



地球深部碳对克拉通边缘岩浆硫化物矿床的控制机制

陈春飞^{1*}, 刘勇胜²

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

2. 长江大学地球深部过程与表层系统耦合研究中心, 武汉 430110

* 联系人, E-mail: chfchen2016@hotmail.com

The control mechanism of deep Earth carbon on magmatic sulfide deposits at cratonic margins

Chunfei Chen^{1*} & Yongsheng Liu²

¹ State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

² YU-CUGW Joint Research Center on Deep Earth and Surface Dynamic Coupling, Yangtze University, Wuhan 430110, China

* Correspondence author, E-mail: chfchen2016@hotmail.com

doi: [10.1360/TB-2025-0156](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0156)

克拉通是地球上最为古老且稳定的大陆板块, 以其异常厚的大陆岩石圈(厚度可达200~300 km)和长期的构造稳定性为特征, 其稳定状态大多已持续至少20亿年^[1,2]. 克拉通通常呈现碗状结构, 面积约占现代大陆总面积的50%, 是重要的矿产储藏区(尤其是金属矿藏和能源矿藏). 尽管克拉通整体呈现高度稳定, 但仍可能受到区域性构造-岩浆活动的影响. 由于长期漂浮在软流圈之上, 克拉通岩石圈地幔经历了持续的软流圈-岩石圈相互作用(或地幔柱-岩石圈相互作用)^[3]. 克拉通岩石圈厚度从中心向边缘呈阶梯式减薄, 其边缘常常是边缘驱动对流(edge-driven convection)和软流圈地幔上涌(asthenospheric upwelling)的活跃区域^[4,5], 并在后续的构造-岩浆事件中易发生再活化与裂谷作用^[3,6]. 因此, 克拉通边缘成为构造-岩浆事件频发的场所, 催生了多种金属矿床类型(包括镍、铜和铂族元素(PGE)矿床)在这一地带集中分布^[7~11](图1).

碳是地球生命的基础元素. 从全球尺度来看, 约90%的碳储存在地球深部. 地球深部的地质活动犹如“发动机”, 不断向地表输送碳等挥发分, 从而调控地球的宜居环境. 此外, 碳作为一种重要的变价元素, 在地球深部主要以负四价的甲烷(CH₄)、零价态的石墨/金刚石, 以及正四价的碳酸盐(CO₃²⁻)和二氧化碳(CO₂)等不同氧化态存在. 因此, 碳在调控地幔氧

化还原状态、影响硫的赋存形式以及成矿元素的富集与迁移方面发挥着关键作用. 前人研究表明, 克拉通岩石圈地幔是一个巨大的挥发分储库, 储存了岩石圈中超过45%的碳、硫和水^[13,14]. 此外, 大多数地幔火成碳酸岩也主要分布在克拉通边缘(图1), 这表明克拉通边缘不仅富集岩浆硫化物矿床, 其深部还富集碳等挥发分. 因此, 探究克拉通地区深部挥发分与金属矿产之间的联系, 对于深入理解岩浆硫化物矿床的成因机制具有重要意义.

本研究团队通过高温高压实验, 模拟了克拉通边缘深部富碳酸盐岩浆的演化过程, 并结合地幔橄榄岩地球化学统计分析, 发现克拉通边缘在约160~190 km深处存在富硫化物的地幔根. 进一步结合全球火成碳酸岩和岩浆硫化物矿床的时空分布特征分析, 结果表明该富硫化物地幔根对硫化物矿床的形成与演化具有重要的控制作用. 该研究成果已发表于 *Nature*^[12].

通常情况下, 只有碳和水等挥发分才能诱发≥140 km深度的地幔熔融, 从而形成富含碳酸盐组分的熔体^[15]. 因此, 克拉通岩石圈地幔的改造主要来自深部软流圈(≥180 km)的富碳酸盐熔体所驱动. 这些熔体通常是碳酸盐化硅酸盐熔体, 而非纯碳酸岩熔体, 原因在于该深度软流圈的温度通常远高于碳酸盐熔融的起始温度^[15,16]. 基于此, 我们开展了一系列

引用格式: 陈春飞, 刘勇胜. 地球深部碳对克拉通边缘岩浆硫化物矿床的控制机制. 科学通报, 2025, 70: 1690–1693

Chen C, Liu Y. The control mechanism of deep Earth carbon on magmatic sulfide deposits at cratonic margins (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 1690–1693, doi: [10.1360/TB-2025-0156](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0156)

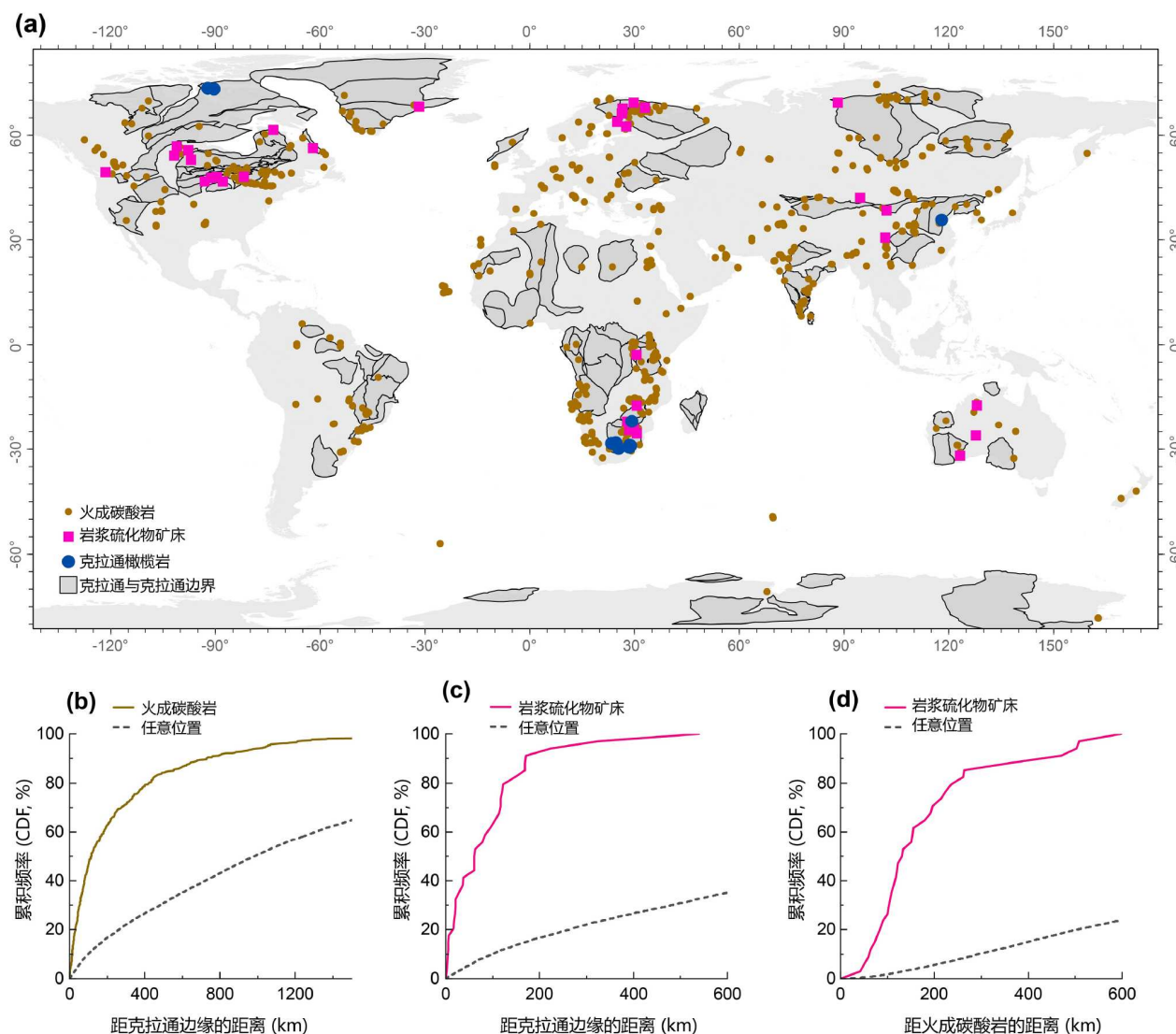


图 1 (网络版彩色)碳酸岩、硫化物矿床与克拉通边缘的空间关系^[12]. (a) 碳酸岩、 ≤ 2.5 Ga 岩浆硫化物矿床、克拉通橄榄岩的分布以及克拉通及其边界. (b, c) 碳酸岩和岩浆硫化物矿床距克拉通边缘的累积频率分布(CDF). (d) 岩浆硫化物矿床距碳酸岩的累积频率分布(CDF). 此外, 图中还对比了随机位置至克拉通边缘(b, c)和碳酸岩(d)的累积频率分布

Figure 1 (Color online) Spatial relationships among carbonatite, sulfide deposits, and cratonic margins^[12]. (a) Distribution of carbonatites, ≤ 2.5 Ga magmatic sulfide deposits, cratonic peridotites, as well as cratons and their margins. (b, c) Cumulative frequency (CDF) of the distance of carbonatites and magmatic sulfide deposits to cratonic margins (boundaries). (d) CDF of the distance of magmatic sulfide deposits to carbonatites. CDF of the distance of random locations to cratonic margins (b, c) and carbonatites (d) are shown for comparison

高温高压实验, 模拟软流圈起源的碳酸盐化硅酸盐熔体向上运移并与克拉通橄榄岩反应时的岩浆演化过程. 结果表明, 随着反应的进行, 熔体中的硅酸盐组分逐渐沉淀, 导致硅不断被去除, 最终演化为几乎纯粹的碳酸盐岩浆, 并在克拉通边缘形成火成碳酸岩(图2).

有趣的是, 我们的高温高压实验还揭示了一个关键现象: 在碳酸盐化硅酸盐熔体与岩石圈地幔橄榄岩反应的过程中, 大量固态硫化物会发生沉淀. 其核心机制在于, 随着反应的

持续进行, 熔体中的二氧化硅含量显著降低, 导致硫在熔体中的溶解度大幅下降, 促使硫化物从熔体中析出. 这意味着, 在克拉通边缘软流圈与岩石圈相互作用的过程中, 碳酸盐化硅酸盐岩浆在发生硅酸盐沉淀的同时, 其中所含的金属和硫元素也会以硫化物的形式从岩浆中离析, 进而在克拉通边缘岩石圈地幔形成异常富集的硫和金属富集带, 并最终塑造出富硫化物的大陆根(图2). 此外, 我们收集并分析了全球克拉通边缘区域由金伯利岩携带至地表的地幔橄榄岩地球化学

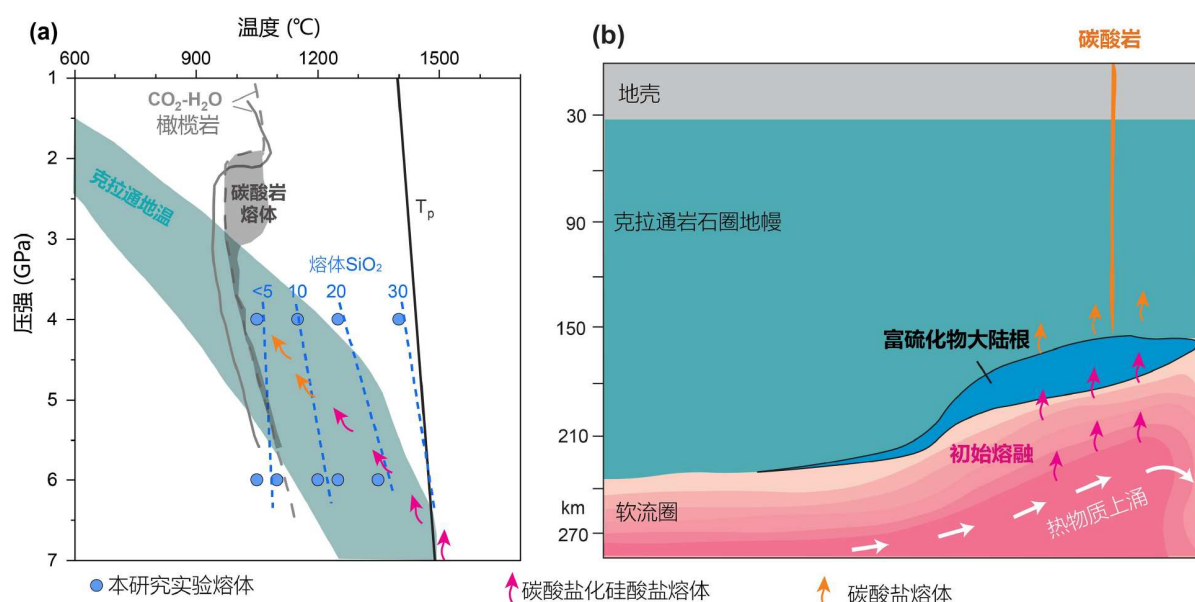


图 2 (网络版彩色)熔体成分演化及富硫大陆根的形成^[12]. (a) 蓝色虚线条表示本研究实验熔体中SiO₂含量的等值线. 显示了地幔潜在温度为1380°C (T_p)时的绝热梯度. 熔体最初为含约20 wt.% SiO₂的碳酸盐硅酸盐熔体(红色箭头), 随着渗透作用的进行, 其成分通过反应逐渐演化为碳酸岩(橙色箭头). (b) 熔体成分演化示意图. 软流圈和低程度熔融的富碳酸盐熔体沿着倒置的“谷地”流动, 这些“谷地”遵循岩石圈底部的负向地形, 并优先向中等深度的克拉通边缘汇聚. 随着熔体成分从碳酸盐硅酸盐演化为碳酸岩, 其携带硫的能力下降, 导致硫化物沉淀在克拉通边缘下方

Figure 2 (Color online) Melt compositional evolution and formation of sulfide-rich continental roots^[12]. (a) Blue lines represent SiO₂ isopleths in the experimental melts of this study. Adiabatic gradient for a mantle potential temperature of 1380°C (T_p) is shown. Melts are initially carbonated silicate melts with ca. 20 wt.% SiO₂ (red arrows) and evolve by the reaction to carbonatite (orange arrows) as infiltration proceeds. (b) Illustration of melt compositional evolution. Asthenospheric material and low-degree carbonate-rich melts flow along inverted valleys that follow the negative topography of the underside of the lithosphere, leading preferentially towards craton margins at intermediate depths. Sulfur carrying capacity drops as the melt composition evolves from carbonated silicate to carbonatite, depositing sulfides beneath the craton margins

数据, 发现克拉通底部约160~90 km深处的地幔橄榄岩中硫和铜均显著富集, 该现象进一步佐证了克拉通边缘存在富硫化物的大陆根.

我们还对碳酸岩、硫化物矿床与克拉通的时空关系进行了相关性分析. 结果显示, 在空间分布上, 全球约93%的岩浆硫化物矿床和62.5%的碳酸岩均集中于距离克拉通边界200 km的范围内, 且约71.5%的岩浆硫化物矿床分布在距离碳酸岩分布区200 km之内(图1). 在时间轴上, 富碳酸盐岩浆主要出现在超大陆裂解时期, 形成峰期在大陆裂解前约6百万年. 这些结果清晰地表明, 硫化物矿床与碳酸岩在克拉通边缘区域具有极高的空间一致性, 并在这一独特的地球动力学环境中共同富集.

克拉通边缘通常发育大规模断裂系统和“薄弱带”通道, 有利于边缘驱动的地幔对流与软流圈地幔上涌. 在这一特殊

的岩石圈构造环境下, 碳酸岩与富硫化物大陆根得以形成. 随后, 当大火成岩省(LIP)岩浆与克拉通边缘的富硫化物大陆根相互作用时, 原本稳定的硫化物大陆根被重新活化并释放金属元素, 进而在岩浆中重新富集并最终形成岩浆硫化物矿床的母岩浆. 研究表明, 富硫化物大陆根极有可能构成岩浆硫化物矿床形成过程中的重要前提条件.

综上, 本研究揭示了硫化物矿床与碳酸岩之间的成因关系, 指出在克拉通边缘160~190 km深处由碳酸盐熔体迁移所形成的富硫化物大陆根, 为随后大火成岩省岩浆活动提供了关键的成矿物质来源. 这一过程极有可能是岩浆硫化物矿床形成的关键前提. 因此, 克拉通边缘火成碳酸岩的分布区或许是关键金属资源的重要潜在分布区域. 该研究不仅为认识矿产资源的成因机制提供了全新视角, 同时也为未来的关键金属资源勘探提供了重要的指示意义.

推荐阅读文献

- 1 Hasterok D, Halpin J A, Collins A S, et al. New maps of global geological provinces and tectonic plates. *Earth-Sci Rev*, 2022, 231: 104069
- 2 Pearson D G, Scott J M, Liu J, et al. Deep continental roots and cratons. *Nature*, 2021, 596: 199–210

- 3 Foley S F. Rejuvenation and erosion of the cratonic lithosphere. *Nat Geosci*, 2008, 1: 503–510
- 4 Doblas M, López-Ruiz J, Cebriá J M, et al. Mantle insulation beneath the West African craton during the Precambrian-Cambrian transition. *Geology*, 2002, 30: 839–842
- 5 Davies D R, Rawlinson N. On the origin of recent intraplate volcanism in Australia. *Geology*, 2014, 42: 1031–1034
- 6 Gernon T M, Jones S M, Brune S, et al. Rift-induced disruption of cratonic keels drives kimberlite volcanism. *Nature*, 2023, 620: 344–350
- 7 Griffin W L, Begg G C, O'Reilly S Y. Continental-root control on the genesis of magmatic ore deposits. *Nat Geosci*, 2013, 6: 905–910
- 8 Hoggard M J, Czarnota K, Richards F D, et al. Global distribution of sediment-hosted metals controlled by craton edge stability. *Nat Geosci*, 2020, 13: 504–510
- 9 Begg G C, Hronsky J A M, Arndt N T, et al. Lithospheric, cratonic, and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits. *Economic Geol*, 2010, 105: 1057–1070
- 10 Holwell D A, Fiorentini M, McDonald I, et al. A metasomatized lithospheric mantle control on the metallogenic signature of post-subduction magmatism. *Nat Commun*, 2019, 10: 3511
- 11 Maier W D, Groves D I. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposits. *Miner Depos*, 2011, 46: 841–857
- 12 Chen C, Förster M W, Shcheka S S, et al. Sulfide-rich continental roots at cratonic margins formed by carbonated melts. *Nature*, 2025, 637: 615–621
- 13 Gibson S A, McKenzie D. On the role of Earth's lithospheric mantle in global volatile cycles. *Earth Planet Sci Lett*, 2023, 602: 117946
- 14 Foley S F, Fischer T P. An essential role for continental rifts and lithosphere in the deep carbon cycle. *Nat Geosci*, 2017, 10: 897–902
- 15 Dasgupta R, Hirschmann M M. Melting in the Earth's deep upper mantle caused by carbon dioxide. *Nature*, 2006, 440: 659–662
- 16 Foley S F, Pintér Z. Chapter 1. Primary melt compositions in the Earth's mantle. In: kono Y, Sanloup C, eds. *Magmas Under Pressure*. Amsterdam: Elsevier, 2018