

胶东大尹格庄金矿床成矿流体特征与演化*

魏瑜吉¹ 邱昆峰^{1**} 郭林楠^{1,2} 刘向东^{1,3} 汤磊⁴ 史启发⁴ 高学坎⁴

WEI YuJi¹, QIU KunFeng^{1**}, GUO LinNan^{1,2}, LIU XiangDong^{1,3}, TANG Lei⁴, SHI QiFa⁴ and GAO XueKan⁴

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. 中国地质调查局成都地质调查中心 成都 610081

3. 山东省第六地质矿产勘查院 威海 264209

4. 招金矿业股份有限公司大尹格庄金矿 招远 265413

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

2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China

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

4. Zhaoyuan Gold Mining Limited Company Dayingezhuang Gold Deposit, Zhaoyuan 265413, China

2019-12-05 收稿, 2020-03-31 改回.

Wei YJ, Qiu KF, Guo LN, Liu XD, Tang L, Shi QF and Gao XK. 2020. Characteristics and evolution of ore – fluids of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong gold province. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1821 – 1832, doi: 10.18654/1000-0569/2020.06.11

Abstract The Jiaodong gold province, defined as the largest gold province in China, postdates ~2Ga years of host rock. The Dayingezhuang gold deposit, located in the middle section of the Zhao-Ping fault, is a world-class gold deposit characterized by disseminated and stockwork style mineralization. Four stages of ore-forming processes were identified, namely sericite-quartz-pyrite stage (stage I), quartz-pyrite stage (stage II), quartz-pyrite-sphalerite-galena stage (stage III), and quartz-calcite-pyrite stage (stage IV). In stage I, the δD range from -84.4‰ to -68.4‰ and the $\delta^{18}O$ range from 2.04‰ to 7.36‰ . In stage II, the δD range from -78.6‰ to -69.8‰ and the $\delta^{18}O$ range from -0.3‰ to 4.2‰ . In stage III, the δD range from -72.0‰ to -81.4‰ and the $\delta^{18}O$ range from -3.47‰ to -1.25‰ . The $\delta^{18}O$ values decreased with the mineralization going on. In contrast, the $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$ were decreased and increased respectively, which is distinct from the $\delta^{18}O$ of H-O isotope composition. The probable reason is that the test object of H-O isotopes composition is the water in inclusions but the object of C-O isotopes is the CO_2 in inclusions. Metamorphic water was the dominant origin of ore-fluid of Dayingezhuang gold deposit. The secondary inclusions caused by continuous structural deformation may give rise to the change of isotopes composition.

Key words C-H-O isotopes; Ore-forming fluids evolution; Dayingezhuang gold deposit; Jiaodong gold province

摘要 胶东是我国最重要的黄金产地,也是全球成矿晚于赋矿围岩近2Ga的巨型金矿集区之一。大尹格庄金矿床位于胶西北招平断裂中段,是区域内典型的超大型蚀变岩型金矿床,也是胶东金矿集区内最大的金银伴生矿床。本研究在详实的野外地质调查和岩相学观察基础上,对不同成矿阶段的石英中流体包裹体进行碳、氢、氧同位素测试和计算。大尹格庄金矿床热液成矿过程可分为四个阶段:黄铁矿-绢云母-石英阶段(I阶段)、石英-黄铁矿阶段(II阶段)、石英-多金属硫化物阶段(III阶段)和石英-方解石-黄铁矿阶段(IV)。氢-氧同位素组成表明,I阶段流体的 δD 为 -84.4‰ ~ -68.4‰ , $\delta^{18}O$ 为 2.04‰ ~ 7.36‰ ;II阶段流体的 δD 为 -78.6‰ ~ -69.8‰ , $\delta^{18}O$ 为 -0.3‰ ~ 4.2‰ ;III阶段流体的 δD 为 -81.4‰ ~ -72.0‰ , $\delta^{18}O$ 为 -3.47‰ ~ -1.25‰ 。随着成矿作用进行, $\delta^{18}O$ 逐渐降低。流体包裹体的碳-氧同位素分析表明, $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 分别随成矿作用的进行降低和升高。两种测试获得的氧同位素变化趋势不同,可能是由于前者是通过石英单矿物氧同位素计算得到的流体包裹体中水的氧同位素,而后者测定的是流体包裹体中 CO_2 的氧同位素。综合分析表明,大尹格庄金矿床成矿流体主体为

* 本文受国家重点研发计划(2019YFA0708603、2016YFC0600107-4)、国家自然科学基金项目(41230311、41572069)和高等学校学科创新引智计划(BP0719021)联合资助。

第一作者简介:魏瑜吉,男,1994年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: 821285469@qq.com

** 通讯作者:邱昆峰,男,1986年生,副教授,从事矿床学科研究与教学工作,E-mail: kunfengqiu@qq.com

变质水;成矿作用过程中,断裂带强烈构造变形诱发次生包裹体的形成导致氢氧同位素组成向中生代大气水漂移。

关键词 C-H-O 同位素;成矿流体演化;大尹格庄金矿床;胶东金矿集区

中图法分类号 P597.2; P618.51

胶东是我国最重要的金矿集区(Deng *et al.*, 2003),已探明金资源储量超过4500吨(宋明春, 2015; Song *et al.*, 2015; Deng *et al.*, 2020b),黄金年产量达全国1/4。胶东金矿集区地处华北克拉通东南缘,被认为是形成明显晚于赋矿围岩的巨型金富集成矿地区之一(杨立强等, 2020)。近年来大量精细成矿年代学研究表明,胶东金矿集区约120Ma的成矿年龄较区域变质作用晚近二十亿年(Yang *et al.*, 2014; Goldfarb *et al.*, 2019; Deng *et al.*, 2020a),且产出环境和成矿动力学背景独具特色,吸引了国内外广大研究者的关注(Fan *et al.*, 2003; Goldfarb and Santosh, 2014; Goldfarb and Groves, 2015; Li *et al.*, 2015; Deng and Wang, 2016; Groves and Santosh, 2016; Yang *et al.*, 2016b; Sai *et al.*, 2020)。

胶东金矿集区内近90%的金资源量赋存于胶西北地区,区内已探明金矿床几乎全部受控于郯庐断裂的NE-NNE向次级断裂系统(杨立强等, 2014),主要的控矿断裂自西向东依次为三山岛断裂带、焦家断裂带和招平断裂带。前人已对胶东金矿集区开展了大量找矿勘查和成矿理论研究工作,主要聚焦矿床地质特征、成矿年代学、成矿流体特征、成矿物质来源和成矿动力学等方面(Deng *et al.*, 2015a; Yang *et al.*,

2017),取得丰硕勘查和科研成果,为揭示胶东金矿集区更贴近客观地质事实的成因模式提供了大量数据资料 and 不同思路(Deng *et al.*, 2015b; Groves *et al.*, 2020)。

大尹格庄金矿床位于胶西北招平断裂带中段,已探明金资源量逾170吨(张良等, 2014),是典型的蚀变岩型金矿床。前人对该矿床开展了包裹体测温、包裹体成分等成矿流体特征方面的初步研究(Yang *et al.*, 2009; 刘育等, 2014; Chai *et al.*, 2019)。然而,关于成矿流体来源与演化等关键科学问题尚未查明,阻碍了对该矿床成因模式的进一步探讨。Yang *et al.* (2009)通过流体包裹体显微测温 and 包裹体成分揭示大尹格庄金矿床金成矿流体属于中低温(140~360°C),早阶段为CO₂-H₂O-K₂SO₄流体系统,逐渐演化成CO₂-H₂O-NaCl系统,晚阶段大气水大量混入;刘育等(2014)分析了不同成矿阶段流体包裹体成分,认为沸腾作用是导致金沉淀的重要因素,成矿流体主要为变质水;Yuan *et al.* (2019)通过菱铁矿和晚阶段方解石的碳同位素研究,认为成矿流体来源于深部幔源岩浆,并于晚期与大气水混合。上述认识存在争议的原因很可能是不同研究者均仅针对某一成矿阶段产物的碳氧或氢氧同位素进行讨论,缺少对整个成

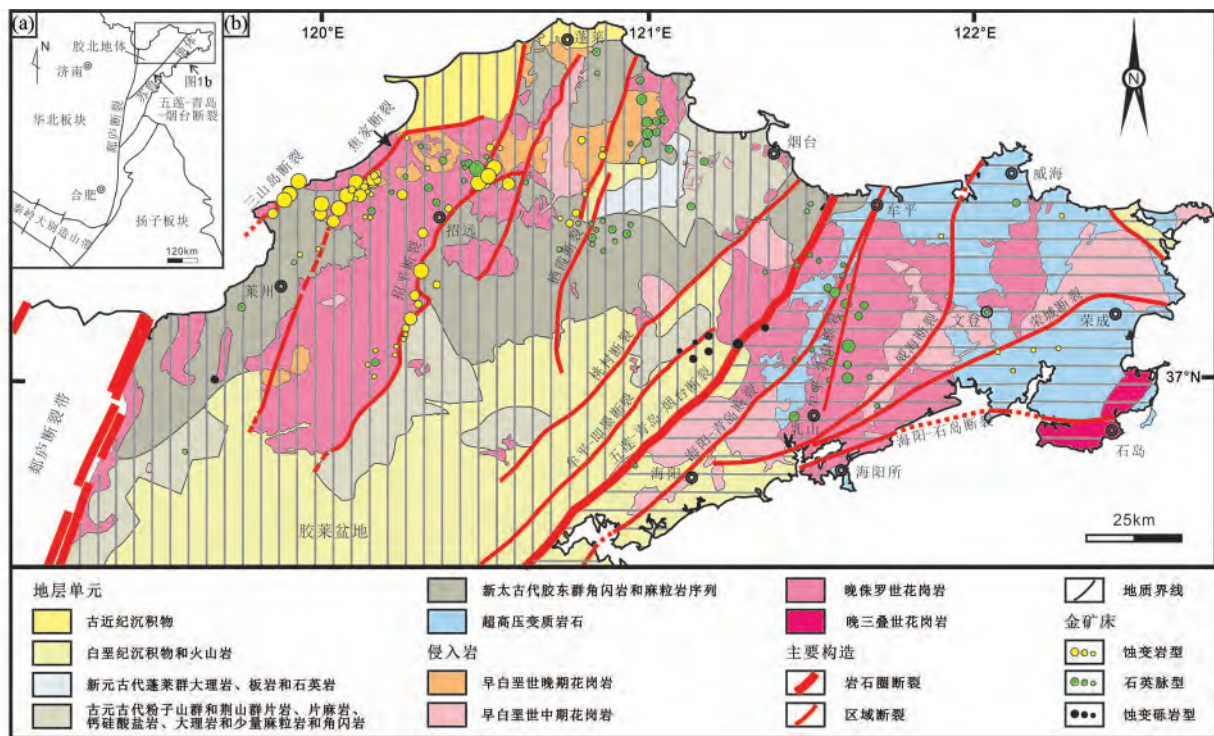


图1 胶东构造地质与金矿分布简图(据Yang *et al.*, 2016b修改)

Fig.1 Simplified geological map of the Jiaodong gold province showing the distribution of major fault zones, Precambrian metamorphic rocks, Mesozoic granitoid intrusions, sedimentary rocks and gold deposits (modified after Yang *et al.*, 2016b)

矿过程的多种同位素约束。本研究在详实的野外地质调查基础上,就成矿流体来源与演化这一问题开展早、主阶段石英中流体包裹体的 C-H-O 同位素研究,分析和总结同位素组成的变化规律,结合区域成矿背景和矿床地质特征,揭示大尹格庄金矿床成矿流体来源与演化过程。

1 区域地质背景

胶东金矿集区位于华北克拉通东南缘,西以郯庐断裂为界,东与太平洋俯冲板片相邻。以五莲-青岛-烟台深大断裂为界,胶东可分为西北部的胶北地体和东南部的苏鲁地体两个前寒武构造单元。胶北地体又可分为北部的胶北隆起和南部的胶莱盆地,其中胶东内近 90% 金资源量赋存于胶北地体中(图 1, Yang *et al.*, 2016a)。

胶北隆起区内出露地层主要有太古宇胶东群(图 1, Tang *et al.*, 2007)、下元古界荆山群和粉子山群(董春艳等, 2011; Tam *et al.*, 2011; 刘平华等, 2011; 谢士稳等, 2014)以及上元古界蓬莱群(Faure *et al.*, 2004; 初航等, 2011)。胶东群主要由角闪岩相区域变质岩组成,常见岩性有斜长角闪岩、黑云片麻岩和变粒岩;荆山群和粉子山群主要由钙镁质碳酸盐岩和超基性-基性-中酸性火山岩经角闪岩相区域变质作用形成,推测与胶东群呈不整合或断层接触(陈光远等, 1993);蓬莱群主要岩性为变质石英砂岩夹变质粉砂岩(初航等, 2011)。

胶东地区中生代岩浆作用十分发育,主要包括玲珑岩体、郭家岭岩体和艾山岩体等。形成于 165 ~ 150Ma 的玲珑复式岩体呈带状分布于焦家断裂和招平断裂之间(Jiang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; 郭林楠等, 2014),主要岩性为黑云母花岗岩(赛盛勋等, 2016)。郭家岭岩体主要岩性为花岗闪长岩和石英二长岩(刘跃等, 2014; 耿科等, 2016),侵位于变质基底或玲珑岩体之中,LA-ICP-MS 测定的锆石 U-Pb 年龄为 132 ~ 123Ma(刘跃等, 2014)。艾山岩体侵位于郭家岭岩体中,岩性为正长花岗岩和二长花岗岩,Goss *et al.* (2010) 报导了该岩体中的锆石 U-Pb 年龄为 118 ~ 110Ma。玲珑岩体和郭家岭岩体是主要的容矿地质体(Deng *et al.*, 2018)。此外,区域内还发育有煌斑岩、辉绿岩等大量基性岩脉(Deng *et al.*, 2017)。

胶东金矿集区内主要的构造格架为 NNE-NE 向断裂系统和 EW 向褶皱或韧性剪切带(图 2, Deng *et al.*, 2019)。EW 向构造带自太古宙便有一系列构造活动,而在中生代活动更为强烈(Deng *et al.*, 2019)。NNE-NE 向断裂带被认为是郯庐断裂的次级断裂系统,包括三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂等及其次级断裂,区域内金矿床分布严格受控于这些断裂(杨立强等, 2014; Deng and Wang, 2016; Qiu *et al.*, 2019)。大尹格庄金矿床位于胶东胶西北招平断裂带中段。区内主要控矿断裂为招平断裂,沿胶东群变质基底岩石和玲珑岩体的接触带展布,主断裂中段走向 10° ~ 20°,倾向

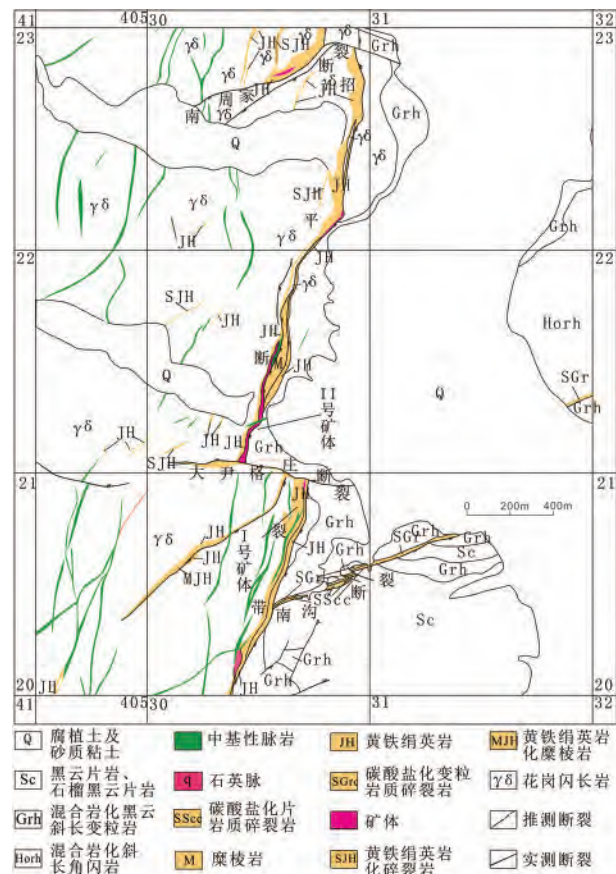


图 2 大尹格庄金矿地质简图(据 Yang *et al.*, 2009 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Dayingezhuang goldfield (modified after Yang *et al.*, 2009)

南东,倾向往深部逐渐变缓。该断裂带及其次级断裂控制着大尹格庄金矿床、夏甸金矿床等大型、超大型金矿床的产出。

2 矿床地质特征

大尹格庄金矿床位于招平断裂带中段。矿区内出露地层是太古宙胶东群和古元古代荆山群禄格庄组变质岩(图 2)。胶东群岩性以黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩为主,分布在招平断裂带上盘,少部分以捕虏体形式分布在下盘花岗岩中。古元古代荆山群禄格庄组主要由黑云片岩组成,分布在矿区中、东部,与围岩呈断裂构造或韧性变形构造接触,呈块状、条带状分布。区内花岗岩分布十分广泛,主要为玲珑二长花岗岩和黑云母花岗岩。玲珑花岗岩是大尹格庄金矿床的主要赋矿围岩,分布在招平断裂带的下盘。此外,区内不同类型脉岩十分发育(图 2),主要有辉绿玢岩、煌斑岩、闪长玢岩、石英闪长玢岩、闪长煌斑岩脉等,走向 NNE 分布在下盘玲珑花岗岩中。脉岩与矿化关系较为复杂,早期脉岩受到不同程度蚀变,甚至形成矿体,晚期脉岩切穿矿体或矿脉。

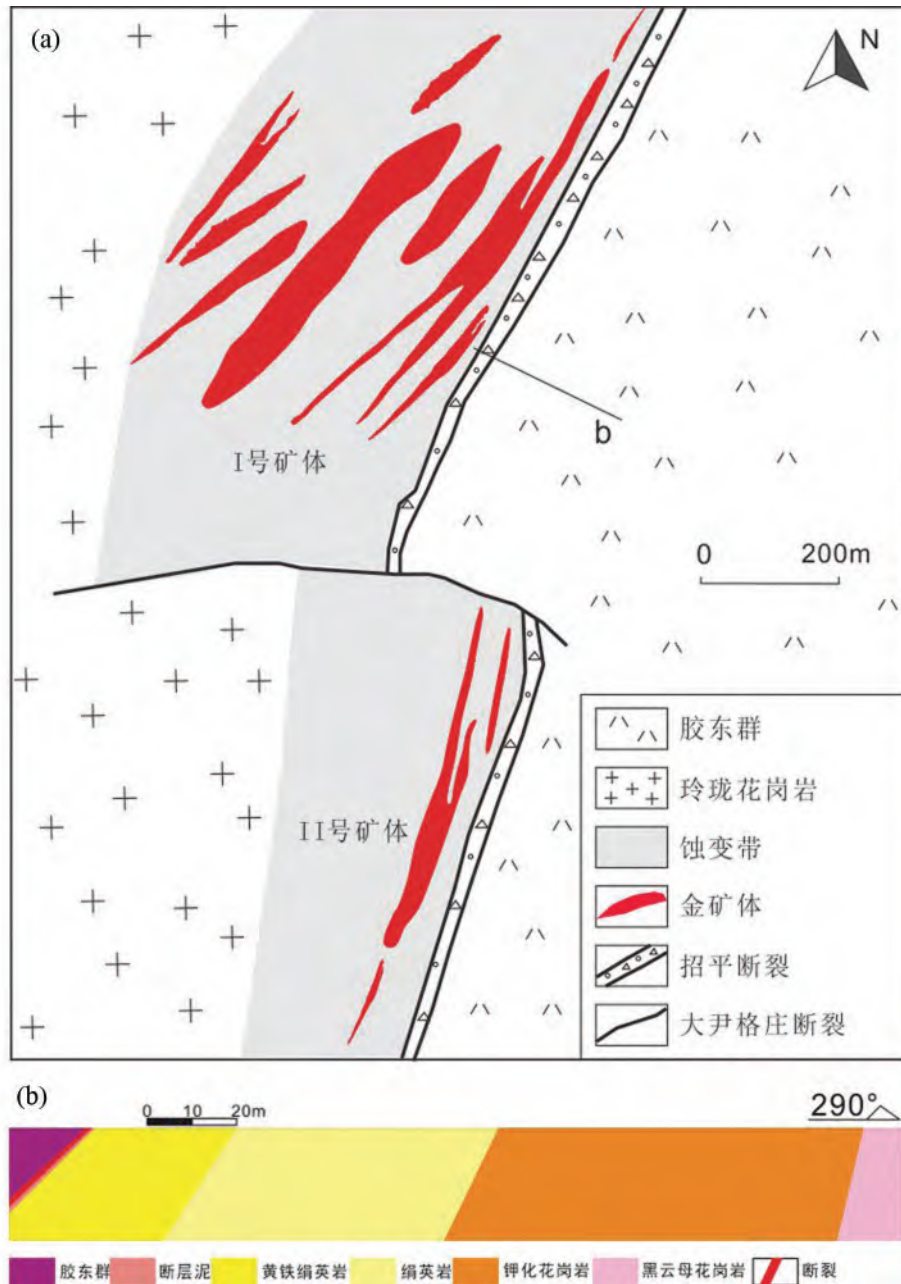


图3 大尹格庄金矿床矿体地质图(a)及地质剖面示意图(b)

Fig. 3 Sketch geological map of the plan view (a) and geological cross-section map (b) of the Dayingezhuang gold deposit

矿区内构造主要为断层,褶皱不发育。主要的断层包括NNE向招平主断裂及其次级断裂和近EW走向的大尹格庄断裂(图2)。招平断裂带走向约20°,倾向南东,自浅部往深倾角从58°逐渐变为近20°。该断层下盘的玲珑黑云母花岗岩普遍发育有黄铁绢英岩化,是大尹格庄金矿床主要的控矿断裂,控制着矿体的规模、产状、形态、品位(图3a)。大尹格庄断裂走向约280°,倾向北东,倾角约43°~60°,由破碎岩、角砾岩和断层泥组成,错断招平断裂(图3a)。

大尹格庄金矿床内热液蚀变较强,发育于招平断裂带的下盘(图4)。热液蚀变类型主要有钾长石化、绢英岩化、碳

酸盐化、硅化等(图3b)。大尹格庄断裂下盘蚀变带相对较窄而上盘蚀变带则较厚。根据矿体赋存位置及地质特征可将大尹格庄金矿床分为两个主要矿体。I号矿体金资源量占总量的34%,赋存于招平断裂下盘和大尹格庄断裂下盘,走向18°~28°,倾角19°~42°,沿走向最大长度990m,最小长度450m,具北东侧伏的特征。矿体呈脉状、似层状,沿走向和倾向呈舒缓波状延伸,矿石类型为黄铁绢英岩化碎裂岩和黄铁绢英岩。II号矿体相对I号矿体更为厚大,金资源量占总储量超过60%,走向18°~51°,倾角28°~53°,沿走向最大长度1057m,最小长度260m。两个矿体主要的金属矿物

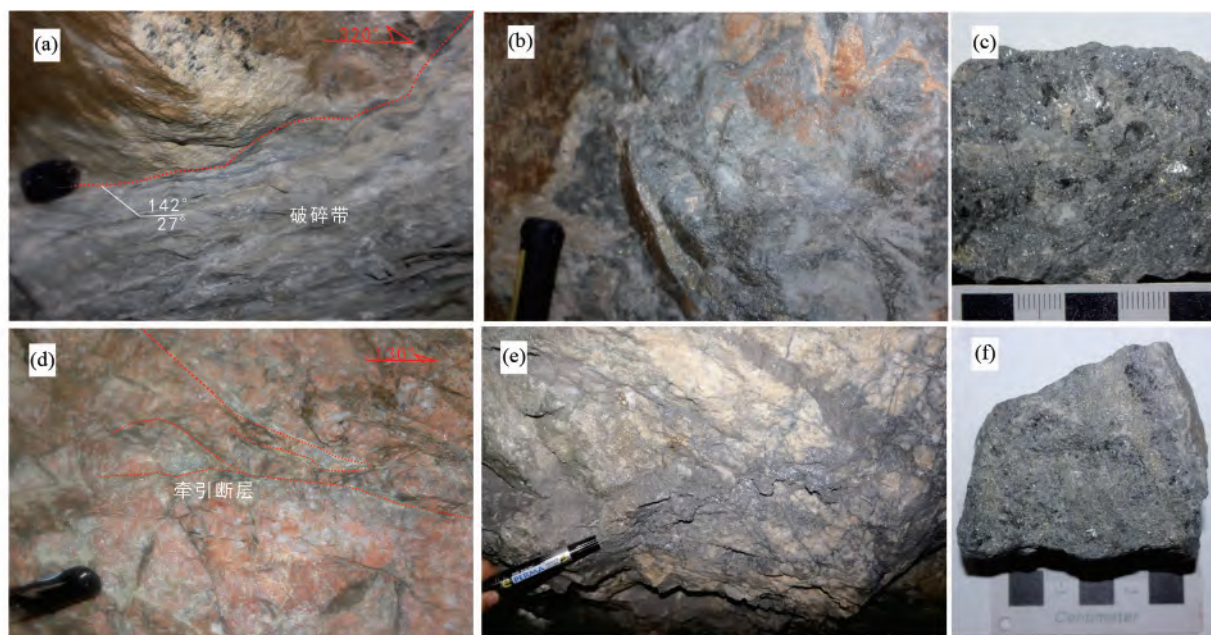


图4 大尹格庄金矿床主要地质体及手标本照片

(a) 招平主断裂破碎带中发育有绢云母、石英等蚀变矿物; (b) II号矿体绢英岩化蚀变带; (c) II号矿体金矿石; (d) 钾化蚀变带; (e) I号矿体绢英岩化蚀变带; (f) I号矿体金银矿石

Fig. 4 Dominant ore-hosting rocks and associated alteration and mineralization of the Dayingezhuang gold deposit

均为黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿等(图5),黄铁矿是主要的载金矿物,但I号矿体银品位和Pb、Zn硫化物含量很高,这一矿物学特征不同于II号矿体(张良等,2014;张瑞忠等,2016)。

根据脉体穿插关系和矿物共生组合,可将金的热液成矿过程分为四个阶段(图6):黄铁矿-绢云母-石英阶段(I)、石英-黄铁矿阶段(II)、石英-多金属硫化物阶段(III)和石英-方解石-黄铁矿阶段(IV)。I阶段主要矿物为石英、绢云母和少量黄铁矿。石英以乳白色居多,呈半自形或他形,可见有韧性变形和脆性变形。自形-半自形黄铁矿呈浸染状分布在石英和绢云母中。该阶段有少量的金发育,为成矿早阶段。II阶段主要以石英黄铁矿细脉、网脉或浸染状黄铁矿形式分布在绢英岩或钾化花岗岩中,主要矿物有黄铁矿、石英和少量绢云母等。石英多呈白色或烟灰色,脆性变形普遍发育。黄铁矿常以自形-半自形立方体或集合体的形式分布。可见金较多,分布在黄铁矿裂隙内或被包裹在石英和黄铁矿中。III阶段发育有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、石英和少量绢云母,石英多呈烟灰色,自形-半自形结构,常伴有脆性变形。黄铁矿多以他形集合体形式存在,方铅矿、闪锌矿等贱金属硫化物广泛发育,稍晚于黄铁矿形成。III阶段与II阶段是金的成矿主阶段。金常发育于黄铁矿裂隙内或被包裹于黄铁矿颗粒中,也可见有金颗粒与方铅矿脉密切共生。IV阶段主要由石英、方解石和少量黄铁矿组成,石英多呈白色,自形或半自形。金含量较少,为成矿晚阶段。

3 样品采集与分析方法

本次研究在对大尹格庄金矿床进行详细的野外地质调查和成矿阶段划分的基础上,系统采集了不同成矿阶段、不同矿化样式(石英脉型、蚀变岩型)的样品26件,分别挑选石英单矿物进行碳、氢、氧同位素分析测试。

C-H-O同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室完成,首先将所选样品进行粉碎、粗选和清洗,在显微镜下选取40~60目石英单矿物,使其纯度达到99%以上。石英内流体包裹体氢和矿物氧同位素测试使用质谱型号为MAT-252。流体包裹体中水的氢同位素分析采用锌还原法,把分选的单矿物在105℃以下烘干后,在真空系统中逐步加热抽走部分次生包裹体的水,加热至600℃使其中的包裹体热爆,释放的水通过收集、冷凝和纯化处理,然后用锌置换出水中的氢,对获得的H₂进行质谱分析。石英的氧同位素则采用BrF₅法,首先用BrF₅在500~550℃条件下与石英矿物反应15小时,然后用液氮将产生的O₂纯化,最后在700℃将O₂转变为CO₂并用于质谱分析。氢、氧同位素的分析精度分别是±1%和±0.2%。流体包裹体的氧同位素是根据寄主矿物石英的氧同位素,利用石英-水之间氧同位素平衡分馏方程 $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$ (Clayton *et al.*, 1972),计算得到与石英达到分馏平衡的流体 $\delta^{18}\text{O}$ 水值。流体包裹体的碳、氧同位素测试方法为:把分选的单矿物在105℃以下烘干后,在高于矿样均一

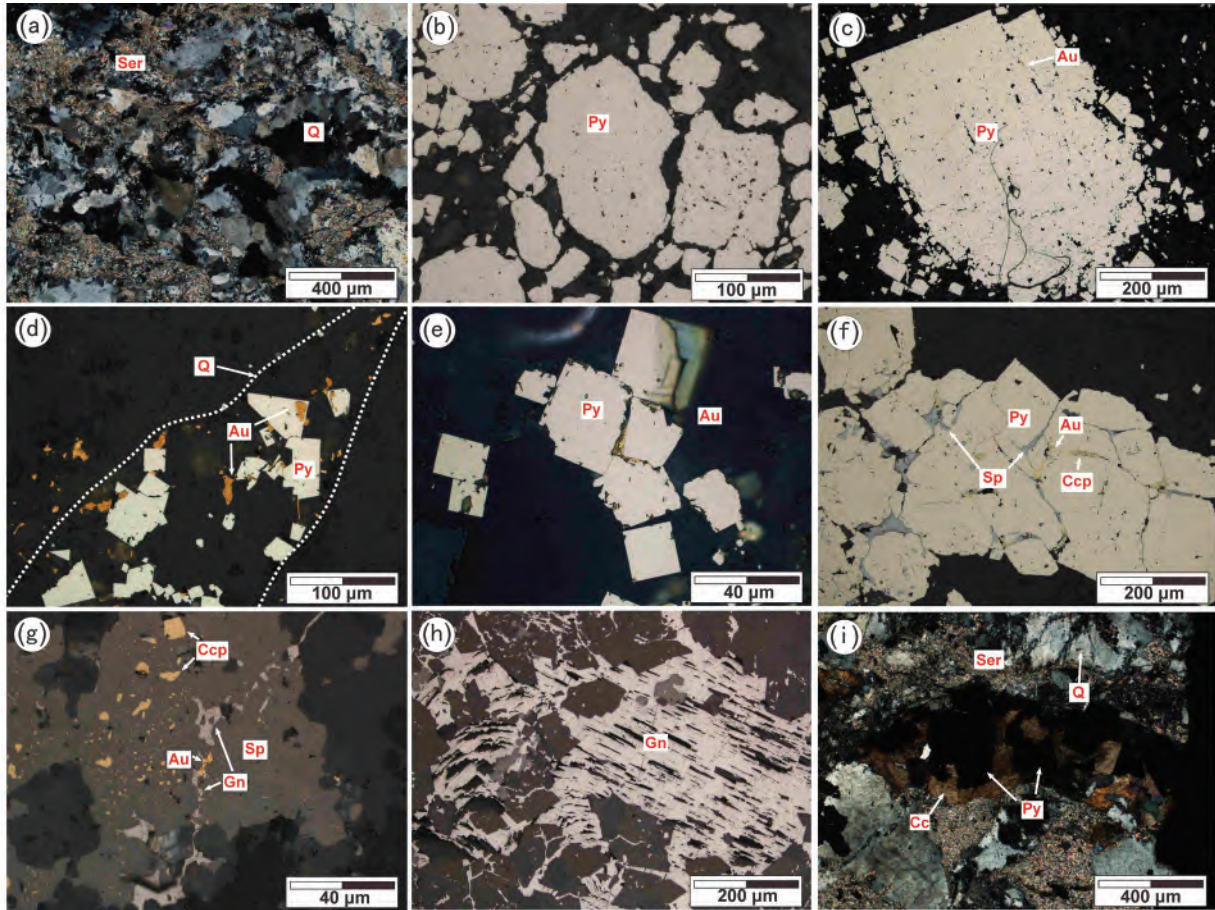


图5 大尹格庄金矿床矿石的显微镜下照片

(a) 绢英岩化蚀变; (b) 半自形黄铁矿; (c) 金存在于黄铁矿集合体中; (d) 金分布于自形黄铁矿的石英脉中; (e) 金分布于自形黄铁矿裂隙中; (f) 金与黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿共生; (g) 含金方铅矿脉穿插闪锌矿; (h) 方铅矿发生强烈变形; (i) 晚期黄铁矿与方解石共生. 矿物缩写: Q-石英; Ser-绢云母; Py-黄铁矿; Au-金矿物; Ccp-黄铜矿; Sp-闪锌矿; Gn-方铅矿; Cc-方解石

Fig. 5 Photomicrographs under transmitted light and reflected light of ore-hosting rocks from the Dayingezhuang gold deposit

矿物种类	黄铁矿-绢云母-石英阶段(I)	石英-黄铁矿阶段(II)	石英-多金属硫化物阶段(III)	石英-方解石-黄铁矿阶段(IV)
石英	—	—	—	—
绢云母	—	—	—	—
黄铁矿	—	—	—	—
金	—	—	—	—
黄铜矿	—	—	—	—
磁黄铁矿	—	—	—	—
方铅矿	—	—	—	—
闪锌矿	—	—	—	—
方解石	—	—	—	—

图6 大尹格庄金矿床矿物共生组合及生成顺序

Fig. 6 Paragenesis of ore minerals from the Dayingezhuang gold deposit

温度 200 ~ 250℃ 的条件下爆裂释放包裹体中的气体, 然后用液氮-酒精的逐步冷凝纯化, 提取出其中 CO₂, 然后对 CO₂ 进行质谱分析, 使用质谱型号 MAT-253。

4 测试结果

4.1 氢-氧同位素特征

14 件样品的 δD 值为 -84.4‰ ~ -68.4‰, δ¹⁸O_{V-SMOW} 为 7.34‰ ~ 12.66‰ (表 1)。流体的氢同位素即为寄主矿物石英中水的氢同位素, 氧同位素则需根据石英的氧同位素和不同成矿阶段的成矿温度计算。流体包裹体均一温度为成矿温度的下限, 故可近似取各成矿 I 阶段的流体包裹体最高均一温度作为成矿温度, 大尹格庄金矿床成矿主阶段普遍存在流体不混溶 (Yang *et al.*, 2014; 刘育等, 2014) 而平衡温度更接近于成矿温度 (Hagemann and Lüders, 2003); 通过流体包裹体均一温度测试, 已得到大尹格庄金矿床成矿 I-III 阶段的成矿温度分别为 350℃、280℃、180℃ (Yang *et al.*, 2009; 刘育等, 2014)。

成矿 I 阶段流体的 δD 为 -84.4‰ ~ -68.4‰, 平均为 -75.8 ± 8.6‰ (n = 6), δ¹⁸O 为 2.04‰ ~ 7.36‰, 平均为 5.0

表1 大尹格庄金矿床 D-O 同位素分析结果(‰)

Table 1 D-O isotopes of the Dayingezhuang gold deposit (‰)

样品号	岩性	成矿阶段	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}(\text{‰})$	$\delta\text{D}_{\text{水}}(\text{‰})$	成矿温度($^{\circ}\text{C}$)
Y62-210B	石英黄铁矿脉		12.66	7.36	-84.4	
Y61-210-4B-1	硅化钾化碎裂花岗岩		9.59	4.29	-83.3	
Y75-247-6A	细脉黄铁矿化钾化花岗岩	I 阶段	7.34	2.04	-68.4	350
Y62-290C-1	石英黄铁矿脉		11.81	6.51	-70.3	
Y75-247-5A-1	脉状硅化钾化碎裂岩型矿石		10.78	5.48	-72.8	
Y61-210-4B-2	硅化钾化碎裂花岗岩		9.59	1.94	-78.6	
Y75-247-5A-2	脉状硅化钾化碎裂岩型矿石		10.78	3.13	-70.0	
Y62-290C-2	石英黄铁矿脉	II 阶段	11.81	4.16	-70.4	280
Y309Cc-2	石英黄铁矿脉		11.59	3.94	-69.8	
Y75-247-6A	细脉黄铁矿化钾化花岗岩		7.34	-0.31	-70.2	
Y61-210-4B-3	硅化钾化碎裂花岗岩		9.59	-3.47	-81.4	
Y309Cc-3	石英黄铁矿脉		11.59	-1.47	-72.0	
Y62-290C-3	石英黄铁矿脉	III 阶段	11.81	-1.25	-74.6	180
Y75-247-5A-3	脉状硅化钾化碎裂岩型矿石		10.78	-2.28	-78.7	

注: 水的氧同位素的计算公式为: $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - 3.38 \times 10^6 T^{-2} + 3.40$ (Clayton *et al.*, 1972)

表2 大尹格庄金矿床流体包裹体 C-O 同位素分析结果(‰)

Table 2 C-O isotopes of fluid inclusion from the Dayingezhuang gold deposit (‰)

样品号	岩性	成矿阶段	PDB 标准		SMOW
			$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$
Y62-210A	石英黄铁矿脉		-4.66	-29.63	-0.46
Y62-210B	石英黄铁矿脉		-6.07	-28.17	1.05
Y75-247-6A-1	细脉黄铁矿化钾化花岗岩		-6.19	-29.02	0.17
Y75-247-5A-1	碎裂岩型矿石	I 阶段	-4.5	-29.02	0.17
Y309Cc-1	石英黄铁矿脉		-4.5	-29.38	-0.2
Y75-247-1A	碎裂状黄铁绢英岩矿石		-5.5	-28.35	0.86
Y61-210-4B-1	硅化钾化碎裂岩花岗岩		-3.74	-29.8	-0.63
Y62-290C-1	石英脉		-5.85	-26.99	2.26
Y309Cc-2	石英黄铁矿脉		-5.15	-26.26	3.01
Y75-247-5A-2	碎裂岩型矿石		-5.74	-28.46	0.75
Y75-247-6A-2	细脉黄铁矿化钾化花岗岩	II 阶段	-9.34	-28.1	1.12
Y62-290C-2	石英黄铁矿脉		-9.92	-26.01	3.27
Y61-210-4B-2	硅化钾化碎裂岩花岗岩		-9.44	-26.33	2.94
Y62-290C-3	石英黄铁矿脉		-12.68	-25.43	3.87
Y75-247-6A-3	细脉黄铁矿化钾化花岗岩	III 阶段	-11.33	-26.97	2.28
Y61-210-4B-3	硅化钾化碎裂岩花岗岩		-12.07	-27.08	2.17

$\pm 3.1\text{‰}$ ($n = 6$); 成矿 II 阶段流体的 δD 为 $-78.6\text{‰} \sim -69.8\text{‰}$ 平均为 $-71.8 \pm 6.8\text{‰}$ ($n = 5$) $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-0.31\text{‰} \sim 4.16\text{‰}$, 平均为 $2.6 \pm 2.8\text{‰}$ ($n = 5$); 成矿 III 阶段流体的 δD 为 $-72.0\text{‰} \sim -81.4\text{‰}$ 平均为 $-76.7 \pm 4.7\text{‰}$ ($n = 4$) $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-3.47\text{‰} \sim -1.25\text{‰}$ 平均为 $-2.1 \pm 1.3\text{‰}$ ($n = 4$)。

$-0.63\text{‰} \sim 2.26\text{‰}$ 之间; 成矿 II 阶段中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值在 $-9.92\text{‰} \sim -5.15\text{‰}$ 之间, 而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 在 $0.75\text{‰} \sim 3.27\text{‰}$ 之间; 成矿 III 阶段中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值在 $-12.68\text{‰} \sim -11.33\text{‰}$ 之间, 而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 在 $2.17\text{‰} \sim 3.87\text{‰}$ 之间。

4.2 碳-氧同位素特征

流体包裹体的碳-氧同位素组成列于表 2 中, 成矿 I 阶段中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值在 $-6.19\text{‰} \sim -3.74\text{‰}$ 之间, 而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 在

5 讨论

5.1 大尹格庄金矿床碳、氢、氧同位素组成特征

氢氧同位素示踪是用于研究成矿流体来源最常用的手

表3 胶东金矿集区主要岩石和流体的氢氧同位素地球化学背景

Table 3 Geochemical background of H-O isotopes of rock and fluid in Jiaodong gold province

岩石/流体	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	数据来源
胶东群变质岩	8.2 ± 3.1	-88.5 ± 7.5	陈振胜等, 1995
玲珑花岗岩	~ 7	-72 ± 11	林文蔚和殷秀兰, 1998; 毛景文等, 2005
郭家岭花岗岩闪长岩	10.1 ± 0.4	-102 ± 15	张理刚等, 1994; 毛景文等, 2005
胶东群变质水	9.9 ± 0.7	-62 ± 21	张理刚等, 1995
玲珑岩浆水	7.7 ± 1.0	-47 ± 11	张理刚等, 1994; 毛景文等, 2005
郭家岭岩浆水	9.3 ± 0.8	-77 ± 15	张理刚等, 1994; 毛景文等, 2005
大气降水	-15.6 ± 0.6	-115 ± 5	张理刚等, 1995

段之一,前人利用该方法有效限定了多种成因矿床的成矿流体来源(Yang *et al.*, 2009; Qiu *et al.*, 2016, 2017)。前人对胶东地区的氢氧同位素进行了大量研究,对主要岩石和流体的氢氧同位素地球化学背景有了较为成熟的认识。陈振胜等(1995)对胶东群黑云变粒岩、斜长角闪岩和斜长片麻岩样品进行氢氧同位素测试,给出的胶东群氧同位素地球化学背景值范围是 $5.1‰ \sim 11.3‰$,氢同位素地球化学背景值为 $-96‰ \sim -81‰$ 之间;毛景文等(2005)通过测定玲珑花岗岩和郭家岭花岗岩闪长岩中黑云母的氢同位素组成得到它们的氢同位素范围分别是 $-72 \pm 11‰$ 和 $-102 \pm 15‰$,而氧同位素分别是 $\sim 7‰$ 和 $10.1 \pm 0.4‰$ (林文蔚和殷秀兰, 1998; 张理刚等, 1994)。胶东群变质水是指达到同位素分馏平衡的水,而岩浆水指高温岩浆达到热力学平衡的水,前人也通过对已有数据的计算得出可靠的背景数值(张理刚, 1994, 1995; 毛景文等, 2005);胶东地区中生代大气降水氢氧同位素背景值也依据测试和大气降水方程计算得出(Craig, 1961; 张理刚等, 1995)。

本研究中氢氧同位素组成分析结果可以看出,在研究区内,只有胶东群氧同位素接近于大尹格庄金矿床石英氧同位素(表3),富铁、镁元素的围岩容易与含 H_2S 的成矿流体发生水岩反应,大尹格庄金矿床围绕断裂、节理等流体通道发育强烈的热液蚀变。因此,在成矿过程中,成矿流体可能与围岩发生过一定的同位素和物质交换。

大尹格庄金矿流体包裹体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值介于 $-17.69‰ \sim -3.74‰$ 之间,与自然界碳同位素组成对比,总体上明显高于有机质(平均 $-27‰$, Schidlowski, 1998),低于海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围(平均值 $-3‰ \sim 2‰$, Hoefs, 1997)结合该矿床产出的地质背景,可以排除成矿流体中碳的有机来源和海相碳酸盐来源的可能性;与此同时,流体包裹体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与大气 CO_2 (约 $-8‰$, Schidlowski, 1998; $-11‰ \sim -7‰$, Hoefs, 1997)、大气水 CO_2 ($-20‰ \sim -9‰$, Hoefs, 1997)的碳同位素,与火成岩/岩浆系统($-30‰ \sim -3‰$, Hoefs, 1997)、地壳(约 $-7‰$, Faure, 1986)、地幔($-7‰ \sim -5‰$, Hoefs, 1997)的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围接近或重叠,表明流体中的碳可能由上述碳储库中的一种或几种碳源提供。

I、II、III三个成矿阶段的包裹体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 平均值分别为 $-5.68‰$ 、 $-7.92‰$ 、 $-9.43‰$,对应的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_2}$ 平均值分别为

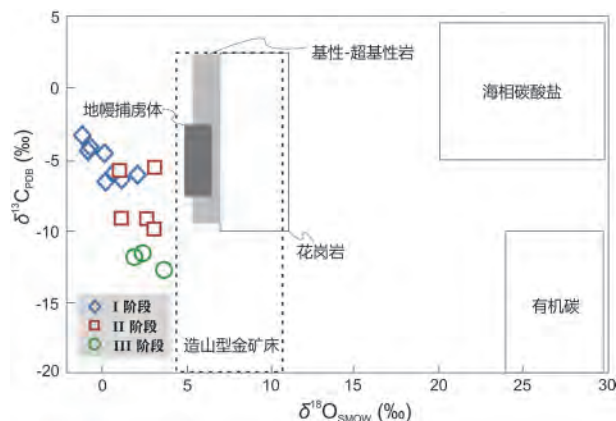


图7 大尹格庄金矿床 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 投图(底图据刘建明等, 1998 修编)

Fig. 7 Plot of $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ vs. $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ for the Dayingezhuang gold deposit (base map modified after Liu *et al.*, 1998)

$0.80‰$ 、 $2.22‰$ 、 $2.32‰$,即从成矿的高温阶段到低温阶段, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 平均值逐渐降低,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_2}$ 平均值逐渐增高(图7),这可能反映了从成矿的早阶段到晚阶段,矿物中的流体包裹体记录了不同来源流体的信息,或者某一成矿阶段的流体以某一储库为主导。结合自然界各个碳储库的碳同位素特征,在大尹格庄金矿床成矿的早阶段,流体中的碳可能主要来自地幔或地壳($\delta^{13}\text{C} = -7‰ \sim -5‰$, Hoefs, 1997 和 $-7‰$, Faure, 1986),故流体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值相对较高,集中在 $-7‰ \sim -3‰$;而在成矿的晚阶段,大气水 CO_2 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -11‰ \sim -7‰$ 和 $-20‰ \sim -9‰$, Hoefs, 1997)的混入可能相对增多,导致流体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值逐渐降低。但是,流体中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_2}$ 值的变化趋势与 H-O 同位素相矛盾,这可能是由于成矿过程中流体-围岩反应等导致矿石中氧同位素组成不断变化导致的,但更可能的原因是:流体包裹体中的气相物质有水蒸气、 CO_2 、 CO 、 SO_2 、 SO_3 、 H_2S 、 O_2 、 H_2 、 N_2 、 CH_4 和惰性气体(Yang *et al.*, 2009)。其中水蒸气占大部分,其次是二氧化碳,在分析 H-O 同位素时,使用的流体中水的氧同位素,而分析 C-O 同位素时,使用的是从包裹体中提取的 CO_2 的氧同位素。

从流体包裹体的 C-O 同位素组成图上(图7)可以发现,包裹体的碳氧同位素组成基本介于大气 CO_2 、大气水 CO_2 、地

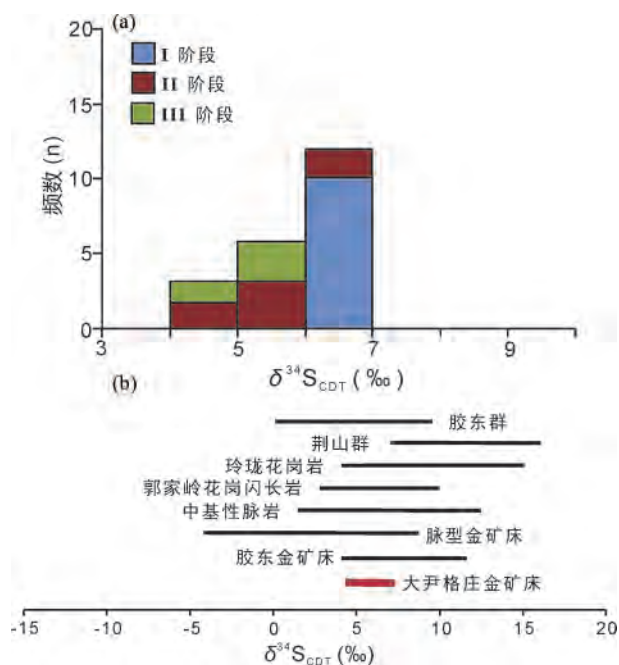


图8 大尹格庄金矿床热液黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 直方图 (a) 和大尹格庄金矿床硫同位素组成与主要相关地质体比较 (b) 数据来自张瑞忠等 (2016); 相关地质体硫同位素数据引自杨立强等 (2014)

Fig. 8 Histogram of $\delta^{34}\text{S}$ values of hydrothermal pyrites from the Dayingezhuang gold deposit (a) and comparison of sulfur isotopic compositions at the Dayingezhuang gold deposit and related major geologic bodies (b)

Data from Zhang *et al.* (2016). The ranges of major geologic bodies from Yang *et al.* (2014)

幔 CO_2 和造山型金矿床等多种碳储库之间, 表明矿物中捕获的流体包裹体可能反映了不同来源的流体。

5.2 成矿流体来源与演化过程

张瑞忠等 (2016) 对大尹格庄金矿床热液黄铁矿进行研究并测得成矿期 $\delta^{34}\text{S}$ 的值在 4.58‰ 到 7.54‰ 之间, 且不同成矿阶段无明显硫同位素组成的变化 (图 8a), 这与区域内其他矿床的硫同位素特征类似, 指示了大尹格庄金矿床的硫源跟胶东绝大多数金矿床来源于同一储库。黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值的范围与胶东群变质岩、玲珑花岗岩、郭家岭花岗闪长岩、区域内中基性脉岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 相重叠, 而仅与荆山群变质岩几乎不重叠 (图 8b)。但有关硫同位素研究无法解释这些地质体是否被后期热液改造过, 其全岩硫同位素能否代表原始岩石中硫同位素的比值 (Goldfarb and Groves, 2015; Qiu *et al.*, 2020)。因此, 仅就硫同位素并不能解决流体来源的问题。

对本次研究得到的氢氧同位素进行 Taylor 投图可以看出 (图 9; Taylor, 1974), 早阶段 (I 阶段) 成矿流体的 $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化于 2‰ ~ 9‰, δD 变化于 -105‰ ~ -70‰。II 阶段成矿流体的 $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化于 -1‰ ~ 6‰, δD 变化于 -100‰ ~

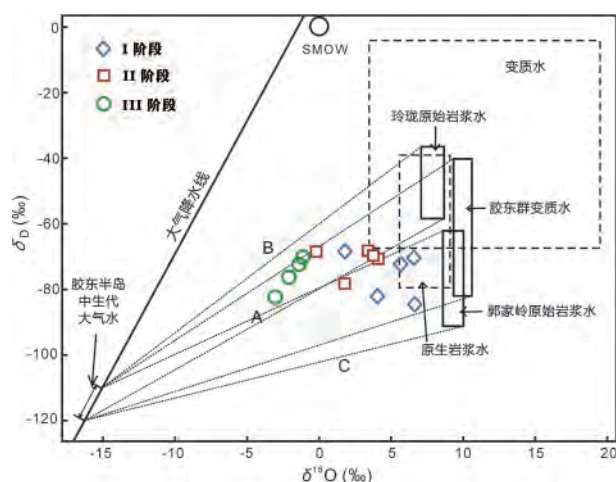


图9 大尹格庄金矿床 I、II、III 阶段流体氢氧同位素组成 (底图据郭林楠等 2014 修编)

A 代表胶东群变质水和大气水混合的区域; B 代表玲珑花岗岩原始岩浆水和大气水混合的区域; C 代表郭家岭花岗闪长岩原始岩浆水与大气水混合的区域

Fig. 9 The H-O compositions of ore-fluid in stages I, II, III (base map modified after Guo *et al.*, 2014)

Area A means metamorphic water of the Jiaodong Group mixed with meteoric water; Area B means magmatic water of the Linglong granite mixed with meteoric water; and Area C means magmatic water of the Guojialing granite mixed with meteoric water

-60‰; III 阶段成矿流体的 $^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化于 -7‰ ~ -1‰, δD 变化于 -85‰ ~ -70‰。与早阶段相比, 中晚阶段的流体明显向大气降水线漂移, 与前人在胶东金矿集区内其他金矿床得出的数据结果类似 (Guo *et al.*, 2017)。前人研究认为, 相对较轻的 $\delta\text{D}_{\text{水}}$ 可能表明深部岩浆热液与大气水的混合是胶东金成矿的流体来源 (Yang *et al.*, 2009)。但是, 目前基于石英中流体包裹体的氢同位素研究无法避免次生包裹体的影响。流体包裹体岩相学、石英阴极发光表明, 胶东金矿床内的成矿期石英普遍遭受晚中生代韧-脆性变形 (Guo *et al.*, 2017, 2020), 且石英中发育有大量的次生水溶液包裹体 (Wei *et al.*, 2019)。而胶东中生代成矿期和成矿期后经历了多次构造变形改造 (杨立强等, 2014; Deng *et al.*, 2018), 可能引起次生包裹体的产生和叠加, 从而影响了氢氧同位素组成的结果。

综上所述, 控矿断裂带持续的强烈构造活动使石英发生变形而诱发次生包裹体的产生与叠加, 从而使氢氧同位素组成出现向胶东中生代大气水漂移的现象, 但大气水并不为金成矿作用做出贡献。大尹格庄金矿床成矿流体属于中低温、中低盐度流体体系 (Yang *et al.*, 2009), 从早阶段到晚阶段温度逐渐降低, 且包裹体中富含 CH_4 、 H_2S 等还原性气体 (刘育等, 2014), 结合胶东金矿床相对重硫的同位素特征, 因此, 变质热液模型更具说服力。胶东中生代成矿作用滞后于区域变质作用近二十亿年 (Deng *et al.*, 2020a), 使胶东群变质水无法为大规模成矿提供足够的成矿物质和流体。结合

区域成矿背景,大量的 $H_2O-CO_2-CH_4$ 流体可能与俯冲古太平洋板块的脱水、脱碳作用有关 (Goldfarb and Santosh, 2014)。大尹格庄金矿床成矿期普遍存在脆性变形活动,相似的矿物共生组合和地球化学特征,均表明大尹格庄金矿床属于造山型金矿床 (Goldfarb *et al.*, 2019)。

6 结论

(1) 大尹格庄金矿床石英单矿物氢氧同位素组成向中生代大气水漂移,并不是成矿流体与大气降水混合的结果,而与中生代晚期的强烈构造活动诱发次生包裹体广泛发育有关。

(2) 多元同位素地球化学特征和成矿动力学背景显示大尹格庄金矿床成矿流体来源是变质水,与俯冲古太平洋板块的脱水、脱碳作用有关。

致谢 研究工作得到中国地质大学(北京)邓军教授、杨立强教授和张静教授的指导;两位匿名审稿人给予了宝贵的修改意见;在此一并致以诚挚的谢意!

References

Chai P, Zhang HR, Dong LL and Zhang ZY. 2019. Geology and ore-forming fluids of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: Implications for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 204: 224–239

Chen GY, Sun DS, Zhou XR, Shao W, Gong RT and Shao Y. 1993. Genetic Mineralogy and gold Mineralization of Guojialing Granodiorite in Jiaodong Region. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–130 (in Chinese)

Chen ZS, Zhang LG, Liu JX, Wang BC, Xu JF and Zheng WS. 1995. A preliminary study on hydrogen and oxygen isotope geochemical backgrounds of geological bodies in Jiaodong (eastern Shandong) gold metallogenic region. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(3): 211–218 (in Chinese with English abstract)

Chu H, Lu SN, Wang HC, Xiang ZQ and Liu H. 2011. U-Pb age spectrum of detrital zircons from the Fuzikuang Formation, Penglai Group in Changdao, Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1017–1028 (in Chinese with English abstract)

Clayton RN, O'Neil JR and Mayeda TK. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3057–3067

Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465): 1702–1703

Deng J, Yang LQ, Sun ZS, Wang JP, Wang QF, Xin HB and Li XJ. 2003. A metallogenic model of gold deposits of the Jiaodong granite-greenstone belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 537–546

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. *Mineralium Deposita*, 50(8): 987–1006

Deng J and Wang QF. 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic

provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Research*, 36: 219–274

Deng J, Liu XF, Wang QF, Dilek Y and Liang YY. 2017. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic dike-Lithospheric extension in the North China craton, eastern Asia. *GSA Bulletin*, 129(11–12): 1379–1407

Deng J, Wang CM, Bagas L, Santosh M and Yao EY. 2018. Crustal architecture and metallogenesis in the south-eastern North China Craton. *Earth-Science Reviews*, 182: 251–272

Deng J, Yang LQ, Li RH, Groves DI, Santosh M, Wang ZL, Sai SX and Wang SR. 2019. Regional structural control on the distribution of world-class gold deposits: An overview from the giant Jiaodong Gold Province, China. *Geological Journal*, 54(1): 378–391

Deng J, Qiu KF, Wang QF, Goldfarb RJ, Yang LQ, Zi JW, Geng JZ and Ma Y. 2020a. In situ dating of hydrothermal monazite and implications for the geodynamic controls on ore formation in the Jiaodong gold province, eastern China. *Economic Geology*, 115(3): 671–685

Deng J, Wang QF, Santosh M, Liu XF, Liang YY, Yang LQ, Zhao R and Yang L. 2020b. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: A new model for the Jiaodong gold province, eastern China. *Mineralium Deposita*, 55(2): 257–274

Dong CY, Wang SJ, Liu DY, Wang JG, Xie HQ, Wang W, Song ZY and Wan YS. 2011. Late Palaeoproterozoic crustal evolution of the North China Craton and formation time of the Jingshan Group: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon dating of meta-intermediate-basic intrusive rocks in eastern Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1699–1706 (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

Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 589

Faure M, Lin W, Monié P and Bruguier O. 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liaodong Peninsula (north-east China). *Terra Nova*, 16(2): 75–80

Geng K, Wang RJ, Li HK, Liang TT and Zhang YB. 2016. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Congjia granodiorite from Northwest Jiaodong area. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(1): 90–100 (in Chinese with English abstract)

Goldfarb RJ and Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? *Geoscience Frontiers*, 5(2): 139–153

Goldfarb RJ and Groves DI. 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233: 2–26

Goldfarb RJ, Qiu KF, Deng J, Chen YJ and Yang LQ. 2019. Orogenic gold deposits of China. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 22: 263–324

Goss SC, Wilde SA, Wu FY and Yang JH. 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton. *Lithos*, 120(3–4): 309–326

Groves DI and Santosh M. 2016. The giant Jiaodong gold province: The key to a unified model for orogenic gold deposits? *Geoscience Frontiers*, 7(3): 409–417

Groves DI, Santosh M, Deng J, Wang QF, Yang LQ and Zhang L. 2020. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Mineralium Deposita*, 55(2): 275–292

Guo LN, Zhang C, Song YZ, Chen BH, Zhou Z, Zhang BL, Xu XL and Wang YW. 2014. Hydrogen and oxygen isotopes geochemistry of the Wang'ershan gold deposit, Jiaodong. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2481–2494 (in Chinese with English abstract)

Guo LN, Goldfarb RJ, Wang ZL, Li RH, Chen BH and Li JL. 2017. A comparison of Jiaojia- and Linglong-type gold deposit ore-forming fluids: Do they differ? *Ore Geology Reviews*, 88: 511–533

Guo LN, Deng J, Yang LQ, Wang ZL, Wang SR, Wei YJ and Chen BH. 2020. Gold deposition and resource potential of the Linglong

- gold deposit, Jiaodong Peninsula: Geochemical comparison of ore fluids. *Ore Geology Reviews*, 120: 103434
- Hagemann SG and Lüders V. 2003. *P-T-X* conditions of hydrothermal fluids and precipitation mechanism of stibnite-gold mineralization at the Wiluna lode-gold deposits, Western Australia: Conventional and infrared microthermometric constraints. *Mineralium Deposita*, 38 (8): 936–952
- Hoefs J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*. 4th Edition. Berlin: Springer, 1–201
- Jiang N, Chen JZ, Guo JH and Chang GH. 2012. In situ zircon U-Pb, oxygen and hafnium isotopic compositions of Jurassic granites from the North China craton: Evidence for Triassic subduction of continental crust and subsequent metamorphism-related ¹⁸O depletion. *Lithos*, 142–143: 84–94
- Li L, Santosh M and Li SR. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting. *Ore Geology Reviews*, 65: 589–611
- Lin WW and Yin XL. 1998. Isotope geological characteristics of mineralizing fluids of gold deposits in Jiaodong area and a discussion on the application conditions of H. P. Taylor's equation. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17(3): 249–259 (in Chinese with English abstract)
- Liu JM, Liu JJ, Zheng MH and Gu XX. 1998. Stable isotope compositions of micro-disseminated gold and genetic discussion. *Geochimica*, 27(6): 585–591 (in Chinese with English abstract)
- Liu PH, Liu FL, Wang F and Liu JH. 2011. U-Pb dating of zircons from Al-rich paragneisses of Jingshan Group in Shandong Peninsula and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(5): 829–843 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Deng J, Wang ZL, Zhang L, Zhang C, Liu XD, Zheng XL and Wang XD. 2014. Zircon U-Pb age, Lu-Hf isotopes and petrogeochemistry of the monzogranites from Xincheng gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2559–2573 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Yang LQ, Guo LN, Li RH, Gao BF, Meng YS and Zhang RZ. 2014. Composition of ore-forming fluids in the Dayingezhuang gold deposit of the Jiaodong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2507–2517 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Li HM, Wang YT, Zhang CQ and Wang RT. 2005. The relationship between mantle-derived fluid and gold ore-formation in the eastern Shandong Peninsula: Evidences from D-O-C-S isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 839–857 (in Chinese with English abstract)
- Qiu KF, Taylor RD, Song YH, Yu HC, Song KR and Li N. 2016. Geologic and geochemical insights into the formation of the Taiyangshan porphyry copper-molybdenum deposit, western Qinling Orogenic Belt, China. *Gondwana Research*, 35: 40–58
- Qiu KF, Marsh E, Yu HC, Pfaff K, Gulbransen C, Gou ZY and Li N. 2017. Fluid and metal sources of the Wenquan porphyry molybdenum deposit, Western Qinling, NW China. *Ore Geology Reviews*, 86: 459–473
- Qiu KF, Yu HC, Wu MQ, Geng JZ, Ge XK, Gou ZY and Taylor RD. 2019. Discrete Zr and REE mineralization of the Baerzhe rare-metal deposit, China. *American Mineralogist*, 104(10): 1487–1502
- Qiu KF, Yu HC, Deng J, McIntire D, Gou ZY, Geng JZ, Chang ZS, Zhu R, Li KN and Goldfarb RJ. 2020. The giant Zaozigu orogenic Au-Sb deposit in West Qinling, China: Magmatic or metamorphic origin? *Mineralium Deposita*, 55(2): 345–362
- Sai SX, Zhao TM, Wang ZL, Huang SY and Zhang L. 2016. Petrogenesis of Linglong biotite granite: Constraints from mineralogical characteristics. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2477–2493 (in Chinese with English abstract)
- Sai SX, Deng J, Qiu KF, Miggins DP and Zhang L. 2020. Textures of auriferous quartz-sulfide veins and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Rushan gold deposit: Implications for processes of ore-fluid infiltration in the eastern Jiaodong gold province, China. *Ore Geology Reviews*, 117: 103254
- Schidlowski M. 1998. Beginnings of terrestrial life: Problems of the early record and implications for extraterrestrial scenarios. In: *Proceedings of SPIE 3441, Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology*. San Diego: SPIE, 149–157
- Song MC. 2015. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province. *Geological Bulletin of China*, 34(9): 1758–1771 (in Chinese with English abstract)
- Song MC, Li SZ, Santosh M, Zhao SJ, Yu S, Yi PH, Cui SX, Lv GX, Xu JX, Song YX and Zhou ML. 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 65: 612–625
- Tam PY, Zhao GC, Liu FL, Zhou XW, Sun M and Li SZ. 2011. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton. *Gondwana Research*, 19(1): 150–162
- Tang J, Zheng YF, Wu YB, Gong B and Liu XM. 2007. Geochronology and geochemistry of metamorphic rocks in the Jiaobei terrane: Constraints on its tectonic affinity in the Sulu orogen. *Precambrian Research*, 152(1–2): 48–82
- 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
- Wei YJ, Yang LQ, Feng JQ, Wang H, Lv GY, Li WC and Liu SG. 2019. Ore-fluid evolution of the Sizhuang orogenic gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Minerals*, 9(3): 190
- Xie SW, Wang SJ, Xie HQ, Liu SJ, Dong CY, Ma MZ, Liu DY and Wan YS. 2014. SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons from the Fenzishan Group in eastern Shandong, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 30(10): 2989–2998 (in Chinese with English abstract)
- Yang KF, Fan HR, Santosh M, Hu FF, Wilde SA, Lan TG, Lu LN and Liu YS. 2012. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of Late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong terrane, the North China Craton. *Lithos*, 146–147: 112–127
- Yang LQ, Deng J, Guo CY, Zhang J, Jiang SQ, Gao BF, Gong QJ and Wang QF. 2009. Ore-forming fluid characteristics of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Gold Province, China. *Resource Geology*, 59(2): 181–193
- Yang LQ, Deng J, Goldfarb RJ, Zhang J, Gao BF and Wang ZL. 2014. ⁴⁰Ar/³⁹Ar 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 MC 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. 2016a. Thermochronologic 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*, 72: 165–178
- Yang LQ, Deng J, Wang ZL, Guo LN, Li RH, Groves DI, Danyushevsky LV, Zhang C, Zheng XL and Zhao H. 2016b. Relationships between gold and pyrite at the Xincheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for gold source and deposition in a brittle epizonal environment. *Economic Geology*, 111(1): 105–126
- Yang LQ, Guo LN, Wang ZL, Zhao RX, Song MC and Zheng XL. 2017. Timing and mechanism of gold mineralization at the Wang'erzhan gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 88: 491–510
- Yang LQ, Li RH, Gao X, Qiu KF and Zhang L. 2020. A preliminary study of extreme enrichment of critical elements in the Jiaodong gold deposits, China. *Acta Petrologica Sinica*, 36(5): 1285–1314,

- doi: 10.18654/1000-0569/2020.05.01 (in Chinese with English abstract)
- Yuan ZZ, Li ZK, Zhao XF, Sun HS, Qiu HN and Li JW. 2019. New constraints on the genesis of the giant Dayingezhuang gold (silver) deposit in the Jiaodong district, North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 112: 103038
- Zhang L, Liu Y, Li RH, Huang T, Zhang RZ, Chen BH and Li JK. 2014. Lead isotope geochemistry of Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2468–2480 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LG, Chen ZS, Liu JX, Yu GX, Wang BC, Xu JF and Zheng WS. 1994. Water-rock exchange in the Jiaojia type gold deposit: A study of hydrogen and oxygen isotopic composition of ore-forming fluids. *Mineral Deposits*, 13(3): 193–200 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LG, Chen ZS, Liu JX and Yu GX. 1995. Two-stage Water-rock Isotopic Exchange Theory and Implied on Prospecting. Beijing: Geological Publishing House, 1–220 (in Chinese)
- Zhang RZ, Wang ZL, Wang SR, Liu Y and Qin WK. 2016. Metallogenic mechanism of Dayingezhuang gold deposit, northwestern Jiaodong Peninsula: Geochemistry constrains from the gold bearing pyrite typomorph and sulfur isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2451–2462 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 陈光远, 孙岱生, 周珣若, 邵伟, 宫润潭, 邵岳. 1993. 胶东郭家岭花岗岩长岩成因矿物学与金矿化. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–130
- 陈振胜, 张理刚, 刘敬秀, 王炳成, 徐金方, 郑文深. 1995. 胶东金成矿区岩石氧氢同位素地球化学背景初探. *岩石矿物学杂志*, 14(3): 211–218
- 初航, 陆松年, 王惠初, 相振群, 刘欢. 2011. 山东长岛地区蓬莱群辅子介组碎屑锆石年龄谱研究. *岩石学报*, 27(4): 1017–1028
- 董春艳, 王世进, 刘敦一, 王金光, 颜炳强, 王伟, 宋志勇, 万渝生. 2011. 华北克拉通古元古代晚期地壳演化和荆山群形成时代制约——胶东地区变质中-基性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *岩石学报*, 27(6): 1699–1706
- 耿科, 王瑞江, 李洪奎, 梁太涛, 张玉波. 2016. 胶西北丛家花岗岩闪长岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究. *地球学报*, 37(1): 90–100
- 郭林楠, 张潮, 宋宇宙, 陈炳翰, 周铸, 张炳林, 徐晓磊, 王彦玮. 2014. 胶东望儿山金矿床氢-氧同位素地球化学. *岩石学报*, 30(9): 2481–2494
- 林文蔚, 殷秀兰. 1998. 胶东金矿成矿流体同位素的地质特征. *岩石矿物学杂志*, 17(3): 249–259
- 刘建明, 刘家军, 郑明华, 顾雪祥. 1998. 微细浸染型金矿床的稳定同位素特征与成因探讨. *地球化学*, 27(6): 585–591
- 刘平华, 刘福来, 王舫, 刘建辉. 2011. 山东半岛荆山群富铝片麻岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 30(5): 829–843
- 刘育, 杨立强, 郭林楠, 李瑞红, 高帮飞, 孟银生, 张瑞忠. 2014. 胶东大尹格庄金矿床成矿流体组成. *岩石学报*, 30(9): 2507–2517
- 刘跃, 邓军, 王中亮, 张良, 张潮, 刘向东, 郑小礼, 王旭东. 2014. 胶西北新城金矿床二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成. *岩石学报*, 30(9): 2559–2573
- 毛景文, 李厚民, 王义天, 张长青, 王瑞廷. 2005. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧硫同位素证据. *地质学报*, 79(6): 839–857
- 赛盛勋, 赵天明, 王中亮, 黄锁英, 张良. 2016. 玲珑黑云母花岗岩成因: 矿物学特征约束. *岩石学报*, 32(8): 2477–2493
- 宋明春. 2015. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展. *地质通报*, 34(9): 1758–1771
- 谢士稳, 王世进, 颜炳强, 刘守偈, 董春艳, 马铭株, 刘敦一, 万渝生. 2014. 华北克拉通胶东地区粉子山群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *岩石学报*, 30(10): 2989–2998
- 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
- 杨立强, 李瑞红, 高雪, 邱昆峰, 张良. 2020. 胶东金矿床中关键金属超常富集特征与机理初探. *岩石学报*, 36(5): 1285–1314, doi: 10.18654/1000-0569/2020.05.01
- 张良, 刘跃, 李瑞红, 黄涛, 张瑞忠, 陈炳翰, 李金奎. 2014. 胶东大尹格庄金矿床铅同位素地球化学. *岩石学报*, 30(9): 2468–2480
- 张理刚, 陈振胜, 刘敬秀, 于桂香, 王炳成, 徐金方, 郑文深. 1994. 焦家式金矿水-岩交换作用——成矿流体氢氧同位素组成研究. *矿床地质*, 13(3): 193–200
- 张理刚, 陈振胜, 刘敬秀, 于桂香. 1995. 两阶段水-岩同位素交换理论及其勘查应用. 北京: 地质出版社, 1–220
- 张瑞忠, 王中亮, 王偲瑞, 刘育, 秦文凯. 2016. 胶西北大尹格金矿床成矿机理: 载金黄铁矿标型及硫同位素地球化学约束. *岩石学报*, 32(8): 2451–2462