

# 混合沉积特征精细刻画： 以江苏徐州寒武系馒头组为例\*

文祖超<sup>1,2</sup> 沈玉林<sup>1,2</sup> 李壮福<sup>1,2</sup> 敬宇鸿<sup>1,2</sup> 党志英<sup>1,2</sup>  
祝玉琳<sup>1,2</sup> 孟 艳<sup>1,2</sup> 李林超<sup>1,2</sup>

1 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008

2 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏徐州 221116

**摘要** 江苏徐州地区寒武系馒头组发育极具特色的陆源碎屑组分与碳酸盐组分混合沉积现象。本研究以寒武系馒头组一套典型的混合沉积序列为例, 依据剖面实测与镜下特征, 对该序列中的混合沉积组合类型开展了系统的岩石学研究; 通过分析不同沉积环境中的混合沉积特征, 建立了陆表海近岸背景下陆源碎屑组分与碳酸盐组分混合沉积模式, 探讨了各种混合沉积组合类型的混积成因类型、混积过程及主控因素等。结果表明: 徐州地区寒武系馒头组混合沉积序列中主要发育含砂鲕粒灰岩、含内碎屑砂质灰岩、灰质细砂岩、含灰粉砂岩等 11 种混合沉积组合类型; 混合沉积序列整体为陆表海海侵背景下次级海平面频繁波动且伴随多期次风暴作用的产物, 主要表现为海侵作用下由近岸的混积潮坪逐渐演化为混积局限台地; 混合沉积主要为相混合与间断混合, 局部发育原地混合与母源混合。气候、陆源输入程度、海平面变化、碳酸盐产率是形成相混合的主控因素, 同时也受到生物活动、水动力条件的调控; 多期次风暴作用在主导间断混合形成的同时, 一定程度上会促进相混合与母源混合的发育; 在各因素叠加影响下, 研究区具有多种混积成因类型组合发育的特征。厘清各种混积成因类型的分布与混积过程可为华北板块寒武纪古环境恢复与沉积演化提供参考, 并为“深时”陆表海台地混合沉积相关研究提供典型范例。

**关键词** 混合沉积 陆表海 风暴沉积 沉积模式 馒头组 寒武系 徐州地区

**第一作者简介** 文祖超, 男, 1999 年生, 博士研究生, 主要从事碳酸盐岩沉积方面研究。E-mail: wenzuchao@163.com。

**通讯作者简介** 沈玉林, 男, 1981 年生, 教授, 主要从事沉积学和煤、油气地质教学和科研工作。E-mail: yulinsh@163.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

## Detailed characterization of mixed sedimentation: a case study of the Cambrian Mantou Formation in Xuzhou, Jiangsu Province

WEN Zuchao<sup>1,2</sup> SHEN Yulin<sup>1,2</sup> LI Zhuangfu<sup>1,2</sup> JING Yuhong<sup>1,2</sup> DANG Zhiying<sup>1,2</sup>  
ZHU Yulin<sup>1,2</sup> MENG Yan<sup>1,2</sup> LI Linchao

1 Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221008, China

\* 地质学江苏省“十四五”重点学科建设项目资助。[Financially supported by the 14th Five-Year Plan Key Discipline Construction Project of Geology of Jiangsu Province]

收稿日期: 2023-10-18 改回日期: 2023-12-11

2 School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221116, China

**Abstract** The Cambrian Mantou Formation in the Xuzhou area of Jiangsu Province is characterized by mixed siliciclastic-carbonate sedimentation. In this study, a set of typical mixed siliciclastic-carbonate sequences from the Mantou Formation were systematically analyzed for their petrological characteristics based on section and microscopic features. By analyzing the mixed sedimentation characteristics in various sedimentary environments, a mixed siliciclastic-carbonate sedimentation model was established in the epicontinental sea environment. The different types of mixing, mixing processes, and controlling factors of various mixed siliciclastic-carbonate rocks were investigated. Research has shown that there are mainly 11 types of mixed sedimentary combination types in the sequence, including sandy-bearing oolitic limestone, sandy limestone with intraclast, fine-grained limy sandstone, and limy-bearing siltstone. The overall sequence is a result of frequent fluctuations in secondary sea-level variation, accompanied by multiple periods of storm activity, within the context of epicontinental transgression. It mainly evolves from an inshore mixed carbonate-siliciclastic tidal flat to a mixed restricted platform. The sedimentation in the study area consists of facies mixing and punctuated mixing, with localized occurrences of in situ mixing and source mixing. Climate, terrestrial input, sea level changes, and carbonate yield rate serve as the primary factors influencing facies mixing, with additional influences from biological activities and hydrodynamic conditions. The multi-stage storm activity can dominate the formation of punctuated mixing, and promote the development of facies mixing and source mixing to some extent. Under the superimposed influence of various factors, the study area is characterized by the development of a combination of multiple mixing types. Clarifying the distribution of various mixing types and mixing process can provide reference for the restoration of the Cambrian paleoenvironment and sedimentary evolution of the North China Plate. It also offers typical examples for the study of mixed sedimentation in the ‘deep time’ epeiric platform.

**Key words** mixed sedimentation, epicontinental sea, storm sedimentation, sedimentary model, Mantou Formation, Cambrian, Xuzhou area

**About the first author** WEN Zuchao, born in 1999, Ph. D. candidate, is mainly engaged in the research on carbonate sedimentation. E-mail: wenzuchao@163.com.

**About the corresponding author** SHEN Yulin, born in 1981, professor, is mainly engaged in teaching and scientific researches on sedimentology and coal, oil and gas geology. E-mail: yulinsh@163.com.

陆源碎屑与碳酸盐组分混合沉积在地质历史时期普遍发育，与通常认为的碳酸盐清水沉积及陆源碎屑沉积不同，这种特殊的沉积类型对古环境、古气候、古构造、海平面变化、物源等研究具有重要意义（赵灿等，2013；徐伟等，2019；李泉泉等，2021）。Mount 在 1984 年系统描述了浅海环境中碳酸盐组分与硅质碎屑的混积现象，提出了混合沉积物的概念。随后，国内外学者在混合沉积的岩石命名与分类方案（张锦泉和叶红专，1989；杨朝青和沙庆安，1990；沙庆安，2001；郭福生等，2003；董桂玉等，2007）、混合成因机理及主控因

素（Mount, 1984; Roberts, 1987）、混合沉积模式（董桂玉等，2009；曾楷等，2020；李凤杰等，2023）、油气地质意义与储层（冯进来等，2011；Feng *et al.*, 2013；Chiarella *et al.*, 2017）等方面开展系统研究，使混合沉积相关研究逐渐拓展与深入。混合沉积在不同沉积环境中普遍发育，如在陆相（陈世悦等，2017）、过渡相（孙娇鹏等，2014）以及现代海洋环境（Halfar *et al.*, 2004）中均有相关研究实例。Mount (1984) 将混合沉积划分为间断混合、相混合、原地混合以及母源混合 4 种成因类型：间断混合指高能突发事件（如风

暴等)引起的不同颗粒类型的搬运混合;相混合指不同相之间的过渡界面发生的沉积物混合,表现为岩石中不同组分类型的混合或碳酸盐岩层与陆源碎屑岩层交互的混积层系;原地混合指硅质碎屑沉积背景下原地死亡钙质生物的沉淀、碳酸盐胶结物的形成、藻席和叠层石等原地生长的微生物作用产物对陆源碎屑的捕获黏结混合等;母源混合指早期碳酸盐岩经风化剥蚀产生的碎屑与陆源碎屑混合形成的沉积。

近年来,混合沉积的研究实例已不断丰富(郭书元等, 2009; Chiarella *et al.*, 2017; 陈世悦等, 2017; 曾楷等, 2020; 李凤杰等, 2023), 然而“深时”陆表海台地混合沉积的实例报道相对较少。另外, 前人(桑树勋等, 2002; 栾守亮等, 2010)对江苏徐州大北望地区寒武系开展了详细的沉积特征与沉积模式研究, 描述了馒头组丰富的混合沉积现象, 但不同环境下的混积成因类型及其控制因素、精细尺度下混合沉积的发育过程仍有待进一步剖析。据此, 笔者针对徐州大北望地区馒头组一套陆源碎屑与碳酸盐混合沉积序列进行详细解剖, 结合剖面实测与镜下观察进行沉积环境分析, 揭示更多混合沉积的沉积学、岩石学、矿物学等宏

微观细节, 识别混积成因类型及其控制因素, 探究混积过程机理, 为徐州地区寒武系古环境恢复及沉积演化提供参考, 并为“深时”陆表海台地混合沉积相关研究提供典型范例。

## 1 地质背景

寒武纪华北板块为陆表海沉积背景, 具有面积广阔、水体极浅、地势平坦等特征, 混合沉积是该环境中的重要沉积类型(桑树勋等, 2002; 郭书元等, 2009; 栾守亮等, 2010; 王龙等, 2018)。华北板块大致于寒武纪第二世晚期开始接受沉积, 并自南东向北西逐渐海侵超覆在不同时代的前寒武纪地层之上(朱茂炎等, 2019, 2021), 总体属于一套二级海侵背景下的陆表海硅质碎屑岩与碳酸盐岩混积序列(Lee *et al.*, 2015; 王龙等, 2018)。

寒武纪第二世晚期, 华北板块位于  $20^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$  之间(Zheng *et al.*, 2023), 而这一区间属于低纬度热带—亚热带地区(图 1-A), 热带海洋气旋频发。从寒武纪第二世华北地区的古地理格局(图 1-B)来看, 研究区西北部的华北陆是主要的物源区, 围绕古陆分布着面积广阔的泥坪, 外围分

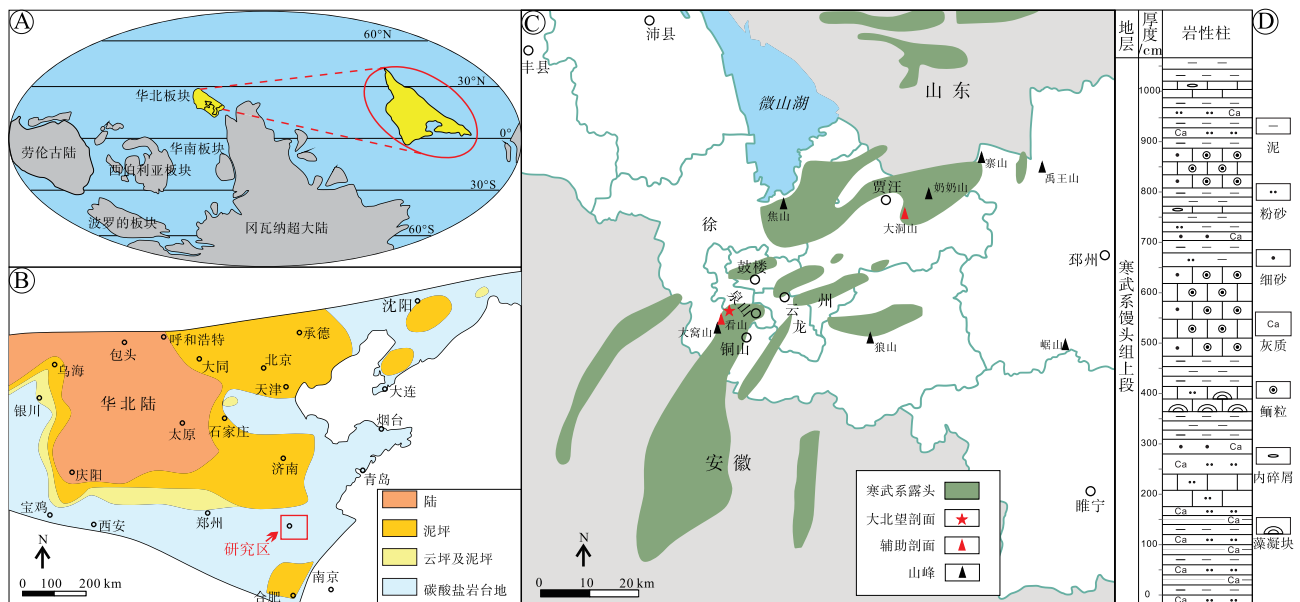


图 1 江苏徐州地区寒武系地质背景及馒头组上段岩性柱状图

Fig. 1 Cambrian palaeogeographic background and outcrop lithologic column of the upper member of Mantou Formation in Xuzhou area, Jiangsu Province

布的是陆表海背景下的碳酸盐岩台地（冯增昭等，2004）。研究区位于泥坪与碳酸盐岩台地的过渡地带，具有发育陆源碎屑与碳酸盐混合沉积的良好条件。

大北望剖面位于江苏省徐州市郊西南部，地属铜山区汉王镇北望村，主要出露寒武系（图 1-C）。文中参考朱茂炎等（2019，2021）华北地区寒武系划分方案，确定馒头组下伏地层为寒武系第二统猴家山组，上覆地层为苗岭统张夏组，所选混合沉积序列位于馒头组上段（图 1-D）。该段混合沉积广泛发育，其中混合沉积序列下部以灰质泥岩、灰质粉砂岩为主，中部以鲕粒灰岩、泥岩、藻凝块灰岩为主，上部以鲕粒灰岩、内碎屑灰岩、泥岩夹灰质粉砂岩为主。根据三叶虫化石带的年代地层划分对比，大北望剖面馒头组大致属于第二统第四阶上部（彭善池，2009；朱茂炎等，2019，2021）。

## 2 混合沉积颗粒组分类型

本研究实测江苏徐州地区大北望剖面寒武系馒头组上段混合沉积序列约 18.9 m。以岩石类型与厚度为分层采样依据，依照 10~100 cm 的采样间隔，共采样并磨制薄片 37 件，岩石光面 15 件。混合沉积组合类型的命名参考董桂玉等（2007）的陆源碎屑和碳酸盐两端元划分方案。混合沉积组合类型的划分与沉积环境分析基于野外宏观特征与镜下组分含量鉴定统计，其中各组分含量统计以目估与标准组分含量视觉比较图对比识别为主，并以稀盐酸（5%）与岩石样品新鲜面反应剧烈程度为辅助参考（灰质组分含量越多，则反应越剧烈）。薄片的室内鉴定、统计、拍照工作使用中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室 Olympus 显微镜完成。

结合野外宏观特征（图 2）与镜下微观特征（图 3），研究区碳酸盐颗粒组分包括内碎屑、球粒、鲕粒、钙质微生物、生物碎屑等，陆源碎屑颗粒组分主要为矿物颗粒与岩屑，其中矿物颗粒包括石英、长石、云母等，岩屑包括砂岩岩屑、碳酸盐岩岩屑等。

### 2.1 碳酸盐颗粒组分

1) 内碎屑。主要分布于混合沉积序列的中部与上部，原岩类型包括含砂泥晶灰岩、含砂鲕粒灰

岩等。砾级内碎屑多呈竹叶状或椭球状，粒径 0.2~5 cm，分选较差，而砂级内碎屑以次圆状为主，粒径 0.3~1.8 mm，分选中等。原岩为含砂灰岩的内碎屑，多呈砾屑产出，粒径 0.5~3 cm，次圆状为主，分选较差，内部含石英、海绿石、生物碎屑等（图 3-A）。

2) 球粒。主要分布于混合沉积序列上部。粒径多为 0.1~0.4 mm，分选中等，形状为椭球状、球状或不规则状，球粒内部成分主要为泥晶方解石，经重结晶作用内部常充填亮晶或微晶方解石。球粒常与鲕粒伴生，但粒径比鲕粒小且无圈层结构（图 3-B）。

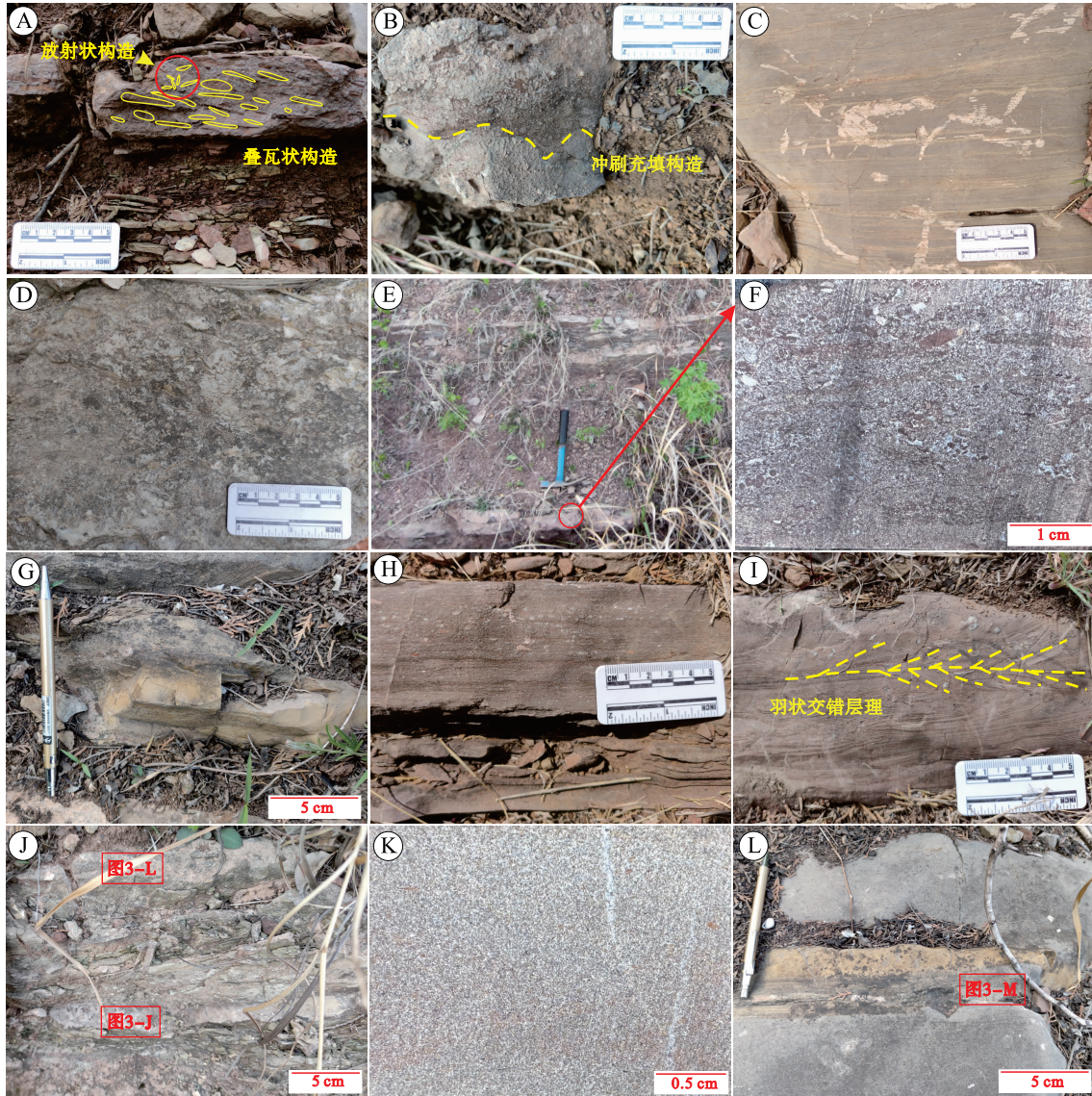
3) 鲕粒。主要分布于混合沉积序列上部。粒径多为 0.4~1.5 mm，部分达到巨鲕（>2 mm）。鲕粒形状受核心控制多呈圆形，少部分因核心为生屑或团块而呈椭球状、长条状或不规则状，核心类型包括方解石、生物碎屑、石英、内碎屑、微生物泥晶团块等。鲕粒的圈层结构类型多呈同心放射状，部分呈放射状。受淡水淋滤影响，鲕粒常发生溶蚀重结晶而使内部被亮晶方解石充填（图 3-B，3-C）。

4) 钙质微生物。主要为葛万菌（*Girvanella*）与附枝菌（*Epiphyton*），分布于微生物凝块石与鲕粒灰岩中。葛万菌较为常见，为丝状集合体，既能以独立颗粒形式出现，也可黏结或附着于其他颗粒产出，长度可达 1 mm，直径 15~20 μm（图 3-E）。附枝菌呈泥晶斑点状聚合体，粒径 20~40 μm，中心部分较为密集，向外逐渐发散（图 3-F）。

5) 生物碎屑（生屑）。主要包括三叶虫、棘皮类、腕足类等，其中三叶虫与棘皮类碎片产出较丰富。棘皮类碎片呈长条形或椭圆形，长 0.3~1.5 mm，具单消光与内部均匀粗孔构造特征（图 3-G）。三叶虫碎片长 0.4~1.5 cm，具波状消光特征，部分边缘呈弯钩状形态，主要为三叶虫胸节碎片（图 3-H）。

### 2.2 陆源碎屑颗粒组分

主要为矿物颗粒与岩屑。矿物颗粒以石英、长石、云母为主，粒径 50~400 μm，粉砂级至细砂级。石英单偏光下呈无色透明，干涉色一级灰白，无解理，次棱角至次圆状（图 3-J）。长石以钾长石为主，薄片无色，负突起，具解理，干



A—含砂内碎屑灰岩，砾屑呈竹叶状，具叠瓦状构造、放射状构造；B—含砂鲕粒灰岩，具冲刷充填构造；C—含粉砂泥晶灰岩，水平—微波状纹层；D—含砂藻凝块灰岩，见微生物凝块构造；E—含内碎屑砂质灰岩，冲刷面发育；F—为 E 红圈所示含内碎屑砂质灰岩的光面特征，见鲕粒灰岩砾屑、生屑等；G—含生屑泥质灰岩，均质层理；H—粉砂质泥晶灰岩，水平纹层，见窗格构造；I—灰质粉砂岩，发育羽状交错层理；J—灰质细砂岩（红框 J）与含灰细砂岩（红框 L），夹泥岩和钙质粉砂岩；K—灰质细砂岩光面特征，颗粒间被白色灰质胶结物充填；L—含砂鲕粒灰岩夹含灰粉砂岩（红框 M）和土黄色泥质灰岩，见冲刷面

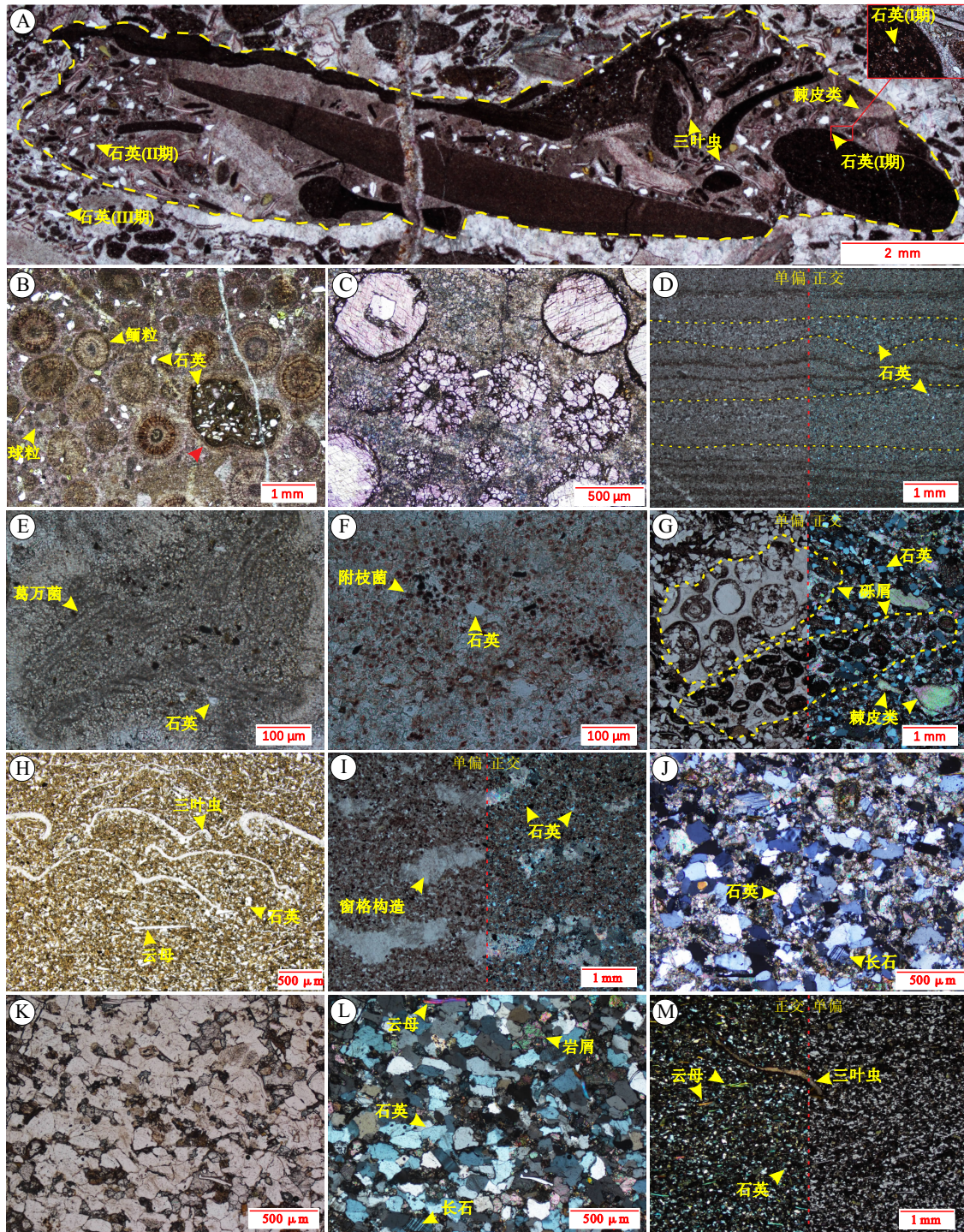
图 2 江苏徐州地区寒武系馒头组上段陆源碎屑与碳酸盐混合沉积宏观特征

Fig. 2 Macroscopic characteristics of mixed siliciclastic-carbonate sedimentation of the upper member of Cambrian Mantou Formation in Xuzhou area, Jiangsu Province

涉色一级灰至灰白，正交偏光下见条纹结构或格子状双晶结构(图 3-J)。云母以白云母为主，长条状，低正突起，具细而直的解理缝，单偏光下无色透明，干涉色较鲜艳(图 3-L)。岩屑类型主要为砂岩岩屑、碳酸盐岩岩屑(图 3-L)等，大小 50~200 μm，粉砂至细砂级，多呈椭圆形或不规则状，具粒状变晶结构与砂状结构等。

### 3 岩石学特征与沉积环境分析

大北望剖面馒头组上段发育众多混合沉积组合类型，文中参考董桂玉等(2007)的陆源碎屑和碳酸盐两端元划分方案(表 1)，对混合沉积组合进行分类命名。根据陆源碎屑组分与碳酸盐组分含量差异划分为含陆源碎屑碳酸盐岩、陆源碎屑质碳酸



A—含砂内碎屑灰岩，见砾屑中多期次混入石英、三叶虫、棘皮类等，单偏光；B—含砂鲕粒灰岩，见核心为内碎屑的鲕粒（红色箭头），内部见灰泥、石英、亮晶方解石、海绿石、云母等，单偏光；C—鲕粒溶蚀重结晶，内部充填亮晶方解石，单偏光；D—含粉砂泥晶灰岩，纹层状，陆源碎屑含量存在旋回性差异；E—葛万菌（*Girvanella*），单偏光；F—附枝菌（*Epiphyton*），单偏光；G—含内碎屑砂质灰岩，砾屑原岩为含砂鲕粒灰岩，见棘皮类碎片；H—含生屑泥质灰岩，三叶虫为主，单偏光；I—粉砂质泥晶灰岩，窗格构造，内部发生重结晶；J—灰质细砂岩，少量长石、碳酸盐岩屑、球粒等，正交偏光；K—含灰细砂岩，单偏光；L—为图 K 的正交偏光特征，见少量长石、碳酸盐岩屑、云母等；M—含灰粉砂岩，见三叶虫、云母等

图 3 江苏徐州地区寒武系馒头组上段陆源碎屑与碳酸盐混合沉积微观特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of mixed siliciclastic-carbonate sedimentation of the upper member of Cambrian Mantou Formation in Xuzhou area, Jiangsu Province

表 1 混合沉积组合类型分类命名方案  
(据董桂玉等, 2007 修改)

Table 1 Classification of mixed siliciclastic-carbonate rocks  
(modified by Dong *et al.*, 2007)

岩石组分	体积分数/%	岩石类型	名称示例
以碳酸盐为主	0<LS<25	含陆源碎屑碳酸盐岩	含泥灰岩
	25<LS<50	陆源碎屑质碳酸盐岩	砂质灰岩
以陆源碎屑为主	25<TS<50	碳酸盐质陆源碎屑岩	灰质砂岩
	0<TS<25	含碳酸盐陆源碎屑岩	含灰砂岩

注: LS 代表陆源碎屑组分; TS 代表碳酸盐组分。

盐岩、含碳酸盐陆源碎屑岩、碳酸盐质陆源碎屑岩 4 类, 并根据实际情况进一步划分为 11 种混合沉积组合类型(表 2)。依据各混合沉积组合类型宏观与微观特征, 进行沉积环境分析。

### 3.1 含陆源碎屑碳酸盐岩

1) 含砂内碎屑灰岩。在混合沉积序列中多处发育。中厚层状, 内碎屑呈浅灰红色, 胶结物呈浅灰色, 风暴序列发育完整程度较差, 序列组合为“泥灰岩夹泥岩—含砂内碎屑灰岩—泥岩”, 见叠瓦状构造与放射状构造(图 2-A)。陆源碎屑组分含量 5%~10%, 多为石英, 粒径 20~150  $\mu\text{m}$ , 细砂级为主, 次棱角至次圆状, 分选良好。碳酸盐组分含量约 80%, 主要为内碎屑和生物碎屑, 其中内碎屑多呈椭圆状或竹叶状, 长 0.1~3.5 cm, 以砂屑和砾屑为主, 原岩类型主要为泥晶灰岩或含粉砂泥晶灰岩, 部分的内碎屑具多期次成因特征, 可见不同时期混入的石英颗粒(图 3-A); 而生物碎屑类型主要为三叶虫与棘皮类碎片, 含量约 10%, 在颗粒内部与颗粒间均有产出。颗粒支撑, 亮晶胶结, 整体指示高能的受风暴影响的潮下滩环境。

2) 含砂鲕粒灰岩。多产出于混合沉积序列的上部。浅灰白色至浅灰红色, 中厚层状, 发育冲刷充填构造(图 2-B)。陆源碎屑组分含量 5%~10%, 以石英为主, 粒径 50~120  $\mu\text{m}$ , 细砂级, 次圆状, 分选中等。碳酸盐组分含量约 90%, 包括鲕粒、球粒等, 其中鲕粒含量约 60%, 粒径 0.5~1.5 mm, 分选良好, 而球粒含量约 10%, 粒径 50~100  $\mu\text{m}$ , 多呈椭球状与圆状, 分选良好。部分鲕粒核心为内碎屑, 其内部组分包括灰泥、石英、亮晶方解石、海绿石、云母等(图 3-B)。颗粒支撑, 胶结物为微晶—亮晶方解石, 整体指示高能水动力条件的鲕粒

滩环境。

3) 含粉砂泥晶灰岩。主要分布于混合沉积序列下部。呈浅灰色至浅黄灰色, 极薄层至纹层状, 纹层泥质含量较高, 水平至微波状层理发育(图 2-C)。陆源碎屑组分含量约 20%, 以泥与粉砂为主。毫米至亚毫米级纹层发育, 暗色纹层中泥和有机质的含量较高, 而陆源粉砂主要分布于较亮的纹层中, 不同纹层内陆源碎屑含量存在差异, 呈明显的富陆源碎屑(约 20%)与贫陆源碎屑(约 5%)纹层旋回(图 3-D)。颗粒主要为石英, 粒径 20~60  $\mu\text{m}$ , 以细粉砂级为主, 次棱角至次圆状, 分选良好。碳酸盐组分以灰泥为主, 含量约 65%, 几乎不含生物碎屑。基质支撑, 整体指示混积潮间坪环境。

4) 含粉砂藻凝块灰岩。在研究区产出较少, 主要分布于混合沉积序列的下部。厚 0.3~0.7 m, 横向上快速尖灭, 见微生物凝块构造(图 2-D)。陆源碎屑组分含量约 5%, 以石英为主, 粒径 20~50  $\mu\text{m}$ , 细粉砂级为主, 次棱角状, 分选良好。碳酸盐组分含量约 90%, 主要为灰泥与钙质微生物, 见葛万菌(图 3-E)、附枝菌(图 3-F)等。灰泥基质支撑, 整体指示中低能环境中原地生长的微生物丘。

### 3.2 陆源碎屑质碳酸盐岩

1) 含内碎屑砂质灰岩。分布于混合沉积序列中部与上部。浅灰色至灰红色, 薄至中层状, 冲刷面发育, 厚度横向上逐渐尖灭(图 2-E), 风暴序列发育完整程度较差, 序列组合为“泥岩夹灰质粉砂岩—含内碎屑砂质灰岩—泥岩”。岩石光面可见鲕粒灰岩砾屑、生屑等多类型颗粒混杂堆积(图 2-F)。陆源碎屑组分含量约 35%, 以石英为主, 少量长石、岩屑、云母, 粒径 80~400  $\mu\text{m}$ , 细砂级为主, 次棱角至次圆状, 分选良好。碳酸盐组分含量约 60%, 包括内碎屑、生物碎屑、灰泥等, 以砾屑为主, 鲕粒内部发生不同程度的重结晶导致鲕粒圈层结构模糊或消失, 内碎屑原岩为不同类型的鲕粒灰岩(图 3-G), 生物碎屑包括三叶虫, 棘皮类等。胶结物为灰泥, 基质支撑, 指示受高能水动力条件搬运而快速沉积的受风暴影响的潮下滩环境。

2) 含生屑泥质灰岩。常与鲕粒灰岩伴生, 以互层、夹层形式产出。土黄色, 薄层为主, 水平层理或均质层理, 可见生物化石(图 2-G), 滴稀盐

表 2 江苏徐州地区寒武系馒头组上段混合沉积组合类型及沉积环境分析

Table 2 Mixed siliciclastic-carbonate rock types and their sedimentary environment analysis of the upper member of Cambrian Mantou Formation in Xuzhou area, Jiangsu Province

类型	岩石命名	显微组分特征		支撑类型	沉积环境
		陆源碎屑组分	碳酸盐组分		
含陆源碎屑碳酸盐岩	含砂内碎屑灰岩	含量 5% ~ 10%。以石英为主, 粒径 20 ~ 150 $\mu\text{m}$ , 主要为细砂级, 次棱角至次圆状, 分选良好	含量约 80%。以内碎屑和生物碎屑为主, 具多期次强水动力改造特征, 生物碎屑类型主要为三叶虫与棘皮类碎片, 含量约 10%	颗粒支撑	受风暴影响的潮下滩
	含砂鲕粒灰岩	含量 5% ~ 10%。以石英为主, 粒径 50 ~ 120 $\mu\text{m}$ , 主要为细砂级, 次圆状, 分选中等	含量约 90%。以鲕粒为主 (60%), 部分球粒 (10%)	颗粒支撑	鲕粒滩
	含粉砂泥晶灰岩	含量约 20%。以泥与石英细粉砂为主, 石英粒径 20 ~ 60 $\mu\text{m}$ , 次棱角至次圆状, 分选良好	含量约 65%。主要为灰泥	基质支撑	混积潮间坪
	含砂藻凝块灰岩	含量约 5%。以石英为主, 粒径 20 ~ 50 $\mu\text{m}$ , 细粉砂级, 次棱角状, 分选良好	含量约 90%。主要为灰泥与钙质微生物, 见附枝菌、葛万菌	基质支撑	微生物丘
陆源碎屑质碳酸盐岩	含内碎屑砂质灰岩	含量约 35%。石英细砂为主, 粒径 100 ~ 400 $\mu\text{m}$ , 次棱角至次圆状, 分选良好	含量约 60%。包括内碎屑、灰泥、生屑等, 其中内碎屑原岩为鲕粒灰岩	基质支撑	受风暴影响的潮下滩
	含生屑泥质灰岩	含量 25% ~ 35%。以泥、石英为主, 少量云母, 石英粒径 40 ~ 100 $\mu\text{m}$ , 粉砂级为主, 次棱角状, 分选良好, 云母粒径 50 ~ 200 $\mu\text{m}$ , 具有一定的水平定向性	含量约 60%。主要为灰泥和生物碎屑, 见三叶虫碎片	基质支撑	滩间
	粉砂质泥晶灰岩	含量约 25%。以石英粉砂为主, 粒径 30 ~ 90 $\mu\text{m}$ , 次棱角状, 分选中等	含量约 60%。以微晶方解石 (30%) 与灰泥 (30%) 为主, 见窗格构造, 亮晶方解石充填	基质支撑	混积潮上坪
碳酸盐质陆源碎屑岩	灰质粉砂岩	含量约 60%。以石英为主、少量云母, 粉砂级, 次圆状至次棱角状, 分选良好	含量约 30%。主要为微晶或泥晶方解石胶结物	颗粒支撑	混积潮间坪
	灰质细砂岩	含量约 55%。以石英细砂为主, 粒径 100 ~ 350 $\mu\text{m}$ , 次棱角状	含量约 35%。以微晶或泥晶方解石为主, 少量鲕粒、球粒、生屑	颗粒支撑	混积潮下滩
含碳酸盐陆源碎屑岩	含灰细砂岩	含量约 80%。以石英为主, 少量长石、岩屑、云母, 粒径 70 ~ 200 $\mu\text{m}$ , 细砂级, 次棱角状, 分选中等	含量 10% ~ 15%。主要为微晶或泥晶方解石胶结物, 充填于孔隙之间	颗粒支撑	混积潮下滩
	含灰粉砂岩	含量约 75%。以石英为主, 粒径 40 ~ 100 $\mu\text{m}$ , 粉砂级, 次棱角状, 分选良好	含量 10% ~ 20%。主要为微晶或泥晶方解石胶结物	基质支撑	滩间

酸 (5%) 剧烈起泡。陆源碎屑组分含量 25% ~ 35%, 以泥与石英为主, 含少量云母, 其中石英粒径 40 ~ 100  $\mu\text{m}$ , 粉砂级为主, 次棱角状, 分选良好, 云母粒径 50 ~ 200  $\mu\text{m}$ , 具有一定的水平定向性。碳酸盐组分含量约 60%, 主要为灰泥和生物碎屑, 其中生屑含量约 5%, 以三叶虫碎片为主 (图 3-H), 粒径 0.2 ~ 4 mm。基质支撑, 整体指示较低能的滩间环境。

3) 粉砂质泥晶灰岩。主要分布在混合沉积序列的下部。灰红色, 薄层至中层状, 发育窗格构造,

水平至微波状层理 (图 2-H)。陆源碎屑组分含量约 25%, 以石英为主, 少量长石、岩屑、白云母等, 粒径 30 ~ 90  $\mu\text{m}$ , 粉砂级, 以次棱角状为主, 分选中等。碳酸盐组分包括灰泥与微晶方解石, 灰泥含量约 30%, 微晶方解石含量约 30%。基质支撑, 生物碎屑几乎不可见, 可见典型暴露成因的窗格构造 (鸟眼构造) (图 3-1), 内部被亮晶方解石充填, 指示相对暴露干旱的混积潮上坪环境。

### 3.3 碳酸盐质陆源碎屑岩

1) 灰质粉砂岩。主要分布于混合沉积序列下

部。灰红色，薄层至纹层状的灰质泥岩与粉砂岩互层，具页状层理，见双黏土层、羽状交错层理等(图 2-I)。陆源碎屑组分含量约 60%，以泥和石英粉砂为主，少量云母，次圆状至次棱角状，分选良好。碳酸盐组分含量约 30%，主要为微晶或泥晶方解石。颗粒支撑，微晶—泥晶胶结，整体指示混积潮间坪环境。

2) 灰质细砂岩。主要在混合沉积序列的中部至上部产出。浅灰色薄层状，多与泥岩或含灰细砂岩伴生，平行至微波状层理(图 2-J)。岩石光面整体较均一，颗粒间白色灰质胶结物充填(图 2-K)。陆源碎屑组分含量约 60%，以石英为主，少量长石、岩屑、云母等，粒径 100~350  $\mu\text{m}$ ，细砂级为主，次棱角状，分选良好。碳酸盐组分含量约 35%，主要为微晶或泥晶方解石，少量鲕粒或球粒，颗粒内部发生重结晶。颗粒支撑，微晶—泥晶胶结，零星可见生物碎屑且主要为三叶虫碎片(图 3-J)，整体为靠陆的中高能水动力的混积潮下滩环境。

### 3.4 含碳酸盐陆源碎屑岩

1) 含灰细砂岩。分布于混合沉积序列中部和上部，常与灰质细砂岩、泥岩伴生。薄层状为主，平行层理至微波状层理(图 2-J)。陆源碎屑组分含量约 80%，石英为主，少量长石、岩屑、云母，粒径 70~200  $\mu\text{m}$ ，细砂级，次棱角状，分选中等。碳酸盐组分含量 10%~15%，主要为微晶或泥晶方解石胶结物，充填于孔隙之间。颗粒支撑(图 3-K, 3-L)，整体指示较高能的混积潮下滩环境。

2) 含灰粉砂岩。该类型岩石多与泥岩、泥质灰岩、鲕粒灰岩伴生，常以薄层状夹层形式产出于鲕粒灰岩间，水平层理(图 2-L)。陆源碎屑组分含量约 75%，石英为主，少量云母、岩屑、长石等，粒径 40~100  $\mu\text{m}$ ，粉砂级，次棱角状，分选良好。碳酸盐组分含量 10%~20%，主要为微晶或泥晶方解石，以胶结物的形式产出。基质支撑(图 3-M)，整体指示低能水动力条件的滩间环境。

## 4 讨论

### 4.1 混合沉积剖面对比

通过对比分析江苏徐州地区大北望剖面、看山剖面、大洞山剖面的寒武系馒头组上段发育特征(图 4)，发现 3 个剖面均具有典型的混合沉积发育

证据，且混合沉积组合类型及其岩性组合在区域上具有可对比性，说明该时期这套独特的陆源碎屑与碳酸盐混合沉积序列在横向上广泛发育。其中大北望剖面与看山剖面的混合沉积序列发育特征较一致，而大洞山剖面的沉积厚度较厚，岩性变化频率较低，这也侧面反映出大北望地区当时沉积环境多变，岸线频繁迁移。

### 4.2 沉积环境演化

寒武纪第二世晚期，华北板块整体发育海侵背景下的陆表海沉积，具有水体浅、地势平、面积广阔等特征，因此小幅度海平面变化都会引起大范围的沉积环境变迁(Irwin, 1965; 王龙等, 2018; 樊爱萍等, 2023)。大北望地区寒武系馒头组极具特色的混合沉积序列(图 5)是对这一时期沉积环境频繁变迁的关键记录。

根据岩性及其组合、沉积构造、显微结构组分类型等特征，馒头组混合沉积序列为海侵背景下次级海平面频繁波动且伴随着多期次风暴沉积作用的产物，整体由混积潮坪相演化为混积局限台地相。根据海平面的波动、水动力条件、沉积地貌特征等，混积潮坪可划分为混积潮上坪、混积潮间坪以及混积潮下滩等亚相，混积局限台地划分为潟湖、鲕粒滩、滩间、受风暴影响的潮下滩等亚相。

混合沉积序列开始阶段为混积潮坪沉积，受潮汐水流影响，发育波状层理、脉状层理、羽状交错层理(图 2-I)、双黏土层等构造。混积潮间坪主要发育灰质粉砂岩、灰质泥岩等；当海平面上升时演变为水体能量较高的混积潮下滩沉积，主要发育含灰细砂岩、灰质细砂岩等；随着垂向不断加积以及海平面的波动，当海平面逐渐下降时，演变为混积潮上坪，主要沉积含粉砂泥晶灰岩，在潮上暴露环境中发育窗格构造(图 2-H; 图 3-I)。混积潮坪整体发育多个向上变浅的沉积序列(梅冥相等, 2000)。

随着海侵的持续，沉积环境逐渐向海过渡，海平面上升淹没混积潮坪相，演化为混积局限台地相。研究区鲕粒滩的规模不大，但受制于陆表海广而浅的特征，正地貌的鲕粒滩所具的障壁作用仍十分显著，能够较大程度地隔绝海水，形成潟湖与滩间沉积。研究表明，稳定的水下低能环境、富营养物质以及充足的光照条件有利于微生物群落的繁

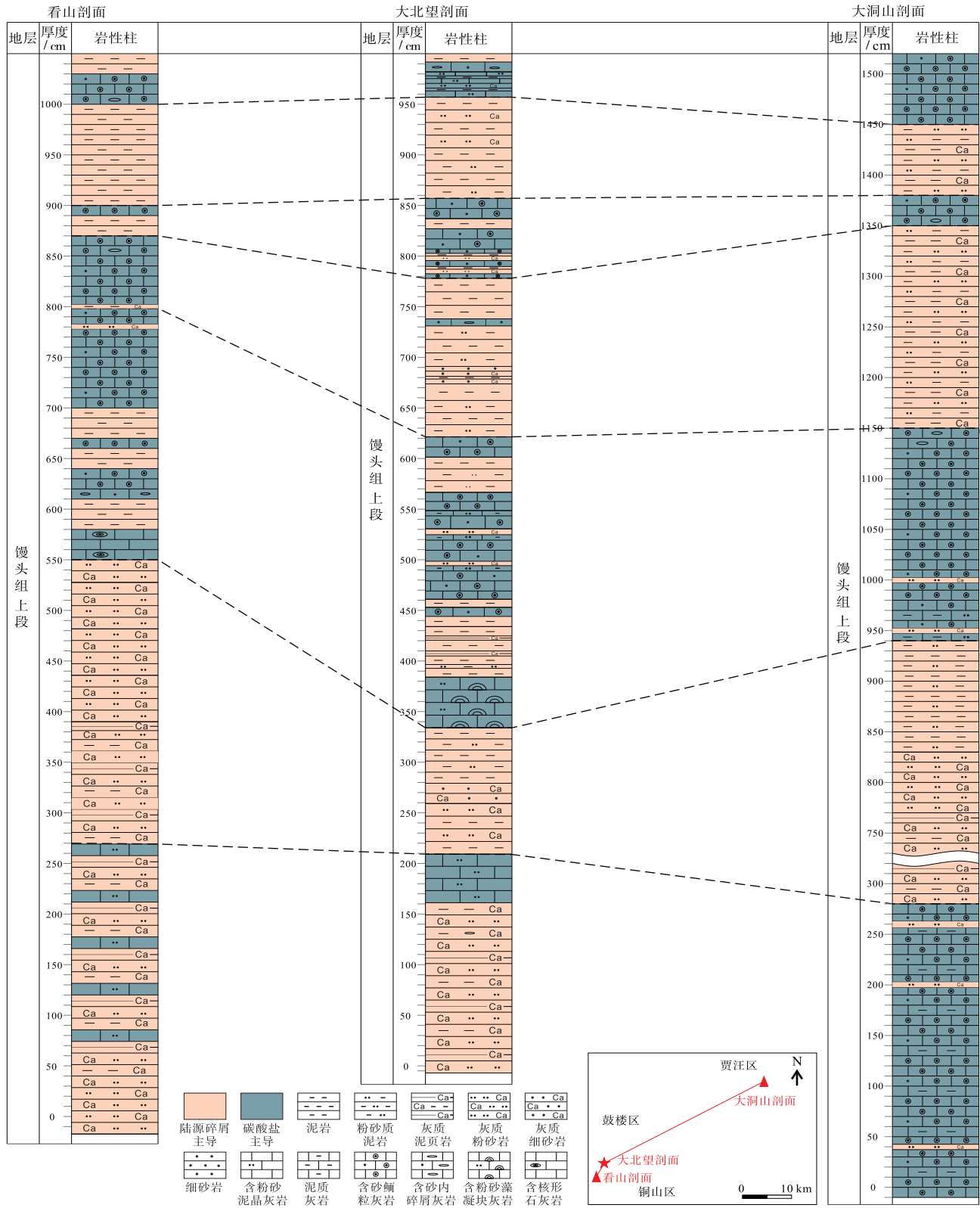
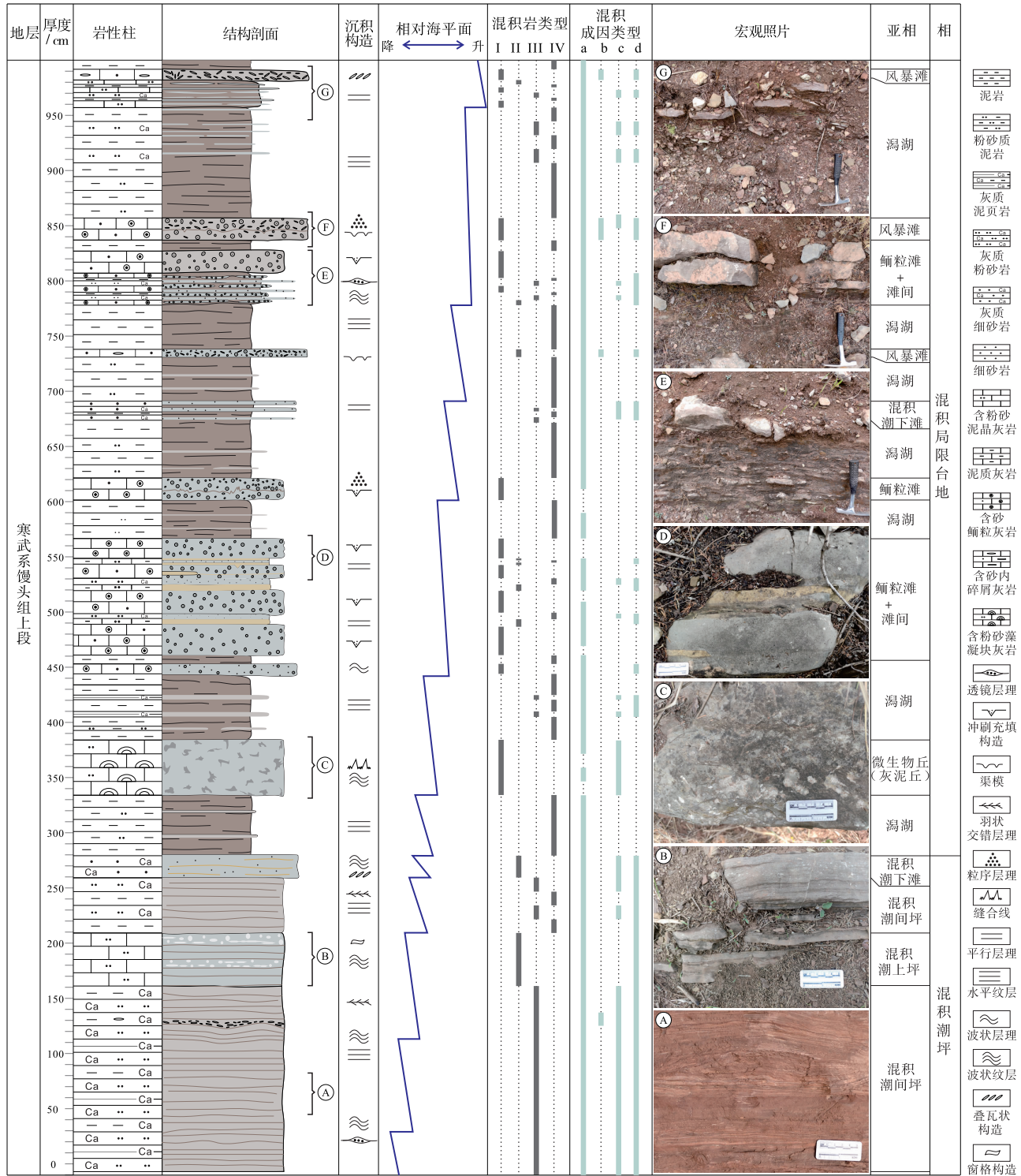


图 4 江苏徐州地区寒武系馒头组上段混合沉积序列剖面对比

Fig. 4 Cross section correlation of mixed sedimentary sequences of the upper member of Cambrian Mantou Formation in Xuzhou area, Jiangsu Province



混积岩类型中：I—含陆源碎屑碳酸盐岩；II—陆源碎屑质碳酸盐岩；III—碳酸盐质陆源碎屑岩；IV—含碳酸盐陆源碎屑岩；

混积成因类型中：a—相混合；b—间断混合；c—原地混合；d—母源混合

图 5 江苏徐州地区寒武系馒头组上段典型混合沉积序列综合柱状图

Fig. 5 Comprehensive histogram of mixed siliciclastic-carbonate sedimentation sequences of the upper member of Cambrian Mantou Formation in Xuzhou area, Jiangsu Province

盛，微生物分泌的胞外聚合物 EPS (Extracellular Polymeric Substances) 可以通过黏结、捕获碎屑颗粒物质与碳酸盐质点，并经微生物作用形成微生物岩、丘体等 (张宝民等, 2009; Decho and Gutierrez, 2017; 吴亚生等, 2021)。研究区水浅且局限的环境给微生物的繁育带来了充足的光照和养分条件，微生物群落可通过微生物的黏结、障积等一系列作用在局部发育微生物丘 (灰泥丘)，然而随着大量陆源物质的再次混入，微生物丘的发育遭受抑制甚至破坏 (Riding, 2002)，因此序列中发育的微生物丘具规模较小、厚度较小且横向上快速尖灭等特点 (图 2-D; 图 3-E, 3-F)。当沉积环境持续向海演化时碳酸盐沉积逐渐占据主导，发育鲕粒滩与滩间沉积组合，此时研究区广泛发育的微生物席 (图 3-E, 3-F) 可供给和鲕粒发育密切相关的 EPS (Gerdes *et al.*, 1994; 李飞等, 2022)，促进鲕粒的发育以及鲕粒滩的沉积。鲕粒滩主要沉积鲕粒灰岩与含砂鲕粒灰岩，滩间沉积含生屑泥质灰岩、含灰粉砂岩等。需要指出的是，近岸的混积潮坪环境尽管已具备鲕粒生长发育的沉积水动力条件，但较多的陆源碎屑物质输入会抑制微生物群落的生长，难以持续稳定的提供 EPS 进而导致鲕粒的生长遭到抑制或破坏，因此鲕粒产出丰度较低或不发育。

在研究区沉积演化的过程中，广泛发育受风暴作用影响的沉积构造及岩性组合。研究区水体较浅，海平面波动频繁，完整的风暴沉积序列较难保存，序列中主要发育“泥灰岩夹泥岩—含砂内碎屑灰岩—泥岩”、“泥岩夹灰质粉砂岩—含内碎屑砂质灰岩—泥岩”、“泥岩—鲕粒灰岩夹泥灰岩—含砂鲕粒灰岩—泥岩”等。主要岩性为含砂内碎屑灰岩 (图 3-A)、含内碎屑砂质灰岩 (图 3-G) 等，发育冲刷充填构造、渠模 (图 5)、叠瓦状构造、放射状构造 (图 2-A) 等。

### 4.3 混合沉积的控制因素

混合沉积的影响因素包括陆源输入、气候、海平面变化、水动力条件、生物活动、碳酸盐产率、构造作用等，各因素之间相互制约，综合影响 (张锦泉和叶红专, 1989; 沙庆安, 2001; 董桂玉等, 2009; 徐伟等, 2019; 李泉泉等, 2021)。文中通过对徐州大北望地区寒武系典型的陆源碎屑与

碳酸盐混合沉积序列 (图 5) 进行精细剖析，结合看山剖面与大洞山剖面横向对比，认为序列中发育的混合沉积成因类型主要为相混合和风暴作用主导的间断混合，局部发育原地混合和母源混合。其中陆源输入、气候、海平面变化、碳酸盐产率是形成相混合的主要控制因素，风暴作用是形成间断混合的主要因素，生物活动、水动力条件等因素也共同参与影响混合沉积。结合前人 (董桂玉等, 2009; 栾守亮等, 2010) 关于寒武系陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究，根据研究区典型混合沉积序列的岩石宏观特征、陆源碎屑组分与碳酸盐组分类型及含量差异、不同剖面的混合沉积现象对比、沉积环境演化等，建立陆表海近岸背景下陆源碎屑与碳酸盐混合沉积模式 (图 6)。需要指出的是，不同沉积环境的混合沉积过程及特征不同，其控制因素也存在差异 (图 7)。

从古地理格局来看 (图 1-B)，研究区一方面受到西北部华北古陆的陆源碎屑输入，另一方面以台地碳酸盐沉积为主。在陆表海浅水背景下，海平面的快速上升不会使碳酸盐产率显著降低，水深大体仍在透光带以内 (王龙等, 2018)，因此研究区陆源碎屑主导沉积时应是海平面逐渐下降、相带界线向海迁移、陆源输入增多的过程，而碳酸盐主导沉积时为海平面相对上升、相带界线向陆迁移、陆源输入减少的过程，最终形成向陆一侧为混积潮坪而向海一侧为混积局限台地的沉积格局 (图 6)。此外，受浅水条件下海平面频繁升降的影响，各相带边界往返迁移，总体形成相混合沉积。

气候也可通过影响物源输入程度的方式来影响研究区混合沉积发育 (徐伟等, 2019; 李泉泉等, 2021)。气候湿润时，大气降水与地表径流增加，研究区陆源输入则增加，碳酸盐沉积受抑制，陆源碎屑主导混合沉积；气候干旱时，大气降水与地表径流减少，陆源输入减少，碳酸盐主导混合沉积。

在研究区混合沉积的发育过程中，潮汐流、波浪、沿岸流是主要的水动力 (Schwarz *et al.*, 2018)，涨潮时混积局限台地内的碳酸盐组分被搬运至近岸的混积潮坪，以少量碳酸盐组分与碳酸盐胶结物为特征，退潮时陆源碎屑被潮汐、波浪以及离岸流搬运至混积局限台地 (图 7-A)。混积潮上坪的蒸发作用较强，尽管有中等程度的陆源碎屑输入，但在干旱气候下强蒸发作用导致的高盐度使得

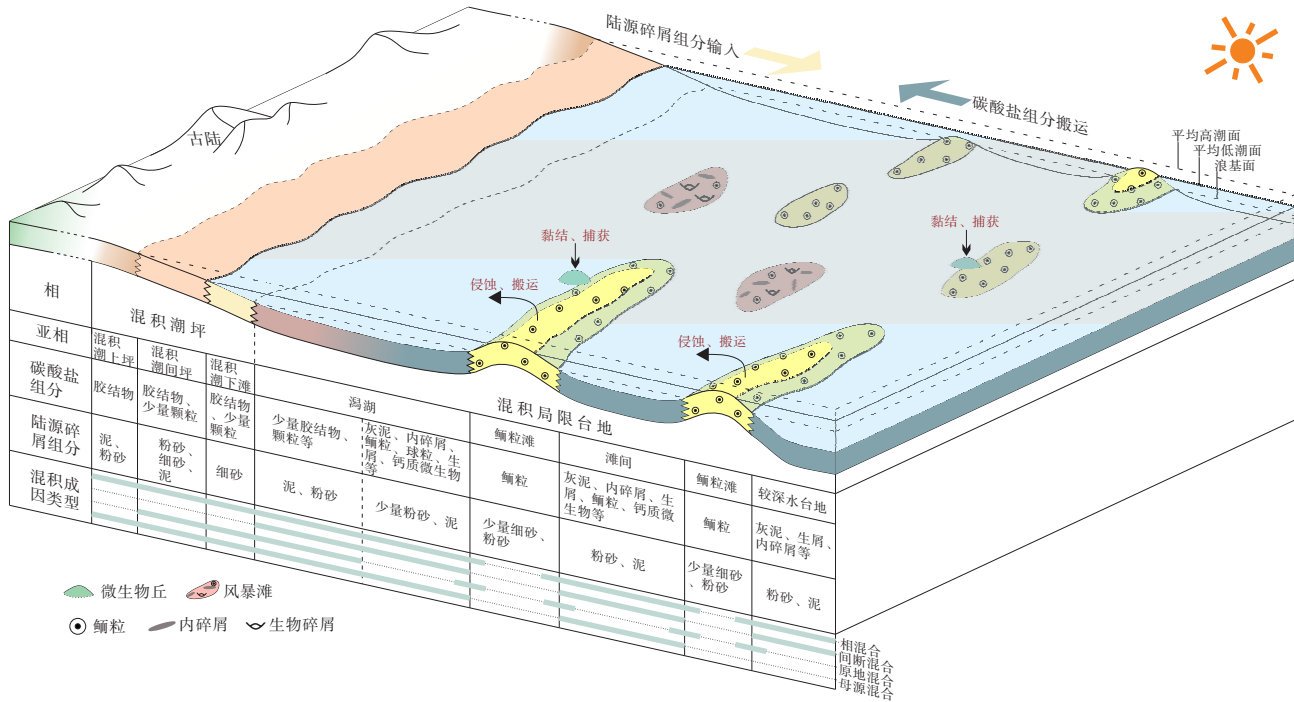


图 6 陆表海近岸背景下陆源碎屑-碳酸盐混合沉积模式

Fig. 6 Sedimentary model of mixed siliciclastic-carbonate sedimentation at nearshore of epicontinental sea

碳酸盐更易沉淀，以胶结物形式发育原地混合，最终形成具窗格构造的粉砂质泥晶灰岩(图 3-I)；混积潮间坪环境中，较少的陆源碎屑输入使得碳酸盐主导混合沉积，陆源碎屑组分主要通过潮汐作用和离岸流从浅水区域搬运而来，海平面下降时搬运的陆源碎屑量较多，反之较少，在海平面频繁波动下不同纹层呈现陆源碎屑含量差异，表现为相混合，发育纹层状的含粉砂泥晶灰岩(图 3-D)，而在强陆源输入时混积潮间坪由陆源碎屑主导混合沉积，碳酸盐组分主要以胶结物形式产出并发育原地混合，最终形成灰质粉砂岩(图 2-I)；混积潮下滩环境在中等陆源输入条件下由陆源碎屑主导混合沉积，浅水高能的环境特点使其沉积的陆源碎屑以细砂级为主，碳酸盐组分主要以胶结物形式构成原地混合，同时也可混入少量碳酸盐颗粒组分，最终形成灰质细砂岩(图 3-J)。当陆源输入进一步增强时，发育含灰细砂岩(图 3-L)。

正地貌的鲕粒滩将大部分波浪能量阻挡，具有低能局限洼地特征的潟湖与滩间环境混合沉积发育程度相对较高，这些陆源细碎屑组分主要由潮汐作用与离岸流搬运混入。因此，在弱陆源输入背景下，碳酸盐主导混合沉积，潟湖与滩间仍保存较多

的陆源碎屑，例如滩间发育的含生屑泥质灰岩(图 3-H)；而在强陆源输入背景下，潟湖与滩间则以陆源碎屑主导混合沉积，例如滩间发育的含灰粉砂岩(图 3-M)，以胶结物形式发育原地混合，整体发育相混合(图 7-B)。同样，潟湖与滩间也是发育微生物丘的有利空间，在弱陆源输入、生物活动繁盛、气候相对温暖的条件下微生物丘逐渐发育，期间会粘结捕获部分陆源碎屑，形成原地混合，发育含砂藻凝块灰岩(图 2-D)。这也进一步表明，浅水高能的环境对陆源碎屑物质混入具有“淘洗”作用(图 7-C)，可显著提升碳酸盐产率(Li *et al.*, 2019; 曾楷等, 2020)，但仍可通过将陆源碎屑组分作为鲕粒成核位点或者利用鲕粒的微生物泥晶圈层黏结陆源碎屑等方式形成原地混合，最终表现为亮晶鲕粒灰岩或仅有少量细砂混入的含砂鲕粒灰岩(图 3-B)。另外，当鲕粒滩不断建隆以及海平面相对下降时，滩体会出露水面从而使鲕粒受大气淡水淋滤作用发生溶蚀重结晶(图 3-C)，这也侧面印证了滩体的暴露区域会遭受风化剥蚀而成为碳酸盐组分的供给源之一(图 6)，在潮汐和波浪的作用下这些碳酸盐组分可被搬运至滩间、潟湖以及混积潮坪中，与陆源碎屑组分形成母源混合

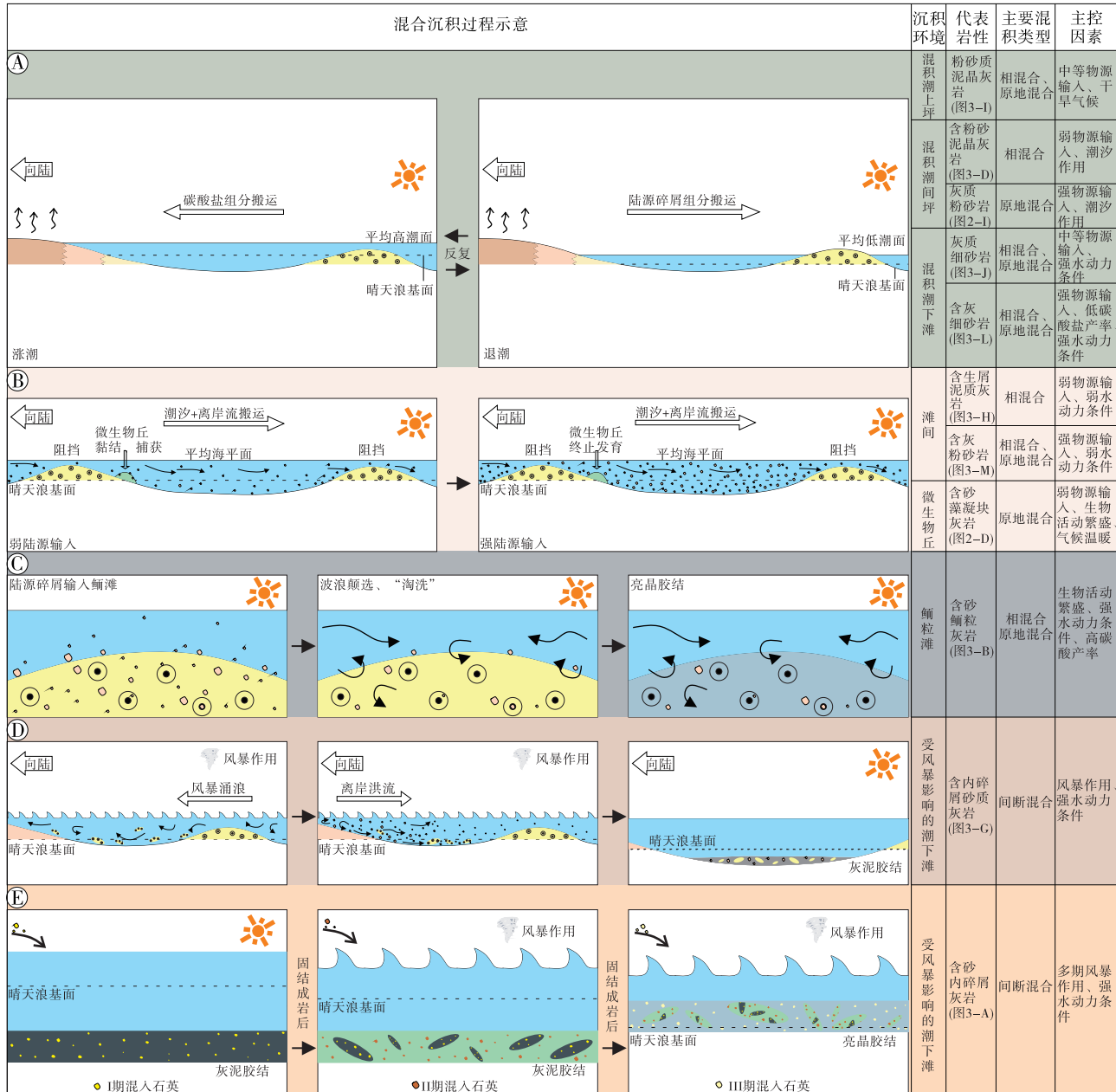


图 7 江苏徐州地区寒武系馒头组上段混合沉积组合类型及其混合沉积过程示意图及主控因素

Fig. 7 Mixing process schematic diagram and controlling factors of mixed siliciclastic-carbonate rocks of the upper member of Cambrian Mantou Formation in Xuzhou area, Jiangsu Province

沉积。

风暴作用影响的纬度范围为  $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，可作为一种古环境、古地理的判断依据 (Kelling and Mullin, 1975)。寒武纪第二世晚期，华北板块位于赤道附近的亚热带至热带地区 (图 1-A)，海洋气旋频发导致研究区广泛发育风暴沉积。风暴浪的强水动力条件将原先沉积的鲕粒灰岩打碎，并将灰泥、内碎屑等碳酸盐组分搅动和搬运，影响波及至岸上

风暴高潮线处，随后风暴离岸洪流将岸上的陆源碎屑搬运入海，在较低能环境 (如潟湖) 中沉积，形成间断混合 (图 7-D)，发育含内碎屑砂质灰岩 (图 3-G)。此外，笔者发现含砂内碎屑灰岩中多期次石英混入现象 (图 3-A)，也进一步表明风暴作用的极强水动力条件以及多期次破坏、搬运、再堆积的复杂沉积过程 (图 7-E)。这一过程可分为 3 个阶段。第 1 阶段：在水体较深的潟湖环境中，以

富有机质的暗色灰泥沉积为主,受陆源输入量较少的影 响,期间仅混入少量陆源细粉砂与泥,属正常的相混合沉积;第2阶段:风暴将先前成岩的含粉砂泥晶灰岩打碎、搬运、磨圆,受风暴离岸洪流影响,期间混入少量陆源细砂与粉砂,同时也将三叶虫、棘皮类等生屑共同搬运至潟湖的浪基面下堆积,形成间断混合,发育灰泥胶结;第3阶段:风暴的再次侵袭将先前成岩的含砂内碎屑灰岩再次打碎、搬运、磨圆,期间再次混入陆源细砂与粉砂,同时也混入生屑、内碎屑等其他颗粒,最终在台地内正地貌处堆积形成滩,浅水高能的环境促进清水碳酸盐沉积从而发育亮晶胶结。由此看来,多期次的风暴作用在浅水条件下不仅可发育间断混合,也一定程度上促进相混合以及母源混合,因此,在各种因素综合影响下,研究区呈现多种混积成因类型组合发育的特征。另外,过强的水动力条件对陆表海近岸浅水生物来说无疑是毁灭性的,风暴浪破坏生物礁与造礁生物,混入的陆源碎屑使海水变得浑浊,抑制生物群落的生长,也抑制碳酸盐沉积(Nummedal, 1991),研究区生物碎屑类型相对单一、微生物丘规模较小等特征也印证了这一点。

## 5 结 论

1) 根据陆源碎屑组分与碳酸盐组分含量差异,将江苏徐州大北望地区寒武系馒头组混合沉积序列划分为含粉砂泥晶灰岩、含砂鲕粒灰岩、含砂内碎屑灰岩、含砂藻凝块灰岩、粉砂质泥晶灰岩、含内碎屑砂质灰岩、含生屑泥质灰岩、灰质细砂岩、灰质粉砂岩、含灰细砂岩和含灰粉砂岩。

2) 馒头组混合沉积序列为海侵背景下次级海平面频繁波动且伴随着多期次风暴沉积作用的产物,据此建立了陆表海近岸背景下陆源碎屑与碳酸盐混合沉积模式,整体由混积潮坪相演化为混积局限台地相,其中混积潮坪相划分为混积潮上坪、混积潮间坪、混积潮下滩等亚相,混积局限台地相划分为潟湖、鲕粒滩、滩间、受风暴影响的潮下滩等亚相。

3) 在陆表海浅水背景下,不同沉积环境的混合成因类型、混合沉积过程及控制因素存在差异。混积潮坪主要受气候及陆源输入、海平面变化、水动力条件等因素影响,以发育相混合与原地混合为主,碳酸盐组分来自台地内的搬运和原地胶结;潟

湖与滩间等低能环境较台地内浅水高能环境混合程度较高,受陆源输入程度、生物活动、水动力条件等综合影响,以发育相混合为主;在较少的陆源输入、生物活动繁盛、气候相对温暖等条件下中低能的微生物丘与中高能鲕粒滩均以碳酸盐沉积为主导,发育原地混合与相混合;多期次风暴作用不仅会形成间断混合,也会一定程度上促进相混合与母源混合的发育。在各种因素综合影响下,徐州大北望地区馒头组呈现多种混积成因类型组合发育的特征。

## 参 考 文 献 (References)

- 陈世悦,张顺,刘惠民,鄢继华. 2017. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨. 古地理学报, 19(2): 271-284. [Chen S Y, Zhang S, Liu H M, Yan J H. 2017. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 19(2): 271-284]
- 董桂玉,陈洪德,何幼斌,秦志勇,罗进雄,辛长静. 2007. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考. 地球科学进展, 22(9): 931-939. [Dong G Y, Chen H D, He Y B, Qin Z Y, Luo J X, Xin C J. 2007. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments. Advances in Earth Science, 22(9): 931-939]
- 董桂玉,陈洪德,李君文,林良彪,钟怡江,罗进雄,王峰,陈安清,李洁. 2009. 环渤海湾盆地寒武系混合沉积研究. 地质学报, 83(6): 800-811. [Dong G Y, Chen H D, Li J W, Lin L B, Zhong Y J, Luo J X, Wang F, Chen A Q, Li J. 2009. The Cambrian mixed sedimentation around Bohai Sea Bay Basin. Acta Geologica Sinica, 83(6): 800-811]
- 樊爱萍,李诚,杨仁超,韩作振,吴祥生. 2023. 岩相特征对海平面升降的响应:以山东苍山寒武系为例. 沉积学报, 41(4): 1040-1053. [Fan A P, Li C, Yang R C, Han Z Z, Wu X S. 2023. Response of lithofacies characteristics to sea-level fluctuations: a case study from the Cambrian Cangshan profile, Shandong Province. Acta Sedimentologica Sinica, 41(4): 1040-1053]
- 房尚明. 1991. 徐州地区的寒武系. 地层学杂志, 15(4): 252-262, 251. [Fang S M. 1991. Cambrian in Xuzhou area. Journal of Stratigraphy, 15(4): 252-262, 251]
- 冯进来,曹剑,胡凯,陈琰,杨少勇,刘云田,边立曾,张国卿. 2011. 柴达木盆地中深层混积岩储层形成机制. 岩石学报, 27(8): 2461-2472. [Feng J L, Cao J, Hu K, Chen Y, Yang S Y, Liu Y T, Bian L Z, Zhang G Q. 2011. Forming mechanism of middle-deep mixed rock reservoir in the Qaidam Basin. Acta Petrologica Sinica, 27(8): 2461-2472]
- 冯增昭,彭永民,金振奎,鲍志东. 2004. 中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理. 北京:石油工业出版社,112-121. [Feng Z Z, Peng Y M, Jin Z K, Bao Z D. 2004. Lithofacies Paleogeography of the Cambrian and Ordovician in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 112-121]

- 郭福生,严兆彬,杜杨松. 2003. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论. 地学前缘, 10(3): 68. [Guo F S, Yan Z B, Du Y S. 2003. Discussion on mixed deposition, mixed rock and mixed layer system. Earth Science Frontiers, 10(3): 68]
- 郭书元,张广权,陈舒薇. 2009. 陆表海碎屑岩—碳酸盐岩混积层系沉积相研究: 以鄂尔多斯东北部大牛地气田为例. 古地理学报, 11(6): 611-627. [Guo S Y, Zhang G Q, Chen S W. 2009. Study on sedimentary facies of mixed clastic-carbonate sediments strata system in epicontinental sea; a case of Daniudi Gasfield in northeastern Ordos. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 11(6): 611-627]
- 李飞,易楚恒,李红,王夏,李杨凡,李怡霖,曾伟,王曾俊. 2022. 微生物成因鲕粒研究进展. 沉积学报, 40(2): 319-334. [Li F, Yi C H, Li H, Wang X, Li Y L, Zeng W, Wang Z J. 2022. Recent advances in ooid microbial origin; a review. Acta Sedimentologica Sinica, 40(2): 319-334]
- 李凤杰,王佳,马小康,赖雪莲,张鹏飞,任栩莹,陈政安. 2023. 四川龙门山地区中泥盆统金宝石组混合沉积特征. 古地理学报, 25(2): 294-307. [Li F J, Wang J, Ma X K, Lai X L, Zhang P F, Ren X Y, Chen Z A. 2023. Mixed sedimentation of the Middle Devonian Jinbaoshi Formation in Longmen Mountain area, Sichuan Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(2): 294-307]
- 李泉泉,鲍志东,肖毓祥,陈建阳,李忠诚,王振军,刘敏昭,李卓伦,许西挺,操凡. 2021. 混合沉积研究进展与展望. 沉积学报, 39(1): 153-167. [Li Q Q, Bao Z D, Xiao Y X, Chen J Y, Li Z C, Wang Z J, Liu M Z, Li Z L, Xu X T, Cao F. 2021. Research advances and prospect of mixed deposition. Acta Sedimentologica Sinica, 39(1): 153-167]
- 栾守亮,陈世悦,马玉新,郭峰,李聪. 2010. 徐州大北望地区寒武系陆表海沉积特征及其演化. 特种油气藏, 17(6): 50-53, 125. [Luan S L, Chen S Y, Ma Y X, Guo F, Li C. 2010. Cambrian epicontinental deposit characteristics and evolution in the Dabeiwang of Xuzhou. Special Oil & Gas Reservoirs, 17(6): 50-53, 125]
- 梅冥相,徐德斌,周洪瑞. 2000. 米级旋回层序的成因类型及其相序组构特征. 沉积学报, 18(1): 43-49, 62. [Mei M X, Xu D B, Zhou H R. 2000. Genetic types of meter-scale cyclic sequences and their fabric features of facies-succession. Acta Sedimentologica Sinica, 18(1): 43-49, 62]
- 彭善池. 2009. 华南斜坡相寒武纪三叶虫动物群研究回顾并论我国南、北方寒武系的对比. 古生物学报, 48(3): 437-452. [Peng S C. 2009. Review on the studies of Cambrian trilobite faunas from Jiangnan slope belt, South China, with notes on Cambrian correlation between South and North China. Acta Palaeontologica Sinica, 48(3): 437-452]
- 桑树勋,徐磊,张华. 2002. 徐州地区寒武纪灰质障壁砂坝沉积模式研究. 中国矿业大学学报, 31(6): 565-570. [Sang S X, Xu Lei, Zhang H. 2002. Depositional model of lime sand barriers of Cambrian in Xuzhou area. Journal of China University of Mining & Technology, 31(6): 565-570]
- 沙庆安. 2001. 混合沉积和混积岩的讨论. 古地理学报, 3(3): 63-66. [Sha Q A. 2001. Discussion on mixing deposit and hunji rock. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 3(3): 63-66]
- 孙娇鹏,陈世悦,胡忠亚,刘文平,郭晨,马帅. 2014. 柴东北缘古生代碎屑岩—碳酸盐岩混积相发育特征及组合模式研究. 天然气地球科学, 25(10): 1586-1593. [Sun J P, Chen S Y, Hu Z Y, Liu W P, Guo C, Ma S. 2014. Research on the mixed model and developmental characteristic of the clastic-carbonate diamictite facies in the northern Qaidam. Natural Gas Geoscience, 25(10): 1586-1593]
- 王龙,吴海,张瑞,李昌伟. 2018. 碳酸盐台地的类型、特征和沉积模式: 兼论华北地台寒武纪陆表海—淹没台地的沉积样式. 地质论评, 64(1): 62-76. [Wang L, Wu H, Zhang R, Li C W. 2018. The types, characteristics and depositional models of carbonate platform; implications for Cambrian sedimentary patterns of epeiric-drowned carbonate platform in North China. Geological Review, 64(1): 62-76]
- 吴亚生,姜红霞,李莹,虞功亮. 2021. 微生物碳酸盐岩的显微结构基本特征. 古地理学报, 23(2): 321-334. [Wu Y S, Jiang H X, Li Y, Yu G L. 2021. Microfabric characteristics of microbial carbonates. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(2): 321-334]
- 徐伟,杜晓峰,黄晓波,宋章强,李正宇. 2019. 混合沉积研究进展与关键问题. 沉积学报, 37(2): 225-238. [Xu W, Du X F, Huang X B, Song Z Q, Li Z Y. 2019. Research Advances and Critical Issues of "mixed siliciclastic and carbonate sediments". Acta Sedimentologica Sinica, 37(2): 225-238]
- 杨朝青,沙庆安. 1990. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境: 一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积. 沉积学报, 8(2): 59-66. [Yang C Q, Sha Q A. 1990. Sedimentary environment of the Middle Devonian Qujing Formation, Qujing, Yunnan Province: a kind of mixing sedimentation of terrigenous clastics and carbonate. Acta Sedimentologica Sinica, 8(2): 59-66]
- 曾楷,李飞,龚峤林,唐浩,苏成鹏,车正强,邓嘉婷,胡广,李凌,曾伟,谭秀成. 2020. 寒武系第二统仙女洞组混合沉积特征及古环境意义: 以川北旺苍唐家河剖面为例. 沉积学报, 38(1): 166-181. [Zeng K, Li F, Gong Q L, Tang H, Su C P, Che Z Q, Deng J T, Hu G, Li L, Zeng W, Tan X C. 2020. Characteristics and Palaeoenvironmental Significance of Mixed Siliciclastic-Carbonate Sedimentation in the Xiannüdong Formation, Cambrian (Series 2): A case study from the Tangjiahe Section, Wangcang, northern Sichuan. Acta Sedimentologica Sinica, 38(1): 166-181]
- 张宝民,刘静江,边立曾,申银民,贾进华,张立平,曹宏,杨晓萍. 2009. 礁滩体与建设性成岩作用. 地学前缘, 16(1): 270-289. [Zhang B M, Liu J J, Bian L Z, Shen Y M, Jia J H, Zhang L P, Cao H, Yang X P. 2009. Reef-banks and reservoir-constructive diagenesis. Earth Science Frontiers, 16(1): 270-289]
- 张锦泉,叶红专. 1989. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积. 成都地质学院学报, 16(2): 87-92. [Zhang J Q, Ye H Z. 1989. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments. Journal of Chengdu College of Geology, 16(2): 87-92]

- 赵灿,李旭兵,郇金来,于玉帅. 2013. 碳酸盐与硅质碎屑的混合沉积机理和控制因素探讨. 地质论评, 59(4): 615-626. [Zhao C, Li X B, Huan J L, Yu Y S. 2013. Mechanism of mixed siliciclastic-carbonate sediments and its controlling factors. *Geological Review*, 59(4): 615-626]
- 朱茂炎,杨爱华,袁金良,李国祥,张俊明,赵方臣, Soo-Yeun AHN, 苗兰云. 2019. 中国寒武纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49(1): 26-65. [Zhu M Y, Yang A H, Yuan J L, Li G X, Zhang J M, Zhao F C, Soo-Yeun AHN, Miao L Y. 2019. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China. *Scientia Sinica Terrae*, 49(1): 26-65]
- 朱茂炎,孙智新,杨爱华,袁金良,李国祥,周志强,张俊明. 2021. 中国寒武纪岩石地层划分和对比. 地层学杂志, 45(3): 223-249. [Zhu M Y, Sun Z X, Yang A H, Yuan J L, Li G X, Zhou Z Q, Zhang J M. 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Cambrian in China. *Journal of Stratigraphy*, 45(3): 223-249]
- Chiarella D, Longhitano S G, Tropeano M. 2017. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 617-627.
- Decho A W, Gutierrez T. 2017. Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems. *Frontiers in Microbiology*, 8: 922.
- Feng J L, Cao J, Hu K, Peng X Q, Chen Y, Wang Y F, Wang M. 2013. Dissolution and its impacts on reservoir formation in moderately to deeply buried strata of mixed siliciclastic-carbonate sediments, northwestern Qaidam Basin, northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 124-137.
- Gerdes G, Dunajtschik-Piewak K, Riege H, Taher A G, Krumbein W E, Reineck H E. 1994. Structural diversity of biogenic carbonate particles in microbial mats. *Sedimentology*, 41(6): 1273-1294.
- Halfar J, Ingle Jr J C, Godinez-Orta L. 2004. Modern non-tropical mixed carbonate-siliciclastic sediments and environments of the southwestern Gulf of California, Mexico. *Sedimentary Geology*, 165(1-2): 93-115.
- Irwin M L. 1965. General theory of epeiric clear water sedimentation. *AAPG Bulletin*, 49(4): 445-459.
- Kelling G, Mullin P R. 1975. Graded limestones and limestone-quartzite couplets; possible storm-deposits from the Moroccan Carboniferous. *Sedimentary Geology*, 13(3): 161-190.
- Lee J H, Chen J T, Chough S K. 2015. The middle-late Cambrian reef transition and related geological events: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, 145: 66-84.
- Li F, Gong Q L, Burne R V, Tang H, Su C P, Zeng K, Zhang Y F, Tan X C. 2019. Ooid factories operating under hothouse conditions in the earliest Triassic of South China. *Global and Planetary Change*, 172: 336-354.
- Mount J F. 1984. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. *Geology*, 12(7): 432-435.
- Nummedal D. 1991. Shallow marine storm sedimentation-the oceanographic perspective. *Cyclic and Events in Stratigraphy*, 227-248.
- Riding R. 2002. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds; concepts and categories. *Earth-Science Reviews*, 58(1-2): 163-231.
- Roberts H H. 1987. Modern carbonate-siliciclastic transitions; humid and arid tropical examples. *Sedimentary Geology*, 50(1-3): 25-65.
- Schwarz E, Veiga G D, Álvarez Trentini G, Isla M F, Spalletti L A. 2018. Expanding the spectrum of shallow-marine, mixed carbonate-siliciclastic systems: processes, facies distribution and depositional controls of a siliciclastic-dominated example. *Sedimentology*, 65(5): 1558-1589.
- Zheng W T, Wang X P, Wan B, Pang K, Tang Q. 2023. Early Cambrian evaporite deposits in the North China Craton and their event stratigraphic, paleogeographic, and paleoenvironmental implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 242: 105489.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)