

低能海岸的垂直层序和风暴沉积^①

李从先 韩昌甫^② 王平

(同济大学海洋地质系)

提要 我国淤泥质海岸由微型和小型层序构成。微型层序主要是潮汐作用形成的, 小型层序由粗、细粒单层构成, 其中粗粒单层形成于风暴时期, 细粒单层形成于平静天气。小型层序系完整的风暴层序。在淤泥质海岸层序中风暴沉积的厚度超过非风暴沉积, 且排列有序。低潮坪沉积物粗, 向陆向海变细, 从而构成中间粗、两端细的淤泥质海岸典型垂直层序。随着条件和因素的变化, 典型垂直层序可以产生若干变异, 识别出三种变异层序。

关键词 低能海岸 沉积层序 风暴沉积

第一作者简介 李从先 53岁 男 教授 海洋地质学

低能海岸沉积层序的研究以北海沿岸最详 (Gunsburg, 1975; Klein, 1977; Reineck and Singh, 1980; Van Straaten and Kwenen, 1955), 中国低能海接纳了长江、黄河等大河的泥沙, 沉积物来量丰富, 其沉积层序有许多特殊之处, 需要进行总结和概括, 过去一般把潮流看作低能海岸沉积的主要动力, 近年来有一些文章讨论淤泥质海岸中的风暴沉积 (李从先、李萍, 1982; 任美镠等, 1983; 许世远等, 1984), 但是很少论文专题讨论风暴沉积在淤泥质海岸层序中的作用和地位。笔者对我国低能海岸数十个钻孔和探槽作了较系统的分析, 同时把浙北下古生界和现代潮坪沉积作了对比研究, 在此基础上, 本文拟对低能海岸层序的类型和特征, 风暴沉积在其中的作用和地位作初步探讨。

一、垂直层序的构成

根据渤海湾沿岸、长江三角洲及江浙地区钻孔岩心、探槽和露头剖面的观察, 低能海岸包括微型层序和小型层序等不同沉积单元。低能海岸一般可分为潮上带潮间带和潮下带 (图1), 其中沉积物、微型层序和小型层序各显示不同的特点。大致以低潮线为界, 向上 (陆) 和向下 (海) 沉积物逐渐变细, 重矿物含量逐渐减少 (表1)。上部植物碎屑和片状矿物丰富, 偶见陆相介形虫和淡水轮藻。下部海相微体化石增多, 垂直层序内部的微型层序和小型层序具有规律性的分布和变化 (图2)。

1. 微型层序

我国低能海岸层序中的微型层序由粗粒纹层和细粒纹层构成, 其厚度一般以毫米计, 也

① 教委基金资助的课题

② 现在地址: 青岛地矿部海洋地质研究所

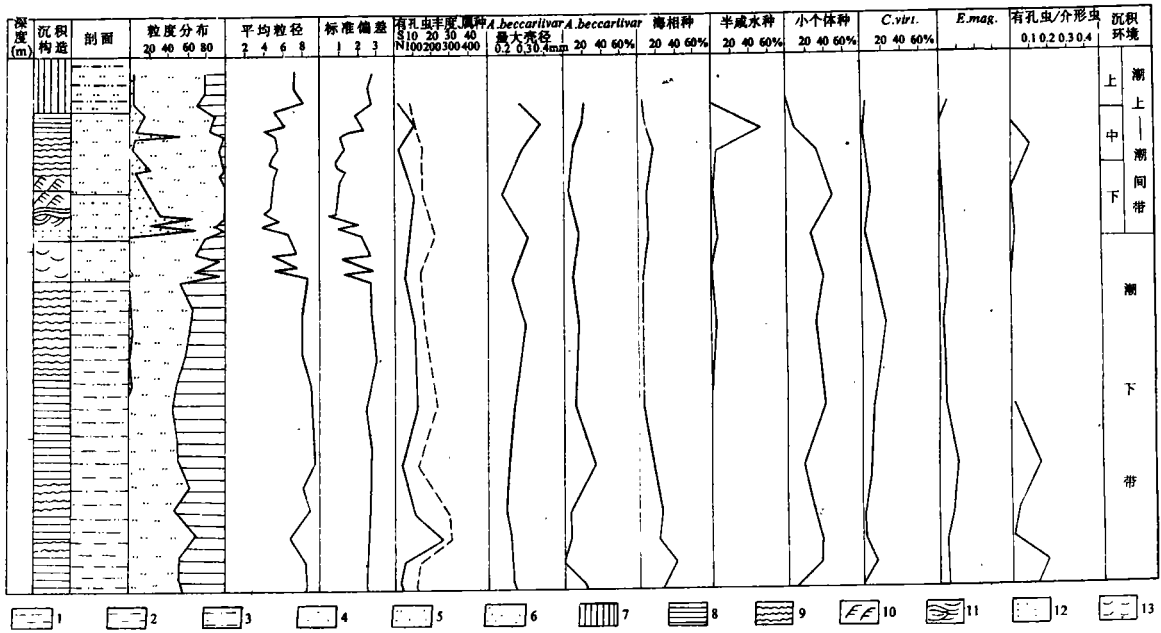
可达厘米级。粗粒纹层主要由砂和粉砂组成，细粒纹层则以粉砂和粘土为主，粗粒纹层与下伏层呈突变接触，常见冲刷面，纹层本身成为粒序层，或者不显粒序，与上覆细粒纹层呈渐变关系，粗粒和细粒纹层构成了一个微型层序。

表 1 低能海岸各个部分重矿物含量

Table 1 Heavy mineral content in sediments in various portions of low-energy coast

	潮间带			潮下带
	上	中	下	
南汇剖面	0.26%(5) ^①	2.82%(3)	5.69%(3)	2.39%(4)
钻孔		3.55%(4)	6.88%(4)	1.01%(3)

①%—百分含量 (5)—样品数



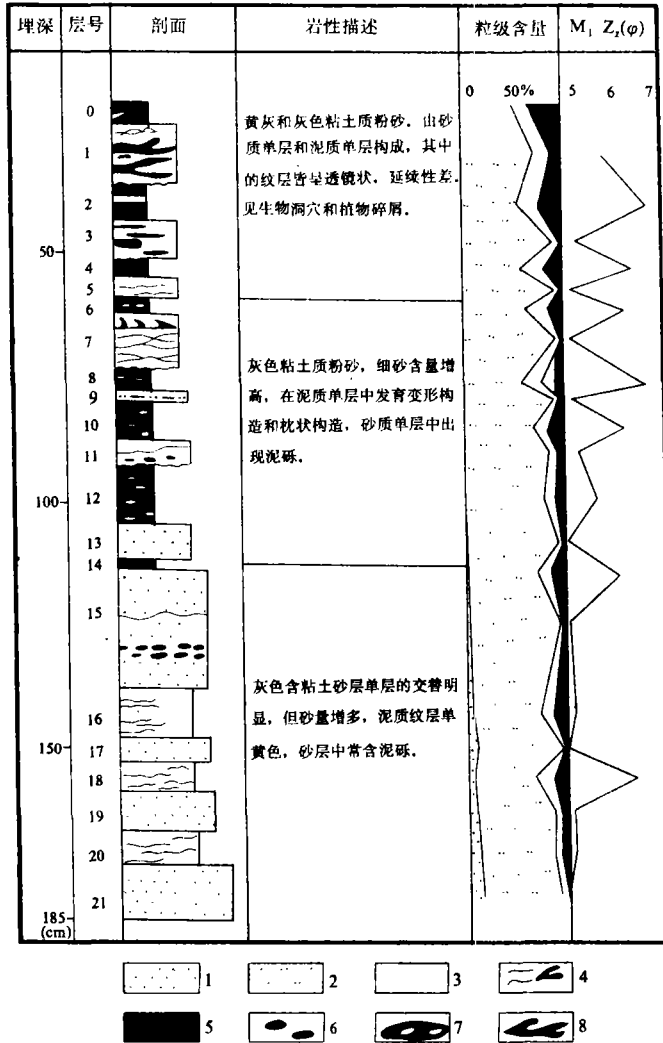
- 1. 粘土 2. 粉砂质粘土 3. 粘土质粉砂 4. 粉砂 5. 砂质粉砂 6. 砂 7. 人工填土 8. 水平层理
- 9. 波状层理 10. 小型交错层理 11. 对称波痕交错层理 12. 平行层理 13. 脉状层理

图 1 长江三角洲南翼 T₂₃ 孔低能海岸垂直层序

Fig. 1 Vertical sequence of low-energy coast in the drilling core No. T₂₃ of the Yangtze River Delta

粗粒纹层和细粒纹层的结构和相对厚度随其在垂直层序中所处的位置而变，高潮线和潮下带波浪基面附近细粒纹层较厚，可达 1-3cm；粗粒纹层较薄，常为 1-3mm，甚至不足 1mm。靠近低潮线粗粒纹层较厚，可达厘米级，细粒纹层变薄，一般为毫米级。纹层的延伸范围一般较小，仅数十厘米，尔后尖灭，在长江三角洲南翼的潮坪剖面中于 70cm 的范围

内两相邻的细粒纹层分聚达四次之多，粗粒纹层一般延伸 10—30cm，因此严格的说粗粒纹层为扁平状的砂质透镜体。在垂直海岸的剖面上纹层延伸较远，可达 1—2m。高潮坪细粒纹层延伸较远，低潮坪则粗粒纹层延伸较远。



1.砂 2.粉砂 3.细粉砂 4.泥质纹层 5.粘土 6.泥砾 7.砂透镜体 8.变形构造

图 2 长江三角洲南翼南汇垃圾码头潮坪剖面微型层序和小型层序的特征和分布

Fig. 2 Characteristics and distribution of the microsequence and small-sequence in the tidal-flat section of southern flank of Yangtze River Delta

根据瓯江南岸，渤海湾沿岸和长江三角洲潮滩的定位观测，纹层的形成与潮汐有关，一个潮周期内一般可留下一对粗粒（下）和细粒（上）纹层，但有时也可见到两对，粗粒纹层和细粒纹层形成于潮周期的不同阶段，高、低潮位时间生细粒纹，平水位时沉积粗粒纹层。然而当平水位高流速到来之时，潮流首先侵蚀改造以前的纹层，形成微型冲刷面，然后产生

粗粒纹层。

2. 小型层序

特征 在低能海岸层序中小型层序由粗粒和细粒单层构成，单层内含众多的纹层。粗、细粒单层的区分主要依据所含粗、细粒纹层的相对厚度和数量，以及砂、泥质沉积物的含量。以中潮坪为例，粗粒单层一般主要由细砂和粗粉砂构成，细粒单层则由粘土和粉砂构成。细粒单层中细粒纹层厚而密集，粗粒单层中细粒纹层薄而稀疏。粗粒单层的底部具冲刷面，与下伏层呈变接触，与上覆的细粒单层为渐变关系，因此构成了小型层序，小型层序相当于黄和(1987)等的潮汐韵律。

如图2所示，相邻粗、细单层的平均粒径、粘土含量和分选性等差异明显，但同为粗粒单层。其沉积物在高低潮坪并不相同，而是向海变粗，例如，高潮坪的粗粒单层，其沉积物的平均粒径较低潮坪的细粒单层还要细（表2），所以单层的粒度既反映了相邻单层的不同，也说明了自高潮坪至代潮坪逐渐变粗的趋势，粗粒单层有孔虫的含量较细粒单层中丰富，且壳径较大，破损程度也较严重。粗粒单层中的粗组分以石英和长石为主，重矿物含量也较高；细粒单层粗组分中植物碎屑和片状矿物则占较大的比例，重矿物的含量也较低，有时甚至趋近于零。这点在高潮坪尤为显著。粗粒单层中常含泥砾，它们或成层分布，或杂乱无章，这种泥砾不仅见于现代潮坪，在古代潮坪中也可发现（图版I，1，2）。粗粒单层的沉积构造主要有递变层理，平行层理，小型交错层理，波状层理等，顶部可见对称波痕及人字形交错层理，粗粒单层底部有袋模，箱状模，侵蚀残体（图版I，3）等，其特征是四壁直立，同时可见槽状模（图版I，4）。粗粒单层的底部也常常近于水平，与下伏层界线明显，呈突变接触。粗粒单层向细粒单层的过渡有两种形式，一种是粒度递变，另一种是细粒纹层的逐渐加密增厚，细粒单层中发育水平层理，波状层理，枕状构造（图版I，5）等。

潮下带自低潮线向下（海）粗粒单层逐渐变薄，细粒单层逐渐增厚，其粗、细单层的变化类似于低潮坪呈高潮坪。

表2 粗、细粒单层沉积物粒度的变化

Table 2 Variation of sedimentary grain size of coarse and fine single layer

岩性	高潮坪		中潮坪		低潮坪	
	粗粒单层	细粒单层	粗粒单层	细粒单层	粗粒单层	细粒单层
细砂	0.35%	0.13%	0.75%	0.70%	10.89%	9.43%
粉砂	95.30%	74.85%	91.06%	81.15%	83.30%	81.12%
粘土	4.35%	25.03%	8.19%	18.15%	5.95	9.46%
$M_{\phi}(\varphi)$	5.21	6.69	5.14	6.18	4.99	5.13
$\delta\varphi$	0.94	2.57	1.42	2.24	1.19	1.38
有孔虫(枚/50克)	752	104			1570	1018

成因 关于小型层序的成因，存在两种截然不同的意见：一种认为是潮汐作用的结

果，粗粒单层形成于大潮，细粒单层产生于小潮，并把小型层序称为潮汐韵律层序 (Terwindt, 1981); 另一种意见认为，粗粒单层主要是暴风浪作用的产物，细粒单层沉积于平静天气下，只在平静天气下细粒单层沉积之时潮汐作用才居主导地位 (李从先, 李萍, 1982; 任美镔, 1983; Dott, 1983; 1988), 这一争论涉及事件沉积在低能海层序中的作用和地位, 有必要进行讨论, 这个问题的解决可以通过两种途径, 一是进行现代低能海岸的直接观测, 一是通过小型层序本身沉积特征的分析研究。

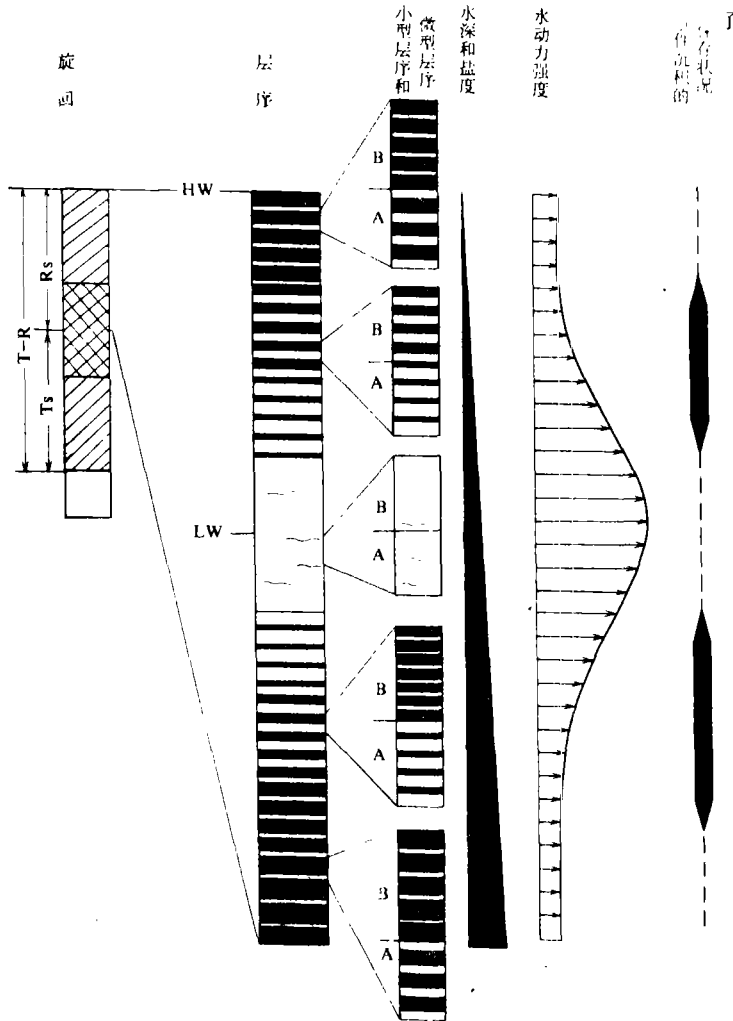


图3 低能海岸层序中小型层序和微型层的分布模式

Fig. 3 The distribution model of micro and small sequence in the low-energy coast section

渤海湾、长江三角洲和江浙沿岸低能海岸的观测表明，平静天气时期潮坪沉积厚约 10-15cm 的粉砂淤泥层，高、中潮位尤为明显，潮汐涨落使之反复暴露，脱水，并稍有固

结。暴风浪到来,首先在滩面上形成一个个侵蚀坑(图版I,6),侵蚀坑随后扩大,互相连接,致使细粒层的面积缩小,出现侵蚀残体。侵蚀坑和残体的四壁近于直立,壁前产生崩塌的泥块,经过1-2个潮周期,泥块磨圆而成泥砾。泥砾常常分别埋彼此分割的侵蚀坑之内。细粒层侵蚀之后,坑内铺覆粗粒层。随着滩面的侵蚀,粗粒层的分布范围逐渐扩大。风暴过后,滩面再度为细粒层所覆盖,8114号台风时苏北王港(任美镔等,1983)、杭州湾北岸(许世远等,1984)观察到类似的情况,野外数百次的直接观测表明,粗粒和细粒层的交替沉积与大、小潮的变化没有直接联系,却与暴风浪密切相关。

近代、亚近代和古代低能海岸层序中粗粒单层底部箱状模、袋状模以及四壁直立的侵蚀残体与现代潮坪风暴作用结果互相吻合。粗粒单层中的丘状交错层理,泥砾层,顶部的对称波痕及其内部的人字型交错层理表明,它们是波浪作用的产物。同时证明,在现代潮坪上所观察到的侵蚀堆积现象大多可以在地层中找到对应物,现代和古代潮坪的对比研究表明,低能海岸层序中的粗粒单层系风暴时期沉积的,属事件沉积;细粒单层沉积于平静天气。小型层序实际上是一个完整的风暴沉积层序。

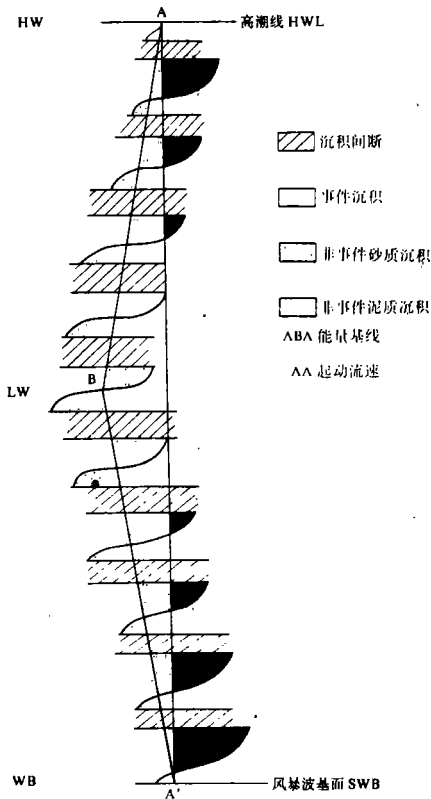


图4 低能海岸各部分小型层序的特征和沉积过程
Fig. 4 Characteristics and sedimentary process of the storm and normal small sequences in low-energy coast.

分布 低能海岸潮下带沉积主要借助于钻孔岩心,有些钻孔的位置十多年前尚为潮坪,如长江南翼东海钻孔,岩心中的小型层序发育良好,对比潮间带和潮下带的沉积特征,可以得出小型层序的分布规律,大致以低潮线为界,向上(陆)和向下(海)单层的组合和分布大体相似(图3)。潮间带和潮下带小型层序分布的相似性是由波浪能量的衰减规律决定的。波浪通过宽广平坦的潮坪,由于底磨擦使其能量逐渐减小,低潮线向海则因水深的加大而波浪对海底的扰动逐渐减弱,低潮线附近能量最高。因此,在同样的情况下,波浪的平均能量在低能海岸的各部分发生相应的变化,即图4所示的能量基线发生变化。然而,相同的沉积颗粒,其起动流速是一致的。因此,同样的风暴天气,在低能海岸各部分所引起的侵蚀和堆积效应是不同的,从而造成小型层序在低能海岸层序各部分的差别。

二、低能海岸层序的类型

虽然潮间带和潮下带沉积层序曾有人分别作了讨论(Gunsburg, 1975; Klein, 1977; 任美镔等, 1983),但只有少数论文把低能海岸层序作为一个整体来进行研究

(李从先、李萍, 1982)。根据我国沿岸钻孔和探槽的资料, 低能海岸垂直层序基本上是连续的、渐变的, 其中未出现大型间断。图 5 中间所示层序可以视为我国低能海岸的典型层序。当条件和某种因素发生变化时, 上述典型层序发生变异, 产生新的层序, 新产生的层序既有其特点, 也保留典型层序某些基本特征, 有以下两种类型。

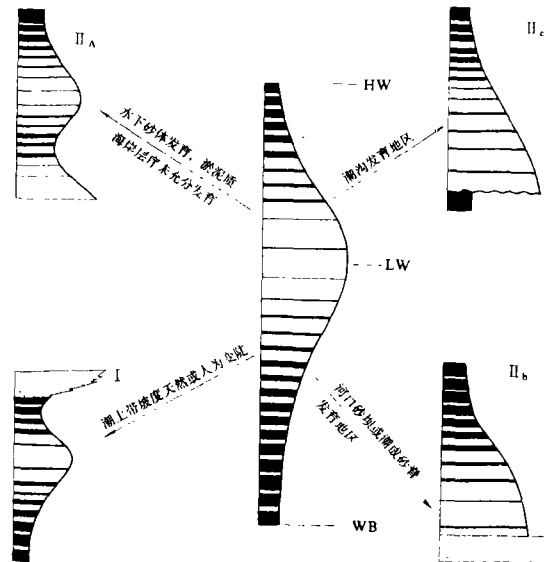


图 5 低能海岸层序类型及其间关系

Fig. 5 The types and their relationship of the low-energy coast sequence.

第一类 特点是于渐变的低能海岸的上部出现粗粒沉积层 (图 5 I)。这既可见于现代海岸 (平面上), 也可见于亚近代和古代垂直剖面中, 在平面上泥质高潮坪向陆出现砂质海滩, 二者的界线清楚。这种现象见于广西钦洲县三娘湾、长江三角洲黄沙岛、浙江普陀岛南端的金沙滩, 其发育条件是高潮坪的后缘陆地变陡, 成为人工堤坝。风暴时波浪在高潮线低能量局部集中, 产生砂质沉积。在垂直层序中, 高潮泥质沉积上覆海滩砂的现象可见于许多剖面, 如渤海湾沿岸的贝壳堆积覆盖在潮坪泥质沉积上, 浙江桐庐二叠系碳酸盐潮坪中亦可见这种现象。

第二类 特点是潮坪沉积直接覆盖在水下砂层上, 完全缺失潮下带的泥质沉积单元 (图 5 II_a), 或者潮下带的泥质沉积层甚薄 (图 5 II_b), 前者可见于长江三角洲 T₁₂ 孔, 后者以 T₅, T₆ 孔较为典型, 此外, 在浙江桐庐上奥陶统也发现类似的现象。这种类型的层序一般出现在河口坝, 潮成砂体, 水下河道和潮下带大型潮沟发育之处。

Klein (1977) 的潮坪层序模式仅仅是低能海岸层序中的一种类型, 发育于潮间带具有大型潮沟的地区, 其特点是潮坪层序下伏潮下带泥质沉积, 二者呈突变接触 (图 5 II_c)。具有这种相组合者在中国沿岸亚近带沉积中尚未发现。

三、风暴沉积在低能海岸层序中的地位

Dott (1983, 1988) 在导出幕式沉积 (episodic sedimentation) 的概念时指出, 在某一环境中可以有一种平均状况或均衡状态, 同时存在离开平均状况的偏异, 以近岸风浪为例, 正偏离可以产生风暴沉积, 负偏离产生无沉积或“硬底”。若将这一概念用于淤泥质海岸的研究, 平均状况即为波浪强度的平均值, 或者称为能量基线 (图 3)。在杭州湾北部, 此值以波高的均方根表示, 大于 0.70 时为暴风浪, 小于此值时为“静浪”¹。我国沿岸低能海岸的观测表明, 风暴 (正偏离) 时, 暴风浪的增长至顶峰期, 其主要作用是侵蚀, 风浪愈强, 被侵蚀沉积层的厚度愈大, 侵蚀作用不仅可以及于风暴前的非事件细粒沉积层, 而且可以达到更早的事件和非事件沉积。顶峰期过后, 则逐渐发育风暴沉积。平静天气 (负偏离) 时, 形成非事件细粒沉积, 而不产生无沉积或“硬底”。

为了认识事件在低能海岸层序形成中的作用, 曾对若干剖面的事件和非事件沉积作了统计。结果表明, 事件和非事件单层构成的小型层序, 其平均厚度为 15.7—163cm, 粗粒单层的厚度占剖面厚度的 57.0—58.8%。如前所述, 在低能海岸中, 事件记录应包括侵蚀面和粗粒单层, 苏北潮坪的观测表明, 8114 号台风时, 潮坪剖面的侵蚀一般为 30—40cm, 最大可达 70cm, 若采用上述小型层序的平均厚度计算, 则被侵蚀沉积层所代表的时间可以超过保留沉积层所代表的时间。

总之, 事件记录在低能海岸层序中占有重要地位, 事件沉积是低能海岸层序不可分割的一部分, 是建立低能海岸沉积模式不可缺少的环节。

因秋宝, 李萍、蔡庆兰等同志进行了样品分析, 陈刚同志参加了野外工作, 王秀雅、吴梅英同志清绘图件, 在此一并致谢。

收稿日期: 1990年5月26日

参 考 文 献

- (1) 李从先, 李萍, 1982, 海洋与湖沼, 3卷1期。
- (2) 任美鏊, 张忍顺, 杨区海等, 1983, 海洋地质与第四纪地质, 3卷4期。
- (3) 许世远, 邵虚生, 洪雪晴, 1984, 中国科学B, 12期。
- (4) 黄遵和, 王根发, 1987, 沉积学报, 5卷2期。
- (5) Dott, Jr R.H., 1983, J.Sed. Petr. V 53, p.5-23
- (6) Dott Jr R.H., 1988, A episodic view of shallow marine clastic sedimentation, in P.L. de Boer et al ed. Tidal influenced sedimentary environments and facies, D.Reidel Publishing Company, p.3-12.
- (7) Gunsburg R. V., 1975, Tidal deposits, a case-book of recent examples and fossil counterparts, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- (8) Klein G.de.v., 1977, Clastic tidal facies, Continuing Education Company, Champaign, Illinois.
- (9) Reineck H. E. and Singh L.B., 1980, Depositional sedimentary environments, Spring-Varlag, Berlin, Heidelberg

¹ 陈卫跃, 1989, 杭州湾北部淤泥质潮滩动力过程和地貌演变, 博士论文。

New York.

- (10) Terwindt J. H. J., 1981, Origin and sequence of sedimentary structures in inshore mesotidal deposits of the North Sea, Spec. Publ. Ass. Sediment. 5, p.4-16.
- (11) Van Straaten L. M. J.U. and PH. H. Kuenen, 1955, J. Sed. Petr., V.28, p.406-413.

Depositional Sequences and Storm Deposition on Low-energy Coast of China

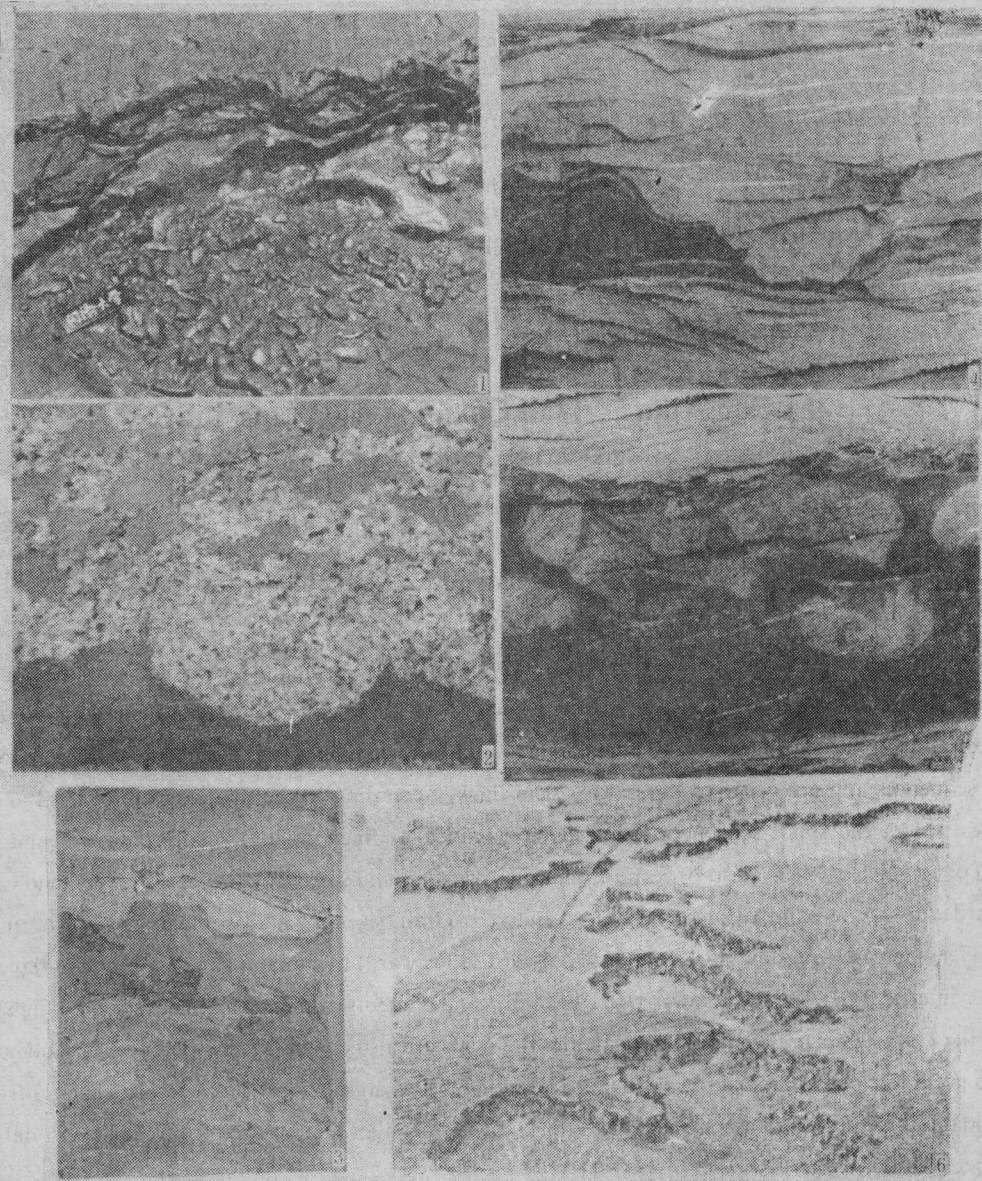
Li Congxian Han Changpu Wang Ping

(Department of Marine Geology, Tongji University Shanghai)

Abstract

Two different scale depositional micro- and small sequences are distinguished to be essential components of the sequences of low-energy coast. Micro-sequences, with the thickness of mm scale, are mainly formed by tides, and can be distinguished as mud laminae and sand laminae. Small sequences are composed of micro-sequences and are generally several to 20cm thick. According to the relative ratio of mud and sand laminae inside, the small sequences can also be classified as fine (muddy) small-sequences and coarse (sandy) ones which are believed to be formed under fair weather and storm weather respectively, and can also be regarded as normal and event sequences respectively. Grain size and sand contents in both normal and event layers increase from low tidal level both seaward (downward) to subtidal zone and upward (landward) to upper intertidal flat. Near the lower water level the sand contents in the normal layers can be higher than that of the event layers in the upper tidal flat, and the sands are also coarser. The differences in sand contents and the grain size between adjacent normal and event deposits are obvious. The seaward changes from the lower tidal flat to the wave base are similar to the landward changes that occurred from the lower tidal flat to the upper tidal flat.

Comparison among the present, subrecent and ancient sections in many areas demonstrated that the basic sequences of the low-energy coast of China is a sequence that fines from lower tidal flat both upward to the upper tidal deposits and downward to the wave base deposits. In the tidal flat where the tidal channels are developed, the tidal sequence fines only upward with a obvious erosional surface at the bottom and with underlying mud deposits, which is similar to the classic sequence described by Klein (1977). In the areas where river mouth sand bars and tidal sand ridges are developed, the sequence also fines only upwards but with underlying sand deposits. Adjacent coastal rocky hills or man-made dams can make the slope of the upper tidal flat or supertidal steepen, which subsequently cause the sediments coarser at the top of the low-energy coast sequence. Shell layers can sometimes be found in the coarsened upper tidal deposits. Such sequence had been detected in the Yangtze Delta and the Paleozoic tidal deposits in western Zhejiang Province.



1-2 潮坪沉积中的泥砾 (1) 长江三角洲南翼潮坪, 8706号台风期间 (2) 古代 3. 四壁直立的侵蚀残体和箱状模, T_{23} 孔 4. 粗粒单层底部的槽状模, 长江三角洲南翼 5. 细粒单层中的枕状构造 6. 潮坪表面的侵蚀坑(8706号台风期间)