

文章编号: 1000-0550(2006)04-0562-08

江苏中部淤泥质潮滩潮汐层理成因机理 和风暴沉积判别标志^①

王 建¹ 柏春广^{1, 2} 徐永辉^{1, 3}

(1. 南京师范大学地理科学学院 南京 210097; 2. 东南大学交通学院 南京 210096; 3. 南京大学城市与资源学系 南京 210093)

摘 要 通过对江苏中部淤泥质潮滩潮汐纹层发育过程的实地观测, 以及对所采样品在室内进行的落淤量的计算与颗粒的粒度、磨圆度分析等, 揭示出江苏中部海岸淤泥质潮滩沉积中的潮汐层理的成因机理: 毫米级薄砂泥互层层理为半日潮的产物, 厘米级厚的厚砂泥互层层理为半月天文潮的产物。此外, 通过对 9711 号台风引致的风暴潮影响前后的滩面进行了现场观测, 发现江苏中部淤泥质潮滩上部存在一个即使在风暴潮期间也不发生侵蚀的地带。该带的风暴沉积与正常的潮滩沉积比较, 具有粒度较粗, 分选较差, 磨圆稍好, 递变现象明显, 平行层理或波状交错层理发育比较典型的特征。

关键词 潮汐纹层 成因机理 风暴潮 判别标志 江苏中部

第一作者简介 王 建 男 1962 年出生 博士 教授(博士生导师) 自然地理学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

在淤泥质潮滩上常见砂泥水平互层层理, 其厚度变化与组合显示出一定的韵律性, 这种韵律性与潮汐作用等的周期性密切相关, 可以用作潮滩沉积的时间标尺。然而, 迄今为止, 对砂泥互层层理的形成机制仍没有统一的认识。即对于砂泥互层层理的成因机制, 有的认为是一次涨潮流(或一次落潮流)所形成^[1~8], 有的认为是一次涨落潮过程的产物^[9~15], 还有的认为是大、小潮旋回的结果^[16], 或与风暴潮的周期作用有关^[17~18]。因此, 从砂泥互层发育过程的实地观测入手, 弄清其形成机制, 并在风暴沉积现场观测的基础上, 分析风暴潮对正常潮滩沉积的影响, 研究其沉积结构及构造与正常潮滩沉积之间的区别, 其意义显得尤为重要。

1 研究区概况

梁垛河闸(120°55'E, 32°50'N)位于江苏中部东台市东南沿海, 具体的地理位置如图 1 所示。在地貌格局上, 该研究区属于华东凹陷, 为典型的粉砂淤泥质海岸, 向海突出, 是淤长型潮滩, 滩面坡度为 3‰~4‰。研究区的潮汐为正规半日潮, 平均高潮线附近涨潮历时短于落潮历时 3 小时, 平均低潮线附近也短近 1 小时^[19], 这就使涨潮流速大于落潮流速, 涨潮含

砂量大于落潮含砂量。涨落潮流速和含砂量的明显不对称性, 驱使泥沙向岸运移, 并在潮滩沉积。该区平均高潮面 2.99 m, 平均低潮面 -0.09 m, 平均海平面 1.23 m, 平均潮差 3.09 m, 最大潮差 4.55 m^[20], 因受北部的废黄河口和南部长江口的影响, 泥沙来源丰富, 潮水含砂量大。较大的潮差和较高的泥沙含量, 使得这里沉积速率较快, 潮汐层理清晰, 因而成为研究潮汐纹层的理想区域。另外, 由于该区受风暴潮作用的强度和频率适中, 也是研究风暴沉积特征和事件

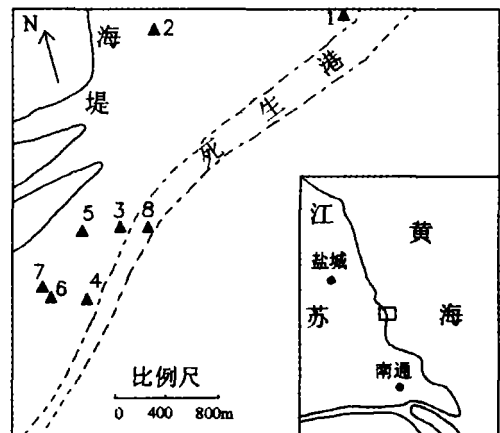


图 1 研究区位置及潮滩定点观测点位置图
(1、2、3、4、5号点在滩面上, 6、7、8号点在潮沟里)

Fig 1 The study area and observation sites on tidal flat

^①国家自然科学基金项目(批准号: 49601019)、国家重点基础和发展规划项目(2003CB415201-8)和国家教育振兴计划教育部青年教师奖励基金(批准号: 2001JBC12)资助。

收稿日期: 2005-04-14; 收修改稿日期: 2005-11-15

频率的理想地点。

2 潮汐层理的成因机理

2.1 实地观测方法

课题组成员于 1997 年 4 月 16 日至 5 月 1 日,在江苏东台附近滩面上 8 个地点(见图 1)共设置了 12 块自制的沉降板,沉降板上设置了滤纸和牛皮纸,以便采集样品和计算落淤量(图 2)。每次潮水过后,都对沉降板和滩面上的沉积物及其层理进行观察,以了解层理的发育过程。在观测的同时,对每次潮水的沉积物都进行了系统采样(将过滤纸和牛皮纸连同上面的泥沙一起装入塑料袋中),同时采集了沉降板附近滩面柱状样,以便分析沉积物粒度、落淤量等与潮汐周期性之间的关系。

2.2 观测及样品分析结果

2.2.1 薄互层层理的形成

图 3 即为 4 号桩附近的两个地点所采集的滩面柱状样的照片。从照片上可以看出,该地潮汐层理发育得比较清晰,同一地点的层理序列可以比较。通过比较,可以跟踪潮汐层理发育的过程。

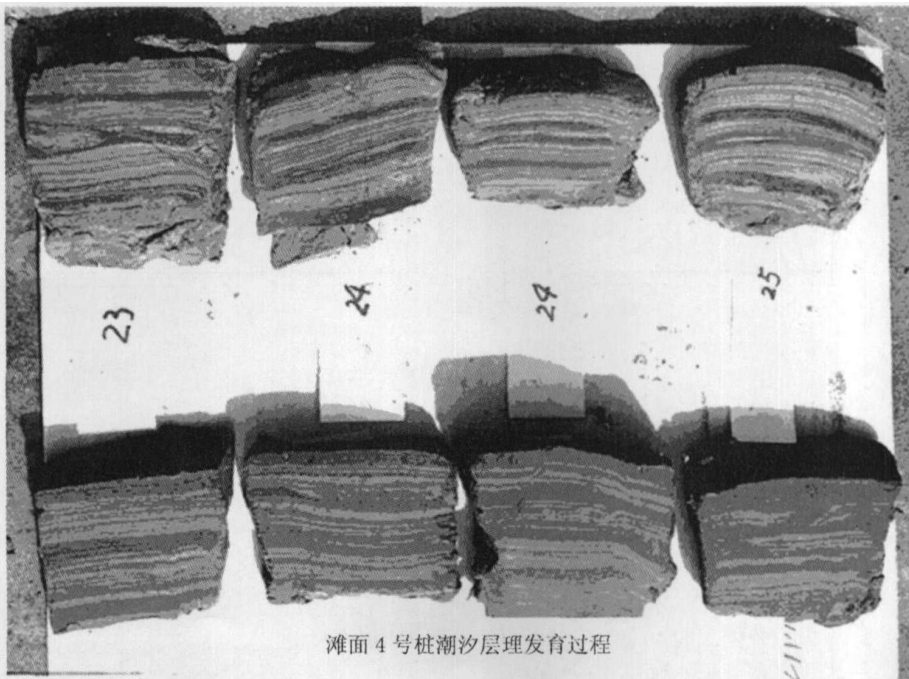
通过对沉降板上的沉积物的观测(每天观测两



图 2 沉降板、采样纸和沉降板上的沉积物

Fig. 2 Sedimentation board sampling paper and sediments

次),以及对每次潮水过后采集的滩面柱状样的观察与对比,发现在最初的一段时间内,一次潮水形成一个薄砂泥互层层理(厚度通常在 0.3~1.5 mm 之间),层理个数与潮汐次数相对应。可是随着层理的发育迭加,可以辨别的层理数目却逐渐的小于潮汐的次数(表 1)。最终的结果是层理数有时等于,但往往



滩面 4 号桩潮汐层理发育过程

图 3 滩面潮汐层理发育过程

(从左到右依次为 4 月 23 日下午、24 日上午、24 日下午和 25 日上午所采样品的照片。

上面四个柱状样来自同一个地点,下面四个取自另一地点)

Fig. 3 The development process of tidal couplets

少于潮汐涨落次数 (表 2)。这样的观测结果表明,薄砂泥互层层理是半日潮的产物。但由于潮间上带不是每次潮汐都上水,并且不是每次形成的层理都能保存下来,或者由于层理太薄难以辨认的原因,潮汐层理的数目有时等于,但往往小于潮汐涨落次数。

表 2 潮汐层理观测的最终结果

Table 2 The result of the observed tidal couplets

观测点	(本研究实测)							25~29日(据前代读等 ^[4])		
	1#点	2#点	3#点	4#点	5#点	7#点	1号板	3号板		
	4.5	4	6	5.5	5	1.5	2	4	5	5
时间间隔(天)	4.5	4	6	5.5	5	1.5	2	4	5	5
潮汐次数	9	8	12	11	10	3	4	8	10	10
潮汐层理数	6	5	8	7	6	3	4	5	8	9

表 1 观测到的层理数目与潮汐次数之间的关系

Table 1 The relation between the number of tidal couplet and tide

潮汐次数	观测点					
	1号	2号	3号	4号	5号	7号
1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2
3	3	2	3	3	3	3
4	4	3	4	4	4	4
5	5	3	5	5	4	4
6	5	4	6	5	5	4
7	5	4	6	5	5	5
8	6	5	7	6	5	5
9	6		7	6	6	
10			8	7	6	
11			8	7		
12			8			

2.2.2 沉积物粒度和落淤量随潮水位的变化

沉积物粒度分析表明,大潮沉积物的颗粒明显粗于中、小潮,并且颗粒的分布也更为集中,具体见图 4,图中大潮、中潮、小潮样品分别为 4 月 24 日下午、4 月 29 日上午和 4 月 17 日下午的沉积物。图 5 中 3 号点沉积物中值粒径及高潮位随时间的变化则进一步体现出沉积物粒度与高潮位之间良好的相关性。这一粒度组成特征与实地观测的纹层变化一致,即大潮期间形成以砂、粉砂为主的潮汐层理,在剖面上表现为浅色调的“砂质段”;小潮期间则形成以粉砂、粘土为主的潮汐层理,在剖面上表现为深色调的“泥质段”;中潮期间的沉积物粒度及特征介于大、小潮沉积物之间。

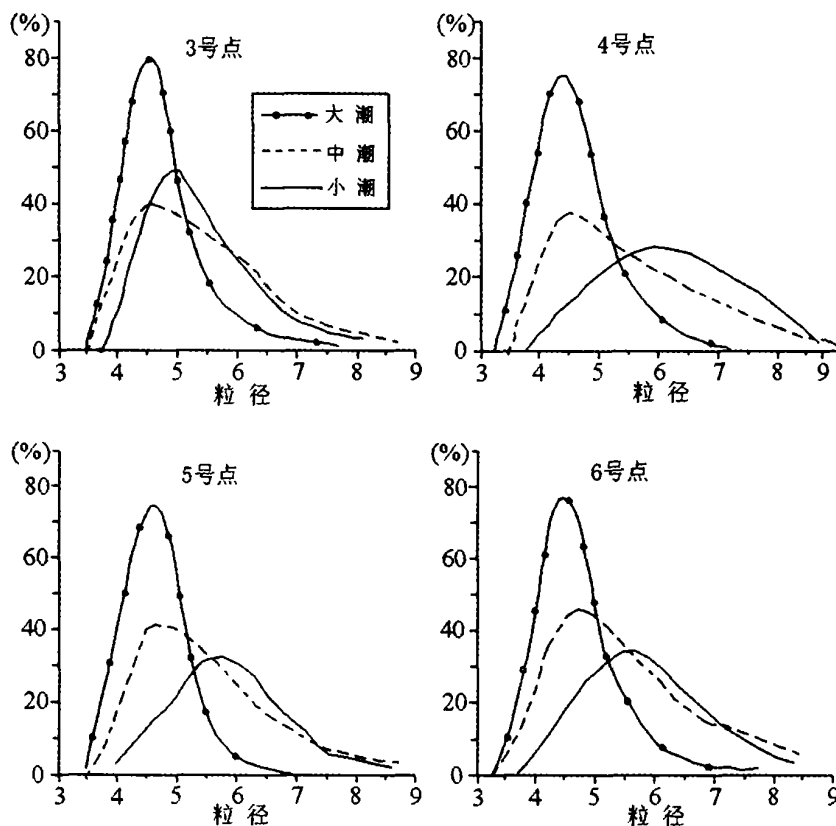


图 4 各观测点潮滩沉积物粒度组成图(图中的粒径为(值))

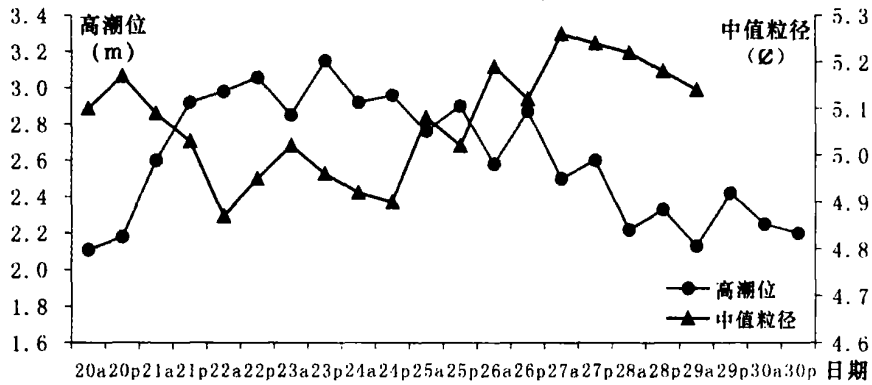


图 5 沉积物的中值粒径、高潮位随时间的变化图(样品取自 3 号点)

Fig 5 Variation of middle grain size of deposits and high tide level with time

将野外连续观测期间采集到的每次潮水沉积物进行室内烘干称重,获得净沉积量,再用净沉积量除以沉积面积,得到每次潮水的单位面积的落淤量。尽管由于不同地点的高程差异,使得滩面被潮水淹没的时间不同,落淤量也就有所差别,但从小潮到大潮的过程中,落淤量逐渐增大,而从大潮到小潮的过程中,落淤量逐渐减小的变化规律却是一致的,这一规律在图 6 所示的滩面 4 号点的落淤量变化中得到了很好的体现。

根据每次潮水滩面上的落淤量可以估算潮汐层理的厚度。以 3 号、4 号采样点为例,大潮期间每次潮水落淤量为 $0.15 \sim 0.35 \text{ g/cm}^2$,中、小潮期间为 $0.036 \sim 0.08 \text{ g/cm}^2$ 。根据泥沙干容重 2.65 g/cm^3 来计算,大潮期间 3 号、4 号点附近互层层理厚度为 $0.56 \sim 1.32 \text{ mm}$,中、小潮期间只有 $0.13 \sim 0.30 \text{ mm}$,因而中、小潮期间形成的层理必然很薄,事实上很薄的层理有时难以用肉眼辨认或容易被改造,从而使得滩面上观测的层理数往往少于实际潮水涨落的次数。

2.2.3 厚互层层理的形成

滩面观测以及连续采集的柱状样的对比均表明,大潮期间形成的层理相对较厚、颗粒也相对较粗,而中、小潮期间层理变薄、颗粒变细,并且在剖面上存在着厘米级 ($1 \sim 2 \text{ cm}$) 厚的由系列纹层组成的砂、泥变化旋回。这种厚的砂泥互层层理,在厚度上或从沉积速率来估算,对应于半月天文潮旋回,但究竟是不是半月天文潮旋回,还需其它方面的证据。为此,以梁垛河滩 1 号点为例,从每次潮水过后所采集的柱状样中,对 4 月 28 日所采柱状样与 6 月 2 日柱状样的层序作了对比,并对两个日期之间两个形成的沉积物的粒度作了分析。

从图 7 所示的两个柱状样的对比中可以看出,在从 4 月 28 日到 6 月 2 日之间的 35 天时间里,形成了 4.8 cm 厚的沉积序列,其中包括两个以粉砂为主的厚层和两个以泥为主的厚层,正好对应于两个天文潮旋回。两个厚泥层中可以分辨的薄层理分别为 9 个和 7 个。由此可见,厚砂泥互层层理确实是半月天文潮的产物。

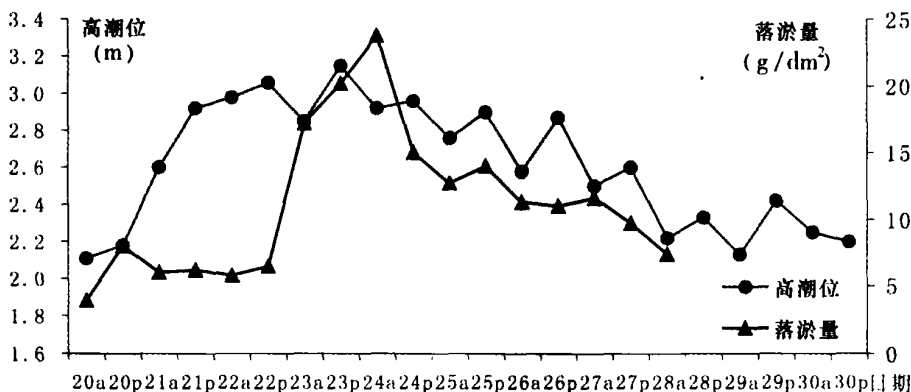


图 6 滩面落淤量与高潮位随时间的变化图(滩面样品取自 4 号点)

Fig 6 Variation of sedimentation quantity and high tide level with time

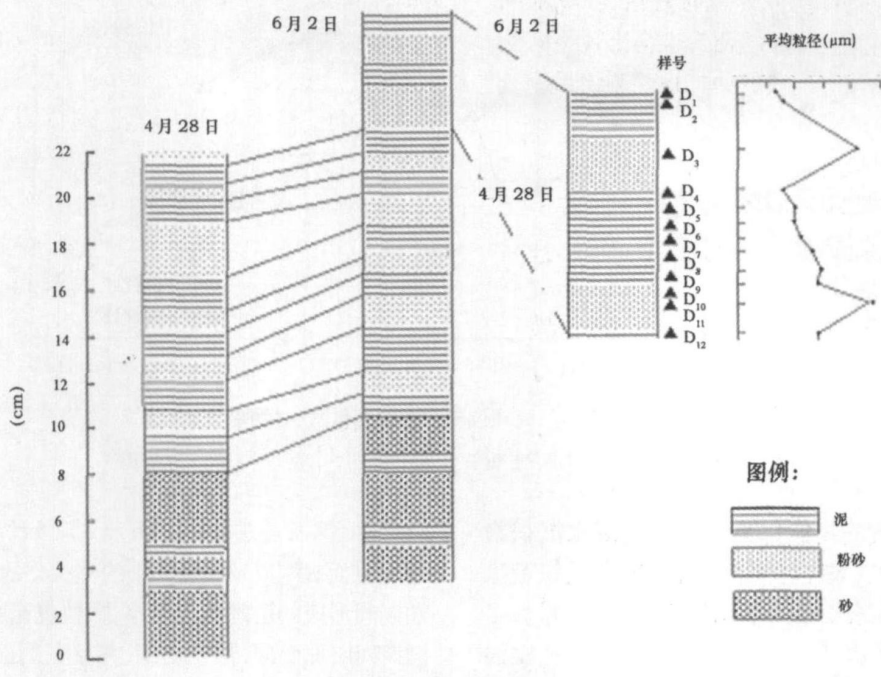


图 7 4月 28日采集的柱状样与 6月 2日柱状样对比图

(图中:▲为粒度采样点)

Fig 7 Comparison of sedimentation samples collected on April 28th and June 2nd, 1997

为进一步分析一个月内的 大小潮沉积物及一个砂泥互层的沉积物粒度特征及其变化,从顶部的 6月 2日纹层至底部的 4月 28日纹层分别采样作镜下粒度统计,样品号为 D_1 至 D_{12} ,其中 D_3 、 D_{11} 为粉砂层的样品,其余为泥层的样品。每个样品统计 250个颗粒,同时以棱、次棱、次圆、圆来统计颗粒的磨圆度,粒度结果见图 7,磨圆度如表 3。

表 3 4月 28日至 6月 2日的大、小潮沉积物特征对比表

Table 3 Comparison of characteristics of spring and neap tidal sediments from April 28th to June 2nd, 1997

	平均粒径 / μm	粒径众数 / μm	磨圆度
泥(小潮)	36	30	差
砂(大潮)	62	70	差

粒度分析结果表明,大潮沉积物颗粒较粗,小潮沉积物的颗粒较细。大、小潮沉积物的磨圆度相差不大,这是由于大小潮期间,潮水能量虽然有差别,但对沉积物颗粒的磨圆度不足以造成影响。

3 风暴沉积的特征及判别标志

对于风暴沉积,目前研究者们不仅广泛发现了现代与古代的风暴沉积事件^[21~26],对其沉积基本特征

的研究也取得了很大的进展^[27~33]。但不同地区和不同的海岸部位,由于物质来源和沉积动力不同,其沉积特征不同。为进一步了解该地区风暴潮的沉积模式与特征,以便建立该区的风暴沉积判别标志,本课题组成员在东台梁垛河闸附近滩面对 1997年的 11号台风作了现场观测。该台风于这一年的 8月 19日在浙江温岭登陆,后转向东北,影响观测区,梁垛河闸出现了二十年来仅次于 1981年 14号台风影响的第二大高潮位,潮位高 5.51 m。

3.1 沉积模式

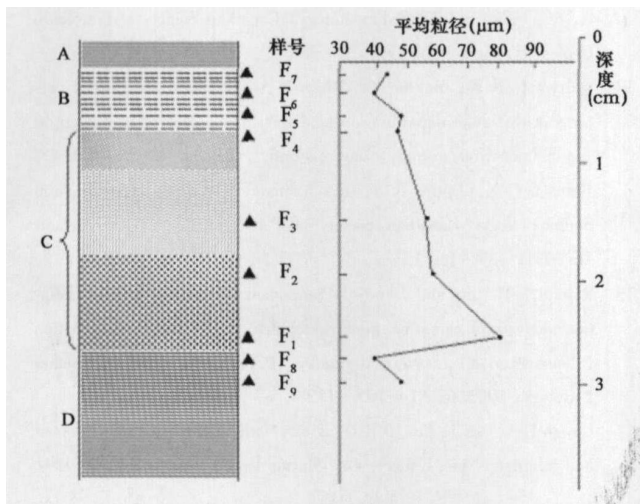
在风暴潮袭击研究区的前一周,本课题组成员在滩面上进行了观测与采样,风暴潮还未结束,又返回滩面进行观测与采样。观测表明,风暴潮造成滩面严重侵蚀,设置的沉降板在风暴潮发生以前,沉积物的厚度约 6 cm,风暴潮过后,沉降板上的沉积物全部被侵蚀掉,并且沉降板基部也被侵蚀掉约 15 cm。整体而言,滩面的侵蚀幅度一般为 5~10 cm,最大可达 14~21 cm。同时,在这次的实地观测中还发现了另外一个重要的事实,即在滩潮上部存在一个 50~100 m 宽的淤积带,淤积厚度 1~3 cm,平均 2 cm,其底面平整,未见冲刷面。侵蚀带与淤积带之间是一个过渡带,没有侵蚀也没有淤积。陈卫跃^[34]在对杭州湾北

岸、长江口南岸部分潮滩沉积研究时曾指出,在暴风浪侵蚀潮滩时,高潮滩上部及盐沼带也会出现不同程度的淤积,这一结论与本项研究的实地观测结果相一致。

3.2 沉积构造及粒度特征

为研究风暴沉积的构造及粒度特征,现场采集了 2 号点沉降板上的风暴沉积的柱状样,观察其结构构造特征,并进行了镜下粒度统计,每个样品统计的颗粒数都在 250 个以上,图 8 显示了风暴潮的沉积构造及粒径的变化。

图 8 中柱状样的 A 段为正常的砂泥互层层理,厚约 0.2 cm,是台风过后的正常潮汐沉积;B 段为粉砂层,可见交错层理,厚约 0.5 cm;C 段为较粗的粉砂层,是台风期间的沉积,递变层理发育明显,厚约 2 cm;D 段为砂泥互层层理,是台风前的正常潮汐沉积。



(图中: A、D 为水平互层层理、泥; B 为交错层理、粉砂; C 为递变层理、砂; ▲ 为采样点)

图 8 2 号点 9711 号台风风暴沉积构造及各层平均粒径
Fig. 8 Deposition structure and the mean grain-size of the deposits of typhoon No. 9711 at site No. 2

从各样品平均粒径的变化曲线可以看出: F_1 的颗粒最粗,平均粒径达 $81 \mu\text{m}$,其次为 F_2 和 F_3 ;而 F_6 、 F_7 、 F_8 、 F_9 的平均粒径值则相对较小,约为 $40 \mu\text{m}$ 左右。

3.3 沉积颗粒磨圆度

在对样品作粒度分析的同时,还以棱、次棱、次圆、圆四个级别对其磨圆度作统计,结果见表 4。

从表 4 可以看出, F_1 样品中磨圆度为圆的颗粒为 15.2%,次圆的颗粒为 33.2%, F_2 样品中磨圆度

为圆的颗粒占 6.4%,次圆的颗粒为 22.8%,磨圆度为棱和次棱的颗粒所占比例较小,而其它样品中磨圆度为圆的颗粒含量均小于 5%,次圆含量也小于 10%,棱和次棱所占比例较大,这说明风暴沉积物的颗粒磨圆度比正常沉积物的颗粒磨圆度要好。造成这一现象的原因是:风暴潮期间,在沉积物沉积的过程中波浪作用很强,流速也相当高,水体挟带的泥砂颗粒之间相互碰撞摩擦,使得颗粒的棱角发生破坏,从而使颗粒的磨圆度变好。

表 4 风暴沉积物及其上覆和下伏沉积物磨圆度对比表
Table 4 Roundness comparison between storm sediments the overlying and underlying sediments

	棱	次棱	次圆	圆
F_1	8.4%	43.2%	33.2%	15.2%
F_2	6.8%	64.0%	22.8%	6.4%
F_3	14.0%	72.4%	10.05%	3.6%
F_4	20.4%	69.2%	7.6%	2.8%
F_5	12.0%	78.0%	5.6%	4.4%
F_6	17.6%	76.4%	3.6%	2.4%
F_7	6.4%	85.2%	5.2%	3.2%
F_8	21.6%	68.4%	6.0%	4.0%
F_9	21.2%	73.6%	3.2%	2.0%

3.4 风暴沉积的特征及判别

对比该区潮间上带风暴沉积物与正常的潮滩沉积物,可以发现两者之间存在着明显差异(见表 5)。

表 5 江苏中部淤泥质潮滩上部风暴沉积与正常潮滩沉积特征的对比

Table 5 Comparison between storm and average tidal sediments from mud tidal flat in middle Jiangsu province

	平均粒径	粒径众数	磨圆度(圆与次圆	分选性	构造
	范围/ μm	/ μm	颗粒所占百分比)		
风暴沉积	81~36	74	10%~48%	较差	递变层理 平行层理
潮滩沉积	43~31	49	5%~10%	较好	水平层理 互层层理

同正常潮滩沉积相比,风暴沉积具有下列明显特征:(1)颗粒偏粗,平均粒径可达 $70 \sim 80 \mu\text{m}$,砂的含量可达 30% 以上;而正常潮滩沉积平均粒径 $31 \sim 43 \mu\text{m}$,砂的含量一般小于 15%。(2)颗粒磨圆度较好,达到圆、次圆的颗粒含量达到 10%~48%,而正常潮滩沉积却只有 5%~10%。(3)分选性较差,颗粒分布的粒级范围较广,从细砂到粘土均有分布,这是因为风暴搬运与沉积作用非常快而来不及分选的结果。

(4) 递变现象明显, 从底部向顶部颗粒由粗变细。
 (5) 以平行层理、波状交错层理为特征, 而正常潮滩沉积却以水平层理、互层层理为特征。

4 结论

通过对潮汐层理及风暴沉积的实地观测及样品的室内分析, 可以得出以下结论:

(1) 江苏中部淤泥质潮滩上部沉积中存在的厚度通常在 0.3~1.5 毫米之间的薄水平互层层理是半日潮的产物。由于受滩面高程、层理保存状况及肉眼辨认难度等的影响, 实际的层理数往往小于潮汐涨落次数。

(2) 潮滩沉积中存在的厘米级厚的厚砂泥互层层理是半月天文潮所形成的。

(3) 在江苏中部淤泥质潮滩上部, 即使在风暴潮期间, 亦存在一个只有淤积没有侵蚀的地带。

(4) 与正常的潮滩沉积相比, 风暴沉积具有粒度较粗, 分选较差, 磨圆稍好, 递变现象明显, 平行层理或波状交错层理发育比较典型的特征, 从而为风暴沉积提供了很好的判别标志。

致谢 在本项工作中, 南京师范大学地理科学学院的徐孝彬、朱晓华、陈仕涛参加了野外考察与采样, 特此谢忱。

参考文献 (References)

- 范代读, 李从先, 邓兵, 等. 潮汐周期在潮坪沉积中的记录. 同济大学学报, 2002, 30(3): 281~285 [Fan Daidu, Li Congxian, Deng Bing, et al. Tidal cycles recorded in tidal-flat deposits. Journal of Tongji University, 2002, 30(3): 281~285]
- 范代读, 李从先. 现代潮汐层偶与古环境解释. 自然科学进展, 2000, 10(12): 1109~1114 [Fan Daidu, Li Congxian. Modern tidal couplets and interpretation on paleo-environment. Progress in Natural Science, 2000, 10(12): 1109~1114]
- 范代读, 李从先. 长江三角洲泥质潮坪沉积的韵律性及保存率. 海洋通报, 2000, 19(6): 34~41 [Fan Daidu, Li Congxian. Lamination and preservation rate of mudflat deposition on the Changjiang delta. Marine Science Bulletin, 2000, 19(6): 34~41]
- 范代读, 李从先, 陈美发, 等. 长江三角洲泥质潮坪沉积间断的定量分析. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(4): 1~6 [Fan Daidu, Li Congxian, Chen Meifa, et al. Quantitative analyses on diastems of the mudflat deposits in the Yangtze river delta. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(4): 1~6]
- 李从先, 王平, 范代读, 等. 潮汐沉积率与沉积间断. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 11~18 [Li Congxian, Wang Ping, Fan Daidu, et al. Sedimentation rate and sedimentary break in tidal deposits. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(2): 11~18]
- 李铁松, 李从先. 潮坪沉积韵律与沉积间断. 同济大学学报, 1995, 23(1): 53~58 [Li Tiesong, Li Congxian. Tidal flat depositional rhythm and diastem. Journal of Tongji University, 1995, 23(1): 53~58]
- Hori K, Saito Y, Zhao Q H, et al. Sedimentary facies of the tide-dominated pale-Changjiang (Yangtze) estuary during the last transgression. Marine Geology, 2001, 177: 331~351
- 李铁松, 李从先. 潮坪沉积与事件. 科学通报, 1993, 38(19): 1778~1781 [Li Tiesong, Li Congxian. Tidal deposits and events. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(19): 1778~1781]
- Reineck H E. Layered sediments of tidal flats, beaches and shelf bottoms of the North Sea. In: Lauff H, ed. Estuaries, 1967, 190~206
- 李炎, 张立人, 谢钦春. 浙江象山大目涂淤泥质潮滩发育的周期性. 海洋学报, 1987, 9(6): 725~734 [Li Yan, Zhang Liren, Xie Qinchun. Development cyclicality of tidal mud flat in Damutu area of Xiangshan in Zhejiang province. Acta Oceanologica Sinica, 1987, 9(6): 725~734]
- Nio S D, and Yang C S. Diagnostic attributes of clastic tidal deposits: a review. In: Smith D G, Reinson G E, Zaitlin B A, and Rahmani R A, eds. Clastic Tidal Sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 16, 1991, 3~28
- Dalrymple R W, Makino Y, Zaitlin B A. Temporal and spatial patterns of rhythmic deposition on mud flats in the macrotidal Cobequid Bay-Salmon River estuary, Bay of Fundy, Canada. In: Smith D G, Reinson G E, Zaitlin B A, and Rahmani R A, eds. Clastic Tidal Sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 16, 1991, 137~160
- Ronald L Martino and Dewey D Sanderson. Fourier and autocorrelation analysis of estuarine tidal rhythmites: lower breithitt formation (Pennsylvanian), eastern Kentucky, USA. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63(1): 105~119
- Cowan E A, Cai J, Powell R D, et al. Modern tidal rhythmites deposited in a deep-water estuary. Geo-Marine Letters, 1998, 18(1): 40~48
- Stupples P. Tidal cycles preserved in late Holocene tidal rhythmites: the Wainway Channel, Romney Marsh, southeast England. Marine Geology, 2002, 182(3): 231~235
- 任美镔, 张忍顺, 杨巨海. 江苏王港地区淤泥质潮滩的沉积作用. 海洋通报, 1984, 3(1): 40~52 [Ren Meibin, Zhang Renshun, Yang Juhai. Sedimentation on tidal mud flat of Wanggang Area, Jiangsu Province, China. Marine Science Bulletin, 1984, 3(1): 40~52]
- 邵虚生, 严钦尚. 上海潮坪沉积. 地理学报, 1982, 37(3): 241~249 [Shao Xusheng, Yan Qinshang. Tidal flat sedimentation in Shanghai area. Acta Geographica Sinica, 1982, 37(3): 241~249]
- 张国栋, 王益友, 朱静昌, 等. 苏北琼港现代潮坪沉积. 沉积学报, 1984, 2(2): 39~51 [Zhang Guodong, Wang Yiyou, Zhu Jingchang, et al. Modern tidal flat sedimentation of Qianggang in the north of Jiangsu province. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(2): 39~51]
- 朱大奎, 柯贤坤, 高抒. 江苏海岸潮滩沉积的研究. 黄渤海海洋, 1986, 4(3): 19~26 [Zhu Dakui, Ke Xiankun, Gao Shu. Studies on

- tidal flat sedimentation of Jiangsu province. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas* 1986, 4(3): 19~26]
- 20 张忍顺. 江苏省淤泥质潮滩的潮流特征及悬移质沉积过程. *海洋与湖沼*, 1986, 17(3): 235~245 [Zhang Renshun. The characteristics of tidal currents and the sedimentation progress of suspended particles of tidal mud flat in Jiangsu province. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 1986, 17(3): 235~245]
- 21 Collins M B. *Est Coastal Marine Science* 1976, 4: 46~57
- 22 Hart B S. and Long B F. Storm deposits from the Quaternary Outardes delta, Quebec, Canada. *Sedimentary Geology*, 1990, 67: 1~5
- 23 赵希涛, 李波, 鲁刚毅, 等. 江苏阜宁西园全新世风暴沉积与海岸沙丘的发现及其意义. *中国科学(B 辑)*, 1992, 22(9): 994~1001 [Zhao Xitao, Li Bo, Lu Gangyi et al. The discovery and its significance of Holocene storm deposits and coastal dune in Xiyuan area, Funing county, Jiangsu province. *Science in China(Series B)*, 1992, 22(9): 994~1001]
- 24 A maud Hequette and Philip R Hill. Response of the seabed to storm-generated combined flows on a sandy Arctic shoreface. *Canadian Beaufort Sea. Journal of Sedimentary Research*, 1995, A65(3): 461~471
- 25 Zong Y Q. and Tooley M J. Evidence of mid-Holocene storm-surge deposits from Morecambe Bay, northwest England: A biostratigraphical approach. *Quaternary International* 1999, 55: 43~50
- 26 Donnelly J P, Bryant S S, Butler J et al. 700yr sedimentary record of intense hurricane landfalls in southern New England. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(6): 714~727
- 27 吕炳全, 韩昌甫, 郑世培. 北部湾涠洲岛晚更新世风暴沉积. *科学通报*, 1987, 32(5): 362~365 [Lü Bingquan, Han Changfu, Zheng Shipai. Storm deposit during the Late Pleistocene in Weizhou island, Northern Bay. *Chinese Science Bulletin*, 1987, 32(5): 362~365]
- 28 许世远, 邵虚生, 陈中原, 等. 长江三角洲风暴潮沉积系列研究. *中国科学(B 辑)*, 1989, 19(7): 767~773 [Xu Shiyuan, Shao Xusheng, Chen Zhongyuan et al. Studies of storm deposits series in the Yangtze delta. *Science in China(Series B)*, 1989, 19(7): 767~773]
- 29 Goodbred Jr S L, Hine A C. Coastal storm deposition: saltmarsh response to a severe extratropical storm, March 1993, west-central Florida. *Geology*, 1995, 23(8): 679~682
- 30 黄光庆, 严维枢. 有孔虫指示的珠江口全新世风暴潮沉积信息. *科学通报*, 1997, 42(2): 423~426 [Huang Guangqing, Yan Weishu. Holocene storm deposits information of the Pearl Estuary indicated by foraminifera. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(2): 423~426]
- 31 Nanayama F, Shigeno K, Satake K, et al. Sedimentary difference between the 1993 Hokkaido-nansei-oki tsunami and the 1959 Miyakojima typhoon at Taisei, southwest Hokkaido, northern Japan. *Sedimentary Geology*, 2000, 135: 255~264
- 32 许世远. 长江三角洲地区风暴沉积研究. 北京: 科学出版社, 1997. 125~145 [Xu Shiyuan. Studies of storm deposits in the Yangtze delta. Beijing: Science Press, 1997. 125~145]
- 33 王颖, 朱大奎, 曹桂云. 潮滩沉积环境与岩相对比研究. *沉积学报*, 2003, 21(4): 539~546 [Wang Ying, Zhu Daku, Cao Guiyun. Study on tidal flat environment and its sedimentary facies comparative. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 539~546]
- 34 陈卫跃. 潮滩泥沙输移及沉积动力环境——以杭州湾北岸、长江口南岸部分潮滩为例. *海洋学报*, 1991, 13(6): 813~821 [Chen Weiyue. Sediments transportation and depositional dynamic environment in tidal flat. A case study of north Hangzhou bay and part of south Yangtze estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(6): 813~821]

Mechanism of Silt-mud Couplet of Mud Tidal Flat and Discrimination Criteria of Storm Surge Sedimentation in the Middle Jiangsu Province

WANG Jian¹ BAI Chun-guang^{1,2} Xu Yong-hui^{1,3}

(1. College of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210097;

2. Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096;

3. Department of Urban and Resource Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Field observation on the formation and development process of silt-mud couplets is carried out on tidal flat of the middle Jiangsu province. Combined the observation result with the calculation of sedimentation quantity and the analysis of grain-size and roundness of sedimentary particles, the mechanism of silt-mud couplets is revealed in this area. One thin silt-mud couplet with the thickness of millimeters is formed during a flood-ebb tidal cycle, and one thick couplet with the thickness of centimeters is formed during a spring-neap tidal cycle.

In addition to the research on the formation of silt-mud couplets, the field observation on the tidal flat is carried out before and after the storm surge for typhoon No. 9711. The result shows that even during storm surge period, high tidal flat can still be in sedimentation over some places, no erosion occurred. Compared with the normal tidal flat sedimentation, the storm sedimentation has the characteristics of coarse particle, bad sorting, relatively high roundness, obviously graded bedding, typical parallel bedding, cross bedding.

Key words tidal couplet; mechanism; storm surge; discrimination criteria; middle Jiangsu province