doi:10.3799/dqkx.2017.005

山东省中部上寒武统碳酸盐风暴沉积的综合模式

王家豪[1,2],王 华[2],曾劲彪[2],程 海[2]

1.中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074
2.中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

摘要:我国的碳酸盐风暴岩丰富多样,但前人对不同环境风暴岩的沉积作用、沉积序列和沉积模式的总结还不够完善.山东省中部上寒武统炒米店组碳酸盐风暴岩发育频繁,分布广,提供了全面分析风暴沉积作用的理想场所.基于该区详实的露头观察,可识别出冲刷面、渠模、丘状交错层理等典型的风暴沉积构造,以及砾屑灰岩、递变层理含砾砂屑灰岩—砂屑灰岩、纹层状粉—砂屑灰岩等风暴岩类型.根据砾屑颜色、磨圆度、排列方式、支撑结构、充填物等岩石学特征,研究区首要发育的砾屑灰岩可被细分为紧密堆积棱角状砾屑灰岩、基质支撑砾屑灰岩、砂屑支撑砾屑灰岩、水平—叠瓦状砾屑灰岩和放射状排列砾屑灰岩5种岩相类型,其分别归属于台前缓坡带原地—近源堆积、碎屑流、高密度—低密度浊流、风暴砾滩和风暴涡流沉积.对台前缓坡、台地边缘和开阔台地等不同环境的风暴沉积序列进行了归纳,建立了缓坡型碳酸盐台地风暴沉积的综合模式,并指出研究区频繁的风暴作用与全球气候变暖、海平面上升以及地震活动存在密切联系.研究表明较多台地边缘发育的大型渠模构造,其充填砾屑呈放射状排列,指示了渠模的风暴涡流成因.

关键词:风暴岩;碳酸盐岩;缓坡型台地;寒武系;地层学;沉积作用.
中图分类号:P5 **文章编号**:1000—2383(2017)01—0068—10 **收稿日期**:2016—06—20

Integrative Depositional Model for Carbonate Tempestites in Upper Cambrian, Central Shandong Province

Wang Jiahao[1,2], Wang Hua[2], Zeng Jinbiao[2], Cheng Hai[2]

1. *Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
2. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: Depositional processes, successions and models for various carbonate tempestites in different environments should be well documented in our country. The carbonate tempestites are frequently and widely developed in the Chaomidian Formation of the Upper Cambrian, central Shandong Province, providing an area favorable to comprehensively realize storm depositional processes. On the basis of outcrop observations in detail, typical storm sedimentary structures including scouring surface, gutter cast and hummocky cross-bedding, and tempestites including calcirudite, graded gravelly calcarenite, laminated calcisiltite and calcarenite were identified. Specially, according to petrologic features such as color, psephicity and arrangement mode of gravel and support fabric, the dominant calcirudites are classified as five sorts of lithofacies, including angular tightly-stacked calcirudite, matrix-supported calcirudite, sand-supported calcirudite, horizontal to imbricate calcirudite and radially-arranged calcirudite, which were attributed to autochthonous to near-sourced deposits at a fore-platform ramp, debris flow deposits, high-density to low-density turbidites, storm gravel beach deposits and storm vortex deposits respectively. Furthermore, storm depositional successes in the various environments of fore-platform ramp, platform margin and open platform were summarized, and an integrative depositional model for carbonate tempestites at the background of ramp platform was built up. Finally, the frequent tempestites were ascribed to warm climate, a sea-level rise and earthquakes. Significantly, many gutter casts occurred at the platform margin, and were commonly filled with radiate gravels indicative of storm vortex processes. Additionally, the

基金项目:国家重大专项大型油气田及煤层气开发子课题(No. 2016ZX05026-003-004).
作者简介:王家豪(1968—),副教授,博士,主要从事沉积—层序地层学科研和教学工作. ORCID: 0000-0003-1320-6852.
E-mail: cugwangjiahao@163.com

引用格式:王家豪,王华,曾劲彪,等,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.

integrative model is useful to illuminate various storm processes.

Key words: tempestite; carbonate; ramp platform; Cambrian; stratigraphy; sedimentation.

作为一种极端天气,现代风暴活动越来越频繁,其引起的巨大灾变事件是气象学家研究的重要课题(杨馥祯和吴胜安,2007);同时,现今风暴形成的气候、地理和构造背景对地史时期的风暴沉积作用具有良好的启示,因此也吸引了地质学家的关注. 风暴沉积和风暴岩的概念在 20 世纪 70 年代被提出(Kelling and Mullin, 1975; Kumar and Sanders, 1976),随后 Dott and Bourgeois(1982)、Aigner(1982)等研究了风暴岩的沉积特点,建立了风暴沉积的垂向序列. 前人大量的研究表明,我国的碳酸盐风暴岩在层位和分布上均十分广泛(宋金民等,2012),主要发育在浅海陆棚、台前缓坡和潮坪滨岸等不同的水深环境,并可划分为原地型—异地型、远岸型—近岸型、远源型—近源型、回流型—涡流型—搅动型等风暴岩类型(孟祥化等,1986; 金瞰崑,1997;胡明毅和贺萍,2002). 然而,受限于各自研究区风暴岩的规模较小和发育环境单一,前人对风暴岩的沉积作用、沉积序列和沉积模式的总结还不够完善,纷繁多样的风暴岩类型划分方案也有待统一.

风暴岩在华北地区上寒武统出现频率高,许多地区几乎整个剖面均由正常天气与风暴天气下的频繁交互序列所组成(孟祥化等,1986). 本文研究区山东省中部上寒武统炒米店组即是如此,该套地层内风暴岩发育频繁,类型多样,分布广泛,为本文提供了一个全面分析风暴沉积作用的理想场所. 本文基于对莱芜市柳条峪村(经纬度 117°42′27.5″E,36°25′59.2″N)、新泰市大寺山(经纬度 117°38′37.8″E,35°51′24.4″N)、新泰市汶南镇郭家庄(经纬度 117°44′10.2″E,35°46′45.0″N)、青州市张庄村(经纬度 118°20′48.0″E,36°41′46.1″N)等野外露头的详实观察(图 1),总结了不同环境下风暴沉积的岩相类型和垂向序列,最终建立了缓坡型台地背景下碳酸盐风暴沉积的综合模式.

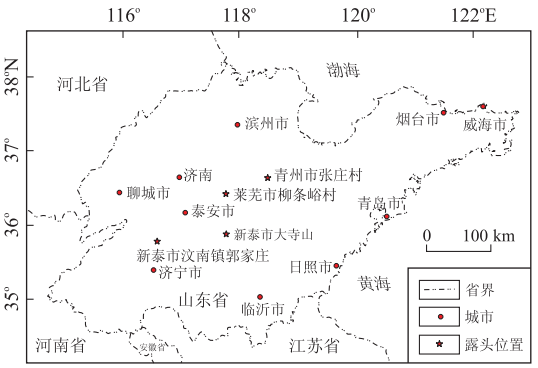

图 1　山东省中部风暴沉积露头位置

Fig. 1　Outcrops sites of carbonate tempestites in the central Shandong Province

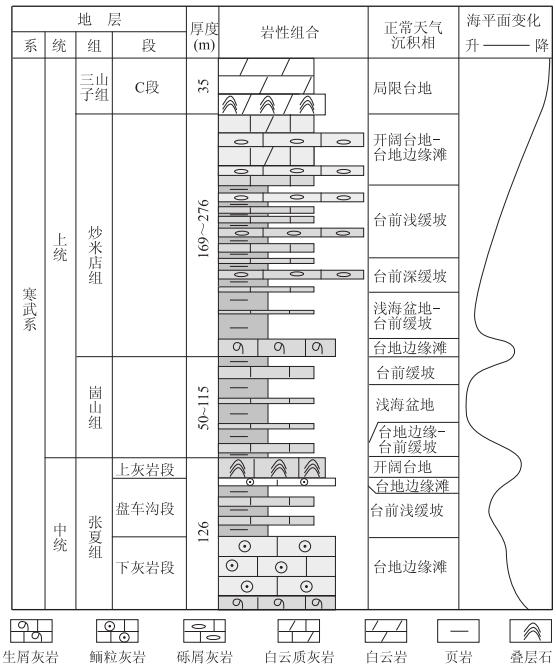

图 2　山东省中部中—上寒武统岩性组成及沉积相演化

Fig. 2　Lithologic associations and sedimentary facies evolutions in the Middle to Upper Cambrian, central Shandong Province

1　正常天气沉积相类型及演化

通过分析正常天气下的碳酸盐沉积相,人们可以获得同沉积期风暴岩发育的古地貌背景、沉积环境和物源信息,是建立风暴岩沉积模式的必要前提. 山东省在早古生代处于华北板块的东缘. 该时期,华北板块稳定沉降,总体呈现东深西浅的古地理格局,全面发育以浅海相为主的碳酸盐沉积(孟祥化等,1986;金瞰崑,1997;周志澄等,2013). 其中,鲁西地区属华北板块陆表海盆地,鲁东北地区处于被动大陆边缘. 撇开砾屑灰岩、递变层理含砾砂屑灰岩—砂屑灰岩、平行—丘状交错层理粉—砂屑灰岩等典型的风暴岩,依据岩性组成和沉积构造特征分析,山东省中部炒米店组及其下、上地层形成于缓坡型碳酸盐台地背景,发育了局限台地、开阔台地、台地边缘滩、台前浅缓坡、台前深缓坡和浅海盆地等沉积相类型(图 2).

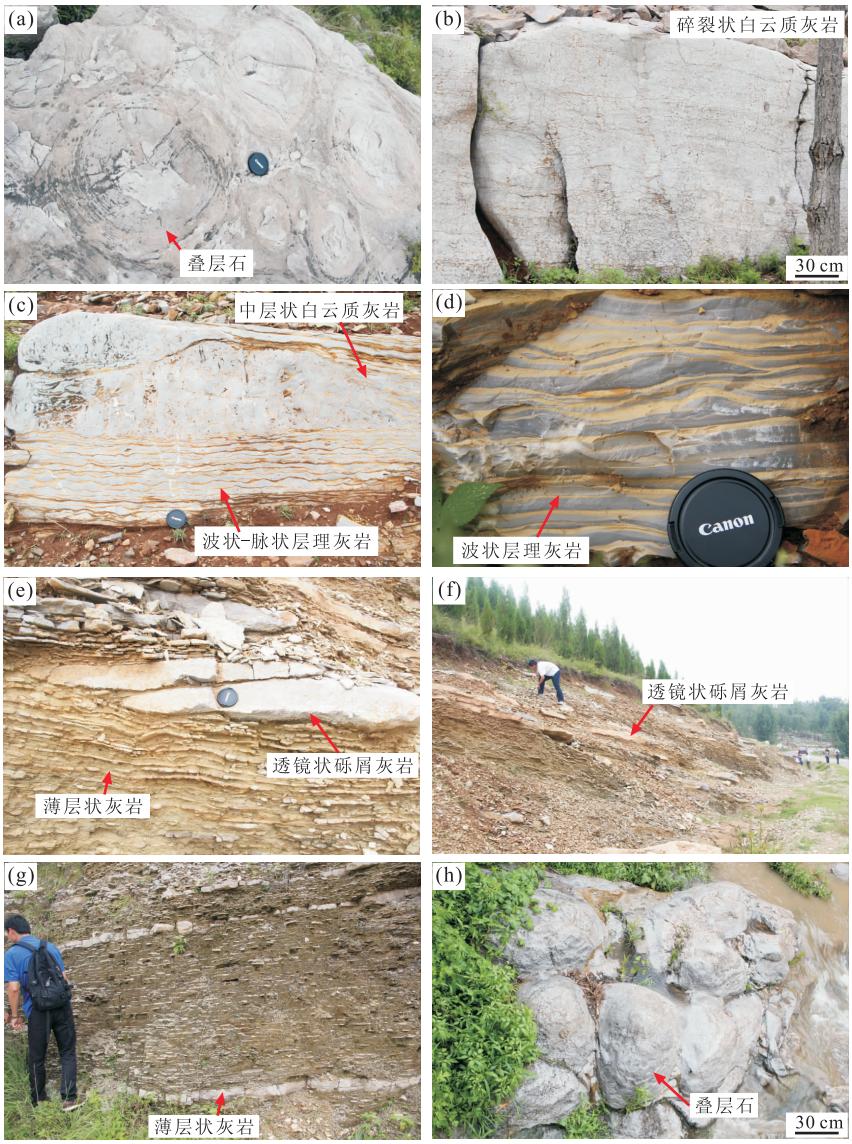

图 3 山东省中部中—上寒武统岩性组合露头

Fig. 3 Outcrop sceneries showing the lithologic associations in the Middle to the Upper Cambrian, central Shandong Province

a. 大寺山露头，三山子组 C 段底部灰白色窝卷状叠层石白云岩；b. 郭家庄露头，炒米店组上部灰白色厚层状白云质灰岩；c. 郭家庄露头，炒米店组上部灰色波状层理灰岩及灰白色中厚层状白云质灰岩；d. 张庄村露头，炒米店组上部灰色波状层理灰岩；e. 郭家庄露头，炒米店组中部页岩夹薄层灰岩及透镜状砾屑灰岩；f. 郭家庄露头，炒米店组下部页岩夹透镜状砾屑灰岩；g. 柳条峪村露头，崮山组灰色页岩夹少量链条状、薄层状灰岩；h. 柳条峪村露头，张夏组上灰岩段叠层石灰岩

各个层段沉积演化特征分述如下：(1)张夏组：厚约 126 m，自下而上可被划分为下灰岩段、盘车沟段和上灰岩段. 下灰岩段由底部少量生屑灰岩和上覆厚层鲕粒灰岩组成，鲕粒直径为 1.0～1.5 mm，最大达 2.4 mm，属台地边缘生屑—鲕粒滩相；盘车沟段由灰色页岩夹透镜状、薄层状灰岩组成，属台前浅缓坡相. 上灰岩段以灰色叠层石灰岩为标志，叠层石直径为 40～80 cm(图 3h)，属开阔台地相. 总体上，该时期充分显示了缓坡型碳酸盐台地的沉积特点，并表现为一个向上变深—变浅的沉积序列；(2)崮山组：厚为 50～115 m，与下伏张夏组整合接触，由深灰色页岩夹少量链条状、薄层状灰岩组成(图 3g)，常见三叶虫化石(周志澄等，2013)，属台前缓坡—浅海盆地相，指示海平面上升，也是研究区寒武纪最大的一次海侵；(3)炒米店组：厚为 169～280 m，与下伏崮山组整合接触. 底部主要由中厚层状砂屑—生物碎屑灰岩组成，属台地边缘砂屑—生屑滩相；下部由浅海盆地相页岩组成(图 3f)；中部由页岩夹薄层灰岩(图 3e)、向上渐变为灰色脉状—波状层理灰岩夹薄层页岩组成(图 3c，3d)，属台前深缓坡—浅缓

坡相;上部由浅灰色中厚层状砂屑灰岩、少量生屑灰岩及白云质灰岩组成(图 3b),属台地边缘生屑—砂屑滩相至开阔台地相;(4)三山子组 C 段:厚约 35 m,与下伏炒米店组整合接触,由下部灰白色窝卷状叠层石白云岩(图 3a)和上部灰白色中厚—厚层状细晶白云岩组成,上部含较多燧石结核,属局限台地相. 总体上,从炒米店组至三山子组 C 段为一个完整的向上变深、再变浅的沉积序列.

2　风暴沉积构造及岩相类型

砾屑灰岩在研究区频繁产出(>100 层),是首要发育的风暴岩类型. 此外,研究区还发育渠模、丘状交错层理等指示意义的风暴沉积构造(Dott and Bourgeois, 1982;孟祥化等,1986;杜远生,2005;张哲等,2008). 以渠模和砾屑灰岩为重点,对研究区风暴沉积构造及岩相类型分述如下.

2.1　侵蚀—冲刷构造

侵蚀—冲刷构造包括冲刷面和渠模 2 类. 冲刷面是一种截切下伏岩层、呈波状起伏的面状构造,普遍发育于砾屑灰岩的底部,指示为风暴高峰阶段风暴浪或减弱阶段风暴回流成因. 风暴作用导致浪基面降低,从而对早期沉积侵蚀、冲刷、撕裂和再沉积,形成与下伏正常天气沉积之间的突变界面——风暴浪基面(图 4a).

渠模呈内壁光滑、对称或不对称的 U 型、W 型或不规则的宽槽状,内部充填粉—砂屑灰岩、砾屑灰岩. 结合围岩的沉积相类型,渠模构造发育在台前浅缓坡至开阔台地环境. 其中,发育于台前浅缓坡的渠模规模较小,宽为 3～6 cm,深为 2～4 cm,多为粉屑—砂屑充填(图 4b,4c);发育在台缘砾滩(图 4e,4f)至开阔台地环境(图 4d)的渠模规模大,宽为 15～50 cm,深为 15～30 cm,形状不够规则,砾屑充填. 发育在台缘砾滩环境的渠模数量多,但容易被忽略,其充填砾屑的颜色、大小和排列方式以及基质颜色与砾滩相的砾屑灰岩存在明显差异,显示了渠模的侵蚀切割特征(图 4e,4f).

渠模构造由风暴气流摩擦海水、形成强大的定

图 4　冲刷面和渠模构造

Fig. 4　Sedimentary structures of scouring surface and gutter cast

a. 大寺山露头,冲刷面、砾屑灰岩和丘状交错层理砂屑灰岩构成的垂向序列;b. 张家庄露头,砾屑灰岩、薄层状灰岩及渠模构造;c. 张庄村露头,正常天气灰色薄层状灰岩及渠模、纹层状砂屑灰岩;d. 郭家庄露头,灰白色碎裂状白云质灰岩及渠模构造;e. 郭家庄露头,渠模及充填砾屑灰岩、叠瓦状灰岩;f. 郭家庄露头,水平—叠瓦状砾屑灰岩及渠模构造. 红色点线和红色箭头指示渠模构造,向上的三角形示意单个风暴沉积序列

向水流或涡流在海底旋切早期沉积物形成(Pérez-López, 2001;杜远生,2005). 风暴气流或飓风俗称龙卷风,其持续的时间短暂,最长不超过数小时,它的出现常常伴生一个或数个漏斗状云柱,所产生的强大提升力在陆地能轻易把大树连根拔起,在海面上则能吸水上升形成高达数米或数十米的水柱、与云层相接,俗称"龙吸水". 研究区渠模内充填的砾屑普遍呈高角度或放射状的异常排列方式,正是风暴涡流提升作用的体现、是渠模受控于风暴涡流的有力证据.

2.2 砾屑灰岩的岩相类型

砾屑灰岩在台前缓坡呈宽为 50～100 cm、厚约为 10 cm 的透镜状(图 3e,3f);在台地边缘一开阔台地则以厚为 10～30 cm 的薄层状产出. 灰岩砾屑以长为 2～5 cm、宽为 0.4～1.0 cm 的长条状为主,由正常天气沉积的碳酸盐岩遭受风暴流冲刷和风暴浪的震荡作用而发生撕裂、破碎形成,属风暴同生或准同生成因. 根据砾屑的颜色、磨圆度、排列方式、充填物和支撑结构等岩石学特征的差异,并结合围岩的沉积相类型,砾屑灰岩可被划分为不同环境和成因机制的多种岩相类型.

砾屑的颜色:包括灰色、灰白色和褐红色 3 种,分别代表了砾屑的不同来源. 灰色砾屑来源于台前缓坡带,该部位正常天气沉积的薄层灰岩与泥岩的互层组合极易遭受风暴浪、风暴潮的挤压而发生破碎. 灰白色砾屑成分为白云质灰岩,来源于开阔台地. 褐红色指示了砾屑遭受暴露氧化的历史,随着暴露时间增加,砾屑出现薄的氧化圈直至整体呈褐红色. 研究区常见灰白色与具氧化圈的混合砾屑,表明砾屑历经了风暴的多次改造和混合.

砾屑的磨圆度:反映了砾屑受波浪、潮汐改造的程度. 次圆状砾屑记录了波浪、潮汐的长期改造作用,指示为台地边缘砾滩来源. 棱角状砾屑则指示为遭受改造程度低的原地或近源堆积(孟祥化等,1986).

砾屑的排列方式:包括杂乱、水平一叠瓦状以及放射状 3 种. 杂乱排列的砾屑长轴无优势指向. 叠瓦状与平行状排列过渡,砾屑扁平面倾斜角度<30°,以单一倾斜方向为主;局部见倾向相反的砾屑层交替出现——双向叠瓦状排列,类似于双向交错层理,指示风暴潮流作用. 放射状排列表现为砾屑扁平面倾角大甚至直立,局部呈向上撒开的"菊花状",是风暴涡流作用的标志.

充填物和支撑结构:充填物包括褐红色灰泥和灰色灰泥 2 种,分别代表了暴露环境(灰泥坪)和水下灰泥来源. 支撑结构包括基质支撑、砂屑支撑和砾屑支撑 3 种样式. 基质支撑、砂屑支撑的砾屑灰岩中砾屑呈漂浮状,分别指示为碎屑流和高密度浊流沉积.

综合以上特征,研究区砾屑灰岩可被区分为 5 种岩相类型.

(1)紧密堆积棱角状砾屑灰岩相,分布在炒米店组中部. 砾屑呈灰色,棱角状,大小不一,堆积紧密,颗粒支撑;基质呈灰色,含量低,仅少量充填砾屑缝隙(图 5a,5b). 围岩为灰色薄层灰岩夹泥岩. 由此可

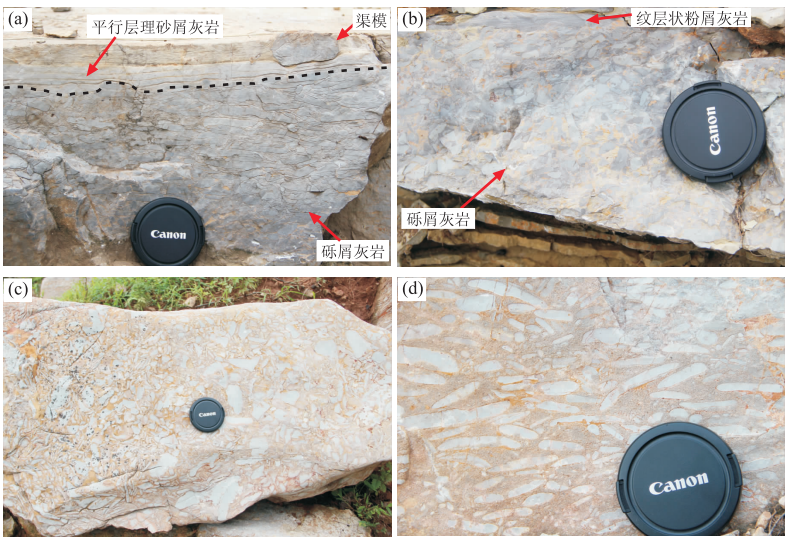

图 5 砾屑灰岩岩相类型

Fig. 5 Lithofacies types of calcirudite

a. 张庄村露头,紧密堆积棱角状砾屑灰岩相以及平行层理砂屑灰岩、渠模;b. 郭家庄露头,紧密堆积棱角状砾屑灰岩相及纹层粉屑灰岩;c. 张庄村露头,基质支撑砾屑灰岩相;d. 大寺山露头,砂屑支撑砾屑灰岩相

图 6　砾屑灰岩岩相类型

Fig. 6　Lithofacies types of calcirudite

a,b. 大寺山露头,冲刷面、砾屑灰岩、递变砂屑灰岩及纹层状砂屑灰岩构成的风暴沉积序列;c,d. 张庄村露头,叠瓦状砾屑灰岩;g,h. 张庄村露头,反射状、水平—叠瓦状砾屑灰岩;e,f. 郭家庄露头,灰色薄层灰岩夹放射状砾屑灰岩

得,该砾岩相形成于台地缓坡带,直接由该相带正常天气沉积的碳酸盐岩经风暴浪挤压破碎、原地或短距离搬运沉积形成.

(2)基质支撑砾屑灰岩相,分布在炒米店组上部.砾屑包括灰白色和具薄氧化圈的混合砾屑,次棱角状—棱角状为主,分选极差,杂乱排列,褐红色基质支撑(图 5c).由此可得,砾屑和基质源自开阔台地和时常暴露的潮坪,由风暴回流搬运至台前斜坡的碎屑流沉积形成(孟祥化等,1986;李壮福和郭英海,2000).

(3)砂屑支撑砾屑灰岩相,分布在炒米店组上部.砾屑磨圆好,砂屑支撑(图 5d).反映台地边缘砂屑滩、砾屑滩供源,由风暴回流搬运至台前缓坡、形成的高密度浊流沉积.

(4)水平—叠瓦状砾屑灰岩相,发育在炒米店组上部,垂向上往往多期反复叠置,形成较厚的砾屑灰岩.该岩相以砾屑支撑、砾屑呈平行或叠瓦状排列为特色,为风暴浪、风暴潮流在台地边缘形成的砾滩堆积(孟祥化等,1986;张国栋等,1987;金瞰崑,1997).可被进一步区分为滩后、滩主体、滩前 3 个部分.其中,滩后砾屑为灰白色与具氧化圈的混合砾屑,基质呈褐灰色,砾屑呈次圆状,水平排列为主;滩主体同样为混合型砾屑,磨圆最好,呈圆—次圆状,砾屑排列较整齐,局部地见双向叠瓦状构造(图 6a,6b),该部位砾屑受正常天气波浪和风暴浪的长期磨蚀、搅动和

混合,在正常天气时高出海平面、暴露氧化形成氧化圈;滩前砾屑以灰色为主,磨圆相对差,分布于正常天气台前浅缓坡相,围岩为灰岩夹薄层页岩(图 6c,6d).

(5)放射状排列砾屑灰岩相,以砾屑呈放射状排列为特色,是风暴涡流作用的标志;可被区分为混合砾屑和灰色砾屑 2 种.其中,混合砾屑常常嵌入在叠瓦状砾屑灰岩内部,与叠瓦状砾屑灰岩在砾屑大小、颜色和排列方式存在明显差异,由发育在台缘砾滩的渠模充填形成(图 4e,4f,图 6e,6f).灰色砾屑源自台前缓坡,围岩为灰岩夹薄层页岩,为台前缓坡带风暴涡流成因(图 6g,6h).

2.3 递变层理含砾砂屑—砂屑灰岩相

该岩相类型在台前缓坡和开阔台地带少量发育,普遍较薄,厚为 2~20 cm.含砾砂屑灰岩中砾屑常具氧化圈,磨圆好,向上逐渐减小、减少至砂屑灰岩,显示粗尾递变层理,指示其为高密度浊流至低密度浊流沉积(图 4a,图 7a,7b).

2.4 纹层状粉—砂屑灰岩相

纹层状粉—砂屑灰岩在研究区少量发育,厚为 3~15 cm,具波状交错层理、平行层理(图 5a,5b,图 6a)或丘状交错层理(图 6g,6h,图 7c),常常覆盖在砾屑灰岩、含砾砂屑灰岩或渠模之上,体现与风暴作用的成因联系.其中,丘状交错层理以纹层向脊部发散增厚为特征,丘高为 2~4 cm,宽可达 60 cm.纹层状粉—砂屑灰岩被普遍认为是在风暴衰落期由风暴回流搬运至台前斜坡沉积形成,本次研究在开阔台地也发现了该岩相类型(图 7c).

3 风暴沉积序列和沉积模式

前人研究建立了理想的碳酸盐风暴沉积层序,自下而上由冲刷底面、渠模及砾屑段、递变段、平行纹层段、丘状纹层段、水平层理泥岩—泥晶灰岩段组成,总体为一个正旋回序列(Aigner, 1982;宋金民等,2012).本次研究表明,研究区风暴沉积序列在不同环境存在较大差异.(1)在台前缓坡带,风暴沉积序列常见自下而上由底部冲刷面→砾屑灰岩(紧密堆积砾屑灰岩相、基质支撑混合砾屑灰岩相或砂屑支撑砾屑灰岩相)→递变含砾砂屑—砂屑灰岩相→纹层状粉—砂屑灰岩相构成(图 4a,图 5a,5b,图 6a,6g,6h).此外,还存在由小型渠模充填、上覆纹层状粉—砂屑灰岩相构成的序列(图 4b, 4c);由单独的砾屑灰岩构成的序列(图 4b).(2)在台缘砾滩相,常见由水平—叠瓦状砾屑灰岩相和渠模充填的放射状砾屑灰岩相构成的序列.(3)在滩后潮坪—开阔台地相带,常见砾屑向上减少的水平砾屑灰岩相构成的序列,呈多期叠置,之间以冲刷面分隔(图 7d),局部上覆递变含砾砂屑—砂屑灰岩相→纹层状砂屑灰岩相(图 7a,7c),笔者根据前人相关研究结果推测其为风暴浪冲越台缘滩,在向陆一侧的滩后潮坪—开

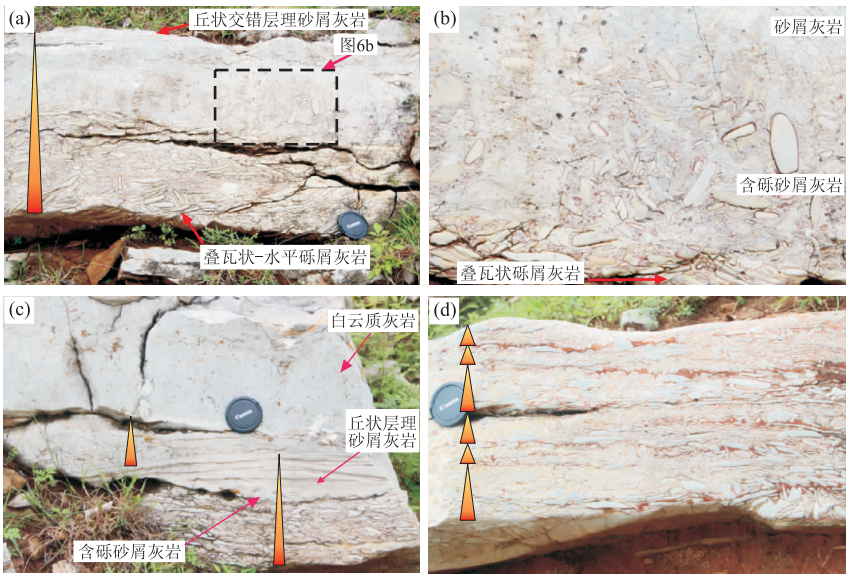

图 7 递变灰岩、纹层状灰岩及风暴沉积序列

Fig. 7 Graded calcarenite, laminated calcarenite and vertical successions of storm deposits

a,b.郭家庄剖面,水平—叠瓦状砾屑灰岩、含砾砂屑灰岩及丘状交错层理砂屑灰岩构成的风暴沉积序列;c.郭家庄剖面,砾屑灰岩、含砾砂屑灰岩丘状交错层理砂屑灰岩构成的风暴沉积序列;d.郭家庄剖面,多期叠置的水平砾屑灰岩

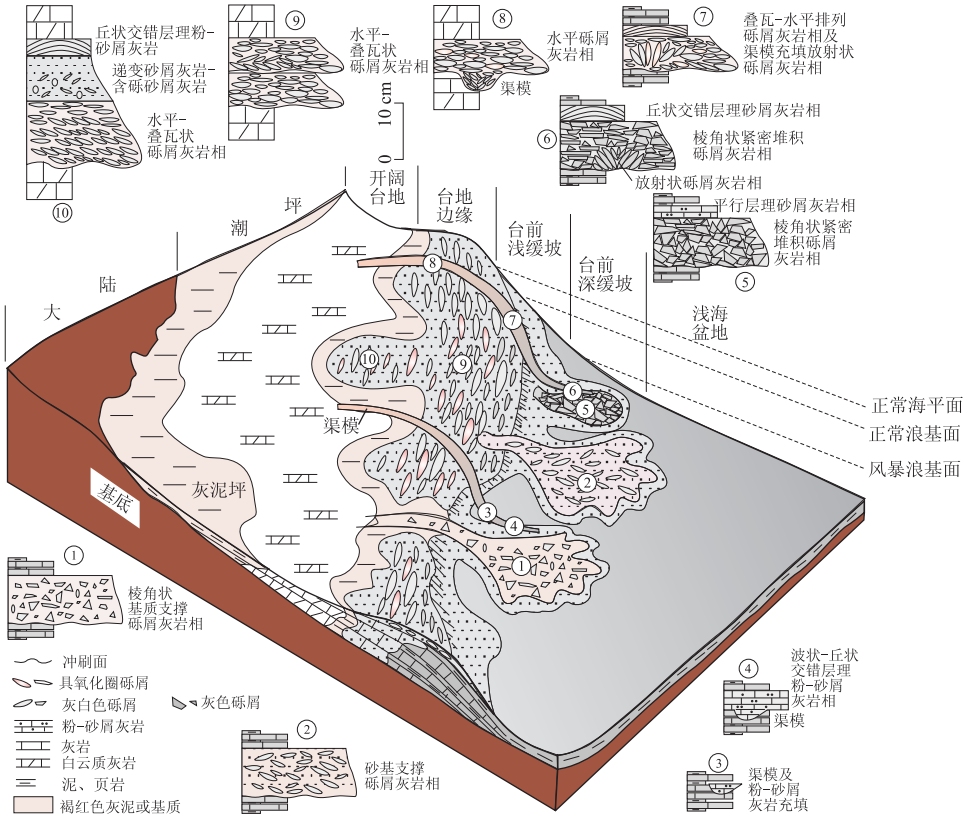

图 8　缓坡型台地碳酸盐风暴沉积的综合模式和典型沉积序列

Fig. 8　Integrative model for carbonate storm deposits and typical depositional successions at a ramp platform

阔台地堆积形成(李壮福和郭英海,2000;胡明毅和贺萍,2002). (4)在前人建立的风暴沉积序列中,渠模一般出现在序列的底部. 但本次野外观察表明,渠模常常孤立出现在正常天气沉积层内,而砾屑灰岩底部也并不一定出现渠模(图 4c,4d).

综合以上研究,研究区风暴岩发育于台前浅—深缓坡、台地边缘、开阔台地等不同环境,包括风暴浪—潮、风暴回流和风暴涡流等水动力机制,形成碎屑流、高密度—低密度浊流、风暴砾滩和渠模充填等风暴沉积(李壮福和郭英海,2000),可归纳出 10 种典型沉积序列. 由此,建立研究区风暴沉积的综合模式如图 8 所示.

4　风暴作用的成因

由于风暴作用限制在 5°～45°N 纬度范围内,因此古代风暴岩的识别能提供地史时期古气候、古板块位置以及古地理演化等信息(杜远生,2005;张哲等,2008). 华北板块在早古生代始终处于赤道两侧的低纬度带,即在热带—亚热带气候带内飘移(孟祥化等,1986),风暴岩在炒米店组内频繁发育且分布广泛,但在其他层段仅少量出现,其成因值得思考. 基于本次研究,笔者认为研究区风暴作用与全球气候变暖、海平面上升以及地震活动存在联系.

气候变暖、气温升高所带来的热能,能提供给空气和海洋巨大的动能,从而造成台风、飓风等极端天气的频繁发生(杨馥祯和吴胜安,2007). 研究区从张夏组至三山子组 C 段沉积时期,总体可识别出 1 个长期、3 个中期的海平面上升至下降旋回,崮山组和炒米店组早期海平面位置较高(图 2),指示全球气候变暖和极地冰川消融. 无独有偶,对应于寒武纪海平面上升最大的时期,研究区崮山组也发现了少量风暴岩(周志澄等,2013).

笔者在炒米店组上部发现了少量碎裂状白云质灰岩,其中可见密集不规则的裂纹和少量漏斗状裂缝(图 3b,图 4d,图 9). 裂纹中充填褐红色灰泥(图 9c,9d);漏斗状裂缝近于垂直,延伸距离大于1.2 m,下部为白云质灰岩碎石充填,上部被风暴砾屑充填(图 9a,9b),反映微裂纹和漏斗状裂缝均属准同生构造,前人普遍解释其为地震成因——震裂岩(乔秀夫等,1997;黄宏伟等,2007;戴朝成等,2009). 由此可得,炒米店组风暴岩的频繁发育还与地震产生的

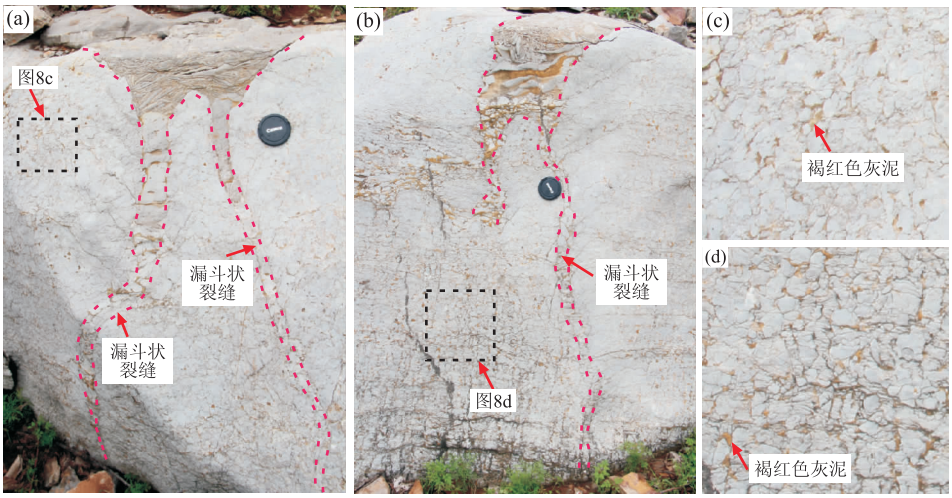

图 9 炒米店组上部碎裂状白云质灰岩及漏斗状裂缝

Fig. 9 Funnel-shaped cracks in fragmental dolomitized limestone of the upper Chaomidian Formation

照片来自郭家庄露头

海啸有关(金瞰 崑,1997;杜远生和韩欣,2000a,2000b).总体看来,研究区炒米店组时期地质背景与当今地球气候变暖、海平面上升、频发的地震活动等存在诸多相似之处.

5 结论及意义

(1)山东省中部炒米店组发育冲刷面和渠模 2 种风暴侵蚀—冲刷构造.其中,渠模构造在台前缓坡、风暴砾滩、开阔台地等不同环境出现,并表现为不同规模和充填特征.

(2)根据岩石学特征,研究区砾屑灰岩可被划分为紧密堆积棱角状砾屑灰岩、基质支撑砾屑灰岩、砂屑支撑砾屑灰岩、水平—叠瓦状砾屑灰岩和放射状排列砾屑灰岩 5 种岩相类型,分别归属于台前缓坡带原地—近源堆积、碎屑流、高密度—低密度浊流、风暴砾滩和风暴涡流这 5 种风暴沉积.

(3)研究区频繁发育的风暴沉积与同沉积期全球气候变暖、海平面上升以及地震活动存在紧密联系.

有意义的是,本次研究识别了较多发育于台地边缘砾滩相中的渠模构造,并依据充填砾屑的放射状排列特征,厘定了渠模的风暴涡流成因.另外,得益于研究区丰富多样的风暴岩,本文较全面地分析了台前缓坡、台地边缘和开阔台地等不同环境的风暴沉积作用,建立了综合的风暴沉积模式,对风暴岩研究具有借鉴价值.

References

Aigner, T., 1982. Calcareous Tempestites: Storm-Dominated Stratification in Upper Muschelkalk Limestones. In: Einsele, G., Seilacher, A., eds., Cyclic and Event Stratification. Springer, New York, 180—198.

Dai, C. C., Zheng, R. C., Zhu, R. K., et al., 2009. The Discovery and Significance of Seismites from Xujiahe Formation in Sichuan Analogous Foreland Basin. *Advances in Earth Science*, 24(2): 172—180 (in Chinese with English abstract).

Dott, R. H. J., Bourgeois, J., 1982. Hummocky Stratification: Significance of Its Variable Bedding Sequences. *Geological Society of America Bulletin*, 93(8): 663—680. doi: 10.1130/0016—7606(1982)93

Du, Y. S., 2005. Tempestite in the Quaternary Huguangyan Formation in Weizhou Island, Beihai City, Guangxi. *Earth Science*, 30(1): 47—51 (in Chinese with English abstract).

Du, Y. S., Han, X., 2000a. Tsunami and Tsunamites. *Geological Science and Technology Information*, 19(1): 19—22 (in Chinese with English abstract).

Du, Y. S., Han, X., 2000b. Seismo-Deposition and Seismites. *Advances in Earth Science*, 15(4): 389—394 (in Chinese with English abstract).

Huang, H. W., Du, Y. S., Huang, Z. Q., et al., 2007. Paleozoic Seismites in the Nandan-Hechi Basin, Guangxi and Its Tectonic Significance. *Geological Review*, 53(5): 592—599 (in Chinese with English abstract).

Hu, M. Y., He, P., 2002. The Study of Tidal Storm Deposits and Its Research Significance. *Advance in Earth Sciences*, 17(3): 391—395 (in Chinese with English abstract).

Jin, K. K., 1997. Tempestites in the Cambrian Strata in Da-

beiwang, Xuzhou, Jiangsu. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 17(1): 34－38 (in Chinese with English abstract).

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. doi: 10.1016/0037－0738(75)90019－6

Kumar, N., Sanders, J. E., 1976. Characteristics of Shoreface Storm Deposits: Modern and Ancient Examples. *Journal of Sedimentary Research*, 46(1): 145－162. doi: 10.1306/212f6edd－2b24－11d7－8648000102c1865d

Li, Z. F., Guo, Y. H., 2000. Storm Deposits in the Sinian Jiayuan Formation of Xuzhou Area. *Journal of Palaeogeography*, 2(2): 19－27 (in Chinese with English abstract).

Meng, X. H., Qiao, X. F., Ge, M., 1986. Study on Ancient Shallow Sea Carbonate Strom Deposits (Tempesite) in North China and Dingjiatan Model of Facies and Sequences. *Acta Sedimentologica Sinica*, 4(2): 1－18 (in Chinese with English abstract).

Pérez-López, A., 2001. Significance of Pot and Gutter Casts in a Middle Triassic Carbonate Platform, Betic Cordillera, Southern Spain. *Sedimentology*, 48(6): 1371－1389. doi: 10.1046/j.1365－3091.2001.00425.x

Qiao, X. F., Li, H. B., Gao, L. Z., 1997. Sinian-Early Paleozoic Seismic Rhythms on the North China Platform. *Earth Science Frontiers*, 4(3－4): 155－160 (in Chinese with English abstract).

Song, J. M., Yang, D., Li, P. W., et al., 2012. Development Characteristics and Geological Significance of Carbonate Tempestites in China. *Geoscience*, 26(3): 589－600 (in Chinese with English abstract).

Yang, F. Z., Wu, S. A., 2007. Change of Extreme Weather Events in Hainan Island for Last 39 Years. *Meteorological Monthly*, 33(3): 107－113 (in Chinese with English abstract).

Zhang, G. D., Wang, Y. Y., Zhu, J. C., et al., 1987. Modern Coastal Storm Deposits of Putuo Island and Zhujiajian Island, Zhoushan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(2): 17－28, 146－147 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z., Du, Y. S., Mao, Z. C., et al., 2008. The Upper Devonian Tempestites from Liantang, Guiyang, Southeastern Hunan Province and Its Palaeogeographic and Palaeoclimatic Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(3): 369－375 (in Chinese with English abstract).

Zhou, Z. C., Willems, H., Li, Y., et al., 2013. Discovery of a Well-Preserved Carbonate Tempestite Sequence from the Cambrian Gushan Formation of the Shandong Province and It's Theoretical and Practical Significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 52(1): 107－117 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

戴朝成,郑荣才,朱如凯,等,2009. 四川类前陆盆地须家河组震积岩的发现及其研究意义. 地球科学进展,24(2): 172－180.

杜远生,2005. 广西北海涠洲岛第四纪湖光岩组的风暴岩. 地球科学,30(1): 47－51.

杜远生,韩欣,2000a. 论海啸作用与海啸岩. 地质科技情报,19(1): 19－22.

杜远生,韩欣,2000b. 论震积作用和震积岩. 地球科学进展,15(4): 389－394.

黄宏伟,杜远生,黄志强,等,2007. 广西丹池盆地晚古生代震积岩及其构造意义. 地质论评,53(5): 592－599.

胡明毅,贺萍,2002. 潮坪风暴沉积特征及其研究意义. 地球科学进展,17(3): 391－395.

金畋㠭,1997. 徐州大北望寒武系地层中的风暴岩及其特征. 岩相古地理,17(1): 34－38.

李壮福,郭英海,2000. 徐州地区震旦系贾园组的风暴沉积. 古地理学报,2(2): 19－27.

孟祥化,乔秀夫,葛铭,1986. 华北古浅海碳酸盐风暴沉积和丁家滩相序模式. 沉积学报,4(2): 1－18.

乔秀夫,李海兵,高林志,1997. 华北地台震旦纪－早古生代地震节律. 地学前缘,4(3－4): 155－160.

宋金民,杨迪,李朋威,等,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.

杨馥祯,吴胜安,2007. 近 39 年海南岛极端天气事件频率变化. 气象,33(3): 107－113.

张国栋,王益友,朱静昌,等,1987. 现代滨岸风暴沉积—以舟山普陀岛、朱家尖岛为例. 沉积学报,5(2): 17－28, 146－147.

张哲,杜远生,毛治超,等,2008. 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. 沉积学报,26(3): 369－375.

周志澄,Willems, H.,李越,等,2013. 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. 古生物学报,52(1): 107－117.