

豫西登封寒武系馒头组碳酸盐岩中的风暴沉积 及相关的生物成因构造

齐永安,姚 倩,代明月,李 姐
(河南理工大学资源环境学院,河南焦作 454003)

摘 要:豫西登封地区寒武系第三统馒头组三段发育了一套含大量生物成因构造的碳酸盐岩风暴沉积。风暴沉积标志包括冲刷面构造、砾屑灰岩及各类交错层理,生物成因构造包括微生物成因构造—叠层石及后生动物扰动构造—各类垂直潜穴。该区风暴沉积包括3种沉积序列:序列1由侵蚀底面、砾屑灰岩段和交错层理段组成,代表了风暴高峰期和衰减期形成的原地型风暴沉积;序列2由侵蚀底面、砾屑灰岩段和泥岩、泥灰岩段组成,为风暴高峰期和间歇期形成的近源型风暴沉积;序列3由侵蚀底面、交错层理段和叠层石灰岩段组成,反映了风暴衰减期和间歇期形成的远源型风暴沉积。这些风暴沉积代表了不同风暴作用留下的多期不完整风暴沉积记录。

关键词:风暴沉积;寒武系;馒头组;生物成因构造;碳酸盐岩

中图分类号: P539.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2014)03-0241-09

碳酸盐岩风暴沉积的研究始于20世纪50年代末期,作为事件沉积的一种主要类型,它是物理作用和生物作用共同影响的结果。风暴沉积形成后,经常受到后期侵蚀、破坏和改造,地层中保存的风暴沉积多以不完整或变形形式出现。以往学者对风暴沉积的研究多注重在物理作用产生的结构、构造方面,往往忽略对其生物成因构造方面进行深入探讨。在正常的海洋环境中,风暴沉积层很少能免于遭受内生动物的改造^[1],因此对风暴沉积中生物成因构造的研究就显得尤为重要。近年来,对风暴沉积中生物成因构造的研究取得了一定程度的进展^[2-8]。与风暴沉积相关的多为后生动物的扰动构造,而微生物成因的沉积构造与后生动物扰动构造共同出现在风暴沉积中则不多见。华北地区碳酸盐岩风暴沉积最早由孟祥化等研究^[9],之后也有一些报道^[10-13]。豫西登封地区寒武系馒头组三段下部发育了一套含垂直潜穴鲕粒灰岩—叠层石灰岩交替演化的风暴沉积序列,与风暴相关的物理及生物成因沉积构造丰富,分析它们的宏观、微观特征及其控制因素,为该地区风暴沉积特征及生物学响应研究提供依据。

1 地层及岩性特征

登封地区位于河南省中西部,属于河南省华北型寒武系豫西分区。该分区可进一步划分为三个小区,由南向北依次为卢氏—确山小区、灵宝—鲁山小区和渑池—登封小区^[14]。本文研究区分布在渑池—登封小区,以登封王窑—唐庄乡关口剖面作为研究剖面(图1)。该剖面寒武系连续发育(图2左),第二统辛集组为海侵初期的砂砾岩、朱砂洞组为滨—浅海白云岩、馒头组一段为潮坪相碎屑岩夹碳酸盐岩;第三统馒头组二、三段为潮坪相和浅海相碎屑岩夹碳酸盐岩,张夏组为滨—浅海相鲕粒灰岩、鲕粒白云岩、生物碎屑灰岩和微生物岩;芙蓉统崮山组、炒米店组、三山子组主要为潮坪相的白云岩^[14,15]。本区馒头组三段总厚41.87 m,上部为鲕粒灰岩及黄绿色页岩,下部为球粒砂屑灰岩、鲕粒灰岩,并伴生有竹叶状砾屑灰岩及数层微生物岩,发育大量垂直或近垂直层面分布的滤食动物居住潜穴、叠层石及交错层理等沉积构造(图2右)。本文研究的风暴沉积主要发育在馒头组三段下部含大量生物成因构造的鲕粒灰岩中。

收稿日期:2014-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目:豫西寒武纪沉积底质变革与造迹方式响应(41472083);教育部高校博士点基金博导类联合课题:豫西寒武纪遗迹组构演化与环境制约(20114116110001)

作者简介:齐永安(1963-),男,教授,主要从事遗迹化石与沉积学教学与科研工作,E-mail:qiya@hpu.edu.cn。

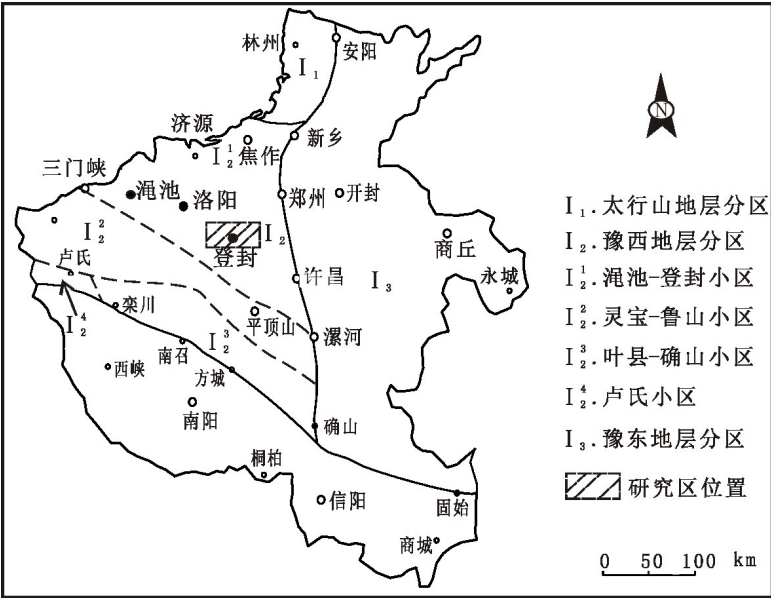


图1 豫西寒武系分区及研究区域

Fig.1 Map of cambrian stratigraphic divisions and the study area

2 风暴沉积标志

通过详细的剖面观察和室内研究，研究区识别出典型的风暴沉积标志主要有冲刷面构造、砾屑灰岩和丘状交错层理。

冲刷面构造作为侵蚀底面构造的一种主要形式，在馒头组三段中广泛发育，通常认为是在一种具有较弱侵蚀作用的较低能风暴作用下形成的^[16]。本研究区冲刷面构造其界面呈不规则的波状起伏，起伏幅度较小，约0.5~2 cm，波峰尖，波谷宽缓，冲刷面之上常为薄层叠层石灰岩或含垂直潜穴鲕粒灰岩(图3-1、3-2)。

风暴成因的砾屑灰岩被认为是风暴

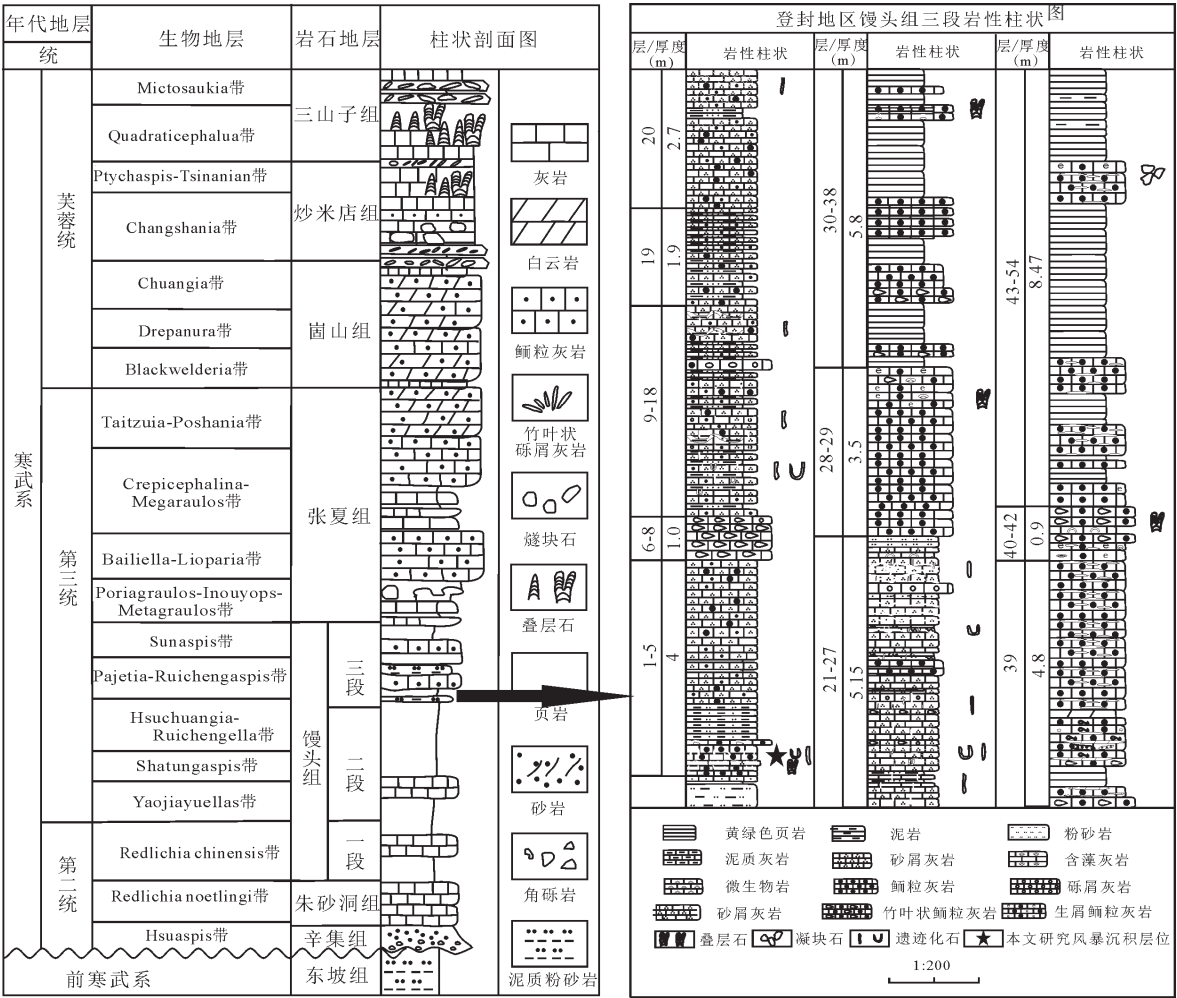


图2 豫西登封地区寒武系及馒头组三段地层柱状图

Fig.2 The stratigraphic column of Cambrian and the third member of the Mantou Formation, Mianchi area, western Henan

流引起海床的沉积物发生同生撕裂、破碎,形成特殊构造排列的扁片状砾屑灰岩,如双向排列、倒“小”字排列、叠瓦状、放射状、平行状排列等。本段地层中,砾屑灰岩层以薄层放射状砾屑层、中厚层杂乱堆积状砾屑层为主:(1)薄层放射状砾屑层,砾屑含量50%~75%,层厚5 cm~10 cm,厚薄不均,呈层状、透镜状分布,横向发育不连续。竹叶状砾屑较小,一般短轴0.3~2 cm,长轴0.5~4 cm,磨圆较好,分选一般,砾屑排列无明显的定向性,呈近水平状、簇状、倒“小”字状、直立状多种形式排列,成分为深灰色鲕粒灰岩(图3-3)。(2)中厚层杂乱堆积状砾屑层,层厚约20~30 cm,横向上不连续,呈层状、透镜状分布;竹叶状砾屑个体普遍较大,最大长轴可达20 cm,短轴10 cm,最小长轴只有1 cm,短轴1 cm,多呈不规则状,大部分为低角度倾斜,少数为高角度倾斜,局部呈直立状,剖面可见有杂乱堆积现象,分选极差,磨圆中等—较差,成分也为鲕粒灰岩(图3-4,图4-1、4-2)。这些砾屑灰岩是在风暴高峰期,半固结的鲕粒灰岩被掀起、打碎成竹叶状砾屑,就地或近距离堆积而成。砾屑层通常分布在风暴序列的下部,记录了风暴密度流高峰期的沉积。

丘状、凹状交错层理是鉴定风暴沉积最明显的标志,也是最能反映风暴沉积作用的沉积构造^[17-20]。一

般认为丘状交错层理和凹状层理伴生出现。本区丘状交错层理纹层宽缓,各细纹层向脊部发散增厚,向两端变薄收敛,层的曲面包括上凸纹层以及下凹纹层,纹层呈丘状起伏,内部含有较多的波状侵蚀面。纹层厚度1~2 mm,层系厚度5~15 cm,丘体内纹层厚度不均,丘体间常见截切现象,纹层与层系底界近乎平行。多为数个丘状层相互叠加、组合形成的厚度不等的层系组,层系组厚度约15~20 cm,波长与波高比值约3:1~7:1,层系顶面多为不规则的波曲状(图3-1)。丘状交错层理多形成于正常浪基面至风暴浪基面之间的水深范围^[20,21]。

3 生物成因构造

风暴沉积中的生物成因构造主要有叠层石以及垂直潜穴两种。叠层石以与含垂直潜穴鲕粒灰岩互层及围绕鲕粒砾屑生长两种形式产出,垂直潜穴则出现在中厚层鲕粒灰岩中。

3.1 叠层石

3.1.1 叠层石组合类型

类型一:与含垂直潜穴鲕粒灰岩互层的叠层石层。该类型叠层石灰岩层厚约2~4 cm,顶底均为含垂直潜穴鲕粒灰岩(图4-3、4-4、4-5、4-6)。叠层石为浅灰白色夹土黄色,形态多样,横向上不连续,以

小柱状为主(图4-1、4-2),局部呈圆柱状、锥柱状、倒锥柱状、指状或不规则状(图4-5、4-6),叠层石底部局部可相互连通,可见分叉现象。其中小柱状叠层石主要为含泥及极少量鲕粒的泥灰岩,柱体高度约为4~7 cm,单个直径1~2 cm,局部可见底部融合生长,叠层石间隙小,充填不同程度的泥和生物碎屑,叠层石层与层之间为土黄色极薄层泥分隔。圆柱状叠层石剖面形态为垂直柱状或微倾斜柱状,呈浅灰白色,岩性主要为含泥及极少量鲕粒的泥灰

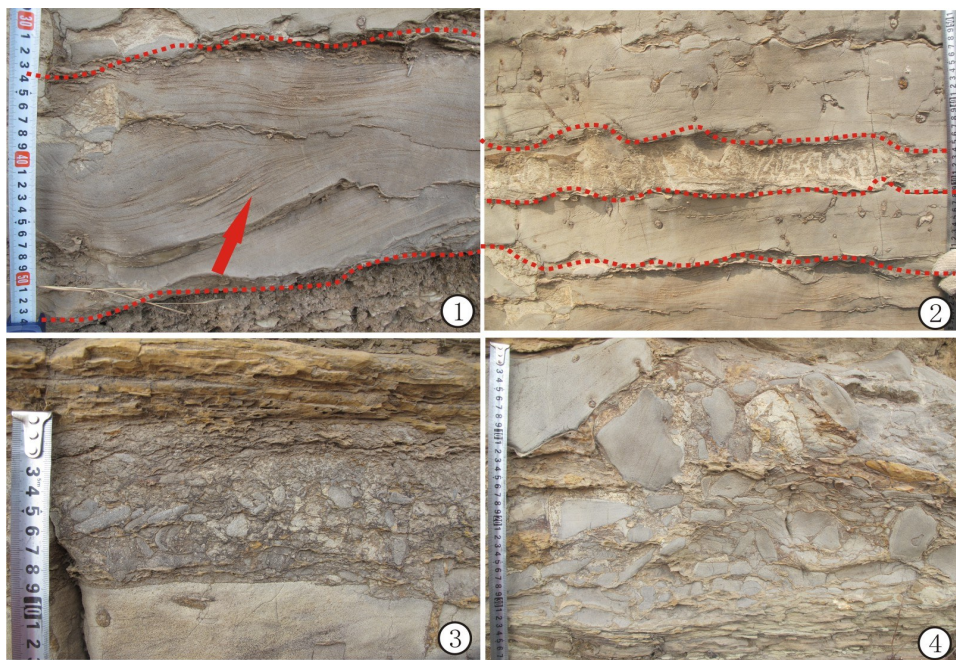


图3 馒头组三段下部风暴沉积构造特征

Fig.3 Sedimentary textures of the storm deposits from the lower part of the Member 3, Mantou Formation

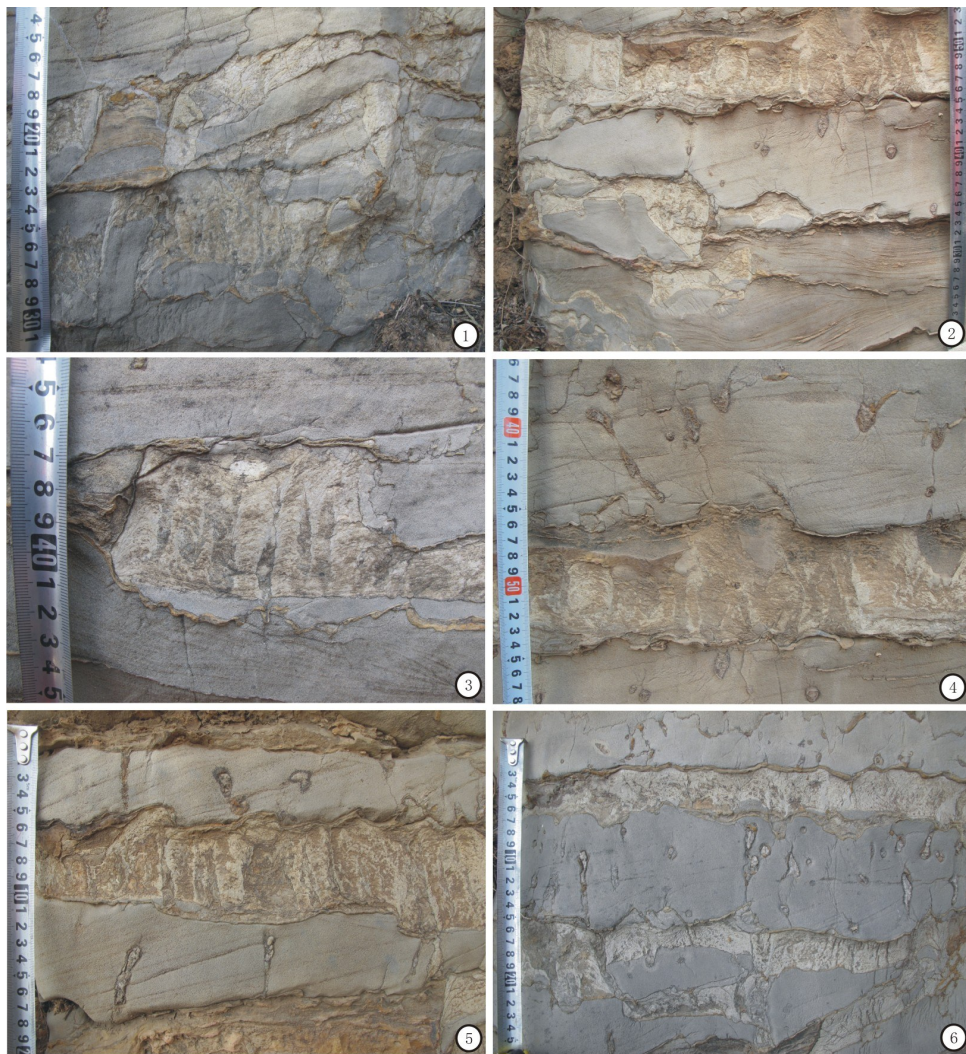


图4 馒头组三段下部叠层石灰岩

Fig.4 Stromatolite limestones from the lower part of the Member 3, Mantou Formation

岩,柱体高度约为6~8 cm,单个直径约为3~5 cm,柱体排列紧密、间隙较小,柱体间充填有不同程度的泥和少量生物碎屑。倒锥柱状叠层石岩性与小柱状叠层石一致,常与小柱状、圆柱状叠层石伴生出现,形状似火把状或倒锥状,上宽下窄,多具有层壁,剖面可见层理为侧向断开的穹窿形,多以侵蚀底面为基底向上生长。上述叠层石间充填大量土黄色极薄层泥岩,叠层石灰岩中灰泥含量达20%~45%,间隙充填为微晶或微亮晶方解石,其次为石英颗粒(10%~35%)及少量生物碎屑(6%~10%)和鲕粒(6%~9%)。上述多种形态叠层石的共存及高含量的泥质充填物反应了其形成于低能的潮下带环境^[23, 24]。

类型二:围绕鲕粒砾屑生长的叠层石层。包裹竹叶状砾屑生长的叠层石,其生长形状受砾屑外形影响较大,一般中间较厚两边较薄,呈小丘状、穹窿

状或薄层状,局部可见侧向连接成穹窿型,形态多样(图3-4、图4-1、4-2)。砾屑密集处,叠层石不清晰,杂乱似凝块石灰岩;砾屑含量较少处可见叠层石在其上方生长呈小半球状、缓波状、锥状,横向上不连续,局部相变为小柱状、不规则小柱状叠层石,纹层不清晰,叠层石个体及纹层间充填大量薄层土黄色泥,基质主要为微晶方解石,但在横向上发现部分砾屑上生长的小柱状叠层石间则充填物为以放射鲕粒、同心-放射鲕粒为主的鲕粒灰岩,石英颗粒含量约为10%~30%,分布不均匀,局部集中分布,生物碎屑含量较少(5%~8%),主要为三叶虫碎屑,多

分布在叠层石间。这些叠层石为风暴过后的相对平静期,在砾屑之间的不规则空间内或以砾屑为基底向上生长所致。

3.2 垂直潜穴

馒头组三段下部鲕粒灰岩中发育了大量滤食动物的垂直或近垂直居住潜穴,以 *Skolithos* 最为丰富(图4-4、4-5、4-6,图5-1、5-2、5-3、5-4),此外发育有少量 *Arenicolites*(图5-5)。这些垂直潜穴在鲕粒灰岩中丰度、分异度由下向上逐渐增加。在剖面上总体扰动强度为较弱-中等,扰动量5%~30%,BI通常1~3,扰动强度向上逐渐增强。根据野外的详细观察及室内分析,发现鲕粒灰岩中的遗迹化石具有以下特征:

(1)剖面上观察到的潜穴形态多呈微弯曲的管状、近圆形及不规则形圆点状,垂直或近垂直层面分

布,由于潜穴多倾斜于层面分布及部分特殊的U型潜穴管构造,剖面上往往只能观察其部分形态,不同的潜穴出现在同一层段时,可见潜穴管交叉、叠覆现象,简单垂直潜穴 *Skolithos* 切穿U型潜穴 *Arenicolites*。

(2) 潜穴发育有明显的土黄褐色或深褐色泥岩

衬壁(图5-6),衬壁厚薄不均,一般300~1200 mm,镜下观察多为灰泥组成,富含大量黑褐色有机质,石英颗粒含量15%~20%,明显高于围岩;潜穴内部充填为亮晶方解石或土黄色泥岩及少量的石英颗粒、岩屑等陆源碎屑,亮晶方解石呈半自形-自形晶不等粒结构,晶体呈舌状、弯曲状、锯齿状紧密堆积,土黄色泥岩常与细小的石英颗粒、岩屑伴生。充填物为土黄色泥岩的潜穴多沿着波曲状土黄色泥线或缝合线向下延伸(图5-7);充填物为亮晶方解石的潜穴多发育在鲕粒灰岩层内(图5-8)。

(3) 本区遗迹化石分布主要有两种形式:一种分布在发育有交错层理的鲕粒灰岩层内,遗迹化石切穿鲕粒灰岩中的交错层理。推测是鲕粒灰岩边沉积,造迹生物边在鲕粒灰岩中掘穴,生物死亡或离开后,潜穴管内被动充填为松散的沉积物,经后期成岩胶结形成了亮晶方解石充填物。另一种是沿着土黄色极薄层泥线或缝合线向下鲕粒灰岩中延伸,是在风暴流多次对沉积底质进行冲刷后的短暂间歇稳定期,造迹生物自风暴作用形成的凹凸不平界面向下掘穴,并被被动充填上伏土黄色泥岩所致。鲕粒灰岩层之间以及鲕粒灰岩层与叠层石灰岩层之间均呈凹凸不平接触,反映了多期风暴作用对沉积物的改造。

(4) 显微镜下,鲕粒灰岩中的鲕粒以放射鲕、

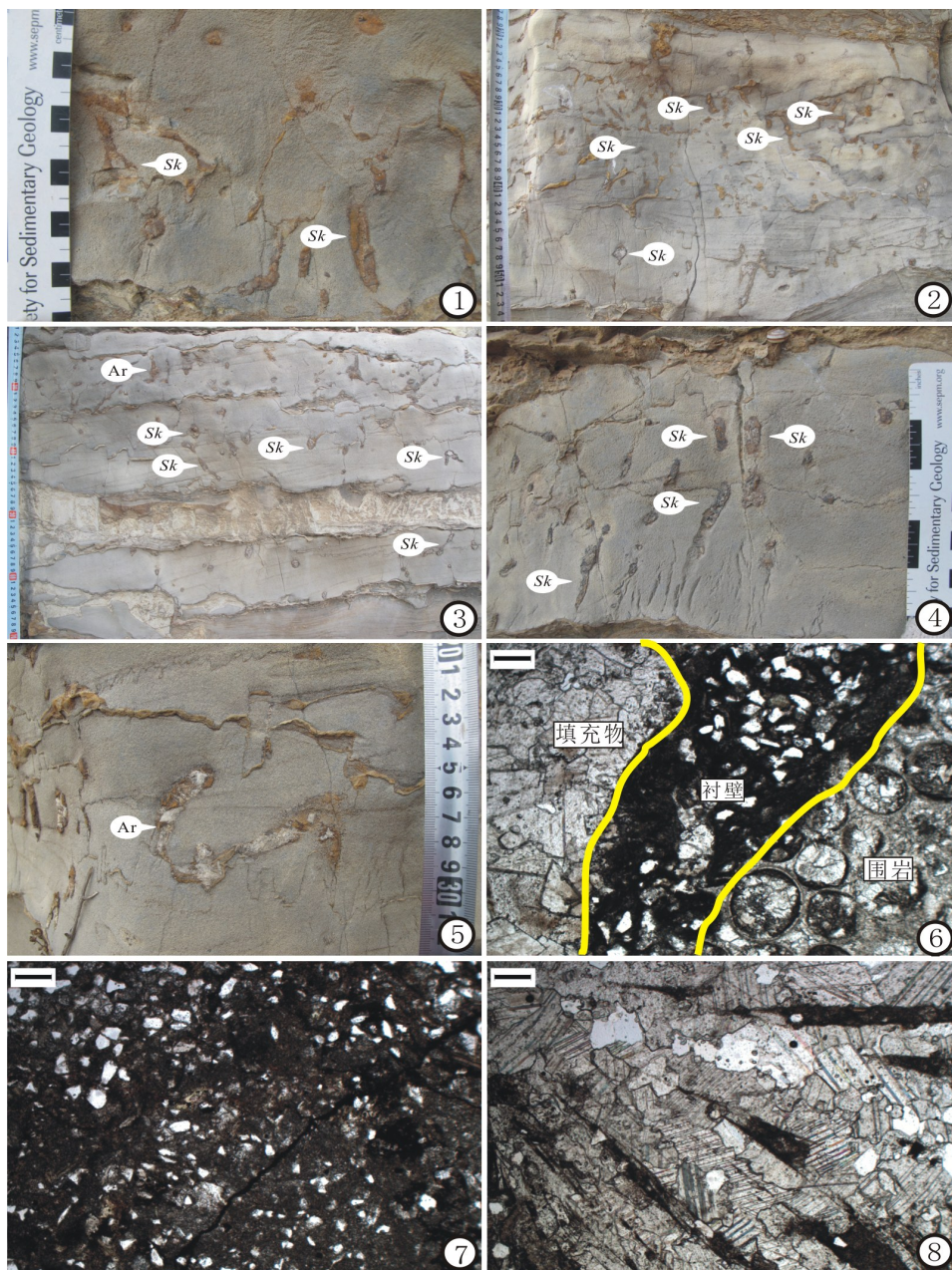


图5 馒头组三段下部鲕粒灰岩中的垂直潜穴

Fig.5 Vertical burrows from the oolitic limestones of the lower part of the Member 3, Mantou Formation

- 1~4.剖面上鲕粒灰岩中的 *Skolithos* (Sk); 5.剖面上鲕粒灰岩中的 *Arenicolites* (Ar);
6.发育有衬壁的 *Skolithos* 微观特征(单偏光, $\times 50$), 图中比例尺为 200 μm ;
7.潜穴内部为土黄色泥质充填物(单偏光, $\times 50$), 图中比例尺为 200 μm ;
8.潜穴内部充填为亮晶方解石(单偏光, $\times 50$), 图中比例尺为 200 μm 。

同心-放射鲕为主,粒径150~400 mm,鲕核多不发育,有核心者其成分多为泥晶团粒、砂屑、藻团粒、生物碎屑以及少量的陆源碎屑,部分鲕粒圈层外发育泥晶套,颗粒间充填物为微晶或微亮晶方解石。在弱动荡水条件下,绕成核物质加积生长的文石针呈径向排列,形成具放射状圈层;当环境能力增强时,径向文石针难以生长,而沿切线方向加积形成同心状圈层^[22]。鲕粒灰岩中发育不规则的板状、楔状交错层理等沉积构造,鲕粒灰岩层之间发育波状起伏的冲刷面。上述特征说明该阶段的鲕粒灰岩形成于正常浪基面附近、低-中等能量交替的台内深斜坡环境。

4 风暴沉积序列

风暴沉积序列是在一次风暴事件引发的风暴沉积作用过程中,由于各阶段的水动力条件的不同而塑造的不同沉积单元组合^[26]。完整的碳酸盐岩风暴沉积相序由下至上包括:a侵蚀底面(代表风暴流及其触发的重力流对海底沉积物的作用);b砾屑层或介壳层,具块状构造(代表风暴浪、风暴涡流沉积);c粒序段,具递变层理(代表风暴衰减期重力分异沉积或风暴浊流沉积);d平行纹层段(代表风暴作用衰减过程中的高能沉积);e丘状纹层段;f水平层理,泥岩、泥灰岩段(正常天气下沉积产物)。在不同的沉积环境中,由于水深、离岸距离、底质性质及海水运动强度等因素的影响,风暴沉积的序列也有所不同,也极易受到后风暴的改造和破坏。本区风暴沉积为多期风暴作用形成的不完整序列叠加而成,可以分为以下几种沉积序列(图6):

序列1:由侵蚀底面、砾屑灰岩段和交错层理段组成,包括沉积单元a、b、e(图6,序列1)。该层厚25~45 cm,厚度不稳定,横向上不连续。底部为不规则的波状侵蚀面,波高0.5~1.5 cm,可见渠筑形构造、袋装构造以及“V”型冲刷沟槽,侵蚀面之上砾屑层厚度不稳定,砾呈杂乱堆积或放射状,为风暴高峰期半固结的沉积物被掀起、打碎,砾屑就地或近距离堆积而成,距离风暴中心距离较近。随着风暴活动频率及强度的减弱,下伏半固结的底质

不再被掀起、打碎,形成发育大量交错层理的鲕粒灰岩。在此生态环境恶化的不稳定环境中,大多数造迹生物无法生存,仅有少数机会主义造迹生物,迅速殖居在此风暴沉积中,最终留下大量垂直或近垂直的居住潜穴。随着风暴作用的再次来临,以风暴作用形成的凹凸不平界面终止了鲕粒灰岩的形成及机会主义生物的殖居。该序列代表了风暴高峰期和衰减期形成的原地型风暴沉积。

序列2:由侵蚀底面、砾屑灰岩段和泥岩、泥灰岩段组成,包括a、b、f沉积单元(图6,序列2)。该层厚约65~80 cm,底部为波状侵蚀面,侵蚀面波状起伏较为平缓,波高0.5 cm以下,局部侵蚀程度较大,发育渠筑形构造、袋装构造。砾屑层段厚度5~10 cm,厚薄不均,横向上不连续,向两侧尖灭,砾屑排列无明显的定向性,砾间充填为不明显的叠层石灰岩夹土黄色泥质粉砂岩。当风暴结束后,该区开始发育正常天气下的土黄色粉砂质泥岩与泥灰岩。该序列代表了风暴高峰期和间歇期形成的异地近源型风暴沉积,反应了风暴过后直接过渡到正常沉积的过程。

序列3:由侵蚀底面、交错层理段和叠层石灰岩段组成,包括a、e、f沉积单元。该序列可进一步分为两个亚序列:序列3-1由发育丘状交错层理、不发育垂直潜穴的鲕粒灰岩和叠层石灰岩组成,厚度15~20 cm,层厚较稳定,横向上不连续,丘状交错层理由

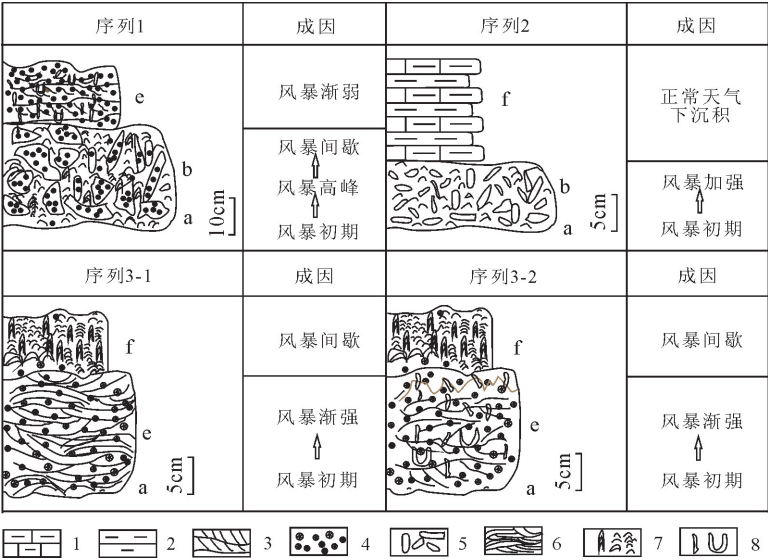


图6 登封馒头组三段下部风暴沉积序列

Fig.6 The sedimentary successions of storm deposits from the lower part of the Member 3, Mantou Formation, Dengfeng

1.泥灰岩; 2.泥岩; 3.鲕粒灰岩; 4.砾屑灰岩; 5.丘状交错层理; 6.板状交错层理; 7.叠层石; 8.垂直潜穴

数个丘状层相互叠加、组合而成的厚度不等的层系组成(图6,序列3-1);序列3-2由发育板状、楔状交错层理及垂直潜穴的鲕粒灰岩和叠层石灰岩组成(图6,序列3-2),层厚不稳定,不发育丘状交错层理。序列3具有以下特征:1)在露头上厚度不稳定,横向上不连续;2)底部波状冲刷面起伏程度较平缓,可见渠筑形构造;3)发育叠层石灰岩,为风暴间歇期微生物在风暴作用形成的凹凸不平界面上大量生长形成微生物席。在水动力较强的区域,微生物席不断叠加向上生长,形成小柱状叠层石;而在局部低能的水下凹地,则形成形态特征不规则、纹层不清晰的凝块状叠层石。叠层石的藻席分泌的EPS捕获粘附了波浪或潮汐作用带来的碳酸盐岩微粒、鲕粒、生物介壳及石英颗粒。该序列代表了风暴衰减期和间歇期形成的异地远源型风暴沉积,反映了一期风暴之后以不明显的冲刷面为界直接变换为第二期风暴的沉积过程^[25,26]。

上述3种序列反映不同的风暴沉积过程。序列1底部侵蚀构造局部表现为渠模或口袋模,砾石屑层呈现杂乱堆积,分选、磨圆较差,反映了风暴作用对下伏地层的强烈侵蚀作用。序列2侵蚀底面为较平缓的波状起伏面,砾屑层中的砾屑比序列1具有一定的磨圆和分选,说明该序列离风暴中心距离相对序列1较远。序列3侵蚀底面为不规则的波状冲刷面,波状起伏程度较平缓,不发育砾屑层而发育交错层理鲕粒灰岩层,表明该序列风暴作用能量较弱,距离风暴中心有一定的距离。剖面中可见大量凹凸不平的冲刷面将鲕粒灰岩层分隔,使其与风暴间歇期的叠层石灰岩层多次交互发育,反映出多期风暴作用间歇频繁影响沉积底质,从而形成了多个不完整的风暴沉积序列。

5 讨论

风暴沉积作用是一种突发的、瞬时性事件,由于风暴强度、持续时间、作用过程与水深有所不同,会形成不同的风暴沉积构造和沉积序列。关于华北寒武系碳酸盐岩中的风暴沉积,前人做过大量的研究工作。孟祥化等^[9]在对华北古浅海碳酸盐风暴沉积的研究中,对风暴成因的粗颗粒灰岩、截切生物丘灰岩、再沉积(鲕)滩灰岩、丘状交错层理灰岩及颗粒泥晶灰岩、浊积灰岩等岩石类型进行了详细的分析,将北京西山丁家滩晚寒武世典型剖面作为详细研究对

象,首次发现云朵状构造、生物丘截切构造和各种风暴成因的复合叠积层序。金瞰^[11]对徐州大北望地区寒武系碳酸盐岩地层中的风暴岩及其特征的分析中,认为风暴岩不仅可以与正常水动力条件下的沉积岩共生,还可以与生物及生物化学作用引起的沉积岩共生,即风暴粗颗粒灰岩与聚环柱状藻叠层石灰岩沉积接触。

河南登封地区寒武系馒头组三段下部的碳酸盐岩风暴沉积与北京西山和徐州大北望地区有一定的相似性,所不同的是微生物成因的沉积构造与后生动物扰动构造共同出现在风暴沉积中。微生物成因的叠层石在华北地区中、新元古代的地层中非常繁盛,在寒武纪仍大量出现,在从寒武纪第二世到芙蓉世各个时代的地层中广泛分布,但发育厚度及类型明显不及元古宙。根据作者对豫西寒武纪叠层石等微生物成因构造与后生动物扰动构造的调查,当微生物成因构造大量出现时,后生动物扰动构造则很少保存;而当后生动物扰动构造大量发育时,微生物成因构造则很少见及。在有些层位,二者共存在一起或从微生物成因构造逐渐过渡为后生动物扰动构造。由此可见,叠层石等微生物成因构造与后生动物扰动构造存在耦合关系。研究区叠层石与垂直潜穴在风暴沉积中的交替出现也充分验证了这一点。叠层石出现在风暴间歇期的低能环境中,持续动荡的水动力条件会抑制其生存;而垂直潜穴则发育在风暴衰减期、反映低-中等能量交替的鲕粒灰岩中。环境水动力条件的高低对二者的发育具有明显的控制作用。因此,对河南登封地区寒武系馒头组三段下部风暴沉积及相关生物成因构造的分析将为研究华北寒武系碳酸盐岩风暴沉积及生物学响应提供重要的依据。

参考文献:

- [1] Sepkoski J J, Bambach R K, Droser M L. Secular changes in Phanerozoic event bedding and the biological overprint.[A]. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A (eds.), Cycles and Events in stratigraphy.[C]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991, 298-312.
- [2] Pemberton S G, Frey R W. Ichnology of storm influenced shallow marine sequence: Cardium Formation (Upper Cretaceous) at Seebe, Alberta [A]. In: Stott D F, Glass D J. The Mesozoic of Middle North America[C]. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1984, 9:281-304.

- [3] Vossler S M, Pemberton S G. *Skolithos* in the Upper Cretaceous Cardium Formation: an ichnofossil example of opportunistic ecology[J]. *Lethaia*, 1988, 21(3): 51–62.
- [4] Foellmi K B, Grimm K A. Doomed pioneers: Gravity flow deposition and bioturbation in marine oxygen-deficient environments[J]. *Geology*, 1990, 18(10): 69–72.
- [5] 王约, 龚一鸣. 黔南泥盆系的风暴遗迹相[J]. *岩相古地理*, 1997, 17(1): 39–44.
- [6] Pemberton S G, 周志澄, MacEacher J. 风暴沉积的遗迹学研究[J]. *沉积学报*, 2000, 18(4): 489–494.
- [7] 贾志海, 洪天求. 新元古代九里桥组中的风暴活动记录及生物学响应[J]. *中国科学技术大学学报*, 2005, 35(6): 889–898.
- [8] 周志澄, Willems H, 李越, 等. 保存完整的风暴沉积序列在山东省寒武系崮山组的发现及其理论和实际意义[J]. *古生物学报*, 2013, 52(1): 107–117.
- [9] 孟祥化, 乔秀夫, 葛铭. 华北古浅海碳酸盐风暴沉积和丁家滩相序模式[J]. *沉积学报*, 1986, 4(2): 1–18.
- [10] 郑秀才, 吴智勇. 冀东北柳江盆地风暴营力碳酸岩岩石类型[J]. *江汉石油学院学报*, 1993, 15(1): 102–103.
- [11] 金瞰崑. 徐州大北望寒武系地层中的风暴岩及其特征[J]. *岩相古地理*, 1997, 17(1): 34–38.
- [12] 谢庆宾, 朱筱敏. 北京西山地区雾迷山组风暴硅岩沉积序列[J]. *沉积学报*, 1997, 15(3): 37–40.
- [13] 白万备, 李建厚, 孙长彦. 碳酸盐风暴沉积研究现状与进展[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(4): 195–203.
- [14] 刘印环, 王建平, 张海清等. 河南的寒武系和奥陶系[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 1–206.
- [15] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎. 中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004, 1–200.
- [16] 杜远生. 广西北海涠洲岛第四纪湖光岩组的风暴岩[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2005, 30(1): 47–51.
- [17] Einsele G, Seilacher A. *Cyclic and Event Stratification* [M]. Berlin–Heidelberg, New York: Springer, 1982, 200–207.
- [18] 刘宝珺, 张继庆, 许效松. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩[J]. *地质学报*, 1986, 60(1): 55–67.
- [19] 马永生, 仲力. 风暴沉积、风暴岩的研究现状[J]. *地质科技情报*, 1990, 9(3): 9–14.
- [20] Dott R H. Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequences[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1982, 93(8): 663–683.
- [21] Duke W L. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes and intense winter storms[J]. *Sedimentology*, 1985, 34: 334–359.
- [22] 王英华, 张秀莲, 杨承运. 华北地台早古生代碳酸盐岩岩石学[M]. 北京: 地震出版社. 1988, 1–130.
- [23] 曹瑞骥, 袁训来. 叠层石[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006, 1–368.
- [24] 郭华, 杜远生, 黄俊华, 等. 河北平泉中元古界高于庄组生境型及古环境[J]. *古地理学报*, 2010, 12(3): 269–280.
- [25] 张哲, 杜远生, 毛治超, 等. 湘东南桂阳莲塘上泥盆系风暴岩特征及其古地理、古气候意义[J]. *沉积学报*, 2008, 26(3): 369–375.
- [26] 韩臻, 余素玉. 云南楚雄盆地西部浅水风暴岩与珊瑚条砾灰岩的成因[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 1989, 14(6): 593–597.

Storm Deposits and Biogenic Structures from the Carbonate of the Mantou Formation (Cambrian), Dengfeng Area, Western Henan

QI Yong-an YAO Qian DAI Ming-yue LI Da

(School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: A suit of carbonate storm deposits with a large amounts of biogenic structures are well preserved in the Mantou Formation (Cambrian), Dengfeng, western Henan Province. The storm sedimentary textures include physical textures of scoured bases, flat-pebble limestone beds and various cross-beddings. The biogenic textures include microbiogenic structures (stromatolites) and metazoan disturbed structures (vertical burrows). Three storm sedimentary successions are recognized in study area. The succession 1 consists of scoured bases, flat-pebble limestone beds and various cross-beddings, reflecting the in situ storm deposits formed in strong stage and weakening stage. The succession 2 is dominated by scoured bases, flat-pebble limestone beds and mudstone-marl, representing the proximal storm deposits formed in strong stage and quiet stage. The succession 3 is characterized by scoured bases, various cross-beddings and stromatolite limestone beds, displaying the distal storm deposits formed in weakening stage and quiet stage. The above storm deposits are the multi-phase incomplete storm records at different storm processes.

Key words: storm deposit; Cambrian; Mantou Formation; biogenic structures; carbonate