

苏南五通组风暴沉积与三脊波痕

吕洪波 夏邦栋 涂涛*

(南京大学地球科学系 210008)

苏南五通组风暴沉积,以无锡、江阴一带为最,发育在滨海带,为近源风暴沉积。风暴层面上发育一种特殊的大波痕,作者称其为三脊波痕(tri-ridge ripple marks)。这种波痕为风暴旋涡流在水底相互干涉的结果,应视为风暴沉积的重要标志之一。

关键词 苏南 五通组 风暴沉积 滨海相 三脊波痕

第一作者简介 吕洪波 男 34岁 讲师(硕士) 沉积学、大地构造学

上泥盆统五通组在苏、浙、皖一带广泛出露,地质界传统上都将其看作一套陆相沉积的石英砂岩建造^[1,2]。近年来,不少学者对五通组的沉积环境提出新的看法,吴贤涛等^[3]通过痕迹学研究指出南京、含山等地存在着近岸风暴沉积,赵激林^[4]则详细论证了安徽巢湖地区五通组的滨海相特征,张国栋等^[5]则提出五通组为海侵过程中的近海沉积。作者认为,五通组实际上是以滨海相为主,间有三角洲、封闭海湾、泻湖及沼泽相等一套陆缘沉积建造。五通组中风暴沉积特别发育,在苏、浙、皖三省均有发现。本文仅以无锡惠山南麓一段剖面为例,介绍苏南五通组风暴沉积层的某些基本特征,并对作为风暴沉积重要标志之一的三脊波痕进行成因探讨。

一、风暴层的特征

无锡惠山南麓五通组中上部剖面出露较好,在无锡自行车厂附近采石场,我们发现了典型的风暴沉积层(图版 I-1, 2),其主要特征如下:

(1) 风暴沉积层为厚的透镜状砂体,砂层厚 0.5—2 m 或更厚,但侧向延伸不远,一般在 10—20 m 内即可尖灭。这一特征是风暴层中常见的现象^[6,7]。

(2) 砂体表面波状起伏强烈,发育特有的大波痕——三脊波痕(图版 I-2, 3, 4, 5),事实上,应将其看作风暴沉积的重要标志之一。

(3) 砂体表面往往有灰白色的泥砾,局部形成泥砾层。泥砾直径 2—30 cm 不等,磨圆度较差,为棱角-次棱角状,具同生变形。层面上见长达 2 m 以上的亚鳞木散乱分布及其它小的生物碎屑。

泥砾层多被当作风暴滞留沉积^[3,6-9]。然而本文所述的泥砾、亚鳞木等粗碎屑却明显不同,

它们不是位于风暴砂层的底部，而是位于风暴砂层的上表面；泥砾大小混杂，分选极差，与亚鳞木共同沉积在一起；泥砾层下部和风暴砂层有渐变趋势，许多泥砾“嵌入”砂层之中；泥砾和亚鳞木之上均匀地覆盖着白云母薄膜层，其上则是代表风暴间歇期的灰白色薄泥质层。这些都说明，泥砾和亚鳞木等粗碎屑绝非风暴层底部的滞留沉积，而是风暴流从附近邻区（如沼泽、海湾等）以悬浮方式搬运而来，并在风暴作用开始减弱的平息期沉积于该处的风暴砂层之上。泥砾具同生变形，证明“原岩”尚处于半塑性状态即遭受风暴破坏，棱角较明显则说明搬运方式以悬浮为主而非滚动，且距离较近，时间较短。提供这种事件性的动力，最有可能是风暴。张国栋等^[10]研究现代滨岸风暴沉积时曾介绍过，“在风暴期的前滨带，可见缓丘状起伏的砂质堆积体……，退潮后丘间低洼处出现冲刷面或波蚀坑，积水20—30 cm，其底见有残留泥砾、贝壳以及其它生物碎屑”。说明泥砾完全有可能后于粗砂而沉淀，因为泥砾多为扁平片状、盘状，易被风暴流搬运较长距离，沉积于砂层的上面^[10]。

为什么此处未见“底部滞留泥砾”？这与该处主要为砂质底质有关，风暴作用时主要是改造了背景沉积的砂体；而泥砾等则是风暴流从更浅处搬来的，自然后于风暴砂层而沉积于砂层表面。

(4) 砂体表面被一层白云母膜所覆，波谷处尤为密集，泥砾等也被白云母膜所盖。白云母是风暴平息期的悬浮沉积。

(5) 砂体之上继承性沉积了一层灰白色的泥质层，厚度均小于3—5 cm，较稳定，为风暴间歇期的产物。人们易将间歇期沉积的泥层当作好天气条件下的背景沉积，然而该处的灰白色泥层却不应看作背景沉积。由于风暴作用，使本来较清的水内富含混浊的粘土物质，在风暴平息后产生缓慢沉积，因此，泥质层仍与风暴作用有关。

(6) 典型的正递变层理不发育，但可见渐变的条带，由细砾、粗砂、中砂、细砂组成，成分均为石英质。这一特征与不少学者介绍的风暴层中常见粒序层理^[3,6,8]的特征有别，说明该处风暴流改造原有的石英砂、砾沉积，且以底部牵引搬运为主，搬运距离较短，具近源性质。

(7) 风暴层往往多层叠置，其间被间歇期的薄泥层所隔，有的则无薄泥层，代之以泥砾或直接由砂透镜层叠覆。这说明风暴作用频繁，间歇期很短，新的风暴流常将原来的风暴沉积层的顶面破坏，造成了不完整的沉积层序。

(8) 有的层内见大型丘状交错层理。尽管丘状交错层理的成因至今还处于探讨之中^[11-18]，但由于丘状交错层理常见于风暴层中，故多数学者都认为与风暴作用有关。

二、风暴层的形成与背景环境

作者不准备建立某种沉积模式，而是选择了一个具代表性的、完整的风暴沉积层序进行剖析（图1），借以探讨风暴层的形成。从图1中可以看出，风暴作用之前，该处沉积了灰白色的泥质岩A，代表着间歇期较安静条件下的悬浮沉积；接着沉积了水平纹层石英细砂岩B，此时风暴作用尚很弱，正常的底流起主导作用，对底部A层的侵蚀不显著；随后相继沉积了C、D，此时风暴作用明显加强，故沉积物的粒度显渐粗趋势，然仍有正常底流的干挠；D的近顶部出现交错层理（局部见丘状交错层理），顶面上发育了大型的三脊波痕，波长可达2 m，说明此时水底受到风暴旋涡流的强烈改造，风暴作用达最大强度；此后，风暴强度开始减弱，被风暴流带来的大量泥砾迅速沉积于三脊波痕面上，这便形成了E，此时代表着平息期的开始；

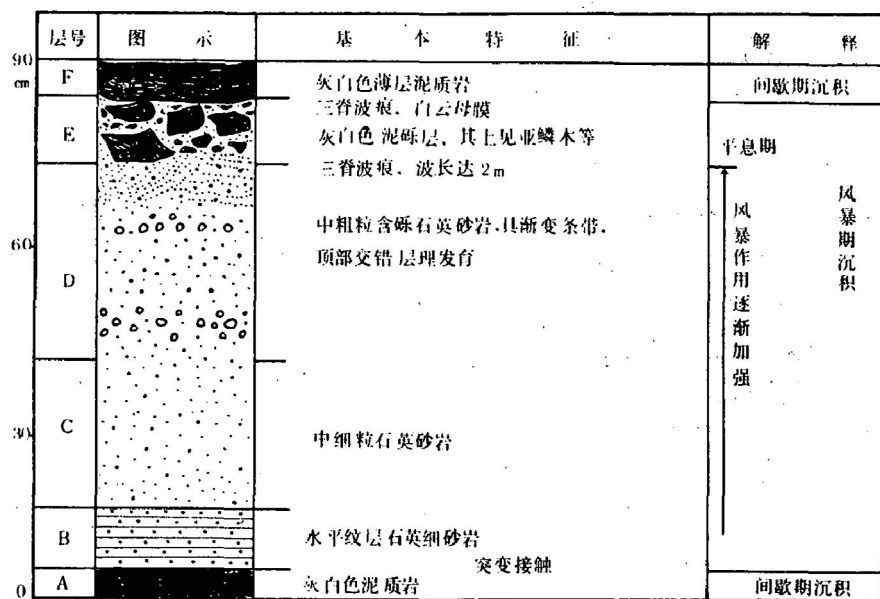


图1 一个完整的风暴沉积层序
(江苏无锡, 上泥盆统五通组)

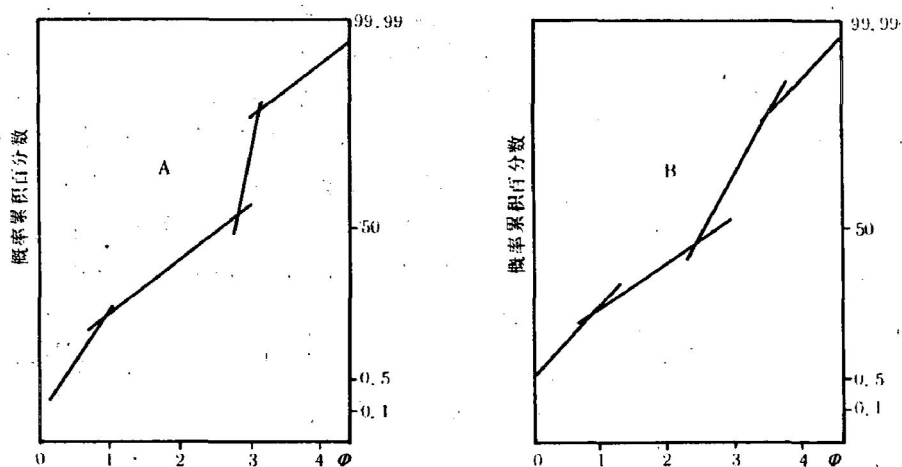


图2 概率累积曲线图

A—五通组风暴层砂岩, B—现代海滩砂^[20]

泥砾之后便是亚鳞木等生物碎屑逐渐沉积于泥砾之上,到平息期末则沉淀了一层白云母膜,至此,一次风暴作用便结束了。此后在E层顶部缓慢沉积了间歇期的灰白色泥质层F。从B到F构成一个完整的风暴沉积层序(即一个旋回)。由于风暴层厚度较大,以中、粗粒石英砂为主,且有泥砾和亚鳞木等粗碎屑,故具近源性质。其背景环境则具滨海相特征,主要证据有四:

(1) 从风暴层的特征可以看出,其厚度较大,粒度粗,砂质、砾质物占主导地位,且砂层表面发育大型三脊波痕,具明显的近源性质,造成上述特征最有利的环境就是滨海。

(2) 风暴层砂岩的物质组成特点是：石英占90%以上，含少量磨圆的硅质岩屑，胶结物为硅质（含少量铁），重矿物组合为黑电气石碎屑和磨圆良好的锆石晶体，只有在滨海环境下反复“淘洗”才能达到如此高的成熟度。正如 Lewis^[19]所指出的那样，石英砂屑岩形成于稳定而平静的构造环境，为造陆沉降阶段海侵过程中的近岸沉积。

(3) 对风暴层砂岩进行了薄片粒度分析*，换算后分析结果为：标准偏差 $\sigma_1=0.69$ ，分选较好；偏态系数 $SK_1=0.06$ ，近对称；峰度 $K_0=1.09$ ，窄峰；平均粒径 $M_z=3.07\phi$ ，细砂。上述特征表明，沉积层非河流相，最大可能是滨海相^[20]。与现代海滩概率累积曲线图对比（图2），二者几乎完全一致。

(4) 作者在无锡市锡惠公园五通组中上部露头上发现一浪成对称波痕，脊较尖、较直，波长20 cm，波高近5 cm，波脊走向为140°。这说明五通组中上部为海相沉积，更可能为滨海沉积。

通过上述分析可见，无锡风暴层为近源相，背景环境为滨海。

三、三脊波痕的基本特征

三脊波痕位于风暴砂岩层的上表面，其主要特征如下：

(1) 为一系列大型波痕，波高达10—20 cm以上，波长达0.5—2 m以上。

(2) 每三条方向不同的波脊交汇于一点，形成一个突起最高的峰，可曰“脊峰”，而每条波脊在相邻两“脊峰”之间又呈下凹状，形成“脊谷”。三条波脊无主次、先后之分，典型者平面上夹角为120°（图3，图版I-3，4，5）。

(3) 三脊波痕总是发育于风暴砂岩层面上，在浙江建德县岭后、长兴县煤山、安徽巢湖狮子口等多处发现。这些波痕下的砂岩层均为风暴沉积层，具近源性质。特别是在江苏江阴定山五通组中上部开采面上发现的三脊波痕，其规模、形态特征等和无锡惠山南麓的完全一样，其下的风暴层亦为滨海近源风暴沉积，波痕面上也见泥砾和亚鳞木（图版I-6）。此外，在安徽巢湖狮子口坟头组风暴层^[10]层面上，作者亦发现大型三脊波痕，波长2—3 m，波高20—30 cm，唯波脊不象无锡五通组风暴层中的那么尖、那么直。上述事实说明，三脊波痕实为风暴沉积（特别是近源风暴沉积）的重要特征，可看作风暴沉积的识别标志之一。

四、三脊波痕的成因

关于三脊波痕，国内尚无报道。Allen^[21]曾介绍过类似的波痕，称为六角波痕（hexagonal ripple marks），认为是一种干涉波痕，但只给出一个波脊线平面几何图案，并未进行任何分析与讨论。作者所述波痕之脊线虽然可构成六角形，但有的却构成五角形，且在脊谷处波脊连接不够明显，平面上更象一个个“Y”字组合，以每三条脊交汇于一点为其最显著的特征，因此，作者称其为三脊波痕（tri-ridge ripple marks）。

一般的浪成干涉波痕，被看作是波浪达岸边浅水区反射后相互干涉的结果，其交互的波脊有先后、主次之分。然而三脊波痕却无这一特点，而是同时形成的，故绝非一般的干涉波

* 选不含砾的细砂岩切片，在同济大学海洋地质系分析。

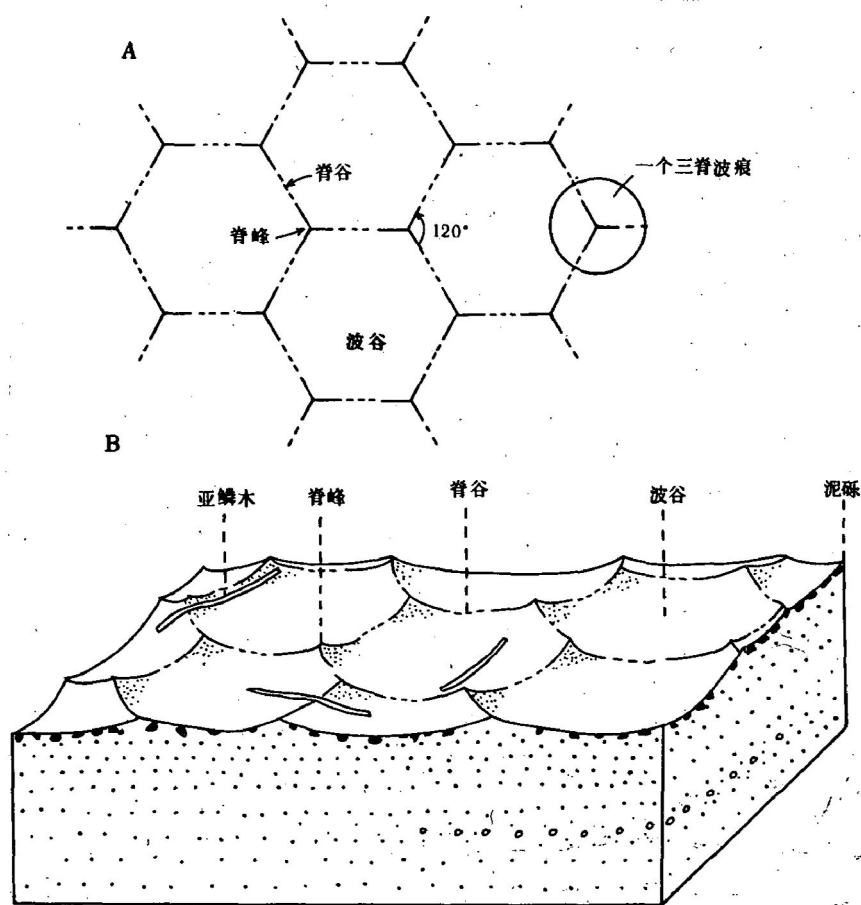


图3 典型的三脊波痕示意图

A—波脊线平面图, B—立体示意图

痕。由于三脊波痕总是与风暴层共存, 故形成过程必然与风暴作用相关。作者认为, 三脊波痕是强大的风暴旋涡流在水底形成若干个旋涡中心, 并自各个中心向四周扩散而相互干涉造成的。其形成过程如下:

(1) 风暴旋涡流在水底形成若干个均匀分布的旋涡中心 (图 4-A)。

(2) 旋涡流以各自的中心向四周扩散 (图 4-B), 首先在每两个相邻的中心之间发生干涉和抵消, 形成最初的波脊, 波脊线与二相邻中心之连线垂直 (图 4-C)。

(3) 随着扩散的继续, 干涉所形成的波脊伸长且交汇, 在交汇处波脊高度最大, 曰“脊峰”, 这便形成了三脊波痕 (图 4-D)。

由于均匀分布, 故理论上每两条不同方向的脊间夹角为 120° , 但因受到定向底流、水底地形等因素的影响, 实际上其夹角会有所变化。

作者所述机制并非凭空想象, 而是有着一定的依据的:

(1) 多个旋涡流水团在水底相互干涉, 无论是否均匀分布, 所形成的波痕必然是三脊波痕, 而不可能是“四脊”或“二脊”。这同陆地上由于多种风向共同作用所形成的星状砂丘道理相似, 星状砂丘实际上也是具有三条脊, 只不过规模更加巨大而已。

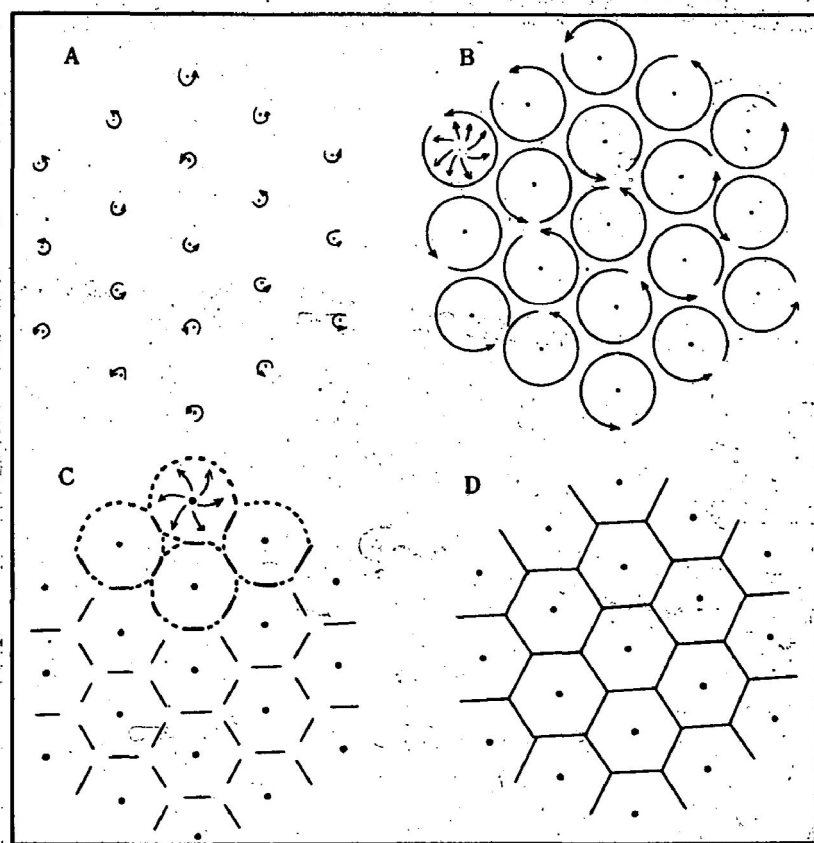


图4 三脊波痕形成过程平面示意图

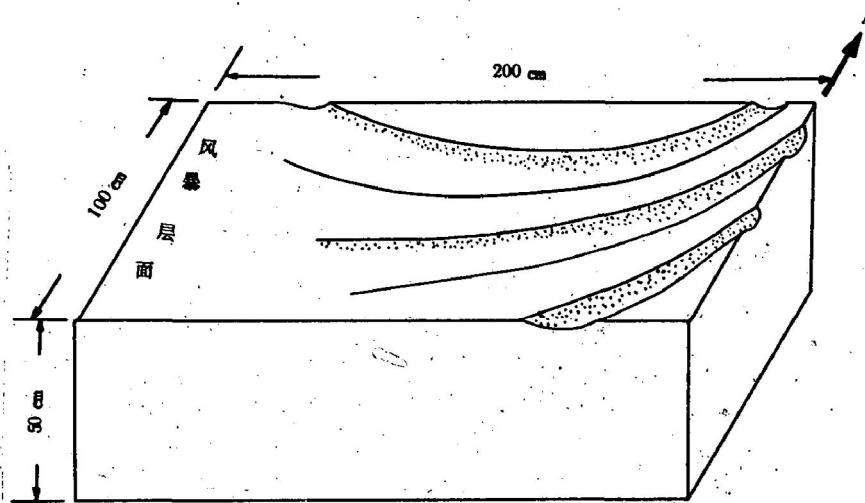


图5 五通组风暴层面上的弧形冲刷槽

(2) 风暴作用于水体，可形成一系列旋涡流。风暴层面上曾见到由强大的旋涡流造成的弧形冲刷槽（图5）。

(3) Allen^[22]曾介绍过由紊流扩散相互干涉所形成的波脊线组合,就是一种三脊波痕(图6),这个实验可以借用来说明三脊波痕的成因机理。

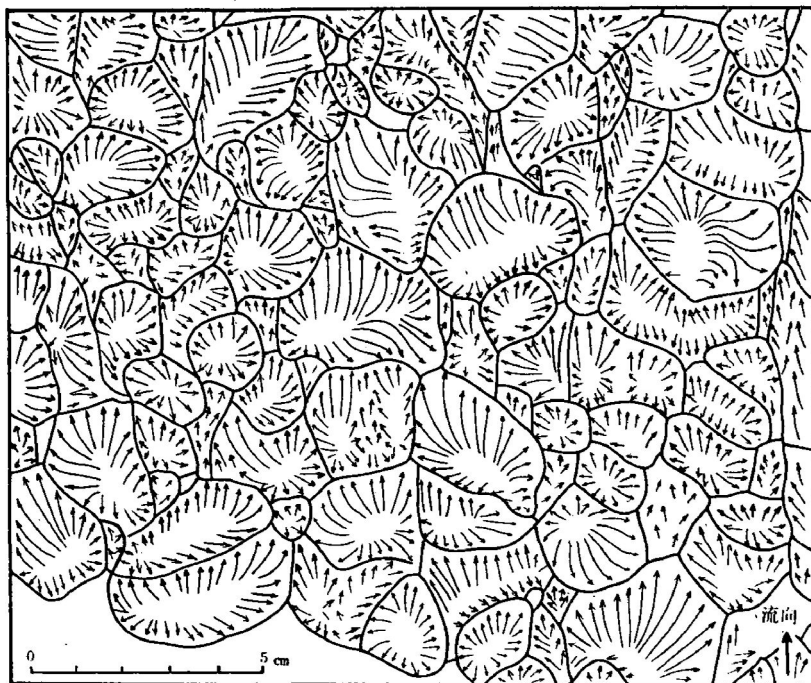


图6 紊流扩散实验所形成的波脊线平面图^[22]

粗线示波脊线, 箭头线示流线

结 论

苏南无锡、江阴等地五通组中、上部滨海相石英砂岩中发育有近源风暴沉积层。风暴砂岩层面上见有一种特殊的大型波痕——三脊波痕, 这种波痕是风暴作用形成的若干旋涡流在水底相互干涉的结果。因此, 三脊波痕可看作风暴沉积(特别是近源风暴沉积)的识别标志之一。

承蒙编辑和审稿者对初稿提出许多宝贵意见, 使本文得以补充和完善, 谨表谢意。参加部分野外工作的还有方华、蔡学美、褚强等同志, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 丁道桂, 李 萍, 吕俊祥. 下扬子地区晚古生代含油气盆地原型. 石油实验地质, 1987, 9 (3): 272—281.
- 2 张渝昌, 秦德瑜, 丁道桂等. 扬子地区古生代盆地构造格架和油气关系的若干初步认识. 石油实验地质, 1989, 11 (3): 205—218.
- 3 吴贤涛等. 苏南皖东五通群观山组的近岸风暴沉积与湖道沉积. 石油实验地质, 1986, 8 (4): 351—361.
- 4 赵微林. 试论安徽巢县五通组沉积相. 石油与天然气地质, 1988, 9 (1): 40—45.

- 5 张国栋等. 苏皖地区晚泥盆世五通组海侵及其沉积环境讨论. 地质论评, 1987, 33 (1), 69—77.
- 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. 成都地质学院学报, 1987, 14 (1), 45—54.
- 7 刘宝瑞等. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩. 地质学报, 1986, 60 (1), 55—67.
- 8 刘宝瑞等. 黔西南中三叠世陆棚-斜坡沉积特征. 沉积学报, 1987, 5 (2), 1—15.
- 9 柳祖汉. 古风暴沉积的化石标志. 沉积学报, 1987, 6 (2), 118—122.
- 10 张国栋等. 现代滨岸风暴沉积——以舟山普陀岛、朱家尖岛为例. 沉积学报, 1987, 5 (2), 17—28.
- 11 Duke W L. Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes, and intense winter storms. *Sedimentology*, 1985, 32 (2), 167—194.
- 12 Duke W L. Reply, Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes and intense winter storms. *Sedimentology*, 1987, 34 (3), 344—359.
- 13 Duke W L, Leckie D A. Origin of hummocky cross-stratification, Part 2, paleohydraulic analysis indicates formation by orbital ripple within the wave-formed flat-bed field. In: Knight R J, McLean J R, eds. Shelf sands and sandstones. *Can. Soc. Pet. Geol. Mem.*, 1986, 11, 339.
- 14 Greenwood B, Sherman D J. Hummocky cross-stratification in the surf zone, flow parameters and bedding genesis. *Sedimentology*, 1986, 33, 33—45.
- 15 Dott R H Jr, Bourgeois J. Hummocky stratification, significance of its variable bedding sequence. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1982, 93, 663—680.
- 16 Allen P A. Hummocky cross-stratification is not produced purely under progressive gravity waves. *Nature (London)*, 1985, 313, 562—564.
- 17 Nottvedt A, Kreisa R D. Model for the combined-flow origin of hummocky cross-stratification. *Geology*, 1987, 15, 357—361.
- 18 Southard J B, Lambie J M, Federico D C, et al. Experiments on bed configurations in fine sand under bidirectional purely oscillatory flow, and the origin of hummocky cross-stratification. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1990, 60, 1—17.
- 19 Lewis D W. *Practical sedimentology*. Stroudsburg: Hutchinson Ross Publishing Company, 1984. 229.
- 20 Komar P D. *Beach processes and sedimentation*. Englewood: Prentice-Hall, 1976. 429.
- 21 Allen J R L. *Sedimentary structures, their character and physical basis*, 1. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982a. 593.
- 22 Allen J R L. *Sedimentary structures, their character and physical basis*, 2. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982b. 663.

STORM DEPOSITS AND TRI-RIDGE MARKS OF WUTONG FORMATION IN SOUTHERN JIANGSU

Lü Hongbo Xia Bangdong Tu Tao

(Department of Earth Sciences, Nanjing University)

Abstract

The Wutong Formation of Upper Devonian is widely distributed in Southern Jiangsu Province and storm deposits developed in many places in this formation. According to the analysis characteristics, the storm deposits are considered to be proximal facies developed in littoral environment. A new kind of mega-ripple marks were found in the storm deposits and named "tri-ridge ripple marks" which were resulted by interference of storm vortex flow in water bottom. So the authors point out that the tri-ridge ripple marks are one of discriminative feature for storm deposit especially for proximal storm deposits.