

波浪作用下渤海湾近岸海域污染物的 输移扩散规律*

孙 涛 陶建华

(天津大学力学系 天津 300072)

提要 用物理模型实验和数学模型计算相结合的方法,研究了均匀缓坡岸滩上,规则波及不规则波浪作用下形成的沿岸流及其对岸边排放污染物输移扩散的影响。针对渤海湾的地形和主要波浪方向,研究了渤海湾主要排污口附近单纯波浪以及波浪、潮流共同作用下近岸海域内流动速度分布与相应污染物输移扩散规律。结果表明,在渤海湾近岸海域(一定范围内),污染物输移扩散受到波浪作用的影响,表现为平行岸线方向。波浪作用使得远离污染物排放口的滩涂受污染的影响增大。

关键词 渤海湾, 波浪, 近岸流, 污染物输移扩散

中图分类号 P731

环渤海地区是我国北方的经济中心,并将成为新世纪我国经济发展的重点区域。近年来,随着经济的快速发展,渤海近岸海域海洋环境不断恶化,赤潮频繁发生。海域环境的污染已经成为影响沿岸人们生活和经济可持续发展的制约因素。位于渤海西部的渤海湾是一个半封闭海湾,海湾沿岸属于典型泥质缓坡海岸,海水交换能力很差。认识渤海湾沿岸海域污染物输移扩散规律对实施科学有效的污染防治和治理意义重大。

海域内污染物输移扩散规律与海域中动力因素密切相关。近岸海域,尤其是缓坡近岸海域内在波浪、潮流的共同作用下,水动力条件十分复杂。波浪在岸滩上变形破碎形成近岸流会改变海域内整体流速分布,进而影响污染物的输移扩散规律。波浪作用使得泥质缓坡浅水海岸内污染物的输移扩散规律,不同于由岩石组成的陡坡海岸条件下单纯考虑潮流作用下的结果。

多年以来,分析整体海域及近海陡坡地形条件下的污染物输移扩散规律时,将潮流作为主要影响因素加以考虑已取得了大量的研究成果,并获得了良好的效果(徐洪达等,1984;朱永春等,1998;沈志良等,2003)。目前,随着研究的逐渐深入,人们逐渐

意识到近岸海域内泥沙输运以及污染物输移扩散过程中,波浪的变形、破碎及其产生的近岸流在海域中所占据的重要作用。Goda(2001)在泥沙输运研究中强调了近岸流的作用;Rodriguez 等(1995)在海岸实地污染物输移扩散研究中,证明了近岸海域内污染物在近岸流作用下沿平行岸线方向输移扩散的结果;Tao 等(2002)研究了模拟海域内波浪对污染物输移扩散的影响。

作者通过研究波浪要素与地形条件等对近岸流的影响,分析了均匀缓坡地形条件下,规则及不规则波浪作用时的近岸流分布规律,并在此基础上通过分析比较渤海湾近岸海域内,单纯波浪及波浪、潮流共同作用下污染物输移扩散规律,探讨波浪作用对缓坡近岸海域污染物输移扩散及其对周围海域的影响。

1 数学模型

1.1 波浪传播模型

研究波浪对污染物输移扩散规律影响,首先是确定海域内波浪场。本文中的波浪传播数学模型分为规则波浪和不规则波浪两部分展开。以 Chawla 等(1998)方程为基础,利用线性叠加原理来建立不规则波浪模型。假设波浪由多个振幅不同、频率不

* 国家自然科学基金重点资助项目,59839330号;国家自然科学基金资助项目,19772031号。孙涛,博士,E-mail:sunt-mail@sina.com

等、初相位不同,并沿 x, y 平面上与 x 轴成不同入射角方向传播的简单余弦波迭加而成。选取坐标系 x 轴指向波浪传播方向,波面方程表示为

$$\eta = \sum_j \sum_l \eta_{jl} = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} A_{jl}(x, y) \cdot e^{i(\bar{k}_j x - \omega_j t)} \right\} \quad (1)$$

其中, $A_{jl}(x, y)$ 表示第 j 个频率,第 l 个方向单波复

$$\begin{aligned} & (C_{gj} + U)(A_{jl})_x - 2\Delta_1 V(A_{jl})_y + i(\bar{k}_j - a_0 k_j)(C_{gj} + U)A_{jl} + \left\{ \frac{\sigma_j}{2} \left(\frac{C_{gj} + U}{\sigma_j} \right)_x - \Delta_1 \sigma_j \left(\frac{V}{\sigma_j} \right)_y \right\} A_{jl} \\ & + i\Delta'_j \left[(p_j - V^2) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{y,y} - i\Delta_1 \left\{ \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right]_{y,x} + \left[UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right]_{x,y} \right\} \right] \\ & + \frac{i\sigma_j k_j^2}{2} R |A_{jl}|^2 A_{jl} + \frac{W}{2} A_{jl} + \frac{-b_1}{k_j} \left\{ \left[(p_j - V^2) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right]_{y,x} + 2i \left[\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right]_{y,x} \right\} \\ & + b_1 \beta_j \left\{ 2i\omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{x,x} + 2i\sigma_j V \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_y - 2UV \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{x,x} + \left[(p_j - V^2) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right]_{y,y} \right\} \\ & - \frac{i}{k_j} b_1 [(\omega_j V)_y + 3(\omega_j U)_x] \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{x,x} - \Delta_2 \left\{ \omega_j U \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right)_{x,x} + \frac{1}{2} \omega_j U_x \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) \right\} \\ & + ik_j \omega_j U (a_0 - 1) \left(\frac{A_{jl}}{\sigma_j} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $p_j = (CC_g)_j$, C_j 为相速度, C_{gj} 为群速度, U 和 V 分别表示 x, y 轴方向的流速。 R 为非线性因子, $R = \frac{\cosh 4kd + 8 - 2\tanh^2 kd}{8\sinh^4 kd}$, 其中 d 为水深。同时有

$$\sigma_j = \omega_j - k_j U; \beta_j = \frac{(k_j)_x}{k_j^2} + \frac{(k_j(p_j - U^2))_x}{2k_j^2(p_j - U^2)} \quad (3)$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1; \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1; \Delta'_j = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}_j}{k_j} \quad (4)$$

其中 a_0, a_1, b_1 为系数,计算中分别选取 $a_0 = 1.0$, $a_1 = -0.75, b_1 = -0.25$ 。

计算中给定波浪入射边界上波高、周期及波浪入射角。采用方向谱 $S(\omega, \theta)$ 表示频率及方向上波能的分布

$$S(\omega, \theta) = S(\omega)G(\omega, \theta) \quad (5)$$

其中 ω 为角频率, θ 是波浪入射方向, $S(\omega)$ 为频谱, $G(\omega, \theta)$ 称为方向分布函数。根据方向谱计算得到入射边界上振幅

$$a_{jl} = \sqrt{2S(\omega, \theta)\Delta\omega\Delta\theta} \quad (6)$$

每个单波分量的复振幅在波浪传播方向上的每一排上可以同时算出,在每个网格节点上将这些波分量线性叠加可得到描述随机波浪的统计量,如有效波高 $H_s(x, y) = \left(8 \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}(x, y)|^2 \right)^{1/2}$ 。当假

波幅,下标 j 表示频率, l 表示方向, N_f 和 N_θ 分别表示频率和方向上的分割数, k_j 为波数, ω_j 为第 j 个波分量的角频率。 \bar{k}_j 为特征波数 $\bar{k}_j(x) = \frac{1}{B} \int_0^B k_j(x, y) dy$ 。假设波浪场仅由平面波组成,有 $A_{jl} = a_{jl} e^{i(k_j \cos\theta_{jl} - k_j)_x + ik_j \sin\theta_{jl} y}$ 。以复波幅 $A_{jl}(x, y)$ 为变量的控制方程由下式给出,

设入射波浪频率,方向惟一,即可由方程(2)计算规则波浪的传播。

式(2)中 W 定义为能量耗散因子,采取能量耗散率 δ 除以总波浪能量 E 的形式:

$$W = \frac{\delta}{E} \quad (7)$$

通过能量耗散因子的不同形式可以模拟波浪传播过程中的能量耗散。Dally 等(1985)假设波能损耗率和局部能量通量与稳定波能通量间的差值成正比,引入波浪破碎因子 Q_b ,可将不规则波浪破碎耗散因子写为

$$W = \frac{\delta}{E} = \frac{K_1 Q_b C_p}{d} \left[1 - \left(\frac{\Gamma_i d}{H_{rms}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中 K_1 为常数(0.1), Q_b 为波浪破碎率因子, C_p 为与不规则波谱峰周期 T_p 相对应的波速, d 为水深, Γ_i 为不规则波浪的稳定波因子, H_{rms} 为均方根波高。Rattanapitikon 等(1998)给出了 Q_b 和 Γ_i 经验表达式。本文中采用 Goda 公式作为波浪破碎标准,确定波浪传播过程中的破碎位置(李玉成等,2000)。

1.2 波浪作用下近岸流模型

波浪在从外海向岸边传播的过程中,由于波浪斜向入射及破碎,同时在地形的影响下将会形成近岸流。波浪对污染物输移扩散的影响主要是通过近岸流发挥作用。近岸流主要包括平行岸线的沿岸流、

离开及朝向海岸的离岸流和向岸流。

选取 x, y 轴分别垂直和平行于海岸, 以 Longuet-Higgins(1970) 辐射应力概念为基础, 采用沿水深积分的水平二维模型(文圣常等, 1984):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + M_x + T_x - B_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + M_y + T_y - B_y \end{aligned} \right\} \quad (9a)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[u(\zeta + d)] + \frac{\partial}{\partial y}[v(\zeta + d)] = 0 \quad (9b)$$

其中 u, v 分别为沿 x, y 轴方向的流速分量, 相对于静止水面的波面高度及深度分别为 ζ 和 d 。 M_i, T_i, B_i 分别代表涡粘项, 辐射应力项及底摩擦项, 下标分别表示沿 x, y 轴的分量。

紊动掺混项 M_i 采用紊动涡粘的概念, 将运动方程中水平涡粘力表示为

$$\begin{aligned} M_x &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ M_y &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中 ϵ 为水平涡粘系数。本文中涡粘系数表达式为

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_{bw} + \epsilon_{bf} + \epsilon_{br} = C_1 \frac{H^2 g T}{4\pi^2 h} \cos^2 \alpha \\ &+ C_2 u_m H + C_3 (h + \zeta) \left(\frac{D_b}{\rho} \right)^{1/3} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\epsilon_{bw}, \epsilon_{bf}$ 及 ϵ_{br} 分别是与波动、底摩擦阻和波浪破碎相关的涡粘系数(Briand *et al.*, 1993; Larson *et al.*, 1991)。计算中参数 C_1, C_2, C_3 分别取为 0.5、0.1 和 0.025。水体紊动侧向掺混项中综合包括了波动、底摩擦阻和波浪破碎的影响。

考虑水滚的影响, 将辐射应力项表示为(Dally *et al.*, 1994; Reniers *et al.*, 1997)

$$\begin{aligned} T_x &= -\frac{1}{\rho D} \left(\frac{\partial}{\partial x} (S_{xx} + R_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (S_{xy} + R_{xy}) \right) \\ T_y &= -\frac{1}{\rho D} \left(\frac{\partial}{\partial x} (S_{xy} + R_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (S_{yy} + R_{yy}) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $D = \zeta + d$ 为总水深, S_{ij} 为辐射应力, R_{ij} 由波浪破碎水滚引起。

$$\begin{aligned} S_{xx} &= E \left[n(1 + \cos^2 \alpha) - \frac{1}{2} \right] \\ &= E \left[\frac{C_g}{C} (1 + \cos^2 \alpha) - \frac{1}{2} \right] \end{aligned}$$

$$R_{xx} = 2E_r \cos^2 \alpha \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} S_{yy} &= E \left[n(1 + \sin^2 \alpha) - \frac{1}{2} \right] \\ &= E \left[\frac{C_g}{C} (1 + \sin^2 \alpha) - \frac{1}{2} \right]; \\ R_{yy} &= 2E_r \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (13b)$$

$$\begin{aligned} S_{xy} = S_{yx} &= \frac{1}{2} E_r \sin^2 \alpha = \frac{E}{2} \frac{C_g}{C} \sin^2 \alpha; \\ R_{xx} = R_{yy} &= E_r \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (13c)$$

Dally 等(1994) 将单位面积上水滚 E_r 能量表示为

$$E_r = 4\beta_r \frac{C}{gT} Q_b E$$

其中, $\beta_r \cong 0.9$, Q_b 表示单波破碎比率, C, T 分别为波速和波周期。

1.3 污染物对流扩散模型

污染物对流扩散模型采用沿水深积分的二维情况如下所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(DS)}{\partial t} + \frac{\partial(DuS)}{\partial x} + \frac{\partial(DvS)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} D \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} D \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yx} D \frac{\partial S}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} D \frac{\partial S}{\partial y} \right) + DS_m \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $D = \zeta + h$ 为总水深; S 是污染物浓度; u, v 分别为沿方向 x, y 的流速分量; S_m 为源项; K_{xx}, K_{yy}, K_{xy} 和 K_{yx} 为水深平均扩散系数(m^2/s)。

2 实验及分析

当波浪斜向入射到均匀岸坡地形时, 近岸流将会以平行岸线方向的沿岸流为主。作者在实验中研究了不同坡度均匀岸坡地形上, 具有不同波浪要素的规则和不规则入射波浪作用下污染物输移扩散规律, 并将数学模型计算与物理模型实验相结合, 分析了均匀岸坡地形上波浪对污染物输移扩散规律的影响。

2.1 实验布置

实验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室多功能综合水池内完成。实验地形简图如图 1 所示, 实验区域长 42.6m, 宽 24.0m。坡度均匀的斜坡海岸地形与造波板成 30° 布置, 实现波浪斜向入射至斜坡地形, 同时增加实验中海岸线的长度。为保证沿岸流的稳定性, 均匀岸坡地形模型两侧及造波机后侧布置了 3.0m 宽度的水渠。

实验中, 波面变化由垂直于岸线方向排列的三列共 40 个电容式浪高仪测量(测线如图 1 中的 A, B, C); 沿岸流流速由垂直岸线排成两列共 32 个电

阻式流速仪测量。

海岸坡度采用 1:100 和 1:40 两种,坡前水深分别为 0.18m 和 0.45m。波浪作用下污染物输移扩散实验与沿岸流分布实验同时进行。实验中使用染料代替污染物。污染物的排放分为瞬时点源和连续点源两种方式。采用摄像机获取实验区域内一定时间间隔的污染物的输移扩散过程。摄像机距离水面 8m,光轴与水面垂直。采用两套摄像设备进行采集,成像区间相互交错,实现大范围的测量。

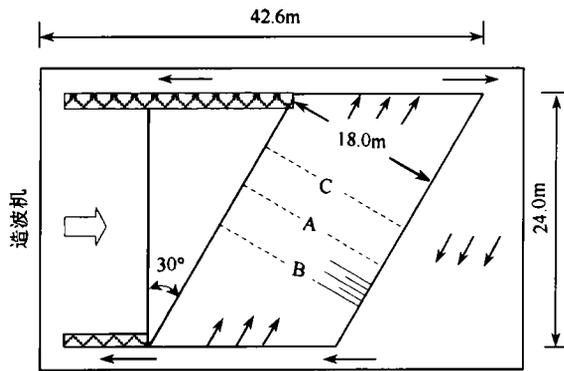


图 1 实验水池示意图

Fig.1 Schematic map of flume

2.2 沿岸流数值计算与物理模型实验结果的比较

图 2 给出了物理模型实验及数值计算得到波浪作用下垂直岸线断面沿岸流速度的分布。规则波浪破碎有明显的破碎位置,规则波浪破碎后,波高突然

衰减。数值计算结果同实验结果吻合良好。

不规则波浪的计算要考虑单向不规则波浪的传播,计算靶谱采用文式谱。规则波浪破碎状态与不规则波浪破碎间的差别造成不规则波浪作用时,沿岸流速度垂直岸线断面上的分布较之规则波浪作用时平缓。

2.3 波浪对均匀岸坡地形上污染物输移扩散的影响

图 3 给出了均匀岸坡地形上不同位置排放污染物的输移扩散计算结果。图中实线为浓度等值线,虚线为水深等值线。计算中入射波浪为规则波浪。4 个投放点 (A, B, C, D) 同时排放污染物,离岸距离分别为 2.0、5.0、8.0 和 14.0m。图 3 中 a, b 比较了相同波浪入射时,不同坡度地形条件下的污染物输移扩散状况。

地形坡度相对较缓时,由于波浪破碎位置离岸距离相对较远,波浪对近岸水域污染物影响范围较大;地形坡度为 1:100 时, A, B, C 点位于波浪破碎区内,三点排放的污染物将在波浪作用下沿平行岸线方向输移扩散,波浪破碎区外的 D 点排放污染物则基本未受到波浪作用的影响,波浪破碎集中区域,波浪破碎产生沿岸流对污染物输移扩散的影响更加明显;地形坡度为 1:40 时,波浪破碎区范围相对较小,波浪破碎区外的 C、D 排放点污染物均未受到波浪作用的影响。

近岸缓坡地形条件下,波浪对污染物输移扩散的影响不可忽略。

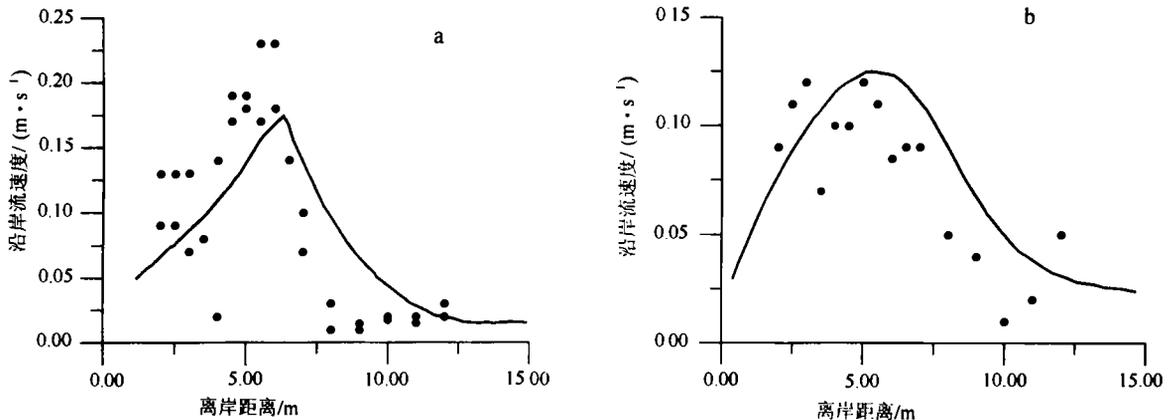


图 2 波浪作用下垂直岸线断面沿岸流速分布

- a. 规则波浪作用,入射波浪周期 $T = 1.0\text{s}$,入射波高 $H = 0.05\text{m}$,地形坡度 1:100 b. 不规则波浪作用,入射波浪平均周期 $T = 1.5\text{s}$,平均波高 $H = 0.05\text{m}$,地形坡度 1:100

Fig.2 Cross-shore velocity distribution of wave-induced long-shore current

- a. incident wave period $T = 1.0\text{s}$, incident wave height $H = 0.05\text{m}$, beach slope 1:100 b. incident average wave period $T = 1.5\text{s}$, average wave height $H = 0.05\text{m}$, beach slope 1:100

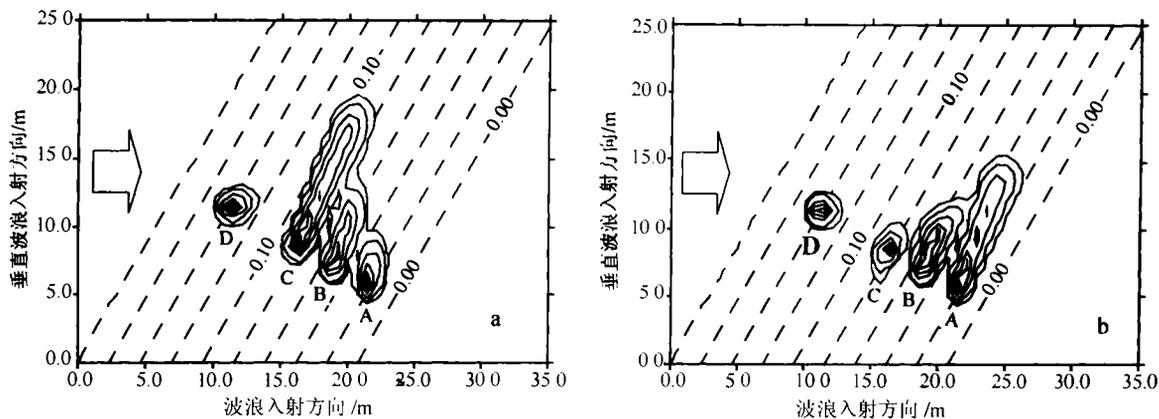


图3 均匀缓坡上规则波浪作用下不同位置污染物排放浓度等值线图

入射波浪周期 $T = 1.0\text{s}$, 入射波高 $H = 0.07\text{m}$, 污染物排放时间 $t = 70\text{s}$ a. 地形坡度 1:100, b. 地形坡度 1:40

Fig.3 Contours of pollutant concentration in different distances from the shoreline waves

incident wave period $T = 1.0\text{s}$; incident wave height $H = 0.07\text{m}$; time intervals after pollutant discharge $t = 70\text{s}$ a. beach slope 1:100, b. beach slope 1:40

3 波浪作用下渤海湾近岸海域污染物输移扩散

均匀岸坡地形上波浪作用下沿岸流分布及相应污染物输移扩散的研究结果表明,缓坡近岸海域内,波浪的作用使一定范围内污染物输移扩散平行岸线方向,从而对远离污染物排放点的近岸水域造成影响。渤海湾近岸海域属于典型的缓坡泥质浅水海岸,其主要波浪入射方向为东向及东南东向。

3.1 规则波浪作用下近岸流分布及相应污染物输移扩散

选择渤海湾主要排污口附近东经 $118^{\circ}7'$ 以西 50km , 北纬 $38^{\circ}38'$ 以北 60.0km 的矩形区域作为研究区域。图4为计算区域地形图。

东向入射波高为 2.9m , 周期为 7.6s 。计算中选取空间步长为 10.0m 。根据波浪传播的计算结果,求得辐射应力的分布,利用波浪作用近岸流数学模型计算得到波浪作用下近岸流分布(图5)。

在实际海域内,波浪和潮流通常同时存在。图6给出了东向波浪与潮流共同存在时的流速分布。

从近岸流、潮流共同存在时近岸海域流速分布可以看出,在近岸海域一定范围内,流动主要以近岸流为主。缓坡浅海区域内,波浪作用下近岸流的强度可以达到与潮流相同的量级,在海域中流动分布的计算应该考虑波浪的存在。

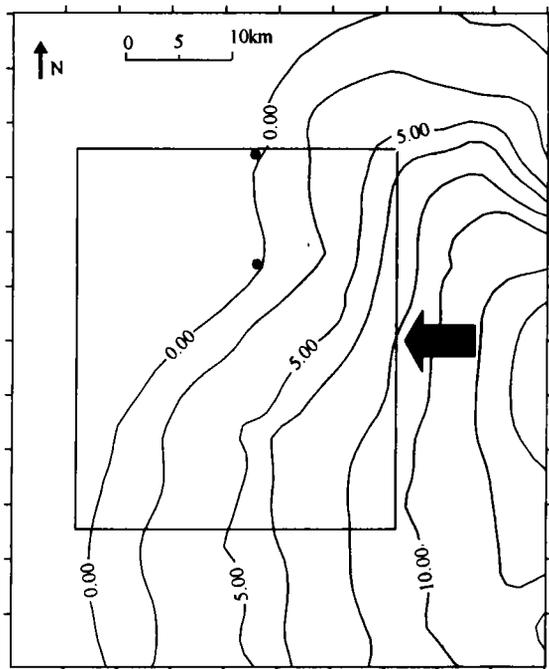


图4 计算区域地形图(m)

Fig.4 Topography of the area of study(m)

图7给出了单纯波浪及波浪、潮流共同作用下,近岸海域内不同位置处污染物连续排放24h的污染频率场。海域各点的污染频率 $P(x_i, y_i)$ 定义为超过一定浓度的污染水体占据该点的累计时间与总体研

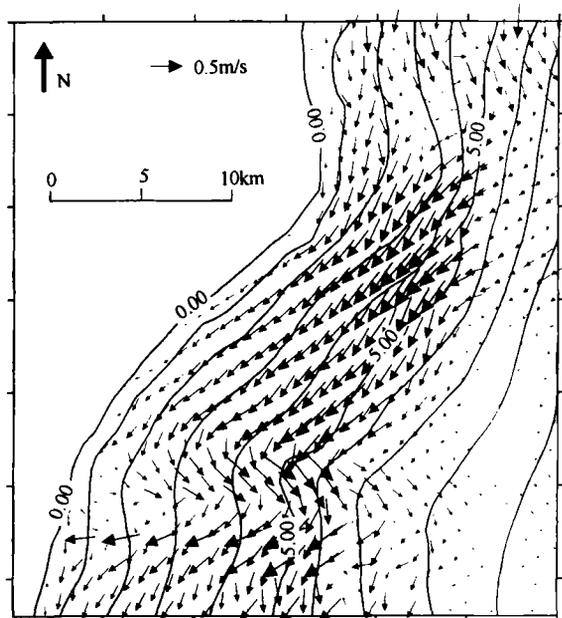


图 5 东向波浪作用下近岸流分布

入射波浪周期 $T = 7.6s$, 入射波高 $H = 2.9m$

Fig.5 Near-shore currents induced by eastward wave from the direction of East

incident wave period $T = 7.6s$, incident wave height $H = 2.9m$

究时间之比(张永良等,1996), $P(x_i, y_i) = \sum_{i=1}^N k_j \cdot \frac{\Delta t}{T_0}$, 其中 Δt 是时间步长, T_0 为总研究时间, $N =$

$T_0/\Delta t$, 当污染物浓度超过确定值时 $k_j = 1$, 否则 $k_j = 0$. 计算中污染物排放点位置的离岸距离分别近似为 0.0、5.0 及 10.0km.

近岸海域一定范围内污染物的输移扩散主要受到波浪作用的控制。波浪、潮流共同作用下, 污染排放影响区域总体与单纯波浪作用结果相似。单纯波浪作用时污染影响区域相对集中。潮流的加入使得污染影响区域垂直于海岸线方向拓展。

图 8a, b 分别给出了东南东向波浪与潮流作用下, 污染物连续排放 24h 海域内的污染频率场。

图 8a 为相对大波高波浪作用下的结果, b 为入射波高相对较小的结果。当入射波高相对较大时, 波浪对污染物输移扩散的影响范围相对较大。而且在东南东向波浪作用下, 向岸流及离岸流的影响比较明显, 远离海岸线排放的污染物在波浪作用下, 依然可以朝向岸线方向输移扩散。

3.2 不规则波浪作用下污染物输移扩散规律

不规则波浪传播、变形及破碎与规则波浪不同, 由此产生近岸流的分布也将不同。作者分析了渤海湾最常见的东向波浪作用下, 单向不规则波浪及多向不规则波浪作用下近岸流的分布及相应污染物输移扩散, 研究得出不规则波浪对污染物输移扩散的影响。

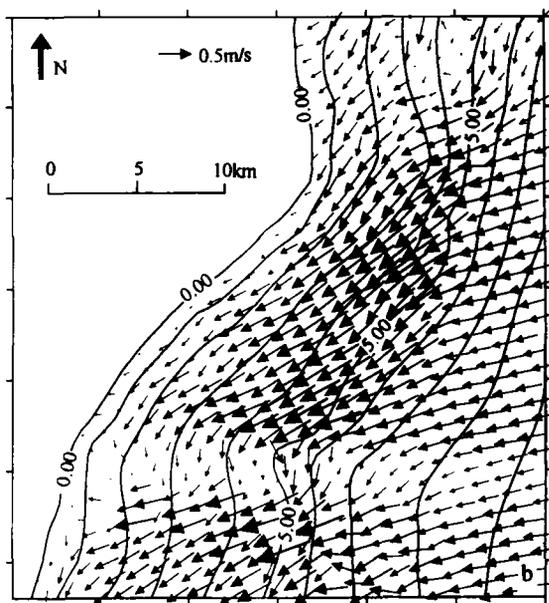
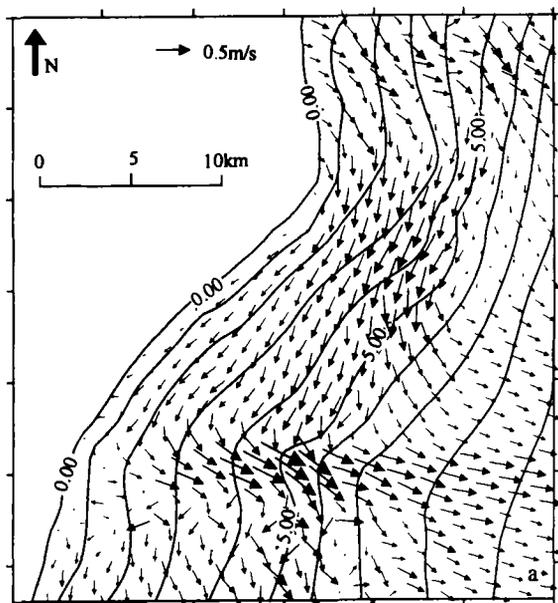


图 6 波浪、潮流共同作用时流速分布

入射波浪周期 $T = 7.6s$, 入射波高 $H = 2.9m$ (东向); a. 落潮阶段, b. 涨潮阶段

Fig.6 Distribution of currents on the combined action of wave and tide

incident wave period $T = 7.6s$, incident wave height $H = 2.9m$ (from the direction of East); a. Ebb tide, b. Flood tide

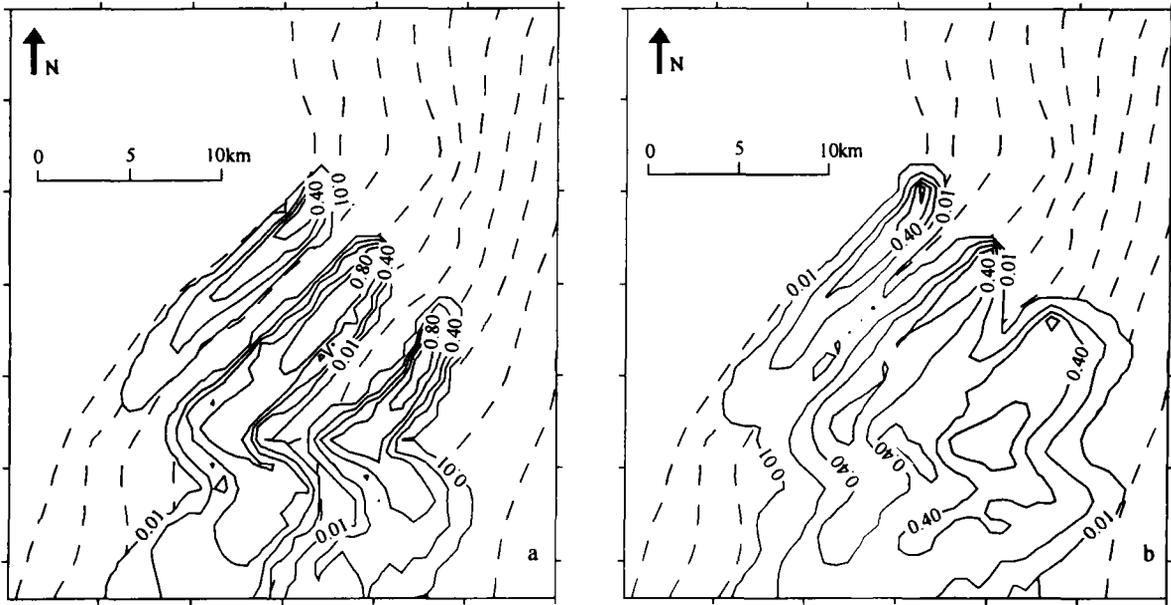


图 7 单纯波浪(a)及波浪、潮流共同(b)作用下连续源污染频率场
入射波浪周期 $T = 7.6s$, 入射波高 $H = 2.9m$ (东向)(24h)

Fig. 7 Contour of contaminated probability for continuous discharge on the action of pure wave(a), combined action of wave and tide current(b)

incident wave period $T = 7.6s$; incident wave height $H = 2.9m$ (from the direction of East), (24h)

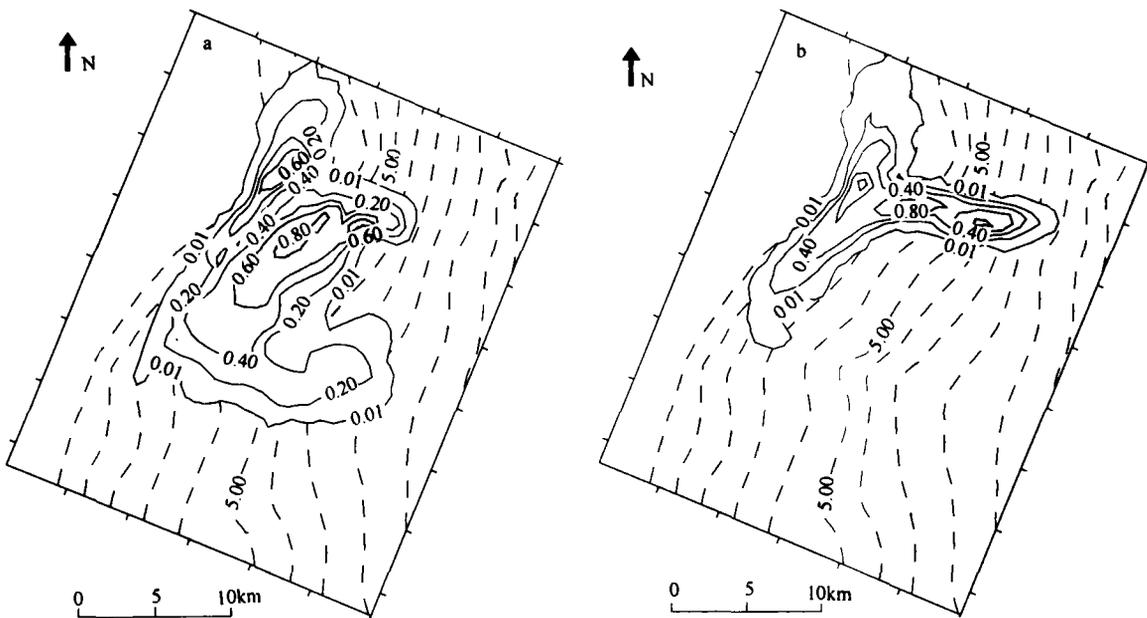


图 8 波浪(东南东向)、潮流共同作用下连续源污染频率场,(24h)

a. 入射波浪周期 $T = 7.6s$, 入射波高 $H = 3.31m$; b. 入射波浪周期 $T = 5.4s$, 入射波高 $H = 1.4m$

Fig. 8 Contour of contaminated probability for continuous discharge acted by wave(from the direction of ESE)and tide current(24h)

a. incident wave period $T = 7.6s$, incident wave height $H = 3.31m$; b. incident wave period $T = 5.4s$, incident wave height $H = 1.4m$

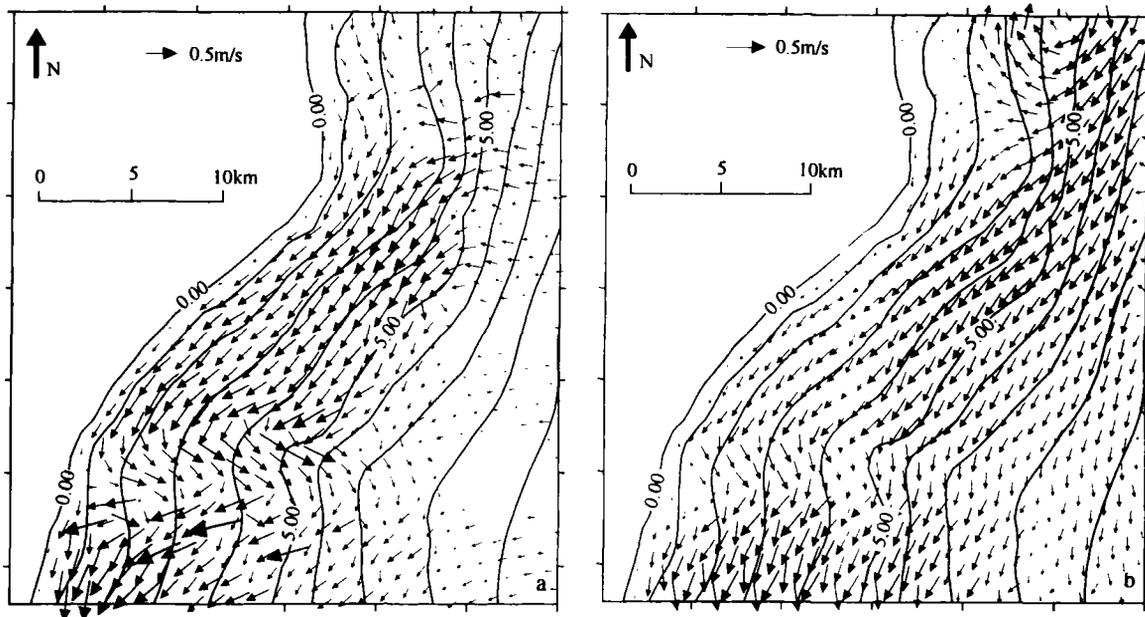


图9 不规则波浪作用下近岸流速度分布

入射有效周期 $T_{1/3} = 7.6s$, 入射有效波高 $H_{1/3} = 2.9m$ a. 单向不规则波浪作用, b. 多向不规则波浪作用

Fig.9 Near-shore currents induced by irregular wave

Incident significant wave period $T_{1/3} = 7.6s$, Incident significant wave height $H_{1/3} = 2.9m$ a. acted by mono-directional irregular wave, b. acted by multi-directional irregular wave

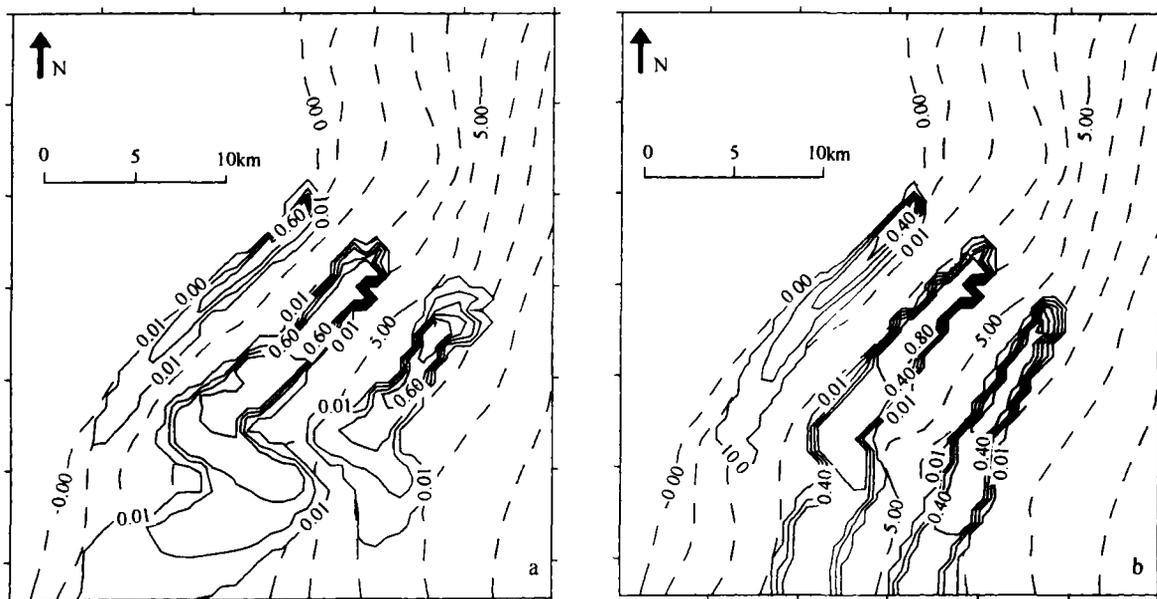


图10 不规则波浪作用下连续源污染频率场(24h)

入射有效周期 $T_{1/3} = 7.6s$, 入射有效波高 $H_{1/3} = 2.9m$ a. 单向不规则波浪作用, b. 多向不规则波浪作用

Fig.10 Contour of contaminated probability for continuo, discharge acted by irregular wave(24h)

Incident significant wave period $T_{1/3} = 7.6s$. Incident significant wave height $H_{1/3} = 2.9m$ a. acted by mono-directional irregular wave, b. acted by multi-directional irregular wave

单向不规则波浪计算靶谱采用交通部港口工程技术规范谱,其表达式为(竺艳蓉,1991):

$$S(\omega) = \frac{0.74}{\omega^5} \exp\left[-\frac{2.45}{\omega^2 H_{1/3}}\right] \quad (16)$$

并有 $\omega_m = 0.993/\sqrt{H_{1/3}}$ 。方向分布函数 $G(\omega, \theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta$ 。图 9 给出了不规则波浪作用下的近岸流分布。计算中选取东向为主波向。

与相应规则波浪作用下的近岸流分布相比较,单向不规则波浪作用下近岸流分布稍平缓一些,反映在靠近岸线水域水流流速比规则波浪作用下近岸流结果稍大,两者分布总体差别不明显。多向不规则波浪作用下近岸流分布较之规则波浪及单向不规则波浪作用的结果平缓,离岸流的存在不再明显。

图 10 给出了不规则波浪作用下,连续源污染排放 24h 后海域内污染物输移扩散结果。

计算结果显示,单向不规则波浪作用下,污染物输移扩散结果基本与规则波浪作用结果相似,岸边排放污染物在单向不规则波浪作用下输移扩散范围稍大。多向不规则波浪的作用使得近岸流垂直岸线方向分布更加均匀。

4 结论

利用物理模型实验和数学模型计算相结合,研究了规则和不规则波浪对渤海湾近岸海域污染物输移扩散规律的影响。波浪作用下污染物输移扩散数学模型经过了实验结果的验证,可应用于模拟大面积实际海域内波浪传播、破碎及相应近岸流的分布和污染物的输移扩散。

研究比较近岸缓坡海域内单纯波浪以及波浪、潮流共同作用的结果发现,在近岸海区一定范围内,流动主要以近岸流为主,其范围受到入射波浪的影响。在波浪破碎区内,潮流对污染物输移扩散的影响明显小于波浪变形、破碎形成近岸流的作用,污染物输移扩散表现为平行岸线方向,而且会随波浪入射方向的变化而变化,从而造成岸边一定范围排放的污染物不能很快地在潮流作用下扩散至外海,而是首先在波浪作用下平行岸线方向运动。

在渤海湾主波向波浪的作用下,远离污染物排放点的海湾南部近岸海域、滩涂地区将受污染物排放的影响。准确掌握缓坡近岸海域污染物输移扩散规律,特别是波浪在其中的作用,将为合理确定污染物离岸排放工程的规模和污染物排放位置提供科学依据,同时也将为确定陆源污染物允许排海量和认识近岸海域污染状况提供科学依据。缓坡近岸海域

污水海洋处置工程设计中必须充分考虑波浪的作用,污染物离岸排放位置应处于波浪破碎区以外,避免近岸海域排放污染物在波浪作用下对近岸其它水域造成影响。

致谢 波浪作用下沿岸流实验工作在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室完成,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 文圣常,余宙文,1984. 海浪理论与计算原理. 北京:科学出版社,617—618
- 孙涛,韩光,陶建华,2002. 波生沿岸流数值模拟研究及其实验验证. 水利学报,11:1—9
- 李玉成,于洋,崔丽芳等,2000. 平缓岸坡上波浪破碎的实验研究. 海洋通报,19(1):10—18
- 朱永春,蔡启铭,1998. 太湖梅梁湾三维水动力学的研究 I. 模型的建立及结果分析. 海洋与湖沼,29(1):79—85
- 张永良,阎鸿邦,1996. 污水海洋处置技术指南. 北京:中国环境科学出版社,151—153
- 沈志良,刘群,张淑美,2003. 长江总氮和有机氮的分布变化和迁移. 海洋与湖沼,34(6):577—585
- 竺艳蓉,1991. 海洋工程波浪力学. 天津:天津大学出版社,201
- 徐洪达,王钟楦,刘赞沛,1984. 渤海潮混合数值模拟 III. 渤海污染物潮扩散的数值计算. 海洋与湖沼,15(2):137—145
- Briand M H G, Kamphuis J W, 1993. Waves and currents on natural beaches: a quasi 3-D numerical model. Coastal Engineering, 20(1—2):101—134
- Chawla A, Ozkan-Haller H T, Kirby J T, 1998. Spectral model for wave transformation and breaking over irregular bathymetry. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 124(4):189—198
- Dally W R, Dean R G, Dalrymple R A, 1985. Wave height variation across beaches of arbitrary profile. Journal of Geophysical Research, 90 (C6):11917—11927
- Dally W R, Osiecki D A, 1994. The role of rollers in surf zone currents. Proceedings 24th International Conference Coastal Engineering. Kobe, Japan, ASCE, 2:1895—1905
- Goda Y, 2001. A new approach to beach morphology with the focus on suspended sediment transport. The Proceedings of the First Asian and Pacific Coastal Engineering (Dalian). APACE, 1: 1—24
- Longuet-Higgins M S, 1970. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, Parts 1 and 2. J Geophys Res, 75: 6778—6801
- Larson M, Kraus N C, 1991. Numerical model of longshore cur-

- rents for bar and trough beaches. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 117(4): 326—347
- Rattanapitikon K, Shibayama T, 1998. Energy dissipation model for regular and irregular breaking waves. *Coastal Engineering*, 40(4):327—346
- Rodriguez A, Sanchez-Arcilla A, Redondo J *et al*, 1995. Pollutant dispersion in the nearshore region: modelling and measurements. *Wat Sci Tech*, 32(9—10):169—178
- Reniers A J H M, Battjes J A, 1997. A laboratory study of long-shore currents over barred and non-barred beaches. *Coastal Engineering*, 30(1—2):1—22
- Tao Jianhua, Han Guang, 2002. Effects of water wave motion on pollutant transport in shallow coastal water. *Science in China, Series E*, 45(6): 593—605

THE STUDY OF POLLUTANT TRANSPORT ON THE ACTION OF WAVES IN THE NEAR-SHORE AREA OF BOHAI BAY

SUN Tao, TAO Jian-Hua

(*Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072*)

Abstract Bohai bay is a typical example of shallow water, mild slope beach with weak water exchange ability in the west of Bohai Sea in China. Accompanying the rapid economic development in the Bohai sea coastal regions has been a serious deterioration of water quality, mainly due to influx of wastewater from Beijing, Tianjin and Hebei province. The ecological environment has been altered and red tides (HAB) now appear frequently. The transport of pollutant is complex in the near-shore area because of the effect of many dynamic factors. In this paper, the state of contamination in the near-shore area of Bohai bay, especially the effect of wave-induced current, the influence of waves on pollutant transport in the near-shore area of Bohai bay is studied by physical experiment and numerical simulation.

The experimental and numerical study on pollutant transport on the action of the regular and irregular waves is investigated for two mild beaches with different slopes in a wave basin. The numerical model is combined with a wave propagation model, a wave-breaking model, a wave-induced current model and a pollutant transport model. The numerical wave propagation model is established based on the high-order approximation of parabolic mild slope equation and it can be used to simulate the wave refraction, diffraction and breaking in the near-shore area combined with wave breaking model. The wave-induced current model is based on the concept of the radiation stress.

The experiments of long-shore current were conducted in the wave basin, which is 42.6m long, 24.0m wide and 1.0m deep. The plane beach was rotated at 30° with respect to the wave marker to increase the length of the beach and make the wave propagate obliquely to the shoreline. Long-shore current induced by the regular and irregular waves with different wave factors is investigated over two mild beaches with different slopes. The agreement between numerical and experimental results is good. The results proved that the pollutant transport in the area outside of the surf-zone is not significantly affected by the effect of wave, and pollutant transport will be parallel approximately to shoreline on the action of wave in the surf-zone.

The effect of waves on pollutant transport near the main sewage outfalls in the Bohai bay were studied by analyzing the distributions of velocities and the pollutant transport under pure wave, pure tide and the combined action of wave and tide. It is concluded that the pollutant transport is influenced significantly by the wave action at certain areas of near-shore zone with mild slope beach. The contaminated area on the combined action of wave and tide is similar to the results on the effect of pure wave. The effect of wave is that contamination is far from outfall in the near-shore zone. The effect of tide current is to extend the contaminated area across to the shoreline.

The direction of pollutant transport is parallel approximately to the shoreline and changes according to wave direction. Compared to the results from regular wave and single-directional irregular wave, cross-shore distributions of current induced by multi-directional irregular waves are more gentle and the pollutant transport on the action of single-directional irregular waves are similar to the results of regular waves. Due to the effect of the waves, the mudflat will be contaminated even away from sewage outfalls. It is thus important, when designing wastewater outfall locations, to place the outfall location outside the surf-zone by considering the action of waves on mild slope beaches such as Bohai bay.

Key words Bohai bay, Water waves, Near-shore current, Pollutant transport