

胶东蚀变岩型金矿金矿物微区地球化学特征^{*}

梁亚运¹ 刘学飞^{1**} 刘龙龙¹ 周勉¹ 李葵¹ 何碧²

LIANG YaYun¹, LIU XueFei^{1**}, LIU LongLong¹, ZHOU Mian¹, LI Yan¹ and HE Bi²

1. 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

2. 成都理工大学沉积地质研究院,成都 610059

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2015-02-02 收稿, 2015-05-31 改回.

Liang YY, Liu XF, Liu LL, Zhou M, Li Y and He B. 2015. The micro-geochemical characteristics of gold from 'altered fracture-type' gold deposit in Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11):3441–3454

Abstract Jiaodong gold concentrated area is one of the most important gold in China. There are two typical deposit types, such as 'altered fracture-type' and 'quartz vein-type', which host the mostly ore deposits in Jiaodong Peninsula. The Sanshandao and Xinli gold deposits, typical 'altered fracture-type' ore deposits, are located in northwestern Jiaodong Peninsula and both of them are controlled by Sanshandao-Cangsan fault. Gold is embodied as intergranular, fissure-filling and inclusion in gold-bearing minerals which are consisted of pyrite, galena, sphalerite and chalcopyrite. Various morphological types of gold grains were found in photomicrograph, which include schistic, ellipsoid, stumpy and slabby. Through back-scattered electron images (BSE) and secondary electron image of gold grains, we found a lot of cavities and pits in the surface and dark gray areas resulted from impurities containing in the that. The data of electronic microprobe analysis (EMPA) shows that the Au content is 63.34% ~ 72.54% with high Ag content (27.39% ~ 36.34%), which belong to electrum. The Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive Spectrum (SEM-EDS) micro-analysis of gold grains contain that the major elements is Au and Ag, and the trace elements include N (6.12% ~ 9.79%), O (1.89% ~ 6.18%), W (0.42% ~ 0.84%), P (6.32% ~ 10.38%), Fe (1.62% ~ 3.37%). Compared to the micro-analysis of gold grains from Linglong gold deposit, one of typical 'quartz vein-type' gold deposits in Jiaodong, both of them have the same elements such as Au, Ag, N, O and Fe, but the contents of N, O and Fe of gold grains in this article are less than Linglong gold deposit. We detected W in the micro-analysis of gold grains from Xinli and Sanshandao gold deposits without Linglong gold deposit. The low content of O indicates precipitation of Au occurs in reducing conditions and 'altered fracture-type' gold is stronger than 'quartz vein-type' gold deposits. N implied that small amount of meteoric water mixed in the ore fluids, and the fluids of 'altered fracture-type' are less admixed meteoric water than 'quartz vein-type'. P implied that there is mantle-derived fluid mixing. W is origin of primary magma fluid formed by early cretaceous magmatism and the precipitation of W and Au indicates the weak alkalic conditions. The analysis of combining micro-chemistry with H-O isotope implies the source of ore fluid of Jiaodong gold deposit is mixed kinds of origins. The Early-Cretaceous intermediate-basic dykes show similarity origin of metal to the gold ore. The $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ complex is as the most likely gold bisulfide complex for gold transport.

Key words Gold mineral; Mineralogy; Micro-chemistry; Ore fluid; Isotope; Jiaodong Peninsula

摘要 胶东半岛金矿集区是我国主要的产金地之一,其中“蚀变岩型”和“石英脉型”金矿为该区两个典型的矿床类型。位于胶东半岛西北部的三山岛-仓上断裂带发育两个典型的“蚀变岩型”金矿:三山岛金矿和新立金矿。这两个金矿区金矿物赋存状态以晶隙金、裂隙金和包裹金为主,呈片状、椭圆状、短柱状和板状形态赋存于载金矿物之中,载金矿物主要为黄铁矿,少量方铅矿、闪锌矿等硫化物。扫描电镜背散射(BSE)电子图像和二次电子图像发现,单个金颗粒表面具有明显的凹坑或凹

* 本文受国家自然科学基金项目(41230311、41172295、40872068)、国家科技支撑计划课题(2011BAB04B09)和高校基本科研业务费(5320095959708)联合资助。

第一作者简介:梁亚运,男,1990年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: liangyayun@cugb.edu.cn

** 通讯作者:刘学飞,男,1983年生,副教授,从事矿床学的研究,E-mail: lxf@cugb.edu.cn

槽,因内部填充杂质或反光而呈暗黑色区域。电子探针(EMPA)分析可得金矿物中 Au 含量为 63.34%~72.54%,含有较高的 Ag 含量(27.39%~36.34%),属于银金矿系列。银金矿单个颗粒微区能谱分析(SEM-EDS)显示,银金矿中除了 Au 和 Ag 外,还存在 N(6.12%~9.79%)、O(1.89%~6.18%)、W(0.42%~0.84%)、P(6.32%~10.38%)和 Fe(1.62%~3.37%)等元素。研究区银金矿与玲珑金矿(“石英脉型”金矿)金矿物微区元素对比分析发现,具有相同的 Au、Ag、N、O 和 Fe 元素,但是仅在研究区银金矿中发现 W 元素,并且所含 N、O 和 Fe 的含量远低于玲珑金矿床。研究区银金矿中低 O 含量反应金形成环境为还原环境,并且与“石英脉型”金矿形成环境相对比,还原性更高。N 元素的存在可能指示成矿流体中有大气降水混入,并且“蚀变岩型”金矿比“石英脉型”金矿混入量较少。P 可指示成矿流体中有慢源流体的加入。W 指示成矿流体可能源自早白垩世岩浆作用形成的初始岩浆流体。通过金矿物微区地球化学与成矿流体氢氧同位素综合分析可得,胶东金矿成矿流体为多源混合。成矿物质来源与早白垩世中-基性脉岩具有同源性,可能源自深部地幔。Au 运移过程中,主要以硫化物 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 的形式运移。

关键词 金矿物;矿物学;微区地球化学;成矿流体;同位素;胶东半岛

中图法分类号 P618.51

1 引言

在金矿床的研究中,矿石中金矿物的研究是其重要的研究内容之一。国内外学者已通过金矿物的形态学、矿物学和地球化学等各个方面来分析金的赋存状态、矿物形态和形成环境等特征,同时也为研究金矿床的形成过程提供了有力的证据(刘荣高和张哲儒,1996;郁云妹等,1997;Pettke *et al.*,1997;曾键年和范永香,2002;Bonev *et al.*,2002;Nakagawal *et al.*,2005;Larizzatti *et al.*,2008;Cabri *et al.*,2008;Litvinenko,2009;刘家军等,2010;邱昆峰和杨立强,2011;Deng *et al.*,2014)。胶东半岛金矿集区发育着两类典型的矿床:“蚀变岩型”和“石英脉型”金矿,对该两类金矿床的特征及成因已有大量研究(邓军等,2000;Fan *et al.*,2003;王庆飞等,2007;Deng *et al.*,2008,2015a,b;Wang *et al.*,2010a,b,2014;Yang *et al.*,2014;Deng and Wang,2015;Wen *et al.*,2015)。其中,已有学者对该区部分金矿床中金矿物的矿物学特征开展了一定的研究工作(李铁公,1985;王微和范国传,1998;张志臣和曲少翠,2006;邓军等,2007;刘建朝等,2010;Yang *et al.*,2011)。但是,胶东地区金矿中金矿物的研究尚缺乏地球化学以及金矿物微区的探索。Yang *et al.*(2013)首次研究了典型“石英脉型”金矿(玲珑金矿)中单个金颗粒微区地球化学特征,为该地区“石英脉型”金矿中金矿物的研究提供了新的认识,对该类型金矿的成因机制具有重要指导意义。

位于胶东半岛西部的三山岛-仓上断裂带中发育有典型的“蚀变岩型”金矿(三山岛、新立和仓上金矿),三山岛金矿为胶东半岛超大型金矿,已有矿床年代学、矿石流体特征、成矿物质来源以及成矿动力背景等的研究。部分学者也对新立金矿矿石流体特征和成矿物质来源开展了相关研究(Fan *et al.*,2003;徐九华等,2005;姜晓辉等,2011;Li *et al.*,2013;Hu *et al.*,2013;Deng *et al.*,2015a)。但是,对于该区矿石中金矿物矿物学和矿物地球化学的研究较为薄弱。本次研究选择三山岛和新立大型金矿为研究对象,借助于扫描电镜-能谱分

析(SEM-EDS)和电子探针分析(EMPA)开展对金矿物微区的详细研究,并与玲珑金矿金颗粒微区地球化学特征开展对比;详细的描述“蚀变岩型”金矿床中金矿物的矿物学特征,并重点研究单个金矿物中微区地球化学特征和指示意义,为胶东地区“蚀变岩型”金矿床成因研究提供新的证据。

2 区域地质特征

胶东半岛金矿集区是我国主要的产金地区之一,其黄金储量约占全国的25%,大约有159个矿床,包括39个大-中型矿床和120个小型矿床(李士先等,2007;Wang *et al.*,2010;Guo *et al.*,2013b;Goldfarb and Santosh,2014;Deng and Wang,2015;Yang *et al.*,2015a)。胶东半岛位于华北克拉通东缘、苏鲁超高压变质带中段西侧和郯庐断裂以东的盆-岭半岛区,该区主要发育NE、NNE、NW和EW向构造,其中NE、NNE构造被认为是左行走滑郯庐断裂的次级断裂(邓军等,2005,2015;Wang *et al.*,2010;杨立强等,2014)。胶东半岛沿着五莲-米山断裂被分为两部分,即西北部的胶北地块和东南部的苏鲁造山带(如图1a)。胶北地块位于华北板块东缘,同时是古元古代“胶-辽-冀”活动带的南端终点地带(Zhao *et al.*,2005;Tan *et al.*,2012;Goldfarb and Santosh,2014)。胶北地块包括北部的胶北隆起和南部的胶莱盆地,主要由前寒武纪基底和中生代火山岩组成(Deng *et al.*,2015a)。苏鲁造山带是大别-苏鲁变质带的东段,为扬子板块与华北板块在早中生代时期碰撞形成的,由晚元古代的花岗质片麻岩、榴辉岩和中生代的岩体组成(张华锋等,2006;Goldfarb and Santosh,2014)。

胶东半岛前寒武纪地层主要由太古宙的麻粒岩、角闪岩、TTG(石英闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)片麻岩以及绿片岩等(胶东群),古元古代的片麻岩、片岩、大理岩、硅质岩和大理岩(荆山群、粉子山群)和新元古代的板岩、大理岩和千枚岩等(蓬莱群)组成(陈光远等,1993;Wang *et al.*,1998;杨忠芳,1998;Yang *et al.*,2015b)。侵入前寒武纪地层的中生代岩体主要集中划分为四期,即晚三叠世-晚侏罗

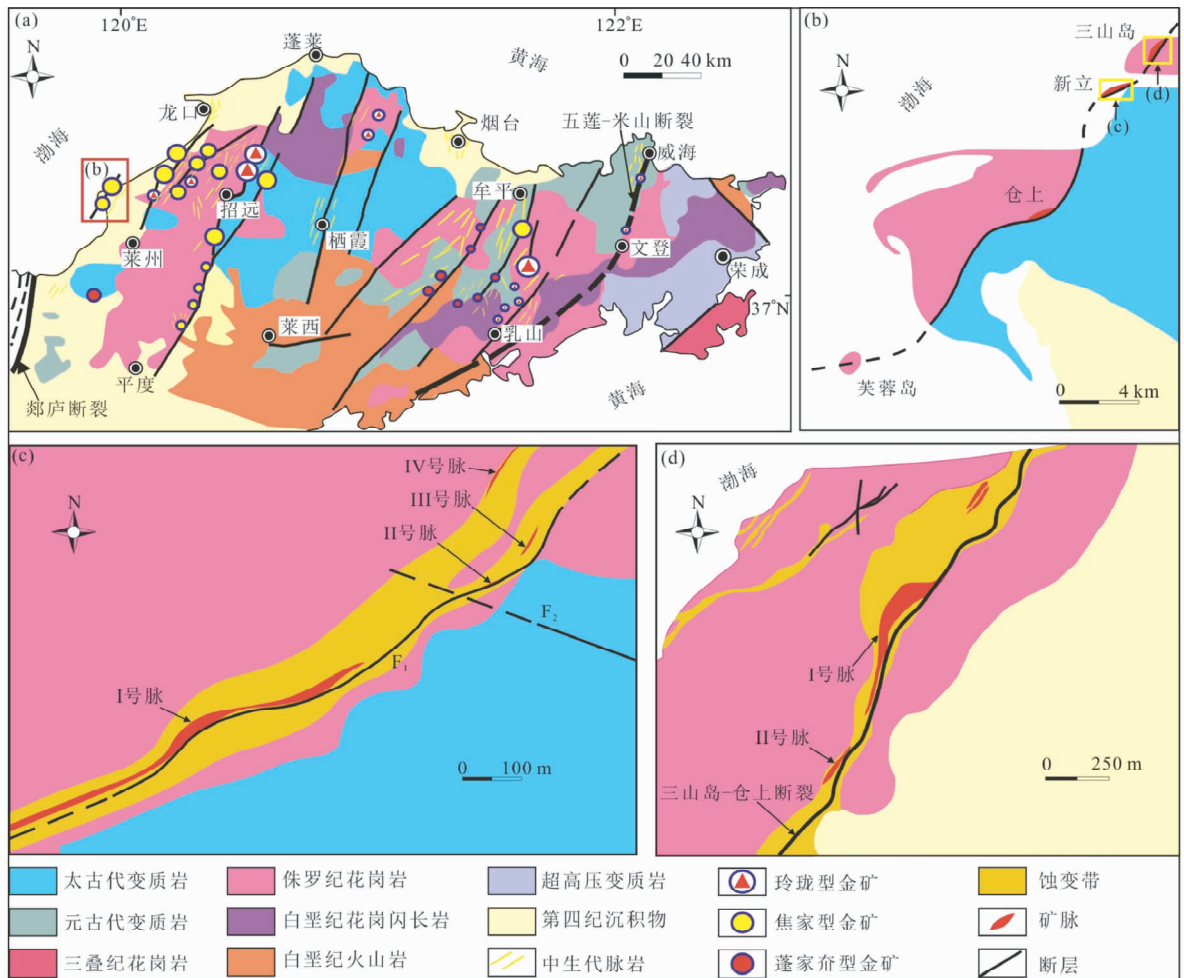


图1 胶东半岛区域地质简图(a)、三山岛-仓上金矿带地质简图(b)、新立金矿床地质简图(c)和三山岛金矿床地质简图(d) (据 Li *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2015a)

Fig. 1 The simplified regional geological map of Jiaodong Peninsula (a) and Sanshandao-Cangshang gold belt (b), geological map of Xinli gold deposit (c) and Sanshandao gold deposit (d) (after Li *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2015a)

世、早白垩世中期和早白垩世晚期(杨立强等, 2014)。晚三叠世岩体(227~205Ma)主要有正长岩、正长花岗岩等,如小石岛岩体、甲子山岩体、邢家岩体和搓山岩体等(郭敬辉等, 2005; 陈竟志和姜能, 2011)。晚侏罗世(160~145Ma)岩体有黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩和二长岩等组成,如玲珑岩体、昆崙山岩体、栾家河岩体和文登岩体等(Wang *et al.*, 1998; 郭敬辉等, 2005; Huang *et al.*, 2006)。早白垩世中期(133~125Ma)岩体主要为花岗闪长岩、二长花岗岩等,如郭家林岩体为其典型代表(关康等, 1998; Wang *et al.*, 1998)。早白垩世晚期(100~125Ma)岩体有二长花岗岩、正长花岗岩等,如三佛山岩体和崂山岩体等(Zhao *et al.*, 1997; 郭敬辉等, 2005)。并且,在胶东半岛发育大量的中生代(145~90Ma)中-基性脉岩(Liu *et al.*, 2009; Cai *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2014a, b; 梁亚运等, 2014)。脉岩主要有两期,早白垩世中-基性脉岩和晚白垩世基性脉岩(Cai *et al.*, 2013)。

该区金矿田密集分布,翟明国等(2004)将其分为三大金

矿带,即招远-莱州金矿带、栖霞-蓬莱成矿带和牟平-乳山金矿带。另外,随着该区研究的深入,在胶莱盆地发现了以蓬家夼、郭城金矿等为代表的金矿田,以及苏鲁超高压变质区新发现的文登-威海金矿带(Zhang *et al.*, 2003; 杨立强等, 2014)。该区金矿床主要类型有石英脉型(玲珑型)、破碎蚀变岩型(焦家型)和蚀变角砾岩型或脉状角砾岩型(蓬家夼型)。“玲珑型”金矿主要产在石英脉中,沿着区域断裂的次级断裂而远离主断裂。“焦家型”金矿为浸染状和网脉状,主要沿着一级区域断裂破碎区发育。“蓬家夼型”金矿赋存于前寒武纪变质地层及中生代花岗岩与中生界盖层接触带附近,受盆地边缘层间滑动断层控制(范宏瑞等, 2005; Tan *et al.*, 2012, 2015; Deng *et al.*, 2015a)。

3 矿床地质特征

“三山岛-仓上”断裂带位于胶东半岛西北部莱州市三山

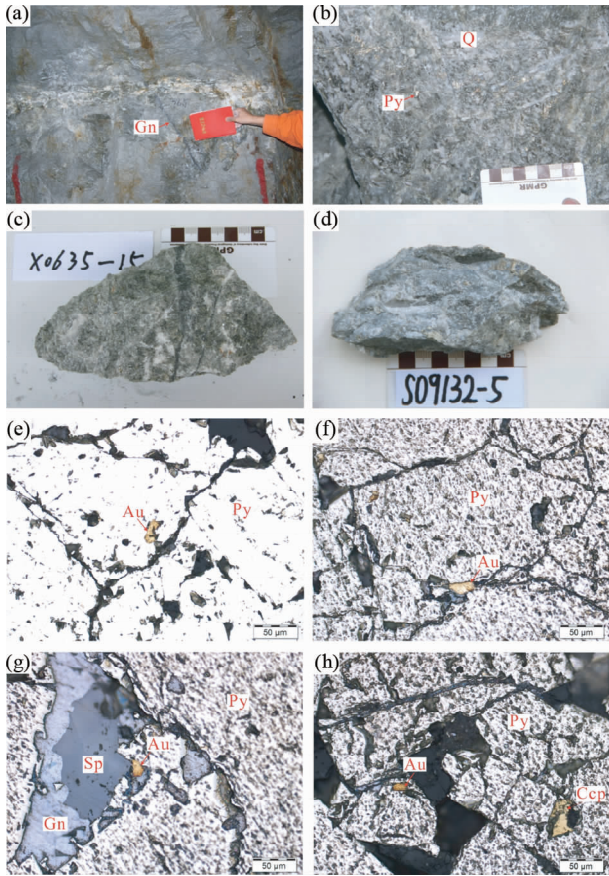


图2 矿石手标本和显微照片

(a, c) 新立金矿矿石手标本; (b, d) 三山岛金矿矿石手标本; (e) 三山岛金矿矿物赋存显微照; (f-h) 新立金矿金颗粒赋存显微照片. Au-金或银金矿; Py-黄铁矿; Gn-方铅矿; Sp-闪锌矿; Ccp-黄铜矿

Fig. 2 Photograph and Photomicrographs of ore in Xinli and Sanshandao gold deposit

(a, c) photograph of ore in Xinli gold deposit; (b, d) Sanshandao gold deposit; (e) photomicrographs of gold grains in ore from Sanshandao gold deposit; (f-h) Xinli gold deposit. Py-pyrite; Gn-galena; Sp-sphalerite; Ccp-chalcopyrite

岛镇, 走向 NNE-NE, 该断裂带控制着三山岛、新立、仓上三个大型矿床 (图 1a, b)。新立金矿、三山岛金矿和仓上金矿均属于“蚀变岩型”金矿。

新立金矿床已探明四条矿脉 (I-IV 号脉), 探明金属量 37t, 金平均品位 3.29g/t, 其中以 I 号脉为主矿脉, 占总矿石储量的 93%。矿体和蚀变带走向 NE 向 ($20^{\circ} \sim 40^{\circ}$), 倾向 SE, 倾角 $35^{\circ} \sim 70^{\circ}$ (图 1c)。矿区控矿构造主要为 NNE-NE 向三山岛-仓上断裂及其次生断裂。在新立矿区内主断裂 F1 长约 1300m, 宽 70~185m, 倾向 SE, 倾角 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ (图 1c)。控矿围岩以玲珑花岗岩、郭家岭花岗闪长岩为主, 并且有一定规模的基性脉岩与矿体伴生。新立金矿区矿石结构主要有晶粒状结构、填隙结构、压碎结构和交代残余结构等; 主要构造有浸染状构造、脉状构造、团块状构造和网脉状构造等

(图 2a)。主要的矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿和黝铜矿等, 脉石矿物主要为石英、绢云母、方解石、钾长石和金红石等 (图 2e, g)。矿床蚀变类型有钾长石化、硅化、黄铁绢英岩化、碳酸盐化、弱绿泥石化。基于矿物共生组合、矿物生成顺序和矿石结构构造等特征, 将该矿床矿化划分为四个主要的成矿阶段: I) 钾长石-石英-绢云母-黄铁矿阶段, 自形黄铁矿以浸染状填充在乳白色石英脉或石英团块中; II) 石英-黄铁矿阶段, 石英中含黄铁矿, 另外还发育少量的毒砂和黄铁矿, 大量的银金矿和自然金出现在该阶段; III) 石英-多金属硫化物阶段, 发育大量的硫化物 (黄铁矿、毒砂、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿); IV) 方解石-石英-黄铁矿阶段, 由石英脉和方解石脉组成, 并含少量黄铁矿 (Deng *et al.*, 2015a)。

三山岛金矿是胶东超大型金矿之一, 截止 2010 年底探明金属储量 200t, 金的平均品位为 3.96g/t。矿区内主要发现两个较大的矿体 (I、II 号), I 号矿体为主矿体、II 号为次要矿体, 此外在 F1 主裂面以上靠主矿体较近处还发现有零星小矿体 (图 1d)。矿区主要控矿构造为三山岛-仓上断裂, 矿体产在 F1 断裂面以下, 主断裂走向 NE (35°), 倾向 SE, 倾角 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。控矿围岩为玲珑花岗岩、郭家岭花岗闪长岩和白垩世基性脉岩。蚀变带和矿脉的走向 NE ($20^{\circ} \sim 40^{\circ}$), 倾向 SE, 倾角 ($35^{\circ} \sim 70^{\circ}$) (图 1d)。三山岛矿区矿石结构, 主要有晶粒状结构、压碎结构、填隙结构、乳滴结构、包含结构和交代结构等; 矿石构造, 主要有浸染状、脉状、网脉状、条带状、块状构造等 (图 2b)。主要的矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、毒砂、磁黄铁矿和黝铜矿等, 脉石矿物主要为石英、绢云母、钾长石和方解石等 (图 2f, h)。矿区发育蚀变有钾长石化、硅化、绢云岩化、碳酸盐化和绿泥石化。基于矿物的生成顺序和结构构造等特征, 该矿床矿化阶段划分为四个阶段: I) 黄铁绢英岩阶段; II) 石英-黄铁矿阶段; III) 石英-多金属硫化物阶段; IV) 石英-方解石阶段。

4 样品采集及分析方法

本文所研究的样品分别采自于新立金矿 -240m 中段 35 号穿脉 (X0635-15) 黄铁绢英岩化碎裂岩和三山岛金矿 -420m 中段 132 号穿脉 (S09132-5) 黄铁绢英岩。矿石探针片是在廊坊市地科勘探技术服务有限公司完成。矿石手标本首先切割成 2cm × 3cm 薄片, 然后用金刚砂 (SiC) 粗磨, BC (W350) 在玻璃板上细磨, 将磨制好的片子放置鼓风式干燥箱中干燥 (温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$)。干燥好的片子用树脂胶粘贴到载玻片上, 再进行粗磨和细磨。最后开始精抛光, 抛光液是由 Cr_2O_3 粉末 (40~200 目) 与水按 1:10 的比例混合配制 (Cr_2O_3 完全溶于水)。将抛光液撒至海军尼布上 (抛光盘), 在 800~1000 转/分钟的转速下开始精磨, 最后用清水将探针片清洗干净。

电子探针分析 (EMPA) 金矿物地球化学分析和元素 Au

和 Ag 的 X 射线扫描是在中国地质大学(北京)电子探针实验室完成。测试条件为: 激发电压为 15kV, 激发电流为 10A, 束斑直径为 1 μ m, 标准样品采用美国 SPI 公司 52 种标准矿物测试。

扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)是在清华大学摩擦学国家重点实验室完成。使用仪器为场发式电子扫描显微镜(FEI Quanta 200F)。扫描电镜(SEM)观察环境为, 激发电压为 20kV, 高真空, 背散射(BSE)电子照放大倍数为 2000 ~ 5000 倍。二次电子成像分析环境为 20kV, 高真空, 放大倍数为 12000 和 20000 倍。金矿物能谱分析(EDS)环境为, 15 ~ 20KV、高真空, 放大倍数 7000 ~ 20000 倍。金矿物微区能谱分析时, 微区划定主要根据金矿物表面色度不同而划定分析区域。规律选取一定数量金矿物表面深色区域和相同数量亮色区域进行微区能谱分析。最后根据能谱图中波峰的不同指示读取所含不同的元素。

5 分析结果

5.1 矿物学特征

光学显微镜观察显示, 含金矿物的样品中主要矿物组合有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等, 属于石英-多金属硫化物阶段(第Ⅲ阶段), 其中黄铁矿为主要载金矿物(图 2)。金矿物主要以单颗粒形式存在于载金矿物中, 具有明显的金黄色反射色、高反射率、均质性和低硬度等特征而与其他金属硫化物截然不同(图 2c-f)。为了更清晰的观察金矿物的形态, 使用扫描电镜(SEM)高倍镜(9000 \times ~ 20000 \times)观察。在 BSE 照片中, 金矿物主要以片状、椭圆状、短柱状、板状形态存在, 长约 15 ~ 25 μ m(图 3a-d)。金矿物在硫化物中的赋存状态主要有三种, 晶隙金、裂隙金和包裹金。晶隙金, 即黄铁矿晶隙以及黄铁矿与多金属硫化物晶隙间发育短柱状、板状形态金矿物, 并呈共生关系(图 2d, e); 裂隙金, 金矿物主要以片状、椭圆状形态存在于黄铁矿或多金属硫化物碎裂形成的裂隙中(图 2c); 包裹金, 金矿物被包裹在黄铁矿内部, 呈椭圆形态(图 2f)。

另外, 在 BSE 图中发现, 金矿物表面并非均一色度, 而是具有亮色、深灰色不同的区域。我们通过 SEM 二次电子图像发现, 金矿物中深灰色区域即为矿物表面的凹坑, 亮色区域为金的光面。已有金矿物研究中, 运用 SEM 高能成像发现, 原始自然金颗粒平滑、规则粒状结构, 但是后期随着热液流体的沉淀, 颗粒表面会发生腐蚀和分解, 从而表现出凹槽或凹点(Nakagawal *et al.*, 2005)。因此, 本文研究金矿物表面深灰色区域可能为表面凹坑区反光原因, 也可能是凹坑填充其他物质而导致, 下文将通过测试其化学成分而进一步探讨(图 3e, f)。

5.2 微区地球化学特征

电子探针(EMPA)分析结果以质量百分比(wt%)表示。

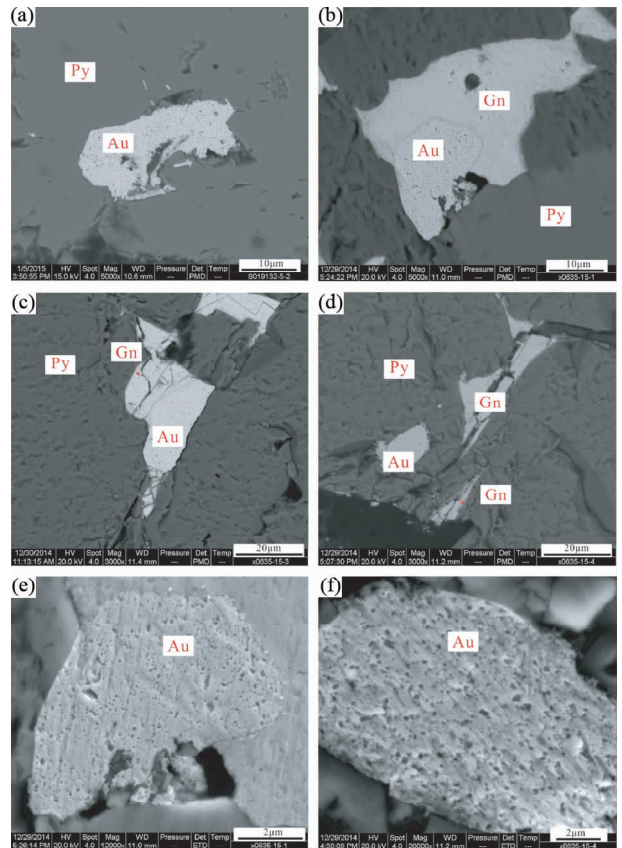


图 3 矿物共生背散射电子图像(a-d)和金颗粒二次电子图像(e, f)

Au-金或银金矿

Fig. 3 Back-scattered electron images of Au grains (a-d) and secondary electron image of Au grains (e, f)

Au-Gold or electrum

表 1 样品 X0635-15 和 S09132-5 中金矿物电子探针分析数据(wt%)

Table 1 Electronic microprobe analysis (wt%) of gold grain from sample X0635-15 and S09132-5

样品号	Ag	Au	总量
X0635-15-3-1	36.04	64.15	100.19
X0635-15-4-1	35.73	64.27	100.00
X0635-15-1-1	36.34	63.34	99.69
S09132-5-2-1	27.39	72.54	99.93

金矿物中 Au 含量为 63.34% ~ 72.54%, 含有较高的 Ag 含量(27.39% ~ 36.34%)(表 1)。据自然金成色计算 $[Au/(Au + Ag)] \times 1000$, 研究区自然金的成色为 640 ~ 726, 成色偏低。按照金银矿物划分法, 研究区自然金属于银金矿系列(刘家军等, 2010)。因此, 本文研究金矿物为银金矿。对金颗粒运用 Au 和 Ag 元素 X 射线扫描图像, 显示含有高含量的 Ag, 并且其载金矿物中也含有 Ag(图 4)。银金矿系列一般指原生金矿物, 并未经受后期环境的影响, 所以可代表其

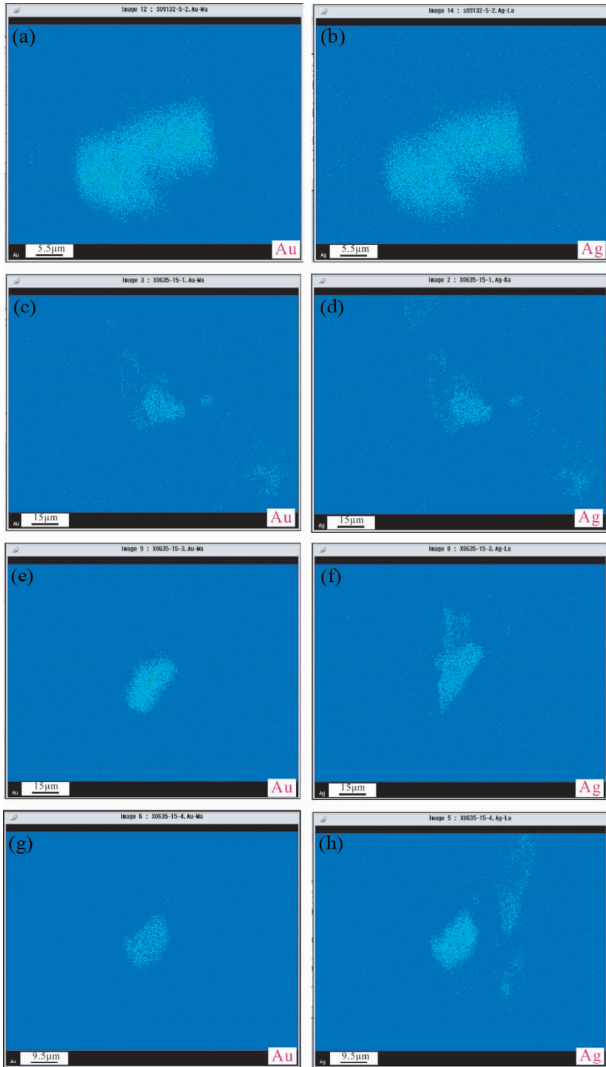


图4 金矿物 Au 和 Ag 元素 X 射线扫描图像

Fig. 4 X-ray scanning images of Au and Ag

最初的生成环境(Nakagawal *et al.*, 2005)。扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)银金矿微区地球化学特征时,以原子数百分含量(at%)表示。在高倍背散射(BSE)电子图片中显示,银金矿颗粒表面出现明显的亮色和深灰色两个区域(图5)。本文对银金矿颗粒表面亮色和深灰色微区进行能谱(EDS)检测(表2),其中,深灰色区域 O(11.41% ~ 20.26%)、Cr(11.08% ~ 28.47%)、N(5.45% ~ 8.34%)、W(0.22% ~ 0.74%)、P(4.29% ~ 8.43%)、Fe(1.58% ~ 5.27%)和少量的 Al、S;亮色区域 N(6.12% ~ 9.79%)、O(1.89% ~ 6.18%)、W(0.42% ~ 0.84%)、P(6.32% ~ 10.38%)、Fe(1.62% ~ 3.37%)。微量元素组成发现,深灰色区域与亮色区域存在的最大差异是,深灰色区域大量富集 Cr 和 O,和少量的 Al、S。在上文提到,在 SEM 二次电子图像下观察到深灰色区域为矿物表面凹坑(图 3e, f)。据上文样品加工流程中所述,样品最后抛光使用 Cr_2O_3 ,因此我们无法排除深灰色区域中所含的 Cr 和 O 为杂质的残余。另外,在亮色区域,并

没有检测到 Cr,同时 O 的含量大大降低,因为亮色区域为自然金抛光面,未能残余 Cr_2O_3 ,这一点更加佐证了深灰色区域所含高含量的 Cr 和 O 可能是源自杂质。因此,金矿物深灰色区域所含元素受人为因素残留杂质影响太高,研究误差过大。本文主要研究金颗粒亮色微区,并与玲珑金矿金颗粒亮色微区对比研究。研究区金颗粒亮色微区,Au 和 Ag 以主要元素存在,微量元素主要有 N(6.12% ~ 9.79%)、O(1.89% ~ 6.18%)、W(0.42% ~ 0.84%)、P(6.32% ~ 10.38%)、Fe(1.62% ~ 3.37%),从颗粒内部微区到边部微区没有明显的含量变化。

6 讨论

6.1 银金矿中元素及其地质意义

Yang *et al.* (2013) 在玲珑金矿床金矿物研究中同样发现,金矿物表面具有颜色不一的现象,并分为:亮色区域、浅灰色区域和深灰色区域。金颗粒中,亮色区域代表金,含少量的银;浅灰色区域富集 O,包含少量 Nb;深灰色区域富集 B(部分可达 90%),以及 Cr。银颗粒与金颗粒相似,浅灰色区域富集 O,深灰色区域富集 B。但是,本文研究银金矿单颗粒表面只有亮色和深灰色区域,由于深灰色区域受杂质影响而不作研究。本文研究银金矿颗粒亮色区域和玲珑金矿金颗粒亮色区域元素对比发现,本文并未检测到 Nb 和 B 的存在、O 含量相对较低、而具有相似的 Cr 含量。具有相同元素 Au、Ag、N、O 和 Fe,但是研究区金颗粒微区所含 N、O 和 Fe 的含量远低于玲珑金矿。在研究区金颗粒微区中检测到 W,而在玲珑金矿金颗粒微区中未发现此元素。

6.1.1 O 元素

研究区金矿物深灰色区域在二次电子照片下观察是凹坑形式,这可能是矿物形成过程中受环境影响导致所致(Nakagawal *et al.*, 2005)。在此次研究过程中,我们观察到颜色为深灰色,可能是凹坑反光导致,也可能是内部充填暗色物质所致。但是,在前文样品处理中已经提到,探针片最后的磨制是用 Cr_2O_3 抛光,人工 Cr_2O_3 杂质可能残存于凹坑中,对深灰色区域的研究带来干扰。因此,我们只对亮色区域(表面均一区域)开展研究。

Au 的沉淀是随着流体环境的变化完成的。环境的改变导致成矿流体各项物理参数的改变从而导致 Au 的沉淀,成矿过程中,随着流体参数的变化,并且成矿流体从氧化环境向还原环境过渡(邓军等, 2005a; Yang *et al.*, 2013)。金颗粒微区低 O 原子数百分含量(at%)无法直接定义其来源,但可以指示环境。通过与玲珑金矿床金矿物微区 O 含量的比较发现:“蚀变岩型”和“石英脉型”金矿床金矿物微区均具有较低的 O,说明金沉淀时均为还原环境;与玲珑金矿床金矿物所含 O 原子数百分含量相对比,研究区金矿物微区 O 更低。由此可知,研究区金形成环境的还原性更高。加之,玲珑金矿微区 O、Fe 的含量高于本研究区,所以玲珑金矿金沉

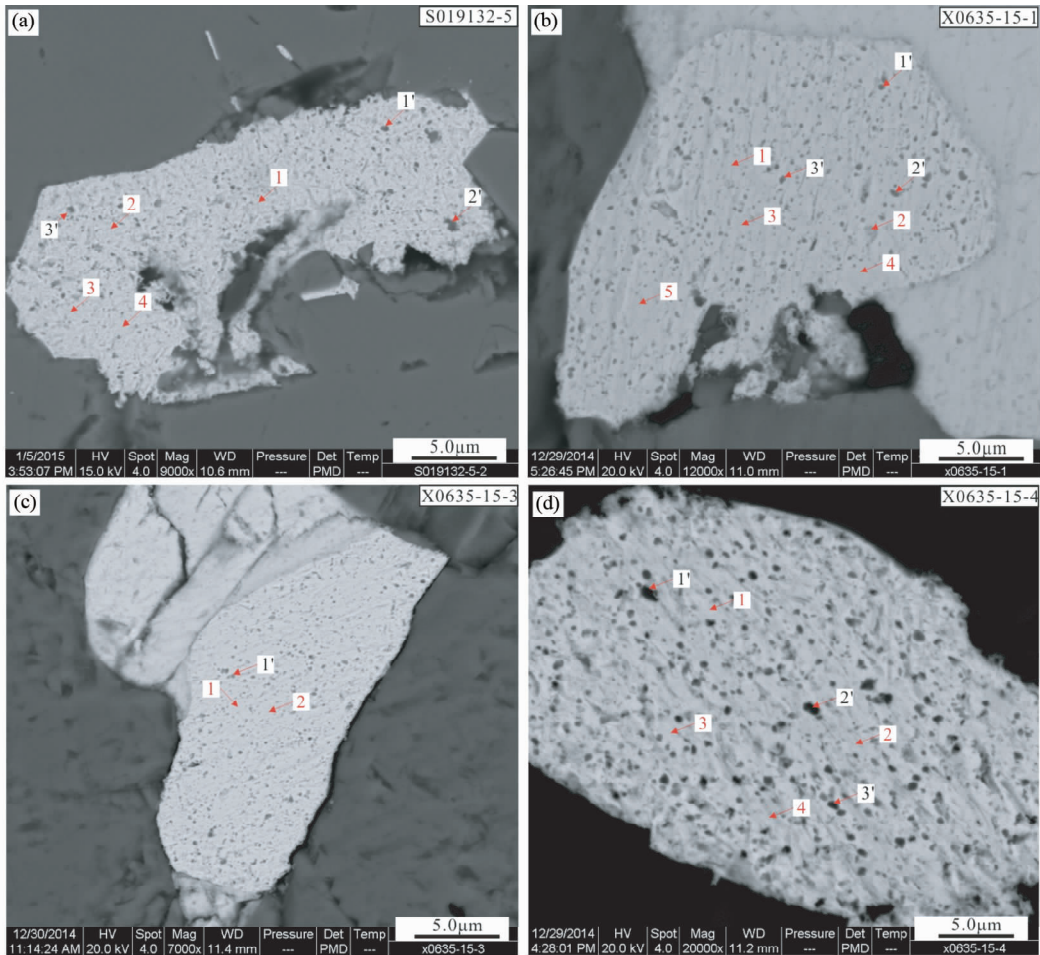


图5 金矿物背散射照片

Fig.5 Back-scattered electron images of Au grains

淀环境还原性更低。结合金矿构造环境分析,玲珑型(即石英脉型)金矿形成于浅部脆性断裂带中,焦家型(即蚀变岩型)形成于较深部从韧性变形到脆性变形的转折期(邓军等, 2005a)。因此,金矿物微区 O 含量对比指示,胶东金矿床中金是在偏还原环境中沉淀,并且“蚀变岩型”金矿床中金沉淀环境还原性比“石英脉型”金矿略高。

6.1.2 N 元素

N 在自然界的分布仅次于氧,它与金矿之间的联系须通过成矿流体来完成。成矿流体可分为地表流体与内部流体两类,地表流体主要包括大气降水、海水与地表卤水,内部流体指产生于岩石圈及上地幔来源的流体(卢焕章等, 2004; 邓军等, 2005)。

内部成矿流体中 N_2 的来源有多种,成矿流体与围岩发生反应或者流体可以直接从围岩中捕获 N_2 (Mernagh, 2001)。岩浆流体加入到围岩中发生接触变质过程中,围岩中含 NH_4^+ 硅酸盐矿物可产出 N_2 (Fu *et al.*, 2014)。研究区成矿过程中,流体加入到围岩即发生强烈、大量的水-岩反应,是成矿重要的阶段和机制(姜晓辉等, 2011; Li *et al.*,

2013; Wen *et al.*, 2015)。如果, N 是来源于围岩,这种反应应该是大规模的,流体包裹体中可以检测到,但是研究区已有流体包裹体研究中并没有发现 N_2 。因此,金矿物微区 N 来源于围岩的可能性不大。另外,在深部地壳中 N 元素以 NH_4^+ 的形式取代 K 而存在于矿物中,或者以 N_2 形式呈自由流体相存在 (Andersen *et al.*, 1993)。据 McDonough (2003),原始地幔中 N 丰度值较低,约 2×10^{-6} 。并且,在地幔捕虏体熔融包裹体的研究中发现,包裹体中流体的主要组成是纯 CO_2 ,偶然才能测定到 N_2 、 CO 、 SO_2 和惰性气体等 (Hurairova *et al.*, 1991; Andersen *et al.*, 1995; 卢焕章等, 2004)。所以,如果有深部(深部地壳或者地幔)含 N 的流体加入, N 应该是以 N_2 的形式存在,但是研究区流体包裹体并未发现 N_2 ,可能是由于含量的过分稀少,也可能是由于 N_2 在上升中,随着温度和压力等的变化导致成矿流体的物理化学性质变化, N_2 以挥发分的形式分离出去。因此,银金矿颗粒微区检测到的 N 来自深部流体的可能性不大。

N 在地表流体中也大量赋存。已有研究新立金矿和三山岛金矿流体包裹体研究发现,成矿流体主要以中-低温、低盐度的流体,并且从成矿前期到后期,密度逐渐降低,这与高

表2 胶东典型金矿床中金、银矿物扫描电镜-能谱分析结果(at%)

Table 2 SEM-EDS analysis of gold and silver grains from representative gold deposits in Jiaodong Peninsula (at%)

样品号	区域	点号	B	N	O	Al	Si	P	S	Fe	Cr	Zn	Nb	Ag	W	Au	数据来源
X0635-15-1	暗色	1'		7.32	12.29			6.51			11.08			27.98	0.73	34.1	本文
	暗色	2'		7.17	16.34			6.22			15.93			24.25	0.6	29.49	
	暗色	3'		6.64	15.84			5.29			14.2			25.97	0.22	31.83	
	亮色	1		8.04	3.26			8.01	1.8					36.8		42.09	
	亮色	2		8	2.39			7.19	2.17		1.74			37.86		40.65	
	亮色	3		9.11	2.63			7.38						36.76		44.12	
	亮色	4		7.3	2.82			8.57						37.96		43.35	
	亮色	5		8.73	2.86			7.52						38		42.89	
X0635-15-3	暗色	1'			16.37			6.08			15.74			27.78	0.42	33.6	本文
	亮色	1		7.34	3.05			8.18	1.62					37.28	0.84	41.7	
	亮色	2		7.22	1.89			10.37	1.97					35.21	0.6	42.74	
X0635-15-4	暗色	1'		6.43	17.37			5.45	1.82	24.13				18.08	0.68	26.03	本文
	暗色	2'		6.98	15.02			6.67	1.58	15.93				22.64	0.74	30.43	
	暗色	3'		6.45	12.89			6.49	2.09	16.26				24.3	0.27	31.26	
	亮色	1		8.03	4.26			8.5	3.37					35.61		40.22	
	亮色	2		8.98	5.46			8.28	2.5					33.81		40.96	
	亮色	3		8.56	6.18			7.65	2.79					33.52	0.67	40.62	
	亮色	4		7.37	4.51			7.82	3.16					34.59	0.73	41.82	
	S09132-5-2	暗色	1'			13.55			5.87			18.61			17.66		
暗色		2'		5.45	20.26	1.28		4.29	2.45	5.27	28.47			10.69			
暗色		3'		8.34	11.41			8.43	3.17	13.22				17.11	0.67	37.64	
亮色		1		6.12				6.32						20.61	0.42	66.53	
亮色		2		8.67	3.1			9.52	2.31					25.63	0.66	50.09	
亮色		3		9.79	2.95			10.02	2.8					26.3	0.54	47.59	
亮色		4		8.58	3.38			10.38	2.91					25.48	0.78	48.5	
玲珑金颗粒		亮色	0'			23.58									15.05		61.37
	亮色	1'		20.09	29.24					5.2	2.54			7.82		35.11	
	亮色	2'		16.48	15.81					4.63				12.74		50.34	
	浅灰	3'			70.37								1.41	5.85		22.36	
	浅灰	4'			69.93								1.67	5.85		22.56	
	浅灰	1			69.18								1.48	5.93		23.42	
	浅灰	2			75.83								1.3	4.29		18.58	
	浅灰	3		12.77	49.14					3.23				6.95		27.91	
	暗灰	4		8.83	48.03					1.53	22.6			2.79		16.22	
	暗灰	5	91.33	2.18	1.16				0.59	0.56	0.15			0.54		3.48	
	暗灰	6		18.89	11.39			29.63	3.54	0.68				5.6		30.95	
玲珑银颗粒 a	亮色	0							1.22					65.85			Yang et al., 2013
	亮色	1												54.15		12.45	
	浅灰	2			67.41				0.49		26.23			3.98			
	浅灰	5			57.15				0.62		18.77			15.8			
	浅灰	4			56.23	1.49	5.09		2.53					23.12			
	浅灰	3			36.71				3.49		7.8			34.87			
	浅灰	6			24.68		1.35		2.61					47.2			
	暗灰	7	95.07	3.34	0.48	0.27					0.3			0.37			
	暗灰	8	97.85	0.39										0.93		0.25	
玲珑银颗粒 b	浅灰	0			57.76		0.78		0.94		16.84			15.75			本文
	浅灰	1			40.46	1.25	2.37		1.06		2.8			32.63			
	浅灰	2			37.64				2.25		4.58			36.93			
玲珑银颗粒 c	浅灰	1			67.95				1.91	1.13	24.22			3.56			本文
	浅灰	2			11.32				3.78	4.67	1.4			53.93			

盐度海水和卤水的关系不大,很有可能是低密度的大气降水的加入。大气降水在降落时溶解了大气中的 CO_2 、 O_2 、 N_2 和其他气体,并且河水和湖水也是来自大气降水, N 元素会以 NO_3^- 的形式存在(卢焕章等, 2004)。因此,金颗粒中 N 元素可能是成矿后期来自于大气降水中的 N_2 或 NO_3^- 加入到成矿流体中,从而以微量的形式存在于金矿物中。这与该区 D-O 同位素研究中发现,成矿流体在后期有大气降水的混入相一致(Fan *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2015a)。

因此,银金矿微区 N 元素反映成矿流体在后期有大气降水的混入。此外, Yang *et al.* (2013) 在玲珑金矿床金矿物微区中也发现 N 元素存在,并且高于研究区,由此可反应出玲珑金矿成矿流体与大气降水混合程度相对较高。

6.1.3 P 元素

已有实验研究证明, P 可以在八面体金颗粒中以离子配位的形式存在(Southam and Beveridge, 1996)。在地球化学中, P 属于高场强元素、化学性质较为稳定。据元素在地幔部分熔融过程中,不被地幔稳定矿物所相容,而是进入熔体相,属于不相容元素,并且 P 属于不相容元素(Sun and McDonough, 1989; 路凤香和桑隆康, 2002)。P 及其氢化物具有较高的挥发性,也是地幔流体的重要成员之一和特色标志元素,在地幔捕虏体熔融包裹体中具有高含量(杜乐天, 1996)。在玄武岩中,尤其是在碱性玄武岩中 P_2O_5 含量较高。例如,五大连池火山岩岩浆(碧玄质)包裹体中富含挥发分 S、P、F、Cl(夏林圻等, 1990)。因此, P 也可以以挥发分的形式存在于地幔流体中。靠近研究区已有山东方城碱性玄武岩中 P_2O_5 约 0.74% ~ 0.96%, 平均 0.84%(Zhang *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2013a), 远高于研究区玲珑花岗岩中 P_2O_5 (仅为 0.03% ~ 0.04%, Li *et al.*, 2013)。并且前人研究发现,胶东金矿成矿流体中有幔源流体的加入(Fan *et al.*, 2003; Deng *et al.*, 2003; 邓军等, 2005; Mao *et al.*, 2008)。所以,本文金矿物微区中 P 有可能源自幔源流体。

另外,地壳中含有较高丰度的 P 元素,以主量元素(P_2O_5)的形式存在(张宏飞和高山, 2012)。但是,浅成地壳范围的岩浆-热液演化过程中不太可能分异出富 P 的流体相(唐勇等, 2008)。此外, P 虽然属于不相容元素,然而其相容性并非绝对,因为 P 在地幔中为不相容元素,但是在花岗岩中, P 以微量元素存在时,被磷灰石等矿物控制,属于相容元素(Roelison, 1993)。研究区玲珑花岗岩中 P_2O_5 为 0.03% ~ 0.04%, 但是在钾长石化、绢云母化、硅化和黄铁-绢云岩-石英蚀变花岗岩中含量分别为 ~ 0.01%、~ 0.025%、~ 0.01% 和 ~ 0.03%, 随着蚀变, P_2O_5 明显降低,并且控制 P 的矿物(磷灰石、独居石等)也逐渐被消耗掉(Li *et al.*, 2013)。此外,在大量过铝质、准铝质等花岗岩岩浆热液-演化体系研究中都显示 P_2O_5 的含量明显受磷灰石的分离结晶控制(李献华等, 2007; Clemens *et al.*, 2011)。同时,蚀变岩是由于岩体受后期受成矿热液的交代蚀变所形成的,如果有大量的 P

在流体中,那么蚀变岩中应该是 P 增加,而非减少,所以围岩中减少的 P 并未进入到流体中。由此可知,成矿流体中的 P 来自地壳或者围岩分异流体的可能性较小。

综上,金矿物微区 P 可能来源于深部地幔,指示成矿流体中有幔源流体加入。

6.1.4 W 元素

W 具有亲铁(金属和硅酸盐分异)的性质,但在壳幔分异过程中是典型高度不相容的亲石元素;因此,在地壳中富集、而在地幔中明显亏损(Yin *et al.*, 2002; 马东升, 2009)。

已有实验测试表明,在温度 800°C 、压力 $1.5 \times 10^8 \text{ Pa}$ 条件下, W 主要集中在熔体中,在流体中的分配系数非常低($K_D < 0.3$)(许永胜等, 1992)。因此,在深部地幔流体中 W 的含量是非常少,金矿物中所含 W 来自地幔流体的可能性不大。

为了研究 W 在成矿流体中的溶解度,大量实验在高温高压环境下检测 WO_3 溶解度,温度为 $600 \sim 250^\circ\text{C}$, 压力为 100、200、34 MPa。结果推测 Na^+ (K^+) 离子在高温热液体系中可能与 W 进行络合,而碱性条件可以促进 WO_3 在热液体系中的溶解,高温条件可以显著提高成矿流体对金属成矿元素钨的萃取能力(Wood and Vlassopoulos, 1989; 龚庆杰等, 2004)。胶东西北部玲珑花岗岩已有 W 的含量数据为 $0.33 \times 10^{-6} \sim 1.65 \times 10^{-6}$, 平均 0.77×10^{-6} (Gong *et al.*, 2013)。研究区成矿流体为中-低温、低盐度流体,从成矿前到成矿后,温度和盐度都明显降低。研究区低温、低 Na^+ 流体环境中 W 的溶解度较低,同时围岩 W 含量较低,水-岩反应也很难从围岩萃取 W。地壳中 W 平均丰度为 1×10^{-6} (Rundnick and Gao, 2003),在硅酸盐岩浆中, W 能与 O 形成 W-O 配位,所以 W 在硅酸盐岩浆中的溶解度很高(马东升, 2009)。原始岩浆具有较高的温度;并且,研究区成矿流体为 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NaCl} \pm \text{CH}_4$ 体系,此时 WO_3 在流体中溶解度也较高。因此, W 可赋存在原始岩浆流体中运移,最后与金共存。在 130 ~ 110 Ma(早白垩世)年之间,在太行、鲁西、辽东和大别-苏鲁地区,岩浆喷发,大规模的金矿形成,以及胶东金矿的成矿年龄为 ~ 120 Ma (Li and Santosh, 2014; Ma *et al.*, 2014; Goldfarb and Santosh, 2014; Yang and Santosh, 2015)。由此可知, W 可能源于早白垩世岩浆作用过程中,分异出的硅酸盐岩岩浆流体。

在钨的沉淀实验以及钨矿床形成机制研究中发现,成矿流体的 pH 是控制 W 沉淀的主要因素之一,并且 pH 偏碱性 (> 5.9)(Graupner *et al.*, 1999)。与 W 有强亲和力的元素 Ca、Mn 和 Fe 会形成“富集障”,从而使 W 沉淀下来,并且在碱性环境下、钙离子浓度高的环境中更容易富集(王发宁, 1987; 孙际茂等, 2013)。研究区主要载金矿物为富铁的黄铁矿,并且在金颗粒的研究中也有 Fe 的存在。因此,在金颗粒中含 W 可反映金的形成环境偏弱碱性。

在玲珑金矿金颗粒微区中并未发现 W,亦可反映“蚀变岩型”金矿沉淀流体环境比“石英脉型”更偏碱性。

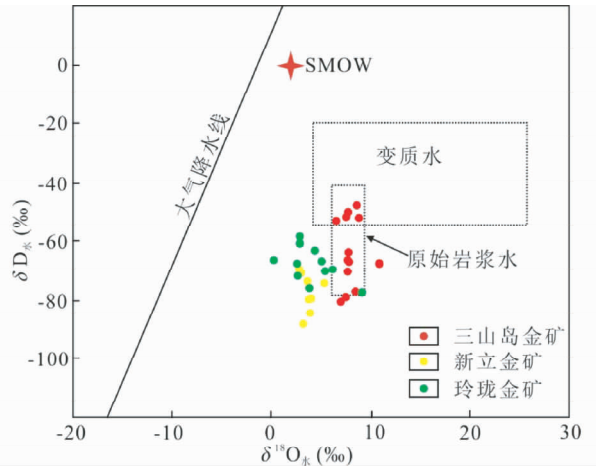


图6 胶东典型金矿 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}-\delta\text{D}$ 关系图解

数据来源:三山岛金矿 (Fan *et al.*, 2003; Mao *et al.*, 2008);新立金矿 (Deng *et al.*, 2015a);玲珑金矿 (Mao *et al.*, 2008; Wen *et al.*, 2015)

Fig.6 Diagram showing $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ vs. δD for typical gold deposits in Jiaodong Peninsula

Data sources: Sanshandao gold deposit (Fan *et al.*, 2003; Mao *et al.*, 2008); Xinli gold deposit (Deng *et al.*, 2015a); Linglong gold deposit (Mao *et al.*, 2008; Wen *et al.*, 2015)

6.1.5 其它元素

研究区矿石中银金矿单颗粒微区地球化学中还存在少量的S、Fe和Zn。因为其含量很小,并且与金共生黄铁矿(FeS_2)和闪锌矿(ZnS)等的影响,它们可能是载金矿物混入进来,因此无法准确的定义其所代表的来源环境。

6.2 成矿物质来源及成矿环境条件

为研究新立、三山岛和玲珑金矿流体和成矿物质来源,已有大量稳定同位素的研究。本文统计已有氢氧同位素数据,并根据岩浆水 $\delta\text{D} = -80\text{‰} \sim -40\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = 5.5\text{‰} \sim 9.5\text{‰}$ (Sheppard, 1986; Ohmoto, 1986);变质水 $\delta\text{D} = -65\text{‰} \sim -20\text{‰}$ (Taylor, 1974)。三个典型矿床 δD 比较相似,都集中在原始岩浆水范围内。玲珑金矿具有比较宽泛的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$, 靠近大气降水趋势较大。三山岛金矿与新立金矿较相似,主要聚集在原始岩浆水和附近小范围区域,向下有靠近大气水的趋势。整体显示以原始岩浆水为主,后期有大气降水的加入。与玲珑金矿相对比,研究区大气降水的混入量相对较少,这与前文N的结论相一致(图6)。结合上文微区元素分析可知,胶东金矿成矿流体为多种来源的混合。主要以岩浆水为主,并且有幔源流体的加入,后期有大气水的混入(“蚀变岩型”混入量较少)。大量成矿物质来源的研究发现,由于太古代和元古代的变质岩、以及晚三叠和晚侏罗世的花岗岩的形成和侵入都要早于成矿,因此提供成矿物质的可能性较小(Mao *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2013; Goldfarb and Santosh, 2014; Wen *et al.*, 2015)。另外,早白垩世花岗岩虽然侵入

时期和金矿相近,但是在矿体形成内部,它们在空间上并没有直接的联系,因此早白垩世花岗岩提供成矿物质的可能也较小(Goldfarb and Santosh, 2014)。已有众多研究揭示,胶东地区早白垩世中-基性脉岩的形成,在时间和空间上与金矿有密切联系,它们具有相似的源区,来源于深部幔源(Deng *et al.*, 2003; Fan *et al.*, 2003; Mao *et al.*, 2008; Tan *et al.*, 2012, 2015)。

Au在热液环境中迁移形式主要以硫化物 $[\text{Au}(\text{HS})^0]$ 和 $[\text{Au}(\text{HS})_2^-]$ 和氯化物 $[\text{AuCl}_2^-]$ 为主(Wen *et al.*, 2015)。研究区载金矿物主要为硫化物,所以研究区Au主要以硫化物 $[\text{Au}(\text{HS})_2^-]$ 的形式运移,并且已有流体包裹体研究得出压力($>3 \sim 1.2\text{kPa}$)和温度($545 \sim 306^\circ\text{C}$)支持 $[\text{Au}(\text{HS})_2^-]$ 的运移环境(Fan *et al.*, 2003; Wen *et al.*, 2015)。硫化物的运移环境偏还原环境,这与上文O元素的指示环境相一致。

7 结论

(1)胶东典型“蚀变岩型”金矿床中金矿物主要以裂隙金、包体金和晶隙金形态赋存于硫化物中,属于银金矿系列。二次电子图像显示金矿物表面并非平面而是发育凹槽或凹坑。

(2)“蚀变岩型”金矿中金矿物微区赋存O、N、W、P元素。低O反映金形成环境为还原环境,与“石英脉型”金矿相比较,“蚀变岩型”金矿形成环境还原性更高。

(3)胶东“蚀变岩型”和“石英脉型”金矿成矿流体为多源混合。N指示大气降水的混入,与“石英脉型”金矿相比较,“蚀变岩型”金矿混入相对较少;P反映幔源流体的加入;W主要源自早白垩世岩浆作用产生的岩浆流体,并指示金沉淀时流体偏弱碱性。

(4)胶东金矿成矿物质来源与早白垩世中-基性脉岩具有同源性,可能源自深部地幔;Au主要以硫化物 $[\text{Au}(\text{HS})_2^-]$ 的形式运移。

致谢 本文研究测试分别受到中国地质大学(北京)电子探针实验尹金武老师和清华大学摩擦学国家重点实验室杨文言老师指导,谨此表示感谢。

References

- Andersen T, Austrheim H, Burke EAJ and Elvevold S. 1993. N_2 and CO_2 in deep crustal fluids: Evidence from the Caledonides of Norway. *Chemical Geology*, 108(1-4): 113-132
- Andersen T, Burke EAJ and Neumann ER. 1995. Nitrogen-rich fluid in the upper mantle: Fluid inclusions in spinel dunite from Lanzarote, Canary Islands. *Contrib. Mineral. Petr.*, 120(1): 20-28
- Bonev IK, Kerestedjian T, Atanassova R and Andrew CJ. 2002. Morphogenesis and composition of native gold in the Chelopech volcanic-hosted Au-Cu epithermal deposit, Srednogie zone, Bulgaria. *Mineralium Deposita*, 37(6-7): 614-629
- Cabri LJ, Rudashevsky NS, Rudashevsky VN and Gorkovetz VY. 2008.

- Study of native gold from the Luopeng deposit (Kostomuksha area, Karelia, Russia) using a combination of electric pulse disaggregation (EPD) and hydroseparation (HS). *Minerals Engineering*, 21(6): 463–470
- Cai YC, Fan HR, Santosh M, Liu X, Hu FF, Yang KF, Lan TG, Yang YH and Liu YS. 2013. Evolution of the lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton: Constraints from mafic dikes in the Jiaobei terrain. *Gondwana Research*, 24(2): 601–621
- Chen CY, Sun DS, Zhou XR, Shao W, Gong RT and Shao Y. 1993. Mineralogy of Guojialing Granodiorite and Its Relationship to Gold Mineralization in the Jiaodong Peninsula. Beijing: China University of Geosciences Press, 1–230 (in Chinese)
- Chen JZ and Jiang N. 2011. Petrogenesis of the Late-Triassic alkaline magmatism in the Jiaodong area: Evidence from U-Pb age, Hf-O isotopes of zircons. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3557–3574 (in Chinese with English abstract)
- Clemens JD, Stevens G and Farina F. 2011. The enigmatic sources of I-type granites: The peritectic connexion. *Lithos*, 126(3–4): 174–181
- Deng J, Fang Y, Yang LQ *et al.* 2000. Shear alteration, mass transfer and gold mineralization: An example from Jiaodong gold-deposit concentration region, Shandong, China. *Earth Science*, 25(4): 428 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Liu W, Sun ZS, Wang JP, Wang QF, Zhang QX and Wei YG. 2003. Evidence of mantle-rooted fluids and multi-level circulation ore-forming dynamics: A case study from the Xiaodian gold deposit, Shandong Province, China. *Science in China (Series D)*, 46(1): 123–134
- Deng J, Gao BF, Wang QF and Yang LQ. 2005a. Formation and evolution of ore-forming fluid system. *Geological Science and Technology Information*, 24(1): 49–54 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang QF, Yang LQ and Gao BF. 2005b. An analysis of the interior structure of the gold hydrothermal metallogenic system of the northwestern Jiaodong Peninsula, Shandong Province. *Earth Science*, 30(1): 102–108 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang JG, Wei YG, Zhang ZQ, Lin JZ and Yan SL. 2007. Ores and gold-bearing characteristics in Xiejiagou gold deposit, Shandong Province. *Earth Science*, 32(3): 373–380 (in Chinese with English abstract)
- Deng J, Wang QF, Yang LQ, Zhou L, Gong QJ, Yuan WM, Xu H, Guo CY and Liu XW. 2008. The structure of ore-controlling strain and stress fields in the Shangzhuang gold deposit in Shandong Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 769–780
- Deng J, Wang QF, Li GJ and Santosh M. 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. *Earth-Science Reviews*, 138: 268–299
- Deng J and Wang QF. 2015. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Research*, doi.org/10.1016/j.gr.2015.10.003
- Deng J, Liu XF, Wang QF and Pan RG. 2015a. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C-D-O-S-Sr isotope compositions. *Ore Geology Reviews*, 65: 674–686
- Deng J, Wang CM, Bagas L, Carranza EJM and Lu YJ. 2015b. Cretaceous-Cenozoic tectonic history of the Jiaojia Fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: Constraints from zircon U-Pb, illite K-Ar, and apatite fission track thermochronometry. *Miner. Deposita*, (8): 987–1006
- Du LT. 1996. The relationship between crust fluids and mantle fluids. *Earth Science Frontiers*, 3(3–4): 13–21 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Zhai MG, Xie YH and Yang JH. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Mineralium Deposita*, 38(6): 739–750
- Fan HR, Hu FF, Yang JH, Shen K and Zhai MG. 2005. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1317–1328 (in Chinese with English abstract)
- Fu B, Mernagh TP, Fairmaid AM, Phillips D and Kendrick MA. 2014. CH₄-N₂ in the Maldon gold deposit, central Victoria, Australia. *Ore Geol. Rev.*, 58: 225–237
- Goldfarb RJ and Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? *Geoscience Frontiers*, 5(2): 139–153
- Gong QJ, Yu CW and Zhang RH. 2004. Physical chemistry study on the ore-forming process of Shizhuyuan tungsten-polymetallic deposit. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 617–625 (in Chinese with English abstract)
- Gong QJ, Deng J, Wang CM, Wang ZL and Zhou LZ. 2013. Element behaviors due to rock weathering and its implication to geochemical anomaly recognition: A case study on Linglong biotite granite in Jiaodong Peninsula, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 128: 14–24
- Graupner T, Kempe U, Dombon E, Pätzold O, Leeder O and Spooner ETC. 1999. Fluid regime and ore formation in the tungsten (-yttrium) deposits of Kyzyltau (Mongolian Altai): Evidence for fluid variability in tungsten-tin ore systems. *Chemical Geology*, 154(1–4): 21–58
- Guan K, Luo ZK, Miao LC and Huang JZ. 1998. SHRIMP in zircon chronology for Guojialing suite granite in Jiaodong Zhaoye district. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 318–328 (in Chinese with English abstract)
- Guo JH, Chen FK, Zhang XM, Siebel W and Zhai MG. 2005. Evolution of syn- to post-collisional magmatism from north Sulu UHP belt, eastern China: Zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1281–1301 (in Chinese with English abstract)
- Guo JT, Guo F, Wang CY and Li CW. 2013a. Crustal recycling processes in generating the Early Cretaceous Fangcheng basalts, North China Craton: New constraints from mineral chemistry, oxygen isotopes of olivine and whole-rock geochemistry. *Lithos*, 170–171: 1–16
- Guo P, Santosh M and Li SR. 2013b. Geodynamics of gold metallogeny in the Shandong Province, NE China: An integrated geological, geophysical and geochemical perspective. *Gondwana Research*, 24(3–4): 1172–1202
- Hu FF, Fan HR, Jiang XH, Li XC, Yang KF and Mernagh T. 2013. Fluid inclusions at different depths in the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Geofluids*, 13(4): 528–541
- Huang J, Zheng YF, Zhao ZF, Wu YB, Zhou JB and Liu XM. 2006. Melting of subducted continent: Element and isotopic evidence for a genetic relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen. *Chemical Geology*, 229(4): 227–256
- Huraiova M, Dubessy J and Konecny P. 1991. Composition and oxidation state of upper mantle fluids from southern Slovakia. *Plinius*, 5: 110–111
- Jiang XH, Fan HR, Hu FF, Yang KF, Lan TG, Zheng XL and Jin NX. 2011. Comparative studies on fluid inclusion in different depths and ore genesis of the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1327–1340 (in Chinese with English abstract)
- Larizzatti JH, Oliveira SMB and Butt CRM. 2008. Morphology and composition of gold in a lateritic profile, Fazenda Pison 'Garimpo', Amazon, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(3): 359–376
- Li SR and Santosh M. 2014. Metallogeny and craton destruction: Records from the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 56: 376–414
- Li SX, Liu CC and An YH. 2007. *Geology of Gold Deposits in Jiaodong*. Beijing: Geological Publishing House, 1–423 (in Chinese)
- Li TG. 1985. Study on the characteristics of gold and silver occurrence in Sanshandao gold deposit. *Gold*, (1): 20–24 (in Chinese)
- Li XC, Fan HR, Santosh M, Hu FF, Yang KF and Lan TG. 2013. Hydrothermal alteration associated with Mesozoic granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong Gold Province, China. *Ore Geology Reviews*, 53: 403–421
- Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. Re-discuss the genetic types and

- construct meaning of Early-Yanshan Epoch in Nanling. Chinese Science Bulletin, 52(9): 981–991 (in Chinese)
- Liang YY, Liu XF, Li GJ and Li HW. 2014. Petrogenesis and connection with gold deposits of dikes in Jiaodong Peninsula, eastern of North China craton: Constrains on geochronology and Sr-Nd-Pb isotope. Geological Science and Technology Information, 33(3): 10–24 (in Chinese with English abstract)
- Litvinenko IS. 2009. The conditions of existence and typomorphism of native gold in ores of the Degdekanskoe deposit (northeastern Russia) in black-shale strata. Russian Geology and Geophysics, 50(6): 535–540
- Liu JC, Li XF, Liu YF, Wang BY, Mi NZ and Zhang X. 2010. Mineralogical characteristics of telluride and their precipitation mechanism in the Jinqingding gold deposit, eastern Shandong, China. Geological Bulletin of China, 29(9): 1319–1328 (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Mao GJ, Wu SH, Liu GZ, Liao YF, Zheng WJ, Hua SG and Yue LX. 2010. Discovery and significance of native gold in the Zhaishang gold deposit, southern Gansu, China. Geological Bulletin of China, 29(1): 115–123 (in Chinese with English abstract)
- Liu RG and Zhang ZR. 1996. The mechanism of microgranular disseminated type gold during metallogenic process. Geology-Geochemistry, (6): 60–62 (in Chinese)
- Liu S, Hu RZ, Gao S, Feng CX, Yu BB, Qi YQ, Wang T, Feng GY and Coulson IM. 2009. Zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of adakitic volcanic rocks from Jiaodong, Shandong Province, eastern China: Constraints on petrogenesis and implications. Journal of Asian Earth Sciences, 35(5): 445–458
- Lu FX and Sang LK. 2002. Petrology. Beijing: Geological Publishing House, 1–399 (in Chinese)
- Lu HZ, Fan HR, Ni P, Ou GX, Shen K and Zhang WH. 2004. Fluid Inclusions. Beijing: Science Press, 1–487 (in Chinese)
- Ma DS. 2009. Progress in research on geochemistry of tungsten. Geological Journal of China Universities, 15(1): 19–34 (in Chinese with English abstract)
- Ma L, Jiang SY, Hofman AW *et al.* 2014a. Lithospheric and asthenospheric sources of lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: A consequence of rapid lithospheric thinning beneath the North China Craton? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 124: 250–271
- Ma L, Jiang SY, Hou ML, Dai BZ, Jiang YH, Yang T, Zhao KD, Pu W, Zhu ZY and Xu B. 2014b. Geochemistry of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implication for lithospheric evolution of the eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 25(2): 859–872
- Mao JW, Wang YT, Li HM, Pirajno F, Zhang CQ and Wang RT. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 33(3–4): 361–381
- Mao JW, Pirajno F and Cook N. 2011. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings: An introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 1–7
- McDonough WF. 2003. Compositional model for the earth's core. In: Carlson RW (ed.). *The Mantle and Core*, Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2: 547–568
- Mernagh TP. 2001. A fluid inclusion study of the Fosterville Mine: A turbidite-hosted gold field in the Western Lachlan Fold Belt, Victoria, Australia. *Chemical Geology*, 173(1–3): 91–106
- Nakagawal M, Santosh M, Nambiar CG and Matsubara C. 2005. Morphology and chemistry of placer gold from Attappadi Valley, Southern India. *Gondwana Research*, 8(2): 213–222
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16(1): 491–559
- Pettke T, Frei R, Kramers JD and Villa IM. 1997. Isotope systematics in vein gold from Brusson, Val d'Ayas (NW Italy) 2. (U + Th)/He and K/Ar in native Au and its fluid inclusions. *Chemical Geology*, 135(3–4): 173–187
- Qiu KF and Yang LQ. 2011. Genetic feature of monazite and its U-Th-Pb dating: Critical considerations on the tectonic evolution of Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2721–2732 (in Chinese with English abstract)
- Roilison HR. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman Group UK Ltd., 1–275
- Rundnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Holland HD and Turekian KK (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 3: 1–64
- Sheppard SMF. 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 16(1): 165–183
- Southam G and Beveridge TJ. 1996. The occurrence of sulfur and phosphorus within bacterially derived crystalline and pseudocrystalline octahedral gold formed in vitro. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(22): 4369–4376
- Sun JM, Lou YL, Huang J, Yin HF, Cui LF, Wu J, Bao ZX and Bao JM. 2013. Geological feature and prospecting potential of scheelite deposits in surrounding of Chenshan intrusion. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 28(1): 85–94 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tan J, Wei JH, Audétat A and Pettke T. 2012. Source of metals in the Guocheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, North China Craton: Link to Early Cretaceous mafic magmatism originating from Paleoproterozoic metasomatized lithospheric mantle. *Ore Geology Reviews*, 48: 70–87
- Tan J, Wei JH, Li YJ, Fu LB, Li HM, Shi WJ and Tian N. 2015. Origin and geodynamic significance of fault-hosted massive sulfide gold deposits from the Guocheng-Liaoshang metallogenic belt, eastern Jiaodong Peninsula: Rb-Sr dating, and H-O-S-Pb isotopic constraints. *Ore Geology Reviews*, 65: 687–700
- Tang Y, Zhang H, Liu CQ and Rao B. 2008. Geochemical behavior of phosphorus in the peraluminous magmatic-hydrothermal system. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(2): 127–134 (in Chinese with English abstract)
- Taylor HP. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Economic Geology*, 69(6): 843–883
- Wang CM, Deng J, Santosh M, Carranza EJM, Gong QJ, Guo CY, Xia R and Lai XR. 2014. Timing, tectonic implications and genesis of gold mineralization in the Xincheng gold deposit, China: C-H-O isotopes, pyrite Rb-Sr and zircon fission track thermochronometry. *Ore Geology Reviews*, 65: 659–673
- Wang FN. 1987. Tungsten deposits related to regional metamorphism and ore-controlling factors. *Geological Review*, 33(5): 417–425 (in Chinese with English abstract)
- Wang LG, Qiu YM, McNaughton NJ, Groves DL, Luo ZK, Huang JZ, Miao LC and Liu YK. 1998. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5): 275–291
- Wang QF, Wan L and Liu XF. 2007. Mathematical modeling and estimation of reserves of typical structural altered rock type gold deposit. *Mineral Deposit*, 26(3): 341–345 (in Chinese with English abstract)
- Wang QF, Deng J, Liu H, Yang LQ, Wan L and Zhang RZ. 2010a. Fractal models for ore reserve estimation. *Ore Geology Reviews*, 37(1): 2–14
- Wang QF, Deng J, Zhao J, Liu HA, Wan L and Yang LQ. 2010b. Tonnage-cutoff model and average grade-cutoff model for a single ore deposit. *Ore Geology Reviews*, 38(1–2): 113–120
- Wang W and Fan GZ. 1998. The analysis and contrast of gold electron probe in Linglong district. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 17(5): 613–614 (in Chinese with English abstract)
- Wen BJ, Fan HR, Santosh M, Hu FF, Pirajno F and Yang KF. 2015. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong

- gold field, China: Constrains from geology, fluid inclusions and stable isotope. *Ore Geology Reviews*, 65: 643 – 658
- Wood SA and Vlassopoulos D. 1989. Experimental determination of the hydrothermal solubility and speciation of tungsten at 500°C and 1kbar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(2): 303 – 312
- Xia LQ, Liu WF and Tang NA. 1990. Abundances of fluorine, chlorine, sulfur and phosphorus and their evolution in volcanic magmas from Wudalianchi. *Geochimica*, (3): 197 – 206 (in Chinese with English abstract)
- Xu JH, Xie YL, Liu JM, Zhu HP and Jia CS. 2005. Trace elements in fluid inclusions of Linglong-Jiaojia type gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1389 – 1394 (in Chinese with English abstract)
- Xu YS, Zhang BR and Han YW. 1992. An experimental study on the partitioning of tungsten between aqueous fluids and silicate melts. *Geochimica*, (3): 273 – 281 (in Chinese with English abstract)
- Yang HY, Wang SH, Song XL, Pan HD and Ma PC. 2011. Gold occurrence of Jiaojia gold mine in Shandong Province. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21(9): 2072 – 2077
- Yang LQ, Deng J, Goldfarb RJ, Zhang J, Gao BF and Wang ZL. 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China. *Gondwana Research*, 25(4): 1469 – 1483
- Yang LQ, Deng J, Wang ZL, Zhang L, Guo LN, Song CM and Zheng XL. 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2447 – 2467 (in Chinese with English abstract)
- Yang LQ, Deng J, Wang ZL, Zhang L, Goldfarb RJ, Yuan WM, Weinberg RF and Zhang RZ. 2015a. Thermo-chronologic constraints on evolution of the Linglong Metamorphic Core Complex and implications for gold mineralization: A case study from the Xiadian gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China. *Ore Geology Reviews*, doi:10.1016/j.oregeorev.2015.07.006
- Yang LQ, Deng J, Guo RP, Guo LN, Wang ZL, Chen BH and Wang XD. 2015b. World-class Xincheng gold deposit: An example from the giant Jiaodong Gold Province. *Geoscience Frontiers*, doi. 10.1016/j.gsf.2015.08.006
- Yang QY, Shen JF, Li SR, Santosh M, Luo ZH and Liu Y. 2013. Oxygen, boron, chromium and niobium enrichment in native Au and Ag grains: A case study from the Linglong gold deposit, Jiaodong, eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 537 – 546
- Yang QY and Santosh M. 2015. Early Cretaceous magma flare-up and its implications on gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China. *Ore Geology Reviews*, 65: 626 – 642
- Yang ZF. 1998. *The Region Area Crustal Evolution and Geochemical Gold Mineralization in Jiaodong*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Yin QZ, Jacobsen SB, Yamashita K, Blichert-Toft J, Télouk P and Albarède F. 2002. A short timescale for terrestrial planet formation from Hf-W chronometry of meteorites. *Nature*, 418(6901): 949 – 952
- Yu YM, Gammons CH and Williams-Jones AE. 1997. A possible mechanism of Au settlement: Disproportionated reaction. *Science in China (Series D)*, 27(5): 419 – 424 (in Chinese)
- Zeng JN and Fan YX. 2002. Experiments of mechanisms of gold precipitated by fluid-mixing function. *Earth Science*, 27(1): 41 – 45 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Fan HR, Yang JH and Miao LC. 2004. Large-scale cluster of gold deposits in East Shandong: Anorogenic metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 85 – 98 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Sun M, Zhou XH, Fan WM, Zhai MG and Yin JF. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144(2): 241 – 254
- Zhang HF, Li SR, Zhai MG and Guo JH. 2006. Crust uplift and its implications in the Jiaodong Peninsula, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 285 – 295 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF and Gao S. 2012. *Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 410 (in Chinese)
- Zhang LC, Shen YC, Liu TB, Zeng QD, Li GM and Li HM. 2003. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr isochron dating of the gold deposits on northern margin of the Jiaolai basin, Shandong, China. *Science in China (Series D)*, 46(7): 708 – 718
- Zhang ZC and Qu SC. 2006. Characteristic of gold ore and gold mineral in Jiaodong Damoqujia gold deposit. *Gold*, 27(2): 17 – 20 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177 – 202
- Zhao GT, Cao QC, Wang DZ and Li HM. 1997. Zirconic U-Pb dating on the Laoshan granitoids and its significance. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 27(3): 382 – 388 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈光远, 孙岱生, 周珣若, 邵伟, 宫润谭, 邵岳. 1993. 胶东郭家岭花岗岩长岩成因矿物学与金矿化. 北京: 中国地质大学出版社, 1 – 230
- 陈竞志, 姜能. 2011. 胶东晚三叠世碱性岩浆作用的岩石成因——来自锆石 U-Pb 年龄、Hf-O 同位素的证据. *岩石学报*, 27(12): 3557 – 3574
- 邓军, 方云, 杨立强等. 2000. 剪切蚀变与物质迁移及金的富集——以胶东矿集区为例. *地球科学*, 25(4): 428
- 邓军, 高帮飞, 王庆飞, 杨立强. 2005a. 成矿流体系统的形成与演化. *地质科技情报*, 24(1): 49 – 54 文中引用区别是 a 还是 b?
- 邓军, 王庆飞, 杨立强, 高帮飞. 2005b. 胶东西北部金热液成矿系统内部结构解析. *地球科学-中国地质大学学报*, 30(1): 102 – 108
- 邓军, 王建国, 韦延光, 张志启, 林吉照, 闫顺玲. 2007. 山东谢家沟金矿床矿石与金矿物特征. *地球科学*, 32(3): 373 – 380
- 杜乐天. 1996. 地壳流体与地幔流体间的关系. *地学前缘*, 3(3 – 4): 13 – 21
- 范宏瑞, 胡芳芳, 杨进辉, 沈昆, 翟明国. 2005. 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. *岩石学报*, 21(5): 1317 – 1328
- 龚庆杰, 於崇文, 张荣华. 2004. 柿竹园钨多金属矿床形成机制的物理化学分析. *地学前缘*, 11(4): 617 – 625
- 关康, 罗镇宽, 苗来成, 黄佳展. 1998. 胶东招掖郭家岭型花岗岩锆石 SHRIMP 年代学研究. *地质科学*, 33(3): 318 – 328
- 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学. *岩石学报*, 21(4): 1281 – 1301
- 姜晓辉, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 蓝廷广, 郑小礼, 金念宪. 2011. 胶东三山岛金矿中深部成矿流体对比及矿床成因. *岩石学报*, 27(5): 1327 – 1340
- 李士先, 刘长春, 安郁宏. 2007. *胶东金矿地质*. 北京: 地质出版社, 1 – 423
- 李铁公. 1985. 三山岛金矿金银赋存状态特性研究. *黄金*, (1): 20 – 24

- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 52(9): 981-991
- 梁亚运, 刘学飞, 李龚健, 李洪伟. 2014. 胶东地区脉岩成因与金成矿关系的研究: 年代学及 Sr-Nd-Pb 同位素的约束. 地质科技情报, 33(3): 10-24
- 刘建朝, 李旭芬, 刘亚非, 汪帮耀, 米乃哲, 张雪. 2010. 胶东牟平-乳山金矿带金青顶金矿砷化物矿物的特征及沉淀机制. 地质通报, 29(9): 1319-1328
- 刘家军, 毛光剑, 吴胜华, 刘光智, 廖延福, 郑卫军, 华曙光, 岳连雄. 2010. 甘肃礼县岷县成矿带西段寨上金矿床中自然金的发现及成因意义. 地质通报, 29(1): 115-123
- 刘荣高, 张哲儒. 1996. 微细粒浸染型金矿成矿过程中金沉淀机理. 地质地球化学, (6): 60-62
- 路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 1-399
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 1-487
- 马东升. 2009. 钨的地球化学研究进展. 高校地质学报, 15(1): 19-34
- 邱昆峰, 杨立强. 2011. 独居石成因特征与 U-Th-Pb 定年及三江特提斯构造演化研究例析. 岩石学报, 27(9): 2721-2732
- 孙际茂, 娄亚利, 黄杰, 尹华峰, 崔立峰, 吴俊, 鲍振襄, 包觉敏. 2013. 辰山岩体周边白钨矿床地质特征与找矿前景. 地质找矿论丛, 28(1): 85-94
- 唐勇, 张辉, 刘丛强, 饶冰. 2008. 过铝质岩浆-热液演化体系中磷的地球化学行为. 岩石矿物学杂志, 27(2): 127-134
- 王发宁. 1987. 与区域变质作用有关的钨矿床及控矿因素. 地质论评, 33(5): 417-425
- 王庆飞, 万丽, 刘学飞. 2007. 典型构造蚀变岩型金矿远景资源量数学模型与预测. 矿床地质, 26(3): 341-345
- 王微, 范国传. 1998. 玲珑地区金矿石中金矿物电子探针分析及对比. 电子显微学报, 17(5): 613-614
- 夏林圻, 刘文峰, 唐南安. 1990. 五大连池火山岩浆中氟、氯、硫、磷的丰度和演化. 地球化学, (3): 197-206
- 徐九华, 谢玉玲, 刘建明, 朱和平, 贾长顺. 2005. 玲珑-焦家式金矿床流体包裹体的稀土和微量元素特征. 岩石学报, 21(5): 1389-1394
- 许永胜, 张本仁, 韩吟文. 1992. 钨在水流体和硅酸盐熔体相间分配的实验研究. 地球化学, (3): 273-281
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 张良, 郭林楠, 宋明春, 郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统. 岩石学报, 30(9): 2447-2467
- 杨忠芳. 1998. 胶东区域地壳演化与金成矿作用地球化学. 北京: 地质出版社
- 郁云妹, Gammons CH, Williams-Jones AE. 1997. 金沉淀的一个可能机理——歧化反应. 中国科学(D辑), 27(5): 419-424
- 曾键年, 范永香. 2002. 流体混合作用导致金沉淀机理的实验研究. 地球科学, 27(1): 41-45
- 翟明国, 范宏瑞, 杨进辉, 苗来成. 2004. 非造山带型金矿——胶东型金矿的陆内成矿作用. 地学前缘, 11(1): 85-98
- 张华锋, 李胜荣, 翟明国, 郭敬辉. 2006. 胶东半岛早白垩世地壳隆升剥蚀及其动力学意义. 岩石学报, 22(2): 285-295
- 张宏飞, 高山. 2012. 地球化学. 北京: 地质出版社, 1-410
- 张志臣, 曲少翠. 2006. 胶东大磨曲家金矿床矿石及金矿物特征. 黄金, 27(2): 17-20
- 赵广涛, 曹钦臣, 王德滋, 李惠民. 1997. 崂山花岗岩锆石 U-Pb 年龄测定及其意义. 青岛海洋大学学报, 27(3): 382-388