

近岸波浪破碎区污染物运动的数值模拟

唐 军, 沈永明, 邱大洪

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116023)

[摘要] 波浪斜向近岸传播中由波浪破碎作用所引起的近岸波流体系是近岸非常重要的环境水动力因素, 对该区域污染物的运动分布起着重要的影响作用。结合近岸波浪传播的抛物型缓坡方程、近岸波流场数学模型及污染物在近岸波流作用下运动的数学模型, 对近岸斜向入射波浪破碎所产生的沿岸波流场中污染物的分布运动过程进行了数值模拟, 并结合实验结果对数值模拟结果进行了分析验证。

[关键词] 抛物型缓坡方程; 波浪破碎区; 辐射应力; 沿岸流; 污染物

[中图分类号] TV139.2; X143 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)12-0063-06

1 前言

随着沿海经济的快速发展, 愈来愈多的工业和生活污染物被排入了沿海海域, 给近岸海域带来了严重的污染, 近海海域环境明显下降, 对沿岸人类的生产、生活活动造成了很大负面影响。近岸海域的环境直接影响到沿海经济的开发与建设, 近海水域的污染已成为沿海国家和城市所共同关注的环境问题^[1]。同时近岸海域是各种水动力因素最复杂的地区之一, 特别是平缓海岸, 波浪在向近岸传播的过程中, 随着水深的变浅, 波浪会发生折射、反射、绕射以及破碎等作用, 其中由波浪破碎作用引起的近岸波流体系对近岸污染物的运动起着非常重要的影响作用。为了治理和保护近岸环境, 就要以近海各种动力因素的运动规律为基础, 分析并揭示污染物在近岸各种复杂环境动力条件下的运动规律。

由于近岸缓坡区域通常水深较浅, 水体的垂向尺度远小于其水平尺度, 水体中污染物沿垂向很快混合均匀, 可将近岸水体和污染物在近岸的运动简化为二维平面运动。国内外许多学者在近岸波流体系方面做了大量研究工作^[2~10], 并取得了大量研究成果。考虑到波浪向近岸传播的过程中, 由于地形

的影响作用, 波浪会发生折射、绕射等各种效应, 致使波浪传播方向不易确定, 郑永红等^[6]从波浪辐射应力定义出发, 将辐射应力和抛物型缓坡方程中的待求变量直接联立起来计算笔者基于近岸抛物型缓坡方程、近岸波流场数学模型和污染物在波流作用下运动的数学模型对污染物在近岸波流场中的运动分布过程进行了数值模拟。通过和实验结果比较对数值模型进行了分析验证。

2 数学模型

在近岸缓坡区域, 二维平面波浪传播的抛物型缓坡方程、近岸波流场数学模型及波流作用下污染物运动的数学模型可分别由如下方程来描述。

2.1 抛物型缓坡方程

在假定波浪沿某一主方向传播且忽略波浪沿主传播方向反射作用的基础上, Kirby^[2]提出了如下适用于近岸缓坡区域波浪传播的抛物型缓坡方程, 如果考虑波浪的破碎效应, 方程形式为

$$C_{\varepsilon} \frac{\partial A}{\partial x} + \left[E' + \frac{1}{2} \frac{\partial C_{\varepsilon}}{\partial x} \right] A - \frac{b_1}{\omega k} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[C C_{\varepsilon} \frac{\partial A}{\partial y} \right] + F' \frac{\partial}{\partial y} \left[C C_{\varepsilon} \frac{\partial A}{\partial y} \right] = 0 \quad (1)$$

[收稿日期] 2006-02-27; 修回日期 2007-09-13

[基金项目] “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB403302); 国家自然科学基金资助项目(50709004, 50779006); 海洋工程国家重点实验室研究基金课题

[作者简介] 唐 军(1976-), 男, 宁夏中宁县人, 博士, 大连理工大学讲师, 从事环境水力学研究

其中 $E' = i(k - a_0 k) C_g + i C_g D |A|^2 / 2 + D_b / (2E)$,

$$F' = i(a_1 - b_1 k/k) / \omega + b_1 [k_x/k^2 + (C_g)_x / (2k C_g)] / \omega,$$

非线性项 D 为

$$D = k^3 C [\cosh(4kh) + 8 - 2 \tanh^2(kh)] / [8 \sinh^4(kh) C_g].$$

式中 x 方向为波浪传播主方向, y 方向为和波浪传播主方向正交的方向, $A(x, y)$ 为波浪复振幅, i 为虚数单位, k 为波数, ω 为波浪角频率, $C = \omega/k$ 为波浪相速度, $C_g = \partial\omega/\partial k$ 为波浪群速度, h 为静水深, \bar{k} 为沿 y 方向上 k 的平均值, a_0, a_1, b_1 为根据波浪传播最大可偏离主传播方向的角度 θ_α 而确定的系数, D_b 为波浪破碎的能量损失, H 为波高, $E = \rho g H^2 / 8$ 为波浪能量。

在波浪传播模型中, 一般认为当某点的波高大于该点的最大破碎波高 H_b 时, 该点波浪发生破碎。最大破碎波高 H_b 可近似取为

$$H_b = \gamma h \quad (2)$$

其中 γ 为波浪破碎指标, 一般可取 $0.4 \sim 0.8$ 。波浪破碎的能量损失可取^[3]

$$D_b = K C_g (E - E_s) / h \quad (3)$$

式中 $K \approx 0.15$ 为经验系数, E_s 为波浪稳定能量, 一般可取水深 $0.4 h$ 处以下的波浪能量。考虑到波浪破碎能量损失因子的不确定性和计算效率, 波浪破碎区波高取 $H = \gamma h$ 。

2.2 近岸波流场数学模型

由波浪引起的近岸波流场可采用如下深度平均的二维浅水方程作为控制方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U(h + \eta)) + \frac{\partial}{\partial y}(V(h + \eta)) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho(h + \eta)} \left[\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right] - \frac{1}{\rho(h + \eta)} (\tau_{\eta x} - \tau_{bx}) - A_{mx} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho(h + \eta)} \left[\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right] - \frac{1}{\rho(h + \eta)} (\tau_{\eta y} - \tau_{by}) - A_{my} = 0 \quad (6)$$

式中 U 和 V 分别为 x 和 y 方向的水平速度分量, η 为平均水面升高, S_{xx}, S_{xy}, S_{yx} 和 S_{yy} 分别为波浪引起的辐射应力分量^[4,5], $\tau_{\eta x}$ 和 $\tau_{\eta y}$ 分别为 x 和 y 方向的表面切应力分量, τ_{bx} 和 τ_{by} 分别为 x 和 y 方向的底部

切应力分量, A_{mx} 和 A_{my} 分别为 x 和 y 方向的侧向湍流应力分量。

郑永红等^[6]从辐射应力定义出发, 基于抛物型缓坡方程中的待求变量提出了如下波浪辐射应力的计算表达式:

$$S_{xx} = \frac{\rho g}{4} \left[\left| \frac{\partial A}{\partial x} + ikA \right|^2 \frac{1}{k^2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] + \left[|A|^2 \frac{2kh}{\sinh 2kh} + \frac{2kh/\tanh 2kh - 1}{2k^2} \cdot \left[\left| \frac{\partial A}{\partial x} + ikA \right|^2 + \left| \frac{\partial A}{\partial y} \right|^2 - k^2 |A|^2 \right] \right] \right] \quad (7)$$

$$S_{yy} = \frac{\rho g}{4} \left[\left| \frac{\partial A}{\partial y} \right|^2 \frac{1}{k^2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] + \left[|A|^2 \frac{2kh}{\sinh 2kh} + \frac{2kh/\tanh 2kh - 1}{2k^2} \cdot \left[\left| \frac{\partial A}{\partial x} + ikA \right|^2 + \left| \frac{\partial A}{\partial y} \right|^2 - k^2 |A|^2 \right] \right] \right] \quad (8)$$

$$S_{xy} = \frac{\rho g}{4} \operatorname{Re} \left[\left[\frac{\partial A}{\partial x} + ikA \right] \frac{\partial A^*}{\partial y} \right] \cdot \frac{1}{k^2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \quad (9)$$

式中 $A(x, y)$ 为波浪复振幅 $A(x, y)$ 的共轭复数, 其余各量含义同前。

波流场中底部切应力分量 τ_{bx} 和 τ_{by} 分布比较复杂, 弱流或流速趋近垂直于波向的环境中时可取^[7]:

$$\tau_{bx} = 4\rho c_t u_0 U / \pi \quad (10)$$

$$\tau_{by} = 2\rho c_t u_0 V / \pi \quad (11)$$

式中 u_0 为近底波浪水质点速度幅值, 可由线性波浪理论得出 $u_0 = 2\pi a_{wb} / T$, 其中 $a_{wb} = H / (2 \sinh kh)$ 为由线性波浪理论得出的近底波浪水质点水平轨迹振幅; c_t 为波流综合作用下的底摩擦系数, 其量级约为 10^{-2} , 对近岸流速的大小有重要影响。采用该公式的优越性在于其格式相对简便灵活。

侧向湍流项为:

$$A_{mx} = \partial(\mu(\partial U/\partial x)) / \partial x + \partial(\mu(\partial U/\partial y)) / \partial y \quad (12)$$

$$A_{my} = \partial(\mu(\partial V/\partial x)) / \partial x + \partial(\mu(\partial V/\partial y)) / \partial y \quad (13)$$

式中 μ 为波流作用下的侧向紊动系数, 采用 L-H 模型确定其取值^[8]:

$$\mu = N x_1 (gh)^{1/2} \quad (14)$$

其中 x_1 为波浪破碎点的岸边距; $N \approx 0 \sim 0.016$ 为无因次量, 对近岸流在波浪破碎区的分布起着重要作用, 破碎带外, μ 取其在波浪破碎点的值。

2.3 波流作用下近岸污染物运动数学模型

波流作用下,污染物在近岸浅水区域的运动可由如下方程控制:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{h + \eta} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[(h + \eta) D_{cwx} \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(h + \eta) D_{cwy} \frac{\partial c}{\partial y} \right] \right] + S_m \quad (15)$$

式中 c 为沿深度平均的污染物浓度, D_{cwx} 和 D_{cwy} 分别为波流共同作用下污染物沿 x 和 y 方向的扩散系数, S_m 为污染物的源汇项。

波流共同作用下污染物的扩散系数比较复杂,文中按线性叠加取^[11]:

$$D_{c_w} = D_c + D_w \quad (16)$$

其中 D_c 为流作用下污染物的扩散系数,取为^[12]

$$D_{c_x} = (k_1 U^2 + k_2 V^2) h g^{1/2} / [C(U^2 + V^2)^{1/2}] \quad (17)$$

$$D_{c_y} = (k_1 V^2 + k_2 U^2) h g^{1/2} / [C(U^2 + V^2)^{1/2}] \quad (18)$$

式中 D_{c_x} 和 D_{c_y} 分别为流作用下污染物在 x 和 y 方向的扩散系数, C 为 Chezy 系数,取 $k_1 = 5.93$ 和 $k_2 = 0.15$ ^[13, 14]。波浪作用下污染物的扩散系数 D_w 取^[11, 15]

$$D_{wx} = D_{wy} = 0.035 \alpha_1 h H / T \quad (19)$$

式中 D_{wx} 和 D_{wy} 分别为波浪作用下污染物在 x 和 y 方向的扩散系数; α_1 为经验系数,考虑到波浪破碎作用的影响,在波浪破碎区和非破碎区采用不同的系数

$$\alpha_1 = \begin{cases} 5.5H/h - 2.0 & \text{破碎区,} \\ 1.0 & \text{非破碎区} \end{cases} \quad (20)$$

3 数值模型的验证

笔者结合在海岸和近海工程国家重点实验室开展的污染物在近岸斜向入射波浪破碎形成的波流场中运动实验的部分实验资料来分析验证文中数值模型。实验地形布置如图 1 所示^[9]。实验工况及数值模型中的计算参数如表 1 所示,其中 h_0 为波浪入射位置静水深; θ 为入射波浪与岸坡间的夹角; H_0 为入射波高; T 为入射波浪周期, L 为污染物排放点岸边距。数值模型的离散求解结合有限差分法进行。在前述研究中,对各计算工况下近岸抛物型缓坡方程和近岸沿岸流的数值模型已进行了验证^[10],在此仅对近岸波流场中污染物的分布运动过程进行数值验证。

表 1 污染物运动工况模型计算参数

Table 1 Computational parameters in pollutant transport model case

工况	岸坡	h_0/m	θ	H_0/m	T/s	γ	c_f	N	L/m	排放方式
1	1:40	0.45	30°	0.05	1.0	0.7	0.009	0.001 2	3.0	连续点源
2	1:40	0.45	30°	0.09	1.0	0.7	0.009	0.001 2	3.0	连续点源
3	1:40	0.45	30°	0.05	2.0	0.7	0.009	0.001 2	3.0	连续点源
4	1:40	0.45	30°	0.09	2.0	0.7	0.009	0.001 2	3.0	连续点源
5	1:40	0.45	30°	0.05	2.0	0.7	0.009	0.001 2	3.0	瞬时点源
6	1:100	0.18	30°	0.05	2.0	0.6	0.0065	0.001 2	4.5	连续点源

图 2 为与实验工况和计算工况(图 3 至图 8)相对应的相对参考坐标(实验中为便于图像采集,不同实验工况中污染物运动范围的坐标略有变化,为此计算结果和实验结果均采用相对参考坐标给出)。图 3 至图 8 为各工况下污染物运动中的污染物分布范围随时间变化的实验结果和数值模拟结果的比较,图中所给的曲线为各时刻污染团分布范围的等浓度线,其中数值模拟所示结果中给定的污染物最小相对浓度值为 10^{-4} (相对于排放点污染物初始浓度值)。由各工况下污染物在各时刻分布的数值计算结果可以看出,在以一定角度斜向近岸传播破碎所产生的沿岸波流场中,污染物主要沿着沿岸方向运动;随着斜向入射波高和近岸底坡的增加,污染物运动的速度明显加快,这和实验所得污染物运

动分布的趋势是相一致的。但由于整个实验过程历时较长,且实验环境背景变化较大,给实验分析带来了一定困难,也给污染物浓度场的定量分析带来了一定难度;同时,数值计算所采用的近岸波流场模型和污染物运动的数学模型为二维平面模型,计算所得污染物浓度分布为沿水深的深度平均值,而实验中所得污染物浓度分布范围为沿水深的垂向叠加值,这些都使得实测值和计算值存在一定差异性。但由于通常近岸波浪破碎区水深较浅,污染物浓度分布沿水深较为均匀,因此污染物沿水深分布范围的垂向叠加值和其沿水深分布范围的平均值随时间的变化过程较为接近(但其浓度值不同),为此给出了污染物分布范围随时间运动变化过程的数值模拟结果和实验结果的比较。由图 3 至图 8 中污染物运

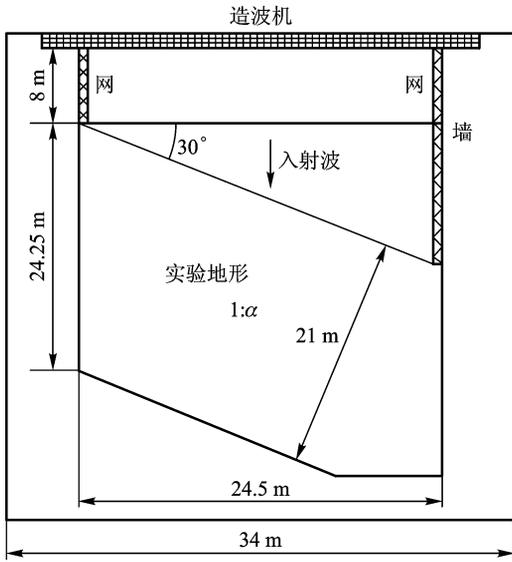


图1 实验地形布置图

Fig. 1 Experimental topography set

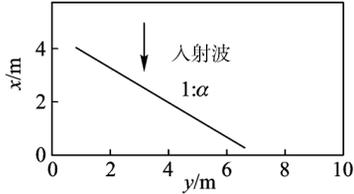


图2 污染物运动相对参考坐标系

Fig. 2 Relative coordinates for pollutant movement

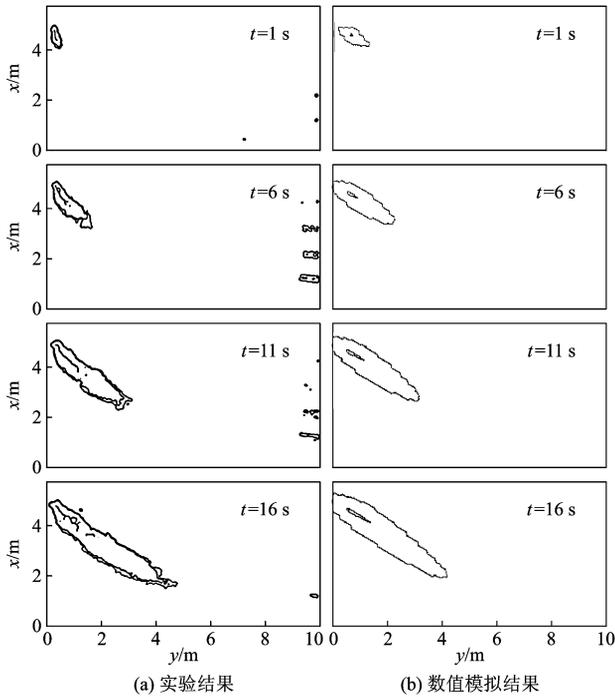


图3 工况1 污染物分布范围的数值模拟结果和实验结果比较

Fig. 3 Comparison between numerical and experimental results of pollutant contours in case 1

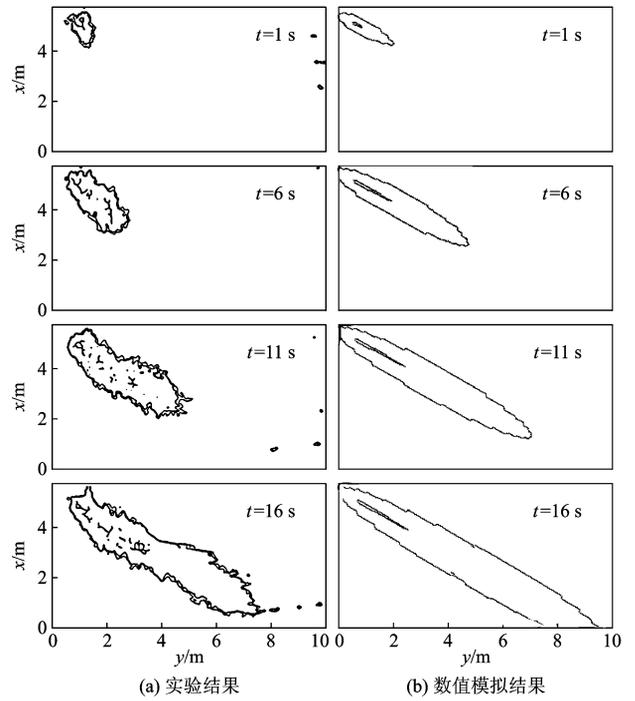


图4 工况2 污染物分布范围的数值模拟结果和实验结果比较

Fig. 4 Comparison between numerical and experimental results of pollutant contours in case 2

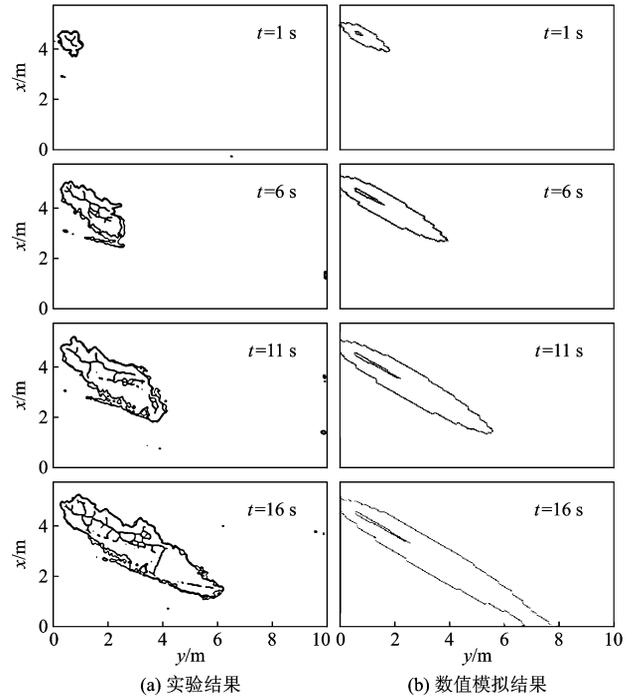


图5 工况3 污染物分布范围的数值模拟结果和实验结果比较

Fig. 5 Comparison between numerical and experimental results of pollutant contours in case 3

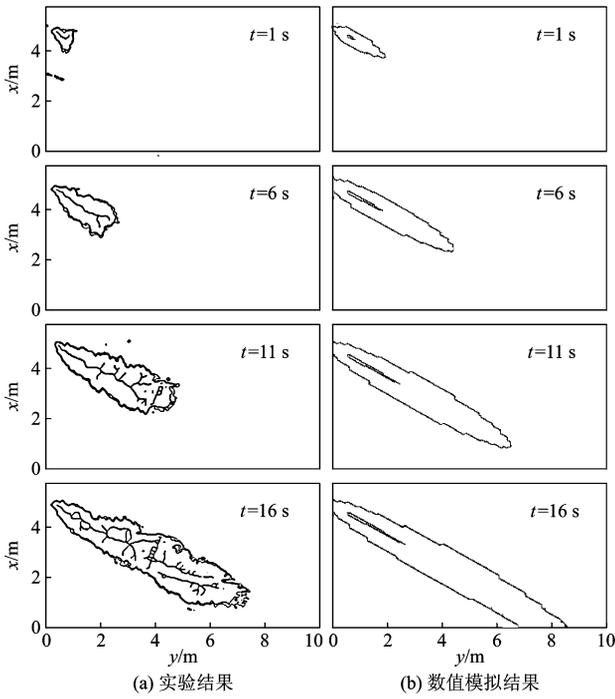


图6 工况4 污染物分布范围的数值模拟结果和实验结果比较

Fig. 6 Comparison between numerical and experimental results of pollutant contours in case 4

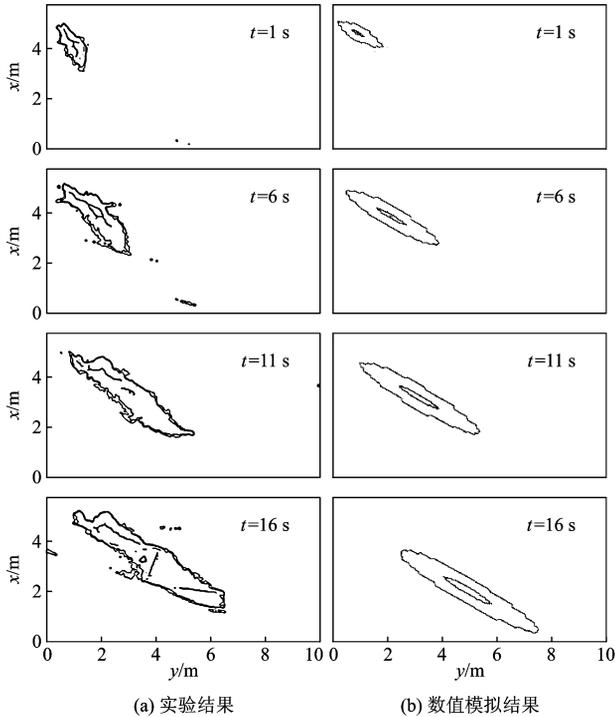


图7 工况5 污染物分布范围的数值模拟结果和实验结果比较

Fig. 7 Comparison between numerical and experimental results of pollutant contours in case 5

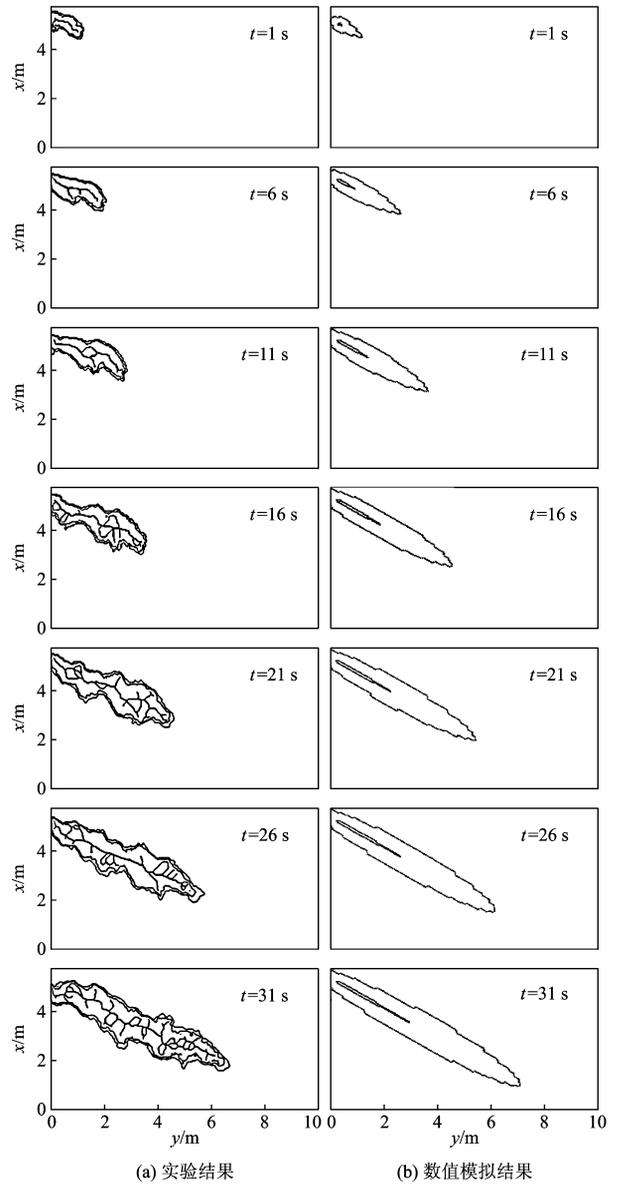


图8 工况6 污染物分布范围的数值模拟结果和实验结果比较

Fig. 8 Comparison between numerical and experimental results of pollutant contours in case 6

动分布的数值模拟结果和实验结果比较可以看出,污染物随时间运动分布过程的数值模拟结果和实验结果在总体趋势上符合良好。通过上述数值计算结果也可看出,在近岸缓坡区域,由斜向入射波浪破碎作用所产生的近岸波流体系对沿岸污染物的运输分布起着不可忽略的影响作用。

4 结论

在近岸缓坡区域,波浪向近岸传播中由波浪破碎作用所产生的近岸波流场是近岸非常重要的环境动力因素,对近岸污染物的运动起着重要影响作用。

结合抛物型缓坡方程、近岸波流场数学模型和污染物在近岸波流作用下运动的数学模型对污染物在近岸斜向入射波浪破碎产生的波流场中随时间运动分布的过程进行了数值模拟,并对数值模拟结果进行了验证分析。数值模拟结果表明,在波浪以一定角度斜向近岸传播破碎产生的沿岸波流场中,随着斜向入射波浪波高和沿岸底坡的增加,污染物运动的速度明显加快,近岸缓坡区域波浪向近岸传播中破碎所产生的波流场对污染物的运动分布起着重要影响作用。限于实验环境的影响,仅结合实验结果对数值模拟结果进行了定性分析,更进一步的研究将在后续工作中开展。

参考文献

- [1] 邱大洪. 海岸和近海工程学科中的科学技术问题[J]. 大连理工大学学报, 2001, 40(6): 631 ~ 637
- [2] Kirby J T. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves [J]. Coastal Engineering, 1986, 10: 355 ~ 378
- [3] Dally W R, Dean R G, Dalrymple R A. Wave height verification across beaches of arbitrary profile [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(C6): 11917 ~ 11927
- [4] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stress mass transport in gravity waves, with application to surf beats [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1962, 13: 481 ~ 504
- [5] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Radiation stress in water waves; a physical discussion with applications [J]. Deep-Sea Research, 1964, 31: 529 ~ 562
- [6] 郑永红, 沈永明, 邱大洪. 结合抛物型缓坡方程计算波浪辐射应力[J]. 海洋学报, 2002, 6: 110 ~ 116
- [7] Birkermeier W A, Dalrymple R A. Nearshore water circulation induced by wind and waves [A]. Proceedings of the Symposium on Modeling Technique [C]. ASCE, 1975. 1062 ~ 1081
- [8] 金忠青. 用混合紊流模型求解沿岸流和近岸流[J]. 河海大学学报, 1988, 16(2): 76 ~ 85
- [9] 王淑平. 沿岸流的研究[D]: 大连: 大连理工大学, 2001
- [10] 沈永明, 唐军, 郑永红, 等. 基于抛物型缓坡方程模拟近岸波流场[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 301 ~ 307
- [11] Katopodi I, Ribberink J S. Quasi-3D modeling of suspended sediment transport by currents and waves [J]. Coastal Engineering, 1992, 18(1 ~ 2): 83 ~ 110
- [12] Falconer R A. Water quality simulation study of a natural harbor [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1986, 112(1): 15 ~ 34
- [13] Elder J W. Computational Hydraulics [M]. Pitman Publishing Limited, London, England, 1979
- [14] Fischer H B. Longitudinal dispersion and turbulent mixing in open channel flow [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1978, 5: 59 ~ 78
- [15] Van-Rijin L C. Sedimentation of dredged channels by currents and waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1986, 112(5): 541 ~ 559

Numerical Simulation of Pollutants Movement in Coastal Surf Zone

Tang Jun, Shen Yongming, Qiu Dahong

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian, Liaoning 116023, China)

[Abstract] In coastal and offshore areas, the breaking-wave-induced currents induced as waves propagate obliquely to coastal zone are important environmental factors, which play important roles on movement and distribution of pollutants in these zones. Based on parabolic mild slope equation for wave propagating in mild slope zones, the near-shore currents model, as well as model of pollutants movement in near-shore water waves and currents, pollutants movement processes in water waves and long-shore currents, which are induced by inclined incident coastal water waves, were numerical simulated, and the numerical results were validated and analyzed.

[Key words] parabolic mild slope equation; surf zone; wave radiation stress; long-shore currents; pollutants