

异质潮滩波浪衰减特性研究

——以长江口崇明东滩为例

蒋丰佩, 何青, 张国安, 王宪业

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 为研究不同底质潮滩对波浪衰减的影响, 在长江口崇明东滩南北两侧光滩, 对潮滩波浪和底质特点展开了现场观测。结果表明: 潮滩沉积物组成对波浪衰减有显著影响, 淤泥质潮滩对波浪的衰减作用要大于粉砂质潮滩。水平方向上, 淤泥质潮滩波能密度、平均波高和有效波高的衰减率分别为 0.27%/m、0.12%/m、0.12%/m, 粉砂质潮滩相应衰减率分别为 0.18%/m、0.09%/m、0.08%/m, 前者衰减率是后者的 1.4 倍; 垂直方向上, 淤泥质潮滩波能密度、平均波高和有效波高的衰减率分别为 1.95%/cm、0.84%/cm、0.83%/cm, 粉砂质潮滩相应衰减率分别为 0.65%/cm、0.30%/cm、0.30%/cm, 前者衰减率为后者的 2.9 倍。波浪高频部分的衰减率大于低频部分, 相对波高值(平均波高/水深)越大, 波浪衰减越强。

关键词: 波浪衰减; 淤泥质; 粉砂质; 潮间带; 长江口

中图分类号: P731.22 文献标识码: A 文章编号: 0468-455X(2013)01-0045-08

1 引言

波浪是近岸海洋环境中最重要的动力因素之一, 引起海岸泥沙运动、海岸变迁和近岸水体交换, 威胁近岸建筑物的安全和稳定。开展相关研究对沿岸工程、浅海作业、近岸环保等方面都具有重要意义。潮滩位于海陆相互作用的动力敏感地带, 是海岸带资源的重要组成部分, 与人类关系极为密切。要深入地认识潮滩的冲淤过程, 必须考虑到波、流的共同作用^[1,2]。目前, 有关潮滩波浪作用的研究成果主要侧重于近岸海浪理论和计算模型的建立和完善。于洋等^[3]借助理论模型, 分析计算了波浪在粉砂质、沙纹和淤泥质海床上传播时波高的衰减; 白玉川等^[4]在波浪衰减理论模型的基础上, 利用水槽试验对海河口淤泥的消波特性进行了探讨, 建立了便于工程应用的波浪衰减规律公式; 王以谋等^[5]通过野外观测, 分析了黄河口“烂泥”区的消波效应, 指出波浪经烂泥湾后波高锐减; 黎满球等^[6]通过对珊瑚礁坪上波浪的衰减特性分析, 阐述了非泥沙质底床造成的消浪效应; I. Möller 等^[7-10]着重描述了潮滩上植被的消浪作用, 并进一步探讨除植被以外的其它消浪因素。可见, 针对波浪衰减特性的研究成果多数依据理论和计算模型, 室内研究成果不多, 基于野外观测的研究成果就更为少见^[11,12]。以往的潮滩波浪现场研究工作一般聚焦在单一特征底床的消波特性或者盐沼植被与光滩消波作用的对比。自然环境下, 泥质潮滩和砂质潮滩对波浪消减作用的差异性研究鲜有讨论。崇明东滩地处长江口, 是我国规模最大、发育最完善的河口型潮滩。在河口动力环境影响下, 相距不足 10km 的崇明东滩南北两侧潮滩的沉积特点差异显著。本文在两异质潮滩区对波浪开展高精度观测, 结合测区的底质构成, 定量分析异质潮滩波浪衰减的不同特点, 以丰富潮滩动力沉积理论, 为潮滩保护等工程实践提供科学依据。

收稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41076051); 国家自然科学基金创新研究群体项目(41021064); 上海市科委重大项目(11dz1204900); 上海市科委重点项目(09231203300)

作者简介: 蒋丰佩(1982-)男, 上海人, 硕士, 主要从事河口海岸水动力泥沙研究。E-mail: jiangfengpei@sina.com

通讯作者: 何青。E-mail: qinghe@sklec.ecnu.edu.cn

2 研究区概况

崇明岛是世界上最大的河口冲积岛。崇明东滩位于崇明岛的东端,滩面宽阔,-5m以上平均坡度为0.24‰^[13]。潮汐类型为非正规半日浅海潮,口门区中浚站多年平均潮差2.67m,最大潮差4.62m,属于中等潮差;东滩两侧和中部的潮流流向具有一定差异,中部以旋转流为主,两侧以往复流为主;年平均风速3.7~4.0m/s,最大风速达26m/s^[14]。崇明岛以东水域以风浪为主。以引水船站为例,口门附近多年平均以N浪向最多,频率为10%,NNE、NE和SE浪居次,频率均为9%^[15]。

本文研究区域选取崇明东滩潮间带南、北两侧无植被覆盖的光滩(图1)。北测站近长江北支入海口,表层沉积物中值粒径为10~13μm;南测站临长江南支北港深槽,表层沉积物中值粒径为40~45μm^[16]。

3 资料和方法

2010年11月中、大潮期间,利用SBE26-plus型浪潮仪(美国SEA-BIRD公司生产)对潮滩波浪进行观测。各区域均设两观测站位,分别布置在垂直于水边线的断面上,各测点间地势平缓,无异常地貌。北部测站距离100m,平均水深1.0m;南部测站距离260m,平均水深1.5m。利用浪潮仪压力探头测算北、南断面两站点的高程差,分别为14cm和73cm。参考往年RTK高程数据,得到观测区域潮滩坡度约为1.4‰(北)和2.8‰(南),均属极平缓岸坡。观测期间风速小于3m/s,离岸风为主,属平静天气。测站经纬度利用GPS测定(表1)。

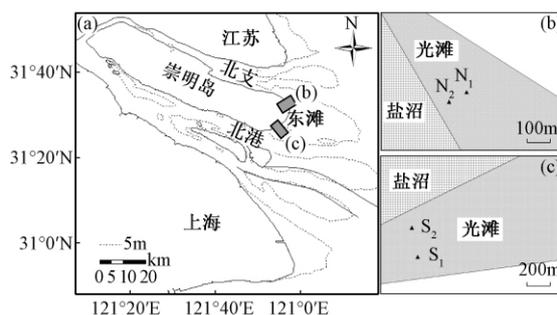


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Sketch of study area

表1 观测站位基本情况一览

Table 1 Characteristics of observation stations

| 站位 | 经度/E | 纬度/N | 最大水深/m | 距离差/m | 高程差/m | 坡度/‰ |
|----|--------------|-------------|--------|-------|-------|------|
| N1 | 121°57'42.5" | 31°32'52.8" | 1.47 | | | |
| N2 | 121°57'40.0" | 31°32'50.5" | 1.33 | 100 | 14 | 1.4 |
| S1 | 121°57'1.9" | 31°27'21.3" | 2.52 | | | |
| S2 | 121°57'0.2" | 31°27'29.5" | 1.79 | 260 | 73 | 2.8 |

浪潮仪观测精度为0.4mm,采样间隔设定为10min,采样频率为4Hz,有效采样时间为256秒。测量时,整套设备平放到滩面上并加以固定,保持压力探头到滩面距离为10cm。本次研究过程,共取得波浪数6400余个。数据后处理采用仪器公司配套的专用软件(Seasoft for waves),得到包含水深、波高等一系列波浪特征参数值。

采集测站附近表层沉积物样品,并在室内经除去表面有机质及超声波分散后,通过Coulter-LS100Q激光粒度仪取得样品的分散粒径。沉积物的分选系数、偏度和峭度按照Folk&Ward方法得到,并采用Shepard方法进行沉积物命名。波高和波能变化率按下式计算

$$\text{变化率} = (X_2 - X_1) / X_1 \times 100\% \quad (1)$$

X指波浪要素,数字代表站位号,1号为近海站位,2号为靠岸站位。结合站点间距,将最终结果表示为单位距离的变化率。由于滩面高程增加也会导致波浪的变化,因此本文将就水平方向上的单位距离变化率和垂直方向上的单位高程(1cm)变化率进行对比研究。

4 结果

4.1 研究区底质粒径参数

长江河口潮滩表层沉积物粒度分布是河口动力条件和地貌相互作用的产物。径流和潮流相互消

长,导致河口潮滩沉积物分布的差异^[17]。北测区近长江北支,水动力以潮流为主;南测区紧邻北港,以径、潮流相互作用为主。水动力变异直接导致崇明东滩南、北两测区表层沉积物的特性截然不同。如图2所示,北测区表层沉积物结构比较松散,密实度差,受压后极容易变形。采样时发现,该区域沉积物具有较强粘性,含水量较大;南测区沉积物密实度好,粘性差,承重能力强,受外力后不易变形,滩地表面有较规则的波纹分布。

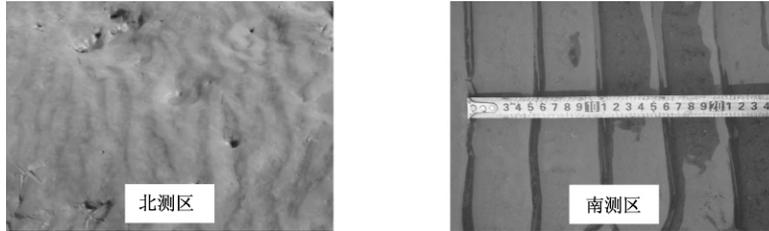


图2 研究区表层沉积物特征
Fig. 2 Characteristics of surface sediments

两测区的沉积物粒度向岸均逐渐变小,但粒度大小和分布特征差异显著(图3)。南测区粗颗粒含量要明显高于北测区,前者粒径主要集中在31.3~105.1 μm 之间,后者主要集中在4.6~22.1 μm 之间。北部表层沉积物以粘土和粉砂为主,砂含量为零;南部则以粉砂和砂为主,粘土含量极少(表2,图4)。

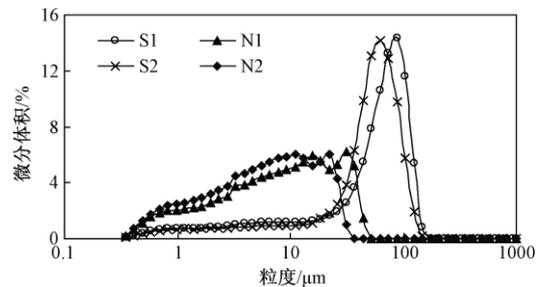


图3 研究区表层沉积物粒径级配曲线
Fig. 3 Distribution of surface sediment grains

表2 测站表层沉积物粒度参数
Table 2 Statistics of surface sediments

| | 中值粒径/ μm | 峰值粒径/ μm | 分选系数 | 偏度 | 峭度 | 粘土/% | 粉砂/% | 砂/% | 沉积物类型 |
|----|---------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| N1 | 9.38 | 31.25 | 1.81 | 0.22 | 0.87 | 27.9 | 72.1 | 0 | 粘土质粉砂 |
| N2 | 6.78 | 22.1 | 1.67 | 0.2 | 0.87 | 34.1 | 65.9 | 0 | |
| S1 | 69.41 | 88.39 | 1.75 | 0.66 | 1.62 | 8.9 | 34.9 | 56.2 | 粉砂质砂 |
| S2 | 58.61 | 62.5 | 1.47 | 0.57 | 2.09 | 7.9 | 47.3 | 44.8 | 砂质粉砂 |

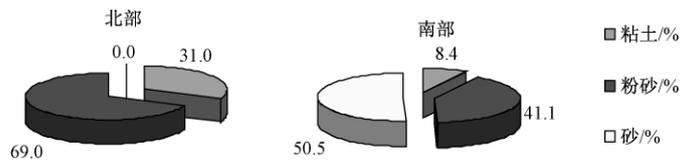


图4 潮滩表层沉积物三组分含量
Fig. 4 Components of surface sediments

根据2008年版的《海港水文规范》(JTJ213-98)所述, d_{50} 小于0.03mm的北测区可定性为淤泥质潮滩,而 d_{50} 介于0.03~0.1mm南测区可定性为粉砂质潮滩^[18]。同时,由于潮周期内动力条件多变,两测区沉积物分选都比较差;偏度数据显示两测区粒径分布曲线的不对称性均比较明显,北部为正偏,南部为极正偏;峭度上,北部较宽平,南部为很窄尖,说明铁板沙区域粒度分布更为集中。

4.2 波高和波能的变化特征

4.2.1 波浪变化差异对比

如表3所示,波浪向岸传播时,由于水深变浅,滩面底质对波浪的摩阻作用加强,波浪能量逐渐衰减。波能密度、平均波高和有效波高在北侧淤泥质潮滩随距离的变化率均为负值,即衰减率分别为

0.27% / m、0.12% / m、0.12% / m; 在南侧粉砂质潮滩的相应衰减率分别为 0.18% / m、0.09% / m、0.08% / m。随着传播距离的变化, 北部淤泥质潮滩的消波能力要强于南部粉砂质潮滩, 前者效果约为后者的 1.4 倍左右(图 5)。

表 3 波浪变化特征统计表
Table 3 Statistics of wave variation

| | N1 | | N2 | | (N2 - N1) / N1 | 波能密度/(J/m ²) | | (S2 - S1) / S1 | 水平变化率 | 垂向变化率 |
|---------|-------|-------|---------|--------|----------------|--------------------------|-------|----------------|--------|--------|
| | S1 | S2 | S1 | S2 | | | | | | |
| Mean | 10.60 | 7.71 | -27.26% | -0.27% | -1.95% | 35.92 | 18.77 | -47.74% | -0.18% | -0.65% |
| Max. | 26.10 | 14.79 | -43.33% | -0.43% | -3.10% | 206.00 | 49.80 | 75.83% | -0.29% | -1.04% |
| 平均波高/cm | | | | | | | | | | |
| Mean | 6.8 | 6.0 | 11.76% | 0.12% | 0.84% | 12.6 | 9.8 | 22.22% | 0.09% | 0.30% |
| Max. | 11.4 | 9.2 | -19.30 | -0.19% | -1.38% | 31.9 | 16.7 | -47.65% | -0.18% | -0.65% |
| 有效波高/cm | | | | | | | | | | |
| Mean | 10.3 | 9.1 | -11.65% | -0.12% | -0.83% | 19.2 | 15.0 | -21.88% | -0.08% | -0.30% |
| Max. | 17.4 | 12.9 | -25.86% | -0.26% | -1.85% | 51.9 | 25.5 | -50.87% | -0.20% | -0.70% |

注: 水平变化率单位(/ m); 垂向变化率单位(/ cm)。

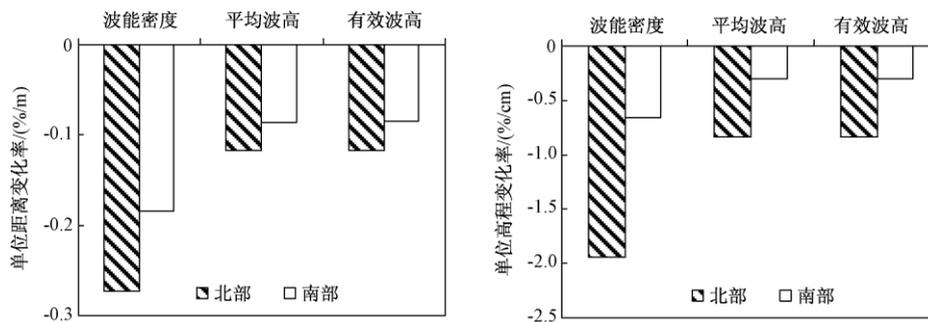


图 5 南北波浪衰减强度比较

Fig. 5 Comparison of wave attenuation rates

如考虑高程变化与波浪衰减率的关系, 结果表明北测区波能密度、平均波高、有效波高随高程的衰减率分别为 1.95% / cm、0.84% / cm、0.83% / cm; 南测区三参数随高程的衰减率分别为 0.65% / cm、0.30% / cm、0.30% / cm。随着高程的变化, 北部淤泥质潮滩的消波能力也要强于南部粉砂质潮滩, 前者效果约为后者的 2.9 倍左右(图 5)。

综上所述, 无论是随传播距离增大, 还是随高程逐渐升高, 淤泥质潮滩对波高、波能值的衰减能力都要强于粉砂质潮滩。

4.2.2 潮滩综合摩阻效果对比

研究认为, 若波浪在浅水中的传播距离较长或水底坡度很缓, 且水底又比较粗糙时, 除波浪浅水变形和折射影响外, 还应考虑到水底摩擦对波高的影响。计算公式为

$$H = H_0 K_s K_r K_f \quad (2)$$

其中 H_0 为初始位置波高, H 为某段距离末端的波高。 K_s 为浅水系数, K_r 为折射系数, K_f 为摩擦减损系数。由于不断产生折射, 波向线传播至近岸浅水区域时, 已与岸线近似垂直, 因此可认为波浪在浅滩传播过程中垂直等深线入射, 即 $K_r = 1$ 。如果不考虑海底摩擦和渗透等波能损耗, 那么波浪在传播过程中波能流守恒, 得

$$EnCb = E_0 n_0 C_0 b_0 \quad (3)$$

其中 E_0 和 E 分别为深、浅水中单位面积水柱的波动能量; C 和 C_0 分别为深、浅水中的波速。 b_0 和 b 分别为深、浅水中两波向线间隔。无折射影响, 波向线平行时 $b = b_0$; n_0 和 n 为深、浅水中波能传递率。根据线性波理论

$$n_0 = \frac{1}{2}, \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi d}{\text{sh} \frac{4\pi d}{L}} \right) \quad (4)$$

其中 L 为浅水波高, $L = \frac{gT^2}{2\pi} \text{th} \frac{2\pi d}{L}$, 可利用迭代法进行求解。上式表明, 浅水中波能传递率的变化范围在 0.5 ~ 1 之间, 水深很浅时, $\text{sh}x \approx x$ 。按线性波理论, 单位面积的水柱波能量正比于波高的平方, 即 $E = \frac{1}{8} \gamma H^2$, γ 为水容重。联立上述公式(2)、(3)、(4), 可得

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{n_0 C_0}{nC}} = \sqrt{\frac{n_0 L_0 / T_0}{nL/T}} \quad (5)$$

考虑到波浪传播至近岸浅水区域时的连续性, 可认为 $T_0 = T$ 。那么 $\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{n_0 L_0}{nL}} = K_s$ (浅水系数), 则浅水波高 H 可解。结合本文测点, 可分别推导近海和近岸点的波高, 两者比值为

$$\frac{H_1}{H_2} = \sqrt{\frac{n_2 L_2}{n_1 L_1}} = \frac{K_{s1}}{K_{s2}} \quad (6)$$

如以近海点波高 H_1 作为原始波高, 求解不考虑折射, 忽略底摩阻效果时的波浪传递至近岸点波高 H_2 的理论值。

根据计算结果(表4), 可见实测近岸波高 H_2 均小于理论值 H_2' , 主要原因是本文在计算理论值过程中, 并未考虑到滩面的摩阻系数。因此, 实测值与理论值差异就可以表明滩面的对波浪的衰减效果。表4中两测区百米衰减率就可说明, 就综合摩阻效果而言, 北侧泥滩是南侧沙滩的1.4倍, 与上文所得的南、北侧波浪随距离衰减情况相同, 进一步证明了不同滩面消波作用的差异性。

表4 潮滩消波效果对比

Table 4 Comparison of wave damping effects

| | L_1 | n_1 | L_2 | n_2 | H_1 (实测) | H_2 (实测) | H_2' (理论) | $(H_2' - H_2) / H_2'$ | 百米衰减率 |
|-----|-------|-------|-------|-------|------------|------------|-------------|-----------------------|-------|
| 北测区 | 5.99 | 0.76 | 5.59 | 0.79 | 0.069 | 0.064 | 0.077 | 17% | 17% |
| 南测区 | 3.07 | 0.52 | 2.84 | 0.60 | 0.145 | 0.098 | 0.148 | 32% | 12% |

注: L, H 单位为 m; n 为无量纲数。

4.2.3 波周期的变化

观测期间, 崇明东滩北部波浪平均周期 2.3s, 有效周期 3.1s; 南部波浪平均周期 2.0s, 有效周期 2.4s(表5)。有效周期一般大于平均周期。

如图6, 北部淤泥质潮滩的 N1 点, 平均波周期值 2s 左右处有明显的频率峰值。虽然波浪在 2 ~ 3.5s 范围内也有所分布, 但其频率值要明显要小于

2s 主峰。在 N2 点可清晰发现 2 ~ 3.5s 范围内的波浪分布频率有显著提升。南部粉砂质潮滩上的 S1 点, 波周期主要分布在 1 ~ 2s 范围内, 平均周期大于 2s 的波浪频率值较小。在 S2 点, 周期在 2s 内的波浪分布频率明显减小, 周期 3s 左右的波浪所占比例却显著提升, 波周期频率峰值由 1.5s 向 2s 偏移。

结合表5, 本文认为波浪在向岸传播过程中, 波周期分布范围有束窄趋势, 总体上向长周期方向发展。波能向岸损耗不均, 高频波即小周期波的损耗一般要大于低频波的损耗。

表5 波浪周期统计

Table 5 Statistics of wave periods

| 站位 | 平均周期/s | | | 有效周期/s | | |
|----|--------|------|------|--------|------|------|
| | Mean | Max. | Min. | Mean | Max. | Min. |
| N1 | 2.26 | 4.67 | 1.34 | 2.95 | 6.52 | 1.44 |
| N2 | 2.43 | 3.75 | 1.82 | 3.20 | 4.93 | 2.04 |
| S1 | 1.71 | 4.24 | 1.09 | 1.98 | 5.45 | 1.14 |
| S2 | 2.22 | 4.06 | 1.26 | 2.73 | 5.16 | 1.21 |

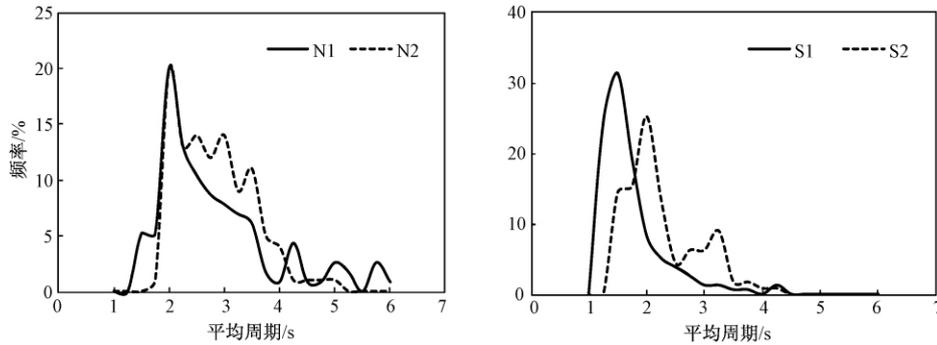


图6 潮滩波周期的变化特点
Fig.6 Variability of wave periods

5 讨论

5.1 波浪衰减与相对波高的关系

在研究波浪衰减时,文献均尝试着探讨波浪衰减的影响因素^[7-9]。小振幅波理论指出,波浪对滩面的底剪切力^[19]与波高和水深均有联系。因此,潮滩底床对波浪的反作用效果也应当与这两个物理量有关。考虑到两测区的波高和水深值均有所差异,并且在潮周期内持续变化,水深和波高又是影响波浪衰减的重要物理量,故本文尝试通过线性回归分析法,考察潮周期内相对波高(平均波高/水深)与波浪变化率的关系。以各测区1号点的相对波高为横坐标,图7表明,波浪向岸传播时,两测区的波浪变化率与相对波高呈良好的线性关系,相对波高越大,波浪衰减越剧烈。且同等波高、水深条件下,北部淤泥质潮滩对波浪的衰减作用更强。

5.2 潮滩消波机制探讨

研究认为在波浪进入浅水区后,能量损失主要包括3个方面:(1)摩阻损失,即底床对于波浪水体的摩擦阻力引起的能量损失;(2)渗透损失,即当底床表面的泥沙颗粒太粗,渗透性较大时,在床面引起渗透水流而造成的能量损失;(3)泥面波阻力损失,当底床出现流动的淤泥质软泥时,波峰和波谷下的压力差可能诱发泥面波而消耗能量^[4]。

从摩阻损失角度看,崇明东滩南部潮滩底质以粉砂质砂为主,且潮滩表面明显可见大量的沙纹分布(图2)。秦崇仁^[20]在研究浅水区砂质床面波浪特征时就发现,沙纹床面上传播的波浪比在平床上传播的波浪的衰减要快很多。于洋等^[3]也发现沙纹底的摩擦系数比平滑粉砂底的摩擦系数大一个数量级。相比之下,崇明东滩北部潮滩表面相对平滑,虽也有少许波纹分布,但其尺度极小,粗糙程度远不如南部潮滩。因此,本文认为单单就摩阻角度而言,南部粉砂质潮滩表面由于大量沙纹的存在,且相对波高值较大,对波浪能量的衰减效果应比北部淤泥质潮滩更为显著。

从潮滩的渗透性角度出发,就必须考虑泥沙粒径级配和淹没程度。研究表明,颗粒愈细,分选愈差时沉积物的渗透系数就愈小;颗粒愈粗,分选愈好时沉积物的渗透系数就愈大^[21]。王万杰等^[22]通过现场竖管法研究发现,中值粒径 $65\mu\text{m}$ 的河床沉积物,其渗透系数的量级在 10^{-4}cm/s 左右。实测数据显示,南侧粉砂质潮滩中值粒径在 $58\sim 69\mu\text{m}$ 之间,北侧淤泥质潮滩中值粒径不大于 $10\mu\text{m}$,且分选性均很差。同时,滩面在测波时段内一直处于被潮水淹没的状态,表层沉积物含水饱和。因此,波浪在潮滩上传播时,渗透损失几乎可以忽略。

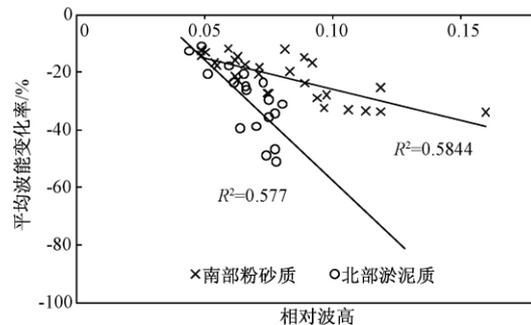


图7 波浪变化率与相对波高的关系
Fig.7 Correlation of wave variation rate and relative wave height

一般情况下,粉砂质潮滩的摩阻系数较大,其波浪衰减应强于淤泥质潮滩,本次实测情况却与之相反。已有研究表明粘性浮泥层能引发波浪的大量损耗。南美洲 Surinam 海岸、印度 Kerala 海岸和美国 Louisiana 海岸均观测到此类情形^[23]。即波浪在泥质潮滩上传播时,一部分能量用于克服底部摩擦,一部分能量会用于克服沙粒粘性。而后者在波浪的快速衰减中起到了重要的作用。本次观测也利用多种手段,试图探明消波差异是否与浮泥有关。结果发现:①淤泥质潮滩表层泥沙粒径极细,含有大量的粘土成分,粘性力作用强,泥沙特性与长江河口浮泥组成极为相似。粉砂质潮滩所邻近的长江口北港属于分水多、分沙少的河道,不利于浮泥发育,且至今未观测到河床有明显的浮泥层。淤泥质潮滩邻近的北支水流含沙量较高,近岸支汊常发现浮泥层,并且持续时间很长^[24]。涨落潮时,滩槽水沙交换频繁,靠近北支的淤泥质潮滩出现浮泥的可能性要远大于南部粉砂质潮滩。②利用十字形手持抗剪强度仪 GEONOR H-60(挪威岩土工程研究所生产)在落潮后立即对潮滩沉积物的最大抗剪强度进行测量,发现距滩面 5cm 深处沉积物的最大抗剪强度平均值分别为 2.7kpa(淤泥质)和 7.3kpa(粉砂质),说明淤泥质潮滩沉积物在水动力作用下更容易在近底床处形成高浓度泥层。南部粉砂质潮滩表层沉积物粒径较大,难悬浮、易沉降,多以推移质形式运动,很难出现类似情况。③利用 HR-Profilor(挪威 Nortek 公司生产)声学流速剖面仪对潮滩流速垂向分布进行观测时发现,淤泥质潮滩近滩面 15cm 以内的流速分布完全偏离对数结构,而在粉砂质潮滩上却结构良好,从侧面反映出淤泥质潮滩近底浮泥层的存在范围。以上三点均表明,北部淤泥质潮滩存在浮泥的可能性极大,必须考虑其对波浪衰减的影响。

6 结语

利用现场高精度波浪数据,对异质潮滩上波浪衰减特性进行了对比研究后发现:

崇明东滩南、北潮滩表层沉积物组分差异显著。北部潮滩以粘土质粉砂为主,为淤泥质潮滩;南部潮滩以粉砂质砂为主,为粉砂质潮滩。

崇明东滩北部淤泥质潮滩对波浪的衰减能力要强于南部粉砂质潮滩。淤泥质潮滩平均波能、平均波高和有效波高在水平方向上的衰减率分别为 0.27%/m、0.12%/m、0.12%/m、粉砂质潮滩相应值分别为 0.18%/m、0.09%/m、0.08%/m,前者衰减率为后者的 1.4 倍。垂直方向上,淤泥质潮滩上三参数分别为 1.95%/cm、0.84%/cm、0.83%/cm;粉砂质潮滩相应值分别为 0.65%/cm、0.30%/cm、0.30%/cm,前者为后者的 2.9 倍。波浪在向岸传播过程中,高频部分的衰减速率均要大于低频部分,波周期频率分布峰值向长周期方向偏移。

观测区域相对波高(平均波高/水深)在 0.04~0.16 之间。潮滩波浪平均波能的衰减率随相对波高的增大而增加。当波高水深比相同时,淤泥质潮滩上波浪衰减率要明显大于粉砂质潮滩。淤泥质潮滩表层浮泥对波浪衰减的影响应当引起足够的重视。

致谢:对王亚博士在数据处理时给予的指导,修稿时编审提出的宝贵意见,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 吉晓强,何青,刘红,等. 崇明东滩水文泥沙过程分析 [J]. 泥沙研究,2010(1): 46-57.
- [2] 刘红,何青,吉晓强,等. 波流共同作用下潮滩剖面沉积物和地貌分异规律——以长江口崇明东滩为例 [J]. 沉积学报,2008(5): 833-843.
- [3] 于洋,李玉成. 极平缓岸坡上的底部波能损耗 [J]. 水动力学研究与进展(A辑),2002(5): 553-564.
- [4] 白玉川,胡世雄,金玉石. 泥质床面上波浪衰减规律的研究 [J]. 水利学报,2001(11): 56-61.
- [5] 王以谋,范顺庭,王兴德. 黄河口“烂泥”波浪特性的分析 [J]. 海洋科学,1995(6): 42-46.
- [6] 黎满球,朱良生,隋世峰. 珊瑚礁坪波浪的衰减特性分析 [J]. 海洋工程,2003(2): 71-75.
- [7] Möller I., T. Spencer, J. R. French, D. J. Leggett, M. Dixon. Wave transformation over salt marshes: A field and numerical modelling study from North Norfolk, England [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 1999, 49(3): 411-426.
- [8] Möller I., J. Mantilla-Contreras, T. Spencer, A. Hayes. Micro-tidal coastal reed beds: Hydro-morphological insights and observations on wave transformation from the southern Baltic Sea [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2011, 92(3): 424-436.

- [9] Quartel S. , A. Kroon , P. G. E. F. Augustinus , P. Van Santen , N. H. Tri. Wave attenuation in coastal mangroves in the Red River Delta ,Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* ,2007(29) : 576 – 584.
- [10] 史本伟,杨世伦,罗向欣,等. 淤泥质光滩 – 盐沼过渡带波浪衰减的观测研究——以长江口崇明东滩为例 [J]. *海洋学报*,2010(2) : 174 – 178.
- [11] 周显初,呼和敖德,李家春,等. 淤泥质海床上波浪衰减研究 [J]. *力学与实践*,1992 (4) : 1 – 9.
- [12] 吉晓强. 崇明东滩水沙输移及植被影响分析 [D]. 上海: 华东师范大学,2008: 36 – 43.
- [13] 杨世伦,姚炎明,贺松林. 长江口冲积岛岸滩剖面形态和冲淤规律 [J]. *海洋与湖沼*,1999 (6) : 85 – 88.
- [14] 上海市海岛资源综合调查报告编写组. 上海市海岛资源综合调查报告[R]. 上海: 上海科学技术出版社,1996: 12 – 16.
- [15] 朱慧芳,恽才兴,茅志昌,等. 长江河口的风浪特性和风浪经验关系 [J]. *华东师范大学学报(自然科学版)* ,1984 (1) : 74 – 84.
- [16] 刘清玉,戴雪荣,何小勤. 崇明东滩表层沉积物的粒度空间分布特征 [J]. *上海地质*,2003 (4) : 5 – 8.
- [17] 刘红,何青,孟翊,等. 长江口表层沉积物分布特征及动力响应 [J]. *地理学报*,2007 (1) : 81 – 92.
- [18] 中华人民共和国交通部. 海港水文规范 [S]. 北京: 1998: 112.
- [19] Roberts W. , P. Le Hir , R. J. S. Whitehouse. Investigation using simple mathematical models of the effect of tidal currents and waves on the profile shape of intertidal mudflats [J]. *Continental Shelf Research* ,2000(20) : 1079 – 1097.
- [20] 秦崇仁. 沙纹床面摩阻引起的波高沿程衰减[J]. *海洋学报* ,1993(2) : 97 – 107.
- [21] 顾慰慈. 渗流计算原理及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社,2000: 6 – 9.
- [22] 王万杰,束龙仓,王志华. 河床沉积物渗透系数试验研究[J]. *中国农村水利水电*,2007 (2) : 136 – 138.
- [23] Johan C. Winterwerp , Gerben J. de Boer , Gert Greeuw , Dirk S. van Maren. Mud-induced wave damping and wave-induced liquefaction [J]. *Coastal Engineering* ,2012 (64) : 102 – 112.
- [24] 李九发,何青,徐海根. 长江河口浮泥形成机理及变化过程 [J]. *海洋与湖沼*,2001 ,32(3) : 302 – 310.

Wave attenuation on tidal flat with particular sediment-case study: Eastern Chongming Island , Yangtze Estuary

JIANG Feng-pei , HE Qing , ZHANG Guo-an , WANG Xian-ye

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research , East China Normal University , Shanghai 200062 , China)

Abstract: In order to investigate the wave attenuation on the tidal flat with particular sediment , the in situ experiments were conducted in Nov. 2010 on the northern and southern parts of Eastern Chongming Island , Yangtze Estuary , China. Based on the analysis of the surface sediment and wave parameters , the following results are concluded. (1) The wave attenuation on the muddy flat is greater than that on the silty flat. Along with the increase in distance and elevation , the wave attenuation ratio on the muddy flat is 1. 4 and 2. 9 times than that on the silty flat , respectively. (2) The relative wave height(average wave height/water depth) is 0. 04 ~ 0. 16 , having positive linear relationship with wave attenuation. The muddy flat is better at wave attenuation with the same relative wave height. (3) Attenuation of wave with high frequency dominates when the wave is propagating landwards.

Key words: wave attenuation; muddy flat; silty flat; intertidal zone; Yangtze Estuary