

[本刊说明] 为了配合全国沉积岩区 1:5 万地质填图工作的开展,以地科院情报所吴瑾秋为负责人的情报调研专题组,按地矿部 75-16-02-Ⅱ课题精神,编译了《国外沉积岩区 1:5 万区域地质调查工作的几个问题》,其中有关构造部分已由贵州人民出版社正式出版。有关沉积岩类型的内容,将由本刊陆续刊出。主要内容包括:生物礁、红层、硅质岩、浊积岩、等深积岩及风暴岩。将针对野外地质填图的需要,重点介绍这几类岩石的基本特征、野外识别标志及相似岩类(如风暴岩与浊积岩、细粒浊积岩与等深积岩等)的区别,并介绍各类沉积岩研究的意义,特别是岩相古地理意义。希望能对野外工作者有所裨益。

风暴岩的基本特征及其与浊积岩的区别标志

刘树臣

(地矿部情报所)

一、引言

随着沉积学和现代海洋学研究的不断发展,七十年代以来,国外掀起了风暴岩研究的热潮,并迅速形成了风暴岩的成因理论,建立了可以与鲍玛序列相比拟的理想序列模式(R. D. Kreisa 等, 1982; T. Aigner, 1982; P. J. Brenchley, 1985)。八十年代中期,我国沉积学工作者引进了风暴岩的概念,研究发展也极其迅速,陆续发现了大量的风暴岩,并将风暴岩的研究应用到岩相古地理的恢复再造工作中。

当前,有关风暴岩层序的描述很多,其时代遍布于从寒武纪到全新世的各个地质历史时期,其类型既有砂质风暴岩和钙质风暴岩,也有磷质风暴岩。对风暴岩的沉积构造等特征描述很多,但对其成因仍有争论,许多问题有待于进一步深入研究。

本文主要从风暴岩的生物特征(特别是遗迹化石)和侧向序列的变化,并详细论述风暴岩与浊积岩的区别标志,期望能对识别风暴岩有所帮助,以便在盆地分析、古地理再造和地层对比上正确应用风暴岩的概念。

二、风暴岩的特征

对风暴岩的研究,最早是从对碎屑岩的研究入手,描述风暴沉积的特征,大多数例子也来自碎屑岩。有关砂质风暴岩的各种沉积,构造的认识,特别是对陆棚上的风暴砂岩,已经研究的较详细(P. J. Brenchley, 1985)。

R. Goldring 和 P. Bridges(1973)、N. L. Banks(1973)及 R. L. Brenner 和 D. K. Davis(1973)等人首先建立了具有特殊性质的风暴成因的陆棚砂岩相。P. J. Brenchley(1985)将风暴影响的陆棚砂岩分为两种类型:(1)形成于风暴浪基面之上,具丘状交错层理和浪成波痕;(2)形成于风暴浪基面之下,无浪成构造,具有浊积岩鲍玛序列的许多组分,即粒序性、平行纹理或

小型交错纹理。但是,到目前为止,我们对陆棚水流与砂的搬运和沉积之间的关系了解甚少。因此,虽然地质学家通过野外观测,对于风暴沉积作用的产物以及正常陆棚的作用过程,有了比较清楚的了解,但我们只能把这些知识尝试性地相互联系。

虽然钙质风暴岩的研究工作开展较晚,但许多人(T. Aigner, 1982; 吴贤涛, 1982)也已系统论述了其沉积特征和生物特征。碎屑岩层序中风暴沉积的许多特征在碳酸盐岩中都可见到,例如丘状交错层理、浪成波痕、工具痕以及垂向上的“似鲍玛序列”等等,它们与砂质风暴岩非常相似。

现将风暴岩的基本特征简述如下:

1. 剖面结构

许多研究者(T. Aigner, 1982; R. D. Kreisa 和 P. K. Bambach, 1982; P. J. Brenchley, 1985)提出了风暴岩的理想剖面序列,并对序列中的各种沉积构造作出了解释。砂质风暴岩和钙质风暴岩的剖面结构相似,它们都可以用图 1 表示。

一个理想的风暴岩层,应具有如下特征(由下向上):(1)冲刷面:强大的风暴流或风暴浪搅动早期沉积的背景沉积物(多为泥),形成具冲沟、冲槽和工具痕等特征的冲刷面;(2)粒序层:由较粗的滞留物(粗砂或细砾)组成,由下向上颗粒逐渐变细。有些风暴岩层在冲刷面之上可形成介壳层(图 1B);(3)丘状交错层理:一般认为这是风暴岩的识别标志;(4)水平层:这是随风暴作用的减弱而出现的上部流动体制的产物,有时在水平层之上可具有浪成波痕(图 1);(5)泥质沉积物:这是安静环境的产物,生物扰动构造发育。

2. 沉积构造

砂质风暴岩和钙质风暴岩的各种沉积构造都非常发育,如粒序层理、平行层理、丘状交错层理、工具痕和碟—柱状构造等,这里主要介绍风暴岩最特征的识别标志——丘状交错层理(HCS)及其变种洼状交错层理(SCS)。

A. 丘状交错层理(HCS)

10 多年来,丘状交错层理已成为风暴岩的识别标志(P. K. Bose & S. K. Chanda, 1986)。实际上,早在 1869 年 Gilbert 就描述过这类层理,并认为它们是风暴浪的产物;1966 年, Campbell 称之为“大型截切波痕纹理”;1975 年, Harms 等人称之为“丘状交错层理。”

丘状交错层理主要出现于粗粉砂和细砂级颗粒中,由平缓上凸的纹层(丘)和下凹的纹层(洼)组成,间距一般为 1—6m。当然,有关小型(<1m)丘状交错层理的报道也很多(W. L. Duke, 1987)。纹层在丘中离心倾斜,在洼中向心倾斜。在野外观测时,一定要注意丘状交错层理是一个三维空间的概念(图 2)。根据 Harms 等的研究,丘状交错层理的特征如下:(1)层系下部有侵蚀面,倾角一般 $<10^\circ$;(2)侵蚀界面之上的纹层平行或基本上平行于底界面;(3)层系中的纹层厚度逐渐变化,倾角逐渐变小;(4)侵蚀面和上覆纹层的倾向是发散的。

因为纹层从穹隆脊部向四周放射状倾斜,所以,丘状交错层理中的低角度纹理没有一定的优选倾向。纹层厚度一般从丘向洼加厚,凹地逐渐被充填,以致于在同一纹层系中,纹层的倾角向上减小,逐渐过渡为水平纹理。但也有例外的情况:低倾角纹层组的边界,无明显侵蚀作用的痕迹,似乎是加积而成的(P. J. Brenchley, 1985; P. K. Bose & S. K. Chanda, 1986)。这类丘状交错层的典型特征是,纹层向脊部加厚而不是向槽部加厚。虽然加积的丘状交错层理与侵蚀的丘状交错层理通常出现于相同的岩相中,但是,这两类构造的形成方式有本质的差别。前者是由水平基底向上生长而成,后者则是因冲刷覆盖而成。尽管一些研究者认为,在

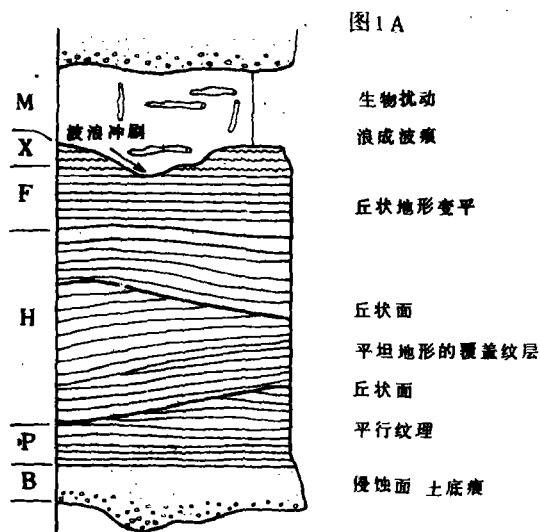


图1A

图1 风暴岩的理想序列图〔据 P. J. Brenchley (1985) 及 R. D. Kreisa 等 (1982)〕

A—不具介壳层 B—具有介壳层

注：有的风暴岩可以完全由介壳层组成

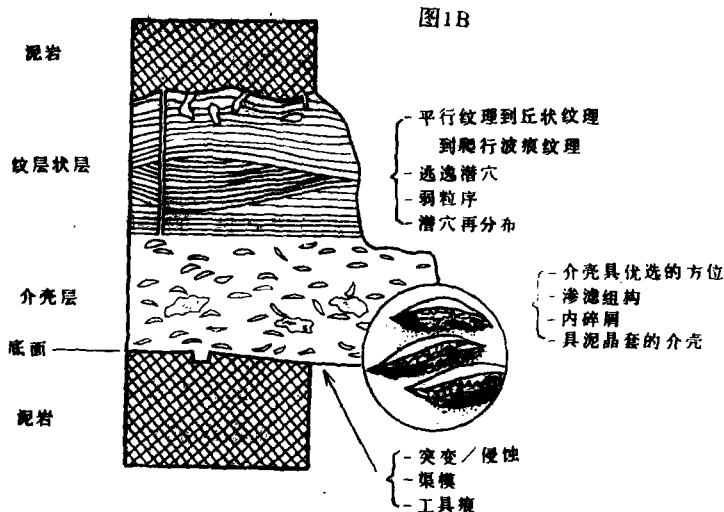


图1B

有些受风暴影响的岩相中,这是一种正常现象,但事实上这种构造很少见到,可能是一种罕见现象(P. J. Brenchley, 1985)。

B. 洼状交错层理(SCS)

洼状交错层理是由 D. A. Leckie & R. G. Walker(1982)首先定义的,它是由一系列下凹的冲沟所组成,约 0.5—2m 宽,数十厘米深。P. K. Bose 等(1986)认为它是丘状交错层理的变形,只保存了洼,而丘被侵蚀掉了(图 3)。在洼地的边缘,层理的倾角一般 $<10^\circ$ 。在各种垂直层面的剖面上,洼状交错层理都与槽状交错层理相似,但前者倾角平缓,一般不与静止角交错层系伴生,而且洼地一般既宽又浅。

通过详细研究可知,在进积的海岸层序(如艾伯塔省侏罗—白垩系)中,SCS 带总是出现于 HCS 带之上海滩沉积之下(D. L. Leckie & R. G. Walker, 1982; R. G. Tillman, 1986; P. K. Bose & S. K. Chanda, 1986)。因此,SCS 具有极强的指示水深的意义,其形成水深较 HCS 浅,可能位于正常浪基面之上。

低角度弯曲的交线上凸的纹层

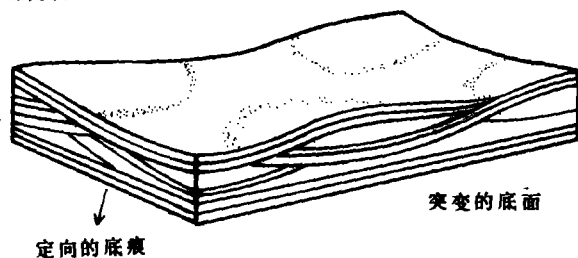


图 2 表示丘状交错层理的主要形态特征主体图

(据 A. P. Hamblin & R. G. Walker)

C. 丘状交错层理的成因

尽管人们普遍承认丘状交错层理是风暴沉积的识别标志,但是对丘状交错层理的成因及意义争论很大(A. Nottvedt & R. D. Kreisa, 1987; D. L. Duke, 1987; G. de. V. Klein & K. M. Marsaglia, 1987; D. J. P. Swift & D. Nummedal, 1987)。一般认为,风暴浪产生的强烈的振荡水流是丘状交错层理形成的主要作用,当然,也有人(D. J. P. Swift, 1983)认为是单向水流的必然产物。最近, A. Nottvedt 和 R. D. Kreisa (1987)在研究了斯瓦尔群岛上出露极好的加罗林福叶列特组后,提出了丘状交错层理的混合流成因模式,认为丘状交错层理是振荡水流和单向水流联合作用下的产物。他们还认为,丘状交错层理和低角度槽状交错层理的内部沉积构造和几何形态实质上是相似的,这些相似处包括:(1)低倾角纹层,倾角一般 $<10^\circ$,很少 $>15^\circ$;(2)上凸纹层层系(丘)与下凹层系(槽或洼)交互出现;(3)相邻的丘与丘间距或槽与槽间距范围为 1m—数米;(4)具波痕顶面的层系有明显的底界;(5)纹层向槽(或洼)变厚;(6)有大量截切面,特别是在上凸层系的边缘和顶部。因此认为,丘状交错层理与低角度槽状交错层理密切相关。此外, A. Nottvedt 和 R. D. Kreisa (1987)还提出了一个值得深思的问题,也是我们在研究中应特别注意的一点,即在描述丘状交错层理中,许多为低角度槽状交错层理。

3. 生物特征

在风暴沉积中,生物化石种类繁多,主要是来自浅水的生物及原地生物,以具有丰富的陆棚(主要为浅水陆棚)环境的生物为特征,主要类别有海百合、双壳类、腕足类、三叶虫和珊瑚等,由于强烈的风暴搅动,生物大多破碎,不易鉴别其属种。除实体化石外,还具有特征的遗迹化石。下面主要介绍一下风暴沉积序列中的遗迹化石。

遗迹化石是生物活动所留下的痕迹,因为它们一经形成后就不会再被搬运迁移,所以在重塑古环境和古地理时非常有效,并且根据它们还可以得到有关的沉积速度、沉积间断和侵蚀以及底层性质的信息。研究风暴岩的许多专家,也非常重视遗迹化石的研究(M. J. Benton & D. I. Gray, 1981; S. G. Pemberton & R. W. Frey, 1984; P. K. Bose & S. K. Chanda, 1986),并建立了遗迹化石与风暴沉积相关关系的模式。通过详细研究得出,在风暴序列中,安静条件和风暴状态的产物,除粒度差别外,遗迹化石的差别也很大。安静期的泥质沉积物以 *Cruziana* (—*Zoophycos*) 遗迹相为特征,风暴期的砂质沉积物以 *Skolithos* (—*Glossifungites*) 遗迹相为特征。

S. G. Pemberton & R. W. Frey (1984)对加拿大艾伯塔省 Seebe 地区的 *Cardium* 组(上白垩统)进行了详细研究,系统总结了风暴序列中的遗迹化石(图 4),并进一步解释了其形成环境。

Cardium 组遗迹相的特征是具有代表较高能量的 *Skolithos* 遗迹相及代表较低能量的 *Cruziana* 遗迹相。*Skolithos* 和 *Cruziana* 可以同时出现,但有主次之分。*Skolithos* 遗迹相的主要组分

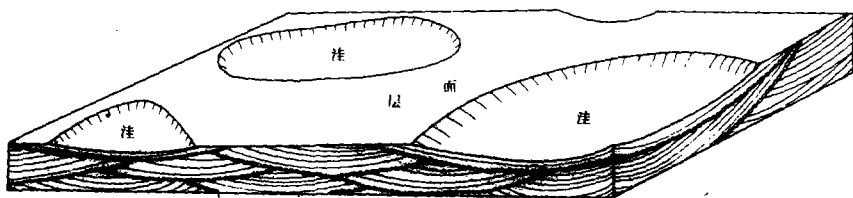


图3 洼状交错层理的立体图(据 P. K. Bose & S. K. Chanda 1986)

有 *Skolithos lineris*, *Ophiomorpha nodosa* 和 *Diplocraterion* 等,其特征是:(1)以垂直层面的柱状和 U 形内虫迹穴为主;(2)几乎没有水平构造;(3)几乎没有代表活动动物的遗迹;(4)分异度低,不过单个生物构造可能很多;(5)大多数居住穴是由食悬浮物的动物造成的。*Cruziana* 遗迹相以 *Zoophycus*, *Planolites* 和 *Rhizocorallium* 为主,还有 *Chondrites*, *Cochlichmus*, *Cylindrichmus*, *Palaeophycus* 和 *Thalassinoides* 等,其特征是:(a)为与层面垂直、斜交和平行的生物构造的混生组合,保存有内迹、表迹和底迹;(b)含有代表活动动物的遗迹;(c)分异度高,而大多数遗迹的个体密度低到中等;(d)以觅食潜穴为主,由食泥动物有选择地吃挖基底造成。互层的 *Cruziana* 遗迹相和 *Skolithos* 遗迹相代表了风暴作用的周期性出现。

此外,在研究遗迹化石时要特别注意整个组合的特征,相似组合间的某些差异,在进一步确定沉积环境(如水深)时意义重大。例如,Cardium 组的组合 1A 由 *Cylindrichmus*, *Gyrochorte*, *Palaeophycus*, *Planolites* 和 *Thalassinoides* 等组成(属 *Cruziana* 遗迹相),这些遗迹化石代表了活动的食肉动物和食泥动物挖掘相对富养的细粒沉积物的产物,而这些沉积物是在远滨的低能环境沉积的。组合 1B 由 *Skolithos*, *Ophiomorpha* 和 *Diplocraterion* 等组成(属 *Skolithos* 遗迹相),个体密度高,分异度低,代表较高能级的环境。组合 2 的主要组成分子有:*Chondrites*, *Cochlichmus*, *Cylindrichmus*, *Gyrochorte*, *Muensteria*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rhizocorallium*, *Rosselia*, *Skolithos* 和 *Thalassinoides*, *Zoophycos*, 以 *Zoophycos*, *Planolites* 和 *Rhizocorallium* 为主,主要代表的是 *Cruziana* 遗迹相。这与上述的组合 1A 类似,主要记录的是在好天气沉积作用期间底栖集群的活动情况。但组合 2 在下述几方面与组合 1A 不同:(1)分异度更高;(2)组合 2 具有 *Zoophycus* 和 *Rhizocorallium*;(3)组合 2 含大量的 *Skolithos*,而组合 1B 显然缺失发育完好的机会动物;组合 2 中无 *Diplocraterion* 和 *Ophiomorpha*。这些差别表明,组合 2 代表较深水的环境。特别是具有大量的 *Zoophycus* 和水平的 *Rhizocorallium*,再加上缺失更典型的较浅水的类型(例如 *Diplocraterion* 和垂直层面的 *Ophiomorpha*)表明,尽管两个组合都是 *Cruziana* 遗迹群的一部分,但与组合 1A 相比,组合 2 发育于离岸更远的远滨环境。

4. 侧向变化

风暴沉积物是突发的水流使沉积物周期性侵位的产物,其性质可能取决于风暴的强度、一定沉积场所的水深、相对于风暴行径的位置、陆棚斜坡的坡度和海岸线的形状(P. J. Rrenchley, 1985)。一般来说,靠近海岸形成的风暴岩层往往较厚,常常发生混合作用,可能代表了强大的风暴流。在正常浪基面之上,出现大量的洼状交错层理,这是因为持续的好天气波浪剥蚀掉了丘,保留了洼;在正常浪基面与风暴浪基面之间,则出现了大量的丘状交错层理,这是因风暴浪改造水底的砂而形成的;在风暴浪基面之下,则形成似浊积岩的风暴岩,以粒序层为主。P. K. Bose 和 S. K. Chanda (1986)认为,以风暴作用为主的陆棚,可以大致分成三个带,即(a)近滨带(近源—正常浪基面之上);(b)浅水远滨带(中间—正常浪基面之下);

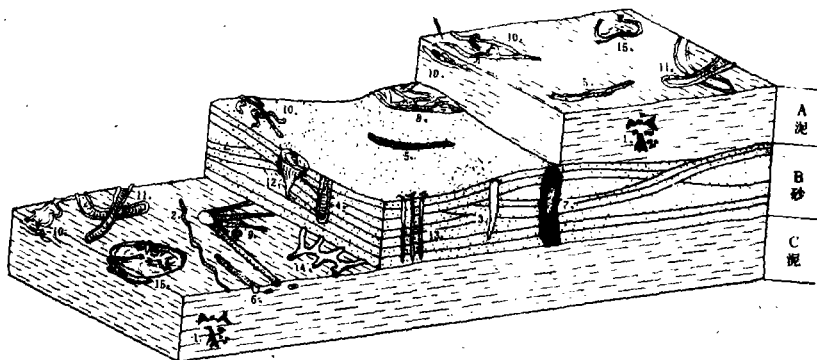


图 4 Seebe 地区 Cardium 组常见遗迹化石的相分布再造示意图(据 S. G. Pemberton & R. W. Frey, 1984)

单元 A 和 C 代表远滨非风暴沉积物;单元 B 代表风暴侵位的砂层,含有丘状交错层理

1. *Chondrites*; 2. *Cochlichnus*; 3. *Cylindrichnus*; 4. *Diplocraterion*; 5. *Gyrochorte*; 6. *Muensteria*; 7. *Ophiomorpha*; 8. *Palaeophycus*; 9. ? *Phoebichnus*; 10. *Planolites*; 11. *Rhizocorallium*; 12. *Rossetia*; 13. *Stololithos*; 14. *Thalassinoides*; 15. *Zoophycos*

(c) 深水远滨带(远源—正常浪基面之下)。每一个带一般都有一套典型的特征(表 1 和图 5)。

表 1 风暴岩随水深增加而发生的空间变化

(据 P. K. Bose 和 S. K. Chanda, 1986)

A 近 滨	B 远滨浅水	C 远滨深水
1. 以 SCS 为主	SCS 和 HCS 都常见	以 HCS 为主
2. 风暴层遭受侵蚀是由风暴天气的波浪和正常天气的波浪引起的	风暴浪引起侵蚀	很少遭受侵蚀
3. 常见波浪筛选的滞留物	无	无
4. 风暴层上部有正常天气的浪成波痕	无正常天气的浪成波痕,局部出现不具内部纹理的溢出波痕和波形	同 B
5. 风暴层与其小型浪成波痕的层可交互出现	与页岩交互出现	同 B
6. 风暴层出现的频率高,常见混合作用	风暴层出现的频率低,混合作用较少见	风暴层出现的频率仍然较低,极少见混合作用
7. 常见风暴流的侵蚀作用	较少见	极少见
8. HCS, 冲刷覆盖型常见	冲刷覆盖型及底形生长型较常见	底形生长型常见
9. 常见水道截切	较少见,常常发生泥质充填	无

在上滨面的岩相中,因为砂岩一般具平行纹理或具水流或浪成交错纹理,所以常常很难鉴别是否是在恶劣气候下形成的构造。在风暴期形成的许多构造可能在好天气期间被改造了。然而,还存在一种被称为洼状交错层理(SCS)的特殊构造(见上述)。表面上,这种构造与丘状交错层理(HCS)相似,不同的是,最初的侵蚀只在平面上形成碟形洼地而不形成丘。洼状交错层理还没有被广泛识别出来,迄今为止,它们只发现于临滨部位形成的岩相中。

在下滨面的岩相中,可以保存风暴活动的更多证据。这些相通常呈厚层状和平坦纹层状,但也可具有含丘状交错层理的不连续层。冲刷面常常既浅又平缓(倾角 $<15^\circ$),但某些冲沟可深(几十厘米)而陡(45° 以上)。在从临滨到陆棚的过渡部位,层序中的泥岩和粉砂岩夹

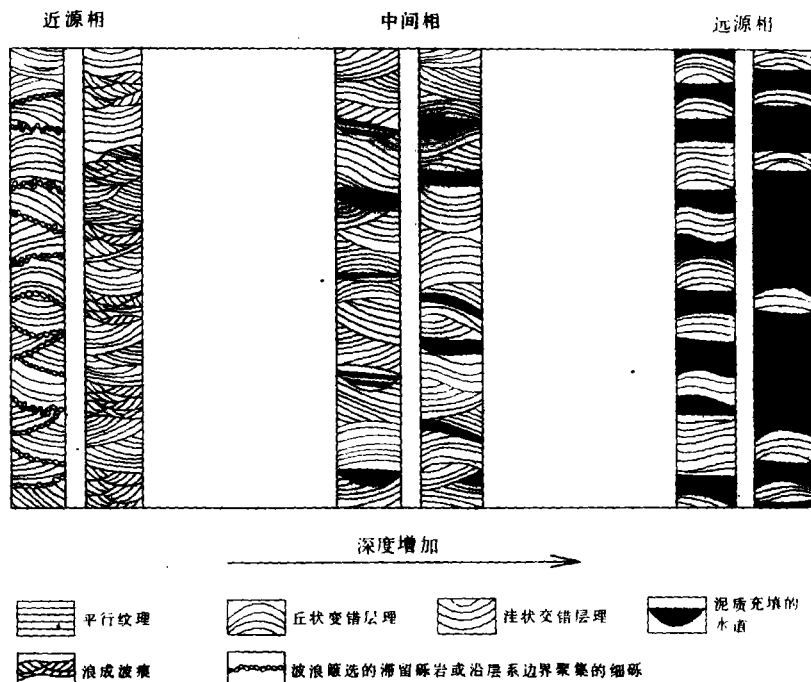


图5 风暴沉积层序随水深增加而发生的空间变化

(据 P. K. Bose & S. K. Chanda, 1986)

注意：近源风暴层与远源风暴层不同，往往较厚，常常发生混合作用，并具有较多的洼状交错层理，此外还有波浪搬运的滞留沉积和底部侵蚀的底形

层逐渐增多，好天气与恶劣天气的沉积作用有明显的差别。在距海岸线较远的陆棚相中进一步发生变化，致使在适当的条件下，有可能区别相对近源的陆棚相与更远的陆棚相。

总之，从近源(滨面)到远源(陆棚)，砂质岩风暴的各种特征连续变化(图6)，其趋势是：(1)岩层底面侵蚀的深度和陡度减小；(2)丘状交错层理中纹层的倾角降低；(3)浪成波痕消失；(4)岩层顶部的侵蚀程度降低；(5)风暴岩层的厚度变薄。

在研究风暴岩时，要特别注意在风暴浪基面之下形成的砂岩层，其特征是缺失浪成构造，所见的典型的内部层理单元有：粒序层、平面纹层、小型单向交错纹层及交错纹层状和平面纹层状泥/粉砂单元。这些与鲍玛序列的各部分(A到D)非常相似，可以把这些砂岩层与“坡脚”浊积岩区分开来的特征有：(1)它们与含有一特征性的陆棚底栖动物群的泥岩共生；(2)虽然内部构造序列经常表现为与浊积岩相似的A到D的序列，但是，这种内部构造序列并不总是排列的那样很有条理；(3)砂岩层内可有许多泥质夹层，这意味着其沉积的不连续性比通常与浊积岩相关的沉积作用的不连续性要更大。

三、风暴岩的特殊类型

从国内外有关风暴岩的报道看，根据岩性和岩石化学成分，可分为砂质风暴岩、钙质风暴岩和磷质风暴岩。砂质风暴岩和钙质风暴岩的报道较多，研究的也较为详细(尤其是砂质

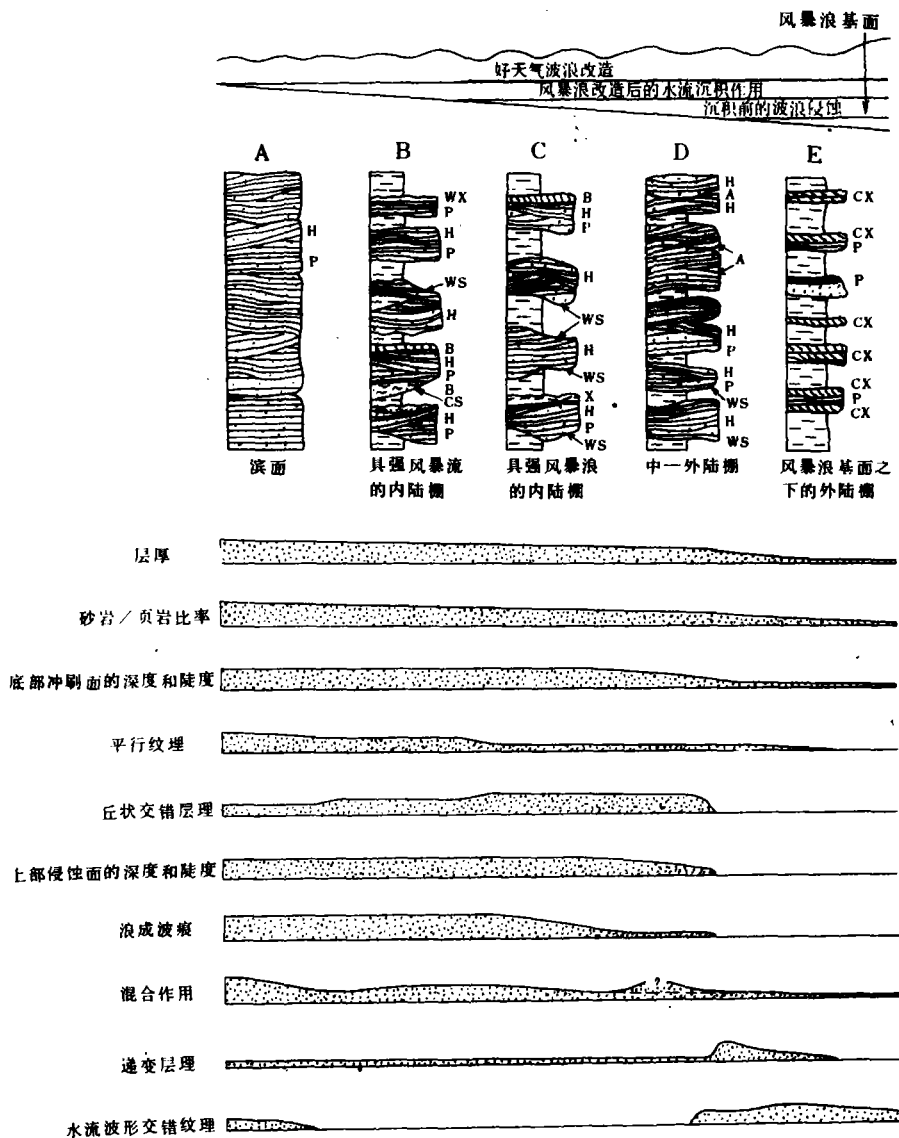


图 6 随距岸远近和水深逐渐增大而发生的岩相变化

(据 P. J. Brenchley, 1985)

WS—波浪冲刷; CS—水流冲刷; B—底部滞留沉积; G—递变层; P—平行纹理; H—丘状交错层理;

WX—浪成交错纹理; CX—水流交错纹理; M—生物扰动作用; A—混合作用

风暴岩); 磷质风暴岩的报道极少。除此之外, 我们还应该强调一些特殊的风暴岩层, 如介壳层和扁平状卵石砾岩 (J. J. Sepkoski, Jr, 1982) 或称竹叶状灰岩。后者是薄层灰岩经风暴搅动、破碎而形成的大小不一, 杂乱堆积的砾状灰岩, 其各种特征孟祥化等 (1986) 已作了详细论述。这里主要介绍一下风暴成因的介壳层。

原则上, 缩聚现象可以在所有类型的紊流事件中出现, 但由于浊流和洪水体制中的净沉

积和侧向搬运速率较高,所以,这种现象就不如在以风暴为主的层序中那样明显(A. Seilacher, 1982)。因此,缩聚几乎成了风暴沉积所特有的作用或现象。“风暴流”向下强烈地切割和搅动早期沉积物,使时代稍有差别的颗粒堆积在一起,构成缩聚层(如海绿石缩聚层、介壳层)。通常,生物群落的缩聚现象表现最明显,报道的实例也很多,如德国中三叠系上壳灰岩(T. Aigner, 1982)。

风暴成因的介壳层有其自己独特的特征,一般具有微弱的粒序性,主要表现在两个方面:一是在同一层内介壳的大小向上变小;二是介壳的含量向上减少。介壳层底部具有冲刷面,既可向上变为含丘状交错层理和浪成波痕的单元,也可变为泥晶灰岩单元。介壳层的生物类别与上下层位相同或相似,表明为原地或近于原地的搅动,再沉积作用。风暴成因的介壳层有许多特殊的沉积构造,风暴过后,悬浮的细粒物质迅速沉积,形成许多渗滤构造,例如遮蔽孔隙及单个介壳之上的微粒序层理等。R. D. Kreisa 和 R. K. Bambach (1982)认为,虽然有些遮蔽孔隙和显微粒序层可能不是由渗滤作用造成的,但其形成也与风暴作用有关。D. Jeffery 等(1982)将风暴成因的介壳层分为两类:(1)分布于粒泥灰岩中,介壳的凸面以朝下或近于直立者为主,是富含介壳的沉积物周期性注入并从悬浮状态迅速沉积的结果;(2)分布于泥粒灰岩—颗粒灰岩中,介壳的凸面以向上为主,基质大部分被冲刷掉了,是介壳层形成后经水流作用再改造的结果。根据上述特征,以及风暴成因的介壳层常常与丘状交错层理和浪成波痕伴生的特点,很容易与介壳滩上的介壳层区分开。

四、风暴岩与浊积岩的区别

“风暴流”和浊流都是重力流,但风暴流还可以表现出牵引流的某些特征(如形成丘状交错层理)。虽然“风暴岩”与“浊积岩”一样是个成因术语,但是并不能严格地对比,因为我们完全确信浊积岩是由浊流形成的,但对引起“风暴岩”沉积的确切作用却极不明确(P. J. Brenchley, 1985)。从风暴岩的特征看,从浅水到深水是逐渐变化的,并可过渡为浊积岩。在浪基面与风暴浪基面之间形成的风暴岩,如果含有典型的丘状交错层理,则很容易与浊积岩区别;但是,某些风暴岩,特别是在风暴浪基面之下形成的风暴岩,缺失丘状交错层理和浪成波痕,具有粒序层理、平行纹理和小型交错纹理等,与浊积岩非常相似,如果不进行仔细研究,很容易得出错误的结论。因此,应特别注意风暴岩与浊积岩的鉴别特征,不要以单个(或某些)沉积构造去推断沉积环境,而应重视岩石各种特征的综合分析,特别应当注意整个沉积旋回中上下沉积层序的各种岩相、生物特征。下面简单介绍一下风暴岩与浊积岩的一般区别特征:

1. 流动机制

“风暴流”与浊流相似,是一种密度流,但是,“风暴流”又具有牵引流的性质。风暴岩的识别标志——丘状交错层理,是一种多成因的沉积构造,它是单向水流和振荡水流联合作用的产物(A. Nottvedt 和 R. D. Kreisa, 1987)。S. Bogge (1987)认为,有四种与风暴有关的作用过程可以搬运并改造陆棚沉积物,它们是:(1)波浪;(2)风驱水流;(3)风暴涨潮——退潮浪;(4)浊流。这里可以肯定浊积岩是由浊流形成的,但在进行古流分析时应注意,浊流是单向的;而“风暴流”是双向或多向的,局部也可呈单向。

2. 层序组合

真正的浊积岩属深水沉积,其上下层序中,无论从岩相上,还是从古生物面貌上都显示出深水沉积的特征。而风暴岩为浅水沉积,无论在海退还是在海进旋回中,它都是位于海滩沉积与深水沉积之间,并可与浊积岩相互过渡。

3. 垂向序列及层内沉积构造

风暴岩与浊积岩都有突变的底面和渐变的顶面,垂向序列非常相似,风暴岩可具有与浊积岩鲍玛序列相似的垂向序列结构。但是,它们的内部沉积构造有着明显差别。典型的风暴岩具有丘状交错层理和浪成构造,而浊积岩绝对没有。当然,有的风暴岩也可能没有这些构造,这时要注意多种特征的综合分析。

4. 层面构造

由于水流的下蚀作用,在风暴岩和浊积岩的底面一般都发育有明显的冲刷面,具有冲沟、冲槽等构造,深浅不一。在风暴岩的底面发育的各种各样的工具痕(D. I. Gray 等, 1981, 1982),主要有沟痕、戳痕和弹跳痕,以及掘蚀痕(pluck mark)、进出沟痕(in-out groove mark)、旋转戳痕(rotation mark),但是没有在浊积岩中常见的跳跃和滚动痕。风暴岩中常见特殊的渠模和钵模,少见重荷模,而浊积岩中无渠模和钵模,常见槽模和重荷模。

对各种压刻痕进行古流分析,作玫瑰花图,也是区别浊积岩和风暴岩的有效方法。例如, D. I. Gray 和 M. J. Benton(1982)在研究英格兰与威尔士交界地带的志留系哈格莱页岩时,根据玫瑰花在水流图的多向水流特征,推断该区的砂岩层为风暴岩,而不是浊积岩。

5. 生物标志

风暴岩中的实体化石与上下层位(背景沉积物)的属种相同,为各种原地的土著生物,代表原地或近于原地冲刷再沉积的产物,化石组合标志着浅水陆棚环境,主要生物类别有:珊瑚、海百合、腕足类、双壳类和三叶虫等;而浊积岩中的生物群面貌与背景沉积物中的生物面貌有一定的差异,既有来自浅水的生物类别,也有原地的深水生物,表现为原地和异地的混生生物组合。

此外,风暴岩与浊积岩序列中的遗迹化石也有很大区别。风暴岩中的遗迹化石种类繁多,主要有 *Zoophycos*, *Chondrites*, *Planolites*, *Rhizocorallium*, *Palaeophycus*, *Diploerasterion*, *Cruziana*, *Skolithos*, *Thalassinoides* 和 *Ophiomorpha* 等,并可明显划分为两个遗迹相:(1)*Cruziana* 遗迹相,代表静水环境的产物;(2)*Skolithos* 遗迹相,代表风暴期高能环境的产物。而浊积岩序列中的遗迹化石主要有 *Granularia*, *Fucusopsis*, *Phycosiphon*, *Scolicia*, *Neonereites*, *Lorenzina*, *Paleodictyon* 和 *Ceratephycus* 等,以弯曲和网状觅食遗迹为特征。

6. 相变

风暴岩与典型的浊积岩岩相在侧向上的变化有很大的区别。风暴岩一般规模较小,分布较局限,侧向相变很快,可见岩层厚度的迅速变化,特别是风暴岩内的介壳层和粗碎屑岩层,常常呈透镜状。而典型的浊积岩的分布极其稳定,几百公里范围内一成不变。

此外,风暴岩还具有特征的缩聚层,如介壳层和海绿石缩聚层等。风暴岩和浊积岩的区别可简单地用表 2 表示。

表2 风暴岩与浊积岩的区别

特 征	风 暴 岩	浊 积 岩
1. 丘状交错层理及浪成波痕	有	无
2. 工具痕	常 见	少 见
3. 槽模和重荷模	少 见	常 见
4. 古流分析结果	一般为多向,有时表现为双向和单向	单 向
5. 实体化石	原地浅水生物组合	浅水与深水的混生生物组合
6. 遗迹化石	可分为 <i>Cruziana</i> 和 <i>Skolithos</i> 两个遗迹相	<i>Nereites</i> 遗迹相
7. 侧向变化	迅 速	稳 定
8. 缩聚层	常见介壳缩聚层和海绿石缩聚层	无

五、风暴岩研究的意义

近15年内兴起的研究风暴岩的热潮,有增无减。甚至有人认为,风暴理论与浊流理论一样,是沉积学甚至地质学上具有里程碑性的重要事件之一,那么,风暴岩研究的意义何在呢?

任何一种新理论的出现和发展,都必然有一定的起因。风暴理论也不例外。随着沉积学和海洋学研究的不断深入,发现了大量似浊积岩、浅水浊积岩和浪成浊积岩等,而所有这些,用传统的浊流理论已无法解释,这样,风暴理论作为浊流理论的一个新的补充开始出现。

目前,风暴岩研究的经济意义尚不清楚。不过,值得注意的是国外学者对油田附近的风暴岩研究的很详细,例如加拿大 Pembina 油田附近的 Cardium 组内的风暴岩(S. G. Pemberton & R. W. Frey, 1984);不列颠哥伦比亚省 Deep 盆地的 Moosebar 组和 Gates 组的风暴岩(D. A. Leckie & R. G. Walker, 1982)。这两种可能,一是由于油气的开采促进了基础地质的研究;二是风暴岩与油气密切相关,可能是很好的油气贮集层。至于风暴岩在盆地分析和地层对比方面的应用,早已受到人们的普遍重视。

1. 盆地分析

已如前述,风暴岩的性质可能取决于风暴的强度、一定沉积场所的水深、相对于风暴行径的位置、陆棚斜坡的坡度和海岸线的形状(P. J. Brenchley, 1985)。由于风暴强度从滨面向陆棚逐渐减弱,造成风暴岩的各种特征在侧向上连续变化(图6),所以,通过详细研究整个盆地不同地点风暴岩的层厚、层数及垂向序列等特征的变化,可以圈定盆地形态及相对水深。

对于确定水深,最有效的标志当数丘状交错层理。但是,目前对丘状交错层理形成的环境和水深仍有争论。W. L. Duke(1985, 1987)认为,丘状交错层理主要局限于潮汐作用和正常浪基面之下的陆棚环境。而 G. de v. Klein 和 K. M. Marsaglia(1987)则认为,丘状交错层理既不是水深也不是环境的识别标志,因为在海滩、潮坪、海湾及三角洲边缘等层序中都发现过丘状交错层理(R. H. Dott & J. Bourgeois, 1982)。笔者认为,尽管许多环境的不同水深都发现了丘状交错层理,但是,由于正常天气下强大的波浪和潮流,大大减小了极浅海环境中风暴成因的构造保存的可能性(W. L. Duke, 1985),所以,岩石中的丘状交错层理一般可以指示相对的水深,即浪基面与风暴浪基面之间。

P. J. Brenchley(1985)认为,在陡倾的陆棚上,离岸水流将会成为更强大的顺坡水流,它们会更经常地使沉积物在浪基面之下沉积。在倾角为一度的斜坡上,风暴浪基面(或许为

150m 深)可以涉及到离岸 8.5km 的范围。在这种情况下,含丘状交错层理的相带是狭窄的,而且在较深的陆棚上会形成似浊积岩层。在近于平坦的陆棚上,含丘状交错层理的相可以在超过 100km 宽的地带内形成,而且似浊积岩的砂岩显示很差。这样,根据风暴岩的分布特征,还可以推断古斜坡的坡度。

2. 地层对比

作为地质研究的基本手段的地层学,一直受到人们的重视。近几年出现的事件地层学,又为基础地质的研究开创了新局面。风暴作为瞬间而又等时的现象,其产物已成为地层对比中特别有用的工具。在研究一个地区(或盆地)时,如果能够正确地辨认并对比等时的风暴层,则可以将生物地层的分辨率提高几个数量级(T. Aigner, 1982)。

罗永国、宋力生等同志校对了本文所用的部分原始资料;奚瑾秋同志审阅了全文,在此一并致谢。

主要参考文献

- [1] Aigner, T., 1982. Calcareous Tempestites, storm-dominated stratification in Upper Muschelkalk limestones (Middle Trias, SW-Germany), in *Cyclic and Event Stratification*, ed. by G. Einsele and A. Seilacher, p. 180-198
- [2] Bentin, M. J. & Gray, D. I., 1981. Lower Silurian Distal Shelf storm-induced turbidites in the Welsh Borders, sediments, tool marks, and trace fossils. *J. Geol. Soc. London*, Vol. 138, p. 675-694
- [3] Boggs, S. (Jr.), 1987. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*
- [4] Bose, P. K. & Chanda, S. K., 1986. Storm deposits and hummocky cross-stratification, a geological viewpoint, *Quart. Jour. Geol. Min. Met. Soc. India*, Vol. 58, No. 1, p. 53-68
- [5] Brechley, P. J., 1985. Storm influenced sandstone beds. *Modern Geology*, Vol. 9, p. 369-396
- [6] Dott, R. H. (Jr) & Bourgeois, J., 1982. 丘状交错层理——其各种层理层序的意义, *国外地质* (1985)
- [7] Duke, W. L., 1985. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes and intense winter storms. *Sedimentology*, Vol. 32, p. 167-194
- [8] Duke, W. L., 1987. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes and intense winter storms, reply. *Sedimentology*, Vol. 34, p. 344-359
- [9] Gray, D. I. & Benton, M. J., 1982. Multidirectional palaeocurrent as indicators of shelf storm beds, in *Cyclic and Event Stratification*, ed. by Einsele, G. & Seilacher, A., p. 350-353
- [10] Hamblin, A. P. & Walker, R. G., 1979. Storm-dominated shallow marine deposits, the Fernie-Kootenay (Jurassic) transition, Southern Rocky Mountains. *Can. J. Earth Sci.*, Vol. 16, p. 1673-1690
- [11] Jeffery, D. & Aigner, T., 1982. Storm sedimentation in the carboniferous limestone near Weston-Mare (Dinantian, SW-England), in *Cyclic and Stratification*, ed. by Einsele, G. & Seilacher, A., p. 240-247
- [12] Klein, G. de V. & Marsaglia, K. M., 1987. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes, and intense winter storms, discussion. *Sedimentology*, Vol. 34, p. 333-337
- [13] Kreisa, R. D., 1981. Storm-generated sedimentary structures in subtidal marine facies with examples from the Middle and Upper Ordovician of Southwestern Virginia. *J. Sedi. Petrol.*, Vol. 51, No. 3, p. 823-848
- [14] Kreisa, R. D. & Bambach, R. K., 1982. The role of storm process in generating shell beds in Paleozoic shelf environments, in *Cyclic and Event Stratification*, ed. by Einsele, G. & Seilacher, A., p. 200-206
- [15] Leckie, D. A. & Walker, R. G., 1982. Storm- and tide-dominated shorelines in Cretaceous Moosebar-Lower Gates interval-outcrop equivalents of deep basin gap trap in Western Canada. *AAPG Bulletin*, Vol. 66, No. 2, p. 138-157
- [16] Nottvedt, A. & Kreisa, R. D., 1987. Model for the combined flow origin of hummocky cross-stratification. *Geology*, Vol. 15, p. 357-361

(下接 43 页)

A Preliminary Study of Sedimentary Facies, Palaeogeography and Mineralization Regularity in Shanxi during the Early Benxian (the Fe-Al-Bearing Rock Members) of Middle Carboniferous Times

Guo Youlu

(Shanxi Institute of Geological Sciences)

Abstract

This paper deals with sedimentary facies and palaeogeography in Shanxi during the early Benxian of Middle Carboniferous times in light of the criteria for recognition of sedimentary facies such as sedimentary structures, fossil assemblages, trace elements and isotopic data. During the period, oldland and islands were confined to the southern and northern ends of Shanxi, respectively, whereas the central part of it was generally occupied by the barriered tidal flat-lagoon system which may be divided into twelve lagoon districts and five swamp districts. The mineralization regularity has also been discussed in terms of sedimentary facies and palaeogeography. Bauxite, iron and pyrite deposits are all associated with ancient lagoons. Pyrite deposits tend to occur in the central facies of the lagoons, whereas iron deposits in the marginal facies. Bauxite deposits are dominantly related to the lagoon beach facies. For example, the rough bauxite ores often lie in the lower part of the subtidal zone; the clastic and oolitic bauxite ores in the upper part of the subtidal zone and intertidal zone, and the compact massive ores in the supratidal zone and swamp facies.

(上接 55 页)

[17] Pemberton, S. G. & Frey, R. W., 1984. Ichthyofauna of storm-influenced shallow marine sequence, Cardium Formation (Upper Cretaceous) at Seebe, Alberta, Can. S. Petrol. Geol., Memoir 9, p. 281-304.

[18] Sepkoski, J. J. (Jr.), 1982. Pebble conglomerates, storm deposits and Cambrian bottom fauna in cyclic and event stratification, ed. by Einsele, G. & Seilacher, A., p. 371-382.

[19] Swift, D. J. P. & Nummedal, D., 1987. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes and intense winter storm, discussion, sedimentology, V. 34, p. 338-344.

[20] Tillman, R. W., 1986. Swaley cross-stratification and associated features, Upper Cretaceous western interior Seaway of United States. AAPG Bulletin, 70(5), p. 656.

[21] Wu, Xian-Tao, 1982. Storm-generated depositional types and associated trace fossils in Lower Carboniferous shallow marine carbonates of Three Cliffs Bay and Ogmore-by-sea, South Wales. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, V. 39, p. 187-202.

[22] 地矿部成都地质矿产研究所, 1985. 风暴流与风暴岩(专集), 国外沉积地质与矿产

[23] 余素玉等(译编), 1985. 风暴沉积(试用教材)