

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.06.009

胶东东部金青顶金矿床成因:硫化物矿石与围岩微量元素制约

李健^{1,2}, 宋明春³, 于建涛⁴, 薄军委⁵, 张照录¹, 刘晓¹

LI Jian^{1,2}, SONG Mingchun³, YU Jiantao⁴, BO Junwei⁵, ZHANG Zhaolu¹, LIU Xiao¹

1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. 山东省第六地质矿产勘查院, 山东 威海 264209;

4. 山东黄金金洲矿业集团有限公司, 山东 威海 264209;

5. 山东省第三地质矿产勘查院, 山东 烟台 264000

1. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China;

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

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

4. Shandong Gold Jinzhou Mining Group Co., Ltd., Weihai 264209, Shandong, China;

5. Shandong Provincial No.3 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Yantai 264000, Shandong, China

摘要:金青顶矿床是胶东东部牟平-乳山成矿带最大的金矿床(>35 t, 平均品位 10 g/t), 矿化类型主要为硫化物石英脉型。在野外地质调查的基础上, 利用微量元素组成对金青顶矿床的成矿流体地球化学性质和成矿物质来源进行了研究, 并将金青顶矿床成因确定为受断裂控制的热液脉型金矿床。矿石稀土元素总量变化范围较大, 呈现出明显的轻稀土元素富集和重稀土元素亏损的特征(LREE/HREE=16.75~50.60), 负Eu异常显著, Ce异常不明显。Hf/Sm、Th/La、Nb/La等特征元素比值均小于1, 暗示成矿流体为富Cl体系。结合前人稳定同位素的研究, I~II阶段矿石 δEu 值逐渐减小, 可能有大气降水的加入, 说明金青顶矿床成矿流体为岩浆水和大气降水混合来源热液。硫化物矿石、蚀变和新鲜围岩Y/Ho值显示, 蚀变的围岩可为金成矿作用提供必要的成矿物质。

关键词:矿床地质; 微量和稀土元素; 成矿流体; 地球化学; 成矿物质来源; 金矿床; 胶东

中图分类号: P618.51; P616.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)06-1010-13

Li J, Song M C, Yu J T, Bo J W, Zhang Z L, Liu X. Genesis of Jinqingding gold deposit in eastern Jiaodong Peninsula: constrain from trace elements of sulfide ore and wall-rock. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(6): 1010-1022

Abstract: The Jinqingding deposit is the largest gold deposit (> 35 t, average grade 10 g/t) within the Muping-Rushan metallogenic belt of eastern Jiaodong, and the main mineralization category is sulfide quartz-vein category. Based on the study of geological survey as well as trace element composition systematically, the geochemical characteristics of ore-forming fluid and source of ore-forming materials are constrained, and conducts the genesis of Jinqingding deposit as a hydrothermal vein-type gold deposit controlled by faults. In this study, the total rare earth elements (ΣREEs) in the ore varies widely, showing obvious light rare earth elements enrichment and heavy rare earth

收稿日期: 2021-06-25; 修订日期: 2021-10-27

资助项目: 国家自然科学基金项目 NFSC-山东联合基金项目《胶东深部金矿断裂控矿机理》(批准号: U2006201)、山东省自然科学基金项目《胶东半岛东部岩浆活动与金成矿作用的响应——以金青顶矿床为例》(编号: ZR2021QD056)和《胶东东部牟平韧性剪切带变形时代及特征》(编号: ZR2019PD010)、山东省地勘基金项目《胶东金矿集区富矿段成因及成矿机制》(编号: 202017)

作者简介: 李健(1993-), 男, 博士, 讲师, 从事矿床学研究。E-mail: jianli@sdut.edu.cn

elements depletion (LREE/HREE = 16.75~50.60), with strong negative Eu anomaly and insignificant Ce anomaly. The ratios of Hf/Sm, Th/La, and Nb/La are all less than 1, suggesting that the ore-forming fluid belongs to Cl-rich system. Combined with previous studies on stable isotopes, the δEu value of the ore from stage I to II gradually decreases in this study, and there may be the addition of meteoric water, indicating that the ore-forming fluid is a mixture of magmatic water and meteoric water. The Y/Ho ratio of sulfide ore, altered and fresh wall-rock implies that altered wall-rock can provide the necessary ore-forming material for gold mineralization.

Key words: ore deposit geology; trace and rare earth elements; ore-forming fluids; geochemistry; source of ore-forming materials; gold deposit; Jiaodong Peninsula

胶东金成矿省是中国最大的金矿产资源聚集地,目前胶东地区已探明金储量大于 5000 t, 占中国黄金总储量的 40% 以上^[1-2]。胶东半岛金矿床成矿时代集中于晚白垩世(120 ± 5 Ma)^[3],其成矿作用具有爆发性和瞬时性的特点。在矿化类型上,胶东金矿床以石英脉型(玲珑型)、蚀变岩型(焦家型)和角砾岩型(蓬家夬型)为主^[4]。胶东金矿床在矿化类型、成矿构造环境等方面极具特色,吸引了全球矿床学者的广泛关注^[5-6]。其中,胶东金青顶矿床(又称乳山矿床)位于牟平-乳山(牟乳)成矿带的中部,是硫化物石英脉型金矿床的典型代表。前人对该矿床进行了部分流体包裹体、同位素^[7-8]、成岩-成矿年代学^[9-11]等的分析。胡芳芳等^[8]和 Li 等^[10]分别对含金石英脉中的热液锆石和绢云母进行了 U-Pb 和 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年研究,显示金青顶金矿床形成于晚白垩世,与胶东金矿主成矿时代一致^[3]。胡芳芳等^[7]和李旭芬^[12]对金青顶矿床各成矿阶段的透明矿物石英和方解石进行了流体包裹体岩相学和显微测温学研究,显示成矿流体为 NaCl-H₂O-CO₂ 体系热液。应汉龙^[8]对硫化物进行了硫同位素分析,提出成矿物质主要来源于地壳。上述研究工作,在金青顶金矿床成矿流体地球化学性质、物质来源、成矿时代等方面取得了一定进展。然而,关于其成矿物质来源和成因机制的研究仍不明确。尤其是在成矿过程中,各阶段之间微量元素组分的变化情况并未进行详尽的说明。这也直接造成了成矿关键元素来源及演化过程的不确定性。为此,查明赋矿围岩和矿石之间元素/离子的交换过程是解决上述问题的关键。近年来,随着测试分析技术的不断发展,可利用矿石微量和稀土元素对成矿物质来源、成矿流体特征等进行较好的制约^[13-17]。本文以胶东金青顶金矿床为研究对象,利用矿石微量和稀土元素组成,对矿床成矿物质来源及成矿流体地球化学进行了详细的研究,确定金青顶矿床的成因,有助于更好地理解牟乳成矿带的金成矿作用。

1 地质背景

位于中国东部的胶东半岛记录了华北板块东部陆块地壳早期发展与显生宙以来的多期俯冲作用、造山过程及大规模成矿事件^[18]。胶东半岛主要由前寒武系结晶基底、中生代火山-沉积岩和侵入岩组成(图 1-a、b)。前寒武系基底的沉积-变质岩系主要包括新太古代胶东群、古元古代荆山群与粉子山群和新元古代蓬莱群^[2]。随着华北板块克拉通化的完成,东部陆块处于长期构造-岩浆活动的沉寂期。直至三叠纪扬子板块相对于华北板块的俯冲碰撞作用^[20],导致区内开始出现大规模的岩浆作用,并形成苏鲁-大别超高压变质带,NE 向的构造格局就此形成(图 1-b)。胶东半岛与辽东半岛的三叠纪岩浆岩可作为华北板块东部克拉通初始破坏作用的标志^[21-22]。侏罗纪以来古太平洋构造体系的叠加作用,使胶东半岛增厚下地壳发生部分熔融,并自西向东形成了一系列中侏罗世岩浆岩(167~157 Ma)^[23-25],包括玲珑、栾家河、昆嵛山、文登等钙碱性岩体,主要岩性为二长花岗岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩等。白垩纪由于古太平洋俯冲板片的后撤,使整个胶东地区处于拉张的构造环境(形成胶莱盆地)^[26],俯冲极性的反转和滞留板片的脱水作用^[27],壳幔相互作用强烈,诱发了大规模的岩浆-构造活动,导致华北克拉通破坏作用达到高潮。该期构造作用形成的岩浆岩以郭家岭、伟德山等岩体为典型代表(130~110 Ma)^[22, 28-31],岩性主要为花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩等。胶东半岛的大量金矿床受断裂控制显著,均发育于 NE 向、NNE 向断裂中^[4],且形成时代较集中,多矿物/多方法的定年均显示成矿作用形成于晚白垩世(120 ± 5 Ma)^[3],具有爆发性和瞬时性的特点。

牟乳成矿带位于胶东半岛东部(图 1-c),发育超过 20 个不同规模的金矿床,代表性矿床包括大型

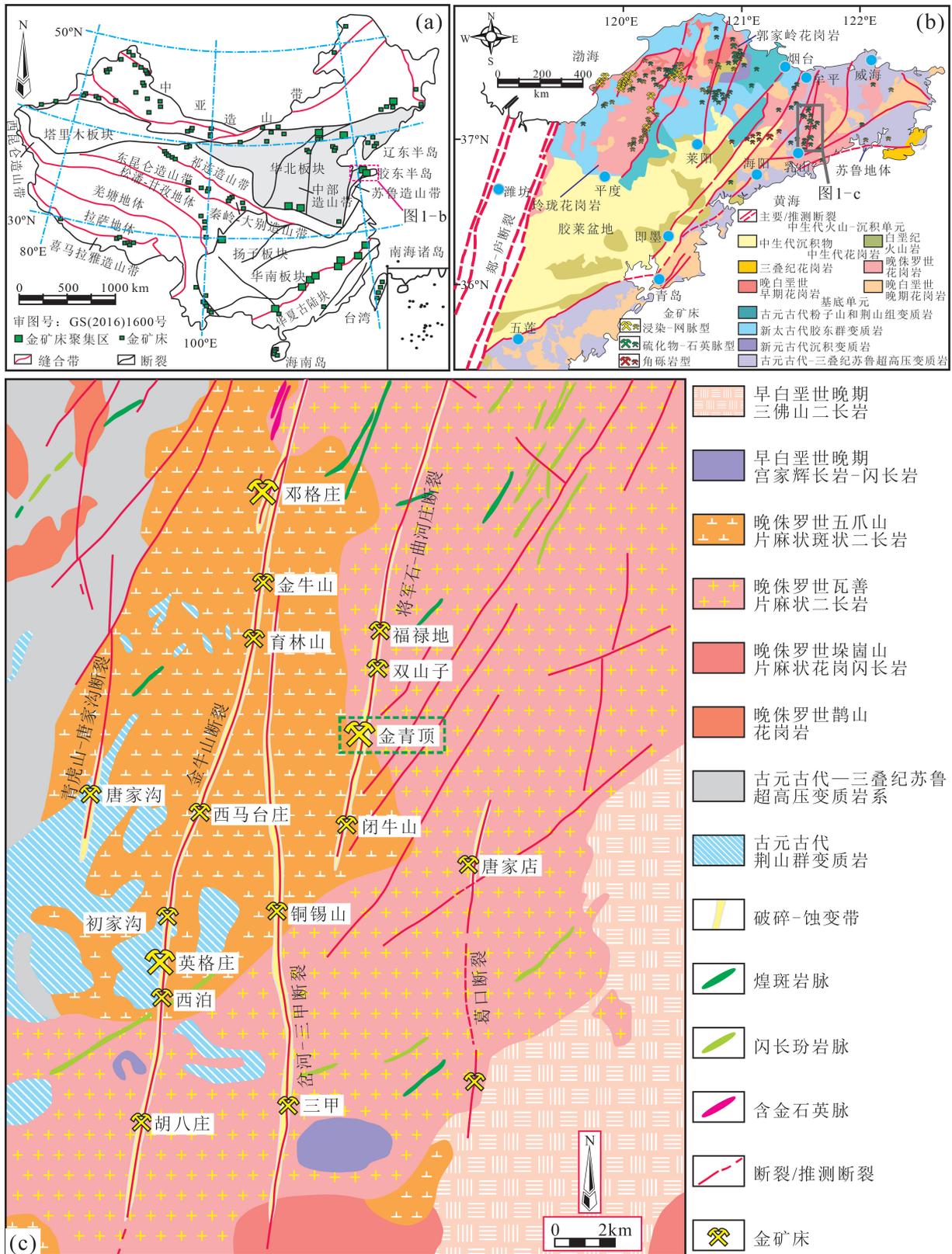


图1 中国主要构造域及金矿床分布简图(a,据参考文献[19]修改)、胶东半岛地质及金矿床分布图(b,据参考文献[2]修改)和牟平-乳山成矿带地质及矿床分布图(c,据参考文献[11]修改)

Fig. 1 Simplified map of China showing major tectonic domains(a) and locations of major gold deposits,geological map of the Jiaodong gold province(b) and geological map of the Muping-Rushan gold metallogenic belt(c)

的金青顶和邓格庄矿床, 中型的唐家沟、三甲和胡八庄矿床等, 是胶东东部最具代表性且规模最大的金矿产区^[32-33]。该成矿带内金矿化作用主要受昆崙山侵入体和 NNE 向断裂联合控制, 广泛发育硫化物-石英脉型矿化。牟乳成矿带内出露的地质单元主要为古元古界荆山群、苏鲁地体超高压变质岩和中生代岩体。荆山群位于成矿带东部地区, 被中生代岩浆岩侵入, 呈孤立岛状分布, 主要由片岩和大理岩组成^[11]。苏鲁变质岩主要为硅质岩、花岗片麻岩、榴辉岩等^[11]。中生代岩体在成矿带范围内出露面积最大, 为最主要的地质单元, 按时代划分为 2 期: 晚侏罗世昆崙山 (161~138 Ma)^[34-35] 和晚白垩世三佛山岩体 (118~113 Ma)^[9, 35]。其中昆崙山单元出露面积大于 1000 km², 是区内最重要的赋矿围岩, 自西向东可进一步划分为垛崙山、瓦善和五爪山三部分, 被晚白垩世长英质-镁铁质岩浆侵入。成矿带内断裂构造发育, 主要呈 NE 向和 NNE 向, 其中自西向东的青虎山-唐家沟、金牛山、岔河-三甲、将军石-曲河庄、葛口等是主要的控矿断裂, 近等间距分布 (间隔 4~5 km)^[4], 带内大中型金矿床均沿断裂分布 (图 1-c)。

2 矿床地质特征

金青顶金矿床位于牟乳成矿带中部 (图 1-c), 在 20 世纪由山东省第三地质矿产勘查院在区域地质调查过程中发现^[10], 是带内资源量最大的矿床, 金储量大于 35 t, Au 平均品位约 10 g/t^[36]。矿区出露的地层主要为古元古界荆山群变质岩系和新生界第四系, 其中荆山群被中生代岩浆岩侵入, 呈近似“脉岩”的椭球状残留体形式产出 (图 2-a)。地表出露的岩浆岩均为昆崙山单元。断裂构造主要为将军石-曲河庄断裂, 长 50 km, 宽 1~15 m, 穿切昆崙山岩体。

区内共发现 2 条主矿体 (其余均为规模较小的矿体), I 和 II 号矿体, 矿体严格受将军石-曲河庄断裂控制, 断裂产状“拐弯处”最易形成有经济价值的矿体 (图 2-a)。其中 II 号矿体规模最大, 占矿床总储量的 90% 以上^[32], 曾是中国资源量最大的单个金矿体^[7]。II 号矿体赋存于昆崙山二长花岗岩中, 走向 NE—NNE, 倾向 SE, 倾角较陡 (66°~90°)^[37] (图 2-b), 沿走向方向延长约 300 m, 倾向方向长达 1800 m, 走向和倾向方向均呈舒缓波状, 厚度 0.2~

7.0 m (平均 1.6 m), Au 品位变化范围较大 (1.5~30 g/t), 平均为 10 g/t^[36-37]。

根据矿脉之间的穿切关系和矿物共生组合, 可将金青顶矿床金成矿作用划分为 3 个阶段 (图版 I)。I 黄铁矿-石英阶段: 该阶段伴随有钾化, 金属硫化物较少发育, 仅见颗粒较小的黄铁矿呈浸染状零星分布于烟灰色石英中, 黄铁矿颗粒结晶程度较差, 以他形为主 (图版 I-f、图版 II-a)。II 含金石英-黄铁矿±黄铜矿阶段: 金属硫化物在该阶段大量出现, 主要为黄铁矿和少量黄铜矿、斑铜矿与自然金, 石英呈乳白色, 常包裹围岩角砾或 I 阶段黄铁矿和烟灰色石英的集合体, 是主成矿阶段 (图版 I-a~c、g~h、图版 II-b~e)。围岩蚀变主要为绢云母化、绿泥石化和绿帘石化, 也可见部分钾化。另在该阶段可见明显的梳状构造, 暗示主成矿阶段处于明显的张性环境。III 石英-方解石阶段: 该阶段为成矿晚期, 不含金属硫化物且蚀变也不甚发育, 主要为石英和方解石, 常见穿切 II 阶段矿石的现象 (图版 II-f)。整体上, 金青顶矿床围岩蚀变较发育, 主要为钾化、绢云母化 (图版 II-g~h)、碳酸盐化、绿泥石化、绿帘石化等。

3 分析方法

为了探讨金青顶金矿床成矿物质来源及成矿流体地球化学特征, 本次对 I、II 阶段矿石及围岩等共计 12 件样品进行了微量元素测定, 其中围岩二长花岗岩分别采集自靠近矿体强蚀变和远离矿体的新鲜样品 2 种。在详细的岩相学观察后, 将采集的样品粉碎至 200 目, 在南京宏创地质勘查技术服务有限公司利用 Elan DRC-e ICP-MS 方法完成分析工作。样品分析的精密度和准确度同参考文献 [38]。此外, 本次研究还将前人测试的金青顶矿床的相关微量元素数据进行了系统的整理 (数据来源于参考文献 [12, 39~40])。

4 分析结果

4.1 稀土元素

本次金青顶矿床含金石英-黄铁矿矿石与围岩的稀土元素组成见表 1。在稀土元素球粒陨石标准化配分图解 (图 3-a~e) 上, 金青顶矿床远离矿体、未蚀变的二长花岗岩样品稀土元素总量 (ΣREE) 变化较小, 介于 $130.74 \times 10^{-6} \sim 137.29 \times 10^{-6}$ 之间; LREE/HREE

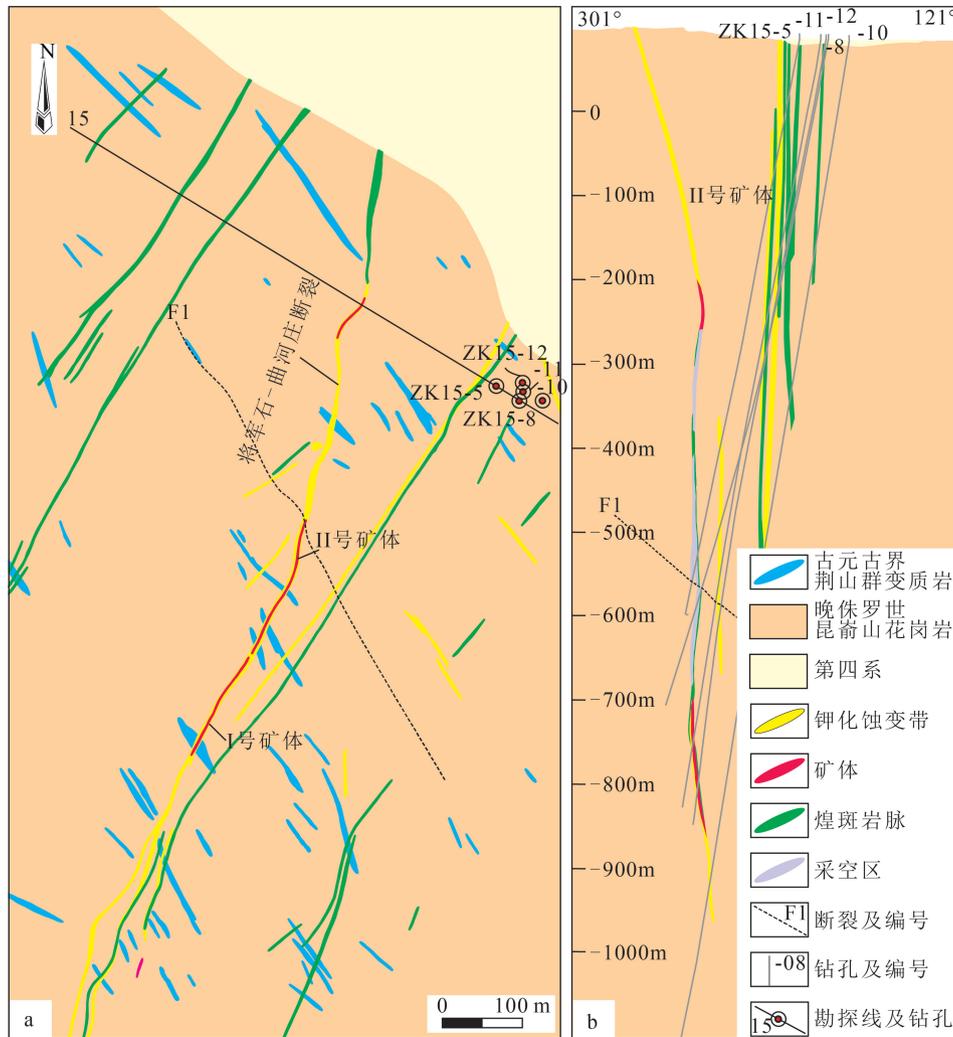


图2 金青顶金矿床地质图(a)和15号勘探线剖面图(b)

Fig. 2 Geological map of the Jinqingding gold deposit(a) and cross-section of exploration line 15(b)

值为 36.47~38.42, La_N/Yb_N 值为 54.87~67.78, 暗示轻、重稀土元素分馏强烈; δEu 和 δCe 值分别为 0.92~0.96 和 1.16~1.44, 异常不明显(图 3-a)。

蚀变二长花岗岩的稀土元素总量为 $111.09 \times 10^{-6} \sim 152.13 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 46.13~49.01, La_N/Yb_N 值较大, 介于 83.54~101.89 之间; δEu 和 δCe 值分别为 0.82~0.85 和 1.13~1.25, 显示弱的负 Eu 异常和正 Ce 异常(图 3-b)。前人对矿区内的成矿后煌斑岩和围岩斜长角闪岩进行了稀土元素组成研究^[12], 发现轻稀土元素富集和重稀土元素亏损的特征明显(LREE/HREE = 12.28~19.79), δEu 值(0.65~1.16)范围较大, 显示负 Eu 至弱正 Eu 异常, Ce 异常($\delta Ce = 1.00 \sim 1.09$)不显著

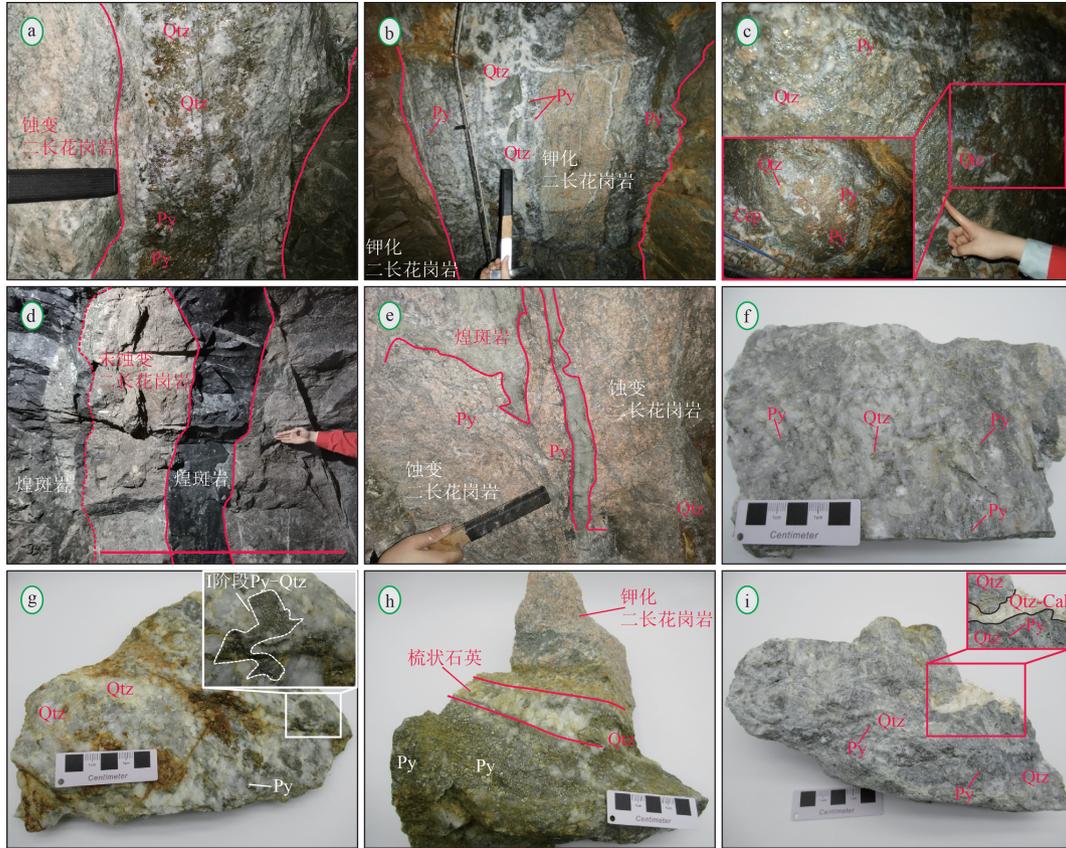
(图 3-c、d)。

石英-黄铁矿矿石的稀土元素总量变化范围较大, 介于 $1.78 \times 10^{-6} \sim 207.57 \times 10^{-6}$ 之间; LREE/HREE 值为 16.75~50.60, La_N/Yb_N 值为 34.53~928.30; 除 20JQD-1-1 样品 Eu 异常不显著外($\delta Eu = 1.01$), 其余均显示明显的负 Eu 异常($\delta Eu = 0.49 \sim 0.84$), Ce 异常($\delta Ce = 0.97 \sim 1.24$)不显著(图 3-e)。

4.2 微量元素

金青顶矿床硫化物矿石与围岩微量元素组成见表 2。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 3-f)上, 围岩(蚀变与新鲜样品)和硫化物矿石微量元素地球化学行为较相似, 即相对富集 Cs、Rb、Ba、U 等大离子亲石元素(LILEs)和 La、Zr 等, 相对亏损

图版 I Plate I



a~i. 金青顶金矿床代表性矿石特征(-435中段); a. 受断裂控制的 II 阶段含金石英-黄铁矿矿脉; b. II 阶段含金石英-黄铁矿矿脉中包裹围岩角砾; c. II 阶段角砾状含金石英-黄铜矿-黄铁矿矿石; d. 与 II 号矿体平行产出的煌斑岩, 穿切未蚀变的二长花岗岩, 按箭头方向, 矿化-蚀变强度逐渐增强; e. 灰绿色煌斑岩脉穿切蚀变二长花岗岩; f. I 阶段黄铁矿-石英矿石; g. II 阶段含金石英-黄铁矿包裹 I 阶段黄铁矿-石英; h. II 阶段含金石英-黄铁矿, 发育梳状构造; i. III 阶段无石英-方解石脉穿切 II 阶段矿石。Cal—方解石; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英

Th、Nb、Ta、Ti、Hf 等高场强元素 (HFSEs) 和 Nd 等 (图 3-f)。硫化物矿石的 Hf/Sm、Th/La、Nb/La 等特征微量元素比值均小于 1 (20JQD-5-1 和 20JQD-5-2 样品除外, 其 Hf/Sm 值分别为 1.01 和 1.21), Y/Ho、Co/Ni、Nb/Ta 和 Zr/Hf 值分别为 19.13~27.06、2.31~16.56、12.27~59.81 和 25.94~73.71。

5 讨论

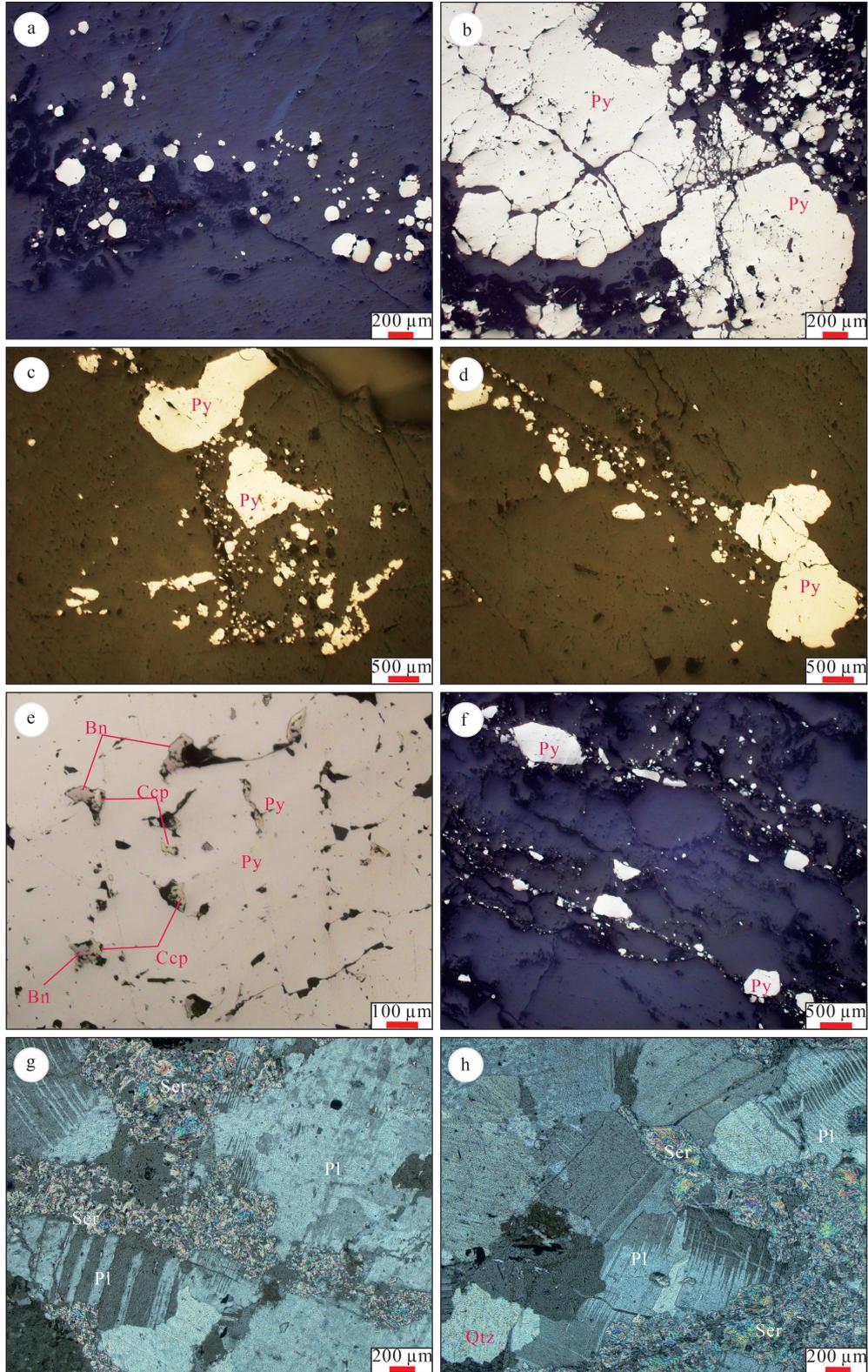
5.1 成矿流体地球化学特征

研究表明, 稀土元素通常具有相似的电价 (+3 价为主) 和离子半径 ($0.977 \times 10^{-6} \sim 1.160 \times 10^{-10}$)^[43], 且地球化学性质较稳定, 元素不会在地质过程中分馏, 无论是在岩浆热液还是变质热液作用中^[44]。此外, 成矿过程中其他常见的金属阳离子 (Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等) 半径较大, 造成 REE³⁺ 离子难以进入矿物的晶格中^[45]。因此, 矿石稀土元素保存了原始的成矿

信息, 是反演初始成矿流体地球化学性质的重要指标^[16, 46]。

REE³⁺ 离子在成矿流体中可与 Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 等阴离子络合, 形成多种络合物^[47]。本次研究的矿石稀土元素配分模式显示明显的轻稀土元素富集和重稀土元素亏损的特征 (图 4-a), 暗示成矿流体中的阴离子主要为 Cl^- 和 F^- , 因为研究显示富 Cl 和 F 的流体具有较强的迁移轻稀土元素的能力^[45, 48-49]。尽管如此, 富 Cl 和 F 的热液流体在迁移高场强元素上存在差别^[45]。前已述及, 本次研究的矿石 Hf/Sm、Th/La、Nb/La 等特征微量元素比值均小于 1, 说明成矿流体可能为富 Cl 热液^[45]。此外, 在微量元素蛛网图上, 高场强元素的明显亏损也排除了成矿流体为富 F 体系^[48-49], 因为 F 更易与高场强元素结合, 且富 F 体系热液的 Hf/Sm、Th/La、Nb/La 等值通常大于 1^[45]。前人对金青顶矿床进行

图版 II Plate II



a~h.金青顶金矿床矿化-蚀变显微特征;a. I 阶段浸染状黄铁矿;b~c. II 阶段呈碎裂结构的黄铁矿;d. II 阶段细脉状黄铁矿;e. II 阶段黄铁矿与斑铜矿和黄铜矿共生;f. III 阶段细脉状黄铁矿;g~h.围岩中绢云母化蚀变。Bn—斑铜矿;Ccp—黄铜矿;Pl—斜长石;Py—黄铁矿;Qtz—石英;Ser—绢云母

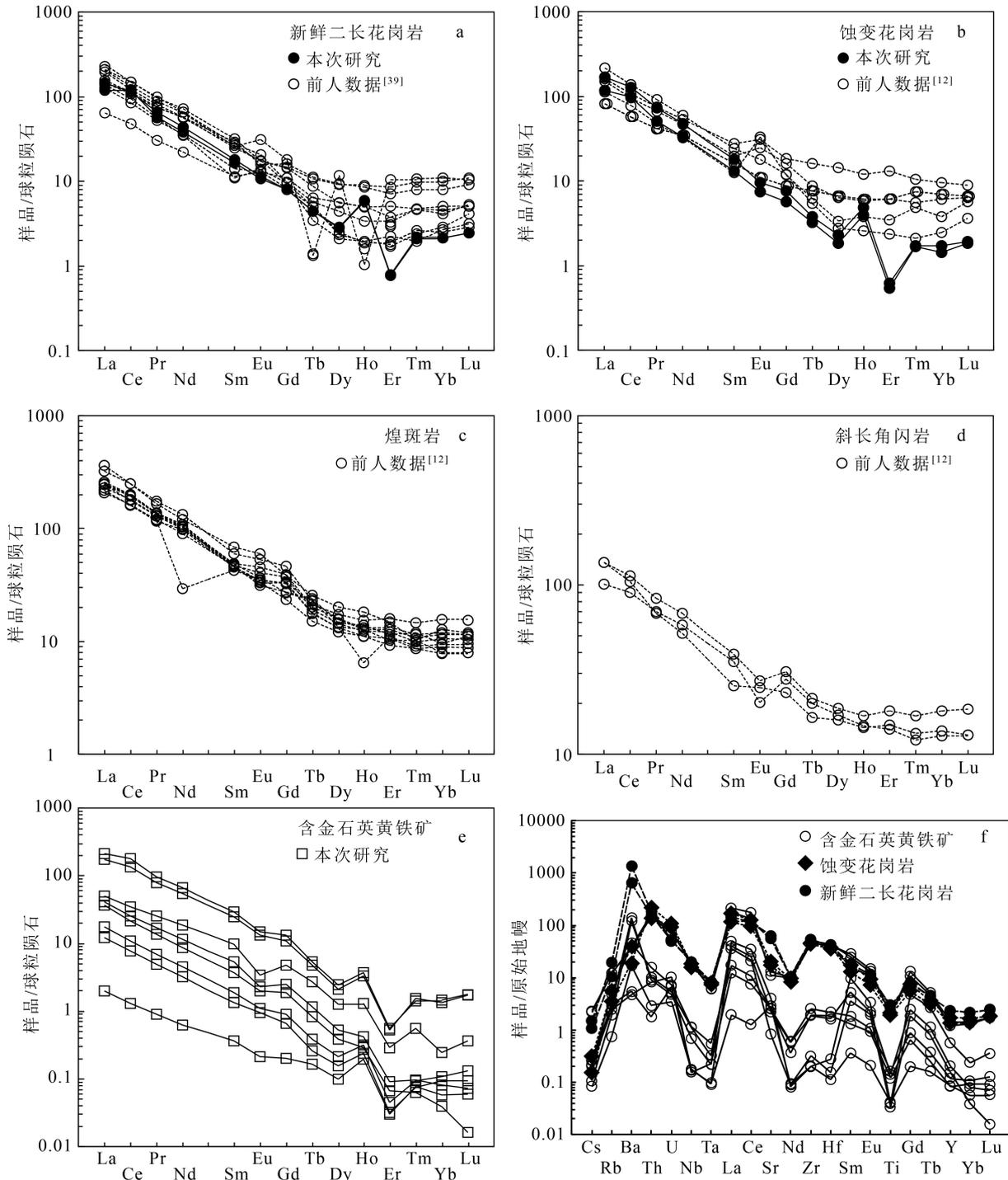


图 3 金青顶金矿床微量元素组成

Fig. 3 Trace element composition of Jinqingding gold deposit

a~e—球粒陨石标准化稀土元素配分模式图解^[41]; f—原始地幔标准化微量元素蛛网图图解^[42]

表1 金青顶金矿床硫化物矿石与围岩稀土元素组成

Table 1 Rare earth elements composition of sulfide ore and wall-rock in Jinqingding gold deposit

10⁻⁶

样品编号	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	5-1	5-2	8-1	8-2	9	10
	II 阶段矿石		I 阶段矿石		II 阶段矿石			蚀变围岩		新鲜围岩		
La	2.88	4.08	11.79	0.46	8.51	9.58	50.54	41.02	40.02	27.46	28.19	34.22
Ce	4.63	6.60	21.19	0.78	13.07	15.56	108.08	80.91	76.99	58.74	72.53	69.26
Pr	0.46	0.66	2.38	0.08	1.26	1.58	9.04	7.46	6.93	4.81	5.44	6.29
Nd	1.47	2.10	8.56	0.29	4.03	5.33	30.49	25.24	21.97	15.32	17.92	20.58
Sm	0.20	0.28	1.49	0.06	0.56	0.80	4.41	3.79	2.70	1.99	2.55	2.77
Eu	0.05	0.06	0.20	0.01	0.11	0.13	0.86	0.76	0.54	0.42	0.62	0.67
Gd	0.13	0.18	0.98	0.04	0.38	0.51	2.71	2.20	1.54	1.15	1.64	1.66
Tb	0.01	0.01	0.10	0.01	0.03	0.04	0.20	0.17	0.14	0.12	0.16	0.17
Dy	0.04	0.05	0.32	0.03	0.10	0.13	0.62	0.53	0.57	0.46	0.73	0.72
Ho	0.01	0.02	0.07	0.01	0.02	0.02	0.21	0.19	0.27	0.22	0.34	0.33
Er	0.01	0.01	0.05	/	0.01	0.01	0.09	0.09	0.10	0.09	0.13	0.13
Tm	/	/	0.01	/	/	/	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.05
Yb	0.02	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.24	0.22	0.28	0.24	0.37	0.36
Lu	/	/	0.01	/	/	/	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06
Y	0.13	0.19	0.89	0.13	0.24	0.32	2.22	1.91	2.68	2.15	3.67	3.64
ΣREE	9.92	14.07	47.18	1.79	28.10	33.72	207.57	162.67	152.13	111.09	130.74	137.29
LREE/HREE	43.71	46.34	28.81	16.75	50.60	44.78	49.05	45.71	49.91	46.13	36.47	38.42
La _N /Yb _N	131.54	160.74	208.20	34.53	928.30	511.85	149.52	131.18	101.89	83.54	54.87	67.78
δEu	1.01	0.84	0.49	0.78	0.76	0.62	0.76	0.80	0.82	0.85	0.92	0.96
δCe	0.99	0.99	0.98	0.97	0.98	0.98	1.24	1.13	1.13	1.25	1.44	1.16

流体包裹体岩相学及显微测温学研究显示,成矿流体为含 CO₂ 的 NaCl-H₂O 体系热液^[12],且包裹体群体成分分析也显示 Cl⁻ 占主体,仅含少量的 F⁻ (Cl⁻/F⁻ > 1)^[50]。

稀土元素 Eu 异常的产生与其价态 (Eu²⁺ 和 Eu³⁺) 相关。在相对还原环境下, Eu 离子主要以二价形式存在,电荷数的减少和离子半径的相对增大,使 Eu 在成矿流体演化过程中发生解耦,与稀土元素发生分离,进而产生 Eu 的正异常或负异常^[14,16]。I 阶段 δEu 值为 0.49~0.78, II 阶段 δEu 值为 0.62~0.84, Ce 异常不明显 (图 4-a), 即随着成矿作用的进行,成矿流体中 Eu 异常逐渐减弱。这说明金青顶金矿床成矿流体处于还原—弱还原环境,且在成矿过程中成矿流体的还原性逐渐减弱,可能与成矿过程中外来热液流体的加入相关。翟

建平等^[51] 对各成矿阶段石英进行了 H-O 同位素分析, δD-δ¹⁸O 图解显示, I 阶段成矿流体靠近岩浆水 (δD 值介于 -96.0‰~-71.0‰ 之间; δ¹⁸O_{H₂O} 值介于 3.5‰~6.0‰ 之间), 随着演化作用的进行, III 阶段 δD (-128.0‰~-105.0‰) 值和 δ¹⁸O (-7.7‰~-5.9‰) 值显著降低, 且靠近大气降水演化曲线。流体包裹体显微测温结果显示, I~III 阶段均一温度逐渐降低^[7], 且水的含量逐渐增加^[12]。He-Ar 同位素也印证了这一推测^[51-53], 即成矿作用早阶段为岩浆水来源, 随着成矿作用的进行伴随有部分大气降水的混入。

5.2 成矿物质来源

金青顶矿床绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究表明, 其成矿年龄为 129~107 Ma^[9-10], 说明金青顶矿床形成于晚白垩世晚期。其赋矿围岩昆崙山花岗岩

表 2 金青顶金矿床硫化物矿石与围岩微量元素组成

Table 2 Trace elements composition of sulfide ore and wall-rock in Jinqingding gold deposit

10⁻⁶

样品编号	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-	20JQD-
	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2	5-1	5-2	8-1	8-2	9	10
	II 阶段矿石		I 阶段矿石		II 阶段矿石			蚀变围岩		新鲜围岩		
Cs	0.04	0.05	0.04	0.05	0.02	0.02	0.41	0.44	0.03	0.06	0.20	0.28
Rb	7.34	11.29	5.74	7.04	1.73	4.46	28.16	28.19	8.15	12.94	24.16	45.09
Ba	337.13	109.64	11.41	13.16	41.02	291.35	92.92	90.29	45.57	95.74	1562.78	3310.39
Th	0.26	0.46	0.24	0.05	0.08	0.30	4.76	4.23	6.40	3.98	4.56	5.34
U	0.04	0.06	0.08	0.05	0.03	0.04	0.63	0.59	0.87	0.75	0.40	0.42
Nb	0.17	0.28	0.04	0.04	0.04	0.27	4.54	4.88	4.52	3.89	4.90	4.93
Ta	/	0.01	/	/	/	/	0.09	0.08	0.11	0.10	0.11	0.12
La	2.88	4.08	11.79	0.46	8.51	9.58	50.54	41.02	40.02	27.46	28.19	34.22
Ce	4.63	6.60	21.19	0.78	13.07	15.56	108.08	80.91	76.99	58.74	72.53	69.26
Sr	18.63	18.47	29.36	20.83	6.06	16.17	80.67	95.49	147.21	125.37	401.84	459.54
Nd	0.17	0.28	0.04	0.04	0.04	0.27	4.54	4.88	4.52	3.89	4.90	4.93
Zr	7.55	9.90	0.78	0.79	1.23	7.28	171.59	195.07	170.80	178.54	188.42	205.48
Hf	0.20	0.23	0.03	0.01	0.02	0.17	4.45	4.59	3.82	4.10	4.17	4.51
Sm	0.20	0.28	1.49	0.06	0.56	0.80	4.41	3.79	2.70	1.99	2.55	2.77
Eu	0.05	0.06	0.20	0.01	0.11	0.13	0.86	0.76	0.54	0.42	0.62	0.67
Ti	53.26	73.40	17.46	18.40	14.97	63.45	869.63	886.42	954.11	854.40	1337.97	1218.07
Gd	0.13	0.18	0.98	0.04	0.38	0.51	2.71	2.20	1.54	1.15	1.64	1.66
Tb	0.01	0.01	0.10	0.01	0.03	0.04	0.20	0.17	0.14	0.12	0.16	0.17
Y	0.13	0.19	0.89	0.13	0.24	0.32	2.22	1.91	2.68	2.15	3.67	3.64
Yb	0.02	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.24	0.22	0.28	0.24	0.37	0.36
Lu	/	/	0.01	/	/	/	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06
Y/Ho	25.3	25.3	19.1	27.1	22.5	22.0	24.7	22.3	26.6	24.6	28.2	28.6
Co	14.90	11.17	27.33	2.23	62.74	35.06	64.26	71.39	0.29	0.42	0.54	0.49
Ni	/	1.96	2.45	0.96	3.97	2.79	3.88	6.79	0.19	0.34	0.20	0.17
Hf/Sm	0.98	0.83	0.02	0.22	0.03	0.21	1.01	1.21	/	/	/	/
Th/La	0.09	0.11	0.02	0.11	0.01	0.03	0.09	0.10	/	/	/	/
Nb/La	0.06	0.07	/	0.10	/	0.03	0.09	0.12	/	/	/	/
Y/Ho	25.32	25.30	19.13	27.06	22.49	21.97	24.66	22.32	/	/	/	/
Co/Ni	/	5.71	11.18	2.31	15.81	12.58	16.56	10.51	/	/	/	/
Nb/Ta	56.04	36.78	12.27	34.30	30.76	59.81	52.06	57.98	/	/	/	/
Zr/Hf	38.53	42.12	25.94	65.61	73.71	42.07	38.59	42.48	/	/	/	/

U-Pb 年龄为 161~138 Ma^[34-35], 形成于中晚侏罗世, 说明赋矿围岩并非金青顶金矿床的成矿相关岩体。然而, 在 $\delta\text{Eu}-\delta\text{Ce}$ 和 $\Sigma\text{REE}-\text{LREE}/\text{HREE}$ 图解(图 4-b、c)中, 矿石与围岩落于相同的范围或具有相同的趋势, 暗示赋矿围岩虽与成矿作用无时间关系, 但可能为成矿作用提供了必要的成矿物质。此外, 矿石与赋矿围岩均显示明显的轻稀土元素富集的右倾型配分模式(图 3-a、b、e), 具有相似的 Eu 和 Ce 异常。说明金青顶矿床成矿物质可能部分继承了昆崙山花岗岩, 它们之间具有源区上的亲缘性。

Y 和 Ho 元素通常具有相同的离子半径和价态^[54], 使其在多种地质作用中不会彼此分离, 因此 Y/Ho 值常用来示踪源区^[16, 55]。金青顶矿床矿石 Y/Ho 值介于 19.0~28.0 之间, 与蚀变的围岩(Y/Ho = 24.6~26.6)重叠(表 2), 暗示成矿物质可能来源于蚀变花岗岩。矿石和蚀变围岩的 Y/Ho 值与新鲜二长花岗岩的 Y/Ho 值(28.2~28.6)相近, 但不叠覆, 说明晚白垩世岩浆热液活动造成围岩中 Y 的流失, 因而造成矿石与围岩中 Y/Ho 值的减小。此外, 硫同位素数据也显示, 除岩浆来源外^[12], 围岩也是成

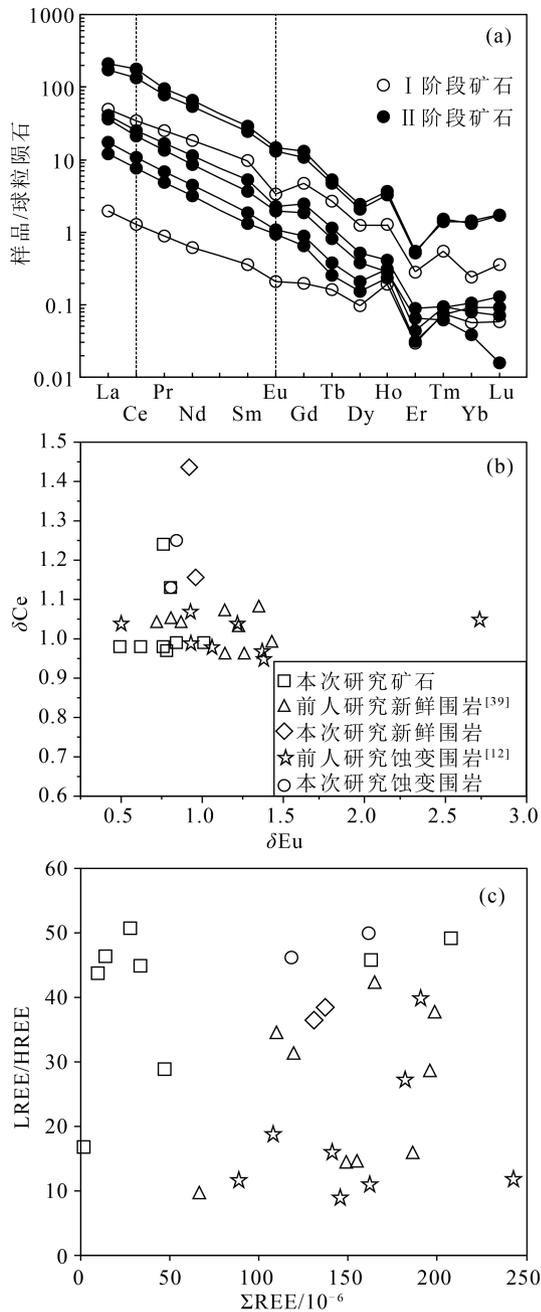


图4 矿石球粒陨石标准化稀土元素配分模式图解(a)、 δEu - δCe 图解(b)和 ΣREE -LREE/HREE图解(c)
Fig. 4 Chondrite-normalized rare earth element patterns for ore (a), δEu vs. δCe (b) and ΣREE vs. LREE/HREE (c)

矿物质的主要来源之一。由此可见,金青顶金矿床同胶东半岛其他石英脉型金矿床类似,即在张性的构造裂隙中,具有足够的空间,使成矿流体以“隧道流”的方式运移^[56-58],成矿热液流经围岩造成围岩蚀变,且在此过程中萃取了一定的成矿物质,蚀变

部位成矿潜力较大,是重要的找矿标志。

5.3 矿床成因

一般情况下,造山型金矿床形成于俯冲洋壳片撕裂的陆缘增生环境中,与区域变质作用时间相差不超过几十百万年^[59-60]。前已述及,胶东半岛金矿床形成于早白垩世,晚于区域变质作用近 2 Ga。但是胶东金矿床在成矿流体地球化学性质(中温-低盐度的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系热液)及与岩浆岩的空间关系上,与造山型金矿床吻合度较高^[61],但成矿年龄较区域变质时代的严重滞后,使胶东半岛金矿床成为全球范围内造山型金矿床的显著例外^[5]。目前胶东金矿床根据控矿断裂形式和规模,主要划分为石英脉型和蚀变岩型 2 种矿化类型,但是该分类方案并未较好地体现成因意义。此外,前人对流体包裹体及同位素的分析显示,二者在成矿流体和物质来源上差异并不显著^[56-58]。金青顶矿床是胶东半岛石英脉型金矿化的典型代表,其流体包裹体类型、温度、盐度、同位素组成等与胶西北地区的石英脉型/蚀变岩型金矿床高度相似^[2]。结合本次及前人的研究成果,笔者认为,金青顶金矿床成矿物质可能主要来源于岩浆,少部分来源于蚀变的围岩。成矿流体在演化过程中有大气降水的混入,并使流体还原性逐渐减弱。由此可见,胶东金矿床可能与岩浆活动相关。为此,笔者认为胶东东部金青顶矿床为与岩浆活动相关,且受断裂控制的热液脉型金矿床。

6 结论

(1) 根据矿脉之间的穿切关系和矿物共生组合,可将胶东东部金青顶矿床成矿作用划分为 3 个阶段: I 烟灰色石英-黄铁矿阶段、II 乳白色石英-黄铁矿±黄铜矿阶段、III 无矿石英-方解石阶段。

(2) 金青顶矿床成矿流体为富 Cl 体系热液,在成矿流体演化过程中还原性逐渐减弱,暗示有大气降水的混入。

(3) 金青顶矿床中热液蚀变的花岗岩可为金矿化提供必要的成矿物质,其为与岩浆活动相关且受断裂控制的热液脉型金矿床。

致谢:感谢山东省第一地质矿产勘查院江海洋博士和乳山市自然资源局潘万伟工程师在野外取样过程中给予的帮助,审稿专家对本文提出了建设性意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Yang L Q, Deng J, Wang Z L, et al. Thermochronologic constraints on evolution of the Linglong Metamorphic Core Complex and implications for gold mineralization: a case study from the Xiadian gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 165-178.
- [2] Deng J, Yang L Q, Groves D I, et al. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China[J]. *Earth Science Reviews*, 2020, 208: 103274.
- [3] 杨立强, 邓军, 王中亮, 等. 胶东中生代金成矿系统[J]. *岩石学报*, 2014, 30: 2447-2467.
- [4] 宋明春, 林少一, 杨立强, 等. 胶东金矿成矿模式[J]. *矿床地质*, 2020, 39(2): 215-236.
- [5] Goldfarb R J, Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? [J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5: 139-153.
- [6] Groves D I, Santosh M. The giant Jiaodong gold province: The key to a unified model for orogenic gold deposits? [J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7: 409-417.
- [7] 胡芳芳, 范宏瑞, 沈昆, 等. 胶东乳山脉状金矿床成矿流体性质与演化[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1329-1338.
- [8] 应汉龙. 胶东金青顶和邓格庄金矿床的同位素组成及其地质意义[J]. *贵金属地质*, 1994, 3: 201-207.
- [9] 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 胶东乳山金矿蚀变岩中绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其对金成矿事件的制约[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, 2: 109-114.
- [10] Li J W, Vasconcelos P M, Zhou M F, et al. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, eastern Jiaodong gold province, northeastern China: implications for regional mineralization and geodynamic setting[J]. *Economic Geology*, 2006, 101: 1023-1038.
- [11] Sai S X, Deng J, Qiu K F, et al. Textures of auriferous quartz-sulfide veins and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Rushan gold deposit: Implications for processes of ore-fluid infiltration in the eastern Jiaodong gold province, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 117: 103254.
- [12] 李旭芬. 胶东牟平-乳山金矿带金青顶金矿床成因与找矿方向研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2011.
- [13] 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 等. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪[J]. *岩石学报*, 2003, 4: 792-798.
- [14] 马玉波, 杜晓慧, 张增杰, 等. 青城子层状/脉状铅锌矿床稀土元素地球化学特征及地质意义[J]. *矿床地质*, 2013, 32(6): 1236-1248.
- [15] 郭林楠, 黄春梅, 张良, 等. 胶东罗山金矿床成矿流体来源: 蚀变岩型和石英脉型矿石载金黄铁矿稀土与微量元素特征约束[J]. *现代地质*, 2019, 33(1): 121-136.
- [16] Li J, Cai W Y, Li B, et al. Paleoproterozoic SEDEX-type stratiform mineralization overprinted by Mesozoic vein-type mineralization in the Qingchengzi Pb-Zn deposit, Northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 184: 104009.
- [17] Li J, Wang K Y, Cai W Y, et al. Triassic gold-silver metallogenesis in Qingchengzi orefield, North China Craton: Perspective from fluid inclusions, REE and H-O-S-Pb isotope systematics [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 121: 103567.
- [18] 翟明国. 华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系[J]. *岩石学报*, 2013, 29: 1759-1773.
- [19] Goldfarb R J, Qiu K F, Deng J, et al. Orogenic Gold Deposits of China [J]. *Society of Economic Geologists Special Publications*, 2019, 22: 263-324.
- [20] Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning [J]. *Ore Geology Reviews*, 2003, 23: 125-152.
- [21] Yang J H, Wu F Y. Triassic magmatism and its relation to decratonization in the eastern North China Craton [J]. *Science in China*, 2009, 52: 1319-1330.
- [22] Li J, Cai W Y, Wang K Y, et al. Initial decratonization of the eastern North China Craton: New constraints from geochronology, geochemistry, and Hf isotopic compositions of Mesozoic igneous rocks in the Qingchengzi district [J]. *Geological Journal*, 2020, 55: 3796-3820.
- [23] Yang K F, Fan H R, Santosh M, et al. 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*, 2012, 146: 112-127.
- [24] 王世进, 万渝生, 宋志勇, 等. 鲁东文登地区文登型(超单元)花岗岩体的 SHRIMP 锆石年代学[J]. *山东国土资源*, 2012, 28(2): 1-5, 10.
- [25] Ma L, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Multiple sources for the origin of Late Jurassic Linglong adakitic granite in the Shandong Peninsula, eastern China: zircon U-Pb geochronological geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence [J]. *Lithos*, 2013, 162: 175-194.
- [26] 张岳桥, 李金良, 张田, 等. 胶莱盆地及其邻区白垩纪-古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义[J]. *地质学报*, 2008, 9: 1229-1257.
- [27] 朱日祥, 孙卫东. 大地幔楔与克拉通破坏型金矿[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51, doi: 10.1360/SSTe-2020-0305.
- [28] Hou M L, Jiang Y H, Jiang S Y, et al. Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, East China: implications for crustal thickening to delamination [J]. *Geological Magazine*, 2007, 144: 619-631.
- [29] Li X H, Fan H R, Zhang Y W, et al. Rapid exhumation of the northern Jiaobei Terrane, North China Craton in the Early Cretaceous: Insights from Al-in-hornblende barometry and U-Pb geochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 160: 365-379.
- [30] 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: 5703-5724.
- [31] 王斌, 宋明春, 霍光, 等. 胶东晚中生代花岗岩的源区性质与构造环境演化及其对金成矿的启示[J]. *岩石矿物学杂志*, 2021, 40(2): 288-320.

- [32] 陈炳翰. 牟乳金矿带成矿作用地球化学[D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文, 2017.
- [33] Zhang Y W, Hu F F, Fan H R, et al. Fluid evolution and gold precipitation in the Muping gold deposit (Jiaodong, China): insights from in-situ trace elements and sulfur isotope of sulfides[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 218: 106617.
- [34] 胡芳芳, 范宏瑞, 杨进辉, 等. 胶东乳山含金石英脉型金矿的成矿年龄: 热液锆石 SHRIMP 法 U-Pb 测定[J]. *科学通报*, 2004, (12): 1191-1198.
- [35] 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石 U-Pb 年代学[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1281-1301.
- [36] 赛盛勋, 邱昆峰. 胶东乳山金矿床成矿过程: 周期性压力波动诱发的流体不混溶[J]. *岩石学报*, 2020, 36(5): 1547-1566.
- [37] 尹升, 张海芳, 王芳, 等. 山东金青顶金矿床 II 号矿体成矿特征[J]. *山东国土资源*, 2015, 31(11): 9-14.
- [38] Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, et al. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh - pressure metamorphism of lower crustal cumulates [J]. *Chemical Geology*, 2008, 247(1/2): 133-153.
- [39] 凌洪飞, 胡受奚, 孙景贵, 等. 胶东金青顶和大尹格庄金矿床花岗岩围岩的蚀变地球化学研究[J]. *矿床地质*, 2002, (2): 187-199.
- [40] 陈海燕, 李胜荣, 张秀宝, 等. 胶东金青顶金矿床围岩蚀变特征与金矿化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2012, 31(1): 5-13.
- [41] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteoritestudies[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [42] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [43] Shannon R D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides [J]. *Acta Cryst*, 1976, 32: 751-767.
- [44] Jiang S Y, Yu J M, Lu J J. Trace and rare-earth element geochemistry in tourmaline and cassiterite from the Yunlong tin deposit, Yunnan, China: implication for migmatitic-hydrothermal fluid evolution and ore genesis[J]. *Chemical Geology*, 2004, 209: 193-213.
- [45] 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, (1): 1-4.
- [46] Mills R, Elderfield H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mount, 26° N mid-Atlantic Ridge[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1995, 59(17): 3511-3524.
- [47] Anenburg M, Mavrogenes J A, Frigo C, et al. Rare earth element mobility in and around carbonatites controlled by sodium, potassium, and silica[J]. *Science Advances*, 2020, 6: eabb6570.
- [48] Ayers J C, Watson E B. Apatite/fluid partitioning of rare - earth elements and strontium: Experimental results at 1.0 GPa and 1000°C and application to models of fluid - rock interaction [J]. *Chemical Geology*, 1993, 110: 299-314.
- [49] Keppler H. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction zone fluids[J]. *Nature*, 1996, 380: 237-240.
- [50] 刘善宝. 山东乳山金青顶金矿田成矿规律及其成矿远景研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2005.
- [51] 翟建平, 胡凯, 陆建军. 乳山金矿床的成因机制—成矿流体和 H, O, Sr 同位素证据[J]. *科学通报*, 1996, (12): 1119-1121.
- [52] 高太忠, 赵伦山, 杨敏之. 山东牟乳金矿带成矿演化机理探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 2001, (2): 155-160.
- [53] 张运强, 李胜荣, 陈海燕, 等. 胶东金青顶金矿床成矿流体来源的黄铁矿微量元素及 He-Ar 同位素证据[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 195-204.
- [54] Bau M, Dulski P. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE behavior during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999, 155: 77-99.
- [55] 王文元, 高建国, 依阳霞, 等. 云南禄劝鲁铅锌矿床稀土元素和微量元素地球化学[J]. *中国稀土学报*, 2017, 35(3): 418-430.
- [56] 郭林楠. 胶东型金矿床成矿机理[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文, 2016.
- [57] Guo L N, Goldfarb R J, Wang Z L, et al. A comparison of Jiaojia- and Linglong-type gold deposit ore-forming fluids: Do they differ? [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 511-533.
- [58] Guo L N, Deng J, Yang L Q, et al. Gold deposition and resource potential of the Linglong gold deposit, Jiaodong Peninsula: Geochemical comparison of ore fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 120: 103434.
- [59] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13: 7-27.
- [60] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a synthesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2001, 18: 1-75.
- [61] 曾国平, 向文帅, 吴发富, 等. 东北非与中国胶东造山型金矿对比及对非洲找矿勘查的启示[J]. *地质通报*, 2022, 41(1): 48-59.