第 28 卷　第 4 期
2026 年　8 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 28　No. 4
Aug. 2026

文章编号：1671-1505(2026)04-1411-14　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2026.059

华北南部下奥陶统冶里组风暴沉积特征及其古地理、古气候意义*

朱佳淇　杨文涛　赵毅楠　唐文广

河南理工大学资源环境学院，河南焦作 454003

摘　要　为了深入理解潮坪环境风暴沉积特征及其古纬度与古气候指示意义，本研究以华北南部下奥陶统冶里组风暴沉积层为研究对象，通过详尽的野外沉积学观察与室内碳酸盐岩微相分析，识别出砾屑白云岩、含石英砂屑白云岩、砂屑白云岩、中晶白云岩和细晶白云岩等 5 类碳酸盐岩微相，并结合宏观沉积特征，推测沉积环境经历了潮下带→潮间带→潮上带的演变过程。其中风暴沉积构造主要由侵蚀、破坏与沉积作用形成，包括风暴冲刷面、风暴砾屑层、粒序层理、块状层理、丘状交错层理、撕裂构造、负载和火焰状构造等。依据这些沉积构造组合与沉积环境的对应关系，按照风暴水动力类型，划分出 6 类风暴沉积序列：潮下带风暴涡流沉积序列；潮下带风暴涡流+风暴浪沉积序列；潮间带风暴重力流+风暴浪沉积序列；潮间带风暴碎屑流沉积序列；潮间带风暴涡流沉积序列；潮上带风暴潮流沉积序列。建立华北南部下奥陶统冶里组潮坪环境碳酸盐岩风暴沉积模式，并认为风暴沉积序列结构主要受控于风暴流作用方式。冶里组风暴沉积记录显示出早奥陶世风暴活动频率与强度的增加，是对气候变暖的响应，说明奥陶纪气候在总体变冷的初期存在波动。结合前人在华北板块报道的同期风暴沉积，推断华北板块东缘应面向广海，其古纬度位置为南纬 15°~24°。研究成果不仅深化了对风暴沉积序列的认识，亦为华北南部早奥陶世古气候与古地理重建提供了关键的沉积学数据。

关键词　华北南部　下奥陶统　风暴沉积　潮坪环境　古气候　古纬度

第一作者简介　朱佳淇，女，2001 年生，河南理工大学资源环境学院硕士研究生，主要从事风暴沉积研究。E-mail：lychee080925@163.com。

通讯作者简介　杨文涛，男，1984 年生，博士、教授，主要从事造山带沉积地质学研究。E-mail：yangwt@hpu.edu.cn。

中图分类号：P534.42；P588.2　　**文献标志码**：A

Storm deposit characteristics of the Lower Ordovician Yeli Formation in southern North China and their palaeogeographic and palaeoclimatic significance

ZHU Jiaqi　YANG Wentao　ZHAO Yinan　TANG Wenguang

School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454003, *China*

Abstract　This paper investigates storm deposit characteristics in tidal flat environments of the Early Ordovician Yeli Formation in southern North China to elucidate their implications for palaeolatitude and palaeoclimate. Through comprehensive field sedimentological observations and carbonate microfacies

* 国家自然科学基金项目(编号：42072123)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42072123)]
收稿日期：2025-07-26　　改回日期：2025-11-28

analysis, five distinct microfacies were identified: intraclastic dolomite, quartz-bearing sandy dolomite, sandy dolomite, medium-crystalline dolomite, and fine-crystalline dolomite. These microfacies, combined with macroscopic sedimentary features, indicate an environmental transition from subtidal through intertidal to supratidal zones. Storm-generated sedimentary structures include scoured surfaces, storm gravel layers, graded bedding, massive bedding, hummocky cross-stratification, rip-up clasts, load and flame structures. Through systematic analysis of structure-environment relationships, six distinct storm deposition sequences were classified based on their formative hydrodynamics: subtidal vortex-dominated, subtidal combined vortex-wave, intertidal hybrid gravity flow-wave, intertidal debris flow, intertidal vortex-controlled, and supratidal tidal current sequences. The established depositional model demonstrates that storm flow dynamics primarily controlled the sequence architecture. The recorded increase in both storm frequency and intensity during the Early Ordovician corresponds to a climatic warming phase within the broader cooling trend. Regional synthesis indicates the eastern North China Block margin faced an open ocean at paleolatitudes of 15°~24°S. The research results not only deepen the understanding of the storm deposition sequence, but also provide key sedimentary data for the reconstruction of the Early Ordovician palaeoclimate and palaeogeography in southern North China.

Key words southern North China, Lower Ordovician, storm deposits, tidal flat environment, palaeoclimate, palaeolatitude

About the first author ZHU Jiaqi, born in 2001, is a master's degree candidate at the School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University. Her main research interest lies in storm deposits. E-mail: lychee080925@163.com.

About the corresponding author YANG Wentao, born in 1984, is a professor with a Ph.D. degree. He is currently engaged in research on sedimentology and geology of orogenic belts. E-mail: yangwt@hpu.edu.cn.

0 前言

风暴沉积是强烈风暴事件引发的高能量水体对沉积底层的侵蚀、破坏和沉积作用下形成的一种特殊的事件沉积（杜远生等，2001）。识别风暴沉积记录在恢复古气候、古地理演变和古板块位置等方面具有重要意义（Belghouthi and Zouari, 2019; Knutson *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2023）。风暴沉积记录的多样性与风暴流作用方式密切相关，如竹叶状灰岩常与风暴涡流相关（Wang *et al.*, 2019）；粒序层理是风暴浊流的产物（王家豪等，2017）；丘状交错层理代表了风暴浪沉积（Wu *et al.*, 2024）。此外，与风暴沉积相关联的各类软沉积物变形构造也是风暴带来的强水动力作用于沉积底层的产物（Chen and Lee, 2013）。风暴沉积构造与相应的层序界面构成一次完整的风暴沉积序列，反映了风暴事件经历了发生—高潮—衰弱—停息 4 个主要阶段（宋慧波等，2024；张治恒等，2024）。虽然不同沉积背景下的风暴沉积序列存在一定差异（宋金民等，2012；Xiong *et al.*, 2018），但现有的风暴沉积序列模式多考虑沉积相变的控制，存在一定的局限性。

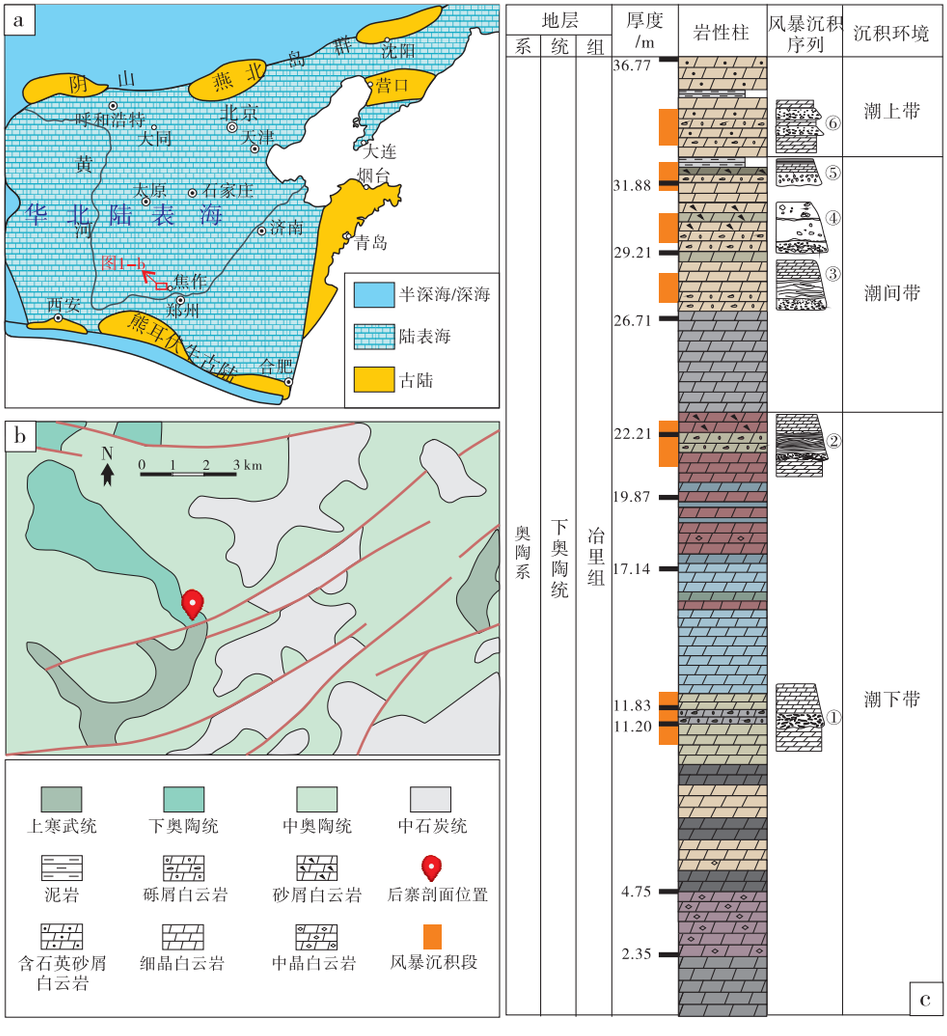
华北板块风暴沉积十分丰富，在古元古代—三叠纪地层中均有记录，涉及碳酸盐岩与碎屑岩，沉积环境包括滨岸潮坪环境、浅海陆棚环境、碳酸盐岩台地环境以及近海湖泊环境（白万备等，2011；Wang *et al.*, 2019; Ji *et al.*, 2021；宋慧波等，2024；Shang *et al.*, 2024）。前人系统描述了该区域内风暴沉积构造特征，识别出多种风暴沉积序列（冉宗媛等，2022；吴淳等，2023）；同时深入分析了风暴事件层中遗迹化石的分布特征（胡斌等，2014；Dai *et al.*, 2025）。就下奥陶统冶里组而言，风暴沉积记录在河北秦皇岛（马坤元等，2016）、承德（关秀宇等，2018）、平泉（刘鹏举和林小谷，2004），山东青州（韩作振等，2014），山西柳林（王千遥等，2010），河南登封（时国，2010）等地区均有发现，但这些有关风暴沉积的报道中缺

乏对于古气候演变的关注与细致的古地理探讨。本研究在华北南部焦作地区冶里组中识别出多层风暴沉积记录，通过对风暴沉积序列的精细描述与碳酸盐岩微相分析，建立冶里组风暴沉积模式，并探讨其对华北板块早奥陶世古纬度位置重建及古气候演变方面的指示意义。

1　地质背景

华北板块在早古生代整体处于稳定的克拉通盆地演化阶段。寒武纪末期，受怀远运动影响，华北板块发生大规模海退。早奥陶世，华北板块再次接受海侵，形成了典型的陆表海台地相沉积，岩性主要为灰色厚层白云岩（陈小炜等，2015；Zhen *et al.*，2016；Quan *et al.*，2025）。中奥陶世，受海平面频繁波动的影响，形成了马家沟组灰色厚层白云岩与灰色厚层灰岩互层的沉积地层，表现出多旋回的海进—海退序列，沉积环境主要由开阔台地过渡为局限台地—蒸发坪。晚奥陶世，受加里东运动影响，华北板块南部抬升，再次发生大规模海退，导致海相沉积范围向北急剧缩小，至奥陶纪末期，海水基本退去，成为古陆（胡斌等，2011；Chen *et al.*，2013）。

研究区位于华北南部焦作地区（图 1），属华北地层区太行山分区。研究地层总厚度为 36.77 m，与上覆中奥陶统马家沟组平行不整合接触。岩性特征主要表现为下部灰色—深灰色、灰紫色厚层状白云岩夹数层砾屑白云岩；上部为土黄色中厚层状白



a—华北板块早奥陶世古地理图（据王鸿祯，1985）；b—研究区区域地质简图（修改自全国1/50万地质图）；c—冶里组岩性柱状图

图 1　华北南部焦作地区后寨剖面位置及下奥陶统冶里组岩性柱状图

Fig. 1　Location and lithological column of the Lower Ordovician Yeli Formation in Houzhai section at Jiaozuo area, southern North China

云岩，夹数层砾岩。《河南省区域地质志》将该套地层定义为下奥陶统冶里组（河南省地质矿产局，1989），后《河南省岩石地层》将之归入到三山子组中（席文祥和裴放，1997），但由于三山子组是一套中晚寒武世—早奥陶世的穿时地层，在使用上存在不便。研究区地层中灰紫色白云岩和砾屑白云岩可与河北东北部（刘鹏举和林小谷，2004）、山东中部（韩作振等，2014）、山西东南部（王千遥等，2010）和河南东部（贾艳雨等，2023）的下奥陶统冶里组形成岩性上的对比，因此本研究将该套地层定义为早奥陶世冶里组。王志浩等（2016）在冶里组中划分出 6 个牙形刺化石带，包括 *Iapetognathus jilinensis-Cordylodus lindstromi* 带、*Cordylodus angulatus* 带、*Chosonodina herfurthi* 带、*Rossodus manitouensis* 带、*Glyptoconus quadraplicatus* 带和 *Scalpellodus tarsus-Triangulodus* aff. *bifidus* 带，据此将冶里组划归为下奥陶统特马豆克阶（王志浩等，2016）。

2 碳酸盐岩微相与沉积环境

2.1 碳酸盐岩岩石类型及特征

根据碳酸盐岩结构类型，将华北南部焦作地区冶里组中的白云岩划分为颗粒白云岩和晶粒白云岩 2 种类型，其中颗粒白云岩可进一步划分为砾屑白云岩、含石英砂屑白云岩和砂屑白云岩；晶粒白云岩可分为细晶白云岩和中晶白云岩。

砾屑白云岩在地层中上部以及下部均有分布（图 2-a）。砾屑多呈扁平状，少数呈岩块状，磨圆度与分选性较差。砾屑主要成分为细晶白云石，被同期白云石胶结。砾屑直径大于 5 mm，部分砾屑边缘可见有紫红色侵染状边缘。

含石英砂屑白云岩分布于地层上部（图 2-b）。石英颗粒含量一般小于 25%，直径小于 0.2 mm，磨圆度较好；白云石颗粒直径普遍小于 0.17 mm，呈现比较污浊的灰褐色，与石英颗粒混杂堆积。此外，泥质撕裂屑的存在指示了陆源物质的非正常输入过程（图 2-c），可能与风暴活动相关。

砂屑白云岩在地层中常见。按照颗粒粒径大小进行分类，包括细砂级白云岩（图 2-d）和粉砂级白云岩（图 2-e）。砂屑主要成分为白云石，呈次棱角状，分选较好，填隙物主要成分为泥晶白云石。砂屑是由先期形成的白云岩经过破碎、搬运和再沉积形成的。砂屑白云岩中常见下粗上细的正粒序（图 2-f），这一微观构造反映了风暴事件的后期，粗颗粒物质在水动力逐渐减弱的过程中沉积下来，颗粒较大的物质先沉积于底部，向上颗粒逐渐变小。

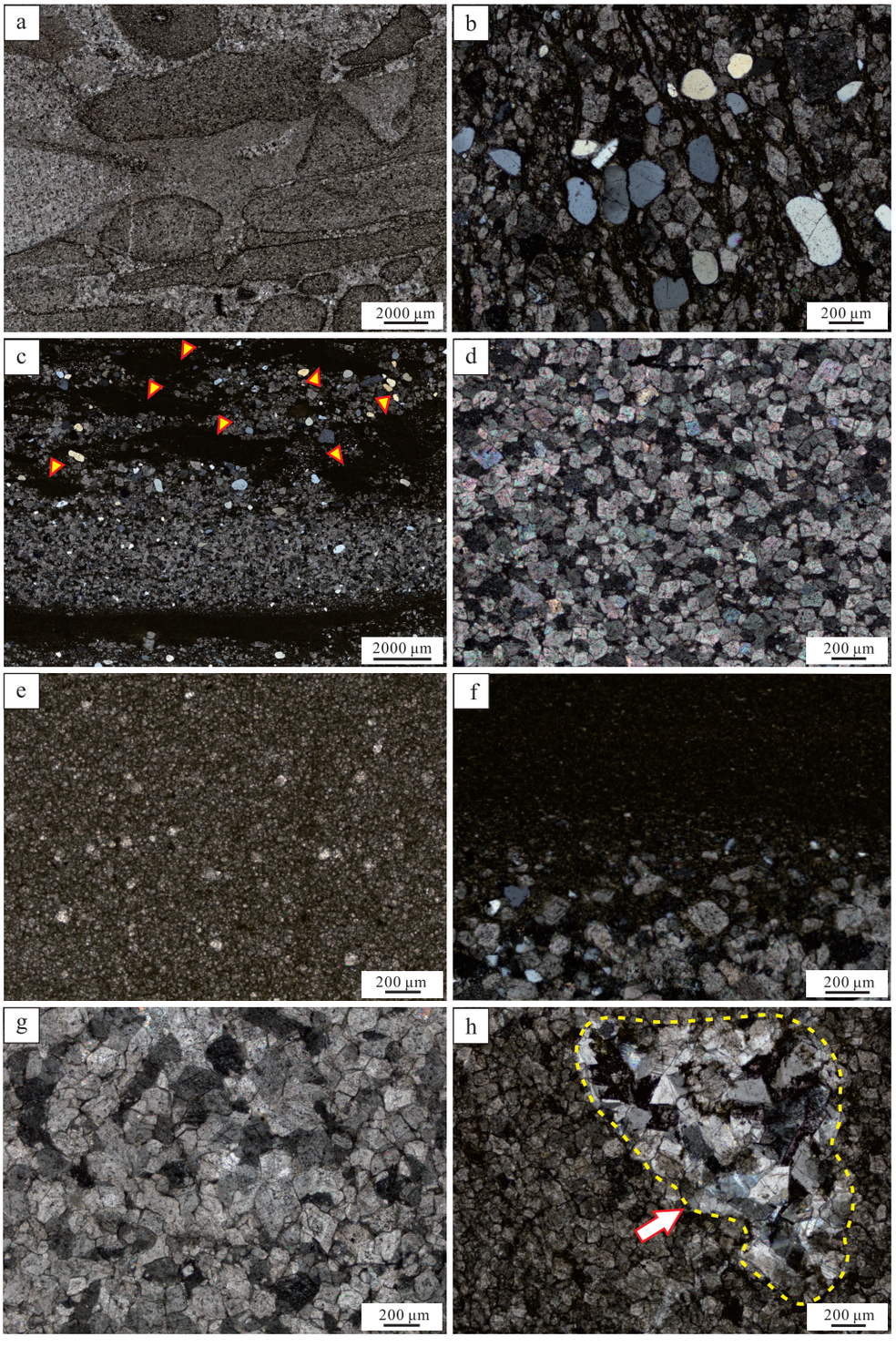
中晶白云岩常见于地层的中下部（图 2-g）。白云石晶体颗粒直径大小在 0.2 mm 左右。白云石晶体呈自形镶嵌状，具有较为平直的晶体边界。晶间孔隙和晶间充填物少。

细晶白云岩在地层中常见（图 2-h）。白云石晶体颗粒直径在 0.05～0.1 mm 之间。大多数白云石晶体为半自形—他形，具有直线或折线形的晶体边界。少数白云石呈他形，晶粒边界比较模糊，少数呈弯曲或不规则状。多数晶体比较浑浊，呈现灰褐色；少数晶体比较洁净，呈现灰白色，常见于上部层位的鸟眼构造中。

2.2 冶里组沉积环境

通过对岩石薄片中特定沉积结构、颗粒组分及其微观特征进行镜下观察与分析，识别出冶里组中共有砾屑白云岩相、含石英砂屑白云岩相、砂屑白云岩相、中晶白云岩相和细晶白云岩相 5 类碳酸盐岩微相。根据碳酸盐岩微相类型在地层中的分布特征，结合宏观沉积现象，冶里组主要形成于潮坪环境中，可识别出潮下带、潮间带及潮上带沉积。

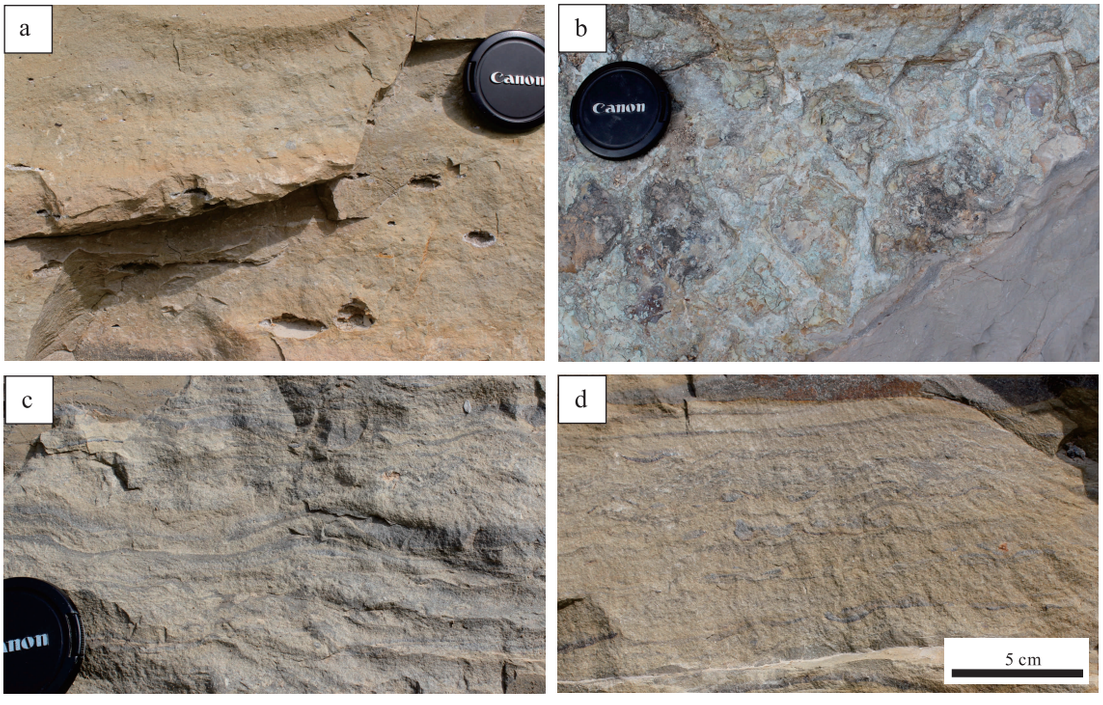
潮下带沉积分布于地层的下部，对应中晶白云岩微相、细晶白云岩微相和砾屑白云岩微相。中晶白云岩微相与细晶白云岩微相中缺少鸟眼构造、膏盐假晶等暴露标志。而砾屑白云岩微相中常发育有放射状构造，是风暴浪基面之上近源风暴沉积的典型标志（吴淳等，2023）。这些特征共同指示该段地层形成于潮下带中。潮间带沉积分布于地层的中上部，对应细晶白云岩微相、砂屑白云岩微相与砾屑白云岩微相组合。潮间带细晶白云岩微相中的白云石粒径较潮下带更细，结合该段地层中常见的波状（图 3-c）与脉状层理（图 3-d）共同指示其形成于潮间带。潮上带沉积发育于地层的上部，发育细晶白云岩微相、含石英砂屑白云岩微相和砾屑白云岩微相。在岩石微观特征与宏观沉积特征上与潮间带具有差异。该层段细晶白云岩微相中普遍发育鸟眼构造；宏观特征上可见有溶蚀孔洞（图 3-a）



a—砾屑白云岩；b—含石英砂屑白云岩；c—含石英砂屑白云岩，下部可见冲刷侵蚀面，上部可见泥质撕裂屑；d—细砂级砂屑白云岩；e—粉砂级砂屑白云岩；f—砂屑白云岩中向上变细的正粒序；g—中晶白云岩；h—细晶白云岩与其中的鸟眼构造

图 2　华北南部焦作地区冶里组白云岩显微镜下特征

Fig. 2　Microscopic characteristics of the Yeli Formation dolomite in Jiaozuo area, southern North China



a—冶里组上部的溶蚀孔洞；b—冶里组上部的泥裂构造；c—冶里组下部的波状纹理；d—冶里组下部的脉状层理

图 3 华北南部焦作地区冶里组上部和下部不同的宏观沉积构造

Fig. 3 Different macroscopic sedimentary structures in the upper and lower parts of Yeli Formation in Jiaozuo area, southern North China

与泥裂构造(图 3-b)，指示其形成于潮上带。综上所述，冶里组沉积环境主要由海退旋回控制，经历了潮下带→潮间带→潮上带的沉积环境演化过程。

3 风暴作用特征

风暴作用是热带海洋风暴气旋对原有沉积物的改造，并相应产生的一系列的侵蚀、破坏和沉积作用。

3.1 风暴侵蚀作用

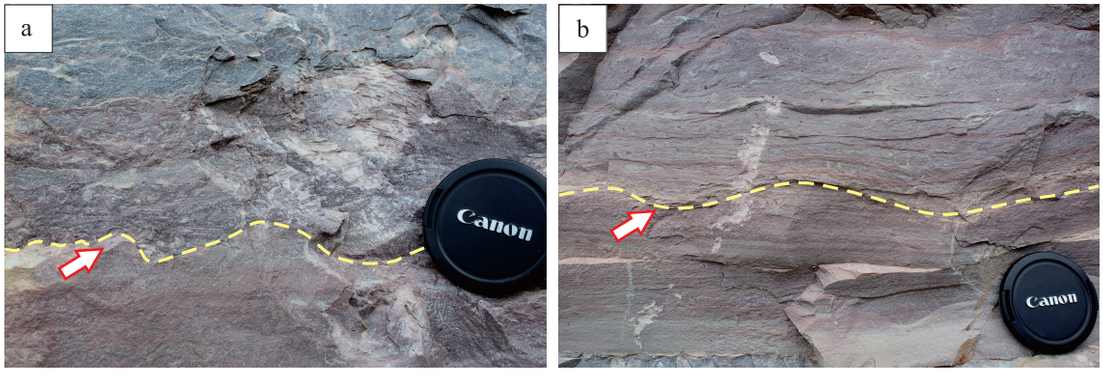
在风暴高峰期，高能风暴流会对海底沉积层产生显著流体剪切作用，通过冲刷和侵蚀形成波状起伏的冲刷面，该界面分隔了风暴事件层与正常天气沉积层。

冶里组风暴侵蚀面之上常见砾屑白云岩(图 4-a)，偶见有砂屑白云岩(图 4-b)。冲刷面形态受控于风暴流能量，位于砾屑白云岩之下的冲刷面常呈不规则波状起伏，表现为短波长与高波峰，形成于风暴流高频涡旋侵蚀作用之下；而砂屑白云岩底部冲刷面波状起伏较为规则，具有相对长的波长与矮的波峰，形成于流体能量衰减的水动力环境中。

3.2 风暴沉积作用

风暴沉积作用是风暴事件驱动的异常沉积过程，在该过程中，风暴所经过的不同沉积环境中均会留下物质记录。在冶里组中识别出的风暴沉积作用下形成的沉积构造包括：风暴砾屑层、粒序层理、块状层理和丘状交错层理。

冶里组中风暴砾屑层包括 2 种类型。类型一中砾屑成分为白云岩(图 5-a，5-b)，分布于地层中、下部。砾屑层总体厚度在 10~40 cm 之间。砾屑颜色为紫红色或灰褐色，砾石长轴不超过 5 cm，成分为白云岩，形态呈近竹叶状、椭圆状或具有塑性变形的弯曲条状。砾屑磨圆度较差，具有明显放射状组构，如菊花状、倒“小”字状等，是风暴涡流的产物，其磨圆度也指示了其搬运距离较短，属于近源风暴沉积类型。类型二由燧石和白云质砾石混杂堆积形成(图 5-c)，分布于地层上部。砾



a—冲刷侵蚀面及其之上的砾屑白云岩；b—冲刷侵蚀面及其之上的砂屑白云岩

图 4　华北南部焦作地区冶里组风暴侵蚀作用下形成的冲刷侵蚀面（黄色虚线所示）

Fig. 4　Scour erosion surfaces formed by storm erosion in the Yeli Formation in Jiaozuo area, southern North China (As indicated by yellow dotted lines)

屑层总体厚度在 8～20 cm 之间，呈多旋回薄层状产出(图 5-d)，成分相对复杂，包括燧石和白云质砾石，砾石呈角砾状，大小不一，分选差，放射状组构不明显。

冶里组风暴沉积作用下形成的层理构造主要包括粒序层理、块状层理以及丘状交错层理。丘状交错层理呈低缓的丘形隆起(图 5-g)，丘体长度 5～15 cm，高 1～5 cm。纹层倾角小于 15°，呈发散状或收敛状排列，与下伏层理呈侵蚀接触，是风暴浪沉积的关键证据（Belghouthi and Zouari，2019）。在风暴衰减期，水动力条件减弱，风暴高峰期被卷起的悬浮颗粒沉积物由于存在重力分异而形成粒序性堆积（刘宝珺等，1986）。在此过程中，颗粒较大的砾石会最先被沉积下来，在其之上形成向上变细的粒序层理以及内部均一的块状层理，平行层理则代表了风暴作用衰减过程中的高能沉积（宋金民等，2012），如图 5-f 所示，这种形成于风暴衰减期的序列自下而上呈现出沉积颗粒变细的趋势。冶里组的粒序层理在宏观上表现为向上变细的正粒序(图 5-e)，底部常见白云岩和燧石砾石，多数砾石直径小于 1 cm，呈角砾状，向上逐渐过渡为砂屑白云岩及泥岩。正粒序层理亦可见于岩石薄片中，表现为砂屑向泥质颗粒的转变(图 2-f)。块状层理指的是内部均一的砂屑白云岩，但其中偶见燧石孤砾，砾径一般在 5～10 cm 之间，叠置于砾岩层之上(图 5-f)。上覆平行层理，是风暴回流期大量的颗粒卸载、堆积而成。

3.3　风暴破坏作用

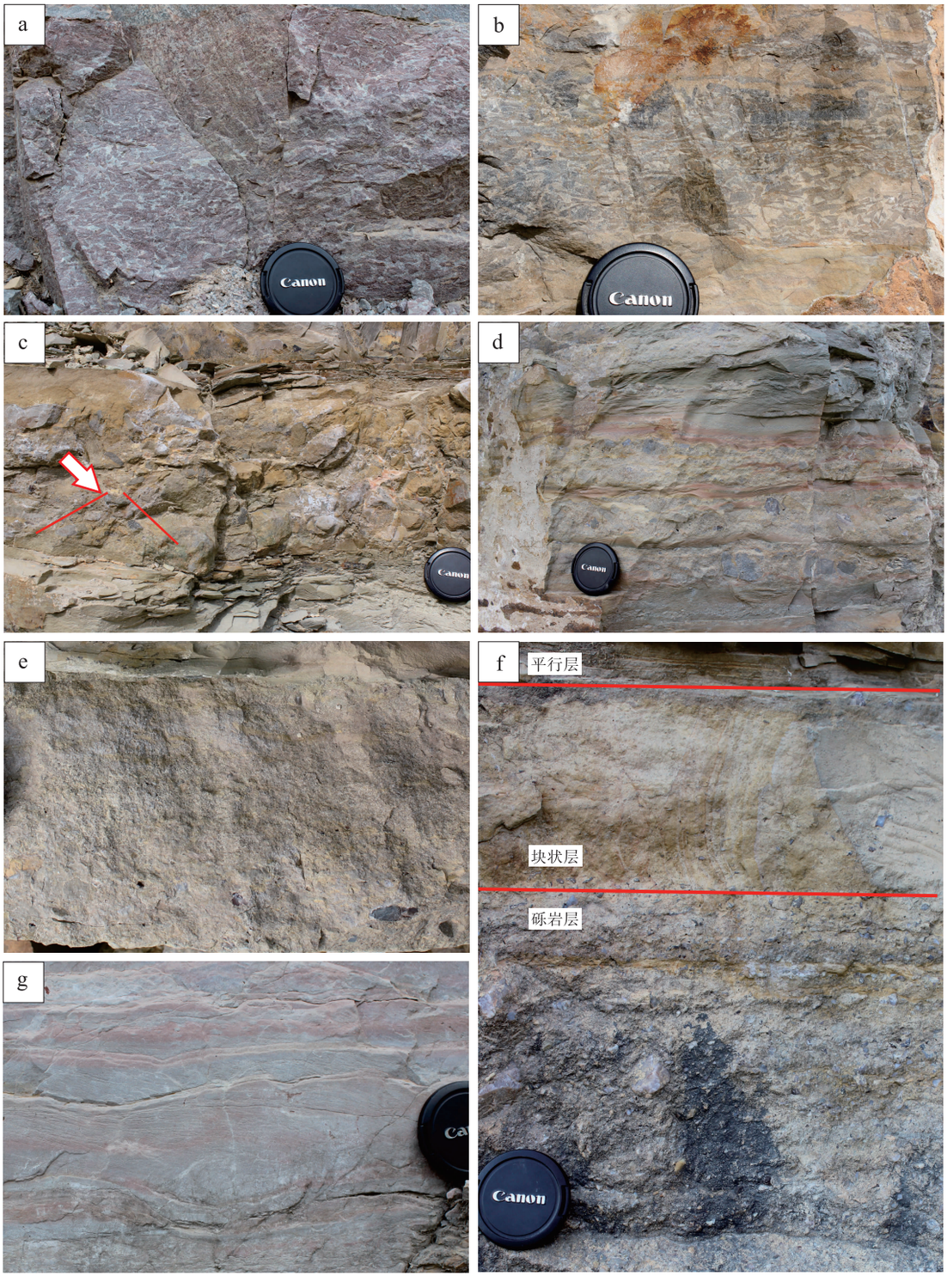
风暴的破坏作用主要表现为对先成沉积物的破坏，包括对先期沉积地层的改造和对各类沉积颗粒的破坏，比较明显的是形成了各类砾屑。除此之外，冶里组中识别出的风暴破坏作用下形成的沉积构造还包括：撕裂构造、负载和火焰状构造。

撕裂构造是风暴流作用于沉积底层，将未固结或半固结沉积物打碎，形成的不规则碎片状沉积构造（张治恒等，2024）。撕裂构造在岩石薄片中比较明显，表现为泥质撕裂屑漂浮在含石英砂屑白云岩的上部(图 2-c)。负载和火焰状构造形成于沉积物未固结时，因差异压实导致上覆粗粒沉积物下沉至下伏细粒沉积物中，下陷的粗粒沉积物是负载构造，而上侵的细粒沉积物则形成火焰状构造。冶里组中的负载构造表现为灰黄色砂屑白云岩向下陷入深色白云岩中，而火焰状构造则表现为深色白云岩向上侵入灰黄色砂屑白云岩中，同时也可见灰黄色砂屑白云岩脱离母岩层，形成球状构造(图 6)。

4　讨论

4.1　风暴沉积模式

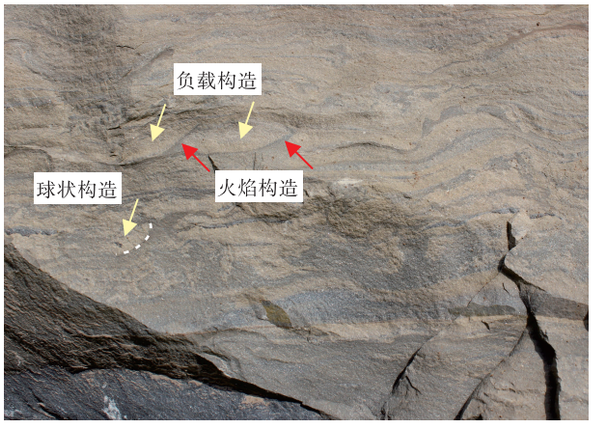
风暴沉积作为一种事件沉积，其沉积过程不仅受沉积环境控制，更多地受到风暴沉积作用于沉积底层的方式控制，如风暴流的类型、运动频率、持续时间、沉积环境的相对水深等，因此，风暴沉积层序结构类型常具有多样性（Xiong *et al.*，2018；



a—紫红色砾屑白云岩；b—深灰色砾屑白云岩；c—砾岩，成分主要为白云岩和燧石，箭头指示砥柱状构造；d—多层砾岩叠覆；e—正粒序层理；f—风暴衰减期形成的风暴沉积序列；g—丘状交错层理

图 5 华北南部焦作地区冶里组风暴沉积作用下形成的沉积构造

Fig. 5 Sedimentary structures formed by storm sedimentation in the Yeli Formation in Jiaozuo area, southern North China



红色箭头处：火焰状构造；黄色箭头处：负载构造与球状构造

图 6　华北南部焦作地区冶里组风暴破坏作用下形成的沉积构造

Fig. 6　Sedimentary structures formed by storm disturbance in the Yeli Formation at Jiaozuo area, southern North China

杜远生等，2022）。理想碳酸盐岩风暴沉积序列，从下到上主要发育：A-侵蚀底面及砾屑段，B-粒序段，C-平行纹层段，D-丘状纹层段，E-远源风暴浊积岩、水平层理泥岩和泥晶灰岩段（宋金民等，2012）。碳酸盐岩风暴沉积主要发育在浅海陆棚及滨岸潮坪环境中。二者的差异主要表现在风暴沉积序列的完整性上。浅海陆棚环境中风暴沉积序列保存完整性较好，常发育有典型的风暴沉积序列。而潮坪环境因受潮汐作用的叠加，风暴沉积序列保存性较差，少见有完整的风暴沉积序列（黄乐清和刘伟，2016）。与此同时在滨岸潮坪环境，风暴沉积作用更为复杂，风暴的主要作用方式除风暴潮流外，风暴浪、风暴涡流、风暴回流等也都对风暴沉积的形成具有贡献。

华北南部焦作地区冶里组形成于潮坪环境中，风暴沉积序列发育不完整，以侵蚀底面及砾屑层在潮上带、潮间带及潮下带均有发育为特征，自下而上共识别出 6 种风暴沉积序列：（1）潮下带风暴涡流沉积序列：风暴涡流具有旋转和向上托举的特点，撕扯半固结岩层并形成具有明显的放射状组构的砾屑。该序列底部为不平整的风暴侵蚀面，其上为具有放射状组构的风暴砾屑白云岩，顶部的细晶白云岩反映了风暴间歇期的低能背景沉积。（2）潮下带风暴涡流+风暴浪沉积序列：风暴高峰期，涡流搅碎原地沉积物形成放射状组构砾屑，风暴衰减期则存在风暴浪与潮汐作用的交替叠加。该序列下部为风暴侵蚀面与砾屑白云岩组合，上部发育波状—丘状砂屑白云岩，顶部为细晶白云岩。（3）潮间带风暴重力流+风暴浪沉积序列：以风暴回流驱动的重力流与风暴浪协同作用为主导机制，回流强度衰减过程中引发沉积物分异并形成正粒序。序列底部风暴侵蚀面不明显，向上依次发育正粒序层理、风暴浪塑造的波状—变形层理，顶部为风暴后背景沉积的细晶白云岩。（4）潮间带风暴碎屑流沉积序列：风暴碎屑流具有卷扬悬浮颗粒、呈“块体”推进的特征，且能量强度高、衰减速率快，致使沉积物表现为砾石的无序堆积。序列底部侵蚀面不明显，中部为燧石与白云质砾石组成的块状砾岩，顶部为含漂砾的块状砂屑白云岩。（5）潮间带风暴涡流沉积序列：受风暴涡流控制，砾石呈砥柱状排列（图 5-c）。序列自上而下由风暴侵蚀面、含砥柱状砾石的块状砾岩、反映水流能量快速衰减的薄层砂屑白云岩，及正常背景沉积的顶部薄层泥岩构成。（6）潮上带风暴潮流沉积序列：风暴潮流表现为海水异常上升以及向岸方向的剧烈流动，其带来的沉积物以颗粒较粗、分选磨圆均较差为特点。该序列底部为薄层块状砾岩，上部为薄层砂屑白云岩，因多次风暴事件叠加呈现多旋回互层特点。

上述 6 种序列揭示了从潮下到潮上带风暴流体的变化：在潮下带，以高能的风暴涡流和风暴浪为主；在潮间带，转变为风暴涡流、风暴碎屑流、重力流与风暴浪的复合作用；至潮上带，则表现为快速衰减的风暴潮流。此外，风暴流形成的砾屑层虽在不同相带均有发育，但其产出形态、组构与成分存在显著差异。在潮间带与潮下带中，砾屑以风暴涡流作用下的放射状组构为特点，成分以原地破碎的白云岩为主。而在潮间带与潮上带，砾屑层多呈块状，砾石成分复杂，除白云岩外，还含有较多燧石与陆源碎屑物质。丘状交错层理作为风暴浪的指相标志，仅出现在潮下带。研究区潮间带常见的粒序层段与块状层理或平行层理段，与典型浅海盆地下部的风暴浊积岩存在差异（Deng *et al.*, 2024）。综上所述，在滨岸潮坪环境中，各相带沉积物虽都可能会受到相同的风暴流作用方式的破坏、改造与沉积，包括风暴潮流、风暴涡流、风暴浪、风暴回流以及风暴重力流等，但这些机制在不同相带具有不同的主导性、强度以及组合方式。因此，风暴岩

沉积序列模式不仅要考虑沉积相带的分布，更应考虑风暴作用的方式与过程，以及陆源物质供应的影响。华北南部焦作地区冶里组风暴沉积模式见图7。

4.2 古地理及古气候意义

古地理位置为风暴沉积的产生创造了条件，反之，风暴沉积的发现也为恢复古板块地理位置提供了间接依据（Li *et al.*，2025）。华北板块作为中国三大板块之一，其早古生代时期的古地理位置的研究对于恢复华北板块的运动方式以及其与冈瓦纳大陆的亲缘性具有重要意义（王洪浩等，2016；Jing *et al.*，2022）。基于古地磁、生物古地理及岩相古地理等数据（黄宝春等，2000），普遍认为华北板块在早奥陶世时期位于南半球中低纬度地区，但其纬度范围存在一定争议，包括赤道附近（Yu *et al.*，2015）、南纬10°（冯岩等，2011；Domeier，2018）、南纬15°（Cocks and Torsvik，2021）、南纬24°（Zhao *et al.*，1992；Yang *et al.*，1997）、南纬30°（陈亮，2003）等观点(图8)。

现代风暴作用主要形成于赤道附近5°~20°的区域，影响范围多在5°~30°之间（Marsaglia and Klein，1983；冉宗媛等，2022）。依据将今论古的原则，地史时期风暴事件引发的风暴岩也应当分布在低纬度地区（Duke，1985）。华北南部焦作地区冶里组风暴沉积记录证实了华北板块在早奥陶世时期处于低纬度位置，结合河北、山东、山西等地区报道的风暴岩（刘鹏举和林小谷，2004；时国，2010；王千遥等，2010；Zhou *et al.*，2011；韩作振等，2014），推测该时期风暴沉积记录主要出现在华北板块东部地区，即华北板块东部应面向广海。

风暴活动不仅受古板块位置的控制，也与古气候背景密切相关（Li *et al.*，2025）。奥陶纪，全球经历了“温室气候”向“冰室气候”的转变，热带海水表面温度由早奥陶世的45 ℃降到晚奥陶世的25 ℃（Cocks and Torsvik，2021），早期的研究认为这种降温的过程表现出稳定的趋势（Algeo

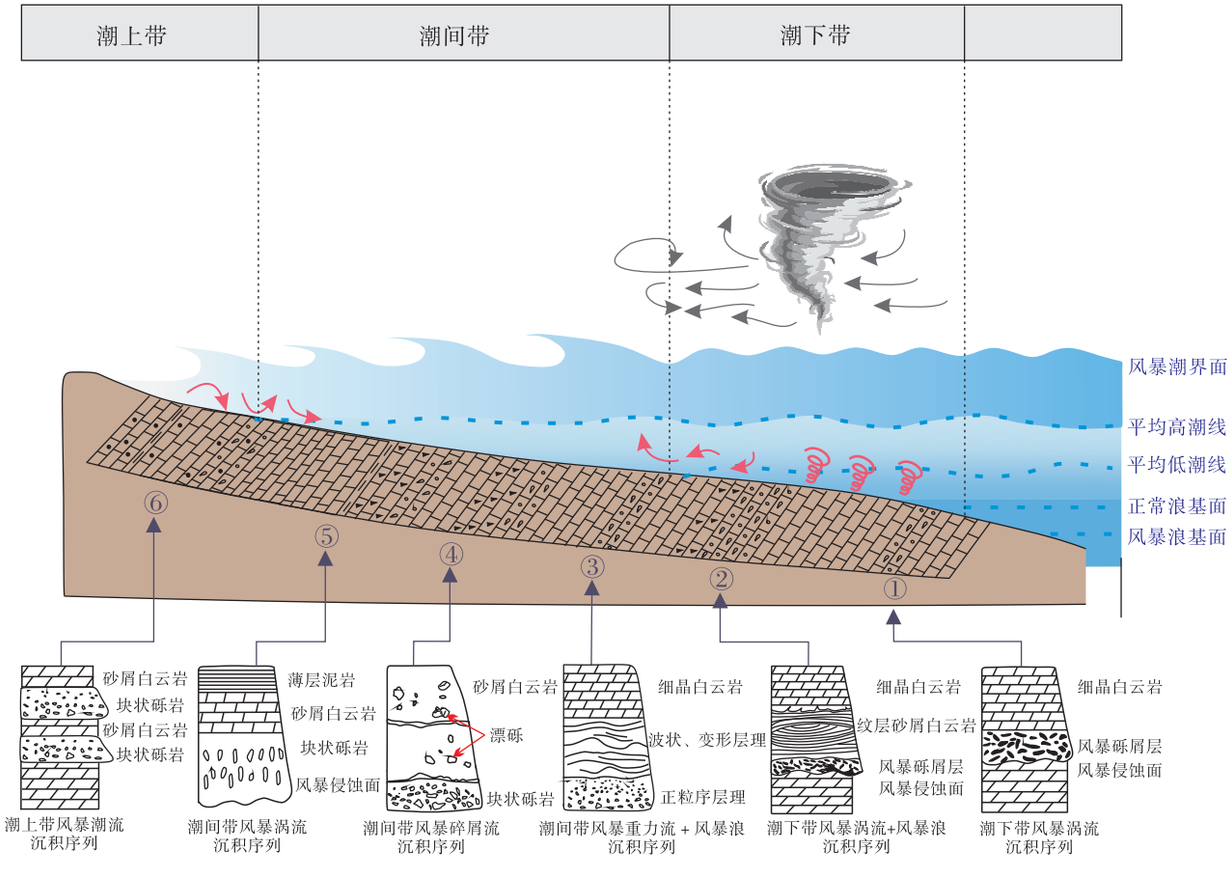


图 7 华北南部焦作地区冶里组风暴沉积模式

Fig. 7 Storm depositional model of the Yeli Formation in Jiaozuo area, southern North China

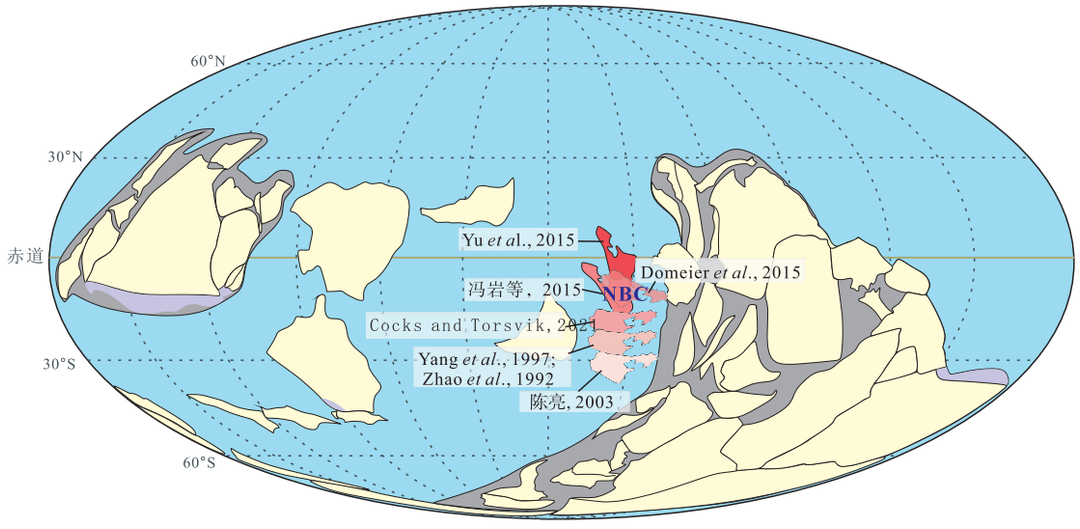


图 8　华北板块早奥陶世古地理位置与风暴作用影响纬度范围示意图

Fig. 8　Schematic diagram of the Early Ordovician palaeogeographic location and influence latitude range of storm action on the North China Block

et al., 2016)。然而，在温室气候背景下，地球轨道参数可以对低纬度气候产生重大的影响（Ma *et al.*, 2022)。基于高精度的热带牙形石氧同位素数据恢复的温度曲线结果发现，在早—中奥陶世时期气温整体下降的背景下，气候具有波动的性质(Cocks and Torsvik, 2021)。华北板块早奥陶世化学地层与旋回地层学数据同样显示了这种波动的气候演变特征（马坤元等，2016)。风暴是深时地球气候系统中一个重要的地质事件，其强度及频率与全球气候变化密切相关（Rush *et al.*, 2021)。普遍认为，随着全球海洋持续变暖和大气水汽含量的增加，风暴活动强度会显著增加；而风暴活动频率取决于盆地所处古纬度位置，随着气候变暖，风暴向高纬度迁移（Sharmila and Walsh, 2018)，其结果是在热带深处地区（纬度 10°左右）风暴发生频率降低，而在热带外围地区（纬度 20°左右）风暴发生频率增高（Korty *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2019)。因风暴活动增强带来的极端降水，其频率和强度也会显著增加。从冶里组风暴沉积特征来看，地层中下部，风暴沉积序列较厚，风暴层间隔厚度也较大；而在地层上部，风暴层序较薄，同时风暴层间隔厚度也较小，这一特征指示了风暴活动频率的增加。另一方面，相对较完整的风暴沉积序列出现在地层的中下部，地层的上部风暴沉积常以多层块状砾岩的叠覆为特征，且层厚减小。块状白云岩中出现的漂砾，其直径通常能达到 10 cm，与下部地层中出现的砾屑白云岩相比，反映了风暴侵蚀、破坏与搬运能力的增强，这是风暴活动强度增加的体现。此外，冶里组上部地层岩性以灰黄色白云岩为主，泥质含量较高，特别是石英颗粒的输入，表明陆源物质显著增多，这一特征也与极端降水强度与频率增加相关(表 1)。综上所述，华北南部焦作地区冶里组中的风暴沉积记录指示了风暴活动频率与强度的增加，与气候变暖背景下的风暴活动特征一致，也证实了早奥陶世气候波动的特征。根据气候变暖背景下热带外围地区（纬度 20°左右）风暴发生频率增高的认识，推测华北板块在早奥陶世更可能位于南纬 15°~24°之间。

表 1　华北南部早奥陶世冶里组风暴沉积与气候变化趋势及热带风暴特征之间的关系

Table 1　Relationship between storm deposits in the Early Ordovician Yeli Formation, southern North China, and climate change trends, and tropical storm characteristics

热带风暴	气候变化趋势		冶里组风暴沉积
	变冷	变暖	
活动强度	减弱	增强	增强
活动频率	降低	热带外围增高	增高
侵蚀、搬运能力	减弱	增强	增强
极端降水	总体减少	增多、增强	增强
陆源物质输入	少	增多	增多

5 结论

1）华北南部下奥陶统冶里组自下而上经历了潮下带→潮间带→潮上带的演化过程，其中潮下带发育风暴涡流沉积序列与风暴涡流+风暴浪沉积序列；潮间带发育风暴重力流+风暴浪沉积序列、风暴碎屑流沉积序列以及风暴涡流沉积序列；潮上带发育风暴潮流沉积序列。风暴作用方式是风暴沉积序列形成的主要控制因素。

2）华北南部下奥陶统冶里组风暴沉积记录了风暴活动频率与强度增加的演变过程，指示了在早奥陶世特马豆克期存在一次气候变暖的波动。早奥陶世华北板块东部应面向广海，其纬度位置可能位于南纬 15°~24°之间。

参考文献(References)

白万备,李建厚,孙长彦,王敏. 2011. 碳酸盐风暴沉积研究现状与进展. 河南理工大学学报(自然科学版),30(4): 426-432. [Bai W B,Li J H,Sun C Y,Wang M. 2011. The present situation and advance in carbonate storm deposits study. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science),30(4): 426-432]

陈亮. 2003. 柴达木北缘榴辉岩类的地球化学及其动力学意义. 西北大学博士学位论文. [Chen L. 2003. Geochemistry of eclogites from north Qaidam and its dynamic significance. Doctoral dissertation of Northwest University]

陈小炜,牟传龙,周恳恳,康建威,王启宇,葛祥英,梁薇. 2015. 华北地区奥陶纪岩相古地理. 沉积与特提斯地质,35(4): 1-11. [Chen X W,Mou C L,Zhou K K,Kang J W,Wang Q Y,Ge X Y,Liang W. 2015. Sedimentary facies and Palaeogeography of the North China region during the Ordovician. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,35(4): 1-11]

杜远生,周道华,龚淑云,韩欣. 2001. 甘肃靖远—景泰泥盆系湖相风暴岩及其古地理意义. 矿物岩石,21(3): 69-73. [Du Y S,Zhou D H,Gong S Y,Han X. 2001. Tempestite and its palaeogeographical significance of Devonian in Jingyuan and Jingtai counties, Gansu Province. Mineralogy and Petrology,21(3): 69-73]

杜远生,杨江海,余文超,杨文涛. 2022. 沉积地质学基础. 湖北武汉: 中国地质大学出版社,367-378 [Du Y S,Yang J H,Yu W C,Yang W T. 2022. Fundamentals of Sedimentary Geology. Hubei Wuhan: China University of Geosciences Press,367-378]

冯岩,温珍河,郑求根,毛小平,侯方辉,祁江豪,郭兴伟. 2011. 古大陆再造与中国主要块体运动特征. 海洋地质前沿,27(7): 41-49. [Feng Y,Wen Z H,Zheng Q G,Mao X P,Hou F H,Qi J H,Guo X W. 2011. A review of progress in paleocontinent reconstruction research in China. Marine Geology Frontiers,27(7): 41-49]

关秀宇,郭杰,陈海燕,修迪,张运强. 2018. 冀北承德盆地奥陶纪冶里组叠层石的发现及沉积环境. 地球科学进展,33(5): 545-553. [Guan X Y,Guo J,Chen H Y,Xiu D,Zhang Y Q. 2018. Discovery of stromatolites from the Ordovician Yeli Formation and its sedimentary environment in Chengde basin, Hebei Province. Advances in Earth Science,33(5): 545-553]

韩作振,赵文龙,高丽华,刘固耀,李瑞华. 2014. 青州地区早奥陶纪碳酸盐岩微相分析及沉积环境研究. 山东科技大学学报(自然科学版),33(1): 9-19. [Han Z Z,Zhao W L,Gao L H,Liu G Y,Li R H. 2014. Early-Ordovician carbonate microfacies and sedimentary environment in Qingzhou area. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),33(1): 9-19]

胡斌,张文涛,牛永斌. 2011. 焦作云台山与青龙峡景区中奥陶统马家沟组沉积特征及演化规律. 河南理工大学学报(自然科学版),30(4): 411-417. [Hu B,Zhang W T,Niu Y B. 2011. Sedimentary characters and evolution of the Middle Ordovician Majiagou Formation in the Black Dragon Canyon,Yuntai Mountain,Jiaozuo area. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science),30(4): 411-417]

胡斌,王瑜,宋慧波,王芳. 2014. 豫西北及晋东南地区下二叠统太原组风暴沉积及伴生遗迹化石特征. 中国煤炭地质,26(1): 1-9. [Hu B,Wang Y,Song H B,Wang F. 2014. Lower Permian Taiyuan Formation storm deposit and associated ichnofossils characteristics in northwestern Henan and southeastern Shanxi area. Coal Geology of China,26(1): 1-9]

河南省地质矿产局. 1989. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社,152-163. [Henan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional Geology of Henan Province. Beijing: Geological Publishing House,152-163]

黄宝春,朱日祥,Y.Otofuji,杨振宇. 2000. 华北等中国主要地块早古生代早期古地理位置探讨. 科学通报,45(4): 337-345. [Huang B C,Zhu R X,Otofuji Y,Yang Z Y. 2000. Discussion on paleogeographic position of main blocks in China, such as North China, in early Early Paleozoic. Chinese Science Bulletin,45(4): 337-345]

黄乐清,刘伟. 2016. 湘西北龙山地区下奥陶统桐梓组潮坪风暴岩的发现及其意义. 沉积学报,34(5): 830-841. [Huang L Q,Liu W. 2016. Characteristics of tempestite of lower Ordovician Tongzi Formation,in the Longshan area,northwestern Hunan and its geological significance. Acta Sedimentologica Sinica,34(5): 830-841]

贾艳雨,宿宇驰,隋少强,贾维明,李宗峰,杨志波,王茜,高飞,季汉成,鲍志东. 2023. 鲁西豫东地区奥陶纪岩相古地理特征及其演化. 古地理学报,25(1): 133-147. [Jia Y Y,Su Y C,Sui S Q,Jia W M,Li Z F,Yang Z B,Wang X,Gao F,Ji H C,Bao Z D. 2023. Lithofacies Palaeogeographic characteristics and evolution of the Ordovician in western Shandong-eastern Henan area. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),25(1): 133-147]

刘宝珺,张继庆,许效松. 1986. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩. 地质学报,60(1): 55-67,121-122. [Liu B J,Zhang J Q,Xu X S. 1986. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of Silong,Xingwen,Sichuan. Acta Geological Sinica,60(1): 55-67,121-122]

刘鹏举,林小谷. 2004. 河北省平泉早奥陶世冶里组碳酸盐风暴沉积.

吉林大学学报(地球科学版),34(1):1-4.[Liu P J,Lin X G. 2004. The carbonate storm deposit of Early Ordovician Yeli Formation in Pingquan area, Hebei Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),34(1):1-4]

马坤元,李若琛,龚一鸣. 2016. 秦皇岛石门寨亮甲山奥陶系剖面化学地层和旋回地层研究. 地学前缘,23(6):268-286.[Ma K Y,Li R C,Gong Y M. 2016. Chemostratigraphy and cyclostratigraphy of the Ordovician Liangjiashan section from Shimenzhai of Qinhuangdao in North China. Earth Science Frontiers, 23(6): 268-286]

冉宗媛,肖倩,佘振兵,王国庆. 2022. 北京周口店雾迷山组碳酸盐岩风暴沉积序列研究. 古地理学报,24(4):634-648.[Ran Z Y, Xiao Q,She Z B,Wang G Q. 2022. Tempestite sequence of carbonate rocks of the Wumishan Formation in Zhoukoudian area, Beijing. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),24(4):634-648]

时国. 2010. 南华北地区奥陶系层序地层与层序格架内古岩溶研究. 成都理工大学博士学位论文.[Shi G. 2010. Study on sequence stratigraphy and palaeokarst characteristics within sequence stratigraphic framework of Ordovician around southern North China. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]

宋慧波,张彬,于振锋,金毅,胡斌,牛永斌,张立军. 2024. 鄂尔多斯盆地东缘太原组风暴沉积特征及环境模式. 沉积学报,42(4):1370-1383.[Song H B,Zhang B,Yu Z F,Jin Y,Hu B,Niu Y B, Zhang L J. 2024. Storm deposit characteristics and their environmental model in the Taiyuan Formation on the eastern margin of the Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica,42(4):1370-1383]

宋金民,杨迪,李朋威,罗平. 2012. 中国碳酸盐风暴岩发育特征及其地质意义. 现代地质,26(3):589-600.[Song J M,Yang D,Li P W,Luo P. 2012. Development characteristics and geological significance of carbonate tempestites in China. Geoscience,26(3):589-600]

王洪浩,李江海,张华添,许丽,李维波. 2016. 华北陆块中奥陶世绝对位置探讨. 中国科学:地球科学,46(1):57-66.[Wang H H, Li J H,Zhang H T,Xu L,Li W B. 2016. The absolute paleoposition of the North China Block during the Middle Ordovician. Scientia Sinica(Terrae),46(1):57-66]

王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京:地图出版社,37-38.[Wang H Z. 1985. Atlas of the Palaeogeography of China. Beijing: Cartographic Publishing House,37-38]

王家豪,王华,曾劲彪,程海. 2017. 山东省中部上寒武统碳酸盐风暴沉积的综合模式. 地球科学,42(1):68-77.[Wang J H,Wang H,Zeng J B,Cheng H. 2017. Integrative depositional model for carbonate tempestites in upper Cambrian, central Shandong Province. Earth Science,42(1):68-77]

王千遥,冯乔,贾凌云,刘阵,赵伟,周书昌. 2010. 鄂尔多斯盆地柳林地区下奥陶统冶里组竹叶状石灰岩的沉积环境和成因机制. 沉积与特提斯地质,30(4):55-59.[Wang Q Y,Feng Q,Jia L Y, Liu Z,Zhao W,Zhou S C. 2010. Sedimentary environments and genesis of edgewise limestones: an example from the Lower Ordovician Yeli Formation in the Ordos Basin. Sedimentary Geology and Tethyan Geology,30(4):55-59]

王志浩,甄勇毅,张元动,吴荣昌. 2016. 中国华北不同相区奥陶纪牙形刺生物地层的再认识. 地层学杂志,40(1):1-16.[Wang Z H,Zhen Y Y,Zhang Y D,Wu R C. 2016. Review of the Ordovician conodont biostratigraphy in the different facies of North China. Journal of Stratigraphy,40(1):1-16]

吴淳,刘航宇,芦飞凡,刘波,石开波,何卿. 2023. 北京西山下苇甸中上寒武统风暴沉积特征及模式. 地学前缘,30(6):110-124.[Wu C,Liu H Y,Lu F F,Liu B,Shi K B,He Q. 2023. Storm deposition characteristics and models for the Middle and Upper Cambrian in Xiaweidian, Xishan area, Beijing. Earth Science Frontiers, 30(6):110-124]

席文祥,裴放. 1997. 全国地层多重划分对比研究河南省岩石地层. 湖北武汉:中国地质大学出版社,84-97.[Xi W X,Pei F. 1997. National Research on Multiple Stratigraphic Division and Correlation Rock Stratigraphy of Henan Province. Hubei Wuhan: China University of Geosciences Press,84-97]

张治恒,黄铭志,王志章,张运杰,刘红超,曲康,安金彪,马莎莎,李坤翰. 2024. 松辽盆地大情字井区青山口组二段风暴沉积及意义. 天然气地球科学,35(3):423-434.[Zhang Z H,Huang M Z, Wang Z Z,Zhang Y J,Liu H C,Qu K,An J B,Ma S S,Li K H. 2024. Storm deposition and significance of the second member of Qingshankou Formation in Daqingzi well area,Songliao Basin. Natural Gas Geoscience,35(3):423-434]

Algeo T J,Marenco P J,Saltzman M R. 2016. Co-evolution of oceans, climate, and the biosphere during the 'Ordovician Revolution': a review. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 458: 1-11.

Belghouthi F,Zouari H. 2019. Storm-dominated shallow-marine carbonates of the lower Eocene succession of the northwestern Tunisian domain. Journal of African Earth Sciences,160: 103608.

Chen J T,Lee H S. 2013. Soft-sediment deformation structures in Cambrian siliciclastic and carbonate storm deposits (Shandong Province, China): differential liquefaction and fluidization triggered by storm-wave loading. Sedimentary Geology,288: 81-94.

Chen X,Bergström S M,Zhang Y D,Wang Z H. 2013. A regional tectonic event of Katian (Late Ordovician) age across three major blocks of China. Chinese Science Bulletin,58: 4292-4299.

Cocks L R M,Torsvik T H. 2021. Ordovician palaeogeography and climate change. Gondwana Research,100: 53-72.

Dai M Y,Han L L,Qi Y A,Du Y G,Yin Z L,Chen S H,Qing S Y. 2025. Storm deposits and trace fossils of Xinji Formation (Cambrian Series 2) in the southern margin of North China Plate. Palaeoworld, 34: 100866.

Deng Y,Zhang Y W,Hou W L,Wang X R. 2024. Sedimentary characteristics and model of Cambrian storm in Xuzhou area. Arabian Journal of Geosciences,17: 213.

Domeier M. 2018. Early Paleozoic tectonics of Asia: towards a full-plate model. Geoscience Frontiers,9(3): 789-862.

Duke W L. 1985. The paleogeography of Paleozoic and Mesozoic storm depositional systems: a discussion. The Journal of Geology, 93: 88-90.

Ji K X, Wignall P B, Peakall J, Tong J N, Chu D L, Pruss S B. 2021. Unusual intraclast conglomerates in a stormy, hot-house lake: the Early Triassic North China Basin. Sedimentology, 68(7): 3385-3404.

Jiang K X, Lin C M, Zhang X, Zhao Y Y, Lang X G, Su M, Wang C, Lei Y P, Liu J R. 2023. Storm-driven variations in depositional environments modify pyrite sulfur isotope records. Earth and Planetary Science Letters, 610: 118118.

Jing X C, Zhao Z Y, Fu L, Zhang C L, Fan R, Shen Y, Yang B. 2022. Biostratigraphically-controlled Darriwilian (Middle Ordovician) $\delta^{13}C$ excursions in North China: implications for correlation and climate change. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 601: 111149.

Knutson T, Camargo S J, Chan J C L, Emanuel K, Ho C H, Kossin J, Mohapatra M, Satoh M, Sugi M, Walsh K, Wu L G. 2020. Tropical cyclones and climate change assessment: Part Ⅱ: Projected response to anthropogenic warming. Bulletin of the American Meteorological Society, 101(3): E303-E322.

Korty R L, Emanuel K A, Huber M, Zamora R A. 2017. Tropical cyclones downscaled from simulations with very high carbon dioxide levels. Journal of Climate, 30(2): 649-667.

Li F J, Chen Z A, Acikalin S, Ogg J G, Flynn S, Liu G C, Zhang P F, Wang J, Chen A Q, Hou M C. 2025. Storm deposit characteristics and orbital cyclicity of the Early Devonian Xiejiawan Formation in the Longmenshan area, Sichuan Province, China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 664: 112792.

Ma K Y, Hinnov L, Zhang X S, Gong Y M. 2022. Astronomical climate changes trigger Late Devonian bio-and environmental events in South China. Global and Planetary Change, 215: 103874.

Marsaglia K M, Klein G D. 1983. The paleogeography of Paleozoic and Mesozoic storm depositional systems. The Journal of Geology, 91: 117-142.

Quan H, Yu Z, Qiao Z F, Li C Q, Xia P, Su Z T, Wen H G, Qin M, Ning M. 2025. Sedimentary and early diagenetic responses to the Huaiyuan movement during the Early-Middle Ordovician transition in the Ordos Basin, North China. Geosciences, 15: 219.

Rush W D, Kiehl J T, Shields C A, Zachos J C. 2021. Increased frequency of extreme precipitation events in the North Atlantic during the PETM: observations and theory. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 568: 110289.

Shang G R, Zhai M G, Peng P, Miao P S, Li Q. 2024. A climate change from icehouse to greenhouse following Huronian glaciation: evidence from long-term storm deposits of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 274: 106289.

Sharmila S, Walsh K J E. 2018. Recent poleward shift of tropical cyclone formation linked to Hadley cell expansion. Nature Climate Change, 8: 730-736.

Wang J H, La Croix A D, Wang H, Guo F Y, Ren B Z. 2019. Linkage between calcirudite lithofacies and storm-generated depositional processes in the Upper Cambrian Series, Shandong Province, Eastern China. Sedimentary Geology, 391: 105518.

Wu X X, Carling P A, Parsons D. 2024. Hummocky sedimentary structures within rippled beds due to combined orbital waves and transverse currents. Sedimentology, 71(2): 573-589.

Xiong H X, Huang G Q, Fu S Q, Qian P. 2018. Progress in the study of coastal storm deposits. Ocean Science Journal, 53: 149-164.

Yan X L, Konopka P, Ploeger F, Podglajen A, Wright J S, Müller R, Riese M. 2019. The efficiency of transport into the stratosphere *via* the Asian and North American summer monsoon circulations. Atmospheric Chemistry and Physics, 19(24): 15629-15649.

Yang Z Y, Zhou D, Graham S A. 1997. Extrusion of the Altyn Tagh wedge: a kinematic model for the Altyn Tagh fault and palinspastic reconstruction of northern China: comment and Reply. Geology, 25(5): 475.

Yu S, Li S Z, Zhao S J, Cao H H, Suo Y H. 2015. Long history of a Grenville orogen relic-The North Qinling terrane: evolution of the Qinling orogenic belt from *Rodinia* to Gondwana. Precambrian Research, 271: 98-117.

Zhao X X, Coe R S, Liu C, Zhou Y X. 1992. New Cambrian and Ordovician paleomagnetic poles for the North China Block and their paleogeographic implications. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B2): 1767-1788.

Zhen Y Y, Zhang Y D, Wang Z H, Percival I G. 2016. Huaiyuan epeirogeny: shaping Ordovician stratigraphy and sedimentation on the North China platform. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 448: 363-370.

Zhou Z C, Willems H, Li Y, Luo H. 2011. A well-preserved carbonate tempestite sequence from the Cambrian Gushan Formation, eastern North China Craton. Palaeoworld, 20(1): 1-7.

(责任编辑 李新坡)