

文章编号: 1000-0550(2000)04-0489-06

# 风暴沉积的遗迹学研究<sup>①</sup>

S. G. Pemberton<sup>1</sup> 周志澄<sup>2</sup> J. MacEacher<sup>3</sup>

1 (Department of Earth and Atmospheric Sciences, Edmonton, Alberta T6G2E3, Canada)

2 (中国科学院南京地质古生物研究所 南京 210008)

3 (Department of Earth Sciences, Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, V5A 1S6, Canada)

**摘要** 遗迹化石正在证明其在鉴别和解释事件地层中的作用。风暴沉积含有一套混合的、与能量水平变化相适应的遗迹化石组合,两种不同的遗迹群落反映变化着的行为方式对生物所移居的两种连续的,但是单个性质不同的生境所作出的反应:常住的或平常天气的遗迹群落可以作为一种稳定的底栖群落的代表,在这一群落里单个的居群达到或接近它们的承载能力;而周期性产生的风暴遗迹群落则代表着在一种不稳定的、生态环境恶化的、机械控制的环境下繁盛的机会主义生物的群落。典型的陆源碎屑的风暴沉积中的遗迹群落可以加拿大艾伯塔上白垩统卡迪组中的遗迹群落为例,而碳酸盐风暴沉积中的遗迹群落则可以中国华北地台东部上寒武统崮山组中的碳酸盐风暴沉积序列中的遗迹群落为例,本文详细介绍这两种类型的成因及结构、构造特点。

**关键词** 风暴沉积 机会主义遗迹化石 均衡遗迹化石

**第一作者简介** S. G. Pemberton教授 1949年出生 加拿大艾伯塔大学地球大气科学系教授 沉积学及遗迹学  
中图分类号 P512.2 文献标识码 A

近二十年间,遗迹学的研究取得了显著的进展,遗迹学研究的最新成果不仅对地层学研究有着重要意义,而且也广泛地被应用到沉积学的各个领域,它对于风暴沉积的识别和解释就是一个很好的例子。传统上,风暴沉积的识别主要依据机械作用所产生的结构、构造(如丘状层理),由于后来的生物成因的和机械的对风暴沉积层的改造作用,影响到这些结构、构造的保存,同时,使我们在识别古代岩石记录中的风暴沉积时带来一定的困难。由风暴沉积所产生的一套混合的遗迹化石组合是识别风暴沉积的一种很好标志,可以给我们提供更多的有关古代风暴沉积的线索。

## 1 幕式沉积事件及风暴沉积的一般特征

近二十年来,地质学家已经开始认识到在岩石记录中相对迅速注入的沉积物(幕式沉积事件)的范围和重要性,事实上, Dott<sup>[6]</sup>曾成功地证明了大多数沉积记录所代表的是幕式的或不连续的沉积事件,而不是逐日的、稳定状态下的沉积条件。最初的研究几乎都仅局限于深水,外陆架和斜坡环境,在这些地方,重力引起的浊流构成一种更重要的产生沉积作用的机制,然而,沉积学家已经开始注意到在浅水、海岸地区所发生的幕式沉积事件。总起来说,这些事件主要由风暴

或飓风所产生并很好地记录在现代环境中<sup>[17, 23, 24]</sup>,而且在岩石记录中正在更多地被人们识别出来<sup>[7, 8, 10, 31]</sup>。

Seilacher<sup>[28]</sup>在一篇讨论文章中简要地指出:幕式的沉积作用事件[包括浊流沉积、风暴沉积、洪水沉积以及植物碎屑脉动(phytodetritus pulses)]具有一些共同的特征:1)根据明显的侵蚀和沉积构造,可以反映出在事件中水的湍流的发生、高峰和消减的整个过程;2)沿着垂向(由底到顶)和横向(由浅水到深水)梯度,它们对生物和非生物的沉积物进行重新分布;3)事件后在一个与生物学相关的时期内,通过海底粘度和/或者食物含量的变化来改变底栖动物的生态环境。浊流沉积和风暴沉积是事件层的最丰富的类型,本文重点介绍风暴沉积的一般特征。有关浊流沉积的成因及结构、构造特征,国内外已有许多文章作过详细介绍,本文不再赘述。

浅水海岸带由多种沉积环境组成,在很短的距离内,沉积条件常常发生很大变化,因此,主要的问题在于如何鉴别和解释风暴事件。就目前而言,岩石类型和沉积构造序列对于解释深水浊流沉积物具有重要意义,但对于浅水沉积物的解释上则受到一定的限制。不管怎样,一种特殊的层理类型(丘状交错层理)看来毫无例外地由风暴浪所产生<sup>[31]</sup>。虽然已经很好地研

① 国家自然科学基金(批准号:49872046)及古生物所创新基金成果。

收稿日期:2000-05-29 收修改稿日期:2000-06-20

究过,但丘状交错层理以及与之共生的槽状交错层理的成因<sup>[21]</sup>仍是一个相当有争议的论题。有关这一争论的专门著作详见 Walker<sup>[32]</sup>, Leckie and Krys-tinik<sup>[20]</sup>, Duke。Duke 等<sup>[10]</sup>指出,争论的要点在于: 1) 产生丘状交错层理的水流的级别; 2) 具有丘状交错层理的层的形态; 3) 风暴产生的水流的性质。使得事情更为复杂的是: 虽然 Walker<sup>[31]</sup>提出丘状交错层理只能在正常浪基面之下形成,但 Harms<sup>[16]</sup>估计,丘状交错层理能够形成于水深从 5~30 m 的范围内,更有甚者, Hunter 和 Clifton<sup>[18]</sup>指出,在水深只有 2m 的地方,它也可形成。最近, Cotter 和 Graham<sup>[4]</sup>在爱尔兰晚泥盆世河流沉积物中也鉴别出丘状交错层理。传统的古生物控制对于这些风暴沉积判别用处甚少,因为大多数砂质碎屑单元通常缺少实体化石,而同样的这些单元却常常含有丰富的遗迹化石<sup>[5, 13, 14, 25, 29]</sup>。风暴单元由从通常拥有一个强的振荡水流成分的单个消减水流事件中迅速沉积(几小时到几天)下来的独特的砂岩层来代表<sup>[6]</sup>。表面上看来,它们很像浊流沉积,但它们以具有波浪成因的和/或者联合水流成因的沉积构造和在页岩夹层中产有浅海动物群而与浊流沉积基本上区别开来<sup>[19]</sup>。风暴成因单元的理想模式已经构成<sup>[7]</sup>并得到解释,这些理想的序列总体上具有以下特征:

### 1. 风暴侵蚀: 一个底部的侵蚀表面可以是波状

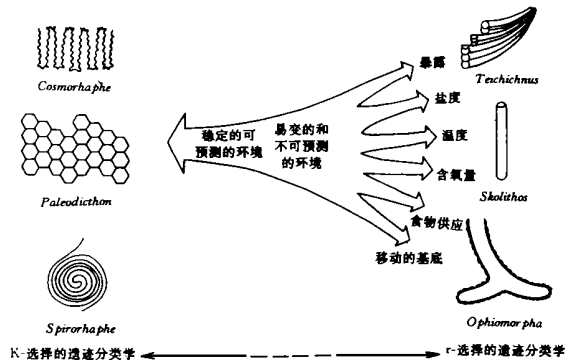


图 1 自然环境条件的稳定性可预测性的梯度将控制掘穴生物的居群策略

均衡(K-选择)遗迹化石在非常稳定的和可预见的条件下的高分异度组合中发育;机会主义(r-选择)遗迹化石在非常多变的、不可预测的条件下的低分异度组合中上升到一个重要地位(据 Ekdale, 1985<sup>[11]</sup>, 改编)。

Fig. 1 Gradients in the stability and predictability of physical environmental conditions will control population strategies among burrowing organisms. Equilibrium (K-selected) trace fossils flourish in high-diversity assemblages under very stable and predictable conditions. Opportunistic (r-selected) trace fossils rise to prominence in low-diversity assemblages under extremely variable and unpredictable conditions. (Modified from Ekdale, 1985)

的,具有底痕,卵石,壳屑或泥岩的内碎屑,局部菱铁矿化;

2. 主要的风暴沉积作用:丘状或槽状交错层,局部共生有水平的或平行的层纹;

3. 消减风暴沉积:联合水流和/或波成波痕的砂层,指示一个逐渐回归到低水流状态的震荡条件;

4. 风暴后一平常天气下泥质沉积作用:反映由风暴所产生的沉积物中的最后的悬浮物的降落(即:风暴后泥的沉积),或者回到正常背景下的沉积作用(即平常天气下泥的沉积)<sup>[19]</sup>。

## 2 风暴沉积物的遗迹学研究

难以保存为实体化石的软体的内栖动物群的活动是任何一个生物学序列的重要组成部分。业已表明,最初重新移居在缺乏动物群环境中的多数机会主义种是栖居居住的多毛类。因此,这一遗迹化石记录(图 1)也许是在一个生态序列里找到机会主义移居者的证据的最好地方<sup>[29]</sup>。Ekdale<sup>[11]</sup>总结了许多可能的来自于: 1) 浊流沉积作用<sup>[27]</sup>; 2) 盐度变化<sup>[1]</sup>; 3) 缺氧<sup>[3]</sup>; 以及 4) 风暴沉积作用<sup>[25, 29, 30]</sup>的例子。在所有这些情况下,一些物理的和/或化学的压力作用于底栖居群。

### 2.1 陆源碎屑的风暴沉积中遗迹化石特征

陆源碎屑的风暴沉积遗迹化石特征,可以加拿大艾伯塔上白垩统(土仑期)卡迪组中的风暴沉积为例<sup>[25, 29]</sup>。遗迹化石组合在这一单元中是复杂的,因为它们同时含有 *Skolithos* 和 *Cruziana* 遗迹相的分子。细粒的粉砂岩和泥岩中含有遗迹化石 *Chondrites*, *Cochlichnus*, *Gyrochorte*, *Palaeophycus*, *Phoebichnus*, *Planolites*, *Rhizoecorallium*, *Rosselia*, *Taenidium*, *Thalassinoides* 和 *Zoophycos*。这一遗迹化石组合可归属为 *Cruziana* 遗迹相,具有分异度高,但大多数遗迹属的个体密度特别低的特征。这些遗迹化石推测为食虫动物或食泥动物在开发营养相对丰富的、沉积在低能的、滨外环境的细粒沉积物时所造成。在这一序列之上所出现的砂岩含有不同的由 *Skolithos*, *Ophiomorpha* 和逃逸构造组成的遗迹化石组合。以居住掘穴为主,属于 *Skolithos* 遗迹相,具有遗迹的个体密度高,但总的遗迹分类单元的分异度较低的特征。

因此,卡迪组的部分层段在一个单独的沉积旋回中都含有一个混合的遗迹化石组合。两个典型的与深度有关的遗迹群落的交替变化通常归结于海平面的反复上升和下降,但是,更可能的解释是水动力能量的波动造成了砂和粉砂的沉积作用的交替变化。两个不同的遗迹群落反映造迹生物的变化着的行为方式以适应正在移居的两个连续的,然而又各不相同的居住环境。

常住的遗迹群落(即 *Cruziana* 遗迹相的分子)可以代表一个稳定的底栖群落, 在这一群落里, 单个的居群达到或接近它们的承载能力(Carrying capacity), 这样一些典型地被认为应变能力有限的<sup>[22]</sup>组合产生于具有低的物理-化学压力的居住环境中; 另一方面, 周期性产生的 *Skolithos* 遗迹相分子代表着在一个不稳定的、高压力的、机械作用控制环境中机会主义群落的繁盛(图2)。在北美西部内陆海槽 15 个白垩系波浪作用为主的、临滨相碎屑层段中已经发现有这些倾向。这种基本的类型也已经在时代从奥陶纪到渐新世的许多其它沉积物中识别出来。这样一些从层纹状到掘穴的序列在许多解释为临滨环境的西部内陆白垩系地层中是典型的。Pemberton 等<sup>[26]</sup>描述了犹太州黑鹰组温泉谷段中的以风暴为主的沉积物。

在岩芯中, 由于受到岩芯较小的限制, 鉴别丘状层理和槽状交错层理比较困难, 但是, 特征的遗迹化石类型可以用来帮助我们解释风暴沉积。卡迪组中的一组岩芯展示出一个多样的和保存良好的遗迹化石组合, 包括至少 15 个遗迹属的代表: *Anconichnus*, *Asterosoma*, *Chondrites*, *Diplocraterion*, *Helminthopsis*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rhizocorallium*, *Rosselia*, *Skolithos*, *Subphyllochorda*, *Teichichnus*, *Terebellina*, *Thalassinoides* 和 *Zoophycos*。一个典型的风暴沉积序列包括: 1. 清楚的底部, 有或没有底部滞后沉积; 2. 低角度平行到次平行的层纹; 3. 逃逸构造; 4. 机会主义生物的居住掘穴; 5. 逐层掘穴的顶部。在砂岩层中的遗迹化石代表迅速移居在风暴砂表面的机会主义生物的活动, 典型的类型包括 *Skolithos* 和 *Ophiomorpha*。这些砂岩与以 *Anconichnus*, *Asterosoma*, *Chondrites*, *Helminthopsis*, *Planolites*, *Rhizocorallium*, *Rosselia*, *Subphyllochorda*, *Teichichnus*, *Terebellina*, *Thalassinoides* 和 *Zoophycos* 为主的生物扰动的细粒沉积物互层, 这一组遗迹化石属于常住的遗迹群落, 指示一种稳定的、平常天气的沉积作用。根据常住的遗迹化石组合的变化可以区别出近基-远基的倾向。

最近, Bromley 和 Asgaard<sup>[2]</sup>介绍了一种新的遗迹相: *Arenicolites* 遗迹相, 用以解释短期的、机会主义遗迹化石出现在不调和的环境中(如风暴沉积)。这一新的术语的提出容易引起混乱, 因为它无法与现在的 *Skolithos* 遗迹相的概念区别开来。现有的遗迹相类型已足以解释这种情况。

Follmi 和 Grimm<sup>[12]</sup>曾提出“罹难者先驱”(Doomed Pioneer)的概念用以解释那些出现在无生物扰动的沉积物中的、唯一与重力流沉积物有关的异常的遗迹化石。这样一种方案表示事件沉积作用可以使

得异地的内栖动物在缺氧沉积环境中出现, 这一概念涉及到以下几个方面: 1. 活着的十足类甲壳纲(或推测为其它勇敢的内栖动物)被带入到湍流沉积作用事件的一些类型中; 2. 这些被带进来的掘穴者改造了大量层纹状的、通常富有有机质的沉积物, 这样一种环境原先是把它们排除在外的; 3. 持续的缺氧环境限制了这些被搬运进来的内栖动物掘穴者的生存时间并使它们成为“罹难者先驱”<sup>[15]</sup>(表1, 图3)。

从事件沉积作用的观点来看, 这一概念也许在解释其它异常的遗迹化石组合的产状时, 具有十分重要的意义。同样, 正如 Follmi 和 Grimm<sup>[20]</sup>所指出的那样, *Thalassinoides* 在缺氧的、半远洋的宿主沉积物中的出现以前曾被不正确地解释为海底水通风和在一个

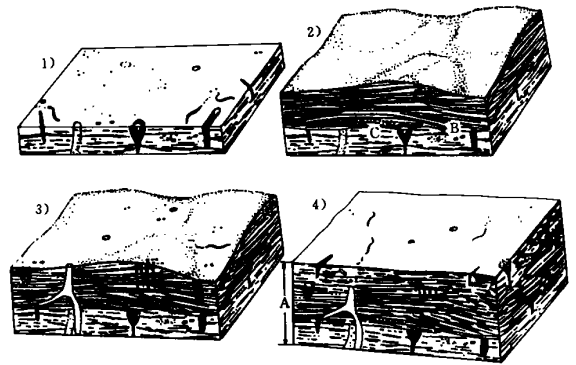


图2 西部内陆白垩系典型的临滨环境中风暴沉积成因示意图

1. 由 *Anconichnus*, *Asterosoma*, *Chondrites*, *Helminthopsis*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rosselia*, *Teichichnus*, *Terebellina* 和 *Thalassinoides* 组成的 D 平常天气沉积作用背景下常住遗迹化石组合;
2. 具有清楚底部的细砂风暴沉积作用; B: 可能具有一个被带入的动物群;
3. 风暴沉积作用的停止以及由 *Arenicolites*, *Diplocraterion*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus* 以及 *Skolithos* 所代表的机会主义动物的移居;
4. 平常天气条件和沉积作用的恢复导致机会主义生物消失, 与此同时, 正常背景下的掘穴者重新建立起它们的掘穴, 常住动物群从顶部向下掘穴, 造成一种逐层掘穴的上接触面的产生(A)(据 Pemberton 等, 1992<sup>[45]</sup>改编)。

Fig. 2 Schematic diagram illustrating the genesis of tempestites in typical shoreface setting from the Cretaceous of the Western Interior.

- (1) Fair-weather sedimentation-background resident assemblage consisting of *Anconichnus*, *Asterosoma*, *Chondrites*, *Helminthopsis*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rosselia*, *Teichichnus*, *Terebellina*, and *Thalassinoides*.
- (2) Storm deposition of fine-grained sand with a sharp base (B) and possibly with an entrained fauna (C) of both larvae and adults.
- (3) Cessation of storm deposition and colonization by opportunistic fauna represented here by *Arenicolites*, *Diplocraterion*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, and *Skolithos*.
- (4) Resumption of fair-weather conditions and sedimentation results in the elimination of the opportunistic organisms as the resident background burrowers are reestablished. The resident fauna burrows down from the top, resulting in the generation of a gradational upper contact (A). (Modified from Pemberton et al. 1992)

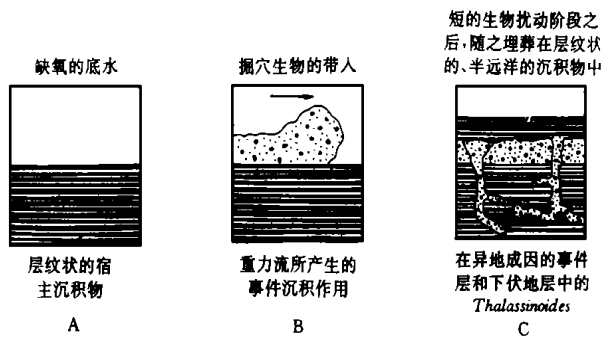


图3 图示说明, 罹难的前驱者成因模式用以解释在具有生物扰动构造的异地事件沉积物中的独特组合, 这一例子与掘穴动物被带入到缺氧环境有关(据 Grimm 和 Follmi, 1990<sup>[15]</sup> 改编)

Fig. 3 Schematic diagram illustrating the doomed pioneers model to explain the exclusive association of allochthonous event deposits with bioturbation; this example relates to the introduction of burrowers into oxygen-depleted environments. (Modified from Grimm and Follmi 1990)

宽阔地区和/或临时的范围内的重新充氧。对于在层纹状序列中突然出现的、一时的生态现象的罹难者先驱遗迹化石组合的鉴别可以使更精确地了解古含氧水平和盆地沉积历史<sup>[25]</sup>。

## 2.2 碳酸盐风暴沉积中的遗迹学研究

如上所述, 陆源碎屑的风暴沉积中的沉积学和遗迹学已经得到了很好的研究, 但迄今为止, 碳酸盐风暴沉积中的遗迹学特征并没有受到很好的研究及应有的重视, 鲜见报道<sup>[33]</sup>。造成这一结果的因素可能很多, 但最重要的因素有以下几方面: 1. 碳酸盐沉积中的遗迹化石不如陆源碎屑沉积中那么丰富; 2. 对于遗迹化石在识别和解释碳酸盐风暴沉积中的作用和意义认

识不足, 人们往往重视碳酸盐沉积的结构、构造特征, 对其中的遗迹学特征没有引起足够的注意; 3. 由于碳酸盐沉积更容易受到成岩作用的影响, 并造成遗迹化石在碳酸盐沉积中的保存比在碎屑岩中更为困难。

作者在对华北地台东部包括山东省泰安、莱芜、淄川一带上寒武统崮山组中的遗迹化石进行研究时发现, 在崮山组中、上部薄层灰岩、泥质灰岩的层面和底面上产有不同的遗迹化石组合, 这一现象与上述北美西部内陆海槽白垩系卡迪组中的遗迹化石组合特征十分相似, 它们与灰岩层本身, 三叶虫碎屑层及上覆的泥、页岩层构成了一个完整的风暴前—风暴—风暴后的碳酸盐风暴沉积序列, 这一系列的组成及成因解释如下(由下至上): 1) 在薄层灰岩的底面含有以 *Phycodes*, *Thalassinoides*, *Palaeophycus* 和 *Planolites* 等为主的遗迹化石, 具有分异度比较高、但单个居群的百分比并不很高的特征。这一遗迹化石组合是由风暴前正常天气条件下常住的造迹生物活动所产生, 可归属于均衡主义(K—选择)的 *Cruziana* 遗迹相; 2) 1~2 cm 厚的泥质灰岩或灰岩, 有或者没有层纹构造。在岩石切面中, 发现有遗迹化石: *Planolites* 和 *Diplocraterion*; 3) 在灰岩表面产有以 *Diplocraterion*, *Arenicolites* 和 *Skolithos* 为主的遗迹化石组合, 反映当风暴刚结束, 在不稳定的基底上机会主义动物(r—选择)立即移居到尚未开发的碳酸盐沉积物表面, 建造起滤食生物的居住构造。这一遗迹化石组合可归属于 *Skolithos* 遗迹相; 4) 薄层灰岩之上, 被一层 1 mm 厚的具有粒序层理的三叶虫碎屑层所覆盖, 在三叶虫碎屑层的顶部, 发现有单轴的钙质海绵骨针。显然, 三叶

表1 罹难的前驱者的概念: 基本观察及解释(据 Grimm 和 Follmi 1990<sup>[15]</sup>)

Table 1 Doomed Pioneers Concept: Critical Observations and Interpretations (After Grimm and Follmi 1990)

观察	解释
1. 生物扰动仅仅产于事件层内至直接深入到下伏的沉积物中。	1. 从一个有关事件沉积作用和生物扰动之间的成因上的关系, 推导出异地沉积物的带入和掘穴的内栖动物的进入之间的成因上的联系。
2. 遗迹化石 <i>Thalassinoides</i> 和 <i>Gyrolithes</i>	2. 来自于浅水环境、与缺氧盆地环境无成因上联系的甲壳类居住掘穴。
3. 生物扰动构造具有选择性, 一般发生在细粒的、富含有机质的层段, 而那些缺乏有机质的凝灰质沉积物则缺少生物扰动构造。	3. 可能指示在盆地古环境中生物连续移居和对营养成分的开发。
4. 生物扰动层段清楚, 整合地被缺乏生物扰动的半远洋沉积物所覆盖。	4. 突然回到或持续的缺氧条件, 明显的限制了临时的掘穴活动的时间。
5. 缺乏带壳的底栖生物和有褶的内栖动物。	5. 突然的掘穴幕不是反映在盆地底部的真实的生态改组的开始, 缺乏生态的复杂性也许反映内栖动物移居者幸存可能性受到限制和/或对于后来的幼虫的补充机会不多。

虫碎屑来自于浅水环境, 由风暴引起的浊流所带来; 5) 1~2 mm 厚的泥岩或页岩, 反映风暴后平常天气下悬浮泥的沉积作用, 悬浮泥的来源可能由风暴作用所带来或来自于正常海洋环境中。

从以上所描述的碳酸盐风暴沉积序列中可以发现, 它与前述的陆源碎屑的风暴沉积序列主要在以下三个方面有所不同:

1. 在碳酸盐风暴沉积序列中, 风暴所引起浊流沉积作用的存在;
2. 在风暴后所产生泥岩、页岩中, 缺乏遗迹化石, 指示一种缺氧的沉积条件;
3. 在序列的垂直方向上, 遗迹化石的分布是间断的。

这种差异的存在, 可能是由沉积环境的差异所造成。华北地台东部崮山组中、上部所出现的薄层状灰岩和泥质灰岩沉积在临滨相的下部或滨外相, 比北美西部内陆的白垩系卡迪组的沉积环境(临滨相)要深。

在崮山组中、上部的薄层状泥质灰岩、灰岩间, 夹有厚层竹叶状灰岩, 其中没有发现有遗迹化石存在, 由风暴所产生的丘状或槽状交错层理由竹叶状砾石所组成, 可以推测, 这种厚层竹叶状灰岩是由飓风所产生, 造迹生物难以在这种高强度的恶劣环境下生存。

### 3 结论

风暴沉积在大多数盆地中代表着一个重要的沉积作用的产物正在更多地岩石记录中被识别出来, 它包含有一套由一个稳定的平常天气的遗迹化石组和不稳定的风暴遗迹化石组组成的特征的遗迹化石组合。前者(常住的)以均衡(K-选择)种遗迹为主; 后者(或先驱)由以机会主义(或r-选择)种的遗迹种组成。

风暴沉积显示出以下的机械的和遗迹学的特征:

1. 清楚的底部, 具有或不具有底部滞后沉积;
2. 平行到次平行的层纹(丘状或槽状交错层理);
3. 逃逸构造常见;
4. 逐层掘穴的顶部。近基-远基的倾向一般由平常天气下的组合特征的变化来区别。遗迹学特征和机械沉积特征的结合对于鉴别风暴沉积尤为重要。

### 参 考 文 献

- 1 Beynon B M, Pemberton S G, Bell D A *et al.* Environmental implications of ichnofossils from the Lower Cretaceous Grand Rapids Formation, Cold Lake Oil Sands Deposit. In: James D J, Leckie D A, eds., Sequences, Stratigraphy, Sedimentology, Surface and Subsurface [ C ]. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1988, 15: 275~90
- 2 Bromley R G, Asgaard U. Ichnofacies: A mixture of taphofacies and biofacies [ J ]. *Lethaia*, 1991, 24: 153~63

- 3 Bromley R G, Ekdale A A. Chondrites: A trace fossil indicator of anoxia in sediment [ J ]. *Science*, 1984, 224: 872~74
- 4 Cotter E, Graham J R. Coastal plain sedimentation in the late Devonian of southern Ireland; hummocky cross-stratification in fluvial deposits [ J ]. *Sedimentary Geology*, 1991, 72: 201~24
- 5 Dam G. Paleoenvironmental significance of trace fossils from the shallow marine Lower Jurassic Neill Klintor Formation, East Greenland [ J ]. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1990, 79: 221~48
- 6 Dott H R Jr. 1982 SEPM Presidential address: Episodic sedimentation: How normal is average? How rare is rare? Does it matter? [ J ]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1983, 53: 5~23
- 7 Dott H R Jr, Bourgeois J. Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequences [ J ]. *Geological Society of America Bulletin*, 1982, 93: 663~80
- 8 Duke W L. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes, and intense winter storms [ J ]. *Sedimentology*, 1985, 32: 167~94
- 9 Duke W L. Geostrophic circulation or shallow marine turbidity currents? The dilemma of paleoflow patterns in storm-induced prograding shoreline systems [ J ]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1990, 60: 870~83
- 10 Duke W L, Amott R W C, Cheel R J. Shelf sandstones and hummocky cross-stratification: New insights on a storm debate [ J ]. *Geology*, 1991, 19: 625~28
- 11 Ekdale A A. Paleocology of marine endobenthos [ J ]. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 1985, 50: 63~81
- 12 Follmi K B, Grimm K A. Doomed pioneers: Gravity-flow deposition and bioturbation in marine oxygen-deficient environments [ J ]. *Geology*, 1990, 18: 1069~72
- 13 Frey R W. Trace fossils and hummocky cross-stratification, Upper Cretaceous of Utah [ J ]. *Palaios*, 1990, 5: 203~18
- 14 Frey R W, Goldring R. Marine event beds and recolonization surfaces as revealed by trace fossil analysis [ J ]. *Geological Magazine*, 1992, 129: 325~35
- 15 Grimm K A, Follmi K B. Doomed pioneers: Event deposition and bioturbation in anaerobic environments [ J ]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1990, 74: 666
- 16 Harms J C. Primary sedimentary structures [ J ]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 1979, 7: 227~48
- 17 Hayes M O. Hurricanes as geological agents: Case studies of Hurricanes Carla, 1961 and Cindy, 1963 [ R ]. Bureau of Economic Geology, The University of Texas. Report of Investigations 1967, 61: 1~56
- 18 Hunter R E, Clifton H E. Cyclic deposits and hummocky cross-stratification of probable storm origin in Upper Cretaceous rocks of the Cape Sebastian area, southwestern Oregon [ J ]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52: 127~43
- 19 Johnston H D, Baldwin C T. Shallow siliciclastic seas. In: Reading H G ed., *Sedimentary Facies and Environments* [ M ]. 2d ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1986, 229~82
- 20 Leckie D A, Krystinik L A. Is there evidence for geostrophic currents preserved in the sedimentary record of inner to middle-shelf deposits? [ J ]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59: 862~70
- 21 Leckie D A, Walker R G. Storm- and tide-dominated shorelines in Cre-

- taceous Moosebar-Lower Gates interval-outcrop equivalents of deep basin gas trap in Western Canada[J]. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 1982, 66: 138~57
- 22 Levinton J S. The paleoecological significance of opportunistic species [J]. Lethaia, 1970, 3: 69~78
- 23 Morton R A. Nearshore responses to great storm[s A]. Geological Society of America Special Paper, 1988, 229: 7~22
- 24 Morton R A, Paine J G. Beach and vegetation line changes at Galveston Island Texas; Erosion, deposition, and recovery from Hurricane Alicia[J]. The University of Texas at Austin Bureau of Economic Geology, Geological Circular, 1985, 85~5: 1~39
- 25 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, eds. The Mesozoic of Middle North America[C]. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1984, 9: 281~304
- 26 Pemberton S G, Van Wagoner J C, Wach G D. Ichnofacies of a wave dominated shoreline[A]. In: Pemberton S G ed., Application of Ichnology to Petroleum Exploration[C]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Core Workshop, 1992, 17: 339~82
- 27 Seilacher A. Paleontological studies in turbidite sedimentation and erosion[J]. Journal of Geology, 1962, 70: 227~34
- 28 Seilacher A. General remarks about event beds[A]. In: Einsele G, D, Seilacher A, eds. Cyclic and Event Stratification[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 161~74
- 29 Vossler S M, Pemberton S G. Skolithos in the Upper Cretaceous Cardium Formation; An ichnofossil example of opportunistic ecology[J]. Lethaia, 1988, 21: 351~62
- 30 Vossler S M. Ichnology and paleoecology of offshore siliciclastic deposits in the Cardium Formation (Turonian, Alberta, Canada)[J]. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 1989, 74: 217~29
- 31 Walker R G. Shelf and shallow marine sands[A]. In: Walker R G, ed. Facies Models[C], 2d ed., Reprint Series 1, Toronto: Geoscience Canada, 1984. 141~70
- 32 Walker R G. Turbidites and associated coarse clastic deposits[A]. In: Walker R G, ed. Facies Models[C]. 2d ed., Reprint Series 1, Toronto: Geoscience Canada, 1984. 171~88
- 33 Zhou Zhicheng, Li Yue, Pemberton S G. Upper Cambrian trace fossils from eastern North China Platform and their environmental significance (in Press)

## Ichnological Studies on Tempestites

S. G. Pemberton<sup>1</sup> ZHOU Zhi-cheng<sup>2</sup> J. MacEachern<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Department of Earth and Atmospheric Sciences, Edmonton, Alberta T6G2E3, Canada)

<sup>2</sup>(Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

<sup>3</sup>(Department of Earth Sciences Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, V5A 1S6, Canada)

### Abstract

Trace fossils are proving to be powerful tools for recognition and interpretation of event beds. Tempestites contain a mixed trace fossil assemblage that reflects fluctuations in energy levels. The two different ichnocoenoses reflect varying behavioral responses of the organisms colonizing two successive, individually distinct habitats. The resident or fair-weather ichnocoenose can be considered representative of a stable benthic community, within which individual populations are at or near their carrying capacity. Periodic generation of the storm ichnocoenose, on the other hand, represents the flourishing of a community of opportunistic organisms in an unstable, high-stress, physically controlled environment. The general succession, typical terrigenous tempestites represented by the tempestites in the Upper Cretaceous Cardium Fm. of Alberta, Canada, consists of (1) a fair-weather resident trace fossil suite; (2) a sharp basal contact, with or without a basal lag; (3) parallel to subparallel laminations (reflecting hummocky or swaley cross-stratification); (4) common escape structures; (5) the dwelling burrows of opportunistic organisms that colonize the unexploited storm unit; (6) gradational burrowed tops, representative of bioturbation resulting from subsequent burrowing by organisms from higher colonization levels; and (7) a fair-weather resident trace fossil suite indicative of a return to quiescent conditions following abatement.

Up to now, the ichnology in the carbonate tempestites has not been well studied and reported. The succession found in the Upper Cambrian Gushan Fm. from eastern North China Platform can be regarded as the typical carbonate tempestites. The succession includes the following parts (from bottom to top): (1) the trace fossils on the sole of the thin-bedded limestone containing *Phycodes*, *Thalassinoides*, *Palaeophycus* and *Planolites* etc; (2) 1—2 cm thick muddy limestone or limestone with or without lamination; (3) the opportunistic trace fossils *Diplocraterion*, *Arenicolites* and *Skolithos* on the surface of the limestone; (4) the surface of the limestone covered by about 1 mm thick trilobite debris; (5) 1—2 mm thick mudstone or shale.

**Key words** tempestites opportunistic trace fossils equilibrium trace fossils