

张朋, 杨宏智, 孙景贵, 等. 黑龙江省马连金矿床流体包裹体特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 265–274.

Zhang Peng, Yang Hongzhi, Sun Jinggui, et al. Characteristics of fluid inclusions of the Malian gold deposit in Heilongjiang Province and their geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 265–274(in Chinese with English abstract).

黑龙江省马连金矿床流体包裹体特征及其地质意义

张 朋¹ 杨宏智¹ 孙景贵² 赵 岩¹ 崔培龙²

(1. 沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110034; 2. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要:为确定马连金矿成矿流体性质, 笔者对成矿期石英开展详细的流体包裹体和氢氧同位素研究, 包裹体岩相学和显微测温结果表明: 石英中主要发育气相包裹体、液相包裹体和纯液相包裹体; 包裹体均一温度为 148~255℃ (峰值为 180~210℃), 盐度为 1.7%~7.5%NaCl_{eqv} (峰值 2%~4%NaCl_{eqv}), 属于低温、低盐度金矿床。激光拉曼和群体包裹体成分分析显示: 成矿流体气相成分以 H₂O 为主, CO₂、CH₄ 次之, 液体主要成分为 Ca²⁺、Na⁺、SO₄²⁻ 和 F⁻, 其次为 K⁺、Mg²⁺、NO₃⁻ 和 Cl⁻, 成矿流体属于 NaCl–H₂O±CO₂±CH₄ 体系。包裹体氢氧同位素研究表明: 成矿流体 δD_{v-SMOW} 值介于 -92.3‰~-113.4‰, δ¹⁸O_{H₂O} 值介于 2.5‰~3.5‰, 具有岩浆水和大气降水混合的特征, 结合成矿流体特征, 认为流体不混溶或沸腾作用导致相分离是马连金矿沉淀主要原因。

关键词:马连金矿床; 流体包裹体; 氢氧同位素; 黑龙江省

中图分类号: P618.51

文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)01-0265-10

Characteristics of fluid inclusions of the Malian gold deposit in Heilongjiang Province and their geological significance

ZHANG Peng¹, YANG Hong-zhi¹, SUN Jing-gui², ZHAO Yan¹, CUI Pei-long²

(1. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110034, Liaoning, China;

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

Abstract: Detailed fluid inclusion and H–O isotope characteristics of metallogenic period quartz veins were studied to reveal the ore-forming fluid features. Petrography and microthermometric studies of fluid inclusions suggest that the main types of fluid inclusions of the Malian gold deposit are gaseous inclusions, liquid inclusions and pure liquid inclusions. Temperature test shows that the homogenization temperature and salinity of fluid inclusions vary from 148 to 255℃, mostly in the range of 180–210℃, and 1.7%–7.5%NaCl_{eqv} (the peak values vary in the range of 2%–4%NaCl_{eqv}), respectively. Based on these results, the authors have reached the conclusion that the ore-forming fluids of the Malian deposit should be of low temperature and salinity. Laser Raman and group fluid inclusions content studies indicate that gas composition of the ore-forming fluids are mainly H₂O, with some CO₂ and CH₄, whereas liquid compositions of the ore-forming fluids are mainly Ca²⁺, Na⁺, SO₄²⁻ and F⁻, with some K⁺, Mg²⁺, NO₃⁻ and Cl⁻. The ore-forming

收稿日期: 2014-02-15; 改回日期: 2014-05-16

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113058700)资助。

作者简介: 张朋, 男, 1983 年生, 博士生, 工程师; 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究; E-mail: geozhangpeng2010@163.com。

fluids are then defined to be of the $\text{NaCl-H}_2\text{O}\pm\text{CO}_2\pm\text{CH}_4$ system. The hydrogen and oxygen isotopic compositions of the ore-forming fluids show that $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ values of the ore-forming fluid are between -92.3‰ and -113.6‰ , and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ are between 2.5‰ and 3.5‰ , which indicates that the ore-forming fluids were derived from the mixing of magmatic water and meteoric water. Based on the characteristics of ore-forming fluids, it is concluded that gold deposition in the Malian gold deposit was related to the phase separation.

Key words: Malian gold deposit; fluid inclusion; H-O isotopes; Heilongjiang Province

About the first author: ZHANG Peng, male, born in 1983, doctor candidate, engineer, majors in mineralogy, petrology, mineral deposit geology; E-mail: geozhangpeng2010@163.com.

佳木斯地块是中国东北地区重要的金矿集中区之一,区内金成矿条件较为优越,现已发现团结沟、杜家河、平顶山、老柞山、马连、连珠山等大、中、小型金矿床多处。马连金矿床是黑龙江省地质矿产局第三地质大队于1989年发现,该矿床自发现以来仅有部分学者在矿床地质特征、控矿构造条件等方面做了少量研究,虽取得一定的认识和成果,但仍存在较多不足,尤其表现在矿床成矿流体的性质与演化、成矿机制等方面,为此,笔者于2013年8月份对该矿床进行了野外实地考察,通过对主成矿阶段含石英流体包裹体岩相学、显微测温、群体包裹体成分、激光拉曼探针分析及氢氧同位素等研究,探讨成矿流体的性质,为揭示矿床的成矿机制提供科学依据。

1 矿床地质特征

马连金矿床位于黑龙江省嘉荫县城东南50 km处,大地构造位置位于小兴安岭与张广才岭褶皱带东北端佳木斯地块(图1-a)。区内发育的地层有下元古界黑龙江群、下元古界麻山群、上侏罗统宁远村组、下白垩统淘洪河组、上白垩统松木河组、古—渐新统乌云组、上一中新统孙吴组、上新统玄武岩,侵入岩有花岗岩,花岗闪长斑岩等,矿区内出露的地层主要是下元古界黑龙江岩群,侵入岩少见,脉岩主要为闪长岩脉,英安玢岩脉,主要构造是NE、NW和近SN向压扭性断裂构造,马连金矿床赋存在NE和近SN向压扭性断裂带内,赋矿围岩为白云母斜长片岩(图1-b)。

目前该矿区发现6条主矿体,其中以IX和X号矿体规模较大(图1-c),IX号矿体呈NNW走向,走向延伸150 m,地表出露最宽达9.93 m,平均宽度4.48 m,倾向E,倾向延伸93 m,平均品位2.88 g/t;X号矿体呈NW走向,走向延伸170 m,地表出露平均

宽度2.45 m,倾向NE,倾斜延伸115 m,平均品位2.51 g/t。

矿石自然类型为石英脉型,主要呈脉状(图2-a)和透镜状(图2-b)产出,金属矿物组合较为简单,主要有黄铁矿(图2-c、e)、毒砂(图2-d)、黄铜矿(图2-f),脉石矿物主要为石英,其次为绢云母和长石等;矿石结构以碎裂结构(图2-c)、半自形—他形结构(图2-d、f)为主,局部见有交代残余结构,主要构造有侵染状构造(图2-e)和脉状构造;围岩蚀变类型主要有钾化、硅化、绿帘石化、绿泥石化、碳酸盐化等。

根据脉体穿插关系,矿石结构、构造、矿物共生组合特征及前人的研究成果,马连金矿成矿作用可分为3个阶段,第I成矿阶段:石英—毒砂—黄铁矿阶段,主要矿物组合为毒砂、黄铁矿和黄铜矿,毒砂和黄铁矿呈自形、半自形赋存于石英之中,生成的蚀变矿物有绢云母、绿泥石、绿帘石等;第II成矿阶段:石英—金属硫化物阶段,该阶段形成的金属矿物有毒砂、黄铁矿、方铅矿、黄铜矿。生成的蚀变矿物有绢云母、绿泥石、绿帘石等,石英主要以隐晶与玉髓状石英为主,该阶段是马连金矿主成矿阶段;第III成矿阶段:石英—碳酸盐阶段,该阶段主要生成石英、方解石、绢云母和褐铁矿等,此外还含有少量绿泥石和绿帘石,其中石英多为乳白色粗脉状石英。

2 实验样品和实验方法

本次对主成矿阶段含石英—硫化物脉开展流体包裹体岩相学、显微测温、群体包裹体成分、激光拉曼探针分析及氢氧同位素测定研究,样品取自马连金矿床XII号脉。将样品磨制成厚度为0.25 mm双面抛光的包裹体薄片做流体包裹体岩相学观察,然后选择代表性样品进行均一温度、冰点和成分等分析工作。

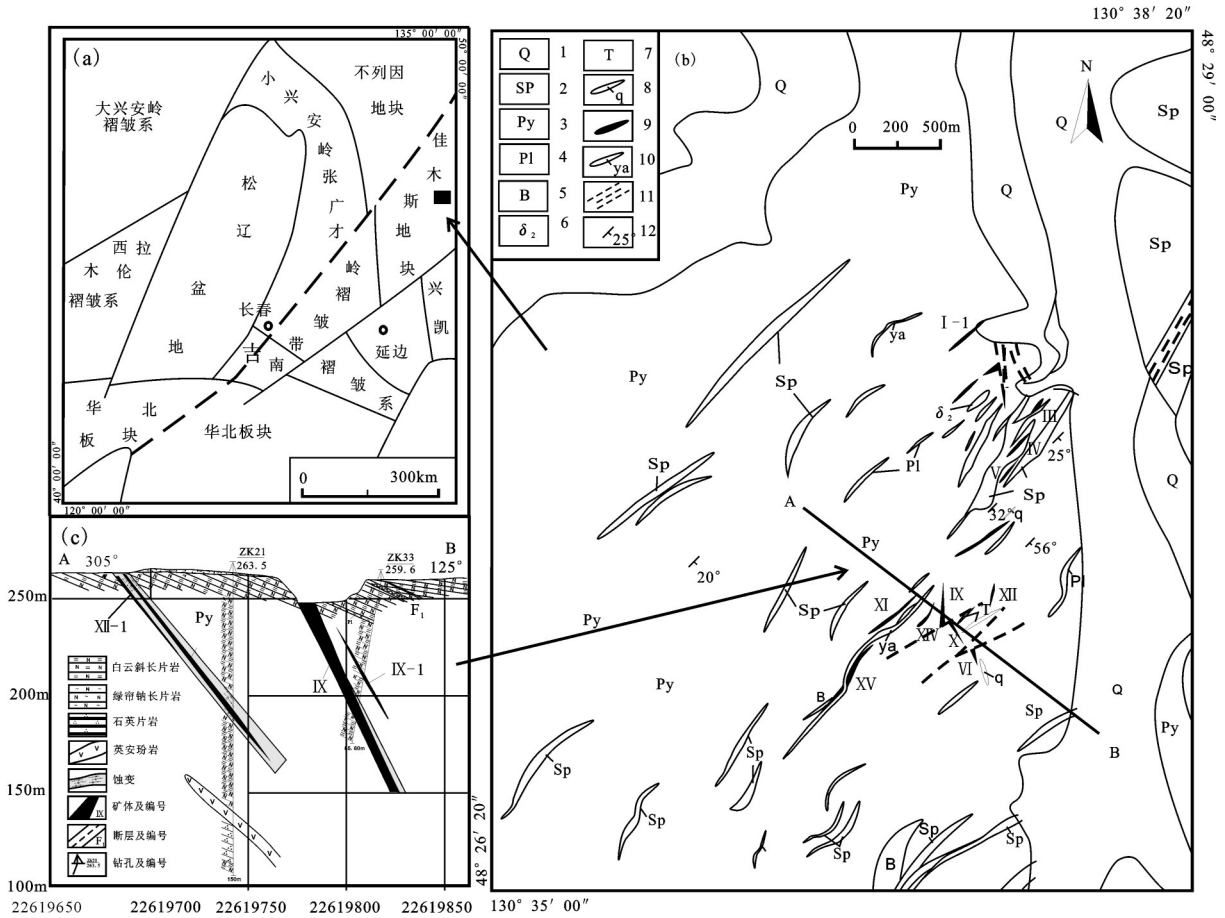


图1 马连金矿大地构造纲要图(a)、矿区地质图(b)及8号勘探线剖面图(c)

(图(a)和图(b)分别根据[1]和①)

- 1—第四系;2—片状石英岩、白云石英岩夹白云斜长片岩;3—白云母斜长片岩;4—含绿帘阳起绿泥钠长片岩;5—斜长变粒岩;6—闪长岩;
7—绿泥透闪石岩;8—石英脉;9—矿体;10—英安玢岩;11—断裂;12—产状

Fig.1 Sketch map of tectonic setting (a), geology (b) and schematic geological section along No. 8 exploration line (c)(Fig. (a) and Fig. (b) modified after [1] and ①, respectively)

- 1—Quaternary; 2—Schistose-quartzite, Musvite-schistose-quartzite and musvite-plagioclase schist; 3—Muscovite-plagioclase schist; 4—Green clay-tremolite; 5—Plagioclase-granulite; 6—Diorite; 7—Chlorite-remolite; 8—Quartz vine; 9—Orebody; 10—Dacite porphyrite; 11—Fault; 12—Attitude

显微测温工作在吉林大学地球科学学院流体实验室完成,所使用的仪器为Linkam THMS-600型冷热台(-196℃~600℃),测试前,应用国际标准样纯H₂O及w(NaCl_{aq})为25%的H₂O-NaCl包裹体,对流体包裹体的参数进行系统矫正,误差为±0.1℃,测试期间,当温度小于30℃升温速率为1℃/min,当温度为200℃以上时,升温速率为10℃/min,在相变化及冰点附近,升温速率小于0.2℃/min。

单个包裹体的激光拉曼分析在北京核工业地质分析测试研究中心(LABHR-VISLABRAM

HR800型显微激光拉曼光谱仪)完成,实验条件为:波长为532nm, Yag晶体倍频,固体激光器,激光束斑≥1μm,扫描时间10s,扫描2次。

流体包裹体群体成分分析工作由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。气相成分分析实验所使用仪器为美国PerkinElmer公司clarus600气相色谱仪。实验条件为温度25℃,载气Ar₂,载气气流25mL/min,载气压力100kPa,检测器TCD,柱箱温度120℃。热导检测器温度150℃,包裹体的爆裂温度为550℃。液相成分分析使用仪器

①李永胜, 杨贺平, 杜英杰, 等. 黑龙江省嘉荫县马连岩金矿床详查报告[R]. 哈尔滨: 黑龙江省矿业集团有限责任公司, 2002.

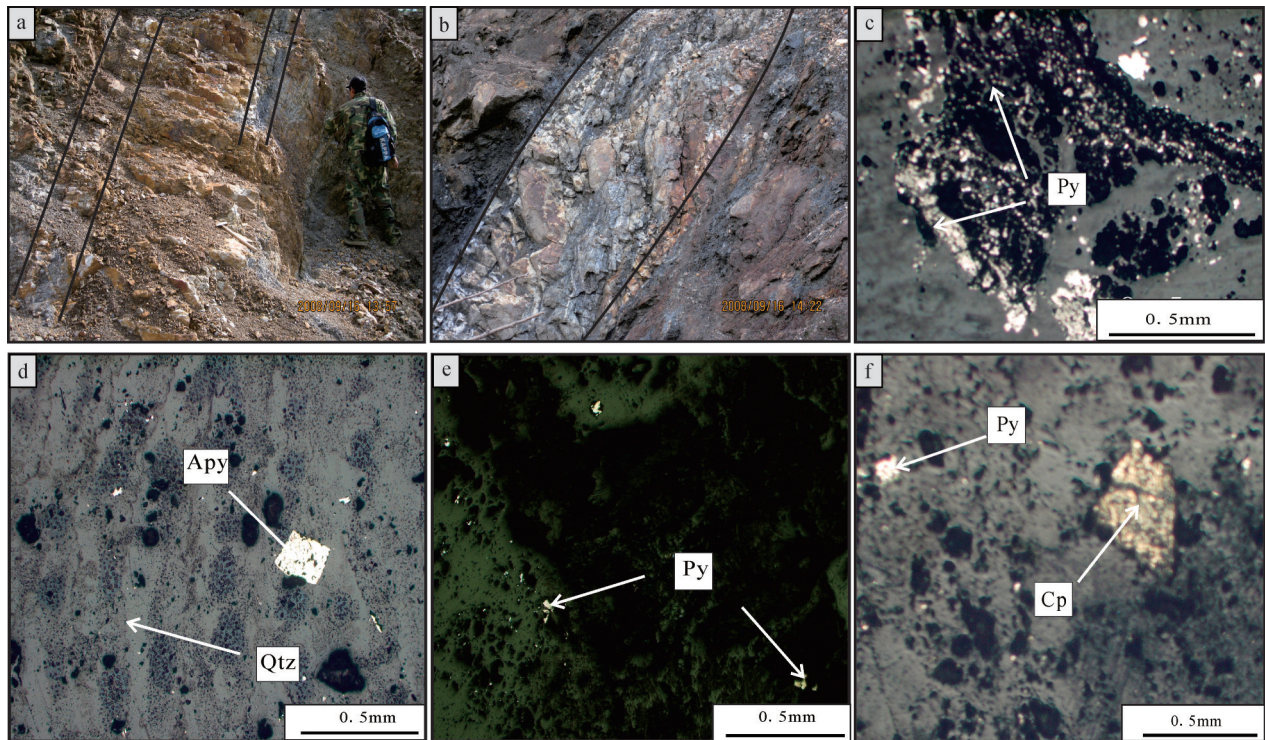


图2 马连金矿床矿体野外和矿石镜下显微照片

a—脉状矿体；b—透镜状矿体；c—碎裂状黄铁矿；d—自形—半自形毒砂；e—浸染状黄铁矿；f—半自形—他形黄铜矿；Py—黄铁矿；Apy—毒砂；Qtz—石英；Cp—黄铜矿

Fig.2 Photographs of orebody and ore in the Malian gold deposit

a—Vein orebody; b—Lenticular orebody; c—Shattered pyrite; d—Euhedral-subhedral arsenopyrite; e—Disseminated pyrite; f—Euhedral-subhedral copyrite Py—Pyrite; Apy—Arsenopyrite; Qtz—Quartz; Cp—Chalcopyrite

为美国 DIONEX-500 型离子色谱仪进行测试分析。

3 实验结果

3.1 流体包裹体类型和特征

流体包裹体岩相学研究显示,含石英内的流体包裹体较发育,包裹体类型简单,根据流体包裹体岩相学及冷热台相变行为^[2-3],可将包裹体分为液相包裹体、气相包裹体和纯液相包裹体。液相包裹体主要由液体成分和气相成分组成,液相成分占包裹体体积60%~80%;包裹体呈不规则状、椭圆状、次圆状,大小6~15 μm (图3-a、b),包裹体加热时均一至液相;气相包裹体同样由气相和液相组成,形态主要为椭圆状、三角状和不规则状,气相成分占整个包裹体50%~70%,大小介于5~10 μm (图3-c、d),包裹体均一至气相;纯液相包裹体常温下全部为液相,包裹体呈椭圆状、次圆状产出,大小介于3~5 μm (图3-a)。

3.2 流体包裹体显微测温、盐度和密度

本次研究工作,共采集6件石英—金属硫化物石英脉用于流体包裹体研究,从中挑选出4件代表性样品用于包裹体均一温度测定,测定均一温度时,首先对包裹体进行冷却,然后再回温加热,首先记录包裹体冰点温度(T_i),然后测定气体包裹体和液体包裹体均一温度(T_{ht})和均一方式,测试结果见表1。

由表1可以看出,马连金石英中流体包裹体均一温度分布在148~255 $^{\circ}\text{C}$ ($N=104$),平均温度为191 $^{\circ}\text{C}$ 。根据所测包裹体均一温度数据绘制直方图。从均一温度直方图可以看出(图4),液体包裹体均一温度变化范围较宽,成矿温度多集中在150 $^{\circ}\text{C}$ ~220 $^{\circ}\text{C}$,具有180 $^{\circ}\text{C}$ 左右峰值,气体包裹体均一温度变化范围较窄,成矿温度多集中在180 $^{\circ}\text{C}$ ~210 $^{\circ}\text{C}$,有190 $^{\circ}\text{C}$ 左右峰值,成矿温度部分高于液体包裹体,但总体成矿温度范围在液体包裹体成矿温度范围之内,说明二者具有相同的均一温度,上述

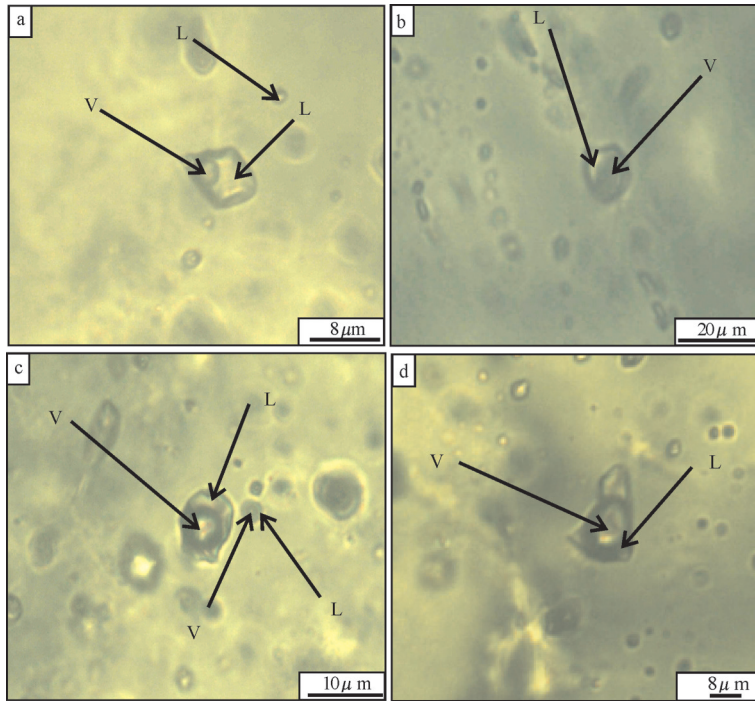


图3 马连金矿体石英中流体包裹体的显微照片
a—液相包裹体和纯液相包裹体;b—气相包裹体;c、d—液相包裹体;V—气相;L—气相

Fig.3 Fluid inclusion microphotographs of the Malian gold deposit
a—Liquid inclusions and pure liquid inclusions; b—Vapor inclusions; c, d— Liquid inclusions;V—Vapor phase;L—Liquid phase

表1 马连金矿石英流体包裹体显微测温数据及参数

Table 1 Microthermometric data and estimated parameters of fluid inclusions in quartz from the Malian gold deposit

样号	包裹体类型	测试数	Ti/°C	Th/°C	w/%NaCl _{eqv}	ρ/(g/cm ³)	P ₁ /MPa	H/km	均一相态
DM-1	I	18	-3.0~-1.5	148~216	2.6~7.5	0.7~1.0	10.7~20.3	1.1~2.0	液相
	II	6	-4.0~-3.8	200~221	3.6~6.5	0.9~0.9	15.4~19.8	1.5~2.0	气相
DM-2	I	23	-2.8~-1.0	170~211	1.7~4.7	0.9~0.9	11.5~17.3	1.2~1.7	液相
	II	12	-1.8~-2.6	191~255	3.1~4.3	0.8~3.1	14.3~20.5	1.4~2.0	气相
DM-4	I	21	-2.5~-2.2	175~238	3.7~4.2	0.9~0.9	13.6~19.0	1.4~1.9	液相
DM-6	I	16	-3.4~-1.5	192~247	2.6~5.7	0.8~0.9	13.9~21.3	1.4~2.1	液相
	II	8	-4.0~-1.9	189~221	3.1~3.2	0.9~0.9	14.1~16.6	1.4~1.7	气相

注: Ti为冰点下降温度; Th为均一温度; w(NaCl)为盐度; ρ为密度; P₁为压力; H为成矿深度。

测温结果表明,马连金矿床成矿阶段流体具有低温热液的特点。

3.3 流体包裹体激光拉曼分析

流体包裹体被喻为成矿热液的原始样品,是解译成矿作用的密码^[4],其成分的测定可以探测成矿流体来源和源区组成^[5],激光拉曼分析是对单个包裹体进行非破坏测定最有效的方法^[6-7]。

本次流体包裹体激光拉曼光谱显示:主成矿阶

段流体包裹体气相成分含有较多的H₂O,CO₂和CH₄。次之,未检测到其他气体成分存在,其特征峰值分别为1393.3 cm⁻¹、3413.5 cm⁻¹、3444.5 cm⁻¹、2921.1 cm⁻¹(图5)。

3.4 流体包裹体群体成分分析

对马连主成矿阶段石英中群体包裹体气液成分进行分析(表2~3),测试结果显示,马连金矿气相成分主要为H₂O,其次是CO₂,除此之外还含有一定

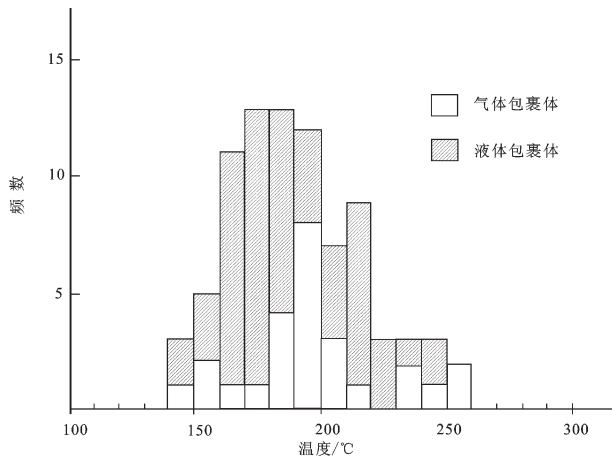


图4 马连金矿床石英中流体包裹体均一温度直方图
Fig.4 Histogram showing microthermometric measurements of fluid inclusions in quartz from the Malian gold deposit

量的 H_2 、 N_2 、 CO 和 CH_4 ，与激光拉曼分析显现相一致，包裹体中液相成分阳离子主要为 Ca^{2+} 、 Na^+ ，含量分别为 $2.735\sim 7.469 \mu g/g$ 、 $1.558\sim 2.578 \mu g/g$ ，含有少量 K^+ 、 Mg^{2+} ，阴离子主要为 SO_4^{2-} 和 F^- ，含量分别为

$2.561\sim 12.610 \mu g/g$ 、 $1.839\sim 2.391 \mu g/g$ ，含有少量 NO_3^- 和 Cl^- 次之，群体包裹体分析显示，流体中 SO_4^{2-} 含量较高，说明成矿流体中有岩浆水存在，与后文氢氧同位素研究结论相一致。

4 氢氧同位素

含矿石英氢和氧同位素测试工作在核工业北京地质研究院测试研究中心完成。使用仪器为德国 Finnigan 公司生产的 MAT-253 稳定同位素质谱仪。天然水中氢同位素通过锌还原法测定，硅酸盐及氧化物矿物氧同位素组成通过五氟化溴法测定，分析精度为 $\delta^{18}O$ 为 0.2‰ ， D/H 为 2‰ 。

本次对 4 件主成矿阶段石英岩样品进行 H-O 同位素分析(表 4)， δD 值直接由实验室测定给出， $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值通过 $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.40$ [8] 计算， T 为绝对温度。经计算石英-多金属硫化物成矿阶段石英单矿物 δD_{V-SMOW} 值介于 -92.3‰ ~ -113.4‰ ， $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值介于 2.5‰ ~ 3.5‰ ，在氢-氧同位素图解上(图 6)，主成矿阶段样品均投在原生岩浆水下方并向大气降水偏移。

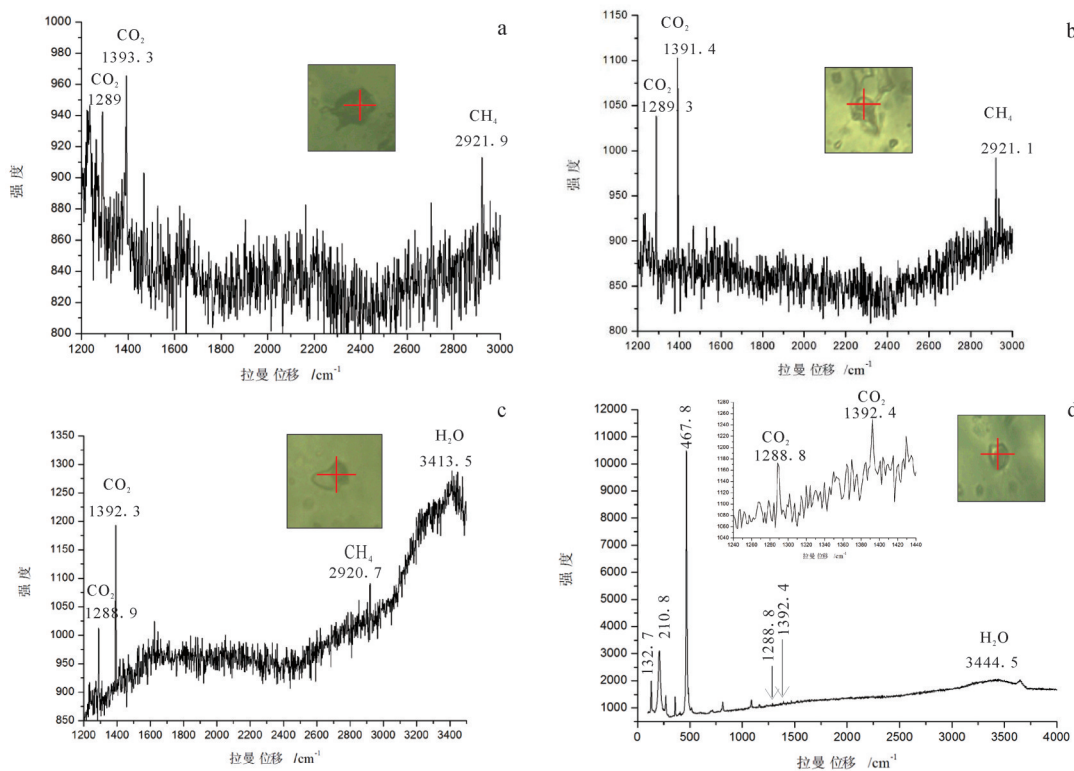


图5 马连金矿床主成矿阶段石英中流体包裹体气相成分的激光拉曼光谱
Fig.5 Raman spectrograms of fluid inclusions in quartz from the Malian gold deposit

表2 马连金矿流体包裹体液相成分($w_{(B)液相}/(\mu\text{g/g})$)

样号	矿物名称	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	Na ⁺ /K ⁺
D-1	石英	1.922	1.369	0.3829	2.563	2.188	0.5923	0.2704	2.735	0.534	3.694
D-2	石英	2.391	1.438	0.3579	2.561	1.558	0.5724	0.3672	3.780	0.561	2.722
D-3	石英	2.045	3.576	0.1651	12.61	2.091	0.5878	0.8439	7.469	0.284	3.557
D-4	石英	1.839	3.238	0.3112	3.097	2.578	0.7592	0.4276	3.348	1.046	3.396

表3 马连金矿流体包裹体气相成分($w_{(B)气相}/(\mu\text{L/g})$)

样号	矿物名称	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O(气相)	CO ₂ /CH ₄	CO ₂ +CH ₄	CO ₂ /H ₂ O
D-1	石英	0.1400	0.1237	0.0640	0.0263	0.1154	1.864×10 ⁴	4.388	0.142	0.625×10 ⁻⁵
D-2	石英	0.1995	4.731	0.0914	0.0615	0.4922	1.833×10 ⁴	8.003	0.554	2.685×10 ⁻⁵
D-3	石英	0.1399	8.309	0.0289	0.0226	2.268	2.849×10 ⁴	100.354	2.291	7.960×10 ⁻⁵
D-4	石英	0.0688	0.1227	0.0713	0.0201	0.5275	1.826×10 ⁴	26.244	0.548	2.889×10 ⁻⁵

表4 马连金矿氢氧同位素测试结果

样品标号	成矿阶段	测试矿物	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$t/^\circ\text{C}$
D-1	II	石英	-96.6	15.2	2.9	190.6
D-2	II	石英	-92.3	15.1	2.8	190.6
D-3	II	石英	-113.4	15.8	3.5	190.6
D-4	II	石英	-109.3	14.8	2.5	190.6

注: t 采用流体包裹体均一温度平均值。

5 讨论

5.1 成矿流体的性质

马连金矿床主成矿阶段流体包裹体可见气相包裹体、液相包裹体和纯液相包裹体相邻,共生于同一结晶面上,流体包裹体显微测温显示,包裹体均一温度介于148~255℃,液相包裹体和气相包裹体均一温度相近,均一方式各异,气相包裹体均一至气相,液相包裹体均一至液相(表1,图4),应属于典型的沸腾流体包裹体组合^[9-10]。然而从流体包裹体盐度直方图(图7)中可以看出,包裹体盐度具有正态分布的特征,与沸腾流体盐度特征不相符,因此,成矿流体是否发生沸腾有待进一步探讨。激光拉曼和群体成分分析显示:流体包裹体气相成分以H₂O为主,具有绝对优势,其次为CO₂和CH₄,还含有少量CO、N₂、H₂等气体,液相成分富Ca²⁺、Na⁺、SO₄²⁻

和F⁻,其次为K⁺、Mg²⁺、NO₃⁻和Cl⁻,成矿流体属于NaCl-H₂O±CO₂±CH₄体系。但在包裹体显微测温中并没有发现CO₂的存在,可能与CO₂的含量低有关。同时CH₄和CO烃类气体的存在可能说明成矿流体具有深源的特点^[11]。

5.2 成矿流体的盐度、密度、压力和成矿深度

本次研究所获得的冰点温度变化范围主要为-4.0~-1.0℃(表1),根据所测得的冰点温度数据($N=64$),采用Potter及Hall的(NaCl-H₂O体系)盐度计算公式: $w=0.00+1.78T_i-0.0442T_i^2+0.000557T_i^3$ (式中 w 为NaCl的质量百分数, T_i 为冰点下降温度)^[12-13],求得盐度为1.7%~7.5% NaCl_{eqv}(表1),平均为3.3% NaCl_{eqv},从盐度直方图中可以看出(图7),流体盐度峰值集中在2.0%~4.0% NaCl_{eqv}。

根据均一温度和盐度,应用刘斌的经验公式 $\rho=a+bTh+cTh^2$ (a 、 b 和 c 均为无量纲参数)^[14],求得马连金

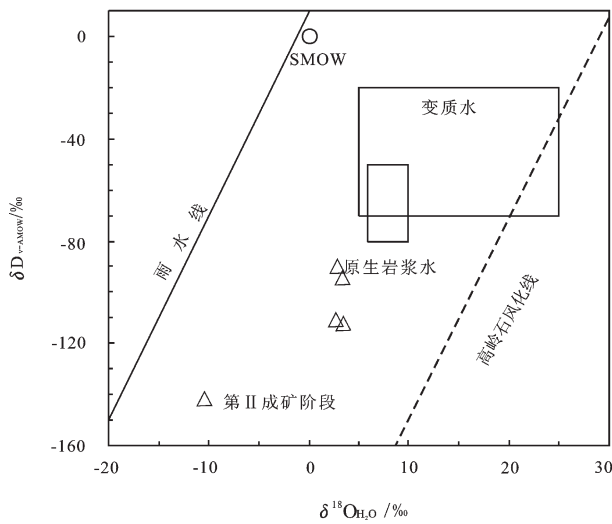


图6 马连金矿成矿流体的 δD_{V-SMOW} 对 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 投影图
Fig.6 Diagram of $\delta D_{V-SMOW}-\delta^{18}O_{H_2O}$ in fluid inclusions of quartz from the Malian gold deposit

矿床流体包裹体的密度变化区间为 $0.7\sim 3.1\text{ g/cm}^3$ (表1),平均值为 0.9 g/cm^3 ,成矿流体具低密度的特征。

根据邵洁连计算流体压力的经验公式 $P_1 = P_0 \times t_1/t_0$ ($P_0=219+2620 \times 0.01s$, $t_0=(374+920 \times 0.01s)/10$),式中 P_1 为成矿压力(MPa); P_0 为初始压力(MPa); t_0 为初始温度^[15]。计算得出马连金矿床成矿压力范围 $10.7\sim 21.3\text{ Mpa}$ (表1),峰值集中在 $10.3\sim 16.4\text{ Mpa}$,平均值为 15.7 Mpa 。

成矿深度对矿床成因研究和资源矿产勘查潜力的确定具有重要的意义,目前对成矿深度测算最常用的方法利用流体包裹体捕获压力估算深度。Sibson建立断裂带流体压力的垂直分带性或非线性关系^[16],孙丰月等把Sibson的深度-压力曲线,用计算机分段拟合,认为在流体压力 $< 40\text{ Mpa}$ 时,可用静水压力梯度计算成矿深度,即用压力除以静水压力梯度(10 MPa/km)^[17],根据这些关系求出马连金矿床的成矿深度范围为 $1.1\sim 2.1\text{ km}$ (表1),平均值为 1.78 km ,可见马连金矿床形成于浅成环境。

由上可知,马连金矿成矿流体显示中-低温、低盐度、低密度低压的流体特征,浅成成矿环境。

5.3 成矿流体来源及成矿机制

氢-氧同位素是热液矿床成矿流体来源有效示踪的手段之一^[18],从表4和图6中可以看出,马连金矿主成矿阶段 δD 值介于 $-92.3\text{‰}\sim -113.4\text{‰}$, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值介于

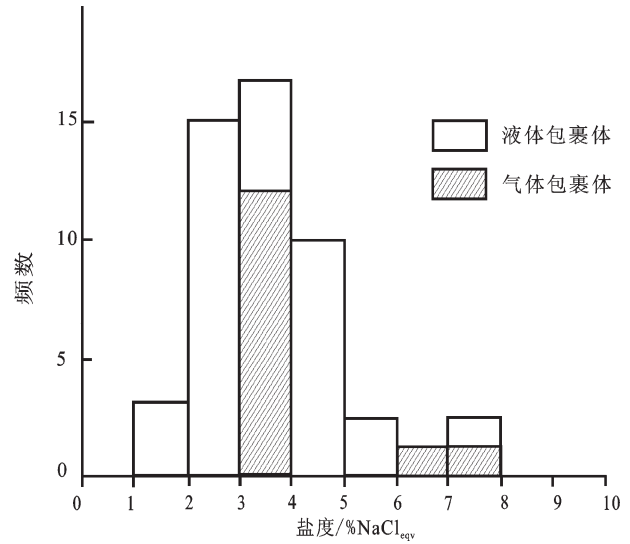


图7 马连金矿石英流体包裹体盐度直方图
Fig.7 Histogram showing salinity of fluid inclusions in quartz from the Malian gold deposit

$2.5\text{‰}\sim 3.5\text{‰}$ (取均一温度平均值 191°C),投影点在原生岩浆水下方,有向大气降水偏移趋势,其中 δD 明显低于岩浆水的值,可能反映成矿流体在演化过程中发生去气作用,使得低密度流体从成矿流体中分离^[19],该过程可能在北东东向控矿构造的控制下发生, $\delta^{18}O$ 向大气降水线偏移,发生所谓的“ $\delta^{18}O_{\text{水}}$ ”飘移^[20-21],反应主成矿期流体受到大气降水交换,即主成矿期成矿流体具有岩浆水和大气降水混合的特征^[22]。

流体混合、水岩反应、流体沸腾或相分离等是热液矿床的成矿物质沉淀主要机制^[23-31]。马连金矿氢氧同位素研究表明成矿流体具有岩浆水和大气降水混合的特点,在流体包裹体研究中,发现液相包裹体、气相包裹体和纯液相包裹体共生同一结晶面,属于同时捕获的结果,研究认为它是含矿热液自超临界状态向临界状态转化应力骤减降低的结果,是流体不混溶或流体沸腾的标志^[32],激光拉曼和群体成分分析显示,成矿流体包括多种组分,说明捕获的流体是不均一状态流体,与相分离作用特征相符^[19],因此流体不混溶或沸腾作用导致相分离,可能是马连金矿成矿作用发生的主要原因。

6 结论

(1)马连金矿床流体包裹体以气相包裹体和液相包裹体为主,含少量纯液相包裹体,成矿流体气

相成分以 H_2O 为主, CO_2 、 CH_4 次之、液体成分以 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 F^- 为主, 其次为 K^+ 、 Mg^{2+} 、 NO_3^- 和 Cl^- , 成矿流体属于 $NaCl-H_2O \pm CO_2 \pm CH_4$ 体系。

(2) 流体包裹体测试和估算显示: 成矿流体具有低温 ($148 \sim 255^\circ C$)、低盐度 ($1.7\% \sim 7.5\%$)、低密度 ($0.7 \sim 3.1 g/cm^3$)、低压 ($10.7 \sim 21.3 MPa$) 和浅成成矿环境 ($1.1 \sim 2.1 km$)。

(3) 流体包裹体氢氧同位素研究表明: 主成矿阶段的成矿流体具有岩浆水和大气降水混合的特征, 成矿过程中流体发生不混溶或沸腾作用是马连金矿成矿作用发生的主要原因。

致谢: 在流体包裹体测温和成分测定过程中, 笔者得到吉林大学地球科学学院流体实验室王力老师和北京核工业地质研究院张敏的诸多帮助; 审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见, 在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 陈雷. 黑龙江省宁安县英城子金矿床成矿作用与成矿模式研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Chen Lei. Mineralization and Metallogenic Model of Yingchengzi Gold Deposit, Ning'an, Heilongjiang[D]. Changchun: Jilin University, 2008(in Chinese).
- [2] Roedder E. Fluid inclusions, mineralogical society of America[J]. Review in Mineralogy, 1984, 12: 1-644.
- [3] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学技术出版社, 2004: 1-487.
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-487(in Chinese).
- [4] Vapnik Y Moroz I. Compositions and formation conditions of fluid inclusions in emerald from the Maria deposit[J]. Mineralogical Magazine, 2002, 66(1): 201-213.
- [5] 褚少雄, 曾庆栋, 刘建明, 等. 西拉木伦钨矿带车户沟斑岩型钨矿-铜矿成矿流体特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2465-2481.
Chu Shaoxiong, Zeng Qingdong, Liu Jianming, et al. Characteristics and its geological significance of fluid inclusions in Chehugou porphyry Mo-Cu deposit, Xilamulun molybdenum metallogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2465-2481(in Chinese with English abstract).
- [6] Bruke E A J. Raman micro-spectrometry of fluid inclusion[J]. Lithos, 2001, 55(1/4): 139-158.
- [7] Yamamoto J, Kagi H, Kancoka I. Fossil pressure of fluid inclusions in mantle xenoliths exhibiting rheology of mantle minerals: implications for the geobarometry of mantle minerals using micro-Raman spectroscopy[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 198(3/4): 511-519.
- [8] Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(17): 3057-3067.
- [9] 邓小华, 李文博, 李诺, 等. 河南嵩县纸房钨矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 2008, 24(9): 2133-2148.
Deng Xiaohua, Li Wenbo, Li Nuo, et al. Fluid inclusion constraints on the origin of Zhifanggou Mo deposit, Songxian county, Henan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(9): 2133-2148 (in Chinese with English abstract).
- [10] Ramboz C, Pichavant M, Weisbord A. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse: II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility[J]. Chem. Geol., 1982, 37: 29-48.
- [11] 杜玉雕, 余心起, 刘家军, 等. 皖南东缘钨铅矿成矿流体特征和成矿物质来源[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1334-1346.
Du Yudiao, Yu Xinqi, Liu Jiajun, et al. Characteristics of ore-forming fluids and sources of ore-forming materials in the Dongyuan W-Mo deposit, southern Anhui Province[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1334-1346 (in Chinese with English abstract).
- [12] Potter R W II, Clynne M A, Brown D L. Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions[J]. Econ. Geol., 1978, 73: 284-285.
- [13] Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of $NaCl-KCl-H_2O$ solutions [J]. Econ. Geol., 1988, 83: 197-202.
- [14] 刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1-290.
Liu Bing, Shen Kun. The Thermodynamics Base of Fluid Inclusion[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1-290 (in Chinese).
- [15] 邵洁连. 金矿找矿矿物学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1999: 1-150.
Shao Jielian. Prospecting Mineralogy of Gold Deposit[M]. Beijing: China University Geosci. Press, 1990: 1-150(in Chinese).
- [16] Sibson R H, Robert F, Poulsen K H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposit[J]. Geology, 1994, 16: 551-555.
- [17] 孙丰月, 金巍, 李碧乐, 等. 关于脉状热液金矿床的成矿深度思考[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(增刊): 27-30.
Sun Fengyue, Jin Wei, Li Bile, et al. Considerations on the mineralizing depth of hydrothermal lode gold deposit[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30 (supp.): 27-30(in Chinese with English abstract).
- [18] 李双保, 李俊建. 山西恒山义兴寨脉金矿田成矿地球化学特征[J]. 前寒武纪研究进展. 1997, 20(2): 1-21.
Li Shuangbao, Li Junjian. Characteristic of metallogenic geochemistry of Yixingzhai gold mine field, Hengshang MT,

- Shanxi Province[J]. *Progress in Precambrian Research*, 1997, 20(2): 1–21 (in Chinese with English abstract).
- [19] 杨增海, 王建平, 刘家军, 等. 内蒙古乌日尼图钨铅矿床成矿流体特征及其地质意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37(6): 1268–1278.
- Yang Zenghai, Wang Jianping, Liu Jiajun, et al. Characteristics and its geological significance of fluid inclusions of the Wurinitu W–Mo deposit in inner Mongolia, China[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(6): 1268–1278(in Chinese with English abstract).
- [20] 岳素伟, 翟清阳, 邓小华, 等. 湖北竹山县银洞沟矿床成矿流体特征及矿床成因[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 27–45.
- Yue Suwei, Zhai Yuyang, Deng Xiaohua, et al. Fluid inclusion and H–O isotope geochemistry and ore genesis of the Yingdonggou deposit, Zhushan County, Hubei, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(1): 27–45(in Chinese with English abstract).
- [21] 邓轲, 李诺, 杨永飞, 等. 黑龙江省黑河市争光金矿流体包裹体研究及矿床成因[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 231–240.
- Deng Ke, Li Nuo, Yang Yongfei, et al. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhengguang gold deposit, Heihe City, Heilongjiang Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(1): 231–240 (in Chinese with English abstract).
- [22] 刘军, 武广, 王峰, 等. 黑龙江省岔路口斑岩钼矿床流体包裹体和稳定同位素特征[J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1231–1251.
- Liu Jun, Wu Guang, Wang Feng, et al. Fluid inclusions and stable isotope characteristics of the Chalukou porphyry Mo deposit in Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(4): 1231–1251(in Chinese with English abstract).
- [23] Shenberger D M, Barnes H L. Solubility of gold in sulfide solutions from 150 to 350°C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(2): 269–278.
- [24] McCuaig T C, Kerrich R. P–T–t deformation–fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 12(6): 381–453.
- [25] Hagemann S G, Luders. VP–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*, 2003, 38(8): 936–952.
- [26] Mernagh T P, Bastrakov E N, Zaw K, et al. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion–related gold systems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(1): 21–32.
- [27] Chen H Y, Chen Y J, Baker M J. Isotopic geochemistry of the Sawayaerdum orogenic–type gold deposit, Tianshan, Northwest China: Implications for ore genesis and mineral exploration[J]. *Chemical Geology*, 2012, 310–311: 1–11.
- [28] Uemoto T, Ridley J, Mikucki E, et al. Fluid chemical evolution as a factor in controlling the distribution of gold at the Archean Grown lode gold deposit, Murchison Province, Western Australia[J]. *Economic Geology*, 2002, 97(6): 1227–1248.
- [29] Zacharias J, Paterova B, Pudilova M. Mineralogy, fluid inclusion, and stable isotope constraints on the genesis of the Roudny Au–Ag deposit, Bohemian Massif[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(1): 53–72.
- [30] 何鹏, 严光生, 祝新友, 等. 青海赛什塘铜矿床流体包裹体研究[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 580–593.
- He Peng, Yan Guangsheng, Zhu Xinyou, et al. Fluid inclusion study of the Saishitang Cu deposit in Qinghai[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 580–593(in Chinese with English abstract).
- [31] 刘军, 武广, 陈方伍, 等. 河南省石寨沟金矿床成矿流体特征及硫铅同位素研究[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1798–1811.
- Liu Jun, Wu Guang, Chen Fangwu, et al. Fluid inclusion and S, Pb isotope study of the Shizhaigou gold deposit in Henan Province[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1798–1811(in Chinese with English abstract).
- [32] 王晓勇, 贾伟光, 王献忠, 等. 内蒙古额尔古纳市虎拉林金矿床成矿流体包裹体研究[J]. *地质与资源*, 2010, 19(2): 138–143.
- Wang Xiaoyong, Jia Weiguang, Wang Xianzhong, et al. Fluid inclusion in the Hulalin gold deposit, Inner Mongolia[J]. *Geology and Resource*, 2010, 19(2): 138–143(in Chinese with English abstract).