

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.839>



# 早期真核生物多样性演化的限制性环境因素是什么？

张水昌<sup>1</sup>, 王晓梅<sup>1</sup>, 王华建<sup>1</sup>, 唐卿<sup>2</sup>, 张凤廉<sup>1,3</sup>, 吕丹<sup>1</sup>

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023
3. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

探索生命的奥秘是永恒的科学前沿。地球表层复杂多样的有机生命是地球区别于太阳系其他行星的最本质特征之一。真核生物是现今地球复杂生物圈的重要组成部分。人类肉眼所能看到的几乎所有动物、植物、真菌等都属于真核生物。相比于较低等的古菌和细菌, 真核生物的出现和多样性演化代表着地球的宜居演化。化石记录显示, 简单的单细胞真核生物在 17 亿年前已经出现 (Agić *et al.*, 2017), 但复杂多细胞真核生物直至 6.35 亿年前才迎来首次多样性大辐射 (Xiao *et al.*, 2014)。这一地质现象究竟是生命演化的内在基因控制, 还是受限于生物生存的外部环境因素, 仍存在重大争议。因此, 揭示早期真核生物多样性演化水平及其受限因素, 尤其是与生命活动相关的环境因素, 是当前地球科学的前沿领域和难点问题之一。

## 1 核心思想

真核生物多样性评价主要依靠化石证据, 其专属性生物标志物——甾烷在沉积物中的检出记录, 以及真核生物相关化合物的分子钟研究, 也可以提供一定约束。然而, 上述 3 种方法所给出的真核生物最早出现时间有着明显差异。目前, 被广泛接受并有着明确结构生物学证据的真核生物化石出现在

17 亿年前的华北汝阳群 (Agić *et al.*, 2017), 可靠甾烷记录出现在 14 亿年前的华北下马岭组 (Zhang *et al.*, 2021), 根据分子钟恢复的简单甾醇合成时间则可以追溯至 23 亿年前 (Gold *et al.*, 2017)。全球已报道真核生物化石、生物标志物和分子钟等数据的综合汇编, 显示真核生物在 18~8 亿年前的多样性演化极其缓慢 (Zhang *et al.*, 2022)。

与古菌和细菌相比, 真核生物体积更大, 需进行有氧呼吸, 对营养物需求较高, 其出现和多样化程度被认为更容易受环境因素影响, 如大气氧含量、古海洋营养物水平等。当前比较具有国际影响力的观点认为, 相比于 25~24 亿年前已经出现的地球氧化现象, 真核生物的迟滞出现和缓慢演化与长期较低的大气含氧量有关 (Lyons *et al.*, 2014)。缺氧为主的水体限制了古海洋中生命必需营养元素的丰度和自由氧的可用性, 进而阻碍了真核生物的多样性演化。

然而, 这种以氧气含量为中心的观点也受到多方质疑。(1)“内共生学说”是当前被普遍接受的真核细胞起源假说。实验发现, 原始真核生物对细菌、古菌的吞噬和内共生可以在低氧、甚至是无氧条件下进行 (Mills *et al.*, 2022)。(2)已发现化石在真核生物早期演化干群或冠群的定位仍不清楚, 而且化石和生物标志物记录可能受保存条件限制, 出现大量缺失 (Eckford-Soper *et al.*, 2022)。(3) 18~8 亿年前的

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2017YFC0603101), 国家自然科学基金项目 (Nos. 41872125, 42202227)。

作者简介: 张水昌 (1961—), 男, 教授级高工, 博士生导师, 主要从事油气地质学和地球化学研究。E-mail: sczhang@petrochina.com.cn

引用格式: 张水昌, 王晓梅, 王华建, 唐卿, 张凤廉, 吕丹, 2022. 早期真核生物多样性演化的限制性环境因素是什么? 地球科学, 47(10): 3856—3857.

Citation: Zhang Shuichang, Wang Xiaomei, Wang Huajian, Tang Qing, Zhang Fenglian, Lü Dan, 2022. What are the Limiting Environmental Factors for the Evolution of Early Eukaryotic Biodiversity? *Earth Science*, 47(10): 3856—3857.

大气氧含量仍存在争议,最新恢复数值高于早期认识,且足以满足真核生物甚至早期动物的呼吸需要(Canfield *et al.*, 2021).因此,无论是从生命进化模式,还是从古环境指标上看,氧气含量似乎都不是限制真核生物多样性演化的唯一环境因素.

根据已发布的 5.4~2.5 亿前的高分辨率海洋生物多样性演化曲线,大气二氧化碳分压是唯一显示出与之相似的长周期环境因素;但在进行时间序列内,自相关去趋势性分析后,这一相似性并未得到进一步证实(Fan *et al.*, 2020).因此,与温室气体二氧化碳浓度相关的古海洋温度可能是约束早期真核生物多样性演化的潜在重要环境因素(Zhang *et al.*, 2022).另外,18~8 亿年前的弱造山作用也可能是导致陆源关键限制性营养元素(如磷)的输送通量较低,进而阻碍真核生物多样性演化的重要原因(Tang *et al.*, 2021).

## 2 科学价值

生命研究的本质在于回答从哪里来、到哪里去.早期真核生物作为人类祖先,其多样性程度和受限环境因素研究是揭示生命起源和进化的关键科学问题之一.这一问题的回答,不仅需要研究生命的过去,也需要研究地球的过去以及二者之间的关联机制.将古论未来、将地球论地外行星,这一研究也将为实现人类与地球的和谐相处、探索地外生命的起源和演化模式提供重要借鉴.另外,生命演化事件的发生往往伴随着地球表层环境突变和沉积型矿产形成,因此,这一研究对油气、铁矿等资源的勘查也有着重要指导意义.

## 3 发展前景

早期真核生物和环境演化模式已成为地球科学领域的国际前沿研究方向.高精度年代学和化石地质资料的匮乏是当前面临的首要难题.中国有着丰富的早期真核生物化石记录和相对连续的 18~8 亿年前的沉积物,具有成为该领域国际性研究中心的巨大潜力.未来研究不仅需要更多古生物学、年代学、地球化学等证据的支持,也需要借助计算生物学、分子遗传学、地球系统科学等手段,来综合揭示 18~8 亿年前的生命-环境协同演化模式,明确环境变化对生物多样性演化的约束效应和作用机制.

### 参考文献

Agić, H., Moczyłowska, M., Yin, L.M., 2017. Diversity of

Organic-Walled Microfossils from the Early Mesoproterozoic Ruyang Group, North China Craton: A Window into the Early Eukaryote Evolution. *Precambrian Research*, 297: 101–130. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.042>

Canfield, D.E., van Zuilen, M.A., Nabhan, S., et al., 2021. Petrographic Carbon in Ancient Sediments Constrains Proterozoic Era Atmospheric Oxygen Levels. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(23): e2101544118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2101544118>

Eckford-Soper, L.K., Andersen, K.H., Hansen, T.F., et al., 2022. A Case for an Active Eukaryotic Marine Biosphere during the Proterozoic Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(41): e2122042119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2122042119>

Fan, J.X., Shen, S., Erwin, D., et al., 2020. A High-Resolution Summary of Cambrian to Early Triassic Marine Invertebrate Biodiversity. *Science*, 367: 272–277. <https://doi.org/10.1126/science.aax4953>

Gold, D.A., Caron, A., Fournier, G.P., et al., 2017. Paleoproterozoic Sterol Biosynthesis and the Rise of Oxygen. *Nature*, 543(7645): 420–423. <https://doi.org/10.1038/nature21412>

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>

Mills, D.B., Boyle, R.A., Daines, S.J., et al., 2022. Eukaryogenesis and Oxygen in Earth History. *Nature Ecology & Evolution*, 6(5): 520–532. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01733-y>

Tang, M., Chu, X., Hao, J.H., et al., 2021. Orogenic Quiescence in Earth's Middle Age. *Science*, 371(6530): 728–731. <https://doi.org/10.1126/science.abf1876>

Xiao, S.H., Muscente, A.D., Chen, L., et al., 2014. The Weng'an Biota and the Ediacaran Radiation of Multicellular Eukaryotes. *National Science Review*, 1(4): 498–520. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwu061>

Zhang, F.L., Wang, H.J., Ye, Y.T., et al., 2022. Did High Temperature rather than Low O<sub>2</sub> Hinder the Evolution of Eukaryotes in the Precambrian? *Precambrian Research*, 378: 106755. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106755>

Zhang, S.C., Su, J., Ma, S.H., et al., 2021. Eukaryotic Red and Green Algae Populated the Tropical Ocean 1400 Million Years ago. *Precambrian Research*, 357: 106166. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106166>