

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.833>



什么过程促发了古元古代大氧化事件?

罗根明¹, 胡清扬²

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 地球科学学院, 湖北武汉 430074
2. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

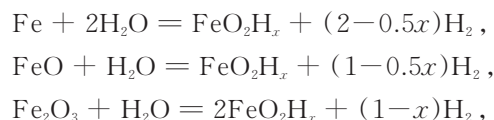
古元古代大氧化事件是指发生在古元古代早期地球大气氧含量(p_{O_2})的一次显著升高事件, 一般简称为 GOE(great oxidation event)(Holland, 1999). GOE 使得地球表层圈层的氧化程度显著升高, 尤其是大气首次由(几乎)无氧状态转变成永久性的含氧状态. 地球表层氧化程度的升高极大地丰富了地质微生物功能群的类型以及能量的获取和转换, 进而通过元素的生物地球化学循环进一步作用于地球表层的气候生态环境, 为真核生物的发展铺平了道路(Lyons *et al.*, 2014; Luo *et al.*, 2018). 因而, GOE 是地球宜居性演化的里程碑, 也是认识生物与环境相互作用的重要窗口(罗根明等, 2022).

近年来, 随着地质、地球化学和大气光化学模型等多学科的综合深入研究, 当前对这一事件发生的过程和时间已经有了较为深入的认识: 一般认为 GOE 是一个长时间尺度的事件($\sim 2.4\sim 2.06$ Ga), 且早期的启动过程可能是一个长时间的不稳定过程(Luo *et al.*, 2016; Gumsley *et al.*, 2017; Philippot *et al.*, 2018; Warke *et al.*, 2020; Poulton *et al.*, 2021; Izon *et al.*, 2022; Wogan *et al.*, 2022). 然而, 对于 GOE 的成因一直存在较大的争议, 最近提出了一种新的假说认为深部过程可能是大气氧气的一种零星、散发的“源”, 其向大气的释放可能促发了 GOE, 称作“深部产氧说”(Hu *et al.*, 2016; Mao and Mao, 2020). 古元古代大氧化事件是地球深部产氧所导致的吗?

1 核心理念

地球上的 O_2 主要来自产氧光合生物的代谢作用. 然而, 一些地质记录表明产氧光合生物起源的时间要显著早于 GOE 的启动时间(Planavsky *et al.*, 2014). 很多学者将其归咎于地球深部过程. 一般是从大气 O_2 汇的角度进行探讨, 如地幔氧逸度的升高或者火山类型的变化(洋底火山转向大陆火山)使得火山气体的还原力下降, 进而降低了大气 O_2 的消耗量, 使得生物产生的 O_2 可以更好地积累在大气中, 导致 GOE 的发生(Kump and Barley, 2007; Gaillard *et al.*, 2011; Kadoya *et al.*, 2020). 或者是深部过程所引发的地表过程对大气 p_{O_2} 含量升高的影响, 如造山作用引起营养盐输入的升高导致生物产氧量的升高或者产甲烷生物的减弱导致氧气消耗量的降低(Campbell and Allen, 2008; Konhauser *et al.*, 2009).

与这些认识不同的是, 深部产氧说认为深部过程可以直接向地球表层释放 O_2 , 是重要的源. 该假说主要是基于近年来在超高压矿物物理化学研究方面的进展. 这些研究发现当含水矿物随着俯冲作用进入深部下地幔时(>1800 km), 金属铁或铁氧化物会和水发生如下反应生成氢化的铁超氧化物, 并释放出氢气(Mao and Mao, 2020).



基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 42172216, 41821001, 42150101).

作者简介: 罗根明(1984—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事重大地质转折期环境演化及微生物地质作用研究. E-mail: gmluo@cug.edu.cn

引用格式: 罗根明, 胡清扬, 2022. 什么过程促发了古元古代大氧化事件? 地球科学, 47(10): 3842—3844.

Citation: Luo Genming, Hu Qingyang, 2022. What Triggered the Paleoproterozoic Great Oxidation Event? *Earth Science*, 47(10): 3842—3844.

以上反应产生的 H_2 主体会脱离富氧的铁超氧化物系统,后者主要聚集在核幔边界,实现了氧的净积累.当这些铁超氧化物积累到一定量时,促发超级地幔柱,使得铁超氧化物中的 O_2 释放到大气,形成大气 O_2 的“源”(Mao and Mao, 2020).

这一新假说的提出,为古元古代以及之后整个地质历史时期大气氧含量演化机理的研究注入了新的动力.后续的研究需解决与该假说相关的许多问题,如铁超氧化物聚集过程产生的 H_2 对地球浅部氧逸度的影响如何?是否会通过火山作用影响表生的氧化还原状态?铁超氧化物超级地幔柱的性质及地质记录?显生宙大火山岩省发育期是否会导致大气 p_{O_2} 的升高?

2 科学价值

古元古代大氧化事件看似是一个地球表层的事件,但可能与地球的深部过程有着非常密切的联系.地球深部产氧假说的深入研究不仅会推动深地科学和技术的发展,如超高压技术、深地成矿等,也会给表生地球科学问题的研究提供新的思路,如生物大灭绝的成因和能源的形成等,更将促进地球表层过程和深部过程研究的联合攻关,推动地球系统科学学科的发展.这些都将极大地提高我们对宜居地球形成和演化的过程和动力的认识.

3 发展前景

大氧化事件是宜居地球发展的一个里程碑,是多圈层复杂过程相互作用的结果,揭示其成因机理是当前科学研究的前沿,也是难点.地球深部产氧假说的证实或证伪都将推动地球系统科学的发展,可以引领地球表层和深部过程耦合、不同时间尺度事件耦合分析等方面的研究,进而产生一系列新技术和新认识.

参考文献

Campbell, I.H., Allen, C.M., 2008. Formation of Supercontinents Linked to Increases in Atmospheric Oxygen. *Nature Geoscience*, 1(8): 554–558. <https://doi.org/10.1038/ngeo259>

Gaillard, F., Scaillet, B., Arndt, N.T., 2011. Atmospheric Oxygenation Caused by a Change in Volcanic Degassing Pressure. *Nature*, 478(7368): 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature10460>

Gumsley, A.P., Chamberlain, K.R., Bleeker, W., et al., 2017. Timing and Tempo of the Great Oxidation Event. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(8): 1811–1816. <https://doi.org/10.1073/pnas.1608824114>

Holland, H.D., 1999. When did the Earth's Atmosphere Become Oxidic? A Reply. *The Geochemical News*, 100: 20–22.

Hu, Q. Y., Kim, D. Y., Yang, W. G., et al., 2016. FeO_2 and $FeOOH$ under Deep Lower-Mantle Conditions and Earth's Oxygen-Hydrogen Cycles. *Nature*, 534(7606): 241–244. <https://doi.org/10.1038/nature18018>

Izon, G., Luo, G.M., Uveges, B. T., et al., 2022. Bulk and Grain-Scale Minor Sulfur Isotope Data Reveal Complexities in the Dynamics of Earth's Oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(13): e2025606119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2025606119>

Kadoya, S., Catling, D.C., Nicklas, R.W., et al., 2020. Mantle Data Imply a Decline of Oxidizable Volcanic Gases could Have Triggered the Great Oxidation. *Nature Communications*, 11: 2774. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16493-1>

Konhauer, K. O., Pecoits, E., Lalonde, S. V., et al., 2009. Oceanic Nickel Depletion and a Methanogen Famine before the Great Oxidation Event. *Nature*, 458(7239): 750–753. <https://doi.org/10.1038/nature07858>

Kump, L.R., Barley, M.E., 2007. Increased Subaerial Volcanism and the Rise of Atmospheric Oxygen 2.5 Billion Years ago. *Nature*, 448(7157): 1033–1036. <https://doi.org/10.1038/nature06058>

Luo, G.M., Junium, C.K., Izon, G., et al., 2018. Nitrogen Fixation Sustained Productivity in the Wake of the Palaeoproterozoic Great Oxygenation Event. *Nature Communications*, 9: 978. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03361-2>

Luo, G.M., Ono, S., Beukes, N.J., et al., 2016. Rapid Oxygenation of Earth's Atmosphere 2.33 Billion Years ago. *Science Advances*, 2(5): e1600134. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600134>

Lyons, T. W., Reinhard, C. T., Planavsky, N. J., 2014. The Rise of Oxygen in Earth's Early Ocean and Atmosphere. *Nature*, 506(7488): 307–315. <https://doi.org/10.1038/nature13068>

Mao, H.K., Mao, W.L., 2020. Key Problems of the Four-Dimensional Earth System. *Matter and Radiation at Extremes*, 5(3): 038102. <https://doi.org/10.1063/1.5139023>

- Philippot, P., Ávila, J. N., Killingsworth, B. A., et al., 2018. Globally Asynchronous Sulphur Isotope Signals Require Re-Definition of the Great Oxidation Event. *Nature Communications*, 9: 2245. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04621-x>
- Planavsky, N. J., Asael, D., Hofmann, A., et al., 2014. Evidence for Oxygenic Photosynthesis Half a Billion Years before the Great Oxidation Event. *Nature Geoscience*, 7 (4): 283–286. <https://doi.org/10.1038/ngeo2122>
- Poulton, S. W., Bekker, A., Cumming, V. M., et al., 2021. A 200-Million-Year Delay in Permanent Atmospheric Oxygenation. *Nature*, 592(7853): 232–236. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03393-7>
- Warke, M. R., Di Rocco, T., Zerkle, A. L., et al., 2020. The Great Oxidation Event Preceded a Paleoproterozoic Snowball Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(24): 13314–13320. <https://doi.org/10.1073/pnas.2003090117>
- Wogan, N. F., Catling, D. C., Zahnle, K. J., et al., 2022. Rapid Timescale for an Oxic Transition during the Great Oxidation Event and the Instability of Low Atmospheric O₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(37): e2205618119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2205618119>
- 罗根明, 朱祥坤, 王水炯, 等, 2022. 元古宙早期大氧化事件的成因机制与气候生态效应. *中国科学: 地球科学*, 52 (9): 1665–1693.