

四川木里梭罗沟金矿床流体包裹体研究及矿床成因*

杨永飞¹, 刘书生^{1**}, 聂飞¹, 张文林²

(1 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2 四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队, 四川 成都 610213)

摘要 四川木里梭罗沟金矿床是产于甘孜-理塘金矿带南端的大型金矿床。矿体产于近东西向断裂控制的构造蚀变带内, 矿石类型主要为蚀变蚀变玄武岩矿石、凝灰岩矿石。由深部至浅部, 依次发育硅化、黄铁绢英岩化、碳酸盐化蚀变。流体成矿过程包括早、中、晚3个阶段, 分别以石英-他形黄铁矿组合、石英-五角十二面体黄铁矿-毒砂组合和石英-碳酸盐±少量立方体黄铁矿组合为标志。矿石矿物主要沉淀于中阶段, 五角十二面体黄铁矿和毒砂是主要的载金矿物。早阶段热液石英中发育CO₂-H₂O型包裹体(C型)和水溶液包裹体(W型), 中、晚阶段只发育水溶液包裹体(W型)。早阶段流体包裹体均一温度集中于251~371℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为3.3%~13.7%; 中阶段流体包裹体均一温度集中于187~294℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为1.6%~13.9%; 晚阶段流体包裹体均一温度集中于144~224℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 介于0.2%~10.6%之间。估算的早阶段流体捕获压力为102~343 MPa, 推测最大成矿深度为10~11 km。上述流体包裹体研究表明, 成矿流体由早阶段中高温、富CO₂的变质热液演化至晚阶段的低温、贫CO₂的大气降水热液; 流体温度降低、CO₂逃逸是控制成矿物质沉淀的主要因素。矿床地质及流体包裹体特征指示梭罗沟金矿床可能为断控造山型金矿床。

关键词 地质学; 流体包裹体; 矿床成因; 梭罗沟金矿床; 甘孜-理塘金矿带

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Fluid inclusion constraint on origin of Suoluogou Au deposit, Muli County, Sichuan Province

YANG YongFei¹, LIU ShuSheng¹, NIE Fei¹ and ZHANG WenLin²

(1 Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2 Regional Geological Survey Party, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract

The Suoluogou Au deposit in Muli County of Sichuan Province is a large deposit in the Garze-Litang suture. Au mineralization occurs in the EW-trending fault, and the ores mainly include the altered basalt and tuff. The hydrothermal alteration is intense, ranging from silicification, beresitization to carbonatization with increasing depth. The hydrothermal ore-forming process includes the early, middle and late stages, characterized by mineral assemblages of quartz-allotriomorphic pyrite, quartz-pyritohedron pyrite-arsenopyrite and quartz-carbonate±cubic pyrite, respectively. Ore minerals were mainly precipitated in the middle stage, and the arsenopyrites and pyritohedron pyrites are the main gold-bearing minerals. The hydrothermal minerals in the early stage contain NaCl-H₂O (W-type) and CO₂-H₂O (C-type) fluid inclusions, while the middle- and late-stage hydrothermal quartz contains only NaCl-H₂O fluid inclusions (W-type). The homogeneous temperatures of the C-type and W-type fluid in-

* 本文得到中国地质调查局地质大地调项目(编号: 12120114012501)的资助

第一作者简介 杨永飞, 男, 1984年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: yyf6811@163.com

** 通讯作者 刘书生, 男, 1977年生, 博士研究生, 主要从事矿产勘查工作。Email: 34946143@qq.com

收稿日期 2018-10-09; 改回日期 2019-02-20。张绮玲编辑。

clusions in the early stage are generally homogenized at temperatures of 251~371°C, with salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ of 3.3%~13.7%. In the middle stage, the W-type fluid inclusions mainly have homogeneous temperatures of 187~294°C and salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ of 1.6%~13.9%. W-type fluid inclusions in the late stage are homogenized at temperatures of 144~224°C, with salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ of 0.2%~10.6%. The estimated pressures range from 102~343 MPa in the early stage, with the formation depth of 10~11 km. In a word, the ore-forming fluids evolved from middle-high temperature, CO_2 -bearing metamorphic fluid to low temperature, CO_2 -poor meteoric fluid. It seems that temperature decreasing and CO_2 escaping caused the precipitation of metallogenic materials. The characteristics of the ore geology and fluid inclusions indicated that the Suoluogou Au deposit can be genetically assigned to the orogenic-type ore-system.

Key words: geology, fluid inclusion, origin of deposit, Suoluogou Au deposit, Garze-Litang Au belt

甘孜-理塘缝合带夹持于中咱-义敦地块和松潘-甘孜褶皱带之间,呈近北北西向展布(图1a),是三江地区重要的金成矿带(图1b; Deng et al., 2016)。甘孜-理塘金矿带北段分布有嘎啦、尼多中型金矿床及色卡、尼亚达柯等金矿点,中段产出雄龙西中型金矿床、阿加隆洼及武隆洼小型金矿床,南段产出梭罗沟大型金矿床,金成矿潜力巨大。前人研究表明,甘孜-理塘金矿带内金矿主要受韧性剪切带或构造破碎带控制,以微细浸染状黄铁矿化、毒砂化(辉锑矿化)糜棱岩型、碎裂岩型矿石为主(付小方等, 2003; 晏子贵, 2006; 杨伟寿等, 2007; 杨永鹏等, 2007; 肖军等, 2008; 张均等, 2012; 燕旒等, 2013; 刘书生等, 2015); 锆石裂变径迹结果显示金成矿时代主要为82~140 Ma(邹伟静等, 2013)。带内嘎拉金成矿流体来源于变质水并有大气降水的参与(燕旒等, 2013),而阿加隆洼金成矿流体来自于循环后的大气降水(张均等, 2012); 2个矿床的成矿物质均主要来自于围岩上三叠统曲嘎寺组蛇绿混杂岩套(张均等, 2012; 燕旒等, 2013)。已有研究主要集中于甘孜-理塘金矿带北段和中段,而南段金成矿作用研究较为薄弱,制约了对甘孜-理塘金矿带金成矿规律的认识。

梭罗沟金矿位于四川省木里县北西约60 km,是近年来甘孜-理塘金矿带南段找矿的重大突破,已查明梭罗沟金矿床的金资源量47.2 t,已达到大型矿床规模,具有超大型矿床远景。目前对该金矿的成因主要存在2种认识:一种认为是韧性剪切带型(造山带型)金矿床,成矿物质主要来源于韧性剪切作用使沉积地层变质脱水,并从围岩中萃取Au、As、Sb等成矿物质形成含矿流体,在动力、热力和韧性剪切构造作用下活化、迁移富集成矿(王兆成等, 2012); 另一种认为梭罗沟金矿为浅成低温热液型矿床,早期中

基性火山岩的形成成为金矿奠定了物质基础,主成矿期受断裂作用的影响一方面使早期初始富集的金活化迁移,另一方面又使地壳深处的含金热液向浅部运移,在断裂带内沉淀形成矿体(杜金锐, 2012; 喻安光等, 2014; 刘书生等, 2015)。

本文总结了梭罗沟金矿床的地质特征,报道了流体包裹体研究结果,讨论了成矿流体特征及演化规律,并探讨了梭罗沟金矿床的成因类型。

1 区域地质背景

甘孜-理塘缝合带西接义敦火山岛弧,东邻松潘-甘孜褶皱带,北起青海治多,经甘孜、理塘,向南至木里,呈近北北西向展布,长约700 km,宽10~15 km,总体呈北窄南宽不对称的反“S”型(潘桂堂等, 1997; 侯增谦等, 2001)。

甘孜-理塘缝合带为甘孜-理塘洋演化的产物,经历了复杂的构造演化历史。甘孜-理塘洋于晚二叠世末至中三叠世扩张形成;晚三叠世中期(238~210 Ma),甘孜-理塘洋西向俯冲消减形成义敦岛弧;晚三叠世末期—燕山早期(208~138 Ma),甘孜-理塘洋闭合,义敦岛弧与扬子西缘发生近东西向碰撞;白垩纪(138~75 Ma)主要在义敦岛弧弧后区发生后造山伸展垮塌作用;随后喜马拉雅早期,印度板块与欧亚大陆碰撞,三江地区发生北西向走滑剪切导致甘孜-理塘缝合带强烈褶皱隆升(潘桂堂等, 1997; 侯增谦等, 2001; 魏永峰等, 2004)。

甘孜-理塘缝合带出露地层主要为三叠系拉纳山组、图姆沟组和曲嘎寺组(张丽婷等, 2015)。拉纳山组主要由砂岩、板岩和碳质板岩组成。图姆沟组下段为板岩、硅质板岩、石英岩夹砾砂岩;中段为长石石英砂岩、板岩、流纹岩、灰岩;上段为板岩夹石英

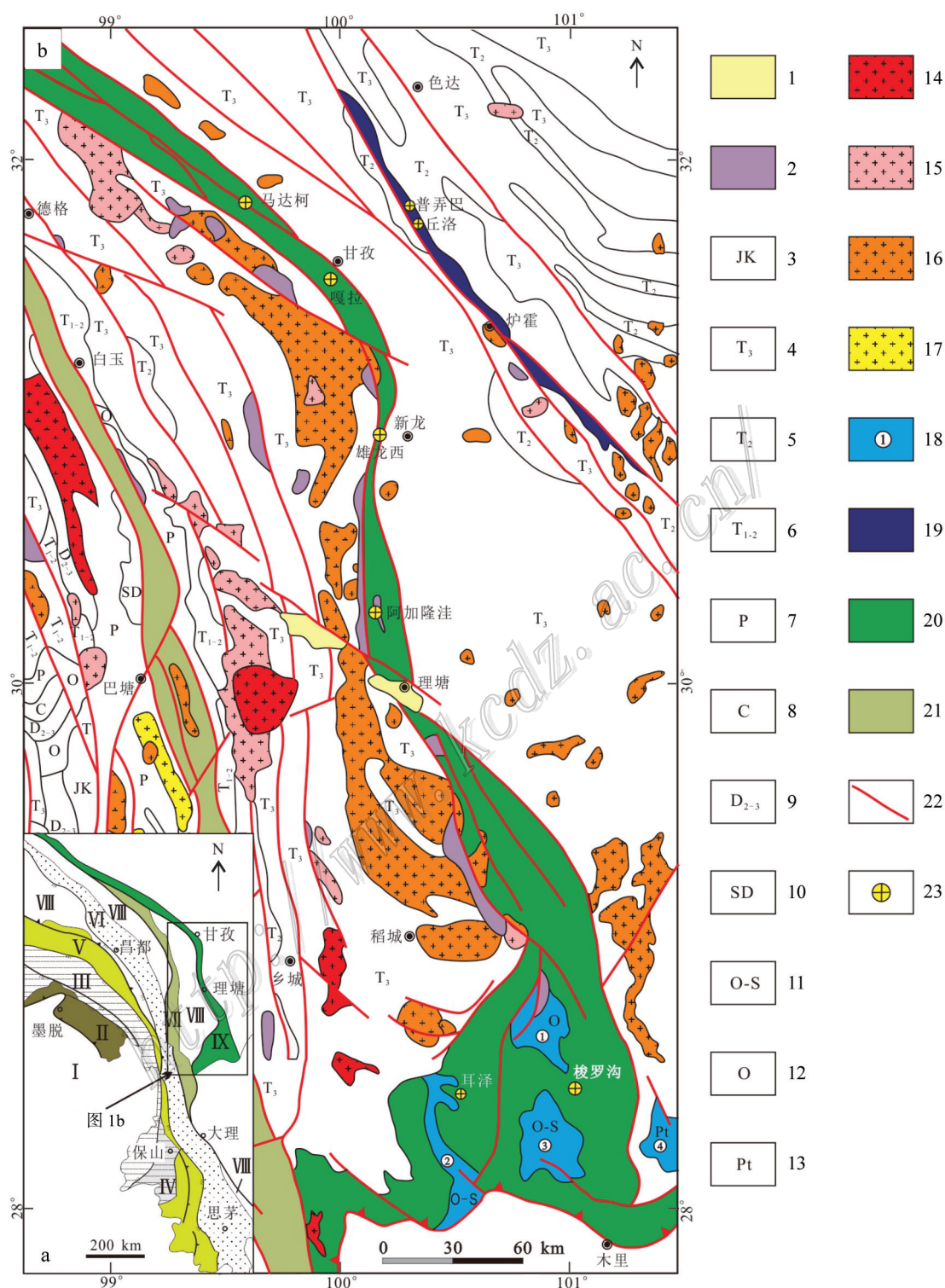


图1 三江地区大地构造简图(a)和甘孜-理塘金成矿带区域地质图(b)(据刘书生等,2015)

1—第四系;2—古近系—新近系砂砾岩;3—侏罗系—白垩系紫红色砂岩、泥岩、砾岩;4—上三叠统碎屑岩夹火山岩、碳酸盐岩;5—中三叠统碎屑岩夹碳酸盐岩;6—下-中三叠统细碎屑岩、砂岩;7—二叠系砂岩、灰岩、中基性火山岩;8—石炭系灰岩、白云岩;9—中-上泥盆统灰岩、白云岩、砂页岩;10—志留系—泥盆系页岩、灰岩、白云岩夹火山岩;11—奥陶系—志留系灰岩、白云岩、粉砂岩、板岩、千枚岩;12—奥陶系灰岩、白云岩、粉砂岩、板岩;13—元古界变质岩;14—喜马拉雅期花岗岩;15—燕山期花岗岩;16—印支期花岗岩;17—华力西期花岗岩;18—构造穹隆及编号;19—炉霍-道孚缝合带;20—甘孜-理塘缝合带;21—金沙江-哀牢山缝合带;22—断裂;23—金矿床

大地构造带: I—喜马拉雅地块; II—雅鲁藏布江缝合带; III—冈底斯地块; IV—保山地块; V—怒江缝合带; VI—昌都—思茅地块;
VII—金沙江-哀牢山缝合带; VIII—中甸-义敦地块; IX—甘孜-理塘缝合带
构造穹窿: ①—唐央穹隆; ②—恰斯穹隆; ③—瓦厂穹隆; ④—长枪穹隆

Fig. 1 Sketch tectonic map (a) and regional geological map of the Garze-Litang gold metallogenic belt (b)

(modified after Liu et al., 2015)

1—Quaternary; 2—Paleogene-Neogene sandy conglomerate; 3—Jurassic-Cretaceous sandstone, mudstone, conglomerate; 4—Late Triassic clastic rocks with some volcanic rocks and carbonate rocks; 5—Middle Triassic clastic rocks with some carbonate rocks; 6—Early-Middle Triassic fine clastic rocks, sandstones; 7—Permian sandstone, limestone, medium-basic volcanic rocks; 8—Carboniferous limestone, dolomite; 9—Middle-Late Devonian limestone, dolomite, sand shale; 10—Silurian-Devonian shale, limestone, dolomite, volcanic rocks; 11—Ordovician-Silurian limestone, dolomite, siltstone, slate, phyllite; 12—Ordovician limestone, dolomite, siltstone, slate; 13—Proterozoic metamorphic rocks; 14—Himalayan granitoid; 15—Yanshanian granitoid; 16—Indosinian granitoid; 17—Variscan granitoid; 18—Dome and its serial number;
19—Luhuo-Daofu suture; 20—Ganzi-Litang suture; 21—Jinsha River-Ailaoshan suture; 22—Fault; 23—Au deposit
Geotectonic belts: I—Himalayan Block; II—Yajiang Suture; III—Gangdise Block; IV—Baoshan Block; V—Nujiang Suture;
VI—Changdu-Simao Block; VII—Jinsha River-Ailaoshan suture; VIII—Zhongzan-Yidun Block; IX—Garze-Litang suture
Domes: ①—Tangyang Dome; ②—Qiasi Dome; ③—Wachang Dome; ④—Changqiang Dome

砂岩。曲嘎寺组下段为石英砂岩、板岩和基性凝灰岩;上段为变质基性、中基性凝灰岩、凝灰质砂岩、板岩和玄武岩。该区域内还发育一套被构造改造的蛇绿混杂岩,分别为卡尔蛇绿岩组、瓦能蛇绿岩组,其中卡尔蛇绿岩组在早期裂谷环境中形成,由变质碎屑岩和硅质岩组成;瓦能蛇绿岩组则为具有洋壳属性的一套玻基橄榄岩、角闪橄榄岩、堆晶辉石岩、辉长岩、枕状玄武岩、含放射虫硅质岩以及砂质、钙质板岩,局部夹岩屑石英杂砂岩块,长石石英杂砂岩块,大理岩块,结晶灰岩块,白云母石英片岩块(魏永峰等,2003)。

区内构造复杂,在缝合带北部发育呈北西向、在中部为近南北向、而在南部呈“帚”状由木里一带向金沙江断裂延伸的区域性主干断裂,控制着区域上金矿床的分布。在木里-锦屏一带,由于义敦岛弧与扬子陆块的碰撞作用,形成了近东西向的弧形逆冲-推覆构造,相继发育了恰斯、唐央、瓦厂、长枪、江浪等一系列大小不等、呈孤立分散状产出的穹窿地质体(图1b;刘严松等,2011),围绕这些穹窿体,形成了与其密切相关的金(恰斯、唐央)、铜锌(江浪)和铅锌多金属(踏卡)等一系列重要矿产地。

2 矿床地质特征

梭罗沟金矿位于甘孜-理塘缝合带南段与扬子陆块西缘接壤的部位(图1b)。矿区出露地层为上三叠统曲嘎寺组、图姆沟组和瓦能组(图2)。地层总体走向北东向,与区内主要控矿构造方向一致,其中

上三叠统曲嘎寺组是矿区内最为重要赋矿层位,岩性主要为基性火山岩、凝灰质粉砂岩、泥灰岩及岩屑砂岩。图姆沟组底部为变质杂色石英质砾岩,含砾砂岩、复成分砾岩和砂岩,其上为变质砂板岩和灰岩互层,局部夹酸性火山岩的地层,与曲嘎寺组整合接触。瓦能组主要岩性为基性枕状熔岩、辉石玄武岩以及镁铁质-超镁铁质岩体和岩墙,在岩层顶部为含放射虫硅质岩夹层的海相复理石、大理岩岩块、玄武质火山岩岩块及砂板岩基质混杂而成,为一套以玄武质火山岩岩块为主的蛇绿混杂岩组合,与曲嘎寺组基性火山岩呈断层接触。

矿区内构造总体表现为由近东西向的主干断裂和近南北向、北东向等断裂组成的基本构造格架(图2)。近东西向断裂是矿区内控矿、导矿、容矿的主干断裂,发育于曲嘎寺组碎屑岩段与基性火山岩段的界面上,产状 $350^{\circ}\angle 75^{\circ}\sim 85^{\circ}$,总体走向 $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$ (刘书生等,2015);其与南部近东西向弧形逆冲-推覆构造方向一致,发育于晚三叠统中,推测其形成于义敦岛弧-扬子陆块碰撞过程中。在近东西向断裂带内发育构造透镜体,根据其排列方式判断该断裂具“左行压扭”性质。近南北向、北东向断裂切割地层及矿体,为矿区成矿后的“破矿”构造。

矿区见少量辉绿岩、煌斑岩脉出露(图2)。辉绿岩呈小岩株产出,岩石呈灰绿色,块状,具变余辉绿结构或辉绿结构,主要由基性斜长石、普通辉石、绿泥石、黑云母组成,副矿物见磷灰石、白钛石。煌斑岩呈脉状侵入矿体及曲嘎寺组中,脉体长数十米至100余米不等,宽30~80 cm,脉壁平直,总体产状 $350^{\circ}\angle 65^{\circ}$ 左右。煌斑岩呈灰黑色,具变余斑状结构,

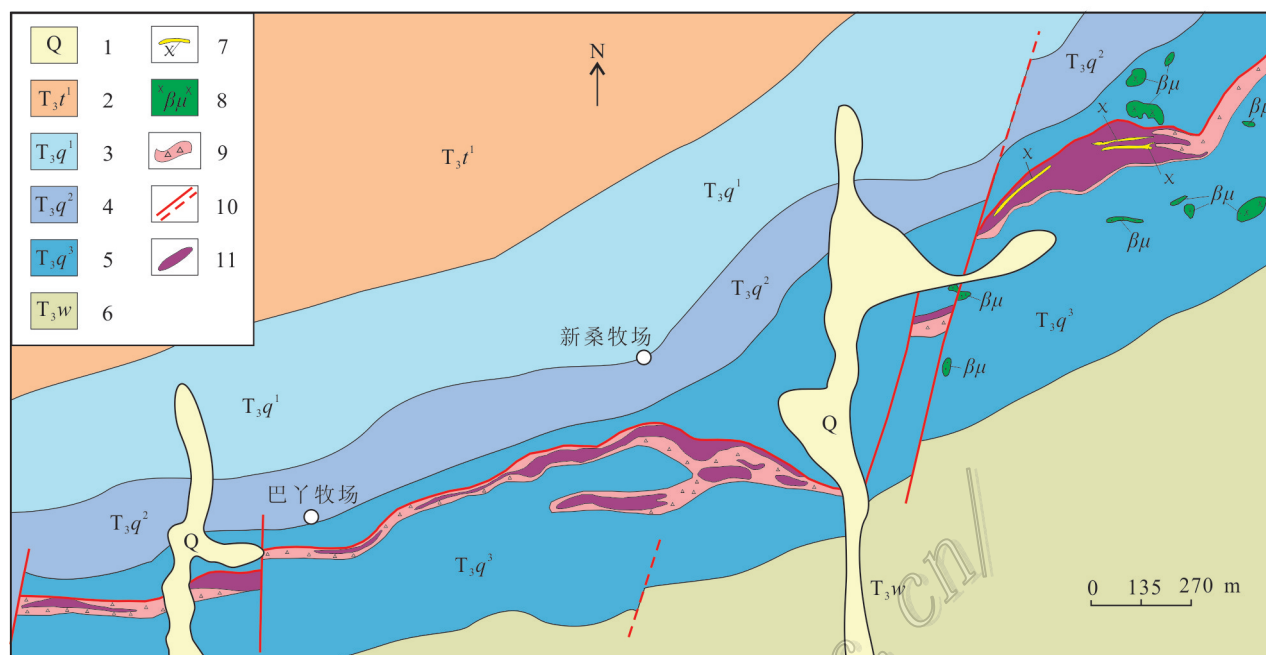


图2 梭罗沟金矿床地质简图(据刘书生等,2015)

1—第四系;2—图姆沟组一段结晶灰岩夹白云岩;3—曲嘎寺组一段岩屑石英砂岩;4—曲嘎寺组二段砂质板岩、板岩;5—曲嘎寺组三段凝灰岩、玄武岩;6—瓦能组蛇绿岩;7—煌斑岩脉;8—辉绿岩;9—含金构造蚀变岩;10—断裂;11—矿体

Fig. 2 Simplified geological map of the Suoluogou Au deposit(after Liu et al., 2015)

1—Quaternary; 2—Crystalline limestones and dolomites in the lower first member of Tumugou Formation; 3—Lithic quartz sandstones in the lower first member of Qukasi Formation; 4—Sandy slates and slates in the second member of Qukasi Formation; 5—Tuffs and basalts in the upper third member of Qukasi Formation; 6—Ophiolite of Waneng Formation; 7—Lamprophyre veins; 8—Diabase; 9—Au-bearing structurally altered rocks; 10—Fault; 11—Orebodies

基质具玻晶交织结构。斑晶主要见普通辉石、黑云母,基质呈隐晶质;普通辉石斑晶大部分已蚀变,由方解石、透闪石集合体取代而具自形粒状的假象外形,基性玻璃呈现一定程度的脱玻化。煌斑岩的黑云母K-Ar年龄为26.4~26.7 Ma(张文林等,2015),形成于渐新世晚期。

矿区已圈出金矿体12条,其中15号矿体为主矿体。矿体在空间上集中分布于近东西向断裂控制的构造蚀变带内,形态呈脉状、透镜状,矿体长30~930 m、厚6.39~65.50 m不等(图2)。各矿体的金平均品位范围为3.96~5.09 g/t,已探明金资源量47.2 t,达大型以上矿床规模。15号矿体位于近东西向断裂的东段,矿体倾向320°~340°,倾角约70°,剖面形态呈上宽下窄的漏斗状(图3),有向下变薄的趋势,局部地段有分支现象。

矿石类型以蚀变岩型金矿石为主,主要包括蚀变玄武岩矿石、蚀变凝灰岩矿石,见少量蚀变岩屑砂

岩矿石及蚀变碳质板岩矿石。矿石发育网脉状(图4a)、脉状(图4b)、角砾状(图4c)、浸染状构造,矿石结构包括自形-半自形粒状结构(图4d)、碎裂结构、充填结构及交代结构等。

金属矿物主要有黄铁矿和毒砂,含少量褐铁矿、蓝铜矿等氧化矿物。主要脉石矿物为绢云母、石英、白云石和方解石,次为钠长石、次闪石、绿泥石等。黄铁矿呈他形粒状,立方体,五角十二面体(图4d),粒度一般0.05~0.2 mm。他形粒状黄铁矿在矿石中多呈团块状集合体及细脉状产出;立方体、五角十二面体黄铁矿多呈浸染状或细脉状产出。毒砂呈自形的菱形、延长状菱形(图4d),粒度一般在0.05~0.3 mm。毒砂多呈星点状产出,常见有穿插黄铁矿的特征。五角十二面体黄铁矿、毒砂为主要的载金矿物。

矿体围岩蚀变主要为硅化、黄铁绢英岩化、碳酸盐化。由地表至深部,碳酸盐化逐渐变弱,硅化、黄

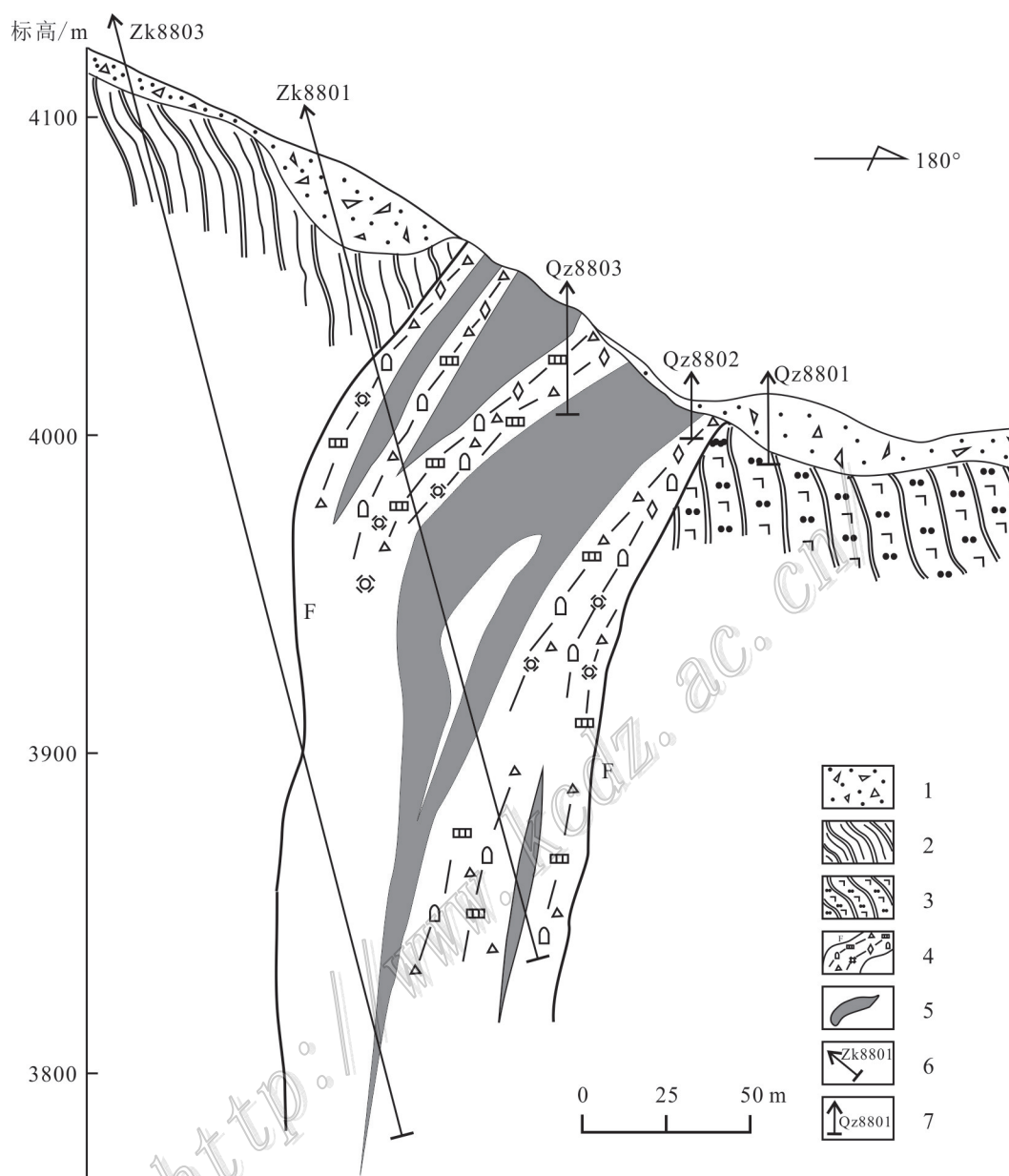


图3 梭罗沟金矿床88勘探剖面图(刘书生等,2015)

1—残坡积物;2—砂质板岩;3—变基性火山岩;4—构造蚀变带;5—金矿体;6—钻孔及编号;7—浅井及编号

Fig. 3 Geological section along No. 88 Exploration line of the Suoluogou Au deposit(modified after Liu et al., 2015)

1—Slope wash; 2—Sandy slates; 3—Meta-basic volcanic rocks; 4—Structural-altered zone; 5—Au orebodies;

6—Drill hole and its serial number; 7—Shallow well and its serial number

铁绢英岩化逐渐变强。硅化蚀变主要表现为各类石英脉体的发育(图4a、b),与金成矿密切相关。黄铁绢英岩化主要表现为绢云母和石英交代长石和黑云母,以及呈细脉状充填于裂隙中的黄铁矿-绢云母(图4c)。碳酸盐化,主要见于矿体浅部及地表,发育石英-方解石脉(图4c、f)。

根据矿物共生组合、矿石结构及脉体穿插关系,可将流体成矿过程分为早、中、晚3个阶段:①早阶段为石英-黄铁矿阶段,发育石英+少量他形黄铁矿组合,以无矿石英脉、石英-黄铁矿脉形式产出;②中阶段为石英-黄铁矿-毒砂阶段,以发育五角十二面体黄铁矿和自形毒砂为特征,是主要的金成矿阶段;

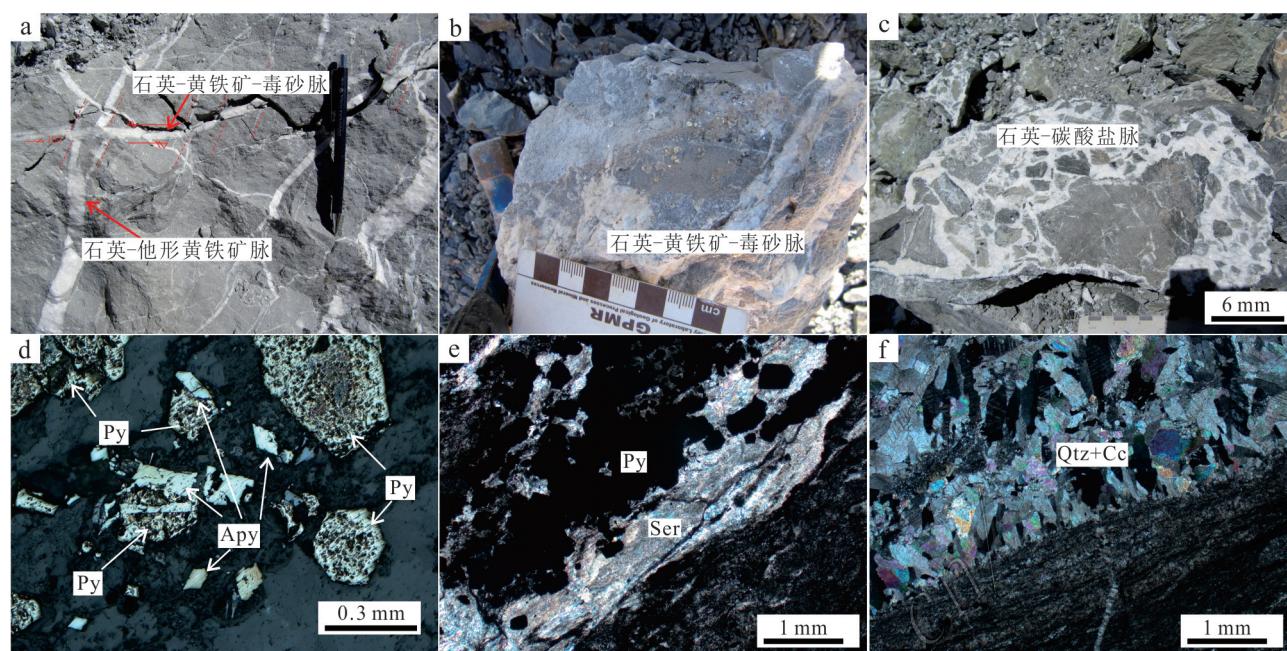


图4 梭罗沟金矿床矿化、蚀变特征

a. 中阶段石英-黄铁矿-毒砂脉穿切早阶段石英-他形黄铁矿脉;b. 中阶段石英-黄铁矿-毒砂脉;c. 晚阶段角砾状矿石,发育石英-碳酸盐脉;d. 中阶段矿石中黄铁矿与毒砂共生;e. 石英-绢云母脉;f. 石英-方解石脉

APy—毒砂;Cc—方解石;Py—黄铁矿;Qtz—石英;Ser—绢云母

Fig. 4 Photographs showing ore petrography of the Suoluogou Au deposit

a. Early-stage quartz-pyrite veinlet, cut by the middle-stage quartz-pyrite-arsenopyrite veinlet; b. Middle-stage quartz-pyrite-arsenopyrite veinlet; c. Late-stage brecciated ore, with development of quartz-calcite veinlet; d. Coexistence of the pyrite and arsenopyrite in the middle-stage ores; e. Quartz-sericite veinlet; f. Quartz-calcite veinlet

APy—Arsenopyrite; Cc—Calcite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Ser—Sericite

③ 晚阶段为石英-碳酸盐阶段,以出现低温的方解石为特征,主要发育石英-方解石脉,见少量立方体黄铁矿。

矿床形成时代不明,考虑到其受控于近东西向断裂,成矿应同步或晚于近东西向断裂形成时代,推测成矿形成于义敦岛弧与扬子陆块西缘的碰撞造山过程中。

3 流体包裹体研究

3.1 样品和测试

研究样品包括来自梭罗沟矿床地表和钻孔的蚀变玄武岩型矿石、蚀变碳质板岩矿石、蚀变凝灰岩型矿石,涵盖了早阶段无矿石英脉、石英-黄铁矿脉,中阶段石英-黄铁矿-毒砂脉、石英-黄铁矿脉,晚阶段石英-碳酸盐±黄铁矿脉(表1)。

流体包裹体显微测温分析在中国地质调查局

成都地质调查中心实验与分析测试室完成,所用仪器为LINKAM THMSG600冷热台,测试温度范围为 $-196\sim 600^{\circ}\text{C}$,在 $-120\sim -70^{\circ}\text{C}$ 温度区间的测定精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、在 $-70\sim +100^{\circ}\text{C}$ 区间精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,在 $100\sim 500^{\circ}\text{C}$ 区间精度为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。采用美国FLUID INC公司提供的人工合成流体包裹体样品对冷热台进行了温度标定。测试过程中,升温速率一般为 $1\sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,含 CO_2 包裹体相变点附近升温速率为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$,水溶液包裹体相变点附近的升温速率为 $0.2\sim 0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,基本保证了相转变温度数据的准确可靠。

单个包裹体成分的激光拉曼显微探针测试在中国地质调查局成都地质调查中心实验与分析测试室完成,测试仪器为RM-1000型拉曼光谱仪,使用 514.5 nm 氩激光器,计数时间为 10 s ,每 1 cm^{-1} (波数)计数一次, $100\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 全波段一次取峰,激光斑束大小为 $2\text{ }\mu\text{m}$,光谱分辨率 $\pm 2\text{ cm}^{-1}$ 。

表1 梭罗沟金矿不同阶段矿石样品特征及其所含流体包裹体类型

Table 1 Characteristics of samples from the Suoluogou Au deposit for fluid inclusion study

样品编号	采样深度	矿石类型	成矿阶段	脉体矿物组合	流体包裹体类型
PM03-3-b1	地表	硅化碳质板岩	晚	石英-碳酸盐脉	W型
PM03-4-b1	地表	硅化碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型
PM03-4-b2	地表	硅化碎裂岩	中	石英-黄铁矿脉	W型
PM03-4-b3	地表	硅化碎裂岩	早	石英-黄铁矿脉	W型
PM03-4-b4	地表	硅化碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型
PM03-6-b1	地表	硅化碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型
PM03-6-b2	地表	硅化碎裂岩	晚	石英-碳酸盐脉	W型
ZK8002-B1	地表	硅化碳质板岩	晚	石英-碳酸盐脉	W型
ZK8002-B2	20 m	硅化碳质板岩	晚	石英-碳酸盐-黄铁矿脉	W型
ZK8002-B3	45 m	蚀变碎裂岩	早	石英-黄铁矿脉	C型、W型
ZK8002-B5	87 m	蚀变碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型
ZK8002-B6	103 m	蚀变碎裂岩	早	石英-黄铁矿脉	C型、W型
ZK8002-B7	125 m	蚀变碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型
ZK8002-B8	151 m	蚀变碎裂岩	早	无矿石英脉	C型、W型
ZK8002-B9	176 m	蚀变碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型
ZK8002-B11	213 m	蚀变碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型
ZK8002-B12	235 m	蚀变碎裂岩	早	石英-黄铁矿脉	W型
ZK8002-B13	257 m	蚀变碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型
ZK8002-B15	303 m	蚀变碎裂岩	中	石英-黄铁矿-毒砂脉	W型

注:碎裂岩原岩主要为玄武岩、凝灰岩。

CO₂-H₂O型包裹体水溶液相的盐度根据笼合物融化温度计算(Collins, 1979);水溶液包裹体的盐度根据冰点温度计算(Bodnar, 1993);CO₂-H₂O型包裹体和水溶液包裹体的密度利用Flincon软件(Brown, 1989)计算获得。

3.2 流体包裹体岩相学

梭罗沟金矿床各成矿阶段脉石矿物中流体包裹体较为发育,其类型较为简单,形态多样(图5a~d)。根据流体包裹体成分以及室温下相态(卢焕章等, 2004;陈衍景等, 2007),将包裹体分为如下2类:

CO₂-H₂O型包裹体(C型):此类包裹体含量较少,主要在早阶段热液石英中发育。多呈负晶形、椭圆形、不规则形孤立分布,长轴长度集中于5~15 μm。CO₂/H₂O比值变化于20%~60%。该类包裹体室温下常可见典型“双眼皮”特征(图5a、b),即V_{CO₂}+L_{CO₂}+L_{H₂O},部分在室温下表现为两相(V_{CO₂}+L_{H₂O}),冷冻过程中出现CO₂液相。

水溶液包裹体(W型):发育广泛,见于成矿各阶段,孤立分布或成群分布,主要为负晶形、椭圆形、不规则形和长条形(图5b~d),长轴长5~20 μm,气相分率为10%~60%;气泡呈圆形或椭圆形,无色或黑色,液相呈无色。

3.3 单个流体包裹体激光拉曼分析

激光拉曼显微探针分析显示,各阶段同类型包裹体的流体成分类似:

C型包裹体中CO₂相仅见CO₂特征峰(1285 cm⁻¹和1387 cm⁻¹)(图6a),未见其他成分,水液相亦仅见宽缓的水峰(图6b)。

W型包裹体气相成分以H₂O为主(图6c)。值得注意的是,产于早、中阶段的W型包裹体气相中含少量CO₂(图6c),而流体包裹体岩相学和显微测温分析中未见CO₂独立相,指示CO₂含量低。W型包裹体液相成分为H₂O(图6d)。

上述包裹体岩相学和激光拉曼显微探针分析结果表明,早阶段成矿流体为H₂O-CO₂-NaCl体

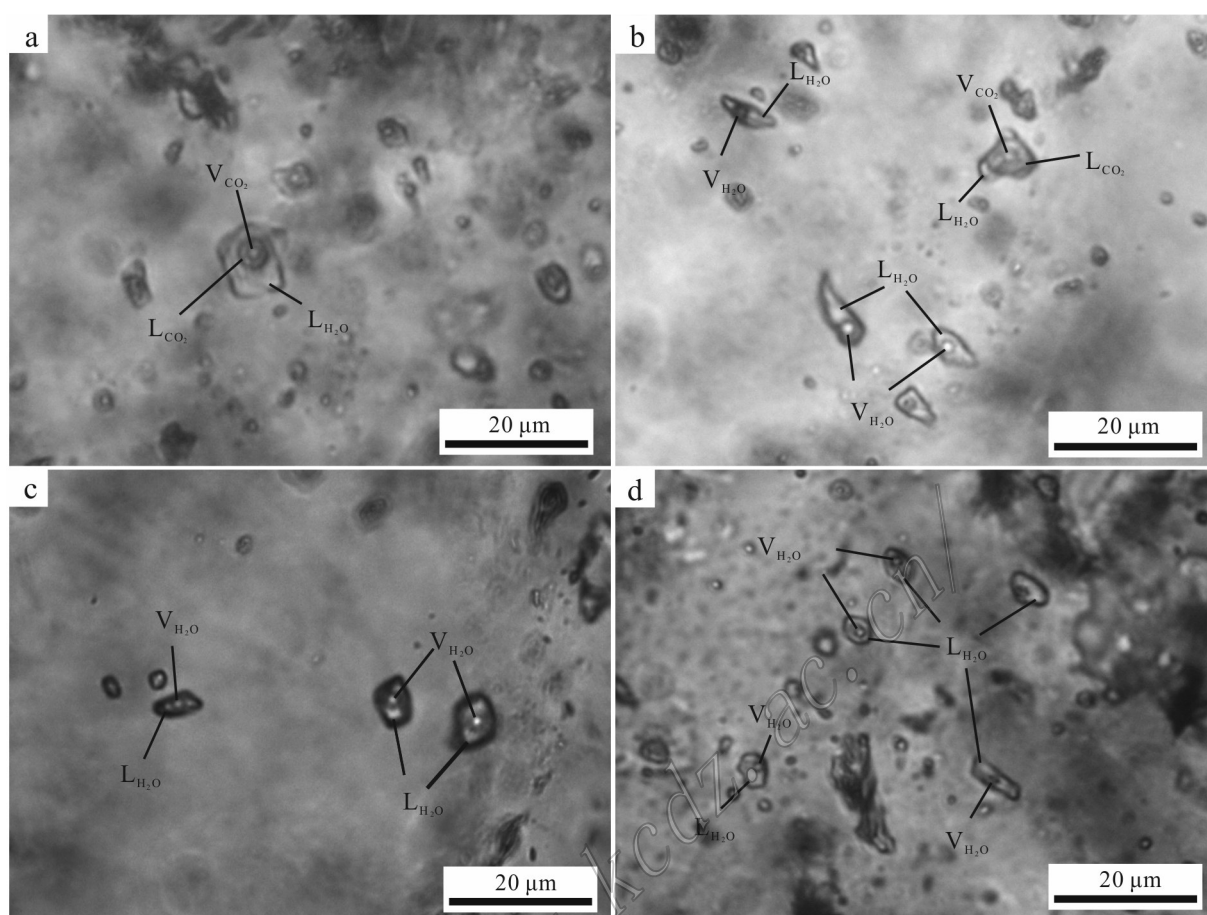


图 5 梭罗沟金矿床流体包裹体显微照片

a. C 型包裹体; b. 富 CO_2 相的 C 型包裹体与 W 型包裹体共生; c. 呈石英负晶形的 W 型包裹体; d. 富液相的 W 型包裹体

V_{CO_2} —气相 CO_2 ; L_{CO_2} —液相 CO_2 ; $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ —气相 H_2O ; $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ —液相 H_2O

Fig. 5 Microphotographs of fluid inclusions in the Suoluogou Au deposit

a. C-type fluid inclusion; b. Coexistence of the W-type fluid inclusion and CO_2 rich C-type fluid inclusion;

c. W-type fluid inclusion with negative quartz crystal in shape; d. W-type fluid inclusion

V_{CO_2} — CO_2 vapor; L_{CO_2} — CO_2 liquid; $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ — H_2O vapor; $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ — H_2O liquid

系,中阶段成矿流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}\pm\text{CO}_2$ 体系,晚阶段成矿流体演变为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系。

3.4 流体包裹体显微测温分析

本文对梭罗沟金矿床各成矿阶段流体包裹体进行了详细的显微测温分析,获得数据 118 件,结果列于表 2 和图 7、图 8。

早阶段热液石英中原生包裹体以 W 型和 C 型为主,多呈负晶形、椭圆形和不规则形产出,长轴长度一般为 $5\sim 15\ \mu\text{m}$ 。C 型包裹体 CO_2 相($\text{L}_{\text{CO}_2}+\text{V}_{\text{CO}_2}$)所占体积比例变化于 $20\%\sim 60\%$;冷冻后回温过程中测得 CO_2 固相的初熔温度为 $-56.6\sim -57.3^\circ\text{C}$,接近于或

略低于纯 CO_2 的三相点(-56.6°C),表明除 CO_2 外可能含其他气相组分,但激光拉曼测试仅见 CO_2 ,可能由于其他组分含量低于拉曼光谱的检测限所致(卢焕章等, 2004);继续升温,获得笼合物消失温度为 $4.7\sim 8.3^\circ\text{C}$,对应水溶液相的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $3.3\%\sim 9.4\%$;部分均一温度介于 $8.9\sim 29.6^\circ\text{C}$ 之间,部分均一至液相;完全均一温度为 $268\sim 371^\circ\text{C}$,均一至气相或液相;计算获得流体密度变化于 $0.86\sim 1.00\ \text{g}/\text{cm}^3$ 之间。W 型包裹体气相约占总体积的 $20\%\sim 60\%$,测得其冰点温度为 $-9.8\sim -3.2^\circ\text{C}$,对应盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $5.3\%\sim 13.7\%$;密度为 $0.73\sim 0.89\ \text{g}/\text{cm}^3$,完全均一温度

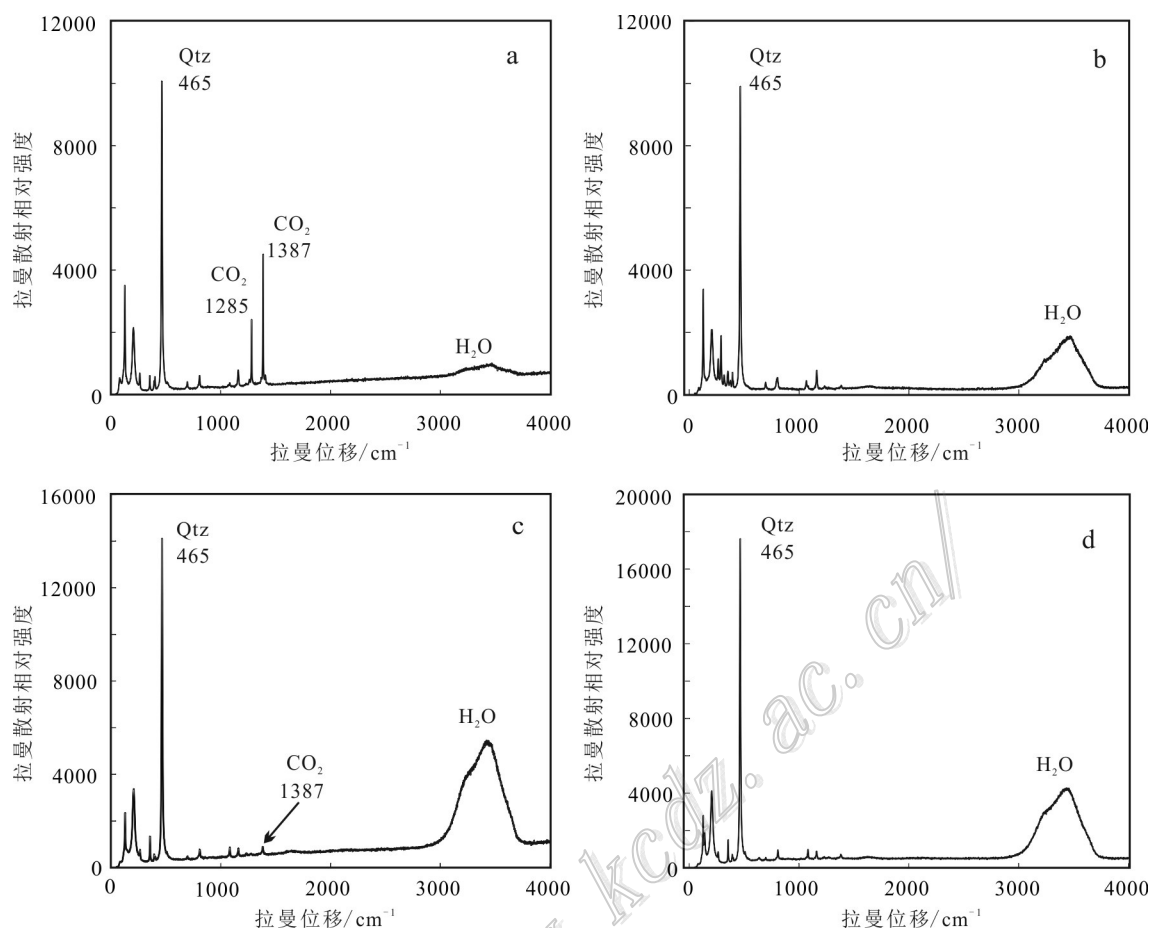


图6 梭罗沟金矿床流体包裹体激光拉曼(LRM)图谱

a. 早阶段C型包裹体气相中的CO₂; b. 早阶段C型包裹体液相中的H₂O; c. 中阶段W型包裹体气相中的H₂O和少量CO₂; d. W型包裹体液相中的H₂O

Fig. 6 The LRM spectra of fluid inclusions in the Souluogou Au deposit

a. CO₂-spectrum of the C-type fluid inclusion in the early stage; b. H₂O-spectra of the C-type fluid inclusion in the early stage; c. H₂O-and CO₂-spectrum of the W-type fluid inclusion in the middle stages; d. H₂O-spectra of the W-type fluid inclusion

集中于372~550℃,均一至液相。

中阶段是金矿化的主要阶段,该阶段热液石英

中大量发育W型包裹体,多呈负晶形、椭圆形、不规则形和长条形产出,长轴长度一般5~20 μm。W型

表2 梭罗沟金矿床石英流体包裹体显微测温结果

Table 2 Microthermometric data of fluid inclusions of quartz from the Souluogou Au deposit

阶段	类型	n/个	$t_{m,CO_2}/^{\circ}C$	$t_{m,ice}/^{\circ}C$	$t_{m,cla}/^{\circ}C$	$t_h/^{\circ}C$	$w(NaCl_{eq})/\%$	$\rho/(g/cm^3)$
早	C	12	-56.6~-57.3		4.7~8.3	268~371(L,V)	3.3~9.4	0.86~1.00
早	W	17		-9.8~-3.2		251~338(L)	5.3~13.7	0.73~0.89
中	W	52		-10.0~-1.0		187~294(L,V)	1.6~13.9	0.79~0.96
晚	W	37		-7.1~-0.1		144~224(L)	0.2~10.6	0.88~0.97

注:n为测试包裹体数目; t_{m,CO_2} 为固相CO₂初熔温度; $t_{m,cla}$ 为笼合物熔化温度; t_{h,CO_2} 为CO₂部分均一温度; $t_{m,ice}$ 为冰点温度; t_h 为完全均一温度; $w(NaCl_{eq})$ 为盐度; ρ 为密度;括号中的V和L分别代表均一至气相和液相。

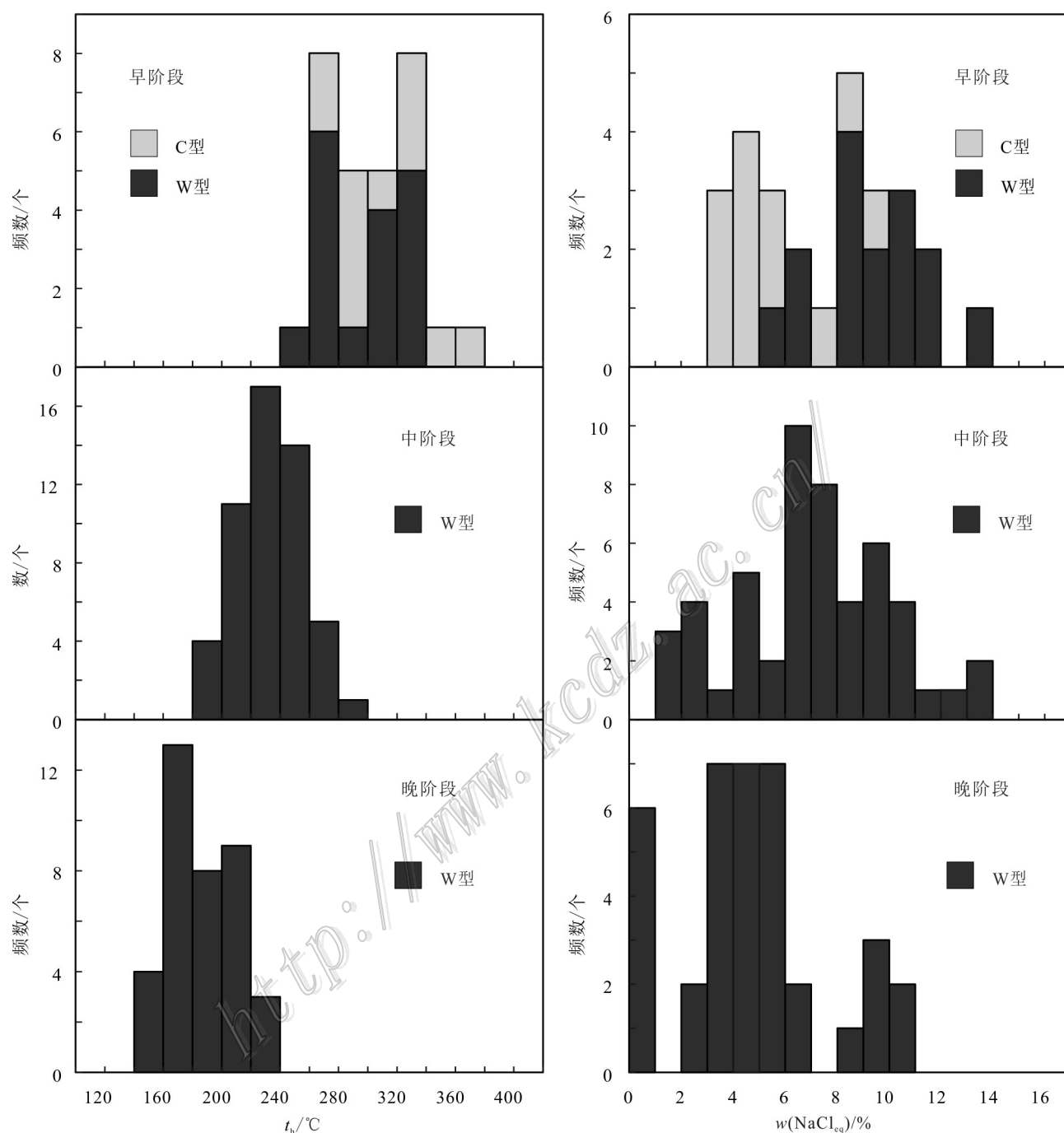


图7 梭罗沟金矿床各成矿阶段流体包裹体均一温度(左)和盐度直方图(右)

Fig. 7 Histograms of homogenization temperatures (left) and salinities (right) of fluid inclusions in different stages of minerals in Suoluogou Au deposit

包裹体中气相所占比例集中于10%~40%。获得其冰点温度为 $-10.0\sim-1.0^{\circ}\text{C}$, 对应盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为1.6%~13.9%;加热过程大部分包裹体均一至液相, 均一温度为 $187\sim294^{\circ}\text{C}$, 峰值为 240°C ;获得流体密度为 $0.79\sim0.96\text{ g/cm}^3$ 。

晚阶段热液石英中仅发育W型包裹体,多呈椭圆形和不规则形,长轴长度变化于 $5\sim20\text{ }\mu\text{m}$,气相分数5%~20%。获得冰点温度为 $-7.1\sim-0.1^{\circ}\text{C}$,对应盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为0.2%~10.6%;密度 $0.88\sim0.97\text{ g/cm}^3$,包裹体全部均一至液相,均一温度变化于 $144\sim224^{\circ}\text{C}$ 之间。

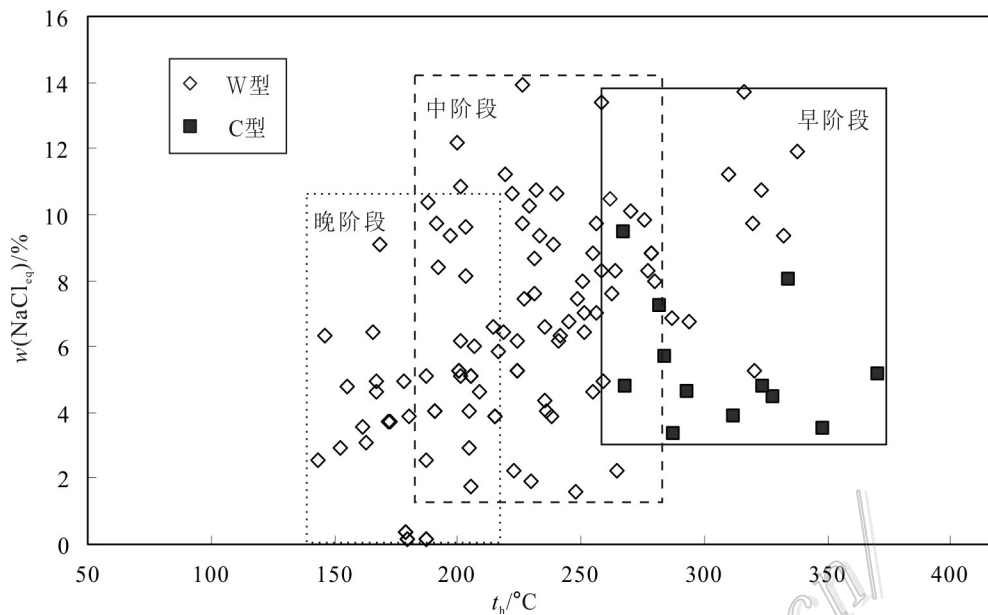


图8 梭罗沟金矿床各成矿阶段流体包裹体均一温度与盐度图

Fig. 8 Homogenization temperatures versus salinities of fluid inclusions in different stages in Suoluogou Au deposit

3.5 包裹体捕获压力及深度估算

根据 H_2O-CO_2 包裹体的部分均一温度、部分均一方式、部分均一时 CO_2 相所占比例及完全均一温度,利用流体包裹体数据处理Flincon程序(Brown, 1989)以及Bowers等(1983)公式,获得早阶段流体包裹体最小捕获压力为102~343 MPa。

鉴于矿区围岩主要为蚀变致密块状玄武岩,取其平均密度 3.0 g/cm^3 ,按照静岩压力计算获得早阶段最小成矿深度约为3.4~11.4 km;如果假设流体处于静水压力系统,则早阶段相应最小成矿深度为10.4~35 km。考虑到梭罗沟金矿体产于断裂破碎带中,流体压力可能受断层阀模式控制,早阶段流体处于静岩压力与静水压力的转换交替状态,其最高压力端代表静岩压力系统(深度约11 km),低端代表静水压力系统(深度约10 km),二者代表的深度近一致,表明梭罗沟金矿床的早阶段成矿深度应为10~11 km。

4 讨论

4.1 成矿流体性质及演化

流体包裹体研究表明,梭罗沟金矿床早阶段发育 CO_2-H_2O 包裹体、水溶液包裹体,均一温度集中于251~371 $^{\circ}C$,盐度 $w(NaCl_{eq})$ 为3.3%~13.7%,表明早阶段成矿

流体属中-高温、低盐度的 H_2O-CO_2-NaCl 体系,与造山型金矿成矿热液特征一致(陈衍景, 2006; 陈衍景等, 2007; Kerrich et al., 2000; Mernagh et al., 2007)。据王兆成等(2012),梭罗沟金矿床载金黄铁矿、毒砂的硫同位素 $\delta^{34}S$ 为-1.18‰~7.79‰,与典型的造山型矿床中硫化物的硫同位素值相似(Goldfarb et al., 2005)。综上,笔者认为梭罗沟初始成矿流体为变质热液。早阶段C型流体包裹体 CO_2/H_2O 比值为20%~60%,变化较大,包裹体均一温度相近而均一方式多样,也表明早阶段成矿流体可能发生了一定程度的沸腾,导致 H_2O 与 CO_2 的不混溶。早阶段成矿流体在成矿10~11 km深处形成早阶段石英-他形黄铁矿脉,流体系统在静岩压力系统与静水压力系统之间转换。

早阶段矿化和蚀变消耗了成矿流体系统的热量和溶质,导致流体的温度和盐度降低(图8)。获得中阶段流体温度集中于187~294 $^{\circ}C$ (峰值为240 $^{\circ}C$),盐度 $w(NaCl_{eq})$ 介于1.6%~13.9%。中阶段只发育W型包裹体,但在包裹体气相中识别出少量 CO_2 成分;未见含 CO_2 独立相的C型包裹体,指示 CO_2 在中阶段大量逃逸。温度的降低、 CO_2 大量逃逸导致中阶段成矿流体氧逸度的降低、硫逸度升高,大量五角十二面体黄铁矿和毒砂沉淀。已有研究证明,在典型热液条件下(低氧逸度、中到弱酸性pH值),金在流体中主要与还原硫组成硫氢络合物进行运移(Gibert et

表 3 梭罗沟金矿床与造山型金矿床标志性特征对比

Table 3 Comparison of key characteristics between the Suoluogou Au deposit and orogenic Au deposits

特征	造山型金矿床	梭罗沟金矿床
构造背景	增生型造山带的俯冲增生楔或碰撞造山带	甘孜-理塘缝合带,碰撞造山带
与构造的关系	成矿同步于或尾随于造山时间	成矿同步或晚于近东西向断裂形成时代,可能形成于义敦岛弧与扬子陆块西缘的碰撞造山过程中
控矿构造	矿体定位受构造控制	矿体产于近东西向断裂控制的构造蚀变带中
矿体特征	矿体呈脉状产出,延深可达数公里,矿体边界清楚	矿体形态呈脉状、透镜状,延深可达 300 m 以上,矿体边界清楚
矿石类型	矿石类型主要为石英脉和蚀变岩	矿石主要为蚀变玄武岩和蚀变凝灰岩,石英脉体发育
矿石矿物	金属矿物以黄铁矿为主	金属矿物主要为黄铁矿和毒砂
矿化期次	3 阶段矿化:早阶段石英-黄铁矿化,中阶段多金属硫化物化,晚阶段石英-碳酸盐化	3 阶段矿化:早阶段石英-他形黄铁矿化,中阶段石英-五角十二面体黄铁矿-毒砂化,晚阶段石英-碳酸盐±立方体黄铁矿化
包裹体类型	3 种类型包裹体:富 CO ₂ 包裹体、含 CO ₂ 水溶液包裹体及水溶液包裹体	2 种类型包裹体:含 CO ₂ 水溶液包裹体及水溶液包裹体
均一温度	从早到晚,流体包裹体的捕获温度降低,成矿温度高于 200℃,但一般低于 500℃	从早到晚,流体包裹体的捕获温度降低,早、中成矿温度分别为 251~371℃ 和 187~294℃
压力/深度	从早到晚,流体包裹体的捕获压力降低,从超静岩压力系统变化到静水压力系统,成矿压力为 50~400 MPa	早阶段成矿流体系统从超静岩压力系统变化到静水压力系统,成矿压力为 102~343 MPa
流体组分	流体成分由富含 CO ₂ 演变为水溶液,CO ₂ /H ₂ O 比值在中阶段突然降低,表明发生了以 CO ₂ 逸失为特征的不混容或沸腾现象	流体成分由含 CO ₂ 演变为水溶液,中阶段未见含 CO ₂ 独立相的 C 型包裹体,表明发生 CO ₂ 逸失
盐度	流体包裹体标志为低盐度、富 CO ₂	流体包裹体标志为低盐度、富 CO ₂
硫同位素	因源区不同而差异较大,大部分矿床硫化物 δ ³⁴ S 值为 0~10‰	黄铁矿、毒砂的 δ ³⁴ S 值为 -1.18‰~7.79‰

al., 1993; Zotov et al., 1995; Benning et al., 1996), 中阶段黄铁矿、毒砂等硫化物的沉淀会导致金的硫氢络合物的不稳定而沉淀,而沉淀形成的五角十二面体黄铁矿、毒砂也成为主要载金矿物。综上,成矿流体温度的降低、CO₂ 的逃逸以及黄铁矿、毒砂等硫化物的沉淀是造成梭罗沟金矿床金沉淀的主要因素。

随成矿系统裂隙的大量发育,高氧逸度的地下水不断混入成矿流体系统并循环对流,流体氧逸度、酸度不断增高。晚阶段只发育 W 型流体包裹体,流体温度已降低至 144~224℃;盐度亦较低, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化于 0.2%~10.6%。上述特征表明初始的变质流体系统已逐步被大气降水热液所代替。

4.2 矿床成因类型

矿床地质和流体包裹体特征可以作为识别不同成因热液金矿的标志性特征(陈衍景等, 2007)。

梭罗沟金矿床产于甘孜理塘缝合带,推测其形成于义敦岛弧与扬子陆块西缘的碰撞造山过程中,成矿与碰撞造山作用密切相关。梭罗沟金矿矿体产于近东西向断裂控制的构造蚀变带中,呈脉状、透镜体状向深部延伸;矿区未见中酸性岩体发育;

矿石主要为蚀变玄武岩和蚀变凝灰岩,黄铁矿和毒砂为主要赋金矿物;主要发育硅化、黄铁绢英岩化和碳酸盐化蚀变,具有三阶段矿化特征,不发育高温钾化蚀变,不具有典型浅成低温热液蚀变特征。可见梭罗沟金矿床构造背景以及地质特征与造山型金矿相似(表 3),区别于浅成低温热液型金矿和岩浆热液型金矿。

梭罗沟金矿床早阶段发育 CO₂-H₂O 型包裹体和水溶液包裹体,未见高盐度含子晶包裹体,最高成矿温度为 371℃,成矿流体具有造山型金矿的特征。成矿早阶段成矿深度约为 10~11 km,明显深于浅成低温热液型金矿和岩浆热液型金矿。矿床黄铁矿、毒砂的硫同位素值与大部分造山型金矿床硫化物硫同位素近似(Goldfarb et al., 2005)。

综合前面对于梭罗沟金矿床地质和流体包裹体特征的研究结果,对比造山型矿床的标志性特征(陈衍景, 2006; 陈衍景等, 2007; Goldfarb et al., 2005)(表 3),特别是国内外典型造山型金矿的特点(Hagemann et al., 2003; Groves et al., 2003; Fan et al., 2003; Chen et al., 2006),笔者认为梭罗沟金矿床为断控造山型金矿。

5 结 论

(1) 梭罗沟金矿床位于甘孜-理塘金矿带南端, 矿体产于近东西向断裂控制的构造蚀变带内, 流体成矿过程可以分为3个阶段: 早阶段以发育石英-他形黄铁矿脉为特征, 矿化较弱; 中阶段以石英、五角十二面体黄铁矿、毒砂矿物组合为特征, 为主成矿阶段; 晚阶段发育石英-碳酸盐±立方体黄铁矿脉, 基本无矿化。硅化、黄铁绢英岩化、碳酸盐化蚀变发育。

(2) 成矿早阶段脉石矿物中发育水溶液包裹体、CO₂-H₂O型包裹体, 均一温度变化于251~371℃; 中、晚阶段只发育水溶液包裹体, 均一温度分别为187~294℃和144~224℃。从早阶段到晚阶段, 成矿流体由中-高温、富CO₂的变质热液向低温、贫CO₂的大气降水热液演化, 成矿流体温度的降低、CO₂逃逸是控制成矿物质沉淀的主要因素。早阶段成矿压力为102~343 MPa, 成矿深度约为10~11 km。

(3) 矿床地质和流体包裹体特征指示梭罗沟金矿床可能为造山型金矿床。

References

- Benning L G and Seward T M. 1996. Hydrosulphide complexing of Au(I) in hydrothermal solutions from 150~400°C and 500~1500 bar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(11): 1849-1871.
- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684.
- Bowers T S and Helgson H C. 1983. Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O-CO₂-NaCl on phase relations in geologic systems: Equation of state for H₂O-CO₂-NaCl fluids at high pressures and temperatures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 1247-1275.
- Brown P E. 1989. Flncon: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data[J]. *American Mineralogist*, 74: 1390-1393.
- Chen Y J. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential[J]. *Geology in China*, 33: 1181-1196(in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Pirajno F, Qi J P and Wang H H. 2006. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shangong gold deposit, East Qinling Orogen, China[J]. *Resource Geology*, 56(2): 99-116.
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajno F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 2085-2108(in Chinese with English abstract).
- Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity[J]. *Econ. Geol.*, 74: 1435-1444.
- Deng J and Wang Q F. 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework[J]. *Gondwana Research*, 36: 219-274.
- Du J R. 2012. Geological character and primary study of genesis about the Suoluogou gold deposit, Muli County, Sichuan Province (Master degree thesis)[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-59(in Chinese with English abstract).
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H and Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 739-750.
- Fu X F and Ying H L. 2003. Cenozoic tectonic movement and its relationship with gold mineralization in the northern segment of the Garze-Litang fault belt[J]. *Geology in China*, 30(4): 413-418(in Chinese with English abstract).
- Gibert F, Pascal M L and Pichavant M. 1993. Solubility of gold in KCl (0.5 m) solution under hydrothermal conditions (350~450°C, 500 bar) (abstr.)[M]. In: Cuney M and Cathelineau M, eds. *Proc. 4th International symposium on hydrothermal reactions*[C]. Institut Lorrain des Geoscience, 65-68.
- Goldfarb R J, Baker T, Dube B, Groves D I, Hart C J R and Gosselin P. 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes[J]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 407-450.
- Groves D I, Goldfarb R J, Robert F and Hart C J R. 2003. Gold deposits in metamorphic belts: Overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance[J]. *Econ. Geol.*, 98: 1-29.
- Hagemann S G and Luders V. 2003. *P-T-X* conditions of hydrothermal fluid and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization and the Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: Conventional and infrared microthermometric constrains[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 936-952.
- Hou Z Q, Qu X M, Zhou J R, Yang Y Q, Huang D H, Lü Q T, Tang S H, Yu J J, Wang H P and Zhao J H. 2001. Collision-orogenic processes of the Yidun Arc in the Sanjiang Region: Record of granites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 484-497(in Chinese with English abstract).
- Huan W J, Li N, Yuan W M, Gong Q J, Zhang J and Wang Q F. 2013. Fission track constrain on mineralization time and tectonic events in Ganzi-Litang gold belt, Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1338-1346(in Chinese with English abstract).
- Kerrick R, Goldfarb R J, Groves D, Garwin S and Jia Y F. 2000. The characteristics, origins and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science in China Series D*, 43

- (Supp.): 1-68.
- Liu S S, Fan W Y, Nie F, Liu W W and Wang X F. 2015. Geological characteristics and ore-controlling factors analysis of Suoluogou gold deposit, Muli County, Sichuan Province[J]. *Gold*, 6(36): 8-13 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, He Z W, Long X J and Feng X L. 2011. Extraction of remote sensing alteration information and analysis of ore-searching Prospect in Jianglang Dome metallogenic zone[J]. *Journal of Sichuan Normal University(Natural Science)*, 34(2): 267-272(in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. Fluid inclusion[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Mernagh T P, Bastrakov E N, Zaw K, Wygralak A S and Wyborn L A I. 2007. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold systems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 21-32.
- Pan G T, Chen Z L and Li X Z. 1997. Geological-Tectonic evolution in the Eastern Tethys[M]. Beijing: Geological Publishing House. 23-29(in Chinese).
- Wang Z C, Gou Y D, Fan X and Luo T. 2012. Typomorphic characteristics and its geological significance from pyrite of the Suoluogou gold deposit, Muli County, Sichuan Province[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(6): 729-735(in Chinese with English abstract).
- Wei Y F and Luo S L. 2003. Geological features of ophiolite in the middle Garze-Litang plate junction[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 23(3): 134-140(in Chinese with English abstract).
- Wei Y F and Luo S L. 2004. Division and composition of the non-Smithian strata in the middle part of the Garze-Litang suture zone, western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(4): 21-30 (in Chinese with English abstract).
- Xiao J, Sun C M, Liu Y S, Ma Z N, Yang H Z, Zhou Q L and Sun Y. 2008. Wallrock alteration and relation with gold mineralization of Ajialongwa gold deposit in the central Ganzi-Litang fault zone, Sichuan[J]. *Geology and Prospecting*, 44(6): 8-12(in Chinese with English abstract).
- Yan N, Zhang J, Yuan W M, Gong Q J, Wang Q F and Luo J H. 2013. Characteristics of isotopic geochemistry and metallogenesis of the Gala gold deposit in Ganzi-Litang suture zone, western Sichuan Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1347-1357(in Chinese with English abstract).
- Yan Z G. 2006. Geological characteristics of gold deposits in Ganzi-Litang fault and preliminary discussion on their ore control factors[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21: 52-57(in Chinese with English abstract).
- Yang W S, Hu Z W and He D R. 2007. Geochemical model for mineral prospecting of the Ajialongwa gold deposit in the central segment of the Garzê-Litang fault zone in Sichuan[J]. *Geology in China*, 34(1): 123-131(in Chinese with English abstract).
- Yang Y P and Yang L Y. 2007. Geological features and prospecting potential of the Ajialongwa-Yahuo Au-(Cu) ore zone, Litang, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 27(3): 170-76(in Chinese with English abstract).
- Yu A G, Lu M G, Song X H and Liu W W. 2014. Geological features of the Suoluogou Au deposit in Muli, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 34(4): 514-516(in Chinese with English abstract).
- Zhang L T, Yuan W M, Li N, Huan W J, Zhang J, Wang Q F and Gong Q J. 2015. Apatite fission track constrains on tectonic activities in Ganzi-Litang gold belt, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3353-3362(in Chinese with English abstract).
- Zhang W L, Cao H W, Yang Z M, Xi X Y, Liu W W, Peng S M and Zheng L. 2015. Geochemical characteristics and genesis of lamprophyres of the Cenozoic from the Suoluogou gold deposit, Sichuan Province, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 110-119(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y, Wang Q F, Zhang J, Gong Q J and Cheng W B. 2012. Geological characteristics and genesis of Ajialongwa gold deposit in Ganzi-Litang suture zone, West Sichuan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 691-701(in Chinese with English abstract).
- Zotov A V and Baranova N N. 1995. The solubility of Au₂S and Au-AgS in near-neutral sulphide solutions at temperatures of 25 and 80°C and pressures of 1 and 500 bars[A]. In: Kharaka Y K and Chudaev O V, eds. *Water-rock interaction-8*[M]. Balkema Press. 773-776.

附中文参考文献

- 陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. *中国地质*, 33: 1181-1196.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2085-2108.
- 杜金锐. 2012. 四川梭罗沟金矿床地质特征与成因初探[D]. 硕士学位论文, 成都: 成都理工大学. 1-59.
- 付小方, 应汉龙. 2003. 甘孜-理塘断裂带北段新生代构造特征及金矿成矿作用[J]. *中国地质*, 30(4): 413-418.
- 侯增谦, 曲晓明, 周继荣, 杨岳清, 黄典豪, 吕庆田, 唐绍华, 余今杰, 王海平, 赵金花. 2001. 三江地区义敦岛弧碰撞造山过程: 花岗岩记录[J]. *地质学报*, 75(4): 484-497.
- 郇伟静, 李娜, 袁万明, 龚庆杰, 张静, 王庆飞. 2013. 四川甘孜-理塘金成矿带成矿时代与构造活动的裂变径迹研究[J]. *岩石学报*, 29(4): 1338-1346.
- 刘书生, 范文玉, 聂飞, 刘文武, 王显峰. 2015. 四川木里梭罗沟金矿地质特征及控矿因素分析[J]. *黄金*, 6(36): 8-13.
- 刘严松, 何政伟, 龙晓君, 冯孝良. 2011. 江浪穹隆成矿区遥感蚀变信息提取及找矿远景分析[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 34(2): 267-272.
- 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. 1-487.
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 1997. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社. 23-29.

- 王兆成, 勾永东, 范晓, 罗涛. 2012. 四川木里梭罗沟金矿黄铁矿标型特征及地质意义[J]. 物化探计算技术, 34(6): 729-735.
- 魏永峰, 罗森林. 2003. 甘孜—理塘结合带中段蛇绿岩的地质特征[J]. 四川地质学报, 23(3): 134-140.
- 魏永峰, 罗森林. 2004. 甘孜—理塘结合带中段非史密斯地层的划分及组分特征[J]. 四川地质学报, 24(4): 21-30.
- 肖军, 孙传敏, 刘严松, 马子宁, 杨弘忠, 周庆磊, 孙遥. 2008. 四川甘孜—理塘断裂带中段阿加隆洼金矿围岩蚀变特征及与金矿化关系[J]. 地质与勘探, 44(6): 8-12.
- 燕旎, 张静, 袁万明, 龚庆杰, 王庆飞, 罗建宏. 2013. 川西甘孜—理塘结合带嘎拉金矿床同位素特征及成矿作用研究[J]. 岩石学报, 29(4): 1347-1357.
- 晏子贵. 2006. 甘孜—理塘断裂带金矿成矿地质特征和控矿因素浅析[J]. 地质找矿论丛, 21(增刊): 52-57.
- 杨伟寿, 胡正文, 何德润. 2007. 四川甘孜—理塘断裂带中段阿加隆洼金矿床地球化学找矿模式[J]. 中国地质, 34(1): 123-131.
- 杨永鹏, 杨露云. 2007. 四川理塘阿加隆洼—亚火金(铜)矿带地质特征及找矿前景[J]. 四川地质学报, 27(3): 170-76.
- 喻安光, 卢玫瑰, 宋晓华, 刘文武. 2014. 四川木里梭罗沟金矿床特征[J]. 四川地质学报, 34(4): 514-516.
- 张丽婷, 袁万明, 李娜, 郇伟静, 张静, 王庆飞, 龚庆杰. 2015. 甘孜—理塘金成矿带构造活动的磷灰石裂变径迹年代学制约[J]. 岩石学报, 31(11): 3353-3362.
- 张文林, 曹华文, 杨志民, 席孝义, 刘文武, 彭仕冕, 郑略. 2015. 四川梭罗沟大型金矿区新生代碱性煌斑岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(1): 110-119.
- 张珂, 王庆飞, 张静, 龚庆杰, 程文斌. 2012. 川西甘孜—理塘缝合带阿加隆洼金矿床地质特征及成因探讨[J]. 岩石学报, 28(2): 691-701.

<http://www.kcdz.ac.cn/>