

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2021.02.004

康定县三碛金矿床流体包裹体研究

何阳阳, 蒋双宇, 邓成雪

(内江师范学院地理与资源科学学院, 四川 内江 641112)

摘要: 探讨康定县三碛金矿床的流体包裹体特征,分析成矿流体的性质,有助于该区成矿条件的认识。通过使用显微冷热台检测该矿床流体包裹体样本的温度,得到该矿床的均一温度、冰点数据,分析其成矿物理化学条件。结果显示,样品的均一温度集中在140~320℃之间,部分样品的均一温度接近500℃;盐度 $w(\text{NaCl, eqv})$ 集中于6.79%~35.30%之间,部分样品的盐度 $w(\text{NaCl, eqv})$ 已达56.06%;密度在0.9935~1.7004 g/cm³之间变化,平均值为1.136 g/cm³。由此表明,三碛金矿床的成矿流体具有中高温、中高盐度、中高密度等特征,地幔流体和地壳流体均参与了成矿。

关键词: 三碛金矿床;包裹体盐度;冷热台测温;大渡河;川西地区

中图分类号: P618.51 **文献标识码:** A

0 引言

大渡河金矿田是我国重要的金矿集成区,其被发现以来就受到地质找矿同行们的广泛关注,该区金矿床(点)分布在南北长约60 km、东西宽约30 km范围内的康定大渡河两岸,被誉为康定大渡河“金谷”^[1]。前人在该区典型矿床的成矿流体和成矿作用等方面做过不少研究工作,例如,李晓峰等^[2-3]根据黄铁矿硫同位素、黄铁矿流体包裹体氦氩同位素、石英流体包裹体氢氧同位素以及石英单矿物中的稀土元素等对区内黄金坪金矿床、白金台子金矿床以及黑金台子金矿床的成矿流体来源进行了探讨,认为其既来源于地壳流体又来源于地幔流体,以地壳来源为主;邹发^[4]对不同赋矿层位的黄金坪金矿床(结晶基底)、偏岩子金矿床(界面)、二里沟金矿床(沉积盖层)进行了矿石特征及成矿过程方面的研

究,认为其为同一成矿系列,都属于石英硫化物脉型热液矿床;赖晋杉^[5]对二里沟、铜炉房、洛河洞、偏岩子、黄金坪、一炷香等金矿床进行了稀有气体同位素方面的研究,认为其成矿流体均为壳幔混源;何阳阳等^[6]对区内三碛金矿床、黄金坪金矿床、竹林金矿床进行了稀土元素地球化学特征研究,认为其成矿物质和流体具有壳幔特征。上述研究从不同角度对区内典型矿床的成矿流体和成矿作用进行了诸多有益的探讨,对于矿床成因的认识及找矿勘查工作提供了有力的证据。本文基于上述成果,将对三碛金矿床进行流体包裹体方面的补充研究,以期有助于该区成矿条件的认识。

1 三碛金矿床简要地质特征

三碛金矿床出露地层为咱里组(P_{t1-2}),呈NW-SE方向分布并贯穿矿区,岩性以灰色、灰黑色

收稿日期: 2020-11-04; **责任编辑:** 沈名星

基金项目: 四川省社会科学重点研究基地康巴文化研究中心资助项目“康定大渡河流域金矿开发与生态环境保护研究”(编号:KBYJ2020B010);四川省教育厅科研项目“康定大渡河金矿田流体包裹体研究”(编号:17ZB0223);国家级大学生创新创业训练计划项目“大渡河流域金成矿带岩石元素地球化学特征研究”(编号:X2019001)。

作者简介: 何阳阳(1984—),男,副教授,博士,从事地质找矿工作。通信地址:四川省内江市东桐路1124号,内江师范学院地理与资源科学学院;邮政编码:641112;E-mail: yangyang.he@qq.com

中-细粒斜长角闪岩、角闪斜长变粒岩及暗绿色变质玄武岩、黑云斜长角闪岩夹黑云阳起斜长变粒岩、黑云角闪斜长片岩、变余杏仁状-枕状玄武岩和硅质岩等为主。矿体主要分布于石英脉的上部或下部,呈现出在平面上弯曲及剖面上背形部位矿体变厚、品位变富的特点,形态则主要表现为不规则脉状、透镜状和楔状等^[7]。按自然类型,金矿石划分为硫化物石英脉型以及蚀变千糜岩型,硫化物石英脉型为主;矿石构造主要为角砾状、网脉状、脉状构造,矿石结构主要为自形-半自形粒状结构和碎裂状结构。三碛金矿床的围岩蚀变主要分为黄铁矿化、碳酸盐化、绢云母化及硅化等;其中黄铁矿化位于绢云母化、硅化之上,于矿体两侧分布。在控矿断裂破碎带中的石英脉周围存在硅化,绢云母化则分布于矿脉两侧的蚀变围岩中。三碛金矿床,按矿物共生组合、成矿地质作用及矿脉的穿插关系可划分为4个阶段:①黄铁矿-石英阶段(I);②金-石英-黄铁矿阶段(II);③金-石英-多金属硫化物阶段(III);④石英-碳酸盐阶段(IV)。

2 流体包裹体研究

矿物在形成的过程中保留了部分流体,流体中蕴含着当时地质环境的各种地质地球化学信息。流体包裹体中的成岩成矿溶液记载和留存了矿物形成的一系列物理化学特征,其对说明成岩成矿流体的特征等有重要的作用^[8]。随着技术的不断进步,流体包裹体研究已成为研究成岩成矿过程、探讨地质作用地球化学和演化历史,并服务于找矿勘探的一门学科。

采集了流体包裹体样品9件,并对每件样品进行显微冷热台检测,观察并记录其相变、冰点、均一温度,计算流体包裹体的盐度、密度,以此为基础寻找各阶段变化规律。本次检测在成都理工大学地球科学学院包裹体实验室完成,使用的仪器为英国LINKAM公司所生产的THMSG600冷热台,最低温度可测-196℃,可测的最高温度为600℃。通过检测发现,石英脉中的样品含有较多的流体包裹体,类型复杂多样,主要以群和孤立的形式出现在石英中。显微镜观察样品的结果表明,其具有的形态有负晶形、椭圆形、圆形、长条形、菱形,以及不规则形

态,说明流体包裹体在其形成过程中受到了其他作用的影响。

(1) 流体包裹体均一温度

流体包裹体的均一温度与矿物流体被捕获时的最低温度等同,即流体的古地温。流体包裹体-显微均一法测温法是应用最为广泛且不会破坏流体包裹体的测温分析方法,它所测到的温度即是流体包裹体保留成矿流体时的温度^[9]。

整理大渡河三碛金矿床的流体包裹体测试数据(表1)后发现,三碛金矿床的流体包裹体均一温度变化范围大,最低仅23.4℃,最高温度则达到492.4℃。在黄铁矿-石英阶段(I),均一温度为171.5~429.2℃,变动相对较大,平均值为270.24℃,是成矿期温度最高的阶段;在金-石英-黄铁矿阶段(II),变动则相对平缓,为218.5~445.6℃,该阶段温度分布较为集中,平均值为255.40℃;在金-石英-多金属硫化物阶段(III),温度变化在28.1~368.6℃,平均值为254.36℃;最后阶段即石英-碳酸盐阶段(IV),均一温度变化的跨度非常大,为23.4~492.4℃,平均值在4个阶段中最低。从成矿期看,第一阶段到第四阶段的平均均一温度呈明显的逐渐下降趋势。为了更直观地观察三碛金矿床的流体包裹体的特点,根据温度数据绘制出其石英包裹体的均一温度直方图(图1),由图1可知,三碛金矿床的形成温度范围较大,区间较宽,其温度主要集中于140~320℃,平均温度为256.36℃;表明三碛金矿床的流体包裹体属于中、高温热液流体,且成矿温度跨度较大。

(2) 流体包裹体盐度

冷冻测温是研究流体包裹体盐度和成分最为有效的方法之一。通过使用该方法,可改变包裹体在冷台上的温度,观察并记录流体包裹体的相态变化,最后可确定流体包裹体所属的流体的体系和成分^[11]。据测验结果发现三碛金矿床流体包裹体冰点温度主要在-15.6~5.3℃(见表2)之间,跨度较广。在黄铁矿-石英阶段(I)冰点温度在-6.8~1.4℃之间,均值为-1.69℃;金-石英-黄铁矿(II)冰点温度在-5.4~1.6℃,均值为-3.61℃;金-石英-多金属硫化物阶段(III)冰点温度在-15.2~5.3℃,均值为-3.5℃;石英-碳酸盐阶段(IV)冰点范围-15.6~1.2℃,均值为-5.1℃。

表 1 三碛金矿包裹体均一温度

Table 1 Homogenization temperature of inclusions in Sandiao gold deposit

成矿期	主矿物	样品编号	包裹体类型	个数	大小/ μm	气液比	均一温度变化范围/ $^{\circ}\text{C}$	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	阶段平均值
黄铁矿-石英阶段(I)	石英	SD01	H ₂ O 两相	11	10~120	0.05~0.3	171.5~429.2	293.85	270.24
		SD02	H ₂ O 两相	12	30~120	0.1~0.3	203.8~424.5	248.61	
金-石英-黄铁矿阶段(II)	石英	SD03	H ₂ O 两相	10	20~150	0.08~0.15	225.6~248.5	237.94	255.40
		SD04	H ₂ O 两相	10	10~40	0.1~0.25	218.5~445.6	272.87	
金-石英-多金属硫化物阶段(III)	石英	SD05	H ₂ O 两相	10	20~150	0.1~0.15	144.1~237.5	225.13	254.33
		SD06	H ₂ O 两相	10	10~50	0.12~0.2	28.1~368.6	283.53	
石英-碳酸盐阶段(IV)	石英	SD07	H ₂ O 两相	12	20~150	0.1~0.15	145.6~184.8	165.26	248.50
		SD08	CO ₂ -H ₂ O 两相	12	10~40	0.15~0.2	23.4~492.4	271.82	
		SD09	CO ₂ -H ₂ O 两相	10	10~60	0.15~0.2	295.6~391.6	322.74	

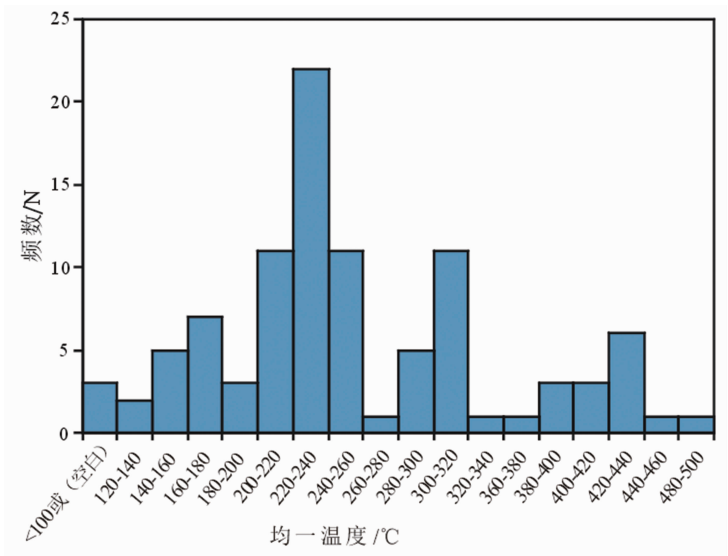


图 1 三碛金矿床石英流体包裹体均一温度直方图

Fig. 1 Homogenization temperature histogram of quartz fluid inclusions in sandiao gold deposit

表 2 三碛金矿床流体包裹体冰点和盐度统计

Table 2 Statistics of freezing point and salinity of fluid inclusions in Sandiao gold deposit

成矿期	样品编号	包裹体类型	冰点温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度 $w(\text{NaCl, eqv})/\%$	平均值	阶段平均值
黄铁矿-石英阶段(I)	SD01	H ₂ O 两相	-6.8~-0.7	1.46~32.72	13.33	6.79
	SD02	H ₂ O 两相	-0.6~1.4	0.00~1.63	0.8	
金-石英-黄铁矿阶段(II)	SD03	H ₂ O 两相	-5.4~-0.6	22.59~26.71	24.83	15.08
	SD04	H ₂ O 两相	-2.3~1.6	1.63~6.44	5.34	
金-石英-多金属硫化物阶段(III)	SD05	H ₂ O 两相	-15.2~-1.0	1.82~39.22	19.81	30.68
	SD06	H ₂ O 两相	-0.6~5.3	38.8~56.06	43.73	
石英-碳酸盐阶段(IV)	SD07	H ₂ O 两相	-15.6~-7.6	16.3~40.64	29.58	35.30
	SD08	CO ₂ -H ₂ O 两相	-3.9~1.2	0.36~6.17	2.39	
	SD09	CO ₂ -H ₂ O 两相	-3.2~0.9	0.88~8.28	2.02	

测验结果表明,盐度的计算采用 Hall^[10]等提出的金矿中成矿流体的盐度计算公式:

$$W=0.00+1.78Tm-0.0442Tm^2+0.000557Tm^3$$

该式中 W 为盐度, Tm 为冰点温度。根据公式

可计算出三碛金矿床的流体包裹体的盐度 $w(\text{NaCl, eqv})=0.00\sim56.0\%$, 盐度范围跨度大。其中在黄铁矿-石英阶段(I)的盐度平均值 $w(\text{NaCl, eqv})=6.79\%$, 其盐度是 4 个成矿阶段中

最小的;在金-石英-黄铁矿阶段(Ⅱ)中,盐度平均值相较第一阶段有所上升, $w(\text{NaCl, eqv})=15.08\%$;后2个成矿阶段的盐度值都表现为逐渐增大的趋势,如石英-碳酸盐阶段(Ⅳ)的盐度已经达到35.30%。总而言之,三碛金矿床的盐度整体呈上升趋势。

据均一温度的变化与盐度的关系可作出温度-盐度散点图(图2),可知三碛矿床成矿热液期流体包裹体盐度 $w(\text{NaCl, eqv})$ 主要集中在0~13.4%之间,但盐度没有随着均一温度的变化而发生较大变化,这表明其成矿流体是自然冷却的过程。

3 成矿物理化学条件

3.1 成矿温度

本次共测试了97个包裹体,根据结果统计,三碛金矿床流体包裹体的均一温度最低为23.4℃,最高为492.4℃,其平均值为236.99℃。

结合图3可以看到,在矿床形成的前期即黄铁矿-石英阶段(Ⅰ)流体包裹体的均一温度范围为120~440℃,其中一些包裹体的均一温度超过400℃,但均一温度集中分布在200~240℃,平均值为270.24℃;在金-石英-黄铁矿阶段(Ⅱ)流体包裹体的均一温度主要分布在220~260℃,平均值为255.40℃,该阶段均一温度跨度小;在金-石英-多金

属硫化物阶段(Ⅲ)的流体包裹体的均一温度范围为140~400℃,跨度大,主要集中在200~320℃,平均值为254.33℃;在石英-碳酸盐阶段(Ⅳ)均一温度的范围在20~480℃,跨度非常大,主要集中在160~320℃,均值是246.50℃。综上所述,该矿床每个阶段的均一温度有所区别,且差别较为显著,其中峰值明显不同,表明成矿流体的脉冲供应较为频繁。

3.2 成矿流体包裹体的盐度和密度

据相关学者研究,金矿床的成矿流体盐度 $w(\text{NaCl, eqv})$ 大部分低于10%,有较少部分成矿流体的盐度 $w(\text{NaCl, eqv})>30\%$ ^[11]。据表2可知三碛金矿的盐度 $w(\text{NaCl, eqv})$ 分布情况,部分已超过30%,分布范围跨度大,可见大渡河金矿流域三碛金矿流体包裹体仍属于中、高盐度的流体;同时暗示成矿流体来源于地壳流体和地幔流体2个端元。

本文使用刘斌^[12]提出的以下公式计算该矿床成矿流体的密度:

$$\rho = A + Bt + Ct^2$$

式中, ρ 表示盐水溶液密度/(g/cm³), t 表示均一温度/(℃),A、B、C分别代表盐度的函数。该公式适用范围为:成矿流体的温度在500℃以下,盐度 $w(\text{NaCl, eqv})$ 在30%以下。将相关数据代入该密度计算公式,即可得到密度值。计算结果(表3)表明,三碛金矿床流体的密度 $\rho=0.9935\sim 1.7004\text{ g/cm}^3$,平均值为1.136 g/cm³,属于中、高密度流体。

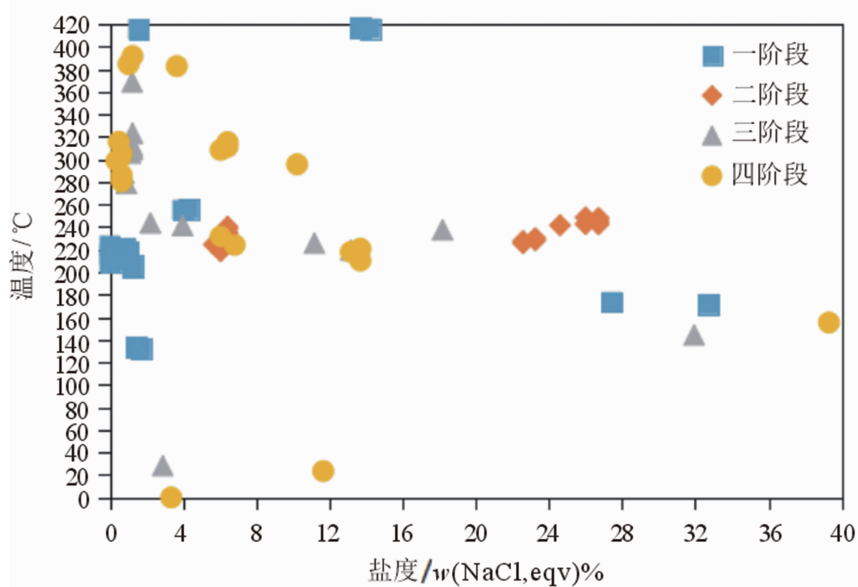


图2 三碛金矿床均一温度-盐度散点图

Fig. 2 Homogenization temperature-salinity scattered point diagram of Sandiao gold deposit

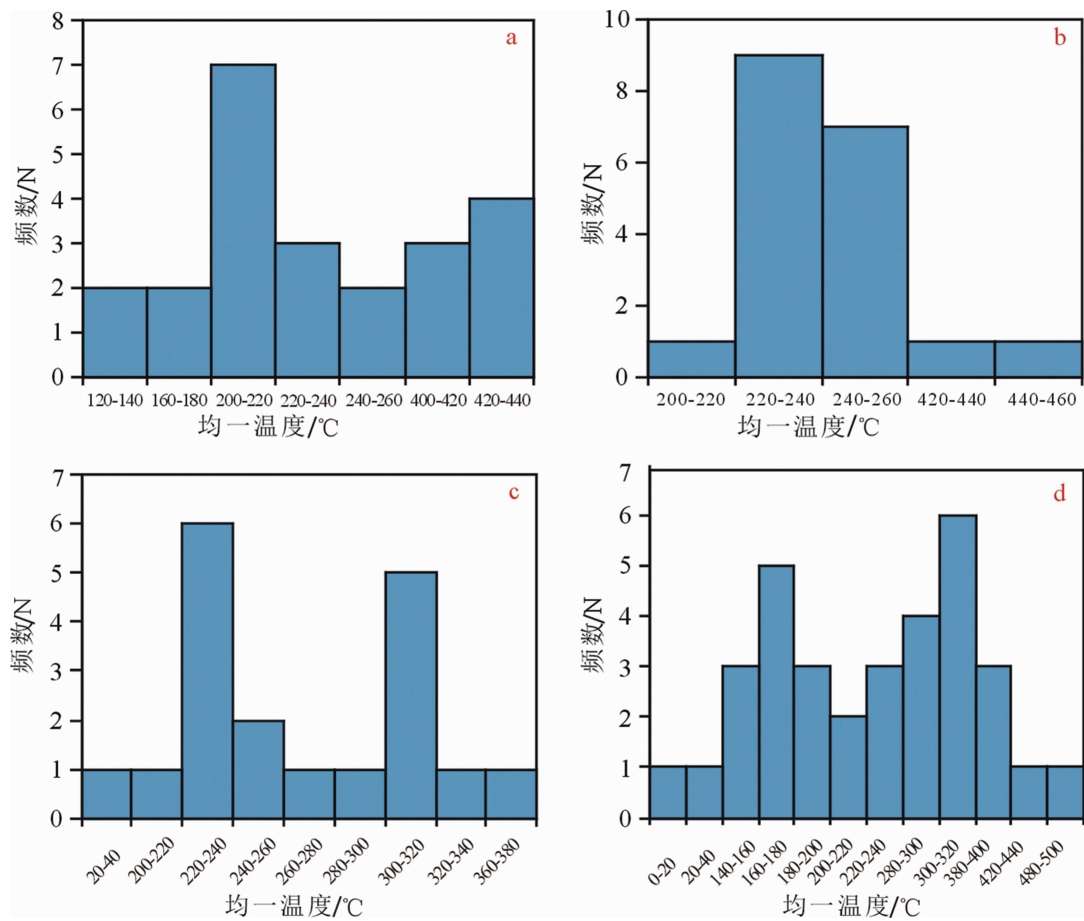


图 3 三碛金矿床各成矿阶段均一温度

Fig. 3 Homogenization temperature of each metallogenic stage in Sandiao gold deposit
a. 黄铁矿-石英阶段; b. 金-石英-黄铁矿阶段; c. 金-石英-多金属硫化物; d. 石英-碳酸盐阶段

表 3 三碛金矿床各阶段密度统计表

Table 3 Density statistics of each metallogenic stage of Sandiao gold deposit

成矿期	主矿物	样品编号	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		
			变化范围	平均	阶段平均值
黄铁矿-石英阶段(I)	石英	SD01	1.006~1.229	1.096	1.0467
		SD02	0.9935~1.0076	1.0005	
金-石英-黄铁矿阶段(II)	石英	SD03	1.0388~1.1926	1.1678	1.1097
		SD04	0.9935~1.0479	1.0346	
金-石英-多金属硫化物阶段(III)	石英	SD05	1.0128~1.6669	1.3230	1.1639
		SD06	1.0003~1.0186	1.0048	
石英-碳酸盐阶段(IV)	石英	SD07	1.1808~1.7004	1.4698	1.1969
		SD08	0.9991~1.1040	1.0218	
		SD09	0.9991~1.1040	1.0423	

综合以上特征,三碛金矿床样品的均一温度集中在 140~320℃ 之间,部分样品的均一温度接近 500℃,表明矿床属于中高温热液矿床;随着成矿过程的进行,均一温度呈现出逐渐下降的趋势,与热液成矿地质事件相符。盐度 $w(\text{NaCl}, \text{eqv}) = 6.79\% \sim 35.30\%$,部分样品的盐度 $w(\text{NaCl}, \text{eqv})$ 已达 56.06%,表明成矿流体的盐度较高,暗示地幔流体

参与成矿^[13]。同时,成矿流体的密度 $\rho = 0.9935 \sim 1.7004 \text{ g/cm}^3$,平均值为 1.136 g/cm^3 ,属于中、高密度流体。

4 结论

(1)三碛金矿床成矿流体的温度较高,随着成矿

的进行,温度呈现出逐渐下降的趋势,与热液成矿地质事件相符。

(2)盐度随着成矿期的变化而逐渐增大,与均一温度的变化呈相反的趋势,属于较为典型的中高盐度矿床,矿床为自然冷却类型。

(3)成矿流体的密度变化范围为 $0.9935 \sim 1.7004 \text{ g/cm}^3$,平均值为 1.136 g/cm^3 ,属于中、高密度流体。

(4)根据三碛金矿床的流体包裹体特征及壳幔混染现象,结合前人研究成果,推测地幔流体和地壳流体均参与了成矿。

参考文献:

- [1] 陈智梁,刘宇平. 康定大渡河两岸主要金矿区矿田构造研究[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [2] 李晓峰,毛景文,王登红,等. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氢氦硫氢氧同位素示踪[J]. 地质学报,2004,78(2): 203-210.
- [3] 李晓峰,毛景文,朱和平,等. 四川大渡河黑金台子金矿成矿流体稀土元素地球化学[J]. 岩石矿物学杂志,2005,24(4): 311-318.
- [4] 邹发. 大渡河流域不同部位典型金矿床矿石特征与成矿过程分析[D]. 成都:成都理工大学,2016.
- [5] 赖晋杉. 大渡河金成矿带稀有气体同位素特征[D]. 成都:成都理工大学,2018.
- [6] 何阳阳,蒋双宇,李开强. 康定大渡河金矿田稀土元素地球化学特征研究[J]. 稀土,2000,41(1): 109-116.
- [7] 何阳阳,蒋双宇,邓成雪. 康定县三碛金矿床岩石化学成分特征及构造环境[J]. 地质找矿论丛,2020,35(2): 129-137.
- [8] 卢焕章. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [9] 卢焕章,单强. 金属矿床的成矿流体成分和流体包裹体[J]. 岩石学报,2015,31(4): 1108-1116.
- [10] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions [J]. Economic Geology, 1988, 83(1): 197-202.
- [11] 卢焕章. 流体包裹体岩相学的一些问题探讨[J]. 高校地质学报,2014,20(2): 177-184.
- [12] 刘斌. 流体包裹体测定计算和分析[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [13] 何阳阳,温春齐,刘显凡,等. 康定大渡河金矿田三碛金矿床成因初探[J]. 四川地质学报,2016,36(4): 585-589.

Study on Fluid Inclusions in Sandiao Gold Deposit, Kangding county

HE Yangyang, JIANG Shuangyu, DENG Chengxue

(College of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang
641112, Sichuan, China)

Abstract: This paper discusses the characteristics of fluid inclusions in Sandiao gold deposit, Kangding County, and analyzes the properties of ore-forming fluid, which will help to understand the metallogenic conditions in this area. Micro cold and hot platform is used to measure homogenization temperature and freezing point of the deposit. Data are obtained and processed to analyze the physical and chemical conditions of the deposit. Homogenization temperature of samples is generally in range of 140°C - 320°C , and those of some samples close to 500°C , the salinity in range of $w(\text{NaCl, eqv})=6.79\%$ to 35.30% , and those of some $w(\text{NaCl, eqv})=56.06\%$, the density varies from 0.9935 g/cm^3 to 1.7004 g/cm^3 with the average value of 1.136 g/cm^3 suggesting that ore-forming fluid of Sandiao gold deposit is characteristic of medium high temperature, medium high salinity and medium high density and mantle fluid and crustal fluid are involved in the mineralization.

Key Words: the Sandiao gold deposit; fluid inclusions; temperature measurement on micro cold and hot platform; the Daduhe River; the west Sichuan province