

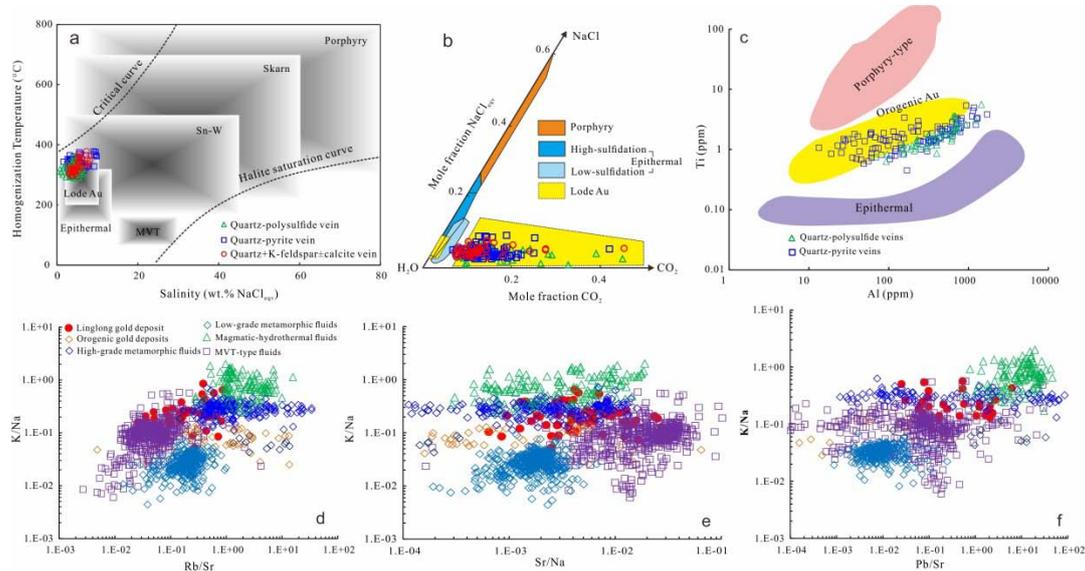
新生下地壳脱水形成胶东金矿： 单个流体包裹体和石英、黄铁矿微区原位分析证据

蓝廷广^{*}，王洪，陈应华，许杨，赵浪叶

(中国科学院 地球化学研究所，矿床地球化学国家重点实验室，贵州 贵阳 550081)

作为我国最大的金矿集区，胶东金矿长期以来受到地质学家关注，然而到目前为止，大规模金的来源及其搬运-沉淀机制仍然存在较大争议。最新的观点认为，成矿流体可能来自俯冲洋壳的脱水 (Goldfarb and Santosh, 2014)，或者来自克拉通破坏过程中的地幔熔体出溶/地幔去气 (Zhu et al., 2015)。然而，胶东金矿的成矿流体是否具有上述流体性质？金能否实现长距离的搬运（穿过几百公里厚的地幔楔或者整个地壳）？为回答上述问题，对成矿流体性质及金的搬运-沉淀过程开展精细研究必不可少。本项研究综合使用 SEM、EPMA、FIB-TEM 特别是 LA-ICPMS 等微区原位分析方法，对胶东金矿最具代表性的金矿—玲珑金矿开展单个流体包裹体、石英及黄铁矿微区原位分析，以期揭示成矿流体来源及金搬运-沉淀机制。

显微测温显示，玲珑金矿成矿期流体包裹体均一温度集中在 300~340 °C、盐度在 2~6 wt.%、CO₂ 含量在 10~20 mol% 之间，与胶东绝大部分金矿一致，也与造山型金矿相似 (图 1a 和 b)。单个流体包裹体 LA-ICP-MS 分析显示，其元素含量和比值也不同于岩浆热液和卤水，而与造山型金矿或高级变质流体相似 (图 1d-f)。石英微量元素也不同于斑岩型和浅成低温热液型金矿，同样与造山型金矿一致 (图 1c)。结合围岩蚀变以及矿物共生组合与造山型金矿的相似性，上述结果表明，玲珑金矿成矿流体确实与造山型金矿一致，其可能具有相似的变质流体来源。



a 底图引自 Wilkinson (2001), b 引自 Ridley and Diamond (2000), c 引自 Rusk (2012)

图 1 玲珑金矿单个流体包裹体及石英 LA-ICP-MS 微量元素特征

显微观察及 EPMA 分析表明，金主要以微米尺度的可见金包裹在黄铁矿内或赋存在黄铁矿裂隙中，主要为银金矿，金成色较低，且从早期石英-黄铁矿阶段 (552-906, 平均 690) 到晚期石英-多金属硫化物阶段 (329-863, 平均 523) 金成色具有降低的趋势。LA-ICP-MS 分析显示，黄铁矿中具有很低的 Au 含量 (通常小于 0.2ppm)，表明晶格金不是金的主要赋存方式，这与显微镜下金主要以微米尺度的可见金存在的现象

基金项目：国家重点研发计划 (专题编号: 2016YFC0600105-06)、国家自然科学基金项目 (批准号: 41873048) 及西部青年学者 A 类

作者简介：蓝廷广，男，1983 年生，研究员，主要从事岩石学、矿床学及微区原位分析技术研究。

^{*}通讯作者，E-mail: lantingguang@126.com

一致。黄铁矿中 As 含量同样较低, 但 As 与 Au 具有很好的相关性, 表明 Au 进入黄铁矿可能与 As 有关, 但其低含量特征明显不同于卡林型金矿中的富 As 和 Au 黄铁矿。黄铁矿中 Ag、Cu、Pb、Zn 等含量具有从早期到晚期阶段含量升高的趋势。综合 Au 的赋存状态及寄主矿物黄铁矿微量元素变化特征, 认为 Au 主要以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ (与黄铁矿密切共生) 方式迁移, 流体沸腾可能是导致 Au 沉淀的重要控制因素 (富气相、富液相和纯 CO_2 包裹体共存, 指示流体沸腾及 CO_2 逃逸, 流体沸腾可导致 Au 快速结核沉淀而形成可见金)。从早到晚期, 多金属硫化物的增加以及金成色的降低可能也与 CO_2 逃逸导致 pH 的升高有关。

根据上述结果, 结合华北克拉通东部中生代以来的岩石圈及构造演化过程, 我们提出了不同于前人的、但类似于高级变质作用形成造山型金矿的胶东金矿成因模型, 其主要过程为: (1) 华北与扬子克拉通中生代的陆-陆碰撞造成胶东地区岩石圈增厚和地壳拆沉以及随后的大规模基性岩浆底侵, 形成了新生下地壳 (Zheng et al., 2012); (2) 上述新生下地壳相对富水、富金, 主要归因于中生代以来古太平洋板块的俯冲交代导致华北岩石圈地幔富水 (Xia et al., 2017)、富金 (Saunders et al., 2018); (3) 在~120-125 Ma 时古太平洋板块俯冲方向改变, 引起郯庐断裂大规模平移及软流圈强烈上涌 (Sun et al., 2013), 加热下地壳造成下地壳发生角闪岩相-麻粒岩相的变质脱水, 形成富含 Au 和 CO_2 的成矿流体; (4) 上述流体沿郯庐断裂及其次生构造上升, 在胶东形成大规模断裂控制的金矿。基性岩浆底侵形成富含金及硫化物的下地壳堆积体已有较多证据, 已被用来解释碰撞及陆内环境斑岩型铜金矿的形成 (e.g., Hou et al., 2017)。本模型的主要问题在于, 如何在下地壳产生大规模流体而不引起部分熔融。越来越多的研究表明, 下地壳麻粒岩相变质作用可以产生大量富 CO_2 和高盐度流体 (Manning, 2018), CO_2 和卤族元素的存在均可显著提高部分熔融温度 (Aranovich et al., 2013), 上述流体在合适的条件下 (如地震引起的薄弱带、断裂带) 可以实现地壳尺度的迁移 (Jamtveit et al., 2019)。此外, 在高温条件下 CO_2 的存在可引起下地壳氧化 (Huizenga and Touret, 2012), 高氧逸度有利于含金硫化物的分解而形成 Au-S 络合物而实现 Au 的萃取和迁移。

参 考 文 献:

- Aranovich LY, Newton RC, Manning CE. 2013. Brine-assisted anatexis: Experimental melting in the system haplogranite-H₂O-NaCl-KCl at deep-crustal conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 374: 111-120.
- Goldfarb RJ, Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? *Geoscience Frontiers*, 5: 139-153.
- Hou Z, Zhou Y, Wang R, et al. 2017. Recycling of metal-fertilized lower continental crust: Origin of non-arc Au-rich porphyry deposits at cratonic edges. *Geology*, 45: 563-566.
- Huizenga JM, Touret JLR. 2012. Granulites, CO_2 and graphite. *Gondwana Research*, 22: 799-809.
- Jamtveit B, Petley-Ragan A, Incel S, et al. 2019. The Effects of Earthquakes and Fluids on the Metamorphism of the Lower Continental Crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124: 7725-7755.
- Manning CE. 2018. Fluids of the Lower Crust: Deep Is Different. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 46: 67-97.
- Ridley JR, Diamond LW. 2000. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Reviews in Economic Geology*, 13: 141-162.
- Rusk B. 2012. Cathodoluminescent Textures and Trace Elements in Hydrothermal Quartz. In: Götze, J., Möckel, R. (Eds.), *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 307-329.
- Saunders JE, Pearson NJ, O'Reilly SY, et al. 2018. Gold in the mantle: A global assessment of abundance and redistribution processes. *Lithos*, 322: 376-391.
- Sun W, Li S, Yang X, Ling M, et al. 2013. Large-scale gold mineralization in eastern China induced by an Early Cretaceous clockwise change in Pacific plate motions. *International Geology Review*, 55: 311-321.
- Wilkinson JJ. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 55: 229-272.
- Xia QK, Liu J, Kovács I, et al. 2017. Water in the upper mantle and deep crust of eastern China: concentration, distribution and implications. *National Science Review*, 6: 125-144.
- Zheng JP, Griffin WL, Ma Q, et al. 2012. Accretion and reworking beneath the North China Craton. *Lithos*, 149: 61-78.
- Zhu R, Fan H, Li J, et al. 2015. Decratonic gold deposits. *Science China: Earth Sciences*, 58: 1523-1537.