



山东杨庄地区寒武系风暴沉积特征及沉积模式

黄迟强, 陈世悦, 赫庆庆, 李强, 马培领, 韩长伟, 陈湘飞, 刘军

引用本文:

黄迟强, 陈世悦, 赫庆庆, 李强, 马培领, 韩长伟, 陈湘飞, 刘军. 山东杨庄地区寒武系风暴沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报, 2022, 40(4): 1073-1082.

HUANG ChiQiang, CHEN ShiYue, HE QingQing, LI Qiang, MA PeiLing, HAN ChangWei, CHEN XiangFei, LIU Jun. Sedimentary Characteristics and Model of Cambrian Storm Deposits in the Yangzhuang Area, Shandong Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 1073-1082.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

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

西昌盆地新基姑地区大箐组风暴岩特征及其地质意义

Characteristics and Geological Significance of Tempestites in the Daqing Formation, Xinjigu Area, Xichang Basin

沉积学报. 2021, 39(4): 908-918 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2020.034>

峡东地区震旦纪最早期风暴沉积记录及其地质意义

Early Sinian Storm Deposits in the Eastern Yangtze Gorges Area and their Geological Significance

沉积学报. 2020, 38(1): 182-195 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.003>

欧龙布鲁克地块古生代风暴沉积特征及地质意义

Sedimentary Characteristics and Geological Significance of Storm Deposit of Paleozoic in the Olongbluk Block

沉积学报. 2017, 35(1): 35-45 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.004>

黔西北丁台地区下寒武统清虚洞组风暴沉积的发现及其意义

Discovery and Significance of the Storm Deposit within the Lower Cambrian Qingxudong Formation in the Dingtai Area, Northwestern Guizhou

沉积学报. 2016, 34(3): 478-486 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.03.005>

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

Characteristics of Tempestite of Lower Ordovician Tongzi Formation, in the Longshan Area, Northwestern Hunan and Its Geological Significance

沉积学报. 2016, 34(5): 830-841 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.05.003>

山东杨庄地区寒武系风暴沉积特征及沉积模式

黄迟强¹, 陈世悦², 赫庆庆³, 李强¹, 马培领¹, 韩长伟¹, 陈湘飞¹, 刘军¹

1. 中国石油东方地球物理公司研究院库尔勒分院, 新疆库尔勒 841000

2. 中国石油大学(华东), 山东青岛 266580

3. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000

摘要 山东杨庄地区寒武系发育大量风暴沉积及相关沉积构造。以沉积学理论为指导,通过详细的野外踏勘,结合室内资料综合分析,识别研究区典型的风暴沉积构造并划分风暴沉积序列,并建立风暴沉积模式。结果表明:杨庄地区发育风暴侵蚀构造、砾屑段、丘状构造及粒序层理4种沉积构造。根据风暴岩垂向组合特征及沉积构造差异,进一步划分出三种风暴沉积序列,分别对应潮坪、台缘滩台地和前缘斜坡。在风暴沉积垂向演化研究的基础上,建立了研究区风暴沉积模式。风暴岩的发现指示寒武纪杨庄地区位于低纬度热带区域,对早古生代华北东部古环境及古地理恢复具有重要意义。

关键词 杨庄地区;寒武系;风暴沉积;沉积模式

第一作者简介 黄迟强,男,1995年出生,硕士研究生,助理工程师,沉积学及层序地层学,E-mail: 894092984@qq.com

中图分类号 P534.41 **文献标志码** A

0 引言

风暴沉积,是由风暴作用影响海水进而影响海底沉积物引发的一种特殊的事件沉积。风暴岩是指在风暴影响下在海洋和盆地中形成的沉积岩。风暴沉积、风暴岩的概念自20世纪70年代被提出^[1],之后学者针对风暴岩的沉积特征、垂向序列进行了系统研究,建立了经典的风暴沉积序列^[2-3]。自20世纪80年代,刘宝珺等^[4]率先将“tempestite”翻译为“风暴岩”并引入国内,针对风暴沉积的研究迅速展开并掀起热潮。经过近35年研究发展,对其沉积构造、沉积演化取得了一系列认识^[5-6]。风暴沉积作为特殊的沉积类型,不仅对古气候变化、古地理分析具有指示作用^[7-9],而且可作为区域地层对比的标志^[10],同时前人也注意到了风暴与成矿作用之间存在一定联系^[11-13]。华北地区早古生代风暴作用频发,风暴岩主要分布在中南和东北一带^[14],众多学者在北京西山丁家滩地区^[5]、山东新泰^[15]、徐州大北望^[16]、豫北及豫西地区^[17-18]均发现报道了寒武系风暴沉积,但是关于山东杨庄地区却未见相关文献报道。笔者通过野外剖面考察,在山东杨庄地区寒武系发现了多层位广泛分布的风暴岩,识别了典型的风暴沉积构造,厘定了沉积

序列,并结合区域地质背景,建立了研究区风暴演化模式。该区寒武系风暴沉积的发现,补充了华北地区风暴沉积研究材料,对早古生代古环境、古气候、古地理恢复具有重要意义。

1 地质背景

杨庄地区剖面位于山东省临沂市沂水县,马站镇至富官庄之间,距杨庄镇大约2 km(图1)。沂沭断裂四条主干断裂活动形成“两堑夹一垒”地形,寒武系剖面位于其中地垒构造单元,地层出露连续。震旦系沉积后,该区经受了近亿年的暴露剥蚀,于寒武纪第二世开始沉降接受海侵,发育一套碎屑岩—碳酸盐岩混合沉积建造^[19-22]。

研究区属于华北地层区鲁西地层分区,寒武系自下而上依次划分为李官组、朱砂洞组、馒头组、张夏组、崮山组、炒米店组及三山子组C段^[23-24],整体厚度大约710 m。寒武纪早期古沂沭海峡再现,并向鲁西地区海侵^[25],沉积地层李官组,平行不整合于震旦系黄绿色白云岩之上^[25],岩性为砂砾岩,属于滨岸相^[26]。朱砂洞组厚约80 m,下段以中厚层灰色泥晶灰岩夹核形石灰岩为主,中段见中层白云质灰岩及

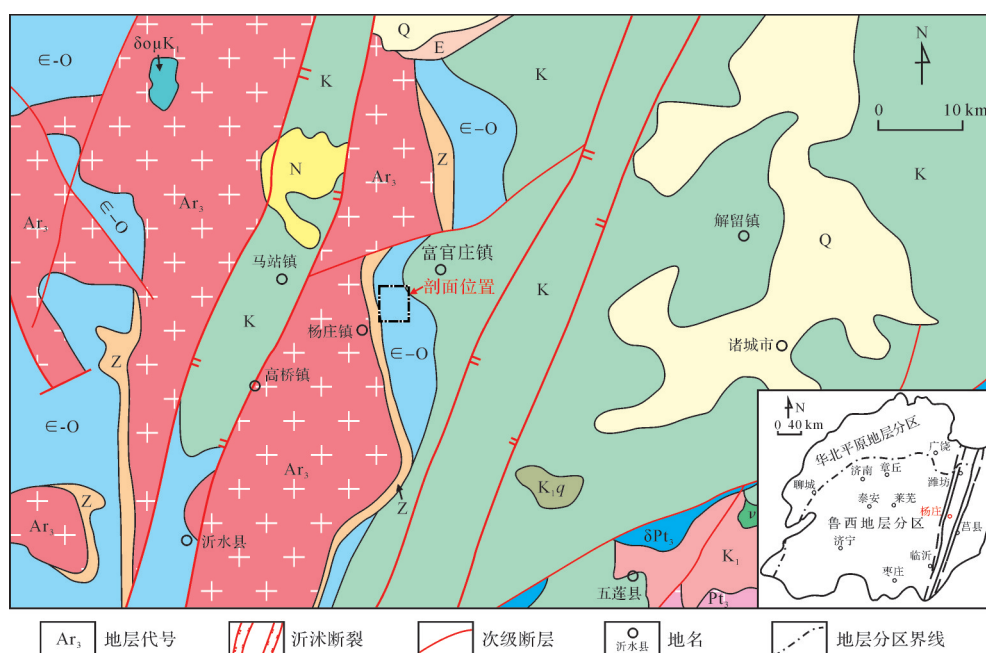


图1 杨庄地区地质简图及剖面位置

Fig.1 Geological map of the Yangzhuang area and location of the studied section

薄层砾屑灰岩,上段沉积厚层泥晶灰岩,见生物碎屑,块状构造,朱砂洞组沉积期海侵作用持续增强^[27],由下至上逐渐由较弱水动力的局限台地变为开阔台地。馒头组厚约185 m,可分为上、中、下明显三段,下段岩性主要为泥质灰岩,颜色为土黄色或灰白色,薄层或中层板状,属于局限台地相;中段沉积紫红色粉砂岩、页岩,夹薄层鲕粒灰岩,沉积环境水体浅,氧化作用明显,为潮坪相;上段沉积大套的鲕粒灰岩及红色中砂岩,该段地层交错层理极为发育,水动力较强,属于滨岸及台缘滩沉积^[28]。张夏组厚150 m,早期发育稳定台缘滩,沉积厚层鲕粒灰岩;向上过渡为黄绿色页岩夹薄层灰岩,局部见生物扰动构造,为水体安静、沉积速率慢、还原性的陆棚环境^[29];上段再次沉积厚层块状鲕粒灰岩,见大量生物碎屑,为典型台缘滩相。崮山组厚约75 m,底部以薄层灰岩与页岩互层同张夏组区分,夹砾屑灰岩,砾屑及基质均被明显氧化,沉积于水体较浅氧化性较强的潮坪相;上段岩性发育泥晶灰岩、泥质条带灰岩及鲕粒灰岩,层状或块状构造,海平面较早期升高,为局限台地及台缘滩相。炒米店组厚80 m,底部为深灰色泥晶灰岩,向上过渡为砾屑灰岩夹泥质条带灰岩,砾屑灰岩夹叠层石灰岩,为台地前缘斜坡到潮坪相的水退旋回^[30];三山子组C段厚130 m,岩性主要为大套厚层块状白云岩,为稳定的局限台地沉积。该区风暴作用频发,

风暴岩常见,风暴沉积构造多样,是良好的风暴沉积观察场所(图2)。

2 风暴沉积构造

风暴沉积作为事件沉积的一种,多由砾屑段及丘状交错层理为标志^[31-33]。在不同沉积环境,水体深度不同,风暴作用强度具有差异,形成的沉积构造也具有多样性。研究区寒武纪风暴作用频发,在多层位、各种岩性段均见到显示。识别典型的风暴沉积构造包括风暴侵蚀构造、砾屑段、丘状构造以及粒序层理。

2.1 风暴侵蚀构造

风暴侵蚀构造是风暴作用下常见的沉积构造之一。一次风暴事件划分为高峰期、衰减期和停息期三个阶段^[34],而风暴侵蚀构造形成于风暴作用高峰期,此时水体能量最强,风暴作用深度范围最大,不同水深的沉积环境风暴侵蚀特征也具有一定差异^[35]。研究区观察到两种典型的侵蚀构造:一是在风暴浪作用下,未固结或半固结的薄层灰岩发生形变,形成的波状侵蚀构造(图3a,b)。平面上类似波痕,具有波峰、波谷,横向没有明显的演变规律,呈杂乱峰谷相间分布特征。剖面上可见迎浪面,为典型波浪作用证据(图3b)。此外,单层灰岩的顶底面均具有起伏特征,层间由泥质杂基不均一充填,横向上局部被

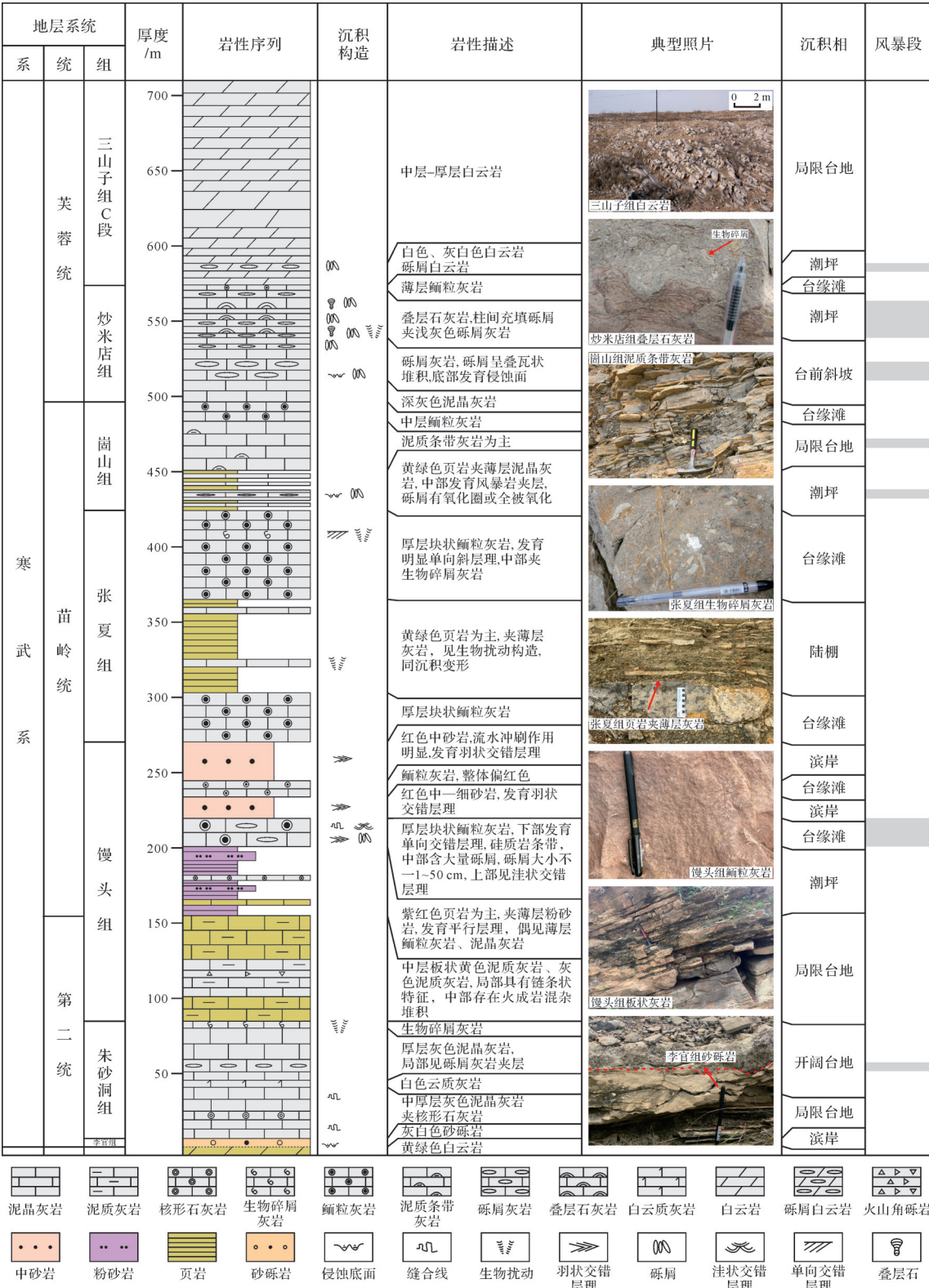


图2 杨庄地区寒武系综合柱状图

Fig.2 Column of the Cambrian strata in the Yangzhuang area

打断,形成“类石香肠构造”,为具有一定韧性特征的灰泥沉积物,在泥质杂基侵入摩擦与风暴外力共同作用的结果^[36]。这类侵蚀构造形成环境风暴浪作用较弱,侵蚀面波峰、波谷起伏幅度小,整体为1~2 cm,并且地层泥质含量高,具有近源、弱水动力特点,薄层状,单层厚度2~5 cm,沉积速率较慢,属于潮坪相

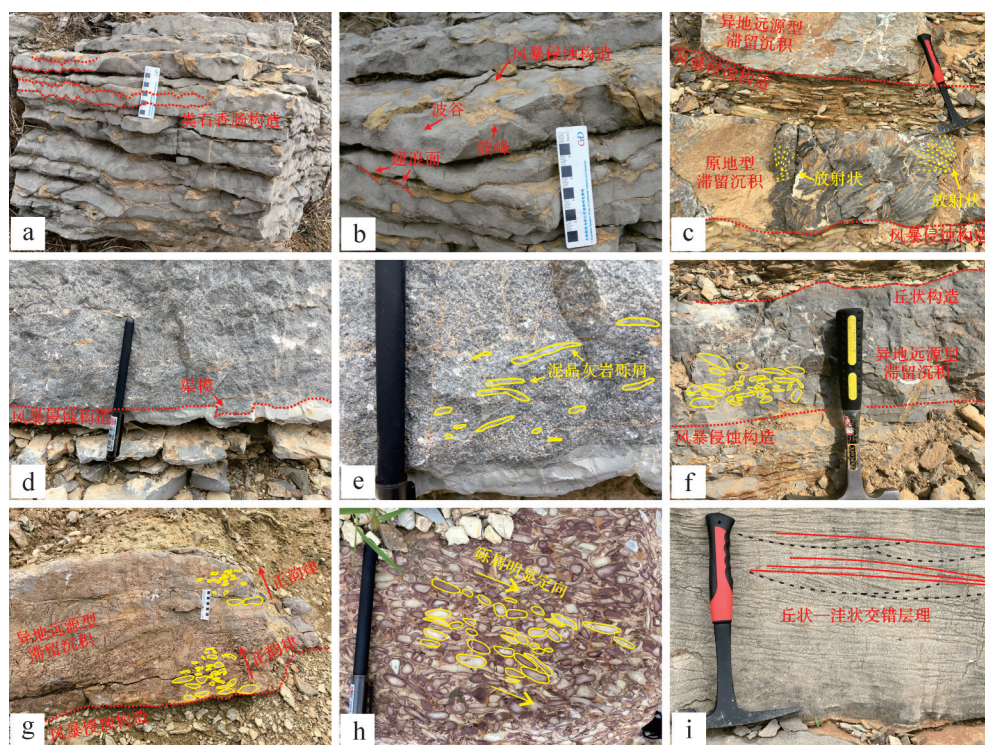


图3 杨庄地区典型风暴沉积构造

(a)类石香肠构造,馒头组;(b)风暴侵蚀面上不均一的波峰—波谷特征,馒头组;(c)多次风暴影响形成上下两层砾屑段,下砾屑段底面风暴侵蚀构造起伏不平,砾屑灰岩呈放射状及叠瓦状,上部为定向明显的异地远源型砾屑段,炒米店组;(d)渠模构造,张夏组;(e)渠模构造上发育含砾的鲕粒灰岩,张夏组;(f)异地近源的砾屑段上部发育丘状构造,崮山组;(g)风暴侵蚀构造上部发育异地远源型砾屑段,具有明显正韵律特点,崮山组;(h)异地远源型砾屑段局部放大,砾屑定向明显,崮山组;(i)鲕粒灰岩中发育的丘状及洼状交错层理,馒头组

Fig.3 Typical storm sedimentary structures in the Yangzhuang area

带。二是风暴回流作用带来的高密度流体,对下伏岩层强烈的冲刷,形成起伏不平的侵蚀面。侵蚀面上下岩性特征突变,上部为一套砾屑灰岩或含砾灰岩,下部为正常的薄层灰岩夹页岩(图3c)。并且,这类风暴侵蚀面切割作用明显,局部发育典型渠模构造(图3d),两壁高角度斜切下伏地层呈不对称的U型,渠模规模较小,宽约3 cm,深1 cm,内部充填含砾鲕粒灰岩,砾石为泥晶灰质(图3e),风暴流异地搬运造成了这类沉积物混合的特征,鲕粒及下伏深灰色薄层泥灰岩证明其发育在距台缘滩较近的台地前缘斜坡相带,与前人针对不同沉积环境发育渠模特点的研究一致^[32]。渠模也可反映风暴作用强度及判断古风暴流向。

2.2 砾屑段

砾屑段一般与风暴侵蚀构造伴生。研究区砾屑段岩性主要为砾屑灰岩和含砾灰岩,砾屑成分多样,包括泥晶灰岩、泥质灰岩和鲕粒灰岩。根据砾屑段距离风暴中心远近可划分出原地型和异地远源型两种类型^[15,37]。

(1) 原地型砾屑段,是在风暴作用下未固结或半固结岩层被打碎、搅动卷扬而起,原地或经过短距离搬运快速沉降堆积形成。研究区观察到的该类型砾屑段厚35~40 cm,砾屑直径长度5~20 cm(图3c),单个砾屑厚度较均匀,约1 cm,成分为灰色泥晶灰岩,砾屑厚度与下伏薄层状灰岩单层厚度基本一致,这表明砾屑段内的砾屑来源于受风暴作用侵蚀的下伏薄层状灰岩。砾屑呈次圆—次棱角状,砾屑支撑,杂乱堆积无定向性,局部可见指示风暴涡流作用的放射状或菊花状砾屑堆积结构(图3c)。原地型砾屑段显示为较强的风暴改造作用,砾屑岩性通常与下伏岩性一致或接近,反映该砾屑段为风暴原地侵蚀、原地堆积的特征。砾屑分选及磨圆较差,杂乱堆积、无明显定向性,砾屑间多为线接触。

(2) 异地远源型,是指风暴作用打碎的岩石,在风暴衰减期回流作用下,搬运至异地接受沉积,整体上,砾屑体积分数相较原地型砾屑段更低。该类型砾屑段沉积时受明显牵引作用,砾屑长轴方向弱定向—定向性,呈平行—叠瓦状排列。长距离的搬运下,砾

屑棱角明显被磨损,大多呈次圆状。此外,异地远源型砾屑分选较差,由于搬运过程中砾屑的滚动、撞击造成破碎,形成砾径较小的砾屑混杂其中,一起快速沉积下来(图3c,f)。研究区还观察到氧化环境的异地远源型砾屑段(图3g),该段厚约55 cm,砾屑呈次圆—圆状,带氧化圈。砾屑长轴具有定向性(图3h),砾屑间接触方式多样,点—线接触,为典型流体搬运结果。砾屑直径0.5~10 cm,厚度1~3 cm,而下伏地层为薄层灰岩,单层厚度约1 cm,因此该段砾屑与下伏地层并非同一环境下产物,属于异地来源。

2.3 丘状构造

丘状构造近年来被学者报道^[33],主要指内部没有明显的纹层或层理,但形态上具有丘状特征的沉积构造。研究区观察到该类型丘状沉积整体以及丘状交错层理,二者作为风暴沉积的判别标志,这里统称为丘状构造。其中在台缘滩沉积环境,沉积物主要为具有颗粒结构特征的鲕粒,在流体作用下,在层内形成成层构造。具体表现为上部为多个宽缓的顶面上凸弧形层系组成,纹层向四周倾斜,下部为洼状层系,层系两端被上部界面截切,为典型的丘状-洼状交错层理(图3i);在台地前缘斜坡环境观察到的丘状构造,顶面形态与波痕类似,为风暴作用下产生的震荡且整体定向的水流作用下形成,具有波形起伏特征。与波痕不同的是,在一定区域内,波痕一般具有相同高度的波峰和波谷,但是丘状构造峰、谷特征具有明显的不均一性,波峰高度变化不等,波谷位置不定,不是正常波浪作用结果,而是在风暴衰减期形成的振荡水流作用下形成的沉积构造。同时,由于沉积在水体较深的弱水动力环境下,水体流动力弱,所以丘状构造内部未观察到明显层系、层理(图3f)。

2.4 粒序层理

粒序层理是沉积物在搬运、沉积过程中,由于风暴作用衰减,流水强度减小携带能力变弱,在沉积分异作用下按粒度大小依次先后沉降而形成。研究区粒序层理发育在风暴侵蚀构造之上的砾屑灰岩中,砾屑砾径由下至上逐渐变小,为典型正粒序特征。该套砾屑灰岩中可见明显两段正粒序层,表明沉积期至少受两次风暴流影响(图3g)。

3 风暴沉积序列

风暴沉积是由一次或多次风暴流引发的事件性沉积。一次典型的风暴流可分为风暴初期、增强期、高峰期、衰减期和平息期5个阶段,不同的风暴作用阶段沉积不同的风暴序列。前人研究碳酸盐岩风暴沉积中典型的沉积构造^[3],建立了类似鲍马序列的风暴沉积理想序列,反映风暴流由强变弱的过程。通过剖面考察,笔者在杨庄地区识别出了风暴沉积4个沉积单元,包括风暴侵蚀底面、砾屑段、粒序层理段和丘状构造,根据不同沉积单元及发育环境,划分出3种序列类型(图4)。

3.1 序列 I

该序列包括风暴侵蚀底面、砾屑段及粒序层理三部分(图3g)。风暴沉积下部岩性为灰绿色页岩夹薄层石灰岩,以页岩为主,暴露风化作用导致了其严重破碎。向上突变为风暴砾屑段的砾屑灰岩,该段厚度约55 cm,砾屑为泥晶灰质成分,砾径从不到1 cm至十几厘米不等,次圆—圆状磨圆,砾屑之间接触方式多样,包括不接触、点接触和线接触。整体上,砾屑具有一定的定向性,长轴方向平行于层面,表明砾石形成经过了流体搬运作用,再接受沉积。

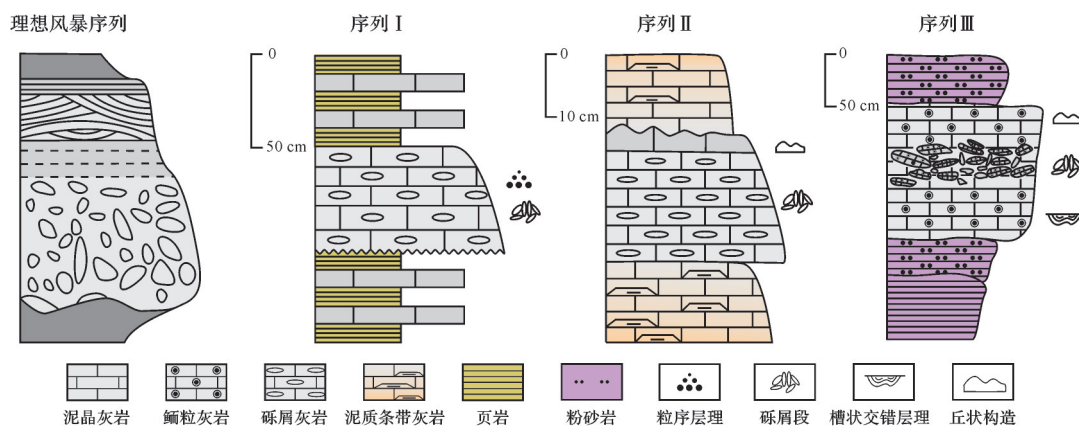


图4 杨庄地区发育风暴沉积序列

Fig.4 Storm deposit sequences found in the Yangzhuang area

同时,砾石被明显氧化,大多带有氧化圈或整体被氧化呈紫红色,这种特征表明其处于长期暴露的浅水环境^[38]。砾屑段底部发育不规则的侵蚀面,侵蚀面向上砾屑砾径由大变小,典型的粒序层理特征,为随着风暴作用强度减弱,风暴流搬运强度降低,形成沉积分异的结果,并且该段发育至少两个明显正韵律结构,表明存在多期风暴作用影响。砾屑段之上岩性突变为薄层的页岩夹灰岩,说明风暴高峰期结束后,重新接受正常沉积。因此,该类型风暴序列发育在水体浅、氧化作用强、水动力较弱的近岸潮坪环境。

3.2 序列Ⅱ

该类型序列包括风暴侵蚀底面、砾屑段及丘状构造三段(图3f)。序列之下为灰色薄层泥晶灰岩,夹泥质条带。风暴侵蚀底面起伏较小,表明风暴作用高峰期海浪并未对该沉积环境造成较大改造作用,应处于较深水的沉积背景。砾屑段中,砾屑成分为灰色泥晶灰岩,与下伏岩性相似,其长轴方向大多与层面平行。分选较差,砾径1~10 cm,棱角一次圆状磨圆,波浪改造作用较小,搬运距离不远。局部见砾屑破碎现象,砾屑之间充填灰泥杂基,可见悬浮砾屑。该段厚度约18 cm,横向上呈透镜状产出。砾屑段之上发育丘状构造,二者界线清晰且具有一定的起伏。丘状构造段岩性为深灰色泥晶灰岩,顶面具独特的波峰一波谷不均一的特征。随着风暴作用平息,其上沉积泥质条带灰岩。该类型反映在深水环境下,风暴影响作用较弱形成的局限分布风暴岩的特点,位于台地前缘斜坡靠近陆棚的沉积区。

3.3 序列Ⅲ

该序列包括砾屑段和丘状构造两段(图5a),砾屑段底部不发育风暴侵蚀构造。砾屑段整体厚度约1 m,其中砾屑砾径1~50 cm不等,切面形态多样,包括椭圆形、月牙形、三角形、不规则形等,多为次圆状

磨圆,砾屑之间点接触或不接触(图5b)。砾屑成分为鲕粒灰岩,砾屑之间基质同样为鲕粒成分,对比这二者发现,两种鲕粒分选均较好,但是粒径明显不同,通常认为鲕粒粒径大小与沉积时水动力条件具有一定相关性,因此砾屑与基质形成于不同环境。此外,砾屑长轴方向多与层面一致,说明其经过流体的搬运作用后在此沉积下来。砾屑段上部为丘状构造段,厚度约35 cm。丘状构造内部层系发育,可见风暴涡流的影响下形成的典型洼状交错层理,单个洼状层系长10~15 cm,纵向高2~5 cm,呈现为多个洼状体交错截切的特征。序列Ⅲ下部观察到槽状交错层理(图5c),指示沉积区强烈的水流作用。该套地层发育鲕粒灰岩典型岩性及丰富的层理构造,推测其沉积于水动力强的台缘滩环境。

4 风暴沉积模式

风暴沉积模式主要受控于平均海平面、正常浪基面和风暴浪基面3个重要界面。基于研究区沉积环境、沉积背景,结合前人研究成果^[14,39],建立了该风暴沉积模式(图6)。风暴浪能影响到台地前缘斜坡,对未固结或半固结的岩石具有破坏性,风暴发展高峰期打碎的砾石被搬运至异地接受沉积。潮坪相带,由一次或多次大型风暴浪带来的砾屑迅速堆积,砾屑间基质为弱水动力下的泥质成分,该相带长期暴露,氧化作用明显,导致砾屑带有氧化圈或整体被氧化;台缘滩相,风暴浪作用下,较浅水地区沉积颗粒灰岩被打碎,搬运至滩后或滩脚沉积,砾屑间充填台缘滩环境鲕粒成分;在正常浪基面附近,风暴浪最强^[5,14],风暴营力主要为风暴回流及风暴涡流,砾屑呈叠瓦状或菊花状排列,砾径较大,并且磨圆度不高,为原地或近原地堆积。

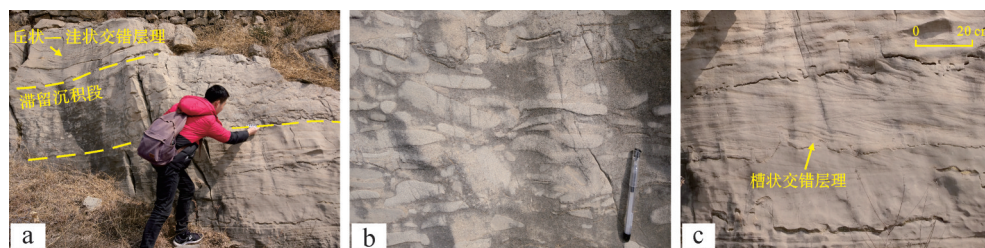


图5 风暴沉积剖面结构及其他特征

(a)序列Ⅲ的整体特征,下部槽状交错层理发育,砾屑段段上部发育丘状构造,馒头组;(b)序列Ⅲ砾屑段段局部放大,砾石形态多样并且分选较差;(c)序列Ⅲ下部地层发育槽状交错层理

Fig.5 Structure and other characteristics of the storm sediment profile

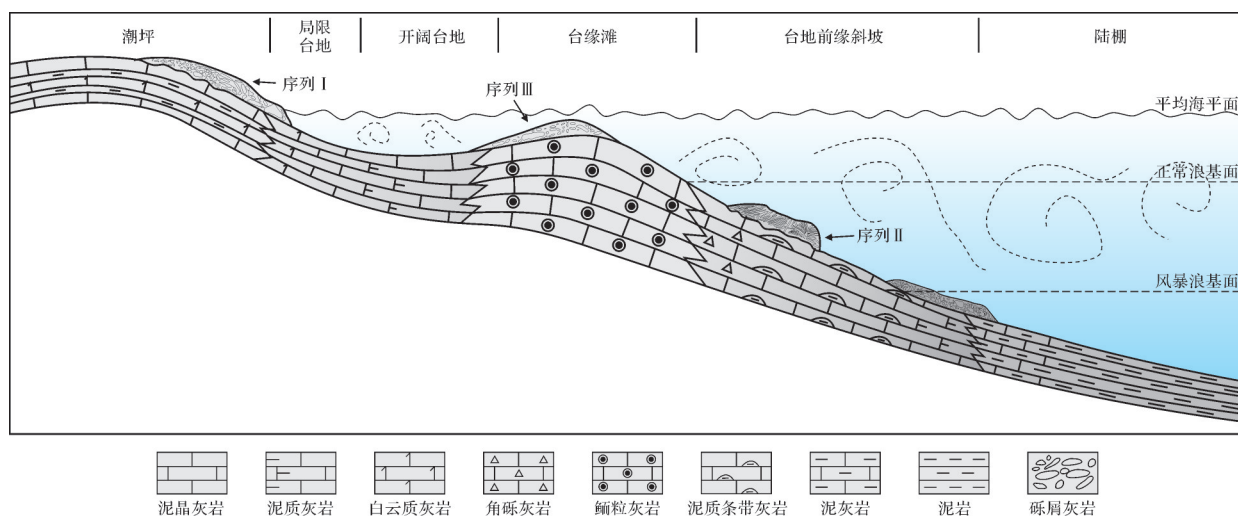


图6 杨庄地区风暴沉积模式

Fig.6 Storm sedimentary model in the Yangzhuang area

5 地质意义

现代研究表明,风暴多形成在纬度 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间,可影响纬度范围为 $5^{\circ}\sim 40^{\circ}$,因此风暴沉积常常作为一种古环境、古地理的判断依据^[40-41]。早古生代华北板块为陆表海沉积环境,海水面积广阔,水体较浅,并且与板块外的大洋直接相邻,有利于海洋风暴的侵袭^[5,38]。华北地区风暴沉积在苗岭统、芙蓉统中尤为常见,并且多由正常天气与风暴天气的交互沉积序列组成。针对杨庄地区研究表明,寒武纪沉积了7套厚度较大风暴岩,第二统一芙蓉统均有发育,不同沉积环境如潮坪、台缘滩、台地前缘斜坡、局限台地等均可受风暴作用影响,苗岭统及芙蓉统中还观察到多期次风暴影响。如此频发的风暴作用证明该地区寒武纪位于赤道附近低纬度地区,这与前人古地磁判断^[42-43]($18.5^{\circ}\sim 29.2^{\circ}$)相吻合。同时,研究区自第二世至芙蓉世沉积地层中经常见到鲕粒发育,而现代鲕粒大多分布在纬度 20° 附近,其沉积需要在动荡的水体、温暖湿润的环境下,所以鲕粒常常作为识别气候的标志^[44],从沉积物的角度也印证了研究区寒武纪位于低纬度热带地区。

6 结论

(1) 杨庄地区寒武纪频发风暴作用,沉积7套风暴岩,典型的沉积构造包括风暴侵蚀构造、砾屑段、丘状构造以及粒序层理。

(2) 风暴沉积在多种沉积环境均发育,包括潮坪、局限台地、开阔台地、台缘滩、台地前缘斜坡。不

同沉积环境下,砾屑堆积方式以及来源存在差异。潮坪环境砾屑为杂乱一半定向堆积,且氧化作用明显,多为异地来源。较深水的台地前缘斜坡,砾屑异地或原地来源,以强水动力下形成的叠瓦状、菊花状堆积方式为特点。

(3) 风暴沉积频发可作为低纬度热带气候的标志,杨庄地区寒武系多期风暴岩的发现为这一论断提供了新的沉积学证据。

致谢 马帅、曾涵钰共同参与了野外考察,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,使笔者受益匪浅,在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Kelling G, Mullin P R. Graded limestones and limestone-quartzite couplets: Possible storm-deposits from the Moroccan Carboniferous [J]. *Sedimentary Geology*, 1975, 13 (3): 161-190.
- [2] Dott R H, Bourgeois J. Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequences [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1982, 93(8): 663-680.
- [3] Aigner T. Calcareous tempestites: Storm-dominated stratification in Upper muschelkalk limestones (Middle Trias, SW-Germany) [M]//Einsele G, Seilacher A. *Cyclic and event stratification*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982: 180-198.
- [4] 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): 55-69. [Liu Baojun, Zhang Jiqing, Xu Xiaosong. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of Silong, Xingwen, Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986, 60(1): 55-69.]
- [5] 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, 130-133, 142.

- [Meng Xianghua, Qiao Xiufu, Ge Ming. Study on ancient shallow sea carbonate storm deposits (tempestite) in North China and Dingjitan model of facies sequences [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1986, 4(2): 1-18, 130-133, 142.]
- [6] 翟晓先. 乌鲁木齐祁家沟剖面中上石炭统风暴岩沉积特征[J]. 成都地质学院学报, 1987, 14(1): 45-54. [Zhai Xiaoxian. Sedimentary features of Carboniferous tempestites, Qijiagou section, Urumqi [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1987, 14(1): 45-54.]
- [7] 陈世悦, 张鹏飞, 杨怀宇. 湘西北江坪地区志留系风暴沉积特征及意义[J]. 古地理学报, 2009, 11(1): 51-57. [Chen Shiyue, Zhang Pengfei, Yang Huaiyu. Silurian storm deposits in Jiangping area, northwestern Hunan province: Characteristics and geological significances [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(1): 51-57.]
- [8] 邹光均, 梁恩云, 张晓阳, 等. 湘西松柏场地区寒武系车夫组风暴岩的沉积特征及其地质意义[J]. 地层学杂志, 2018, 42(4): 499-509. [Zou Guangjun, Liang Enyun, Zhang Xiaoyang, et al. Tempestite in the Cambrian Chefu Formation in the Songbaichang area of northwestern Hunan province [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2018, 42(4): 499-509.]
- [9] 赵聪, 刘树根, 宋金民, 等. 川西汉旺地区雷口坡组四段风暴岩特征及地质意义[J]. 沉积学报, 2019, 37(1): 94-103. [Zhao Cong, Liu Shugen, Song Jinmin, et al. Sedimentary characteristics and geological significance of tempestites in the Fourth member of the Leikoupo Formation at the Hanwang section, western Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(1): 94-103.]
- [10] 马永生. 华北北部晚寒武世碳酸盐岩岩石学沉积学及沉积作用等时性研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 1990. [Ma Yongsheng. Study on carbonate petrology, sedimentology and sedimentational synchrony of Late Cambrian in the north part of North China Platform [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1990.]
- [11] 刘宝珺, 许效松, 罗安屏, 等. 中国扬子地台西缘寒武纪风暴事件与磷矿沉积[J]. 沉积学报, 1987, 5(3): 28-39. [Liu Baojun, Xu Xiaosong, Luo Anping, et al. Storm events and phosphate deposition in Cambrian on the western margin of the Yangtze Platform, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1987, 5(3): 28-39.]
- [12] 胡益成, 苏华成. 河南晚石炭世含煤地层中的风暴异地煤[J]. 煤田地质与勘探, 1992, 20(3): 1-5. [Hu Yicheng, Su Huacheng. The storm allochthony coal of Late Carboniferous coal-bearing formation in Henan province [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1992, 20(3): 1-5.]
- [13] 黄乐清, 刘伟. 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[J]. 沉积学报, 2016, 34(5): 830-841. [Huang Leqing, Liu Wei. Characteristics of tempestite of Lower Ordovician Tongzi Formation, in the Longshan area, northwestern Hunan and its geological significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 830-841.]
- [14] 宋金民, 杨迪, 李朋威, 等. 中国碳酸盐风暴岩发育特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2012, 26(3): 589-600. [Song Jinmin, Yang Di, Li Pengwei, et al. Development characteristics and geological significance of carbonate tempestites in China [J]. *Geoscience*, 2012, 26(3): 589-600.]
- [15] 田海芹, 马玉新, 狄明信. 山东新泰盘车沟地区崮山组和长山组风暴沉积特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(6): 8-13. [Tian Haiqin, Ma Yuxin, Di Mingxin. Storm deposits of Gushan and Changshan Formations at Panchegou region of Xintai in Shandong province [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1994, 18(6): 8-13.]
- [16] 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. [Jin Kankun. Tempestites in the Cambrian strata in Dabeiwang, Xuzhou, Jiangsu [J]. *Journal of Palaeogeography*, 1997, 17(1): 34-38.]
- [17] 马瑞申, 张良, 杜远生, 等. 豫北地区寒武系风暴岩沉积特征及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2011, 30(4): 15-20. [Ma Ruishen, Zhang Liang, Du Yuansheng, et al. Sedimentary characteristics and its geological implications of Cambrian tempestite in northern Henan province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(4): 15-20.]
- [18] 郑德顺, 杨东亮, 杨文涛, 等. 豫西鲁山地区寒武系辛集组沉积环境及其控制因素[J]. 现代地质, 2019, 33(3): 604-614. [Zheng Deshun, Yang Dongliang, Yang Wentao, et al. Sedimentary environment and controlling factors of the Cambrian Xinji Formation, Lushan area, western Henan [J]. *Geoscience*, 2019, 33(3): 604-614.]
- [19] 陶洪兴. 华北地区下古生界沉积相标志的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1987(1): 20-28. [Tao Hongxing. A discussion on the sedimentary facies marks of Lower Palaeozoic in North China region [J]. *Petroleum exploration and Development*, 1987(1): 20-28.]
- [20] 韩征, 何镜宇, 王英华, 等. 华北地区下古生界沉积相和层序地层分析[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1997, 22(3): 293-299. [Han Zheng, He Jingyu, Wang Yinghua, et al. Sedimentary facies and sequence stratigraphy of Lower Paleozoic in North China [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(3): 293-299.]
- [21] 李君文. 环渤海湾地区下古生界层序岩相古地理特征及演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2007. [Li Junwen. The characteristic and evolution of sequence-lithofacies palaeogeography of Lower Paleozoic around Bohai Gulf area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.]
- [22] 史晓颖, 陈建强, 梅仕龙. 华北地台东部寒武系层序地层年代格架[J]. 地学前缘, 1997, 4(3/4): 161-173. [Shi Xiaoying, Chen Jianqiang, Mei Shilong. Cambrian sequence chronostratigraphic frame work of the North China platform [J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(3/4): 161-173.]
- [23] 山东省地质矿产局. 山东省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大

- 学出版社, 1996: 1-328. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province. Lithostratigraphy of Shandong province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 1-328.]
- [24] 张彬. 鲁西地块寒武系划分对比研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2010. [Zhang Bin. Study on the division and correlation of Cambrian in Luxi block[D]. Ji'nan: Shandong University of Science and Technology, 2010.]
- [25] 田洪水, 张邦花, 祝介旺, 等. 早寒武世初期沂沭断裂带地震效应[J]. 古地理学报, 2011, 13(6): 645-656. [Tian Hongshui, Zhang Banghua, Zhu Jiewang, et al. Seismic effects from Yishu fault zone during the earlier Early Cambrian[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(6): 645-656.]
- [26] 邢吉辉. 鲁西地块寒武纪岩相古地理研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2008. [Xing Jihui. Study on Cambrian lithofacies palaeogeography in Luxi block[D]. Ji'nan: Shandong University of Science and Technology, 2008.]
- [27] 李庆平, 董仁国, 李秀章, 等. 鲁西寒武系一下奥陶统层序地层研究新进展[J]. 地层学杂志, 2005, 29(4): 376-380, 386. [Li Qingping, Dong Renguo, Li Xiuzhang, et al. New advances in the study of the Cambrian to Lower Ordovician sequence-stratigraphy in the west Shandong[J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29(4): 376-380, 386.]
- [28] 高华丽. 渤海湾及邻区寒武纪岩相古地理研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2009. [Gao Huali. Study on Cambrian lithofacies palaeogeography in the Bohai Bay and its neighbourhood[D]. Ji'nan: Shandong University of Science and Technology, 2009.]
- [29] 孙智新, 袁金良, 王平丽. 华北地台寒武系张夏组盘车沟段岩石地层与古地理特征[J]. 地层学杂志, 2019, 43(3): 269-278. [Sun Zhixin, Yuan Jinliang, Wang Pingli. Lithostratigraphic and palaeogeographic features of the Panchegou member of the Changshia Formation in North China Platform[J]. Journal of Stratigraphy, 2019, 43(3): 269-278.]
- [30] 杜圣贤, 张昊, 高黎明, 等. 山东长清张夏一崮山地区寒武系层序地层划分与沉积环境演变[J]. 地层学杂志, 2019, 43(3): 279-294. [Du Shengxian, Zhang Hao, Gao Liming, et al. Sequence stratigraphic subdivision and evolution of depositional environment of Cambrian at Zhangxia-Gushan area, Changqing county, Shandong province[J]. Journal of Stratigraphy, 2019, 43(3): 279-294.]
- [31] 陈世悦, 杨怀宇, 李文涛, 等. 贵州紫云地区上泥盆统风暴重力流沉积特征及地质意义[J]. 地质学报, 2010, 84(1): 127-132. [Chen Shiyue, Yang Huaiyu, Li Wentao, et al. The sedimentary characteristics of the Upper Devonian tempestite and gravity flow in the Ziyun area, Guizhou and its geological implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(1): 127-132.]
- [32] 王家豪, 王华, 曾劲彪, 等. 山东省中部上寒武统碳酸盐风暴沉积的综合模式[J]. 地球科学, 2017, 42(1): 68-77. [Wang Jiahao, Wang Hua, Zeng Jinbiao, et al. Integrative depositional model for carbonate tempestites in Upper Cambrian, central Shandong province[J]. Earth Science, 2017, 42(1): 68-77.]
- [33] 钟建华, 倪良田, 邵珠福, 等. 青岛灵山岛下白垩统风暴岩与风暴沉积的发现及意义[J]. 古地理学报, 2016, 18(3): 381-398. [Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Shao Zhufu, et al. Tempestites and storm deposits in the Lower Cretaceous from Lingshan Island, Qingdao[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(3): 381-398.]
- [34] Kreisa R D, Bambach R K. The role of storm processes in generating shell beds in Paleozoic shelf environments[M]//Einsele G, Seilacher A. Cyclic and event stratification. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982: 200-207.
- [35] 马帅, 陈世悦, 汪峰, 等. 欧龙布鲁克地块古生代风暴沉积特征及地质意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 35-45. [Ma Shuai, Chen ShiYue, Wang Feng, et al. Sedimentary characteristics and geological significance of storm deposits of Paleozoic in the Olongbluk block[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(1): 35-45.]
- [36] 陈吉涛, 韩作振, 张晓蕾, 等. 鲁西芙蓉统条带灰岩早期成岩变形构造: 竹叶状砾屑灰岩形成机理探讨[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2009, 39(12): 1732-1743. [Chen Jitao, Han Zuozhen, Zhang Xiaolei, et al. Early diagenetic deformation structures of the Furongian ribbon rocks in Shandong province of China: A new perspective of the genesis of limestone conglomerates[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2009, 39(12): 1732-1743.]
- [37] 李强. 鄂尔多斯盆地寒武系风暴沉积研究[D]. 荆州: 长江大学, 2017: 1-77. [Li Qiang. Research on Cambrian storm deposits in Ordos Basin[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2017: 1-77.]
- [38] 余宽宏, 畅通, 邱隆伟, 等. 华北地台早古生代竹叶状灰岩岩石特征及成因研究进展[J]. 沉积学报, 2015, 33(6): 1111-1125. [Yu Kuanhong, Chang Tong, Qiu Longwei, et al. Research development of flat-pebble conglomerate characteristics and their origin in Early Paleozoic North China Platform[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1111-1125.]
- [39] 冯荣昌, 吴因业, 杨光, 等. 川中大安寨段风暴沉积特征及分布模式[J]. 沉积学报, 2015, 33(5): 909-918. [Feng Rongchang, Wu Yinye, Yang Guang, et al. Storm deposition of the Da'anzhai member (Jurassic) in central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(5): 909-918.]
- [40] 杜远生, 周道华, 龚淑云, 等. 甘肃靖远—景泰泥盆系湖相风暴岩及其古地理意义[J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 69-73. [Du Yuansheng, Zhou Daohua, Gong Shuyun, et al. Tempestite and its palaeogeographical significance of Devonian in Jingyuan and Jingtai counties, Gansu province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3): 69-73.]
- [41] 杨宝忠, 杨坤光, 夏文臣. 鄂东黄石地区中上寒武统风暴岩的发现及意义[J]. 地质科技情报, 2007, 26(3): 33-36. [Yang Baozhong, Yang Kunguang, Xia Wenchen. Discovery of Middle-Upper Cambrian tempestites and its significance in

- Huangshi, eastern Hubei province[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(3): 33-36.]
- [42] 黄宝春,周姚秀,朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 348-359. [Huang Baochun, Zhou Yaoxiu, Zhu Rixiang. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 348-359.]
- [43] 朱日祥,杨振宇,马醒华,等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 1998, 28(增刊1): 1-16. [Zhu Rixiang, Yang Zhenyu, Ma Xinghua, et al. Apparent pole shift curve and block motion of Phanerozoic paleomagnetic in the main block of China[J]. Science in China (Seri. D): Earth Sciences, 1998, 28(Suppl. 1): 1-16.]
- [44] 张国仁. 华北地台东部早中寒武世古气候的识别标志及变化旋回[J]. 辽宁地质, 1997(4): 282-290. [Zhang Guoren. Recognition marks and variation cycle of Early-Middle Cambrian paleoclimate in the east of North China Platform[J]. Liaoning Geology, 1997(4): 282-290.]

Sedimentary Characteristics and Model of Cambrian Storm Deposits in the Yangzhuang Area, Shandong Province

HUANG ChiQiang¹, CHEN ShiYue², HE QingQing³, LI Qiang¹, MA PeiLing¹, HAN ChangWei¹, CHEN XiangFei¹, LIU Jun¹

1. Korla Branch of Geophysical Research Institute, BGP Inc., Korla, Xinjiang 841000, China

2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

3. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China

Abstract: A great quantity of storm deposits and related sedimentary structures developed in the Cambrian of Yangzhuang area, Shandong province. Under the guidance of sedimentology theory, through detailed field survey and comprehensive analysis of indoor data, the typical storm sedimentary structures in the study area are identified, storm sedimentary sequences are divided, and the storm deposition model is established. The results show that there are four storm sedimentary structures: storm erosion structure, gravel section, mound structure and graded bedding in the Yangzhuang area. According to the vertical features and sedimentary structure differences of tempestites, three storm sedimentary sequences are divided, corresponding to the tidal flat, platform front slope and platform margin beach respectively. Based on the study of vertical evolution of storm deposits, a storm deposit model is established. The discovery of tempestites indicates that the Yangzhuang area is located in a low latitude tropical region during the Cambrian, and it is of great significance to the early Paleozoic paleoenvironment and paleogeography restoration in eastern North China.

Key words: Yangzhuang area; Cambrian; storm deposit; sedimentary model