https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.838

前寒武—寒武纪重大转折期生物礁是如何演化的?

李杨凡,李 飞

西南石油大学地球科学与技术学院,四川成都 610500

生物礁所在环境是海洋中物种丰度和多样性最高的区域之一,通过研究地质历史时期生物礁的构成、分布和演化信息可为认识当时的海洋环境状况提供重要线索.前寒武纪与寒武纪之交是地球生命与环境演化的重大转折期:大氧化事件驱动生命演化进程加快并在寒武纪早期促成了"生命大爆发",气候(由"冰室"转为"热室")以及海水化学成分(由"文石海/白云石海"为主转为"方解石海"为主)等也发生了显著变化(Wood *et al.*, 2017; Tucker, 1992).作为一种高等级海洋生态系统,生物礁如何应对当时一系列"波澜壮阔"的转变是一个值得探索的科学问题.

1 核心思想

在前寒武纪—寒武纪转折期,生物礁系统从造礁生物、宏观特征、微观结构、建造方式以及形成环境等方面均发生了显著变化.前寒武纪造礁生物几乎完全为微生物,它们通过有机矿化作用以及黏结、捕获细小颗粒的方式形成隆起地形(丘状和柱状为主);生物礁类型以叠层石和凝块石为主,发育规模有限(单体厚度一般小于1 m).其中,叠层石礁分布范围较广,从陆棚至潮坪环境均有发育,凝块石礁主要发育于浅水动荡环境(Grotzinger and James., 2000).尽管埃迪卡拉纪晚期可能存在后生动物(如*Cloudina*)参与生物礁的形成(Penny *et al.*, 2014),但无争议的、广泛的后生动物造礁过程发生在寒武纪早期(纽芬兰世和第二世).以古杯为代表的后生动物具有完全钙化的骨骼结构,能够抵抗较强的水体能量.与此同时,微生物群落也开始广泛发育钙化组构(以葛万菌、附枝菌和肾形菌为代表),形成大量直立、分枝状内部结构.这使得寒武纪早期生物礁的构成出现多样化,既包括微生物群落主导,也包括后生动物主导,以及后生动物与微生物联合建造等多种形式(图1).凝块石礁以及后生动物与微生物联合建造的生物礁,与前寒武纪相比规模明显增大(厚度可达数米,甚至十多米),主要形成于潮下低能—高能环境,侧向连续性较好,经常形成高大、隆起的单个礁体,并且多礁体叠置形成的复合体也较为常见.此外,附礁生物(三叶虫类、棘皮类和小壳动物等)开始大量出现.

2 科学价值

前寒武纪—寒武纪转折期生物礁系统的显著变化不能简单归结为后生动物的兴盛,而是生物与环境协同变化过程中一系列因素共同作用的结果.以营养水平为例,富营养条件有利于微生物群落的繁盛,但是古杯动物由于生态竞争关系可能更适宜寡营养环境;为适应寒武纪早期海洋环境营养水平的频繁变化,主要造礁生物类型可能因此而经常发生更替(Li *et al.*, 2021a).通过精细解剖生物礁类型

作者简介:李飞(1986—),男,博士,副研究员,主要从事碳酸盐沉积学和沉积地球化学方面研究.E-mail: lifei@swpu.edu.cn

引用格式:李杨凡,李飞,2022.前寒武—寒武纪重大转折期生物礁是如何演化的?地球科学,47(10):3853-3855.

Citation: Li Yangfan, Li Fei, 2022. How did Reefs Evolve During the Precambrian-Cambrian Transition? *Earth Science*, 47(10): 3853-3855.

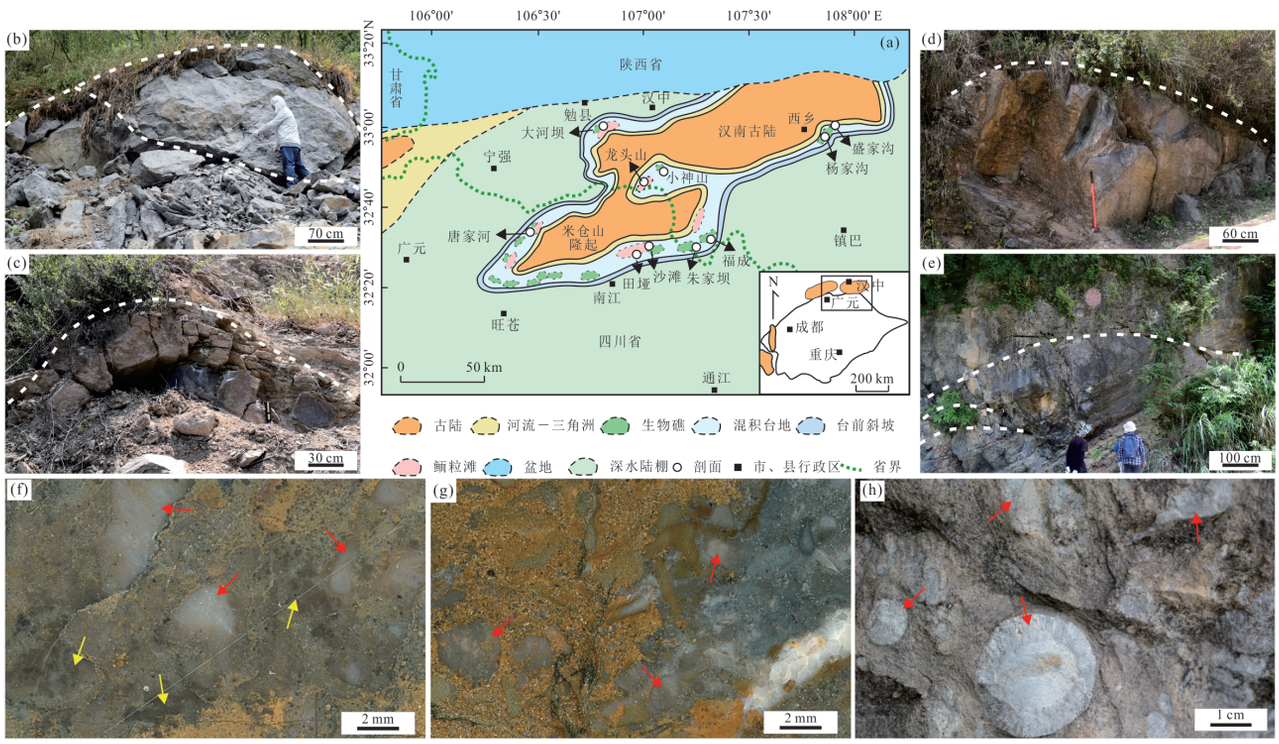

图 1 寒武纪早期生物礁分布及特征(以上扬子北缘汉南－米仓山地区为例)

a.研究区寒武纪第二世第三期古地理图;b.大型叠置状生物礁,龙头山,仙女洞组中部;c.小型隆起状古杯礁,杨家沟,仙女洞组下部;d.钙质微生物－古杯礁,大河坝,仙女洞组上部;e.含古杯大型钙质微生物礁,福成,仙女洞组中部;f.古杯(红色箭头)和钙质微生物组构(黄色箭头),大河坝,仙女洞组上部;g.古杯(红色箭头)和共生的陆源细碎屑组分,杨家沟,仙女洞组下部;h.古杯礁近景(红色箭头),小神山,仙女洞组中部

的演化序列可为认识当时浅海营养条件波动规律提供重要线索.另一方面,微生物作为生物礁建造的主要参与者在寒武纪早期保存有大量钙化结构,这被称为“蓝细菌钙化作用幕”(Riding, 1992).受新元古代“文石海/白云石海”向寒武纪“方解石海”转变过程中海水化学成分的调控,寒武纪钙化微生物以原生方解石质矿物为主,这种矿物类型具有较强的抗成岩改造能力.这与寒武纪海水较高的钙离子浓度,以及微生物矿化能力增强等因素共同促进了钙化微生物化石在寒武纪的产生和保存(Li *et al.*, 2021b; Riding, 2006).此外,围绕前寒武纪－寒武纪转折期生物礁的发育还存在很多谜团,例如生物礁如何适应当时气候、水体温度以及氧化还原条件的变化等.通过生物与环境协同变化视角可为认识当时生物礁的发育过程提供关键线索.

3 发展前景

目前,我们面临着气候变暖和海洋酸化等一系列生态环境问题,作为地质历史时期“宜居地球”生态环境出现的典型指标,生物礁的演化过程对于深入认识地球早期生态系统以及生物与环境协同变化规律方面具有重要价值,值得今后深入探究.

参考文献

Grotzinger, J.P., James, N.P., 2000. Precambrian Carbonates: Evolution of Understanding. In: Grotzinger, J. P., James, N.P., eds., Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian World. *SEPM (Society for Sedimentary Geology)*, 3－20. https://doi.org/10.2110/pec.00.67.0003

Li, H., Li, F., Li, X., et al., 2021a. Development and Collapse of the Early Cambrian Shallow-Water Carbonate Factories in the Hannan-Micangshan Area, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 583: 110665. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110665

Li, F., Deng, J.T., Kershaw, S., et al., 2021b. Microbialite Development through the Ediacaran-Cambrian Transition in China: Distribution, Characteristics, and Paleoceano-

graphic Implications. *Global and Planetary Change*, 205: 103586. https://doi. org/10.1016/j. gloplacha.2021.103586

Penny, A. M., Wood, R., Curtis, A., et al., 2014. Ediacaran Metazoan Reefs from the Nama Group, Namibia. *Science*, 344(6191): 1504—1506. https://doi.org/10.1126/science.1253393

Riding, R., 1992. Temporal Variation in Calcification in Marine Cyanobacteria. *Journal of the Geological Society*, 149(6): 979—989. https://doi.org/10.1144/gsjgs.149.6.0979

Riding, R., 2006. Cyanobacterial Calcification, Carbon Dioxide Concentrating Mechanisms, and Proterozoic-Cambrian Changes in Atmospheric Composition. *Geobiology*, 4(4): 299—316. https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2006.00087.x

Tucker, M. E., 1992. The Precambrian-Cambrian Boundary: Seawater Chemistry, Ocean Circulation and Nutrient Supply in Metazoan Evolution, Extinction and Biomineralization. *Journal of the Geological Society*, 149(4): 655—668. https://doi.org/10.1144/gsjgs.149.4.0655

Wood, R. A., Zhuravlev, A. Y., Sukhov, S. S., et al., 2017. Demise of Ediacaran Dolomitic Seas Marks Widespread Biomineralization on the Siberian Platform. *Geology*, 45(1): 27—30. https://doi.org/10.1130/g38367.1