

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.04.010

胶东大柳行金矿矿床特征及成因探讨

黄鑫^{1,2,3}

(1. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东 济南 250104; 2. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074;
3. 山东省非煤矿山事故防范技术研究中心, 山东 济南 250104)

摘要:探讨了胶东大柳行金矿区矿床特征和成因,通过地质特征、成矿流体来源和物质来源等方面研究,对大柳行多个矿体进行样品采集工作,采用电子探针、光谱定量、流体包裹体、硫碳氢氧同位素等分析方法,认为大柳行金矿床可划分为 3 个成矿阶段;成矿流体为大气水和岩浆水的混合物;具有富 H₂O、富 CO₂ 流体特征;成矿物质可能主要为地幔来源,混合有大气降水;具壳幔混源特征。属于低盐度、低密度、中低温、中深成矿床。

关键词:金矿;胶东;矿床特征;物质来源;流体来源;成因探讨

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2021)04-0129-13

Discussion on the Characteristics and Genesis of the Daliuhang Gold Deposit in Jiaodong

HUANG Xin^{1,2,3}

(1. Shandong Provincial Research Institute of Coal Geology Planning and Exploration, Jinan 250104, Shandong, China;
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Research Center of Non-Coal Mine Accident Prevention Technology in Shandong, Jinan 250104, Shandong, China)

Abstract: This paper discusses the characteristics and genesis of Daliuhang gold deposit in Jiaodong. The samples from several ore bodies of Daliuhang are collected and analyzed by electron microprobe, spectral quantification, fluid inclusions, and sulfur-carbon-hydrogen-oxygen isotopes from the aspects of geological characteristics, ore-forming fluid sources and material sources. It is considered that the Daliuhang gold deposit can be divided into three metallogenic stages. The ore-forming fluid is a mixture of meteoric water and magmatic water, rich in H₂O and CO₂. The ore-forming material may mainly derive from mantle, mixed with meteoric water and characterized by mixed crust mantle source. Daliuhang gold deposit belongs to medium plutonic deposits with low salinity, low density, and medium-low temperature.

Keywords: gold deposit; Jiaodong; deposit characteristics; material source; fluid source; genesis discussion

收稿日期:2020-06-19;修回日期:2021-05-26

基金项目:2018 年度山东省地质勘查项目“山东省栖霞-蓬莱金矿带黑岚沟-大柳行金矿田深部成矿预测”(鲁勘字(2018)15 号),山东省煤田地质局科研专项基金“山东省牟平-乳山成矿带三维综合找矿模型构建与深部找矿预”(鲁煤地科字(2019)4 号)。

作者简介:黄鑫(1990-),男,高级工程师,主要从事地质勘查及找矿预测研究工作。E-mail:705018182@qq.com。

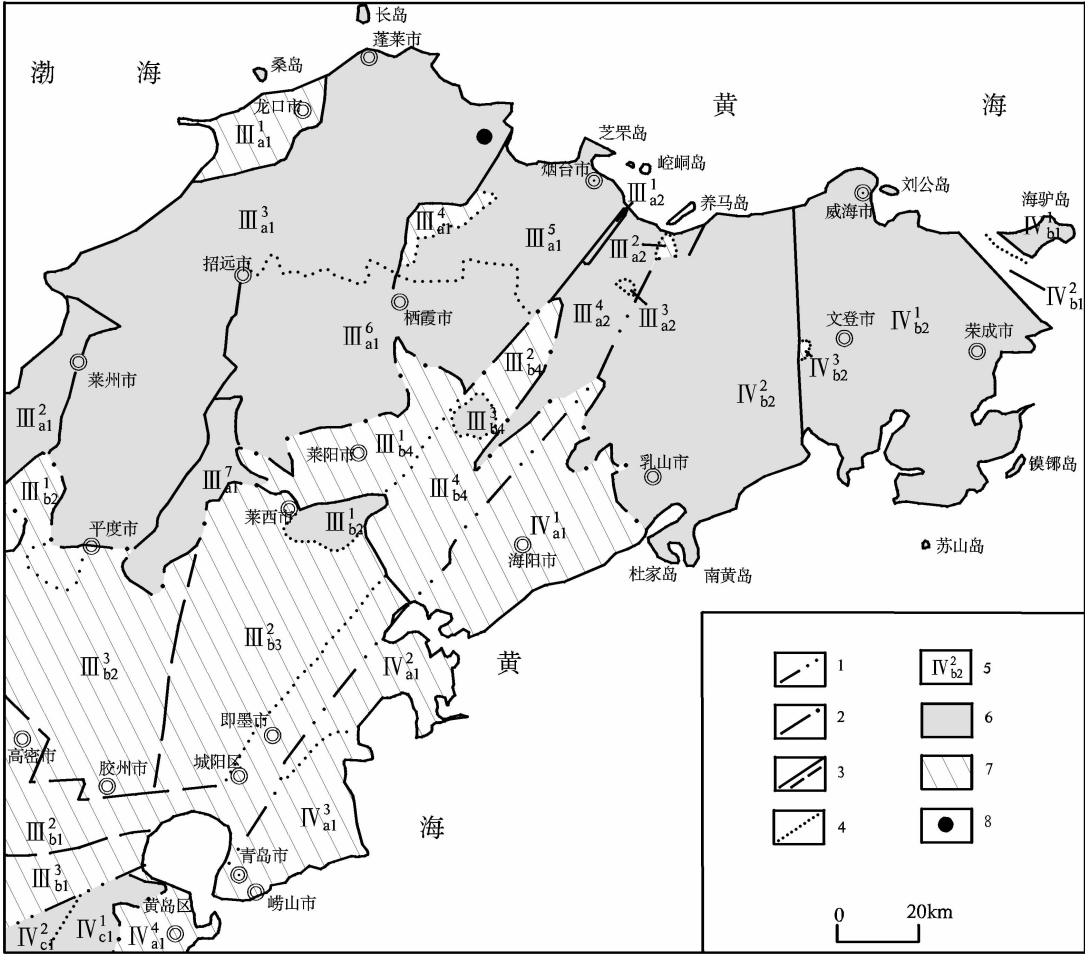
胶东金矿集区位于胶东半岛东部,已发现金矿床 200 余处,累计探明金矿资源储量近 5 000 t,是中国第一和世界第三大金矿集区。胶东的含金石英脉型(玲珑式)和破碎带蚀变岩型(焦家式)金矿在全国范围内基本达成了共识。随着胶东东部金矿勘查取得突破,发现了一批新的金矿床,提出了一些新的金矿化类型。例如,角砾岩型、碳酸盐脉型等,但限于研究程度,认识并不统一。目前,对胶东金矿成因类型讨论最多的是造山型金矿(Groves D I et al., 1998)和胶东型金矿(翟明国等,2004)。

本次工作研究的大柳行金矿床位于蓬莱-栖霞成矿带的南部,该带相对于其东西 2 个成矿带(招远-莱州成矿带和牟平-乳山成矿带)缺乏大型超大型金矿床(申玉科等,2019),多以中小型石英脉型金矿床为主(薛建玲等,2012),其研究程度也相对较为

薄弱。笔者拟通过详尽的矿床地质特征、岩相学、流体包裹体及相关稳定同位素等方面的研究(陈国忠等,2017;安生婷等,2020;刘洋等,2017;张国宾等,2018;柯昌辉等,2020;肖凡等,2020;张运强等,2012;李杰等,2016),探讨大柳行金矿床成矿过程及成矿流体和成矿物质来源问题。

1 区域及矿区地质背景

矿区位于蓬莱市区东南部约 34 km 的大柳行镇大柳行村,位于华北板块(I)、胶辽隆起区Ⅲ(Ⅱ)、胶北隆起Ⅲa(Ⅲ)、胶北断隆Ⅲal(Ⅳ)、胶北凸起Ⅲ3a1(Ⅴ)的东北部边缘(王世进等,2009),蓬莱东南部金成矿带中部(翟裕生等,2011);区内地层简单,断裂构造发育,岩浆岩广布(图 1)。



1. 二级单元界线;2. 三级单元界线;3. 四级单元界线;4. 不整合界线;5. 单元代号;6. 隆起区;7. 凹陷区;8. 研究区位置

图 1 研究区大地构造位置图

Fig. 1 Geotectonic location map of the study area

矿区地层简单,仅见新生代第四系分布于山前洼地,为残坡积物;岩性主要为含砾砂质黏土、黏土质粉砂夹砂砾石层;构造发育,断裂构造控制了区内矿脉(体)的分布,按其空间展布可分为北东向、北北东向、南北向 3 组,构成区内主要构造格架,为区内主要控矿构造。矿区东南部以南北向构造为主,北

西部以北北东向为主,北东向次之;岩浆岩广布,主要为郭家岭序列罗家单元的斑状中细粒含黑云二长花岗岩及燕山晚期的各种脉岩。区内脉岩主要为闪长玢岩、石英脉(存在于黄铁绢英岩化碎裂岩中)及煌斑岩(李兆龙等,1990;胡伟华等,2008;邓军等,1999;孔会磊等,2021)(图 2)。

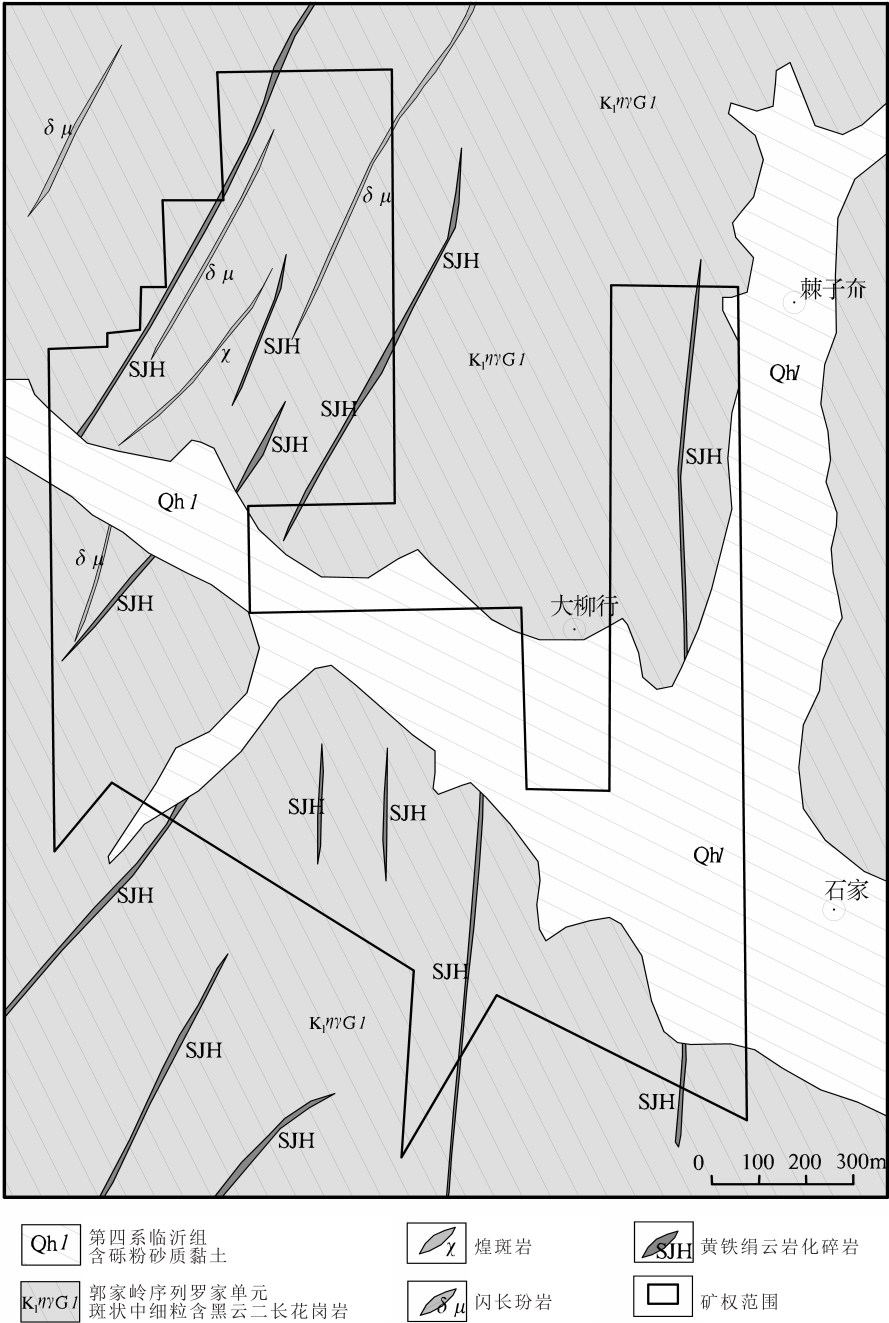


图 2 研究区地质图

Fig. 2 Geological map of the study area

2 矿床地质

2.1 矿体特征

圈定 12 个矿体,其中(7)-1、(8)-1、(259)-1、(291)-1 号矿体为主要矿体(图 3),资源量分别占矿床矿石量的 33.13%、26.42%、26.79%和 11.20%。

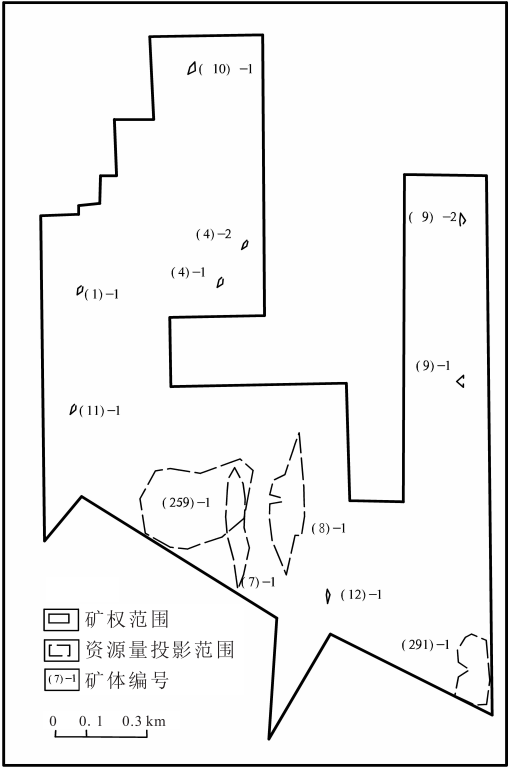


图 3 资源量估算范围叠合图

Fig. 3 Resource estimation range overlay

(7)-1 号矿体:赋存于-40~-558 m,控制最大长度为 433 m,最大斜深为 520 m,最小埋深为 133 m;呈脉状,总体走向近南北,倾向东,倾角平均为 80°左右;厚度为 0.38~1.18 m,平均厚度为 0.76 m;矿体单样品 Au 品位为 1.05×10^{-6} ~ 26.40×10^{-6} ,平均品位为 5.61×10^{-6} ,矿体沿走向及沿倾向均未封闭。

(8)-1 号矿体:赋存标高为-40~-554 m,控制最大长度为 412 m,最大斜深为 531 m,最小埋深为 135 m;呈脉状,总体走向近南北,倾向东,倾角平均为 75°左右;厚度为 0.39~1.17 m,平均厚度为 0.73 m;矿体单样品 Au 品位为 1.55×10^{-6} ~ 28.90×10^{-6} ,

平均品位为 6.33×10^{-6} ,矿体沿走向及沿倾向均未封闭。

(259)-1 号矿体:赋存标高-47~-569 m,区内控制走向长为 420 m,最大斜深为 620 m,最小埋深为 141 m;呈脉状,总体走向 30°,倾向南东,倾角平均为 55°左右;厚度为 0.36~1.13 m,平均厚度为 0.78 m;矿体单样品 Au 品位为 1.00×10^{-6} ~ 83.60×10^{-6} ,平均品位为 5.69×10^{-6} ,矿体沿走向及沿倾向均未封闭。

(291)-1 号矿体:赋存标高-49~-353 m,区内控制走向长为 270 m,最大斜深为 302 m,最小埋深为 128 m;呈脉状,总体走向 5°,倾向南东,倾角平均为 60°左右;矿体厚度达 0.45~1.13 m,平均厚度为 0.68 m;矿体单样品 Au 品位为 1.75×10^{-6} ~ 16.50×10^{-6} ,平均品位为 5.74×10^{-6} ,矿体沿走向及沿倾向均未封闭。

2.2 矿石特征

依据本次岩矿鉴定资料可知,该矿床矿石矿物成分较简单,由金属矿物和非金属矿物组成。在金属矿物组合中以硫化物类矿物为主,主要是黄铁矿,次为少量的黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿等。依据电子探针分析结果(表 1),金矿物主要为银金矿、自然金;非金属矿物主要有石英、长石、绢云母、绿泥石、方解石等。

金矿物主要为银金矿、自然金,反射色为亮金黄色;赋存状态主要为包体金,次为晶隙金、裂隙金,与金属硫化物共生。岩矿鉴定样中,以尖角粒状、枝叉状为主,肉眼容易辨认(图 4)。金颗粒以中细粒为主,分布不均,偶见于高品位矿石。

共采取了 12 件光谱分析样品,分布于 4 个主矿体中,主要采取-206 m、-286 m 和 -400 m 中段的黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩,对各种元素含量进行梳理(表 2)。

矿石通过光谱半定量分析及参考周边相似类型矿床的有用组分特征,确定组合分析项目为 Ag、Cu、Pb、Zn、S;钻孔按照单工程组合、坑道按照相邻取样点组合,分别将矿体内参与资源量估算的全部基本分析样品副样按样长比例 2~10 个组合成 1 件样品,重量约 200g。As 在周边其他矿床中均达不到标准,对选矿不构成影响,所以本次未化验 As 的含量。本次工作共采取组合分析样 73 件,分析结果见表 3。

表 1 大柳行矿区电子探针分析结果表

Tab. 1 Table of results of electron probe analysis in Daliuhang mining area

测点	Fe	Co	Ni	Cu	Ag	Te	Sb	Au	总和	备注
H1	0.04	0.02	0.1	0	14.48	0	0.07	84.14	98.85	自然金(7-1矿体)
H2	0.21	0	0.21	0.44	28.84	0	0	69.27	98.97	银金矿(8-1矿体)
H3	0.04	0.01	0.17	0.14	27.27	0.03	0	71.37	99.03	银金矿(8-1矿体)
H4	0.15	0	0	0.43	25.95	0	0	72.34	98.87	银金矿(7-1矿体)
H5	0.15	0.07	0.23	0.5	21.66	0	0	76.45	99.06	银金矿(259-1矿体)
H6	16.91	0.23	0.09	0.28	19.69	0	0.16	60.33	97.69	银金矿(259-1矿体)
H7	0.1	0	0.14	0	17.57	0	0	81.21	99.02	自然金(7-1矿体)
H8	0.33	0.03	0.08	0.48	14.48	0	0.19	82.77	98.36	自然金(291-1矿体)
H9	0	0	0.22	0.4	12.25	0	0	86.72	99.59	自然金(291-1矿体)
H10	0.06	0	0.01	0.08	14.38	0.03	0.12	84.1	98.78	自然金(291-1矿体)

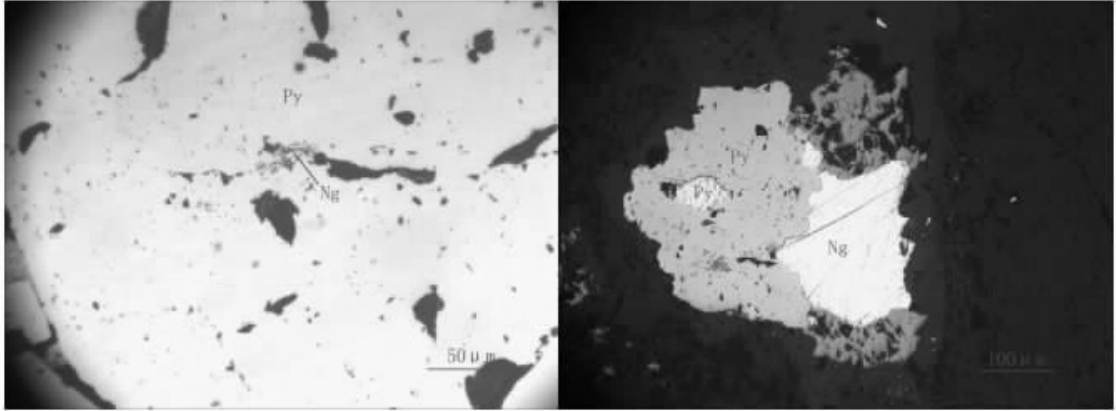


图 4 金矿物的赋存状态照片

Fig. 4 Photos of occurrence state of gold minerals

表 2 矿石光谱分析结果统计表

Tab. 2 Statistics table of ore spectral analysis results

含量(10^{-6})	>1 000	1 000~100	100~10	<10
元素	Ti、S	Pb、Ba、Cu、P、Mn、Rb、Sr、Zn	Ag、As、Ce、Co、Cr、Cs、Ga、La、Nd、Ni、V、Zr	Mo、Nb、Sb、Sc、Se、Tb、U、W、Y、Yb

表 3 组合分析结果统计表

Tab. 3 Statistical results of combined analysis

元素	Ag(10^{-6})	Cu(%)	Pb(%)	Zn(%)	S(%)	样品数量	
评价指标	2	0.1	0.2	0.2	2		
矿体编号	(7)-1	0.5~34.5	0.011~0.046	0.063~0.17	0.022~0.28	1.54~3.34	20
	平均	13.23	0.02	0.04	0.08	2.48	
	(8)-1	4.5~33.0	0.014~0.044	0.006~0.21	0.035~0.31	1.41~8.75	21
	平均	13.19	0.02	0.06	0.13	3.14	
	(259)-1	2.0~46.0	0.013~0.038	0.02~0.14	0.036~0.21	1.61~7.08	23
	平均	18.8	0.02	0.06	0.12	3.76	
	(291)-1	2.5~17.5	0.006~0.016	0.014~0.087	0.036~0.13	0.83~5.06	9
	平均	8.33	0.01	0.03	0.09	2.19	

由表 3 可看出,可以综合回收的组分为 Ag、S, 其他元素达不到综合回收的要求。

矿石结构主要有压碎结构、半自形-他形结构、交代溶蚀结构、包含结构、填隙结构、乳滴状结构等。矿体中常见的矿石构造类型为细脉浸染状构造,斑杂状构造、致密块状构造等。

本矿床矿石以黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩为主,局部夹黄铁石英脉。矿石呈灰白色、灰色、浅灰绿色,变余碎裂结构,斑杂状构造。黄铁矿呈细粒浸染状,与硅化石英呈细脉状、脉状分布,构成细脉浸染状、脉状构造。金属矿物以黄铁矿为主,少量黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿;非金属矿物以石英、长石、绢云母为主,少量方解石。

2.3 成矿阶段划分

根据脉体穿切关系(耿瑞等,2012;李洪奎等,2012,2017)、矿物共生组合和结构构造特征,大柳行金矿床可划分为 3 个成矿阶段:即早期石英-黄铁矿阶段、中期石英-多金属硫化物阶段、晚期石英-碳酸盐阶段。

石英-黄铁矿阶段:含矿热液沿破碎带运移,与碎裂岩交代,长石转变成绢云母和硅化石英,角闪石、黑云母变为绿泥石,自形黄铁矿晶出。由于构造持续作用,黄铁矿产生裂隙,金矿物沿裂隙沉淀。

石英-多金属硫化物阶段:该阶段蚀变矿化强烈,多金属硫化物呈细脉状、团块状、浸染状产出,金矿物大量形成,是最主要的成矿阶段。

石英-碳酸盐阶段:成矿期后残余低温热液沿后期构造裂隙充填形成碳酸盐或石英细脉,穿插于早期形成的矿化岩石中。该阶段基本无金质析出。

3 金矿成因探讨

3.1 成矿流体来源

本次在大柳行金矿的采矿和探矿平巷沿矿体(脉)进行了采样,采集了主成矿期矿石样品 6 件,分布于 4 条主矿体内,采集样品均为黄铁矿化石英脉 2 件和黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩 4 件。采样方法为打块法,2 类样品内包裹体特征几乎无差异。

3.1.1 流体包裹体类型和形态特征概述

本次流体包裹体岩相学研究主要对象为石英流体包裹体。共对 6 个样品测试 76 个包裹体数量(王佳良,2013;丁正江等,2015;卢焕章等,2004;Chen

G Y et al.,1989;游军等,2018)。

按相态将其分为单相包裹体(I)、气液两相包裹体(II)及三相包裹体(III)。以呈透明无色的纯液包裹体(Ia)与呈无色-灰色的富液体包裹体(IIa)及含子矿物富液体包裹体(IIIb)为主,部分视域内较为发育呈无色-灰色的 H_2O-CO_2 三相包裹体(IIIa)与呈深灰色的气体包裹体(Ib),局部视域可见少量呈灰色-深灰色的富气体包裹体(IIb)(图 5)。

单相包裹体(I):可分为纯液相(Ia)和纯气相(Ib)包裹体,以纯液相(Ia)为主,大小一般为 $4\sim 10\mu m$,随机分布,呈浑圆形。

气液两相包裹体:以富液包裹体为主,主要为浑圆形、椭圆形、长条形或不规则多边形,大小一般为 $4\sim 12\mu m$,集中于 $5\sim 10\mu m$,气液比为 $15\%\sim 30\%$,以 $25\%\sim 25\%$ 为主,偶见气液比 $\geq 50\%$ 的富气包裹体。

三相包裹体:主要为 H_2O-CO_2 三相包裹体和含子矿物富液体包裹体,以浑圆形、长条形和不规则形为主,成群或均匀密集分布,大小一般为 $4\sim 15\mu m$,集中在 $6\sim 12\mu m$ 。原生包裹体居多,部分包裹体受矿物裂隙影响发生破裂,属次生包裹体。

3.1.2 流体包裹体测温、盐度和压力

笔者对富液体包裹体(IIa)、 H_2O-CO_2 三相包裹体(IIIa)、含子矿物富液体包裹体(IIIb)进行了包裹体测温,结果见图 6。并采用 Hall(Hall D L et al.,1988)等提出的盐度计算方法,利用 FLINCOR 计算机程序估算了成矿压力(Touret J et al.,1979;Sterner S M et al.,1991)。

可以看到大柳行金矿床石英流体包裹体(李杰等,2016;王成辉等,2012;邵主助等,2019;邓碧平等,2015)均一温度在 $184\sim 341^\circ C$,主要集中于 $200\sim 340^\circ C$,计算得到盐度为 $0.88\%\sim 11.46\%$,主要集中于 $3\%\sim 8\%$ NaCl 范围;包裹体捕获压力值为 $252\sim 312\text{ Mpa}$,集中于 $260\sim 290\text{ Mpa}$ 。其中,富液体包裹体(IIa)均一温度在 $184\sim 343^\circ C$,主要集中于 $200\sim 340^\circ C$; H_2O-CO_2 三相包裹体(IIIa)均一温度在 $197\sim 366^\circ C$,主要集中于 $240\sim 360^\circ C$;含子矿物富液体包裹体(IIIb)均一温度在 $215\sim 337^\circ C$,主要集中于 $220\sim 320^\circ C$ 。

3.1.3 流体包裹体密度、深度计算

根据实验的测温数据和盐度数据可计算流体的密度。计算的对象分为不同盐度的气液两相包裹

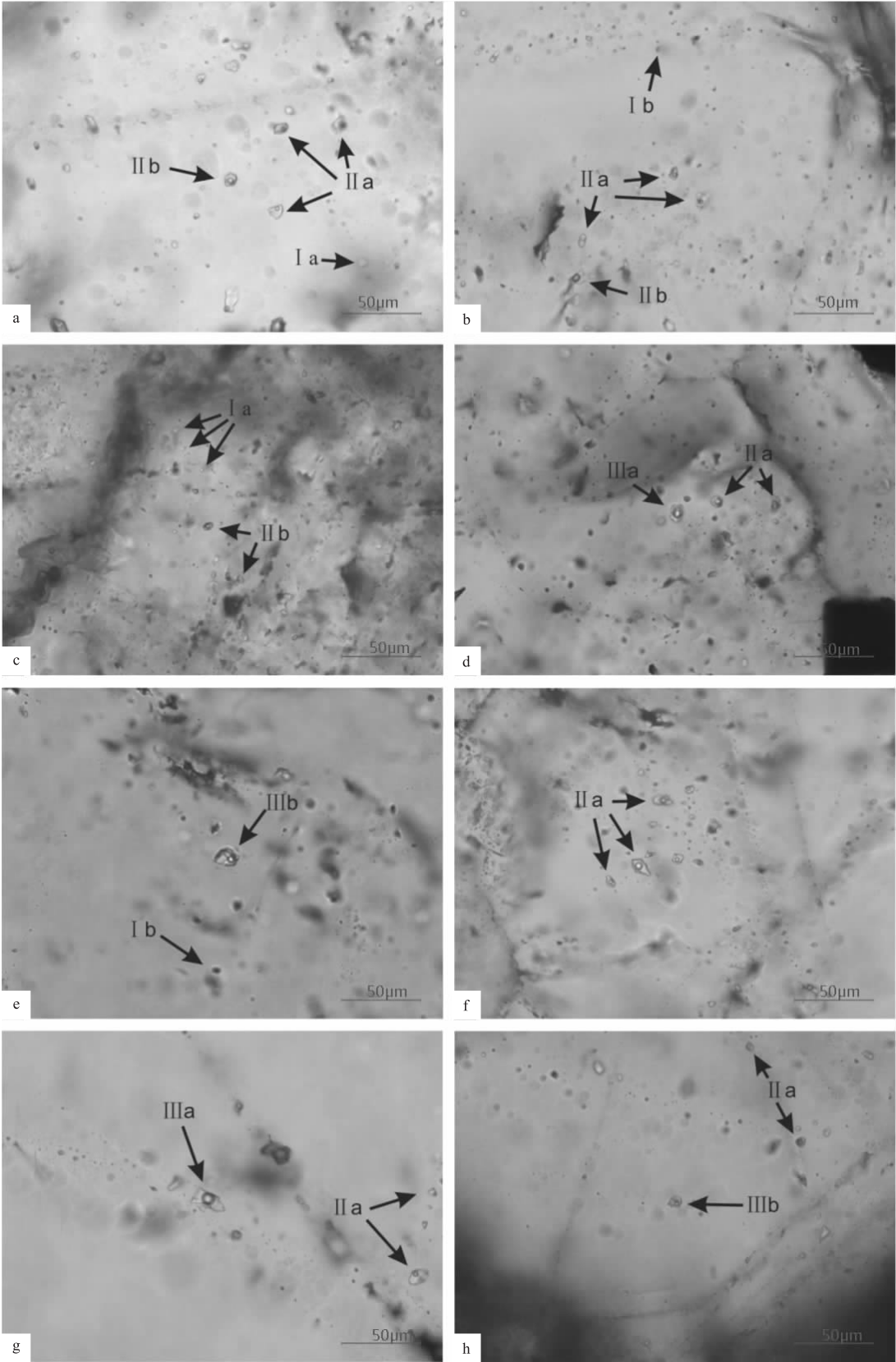


图 5 石英流体包裹体镜下照片
Fig. 5 Photograph of quartz fluid inclusion lens

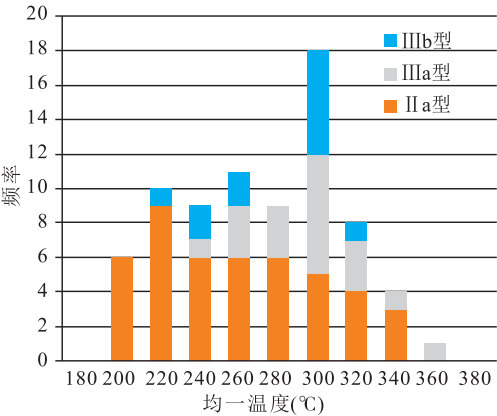


图 6 矿床流体包裹体均一温度直方图

Fig. 6 Homogeneous temperature histogram of fluid inclusions in a deposit

体和含(富)CO₂三相包裹体。

对于气液两相包裹体,流体的密度由均一温度和盐度决定。根据测得的流体包裹体均一温度和盐度数据,在饱和水蒸气 NaCl - H₂O 溶液密度图上投点(图 7),得到气液两相溶液包裹体的密度集中在 0.68~0.96 g/cm³。对于含 CO₂ 三相包裹体,流体密度的计算是根据刘斌和沈昆的密度公式(刘斌等,1999),经计算,含 CO₂ 三相包裹体密度为:0.64~

0.94 g/cm³。总体来看,该矿床流体包裹体密度主要集中在 0.68~0.94 g/cm³,属低密度流体。

深度的估算根据 Sheperd(Sheperd T J et al., 1985)等提出的成矿深度 H 和成矿压力 P 之间的换算关系: $P = \rho g H$ ($\rho = 3 \text{ g/cm}^3$) 计算得到成矿深度,结果为 8.4~10.6 km。

通过以上岩相学观察表明,研究区金矿床含 Au 石英脉石英中发育大量的原生流体包裹体,它们直接反映了成矿流体的基本特征。由于 II 型和 III 型原生流体包裹体常同时存在,且成群共生在同一个石英颗粒中,表明其捕获时成矿流体处于一种不均匀的热液体系状态。

本次显微测温结果显示,III 型包裹体的均一温度多高于 II 型包裹体,并且连续变化,盐度、密度多小于 II 型包裹体。这种结果是由压力波动导致的连续多次不混溶作用形成的。在流体不混溶过程中,捕获的端元组分的包裹体均一温度及压力相近,并且可以代表捕获温度和压力。大柳行金矿床成矿过程中明显经历了流体不混溶过程,因此 III a 型包裹体($V_{\text{CO}_2} > 50\%$)的均一温度可代表不混溶包裹体群的捕获温度,即成矿温度为 240~340 °C。石英内发育大量的含 CO₂ 三相包裹体说明流体中富含 CO₂

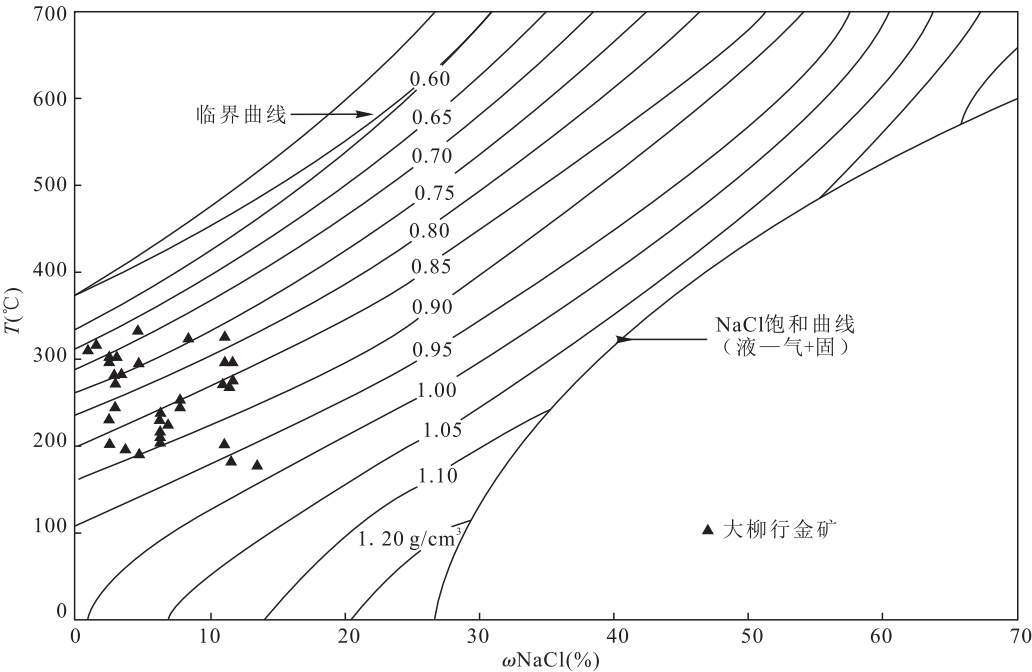


图 7 矿床流体包裹体 NaCl - H₂O 体系密度图解

Fig. 7 Density diagram of the fluid inclusions of the deposit, NaCl - H₂O system

或为碳质流体。 CO_2 的存在可以增加氯和水在岩浆流体中的溶解度,有利于金属元素的运移(芮宗瑶等,2003;陈衍景等,2006)。按陈衍景等对造山型金矿的论述,说明该矿床是在中低压力、中深度条件下形成的。

综上所述,研究区金矿床成矿流体包裹体均一温度集中于 $240\sim 340\text{ }^{\circ}\text{C}$,成矿流体包裹体盐度在 $3\%\sim 12\%\text{ NaCl}$,流体包裹体密度主要集中在

$0.68\sim 0.96\text{ g/cm}^3$ 。成矿流体属于低盐度、低密度、富 H_2O 、富 CO_2 流体,为中低温、中深成矿床。

3.2 成矿物质来源

3.2.1 硫同位素

本次研究共采集 6 件黄铁矿样品,分布于 4 条主矿体内,采集样品均为黄铁矿化石英脉。采样方法为打块法,分析了硫同位素组成(表 4), $\delta^{34}\text{S}$ 值总体变化为 $6.3\%\sim 7.7\%$,平均值为 7.0% 。

表 4 研究区硫同位素分析结果表
Tab. 4 Table of sulfur isotope analysis results in the study area

序号	样品编号	测试对象	$\delta^{34}\text{S}$ 值(‰)	备注
1	DLH-1	黄铁矿	7.7	7-1 矿体
2	DLH-2	黄铁矿	6.8	7-1 矿体
3	DLH-3	黄铁矿	7	8-1 矿体
4	DLH-4	黄铁矿	7	8-1 矿体
5	DLH-5	黄铁矿	7.3	259-1 矿体
6	DLH-6	黄铁矿	6.3	259-1 矿体

结合侯明兰等(2004)研究的河西金矿分析可知,研究区各典型矿床硫同位素组成差异基本一致。

区域上中基性脉岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $5.3\%\sim 10.8\%$,胶东岩群 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $3.0\%\sim 6.8\%$,玲珑花岗岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $6.1\%\sim 10.1\%$,郭家岭花岗岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $2.7\%\sim 10.0\%$ 。可以看出(图 8),胶东金矿区不同地质体的硫同位素在组成上比较接近。特别是幔源中基性脉岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 也并不象地幔值($\delta^{34}\text{S}\approx 0$)那么低。因此,胶东金矿中硫化物的硫同位素组成与赋存主岩——花岗岩、伴生岩石——煌斑岩基本一致,

而普遍高于胶东岩群。

通过本次研究再次表明:大柳行金矿带与玲珑金矿区硫同位素组成相近,均一化程度较高,2 个成矿带成矿物理化学条件或硫的来源具有一致性,这通常被解释为以深部幔源硫为主、受壳源硫部分混染,这一结论再次验证了“两者具有基本一致的变化特征”的结论。

综上所述,研究区金矿床硫同位素组成基本一致;金矿的成矿流体可能是壳幔混合来源;金矿的硫与中基性脉岩或花岗岩体可能具有成分的继承关系;胶东岩群不太可能是大柳行金矿带的主要矿源层;蓬莱金矿区矿体的剥蚀深度与玲珑金矿区的非常接近,2 个地区金矿的成矿物源、成矿流体性质、成矿机制具有总体上的 consistency。

3.2.2 碳氢氧同位素

本次研究在大柳行金矿对矿体(脉)、围岩进行采样。主要采集了矿石样品,采样数量为 8 件,采样方法为打块法。实际取得的测试数据见表 5。

(1)碳同位素。系统采集测试了矿区含碳酸盐矿物的矿石样品 2 件(孔会磊等,2021;游军等,2018)。

2 件样品的 $\delta^{13}\text{CPDB}$ 来自 2 个矿体,分别为(7)-1 和(259)-1,数值总体分布区间为 $-5.2\%\sim -7\%$,平均为 -5.6% 。样品的 $\delta^{13}\text{CPDB}$ 值与前人

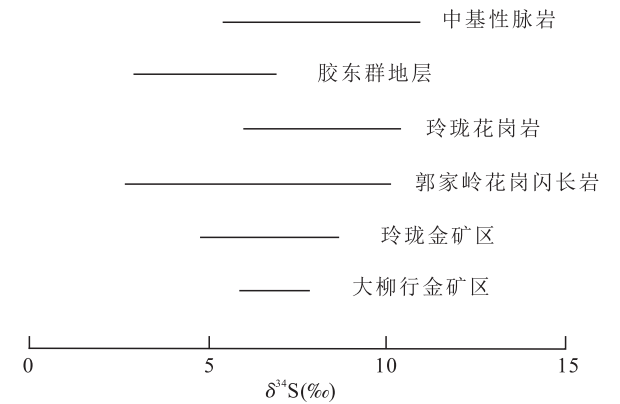


图 8 胶东金矿区矿石与岩石的硫同位素组成对比图
Fig. 8 Sulfur isotopic compositions of ores and rocks in Jiaodong gold deposit

表 5 矿区金矿碳氢氧同位素测定结果表
Tab. 5 Determination of carbon and oxygen isotopes in gold deposits in mining areas

序号	样品 编号	样品类型	测试结果			计算结果
			$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-SMOW}}(\text{‰})$
1	DLH-1	石英			-83.2	
2	DLH-2	石英			-79.2	
3	DLH-3	石英			-86.9	
4	DLH-4	石英			-86.6	
5	DLH-5	石英			-92.6	
6	DLH-6	石英			-92.9	
7	DLH-7	方解石	-5.2	12.8		0.9
8	DLH-8	方解石	-6	10.7		

注： $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-SMOW}}$ 计算公式采用 $\delta^{18}\text{O}_{\text{方解石}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 3.20 \times 10^6 \text{ T}^{-2} - 2.0$ ；金矿流体包裹体均一温度采用 $260\text{ }^\circ\text{C}$ 。

研究成果($\delta^{13}\text{CPDB}$ 主要集中在 $-1\text{‰} \sim -6\text{‰}$) 基本一致,表明研究区以大柳行金矿为代表的金矿床成矿流体来源可能是幔源混合少量壳源物质,这说明金矿流体在迁移过程中不断淬取流经的不同围岩中的成矿物质,共同构成含 Au 的成矿流体并在构造有利部位沉淀、富集成矿,也说明了区内金矿成矿的继承性和集束性。

由图 9 可见,大柳行矿床 2 个数据位于地幔多相体系或原生碳酸盐右侧位置,具壳幔混源特征,显示壳幔混合流体与赋矿围岩发生相互作用。大柳行矿床还有一个样品位于岩浆岩区以外,向 ^{18}O 增大的方向漂移,可能是由于流体与围岩发生了反应。

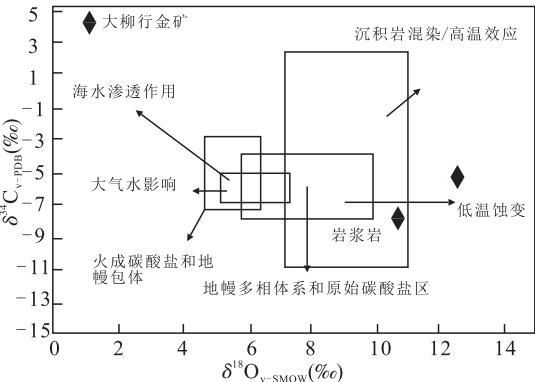


图 9 矿区典型金矿 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 关系图
(底图据杨立强等,2014 修改)

Fig. 9 Relationship between $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ of typical gold deposits in mining area

(2)氢同位素。本次工作采集测试了 6 件氢同位素样品,结果见表 5。 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 值为 $-92.9\text{‰} \sim -79.2\text{‰}$,

平均为 -86.9‰ 。

这一结果比 Sheppard 等提出的岩浆流体的氢同位素值区间($-80\text{‰} \sim -40\text{‰}$)要低。反映了大柳行矿床成矿流体来源可能并不限于岩浆流体,可能受到大气水的影响。

(3)氧同位素。本次测试了 2 件氧同位素样品,由表 5 中可知,氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值总体为 $+10.7\text{‰} \sim +12.8\text{‰}$,平均为 11.8‰ 。

将大柳行金矿矿石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值与研究区其他金矿对比,结果基本一致。大柳行金矿流体中的氧同位素值反映出形成矿石的流体为再平衡岩浆水或岩浆水($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值 $+5.5\text{‰} \sim +9.5\text{‰}$),并混合有大气降水(图 10)。

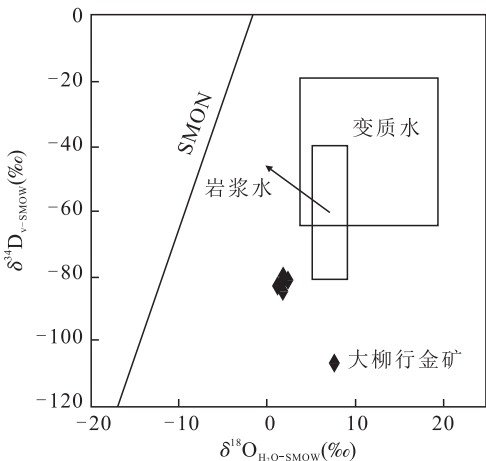


图 10 研究区典型金矿 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-SMOW}}$ 图
(底图据孙丰月等,2015 修改)

Fig. 10 $\delta\text{D}_{\text{SMOW}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O-SMOW}}$ diagram of a typical gold deposit in the study area

从碳氢氧同位素分析结果来看,研究区金矿床的碳氢氧同位素数值差别不大,推断成矿流体主要为地幔来源,混合有大气降水,具壳幔混源特征。

4 结论

(1)大柳行金矿床可划分为3个成矿阶段。其中,第二阶段中期石英-多金属硫化物阶段为主要成矿阶段。

(2)大柳行金矿床含Au石英脉石英中由于Ⅱ型和Ⅲ型原生流体包裹体常同时存在,具有富H₂O、富CO₂流体特征。

(3)大柳行金矿床成矿流体包裹体均一温度集中于240~340℃,成矿流体包裹体盐度在3%~12%NaCl,流体包裹体密度主要集中在0.68~0.96 g/cm³,成矿深部为8.4~10.6 km,成矿流体属于低盐度、低密度、中低温、中深成矿床。

(4)根据硫、氢、氧、碳同位素特征,成矿流体为大气水和岩浆水的混合物,主要为地幔来源,混合有大气降水,具壳幔混源特征。

参考文献(References):

翟明国,范宏瑞,杨进辉,等. 非造山带型金矿-胶东型金矿的陆内成矿作用[J]. 地学前缘,2004,11(1):85-98.

ZHAI Mingguo, FAN Hongrui, YANG Jinhui, et al. Non orogenic belt type gold deposits, Jiaodong gold deposit of intracontinental mineralization [J]. Geological frontiers, 2004, 11 (1): 85-98.

王世进,王来明,万愈生,等. 鲁东地区侵入岩形成时代和期次划分[J]. 山东国土资源,2009,25(12):8-21.

WANG Shijin, WANG Laiming, WAN Yusheng, et al. Age and stage division of intrusive rocks in eastern Shandong [J]. Shandong Land and Resources, 2009, 25 (12): 8-21.

翟裕生,王建平. 矿床学研究的历史观[J]. 地质学报, 2011,85(5):603-611.

ZHAI Yusheng, WANG Jianping. Historical view of ore deposit research [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85 (5): 603-611.

李兆龙,张连营,肖秀梅,等. 胶东马家窑金矿地质地球化学特征及矿床成因[J]. 地质找矿论丛,1990,5(3):36-48.

LI Zhaolong, ZHANG Lianying, XIAO Xiumei, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of

Majiyao gold deposit in Jiaodong [J]. Geological and Prospecting Research, 1990,5 (3): 36-48.

胡伟华,邱介玲,程鑫,等. 栖霞市马家窑金矿床成矿流体地球化学特征[J]. 山东国土资源,2008,24(1):26-29.

HU Weihua, QIU Jiuling, CHENG Xin, et al. Geochemical characteristics of ore-forming fluids of Majiyao gold deposit in Qixia City [J]. Shandong Land and Resources, 2008, 24 (1): 26-29.

邓军,翟裕生,杨立强,等. 构造演化与成矿系统动力学—以胶东金矿集中区为例[J]. 地学前缘,1999,6(2):315-323.

DENG Jun, ZHAI Yusheng, YANG Liqiang, et al. Tectonic evolution and metallogenic system dynamics: a case study of Jiaodong gold concentration area [J]. Geoscience Frontiers, 1999,6 (2): 315-323.

耿瑞. 山东省栖霞市山城金矿床地质特征及成因研究[D]. 长春:吉林大学,2012.

GENG Rui. Geological characteristics and genesis of Shancheng gold deposit in Qixia City, Shandong Province [D]. Changchun: Jilin University, 2012.

李洪奎,嵇传源,耿科,等. 胶东金矿成矿构造背景探讨[J]. 山东国土资源,2012,28(1):5-13.

LI Hongkui, ZHUO Chuanyuan, GENG Ke, et al. Discussion on metallogenic tectonic background of Jiaodong gold deposit [J]. Shandong Land and Resources, 2012, 28 (1): 5-13.

李洪奎,于学峰,嵇传源,等. 山东胶东金矿成矿理论体系[J]. 山东国土资源,2017,33(7):1-6.

LI Hongkui, YU Xuefeng, ZHUO Chuanyuan, et al. Metallogenic theory system of Jiaodong gold deposit in Shandong Province [J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33 (7): 1-6.

王佳良. 山东栖霞马家窑金矿床地质特征及矿化富集规律研究[D]. 长春:吉林大学,2013.

WANG Jialiang. Geological characteristics and mineralization enrichment regularity of Majiyao gold deposit in Qixia, Shandong [D]. Changchun: Jilin University, 2013.

丁正江,孙丰月,刘福来,等. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列[J]. 岩石学报,2015,31(10):3045-3080.

DING Zhengjiang, SUN Fengyue, LIU Fulai. et al. Mesozoic dynamic evolution and metallogenic series of main metal deposits in Jiaodong [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015,31 (10): 3045-3080.

卢焕章,范宏瑞,倪培,等. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社,2004:1-15.

- LU Huanzhang, FAN Hongrui, NI Pei, et al. Fluid inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004:1-15.
- 刘斌,沈昆. 流体包裹体热力学[M]. 北京:地质出版社, 1999:115-116.
- LIU Bin, SHEN Kun. Thermodynamics of fluid inclusion [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 115-116.
- 芮宗瑶,李荫清,王龙生,等. 从流体包裹体研究探讨金属矿床成矿条件[J]. 矿床地质,2003,22(1):13-23.
- RUI Zongyao, LI Yinqing, WANG Longsheng, et al. The metallogenic conditions of metal deposits are discussed from fluid inclusions [J]. Mineral Deposit, 2003, 22 (1): 13-23.
- 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力[J]. 中国地质, 2006,33(6):1181-1196.
- CHEN Yanjing. Orogenic deposits, metallogenic model and prospecting potential [J]. Geology of China, 2006, 33 (6): 1181-1196.
- 杨立强,邓军,王中亮,等. 胶东中生代金成矿系统[J]. 岩石学报,2014,30(09):2447-2467.
- YANG Liqiang, DENG Jun, WANG Zhongliang, et al. Mesozoic gold metallogenic system in Jiaodong [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014,30 (09): 2447-2467.
- 侯明兰,丁昕,蒋少涌. 胶东蓬莱河西金矿床铅、硫同位素地球化学特征[J]. 地球学报,2004,(02):145-150.
- HOU Minglan, DING Xin, JIANG Shaoyong. Lead and sulfur isotope geochemistry of the Hexi Gold Deposit in Penglai, Jiaodong [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, (02): 145-150.
- 申玉科,郭涛,吕志成,等. 山东招远大尹格庄金矿控矿构造解析与找矿预测[J]. 中国地质, 2019, 39(02):1-13.
- SHEN Yuke, GUO Tao, LÜ Zhicheng, et al. Ore controlling structure analysis and prospecting prediction of Dayingezhuang gold deposit in Zhaoyuan, Shandong [J]. Geology of China, 2019, 39 (02): 1-13.
- 薛建玲,李胜荣,孙文燕,等. 胶东邓格庄金矿地质特征与深部预测[J]. 中国地质,2012,39(01):183-194.
- XUE Jianling, LI Shengrong, SUN Wenyan, et al. Geological characteristics and deep prediction of dayingezhuang gold deposit in jiaodong [J]. Geology of China, 2012, 39 (01): 183-194.
- 孔会磊,栗亚芝,李金超,等. 东昆仑希望沟橄榄辉长岩的岩石成因:地球化学、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素制约[J]. 中国地质,2021,48(01):173-188.
- KONG Huilei, LI Yazhi, LI Jinchao, et al. Petrogenesis of wangwangou olivine gabbro in East Kunlun: constraints of geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotope [J]. Geology of China,2021, 48(01):173-188.
- 游军,唐永忠,罗婷,等. 陕西勉略宁地区赵家坪-苍社一带碳酸岩地质地球化学特征与成因探讨[J]. 科学技术与工程,2018,18(06):57-64.
- YOU Jun, TANG Yongzhong, LUO Ting, et al. Geological and geochemical characteristics and genesis of carbonate in Zhaojiapingcangshe area of mianlueing area, Shaanxi Province [J]. Science, Technology and Engineering, 2018,18 (06): 57-64.
- 李杰,宋明春,李世勇,等. 胶东大邓格金多金属矿床地质地球化学特征及意义[J]. 中国地质,2016,43(01): 221-237.
- LI Jie, SONG Mingchun, LI Shiyong, et al. Geological and geochemical characteristics and significance of Dadengge gold polymetallic deposit in Jiaodong [J]. Geology of China, 2016,43 (01): 221-237.
- 王成辉,王登红,黄凡,等. 中国金矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质,2012,39(05):1125-1142.
- WANG Chenghui, WANG Denghong, HUANG Fan, et al. Discussion on gold concentration area and its resource potential in China [J]. Geology of China, 2012, 39 (05): 1125-1142.
- 邵主助,彭振安,蔡明海,等. 贵州泥堡金矿成矿流体特征及其地质意义[J]. 科学技术与工程,2019,19(14):46-56.
- SHAO Zhuzhu, PENG Zhenan, CAI Minghai, et al. Characteristics of ore-forming fluid and its geological significance in Nibao gold deposit, Guizhou [J]. Science, Technology and Engineering, 2019,19 (14): 46-56.
- 邓碧平,刘万顺,曾东,等. 壳幔混染成矿机制的流体包裹体证据—以滇西老王寨金矿为例[J]. 科学技术与工程, 2015,15(23):15-20.
- DENG Biping, LIU Wanshun, ZENG Dong, et al. Fluid inclusion evidence of crust mantle mixing mineralization mechanism: a case study of Laowangzhai Gold Deposit in western Yunnan [J]. Science, Technology and Engineering, 2015,15 (23): 15-20.
- 陈国忠,龚全胜,梁志录,等. 西秦岭甘肃段特大型金矿床的地质地球化学特征及其成岩成矿年龄[J]. 西北地质, 2017,50(04):91-104.
- CHEN Guozhong, GONG Quansheng, LIANG Zhilu, et al. Geological and geochemical characteristics and diagenetic and metallogenic ages of the superlarge gold deposits in Gansu section of West Qinling [J]. Northwestern Geology, 2017,50 (04): 91-104.
- 安生婷,李培庚,杜生鹏,等. 青海柴北缘滩间山地区金龙

- 沟金矿成矿模式总结与找矿前景分析[J]. 西北地质, 2020, 53(04): 99-107.
- AN Shengting, LI Peigeng, DU Shengpeng, et al. Metallogenic model summary and prospecting prospect analysis of JINLONGGOU gold deposit in Tanjianshan area, northern Qaidam Basin, Qinghai [J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53 (04): 99-107.
- 刘洋, 张海东, 王金雅. 胶东地区夏甸金矿床构造蚀变带元素质量迁移与 Au 沉淀关系研究[J]. 西北地质, 2017, 50(04): 176-185.
- LIU Yang, ZHANG Haidong, WANG Jinya. Relationship between element mass migration and Au precipitation in the structural alteration zone of Xiadian gold deposit in Jiaodong area [J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50 (04): 176-185.
- 张国宾, 韩超, 杨言辰, 等. 完达山地块跃进山矽卡岩型铜金矿区酸性侵入岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 中国地质, 2018, 45(05): 977-991.
- ZHANG Guobin, HAN Chao, YANG Yanchen, et al. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and genesis of acidic intrusive rocks in Yuejinshanshan type copper gold deposit, Wandashan block [J]. *Geology of China*, 2018, 45 (05): 977-991.
- 柯昌辉, 王晓霞, 聂政融, 等. 西秦岭中川岩体年代学、元素地球化学、Nd-Hf 同位素组成及其与金成矿的关系[J]. 中国地质, 2020, 47(04): 1127-1154.
- KE Changhui, WANG Xiaoxia, NIE Zhengrong, et al. Geochronology, element geochemistry, Nd-Hf isotopic composition of Zhongchuan pluton in West Qinling and their relationship with gold mineralization [J]. *Geology of China*, 2020, 47 (04): 1127-1154.
- 肖凡, 班宜忠, 范飞鹏, 等. 福建政和县东际金(银)矿床黄铁矿微量元素和硫-铅同位素及锆石年龄研究[J]. 中国地质, 2020, 47(02): 375-393.
- XIAO Fan, BAN Yizhong, FAN Feipeng, et al. Study on trace elements, sulfur lead isotope and zircon age of pyrite in Dongji gold (silver) deposit, Zhenghe County, Fujian Province [J]. *Geology of China*, 2020, 47 (02): 375-393.
- 张运强, 李胜荣, 陈海燕, 等. 胶东金青顶金矿床成矿流体来源的黄铁矿微量元素及 He-Ar 同位素证据[J]. 中国地质, 2012, 39(01): 195-204.
- ZHANG Yunqiang, LI Shengrong, CHEN Haiyan, et al. Trace elements and He-Ar isotopic evidence of pyrite from Jinqingding Gold Deposit in Jiaodong [J]. *Geology of China*, 2012, 39 (01): 195-204.
- 李杰, 宋明春, 李世勇, 等. 胶东大邓格金多金属矿床地质地球化学特征及意义[J]. 中国地质, 2016, 43(01): 221-237.
- LI Jie, SONG Mingchun, LI Shiyong, et al. Geological and geochemical characteristics and significance of dadengge gold polymetallic deposit in Jiaodong [J]. *Geology of China*, 2016, 43 (01): 221-237.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1-5): 7-27.
- Chen G Y, Shao W, Sun D S. Genetic mineralogy of gold deposits in Jiaodong region with emphasis on gold prospecting [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1989, 125-234 (in Chinese with English abstract).
- Touret J. Equation of state of CO₂: application to carbonic inclusions [J]. *Bull Mineral*, 1979, 10(02): 577-583.
- Sterner S M. Synthetic fluid inclusions: X. Experimental determination of P-V-T-X properties in the CO₂-H₂O system to 6 kbar and 200 °C [J]. *Amer J Sci*, 1991, 29(01): 1-54.
- Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-H₂O solutions [J]. *Econ Geol*, 1988, 8 (03): 197-202.
- Shepherd T J, Rankin A H, Alderton D H M. A practical guide to fluid inclusion studies [J]. Glasgow, Scotland: Blackie & Sons Limited, 1985, 67(1): 63-142.