

文章编号: 1000-0550(2010) 03-0585-11

# 一种新的错时相沉积物<sup>1</sup>

## ——巨鲕及其环境意义

李 飞<sup>1</sup> 王 夏<sup>1</sup> 薛武强<sup>1</sup> 颜佳新<sup>1,2</sup>

(1 中国地质大学地球科学学院 武汉 430074; 2 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室 武汉 430074)

**摘 要** 华南下三叠统缓坡背景的地层中广泛发育高能滩相鲕粒灰岩, 其中含相当数量的巨鲕, 粒径大部分在 2~6 mm 之间, 最大可达 12 mm。巨鲕的核心类型以多晶粒状方解石和球粒为主, 具明暗相间的同心纹层, 沿切线方向定向排列的晶体结构表明其原生矿物可能为文石。含巨鲕灰岩与生物碎屑灰岩交互沉积, 指示了当时海平面的相对变化。巨鲕在新元古代地层中广泛发育, 但在显生宙和现代海洋环境中超过 5 mm 的鲕粒相当少见。巨鲕在二叠纪末灭绝事件后大量出现, 随着中三叠世生态的复苏、海洋环境趋于正常而又消失。这些特征说明巨鲕可以作为一种错时相沉积物, 它的形成无疑与当时的生态和海水环境有关, 代表着一类特殊的沉积学现象。分析了巨鲕产出背景、微观结构和沉积特征, 对于了解其成因、探索二叠纪—三叠纪之交地质突变期异常的生态状况和特殊的海洋环境具有重要意义。

**关键词** 巨鲕 错时相 早三叠世 华南

**第一作者简介** 李飞 男 1986 年出生 研究生 古生物与地层学 E-mail feinan\_lf@gmail.com

**通讯作者** 颜佳新 jxyan@cug.edu.cn

**中图分类号** P588.24<sup>+</sup>.5 P534.51 文献标识码 A

二叠纪—三叠纪之交的大灭绝是五次灭绝事件中最严重的一次<sup>[1]</sup>, 造成当时海洋生态系统全面瓦解, 各种繁盛的生物组合突然消失, 生态环境几近空缺<sup>[2]</sup>。同时海洋沉积体系也发生相当大的改变, 出现了大量的特殊沉积构造, 这些沉积特征在寒武纪之前的海洋环境中广布, 随着奥陶纪后生动物大发展而退出正常浅海环境。当这些沉积物在早三叠世浅海环境中再次广泛发育时, 被认为在时间上或环境上发生了错位, 所以称之为错时相沉积<sup>[1, 3]</sup>。已知的错时相沉积包括扁平砾石砾岩<sup>[4-6]</sup>、微生物岩<sup>[7, 8]</sup>、海底碳酸盐胶结岩扇<sup>[9]</sup>、皱纹构造<sup>[6, 10]</sup>、薄层灰岩—粉砂质灰岩和条带灰岩<sup>[11]</sup>等。除这些已证实的类型之外, 本次研究认为广泛发育于下三叠统中的特殊沉积物—巨鲕也应归入错时相沉积的范畴。

鲕粒是由钙质纹层围绕单个核心而形成的圆形或椭圆形包粒 (coated grain), 以光滑、均匀的纹层结构, 不具有渗流特征而与核形石和渗流豆粒相区别<sup>[12-13]</sup>。对于一些粒径突破 2 mm, 而形态结构和矿物组分没有发生改变的鲕粒, 称之为巨鲕 (giant ooids)<sup>[13, 14]</sup>。其主要分布在前寒武 (新元古代最多) 地层当中<sup>[14-22]</sup>, 在显生宙 (尤其是奥陶纪之后) 和现代

海相环境中超过 5 mm 的巨鲕相当少见<sup>[14, 23-25]</sup>。前人<sup>[26-28]</sup>在对华南早三叠世鲕粒灰岩的详细研究中已经注意到了这类“特殊”鲕粒, 称之为“大鲕”或是“豆粒”。限于当时的认识水平, 对巨鲕只是进行简单的形貌描述, 没有对其特殊性进行分析。随着人们对碳酸盐鲕粒成因的深入研究, 对这类鲕粒有了新的认识。最新的研究已证实华南下三叠统多个剖面<sup>[29-31]</sup>都存在巨鲕, 在特提斯西北缘德国盆地同期地层中也有报道<sup>[32]</sup>。本文通过对现有资料的整理发现, 早三叠世巨鲕分布范围广泛, 在早三叠世大量发育并非偶然现象, 而是和当时的环境有着密不可分的联系<sup>[32-34]</sup>。

本文结合所研究剖面下三叠统巨鲕的形态特征、分布规律及产出背景等, 对其在灭绝事件后荒凉的海洋环境中突然大量出现的原因及意义进行了初步探讨。

## 1 地质背景

早三叠世华南仍延续晚二叠世古地理格局, 扬子板块北部为碳酸盐台地, 南部为陆间及大陆边缘盆地。其中在上扬子台地周缘、江南隆起及南宁台地两

<sup>1</sup> 国家自然科学基金项目 (批准号: 40472062) 和中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目 (编号: G0800-06-ZS-319) 联合资助。

收稿日期: 2009-05-22 收修修改稿日期: 2009-08-20

侧广泛发育碳酸盐鲕粒浅滩<sup>[28]</sup>。扬子台上的浅滩主要是从康滇古陆滨岸向东、向南进积,北部大巴山和西部龙门山沿二叠纪形成的隆起高地向外进积。最终形成围绕上扬子台地边缘分布的鲕粒滩。东部沿江南隆起带两侧,向外进积至奥伦尼克期末发育成了一个规模较大的鲕粒滩<sup>[27, 35]</sup>,南宁台地及南盘江盆地中几个孤立台地周缘也都发育有鲕粒滩相沉积。与江南隆起带鲕粒滩类似,这些滩的进积作用时间较长,一直延续到奥伦尼克期末<sup>[27, 28]</sup>(图 1)。

在笔者研究过程中发现原本认为在显生宙海相地层中非常罕见的巨鲕在早三叠世滩相地层中大量出现,已经发现的地点包括无锡、长兴、上饶、大冶、来宾、崇左、平果、罗甸(大贵州滩)、利川、赤壁、织金等地<sup>[26, 29-31, 36-38]</sup>。含巨鲕浅滩发育的基底为印度期碳酸盐缓坡背景下的薄层泥晶灰岩<sup>[27]</sup>或孤立台地背景下低缓的微生物岩建隆<sup>[39]</sup>。本文以大贵州滩南缘的罗甸沫阳剖面为例,介绍巨鲕的岩性特征和沉积特征。

## 2 鲕粒特征—以沫阳剖面为例

沫阳剖面位于贵州省罗甸县沫阳镇附近,研究区为一套厚层鲕粒灰岩,局部含少量腹足、双壳类和棘皮类碎片。鲕粒灰岩下部为上二叠统长兴组厚层生屑灰岩,上覆地层为下三叠统罗楼组具平行纹层的砖红色泥岩(图 2)。

### 2.1 鲕粒岩石学特征

#### 2.1.1 鲕粒类型

正常鲕 从野外宏观观察来看,鲕粒大小不一,浅灰色同心圆状,纹层明暗相间,保存于厚层亮晶颗粒灰岩之中(图 3A, B)。鲕粒个体分布较为密集,共生的生物化石较少,种类单一,主要为双壳类和腹足类。镜下观测表明,沫阳剖面鲕粒全部为同心圆结构,圆形—椭圆形。鲕粒粒径以 0.5~3 mm 为主,已观测到的最大粒径为 12 mm。多数鲕粒保存较好,结构清晰,未发生白云岩化。

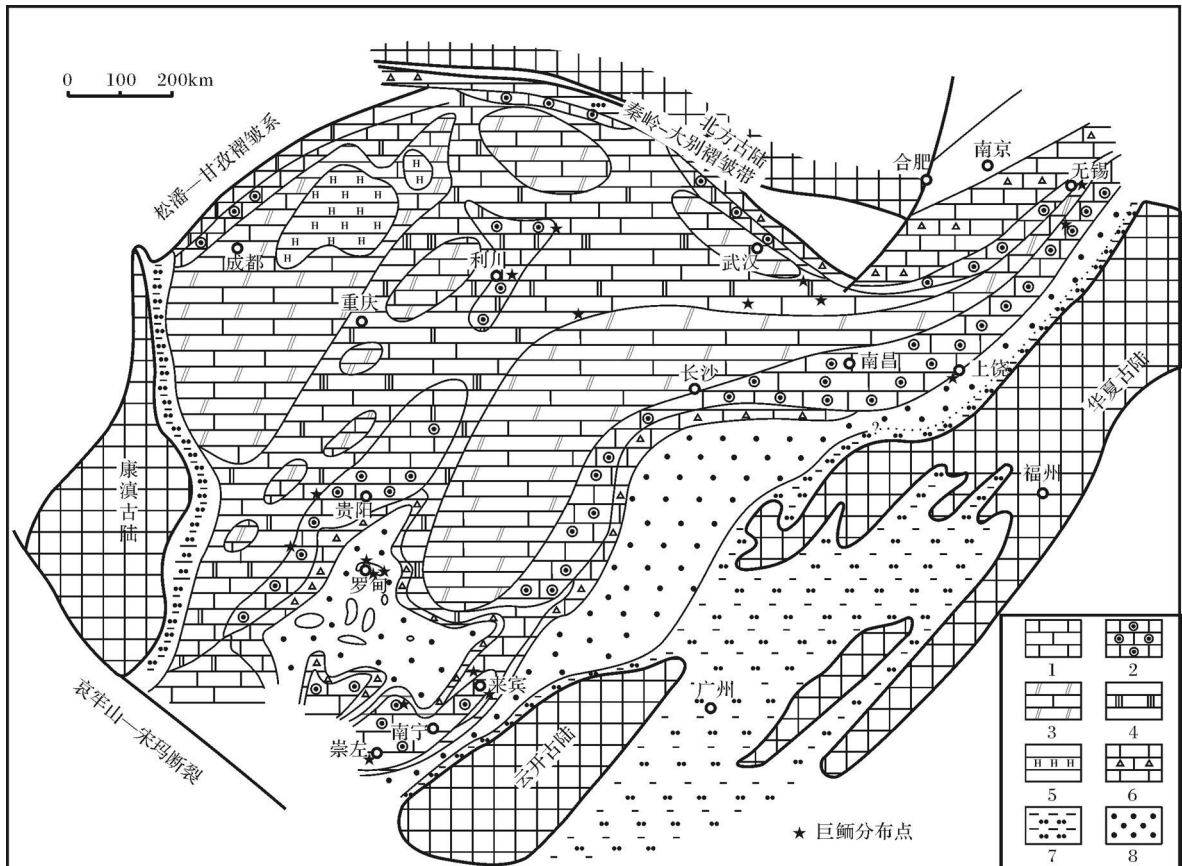


图 1 华南早三叠世岩相古地理(据文献[28]和[40]修改)及巨鲕分布

1 开阔台地相:灰岩、页岩,常见风暴沉积; 2 浅滩相:灰岩、鲕粒灰岩、白云岩组合; 3 局限台地及蒸发岩相:主要为潮坪沉积的灰岩、白云岩及部分萨布哈沉积; 4 硬石膏岩; 5 盐湖相:主要为萨布哈及盐湖沉积石盐、硬石膏、白云岩; 6 斜坡相:灰岩、角砾灰岩组合,页岩、粉砂岩、角砾灰岩组合; 7 滨岸—陆架相:粉砂岩、泥岩互层; 8 深水盆地:火山碎屑浊积岩、陆源碎屑浊积岩。

Fig 1 Lithofacies paleogeography of Early Triassic of South China (modified from refs [28, 40]), showing the distribution of giant oolites

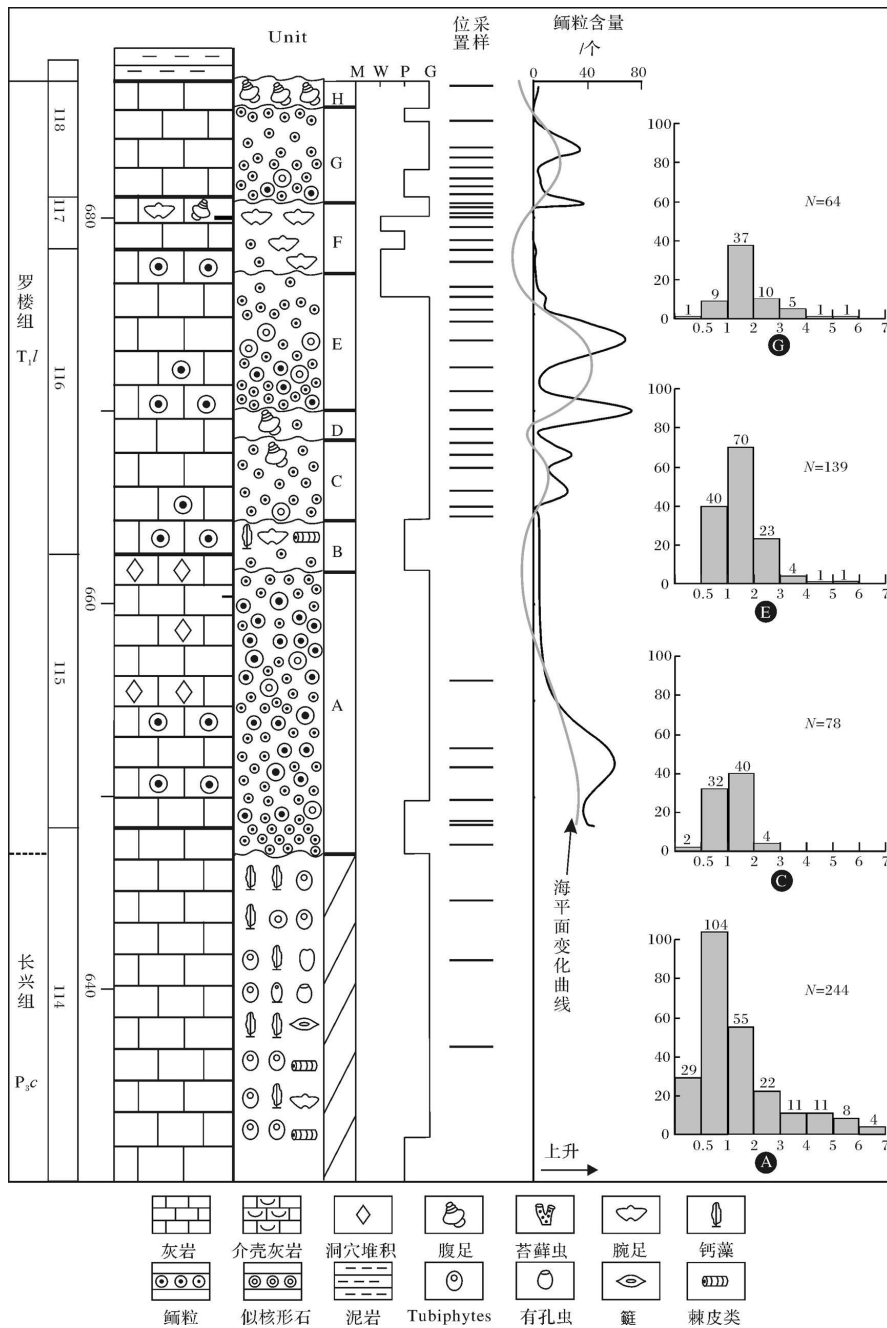


图 2 贵州罗甸沫阳剖面下三叠统罗楼组综合地层柱及鲕粒丰度、粒径统计图

A—H 共 8 层: 鲕粒富集层 (A、C、E、G) 和生物碎屑富集层 (B、D、F、H) 各 4 层, 相间排列。右图为四个鲕粒富集层鲕粒粒径统计图。横坐标表示粒径大小区间 (mm), 纵坐标表示鲕粒含量区间 (个)。N 表示鲕粒总量, A、E 和 G 层各统计 5 块样品, C 层统计 4 块样品, 间隔 1 m 连续采样。单块样品鲕粒数据来自镜下岩石薄片统计, 表示每 5 cm<sup>2</sup> 范围内鲕粒个数。

Fig 2 Synthesized column of the Lower Triassic Luoju Formation in Moyang section, Luodian County, Guizhou Province, showing statistical charts of ooid abundance and diameter on the right

破碎和再生的鲕粒 这也是镜下常见的颗粒类型 (图 3H), 常与完整鲕共生, 但丰度不高。巨鲕和长条状鲕粒更容易受到压实作用而破碎。一些鲕粒由于压实作用不太强烈, 破碎后一般在原地附近, 保

持大概外形, 可以拼合 (图 3G)。有些是在沉积物渐次加厚、上覆压力不断增大的情况下, 鲕的破裂可以穿过纹层, 引起鲕粒全部开裂。王英华等<sup>[41]</sup>认为破碎鲕粒形成与变形作用密切相关, 有些变形鲕的破碎



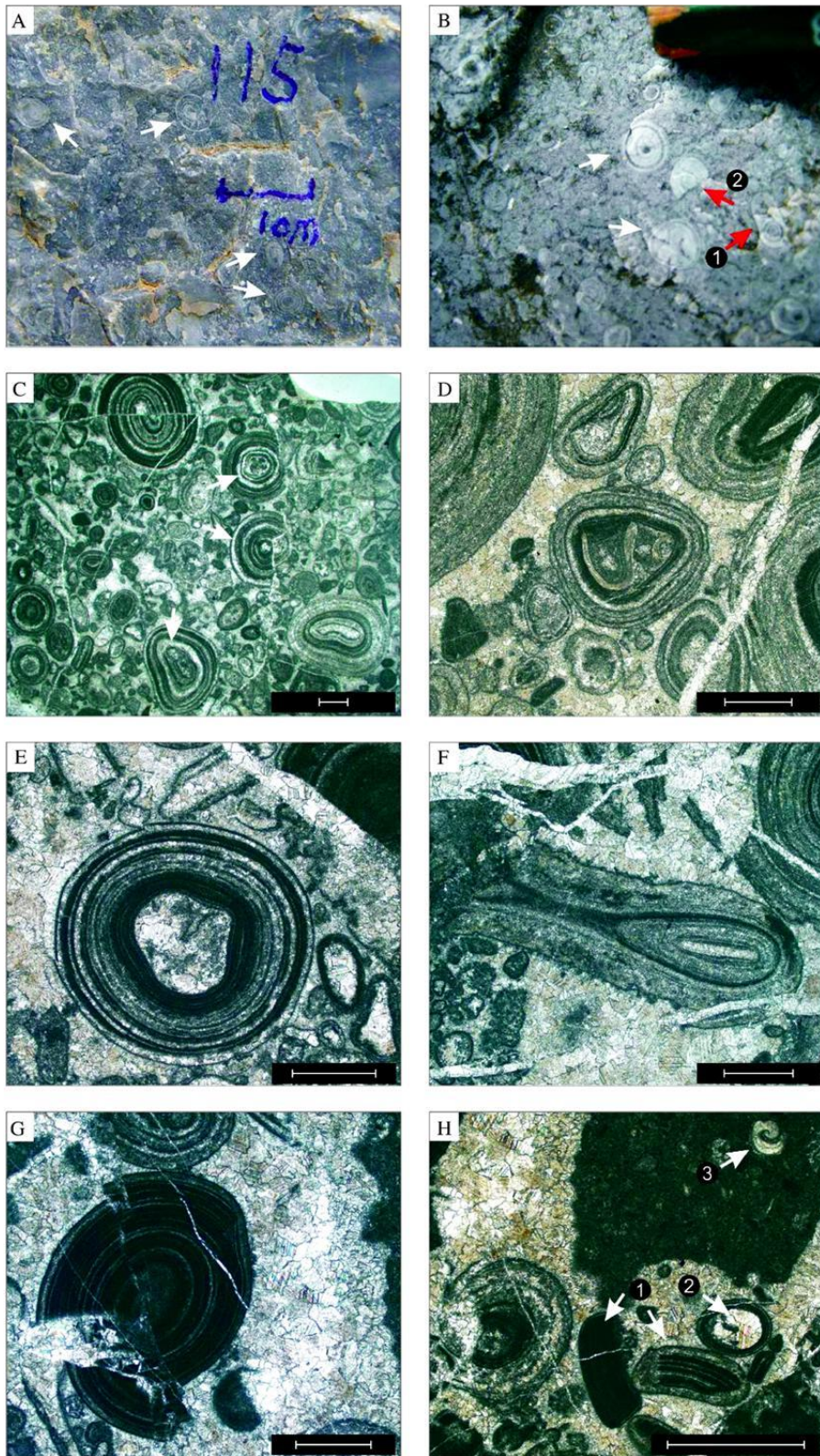


图 3 沫阳剖面鲕粒宏观及镜下特征

A—B 为野外照片, 其中①为复鲕, ④为鲕粒碎片; C—H 为镜下照片, 单偏光, 比例尺均为 2 mm。包括各种巨鲕, 破碎的鲕粒, 再生鲕和变形鲕。鲕粒核心包括多晶粒状方解石、似球粒、完整鲕粒和鲕粒碎片。H: 其中①为再生鲕粒, ④鲕粒的核心原生成分可能为生物碎屑, ④藻屑内见腹足化石, 推测为异地保存。

Fig 3 Photos showing the macroscopic and microscopic features of giant ooids in Moyang section

可能与淡水方解石的结晶作用有关。再生的鲕粒是指核心为鲕粒碎片, 生长过程中被纹层重新包裹的鲕粒。这表明鲕粒在形成过程中发生过间断, 受到多种同沉积作用的改造。

**复鲕** 主要是由多个较小的鲕粒作为核心, 被光滑的鲕状纹层包裹, 形状不规则。颗粒粒径较大(从 2~7 mm), 被包裹的成分既包括鲕粒, 也有一些球粒和化石碎片, 还有少量微晶基质。纹层稀疏, 总体较薄。这可能是由微生物或者藻类粘结缠绕鲕粒、化石碎片、球粒和松散的粉砂质颗粒后凝聚形成<sup>[42]</sup>。这些复鲕以平滑的纹层结构而与其他类型的聚合颗粒(如葡萄石、凝块石等)相区别<sup>[30]</sup>。复鲕的形成是经过粘结、凝聚和胶结作用等多个阶段才最后形成的, 沉积的水体环境可能是鲕粒中最浅的<sup>[43]</sup>。

**变形鲕粒和扭曲的鲕粒** 受强烈构造压力影响扁化, 形成蝌蚪状、链状或飘带状的鲕粒<sup>[41]</sup>。扭曲的

鲕粒比较多见, 鲕粒的纹层散开类似于拖长的尾巴(图 3F)。临近的两个鲕粒同时发生扭曲, 纹层相互接触结合类似于“眼睛”。此类鲕粒在镜下较少出现, 是在成岩早期, 刚生成鲕粒在未胶结或弱胶结时受外界压力作用, 变形压紧后形成的<sup>[44~46]</sup>。

### 2.1.2 鲕粒核心

由多晶粒状方解石、完整的鲕粒、鲕粒碎片和似球粒四种类型组成。其中多晶粒状方解石核心(图 3E)的原生成分可能为双壳类或腹足类碎片。核心仍为鲕粒的大鲕反映了其在形成过程中经历了多次较长时间的间断, 可以根据纹层类型和疏密程度与其他鲕粒进行区别。鲕粒的外形容易受到核心类型的影响, 针状或柱状核心形成的鲕粒形貌与其核心延伸方向一致, 并且纹层较薄。这种鲕粒的核心全部为多晶粒状方解石, 没有发现核心为完整生物化石的鲕粒。

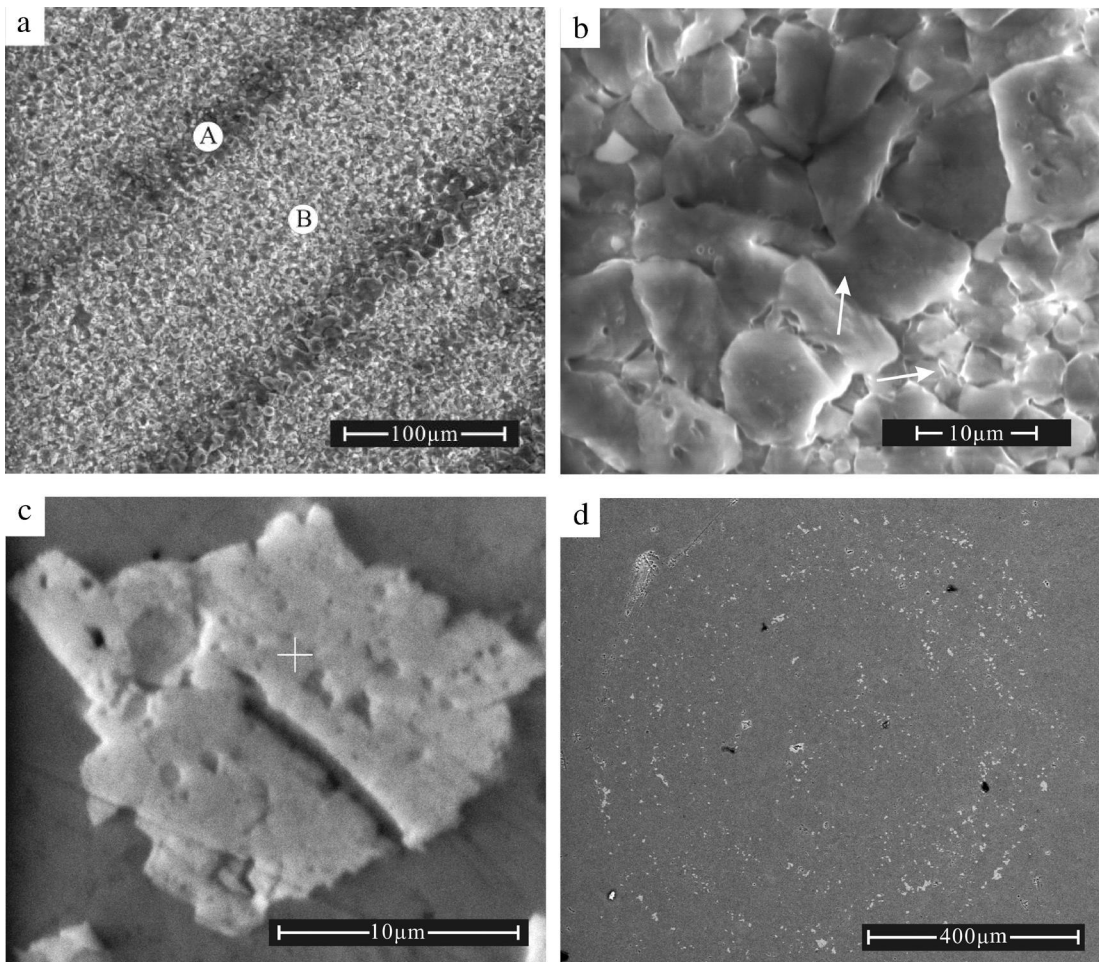


图 4 扫描电镜下鲕粒纹层特征

a 鲕粒纹层显微特征: A 为暗色纹层; B 为亮色纹层; b 向上的箭头指示晶形较大的暗色纹层, 向右的箭头指示晶形较小的亮色纹层。两者之间界限明显; c 亮色纹层内的自生磷酸盐矿物, 形状不规则, 表面具溶蚀孔洞; d 由磷酸盐颗粒组成的圈层结构。环境扫描电子显微镜型号: Quanta 200 低真空模式下。



### 2.1.3 纹层

暗色纹层与亮色纹层相间排列,两种纹层接触平整,光滑致密。在一些鲕粒纹层中还存在两类特殊的亮色层(图 3C、D),厚度远大于普通的亮色或暗色纹层:一类是由干净的方解石晶粒沿切线方向排列而形成的,分布在鲕粒纹层之间或最外层,形成明显的亮带;另一类是由粗晶方解石组成的波状条带,分布于巨鲕纹层之间,阴极发光显微镜下具有良好的发光性。推测这两类纹层的形成可能与藻类有关,可以指示巨鲕形成的多期性:部分鲕粒受水动力条件的影响(如风暴等)多次被搅动,以鲕核的形式参与生成更大的鲕粒。这样在平静期时,如果鲕粒被藻类等包裹、缠绕的话就会在巨鲕纹层中记录下来。另一部分未被搅动的鲕粒和新生成鲕粒仍保留原来大小,造成巨鲕和粒径较小鲕粒的混生。从沿切线方向定向排列的晶体结构和电子探针分析结果未发表数据来看,鲕粒原生矿物成分为文石,没有发现具放射状纹层类型的鲕粒。

在低真空模式下通过 SEM 观察巨鲕样品,发现亮色纹层和暗色纹层的成分大致相同,主要为方解石晶粒(图 4a、b)。其中暗色纹层(A)厚度 28 $\mu\text{m}$ ,亮色纹层(B)较厚,达 120 $\mu\text{m}$ (图 4a)。方解石颗粒自形程度高,表面有些溶蚀孔洞,两类纹层接触较为平整。但是暗色纹层内方解石颗粒明显较亮色纹层内方解石粗大。对另一巨鲕样品 SEM 观察发现,鲕粒纹层中存在一些不连续层(图 4d)。放大后发现为不规则片状颗粒(图 4c),表面具有孔洞。此种颗粒大小不一,明显不同于方解石颗粒。EDS 分析显示该颗粒 P、F 元素异常高,分别达到 7w% ~ 10w% 和 1.5w% ~ 2.1w%,可能为磷灰石。与其相邻的方解石颗粒中则没有 P 元素异常。这种自生磷酸盐矿物是否和海水翻转(上升流)模式<sup>[51]</sup>有关,还有待进一步研究。

### 2.2 鲕粒沉积特征

根据下三叠统罗楼组鲕粒的富集程度、生物类型和岩性等特征将该段地层分为 A—H 共 8 个组合,其中 A、C、E 和 G 层为鲕粒富集层, B、D、F 和 H 层为生物碎屑富集层。鲕粒富集层和生物碎屑富集层交替出现,成韵律性变化(图 2)。

A 层 从 H114 层顶部开始出现大量鲕粒和鲕粒碎片,极少量的复合鲕粒。大的鲕粒常呈破碎状。鲕粒之间为亮晶方解石胶结物。鲕粒纹层大多清晰明显。鲕粒表面光滑,外层一般被较宽的亮色层包裹。鲕粒核心类型以破碎的鲕粒、多晶粒状方解石和

球粒三种为主。向上见部分鲕粒纹层发生塑性拉伸,形成蝌蚪状的变形鲕、纹层厚度不均匀的偏心鲕等。顶部鲕粒数量明显减少,局部泥粒岩,出现少量介壳碎片。

B 层 大量的藻屑、海百合茎、双壳和腹足碎片。少量鲕粒,核心类型为多晶粒状方解石,纹层较少。常见泥晶套和球粒。顶部发育似核形石。

C 层 底部鲕粒纹层不清晰,存在大量的球粒。向上鲕粒形状多不规则。见少量腹足化石,个体较小,壳体发生溶蚀。鲕粒多数 1~2 mm,核心类型以多晶粒状方解石为主,生物碎屑和部分鲕粒的边缘泥晶化严重。

D 层 含有少量鲕粒,大量泥晶化颗粒。出现少量腹足碎片,与小的鲕粒共生。

E 层 底部鲕粒大量富集,粒径大。核心类型多样,包括破碎的鲕粒,完整的鲕粒,多晶粒状方解石和球粒。鲕粒大多为圆形,少量为椭圆形。纹层光滑清晰,亮色纹层厚度往往大于暗色纹层。下部见大量的似核形石,与底部相比鲕粒粒径减小,形状以圆形居多,存在少量似核形石和复合鲕粒。鲕粒纹层比较模糊,且暗色纹层居多。再向上鲕粒数量和粒径都在减小,似核形石含量逐渐增加。生物化石缺乏。

F 层 底部见零星鲕粒,少量鲕粒碎片。生物碎屑含量 20% ~ 30%。向上为大量的双壳类碎片,个体较大,一般 7~8 mm 长,壳体厚 2 mm 左右。还有少量钙藻和腹足类碎片,未见鲕粒或球粒。

G 层 底部含有大量鲕粒,分选较好,圆—椭圆形。鲕粒外层大多被厚的亮色层包裹。纹层清晰致密。大于 2 mm 的鲕粒都为长柱状,推测核心为生物壳体碎片。复鲕粒径在 5 mm 左右,杏仁形。见 1 mm 左右的鲕溶孔,大量生屑泥晶化严重。发育缝合线,其内见少量小的白云石(不足 1%)。向上鲕粒逐渐减少,生物碎屑含量逐渐增加,见大量球粒及泥晶套。巨鲕纹层中出现大量不规则的亮色层。化石类型主要为腹足、腕足和双壳类碎片。顶部鲕粒大小混杂,大的鲕粒多发生破碎,保存不够好。鲕粒形状较为规则。含有少量似核形石和球粒,球粒粒径 0.5 mm 左右,含量 10% ~ 15%。

H 层 大量的生物碎屑和藻球粒。生物碎屑以腹足和双壳类化石碎片为主,也有少量保存较好的腹足,保留有腹足刺。似核形石和球粒含量占 30% 左右。

鲕粒粒径在 A、C、E、G 四个富集层内呈“双峰”

型,即在各层底部和顶部各有一个高丰度区。鲕粒核心类型以多晶粒状方解石和球粒为主,与鲕粒共生的生物碎片含量非常少,尤其是在鲕粒分布密集的层位。A 层内鲕粒粒径变化范围最大,从小于 0.5 mm 到大于 6 mm 呈正态分布,以 0.5~1 mm 为主。C、E、G 层内则是 1~2 mm 占多数,但数量和粒径范围上与 A 层相比都大为减少。这表明形成 C、E、G 层的水体能量低于 A 层,但各层中巨鲕占总体比例分别为 23%、5%、21% 和 27%。除 C 层外都维持在较高比例,这说明水体能量并不是形成巨鲕的主要因素,它的形成可能与当时的海水环境有关。

鲕粒颗粒岩沉积单元和生物碎屑粒泥岩—泥粒岩沉积单元的交替出现也可以反映当时海平面的相对变化。Kindler 等人<sup>[47]</sup>在对巴哈马的研究中认为当海平面高于现在的水平时主要沉积鲕粒;当海平面和现在持平或低于现在的水平时则以生物碎屑沉积为主。同时他们认为这种模式也适用于古代碳酸盐沉积中。对应到沫阳剖面(图 2),我们认为在高水位期形成以鲕粒为主的沉积,低水位期形成以生物碎屑为主的沉积。

### 3 显生宙巨鲕的成因、分布与错时相沉积特征

从如下方面看,巨鲕完全可以作为一种可靠的错时相标志沉积物:

1) 从 Fligel<sup>[48]</sup>、Richter<sup>[46]</sup>和 Sumner and Grotzinger<sup>[14]</sup>收集的统计资料来看,巨鲕在前寒武—寒武纪鲕粒粒径最大可达 16mm。在晚奥陶世、早石炭世和中晚侏罗世也出现少量巨鲕,但粒径都在 5mm 以下(也可能指示当时“特殊”环境)。本次研究的早三叠世沫阳剖面巨鲕粒径最大可达 12 mm,大部分在 2~6 mm 之间。在奥陶纪后生动物大发展之后正常海水环境下,鲕粒粒径与新元古代巨鲕最为接近的时期。巨鲕在华南早三叠世广泛发育,但随着中三叠世各类海洋生物的复苏,巨鲕又退出正常浅海环境。这表明在时间上巨鲕的出现与错时相沉积物是一致的。

2) 巨鲕在华南早三叠世地层中广泛发育。已发现巨鲕最早出现于黔西织金一带,地层为印度阶夜郎组二段,然后向东向南发展,符合早三叠世鲕滩迁移趋势,这个过程一直持续到奥伦尼克期末,最远到达江南隆起带两侧。印度期和奥伦尼克期之交为巨鲕发育的主要时期,在多个剖面都有巨鲕粒径大于 10 mm 的记录,到奥伦尼克期末巨鲕粒径逐渐减小,到

早三叠世末巨鲕消失。这样在华南早三叠世存在相当数量含巨鲕的剖面点。同时位于义敦地块的川西乡城县和德荣县剖面早三叠世茨岗组也存在部分巨鲕<sup>[49]</sup>,并且与鲕粒灰岩层交互沉积的地层中含有丰富的菊石、腕足类等窄盐度生物,说明当时为正常浅海沉积环境。Weilich<sup>[32]</sup>报道了早三叠世与特提斯洋相连的德国盆地内也存在着大量巨鲕。这两地与华南发现的巨鲕有些不同:巨鲕具有同心状和放射状两种不同的纹层类型;都形成于碳酸盐—硅质碎屑岩混合沉积类型中。这说明巨鲕的分布范围不限于华南,在全球范围内可能都有分布。随着研究的深入进行,将会有更多含巨鲕沉积的剖面点被报道出来。

3) Sumner and Grotzinger<sup>[14]</sup>的研究表明巨鲕的形成受到低的核心供给率、高的纹层生长率、高的水流周转率和周转梯度等因素的影响,并且认为新元古代巨鲕的形成是由于: a 前寒武时期缺乏粪球粒或是生屑碎片作为核心,从而降低了核心供给; b 新元古代广泛发育的缓坡环境能够提供更高的水流周转率。早三叠世和新元古代环境条件有许多相似之处:二叠纪末生物大灭绝事件后,可以作为鲕粒核心的生物碎屑含量大为减少;早三叠世在上扬子、中下扬子及南宁台地等边缘形成了大量面向深水盆地的低角度斜坡,大约在印度期—奥伦尼克期先后发展成镶边碳酸盐陆架<sup>[28]</sup>。再加上早三叠世风暴盛行,容易受到广海波浪和潮汐作用的影响(具有较高的水动力条件)。这样较低的生物碎屑供给,动荡的沉积背景,与发育巨鲕的新元古代浅海环境极为相似<sup>[2, 31, 51]</sup>。

## 4 讨论

Grotzinger and Knoll<sup>[52]</sup>首次提出碱性海水在上升流作用下可以到达陆架环境来解释前寒武和晚二叠世类似的非正常沉积,Pruss<sup>[6]</sup>把这种模式引入早三叠世,用来解释海底胶结作用及胶结岩扇的形成。同样,这种上升流模式也可以用来解释形成巨鲕所需要的碳酸盐过饱和的海水环境。

二叠纪末出现全球范围内的海水缺氧事件,持续时间约 6~10 Ma 一直到中三叠世生态复苏才恢复正常<sup>[53]</sup>。在深水厌氧环境下有机物随着硫酸盐还原反应的进行造成  $\Sigma \text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的聚集,同时硫酸盐的还原产生  $\text{HCO}_3^-$ ,使海水碱性增强。 $P_{\text{CO}_2}$  在这个过程中显著增加,造成深部海水向表层翻转,把含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的海水带至陆架环境<sup>[51]</sup>。碱性海水对形成过饱和碳酸盐海水具有极大的促进作用<sup>[54]</sup>。同时

这种海水毒害浅水后生动物,推迟了生物复苏的进程,也大大减少了骨骼碳酸盐颗粒的产生(有利于保持高的海水碳酸盐饱和度)以及作为鲕粒核心的可能性。再加上这种周期性的海水翻转模式和当时盛行的风暴条件对形成高的水流周转率和周转梯度具有非常大的带动。因此早三叠世特殊的海洋环境条件非常有利于巨鲕的形成。

同时,巨鲕与其他错时相标志之间关系密切。华南最常见的错时相沉积为蠕虫状灰岩(扁平砾石砾岩的一种特殊形式)经常与含巨鲕的鲕粒灰岩层交互沉积,共生时代从早三叠世初期到末期都有发现:如湖南慈利剖面微生物岩之上含巨鲕灰岩夹薄层蠕虫状灰岩;浙江长兴剖面早三叠世晚期扁担山组含巨鲕灰岩与蠕虫状灰岩交互沉积等<sup>[26]</sup>。但是巨鲕的分布范围和出现频度与蠕虫状灰岩相比要小,更多的是以鲕粒灰岩与蠕虫状灰岩或其他错时相沉积共生的形式出现:如四川华蓥山剖面蠕虫状灰岩出现于嘉陵江组一、三段,鲕粒灰岩出现于嘉一、三段上部;宜昌地区蠕虫状灰岩从大冶组二段一直到顶部,鲕粒灰岩只出现于大冶组的顶部等<sup>[55]</sup>。它们的共生覆盖范围非常广,在特提斯区从意大利北部经土耳其一直延伸到华南的条带上都有分布<sup>[33]</sup>。但是巨鲕和其他错时相沉积物成因上有什么共同之处目前还不清楚,有待进一步研究。

以巨鲕为代表的错时相沉积在整个下三叠统中广泛存在,伴随的是全球范围内的缺氧事件和极单一的生态类型的同时出现,表明沉积系统同样受到二叠纪末生物灭绝事件后异常的环境和生态条件的影响。与下三叠统底部的微生物岩一样,被称为“灾难沉积”,反映灭绝事件后生态危机的一套沉积记录,是一种独立于化石记录之外的生态变化指针<sup>[3, 56]</sup>。在地质历史时期其他几次灭绝事件附近可能也存在以巨鲕为代表的非正常沉积,例如奥陶纪末美国俄克拉何马州 Kee 组含巨鲕灰岩<sup>[25, 57]</sup>。目前对巨鲕的形成机制还不确定,生物灭绝事件或是全球缺氧/贫氧事件造成的极端环境与其产出是否存在关联尚不清楚,但这无疑给我们提供了一个新的思路去研究当时的生态和海洋环境。

## 5 结论

本文在对华南早三叠世巨鲕分布范围、形成环境、岩石学及沉积学特征进行深入观察的基础上,结合前人研究成果,对这种特殊的碳酸盐颗粒有了新的

认识:

1) 在早三叠世特殊环境下巨鲕大范围发育,海水环境与大量发育巨鲕的新元古代有许多相似之处;随着中三叠世生物复苏、海洋环境趋于正常巨鲕又从正常浅海环境中消失。这些特征表明巨鲕为一种典型的错时相沉积物;

2) 巨鲕的形成可能与二叠纪末海水缺氧事件有关。深部海水缺氧引起海水翻转导致含  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{HCO}_3^-$  的海水带至陆架环境。这样造成浅水碳酸盐超饱和,同时海水毒化后生动物引起鲕粒成核颗粒的减少,以及周期性的海水翻转和盛行的风暴气候形成的高度动荡的水环境等,无疑有利于巨鲕的产生。

早三叠世错时相沉积物广泛发育,一直持续到早三叠世末才逐渐消失,这与灭绝事件后生态系统的复苏与重建基本同时。表明沉积体系和生态系统之间存在一定的关联,都是环境异常事件造成的结果。研究以巨鲕为代表的特殊沉积物对探索转折期异常的生态状况和特殊的海洋环境都具有重要意义。

致谢 本文作者在野外工作及成文过程中得到实验室马志鑫、刘喜停、李波、严雅娟、胡宗杰等同学的帮助,在此一并致谢!

## 参考文献 (References)

- 1 Sepkoski J J, Bambach R K, Droser M L. Secular Changes in Phanerozoic Event Bedding and the Biological Overprint [M] // Einsele G, Ricken W, Seilacher A, eds. *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin: Springer Verlag, 1991: 298-312
- 2 戎嘉余, 方宗杰. 华南古生代三次大灭绝及其后残存与复苏的分析对比 [M] // 戎嘉余, 方宗杰主编. *生物大灭绝与复苏——来自华南古生代和三叠纪的证据*. 合肥: 中国科技大学出版社, 2004: 931-1018 [Rong Jiayu, Fang Zongjie. Comparative Analysis of the Three Major Palaeozoic Mass Extinction and Their Subsequent Recoveries in South China [M] // Rong Jiayu, Fang Zongjie, eds. *Mass Extinction and Recovery-Evidences from the Palaeozoic and Triassic of South China*. Hefei University of Science and Technology of China Press, 2004: 931-1018, 1078-1087]
- 3 赵小明, 童金南, 姚华舟, 等. 华南早三叠世错时相沉积及其对复苏期生态系的启示 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(12): 1564-1574 [Zhao Xiaoming, Tong Jinnan, Yao Huazhou et al. Anachronistic facies in the Lower Triassic of South China and their implications to the ecosystems during the recovery time [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(11): 1646-1657]
- 4 Pruss S B, Corsetti F A, Bottjer D J. The unusual sedimentary rock record of the Early Triassic: A case study from the southwestern United States [J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 2005, 222(1-2): 33-52
- 5 Wignall P B, Twitchett R J. Unusual intraclastic limestones in Lower



- Triassic carbonates and their bearing on the aftermath of the end-Permian mass extinction[J]. *Sedimentology*, 1999, 46(2): 303-316
- 6 Pruss S B, Bottjer D J, Corsetti F A, *et al*. A global marine sedimentary response to the end-Permian mass extinction: Examples from southern Turkey and the western United States[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 78(3-4): 193-206
  - 7 Schubert J K, Bottjer D J. Early Triassic stromatolites as post-mass extinction disaster forms[J]. *Geology*, 1992, 20(10): 883-886
  - 8 Mary M, Woods A D. Stromatolites of the Lower Triassic Union Wash Formation, CA: Evidence for continued post-extinction environmental stress in western North America through the Spathian[J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 261(1-2): 78-86
  - 9 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
  - 10 Pruss S B, Fraiser M L, Bottjer D J. Proliferation of Early Triassic wrinkle structures: Implications for environmental stress following the end-Permian mass extinction[J]. *Geology*, 2004, 32(5): 461-464
  - 11 Pruss S B. The unusual sedimentary rock record of the Early Triassic anachronistic facies in the Western United States and southern Turkey [D]. Los Angeles University of Southern California, 2004
  - 12 Tucker M E, Wright V P, Dickson J A. Carbonate sedimentology [M]. Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1990: 1-482
  - 13 Sowers F D. Oolite and coated grains[M]// Middleton G V, Church M J, Congilio M, *et al*. *Encyclopedia of Sedimentology*. Dordrecht, Boston and London: Kluwer Academic Publishers, 2003: 502-506
  - 14 Sumner D Y, Grotzinger J P. Numerical modeling of ooid size and the problem of Neoproterozoic giant ooids[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(5): 974-982
  - 15 Clough J G, Blodgett R B, Imm T A, *et al*. Depositional environments of Katakumuk Dolomite and Nanook Limestone: A retic National Wildlife Refuge, Alaska [J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72(2): 172
  - 16 Corsetti F A, Kilder D L, Marengo P J. Trends in oolite dolomitization across the Neoproterozoic-Cambrian boundary: A case study from Death Valley, California [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 191(3-4): 135-150
  - 17 Grotzinger J P, Read J F. Evidence for primary aragonite precipitation: early Proterozoic (1.9 Ga) Rocknest Dolomite, Wopmay Orogen, Northwest Canada [J]. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 1983, 15(6): 587
  - 18 Hall W D, Goode A D. The early Proterozoic Nabben Basin and associated iron formations of Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 1978, 7(2): 129-184
  - 19 Knoll A H, Swett K. Carbonate deposition during the late Proterozoic era: an example from Spitsbergen [J]. *American Journal of Science*, 1990, 290A: 104-132
  - 20 Singh U. Ooids and cements from the late Precambrian of the Flinders Ranges, South Australia [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57(1): 117-127
  - 21 Swett K, Knoll A H. Marine pisolites from upper Proterozoic carbonates of East Greenland and Spitsbergen [J]. *Sedimentology*, 1989, 36(1): 75-93
  - 22 Tucker M E. Calcitic aragonitic and mixed calcitic-aragonitic ooids from the mid-Proterozoic Belt Supergroup Montana [J]. *Sedimentology*, 1984, 31(5): 627-644
  - 23 Heydari E, Moore C H. Paleoclimatologic and paleoclimatic controls on ooid mineralogy of the Snackover Formation, Mississippi salt basin: implications for Late Jurassic seawater composition [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, 64(1a): 101-114
  - 24 Fligel E. Microfacies Analysis of Limestones [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1982: 1-633
  - 25 Amsharov T W. Late Ordovician-Early Silurian strata in Mid-Continent area [J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 63(3): 410
  - 26 冯增昭, 王英华, 李尚武, 等. 下扬子地区中下三叠统青龙群岩相古地理研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1988: 1-197 [Feng Zengzhao, Wang Yinghua, Li Shangwu, *et al*. Study on Lithofacies Paleogeography of Qinglong Group of Lower-Middle Triassic in the Lower Yangtze River Region [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1988: 1-197]
  - 27 朱忠发. 扬子板块东南边缘三叠纪巨型浅滩 [C]// 刘宝瑞, 曾允孚. 岩相古地理文集 8. 北京: 地质出版社, 1992: 113-121 [Zhu Zhongfa. Triassic megabeach on the southeastern margin of the Yangtze plate [C]// Liu Baojun, Zeng Yunfu. Collected Papers on Lithofacies and Paleogeography 8. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 113-121]
  - 28 吴应林, 朱洪发, 朱忠发, 等. 中国南方三叠纪岩相古地理与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-143 [Wu Yinglin, Zhu Hongfa, Zhu Zhongfa, *et al*. Triassic Lithofacies Paleogeography and Mineralization in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-143]
  - 29 Lehmann D J, Payne J L, Pei D, *et al*. Record of the end-Permian extinction and Triassic biotic recovery in the Chongzuo-Pingguo platform, southern Nanpanjiang basin, Guangxi, south China [J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252(1-2): 200-217
  - 30 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 Liduan Section in Hubei Province, South China [J]. *Geoscience*, 2008, 22(5): 683-698]
  - 31 Payne J L, Lehmann D J, Christensen S, *et al*. Environmental and biological controls on the initiation and growth of a Middle Triassic (Anisian) reef complex on the Great Bank of Guizhou, Guizhou Province, China [J]. *Palaeos*, 2006, 21(4): 325-343
  - 32 Weidlich O. PTB mass extinction and earliest Triassic recovery overlooked? New evidence for a marine origin of Lower Triassic mixed carbonate-siliciclastic sediments (Rogenstein Member), Gemany [J]. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 252(1-2): 259-269
  - 33 Groves J R, Caher M, Anonymous. Lower Triassic oolites in Tethys

- a sedimentologic response to the end-Permian mass extinction [ J]. Abstracts with Programs Geological Society of America 2004 36 (5): 336
- 34 Schubert J K, Bottjer D J. A femath of the Permian-Triassic mass extinction event: paleoecology of Lower Triassic carbonates in the Western USA [ J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1995 116(1-2): 1-39
- 35 朱洪发, 顾如叶, 朱佩君, 等. 苏南青龙群沉积相及储集性探讨 [ C]// 刘宝珺, 曾允孚. 岩相古地理文集 2. 北京: 地质出版社, 1986 31-52 [ Zhu Hongfa, Gu Ruyue, Zhu Peijun, *et al*. Characteristics of Sedimentation and Reservoirs of Qinglong Group Triassic Southern Jiangsu Province [ C]// Liu Baojun, Zeng Yunfu. Collected Papers On Lithofacies and Paleogeography 2, Beijing Geological Publishing House 1986 31-52]
- 36 广西壮族自治区地质局. 中华人民共和国区域地质测量报告, 1: 200 000 来宾幅 [ R]. 1972 [ Guangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geological Report of the People's Republic of China. Laibin Map 1: 200 000 [ R]. 1972]
- 37 湖北省区域地质测量队. 中华人民共和国区域地质调查报告, 1: 50 000, 大冶幅 [ R]. 1980 [ Hubei Geological Surveying Team. Regional Geological Report of the People's Republic of China. Daye Map 1: 50 000 [ R]. 1980]
- 38 王尚彦, 张慧, 彭成龙, 等. 贵州西部古一中生代地层及裂隙槽盆的演化 [ M]. 北京: 地质出版社, 2005: 80-85 [ Wang Shangyan, Zhang Hui, Peng Chenglong, *et al*. Strata of Palaeozoic-Mesozoic and Evolution of the Chasmic Furrow in Western Guizhou Province [ M]. Beijing Geological Publishing House 2005 80-85]
- 39 Lehmann D A, Payne J Q, Felix S H, *et al*. Permian-Triassic boundary sections from shallow-marine carbonate platforms of the Nanpanjiang Basin, South China: Implications for oceanic conditions associated with the End-Permian extinction and its aftermath [ J]. Palaios 2003, 18(2): 138-152
- 40 刘宝珺, 许效松. 中国南方岩相古地理图集 [ M]. 北京: 科学出版社, 1994 1-188 [ Liu Baojun, Xu Xiaosong. Atlas of the Lithofacies and Paleogeography of South China (Sinian-Triassic) [ M]. Beijing Science Press 1994: 1-188]
- 41 王英华, 张秀莲, 杨承运. 碳酸盐岩中的包壳粒 [ M]// 冯增昭, 王英华, 刘焕杰, 等. 中国沉积学. 北京: 石油工业出版社, 1994 128-151 [ Wang Yinghua, Zhang Xiulian, Yang Chengyun. Coated Grains in Carbonate rocks [ M]// Feng Zengzhao, Wang Yinghua, Liu Huanjie, *et al*. Sedimentology of China. Beijing Petroleum Industry Press 1994 128-152]
- 42 Fligel E. Microfacies of Carbonate Rocks Analysis: Interpretation and Application [ M]. Berlin Heidelberg Springer-Verlag 2004: 1-976
- 43 Esteban M, Pray L C. Pisolids and pisolite facies ( Permian ), Guadalupe Mountains New Mexico and West Texas [ M]// Peryt T M, Coated Grains Berlin Springer-Verlag 1983 503-537
- 44 Carozzi A V. Distorted oolites and pseudoolites [ J]. Journal of Sedimentary Research 1961 31(2): 262-274
- 45 Conley C D. Origin of distorted oolites and pisolites [ J]. Journal of Sedimentary Research 1977 47(2): 554-564
- 46 Richter D K. Calcareous ooids: a synopsis [ M]// Peryt T M. Coated Grains Berlin Springer-Verlag 1983 71-99
- 47 Kindler P, Hearty P J. Carbonate petrography as an indicator of climate and sea-level changes: new data from Bahamian Quaternary units [ J]. Sedimentology, 1996 43(2): 381-399
- 48 Fligel E. Microfacies Analysis of Limestones [ M]. Berlin Heidelberg Springer-Verlag 1982 1-633
- 49 侯立玮, 罗代锡, 傅德明, 等. 川西藏东地区三叠纪沉积-构造演化 [ M]. 北京: 地质出版社, 1991: 89-96 [ Hou Liwei, Luo Daixi, Fu Deming, *et al*. Triassic Sedimentary-Tectonic Evolution in Western Sichuan and Eastern Xizang Region [ M]. Beijing Geological Publishing House 1991: 89-96]
- 50 Grotzinger J P, Janes N P. Precambrian carbonates: evolution of understanding [ J]. Special Publication - Society for Sedimentary Geology, 2000, 67: 3-20
- 51 Knoll A H, Bambach R K, Canfield D E, *et al*. Comparative Earth History and Late Permian Mass Extinction [ J]. Science, 1996 273 (5274): 452-457
- 52 Grotzinger J P, Knoll A H. Anomalous carbonate precipitates: is the Precambrian the key to the Permian? [ J]. Palaios, 1995, 10(6): 578-596
- 53 Isozaki Y. Permian-Triassic boundary superanoxia and stratified superoceanic records from lost deep sea [ J]. Science, 1997 276(5310): 235-238
- 54 Kempe S. Alkalinity: The link between anaerobic basins and shallow water carbonates? [ J]. Naturwissenschaften, 1990, 77(9): 426-427
- 55 张杰. 下扬子地区早三叠世蠕虫状灰岩及其成因研究 [ D]. 武汉: 中国地质大学, 2008 [ Zhang Jie. A Study of Early Triassic Vermicular Limestone and Its Genesis in Lower Yangtze Region [ D]. Wuhan: China University of Geosciences 2008]
- 56 Pruss S B, Corsetti F A, Bottjer D J. The unusual sedimentary rock record of the Early Triassic: A case study from the southwestern United States [ J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005 222(1-2): 33-52
- 57 Pope M C. Cherty carbonate facies of the Montoya Group, southern New Mexico and western Texas and its regional correlatives: a record of Late Ordovician paleoceanography on southern Laurentia [ J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 2004, 210(2-4): 367-384

# Origin and Environmental Significance of Giant Ooids in the Early Triassic: a new kind of anachronistic facies

LIFei<sup>1</sup> WANG Xia<sup>1</sup> XUE Wu-qiang<sup>1</sup> YAN Jia-xin<sup>1, 2</sup>

(1 Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2 Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

**Abstract** Oolitic beach facies of high-energy was widely distributed in the Lower Triassic Strata of South China under the background of carbonate ramp, particularly within a certain quantity of giant ooids. Examined the sizes of giant ooids are mostly between 2mm and 6mm, some up to 12mm, and the nucleus predominantly consist of granular calcite and peloid. All giant ooids exhibit concentric laminae and tangentially oriented crystals, suggesting their originally aragonitic mineralogy. Units of giant ooids-bearing oolitic and bioclastic limestone deposited alternately, reflected the relative sea-level changes at that time. The occurrence of such giant ooids which diameters over 5mm are commonly developed in the Neoproterozoic, however, were extremely uncommon after the Cambrian. Numerous giant ooids were widespread occurred after the end-Permian mass extinction, yet eliminated following the radiation of the Mesozoic biotas and the normalization of marine environment. It is implied that giant ooid is a new kind of anachronistic facies, and its occurrence apparently relate to biotas and marine environment at that time. This paper is based on detailed analysis of production background, microscopic structure and sedimentary characteristics of giant ooids, therefore, it is available to aid our understanding of their origin, explore the harsh marine environment and the particular ecosystems under the Paleozoic-Mesozoic transitional events.

**Key words** giant ooids, anachronistic facies, Early Triassic, South China