

巨鲕成因探讨:来自上扬子地区下寒武统、中泥盆统及下三叠统的证据

范 鸿,姬国锋,时志强,段 雄,金 鑫

(成都理工大学 沉积地质研究院,四川 成都 610059)

摘 要:通过对下寒武统、下三叠统与中泥盆统金宝石组葛万藻成因的核形石对比研究认为,微生物是巨鲕形成的主要因素之一。微生物参与构建巨鲕暗色纹层,促进同心纹层加积,对巨鲕的形成具有建设性作用。在金宝石组核形石纹层中微生物发育的区域,纹层厚度不均匀且形态不规则,说明微生物对巨鲕规律纹层是具有破坏性的。巨鲕和核形石都是在无机化学和微生物共同作用下形成的产物,不同的水体环境制约着微生物的发育程度,进而控制了巨鲕与核形石的形成。

关键词:上扬子地区;巨鲕;核形石;微生物成因

中图分类号:P581

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)06-0016-09

Origin of Giant Ooids: Evidence from Lower Cambrian, Middle Devonian and Lower Triassic in Upper Yangtze Region

Fan Hong, Ji Guofeng, Shi Zhiqiang, Duan Xiong, Jin Xin

(Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: By comparing the ooids caused by *Girvanella* from Lower Cambrian, Lower Triassic and Middle Devonian Jinbaoshi Formation, it is deduced that microbes are one of the main factors in the formation of giant ooids. By participating in the construction of the dark laminae and promoting the accretion of concentric laminae, microbes play a constructive role in the formation of giant ooids. The nonuniform thickness and irregular shape of ooid laminae in the Jinbaoshi Formation indicate that the microbial growth is destructive for the regular laminae of giant ooids. Both giant ooids and ooids are the products of the joint actions of inorganic chemistry and microbes. Different water environments restrict the development extent of microbes, which in turn control the formation of giant ooids and ooids.

Key words: Upper Yangtze Region; giant ooid; ooid; microbial cause

鲕粒是一种由核心与包壳组成的粒径小于 2 mm 的球形或椭球形颗粒,其核心可以是陆源碎屑、内碎屑、生物碳酸盐岩颗粒等,包壳由化学沉淀形成的呈同心状或放射状排列的微晶碳酸盐岩矿物组成,其粒径大于 2 mm 的称为豆粒^[1]。随着近年来新元古代、古生代及早三叠世特殊的大型鲕粒的发现和研究,这一概念又发生了重要变化:豆粒一般应用于与淡水成岩作用有关的非海相鲕状颗粒^[2],而粒径大于 2 mm 的海相鲕粒则被定义为“巨鲕”^[3-6]。豆粒主要形成于饱和碳酸盐的搅动水中的化学沉淀作用,或在低能环境中化学

收稿日期:2015-05-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41272131)

作者简介:范 鸿(1986—),男,湖北浠水人,硕士研究生,主要从事沉积学方面的研究。E-mail:fanhong0713@sina.com

时志强(1972—),男,河南开封人,教授,博士,主要从事沉积学、石油地质学方面的研究工作,本文通信作者。

E-mail:szqcudt@163.com

和生物化学的沉淀作用,或者呈结核状生长在干旱、半干旱的土壤层中^[7];巨鲕则是水体动荡的海相环境中无机化学和生物生长、生物化学沉淀共同作用下产生的结果。

鲕粒的成因主要有无机和有机两种说法:持有机成因论者认为,鲕粒的形成与藻类以及细菌的作用有关^[1];无机成因说主张碳酸盐鲕粒是在碳酸盐过饱和且扰动的水体环境,由溶液中所析出的碳酸钙(主要是文石)围绕被水扰动浮起的质点为核心沉淀而成的。国内对巨鲕的研究实例主要为豫西滎池地区寒武系第三统张夏组^[6]、湖北利川下三叠统大冶组^[4]和贵州沱阳剖面下三叠统罗楼组^[8]等,缺少微生物与巨鲕形成关系的研究。上扬子地区古生代及早三叠世碳酸盐岩沉积中偶见巨鲕,本次研究的巨鲕发现于下寒武统天河板组(重庆石柱石流剖面)、下三叠统飞仙关组(江油鱼洞子剖面),此外在中泥盆统金宝石组(北川甘溪剖面)发现葛万藻成因的核形石,将三者进行对比可进一步认识巨鲕的成因,尤其是微生物在巨鲕形成中的作用。

1 地质背景

早寒武世巨鲕样品采自重庆石流石柱地区(图 1(c))的天河板组,该组由天河板灰岩演变而来。中上扬子地区早寒武世主要表现为浅海环境^[9]。早寒武世早期的碳酸盐台地消亡后,研究区发生碎屑物质的填平补齐作用,使得重庆石柱地区沉积了以陆源沉积岩为主的下寒武统水井垞组、石碑组,其上沉积为天河板组灰岩和页岩^[10]。按岩性天河板组可分为两段,下部为灰岩,上部为页岩、泥质粉砂岩夹鲕粒灰岩,与上覆石龙洞组整合接触。在距离与石龙洞组分界线约两米处发育巨鲕灰岩透镜体(图 2(a)),最厚约 0.35 m,与鲕粒灰岩共生,其上下均发育黄灰色页岩。



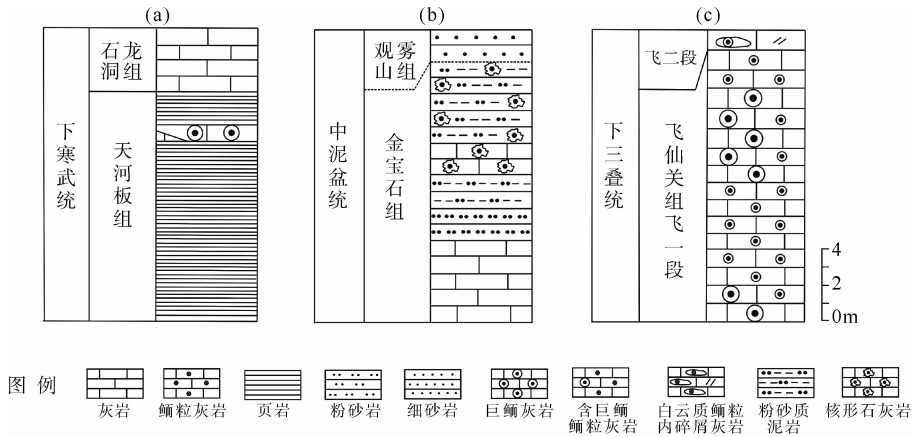
a. 北川甘溪剖面; b. 江油鱼洞子剖面; c. 石柱石流剖面

图 1 上扬子地区野外剖面地理位置图

Fig. 1 Location of study sections in Upper Yangtze Area

泥盆纪时龙门山地区位于上扬子板块北西边缘^[11],北川甘溪(图 1(a))剖面主体位于稳定型滨浅海相。中泥盆统下部的金宝石组为一套砂岩-泥岩-灰岩组成的两个海进-海退沉积旋回。本次研究的层位为北川甘溪剖面金宝石组近顶部粉砂质泥岩中所夹核形石及之下产生的粉砂质核形石灰岩(图 2(b))。其产出于金宝石组与上覆观雾山组平行不整合面之下,曾被描述成与淡水渗滤有关的豆粒。

早三叠世飞仙关期,上扬子西北部为开阔台地—海槽—孤立台地—海槽沉积环境格局,在海槽与台地的转换地带,发育了大套台缘滩^[12-13]。江油鱼洞子(图 1(b))剖面出露的下三叠统飞仙关组一段上部其整体上以厚层状鲕粒灰岩为主,夹中-厚层状含巨鲕鲕粒灰岩以及含鲕粒巨鲕灰岩(图 2(c)),局部呈透镜体状。



(a) 下寒武统天河板组; (b) 中泥盆统金宝石组; (c) 下三叠统飞仙关组

图 2 研究区野外剖面岩性柱状图

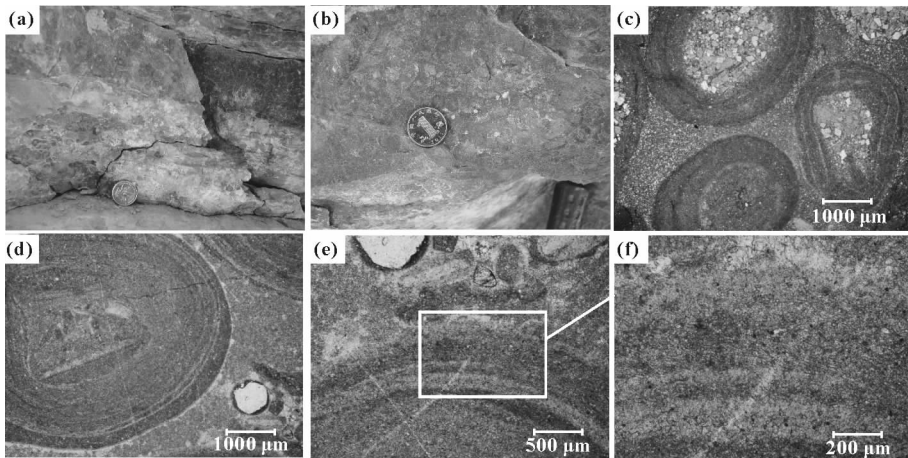
Fig. 2 Lithological columns of the study sections

2 巨鲕及核形石特征

2.1 下寒武统巨鲕特征

在重庆石流石柱剖面,下寒武统天河板组近顶部见巨鲕灰岩,岩层大体呈透镜体状,最厚达 35 cm,横向延伸可达 6 m 以上。其中的巨鲕为圆状-次圆状同心鲕粒,直径大小不一,最大可达 9 mm,大部分巨鲕颗粒直径集中在 4~8 mm (图 3(a))。宏观观察巨鲕约占岩石组分的 50%~55%^[10],见含量不等的正常鲕粒,含少量三叶虫等生屑。岩石多呈深灰色、灰色,部分巨鲕被铁质交代而呈浅褐色(图 3(b))。

显微镜下观察,巨鲕多具有较规则的、明暗相间的同心纹层,且暗层明显厚于亮层(图 3(c)(d))。同心纹层数量不等,最多可达 20 余层。在巨鲕外层局部可见纹层为突起状的不规则纹层,推测与微生物活动相关,放大观察可见不规则纹层中发育蓝细菌类微生物,多呈丝管状交织(图 3(e)(f)),管体间被灰泥充填,蓝细菌管状体直径仅为 10~15 μm ,单个管丝体的延伸长度多为 100~150 μm 。同时在巨鲕外部纹层可见灰黑色斑点状铁质矿物(图 5(e)(f))不均匀分布,其与微生物是否存在成因联系值得探讨。巨鲕核心内部为生屑、凝块石等,或为数个生屑被微晶方解石凝聚的团块(图 3(d)),可发生重结晶或者发生白云化现象(图 3(c))。巨鲕间充填灰泥杂基、粪球粒或正常鲕粒(图 3(c)(d)),局部粪球粒极为发育,与灰泥杂基共同存在于巨鲕粒间。



(a) 巨鲕灰岩宏观特征; (b) 被铁质交代呈浅褐色巨鲕灰岩宏观特征; (c) 茜素红染色的核心发生白云石化的巨鲕;

(d) 巨鲕同心纹层较规则,核心为包含生物碎屑团块; (e) 巨鲕的外部纹层见管束状微生物发育;

(f) 为(e)图矩形框放大,显示巨鲕外部纹层管束状微生物及斑点状金属物质

图 3 重庆石柱石流剖面下寒武统天河板组巨鲕特征

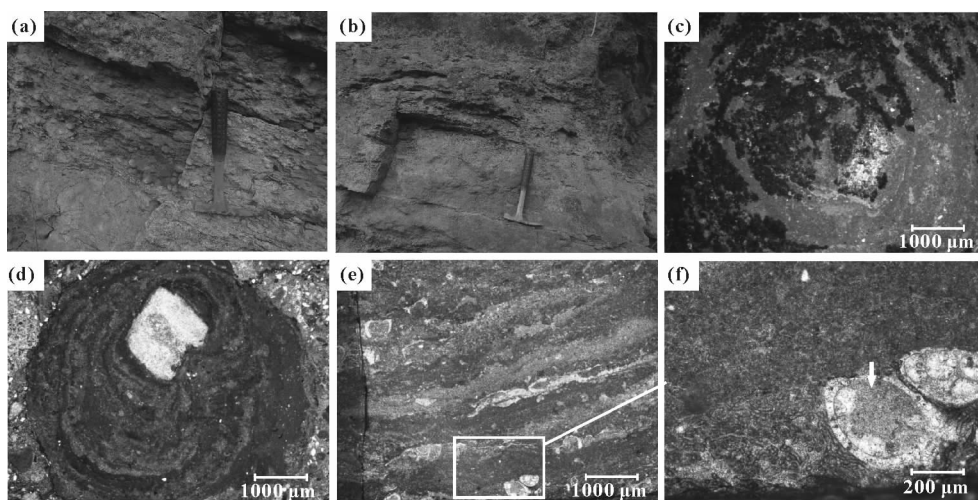
Fig. 3 Characters of giant ooids from Lower Cambrian Tianheban Formation at Shiliu Section in Shizhu, Chongqing

2.2 中泥盆统核形石特征

在北川甘溪中泥盆统剖面, 蓝宝石组近顶部发育核形石粉砂质泥岩, 厚约 2.5~4.0 m, 泥岩中发育厘米级核形石, 野外观察为圆状颗粒, 分散分布于灰黑色粉砂质泥岩中, 含量可占岩石的 35%~45% (图 4(a))。核形石呈圆球状, 颗粒巨大, 直径大小不一, 最大可达 3.5 cm, 一般约为 1~2 cm (图 4(a))。在该套灰黑色核形石粉砂质泥岩下, 发育泥质核形石灰岩 (图 4(b)), 其抗风化能力较上覆粉砂质泥岩强, 呈灰黑色、深灰色, 厚度大于 2 m, 核形石含量由上而下逐渐减少, 一般约为 40%~55%, 颗粒直径较上覆岩层中的核形石小, 大部分核形石的直径集中在 4~8 mm, 最大为 10 mm。

显微镜观察可见核形石内部不规则的明暗相间纹层 (图 4(c)(d)(e)(f)), 明暗纹层厚度分布不均, 暗层厚度明显多于亮层, 纹层整体多呈同心状, 同一层包壳大多数宽窄不一, 少量纹层出现间断, 部分颗粒纹层呈波状围绕生屑核心形成核形石 (图 4(d))。有的核形石圈层交界不明显 (图 4(c)), 疑为方解石重结晶所致。核形石内含一定泥质, 颗粒间多被灰泥充填, 边缘见生物碎屑。在核形石核心 (图 4(d)) 和纹层中亦见大量介形类、腹足类等生物碎屑 (图 4(c)(d)(e)(f)), 生物碎屑多见于核形石暗色纹层, 少量存在于亮层 (图 4(e)), 推测在水体能量较低、微生物生物化学作用形成暗层时, 嗜食微生物的后生生物 (如介形类、腹足类等) 也大量繁盛发育。在核形石颗粒内部可见大量突起状微生物富集体 (图 4(c)), 微生物富集体在核形石内部生长, 推测是由微生物在纹层内部生长生物化学作用产生。但核形石并未完全由微生物组成。

核形石内部所见大量微生物为葛万藻 (*Girvanella*) 钙化丝状体, 其杂乱分布在核形石暗色纹层中, 形态各异, 多呈弯曲管束状, 长短不一, 无分枝, 截面呈不规则圆状或椭圆状 (图 4(f)), 大部分直径为 10~18 μm , 最大直径可达 28 μm , 丝状体的延伸长度多为 80~180 μm , 分布较为密集, 互相交织在一起。葛万藻钙化丝状体管壁在单偏光镜下多呈深灰色, 由泥晶方解石组成, 管内多为浅灰色, 为微亮晶方解石充填, 丝状体分布密集互相交织在一起, 同时在核形石所含生屑腔室内部也可见微生物丝状体, 但其直径与长度比大部分葛万藻要小 (图 4(f))。核形石不规则微生物圈层对认识巨鲕纹层的形成有积极意义。



(a) 大量核形石分散在灰黑色粉砂质泥岩中; (b) 深灰色核形石灰岩 (放置地质锤处) 发育在核形石粉砂质泥岩之下;

(c) 具较多微生物富集体的核形石, 局部方解石重结晶; (d) 以生物碎屑为核心的核形石, 其外部见生屑、粉砂及粘土, 灰泥杂基; (e) 具大量生物碎屑的核形石纹层; (f) 为 (e) 图矩形框放大图, 核形石外部纹层中含大量葛万藻管束体, 可见较大生物碎屑内腔存在微生物 (白色箭头所指)

图 4 北川甘溪剖面中泥盆统蓝宝石组核形石特征

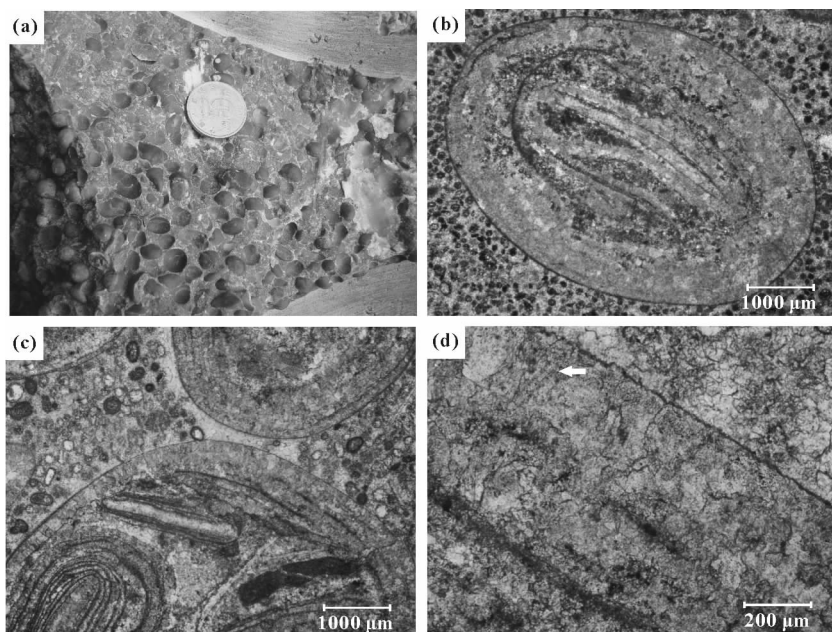
Fig. 4 Characters of oncoids from Middle Devonian Jinbaoshi Formation at Ganxi Section in Beichuan, Sichuan

2.3 下三叠统巨鲕特征

在江油鱼洞子剖面, 下三叠统飞仙关组飞一段上部见含巨鲕鲕粒灰岩和含鲕粒巨鲕灰岩, 夹于大套鲕粒灰岩中。巨鲕灰岩多呈深灰色到灰色, 层厚 0.3~1.0 m, 层厚较薄者呈透镜体状, 巨鲕直径可达 1.2 cm, 大

部分巨鲕颗粒直径集中在 3~8 mm 之间,外观多呈椭球状,个别为圆球状,可占岩石的 50%以上(图 5(a)),另见鲕粒、粪球粒、生屑颗粒及灰泥杂基。在岩石断面上可见薄皮巨鲕,与双壳类、腹足类等生物化石共生。部分鲕粒灰岩中含 10%~35%不等的巨鲕。

显微镜下观察巨鲕发育比较规则的明暗纹层,亮层厚度多于暗层,同心纹层界限明显,核心多为亮晶方解石(图 5(b))。除了次圆状的同心巨鲕,较为常见的还有复合巨鲕(图 5(c))。复合巨鲕内部常含多个形态不一的鲕粒,内部鲕粒多为次圆状或者椭圆状,个别为呈长条状的以生屑为中心的薄皮鲕。巨鲕内部的鲕粒间多被微晶方解石或假亮晶方解石充填,部分巨鲕同心纹层明暗明显,亮层厚度多于暗层(图 5(c))。巨鲕颗粒之间可见大量后生动物活动留下的深色粪球粒(图 5(b)(c)),推测为嗜食微生物的动物所排泄。在巨鲕内部暗色纹层可见很少量的微生物(图 5(d)),推测微生物不发育与水体能量较高外,也可能与当时后生动物发育相关,亦或是方解石重结晶作用较强而使微生物难以看清。



(a)巨鲕灰岩宏观特征;(b)被粪球粒包围的亮层较发育的巨鲕;(c)巨鲕复鲕,内部见多个鲕粒及生屑;
(d)巨鲕外部纹层中极少量丝状微生物(白色箭头所指)

图 5 江油鱼洞子剖面下三叠统飞仙关组巨鲕特征

Fig. 5 Characters of giant ooids from Lower Triassic Feixianguan Formation at Yudongzi Section in Jiangyou, Sichuan

3 巨鲕成因探讨

3.1 微生物对巨鲕及核形石的作用

巨鲕作为一种特殊的碳酸盐颗粒类型,其成因一直存在不同的说法。近年来对 Geneva 湖淡水鲕粒的调查及巴哈马台地现代文石鲕粒的研究表明^[15],构成鲕粒的碳酸盐晶体的形成与超微细菌存在关联,而且这些超微细菌对碳酸盐沉淀作用的影响与较大的蓝细菌相似^[4,16]。同时,有观点认为巨鲕最外缘的由蓝细菌组成的不规则突起状暗色层是一种“夭折的纹层”,为富有机质暗色层的初始状态,或为风暴轻微改造富微生物纹层后的特征,也不排除巨鲕沉积后蓝细菌在巨鲕边缘生长的可能性^[10]。在上扬子地区寒武系天河板组巨鲕和泥盆系金宝石组核形石中发现蓝细菌等微生物痕迹,在颗粒同心纹层形成中扮演了重要角色,此次研究发现微生物一般存在于颗粒的不规则纹层,在核形石中表现得尤为明显(图 4(e)(f)),微生物对碳酸盐颗粒纹层的形成起到构建作用,但是对巨鲕规则纹层具有破坏作用。

3.1.1 不规则纹层

偏光显微镜下,巨鲕多呈圆状或者次圆状,分选较好,内部明暗纹层区分明显。圈层是在低、中等能量交替并以弱搅动为主的水体环境中形成的^[6]。在巨鲕外部形成规则的同心纹层则需要更高的水体能量,这样才能使大颗粒的巨鲕受到搅动。在上扬子地区下寒武统、下三叠统所采巨鲕(图 3(e)(f),图 5(d))暗色纹层中均发现微生物的痕迹(尤其是在巨鲕的外层)。巨鲕及核形石的明暗纹层形成可大致反映水体能量的强弱变化,暗层发育、特别是不规则暗层发育则微生物常见,其形成时的水体趋向于低能,巨鲕或核形石受到的搅动弱,微生物能够更方便地在颗粒外层生长,观察发现微生物发育的巨鲕圈层明暗界限比较模糊,这在核形石中表现得更为明显。巨鲕暗色纹层中的微生物发育程度高于亮层,推测巨鲕暗色纹层的形成多与微生物相关,微生物发育促进巨鲕不规则纹层发育。中泥盆统金宝石组核形石中可见大量的微生物,不规则暗色纹层厚度大大厚于亮层,大量微生物(*Girvanella*)发育,与下寒武统和下三叠统巨鲕对比说明微生物特别发育则形成核形石,其代表的水体能量较巨鲕低。

3.1.2 规则纹层

下三叠统飞仙关组巨鲕的同心纹层中微生物较少,多为微亮晶方解石纹层。在低能超饱和碳酸钙水体环境中,碳酸钙围绕陆源碎屑或生物碎屑沉淀生长,沉淀到一定程度后,碳酸盐表面受到 Mg^{2+} , H^+ 或者 $MgCO_3$ 的剩余物质影响,沉淀作用停止,表面沉淀物与海水呈平衡状态^[17],从而形成巨鲕的核心(对于复鲕型巨鲕其核心不止一个)。微生物通过生物化学作用使碳酸钙等微晶体在生物膜表面沉淀并钙化,形成暗色纹层^[18]。当水体能量变强时,颗粒悬浮,水体中过饱和碳酸钙围绕核心进行化学沉淀,形成亮层,同时,波浪、潮汐等水流的作用促使明暗纹层被磨蚀并伴有碳酸盐沉淀加积,从而促使巨鲕保持球形^[19]。周期性反复,则形成巨鲕的多个纹层。明暗纹层规则发育显示了水动力变化规律,暗层比较薄和微生物不发育说明强水动力条件持续时间多于弱水动力条件,由此可以推测巨鲕的规则纹层是在较强水动力条件下化学沉淀和微生物共同作用的结果。

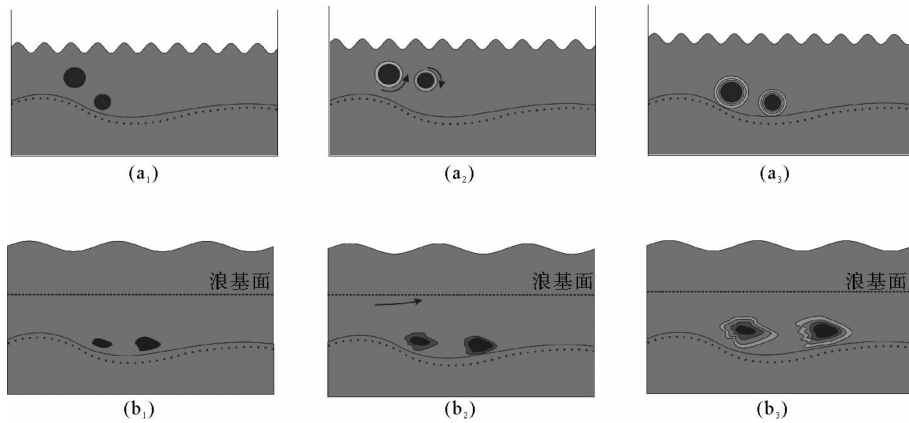
早三叠世的古海洋发育海底碳酸盐胶结岩等特殊沉积,显示当时的海洋回到了与元古代或太古代相似的极端环境,如缺氧、高碱度、碳酸钙过饱和等^[20-21],古海洋碳酸钙过饱和状态,有利于方解石直接从海水里化学沉淀,从而使得巨鲕的亮层更容易形成。在二叠纪至三叠纪转折时期,大气中 CO_2 的含量经历了实质性的增加^[22],而由 CO_2 引起的温室效应使全球温度升高达 $6\sim 8\text{ }^\circ\text{C}$,形成缺氧而富含 CO_2 的海水,深部海水缺氧引起海水翻转导致含 CO_2 , H_2S 和 HCO_3^- 的海水带至陆架环境,这样造成浅水碳酸盐超饱和^[5]。同时,大量 CO_2 引起全球变暖,可能导致飓风和风暴发生的强度和频率增加^[23-25]。三叠纪是地球发展历史上风暴沉积最为发育的时期之一^[26],早三叠世的极端古海洋、古气候条件提供了巨鲕形成的基本水化学环境和水动力条件:过量 CO_2 引起的碳酸钙过饱和的海水和由于风暴引起的规律动荡水动力条件,促进了巨鲕的形成。

3.2 巨鲕和核形石的成因模式

一般认为,形成鲕粒的必要条件有^[27]:①存在一个原始核心;②有序更新并经常脱 CO_2 的相对于钙碳酸盐过饱和的海水;③允许 CO_2 脱气的动荡环境^[28]。一般认为鲕粒皮层形成于海水中的直接沉淀作用、以及生物调节的作用机制^[29-30,16]但是,鲕粒皮层沉淀物的精确形成过程一直有待研究。前人研究总结的鲕粒形成过程^[31-32]包括:①生物作用过程;②化学沉淀作用过程;③物理作用过程;④以上过程的可能综合。

基于以上分析认为,生物碎屑、球粒、藻屑以及鲕粒、陆源碎屑等为巨鲕及核形石的生长发育提供了核心。在低能沉积环境中,底部水体不断搅动造成巨鲕原始核心的频繁移动,让其不断发育,在水体能量较弱的时候,蓝细菌发育在幼年巨鲕的外层,捕获周围环境中的微小碳酸盐颗粒,并通过生物化学作用促进碳酸盐沉淀形成暗层。当水体能量变强时,鲕粒被推起变成悬浮状态,水体中过饱和碳酸钙围绕颗粒沉淀形成微亮晶方解石浅色纹层。持续的生物作用可引起的碳酸钙沉淀导致不对称泥晶暗色纹层的形成^[33]。悬浮过程中的碳酸钙沉淀造成同心纹层中亮层的形成,经过水体环境能量不断的更迭变化,当鲕粒自身重力与海水最大水体能量达到平衡时,沉积过程结束,形成巨鲕(图 6(a₁)~(a₃))。在这一过程中,频繁的风暴作用有利于巨鲕的频繁搅动、沉积,同时也造成了巨鲕、粪球粒、破碎的生物碎屑、灰泥杂基等一同沉积下来。

当动荡水体的能量不足以将颗粒搅起呈悬浮状态时候,蓝细菌等微生物大量发育、不断生长,其分泌的粘液不断捕集、粘结细粒碳酸盐岩颗粒或碎屑,通过生物化学作用形成明暗层纹,具一定动荡、不断搅动的水体使层纹围绕其核心不断加积,在生物化学作用和机械作用共同参与下形成形态不规则的核形石(图 6(b₁)~(b₃))。马伯永等^[34]根据核形石灰岩中灰泥基质较多和较完整的生物碎屑判断,认为核形石可能形成于略低于正常浪基面的中低能的海水微弱动荡的浅潮下环境。根据杨仁超等^[35]对核形石的分类,中泥盆统金宝石组核形石应为藻(菌)纹层核形石,其对应的水体能量和沉积环境应该为中-低能量的泻湖或潮下带。



(a₁)巨鲕原始核心形成于动荡水体;(a₂)核心在有规律水动力条件变化下悬浮、沉降形成明暗层;
(a₃)颗粒自身重力与水动力达到平衡沉降形成巨鲕;
(b₁)核形石原始核心;(b₂)核心在一定搅动的水体中围绕核心同心加积;(b₃)形成核形石并沉淀

图 6 巨鲕及核形石的形成过程

Fig. 6 Sketch map showing the evolution of giant ooids and oncolites

4 结论

微生物在上扬子地区重庆石柱石流地区的上寒武统天河板组巨鲕中表现明显,主要出现在暗色层纹及外侧纹层中,微生物参与巨鲕形成过程,说明巨鲕的形成与微生物的生物化学作用密不可分。

通过对上扬子地区重庆石柱石流上寒武统天河板组及江油鱼洞子下三叠统飞仙关组巨鲕的观察,微生物在巨鲕形成过程中参与构建暗色纹层,促进同心纹层加积,对巨鲕的形成具有建设性作用。经与中泥盆统金宝石组核形石纹层中微生物对比观察发现,微生物发育的区域纹层厚度不均匀且形态不规则,说明微生物对巨鲕规律纹层是具有破坏性的,这在上寒武统天河板组巨鲕的外层不规则纹层中亦有显示。

巨鲕和核形石都是在无机化学反应和微生物生物化学反应共同作用下形成的产物。不同的水体环境制约着微生物的发育程度,进而控制了巨鲕与核形石的形成。

参考文献:

[1]何幼斌,王文广. 沉积岩与沉积相[M]. 北京:石油工业出版社,2007:108-113.
 [2]Flügel E. Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application[M]. New York: Springer-Verlag, 2004: 35-42.
 [3]Sumner D A, Grotzinger J P. Numerical modeling of ooid size and the problem of Neoproterozoic giant ooids[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63: 974-982.
 [4]梅冥相. 显生宙罕见的巨鲕及其鲕粒形态多样性的意义:以湖北利川下三叠统大冶组为例[J]. 现代地质, 2008, 22(5): 683-698.
 Mei Mingxiang. Implication for the unusual giant oolites of the phanerozoic and their morphological diversity: A case study from the Triassic Daye Formation at the Lichuan Section in Hubei province, south China[J]. Geoscience, 2008, 22(5): 683-

698.

- [5] 李飞, 王夏, 薛武强, 等. 一种新的错时相沉积物: 巨鲕及其环境意义[J]. 沉积学报, 2010, 28(3): 585-595.
Li Fei, Wang Xia, Xue Wuqing, et al. Origin and environmental significance of giant ooids in the Early Triassic: A new kind of anachronistic facies[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(3): 585-595.
- [6] 代明月, 齐永安, 陈尧, 等. 豫西泥池地区寒武系第三统张夏组的巨鲕及其成因[J]. 古地理学报, 2014, 16(5): 726-734.
Dai Mingyue, Qi Yong'an, Chen Yao, et al. Giant ooids and their genetic analysis from the Zhangxia Formation of Cambrian Series 3 in Mianchi area, western Henan province[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(5): 726-734.
- [7] 王洁, 宋玉萍. 从巨鲕的概念窥视碳酸盐岩包覆颗粒的研究[J]. 大庆石油地质开发与研究, 2010, 29(2): 40-43.
Wang Jie, Song Yuping. The research progress of coating grains in carbonate rock based on the definition change of large ooid[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2010, 29(2): 40-43.
- [8] 李飞, 吴夏. 贵州沱阳剖面二叠纪末浅水沉积特征及其古环境意义[J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 679-688.
Li Fei, Wu Xia. Characteristics and palaeoenvironmental significances of shallow-marine sediments in the latest Permian, Moyang Section, Guizhou[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 679-688.
- [9] 牟传龙, 梁薇, 周恩恩, 等. 中上扬子地区早寒武世(纽芬兰世—第二世)岩相古地理[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(3): 41-53.
Mou Chuanlong, Liang Wei, Zhou Kenken, et al. Sedimentary facies and palaeogeography of the middle-upper Yangtze area during the Early Cambrian (Terreneuvian-Series 2)[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(3): 41-53.
- [10] 段雄, 时志强, 金鑫, 等. 下寒武统巨鲕的微生物成因: 来自重庆石柱地区的证据[J]. 古地理学报, 2015, 17(2): 241-248.
Duan Xiong, Shi Zhiqiang, Jin Xin, et al. Microbial cause for giant ooids: the evidence from the Lower Cambrian in Shizhu, Chongqing Municipality, China[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(2): 241-248.
- [11] 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社, 1985: 37-51.
- [12] 王一刚, 洪海涛, 夏茂龙, 等. 四川盆地二叠、三叠系环海槽礁、滩富气带勘探[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 25-27.
Wang Yigang, Hong Haitao, Xia Maolong, et al. Exploration of reef-bank gas reservoirs surrounding Permian and Triassic troughs in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1): 25-27.
- [13] 魏国齐, 陈更生, 杨威, 等. 川北下三叠统飞仙关组“槽台”沉积体系及演化[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 254-260.
Wei Guoqi, Chen Gengsheng, Yang Wei, et al. Sedimentary system of platformal trough of Feixianguan Formation of Lower Triassic in Northern Sichuan Basin and its evolution[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 254-260.
- [14] 荣辉, 焦养泉, 吴立群, 等. 江油二郎庙鱼洞子剖面飞仙关组鲕粒滩内部构成[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2010, 35(1): 125-136.
Rong Hui, Jiao Yangquan, Wu Liqun, et al. Oolitic shoal composition and its implication of Feixianguan Formation in Yudongzi Section of Erlangmiao, Jiangyou, Sichuan, China[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2010, 35(1): 125-136.
- [15] Davaud E, Girardclos S. Recent freshwater ooids and oncooids from western Lake Geneva (Switzerland): Indications of a common organically mediated origin[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(3): 423-429.
- [16] Folk R L, Lynch F L. Organic matter, putative nannobaeteria and formation of ooids and hardground[J]. Sedimentology, 2001, 48(2): 215-229.
- [17] 周书欣. 碳酸盐鲕粒的成因与鉴别[J]. 地质地球化学, 1982, 10(1): 16-20.
Zhou Shuxin. The cause of the carbonate ooid and differential[J]. Geology-Geochemistry, 1982, 10(1): 16-20.
- [18] Reitner J, Peckmann J, Blumenberg M, et al. Concretionary methane-seep carbonates and associated microbial communities in Black Sea sediments[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 227: 18-30.
- [19] 梅冥相. 鲕粒成因研究的新进展[J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 21-32.
Mei Mingxiang. Brief introduction on new advances on the origin of ooids[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 21-32.
- [20] Woods A D, Bottjer D J, Mutti M, et al. Lower Triassic large sea-floor carbonate cements: Their origin and a mechanism for the prolonged biotic recovery from the end-Permian mass extinction[J]. Geology, 1999, 27(7): 645-648.
- [21] 赵小明, 牛志军, 童金南, 等. 早三叠世生物复苏期的特殊沉积“错时相”沉积[J]. 沉积学报, 2010, 8(2): 314-323.
Zhao Xiaoming, Niu Zhijun, Tong Jinnan, et al. The distinctive sediments in the Early Triassic recovery time “anachronistic

- facies”[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 8(2): 314-323.
- [22] Berner R A, Kothavala Z. Geocarb III: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time[J]. *American Journal of Science*, 2001, 301(2): 182-204.
- [23] Barron E J. Severe storms during Earth history[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101: 601-612.
- [24] Duke W L. Hurmmocky cross-stratification, tropical hurricanes, and intense winter storms[J]. *Sedimentology*, 1985, 32: 167-194.
- [25] Marsaglia K M, Klein G D. The paleogeography of Paleozoic and Mesozoic storm depositional systems[J]. *Journal of Geology*, 1983, 91: 117-142.
- [26] 时志强, 伊海生, 曾德勇, 等. 上扬子地区下三叠统飞仙关组一段: 大灭绝后从停滞海洋到动荡海洋的沉积记录[J]. *地质论评*, 2010(6): 769-780.
Shi Zhiqiang, Yi Haisheng, Zeng Deyong, et al. The lowest member of Lower Triassic Feixianguan Formation in Upper Yangtze region: Sedimentary records from sluggish water to turbulent ocean after the mass extinction[J]. *Geological Review*, 2010(6): 769-780.
- [27] Duguid S M A, Kyser T K, James N P, et al. Microbes and ooids[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80: 236-251.
- [28] Simone L. Ooids: A review[J]. *Earth Science Reviews*, 1980, 16: 319-355.
- [29] Davies P J, Bubela B, Ferguson J. The formation of ooids[J]. *Sedimentology*, 1978, 25: 70-79.
- [30] Gaffey S J. Formation and infilling of pits in marine ooid surfaces[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1983, 53: 193-208.
- [31] Fabricius F H. Origin of marine ooids and grapestones[M]// *Contribution to Sedimentology*. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1977: 100-113.
- [32] Reid R P, Visscher P T, Decho A W, et al. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites[J]. *Nature*, 2000, 406: 989-992.
- [33] Freeman T. Quiet water oolites from Laguna Madre, Texas[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1962, 32: 475-483.
- [34] 马伯永, 王训练, 王根厚, 等. 青藏高原羌塘盆地东缘贡日地区中侏罗统布曲组碳酸盐岩微相与沉积环境[J]. *地质通报*, 2009, 28(5): 609-617.
Ma Boyong, Wang Xunlian, Wang Genhou, et al. Carbonatemicro facies and sedimentary environment of the Middle Jurassic Buqu Formation in the Gongri area, eastern part of the Qiangtang Basin, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(5): 609-617.
- [35] 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 核形石研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 465-474.
Yang Renchao, Fan Aiping, Han Zuozhen, et al. Status and prospect of studies on oncoid[J]. *Advance in Earth Science*, 2011, 26(5): 465-474.

(责任编辑: 高丽华)