

波流共同作用下废黄河河口水下三角洲地形演变预测模式*

虞志英 张国安 金 包四林
(华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

樊社军
(Old Dominion University, USA)

提要 通过对废黄河河口水下三角洲海域水文、泥沙、沉积和地形的调查分析,对组成水下三角洲-10--15m以深的平坦海床、-5--10m间的水下斜坡、-5m以浅的近岸浅滩三个地貌单元的水动力特征以及在波流和潮流作用下底部泥沙冲刷率的横向分布进行计算分析,并建立了水下三角洲地形横向剖面地形的演变预测模式。结果表明,在三角洲不同地貌单元内,由于所处不同的水动力条件和底部泥沙特性,出现了不同的侵蚀状态,其中在-10--15m以深的平坦海床,除了3m以上的大浪外,水动力作用以强劲的潮流冲刷为主,目前已接近冲刷相对平衡的状态;在-5--10m间的水下斜坡,受波浪和潮流的共同作用,冲刷程度大,地形剖面呈继续平行后退状态;-5m以浅的近岸浅滩,潮流作用相对较弱,以波浪对滩面的刷低为主,水深线不断向岸方向移动、滩宽变窄;0m以上的潮间带滩地,则波浪和潮流作用均较弱,近岸高滩接近相对稳定状态,有利于海岸线的工程防护。

关键词 废黄河水下三角洲,演变预测,模式,波浪,潮流

中图分类号 P731

江苏北部废黄河三角洲形成于公元1128—1855年间黄河在江苏北部夺淮入海时期。自1855年以后,黄河北归山东,由于黄河巨量入海泥沙的枯竭,原先强烈淤涨的三角洲,转变为在海洋动力作用下的岸滩与水下三角洲的强烈后退过程,主要表现为水下三角洲大面积的冲蚀和岸线的夷平过程(图1)(张忍顺,1984;袁迎如等,1983;万延森,1989;虞志英等,1986;王庆等,1999;孙效功等,2001)。根据不同时期历史海图对比及水动力与沉积物

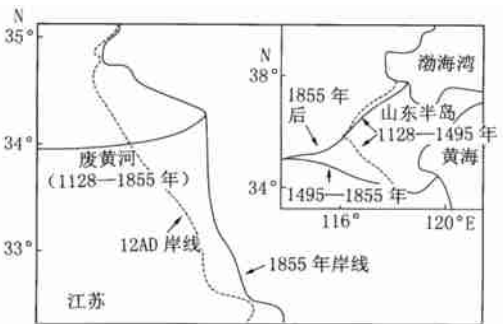


图1 研究区域

Fig.1 Location of the abandoned Yellow River subaqueous delta

* 国家自然科学基金资助项目,49601001号和40071014号。虞志英,男,出生于1935年10月,教授,E-mail: zyu@sklec.ecnu.edu.cn

收稿日期:2001-11-22,收修改稿日期:2002-04-16

调查, 作者认为, 经过一个多世纪的侵蚀改造, 江苏北部废黄河水下三角洲形成了三个主要地貌单元: (1) - 10 - 15m 以深的平坦海床; (2) - 5 - 10m 间的水下斜坡; (3) - 5m 以浅的近岸浅滩(表 1)。水下三角洲的冲蚀由海及岸, 由南而北, 以水下斜坡为代表的三角洲前缘开始内移和近岸浅滩的刷低为主要特征。作者根据现场水文、泥沙、沉积和地形资料, 定量计算波流共同作用下的海底底部切应力的横向变化以及泥沙冲刷率的横向分布, 并在此基础上建立了岸滩与水下地形的演变计算模式, 对水下三角洲地形稳定性进行动力学解析, 所得结论将会给该区海岸防护工程提供决策依据。

表 1 废黄河三角洲不同岸段水下地形剖面特征

Tab. 1 Topographic profile characteristics in different sections of the abandoned Yellow River subaqueous delta

岸 段	浅滩(1-5m)		水下斜坡(5-10m)		海床(> 10m)
	宽度(m)	坡度	宽度(m)	坡度	坡度
新淮河口(三角洲北侧)	5200	1/1300	700	1/120	1/1000
拐角点翻身河闸北	2000	1/500	1125	1/225	1/1000
翻身河闸南(三角洲南侧)	3500	1/700	500	1/100	1/1000

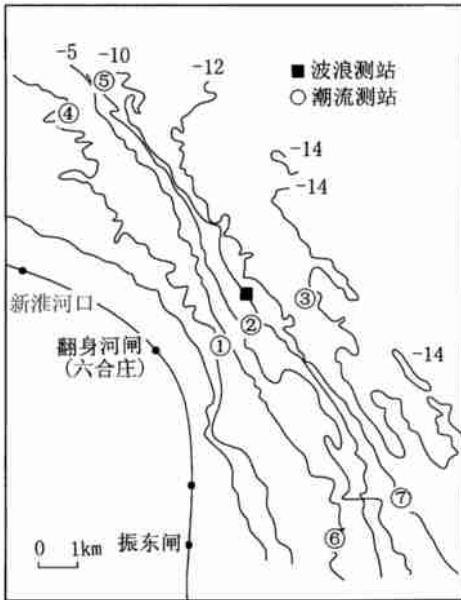


图 2 废黄河三角洲岸滩与水下地形及波浪、潮流测站

Fig. 2 Bathymetry of the study area, and wave / tidal current observation stations

1 近岸水动力与泥沙运动特征

1993 年, 在当地滨海县政府建港办公室组织下, 进行了 8 条垂线的全潮水文泥沙观测(图 2)。每条垂线在表层、0.2 层、0.4 层、0.6 层、0.8 层和底层水深处分别进行流速、流向和含沙量观测。观测时间每隔一小时测量一次, 在潮流涨、落急时加测一次。

1993—1994 年, 还在 -10m 等深线处投放了岸用声学测波仪进行波高和波周期的观测, 每 3h 观测一次, 每次测 20min。观测过程通过微处理机取样和处理数据并输出最大波高和周期、有效波高和周期、十分之一波高和周期以及平均波高与周期。

1.1 近岸潮流特性和潮流底部切应力的横向分布

据实测潮流资料分析(虞志英等, 1986), 近岸潮流呈逆时针方向旋转, 由海向岸, M_2 分潮潮流椭圆旋转率逐渐减少, 至 -5m 和 -10m 等深线间的水下斜坡, 潮流近于往复流, 其长轴方向与等深线基本平行。-5m 以深各测站流速相差

不大, 垂线平均流速大, 中潮为 60—70cm/s, 小潮为 30—50cm/s。进入 -5m 以浅的浅滩, 旋转率迅速增大, 潮流速急剧减小。这表明, 在浅滩带潮流扩散泥沙到水下斜坡并被强劲的往复流带走, 和美国大湖区海岸类似(Kamphuis *et al*, 1987), 再悬浮泥沙很少就地沉积。

潮流底部切应力 $\tau_{0c} = \rho u_{*c}^2$ 是描述潮流冲刷能力的特征参数, 这里 ρ 是水体密度, u_{*c} 是底部切速。研究表明 (Write *et al*, 1999), 当流速在离底部 50cm 处大于 10cm/s, u_{*c} 可以用 Von Karman-Prandtl 对数速度剖面来计算:

$$u_{*c} = \frac{k \cdot |u|}{\ln(z/z_{0c})} \tag{1}$$

这里 u 是潮流在离底部 z 处的流速, $k=0.4$ 是 Von Karman 常数, z_{0c} 是表观粗糙度。

图 3 是大、中、小潮全潮站位 1(-5m)、2(-9m)、3(-13m) 的潮流底部切速变化, 它与垂线平均流速一致, 大潮底部切速大于中潮, 中潮大于小潮, 在 -5m 以深底部切速横向变化不大。大潮涨落急时底部切速可达 9cm/s, 远大于底部沉积物的启动切速 3.5cm/s^1 , 中、小潮涨落急时底部切速也可达 5cm/s 左右, 因此潮流不仅有较强的输沙能力, 而且能直接对水三角洲造成冲刷。

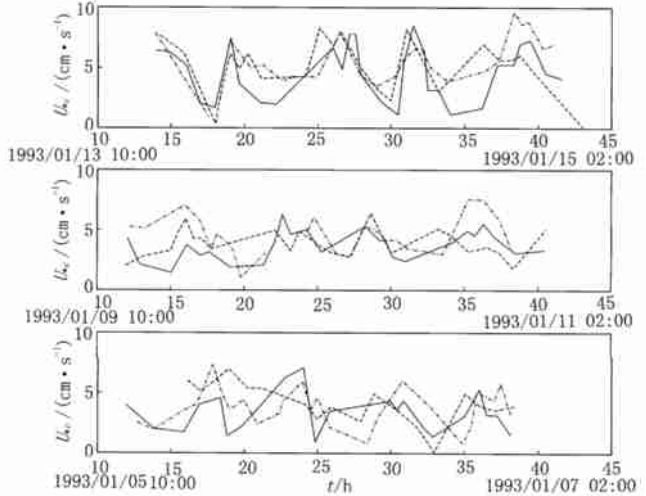


图 3 大、中、小潮全潮站位 1、2、3 的潮流底部切速分布

Fig.3 Friction velocity during tidal cycles

虚线为站位 1; 实线为站位 2; 点虚线为站位 3

表 2 是大、中、小潮全潮站位 1、2、3 的平均含沙量的变化。虽然三站的平均流速和底部切速基本相同, 但站位 1 的平均含沙量远大于站位 2 和 3, 表明浅滩区被冲刷再悬浮泥沙被扩散到斜坡带上部, 或者波浪和潮流共同作用加强了斜坡带上部泥沙的冲刷和再悬浮。

表 2 大、中、小潮全潮站位 1、2、3 的平均含沙量

Tab.2 Vertical mean suspended sediment concentrations during tidal cycles

站位	大潮(kg/m ³)	中潮(kg/m ³)	小潮(kg/m ³)
1	0.99	1.32	0.62
2	0.69	0.89	0.58
3	0.63	0.61	0.43

1.2 近岸波浪特性和波浪底部切应力的横向分布

废黄河口三角洲海岸线突出, 三面临海, 外无任何屏蔽掩护, 波浪可长驱直入, 是本区岸滩与水下地形演变的另一重要动力因素。在本区 -10m 等深线处的波浪观测资料表明, 波浪常浪向为 NE 向和 SE 向, 强浪向为 N-NE 向, $H_{1/10}$ 波高分布见表 3, 由本区长期

1) 呼和敖德, 1995. 江苏中山港淤泥特性试验研究. 中国科学院力学研究所、清华大学水利系

观测资料经统计得到的波高和周期有如下关系¹⁾:

$$T = 5.10H_{V10}^{0.31} \quad (2)$$

表3 H_{V10} 波高分布(1993年7月—1994年6月)

Tab. 3 Distribution of H_{V10} (07/1993—06/1994)

波高范围(m)	0.0—0.5	0.5—1.0	1.0—1.5	1.5—2.0	2.0—2.5	2.5—3.0	> 3.0
出现频率(%)	24.67	39.22	17.31	9.73	4.00	2.86	2.19

波浪向岸传播将受到浅水效应、折射、底部摩阻和波浪破碎等作用。以破波点为界,破波点外,底部摩阻是波浪衰减的主要原因,破波点以内,波浪破碎则是波浪衰减的主要原因。由于本海区水下水地形平缓开阔,近岸等深线和海岸线几近平行且垂直于强浪向,作者计算波高横向变化时将只考虑浅水效应、底部摩阻和波浪破碎等作用。

横向波浪能量守恒方程为:

$$\frac{d(EC_g)}{dx} = -D_b - D_f \quad (3)$$

这里 $E = \frac{1}{8}\rho g H^2$ 是波浪能量密度, C_g 是波浪群速, D_b 和 D_f 分别是波浪破碎和底部摩阻造成的能量衰减。 D_f 可用下式计算(Nelson, 1995):

$$D_f = \frac{2}{3\pi} \rho_w u_{b\max} \quad (4)$$

这里 f_w 是摩擦系数,本地区 $f_w \approx 0.015^2$; $u_{b\max}$ 是底部水质点最大流速。

D_b 的选取取决于波浪的破碎形式。波浪破碎形式可根据参数 $\xi_0 = \delta(H_b/L_0)^{-1/2}$ 分溢波、崩破波和卷波三种形式,其中 δ 是浅滩坡度, H_b 是破波波高, L_0 是深水波长。计算表明本区 $\xi_0 < 0.1$, 所以溢波是本区波浪破碎的主要形式,线性波浪理论可以用于波浪能量在破波带的变化和底部波浪切应力的计算(Lippmann *et al*, 1996, Cox *et al*, 1996), D_b 可用破波带中剩余能量的概念来求解(Dally *et al*, 1985):

$$D_b = -\frac{K}{d} [(E_{st} C_g) - (EC_g)] \quad (5)$$

这里 $E_{st} = \frac{\rho g}{8} (\Gamma d)^2$ 是饱和波浪能量, g 为重力加速度, d 为水深, $K = 0.15$ 和 $\Gamma = 0.4$ 是常数。

当波高的横向分布求出后,波浪底部最大切速为:

$$u^*_{w\max} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_{b\max} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} \frac{\mathcal{H}}{T \sinh(kd)} \quad (6)$$

由于泥沙的启动判据是一个平均的概念,因此应用波浪平均切速 $u^*_{wa} = \frac{1}{2} u^*_{w\max}$ 来考虑波浪对泥沙的冲刷作用(Bijker, 1986)。

1) 龚崇淮, 1994. 江苏省中山港波浪分析计算. 河海大学

2) 金, 1978. 连云港基础资料汇编. 江苏省连云港建港指挥部

图 4 是波高和波浪底部切应力沿潮流观测垂线 1、2 和 3 横向剖面的分布, 随着波浪向岸传播, 底部波浪切速逐渐增大, 但在平坦海床区, 即使 3m 的大浪底部波浪切速也小于 3.5cm/s, 从而很难单独启动泥沙。当波浪进入斜坡带, 由于浅水效应, 底部波浪切速急剧增加, 在水下浅滩区, 特别是波浪破碎区前后, 底部波浪切速超过潮流切速成为主导冲刷因子。

综合 1.1 和 1.2 小节, 江苏北部废黄河水下三角洲的三个主要地貌单元的蚀退有其各自的特点, -10m 以深的海床冲蚀主要受到大、中潮流的控制, 只有 3m 以上的大波浪才能启动底部泥沙。随着水深的变浅, 波浪的作用逐渐加强, 到 -5—10m 水深的斜坡带, 波浪和潮流的底部切

应力具有相同的量级, 特别在斜坡带上部, 波浪的作用将超过潮流成为主要的动力, 因此在斜坡带波浪和潮流将共同作用启动泥沙, 同时潮流还是泥沙输移的主要动力。当进入 -5m 以浅的浅滩带, 潮流的底部切应力急剧减小, 波浪尤其是破碎波浪成为主要的泥沙启动动力, 潮流则主要起泥沙扩散输移作用, 即“波浪掀沙, 潮流输沙”。因此在计算泥沙冲刷率时, 在浅滩破波带内主要考虑波浪的作用, 浅滩破波带外则要考虑波流的共同作用。

1.3 波流共同作用下横向底部切应力和泥沙冲刷率分布

由于粘性细颗粒泥沙的冲刷率通常可表示为剩余切应力的函数 (Mehta, 1989; Pathenader, 1965), 波流共同作用下的底部切应力计算是分析泥沙启动、再悬浮的关键, 并已有几个模型, 其中 Grant-Madsen 模型 (1979、1986) 和 Smith 模型 (1977) 能够给出波浪-潮流边界的精细流场结构。由于作者在本文中主要关心波流共同作用下底部切应力造成的泥沙冲刷率, 将用 Bijker (1986) 的简单模型, 时间平均的波流共同作用下的底部切应力为 $\tau_{b, cw}$ = ρu_{*c}^2 为:

$$\tau_{b, cw} = \tau_{b, c} + \tau_{b, w} = \rho u_{*c}^2 + \frac{1}{4} \rho u_{*w \max}^2 \tag{7}$$

上式中变量 $\tau_{b, w}$ 是时间平均波浪底部切力, $\tau_{b, c} = \rho u_{*c}^2$ 是波浪存在时的时间平均潮流底部切力。波浪存在时的时间平均潮流底部切力 u_{*c} 可以迭代求解以下方程 (Sleath, 1991):

$$u_{*c} = \frac{u_{*c}}{K} \ln \frac{z}{z_a} \tag{8}$$

$$z_a = z_0 \left[1 + 0.19 \frac{u_{b \max}}{u_{*c}} \sqrt{\frac{u_{b \max}}{30z_0 \omega}} \right] \tag{9}$$

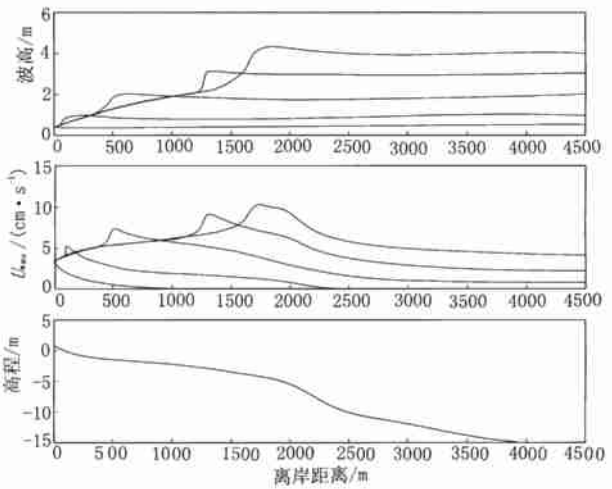


图 4 波高和波浪底部摩擦流速的横向分布

Fig. 4 Distribution of near-bed wave generated friction velocity and wave height

这里 u_z 是流场在离底部 z 的流速, z_a 和 z_0 分别是表观和水力粗糙度, ω 是波浪圆频率。

Partheniades (1965) 提出的公式被广泛用来计算粘性细颗粒泥沙的冲刷率 dE/dt :

$$\frac{dE}{dt} = H \left(\tau_{b,av} - \tau_c \right) M \left[\frac{\tau_{b,av}}{\tau_c} - 1 \right] = H \left(u^*_{av} - u_c \right) M \left[\left(\frac{u^*_{av}}{u_c} \right)^2 - 1 \right] \quad (10)$$

这里 $H(x)$ 是 Heaviside 阶梯函数, M 是冲刷系数, 通常作为率定系数, τ_c 和 u_c 分别是泥沙启动临界切应力和切速。

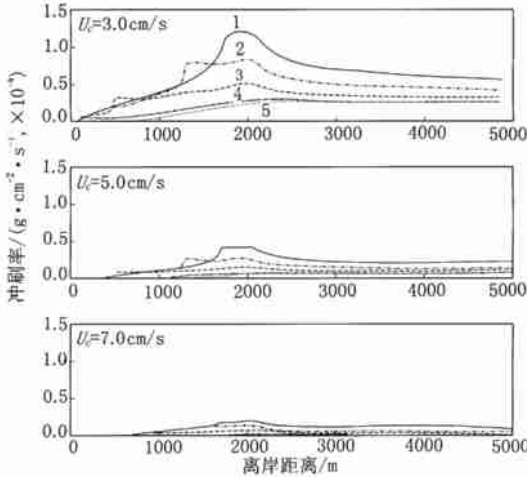


图 5 大潮涨急时波流在不同的泥沙启动临界切速下的横向泥沙冲刷率

Fig. 5 Erosion rate for different thresholds of sediment movement during flood maxima, spring tide

- 1. $H_{1/10} = 4.0$; 2. $H_{1/10} = 3.0$; 3. $H_{1/10} = 2.0$;
- 4. $H_{1/10} = 1.0$; 5. $H_{1/10} = 0.5m$

假设潮流流速在 $-5m$ 以浅的浅滩呈线性递减, $-5m$ 以深用实测数据内差或外差求潮流流速的横向分布, 大潮涨急时波流在不同的泥沙启动临界切速下的横向泥沙冲刷率如图 5。

图 5 还表明泥沙启动临界切速 u_c 是控制冲刷过程的重要参数。研究表明, u_c 是泥沙物理化学性质的函数, 并随冲刷过程中泥沙物理化学性质的变化而变化, 这种变化主要有底部泥沙的筛选粗化和老淤泥的出露两个过程 (Zhang *et al*, 1998)。泥沙的筛选粗化过程是由于不同泥沙成分的沉降速度不同造成, 细颗粒泥沙沉降速度小, 容易被潮流输移到较远的地方, 很难就地沉积, 粗颗粒泥沙沉降速度大, 容易就地沉积, 长此以往在底部表层就会形成一层粗化沉积层, 这种粗化层具有较强的抗冲刷能力, 从而得以保护底下的细颗粒泥沙

免受冲刷。老淤泥的出露过程则随着岸滩和 underwater 地形的蚀退而发生, 老淤泥是黄河夺淮入海时的早期沉积, 具有较大的密度, 从而具有较大的启动临界切速和较强的抗冲刷能力 (Smith *et al*, 1977)。因此底部泥沙的筛选粗化和老淤泥的出露会降低泥沙的冲刷率。

2 废黄河口三角洲岸滩与水下地形横向蚀退计算模型

废黄河口水下三角洲由于黄河夺淮, 河流入海泥沙供应枯竭以后, 冲刷已成为岸滩与水下地形演变的主要过程。由于冲刷后进入水体中悬浮泥沙是以黏粒含量为主的细颗粒泥沙, 沉降速度非常小, 可以被潮流带到很远的地方, 这种再悬浮泥沙很难就地沉积, 因而废黄河口三角洲岸滩与水下地形横向蚀退是一个不可逆的过程。因此本模型将不考虑再悬浮泥沙的就地沉积, 岸滩与水下地形的蚀退只有横向泥沙冲刷率分布决定。

潮流有大、中、小的变化, 波浪则为一随机变量, 因而泥沙冲刷量 E 也是一个随大、中、小潮长周期变化的随机变量, 考虑到岸滩与水下地形的变化是大、中、小潮和各种不同大小波浪作用的综合结果, 岸滩与水下地形的冲刷模型为:

$$E = \iint_0^{\infty} H \left(u^*_{av} - u_c \right) M \left[\left(\frac{u^*_{av}}{u_c} \right)^2 - 1 \right] dH dt \quad (11)$$

$$z_b = z_{b,0} - E/\gamma \quad (12)$$

这里 z_b 是底床高程, $z_{b,0}$ 是底床初始高程, γ 是泥沙干容重。

3 废黄河口三角洲岸滩与水下地形横向蚀退演变趋势分析

通过上述计算,将废黄河口三角洲三个主要地貌单元地形横剖面的演变过程模拟于图6。由于所处水动力条件和底部泥沙特性的不同,因此在单位时间单元内所反映的蚀退状态存在着明显的差异。图6采用翻身闸闸北剖面为代表,虚线代表1989年实测的剖面线,实线代表1999年实测的剖面线,图6中可以看出,在-5m以浅的近岸浅滩部分,滩面沉积以粉沙为主,临界起动流速为3—4cm/s,在近岸破波带为主的浅滩动力作用下,滩面泥沙在强烈扰动下呈悬浮状态,并被潮流运输,造成滩面以刷低为主。1989年以来,由于护岸工程,限制了滩面向岸方向的拓宽,而以下切为主。在-5—10m水下斜坡部分,沉积物以砂质粉沙为主,抗冲性较差,以强劲潮流为主的侧向侵蚀作用下,侵蚀明显,目前仍在继续发展,是整个水下三角洲侵蚀最强烈的部位,水深浅,向岸移动方向明显。在-15m以深的海床部分,造成冲刷的主要动力为强潮流。由于水深较深,一般波浪作用难以对底部泥沙造成冲刷,此外经冲刷后三角洲底部沉积物的粘土层外露,其临界起动切速达6cm/s,抗冲性强,又抑制了冲刷的发展,冲刷已接近相对平衡状态。1999年的计算值与实测值作对比,两者结果比较接近。在此基础上对20年后的冲刷现状作

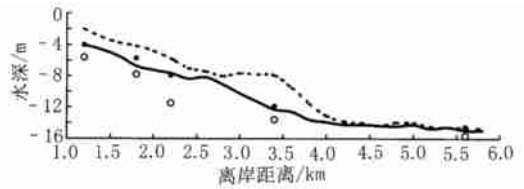


图6 废黄河口水下三角洲地形横向蚀退过程模拟

Fig. 6 Profile evolution of the subaqueous delta
虚线为实测值(1989);实线为实测值(1999);●计算
值(1999);○计算值(20年后)

了预测,其蚀退过程同样反映了上述水下三角洲不同地貌单元的冲刷特征,但其速度上,除海床部分将继续保持相对平衡外,水下斜坡和近岸浅滩的冲刷后退速度将逐渐转缓。

4 结语

江苏北部废黄河河口水下三角洲经历了黄河夺淮入海时间的大规模的堆积和1855年黄河回归山东渤海后的大范围侵蚀的进程变化,经过一个半世纪以来,组成整个水下三角洲的近岸浅滩、水下斜坡及前缘海床三个地貌单元。由于组成沉积物特征的不同以及所经受的潮流、波浪动力作用强度的差异,因而出现了在不同地貌单元内不同的蚀退速度和地形形态。通过冲刷强度以及蚀退模式的计算结果,从定量上显示了三个不同的地貌单元各自所处的蚀退阶段,并与实测地形相互验证,在此基础上,对水下三角洲各地貌部位的蚀退过程的发展趋势进行预测,为今后废黄河口三角洲海岸的防护规划提供决策依据。

参 考 文 献

- 万延森, 1989. 苏北古黄河三角洲的演变. 海洋与湖沼, 20(1): 66—74
王庆, 李道季, 孟庆海等, 1999. 黄河夺淮期间淮入海口动力、地貌与演变机制. 海洋与湖沼, 30(6): 751—757
孙效功, 赵海虹, 崔承琦, 2001. 黄河三角洲潮滩潮沟体系的分维特征. 海洋与湖沼, 32(1): 74—80
张忍顺, 1984. 苏北废黄河三角洲及滨海平原的成陆过程. 地理学报, 39(2): 173—184
袁迎如, 陈庆, 1983. 古黄河水下三角洲的发育和侵蚀. 科学通报, 21: 1322—1324
虞志英, 金, 陈德昌, 1986. 江苏北部旧黄河水下三角洲的现场及其侵蚀改造. 海洋学报, 8(2): 197—206
Bijker E W, 1986. Coastal engineering, Vol. II Lecture notes, Delft Univ. Technology, Delft, The Netherlands, 1—88

- Cox D T, Kobayashi N, Okayasu A, 1996. Bottom shear stress in the surf zone. *J Geophys Res*, 101: 14337—14348
- Dally W R, Dean R G, Dalrymple R A, 1985. Wave height variation across beach of arbitrary profile. *J Geophys Res*, 90: 11917—11927
- Grant W D, Madsen O S, 1979. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J Geophys Res*, 84: 1797—1808
- Grant W D, Madsen O S, 1986. The continental shelf bottom boundary layer. *Annu Rev Fluid Mech*, 18: 265—305
- Kamphuis J W, 1987. Recession rate of glacial till bluffs. *J Waterw Port, Coast Eng ASCE*, 113: 60—73
- Lippmann T C, Brookins A H, Thornton E B, 1996. Wave energy transformation on natural profiles. *Coastal Engineering*, 27: 1—20
- Mehta A J, Hayter E J, Parker W R *et al*., 1989. Cohesive sediment transport I: Process description. *J Hydr Eng*, 115: 1076—1093
- Nelson R C, 1995. Wave bed friction damping over shoaling, movable beds. *Coastal Engineering*, 35: 65—80
- Patheniades E, 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *J Hydr. Div, ASCE*, 91: 105—139
- Sleath J F A, 1991. Velocities and shear stresses in wave-current flows. *J Geophys Res*, 96: 15237—15244
- Smith J D, McLean S R, 1977. Boundary layer adjustments to bottom topography and suspended sediments. In: Nihoul J C J ed. *Bottom Turbulence*, Elsevier, New York, 123—151
- Write L D, Sherwood C R, Sternberg R W, 1999. Field measurements of fairweather bottom-boundary-layer processes and sediment suspension on the Louisiana inner continental shelf. *Marine Geology*, 140: 329—345
- 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: 133—148

EVOLUTION PREDICTION OF THE ABANDONED YELLOW RIVER SUBMERGED DELTA UNDER WAVE AND CURRENT

YU Zhi-Ying, ZHANG Guo-An, JIN Liu, BAO Si-Lin

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

FAN She-Jun

(Old Dominion University, USA)

Abstract This paper presents a quantitative, dynamic model for simulating and predicting the evolution of the near shore muddy profile and the delta of the abandoned Yellow River. Based on the analysis of wave, current and sediment concentration data from field and laboratory, three different types of morphological zones, which are pro-delta shelf (> 10m water depth with slope of < 1/1000), delta front slope (5m to 10m isobath with slope of < 1/100) and subsided delta platform (landward of the 5m isobath with slope of < 1/500), have different characteristics and mechanisms of erosion. For the pro-delta shelf, strong tidal currents and large storms are the dominant forces for erosion, as the progressively exposed old muds that were deposited during the early stage of delta progradation has become relatively stable. For the former delta front slope, tidal currents and waves together contribute to the seabed erosion, although the tidal current is the dominant force during calm weather. For the delta-top platform, breaking waves are the dominant force for the erosion and profile evolution. The results show that the delta front slope and subsided delta platform are still in their younger stages of evolution, which is characterized by severe erosion. As the erosion continues, bed armoring and exposure of well consolidated old muds will cause the erosion rate to decrease and an equilibrium profile will reach finally.

Key words Abandoned Yellow River submerged delta, Evolution prediction, Model, Wave, Tidal current