第 58 卷 第 5 期
2025 年（总 243 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 58 No. 5
2025（Sum243）

引文格式：吴明刚，邱敦方，宋子崇，等. 山东平度旧店金矿床成矿物质来源和成矿模式[J]. 西北地质，2025，58(5)：60−74. DOI：10.12401/j.nwg.2025070

Citation: WU Minggang, QIU Dunfang, SONG Zichong, et al. Sources of Ore-forming Materials and Ore-forming Model of the Jiudian Gold Deposit in Pingdu, Shandong Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 60−74. DOI: 10.12401/j.nwg.2025070

山东平度旧店金矿床成矿物质来源和成矿模式

吴明刚[1,2]，邱敦方[3]，宋子崇[3]，田福泉[3]，吕鹏瑞[4]，许道学[3]，牛警徽[1]，Rahnama Zohreh[5]，张永林[6]，范德江[1]，钟世华[1,*]

（1. 中国海洋大学海洋地球科学学院，海底科学与探测技术教育部重点实验室，山东 青岛 266100；2. 烟台黄金职业学院，山东 烟台 265401；3. 青岛金星矿业股份有限公司，山东 青岛 266748；4. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心，陕西 西安 710119；5. ANGLO REM CA Exploration Mining Ltd，阿斯塔纳 200440900161，哈萨克斯坦；6. 福建省政和县源鑫矿业有限公司，福建 南平 353600）

摘 要：山东平度旧店金矿床地处胶东金成矿省西北部、招平断裂带南段，是该地区石英脉型金矿床的典型代表。虽然该矿床开采历史悠久，但由于规模较小，矿床成因研究较为薄弱，制约了对区域成矿规律的认识。本次研究在详细的野外地质调查基础之上，开展了含矿石英脉中石英氢氧同位素和黄铁矿硫同位素分析，以期揭示成矿流体和金属来源，厘定矿床成矿模式。研究表明，旧店金矿床成矿过程可分为早成矿阶段（I）、主成矿阶段（II）和晚成矿阶段（III）3 个阶段，其中主成矿阶段是金矿化主要发育阶段，包括中粗粒黄铁矿阶段（II_1）、细粒–微细粒黄铁矿阶段（II_2）和多金属硫化物阶段（II_3）3 个亚阶段。不同成矿阶段的石英氢氧同位素特征显示，早成矿阶段成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为 2.22‰～4.64‰，$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−90.2‰～−72.2‰，主成矿阶段成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为 1.17‰～4.36‰，$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−84.3‰～−77.1‰，晚成矿阶段成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为−0.01‰～4.28‰，$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−97.7‰～−87.1‰。旧店金矿床早阶段成矿流体以岩浆水为主，随着流体演化，大气降水逐步混入且所占比例不断增加。不同成矿阶段的黄铁矿硫同位素无明显差异，$\delta^{34}S$ 值大多为 7.65‰～10.10‰（平均值为 8.87‰），这一范围与前寒武纪变质基底和中生代花岗岩特征十分类似。综合前人研究成果，建立了旧店金矿成矿模式：晚侏罗世，旧店地区大量含金的古老变质岩基底发生重熔，形成玲珑型花岗岩；在早白垩晚期受华北克拉通东部岩石圈大规模伸展–减薄和软流圈上涌影响，花岗岩和变质岩残留体中的金发生活化富集，并在岩浆水和大气降水组成的混合流体作用下，在招平断裂带下盘次级断裂构造中富集成矿。

关键词：H-O-S 同位素；成矿物质来源；成矿模式；旧店金矿床；胶东

中图分类号：P618.51 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2025)05-0060-15

收稿日期：2025-03-31；**修回日期**：2025-05-11；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：国家自然科学基金面上项目“基于多维数据的斑岩 Cu 矿床成矿岩浆机器学习识别方法和矿床成因研究”（42472104）资助。

作者简介：吴明刚（1989−），男，博士研究生，副教授，从事胶东金矿成矿规律研究。E-mail：neu_wmg@163.com。

*** 通讯作者**：钟世华（1989−），男，博士，副教授，从事矿床学和地质大数据研究。E-mail：zhongshihua@ouc.edu.cn。

Sources of Ore-forming Materials and Ore-forming Model of the Jiudian Gold Deposit in Pingdu, Shandong Province

WU Minggang[1,2], QIU Dunfang[3], SONG Zichong[3], TIAN Fuquan[3], LYU Pengrui[4], XU Daoxue[3], NIU Jinghui[1], Rahnama Zohreh[5], ZHANG Yonglin[6], FAN Dejiang[1], ZHONG Shihua[1,*]

(1. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China；2. Yantai Gold College, Yantai 265401, Shandong, China；3. Qingdao Jinxing Mining Co., Ltd., Qingdao 266748, Shandong, China；4. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China；5. ANGLO REM CA Exploration Mining Ltd, Astana 200440900161, Kazakhstan；6. Fujian Zhenghe County Yuanxin Mining Co., Ltd., Nanping 353000,Fujian, China)

Abstract: The Jiudian gold deposit in Pingdu, Shandong Province, is located in the northwestern part of the Jiaodong gold metallogenic province and the southern segment of the Zhaoping Fault Zone. It serves as a typical representative of quartz-vein type gold deposits in this region. Despite its long mining history, genetic studies of this relatively small-scale deposit have remained inadequate, constraining the understanding of regional metallogenic regularity. Based on detailed field geological investigations, this study conducted hydrogen-oxygen isotopic analyses of quartz from ore-bearing veins and sulfur isotopic analyses of pyrite from ores, aiming to elucidate ore-forming fluid and metal sources and establish a metallogenic model for the deposit. Research indicates that the mineralization process of the Jiudian gold deposit can be divided into three stages: early mineralization stage (I), main mineralization stage (II), and late mineralization stage (III). The main mineralization stage represents the primary period of gold mineralization, further subdivided into three sub-stages: medium-coarse grained pyrite stage (II_1), fine-micron fine grained pyrite stage (II_2), and polymetallic sulfide stage (II_3). Isotopic characteristics of quartz from different mineralization stages show: $\delta^{18}O_{H_2O}$=2.22‰～4.64‰ and $\delta D_{V\text{-}SMOW}$=−90.2‰～−72.2‰ for the early stage; $\delta^{18}O_{H_2O}$=1.17‰～4.36‰ and $\delta D_{V\text{-}SMOW}$=−84.3‰～−77.1‰ for the main stage; $\delta^{18}O_{H_2O}$=−0.01‰～4.28‰ and $\delta D_{V\text{-}SMOW}$=−97.7‰～−87.1‰ for the late stage. The early-stage ore-forming fluids were predominantly magmatic water, with progressive mixing and increasing proportion of meteoric water during fluid evolution. Sulfur isotopic compositions of pyrite from different mineralization stages show no significant variation, with $\delta^{34}S$ values ranging from 7.65‰ to 10.10‰ (average 8.87‰), closely resembling the characteristics of Precambrian metamorphic basements and Mesozoic granites. Integrating previous research findings, a metallogenic model for the Jiudian gold deposit is proposed: During the Late Jurassic, remelting of gold-bearing ancient metamorphic basement rocks in the Jiudian area formed Linglong-type granites. In the Late Early Cretaceous, under the influence of large-scale lithospheric extension-thinning in the eastern North China Craton and asthenosphere upwelling, gold from granites and metamorphic rock relics underwent mobilization and enrichment. Driven by mixed fluids composed of magmatic water and meteoric water, gold precipitation occurred in secondary fracture structures within the footwall of the Zhaoping Fault Zone, forming the ore deposit.

Keywords: H-O-S Isotopes; source of ore-forming materials; ore-forming model; Jiudian gold deposit; Jiaodong

中国胶东地区资源丰富，已发现金矿床超过 240 个(宋英昕等, 2017)，累计探明黄金资源储量近 5 800 t (Deng et al., 2023; 宋明春等, 2023)，占国内黄金总资源量的近 1/3，是仅次于南非兰德和乌兹别克斯坦穆龙套的世界第三大金矿集中区(杨立强等, 2022)。区内招平断裂带是胶东地区 6 条主要构造–金矿带之一，带内目前已探明含玲珑、大尹格庄、夏甸金矿等大型-超大型金矿床在内的 40 余处金矿床(宋明春等, 2022a, 2022b)。金矿床主要位于招平断裂中段和北段，累计探明黄金资源储量超过 1 500 t(邓军等, 2023; 杨立强等, 2024)。目前，前人对这些位于招平断裂中段和北段的大型–超大型金矿床已经开展了大量的研究，揭示了它们的成岩成矿时代、成矿流体、金属来源以及流体活动规律(Song et al., 2020; Xiong et al., 2020)。

然而，作为胶东金矿集区的重要组成部分，招平断裂带南段由于金矿床规模普遍较小，研究一直较为薄弱，对成矿物质来源等关键问题还未形成统一认识，成矿机制和成矿模型也存在争议（岳石等，1988；李逸凡等，2015；Tian et al., 2022；汪浩等，2024）。这严重制约了对区域金矿成矿规律的认识。

旧店金矿床位于山东省平度市旧店镇，是招平断裂带南段发育的典型石英脉型金矿床，矿床规模已达中型（牛警徽等，2023a；李经纬等，2023）。本次研究在详细的野外地质调查基础之上，基于矿石矿物组合、脉体穿插包裹关系和结构构造特征等，识别出 3 个成矿阶段，并对来自不同成矿阶段的石英和黄铁矿分别开展了石英 H-O 同位素和 S 同位素分析。研究结果可以深刻揭示旧店金矿成矿流体和金属来源，厘定矿床成矿模式，从而有助于深入认识招平断裂带金矿成矿规律，并为该地区下一步找矿勘查提供理论指导。

1 区域地质背景

旧店金矿床所处的胶东地区，地处华北克拉通东部（图 1a），以郯庐断裂为界和鲁西相邻，包括胶北地体和苏鲁地体，二者以五莲–烟台断裂为界（Deng et al., 2020）。

胶北地体由胶北隆起和胶莱盆地构成（图 1b），胶北隆起中变质基底发育，可见新太古代胶东群斜长角闪岩、浅粒岩、黑云变粒岩（王惠初等，2015；万渝生等，2017），古元古代荆山群和粉山子群石英岩、片岩、大理岩、变粒岩、透辉岩（陈燕平等，2024），新元古代蓬莱群灰岩、板岩、大理岩、石英岩（旷红伟等，2023）。胶莱盆地主体为早白垩世沉积岩和火山岩，自下而上可见莱阳组，青山组，王氏组，岩性以砾岩、砂砾岩、粉砂岩、泥岩、山岩及火山碎屑岩为主（李守军，1998；任凤楼等，2008；庞崇进，2015）；中生代花岗岩广布，以晚侏罗世玲珑花岗岩为主，其次为早白垩世早期郭家岭花岗闪长岩和艾山花岗岩；断裂构造发育，以 NE 向–NNE 向三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂、栖霞断裂、桃村断裂、牟平–即墨断裂规模最大，是胶东地区重要的金矿控矿构造，各断裂带内探明金矿床超过 160 处，累计探明黄金资源储量超过 5 000 t（杨立强等，2024）。苏鲁地体由超高压变质带和中生代侵入岩组成（徐扬等，2015；Liu et al., 2022），超高压变质带以新元古代花岗质片麻岩为主（刘利双等，2018）；中生代侵入岩可见晚侏罗世昆嵛山花岗岩（Goss et al., 2010；Yang et al., 2017）、早白垩世晚期伟德山花岗岩

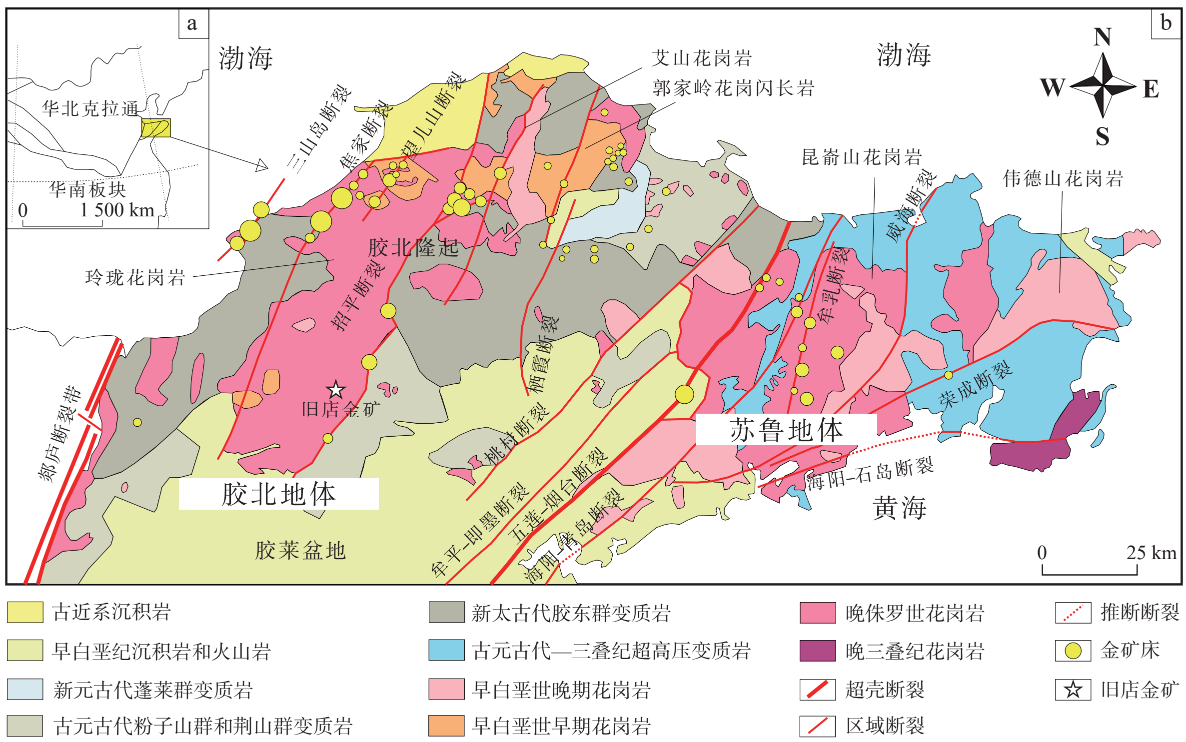


图1 旧店金矿床大地构造位置示意图（据邓军等，2023 修改）

Fig. 1 Schematic diagram of the geotectonic location of the Jiudian gold deposit

(邓军等, 2023); 断裂构造以海阳–青岛断裂、牟乳断裂、威海断裂、荣成断裂和海阳–石岛断裂为代表, 断裂带内矿体赋存和发育程度不及胶北地体, 累计明金矿床超过 90 处, 累计探明黄金资源储量超过 450 t(杨立强等, 2024)。

2　矿床地质特征

旧店金矿床地处胶北地体招平断裂带南段下盘。区内地层出露有古元古代荆山群和新生代第四系(图 2), 荆山群呈孤岛残留体零星分布于中生代玲珑超单元云山单元花岗岩体中, 岩性可见野头组蛇纹大理岩、长石石英砂岩、透辉变粒岩、斜长透辉岩和黑云变粒岩, 第四系主要分布于黄同水库上游庙东河和陈家沟河道内, 岩性可见河床相砂砾、含砾粗砂, 洪冲积相泥、砂、砾、巨砾混杂堆积。区内构造以断裂构造为主, 可分为 NE 向、NNE 向和 NW 向 3 组, 其中以 NE 向和 NNE 向为主, 该两组断裂是 I 级招平断裂和 II 级涧里断裂的次级断裂, 是区内重要的控矿和容矿构造, 北西向断裂以碎石山断裂为代表且规模最大, 为成矿后断裂。区内岩浆岩发育, 以玲珑超单元云山单元弱片麻状细粒含石榴二长花岗岩为主, 次为崔召单元片麻状细粒二长花岗岩, 郭家店单元中粗粒二长花岗岩仅在矿区西北角小面积出露, 脉岩可见煌斑岩、闪长玢岩、石英闪长玢岩、花岗细晶岩和伟晶岩脉等。

矿区及附近共分布大小矿脉 20 多余条, 矿石类

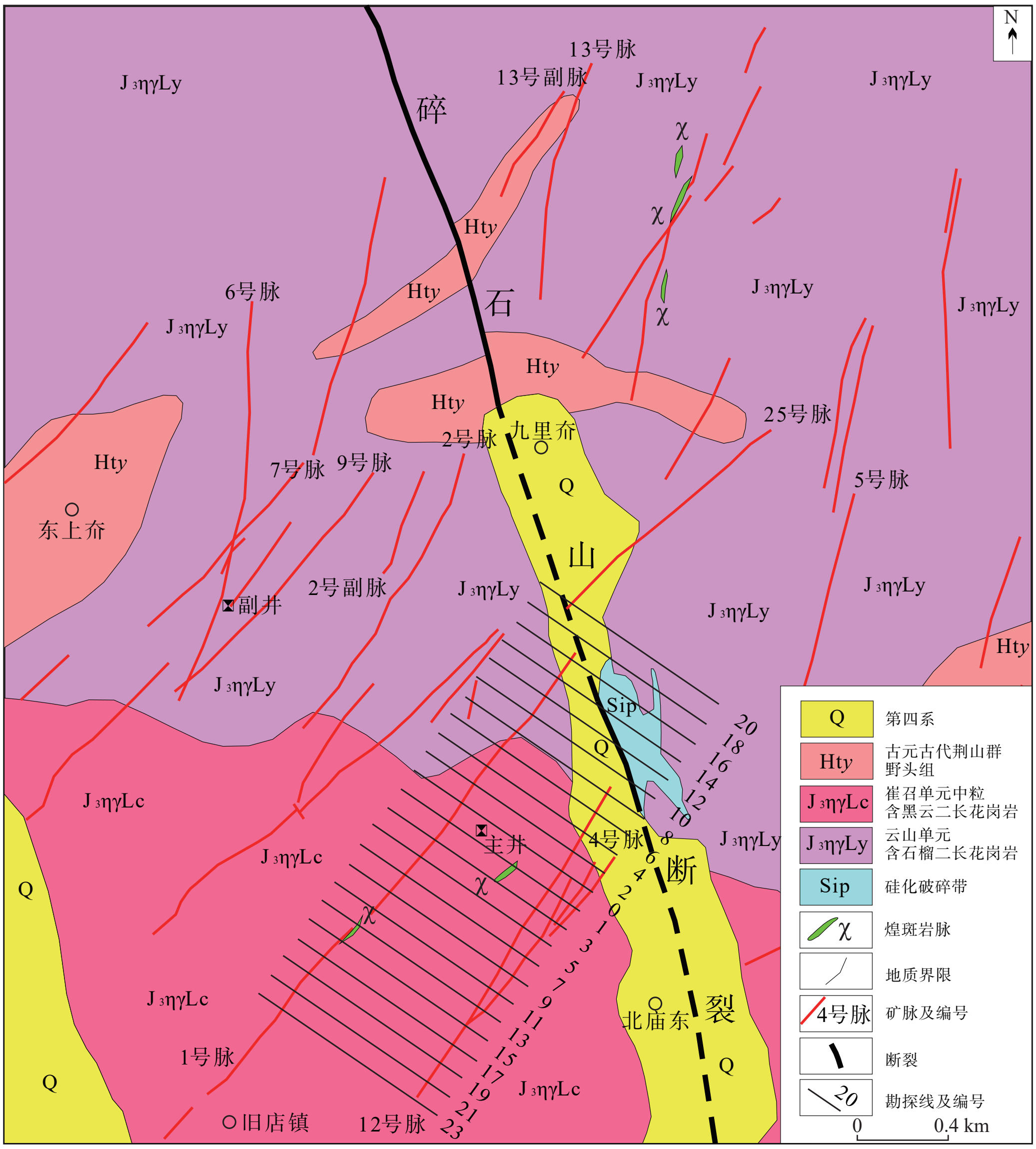


图2　旧店金矿床矿区地质图(引自矿山内部报告)

Fig. 2　Geological map of the Jiudian gold deposit mining area

型以石英脉型为主(图 2),局部出现少量交代蚀变岩型,矿体以 1 号脉规模最大,矿体连续性好,已累计探明金资源量超过 20 t(姜文峰等, 2008; 文志民等, 2013),包括 I、II 两个矿段。其中,II 矿段分布在旧店镇至北双山一带,为旧店金矿早期主要开采矿段,受北东向断裂构造控制,区内延伸长度约为 1.5 km,走向为 36°～44°,总体走向为 40°,倾向 NW,倾角为 60°～84°,矿体与围岩界限清晰,石英脉两侧黄铁绢英岩化蚀变发育(图 3)。

矿石类型以石英脉型、多金属硫化物石英脉型和黄铁绢英岩型为主,矿石结构可见自形–半自形粒状结构、不等粒结构和交代残余结构,矿石构造主要为块状构造、网脉状构造和浸染状构造,矿石金属矿物以黄铁矿为主,其次为黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿,含有少量的银金矿、金银矿、自然金及自然银,金主要以银金矿形式产出。

通过野外和镜下观察,依据矿石矿物组合、相互间的穿插包裹关系、矿石结构特征等,结合前人研究成果(谢成连等, 2008),初步认定成矿过程可划分为早成矿阶段(I)、主成矿阶段(II)、晚成矿阶段(III)3 个阶段,早阶段主要发育不含金的石英–黄铁矿脉(图 4a),主成矿阶段是金矿化主要发育阶段,从早到晚可以进一步分为 3 个亚阶段,包括中粗粒黄铁矿阶段(II_1)(图 4b、图 4d)、细粒–微细粒黄铁矿阶段(II_2)(图 4c、图 4g)、多金属硫化物阶段(II_3)(图 4e、图 4h),晚阶段以大量出现无矿石英–碳酸盐脉为特征(图 4f、图 4i)。

3　样品采集和测试方法

挑选 4 号脉 3 中段、5 中段、7 中段、8 中段、14 中段和 12 号矿体 7 中段、8 中段、14 中段、16 中段涵盖各成矿阶段且有代表性的含黄铁矿石英脉样品用于 H-O-S 稳定同位素分析,可以代表各成矿阶段的成矿流体特征。H、O、S 同位素分析工作委托核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。样品测试前经严格预处理,包括粉碎,清洗,镜下黄铁矿和石英单矿物挑选后进行送样测试。测试过程中,H 同位素和 O 同位素的测试仪器为 MAT 253 型稳定同位素质谱仪,S 同位素的测试仪器为 Delta V plus 型硫稳定同位素质谱仪。O 同位素的测试直接分析了各成矿阶段矿石石英晶格中的 O 元素,测试方法采用用 BrF_5 法进

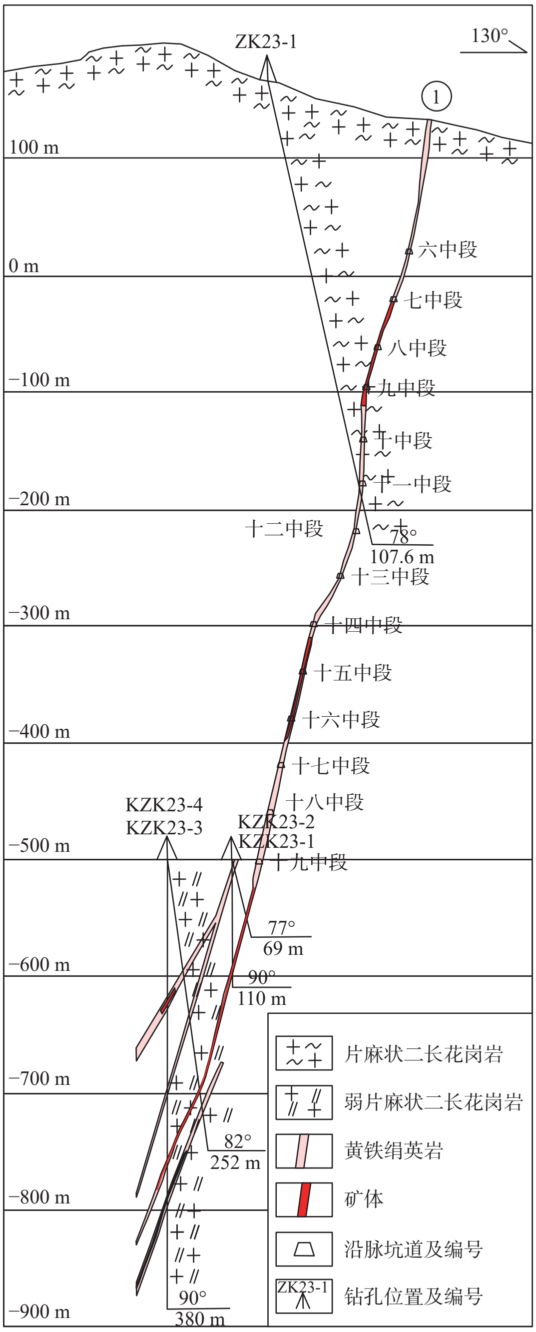
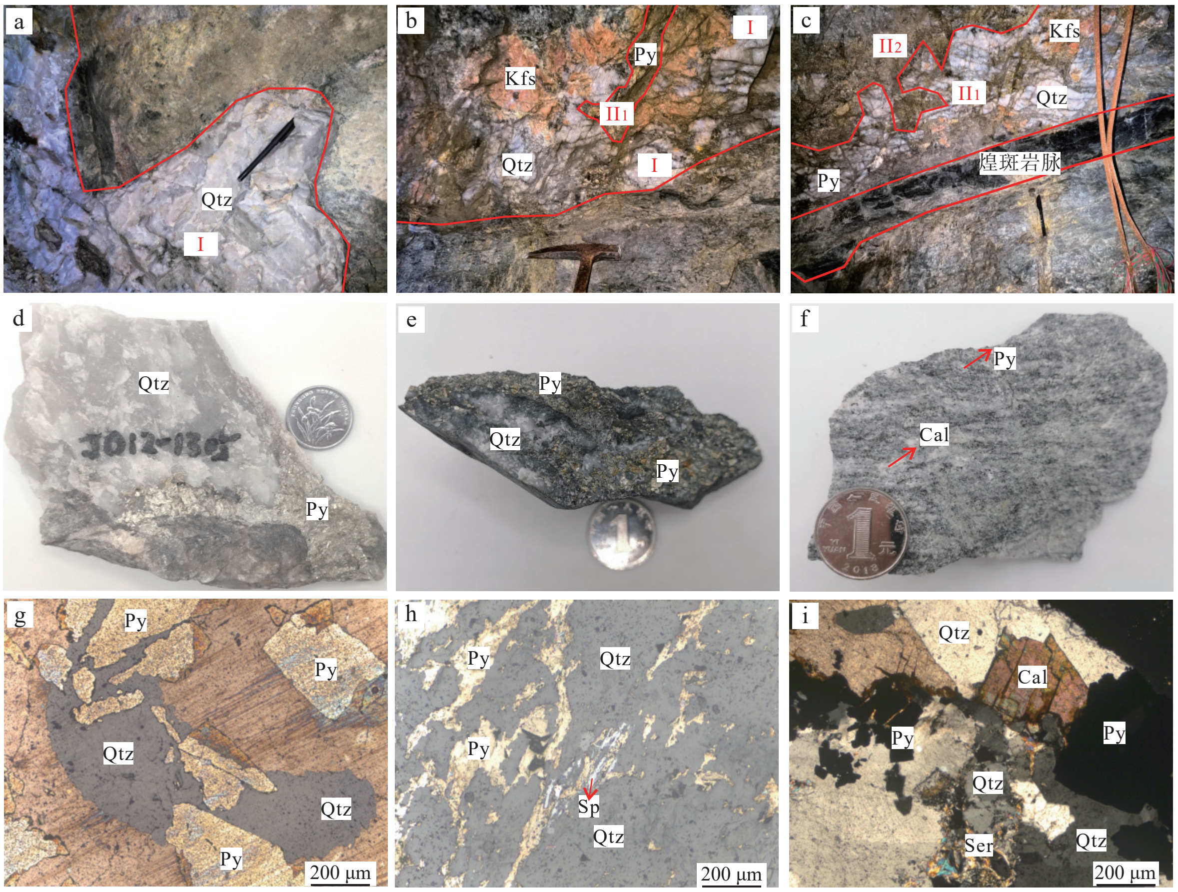


图3　旧店金矿床 1 号脉 II 矿段 23 号勘探线剖面图
(引自矿山内部报告)

Fig. 3　Section diagram of the No. 23 exploration line in the No. II ore block of the No. 1 ore vein in the Jiudian gold deposit

行,H 同位素则通过测定石英包裹体中水直接获得,测试方法为爆裂取水 Zn 还原法(刘天航等, 2024)。S 同位素的分析目标为硫化物中的 S 元素,测试结果为 $\delta^{34}S$ 与 Caòon Diablo Troilite(CDT)的比值,分析误差为±0.2‰。同位素具体测试的工作由研究中心根据国家同位素检测标准开展,可参考 Wang 等(2016)的论述。



a.早成矿阶段(I)；b.主成矿阶段中粗粒黄铁矿矿体(II$_1$)侵入早成矿阶段纯白石英脉中(I)；d.主成矿阶段细粒-微细粒黄铁矿矿体(II$_2$)切入中粗粒黄铁矿矿体(II$_1$)；d.中粗粒黄铁矿阶段(II$_1$)；e、h.多金属硫化物阶段(II$_3$)；f、i.晚成矿阶段(III)；g.细粒–微细粒黄铁矿阶段(II2)；Py.黄铁矿；Sp.闪锌矿；Qtz.石英；Ser.绢云母；Kfs.钾长石；Cal.方解石

图4　旧店金矿床矿石宏观和显微特征

Fig. 4　Macroscopic and microscopic characteristics of ore in the Jiudian gold deposit

4　分析结果

4.1　石英 H-O 同位素特征

笔者对各成矿阶段的 13 个样品的石英流体包裹体进行了 H-O 同位素分析(表 1)，总体上旧店金矿床石英的 O 同位素 $\delta O_{V\text{-}SMOW}$ 值为 8.08‰～12.77‰，H 同位素 $\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−97.7‰～−72.2‰。根据 O 同位素组成，采用了 Clayton 等(1972)的分馏方程，结合各成矿阶段内石英中流体包裹体的平均均一温度(牛警徽等，2023b)限定分馏系数，计算得出成矿流体的 O 同位素值 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为−0.01‰～4.64‰(Sharp et al.，2016)。其中，早成矿阶段(I)成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为 2.22‰～4.64‰，$\delta O_{V\text{-}SMOW}$ 值为 10.33‰～12.77‰，$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−90.2‰～−72.2‰；主成矿阶段(II)成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为 1.17‰～4.36‰，$\delta O_{V\text{-}SMOW}$ 值为 9.27‰～12.48‰，$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−84.3‰～−77.1‰；晚成矿阶段(III)成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为−0.01‰～4.28‰，$\delta O_{V\text{-}SMOW}$ 值为 8.08‰～12.48‰，$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−97.7‰～−87.1‰。

4.2　黄铁矿 S 同位素特征

对旧店金矿床各成矿阶段的 15 个样品的黄铁矿进行了 S 同位素分析(表 2)。结果显示，旧店金矿床主成矿阶段黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值大多为 7.65‰～10.10‰(平均值为 8.87‰)，$\delta^{34}S$ 值标准差小，表明硫源相对均一、稳定，S 同位素分馏较弱(马健等，2019)，暗示深部岩浆流体是主要硫源。其中，早成矿阶段(I)$\delta^{34}S$ 值为 8.46‰～8.67‰(平均值为 8.53‰)，主成矿阶段(II)$\delta^{34}S$ 值为 7.65‰～10.1‰(平均值为 9.11‰)，晚成矿阶段(III)$\delta^{34}S$ 值为 7.81‰～9.03‰(平均值为 8.47‰)，各成矿阶段黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值基本一致(图 5)、成矿物质来源相同。

表 1 旧店金矿及其他金矿成矿流体 H-O 同位素组成

Tab. 1 H-O isotope compositions of the ore-forming fluids in the Jiudian gold deposit and other gold deposits

金矿床	样品数	样号	测试矿物	$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ (‰)	$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ (‰)	温度(℃)	$\delta^{18}O_{H2O}$ (‰)	数据来源
旧店	13	I阶段-JD4-0301	石英	−90.2	12.77	270.0	4.64	本文
		I阶段-JD4-0501		−72.6	10.33	270.0	2.22	
		I阶段-JD4-0801		−72.2	11.18	270.0	3.07	
		II阶段-JD4-0802		−81.9	12.39	270.0	4.27	
		II阶段-JD12-0706		−80.5	12.21	270.0	4.09	
		II阶段-JD12-1 601		−80.9	12.48	270.0	4.36	
		II阶段-JD4-0302		−84.3	10.52	270.0	2.41	
		II阶段-JD12-0809		−77.1	12.31	270.0	4.19	
		II阶段-JD12-1408		−78.9	9.27	270.0	1.17	
		II阶段-JD12-1602		−80.4	12.16	270.0	4.04	
		III阶段-JD4-0806		−97.7	12.4	270.0	4.28	
		III阶段-JD4-1402		−87.1	8.08	270.0	−0.01	
		III阶段-JD12-0704		−91.1	12.39	270.0	4.27	
旧店	6	JD-TW1等	石英	−83.4～−74.2	10.7～12.8	300.0	3.81～5.91	Tian et al., 2022
旧店	7	17S32等	石英	−92～−74.2	9.1～13.4	265.2	0.84～5.14	安梦莹, 2022
夏甸	9	XD-wd-1等	石英	−73.22～−46.22	10.4～12.4	240.0	−1.6～2.89	李逸凡等, 2021
夏甸	3	XD-3等	石英	−99.8～−95.1	8.6～9.3	253.0	−0.2～0.5	杜佛光, 2019
夏甸	3	713-41等	石英	−72.1～−66.2	13～14.9	172.0～363.7	4.6～9.2	吴迪, 2016
大尹格庄	11	DYGZ-4-2等	石英	−103～−77.3	8.7～12.2	173.8～353.8	2.75～7.18	严子清等, 2024
大尹格庄	11	Y309Cc3等	石英	−95～−68	7.3～12.7	280.0～350.0	−0.3～7.8	Yang et al., 2010
山后	5	SH-CM4-TW2等	石英	−90.7～−77	10.2～11.1	230.0	0.55～1.25	王巧云等, 2023
山后	4	WH2-1等	石英	−82.1～−78.6	7.5～11.2	215.0	−3.28～0.42	安梦莹, 2022
姜家窑	2	K3等	石英	−66.5～−61.78	7.9～8.5	311.0～344.0	1.57～2.1	王金辉, 2020
曹家洼	3	K12等	石英	−74.16～−61.55	10.4～10.8	299.0～333.0	3.89～5.33	王金辉, 2020
谢家沟	15	XJG19等	石英	−106～−85	7.7～11.3	209.0～351.0	0.8～5.7	Du et al., 2023
三山岛	2	S615-1等	石英	−83.1～−79.1	13.55～13.67	257.0～335.0	7.49～7.61	王金雅, 2020
焦家	5	J450-1等	石英	−95.8～−68.3	10.4～14.58	200.0～400.0	3.94～8.38	辛洪波, 2005
新立	9	XJG19等	石英	−77.63～−68.77	11.4～14.17	165.0～310.0	−0.17～7.02	毛兴强, 2022

5 讨论

5.1 成矿流体来源

笔者收集并整理前人关于旧店金矿床及胶东地区其他主要金矿床的 H-O 同位素数据(图 6, 表 1)。H-O 同位素特征表明, 旧店金矿床的成矿流体与招平断裂带内夏甸(吴迪, 2016; 杜佛光, 2019; 李逸凡等, 2021)、大尹格庄(Yang et al., 2010; 严子清等, 2024)、山后(安梦莹, 2022; 王巧云等, 2023)等金矿床, 以及三山岛(王金雅, 2020)、焦家(辛洪波, 2005)和新立(毛兴强等, 2022)等其他金成矿带内金矿床, 其成矿流体性质具有高度相似性。除焦家、新立、夏甸和姜家窑(王金辉, 2020)等金矿床少量 H-O 同位素落点于岩浆水区域, 大部分金矿床 H-O 同位素特征位于岩浆水附近且向大气降水线逐步靠近, 表明成矿过程中旧店金矿床等胶东地区金矿床成矿流体表现出岩浆水参与的显著特征(李逸凡等, 2021), 同时在成矿过程中大气降水的参与逐渐增多。

此外, Tian 等(2022)和 Sun 等(2022)在对旧店金矿床各成矿阶段包裹体测温结果显示, 从早期到晚期, 旧店金矿床成矿总体上呈现中温(198.5～329.2 ℃)和中低盐度(3.95～12.50 wt% NaCl.eqv), 温度从早期(303.1～329.2 ℃)到主成矿期(240.3～319.7 ℃)到晚期(198.5～311.7 ℃)呈现不断降低的趋势, 表明成矿流体向上运移过程中, 温度和压力逐步降低, 可能触发了流体的沸腾作用(Du et al., 2024), 导致流体相分离(倪培等, 2020)和金属沉淀(张德会, 1997), 进而了

加速了成矿流体系统逐步转变为开放系统的进程、导致大气降水的混入。综上所述，胶东地区金矿床的成矿流体在整体性质上差异不大，均为岩浆水与大气降水的混合体系（Wen et al., 2016），随着成矿阶段的推进，大气降水的加入比例呈现逐渐增多的趋势，这进一步指示胶东地区金矿床成矿流体体系的一致性。

5.2　金属来源

本次研究同时收集了胶东地区部分典型金矿床和花岗岩体的 S 同位素数据结果见表 2，并绘制了胶东部分金矿床和地质单元 S 同位素组成（图 7）。一方面，旧店金矿床的 S 同位素特征与夏甸金矿、焦家金矿和新城金矿等胶东地区大型金矿床 S 同位素特征基本一致，表明旧店金矿床主要载金矿物来源与招平断裂带内乃至胶东地区其他金矿床基本一致。另一方面，旧店金矿床的 S 同位素组成（7.65‰～10.10‰）主要与胶东群（6.9‰～9.4‰）（张潮等，2014）和荆山群（9.3‰～9.8‰）（张竹如等，1999）等老地层 S 同位素特征重叠；且与玲珑花岗岩（6.1‰～10.1‰）（毛景文等，2005）、郭家岭花岗闪长岩（2.4‰～9.7‰）（宋明春等，2013）也有一定的重合；此外，早白垩世晚期的中基性脉岩的侵入时代（116 Ma～124 Ma）是胶东地区主金成矿期（Song et al., 2020; Deng et al., 2023），其

表 2　旧店金矿床及其他地质单元 S 同位素特征

Tab. 2　Sulfur isotope characteristics of the Jiudian gold deposit and other geological units

金矿/地质单元	样品数	样号	矿物/对象	$\delta^{34}S$值（‰）	数据来源
旧店金矿	13	I阶段-JD4-0301	黄铁矿	8.46	本文
		I阶段-JD4-0501		8.67	
		I阶段-JD4-0801		8.46	
		II阶段-JD4-0802		10.1	
		II阶段-JD12-0706		9.51	
		II阶段-JD12-1601		7.65	
		II阶段-JD4-0302-1		9.23	
		II阶段-JD4-0302-2		9.15	
		II阶段-JD12-0809		8.29	
		II阶段-JD12-1408-1		9.75	
		II阶段-JD12-1408-2		9.63	
		II阶段-JD12-1602		8.72	
		III阶段-JD4-0806		7.81	
		III阶段-JD4-1402		8.56	
		III阶段-JD12-0704		9.03	
玲珑金矿	5	JQ-Q-04等	黄铁矿	5.9～7.4	Wen et al.，2015
东风金矿	5	10LL18等	黄铁矿	5.8～7.0	Wen et al.，2015
大尹格庄金矿	10	DYGZ-4-2等	黄铁矿	3.1～7.6	严子清等，2024
夏甸金矿	7	713-1等	黄铁矿	6.95～8.1	Liu et al.，2018
夏甸金矿2	10	XD-wd-1等	黄铁矿	6.3～8.1	李逸凡等，2021
谢家沟金矿	42	XJG34-2-1-Py等	黄铁矿	5.7～9.0	Du et al.，2023
焦家金矿1	5	17JJ04-1等	黄铁矿	8.7～11.2	Qiu et al.，2023
焦家金矿2	8	\	黄铁矿	8.6～11.3	陈阳阳，2017
三山岛金矿1	7	09S37等	黄铁矿	11.5～12.4	姜晓辉等，2011
三山岛金矿2	20	17SSD-1-1等	黄铁矿	9.4～13.0	Qiu et al.，2023
新城金矿	33	XC12D001B1等	黄铁矿	5.7～10.6	张潮等，2014
新立金矿	6	XL48508-21等	黄铁矿	7.7～13.2	毛兴强等，2022
金青顶金矿	8	J-335-05等	黄铁矿	6.95～8.69	李旭芬，2011
大柳行金矿	6	DLH-1等	黄铁矿	6.3～7.7	黄鑫，2021
胶东群	3	XC10D218B1等	黄铁矿	6.9～9.4	张潮等，2014
荆山群	6	\	黄铁矿	9.3～9.8	张竹如等，1999
玲珑花岗岩	8	LL-190-9等	黄铁矿	6.1～10.1	毛景文等，2005
郭家岭花岗闪长岩	5	\	黄铁矿	2.4～9.7	宋明春等，2013
中基性岩脉	6	\	黄铁矿	5.4～11.2	李俊建等，2006

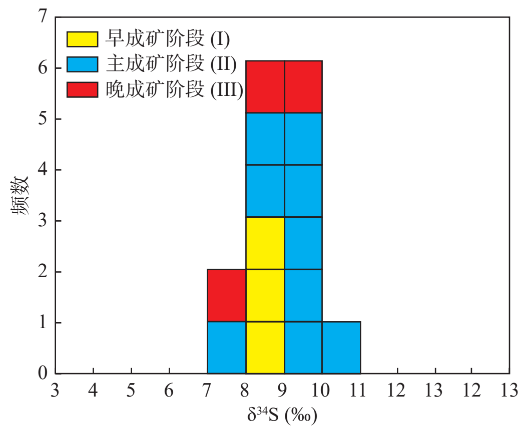


图5　旧店金矿床黄铁矿硫同位素直方图

Fig. 5　Histogram of sulfur isotopes of pyrite in the Jiudian gold deposit

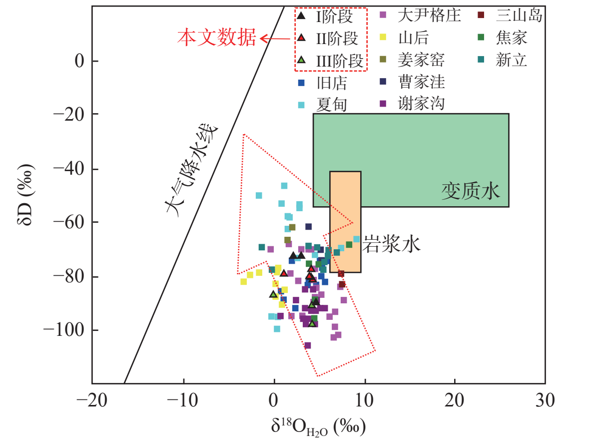


图6　部分金矿床成矿流体 δD-$\delta^{18}O_{H_2O}$ 同位素组成

Fig. 6　Isotope compositions of δD-$\delta^{18}O_{H_2O}$ of the ore-forming fluids in some gold deposits

在空间分布上多与矿体控矿断裂产状基本一致，且其S同位素组成与金矿床矿石中硫化物相似(图 7)(李俊建等, 2006; 冯李强, 2022)，表明胶东地区中基性脉岩成岩物质与金矿床成矿物质也可能具有相同的物质源区(Li et al., 2016; Yuan et al., 2019)。尽管上述研究表明这些地质体与成矿作用的直接关系较弱，但从太古代胶东岩群到中生代玲珑花岗岩体，再到旧店金矿床的S同位素组成变化来看，存在逐渐增大的趋势(表 2, 图 7)。上述证据表明，旧店金矿床乃至胶东地区金矿床的S同位素组成不仅是对胶东群、荆山群、玲珑花岗岩以及郭家岭花岗闪长岩等地层和侵入体S同位素特征的继承，而且在这一过程中有逐步富集的趋势。近年多，部分学者通过胶东地区六条金成矿带载金黄铁矿中相关均一的 δ^{199}Hg 组成(平均值为

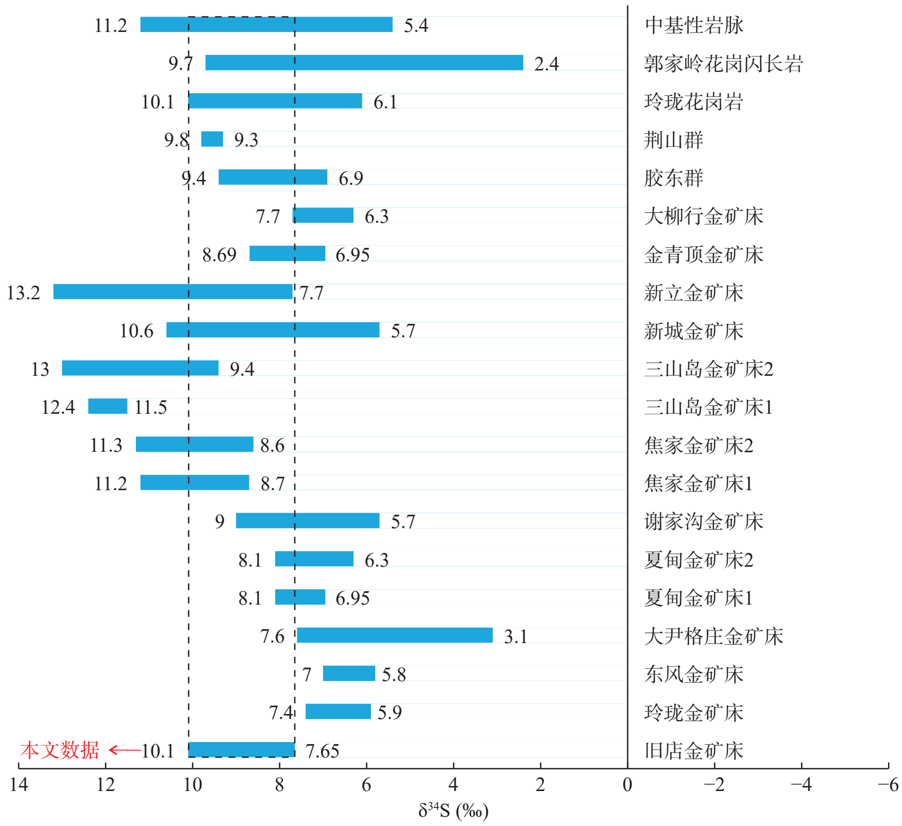


图7　胶东部分金矿床和地质单元 S 同位素组成

Fig. 7　Sulfur isotope compositions of some gold deposits and geological units in Jiaodong region

0.012‰)(Wang et al., 2024; Zhang et al., 2024)以及胶东地区典型金矿中黄铁矿多硫同位素中相对恒定的 $\delta^{33}S$ 组成(平均值为−0.04‰)(Qiu et al., 2023)分析认为胶东地区含金流体主要来源于深部源区，同时交代岩石圈成矿物质。综合成矿流体特征认为，旧店金矿床成矿物质以幔源为主，上涌过程中活化并交代荆山群变质岩和玲珑花岗岩的部分成矿物质，进而达到 S 同位素的均衡。

5.3　成矿模式

目前研究成果显示旧店金矿床内至少发育有新元古代(709.1 Ma)花岗质片麻岩、晚侏罗世(146.5 Ma～164.1 Ma)玲珑花岗岩和早白垩世(110.6 Ma～123.0 Ma)脉岩 3 期岩浆(Bi et al., 2017; 牛警徽等, 2023)活动，胶东地区金成矿时代与早白垩世中基性脉岩成岩时代高度吻合(Yang et al., 2015; Wang et al., 2022)，且岩浆岩锆石 Hf 同位素特征显示玲珑花岗岩成岩物质主要来自前寒武纪变质基底岩石的部分熔融(Cho et al., 2021; 李经纬等, 2023; Chen et al., 2024)，与玲珑花岗岩和荆山群等变质岩 S 同位素 $\delta^{34}S$ 值有一定重合的特征一致，结合区内成矿流体特征和成矿物质来源，初步建立旧店金矿床成矿模式(图 8)。

第一阶段为～709 Ma(图 8a)，在旧店矿区，花岗质片麻岩侵入到古元古代荆山群冶头组黑云变粒岩中，标志着旧店金矿床岩浆活动的开始。第二阶段为 164 ～146 Ma(图 8b)，晚侏罗世，扬子板块向华北板块持续俯冲(刘晓阳等, 2020; Chen et al., 2024)，造成地壳增厚发生熔融，在胶东地区生成大量的地壳重熔型玲珑花岗岩，岩性主要包括黑云母二长花岗岩、含石榴子石二长花岗岩、花岗伟晶岩脉和花岗细晶岩脉等。第三阶段为 123 Ma～110 Ma，是旧店金矿床形成阶段，早白垩世晚期，受晚中生代时期太平洋板块向华北板块俯冲影响(Zhang et al., 2020)，旧店金矿床所处的胶

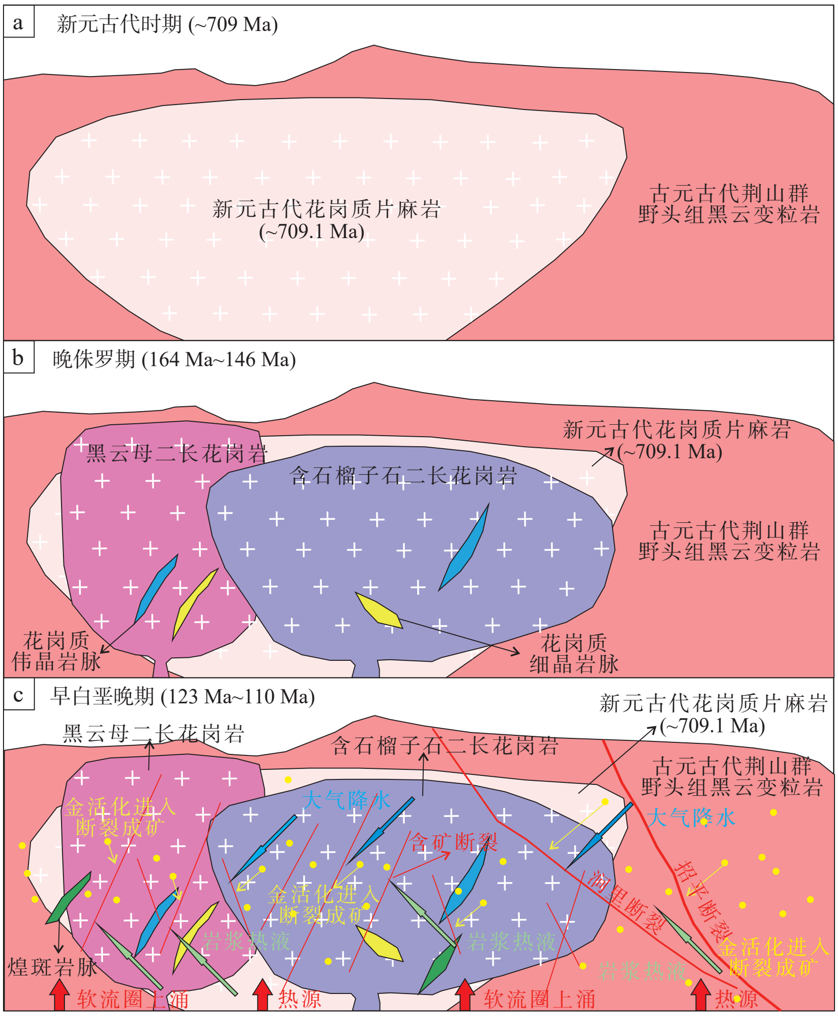


图8　旧店金矿床成矿模式示意图

Fig. 8　Schematic diagram of the mineralization model of the Jiudian gold deposit

东地区发生华北克拉通东部岩石圈大规模伸展–减薄和软流圈上涌(Yang et al., 2016; Ma et al., 2017)(图 8c),在地壳产生大量的断裂(宋明春等, 2022a),大范围的幔源岩浆活化了古元古代荆山群变质岩残留体、玲珑花岗岩体以及中基性脉岩中的 Au 物质,在岩浆水为主、大气降水为辅的混合流体作用下在招平断裂带下盘次级断裂构造中富集成矿。

6 结论

(1)旧店金矿床矿体主要赋存于 NE 向和 NNE 向断裂构造中,成矿过程可分为早成矿阶段(I)、主成矿阶段(II)、晚成矿阶段(III)3 个阶段。其中,主成矿阶段包括中粗粒黄铁矿阶段(II_1)、细粒–微细粒黄铁矿阶段(II_2)和多金属硫化物阶段(II_3)3 个亚阶段。

(2)不同成矿阶段的石英 H-O 同位素分析显示,早成矿阶段成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为 2.22‰~−4.64‰,$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−90.2‰~−72.2‰,主成矿阶段成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为1.17‰~−4.36‰,$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−84.3‰~−77.1‰,晚成矿阶段成矿流体 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为−0.01‰~4.28‰,$\delta D_{V\text{-}SMOW}$ 值为−97.7‰~−87.1‰。以上特征表明,早阶段成矿流体以岩浆水为主,随着流体演化,大气降水逐步混入且所占比例不断增加。

(3)不同成矿阶段的黄铁矿 S 同位素无明显差异,$\delta^{34}S$ 值大多为 7.65‰~10.10‰(平均值为 8.87‰),这一范围与前寒武纪变质基底和中生代花岗岩特征十分类似,表明旧店金矿床成矿物质来源于前寒武纪变质基底和中生代花岗岩。

(4)综合前人研究成果,建立了旧店金矿成矿模式:晚侏罗世,旧店地区大量含金的老变质岩基底发生重熔,形成玲珑型花岗岩;在早白垩晚期受华北克拉通东部岩石圈大规模伸展–减薄和软流圈上涌影响,花岗岩和古老变质基底中的金发生活化富集,并在岩浆水和大气降水组成的混合流体作用下,在招平断裂带下盘次级断裂构造中富集成矿。

参考文献(References):

安梦莹. 胶东招平断裂带南段金矿成矿作用及成矿规律 [D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.

AN Mengying. Metallogenic Processes and Regularities of Gold Deposits in the Southern Section of the Zhaoping Fault Zone, Jiaodong[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022.

陈燕平, 李增胜, 李旭平, 等. 胶东辽上金矿荆山群 U-Pb 年代学特征及其记录的多期地质事件[J]. 岩石学报, 2024, 40(11): 3643−3662.

CHEN Yanping, LI Zengsheng, LI Xuping, et al. U-Pb Chronology Characteristics of the Jingshan Group in the Liaoshang Gold Deposit, Jiaodong and Its Recorded Multiple Geological Events [J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(11): 3643−3662.

陈阳阳. 山东焦家金矿床地球化学特征及矿床成因探讨 [D]. 西安: 长安大学, 2017.

CHEN Yangyang. Geochemical Characteristics and Genesis of the Jiaojia Gold Deposit in Shandong[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.

邓军, 王庆飞, 张良, 等. 胶东型金矿成因模型[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(10): 2323−2347.

DENG Jun, WANG Qingfei, ZHANG Liang, et al. Genetic Model of Jiaodong-Type Gold Deposits[J]. Science China: Earth Sciences, 2023, 53(10): 2323−2347.

杜佛光, 姜耀辉, 青龙, 等. 胶东夏甸金矿成矿流体及成矿物质来源: H-O、He-Ar、Sr-Nd-Pb 同位素证据[J]. 高校地质学报, 2019, 25(5): 686−696.

DU Fuguang, JIANG Yaohui, QING Long, et al. Ore-Forming Fluids and Sources of Ore-Forming Materials of the Xiadian Gold Deposit in Jiaodong: Evidence from H-O, He-Ar, and Sr-Nd-Pb Isotopes[J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(5): 686−696.

冯李强. 山东蓬莱石家金矿床成因与找矿方向 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2022.

FENG Liqiang. Genesis and Prospecting Direction of the Shijia Gold Deposit in Penglai, Shandong[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2022.

黄鑫. 胶东大柳行金矿矿床特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2021, 54(4): 129−141.

HUANG Xin. Characteristics and Genesis of the Daliliuxing Gold Deposit in Jiaodong[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(4): 129−141.

姜文峰, 张彬. 山东平度旧店金矿床的成矿特点及深部盲矿预测标志[J]. 黄金科学技术, 2008, (4): 45−47.

JIANG Wenfeng, ZHANG Bin. Metallogenic Characteristics and Deep Blind Ore Prediction Marks of the Jiudian Gold Deposit in Pingdu, Shandong[J]. Gold Science and Technology, 2008, (4): 45−47.

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.

JIANG Xiaohui, FAN Hongrui, HU Fangfang, et al. Comparison of Ore-Forming Fluids in the Middle and Deep Parts of the Sanshandao Gold Deposit in Jiaodong and the Deposit Genesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(5): 1327−1340.

旷红伟, 柳永清, 耿元生, 等. 中国中—新元古代地层研究进展及建议划分、对比方案[J]. 地质学报, 2023, 97(12): 3961−

4019.

KUANG Hongwei, LIU Yongqing, GENG Yuansheng, et al. Research Progress on the Meso-Neoproterozoic Strata in China and Suggested Division and Correlation Schemes[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(12): 3961−4019.

李经纬, 邱昆峰, 马明, 等. 胶东旧店金矿床赋矿岩浆岩岩石成因及其地质意义[J]. 岩石学报, 2023, 39(2): 393−410.

LI Jingwei, QIU Kunfeng, MA Ming, et al. Petrogenesis of the Ore-Bearing Magmatic Rocks in the Jiudian Gold Deposit, Jiaodong and Its Geological Significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(2): 393−410.

李俊建. 华北陆块主要成矿区带成矿规律和找矿方向 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2006, 297−312.

LI Junjian. Metallogenic Regularities and Prospecting Directions of the Main Metallogenic Belts in the North China Block[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2006: 297−312.

李守军. 山东侏罗-白垩纪地层划分与对比[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(1): 4−7, 111.

LI Shoujun. Division and Correlation of the Jurassic-Cretaceous Strata in Shandong[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1998, 22(1): 4−7, 111.

李旭芬. 胶东牟平-乳山金矿带金青顶金矿矿床成因与找矿方向研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.

LI Xufen. Study on the Genesis and Prospecting Direction of the Jinqingding Gold Deposit in the Muping-Rushan Gold Belt, Jiaodong[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.

李逸凡, 李洪奎, 汤启云, 等. 山东旧店金矿黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(2): 45−50.

LI Yifan, LI Hongkui, TANG Qiyun, et al. Typomorphic Characteristics of Pyrite in the Jiudian Gold Deposit in Shandong and Their Geological Significance[J]. Gold Science and Technology, 2015, 23(2): 45−50.

李逸凡, 李洪奎, 韩学林, 等. 胶东夏甸金矿床成因: 流体包裹体及同位素证据[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(2): 184−199.

LI Yifan, LI Hongkui, HAN Xuelin, et al. Genesis of the Xiadian Gold Deposit in Jiaodong: Evidence from Fluid Inclusions and Isotopes[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(2): 184−199.

刘利双, 刘福来, 冀磊, 等. 北苏鲁超高压变质带内多成因类型的变花岗质岩石及其地质意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(6): 1557−1580.

LIU Lishuang, LIU Fulai, JI Lei, et al. Polygenetic Granitic Rocks in the North Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt and Their Geological Significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(6): 1557−1580.

刘天航, 唐卫东, 高永宝, 等. 内蒙古北山花石头山萤石矿床成因: 萤石微量、稀土和 H-O 同位素制约[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 66−79.

LIU Tianhang, TANG Weidong, GAO Yongbao, et al. Genesis of the Huashitoushan Fluorite Deposit, Beishan, In-ner Mongolia: Constraints from Trace Elements, REE and H-O Isotope Geochemistry of Fluorite[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 66−79.

刘晓阳, 谭俊, 王怀洪, 等. 胶东范家庄地区晚侏罗世低镁埃达克质花岗岩成因及构造背景[J]. 地球科学, 2020, 45(2): 451−466.

LIU Xiaoyang, TAN Jun, WANG Huaihong, et al. Genesis and Tectonic Setting of the Late Jurassic Low-Mg Adakitic Granites in the Fanjiacun Area, Jiaodong[J]. Earth Science, 2020, 45(2): 451−466.

马健, 吕新彪, 但荣飞, 等. 西秦岭左家庄金矿成因研究: 来自黄铁矿微量元素及多元同位素地球化学的制约[J]. 地学前缘, 2019, 26(5): 146−162.

MA Jian, LV Xinbiao, DAN Rongfei, et al. Genetic Study of the Zuojiazhuang Gold Deposit in the Western Qinling Mountains: Constraints from Trace Elements and Multiple Isotope Geochemistry of Pyrite[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(5): 146−162.

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.

MAO Jingwen, LI Houmin, WANG Yitian, et al. Evidence from H, O, C, and S Isotopes for the Involvement of Mantle Fluids in the Metallogenesis of Jiaodong Gold Deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 839−857.

毛兴强, 王恩德, 杨群, 等. 山东省胶东半岛新立金矿床成因[J]. 地质通报, 2022, 41(10): 1855−1868.

MAO Xingqiang, WANG Ende, YANG Qun, et al. Genesis of the Xinli Gold Deposit in the Jiaodong Peninsula, Shandong Province[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(10): 1855−1868.

倪培, 迟哲, 潘君屹. 斑岩型和浅成低温热液型矿床成矿流体与找矿预测研究: 以华南若干典型矿床为例[J]. 地学前缘, 2020, 27(2): 60−78.

NI Pei, CHI Zhe, PAN Junyi. Research on Ore-Forming Fluids and Prospecting Prediction of Porphyry and Epithermal Deposits: Taking Several Typical Deposits in South China as Examples [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(2): 60−78.

牛警徽, 田福泉, 邱敦方, 等. 山东旧店金矿床花岗岩类锆石 U-Pb 年龄及对招平断裂带南段岩浆活动规律的约束[J]. 地质通报, 2023, 42(5): 813−827.

NIU Jinghui, TIAN Fuquan, QIU Dunfang, et al. Zircon U-Pb Ages of Granitoids in the Jiudian Gold Deposit in Shandong and Their Constraints on the Magmatic Activity Regularities in the Southern Section of the Zhaoping Fault Zone[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(5): 813−827.

牛警徽，吴明刚，范德江，等. 胶东地区招平断裂带南段旧店金矿床流体包裹体研究 [A]//中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会. 第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集 [C]. 2023b, 50.

NIU Jinghui, WU Minggang, FAN Dejiang, et al. Study on Fluid Inclusions in the Jiudian Gold Deposit in the Southern Section of the Zhaoping Fault Zone, Jiaodong Area[A]// Ore Deposit Geochemistry Committee of the Geochemical Society of China. Abstracts of the 10th National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods[C]. 2023b, 50.

庞崇进. 华北克拉通东部白垩纪中基性火山岩的年代学和地球化学特征 [D]. 广州: 中国科学院研究生院 (广州地球化学研究所), 2015.

PANG Chongjin. Geochronology and Geochemical Characteristics of Cretaceous Mafic-Ultramafic Volcanic Rocks in the Eastern North China Craton[D]. Guangzhou: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2015.

任凤楼，柳忠泉，邱连贵，等. 胶莱盆地莱阳期原型盆地恢复[J]. 沉积学报，2008，24(2)：221−233.

REN Fenglou, LIU Zhongquan, QIU Liangui, et al. Restoration of the Prototype Basin of the Laiyang Period in the Jiaolai Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 24(2): 221−233.

宋明春，丁正江，刘向东，等. 胶东型金矿床断裂控矿及成矿模式[J]. 地质学报，2022a，96(5)：1774−1802.

SONG Mingchun, DING Zhengjiang, LIU Xiangdong, et al. Fault control of ore deposits and ore-forming models of Jiaodong-type gold deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2022a, 96(5): 1774−1802.

宋明春，宋英昕，李杰，等. 胶东型金矿热隆-伸展成矿系统[J]. 岩石学报，2023，39(5)：1241−1260.

SONG Mingchun, SONG Yingxin, LI Jie, et al. The Thermal-Uplift-Extension Metallogenic System of Jiaodong-Type Gold Deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 39(5): 1241−1260.

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.

SONG Mingchun, SONG Yingxin, SHEN Kun, et al. Geochemical Characteristics of the Deep Jiaojia Gold Deposit in Jiaodong and Discussion on Related Issues[J]. Geochimica, 2013, 42(3): 274−289.

宋明春，杨立强，范宏瑞，等. 找矿突破战略行动十年胶东金矿成矿理论与深部勘查进展[J]. 地质通报，2022b，41(6)：903−935.

SONG Mingchun, YANG Liqiang, FAN Hongrui, et al. Progress in Metallogenic Theories and Deep Exploration of Jiaodong Gold Deposits during the Decade of the Strategic Action for Ore Prospecting Breakthrough[J]. Geological Bulletin of China, 2022b, 41(6): 903−935.

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.

SONG Yingxin, SONG Mingchun, DING Zhengjiang, et al. Important Progress in Deep Ore Prospecting and Metallogenic Characteristics of the Jiaodong Gold Ore Concentration Area[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(3): 4−18.

万渝生，宋志勇，王来明，等. 华北克拉通太古宙典型地区栖霞县幅 1: 5 万地质图修编——野外地质调查和 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质通报，2017，36(11)：1927−1941.

WAN Yusheng, SONG Zhiyong, WANG Laiming, et al. Revision of the 1: 50, 000 Geological Map of the Qixian County Sheet in Typical Archean Areas of the North China Craton-Field Geological Investigation and SHRIMP Zircon U-Pb Dating[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(11): 1927−1941.

汪浩，孙唯品，李华，等. 原位硫-铅同位素对胶东旧店金矿床成矿物质来源的约束 [J/OL]. 大地构造与成矿学，1−30[2025-03-25].

WANG Hao, SUN Weipin, LI Hua, et al. Constraints on the Sources of Ore-Forming Materials of the Jiudian Gold Deposit in Jiaodong by In-Situ Sulfur-Lead Isotopes[J/OL]. Geotectonica et Metallogenia, 1−30[2025-03-25].

王惠初，康健丽，任云伟，等. 华北克拉通～2.7Ga 的 BIF: 来自莱州-昌邑地区含铁建造的年代学证据[J]. 岩石学报，2015，31(10)：2991−3011.

WANG Huichu, KANG Jianli, REN Yunwei, et al. ～2.7Ga BIF in the North China Craton: Chronological Evidence from the Iron-Bearing Formations in the Laizhou-Changyi Area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(10): 2991−3011.

王金辉. 胶西北金成矿区 He、Ar 同位素组成及成矿流体来源研究[J]. 岩石矿物学杂志，2020，39(2)：172−182.

WANG Jinhui. He and Ar Isotope Compositions and Sources of Ore-Forming Fluids in the Jiaobei Gold Metallogenic Area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2020, 39(2): 172−182.

王金雅. 胶东地区 Au 成矿流体演化与成矿规律研究 [D]. 西安: 长安大学，2020.

WANG Jinya. Study on the Evolution of Au Ore-Forming Fluids and Metallogenic Regularities in the Jiaodong Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.

王巧云，郭晶，郝兴中，等. 胶东山后金矿成矿流体及成矿物质来源: 来自 H-O、Sr-Nd-Pb、He-Ar 同位素证据[J]. 山东国土资源，2023，39(8)：1−7.

WANG Qiaoyun, GUO Jing, HAO Xingzhong, et al. Ore-Forming Fluids and Sources of Ore-Forming Materials of the Shanhou Gold Deposit in Jiaodong: Evidence from H-O, Sr-Nd-Pb, and He-Ar Isotopes[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2023, 39(8): 1−7.

文志民，姜深光，李绪俊，等. 山东旧店金矿 1#脉地质地球化学特征及深部找矿[J]. 世界地质，2013，32(1)：45−53.

WEN Zhimin, JIANG Shenguang, LI Xujun, et al. Geological and Geochemical Characteristics of the No. 1 Vein in the Jiudian Gold Deposit in Shandong and Deep Prospecting[J]. World Geology, 2013, 32(1): 45−53.

吴迪. 山东夏甸金矿床地球化学特征及矿床成因探讨 [D]. 西安: 长安大学, 2016.

WU Di. Geochemical Characteristics and Genesis of the Xiadian Gold Deposit in Shandong[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.

谢成连, 何国强, 史维全. 平度旧店金矿区同成矿构造与金的富集关系[J]. 山东国土资源, 2008(2): 9−11.

XIE Chenglian, HE Guoqiang, SHI Weiquan. Relationship between Syn-Metallogenic Structures and Gold Enrichment in the Jiudian Gold Mine Area in Pingdu[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2008(2): 9−11.

辛洪波. 胶东谢家沟金矿与焦家金矿地质特征与成因对比 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2005.

XIN Hongbo. Comparison of Geological Characteristics and Genesis between the Xiejiagou Gold Deposit and the Jiaojia Gold Deposit in Jiaodong[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005.

徐扬, 李日辉, 温珍河, 等. 胶北地块和北苏鲁超高压变质带前寒武纪基底对比研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 99−110.

XU Yang, LI Rihui, WEN Zhenhe, et al. Comparative Study on the Precambrian Basements of the Jiaobei Block and the North Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(1): 99−110.

严子清, 石文杰, 张鹏涛, 等. 胶东大尹格庄金矿成矿流体时空演化及矿床成因: 来自流体包裹体、成矿元素和 H-O-S-Pb 同位素证据[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 156−174.

YAN Ziqing, SHI Wenjie, ZHANG Pengtao, et al. Temporal and Spatial Evolution of Ore-Forming Fluids and Genesis of the Dayingezhuang Gold Deposit in Jiaodong: Evidence from Fluid Inclusions, Ore-Forming Elements, and H-O-S-Pb Isotopes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 156−174.

杨立强, 邓军, 张良, 等. 胶东型金矿[J]. 岩石学报, 2024, 40(6): 1691−1711.

YANG Liqiang, DENG Jun, ZHANG Liang, et al. Jiaodong-Type Gold Deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(6): 1691−1711.

杨立强, 魏瑜吉, 王偲瑞, 等. 胶东金矿床中关键金属资源储量估算与潜力初探[J]. 岩石学报, 2022, 38(1): 9−22.

YANG Liqiang, WEI Yujie, WANG Sierui, et al. Preliminary Exploration of the Reserve Estimation and Potential of Key Metal Resources in Jiaodong Gold Deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(1): 9−22.

岳石, 赵寅震. 胶东旧店金矿构造控矿特征研究[J]. 地质找矿论丛, 1988(2): 38−46.

YUE Shi, ZHAO Yinzhen. Study on the Tectonic Ore-Controlling Characteristics of the Jiudian Gold Deposit in Jiaodong[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1988(2): 38−46.

张潮, 刘育, 刘向东, 等. 胶西北新城金矿床硫同位素地球化学[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2495−2506.

ZHANG Chao, LIU Yu, LIU Xiangdong, et al. Characteristics of Sulfur Isotope Geochemistry of the Xincheng Gold Deposit, Northwest Jiaodong, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(9): 2495−2506.

张德会. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义[J]. 地球科学进展, 1997(6): 49−55.

ZHANG Dehui. Significance of Fluid Boiling and Mixing in Hydrothermal Metallogenesis[J]. Advances in Earth Science, 1997(6): 49−55.

张竹如, 陈世桢. 胶东金成矿域胶莱盆地中超大型金矿床找矿远景[J]. 地球化学, 1999(3): 203−212.

ZHANG Zhuru, CHEN Shizhen. Prospecting Prospects for Super-Large Gold Deposits in the Jiaolai Basin of the Jiaodong Gold Metallogenic Province[J]. Geochimica, 1999(3): 203−212.

Bi S J, Zhao X F. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of the Jiehe gold deposit in the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: Implications for regional gold metallogeny[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 86: 639−651.

Chen Y, Li H, Wang W, et al. Tectonic transition during the Jurassic-Cretaceous in the Jiaodong Peninsula, North China: insights from asynchronous adakitic and A-type granitic plutons[J]. International Geology Review, 2024, 66(9): 1743−64.

Cho D, Lee T, Takahashi Y, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotope geochemistry of magmatic and metamorphic rocks from the Hida Belt, southwest Japan[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(4): 189−205.

Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical research, 1972, 77(17): 3057−67.

Deng J, Qiu K F, Wang Q F, et al. In-situ dating of hydrothermal monazite andimplications on the geodynamic controls of ore formation in theJiaodong gold province, eastern China[J]. Economic Geology, 2020, 115(3): 671−685.

Deng J, Wang Q F, Zhang L, et al. Metallogenetic model of Jiaodong-type gold deposits, eastern China[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(10): 2287−2310.

Du J, Du Y, Wang G, Wu C, et al. Gold mineralisation by pyrite recrystallisation and arsenopyrite sequestration in the Jiaochong Au deposit, Tongling ore district, eastern China: Implications for the formation of stratabound ore deposits[J]. Ore Geology

Reviews. 2024: 105955.

Du Z Z, Cheng Z Z, Yao X F, et al. Two-stage superimposed gold mineralization in the xiejiagou gold deposit, shandong province: insights from fluid inclusions, H-O-S isotopes, and trace elements[J]. Minerals, 2023, 13(9): 26.

Goss S C, Wilde S A, Wu F, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. Lithos, 2010, 120(3-4): 309−326.

Li L, Li S R, Santosh M, et al. Dyke swarms and their role in the genesis of world-class gold deposits: Insights from the Jiaodong peninsula, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 130: 2−2.

Liu J, Wang J, Liu Y, et al. Ore genesis of the Xiadian gold deposit, Jiaodong Peninsula, East China: Information from fluid inclusions and mineralization[J]. Geological Journal, 2018, 53: 77−95.

Liu X D, Ding Z J, Song M C, et al. Geology and mineralization of the Dayin'gezhuang supergiant gold deposit(180 t) in the Jiaodong Peninsula, China: A review[J]. China Geology, 2022(4): 696−721.

Ma W D, Fan H R, Liu X, et al. Geochronological framework of the Xiadian gold deposit in the Jiao dong Province, China: Implications for the timing of gold mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 86(1): 196−211.

Qiu K F, Deng J, Laflamme C, et al. Giant Mesozoic gold ores derived from subducted oceanic slab and overlying sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2023, 343: 133−141.

Sharp Z D, Gibbons J A, Maltsen O, et al. A calibration of the triple oxygen isotope fractionation in the SiO_2-H_2O system and applications to natural samples[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta Journal of the Geochemical Society & the Meteoritical Society, 2016, 186: 105−119.

Song M C, Zhou J B, Song Y X, et al. Mesozoic Weideshan granitoid suite and its relationship to large-scale gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China[J]. Geological Journal, 2020, 55(8): 5703−5724.

Sun W P, Feng Y X, Lai C, et al. A high-efficiency gold precipitation model associated with Fe carbonates: Example from the Jiudian deposit of the world-class Jiaodong gold province[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 145: 104894.

Tian R C, Li D P, Tian J P, et al. Genesis of the Jiudian gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: Fluid inclusion and CHO-Pb isotope constraints[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 149: 105086.

Wang Y H, Zhang F F, Liu J J, et al. Genesis of the Fuxing porphyry Cu deposit in Eastern Tianshan, China: Evidence from fluid inclusions and C-H-O-S-Pb isotope systematics[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 79: 46−61.

Wang B, Ding Z J, Bao Z Y, et al. Mesozoic Magmatic and Geodynamic Evolution in the Jiaodong Peninsula, China: Implications for the Gold and Polymetallic Mineralization[J]. Minerals, 2022, 12(9): 1073.

Wang Q F, Liu X F, Yin R S, et al. Metasomatized mantle sources for orogenic gold deposits hosted in high-grade metamorphic rocks: Evidence from Hg isotopes[J]. Geology, 2024, 52(2): 115−9.

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.

Wen B J, Fan H R, Santosh M, et al. Genesis of two different types of gold mineralization in the Linglong gold field, China: Constrains from geology, fluid inclusions and stable isotope[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 643−58.

Xiong L, Zhao X F, Wei J B, et al. Linking Mesozoic lode gold deposits to metalfertilized lower continental crust in the North China Craton: Evidence from Pb isotope systematics[J]. Chemical Geology, 2020, 533: 119440.

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, 2010, 59(2): 181−193.

Yang L Q, Deng J, Wang Z L, et al. Relationships Between Gold and Pyrite at the Xincheng Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China: Implications for Gold Source and Deposition in a Brittle Epizonal Environment[J]. Economic Geology, 2016, 111(1): 105−126.

Yang L Q, Dilek Y, Wang Z L, et al. Late Jurassic, high Ba-Sr Linglong granites in the Jiaodong Peninsula, East China: lower crustal melting products in the eastern North China Craton[J]. Geological Magazine, 2017, 1−23.

Yang Q Y, Santosh M. Early Cretaceous magma flare-up and its implications on gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 626−642.

Yuan Z Z, Li Z K, Zhao X F, et al. New constraints on the genesis of the giant Dayingezhuang gold (silver) deposit in the Jiaodong district, North China Craton[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 112: 103038.

Zhang L, Weinberg R F, Yang L Q, et al. Mesozoic orogenic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: A focused event at 120±2 Ma during cooling of pregold granite intrusions[J]. Economic Geology, 2020, 115(2): 415−441.

Zhang J Y, Qiu K F, Yin R S, et al. Lithospheric mantle as a metal storage reservoir for orogenic gold deposits in active continental margins: Evidence from Hg isotopes[J]. Geology, 2024, 52(6): 423−8.