

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.844>



# 战略性关键金属是如何发生超常富集成矿的?

蒋少涌<sup>1,2</sup>, 王 微<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074  
2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

关键金属是国际上最近提出的资源概念, 指的是现今社会必需、但安全供应存在高风险的一类矿产的总称, 主要包括稀有金属(如 Li、Be、Rb、Cs、Nb、Ta、Zr、Hf、W)、稀土金属(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Sc、Y)、分散金属(Ga、Ge、Se、Cd、In、Te、Re、Tl)和部分稀贵金属(PGE、Cr、Co 等)(侯增谦等, 2020)。这些金属对新材料、新能源、信息技术、航空航天、尖端武器等新兴产业十分关键, 是这些领域不可缺少的重要支撑原材料, 对国民经济、国家安全和科技发展具有十分重要的战略意义。

相对于地壳丰度较高、正常富集几倍到几十倍即可成矿的传统大宗金属矿产(如铁、铝、铜)来说, 大多数关键金属元素以“稀”为主要特征, 地壳丰度很低(一般为 ppm 级以下), 需要百倍甚至万倍的“超常富集”才能形成可供开采的矿床(涂光炽等, 2004), 成矿条件十分苛刻, 这也造成关键金属矿产资源在全球分布的极度不均性。那么, 低丰度关键金属元素超常富集成矿是如何发生的? 关键金属元素成矿的地质背景、源、运、聚演化, 重大地质事件对关键金属富集成矿的控制作用等是矿床学研究的前沿领域和难点问题之一。

## 1 核心思想

关键金属矿产的共性特征是“稀、细、伴”, 其地壳丰度低, 多与主成矿元素共伴生成矿, 常以吸附、类质同象和极细小矿物形式存在于矿床中, 这些特征客观上制约了认识关键金属矿床超常富集成矿的源—运—聚过程。关键金属源在哪里? 关键金属如何运移? 如何富集成矿? 核心问题包括 3 个关键科学问题: (1) 关键金属元素地球化学性质与行为; (2) 重大地质事件和层圈物质循环过程与关键金属成矿关系; (3) 关键金属元素超常富集成矿条件。

关键金属矿床类型复杂, 不同学者有多种不同划分方案。翟明国等(2019)认为以下 5 种类型在我国最为重要: (1) 花岗岩—伟晶岩相关的 W、Sn、Nb、Ta、Li、Rb、Cs、Be 矿床; (2) 碱性岩—碳酸岩相关的 REE、Nb、U 矿床; (3) 镁铁质—超镁铁质岩相关的 Ni、Co、Cr、Pt 族元素矿床; (4) 热液贱金属硫化物矿床相关的 Re、Ge、In、Cd、Tl、Te、Se、Sc、Ga; (5) 风化—沉积作用相关的盐湖型(卤水型) Li、Rb、Cs 矿床, 表生沉积型(包括铝土矿和煤中的伴生组分) Mn、V、Ni、Mo、Co、Li、Ga、Tl、Ge、V、Sc、Nb、Ta 等矿床和与表生风化作用有关的离子吸附型 REE 矿床。

金属元素成矿的核心是元素在成矿过程中基于其“本质地球化学性质与行为”的活化—迁移—

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.921623234); 国家重点研发计划项目(No.2022YFC2903504)。

作者简介: 蒋少涌(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床地球化学和同位素地球化学方面的研究。E-mail: shyjiang@cug.edu.cn

引用格式: 蒋少涌, 王微, 2022. 战略性关键金属是如何发生超常富集成矿的? 地球科学, 47(10): 3869—3871.

Citation: Jiang Shaoyong, Wang Wei, 2022. What are the Super-Enrichment Mechanisms for Strategic Critical Metal Deposits? *Earth Science*, 47(10): 3869—3871.

富集过程.目前,对关键金属元素的地球化学性质及行为研究还较薄弱,许多成矿机理方面的问题仍存在较大争议,如化学性质相似的铈和钽在大陆地壳中为何产生如此大的分异(Rudnick *et al.*, 2000),惰性元素铈、钽、锆、钪是怎样在极端条件下活化迁移和成矿(Jiang *et al.*, 2005),壳幔中丰度仅为几个 ppb 的 Te 为何能形成上百万倍的超常富集,以及铂族元素如何高度富集成矿等,这些问题亟需加强相关研究.

物质基础是成矿的重要前提.关键金属元素在地球岩石中的丰度均十分低,它们在地幔和地壳中的含量差异也十分大,其成矿作用与重大地质事件和层圈循环过程密切相关(蒋少涌等, 2019).大量研究表明,起源于地幔的碱性岩—碳酸岩中富集稀土元素和铈(Hou *et al.*, 2015),而地壳中的高分异花岗岩和 LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩中富集锂、铍、铷、铯、铈、钽等元素(吴福元等, 2017),壳幔混合来源的碱性花岗岩和 NYF(Nb-Y-F)型伟晶岩则富含铈、钽、锆、钪、钇等元素(McCauley *et al.*, 2014; Dostal and Shellnutt, 2015; London, 2018; Siegel *et al.*, 2018).这些元素的迁移、富集与成矿,受地壳、地幔或壳幔相互作用过程控制.因此,在关键金属的层圈循环与岩浆作用过程中,源区中成矿元素的含量高低、成矿元素能否高效地从源区岩石中转入熔体、受岩浆分异结晶和熔—流过程控制的成矿元素行为,这些因素对成矿与否起决定作用.但关键金属元素如何通过层圈循环与岩浆作用过程富集成矿的机制目前尚不清楚.重大地质事件驱动成矿的机制、壳幔物质和能量循环与关键元素富集机理、表生环境圈层作用与关键元素富集机理,也是亟需进一步解决的问题.

关键金属元素超常富集的条件苛刻,与各类地质作用过程和成岩成矿体系的物理化学条件息息相关.查明关键金属矿床特征、分布规律及控制关键金属矿床形成的地质—物理—化学过程,是理解关键金属元素成矿规律与形成机制的关键.成矿作用从宏观上与板块俯冲、大陆聚合和裂解、岩浆源区特征、岩浆结晶分异和表生作用等过程有关,微观上又受挥发份、温度、压力、氧逸度、酸碱度、古气候、古环境等物理的和化学的因素控制.但是,究竟是何种因素和条件起主导作用,仍存在许多争议,

且不同的关键金属很可能各有不同.对一个具体的关键金属元素而言,其迁移—超常富集的苛刻条件目前远未得到清晰揭示.此外,一个重要事实是,大多数关键金属元素常与主成矿元素相伴产出,具有共同迁移、沉淀的特征.因此,需精确确定岩浆—流体出溶过程和水—岩相互作用过程中元素分配机制、关键金属元素与载体矿物的生成关系、控制因素和超常富集机制等.

## 2 科学价值

中国的关键矿产种类丰富,成矿过程中关键金属元素的地球化学行为和成矿机制复杂,矿化类型多样,空间分布成群成带,资源潜力大.对战略性关键金属发生超常富集成矿机制的研究,查明矿床的分布、富集成因等,有助于开展关键金属矿床的预测、勘探和开发工作,结合关键金属元素的赋存状态,努力攻克关键金属强化分离理论瓶颈,实现分离理论突破.摸清关键矿产资源家底,发展高效清洁的采—选—冶技术,可全面提升战略布局和管理水平.

## 3 发展前景

新技术新方法运用于对关键金属成矿机制研究,如锂—硼等非传统稳定同位素,矿石矿物和副矿物的微区原位成矿年代学,微区原位元素和同位素分析技术、单个流体包裹体分析技术,实验岩石学研究 and 热力学、动力学模拟等有望在关键金属成矿作用研究方面发挥重要的作用.面对国内强劲需求和严峻的国际资源竞争态势,迫切需要加大科技创新力度,持续开展关键矿产成矿基础理论和综合利用技术研究.

## 参考文献

- Dostal, J., Shellnutt, J.G., 2015. Origin of Peralkaline Granites of the Jurassic Bokan Mountain Complex (Southeastern Alaska) Hosting Rare Metal Mineralization. *International Geology Review*, 58(1): 1–13. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1052995>
- Hou, Z. Q., Liu, Y., Tian, S. H., et al., 2015. Formation of Carbonatite-Related Giant Rare-Earth-Element Deposits by the Recycling of Marine Sediments. *Scientific Re-*

- ports, 5: 10231. <https://doi.org/10.1038/srep10231>
- Jiang, S.Y., Wang, R.C., Xu, X.S., et al., 2005. Mobility of High Field Strength Elements (HFSE) in Magmatic-, Metamorphic-, and Submarine-Hydrothermal Systems. *Physics and Chemistry Earth, Parts A/B/C*, 30(17/18): 1020—1029. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.11.004>
- London, D., 2018. Ore-Forming Processes within Granitic Pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 101: 349—383. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.020>
- McCauley, A., Bradley, D.C., 2014. The Global Age Distribution of Granitic Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, 52(2): 183—190. <https://doi.org/10.3749/canmin.52.2.183>
- Rudnick, R.L., Barth, M., et al., 2000. Rutile-Bearing Refractory Eclogites: Missing Link between Continents and Depleted Mantle. *Science*, 287(5451): 278—281. <https://doi.org/10.1126/science.287.5451.278>
- Siegel, K., Vasyukova, O. V., Williams-Jones, A. E., 2018. Magmatic Evolution and Controls on Rare Metal-Enrichment of the Strange Lake A-Type Peralkaline Granitic Pluton, Québec-Labrador. *Lithos*, 308/309: 34—52.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等, 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106—111.
- 侯增谦, 陈骏, 翟明国, 2020. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿. 科学通报, 65(33): 3651—3652.
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 等, 2019. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向. 中国科学基金, 33(2): 112—118.
- 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 2004. 分散元素地球化学及成矿机制. 北京: 地质出版社.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. 中国科学: 地球科学, 47(7): 745—765.