14.17%~14.66%; MgO 含量分别为 20.08%~21.16%、9.04%~9.78%; MnO 含量分别为 0.00%~0.08%、1.94%~2.78%; CaO 含量分别为 29.52%~31.03%、28.31%~28.96%。Dol-II 的 FeO 含量为 0.63%~1.48%; MgO 含量为 19.71%~20.69%; MnO 含量为 0.24%~0.87%; CaO 含量为 29.09%~30.58%。Dol-III 的 FeO 含量为 1.57%~3.89%; MgO 含量为 18.12%~19.63%; MnO 含量为 0.26%~1.11%; CaO 含量为 29.31%~30.95%。Cal-IV 的 FeO 含量为 0.61%~1.34%; MgO 含量为 0.14%~0.35%; MnO 含量为 0.22%~1.21%; CaO 含量为 52.04%~53.87%。

4.2 碳酸盐矿物碳、氧同位素组成

阿希金矿床矿石中皮壳状石英中自形粗粒白云石(Dol-I)和叶片状白云石(Dol-II)的粒度较小, 单矿物挑选过程中难以将其完全分离, 样品不易制备, 因此笔者只测试 Dol-III、Cal-IV 的 C-O 同位素特征。

碳酸盐矿物 C-O 同位素地球化学分析结果见表 2 和图 7: 碳酸盐-石英阶段(IV)中 Dol-III 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 为 2.54‰和 3.56‰, 均值为 3.05‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 为 -15.61‰和 -13.86‰, 均值为 -14.74‰。碳酸盐阶段(V)中 Cal-IV 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 为 1.77‰和 3.18‰, 均值为 2.48‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 为 -18.26‰和 -11.29‰, 均值为 -14.78‰。根据公式 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}} = (\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - 30.91) / 1.0309$, 计算出 Dol-III 的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 14.82‰和 16.62‰, 均值为 15.72‰; Cal-IV 的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 12.09‰和 19.27‰, 均值为 15.68‰。

4.3 碳酸盐矿物组构学特征

4.3.1 皮壳状石英中自形粗粒白云石(Dol-I)

Dol-I 形成于石英-黄铁矿阶段(II), 呈白色/黄褐色自形-半自形粗粒结构, 粒度为 0.1~0.5 mm, 分布于皮壳状石英中梳状石英脉的中心晶洞处, 阴极发光下呈橘红色(图 4a)。阴极发光显示, 皮壳状石英中乳白色胶状石英最亮, 烟灰色他形细粒石英最暗, 无色透明自形粗粒石英发光强度中等、具明显生长环带(图 4b)。梳状石英脉的中心晶洞发育呈自形粗粒结构的 Dol-I, 含量较少, 并非在皮壳状石英脉中心位置都可以形成白云石。胶状结构的“球状”石英分布在梳状石英和 Dol-I 之间(图 3c、图 4a)。梳状石英沿着中心向外生长的晶形方向, 说明 Dol-I 是滞后于皮壳状石英微条带的形成(图 4a)。结合背散射图像, Dol-I 中铁白云石(Dol-Ib)沿着白云石(Dol-Ia)晶体边界生长(图 4j), 故 Dol-Ib 略晚于 Dol-Ia 的形成。

4.3.2 叶片状白云石(Dol-II)

Dol-II 形成于石英-多金属硫化物-碳酸盐阶段(III), 呈乳白色叶片状/针状结构, 分布于烟灰色石英中, 阴极发光下呈暗红色(图 4d)。皮壳状石英被含 Dol-II 的烟灰色隐晶质石英脉明显穿切, 其中 Dol-II 基本沿着皮壳状石英的边界发育(图 3d、图 4c), 由此推测, 叶片状/针状白云石形成时间晚于皮壳状石英中自形粗粒白云石, 即 Dol-II 晚于 Dol-I 的形成。此外, 烟灰色石英中的 Dol-II 被胶状石英交代形成了叶片状石英(图 4e)。

4.3.3 脉状白云石(Dol-III)

Dol-III 形成于碳酸盐-石英阶段(IV), 呈乳白色自形-半自形梳状结构, 粒度为 0.2~2.0 mm, 阴极发光下呈亮红色(图 4f)。Dol-III 常呈脉状明显穿插含 Dol-II 的烟灰色隐晶质石英(图 3g、图 4e)和早期皮壳状石英(图 3e、图 3f), 或胶结石英±安山岩形成鸡冠

表 1 阿希金矿床碳酸盐矿物电子探针分析结果(%)

Tab. 1 The Electron Probe Micro-Analysis (EPMA) results of carbonate minerals from the Axi gold deposit (%)

样号	样品类型	Na ₂ O	MgO	MnO	CaO	FeO	SrO	K ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	BaO	CO ₂	Total
17AX-28-2B-1	Dol-Ia	0.03	20.68	0.03	31.03	0.68	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	47.43	99.98
17AX-28-2B-2		0.00	20.08	0.00	29.71	0.45	0.01	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	48.01	98.31
17AX-28-2B-3		0.00	20.57	0.06	30.71	0.31	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	47.70	99.36
17AX-28-2B-4		0.06	21.16	0.08	29.52	0.37	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	47.87	99.11
17AX-28-2B-5	Dol-Ib	0.00	9.78	1.98	28.88	14.58	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	44.22	99.45
17AX-28-2B-6		0.02	9.55	1.94	28.96	14.58	0.06	0.00	0.00	0.03	0.01	0.04	44.20	99.39
17AX-28-2B-7		0.03	9.76	2.51	28.31	14.17	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	44.31	99.11
17AX-28-2B-8		0.04	9.04	2.78	28.61	14.66	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	44.08	99.24
14AX-13T-1-1	Dol-II	0.00	20.03	0.42	29.47	1.29	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	47.64	98.92
14AX-13T-1-2		0.00	19.71	0.44	30.58	1.25	0.02	0.04	0.00	0.06	0.03	0.00	47.39	99.51
14AX-13T-1-3		0.02	20.69	0.24	29.85	0.63	0.03	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	47.73	99.26
14AX-13T-1-4		0.00	20.03	0.54	29.79	0.77	0.03	0.00	0.01	0.06	0.01	0.03	47.68	98.96
14AX-13T-1-5		0.00	20.04	0.58	29.15	1.42	0.00	0.01	0.02	0.05	0.02	0.00	47.64	98.92
14AX-13T-1-6		0.00	20.28	0.87	29.09	1.48	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	47.50	99.23
14AX-13T-1-7		0.00	20.24	0.43	30.27	1.30	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.00	47.39	99.75
14AX-13T-1-8		0.01	20.12	0.57	29.29	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.62	98.96
14AX-13T-2-1	Dol-III	0.04	19.44	0.26	30.95	1.98	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	47.16	99.84
14AX-13T-2-2		0.00	18.71	0.76	29.43	2.73	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.09	47.20	98.99
14AX-13T-2-3		0.00	19.04	0.47	30.72	1.61	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	47.33	99.23
14AX-13T-2-4		0.01	18.12	1.04	29.96	3.89	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	46.70	99.75
14AX-13T-2-5		0.00	18.45	1.11	29.74	3.02	0.08	0.01	0.00	0.05	0.04	0.01	46.94	99.45
14AX-13T-2-6		0.00	19.63	0.72	29.62	2.07	0.00	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	47.30	99.44
14AX-13T-2-7		0.01	19.31	0.80	29.45	2.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	47.24	99.23
14AX-13T-2-8		0.00	19.54	0.71	29.31	1.57	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	0.02	47.57	98.78
16AX-58J-1-1	Cal-IV	0.00	0.24	1.16	53.47	0.83	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	43.91	99.69
16AX-58J-1-2		0.01	0.31	1.21	53.47	0.91	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.04	43.87	99.87
16AX-58J-1-3		0.00	0.14	0.61	53.49	0.61	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	0.10	44.12	99.14
16AX-58J-1-4		0.00	0.17	0.79	53.65	0.70	0.07	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	44.01	99.45
16AX-58J-1-5		0.00	0.35	0.22	52.04	1.34	0.07	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	44.36	98.43
16AX-58J-1-6		0.00	0.25	0.24	53.17	0.99	0.05	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	44.21	98.94
16AX-58J-1-7		0.00	0.19	0.27	53.13	0.98	0.12	0.01	0.01	0.04	0.01	0.00	44.19	98.95
16AX-58J-1-8		0.03	0.21	0.44	53.87	0.89	0.10	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	44.00	99.60

状白云石(图 3h)。脉状白云石中有时还可能发育硫化物细脉(图 4h)。由此推测,脉状白云石的形成明显晚于叶片状白云石(图 3e~图 3h、图 4e),故 Dol-III 形成时间晚于 Dol-II。

4.3.4 脉状方解石(Cal-IV)

Cal-IV 形成于碳酸盐阶段(V),呈白色自形-半自形粗粒结构,粒度 0.5~2.0 mm,常呈细脉状产出,阴极发光下呈亮黄色(图 4i)。该阶段方解石脉不含矿,

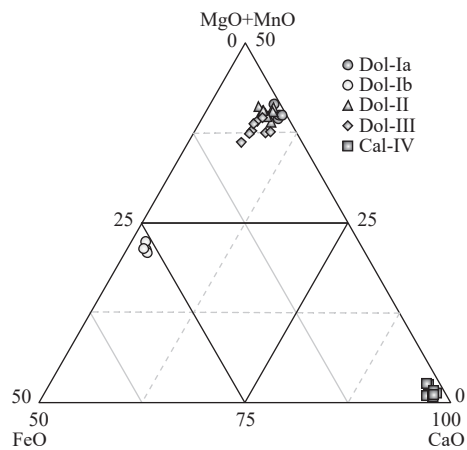


图6 阿希金矿床碳酸盐矿物电子探针主量元素三元图

Fig. 6 Ternary diagram of major elements of carbonate minerals in the Axi deposit by electron probe

穿切早期成矿阶段的石英±多金属硫化物±碳酸盐脉体,其形成时间晚于 Dol-I、Dol-II 和 Dol-III(图 3i)。

5 讨论

5.1 碳酸盐矿物形成过程

白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)属于菱形碳酸盐矿物,其结构与方解石(CaCO_3)存在显著差异,主要由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 离子有序交替排列构成。白云石按晶体形态可分为泥晶、粉晶、细晶、中晶和粗晶白云石等(崔广申等, 2023);按化学成分可分为铁白云石、含铁白云石、锰白云石、钙白云石等(Klein et al., 2008; Gregg et al., 2015)。在自然界中,铁白云石或含铁白云石的形

表 2 阿希、塔吾尔别克、塔北和京希-伊尔曼德矿床碳酸盐矿物的 C、O 同位素组成(‰)

Tab. 2 The carbon and oxygen isotope compositions of carbonate minerals in the Axi, Tawuerbieke, Tabei and Jingxi-Yelmend deposits (‰)

矿床	样品号	样品类型	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	数据来源
阿希金矿	16AX-34	阶段IV脉状白云石	2.54	-15.61	14.82	本研究
	17AX-57		3.56	-13.86	16.62	
	16AX-58	阶段V脉状方解石	1.77	-18.26	12.09	本研究
	16AX-6		3.18	-11.29	19.27	
塔吾尔别克金矿	ABYD-11	方解石	-2.90	-23.90	6.20	Peng et al., 2017
	ABYD-12	方解石	-0.90	-17.10	13.30	
	ABYD-16	方解石	-2.80	-21.70	8.60	
	TWE IV-6	方解石	-0.30	-17.10	13.30	
	TWE I-2	方解石	-1.30	-20.10	10.10	
塔北铅锌矿	TB-18	方解石	0.50	-22.50	7.80	Peng et al., 2018, 2022
	TB-22	方解石	1.30	-22.00	8.30	
	TB-35	方解石	1.50	-20.90	9.40	
	TB-40	方解石	1.10	-21.40	8.80	
	TB-50	方解石	1.00	-21.80	8.50	
	15TB-4	方解石	1.00	-23.70	6.50	
	15TB-6	方解石	1.00	-23.50	6.70	
	21TB-1	方解石	1.50	-24.50	5.60	
	21TB-1	方解石	1.50	-24.70	5.40	
	21TB-4-2	方解石	0.90	-24.50	5.60	
京希-伊尔曼德金矿	JXQ12	方解石	-2.76	-12.24	18.24	朱亿广等, 2011
	JXQ14	方解石	2.14	-17.29	13.04	
	GM09	方解石	4.32	-16.70	13.64	
	GM21	方解石	6.26	-16.70	13.64	
	9-May-08	方解石	1.20	-10.15	20.40	
	9-May-10	方解石	2.72	-23.82	6.30	

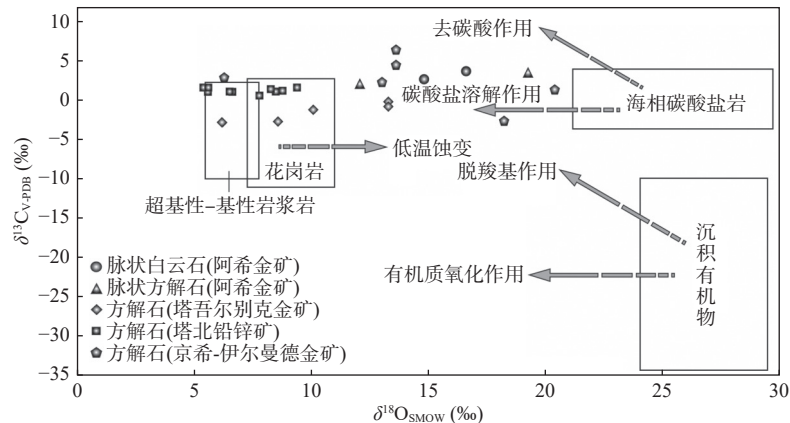


图7 阿希金矿床碳酸盐矿物的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 图解 (据刘建明等, 1997; 毛景文等, 2002)

Fig. 7 The $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ diagram of carbonate minerals in the Axi deposit

成通常与流体中富集的 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等金属离子密切相关, 这些离子通过置换白云石中的 Mg^{2+} 进入晶格, 这种替代过程影响了白云石的晶体结构、物理化学性质等方面 (杨虎城等, 2022; 葛禹等, 2023)。

根据国际矿物协会针对固溶体提出的“50%原则”, 在 Ca-Mg-Fe 的矿物中, 铁对镁的替代程度决定了矿物的种类 (Nickel et al., 1998)。若铁未替代白云石中半数以上的镁的位置时, 该矿物被称为白云石; 若铁替代超过半数镁的位置, 被称为铁白云石; 在白云石矿物范畴内, 当 Fe 含量较高, 但又未达到替代半数镁的程度时, 则被称作含铁白云石 (由雪莲等, 2018)。根据背散射图像和电子探针分析结果, 阿希金矿床中 Dol-I 可细分为 Dol-Ia、Dol-Ib (图 4j、图 6), 二者 CaO 、 MnO 含量相似, Dol-Ia 的 FeO 含量为 0.31%~0.68%, FeO 含量偏低, 未超 MgO 含量的 50%, 属于白云石; Dol-Ib 的 FeO 含量为 14.17%~14.58%, FeO 含量超过 MgO 的 50%, 属于铁白云石, 说明 Dol-I 是由白云石和铁白云石构成。结合 Dol-I 因氧化呈黄褐色, 间接证实其中 Fe^{2+} 的存在 (图 3c)。Dol-II 的 FeO 含量为 0.627%~1.484%, MgO 含量为 19.706%~20.691%, 属于含铁白云石; Dol-III 的 FeO 含量为 1.569%~3.885%, MgO 含量为 18.119%~19.626%, 属于含铁白云石 (图 6)。

5.1.1 皮壳状石英中自形粗粒白云石 (Dol-I)

皮壳状构造是低硫型矿床中普遍发育的一种原生成因的矿石构造, 在澳大利亚昆士兰州 Cracow 矿床 (Dong et al., 1996)、日本 Hishikari 矿床 (Faure et al., 2002)、秘鲁 Apacheta 矿床 (André-Mayer et al., 2002) 中均有发现。新疆西天山阿希金矿床亦发现了大量

高品位皮壳状矿石 (彭义伟等, 2020; McLeish et al., 2021)。

皮壳状石英由连续、狭窄和近平行的乳白色胶状石英、烟灰色含载金硫化物的他形细粒石英和无色透明自形粗粒石英微条带多次交替生长组成。石英微条带对称发育在裂隙两壁构成皮壳状结构 (图 3c、图 4b、图 4c), 或包裹早期围岩/石英角砾呈同心环状生长形成鸡冠状结构 (图 3h)。其中, 胶状石英是原生成因的“球状”或菱形矿物集合体 (图 4b、图 4c), 边缘呈羽毛状消光, 表明其可能历经多个结晶过程, 暗示石英与多金属成矿过程的连续性 (Fournier, 1985; Dong et al., 1995; Shimizu et al., 1998)。他形细粒石英具有高度不规则的晶体边界, 可能是先前流体沸腾过程中沉淀的非晶质硅在热液中重结晶形成的 (Lovering, 1972)。针状/放射状硫化物集合体大多顺层产于他形细粒石英微条带中, 少量分布于他形细粒和胶状石英之间 (图 4b), 自然金主要分布于硫化物集合体粒间 (图 4l), 该现象说明非晶质二氧化硅的形成和贵金属的沉淀可能是同时发生的。在他形细粒石英微条带生长过程中, CO_2 、 HS^- 和 S^{2-} 等酸性离子被大量消耗, 形成载金硫化物, 导致成矿流体从中酸性转变为碱性。伴随剧烈沸腾作用的减弱, 温度与压力缓慢降低, 热液在物理化学条件相对稳定或轻微变动的条件下, 在皮壳状石英的矿脉中心, 垂直于先前形成的自形粗粒梳状石英缓慢生长, 沿自形晶一端的生长方向往矿脉中心延伸并形成空腔 (图 4a) (Yilmaz et al., 2013; Swinkels et al., 2021)。梳状石英的存在及其晶形生长方向表明阶段 II 晚期的成矿环境相对稳定, 流体沸腾作用的强度由剧烈渐趋轻微, 直至停止 (Genna et al., 1996)。

“球状”石英生长在梳状石英和 Dol-I 之间(图 4a), 暗示梳状石英后流体可能再次发生相对轻微的沸腾作用。随后沸腾作用逐渐减弱, 热液 pH 值逐渐上升, 酸性离子再度被消耗, 成矿流体呈碱性。当热液向上运移时与围岩反应, 成矿流体中富含 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} , 最终在皮壳状矿石中梳状石英脉中心, 热液缓慢结晶形成自形粗粒白云石(Dol-I)(图 3c、图 4a)。梳状石英及其后续沉淀矿物中均无硫化物, 结合电子探针分析和 Dol-I 被氧化成黄褐色的特征(图 3c), 可知反复发生的流体沸腾及大量硫化物的沉淀使热液中 HS^- 和 S^{2-} 耗尽, 热液中残余 Fe^{2+} 进入白云石晶格替代 Ca^{2+} , 但因残余 Fe^{2+} 含量不足以完全替代白云石中的 Ca^{2+} 形成铁白云石, 从而造成铁白云石和含铁白云石相互交代的结果。作为剧烈沸腾阶段收尾的产物, Dol-I 出现阶段 II 晚期, 指示成矿物理化学条件相对稳定。

5.1.2 叶片状白云石(Dol-II)

叶片状碳酸盐/石英是低硫型矿床中常见的交代成因的矿物(André-Mayer et al., 2002; Simmons et al., 2006), 通常形成于活跃的低温热液系统沸腾带附近, 是流体沸腾时(CO_2 逸失和 pH 值升高)直接从非平衡的过饱和热液体系中晶出的(Marchev et al., 2004; Marinova, 2014, 2019)。

CO_2 作为热液中溶解度最低的酸性气体成分, 对压力变化十分敏感(Monecke, 2019; 史训立, 2019)。当含矿热液从深部向浅部断裂空间运移过程中, 发生初始流体沸腾, 在由静岩压力向静水压力转变处, CO_2 率先大量逸出, 使得 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 达到饱和, 进而沉淀形成叶片状白云石(图 3d、图 4c~图 4e)(Simmons et al., 1994; Dong et al., 1995; Etoh et al., 2002)。前人发现, 二氧化硅过饱和后, 先前形成的叶片状碳酸盐在降温过程中会发生溶解, 二氧化硅充填白云石叶片/格子的空腔, 在叶片状碳酸盐表面结晶形成晶形较好的叶片状石英(Simon et al., 1999; Etoh et al., 2002)。然而, 阿希金矿床中的 Dol-II 的表面常被交代形成胶状石英(图 4e), 说明在由于初始沸腾作用形成的叶片状白云石沉淀后, 热液可能持续沸腾甚至加剧, 使二氧化硅达到过饱和状态, 与 Dol-II 发生交代作用, 并在其表面沉淀形成胶状石英(Simmons et al., 1994)。随着物理化学条件逐渐趋于稳定, 胶状石英发生重结晶或者二氧化硅直接从热液中缓慢结晶形成他形细粒石英(图 4d)。叶片状白云石周围的胶状

石英的发育进一步证明剧烈流体沸腾的发生, 叶片状白云石作为初始剧烈沸腾的产物, 出现在阶段 III 早期, 指示流体沸腾作用的开始。

5.1.3 脉状白云石(Dol-III)

梳状碳酸盐矿物呈自形粗粒结构, 通常是在流体略微过饱和的条件下形成的, 表明在晶体生长过程中, 热液的物理化学性质, 如温度、压力和 pH 值等, 经历了缓慢变化或非常轻微的波动(Dong et al., 1995; Moncada et al., 2017)。梳状结构是相邻晶体对空间有效的几何选择的结果(图 4f~图 4h), 只有在开放空间中相对缓慢的变化条件下, 最大生长速率方向垂直于生长表面的晶体才能形成(Simmons et al., 1994)。

阿希金矿区火山活动和环形断裂普遍发育, 热液流体在浅地表开放空间中逐渐冷却, 此时物理化学性质相对稳定, 热液中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 等阳离子略微过饱和, 最终缓慢结晶形成梳状结构的 Dol-III。作为晚期成矿阶段的产物, Dol-III 常穿插于早期矿脉之中。通过岩矿鉴定发现, 部分脉状白云石中心发育有灰黑色硫化物细脉, 主要为粒度约 5~10 μm 的浸染状细粒黄铁矿(图 4h)。然而, 从整个成矿流体性质的演化历程来看, 阶段 IV 中成矿流体的物理化学条件相对稳定, 且热液 pH 值有所升高。

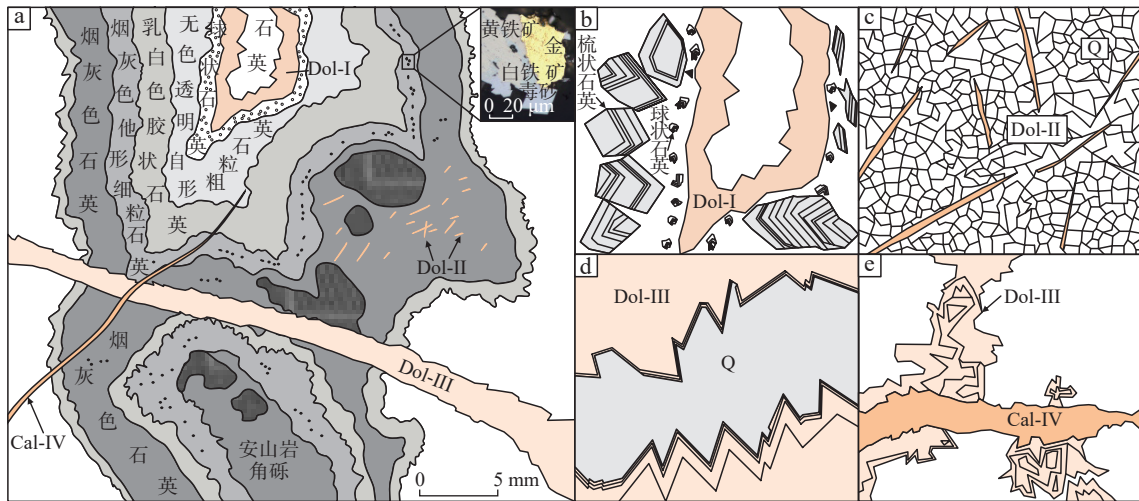
5.1.4 脉状方解石(Cal-IV)

晚期方解石脉作为成矿后的产物, 其形成机制可能与 CO_2 逸失以及 HCO_3^- 解离产生的 CO_3^{2-} 离子密切相关(Reed et al., 1985)。在成矿系统中, 晚期方解石脉通常分布于成矿系统的边缘或浅层部位, 反映了成矿后流体物理化学条件的空间变化(Yilmaz et al., 2013)。

阿希金矿床中, Dol-I 和 Dol-II 形成于早期静岩压力向静水压力转换的深部沸腾面附近。当热液向上运移时, 物理化学条件发生改变, 流体沸腾作用逐渐减弱, Dol-III 开始缓慢结晶, 其结晶形态和生长方式受热液运移及周围介质条件的影响, 常以穿插或者胶结早期矿脉的形式产出(图 3e~图 3h)。在热液体系中, 方解石的形成是多种因素协同作用的结果(Li et al., 2023a)。在早期成矿阶段, 流体沸腾作用导致 CO_2 、 H_2S 等酸性气体逸出, 这一过程打破了化学反应平衡, 促使碳酸氢根离子发生分解, 产生的碳酸钙为 Cal-IV 的形成提供了物质基础。随着热液持续向上运移至成矿系统的边缘或浅层部位, 温度与压力逐渐降低, 当温压降至临界值时, 方解石在热液中的溶解度急剧

减小,进而引发 Cal-IV 沉淀析出(图 3i、图 4i)。同时,成矿后的碱性环境为方解石的结晶过程提供了更优越的热力学与动力学条件。在这些条件的共同作用下,晚期 Cal-IV 得以缓慢结晶,最终形成自形粗粒结构。研究表明,方解石属于流体沸腾作用之后的产物,

通常不发生矿化(Simon et al., 1999; John et al., 2003)。该阶段的成矿温度相对较低,成矿流体呈碱性,物理化学条件较为稳定,反映了成矿后热液体系的演化特征。不同成矿阶段的碳酸盐矿物的组构学特征素描见图 8。



a. 阿希金矿床不同成矿阶段碳酸盐矿物 Dol-I、Dol-II、Dol-III 和 Cal-IV 的脉体穿切关系素描图; b. Dol-I 组构特征素描图, 皮壳状石英脉中间位置发育的梳状石英、“球状石英”和自形粗粒结构的白云石; c. Dol-II 组构特征素描图, 烟灰色隐晶质石英中发育的叶片状白云石; d. Dol-III 组构特征素描图, 自形粗粒结构的梳状白云石及白云石脉中间位置分布的石英; e. Cal-IV 组构特征素描图, 晚期成矿阶段发育的自形粗粒脉状方解石明显穿切早期白云石脉

图8 阿希金矿床碳酸盐矿物组构学特征素描图

Fig. 8 Sketch diagrams showing the textural characteristics of carbonate minerals in the Axi gold deposit

5.2 成矿物质来源

低硫型金矿床中的碳酸盐矿物通常是在热液演化的特定阶段形成的,主要形成的碳酸盐矿物是方解石,其次为白云石。不同类型的碳酸盐矿物主要是热液中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等阳离子与 CO_3^{2-} 结合形成的。在热液系统中,这些离子可能来源于围岩的溶解或热液与大气降水的混合(Burtner et al., 2013; Fu et al., 2020)。例如,在印度尼西亚的 Pongkor 金-银矿床中流体包裹体研究表明,热液温度范围为 180~220 °C,流体起源于大气降水(盐度非常低,接近 0% NaCl),碳酸钙容易沉淀形成方解石(Warmada et al., 2007)。在赣南会昌县年坑银矿床中,成矿具有中硫化型特征,热液中的锰离子浓度较高,可能导致含锰白云石的形成(吴胜华等, 2021)。在阿希金矿床中,赋矿火山岩呈灰绿色、紫红色的斑状结构,斑晶占 15%~40%,主要发育了斜长石、角闪石和辉石,以及少量黑云母和石英(Zhai et al., 2009; 彭义伟, 2020)。研究发现,赋矿火山岩的 MgO 含量为 1.60%~9.72%,平均值为 5.06%,

Mg[#] 值为 29~84, 平均值为 58($\text{Mg}^{\#} = 100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$), $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 值为 0.80~5.06, 平均值为 2.04, 但绝大多数小于 1.5(岳继宗, 2021; Ma et al., 2023), 具有典型高镁安山岩的地球化学属性,类似于日本赞岐岩类(Martin et al., 2005; Zhang et al., 2012; 彭义伟, 2015)。赋矿火山岩为热液提供了 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 等阳离子,特别是 Mg^{2+} 的存在,导致阿希金矿床中主要形成的碳酸盐矿物是白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$),其次是方解石(CaCO_3)。由此推测,成矿物质可能主要来源于热液流经的赋矿火山岩。

阿希金矿床矿石中的碳酸盐矿物以白云石、方解石为主,主成矿阶段未见石墨与碳酸盐共生,因此碳酸盐矿物的 C 同位素组成大致代表成矿热液的总碳同位素组成(Ohmoto et al., 1979)。碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化不大,阶段 IV 中 Dol-III 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 2.54‰、3.56‰,阶段 V 中 Cal-IV 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值为 1.77‰、3.18‰,与海相碳酸盐的 C 同位素组成相似(图 7)(Ohmoto, 1972; Hoefs, 2009),表明流体中的碳

有可能来自矿区基底中元古界或奥陶系的灰岩。吐拉苏盆地中的塔吾尔别克金矿、塔北铅锌矿和京希-伊尔曼德金矿的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值平均为-1.64‰、1.30‰、2.31‰, 与阿希金矿床的 C 同位素组成相近, 表明 4 个矿床之间具有共同的碳源(朱亿广等, 2011; Peng et al., 2017, 2018, 2022)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值变化范围相对较宽, Dol-III 的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 14.82‰、16.62‰; Cal-IV 为 12.09‰、19.27‰, 两者都介于地幔储库与海相碳酸盐岩之间, 呈现负向飘移的趋势(图 6)(Ohmoto, 1972; Hoefs, 2009)。在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 图解中, C、O 同位素近水平分布, 可能是 CO_2 的脱气作用或水-岩反应所致(Zheng et al., 1993), 但是 CO_2 的脱气作用对 O 同位素的影响小, 对 C 同位素影响大, 导致碳酸盐的 C 同位素组成显著变化(郑永飞, 2001)。因此, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值发生负向飘移可能是受大气降水的加入所致。

低硫型矿床成矿流体通常具有较低的温度(150~300 °C)和盐度(<3.5% NaCl_{eq}), 其 H-O 同位素组成显示出循环大气降水的特征, Au、Ag 等成矿物质主要萃取自循环过程中途经的火山岩(Drummond et al., 1985; Hedenquist et al., 2000; Shimizu et al., 2014)。阿希金矿床中含金石英 H-O 同位素变化范围较小(翟伟等, 2007; Dong et al., 2018; An et al., 2018)。黄铁矿原位 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.8‰~2.4‰, 与陨石硫相似, 说明成矿物质与赋矿围岩火山岩以及基底岩石存在紧密关联(Dong et al., 2018)。综合石英和碳酸盐矿物的组构学、成分和同位素组成特征, 笔者认为阿希金矿床成矿流体物质来源可能是循环大气降水萃取的赋矿大哈拉军山组火山岩(Zhai et al., 2009; Dong et al., 2018; An et al., 2018)。

5.3 沉淀机制

低硫型浅成低温热液金矿床的沉淀富集机制存在诸多争议, 主要包括流体沸腾、流体混合、水岩反应、硫化作用和温度/压力降低等(Hedenquist et al., 2000; Hayashi et al., 2001; André-Mayer et al., 2002; Gao et al., 2018, 2021)。长期以来, 流体沸腾被视为低硫型金矿床最主要的沉淀机制, 其证据主要包括矿床广泛发育角砾状/胶状/皮壳状矿石、玉髓和叶片状碳酸盐, 矿物内存在富气相或纯气相包裹体(Hedenquist et al., 2000; Moncada et al., 2012, 2017)。然而, 部分矿床中这类特殊形态的石英和碳酸盐矿物, 并未与金银或载金硫化物共/伴生。因此, 有学者对流体沸腾是否能够引起金富集沉淀提出质疑, 并认为流体混合或硫化作

用才是更为重要的沉淀机制(Rottier et al., 2021)。例如, 黑龙三道湾子碲金矿床矿质沉淀主要由深部岩浆与大气降水的流体混合形成的, 流体沸腾反而促使金银进一步溶解(Gao et al., 2018)。相较于其他类型的浅成低温热液矿床, 低硫型金矿床中矿质富集沉淀机制较为复杂。不同成矿阶段的矿石往往具有不同的矿物组合、组构特征、热液蚀变及金银品位, 其形成是多种沉淀富集机制耦合的结果(Camprubí et al., 2007)。

碳酸盐矿物和石英是低硫型金矿床中重要的脉石矿物, 其丰富多变的组构特征和成分变化能够反应其形成时的热液成分、温度、压力、pH 等信息, 记录了成矿过程中不同阶段、不同空间流体的来源、成分和物理化学条件(Brathwaite et al., 2002; Moncada et al., 2017; Clark et al., 2018; Rottier et al., 2021), 是研究阿希金矿床矿质富集沉淀机制的理想研究对象。从微观尺度看, 在阿希金矿床中, 局部区域出现的胶状、“球状”、鸡冠状和皮壳状矿石, 烟灰色石英脉和块状玉髓中发育的叶片状/格子状白云石, 以及后期相继形成的交代结构和角砾岩, 说明由于间歇性热液活动的影响, 不同成矿阶段均发育有多种碳酸盐和石英组构, 这些组构特征都是流体沸腾作用最直接的矿物学证据(Simmons et al., 1994; Hedenquist et al., 2000)。

阶段 II 发育的皮壳状石英是在剧烈沸腾作用下形成的高品位矿石(Sander et al., 1988; Dong et al., 1996; Etoh et al., 2002; Saunders et al., 2008; Marinova, 2019)。其组构特征暗示热液曾发生多次、剧烈的沸腾作用, 形成了交替生长的石英微条带, 揭示了成矿环境由于裂隙反复开放和闭合, 导致剧烈沸腾反复发生和静岩压力-静水压力的不断变化的现象(Marinova et al., 2014; 彭义伟等, 2020; Gao et al., 2021; Zeeck et al., 2021)。在浅成低温热液环境中, Au 通常以 $\text{Au}(\text{HS})_2^{2-}$ 络合物的形式, 在还原且近中性的成矿流体中迁移(Heald et al., 1987; Peng et al., 2018; 孙非非等, 2023)。研究发现, 当成矿流体上升至沸腾面附近时, 压力降低, 引发剧烈流体沸腾, CO_2 、 H_2S 等酸性挥发份迅速逸失。由于 CO_2 的溶解度相对较低, 它先于 H_2S 从流体中逸出, 导致流体 pH 值升高, 此时 Au 溶解度略有上升, 进而促使皮壳状矿石中胶状石英得以形成, 该过程几乎不存在载金硫化物(McLeish et al., 2021)。随后受 CO_2 、 H_2S 等酸性气体大量逸出以及硫化物沉淀的双重影响, 硫氢络合物发生分解, 溶液中 Au 溶解度急剧下降, 致使金银矿物和载金硫化物沉

淀富集,最终在皮壳状石英中形成了含大量载金硫化物的烟灰色他形细粒石英(Frondel, 1938; Fournier, 1985; Saunders, 1990)。低硫型矿床中非晶质二氧化硅的形成和贵金属富集沉淀过程,与近地表环境中热液系统的间歇性剧烈沸腾有关(Özbaş et al., 2025; Miladinovic et al., 2024)。在热液系统的特定条件下,非晶质二氧化硅的形成和贵金属的沉淀可能是同时发生的(Kaewpaluk et al., 2023; Miladinovic et al., 2024)。阿希金矿床中含载金硫化物的他形细粒石英带由非晶质二氧化硅重结晶形成,这为理解贵金属的富集机制提供了重要线索。然后,成矿物理化学条件逐渐趋于稳定,形成自形粗粒的梳状石英。最后,流体再次沸腾,消耗皮壳状石英中心剩余的 Fe^{2+} ,先后形成“球状”石英和 Dol-I。含他形细粒石英的致密块状矿石和皮壳状矿石的品位相差较大,可能是流体沸腾作用的早晚和强弱程度影响了 Au 的溶解度、沉淀速率和富集程度(André-Mayer et al., 2002)。

阶段 III 中烟灰色隐晶质石英广泛分布,硫化物以粗粒柱状黄铁矿为主,毒砂环绕黄铁矿生长,整体呈浸染状分布(图 4m)。与阶段 II 相比,该阶段载金硫化物的含量有所降低,说明矿化强度随流体沸腾作用的减弱而降低。烟灰色石英中的 Dol-II 受轻微流体沸腾作用影响,其形成过程早于非晶质二氧化硅和载金硫化物,表明初始沸腾作用在阶段 III 的成矿过程中发挥了重要作用。皮壳状石英和叶片状碳酸盐的重复出现,说明两者主要与流体沸腾作用关系密切。由此可见,沸腾作用极有可能是阶段 II、阶段 III 金矿化的主要原因(Simmons et al., 1994; Yilmaz et al., 2013)。

阶段 IV 发育大量脉状白云石、玉髓和石英,白云石脉中心有时发育灰黑色黄铁矿细脉(图 4h),说明该阶段矿化程度较弱,属于成矿晚阶段。阶段 I 主要发育石英和绢云母,阶段 V 广泛发育的是自形粗粒的 Cal-IV,说明两者都与金矿化无关。综上,阿希金矿床的矿化强度随流体沸腾的减弱而逐渐降低,矿石品位从阶段 II 演化到阶段 IV 逐渐降低。

6 结论

(1)皮壳状石英中的白云石(Dol-I)在阶段 II 中受流体沸腾作用逐渐减弱的影响,由富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 的热液缓慢结晶的;烟灰色隐晶质石英中的叶片

状白云石(Dol-II)在阶段 III 中受初始沸腾作用直接从非平衡的过饱和热液体系中形成的;脉状白云石(Dol-III)在阶段 IV 中受流体冷却的影响,在浅地表缓慢结晶的;脉状方解石(Cal-IV)局限于成矿系统的边缘或浅层部分,在阶段 V 中温度和压力降低的条件下,由 CO_2 逸失以及 HCO_3^- 解离产生的 CO_3^{2-} 离子与 Ca^{2+} 结合所形成的。

(2)电子探针分析结果显示, Dol-I 由白云石和铁白云石构成, Dol-II 与 Dol-III 则属于含铁白云石。C-O 同位素分析结果显示 Dol-III 与 Cal-IV 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 组成相似,说明成矿物质中碳可能来自矿区基底中元古界或奥陶系的灰岩; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 负向飘移可能是受循环大气降水萃取赋矿大哈拉军山组火山岩的影响。

(3)综合皮壳状石英/叶片状碳酸盐矿物组构学特征、不同阶段碳酸盐矿物的成分特征和同位素分析,表明剧烈流体沸腾是阶段 II 中高品位皮壳状矿石和载金硫化物的主要沉淀机制,轻微流体沸腾是阶段 III 中浸染状矿石和硫化物的主要沉淀机制。

参考文献(References):

- 安芳,朱永峰.新疆阿希金矿床地质和地球化学研究[J]. *矿床地质*, 2009, 28(2): 143-156.
- AN Fang, ZHU Yongfeng. Geological and Geochemical Studies on the Axi Gold Deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(2): 143-156.
- 鲍景新,陈衍景,张增杰,等.西天山阿希金矿浊沸石化与古地热成矿流体系统的初步研究[J]. *北京大学学报(自然科学)*, 2002, 38(2): 252-259.
- BAO Jingxin, CHEN Yanjing, ZHANG Zengjie, et al. The Preliminary Study of Laumontitization of Axi Gold Deposit and Paleogeothermal Minerogenetic Fluid System in West Tianshan[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2002, 38(2): 252-259.
- 崔广申,包志伟,李群.云南会泽超大型铅锌矿田热液白云岩的成因及地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2023, 47(2): 361-375.
- CUI Guangshen, BAO Zhiwei, LI Qun. Genesis and Geological Significance of Hydrothermal Dolomite in the Huize Super-Large Lead-Zinc Ore Field, Yunnan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2023, 47(2): 361-375.
- 丁坤.南秦岭柞-山矿集区典型金矿床成矿作用与成矿动力学背景[D].西安:长安大学, 2020.
- DING Kun. Metallogenesis and Metallogenic Dynamic Background of Typical Gold Deposits in the Zha-Shan Ore Concentration Area, South Qinling[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- 董连慧,沙德铭.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, 2005.
- DONG Lianhui, SHA Deming. Epithermal Gold Deposits in the Late Paleozoic in Western Tianshan Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- 董连慧, 田昌烈. 西天山吐拉苏-也里莫墩金成矿带简述[J]. *地质与资源*, 2001, 10(2): 85-90.
- DONG Lianhui, TIAN Changlie. A Brief Introduction to the Tulasu-Yerimodun Gold Metallogenic Belt in Western Tianshan[J]. *Geology and Resources*, 2001, 10(2): 85-90.
- 顾雪祥, 董连慧, 彭义伟, 等. 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*, 2016, 32(5): 1283-1300.
- GU Xuexiang, DONG Lianhui, PENG Yiwei, et al. Formation and Evolution of the Epithermal-Porphyry Gold Polymetallic Metallogenic System in the Tulasu Volcanic Basin, Western Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(5): 1283-1300.
- 葛禹, 李昌昊, 彭深远, 等. 四川盆地东南缘下志留统龙马溪组白云岩特征及成因分析[J]. *矿物岩石*, 2023, 43(4): 132-141.
- GE Yu, LI Changhao, PENG Shenyuan, et al. Characteristics and Genesis Analysis of Dolomite in the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Southeastern Margin of the Sichuan Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2023, 43(4): 132-141.
- 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. The Accretionary Orogenic Process of Western Tianshan[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(12): 1804-1816.
- 顾雪祥, 章永梅, 彭义伟, 等. 西天山博罗科努成矿带与侵入岩有关的铁铜钼多金属成矿系统: 成岩成矿地球化学与构造-岩浆演化[J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 156-175.
- GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, PENG Yiwei, et al. The Fe-Cu-Mo Polymetallic Metallogenic System Related to Intrusive Rocks in the Boluokenu Metallogenic Belt, Western Tianshan: Geochemistry of Diagenesis and Mineralization and Tectonic-Magmatic Evolution[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 156-175.
- 贾斌, 毋瑞身. 新疆阿希晚古生代冰长石-绢云母型金矿特征[J]. *地质与资源*, 1999, 8(4): 199-208.
- JIA Bin, WU Ruishen. Characteristics of the Adularia-Sericite Type Gold Deposits in the Late Paleozoic in Axi, Xinjiang[J]. *Geology and Resources*, 1999, 8(4): 199-208.
- 梁峰, 毕献武, 冯彩霞, 等. 云南富乐铅锌矿床碳酸盐矿物化学特征及其对成矿作用的指示[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3418-3430.
- LIANG Feng, BI Xianwu, FENG Caixia, et al. Chemical Characteristics of Carbonate Minerals in the Fule Lead-Zinc Deposit, Yunnan and Their Implications for Mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(11): 3418-3430.
- 刘建明, 刘家军. 滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. *矿物学报*, 1997, 17(4): 448-456.
- LIU Jianming, LIU Jiajun. Basin Fluid Genetic Model of Sediment-Hosted Microdisseminated Gold Deposits in the Gold-Triangle Area between Guizhou, Guangxi and Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1997, 17(4): 448-456.
- 毛景文, 赫英, 丁悌平. 胶东金矿形成期间地幔流体参与成矿过程的碳氧氢同位素证据[J]. *矿床地质*, 2002, 21(2): 121-128.
- MAO Jingwen, HE Ying, DING Tiping. Mantle Fluids Involved in Metallogenesis of Jiaodong (East Shandong) Gold District: Evidence of C, O and H Isotopes[J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21(2): 121-128.
- 毛先成, 潘敏, 刘占坤, 等. 西天山阿希金矿床黄铁矿微量元素 LA-ICP-MS 原位测试及其指示意义[J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2018, 49(5): 1148-1159.
- MAO Xiancheng, PAN Min, LIU Zhankun, et al. LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from Axi gold deposit in western Tianshan and its significance[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(5): 1148-1159.
- 彭义伟, 顾雪祥, 程文斌, 等. 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*, 2016, 32(5): 1361-1378.
- PENG Yiwei, GU Xuexiang, CHENG Wenbin, et al. Discussion on the Genesis of the Tawuerbieke Gold Deposit in the Tulasu Basin, Western Tianshan: Evidence from Isotope Geochronology and Stable Isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(5): 1361-1378.
- 彭义伟. 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, 2015.
- PENG Yiwei. Magmatism and Gold-Copper-Iron Polymetallic Metallogenic System in the Tulasu Volcanic Belt, Western Tianshan, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- 彭义伟, 顾雪祥, 章永梅, 等. 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*, 2020, 94(10): 2920-2945.
- PENG Yiwei, GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, et al. Genetic Links between the Axi and Tawuerbieke Gold Deposits in Xinjiang: Evidence from Fluid Inclusions, S-Pb Isotopes and Pyrite Thermoelectricity[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(10): 2920-2945.
- 史训立. CO₂ 和石英等矿物在常见水盐体系中的溶解度模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- SHI Xunli. Research on Solubility Models of CO₂ and Minerals Such as Quartz in Common Water-Salt Systems [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- 沙德铭, 董连慧, 鲍庆中, 等. 西天山地区金矿床主要成因类型及找矿方向[J]. *新疆地质*, 2003, 21(4): 419-425.
- SHA Deming, DONG Lianhui, BAO Qingzhong, et al. Main Genetic Types and Prospecting Directions of Gold Deposits in Western Tianshan Region[J]. *Xinjiang Geology*, 2003, 21(4): 419-425.
- 沙德铭, 金成洙, 董连慧, 等. 西天山阿希金矿成矿地球化学特征研究[J]. *地质与资源*, 2005, 14(2): 118-125.
- SHA Deming, JIN Chengzhu, DONG Lianhui, et al. Study on the

- Metallogenic Geochemical Characteristics of the Axi Gold Deposit in Western Tianshan[J]. *Geology and Resources*, 2005, 14(2): 118–125.
- 孙非非, 张爱奎, 刘智刚, 等. 东昆仑西段阿其音金矿成矿流体特征及其成因机制[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 82–94.
- SUN Feifei, ZHANG Aikui, LIU Zhigang, et al. Analysis of the Genesis and H–O–S–Pb Isotopic Characteristics of Aqiyin Gold Deposit in the Western Section of the East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 82–94.
- 谭茂, 吴鹏, 韩润生, 等. 会泽超大型铅锌矿床“矿石-接触带-围岩”白云石微区原位地球化学特征及其指示意义[J]. *矿物学报*, 2022, 42(3): 315–328.
- TAN Mao, WU Peng, HAN Runsheng, et al. In-situ Geochemical Characteristics of Dolomite in the “Ore-Contact Zone-Wall Rock” of the Huize Super-large Lead-Zinc Deposit and Their Implications[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2022, 42(3): 315–328.
- 魏佳林, 曹新志, 徐伯骏, 等. 西天山阿希浅成低温热液金矿床剥蚀改造过程探讨[J]. *矿床地质*, 2014, 33(2): 241–254.
- WEI Jialin, CAO Xinzh, XU Bojun, et al. Discussion on the Denudation and Reformation Process of the Axi Epithermal Gold Deposit in Western Tianshan[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(2): 241–254.
- 王天齐, 李红艳, 王栋. 胶东大尹格庄金矿碳酸盐矿物的特征、物源及其在金成矿过程中的作用[J]. *岩石学报*, 2024, 40(4): 1264–1284.
- WANG Tianqi, LI Hongyan, WANG Dong. Characteristics, Provenance and Role in Gold Mineralization Process of Carbonate Minerals in the Dayingezhuang Gold Deposit in Jiaodong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40(4): 1264–1284.
- 吴胜华, 毛景文, 谭道荣, 等. 赣南印支期中硫化型浅成低温热液银矿床的发现和意义[J]. *矿床地质*, 2021, 40(3): 636–640.
- WU Shenghua, MAO Jingwen, TAN Daorong, et al. Discovery and Significance of the Indosinian Intermediate-Sulfidation Epithermal Silver Deposits in Southern Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 2021, 40(3): 636–640.
- 薛春纪, 王洪刚, 赵晓波, 等. 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*, 2013, 20(6): 180–194.
- XUE Chunji, WANG Honggang, ZHAO Xiaobo, et al. Kexiaxi Cluster of Small Intrusions in the Tulasu Mineralization District, Western Tianshan, Xinjiang and Its Copper Exploration Prospect[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(6): 180–194.
- 徐伯骏, 曹新志, 魏佳林, 等. 新疆伊犁阿希-塔吾尔别克-阿庇因迪成矿区金-铅锌成矿系列和成矿模型研究[J]. *地质找矿论丛*, 2014, 29(4): 495–505.
- XU Bojun, CAO Xinzh, WEI Jialin, et al. Study on Gold-Lead-Zinc Metallogenic Series and Metallogenic Model in the Axi-Tawuerbieke-Abiyindi Metallogenic Area in Yili, Xinjiang[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2014, 29(4): 495–505.
- 岳继宗. 新疆伊宁大哈拉军山组火山岩特征与构造意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- YUE Jizong. Characteristics and Tectonic Significance of Volcanic Rocks of the Dahalajunshan Formation in Yining, Xinjiang[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- 由雪莲, 贾文强, 徐帆, 等. 铁白云石矿物学特征及原生次生成因机制[J]. *地球科学*, 2018, 43(11): 4046–4055.
- YOU Xuelian, JIA Wenqiang, XU Fan, et al. Mineralogical Characteristics and Primary and Secondary Genesis Mechanisms of Ankerite[J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 4046–4055.
- 杨虎城, 林良彪, 余瑜, 等. 川西南天全地区中二叠统碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义[J]. *矿物岩石*, 2022, 42(2): 47–59.
- YANG Hucheng, LIN Liangbiao, YU Yu, et al. Geochemical Characteristics of Middle Permian Carbonate Rocks in Tianquan Area, Southwestern Sichuan and Their Palaeo Environmental Significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2022, 42(2): 47–59.
- 张涛, 陈正乐, 周振菊, 等. 西南天山阿沙哇义金矿床流体包裹体和 H-O 同位素地球化学特征与造山型金矿成因[J]. *中国地质*, 2023, 50(5): 1513–1531.
- ZHANG Tao, CHEN Zhengle, ZHOU Zhenju, et al. Geochemical Characteristics of Fluid Inclusions and H-O Isotopes in the Ashawayi Gold Deposit in Southwestern Tianshan and the Genesis of Orogenic Gold Deposits[J]. *Geology in China*, 2023, 50(5): 1513–1531.
- 张作衡, 毛景文, 王志良, 等. 新疆西天山阿希金矿床流体包裹体地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10): 2403–2414.
- ZHANG Zuoheng, MAO Jingwen, WANG Zhiliang, et al. Geochemical Characteristics of Fluid Inclusions in the Axi Gold Deposit in Western Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10): 2403–2414.
- 翟伟, 孙晓明, 高俊, 等. 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*, 2006, 22(5): 1399–1404.
- ZHAI Wei, SUN Xiaoming, GAO Jun, et al. SHRIMP Zircon Ages of the Ore-Hosting Wall Rocks-Dahalajunshan Formation Volcanic Rocks in the Axi Gold Deposit, Xinjiang and Their Geological Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1399–1404.
- 翟伟, 孙晓明, 贺小平, 等. 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*, 2007, 81(5): 659–669.
- ZHAI Wei, SUN Xiaoming, HE Xiaoping, et al. Fluid Geochemical Characteristics and Metallogenic Mechanism of the Axi Low-sulfur Gold Deposit, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(5): 659–669.
- 翟伟, 孙晓明, 苏丽薇, 等. 新疆阿希金矿: 古生代的低硫型浅成低温热液金矿床[J]. *地学前缘*, 2010, 17(2): 266–285.
- ZHAI Wei, SUN Xiaoming, SU Liwei, et al. Axi Gold Deposit in Xinjiang: A Paleozoic Low-Sulfur Epithermal Gold Deposit[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(2): 266–285.
- 郑永飞. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J].

矿床地质, 2001, 20(1): 57–85.

ZHENG Yongfei. Theoretical Models of Stable Isotope Systems and Their Application in Deposit Geochemistry[J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(1): 57–85.

朱亿广, 刘家军, 朱炳玉, 等. 新疆金山金矿床硫铅碳同位素组成及对成矿物质的示踪[J]. *黄金*, 2011, 32(11): 10–15.

ZHU Yiguang, LIU Jiajun, ZHU Bingyu, et al. Sulfur, Lead and Carbon Isotope Compositions of the Jinshan Gold Deposit in Xinjiang and Their Tracing for Ore-forming Materials[J]. *Gold*, 2011, 32(11): 10–15.

朱志新, 李锦铁, 董连慧, 等. 新疆西天山古生代侵入岩的地质特征及构造意义[J]. *地学前缘*, 2011, 18(2): 170–179.

ZHU Zhixin, LI Jinyi, DONG Lianhui, et al. Geological Characteristics and Tectonic Significance of Paleozoic Intrusive Rocks in Western Tianshan, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 170–179.

André-Mayer A, Leroy J, Bailly L, et al. Boiling and vertical mineralization zoning: a case study from the Apacheta low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, southern Peru[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(5): 452–464.

An F, Zhu Y. Geology and geochemistry of the early permian Axi low-sulfidation epithermal gold deposit in North Tianshan (NW China)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 100: 12–30.

Brathwaite R L, Faure K. The waihi epithermal gold-silver-base metal sulfide-quartz vein system, New Zealand: temperature and salinity controls on electrum and sulfide deposition[J]. *Economic Geology*, 2002, 97(2): 269–290.

Burtner, Geoffrey K. The mercedes gold-silver district, sonora, mexico: geology, geochemistry and structure of a sierra madre low-sulfidation epithermal system[D]. Reno: University of Nevada, 2013.

Camprubi A, Albinson T. Epithermal deposits in Mexico-Update of current knowledge and an empirical reclassification[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 2007, 422: 377–415.

Clark L V, Gemmell J B. Vein Stratigraphy, Mineralogy, and Metal Zonation of the Kencana Low-Sulfidation Epithermal Au-Ag Deposit, Gosowong Goldfield, Halmahera Island, Indonesia[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(1): 209–236.

Carrillo-Rosúa J, Morales-Ruano S, Roberts S, et al. Application of the mineralogy and mineral chemistry of carbonates as a genetic tool in the hydrothermal environment[J]. *Minerals*, 2021, 11(8): 822.

Chen Y J, Pirajno F, Wu G, et al. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2012, 101(4): 889–917.

Dong G, Morrison G, Jaireth S. Quartz textures in epithermal veins, Queensland-classification, origin, and implication[J]. *Economic Geology*, 1995, 90(6): 1841–1856.

Drummond S E, Ohmoto H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems[J]. *Economic Geology*, 1985, 80(1): 126–147.

Dong L L, Wan B, Deng C, et al. An Early Permian epithermal gold system in the Tulasu Basin in North Xinjiang, NW China: Constraints from in situ oxygen-sulfur isotopes and geochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 153: 412–424.

Dong G Y, Zhou T. Zoning in the Carboniferous-Lower Permian Cracow epithermal vein system, central Queensland, Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 1996, 31(3): 210–224.

Etoh J, Izawa E, Taguchi S. A fluid inclusion study on columnar adularia from the Hishikari low-sulfidation epithermal gold deposit, Japan[J]. *Resource Geology*, 2002, 52(1): 73–78.

Fu Hanjing, Jian Xing, Zhang Wei, et al. A comparative study of methods for determining carbonate content in marine and terrestrial sediments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 116: 104337.

Faure K, Matsuhisa Y, Metsugi H, et al. The Hishikari Au-Ag Epithermal Deposit, Japan: Oxygen and Hydrogen Isotope Evidence in Determining the Source of Paleohydrothermal Fluids[J]. *Economic Geology*, 2002, 97(3): 481–498.

Frondel C. Stability of colloidal gold under hydrothermal conditions[J]. *Economic Geology*, 1938, 33: 1–20.

Fournier R O. Silica minerals as indicators of conditions during gold deposition[J]. *Geological Survey Bulletin*, 1985, 1646: 15–26.

Gregg J M, Bish D L, Kaczmarek S E, et al. Mineralogy, Nucleation and Growth of Dolomite in the Laboratory and Sedimentary Environment: A Review[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(6): 1749–1769.

Gorczyk W, Gonzalez M C, Hobbs B. Carbon dioxide as a proxy for orogenic gold source[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 127: 103829.

Gao S, Xu H, Zang Y Q, et al. Mineralogy, ore-forming fluids and geochronology of the Shangmachang and Beidagou gold deposits, Heilongjiang province, NE China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 188: 137–155.

Gao S, Hofstra A H, Zou X, et al. Oxygen isotope evidence for input of magmatic fluids and precipitation of Au-Ag telluride s in an otherwise ordinary adularia sericite epithermal system in NE China[J]. *American Mineralogist*, 2021, 106: 2003–2019.

Genna A, Jebrak M, Marcoux E, et al. Genesis of cockade breccias in the tectonic evolution of the Cirotan epithermal gold system, West Java[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1996, 33(1): 93–102.

Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. Berlin: Springer, 2009.

Hedenquist J W, Arribas A, Gonzalez-Ruiz E. Exploration for epithermal gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13: 245–277.

Heald P, Foley N, Hayba D. Comparative Anatomy of Volcanic-Hot Epithermal Deposits-Acid-Sulfate and Adularia-Sericite Types[J]. *Economic Geology*, 1987, 82(1): 1–26.

Hayashi K I, Maruyama T, Satoh H. Precipitation of gold in a low-sulfidation epithermal gold deposits: Insights from a submillimeter-scale oxygen isotope analysis of vein quartz[J]. *Economic Geology*, 2001, 96: 211–216.

- John D A, Hofstra A H, Fleck R J, et al. Geologic setting and genesis of the Mule Canyon low-sulfidation epithermal gold-silver deposit, north-central Nevada[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2003, 98(2): 425–463.
- Klein C, Dutrow B. *Manual of Mineral Science*[M]. New York: Wiley, 2008.
- Kaewpaluk S, Salam A, Assawincharoenkij T, et al. Geology, mineralization, and alteration of B Prospect of the epithermal Au-Ag deposit in Central Thailand: A study on Chatree's satellite deposit for future gold exploration[J]. *Scienceasia*, 2023, 49(1): 131.
- Lovering T G. Jasperoid in the United States; its characteristics, origin, and economic significance[M]. Washington: U. S. Geological Survey, 1972.
- Liu Z, Mao X, Ackerman L, et al. 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*, 2020, 55(5): 863–880.
- Liu Z K, Mao X C, Deng H L, et al. Hydrothermal processes at the Axi epithermal Au deposit, western Tianshan: Insights from geochemical effects of alteration, mineralization and trace elements in pyrite[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 102: 368–385.
- Li K, Xi K L, Cao Y C, et al. Genesis of granular calcite in lacustrine fine-grained sedimentary rocks and its indication to volcanichydrothermal events: A case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023b, 50(3): 615–627.
- Li N, Zhang B, Ulrich T, et al. Magmatic degassing controlled the metal budget of the Axi epithermal gold deposit, China[J]. *American Mineralogist*, 2024, 109(1): 51–60.
- Li N, Zhang B, Danisik M, et al. Formation-exhumation history of the Carboniferous Axi epithermal gold deposit in the Chinese Western Tianshan based on zircon U-Pb and pyrite Re-Os geochronology, and (U-Th)/He zircon-apatite thermochronometry [J]. *Journal of the Geological Society*, 2023a: jgs2021-150.
- Marinova I. Bladed Texture and Exploration Implications. A Case Study from the Kuklitsa Deposit, Krumovgrad Goldfield, SE Bulgaria[J]. *Geology of Ore Deposits*, 2019, 61(2): 185–197.
- Moncada D, Baker D, Bodnar R J. 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*, 2017, 89: 143–170.
- Mottram, Catherine M K, Dawn A B, et al. Tracking the porphyry-epithermal mineralization transition using U-Pb carbonate dating[J]. *Geology*, 2024, 52(9): 723–728.
- Ma L T, Dai L Q, Zheng Y F, et al. Geochemical evidence for incorporation of subducting sediment-derived melts into the mantle source of Paleozoic high-Mg andesites from northwestern Tianshan in western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2023, 135(1-2): 310–330.
- Marinova I, Ganey V, Titorenkova R. Colloidal origin of colloform banded textures in the Paleogene low sulfidation Khan Krum gold deposit, SE Bulgaria[J]. *Mineralium Deposita*, 2014, 49: 49–74.
- Moncada D, Mutchler S, Nieto A, et al. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 114: 20–35.
- Monecke T, Monecke J, Reynolds J T. The Influence of CO₂ on the Solubility of Quartz in Single-Phase Hydrothermal Fluids: Implications for the Formation of Stockwork Veins in Porphyry Copper Deposits[J]. *Economic Geology*, 2019, 114(6): 1195–1206.
- Marchev P, Singer B, Jeleu D, et al. The Ada Tepe deposit: a sediment-hosted, detachment fault controlled, low-sulfidation gold deposit in the Eastern Rhodopes, SE Bulgaria[J]. *Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen*, 2004, 84: 59–78.
- Miladinovic Z, Simic V, Nikolic N, et al. Agates of the Lece Volcanic Complex (Serbia): Mineralogical and Geochemical Characteristics[J]. *Minerals*, 2024, 14(5): 511–511.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79: 1–24.
- McLeish D F, Williams-Jones A E, Vasyukova O V, et al. Colloidal transport and flocculation are the cause of the hyperenrichment of gold in nature[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(20).
- Nickel E H, Grice J D. The IMA commission on new minerals and mineral names: Procedures and guidelines on mineral nomenclature, 1998[J]. *Canadian Mineralogist*, 1998, 36(3): 913–926.
- Özbaş F, Haniçlı N. Quartz textures, mineral chemistry and fluid inclusion features of Tuztaşı low-sulphidation Au mineralization: Implication to its formation[J]. *Geochemistry*, 2025, 85(1): 126220.
- Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67: 551–578.
- Ohmoto H, Rye R O. *Isotopes of sulfur and carbon*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1979.
- Peng Y W, Gu X X, Cheng W B, et al. 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*, 2018, 53(6): 3030–3050.
- Peng Y W, Gu X X, Lv P R, et al. Genesis and tectonic setting of the Late Devonian Tawuerbieke gold deposit in the Tulasu ore cluster, western Tianshan, Xinjiang, China[J]. *International Geology Review*, 2017, 59(10): 1344–1368.
- Peng Y W, Gu X X, Su J, et al. 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*, 2022, 58(2): 583–604.
- Qiu K F, Deng J, Laflamme C, et al. Giant Mesozoic gold ores derived from subducted oceanic slab and overlying sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, 343: 133–141.
- Rottier B, Casanova V. Trace element composition of quartz from porphyry systems: a tracer of the mineralizing fluid evolution[J]. *Mineralium Deposita*, 2021, 56(5): 843–862.
- Reed M H, Spycher N F. Boiling, cooling, and oxidation in epithermal systems: A numerical modelling approach[J]. *Reviews in Economic Geology*, 1985, 249–272.
- Saunders J A. Colloidal transport of gold and silica in epithermal precious metal systems. Evidence from the Sleeper deposit, Nevada[J]. *Geology*, 1990, 18(8): 757–760.
- Simmons S F, Brown K L. Gold in magmatic hydrothermal solutions and the rapid formation of a giant ore deposit[J]. *Science*, 2006, 314(5797): 288–291.
- Simmons S F, Christenson B W. Origins of calcite in boiling geothermal system[J]. *American Journal of Science*, 1994, 294: 361–400.
- Sander M V, John E B. Crystallization and recrystallization of growth-zoned vein quartz crystals from epithermal systems; implications for fluid inclusion studies[J]. *Economic Geology*, 1988, 83(5): 1052–1060.
- Simon G, Kesler S E, Russell N, et al. Epithermal gold mineralization in an old volcanic arc: The Jacinto deposit, Camaguey district, Cuba[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 1999, 94(4): 487–506.
- Shimizu T. Reinterpretation of quartz textures in terms of hydrothermal fluid evolution at the Koryu Au-Ag deposit, Japan[J]. *Economic Geology*, 2014, 109: 2051–2065.
- Shimizu T, Matsueda H, Ishiyama D, et al. Genesis of epithermal Au-Ag mineralization of the Koryu mine, Hokkaido, Japan[J]. *Economic Geology*, 1998, 93(3): 303–325.
- Swinkels L J, Schulz I J, Frenzel M, et al. Spatial and Temporal Evolution of the Freiberg Epithermal Ag-Pb-Zn District, Germany[J]. *Economic Geology*, 2021, 116(7): 1649–1667.
- Saunders J A, Unger D L, Kamenov G D, et al. Genesis of Middle Miocene Yellowstone-hotspotrelated bonanza epithermal Au-Ag deposits, Northern Great Basin Region, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 715–734.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. Petrogenesis of gold-mineralized magmatic rocks of the Taerbieke area, northwestern Tianshan (western China): Constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic compositions[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 113–128.
- Wang Y N, Cai K D, Sun M, et al. 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*, 2018, 100: 111–132.
- Wang Q X, Deng T, Xu D, et al. Genetic association between carbonates and gold precipitation mechanisms in the Jinshan deposit, eastern Jiangnan orogen[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2024, 136(9-10): 4195–4217.
- Warmada I W, Lehmann B, Simandjuntak M, et al. Fluid inclusion, rare-earth element and stable isotope study of carbonate minerals from the Pongkor epithermal gold-silver deposit, west Java, Indonesia[J]. *Resource Geology*, 2007, 57(2): 124–135.
- Xie Z J, Huang K J, Xia Y, et al. Heavy $\delta^{26}\text{Mg}$ values in carbonate indicate a magmatic-hydrothermal origin of Carlin-type Au deposit[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 333: 166–183.
- Yilmaz H, Sonmez F N, Akay E, et al. Low-sulfidation epithermal Au-Ag mineralization in the Sindirgi District, Balikesir Province, Turkey[J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 2013, 22(4): 485–522.
- Zheng Y F, Hoefs J. Carbon and oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcites[J]. *Mineralium Deposita*, 1993, 28(2): 79–89.
- Zeeck L R, Monecke T, Reynolds T J, et al. Textural Characteristics of Barren and Mineralized Colloform Quartz Bands at the Low-Sulfidation Epithermal Deposits of the Omu Camp in Hokkaido, Japan: Implications for Processes Resulting in Bonanza-Grade Precious Metal Enrichment[J]. *Economic Geology*, 2021, 116(2): 407–425.
- Zhang B L, Nuo S, Sun P W, et al. Textural and compositional evolution of Au-hosting Fe-S-As minerals at the Axi epithermal gold deposit, Western Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 100: 31–50.
- Zhai W, Sun X M, Sun W D, et al. Geology, geochemistry, and genesis of Axi: A Paleozoic low-sulfidation type epithermal gold deposit in Xinjiang, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36(4): 265–281.
- Zhang Y Z, Wang Y J, Fan W M, et al. Geochronological and geochemical constraints on the metasomatised source for the Neoproterozoic (similar to 825 Ma) high-mg volcanic rocks from the Cangshuipu area (Hunan Province) along the Jiangnan domain and their tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 2012, 220: 139–157.
- Zhao X B, Xue C J, Symons D T A, et al. 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*, 2014, 85: 210–223.
- Zhang H, Zhou X J, Zhou F M, et al. Zinc isotopes revealed the role of ore-hosting carbonate rocks in the formation of MVT deposits: A case study of the Huize Pb-Zn deposit, SW China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2024, 258.