

# 连云港地区淤泥质海岸近岸带水体含沙量的横向分布

陈德昌 金 镠\* 唐寅德 虞志英

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海)

**摘要** 本文以连云港为例, 将淤泥质岸滩泥沙运动归结为二种基本的物理过程: 在破波带内, 波浪掀沙造成泥沙悬浮; 在破波带外, 水体含沙量来源于破波带内悬浮泥沙在潮流作用下的扩散运移。从波高的统计分布等出发, 按波能法概念提出了破波带内水体含沙量横向分布表达式; 破波带被视为无数泥沙扩散线源的迭加, 由此建立破波带外水体含沙量横向分布的表达式。由以上两表达式算得的破波带内、外水体含沙量分布与实测结果基本一致。

近岸带水体含沙量在法线方向上的变化, 是近岸水动力对海滩沉积物作用的综合反映。淤泥质海岸组成物质以粘性细颗粒泥沙为主, 其岸滩滩面泥沙一经扰动, 便可长时间悬浮水中而随潮流运移。波浪破碎带是海岸带中水动力作用最活跃、泥沙运动最剧烈的地带, 淤泥质海岸滩坡平缓, 破波带比较宽阔, 破波作用使底部泥沙悬浮。作为泥沙输移过程中向破波带外的扩散和沿岸方向的输送, 是淤泥质海岸泥沙输移的两个主要方面。

## 一、水体含沙量横向分布的一般特征

1982年10月在墟沟湾进行两站同步定位观测(图1), 通过对测得的含沙量资料进行逐步回归分析和坐标处理<sup>[1]</sup>, 获得两点认识: (1) 波高是影响淤泥质海岸近岸水体含沙量

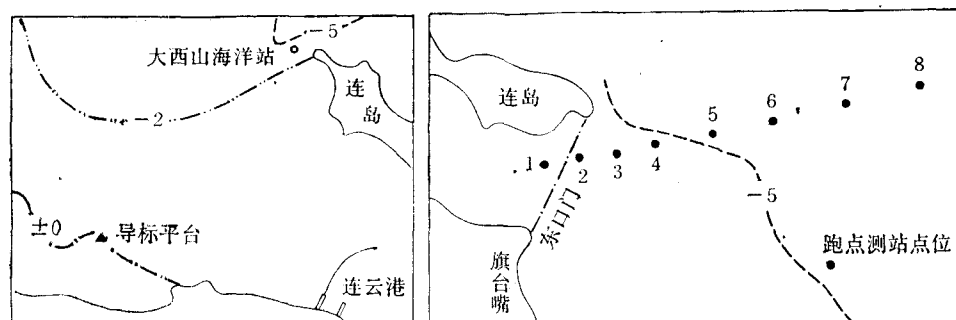


图1 同步及准同步含沙量观测站位

Fig. 1 The sediments concentration of synchronous and quasisynoptic

\* 江苏省连云港建港指挥部。  
收稿日期: 1987年12月15日。

的主要因素; (2) 破波带内的水体含沙量明显高于破波带外, 从破波点向外, 含沙量迅速降低。

连云港海峡东口门外不同波高时, 外航道轴线准同步含沙量观测资料(图 2a, b), 均显示出与文献[1]相仿的特点。

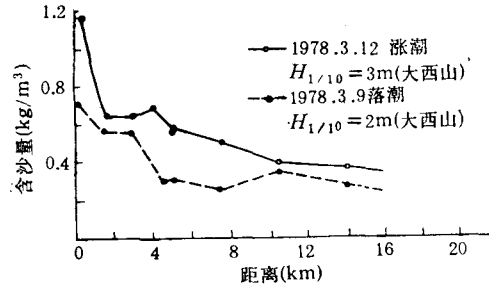


图 2a 连云港东口门外拟选航道轴线准同步含沙量分布

Fig. 2a The quasi-synoptic distribution of sediments concentration outside the east outlet of the Lianyungang Harbour (where will be the axial line of waterway)

据上海航道局资料

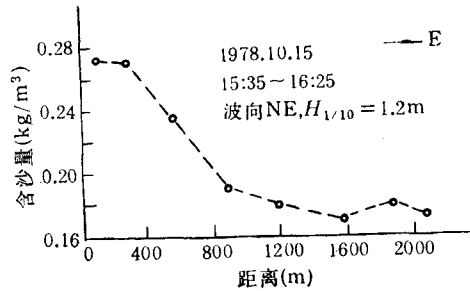


图 2b 连云港东口门横向含沙量分布

Fig. 2b Lateral distribution of sediments concentration at the east outlet of the Lianyungang Harbour

## 二、浅水波浪变形及破波带内的波高变化

波浪自深水传向海岸时, 由于水深逐步变浅, 波浪的传播速度、波长、波高及水质点速度都随之变化, 当水深小到一定程度时便会出现不同形式的波浪破碎, 波浪在传播过程中的变形, 在达到破碎前表达式为:  $H/H_0 = K_r, K_t, K_f$ 。式中,  $H_0$  为深水波高;  $K_r, K_t, K_f$  分别为浅水因子、折射因子和底摩擦因子。由于淤泥质海滩, 波浪从深水传到岸边需经很长的距离, 因此, 底摩擦效应往往成为波高衰减的主要因素。根据连云港水深 5.6m 及水深 2.2m 二处测波资料的统计, 充分成长的风浪有如下关系:

$$\bar{r} = 3.745H_{1/10}^{0.472} \quad (5.6\text{m 水深}) \quad (1)$$

$$\bar{r} = 4.520H_{1/10}^{0.482} \quad (2.2\text{m 水深}) \quad (2)$$

根据连云港不同水深处波浪观测资料统计得出, 波高折减率平均为 0.72, 与底摩擦系数

$K_f$  接近。 $K_f$  依下式计算:

$$K_f = \exp\left(-\frac{0.05H_{1/10}\sqrt{L}}{\bar{h}\sqrt{\bar{\lambda}\bar{\tau}}}\right) \quad (3)$$

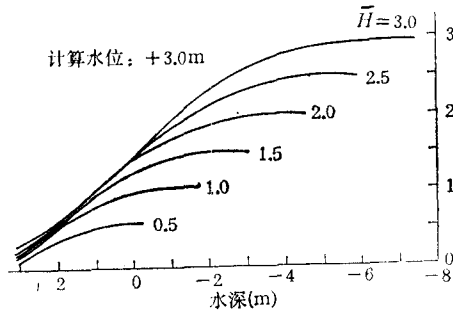


图3 近岸区波高的横向变化计算值  
Fig. 3 Calculated lateral change of wave height nearshore area  
纵坐标为平均波高(m)

式中,  $L$  为依据波所在位置到计算点的距离;  
 $\bar{h}$  为该距离内的平均水深;  $H_{1/10}$ ,  $\bar{\lambda}$ ,  $\bar{\tau}$  分别为依据波波高、平均波长及平均周期。

破波带内的波高衰减, 主要取决于波能的紊动损耗。由于组成某一波列的各种波高成分对应于不同的破碎水深, 因此, 波浪在其传播过程中逐步破碎的过程, 可以看作是组成波列的各波高成分从低频到高频依次破碎的滤波的过程。破碎水深  $d_b$  与破碎波高  $H_b$  由试算确定, 即波浪传播到达  $d_b$  处的计算波高, 应与海洋水文规范中的  $d_b/H_b - d_b/\lambda_0$  关系线一致。

1979—1980 年, 在连云港外海(34°52'48"N, 119°42'24"E, 水深 16m), 用“波浪骑士”(Wave rider) 测波仪记录波浪资料, 分析结果表明, 波要素( $H, \tau$ )符合 Weibull 分布:

$$F\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \exp\left[-0.761\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{2.25}\right] \quad (4)$$

概率密度函数:

$$f\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = -1.712 \cdot 2\frac{H}{\bar{H}} \cdot \exp\left[-0.761\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^{2.25}\right] \quad (5)$$

表1 不同来波破碎点位置及破碎波高

Tab. 1 Position of breakpoint ( $d_b$ ) and breaking wave height ( $H_b$ ) under the conditions of different wave

来波 $\bar{H}$	$H_{1/10}$ (-5m 处)	$L$ (m)	$\bar{\tau}$ (s)	$\lambda_0$ (m)	$d_{b1/10}$ (m)	$d_{b1/3}$ (m)	$H_{b1/10}$ (m)	$H_{b1/3}$ (m)
3.0	5.42	0	8.32	108.0	-3.31	-1.82	4.54	3.47
2.5	4.81	0	7.86	96.4	-2.26	-1.01	3.79	2.89
2.0	4.06	0	7.26	82.2	-1.21	-0.21	3.03	2.31
1.5	3.45	2 556	6.72	70.4	-0.157	+0.592	2.27	1.73
1.0	2.50	4 800	5.77	51.9	+0.896	+1.394	1.51	1.16
0.5	1.13	6 800	3.97	24.6	+1.947	+2.197	0.76	0.53

按上述滤波概念, 算得不同来波(深水波)条件所相应的波高变化(图3)。

依(3)式可计算不同来波所相应的连云港海洋站波高  $\bar{H}_{(-5m)}$  及  $H_{1/10(-5m)}$ 。计算按试算进行, 例如, 对于来波  $\bar{H} = 1.0m$ , 设 -5m 处  $H_{1/10} = 2.5m$ , 则  $\bar{\tau} = 5.77s$ ,  $\bar{\lambda} = 42.6m$ ; 由 -5m 到 -1.0m,  $L = 4800m$ , 此距离内  $K_f = 0.847$ , 于是 -1.0m 处  $H_{1/10} = 2.12m$ , 与图3一致, 试算成功。按规则波考虑, 破碎点位置  $d_b$  及相应的破碎波高  $H_b$  均

列于表 1, 破波范围相应于  $H_{1/10}$  及  $H_{1/3}$  两种波列累积率。

### 三、破波带内波能耗散率及悬沙含沙量的横向分布

波能与波高平方成正比, 由上述波浪破碎造成的波高变化, 可得波能耗散率  $\frac{\partial \bar{H}^2}{\partial x}$  的横向变化  $\frac{\partial \bar{H}^2}{\partial x} = (\text{tg } \beta) \frac{\partial \bar{H}^2}{\partial d}$  (图 4)。 $\beta$  为滩坡坡角。破波点附近, 波能耗散率迅速增大并达到峰值。

一个波周期内, 提供泥沙悬浮所需的功率为:

$$(\rho_s - \rho)gC_s\omega\tau$$

式中,  $\rho_s$ ,  $\rho$  分别为泥沙颗粒密度及水的密度;  $C_s$  为悬沙体积含沙量;  $\omega$  为泥沙沉速;  $\tau$  为波周期。

据日本泉宫尊司的研究, 在平缓海滩, 波浪破碎多属崩波破碎型, 崩波波形及底切力过程仍基本对称, 因此可近似地仍采用线性波动理论。一个波周期进入某一断面的波能为:

$$E = \frac{1}{8} \rho g \bar{H}^2$$

波能耗散率为:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{8} \rho g \frac{\partial \bar{H}^2}{\partial x} = \frac{1}{8} \rho g (\text{tg } \beta) \frac{\partial \bar{H}^2}{\partial d}$$

破波带内波能耗散, 一部分用于泥沙悬浮, 记效率因子为  $\eta$ , 则有:

$$(\rho_s - \rho)gC_s\omega\tau = \frac{1}{8} \eta \rho g (\text{tg } \beta) \frac{\partial \bar{H}^2}{\partial d}$$

于是得悬沙含沙量为:

$$C_s = \frac{1}{8} \eta \frac{\text{tg } \beta}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)\omega\tau} \frac{\partial \bar{H}^2}{\partial d} \quad (6)$$

下面以墟沟湾海滩的实际资料来确定  $\eta$ 。

#### 1. 海滩坡度 ( $\text{tg } \beta$ )

图 5 为墟沟湾淤泥质海滩剖面 and  $\text{tg } \beta$  的横向变化。

#### 2. 淤泥沉速及含沙量

据文献[2], 连云港淤泥在流动海水中的沉速:  $\omega = 3\text{cm/s}$ 。根据连云港南侧羊山岛站 ( $d = -2.2\text{m}$ ) 实测含沙量与大西山海洋站实测波高  $H_{1/10}$ , 得向岸风条件下的海洋站波高与近岸含沙量关系, 如图 6 所示。

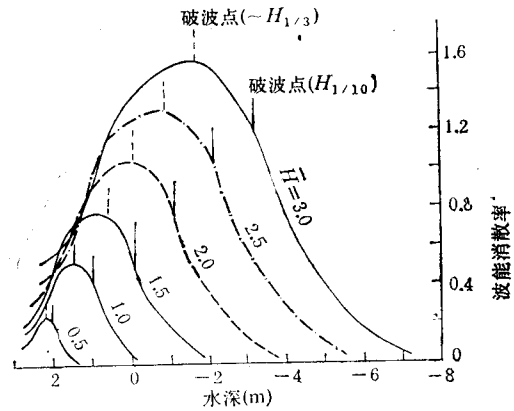


图 4 近岸波能横向耗散率

Fig. 4 Attenuation rate of lateral wave energy nearshore area

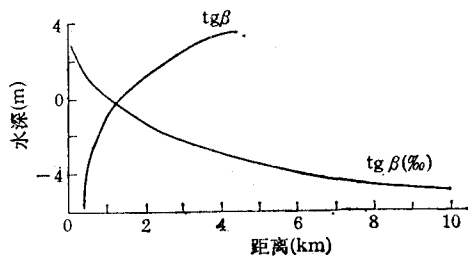


图 5 连云港附近典型海滩剖面及滩坡的横向变化  
Fig. 5 Lateral change of the typical beach profile and beach slope near the Lianyungang Harbour

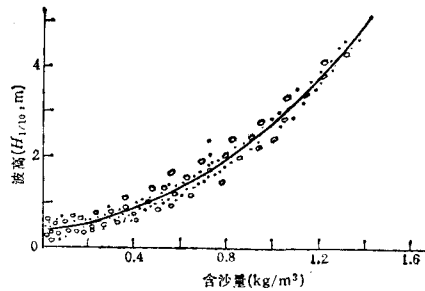


图 6 羊山岛站波高与含沙量关系  
Fig. 6 Relationship of wave height and sediments concentration at the Yangshan Island

### 3. 效率系数 $\eta$

将上述波高-含沙量资料及破波点处的  $(\partial \bar{H}^2 / \partial d)_b \cdot (\text{tg} \beta)_b$  代入(6)式,求得  $\eta$ , 发现  $\eta$  与滩坡  $\text{tg} \beta$  关系甚好(图 7), 此处破波点  $d_b$  按有效波考虑; 图 6 之含沙量可近似看作是有效破碎点附近的含沙量, 于是得破波带内含沙量横向分布表达式为:

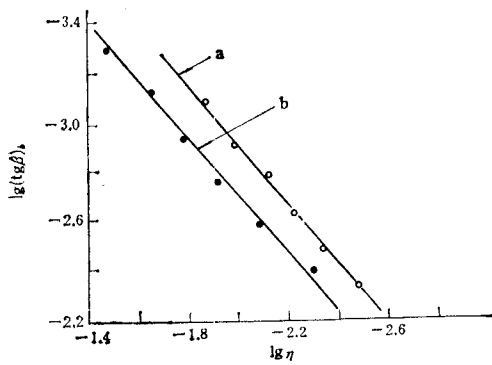


图 7  $\eta$ - $\text{tg} \beta$  的关系  
Fig. 7 The relationship of  $\eta$ - $\text{tg} \beta$

- a. 波高取有效波  $H_{1/3}$  时,  $\eta = 0.048 \times 10^{-3} (\text{tg} \beta)^{-0.8}$ ;
- b. 波高取  $H_{1/10}$  时,  $\eta = 0.071 \times 10^{-3} (\text{tg} \beta)^{-0.8}$ .

$$C_s = 0.006 \times 10^{-3} \frac{(\text{tg} \beta)^{0.2}}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \omega \tau} \frac{\partial \bar{H}^2}{\partial d} \quad (7)$$

上式所示之含沙量横向分布形态, 表明破波带以外含沙量急剧降低; 在破波带内, 有效波波高所相应的破碎位置附近, 含沙量为最高<sup>[2]</sup>。这与图 2 所示实际含沙量分布趋势一致。

上述结果还表明, 淤泥质海岸近岸波能用于泥沙悬浮的部分, 其比例  $\eta$  值与海滩滩坡呈反比关系,  $\eta$  值的幅度大体为 3—30‰。

## 四、波浪破碎带外含沙量的横向分布

破波带外波浪对底部沉积物的扰动微弱, 因此可认为, 破波带外水体含沙量的横向分布, 主要是破波带内的破浪掀沙在潮流作用下向破波带外扩散运移的结果。

### 1. 近岸潮流特征

连云港所在岸段, 潮流受制于黄海驻波系统, 潮流作逆时针向旋转运动, 在外海潮波向岸推进过程中, 潮流椭圆的旋转率降低, 逐步过渡为往复流, 以  $M_2$  分潮为例, 椭圆长短轴之比由海向岸渐减, 在 -10m 处为 0.8, -5m 处为 0.5, 岸边则降到 0.2 以下。取全潮过程中平行于岸线的切向流速的平均值  $|\bar{u}|$  与垂直于岸线的法向流速的平均值  $|\bar{v}|$ , 则  $|\bar{v}|$  的横向分布随着离岸距离的增加而加大。

## 2. 破波带内波浪对底部的作用力及掀沙强度的横向分布

波浪对滩面的作用强度用波浪底切力  $\tau_{b,\omega}$  来量度, 平缓海滩, 破波波形及底切力过程仍基本对称, 因此近似地仍采用线性波动理论, 即

$$u_{* \cdot 0} = \sqrt{\frac{f_{\omega}}{2}} u_{b \cdot 0}; \quad u_{b \cdot 0} = \frac{\pi H}{\tau \sin h \left[ \frac{2\pi d}{\lambda} \right]} \quad (8)$$

式中,  $u_{b \cdot 0}$  为最大波浪底速:  $u_{* \cdot 0} = \sqrt{\frac{\tau_{b \cdot 0}}{\rho}}$ , 阻力系数:  $f_{\omega} = 0.015$ 。算得最大波浪底切力  $u_{* \cdot 0}$  在破波带内的分布<sup>[3]</sup>, 破波带外缘附近,  $u_{* \cdot 0}$  为最大;  $u_{* \cdot 0}$  也随来波波高的增大而增大。

波浪作用下粘性泥沙的冲刷悬浮, 与河道一样, 宏观上也应受制于水流底切力与沉积物起动切力 ( $u_{* \cdot c}$ ) 的对比, 即当  $u_{* \cdot 0} > u_{* \cdot c}$  时发生冲刷。

单位面积的冲刷率可表示为:  $E = M \left[ \left( \frac{u_{* \cdot 0}}{u_{* \cdot c}} \right)^2 - 1 \right] \Delta t$ ;  $M$  为沉积物冲刷系数;  $\Delta t$  为波周期中  $u_{* \cdot 0} > u_{* \cdot c}$  的历时, 因此, 不同来波条件下波浪掀沙强度为

$$E' = M \left[ \left( \frac{u_{* \cdot 0}}{u_{* \cdot c}} \right)^2 - 1 \right] \Delta t / \tau \quad (9)$$

式中,  $\tau$  为波周期; 淤泥沉积物起动切速  $u_{* \cdot c} = 5 \text{ cm/s}$ ; 冲刷系数  $M = 0.358 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 将波浪底切力过程概化成正弦曲线, 则

$$\sin \sigma t_{1-2} = u_{* \cdot c} / u_{* \cdot 0}, \quad \sigma = 2\pi / \tau \quad (10)$$

$t_1, t_2$  为半波周期中发生冲刷的起、终时刻, 即  $\Delta t = (t_2 - t_1) \times 2$ 。算得不同来波条件下破波带波浪掀沙强度的横向分布见图 8。由图 8 可知破波点附近掀沙强度最高, 向岸明显衰减, 破波点附近的  $E'$  与波高的关系见图 9。

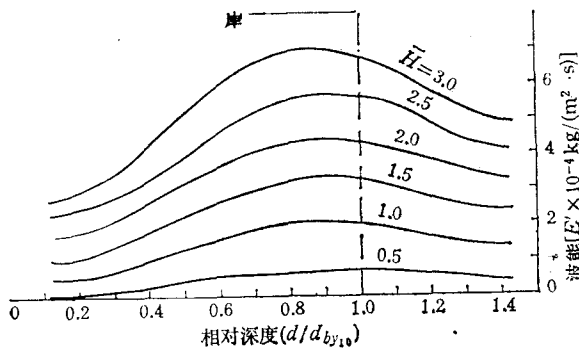


图 8 不同来波条件下波浪对海滩的冲刷强度的横向分布

Fig. 8 Lateral distribution of erosional strength of wave on the beach under the conditions of different incident wave

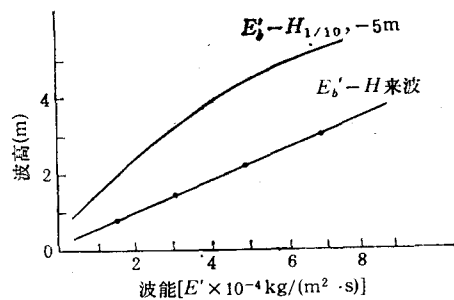


图 9 破波点处波浪冲刷强度与来波波高的关系

Fig. 9 The relationship of the erosional strength and incident wave height at the breaking wave point

## 3. 破波带内波浪掀沙向岸外的扩散输移

破波带内波浪对底部沉积物强烈的扰动, 是泥沙运动最活跃的地带; 破波带以外, 波

浪对底部沉积物的扰动较弱, 水体含沙量主要来源于破波带水体含沙量在潮流作用下的平流及扩散输移。对于长度远大于破波带宽度的平直海岸, 可将破波带视为稳定水流中无数互相平行的无限长稳定扩散线源的迭加, 按 Fick 扩散模型, 不计泥沙沉速, 则

$$\frac{\partial s}{\partial t} + v \frac{\partial s}{\partial x} = D \left( \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

式中,  $D$  为扩散系数。记在  $y$  轴方向上延伸的稳定扩散线源的物质发射率为  $m$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ], 则在点  $(x, z)$  处的浓度为

$$s(x, z) = \frac{\dot{m}}{\sqrt{2\pi D x v}} \exp\left(-\frac{v z^2}{4 D x}\right) \quad (12)$$

前已得到破波带中破碎波对底部沉积物的冲刷率为  $E'$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ], 因此, 破波带中  $x$  方向上微分宽度  $dx'$  ( $0 \leq x' \leq x_b$ ) 内线源的发射强度为:  $E' \cdot dx'$ 。用中心面 ( $z = 0$ ) 的  $x$  向浓度分布近似代表沿水深平均的含沙量在  $x$  方向的变化, 则  $dx'$  内线源扩散在  $x$  ( $x \geq x_b$ ) 处产生的强度  $ds_x$  为:  $ds_x = \frac{E' dx'}{\sqrt{2\pi D v (x - x')}}$ , 于是  $x$  处的水体含沙量为

$$s = \int_0^{x_b} \frac{E'}{\sqrt{2\pi D v (x - x')}} dx' \quad (13)$$

将  $E'$  在破波带中的横向分布近似地取为线性分布, 即

$$E' = \frac{E'_b - E'_0}{x_b} x' + E'_0 \quad (14)$$

$E'_b$  和  $E'_0$  分别为  $x'/x_b = 1$  及  $0$  处的冲刷率, 将(14)式代入(13)式并积分

$$s = \frac{E'_b - E'_0}{\sqrt{2\pi D v}} \frac{1}{x_b} \int_0^{x_b} \frac{x'}{\sqrt{x - x'}} dx' + \frac{E'_0}{\sqrt{2\pi D v}} \int_0^{x_b} \frac{1}{\sqrt{x - x'}} dx';$$

整理后得破波带外水体含沙量横向分布表达式为

$$s = \frac{\sqrt{2}(E'_b - E'_0)}{3x_b \sqrt{\pi D v}} [2x\sqrt{x} - (2x + x_b)\sqrt{x - x_b}] + \frac{\sqrt{2}E'_0}{\sqrt{\pi D v}} (\sqrt{x} - \sqrt{x - x_b}) \quad (x \geq x_b) \quad (15)$$

在边界条件  $x = x_b$  处, 由  $s = s_b$  确定扩散系数  $D$ 。

据研究, 紊动扩散系数与紊动动量交换系数相当, 后者可写成  $\frac{\varepsilon}{d u_*} = K\eta(1 - \eta)$ ; 垂

线平均值  $\bar{\varepsilon} = \int_0^1 \varepsilon d\eta = 0.069 5 u_* d$ 。因此可将  $D$  表示为

$$D = \alpha u_* d \quad (16)$$

以破波带外缘的  $u_* = |v|/20$  及  $d$  代入(16)算得如表 2。因此, 对于不同来波条件,  $\alpha$  是一稳定的值, 可取  $\alpha = 0.10$ , 表明破波带以外泥沙掺混机制主要是沿岸带潮流引起的紊动扩散。由此, 即可按(15)式计算破波带外含沙量的横向分布, 见图 10a, b。图上破波带波浪掀沙计算结果同时标出。显然, 破波带外直接的波浪掀沙作用对水体含沙量的贡

献是微弱的，水体含沙量主要取决于破波带内波浪掀沙向岸外的扩散输移。

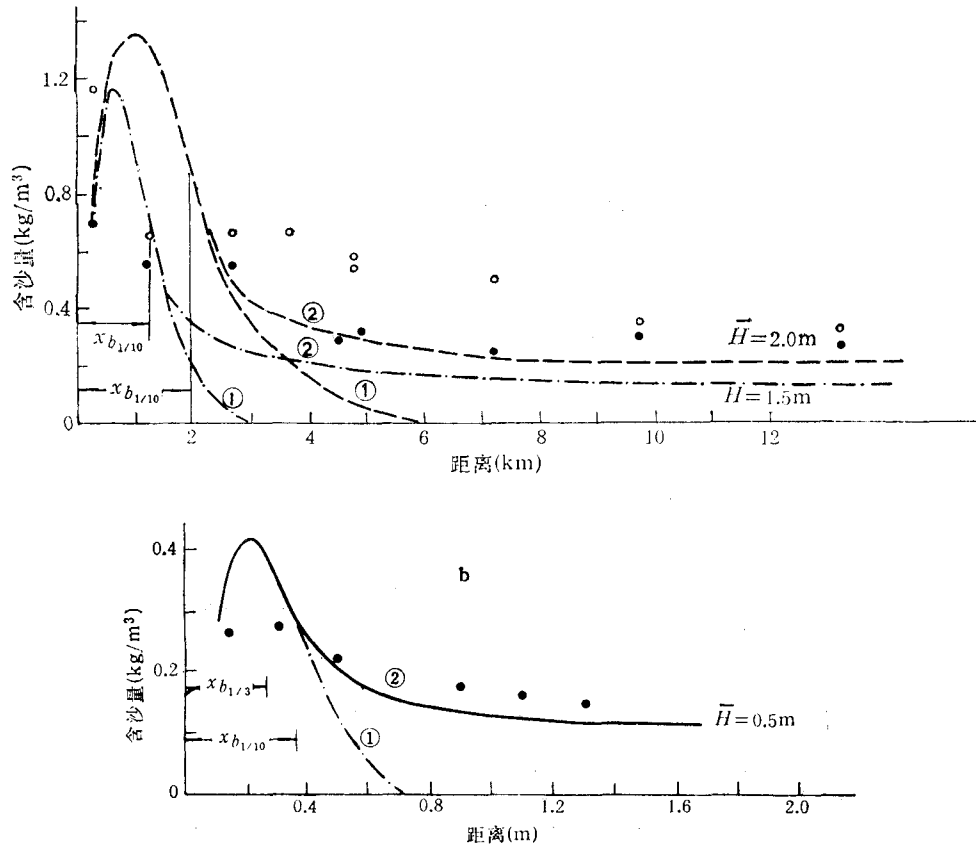


图 10 含沙量横向分布计算结果与实测值比较

Fig. 10 Comparisons of the calculated results and the measured values of the sediments concentration at the lateral

a. 较大浪时(上图); b. 小浪时。

表 2 不同来波条件下的  $\alpha$  值

Tab. 2 Distribution of  $\alpha$  value under the conditions of different waves

$H_{1/10,3m}$ (m)	$d_{b1/10}$ (m)	$x_b$ (m)	$E_b^*$ ( $10^{-4}$ ) [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	$E_0^*$ ( $10^{-4}$ ) [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]	$ v $ (m/s)	$S_b$ (kg/m <sup>2</sup> )	$D$ (cm <sup>2</sup> /s)	$d_b$ (m)	$u_*$ (m/s)	$\alpha$
5.42	-3.31	4 850	6.8	2.8	0.170	1.01	53.3	6.31	0.003 05	0.10
4.81	-2.26	3 150	5.7	2.3	0.130	0.97	34.3	5.26	0.006 05	0.10
4.06	-1.21	1 900	4.4	1.7	0.095	0.92	18.4	4.21	0.004 75	0.09
3.45	-0.157	1 150	3.3	1.0	0.070	0.79	10.8	3.16	0.003 50	0.10
2.50	+0.896	650	2.2	0.6	0.055	0.62	5.8	2.10	0.002 75	0.10
1.13	+1.947	250	0.8	0.2	0.030	0.44	1.0	1.05	0.001 50	(0.06)

## 五、结 语

1. 研究淤泥质海岸水体含沙量的横向分布，不仅对估计港口航道回淤强度有直接意



义,也有助于探讨淤泥质海岸的演变规律。

2. 决定破波带内外水体含沙量的基本物理过程不同,在破波带内是波浪直接掀沙;在破波带外则主要是破波带水体含沙量在潮流作用下向岸外的扩散输移。水体含沙量横向分布的计算公式

破波带内:

$$C_s = \frac{1}{8} \eta \frac{\operatorname{tg} \beta}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \omega \tau} \frac{\partial \bar{H}^2}{\partial d}, \quad \eta = f(\operatorname{tg} \beta)$$

破波带外:

$$s = \frac{\sqrt{2(E'_b - E'_0)}}{3x_b \sqrt{\pi D \nu}} [2x \sqrt{x} - (2x + x_b) \sqrt{x - x_b}] + \frac{\sqrt{2E'_0}}{\sqrt{\pi \nu D}} (\sqrt{x} - \sqrt{x - x_b})$$

计算结果与实测含沙量分布趋势一致。

3. 作为计算破波带外含沙量分布的中间步骤,算得波浪底切力及其对海滩沉积物冲刷强度的横向分布,表明在常见的中、大浪情况下,平均低潮线附近( $\pm 0-+1\text{m}$ ),波浪对海滩沉积物的冲刷强度相对较高。

### 参 考 文 献

- [1] 张勇、金镠,1987。淤泥质海滩悬沙回归模型的建立及其应用。泥沙研究 1:22—24。  
 [2] 金镠、虞志英、陈德昌,1985。淤泥质海岸浅滩人工挖槽回淤率计算方法的探讨。泥沙研究 2:12—18。  
 [3] 虞志英、金镠、陈德昌,1986。连云港吹泥区岸滩自然冲淤及吹泥条件下海滩演变的观测分析。海洋与湖沼 17(4):354—355。

## LATERAL DISTRIBUTION OF SUSPENDED SEDIMENTS IN NEARSHORE WATERS OF MUDDY COAST OF LIANYUNGANG HARBOUR

Chen Dechang, Jin Liu, Tang Yinde and Yu Zhiying

(Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai)

### ABSTRACT

In Lianyungang Harbour, two basic physical processes of sediments movement in nearshore waters of muddy coast, i. e., the stir and suspension of sediments by waves inside the breaking wave zone and the dispersion of suspended sediments by tidal currents in the offshore region, are described. From the statistical distribution of wave height, the expression of lateral distribution of sediments concentration of the water body is proposed according to the wave energy method: that is,

$$C_s = \frac{1}{8} \eta \frac{\text{tg } \beta}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \omega \tau} \frac{\partial \bar{H}^2}{\partial d}, \quad \eta = f(\text{tg } \beta).$$

The breaking wave zone is known as the superposition of numerous sediments dispersing lines, thus, the expression beyond the breaking wave zone is established as follows:

$$s = \frac{\sqrt{2(E'_b - E'_0)}}{3x_b \sqrt{\pi \nu D}} [2x \sqrt{x} - (2x + x_b) \sqrt{x - x_b}] + \frac{\sqrt{2E'_0}}{\sqrt{\pi \nu D}} (\sqrt{x} - \sqrt{x - x_b}).$$

The calculated sediments concentration distribution inside and outside the breaking wave from the two expressions above correspond well with the measured results.