

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.853>



什么样的碳酸岩才能形成大型—超大型稀土矿床?

陈 唯^{1,2}, 蒋少涌^{1,2}

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

稀土在清洁能源、航空航天、国防军工等低碳高科技领域具有日益广泛的用途, 是各国争夺未来高科技领域战略制高点的关键性原材料. 碳酸岩型稀土矿床是最主要的稀土矿床类型, 在已探明稀土资源中占比超 51% (Weng *et al.*, 2015; 范宏瑞等, 2020). 中国是世界最大的稀土资源国和稀土生产国, 约 98% 的中国稀土资源来自碳酸岩型稀土矿床 (谢玉玲等, 2020). 世界上已发现碳酸岩杂岩体 609 处 (Humphreys-Williams and Zahirovic, 2020), 而形成具有工业价值的稀土矿床却很少. 来自地幔的碳酸岩岩浆—热液演化过程中稀土富集成矿是如何发生的? 稀土成矿的关键地质过程, 初始岩浆性质、岩浆演化、热液改造事件对稀土富集成矿的控制作用, 是矿床学研究的前沿领域和难点问题之一.

1 核心思想

碳酸岩浆的起源可以追溯至富 CO₂ 地幔, 该地幔源区通常也富集 Na、K、P、S 和 F 等组分. 碳酸岩浆可直接形成于碳酸盐化地幔的部分熔融, 或碱性硅酸盐熔体的液态不混溶或分离结晶, 这些过程都会导致碳酸岩浆中轻稀土元素的富集. 地幔极低程度部分熔融形成的碳酸岩浆, 相对于同一源区较高程度部分熔融形成的硅酸岩浆更富集轻稀土元素 (Foley *et al.*, 2009). 碳酸盐和硅酸盐熔体在不混溶

过程中也会导致碳酸岩浆轻稀土元素的富集, 尤其当不混溶硅酸盐熔体高度聚合、贫钙且含水时, 轻稀土元素在碳酸岩浆中富集程度最高 (Nabyl *et al.*, 2020). 钙质和钙镁质碳酸岩杂岩体最为常见, 而熔体包裹体和高温高压实验岩石学研究均表明初始碳酸岩浆为碱土金属富集或中等富集的碱性岩浆 (Chen *et al.*, 2013; Berndt and Klemme, 2022).

碳酸岩浆中早期矿物 (包括磁铁矿、橄榄石、斜辉石和碳酸盐) 的分离结晶对于残余熔体中的稀土富集至关重要. 由于稀土元素在这些矿物中的不相容性, 导致稀土元素在残余岩浆中强烈富集. 氟磷灰石也是碳酸岩浆整个结晶过程中常见的矿物, 稀土元素与 Na⁺ 或 Si⁴⁺ 的耦合取代机制可在氟磷灰石中相容, 但在高温碳酸岩浆中仍较难形成富稀土氟磷灰石 (Anenburg *et al.*, 2020). 随着温度降低 (650~400 °C 左右), 碳酸岩浆演化为更富镁和铁的成分, 钠、钾、水、硫酸盐、氯和氟等组分残留在熔体中, 形成碱性“盐熔体” (Anenburg *et al.*, 2021; Walter *et al.*, 2021). 轻稀土元素在盐熔体中足够富集, 能够结晶独居石和碱稀土碳酸盐等稀土矿物. 至此阶段, 碳酸岩可形成具有经济价值的稀土矿床.

碳酸岩浆演化的晚期, 盐熔体演化成更为传统的热液流体, 盐度随着水含量的增加而降低. 在热液阶段, 高可溶性碱稀土碳酸盐一般被不易溶的稀土 (氟) 碳酸盐和独居石取代 (Giebel *et al.*, 2017).

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 921623234, 41973016); 国家重点研发计划项目 (No. 2019YFA0708400).

作者简介: 陈唯 (1987—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事碳酸岩成岩成矿地球化学方面的研究. E-mail: wchen@cug.edu.cn

引用格式: 陈唯, 蒋少涌, 2022. 什么样的碳酸岩才能形成大型—超大型稀土矿床? 地球科学, 47(10): 3891—3893.

Citation: Chen Wei, Jiang Shaoyong, 2022. How did Carbonatite-Related Rare Earth Element Deposits Form? *Earth Science*, 47(10): 3891—3893.

同时,稀土元素在局部范围内可被热液进一步活化迁移再沉淀,导致稀土元素在矿物间的再分配.例如,热液稀土矿物的结晶可能与早期磷灰石和方解石中稀土元素的溶解、活化再迁移相关(Ying *et al.*, 2020).与热液过程相似,风化过程也可以导致原生稀土相的分解并迁移沉淀为新的稀土矿物相(Andersen *et al.*, 2017).

碳酸岩中稀土富集的总量取决于最初短期岩浆侵入事件,在后期变质或热液过程中不会获得额外的稀土,后期热液改造过程只可能会改变矿物组合或地球化学特征并导致局部稀土重新分布(Song *et al.*, 2018).由于富稀土的碳酸岩浆可以通过多种途径形成,因此碳酸岩经历的复杂岩浆—热液—风化过程是形成大多数具有经济价值的稀土矿床的主要控制因素.

2 科学价值

碳酸岩是地幔深部碳迁移至地表的主要形式,是研究地幔岩浆过程、深部碳循环和关键金属矿产资源富集规律的天然实验室.因此碳酸岩尽管在地表出露较少,一直是地球科学家和经济地质学家研究的热点.碳酸岩型矿床是稀土和铌等战略性关键金属的主要来源,查明碳酸岩矿床的分布规律和成矿机制,将更有针对性地指导找矿勘查.同时,对碳酸岩岩石成因的研究,将极大地促进对地幔过程和深部碳循环的理论认识.

3 发展前景

碳酸岩型矿床已经成为关键原材料轻稀土的主要来源,该类矿床的形成经历了复杂的岩浆和热液演化历史.碳酸岩型稀土矿床不仅超常富集了巨量的轻稀土资源,也有可观的中重稀土资源,因而对相比轻稀土更为紧缺的中重稀土,找矿潜力未来可期,比如非洲马拉维 Songwe Hill 碳酸岩稀土矿和我国小秦岭地区三叠纪碳酸岩脉中发现重稀土富集.加强碳酸岩稀土分异与中重稀土富集机理研究,为中重稀土矿产找矿勘查提供理论依据,服务国家重大需求.破译该类稀土矿床岩浆—热液演化

历史的关键手段是原位微区分析方法,加强原位微区分析技术的开拓与应用,从而更有效地解开碳酸岩成岩成矿未解之谜.

参考文献

- Andersen, A.K., Clark, J.G., Larson, P.B., et al., 2017. REE Fractionation, Mineral Speciation, and Supergene Enrichment of the Bear Lodge Carbonatites, Wyoming, USA. *Ore Geology Reviews*, 89: 780—807.
- Anenburg, M., Broom-Fendley, S., Chen, W., 2021. Formation of Rare Earth Deposits in Carbonatites. *Elements*, 17(5): 327—332. <https://doi.org/10.2138/gselements.17.5.327>
- Anenburg, M., Mavrogenes, J.A., Frigo, C., et al., 2020. Rare Earth Element Mobility in and around Carbonatites Controlled by Sodium, Potassium, and Silica. *Science Advances*, 6(41): eabb6570. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb6570>
- Berndt, J., Klemme, S., 2022. Origin of Carbonatites—Liquid Immiscibility Caught in the Act. *Nature Communications*, 13: 2892. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30500-7>
- Chen, W., Kamenetsky, V.S., Simonetti, A., 2013. Evidence for the Alkaline Nature of Parental Carbonatite Melts at Oka Complex in Canada. *Nature Communications*, 4: 2687. <https://doi.org/10.1038/ncomms3687>
- Foley, S.F., Yaxley, G.M., Rosenthal, A., et al., 2009. The Composition of Near-Solidus Melts of Peridotite in the Presence of CO₂ and H₂O between 40 and 60 kbar. *Lithos*, 112: 274—283. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.020>
- Giebel, R.J., Gauert, C.D.K., Marks, M.A.W., et al., 2017. Multi-Stage Formation of REE Minerals in the Palabora Carbonatite Complex, South Africa. *American Mineralogist*, 102(6): 1218—1233. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6004>
- Humphreys-Williams, E.R., Zahirovic, S., 2020. Carbonatites and Global Tectonics. *Elements*, 17(5): 339—344. <https://doi.org/10.2138/gselements.17.5.339>
- Nabyl, Z., Massuyeau, M., Gaillard, F., et al., 2020. A Window in the Course of Alkaline Magma Differentiation Conducive to Immiscible REE-Rich Carbonatites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 282: 297—323. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.05.030>

- doi.org/10.1016/j.gca.2020.04.008
- Song, W.L., Xu, C., Smith, M., et al., 2018. Genesis of the World's Largest Rare Earth Element Deposit, Bayan Obo, China: Protracted Mineralization Evolution over ~1 B. y. *Geology*, 46(4): 323–326. <https://doi.org/10.1130/G39801.1>
- Walter, B.F., Giebel, R.J., Steele-Macinnis, M., et al., 2021. Fluids Associated with Carbonatitic Magmatism: A Critical Review and Implications for Carbonatite Magma Ascent. *Earth-Science Reviews*, 215(1–4): 103509. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103509>
- Weng, Z.H., Jowitt, S., Mudd, G., et al., 2015. A Detailed Assessment of Global Rare Earth Element Resources: Opportunities and Challenges. *Economic Geology*, 110(8): 1925–1952. <https://doi.org/10.2113/econgeo.110.8.1925>
- Ying, Y.C., Chen, W., Simonetti, A., et al., 2020. Significance of Hydrothermal Reworking for REE Mineralization Associated with Carbonatite: Constraints from in Situ Trace Element and C–Sr Isotope Study of Calcite and Apatite from the Miaoya Carbonatite Complex (China). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 280: 340–359. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.04.028>
- 范宏瑞,牛贺才,李晓春,等,2020. 中国内生稀土矿床类型、成矿规律与资源展望. 科学通报, 65(33): 3778–3793.
- 谢玉玲,夏加明,崔凯,等,2020. 中国碳酸岩型稀土矿床: 时空分布与成矿过程. 科学通报, 65(33): 3794–3808.