

# 沙坝地形上沿岸流不稳定运动模式变化特性

任春平<sup>1,2</sup>, 白玉川<sup>1</sup>

(1. 天津大学水利工程安全与仿真国家重点实验室, 天津 300072; 2. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为研究沙坝地形上沿岸流不稳定运动特征模式变化特性, 建立了考虑底摩擦影响的不稳定模型, 并用该模型计算了两种沙坝地形(坡度分别为 1:40 和 1:100)上的不稳定特征模式, 这些模式内容包括不稳定运动波长、传播速度、不稳定增长率和扰动速度场。将这些结果与忽略底摩擦计算结果进行了比较, 分析了底摩擦对不稳定特征模式的影响。上述研究表明沙坝地形上不稳定运动传播速度约为时均沿岸流最大值的 0.71~0.79; 1:40 沙坝地形上产生不稳定运动所用的时间比 1:100 地形上更短; 底部摩擦可以很大程度上抑制沿岸流不稳定运动的产生; 一般观测到的(准)韵律形、新月形沙坝都在后剪切区(紧邻时均沿岸流最大值向海方向区域)产生; 不稳定运动在沙坝处运动最强, 并且坡度越缓, 不稳定运动沿岸方向波长越长。

**关键词:** 沙坝; 沿岸流; 不稳定运动; 双峰速度剖面; 不稳定模式

**中图分类号:** P731.21      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2016)03-0403-09

近岸沙坝的存在减少了岸滩的侵蚀, 对岸滩保护具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。沿岸流不稳定运动是导致近岸沙坝常常以韵律形或准韵律形呈现的主要影响因素之一, 开展沙坝地形上沿岸流不稳定运动特征模式的研究, 对于研究沙坝在沿岸方向空间尺度、特征的发展变化、岸滩养护等有比较重要的意义<sup>[3-5]</sup>。

早期研究主要集中在建立沿岸流不稳定运动特征模型。Bowen 和 Holman<sup>[6]</sup>指出沿岸流不稳定运动是由于沿岸流在垂直岸线方向的速度梯度引起, 基于此建立了忽略底摩擦的线性不稳定特征模式模型。Dodd<sup>[7]</sup>、Allen 等<sup>[8]</sup>建立了考虑底摩擦的不稳定运动特征模型。这些不稳定模型是一个粗略的模型, 没有考虑泥沙的输移、三维特征等, 仅仅用于平面二维沿岸流不稳定运动沿岸方向尺度、特征模式的初步研究<sup>[5]</sup>。在这些不稳定特征模式基础上, 可以进一步研究新月形、(准)韵律沙坝在沿岸方向的空间变化尺度<sup>[9]</sup>。其中已得到基本认同的是沙坝在沿岸方向的特征波长随着波浪入射角的增大而增大<sup>[10]</sup>。Tiessen 等<sup>[11-12]</sup>利用线性不稳定模型预测了新月形沙坝特征模式的演化, 指出风暴潮过后新月形沙坝在沿岸方向的空间尺度为 500~800 m。国内许多学者主要对沙坝剖面的形成及发展过程进行了数值及试验研究<sup>[1, 13-14]</sup>, 这些研究更多关注的是沙坝剖面的形成及其变化, 对于沙坝沿岸方向特征模式发展演化特性研究相对较少。

本文基于 Allen 等<sup>[8]</sup>建立的考虑底摩擦的不稳定特征模型, 研究了波浪斜向入射时不同波况以及不同坡度沙坝地形上产生的沿岸流不稳定运动的特征模式变化特性。

## 1 考虑底摩擦的沿岸流不稳定运动特征模型

本文拟建立的沿岸流不稳定运动特征模型, 是以水平二维浅水方程为基础, 考虑底摩擦的影响, 将速度场分解为时均量和摄动量, 引入流函数, 做“刚盖”假定, 并且忽略了与侧混有关的非线性项。

**收稿日期:** 2015-11-16; **网络出版时间:** 2016-04-28

**网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160428.2235.028.html>

**基金项目:** 水利工程安全与仿真国家重点实验室开放基金资助项目(HESS-1406); 中国博士后科学基金资助项目(2013M541179)

**作者简介:** 任春平(1978—), 男, 山西祁县人, 副教授, 博士, 主要从事河口、海岸水动力学研究。

E-mail: chunpingren@163.com

### 1.1 控制方程

在‘刚盖’假定下, 即  $\partial\eta/\partial t=0$ , 波浪周期平均和水深平均后形成的包含波浪驱动力项、侧向掺混项以及底摩擦项的水平二维沿岸流方程:

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{Qu}{h} - R^{-1} \nabla^4 u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{Q[v-V]}{h} - R^{-1} \nabla^4 v \quad (3)$$

式中:  $x$  和  $y$  分别为垂直海岸方向和沿岸方向, 取  $x$  轴向海为正, 原点取在岸线上;  $\eta$  为波面升高,  $h$  为静水水深,  $d=h+\eta$  为总水深;  $V$  为时均沿岸流;  $u$  和  $v$  分别为  $x$  和  $y$  方向的波浪平均和水深平均的水流速度。

$$Q = \frac{\mu L}{V_M h_0} \quad (4)$$

$$R^{-1} = \frac{\nu}{V_M L^3} \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为底摩擦系数;  $V_M$  为时均沿岸流最大值;  $L$  为从岸线到  $V_M$  的距离;  $h_0$  为  $V_M$  处水深;  $\nu$  为双扩散系数。一般来说,  $\nu \approx 10 \text{ m}^2/\text{s}$ , 当  $V_M \approx 1 \text{ m/s}$  时,  $L \approx 90 \text{ m}$ , 因此, 由式(5)可以看出  $R^{-1} \ll 1$ , 所以本文讨论中不考虑侧混的影响<sup>[8]</sup>。

假设流场内水平流速由扰动速度  $\vec{u}'(x, y, t) = [u'(x, y, t), v'(x, y, t)]$  和稳定的沿岸流  $V(x)$  组成,  $v'$  和  $u'$  分别为沿岸方向( $y$  方向)和垂直岸方向( $x$  方向)扰动速度, 即  $\vec{u}(x, y, t) = [u'(x, y, t), V(x) + v'(x, y, t)]$ , 将其代入式(2)和式(3)中, 忽略非线性项  $u' \frac{\partial u'}{\partial x}$ ,  $v' \frac{\partial u'}{\partial y}$ ,  $-R^{-1} \nabla^4 u$  等, 又因为  $V$  是稳定的,

地形是平直坡, 所以  $V$  在沿岸方向不变化, 也就是  $\frac{\partial V}{\partial y} = 0$ , 所以有

$$u'_t + Vu'_y = -g\eta_x - \frac{Qu'}{h} \quad (6)$$

$$v'_t + u'V_x + Vv'_y = -g\eta_y - \frac{Qv'}{h} \quad (7)$$

由方程(1)可知, 可以引入以下流函数  $\psi$ :

$$\psi_x = hv' \quad (8)$$

$$\psi_y = -hu' \quad (9)$$

将式(6)及式(7)分别对  $y$  和  $x$  进行偏导得

$$u'_{ty} + (Vu'_y)_y = -g\eta_{xy} - \left(\frac{Qu'}{h}\right)_y \quad (10)$$

$$v'_{tx} + (u'V_x)_x + (Vv'_y)_x = -g\eta_{yx} - \left(\frac{Qv'}{h}\right)_x \quad (11)$$

将式(10)和式(11)两边相减, 消除  $\eta$  得

$$u'_{ty} + Vu'_{yy} - v'_{tx} - u'V_{xx} - V_x v'_y - Vv'_{yx} = \left(\frac{Qv'}{h}\right)_x - \left(\frac{Qu'}{h}\right)_y \quad (12)$$

并通过式(8)和式(9)将  $u'$  和  $v'$  用  $\psi$  表示, 代入式(12)得

$$\left(\frac{\psi_y}{h}\right)_{ty} + V\left(\frac{\psi_y}{h}\right)_{yy} + \left(\frac{\psi_x}{h}\right)_{tx} - \left(\frac{\psi_y}{h}\right)_x V_x - \left(\frac{\psi_y}{h}\right) V_{xx} + V_x \left(\frac{\psi_x}{h}\right)_y + V\left(\frac{\psi_x}{h}\right)_{yx} = \left(\frac{Q\psi_x}{h^2}\right)_x + \left(\frac{Q\psi_y}{h^2}\right)_y \quad (13)$$

方程(13)为考虑底摩擦  $\mu$  (包含在  $Q$  中) 计算沿岸流不稳定的控制方程。扰动的流函数假定为下式:

$$\psi(x, y, t) = \varphi(x) \exp[i(ky - \omega t)] = \varphi(x) \exp(\omega_i t) \exp[i(ky - \omega_r t)] \quad (14)$$

式中:  $k$  为不稳定的波数;  $\omega = \omega_r + i\omega_i$ ,  $\omega_i$  为沿岸流不稳定运动的增长率,  $\omega_r$  为沿岸流波动的圆频率;  $\varphi(x)$  为流函数的幅值; 下标  $i$  表示虚部; 下标  $r$  表示实部。将式(14)代入式(13)得<sup>[8]</sup>

$$\left( V - c - i \frac{\mu}{kh} \right) \left( \varphi_{xx} - \frac{h_x}{h} \varphi_x - k^2 \varphi \right) - h \left( \frac{V_x}{h} \right)_x \varphi + i \frac{\mu}{kh^2} h_x \varphi_x = 0 \quad (15)$$

其中  $c = \omega/k = c_r + ic_i$ , 而  $c_r = \omega_r/k$  为沿岸流不稳定传播速度。式(15)即考虑底摩擦影响的沿岸流不稳定运动特征方程。本文利用式(15)计算沙坝地形上的沿岸流不稳定的增长率与传播速度。

### 1.2 边界条件

上述控制方程(15)的边界条件为

$$\varphi = 0 \quad (x = 0, x \rightarrow \infty) \quad (16)$$

沿岸流不稳定的增长率  $\omega_i$  和传播速度  $c_r$  利用公式:  $\omega = \omega_r + i\omega_i = kc_r + ikc_i$  求得, 其中特征值  $c = c_r + ic_i$ 。

### 1.3 数值求解

将流场沿垂直岸线方向划分成  $N$  个等间距网格, 网格间距为  $\Delta x$ , 网格节点上  $\varphi$  记为  $\varphi_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。利用二阶中心差分对式(15)进行离散。

将  $\varphi_{xx} = \frac{\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}}{\Delta x^2}$ ,  $\varphi_x = \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}}{2\Delta x}$  代入式(15)并整理得

$$\begin{aligned} & \varphi_{i-1} \left( \frac{V}{\Delta x^2} + \frac{Vh_x}{2h\Delta x} - i \frac{\mu}{kh\Delta x^2} - i \frac{\mu h_x}{kh^2\Delta x} \right) + \varphi_i \left( \frac{-2V}{\Delta x^2} - k^2 V - V_{xx} + \frac{V_x h_x}{h} + i \frac{2\mu}{kh\Delta x^2} + i \frac{\mu k}{h} \right) + \\ & \varphi_{i+1} \left( \frac{V}{\Delta x^2} - \frac{Vh_x}{2h\Delta x} - i \frac{\mu}{kh\Delta x^2} + i \frac{\mu h_x}{kh^2\Delta x} \right) = \\ & c \left\{ \varphi_{i-1} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{h_x}{2h\Delta x} \right) + \varphi_i \left( \frac{-2}{\Delta x^2} - k^2 \right) + \varphi_{i+1} \left( \frac{1}{\Delta x^2} - \frac{h_x}{2h\Delta x} \right) \right\} \quad i = 2, 3, 4, \dots, N-1 \quad (17) \end{aligned}$$

得到如下矩阵方程:

$$\mathbf{A} \{ \varphi \} = c \mathbf{B} \{ \varphi \} \quad (18)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为复数矩阵;  $\mathbf{B}$  为实数矩阵; 由于特征值  $c$  为复数, 所以离散后的方程, 是广义特征值问题。求得式(18)的特征值及特征向量后, 就可得到不稳定运动的增长率及传播速度<sup>[15]</sup>。

上述矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  都为  $N$  行  $N$  列的矩阵,  $\{ \varphi \}$  表示  $N$  维特征向量。给定边界条件式(16)、 $h(x)$  和  $V(x)$ , 每给定一个  $k$ , 可以用方程(18)求出  $N$  个特征值  $c$ 。假定最大增长率控制着不稳定运动, 在这些特征值中选取虚部不为零的特征值, 然后选虚部最大值作为最后的结果<sup>[15]</sup>。这样就得出了不同波数情况下所对应的增长模式。

Allen 等<sup>[8]</sup>利用式(15)计算了平直斜坡上的沿岸流不稳定特征模式, 使用的速度分布  $V(x) = c_0 x^2 \exp \left[ - \left( \frac{x}{\alpha} \right)^n \right]$ ,  $n = 3$  或  $6$ , 假定  $V$  的最大值在  $x = 90$  m 处得到, 且其最大值为  $1$  m/s, 因此, 由  $x = 90$  m,  $\frac{dV}{dx} = 0$ , 可以推导出  $2x + x^2 \left[ - \left( \frac{x}{\alpha} \right)^{n-1} \right]_{x=90} = 0$ , 当给定  $n$  就可求出  $\alpha$ , 然后利用求出的  $\alpha$  和  $V(90) = 1$  m/s, 就可求出参数  $c_0$ 。这样就可以得到垂直岸线方向的速度分布  $V$ , 图 1(a) 给出了  $n = 3$  和  $n = 6$  的速度分布, 图 1(b) 给出了这两种速度分布时所用的地形, 图 1(c)、图 1(d)、图 1(e) 和图 1(f) 分别给出了 Allen 和本文计算的增长率  $kc_i$  以及传播速度  $c_r$ 。从比较结果来看, 本文结果与 Allen 的吻合较好。

用计算出的最大增长率, 可以确定不稳定模式的波数  $k_0$ 、增长率以及对应的传播速度  $c_r$ , 再进一步得到不稳定的波动周期  $T = \frac{2\pi}{k_0 c_r}$ , 波长  $L = \frac{2\pi}{k_0}$ 。由  $\varphi(x) = \varphi_r + i\varphi_i$ ,  $\omega = ck = \omega_{re} + i\omega_i$ , 所以流函数  $\psi(x, y, t)$  为

$$\begin{aligned} \psi(x, y, t) &= \text{Re}\{\varphi(x) \exp(i(ky - \omega t))\} = \\ &= \exp(\omega_i t) \text{Re}\{\varphi_r \cos(ky - \omega_r t) - \varphi_i \sin(ky - \omega_r t) + i[\varphi_i \cos(ky - \omega_r t) + \varphi_r \sin(ky - \omega_r t)]\} = \\ &= \exp(\omega_i t) [\varphi_r \cos(ky - \omega_r t) - \varphi_i \sin(ky - \omega_r t)] \end{aligned} \quad (19)$$

其中 Re 代表实部。因此，由不稳定运动引起的扰动速度：

$$\begin{aligned} u' &= -\frac{\psi_y}{h} = -\frac{\exp(\omega_i t)}{h} [-k\varphi_r \sin(ky - \omega_r t) - k\varphi_i \cos(ky - \omega_r t)] = \\ &= \frac{k \exp(\omega_i t)}{h} [\varphi_r \sin(ky - \omega_r t) + \varphi_i \cos(ky - \omega_r t)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$v' = \frac{\psi_x}{h} = \frac{\exp(\omega_i t)}{h} \left[ \frac{\partial \varphi_r}{\partial x} \cos(ky - \omega_r t) - \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \sin(ky - \omega_r t) \right] \quad (21)$$

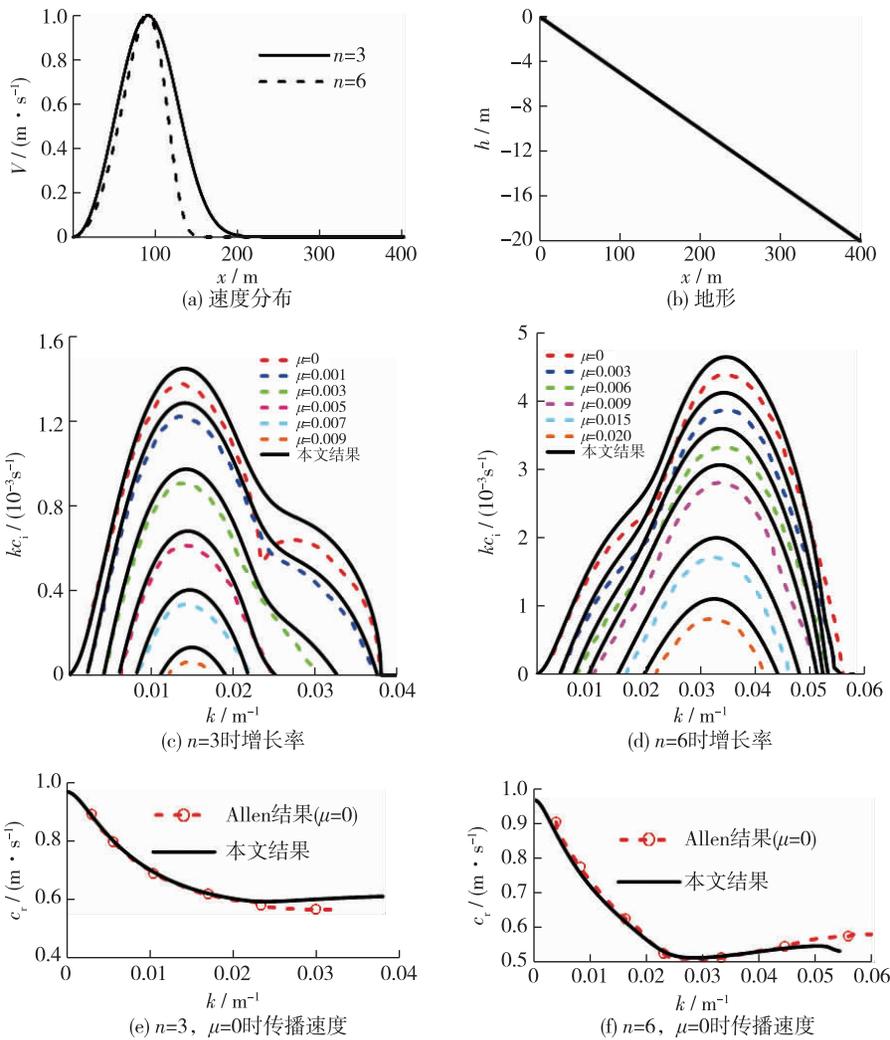


图 1 本文计算结果与 Allen 计算结果比较

Fig. 1 Comparison between Allen's and the present

上述推导过程中忽略与侧混相关的非线性项，假设扰动速度的幅值随时间按指数增长，因此，随着时间的推移，非线性作用会变大，会使得上述模型不适用。所以，本文只给出初始时刻对应的增长模式。计算不稳定扰动速度场的目的是了解沿岸流不稳定在沿岸及垂直岸线方向的速度分布，因此，将计算过程中的流函数  $\varphi$  统一作出了归一化处理，使得扰动速度最大值与平均沿岸流最大值的 1/6 (对于 1:40 坡) 和 1/10 (对于 1:100 坡) 设置为相等<sup>[16]</sup>。

## 2 沙坝地形上沿岸流不稳定增长模式

### 2.1 沿岸流不稳定运动的地形及速度剖面

沙坝海岸沿岸流速度剖面一般都会出现双峰值剖面特征<sup>[17]</sup>。图 2 为 Wang 和 Zou<sup>[17]</sup>给出的两种波况(见表 1)下时均沿岸流分布。由图 2 看出沙坝地形上时均沿岸流速度剖面呈现双峰特征。图 2 还给出了 Wang 和 Zou<sup>[17]</sup>实验中采用 1:40 和

1:100 沙坝地形  $h(x) = \frac{\{x - (x_0/2)\exp[-30(x-x_0)^2/x_0^2]\}}{L'}$ ,  $x_0$  为

破波带宽度,  $L'$  为坡度控制参数, 对于这两种坡度, 破波带宽度  $x_0$  分别取 5 m 和 7 m,  $L'$  分别取 40 和 100 (对应两种坡度), 网格间距为  $\Delta x = 0.2$  m。

表 1 入射波况参数

Table 1 Incident wave parameters

波况	坡度	$d/m$	$T/s$	$H_0/m$
Test 1	1:40	0.45	1	0.07
Test 7	1:100	0.18	1	0.05

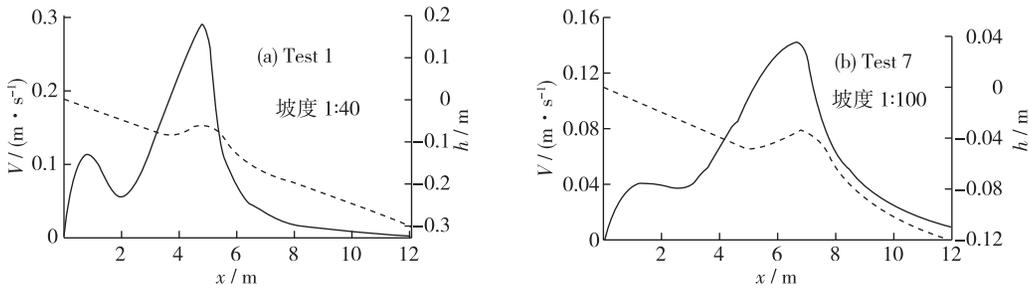


图 2 文献[17]中 Test 1 和 Test 7 时均沿岸流实验拟合结果(实线)及对应的地形(虚线)

Fig. 2 Fitted mean longshore currents (solid line) and topography (dashed line) from the reference [17]

### 2.2 底摩擦系数 $\mu$

Wang 和 Zou<sup>[17]</sup>底部剪切应力用下式计算:

$$\tau_{bx} = \frac{4}{\pi} \rho f_w U_m U \tag{22}$$

$$\tau_{by} = \frac{2}{\pi} \rho f_w U_m V \tag{23}$$

式中:  $f_w$  为底部摩擦系数;  $U_m = \frac{A\omega}{\sinh(kh)}$ ,  $A$ 、 $\omega$ 、 $k$  和  $h$  分别为入射波波幅、频率、波数和静水深。对应这两种波况, Wang 和 Zou<sup>[17]</sup>取  $f_w = 0.015$ , 计算结果与实验结果吻合较好。文献[17]所定义的  $f_w$  与本文中所定义的  $\mu$  不同, 本文采用的摩擦系数  $\mu$  (式(3))与  $f_w$  有如下关系:

$$\tau_{by} = \frac{2}{\pi} \rho f_w U_m V = \rho \mu V \tag{24}$$

所以有

$$\mu = \frac{2}{\pi} f_w U_m \tag{25}$$

把这两种波况对应的参数带入  $U_m$  及式(25), 得到  $\mu$  分别为 0.001 2 和 0.001 6。对于 Test 7 (1:100 沙坝地形), 当  $\mu > 0.000 78$  时就完全抑制了不稳定运动的产生, 也就是不存在增长模式, 所以对于 Test 7, 取  $\mu = 0.000 78$ , 这说明底摩擦对沿岸流不稳定运动的重要影响, 反过来, 如果破波带内床底部摩擦系数较大的话, 则可能减弱沿岸流不稳定运动的强度。

### 2.3 沙坝地形上沿岸流不稳定增长模式

计算不稳定模式时波数间隔  $\Delta k = 0.01$ 。图 3 给出了 Test 1 波况下考虑与不考虑底摩擦的增长率、传播速

度。由图3(a)可以看出,当 $\mu=0$ 时增长率曲线在 $k=0.45\text{ m}^{-1}$ 和 $k=1.69\text{ m}^{-1}$ 时出现了峰值,即出现了多模式情况,这说明 $V_M$ 到岸线方向速度分布以及 $V_M$ 向海方向速度分布都能激发出不稳定模式,也就是前剪切和后剪切模式<sup>[18-19]</sup>,但对于 $\mu=0.0012$ 时,增长率曲线只在 $k=1.69\text{ m}^{-1}$ 处有峰值,说明只有后剪切不稳定模式出现,也就是 $V_M$ 到岸线方向的速度分布已经诱导出不稳定运动,并且其最大峰值比 $\mu=0$ 时减小约 $16\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,说明沿岸流不稳定运动产生后,最大增长率与 $\mu=0$ 时相比减少了23.9%( $0.016/0.067$ ),说明增大底部摩擦可以使后剪切不稳定产生滞后。由此可见,增加破波带内床底部的摩擦,可以有效减小不稳定的出现,进而有效地防护海滩、保护海岸。由图4(a)、图5(a)看出,Test 7情况下不稳定模式增长率也具有上述特性,底部摩擦可以有效抑制不稳定运动的产生。实际情况下,沿岸流都会受底部摩擦影响,没被底部摩擦抑制的模式就是后剪切引起的不稳定模式,也就是紧邻 $V_M$ 向海一侧的沿岸流速度分布引起的不稳定模式,因此,一般观测到的(准)韵律形、新月形沙坝一般都在该区域产生,这与Ribas等<sup>[9]</sup>给出的实际观测到的韵律形沙坝所处的位置较吻合。

由图3、图4(b)看出,传播速度随着波数的增加而增加,这与无沙坝平直斜坡地形上的变化趋势完全相反<sup>[16]</sup>,传播速度越来越强,说明能量越来越强,这也说明了沙坝地形上沿岸流不稳定运动比平直斜坡地形上更强,也更容易产生。并且由图5(b)看出,相同波数情况下,1:40坡(Test 1)上的传播速度比1:100坡(Test 7)上大,说明坡度越陡沿岸流不稳定运动能量越强。对于Test 1, $c_r/V_M \approx 0.2/0.28 = 0.71$ ,对于Test 7, $c_r/V_M \approx 0.11/0.14 = 0.79$ ,因此,沙坝地形上 $c_r/V_M$ 要普遍大于平直斜坡上的 $0.50\sim 0.75$ <sup>[16]</sup>,这也说明沙坝地形上不稳定运动要比平直斜坡上强。

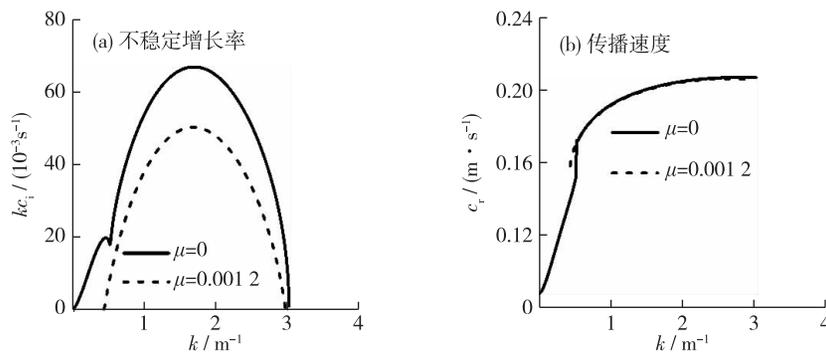


图3 Test 1 考虑和不考虑底摩擦的不稳定模式

Fig. 3 Instability mode with bottom friction (dashed line) and without bottom friction (solid line) for Test 1

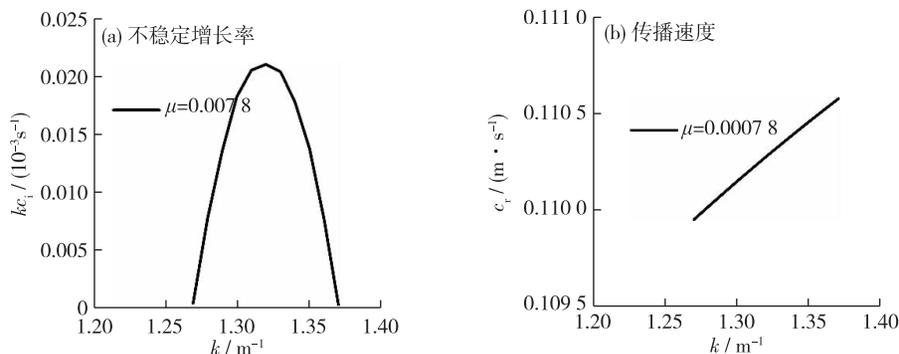


图4 Test 7 考虑底摩擦的不稳定模式

Fig. 4 Instability mode with bottom friction for Test 7

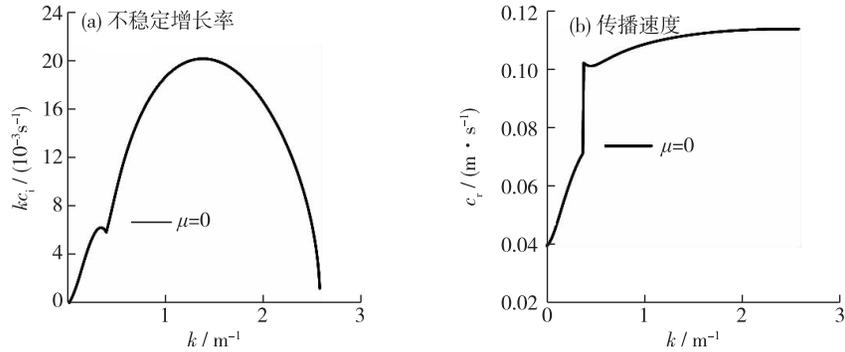


图 5 Test 7 不考虑底摩擦的不稳定模式

Fig. 5 Instability mode without bottom friction for Test 7

表 2 给出了 Test 1 和 test 7 对应的两种模式计算结果, 其中  $\omega_i = kc_i$ ,  $k_0$  为最大增长率  $kc_i$  对应的波数, 周期  $T = 2\pi/k_0c_r$ , 波长  $L = 2\pi/k_0$ 。

表 2 Test 1 和 Test 7 不稳定模式

Table 2 Instability modes for Test 1 and test 7

波况	底摩擦系数	模式	$\omega_i/s^{-1}$	$k_0/m^{-1}$	$c_r/(m \cdot s^{-1})$	$T/s$	$L/m$
Test 1	$\mu=0$	第一模式	0.02	0.45	0.12	116.30	13.96
		第二模式	0.07	1.69	0.20	18.40	3.72
	$\mu=0.0012$	第一模式	0.02	0.45	0.12	116.30	13.96
		第二模式	0.05	1.68	0.20	18.51	3.74
Test 7	$\mu=0$	第一模式	0.01	0.38	0.06	284.94	16.53
		第二模式	0.02	1.38	0.11	41.37	4.55
	$\mu=0.00078$	第一模式	0.01	0.38	0.06	284.94	16.53
		第二模式	$2.11 \times 10^{-5}$	1.32	0.11	43.25	4.76

2.4 沿岸流不稳定扰动速度场的分析

由式(20)、式(21)可以得到不稳定摄动速度场  $u'$ 、 $v'$ , 图 6 给出了 Test 1 和 test 7 考虑底摩擦不稳定摄动速度场, 在图 6 中标示出沙坝附近流线(图 6 中实线所示)以及第二模式对应的波长  $L$ (具体计算结果见表 2)。由图 6 可以看出, 沙坝地形上不稳定运动在沙坝处最强, 并且坡度越缓不稳定运动沿岸方向波长越长。整个速度场呈现涡旋运动, 对于近岸物质运输具有比较重要的影响。

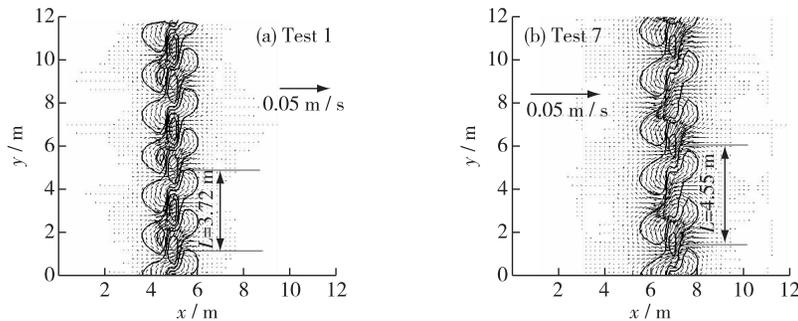


图 6 Test 1 和 Test 7 沿岸流不稳定引起的扰动速度场

Fig. 6 Perturbation velocity field for Test 1 and Test 7

### 3 结 论

(1) 沙坝地形上沿岸流不稳定运动传播速度随着波数的增加而增大, 而无沙坝平直斜坡地形上则是随着波数的增加而减小。沙坝地形上不稳定运动传播速度约为时均沿岸流最大值的 0.71~0.79。

(2) 1:40 沙坝地形上沿岸流不稳定运动的增长率要比坡度 1:100 的大, 不稳定运动在 1:40 沙坝地形上产生所用的时间比 1:100 更短。

(3) 底部摩擦对于抑制沿岸流不稳定运动的产生具有重要作用。实际情况下, 沿岸流都会受底部摩擦影响, 这种摩擦抑制有些不稳定模式产生, 而没被底部摩擦抑制的模式就是后剪切引起的不稳定模式, 也就是紧邻  $V_{\max}$  向海一侧的沿岸流速度分布引起的不稳定模式, 因此, 一般观测到的(准)韵律形、新月形沙坝一般都在该区域产生。

(4) 沙坝地形上两种坡度下的扰动速度场在沿岸方向都呈现出周期性波动, 沙坝地形上不稳定运动在沙坝处运动最强, 且坡度越缓不稳定运动沿岸方向波长越长。

#### 参考文献:

- [1] 张弛, 郑金海, 王义刚. 波浪作用下沙坝剖面形成过程的数值模拟[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 104-109. (ZHANG C, ZHENG J H, WANG Y G. Numerical simulation of wave-induced sandbar formation[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 104-109. (in Chinese))
- [2] 邹志利. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (ZOU Z L. Coastal hydrodynamics [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [3] FALQUE'S A, MONTOTO A, IRANZO V. Bed-flow instability of the longshore current[J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(15): 1927-1964.
- [4] CABALLERIA M, COCO G, FALQUES A, et al. Self-organization mechanisms for the formation of nearshore crescentic and transverse sand bars[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 465: 379-410.
- [5] BRIVOIS O, IDIER D, THIEBOT J, et al. On the use of linear stability model to characterize the morphological behaviour of a double bar system: application to Truc Vert beach (France)[J]. Comptes Rendus Geosciences, 2012, 344(5): 277-287.
- [6] BOWEN A J, HOLMAN R A. Shear instabilities of the mean longshore current: 1: theory[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1989, 94(C12): 18023-18030.
- [7] DODD N. On the destabilization of a longshore current on a plane beach: bottom shear stress, critical conditions, and onset of instability[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 811-824.
- [8] ALLEN J S, NEWBERGER P A, HOLMAN R A. Nonlinear shear instabilities of alongshore currents on plane beaches[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1996, 310: 181-213.
- [9] RIBAS F, FALQUES A, SWART H E, et al. Understanding coastal morphodynamic patterns from depth-averaged sediment concentration[J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53: 362-410.
- [10] CALVETE D, COCO G, FALQUES A, et al. (Un)predictability in rip channel systems[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(5): 89-103.
- [11] TIESSEN M C H, LEEUWEN S M V, CALVETE D, et al. A field test of a linear stability model for crescentic bars[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(1): 41-51.
- [12] TIESSEN M C H, DODD N, GAMIER R. Development of crescentic bars for a periodically perturbed initial bathymetry[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2011, 116(F4): 759-775.
- [13] 王彦, 邹志利. 平直沙坝海岸叠加波浪的裂流试验[J]. 水科学进展, 2015, 26(1): 123-129. (WANG Y, ZOU Z L. Experimental study of rip currents by intersecting wave on barred beach[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 123-129. (in Chinese))
- [14] 潘昀, 程永舟, 李青峰, 等. 破碎波作用下沙坝附近悬浮泥沙浓度试验研究[J]. 人民长江, 2013, 44(21): 71-75. (PAN Y, CHEN Y Z, LI Q F, et al. Experimental study on suspended sediment concentration near sand bars under action of breaking

- waves [J]. *Yangtze River*, 2013, 44(21): 71-75. (in Chinese))
- [15] 任春平, 邹志利. 沿岸流不稳定性的实验研究及理论分析[J]. *海洋学报*, 2008, 30(5): 113-123. (REN C P, ZOU Z L. Laboratory study and analysis of the instability of alongshore currents[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(5): 113-123. (in Chinese))
- [16] REN C P, ZOU Z L, QIU D H. Experimental study of the instabilities of alongshore currents on plane beaches[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 59(1): 72-89.
- [17] WANG Y, ZOU Z L. An experimental and numerical study of bimodal velocity profile of longshore currents over mild-slope barred beaches[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 415-423.
- [18] 任春平, 邹志利. 沿岸流不稳定多模式运动的理论分析[J]. *力学学报*, 2012, 44(1): 96-105. (REN C P, ZOU Z L. The theoretical analysis on multi-mode of the instability of longshore currents[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2012, 44(1): 96-105. (in Chinese))
- [19] BAQUERIZO A, CABALLERIA M, LOSADA M A, et al. Frontshear and backshear instabilities of the mean longshore current[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C8): 16997-17012.

## Variations of the instabilities of longshore currents on sand barred beaches\*

REN Chunping<sup>1,2</sup>, BAI Yuchuan<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

2. *College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

**Abstract:** In this paper, a hydrodynamic numerical model including bottom friction is developed to calculate the instabilities of longshore currents on two barred beaches with respective slopes of 1:40 and 1:100. This model enables to estimate wavelength, propagation velocity, growth rate and perturbation velocity field of the instabilities. Here, the effects of the bottom friction on the instabilities are analysed according to the beach slope. The results show that the propagation velocity of the instabilities ranges between 0.71—0.79. Furthermore, the instabilities develop faster on the 1:40 slope beach than on the 1:100 slope beach. It is also shown that the bottom friction has a great effect on the inhibition of the instabilities and that backshear is a key parameter in the instabilities development. Therefore sand bars can often be observed in this zone. Finally, the strongest energy of the instabilities generally occurs at the crest of bar and the milder the slope, the longer the wave length of the instabilities.

**Key words:** sand barred beach; longshore currents; the instabilities; bimodal velocity profile; the unstable modes

---

\* The study is financially supported by the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2013M541179).