

波浪和风生浪流作用下的近岸海底 泥沙运移模型的推广和应用

邹舒觅, 林 緬

(中国科学院力学研究所工程科学部,北京 100080)

摘 要 本文利用数值计算和经验公式相结合的方法,获得了在波浪和风生流和波浪共同作用下海底泥沙输移的二维模型.在此基础上,讨论了海底泥沙输移在风速、风向和泥沙粒径不同等三种情况下的变化特征;指出了经验公式对泥沙输移规律的适用范围以及风速、风向对于近岸处泥沙输移重要性.这一研究结果对近岸结构物的选址设计具有实际应用价值.

关键词 波浪和风生流共同作用浪流,经验公式,风速,泥沙粒径,泥沙输移率和输移方向

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)01-0273-06

The extension and application of the sediment transport model on the seabed near shore due to combining driven by wave with wind-generated current wind-wave current

ZOU Shu-mi, LIN Mian

(Department of Engineering Science, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract By using the method of combined numerical computation and experiential equations, the two dimensional model which describe the sediment transport caused by both wind and wave on the seabed is got in the paper. after that, the features of sediment transport with different wind speed, wind orientation and the sediment's diameter are discussed, we point out the proper cases in which the experiential equations could be used, and also the importance of wind speed and wind orientation of sediment transport, which is useful in the design of structures near shore.

Key words combined action of wave and wind-generated current wind, and wave, empiricalexpieriential equations, wind speed, sediment's diameter, rate and orientation of sediment transport

0 引 言

随着海洋资源的开发,研究近岸海底泥沙输移越来越引起人们的关注.在海水动力作用下,近岸区海底泥沙通常是不稳定的.现场观测表明(Langhorne^[1],1981;Anthony等^[2],2002;Kenyon等^[3],2002),泥沙输移除了和沙粒的物理性质有关外,主要还取决于近底层流速的变化.风生流流场是引起近底层泥沙输移的主要动力之一.因此探讨风速、风向与海底泥沙运移之间的关系,可为海洋工程结构物的选址设计提供一些参考依据.

最早关于泥沙输移的研究主要集中在河道,提出了诸多经验公式.这些经验公式在研究河道泥沙输移问题时得到广泛的应用.90年代初 Martec 就提出波浪作用的了一维海底泥沙输移模型(SED90模型)^[4].之后,Li和Amos(1992,1996)又对该模型进行了改进,提出了考虑海底存在沙纹的情况时的改进模型(SED92模型^[5]、SED96模型^[6]).这些模型充分利用了基于河道泥沙输移得出的经验公式来,预测海底泥沙输移.但由于这些模型中的近底层流速依赖于现场观测测试结果,从而限制了模型的应用.为此本文提出了考虑波浪和风生流风浪共同作用下的近岸海

收稿日期 2006-02-10; 修回日期 2006-06-20.

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-212-2)和国家自然科学基金(40576046)联合资助.

作者简介 邹舒觅,男,汉族,1981年出生,中国科学院力学研究所硕士研究生,现从事波浪与海床相互作用研究.

底泥沙输移的准二维模型. 为了便于工程应用,模型中我们分别代入了四种常用的泥沙输移经验公式进行比较分析,结合四种常用的经验公式,给出了分析泥沙粒径、风速和风向与泥沙输移之间的关系,以及各种输移公式的应用范围. 这些结果对于研究大陆架泥沙输移趋势是非常有意义的.

1 计算模型

假定海岸线是直线,大陆架坡度为常数,风速恒定,风向和波浪夹角任意. 设风向与 x 轴方向一致. 整个流场可分为三部分:上边界层、下边界层和中间风生环流,假定粘度在上下边界层内呈线性变化,在中间恒定. 如图 1 所示,图中沿水深方向变化的箭头表示不同深度时风生流的流向,受柯氏力影响有所偏转.

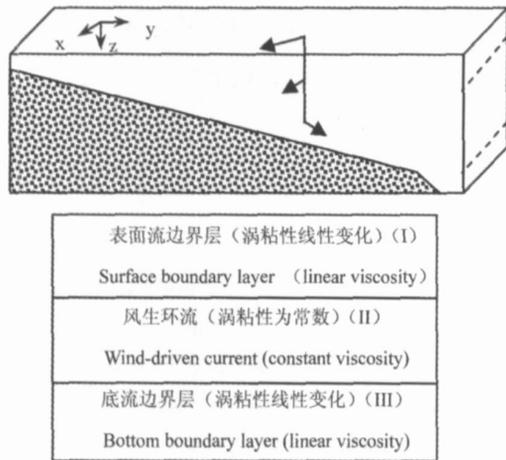


图 1 环流计算模型

Fig. 1 Circulation model

由风应力形成的二维环流速度场方程如下^[7],忽略非线性项:

$$\begin{cases} fv + K \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0, \\ -fu + K \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

水面剪应力满足:

$$\tau_s = a c_d s Q / |Q|,$$

底床面剪应力满足:

$$\tau_b = f c_d R / |R|,$$

底面上滑移速度 R 为^[8]:

$$R = \frac{f Q^2 \cos \alpha}{N_f \cos \alpha} \frac{c_{dk}}{c_d}.$$

各个符号的物理意义参见附录 A.

潮流场速度 G 满足方程:

$$\begin{aligned} (G - R \cos \alpha) (\cosh 4 - \cos 4) = \\ E [\cos(\alpha - \beta/4) \sinh 4 + \sin(\alpha - \beta/4) \sin 4] \\ - 2F [\cos(\alpha - \beta/4) \sinh 2 \cos 2 \\ + \sin(\alpha - \beta/4) \cos 2 \sin 2], \end{aligned} \quad (2)$$

平行和垂直于海岸方向的速度分量可表示为:

$$\begin{aligned} u(z) = G - \frac{N(A - B) - M(C - D)}{4qK(\cosh 2 + \cos 2)} \\ - \frac{P(A + B) + O(C + D)}{4qK(\cosh 2 - \cos 2)}, \\ v(z) = - \frac{M(A - B) + N(C - D)}{4qK(\cosh 2 + \cos 2)} \\ - \frac{O(A + B) - P(C + D)}{4qK(\cosh 2 - \cos 2)}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中各个参量的定义参见附录 C. 由(3)式我们可以得到近岸海底沿垂向速度分布,它与风速、风向、波高、波周期,以及底床面粗糙度、泥沙粒径相关. 计算近底层流速时,首先给定风速、风向、波高、波周期、水深等五个物理量,由式(2)和(3)可以得到速度场,再由 Airy 线性波理论迭代得到波长和波速,然后通过 G-M 波流混合边界层模型^[10]将二者耦合,这样我们就得到近底层流速分布. 计算范围是从海岸开始至 100 千米的大陆架,1 千米为一个网格.

泥沙输移通量时,我们选用了四个常用的泥沙输移经验公式. 这四个公式可分为两类,一类是包括推移质和悬移质的泥沙总通量公式:a、Engelund-Hansen 公式^[11];b、Bagnold 公式^[12];另一类是推移质泥沙通量公式:c、Einstein-Brown 公式^[13];d、Yalin 公式^[14]. 详见附录 B. 把前面得到的底床流速代入这些泥沙经验公式中,就可以得到计算泥沙输移量及其输移方向. 计算范围是从海岸开始至 100 千米的大陆架,1 千米为一个网格.

2 计算结果和讨论

2.1 风速对泥沙输移率的影响

2.1.1 单一粒径情况下的泥沙输移

为了研究风速对泥沙输移的影响,我们首先考虑计算了单一粒径泥沙在四种经验公式下的输移率及移动方向变化趋势. 当分别考虑了粒径为 0.25 mm 和 0.6 mm 两种情况,风速条件为 5 m/s、8 m/s 和 10 m/s 时,泥沙粒径分别为 0.25 mm 和 0.6 mm. 如图 2、图 3 所示. 图中(a)、(b)、(c)、(d)分别对应着公式 a、b、c、d. 由于三种风速情况下所得到的计算结果量级不同,为了更好地比较泥沙输

移的整体趋势,我们采用了两个纵坐标标尺.在图 2、32 和图 3 中左边纵坐标对应的是为风速为 8 m/s 和 10 m/s 两种情况(图中点划线和实线),对应的泥沙输移率,右边纵坐标对应的是为风速为 5 m/s 时计算结果(图中虚线),由于二者量级不同,因此采用不同的坐标.

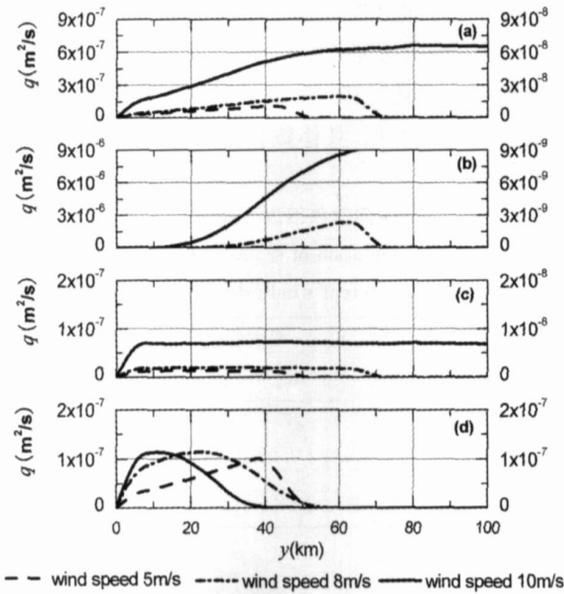


图 2 单一粒径下四种经验公式结果比较 ($D=0.25\text{ mm}$)

Fig. 2 Comparison of the results of 4 formula ($D=0.25\text{ mm}$)

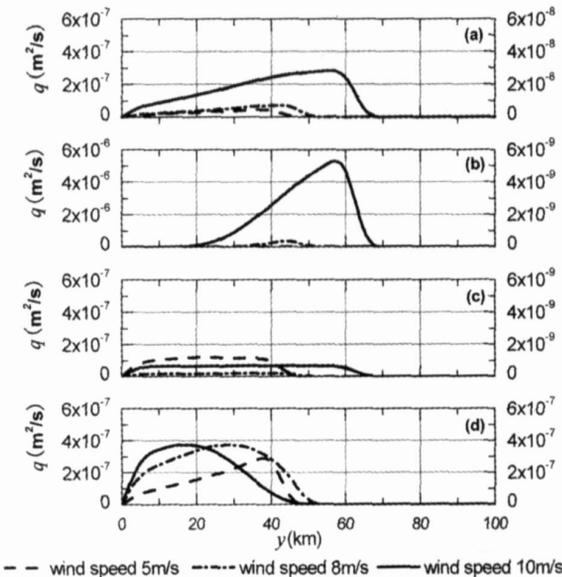


图 3 单一粒径下四种经验公式结果比较 ($D=0.6\text{ mm}$)

Fig. 3 Comparison of the results of 4 formula ($D=0.6\text{ mm}$)

由图 2 可知,风速大于 8 m/s 时泥沙粒径为

0.25 mm 时(图 2),前两个公式的计算结果趋势类似,但泥沙输移量相差一个量级.泥沙输移率和输移距离随着风速增加而增加.风速为 5 m/s 时,由公式 b 得到泥沙输移量几乎为零;而后两个公式在风速大于 8 m/s 时得到的泥沙输移基本上同量级.风速为 5 m/s 时,两公式的结果相差一个量级在距岸 50 km 左右停止,风速为 8 m/s 时,由图 3 可知,风速比较大时,公式 a 和公式 d 的计算结果同量级,但泥沙输移最明显的区域不同,公式 a 泥沙输移发生在距岸 40 km~60 km,公式 d 发生在近岸 10 km~30 km 以内.这是因为风速超过一定值后,泥沙输移就不再以推移质输移为主,而当风速为增加为 10 m/s 时,比较图 2 和图 3 可以看出,前两个公式对风速、水深及粒径几个参数都比较敏感.而公式 c 对水深不是很敏感,公式 d 对风速不是很敏感,对粒径和水深比较敏感泥沙输移则持续到距岸 100 km 以外(见图 2a、2b、2c).图 2d 是公式 d 的计算结果,很明显风速为 10 m/s 时的泥沙输移率比风速 8 m/s 时小.这是因为风速超过一定值后,泥沙输移就不再以推移质输移为主.同样在泥沙粒径为 0.6 mm 时(图 3),也可以清晰地看到这些特点,不同的是风速 10 m/s 情况下泥沙输移距离比粒径 0.25 mm 时要小,仅距岸大约 65 km 以内.比较两类公式的泥沙输移通量率,可以发现,前两个公式中,小风速时公式(b)的结果比公式(a)偏小,而大风速时公式(b)的结果比公式(a)的大一个量级,说明公式(b)对风速更为敏感.后两个公式中,公式(c)的推移质泥沙输移率几乎不随水深变化,公式(d)的推移质泥沙输移率在某一水深达到极大,然后又逐渐减小.公式(d)是推移质输移、公式(a)是泥沙输移总量,泥沙输移总量和推移质都是随着水深的增加而增加,但水深达到一定程度以后,泥沙就起动为悬移质,使得推移质输移减小到 0,但是泥沙输移的总量还是增加的.因此,总的来看,我们认为公式(a)和公式(d)更能反映泥沙输移率随风速、水深和泥沙粒径的变化规律.

2.1.2 变化粒径情况下的泥沙输移

在实际情况下,海底泥沙并不是完全均匀的.随着离岸距离的增加,沉积下来的泥沙粒径不断减小.因此,我们又计算了四种粒径情况.参照南海卫滩幅实测结果,我们沿着大陆架将海底分成几个区间,不同区间中采用不同的泥沙粒径进行计算(见表 1).风速仍采用三个风速段 5 m/s、8 m/s、10 m/s 进行计算.同样,图 4 中左边纵坐标为风速 8 m/s 和 10 m/s 对应的泥沙输移率,右边纵坐标为风速

5 m/s时的计算结果. 为比较方便起见,图 4(a)、(b)、(c)、(d)四幅图的纵坐标范围相同.

表 1 沿程泥沙分区计算数据

Table 1 Data of varying diameters of sediment

距离(L)	泥沙粒径(D)
0 km ~ 25 km	0.25 mm
25 km ~ 50 km	0.20 mm
50 km ~ 75 km	0.163 mm
75 km ~ 100 km	0.075 mm

由图 4(a)和图 4(b)可以看出,泥沙输移率仍然是沿 x 方向逐渐增大.这是由于泥沙粒径的减小,使得悬移质大大增加,故总输移率也随之增加.由图 4(c)和图 4(d)给出的推移质公式结果可以看出近岸区泥沙率随水深变化规律.当离岸距离大于 51km 时,泥沙输移率为零,可以认为此时中细沙和细沙的输移已经全部转化为悬移质输移,推移质公式已无法描述.比较发现,用公式(a)和公式(d)描述大陆架近岸泥沙输移率,我们发现公式(a)和公式(d)的结果比较好.这是因为,在近岸区粗砂段公式(d)能够所体现的推移质泥沙的输移随着泥沙粒径的减小而减小,这是由于泥沙粒径的减小使得悬移质大大增加所造成的,而公式(a)则可以体现了离岸区细砂随着泥沙粒径的减小,泥沙输移总量增加的规律.所以我们提出,计算泥沙输移率在近岸区应采用推移质公式,离岸一定距离之后采用泥沙总输移公式,这一距离由泥沙粒径确定.

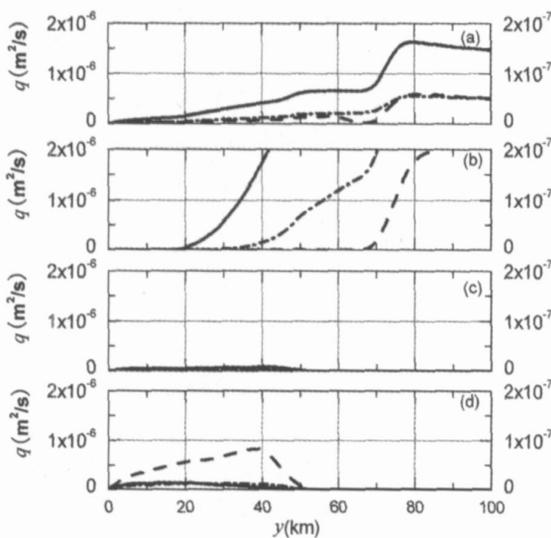


图 4 变化粒径下四种经验公式结果比较
Fig. 4 Comparison of 4 formula's results of varying sediment's diameter

2.2 风速和风向对于泥沙输移方向的影响

除了泥沙输移率,泥沙输移方向也是海洋工程关心的问题.下面我们讨论风速和风向对泥沙输移方向的影响.

由图 5 可以看出,在恒定风速作用下,泥沙输移方向随着离岸距离的增加,偏移角度逐渐增大而后慢慢减小,最后稳定在一定值.风速不同时不仅偏移的角度不同,而且发生最大偏移的位置也不同.显然,随着风速的增加,泥沙输移方向发生最大偏转的位置向深海方向发展,但在深海处偏转角度并不随风速的增加而增加.具体数据如表 2 所示.

表 2 不同风向下泥沙输移偏转角度

Table 2 Orientation of sediment transport under different wind orientation

风 向 风 速	近岸偏转(°)			最大偏转(°)			远岸偏转(°)		
	0	-30	-60	0	-30	-60	0	-30	-60
5m/s	3	10	20	27	29	32.5	17	16	13.5
8m/s	2	8	17.5	22	24	28	17	16	13.5
10m/s	1.5	7.5	16.5	19.5	21	25	17	16	13.5

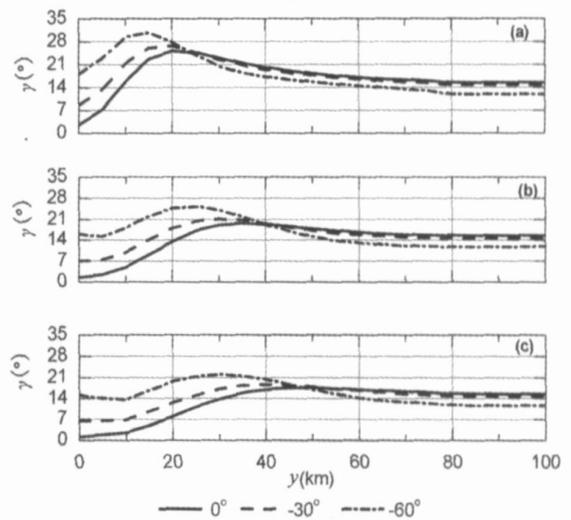


图 5 泥沙输移方向沿大陆架变化曲线

图中(a)、(b)、(c)分别表示风速为 5 m/s、8 m/s、10 m/s
Fig. 5 Sediment transport orientation along shelf

此外我们还注意到(图 5),随着风向角度增加,近岸处泥沙输移方向偏转角度也随之增大,而远岸处的偏转角度基本上不随风向变化.为了进一步说明这一点,我们考察海底某一点泥沙输移方向与风向之间的关系,如图 6 所示,其中(a)、(b)分别表示距离海岸 20km 和 40km.可以看出,近岸区泥沙输

移方向随着风向角度的增加而增加,并且这一特点随着风速的增加而愈加明显(图 6(a)). 随着离岸距离愈远,泥沙输移方向几乎不再随风向和风速变化(图 6(b)). 由此可以得到结论,离岸越近(水深很浅)泥沙移动方向随风速变化越大,并且随着风速的增大,发生最大偏移的位置不断后移,向深水区发展. 同样风向对于泥沙输移方向的影响也是跟水深有关. 在浅水区泥沙输移方向的偏转角度随着风向角度的增加而增加.

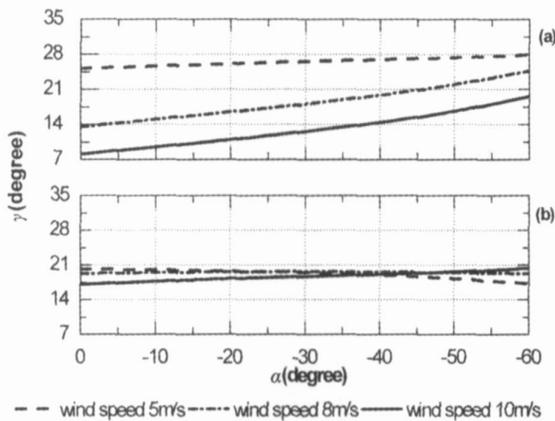


图 6 泥沙输移方向随风向变化曲线

Fig. 6 Relations between sediment transport orientation and wind orientation

为了考察泥沙输移方向与泥沙粒径之间的关系,我们改变泥沙粒径进行计算. 结果发现,在流场条件不变的情况下,泥沙粒径对于输移方向的影响很小,可以忽略不计.

3 结 论

本文建立风浪流作用下沿大陆架的二维泥沙输移模型,用四种常用经验公式分别计算相同流场下的泥沙输移率,并分析了不同风速、风向和泥沙粒径下泥沙输移率及泥沙输移方向.

从计算结果分析中可以看出,在本文计算条件下 Engelund-Hansen 公式和 Yalin 公式得到结果能够反映泥沙输移随水深变化规律, Einstein-Brown 公式适用于底部比较平坦、水深变化不大的情况, Bagnold 公式则适用于底流速较大,泥沙粒径也较大的情况. 同时,风速和风向对泥沙输移方向也有重要影响,尤其在近岸浅水区,泥沙输移方向随风速和风向变化比较明显,在深海域泥沙输移方向基本固定. 此外还可以看到,泥沙粒径只对输移率的大小起

作用,对泥沙输移方向影响不大.

附录 A:

符号	物理意义
C	经验系数
C_{ds}	水表面阻力系数
C_d	底床阻力系数
D	泥沙粒径
f	科氏系数
K	涡粘性系数
q_t	单位宽度上的泥沙总体积输移率
q_b	单位宽度上的推移质体积输移率
Q	风速
S	标准化平均超边界剪应力
U^*_{sk}	表层摩擦速度
u^*	泥沙剪切速度
$u(z)$	平行于海岸方向的速度分量
$v(z)$	垂直于海岸方向的速度分量
V	沿深度平均的流速
W_n	泥沙颗粒沉降速率
	风向,沿海岸方向为 0° ,向海洋方向为 90°
	底床剪应力和海岸线的夹角
a	空气密度
f	海水密度
	表示泥沙密度与水密度的差
b	作用在砂粒表面的平均切应力
c_r	泥沙起动的临界剪应力值
c_w	底床波流混合剪应力最大值
	水面高度

附录 B:

a、Engelund-Hansen 泥沙输移总量公式:

$$q_t = 0.05V^2 (f/b)^{0.5} / D(\rho/\rho_s)^2.$$

b、Bagnold 泥沙输移总量公式:

$$q_t = C c_w V / g,$$

其中

$$C = 0.005 \exp[0.7(c_w - c_r) / c_r].$$

c、Einstein-Brown 推移质公式:

$$q_b = 40W_n D (\rho/\rho_s)^3 u^* / |u^*|.$$

d、Yalin 推移质公式:

$$q_b = a_1 u^* S D \left[1 - \frac{1}{a_2 S} \ln(1 + a_2 S) \right].$$

其中 $a_1 = 0.635$,

$$a_2 = 2.45 \left(\frac{f}{s} \right)^{0.4},$$

$$S = (c_v - c_r) / c_r.$$

附录 C:

公式 2、3 中的中间量说明:

G 为地转流速度, 和 R, , 有关. 由下式确定:

$$(G - R \cos \theta) (\cosh 4 - \cos 4)$$

$$= E \left[\cos \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right) \sinh 4 + \sin \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right) \sin 4 \right]$$

$$- 2F \left[\cos \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right) \sinh \cos 2 \right.$$

$$\left. + \sin \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right) \cosh 2 \sin 2 \right].$$

其中

$$E = \frac{c_d R^2}{\sqrt{2} q A_v},$$

$$F = \frac{\cos \theta}{\cos} E.$$

A、B、C、D、M、N、O、P 都是计算过程中的中间量, 表达式如下:

$$A = \sinh(\theta + \varphi) \cos(\theta - \varphi),$$

$$B = \sinh(\theta - \varphi) \cos(\theta + \varphi),$$

$$C = \cosh(\theta - \varphi) \sin(\theta + \varphi),$$

$$D = \cosh(\theta + \varphi) \sin(\theta - \varphi),$$

$$M = c_d R^2 (\sin \theta - \cos \theta) + c_b \frac{a}{f} Q^2 (\sin \theta - \cos \theta),$$

$$N = c_d R^2 (\sin \theta + \cos \theta) + c_b \frac{a}{f} Q^2 (\sin \theta + \cos \theta),$$

$$O = c_d R^2 (\sin \theta - \cos \theta) - c_b \frac{a}{f} Q^2 (\sin \theta - \cos \theta),$$

$$P = c_d R^2 (\sin \theta + \cos \theta) - c_b \frac{a}{f} Q^2 (\sin \theta + \cos \theta).$$

参 考 文 献 (References):

- [1] Langhorne D N. An evaluation of Bagnold's dimensionless coefficient of proportionality using measurements of sandwave movement[J]. *Marine Geology*, 1981, 43(1~2): 49~64.
- [2] Anthony D, Leth J O. Large-scale bedforms, sediment distribution and sand mobility in the eastern North Sea off the Danish west coast[J]. *Marine Geology*, 2002, 182(3~4): 247~263.
- [3] Kenyon N H, Akhmetzhanova A M, Twichell D C. Sand wave fields beneath the Loop Current, Gulf of Mexico: reworking of fan sands[J]. *Marine Geology*, 2002, 192(1~3): 297~307.
- [4] Martec Ltd. Upgrading and application of the AGC sediment transport model SEDTRANS: unpubl. Rept[J]. Submitted to Geol, Survey Canada. 1990, 56.
- [5] Li M Z, Amos C L. SEDTRAN92: a sediment transport model for continental shelves[J]. *Computer & Geosciences*, 1995, 21(4): 533~554.
- [6] Li M Z, Amos C L. SEDTRANS96: the upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental shelves[J]. *Computers & Geosciences*, 2001, 27: 619~645.
- [7] Jeffries H. The effect of a steady wind on the sea-level near a straight shore[J]. *Philosophical Magazine*, 1923, 5: 114~125.
- [8] 林 緬, 邹舒宽. 风浪流作用下的沙波运移[J]. *中国造船*, 2004, 45: 233~238.
Lin M, Zou S M. The sand wave transport under wind and wave-current driven[J]. *China Shipbuilding*, 2004, 45: 233~238.
- [9] Cookman J L, Flemings P B. STORMSED1.0: hydrodynamics and sediment transport in a 2-D, steady-state, wind and wave-driven coastal circulation model[J]. *Computers Geosciences*, 2001, 27: 647~674.
- [10] Grant W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(C4): 1797~1808.
- [11] Engelund F, Hansen E. A monograph on sediment transport in alluvial streams[J]. *Teknisk Vorlag*, Copenhagen, Denmark, 1967, 62.
- [12] Bagnold R A. *Mechanics of marine sedimentation*. In: Hill, M. N. ed[J]. *The Sea: Wiley-Interscience*, 1963, 3: 507~527.
- [13] Brown C B. In: Rouse, H. (Ed.), *Engineering Hydraulics: John Wiley & Sons*[J]. New York, 1950: 1039.
- [14] Yalin M S. An expression for bedload transportation. *Journal of the Hydraulic Division*[J]. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 89(HY3), 221~250.