内蒙古长山壕金矿矿床地球化学特征与成因研究

赵百胜[1]，刘家军[2]，王建平[2]，翟裕生[2]，彭润民[2]，王守光[3]，沈存利[3]

（1. 有色金属矿产地质调查中心，北京 100012；2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室，北京 100083；
3. 内蒙古自治区地质调查院，内蒙古 呼和浩特 010020）

摘要：长山壕金矿是近年来在内蒙古中部发现的一个大型浅变质碎屑岩型金矿，产于中—新元古代白云鄂博群比鲁特组碳质板岩和千枚岩中，矿体与围岩呈渐变关系。矿石呈硫化物细脉和石英硫化物细脉状，产于地层层理、节理和破碎带中，与地层同步褶皱变形。矿石的微量元素特征与围岩一致，矿石铅同位素为$^{208}Pb/^{204}Pb$为37.430 8～38.979 2，$^{207}Pb/^{204}Pb$为15.452 2～15.674 1，$^{206}Pb/^{204}Pb$为17.109～18.921 7，与地层铅同位素接近。流体包裹体以液相包裹体为主，均一温度230～370 ℃，平均286.8 ℃；盐度w(NaCl)为6.01%～20.52%，平均10.84%；包裹体水的δD为－108‰～－112‰，$\delta^{18}O$为6.4‰～9.4‰。地质地球化学特征表明成矿物质来自地层，成矿热液主要来自地层水。研究认为长山壕金矿为沉积－变质型金矿，后期的岩浆活动对成矿作用影响较小。

关键词：金矿床；地质地球化学特征；沉积－变质；长山壕；内蒙古

中图分类号：P618.51 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8527(2011)06－1077－11

Geological-Geochemical Characteristics and Genesis of Changshanhao Gold Deposit in Inner Mongolia, China

ZHAO Bai-sheng[1], LIU Jia-jun[2], WANG Jian-ping[2], ZHAI Yu-sheng[2], PENG Run-min[2], WANG Shou-guang[3], SHEN Cun-li[3]

(1. *China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing* 100012, *China*;
2. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*;
3. *Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*)

Abstract: Changshanhao gold deposit is a large metamorphic microclastic rock type gold deposit hosted in carbonaceous slates and phyllites of the Meso-Neoproterozoic Bilute Formation of Bayan Obo Group in central Inner Mongolia. The gold ore bodies are tabular and lenticular and no clear boundary to wall rocks; the ores occur as sulfur veinlets or quartz-sulfide veinlets deformed with strata in beddings, joints and fractures, which consist of simple minerals with weak alterations. The ore and wall rocks have the similar trace element geochemical feature. The ranges of ore $^{208}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ and $^{206}Pb/^{204}Pb$, close to those of strata, are 37.430 8 to 38.979 2, 15.452 2 to 15.674 1 and 17.109 to 18.921 7, respectively. Gold-bearing quartz veins mainly contain liquid fluid inclusion with homogenization temperature of 230 to 370 ℃ and salinity of 6.01% to 20.52% NaCl eqv. δD and $\delta^{18}O$ of the fluid are －108‰ to －112‰ and 6.4‰ to 9.4‰. These geological-geochemical characteristics indicate that ore-forming material and fluid come from strata. The authors infer that Changshanhao gold deposit is a sediment-metamorphism mesotherm deposit, and the later magmatic activity had a little effect on the metallogenesis.

Key words: gold deposit; geological-geochemical characteristic; sediment-metamorphism; Changshanhao; Inner Mongolia

收稿日期：2011－06－24；**改回日期**：2011－10－26；**责任编辑**：楼亚儿。

基金项目：国土资源部地质矿产调查评价项目(资［2010］矿评01－18－06)；教育部长江学者和创新团队计划项目(IRT0755)；高等学校科技创新引智计划项目(B07011)；中国地质调查局地质矿产调查评价专项“覆盖区矿产综合预测”(1212011085471)。

作者简介：赵百胜，男，工程师，博士，矿床学专业，从事矿产勘查开发工作和矿床学研究。Email：zbsh_2002@126.com。

0 引 言

长山壕(曾称浩尧尔忽洞)金矿位于内蒙古乌拉特中旗(北纬 41°40′9″，东经 109°15′54″)，是近年来在内蒙古中西部元古宙浅变质碎屑岩系中发现的大型金矿之一。该矿床由宁夏核工业西北地质局 217 队发现，现由中国黄金国际资源有限公司进行露天开采，截至 2009 年 12 月底矿床共探明金储量 93.34 t，平均品位 0.67 g/t[1]。该金矿是一个品位低、规模大、易选冶的大型金矿，矿体深部仍未封闭，品位变高，资源前景乐观。

浅变质碎屑岩型金矿床在国内外分布广泛，西方及原苏联学者根据含矿岩系的特征把此类型金矿床叫做浊积岩型或黑色页岩型金矿床等[2]。浅变质碎屑岩型金矿是一种重要的金矿类型，国内外对其有深入的研究[2-12]，但对华北地台北缘浅变质碎屑岩型金矿的勘探和研究工作还比较少[13-15]。对长山壕金矿的成矿特征与成因进行深入研究，对揭示华北地台北缘元古宙浅变质碎屑岩型金矿的成矿规律和指导找矿具有重要意义。

1 区域地质背景

长山壕金矿床位于华北板块北缘白云鄂博裂谷带的中部。区域上出露地层为中—新元古界白云鄂博群、白垩系下统白女羊盘火山岩组和第三系。白云鄂博群是一套巨厚的旋回性清楚的以碎屑岩、泥质岩为主体，并有碳酸岩和碱性火山岩的火山—沉积建造，是一套轻微变质的大陆边缘裂谷沉积岩系[16-17]。区域内主要构造为白云鄂博群地层组成的北东东向复式向斜，夹于近东西向高勒图断裂带与北西向合教—石崩断裂带之间。区域上岩浆活动频繁，以加里东晚期和海西中、晚期活动为主，岩性有花岗岩、花岗闪长岩、斜长角闪岩等，以岩基、岩株形式侵入，具有多期次的活动特征。矿床处于华北板块北缘多金属和稀有、稀土元素成矿带中。该成矿带矿产资源丰富，其中在中西部元古宙浅变质碎屑岩中发育一系列金矿床，如长山壕金矿(图 1，图 2)、赛乌苏金矿、比鲁特金矿、布龙土金矿、朱拉扎嘎金矿等。

2 矿区地质特征

2.1 地层

本区出露的地层为中—新元古界白云鄂博群尖山组、哈拉霍疙特组和比鲁特组。尖山组为一套滨海相的碎屑岩建造，由黑色碳质板岩、粉砂质板岩、红柱石角岩、变质粉砂岩和长石石英砂岩组成。哈拉霍疙特组是白云鄂博群内唯一主要由大陆架碳酸盐相组成的岩组，由薄层至中层白云质灰岩组成，夹有燧石板岩、硅质条带和钙质碎屑岩。比鲁特组按其岩石组合类型划分为 4 个岩段。第一岩段：由碳质变质粉砂岩组成，夹有粉砂质板岩；第二岩段：以碳质千枚岩、千枚岩和红柱石—十字石—石榴子石千枚岩为主，夹有变质粉砂岩和变质玄武质砂岩薄层；第三岩段：由变质粉砂岩、变质砂岩组成，夹变质同生角砾岩夹层；第四岩段：由钙质黑色千枚岩和千枚状片岩组成。该岩组主要出露在矿区的中部。所有已知的金矿化带都赋存于比鲁特组的第一岩段和第二岩段内，这 2 个岩段是该区金矿化的主要赋矿层位。

2.2 构造

区内的褶皱构造为一轴向呈北东东向展布的浩尧尔忽洞向斜。向斜核部为比鲁特组，内翼为哈拉霍疙特组，外翼为尖山组。向斜北翼一部分被岩浆岩破坏，局部褶皱发生轻微的倒转。轴部比鲁特组在西部圈闭，褶皱紧密，形似柳叶。在两翼常伴有次级小型褶曲，石香肠构造发育。断裂表现为走向近东西向、近似平行密集的一系列层间挤压破碎带，其次为近北西向的平移断层，且切割挤压破碎带。挤压破碎带为一左行的韧性剪切带，主要发育在比鲁特组第一岩段和第二岩段，由数条至十几条近似平行的单个挤压破碎带和片理化带构成，延伸较稳定，少数切割岩层。产状与岩层产状一致，个别地段倾角变大，切割岩层。带内发育网状、细条带状石英脉和透镜状石英团块。该区的断裂构造具有多期性、连续性和继承性的特征。金矿化主要分布在近东西向的挤压破碎带内。

2.3 岩浆岩

区内岩浆岩主要为海西中晚期黑云母花岗岩、钾质花岗岩和花岗闪长岩。以岩基和小岩株出露于矿区的北部和南部，距比鲁特组内金矿化带数百米至数公里不等。侵入岩体内部尚未发现金矿化。金矿化带内出露了大量不同成分的岩脉。

2.4 变质作用

区内白云鄂博群原岩主要由碎屑沉积建造夹有一个碳酸盐岩建造构成。其变质作用主要以区域变质作用为主，其次为动力变质作用和热液蚀

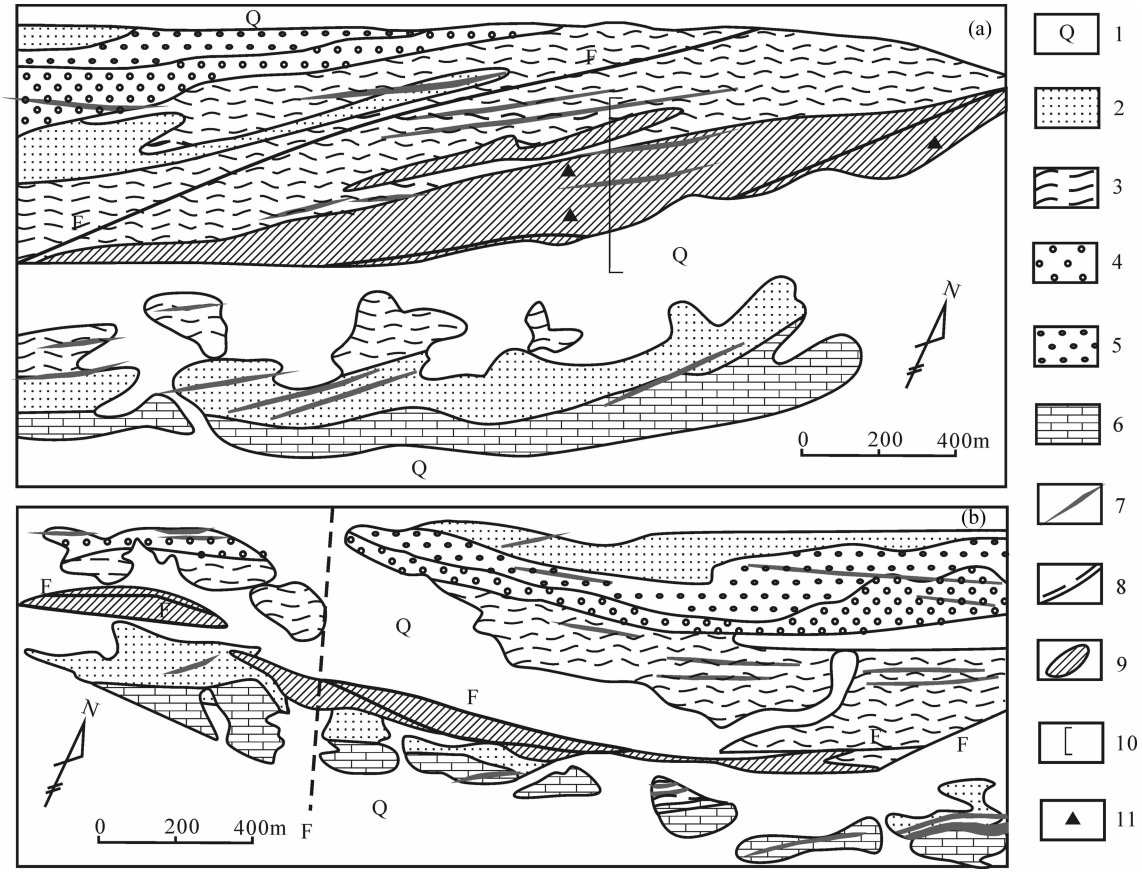


图 1　内蒙古长山壕金矿地质简图(据聂凤军等，2010[15]，修改)

Fig. 1　Simplified geological map of Changshanhao gold deposit

(a)东矿区；(b)西矿区；1. 第四系；2～6. 中—新元古界白云鄂博群比鲁特组：2. 变质粉砂岩；3. 碳质千枚岩；4. 杂砂岩；5. 砾岩；6. 灰岩；7. 铁镁质及长英质侵入岩脉；8. 实测或推测断层；9. 金矿体；10. 剖面位置；11. 采样位置

变作用。变质程度以低级变质作用为主，形成以板岩、千枚岩、片岩为主的岩石。部分“岩脉”呈夹层产于碳质板岩中，呈韵律出现，产状与围岩一致，常见片理和斑晶(图 3A)。镜下呈斑状变晶结构，片状构造，矿物成分主要有石英、黑云母、斜长石、石榴子石等(图 3B)，初步定名为石榴子石斜长石黑云母石英片岩。

3　矿床地质特征

3.1　矿体特征

长山壕金矿矿体严格受地层比鲁特组第二岩段和构造破碎带及片理化带控制。含矿岩石主要为千枚岩、片岩、千枚状板岩等。矿床处于浩尧尔忽洞向斜的南翼，靠近哈拉霍疙特组第三岩段(灰岩)的部位，又在高勒图断裂带向南弧形凸出的地段，属于构造应力相对集中区，故金矿化定位于与该断裂平行的一系列构造破碎带和挤压片理化带中。矿带整体呈 EW—NEE 走向，由一条北东向的压扭性断裂构造为界，分为东、西两个矿带(图 1)。东矿带由 28 个矿体组成，西矿带由 16 个矿体组成。

矿体形态比较简单，主要为板状、似板状和透镜状(图 2)。矿体走向为北东向，东矿带倾向北西，西矿带倾向南东，倾角一般为 75°～85°。主矿体钻孔垂直控制延深最深 243 m。矿体产状基本与岩层一致，局部地段受构造影响有切层现象。矿体在平面上呈雁列式或平行排列成群出现，间距为 10～20 m。矿体沿走向和倾向比较稳定，但具有膨胀收缩的特点。矿体平均厚度数十米至数米，最厚达 47.64 m，长数百米至数千米。矿体中金分布比较均匀，金品位一般为 0.5～1.5 g/t，极个别样品品位大于 6 g/t，品位变化较稳定。

3.2　矿石特征

矿石中金属矿物有自然金、黄铁矿、磁黄铁矿及少量毒砂、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等，脉石矿物主要有云母、石英、绿泥石、钠长石及部分碳酸盐类矿物。矿石自然类型分为石英—硫化物细脉型(图 3C)和硫化物细脉型两种(图 3D)。

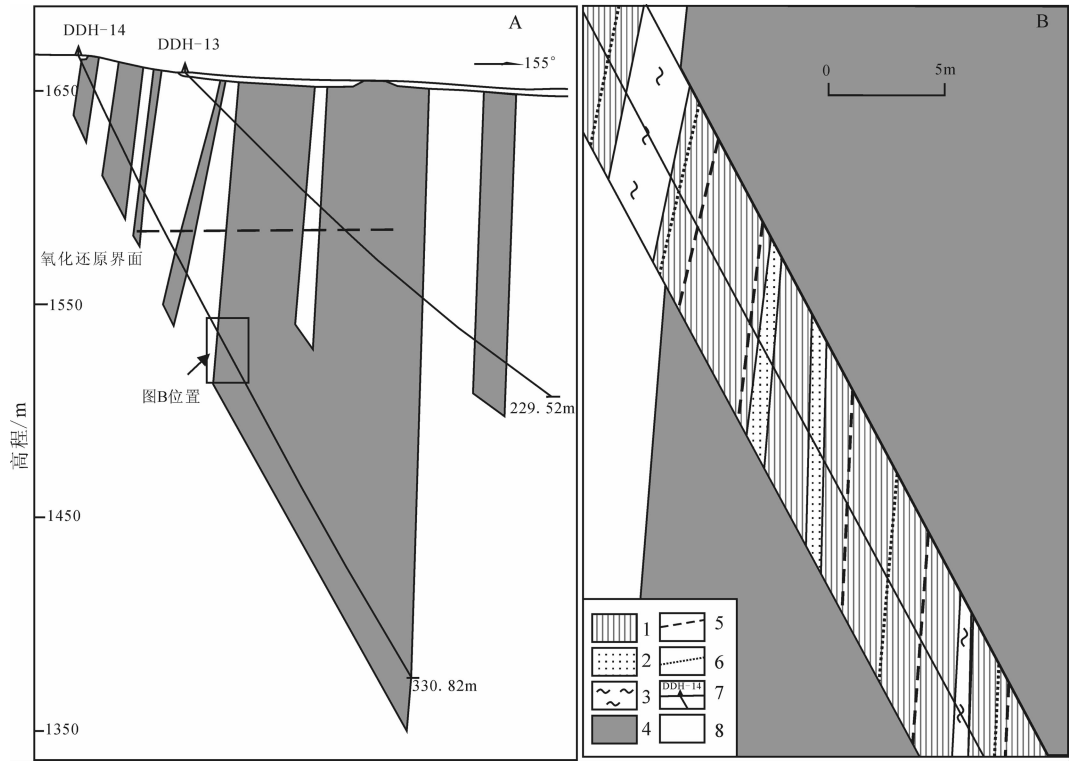


图 2 长山壕金矿东矿带 10100E 勘探线剖面图(据宁夏回族自治区核工业地质勘查院，2005①，改编)

Fig. 2 No. 10100E exploration section of the eastern ore belt in Changshanhao gold deposit

1. 千枚岩；2. 变质砂岩；3. 黑云母片岩；4. 金矿体；5. 石英脉；6. 黄铁矿脉；7. 钻孔及编号；8. 未知岩性

(1)石英－硫化物细脉型：几毫米—几厘米宽的石英脉产于碳质板岩中，呈灰色，富含金属硫化物。具有半自形粒状结构，细脉状构造、蜂窝状构造、团块状构造、石香肠构造等。含金石英脉多顺层产于碳质板岩的层理中，并和地层同步发生褶皱弯曲，甚至被拉伸形成石香肠构造(图 3E)。(2)硫化物细脉型：主要由板岩、千枚岩、片岩和少量的碳质板岩、断层泥组成。矿石中发育细脉状、薄膜状金属硫化物，产于碳质板岩的层理和节理中。矿石呈它形细粒结构、隐晶结构，偶见自形粒状结构(图 3F)，细脉状构造、薄膜状构造等。两种矿石类型是不同成矿热液活动强度的表现，成矿热液活动较强，表现为石英硫化物细脉，热液活动较弱部位只形成了硫化物细脉。金主要呈游离自然金颗粒(图 3G)，少量呈包裹体以及简单联体赋存于毒砂中。

4 矿床地球化学特征

4.1 微量元素地球化学

采用 ICP-MS 分析方法对长山壕金矿的围岩和矿石进行了微量元素分析，结果见表 1。将分析结果进行比较(图 4)，显示碳质板岩金矿石除 Au 含量高外，其他微量元素含量和组合特征与围岩相似；含金石英脉(CSH-3)除 Au 偏高，Ba、V 偏低外，其他微量元素特征也与围岩相似，表明金矿石的蚀变作用较弱，继承了碳质板岩的地球化学特征。

4.2 同位素地球化学

4.2.1 铅同位素

对金矿含金石英脉中的 4 个样品进行了铅同位素测试，测试结果见表 2。长山壕金矿铅同位素组成差别较大，$^{208}Pb/^{204}Pb$ 范围为 37.430 8 ~ 38.979 2，$^{207}Pb/^{204}Pb$ 范围为 15.452 2 ~ 15.674 1，$^{206}Pb/^{204}Pb$ 的范围为 17.109 ~ 18.921 7。将铅同位素值投于坎农三角图解[18](图 5)中，显示铅同位素为普通铅。按单阶段铅演化模式 H－H 法[19]，参数采用国际地科联年代学分会推值[20]，利用 GeoKit软件[21]计算得出长山壕金矿模式年龄为 －113.8 ~926.1 Ma，年龄数值差别较大，且出现负值，表明铅同位素经过了两阶段或多个阶段演

①宁夏回族自治区核工业地质勘查院. 内蒙古自治区乌拉特中旗浩尧尔忽洞金矿详查报告. 2005：8－32.

表 1　长山壕金矿矿石和围岩微量元素含量分析

Table 1　Trace elements analysis of ore and wall rocks from Changshanhao gold deposit

样号	岩 性	Au	Ag	Hg	As	Ba	Cu	Pb	Zn	Mo	Ni	Co	Mn	V	P	U
CSH-3	含黄铁矿的石英脉金矿石	421.00	472.00	4.90	75.00	30.00	108.70	4.10	14.00	4.67	97.20	19.80	405.00	12.50	164.00	2.42
CSH-P1-4	碳质千枚岩金矿石	1 045.00	255.00	5.00	37.72	684.00	53.10	16.00	50.00	2.80	21.80	6.80	535.00	154.00	877.00	4.40
CSH-P1-5	碳质千枚岩金矿石	527.00	230.00	5.00	110.35	546.00	66.80	15.00	55.00	3.20	25.80	7.00	706.00	140.00	720.00	6.60
CSH-P1-6	碳质千枚岩金矿石	3 611.80	587.00	5.00	153.50	593.00	70.80	16.00	62.00	2.70	27.50	5.50	571.00	124.00	664.00	7.10
CSH-2	含石英细脉的碳质板岩	78.20	185.00	4.90	52.30	352.00	158.50	9.40	39.10	3.03	160.90	9.10	541.00	108.20	955.00	7.30
CSH-P1-2	碳质板岩	122.40	409.00	5.00	29.13	601.00	91.30	9.00	56.00	2.40	45.50	11.30	637.00	209.00	1 116.00	4.40
CSH-P1-3	碳质千枚岩、板岩	98.10	255.00	6.00	24.31	937.00	38.70	37.00	40.00	1.80	6.20	2.80	403.00	145.00	260.00	3.60
CSH-P2-1	条带状硅质岩	5.60	271.00	10.00	16.68	369.00	40.90	33.00	89.00	3.40	39.80	5.10	371.00	194.00	1 897.00	9.50
CSH-P2-2	黑色硅质页岩	2.50	115.00	5.00	27.58	474.00	39.70	26.00	118.00	3.70	45.10	7.70	317.00	140.00	759.00	5.00
CSH-P2-4	黑色碳质板岩	3.20	102.00	7.00	18.30	476.00	48.60	27.00	119.00	1.90	35.30	6.10	349.00	137.00	614.00	5.90
CSH-P2-5	黑色碳质板岩	11.50	121.00	8.80	9.90	564.00	25.00	18.00	101.00	1.10	14.70	6.90	448.00	99.20	942.00	4.19
CSH-P2-6	黑色碳质板岩	25.60	119.00	9.00	9.35	531.00	34.70	18.00	109.00	1.60	12.30	4.10	306.00	114.00	421.00	3.70
CSH-P2-7	黑色碳质板岩	11.50	121.00	10.80	45.50	693.00	31.30	26.20	128.00	1.49	22.90	7.90	700.00	128.40	727.00	3.95
CSH-P2-7′	板岩	12.90	83.00	10.00	24.91	615.00	36.10	11.00	50.00	1.70	26.20	6.90	577.00	188.00	2 130.00	2.80
CSH-P2-8	黑色碳质板岩	9.60	67.00	5.00	13.28	802.00	47.70	14.00	83.00	1.60	20.90	10.20	500.00	130.00	599.00	2.80
CSH-P2-9	黑色碳质板岩	24.50	126.00	8.00	61.36	389.00	39.30	15.00	57.00	2.00	28.30	9.20	516.00	126.00	2 317.00	2.50
CSH-P2-14	黑色硅质岩	3.30	222.00	7.80	9.30	174.00	67.90	40.40	90.40	5.48	38.70	4.60	846.00	218.50	1 897.00	5.71
CSH-P1-7	长石黑云母片岩	112.30	279.00	5.00	9.82	624.00	34.10	16.00	97.00	1.30	49.90	27.90	1 260.00	171.00	1 046.00	1.90

注：测试单位为中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所；Au、Ag 含量单位为 10^{-9}，其余元素含量单位为 10^{-6}。

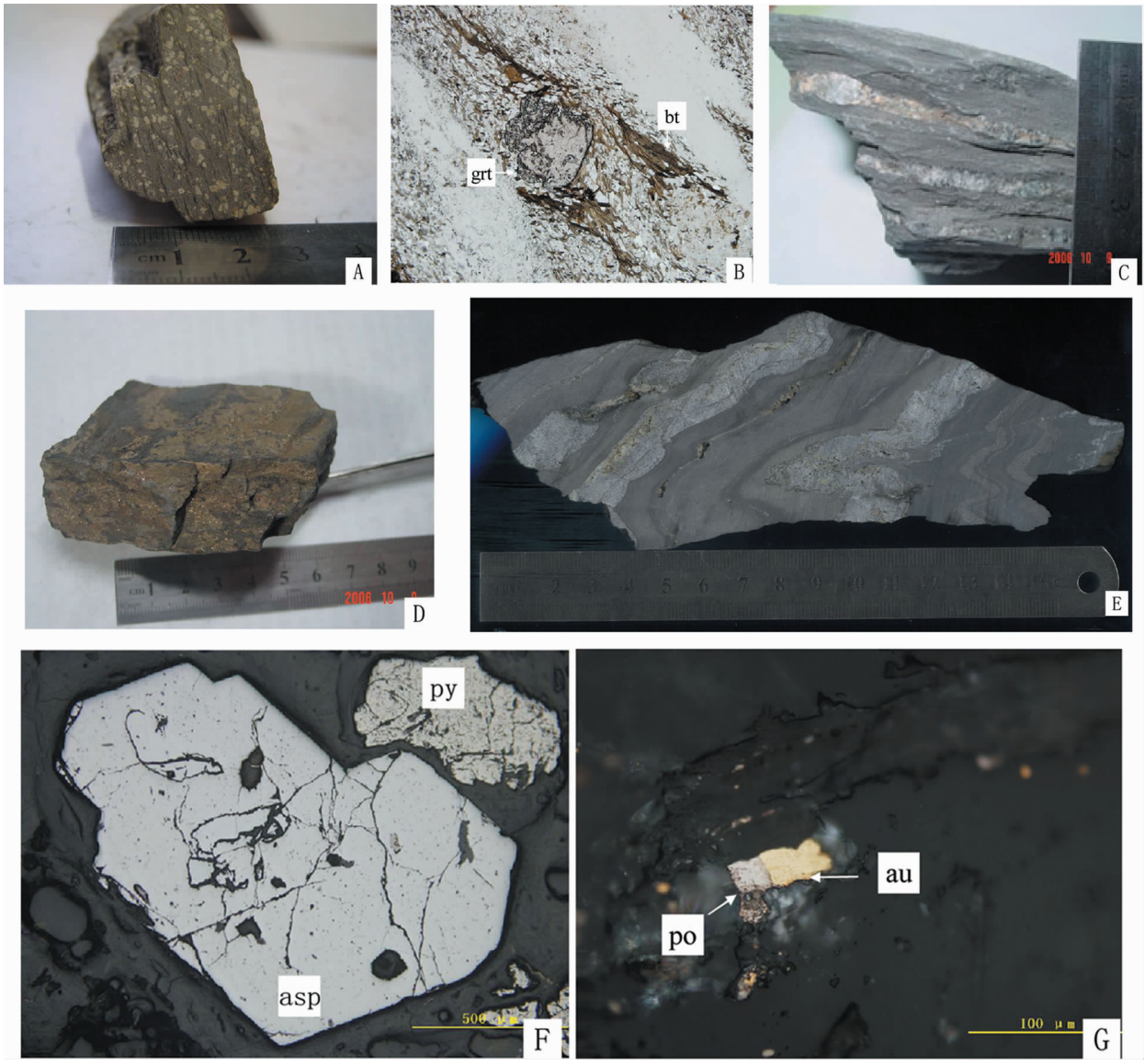


图 3 长山壕金矿矿石及围岩特征

Fig. 3 Ore and wall rock characteristics in Changshanhao gold deposit

A. 石榴子石斜长石黑云母石英片岩；B. 石榴子石斜长石黑云母石英片岩，单偏光显微镜下斑状变晶结构；C. 石英－硫化物细脉型金矿石；D. 硫化物细脉型金矿石；E. 石英－硫化物细脉在碳质板岩中顺层产出，并和地层一起发生褶皱变形，局部形成石香肠构造；F. 硫化物细脉中的毒砂呈自形粒状结构；G. 石英－硫化物细脉中的显微自然金；矿物缩写代号：grt. 石榴子石；bt. 黑云母；po. 磁黄铁矿；au. 自然金；asp. 毒砂；py. 黄铁矿

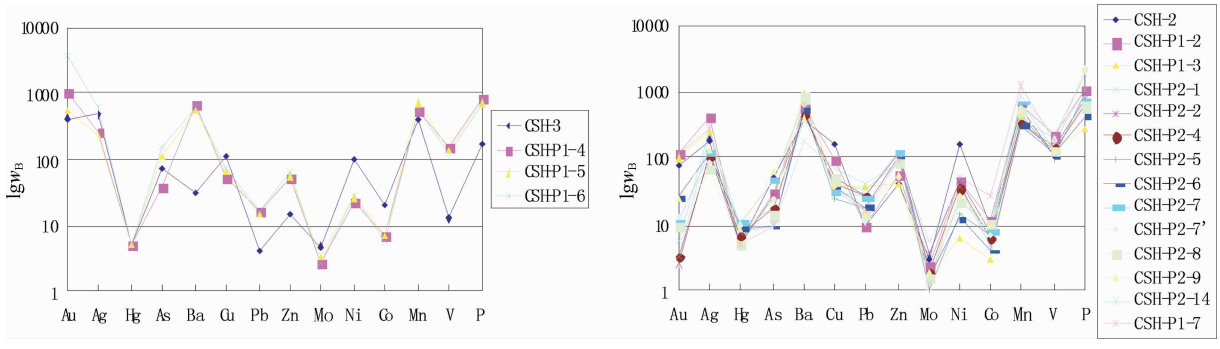


图 4 长山壕金矿微量元素图解(左图为金矿石，右图为围岩)

Fig. 4 Trace elements plot of Changshanhao gold deposit

表 2　长山壕金矿床铅同位素组成及相关参数

Table 2　Pb isotope composition and parameters of Changshanhao gold deposit

编号	矿物	$^{208}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{206}Pb/^{204}Pb$	模式年龄/Ma	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
CSH－P1－8	石英	37.430 8	15.452 2	17.109	926.1	59.38	13.30	39.94
CSH－3	石英	37.868 2	15.528 4	17.635	638.8	66.04	15.98	38.66
06CSH－1	黄铁矿	38.960 0	15.645 3	18.566	110.3	78.14	20.75	44.55
06CSH－2	毒砂	38.979 2	15.674 1	18.921 7	－113.8	90.27	22.20	40.26

注：测试单位为中国地质科学院地质研究所同位素实验室。

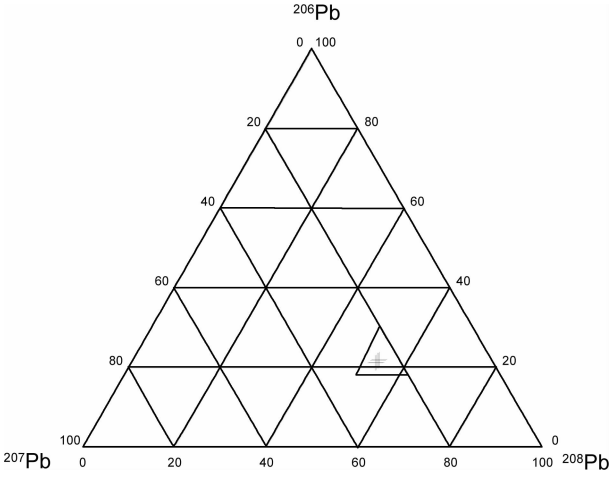


图 5　长山壕金矿铅同位素“坎农”三角图解

（底图据 Cannon et al [18]）

Fig. 5　Pb isotope “Cannon” trilinear diagram of Changshanhao gold deposit

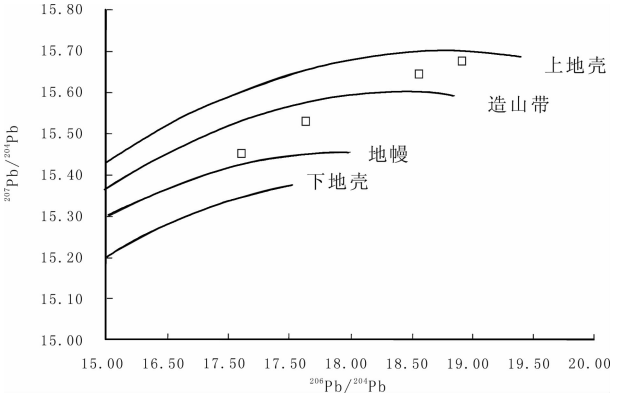


图 6　长山壕金矿铅同位素构造模式图解

（底图据 Zartman et al[22]）

Fig. 6　Pb isotope diagram of Changshanhao gold deposit

化。将铅同位素组成投入 Zartman 构造模式图[22]（图 6）中，长山壕金矿铅同位素数据点分布范围较广，在地幔铅和上地壳之间，具有壳幔混合铅的特征。

朱炳泉等[23]在广泛搜集世界各地不同时代和成因的铅同位素资料基础上，根据构造环境与成因不同，提出了将铅的 3 种同位素表示成同时代

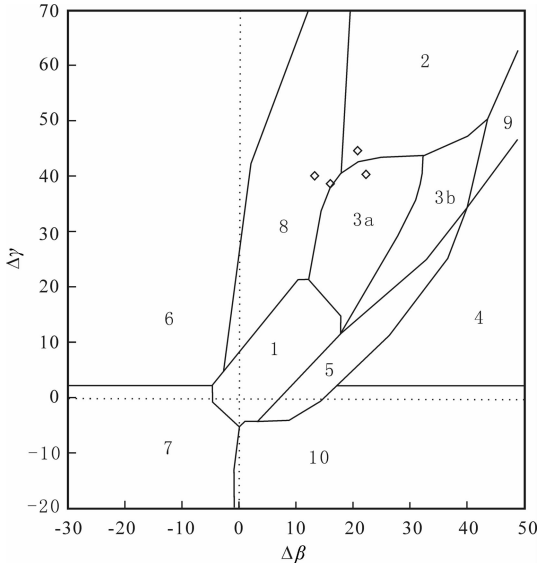


图 7　长山壕金矿铅同位素 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图解

（底图据朱炳泉等[23]）

Fig. 7　$\Delta\gamma-\Delta\beta$ diagram of Pb isotope in Changshanhao gold deposit

1. 地幔铅；2. 上地壳源铅；3. 上地壳与地幔混合的俯冲带铅（3a. 岩浆作用；3b. 沉积作用）；4. 化学沉积型铅；5. 海底热水作用铅；6. 中深变质作用铅；7. 深变质下地壳铅；8. 造山带铅；9 古老页岩上地壳铅；10. 退变质铅

地幔的相对偏差 $\Delta\alpha$、$\Delta\beta$、$\Delta\gamma$，并通过 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图解，追踪矿石铅的源区的方法。利用 GeoKit 软件[21]计算得到 $\Delta\alpha$、$\Delta\beta$、$\Delta\gamma$ 值（表 2），并投影到矿石铅同位素的 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图解（图 7）上，样品点落在上地壳、造山带和上地壳与地幔混合的俯冲带铅中岩浆作用来源铅的交界部位，与 Zartman 构造模式中样品分布特征相似，具有壳幔混合的特征。

将本区金矿与区域上产于中—新元古代地层中的矿床铅同位素组成对比（表 3）可见，本区金矿铅同位素组成与赋矿地层铅同位素组成相似，同时与区域上产于渣尔泰山群浅变质碎屑岩中的朱拉扎嘎金矿相似，但与区域上喷流沉积矿床差别较大，表明矿石铅来自沉积地层，其壳幔混合的特点也继承自地层。

表 3 内蒙古中西部产于中—新元古代地层中的矿床铅同位素组成对比

Table 3 Pb isotope of the deposits in Meso-Neoproterozoic strata in midwest area of Inner Mongolia

矿床	$^{208}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{206}Pb/^{204}Pb$	资料来源
长山壕金矿	37.430 8 ~ 37.868 2	15.452 2 ~ 15.528 4	17.109 ~ 17.635	本文
朱拉扎嘎金矿	36.599 ~ 37.489	15.297 ~ 15.552	17.034 ~ 17.725	[24]
东升庙硫多金属矿	35.281 ~ 35.435	15.144 ~ 15.182	15.171 ~ 15.202	[25]
白云鄂博群碳质板岩	38.447 4 ±58	15.368 5 ±22	17.2087 ±22	[26]

4.2.2 氢、氧同位素

对长山壕金矿 3 件含金石英脉中石英的 $\delta^{18}O$ 和流体包裹体水的 δD 进行了分析。利用测得的石英 $\delta^{18}O$、包裹体水的 δD 值和包裹体平均均一温度，根据石英—水同位素分馏方程[27]：

$$1\,000\ln\alpha^{18}O_{(石英-水)}=3.38\times10^6/T^2-3.4$$

式中：$\alpha^{18}O_{(石英-水)}$ 为石英与水之间 ^{18}O 的分馏系数；T 是绝对温度。计算得到流体包裹体水的 $\delta^{18}O$ 值，结果见表 4。

表 4 长山壕金矿氢、氧同位素组成

Table 4 H, O isotope composition in Changshanhao gold deposit

样号	样品名称	石英 $\delta^{18}O$/‰	水 δD/‰	平均均一温度/℃	水 $\delta^{18}O$/‰
CSH-2	石英	16.8	-108	286.8	9.3
CSH-3	石英	16.9	-112	286.8	9.4
CSH-P1-8	石英	13.9	-110	286.8	6.4

注：测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所。

从所得结果可见，包裹体水 δD 值比较集中，都是较低的负值（-108‰ ~ -112‰），$\delta^{18}O$ 为较低的正值（6.4‰ ~ 9.4‰），具有封存水的特征。封存水是海水或大气降水深循环后长期封存的产物。将所得流体包裹体的氢、氧同位素值投于氢、氧同位素图解（图 8）中，投点偏离雨水线较远，表明发生了“$\delta^{18}O$ 漂移”，反映了封存水与岩石中氧同位素发生了较强烈的水-岩反应。

4.3 流体包裹体地球化学

在长山壕金矿矿体内采集了石英脉样品，进行包裹体片的镜下观察、激光拉曼光谱分析、显微测温和包裹体气、液相成分分析。测试工作在

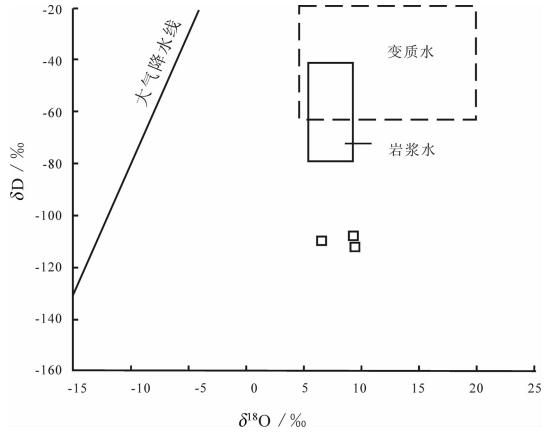


图 8 长山壕金矿成矿流体的氢、氧同位素图解

Fig. 8 H, O isotope diagram of ore-forming fluid in Changshanhao gold deposit

中国科学院地质与地球物理研究所流体包裹体实验室完成。激光拉曼光谱分析采用英国 Ranishaw 公司生产的 Raman2000 型激光拉曼光谱仪。包裹体液相成分分析使用日本岛津公司 Shimadzu HIC-SP Super 离子色谱仪，气相成分使用日本岛津公司 GC2010 气相色谱仪分析。

4.3.1 流体包裹体类型

通过对长山壕金矿 4 件包裹体片的单偏光显微镜下观察，将其中流体包裹体分为 4 类（图 10）。

液相包裹体：形态为不规则状、椭圆、负晶形等，成群出现。包裹体长轴 4 ~ 20 μm，一般 6 ~ 12 μm，充填度为 70% ~ 85%，气相成分以水为主。普遍发育。

气相包裹体：形态为不规则状、椭圆等，随机出现，有时和富液相包裹体共生。长轴 6 ~ 16 μm，充填度为 20% ~ 50%，气相成分较复杂，除水外还常出现 CO_2、CH_4、N_2 等成分。在测试均一温度时，常在均一前发生爆裂。少量出现。

含液体 CO_2 包裹体：形态为不规则状、椭圆状等。包裹体长轴 6 ~ 16 μm，一般 8 ~ 12 μm，充填度为 50% ~ 70%，一般随机分布。在常温下能看到 3 相（$V_{CO_2}+L_{CO_2}+L_{H_2O}$），在测试均一温度时，常在均一前发生爆裂。少量出现。

纯气相包裹体：形态为负晶形、椭圆、不规则状等，呈定向成群分布。包裹体长轴 4 ~ 15 μm。气相成分以 CH_4 为主，有时出现少量 CO_2、N_2。

总体来说，长山壕金矿包裹体以液相包裹体为主，其他 3 种包裹体少量出现。

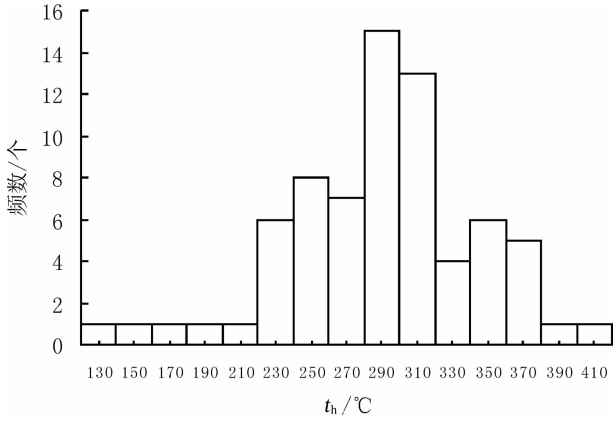


图 9　长山壕金矿流体包裹体均一温度直方图

Fig. 9　Fluid inclusions homogenization temperature histogram of Changshanhao gold deposit

4.3.2　流体包裹体显微测温

显微测温采用英国 Linkam 科仪公司生产的 THMSG600 冷/热台上进行，冷冻实验先于加热实验，在相变附近升温速率适当减小。富液相包裹体和富气相包裹体的盐度由流体包裹体冷冻法冰点与盐度关系表[28]求得，含液体 CO_2 包裹体的盐度由 CO_2 笼合物熔化温度和盐度关系表[29]求得。

对长山壕金矿 4 件石英样品的流体包裹体做了显微测温，部分包裹体尚未均一就发生爆裂，统计结果见图 9。包裹体均一温度为 119 ~ 400.7 ℃，主要集中在 230 ~ 370 ℃，平均为 286.8 ℃。根据冰点和 CO_2 笼合物的熔化温度求得盐度 w(NaCl) 为 6.01% ~ 20.52%，平均为 10.84%。

4.3.3　流体包裹体成分特征

对长山壕金矿的含金石英脉 4 个包裹体片的单个流体包裹体进行了激光拉曼光谱测试。测试时在镜下挑选个体较大、图像清晰、接近表面的包裹体，以测试气相为主。测试结果显示(图 10)，液相包裹体的气相以水为主，气相包裹体的气相成分较复杂，除水以外还含有 CO_2、CH_4、N_2。含液体 CO_2 包裹体的气相成分也较复杂，除 CO_2 外还含有 H_2O、CH_4 等。纯气体包裹体成分较单一，主要为 CH_4 和少量 N_2。

对 3 件流体包裹体样品的气相成分和液相成分进行分析，结果见表 5 和表 6。流体包裹体气相成分以 H_2O、N_2、CO_2 为主，流体并非富含 CO_2，N_2 却较为丰富，并含一定量 O_2，可能代表有大气组分的加入。还原参数 R 可用来反映成矿环境，计算公式为 $R = n(CH_4 + C_2H_2 + C_2H_6)/n(CO_2)$。本区 R 值在 0.006 ~ 0.048 之间，显示较氧化的条件。

大部分流体包裹体液相成分中阴离子以 Cl^-、SO_4^{2-} 为主，其次为 NO_3^-、F^-；阳离子以 Na^+、Ca^{2+} 为主。流体离子类型为 Na^+-Ca^{2+}-Cl^--SO_4^{2-} 型，成分类似于热卤水。

综上所述，长山壕金矿成矿流体温度中等，盐度中等，含有少量的 CO_2 和 CH_4，离子类型类似于热卤水，成矿流体以地层水为主，可能混有少量变质水。这与包裹体的氢、氧同位素特征基本一致。

5　成因讨论

长山壕金矿具有层控性，矿体产于白云鄂博群比鲁特组碳质板岩和千枚岩中。矿体位于向斜的核部，呈板状、似板状，产状与围岩一致，与地层同步褶皱变形。围岩蚀变以硅化、黄铁矿化、黑云母化和碳酸盐化等中低温蚀变为主。矿石成

表 5　包裹体气相成分分析(摩尔分数)

Table 5　The gas composition of the fluid inclusions

编号	矿物	取样温度/℃	$CH_4/10^{-6}$	$C_2H_2/10^{-6}$	$C_2H_6/10^{-6}$	CO_2/%	H_2O/%	O_2/%	N_2/%	CO/%	R
CSH-2	石英	100 ~ 500	90.974	41.602	6.103	1.149	97.016	0.044	1.777	0	0.012
CSH-3	石英	100 ~ 500	108.227	14.836	1.421	2.140	90.198	0.655	6.995	微量	0.006
CSH-P1-8	石英	100 ~ 500	75.378	23.486	3.536	1.043	96.797	0.112	2.038	0	0.010

注：测试单位为中国科学院地质与地球物理研究所。

表 6　包裹体液相成分分析(w_B/(μg/g))

Table 6　The liquid composition of the fluid inclusions

编号	矿物	Li^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	NO_2^-	Br^-
CSH-2	石英	0	1.949	0	0	0	0.031	1.856	0.125	1.488	0	0
CSH-3	石英	0	1.967	0	0	2.075	0.025	1.411	0.83	1.677	0	0
CSH-P1-8	石英	0	3.523	0	0	2.806	0.035	0.483	0.224	0.095	0	0

注：测试单位为中国科学院地质与地球物理研究所。

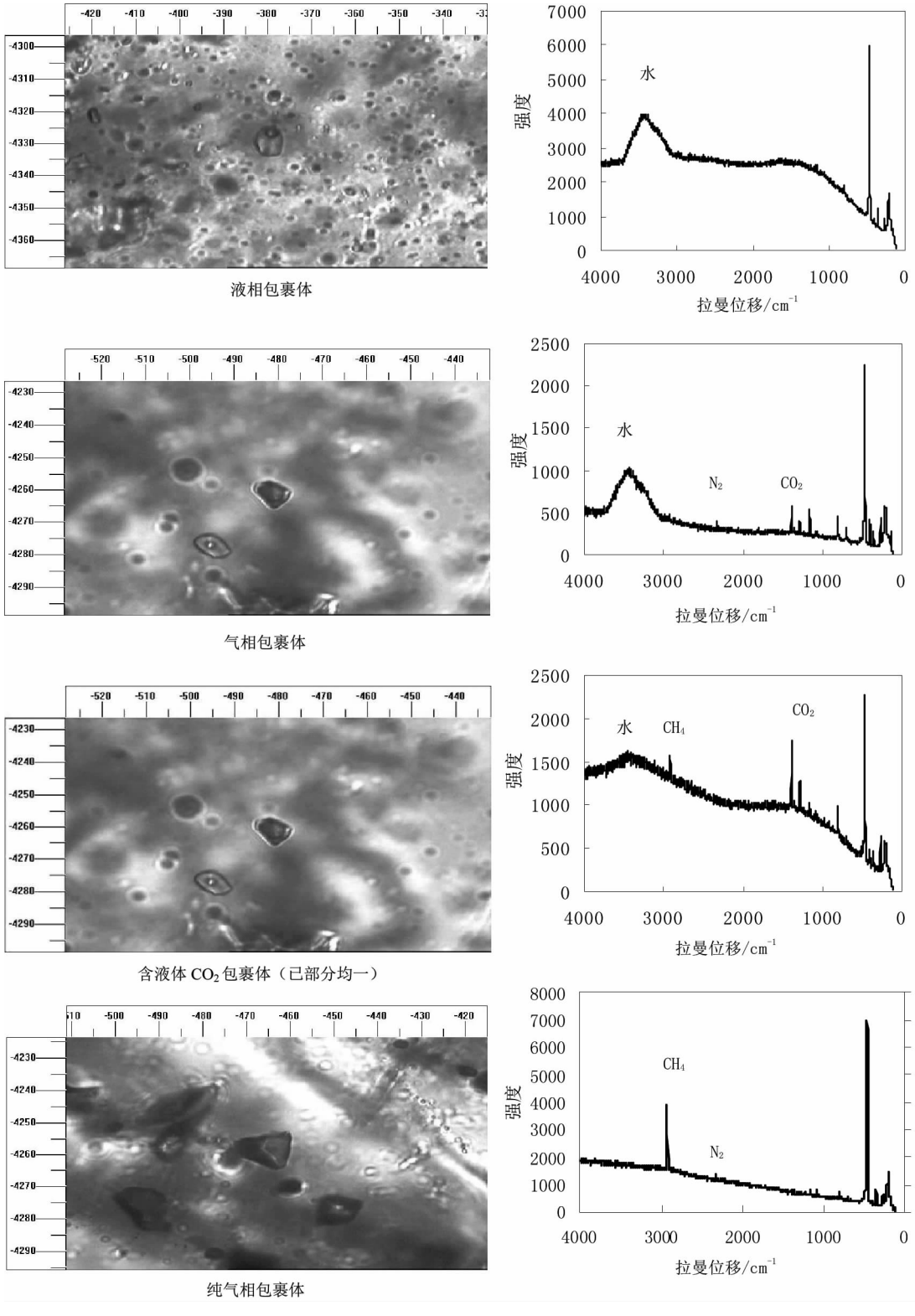


图 10 典型包裹体与激光拉曼光谱(照片标尺单位为 μm)

Fig. 10 Microphotograph of fluid inclusions and laser Raman spectra

分简单，金矿物为自然金，金属矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿及少量毒砂等，脉石矿物主要为石英。成矿物质来自容矿的浅变质碎屑岩地层；成矿流体的温度和盐度中等，来自地层水和变质水。上述地质特征与变质碎屑岩型金矿地质特征一致。因此，长山壕金矿为沉积－变质改造成因的中温热液型金矿。

研究表明白云鄂博群存在两期褶皱，分别为

加里东期和印支期[30]，矿区内浩尧尔忽洞向斜被海西期花岗岩侵入破坏，说明褶皱变形要早于海西期岩浆活动，为加里东期褶皱；矿区含金石英脉与元古宙地层发生了同步褶皱，表明成矿作用发生在褶皱变形的同时或之前。因此，初步推断金成矿作用形成于加里东期，早于外围海西期岩体，该岩浆活动对金成矿作用不大。

致谢：野外工作中得到内蒙古地质勘查局及内蒙古国土资源勘查院、长山壕金矿的大力支持，在此表示衷心的感谢！

参考文献：

[1] 中国黄金国际资源有限公司. 金山矿业在中国长山壕金矿资源储量增加51%，总探明和控制黄金资源量增加至四百九十九万盎司. [2010-03-04]. http://www.jinshanmines.com.

[2] 王秀璋，程景平，梁华英，等. 变质细碎屑岩型金矿床的三阶段成矿模式 [J]. 矿床地质，1995，14(4)：322-328.

[3] 刘友梅，杨蔚华. 变质碎屑岩型金矿床的成矿模式及找矿方向 [J]. 地质地球化学，1996 (1)：25-30.

[4] 应汉龙，陆德复. 国外超大型浅变质细碎屑岩型金矿床的地质特征 [J]. 贵金属地质，1997，6(1)：296-304.

[5] 陈毓川，李兆鼐，毋瑞身，等. 中国金矿床及其成矿规律 [M]. 北京：地质出版社，2001：182-284.

[6] 刘春涌，王永江. 初论中亚黑色岩系型金矿床的基本特征——兼论新疆黑色岩系型金矿找矿方向 [J]. 新疆地质，2007，25(1)：34-39.

[7] Glasson M J, Keays R R. Gold mobilization during cleavage development in sedimentary rocks from the auriferous slate belt of central Victoria, Australia: some important boundary conditions [J]. Economic Geology, 1978, 73(4): 496-511.

[8] Forde A. The late orogenic timing of mineralisation in some slate belt gold deposits, Victoria, Australia [J]. Mineralium Deposita, 1991, 26(4): 257-266.

[9] Lu J, Seccoumber P K, Foster D, et al. Timing of mineralization and source of fluids in a slate-belt auriferous vein system, Hill End gold field, NW, Australia: Evidence from $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating and O and H isotopes [J]. Lithos, 1996, 38(3/4): 147-165.

[10] Wilde A R, Layer P, Mernagh T, et al. The giant Muruntau gold deposit: geologic, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis [J]. Economic Geology, 2001, 96(3): 633-644.

[11] Ryan Morelli, Robert A C, Reimar S, et al. Age and source constraints for the giant Muruntau gold deposit, Uzbekistan, from coupled Re-Os-He isotopes in arsenopyrite [J]. Geology, 2007, 35(9): 795-798.

[12] Willman C E, Korsch R J, Moore D H, et al. Crustal-scale fluid pathways and source rocks in the Victorian Gold Province, Australia: Insights from deep seismic reflection profiles [J]. Economic Geology, 2010, 105(5): 895-915.

[13] 刘斌，余昌涛. 辽南猫岭细脉浸染型金矿床的成矿模式 [J]. 贵金属地质，1994，3(2)：103-106.

[14] 江思宏，杨岳清，聂凤军，等. 内蒙古朱拉扎嘎金矿矿床地质特征 [J]. 矿床地质，2001，20(3)：234-243.

[15] 聂凤军，江思宏，侯万荣，等. 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，2010，29(1)：58-70.

[16] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京：地质出版社，1991：35-55.

[17] 王楫，李双庆，王保良，等. 狼山—白云鄂博裂谷系 [M]. 北京：北京大学出版社，1992：17.

[18] Cannon R S, Pierce A P, Antweiler J C, et al. The data of lead isotope geology related to problems of ore genesis [J]. Economic Geology, 1961, 56: 1-38.

[19] Russell R D, Farquhar R M. Lead Isotopes Geology [M]. New York: Interscience Publishers, 1960: 1-243.

[20] Doe B R, Stacey J S. The application of lead isotopes to the problems of ore genesis and prospect evoluation: a review [J]. Economic Geology, 1974, 69: 757-776.

[21] 路远发. GeoKit：一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包 [J]. 地球化学，2004，33(5)：459-464.

[22] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics-the model [J]. Tectonophysics, 1981: 75: 135-162.

[23] 朱炳泉，李献华，戴橦谟，等. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化 [M]. 北京：科学出版社，1998：216-230.

[24] 江思宏，杨岳清，聂凤军. 阿拉善地区朱拉扎嘎金矿床硫、铅同位素研究 [J]. 地质论评，2001，47(4)：438-445.

[25] 丁悌平，蒋少涌，万德芳，等. 华北元古宙铅锌成矿带稳定同位素研究 [M]. 北京：北京科学技术出版社，1992：9-35.

[26] 张宗清，袁忠信，唐索寒，等. 白云鄂博矿床年龄和地球化学 [M]. 北京：地质出版社，2003：222.

[27] Robert N C, James R O'Neil, Toshiko K Mayeda. Oxygen isotope exchange between quartz and water [J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(17): 3057-3067.

[28] Bodnar R J. Reviced equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solutions [J]. Geochimica et Cosmochimca Acta, 1993, 57: 683-684.

[29] Collins P L F. Gas hydrates in CO_2-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity [J]. Economic Geology, 1979, 74: 1435-1444.

[30] 张玉清，王弢，贾和义，等. 白云鄂博叠加褶皱及其变形机制 [J]. 华南地质与矿产，2003 (1)：23-26.