

Cyclicality and Controlling Factor Analysis of Storm Deposition

—A Case Study from Flat-Pebble Conglomerates in Middle Cambrian Zhangxia Formation at Xiaweidian Profile in West Hill, Beijing

Meng Ning¹, Huaping Mei², Mingjun Liu³

¹School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing

²Gas Production Plant5, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an Shaanxi

³Research Institute of Shanxi Yanchang Petroleum Company Ltd., Xi'an Shaanxi
Email: 342850128@qq.com

Received: Jul. 10th, 2018; accepted: Jul. 26th, 2018; published: Aug. 2nd, 2018

Abstract

As a typical type of event deposition, storm deposition has random spatial and temporal distribution, however, presents periodic evolution of intensity and frequency on vertical development. In this study, we have carried on a case study from flat-pebble conglomerates in Middle Cambrian Zhangxia formation at Xiaweidian profile in West Hill. Based on field observations and measurement, combined with previous research results, we have recognized 8 sets of flat-pebble conglomerates including two types of storm deposition sequence. Type I storm sedimentary sequence formed in the lower part of the relatively deep subtidal zone, representing a strong storm with short peak time. While Type II storm sedimentary sequence, which developed in higher energy sedimentary environment than Type I, may form in the middle and upper part of the deep subtidal zone, representing small storm scale and short duration of action. The storm deposition events mainly occurred in the lower part of the profile, the frequency decreased in the central section, and gradually increase upwards. In general, the storm intensity weakened from the lower part to the upper part of the profile. The type of storm sequence is directly related to sea level change. During transgression period, type I storm sequence was well developed, while during the regression process, type II storm sequence was prevailed, and the storm events mainly occur in the transgression. There were 2 large-scale regression and transgression cycles in the stratigraphic succession of the studied area. The first transgression process was characterized by strong storm intensity and shorter peak time. Otherwise, the second transgression process was characterized by small storm scale and short duration of action.

Keywords

Storm Deposition, Sedimentary Cycles, Controlling Factors, Zhangxia Formation, Flat-Pebble Conglomerates

风暴沉积的旋回性及其控制因素分析

—以北京西山下苇甸剖面中寒武统张夏组砾屑灰岩为例

甯 濛¹, 梅华平², 刘明军³

¹北京大学地球与空间科学学院, 北京

²中国石油长庆油田分公司第五采气厂, 陕西 西安

³陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安

Email: 342850128@qq.com

收稿日期: 2018年7月10日; 录用日期: 2018年7月26日; 发布日期: 2018年8月2日

摘 要

风暴沉积为典型的事件沉积, 尽管其时空分布具有随机性, 但是垂向发育强度与频率具有周期性演变。本文以北京西山下苇甸剖面中寒武统张夏组风暴沉积为例, 通过野外剖面观察、实测结合前人研究成果, 在研究剖面识别出8套(S1~S8)以竹叶状砾屑灰岩为代表的两类风暴沉积序列: I类风暴沉积序列, 形成于水体相对较深的深潮下带下部, 代表的风暴强度大, 高峰期时间短; II类风暴沉积序列, 沉积环境能量较I类风暴层序高, 可能形成于深潮下带中-上部, 代表的风暴规模不大, 作用时间较短。风暴沉积事件主要发生在剖面下部, 中部频率降低, 向上又逐渐增加, 从剖面下部到上部风暴强度呈增强到逐渐减弱的趋势。风暴沉积序列类型与海平面变化直接相关, 海侵时期主要发育I型风暴沉积序列, 而海退时则主要发育II型风暴沉积序列, 且风暴事件主要发生在海侵过程中。研究剖面在沉积时期发生了两次较大规模的海退-海侵旋回, 第一次海侵过程中, 风暴强度大, 风暴高峰期时间较短, 第二次海侵过程中, 风暴规模不大, 作用时间很短。

关键词

风暴沉积, 沉积旋回, 控制因素, 张夏组, 砾屑灰岩

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

风暴沉积是风暴直接作用于海底沉积物而形成的一种突发的、瞬时的、特殊的事件沉积, 主要发生在潮坪、浅海和深海沉积环境中。G. Kelling 于 1975 年最早提出风暴岩一词, 用以描述受风暴作用后再沉积的浅海盆地风暴沉积岩[1]。扁平砾屑灰岩作为一类常见的风暴沉积岩, 主要形成于浅海沉积环境中, 未固结或半固结的薄层灰岩被风暴流撕裂、搬运、再沉积[2]。砾屑灰岩主要分布在早古生代地层中, 在北美、华北、及韩国的寒武系和中奥陶统最为常见[2]。寒武纪时期, 全球范围地层内广泛发育特殊的以竹叶状砾屑灰岩为代表的的风暴沉积[2] [3] [4] [5] [6], 因此 Myrow 等(2004)认为该时期的海洋为“风暴海”[7]。华北地台中寒武统张夏组发育多套竹叶状砾屑灰岩[8], 对于其成因已基本达成共识, 属于风暴成因

[3] [9]。华北地台在张夏组沉积时期处于低纬度热带地区，整个华北陆表海处于低纬度赤道飓风带控制之内，有利于风暴作用发生[3] [10] [11]。

目前对风暴沉积的研究主要集中在其成因机制、沉积模式[12] [13] [14] [15]及其在古地理恢复中的意义等方面[16] [17]，对风暴沉积的旋回地层学及其控制因素研究相对较少。景宇轩等曾利用下苇甸剖面寒武纪中晚期风暴沉积类型的周期性变化，恢复古海平面变化[9]，但受其研究精度的影响，并未讨论具体海侵-海退过程中风暴沉积类型的变化。风暴沉积类型的周期性变化主要受水深和风暴强度的控制[9]，而风暴强度的长期变化则是全球气候变化的响应[18] [19]。本文以北京西山下苇甸剖面中寒武统张夏组风暴沉积为例，通过野外剖面观察、实测结合前人研究成果，划分出不同类型的风暴沉积序列，并识别出其在垂向上的周期性变化，进一步探讨风暴沉积的旋回性与海平面变化的关系，为古气候研究提供一定参考。

2. 地质背景

下苇甸剖面位于北京西郊门头沟区军庄镇下苇甸村国道 G109 路边丰(台)-沙(城)铁路沿线，古地理位置上属于华北地台西北缘(图 1)。下苇甸剖面张夏组出露良好，是研究华北地区寒武系沉积的典型剖面之一，该组地层与其上覆徐庄组和下伏崮山组呈整合接触，地层厚度约 150 m，岩性以泥晶鲕粒灰岩为主，夹薄层泥质条带灰岩及竹叶状灰岩。主要颗粒类型为鲕粒和生物碎屑，及少量内碎屑和陆源碎屑[20]。

本次研究实测张夏组下部厚约 30 m 的地层，经过详细地野外观测和分析，共识别出 71 个岩性层，厚度从十几厘米至几百厘米不等，根据沉积相的突变，划分出 25 个向上变浅沉积旋回(图 2)，风暴事件可以发生在向上变浅旋回的任何部位，具有随机性。

3. 岩石特征

根据野外描述结合前人岩石薄片分析，共划分出 6 种岩石类型(图 3)，钙质泥岩、灰质条带泥岩、泥质条带灰岩、泥晶灰岩、泥晶鲕粒灰岩、竹叶状砾屑灰岩。

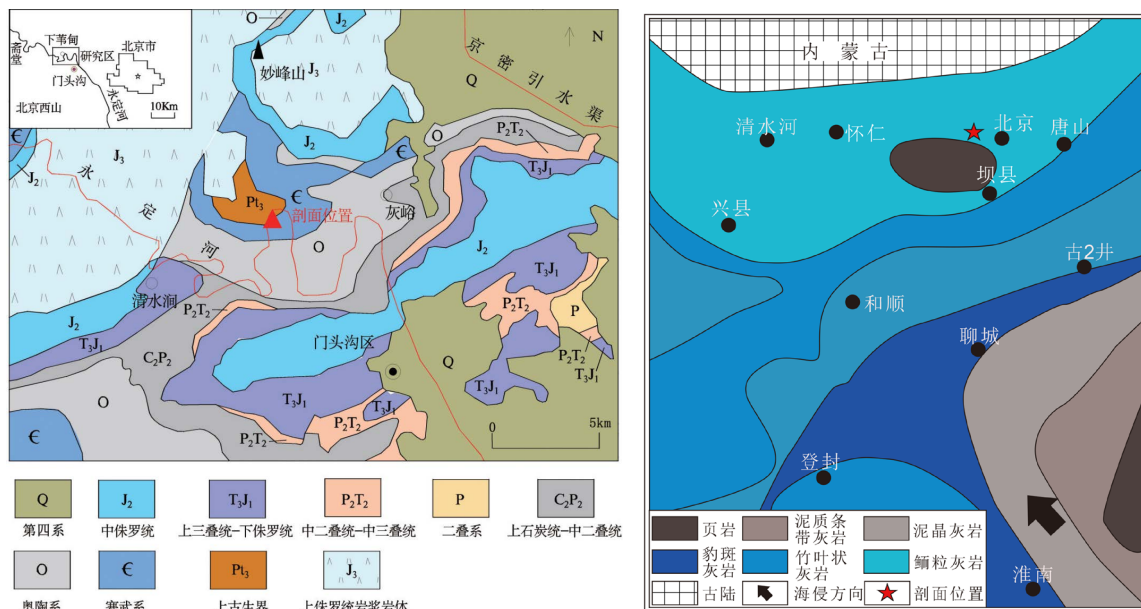


Figure 1. Geological map of Xiaweidian Profile in West Hill, Beijing [21] indicating the location of the outcrop and the middle Cambrian Zhangxia period paleogeographic map of the North China Block [22]

图 1. 北京西山地质图及剖面位置[21]及华北张夏期岩相古地理图[22]

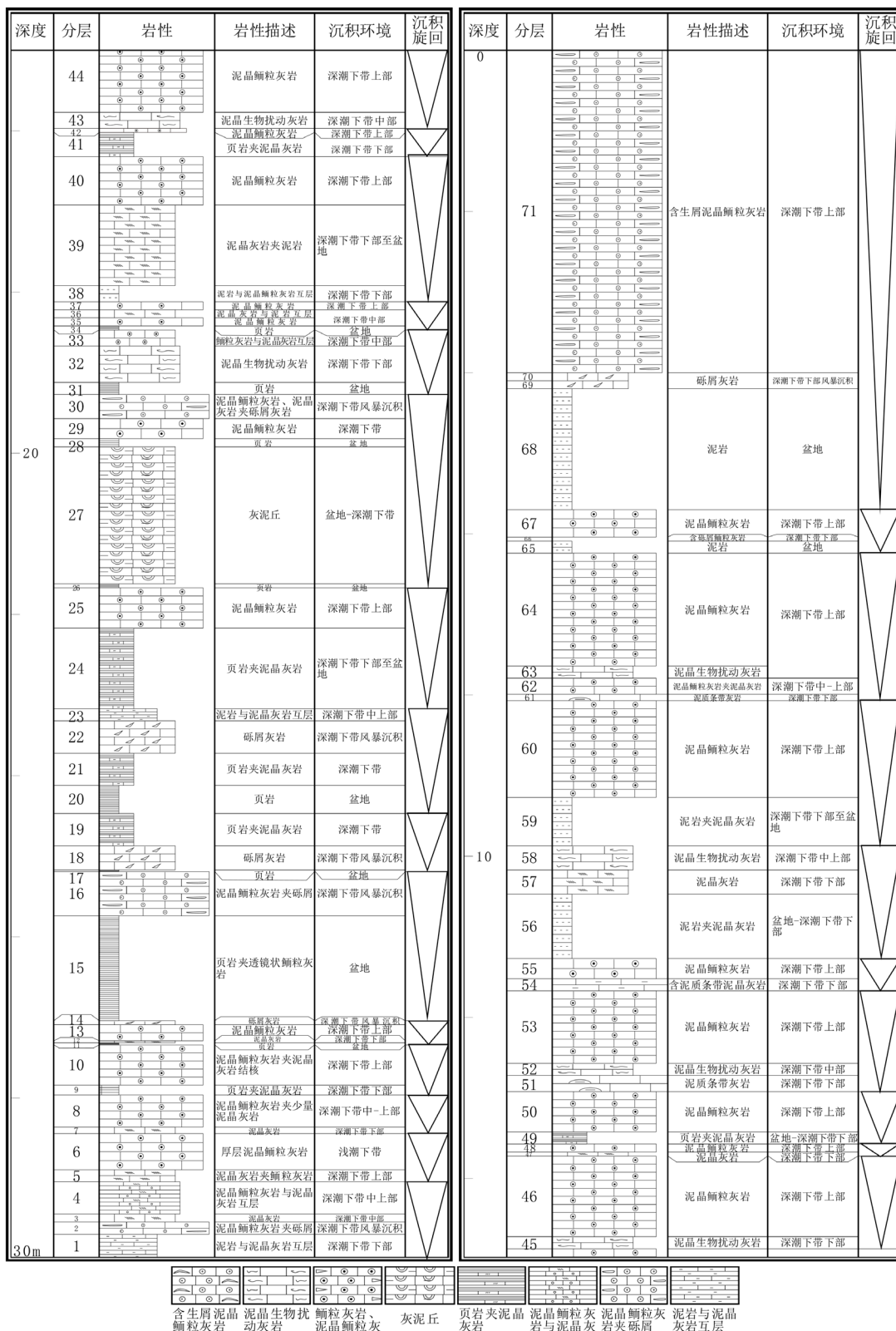


Figure 2. Stratigraphic sedimentary cycle profile of the Zhangxia Formation at Xiaweidian profile (plotting scale 1:50)

图 2. 下苇甸剖面张夏组下部沉积旋回柱状图(比例尺 1:50)



Figure 3. Field photographs of typical lithologies from Zhangxia Formation at Xiaweidian profile. (a) calcareous mudstone; (b) lime banded mudstone; (c) argillaceous banded limestone, with rip-up structures; (d) micrite; (e) oolitic micrite; (f) flat-pebble conglomerate; (g) calcareous mudstone interbedded with thin layer micrite and micrite cycle; (h) calcareous mudstone, flat-pebble conglomerate and shale interbedded with thin layer micrite cycle

图 3. 下苇甸剖面张夏组几种典型岩性野外照片。(a) 钙质泥岩；(b) 灰质条带泥岩；(c) 泥质条带灰岩，发育撕裂构造；(d) 泥晶灰岩；(e) 泥晶鲕粒灰岩；(f) 竹叶状砾屑灰岩；(g) 钙质泥岩夹薄层泥晶灰岩 - 泥晶灰岩旋回；(h) 钙质泥岩 - 砾屑灰岩 - 页岩夹薄层泥晶灰岩旋回

3.1. 钙质泥岩

该泥岩以灰绿色为主(图 3(a)), 通常与条带状泥晶灰岩互层, 构成米级旋回。钙质泥岩中常夹有竹叶状灰岩透镜体或透镜层, 有时为厚层竹叶状砾屑灰岩层。钙质泥岩与泥晶灰岩的互层单元(图 3)代表了风暴浪基面之下的页岩盆地 - 深缓坡相低能沉积序列。钙质泥岩中发育的竹叶状砾屑灰岩透镜体或透镜层(图 4)属于典型的风暴事件沉积[9]。

3.2. 泥质条带灰岩与灰质条带泥岩

以灰岩层与泥质层互相叠置形成, 根据二者相对含量的多少, 形成泥质条带灰岩与灰质条带泥岩。

泥质条带灰岩, 以灰岩为主, 泥质条带风化面为灰黄色、黄褐色, 呈连续或不连续波状夹于泥晶灰岩中(图 3(b))。灰质条带泥岩, 以泥岩为主, 灰岩层通常呈薄板状、弯曲状或透镜状夹于泥岩中, 其中很少或者没有生物扰动(图 3(c))。可能是当时的地壳在震荡运动中, 即海平面频繁变化, 但其变幅又不是太大, 于是就形成了泥晶灰岩与泥岩互层的沉积韵律。其中发育风暴撕裂构造, 表现为被撕裂岩层的条带断续相连。图 3(c)下部所示的灰白色灰岩条带和黄灰色泥质灰岩条带形成撕裂构造, 灰岩条带局部角砾化, 可能形成于远离风暴中心, 但风暴作用仍较强的区域。

3.3. 泥晶灰岩

灰色薄层至中厚层灰岩, 由泥晶基质组成, 常见泥质条带夹在较纯的薄层泥晶灰岩层间。偶见少量砾屑层夹于中 - 厚层泥晶灰岩中。

3.4. 泥晶鲕粒灰岩

以泥晶鲕粒为主, 鲕粒之间的填隙物主要为泥晶方解石。可见少量生屑和内碎屑。鲕粒粒径 0.05~2.00 mm, 形状为不规则的圆形及椭圆形, 粒度变化范围大, 分选差, 颗粒支撑, 以泥晶充填为主, 有时出现亮晶胶结物。这类鲕粒多形成于较低能的环境之中。在研究剖面中, 泥晶鲕粒灰岩常与泥晶灰岩或砾屑共生。

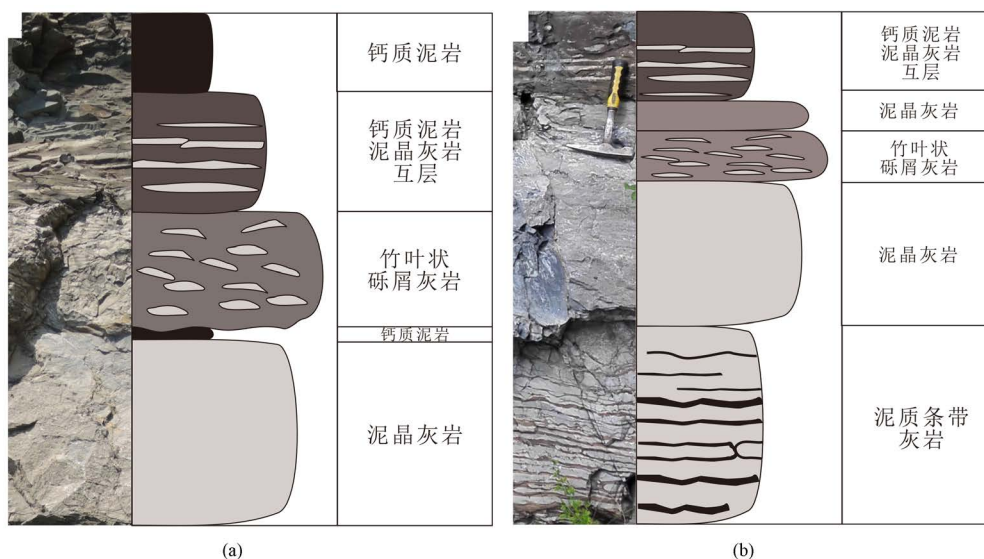


Figure 4. Types of storm sedimentary sequence. (a) Type I storm sedimentary sequence; (b) Type II storm sedimentary sequence

图 4. 风暴沉积序列类。(a) I 类风暴沉积序列; (b) II 类风暴沉积序列

3.5. 竹叶状砾屑灰岩

竹叶状灰岩呈灰色、绿色、棕色。组构从颗粒支撑到基质支撑。野外可识别出两种类型的基质，一种为钙质泥岩胶结，一种为泥晶灰岩胶结。岩层的几何形态从平板状到透镜状，岩层接触关系从相对平整变化到高度不规则。竹叶状灰岩的砾屑常成平板状(或称为扁饼状)，也有多边形或者不规则的，横切面似竹叶，砾屑大多很薄，厚 5~20 mm，平均约 10 mm，其长度变化很大，多为 5 cm，偶尔也会达到 30 cm 甚至更大；通常情况下，砾屑长短轴比值大于 3:1。作为本次研究的主要研究对象，张夏组砾屑灰岩为典型的风暴事件成因((景宇轩等，2015)。

4. 风暴沉积旋回性及其控制因素分析

4.1. 风暴沉积序列

风暴是热带、亚热带海洋的一种热带气旋，一般形成于赤道附近 5°~20° 的热带洋面，影响范围多在纬度 5°~30° 之间，少数达纬度 40°。风暴流是风暴在滨岸和海底引起的一种特殊流体，具有密度流、牵引流、涡流的特征。当风暴掠过海水表面时会驱动海水以波浪形式前进而形成风暴浪，在海岸形成高达 6 m 以上的风暴潮。风暴潮回退则引起风暴回流，并有可能扰动海底沉积物而形成密度流。随着风暴衰退，由不同风暴流搬运的颗粒则迅速下沉，在风暴浪击面之上形成近源风暴岩，在风暴浪击面之下形成远源风暴岩[11]。

一个完整的典型风暴沉积序列自下而上发育三个不同的层段，风暴滞积层、纹理层段、泥质层段或泥岩段[23]。通过对比典型的风暴沉积序列，以及风暴活动的不同阶段，可将下苇甸剖面寒武系张夏组的风暴沉积序列划分为以下两类沉积序列：

I 类风暴沉积序列

该类风暴沉积序列发育在研究剖面下部，主要由钙质泥岩和泥晶灰岩组成。沉积序列自下而上由 4 部分组成：A. 灰绿色钙质泥岩；B. 钙质泥岩夹泥晶灰岩条带；C. 竹叶状砾屑灰岩；D. 钙质泥岩与泥晶灰岩互层(图 4(a))。风暴沉积序列由侵蚀底面、砾屑层(风暴滞积层)和泥岩泥晶灰岩互层构成。冲刷侵蚀面较为平坦，发育底面侵蚀构造，纹理层发育很薄，厚约 2~5 cm，波状层理。

I 类风暴层序，以泥岩、泥晶灰岩层为主，发育泥质条带灰岩，生物碎屑含量较少，表明是处于贫氧的环境中，不利于生物的生存，且处于水动力作用相对较弱的沉积环境，推测形成于水体相对较深、离海岸线较远的风暴浪基面附近水体相对较深的深潮下带下部。

I 类风暴层序发育风暴滞积层和泥质层段，缺失纹理层段。风暴滞积层是在风暴高潮期沉积物快速沉积的结果，以竹叶状砾屑灰岩为代表，砾屑分选、磨圆较好，原岩韧性变形，砾屑间多保持原有的接触关系(图 5(a))。风暴增强期主要以侵蚀底面为主，该阶段是风暴浪引起的强烈的涡流和回流等冲刷未固结的岩层，形成明显的冲刷面。在风暴高峰期，纹层面起伏不平，水动力作用较强，沉积环境较动荡，强度逐渐减弱。风暴作用后期，短期海平面频繁波动，悬浮的沉积物最终沉积下来，形成了正常天气下的泥岩与泥晶灰岩互层。推测该类型风暴沉积可能与物源区距离较近，风暴强度很大，风暴记录较简单且不完整，风暴高峰期时间很短。

II 类风暴沉积序列

II 类风暴沉积序列发育在研究剖面上部，主要由泥质条带灰岩和泥晶灰岩组成。沉积序列自下而上由 4 部分组成：A. 泥质条带灰岩；B. 厚层状泥晶灰岩；C. 竹叶状砾屑灰岩；D. 厚层状泥晶灰岩(图 4(b))。该组合序列的风暴岩形成的沉积环境能量较 I 类风暴层序高，可能形成于晴天浪基面与风暴浪基面之间的深潮下带中 - 上部。



(a)



(b)

Figure 5. Characteristics of the flat-pebble conglomerate in the two types of storm sedimentary sequences. (a) Field photograph and sketch of the flat-pebble conglomerate in type I storm sedimentary sequence; (b) Field photograph and sketch of the flat-pebble conglomerate type II storm sedimentary sequence

图 5. 两类风暴沉积序列中砾屑灰岩的特征。(a) I 类风暴沉积序列中砾屑灰岩野外照片及素描图；(b) II 类风暴沉积序列中砾屑灰岩野外照片及素描图

II类风暴层序发育不完整,底部缺乏侵蚀面,砾屑灰岩层厚十厘米左右,夹在厚层状泥晶灰岩内部。砾屑呈漂浮状散布在泥晶灰岩中,分选、磨圆一般,呈顺层定向排列,粒序层理不明显(图5(b))。海水微微搅动,使厚层泥晶灰岩层中发育不明显的平行层理。该类风暴沉积序列代表的风暴规模不大,作用时间很短,沉积变化不大。

4.2. 风暴沉积序列的周期演变及其控制因素分析

风暴沉积是短时间内的事件沉积,其余时间的沉积均为正常天气下的沉积。风暴事件沉积的时空分布是随机的,本身不具有周期性。风暴沉积和正常天气下的沉积交替出现形成风暴沉积的周期性,体现在风暴沉积强度和频率的周期性演变。

通过野外观察,在研究剖面张夏组中共识别出8套风暴沉积序列(S1-S8),厚度从几十厘米至几厘米不等。其中S1、S2为II类风暴沉积序列,S3~S6为I类风暴沉积序列,S7、S8为II类风暴沉积序列。通过统计风暴沉积厚度随深度变化,发现风暴沉积事件主要发生在剖面下部0~10 m的地层中,中部频率降低,向上又逐渐增加。通过分别统计8次风暴沉积厚度占其所在沉积旋回的厚度比例(图6(b)),发现从剖面下部到上部风暴沉积厚度逐渐增厚再减薄,反映风暴强度呈现增强到逐渐减弱的趋势(图6(a))。

风暴沉积垂向分布具有明显规律性,受到海平面变化控制。风暴沉积序列类型与海平面变化有直接联系,海进和海退对应着不同的风暴岩组合类型[24]。海侵时期主要发育I型风暴沉积序列,而海退时风暴岩类型组合与海进时相反,发育II型风暴沉积序列。

Fischer图解反映研究剖面在沉积时期发生了两次较大规模的海退-海侵变化,与苏德辰等1995年对下苇甸剖面张夏组绘制的Fischer图解可进行对比[25]。风暴事件主要发生在海侵过程中(图7)。第一次海侵过程中发育了S2~S6这5套风暴沉积层,第二次海侵过程中发育了S7、S8两套风暴沉积层,说明在海侵过程中风暴频发,强度大,海退时期则相反。由于S1、S2为II类风暴沉积序列,S3~S6为I类风暴沉积序列,S7、S8为II类风暴沉积序列,说明第一次海侵过程中,风暴强度很大,风暴高峰期时间很短,第二次海侵过程中,风暴规模不大,作用时间很短。

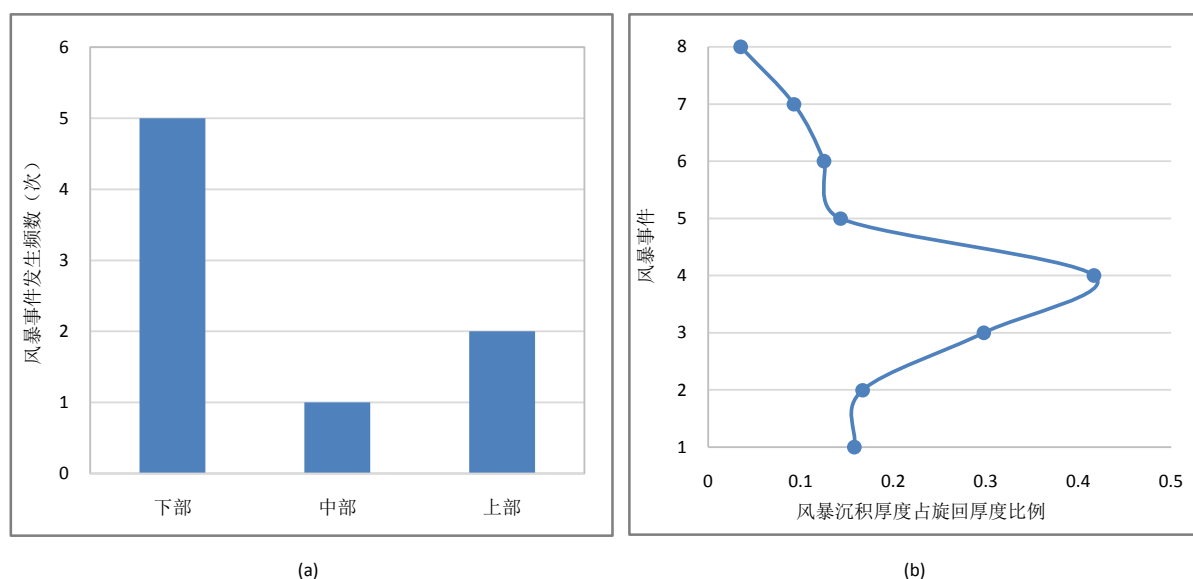


Figure 6. Statistics of the frequency and strength of the storm events in the lower part of Zhangxia Formation. (a) frequency of the storm events; (b) The variation trend of the proportion of the thickness of storm deposition in each cycle

图 6. 张夏组下部风暴事件频数与强度统计。(a) 风暴事件发生频数; (b) 风暴沉积厚度占旋回厚度比例变化趋势

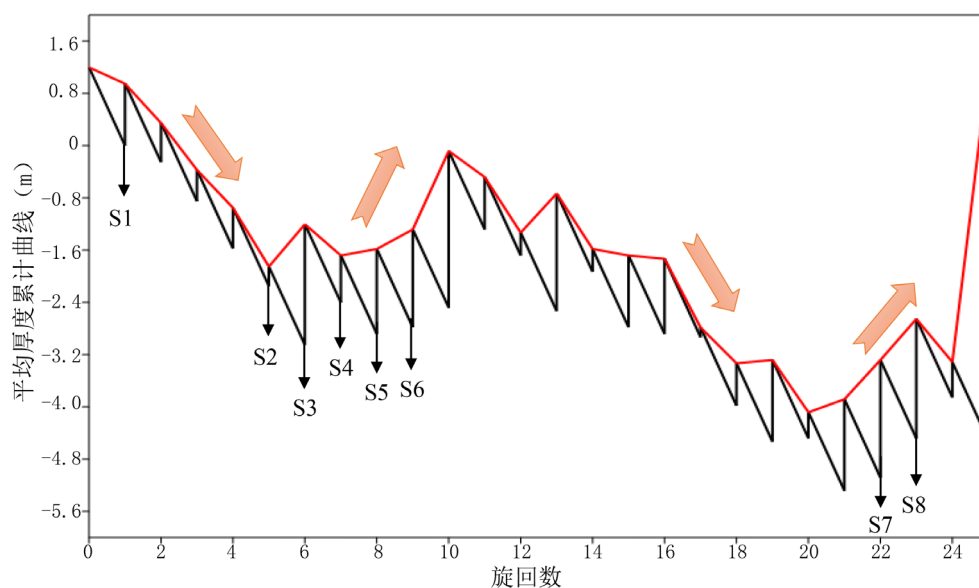


Figure 7. Fischer plots indicating the relationship between the fluctuations of sea level and the periodic evolution of storm sedimentary sequences

图 7. Fischer 图解指示的海平面变化与风暴沉积序列周期演变的关系

5. 结论

1) 下苇甸剖面张夏组发育以竹叶状砾屑灰岩为代表的两类风暴沉积序列：I 类风暴沉积序列以泥岩、泥晶灰岩为主，发育泥质条带灰岩，形成于风暴浪基面附近水体相对较深的深潮下带下部，代表的风暴强度大，高峰期时间短；II 类风暴沉积序列主要由泥质条带灰岩和泥晶灰岩组成，其沉积环境能量较 I 类风暴层序高，可能形成于晴天浪基面与风暴浪基面之间的深潮下带中 - 上部，代表的风暴规模不大，作用时间较短。

2) 尽管风暴事件的时空分布是随机的，不具有周期性，但风暴沉积强度和频率具有周期性演变。研究剖面共发育 8 套风暴沉积序列(S1~S8)，其中 S1、S2 为 II 类风暴沉积序列，S3~S6 为 I 类风暴沉积序列，S7、S8 为 II 类风暴沉积序列。风暴沉积事件主要发生在剖面下部，中部频率降低，向上又逐渐增加，从剖面下部到上部风暴强度呈现增强到逐渐减弱的趋势。

3) 风暴沉积序列类型与海平面变化直接相关。海侵时期主要发育 I 型风暴沉积序列，而海退时则主要发育 II 型风暴沉积序列，且风暴事件主要发生在海侵过程中。研究剖面在沉积时期发生了两次较大规模的海退 - 海侵变化，第一次海侵过程中，风暴强度大，风暴高峰期时间较短，第二次海侵过程中，风暴规模不大，作用时间很短。

参考文献

- [1] Kelling, G. and Mullin, P.R. (1975) Graded Limestones and Limestone-Quartzite Couplets: Possible storm-deposits from the Moroccan Carboniferous. *Sedimentary Geology*, **13**, 161-190. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(75\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(75)90019-6)
- [2] Sepkoski Jr., J.J. (1982) Flat-Pebble Conglomerates, Storm Deposits, and the Cambrian Bottom Fauna. In: *Cyclic and Event Stratification*, Springer Berlin Heidelberg, 371-385. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75829-4_28
- [3] 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(2): 4-21, 133-136, 145.
- [4] Kwon, Y.K., Chough, S.K., Choi, D.K. and Lee, D.J. (2002) Origin of Limestone Conglomerates in the Choson Supergroup (Cambro-Ordovician), Mid-East Korea. *Sedimentary Geology*, **146**, 265-283.

[https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00128-2](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00128-2)

- [5] 张萌, 吴鹏. 北京西山下苇甸寒武系上部竹叶状砾屑灰岩研究[C]//全国大型矿山地质成果暨学术交流会. 北京: 中国地质学会, 2011.
- [6] Brandt, D.S. and Elias, R.J. (1989) Temporal Variations in Tempestite Thickness May Be a Geologic Record of Atmospheric CO₂. *Geology*, **17**, 951-952. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0951:TVITTM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0951:TVITTM>2.3.CO;2)
- [7] Myrow, P.M., Tice, L., Archuleta, B., Clark, B., Taylor, J.F. and Ripperdan, R.L. (2004) Flat-Pebble Conglomerate: Its Multiple Origins and Relationship to Metre-Scale Depositional Cycles. *Sedimentology*, **51**, 973-996. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2004.00657.x>
- [8] 余宽宏, 畅通, 邱隆伟, 孙沛沛. 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.
- [9] 景宇轩, 刘建波, 闫振, 孙永超, 许振清. 利用风暴沉积类型恢复海平面变化: 以北京西山下苇甸剖面寒武纪中晚期风暴沉积为例[J]. 古地理学报, 2015, 17(5): 653-668.
- [10] 王立峰. 华北晚寒武世风暴作用与天文周期的地层意义[J]. 石家庄经济学院学报, 1995, 18(4): 328-333.
- [11] 马瑞申, 张良, 杜远生, 汪校锋. 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.
- [12] Łuczyński, P., Skompski, S. and Kozłowski, W. (2014) Stromatoporoid Beds and Flat-Pebble Conglomerates Interpreted as Tsunami Deposits in the Upper Silurian of Podolia, Ukraine. *Acta Geologica Polonica*, **64**, 261-280. <https://doi.org/10.2478/agp-2014-0014>
- [13] 白万备, 李建厚, 孙长彦, 王敏. 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): 426-432.
- [14] 章雨旭, 万渝生. 北京西山竹叶状灰岩的成因[C]//中国地质科学院地质研究所文集. 1990.
- [15] Pratt, B.R. and Bordonaro, O.L. (2007) Tsunamis in a Stormy Sea: Middle Cambrian Inner-Shelf Limestones of Western Argentina. *Journal of Sedimentary Research*, **77**, 256-262. <https://doi.org/10.2110/jsr.2007.032>
- [16] Einsele, G. and Seilacher, A. (1982) *Cyclic and Event Stratification*. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75829-4>
- [17] Duke, W.L. (1985) The Paleogeography of Paleozoic and Mesozoic Storm Depositional Systems: A Discussion. *Journal of Geology*, **93**, 88-90. <https://doi.org/10.1086/628923>
- [18] Masselink, G. and Van Heteren, S. (2014) Response of Wave-Dominated and Mixed-Energy Barriers to Storms. *Marine Geology*, **352**, 321-347. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.004>
- [19] Garrison, J.R., Miller, S.P., Mestasnunez, A.M. and Williams, J. (2013) Record of Historical Gulf of Mexico Storms Preserved in the Stratigraphy of Gum Hollow Delta, Nueces Bay, Texas, U.S.A.: An Example of Tropical-Cyclone-Induced Hyperpycnal Deposition. *Journal of Sedimentary Research*, **83**, 1-11. <https://doi.org/10.2110/jsr.2013.2>
- [20] 赵双丰. 北京西山下苇甸张夏组地质剖面沉积特征[C]//中国石油地质年会, 2013.
- [21] 康世龙, 邵龙义, 易琦, 赵晓峰, 许文茂, 鲁静. 京西下苇甸地区寒武系岩石特征及沉积环境研究[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(6): 1-8.
- [22] 狄明信, 管守锐, 黄醒汉. 华北地区中寒武世张夏期沉积相及古地理[J]. 华东石油学院学报: 自然科学版, 1986(1): 6-19.
- [23] 吴贤涛, 胡斌, 王观忠, 张国成. 豫西焦作地区上石炭统浅海碳酸盐岩中的风暴沉积[J]. 沉积学报, 1987(4): 5-17+168.
- [24] 陈芳. 豫西偃师地区寒武系张夏组风暴沉积特征及意义[D]: [硕士学位论文]. 焦作市: 河南理工大学, 2014.
- [25] 苏德辰, 李庆谋, 罗光文, 梅冥相. Fischer 图解及其在旋回层序研究中的应用——以北京西山张夏组为例[J]. 现代地质, 1995(3): 279-283.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org