

doi: 10.12029/gc20220111

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.

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 Sawyardun gold deposit in Southwestern Tianshan Orogen[J]. Geology in China, 49(1): 181-200(in Chinese with English abstract).

## 西南天山萨瓦亚尔顿金矿床构造-流体控矿作用研究

周振菊<sup>1,2</sup>, 陈正乐<sup>1,2,3</sup>, 张文高<sup>1,2</sup>, 张涛<sup>3</sup>, 张青<sup>1,2</sup>, 韩凤彬<sup>1,2</sup>,  
霍海龙<sup>1,2</sup>, 杨斌<sup>3</sup>, 马骥<sup>3</sup>, 王威<sup>4</sup>, 王成<sup>4</sup>, 柳献军<sup>4</sup>

(1. 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; 2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081; 3. 东华理工大学, 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 4. 新疆维吾尔自治区人民政府国家三〇五项目办公室, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**【研究目的】构造-流体与成矿的耦合关系属于目前矿床学研究的前沿问题, 造山型金矿作为典型受构造变形控制的热液矿床, 是窥探构造-流体与成矿作用内在联系的理想研究对象。【研究方法】萨瓦亚尔顿金矿床是西南天山地区规模最大的造山型金矿, 通过野外构造解析, 流体包裹体和 C-H-O-S 同位素地球化学数据, 研究矿区的构造变形特征, 分析成矿流体性质及其成矿物质来源。【研究结果】矿区变形可分 3 期: 早期为韧性变形、中期为脆-韧性变形、晚期为脆性变形。根据脉体穿切关系和变形特征, 识别出 3 期与构造相对应的石英脉(Qz1, Qz2, Qz3), 其中 Qz2 为含金石英脉体, 金矿主要形成于第二期的脆-韧性变形期。室内观测发现, 早、中期石英中发育 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 型、纯 CO<sub>2</sub> 型和 H<sub>2</sub>O 溶液型 3 种类型流体包裹体, 晚期仅发育水溶液型包裹体。早期石英中包裹体均一温度为 237~386°C, 盐度为 1.4%~9.2% NaCl equiv.; 中期石英获得 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 和水溶液包裹体均一温度为 204~310°C, 盐度为 0.5%~16.6% NaCl equiv.; 晚期水溶液包裹体具有较低的均一温度(125~235°C)和盐度(0.2%~10.6% NaCl equiv.)。根据 CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 型包裹体计算早、中期的流体压力分别为 267 MPa 和 208~253 MPa, 对应形成的深度分别为 10 km, 8~9 km。同位素分析结果揭示, 成矿的流体具有变质流体以及大气降水的特征, 成矿物质主要来源于赋矿地层-古生代碎屑岩-碳酸盐岩建造。【结论】萨瓦亚尔顿金矿床晚古生代经历了早期挤压向晚期走滑伸展的转变; 早期 NW-SE 向的挤压作用促使地层变质脱水产生了大量富 CO<sub>2</sub>、低盐度的变质流体, 形成无矿石英脉; 在构造变形转向走滑伸展时, 造山带抬升剥蚀, 流体压力降低并发生不混溶或沸腾作用, CO<sub>2</sub> 等气体逃逸, 诱发浅源大气降水加入并与变质热液混合, 导致大量成矿物质快速沉淀成矿。

**关键词:** 造山型金矿床; 构造; 流体; 矿产资源勘查工程; 萨瓦亚尔顿; 西南天山

**创新点:** 萨瓦亚尔顿金矿晚古生代经历了两期变形作用, 成矿主要与晚期变形密切相关; 结合成矿作用特征研究, 建立了萨瓦亚尔顿金矿构造-流体与成矿模式图。

中图分类号: P618.51 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)01-0181-20

## Structural deformation and fluid evolution associated with the formation of the Sawyardun gold deposit in Southwestern Tianshan Orogen

收稿日期: 2019-12-19; 改回日期: 2020-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772085, U1803242, U1403292)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2018YFC0604005, 2015BAB05B04)和中国地质调查局基本科研业务费(JYYWF20183702, JYYWF20180602)联合资助。

作者简介: 周振菊, 女, 1984 年生, 副研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业; 主要从事矿床地质和矿床地球化学研究;

E-mail: zhenjuzhou@126.com。

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

ZHOU Zhenju<sup>1,2</sup>, CHEN Zhengle<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wengao<sup>1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>3</sup>, ZHANG Qing<sup>1,2</sup>,  
HAN Fengbin<sup>1,2</sup>, HUO Hailong<sup>1,2</sup>, YANG Bin<sup>3</sup>, MA Ji<sup>3</sup>, WANG Wei<sup>4</sup>, WANG Cheng<sup>4</sup>, LIU Xianjun<sup>4</sup>

(1. *Laboratory of Dynamic Diagenesis and Metallogenesis, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081, China*; 2. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing, 100081, China*; 3. *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, 330013, Jiangxi, China*; 4. *National 305 Project Office, Xinjiang, 830000, Urumqi, China*)

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

**[Objective]** The relationship between structure–fluid and mineralization is a frontier problem in modern study of mineral deposit. The orogenic–type gold deposits are hosted in fault zone, and are representative target to study structural deformation and fluid evolution responsible for mineralization process. **[Methods]** The Sawayardun orogenic–type gold lode system is the largest gold deposit in the Southwestern Tianshan Orogen, northwestern China. Basing on results of structural analysis, fluid inclusions and C–H–O–S isotope, natures of ore–controlling structure and ore–fluid, and metal source were studied. **[Results]** The structural deformation at the Sawayardun mine can be divided into the early ductile, middle ductile–brittle, and late brittle stages, according to the crosscutting relationships of veins, and macro and micro structures. The three–stage deformation process associated with three kinds of quartz veins (Qz1, Qz2, Qz3) from early to late, with gold mineralization being mainly introduced in middle stage. Quartz formed in the early and middle stages (Qz1 and Qz2) contains three compositional types of fluid inclusions, i.e. pure CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O and NaCl–H<sub>2</sub>O, but the late–stage minerals only contain the NaCl–H<sub>2</sub>O inclusions. The inclusions trapped in the early, middle and late stages yield total homogenization temperatures of 237° C–386° C, 204° C–310° C, and 125° C–235° C, respectively, with corresponding salinities of 1.4–9.2, 0.5–16.6, and 0.2%–10.6 % NaCl equiv., respectively. The minimum trapping pressures estimated from CO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O inclusions are 267 MPa and 208–253 MPa in the early and middle stages, corresponding to lithostatic depths of 10 km and 8–9 km, respectively. The isotope systematics shows the nature of metamorphic and meteoric fluids and the hostrocks (Palaeozoic clastic and carbonate sediments) to be a significant source of ore metals. **[Conclusions]** The structural deformation features at Sawayardun indicate that the mineralization was associated with the tectonic transition from the early NW–SE–trending compression to the late strike–slip extension. The early compression caused the metamorphism and metamorphic dehydration of the Palaeozoic clastic and carbonate sedimentary rocks, resulting in the formation of the low salinity, CO<sub>2</sub>–rich fluids and the early–stage barren quartz veins. Coupling with the tectonic transition from compression to strike–slip extension, the crust was rapidly uplifted and eroded, the fluid system depressurized and boiled, and mixed with and input by and mixed with the meteoric water, causing rapid escape of gases such as CO<sub>2</sub> and deposition of ore–metals such as Au.

**Key words:** Orogenic gold deposit; structure; fluid; mineral exploration engineering; Sawayardun; Southwestern Tianshan Orogen

**Highlights:** The structural deformation at Sawayardun comprises two stages: pre–ore NW–SE–trending compression and syn–ore strike–slip extension; Combined with the study on the characteristics of ore–forming processes, the structure–fluid and metallogenic model for the Sawayardun deposit is established.

**About the first author:** ZHOU Zhenju, female, born in 1984, associate researcher, mainly engaged in mineralogy, petrology, mineral geology; E–mail: zhenjuzhou@126.com

**About the corresponding author:** CHEN Zhengle, male, born in 1967, researcher, mainly engaged in structural geology; E–mail: chenzhengle@263.net.

**Fund support:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41772085, No.U1803242, No.U1403292), and National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (No.2018YFC0604005, No. 2015BAB05B04), and the projects of China Geological Survey (No.JYYWF20183702, No. JYYWF20180602).

# 1 引言

西南天山造山带自太古宙以来经历了多期次的俯冲、碰撞造山作用(刘本培等, 1996; 叶庆同等, 1999; 张招崇等, 2009), 构造-热液活动强烈, 发育多类型的热液成矿系统, 尤其以晚古生代造山型金矿床而独具特色。近年来, 随着基础地质研究与矿产资源勘查工作的进行, 西南天山地区的金矿勘查不断取得重大进展, 先后发现了特大型萨瓦亚尔顿金矿, 中型阿沙哇义金矿, 小型布隆和大小山口金矿, 及萨根托亥、艾西麦、卡恰等金矿点。萨瓦亚尔顿金矿作为中国南疆最大的金矿, 前人对其矿床地质特征(陈华勇等, 2004, 2007; 杨富全等, 2004, 2005, 2007; 薛春纪等, 2014, 2015)、成矿流体(郑明华等, 2002; Chen et al., 2012a)、成矿物质来源(Chen et al., 2012b)及成岩成矿时代(刘家军等, 1999, 2002; 陈富文和李华芹, 2003; 杨富全等, 2006; Zhang et al., 2017)等方面开展了研究, 取得了许多重要成果, 但是对成矿物质和流体来源始终存在争议, 同

时在控矿构造等方面研究也相对较薄弱。鉴于此, 本文选取了西南天山规模最大的萨瓦亚尔顿金矿, 通过详细的野外地质调查, 查明了控矿构造特征, 并着重结合矿床流体包裹体和C-H-O-S同位素研究, 分析了成矿流体性质及其成矿物质来源, 总结成矿规律, 建立成矿模式和构造控矿模型, 以期为进一步探讨构造-流体与成矿作用的耦合机理, 也为指导矿区下一步的勘探开发提供依据。

# 2 区域地质背景

天山造山带自北向南包括了北天山、中天山、南天山3个构造单元(图1a), 不同构造单元之间均为深大断裂, 自北向南分别为Nikolaev—那拉提北缘断裂、Atbash—Inlychek—那拉提南缘断裂。西南天山造山带位于Atbash—Inlychek—那拉提南缘断裂南侧, 处于塔里木和哈萨克斯坦—准噶尔板块之间(图1a), 记录了塔里木板块与西伯利亚板块最终拼合的过程(Sengör et al., 1993; Chen et al., 2017; Zhou et al., 2018)。西南天山通过早古生代南天山

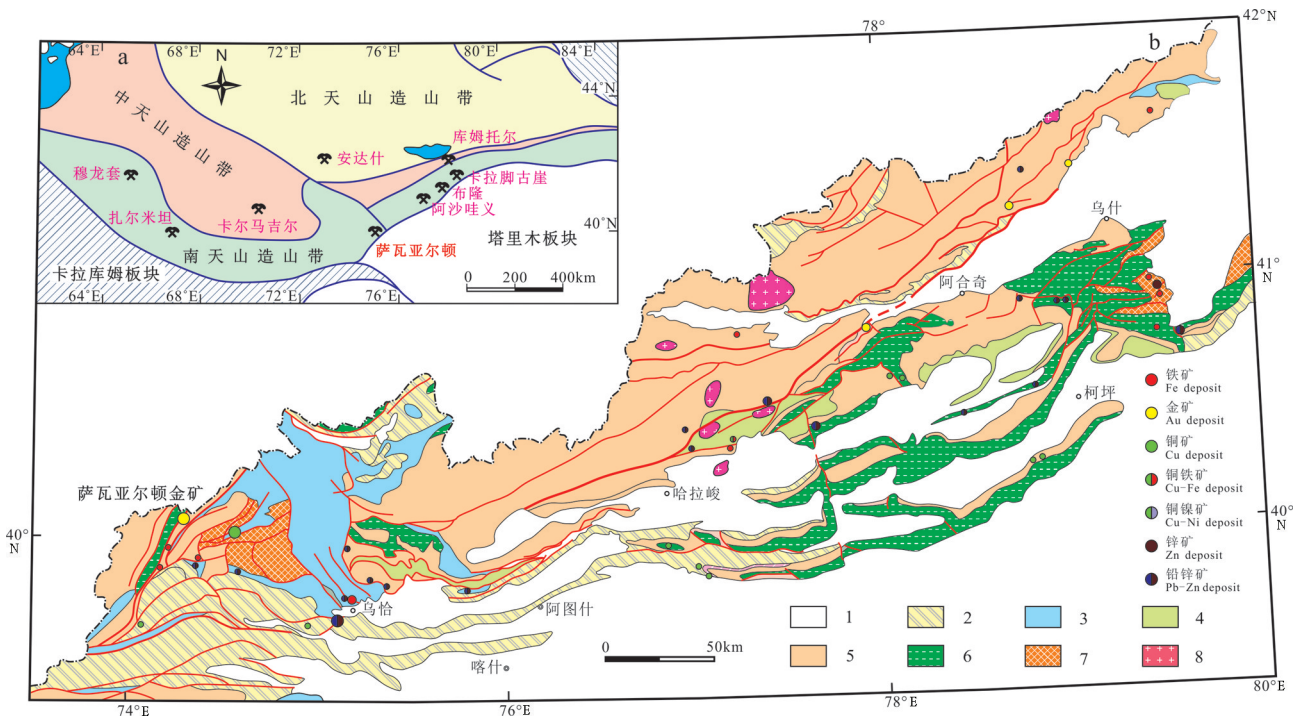


图1 天山造山带构造简图(a, 据 Zhang et al., 2017 修改)及西南天山区域地质及矿床分布示意图(b)

1—第四系; 2—新近系—古近系; 3—中生界; 4—二叠系; 5—石炭—泥盆系; 6—下古生界; 7—前寒武系; 8—花岗岩

Fig. 1 Tectonic map of deposits of the Tianshan Orogen (a, modified from Zhang et al., 2017) and geology and distribution of deposits of the Southwestern Tianshan Orogen (b)

1—Quaternary; 2—Neogene—Paleogene; 3—Mesozoic; 4—Permian; 5—Carboniferous—Devonian; 6—Lower Paleozoic; 7—Precambrian; 8—Granite

大洋的俯冲增生和晚古生代陆陆碰撞作用形成,中新生代又受到陆内挤压与褶皱断裂作用的改造(刘本培等, 1996; 叶庆同等, 1999)。西南天山造山带地层由前寒武纪基底和古生界、中生界盖层组成(图1b)。西南天山发育多条区域性的断裂带和蛇绿岩带,包括阔克萨彦岭—巴雷公蛇绿混杂岩带、乌恰—库尔勒断裂带、塔拉斯—费尔干纳断裂、托什干断裂以及其他一些次级断裂,控制了本区金矿床(如萨瓦亚尔顿、布隆、阿沙哇义、卡拉脚古崖等)和岩脉的产出分布。区域岩浆活动较弱,主要以侵入岩为主(图1b)。

### 3 矿区地质特征

萨瓦亚尔顿金矿床位于新疆乌恰县东阿赖山北部,处于西南天山造山带西端(图1),即塔里木板块北缘活动带与伊犁—伊塞克湖微板块的交接部位。矿区出露地层有志留系、泥盆系、石炭系、白垩系和第四系(图2;新疆地质矿产勘查开发局第二地质大队, 2015)。上志留统塔尔特库里组出露于矿区中西部,由一套浅变质碎屑岩组成,从下到上可划分出4个岩性段:第一段( $S_3t^1$ )为千枚岩夹变质砂岩;第二段( $S_3t^2$ )以石英砂岩为主,夹少量千枚岩;第三段( $S_3t^3$ )以千枚岩、变质砂岩为主,夹板岩、变质粉砂岩;第四段( $S_3t^4$ )以硅质(板)岩、千枚岩、变质粉砂岩为主,夹变质砂岩、斑点板岩。泥盆系出露地层为下统沙尔组( $D_{1s}$ )、萨瓦亚尔顿组( $D_{1sw}$ )和中统托格买提组( $D_{2t}$ )。下泥盆统为一套半深海—深海相复理石建造,由中厚层状变质砂岩和薄层状含炭千枚岩组成。沙尔组( $D_{1s}$ )岩性主要为变砂岩、变质石英杂砂岩、变质岩屑砂岩夹千枚岩,硅质岩。萨瓦亚尔顿组( $D_{1sw}$ )主要由薄层状炭质千枚岩,中厚层状变质岩屑砂岩交互组成,是金矿主要的赋矿地层。托格买提组( $D_{2t}$ )为一套碳酸盐岩夹碎屑岩建造。石炭纪地层由一套海相碎屑岩—碳酸盐岩组成,可划分为下石炭统巴什索贡组( $C_1b$ )、上石炭统别根他乌组( $C_2b$ )和康克林组( $C_2k$ ),岩性主要为变石英砂岩、板岩、灰岩、千枚岩等(图2)。下白垩统江额结尔组( $K_j$ ),为陆相红色碎屑岩建造。

矿区断裂和褶皱构造发育,构造线以北北东—北东向为主,延伸数十至数百千米。萨瓦亚尔顿金矿床东为阿热克托如克断裂(F18;图2),西为伊

尔克什坦断裂(F12;图2),二者皆为倾向NW的逆冲断裂,两断裂之间发育了一系列次级层间断裂带和韧性剪切带。其中,F15断层具韧性剪切带性质,总体走向北东—南西,一般为 $20^\circ\sim 45^\circ$ ,倾向 $290^\circ\sim 315^\circ$ ,倾角 $42^\circ\sim 88^\circ$ ,断层内发育构造透镜体、褶曲、A型褶皱、节理、劈理、片理、摩擦镜面、糜棱岩、碎裂岩(马天林等, 1999)。F15断层控制了萨瓦亚尔顿金矿IV矿体的定位,使金矿体产于其上盘的更次级构造中(图3),并与次级断裂产状近乎一致。

褶皱主要分布于下泥盆统萨瓦亚尔顿组( $D_{1sw}$ )中,由一系列NE向近平行的背斜和向斜组成。鞘褶皱、A型褶皱在矿区各地层及金矿化破碎带中均为发育,多为韧性剪切挤压带的产物。

矿区岩浆活动微弱,未见大的侵入岩体,但在志留纪地层中及沿断裂带有少量超基性岩(变质橄榄岩)、变质辉长辉绿岩、基性熔岩(玄武岩、细碧岩)、安山岩、基性火山角砾岩等透镜体,共同组成蛇绿杂岩(图2;王德贵, 2000;徐学义等, 2003),为晚古生代塔里木板块北缘拉张形成洋盆消减的产物。

矿区已发现的24条矿化带受NE—NNE向断裂破碎带控制,矿化带由比较密集的含金石英细脉和蚀变岩组成,以I、II、IV、XI矿化带最重要(图2)。IV号矿化带规模最大,长 $>4000\text{ m}$ ,宽 $15\sim 200\text{ m}$ ,金品位为 $1.44\sim 5.92\text{ g/t}$ 。矿体总体呈脉状或透镜状展布(图2,图3)。围岩蚀变主要有黄铁矿化、毒砂化、硅化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化。矿石矿物主要有黄铁矿、毒砂、辉锑矿、黄铜矿、脆硫锑铅矿,少量的磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、银金矿。金主要以银金矿和自然金的形式出现在黄铁矿和毒砂的裂隙中,或以包裹体形式出现在黄铁矿、毒砂和石英的包裹体等矿物中。脉石矿物主要有石英、绿泥石、方解石、菱铁矿、绢云母等。矿石结构主要有自形—半自形结构、他形晶结构、充填结构、包含结构、固溶体分解结构、交代结构和压碎结构等。矿石构造主要有条带状、浸染状、块状、细脉状、网脉状和角砾状构造等。

结合前人的分析(马天林等, 1999;陈华勇等, 2004)和野外调查及室内分析,发现矿区构造格架是一个在区域褶皱基础上叠加一套从韧性到脆性断裂系列的北东向褶皱断带,矿区晚古生代的变形至少可以分为3期:早期为韧性变形,早古生代地层发

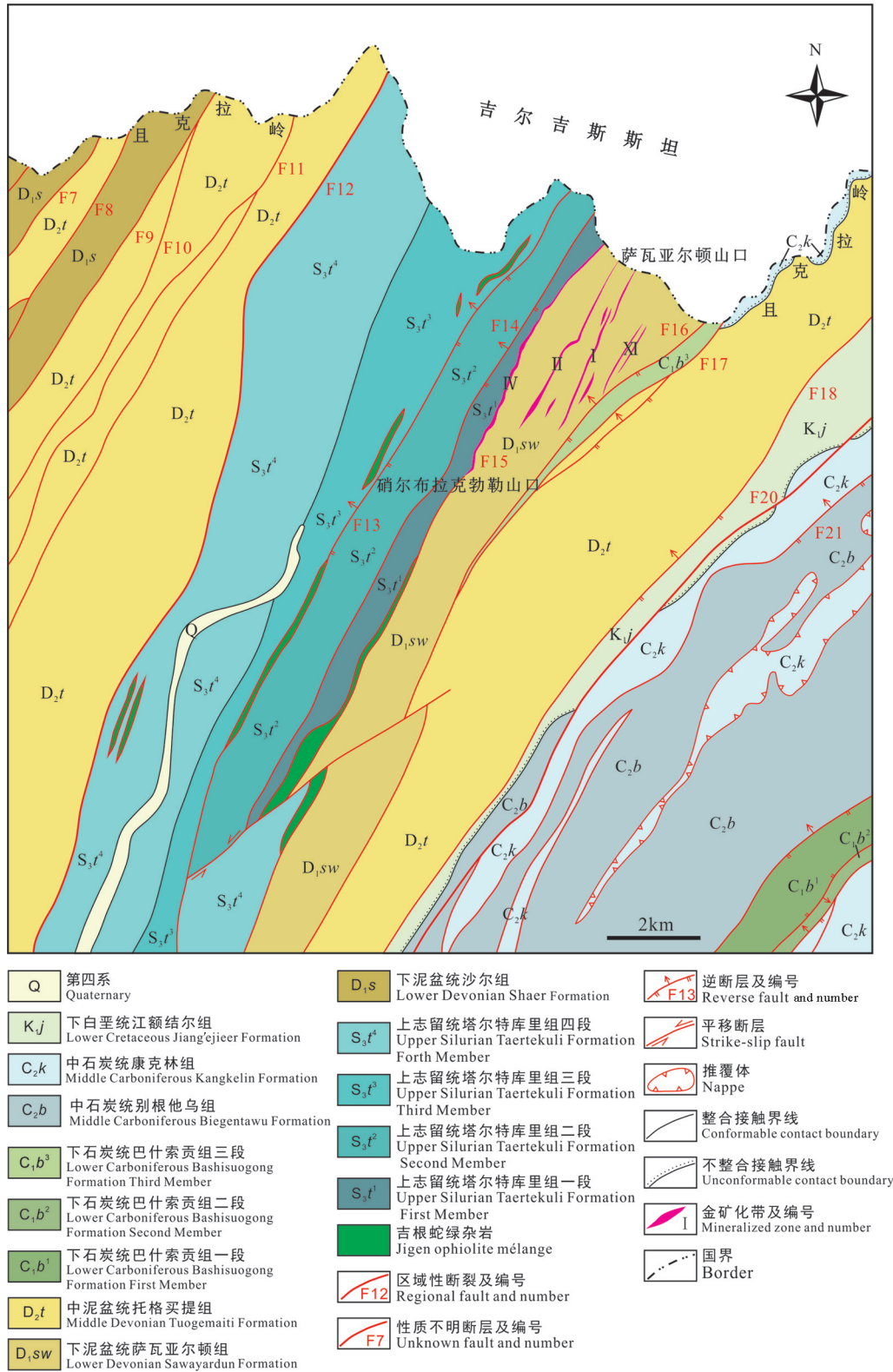


图2 萨瓦亚尔顿金矿区地质简图

(据新疆地质矿产勘查开发局第二地质大队, 2015, 有修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Sawayardun gold deposit

(modified from Geological Team No. 2, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2015)

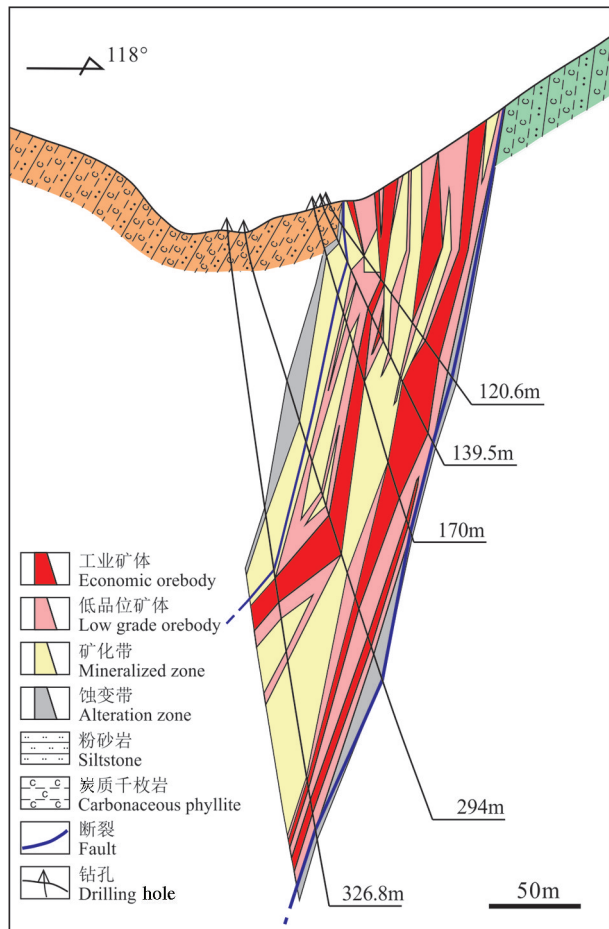


图3 萨瓦亚尔顿金矿IV号矿化带23勘探线剖面图  
(据新疆地质矿产勘查开发局第二地质大队, 2015, 有修改)

Fig.3 Geological section of No.23 prospecting line of No. IV mineralized zone at the Sawayardun gold deposit (modified from Geological Team No. 2, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, 2015)

生强烈的褶皱变形,发育了区域性的韧性断裂带(以F15断裂带为代表),形成了一系列区域性北东-南西向的褶皱-断裂构造带,伴随发育了A型褶皱和鞘褶皱;中期为韧-脆性变形,表现为北东向韧性断裂带上叠加出现脆性破裂,发育透镜体化的石英脉和断层碎裂岩;晚期变形为脆性,主要发育一些斜切早古生代碎屑岩层、褶皱或韧性剪切带的小型破碎带或裂隙,其内部分充填石英脉(图4)。

根据石英脉穿插关系和含矿情况及其矿体等特征,发现韧性变形在成矿之前,金成矿主要与第二期的韧-脆性变形密切相关(图4,图5)。综合构造变形特征、脉体穿插关系、石英脉的微观变形特征及其矿物共生组合等,可将矿床的成矿过程划分

出3个阶段。

(1) 早期以石英-黄铁矿组合为特征(图4a、b;图5a),石英脉较厚(图3b),一般平行含炭千枚岩面理(图4d)。这些脉通常变形呈透镜状、石香肠状和小褶皱(图4a,图5a),其形成与区域变质作用和韧性挤压变形有关。石英呈乳白色,但普遍遭受韧性剪切作用,具亚颗粒、波状消光等特征(图5e),部分破碎呈角砾状。黄铁矿集合体形成透镜体(图5g)或因后期构造作用而发生碎裂,部分为后期的金属硫化物所交代。

(2) 中期为石英-多金属硫化物阶段(图4c,图5f、h),是金矿化最重要的阶段,主要形成多金属硫化物石英细脉和网脉,顺层或切层分布。以黄铁矿-自然金-毒砂-辉锑矿-黄铜矿组合为特征,毒砂呈浸染状分布在石英脉中。该阶段石英多呈烟灰色(图5b、c),透明度较差。

(3) 晚期以发育石英-碳酸盐细脉为特征(图4d),该阶段石英多呈纯白色(图5d),含少量黄铁矿。细脉多沿张性裂隙充填,或切穿前期石英脉(图4d,图5f),发育晶洞构造。

## 4 样品和测试

### 4.1 测试样品

本次流体包裹体研究对象为早期同构造石英,中期与硫化物共生的烟灰色石英以及晚期张性裂隙充填的白色石英。先将样品磨制成厚度约0.2 mm、双面抛光的薄片进行流体包裹体岩相学观察,然后选择其中12件代表性样品(早期3件,中期4件,晚期5件)进行显微测温和激光拉曼分析。将通过显微镜薄片研究而选出的28件样品粉碎至20~40目或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%的石英和硫化物样品进行同位素分析。

### 4.2 流体包裹体显微测温和激光拉曼分析

流体包裹体显微测温研究在中国地质科学院地质力学研究所动力成岩成矿实验室的流体包裹体实验室完成,使用仪器为Linkam THMS 600型冷热台,温度范围是-196℃~+600℃,以美国FLUID INC公司的合成流体包裹体标准样品标定冷热台温度。测温过程中的升温速率为10~20℃/min,相转变温度附近的升温速率降低0.2~0.5℃/min;分析

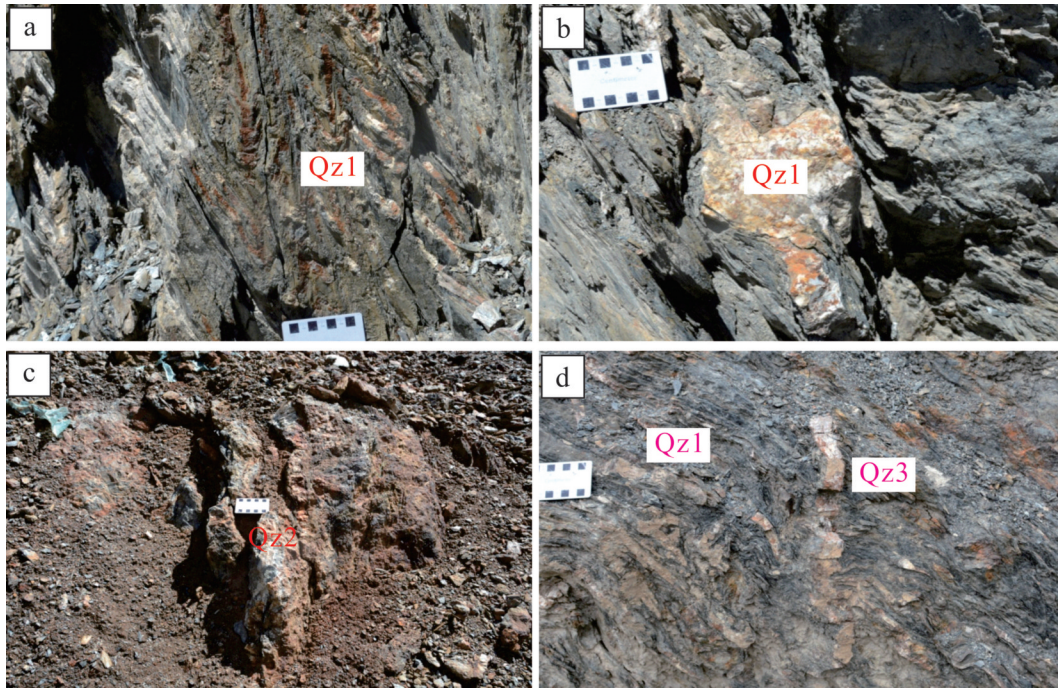


图4 萨瓦亚尔顿金矿野外照片

a—韧性变形的炭质千枚岩,早期石英脉变形呈小褶皱(镜头朝向东北);b—早期韧性变形的强片理化千枚岩及内部发育的早期石英脉;  
c—成矿期韧性矿化蚀变带;d—晚期脆性变形,发育石英细脉切穿前期构造

Fig. 4 Field photos of the Sawayardun gold deposit

a—Ductile deformed carbonaceous phyllite with small folds of early quartz vein deformation (camera faces northeast); b—Early-stage quartz occurring in carbonaceous phyllite in early ductile deformation stage; c—Ductile and brittle mineralized alteration zone during gold metallogenic period; d—Quartz veinlets crosscutting the earlier formed quartz veins in late brittle deformation stage

精度在 $<30^{\circ}\text{C}$ 时为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ,在 $30\sim 300^{\circ}\text{C}$ 区间为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,在 $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ 区间为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

单个流体包裹体的激光拉曼光谱分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心激光拉曼室完成,使用仪器为LAB-HR-VIS LabRAM HR800型激光拉曼光谱仪,采用532 nm的Ar原子激光束,光谱的计数时间为30 s,扫描次数为一次,扫描范围为 $1000\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ ,光谱分辨率为 $2\text{ cm}^{-1}$ 。

$\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 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的冰点温度,利用Bodnar (1993)提供的方程计算得到(卢焕章等, 2004)。

#### 4.3 O-H-C-S同位素分析

石英氧同位素分析。将挑选的石英样品研磨至200目,干燥后取样品10~30 mg,于 $550\sim 700^{\circ}\text{C}$ 与纯 $\text{BrF}_5$ 恒温反应而获得氧气,用组合冷阱分离 $\text{SiF}_4$ 、 $\text{BrF}_3$ 等杂质组分获得纯净的 $\text{O}_2$ 。将纯化后的氧气在 $700^{\circ}\text{C}$ 铂催化作用下与碳棒逐级反应,逐一收集反应生成的 $\text{CO}_2$ 气体,然后送质谱测试。

石英矿物流体包裹体氢同位素测试。先将石英样品进行低温烘干,去除矿物表面的吸附水,然后在真空系统中加热逐步去除次生包裹体,加热至 $600^{\circ}\text{C}$ 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,然后用锌置换水中的氢,进而对获得 $\text{H}_2$ 进行质谱分析。

石英矿物流体包裹体碳同位素分析。将石英样品烘干,置于真空系统,逐步加热,抽走次生包裹体爆裂产生的气体,然后加热至 $600^{\circ}\text{C}$ 使包裹体爆裂,用组合冷阱分离出二氧化碳,然后送质谱测试。

碳氢氧同位素质谱测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成。石英氧同位素、包裹体氢同位素和碳同位素采用MAT253EM型质谱测试。碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 以PDB标准报出, $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均以SMOW标准报出。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 分析误差均分别优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 、 $\pm 2\text{‰}$ 、 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

黄铁矿和毒砂硫同位素测试。首先将硫化物样品与氧化亚铜按质量比1:10混合,并研磨至200目左右,然后在真空达 $2.0\times 10^{-2}\text{ Pa}$ 状态下加热至

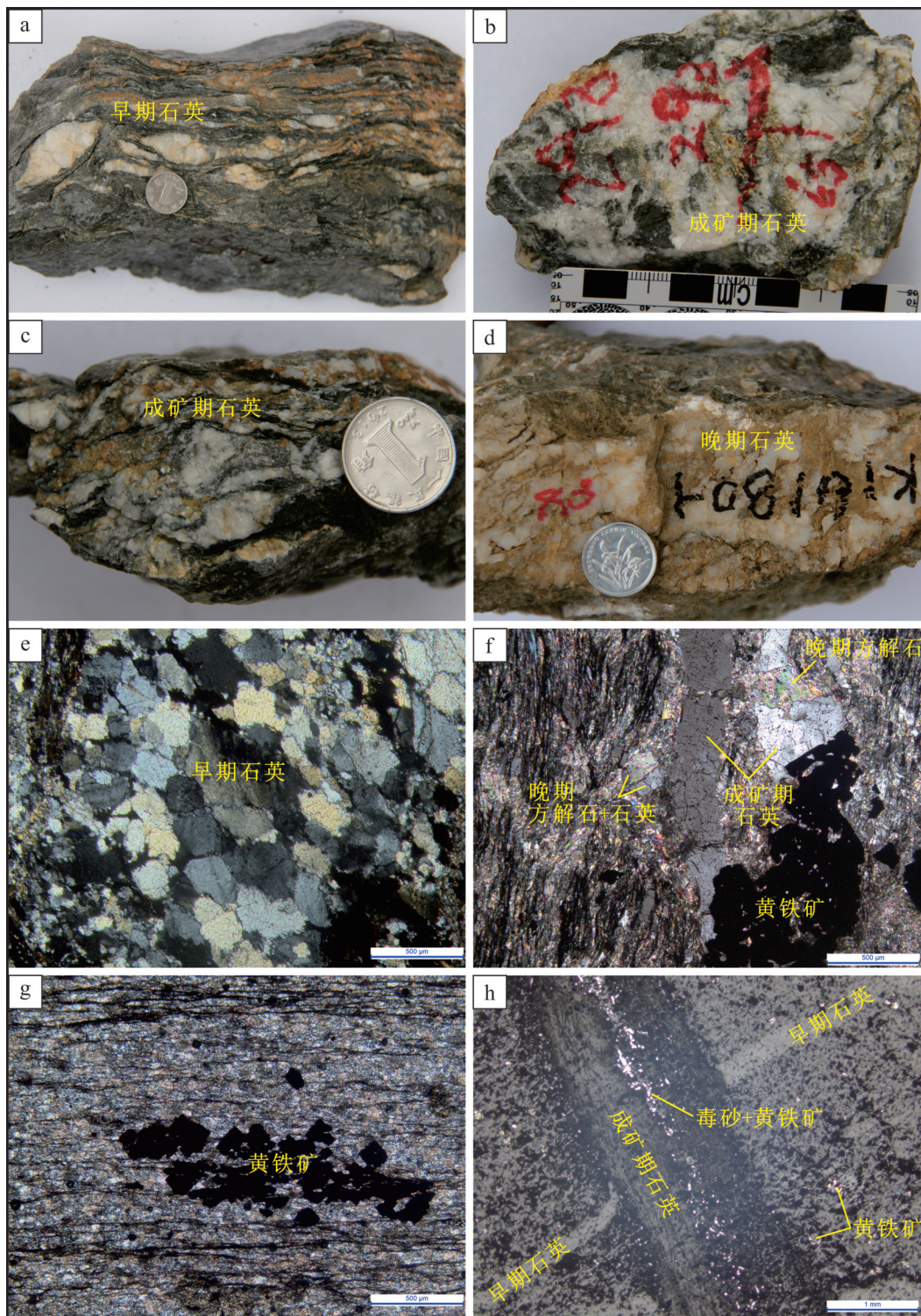


图5 萨瓦亚尔顿金矿矿石岩相学照片

a—早期石英脉；b, c—成矿期石英-多金属硫化物脉；d—晚期石英-碳酸盐细脉；e—早期石英亚颗粒、不均匀消光；f—成矿期石英-多金属硫化物脉和晚期石英-碳酸盐细脉；g—早期黄铁矿集合体形成透镜体；h—早期石英-黄铁矿脉和成矿期石英-多金属硫化物脉

Fig.5 Photos showing ore petrography of the Sawayardun gold deposit

a—Early-stage quartz vein; b, c—Middle-stage quartz-polymetallic sulfide vein; d—Late-stage carbonate-quartz veinlet; e—Early-stage quartz showing subgrain structure and wavy extinction; f—Middle-stage quartz-polymetallic sulfide vein and late-stage carbonate-quartz veinlet; g—Early-stage pyrite aggregate showing lens; h—Early-stage quartz-pyrite vein and middle-stage quartz-polymetallic sulfide vein



980℃,将硫化物的硫氧化生成SO<sub>2</sub>。用冷冻法收集、提纯释放的SO<sub>2</sub>,获得质谱分析的SO<sub>2</sub>。硫同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。黄铁矿和毒砂硫同位素采用MAT253气体同位素质谱测试。硫同位素δ<sup>34</sup>S以CDT标准报出,δ<sup>34</sup>S分析误差优于±0.2‰。

## 5 流体包裹体研究

### 5.1 岩相学特征

根据室温下(21℃)流体包裹体的岩相学特征(卢焕章等,2004)、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,可将包

裹体分为如下3类:含CO<sub>2</sub>包裹体、纯CO<sub>2</sub>包裹体及水溶液包裹体。

含CO<sub>2</sub>包裹体(C型):以长条形、不规则形、椭圆形为主,个体一般5~25 μm。室温下表现为两相(L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>+V<sub>CO<sub>2</sub></sub>,图6a~c)或三相(L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>+V<sub>CO<sub>2</sub></sub>+L<sub>CO<sub>2</sub></sub>)。据CO<sub>2</sub>相(V<sub>CO<sub>2</sub></sub>+L<sub>CO<sub>2</sub></sub>)占包裹体总体积的比例,可进一步划分为富CO<sub>2</sub>包裹体(C1型,图6d、e)和贫CO<sub>2</sub>包裹体(C2型,图6b、c)。其中前者CO<sub>2</sub>相(V<sub>CO<sub>2</sub></sub>+L<sub>CO<sub>2</sub></sub>)占包裹体总体积的50%~95%,后者CO<sub>2</sub>相占总体积的10%~50%。

纯CO<sub>2</sub>包裹体(PC型):多为圆形、次椭圆形或不规则形,5~20 μm;室温下表现为单相,冷冻过程

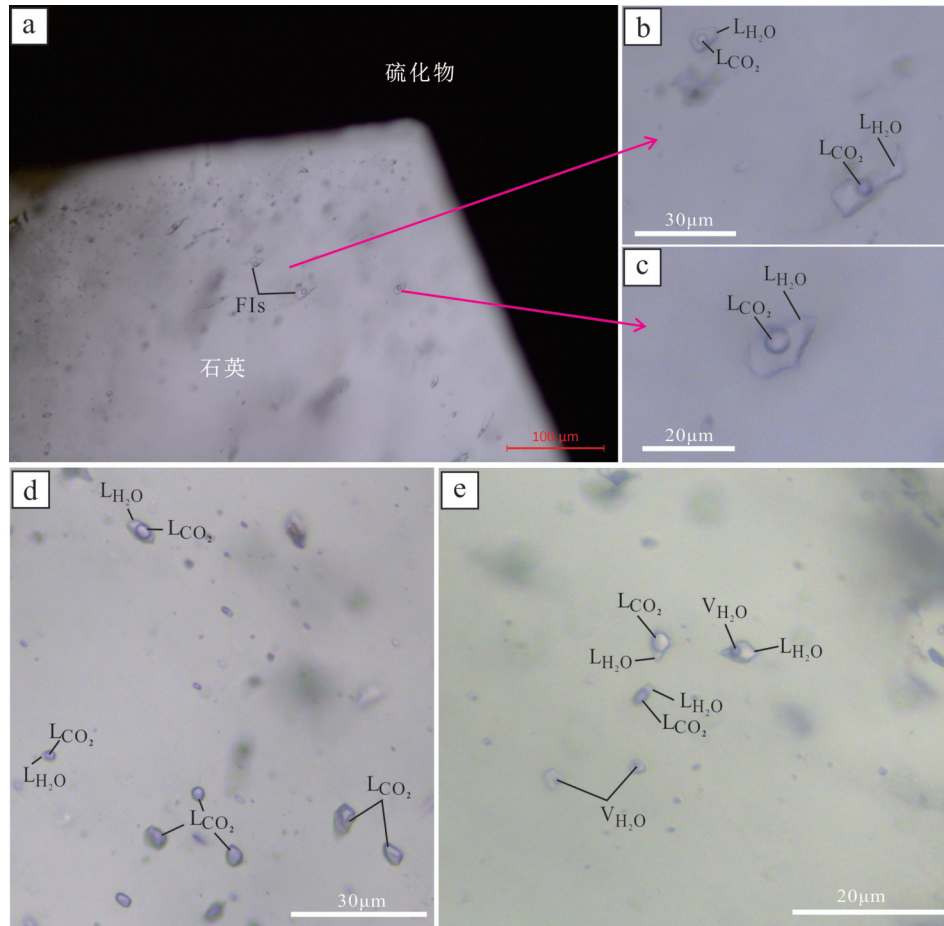


图6 萨瓦亚尔顿金矿床流体包裹体岩相学特征

a—与硫化物共生石英中的包裹体;b,c—富液相的C2型包裹体;d—共存的富气相C1型和PC型包裹体;e—共存的C型和W型包裹体,显示流体不混溶或沸腾特征;V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—气相H<sub>2</sub>O;L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—液相H<sub>2</sub>O;V<sub>CO<sub>2</sub></sub>—气相CO<sub>2</sub>;L<sub>CO<sub>2</sub></sub>—液相CO<sub>2</sub>;FIs—流体包裹体

Fig. 6 Photomicrographs of fluid inclusions in quartz from the Sawayardun gold deposit.

a—Fluid inclusions in sulfide-coexisting quartz of main-stage; b, c—CO<sub>2</sub>-poor fluid inclusions (C2 type); d—Coexisting C-type and PC-type fluid inclusions in main-stage quartz; e—Coexistence of the W-type and C-type fluid inclusions, implying for fluid boiling; V<sub>CO<sub>2</sub></sub>—vapor CO<sub>2</sub>;

L<sub>CO<sub>2</sub></sub>—liquid CO<sub>2</sub>; V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—vapor H<sub>2</sub>O; L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—liquid H<sub>2</sub>O; FIs—fluid inclusions

中出现气相CO<sub>2</sub>;孤立或成群分布(图6d),有时呈线状沿着石英的生长边分布。

水溶液包裹体(W型):以长条形、椭圆形或不规则形为主,个体4~25 μm,室温下表现气液两相(V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>+L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>),呈孤立状与C型共生(图6e)。此外,可见次生包裹体,沿石英裂隙呈线性定向排列。

## 5.2 显微测温结果

石英中流体包裹体的显微测温结果见表1和图7,现分述如下:

(1)早期的无矿石英-黄铁矿中3类流体包裹体都发育。C型包裹体见富CO<sub>2</sub>三相,完全冷冻后回温过程中,固态CO<sub>2</sub>初熔温度为-65.8℃,低于CO<sub>2</sub>的三相点(-56.6℃);笼合物熔化温度为6.9℃,据此计算包裹体盐度5.9% NaCl equiv.;CO<sub>2</sub>部分均一温度为26.7℃,均一至液相;加热至358℃时,包裹体达到完全均一,而均一方式为液相均一。纯CO<sub>2</sub>包裹体室温下表现为单相,冷冻过程中可出现CO<sub>2</sub>气相,回温过程中固态CO<sub>2</sub>初熔温度为-65.3℃,CO<sub>2</sub>部分均一于28.5℃,均一方式为液相均一。W型包裹体,其冰点温度为-6.0~-0.8℃,对应盐度为1.4%~9.2% NaCl equiv.;包裹体在237~386℃时向液相均一。考虑本矿区岩石类型主要为碳酸盐岩-碎屑岩建造,故设其岩石密度2.67 g/cm<sup>3</sup>,根据CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O型包裹体计算早期的流体压力为267 MPa (Brown, 1989),对应形成的深度为10 km。

(2)中期石英-多金属硫化物脉中的C型包裹体的CO<sub>2</sub>含量较高,部分包裹体L<sub>CO<sub>2</sub></sub>+V<sub>CO<sub>2</sub></sub>相所占比例大于50%,个别包裹体甚至可达80%。另外,水溶液包裹体也较发育,见少量纯CO<sub>2</sub>包裹体。C型

包裹体固态CO<sub>2</sub>初熔温度为-70.5~-67.2℃,略低于纯CO<sub>2</sub>固相初熔温度值,表明可能含CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>等组分,与激光拉曼光谱测试结果吻合(图8b、c);CO<sub>2</sub>笼合物熔化温度变化于-0.7~2.1℃,相应盐度为13.1%~16.6% NaCl equiv.;CO<sub>2</sub>部分均一温度为3.5~4.8℃,全部向液相均一;包裹体在255~270℃时完全均一成液相。对于W型包裹体,其冰点温度为-2.7~

-0.3℃,对应盐度为0.5%~4.5% NaCl equiv.;包裹体在204~310℃均一,均一方式以液相均一为主,部分向气相均一。纯CO<sub>2</sub>包裹体初熔温度为-67.5~-67.1℃,CO<sub>2</sub>全部均一到液相,部分均一温度为3.8~4.3℃。根据C型包裹体估算其最小压力为208~253 MPa (Brown, 1989),对应成矿深度为8~9 km。

(3)晚期石英-碳酸盐脉中仅见水溶液包裹体,其冰点温度为-7.1~-0.1℃,相应盐度为0.2%~10.6% NaCl equiv.;通过气相消失达完全均一,均一温度为125~235℃。

## 5.3 激光拉曼光谱测试结果

流体包裹体激光拉曼光谱测试表明,萨瓦亚尔顿金矿成矿期石英脉中的C型包裹体中液相成分主要为水(特征峰3450 cm<sup>-1</sup>)(图8a),气相成分主要为CO<sub>2</sub>(特征峰1386 cm<sup>-1</sup>和1282 cm<sup>-1</sup>),此外还有一定量的CH<sub>4</sub>(特征峰2913 cm<sup>-1</sup>)和N<sub>2</sub>(特征峰2328 cm<sup>-1</sup>)(图8b、c)。PC型包裹体除CO<sub>2</sub>外,部分含少量CH<sub>4</sub>+N<sub>2</sub>(图8d)。

## 6 成矿流体来源

石英的H-O同位素分析结果见表2。从表中可以看出,石英的δ<sup>18</sup>O值分布在19.0‰~21.5‰,富集<sup>18</sup>O。利用石英-水之间的氧同位素平衡分馏方程1000lnα<sub>石英-水</sub>=3.38×106/T<sup>2</sup>-3.40 (Clayton et al., 1972),将包裹体均一温度峰值代入公式,计算得到与石英达到分馏平衡的流体δ<sup>18</sup>O<sub>w</sub>值是4.1‰~16.2‰(表2),测试获得包裹体中水的δD值为-110‰~-70‰,落入大多数脉状金矿范围(图9; Kerrich, 1987; McCuaig and Kerrich, 1998; Ridley and Diamond, 2000; Chen et al., 2012b; Zhou et al., 2014a, b, 2015),与阿拉斯加州的朱诺造山型金矿带相似(Goldfarb et al., 1991; 图9)。萨瓦亚尔顿金矿早阶段流体δ<sup>18</sup>O<sub>w</sub>值变化于13.5‰~16.2‰,δD变化

表1 萨瓦亚尔顿金矿床石英流体包裹体显微测温结果  
Table 1 Microthermometric data for fluid inclusions in quartz from the Sawayardun gold deposit

期次	类型	数量	T <sub>m,CO<sub>2</sub></sub> /°C	T <sub>m,chl</sub> /°C	T <sub>h,CO<sub>2</sub></sub> /°C	T <sub>m,ice</sub> /°C	T <sub>h,tot</sub> /°C
早期	C	1	-65.8	6.9	26.7		358
	PC	1	-65.3		28.5		
	W	16				-6.0~-0.8	237~386
中期	C	8	-70.5~-67.2	-0.7~2.1	3.5~4.8		255~270
	PC	2	-67.5~-67.1		3.8~4.3		
晚期	W	24				-2.7~-0.3	204~310
	W	77				-7.1~-0.1	125~235

注: T<sub>m,CO<sub>2</sub></sub>—CO<sub>2</sub>固相熔化温度; T<sub>m,chl</sub>—CO<sub>2</sub>笼合物消失温度;  
T<sub>h,CO<sub>2</sub></sub>—CO<sub>2</sub>部分均一温度; T<sub>m,ice</sub>—冰点温度; T<sub>h,tot</sub>—完全均一温度。

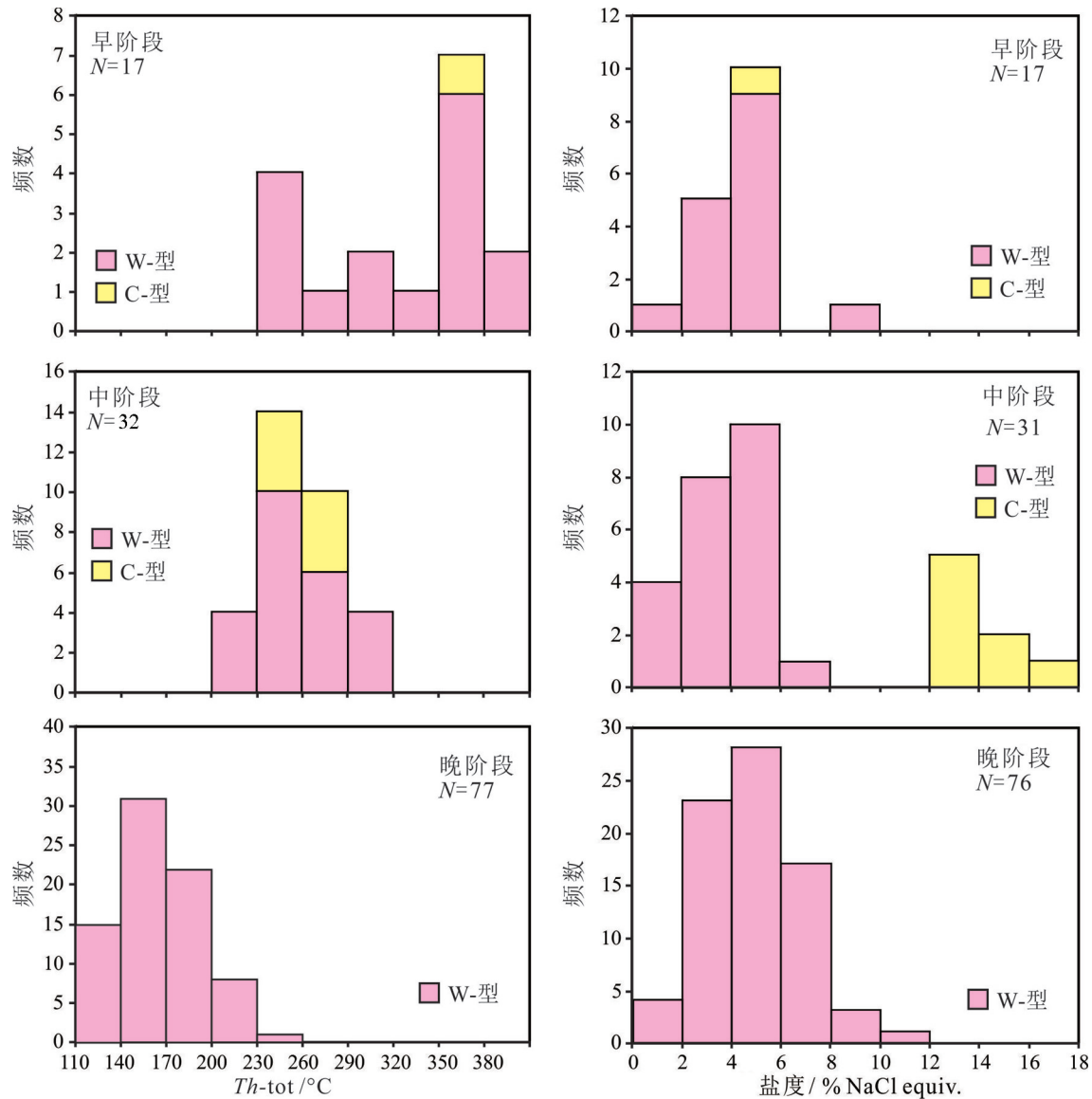


图7 萨瓦亚尔顿金矿各阶段流体包裹体均一温度和盐度直方图

Fig.7 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in quartz from the Sawayardun gold deposit

于-102‰~-71‰,投影点落在变质水和岩浆水范围的右侧(图9),表明成矿流体可能主要为变质流体成因而非岩浆成因,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,生成后又不断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 $^{18}\text{O}$ 而降温到310~360℃时仍保持 $\delta^{18}\text{O}_w$ 在13.5‰~16.2‰范围之内(表2),这就要求初始岩浆水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 必须高于16.2‰,而自然界尚未报道 $\delta^{18}\text{O}_w >> 16.2‰$ 岩浆水;即使是花岗岩,也只能是壳源改造型或S型(Wulff et al., 2010)。(2)早阶段主要发育纯 $\text{CO}_2$ 包裹体、低

盐度 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体和水溶液包裹体,且含 $\text{N}_2$ 、 $\text{CH}_4$ (Chen et al., 2012a),属变质流体的典型特征(陈衍景等, 2007)。因此,萨瓦亚尔顿金矿早阶段成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_w$ 不可能是岩浆水,而只能是变质水。中阶段流体 $\delta^{18}\text{O}_w$ 变化于10.7‰~12.6‰, $\delta\text{D}$ 为-110‰~-76‰, $\delta^{18}\text{O}_w$ 值高于6‰~9‰的初始岩浆热液的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 范围,投图落入岩浆水范围的右侧,这一现象与早阶段相似,说明中阶段流体为变质流体。因此,中阶段流体 $\delta^{18}\text{O}_w$ 值降低,应是成矿过程中大气降水热液混入造成的(Zacharias et al., 2009)。晚阶段流体 $\delta^{18}\text{O}_w$ 变化于4.1‰~7.8‰,平均6.3‰, $\delta\text{D}$ 为-88‰~-

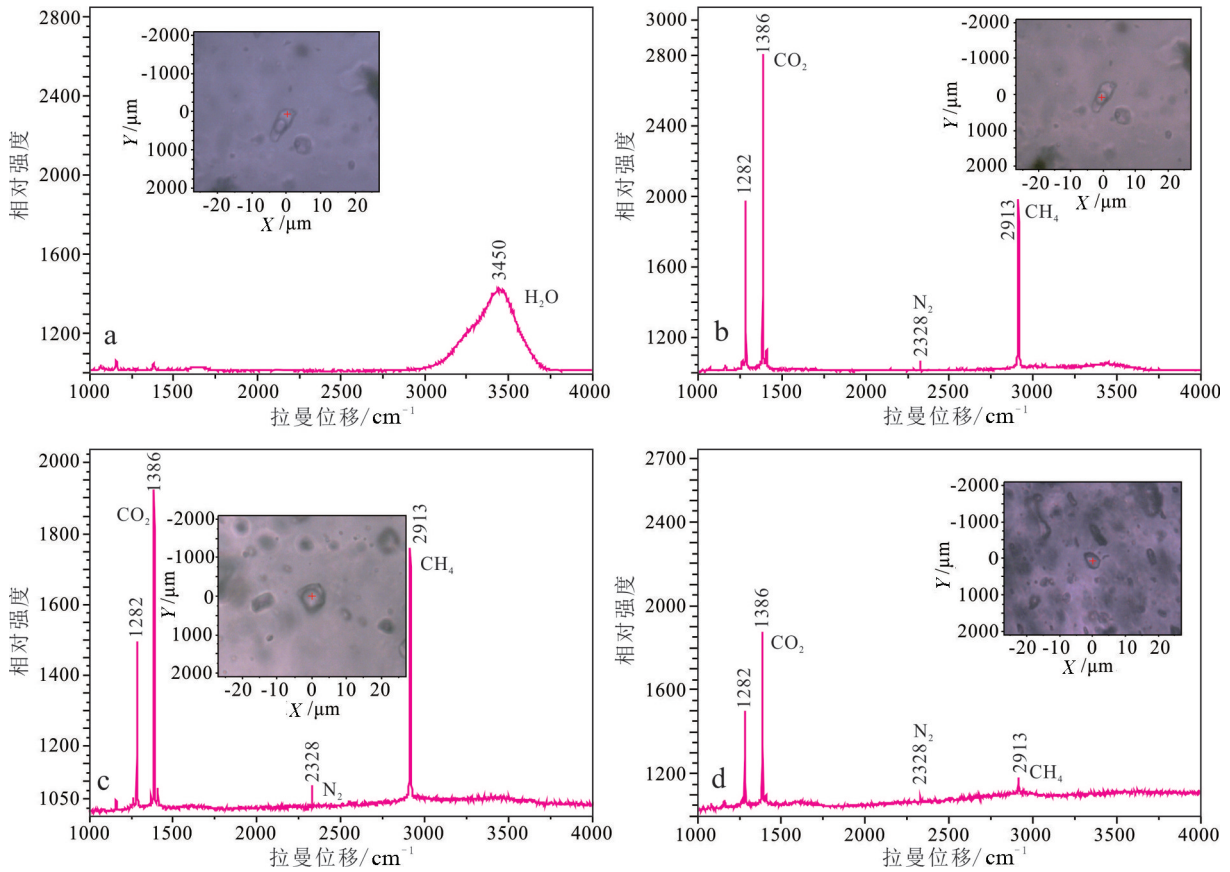


图8 萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体拉曼图谱

a—CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O包裹体液相中的H<sub>2</sub>O; b—贫CO<sub>2</sub>包裹体(C1型)气相成分含N<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>; c—富CO<sub>2</sub>包裹体(C2型)气相成分含N<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>; d—纯CO<sub>2</sub>包裹体气相成分含N<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>

Fig. 8 Representative raman spectra of fluid inclusions of the Sawayardun gold deposit.

a—Spectrum for liquid bubbles of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O inclusions; b— Spectrum for vapor bubbles of CO<sub>2</sub>- poor fluid inclusions (C1 type), containing variable contents of N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, in addition to CO<sub>2</sub>; c—Spectrum for vapor bubbles of CO<sub>2</sub>-rich fluid inclusions (C2 type), showing variable contents of N<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, in addition to CO<sub>2</sub>; d—Spectrum for pure CO<sub>2</sub> inclusions, containing variable CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>, in addition to CO<sub>2</sub>.

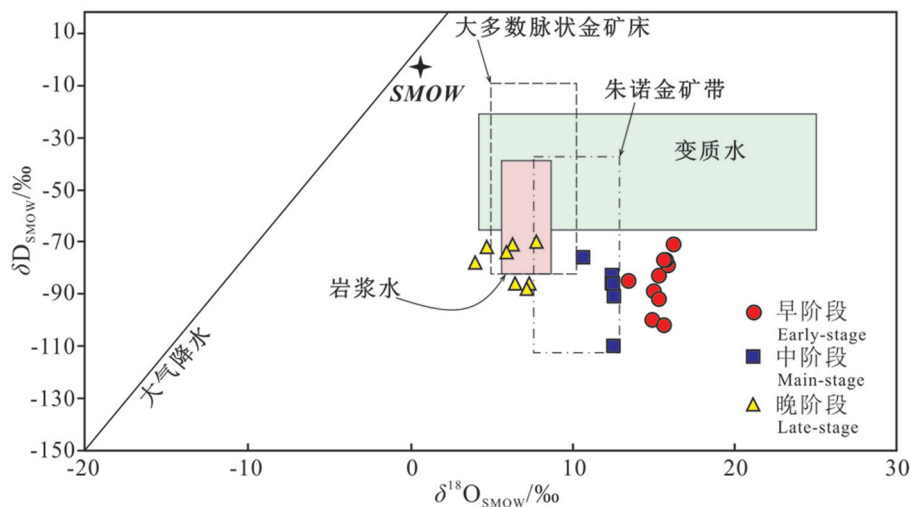


图9 萨瓦亚尔顿金矿成矿流体的δ<sup>18</sup>O-δD组成(底图据Taylor, 1997,其他矿床数据引用文献见正文)

Fig. 9 δ<sup>18</sup>O-δD plots of the ore fluids at the Sawayardun gold deposit (Domains for metamorphic and magmatic fluids are cited from Taylor (1997), and other deposits data are cited in the text)

表2 萨瓦亚尔顿金矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ (‰)  
Table 2 The  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  ratios (‰) of the Sawayardun gold deposit

编号	样品号	测试样品	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}$	$\delta^{18}\text{O}_w$	$\delta\text{D}_w$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	$T/^\circ\text{C}$	阶段
1	K16177-1	石英	20.5	15.3	-92	-1.8	355	早
2	K16166-1	石英	20.0	13.5	-85	-11.8	310	早
3	K16177-7	石英	21.2	15.9	-79	-5.4	350	早
4	K16178-1	石英	20.8	15.8	-77	-10.2	360	早
5	K16179-2	石英	20.5	15.3	-83	-3.9	355	早
6	K16179-4	石英	20.8	15.6	-77	-10.1	355	早
7	K16179-8	石英	21.4	16.2	-71	-2.7	355	早
8	KS5-3	石英	20.8	15.6	-102	-3.4	355	早
9	KS5-4	石英	20.2	15.0	-89		355	早
10	KS5-5	石英	20.1	14.9	-100	-4.7	355	早
	平均		20.6	15.3	-86	-6.0		
11	K16177-3	石英	21.0	12.5	-83	-5.5	260	中
12	K16174-5	石英	19.6	10.7	-76	-2	250	中
13	K16177-6	石英	21.5	12.6	-91	-5	250	中
14	K16179-5	石英	20.6	12.6	-86	-9.3	270	中
15	KS3-2	石英	20.3	12.5	-110	-5.4	277	中
16	KS3-3B	石英	20.2	12.4	-86	-7.7	277	中
	平均		20.5	12.2	-89	-5.8		
17	K16165-1	石英	19.0	6.0	-74	-9.8	180	晚
18	K16165-2	石英	19.5	7.8	-70	-3.1	200	晚
19	K16174-4	石英	19.9	7.2	-88	-10.5	185	晚
20	K16178-2	石英	19.2	7.4	-86	-7.0	198	晚
21	K16178-3	石英	19.5	4.1	-78	-3.6	150	晚
22	K16179-6A	石英	20.2	4.8	-72	-5.2	150	晚
23	K16180-1	石英	19.4	6.4	-71	-3.2	180	晚
24	K16179-6B	石英	21.5	6.5	-86	-5.8	155	晚
	平均		20.0	6.3	-78	-6.0		

-70‰,显示流体主要来自大气降水,这与该阶段流体包裹体中贫 $\text{CO}_2$ 的事实相吻合。

## 7 成矿物质来源

### 7.1 碳同位素示踪

萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体激光拉曼测试结果表明,流体包裹体中 $\text{CO}_2$ 含量远大于 $\text{CH}_4$ 含量,即热液系统中 $\text{CO}_2$ 为主要含碳组分, $\text{CH}_4$ 对整个流体系统 $\delta^{13}\text{C}$ 影响较小,故 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 可以近似代表整个体系 $\delta^{13}\text{C}$ 。萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值介于-11.8‰~-1.8‰,平均-6.0‰(表2),可对比大多数造山型金矿中碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-23‰~2‰; Kerrich, 1987; McCuaig and Kerrich, 1998;

Ridley and Diamond, 2000; Jia et al., 2001),也落入典型造山型金矿范围,如澳大利亚Bendigo,加拿大Abitibi,中国小秦岭(-27‰~4.4‰; Kerrich et al., 1987; Cox et al., 1995; Gao and Kwak, 1995; Jia et al., 2001; Zhou et al., 2014a, 2015)。萨瓦亚尔顿金矿 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值为-11.8‰~-1.8‰,从早到晚变化不大,对比有机质(平均-27‰, Schidlowski, 1998)、大气 $\text{CO}_2$ (-7‰~-11‰, Schidlowski, 1998)、淡水 $\text{CO}_2$ (-9‰~-20‰, Hoefs, 1997)、火成岩/岩浆系统(-3‰~-30‰, Hoefs, 1997)、地壳(-7‰, Faure, 1986)和地幔(-5‰~-7‰, Hoefs, 1997)等碳储库的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,表明流体 $\text{CO}_2$ 不可能单由上述碳储库的任何一种提供,具有混合来源的特征。其中萨瓦亚尔顿金矿3个 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-2.7‰~-1.8‰)高于其他碳储库的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,但落入海相碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ (-3‰~2‰, Hoefs, 1997),因此高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值源于海相碳酸盐地层变质脱水作用。

总之,碳同位素特征显示,萨瓦亚尔顿金矿成矿流体较复杂,但是海相碳酸盐地层是不可缺少的源区物质成分。考虑到含矿围岩古生代地层为一套碎屑岩-碳酸盐岩建造,与碳同位素研究所揭示的流体源区岩性一致,认为古生代赋矿地层可能是萨瓦亚尔顿金矿成矿流体的主要来源。

### 7.2 硫同位素示踪

萨瓦亚尔顿金矿床矿石中的黄铁矿和毒砂的 $\delta^{34}\text{S}$ 数据列于表3,数据总体集中,变化于-1.8‰~1.4‰,显示塔式效应(图10),指示成矿过程中硫同位素均一化程度高。3件早阶段黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 范围稍宽,为-1.8‰~1.4‰,平均-0.5‰;6件中阶段硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 变化小,为-1.0‰~1.4‰,平均为0.5‰,其中有3个样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{毒砂}}$ ,表明这3个样品中的硫在这两个矿物间可能达到了平衡;晚阶段黄铁矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 为0.6‰。中、晚阶段 $\delta^{34}\text{S}$ 值略高于早阶段,说明热液以还原硫为主,因为硫化物从 $\text{H}_2\text{S}$ 为主的热液中沉淀时,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值从早阶段类似初始溶液 $\delta^{34}\text{S}$ 值到晚阶段显著大于初始热液 $\delta^{34}\text{S}$ 值(Zheng and Hoefs, 1993)。中阶段大量硫化物共生,成矿温度为204~310℃,表明成矿系统氧逸度并不高,应属还原性质,热液总硫可近似为硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ (Ohmoto and Rye, 1979; Ohmoto and Goldhaber, 1997)。虽然矿石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值落入岩浆岩和

沉积岩范围(Hofes, 2009),但是萨瓦亚尔顿金矿区岩浆活动微弱,未见大的侵入岩体,仅在矿区及外围地层沿断裂带发育少量基性熔岩(Sm-Nd等时线年龄:(392±15)Ma;徐学义等, 2003)、辉绿岩脉(K-Ar法年龄:(207.5±4.2)~(169.0±2.0)Ma;郑明华等2002)、超基性岩透镜体和二长斑岩脉(锆石U-Pb年龄为133.7~131.0 Ma;陈富文和李华芹, 2003),而萨瓦亚尔顿金矿两组矿石黄铁矿Re-Os年龄分别为(324±4.8)Ma;(282±12)Ma(Zhang et al., 2017),此外,围岩古生代碎屑岩-碳酸盐岩建造中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为-1.6‰~0.3‰,与矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近,指示矿石硫可能主要源于赋矿地层。

萨瓦亚尔顿金矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均落入这些造山型金矿,比如小秦岭(Zhou et al., 2014a, 2015),朱诺(Goldfarb et al., 1989)和本迪戈(Jia et al., 2001)(图10)。

## 8 讨 论

### 8.1 构造变形与金成矿关系

区域资料分析和测年结果(未发表),西南天山在晚古生代,主要经历了2期变形作用(图11a):早期NW-SE向的挤压和晚期的走滑伸展。早期NW-SE向的挤压,形成了一系列的NEE向展布的叠瓦逆冲推覆构造,伴随发育了一系列的逆冲推覆相关褶皱构造,同时伴随着发育了区域性低绿片岩相的变质作用;随着推覆构造的持续发展,在推覆体的上盘,局部地段还发育了一些反冲构造,形成了一个逆冲推覆-反冲叠加的褶皱-断裂构造系统(图11a1);随着

NW-SE向主体挤压逆冲推覆构造的结束,接替发育了区域性的伸展调整,导致了研究区NNE向断裂带出现了右旋走滑和伸展变形(图11a2)。

萨瓦亚尔顿金矿的含矿构造,野外和室内镜下观测发现具有一定的韧性变形特征(图4a、b,图5a、e、g),属于韧-脆性转换域的构造。矿体主要赋存在断裂带上盘的脆性构造、反冲构造等相对拉张的区域(图2)。目前已经勘查到的金矿主要为与断裂构造活动密切相关的破碎蚀变岩型和破碎带充填型金锑(汞)矿,因此断裂是区内最为主要的控矿因素,也是最为主要的含矿空间。上述事实表明晚期脆性变形是萨瓦亚尔顿金矿主要的成矿阶段,区域性的拉张环境致使深部的成矿流体通过相对开放的断裂破碎带,运移上侵到浅地表,随着地球化学性质的变化而发生沉淀富集成矿。

### 8.2 流体演化与金成矿关系

上述流体包裹体显微测温结果表明(表1,图8),萨瓦亚尔顿金矿床成矿流体系统从早到晚发生规律性变化:流体均一温度从早阶段237~386℃经中阶段204~310℃,到晚阶段125~235℃,逐步降低;包裹体盐度从早阶段1.4%~9.2% NaCl equiv. 经中阶段0.5%~16.6% NaCl equiv., 到晚阶段0.2%~10.6% NaCl equiv., 盐度先升高再降低;流体成分从早、中阶段的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{N}_2$ 体系向晚阶段 $\text{H}_2\text{O}$ 体系演化, $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$ 等挥发分含量逐步降低。

萨瓦亚尔顿金矿中阶段的石英中包裹体类型复杂,发育3类包裹体,这些包裹体具有以下特征:(1)同一石英颗粒内可见W型包裹体和C型包裹体共生(图6e),且两类包裹体完全均一温度相近(图8);(2)C型包裹体相比不同,具有相近的均一温度;(3)W型均一方式各异,完全均一温度相近;以上特征表明萨瓦亚尔顿金矿中阶段的成矿流体经历了不混溶或沸腾作用。这种不混溶或沸腾作用是成矿物质从热液中快速沉淀的主要机制之一,并在其他造山型矿床已有报道(Fan et al., 2000, 2003; Hagemann and Luders, 2003; Chen et al., 2006; 邓小华等, 2008; Zhou et al., 2014 a, b, 2015)。这种不混溶或沸腾导致 $\text{CO}_2$ 等挥发分大量逃逸,流体盐度和pH值增高,氧化性降低或还原性增强,使流体中矿质的溶解度大大降低,促使大量金属矿物沉淀下来。

H-O同位素表明萨瓦亚尔顿金矿早阶段流体

表3 萨瓦亚尔顿金矿硫同位素分析结果

Table 3 The  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfides at the Sawayardun gold deposit

序号	样品	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\%$	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\%$	阶段
1	K16179-4	黄铁矿	-1.8			早
2	K16179-8	黄铁矿	-1.2			早
3	K16179-2	黄铁矿	1.4			早
	平均		-0.5			
4	K16179-5	黄铁矿	-0.5	毒砂	0.6	中
5	K16177-4	黄铁矿	0.5	毒砂	0.5	中
6	K16177-2	黄铁矿	1.4	毒砂	1.0	中
7	K16177-5	黄铁矿	1.2	毒砂	0.6	中
8	K16179-3	黄铁矿	-1	毒砂	0.1	中
9	K16177-6	黄铁矿	1.2	毒砂	0.2	中
	平均		0.5	0.5		
10	K16179-7	黄铁矿	0.6			晚

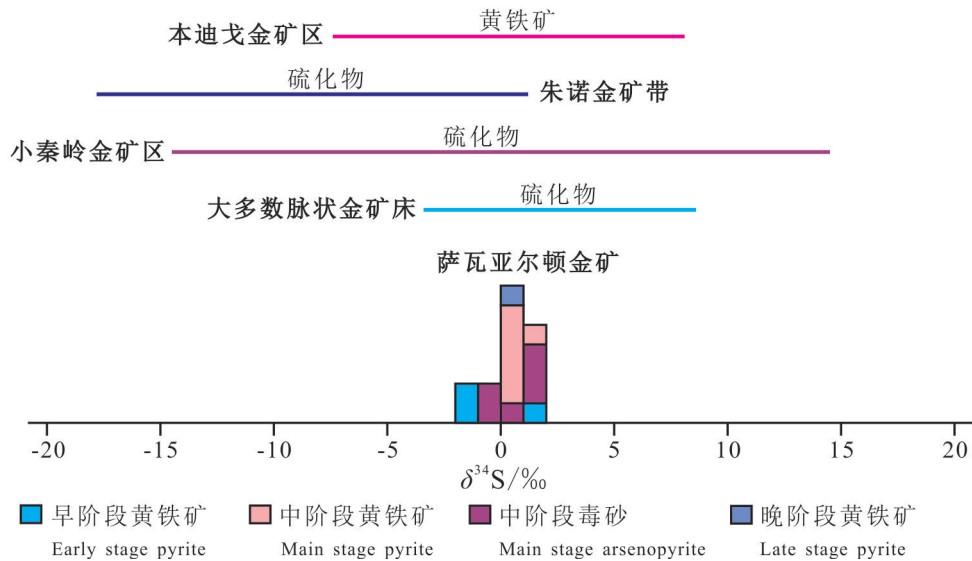


图10 萨瓦亚尔顿金矿的硫同位素分布特征(其他矿床数据引用文献见正文)

Fig.10  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfides from the Sawayardun deposit (other deposits data are cited in the text)

来自变质作用,中阶段为变质流体与大气降水热液混合,晚阶段流体为大气降水热液。总体而言,萨瓦亚尔顿金矿的初始流体具有中高温、富 $\text{CO}_2$ 、低盐度的变质流体特征,中阶段流体压力降低,发生流体不混溶或沸腾作用, $\text{CO}_2$ 等气体逃逸,随后大量浅源大气降水进入流体成矿系统,与深源变质热液发生混合,促使大量成矿物质的沉淀,晚阶段大气降水加入增多,流体演化为低温、低盐度水溶液流体。

### 8.3 构造-流体-金成矿关系

通常,在构造控制的流体成矿系统中,构造不仅是驱动成矿流体运移和循环的主要动力,而且为成矿流体聚集沉淀提供有利的赋存空间;同时成矿过程中流体的作用也是功不可没的,它作为构造控制成矿作用发生过程的重要媒介从矿源区汲取并搬运成矿物质(Sibson et al., 1988; 翟裕生, 1996; 邓军等, 2000)。在萨瓦亚尔顿金矿成矿的过程中,构造和流体起了重要的作用。同大多数与韧性剪切带有关的金矿床一样,韧性剪切带为含矿流体运移提供通道和容矿空间。特别是晚期的脆性断裂叠加,有利于金矿的形成(陈衍景和富士谷, 1992; 陈衍景等, 2004; Chen et al., 2004, 2005; 陈衍景, 2006, 2010)。前述研究表明,在韧-脆性变形阶段,萨瓦亚尔顿金矿流体主要为变质流体和大气降水,其中构造变形导致流体的沸腾和混合作用,并使流体系统物理化学条件不断变化,导致金等成矿物质的沉淀。

总之,从矿区构造、矿物组合、同位素以及流体特征,笔者认为萨瓦亚尔顿金矿构造-流体演化与成矿过程如下:古生代晚期,塔里木和哈萨克斯坦板块随着南天山洋的俯冲消减、洋盆逐渐闭合,塔里木板块与哈萨克斯坦(含伊犁地块)板块在晚石炭世开始碰撞,南天山地区地壳挤压、缩短、增厚、隆升。随着发生区域性的伸展调整,NNE向断裂带为右旋走滑-伸展变形(图11a2),同时可能伴随了造山带隆升-剥蚀作用,早阶段石英脉及含矿构造带埋藏变浅,围岩压力和构造附加压力降低(图11b2),在岩石韧-脆性转化界面,脆性破碎叠加在早期的韧性变形之上,流体压力由静岩压力转化为静水压力,发生不混溶作用或减压沸腾,并捕获多种类型、温度相近的流体包裹体,流体减压沸腾导致岩体裂隙系统与地表贯通,使大量浅源大气降水涌入流体成矿系统,深源变质热液与浅源大气降水热液发生混合,导致大量成矿物质沉淀(图11b2)。晚阶段,随着大气降水不断加入(图11b3),流体成矿作用逐渐停止,只发育少量具明显的张性组构的碳酸盐-石英细脉,该阶段仅见低盐度水溶液包裹体,均一温度基本小于 $200^\circ\text{C}$ 。

## 9 结论

(1)萨瓦亚尔顿金矿床位于伊犁-伊塞克湖微板块与塔里木北缘活动带的交接部位;野外构造解

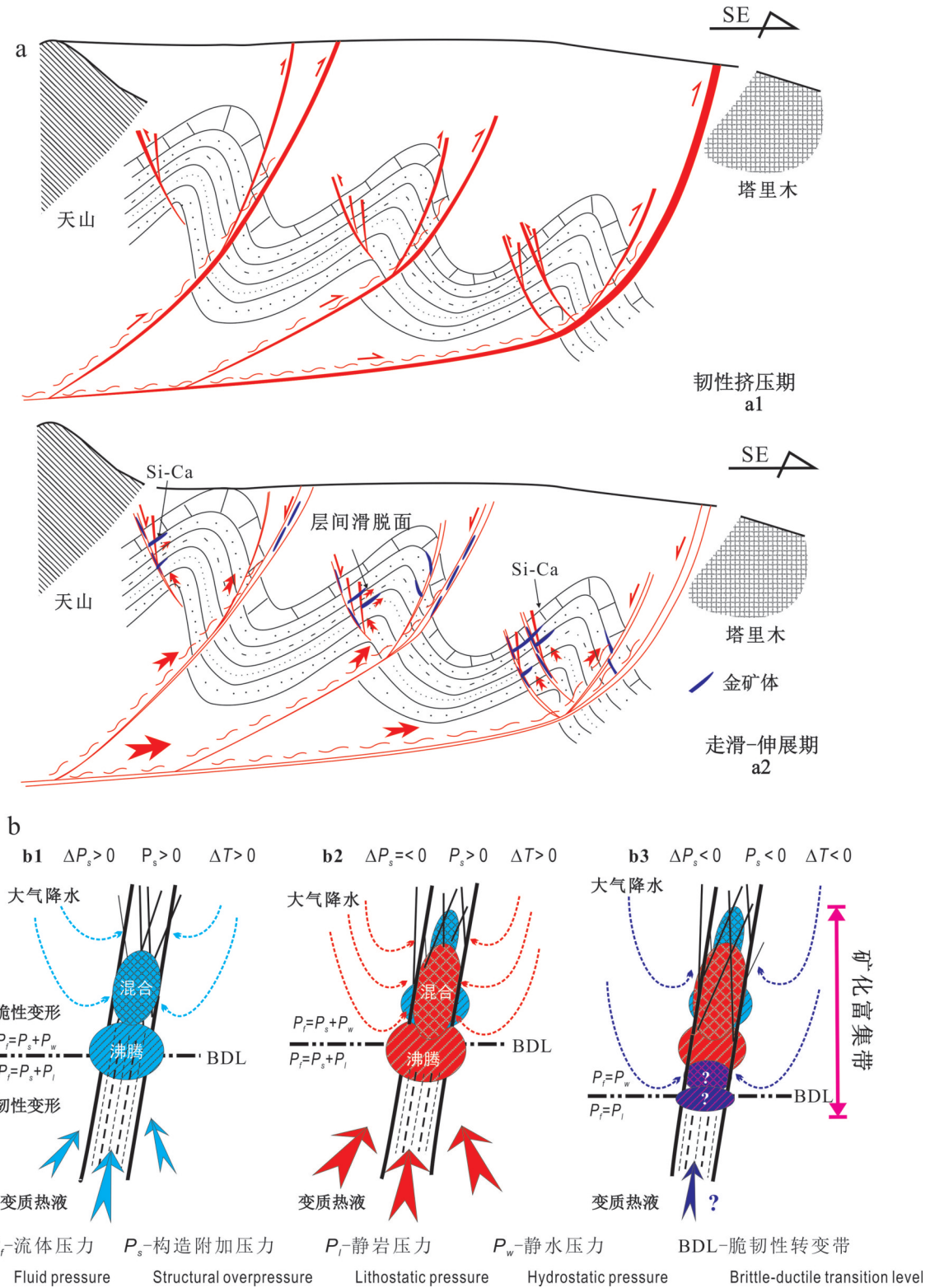


图 11 西南天山萨瓦亚尔顿金矿构造-流体与成矿模式图(b据陈衍景等, 2008; 陈衍景, 2013)

Fig. 11 Structure-fluid and metallogenic model for the Sawayardun deposit, Southwestern Tianshan Orogen (modified from Chen Yanjing et al., 2008; Chen Yanjing, 2013)



析表明矿区晚古生代发育了3期变形,同时识别出3期与构造变形相对应的石英脉,认为金矿主要形成于第二期的脆-韧性变形期间。

(2)流体包裹体研究表明,成矿流体为中温、低盐度、富CO<sub>2</sub>的H<sub>2</sub>O-NaCl-CO<sub>2</sub>体系,成矿时的温度为204~386℃,压力为208~253 MPa,对应成矿深度为8~9 km;H-O同位素显示,初始变质热液被后期大气降水叠加和改造;C-S同位素显示,成矿物质主要来源于赋矿地层古生代碎屑岩-碳酸盐岩建造。

(3)萨瓦亚尔顿金矿晚古生代经历了2期变形作用,成矿主要与晚期变形密切相关。早期挤压变形导致了地层变质脱水,产生了大量富CO<sub>2</sub>、低盐度变质流体;晚期区域的伸展变形,在岩石韧-脆性转化界面,断裂作用发生,流体压力降低,成矿流体经历了不混溶或沸腾作用,随后大气降水加入流体成矿系统,深源变质热液与大气降水热液发生混合,从而导致了主成矿期矿质的大量沉淀。

**致谢:**野外工作得到的新疆维吾尔自治区305项目办公室领导和同事的大力支持;实验工作得到中国地质科学院矿产资源研究所张增杰博士的帮助;三位评审人提出了宝贵的修改意见,特致谢意!

## Reference

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 683-684.
- Brown P E. 1989. Flincor: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data[J]. *American Mineralogist*, 74: 1390-1393.
- Chen Fuwen, Li Huaqin. 2003. Metallogenic chronology of the Sawayaerdun gold-antimony deposit in Xinjiang[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(6): 563-567 (in Chinese with English abstract).
- Chen Huayong, Chen Yanjing, Ni Pei, Zhang Zengjie. 2004. Fluid inclusion study of the Sawayaerdun 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 the Sawayaerdun 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: 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: 1-11.
- Chen Y J, Pirajno F, Qi J P, Li J, Wang H H. 2006. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China[J]. *Resource Geology*, 56(2): 99-116.
- Chen Y J, Pirajno F, Qi J P. 2005. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids in the Jiaodong Province, eastern China [J]. *International Geology Review*, 47: 530-549.
- Chen Y J, Pirajno F, Sui Y H. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver deposits and related tectonic setting[J]. *Mineralium Deposita*, 39: 560-575.
- Chen Yanjing, Fu Shigu. 1992. Gold Mineralization in West Henan, China [M]. Beijing: Seismological Press, 234 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, Pirajno F, Lai Yong, Su Wencho and 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 Yanjing, Xiao Wenjiao, Zhang Jinjiang. 2008. Ore-system as a geodynamic probe[J]. *Geology in China*, 35 (6): 1059-1073 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, Pirajno F, Li Chao. 2004. Carlin and Carlin-like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. *Geological Review*, 50: 134-152 (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. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, central China[J]. *Geology in China*, 37(4): 854-865 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing. 2013. The development of continental collision metallogeny and its application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 1-17 (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, Latysheva 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 CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and

- use of freezing data for estimation of salinity[J]. *Economic Geology*, 74: 1435–1444.
- Cox S F, Sun S S, Etheridge M A, Wall V J, Potter T F. 1995. Structural and geochemical controls on the development of turbidite-hosted gold quartz vein deposits, Wattle Gully Mine, Central Victoria, Australia[J]. *Economic Geology*, 90: 1722–1746.
- Deng Jun, Yang Liqiang, Zhai Yusheng, Sun Zhongshi, Chen Xueming. 2000. Theoretical framework and methodological system of tectonics–fluids–mineralization system and dynamics[J]. *Earth Science*, 25(1): 71–78 (in Chinese with English abstract).
- Deng Xiaohua, Li Wenbo, Li Nuo, Mi Mei, Zhang Ying. 2008. Fluid inclusions constrains on the origin of the Zhifang Mo deposit in Songxian County, Henan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (9): 2133–2148(in Chinese with English Abstract).
- Fan H R, Xie Y H, Zhao R, Wang Y L. 2000. Dual origins of Xiaoqinling gold-bearing quartz veins: Fluid inclusion evidences[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45 (5): 537–542 .
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 38 (6): 739–750.
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology*[M]. 2nd edition. John Wiley and Sons, New York, 589 pp.
- Gao Z L, Kwak T. 1995. Turbidite-hosted gold deposits in the Bendigo–Ballarat and Melbourne Zones, Australia. I. geology, mineralization, stable isotopes, and implications for exploration[J]. *International Geology Review*, 37: 910–944.
- Geological Team No. 2 (Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources). 2015. Prospecting report of the Sawayaerdun gold deposit, Wuqia County, Uygur Autonomous Region of Xinjiang[R]. 1–302 (in Chinese).
- Goldfarb R J, Leach D L, Rose S C, Landis G P. 1989. Fluid inclusion geochemistry of gold-bearing quartz veins of the Juneau gold belt, southeastern Alaska: Implications for ore genesis[J]. *Economic Geology Monograph*, 6: 363–375.
- Goldfarb R J, Newberry R J, Pickthorn W J, Gent C A. 1991. Oxygen, hydrogen, and sulfur isotope studies in the Juneau gold deposit, southeastern Alaska: Constraints on the origin of hydrothermal fluids[J]. *Economic Geology*, 86: 66–80.
- Hagemann S G, Luders V. 2003. P–T–X conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite–gold mineralization at the Wiluna lode–gold deposits, Western Australia: Conventional and infrared microthermometric constraints[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 936–952
- Hoefs J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. 4th edition. Springer-Verlag, Berlin, 201.
- Hofes J. 2009. *Stable Isotope Geochemistry*[M]. Berlin, Springer, 1–285.
- Jia Y, Li X, Kerrich R. 2001. Stable isotope (O, H, S, C and N) systematics of quartz vein systems in the turbidite-hosted Central and North Deborah gold deposits of the Bendigo gold field, Central Victoria, Australia: Constraints on the origin of oreforming fluids[J]. *Economic Geology*, 96: 705–721.
- Kerrich R, Fryer B J, King R W, Willmore L M, Hees E. 1987. Crustal outgassing and LILE enrichment in major lithosphere structures, Archean Abitibi greenstone belt: Evidence on the source reservoir from strontium and carbon isotope tracers [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 156–168.
- Kerrich R. 1987. The stable isotope geochemistry of Au–Ag vein deposits in metamorphic rocks[C]//Kyser T K (ed.). *Stable Isotope Geochemistry of Low Temperature Fluids: Mineralogical Association of Canada Short Course*, 13: 287–336.
- Liu Benpei, Wang Ziqiang, Zhang Chuanheng, Ma Hongwen, Zhou Hongrui, Zhu Hong. 1996. *Tectonic Framework and Evolution in Southwest Tianshan Mountains, China*[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1–120 (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 Sawayaerdun gold deposit in Xinjiang and its significant[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44( 6): 653–656 (in Chinese).
- 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).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. 2004. *Fluid Inclusion*[M]. Beijing: Science Press, 208–222 (in Chinese).
- Ma Tianlin, Sun Liqian, Chen Xuanhua, Zhou Jianhai, Zhang Xinli. 1999. Study of Orefield Structure of Sawayaerdun Gold Deposit, Wuqia (Ulugqat) County, Xinjiang[R]. 1–107 (in Chinese).
- McCuaig T C, Kerrich R. 1998. P–T–t deformation–fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics[J]. *Ore Geology Reviews*, 12: 381–454.
- Ohmoto H, Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes[C]// Barnes H L (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley Interscience, New York, 435–486.
- Ohmoto H, Rye R O. 1979. Isotopes of sulphur and carbon[C]// Barnes H L (ed). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York, John Wiley, 509–567.
- 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.
- Schidlowski M. 1998. Beginning of terrestrial life: Problems of the early record and implications for extraterrestrial scenarios[J]. *Instruments, methods, and missions for astrobiology, SPIE 3441*,

- 149-157.
- Sengör A M C, Natalin B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299-307.
- Sibson R H, Robert F, Poulsen H. 1988. High angle reverse faults, fluid pressure cycling and mesothermal gold quartz deposits[J]. *Geology*, 16: 551-555.
- Taylor H P. 1997. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits[C]//Barnes H L (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Wiley and Sons, New York, 229-302.
- Wang Deigui. 2000. Characteristics of ophiolite complex in the Sawayaerdun area, Xinjiang and its tectonic significance[C]//Wang Futong (ed.). *Proceeding for the Fourth Tianshan Geology, Mineral Resources*, 504-509 (in Chinese).
- 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 Xueyi, Ma Zhongping, Li Xiangmin, He Shiping, Yang Junlu. 2003. The discovery of P-MORB in Jigen area of southwest Tianshan Mountains and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 245-253(in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Mo Xuanxue, Dong Lianhui, Gu Xuexiang, Nurtaev B, Pak N, Zhang Zhaochong, Wang Xinli, Zu Bo, Zhang Guozhen, Feng Bo, Liu Jiaying. 2014. Asian gold belt in western Tianshan and its dynamic setting, metallogenic control and exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(5): 28-155 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Zhao Xiaobo, Zhang Guozhen, Mo Xuanxue, Gu Xuexiang, Dong Lianhui, Zhao Shuming, Mi Dengjiang, Nurtaev B, Pak N, Li Zhidan, Wang Xinli, Zu Bo, Yaxiaer Yalikun, Feng Bo. 2015. Metallogenic environments, oreforming 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).
- 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 Fuquan, Mao Jingwen, Wang Yitian, Li Mengwen, Ye Huishou, Ye Jinhua. 2005. Geological characteristics and metallogenesis of Sawayaerdun gold deposit in southwest Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 206-227 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Wang Yitian, Ye Huishou, Chen Wen. 2006. Chronology and geochemical characteristics of helium, argon, carbon and oxygen isotope in fluid inclusion of the Sawayaerdun gold deposit, Xinjiang, Northwestern China and their significance[J]. *Geological Review*, 52(3): 341-351(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Wang Yitian, Zhao Caisheng, Zhang Yan, Liu Yaling. 2007. Major types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in southwest Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 26(4): 361-379(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: 53-72.
- Zhai Yusheng. 1996. Problems in the study of structure-fluid-ore-forming processes [J]. *Earth Science Frontiers*, 3(3/4): 230-236(in Chinese with English abstract).
- 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 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, Liu Jiajun, Zhang Shouting, Long Xunrong. 2002. Isotopic composition and genetic indication of Sawaya'erdun gold deposit, Xinjiang[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(3): 237-245 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Hoefs J C. 1993. Effects of mineral precipitation on the sulfur isotope composition of hydrothermal solutions[J]. *Chemical Geology*, 105(4): 259-269.
- 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 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, southern margin of North China Craton [J].

- Ore Geology Reviews, 59: 1–20.
- Zhou Z J, Chen Z L, Han F B, Han S Q, Wang Z X, Xiao W F, Shen T, Wu J F. 2018. Fluid inclusion and isotope geochemistry of the Atebayue Sb deposit, South Tianshan Orogen, Kyrgyzstan[J]. Geological Journal, 53: 1050–1060.
- Zhou Z J, Liu Z W, Qin, Y. 2014b. Geology, geochemistry and genesis of the Huachangou gold deposit, western Qinling Orogen, central China[J]. Geological Journal, 49: 424–441.
- ### 附中文参考文献
- 陈富文, 李华芹. 2003. 新疆萨瓦亚尔顿金梯矿床成矿作用同位素地质年代学[J]. 地球学报, 24(6): 563–567.
- 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.
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1–234.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, F Pirajno, 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.
- 陈衍景, 肖文交, 张进江. 2008. 成矿系统: 地球动力学的有效探针[J]. 中国地质, 35(6): 1059–1073.
- 陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F, 李超. 2004. 西秦岭地区卡林–类卡林金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. 地质论评, 50(2): 134–152.
- 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. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. 中国地质, 37(4): 854–865.
- 陈衍景. 2013. 大陆碰撞成矿理论的创建及应用[J]. 岩石学报, 29(1): 1–17.
- 邓军, 杨立强, 翟裕生, 孙忠实, 陈学明. 2000. 构造–流体–成矿系统及其动力学的理论格架与方法体系[J]. 地球科学, 25(1): 71–78.
- 邓小华, 李文博, 李诺, 糜梅, 张颖. 2008. 河南嵩县纸房钼矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 24(9): 2133–2148.
- 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, 1–120.
- 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, 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时代的重新厘定及其意义[J]. 科学通报, 44(6): 653–656.
- 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.
- 马天林, 孙立倩, 陈宣华, 周建海, 张新利. 1999. 新疆西南天山萨瓦亚尔顿金矿田构造研究[R]. 1–107.
- 王德贵. 2000. 新疆萨瓦亚尔顿地区蛇绿杂岩的特征及构造意义[C]//王福同. 第四届天山地质矿产资源学术讨论会论文集, 504–509.
- 新疆地质矿产勘查开发局第二地质大队. 2015. 新疆维吾尔自治区乌恰县萨瓦亚尔顿金矿勘探报告[R]. 1–302.
- 徐学义, 马中平, 李向民, 何世平, 杨军录. 2003. 西南天山吉根地区P–MORB残片的发现及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 22(3): 245–253.
- 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, 刘家璞. 2014. 西天山“亚洲金腰带”及其动力背景和成矿控制与找矿[J]. 地学前缘, 21(5): 128–155.
- 薛春纪, 赵晓波, 张国震, 莫宣学, 顾雪祥, 董连慧, 赵树铭, 米登江, Bakhtiar Nurtaev, Nikolay Pak, 李志丹, 王新利, 俎波, 亚夏尔亚力坤, 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.
- 杨富全, 王立本, 王义天, 夏浩东, 邓会娟, 马伯永. 2004. 西南天山金梯成矿带成矿远景[J]. 成都理工大学学报. 31(4): 338–344.
- 杨富全, 毛景文, 王义天, 李蒙文, 叶会寿, 叶锦华. 2005. 新疆西南天山萨瓦亚尔顿金矿床地质特征及成矿作用[J]. 矿床地质, 24(3): 206–227.
- 杨富全, 毛景文, 王义天, 赵财胜, 叶会寿, 陈文. 2006. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床年代学、氩氩碳氧同位素特征及其地质意义[J]. 地质论评, 52(3): 341–351.
- 杨富全, 毛景文, 王义天, 赵财胜, 张岩, 刘亚玲. 2007. 新疆西南天山金矿床主要类型、特征及成矿作用[J]. 矿床地质, 26(4): 361–379.
- 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. 西南天山金和有价金属矿床成矿条件和矿床预测[M]. 北京: 地质出版社, 1–201.
- 翟裕生. 1996. 关于构造–流体–成矿作用研究的几个问题[J]. 地学前缘, 3(3/4): 230–236.
- 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, 刘家军, 张寿庭, 龙训荣. 2002. 萨瓦亚尔顿金矿床的同位素组成特征及其成因意义[J]. 成都理工大学学报(自科版), 29(3): 237–245.