



南京地区早三叠世碳酸盐沉积动力过程初探

高抒

引用本文:

高抒. 南京地区早三叠世碳酸盐沉积动力过程初探[J]. 沉积学报, 2023, 41(6): 1673-1680.

GAO Shu. Preliminary Study on Sediment Dynamic Processes of Early Triassic Carbonate Deposits in Nanjing Area, Eastern China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(6): 1673-1680.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

肥城邓家庄剖面寒武系微生物碳酸盐岩沉积序列

Sedimentary Succession of Cambrian Microbial Carbonates at Dengjiazhuang Section at Feicheng

沉积学报. 2020, 38(1): 64-75 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.071>

渤海湾盆地饶阳凹陷大王庄地区古近系沙三上亚段混积模式研究

Sedimentary Model of Mixed Rocks in the Upper Es3 of Paleogene in the Dawangzhuang Area, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

沉积学报. 2020, 38(5): 1037-1048 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.096>

微生物碳酸盐岩沉积学研究进展——基于第33届国际沉积学会议的综述

Research Progress in Sedimentology of Microbial Carbonate Rocks: A re-view based on the 33rd International Sedimentological Congress

沉积学报. 2018, 36(4): 639-650 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.134>

泰国呵叻盆地二叠系Pha Nok Khao组碳酸盐岩沉积相特征

Facies Characteristics of a Permian Carbonate Platform of Pha Nok Khao Formation from Khroat Basin, Thailand

沉积学报. 2017, 35(4): 789-796 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.013>

西天山早石炭世构造环境:大哈拉军山组底部沉积地层学证据

Tectonic Environment of Western Tianshan during the Early Carboniferous: Sedimentary and stratigraphical evidence from the bottom of the Dahalajunshan Formation

沉积学报. 2015, 33(3): 459-469 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.03.004>

南京地区早三叠世碳酸盐沉积动力过程初探

高抒

南京大学地理与海洋科学学院,南京 210023

摘要 【目的】早三叠世碳酸盐沉积揭示了二叠纪末生物大灭绝之后的沉积环境剧变,如何用沉积动力学方法获取沉积环境信息,其主要困难是现场观测不可实施、初始和边界条件未知、沉积物来源和去向未知。新的思路之一是根据复杂系统理论重构控制方程,以达到正确计算或模拟的目的。【方法】针对南京地区早三叠世和龙山组24个周期的泥质—碳酸盐沉积,构建沉积环境参数计算方法,提取沉积记录信息。【结果】各周期性沉积的垂向尺度为 $10^0\sim 10^2$ cm,碳酸盐层与泥质层交替出现,沉积构造以纹层为特征,在24个周期中碳酸盐沉积厚度占74%,沉积构造以纹层为特征;根据泥质层的沉积速率推算每个周期的时间尺度为5~40 ka,虽然泥质层厚度只占总厚度的26%,但却占总时长的73%;泥质和碳酸盐物质沉积速率、沉降通量、水层悬沙浓度、碳酸盐物质产出、生物生产等各项环境参数与现今深海碳酸盐沉积环境相当。【结论】该沉积记录反映研究区域古海洋环境和气候变化特征,但计算方法的进一步改进有赖于碳酸盐沉积的杂质含量、纹层厚度和保存潜力、沉积物和有机质来源等约束条件的确定。

关键词 碳酸盐沉积;早三叠世;动力过程;周期性;沉积速率;南京地区

第一作者简介 高抒,男,1956年出生,教授,海洋地质学、海岸地质学、沉积学,E-mail: shugao@nju.edu.cn

中图分类号 P534.51 **文献标志码** A

0 引言

古生代结束之时,环境巨变导致了生物大灭绝事件,此后的三叠纪表现出独特的沉积特征,与石炭纪—二叠纪差异很大,却与早古生代的特征接近^[1-3]。在南京地区,石炭纪—二叠纪石灰岩总厚度约为300 m,前人研究极为详尽,划分出金陵灰岩、黄龙灰岩、船山灰岩、栖霞灰岩等四个种类。三叠纪早期,这里堆积了更厚的石灰岩(总厚度约为440 m),并命名为“青龙灰岩”。然而当时的学者对其感到困惑,它没有继承二叠纪的环境特征,青龙灰岩为薄层灰岩,含杂质较多,层理常有挠曲,化石甚少^[4]。

数十年来,研究者们试图重建生物大灭绝事件、解释三叠纪沉积特征、提取环境恢复过程的信息^[5-7]。在我国,自20世纪80年代以来,浙江长兴、安徽巢湖和南京地区的早、中三叠世碳酸盐沉积被广泛关注^[8-11]。

根据笔者对南京地区的野外考察,该区域多个地点有出露良好的三叠纪碳酸盐沉积剖面,其中一处连续出露的地层厚度约为200 m。除生物地层、岩性分析、环境指标重建等,用沉积动力学方法获取沉积环

境信息,有助于沉积记录的解释。但传统上沉积动力学是针对现代过程的,应用于地质时期的地层,其主要困难是现场观测不可实施、系统的初始和边界条件为未知、沉积物来源和去向的信息缺失。新的思路之一是根据复杂系统理论改进分析方法,如勘察式模拟技术(Exploratory Modelling)^[12]。

在此次所关注的剖面中,有一段碳酸盐岩和泥岩交替沉积的地层特别引人注目:该层序含有24个周期的沉积记录,它代表什么周期、物源来自何处、与区域环境—气候变化的关系如何?研究的目的是采用基于系统状态变量时间变率定义沉积动力学方法来探讨该周期性沉积的形成机制,根据剖面沉积特征及物性和沉积构造参数,获得其时间尺度、沉积速率、沉降通量、水层悬沙浓度、碳酸盐物质产出、生物生产等各项环境信息。

1 材料与方法

1.1 研究地点与现场观测

三叠纪开始的时候,研究地点所处的海洋称为

古特提斯洋;南京地区位于其东北部的巨大边缘海,属于陆架、陆坡环境,陆地位于本区域的北侧和东侧,两大陆块之间有通向泛大洋的水域^[13]。陆源物质供给主要来自北方,东侧陆地则要到较晚的时候才影响本区域^[8]。

南京地区的海洋沉积主要形成于早三叠世^[8]。地层自下而上分为殷坑阶(殷坑组)、巢湖阶(和龙山组、沧波门组)、关刀阶(周冲村组)。到了中三叠世时期,海洋环境又延续了一段时间,以新铺阶的黄马青组下部海相地层为标志,此后逐渐脱离海洋环境,在空间上沉积分异特征显著,指示地形多变的沉积环境。

由于当地采矿和筑路作业,南京地区多处出露海相三叠纪地层。2022年1月19日,在南京大学仙林校区附近发现一处特征性的剖面,并选为研究对象,其地理位置为118.953 7° E, 32.098 7° N(图1a)。该层序呈现周期性堆积特征,泥质沉积和碳酸盐沉积交替出现(图1b);产状测量显示,地层走向为72°~252°,倾向NNW,倾角为40°,剖面几乎与地层走向垂直,因而地层形态展示清晰。该层序下伏的剖面展示杂色钙质页岩、泥灰岩、瘤状灰岩(图1c),剖面的最下部出现厚层灰岩上的次生岩溶现象,而上覆地层为厚层和薄层深色灰岩、薄层浅色瘤状灰岩(图1d)。根据区域性地层特征^[8,14]对比,目标剖面的地层属于和龙山组;具体层位可与附近区域(江苏省句容

市)的剖面^[11]相对照。

2022年1月起对目标剖面多次开展野外工作。首先,对本区出露的相近产状地层进行了踏勘,记录总厚度约为200 m的层序特征,以便确定目标剖面在地层构架中的位置。其次,将现场观测集中于目标剖面,测量沉积层厚度、记录岩性和沉积构造特征、拍摄现场照片。最后,在现场观测工作中穿插进行样品和标本采集,因作业条件欠佳,操作难度大,此项工作目前尚未完成。

1.2 周期性沉积的时间尺度和沉积速率估算

殷坑组、和龙山组、沧波门组属于早三叠世^[8],在研究地点的厚度约为200 m,经历约6 Ma,因此,作为一级近似,若假设地层中泥质物质含量为10%、20%、30%或40%,则对应的沉积速率分别为 0.33×10^{-5} m/a、 0.67×10^{-5} m/a、 1.0×10^{-5} m/a、 1.3×10^{-5} m/a。这与现今海洋中远海沉积的数值相似,代表低悬沙浓度的海洋环境^[15]。

根据现场测量数据,可针对目标剖面作进一步计算。假设地层形成的时间长度与地层厚度成正比,则有:

$$T = 6.0 \times 10^6 H / 200 \quad (1)$$

式中: T 为目标剖面沉积层形成的时间长度(a), H 为沉积层厚度(m)。式(1)还间接给出了该沉积层的沉积速率($=H/T$)。此外,目标剖面含泥质层和碳酸盐层,因而可分别测量其总厚度。碳酸盐物质堆积发

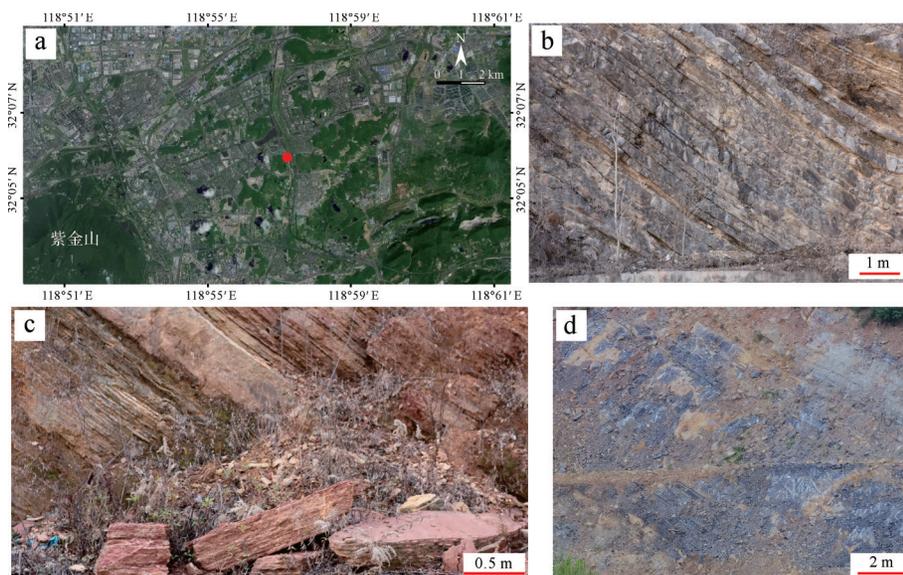


图1 研究地点早三叠世碳酸盐沉积

(a)地理位置(底图为卫星影像地图);(b)工作剖面特征(对角线距离12 m),显示泥质沉积和碳酸盐沉积的周期性堆积特征;(c)工作剖面的下伏层序特征(对角线距离5 m),岩性为杂色钙质页岩、泥灰岩、瘤状灰岩;(d)工作剖面的上覆地层特征(对角线距离20 m),岩性为深色灰岩、薄层浅色瘤状灰岩

Fig.1 The profiles of Early Triassic carbonate deposits at the study site

生时也伴随着泥质物质的堆积,各自所占的百分比取决于两者沉积速率的对比^[15-17]。因此,考虑泥质物质总量后的沉积速率为:

$$D_m = [H_m + P(H - H_m)] / T \quad (2)$$

式中: D_m 为泥质物质的沉积速率(m/a), H_m 为目标剖面中泥质层总厚度(m), P 为碳酸盐沉积层中的杂质含量(%)。对于任何一个周期的沉积,有:

$$D_m = [H_1 + P(H_2 - H_1)] / T' \quad (3)$$

式中: H_1 为周期内泥质物质厚度(m), H_2 为碳酸盐物质厚度(m), T' 为与周期沉积形成的时间长度(a)。显然,若 D_m 为已知,则周期沉积形成所需的时间长度可从式(3)获得,并间接推算碳酸盐沉积速率(详见下文“结果”部分)。

1.3 物源供给的动力过程分析方法

沉积体系的特征可由特定的变量组合来表征,可将其中的一些关键变量看成为状态变量,其余为自变量。按照复杂系统的观点,刻画状态变量需要定义其随时间的变率^[18]。对于要研究的周期性沉积而言,状态变量有两个,即泥质层物质量 M_m 和碳酸盐沉积层物质量 M_c 。根据沉积层的岩性和沉积构造,悬沙沉降是主要的堆积形式,包括从水层中、深海环流水体中沉降的物质,浊流和推移质运输的堆积形态缺失,因而 M_m 的时间变率可表示为:

$$dM_m/dt = \gamma D_m A \quad (4)$$

式中: M_m 为泥质沉积总量(kg), γ 为泥质沉积物容重(kg/m³), D_m 为沉积速率(由式(2)定义), A 为堆积区面积(m²)。泥质物质的沉积速率与沉降过程相联系:

$$D_m = C w_s / \gamma \quad (5)$$

式中: C 为悬沙浓度(kg/m³), w_s 为颗粒沉降速率(m/s)。式(5)表示,若沉积速率为已知,则可以反演悬沙浓度的值。

另一个状态变量碳酸盐沉积层物质量的时间变率为:

$$dM_c/dt = dM_m/dt + (F_1 + F_0) A \quad (6)$$

式中: M_c 为碳酸盐沉积层物质量,它是泥质物质、碳酸盐颗粒、颗粒态有机质等沉降物质的总和, F_1 为碳酸盐颗粒垂向通量, F_0 为水层颗粒态有机质垂向通量。式(6)表示,碳酸盐沉积是含有杂质的,来源于水层中的泥质物质和有机质。作为一种生物成因的沉积,三叠纪碳酸盐沉积来源于能够产生钙质物质和颗粒态有机质的生物过程,前者可进一步区分远

距离搬运的物质、钙藻等生物颗粒,以及细菌等微生物分泌的物质,而后者来自水层初级生产所固定的碳。与泥质物质沉积速率相类似,这两类物质的垂向通量为:

$$F_1 = C_1 w_1 / \gamma_1 \quad (7)$$

$$F_0 = C_0 w_0 / \gamma_0 \quad (8)$$

式中: C_1 和 C_0 分别为碳酸盐颗粒、有机质颗粒的浓度(kg/m³), w_1 和 w_0 分别为其沉降速率(m/s), γ_1 和 γ_0 分别为其容重。若碳酸盐沉积的物质组成为已知,则式(7)、(8)定义了水层中的生物生产大小。应注意的是,沉积物中的有机质经过成岩作用等的改造,可能偏离当初的特征,此时需要调整有机质沉积速率、有机质垂向通量、生物生产之间的相关关系。

研究的计算流程如下:根据研究地点的泥质沉积、碳酸盐沉积厚度测量数据,以式(1)估算沉积层形成的时间尺度;碳酸盐沉积层中杂质含量的大小由式(2)估算泥质物质沉积速率以及周期性沉积的时间尺度;以泥质沉积为约束,以式(3)估算碳酸盐沉积速率;最后以式(4)、(6)估算泥质沉积和碳酸盐沉积的物质量变率,并由此反演物质来源状况,其中 F_1 根据物质组成而推算(详见“结果”部分);由于碳酸盐沉积中有机质含量相对较小,此处暂时将 F_0 忽略不计。

2 结果

2.1 观测剖面的沉积特征

目标剖面含交替出现的泥质和碳酸盐沉积,共48层,构成24个周期(图2)。各层泥质沉积特征相似,为浅褐色或土黄色薄层泥岩、页岩,层理厚度为毫米级,而碳酸盐沉积有不同的特征,显示出多样性。

每个周期的沉积特征简述如下(按自上而下的顺序, H_c 表示碳酸盐沉积厚度, H_m 表示泥质沉积)。

周期24: $H_c=40$ cm, $H_m=28$ cm。周期性沉积的顶部,碳酸盐沉积层为扭曲层理薄层灰岩(图3a),下层为层理厚度不同的泥岩和钙质泥岩夹层,最大层理厚度1 cm。

周期23: $H_c=4$ cm, $H_m=24$ cm。浅色含泥质灰岩,可见模糊纹层,下部泥岩、钙质泥岩,最大层理厚度1 cm。

周期22: $H_c=60$ cm, $H_m=21$ cm。浅色灰岩、亮晶薄层灰岩,断口处棱角明显,向下过渡为黄色泥岩页岩。

周期21: $H_c=25$ cm, $H_m=12$ cm。深灰色、灰色块

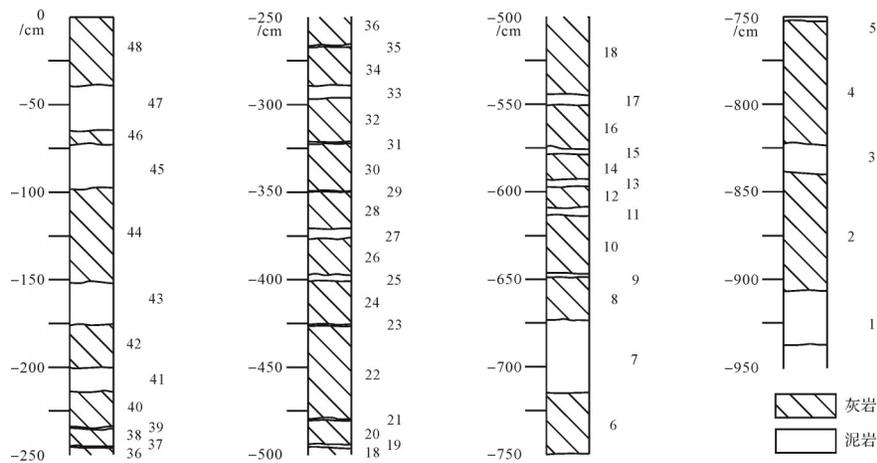


图2 研究地点碳酸盐沉积的剖面特征

左侧数字为垂向距离,层序顶部为0 cm,右侧数字为层序中的沉积层编号,详见正文沉积特征的描述

Fig.2 Profile characteristics of carbonate deposits at the study site

vertical distance is represented by numbers on the left, 0 cm being at the top of the sequence, and sedimentary layer numbers in the sequence are indicated by numbers on the right

状灰岩,断口尖锐,可划分为0.5~2 cm的多层,其中含更小的纹层,下层面波状起伏,与浅褐色泥接触。

周期20: $H_c=20$ cm, $H_m=0.5$ cm。灰色纹层灰岩,断口尖锐,下部为黄色泥岩。

周期19: $H_c=11.5$ cm, $H_m=0.5$ cm。深灰色纹层灰岩,具蠕虫状灰岩形态

周期18: $H_c=19$ cm, $H_m=2$ cm。深灰色纹层灰岩,下部黄色泥岩、钙质泥岩,最大层厚厘米级。

周期17: $H_c=21$ cm, $H_m=6$ cm。灰岩和泥灰岩,具纹层,下部为薄层泥岩夹层

周期16: $H_c=27$ cm, $H_m=0.5$ cm。的泥质灰岩,具模糊的李泽冈环形态,下部为薄层泥岩夹层

周期15: $H_c=27$ cm, $H_m=0.5$ cm。蠕虫状灰岩,底部黄色页岩夹层。

周期14: $H_c=21$ cm, $H_m=7.5$ cm。浅灰色纹层灰岩,底部为含钙泥质沉积。

周期13: $H_c=20$ cm, $H_m=5.5$ cm。灰岩、泥灰岩,底部为薄层泥岩。

周期12: $H_c=22$ cm, $H_m=2$ cm。棕灰色致密灰岩,具模糊的李泽冈环形态,底部为黄色薄层泥岩(图3b)。

周期11: $H_c=50$ cm, $H_m=1$ cm。浅灰色泥质灰岩,含光滑而波状起伏的上层面。

周期10: $H_c=11$ cm, $H_m=2$ cm。薄层灰岩、泥灰岩,底部为黄色薄层泥岩。

周期9: $H_c=52$ cm, $H_m=6$ cm。致密蠕虫状灰岩(图3c),底部为黄色泥岩夹层。

周期8: $H_c=23$ cm, $H_m=5$ cm。灰色灰岩,下部为大粒径的扁平石灰岩砾石,砾石的磨圆度好,粒径为7~15 cm,砾石所在层向两端延伸,范围大于10 m(图3d,e);砾石盖在下伏泥岩之上,使得泥岩的上层面不平整,底部砾石相对脱离,向上与周边灰岩紧密结合。

周期7: $H_c=12$ cm, $H_m=4$ cm。灰色薄层灰岩,向下过渡为黄色泥岩。

周期6: $H_c=12$ cm, $H_m=6$ cm。灰色灰岩、泥灰岩,底部为黄褐色泥岩。

周期5: $H_c=33$ cm, $H_m=2$ cm。深灰色致密中薄层灰岩(图3f),扭曲层面,底部为泥灰岩和黄色泥岩。

周期4: $H_c=23$ cm, $H_m=43$ cm。深灰色灰岩,薄层到中等厚度层理,下部为土黄色泥岩。

周期3: $H_c=35$ cm, $H_m=4$ cm。致密灰岩,下部为泥岩。

周期2: $H_c=70$ cm, $H_m=15$ cm。致密状石灰岩,有红色风化面,下部的泥岩厚度变幅较大,在可见范围内为5~20 cm。

周期1: $H_c=70$ cm, $H_m=28$ cm。上部浅色灰岩,内部可再分为多层,层厚5~10 cm,下部为黄色薄层泥岩。

在目标剖面的层序中,泥质沉积的层理厚度总体上小于2 mm,也有一些较厚的,最大可达1 cm,但其物质近似于泥质灰岩,不像毫米级泥岩那样易于风化成粉末状。碳酸盐沉积部分,通常可分为1~5 cm厚度的次级沉积层,并可进一步细分出纹层和蠕虫状层理。有些层位宏观上表现为块状,分层不明

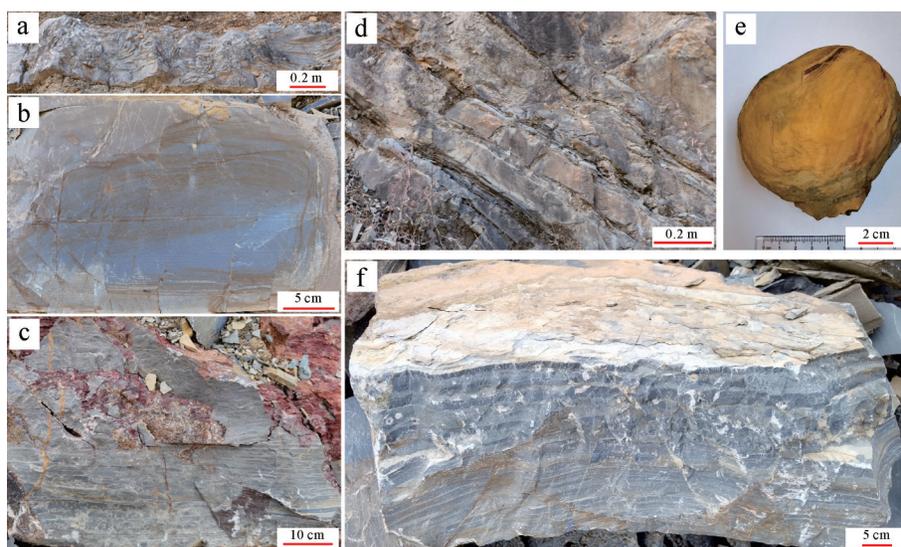


图3 研究地点碳酸盐岩的典型特征

(a)褐色层面扭曲层理薄层灰岩(第44层,灰岩层标本垂向尺度40 cm);(b)具模糊李泽冈环的泥质灰岩(第24层,标本垂向尺度22 cm);(c)红色断裂面蠕虫状灰岩(第18层,标本垂向尺度50 cm);(d)含“扁平砾石”的泥质灰岩(第16层,对角线为所在层的底部)(e)扁平砾石形态;(f)扭曲层理薄层灰岩(第10层,灰岩层标本垂向尺度30 cm)

Fig.3 Typical characteristics of carbonate rocks at the study site

显,但在风化程度较高的界面上更细的层理清晰可见。典型的纹层层理特征举例如下:第34层的样品显示细小纹层特征,最密集处层厚小于0.3 mm(图4a);层厚为毫米尺度的纹层最常见,如第40层(图4b)和第22层(图4c)的纹层。另外,在24个周期的碳酸盐沉积中,至少有3个周期的沉积具有蠕虫状构造。其层理特征明显地不同于纹层,微层的厚度沿层面变化,常出现断续现象,层面相应地表现为有起伏的“粗糙层面”形态。蠕虫状层理的厚度大于前述

的纹层,如第38层的蠕虫状层理厚1.5~2.0 mm(图4d),第30层(图4e)和第18层(图4f)的平均层厚均不小于2.5 mm。

2.2 泥质和碳酸盐物质的沉积速率和周期性沉积时间尺度

目标剖面的总厚度为9.40 m,根据式(1),沉积层形成的时间长度为0.28 Ma,平均沉积速率为 3.3×10^{-5} m/a。剖面中泥质层厚度总计为2.44 m,占26%;假设泥质层中碳酸盐含量可忽略,而碳酸盐层含有

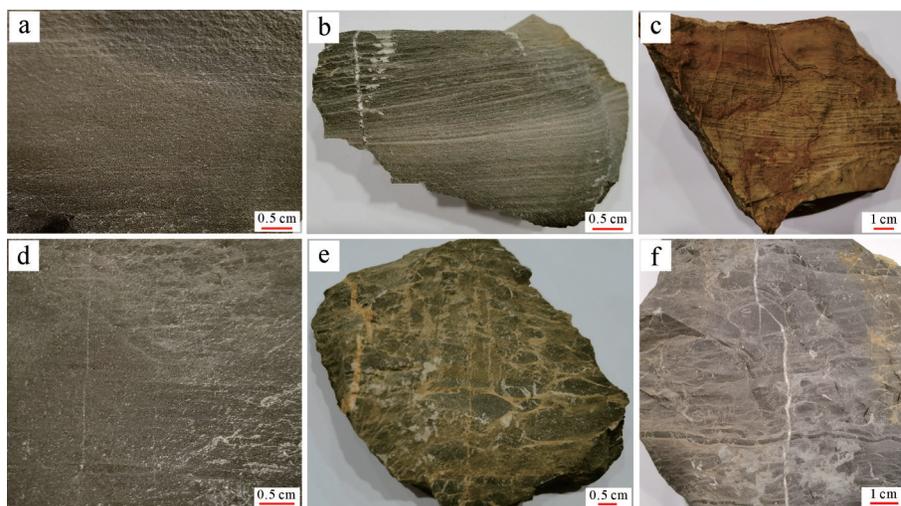


图4 研究地点碳酸盐岩沉积的纹层和蠕虫状层理特征

(a)细小纹层(第34层,图幅垂向尺度3.8 cm);(b)层厚为毫米尺度的纹层(第40层,垂向尺度4.5 cm);(c)风化面上显示的层厚为毫米尺度的纹层(第22层,垂向尺度10.0 cm);(d)蠕虫状层理(第38层,垂向尺度5.0 cm);(e)蠕虫状层理(第30层,垂向尺度6.5 cm);(f)蠕虫状层理(第18层,垂向尺度10.3 cm)

Fig.4 The laminae and vermicular bedding in the carbonate deposits studied

10%、20%、30%的泥,则泥的总厚度分别为3.13 m、3.83 m、4.52 m;根据式(2),泥的沉积速率分别为 1.1×10^{-5} m/a、 1.4×10^{-5} m/a、 1.6×10^{-5} m/a。

具体到每个周期,将泥质沉积层厚度除以沉积速率可得到泥质沉积层形成的时间长度;根据式(3)获得整个周期的时间长度,以其减去泥质层时间长度后得到碳酸盐层时间长度。图5显示了目标剖面周期性沉积的时间尺度。在整个层序的两端,有7个周期的时长介于10~40 ka,明显长于层序中部的各个周期(大多为5~10 ka)。一个突出的特征是,虽然泥质层厚度只占总厚度的26%,但堆积的时长为0.20 Ma,占总时长的73%,也就是说,该区域在这一时期内的大部分时间不利于碳酸盐沉积。

2.3 物源供给特征

按照一级近似预估的泥质物质沉积速率 1.1×10^{-5} m/a,与现今深海环境的堆积速率^[15]相当,若颗粒沉降速率定为 10^{-5} m/s,且考虑孔隙率因素的沉积物容重值设为 1600 kg/m^3 ,则式(5)给出的悬沙浓度为 $0.056 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ 。

根据前述的剖面观测和计算结果,碳酸盐沉积层的总厚度为6.96 m,其堆积发生于0.08 Ma的时间内,因此其平均沉积速率为0.087 m/ka。由于在一级近似的假设中泥质和碳酸盐物质各占10%和90%,因此根据式(6)碳酸盐物质的沉降通量为0.21 kg/a。与现代生物礁(以珊瑚礁为代表)的沉降通量(1~60 kg/a)^[19]相

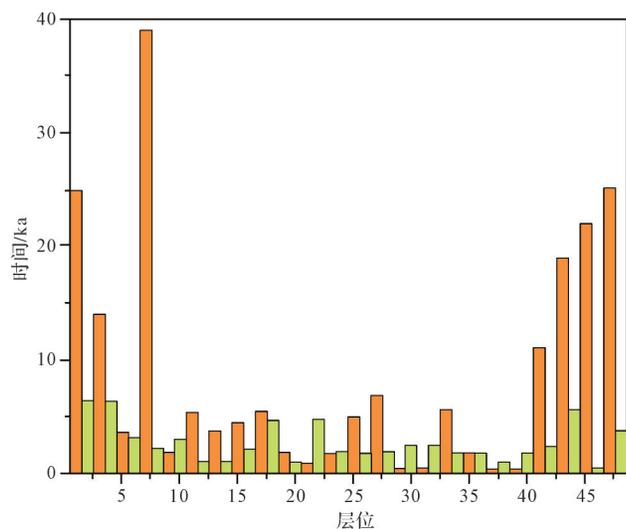


图5 目标剖面周期性沉积的时间尺度(棕黄色为泥质层的时间长度,绿色为碳酸盐层的时间长度)

Fig.5 The time scale of periodic deposition of the studied profile (brown color for the muddy layers, and green color for the carbonate layers)

比,当时的碳酸盐物质生产量是较低的,为现今数值的0.35%~20%。若颗粒沉降速率定为 10^{-5} m/s,碳酸盐沉积物容重值取为 2600 kg/m^3 ,则式(7)给出的碳酸盐悬浮物浓度为 $6.5 \times 10^{-3} \text{ g/m}^3$ 。现今海洋的珊瑚礁是高生产力区,若生物生产以 $400 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 计,则当时的水层生物生产可能为 $1 \sim 10 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 量级。

3 讨论

波浪基面以下的海洋沉积常有 $10^0 \sim 10^2 \text{ cm}$ 尺度的周期性,人们认为与米兰科维奇周期相关,气候变化使沉积物供给状况发生变化^[15]。南京地区早三叠世的周期性沉积涉及5~40 ka的尺度,似乎与此主张一致。此次研究的目标剖面,泥质沉积的厚度占比较大,时间占比更大,这可解释为本区域所处气候带的特征。研究区地处古特提斯洋的东北部,与古生代时期不同,其时本区域已离开典型的热带海洋,只是由于顺时针的洋盆环流,才使得热带海洋环境周期性地控制该区域(图6)。此外,研究区与当时的泛大洋有一条通道相连,这里暂称之为“华东海峡”。虽然东面的华夏地块难以给本区提供陆源物质^[8],但古特提斯洋洋盆环流和往返于华东海峡的海流持续带来悬浮沉积物,可在当时南京地区的边缘海发生堆积。在大部分时间里,研究区不具备大量产生碳酸盐沉积物的条件,但在气候暖期,仍然可被热带海洋所控制,形成沉积速率相对较高的碳酸盐堆积体。

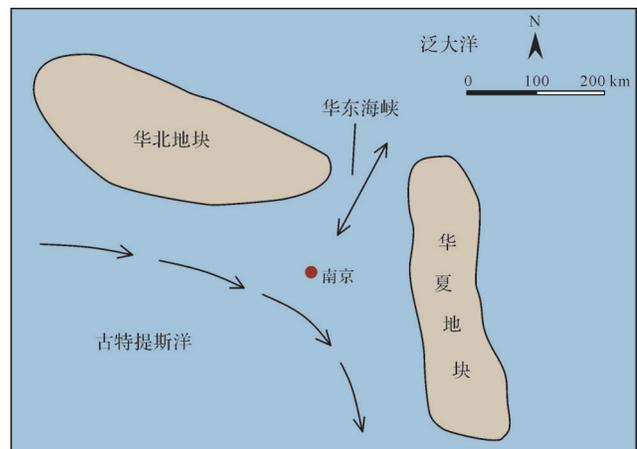


图6 南京地区三叠纪碳酸盐岩形成时的沉积环境和洋流特征(底图据文献[13]修改)

Fig.6 Paleogeographic conditions during the formation of Triassic carbonate strata in the Nanjing area (the ancient environmental setting based on the reference [13])

尽管如此,此次研究的初步结果依赖于泥质物质沉积速率和碳酸盐沉积中泥质物质含量的预估值。在两者均为常数的假设条件下,可根据式(1)~(7)计算中期行沉积的相关参数。但在古特提斯洋演化的后期阶段,环境逐渐发生变化,陆源物质的源地可能发生变化。在不同的气候变化周期里,碳酸盐沉积和泥质物质在地层中占比也有不同,证据是此次探讨的24个周期中碳酸盐沉积特征有较大变化,一些层位含泥量较高,形成有李泽冈环的泥灰岩,而另一些层位含泥量较低,形成质地致密的灰岩或蠕虫状灰岩(图3)。如果将每个周期分别处理,则碳酸盐沉积中的杂质含量 P 可对式(3)起到约束作用。

但是,由于在新的假设条件下式(3)有两个未知量,即 D_m 和 T' ,因此还需要增加一个约束变量。目标剖面的沉积以纹层或蠕虫状构造为特征(图4),其中蠕虫状构造的时间尺度不确定性较高,而细小的纹层很可能与尺度为 a 的沉积相关联^[12],在陆架、陆坡、边缘海等环境,物质来源和生物生产决定了沉积速率。如果此时间尺度的纹层能够被识别,则有:

$$T' = kH_2/D_L \quad (9)$$

式中: H_2 为周期内碳酸盐沉积厚度(m), D_L 为用纹层厚度推算的沉积速率(m/s)。应注意的是,由于沉积层保存潜力的因素,纹层在同一点上难以完整保存,因而式(9)中要加入校正系数 k 加以调整。系数 k 的确定需根据堆积、冲刷周期过程来确定^[20-21]。此时,将式(9)、式(3)并列,可解出 D_m 和 T' 的值。此外,如果以生物生产作为参照,也能根据式(8)用有机质颗粒的垂向通量来估算 T' 值。总体上,碳酸盐沉积的杂质含量、纹层厚度、沉积物和有机质来源信息均有助于约束条件的形成,但这些方面还需进一步的研究。

4 结论

(1) 南京地区早三叠世碳酸盐地层中发现的一段周期性沉积具有 $10^0 \sim 10^2$ cm垂向尺度,碳酸盐层与泥质层交替出现,在24个周期中碳酸盐沉积厚度占74%,并显示岩性的多样性,如扭曲层理薄层灰岩、具有李泽冈环的含泥灰岩、蠕虫状灰岩,沉积构造则表现为层理级别的多样性,纹层是各个周期中存在的普遍特征。

(2) 沉积动力学计算显示,泥质层的沉积速率为 10^{-5} m/a量级,据此推断周期性沉积的时间尺度为5~40 ka,与米兰科维奇周期一致。虽然泥质层厚度只

占总厚度的26%,但却占总时长的73%。

(3) 计算所获的环境参数,如泥质和碳酸盐物质沉积速率、沉降通量、水层悬沙浓度、碳酸盐物质产出、生物生产等,与现今深海碳酸盐沉积环境的参数值相当。

(4) 研究区的周期性沉积可与区域性的古海洋环境和气候变化特征相对照。但为了进一步提高计算精度,需明确所在层位的碳酸盐沉积的杂质含量、纹层厚度和保存潜力、沉积物和有机质来源等约束条件。

致谢 南京大学张红霞参与现场观察和测量工作,华东师范大学刘桢峤在图件绘制上提供了帮助。本文曾在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室学术报告会上宣读,感谢贾建军、赵宁研究员的邀请。感谢审稿专家提出中肯的修改建议。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] Baud A, Richoz S, Pruss S. The Lower Triassic anachronistic carbonate facies in space and time[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(1/2/3): 81-89.
- [3] Feng X Q, Chen Z Q, Bottjer D J, et al. Unusual shallow marine matground-adapted benthic biofacies from the Lower Triassic of the northern Paleotethys: Implications for biotic recovery following the end-Permian mass extinction[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 189: 194-219.
- [4] 李四光,朱森. 南京龙潭地质指南[M]. 南京:地质研究所, 1932: 1-13. [Li Siguang, Zhu Sen. The geology of the Longtan area in Nanjing: A guideline[M]. Nanjing: Geological Institution, 1932: 1-13.]
- [5] Woods A D. Microbial ooids and cortoids from the Lower Triassic (Spathian) virgin limestone, Nevada, USA: Evidence for an Early Triassic microbial bloom in shallow depositional environments[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 105: 91-101.
- [6] Li F, Yan J X, Chen Z Q, et al. Global oolite deposits across the Permian-Triassic boundary: A synthesis and implications for palaeoceanography immediately after the end-Permian biocrisis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 149: 163-180.
- [7] Heuer F, Leda L, Moradi-Salimi H, et al. The Permian-Triassic boundary section at Baghuk Mountain, central Iran: Carbonate microfacies and depositional environment[J]. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 2022, 102(2): 331-350.
- [8] 童金南. 华东地区早—中三叠世海相地层划分和对比[J]. *地球学报*, 2015, 36(5): 546-558. [Tong Jinnan. Division and correlation of Early-Middle Triassic marine strata in East China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 36(5): 546-558.]

- tion of marine Lower-Middle Triassic strata in East China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(5): 546-558.]
- [9] 林春明, 张霞, 于进, 等. 安徽巢湖平顶山西坡剖面下三叠统殷坑组沉积及地球化学特征[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2363-2373. [Lin Chunming, Zhang Xia, Yu Jin, et al. Sedimentary and geochemical characteristics of the Early Triassic Yinkeng Formation at west Pingdingshan section in Chaohu, Anhui province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2363-2373.]
- [10] Huang Y F, Bond D P G, Wang Y B, et al. Early Triassic microbialites from the Changxing region of Zhejiang province, South China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 8: 22.
- [11] Liu S, Sun Z Y, Ji C, et al. Conodont biostratigraphy and age of the Early Triassic fish-bearing-nodule levels from Nanjing and Jurong, Jiangsu province, South China[J]. *Journal of Earth Science*, 2020, 31(1): 9-22.
- [12] 高抒. 环礁沉积体系的过程—产物关系: 勘察式模拟初探[J]. *海洋与湖沼*, 2023, 54(1): 1-15. [Gao Shu. Process-product relationships of atoll deposition systems: A preliminary testing of exploratory modeling[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, 54(1): 1-15.]
- [13] Sverdrup K, Duxbury A C, Duxbury A B. Introduction to the world's oceans[M]. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2005: 1-514.
- [14] Qiu X C, Xu Y L, Chen Z Q, et al. The Early Triassic Jurong fish fauna, South China: Age, anatomy, taphonomy, and global correlation[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 180: 33-50.
- [15] Pickering K T, Hiscott R N. Deep marine systems: Processes, deposits, environments, tectonics and sedimentation[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2016: 1-672.
- [16] Ginsburg R N, James N P. Holocene carbonate sediments of continental shelves[M]//Burk C A, Drake C L. The geology of continental margins. Berlin, Heidelberg: Springer, 1974: 137-155.
- [17] Wang P X, Li Q Y. The South China Sea: Paleooceanography and sedimentology[M]. Dordrecht: Springer, 2009: 1-506.
- [18] Strogatz S H. Exploring complex networks[J]. *Nature*, 2001, 410(6825): 268-276.
- [19] Fagerstrom J A. The evolution of reef communities[M]. New York: Wiley, 1987: 1-600.
- [20] Gao S. Modeling the preservation potential of tidal flat sedimentary records, Jiangsu coast, eastern China[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(16): 1927-1936.
- [21] Davies N S, Shillito A P, Slater B J, et al. Evolutionary synchrony of Earth's biosphere and sedimentary-stratigraphic record[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 102979.

Preliminary Study on Sediment Dynamic Processes of Early Triassic Carbonate Deposits in Nanjing Area, Eastern China

GAO Shu

School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: [Objective] Early Triassic carbonate deposits indicate the dramatic change of sedimentary environment after the Permian mass extinction. However, the main difficulties in obtaining sedimentary environment information by sediment dynamics lie in the difficulties in field observation, unknown initial and boundary conditions, and unknown source and transport direction of sediments. One of the new approaches is to reconstruct the governing equations according to the complex system theory to achieve the goal of reliable simulation. [Methods] Here a method for calculating sedimentary environment parameters is established to analyze the sedimentary record of the Early Triassic (Helongshan Formation) carbonate deposits in the Nanjing area, which contain 24 mud-carbonate cycles. [Results and Discussions] The preliminary results show that the cyclic deposition has a vertical scale of 10^0 - 10^2 cm, the carbonate and the muddy layers appear alternately, the sedimentary structure is characterized by laminae, and the thickness of the carbonate deposit accounts for 74% in the 24 cycles. The time scale of each cycle is 5-40 ka, as calculated according to the deposition rate of the mud layers. Although the thickness of the mud layers only accounts for 26% of the total thickness, it accounts for 73% of the total temporal duration. The environmental parameters, such as deposition rate, vertical settling flux, suspended sediment concentration, carbonate and biological production, are similar to those of the present deep-sea carbonate sedimentary environment. [Conclusions] Cyclic sedimentation reflects the characteristics of paleo-marine environment and climate change in this region, but the further improvement of the calculation method depends on the definition of the constraining conditions associated with the impurity content of carbonate, the thickness and preservation potential of laminae, and the production of sediment and organic matter within the water column.

Key words: carbonate deposits; Early Triassic; dynamic processes; cyclicity; deposition rate; Nanjing area