

doi: 10.12029/gc20200418001

张涛,陈正乐,周振菊,张文高,张青,潘家永,韩凤彬,孙岳,冯宏业,马骥,杨斌. 2023. 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, 50(5): 1513-1531.

Zhang Tao, Chen Zhengle, Zhou Zhenju, Zhang Wengao, Zhang Qing, Pan Jiayong, Han Fengbin, Sun Yue, Feng Hongye, Ma Ji, Yang Bin. 2023. Geochemical characteristics of fluid inclusions and H-O isotopes of the Ashawayi gold deposit in the Southwest Tianshan Orogen and its orogenic-type gold deposit[J]. Geology in China, 50(5): 1513-1531(in Chinese with English abstract).

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

张涛^{1,2}, 陈正乐^{3,4}, 周振菊³, 张文高³, 张青³, 潘家永⁴,
韩凤彬³, 孙岳⁴, 冯宏业⁵, 马骥⁶, 杨斌⁷

(1.核工业二七〇研究所,江西 南昌 330200;2.中国地质大学地球科学学院,湖北 武汉 430074;3.中国地质科学院地质力学研究所,动力成岩成矿实验室,北京 100081;4.东华理工大学,核资源与环境国家重点实验室,江西 南昌 330013;5.中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037;6.广东省核工业地质局二九三大队,广东 广州 510800;7.江西省地质局第七地质大队,江西 赣州 341000)

提要:【研究目的】阿沙哇义金矿位于西南天山,处在“亚洲金腰带”的中南缘,是最近几年新探明、中型规模的金矿,矿床基础研究程度较低。【研究方法】通过野外地质调查,室内开展流体包裹体岩相学、成分分析、测温、H-O同位素等研究。【研究结果】提出矿床的含矿地层为上石炭统喀拉治尔加组,矿体产于NEE走向逆冲推覆构造系统的次级断裂内;成矿可分为3阶段,早—中阶段发育H₂O溶液型、CO₂-H₂O型和纯CO₂型三种流体包裹体,但晚期仅发育纯H₂O溶液型包裹体。其中早期均一温度236~386℃,盐度1.6%~9.7% NaCl eqv.;中期均一温度225~301℃,盐度1.4%~12.5% NaCl eqv.;晚期均一温度139~222℃,盐度1.4%~7.3% NaCl eqv.;流体包裹体激光拉曼图谱显示液体成分为H₂O和CO₂,含CH₄和N₂;表明成矿流体具中低温、富CO₂、含CH₄和N₂、低盐度的变质流体特征;根据CO₂-H₂O型包裹体估算早—中期压力分别为140~180 MPa和130~160 MPa,对应的静岩压力深度分别为5~7 km和5~6 km;石英的H-O同位素结果显示成矿流体从早期深源变质流体,经中期变质流体与大气降水混合流体,晚期向浅源大气降水热液演化。【结论】综合分析认为,压力降低,流体不混溶或沸腾,CO₂、CH₄等气体逃逸,发育硫化、碳酸盐化这一过程是阿沙哇义金矿床金快速沉淀的主要机制,矿床属于典型的中浅成造山型金矿床。

关键词:流体包裹体;激光拉曼;H-O同位素;造山型金矿;阿沙哇义金矿床;矿产勘查工程;西南天山

创新点:(1)首次系统的研究了矿床成矿流体特征;(2)首次提出该矿床沉淀机制及厘定矿床成因类型。

中图分类号: P54; P61 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)05-1513-19

Geochemical characteristics of fluid inclusions and H-O isotopes of the Ashawayi gold deposit in the Southwest Tianshan Orogen and its orogenic-type gold deposit

收稿日期:2020-04-18;改回日期:2021-02-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41772085, 41902214)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2018YFC0604005, 2015BAB05B04)、中国地质科学院基本科研项目(DZLXJK201904)、核资源与环境国家重点实验室开放基金(2020NRE04)、中国核工业地质局项目(202231、202130-1、202231-4)及核工业二七〇研究所自主科研项目(270202301)联合资助。

作者简介:张涛,男,1992年生,博士生,工程师,主要从事矿床地质和矿田构造解析研究;E-mail: zhangtao270@163.com。

通讯作者:陈正乐,男,1967年生,研究员,主要从事矿田构造方面研究;E-mail: chenzhengle@263.net。

ZHANG Tao^{1,2}, CHEN Zhengle^{3,4}, ZHOU Zhenju³, ZHANG Wengao³, ZHANG Qing³,
PAN Jiayong⁴, HAN Fengbin³, SUN Yue⁴, FENG Hongye⁵, MA Ji⁶, YANG Bin⁷

(1. No.270 Research Institute, CNNC, Nanchang 330200, Jiangxi, China; 2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Laboratory of Dynamic Diagenesis and Metallogenesis, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 4. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 5. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 6. 293 Brigade of Guangdong Nuclear Industry Geological Bureau, Guangzhou 510800, Guangdong, China; 7. The Seventh Geological Brigade of Jiangxi Bureau of Geology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The Ashawayi gold deposit, located at the central and southern margin of the "Asian Gold Belt", is a newly discovered medium-sized gold deposit in southwestern Tianshan Orogen, NW China. **[Methods]** Through field geological survey, indoor research on fluid inclusion petrology, fluid inclusion composition analysis, fluid inclusion temperature measurement, H-O isotope and so on is carried out. **[Results]** The deposits are hosted in Kalazierjiao Group, Late Carboniferous, and ore bodies are produced in secondary faults of the NEE-trending thrust nappe system. According to the relationship between vein cutting and mineral metastasis, the mineralization process can be divided into three stages. Microscopic observation analyses of inclusions in quartz showed that there were three compositional types of fluid inclusions, i.e. pure CO₂, CO₂-H₂O and NaCl-H₂O in the early and middle stage, but only pure H₂O inclusions in the latest. Measurement of inclusions trapped in quartz revealed that the total homogenization temperatures were 236-386°C in the early stage, 225-301°C in middle and 139-222°C in last, respectively, with corresponding salinities of 1.6%-9.7%, 1.4%-12.5%, and 1.4%-7.3% NaCl eqv.. The laser Raman spectrum of fluid inclusions showed that the liquid was composed of H₂O and CO₂, a few of CH₄ and N₂, indicating that the ore-forming fluid was a kind of medium-low temperature, rich of CO₂, bearing few of CH₄ and N₂, and low-salinity metamorphic fluids. The estimated pressures based on CO₂-H₂O type inclusions are 140-180 MPa in the early stage and 130-160 MPa in the middle, corresponding a depth of 5-7 km and 5-6 km, respectively, under the static rock pressure. The content of H-O isotopes of quartz showed ore-forming fluids changing from a kind of deep-source metamorphic fluid in the early stage, to a metaphase and atmospheric precipitation mixed fluid in the middle, and to a hydrothermal fluid of late-seasonal precipitation in the last. **[Conclusions]** Comprehensive analysis suggested that the fluid system stress reduction, immiscible or boiling, the escape of CO₂-CH₄ and other gases, and the development of vulcanization and carbonate, should result to the rapid precipitation of the gold and the deposit is a typical medium-shallow orogenic-type gold deposit.

Key words: fluid inclusion; Laser Raman; H-O isotope; orogenic gold deposit; Ashawayi gold deposit; mineral exploration engineering; Southwest Tianshan

Highlights: (1) For the first time, the metallogenic fluid characteristics of the Ashawayi gold deposit was systematically studied; (2) For the first time, the sedimentation mechanism of the deposit and determine the type of origin of the deposit.

About the first author: ZHANG Tao, male, born in 1992, Ph.D. candidate, assistant engineer, mainly engaged in mineralogy geology and ore structure research; E-mail: zhangtao270@163.com.

About the corresponding author: CHEN Zhengle, male, born in 1967, researcher, mainly engaged in the research of orefield structure; E-mail: chenzhengle@263.net.

Fund support: Supported by the projects of National Natural Science Foundation of China (No.41772085, No.41902214), National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (No.2018YFC0604005, No.2015BAB05B04), the Basic Scientific Research Business Expense Project of the Chinese Academy of Geological Science (No. DZLXJK201904), State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment Open Fund (No.2020NRE04), China Nuclear Industry Geology Bureau (No.202231, No.202130-1, No.202231-4) and Independent scientific research of No.270 Research Institute, CNNC (No.270202301).

1 引言

在中亚造山带的南缘,从西往东,分布了一系列世界级金矿,如乌兹别克斯坦的穆龙套(Muruntau)金矿(Au约6137 t)(Frimmel, 2008)和吉尔吉斯斯坦的库姆托尔(Kumtor)金矿(Au约1100 t)(Mao et al., 2004)等超大型造山型金矿,组成世界上著名的“亚洲金腰带”(图1),成为仅次于南非兰德盆地的第二大金富集区(薛春纪等, 2014a,b, 2020)。造山型金矿产于造山带、变质地体为赋矿地质体,韧性剪切带为主要控矿构造,成矿流体具中低温、低盐度的变质流体等特征(陈衍景, 2006)。中国境内的西南天山造山带处于亚洲金腰带的南西边缘,最近几年也相继发现了多个大型中型金矿床,如萨瓦瓦尔顿金矿、阿沙哇义金矿、布隆金矿、卡拉脚古牙金矿床,及其玉其开、卡拉公盖等金矿点,显示出该区具有良好找矿前景(陈华勇等, 2007)。其中萨瓦瓦尔顿金矿具穆龙套型金矿特征,但存在明显的特殊性,显示出造山型金矿特征(刘家军等, 2002; 陈华勇等, 2004, 2007);布隆金矿成矿年龄为212 Ma,属浅变质碎屑岩型(刘家军等, 2004; 徐述平等, 2014)。杨富全(2005)、杨鑫朋等(2015)提出西南天山金矿床主要包括穆龙套型(造山型)、浅成低温热液型、斑岩型(与侵入岩有关)及石英重晶石型。

阿沙哇义位于中国西南天山的阿合奇县境内,由新疆地矿局第八地质队于2003—2006年开展普查工作发现,后中矿资源勘探股份有限公司继续开展勘探工作。近几年随着地质勘查工作的投入,矿床储量达中型规模,具有大型勘探远景,为中国西南天山第二大金矿床(陈奎等, 2007),仅次于萨瓦瓦尔顿金矿。张涛等(2020)认为含砷黄铁矿和毒砂是矿床中主要载金矿物,成矿物质来自赋矿地层,属典型的中浅成造山型金矿,矿区深部具有很好找矿潜力。陈博等(2019)通过流体包裹体及硫化物成分研究认为矿床属于剥蚀程度较浅的造山型金矿,流体不混溶作用是本区金富集、沉淀的最重要机制。但是成矿流体性质、成矿物质来源、流体压力及成矿深度研究深入不够,严重制约了对矿床的成因认识及下一步勘探方向。

本文对阿沙哇义金矿其开展流体包裹体、同位

素研究,分析成矿流体性质及其成矿物质来源,探讨矿床成因及类型,为推进矿床勘查,丰富西南天山金矿成矿理论研究提供素材。

2 区域地质背景

西南天山位于中亚造山带的南缘,其北界为Atbash—Inlychek—那拉提南缘断裂,为塔里木板块与哈萨克斯坦的汇聚地带,记录了塔里木板块与西伯利亚两大板块之间的碰撞—俯冲—汇聚的全过程。泥盆纪开始,南天山盆洋开始向北俯冲;至晚泥盆世,塔里木大陆与伊犁地块碰撞;在早二叠世末,塔里木地块与哈萨克斯坦地块的汇聚作用结束,伴随发生一系列韧性剪切带、区域性的逆冲推覆,随后区域发育了一系列的走滑作用(Sengör et al., 1993; 刘本培等, 1996; 叶庆同等, 1999; 郑明华等, 2001; 张昭崇等, 2009; Chen et al., 2017; Zhou et al., 2018)。多期次的构造—热液活动,伴随发生了多期次的成矿作用,形成了独具特色的成矿系统——以萨瓦瓦尔顿、阿沙哇义、卡拉脚古牙、布隆金矿为代表的晚古生代造山型金矿床,显示出西南天山具有寻找大型矿床的资源潜力(刘家军等, 1999, 2002; 杨富全等, 2004; 朱永峰等, 2007a,b; Chen et al., 2012a, b; 薛春纪等, 2014a, b, 2015; Zhang et al., 2017)。

萨瓦瓦尔顿—吉根金矿成矿带、布隆—麦丹—托云金—铜成矿带及乌什北山—马场金矿—铁锰成矿带是西南天山的三个次级成矿亚带。布隆—麦丹—托云金—铜成矿带出露地层较为简单,主要为下奥陶统丘里塔格群、下志留统柯坪塔格群、中泥盆统沙拉依姆群、中石炭统艾克提克组、中石炭统比京他乌组、上石炭统喀拉治尔加下亚组、上石炭统喀拉治尔加上亚组、上石炭统康克林组、下二叠统比尤列提群、乌恰组、西域组及第四系冲积物。带内发育区域性的丹麦—他乌复向斜,沿NE向展布有喀拉铁克和喀勒铁别克两条区域性大断裂。区内金、锑、铜等多金属矿床(点)发育。

阿沙哇义金矿是布隆—麦丹—托云金—铜成矿带最大的矿床。与布隆金矿、玉其开金矿、卡拉公盖金矿成矿地质背景一致,金地球化学异常连续展布,构成了异常集中区,显示出研究区具有较大的找矿潜力(图2)(陈奎等, 2007; 王文胜, 2009; 徐述平等, 2014)。

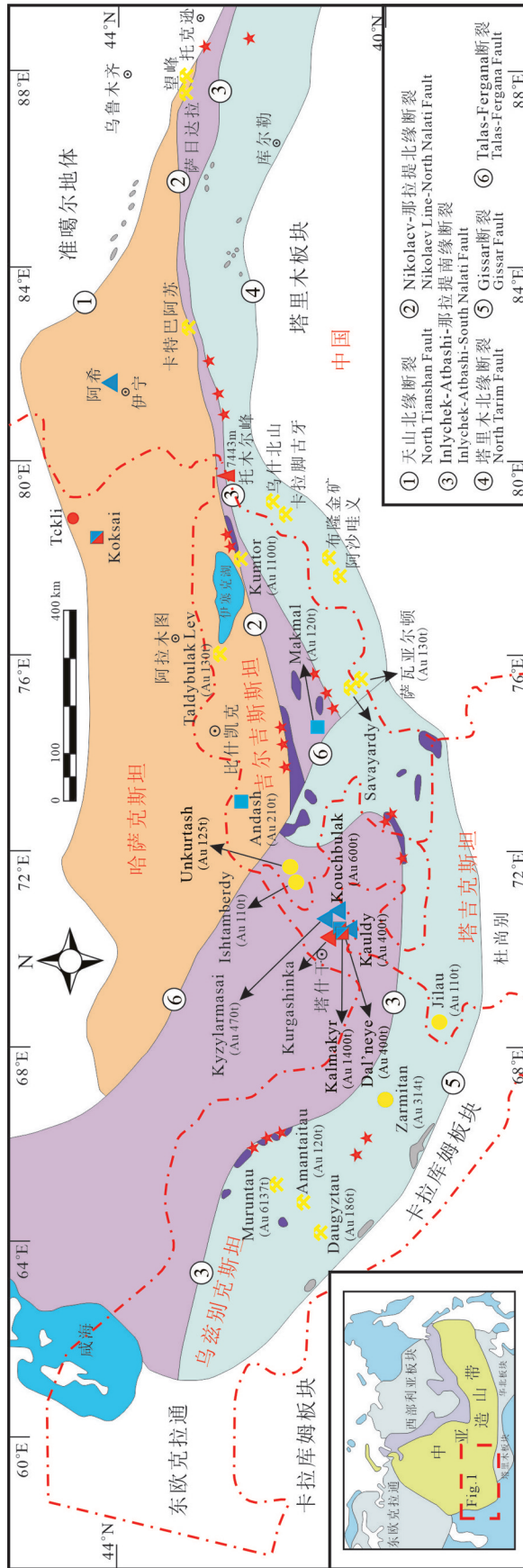


图1 西南天山金多金属成矿带区域构造矿产简图(据薛春纪等, 2014a, b; Zhang et al., 2017 修改)
 1—北天山; 2—中天山; 3—南天山; 4—斑岩型金铜矿; 5—斑岩-矽卡岩型金矿; 6—浅成低温热液型金矿; 7—造山型金矿; 8—SEDEX 铅锌矿; 9—矽卡岩型铅锌矿; 10—砂岩容矿铅锌矿; 11—砂岩容矿铜矿; 12—侵入体有关金矿; 13—蛇绿混杂岩(寒武纪—二叠纪); 14—蛇绿混杂岩(泥盆纪—石炭纪); 15—高压变质岩(泥盆纪—二叠纪); 16—国界
 Fig. 1 Sketch map of tectonic, Au and polymetallic deposits in Western Tianshan (modified from Xue Chunji et al., 2014a, b; Zhang et al., 2017)
 1—Northern Tianshan; 2—Middle Tianshan; 3—Southern Tianshan; 4—Porphyry Au-Cu deposit; 5—Porphyry-skarn Au deposit; 6—Epithermal Au deposit; 7—Orogenic Au deposit; 8—SEDEX Pb-Zn deposit; 9—Skarn Pb-Zn deposit; 10—Sediment-hosted Pb-Zn deposit; 11—Sediment-hosted Cu deposit; 12—Gold deposits related to intrusions; 13—Ophiolite (Cambrian to Permian); 14—Ophiolite (Devonian to Carboniferous); 15—High-pressure metamorphic rocks (Devonian to Permian); 16—National boundaries

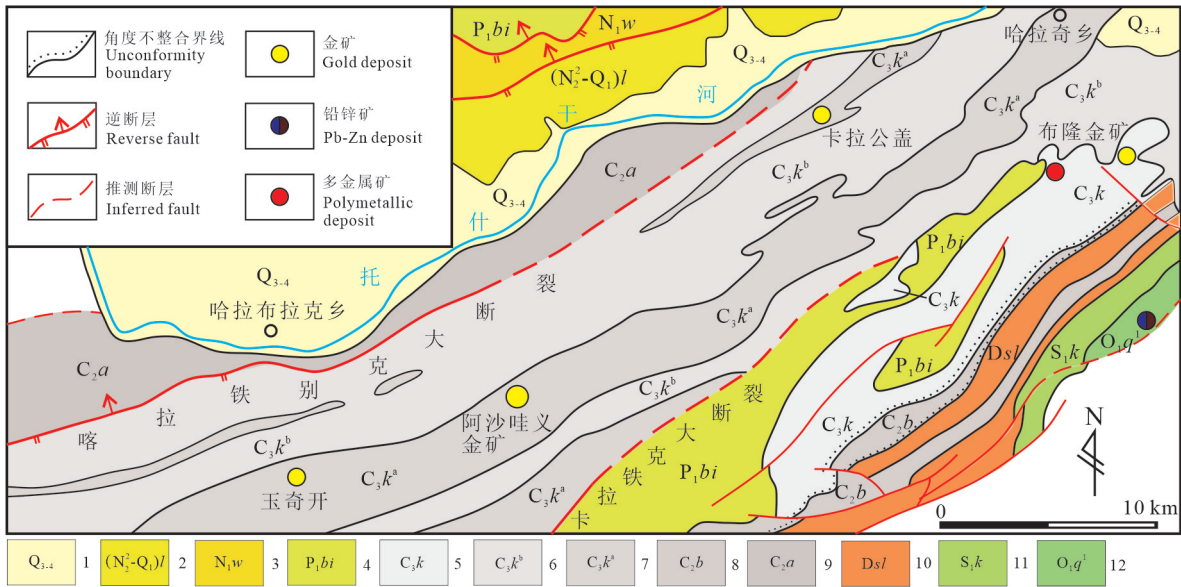


图2 阿沙哇义金矿区地质简图(据陈奎等, 2007修改)

1—冲积物;2—西域组;3—乌恰组;4—下二叠统比尤列提群;5—上石炭统康克林组;6—上石炭统喀拉治尔加上亚组;7—上石炭统喀拉治尔加下亚组;8—中石炭统比京他乌组;9—中石炭统艾克提克组;10—中泥盆统沙拉依姆群;11—下志留统柯坪塔格组;12—下奥陶统丘里塔格群

Fig.2 Regional geological map of the Ashawayi gold deposit (modified from Chen Kui et al., 2007)

1—Alluvial deposit; 2—Western Region Formation; 3—Ucha Formation; 4—Biyouletti Group of Lower Permian; 5—Conklin Formation of Upper Carboniferous; 6—Upper Kalachirga Formation of Upper Carboniferous; 7—Lower Kalachirga Formation of Upper Carboniferous; 8—Bijingtawu Formation of Middle Carboniferous; 9—Aiketik Formation of Middle Carboniferous; 10—Shalam Group of Middle Devonian; 11—Kepingtage Formation of Lower Silurian; 12—Qiulitage Group of Lower Ordovician

3 矿床地质背景

阿沙哇义金矿床出露的地层较为单一,为上石炭统喀拉治尔加组上、下段(C_3k)和第四系。喀拉治尔加组下段为主要的赋矿围岩,岩性组合为灰色薄层状绢云母化粉砂岩、深灰色至浅黄色千枚岩夹黄色变余细砂岩(图3)。

晚古生代西南天山受南天山洋闭合过程中发生强烈俯冲-碰撞构造事件,致使区内地层强烈挤压、缩短变形,发育较陡立逆冲断层、紧闭褶皱及大规模的逆冲推覆构造。贯穿矿区的托什干河构造剖面显示矿区地层经历早期强烈逆冲挤压,后期在早期挤压结构面叠加走滑作用,局部出现较深构造层次的脆-韧性特征(霍海龙, 2019)。矿区内发育一系列次级逆冲断层、节理、裂隙带和小褶皱,次级断裂构造具压扭-走滑性质。次级逆冲断层走向延伸与区域构造线相同,与地层略有斜交;倾角比区域断裂构造更陡,倾角更大(图4)。矿体产于次级逆冲断层带内。

阿沙哇义金矿床围岩普遍发育浅变质作用,受

热液流体作用,沿断裂破碎带发育硅化、黄铁矿化、褐铁矿化、碳酸盐化、绢云母化等蚀变作用。与金成矿作用有关的蚀变为硅化、黄铁矿化、褐铁矿化。硅化在矿床内最为普遍,与金成矿作用密切相关,在所有断裂破碎蚀变带内、围岩层间均有发育,伴随成矿作用的各期次。

阿沙哇义金矿床发育两类金矿石:一类是氧化型矿石,另一类是原生型矿石。矿石矿物中金属矿物有黄铁矿、褐铁矿、辉锑矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿、磁铁矿、黝铜矿;非金属矿物有石英、斜长石、方解石、铁白云石、绢云母、白云母、磷灰石、锆石。

4 成矿期次划分

根据脉体穿插关系、矿石结构和矿石组合等特征,将阿沙哇义金矿床成矿作用划分为3个期次(图5),各期次矿物共生组合见表1。张涛等(2020)对矿床中载金矿物特征及其地质意义进行了详细研究,认为含砷黄铁矿为主要载金矿物、毒砂次之。成矿早期成矿物质预先富集,中期为成矿作用最为关键时期,大量成矿物质富集沉淀成矿。

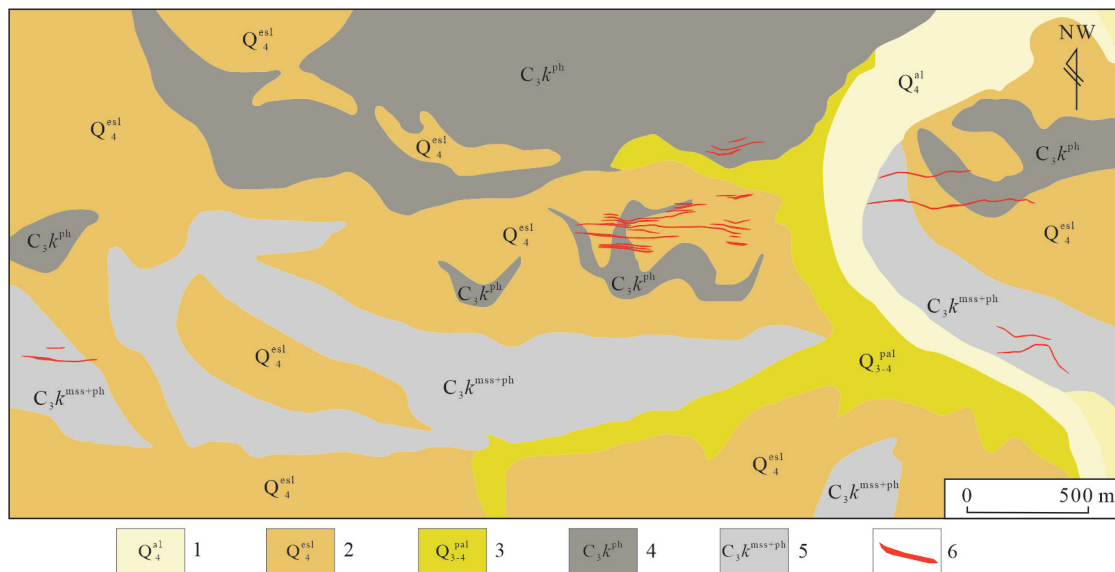


图3 阿沙哇义金矿床地质特征

1—第四系冲积物; 2—第四系残坡积物; 3—第四系洪冲积物; 4—上石炭统喀拉治尔加组上段; 5—上石炭统喀拉治尔加组下段; 6—矿体

Fig.3 Geological map of the Ashaway gold deposit

1-Quaternary alluvial deposits; 2-Quaternary residual slope deposits; 3-Quaternary alluvial deposits; 4-Upper member of Kalazhiera Formation of Upper Carboniferous; 5-Lower member of Kalazhiera Formation of Upper Carboniferous; 6-Ore body

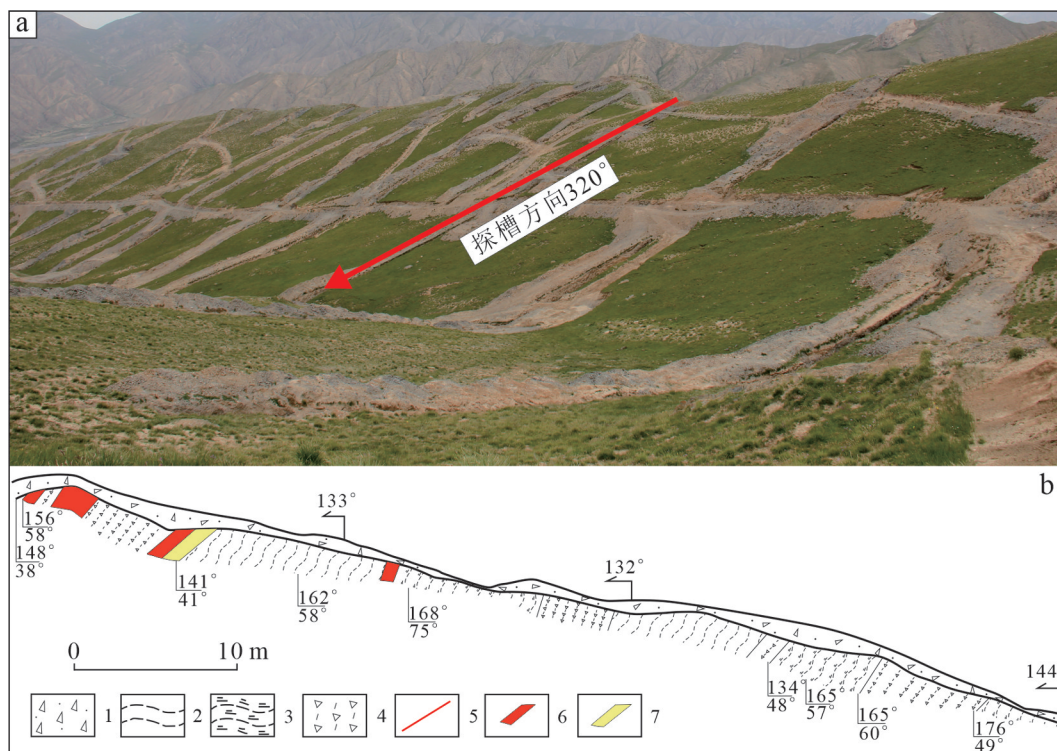


图4 阿沙哇义金矿区全貌(a)及TC2901剖面(b)

1—第四系残坡积物; 2—千枚岩; 3—绢云母千枚岩; 4—断层角砾; 5—断层; 6—Au工业矿体 ($Au \geq 1.2 \times 10^{-6}$); 7—Au低品位矿体 ($0.5 \times 10^{-6} \leq Au \leq 1.2 \times 10^{-6}$)

Fig.4 The overall picture of the mining area (a) and the trench 2901 section (b) in the Ashaway gold deposit

1-Quaternary residual slope deposits; 2-Phyllite; 3-Sericite phyllite; 4-Fault breccia; 5-Fault; 6-Au industrial ore body ($Au \geq 1.2 \times 10^{-6}$); 7-Au low grade ore body ($0.5 \times 10^{-6} \leq Au \leq 1.2 \times 10^{-6}$)

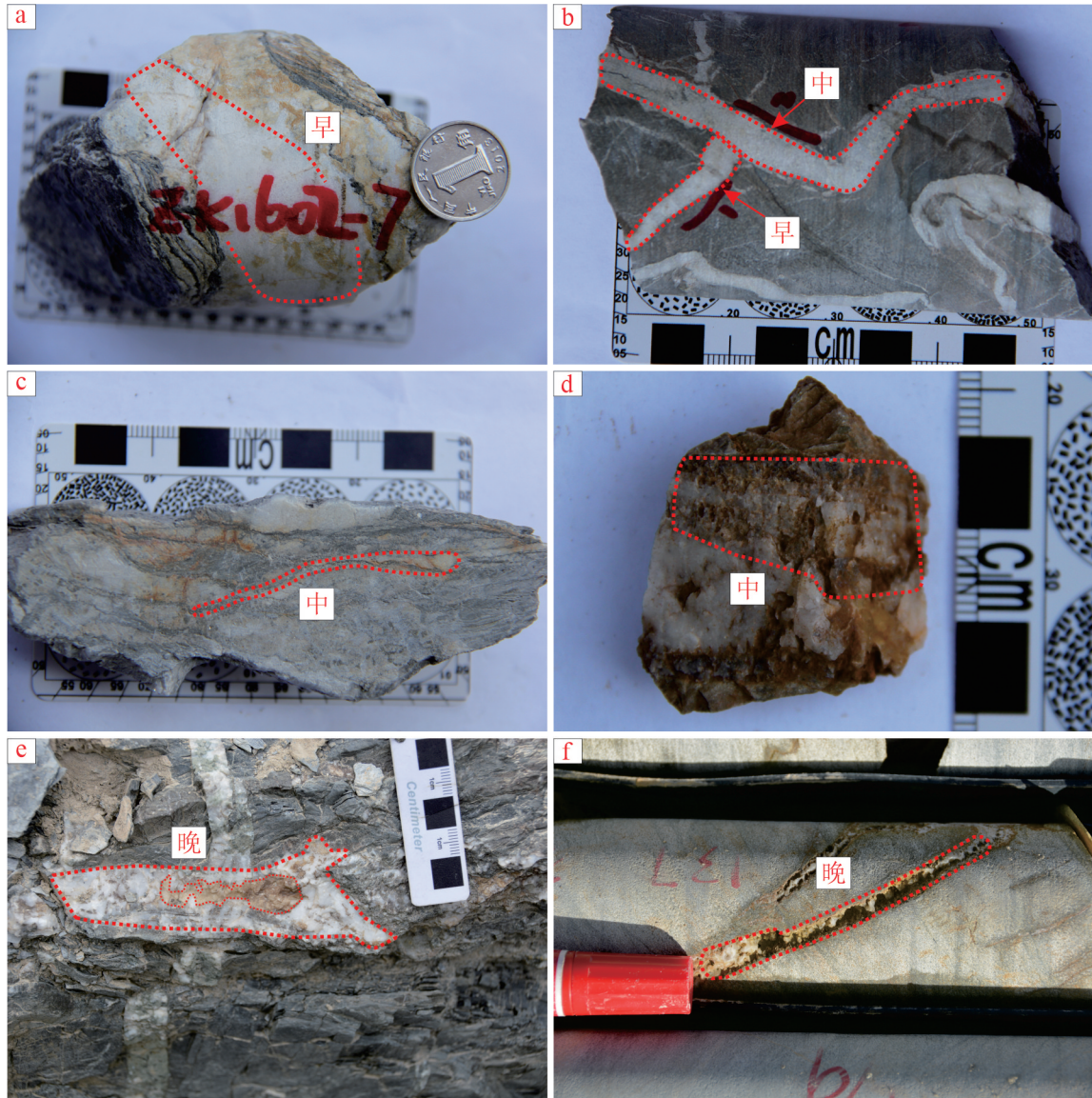


图5 阿沙哇义金矿床不同期次矿石照片

a—早期乳白色石英;b—早期石英脉被中期石英脉切穿;c—成矿期烟灰色石英脉+硫化物;d—成矿期烟灰色石英;e—成矿晚期白色石英+碳酸盐;f—晚期梳状石英

Fig.5 Ore photos of different periods of the Ashawayi gold deposit

a—Early milky white quartz; b—Early quartz veins cut through middle quartz veins; c—Smoke-gray quartz vein + sulfide during mineralization; d—Smoke-gray quartz during mineralization; e—Late mineralization white quartz + carbonate; f—Late comb quartz

4.1 早期:石英—黄铁矿期(图5a、b)

早期石英呈乳白色、灰白色,较纯净;多以团块状、脉状产出。其中脉体较宽,多为顺层发育,颗粒粗大。黄铁矿较少,零星分布,以立方体为主,自形程度较高。

4.2 中期:石英—多金属硫化物期(图5b~d)

中期是金矿化最重要期次,出现黄铁矿、毒砂、辉锑矿、黄铜矿及方铅矿等金属硫化物,其中大量

发育黄铁矿尤为突出。石英呈烟灰色细脉—网脉状,常交代、穿插于早期石英脉之间或直接产于断裂破碎蚀变带内;黄铁矿呈细粒状,晶形多样,以五角十二面体、立方体为主;毒砂与黄铁矿伴生或共生,呈细粒状、自形或其他形产出;辉锑矿、黄铜矿、方铅矿与石英共生。

4.3 晚期:石英—碳酸盐期(图5e、f)

晚期仅发育少量黄铁矿,石英和碳酸盐细脉多

表1 阿沙哇义金矿床成矿期次划分及矿物共生组合特征
Table 1 Division of mineralization stages and mineral symbiosis of the Ashawayi gold deposit

矿物	成矿早期	成矿中期	成矿晚期
石英	++++	++++++	++++++
绢云母	++	+++	+
黄铁矿	++++	++++++	++
毒砂		++++	
辉锑矿		++++	
黄铜矿		++	
方铅矿		++	
褐铁矿			++++++
金	++	++++++	
铁白云石			++++
方解石			++++

穿插于早期、中期石英脉之间,或充填于破碎蚀变带之中,或沿张性裂隙充填,在石英脉中见晶洞和梳状构造。其中碳酸盐主要是方解石和铁白云石。

5 流体包裹体研究

5.1 样品及测试方法

样品采自阿沙哇义金矿床内的地表、探槽及钻孔岩心,共计36件。样品磨制成厚约0.2 mm的双面抛光薄片,进行矿相学、流体包裹体观察,最后选择其中16片具有代表性的样品进行流体包裹体显微测温及激光拉曼测试分析。

流体包裹体岩相学观察和流体包裹体显微热力学测温在中国地质科学院地质力学研究所动力成岩成矿实验室完成。测温使用的仪器为Linkam THMS 600型冷热台,与德国ZEISS公司的偏光显微镜匹配:温度范围是-196~600℃,以美国FLUIDINC公司的合成流体包裹体标准样品标定冷热台温度;测量精度在小于0℃为0.1℃,0~30℃范围内为0.5℃,大于30℃为1℃。测试过程中,速率一般为0.5~5℃/min,含CO₂包裹体相转变点附近的升温速率一般为0.1~0.2℃/min,水溶液包裹体相变点附近的升温速率为0.2~0.5℃/min,基本保证了相转变温度的准确性。

流体包裹体成分原位激光拉曼分析在核工业北京地质研究院分析测试研究所流体包裹体实验室完成,测试仪器为LAB-HR-VIS LabRAM HR800型显微激光拉曼光谱仪,波长为532 nm,扫描范围为100~4200 cm⁻¹,测试环境温度为25℃,湿

度为50%。

CO₂-H₂O型包裹体盐度根据所测笼合物融化温度,利用Collins(1979)提供的方法获得;水溶液包裹体盐度根据所测得冰点温度,利用Bodnar(1993)提供的方程计算得到(卢焕章等,2004)。

5.2 流体包裹体岩相学特征

流体包裹体根据室温下(21℃)的岩相学特征、在冷热台升温或降温过程中(-196~600℃)的相变行为以及激光拉曼光谱分析,可以将阿沙哇义金矿成矿各期次矿物中的包裹体分为3种类型,即水溶液型、CO₂-H₂O包裹体、纯CO₂包裹体(图6),具体描述如下:

5.2.1 水溶液包裹体(W型)

多呈长条状、椭圆状及不规则状,有时呈负晶型,粒径4~14 μm;室温条件下表现为气液两相(L_{H₂O}+V_{H₂O}),在冷热台上温度降到0℃以下时,两相立即呈一相,气液比7%~30%,以富液相包裹体为主,基本未见富气相包裹体。

5.2.2 CO₂-H₂O包裹体(C型)

多为椭圆状、球状、长条状或部分不规则状,粒径4~18 μm,室温下表现为两相或三相(L_{H₂O}+L_{CO₂}+V_{CO₂}),其中CO₂相(L_{CO₂}+V_{CO₂})所占比例差别较大,5%~80%均有出现。根据包裹体中CO₂相所占比例可将C型包裹体进一步划分为富CO₂(C1)包裹体和富H₂O(C2)型包裹体两个亚类。其中,C1型包裹体CO₂相所占比例大于50%,而C2中的CO₂相所占比例为5%~50%。

5.2.3 纯CO₂包裹体(PC型)

多呈椭圆状、不规则状,粒径2~8 μm,室温下表现为一相或者两相,前者冷冻过程中出现气相CO₂。

成矿作用各期次热液形成的脉石矿物中发育数量不等、类型不同的流体包裹体组合。早期和中期3类包裹体均发育,呈长条、椭圆及不规则状,成群或孤立分布,粒径2~18 μm,其中期W型和富CO₂型包裹体增多;晚期仅见水溶液包裹体,呈椭圆、长条及不规则状,粒径4~14 μm,成群、孤立或沿裂隙线状分布。

5.3 流体包裹体成分分析

运用激光拉曼光谱分析技术对阿沙哇义金矿发育的单个包裹体进行成分研究,测点数为15个。激光拉曼光谱测试结果表明(图7),各期次包裹体

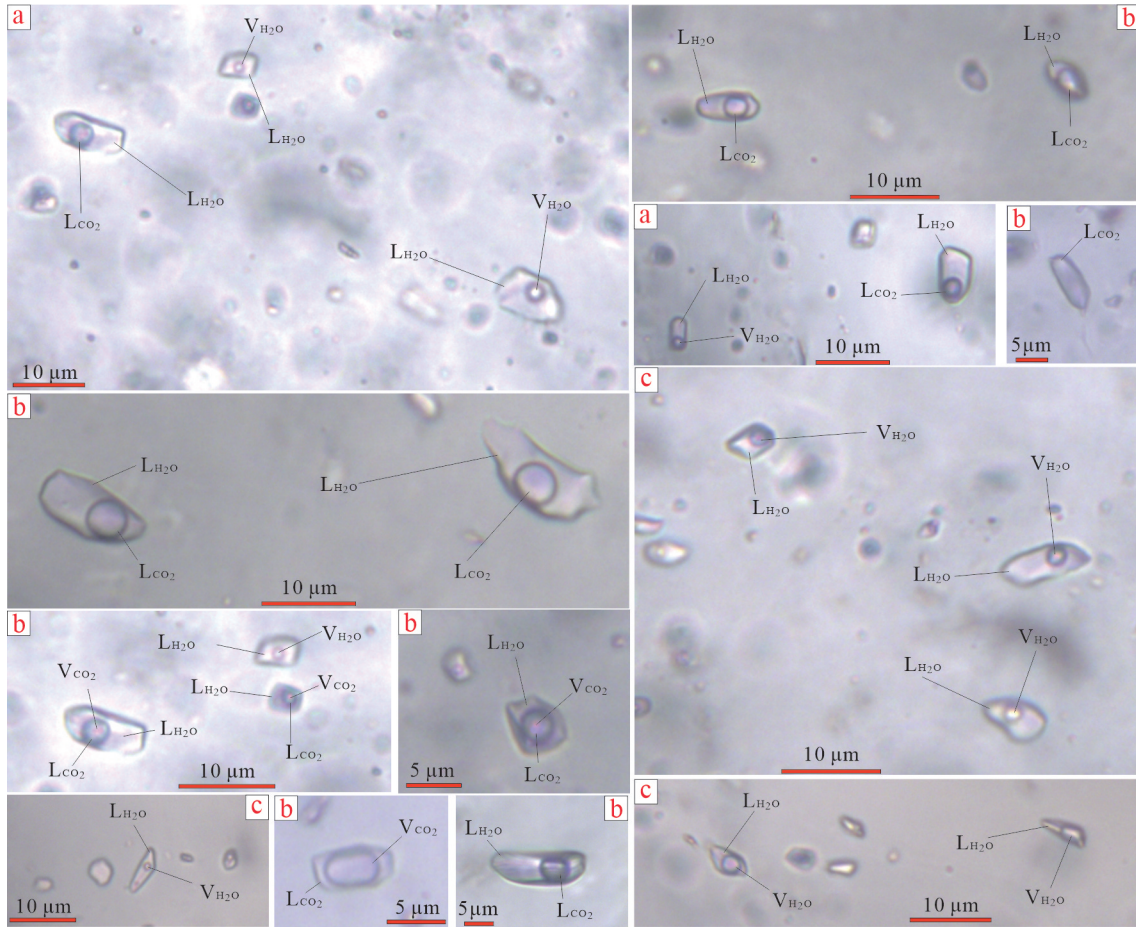


图6 阿沙哇义金矿床流体包裹体显微照片

a—早期石英中包裹体;b—中期石英中包裹体;c—晚期石英中包裹体;V_{CO₂}—气相CO₂;L_{CO₂}—液相CO₂;V_{H₂O}—气相H₂O;L_{H₂O}—液相H₂O

Fig.6 Photomicrograph of fluid inclusions in the Ashawayi gold deposit

a—Inclusions in early quartz; b—Inclusions in medium quartz; c—Inclusions in late quartz; V_{CO₂}—Gas phase CO₂; L_{CO₂}—Liquid phase CO₂; V_{H₂O}—Gas phase H₂O; L_{H₂O}—Liquid phase H₂O

液相成分主要为水(特征峰 3378.9~3432.8 cm⁻¹);气体成分主要为 CO₂(特征峰 1385.7~1392.8 cm⁻¹),并且出现一定量的 CH₄(特征峰 2912.9~2921.4 cm⁻¹)和 N₂(特征峰 2327.6~2333.3 cm⁻¹)。早期包裹体液相主要为水,气体主要为 CO₂,出现 CH₄、N₂;成矿期,包裹体液相主要为水,气相以 CO₂ 为主,加入了大量 CH₄、N₂ 等气体参与成矿作用;晚期流体包裹体成分较为简单,主要为水溶液。

5.4 流体包裹体显微测温

冷热台显微测温共获得 111 组流体包裹体测温数据,结果见表 2、图 8 和图 9,现分述如下:

早期包裹体寄主矿物主要为石英,3 类包裹体均发育。C 型包裹体见富 CO₂ 三相包裹体,完全冷冻回温过程中,固态 CO₂ 初熔温度介于 -64.5~

-56.6℃,低于 CO₂ 三相点(-56.6℃),可能含 CH₄、N₂ 等组分,与激光拉曼光谱测试结果吻合(图 7a、b);笼合物熔化温度 4.6~9.1℃,对应的盐度 1.6%~9.7% NaCl eqv.;部分均一温度 10.8~29.3℃,向液相均一;完全均一温度介于 290~386℃,均一至液相。PC 型包裹体室温下表现为单相,冷冻过程中可出现气相,固相熔化温度 -60.5~-58.2℃,均一温度 26.1~27.6℃,向液相均一。W 型包裹体冰点温度 -5.0~-2.8℃,对应盐度 4.7%~7.9% NaCl eqv.;完全均一温度 236~304℃,均一至液相。

中期包裹体寄主矿物主要为石英,3 类包裹体均发育,其中富 CO₂ 的 C 型及 W 型增多。C 型包裹体固态 CO₂ 初熔温度为 -65.6~-56.6℃,可能含 CH₄、N₂ 等组分导致,与激光拉曼光谱测试结果吻合

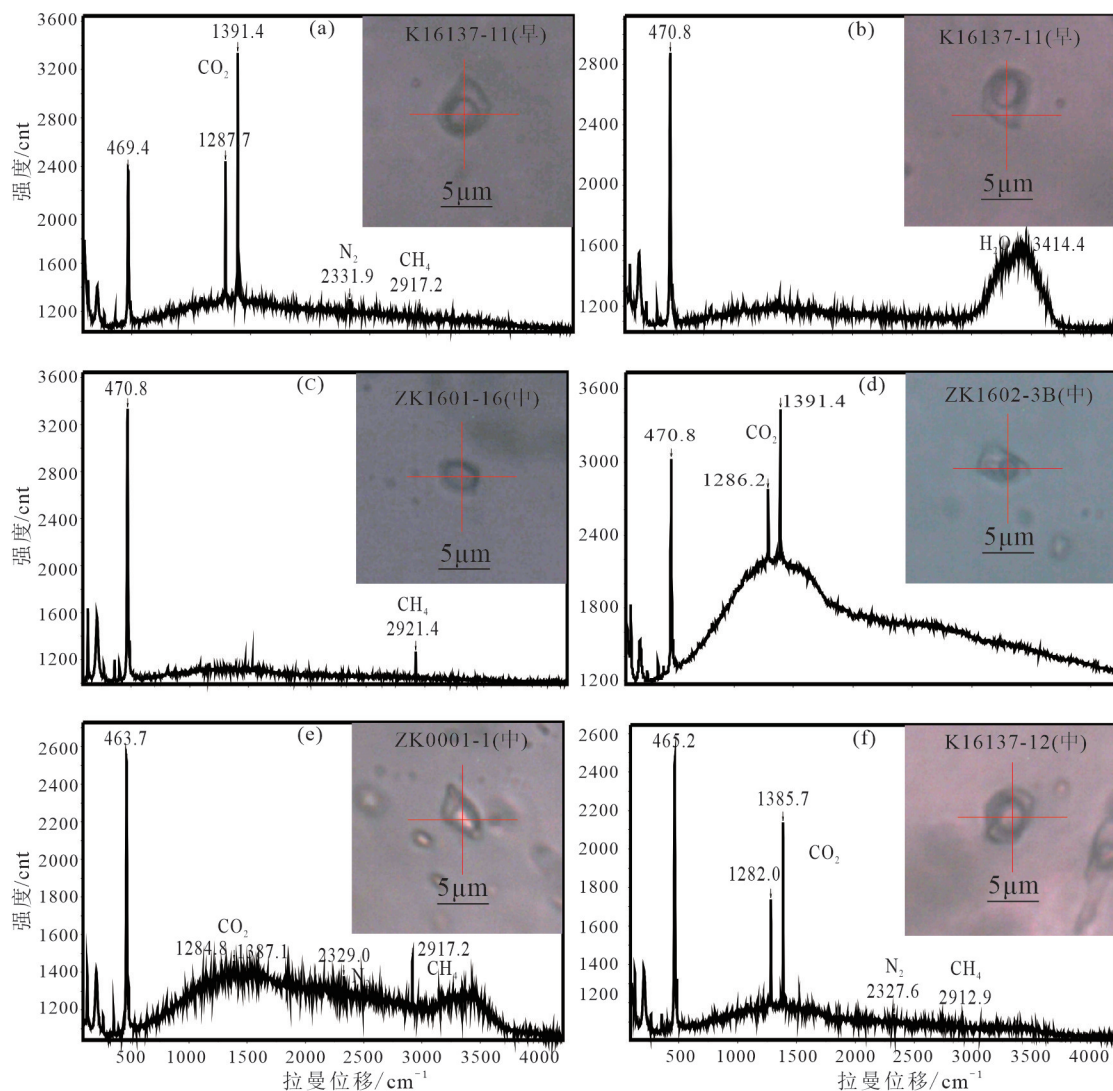


图7 阿沙哇义金矿床流体包裹体显微激光拉曼光谱谱图

a—早期C型包裹体液相中的H₂O; b—早期C型包裹体气相中含CH₄、N₂; c—中期富CO₂包裹体(C1)中含CH₄; d、e、f—中期C型包裹体, 气相为CO₂或CH₄、N₂

Fig. 7 Microlaser Raman spectrum of fluid inclusions in Ashawayi gold deposit

a—H₂O in early C-wrapped body fluids; b—CH₄ and N₂ in gas phase of early C-type inclusions; c—CH₄ in CO₂-rich medium-term inclusions (C1); d, e, f—Medium-term C-type inclusions, gas phase CO₂ or CH₄, N₂

(图7c~f); CO₂笼合物熔化温度2.6~8.6℃, 相应盐度为2.8%~12.5% NaCl eqv.; CO₂部分均一温度为16.8~29.1℃, 向液相均一; 完全均一温度246~301℃, 均一至液相。PC型包裹体室温下表现为单相, 冷冻过程中可出现气相, 固相熔化温度-62.4~-57.8℃, 均一温度21.3~25.1℃, 向液相均一。W型包裹体冰点温度-3.8~-0.8℃, 对应盐度1.4%~6.2% NaCl eqv.; 完全均一温度225~258℃, 均一至液相。

晚期包裹体寄主矿物为石英和方解石, 仅发育W型包裹体。W型包裹体冰点温度为-4.6~-0.8℃,

相应盐度1.4%~7.3% NaCl eqv., 向液相均一, 均一温度为139~222℃。根据图8和图9, 成矿流体从早期→中期→晚期, 流体温度和盐度逐渐降低。

5.5 成矿压力和深度估算

阿沙哇义金矿床成矿早期、中期发育C型包裹体, 且流体包裹体的盐度普遍较低 (< 7% NaCl eqv.), 选取盐度介于4%~7% NaCl eqv. 的C型包裹体估算其最小压力。具体步骤如下: ①根据流体包裹体部分均一温度, 在 Shepherd et al. (1985) 提出的图解中查出 CO₂ 相的密度; ②根据 CO₂ 相的密度与

表2 阿沙哇义金矿床流体包裹体显微测温结果

Table 2 Micro-thermometry results of fluid inclusions in the Ashawayi gold deposit

成矿期次	类型	寄主矿物	数量	$T_{m,CO_2}/^{\circ}C$	$T_{m,chl}/^{\circ}C$	$T_{h,CO_2}/^{\circ}C$	$T_{m,ice}/^{\circ}C$	$T_{h,tot}/^{\circ}C$
早	C	石英	19	-64.5~-56.6	4.6~9.1	10.8~29.3		290~386
	W	石英	6				-5.0~-2.8	236~304
	PC	石英	2	-60.5~-58.2		26.1~27.6		
中	C	石英	26	-65.6~-56.6	2.6~8.6	16.8~29.1		246~301
	W	石英	31				-3.8~-0.8	225~258
	PC	石英	4	-62.4~-57.8		21.3~25.1		
晚	W	石英	21				-4.6~-0.8	139~222
	W	方解石	2				-3.7~-1.2	186~210

注: T_{m,CO_2} -CO₂固相熔化温度; $T_{m,chl}$ -CO₂笼合物消失温度; T_{h,CO_2} -CO₂部分均一度; $T_{m,ice}$ -冰点温度; $T_{h,tot}$ -完全均一温度。

包裹体完全均一温度在图 10 A1/B1 中查得摩尔分数和体积分数;在图 10 A2/B2 中查得压力。估算结果显示,早期包裹体压力介于 140~180 MPa,包裹体总密度为 0.63~0.85 g/cm³;中期流体包裹体压力介于 130~160 MPa,包裹体总密度为 0.63~0.80 g/cm³。由于矿床内主要出露一套含碳质的复理石建造,岩石密度较小,取 2.6 t/m³。根据公式 $P=\rho \times g \times h$,其中 $g=9.8$ m/s,推算得到早期静岩压力深度为 5~7 km,中期静岩压力深度为 5~6 km。

6 同位素地球化学

6.1 样品分析方法

石英中H-O同位素分析在核工业北京地质研究院稳定同位素实验室完成,选取的样品为上述甄选出进行流体包裹体测温所对应的样品,首先将不同期次的石英样品粉碎至 40~60 目,经筛分、清洗晾干、磁选后,在双目镜下挑选,得到纯度为 99% 的单

矿物样品。

氧同位素分析:将挑选的石英样品碾磨至 200 目,干燥后取 10~30 mg 于 550~700℃与纯 BrF₃ 恒温箱反应获得氧气,用组合冷阱分离 SiF₄、BrF₃ 等杂质,从而获得较纯净的 O₂。将纯净的氧气在 700℃铂催化作用下与碳棒逐级反应,逐一收集反应生成的 CO₂ 气体,选用 Finnigan MAT-253 型质谱仪进行测试,以 PDB、SMOW 两种国际标样报出,分析精度优于 ±0.2‰。

氢同位素测试:直接将挑选的石英样品进行低温烘干,去除矿物表面的吸附水,然后在真空系统中逐步加热除去次生包裹体,加热至 600℃使其中的包裹体热爆裂,释放的水通过收集、冷凝和纯化处理,然后用锌置换水中氢,对获得的氢气选用 Finnigan MAT-253 型质谱仪进行测试,分析精度优于 1‰。

6.2 H-O 同位素结果

阿沙哇义金矿中石英 H-O 同位素分析结果见表 3。结果显示,包裹体中水的 $\delta D = -75‰ \sim -61‰$;石英中 $\delta^{18}O_{\text{石英}} = 19.6‰ \sim 22.3‰$ 。根据石英-水之间氧同位素分馏方程 $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$ (Clayton et al., 1972),计算得到与石英达到分馏平衡的流体 $\delta^{18}O_{\text{水}} = 8.2‰ \sim 14.8‰$ 。早期石英包裹体中 $\delta D = -62‰ \sim -75‰$,石英中 $\delta^{18}O = 20.0‰ \sim 21.8‰$,计算其平衡水 $\delta^{18}O_{\text{水}}$ 的值为 11.6‰~14.8‰;中期石英包裹体中 $\delta D = -62‰ \sim -72‰$,石英中 $\delta^{18}O_{\text{石英}} = 19.6‰ \sim 21.6‰$,计算其平衡水 $\delta^{18}O_{\text{水}}$ 的值为 10.7‰~12.7‰;晚期石英包裹体中 $\delta D = -61‰ \sim -69‰$,石英中 $\delta^{18}O_{\text{石英}} = 20.4‰ \sim 22.3‰$,计算其平衡水 $\delta^{18}O_{\text{水}}$ 的值为

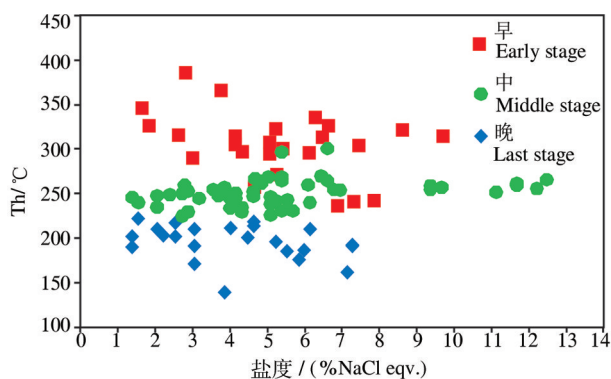


图8 阿沙哇义金矿床包裹体均一温度-盐度图
Fig.8 Homogenization temperature-salinity plots of fluid inclusions in the Ashawayi gold deposit

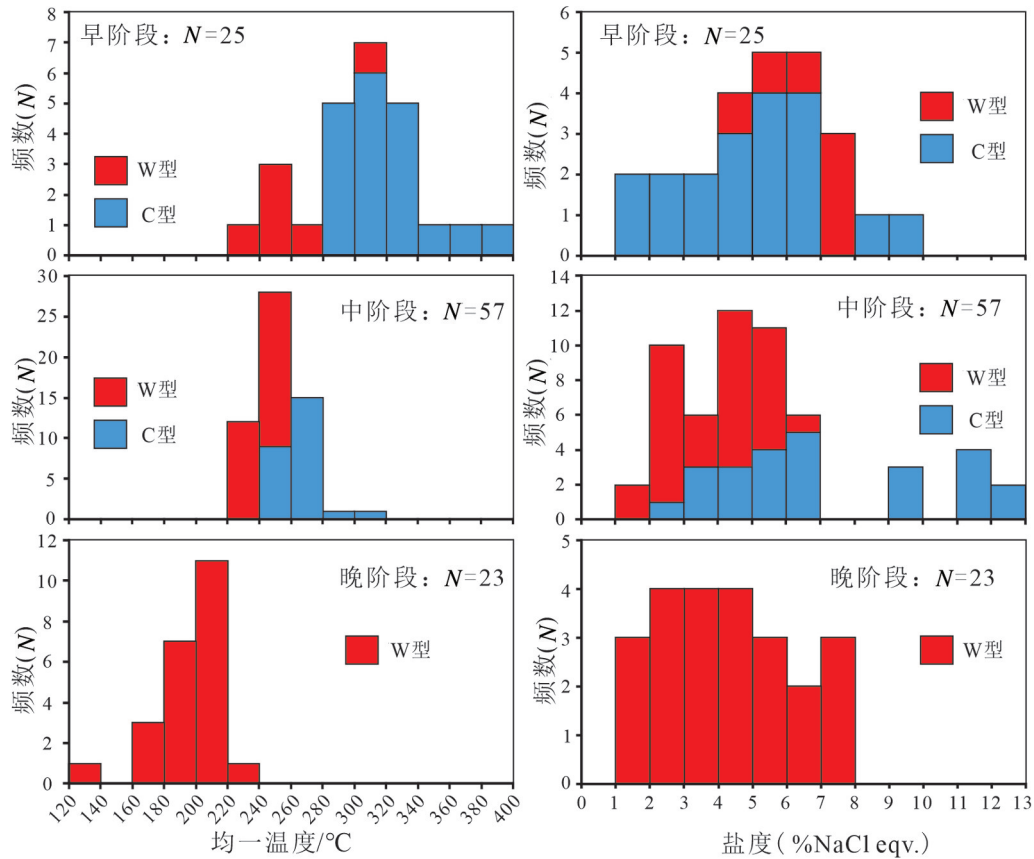


图9 阿沙哇义金矿床流体包裹体均一温度-盐度直方图

Fig.9 A homogenous temperature-salt histogram of fluid inclusions in the Ashawayi gold deposit

8.2‰~10.6‰。

7 讨论

7.1 成矿流体特征及其演化

通过对研究区不同期次流体包裹体测温研究表明:早期包裹体均一温度介于236~386℃,盐度介于1.6%~9.7% NaCl eqv.,压力介于140~180 MPa,包裹体总密度为0.63~0.85 g/cm³,静岩压力深度为5~7 km;中期包裹体均一温度介于225~301℃,盐度介于1.4%~12.5% NaCl eqv.,压力介于130~160 MPa,包裹体总密度为0.63~0.80 g/cm³,静岩压力深度为5~6 km;成矿晚期包裹体均一温度介于139~222℃,盐度介于1.4%~7.3% NaCl eqv.。从成矿早期→中期→晚期,流体包裹体均一温度下降、盐度减少、压力降低。

成矿早期投点均落入变质水范围,远离岩浆水范围右侧;中期 $\delta^{18}\text{O}_w$ 值降低,投点均落入变质水范围,推测为成矿过程中大气降水热液混入造成;晚

期投点落入变质水和岩浆水范围右侧附近(图11)。表明成矿作用过程主要由变质流体参与成矿,理由如下:①如果是岩浆水,其初始生成温度应在573℃(最低共结点)以上,后通过水岩作用形成石英-碱性长石等 $\ln\alpha_{\text{矿物-水}}>0$ 的矿物,即初始岩浆水不断卸载¹⁸O而降温到260~296℃时仍保持 $\delta^{18}\text{O}_w$ 在10.7‰~14.8‰,而自然界尚未报道 $\delta^{18}\text{O}_w>14.8$ ‰的岩浆水;即使是花岗岩,也只能是壳源改造型或S型花岗岩(Wulff et al., 2010)。且在矿区内并未见花岗岩出露,成矿作用过程中如此高的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 并不是源自花岗岩,只能来源于富 $\delta^{18}\text{O}$ 的岩石建造的变质脱水,矿区地层在晚古生代经历强烈挤压、逆冲推覆构造运动,可以为变质脱水作用提供热量。②研究区成矿温度在225~301℃,远低于初始岩浆热液温度,如果是岩浆热液成矿,则必须要求岩浆流体降温至395℃或更低。然而,通过对矿区大量薄片及流体包裹体测温研究,矿区内未发现任何600~395℃范围的流体和围岩蚀变痕迹,只存在小于

表3 阿沙哇义金矿床流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD (‰)
 Table 3 The $\delta^{18}\text{O}$ and δD ratios (‰) of the Ashawayi gold deposit

样号	测试矿物	δD	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$	均一温度/°C	期次
ZK1601-14	石英	-62	20	13.0	296	早
K16137-11	石英	-69	21.3	14.3	296	早
K16137-15	石英	-75	20.3	13.3	296	早
K16140-1	石英	-65	20.1	11.6	260	早
K16144-1C	石英	-72	21.8	14.8	296	早
ZK1602-3C	石英	-62	19.7	10.8	252	中
ZK0001-1	石英	-69	19.6	10.7	252	中
K16137-4	石英	-65	20.1	11.2	252	中
K16137-7	石英	-66	20.8	11.9	252	中
K16138-1	石英	-72	19.8	10.9	252	中
K16144-1A	石英	-70	21.6	12.7	252	中
K16138-5	石英	-61	21.6	10.2	205	晚
K16139-1	石英	-64	21.6	8.2	175	晚
ZK16901-3	石英	-66	22.3	10.6	200	晚
K16140-2	石英	-69	20.7	9.0	200	晚
K16140-4	石英	-69	20.4	8.7	200	晚

386°C的围岩蚀变及流体成矿条件。③成矿早期石英流体包裹体 $\delta\text{D} = -62\text{‰} \sim -75\text{‰}$, 平均 -68‰ ; 中期石英流体包裹体 $\delta\text{D} = -62\text{‰} \sim -72\text{‰}$, 平均 -67‰ , 均显示变质水特征。④成矿早期 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = 11.6\text{‰} \sim 14.8\text{‰}$, 平均 13.4‰ ; 成矿中期 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = 10.7\text{‰} \sim 12.7\text{‰}$, 平均 11.4‰ , 同样显示变质流体特征。⑤中期发育的纯 CO_2 包裹体及盐度较低, 且拉曼分析表明包裹体气体成分除 CO_2 之外, 还包含 CH_4 和 N_2 , 流体成分为 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$, 具变质流体特征, 是变质热液矿床的标志性特征(Goldfarb et al., 2005; 陈衍景等, 2007; Zacharias et al., 2009)。综合以上观点, 阿沙哇义金矿成矿流体为变质流体。

成矿作用的各期次H-O同位素值较为均一, 表明不同期次成矿流体具有相同来源。但各期次也存在一定差异。由成矿早期 \rightarrow 中期 \rightarrow 晚期, δD 平均值由 $-69\text{‰} \rightarrow -67\text{‰} \rightarrow -66\text{‰}$ 逐一增大, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 平均值由 $13.4\text{‰} \rightarrow 11.4\text{‰} \rightarrow 9.3\text{‰}$ 逐渐减小的过程。成矿从早到晚, 氢氧同位素显示向大气降水飘移的趋势(图9), 表明成矿作用过程有大气降水混入(Zacharias et al., 2009), 成矿构造环境由挤压向伸展过渡。与估算的各成矿期深度和压力变化特征相互佐证。

7.2 矿质沉淀机制

阿沙哇义金矿床流体包裹体表现出: ①在单颗

石英中, C型和W型共生, 表明这些包裹体是同时捕获的; ②中期C1型和C2型包裹体均一温度相近; ③ CO_2 部分均一温度低于纯 CO_2 的临界温($31.1\text{ }^\circ\text{C}$), 表明成矿流体经历了不混溶作用。而不混溶或沸腾所导致 CO_2 大量逃逸的现象在其他造山型矿床中已有报道(陈华勇等, 2007; 周振菊等, 2011, 2022; Zhao et al., 2013; Ni et al., 2015)。

金在造山型金矿床C-H-S成矿流体体系中, 以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物迁移最为合适(Ridley and Diamond, 2000; Phillips and Powell, 2009)。 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物到达沉淀空间内, 需要一个快速、高效的沉淀机制, 这样才能在较短时间内富集成矿, 否则成矿元素容易受沉淀时环境影响而分散, 不利于成矿。 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 溶解度受温度、pH值、氧逸度、压力等控制。Weatherley and Henley (2013)和陈柏林(2001)研究表明流体在地震发生过程中进入沉淀空间, 流体会出现闪蒸现象, 流体中硅和金立即沉淀, 流体压力骤降, 流体沸腾, 导致相分离。沉淀机制为相分离过程中, CO_2 、 CH_4 等还原性气体会优先进入气相中, 导致含矿热液氧化性增强(Hodkiewicz et al., 2009), 打破了 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合离子稳定性, 导致金沉淀。Robert and Kelly (1987)和Lawrence et al. (2013)认为沸腾包裹体, 可以指示流体发生相分离。可见, 压力骤降是金发生高效沉淀的诱发因

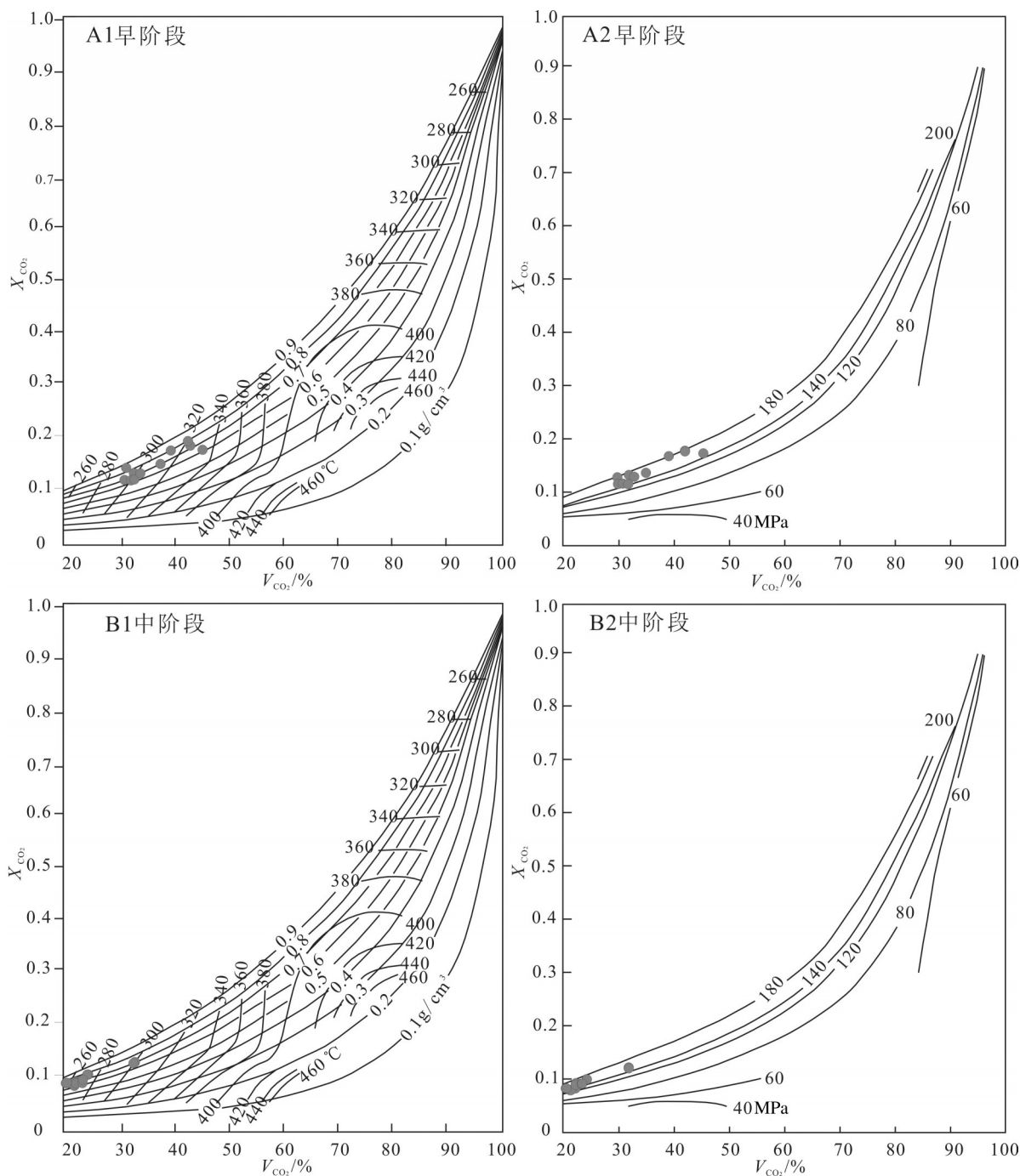


图10 含盐度为6%的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 包裹体 X_{CO_2} 、 V_{CO_2} 、 ρ 和 T 关系图(A1、B1)和含盐度为6%的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 包裹体 X_{CO_2} 、 V_{CO_2} 、 ρ 和 P 关系图(A2、B2)

Fig.10 Relationship of X_{CO_2} , V_{CO_2} , ρ density to T (A1, B1) and relationship of X_{CO_2} , V_{CO_2} to P (A2, B2) of the $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ fluid inclusion with salinity of 6% NaCl eqv.

素。研究区成矿早期至晚期,经历韧性变形到脆性变形,存在压力骤降(张涛等,2020)。

研究区金的主要载体为黄铁矿和毒砂,矿化过程伴随硫化(黄铁矿化、毒砂、辉锑矿)及碳酸盐化;

流体包裹体气体成分主要为 CO_2 ,含 CH_4 和 N_2 ,显示流体包裹体具有富 CO_2 特征。综合分析,压力骤降及成矿流体经历了不混溶作用是金快速沉淀的主要机制,与之成矿地质背景相似的西南天山最大的

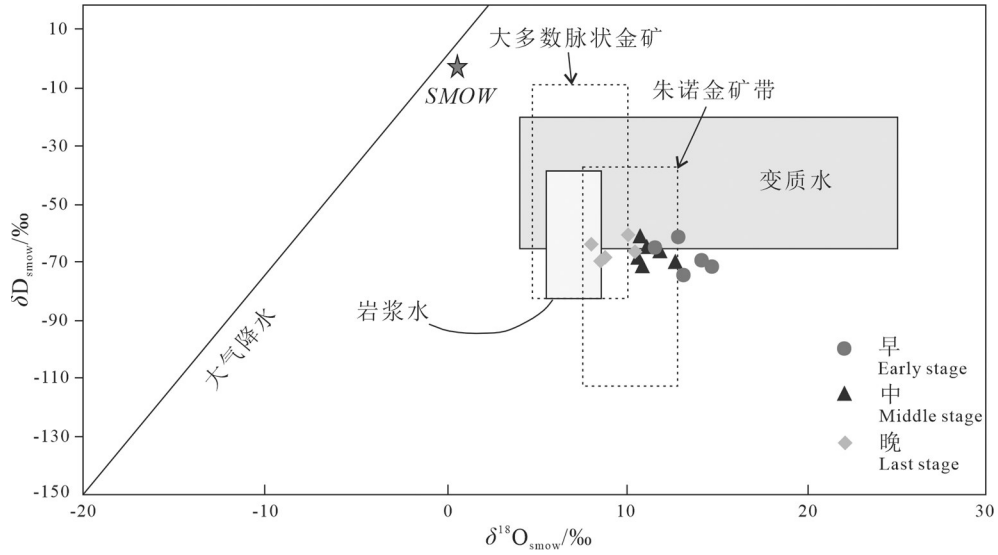


图 11 阿沙哇义金矿床成矿流体 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 组成(底图据 Taylor, 1974)

Fig.11 $\delta^{18}\text{O}$ - δD plots of the ore fluids in the Ashawayi gold deposit (modified from Taylor, 1974)

萨瓦亚尔顿金矿沉淀成矿机制基本一致(周振菊等, 2022)。

7.3 矿床成因探讨

阿沙哇义金矿床中流体包裹体测温及H-O同位素研究显示成矿流体具变质特征。 $\delta^{18}\text{O}$ 值(19.6‰~21.6‰)符合 Goldfarb et al.(2005)提出的变质地体中造山型金矿中 $\delta^{18}\text{O}$ 一般大于10‰的观点。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ (10.7‰~14.8‰)与显生宙典型造山型金

矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 范围基本一致(7‰~13‰)(Bierlein and Grove, 2000)。流体包裹体特征显示成矿流体具有中低温、低盐度、富 CO_2 特征,流体成分为 $\text{HO}_2\text{-CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2$,具变质流体特征,是造山型金矿成矿流体标志性特征(Goldfarb et al., 2005; 陈衍景等, 2007; Zacharias et al., 2009; Zhou et al., 2014a,b, 2015)。

陈华勇等(2007)、Chen et al.(2012a,b)和周振

表 4 阿沙哇义金矿床与造山型金矿的地质、成矿流体特征对比

Table 4 The geological and ore-fluid features of the Ashawayi gold deposit and their comparison with the orogenic-types gold deposits

对比项目	造山型金矿*	萨瓦亚尔顿金矿	阿沙哇义金矿床	备注
构造背景	造山带	造山带	碰撞造山带	造山型
赋矿地质体	变质体	碎屑岩-碳酸盐岩建造	浅变质沉积建造	造山型
岩性控制	任意岩性	碳质千枚岩、变质岩屑砂岩	含碳千枚岩	造山型
控矿构造	韧性剪切带	韧性剪切带	韧性剪切带	造山型
矿体形态、矿体边界	脉状,边界清楚	脉状,边界清楚	脉状,边界清楚	造山型
矿石类型	石英脉、蚀变岩	石英脉、蚀变岩型	石英脉、蚀变岩型	造山型
矿石矿物组合	黄铁矿为主	黄铁矿、毒砂、辉锑矿、黄铜矿	黄铁矿为主,少量毒砂	造山型
矿化元素组合	Au、Ag、($\pm\text{As}$ 、 Sb 、 Te 、 W 、 Mo 、 Bi 、 B)	Au、Ag、As、Sb、Cu	Au、Ag、As、Sb、Te	造山型
自然金粒度	较粗,可见明金	银金矿、自然金	较细,可见明金	类似
包裹体类型	CO_2 ,含 CO_2 ,水溶液	富 CO_2 的 $\text{H}_2\text{O-NaCl-CO}_2$ 体系	CO_2 ,含 CO_2 ,水溶液	造山型
流体盐度	< 6	13.1~16.6	< 12.5(平均5.4)	造山型
起始流体来源	变质流体	变质流体	变质流体	造山型
主成矿温度	200~500 °C	204~386 °C	225~301 °C(成矿期)	造山型
成矿压力	50~400 Mpa	208~253 MPa	130~160 Mpa(成矿期)	造山型
流体不混溶	有	有	有	造山型

注:*资料来源 Kerrich et al.(2000)和陈衍景(2006)。

菊等(2022)研究认为西南天山最大的萨瓦牙尔顿金矿属于典型的造山型金矿。阿沙哇义金矿与造山型金矿、萨瓦牙尔顿金矿特征标志进行对比分析发现(表4),阿沙哇义金矿床位于西南天山造山带;矿床定位受区域的麦丹他乌复向斜、喀拉铁别克大断裂、喀拉铁克大断裂及上石炭统喀拉治尔加组地层共同控制;矿体受喀拉铁克大断裂控制的次级逆冲断层控制;成矿流体具中低温、低盐度、富含 CO_2 、含有 CH_4 和 N_2 的变质水特征。阿沙哇义金矿成矿地质特征基本符合典型造山型金矿特征,与萨瓦亚尔顿金矿矿床类型及成因基本相似,应属造山型金矿床。

8 结 论

(1)阿沙哇义金矿主要发育 CO_2 - H_2O 、纯 CO_2 包裹体和水溶液包裹体。早期和中期3类包裹体均发育,中期富 CO_2 的 CO_2 - H_2O 、纯 CO_2 及水溶液包裹体明显较早期增多,指示成矿流体富 CO_2 ;晚期仅见水溶液包裹体。

(2)早期包裹体均一温度 $236\sim 386\text{ }^\circ\text{C}$,盐度 $1.6\%\sim 9.7\%$ NaCl eqv.;中期包裹体均一温度 $225\sim 301\text{ }^\circ\text{C}$,盐度 $1.4\%\sim 12.5\%$ NaCl eqv.;晚期包裹体均一温度 $139\sim 222\text{ }^\circ\text{C}$,盐度 $1.4\%\sim 7.3\%$ NaCl eqv。总体来看,流体温度、盐度从早期至晚期呈现减少趋势。

(3)阿沙哇义金矿成矿早期和中期流体包裹体压力分别介于 $140\sim 180\text{ MPa}$ 和 $130\sim 160\text{ MPa}$;对应的成矿深度分别为 $5\sim 7\text{ km}$ 和 $5\sim 6\text{ km}$;对比分析矿床属于典型的中浅成造山型矿床。

(4)流体包裹体研究表明,成矿流体为中温、低盐度、富 CO_2 的 H_2O - NaCl - CO_2 - CH_4 - N_2 体系; H - O 同位素显示成矿流体从早期深源变质流体,经中期变质流体与大气降水混合流体,晚期向浅源大气降水热液演化;流体不混溶和沸腾作用导致了主成矿期矿质的大量沉淀。

致谢:野外工作得到新疆自治区305项目办公室领导和中矿资源勘探股份有限公司赵忠林工程师大力支持; H - O 同位素实验工作得到核工业北京地质研究院张佳老师帮助;论文撰写得到东华理工大学夏菲教授、巫建华教授指导,在此一并感谢!

Reference

Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the

- freezing point depression of H_2O - NaCl solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684.
- Bierlein F P, Crowe D E. 2000. Phanerozoic orogenic lode gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 13: 103-139.
- Chen Bailin. 2001. Calculation of Metallogenic depth of lode gold deposits from mineralization structure-dynamics[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 380-384 (in Chinese with English abstract).
- Chen Bo, Hou Quanlin, Feng Hongye, Guo Hu, Xu Yingxia. 2019. Fluid and sulfide component constraints on the genesis and prospecting implications of the Ashawayi gold deposit, South Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 2086-2104 (in Chinese with English abstract).
- Chen Huayong, Chen Yanjing, Ni Pei, Zhang Zengjie. 2004. Fluid inclusion study of the sawayardun Au deposit in southern TianShan, China implication for ore genesis and exploration[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 46-54 (in Chinese with English abstract).
- Chen Huayong, Chen Yanjing, Ni Pei, Zhang Li, Zhang Zengjie. 2007. Chemical composition of fluid inclusions of Sawayardun gold deposit, Xinjiang: Implications for ore genesis and prediction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2189-2197 (in Chinese with English abstract).
- Chen H Y, Chen Y J, Baker M J. 2012a. Evolution of ore-forming fluids in the Sawayaerdun gold deposit in the Southwestern Chinese Tianshan metallogenic belt, Northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49(3): 131-144.
- Chen H Y, Chen Y J, Baker M J. 2012b. Isotopic geochemistry of the Sawayaerdun orogenic-type gold deposit, Tianshan, northwest China: Implications for ore genesis and mineral exploration[J]. *Chemical Geology*, 310-311(3): 1-11.
- Chen Kui, Tian Xinwen, Yang Guirong, Zhang Yutan. 2007. The geological characteristics and exploration guides at the Ashawayi Gold deposit[J]. *Xinjiang Geology*, 25(4): 384-388 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. *Geology in China*, 33(6): 1181-1196 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, Pirajno F, Lai Yong, Su Wenchao, Zhang Hui. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z L, Wang Z X, Han F B, Zhang W G, Zhang Q, Zhou Z J, Wang X H, Xiao W F, Han S Q, Yu X Q, Sun Y, Nurgazy T, Latyshev N, Zailabidin H. 2017. Late Cretaceous-Cenozoic uplift, deformation, and erosion of the SW Tianshan Mountains in Kyrgyzstan and Western China[J]. *International Geology Review*, 60: 1-19.
- Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical*

- Research, 77: 3057–3067.
- Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity[J]. *Economic Geology*, 74(6): 1435–1444.
- Frimmel H E. 2008. Earth's continental crustal gold endowment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(1/2): 45–55.
- Goldfarb R, Baker T, Dube B, Groves D I, Hart C J, Gosselin P. 2005. Distribution, Character and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes[M]. Society of Economic Geologists, 407–450.
- Hodkiewicz P F, Groves D I, Davidson G J, Weinberg R F, Hagemann S G. 2009. Influence of structural setting on sulphur isotopes in Archean orogenic gold deposits, Eastern Goldfields Province, Yilgarn, Western Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 44(2): 129.
- Huo Hailong. 2019. Late Paleozoic Tectonic Evolution and Magmatism of Southwest Tianshan, Northwest China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science (in Chinese with English abstract).
- Kerrich R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S, Jia Y F. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China (Series D)*, 43: 1–68.
- Lawrence D M, Treloar P J, Rankin A H, Boyce A, Harbidge P. 2013. A fluid inclusion and stable isotope study at the Loulo Mining District, Mali, West Africa: Implications for multifluid sources in the generation of orogenic gold deposits[J]. *Economic Geology*, 108(2): 229–257.
- Liu Benpei, Wang Ziqiang, Zhang Chuanheng, Ma Hongwen, Zhou Hongrui, Zhu Hong. 1996. Tectonic Framework and Evolution in Southwest Tianshan Mountains, China[M]. Wuhan: Publishing House of China University of Geoscience, 1–120 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Li Endong, Long Xunrong, Zheng Minghua, Wang Jiangzhen. 2004. Metallogenic characteristic and epoch of the Bulong gold deposit in Xinjiang, Southwestern Tianshan Mountains[J]. *Geology and Prospecting*, 40(5): 6–11 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Zheng Minghua, Long Xunrong, Yin Huaixin, Wang Jiangzhen, Li Endong, Wang Jin. 2002. Metallogenic characteristics of Sawayaerdun gold deposit in Xinjiang, and their similarities to and differences from those of Muruntau-type gold deposits[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(1): 54–61 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jiajun, Zheng Minghua, Long Xunrong, Zhang Shouting, Song Xiehuo, Gu Tuan. 1999. Redefinition of ore-bearing strata age of Sawaya'erdun gold deposit in Xinjiang and its significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(6): 653–656 (in Chinese).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. 2004. Fluid Inclusion[M]. Beijing: Science Press, 208–222 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Konopelko D, Seltmann R, Lehmann B, Chen W, Wang Y T, Eklund O, Usabaliev. 2004. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. *Economic Geology*, 99(8): 1771–1780.
- Ni P, Wang G G, Chen H, Xu Y F, Guan S J, Pan J Y, Li L. 2015. An Early Paleozoic orogenic gold belt along the Jiangshao fault, South China: Evidence from fluid inclusions and Rb–Sr dating of quartz in the Huangshan and Pingshui deposits[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 87–102.
- Phillips G N, Powell R. 2009. Formation of gold deposits: Review and evaluation of the continuum model[J]. *Earth–Science Reviews*, 94(1/4): 1–21.
- Ridley J R, Diamond L W. 2000. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models[C]//Hagemann S G, Brown P E(eds.). *Reviews in Economic Geology*, 13: 141–162.
- Robert F, Kelly W C. 1987. Ore-forming fluids in Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma Mine, Abitibi Greenstone Belt, Quebec, Canada[J]. *Economic Geology*, 82(6): 1464–1482.
- Sengör A MC, Natalin B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299–307.
- Shepherd T J, Rankin A H, Alderton D H M. 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies[M]. Blackie: Chapman and Hall, 1–239.
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 69(6): 843–883.
- Wang Wensheng. 2009. Xinjiang Aheqi country Machang area ore forming element geochemistry characteristic and with mineralization and to explore the relationship between[J]. *Xinjiang Geology*, 27(2): 141–144 (in Chinese with English abstract).
- Weatherley D K, Henley R W. 2013. Flash vaporization during earthquakes evidenced by gold deposits[J]. *Nature Geoscience*, 6(4): 294–298.
- Wulff K, Dziggel A, Kolb J, Vennemann T, Bottcher M E, Meyer F M. 2010. Origin of mineralizing fluids of the sediment-hosted Navachab gold mine, Namibia: Constraints from stable (O, H, C, S) isotopes[J]. *Economic Geology*, 105(2): 285–302.
- Xu Shuping, Song Jianchao, Song Hemin. 2014. Gold deposit type and metallogenic model of the Bulong Gold Deposit in Southwest Tianshan, Xinjiang[J]. *Gold Science and Technology*, 22(6): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Mo Xuanxue, Dong Lianhui, Gu Xuexiang, Bakhtiar Nurtaev, Nikolay Pak, Zhang Zhaochong, Wang Xinli, Zuo bo, Zhang Guozhen, Feng Bo, Liu Jiaying. 2014a. Asian gold belt in western Tianshan and its dynamic setting, metallogenic control and exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 128–155 (in Chinese).
- Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Mo Xuanxue, Chen Yuchuan, Dong Lianhui, Gu Xuexiang, Zhang Zhaochong, Bakhtiar Nurtaev,

- Nikolay Pak, Li Zhidan, Wang Xinli, Zhang Guozhen, Yaxiaer Yalikun, Feng Bo, Zu bo, Liu Jiaying. 2014b. Tectonic–metallogenic evolution of Western Tianshan giant Au–Cu–Zn–Pb metallogenic belt and prospecting orietation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2490–2531 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Zhang Guozhen, Mo Xuanxue, Gu Xuexiang, Zhao Shumin, Mi Dengjiang, Bakhtiar Nurtaev, Nikolay Pak, Li Zhidan, Wang Xinli, Zu Bo, Yaxiaer Yalikun, Feng Bo. 2015. Metallogenic environments, ore– forming types and prospecting potential of Au– Cu– Zn– Pb resources in Western Tianshan Mountains[J]. *Geology in China*, 42(3): 381– 410 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Zhao Weice, Zhao Yun, Zhang Guochen, Bakhtiar Nurtaev, Nikolay Pak, Mo Xuanxue. 2020. Deformed zone hosted gold deposits in the China–Kazakhstan–Kyrgyzstan–Uzbekistan Tianshan: Metallogenic environment, controlling parameters, and prospecting criteria[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 294–319 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan. 2005. The Metallogenic Environments and Metallogenic Mechanism of Gold Deposits in Southwestern Tianshan Mountains[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Wang Liben, Wang Yitian, Xia Haodong, Deng Hujuan, Ma Boyong. 2004. Ore– forming prospects of gold– antimony metallogenic belt in Southwestern Tianshan Mountain of Xinjiang, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 31(4): 338–344 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xinpeng, Yu Xinqi, Wang Zong xiu, Xiao Weifeng, Zhou Xiang. 2015. Comparative study on ore– forming conditions and sources of the hydrothermal gold deposits in the Chinese Western Tianshan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(4): 633– 646 (in Chinese with English abstract).
- Ye Qingtong, Wu Yiping, Fu Xujie, Chen Mingyong, Ye Jinhua, Zhuang Daoze, Yang Fuquan, Bai Honghai. 1999. Ore– Forming Conditions and Metallogenic Prognosis of Gold and Nonferrous Metallic Resources in Southwestern Tianshan Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1– 201 (in Chinese with English abstract).
- Zacharias J, Paterova B, Pudilova M. 2009. Mineralogy, fluid inclusion, and stable isotope constraints on the genesis of the Roudny Au– Ag deposit, Bohemian Massif[J]. *Economic Geology*, 104(1): 53–72.
- Zhang G Z, Xue C J, Chi G X, Liu J Y, Zhao X B, Zu B, Zhao Y. 2017. Multiple–stage mineralization in the Sawayaerdun orogenic gold deposit, western Tianshan, Xinjiang: Constraints from paragenesis, EMPA analyses, Re–Os dating of pyrite (arsenopyrite) and U–Pb dating of zircon from the host rocks[J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 326–341.
- Zhang Tao, Chen Zhengle, Huang Hongye, Zhang Wengao, Zhang Qing, Pan Jiayong, Zhou Zhenju, Zou Mingliang, Feng Hongye, Wang Xiaohu, Han Fengbin, Sun Yue, Huo Hailong, Ma Ji, Yang Bin. 2020. Geochemical characteristics of gold– bearing minerals and its geological significance in the Ashawayi gold deposit in the southwestern Tianshan orogen[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(3): 443–458 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Dong Shuyun, Huang He, Ma Letian, Zhang Dongyang, Zhang Shu, Xue Chunji. 2009. Geology and geochemistry of the Permian intermediate– acid intrusions in the southwestern Tianshan, Xinjiang, China: Implications for petrogenesis and tectonics[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1827–1839 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Minghua, Zhang Shouting, Liu Jiajun. 2001. Geological Background and Metallogenic Mechanism of the Mulongtao Gold Deposit in Tianshan, Southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zhao C, Ni, P, Wang G G, Ding J Y, Chen H, Zhao K D, Cai Y T, Xu Y F. 2013. Geology, fluid inclusion, and isotope constraints on ore genesis of the Neoproterozoic Jinshan orogenic gold deposit, South China[J]. *Geofluids*, 13(4): 506–527.
- Zhou Zhenju, Jiang Shaoyong, Qin Yan, Zhao Haiyan, Hu Chunjie. 2011. Fluid inclusion characteristics and ore genesis of the Wenyu gold deposit, Xiaoqinling gold belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3787–3799.
- Zhou Zhenju, Chen Zhengle, Zhang Wengao, Zhang Tao, Zhang Qing, Han Fengbin, Huo Hailong, Yang Bin, Ma Ji, Wang Wei, Wang Cheng, Liu Xianjun. 2022. Structural deformation and fluid evolution associated with the formation of the Sawayardun gold deposit in southwestern Tianshan orogen[J]. *Geology in China*, 49(1): 181–200 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z J, Chen Y J, Jiang S Y, Zhao H X, Qin Y, Hu C J. 2014a. Geology, geochemistry and ore genesis of the Wenyu gold deposit, Xiaoqinling gold field, Qinling Orogen, southern margin of North China Craton [J]. *Ore Geology Reviews*, 59: 1–20.
- Zhou Z J, Lin Z W, Qin Y. 2014b. Geology, geochemistry and genesis of the Huachanggou gold deposit, western Qinling Orogen, central China[J]. *Geological Journal*, 49: 424–441.
- Zhou Z J, Chen Y J, Jiang S Y, Hu C J, Qin Y, Zhao H X. 2015. Isotope and fluid inclusion geochemistry and ore genesis of the Qiangma gold deposit, Xiaoqinling gold field, Qinling Orogen, southern margin of North China Craton[J]. *Ore Geology Reviews*, 66: 47–64.
- Zhou Z J, Chen Z L, Han F B, Han S Q, Wang Z X, Xiao W F, Shen T, Wu J J. 2018. Fluid inclusion and isotope geochemistry of the Atebayue Sb deposit, South Tianshan Orogen, Kyrgyzstan[J]. *Geological Journal*, 53: 1050–1060.
- Zhu Yongfeng, He Guoqi, An Fang. 2007a. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(9): 1167– 1177 (in

- Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, Wang Tao, Xu Xin. 2007b. Progress of geology study in Xinjiang and its adjacent regions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1785–1794 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈柏林. 2001. 从成矿构造动力学探讨脉状金矿床成矿深度[J]. *地质科学*, 36(3): 380–384.
- 陈博, 侯泉林, 冯宏业, 郭虎, 许英霞. 2019. 新疆南天山阿沙哇义金矿床的成因与找矿启示:来自流体和硫化物成分的限定[J]. *岩石学报*, 35(7): 2086–2104.
- 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 张增杰. 2004. 南天山萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体研究:矿床成因和勘探意义[J]. *矿物岩石*, 24(3): 46–54.
- 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 张莉, 张增杰. 2007. 新疆萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体成分、矿床成因和成矿预测[J]. *岩石学报*, 23(9): 2189–2197.
- 陈奎, 田新文, 杨桂荣, 张玉坛. 2007. 阿沙哇义金矿地质特征及找矿标志[J]. *新疆地质*, 25(4): 384–388.
- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 33(6): 1181–1196.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿床的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2085–2108.
- 霍海龙. 2019. 西南天山晚古生代构造变形与岩浆作用[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 刘本培, 王自强, 张传恒, 马鸿文, 周洪瑞, 朱鸿. 1996. 西南天山构造格局与演化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 刘家军, 郑明华, 龙训荣, 张寿庭, 宋谢火, 谷团. 1999. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床赋矿地层的重新厘定及其意义[J]. *科学通报*, 44(6): 653–656.
- 刘家军, 郑明华, 龙训荣, 尹怀信, 王奖臻, 李恩东, 王进. 2002. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床成矿特征及其与穆龙套型金矿床的异同性[J]. *矿物学报*, 22(1): 54–61.
- 刘家军, 李恩东, 龙训荣, 郑明华, 王奖臻. 2004. 新疆布隆金矿床的成矿特征与成矿时代[J]. *地质与勘探*, 40(5): 6–11.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 208–222.
- 王文胜. 2009. 新疆阿合奇马场地区地球化学特征及与成矿关系探讨[J]. *新疆地质*, 27(2): 141–144.
- 徐述平, 宋建潮, 宋贺民. 2014. 新疆西南天山布隆金矿床类型与成矿模式[J]. *黄金科学技术*, 22(6): 7–11.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 董连慧, 顾雪祥, Bakhtiar Nurtaev, Nikolay Pak, 张招崇, 王新利, 俎波, 张国震, 冯博, 刘家瑛. 2014a. 西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿[J]. *地质前缘*, 21(5): 128–155.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 陈毓川, 董连慧, 顾雪祥, 张招崇, Bakhtiar Nurtaev, Nikolay Pak, 李志丹, 王新利, 张国震, 亚复尔亚力坤, 冯博, 俎波, 刘家瑛. 2014b. 西天山巨型金铜铅锌成矿带构造成矿演化和找矿方向[J]. *地质学报*, 88(12): 2490–2531.
- 薛春纪, 赵晓波, 张国震, 莫宣学, 顾雪祥, 董连慧, 赵树铭, 米舜江, Bakhtiar Nurtaev, Nikolay Pak, 李志丹, 王新利, 俎波, 亚复尔亚力坤, 冯博. 2015. 西天山金铜多金属重要成矿类型、成矿环境及找矿潜力[J]. *中国地质*, 42(3): 381–410.
- 薛春纪, 赵晓波, 赵伟策, 赵云, 张国震, Bakhtiar Nurtaev, Nikolay PAK, 莫宣学. 2020. 中-哈-吉-乌天山山变形带容矿金矿床:成矿环境和控矿要素与找矿标志[J]. *地质前缘*, 27(2): 302–327.
- 杨富全. 2005. 西南天山金矿成矿条件及成矿机制[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 杨富全, 王立本, 王义天, 夏浩东, 邓会娟, 马伯永. 2004. 西南天山金锑成矿带成矿远景[J]. *成都理工大学学报*. 31(4): 338–344.
- 杨鑫朋, 余心起, 王宗秀, 肖伟峰, 周翔. 2015. 西天山成矿带热液型金矿成矿地质条件及成矿物质来源对比[J]. *大地构造与成矿学*, 39(4): 633–646.
- 叶庆同, 吴一平, 傅旭杰, 陈明勇, 叶锦华, 庄道泽, 杨富全, 白洪海. 1999. 西南天山金和有色金属矿床成矿条件和矿床预测[M]. 北京: 地质出版社, 1–201.
- 张涛, 陈正乐, 黄宏业, 张文高, 张青, 潘家永, 周振菊, 邹明亮, 冯宏业, 王晓虎, 韩凤彬, 孙岳, 霍海龙, 马骥, 杨斌. 2020. 西南天山阿沙哇义金矿载金矿物地球化学特征及地质意义[J]. *地质力学学报*, 26(3): 443–458.
- 张招崇, 董书云, 黄河, 马乐天, 张东阳, 张舒, 薛春纪. 2009. 西南天山二叠纪中酸性侵入岩的地质学和地球化学:岩石成因和构造背景[J]. *地质通报*, 28(12): 1827–1839.
- 郑明华, 张寿庭, 刘家军. 2001. 西南天山穆龙套型金矿床产出地质背景与成矿机制[M]. 北京: 地质出版社.
- 周振菊, 蒋少涌, 秦艳, 赵海香, 胡春杰. 2011. 小秦岭文峪金矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. *岩石学报*, 27(12): 3787–3799.
- 周振菊, 陈正乐, 张文高, 张涛, 张青, 韩凤彬, 霍海龙, 杨斌, 马骥, 王威, 王成, 柳献军. 2022. 西南天山萨瓦亚尔顿金矿床构造-流体控矿作用研究[J]. *中国地质*, 49(1): 181–200.
- 朱永峰, 何国琦, 安芳. 2007a. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律[J]. *地质通报*, 26(9): 1167–1177.
- 朱永峰, 王涛, 徐新. 2007b. 新疆及邻区地质与矿产研究进展[J]. *岩石学报*, 23(8): 1785–1794.