

# 淤泥质潮滩潮锋的形成机制及其作用\*

徐元 王宝灿

(华东师范大学河口海岸研究所 上海 200062)

**提要** 根据1979—1992年不同类型淤泥质潮滩涨潮前锋水沙观测资料,结合潮锋作用沿滩面上溯的强度变化进行分析。结果表明,涨潮前锋存在水流加速过程是潮锋作用的本质,其出现前提是滩面的宽展平缓,而潮位变化速率过程则决定了潮锋作用强度及其时空变化。潮锋带水体的高含沙量现象及其沿程变化在潮滩滩面发育中具有重要意义。

**关键词** 淤泥质潮滩 潮锋带水流加速效应 潮位变率 滩坡 发育模式

**学科分类号** P737.13

自Postma(1954, 1961, 1967)和van Straaten等(1957, 1958, 1961)建立潮滩潮间带流场及泥沙输移假说以来,Evans等(1975)、张忍顺(1986)和徐元(1993)<sup>1)</sup>的研究发展和完善了上述假说。Anderson等(1984)、Wang等(1988)从不同角度分别提出了“潮涌”和“潮锋”两种有关潮锋作用的概念,开拓了进一步认识潮流在潮滩滩面水沙输移中作用的研究思路。徐元等(1994)对潮锋作用的研究有所深入,但其解释停留在定性上。在以上工作的基础上,本文试图对潮锋作用的本质作进一步研究,并依据潮滩滩面潮流过程由潮锋水流过程和锋后潮流过程组成这一基本论点,对理想状态下潮滩发育模式作一探讨。

## 1 研究方法

于1979—1992年,在浙江温州(港湾平原型)、杭州湾北岸(河口湾型)、长江口南岸(河口边滩型)以及江苏连云港(开敞海岸型)等地的潮间带,多次于洪、枯季分别在中潮滩上部、中潮滩下部及低潮滩,放置印刷海流计(HLJ1-1型,天津海洋仪器厂出品)2—3台,用于记录时间间隔为5—15min不等的近滩面水流过程。与潮流过程相应,在潮滩不同部位连续采集近滩面水样(包括潮锋带水体),以取得近滩面含沙量过程数据,且在涨、落潮过程中沿程取得潮锋水体和退潮尾部水体的含沙量数据。为典型起见,本文仅分析无风浪或微风浪期间所测资料。

## 2 研究结果

### 2.1 水沙动力特征

淤泥质潮滩依其特征水位可划分成超潮滩带、潮间带和潮下带,而宽缓的潮间带(狭义的潮滩)又可分为高潮滩、中潮滩和低潮滩(图1)。淤泥质潮滩的组成是以粘性细颗粒

\* 国家自然科学基金资助项目, 49106060号。徐元,男,出生于1965年3月,博士,高级工程师, Fax: 0086-021-64335958,现工作单位为交通部第三航务工程勘察设计院

1) 徐元,1993. 上海淤泥质潮滩沉积及滩面冲淤过程. 华东师范大学河口海岸研究所博士学位论文. 81  
收稿日期:1995-10-15,收修改稿日期:1997-08-20

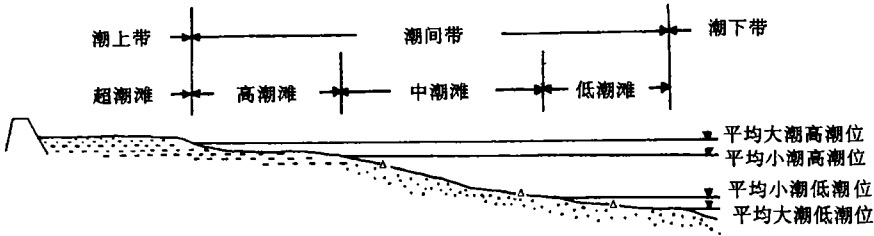


图1 淤泥质潮滩分带及自记式海流计位置示意图(Δ为印刷海流计概位)

Fig.1 Division of muddy tidal flat and stations for self-recording current meter measurements along the profile

沉积物(粘土和粉砂)为特征,一般自低潮滩向高潮滩平均粒径减少,含泥量增加。上述淤泥质潮滩沉积物特征的变化与潮间带的水动力变化相吻合。

潮滩各部位(即某一定点)近滩面的水流过程和含沙量过程均表现为双峰型(图 2)。水流过程的第一峰出现在涨潮前锋到达直至达到一定水深(潮锋带)时段内,水流速度比随后的水流平均流速高 1—3 倍。该过程一般可维持 30min 左右,与此同时水体的含沙量相应出现第一峰,大大高于随后的水体(锋后)含沙量。退潮尾部的席状水流出现水流过程的第二峰,其流速为水深较大时水流的 1—1.5 倍,相应地,水体出现较高的含沙量。上述涨潮前锋

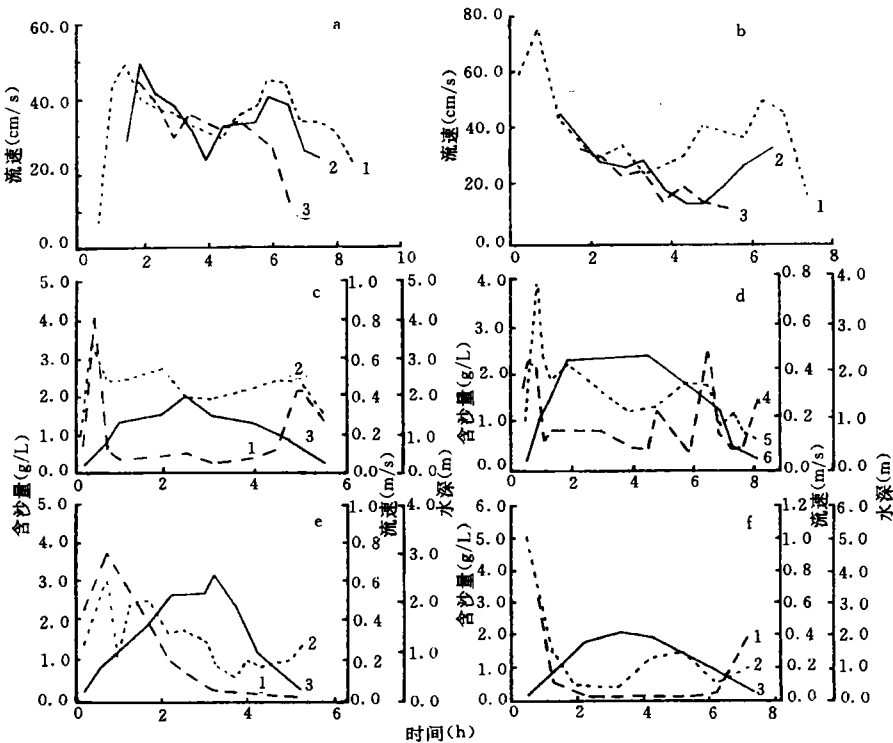


图 2 潮滩近滩面水流特征

Fig.2 Current characteristics over the surfaces of tidal flats

a. 东海农场(83.07.29,小潮); b. 东海农场(83.08.10,大潮); c. 张家厓(85.11.20,小潮); d. 张家厓(85.10.28,大潮); e. 温州(79.05.25,大潮); f. 连云港(86.06.25,小潮)。1, 2, 3 分别为吴淞零点上 1.05m, 1.89m, 2.40m; 4, 5, 6 分别为含沙量、流速、水深

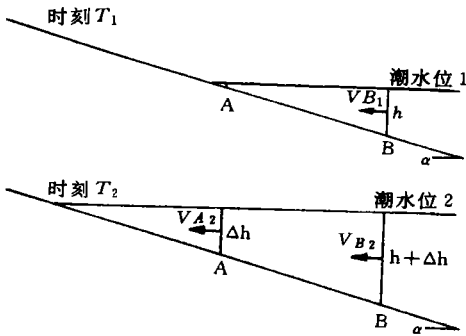


图3 潮锋带流速脉动形成机制示意图  
Fig.3 Diagram showing the mechanism of velocity acceleration in the flood surge zone

水沙动力特征存在于整个涨潮过程,亦存在于整个潮滩滩面(涨潮过程滩面水深较小时),即既是一个时间过程,又是一个空间过程。

### 2.2 潮锋作用形成机制的半定量表达

半日潮潮波周期长约为 12h,涨潮过程一般在 4—6h 左右。考虑滩面某一地点,经历潮锋流速脉动时间仅为 30min 左右,故滩面涨潮前缘水流可理想地看作单向水流。

滩面上两点 A 和 B 处,分别取断面 A 和 B(图 3)。考虑较短时段  $\Delta T$ ,时刻  $T_1$ ,断面 A 位于水边线,流速为零,断面 B 取在该时刻潮锋作用最强烈

处;时刻  $T_2$ ,断面 A 处为该时刻潮锋作用最强烈处。从时刻  $T_1$  至  $T_2$ ,潮位上升  $\Delta h$ ,A,B 两断面相应水深为  $\Delta h$  和  $h + \Delta h$ (时刻  $T_2$ ),则容易求得 A,B 断面净过水体积(单宽,下同)分别为

$$V_A = \frac{1}{2} \cdot \Delta h^2 \cdot \text{ctg} \alpha \tag{1}$$

及 
$$V_B = \frac{1}{2} \cdot (\Delta h^2 + 2 \cdot \Delta h \cdot h) \cdot \text{ctg} \alpha \tag{2}$$

其中  $\alpha$  为两断面间滩面平均坡角。又依质量守恒,有

$$V_A = \int_{T_1}^{T_2} h_A(t) \cdot U_A(t) dt \tag{3}$$

及 
$$V_B = \int_{T_1}^{T_2} h_B(t) \cdot U_B(t) dt \tag{4}$$

其中  $h_A(t)$ ,  $U_A(t)$  和  $h_B(t)$ ,  $U_B(t)$  分别为两断面的水深过程和垂线平均流速过程。由于水深浅且时间短,假设两断面水深过程和垂线平均流速过程分别为单调均匀变化过程,有

$$h_A(t) = \frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \cdot \Delta h \tag{5}$$

$$U_A(t) = \frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \cdot (U_{A2} - U_{A1}) + U_{A1} \tag{6}$$

及 
$$h_B(t) = h + \frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \cdot \Delta h \tag{7}$$

$$U_B(t) = U_{B1} \frac{t - T_1}{T_2 - T_1} \cdot (U_{B2} - U_{B1}) \tag{8}$$

其中  $U_{A1}$ ,  $U_{A2}$  和  $U_{B1}$ ,  $U_{B2}$  分别为两断面垂线平均流速  $U_A(t)$ ,  $U_B(t)$  在时刻  $T_1$ ,  $T_2$  的流速。时刻  $T_1$ ,断面 A 处于水边线

$$U_{A1} = 0 \tag{9}$$

式(5)—(9)代入式(3)和式(4),得

$$V_A = \frac{1}{3} \cdot \Delta h \cdot U_{A2} \cdot (T_2 - T_1) \tag{10}$$

$$V_B = \left( \frac{1}{2} \cdot h U_{B1} + \frac{1}{6} \cdot \Delta h \cdot U_{B1} + \frac{1}{2} \cdot h \cdot U_{B2} + \frac{1}{3} \cdot \Delta h \cdot U_{B2} \right) \cdot (T_2 - T_1) \quad (11)$$

式(10), (11)结合式(1), (2), 有

$$(4 \cdot h + 2 \cdot \Delta h) \cdot U_{A2} - (3 \cdot h + \Delta h) \cdot U_{B1} = (3 \cdot h + \Delta h) \cdot U_{B2} \quad (12)$$

假设断面 A 与断面 B 之间的距离为小值, 断面 A 潮锋作用最强烈时( $T_2$ )的水深、水流速度与断面 B 潮锋作用最强烈时( $T_1$ )的水深、水流速度相同, 时刻  $T_1$  至  $T_2$ , 水深变幅( $\Delta h$ )亦为小值, 即对两断面在两时刻下的水流状态作一级近似有

$$h_{A2} = h_{B1} \quad (13)$$

和

$$U_{A2} = U_{B1} \quad (14)$$

式(13)及(14)代入式(12), 得

$$U_{A2} = 2.5 U_{B2} \quad (15a)$$

或

$$U_{B1} = 2.5 U_{B2} \quad (15b)$$

由式(15a, b)知, 潮锋带水流垂线平均流速与其后水流相比, 流速增大, 本文称之为“潮锋带水流加速效应”。对某一定点, 潮锋带流速存在一先加速(潮锋)后减速(锋后)的过程。

值得注意的是, 流速的脉冲增大只存在于潮锋的较薄水层之中。水深达到一定程度后, 通过前后断面水量的变率相对于水量已很小, “加速效应”则不再明显, 而且水深较大后, 由于滩面摩阻, 底层水流流速相对比上层水流小, 水体开始某种形式的流速分层, 在一定范围内, 由于表层流速较底层流速大, 前方滩地滞阻水流造成水体表层壅水, 形成外形类似船涌的滩涌。

### 2.3 潮锋作用强度的影响因素

潮锋作用的强度及其时空变化与潮滩所在海区的潮汐性质和滩面特点有关。由式(1)和式(10), 得

$$U_{A2} = \frac{1.5 \cdot \Delta h}{T_2 - T_1} \cdot \text{ctg} \alpha \quad (16)$$

表 1 潮锋作用强度(水流速度)与潮位变率、滩坡的关系

Tab.1 Relationships between flood surge strength (current velocity) and change rate in tidal level and tidal flat slope

| 地点与潮滩部位             |       | 潮汛 | 潮位变率<br>(m/h) | 滩坡     | 潮锋带水流流速(cm/s) |       |       |
|---------------------|-------|----|---------------|--------|---------------|-------|-------|
|                     |       |    |               |        | 计算值           | 实测最大值 | 实测平均值 |
| 杭州湾北岸<br>张家厍        | 中潮滩   | 大潮 | 1.80          | 1/640  | 48.0          | 59.0  | 46.0  |
|                     |       | 小潮 | 1.24          | 1/640  | 33.0          | 47.5  | 39.0  |
| 长江口<br>南岸边滩<br>东海农场 | 中潮滩上部 | 大潮 | 0.81          | 1/850  | 28.8          | 32.0  | 30.0  |
|                     |       | 小潮 | 0.56          | 1/1000 | 23.3          | 44.2  | 37.7  |
|                     | 中潮滩下部 | 大潮 | 1.31          | 1/990  | 53.9          | 45.0  | 40.2  |
|                     |       | 小潮 | 0.78          | 1/1260 | 41.0          | 50.0  | 36.0  |
|                     | 低潮滩   | 大潮 | 1.51          | 1/1280 | 80.2          | 75.0  | 52.8  |
|                     |       | 小潮 | 1.16          | 1/935  | 45.0          | 48.7  | 42.5  |
| 江苏连云港               | 中潮滩   | 小潮 | 0.89          | 1/1250 | 46.0          | 50.0  | 33.0  |
| 浙江温州                | 中潮滩   | 大潮 | 1.30          | 1/900  | 50.0          | 61.0  | 45.0  |

其中,  $\Delta h / (T_2 - T_1)$  即为潮位变化速率(简称潮位变率);  $ctg\alpha$  为滩面坡度的倒数, 因而潮锋带水流速度的大小与所在滩面的局部坡度及此时的潮位变率有关。一方面, 水流速度与所在位置的局部滩面坡度成反比, 坡度越小, 流速变幅越大; 另一方面, 水流速度又与涨潮前锋到达所在位置时潮位变率成正比, 潮位变率越大, 流速变幅越大(表 1)。

由表 1 可见, 滩坡(一般在  $5 / 1000 - 3 / 1000$  之间)平缓是淤泥质潮滩涨潮前锋存在水流流速脉动而有别于砂质海滩(坡度陡, 多在  $1 / 10 - 1 / 100$  之间)的原因, 而海区潮波性质和潮差大小则决定了潮位过程的特点, 因而潮位变率对潮锋作用强度的影响表现出显著的区域特征。

### 2.4 潮锋带水体水沙特征与滩面塑造

潮锋带水体的含沙量大大高于其后水体。所含悬沙有两个来源: 一是水体尚在滩地相对外沿部位或潮间带外时已携泥沙; 二是潮滩沉积物就地再悬浮。容易推理, 较薄水层时出现的短时间流速脉动是潮锋带水体出现高紊动(Froude 数很大)以至高含沙量现象的原因(高紊动同样也是退潮尾部席状水流具较高含沙量的原因)。被扰起的泥沙并未完全随涨潮流向前运移, 大部分较粗成分在较高部位重新沉降到滩面, 只有一部分被带至更高的部位, 滩地随后被泥沙含量较低的锋后水体漫越。但潮锋作用对潮滩发育的影响并不只限于涨潮前锋本身, 潮锋带水体扰动沉积物, 影响甚至中断其固结过程, 滩面物质抗冲刷能力降低而易于被随后水流起动、运移。不同海区的潮位变率因潮汐性质不同而异(图 4), 潮滩底形又各具特点, 影响相应潮滩上潮锋作用强度的空间变化, 加之潮流过程与潮位过程之间的位相关系不同, 因而潮滩发育形式具明显的区域特点。

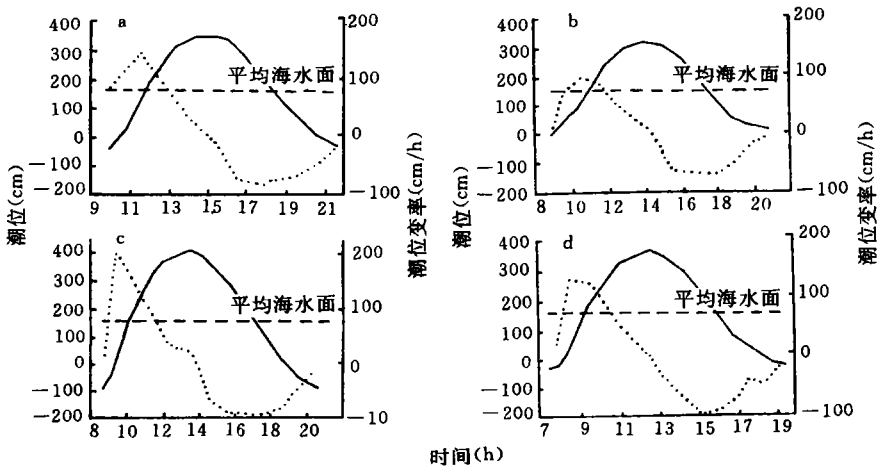


图 4 潮位过程与潮位变率过程

Fig.4 Changes in the tidal level and the rates

- a. 金山咀(1983.07.29, 小潮); b. 芦潮港(1983.07.29, 小潮); c. 金山咀(1983.08.10, 大潮);
- d. 芦潮港(1983.08.10, 大潮). 实线为潮位; 虚线为潮位变率

岸外潮波呈典型驻波性质的潮滩(如杭州湾北岸潮滩), 最大潮位变率、滩面最大涨落潮流速均出现在中潮位时刻前后, 最小潮位变率、憩流出现在高潮位和低潮位时刻前后(图 4a, c)。潮锋作用在低潮滩和高潮滩相对较弱, 中潮滩相对强烈(表 2, 图 2c—f)。随着

潮水上涨, 潮锋作用逐渐加强, 至中潮滩潮锋紊动最强烈, 薄层水体含沙量可在  $8\text{kg}/\text{m}^3$  以上, 而锋后涨潮流在中潮位附近流速亦达到最大; 中潮位以后, 潮锋紊动作用减弱, 锋后水流流速亦渐小, 水体泥沙逐渐落淤。落潮过程中, 尤其是潮水落至中潮位附近, 落潮流流速达到最大值, 落潮流尾部席状薄层水流将滩面细颗粒泥沙掀起, 使涨潮减速阶段及涨憩落淤的细颗粒泥沙不易保存。在泥沙来源丰富的条件下, 滩面冲淤情况表现为: 高潮滩、中潮滩的上部和下部及低潮滩均呈不同程度淤积, 而中潮滩中部则基本处于冲淤平衡, 潮滩整体向外淤涨。

表 2 张家厓潮滩潮锋带水流及含沙量<sup>1)</sup>

Tab.2 Current velocities and suspended sediment concentrations in the flood surge zone on Zhangjiashe tidal flat

| 水深<br>(cm) | 低潮滩          |           |              | 中潮滩          |           |              | 高潮滩下部        |           |              | 高潮滩上部        |           |              |
|------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|
|            | 流速<br>(cm/s) | 方向<br>(°) | 含沙量<br>(g/L) | 流速<br>(cm/s) | 方向<br>(°) | 含沙量<br>(g/L) | 流速<br>(cm/s) | 方向<br>(°) | 含沙量<br>(g/L) | 流速<br>(cm/s) | 方向<br>(°) | 含沙量<br>(g/L) |
| 8          | 5.8          | 265       | 2.18         | 16.7         | 320       | 2.38         | 6.0          | 320       | 1.48         | 5.0          | 330       | 0.26         |
| 30         | 10.0         | 295       | 2.63         | 18.5         | 295       | 2.81         | 16.0         | 330       | 1.33         | 6.0          | 330       | 0.35         |
| 70         | 16.7         | 275       | 0.34         | 18.5         | 280       | 1.19         | 11.7         | 330       | 1.39         |              |           |              |

1) 陈宏达, 1987. 杭州湾北岸(曹泾岸段)潮滩沉积过程. 华东师范大学河口海岸研究所硕士论文

岸外潮波以前进波占优的潮滩(如长江口南岸边滩)发育另有特点。涨潮过程, 低潮位后(初涨后 1—2h)潮位变率最大, 然后中潮位、高潮位依次减小(图 4b, d), 低潮滩潮锋作用最为强烈(图 2a, b), 潮锋带水体含沙量最大, 而滩面锋后水流最大流速恰亦出现在低潮位前后, 自中潮滩向高潮滩潮锋作用渐弱, 潮锋带水体含沙量亦变小, 滩面水流于高潮位前后又出现较大流速; 落潮过程, 潮位变率最大时段在高潮位后 1—2h, 然后中潮位、低潮位依次减小, 落潮流尾部席状薄层水流同样可掀起涨潮减速阶段及涨憩落淤的细颗粒泥沙。因而滩面发育的理想状况是, 高潮滩淤积率最小, 低潮滩次之, 中潮滩较高。但实际情形中, 由于高潮滩往往植被密布, 滩面沉积物抗冲刷能力沿滩面自海向陆增大(徐元等, 1996), 影响潮锋作用强度的局部滩面底形沿程又有很大变化(表 1), 加之影响潮滩发育的因素甚为复杂, 在泥沙供应充分的前提下, 淤积程度常表现为高潮滩反而最大、中潮滩次之、低潮滩最小, 整个滩面由里向外缓慢淤涨。

### 3 结语

3.1 潮流作为潮滩发育的主要动力因素之一, 就目前的研究程度而言, 认为其动力过程由潮锋作用过程和锋后水流过程组成。

3.2 潮锋作用的本质在于涨潮前峰薄层水体存在着“水流加速效应”[式(15)]。时间上, 就滩面某一点而言, 涨潮流存在一先加速(潮锋)后减速(锋后)的过程; 空间上, 潮锋作用存在于整个滩面涨潮水体的前锋。

3.3 潮锋作用强度主要决定于滩面局部滩坡和潮位变率[式(16)], 前者反映滩面的基本特征, 是出现潮锋作用的前提; 后者则反映潮滩所在海区的区域特点, 决定潮锋作用强度及其时空变化。

3.4 潮锋带水体的高含沙量缘于其水流过程的特殊性(高 Froude 数)。滩面沉积物受潮

锋带水体扰动,其自然固结过程受干扰甚至被中断,而易于为随后水流所起动、运移。

3.5 潮锋作用强度在滩面空间的分布受制于潮位变率过程,而潮位变率过程和锋后水流过程均决定于区域潮波运动性质,因而潮滩发育过程具有明显的区域性。在岸外潮波性质以驻波为主时,潮滩滩面的冲淤情况表现为,高潮滩、中潮滩上部和下部及低潮滩处于淤积状态,中潮滩中部则冲淤基本平衡;在岸外潮波性质以前进波为主时,中潮滩淤积率最高,低潮滩次之,高潮滩最低。但实际情形中,由于内外动力因素的复杂性,潮滩发育的情况会更多样。

### 参 考 文 献

- 徐元 王宝灿 章可奇, 1994. 上海淤泥质潮滩潮锋作用及其形成机制初步探讨. 地理研究, 13(3): 60—68
- 徐元 王宝灿, 1996. 淤泥质潮滩表层沉积物稳定性时空变化的探讨. 海洋学报, 18(6): 50—60
- 张忍顺, 1986. 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, 17(13): 235—245
- Anderson F E, Mayer L M, 1984. Seasonal and spatial variability of particulate matter of a muddy intertidal flood front. *Sedimentology*, 31: 383—394
- Evans G, Collins M R, 1975. The Transportation and Deposition of Suspended Sediment Over the Intertidal Flats of the Wash, In: *Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation*. London: John Wiley & Sons. 273—305
- Postma H, 1954. Hydrography of the dutch Wadden Sea. *Arch Neerl Zool*, 10: 405—511
- Postma H, 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Wadden sea. *Netherl J Sea Res*, 1: 148—179
- Postma H, 1967. Sediment Transport and Sedimentation in the Estuarine Environment. In: *Estuaries*, New York: Springer-Verlog. 158—179
- van Straaten L M J U, Kuenen Ph H, 1957. Accumulation of fine grained sediments in the dutch Wadden Sea. *Geologie En Mijnbouw*, 19: 329—354
- van Straaten L M J U, Kuenen Ph H, 1958. Tidal action as a cause for clay accumulation. *J Sedi Petrol*, 28: 406—413
- van Straaten L M J U, Kuenen Ph H, 1961. Sedimentation in tidal flat areas. *J Albert Socie Petrol Geol*, 9(7): 203—313, 216—226
- Wang B C, Eisma D, 1988. Mudflat Deposition Along the Wenzhou Coastal Plain in Southern Zhejiang China. In: *Tidal-Influenced Sedimentary Environment and Facies*, Champaign. Illinois: Continuing Education Publication Co. 265—274

## THE MECHANISM AND SIGNIFICANCE OF FLOOD SURGE ALONG MUDDY TIDAL FLAT

XU Yuan, WANG Bao-can

*(Institute of Coastal & Estuarine Research, East China Normal University, Shanghai, 200062)*

**Abstract** Based on the results of previous investigations in 1979—1992, this paper describes processes of the tidal current effect on muddy tidal flats, including the effects of tidal surges and the post-surge tidal currents. A mechanism for the formation of the flood surge is shown to be the current acceleration over the flood tidal surge zone, which is associated with pulse current velocity being about 2.5 times of a mean current velocity. Such a hypothesis was examined using detailed observation data representing dynamic characteristics of the currents and sands on tidal flats of different types such as harbor-plain, estuary-bay, estuarine-shoal and open sea types. It is theoretically deduced that a premise for the formation of flood surges is a small slope of tidal flats. The rate of the change in the local tidal level governs the spatial and temporal changes in the flood surge strength. Thus, the phenomenon of high suspended sediment concentration in the flood surge zone and its variation over the tidal flat can be explained. The processes associated with the tidal surge and the post-surge tidal current are determined by the characteristics of the local tidal wave; the tidal flat can be dominated by the progressive and the standing tidal waves. For the former the accretional-erosional pattern of the tidal flat is represented by accretion over the high tidal flat, upper and lower parts of the middle tidal flat and the low tidal flat, whereas the central part of the middle tidal flat is in a balanced situation in terms of accretion and erosion. For the latter, the rate of accretion is the highest over the middle tidal flat; it decreases over the low tidal flat and is the lowest over the high tidal flat.

**Key words** Muddy tidal flat    Current accelerating effect in flood surge zone    Change rate of tidal level    Tidal flat slope    Development model

**Subject classification number** P737.13