

文章编号 10258-7106 (2007) 02-0184-11

黑龙江金厂金矿流体地球化学特征^{*}

王 永, 席斌斌, 张德会, 张文淮

(中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要 通过对黑龙江省金厂金矿床内包裹体的研究, 对比不同矿化程度岩石中包裹体特征, 认识到矿化程度与岩浆-流体的演化程度有密切的关系。矿化主要为黄铁矿化, 还见有黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂等硫化物矿物, 主要呈脉状、条带状及浸染状产出。矿化程度高的钻孔岩芯内, 包裹体类型发育完整, 流体包裹体、熔融包裹体、熔-流包裹体均有发现。进一步研究发现, 矿化与岩浆的结晶分异作用、流体的沸腾作用及流体的混合作用关系密切。分异作用使成矿物质得到富集, 沸腾与混合作用使矿质进一步富集并沉淀析出。

关键词 地球化学, 流体包裹体, 结晶分异, 沸腾, 混合流体, 金厂金矿床

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

Geochemical characteristics of fluid inclusions in Jinchang gold deposit, Heilongjiang Province

WANG Yong, XI BinBin, ZHANG DeHui and ZHANG WenHuai

(School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Based on a study of fluid inclusions in the Jinchang gold deposits of Heilongjiang Province and a comparison of characteristics of inclusions in rocks with different mineralization intensities, the authors hold that the mineralization intensity is closely related to the evolution degree of magma and fluid. Mineralizations include mainly pyritization as well as some other sulfides such as chalcopyrite, sphalerite and arsenopyrite, assuming veinlike, banded and disseminated forms. Inclusions are well-developed in highly-evolutionary rocks, composed of fluid inclusions, melt inclusions and melt-fluid inclusions. Further studies indicate that mineralization has intimate relationship with magmatic fractional crystallization, fluid boiling and fluid mixing. Fractional crystallization concentrated metallogenic elements, which precipitated under the conditions of boiling and fluid mixing.

Key word: geochemistry, fluid inclusion, fractional crystallization, boiling, mixing fluid, Jinchang gold deposit

金厂金矿是中国的大型金矿床之一, 位于黑龙江省东南部东宁县境内, 其地理座标为, 东经 $130^{\circ}45'00'' \sim 130^{\circ}59'30''$, 北纬 $44^{\circ}12'00'' \sim 44^{\circ}17'00''$ 。该矿床产于老黑山断陷盆地火山-侵入杂岩区, 矿化类型为网脉-角砾岩型(刘连登等, 1999)。自 20 世纪

90 年代始, 武警黄金地质研究所和武警黄金第一总队在该区开展找矿勘探和科学研究工作, 取得颇多成果(慕涛等, 2000; 陈锦荣等, 2002; 李高生等, 2003; 朱成伟等, 2003)。金厂金矿床的发现, 对在黑龙江省中-新生代火山岩发育区, 特别是吉黑东部地

^{*} 本文得到国家自然科学基金(编号: 40173021, 40573033)和武警黄金部队科研项目的联合资助

第一作者简介 王 永, 男, 1982 年生, 在读硕士研究生, 地球化学专业, 主要从事流体包裹体研究。E-mail: firefly008@163.com

收稿日期 2006-07-07; 改回日期 2006-10-09。许德焕、李 岩编辑。

区开展金矿地质理论研究和找矿勘查工作具有重要的指导意义。迄今为止,由该矿床提交的金资源量(333)已超过40 t,品位为8 g/t,达大型规模。尽管对其已进行了长期且多方面的研究,获得了许多有益认识,但在岩浆岩与成矿的关系和岩体的含矿性评价、成矿流体地球化学、矿床成因以及成矿规律等方面,还存在很多尚未阐明的问题。本文旨在通过岩浆岩及后期石英方解石脉中流体包裹体的研究,从流体地球化学的角度,来探讨成矿流体形成机制、矿石沉淀机理以及矿床潜力预测等问题。

1 地质背景

金厂金矿区位于黑龙江省东部的兴凯湖地块。在区域上,该地区南临华北板块北缘,北临安加拉(Angara)板块南缘,位于中亚—蒙古构造域与滨西太平洋构造域的交接复合区段(张炯飞等,2000;林强等,1998;方如恒,1994;王东方等,1992)。该地区构造-岩浆活动强烈,形成了一系列隆起带和凹陷带,构造线总体走向以NE和NNE向为主,金厂金矿床正好处于太平岭隆起与老黑山断陷的交接部位。

区域上出露地层有基底岩系上元古界黄松群云母片岩、变粒岩、斜长角闪岩,盖层岩系为三叠系罗圈站组酸性熔岩、碎屑岩夹凝灰岩,侏罗系托盘沟组、天桥岭组、屯田营组及东宁组的中酸性火山-火山碎屑-正常沉积建造;白垩系粉砂岩、泥质岩和凝灰岩,第三系含煤薄层陆相沉积,第四系沉积物。沉积岩中见有丰富的植物化石,属Cycadocarpidium-Taeniopteris组合。火山岩全岩Rb-Sr年龄为 (231.9 ± 28.5) Ma, K-Ar年龄为190.8~226.2 Ma(朱成伟等,2003)。

该矿区西北与区域NE向绥阳深大断裂相邻,受其长期活动的影响,派生出一系列不同方向、不同性质的低序次断裂,形成了“米”字形断裂系,在2组或2组以上断裂的交汇部位,常发育有隐爆角砾岩筒或环形构造(图1)。因此,“米”字形断裂加环形构造是区内最基本的构造格架,也是区内最重要的控岩、控矿构造。其中,NW向断裂构造(图1中2条贯穿矿区的近平行线)除控制了部分花岗斑岩体的分布外,还控制了环形构造在空间上的展布;近EW向构造控制了部分花岗斑岩和闪长玢岩体的侵入。

矿区内岩浆活动非常强烈,根据野外地质产状、

与围岩的相互关系以及同位素年龄等资料,可将岩浆岩划分为5期:①印支早期闪长岩,岩性主要为中粒黑云母闪长岩和微细粒黑云母闪长岩;②印支晚期-燕山早期花岗岩,岩性比较复杂,以斜长花岗岩为主,局部相变为花岗闪长岩及黑云母花岗岩、白岗岩等;③燕山中期花岗岩,岩性主要为中-粗粒黑云母花岗岩;④燕山中晚期花岗斑岩,主要以小岩枝和小岩株产出,斑晶主要为长石和石英,地表所见甚少;⑤燕山晚期闪长玢岩,多呈小岩枝或小岩株产出,斑晶主要为斜长石。各期次岩石的里特曼指数(RI)为1.10~3.52,多小于3.3,以钙碱性系列为主,仅个别样品为偏碱性;碱度(NK)为4.90%~9.60%,属正常碱度。闪长岩类的 $w(\text{SiO}_2)$ 为55.36%~59.18%,花岗岩类 $w(\text{SiO}_2)$ 为61.10%~74.24%。各期次岩石的稀土元素均以轻稀土元素稍富集,重稀土元素略亏损及含量变化范围较小为特征,其分布形式与I型花岗岩大体相似(马家骏等,1991;邱家骧等,1996;慕涛等,2000)。野外和室内研究表明,金矿化主要与第4期花岗斑岩及第5期闪长玢岩有关。矿区赋矿围岩蚀变强烈,主要类型包括硅化、绢云母化、钾化、黄铁矿化等(慕涛等,2000)。

金厂矿区内现已发现大小金矿体数十个,主要分为3种类型(金宝义等,2002):隐爆角砾岩型、裂隙充填型和破碎蚀变岩型。隐爆角砾岩型是该区内最重要的矿化类型,具有规模大、品位高和储量集中的特点。矿区内次一级的NE向、SN向及NW向断裂构造的交汇部位是最为重要的容矿构造,控制了隐爆角砾岩筒及与之有关的矿体的产出。目前已发现的隐爆角砾岩型矿体主要有J-0(高丽沟0号矿体)、J-1(穷棒子沟1号矿体)、J-2(孢子沟2号矿体)、J-8(八号硐矿体)、J-9(邢家沟矿体)。裂隙充填型矿体在矿区内分布较广,常成群产出,矿体一般延长几十到几百米,延深几十到200余米,平均厚度为0.1~2.65 m,在地表,矿体沿长轴方向较稳定,向下膨胀、收缩,变化较大。蚀变岩型矿体在矿区内仅发现2个,因研究不多而尚未控制。前人根据金矿体产状、矿化蚀变组合及其相互穿插关系,将金矿化分为4个阶段:第1阶段,与花岗岩有关的角砾岩筒金矿化;第2阶段,石英-黄铁矿脉叠加矿化;第3阶段,多金属硫化物石英脉叠加矿化;第4阶段,黄铁矿-方解石阶段(李高生等,2003)。

对爆破角砾岩型矿体J-0、J-1号,前人已在成矿

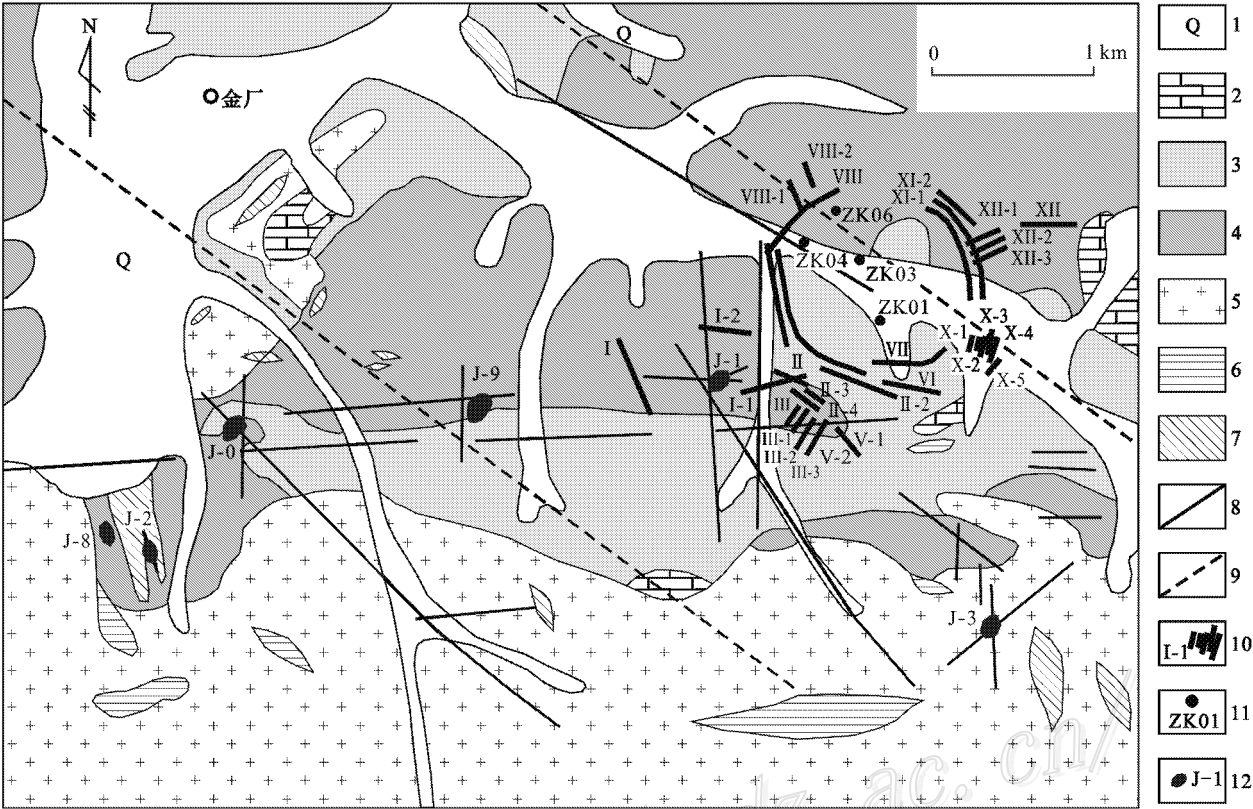


图 1 金厂矿区地质简图(底图据陈锦荣等^① 2002 修改)

1—第四系 2—上侏罗统屯田营组 3—印支期闪长岩 4—印支期文象花岗岩 5—印支期花岗岩 6—燕山早期花岗斑岩脉 7—燕山晚期闪长玢岩脉 8—断层 9—遥感解译 NW 向线形构造 ;10—矿脉及编号 ;11—钻孔及编号 ;12—角砾岩型矿体及编号

Fig. 1 Geological sketch map of the Jinchang ore district (modified from Chen J R et al. 2000)

1—Quaternary ; 2—Upper Jurassic Tuntianying Formation 3—Diorite ; 4—Graphic granite ; 5—Granite ; 6—Granite porphyry vein ; 7—Diorite porphyrite vein ; 8—Fault ; 9—Telemetric interpretive NW strike linear structure ; 10—Ore vein and its serial number ; 11—Drill hole and its serial number ; 12—Gold ore body of breccia and its serial number

流体方面进行了一定的研究。本次研究的 ZK04 钻孔的岩芯保存较好,深部有第 5 期闪长玢岩的叠加作用,但并未发现爆破角砾岩,因此,以其作为典型来进行解剖。该钻孔岩芯的主要矿石类型为石英-黄铁矿脉型和多金属硫化物石英脉型。金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿,其次有辉铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、辉钼矿及辉铋矿等。脉石矿物主要为石英、绢云母和绿泥石,其次为长石、方解石、角闪石、黑云母、绿帘石及冰长石。

2 包裹体研究

本次研究以 ZK04 孔为代表。其第 1 阶段矿化主要产在钾长花岗岩以及少量闪长岩和在岩浆-热

液过渡阶段产出的粗晶文象花岗岩中。第 2 和第 3 阶段矿化主要产于各种脉体内。通过镜下观察,确定了诸脉体的形成先后顺序为:角闪石-绿泥石-阳起石-黄铁矿-石英脉,条带状黄铁矿±黄铜矿-石英脉,黄铁矿-细粒石英脉,黄铁矿-石英-方解石脉。钾长花岗岩以及早期脉体中包裹体极其发育,而晚期(第 4 阶段)黄铁矿-细粒石英脉和黄铁矿-石英-方解石脉中,包裹体发育情况则较差。

流体包裹体的岩相学研究和测温工作在中国地质大学(北京)流体包裹体实验室进行。所使用的仪器包括:德国 ZEISS 公司生产的 Axioskop 40 型正交偏反光显微镜和 Axiolab 型正交偏光显微镜,放大倍数为 100 ~ 800 倍;英国 Linkam 公司生产的 THMSG600 型冷热台(温控范围 - 196 ~ 600℃)及

① 陈锦荣,金宝义,王克强. 2000. 黑龙江省东宁县金厂矿区及外围金矿成矿规律与深部预测. 武警黄金地质研究所. 内部研究报告.

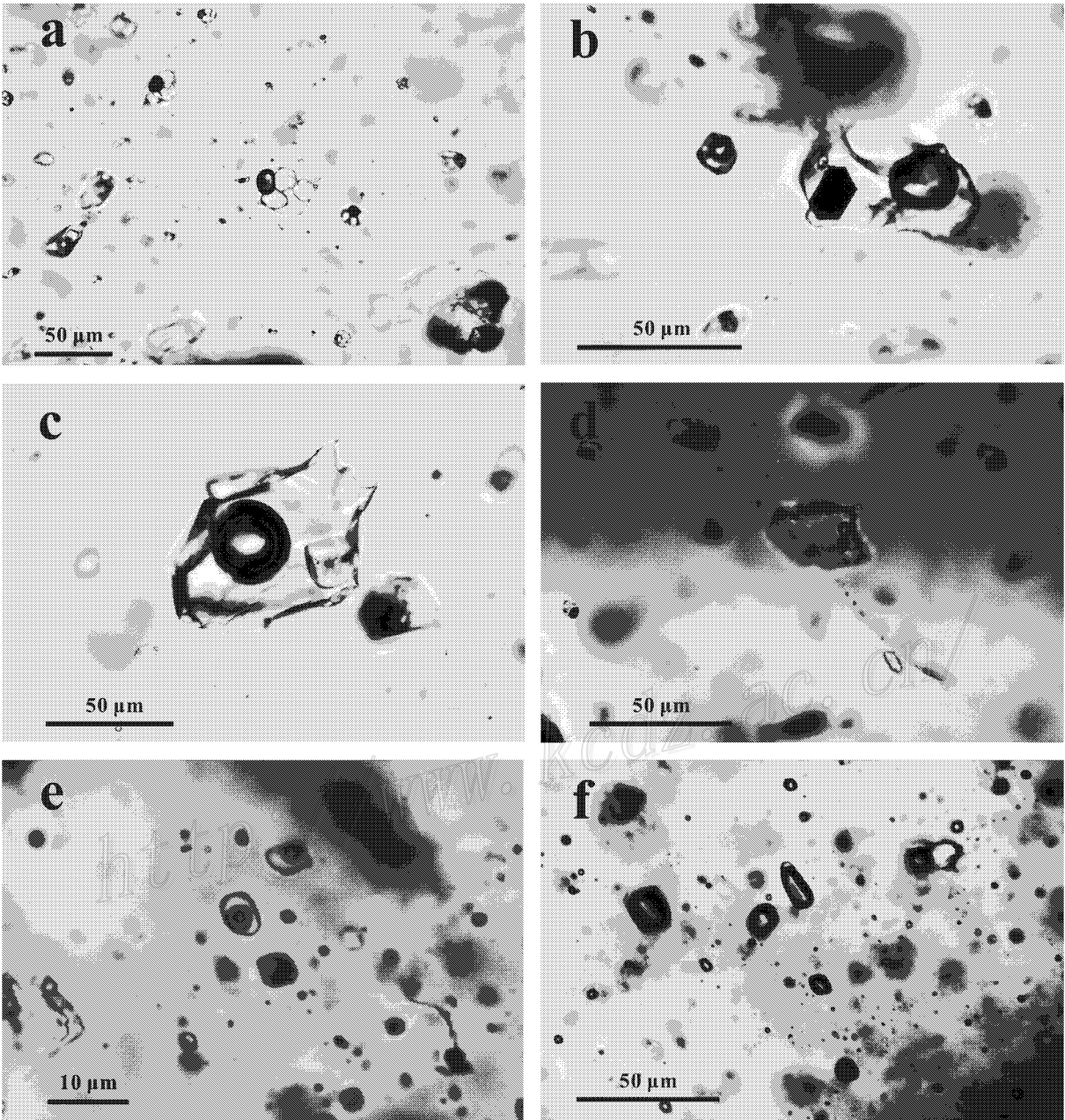


图 2 金厂金矿包裹体照片

a. 含多个子晶的高盐度包裹体；b. 含有金属子矿物包裹体；c. 含有单个 NaCl 子矿物包裹体；d. 熔体包裹体；e. 含 CO₂ 三相包裹体；
f. 气体包裹体与高盐度包裹体共生

Fig. 2 Photomicrographs of inclusions in the Jinchang gold deposit

a. High salinity fluid inclusions with multi-daughter minerals ; b. Fluid inclusions with metal daughter mineral ; c. Fluid inclusion with single daughter mineral ; d. Melt inclusion ; e. Mixed CO₂-H₂O inclusion ; f. Coexistence of gas-bearing fluid inclusion and high salinity fluid inclusions

TH1500 型高温热台,冰点温度误差小于 0.2℃,均一温度误差小于 2℃。

2. 1 包裹体类型

本次研究所测试的流体包裹体,主要采自钾化花岗岩,少量采自闪长岩及绢英岩化花岗岩。镜下

观察表明,钾化花岗岩中包裹体极其发育,数量多、个体较大、类型复杂(图 2),其他样品中包裹体也比较发育。据野外及镜下观察可以得知:第 1 成矿阶段以结晶质硅酸盐包裹体(熔融包裹体)和熔-流包裹体为主,第 2 和 3 成矿阶段,包裹体类型复杂,加

之多次沸腾作用的叠加,很难将其区分开。主要发育的流体包裹体类型如下:

(1)富液体包裹体 发育较为普遍,个体一般小于 $30\text{ }\mu\text{m}$,形状变化较大,有负晶形、浑圆状、不规则棱角状等,气液体积比变化很大,一般介于 $50\% \sim 75\%$ 之间,加热后均一到液相。

(2)富气体包裹体 发育比较普遍,个体较小,一般为 $5 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$,多为负晶形,充填度小于 40% ,加热后均一到气相。

(3)含子矿物多相包裹体 发育普遍,个体大小变化很大($<5 \sim >50\text{ }\mu\text{m}$),呈负晶形和不规则棱角状。透明子矿物包括:呈立方体的 NaCl ,呈碎屑状的钾盐,呈长板状的硬石膏(?),与钾盐和石盐共生的浑圆状未知子矿物。不透明子矿物有:呈三角形的黄铜矿,呈立方体的黄铁矿等。在该类包裹体中,不透明子矿物常与透明子矿物共生,个别个体仅含金属子矿物。

(4)纯气体包裹体 数量也较多,主要与含子矿物包裹体、富液体包裹体及熔-流包裹体等共生。其形状一般较规则,多数为负晶形,部分为不规则状,为次生包裹体。

(5)有机包裹体 在常温下,与富液体包裹体难以区别,仅在回温过程中,表现出复杂的低温相变。该类包裹体较少,常在角闪石中沿解理分布,多呈长条状,充填度多为 $80\% \sim 90\%$ 。

除上述包裹体类型外,还有极少量的含 CO_2 三相包裹体。

2.2 包裹体世代划分

按包裹体的产状以及相互间的关系,可将其划分为早(I)、中(II)、晚(III)3个世代。世代I主要是指熔融包裹体、熔-流包裹体,多数伴生有高盐度包裹体和气体包裹体,主要产在钾化花岗岩的石英中。世代II又可分为IIa、IIb和IIc三个亚世代,在IIa和IIb中,富气体包裹体、纯气体包裹体和高盐度包裹体共生,显示出沸腾的特点,分别产在伟晶岩脉和角闪石-绿泥石-阳起石-黄铁矿-石英脉中;IIc中则主要发育含子矿物包裹体和液体包裹体,产在条带状黄铁矿 $\pm$ 黄铜矿-石英脉中。世代III也可细分为IIIa和IIIb两个亚世代,主要为富液体包裹体,分别产在黄铁矿-细粒石英脉和黄铁矿-石英-方解石脉中。有机包裹体更多表现出次生包裹体的特征,常沿裂隙或角闪石的解理分布,对矿质的沉淀无直接影响,因此,未对其进行世代划分。由于该矿区金

矿的沉淀与流体关系最为密切,因此,本文的研究重点放在流体包裹体方面,对熔融包裹体,主要描述其产状;对熔-流包裹体,除描述其产状外,还进行了激光拉曼探针分析。

2.3 包裹体的均一温度和盐度

在对包裹体类型及世代进行充分了解后,笔者对24件测温片进行了测试。其中,运用高温热台测试了10个包裹体,运用冷热台测试了665个包裹体,测试结果见表1。不同世代包裹体的均一温度(图3)、冰点以及子矿物熔化温度具有明显差别,代表了成矿热液不同演化阶段的特征。对低盐度包裹体,利用数据表查出其对应的盐度(Bodnar,1993;卢焕章等,2004);对 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系的高盐度包裹体和 $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$ 体系包裹体,利用公式(Hall et al., 1988;刘斌等,1999)对其中的 NaCl 及 KCl 含量进行计算。

因为在钾化花岗岩的石英斑晶中叠加了后期流体的信息,尤其是沸腾作用的信息,所以,包裹体情况复杂。斑晶中的熔融包裹体以及熔-流包裹体为原生包裹体,较易识别。其中的流体包裹体则情况比较复杂,从富气到富液,从高盐度到低盐度,从高温均一到低温均一均有表现,对富气包裹体和高盐度包裹体,难以区分其是原生的还是次生的。由于世代IIa和世代IIb与世代I的流体包裹体组合特征相似,均表现为具沸腾特征的高盐度包裹体与低盐度富气包裹体共生,并且,IIa和IIb世代的高盐度包裹体和气体包裹体,无论是均一温度还是盐度,均表现出与世代I包裹体较一致的特征,因此,笔者认为,将世代I、IIa和IIb沸腾事件结合在一起讨论比较合适。IIc包裹体主要为含子晶包裹体和液体包裹体,很可能是沸腾阶段与后期流体作用间过渡阶段的产物。世代III包裹体的情况较为简单,主要是液体包裹体发育,均一温度也较低,表现出岩浆热液冷却及大气降水混入的作用。

2.4 包裹体激光拉曼探针分析

本次研究主要对部分具代表性的单个熔-流包裹体(固相和气液相)的成分进行了激光拉曼探针分析。测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的流体包裹体实验室进行,测试仪器为英国Renishaw公司生产的RM-2000型激光拉曼探针仪;测试条件为: Ar^+ 激光器,波长 514 nm ,激光束斑大小约为 $1\text{ }\mu\text{m}$,测谱计数时间为 10 s ,每 1 cm^{-1} (波数)计数1次, $100 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 全

表 1 金厂金矿流体包裹体显微测温结果								
Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions in the Jinchang gold deposit								
样品号	岩性	主矿物	个数	世代	大小/ μm	气相 百分数/%	$t_{\text{h}}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$
J18-04-Q1	绢英岩化花岗岩	石英	19	I + II(a+b)	8~22	5~80	277.6~580 以上	0.35~49.11
			23	II c	6~44	5~60	270~380	4.03~46.27
J18-04-Q2	钾化花岗岩	石英	18	I + II(a+b)	10~50	5~80	407.5~550 以上	5.56~53.85
			17	II c	6~38	10~45	267~406	6.01~48.01
J18-04-Q3	钾化花岗岩	角闪石	5	有机?	15~30	10~20	95~259.3	—
		石英	20	I + II(a+b)	2~40	5~80	369.3~580 以上	1.4~50.31
J18-04-Q4	钾化花岗岩	石英		II c	6~30	5~40	262~368	3.87~44.13
			23	I + II(a+b)	10~30	5~80	404.7~996	6.59~56.05
J18-04-Q5	钾化花岗岩	石英	22	II c	8~20	5~30	249~393	5.11~46.71
			12	II(a+b)	8~22	10~90	310~424	7.02~50.14
J18-04-Q6	钾化花岗岩	石英	16	II c	6~10	10~20	223~334	4.18~33.2
			5	I + II(a+b)	12~40	10~85	346~465	6.45~54.39
J18-04-Q7	钾化花岗岩	石英	9	II c	7~46	10~20	281~420	6.30~49.68
			8	I + II(a+b)	8~35	10~20	321~433.7	3.71~48.66
J18-04-Q8	钾化花岗岩	石英	43	II c	5~40	5~35	296.7~398.2	5.26~46.2
			7	II(a+b)	8~18	1~10	376~447	44.22~49.22
J18-04-Q9	绢英岩化花岗岩	石英	13	II c	6~20	10~20	251~352	5.86~38.9
			20	I + II(a+b)	8~30	5~95	380~550 以上	5.56~66.75 以上
J18-04-Q10	钾化花岗岩	石英	19	II c	8~20	10~90	254~377	5.41~45.03
			13	I + II(a+b)	5~22	5~50	350~550 以上	6.45~66.75 以上
J18-04-Q11	钾化花岗岩	石英	15	II c	4~22	5~30	259~358.4	3.87~43.22
J18-04-Q12	闪长岩	石英	7	III	4~14	3~20	160~303.3	7.86~8.00
J18-04-Q14	钾化花岗岩	石英	13	II(a+b)	10~28	10~20	388~557	32.51~54.64
			14	II c	10~85	10~20	290~557	7.17~51.09
J18-04-Q15	钾化花岗岩	石英	8	I + II(a+b)	5~25	10~80	389~580 以上	6.3~44.82
			8	II c	6~25	10~15	234~386	7.31~45.95
J18-04-Q16	钾化花岗岩	石英	1	III	1~6	10	210	—
			12	II(a+b)	8~25	10~20	360~499	6.45~52.40
J18-04-Q17	钾化花岗岩	石英	5	II c	8~20	10~21	308~375	6.45~70.33
			9	II(a+b)	10~30	10~80	358~570	5.71~47.55
J18-04-Q18	钾化花岗岩	石英	8	II c	8~30	10~15	285~364	5.71~42.85
			19	II(a+b)	8~28	10~70	297~474	6.88~55.03
J18-04-Q19	钾化花岗岩	石英	12	II c	6~18	10~15	237~357	4.8~3.80
			14	II(a+b)	6~14	10~90	324~410	4.05~47.88
J18-04-Q20	钾化花岗岩	石英	11	II c	8~14	10~20	264~355	6.16~37.32
			26	I + II(a+b)	10~30	5~90	350~575	6.30~69.77
J18-04-Q21	钾化花岗岩	石英	10	II c	8~30	10~30	271.2~358.8	4.96~8.14
			1	III	1~8	15	266	—
J18-04-Q22	钾化花岗岩	石英	26	I + II(a+b)	8~20	5~30	360.7~505	35.57~59.49
			3	II c	10~20	10~20	308~367	39.6~44.00
J18-04-Q23	钾化花岗岩	石英	27	I + II(a+b)	4~40	5~95	349.7~580 以上	4.65~57.30
			2	II c	14~16	20	368.6~378	7.73~44.2
J18-04-Q24	钾化花岗岩	石英	9	I + II(a+b)	8~18	10~70	408~550 以上	5.56~66.75 以上
			2	II c	8~10	5~30	308.4~335	6.30~41.04
J18-04-Q25	钾化花岗岩	石英	1	III	1~12	10	213	6.59
			19	I + II(a+b)	5~20	10~90	358~550 以上	4.65~51.71
J18-01-Q12	钾化花岗岩	方解石	2	II c	7~8	10	320~381	39.76~45.43
			22	I + II(a+b)	6~80	5~80	371~560 以上	3.87~66.75 以上
			14	II c	7~20	5~90	258~387.3	4.03~42.75
			11	III	8~25	4~8	134.5~188.6	1.23~7.02

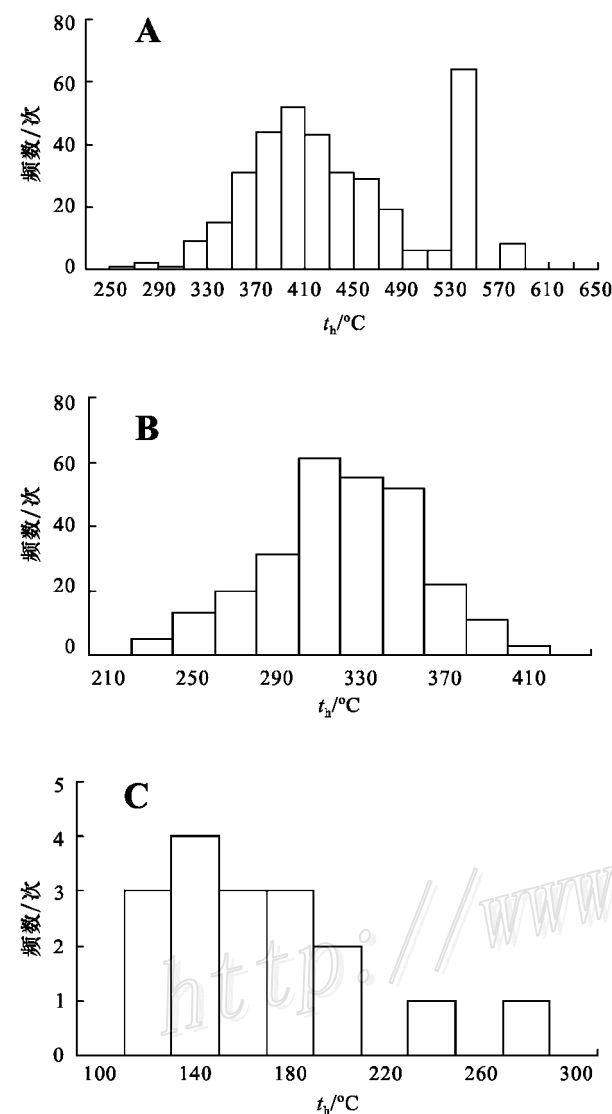


图 3 各阶段流体包裹体均一温度直方数图

A. 沸腾阶段(世代 I + II a + II b); B. 过渡阶段(世代 II c);
C. 混合阶段(世代 III)

(由于超出冷热台温度的上限,故将未准确测出均一温度的包裹体在图 A 中划入 540~560℃ 区间,将测得准确均一温度大于 600℃ 的包裹体在图 A 中划入 580~600℃ 区间)

Fig. 3 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions at different stages

A. Boiling stage(generation I + II a + II b); B. Intergrade stage(generation II c); C. Mixing stage(generation III)

(some inclusions which homogeneous temperatures are beyond the top temperature of heating stage are classified into 540~560℃ range ; some inclusions which homogeneous temperatures are higher than 600℃ and can be determined accurately in heating stage are classified into 580~600℃ range)

波段一次取峰,光谱分辨率为 2 cm^{-1} 。共测流体包裹体 27 个,鉴定出固相中的矿物 32 种,气体包裹体中的成分为 H_2O 、 SO_2 、 CH_4 、 CH_3 、 C_4H_6 、 C_6H_6 、 O_2 、 NO_3^- 、 CO_2 、 CO 、 H_2S 、 CO_3^{2-} 及 N_2 (图 4),除常见的无机组分外,还有甲烷、1,3-丁二烯(C_4H_6)、甲基团以及苯(?)等有机组分。

熔-流包裹体中的固相组分非常复杂,主要测试了固体矿物、暗色矿物及碎屑状物质。鉴别出的矿物有:石英、鳞石英、孔雀石、水磷铝钠石、氯黄晶、六方氮化硼、毒砂、拉长石、叶蜡石、硅灰石、异性石、蓝线石、赛黄晶、天青石、方解石、透绿柱石、磷铜矿、针叶钠石、绿铬矿、利蛇纹石、片沸石、白榴石、钙锂电气石、锌孔雀石、尖晶石、金绿宝石(乳光橄榄石)等。

激光拉曼光谱研究表明,金厂金矿床熔-流包裹体中的子矿物主要为硅酸盐,也有少量硫化物,如毒砂等,还有一些氧化物,特别是 Cu 等的氧化物,如孔雀石等。一些碎屑状矿物可能为水磷铝钠石等,属伟晶岩中的矿物,此外,还有氯黄晶、六方氮化硼等含挥发组分的矿物,都表明金厂金矿区内文象伟晶状花岗岩的形成可能与富含挥发组分的残余熔浆有关。

3 岩浆-流体演化与矿质沉淀

3.1 充分的分异

在矿化较好的 ZK04 孔钾长花岗岩和伟晶岩(或似伟晶岩)中,均可见岩浆阶段的熔融包裹体(均一温度为 1 000℃ 左右)、岩浆-热液过渡阶段的熔-流包裹体(均一温度为 700~850℃)、热液阶段的沸腾包裹体和中低温气液包裹体,说明该类岩石的岩浆演化充分,尤其是岩浆-热液过渡阶段极为发育。除包裹体证据外,伟晶岩的普遍产出也是岩浆热液过渡阶段存在的地质证据。与矿化较好的岩体相比,非矿化花岗岩中,包裹体发育较差、类型单一、个体较小,往往只发育气液包裹体,很少见到熔融包裹体及熔-流包裹体,说明其岩浆演化并不充分。

3.2 沸腾作用

在世代 I、II a 和 II b 内,发育着均一温度和盐度变化范围非常广的气体包裹体及高盐度包裹体。高盐度包裹体表现出 2 种均一方式:通过子矿物溶解消失而均一(A类);通过气泡溶解消失而均一(B

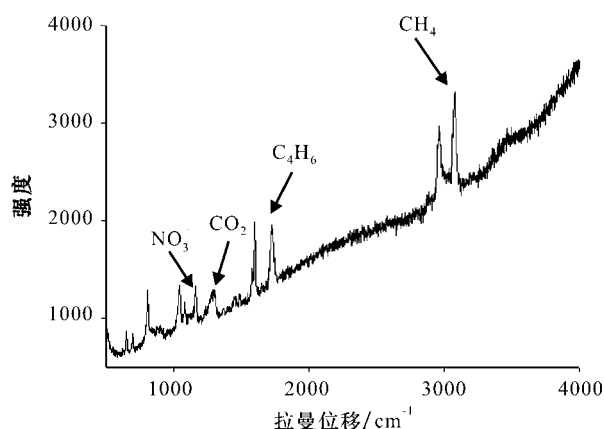
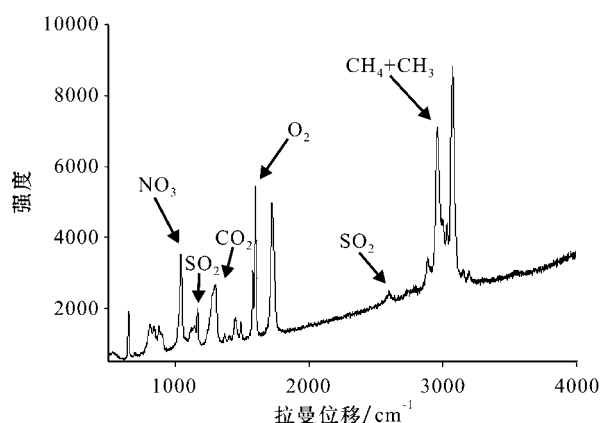


图 4 石英中流体包裹体气液相成分的激光拉曼谱图

Fig. 4 LAM spectrogram of fluid inclusions in quartz

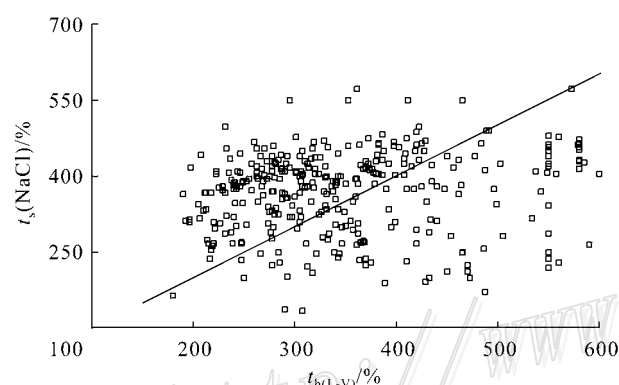


图 5 包裹体子矿物熔化温度-气泡消失温度图

$t_{h(L-V)}$ 为气泡消失温度; $w(NaCl)$ 为子矿物消失温度; 黑线斜率为 1 且通过原点

Fig. 5 Liquid-vapor homogenization temperature

$t_{h(L-V)}$ versus $t_{h(NaCl)}$ for halite-bearing inclusions at the second stage

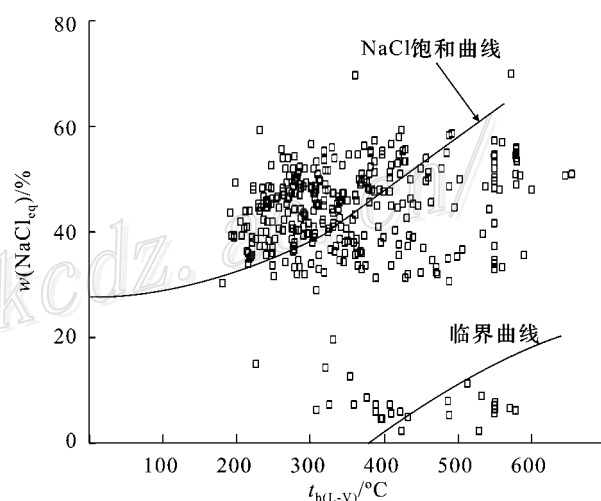


图 6 包裹体盐度-均一温度图(底图据 Calagari 2004)

Fig. 6 Salinity versus $t_{h(L-V)}$ diagram, illustrating the distribution pattern of the data points relative to NaCl saturation and critical curves(modified from Calagari, 2004)

类)。A 类包裹体被认为是在 NaCl 过饱和的溶液中捕获的, B 类包裹体则被认为是在 NaCl 饱和或不饱和的条件下捕获的(卢焕章等, 2004)。前者的均一温度为 254~550 °C, 有些为 550 °C 以上; 后者的均一温度为 180~550 °C, 有部分也超过 550 °C。由图 5 可见, A 和 B 类包裹体的气液均一温度及盐度的分布范围很大。除沸腾作用可产生这种现象外, 包裹体捕获时的条件也很重要。在 NaCl 过饱和的溶液中, 可能存在着悬浮在溶液中的 NaCl 固体颗粒, 由于成核条件的不同, 固体颗粒的大小差异极大, 且在溶液中的分布也不均匀(Calagari, 2004), 因此, 高盐度包裹体在形成过程中, 有可能捕获不同数量的 NaCl 颗粒, 造成包裹体的盐度比原始溶液的要偏高, 形成 A 类包裹体, 致使其均一温度高于捕获温

度, 故此类包裹体不能表示真实的沸腾温度。但是, 在 NaCl 过饱和的条件下也可能出现 B 类包裹体, 如果包裹体同时捕获了共存的气相和液相(通常所说的过渡类型包裹体), 那么, 此类包裹体很可能会以气泡消失为最终的均一, 其均一温度同样会高于捕获温度, 因而也不能表示真实的沸腾温度。另外, “卡脖子”包裹体也可能造成包裹体的盐度和均一温度差别比较大。在不饱和 NaCl 的溶液中捕获的包裹体, 其情况相对简单一些, 在此不再赘述。就是上述原因造成了世代 I、II a 和 II b 高盐度包裹体及气体包裹体的均一温度和盐度的变化范围很广。

由图 6 可见, 有很多包裹体落在了临界曲线以下的区域, 说明由沸腾作用形成的部分富气/气体包

裹体很可能处于临界条件下。另外,还有少数均一温度高(常在 550 ℃ 以上)、充填度大(常在 85 % 以上)的液体包裹体也落在了临界曲线以下的区域,该类包裹体很可能是在沸腾发生前被捕获的流体包裹体或含有肉眼难以识别的硅酸盐矿物的熔-流包裹体。

世代Ⅱc的包裹体组合以中等盐度和液体包裹体为主,富气包裹体仅零星出现。该阶段很可能代表沸腾作用的结束阶段,其后,流体又恢复为有大气降水(或地下水)的混合均一体系。

流体要保持沸腾,需有持续的热量供给,岩浆结晶所释放的热量可满足此条件。另外,随着岩浆的结晶,会不断有流体释放出来,对沸腾的流体进行物质的补充和成分的改造,可能会增长沸腾的寿命。随着沸腾作用的进行,气体不断积累,使流体压力增大,造成围岩产生裂隙,从而压力释放,温度降低,矿质沉淀且封存裂隙,使残余流体处于较为封闭的条件下,岩浆结晶所释放的热量又会使残余流体再次沸腾。因此,该区的流体很可能经历了持续的、多次的沸腾作用。

3.3 混合作用

世代Ⅲ包裹体主要是液体包裹体,其中,Ⅲa包裹体十分稀少且个体较小,给测温工作带来困难,因而仅测得 6 个包裹体的数据,其中只有 2 个测出了冰点。但由测得的数据可见,其均一温度范围较大,为 160.0~303.3 ℃,冰点为 -5~-5.1 ℃。因无足够多的数据,故难以做出肯定的判断,但据其变化范围较大的均一温度,可推测有混合作用发生。混合作用的端员可能是晚阶段的岩浆热液及加热循环的大气降水和/或地下水。Ⅲb 在 ZK04 孔内不太发育,因此,笔者采取了与 ZK04 孔临近的 ZK01 孔的样品进行了测试,其均一温度范围为 134.5~188.6 ℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 0.88 %~7.17 %。由图 7 可见,除盐度较高的 2 个点外,其余的点显示出线性关系,说明有混合作用发生,2 个端员的温度均不高,说明岩浆热液的活动已很微弱,主要为大气降水和地下水的活动。世代Ⅲ的矿化很微弱,说明混合作用对矿质沉淀的影响不大。

图 8 示意性地表示了岩浆-热液演化过程中包裹体类型及均一温度的变化情况。

3.4 矿质的沉淀

岩浆出溶的热液可含有丰富的成矿物质(Campbell, 1995; 张德会等, 2001)。沸腾作用的发生使原

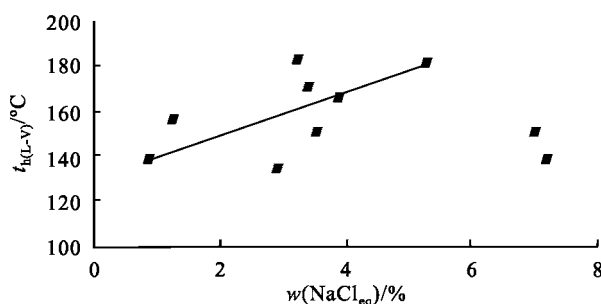


图 7 世代Ⅲ包裹体盐度-均一温度图

Fig. 7 Salinity versus homogenization temperature for fluid inclusions at the third stage

来均一的流体分为 2 个性质截然不同的流体相; CO_2 、 HCl 等酸性气体在气相中富集,使高盐度流体相的 pH 值急剧升高,造成金属络合物不稳定而沉淀成矿。在金厂矿区,岩浆热液经历了长时间的沸腾,而且有可能经历多次沸腾,使岩浆中的成矿物质不断被萃取、沉淀。另外,在包裹体中还发现了大量有机质。东宁县地处黑龙江省东部的烟煤、无烟煤分布区(顾娇杨, 2004),因此,包裹体中的有机质很可能是由于岩浆热作用的影响使下伏煤层发生裂解而混入包裹体内的。金属有可能与有机质络合呈气相迁移,在有利的条件下沉淀(张文淮等, 1998, 2003)。

4 结 论

综上所述,可得如下结论:

(1) 在钾化花岗岩、伟晶岩等岩石中包裹体十分发育,从岩浆硅酸盐包裹体(熔融包裹体)→硅酸盐-溶液包裹体(熔-流包裹体)→含子矿物包裹体→纯气体包裹体→富 CO_2 包裹体→气-液包裹体,均一温度逐渐降低,表明岩浆的结晶分异作用十分发育,充分的结晶分异是成矿的重要原因。

(2) 丰富的水、 CO_2 、 CH_4 等挥发组分是该区成矿的有利条件。

(3) 大量含金属矿物(如黄铁矿、黄铜矿等)的包裹体的存在,表明岩浆带来了丰富的成矿物质,为成矿提供了不可缺少的物质基础。

(4) 该区的流体经历了长期、多次的沸腾作用,有利于成矿物质不断从岩浆中抽提并沉淀。经与已知矿体对比可知,该区包裹体的温度区间要比其他矿区的宽,沸腾作用的影响更大,具有很大的找矿潜力。

致 谢 感谢中国地质大学(北京)包裹体实验

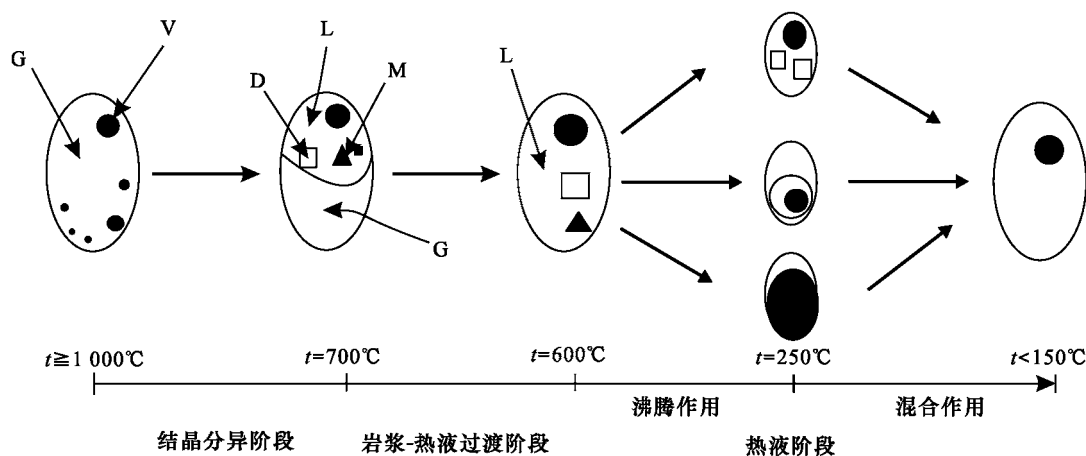


图 8 岩浆结晶分异示意图

D—石盐子矿物 G—玻璃质 L—液体 M—金属子矿物 V—气体

Fig. 8 Schematic map showing magma crystallization and immiscibility

D—NaCl daughter mineral ; G—Glass ; L—Liquid ; M—Metal daughter mineral ; V—Vapour

室负责人诸惠燕老师、辛亮同学和王汪根同学在包裹体测温与论文写作过程中给予的帮助,感谢中国科学院地质与地球物理研究所范宏瑞研究员和胡芳芳博士在激光拉曼探针测试过程中提供的帮助和指导。

References

- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ solutions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 683~684.
- Campbell A R. 1995. The evolution of a magmatic fluid: A case history from the Capitan mountains, New Mexico [A]. In: Thompson J F H, ed. *Mineralogical Association of Canada short course series: Magma, fluids and ore deposits* [C]. Victoria, British Columbia: Short course series 23, Mineral Association of Canada. 291~308.
- Calagari A A. 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran [J]. *J. Asian Earth Sciences*, 23: 179~189.
- Chen J R, Li H G, Jin B Y, Wu Y H, Wang Y Z and Yu W Q. 2002. Geological features and the deep metallogenic forecast of the No. J-1 gold body in the Jinchang gold deposit, Heilongjiang [J]. *Gold Geol.*, 8(4): 8~12 (in Chinese with English abstract).
- Fang R H. 1994. Metaltectonic setting and its evolution of nonferrous metals on the Northern margin of the North China landmass and in its adjacent area [A]. In: Rui Z Y, Shi L D, Fang R H, ed. *Geology of the nonferrous metallic ore deposits in the northern margin of the North China block and its adjacent areas* [C]. Beijing: Geol. Pub. House. 5~24 (in Chinese with English abstract).
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1998. Freezing point depression of $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ solution [J]. *Econ. Geol.*, 83: 197~202.
- Hedenquist J W. 1995. The ascent of magmatic fluid: Discharge versus

mineralization [A]. In: Thompson J F H, ed. *Mineralogical Association of Canada short course series: Magma, fluids and ore deposits* [C]. Victoria, British Columbia: Short course series 23, Mineral Association of Canada. 263~289.

- Jin B Y, Chen J R, Zhu J H and Wang Y Z. 2002. The character of volcanic structure and its ore control features in Jinchang area, Heilongjiang [J]. *Gold Geol.*, 8(1): 26~32 (in Chinese with English abstract).
- Li G S, Chen J R, Wang Y Z, Jin B Y, Wu Y H and Yu W Q. 2003. Study on the mineralization type and inclusion features of the Jinchang gold deposit, Heilongjiang [J]. *Gold Geol.*, 9(1): 32~37 (in Chinese with English abstract).
- Lin Q and Ge W C. 1998. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in Northeastern China [J]. *Scientia Geologic Sinica*, 33(2): 129~138 (in Chinese with English abstract).
- Liu B and Shen K. 1999. Thermodynamics of fluid inclusions [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 44~140 (in Chinese).
- Liu L D, Li Y and Lan X. 1999. A discussion on breccia/stockwork-porphyry type gold deposits [J]. *Mineral Deposits*, 18(1): 29~36 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W H. 2004. Fluid inclusions [M]. Beijing: Sci. Press. 201~229 (in Chinese).
- Ma J J and Fang D H. 1991. A preliminary study of the Mesozoic volcanic rocks in Heilongjiang Province [J]. *Heilongjiang Geol.*, 2(2): 1~16 (in Chinese with English abstract).
- Mu T, Liu G G and Xu K C. 2000. The geological-geochemical characteristics and ore genesis of Jinchang gold deposit in Heilongjiang [J]. *Gold Geol.*, 6(3): 57~64 (in Chinese with English abstract).
- Qiu J X, Zhao J L, Tao K Y and Ma C Q. 1996. Volcanic rock [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~190 (in Chinese with English abstract).
- Wang D F, Chen C Y, Yang S, Liu X L, Zhang J F, Yang X Z, Liu C

- and Liu H S. 1992. The continental geology in northern margin of Sino-Korean platform[M]. Beijing: Seismological Press. 5~125 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J F, Quan H, Wu G and Zhu H C. 2000. Tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Northeast China[J]. Precious Metallic Geology, 9(1): 33~38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D H, Zhang W H and Xu G J. 2001. Exsolution and evolution of magmatic hydrothermal fluids and their constraints on the porphyry ore-forming system[J]. Earth Science Frontiers, 8(3): 193~202 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W H and Tan T L. 1998. Relationship between organic fluids and gold mineralization in the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 17(1): 15~24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W H, Zhang D H and Liu M. 2003. Study on ore-forming mechanisms of the Yinshan Cu-Pb-Zn-Au-Ag deposits, Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 19(2): 242~250 (in Chinese with English abstract).
- Zhu C W, Chen J R, Li T G, Cui B, Jin B Y and Wang K Q. 2003. Geology and ore genesis of Jinchang gold deposit, Heilongjiang Province[J]. Mineral Deposits, 22(1): 57~64 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈锦荣, 李汉光, 金宝义, 武玉海, 王艳忠, 喻万强. 2002. 黑龙江金厂 J-1 号金矿体地质特征及深部预测[J]. 黄金地质, 8(4): 8~12.
- 方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属成矿构造环境与演化[A]. 见: 芮宗瑶, 施林道, 方如恒, 主编. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质[C]. 北京: 地质出版社. 5~24.
- 金宝义, 陈锦荣, 褚金海, 王艳忠. 2002. 黑龙江金厂金矿区火山构造及其控矿特征[J]. 黄金地质, 8(1): 26~32.
- 李高生, 陈锦荣, 王艳忠, 金宝义, 武玉海, 喻万强. 2003. 黑龙江金厂金矿床矿化类型及包裹体特征研究[J]. 黄金地质, 9(1): 32~37.
- 林强, 葛文春. 1998. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义[J]. 地质科学, 53(2): 129~138.
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社. 44~140.
- 刘连登, 李颖, 兰翔. 1999. 论角砾/网脉-斑岩型金矿[J]. 矿床地质, 18(1): 29~36.
- 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: 地质出版社. 201~229.
- 马家骏, 方大赫. 1991. 黑龙江省中生代火山岩初步研究[J]. 黑龙江地质, 2(2): 1~16.
- 慕涛, 刘桂阁, 项魁辰. 2000. 黑龙江金厂金矿地质地球化学特征及矿床成因[J]. 黄金地质, 6(3): 57~64.
- 邱家骥, 赵俊磊, 陶奎元, 马昌前. 1996. 火山岩[M]. 北京: 地质出版社. 1~190.
- 王东方, 陈从云, 杨森, 刘效良, 张炯飞, 杨学增, 刘椿, 刘海山. 1992. 中朝陆台北缘大陆构造地质[M]. 北京: 地震出版社. 5~125.
- 张炯飞, 权恒, 武广, 祝洪臣. 2000. 东北地区中生代火山岩形成的构造环境[J]. 贵金属地质, 9(1): 33~37.
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2001. 岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统的制约[J]. 地学前缘, 8(3): 193~202.
- 张文淮, 谭铁龙. 1998. 江西省金山金矿有机流体与金矿关系[J]. 矿床地质, 17(1): 15~24.
- 张文淮, 张德会, 刘敏. 2003. 江西银山铜铅锌金银矿床成矿流体及成矿机制研究[J]. 岩石学报, 19(2): 242~250.
- 朱成伟, 陈锦荣, 李体刚, 崔彬, 金宝义, 王克强. 2003. 黑龙江金厂金矿床地质特征及成因讨论[J]. 矿床地质, 22(1): 57~64.