

doi:10.3799/dqkx.2010.070

# 淤长型潮滩剖面形态演变模拟： 以江苏中部海岸为例

刘秀娟<sup>1</sup>, 高 抒<sup>2</sup>, 汪亚平<sup>2</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏南京 210093

**摘要:** 在泥质、砂质物质共存的淤长型潮滩, 其剖面的塑造受到潮流作用下堆积过程的控制。为探讨这种潮滩剖面的演变过程, 以江苏中部海岸为研究对象建立了大小潮周期性作用下的潮滩剖面演变模型, 模拟了潮滩均衡态剖面形态与初始坡度、潮差、沉积物供应量之间的关系及潮滩的持续淤长剖面。模拟结果表明: (1) 淤长型潮滩剖面达到均衡态时的形态是上凸的, 且与初始形态无关; (2) 在外源一定的条件下, 潮滩的宽度与潮差呈正相关; (3) 外源物质供应越丰富, 潮滩宽度越大; (4) 潮滩的冲淤状态由沉积物的供应量决定; (5) 对大潮高潮位附近的无沉积带进行充填可实现对其长期持续淤长剖面的模拟; (6) 有丰富沉积物来源的潮滩, 在调整至均衡态后仍持续向海淤长, 并在淤长过程中保持均衡态; (7) 当在模型中输入有关江苏海岸的参数时, 模拟的潮滩宽度和坡度与江苏海岸的潮滩一致。

**关键词:** 潮滩; 沉积物搬运; 沉积作用; 剖面形态; 均衡态; 江苏海岸。

中图分类号: P512.32

文章编号: 1000-2383(2010)04-0542-09

收稿日期: 2009-10-12

## Modeling the Shore-Normal Profile Shape Evolution for an Accretional Tidal Flat on the Central Jiangsu Coast

LIU Xiu-juan<sup>1</sup>, GAO Shu<sup>2</sup>, WANG Ya-ping<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory for Coast and Island Development of the Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract:** The evolution of the shore-normal profile shape of an accretional tidal flat is controlled by the transport of muddy and sandy sediments by tidal currents. To understand the evolution processes, a model is established to simulate the tidal flat profile changes in response to spring-neap tidal cycles, and it is applied to the accretional tidal flat on the central Jiangsu coast to investigate the interrelationships between the initial profile shape of the inter-tidal flat, tidal range, sediment supply, the equilibrium profile shape of the intertidal flat, and the long-term behavior of a prograding profile. The modeling output indicates that: (1) the shape of the accretional tidal flat tends to be convex when reaching its equilibrium state; (2) equilibrium of the intertidal flat morphology is independent of the initial profile shape; (3) if the sediment supply remains stable, then the width of the intertidal flat is positively correlated to tidal range; (4) the width of the intertidal flat increases with sediment supply and the accretion or erosion status of the intertidal flat is determined by sediment supply; (5) there is a need to design an algorithm to treat the area close to high water on springs to simulate long-term growth of the tidal flat; (6) the intertidal flat associated with abundant sediment supply will prograde towards the sea, and at the same time its equilibrium shape will be maintained; and (7) the width and gradient of the intertidal flat from the model output are consistent with those of the Jiangsu coast, when inputting parameters derived locally for the model.

**Key words:** tidal flats; sediment transport; sedimentology; shore-normal profile shape; equilibrium; Jiangsu coast.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 40876045, 40576040); 国家“973”计划前期研究专项 (No. 2006CB708410); 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室开放基金项目 (No. MRE200906).

作者简介: 刘秀娟 (1972-), 女, 副教授, 主要从事海岸沉积动力学研究. E-mail: xjliu@cug.edu.cn

## 0 引言

潮滩是细颗粒物在以潮流作用为主的水动力条件下形成的潮间带浅滩,其剖面形态主要受沉积物供给和水动力条件的控制(高抒和朱大奎,1988;陈才俊,1991; Lee and Mehta, 1997; Kirby, 2000; Roberts *et al.*, 2000; Pritchard *et al.*, 2002; Pritchard and Hogg, 2003; Draut *et al.*, 2005). 而长时间尺度(超过 10 年)上潮滩剖面的演变还受气候因素的强烈控制(Kirby and Kirby, 2008). 对潮滩剖面形态的研究通常是基于对大量实测数据的分析,淤长型潮滩的剖面形态呈上凸形,而侵蚀型潮滩的剖面则呈上凹形. 沉积物的供应量决定了潮滩的冲淤状态(Roberts *et al.*, 2000; Pritchard *et al.*, 2002). 对潮滩剖面形态的研究有助于判断潮滩的淤长情况,预测其未来的发展趋势及提高对潮滩重建的研究.

除了基于实测数据对潮滩剖面进行研究外,前人也采用数值模拟的方法研究潮滩剖面对沉积物供给和水动力条件的响应. 淤长型潮滩上近岸潮波变形所产生的潮流流速—时间不对称可以导致沉积物在潮间带堆积(朱大奎和高抒,1985). 淤长型潮滩的沉积物供应越丰富,均衡态时潮滩的坡度越小,均衡态时潮滩的横向宽度不依赖于潮差,但随着沉积物供应量的增加而增加. 潮汐的不对称性形成了较为陡峭的潮滩,如落潮流起控制作用,则潮滩向岸后退(Roberts *et al.*, 2000; Pritchard *et al.*, 2002). 但前人在研究淤长型潮滩剖面演变时都忽略了潮滩中砂的成分对潮滩剖面演变的影响. 因此,本文以江苏中部海岸为例,研究大小潮作用下由泥、砂输运引起的潮滩剖面演变及其持续淤长的剖面形态.

江苏中部潮滩是以王港为中心的持续淤长潮滩. 江苏中部海岸的潮间带宽度平均为 8~10 km,最宽处可达 10~13 km,平均坡度为 0.2‰~1.0‰(图 1). 滩面沉积物呈明显的分带性,自岸向海可分为草滩、泥滩、泥砂混合滩和粉砂细沙滩(朱大奎和许廷官,1982). 江苏中部潮滩剖面形态为上凸形,尤其在堆积较快的区域,剖面呈现双凸形,并且沉积量越大的潮滩,双凸特征越明显(高抒和朱大奎,1988;陈才俊,1991).

江苏中部海岸属中等潮差海岸,潮汐类型为不规则半日潮,平均潮差为 3.68 m. 潮间浅滩上最大涨潮流速及平均涨潮流速均大于落潮,两者之比约为 1.4,平均涨落潮历时之比为 0.73. 最大落潮流方

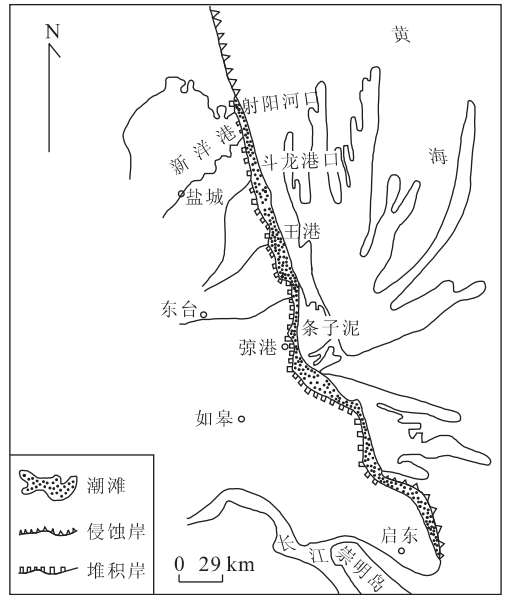


图 1 研究区示意(王颖和朱大奎,1994)

Fig. 1 Sketch map of study area

向变化不大,最大涨潮流方向从低潮水边线向高潮水边线变得逐渐与岸垂直(张忍顺,1986). 江苏沿海近岸波浪主要受季风影响,产生以风浪为主的混合浪. 该海区全年盛行偏北向浪. 波高小于 1 m 的出现频率为 85%(任美镔,1986).

1128—1855 年间黄河从苏北入海,带来了巨量的泥沙. 在苏北沿岸流的作用下,黄河的入海泥沙主要向南转移,因此苏北潮滩长期持续向海淤长,盐城附近的海岸平均淤长速度为 43 m/a. 在黄河北归前的 200 a 间,淤长速度高达约 90 m/a. 在黄河北归入海后,由于沉积物供应量的剧烈减少,苏北潮滩的北段从持续淤长状态转为侵蚀状态,并且侵蚀界面逐渐向南推进. 由于岸外辐射沙洲和江苏北部侵蚀海岸提供的泥沙,江苏中部海岸仍保持淤长状态,目前的淤长速率为 50 m/a(张忍顺,1984).

## 1 研究方法

### 1.1 模型的建立

1.1.1 潮流模型 研究区为江苏中部淤长型宽浅潮滩,对淤长型潮滩演变起控制作用的水动力主要是潮流. 因此在本研究中,忽略了波浪的作用,只考虑潮流对潮滩剖面的塑造作用. 潮滩宽度远小于潮波波长,因此在计算时可以近似认为海平面是水平的. 潮间带上任意一点的垂线平均流速  $\bar{U}$  可表示为:

$$\bar{U} = \frac{1}{\text{tg}\alpha} \frac{dz}{dt}, \quad (1)$$

式(1)中,  $\alpha$  表示该点处潮滩的坡度,  $z$  表示水深,  $t$  表示时间。

江苏近岸海域的潮汐为半日潮(任美镔, 1986), 因此, 可考虑由  $M_2$  分潮和  $S_2$  分潮变形构成大小潮周期变化的潮位时间序列。此外, 江苏淤长型潮滩上由潮波变形引起的涨潮历时小于落潮历时, 因此可将与  $M_2$  分潮相联系的潮位表示为:

$$h_m(t) = \begin{cases} \frac{R_m}{2} \cos\left(\frac{\pi t}{T_{mf}}\right), & 0 \leq t \leq T_{mf}, \\ \frac{R_m}{2} \cos[\pi(t + (T_{me} - T_{mf})/T_{me})], & T_{mf} \leq t \leq T_m. \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $T_m$  为与  $M_2$  分潮相联系的潮位循环时间,  $T_{mf}$  为与  $M_2$  分潮相联系的涨潮历时,  $T_{me}$  为与  $M_2$  分潮相联系的落潮历时,  $R_m$  为与  $M_2$  分潮相联系的潮差。与  $S_2$  分潮相联系的潮位表示为:

$$h_s(t) = \begin{cases} \frac{R_s}{2} \cos\left(\frac{\pi t}{T_{sf}}\right), & 0 \leq t \leq T_{sf}, \\ \frac{R_s}{2} \cos[\pi(t + (T_{se} - T_{sf})/T_{se})], & T_{sf} \leq t \leq T_s. \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $T_s$  为与  $S_2$  分潮相联系的潮位循环时间,  $T_{sf}$  为与  $S_2$  分潮相联系的涨潮历时,  $T_{se}$  为与  $S_2$  分潮相联系的落潮历时,  $R_s$  为与  $S_2$  分潮相联系的潮差。因此半月大小潮的潮位时间序列为:

$$h(t) = h_m(t) + h_s(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (4)$$

式中,  $T$  为半月大小潮循环时间。

**1.1.2 推移质输运及悬移质沉降、再悬浮模型** 江苏中部潮滩悬沙的组分以粉砂为主, 在潮滩多数部位, 其悬沙中砂的含量不超过 1%。只有当潮流流速超过砂的临界起动流速时, 才会有极少量的砂进入悬浮状态(李占海等, 2006), 因此在本文的模拟中, 只计算砂的推移输运, 砂的悬移输运方式被忽略; 而对于泥的输运, 则只考虑其悬移输运方式。

对于推移质输沙率的计算, 采用 Bagnold 型的 Nielsen 公式(Nielsen, 1992):

$$q_b = \Phi [g(s-1)d^3]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\Phi = 12\theta^{1/2}(\theta - \theta_{cr}), \quad (6)$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{\rho g(s-1)d}, \quad (7)$$

$$\tau_0 = \rho u_*^2 = \rho C_d \bar{U}^2 = \rho C_{100} U_{100}^2, \quad (8)$$

$$s = \frac{\rho_s}{\rho}, \quad (9)$$

式(5)~(9)中,  $q_b$  为推移质体积输沙率,  $\Phi$  为无量

纲型推移质输沙率,  $\theta$  为 Shields 数,  $\tau_0$  为近底部切应力,  $C_d$  为和垂线平均流速对应的拖曳系数,  $C_{100}$  为距离底床 100 cm 处的拖曳系数,  $u_*$  为摩阻流速,  $\bar{U}$  为垂线平均流速,  $U_{100}$  为距离底床 100 cm 处的流速,  $g$  为重力加速度,  $\rho_s$  为沉积物密度,  $\rho$  为海水密度,  $d$  为沉积物粒径,  $s$  为沉积物与海水密度之比。

泥沙起动时的临界 Shields 数  $\theta_{cr}$  可用下式计算(Soulsby and Whitehouse, 1997):

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2D_*} + 0.055(1 - e^{-0.020D_*}), \quad (10)$$

$$D_* = \left[ \frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \cdot d, \quad (11)$$

式中,  $D_*$  为无量纲粒径,  $v$  为海水的运动粘滞系数。

悬移质沉降公式(Krone, 1962)为:

$$\frac{dM_s}{dt} = C\omega_s \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_m}\right) H\left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_m}\right), \quad (12)$$

$$H\left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_m}\right) = \begin{cases} 0, & \tau_0 \leq \tau_m, \\ 1, & \tau_0 > \tau_m. \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $M_s$  为沉降通量,  $C$  为悬沙浓度,  $\omega_s$  为悬沙沉降速率,  $H$  为 Heaviside 函数,  $\tau_m$  为临界沉降切应力。

再悬浮公式(Partheniades, 1965)为:

$$\frac{dM_e}{dt} = E \left(\frac{\tau_0}{\tau_e} - 1\right) H\left(\frac{\tau_0}{\tau_e} - 1\right) \quad (14)$$

$$H\left(\frac{\tau_0}{\tau_e} - 1\right) = \begin{cases} 0, & \tau_0 \leq \tau_e, \\ 1, & \tau_0 > \tau_e. \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $M_e$  为侵蚀通量,  $E$  为再悬浮常数,  $\tau_e$  为临界侵蚀切应力。

**1.1.3 床面变形模型** 一维床面变形方程可表示为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{1-\epsilon} \left( \frac{\partial q_b}{\partial x} + M_d - M_e \right), \quad (16)$$

式中,  $z$  为底床上任一点的纵坐标,  $\epsilon$  为底床的空隙率。

**1.2 边界条件与初始条件**

研究区域为江苏中部海岸淤长型潮滩, 计算域的开边界为潮间带最低低潮位处, 陆域边界为海平面与潮滩的交点, 该边界为动边界。江苏大丰粉砂细沙滩上涨潮期间的悬沙浓度为 0.5 g/L(李占海等, 2006)。因此在涨潮期间的最低低潮位处, 悬沙浓度设置为定值(0.5 g/L), 该值不随潮流流速变化而变化。而在变动的陆边界上, 其悬沙浓度是由涨潮阶段其下相邻节点上的悬沙浓度决定的。落潮阶段最低低潮位处的悬沙浓度, 由平流输运及局地的垂向通量决定。

初始时刻, 海平面位于最低低潮位处, 该处的水深近于零, 悬沙浓度为 0.5 g/L。对最低低潮位以上

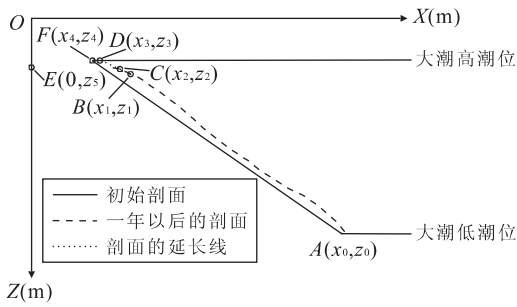


图 2 对潮间带大潮高潮位附近的无沉积带进行充填的算法示意

Fig. 2 Diagram showing the algorithm to fill in the non sedimentation zone near high water level on springs on the tidal flat

的潮滩,因在初始时刻没有被水淹没,因此其悬沙浓度为 0 g/L.

### 1.3 潮滩大潮高潮位附近无沉积带的算法处理

潮滩的大潮高潮位附近,由于被水淹没的时间较短及水层厚度较小,因此沉积量较小(Amos, 1995). 该处的沉积主要是风暴潮、大气降尘等作用所致.

建立直角坐标系(图 2),AO 线段表示潮滩的初始剖面, $F(x_4, z_4)$ 为潮滩初始剖面与大潮高潮位的交点. $E(0, z_5)$ 点为  $z$  坐标轴上水深为水深阈值的点.由于  $E(0, z_5)$ 点以上潮滩的最大水深均小于水深阈值,因此在地貌模拟中  $E(0, z_5)$ 点以上的潮滩为无沉积带,即潮间带大潮高潮位附近的沉积无法在地貌模拟中实现.

因此必须对图 2 中的无沉积带进行充填,以重现该处真实的沉积.以对潮滩演变一年时的剖面进行充填为例说明该方法.在一年时的潮滩剖面上靠近水深阈值的附近取  $B(x_1, z_1)$ 和  $C(x_2, z_2)$ 两点,把该两点的连线延长至大潮高潮位, $D(x_3, z_3)$ 点为该延长线与大潮高潮位的交点,该交点为一年时的潮滩剖面与大潮高潮位的交点,即潮滩上的大潮高潮位点.在下一个时间步长的计算中, $D$ 点即为水域的左边界点,即潮滩地形经过一年演变,潮滩上的大潮高潮位从  $F(x_4, z_4)$ 点前积到了  $D(x_3, z_3)$ 点.以同样的方法在每次地形更新时对潮间带大潮高潮位附近的无沉积带进行充填,即可实现对潮滩地形长期演变的模拟.

### 1.4 输入参数的确定

1.4.1 潮汐 设江苏中部海岸潮汐的落潮历时比涨潮历时长 1.5 h(任美镔, 1986). 根据实测水位数据的调和结果,江苏中部近海潮汐分潮  $M_2$  和

表 1 动力学模型中的有关参数取值

Table 1 The parameters in the model

参数类型	参数名称	数值
潮汐参数	与 $M_2$ 相联系的涨潮历时 $T_{mf}$ (s)	19 656
	与 $M_2$ 相联系的落潮历时 $T_{me}$ (s)	25 056
	与 $M_2$ 相联系的潮位循环时间 $T_m$ (s)	44 712
	与 $M_2$ 相联系的最大潮差 $R_m$ (m)	3. 495 8
	与 $S_2$ 相联系的涨潮历时 $T_{sf}$ (s)	18 900
	与 $S_2$ 相联系的落潮历时 $T_{se}$ (s)	24 300
	与 $S_2$ 相联系的潮位循环时间 $T_s$ (s)	43 200
	与 $S_2$ 相联系的最大潮差 $R_s$ (m)	1. 160 8
	大小潮循环时间 $T$ (s)	1 277 486
	潮滩沉积物粒度参数	沉积物密度 $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
砂的粒径 $D_s$ (mm)		0. 07
泥的粒径 $D_m$ (mm)		0. 01
砂的临界起动流速 $U_{cs}$ (m/s)		0. 30
泥的临界再悬浮流速 $U_{cm}$ (m/s)		0. 25
泥的临界沉降切应力 $\tau_m$ (N/m <sup>2</sup> )		0. 19
泥的临界侵蚀切应力 $\tau_c$ (N/m <sup>2</sup> )		0. 19
悬沙沉降速率 $\omega_s$ (mm/s)		0. 5
海水密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )		1 025
动力黏度系数 $\mu$ (kg/m/s)		$1. 4 \times 10^{-3}$
海水物理性质	运动黏度系数 $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$1. 4 \times 10^{-6}$
	距离底床 100 cm 处的拖曳系数 $C_{100}$	$3. 0 \times 10^{-3}$
	卡门常数 $\kappa$	0. 4
底床物理性质	粗糙长度 $Z$ (m)	$1. 98 \times 10^{-2}$
	再悬浮常数 $E$ (kg/m <sup>2</sup> /s)	$1. 0 \times 10^{-5}$
	底床沉积物的空率 $\epsilon$	0. 4
其他参数	空间步长 (m)	200
	时间步长 (s)	120
	地形更新时间 (s)	1 277 486

$S_2$  分潮的振幅分别为 1. 7 479 m 和 0. 5 804 m, 该分潮振幅对应的半月大小潮平均潮差为 3. 62 m. 潮汐参数如表 1 所示.

1.4.2 潮滩沉积物粒度参数、临界起动条件及悬沙沉降速率 江苏滨海平原泥的粒径取为 0. 01 mm, 砂的粒径取为 0. 07 mm. 江苏中部潮滩的粘性沉积物的临界起动流速取为 0. 25 m/s (Roberts *et al.*, 2000; van Ledden, 2002; Paarlberg *et al.*, 2005). 根据 Miller 公式 (Miller *et al.*, 2006), 砂的临界起动流速为 0. 30 m/s. 由于絮凝效应, 泥的沉降速率设为 0. 5 mm/s (Kineke and Sternberg, 1989) (表 1).

1.4.3 最小水深的确定 为避免在模拟过程中近底部切应力出现异常值, 水深阈值设为 0. 20 m, 该值系经过试算确定.

1.4.4 海水及底床的物理性质 海水及底床的物理性质见表 1. 设初始时刻潮间带上除最低低潮位处有砂的堆积外, 其余部位的沉积物全部为泥.

## 2 模拟实验结果

### 2.1 大潮高潮位附近无沉积带充填与否对潮滩地形演变模拟的影响

为研究潮间带大潮高潮位附近无沉积带的充填与否对潮滩地形演变的影响,分别以对无沉积带不加充填及对其加以充填两种方法模拟潮滩的地形演变.

由于水深阈值设为 0.2 m,因此在计算中,潮间带大潮高潮位附近水深小于 0.2 m 的部位不发生沉积物的沉积.假如在每次地形更新时,不对潮间带大潮高潮位附近的无沉积带进行处理,则潮滩顶部水深小于 0.2 m 的范围内始终无沉积物沉积.当外源为泥和砂时,潮滩中下部的堆积速率基本保持稳定,但潮滩上部沉积物的堆积速率随时间快速减小(图 3a).因此即使有稳定的外源供应,在模拟中由于潮间带上部大潮高潮位附近无沉积带的影响,潮滩的持续淤长剖面无法在模拟中实现.如在地形更新时对无沉积带进行处理,即对其进行充填以重现该处真实的沉积,则潮滩在调整至均衡态后仍可向海淤长,并在淤长过程中保持其均衡时的剖面形态(图 3b).

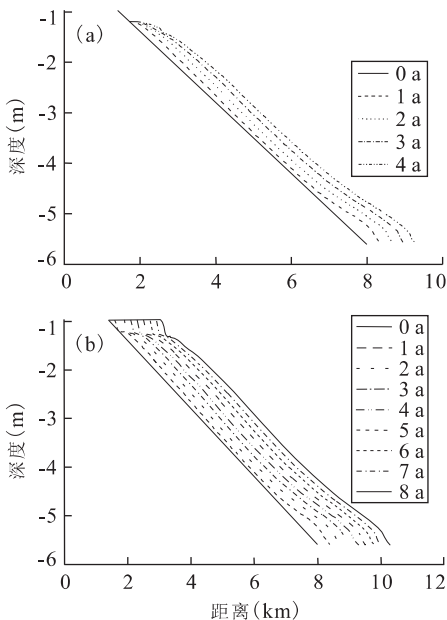


图 3 水域左边界的控制与否对潮滩地形演变的影响

Fig. 3 Influence of the treatment of the left side boundary (i. e., the non sedimentation zone) on the model output of the profile evolution

a. 水域左边界不控制; b. 水域左边界加以控制; 潮滩的初始坡度为 0.7‰, 平均潮差为 3.62 m, 涨潮阶段开边界悬沙浓度为 0.5 g/L

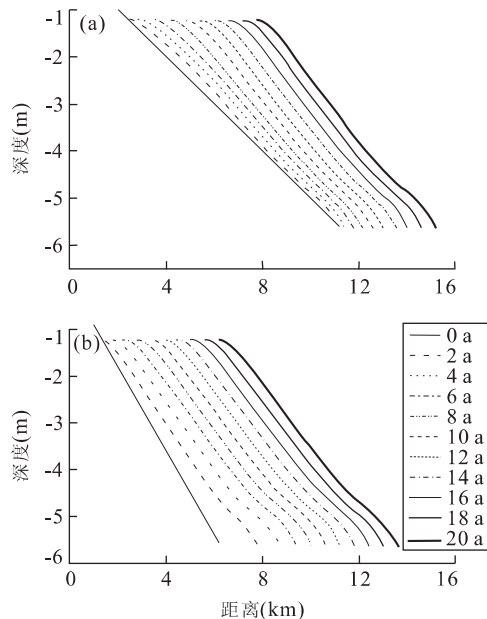


图 4 不同初始坡度潮滩剖面的演变及其均衡态

Fig. 4 Evolution process and the equilibrium of the intertidal flat with different initial gradients

a. 潮滩初始坡度为 0.5‰; b. 潮滩初始坡度为 0.9‰; 涨潮阶段开边界悬沙浓度为 0.5 g/L, 平均潮差为 3.62 m

### 2.2 潮滩剖面的均衡态与初始坡度的关系

模型中  $M_2$  和  $S_2$  分潮的振幅分别取为 1.7479 m 和 0.5804 m 时,当潮滩初始坡度较小时,在潮滩调整至均衡态的过程中,其上部堆积速率较大,中下部堆积速率较小(图 4a);当初始坡度较大时,潮滩上部的堆积速率较小,其中下部尤其是下部的堆积速率较大(图 4b).当潮滩初始坡度分别为 0.5‰、0.9‰ 时,涨潮期间边界悬沙浓度设为 0.5 g/L,调整至均衡态时,潮滩的宽度均为 8 km,潮滩的坡度为 0.6‰,即均衡态时潮滩的宽度(坡度)与潮滩初始坡度无关.均衡态时的潮滩剖面是上凸的,并且在平均低潮位线附近有一明显的上凸,这和陈才俊(1991)对江苏淤长型潮滩剖面形态的观测结果是一致的.该模拟结果表明,当根据江苏海岸的数据输入模型参数时,均衡态时潮滩的宽度、坡度及剖面特征与江苏中部海岸潮滩一致.因潮滩初始坡度都较接近其均衡态坡度,因此从初始剖面调整至均衡态剖面,历时较短(约 6 a).

### 2.3 潮差对潮滩剖面的影响

假设潮滩初始坡度相同,且涨潮期间水域开边界上的悬沙浓度均为 0.5 g/L.当半月大小潮的平均潮差为 2.66 m 时,均衡态时的潮滩宽度为 6.6 km(图 5a).当半月大小潮的平均潮差为 4.66 m 时,均衡态时的潮滩宽度为 8.2 km(图 5b).当边界

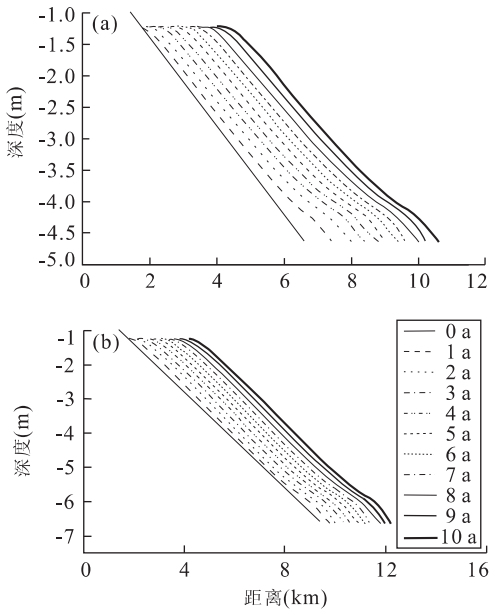


图 5 潮差对潮滩宽度的影响

Fig. 5 Effect of tidal range on the width of the intertidal flat

a. 平均潮差为 2.66 m; b. 平均潮差为 4.66 m; 潮滩初始坡度为 0.7%, 涨潮阶段开边界悬沙浓度为 0.5 g/L

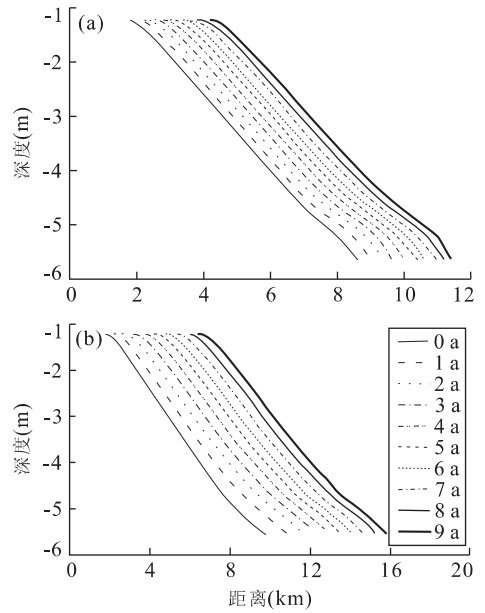


图 7 外源量的变化对潮滩剖面的演变及其均衡态的影响

Fig. 7 Effect of variations in sediment supply on the evolution of the intertidal flat profile and the equilibrium status

a. 涨潮阶段开边界悬沙浓度为 0.5 g/L; b. 涨潮阶段开边界悬沙浓度为 1.0 g/L; 潮滩初始坡度为 0.7%, 平均潮差为 3.62 m

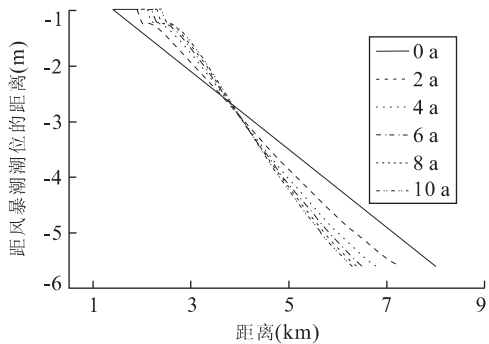


图 6 沉积物供应中止时潮滩剖面的演变

Fig. 6 Evolution of the intertidal flat when sediment supply was cut off

初始潮滩坡度为 0.5%, 平均潮差为 3.62 m

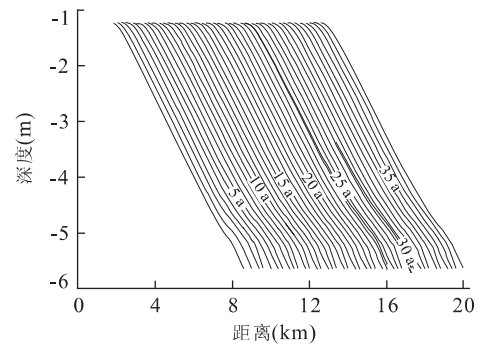


图 8 潮滩长期持续淤长剖面

Fig. 8 Long-term intertidal flat profile evolution

潮滩剖面初始坡度为 0.7%, 平均潮差为 3.62 m, 潮滩阶段开边界悬沙浓度为 0.5 g/L

悬沙浓度相同时, 半月大小潮的潮差越小, 潮滩的宽度越小. 半月大小潮的潮差越大, 潮滩的宽度越大.

### 2.4 物源变化对潮滩剖面的影响

当潮滩失去外源供应时, 在半月大小潮的作用下, 潮滩上部发生堆积, 潮滩中下部则开始侵蚀. 在演变初期, 堆积和侵蚀速率都较快, 而后变慢直至达到均衡态, 此时潮滩宽度变窄, 坡度变陡 (图 6).

当潮滩水域开边界上的悬沙浓度设置为 0.5 g/L 且半月大小潮的平均潮差为 3.62 m 时, 均衡态时潮滩的宽度为 8 km, 坡度为 0.6% (图 7a).

当潮滩水域开边界上的悬沙浓度设置为 1.0 g/L 时, 均衡态时潮滩的宽度为 9.2 km, 坡度为 0.5% (图 7b). 即物源供应越丰富潮滩宽度越大, 坡度越小.

### 2.5 潮滩的持续淤长剖面

当外源供应充足且其浓度 (0.5 g/L) 保持不变时, 潮滩从初始坡度 (0.7%) 调整至均衡态后仍可长期保持淤长状态, 并在淤长过程中保持均衡态时的剖面形态, 即潮滩剖面处于动态的均衡态中 (图 8).

### 3 讨论

#### 3.1 潮滩宽度的影响因素

根据本文的模拟结果,当外源来沙量不变时,潮滩的宽度与潮差有关,即潮差增加时,潮滩宽度也会相应增加。因此,潮差是影响潮滩宽度的因素之一,但并非是潮滩宽度的唯一影响因素,如荷兰 Wadden Sea,其平均潮差介于 1.3~2.8 m,其潮滩宽度为 7~10 km(van Straaten, 1961)。而韩国的 Baeksu 潮滩,其平均潮差为 3.9 m,但潮滩宽度只有 4~6 km(Yang *et al.*, 2005)。因此潮滩宽度既与潮差有关,也与沉积物的供应量有关,即沉积物的供应越丰富,潮滩越宽。

#### 3.2 潮滩淤长与否的决定性因素

江苏海岸的潮滩,在黄河从苏北入海的几百年间一直保持淤长状态(张忍顺, 1984)。在黄河北归后,靠近废黄河口的潮滩由于失去了沉积物的供应,从淤长状态逐渐转变为侵蚀状态,且侵蚀面向南推进。而江苏中部的潮滩,由于岸外辐射沙洲提供的沉积物,继续保持淤长状态,现在仍然保持约 50 m/a 的向海推进速率。本文的模拟结果也显示,在潮差不变的前提下,当潮滩失去沉积物供应时,潮滩上部堆积,下部侵蚀,宽度变窄,坡度变陡,并将进入持续的侵蚀状态,这和前人的研究结果是一致的(张勇等, 1993; Zhang *et al.*, 1998)。所以,潮差的大小不是决定潮滩侵蚀与否的因素,沉积物供应的多寡才是潮滩淤长与否的决定性因素。在江苏海岸,冲淤状态转换的位置大致在射阳河口,射阳河口北翼海岸从冲刷初期到岸线剧烈后退的潮滩剖面都存在,而其南翼的海岸则表现为淤长速率向南增加(高抒和朱大奎, 1988),这一环境为潮滩动力地貌模拟提供了良好的研究地点,而本文模型的进一步完善有助于对淤长型和蚀退型潮滩的沉积记录的连续性和间断性进行了解,从而为潮滩沉积记录的正确解译提供帮助。沉积记录是环境的产物,因此可通过对沉积记录的研究提取环境信息,这通常依赖于反演方法(顾延生等, 2008; 陈金霞等, 2009; 张玉芬等, 2009)。另外,还可以采用正演方法模拟和计算环境的产物,从而有助于从机制上研究环境及其产物之间的关系(Kamp and Naish, 1998; Gao, 2009)。因此一定环境下沉积记录的形成是正演方法重要的研究方向之一。

### 4 结论

本文以江苏中部海岸为例建立了大小潮作用下的淤长型潮滩剖面演变过程模型。在该模型中,沉积物的运输包括砂的推移运输和泥的悬移运输两种方式。为实现对潮滩长期持续淤长剖面的模拟,模型对潮滩大潮高潮位附近的无沉积带进行了充填处理。用该模型研究了潮滩均衡态时的形态及其与潮滩初始形态、潮差、沉积物供应量等影响因素之间的关系,并模拟了潮滩的持续淤长剖面。主要结论如下:

(1)淤长型潮滩剖面均衡态时的形态是上凸的,且其均衡态时的形态与初始形态无关;(2)在外源一定的条件下,潮滩的宽度与潮差呈正相关;(3)外源的供应越丰富,潮滩宽度越大;(4)潮滩的冲淤状态由沉积物的供应量决定;(5)对潮滩大潮高潮位附近的无沉积带进行充填后可实现对长期持续淤长潮滩剖面的模拟;(6)有丰富沉积物来源的潮滩,在调整至均衡态后仍可持续向海淤长,并在淤长过程中保持均衡态时的形态;(7)当在模型中输入有关江苏海岸的参数时,模拟的潮滩的宽度、坡度及其剖面特征与江苏中部海岸的潮滩一致。

#### References

- Amos, C. L., 1995. Siliciclastic tidal flats. In: Perillo, G. M. E., ed., *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. Elsevier Science BV, 273—306.
- Chen, C. J., 1991. Development of depositional tidal flat in Jiangsu Province. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 22 (4): 360—368 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. X., Li, T. G., Nan, Q. Y., 2009. Variations of Terigenous material discharges in the South Okinawa trough and its relation to the East Asian summer monsoon since the last millennium. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34 (5): 811—818 (in Chinese with English abstract).
- Draut, A. E., Kineke, G. C., Huh, O. K., et al., 2005. Coastal mudflat accretion under energetic conditions, Louisiana chenier-plain coast, USA. *Marine Geology*, 214 (1—3): 27—47. doi:10.1016/j.margeo.2004.10.033
- Gao, S., 2009. Modeling the preservation potential of tidal flat sedimentary records, Jiangsu coast, eastern China. *Continental Shelf Research*, 29 (16): 1927—1936. doi:10.1016/j.csr.2008.12.010
- Gao, S., Zhu, D. K., 1988. The profile of Jiangsu's mud coast. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 24 (1): 75—84 (in Chinese with English abstract).

- Gu, Y. S., Qiu, H. O., Xie, S. C., et al., 2008. Lake sediment records for eutrophication history in response to human activity during recent century in the Liangzi lake, Hubei Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(5): 679—686 (in Chinese with English abstract).
- Kamp, P. J. J., Naish, T., 1998. Forward modelling of the sequence stratigraphic architecture of shelf cyclothems: application to Late Pliocene sequences, Wanganui basin (New Zealand). *Sedimentary Geology*, 116(1—2): 57—80. doi: 10.1016/S0037-0738(97)00080-8
- Kineke, G. C., Sternberg, R. W., 1989. The effect of particle settling velocity on computed suspended sediment concentration profiles. *Marine Geology*, 90(3): 159—174. doi: 10.1016/0025-3227(89)90039-X
- Kirby, R., 2000. Practical implications of tidal flat shape. *Continental Shelf Research*, 20(10—11): 1061—1077. doi: 10.1016/S0278-4343(00)00012-1
- Kirby, J. R., Kirby, R., 2008. Medium timescale stability of tidal mudflats in Bridgwater Bay, Bristol Channel, UK: influence of tides, waves and climate. *Continental Shelf Research*, 28(19): 2615—2629. doi: 10.1016/j.csr.2008.08.006
- Krone, R. B., 1962. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Hydraulics Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of Berkeley, California.
- Lee, S. C., Mehta, A. J., 1997. Problems in characterizing dynamics of mud shore profiles. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(4): 351—361. doi: 10.1061/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:4(351)
- Li, Z. H., Gao, S., Shen, H. T., et al., 2006. Characteristics of grain-size distributions of suspended sediment and its response to dynamics over the Dafeng tidal flat, Jiangsu coast in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(4): 87—95 (in Chinese with English abstract).
- Miller, M. C., McCave, I. N., Komar, P. D., 2006. Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24(4): 507—527. doi: 10.1111/j.1365-3091.1977.tb00136.x
- Nielsen, P., 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific Publishing, 4.
- Paarlberg, A. J., Knaapen, M. A. F., de Vries, M. B., et al., 2005. Biological influences on morphology and bed composition of an intertidal flat. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 64(4): 577—590. doi: 10.1016/j.eess.2005.04.008
- Partheniades, E., 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 91: 105—139.
- Pritchard, D., Hogg, A. J., Roberts, W., 2002. Morphological modelling of intertidal mudflats: the role of cross-shore tidal currents. *Continental Shelf Research*, 22(11—13): 1887—1895. doi: 10.1016/S0278-4343(02)00044-4
- Pritchard, D., Hogg, A. J., 2003. Cross-shore sediment transport and the equilibrium morphology of mudflats under tidal currents. *Journal of Geophysical Research*, 108(C10): 3313—3327. doi: 10.1029/2002JC001570
- Ren, M. E., ed., 1986. Comprehensive investigation of coastal zone and tidal flat resources, Jiangsu Province. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Roberts, W., Le Hir, P., Whitehouse, R. J. S., 2000. Investigation using simple mathematical models of the effect of tidal currents and waves on the profile shape of intertidal mudflats. *Continental Shelf Research*, 20(10—11): 1079—1097. doi: 10.1016/S0278-4343(00)00013-3
- Soulsby, R. L., Whitehouse, R. J. S., 1997. Threshold of sediment motion in coastal environments. Pacific Coasts and Ports'97, Proceedings Volume 1: 149—154.
- van Ledden, M., 2002. A process-based sand-mud model. In: Winterwerp, J. C., Kranenburg, C., eds., Proceedings of Marine Science. Amsterdam, Elsevier, 5: 577—594
- van Straaten, L. M. J. U., 1961. Sedimentation in tidal flat areas. *Journal of the Alberta Society of Petroleum Geologists*, 9: 203—226.
- Wang, Y., Zhu, D. K., 1994. Coastal geomorphology. High Education Press, Beijing, 180—181 (in Chinese).
- Yang, B. C., Dalrymple, R. W., Chun, S. S., 2005. Sedimentation on a wave-dominated, open-coast tidal flat, southwestern Korea: summer tidal flat-winter shoreface. *Sedimentology*, 52(2): 235—252. doi: 10.1111/j.1365-3091.2004.00692.x
- Zhang, R. S., 1984. Land-forming history of the Huanghe River delta and coastal plain of North Jiangsu. *Acta Geographica Sinica*, 39(2): 173—184 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. S., 1986. Characteristics of tidal current and sedimentation of suspended load on tidal mud flat in Jiangsu Province. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 17(3): 235—245 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Swift, D. J. P., Yu, Z. Y., et al., 1998. Modeling of coastal profile evolution on the abandoned delta of the Huanghe River. *Marine Geology*, 145(1—2): 133—148. doi: 10.1016/S0025-3227(97)00110-2



- Zhang, Y., Yu, Z. Y., Jin, L., 1993. The erosion process model of mud flat by wave. *The Ocean Engineering*, 11(4): 74—83 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Chen, L., et al., 2009. Magnetic fabric of Holocene palaeo-floods events in Jiangnan plain. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 985—992 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. K., Gao, S., 1985. A mathematical model for the geomorphic evolution and sedimentation of tidal flats. *Marine Science Bulletin*, 4(5): 15—21 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. K., Xu, T. G., 1982. The cast development and exploit of middle Jiangsu. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 3: 799—818 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈才俊, 1991. 江苏淤长型淤泥质潮滩的剖面发育. *海洋与湖沼*, 22(4): 360—368.
- 陈金霞, 李铁刚, 南青云, 2009. 冲绳海槽千年来陆源物质输入历史与东亚季风变迁. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(5): 811—818.
- 高抒, 朱大奎, 1988. 江苏淤泥质海岸剖面的初步研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 24(1): 75—84.
- 顾延生, 邱海鸥, 谢树成, 等, 2008. 湖北梁子湖近代沉积记录对人类活动的响应. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(5): 679—686.
- 李占海, 高抒, 沈焕庭, 等, 2006. 江苏大丰潮滩悬沙级配特征及其动力响应. *海洋学报*, 28(4): 87—95.
- 任美镔, 主编, 1986. *江苏省海岸带与海涂资源综合调查报告*. 北京: 海洋出版社.
- 王颖, 朱大奎, 1994. *海岸地貌学*. 北京: 高等教育出版社, 180—181.
- 张忍顺, 1984. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程. *地理学报*, 39(2): 173—184.
- 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(3): 235—245.
- 张勇, 虞志英, 金镠, 1993. 波浪作用下淤泥质海滩剖面侵蚀过程的计算模式——以江苏北部淤泥质海岸为例. *海洋工程*, 11(4): 74—83.
- 张玉芬, 李长安, 陈亮, 等, 2009. 基于磁组构特征的江汉平原全新世古洪水事件. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(6): 985—992.
- 朱大奎, 高抒, 1985. 潮滩地貌与沉积的数学模型. *海洋通报*, 4(5): 15—21.
- 朱大奎, 许廷官, 1982. 江苏中部海岸发育和开发利用问题. *南京大学学报(自然科学版)*, 3: 799—818.