



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：胶东金矿端元成矿理论认识初论：两类成矿端元的提出及成矿机制的热力学约束

作者：丁正江，辛未，孙丰月，邱昆峰，薄军委，张琪彬，王 斌，张静，邓军

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026094

投稿时间：2026-07-11

录用时间：2026-09-29

预出版时间：2026-10-19

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

引用格式: 丁正江, 辛未, 孙丰月, 等, 2026. 胶东金矿端元成矿理论认识初论: 两类成矿端元的提出及成矿机制的热力学约束[J]. 地质力学学报, 32(5): 1223–1241. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2026094](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2026094)

Citation: DING Z J, XIN W, SUN F Y, et al., 2026. A preliminary exploration of Extremal-Entropy Mineralization Theory for Jiaodong gold deposits: proposal of two metallogenic end members and thermodynamic constraints on their formation mechanisms[J]. Journal of Geomechanics, 32(5): 1223–1241. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2026094](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2026094)

胶东金矿端元成矿理论认识初论: 两类成矿端元的提出及成矿机制的热力学约束

丁正江^{1,2,3,4,5}, 辛未^{3,4,6}, 孙丰月^{1,3,4,5}, 邱昆峰^{3,4,5,7,8}, 薄军委^{1,3,4,5}, 张琪彬^{3,4,5,9},
王斌^{3,4,5,7}, 张静^{3,4,7,8}, 邓军^{3,4,5,8,10}

DING Zhengjiang^{1,2,3,4,5}, XIN Wei^{3,4,6}, SUN Fengyue^{1,3,4,5}, QIU Kunfeng^{3,4,5,7,8}, BO Junwei^{1,3,4,5}, ZHANG Qibin^{3,4,5,9},
WANG Bin^{3,4,5,7}, ZHANG Jing^{3,4,7,8}, DENG Jun^{3,4,5,8,10}

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;
2. 山东黄金地质矿产勘查有限公司, 山东 烟台 264000;
3. 自然资源部深部金矿勘查开采技术创新中心, 山东 威海 264209;
4. 山东省深地资源勘查评价重点实验室, 山东 威海 264209;
5. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264209;
6. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;
7. 中国地质大学(北京)深时数字地球前沿科学中心, 北京 100083;
8. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
9. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
10. 山东黄金地质研究院, 山东 烟台 264000

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;
2. Shandong Gold Geological and Mineral Exploration Co., Ltd., Yantai 264000, Shandong, China;
3. Technology Innovation Center for Deep Gold Resources Exploration and Mining, Ministry of Natural Resources, Weihai 264209, Shandong, China;
4. Shandong Provincial Key Laboratory for Exploration and Evaluation of Deep Resources, Weihai 264209, Shandong, China;
5. No.6 Geological Team, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Weihai 264209, Shandong, China;
6. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;
7. Frontiers Science Center for Deep-time Digital Earth, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
8. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
9. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
10. Geology Research Institute of Shandong Gold Group, Yantai 264000, Shandong, China

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC2906900); 国家自然科学基金面上项目(41973048, 42572115); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2023CXGC011001); 山东省泰山学者工程项目(tstp20240847); 自然资源部科技支撑项目(ZKKJ202419)

This research was financially supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2023YFC2906900), the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41973048 and 42572115), the Key R&D Program of Shandong Province (Major Scientific and Technological Innovation Project) (Grant No. 2023CXGC011001), the Taishan Scholar Program of Shandong Province (Grant No. tstp20240847), and the Science and Technology Support Project of the Ministry of Natural Resources (Grant No. ZKKJ202419).

第一作者及通信作者: 丁正江(1977—), 男, 博士, 研究员, 从事找矿理论技术方法研究与应用。Email: ytdzhj@126.com

收稿日期: 2026-07-11; 修回日期: 2026-09-22; 录用日期: 2026-09-29; 网络出版日期: 2026-09-29; 责任编辑: 王婧

Received: 2026-07-11; Revised: 2026-09-22; Accepted: 2026-09-29; Available Online: 2026-09-29; Handling Editor: WANG Jing

A preliminary exploration of Extremal-Entropy Mineralization Theory for Jiaodong gold deposits: proposal of two metallogenic end members and thermodynamic constraints on their formation mechanisms

Abstract: [Objective] Traditionally, the Jiaodong gold deposits are mainly classified into altered-rock type and quartz-vein type. Both types are controlled by a unified geodynamic mechanism, and extensive multi-isotope studies have revealed a broadly homogeneous nature of the ore-forming fluids, with both the ore-forming materials and hydrothermal fluids showing predominantly deep-seated characteristics. However, how a common deep-sourced hydrothermal system evolved to produce two deposits with markedly different geological characteristics remains inadequately understood. [Methods] We employ thermodynamic modeling to investigate the evolution of ore-forming fluids and the mechanisms of gold precipitation in the two types of gold deposits. Based on the systematic differences in the spatial configuration of ore-forming materials between quartz vein-type and altered-rock-type gold deposits, we propose a “low-entropy–high-entropy” end-member framework: the former is characterized by unloading along preferential fluid pathways and localized concentration of ore-forming materials, whereas the latter is characterized by fluid infiltration through complex fracture networks, extensive fluid–rock interaction, and dispersed distribution of ore-forming materials. This end-member framework provides a geological basis for the thermodynamic modeling, on which two representative metallogenic scenarios—unloading along preferential pathways and widespread fluid infiltration coupled with fluid–rock interaction—are established to compare their effects on mineral assemblages and gold precipitation. [Results] The simulations show that most pyrite crystallized prior to native gold, consistent with the common occurrence of native gold along intergranular or intragranular fractures in pyrite and its close association with fine-grained pyrite. Extensive pyrite crystallization continuously consumes HS^- in the fluid and modifies the stability of Au complexes, while inducing reducing conditions that promote the conversion and precipitation of Au from complexed forms to native gold. [Conclusions] Pyrite formation and its sustained regulation of fluid chemistry may represent an important mechanism controlling gold unloading and enrichment in the Jiaodong gold deposits. The final localization of ore bodies is controlled by the regulation of fluid flow by fault geometry. Gently dipping segments and composite sites of fault branching become favorable sites for gold precipitation because reduced fluid flow velocity promotes fluid accumulation, while prolonged fluid residence enhances fluid–rock interaction. In contrast, steeply dipping fault segments mainly serve as fluid conduits. Together, these features constitute a spatial differentiation mechanism of “fluid transport–ore-forming material precipitation.” [Significance] Guided by the end-member metallogenic framework, diagnostic information of the metallogenic end members, including geological, geophysical, and geochemical characteristics, can be extracted to establish an integrated prospecting model for the metallogenic system, thereby potentially advancing metallogenic prediction from qualitative to quantitative approaches. **Keywords:** Jiaodong gold deposits; ore-forming thermodynamic modeling; ore localization; the Extremal-Entropy Mineralization Theory; gold precipitation mechanism

摘 要: 传统上, 胶东金矿主体被划分为石英脉型和破碎带蚀变岩型, 二者受控于统一的地球动力学机制。多同位素研究结果显示, 成矿流体呈现大范围的均一性, 成矿物质与成矿热液均表现出显著的深源特征。然而, 统一的深部热液来源如何演化并形成两类地质特征截然不同的矿床尚未有令人信服的解释。文章尝试采用热力学软件模拟方法, 探讨两类金矿的成矿流体演化过程与金沉淀机制。基于石英脉型与蚀变岩型金矿在成矿物质空间配置上的系统差异, 提出“低熵–高熵”端元认识。石英脉型金矿对应低熵端元, 以优势通道卸载和成矿物质局部集中为特征; 蚀变岩型金矿对应高熵端元, 以复杂裂隙渗流、水–岩反应及成矿物质分散分配为特征。该端元认识为热力学模拟提供了地质依据, 据此设置优势通道卸载与广泛渗流条件下水–岩反应两类典型成矿情景, 以对比不同成矿过程对矿物组合及 Au 沉淀的影响。模拟表明, 大部分黄铁矿结晶早于自然金, 这也解释了自然金多出现在黄铁矿晶间或晶内裂隙, 并与细粒黄铁矿关系密切。黄铁矿大量结晶可持续消耗流体中的 HS^- 并改变 Au 络合物的稳定性, 同时伴随还原作用, 促进 Au 由络合态向自然金转化并沉淀。因此, 黄铁矿形成及其对流体化学条件的持续调节, 是控制胶东金矿 Au 卸载与富集的重要机制。矿体最终定位则受控于断层几何形态对流体运移过程的调控。缓倾转折段和断裂分支复合部位因流体流速降低, 淤积、停留时间长, 水–岩反应增强, 成为 Au 沉

淀的优势部位;而陡倾断裂段主要承担流体输运功能,二者共同构成“流体输导-矿质沉淀”的空间分异机制。在端元成矿理论认识指导下,可通过提取成矿端元成矿表征信息(地质、地球物理、地球化学等),建立整个成矿系统找矿模型,从而实现成矿预测由定性化向量化转变。

关键词: 胶东金矿; 成矿热力学模拟; 矿体定位; 端元成矿理论; Au 卸载机制

中图分类号: P618.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2026)05-1223-19

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026094

0 引言

以胶西北地区为核心的胶东金成矿省,已探明金资源量累计超过 5000 t(Yang and Santosh, 2020; Song et al., 2021; Deng et al., 2023),约占中国已探明金资源量的 1/3,包括玲珑金矿、焦家金矿在内的一批大型—超大型金矿床构成了世界级金矿集区。胶东金矿具有资源量大、集中度高、构造控矿显著等特点,是全球研究造山型金矿成矿机制与深部找矿的关键区域。大量年代学、构造学及岩石地球化学研究表明,胶东地区大规模金成矿主要发生于早白垩世,具有短时间内爆发式成矿的特征,与华北克拉通破坏及古太平洋板块俯冲背景下的大规模岩石圈减薄和深部物质迁移密切相关(Mao et al., 2008; Liu et al., 2019; Deng et al., 2020a, 2020b, 2022; Qiu et al., 2020, 2023a; Zhu and Sun, 2021; Song et al., 2022; Yang et al., 2024)。

胶东金矿按照矿石类型及围岩蚀变等成矿特征,可划分为“玲珑式”石英脉型和“焦家式”破碎蚀变岩型两种主要类型。两类矿床虽然在矿体形态、围岩蚀变、矿石结构构造及矿物组合等方面存在明显差异,但大量同位素年代学表明二者具有高度一致的成矿时代(约 120 Ma; Deng et al., 2020a);且现有同位素证据倾向于认为二者都具有深部来源和富集岩石圈地幔储 Au 的特点,同时成矿流体在向上运移过程中可能受到地壳物质加入及水-岩反应的影响(杜佛光等, 2019; Hu et al., 2020; 薄军委等, 2021; Lan et al., 2022; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2024; Li et al., 2026b)。流体包裹体研究也表明,二者都属于中温 NaCl-H₂O-CO₂ 流体系统(李杰等, 2021; 李逸凡等, 2021; Wu et al., 2021; 毛兴强等, 2022; Xu et al., 2022)。上述无显著差别的成矿时代、成矿流体性质和成矿物质来源共同反映出,“玲珑式”和“焦家式”金矿在本质上属于同一成矿流体体系在不同地质环境下演化的结果。然而,对

于同源成矿流体在地壳深部的演化路径以及控制矿物组合分异的机制,目前尚未得到系统性的阐释。Au 在流体演化过程中如何发生卸载、沉淀与富集,仍存在不同认识,典型机制主要包括流体混合(Yang et al., 2009; Wang et al., 2025b)、流体沸腾(Xiao et al., 2024; Yu et al., 2024)、流体不混溶(相分离; Sun et al., 2022; Li et al., 2024)及围岩硫化作用(Wei et al., 2022; Mao et al., 2024)等。尽管上述过程均可在一定条件下促进 Au 的沉淀,但不同物理化学过程对 Au 络合物稳定性及 Au 卸载的具体控制机制仍缺乏统一认识,尤其缺少定量的热力学约束。

热力学模拟能够在已知温压及流体组成条件下定量重建矿物-流体相互作用过程,是揭示成矿流体演化及 Au 沉淀机制的重要研究手段(Oelkers et al., 2009; Gysi et al., 2023; Pokrovski, 2025)。胶东金矿成矿主要发生于剪切性质断裂系统中,矿化阶段断裂多处于低渗透性或间歇性开启状态,流体沿断裂缓慢运移,并持续与围岩发生水-岩反应,使成矿体系整体表现为以局部开放、整体近封闭为特征的化学反应体系(Deng et al., 2020a, 2022; Song et al., 2022; Qiu et al., 2023b)。在较高温度和较长成矿持续时间条件下,流体-矿物反应能够较充分地趋近平衡,为化学平衡热力学模拟的合理性提供了理论基础。

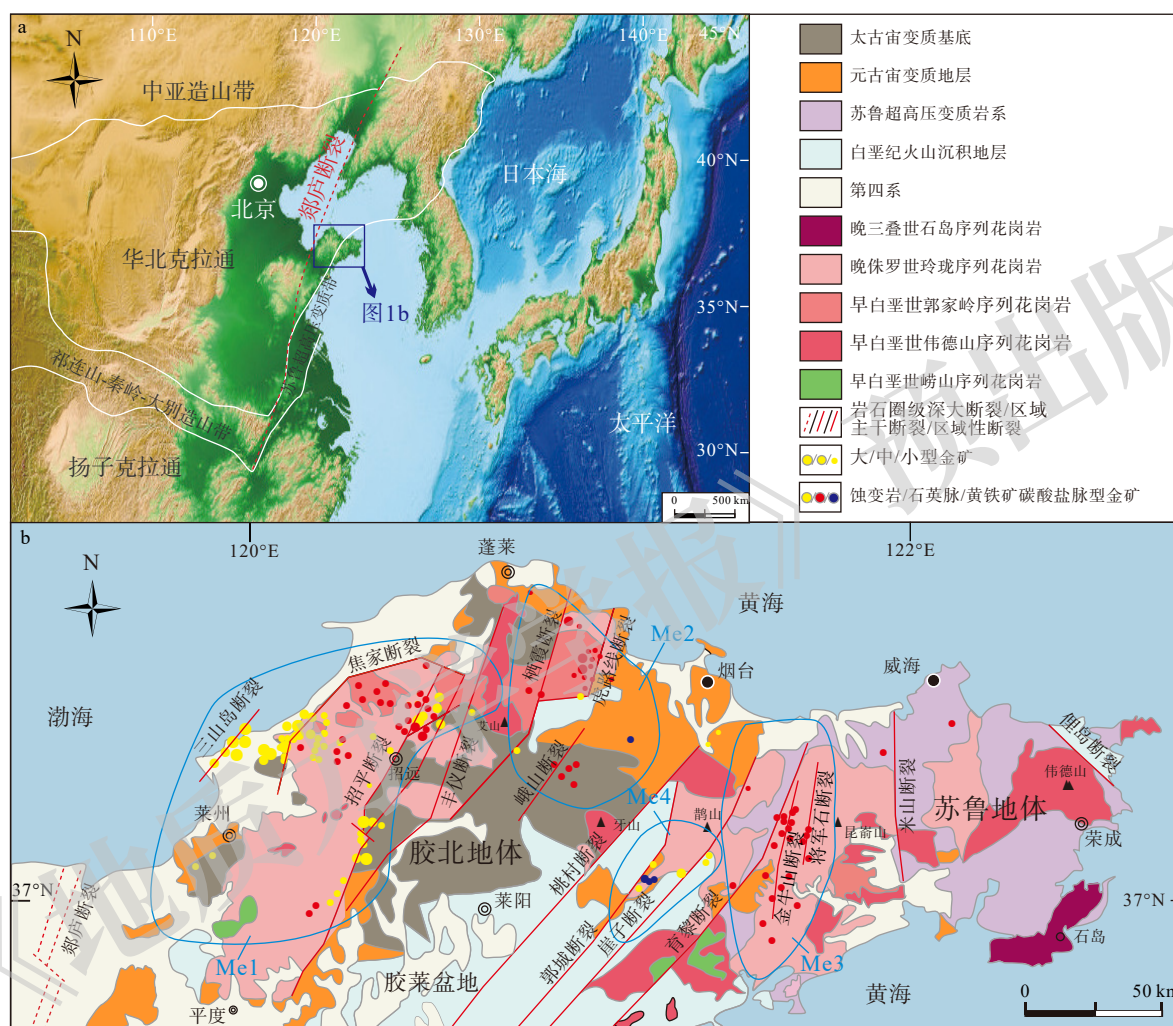
因此,文章试图以严格受断裂构造控制的胶东金矿成矿系统为研究对象,结合“玲珑式”和“焦家式”金矿不同的地质特征,建立成矿流体-围岩反应热力学模型,从物理化学角度重建成矿流体演化路径,探讨两类金矿形成过程中矿物组合特征、流体性质变化及金沉淀富集机制,以期探讨胶东不同类型金矿的形成机制提供新的参考,并为未来进一步研究指明方向。

1 区域地质背景

胶东半岛位于古亚洲与环太平洋成矿域的交汇部位(Wang et al., 2025a)。中生代期间,扬子板块

与华北板块的碰撞以及太平洋板块的俯冲 (Wang et al., 2026), 导致了强烈的壳幔相互作用和频繁的构造-岩浆活动, 引发了胶东半岛白垩纪爆发式金成矿作用 (Chi et al., 2025)。胶东半岛主要由前寒武纪变

质基底、中生代侵入岩和中生代—新生代火山-沉积岩系构成, 以牟平-即墨断裂带为界可分为东、西两部分: 西部的胶北地体和东部的苏鲁地体 (Qu et al., 2021; Wang et al., 2025a; Yang et al., 2026; 图 1a)。



Me1—胶西北金成矿区; Me2—栖霞-蓬莱-福山金成矿区; Me3—牟平-乳山金成矿区; Me4—胶莱盆地东北缘金成矿区

a—中国东部大地构造简图; b—胶东半岛地质简图

图 1 胶东半岛大地构造位置及地质简图 (底图据 Bo et al., 2025; Wang et al., 2025a 修改)

Fig. 1 Tectonic setting and simplified geological map of the Jiaodong Peninsula (base map modified after Bo et al., 2025; Wang et al., 2025a), showing the distribution of gold deposits in the Jiaodong Peninsula

(a) Simplified tectonic map of eastern China; (b) Simplified geological map of the Jiaodong Peninsula

Me1—Northwestern Jiaodong gold metallogenic district; Me2—Qixia-Penglai-Fushan gold metallogenic district; Me3—Muping-Rushan gold metallogenic district; Me4—gold metallogenic district along the northeastern margin of the Jiaolai Basin

在基底岩石与地层方面, 胶东地区以前寒武纪变质基底为主体, 主要包括胶北地体发育的胶东群中太古代—新太古代 TTG (英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩) 片麻岩组合 (Qiu et al., 2020), 以及古元古代荆山群、粉子山群等孔兹岩系变质岩 (Deng

et al., 2020b; Qiu et al., 2024); 岩性以富铝片岩、麻粒岩、大理岩及含石墨岩系为主。中元古代芝罘群由石英岩和钾长石石英岩夹磁铁矿层组成, 其原岩为一套陆源碎屑岩夹碳酸盐岩沉积组合 (Wang et al., 2022b)。新元古代蓬莱群主要包括千枚岩、板岩、石英岩、

结晶灰岩和大理岩, 其原岩为富铝、富钙的泥质-碳酸盐岩沉积组合(初航等, 2011)。中生代-新生代地层主要为一套陆相沉积/火山岩(图 1b), 广泛分布于胶莱盆地、臧家庄盆地和俚岛盆地, 主要由中生代白垩纪莱阳群、青山群、王氏群以及新生代临朐群组成。

岩浆岩方面, 胶东地区中生代岩浆活动极为强烈, 尤其是晚侏罗世-早白垩世期间广泛发育花岗岩侵入岩, 形成了以玲珑和郭家岭为代表的花岗岩系列(Yang et al., 2012)。早白垩世伟德山期花岗岩分布于胶北和苏鲁地体(图 1b), 成岩时代为 125 Ma~110 Ma(丁正江等, 2013), 与胶东半岛部分金矿化同期。此外, 区内还发育一定规模的基性-中性脉岩(如煌斑岩), 常与金矿化具有时空上的密切关系, 指示深部幔源物质的参与(Chen and Li, 2025)。

胶东半岛经历了多期构造活动, 自中生代以来, 基底构造之上叠加了以东北-北北东向断裂为主的断裂构造系统(图 1b), 控制了区域岩浆岩的空间分布以及胶东半岛金及多金属矿床的分布(丁正江等, 2015)。自西向东, 胶东的主要断裂有三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂、栖霞断裂、牟平-即墨断裂带和金牛山断裂。前 4 条断裂位于胶东西部, 总体呈北东走向; 金牛山断裂位于胶东东部, 总体近南北走向。牟平-即墨断裂带包括桃村、郭城、崖子和育黎 4 条断裂, 是胶东东、西部的分界线。蚀变岩型金矿受控于区域压扭性缓倾角断裂, 如三山岛断裂、焦家断裂和招平断裂, 这些断裂的宽大构造破碎带为流体活动提供了通道, 同时也是成矿物质聚集和沉淀的场所, 矿化以交代作用为主(Huang et al., 2023; Dong et al., 2026; Li et al., 2026a;

Zhang et al., 2026)。相比之下, 石英脉型金矿床受控于陡倾张扭性断裂, 如金牛山断裂, 矿化以充填作用为主, 断裂内部的张性空间被含硫化物石英脉充填(Fan et al., 2021)。

2 矿床地质特征

胶东地区爆发式金成矿期, 金矿主要受东北-北北东向断裂构造控制, 其中包括莱州、招远、蓬莱、栖霞等在内的胶东西部地区, 占据了 90% 以上的资源量。孙丰月等(1995)认为, 以桃村断裂为界, 胶东西部与东部地区金矿资源量差距显著, 主要原因在于二者赋矿构造的差异: 前者发育以中地壳不连续面为基础而形成的“宽缓+陡倾”成矿断裂构造系统, 后者则主要为陡倾张扭断裂成矿系统, 从而导致二者在成矿作用特征上亦有所区别。

主要成矿带方面, 依据目前地表出露特征, 胶东地区可划分出三山岛、焦家、招平等 7 个金成矿区(带), 并可进一步圈出 4 个主要金成矿区, 即胶西北金成矿区(Me1)、栖霞-蓬莱-福山金成矿区(Me2)、牟平-乳山金成矿区(Me3)和胶莱盆地东北缘金成矿区(Me4; 图 1b)。

主要成矿类型与成矿方式方面, 胶东金矿床主要可划分为“焦家式”破碎带蚀变岩型和“玲珑式”石英脉型金矿床, 二者在成矿方式、矿体特征及矿物组合等方面的特征见表 1。其中, “焦家式”金矿床的围岩主要为中生代花岗岩, 蚀变作用强烈且分布广泛, 蚀变分带特征明显, 成矿方式以交代作用为主。相比之下, “玲珑式”金矿床的围岩蚀变作用相对较弱, 矿石矿物集中在脉体中, 成矿方式以充填作用为主。

表 1 胶东地区两种金矿类型矿床地质特征对比

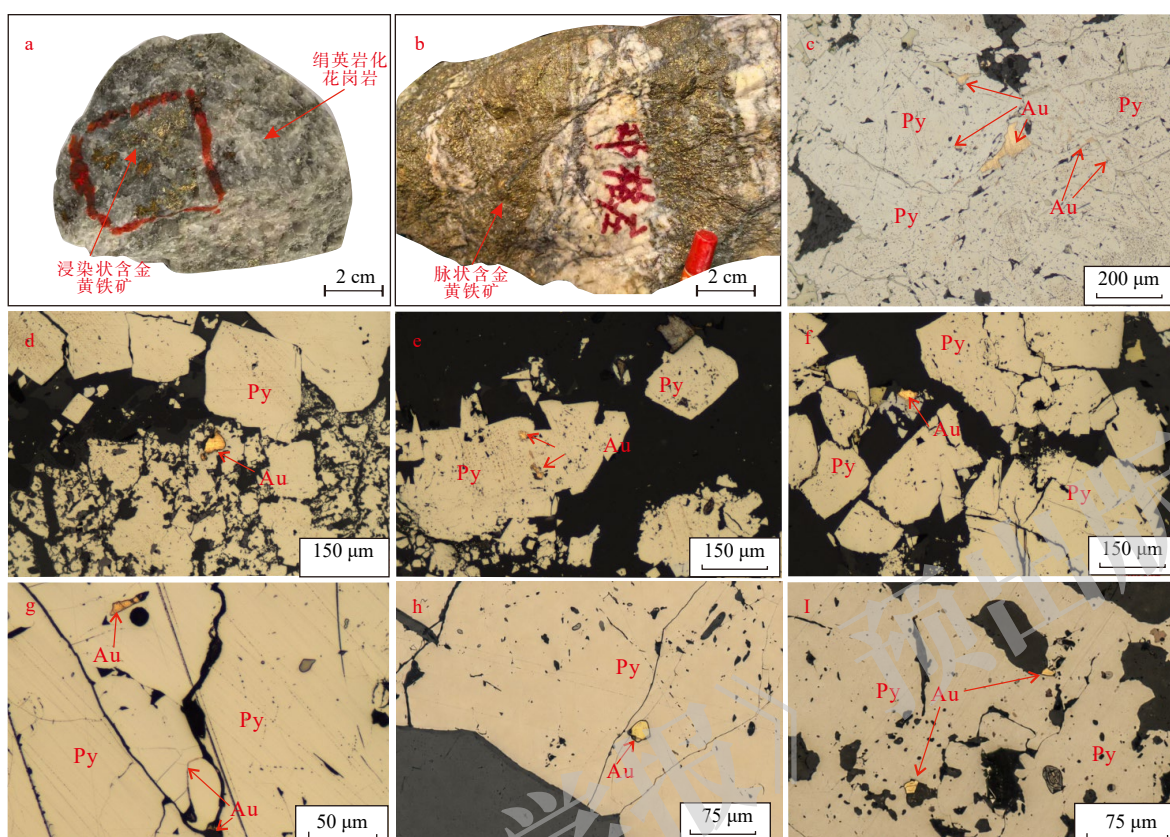
Table 1 Comparison of the geological characteristics of the two types of gold deposits in the Jiaodong Peninsula

矿床类型	矿体形态	成矿方式	矿石矿物组成			围岩	主要围岩蚀变	品位变化
			矿石矿物	脉石矿物	含金矿物			
破碎带蚀变岩型	似层状、网脉状、透镜状	以交代为主	黄铁矿、自然金、多金属硫化物	石英、绢云母、碳酸盐矿物	黄铁矿、石英	胶东群变质基底、中生代中酸性侵入岩等	绢英岩化、硅化、绢云母化、钾化、碳酸盐化	小
石英脉型	透镜状、脉状	以充填为主	黄铁矿、自然金、多金属硫化物	石英、碳酸盐矿物	黄铁矿、石英	胶东群变质基底、中生代中酸性侵入岩等	硅化、绢云母化、钾化、碳酸盐化	大

矿体特征方面, 在宏观特征上, “焦家式”金矿床矿体规模通常较大, 多呈板状产出, 产状稳定、倾角平缓, 矿石品位变化幅度较小; 而“玲珑式”金矿床的矿体规模普遍较小(矿化集中), 主要以脉状和

透镜状产出, 产状复杂, 品位变化范围较大, 局部矿石中可见自然金。

金赋存状态方面, 在载金矿物上, “焦家式”和“玲珑式”金矿床都以黄铁矿和石英为主(图 2a、



Py—黄铁矿; Au—自然金

a—三山岛蚀变岩型金矿石; b—邓格庄石英脉型金矿石; c—自然金颗粒沿黄铁矿晶内裂隙分布(三山岛金矿, 蚀变岩型); d—自然金颗粒与细粒黄铁矿相关(邓格庄金矿, 石英脉型); e—自然金颗粒沿晶内和晶间裂隙分布(邓格庄金矿, 石英脉型); f—自然金颗粒沿晶内裂隙分布(邓格庄金矿, 石英脉型); g—自然金颗粒分布在细粒黄铁矿粒间(金青顶金矿, 石英脉型); h—自然金颗粒沿晶内裂隙分布(双山屯金矿, 蚀变岩型); i—自然金颗粒沿黄铁矿晶内裂隙分布(西王丛金矿, 蚀变岩型)

图2 胶东金矿代表性手标本和显微镜下明金赋存状态特征图

Fig. 2 Representative hand specimens and microscopic characteristics of visible gold occurrence in the Jiaodong gold deposits

(a) Sanshanda altered-rock-type gold ore; (b) Denggezhuang quartz-vein-type gold ore; (c) Native gold grains distributed along intragranular fractures (Sanshanda gold deposit, altered-rock type); (d) Native gold grains associated with fine-grained pyrite (Denggezhuang gold deposit, quartz-vein type); (e) Native gold grains hosted by intragranular fractures in pyrite (Denggezhuang gold deposit, quartz-vein type); (f) Native gold grains filling intragranular fractures in pyrite (Denggezhuang gold deposit, quartz-vein type); (g) Native gold grains occurring between fine-grained pyrite grains (Jinqingding gold deposit, quartz-vein type); (h) Native gold grains hosted by intragranular fractures in pyrite (Shuangshantun gold deposit, altered-rock type); (i) Native gold grains hosted by intragranular fractures in pyrite (Xiwangcong gold deposit, altered-rock type)

Py—pyrite; Au—native gold

2b)。二者早成矿阶段块状粗粒黄铁矿一般不含金,金主要产于第II和第III成矿阶段细粒黄铁矿的裂隙或晶隙之间,这在胶东金矿是一种普遍的规律,如三山岛(图2c)、邓格庄(图2d—2f)、金青顶(图2g)、双山屯(图2h)以及西王丛金矿(图2i),即使是包裹金,也多被证实为裂隙金(Xiao et al., 2024)。

成矿阶段划分方面,胶东金矿成矿四阶段划分方案比较统一,一般划分为黄铁矿—石英—(钾化)阶段(阶段I)、金—石英—黄铁矿—(绢英岩化)阶段(阶

段II)、金—石英—多金属硫化物阶段(阶段III)和石英—碳酸盐阶段(阶段IV),其中阶段II、III与金成矿关系最为密切。

成矿流体性质方面,综合多位学者的流体包裹体研究成果,胶东金矿均属于 $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O—NaCl}$ 体系,未表现出本质差异(纪攀, 2016; Wu et al., 2022)。流体包裹体研究表明,成矿流体属于中温(200~400℃)、中低盐度(NaCl的质量分数<10%)、还原性热液(Yang et al., 2016)。这表明在区域尺度上,胶东半岛不同

类型金矿的原始热液流体性质具有较好的一致性。

成矿时代方面,胶东金矿床的成矿年龄约为 120 ± 5 Ma (Deng et al., 2020a; Bo et al., 2025; Chen et al., 2025), 表明胶东金成矿作用在统一的构造-成矿背景下、于相对较短的时间尺度内集中发生。

流体和成矿物质来源方面,胶东金矿已积累了大量的研究资料, H-O、C-O、S、Pb、Sr-Nd、He-Ar 及近年来的 Hg 同位素研究为其提供了重要约束 (Deng et al., 2015, 2020a, 2020b, 2022; 盛鹏, 2019; Qiu et al., 2020, 2023a; Song et al., 2022; Yang et al., 2024; Zhang et al., 2024)。普遍认为,“焦家式”和“玲珑式”金矿床的成矿流体及金属主要来源于交代改造的岩石圈地幔等深部物质,围岩对成矿物质的贡献较为有限。H-O 和 He-Ar 同位素显示,部分典型矿床的成矿流体具有明显的深源特征 (Jiang et al., 2020); Sr-Nd-Pb 同位素表明,其组成更接近富集岩石圈地幔,而非单纯的围岩花岗岩或浅部地壳物质,成矿流体和成矿物质在上升过程中与基底岩石发生相互作用 (杜佛光等, 2019; Li et al., 2026b)。近年来, Hg 同位素研究发现,胶东金矿黄铁矿、自然金及煌斑岩总体具有接近地幔的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 特征,指示富集岩石圈地幔可能是 Au 及挥发分的重要储库, Au 和挥发分可能在早期俯冲-交代过程中进入并储存在岩石圈地幔中,后期再被重新活化并参与成矿 (Zhang et al., 2024; Liu et al., 2026; Wang et al., 2026)。

围岩对成矿的控制性方面,“焦家式”和“玲珑式”金矿床对围岩性质不具有明显选择性,可赋存于中生代花岗岩、太古代胶东群或古元古代荆山群中,矿体规模与品位主要受控于构造 (Huang et al., 2023; Dong et al., 2026; Zhang et al., 2026)。

3 基于矿床地质的端元成矿理论认识

上文对比表明,“焦家式”和“玲珑式”金矿床在矿体形态、矿石结构、矿化空间分布、围岩蚀变特征及矿石矿物赋存方式等方面存在系统差异。针对这一地质事实,基于胶东地区金矿体主要赋存于相对封闭的扩容空间这一规律和热力学第二定律,概括性地提出胶东金矿的端元成矿认识,即成矿最有利部位对应于成矿系统中 2 个熵的端元状态:“玲珑式”金矿代表以裂隙充填作用为主、成矿物质集中卸载并导致成矿元素高度局部富集的低熵端元,其特征为成矿物质空间高度集中、离散度

低、结构有序性强;而“焦家式”金矿则代表以围岩广泛交代作用为主、流体-岩石反应充分且成矿元素弥散分布的高熵端元,其特征表现为成矿物质空间分布范围大、离散度高、结构无序性增强。

上述“低熵-高熵”端元的划分,本质上反映了成矿物质在成矿空间中的分布状态及其结构组织程度差异。从统计热力学角度看,描述这种空间分布与排列状态的一个重要物理量是构型熵 (configurational entropy),其大小取决于体系中物质组分及其空间排列方式所对应的微观状态数。文中所提出的低熵石英脉型与高熵蚀变岩型 2 个端元,可进一步从成矿物质空间配置状态的差异来理解和表征。

为比较“玲珑式”与“焦家式”金矿中成矿物质空间分布状态的差异,假设在温度、压力、流体组成、矿物组成及其他条件均相同的情况下,相同质量 (1 kg) 的黄铁矿分别分布于 1 m 宽石英脉和 10 m 宽破碎蚀变岩中,仅考虑矿化空间范围变化对空间构型熵的影响。将黄铁矿的空间分布简化为由 N 个可重新定位的基本单元组成,以空间微观状态数 Ω 表征其空间配置自由度。将成矿物质的空间分布状态视为具有不同空间微观状态数的体系,单位矿体构型熵可表示为

$$S_{\text{conf}} = k_B \ln \Omega \quad (1)$$

式中, S_{conf} —构型熵; k_B —玻尔兹曼常数; Ω —黄铁矿可能的空间排列状态数。设定 1 m 宽石英脉对应的有效分布体积为 V_1 , 10 m 宽破碎蚀变岩对应的有效分布体积为 V_2 , 则:

$$V_2 = 10V_1 \quad (2)$$

分别记两种状态的构型熵为 S_1 和 S_2 , 相应的空间微观状态数为 Ω_1 和 Ω_2 , 则:

$$S_1 = k_B \ln \Omega_1 \quad (3)$$

$$S_2 = k_B \ln \Omega_2 \quad (4)$$

在理想的离散占位模型中,若 N 个基本单元可近似独立地重新选择空间位置,则矿化空间扩大 10 倍会增加每个基本单元的可选位置数,从而可近似写为

$$\Omega_2 \approx 10^N \Omega_1 \quad (5)$$

两种状态的构型熵差为

$$\Delta S_{\text{conf}} = S_2 - S_1 = k_B \ln (\Omega_2 / \Omega_1) \approx N k_B \ln 10 > 0 \quad (6)$$

因此,文中的概念模型中,石英脉型矿化可视为相对低构型熵端元,而蚀变岩型矿化可视为相对高

构型熵端元。胶东地区各类金矿床及同一矿床内部不同空间部位的矿化特征,均可视为低熵端元与高熵端元之间连续过渡与混合演化的结果,即端元之间的连续谱系表达。文中“低熵-高熵”端元是地质概念模型,借用构型熵的思想描述成矿物质空间离散/集中程度,不等同于成矿流体的热力学绝对熵值。

需要强调的是,文章引入“低熵-高熵”端元,并非用于简单分类,而是从成矿物质空间配置状态出发,构建统一认识不同类型金矿成矿特征的理论框架。低熵端元以石英脉型矿化为代表,成矿物质集中于有限扩容空间,反映流体沿主干优势通道卸载;高熵端元以蚀变岩型矿化为代表,成矿物质向复杂裂隙及围岩广泛分配,并通过水-岩反应固定。两类端元所对应的流体运移和成矿过程,为后续热力学模拟条件设置提供地质依据,并据此构建优势通道卸载与广泛渗流条件下的水-岩反应两类典型成矿情景。同时,该框架可为进一步开展找矿预测提供理论基础,可重点关注找矿元素异常的集中程度、展布范围及其与断裂构造、围岩蚀变和黄铁矿化的空间耦合关系,以识别不同端元状态及有利成矿部位;相关预测指标和端元识别方法仍需进一步研究验证。

4 热力学模拟过程及讨论

4.1 模拟手段

文章采用 GEMS-selektor 软件开展化学反应模拟研究。该程序基于吉布斯自由能最小化原理,对复杂化学体系的平衡状态进行求解(<https://gems.web.psi.ch/GEMS3/techinfo.html>)。计算过程中选用 MINES 23 热力学数据库(Gysi et al., 2023),该数据库汇集了经系统修订、保持内部一致性的矿物、水溶物及气体的热力学数据,适用于上地壳热液条件(≤ 500 MPa, $\leq 600^\circ\text{C}$)下地球化学过程的模拟,尤其在成矿作用研究中具有较强的适用性。借助 GEMS-selektor 软件,可系统刻画化学物种在加热、冷却及质量转移过程中的分布演化规律,并能够有效模拟水-岩相互作用、流体混合过程以及反应体系中的同位素分馏行为,为成矿过程的定量约束提供重要手段。

4.2 模型参数设定

4.2.1 围岩反应模式

在成矿特征方面,“玲珑式”金矿以充填作用为主,与围岩界线清晰、截然分明(Bo et al., 2025),

表明矿体主要形成于流体逐渐演化、矿物依次析出的过程,缺乏显著的水-岩反应。而“焦家式”金矿中流体明显与花岗质围岩发生了强烈的水-岩反应,蚀变带宽大,以黄铁绢英岩化最具代表性。花岗岩成分以过往研究测得的玲珑花岗岩作为代表(Hu et al., 2024; 表 2)。

表 2 玲珑花岗岩代表性成分 (Hu et al., 2024)

Table 2 Representative composition of the Linglong granite (Hu et al., 2024)

氧化物	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
含量	72.60	15.53	1.12	0.20	2.11	4.91	2.98	99.45

注: 氧化物含量为质量分数, %

4.2.2 初始成矿流体参数

由于胶东金矿在成矿特点、矿物组合以及同位素地球化学数据方面具有很大的相似性,一般认为胶东金矿的形成受控于统一的深部流体成分,可能来源于富集地幔的脱挥发分作用(孙丰月等, 1995; Mao et al., 2008; Deng et al., 2020b; Zhu and Sun, 2021; Yang et al., 2024)。初始流体 A 应为更深部高温高压条件下的流体,由于采样深度限制,现阶段的研究可能仅采集到了相对演化的流体 B 的参数。其初始条件已有一系列成果发表,归纳并分析设定如下:

物理化学条件方面,在深部成矿流体物理化学条件设定中,最重要的参数是温度、pH、氧逸度和压力。就初始 pH 而言,岩浆流体通常是在岩浆演化过程中,因减压和结晶作用导致挥发分出溶而形成的(Hu and Huang, 2026)。这些流体通常属于 H₂O-NaCl-CO₂-S 体系,整体呈酸性,其 pH 一般在约 3~6 之间变化,具体取决于挥发分的赋存形式及体系的氧化还原状态(Sharma et al., 2014; Farsang and Zajacz, 2025)。由于初始成矿流体($>600^\circ\text{C}$)在进入成矿裂隙前已经历降温过程,低温下酸性气体(H₂S 和 SO₂)更易电离出氢离子,因此 pH 设定为 2.85,这也与已有研究计算所得范围一致(Xu et al., 2016; Hu et al., 2024)。初始氧逸度设定为 $\log f_{\text{O}_2} = -26.55$,该条件下硫大部分以还原硫形式存在,与胶东金矿大量发育的硫化物而非硫酸盐的特征一致。初始流体温度设定为 400°C ,以胶东三山岛地区成矿流体作为代表(Hu et al., 2024)。初始压力设定为 200 MPa,与已有研究假设的范围一致(Hu et al., 2024),对应于静岩深度约 6.5~7.5 km,接近成矿的实际深度。

硫含量方面,已有研究显示矿石硫同位素具有重硫富集的特点,石英脉和蚀变岩型金矿范围基本一致,硫主要来自于深源流体。硫总浓度在造山型金矿床中表现为较宽的范围(0.006~0.2 mol/kg H₂O; Kokh et al., 2026),文中取值 0.057 mol/kg H₂O,相当于中值范围。

SiO₂ 含量方面,考虑到硅化是胶东金矿的主要蚀变类型, SiO₂ 浓度设为给定温压条件下接近饱和的 0.04 mol/kg H₂O。

Fe 含量方面,石英脉型金矿成矿以充填的方式为主,热液与围岩成分交换微弱;蚀变岩型金矿的围岩主要为花岗岩,其 TFeO 含量一般小于 2%,而蚀变岩型矿石的黄铁矿含量一般大于 10%。因此,矿石中大量的 Fe 只能来源于热液。FeCl₂ 浓度设定为 0.03 mol/kg H₂O,位于已有研究实测包裹体中 FeCl₂ 含量的中值范围(Wang et al., 2022a)。

Au 含量方面, Au 主要来源于深部富 Au 热液,这已成为学界共识。为在模拟过程中计算 Au 的富集量,初始含 Au 流体中 Au 的质量分数设定为 100×10⁻⁹,这是基于实测富 Au 岩浆和变质流体通常含 Au 约 20×10⁻⁹~200×10⁻⁹ 的事实(Rauchenstein et al., 2014; Chang et al., 2024; Farsang and Zajacz, 2025)。

Mg、Ca 含量方面,胶东金矿深源成矿热液中普遍具有较低的 Ca 和 Mg 离子浓度(Xu et al., 2016; Ca²⁺ < 0.01 mol/kg H₂O, Mg²⁺ < 0.001 mol/kg H₂O)。相应地,流体中 Mg²⁺ 与 Ca²⁺ 浓度分别设为 0.00548 mol/kg H₂O 与 0.0005 mol/kg H₂O,与已有研究的实测保持一

致(Xu et al., 2016)。

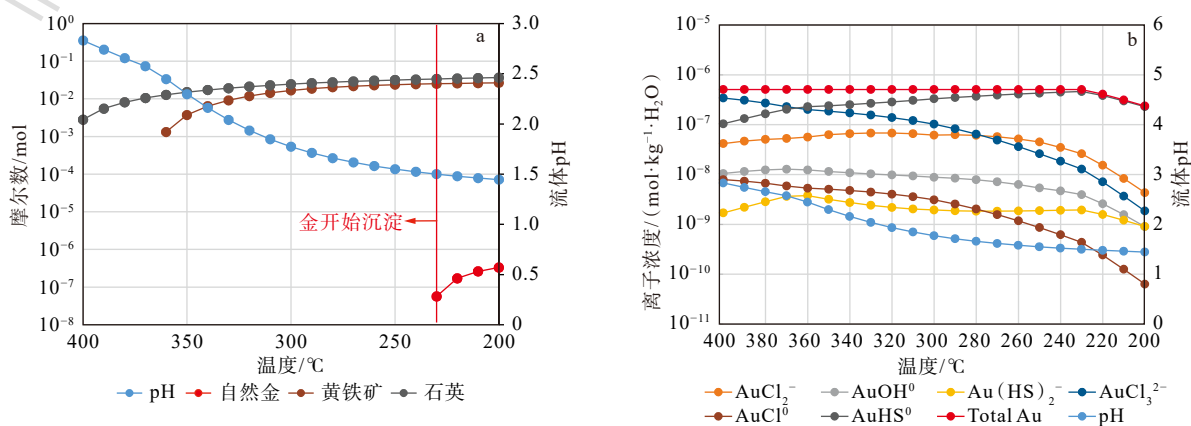
C-O 含量方面,已有针对胶东矿床中相关石英包裹体的微热分析显示, CO₂ 的摩尔分数范围为 8.0%~13.0%(Aibai et al., 2023; Hu et al., 2024),对应于 4.4~7.2 mol/kg H₂O。初始含 Au 流体中 CO₂ 浓度设定为 5 mol/kg H₂O。

盐度方面,根据焦家金矿及同源三山岛金矿石英脉的包裹体微热分析和整体成分分析,矿液盐度质量分数约为 8% (NaCl 当量),其中 NaCl 摩尔浓度约为 KCl 的 4 倍(Hu et al., 2021)。因此, NaCl 和 KCl 浓度分别设定为 1.4 mol/kg H₂O 和 0.32 mol/kg H₂O。

4.3 胶东石英脉型金矿成矿机制

石英脉型金矿体以充填作用为主,表明矿体主要形成于流体逐渐演化、矿物依次析出的过程,缺乏显著的水-岩反应。流体在开放裂隙向上运移过程中,最可能经历的是与大气水混合并且迅速降温冷却。该过程的热力学模拟如下。

考虑到石英流体包裹体测温数据很少超过 400°C,因此认为流体在进入成矿裂隙时的温度为 400°C,矿物自该温度开始积累。初始流体 A 减压并降温至 400°C 后(流体 B)进入成矿位置,随后与大气水混合进一步降温,该过程中发生的主要化学反应为黄铁矿的形成(反应式 R1)。在高温条件下, Fe²⁺ 以氯络合物形式存在更为稳定。随着温度降低, FeCl₂(aq) 稳定性逐渐减弱,导致 Fe²⁺ 浓度升高。冷却至约 360 °C 时,预测黄铁矿(Py)开始析出(图 3a)。该矿物沉淀过程伴随溶液 pH 的大幅下



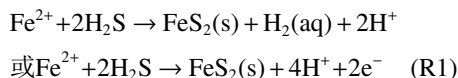
a—热液冷却过程中矿物析出摩尔数变化趋势图; b—热液中 Au 的络合离子浓度随温度变化趋势图

图 3 成矿流体 B 降温过程中矿物析出和热液中 Au 络合离子浓度变化图

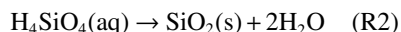
Fig. 3 Modeled mineral precipitation and variations in Au complex concentrations during cooling of the initial ore-forming fluid B

(a) Trend in the molar amounts of minerals precipitated during hydrothermal cooling; (b) Variation in the concentrations of Au complexes in hydrothermal fluids with temperature

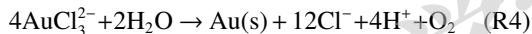
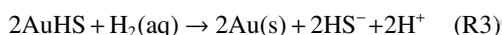
降,同时 H_2 的生成使流体还原性增强:



温度下降使导致石英随之沉淀;由于石英在热液中处于饱和状态,400°C时石英即大量形成(反应式 R2),早阶段无矿石英(有时呈现为角砾)就是该阶段的产物。



黄铁矿的形成消耗了大量 HS^- (Au 离子的配体)并生成大量 H_2 (或释放自由电子;反应式 R1),因此 Au 在热液中的溶解度逐渐降低(勒夏特列原理;反应式 R3,反应式 R4)。同时,由于生成黄铁矿的反应显著降低了热液的 pH,且缺乏水-岩反应缓冲,致使 Au 的沉淀延迟至更低温度,从而抑制了 Au 的沉淀(反应式 R3,反应式 R4)。因此,直至 240°C 时, Au 才开始沉淀(图 3a),自然金多表现为裂隙金。200°C 时,仍有近 1/2 的 Au 保存在热液中(图 3b,附表 1)。



1 kg 流体 B 冷却至 200°C 时形成的石英量为 0.033 mol,黄铁矿为 0.026 mol,自然金为 3.31×10^{-7} mol,折合 Au 品位为 12.6 g/t,接近于石英脉型金矿脉体的平均品位。传统上,石英脉型金矿的第一和第二成矿阶段成矿进程可以概括为:温度 >250°C 时,沉

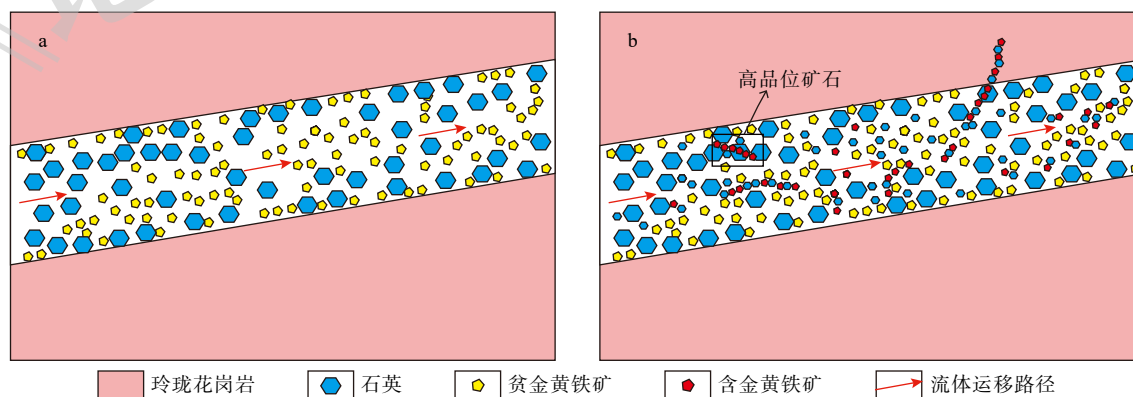
淀贫金粗粒黄铁矿和石英(图 4a);温度 <250°C 时,含金黄铁矿与自然金开始析出,自然金在黄铁矿晶隙或裂隙中大量形成,局部流体集中部位形成高品位矿石(图 4b)。

除黄铁矿、石英和自然金外,石英脉中常见的矿物还包括黄铜矿、方铅矿以及闪锌矿等多金属硫化物,以及菱铁矿等碳酸盐矿物。这些矿物属于传统上第三或第四成矿阶段的产物,应是成矿流体因某些地质过程(如水-岩比提升、酸性气体逸散等)导致 pH 升高,才从热液中析出,并填充于较早形成的黄铁矿晶内或晶间裂隙,或局部交代黄铁矿(图 5a—5c)。

综上,深源流体在张性裂隙中与低温大气水混合,温度逐渐降低,黄铁矿析出导致 Au 络合物稳定性降低;随着黄铁矿结晶至尾声, Au 发生沉淀,形成石英脉型金矿体。事实上,石英脉型金矿围岩也同样发育一定程度以绢英岩化为主的蚀变,这在胶东金矿是一种普遍现象。与围岩的适度反应可在一定程度上中和热液中过剩的氢离子,使自然金沉淀更为显著,并提前至更高的温度,同时促进多金属硫化物的结晶。

4.4 胶东蚀变岩型金矿成矿机制

蚀变岩型金矿代表性矿物组合为黄铁矿、绢云母和石英,局部可见磁铁矿和磁黄铁矿。其形成明显与成矿流体和围岩反应有关。当流体 A 冷却至流体 B 和流体 C 时,分别与围岩反应,即可以得到

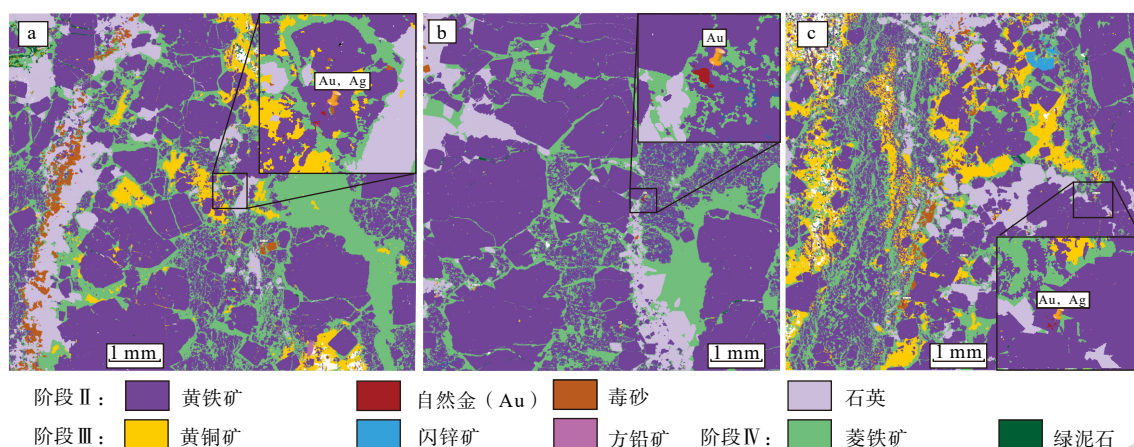


a—温度 >250°C 时,沉淀贫 Au 粗粒黄铁矿和石英; b—温度 <250°C 时,含 Au 黄铁矿与自然金开始析出,自然金在黄铁矿晶隙或裂隙中大量形成,局部流体集中部位形成高品位矿石

图 4 石英脉型金矿成矿热力学进程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the thermodynamic mechanism of quartz-vein-type gold mineralization

(a) At temperatures above 250 °C, Au-poor coarse-grained pyrite and quartz precipitate; (b) At temperatures below 250 °C, Au-bearing pyrite and native gold begin to precipitate; native gold is commonly hosted in intergranular spaces or intragranular fractures of pyrite, and high-grade ores form in localized fluid-concentrated zones.



a—阶段Ⅳ菱铁矿和黄铜矿明显沿阶段Ⅱ黄铁矿晶内和晶间裂隙穿插; b—阶段Ⅳ菱铁矿沿着阶段Ⅱ黄铁矿晶间和晶内裂隙穿插交代; c—阶段Ⅲ黄铜矿沿阶段Ⅱ黄铁矿晶间裂隙分布, 局部呈现微弱的交代

图 5 邓格庄石英脉型金矿矿石 TIMA 综合矿物相图

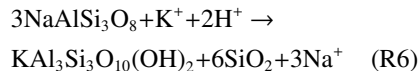
Fig. 5 TIMA integrated mineral phase map of an ore thin section from the Denggezhuang quartz-vein-type gold deposit, showing the spatial relationships among minerals formed during different mineralization stages

(a) Stage IV siderite and chalcopyrite clearly crosscuts pyrite along intragranular and intragranular fractures; (b) Stage IV siderite crosscuts and replaces Stage II pyrite along both intergranular and intragranular fractures; (c) Stage III chalcopyrite occurs along intergranular fractures in Stage II pyrite, showing weak local replacement

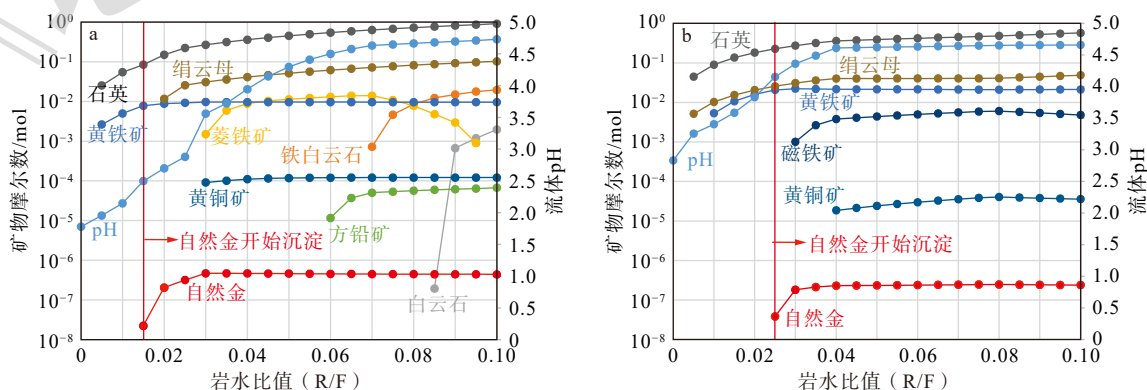
上述矿物组合。

以原始流体冷却至 300 °C 时的组成作为蚀变岩型成矿流体的代表, 采用围岩花岗岩(表 2)分别对成矿流体 B 和流体 C 进行滴定。

在滴定过程中, 钾长石(Or)和斜长石(Pl, 主要为钠长石)最先受到流体蚀变(反应式 R5, 反应式 R6), 生成石英和绢云母(图 6a)。



随着绢英岩化的进行, 流体 pH 迅速升高, 黄铁矿在 300 °C 条件下迅速沉淀; 磁铁矿则在 400 °C 条件下随着 R/F(岩水比值, 即岩石和水的质量比)的升高而出现, 同时黄铁矿开始略微降低(反应式 R7; 图 6b)。

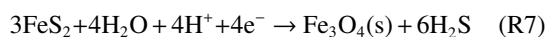


a—300 °C 条件下, 主要矿物组合为黄铁矿、自然金、石英和绢云母, Au 在大部分黄铁矿形成后沉淀; b—400 °C 条件下, 主要矿物组合为黄铁矿、自然金、石英、绢云母和磁铁矿, 不出现碳酸盐矿物

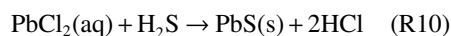
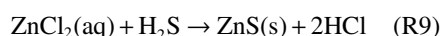
图 6 深源富 Au 流体与花岗岩水-岩反应进程图

Fig. 6 Schematic diagram of water-rock interaction between deep Au-rich fluids and granites

(a) At 300 °C, the dominant mineral assemblage consists of pyrite, native gold, quartz, and sericite; Native gold precipitates after most of the pyrite has formed; (b) At 400 °C, the dominant mineral assemblage consists of pyrite, native gold, quartz, sericite and magnetite, with no carbonate minerals precipitating



与此同时, 由于黄铁矿的形成消耗了大量 HS^- (配体), 并伴随 H_2 (或自由电子) 的大量生成; 加之水-岩反应导致的热液 H^+ 含量降低 (反应式 5, 反应式 6), 热液中 Au 浓度迅速降低, Au^+ 被还原为自然金并大量沉淀 (反应式 3, 反应式 4)。随着岩水比的升高, 热液逐渐被中和, pH 升高, 流体中逐渐沉淀出其他矿物, 如黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和一系列碳酸盐矿物 (图 6; 反应式 R8—反应式 R12)。

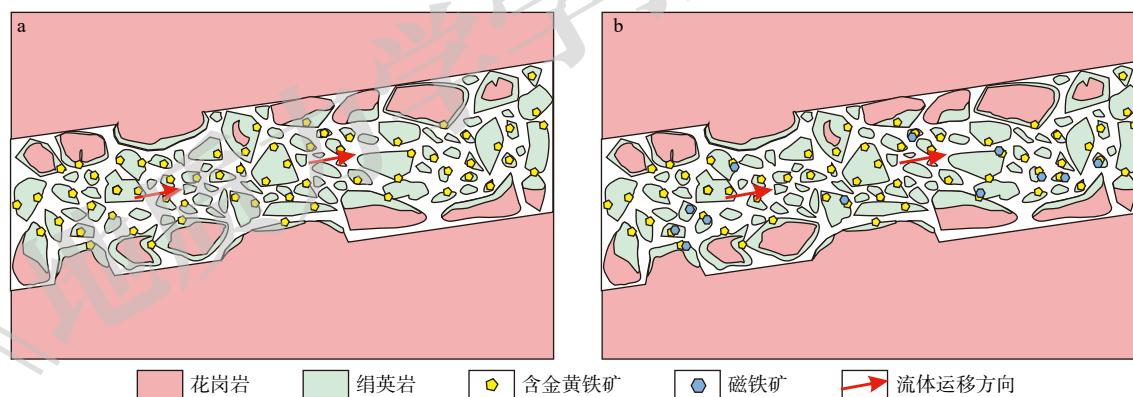


黄铁矿、多金属硫化物和碳酸盐结晶过程中释放的氢离子可被长石的绢云母化反应中和, 从而维

持反应持续进行 (反应式 R5, 反应式 R6)。

300°C 条件下, 当岩水比为 0.03 时, 1 kg 流体形成的矿物组合为菱铁矿 0.0014 mol、 Au 4.66×10^{-7} mol、黄铁矿 0.001 mol、黄铜矿 9.06×10^{-5} mol、石英 0.26 mol、绢云母 0.03 mol, 金品位为 3.06 g/t, 接近于蚀变岩型矿石的真实品位。成矿进程可概括为: 300°C 条件下, 流体 C 与热液反应, 形成典型的黄铁绢英岩化, Au 在大部分黄铁矿形成后沉淀于黄铁矿的晶间与晶内裂隙 (图 7a); 400°C 条件下, 流体 B 与热液反应, 随着岩水比升高, 少部分黄铁矿逐渐转化为磁铁矿 (图 7b), 热液中的 Au 沉淀明显晚于 300°C 条件 (图 6b), 并且不完全沉淀, 一半的 Au 仍然保存在热液中。与 300°C 条件不同, 碳酸盐矿物不出现。

事实上, 实际成矿流体温度可能是变化的, 最早阶段流体可能温度较高 (约 400°C), 高温条件下形成磁铁矿, 并明显交代黄铁矿 (Cui et al., 2026); 局部围岩含铁量提高, 则可形成磁黄铁矿 (高铁围岩模拟结果)。随着流体系统冷却, 主要成矿流体温度可能以 300°C 为主, 形成以黄铁绢英岩为主的矿石。



a—300°C 条件下, 流体 C 与热液反应, 形成典型的黄铁绢英岩化, 自然金在大部分黄铁矿形成后沉淀于黄铁矿的晶间与晶内裂隙; b—400°C 条件下, 流体 B 与热液反应, 随着岩水比值升高, 少量黄铁矿逐渐转化为磁铁矿

图 7 蚀变岩型金矿成矿热力学机制示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the thermodynamic mechanism of altered-rock-type gold mineralization

(a) Fluid-rock interaction at 300 °C leads to typical pyrite-sericite alteration. Native gold precipitates mainly after most pyrite has formed, occurring along intergranular and intragranular fractures within pyrite; (b) Fluid-rock interaction at 400 °C. With decreasing water-rock ratio, minor pyrite is progressively transformed into magnetite.

4.5 矿体定位机制

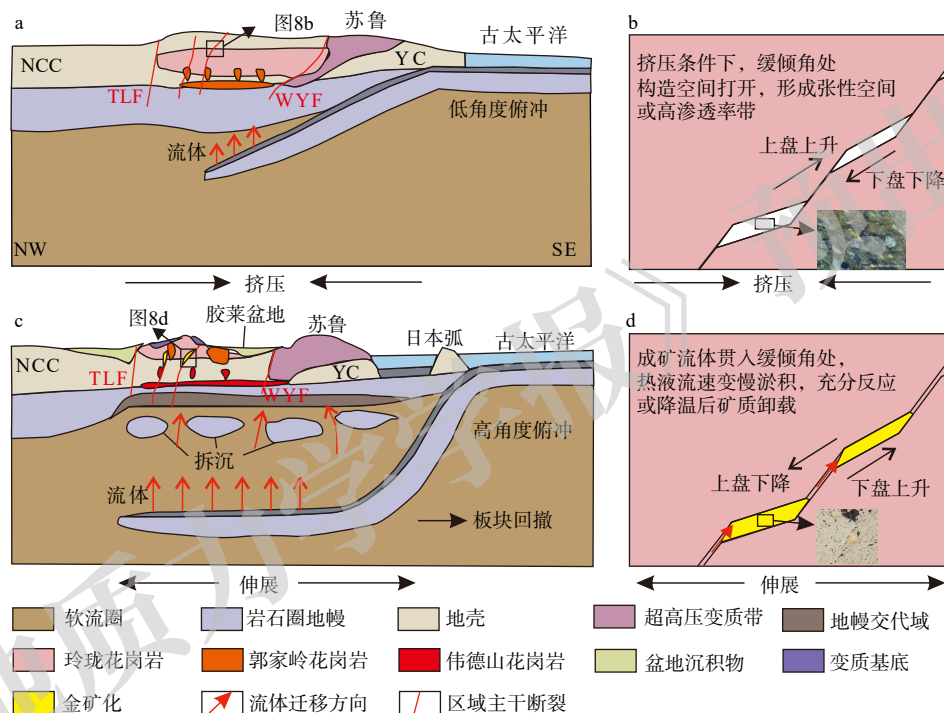
石英脉型和蚀变岩型金矿各个类型脉体与蚀变带之间的穿切关系清晰, 4 个成矿阶段的划分方案已经成为共识。成矿流体可能以多期次方式注入断裂系统, 且原始流体在深部经历了不同的演化过程。上述地质特征可通过 Sibson (2004, 2007) 提

出的断层阀 (fault-valve) 与泵吸 (suction-pump) 模型加以解释, 即断裂构造活动控制了成矿流体的间歇性释放与持续性补给过程 (Cox, 2005)。控矿断裂在矿体形成过程中扮演了重要角色, 其形成与演化控制了矿体的空间分布规律与变化。在玲珑 (Li et al., 2026a)、焦家-新城 (Dong et al., 2026)、三山岛、台上-水旺庄

(Liu et al., 2025)等矿床中均可观察到,矿体膨大多位于断裂倾角变缓处(Huang et al., 2023; 阶梯式分布规律)或者分支复合部位(Zhang et al., 2026)。但这一重要的现象的形成机制仍然众说纷纭,文章尝试从控矿断层形成演化及其对成矿流体流动的控制角度,对该问题进行初步讨论。

自早侏罗世(约177 Ma)以来,古太平洋板块(PPOP)沿华北克拉通东缘向西北方向快速、低角度俯冲,导致胶东半岛地壳持续处于挤压应力状态

并发生增厚(Ding et al., 2015; Zhu et al., 2018; Dong et al., 2023; Qiu et al., 2023b; Tang et al., 2025; Wang et al., 2025a)。160 Ma以来,玲珑花岗岩大规模侵位(Wang et al., 2024; 图8a),控矿构造在这一时期开始形成(图8b)。虽然整体处于挤压应力条件,但在断层转向的缓倾角处仍处于局部拉张状态,形成张性空间或岩石破碎的高渗透率带(图8b)。这一阶段无大规模成矿流体活动,陡倾裂隙主要作为高渗透率流体通道,但尚未大量成矿。



TLF—郯庐断裂; WYF—五莲—烟台断裂; NCC—华北克拉通; YC—扬子克拉通

a—160~125 Ma, 胶东地区整体处于挤压构造背景; b—160~125 Ma 期间, 挤压背景下具有逆断裂性质的控矿构造开始形成; c—125~115 Ma, 胶东地区整体处于伸展构造背景; d—125~115 Ma, 伸展构造背景下断裂性质反生反转, 裂隙张开, 成矿热液贯入成矿

图8 胶东地区地球动力学背景与局部控矿构造活动与演化图解(底图据 Wang et al., 2025a 修改)

Fig. 8 Schematic illustration of the regional geodynamics of the Jiaodong area and the evolution of local ore-controlling structural activities (base map modified from Wang et al., 2025a).

(a) 160–126 Ma: the Jiaodong area was dominated by a regional compressional tectonic regime; (b) 160–125 Ma: ore-controlling structures with reverse-fault kinematics began to develop under a compressional regime; (c) 125–115 Ma: the Jiaodong area shifted to an overall extensional tectonic regime; (d) 125–115 Ma: under the extensional regime, fault kinematics were reactivated and inverted, fractures opened, and mineralizing hydrothermal fluids infiltrated the system to form ore deposits

TLF—Tan-Lu Fault; WYF—Wulian—Yantai Fault; NCC—North China Craton; YC—Yangtze Craton

最新研究证据表明,早白垩世构造体制转换期间,古太平洋板块俯冲板片角度变陡后撤,导致地壳减薄并诱发进一步的岩浆活动(Wang et al., 2024; 图8c)。在此期间,控矿构造发生再活化(图8d)。由于应力场发生了反转,断层反向滑动,陡倾的断

裂通道打开,成矿流体在泵吸作用下从深部贯入裂隙。在相同流体通量的条件下,陡倾角处空间狭窄,流体流速高,与围岩反应不充分,难以卸载Au,主要作为热液的运移通道。缓倾角处空间较大,流体流速大幅降低,流体淤积;同时岩石更为破碎,导

致流体与岩石反应面积显著增加,在较长时间内与围岩发生大规模水-岩反应。上述多种因素导致成矿物质迅速卸载,使该部位成为矿石矿物堆积场所(图 8d)。

4.6 成矿热力学模型

热力学模拟较为成功地复现了胶东金矿的成矿进程。模型计算得到的矿物组合、相对含量及矿物生成顺序,与实际矿石中观察到的矿物学特征总体一致,表明该模拟能够较好地约束成矿流体演化及矿物沉淀过程。更为重要的是,模拟结果揭示了黄铁矿大量结晶与 Au 沉淀之间存在密切的热力学耦合关系。随着成矿流体持续演化,黄铁矿由早期少量成核逐渐转变为大规模结晶,其形成不仅改变了硫化物矿物的相平衡,而且显著影响了流体中 Au 的赋存形式、HS⁻配体活度以及体系的氧化还原状态。对于以 HS⁻为主要配体迁移的 Au 而言, Au 主要以 Au-HS 络合物形式存在于热液中;当黄铁矿大量结晶时,体系中 HS⁻不断被硫化物矿物形成过程所消耗,使维持 Au-HS 络合物稳定性的配体活度持续降低,从而削弱 Au 在流体中的络合能力。与此同时,黄铁矿形成过程伴随 H₂ 生成;从电子转移的角度看,表现为体系还原性增强,即电子活度升高、氧化还原电位降低。在此条件下,原先以较高价态络合物形式迁移的 Au 发生还原, Au⁺逐渐向 Au⁰ 转变。当 Au-HS 络合物稳定性因 HS⁻消耗而降低,并与还原条件增强产生协同作用时,流体中 Au 的溶解度迅速下降,最终以自然金形式从流体中沉淀出来。这一过程意味着,黄铁矿并非仅作为与自然金共生的伴生矿物出现,而可能是控制胶东金矿 Au 沉淀的重要反应介质和化学触发因素。

从矿物共生关系来看,这一机制也能够较好地解释胶东金矿中自然金与黄铁矿密切共生的现象。大量浸染状、细脉状及裂隙充填状黄铁矿的形成,为 Au 沉淀提供了持续发生的化学反应环境。特别是在流体由相对均一的深部热液向断裂、裂隙及破碎蚀变带运移过程中,黄铁矿的大规模沉淀可能使流体化学组成发生突变,导致 Au 由稳定迁移状态迅速转入过饱和状态。因此, Au 矿化并不一定需要单独引入一个突发性的外部沉淀机制,而可由成矿流体内部矿物沉淀所产生的自组织化学反馈所触发,即“黄铁矿结晶—HS⁻消耗—Au 络合物失稳—

还原增强—Au⁰ 沉淀—进一步硫化物沉淀”的连续反应链。

综上,胶东金矿省不同类型金矿可视为统一深源成矿流体在不同温压条件和流体-岩石作用强度下形成的不同热力学终态。深部岩石圈减薄和软流圈上涌引发地幔脱挥发分作用(孙丰月等, 1995; Mao et al., 2008; Deng et al., 2020b; Zhu and Sun, 2021; Yang et al., 2024), 大量富含 H₂O、CO₂、S 及 Au 等成矿元素的流体从深部释放,并在高温高压条件下(A 阶段; >600℃, 500 MPa)形成具有较高热力学势和较高元素配置熵的初始成矿流体(图 9)。随着流体沿区域性深大断裂向浅部运移,体系经历持续的减压、冷却和能量耗散过程(流体 A→流体 B→流体 C→流体 D), 流体稳定性逐渐降低, Au(HS)₂⁻等 Au 络合物不断接近过饱和状态,成矿元素开始发生重新分配和沉淀。在这一过程中,流体体系整体表现为由高温高压、高熵状态向低温低压、低熵状态演化,其本质是一个半封闭体系不断输出热量和物质并形成有序矿物组合的过程。

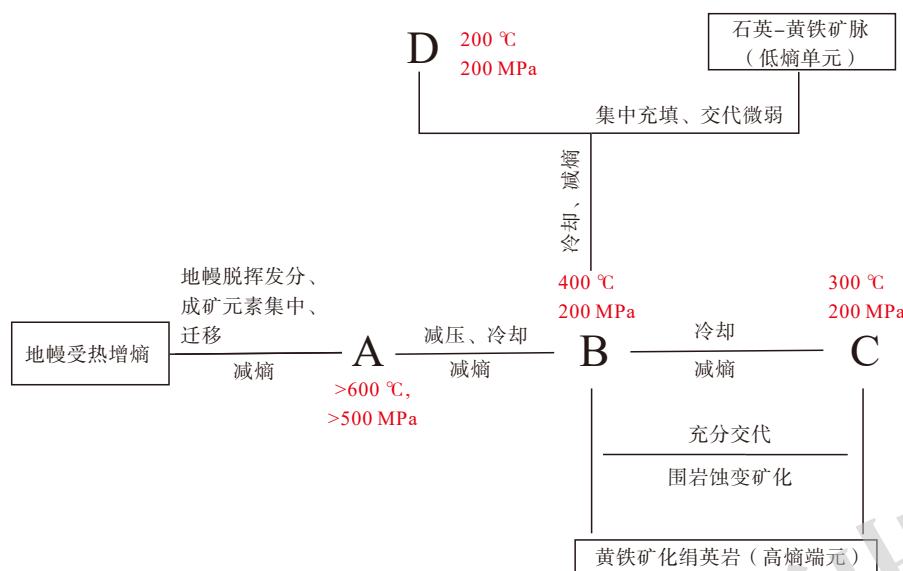
4.7 未来展望

4.7.1 矿床成因理论研究

在端元成矿理论指导下,矿床成因研究应以热力学成矿模拟为核心,结合相关高温高压试验,系统揭示并验证成矿流体中 Au 的迁移与卸载机制,从源-运移-沉淀全过程系统厘定胶东金矿的成矿过程。

首先,热力学模拟的可靠性在很大程度上取决于初始流体条件的合理约束。因此,未来工作需首先加强对初始成矿流体成分的精细刻画,包括 H₂O-CO₂-NaCl±CH₄ 体系组成、各类金属离子含量、还原性组分(如 H₂、H₂S)、盐度变化范围、温压条件及流体来源端元(如岩浆水、变质水与大气降水混合比例)等关键参数。通过流体包裹体、同位素地球化学与矿物平衡约束相结合的方法,建立更符合地质实际的初始流体输入条件。在此基础上,开展不同 P-T-X(压力-温度-成分)条件下的热力学模拟,重建 Au 络合-迁移-沉淀全过程,重点刻画 Au 溶解度随温度、压力、氧逸度及硫逸度变化的响应关系,从而约束 Au 从溶解态向沉淀态转变的热力学边界,进一步明确“Au 卸载机制”的物理化学控制因素。

其次,热力学模拟的可靠性在很大程度上也取决于所采用化学参数的准确性,包括矿物溶解/沉淀



A、B、C 和 D 分别为流体 A、流体 B、流体 C 和流体 D, 具体成分见附表 1

图 9 胶东金成矿省成矿热力学模型

Fig. 9 Thermodynamic model of ore formation in the Jiaodong gold metallogenic province

A, B, C, and D represent Fluids A, B, C, and D, respectively as described in Section 4.5. Their detailed compositions are provided in Appendix Table 1.

平衡常数、络合反应稳定常数以及流体中组分的活度模型参数等。这些关键热力学数据通常来源于既有数据库(如 SUPCRT、LLNL 或 MINES 数据库),但在复杂地质条件(高温、高压、多组分流体体系)下仍存在一定不确定性。因此,有必要通过高温高压实验对矿物-流体相互作用过程进行直接约束,以获取或校正关键反应的热力学参数,从而提高模型对实际成矿过程的拟合能力与预测可靠性。

4.7.2 成矿预测

以端元成矿理论为指导的成矿预测,应突破传统以单一地质、地球物理或地球化学异常为主要依据的预测思路,针对不同成矿端元构建量化的成矿信息表征体系。由于不同成矿端元对应着不同的热力学演化过程及元素富集沉淀模式,其成矿信息具有显著差异。例如,低熵端元的石英脉型金矿表现为成矿元素和金属矿物高度集中于狭窄断裂及石英脉中,空间离散度较低;高熵端元的蚀变岩型金矿则表现为成矿元素在较大范围内扩散并形成广泛蚀变,空间离散度较高。因此,应围绕不同端元分别提取断裂几何特征、地球物理等特征指标、围岩蚀变类型、矿物组合、流体包裹体温压、元素空间分布、元素离散度等关键表征参数,量化表达不同成矿端元位置成矿表征信息。这些成矿表征信息可量化表达,且其在整个成矿系统模型

中的相对立体空间位置相对固定,因而可在已有工作基础上开展量化成矿预测。在建立胶东金矿成矿系统成矿表征信息三维空间模型基础上,需进一步结合钻探、坑道及其他已有工程揭露信息,对三维成矿表征模型进行动态约束与校正。

需要说明的是,此研究在模拟过程中未定量考虑断裂形态对流体动力学和化学反应的控制效应。在后续工作中,上述表征体系可进一步与控矿断裂的几何学与动力学特征相耦合。具体而言,断裂的波状起伏、分段结构、倾角阶跃变化及其多期活动演化,可能不仅控制流体运移通道的时空演化,也直接影响成矿元素的富集与沉淀位置。因此,在特征提取过程中,有必要将断裂结构参数与成矿元素信息进行联合表达,构建“断裂几何-流体活动-元素富集”一体化特征空间。通过将断裂控矿规律嵌入成矿信息表征与特征学习过程,可使预测模型同时约束“成矿发生条件”与“成矿空间位置”,在方法上实现地质机制与数据驱动的融合,最终提高成矿预测的量化水平与深部靶区识别能力。

5 结论

(1)胶东金成矿系统中,矿化最好的位置对应于热力学第二定律中熵的 2 个端元:低熵单元为

“玲珑式”金矿,高熵单元为“焦家式”金矿。

(2)热力学模拟复现了胶东金矿2个端元的成矿进程,模型输出的矿物组合、含量和生成顺序与实际矿石近于一致。模型表明,黄铁矿大量形成消耗了大量 Au^+ 的 HS^- 配体,并释放了大量 H_2 (或自由电子),促进了 Au^+ 的还原沉淀,可能是Au沉淀的决定性因素。

(3)以端元成矿理论为指导的成矿预测工作,需针对不同成矿端元构建量化的成矿信息表征体系,系统提取和表达各类成矿表征信息,由此建立整个成矿系统三维成矿表征信息模型。再结合已有工程信息开展成矿预测,有望实现成矿预测由定性识别向定量评价、由经验判断向模型约束转变。致谢:在成文过程中,承蒙杨志明、王庆飞、陈华勇、杨立强、于学峰等专家学者交流指导,并提出许多建设性意见;审稿专家认真而细致地提出文章改进意见;项目组其他成员亦提供了不少辅助工作。在此一并感谢。

附加材料:附表1由作者提供,数据真实性由作者负责,在线查看网址:。

作者贡献声明:丁正江、孙丰月、邱昆峰和邓军负责论文构思、研究方法和论文写作;丁正江和辛未负责具体数据分析和技术手段的实践应用和绘图;丁正江、王斌、张琪斌、薄军委和张静参与了数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: DING Zhengjiang, SUN Fengyue, QIU Kunfeng, and DENG Jun were responsible for the conceptualization of the study, methodology development, and manuscript writing; DING Zhengjiang and XIN Wei was responsible for data analysis, the implementation of technical methods, and figure preparation; DING Zhengjiang, WANG Bin, ZHANG Qibin, BO Junwei, and ZHANG Jing contributed to data analysis, methodology refinement, and manuscript revision. All authors have read and approved the manuscript for submission and publication.

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

- AIBAI A, CHEN X, WU Y S, et al., 2023. Nature, origin, and evolution of carbon-rich fluids in orogenic gold deposits: insights from fluid inclusion and C-H-O isotope studies of the Tokuzbay gold deposit, Chinese Altai[J]. *Ore Geology Reviews*, 163: 105766.
- BO J W, DING Z J, SONG M C, et al., 2021. C, O, S and Pb isotopic compositions and genesis of the Liaoshang gold deposit in Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(2): 321-336. (in Chinese with English abstract)
- BO J W, DING Z J, DENG J, et al., 2025. Metallogenic characteristics and mineralization of supergiant gold deposits (223 t) in the northeastern margin of the Jiaolai Basin, Shandong province: a review[J]. *China Geology*, 8(4): 806-842.
- CHANG J, AUDÉTAT A, PETTKE T, 2024. The gold content of mafic to felsic potassic magmas[J]. *Nature Communications*, 15(1): 6988.
- CHEN H, LI B, 2025. Lithospheric thinning of the North China Craton: constraints from Mesozoic mafic dikes in the Jiaodong Peninsula[J]. *Geochemistry*, 85(1): 126254.
- CHEN Y L, LI H, GU S Y, et al., 2025. Geochemistry, geochronology and Fe-Mg-S isotopic composition of the Liaoshang gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: implications for ore-forming processes and mineral exploration[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 273: 107738.
- CHI N J, WANG Z P, WANG S J, et al., 2025. Zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on the petrogenesis of adakitic granite in the Nansu complex, Jiaodong Peninsula[J]. *Ore Geology Reviews*, 185: 106765.
- CHU H, LU S N, WANG H C, et al., 2011. U-Pb age spectrum of detrital zircons from the Fuzikuang Formation, Penglai Group in Changdao, Shandong province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1017-1028. (in Chinese with English abstract)
- COX S F, 2005. Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust[J]. *Economic Geology*, 100(5): 39-75.
- CUI T, YU H C, JOWITT S M, et al., 2026. Genesis of the gold deposits in the northeastern Jiaolai Basin, Jiaodong, China: constraints from geochronology, geochemistry, and thermodynamic modeling[J]. *GSA Bulletin*, doi: 10.1130/B38945.1.
- DENG J, LIU X F, WANG Q F, et al., 2015. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: constraints from fluid inclusion and C-D-O-S-Sr isotope compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 65(Pt 3): 674-686.
- DENG J, YANG L Q, GROVES D I, et al., 2020a. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China[J]. *Earth-Science Reviews*, 208: 103274.
- DENG J, WANG Q F, SANTOSH M, et al., 2020b. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: a new model for the Jiaodong gold province, eastern China[J]. *Mineralium Deposita*, 55(2): 257-274.
- DENG J, WANG Q F, LIU X F, et al., 2022. The formation of the Jiaodong gold province[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 96(6): 1801-1820.
- DENG J, WANG Q F, ZHANG L, et al., 2023. Metallogenic model of

- Jiaodong-type gold deposits, eastern China[J]. *Science China Earth Sciences*, 66(10): 2287-2310.
- DING Z J, SUN F Y, LIU F L, et al., 2013. U-Pb dating of zircons from the Weideshan molybdenum copper polymetallic deposits in Jiaodong Peninsula, China, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 607-618. (in Chinese with English abstract)
- DING Z J, SUN F Y, LIU F L, et al., 2015. Mesozoic geodynamic evolution and metallogenic series of major metal deposits in Jiaodong Peninsula, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 3045-3080. (in Chinese with English abstract)
- DONG L L, BAI X, SONG M C, et al., 2023. Crustal thickness of the Jiaodong Peninsula in the Mesozoic: implications for the destruction of the North China Craton[J]. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1171456.
- DONG L L, SONG M C, LI J, et al., 2026. The geology and genesis of the Jiaojia-Xincheng gold district (~1200 t) in the Jiaodong Peninsula, China: a review[J]. *Ore Geology Reviews*, 188: 107068.
- DU F G, JIANG Y H, QING L, et al., 2019. H-O, He-Ar and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on the sources of ore-forming fluids and ore-forming materials in the Xiadian Gold Deposit, Jiaodong[J]. *Geological Journal of China Universities*, 25(5): 686-696. (in Chinese with English abstract)
- FAN H R, LAN T G, LI X H, et al., 2021. Conditions and processes leading to large-scale gold deposition in the Jiaodong province, eastern China[J]. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1504-1523.
- FARSANG S, ZAJACZ Z, 2025. Sulfur species and gold transport in arc magmatic fluids[J]. *Nature Geoscience*, 18(1): 98-104.
- GYSI A P, HURTIG N C, PAN R, et al., 2023. MINES thermodynamic database, version 23[R]. New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, doi: 10.58799/mines-tdb.
- HU H L, FAN H R, SANTOSH M, et al., 2020. Ore-forming processes in the Wang'ershan gold deposit (Jiaodong, China): insight from microtexture, mineral chemistry and sulfur isotope compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 123: 103600.
- HU H L, JIANG X H, LIANG G Z, et al., 2021. The vertical variation characteristics of ore-forming fluids of the Jiaojia deposit: implications for mineralizing processes of gold deposits in the Jiaodong Peninsula[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(6): 1345-1356. (in Chinese with English abstract)
- HU H L, FAN H R, LAN T G, et al., 2024. Fluid-rock interaction modeling to constrain Au enrichment: implication for the giant Jiaodong Au mineralization, eastern North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 125: 91-109.
- HU R Z, HUANG M L, 2026. Research trends in magmatic-hydrothermal deposits[J]. *Science China Earth Sciences*, 69(3): 1156-1160.
- HUANG J X, DENG H, MAO X C, et al., 2023. 3D modeling of detachment faults in the Jiaodong gold province, eastern China: a Bayesian inference perspective and its exploration implications[J]. *Ore Geology Reviews*, 154: 105307.
- JI P, 2016. On Geological characteristics and metallogenesis of Liaoshang gold deposit in Jiaodong peninsula, Shandong province[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Y H, DU F G, QING L, et al., 2020. Elemental and multiple isotopic evidences of enriched lithospheric mantle origin of the Xiadian gold deposit in the Jiaodong Peninsula, East China[J]. *Ore Geology Reviews*, 127: 103824.
- KOKH M A, POKROVSKI G S, KLEMM S, et al., 2026. The role of hydrogen sulfide and trisulfur radical ion in molybdenum transport by hydrothermal fluids: implications for porphyry-epithermal Cu-Au-Mo deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 412: 90-109.
- LAN T, FAN Y C, LU J L, et al., 2022. Origin of the Dayingezhuang gold deposit in the Jiaodong district, eastern China: insights from trace element character of pyrite and C-O-S isotope compositions[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 236: 106986.
- LI J, ZHANG L P, SONG M C, et al., 2021. Formation mechanism of Shuiwangzhuang gold deposit in Jiaodong Peninsula: constraints from S-H-O isotopes and fluid inclusions[J]. *Earth Science*, 46(5): 1569-1584. (in Chinese with English abstract)
- LI J, BAI T H, SONG M C, et al., 2026a. Geology and mineralization of quartz vein-type and altered rock-type gold deposits in the Linglong gold orefield (916 t), Jiaodong Peninsula, China: a review[J]. *China Geology*, 9(2): 400-429.
- LI J Y, JIANG S Y, YUAN F, et al., 2026b. In situ monazite isotopes reveal mantle fluids for giant Jiaodong gold mineralization[J]. *Communications Earth & Environment*, 7: 374.
- LI M Z, MAO G Z, DING Z J, et al., 2024. Genesis of the Panzidian gold deposit in Jiaodong Peninsula, Eastern China: insights from fluid inclusion and isotopes[J]. *Solid Earth Sciences*, 9(2): 100177.
- LI Y F, LI H K, HAN X L, et al., 2021. Genesis of Xiadian gold deposit in Jiaodong: evidence from fluid inclusions and isotopes[J]. *Gold Science and Technology*, 29(2): 184-199. (in Chinese with English abstract)
- LIU J A, CAI R H, PEARSON D G, et al., 2019. Thinning and destruction of the lithospheric mantle root beneath the North China Craton: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 196: 102873.
- LIU X D, DING Z J, BAO Z Y, et al., 2025. Geology, geochemistry and mineralization of the Taishang-Shuiwangzhuang supergiant gold deposit (>700 t Au), northwestern Jiaodong Peninsula, China: a review[J]. *China Geology*, 8(4): 843-861.
- LIU X F, YIN R S, WANG Q F, et al., 2026. Hg isotope compositions of syn-gold mafic dikes confirm an anomalous metasomatized mantle lithosphere source for the giant Jiaodong orogenic gold province, China[J]. *GSA Bulletin*, doi: 10.1130/B38645.1.
- MAO J W, WANG Y T, LI H M, et al., 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: evidence from D-O-C-S isotope systematics[J]. *Ore Geology Reviews*, 33(3-4): 361-381.
- MAO X C, CHEN Y D, LIU Z K, et al., 2024. Hydrothermal alteration and its geochemistry of the Xiadian gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: implications for fluid-rock interaction processes and mineral exploration[J]. *Ore Geology Reviews*, 170: 106134.
- MAO X Q, WANG E D, YANG Q, et al., 2022. Genesis of Xinli Gold Deposit in Jiaodong Peninsula, Shandong province[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(10): 1855-1868. (in Chinese with English abstract)
- OELKERS E H, BÉNÉZETH P, POKROVSKI G S, 2009. Thermodynamic databases for water-rock interaction[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 70(1): 1-46.
- POKROVSKI G S, 2025. Thermodynamic modeling of hydrothermal ore de-

- posit formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 178: 106436.
- QIU K F, GOLDFARB R J, DENG J, et al., 2020. Gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern China[M]//SILLITOE R H, GOLDFARB R J, ROBERT F, et al. *Geology of the world's major gold deposits and provinces*. Littleton: Society of Economic Geologists: 753-774.
- QIU K F, DENG J, LAFLAMME C, et al., 2023a. Giant Mesozoic gold ores derived from subducted oceanic slab and overlying sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 343: 133-141.
- QIU K F, DENG J, SAI S X, et al., 2023b. Low-temperature thermochronology for defining the tectonic controls on heterogeneous gold endowment across the Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Tectonics*, 42(1): e2022TC007669.
- QIU K F, ROMER R L, LONG Z Y, et al., 2024. Potassium isotopes as a tracer of hydrothermal alteration in ore systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 368: 185-196.
- QU J H, GAO S S, WANG C Z, et al., 2021. Crustal P-wave velocity structure and earthquake distribution in the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Tectonophysics*, 814: 228973.
- RAUCHENSTEIN-MARTINEK K, WAGNER T, WÄLLE M, et al., 2014. Gold concentrations in metamorphic fluids: a LA-ICPMS study of fluid inclusions from the Alpine orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 385: 70-83.
- SHARMA S, SRIVASTAVA D, GROVER S, et al., 2014. Biomaterials in tooth tissue engineering: a review[J]. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 8(1): 309-315.
- SHENG P, 2019. Genetic mineralogy and sources of metallogenic materials of Liaoshang gold deposit in Shandong province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- SIBSON R H, 2004. Controls on maximum fluid overpressure defining conditions for mesozonal mineralisation[J]. *Journal of Structural Geology*, 26(6-7): 1127-1136.
- SIBSON R H, 2007. An episode of fault-valve behaviour during compressional inversion?: The 2004 $M_{\text{f}}6.8$ Mid-Niigata Prefecture, Japan, earthquake sequence[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(1-2): 188-199.
- SONG M C, DING Z J, ZHANG J J, et al., 2021. Geology and mineralization of the Sanshandao supergiant gold deposit (1200 t) in the Jiaodong Peninsula, China: a review[J]. *China Geology*, 4(4): 686-719.
- SONG M C, YANG L Q, FAN H R, et al., 2022. Current progress of metallogenic research and deep prospecting of gold deposits in the Jiaodong Peninsula during 10 years for Exploration Breakthrough Strategic Action[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(6): 903-935. (in Chinese with English abstract)
- SUN F Y, SHI Z L, FENG B Z, 1995. Gold ore geology, lithogenesis and metallogenesis related to the differentiation of mantle-derived C-H-O fluids in Jiaodong Peninsula, Eastern China[M]. Changchun: Jilin People's Press: 1-170. (in Chinese).
- SUN W P, FENG Y Z, LAI C, et al., 2022. 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*, 145: 104894.
- TANG J, GUO P, WANG F, et al., 2025. Spatial-temporal variations in Mesozoic crustal thickness along the northeast Asian continental margin: response to the subduction history of the Paleo-Pacific Plate[J]. *GSA Bulletin*, 137(1-2): 374-390.
- WANG B, ZHOU J B, DING Z J, et al., 2024. Late Mesozoic magmatism and gold metallogeny of the Jiaodong Peninsula, China: a response to the destruction of the North China Craton[J]. *GSA Bulletin*, 136(3-4): 1395-1412.
- WANG B, DING Z J, ZHOU J B, et al., 2025a. Rapid tectonic transition, crust-mantle interaction, and gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula, eastern China: revealed by Early Cretaceous granitoids and microgranular mafic enclaves[J]. *Lithos*, 508-509: 108101.
- WANG H, LAN T G, FAN H R, et al., 2022a. Fluid origin and critical ore-forming processes for the giant gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: constraints from in situ elemental and oxygen isotopic compositions of quartz and LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions[J]. *Chemical Geology*, 608: 121027.
- WANG H, LAN T G, XU Y, et al., 2026. The role of continental and oceanic subduction in generating the giant Jiaodong gold province, China: constraints from mercury isotopes[J]. *Gondwana Research*, 159: 296-307.
- WANG H C, XIANG Z Q, REN Y W, et al., 2022b. The northern margin of the Yangtze Craton or the southeastern margin of the North China Craton: new insights on the tectonic attribution of Neoproterozoic granitic gneisses in Jiaodong Peninsula[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(9): 3012-3033. (in Chinese with English abstract)
- WANG L G, YANG L Q, YANG W, et al., 2025b. Genesis and exploration potential of gold deposits in Archean high-amphibolite facies metamorphic rocks of the Jiaodong Peninsula: geological and geochemical constraints from the Majiayao gold deposit[J]. *Ore Geology Reviews*, 181: 106596.
- WEI Y J, YANG L Q, QIU K F, et al., 2022. Geology, mineralogy and pyrite trace elements constraints on gold mineralization mechanism at the giant Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 148: 104992.
- WU J H, CHEN Y L, ZHENG C Y, et al., 2021. Genesis of the Longkou-Tudui gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: constraints from zircon U-Pb dating, fluid inclusion studies and C-H-O-S stable isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104449.
- WU J J, ZENG Q D, SANTOSH M, et al., 2022. Deep ore-forming fluid characteristics of the Jiaodong gold province: evidence from the Qianchen gold deposit in the Jiaojia gold belt[J]. *Ore Geology Reviews*, 145: 104911.
- XIAO J D, XIE Z J, XIA Y, et al., 2024. Predominant fracture gold in the Jiaodong gold province, China: constraints on gold mineralization processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 165: 105915.
- XU W G, FAN H R, YANG K F, et al., 2016. Exhaustive gold mineralizing processes of the Sanshandao gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: displayed by hydrothermal alteration modeling[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129: 152-169.
- XU Y W, MAO G Z, LIU X T, et al., 2022. Genesis of the Zhaoxian gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: insights from *in-situ* pyrite geochemistry and S-He-Ar isotopes, and zircon U-Pb geochronology[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 886975.

- YANG C X, SANTOSH M, 2020. Ancient deep roots for Mesozoic world-class gold deposits in the North China Craton: an integrated genetic perspective[J]. *Geoscience Frontiers*, 11(1): 203-214.
- YANG K F, FAN H R, SANTOSH M, et al., 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[J]. *Lithos*, 146-147: 112-127.
- YANG K F, LIU N X, LI X H, et al., 2026. Structural control on gold mineralization in the northwestern Jiaodong terrane, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 196: 107486.
- YANG L Q, DENG J, GUO C Y, et al., 2009. Ore-forming fluid characteristics of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong gold province, China[J]. *Resource Geology*, 59(2): 181-193.
- YANG L Q, DENG J, GUO L N, et al., 2016. Origin and evolution of ore fluid, and gold-deposition processes at the giant Taishang gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 72(Pt 1): 585-602.
- YANG L Q, DENG J, ZHANG L, et al., 2024. Mantle-rooted fluid pathways and world-class gold mineralization in the giant Jiaodong gold province: insights from integrated deep seismic reflection and tectonics[J]. *Earth-Science Reviews*, 255: 104862.
- YU B, ZENG Q D, FRIMMEL H E, et al., 2024. Spatio-temporal fluid evolution of gold deposit in the Jiaodong Peninsula, China: a case study of the giant Xiling deposit[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 260: 107455.
- ZHANG J Y, QIU K F, YIN R S, et al., 2024. Lithospheric mantle as a metal storage reservoir for orogenic gold deposits in active continental margins: evidence from Hg isotopes[J]. *Geology*, 52(6): 423-428.
- ZHANG Z Q, WANG G W, CARRANZA E J M, et al., 2026. Three-dimensional geological modeling and mineral potential mapping in the world-class Jiaojia-Sanshandao gold district, China[J]. *Journal of Applied Geo-physics*, 250: 106261.
- ZHU G, LIU C, GU C C, et al., 2018. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone[J]. *Science China Earth Sciences*, 61(4): 386-405.
- ZHU R X, SUN W D, 2021. The big mantle wedge and decratonic gold deposits[J]. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1451-1462.

附中文参考文献

- 薄军委, 丁正江, 宋明春, 等, 2021. 胶东辽上金矿床 C、O、S、Pb 同位素组成及矿床成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(2): 321-336.
- 初航, 陆松年, 王惠初, 等, 2011. 山东长岛地区蓬莱群辅子乔组碎屑锆石年龄谱研究[J]. *岩石学报*, 27(4): 1017-1028.
- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 等, 2013. 胶东伟德山地区铜钼多金属矿锆石 U-Pb 法测年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(2): 607-618.
- 丁正江, 孙丰月, 刘福来, 等, 2015. 胶东中生代动力学演化及主要金属矿床成矿系列[J]. *岩石学报*, 31(10): 3045-3080.
- 杜佛光, 姜耀辉, 青龙, 等, 2019. 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*, 25(5): 686-696.
- 纪攀, 2016. 胶东辽上金矿床地质特征及成因研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 李杰, 张丽鹏, 宋明春, 等, 2021. 胶东水旺庄金矿床成矿机制: 来自 S-H-O 同位素和流体包裹体的制约[J]. *地球科学*, 46(5): 1569-1584.
- 李逸凡, 李洪奎, 韩学林, 等, 2021. 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*, 29(2): 184-199.
- 毛兴强, 王恩德, 杨群, 等, 2022. 山东省胶东半岛新立金矿床成因[J]. *地质通报*, 41(10): 1855-1868.
- 盛鹏, 2019. 山东省辽上金矿成因矿物学与成矿物质来源研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 孙丰月, 石淮立, 冯本智, 1995. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿[M]. 长春: 吉林人民出版社: 1-170.

获奖者简历:

丁正江, 矿床学博士, 二级研究员, 2025 年获第十九次李四光地质科学奖野外奖。自然资源部科技领军人才, 曾任山东省地矿局总工程师、第六地质大队队长, 现任自然资源部深部金矿勘查开采技术中心主任、山东省深部资源勘查评价重点实验室主任, 兼任山东省科学技术协会副主席。从事野外地质工作 27 年, 先后主持承担国家重点研发计划、国家自然科学基金、山东省重点研发计划等国家/省部级科研项目 10 项, 主持、组织、参与重要地质勘查项目 100 余项; 合作发表论文 130 篇 (SCI 54 篇、EI 26 篇), 出版专著 13 部 (第一作者 4 部); 获发明专利 13 项, 参编国标、行标或地方标准 7 项; 获省部级科学技术奖 15 项 (含省科技进步一等奖首位 1 项)。

