doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.014

胶东主要金矿类型流体包裹体特征对比及其对 成矿环境差异的指示

——以纱岭、旧店和辽上金矿床为例

王珊珊¹,鲍中义^{1*},戴长国²,刘向东¹,赵成乐¹,甘云³,李杰⁴ WANG Shanshan¹, BAO Zhongyi^{1*}, DAI Changguo², LIU Xiangdong¹, ZHAO Chengle¹, GAN Yun³, LI Jie⁴

1.山东省第六地质矿产勘查院,山东 威海 264209;

2.山东省核工业二七三地质大队,山东烟台 264000;

3.威海国盛黄金有限公司,山东 威海 264200;

4.河北地质大学地球科学学院,河北石家庄 050031

1.No.6 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Weihai 264209, Shandong, China;

2. Shandong Province Nuclear Industry Geological Group 273, Yantai 264000, Shandong, China

3. Weihai Guosheng Gold Co., Ltd., Weihai 264200, Shandong, China;

4. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China

摘要:胶东是中国最重要的金矿集区,破碎带蚀变岩型、石英脉型和黄铁矿碳酸盐脉型金矿是区内的主要矿化类型,前人对不同矿化类型成矿条件的差异性尚缺乏深入研究。对胶东 3 种矿化类型的代表性金矿床流体包裹体研究发现:不同矿化类型 金矿床主成矿期的流体包裹体具有相似的岩相学特征,均发育 H₂O-CO₂(Ⅱ-g型)、富 CO₂(Ⅲ_{CO2}型)和水溶液包裹体(Ⅰ-1型和Ⅱ-1型)4 种流体包裹体,均属于 CO₂-H₂O-NaCl±CH₄体系。不同矿化类型的流体特征也有差异,黄铁矿碳酸盐脉型金矿的流体包裹体以盐度和均一温度较高明显区别于其他矿化类型,石英脉型金矿流体包裹体以直径较大、三相包裹体占比略高,区别于破碎带蚀变岩型金矿。破碎带蚀变岩型和石英脉型金矿成矿流体整体属于中—低盐度、低密度流体,黄铁矿碳酸盐脉型金矿成矿流体属于中—高温、中—低盐度、低密度流体。对纱岭金矿床-1000~2000 m 海拔高程范围矿体中的流体包裹体研究表明,在垂深 2000 m 深度范围内,成矿流体除盐度有不明显的降低趋势外,其他特征高度一致,说明不同深度成矿流体具有一致的性质和物理化学条件。不同矿化类型和不同深度金矿成矿流体特征的总体一致性和部分差异性指示,胶东金矿是在统一的成矿构造-流体背景下,不同的局部环境中短时间集中爆发成矿的。

关键词:流体包裹体;胶东金矿;矿化类型;成矿环境;成矿流体

中图分类号:P618.51 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2022)06-1081-14

Wang S S, Bao Z Y, Dai C G, Liu X D, Zhao C L, Gan Y, Li J. Comparisons of the fluid inclusions in the main types of gold deposits in Jiaodong area and the indication on their metallogenic conditional differences: a case study of Shaling, Jiudian and Liaoshang gold deposits. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(6):1081–1094

Abstract: Jiaodong area is the most important gold ore-concentrating area in China. The altered-rock-type in fractured zone, quartzvein-type and pyrite-carbonate-vein-type gold deposits are the main mineralization types. Previous studies on the differences of

收稿日期:2021-06-26;修订日期:2021-12-05

资助项目:国家自然科学基金项目 NSFC-山东联合基金《胶东深部金矿断裂控矿机理》(批准号:U2006201)、山东省财政资金项目重点研发计划专项《深部金矿评价理论、方法与预测》(编号:2017CXGC1604)、山东省第六地质矿产勘查院科技攻关项目《焦家式金 矿》(编号:LYKY2020-01)、山东省地矿局深部找矿创新团队项目《胶东深部金矿资源评价与预测》(编号:KY2018002)

作者简介:王珊珊(1984-),女,硕士,高级工程师,从事地质矿产勘查及研究工作。E-mail:278290012@qq.com

* 通信作者:鲍中义(1979-),男,高级工程师,从事地质矿产勘查及研究工作。E-mail:Gybzy2005@126.com

mineralization conditions of different mineralization types are still lacking. Fluid inclusions of three typical gold deposits in Jiaodong are studied in this paper. The fluid inclusions of gold deposits of different mineralization types have similar petrographic characteristics in main mineralization stages. There are four types of fluid inclusions, including $H_2O-CO_2(II - g type)$, CO_2 -rich(III_{CO2} type) and aqueous solution inclusions(I-I type and II-I type), which belong to $CO_2-H_2O-NaCl\pm CH_4$ system. The fluid inclusions of pyrite-carbonate-vein-type gold deposit are obviously different from other types of mineralization due to higher salinity and homogenization temperature. The fluid inclusions of quartz-vein-type gold deposit are different from altered -rock-type gold deposit in fractured zone due to larger diameter and higher proportion of three-phase inclusions. The ore-forming fluid of altered-rock-type and quartz-vein-type gold deposit belongs to medium-low temperature, salinity and low density fluid as a whole, while the pyrite-carbonate-vein-type gold deposit belongs to medium-ligh temperature, medium-low salinity and low density fluids have the same characteristics except the salinity decrease in the vertical depth of 2000 m, indicating that ore -forming fluids at different depths have the same properties and physicochemical conditions. The general consistency and partial difference of the fluid characteristics of different gold deposits indicate that the Jiaodong gold deposit was formed in a short time under a unified metallogenic structure-fluid background in different local environments.

Key words: fluid inclusions; Jiaodong gold deposits; mineralized type; metallogenic condition; ore-forming fluid

胶东是中国最重要的金矿集区,已累计探明金 资源量逾5000 t,约占全国的1/3^[1-2]。胶东金矿的 矿化类型多样,其中焦家式破碎带蚀变岩型金矿的 资源量约占胶东金矿总量的90%,玲珑式石英脉型 金矿约占8%^[1-2],辽上式黄铁矿碳酸盐脉型金矿化 是近年深部找矿发现的新矿化类型^[1,3-4]。近年来, 胶东深部找矿取得重大突破,胶西北的三山岛、焦 家、玲珑、大尹格庄等金矿田控制的金矿体深度垂 深已达2000 m 左右,个别钻孔见矿深度近3000 m, 控制矿化蚀变带的深度近4000 m^[1,5-6]。

流体包裹体特征作为矿床学研究的重要手段 之一,20世纪70年代以来,越来越多地被应用于胶 东金矿成矿流体基本组成、成矿物理化学条件等研 究[7-10]。前人主要对蚀变岩型(包括三山岛、新城、 焦家、大尹格庄、大磨曲家、寺庄、台上等矿床)和石 英脉型金矿床(包括玲珑、乳山、邓格庄、三甲、胡八 庄、石城等矿床)的成矿流体开展了大量研究,取得 了丰硕的研究成果[11-27],对蚀变岩型金矿纵深 4000 m范围的成矿流体特征[28-29]和黄铁矿碳酸盐脉型 金矿的成矿流体^[30]也开展了相应研究。以往研究 绝大部分是针对单一或几个同类型金矿的研究,缺 乏对不同矿化类型金矿床的详细对比,制约了对胶 东金矿成矿物理化学条件或成矿环境的综合理解, 导致对不同类型矿床成因的解释众说纷纭。本文 选取纱岭、旧店和辽上3种不同矿化类型的代表性 金矿床进行流体包裹体特征观察和成矿温压条件 对比,并对纱岭矿区-1000~-2000 m 高程范围的流 体特征变化情况进行分析,为区域成矿流体特征的综合研究提供新信息,对深化研究胶东金矿成矿物理化 学条件乃至矿床成因等具有重要意义。

1 区域地质概况和主要金矿类型

1.1 地质背景

胶东金矿集中区位于华北克拉通东南缘与大 别-苏鲁造山带东北段的结合位置,由隶属华北克 拉通的胶北隆起、胶莱盆地和隶属大别-苏鲁造山 带的威海隆起组成。区内分布有胶西北、栖蓬福、 牟乳3个二级矿集区^[5,31-32](图1)。

胶北隆起由前寒武纪基底变质岩系组成^[34],主 要为太古宙花岗绿岩带(包括中太古代唐家庄岩 群、新太古代胶东岩群、新太古代 TTG 质花岗片麻 岩套和中—新太古代基性—超基性岩组合)和古— 新元古代变质地层(包括以高铝片岩、大理岩和石墨 变粒岩为代表的荆山群、粉子山群和中元古代以变质 碎屑岩为主的芝罘群及新元古代浅变质的蓬莱群)。

威海隆起前寒武纪变质岩系主要由新元古代 含超高压榴辉岩的花岗质片麻岩(荣成片麻岩套) 组成,含少量古元古代变质表壳岩(胶南表壳岩)和 中元古代基性—超基性岩组合。

胶莱盆地为白垩纪伸展盆地,由3个构造层组 成:下部为由绿色、杂色河湖相碎屑岩系组成的早 白垩世早期莱阳群,中部为由基性、中性和酸性火 山岩组成的早白垩世中晚期青山群,上部为由红色 河湖相碎屑岩系组成的晚白垩世—古新世王氏群。



图 1 胶东地区区域地质和金矿分布简图(据参考文献[32-33]修改) Fig. 1 Diagram of regional geology and gold deposits distribution in Jiaodong area

胶东地区中生代岩浆活动广泛发育,表现为胶 北和威海隆起区中的大量花岗岩类侵入岩和中基 性一酸性脉岩及胶莱盆地中的火山岩。按照成因、 形成时代和岩浆演化特点,中生代花岗岩类侵入岩 可分为三叠纪宁津所型正长岩、槎山型正长花岗 岩,侏罗纪玲珑型花岗岩、文登型花岗岩和垛崮山 型花岗闪长岩,白垩纪郭家岭型花岗闪长岩、伟德 山型花岗岩、雨山型花岗闪长斑岩和崂山型花岗 岩。按照形成时间、岩石类型和组合特征,脉岩被 划分为玲珑-招风顶脉岩带、巨山-龙门口脉岩带和 崂山-大珠山脉岩带。

胶东地区断裂构造发育,主要的一组断裂为 NE—NNE 走向,其次为近 EW—NEE 走向断裂。 EW 向断裂地表出露较零星,连续性较差。华北克 拉通(胶北隆起)和大别-苏鲁造山带(威海隆起)的 结合带被 NE 向断裂和中生代花岗岩叠加,大致以 五莲-青岛-烟台断裂为界。胶东金矿主要受 NNE—NE向拆离断层控制,自西向东依次为三山 岛断裂带、焦家断裂带、招远-平度断裂带、西林断 裂带和金牛山断裂带。

1.2 主要金矿化类型

胶东地区传统的金矿化类型为破碎带蚀变岩型(焦家式)和石英脉型(玲珑式)。后来相继发现和提出邓格庄式硫化物石英型、河西式破碎带石英网脉带型、蓬家夼式盆缘断裂角砾岩型、发云夼式蚀变砾岩型、杜家崖式层间滑动构造带型、辽上式黄铁矿碳酸盐脉型等金矿化类型^[1,3,5,35-36]。值得注意的是,在中生代盆地边缘成矿系统中,发现并评价了辽上特大型黄铁矿碳酸盐脉型(辽上式)金矿床,使辽上式金矿成为胶东地区继焦家式和玲珑式之外的另一种重要金矿类型。

焦家式破碎带蚀变岩型金矿,主要产出于胶北 隆起区内,赋存于规模较大的区域性断裂构造带 中,重要的断裂成矿带有三山岛、焦家和招平断裂, 以产出大型超大型矿床而著名。控矿断裂一般为 区域性伸展构造,发育宽大的构造破碎带,总体走 向 NE 向,沿走向常呈"S"形摆动,倾角总体较缓, 呈上陡下缓的铲式特征(图 2)。围岩蚀变以强烈的 钾化、黄铁绢英岩化为主。矿石主要金属矿物为黄 铁矿,次要金属矿物为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿;主 要非金属矿物有石英、绢云母,次要矿物有长石、方 解石。一般分为4个成矿阶段:黄铁矿-石英阶段 (Ⅰ)、金-石英-黄铁矿阶段(Ⅱ)、金-石英-多金属 硫化物阶段(Ⅲ)和石英-碳酸盐阶段(Ⅳ)^[39],Ⅱ、 Ⅲ阶段是金的主要成矿阶段。

玲珑式石英脉型金矿与焦家式破碎带蚀变岩 型金矿最大的区别在于,控矿断裂的规模均较小, 矿化连续性也较差,但金矿品位较高。石英脉型金 矿床主要分布于招远市东北部的玲珑和平度市旧 店一带(图3),此外蓬莱东南部地区也成片出露。 矿床规模一般为中、小型,个别达大型以上。矿床 产于焦家式金矿控矿断裂下盘的玲珑型和郭家岭 型花岗岩中的次级断裂、裂隙内。石英脉的倾角较 陡,一般大于60°。围岩蚀变以黄铁绢英岩化为主, 其次为碳酸盐化、绿泥石化等。矿石矿物为自然金 及与黄铁矿和黄铜矿相关的银金矿,局部有少量的 黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿和闪锌矿。成矿阶段的 划分与破碎带蚀变岩型金矿相同。

辽上式黄铁矿碳酸盐脉型金矿主要分布于乳

山市西北部的郭城一崖子一带,矿床受牟平-即墨 断裂带与郭城断裂之间的次级裂隙构造控制,控矿 断裂呈铲式阶梯状和舒缓波状展布,矿体产于断裂 深部倾角明显变缓处(图4)。围岩主要发育黄铁矿 化、硅化,其次为绢云母化、绿泥石化、碳酸岩化等 蚀变。矿石中金属矿物主要为黄铁矿,含少量黄铜 矿、方铅矿、磁黄铁矿等;非金属矿物主要有石英、 钾长石、斜长石、方解石、白云石、透辉石等。分为3 个成矿阶段:金-黄铁矿-白云石阶段(Ⅰ)、金-白云 石-多金属硫化物阶段(Ⅱ)和方解石-石英阶段 (Ⅲ),Ⅰ、Ⅱ阶段为主要成矿阶段^[3,36,41]。

2 流体包裹体测试方法和结果

2.1 样品采集和测试方法

流体包裹体测试样品分别取自胶东破碎带蚀 变岩型、石英脉型和黄铁矿碳酸岩型金矿的代表性 矿床——纱岭、旧店和辽上金矿床,对主成矿阶段 热液石英或白云石矿物进行了流体包裹体岩相学 观察、显微测温和成分分析。所取样品的矿石类 型、样品岩性和采样位置见表 1 和图版 I。

为系统研究垂向范围内主成矿阶段成矿流体 性质及演化特征,选择纱岭矿区的 I-2 号主矿体, 采集了 320、256 两条勘探线上 6 个钻孔中-1000~ -2000 m标高间的矿石样品,采样位置和取样照片 分别见表 2 和图版 I。



图 2 焦家金矿床 112 线地质剖面示意图(据参考文献[37-38]修改) Fig. 2 No.112 exploration line cross-section of Jiaojia gold deposit





5—产状;6—断裂带;7—地质界线;8—竖井;9—矿脉及其变化;10—村庄

测试分析在自然资源部金矿成矿过程与资源 利用重点实验室完成。流体包裹体测温分析方法 是根据 Roedder^[42]、Touret^[43]、Vanden 等^[44]提出的



图 4 辽上金矿床 12 线地质剖面示意图(据参考文献[3-4]修改) Fig. 4 No.12 exploration line cross-section of Liaoshang gold deposit

方法。首先磨制双面抛光薄片,进行流体包裹体岩 相学观察,详细记录流体包裹体所含的相、包裹体 形态、大小、产状、分布等特征。选择具有代表性、 个体较大的包裹体进行显微测温,使用仪器为英国 产 Linkam THMS600 冷热台。用液氮作为冷却剂, 并通过测定人工合成纯水包裹体的冰点(0℃)和均 一温度(374.1℃)、CO₂包裹体的熔点(-56.6℃),对 冷热台进行校正。在低于室温时的精度为±0.2℃, 在高于 200℃时的精度为 5℃。

激光拉曼光谱分析选择代表性气液包裹体和 含 CO₂三相包裹体使用 Renishwinvia 型激光共焦显 微拉曼光谱仪,选用 532 nm 激光器,光栅 1800 I/nm(vis),狭缝 20 μm,50 倍长焦距物镜。测试前 采用单晶硅片对光谱仪进行校正,确保硅的拉曼特 征峰在 520.5 cm⁻¹,特征峰偏移小于 0.2 cm⁻¹。测试 主要采用 Static 模式(部分采用 Extended 模式以获 得更大范围的谱图), Standard 共焦,激光功率 10%,曝光时间1s,重复测试 50 次。整个测试在室温

Table 1 Samples schedule of fluid inclusions from Shaling, Jiudian and Liaoshang gold deposits								
矿床名称	矿石类型	主成矿阶段	样品编号	围岩蚀变	样品描述	取样位置		
纱岭	破碎蚀变岩型	金石英黄铁矿阶段	17875	绢英岩化、黄铁矿化	黄铁绢英岩化碎裂岩	320ZK722 钻孔		
旧店	石英脉型	金石英多金属硫化物阶段	17S32	硅化、黄铁矿化	黄铁矿化石英脉	4 中段		
辽上	黄铁矿碳酸盐脉型	! 金-黄铁矿-白云石阶段	17S24	碳酸盐化、黄铁矿化	黄铁矿化碳酸盐脉	+31 m 中段		

表 1 纱岭、旧店和辽上金矿床流体包裹体研究样品特征 Samples schedule of fluid inclusions from Shaling. Jiudian and Liaoshang gold deposi

图版 I Plate I



a~i.流体包裹体取样标本照片,样品编号:a-17S75;b-17S32;c-17S24;d-SL-1;e-SL-18;f-SL-19;g-SL-2;h-SL-3;i-SL-5。a.黄铁绢英岩化碎裂岩;b.黄铁矿化石英脉;c.黄铁矿化碳酸盐脉;d.黄铁绢英岩化碎裂岩;e.黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩;f.黄铁绢英岩化花岗岩;g.黄铁绢英岩化花岗岩;h.黄铁绢英岩化花岗岩

(23℃)和常压下完成。数据处理采用 WIRE4.3 软件。

2.2 不同类型金矿床流体包裹体地球化学特征

2.2.1 流体包裹体岩相学特征

进行流体包裹体测试的矿物包括纱岭和旧店 金矿床成矿阶段黄铁绢英岩化碎裂岩和黄铁矿化 石英脉矿石中的石英,以及辽上金矿床主成矿期黄 铁矿化碳酸盐脉型矿石中的白云石。 测试的大部分流体包裹体颜色为无色透明,少 量富 CO₂或有机气体的包裹体呈棕黑色。包裹体 形态总体上分为规则和不规则两大类,前者以似圆 形、椭圆形、负晶形为主,后者主要为长条状、月状、 三角形、勺形等。纱岭和辽上金矿床的流体包裹体 偏小,大部分包裹体直径小于 10 μm,主要集中在 2~7 μm,个别包裹体较大,直径可达 12 μm,而旧店 金矿床的流体包裹体较前两者偏大,直径大小介于

表 2 纱岭矿区不同深部流体包裹体特征 Table 2 Samples schedule of fluid inclusions at

different depth from Shaling deposit

样品 编号	钻孔编号	岩性描述	取样位置 (垂深/m)	品位 /10 ⁻⁶	勘探线 编号
SL-1	ZK722	黄铁绢英岩化碎裂岩	-1205	3.29	320
SL-18	ZK744	黄铁绢英岩化花岗 质碎裂岩	-1588	5.89	320
SL-19	ZK740	黄铁绢英岩化花岗岩	¦ −1883	14.31	320
SL-2	ZK704	黄铁绢英岩化碎裂岩	[⊨] −1114	1.10	256
SL-3	ZK766	黄铁绢英岩化碎裂岩	¹ −1488	3.00	256
SL-5	ZK752	黄铁绢英岩化碎裂岩	-1693	4.00	256

4~17 μm 之间,普遍集中在 7~12 μm。

流体包裹体中的物质均具有气态和液态2种相态,在室温环境下可见单一相态包裹体、两相包裹体和富 CO₂三相包裹体。根据室温下流体包裹体的各相态成分、比例及组合关系,将流体包裹体分为3种类型,细分为4个亚类(表3)。

(1)单相包裹体(I型)

该类包裹体在室温下只存在一种相态,根据相态可将其进一步分为纯液相包裹体(Ⅰ-1型)和纯 气相包裹体(Ⅰ-g型)(图版Ⅱ)。纯液相包裹体 (Ⅰ-1型)含量较多,呈无色透明,液相成分为盐水 溶液、液态水;纯气相包裹体(Ⅰ-g型)主成矿期很 少见,在成矿早期较发育,颜色较暗,气相成分主要 为气态 CO,及少量 CH₄。

(2)两相包裹体(Ⅱ型)

该类包裹体室温下可见 2 种相态,多以气相和 液相为主,气相成分为 H₂O、CO₂或 CH₄等,液相成 分主要为盐水溶液。根据气相物质成分可进一步 划分为Ⅱ -1 型和Ⅱ-g 型包裹体(图版Ⅱ)。

I 1型包裹体在室温下由水溶液相(L_{H20})及 气相(V_{H20})两相组成,气液比较低,一般为 10%~ 35%。包裹体大小变化较大,一般 5~15 μm,形态 主要为椭圆形、负晶形、菱形、不规则四边形等,成 群或条带状分布。气相一般呈无色透明圆形,在包 裹体较小的情况下呈现为一个小亮点,是胶东金矿 最常见的包裹体类型。

Ⅱ-g型包裹体室温下主要由气相 CO₂(V_{CO2}) 及 H₂O 溶液(L_{H,0})两相构成,包裹体大小多为

表 3 不同矿化类型流体包裹体岩相学特征

 Table 3
 Petrographic characteristics of fluid inclusions

 in different mineralization-type deposits

类型	亚类	成分	所占比例
单相包裹体 (【刊)	纯液相包裹 体(Ⅰ-1型)	盐水溶液	纱岭 20% 旧店 15% 辽上 15%
(1 ±)	纯气相包裹 体(Ⅰ-g型)	气相 CO ₂ ±CH ₄	少量
两相包裹体	两相包裹体 (Ⅱ-1型)	盐水溶液、 气态 H ₂ O	纱岭 25% 旧店 15% 辽上 25%
(Ⅱ型)	型) 两相包裹体 (Ⅱ-g型)	盐水溶液、 气态 CO ₂ ± H ₂ O±CH ₄	纱岭 30% 旧店 40% 辽上 45%
三相包裹体 (Ⅲ型)	富 CO₂三 相包裹体 (Ⅲ _{CO2} 型)	盐水溶液、 液相 CO ₂ 、 气相 CO ₂ ±CH ₄	纱岭 25% 旧店 30% 辽上 15%

5~12 μm,形态为椭圆形、负晶形、不规则四边形等, 成群分布或孤立分布。气相一般呈浅暗色椭圆形, 与液相的界线为一黑色圆圈。该类包裹体是胶东 金矿的常见类型。

(3)三相包裹体(Ⅲ型)

该类包裹体主要为富 CO₂三相包裹体(Π_{co_2} 型)(图2),室温下通常由气相和液相(V_{co_2} 、 L_{co_2} 和 $L_{H_{2O}}$)组成,由外至内相态依次为液相盐水溶液/液相 CO₂笼合物、气相 CO₂,一般 CO₂气液两相大小通常在 5~12 µm 之间,包裹体形态规则。气态和液态 CO₂占包裹体的 20%~50%,加热时,气相 CO₂先均一到液相 CO₂,得到部分均一温度(T_{hCO_2}),而后再均一到液相 H₂O,得到完全均一温度(T_h)。该类包裹体形态为椭圆形、负晶形、不规则四边形等,是成矿主阶段的主要包裹体类型。

2.2.2 流体包裹体的成因分类

各矿床主成矿阶段的石英和碳酸盐矿物内均 有不同类型和不同数量的流体包裹体组合。根据 成因可将各矿床流体包裹体分为原生、次生及假次 生包裹体3类,且以原生包裹体为主。

原生包裹体一般随机分布,个体较大,形状较规则(图版Ⅱ-c、d),与矿物生长结晶方向有关;次 生包裹体多数发育在寄主矿物的切穿裂隙或愈合 缝隙中,其大小、形态、充填度与原生包裹体相似
(图版Ⅱ-b),主要反映寄主矿物形成后的流体信息。假次生包裹体主要发育在愈合缝隙或没切穿寄主矿物的微裂隙中,由产生微小裂隙的寄主矿物
随着后期继续生长将该裂隙封闭而形成(图版Ⅱf),故形态与次生包裹体相似,而成分与原生包裹体
一致。本次全部选择原生包裹体进行测温及盐度、
密度测算。

2.2.3 流体包裹体测温

纱岭、旧店及辽上金矿床成矿主期富 CO₂的 CO₂-H₂O 型包裹体出现不同密度的两相、三相 CO₂-H₂O 型包裹体与水溶液型包裹体共存的现 象,其均一温度相近,反映流体在被捕获时可能有 "沸腾"(不混溶)现象发生^[7,39]。而对于从沸腾(不 混溶)流体中捕获的包裹体(如 H,O-CO,包裹 体),如果具有最小气相百分比的富液相包裹体和 具有最大气相百分比的富气相包裹体在大致相同 的温度分别均一到液相和气相,则它们的均一温度 就是形成温度^[45]。

对 3 个金矿床的原生 II -1 型、II -g 型及 III_{co}2型包裹体的 CO₂-H₂O 完全均一温度 Th 进行测试,结果(表 4)显示:纱岭矿区流体包裹体完全均一温度介于 179~367℃之间,主要集中在 250~300℃; 旧店矿区流体包裹体完全均一温度介于 160~320℃之间,主要集中在 220~300℃; 而辽上矿区流体包裹体完全均一温度介于 302~385℃之间,主要集中在 320~380℃(图 5)。由此可见,纱岭和旧店金矿床的成矿流体具有相近的成矿温度,为中—低温成矿流体;而辽上金矿床的流体的成矿温度明显较前两 者高,为中—高温成矿流体。



图版Ⅱ Plate Ⅱ

a~i.纱岭、旧店、辽上金矿床主成矿期主要流体包裹体特征。a.纱岭矿床石英中Ⅱ-g型包裹体;b.纱岭矿床石英中Ⅱ-g型、I-1型和Ⅱ-1型包裹体;c.纱岭矿床石英中Ⅲ_{CO2}型包裹体;d.旧店矿床石英中Ⅱ-g型包裹体;e.旧店矿床石英中 I-1型包裹体;f.旧店矿床石英中Ⅲ_{CO2}型和Ⅱ-g型包裹体;g.旧店矿床石英中Ⅱ-1型包裹体;h.辽上矿床白云石中 Ⅱ-g型包裹体;i.辽上矿床白云石中Ⅱ-1型包裹体

表 4 纱岭、旧店和辽上金矿床流体包裹体测温结果

Table 4 Temperature measurement results of fluid inclusions in the main

metallogenic epoch of Shaling, Jiudian and Liaoshang gold deposits

矿床	样品	包裹体	气相比例	大小	$T_{\rm mCO_2}$	$T_{\rm m,ice}$	$T_{\rm m\ cla}$	$T_{h CO_2}$	$T_{\rm h}$	盐度	密度
名称	编号	类型	/%	∕µm	⁄℃	∕°C	∕℃	⁄℃	∕℃	∕%NaCl	$/(g \cdot cm^{-3})$
4/5/JA 17875		∏ −1	15~35	5 ~ 10	-	11.5~-0.7	7		205~367	1.22~15.47	0.59~0.93
<i>थ्रुप</i> र 1/3/	1/3/3	$I\!I = g , I\!I\!I_{\rm CO2}$	10~35	4∼1 0	-57.6~-56.8		5.9~8.7	20.7~25.7	179~367	2.07~7.64	0.66~0.92
旧店	17832	$I\!I - g , I\!I I _{\rm CO2}$	10~45	5~17	-57.3~-56.8		4.5~9.5	28.5~31	160~320	1.63~9.69	0.75~0.93
辽上 17824	17804	Ш −1	25	6		-3.2			317	5.26	0.73
	1/524	$I\!I - g , I\!I I _{\rm CO2}$	10~35	4~8	-62.2~-56.8		1.2~7.8	27.1~30.1	302~385	4.32~14.22	0.66~0.84

注: T_{mCO_3} —CO₂固相熔化温度; $T_{m,ice}$ —冰点温度; $T_{m ch}$ —水合物分解温度; T_{hCO_3} —CO₂部分均一温度; T_h —完全均一温度

2.2.4 流体包裹体盐度

本文H₂O包裹体(Ⅱ -1 型)盐度根据 Hall 等^[46] 提出的H₂O-NaCl体系盐度-冰点公式计算得出:

 $W=1.78 T-0.0442 T^{2}+0.000557 T^{3}$ (1)

式中,W为 NaCl 的质量分数,T为冰点下降温 度(∞)。

H₂O-CO₂包裹体(Ⅱ-g型及Ⅲ_{co2}型)盐度通 过 Hall 等^[46]提出的 H₂O-CO₂公式计算得出:

 $W = 15.52022 - 1.02342 T - 0.05286 T^2$ (2)

式中,T为 CO₂笼合物消失温度(℃)。

采用上述计算方法,分别得出纱岭、旧店和辽 上金矿床的Ⅱ型和Ⅲ_{co2}型流体包裹体盐度。纱岭 矿区的包裹体盐度分布在 1.22% ~ 15.47% NaCl 之 间,平均4.87%,集中分布在 2.5% ~ 7% NaCl 之间; 旧店矿区的包裹体盐度分布在 1.63% ~ 9.69% NaCl 之间,平均4.61% NaCl,集中分布在 2.5% ~ 7.0% NaCl 之间;辽上矿区的包裹体盐度分布在 4.32% ~ 14.22% NaCl 之间,平均 9.72% NaCl,集中分布在 5.5%~11.5% NaCl之间(表4;图6)。纱岭和旧店 金矿床流体盐度大致一致,而辽上金矿床的盐度较 前两者高。流体盐度均属于中—低盐度流体。 2.2.5 密度

对 H₂O 包裹体(Ⅱ -1 型)和 H₂O-CO₂两相包 裹体(Ⅱ-g 型),当盐度在 1%~30% NaCl 之间时, 采用盐水溶液包裹体密度公式^[47],Bodnar^[48]得出:

$$\rho = A + Bt + Ct^2 \tag{3}$$

式中,*ρ* 为盐水溶液密度(g/cm³), *t* 为均一温 度(℃)。A、B、C 为盐度的函数。

A=0.993531+8.72147×10⁻³×s-2.43975×10⁻⁵× s^{2} ,B=7.11652×10⁻⁵-5.2208×10⁻⁵×s+1.26656×10⁻⁶× s^{2} ,C=-3.4997×10⁻⁶+2.12124×10⁻⁷×s-4.52318× 10^{-9} × s^{2} ₀

其中,s为盐度(%)。

对Ⅲ型 H₂O-CO₂三相包裹体密度,根据包裹体 CO₂的均一温度、部分均一温度和盐度,计算出 CO₂相密度。

CO2三相包裹体部分均一成液相 CO2时,采用





Fig. 5 Statistical histogram of the homogenization temperature measurement results of fluid inclusions in Shaling, Jiudian and Liaoshang gold deposits



Fig. 6 Statistical histogram of salinity measurement results of fluid inclusions in Shaling, Jiudian and Liaoshang gold deposits

Touret^[49]计算 CO₂密度公式:

 $\rho_1 = 0.4683 + 0.001441 \cdot (31.35 - t) + 0.1318 \cdot \sqrt[3]{31.35 - t}$ (4)

 CO_2 三相包裹体部分均一成气相 CO_2 时,采用 Toure^[49] 计算 CO_2 密度公式:

 $\rho_{\rm g} = 0.4683 + 0.001441 \cdot (31.35 - t) - 0.1318 \cdot \sqrt[3]{31.35 - t}$ (5)

式中, ρ_1 、 ρ_g 分别表示 CO₂液相、气相密度,t 为部分均一温度(℃)。

$$\rho = \varphi_{\rm CO_2} \cdot \rho_{\rm CO_2} + (1 - \varphi_{\rm CO_2}) \cdot \rho_{\rm aq} \tag{6}$$

式中, ρ 为流体总密度(g/cm^3), φ_{CO_2} 为 CO₂气 液均一时的 CO₂相的充填度, ρ_{CO_2} 为 CO₂气液均一 时 CO₂相密度(g/cm^3),由公式(4)(5)计算。

采用上述公式计算得出,纱岭矿床的流体包裹 体密度介于 $0.59 \sim 0.93$ g/cm³之间,主要集中在 $0.7 \sim 0.9$ g/cm³之间;旧店矿床的流体包裹体密度介于 $0.73 \sim 0.93$ g/cm³之间,主要集中在 $0.8 \sim 0.9$ g/cm³之间;辽上矿床的流体包裹体密度介于 $0.66 \sim 0.84$ g/cm³之间,主要集中在 $0.7 \sim 0.8$ g/cm³之间(表 4; 图 7)。3 个矿区的流体密度相近,均属于低密度流体。

2.2.6 流体包裹体成分

对两相包裹体(Ⅱ型)和三相包裹体(Ⅲ型)进 行的激光拉曼探针原位测试结果表明,气液两相包 裹体(Ⅱ-g型、Ⅱ-1型)液相成分主要为 H_2O ,气相 成分主要为 H_2O 或 CO_2 ,对应的拉曼光谱峰值分 別为3450~3460 cm⁻¹和1384~1390 cm⁻¹,少量 CH_4 对应的拉曼光谱峰值为2913~2919 cm⁻¹。 CO_2 三 相包裹体(Ⅲ_{co},型)外部液相主要成分为 H_2O ,内 部液相成分主要为 CO₂,最内部气相主要成分为 CO₂及少量 CH₄,对应的拉曼光谱峰值为 1384~ 1390 cm⁻¹和 2913~2919 cm⁻¹(图 8),这也与包裹体 岩相学研究和测温实验所得的结果一致,少量 CH₄ 的存在,造成部分包裹体的初熔温度值(-62.2~ -56.8℃)低于 CO₂三相点(-56.6℃)。此外,部分 包裹体气相成分也含有 H₂O,对应的峰值为 3450~ 3460 cm⁻¹。

可见,3个矿区的流体包裹体液相成分以H₂O 为主,气相整体成分均为CO₂±H₂O±CH₄,暂没有 检测到H₂S或N₂,可能是由于流体演化过程中减压 沸腾发生相分离作用,导致气相成分多种类型的出 现。成矿流体总体属于CO₂-H₂O-NaCl±CH₄体系。

2.3 不同深度流体包裹体地球化学特征

对纱岭矿区-1000~-2000 m 高程金矿体的主 成矿期石英中流体包裹体进行镜下岩相学观察和 测温(表5),将流体包裹体测试结果按不同标高进 行整理,对比研究矿床纵深方向的流体包裹体均一 温度、流体盐度、密度等的特征及变化(图9)。



图 7 纱岭、旧店和辽上金矿床流体包裹体密度统计图

Fig. 7 Statistical histogram of density measurement results of fluid inclusions in Shaling, Jiudian and Liaoshang gold deposits



图 8 不同类型包裹体激光拉曼图

Fig. 8 Laser Raman spectroscopy of fluid inclusions in different mineralization-type depost a— I 型:L_{H₂O}+V_{H₂O}包裹体;b—II -g 型:L_{H₂O}+V_{CO₂+CH₄}包裹体;c、d—II型:L_{H₂O}+V_{CO₂+CH₄}包裹体

在 $-1000 \sim -2000 \text{ m}$ 标高范围内,流体包裹体的 均一温度范围为 179 ~ 367 °C,主要集中在 220 ~ 300 °C;盐度范围为 0.41% ~ 15.74% NaCl,主要集中 在4% ~ 10% NaCl;密度范围为 0.58 ~ 0.95 g/cm³,主 要集中在 0.8 ~ 0.9 g/cm³。深部金矿流体包裹体特 征与前述不同矿化类型流体包裹体的测试结果大 致一致。不同标高比较而言,均一温度略有变化, 但略高和略低值呈相间跳跃性分布,没有形成系统 性变化规律(图 9-a);密度值基本保持一致(图 9c);盐度范围虽然相似,但略有变化,由浅部至深部 略呈降低趋势(图 9-b)。

3 讨 论

前人对胶东金矿流体包裹体的大量研究表明, 成矿流体为中温、低盐度的 CO₂-H₂O-NaCl±CH₄ 体系热液^[32],与本文的研究结果一致,前人对流体 包裹体特征、温度、盐度、密度的研究结果也与本文 一致。尽管前人和本文的研究显示,胶东不同金矿 化类型的流体包裹体特征总体一致,反映其形成于 统一的构造-流体成矿系统,但是不同矿化类型的 流体参数仍有差异。石英脉型金矿流体包裹体的 直径明显大于破碎带蚀变岩型和黄铁矿碳酸盐脉 型,黄铁矿碳酸盐脉型金矿中的两相包裹体(主要 为Ⅱ-g型)含量明显高于其他2种金矿化类型,石 英脉型金矿中三相包裹体占比较高;黄铁矿碳酸盐 脉型金矿的成矿流体温度明显高于其他类型,盐度 值高出约1倍。可以看出,黄铁矿碳酸盐脉型金矿 的流体包裹体特征与其他2种类型差异较明显,石 英脉型金矿除包裹体大小及包裹体类型与破碎带 蚀变岩型金矿略有差异外,二者的流体包裹体温 度、密度、成分等高度一致。前人对破碎带蚀变岩 型与石英脉型金矿流体包裹体的对比结果表明,前

× (L + + + + - + - +

	表 5 约岐金矿主成矿防技流体包裹体均一温度、流体盘度及密度
Table 5	The homogenization temperature, sality and density of fluid inclusions in the

main metallogenic	epoch of	f Shaling gold	d deposit
-------------------	----------	----------------	-----------

样且绝早	十两句重休米刑	均一温度/℃		盐度/% NaCl		密度/(g・cm ⁻³)	
竹中田明安	土女也委仲矢室 -	分布范围	主要集中	分布范围	主要集中	分布范围	主要集中
SL-1	Ⅱ-1型、Ⅱ-g型、Ⅲ _{CO2} 型	179~367	260~320	1.22~15.47	4.0~7.0	0.59~0.93	0.7~0.9
SL-18	Ⅱ-1型、Ⅱ-g型、Ⅲ _{CO2} 型	190~334	220~280	3.39~10.72	7.0~8.5	0.72~0.94	0.8~0.9
SL-19	Ⅱ-1型、Ⅱ-g型、Ⅲ _{CO2} 型	185~330	220~260	1.03~13.63	7.0~8.5	0.75~0.97	0.8~0.9
SL-2	Ⅱ-1型、Ⅱ-g型、Ⅲ _{CO2} 型	196~318	240~300	6.12~11.70	8.5~10	0.77~0.95	0.8~0.9
SL-3	Ⅱ-1型、Ⅱ-g型、Ⅲ _{CO} 型	180~313	220~300	3.55~12.85	5.5~10	0.76~0.98	0.8~0.9
SL-5	Ⅱ-1型、Ⅱ-g型、Ⅲ _{CO2} 型	183~330	220~280	0.41~12.85	7.0~8.5	0.73~0.95	0.8~0.9



和密度(c)随深部变化图解 Fig. 9 Variation diagrams of the homogenization

temperature(a),sality(b) and density(c) of fluid
inclusions in the deep part of Shaling mine

者的盐度小于后者^[49-50],且这种差异与成矿方式有 关,充填作用发生的时间短,只有成矿元素浓度高 (盐度大)的流体才能形成有效富集;而交代作用持 续时间长,成矿元素浓度低(盐度小)的流体也可有 效富集成矿。或者该差异与成矿地质条件有关,焦 家式金矿形成的深度略浅、构造空间较开放,受大 气降水影响大于石英脉型金矿。也有研究显示,由 胶北隆起(破碎带蚀变岩型金矿为主)到苏鲁超高 压变质带(石英脉型金矿为主)再到胶莱盆地北缘 (盆缘断裂角砾岩型),成矿温度和压力依次降低,可能反映了成矿作用深度由深变浅^[32]。

不同矿化类型流体包裹体特征的差异指示,其 在统一的成矿构造-流体背景下有不同的局部成矿 环境。黄铁矿碳酸盐脉型金矿的成矿流体温度高, 与附近同成矿期的强烈岩浆活动有关。在该类型 金矿(辽上金矿床)西侧的胶莱盆地中发育白垩纪 青山群火山活动,在其附近的基底隆起边缘发育伟 德山型的海阳花岗岩岩体,同时,强烈的岩浆活动 导致地幔部分熔融形成中基性岩浆并快速上 涌[37-38,40,51-52],因而在矿区发育大量白垩纪中—基 性岩脉,使该类型成矿期温度偏高。该类型金矿盐 度值高的原因,可能是其成矿位置接近胶莱盆地, 成矿流体受到高盐度盆地卤水的影响[32]。石英脉 型金矿与破碎带蚀变岩型金矿的主要差别是,前者 的流体包裹体直径大,CO,包裹体含量相对高。鉴 于岩浆热液矿床具有高 CO,特征¹⁹,笔者认为石英 脉型金矿中含有相对多的岩浆流体成分。这与前 人研究的石英脉型金矿流体包裹体的氢氧同位素 特征更接近岩浆水区[31,53-55]的认识一致。总体看, 由石英脉型到蚀变岩型再到黄铁矿碳酸盐脉型金 矿,流体包裹体中的岩浆水逐渐减少,大气水含量 逐渐增多。这种现象与三者的成矿局部环境不同 有关,石英脉型金矿赋存于规模不大的断裂、裂隙 中,而且主要产于赋存蚀变岩型金矿的区域较大断 裂下盘,成矿深度较大,因此受大气降水影响较小, 保留了较多的岩浆水特征。破碎带蚀变岩型金矿 赋存于规模较大的区域性断裂中,断裂与地表有一 定的连通,大气降水较多。黄铁矿碳酸盐脉型金矿 赋存于盆地边缘的基底断裂中,成矿深度较浅,受 盆地水影响较大,具有显著的大气降水特征。不同 金矿化类型中, H, O-CO, (Ⅱ-g型)、富CO, (ⅢCO₂型)和水溶液包裹体(Ⅰ-1型和Ⅱ-1型)共 存,而且均一温度一致,在岩相学观察时,一些视域 内同时出现不同类型、不同气液比的包裹体群。这 些证据指示,不同类型的金矿成矿流体在主成矿期 发生了流体的不混溶(相分离)或沸腾作用,而在低 于 400℃的低温热液环境下,蒸气相密度非常低,Au 难以大量分配进入蒸气相,且 Au 主要以氢硫化物 形式存在,在此条件下,热液相沸腾使流体中的 H₂S 和 CO, 移出进入蒸气, 造成 Au 的氢硫化物配合物 解离,导致金的最终沉淀[56-57]。

纱岭矿区-1000~-2000 m 标高范围内的流体 包裹体特征,与前人研究的-500 m 以浅的焦家、三 山岛等浅部金矿的流体包裹体特征一致[21,58]。纱 岭矿区在-1000~-2000 m标高,除盐度有不明显的 降低趋势外,其他特征高度一致,说明在 2000 m 深 部范围内流体包裹体特征随深度增加未发生明显 变化,深、浅部流体具有一致的性质和物理化学条 件。这与三山岛一带在纵深超过 4000 m 范围内具 有一致的成矿流体介质条件[15,28-29]的研究结果吻 合。纱岭矿区浅部矿体流体包裹体盐度稍偏高,可 能是受地表高浓度的盆地卤水沿断裂下渗影响所 致。深浅部金矿成矿流体特征的高度一致性,说明 成矿流体是在短时间内快速涌入断裂空间成矿的. 没有经过长期的、缓慢的流动和演化。这与前人大 量研究得出的胶东金矿在短时间内集中爆发成矿 的认识吻合[5,21-22,32,53,59]。可能由于压力震荡或瞬 变蒸气化,导致成矿流体快速充填裂隙,降温、降压 及相分离(沸腾),以及金的沉淀。由于成矿流体压 力受静水压力控制,使浅层和深层流体的压力差、 温度差对流体的影响可以忽略不计[10,15,60],深、浅部 流体特征差异不大。

4 结 论

(1)胶东破碎带蚀变岩型、石英脉型和黄铁矿 碳酸盐岩型金矿石的主成矿阶段均主要发育4种流 体包裹体:H₂O-CO₂(Ⅱ-g型)、富CO₂(Ⅲ_{CO2}型) 和水溶液包裹体(Ⅰ-1型和Ⅱ-1型)。破碎带蚀变 岩型和石英脉型金矿为中—低温、中—低盐度、低 密度流体,黄铁矿碳酸盐脉型金矿属中—高温、 中—低盐度、低密度流体,成矿流体均属于CO₂-H₂ O-NaCl±CH₄体系。

(2)不同矿化类型的流体特征有差异。黄铁矿 碳酸盐脉型金矿的流体包裹体以盐度和温度较高 明显区别于其他矿化类型,石英脉型金矿流体包裹 体以直径较大、三相包裹体占比略高区别于破碎带 蚀变岩型金矿。指示胶东金矿成矿流体在统一的 成矿构造-流体背景下有不同的局部成矿环境,黄 铁矿碳酸盐脉型金矿成矿深度浅,受强烈的岩浆活 动和高盐度盆地卤水影响明显;石英脉型金矿成矿 深度较深、成矿空间相对狭小。

(3) 纱岭矿区在垂深 2000 m 深度范围内, 流体 包裹体特征除盐度有不明显的降低趋势外, 其他高 度一致,说明成矿流体是在短时间内快速涌入断裂 空间成矿的,可能由于压力震荡或瞬变蒸气化导致 成矿流体快速充填裂隙,发生降温、降压及相分离 (沸腾),造成了金的沉淀。

致谢:山东省地质矿产勘查开发局首席专家宋 明春对本文进行了详细修改,在此致以诚挚的感谢。

参考文献

- [1] 宋英昕,宋明春,丁正江,等.胶东金矿集区深部找矿重要进展及成 矿特征[J].黄金科学技术,2017,25(3):4-18.
- [2] 宋明春,宋英昕,丁正江,等.胶东金矿床:基本特征和主要争议[J]. 黄金科学技术,2018,26(4):406-422.
- [3] 李国华, 丁正江, 宋明春, 等. 胶东新类型金矿——辽上黄铁矿碳酸盐脉型金矿[J]. 地球学报, 2017, 38(3): 423-429.
- [4] 王志新,焦秀美,丁正江,等.胶莱盆地东北缘辽上式金矿构造控矿 特征及找矿方向[J].黄金科学技术,2017,25(3):4-15.
- [5] 宋明春, 林少一, 杨立强, 等. 胶东金矿成矿模式[J]. 矿床地质, 2020, 39(2): 215-236.
- [6]于学峰,李大鹏,田京祥,等.山东金矿深部勘查进展与成矿理论创新[J].山东国土资源,2018,34(5):1-13.
- [7] 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-486.
- [8] 卢焕章.流体不混溶性和流体包裹体[J].岩石学报,2011,27(5): 1253-1261.
- [9] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2007, 23(9): 2085-2108.
- [10] 张德会.成矿作用地球化学[M].北京: 地质出版社,2015: 1-481.
- [11]周凤英,李兆麟.胶东台上金矿床矿物中包裹体研究[J].矿物学 报,1991,11(4):403-412.
- [12] 杨敏之.金矿床围岩蚀变带地球化学——以胶东金矿床为例[M].北 京:地质出版社,1998:1-120.
- [13] Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, et al. Ore –forming fluids associated with granite – hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China[J]. Mineralium Deposita, 2003, 38(6): 739–750.
- [14] Fan H R, Hu F F, Yang K F, et al. Gold ore –forming fluids and metallogeny in the Jiaodong Peninsula, eastern China[J].10th Biennial SGA Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, 2010: 219–221.
- [15] Hu F F, Fan H R, Jiang X H, et al. Fluid inclusions at different depths in the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, China [J]. Geofluids, 2013, 13: 528–541
- [16] Yang L Q, Deng J, Zhang J, et al. Decrepitation thermometry and compositions of fluid inclusions of the Damoqujia gold deposit, Jiaodong gold province, China: Implications for metallogeny and exploration[J].Journal of China University of Geosciences, 2008, 19 (4): 378–390.
- [17] Yang L Q, Deng J, Guo C Y, et al. Ore–Forming Fluid Characteristics of the Dayingezhuang Gold Deposit, Jiaodong Gold Province, China[J].Resource Geology, 2009, 59(2): 181–193.

- [18] Yang L Q, Deng J, Guo L N, et al. Origin and evolution of ore fluid, and gold-deposition processes at the giant Taishang gold deposit[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 585–602.
- [19] 卢焕章, Guha J, 方根保. 山东玲珑金矿的成矿流体特征[J]. 地球 化学, 1999, 28(5): 421-437.
- [20] 沈昆,胡受奚,孙景贵,等.山东招远大尹格庄金矿成矿流体特征[J].岩石学报,2000,16(4):542-550.
- [21] 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 等. 胶东中生代构造体制转折过程中流体演化和金的大规模成矿[J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1317-1328.
- [22] 毛景文,李厚民,王义天,等.地幔流体参与胶东金矿成矿作用的 氢氧碳硫同位素证据[J].地质学报,2005,79(6):839-857.
- [23] 刘育,杨立强,郭林楠,等.胶东大尹格庄金矿床成矿流体组成[J]. 岩石学报,2014,30(9):2507-17.
- [24] 陆丽娜, 范宏瑞, 胡芳芳. 胶西北新城金矿成矿流体与矿床成 因[J]. 矿床地质, 2011, 30(3): 522-532.
- [25] 卫清,范宏瑞,蓝廷广,等.胶东寺庄金矿床成因:流体包裹体与石 英溶解度证据[J].岩石学报,2015,31(4):1049-1062.
- [26] 郭林楠.胶东型金矿床成矿机理[D].中国地质大学(北京)博士学 位论文,2016.
- [27] 赵宏光,孙景贵,凌洪飞,等.胶东金矿成矿流体性质及其地质意义[J].地质与勘探,2005,41(5):27-33.
- [28] Wen B J, Fan H R, Hu F F, et al. Fluid evolution and ore genesis of the giant Sanshandao gold deposit, Jiaodong gold province, China: Constrains from geology, fluid inclusions and H – O – S – He – Ar isotopic compositions[J].Journal of Geochemical Exploration, 2016, 171: 96–112.
- [29] 姜晓辉,范宏瑞,胡芳芳,等.胶东三山岛金矿中深部成矿流体对 比及矿床成因[J].岩石学报,2011,27(5):1327-1340.
- [30] Li J J, Zhang P P, Li G H, et al. Formation of the Liaoshang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: Evidence from geochronology and geochemistry [J]. Geological Journal, 2020, 55: 5903–5913.
- [31] 宋明春,崔书学,伊丕厚,等.山东省胶西北金矿集中区深部大型-超大型金矿找矿与成矿模式[M].北京:地质出版社,2010:1-339.
- [32] 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(9):2447-2467.
- [33] Yang L Q, Guo L N, Wang Z L, et al. Timing and mechanism of gold mineralization at the Wang' ershan gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J].Ore Geology Reviews, 2017, 88: 491–510.
- [34] Li S Z, Zhao G C, Santosh M, et al. Structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton[J]. Precam-brian Research, 2012, 200/203: 59-73.
- [35] 宋明春,李三忠,伊丕厚,等.中国胶东焦家式金矿类型及其成矿 理论[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(1):87-104.
- [36] 纪攀,丁正江,李国华,等.胶东辽上特大型金矿床地质特征[J].山 东国土资源,2016: 32(6): 9-13.
- [37] 宋国政, 闫春明, 曹佳等. 胶东焦家成矿带超千米深部金矿勘查突 破及意义[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(3)::1-27.
- [38] 宋明春,徐军祥,等.大型-超大型矿床勘查方法与实践[M].北 京:地质出版社,2018:1-397.
- [39] 王燕,卢作祥.山东招掖金矿带焦家式金矿的矿床分带[J].地球

科学,1988,13(2):137-146.

- [40] 李波,文志民,段定群,等.旧店金矿床 12 号脉地质特征及深部矿体定位预测[J].黄金地质,2012,11(33):18-23.
- [41] 丁正江,孙丰月,赵财胜,等.山东胶莱盆地东北缘地区金矿成矿 系列[J].矿床地质,2010,29(增刊):919-920.
- [42] Roedder E. Fluid Inclusion, Review in Mineralogy [M]. Am. Mineralogical Society, 1984: 1–644.
- [43] Touret J L R.Fluids in metamorphic rocks[J].Lithos, 2001, 55: 1-25.
- [44] Van denKerkhof A M, Hein U F. Fluid inclusionpetrography [J]. Lithos, 2001, 55: 27–47.
- [45] 刘斌,沈昆.流体包裹体热力学[M].北京: 地质出版社, 1999: 1-290.
- [46] Hall D L.Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solution[J]. Econ Geology, 1988,83: 197–202.
- [47] Hass J L. Physical properties of the coexisting phases and thermochemical properties of the H₂O component in boiling NaCl solution[J].U S Geol.Surv.Bull., 1976, 1421A: 1–73.
- [48] Bodnar R J.A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and P-V-T-X properties of inclusion fluids[J].Econ.Geol., 1983, 78(3): 535-542.
- [49] Touret J.Equation of state of CO₂: application to carbonic inclusions[J]. Bulletin Mineralogic, 1979, 102: 577–583.
- [50] 张海泉.山东胶东地区焦家式金矿床中含金石英大脉流体包裹体的特征[J].地质通报,2005,24(5):456-461.
- [51] 宋明春,宋英昕,沈昆,等.胶东焦家深部金矿矿床地球化学特征 及有关问题讨论[J].地球化学,2013,42(3):274-289.
- [52] Ling W L, Duan R C, Xie X J, et al. Contrasting geochemistry of the Cretaceous volcanic suites in Shandong Province and its implications for the Mesozoic lower crust delamination in the eastern North China craton[J].Lithos, 2019, 113: 640–658.
- [53] 匡永生,庞崇进,罗震宇,等.胶东青山群基性火山岩的 Ar-Ar 年 代学和地球化学特征:对华北克拉通破坏过程的启示[J].岩石学 报,2012,28(4):1073-1091.
- [54] 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 等. 胶东中生代花岗岩及大型-超大型金 矿床形成的地球动力学环境[]]. 矿床地质, 2005, 24(4): 361-372.
- [55] Guo L N, Deng J, Yang L Q, et al. Gold deposition and resource potential of the Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula: Geochemical comparison of ore fluids [J]. Ore Geology Reviews, 2020, 120: 103–434.
- [56] 薛建玲, 庞振山, 李胜荣, 等. 胶东邓格庄金矿床成因: 地质年代学和同位素体系制约[]]. 岩石学报, 2019, 35(5): 1532-1550.
- [57] Saunders and Schoenly. Boiling, colloid nucleation and aggregation, and the genesis of bonanza Au – Ag ores of the Sleeper deposit, Nevada[J].Mineral Deposita,1995,30: 199–210.
- [58] Simon A C,Pettke T,Candela P A,et al.Gold partitioning in melt-vaporbrine systems[J].Geochim Cosmochim Acta, 2005,69: 3321-3335.
- [59] 李士先,刘长春,安郁宏,等.胶东金矿地质[M].北京: 地质出版社, 2007:129-160.
- [60] 苗来成,罗镇宽,黄佳展,等.山东招掖金矿带内花岗岩类侵入体 锆石 SHRIMP 研究及其意义[J].中国科学(D辑),1997,27(3): 207-213.
- [61] 张德会.热液成矿作用地球化学[M].北京: 地质出版社, 2020: 1-667.