

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.06.013

# 基于植被和潮动力作用的潮滩剖面演变数值模拟

龚 政<sup>1,2</sup>, 白雪冰<sup>1</sup>, 靳 闯<sup>3</sup>, 赵 堃<sup>1</sup>, 周 曾<sup>2</sup>, 张长宽<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;  
2. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. School of Environment, University of Auckland, Auckland 92019 New Zealand)

**摘要:** 为研究多因子共同作用下的潮滩演变机制, 开发了基于植被生长和潮动力作用的潮滩剖面演变数学模型。在不考虑植被作用下, 模拟得到了潮滩中长期演变后的上凸形剖面特征; 泥沙供给是决定潮滩宽度的因素, 供给越充分, 潮滩宽度越大。模型考虑植被过程时, 结果表明不同的植被生物量分布形式对潮滩水动力的影响程度不同, 在潮间带上部, 生物量抛物线分布时的减流效果强于生物量线性分布形式; 而在潮间带下部则相反。模拟结果显示盐沼和光滩之间出现陡坎, 且随着滩面的逐步淤高, 陡坎逐步向海移动。

**关键词:** 潮滩; 地貌演变; 植被影响; 盐沼陡坎; 数值模拟

**中图分类号:** TV122      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2018)06-0877-10

潮滩发育在各种半封闭或开敞式海岸以及河口环境中, 如有屏障的水域、河口、三角洲和沿海平原。潮滩是海洋与陆地之间物质交换的中间地带, 具有丰富的底质类型、复杂的水动力条件与多样的生物资源, 在水产养殖、围垦造地、生态环境保护、促淤保滩和旅游度假等方面具有重要的环境意义和经济价值<sup>[1]</sup>。掌握潮滩演变规律, 有助于对潮滩进行科学有效的开发、保护和利用。

作为海陆相互作用的敏感地带, 潮滩的尺度和形态特征主要受潮流、波浪、泥沙供应和生物环境等因素影响<sup>[2-4]</sup>, 潮滩剖面的时空变化极为复杂。潮滩动力地貌演变过程是将潮滩上的动力过程、泥沙运动过程和地貌演变等过程结合在一起研究, 这与单纯的地貌研究以及潮滩上的现场观测研究不同<sup>[5]</sup>。正常天气下潮流控制着泥沙输移和再悬浮过程<sup>[6]</sup>, 在潮流输沙堆积下, 滩上易形成淤泥质潮滩, 潮流动力是淤泥质潮滩沉积的支配动力, 在强潮流的作用下泥沙向岸输运, 潮滩剖面往往呈现上凸形<sup>[7-8]</sup>。潮滩植被是塑造潮滩的重要因子之一, 潮滩水动力、泥沙沉积和植被生长之间的关系复杂多变, 相互之间存在耦合作用<sup>[9]</sup>。许多学者通过野外观测证明, 潮滩植被的存在可以减缓水流、衰减波浪、促进泥沙在植被带内部沉降<sup>[10-12]</sup>。拾兵等<sup>[13]</sup>选用 3 种植物进行抗冲性物理试验来研究植物根系对边滩坡面固土抗冲性的影响, 结果表明根系发达、根系面积比率大的植物使边滩冲刷量小, 对滩坡的固土护岸作用大且范围广。许多学者采用数值模拟的方法研究潮滩剖面的演变情况, Roberts 等<sup>[14]</sup>提出了潮滩剖面演变一维模型, 发现潮差增大能加剧潮下带冲刷, 使滩面坡度变陡, 但对剖面宽度影响较小; 剖面宽度随边界含沙量的增加而增大; Pritchard 等<sup>[15]</sup>建立了横向潮流作用下的一维模型, 发现在潮流输沙控制下, 潮滩剖面呈上凸形, 且凸点位于平均海平面附近。前人主要研究了光滩的剖面演变过程, 近年来, 学者考虑了生物与动力-地貌过程的耦合作用, 取得了一些成果。Mudd 等<sup>[16]</sup>、Morris 等<sup>[17]</sup>以生长互花米草的盐沼为研究对象, 提出了考虑水动力、沉积和植被演化

收稿日期: 2018-01-09; 网络出版时间: 2018-09-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20180910.1528.022.html>

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51620105005); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2017B41614)

作者简介: 龚政(1975—), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士, 主要从事海岸潮滩系统演变动力机制、河口海岸水动力及泥沙运动数值模拟等研究。E-mail: gongzheng@hhu.edu.cn

通信作者: 白雪冰, E-mail: xuebing@hhu.edu.cn

之间相互作用的一维模型,用生物量表征植被,与水动力和泥沙输运联系起来,发现植被的存在能够明显影响潮滩上的潮流和泥沙行为,但该模型基于特定区域——美国南卡罗来纳州北汉河口 18 年的植被密度、直径和高度等实测资料,将植被生物量与淹没历时建立了简单的线性关系;Morris 等<sup>[18]</sup>在潮滩生物与动力地貌耦合的模型中,建立了植被生物量与平均高潮位和床面高程之间距离的抛物线关系,但未单独剥离水动力、泥沙单个因素对植被的响应;Zhou 等<sup>[19]</sup>在一维剖面生物动力地貌模型中,通过在动量方程中增加阻力项来简化植被对潮流的减缓作用,将植被简化为排列均匀的圆柱体,并考虑其对泥沙的黏附作用,但模型中未考虑植被自身的有机物堆积和外部泥沙供给对滩面高程的影响,与实际潮滩存在一定差异。

本文以潮流为主导作用的淤长型潮滩为例,建立了一维水动力、泥沙输运及潮滩植被生长过程相耦合的地貌演变数学模型,模拟了潮滩剖面的发育和演变过程,剖析了植被对潮滩水动力、泥沙输运以及地貌演变的影响。

## 1 模型基本情况

本研究开发了考虑植被生长-水动力-泥沙输运耦合过程的潮滩剖面演变数学模型。模拟过程中,首先给定各变量初始值,采用一维水动力模型计算水动力场;根据悬沙输运方程计算含沙量场,并根据床面变形方程计算潮滩地形变化;将植被生长与地貌过程耦合,考虑植被对水流阻碍、泥沙黏附以及床面有机物堆积的效果,计算植被生长分布、更新潮滩地形。更新地形后,进入循环计算。

### 1.1 水动力-泥沙输运-地貌演变模型

基于一维浅水方程组,仅考虑垂直于岸线的潮流,忽略沿岸向潮流以及波浪影响,采用一维浅水方程来计算横向潮流的水动力过程。方程表示为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho h} + D_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F_D \quad (2)$$

式中:  $h$  为水深, m;  $t$  为时间, s;  $u$  为垂向平均流速, m/s;  $x$  为距海边界的距离, m;  $\eta$  为潮位, m;  $D_x$  为  $x$  方向水流紊动黏性系数, 取  $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $F_D$  为其他耦合过程(如考虑潮滩植被作用)存在时增加的源汇项;  $g$  为重力加速度, 取  $9.8 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $\rho$  为水的密度, 取  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $\tau_b$  为沿  $x$  方向的水底摩阻, Pa, 计算公式表示为

$$\tau_b = \frac{\rho g u |u|}{C_z^2} \quad (3)$$

式中:  $C_z$  为谢才系数, 取  $65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ 。

淤泥质潮滩以悬移质输运为主,本次研究暂不考虑推移质运动,悬沙输移方程为

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(uch)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( h \varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) = Q_e - Q_d \quad (4)$$

式中:  $c$  为垂线平均含沙量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\varepsilon_x$  为泥沙扩散系数, 取  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $Q_e$  为泥沙冲刷量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $Q_d$  为泥沙沉积量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 泥沙冲刷量和沉积量使用 Partheniades-Krone 方程<sup>[20-21]</sup>表示:

$$Q_e = \begin{cases} m_c \left( \frac{\tau_c}{\tau_e} - 1 \right) & \tau_c \geq \tau_e \\ 0 & \tau_c < \tau_e \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_d = \begin{cases} c w_s \left( 1 - \frac{\tau_c}{\tau_d} \right) & \tau_c \leq \tau_d \\ 0 & \tau_c > \tau_d \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $m_e$  为冲刷速率, 取  $5 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2/\text{s})$ ;  $\tau_e$  为临界底床冲刷切应力, 取  $0.2 \text{ Pa}$ ;  $\omega_s$  为沉积速率, 取  $0.5 \text{ mm}/\text{s}$ ;  $\tau_d$  为临界底床沉积切应力, 取  $0.1 \text{ Pa}$ ;  $\tau_c$  为底床切应力, 计算式为

$$\tau_c = \frac{\rho g u^2}{C_z^2} \quad (7)$$

忽略底床泥沙的固结作用, 计算潮滩滩面变形, 方程表示为

$$(1 - \varepsilon_p) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{\rho_s} (Q_d - Q_e) \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_p$  为床面的空隙率, 取  $0.4$ ;  $z$  为床面高程,  $\text{m}$ ;  $\rho_s$  为泥沙密度, 取  $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

## 1.2 植被生长模型

采用目前应用较广泛的两种植被生长模型, 分别研究植被-动力-地貌过程。Mudd 等<sup>[16, 22]</sup> 提出生物量与平均高潮位时滩面水深间呈线性关系<sup>[22]</sup>, 生物量为

$$B = \begin{cases} \frac{B_{\max}}{D_{\max} - D_{\min}} (D - D_{\min}) & D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \\ 0 & D < D_{\min} \text{ 或 } D > D_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $B$  为生物量;  $B_{\max}$  为最大生物量, 取  $2.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ ;  $D$  为平均高潮位时滩面水深  $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$  分别为植被生存的上下限水深。

Morris 等<sup>[18]</sup> 提出生物量与平均高潮位时滩面水深间呈抛物线关系, 生物量为

$$B = \begin{cases} B_{\max} (aD + bD^2 + c) & D_{\min} \leq D \leq D_{\max} \\ 0 & D < D_{\min} \text{ 或 } D > D_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

选取参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ , 满足式(10)中  $B$  值在  $D$  取值  $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$  时为 0 以及在抛物线对称轴处取最大值  $B_{\max}$ 。

式(9)和式(10)中,  $D_{\min}$  取值为  $0 \text{ m}$ ,  $D_{\max}$  为潮差的函数<sup>[23-24]</sup>:

$$D_{\max} = 0.7167T_r - 0.483 \quad (11)$$

式中:  $T_r$  为潮差,  $\text{m}$ 。

## 1.3 植被生长对动力-地貌过程的影响模型

植被的存在提高了滩面的抗冲刷能力, Mariotti 和 Fagherazzi<sup>[25]</sup> 提出了泥沙起动临界切应力与生物量之间的关系式, 表达式为

$$\tau_{\text{eveg}} = \tau_e (1 + K_{\text{veg}} B/B_{\max}) \quad (12)$$

式中:  $K_{\text{veg}}$  为决定植被影响程度的系数, 本研究取值为  $5.0$ <sup>[26]</sup>。

植被的存在还影响了泥沙沉积过程, Mariotti 和 Fagherazzi<sup>[25]</sup>、Matthewl 等<sup>[27]</sup> 提出了植被存在时泥沙沉积率的计算公式, 表达式为

$$Q = Q_s + Q_i \quad (13)$$

式中:  $Q_s$  为泥沙的自然沉积率;  $Q_i$  为被植被黏附所引起的泥沙沉积率, 本研究中把植株看成圆柱体,  $Q_i$  计算式如下:

$$Q_i = cud_s n_s h_s \xi \quad (14)$$

式中:  $d_s$  为植株的直径,  $\text{m}$ ;  $n_s$  为单位面积内的植株数量,  $\text{m}^{-2}$ ;  $h_s$  为植株的平均高度,  $\text{m}$ ;  $\xi$  为植株捕获泥沙颗粒的效率, Palmer 等<sup>[28]</sup> 根据实测资料提出  $\xi$  的经验计算公式为

$$\xi = 0.224 \left( \frac{ud_s}{\nu} \right)^{0.718} \left( \frac{d_p}{d_s} \right)^{2.08} \quad (15)$$

式中:  $d_p$  为泥沙颗粒的中值粒径,  $\text{m}$ ;  $\nu$  为水的运动黏滞系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。式(14)、式(15)中  $d_s$ 、 $n_s$ 、 $h_s$  为植被的参数, Mudd 等<sup>[16]</sup> 提出植被参数是生物量的函数, 关系式分别为:

$$d_s = 0.0006B^{0.3} \quad (16)$$

$$n_s = 250B^{0.3032} \quad (17)$$

$$h_s = 0.0609B^{0.1876} \quad (18)$$

植被的存在能增加额外的水流拖曳力,对水流流速产生影响。自然界中的植物存在多样性,本研究将植株简化成在水流作用下不发生倾倒和摆动的刚性圆柱体。目前考虑植被对水流作用的普遍做法<sup>[29]</sup>是把植被看成吸收平均动量的“汇”,在动量方程中增加阻力项 $F_D$ (式(2)),表达式为

$$F_D = \frac{1}{2}C_{DV}n_s d_s u^2 \quad (19)$$

式中: $C_{DV}$ 为植被对水流的拖曳系数,设为1.0; $u$ 为潮流经过植被区时的垂向平均流速,m/s。

滩面以上的植被产生有机物沉积,可直接改变床面高程。Randerson<sup>[30]</sup>提出有机物沉积导致滩面高度增加值与生物量之间的线性关系式为

$$\Delta z_g = k_b B / B_{\max} \Delta t \quad (20)$$

式中: $\Delta z_g$ 为有机物沉积滩面高度增加值,m; $k_b$ 为最大的沉积速率,取0.009 m/a。

#### 1.4 数值格式及控制条件

在对控制方程离散时,空间上采用一维交错网格布置变量,水深、含沙量布置在网格中心,速度矢量布置在网格边缘。采用有限差分法对控制方程进行求解,水动力控制方程对流项采用向前差分形式,扩散项采用中心差分形式<sup>[31]</sup>;含沙量场计算中,为使计算稳定,悬沙输移方程中对流项采用上风格式<sup>[32]</sup>。

初始时刻,流速、水位、含沙量都给定0。

闭边界上有

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = 0 \quad \frac{\partial c}{\partial n} = 0 \quad (21)$$

式中: $\vec{V}$ 为流速矢量; $\vec{n}$ 为闭边界法向矢量。

在海侧开边界,采用对称型边界条件,即边界处流速等于次一个网格点的流速;涨潮时开边界设置悬沙浓度常量,落潮时开边界悬沙浓度满足: $\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(uch)}{\partial x} = 0$ 。

## 2 潮滩动力-地貌过程模拟

初始潮滩剖面见图1。平均海平面为0 m,潮滩高程从-6 m到4 m,坡度为1/1 000,潮滩总宽度10 km。海边界设置潮差为4.0 m、周期为12 h的正弦潮;涨潮期间海边界的悬沙浓度设置为定值0.1 kg/m<sup>3</sup>。空间步长 $\Delta x = 50$  m,时间步长 $\Delta t = 20$  s。暂不考虑植被作用。

在剖面上选取监测点,潮下带监测点选取离海边界分别为0.5 km、3.0 km的A、B点,潮间带监测点选取离海边界分别为5.0 km、6.0 km的C、D点,E点为初始时刻盐沼前缘位置,潮间带上带监测点选取离海边界为6.8 km的F点。

### 2.1 演变初期水沙特征

根据监测点A、B、C和D的水沙过程,分析地貌演变初期的潮位、水深、流速(涨潮流为正、落潮流为负)以及含沙量过程,如图2所示。

自海向岸方向各区域水位变化过程基本一致,潮下带A、B滩面长期处于淹没状态,潮位过程呈现完整的正弦曲线型,潮间带C、D点因滩面高程的差异表现

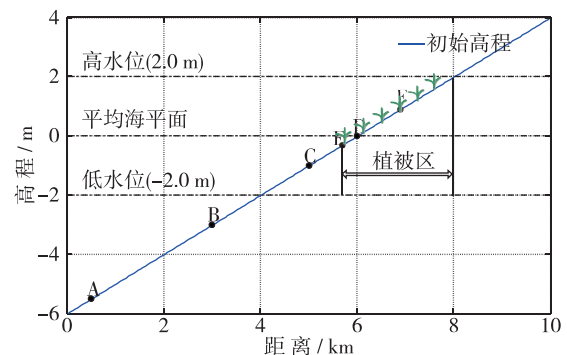


图1 初始潮滩剖面及监测点位布置

Fig. 1 Initial tidal flat cross-shore profile and locations of monitoring stations

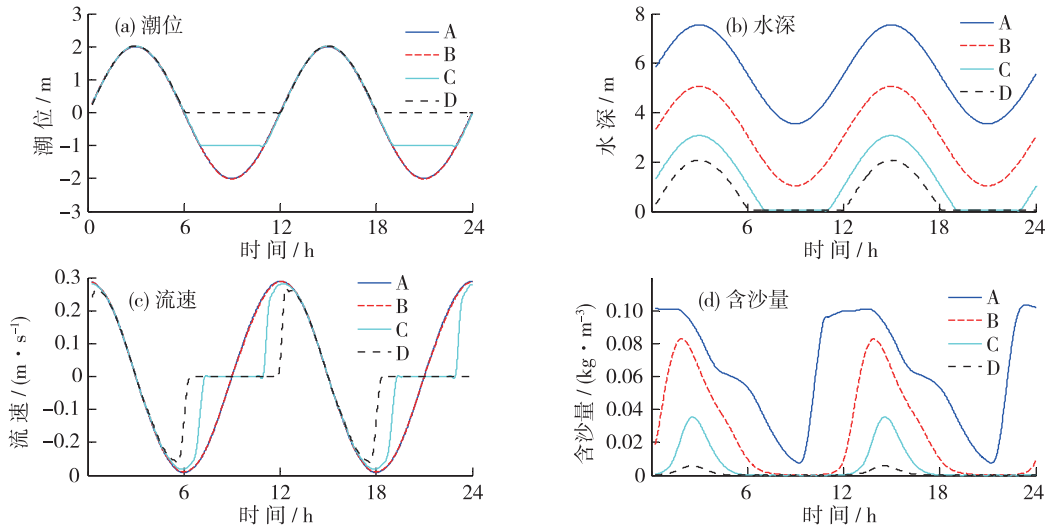


图 2 各监测点的潮位、水深、流速以及含沙量过程

Fig. 2 Tidal level, water depth, velocity and SSC at stations A, B, C and D

为不同的淹没与露滩情况；同一时刻，A、B、C、D点的水深逐渐减小。在演变初期，各点位涨落潮过程基本对称，A、B、C、D点的涨落急流速依次减小。

含沙量对潮流流速变化过程响应良好；涨潮时各监测点含沙量增加，自海向岸方向含沙量降低；落潮时各监测点含沙量减小，自海向岸方向含沙量降低；含沙量过程与流速过程之间存在一定的滞后性，最大含沙量的出现滞后于最大流速约 2 h，A 点最小含沙量的出现滞后于憩流约 0.5 h，反映出泥沙“起动滞后”和“沉降滞后”的基本特性。

### 2.2 中长期演变地貌特征

潮滩剖面床面高程演变过程如图 3 所示。在潮流作用下，在地貌演变初期潮滩的中下部淤积速率高于上部地区，随着演变的进行，剖面向海方向淤积，剖面高程淤长速率逐渐变慢；潮滩剖面呈凸形，凸点大致位于高水位线附近；演变至 16 年后，剖面形态并没有达到平衡态，但是淤积速率比初始淤积速率明显减小，此时整个剖面的平均坡度大概为  $6.9 \times 10^{-4}$ ，小于初始坡度 1:1 000。

### 2.3 潮差、泥沙供给对潮滩剖面的影响

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设置为  $0.1 \text{ kg/m}^3$ ，当外海潮差分别为 3 m、4 m 和 5 m 时，16 年后潮滩剖面床面高程如图 4(a) 所示。可以看出，剖面形状仍呈现上凸形，在高水位线附近趋向于水平。潮差为 3 m 时，潮滩宽度(高低潮位线之间的潮滩宽度)为 4.7 km，平均坡度为  $6.1 \times 10^{-4}$ ；潮差为 4 m 时，潮滩宽度为 4.9 km，平均坡度为  $7.9 \times 10^{-4}$ ；潮差为 5 m 时，潮滩宽度为 4.8 km，平均坡度为  $1.02 \times 10^{-3}$ 。这说明潮差越大，潮滩剖面的平均坡度越大；但是潮滩剖面宽度与潮差大小关系不大，与 Roberts 等<sup>[14]</sup>、Pritchard 等<sup>[15]</sup>的结论一致。

图 4(b)为模型在不同悬移质泥沙供给条件下计算 16 年后潮滩剖面形状对比。可以看出，对应 3 种边界垂线平均含沙量，演变 16 年后的潮滩宽度分别为 4.9 km、5.5 km、5.8 km，平均坡度分别为  $7.8 \times 10^{-4}$ 、 $7.1 \times 10^{-4}$ 、 $6.7 \times 10^{-4}$ 。这说明开边界供沙越多，潮滩宽度越大，潮滩剖面的坡度越小，这与 Roberts 等<sup>[14]</sup>的

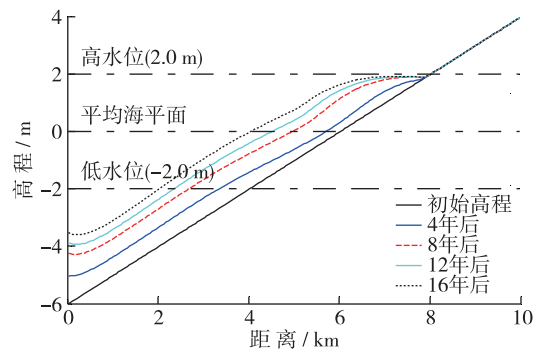


图 3 剖面高程演变过程

Fig. 3 Bed evolution of the cross-shore profile

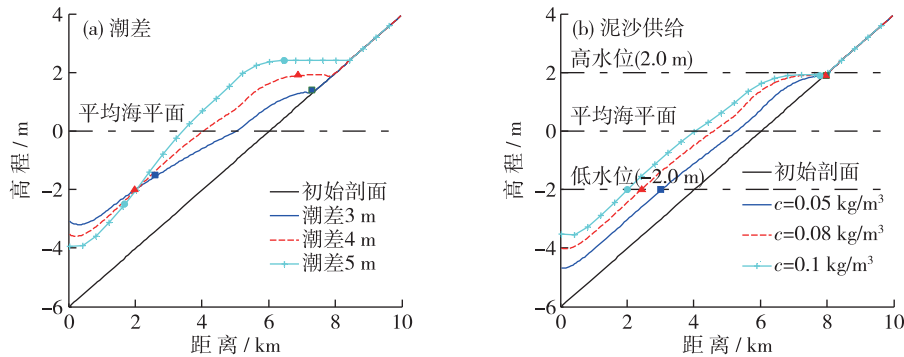


图4 不同潮差、泥沙供给时潮滩演变16年后剖面形态

Fig. 4 Tidal flat cross-shore profile after 16 years evolution with different tidal ranges and sediment supply

结论一致。

## 2.4 与前人模拟成果对比分析

由于概化模型很难采用实测资料进行模型验证，因此，本文选取经典的潮滩一维水沙数值模拟结果<sup>[13]</sup>与本研究结果进行对比分析。在模拟中，设置相同的剖面初始坡度为1:1000，平均海平面为3 m，潮差设置为4 m，涨潮期间水域开边界上的悬沙浓度设置为 $0.1 \text{ kg/m}^3$ ，临界底床冲刷切应力取 $0.2 \text{ Pa}$ ，临界底床沉积切应力取 $0.1 \text{ Pa}$ ，演变16年后一个潮周期内的沿程最大涨潮流速和最大落潮流速对比以及剖面高程演变对比结果如图5(a)、图5(b)所示。

如图5(a)所示，中长期演变之后沿程涨落潮流速呈现出明显的不对称性，涨急流速大于落急流速，本次模拟结果和前人结果在变化趋势上一致。但在潮滩整个计算区域，本次模拟的涨落急流速比前人模拟结果小，可能的原因是本次模拟采用的水底摩擦阻计算公式和干湿边界处理方法有所不同。

从图5(b)可以看出，本次模拟的剖面高程演变结果与前人研究成果在趋势上一致，潮滩剖面呈上凸形，凸点位置在高水位线附近，潮滩中下部淤积速率高于潮滩上部。相比前人研究成果，本研究在潮下带的淤积率相对偏低、潮间带的淤积率相对偏高。这与图5(a)中涨落急流速沿程急剧变化的位置有关，本研究中急变点在距离开边界约3.5 km处，对应的滩面高程大致在低水位线附近，自陆向海运输的泥沙在潮间带快速落淤，因此，本研究潮间带淤积率偏高，相应的落潮流带回潮下带的泥沙偏少，导致潮下带淤积率偏小。另外，前人研究中未提到采用的床面变形方程，这对剖面垂向变形计算差异的影响尚无法分析。

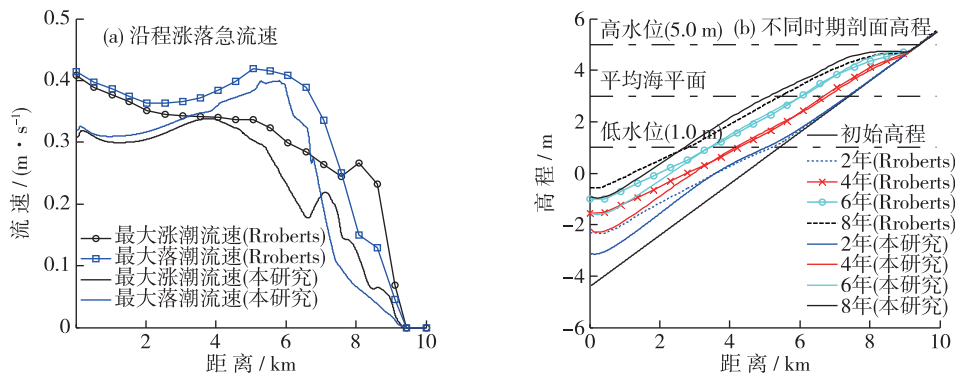
图5 本研究与前人研究成果对比<sup>[15]</sup>

Fig. 5 Comparison with previous research results



### 3 潮滩植被-动力-地貌过程耦合模拟

潮滩作为部分生物群的栖息场所, 为生物繁衍提供了良好的生长条件, 随着潮滩上生物群落规模的持续扩大, 生物作用对潮滩演变的影响持续增强<sup>[33]</sup>。根据不同的生物类别, 生物作用可以分为底栖动物作用和植被作用两类, 本研究主要考虑植被作用。

本文分别采用式(9)和式(10)的两种植被生物量计算方法(分别简称“植被生物量线性分布”和“植被生物量抛物线分布”)研究潮滩植被-动力-地貌过程。在外海潮差 4 m 时, 初始时刻植被生物量沿程分布如图 6 所示, 植被分布在距海边界 5.7~8.0 km 的区域, 生物量分别呈线性和抛物线分布。

#### 3.1 植被对水流的影响

为了研究植被对潮滩水流的作用, 本文分别计算潮滩有无植被时演变初期几个代表性区域的涨潮时最大流速值, 选择的区域分别为光滩区(C点)、盐沼边缘地带(E点)、植被区(D点)、潮间带上部(F点)。涨潮期间最大流速值以及植被对水流产生的阻力项计算结果见表 1, 表中涨潮最大流速是指演变初期一个潮周期内的涨急流速, 通过该值的变化情况分析植被的减流作用。

从表 1 可知, 在无植被和有植被分布时, 涨潮最大流速都是从海向陆依次减小。在光滩区, 植被存在对涨潮最大流速影响较小。生物量呈线性分布时, 植被存在时对盐沼边缘 E 点涨潮最大流速有削弱的作用, 削弱了 25.1%; 对植被区 D 点涨潮最大流速削弱了 25.3%; 对潮间带上部 F 点涨潮最大流速削弱了 28.6%。生物量呈抛物线分布时, 植被存在对盐沼边缘 E 点涨潮削弱了 20.7%; 对植被区 D 点涨潮最大流速削弱了 23.3%; 对潮间带上部 F 点涨潮最大流速削弱了 33.9%。由此可知, 在潮间带上部当抛物线分布的生物量多于线性分布时, 植被的减流效果更加明显, 而潮间带下部则相反。由表 1 阻力项  $F_D$  数据可知, 在潮间带上部 F 点处, 生物量呈抛物线分布产生的阻力项大于线性分布产生的阻力项, 在潮间带下部则相反。生物量分布形式不同会产生不同的减流效果和阻力, 因此, 选取合适的生物量分布形式对潮滩演变数值模拟很重要。

表 1 不同区域涨潮最大流速以及植被对水流产生的阻力项

Table 1 Maximum flood velocity and resistance of vegetation to flow in different locations of cross-shore profile

监测点	流速/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )			阻力项 $F_D$ /( $10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )		
	无植被	线性分布	抛物线分布	无植被	线性分布	抛物线分布
光滩区 C 点	27.9	27.2	27.9	0	0	0
盐沼边缘 E 点	25.1	18.8	19.9	0	3.9	1.4
植被区 D 点	24.9	18.6	19.1	0	3.7	2.7
潮间带上部 F 点	22.7	16.2	15.0	0	2.0	2.6

#### 3.2 植被-动力-地貌耦合过程

分别采用两种植被生物量分布形式, 模拟潮滩生物-动力-地貌过程。从初始状态至模拟 16 年, 主要时期潮滩剖面床面高程和对应的生物量分布如图 7 所示, 图中圆圈表示剖面沿程的生物量相对大小。与图 4 无植被时的潮滩剖面床面高程演变过程比较, 潮间带植被的存在能够改变潮滩剖面的形态。初始时刻, 植被区从距海边界 5.7 km 附近的位置开始出现, 此处剖面高程演变和生物量演变的过程中都有一个陡坎。分析陡坎出现的原因, 可能是涨潮流在盐沼边缘突遇植物的阻碍, 水体进入盐沼后流速减小, 携带泥沙的能力下降, 导致泥沙沉积; 植丛对底床的掩护又使滩面沉积物在落潮期不易再被掀起, 加速了滩面淤积, 光滩与植被区边缘滩面沉积高度不同, 出现了陡坎。

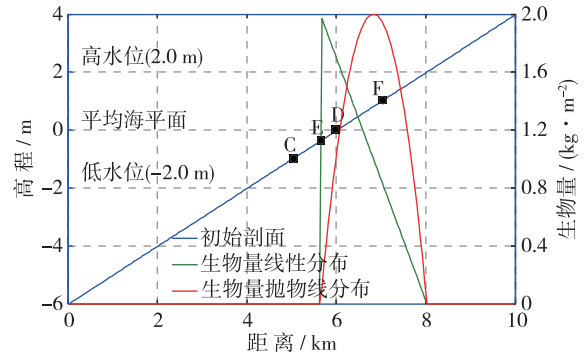


图 6 初始时刻生物量沿程分布

Fig. 6 Initial cross-shore distribution of biomass production

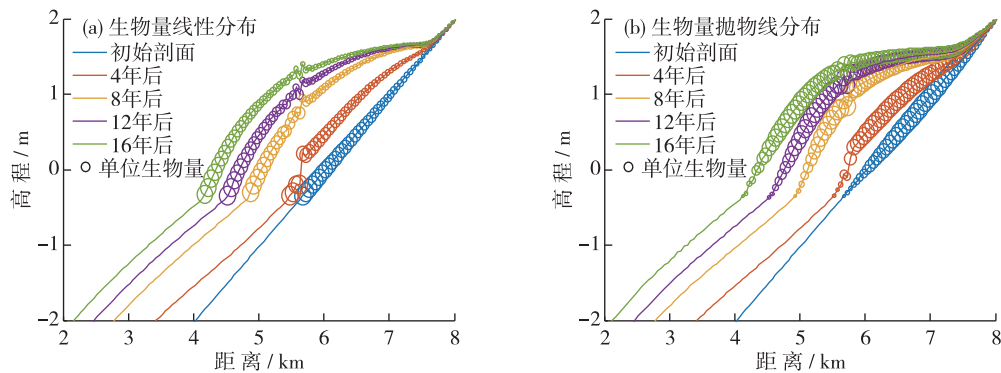


图7 生物量分布以及潮滩剖面演变过程

Fig. 7 Distribution of biomass production and bed evolution in the cross-shore profile

随着潮滩演变的继续,滩面在持续淤高,滩面与平均高潮位之间的距离减小,植被为了自身的生存空间开始向海外移,植被区一直向光滩扩展,即盐沼与光滩的交界处一直向外海移动。可以看出,采用两种生物量分布形式进行潮滩生物-动力-地貌模拟的过程中,地貌演变趋势都符合以上规律,但盐沼边缘出现的陡坎坡度有显著差异。当采用线性分布的生物量时,生物量最大值出现在盐沼边缘,则植被对此处的水动力、地貌过程影响大,因此,陡坎坡度较陡,如图7(a)所示;而采用抛物线分布的生物量时,生物量最大值并不出现在盐沼边缘,因此,陡坎的坡度较缓,如图7(b)所示。盐沼植被可以减流促淤,大量泥沙淤积提高了滩面高程,为植被生长提供了条件,体现出了植被与动力-地貌的互反馈机制。

不同的植被生物量分布形式,将直接影响到潮滩演变过程。图7(a)采用的植被生物量线性分布形式,其参数设置基于 Morris 等<sup>[17]</sup>收集的美国南卡罗来纳州北汉河口18年的植被密度、直径、高度等实测资料。Morris 等<sup>[18]</sup>指出,不同区域的代表性植被的生物量空间分布类型不同,故选择线性分布对于模型研究有很大的局限性;提出式(10)中植被生物量呈抛物线分布,其适用于不同类型植被同时存在以及种间竞争等作用的情况。图7(b)反映一种典型的盐沼植被——互花米草初始时刻生物量呈抛物线分布,随着潮间带区域剖面演变,对应的生物量空间分布情况。因此,要使模型具有广泛的适用性,就需要收集其他区域、其他植被类型的密度、直径等数据,分析植被的空间分布情况,选择适用于本区域和本植被类型的生物量分布形式。

## 4 结 论

(1) 在不考虑植被作用下,模拟得到了中长期演变后的上凸形剖面特征;泥沙供给越充分,潮滩宽度越大,潮滩坡度越缓;潮差大小对潮滩宽度无影响。这与前人研究成果定性吻合。

(2) 不同的植被生物量分布形式,其对潮滩水动力的影响程度不同。在潮间带上部,生物量抛物线分布时的减流效果强于生物量线性分布形式;而在潮间带下部则相反。

(3) 考虑潮滩植被-潮动力-地貌耦合过程,模拟得到了盐沼和光滩之间的陡坎,且随着滩面的逐步淤高,陡坎逐步向海移动。

不同的植被生物量分布形式,直接影响到潮滩演变过程。因此,今后需要收集其他区域、其他植被类型的密度、直径等数据,分析植被的空间分布情况,选择适用于本区域和本植被类型的生物量分布形式。

### 参考文献:

- [1] 龚政,靳闯,张长宽,等. 江苏淤泥质潮滩剖面演变现场观测[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 880-887. (GONG Z, JIN C, ZHANG C K, et al. Surface elevation variation of the Jiangsu mudflats: field observation[J]. Advances in Water Science, 2014, 25



- (6): 880-887. (in Chinese))
- [2] D'ALPAOS A, TOFFOLON M, CAMPOREALE C. Ecogeomorphological feedbacks of water fluxes, sediment transport and vegetation dynamics in rivers and estuaries[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 93: 151-155.
- [3] COCO G, ZHOU Z, van MAANEN B, et al. Morphodynamics of tidal networks: advances and challenges[J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 1-16.
- [4] FRIEDRICHS C T, POINT G. Tidal flat morphodynamics: a synthesis[M]. Waltham: Academic Press, 2011.
- [5] 时钟, 陈吉余, 虞志英. 中国淤泥质潮滩沉积研究的进展[J]. *地球科学进展*, 1996(6): 37-44. (SHI Z, CHEN J Y, YU Z Y. Sedimentation on the intertidal mudflat in China: an overview[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1996(6): 37-44. (in Chinese))
- [6] BASSOULLET P H, HIR P L, GOULEAU D, et al. Sediment transport over an intertidal mudflat: field investigations and estimation of fluxes within the "Baie de Marennes-Oleron" (France)[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(12/13): 1635-1653.
- [7] 陈君, 王义刚, 蔡辉. 江苏沿海潮滩剖面特征研究[J]. *海洋工程*, 2010(4): 90-96. (CHEN J, WANG Y G, CAI H. Profile characteristics study of the Jiangsu Coast[J]. *Ocean Engineering*, 2010(4): 90-96. (in Chinese))
- [8] 王艳红, 张忍顺, 吴德安, 等. 淤泥质海岸形态的演变及形成机制[J]. *海洋工程*, 2003, 21(2): 65-70. (WANG Y H, ZHANG R S, WU D A, et al. Development and mechanism of transitional coast[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 21(2): 65-70. (in Chinese))
- [9] 袁代亮. 潮滩植被水沙分布特性试验研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013. (YUAN D L. Experiments of flow and suspended sediment in tidal vegetation[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013. (in Chinese))
- [10] NEUMEIER U, AMOS C L. The influence of vegetation on turbulence and flow velocities in European salt-marshes[J]. *Sedimentology*, 2010, 53(2): 259-277.
- [11] 杨世伦, 时钟, 赵庆英. 长江口潮沼植物对动力沉积过程的影响[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 75-80. (YANG S L, SHI Z, ZHAO Q Y. Influence of tidal marsh vegetations on hydrodynamics and sedimentation in the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 75-80. (in Chinese))
- [12] CHRISTIANSEN T, WIBERG P L, MILLIGAN T G. Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2000, 50(3): 315-331.
- [13] 拾兵, 陈举, 张芝永. 植物根系对河道滩坡抗冲性影响的试验[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(2): 50-53. (SHI B, CHEN J, ZHANG Z Y. Experimental study of influence of plant root system on erosion resistance of flood plain of the vegetated river[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(2): 50-53. (in Chinese))
- [14] ROBERTS W, HIR P L, WHITEHOUSE R J S. 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(10/11): 1079-1097.
- [15] PRITCHARD D, HOGG A J, ROBERTS W. Morphological modelling of intertidal mudflats: the role of cross-shore tidal currents[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(11/12/13): 1887-1895.
- [16] MUDD S M, FAGHERAZZI S, MORRIS J T, et al. Flow, sedimentation, and biomass production on a vegetated salt marsh in South Carolina: toward a predictive model of marsh morphologic and ecologic evolution.[J]. *Ecogeomorphology of Tidal Marshes*, 2004, 59: 165-188.
- [17] MORRIS J T, SUNDARESHWAR P V, NIETCH C T, et al. Responses of coastal wetlands to rising sea level[J]. *Ecology*, 2002, 83(10): 2869-2877.
- [18] MORRIS J T, TORRES R, FAGHERAZZI S, et al. Competition among marsh macrophytes by means of geomorphological displacement in the intertidal zone[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*. 2006, 69(3/4): 395-402.
- [19] ZHOU Z, YE Q, COCO G. A one-dimensional biomorphodynamic model of tidal flats: sediment sorting, marsh distribution, and carbon accumulation under sea level rise[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 93: 288-302.
- [20] KRONE R B. Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling process[R]//Berkley: University California Hydraulic Engineering & Sanitary Engineering Resources, Lab, 1962: 110.
- [21] PARTHENIADES E A. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. *World Journal of Biological Psychiatry the Official Journal of the World Federation of Societies of Biological Psychiatry*, 1965, 2(4): 190-192.
- [22] MUDD S M, D'ALPAOS A, MORRIS J T. How does vegetation affect sedimentation on tidal marshes? Investigating particle capture and hydrodynamic controls on biologically mediated sedimentation[J]. *Journal of Geophysical Research*. 2010, 115(F3): 127-137.

- [23] MCKEE K L, PATRICK W H. The relationship of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) to tidal datums: a review[J]. *Estuaries*, 1988, 11(3): 143-151.
- [24] KIRWAN M L, GUNTENSPERGEN G R. Influence of tidal range on the stability of coastal marshland[J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2010, 115(F2): 145-156.
- [25] MARIOTTI G, FAGHERAZZI S. A numerical model for the coupled long-term evolution of salt marshes and tidal flats[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(F1): F1004
- [26] HIR P L, MONBET Y, ORVAIN F. Sediment erodability in sediment transport modelling: can we account for biota effects? [J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(8): 1116-1142.
- [27] MATTHEWL K, GLENNR G, JAMEST M. Latitudinal trends in *Spartina alterniflora* productivity and the response of coastal marshes to global change[J]. *Global Change Biology*, 2010, 15(8): 1982-1989.
- [28] PALMER M R, NEPF H M, ACKERMAN J D. Observations of particle capture on a cylindrical collector: implications for particle accumulation and removal in aquatic systems[J]. *Limnology & Oceanography*, 2004, 49(1): 76-85.
- [29] BAPTIST M J. Modelling floodplain biogeomorphology[D]. Delft: Delft University of Technology, 2005.
- [30] RANDERSON P F. A simulation model of salt-marsh development and plant ecology[J]. *Estuarine and Coastal Land Reclamation and Water Storage*, 1979: 48-67.
- [31] 谢鉴衡, 魏良琰. 河流泥沙数学模型的回顾与展望[J]. *泥沙研究*, 1987(3): 3-15. (XIE J H, WEI L Y. The review and prospect of river sediment mathematical models[J]. *Journal of Sediment Research*, 1987(3): 3-15. (in Chinese))
- [32] 胡华锋, 许足怀, 张华庆. 漳卫新河闸下淤积一维数学模型研究及应用[J]. *水道港口*, 2005, 26(3): 149-153. (HU H F, XU Z H, ZHANG H Q. Study on 1-D sediment silting model of downstream reach of barrage in Zhangweixin River and its application[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2005, 26(3): 149-153. (in Chinese))
- [33] 王宁舸, 龚政, 张长宽, 等. 淤泥质潮滩地貌演变中的水动力及生物过程研究进展[J]. *海洋工程*, 2016(1): 104-116. (WANG N G, GONG Z, ZHANG C K, et al. Hydrodynamic and biological processes that control the morphodynamic evolution of mudflats: an overview[J]. *Ocean Engineering*, 2016(1): 104-116. (in Chinese))

## A numerical model for the cross-shore profile evolution of tidal flats based on vegetation growth and tidal processes\*

GONG Zheng<sup>1,2</sup>, BAI Xuebing<sup>1</sup>, JIN Chuang<sup>3</sup>, ZHAO Kun<sup>1</sup>, ZHOU Zeng<sup>2</sup>, ZHANG Changkuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. School of Environment, University of Auckland, Auckland 92019 New Zealand)

**Abstract:** To explore the evolution mechanism of tidal flats under the influence of multiple factors, a cross-shore profile numerical model is developed based on vegetation growth and tidal processes. For a bare flat driven by tides, a general convex cross-shore profile is obtained after medium-to long-term simulation. Sediment supply determines the width of mudflat, and a higher sediment supply leads to a wider and gentler mudflat. For marsh flats, different spatial distribution of biomass affects tidal hydrodynamics differently. At the upper intertidal flat, the flow reduction effect with parabolic distribution of biomass production is stronger than that with linear distribution, and it is converse at the lower intertidal flat. A scarp is simulated at the edge between the bare flat and marsh flat, and it moves seaward as the sediment deposition on intertidal flats.

**Key words:** tidal flat; morphological evolution; biophysical effects of vegetation; marsh-edge; numerical simulation

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51620105005) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. 2017B41614).