

内蒙古浩尧尔忽洞金矿床流体包裹体特征

李义明¹, 王建平¹, 彭润民¹, 李 赞¹, 江向东², 张雁敏²

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 内蒙古太平矿业有限公司, 巴彦淖尔市 014040)

[摘 要]成矿流体来源与矿床成因的关系一直是矿床学研究的重点与难点。通过流体包裹体显微测温、原位激光拉曼光谱分析和包裹体化学成分分析,对浩尧尔忽洞金矿床成矿流体进行了较系统的研究。测试结果表明:该矿床石英中流体包裹体分为气液包裹体、气体包裹体、纯气体包裹体和纯液相包裹体四类。大部分流体包裹体均一为液相,少量气体包裹体均一为气相。伟晶岩脉石英流体包裹体均一温度峰值 260~340℃,炭质板岩内含矿石英细脉内石英流体包裹体均一温度峰值 260~380℃。石英流体包裹体气相成分为 H₂O、CO₂、CH₄、N₂ 和 C₂H₆,液相成分为 Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺。炭质板岩中石英流体包裹体的氢氧同位素($\delta D_{H_2O} = -96.20\text{‰} \sim -82.80\text{‰}$, $\delta^{18}O_{H_2O} = 3.97\text{‰} \sim 7.93\text{‰}$)靠近原生岩浆水。认为浩尧尔忽洞金矿床成矿与海西期岩浆活动有关,属中高温低压浅成热液矿床。

[关键词]浩尧尔忽洞金矿床 成矿流体 流体包裹体 氢氧同位素 内蒙古

[中图分类号]P597+P618.51 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2013)05-0920-8

Li Yi-ming, Wang Jian-ping, Peng Run-min, Li Zan, Jiang Xiang-dong, Zhang Yan-min. Fluid inclusions of the Haoyaoerhudong gold deposit, Inner Mongolia [J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(5): 0920-0927.

华北地台北缘中元古代发育白云鄂博群和渣尔泰山群裂谷沉积,其中形成世界著名的白云鄂博 Fe-Nb-REE 矿床和狼山-渣尔泰山中元古代 SEDEX 型 Cu-Pb-Zn-S 矿带。同时,裂谷沉积中还形成一套黑色岩系,包括渣尔泰山群中的阿古鲁沟组和白云鄂博群中的尖山组和比鲁特组。近年来,在这套黑色岩系中陆续发现一些金矿床,如朱拉扎嘎(阿古鲁沟组)、浩尧尔忽洞(比鲁特组)等大型金矿床以及比鲁特、布龙土等小型矿床和矿点,显示出良好的金矿找矿潜力。目前,有关浩尧尔忽洞金矿研究工作相对较少,前人认为其属于浅成热液矿床(郭书胜,2008;金龙,2010)。本文试通过系统的流体包裹体和氢氧同位素分析,揭示浩尧尔忽洞金矿床成矿流体特征,探讨成矿流体的来源和矿床成因。

1 区域地质背景

浩尧尔忽洞金矿床位于华北陆块北缘西段中元

古界白云鄂博裂谷带西段。矿区出露地层主要有第四系残积、坡积和冲积物和白云鄂博群比鲁特组、哈拉霍疙特组和尖山组沉积岩,其中金矿床的直接赋矿围岩是比鲁特组一、二岩段(胡鸿飞等,2008;王建平等,2009;聂凤军等,2010),主要岩性为炭质变质粉砂岩、炭质千枚状板岩、含红柱石-石榴子石炭质板岩。

浩尧尔忽洞向斜横贯整个矿区,核部为比鲁特组,内、外翼分别为哈拉霍疙特组和尖山组。断裂构造主要是一条左行的脆韧性剪切带和一条近北东向展布的平移断层,且前者被后者所切割破坏(图1)。整个剪切带由一系列近似平行的单个挤压破碎带和片理化带构成,呈近东西向到北东向分布,是本区最重要的导矿和容矿构造。

区域上岩浆活动频繁,主要以加里东晚期和海西中、晚期活动为主,岩浆岩主要为花岗岩和花岗闪长岩,以岩基、岩株形式侵入,具有多期次活动特征。

[收稿日期] 2013-01-23; [修订日期] 2013-03-26; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划项目(编号 2012CB416600)、国家自然科学基金项目(编号 41272106、41030423)和中国地质调查局地质矿产调查评价专项(编号 1212011220923)联合资助。

[第一作者] 李义明(1982年—),男,硕士,从事金属矿产调查与研究工作。E-mail: jpwang@cugb.edu.cn。

[通讯作者] 王建平(1972年—),男,副教授,主要从事矿床学教学与科研工作。E-mail: jpwang@cugb.edu.cn。

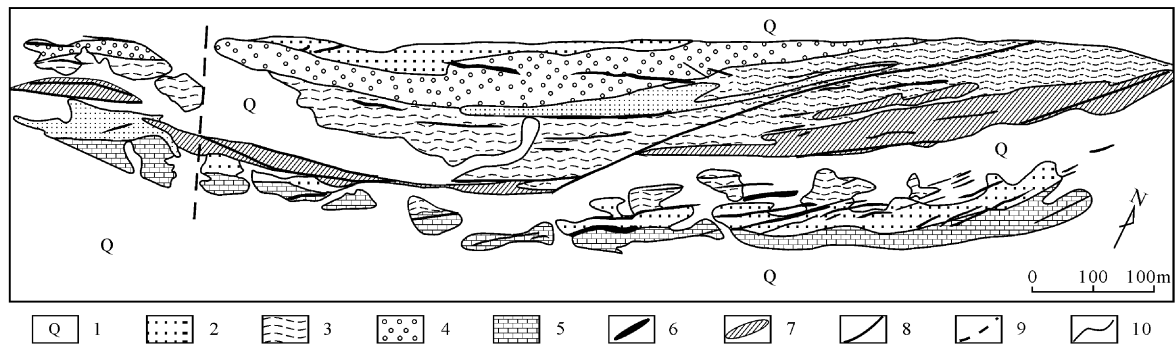


图1 浩尧尔忽洞金矿床地质简图(据聂凤军等,2010 修编)

Fig. 1 Geological map of the Haoyaoerhudong gold deposit in Inner Mongolia (modified from Nie *et al.*, 2010)

1 - 第四系;2~5 - 中元古界比鲁特组(2 - 变质粉砂岩;3 - 炭质千枚岩;4 - 杂砂岩;5 - 灰岩);6 - 镁铁质及长英质侵入岩脉;
7 - 金矿体(矿化带);8 - 断层;9 - 推测断层;10 - 地层界限
1 - Quaternary; 2~5 - middle Proterozoic Bilute Formation (2 - meta-siltstone; 3 - carbonaceous phyllite; 4 - graywacke;
5 - limestone); 6 - mafic and felsic intrusive dyke; 7 - ore body(or mineralized zone); 8 - fault; 9 - inferred fault; 10 - stratigraphic boundary

2 矿床地质特征

浩尧尔忽洞金矿矿体产状与围岩基本一致,以层状为主,厚几米到几十米不等,矿层与地层同步褶皱,矿体形态严格受韧性剪切带控制。矿区以中部北东向断层为界分为东西两个矿区,东矿区矿体呈北东-南西走向,西矿区矿体则呈近东西走向(图1)。矿体沿倾向方向变化不大,矿体北部受海西期岩体侵位影响,叠加有接触热变质作用(王建平等,2011)。矿体中发育层间挤压破碎带和片理化带,局部形成小的褶曲构造,伴有石英细脉、透镜体的形成(图2(a)、(b))。

原生矿石主要为炭质板岩型(聂凤军等,2010),金属矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、方铅矿、自然金和辰砂,脉石矿物有石英、方解石、红柱石、石榴子石、绿泥石、高岭石和绢云母,金含量为 $(0.67 \sim 1.54) \times 10^{-6}$,平均值为 0.85×10^{-6} ,矿石中黄铁矿、磁黄铁矿主要以细脉状(图2(c))和薄膜状(图2(d))沿炭质板岩板理面或节理面(少量)产出,少量呈浸染状。金主要赋存于黄铁矿、磁黄铁矿和石英中,偶在偏光显微镜下能见到自然金。

3 成矿流体包裹体特征

流体包裹体能提供成岩成矿流体的性质、演化以及温度、压力条件等重要信息(卢焕章等,2004)。本次研究所取样品全部来自浩尧尔忽洞金矿床东、西两个露采坑和钻孔。样品类型包括基性岩脉有关的石英脉、伟晶岩脉和炭质板岩中的石英透镜体、炭质板岩中石英硫化物脉以及钻孔 DDH183 岩心中石

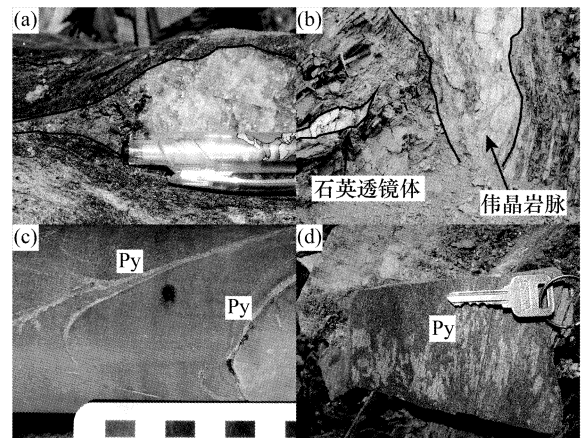


图2 浩尧尔忽洞金矿床矿化特征

Fig. 2 Photos showing mineralization features of the Haoyaoerhudong gold deposit

(a) - 炭质板岩中石英脉;(b) - 伟晶岩脉旁石英透镜体;
(c) - 炭质板岩中脉状黄铁矿(Py);(d) - 板理面上黄铁矿薄膜
(a) - ore-bearing quartz vein in carbonaceous slates; (b) - lenticular quartz near the pegmatite vein; (c) - pyrite veins in carbonaceous slates; (d) - pyrite thin film on the schistosity plane of carbonaceous slates

英硫化物细脉。将这些样品磨制成厚度约为0.2mm 双面抛光的薄片做矿相学和流体包裹体观察,选择有代表性的包裹体进行显微测温和激光拉曼探针分析。

3.1 流体包裹体类型及相态特征

包裹体的空间分布有两种,一种是呈单个星点状随机分布,为原生包裹体,另一种呈群或是呈带状分布,切穿矿物颗粒,该类包裹体为次生包裹体(图

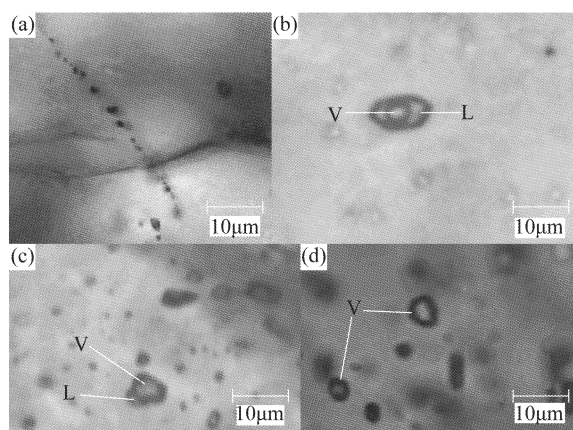


图3 流体包裹体岩相学特征

Fig. 3 Petrography of fluid inclusions

(a) - 次生包裹体; (b) - 气液包裹体; (c) - 气体包裹体;
(d) - 纯气体包裹体; V - 气相; L - 液相
(a) - secondary inclusions in line; (b) - two - phase inclusion of
vapor and liquid; (c) - gaseous inclusion; (d) - pure gaseous in-
clusion; Abbreviations: V - vapor phase; L - liquid phase

3(a))。原生包裹体根据气液比差异,可以分为四类:(1) 气液包裹体(图 3(b)),占所测包裹体总数的 87%,形状复杂多变,气液比主要集中在 10% ~ 30% 之间,大小集中在 4 ~ 9 μm 之间;(2) 气体包裹体(图 3(c)),占所测包裹体总数的 12%,气液比集中在 60% ~ 80% 之间,大小峰值为 8 μm 左右;

(3) 纯气体包裹体(图 3(d)),大小主要在 7 ~ 9 μm 间;(4) 纯液相包裹体,大小主要为 4 ~ 10 μm 。本文主要选取第一类气液包裹体为本次研究的重点。所测的包裹体全部为气液两相盐水溶液包裹体,以液相为主,气液比在 5% ~ 80% 之间,以 10% ~ 30% 和 40% 居多,占了全部包裹体的近 87%,包裹体大小在 4 ~ 29 μm 之间,形状主要有长条状、椭圆状、负晶型及不规则状。

3.2 成矿物理化学参数

在流体包裹体岩相学研究基础上,选择不同产状的原生包裹体,在中国地质大学(北京)地球科学与资源学院成矿流体实验室用 Linkam THMS600 型冷热台进行均一温度测试。将取得的均一温度和盐度(见表 1),按石英不同产状分别作出均一温度、盐度直方图。

3.2.1 均一温度

根据浩尧尔忽洞金矿区气液包裹体总的均一温度分布直方图,可以看出不同产状包裹体的均一温度分布呈正态分布,但二者有各自的特点(图 4):炭质板岩中透镜状包裹体均一温度分布范围较广,跨度为 100 ~ 460 $^{\circ}\text{C}$,峰值为 220 ~ 380 $^{\circ}\text{C}$,极值峰位于 340 $^{\circ}\text{C}$,揭示该产状的石英形成的鼎盛时期是中高温。伟晶岩脉中包裹体均一温度直方图所示,分布范围较窄,跨度为 220 ~ 380 $^{\circ}\text{C}$,峰值为 260 ~ 340 $^{\circ}\text{C}$,

表 1 浩尧尔忽洞金矿区石英流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of quartz - fluid inclusions from the Haoyaoerhudong gold deposit

样品产状	样品号	测定数(个)	均一温度(Th)($^{\circ}\text{C}$)	冰点(Tm)($^{\circ}\text{C}$)	气液比(%)	粒径(μm)	矿物
炭质板岩中透镜状石英	E59	10	123 ~ 419	-16.3 ~ -1.3	5 ~ 30	6 ~ 11	石英
	E57	11	88 ~ 370	-11.2 ~ -3.5	5 ~ 30	5 ~ 20	石英
	E52	9	152 ~ 389	-10 ~ -1.2	5 ~ 30	6 ~ 21	石英
	E48	16	145 ~ 345	-9.7 ~ -0.3	10 ~ 45	5 ~ 19	石英
	E47	11	167 ~ 459	-5.3 ~ -1.1	10 ~ 70	4 ~ 17	石英
	E43	20	216 ~ 400	-12.9 ~ -1.8	15 ~ 30	5 ~ 18	石英
	E34	4	185 ~ 230	-2.4 ~ -0.2	5 ~ 10	8 ~ 14	石英
	W02	17	148 ~ 379	-12 ~ -2.9	5 ~ 40	5 ~ 13	石英
	W15	18	116 ~ 420	-9.4 ~ -1.5	8 ~ 40	4 ~ 15	石英
	W26	16	216 ~ 395	-9.4 ~ -1.5	5 ~ 30	4 ~ 13	石英
	ZK19	18	136 ~ 429	-6.8 ~ -0.2	5 ~ 30	4 ~ 18	石英
	ZK30	15	283 ~ 430	-8.9 ~ -3.5	20 ~ 80	5 ~ 12	石英
	E49	16	230 ~ 294	-5.6 ~ -0.8	15 ~ 30	4 ~ 18	石英
伟晶岩脉中石英脉	W01	15	187 ~ 379	-8.8 ~ -1.7	5 ~ 40	5 ~ 29	石英

注:①测试单位:中国地质大学(北京)地球科学与资源学院的成矿流体实验室。②W15 的均一温度大于 420 $^{\circ}\text{C}$,测温时为了防止其他包裹体爆裂,没有继续加温。

表 2 浩尧尔忽洞金矿区石英流体包裹体盐度、密度、压力及估算深度计算结果

Table 2 Salinity, density, pressure and estimated depth of the Haoyaoerhudong gold deposit

样品产状(石英脉)	样品号	盐度 % NaCl eqv.	密度 g/cm ³	压力 MPa	静水深度/平均 km
炭质板岩中透镜状石英	E59	2.23 ~ 20.7	0.46 ~ 1.01	8.2 ~ 84.9	0.8 ~ 8.7/3.9
	E57	5.70 ~ 15.2	0.71 ~ 1.07	1.1 ~ 40.8	0.9 ~ 4.1/2.5
	E52	2.06 ~ 13.9	0.72 ~ 1.01	3.0 ~ 48.9	0.5 ~ 5.0/2.2
	E48	1.05 ~ 13.6	0.62 ~ 0.97	5.3 ~ 46.2	0.8 ~ 4.7/2.3
	E47	1.90 ~ 8.27	0.56 ~ 0.96	9.0 ~ 111	0.9 ~ 11/4.4
	E43	2.56 ~ 16.9	0.67 ~ 0.95	1.8 ~ 39.1	0.7 ~ 4.0/2.1
	E34	0.35 ~ 4.01	0.83 ~ 0.89	11.7 ~ 37.0	1.2 ~ 3.8/2.2
	W02	4.79 ~ 16.0	0.76 ~ 0.97	14.9 ~ 29.9	1.5 ~ 3.1/2.5
	W15	3.85 ~ 13.3	0.76 ~ 1.03	2.4 ~ 50.7	0.7 ~ 5.2/2.9
	W26	2.56 ~ 13.3	0.70 ~ 0.88	17 ~ 35.3	1.7 ~ 3.6/2.7
	ZK19	0.35 ~ 10.2	0.69 ~ 0.99	8.3 ~ 67.2	0.8 ~ 6.9/2.3
	ZK30	5.70 ~ 12.7	0.52 ~ 0.81	11.2 ~ 62.2	1.1 ~ 6.3/3.4
伟晶岩脉中石英	E49	1.40 ~ 8.67	0.73 ~ 0.87	2.2 ~ 42.6	0.9 ~ 4.3/2.1
	W01	2.89 ~ 12.6	0.58 ~ 0.91	1.7 ~ 56.2	1.6 ~ 5.7/2.3

极值峰位于 300℃,揭示矿区该产状的石英形成于中高温范畴。产状不同的石英包裹体的均一温度基本集中在 260 ~ 380℃,峰值基本上一致,整体上看,浩尧尔忽洞金矿床应属于中高温热液矿床。

3.2.2 盐度特征

所测包裹体大部分为气液两相包裹体,通过测试冰点温度,利用 Potter 等(1977)提出的 H₂O - NaCl 体系盐度 - 冰点公式计算成矿热液的盐度值:

$$W = 0.00 + 1.7695\theta - 4.2384 \times 10^{-2}\theta^2 + 5.2778 \times 10^{-4}\theta^3 \pm 0.028$$

式中:W - 含盐度(NaCl%, wt),适用范于 0 ~ 23.3% 范围,θ - 冰点温度,适用于 0 ~ 21.1℃ 范围。根据计算(表 2)获得的盐度,做出了不同产状包裹体的盐度分布直方图(图 4)。可以看出,炭质板岩中石英透镜体包裹体盐度值有两个峰值,分别为 4% ~ 6% 和 10% ~ 14%,伟晶岩脉中包裹体盐度峰值为 4% ~ 6% 和 12%,总体看成矿流体的盐度不是很高。

3.2.3 流体的密度、压力以及成矿深度估算

(1) 所测包裹体的均一温度均小于 500℃,含盐度小于 30% (wt),满足刘斌等(1999)提出的估算公式及密度 - 盐度 - 温度 - 压力关系表:

$$D = A + Bt + Ct^2$$

式中 D - 流体密度(g/cm³); t - 均一温度(℃); A, B, C - 无量纲常数,它们又是盐度的函数:

$$A = 0.993531 + 8.72147 \times 10^{-3} \times W - 2.43975 \times 10^{-5} \times W^2$$

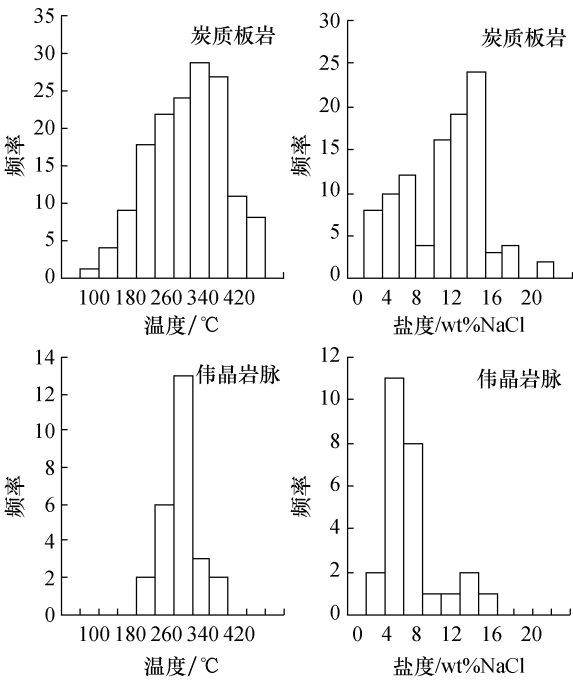


图 4 浩尧尔忽洞金矿床流体包裹体均一温度和盐度直方图

Fig. 4 Homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions

$$B = 7.11652 \times 10^{-5} - 5.2208 \times 10^{-5} \times W + 1.26656 \times 10^{-6} \times W^2$$
$$C = -3.4997 \times 10^{-6} + 2.12124 \times 10^{-7} \times W - 4.52318 \times 10^{-9} \times W^2$$

(2) 包裹体的等容式为:

$$p = a + bt + ct^2$$

p - 压力 (bar); t - 温度 (°C); a, b, c 为无量纲参数, 不同盐度、密度下的 a, b, c 参数值见刘斌等(1999)。

(3) 成矿深度

根据矿区地质背景, 浩尧尔忽洞金矿形成于造山后伸展环境, 故用本次研究计算成矿深度公式采用静水深度公式:

$$p = \rho gh$$

p - 压力 (Pa), ρ - 水密度 (取 $1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$); $g - 9.8 \text{ N/m}^2$; h - 静水深度 (m)。

据上述公式求得流体的密度、压力以及成矿深度。炭质板岩中透镜状石英流体的成矿溶液密度区间为 $0.46 \sim 1.07 \text{ g/cm}^3$, 平均为 0.82 g/cm^3 ; 压力区间为 $6.5 \sim 111 \text{ MPa}$, 平均为 26.1 MPa , 平均静水深度为 2.9 km ; 产状为伟晶岩脉的流体密度区间为 $0.58 \sim 0.91 \text{ g/cm}^3$, 平均为 0.79 g/cm^3 , 压力区间为 $15.7 \sim 56.2 \text{ MPa}$, 平均为 19.9 MPa , 平均静水深度为

2.2 km 。

3.2.4 流体组分

(1) 激光拉曼流体包裹体化学成分

不同类型流体包裹体激光拉曼光谱原位分析表明: 纯气体包裹体: 产于伟晶岩石英流体包裹体的组分为 $\text{CH}_4 - \text{N}_2 - \text{CO}_2 - \text{SO}_2$ (图 5(a)), 炭质板岩中石英透镜体中流体包裹体的组分主要为 $\text{CH}_4 - \text{N}_2$ (图 5(b))。气液包裹体: 产于伟晶岩中的气相组分为 $\text{H}_2\text{O} - \text{CH}_4 - \text{N}_2 - \text{CO}_2 - \text{SO}_2$ (图 5(c)), 液相组分为 H_2O , 炭质板岩中石英透镜体气相组分为 $\text{H}_2\text{O} - \text{CH}_4 - \text{N}_2 - \text{CO}_2$ (图 5(d)), 液相组分为 H_2O 。气体包裹体: 产于伟晶岩中的气相组分为 $\text{N}_2, \text{H}_2\text{O}$ 和少量的有机组分 C_2H_6 (图 5(e)), 液相组分主要是 H_2O ; 炭质板岩中透镜状气相组分为 $\text{H}_2\text{O} - \text{CH}_4 - \text{CO}_2$ (图 5(f)), 液相组分为 H_2O 。

(2) 群体气液相流体包裹体成分

选取浩尧尔忽洞金矿床 8 个样品进行测试, 结果见表 3。总体上气相成分与激光拉曼光谱原位分

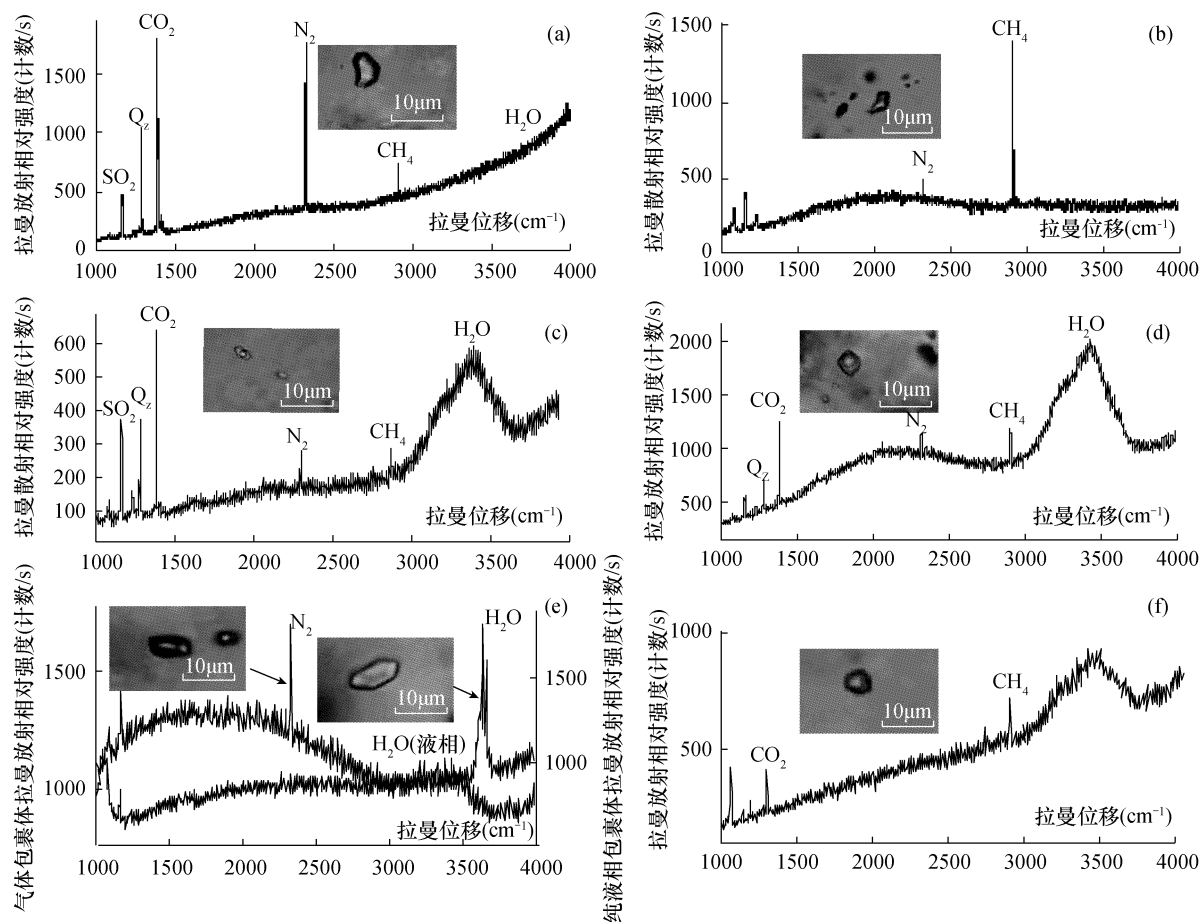


图 5 浩尧尔忽洞金矿床不同产状包裹体激光拉曼光谱分析

Fig. 5 Laser Raman spectra of fluid inclusions in ore-bearing quartz from the Haoyaoerhudong gold deposit

表 3 浩尧尔忽洞金矿床流体包裹体化学成分分析表(气相: mol%; 液相: $\times 10^{-6}$)
Table 3 Chemical composition of fluid inclusions in the Haoyao'erhudong gold deposit

矿物	样号	H ₂ O	N ₂	Ar *	O ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂ S	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
石英	E3	77.98	1.832	0.168	—	17.052	2.730	0.235	0.002	—	1.15	0.222	0.678	0.111	—	0.858
石英	E7	91.7	0.735	0.053	—	4.362	3.016	0.134	0.001	—	11.7	0.333	2.69	0.378	0.072	5.37
石英	E32	83.96	1.620	0.102	—	12.668	1.398	0.251	0.001	—	2.04	1.55	2.03	0.177	—	0.399
石英	E26	82.07	0.923	0.033	—	15.486	1.319	0.167	0.001	—	1.19	0.444	1.50	0.090	—	0.399
石英	E35	70.03	2.572	0.183	—	24.789	1.958	0.390	0.008	—	1.23	4.23	2.27	0.267	—	0.456
石英	E57	83.01	1.816	0.200	—	11.220	3.431	0.320	0.004	—	2.14	3.12	2.27	0.267	—	0.630
石英	W6	83.64	2.857	0.328	—	8.032	4.374	0.690	0.007	—	0.810	0.666	0.930	0.132	—	0.486
石英	W26	89.05	1.053	0.191	—	7.102	2.212	0.349	0.004	—	2.72	2.00	2.37	0.177	—	0.342

注: —表示未检出结果, * 结果仅供参考, E3、E7 与基性岩脉有关的石英脉, E32 伟晶岩脉中石英, 其余为炭质板岩石英脉中的石英。
测试单位: 中国科学院地质与地球物理所矿产资源重点实验室, 测试人: 朱和平。

析结果基本一致, 均含有 H₂O、CO₂、CH₄、N₂ 和烃类气体, 含少量 H₂S 和惰性气体 Ar, 没有检出 O₂ 的含量; 液相成分中阳离子有 Na⁺、K⁺、Ca²⁺, 阴离子为 Cl⁻ 和 SO₄²⁻, 没有检测到 F⁻ 的含量, 成矿流体体系为 Na⁺ - Ca²⁺ - K⁺ - Cl⁻ - SO₄²⁻。从以上可以看出整个流体中, 既有还原性组分(CH₄、C₂H₆、H₂S), 又有氧化性组分(CO₂、SO₄²⁻)。气体主要为 CO₂, 阳离子主要为 Na⁺ (图 6), CO₂ 大量出现可能是成矿流体中碳组分的加入发生浓缩作用而产生。

流体系统中富含 H₂O、CO₂ 与原岩碳质沉积岩石受低级变质作用相符合, 还原参数 R/O((C₂H₆ + CH₄)/CO₂ 比值) 为 0.09 ~ 0.72, CO₂/CH₄ 特征值 1.44 ~ 12.65, 表明该流体为弱还原条件; 阳离子富含 Na⁺、K⁺, Na⁺/K⁺ 比值为 6.11 ~ 16.67, Na⁺ 大于 K⁺, 认为与建造水关系密切(王秀璋等, 1992)。阴离子主要为 Cl⁻ 和 SO₄²⁻, 推测成矿过程中金可能主要以硫氢络合物和氯络合物的形式迁移。

CO₂ 和 H₂O 比值是反映成矿构造环境的一个重要参数, CO₂ 在流体中溶解度随压力增加而增加, 压力减小时, 该比值将降低(刘伟等, 2007)。经计算, 本区 CO₂/H₂O 的比值变化范围较大, 大的达 0.35, 小的仅为 0.07, 表明成矿构造环境复杂, 与本区造山环境相符。

3.2.5 氢氧同位素特征

成矿热液氢氧同位素组成主要采用两种方法获得。一是对不含氢或氧的矿物直接测定其矿物包裹体溶液的 δD、δ¹⁸O 值。二是对含氢、氧的矿物先测定其矿物的 δD、δ¹⁸O 和形成温度, 然后根据矿物 - 水同位素平衡分馏方程计算出相应温度下与之平衡

的水的 δD、δ¹⁸O 值。本文采取后者, 根据石英 - 水同位素分馏方程:

$$1000\ln\alpha^{18}\text{O}_{(\text{石英}-\text{水})} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.40$$

式中: $\alpha\text{O}^{18}_{(\text{石英}-\text{水})}$ 为石英与水之间¹⁸O 的分馏系数, T 是绝对温度(Clayton *et al*, 1972), 计算结果如表 4。浩尧尔忽洞金矿床流体包裹体水中氢、氧稳定同位素组成图解(图 4) 显示, 伟晶岩脉中石英流体包裹体的氢氧同位素 δD_{H₂O} 为 -65.20‰, δ¹⁸O_{H₂O} 为 4.07‰, 其投点位于变质水、岩浆水的左侧; 炭质板岩中透镜状石英流体包裹体的氢氧同位素为 δD_{H₂O} = -96.20‰ ~ -82.80‰, 投点在原生岩浆水正下及左下方(图 7), 而且比较近原生岩浆水的值, 说明浩尧尔忽洞金矿区成矿热水溶液来源以岩浆水为主, 可能有建造水混合。

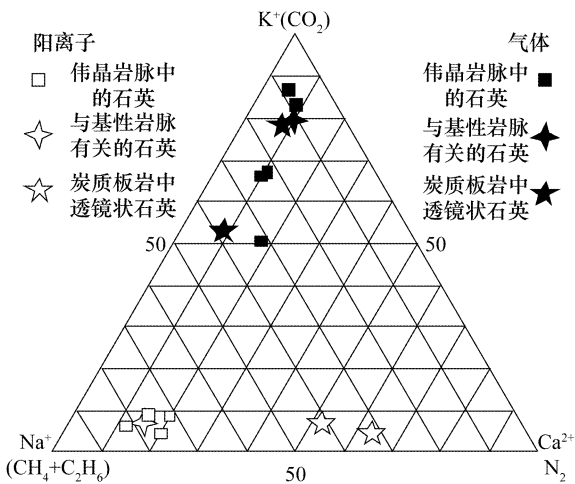


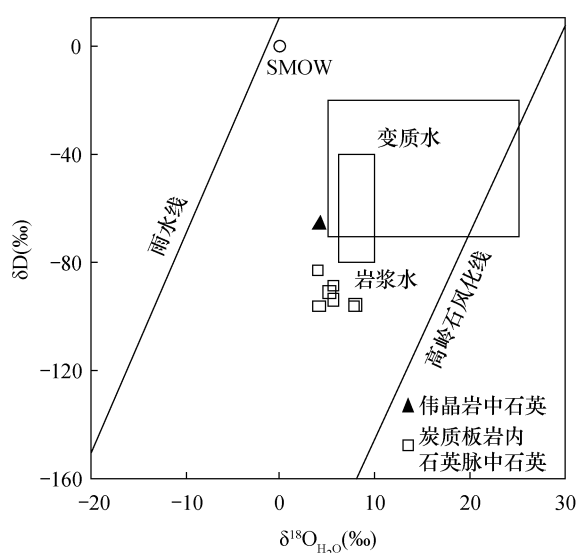
图 6 浩尧尔忽洞金矿床流体包裹体气 - 液组分三角图
Fig. 6 Ternary diagram of composition of fluid inclusions from the Haoyao'erhudong gold deposit

表 4 浩尧尔忽洞金矿床流体包裹体水的氢氧同位素组成表

Table 4 H and O isotopic compositions of water in fluid inclusions from the Haoyao erhudong gold deposit

产状	样品号	样品名称	T(K)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}(\text{‰})$	$\delta\text{D H}_2\text{O}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O H}_2\text{O}(\text{‰})$
伟晶岩脉中石英脉	E49	石英	547.6	12.30	-65.20	4.07
炭质板岩中石英脉	E43	石英	574.0	12.80	-88.20	5.58
	E47	石英	589.0	11.80	-90.40	5.09
	E48	石英	537.0	12.80	-96.00	4.12
	E52	石英	577.0	12.60	-93.10	5.49
	E57	石英	555.0	11.90	-82.80	3.97
	W02	石英	590.0	14.50	-96.20	7.82
	W26	石英	596.0	14.40	-95.30	7.93

测试单位:核工业北京地质研究所,测试人:刘汉彬。

图 7 浩尧尔忽洞金矿床 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解

(底图据 Taylor, 1974; 张理刚, 1989)

Fig. 7 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ diagram for the ore-forming fluids in the Haoyaoerhudong gold deposit (after Taylor, 1974; Zhang, 1989)

4 结论

(1) 浩尧尔忽洞金矿成矿流体包裹体主要有气液包裹体、气相包裹体和纯气体包裹体,偶见纯液相包裹体。成矿流体组分复杂,气相成分体系为 $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2 - \text{CH}_4 - \text{N}_2 - \text{C}_2\text{H}_6 - \text{H}_2\text{S}$,液相成分体系为 $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{K}^+ - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$,含有大量还原性气体成分。

(2) 浩尧尔忽洞金矿成矿流体捕获温度以 $220^\circ\text{C} \sim 380^\circ\text{C}$ 为主,流体密度均值为 $0.82\text{g}/\text{cm}^3$;盐

度 $0.35 \sim 13.9\text{wt}\%$,均值为 $9.17\text{wt}\%$;压力均值为 26.1MPa ,成矿深度为 2.9km 左右,属中高温低压浅成热液矿床。

(3) 炭质板岩中石英脉石英流体包裹体与伟晶岩脉石英中流体包裹体均一温度峰值基本重叠,盐度相近,说明二者关系密切;氢氧同位素特征显示成矿作用可能与海西期岩浆活动有关,未来找矿工作中不仅应注意比鲁特组炭质岩系这一特定层位,还要对海西期岩体加以关注。

致谢:野外工作得到了内蒙古太平矿业有限公司的大力支持,实验过程得到了中国地质大学(北京)流体包裹体实验室刘丽老师和中国科学院地质与地球物理研究所朱和平研究员的帮助和指导,论文写作过程中得到了付超硕士、康春景硕士大力帮助,特此致谢!

[References]

- Clayton R N, O'Neil J L, Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal Geophysical Research, B77: 3057 - 3067
- Guo Shu-sheng. 2008. Analysis on the genesis and ore-controlling factors of the Haoyaoerhudong gold deposit[J]. China Science and Technology Review, 16:21 - 23(in Chinese with English abstract)
- Hu Hong-fei, Dai Shuang, Tang Yu-hu, Hou Wan-rong, Zhu Qiang, Liu Ping. 2008. Metallogenic characteristics and genesis of gold deposits in western rift zone of the northern margin of the north China platform[J]. Geology and Prospecting, 44(1):8 - 14(in Chinese with English abstract)
- Jin Long. 2010. Geological characteristics of the Haoyaoerhudong gold deposit in Wulatezhong banner, Inner Mongolian Autonomous Region[J]. China Science and Technology Review, 6: 10 - 11(in Chinese with English abstract)
- Liu Bin, Shen Kun. 1999. Thermodynamics of Fluid Inclusions [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1 - 290(in Chinese with English abstract)

English abstract

- Liu Wei, Dai Ta-gen, Fu Wen-jie, Sun Sang-dun, Hu Bin. 2007. Characteristics of ore-forming fluids of the Shihu gold deposit, western Hebei[J]. *Geology in China*, 34(2):335–341 (in Chinese with English abstract)
- Lu Huan-zhang, Fan Hong-rui, Ni Pei, Ou Guang-xi, Shen Kun, Zhang Wen-huai. 2004. Fluid Inclusions [M]. Beijing: Science Press:1–487 (in Chinese)
- Nie Feng-jun, Jiang Si-hong, Huo Wan-rong, Liu Yi-fei, Xiao Wei. 2010. Geological features and genesis of gold deposits hosted by low-grade metamorphic rocks in central-western Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 29(1):58–70 (in Chinese with English abstract)
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *Economic Geology*, 69:843–883
- Wang Jian-ping, Liu Jia-jun, Jiang Xiang-dong, Wang Bin, Jiang Sheng-mei. 2011. Argon-Argon age of Biotite from the Haoyaoerhudong gold deposit in Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, (Supp.):643–644 (in Chinese)
- Wang Jian-ping, Liu Jia-jun, Peng Run-min, Zhao Bai-sheng, Fu Chao, Liu Zhen-jiang. 2009. Characteristics of Au-bearing formation in Haoyaoerhudong gold deposit in Inner Mongolia[R]. Symposium of the Ninth All-China Mineral Deposits Congress: 165–167 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xiu-zhang, Cheng Jing-ping, Zhang Bao-gui, Fan Wen-ling, Bai Zheng-hua, Liang Hua-ying. 1992. Geochemistry of Reworked Gold Deposit, China [M]. Beijing: Science Press:160–161 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Li-gang. 1989. Petrogenic and minerogenic theories and prospecting—the main deposit types and stable isotopic geology of granitoid in China [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press:1–200 (in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 郭书胜. 2008. 浩尧尔忽洞金矿床成因控矿因素浅析[J]. *中国科技博览*, 16:21–23
- 胡鸿飞, 戴霜, 唐玉虎, 侯万荣, 朱强, 刘萍. 2008. 华北板块北缘西段裂谷系金矿床成因特征及成因探讨[J]. *地质与勘探*, 44(1):8–1
- 金龙. 2010. 内蒙古乌拉特中旗浩尧尔忽洞金矿地质特征[J]. *中国科技博览*, 6:10–11
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京:地质出版社:1–290
- 刘伟, 戴塔根, 傅文杰, 孙礞礞, 胡斌. 2007. 冀西石湖金矿成矿流体特征[J]. *中国地质*, 34(2):335–341
- 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
- 聂风军, 江思宏, 侯万荣, 刘翼飞, 肖伟. 2010. 内蒙古中西部浅变质岩为容矿围岩的金矿床地质特征及形成过程[J]. *矿床地质*, 29(1):58–70
- 王建平, 刘家军, 江向东, 王彬, 姜胜梅. 2011. 内蒙古浩尧尔忽洞金矿床黑云母 $\text{Ar}-\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. *矿物学报*, 31(Supp.):643–644
- 王建平, 刘家军, 彭润民, 赵百胜, 付超, 柳振江. 2009. 内蒙古浩尧尔忽洞金矿床含金建造特征[R]. 第九届全国矿床会议论文集: 165–167
- 王秀璋, 程景平, 张宝贵, 樊文苓, 白正华, 梁华英. 1992. 中国改造型金矿床地球化学[M]. 北京:科学出版社:160–161
- 张理刚. 1989. 成岩成矿理论与找矿—中国主要类型矿床及花岗岩类岩石的稳定同位素地质学[M]. 北京:北京工业大学出版社:1–200

Fluid Inclusions of the Haoyaoerhudong Gold Deposit, Inner Mongolia

LI Yi-ming¹, WANG Jian-ping¹, PENG Run-min¹, LI Zan¹, JIANG Xiang-dong², ZHANG Yan-min²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2. Inner Mongolia Pacific Mining Co. Ltd, Bayannaoer, Inner Mongolia 014040)

Abstract: The origin of ore-forming fluids and its relationship to deposit genesis are critical and difficult issues in study of mineral deposits. Taking the Haoyao erhudong gold deposit as an example, this work analyzes the microthermometric data, in-situ laser Raman spectroscopy and chemical composition of fluid inclusions and describes the ore-forming fluids systematically. The results show that the fluid inclusions in quartz can be divided into four categories: two-phase inclusions of vapor and liquid, gaseous inclusions, pure gaseous inclusions, and pure liquid inclusions. Most fluid inclusions are homogenized into liquids, while few inclusions are homogenized to gas phase. The homogenization temperature of the fluid inclusions in ore-bearing quartz veins is 260°C ~ 380°C, and 260°C ~ 340°C for carbonaceous slates. Raman spectra of the inclusions indicate that water is the dominant component with amount of CH_4 , N_2 , H_2S and CO_2 in the gaseous phase and Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} in the liquid phase of the inclusions. Hydrogen and oxygen isotope compositions ($\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}} = -96.20\text{‰} \sim -82.80\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3.97\text{‰} \sim 7.93\text{‰}$) suggest a mixing event between magmatic water and formation water. It is inferred that the gold mineralization may relate with the Hercynian magmatic hydrothermal activity. This gold deposit is of the meso-hypothermal type gold, which formed under low pressure in the shallow crust.

Key words: Haoyao'erhudong gold deposit, ore-forming fluid, fluid inclusion, oxygen and hydrogen isotope, Inner Mongolia