DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.03.010
蒋学炼, 宋吉宁, 张娜, 等. 基于能量守恒的淤泥质外航道风淤估算[J]. 水利水运工程学报, 2015(3): 66-72. (JIANG Xue-lian, SONG Ji-ning, ZHANG Na, et al. Forecast of windblown siltation in entrance channel located on muddy coast based on energy conservation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(3): 66-72.)

基于能量守恒的淤泥质外航道风淤估算

蒋学炼[1,2], 宋吉宁[1], 张 娜[1], 郄禄文[3]

(1. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 3. 河北大学 建筑工程学院, 河北 保定 071002)

摘要: 回顾了淤泥质海岸外航道回淤的研究进展。基于风能与波能、波能与悬沙位能之间的能量守恒关系,推导了大风过程中波高、挟沙力和航道平均淤积强度的表达式,提出了直接利用风场要素预测某一指定外航道回淤量的经验式。采用天津港某段外航道大风过程的风场要素和回淤资料对经验式进行了实例验证和模拟预测,结果显示,当拟合样本数足够大时,淤积量的预测精度值与实测值能满足工程要求。单位风时淤积强度的预测值表明,风速是影响悬沙挟沙能力和单位时长淤强的主要风场要素。

关 键 词: 淤泥质海岸; 外航道; 回淤; 能量守恒; 风场要素; 挟沙力; 风淤

中图分类号: TV148 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2015)03-0066-07

淤泥质海岸是我国主要海岸类型之一,约占全国海岸线长度的1/4,多个港口群建设在这一区域,如渤海湾、黄河三角洲、长江口、杭州湾、珠江三角洲等。由于淤泥质海岸滩面宽广,坡度平坦,在此地建造港口,通常需要开挖较长的进港航道,因此其回淤问题成为工程中的主要难题。从泥沙来源分析,淤泥质海岸的淤积主要来自于河口径流泄沙和浅滩底质风浪输沙。对于前者,通常在规划设计时即进行了细致考虑,从我国建于淤泥质海岸的港口航道现状分析,径流下泄沙量在总淤积量中通常占比很小。对于后者,由于淤泥质海岸主要由黏性细颗粒泥沙构成,中值粒径小于0.03 mm,因此大风过程中浅滩底质在波浪、水流等动力因素作用下掀动、悬扬、输运,是引起外航道回淤的主要来源。

围绕淤泥质海岸外航道风浪回淤的问题,已有众多文献从现场观测、模型试验、理论分析和数值模拟角度进行了系统研究。吴柳[1]采用ECOMSED三维水动力模型和SWAN风浪模型嵌套的方式研究了渤海湾悬浮泥沙特征,并分析了天津南港工业区建设后天津近海区域泥沙在一般天气和给定大风过程中悬浮泥沙的分布特征,指出在仅考虑潮流的作用下,渤海湾内整体含沙浓度不大,近岸悬沙浓度也仅0.1 kg/m^3,但在大风过程中,近岸悬沙浓度急剧增大,可达0.85 kg/m^3,会导致航道出现骤淤。许婷等[2]建立了多重嵌套的风浪潮流泥沙数值模型,依据现场水文泥沙实测资料,计算了天津港南北防波堤延伸后航道的淤强分布情况。Feng Xiao-xiang等[3]基于海岸动力条件和泥沙特性分析,提出了大风条件下粉砂淤泥质海岸外航道骤淤厚度的计算式,并将运用于滨州港工程中。解鸣晓等[4]应用波浪潮流二维泥沙数学模型讨论了连云港进港航道的回淤问题,建议采用年平均含沙量场进行回淤计算。张玮等[5]利用实测航道淤积、近岸含沙量等资料,根据航道回淤计算式、近岸率定淤积系数,反推了外海含沙量计算式,并将运用于连云港7万t级进港

收稿日期: 2014-10-01
基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(14JCYBJC22100);天津市建交委科技项目(2013-8);河北省自然科学基金资助项目(E2012201057)
作者简介: 蒋学炼(1975—), 男, 湖南桃源人, 副教授, 博士, 主要从事港口、海岸及近海工程研究。
E-mail: jiang.xue.lian@163.com

航道回淤预测。丁军华等[6]基于数学模型分析，探讨了连云港徐圩港区旋转流和黏性泥沙运动对港池布置方案的影响。刘杰等[7]利用长江口深水航道的回淤资料，研究了长江口深水航道治理一、二期工程实施后，北槽航道回淤的时空变化特征及其对流域来水来沙、河槽地形的影响，指出流域悬沙输沙量并不是深水航道回淤的主要来源。刘家驹[8]在波浪和潮流综合作用下的挟沙力公式中引入了特定的泥沙因子，使之能同时应用于淤泥质、粉沙质及沙质海岸的航道回淤计算，结合连云港主航道扩建、京唐港外航道及黄骅港外航道等工程探讨了风暴潮和破波巨大掀沙能力造成航道骤淤的问题。

本文以风浪生成、波浪掀沙、水流输沙理论为基础，建立大风过程中直接以风场要素推算外航道回淤量的经验计算式，并利用天津港某段外航道的回淤资料进行校验和预测。

1　能量守恒原理

大风过程中，风对海面的扰动形成重力表面波，其能量转换关系[9]可表示为：

$$E_{\mathrm{H}} = e_{\mathrm{HW}} E_{\mathrm{W}} \tag{1}$$

式中：E_{H} 为波能；e_{HW}为风能转化为波能的有效转换系数；E_{W} 为风能。

风浪达到一定强度后，外航道边滩泥沙将被掀起悬扬形成悬移质，其位能主要来自于波浪底部振荡水流对床沙的剪切耗能，能量转换关系可表示为：

$$E_{\mathrm{S}} = e_{\mathrm{SH}} E_{\mathrm{H}} \tag{2}$$

式中：E_{S} 为悬沙位能；e_{SH}为波能转化为悬沙位能的有效转换系数。

结合式(1)和(2)，可建立悬沙位能与风能之间的函数关系式：

$$E_{\mathrm{S}} = e_{\mathrm{SH}} e_{\mathrm{HW}} E_{\mathrm{W}} = e_{\mathrm{SW}} E_{\mathrm{W}} \tag{3}$$

式中：$e_{\mathrm{SW}} = e_{\mathrm{SH}} e_{\mathrm{HW}}$ 为风能转化为悬沙位能的有效转换系数。

2　外航道风淤过程

大风过程中，边滩处和航道内的水体挟沙力随风浪的增长和衰减相应变化，其变化过程[10]如图 1。

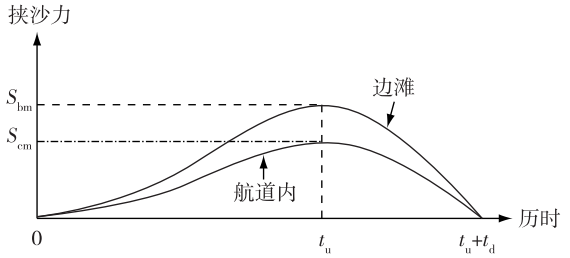

图 1　大风过程中航道和边滩挟沙力变化过程

Fig. 1　Changes in sediment-carrying capacity along channel and beach during a heavy wind process

由于边滩水深小，底部流速大，挟沙力强，波浪作用下形成的悬沙浑水随海流进入挟沙力较弱的航道后将部分落淤，其大风过程中的淤积强度可由下式[11-13]计算：

$$p = \frac{\alpha \omega_{\mathrm{s}}}{\gamma_0}\left[\int_0^{t_{\mathrm{u}}} (S_{\mathrm{bu}} - S_{\mathrm{cu}})\,\mathrm{d}t + \int_{t_{\mathrm{u}}}^{t_{\mathrm{u}}+t_{\mathrm{d}}} (S_{\mathrm{bd}} - S_{\mathrm{cd}})\,\mathrm{d}t\right]\sin\theta \tag{4}$$

式中：p 为 1 次风浪过程后航道底部单位面积的淤积强度(m)；α 为泥沙沉积系数；ω_{s} 为泥沙沉速(m/s)；γ_0 为淤积土干密度(kg/m^3)；S_{bu}为增长期边滩处挟沙力(kg/m^3)；S_{cu}为增长期航道内挟沙力(kg/m^3)；t_{u} 为挟沙力增长时长(s)；S_{bd}为衰减期边滩处挟沙力(kg/m^3)；S_{cd}为衰减期航道内挟沙力(kg/m^3)；t_{d} 为挟沙力衰减时长(s)；θ 为航道走向与水流流向之间的夹角(°)。

在式(4)中引入线型系数 c_{u} 和 c_{d}，假定边滩处和航道内挟沙力变化曲线线型一致，经变形为：

$$p = \frac{\alpha \omega_{\mathrm{s}}}{\gamma_0} c_{\mathrm{u}} t_{\mathrm{u}} \left(1 + \frac{c_{\mathrm{d}} t_{\mathrm{d}}}{c_{\mathrm{u}} t_{\mathrm{u}}}\right)(S_{\mathrm{bm}} - S_{\mathrm{cm}})\sin\theta \tag{5}$$

式中：c_{u} 和 c_{d} 为线型系数，当挟沙力历时变化曲线均为直线时，$c_{\mathrm{u}} = c_{\mathrm{d}} = 0.5$，当挟沙力历时变化曲线为三角函数时，$c_{\mathrm{u}} = c_{\mathrm{d}} = 2/\pi$；$S_{\mathrm{bm}}$和 S_{cm}分别为边滩处和航道内挟沙力峰值(kg/m^3)。

3 外航道风淤估算方法

求解式(5)的关键在于确定峰值挟沙力 S_{bm} 和 S_{cm} 的表达式,这可基于第一节的“能量守恒原理”得到。

大风过程中,海床悬扬泥沙的位能由波浪底部剪切应力对底床泥沙作功提供,其能量转换方程为:

$$E_S = e_{SH} G_{SH} \tag{6}$$

式中:E_S 为悬沙位能(J/(m^2·s));e_{SH} 为能量转换系数;G_{SH} 为波浪底部剪切力对底床作的功(J/(m^2·s))。

悬沙位能 E_S 即单位时间内紊流对床面上方的单位面积浑水水柱中的悬沙作功:

$$E_S = Sh\omega_s \tag{7}$$

式中:S 为水体挟沙力(kg/m^3);h 为水深;ω_s 为泥沙沉速(m/s)。

单位时间内,波浪底部剪切力对单位面积底床作功 G_{SH} 的平均值[14]可表示为:

$$G_{SH} = \frac{1}{T}\int_0^T \tau_b u_b \mathrm{d}t = \frac{2\pi^2}{3}\rho f_H \left(\frac{H}{T\sinh kh}\right)^3 \tag{8}$$

式中:$\tau_b = \frac{1}{2}\rho f_H u_b |u_b|$ 为瞬时波浪底部剪切应力(N/m^2);$u_b = \frac{\pi H}{T\sinh(kh)}\cos\sigma t$ 为波浪底部水质点瞬时速度(m/s),假定为微幅波;ρ 为水密度(kg/m^3);f_H 为波浪底摩阻系数;H 为波高(m);T 为波周期(s);k 为波数;σ 为波浪角频率(rad/s)。

将式(7)和(8)代入式(6)得到水体挟沙力表达式:

$$S = \frac{2\pi^2}{3h\omega_s} e_{SH}\rho f_H \left(\frac{H}{T\sinh kh}\right)^3 \tag{9}$$

上式中,波高 H 代表波能的平均能量,由风的剪切力对海水表面作功提供。据式(1),其能量转换方程为:

$$\frac{\mathrm{d}E_H}{\mathrm{d}t} = e_{HW} G_{HW} \tag{10}$$

式中:G_{HW} 为风剪切力对水面作功(J/(m^2·s)),可表示为:

$$G_{HW} = \tau_w u_c = \frac{1}{2}K\rho_a f_w u_w^3 \tag{11}$$

式中:$\tau_w = \frac{1}{2}\rho_a f_w u_w^2$ 为风对水面的剪切应力(N/m^2),ρ_a 为空气密度(kg/m^3);f_w 为风与水面的摩阻系数;u_w 为特征风速(m/s);$u_c = Ku_w$ 为风海流流速(m/s),K 取 0.024~0.03。淤泥质海岸在小风或无风浪天气条件下,单一潮流的作用引起的泥沙悬浮输移量较小,因此不考虑潮流流速的叠加。

将式(11)代入式(10)积分,并取边界条件 $t = 0$, $H = 0$ 得:

$$H = \left\{4Ke_{HW} f_w \left(\frac{\rho_a}{\rho g}\right)(u_w^3 t)\right\}^{1/2} \tag{12}$$

考虑到一次大风过程中,风级由小变大,对应不同的风速和风时,因此上式可写为:

$$H = \left\{4Ke_{HW} f_w \left(\frac{\rho_a}{\rho g}\right)\left(\sum_{i=i_0}^{i_n} u_{wi}^3 t_i\right)\right\}^{1/2} \tag{13}$$

式中:i 为风级;i_0 为开始引起悬沙输移时的风级;i_n 为挟沙力停止增长时的风级;u_{wi} 为 i 级风的特征风速(m/s);t_i 为 i 级风的历时(s)。

将式(13)代入式(9),考虑淤泥质浅滩相对水深较小,采用一阶近似 kh 代表 $\sinh kh$,波速 $C = \frac{L}{T} = \sqrt{gh}$,则一次大风过程的挟沙力可表示为:

$$S = \frac{2}{3}\left(\frac{e_{SH}e_{HW}^{1.5}\rho_a^{1.5}\rho^{-0.5}f_H f_w^{1.5}K^{1.5}}{\pi\omega_s}\right)\left(\frac{1}{h}\right)^{2.5}\left(\sum_{i=i_0}^{i_n}u_{wi}^{4.5}t_i^{1.5}\right) \tag{14}$$

将式(14)代入式(5)，可得一次大风过程后航道底部单位面积的平均淤强为：

$$p = \frac{2}{3}c_u t_u\left(1+\frac{c_d t_d}{c_u t_u}\right)\left(\frac{\alpha e_{SH}e_{HW}^{1.5}\rho_a^{1.5}\rho^{-0.5}f_H f_w^{1.5}K^{1.5}}{\pi\gamma_0}\right)\left(\left(\frac{1}{h_b}\right)^{2.5}-\left(\frac{1}{h_c}\right)^{2.5}\right)\left(\sum_{i=i_0}^{i_n}u_{wi}^{4.5}t_i^{1.5}\right)\sin\theta \tag{15}$$

式中：h_b 为边滩平均水深(m)；h_c 为航道内平均水深(m)。

上式包含的变量非常多，很难在一次大风过程中同时准确地测取。为了便于工程应用，需将之简化。上式中，ρ_a 和 ρ 为定值；挟沙力增长时长 t_u 可认为与大风历时 $\sum_{i=i_0}^{i_n}t_i$ 近似相等，即 $t_u \approx \sum_{i=i_0}^{i_n}t_i$；据实测资料统计 $t_d/t_u = 0.5 \sim 0.7$，可视为定值；其他变量如 u_{wi}，t_i，c_u，c_d，α，e_{SH}，e_{HW}，f_H，f_w，K，γ_0，h_b，h_c，θ 等随大风特征、海床泥沙、海域地形、航道布置、水流特性等变化，但对于某一指定航道而言，除了大风特征值(风速 u_{wi} 和风时 t_i)外，其他因素可近似认为保持不变。基于以上分析，式(15)可概化表示为：

$$p = \sum_{i=i_0}^{i_n}\alpha_i u_{wi}^{\beta_i}t_i^{\gamma_i} \tag{16}$$

式中：$\alpha_i = \frac{2}{3}c_u t_u\left(1+\frac{c_d t_d}{c_u t_u}\right)\left(\frac{\alpha e_{SH}e_{HW}^{1.5}\rho_a^{1.5}\rho^{-0.5}f_H f_w^{1.5}K^{1.5}}{\pi\gamma_0}\right)\left(\left(\frac{1}{h_b}\right)2.5-\left(\frac{1}{h_c}\right)2.5\right)\sin\theta$。

将 p 乘以航道底面积 A，则一次大风过程后航道内的淤积量为：

$$Q = pA = \sum_{i=i_0}^{i_n}\alpha_{Ai}u_{wi}^{\beta_i}t_i^{\gamma_i} \tag{17}$$

式中：Q 为一次大风过程后航道内的淤积量(m^3)；$\alpha_{Ai} = \alpha_i A$，A 为航道底面积(m^2)；β_i，γ_i 分别为 i 级风的特征风速系数和风时系数，根据具体航道的实测资料反算确定。

4　实例验证

为了确定经验式(17)中的系数，需明确合适的拟合样本数。本文采用天津港外航道某段 37 次大风过程的风场要素和航道淤积量实测值[15]。表 1 采用非线性最小二乘法分别拟合计算了 24~32 组样本的情况，图 2 给出了“32 组”样本拟合得到的淤积量计算值与实测值的比较。可以看出，“24 组”中的“6 级风以上”对应的 3 个参数明显不合理，这与工程中通常以样本数是否大于等于 25 组作为大小样本分界是一致的。而且，根据“26~32 组”拟合得到的计算淤积量相对误差绝对值的平均值和标准差接近，表明精度基本一致。因此，用于确定经验系数的实测资料样本数至少应多于 25 组。

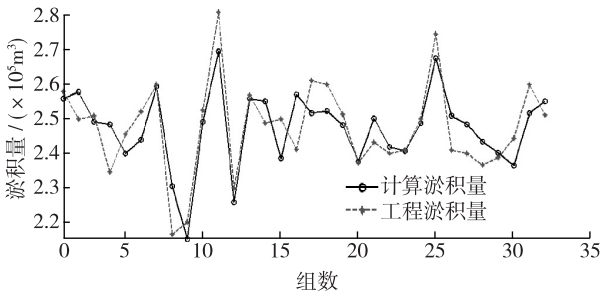

图 2　淤积量计算值与实测值比较(32 组)

Fig. 2　Comparison between calculated and measured values fitted for 32 samples

表 1　淤积量计算式系数拟合

Tab. 1　Fitting coefficients for empirical formula of siltation

组数	1+2+3 级风			4+5 级风			6 级风以上			计算淤积量相对误差绝对值平均	计算淤积量相对误差绝对值标准差
	α_{A1}	β_1	γ_1	α_{A2}	β_2	γ_2	α_{A3}	β_3	γ_3		
32	1 079	1.10	0.49	1 062	1.06	0.51	950	0.94	0.46	2.49	1.80
30	1 061	1.07	0.50	1 066	1.07	0.51	965	0.96	0.43	2.50	1.85
28	1 096	1.12	0.51	990	0.98	0.55	826	0.83	0.51	2.58	1.79

(续表)

组数	1+2+3 级风			4+5 级风			6 级风以上			计算淤积量相对误差绝对值平均	计算淤积量相对误差绝对值标准差
	α_{A1}	β_1	γ_1	α_{A2}	β_2	γ_2	α_{A3}	β_3	γ_3		
26	1 074	1.09	0.52	982	0.98	0.53	828	0.83	0.56	2.53	1.87
24	933	0.94	0.63	923	0.92	0.55	240	0.22	0.01	2.31	1.86

注:表中带下划线的数值为不合理的拟合值。

采用表 1 中的“32 组”拟合得到的经验参数对后 5 组实测数据进行模拟预测,结果如表 2。可以看出,相对误差绝对值介于 5.36%~2.25%之间,满足工程所需精度。

表 2 淤积量计算值与实测值比较

Tab. 2 Comparison between calculated and measured values of siltation

组数	风时/h			计算淤积量/m^3			计算淤积量合计/m^3	工程淤积量/m^3	相对误差绝对值/%
	1+2+3 级风	4+5 级风	6 级风	1+2+3 级风	4+5 级风	6 级风以上			
33	607	85	28	92 715	92 769	51 113	236 597	250 000	5.36
34	626	88	30	94 126	94 425	52 746	241 296	247 329	2.44
35	525	150	45	86 350	123 939	63 447	273 736	280 029	2.25
36	589	103	28	91 357	102 317	51 113	244 788	251 437	2.64
37	625	90	29	94 052	95 513	51 937	241 502	248 729	2.91

注:1,2,3 级风对应的特征风速为 3.3 m/s,4,5 级为 8 m/s,6 级为 13.8 m/s。

为比较各风级的输沙能力,将各风级计算淤积量除以对应的风时得到单位风时淤积强度(如表 3)。可以看出,随着风级的增大,风海流流速随之增大,单位风时淤积强度显著增加,表明风速是影响悬沙挟沙能力和单位时长淤强的主要风场要素。

表 3 单位风时淤积量

Tab. 3 Siltation volumes per wind hour ($m^3 \cdot h^{-1}$)

组数	1,2,3 级风单位风时淤积量	4,5 级风单位风时淤积量	6 级风单位风时淤积量
33	153	1 091	1 825
34	150	1 073	1 758
35	164	826	1 410
36	155	993	1 825
37	150	1 061	1 791

5 结 语

回顾了淤泥质海岸外航道回淤的主要原因和影响因素,基于能量守恒和转换原理推导了大风过程中波高、挟沙力和航道平均淤积强度的表达式,提出了直接利用风场要素(特征风速和风时)预测某一指定外航道回淤量的经验式。

采用以往文献中天津港外航道某段 37 次大风过程的风场要素和回淤量资料对经验式进行了实例验证。其中前 32 组资料用于非线性拟合得到经验系数值,后 5 组数据用于模拟预测。从结果分析,预测值与工程值相对误差绝对值介于 5.36%~2.25%之间,满足此类工程所需的精度。

计算了预测值的单位风时淤积强度。结果显示,随着特征风速的增大,单位风时淤积强度显著增加,表明风速是影响悬沙挟沙能力和单位时长淤强的主要风场要素。

本文提出的经验式,是基于风生浪、浪掀沙、流输沙、悬沙落淤的基本原理推导而来的,具有一定通用性。

对于某一具体航道而言,如有足够的前期实测样本资料,即可拟合出经验系数,进而利用气象资料估算大风过程中的回淤量,使用较方便,精度满足工程需要。

参 考 文 献:

[1] 吴柳. 近岸物质输运数值模拟研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2012.（WU Liu. Numerical simulation of the nearshore material transport[D]. Qingdao：Ocean University of China，2012.（in Chinese））

[2] 许婷，孙连成. 天津港外航道水动力条件及工程泥沙淤积研究[J]. 中国港湾建设，2008(1)：26-30.（XU Ting，SUN Lian-cheng. Research on hydrodynamic conditions and siltation in outer channel of Tianjin port[J]. China Harbour Engineering，2008(1)：26-30.（in Chinese））

[3] FENG Xiao-xiang，LI Jian-bing，HAO Pin-zheng，et al. Relation between sudden sedimentation and wind energy in outer channel of Huanghua port and its application in Binzhou port[J]. China Ocean Engineering，2008，22(1)：161-170.

[4] 解鸣晓，张玮，黄志扬,等. 淤泥质海岸泥沙运动及进港航道回淤强度数值研究[J]. 中国港湾建设，2007(4)：1-4.（XIE Ming-xiao，ZHANG Wei，HUANG Zhi-yang，et al. Numerical modeling of sediment movement and back silting on approach channel in muddy coast[J]. China Harbour Engineering，2007(4)：1-4.（in Chinese））

[5] 张玮，李醒，解鸣晓，等. 连云港外海含沙量推求及航道回淤预测[J]. 中国港湾建设，2008(3)：1-4.（ZHANG Wei，LI Xing，XIE Ming-xiao，et al. Prediction of sediment concentration in open sea and siltation in approach channels to Lianyungang port[J]. China Harbour Engineering，2008(3)：1-4.（in Chinese））

[6] 丁军华，张金善，高正荣，等. 淤泥质海岸环抱式港池口门布置方案研究[J]. 水利水运工程学报，2014(1)：17-23.（DING Jun-hua，ZHANG Jin-shan，GAO Zheng-rong，et al. Analysis of layout scheme of entrance of encircled basin along muddy coast[J]. Hydro-Science and Engineering，2014(1)：17-23.（in Chinese））

[7] 刘杰，徐志杨，赵德招,等. 长江口深水航道(一、二期工程)回淤变化[J]. 泥沙研究，2009(2)：22-28.（LIU Jie，XU Zhi-yang，ZHAO De-zhao，et al. Change of re-siltation in the Yangtze estuary deepwater channel during 1st and 2nd stages[J]. Journal of Sediment Research，2009(2)：22-28.（in Chinese））

[8] 刘家驹. 淤泥质、粉沙质及沙质海岸航道回淤统一计算方法[J]. 海洋工程，2012，30(1)：1-7.（LIU Jia-ju. A unified computation method of siltation for dredged approach channel in different sediment beaches[J]. The Ocean Engineering，2012，30(1)：1-7.（in Chinese））

[9] 孔令双，曹祖德，李炎保. 利用“有效风能”预报航道淤积[J]. 水道港口，2004，25(4)：209-212.（KONG Ling-shuang，CAO Zu-de，LI Yan-bao. Forecasting siltation of channel by effective energy of wind[J]. Journal of Waterway and Harbour，2004，25(4)：209-212.（in Chinese））

[10] 曹祖德，孔令双. 淤泥质海岸开敞航道的回淤计算[J]. 水道港口，2004，25(2)：59-68.（CAO Zu-de，KONG Ling-shuang. Siltation calculation for open channel[J]. Journal of Waterway and Harbour，2004，25(2)：59-68.（in Chinese））

[11] 刘家驹. 粉沙淤泥质海岸的航道淤积[J]. 水利水运工程学报，2004(1)：6-11.（LIU Jia-ju. Silt siltation in approach channel of the coast with silty mud sediment[J]. Hydro-Science and Engineering，2004(1)：6-11.（in Chinese））

[12] 白玉川，张彬，张胤祺，等. 波浪挟沙能力及航道骤淤机理的研究[J]. 水利学报，2007，38(6)：646-653.（BAI Yu-chuan，ZHANG Bin，ZHANG Yin-qi，et al. Sediment-carrying capacity of wave and mechanism of sudden silting in navigation channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2007，38(6)：646-653.（in Chinese））

[13] WANG Yi-gang，LI Xi，LIN Xiang. Analysis of suspended sediment deposition rate for muddy coast of reclaimed land[J]. China Ocean Engineering，2001，15(1)：147-152.

[14] 邹志利. 海岸动力学[M]. 4 版. 北京：人民交通出版社，2009.（ZHOU Zhi-li. Coastal hydrodynamics[M]. 4th ed. Beijing：China Communications Press，2009.（in Chinese））

[15] 霍粤蓟. 港口航道回淤分析中人工神经网络预测模型的建立[D]. 天津：天津大学，2004.（HUO Yue-ji. Establishing a sea-route safety forecast model by using the ANN in analysing the sullage in the sea-route[D]. Tianjin：Tianjin University，2004.（in Chinese））

Forecast of windblown siltation in entrance channel located on muddy coast based on energy conservation

JIANG Xue-lian[1, 2], SONG Ji-ning[1], ZHANG Na[1], QIE Lu-wen[3]

(1. *Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics & Engineering Environment*, *Tianjin Chengjian University*, *Tianjin* 300384, *China*; 2. *State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety*, *Tianjin University*, *Tianjin* 300072, *China*; 3. *Civil Engineering College of Hebei University*, *Baoding* 071002, *China*)

Abstract: Advances in research on siltation in the entrance channel located on the muddy coast have been reviewed in the paper. Expressions for wave height, sediment-carrying capacity and average siltation intensity during wind process have been derived based on the energy conversation during the transformation among wind energy, wave energy and potential energy of the suspended sediments. Subsequently, the semi-empirical formula forecasting the deposition of a specified entrance navigation channel directly utilizing wind data is put forward. The measurements of the wind field and related siltation in a certain entrance channel of the Tianjin port are used to validate the semi-empirical formula and simulate siltation in this channel based on the formula. Analysis results show that predicted values agree well with the measured values when the sample size is large enough for the fitting of parameters in the semi-empirical equation. In addition, predictions of siltation volume per wind hour for different wind scales indicate that wind speed is the main wind field element affecting the carrying capacity of the suspended sediment and deposition intensity per wind hour of the entrance channel.

Key words: muddy coast; entrance channel; siltation; energy conservation; wind field elements; sediment-carrying capacity; windblown siltation