

# 发展新型的海面空气动力学粗糙度参数化方案

潘玉萍<sup>1\*</sup> 沙文钰<sup>2</sup> 王巨华<sup>3</sup> 葛苏放<sup>4</sup> 尹志军<sup>2</sup>

1. 南京军区空军气象中心, 南京 210018; 2. 解放军理工大学气象学院军事海洋系, 南京 211101;

3. 南京空军司令部气象处, 南京 210018; 4. 南京信息工程大学研究生部, 南京 210044

**摘要** 由量纲分析导出无因次粗糙度长度与波龄有关, 粗糙度长度无因次形式写为与有效波高有关, 综合利用 6 个试验资料(HEXMAX 试验、RASEX 试验、BIO 稳定平台试验、FETCH 试验、CBLAST 低风试验), 共同验证 Charnock 参数  $z_{0c}$  与无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$  对波龄的依赖性, 建立粗糙度长度方案, 并讨论其对摩擦速度和波龄的敏感度. 把研制的海面粗糙度参数化方案引入 COARE(V3.0)算法中, 选择 1985 年 12 月在北海的 FPN 平台上的试验资料, 检验海面粗糙度长度参数化方案与 COARE 算法中 3 种方案的适用性. 结果表明: O02 和 TY01 方案较高估计了摩擦速度, YT96 方案略偏低估计了摩擦速度, 而研制的方案计算结果与实测结果最接近. 将研制的海面粗糙度方案应用于风浪耦合嵌套模式中, 选取湛江港 3 次历史台风资料, 计算硃洲岛海浪并与实测浪高相比较, 验证该方案具有较好的适用性.

**关键词** 海面粗糙度长度参数化方案 有效波高 波龄 COARE 算法

海气相互作用主要通过海气之间动量、热量和水汽的交换影响气候变化及环境变异<sup>[1,2]</sup>. 一般来说, 精确确定海气表面动量交换主要取决于: (1) 合理地描述稳定度的依赖关系, (2) 精确地确定海面空气动力学粗糙度. Morin Obukhov 相似理论很好地描述了稳定度的依赖关系<sup>[3,4]</sup>. 然而如何精确地确定海面空气动力学粗糙度至今仍然是研究热点<sup>[5-10]</sup>.

“水之妙风起波生”, 风浪必然改变海面空气动力学粗糙度, 尤其在西北太平洋第二岛链以内的海域, 风浪甚至可达 6 m 以上<sup>[11]</sup>. 风浪的复杂性表现在其动力来源于大气运动, 这样必定存在海气相互作用. 风浪的大小一方面取决于从运动气体中获取能量的大小, 另一方面取决于海面粗糙度, 从而决定了气体能够给予风浪的能量, 因此深入研究海面空气动力学粗糙度, 可以提高海气之间动量交换和风浪的计算精度, 在实际的数值预报中提供借鉴和参考.

典型的计算海面粗糙度的参数化方案是采用

Charnock 关系式<sup>[12]</sup>. 以往的研究中, 在有限风浪区或湖泊条件下, Charnock 参数的取值也不相同, Yelland 等<sup>[7]</sup>在 1996 年给出的海面粗糙度方案(以下称为 YT96)中, Charnock 参数在风速  $10-18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间就取为一线性公式. 目前许多试验研究表明, 海面粗糙度与海浪的特征有关. Taylor 等<sup>[9]</sup>指出海面空气动力学粗糙度与波陡密切相关, 并给出了参数化方案, 以下称该方案为 TY01. Oost<sup>[10]</sup>指出, 海面粗糙度是关于波龄和摩擦速度的函数, 他们给出的方案以下称为 O02. 目前, 这两个公式都已被包含于最新版的 COARE (coupled ocean atmosphere response experiment)算法中. 鉴于空气动力学粗糙度在风浪发展及海气相互作用研究中的重要性, 提高空气动力学粗糙度计算方法的精确性和普适性是本文的研究重点.

## 1 量纲分析

海面粗糙度长度与海面上的风应力及海况有

2006 10 16 收稿, 2007 03 09 收修稿

\* E-mail: PYPNanjing@163.com

关, 风应力及海况可以写成如下形式:

$$U = f(u^*, dir_a, \rho_a, \nu_a, T_a, g) \quad (1)$$

$$W = f(H_s, T_p, dir_w, h, \rho_w, \nu_w, T_w, g, z_{0s}) \quad (2)$$

式中  $U$  代表风场,  $W$  代表海况. 海浪的波高与周期有很多表示形式, 这里采用普遍使用的有效波高  $H_s$  及波周期  $T_p$ .  $u^*$  为摩擦速度,  $dir_a$ ,  $dir_w$  分别为风向, 浪向,  $\rho_a$ ,  $\nu_a$ ,  $T_a$  分别为空气密度、粘度及温度,  $\rho_w$ ,  $\nu_w$ ,  $T_w$  分别为海水密度、粘度及温度,  $h$  为水深,  $g$  为重力加速度,  $z_{0s}$  为背景粗糙度.

海表面粗糙度长度可以写为:  $z_0 = f(U, W)$ , 由(1), (2)式得

$$z_0 = f(u^*, dir_a, \rho_a, \nu_a, T_a, g; H_s, T_p, dir_w, h, \rho_w, \nu_w, T_w, z_{0s}) \quad (3)$$

把(3)式写成无因次形式:

以  $\rho_a$ ,  $u^*$ ,  $g$  及  $H_s$  为替换量, 把其他各项写成无因次形式

$$\frac{z_0}{H_s} = f\left(\frac{gT_p}{u^*}, \frac{gh}{u^{*2}}, \frac{gz_{0s}}{u^{*2}}, \frac{u^{*3}}{g\nu_a}, \frac{u^{*3}}{g\nu_w}, \frac{T_w}{T_a}, \frac{dir_w}{dir_a}, \frac{\rho_w}{\rho_a}\right) \quad (4)$$

引入如下假设

(1) 利用频散关系式  $c_p^2 = \frac{g}{k} thkh$ , 取深水近似,

右式中第一项可写为与相速  $c_p$  有关, 第二项可略去.

$$\frac{gT_p}{u^*} = 2\pi \frac{c_p}{u^*} \quad (5)$$

(2) 假定在无风浪的情况下, 海面是完全光滑的, 因此消去  $\frac{gz_{0s}}{u^{*2}}$  项.

(3) 假定海气表面是粗糙湍流条件, 因此去掉右式中的分子粘滞项  $\frac{u^{*3}}{g\nu_a}$ ,  $\frac{u^{*3}}{g\nu_w}$ .

(4)  $\frac{T_w}{T_a}$  是海水温度及空气温度由于层结对海气界面动量通量的作用. 中性条件下由于海气温差很小, 也可以忽略该项.

(5) 在背景粗糙度为 0 时, 风向与浪向基本一

致,  $\frac{dir_w}{dir_a}$  项也可以消掉.

(6)  $\frac{\rho_w}{\rho_a}$  为一常数, 可去掉该项.

因此(4)式可写成

$$\frac{z_0}{H_s} = f\left(\frac{gT_p}{u^*}\right) = f\left(\frac{c_p}{u^*}\right) \quad (6)$$

可见海面粗糙度长度  $z_0$  与有效波高及波龄有关. 在以往的研究中, 考虑了 Toba<sup>[1]</sup> 指出的无因次波高与周期之间存在显著的 3/2 次方相似关系式, 并采用一系列的假定, 得到 Charnock 参数与波龄有关. 这里直接把粗糙度长度无因次形式写为与有效波高有关, 一是由于海面粗糙度不仅取决于粗糙元的大小(用有效波高代表), 还与其运动状况(波龄代表)有关. 二是由于在众多海浪要素中, 只有有效波高是唯一可以观测的量. 略去 Toba 近似关系, 物理意义更加明确. 以下通过 HEXMAX, RASEX, BIO 稳定平台试验, FETCH, CBLAST 试验及 Anctil 和 Donelan(1996)对 Ontario 湖的研究资料<sup>[13]</sup> 分别讨论.

## 2 不同试验条件下空气动力学粗糙度长度的发展

### 2.1 试验资料

**2.1.1 HEXMAX 试验** HEXMAX (humidity exchange over the sea main experiment) 试验是 HEXOS (humidity exchange over the sea) 项目的一部分, 于 1986 年 10—11 月间在北海南部荷兰海岸附近的 MPN (Meetpost Noordwijk) 平台上进行的, 为了调查曳力系数与粗糙度长度对海况的依赖性, 有效波高及相速同步测量. 该海区水深 18 m, 风区长度超过 175 km. 因此, HEXMAX 试验代表有限水深的长风区洋面条件.

**2.1.2 RASEX 试验** RASEX (Risø Air Sea Exchange) 试验是 1994 年春季和秋季在波罗的海进行的浅水试验, 试验包括两个 48 m 高的离岸观测塔, 本文使用的是其中洛兰岛沿岸观测塔 10—11 月向岸流部分资料. 水深 3—4 m, 离岸风区长 2—5 km,

向岸风区长 15—25 km. 因此所有资料都在有限风区条件下.

**2.1.3 BIO 稳定平台试验** BIO (the Bedford Institute of Oceanography) 稳定平台试验是 1976—1978 年间在加拿大新斯科舍地区的沙布尔岛进行的. 试验要求一稳定的平台能抵挡 (i) 18 m 波高 (波峰至波谷); (ii) 45 m/s 的平均风速, 阵风因子 1.25; (iii) 0.25 m/s 的流速. 该海区水深 59 m, 允许 99% 的 10 s 波以深水相速传播, 因此是典型的深水

波. 在来自于北大西洋的偏南和偏东风下, 风区可以看作长风区, 来自于海岸的西风条件下, 最小风区为 10 km.

**2.1.4 Lake Ontario data** Ontario 湖附近由于有浮标站点, 表面气象资料较多. 这里为了同时获得通量资料与海浪参数资料, 使用 Ancil 和 Donegan<sup>[13]</sup> 对 Ontario 湖的研究资料. 资料来源与 4 个气象观测塔, 水深分别为: 2, 4, 8 和 12 m, 包括两次风事件, 166 步平均风速约  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 风区约

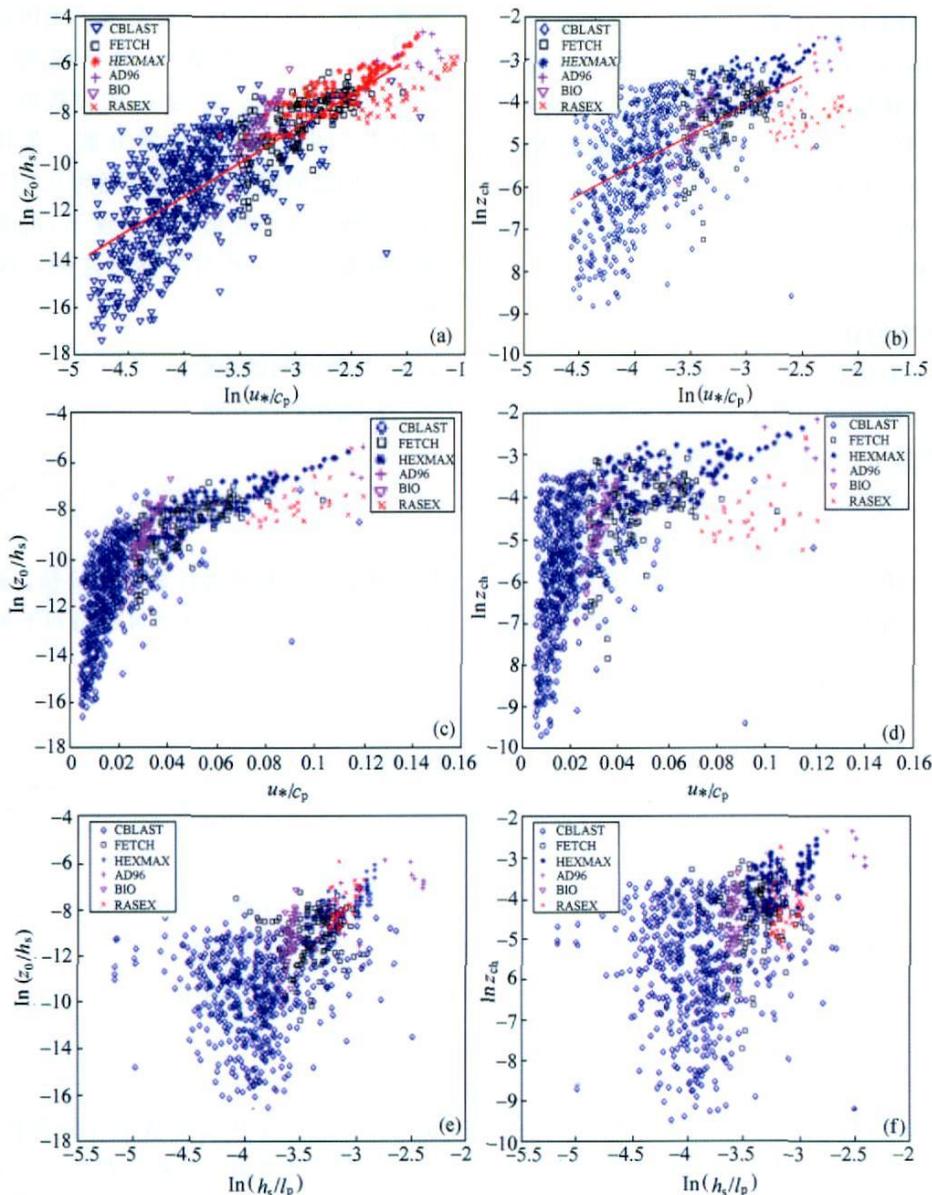


图 1 无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$  与 Charnock 参数  $z_{ch}$  对波龄倒数 (a) — (d) 及波陡 (e), (f)

8 km; 185 步平均风速约  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 风区约 300 km.

**2.1.5 FETCH 试验** FETCH(Flux, Etat de la mer, et Télédetection en Condition de Fetch variable)试验是 1998 年 3 月 12 日至 4 月 15 日在地中海北部进行的, 试验的主要目的是估计沿岸地区的湍流通量, 处理波浪场的演化和对海气边界层资料的遥感分析. 该海域盛行向岸风, 因此以长风区条件为主. 本文应用的是 R/V L'Atalante 观测船的观测资料.

**2.1.6 CBLAST low 试验** CBLAST low (the Coupled Boundary Layer Air Sea Transfer) 试验是耦合边界层海气传输项目的低风部分, 于 2003 年 7 月 22 日至 8 月 27 日在美国马萨诸塞州沿海的 Nantucket 岛进行的. 本文应用的是 Martha's Vineyard 港沿岸 ASIT(Air Sea Interaction Tower) 观测塔同期气象观测资料.

## 2.2 参数化方案的建立

由于单个试验所得的结果依据不同的试验条件而异, 因此本文综合利用以上 6 个试验资料共同验证 Charnock 参数  $z_{ch}$  与无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$  对波龄的依赖性, 如图 1.

由图 1(a), (b) 可知, 无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$ 、Charnock 参数  $z_{ch}$  的对数形式与波龄倒数  $u^*/c_p$  的对数形式之间有良好的线性关系, 相关系数分别为 0.8274 及 0.6313. 线性回归方程分别为  $\ln \frac{z_0}{h_s} =$

$$2.82 \ln \left( \frac{u^*}{c_p} \right) - 0.295, \ln z_{ch} = 1.4 \ln \left( \frac{u^*}{c_p} \right) - 0.06.$$

张子范<sup>[14]</sup>在研究海面阻力系数时指出粗糙度长度与波龄倒数之间呈指数分布, 因此, 本文也给出了无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$ 、Charnock 参数  $z_{ch}$  与波龄之间的半对数分布形式, 如图 1(c), (d); 由图 1(c), (d) 可知,  $z_0/h_s$  与  $z_{ch}$  的对数形式与波龄之间点的分布相对集中, 但是线性关系不明显, 相关系数也相对偏低, 分别为 0.7419, 0.5359. 可以看出  $z_0/h_s$  与  $u^*/c_p$  之间的 HEXOS 关系( $z_{ch} = \alpha (u^*/c_p)^\beta$ ) 好于指数关系. 图 1(e), (f) 给出了无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$ 、Charnock 参数  $z_{ch}$  与波陡的分布. 由图 1(e)、(f) 可知,  $z_0/h_s$  与  $z_{ch}$  的对数形式与波陡的对数形式之间点的分布非常分散, 尤其是低风速部分. 它们之间的相关系数分别为 0.5172 和 0.3837. 综上所述, 无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$  的对数形式与波龄倒数  $u^*/c_p$  的对数形式之间, 线性关系最明显,  $R=0.8274$ .

## 2.3 线性回归的检验 对线性回归方程

$$\ln \frac{z_0}{h_s} = 2.82 \ln \left( \frac{u^*}{c_p} \right) - 0.295 \quad (7)$$

回归系数及常数项进行显著性检验, 模型的预测效果进行优度检验, 具体计算结果列于表 1.

表 1 线性回归参数表

	回归系数	标准误差	t 统计量	显著性水平	
1	-0.29522	0.238359	-1.2385	0.21587	
x	2.82445	0.066585	42.4189	0.	
决定系数 0.684595			调整决定系数 0.684214		
	自由度	平方和	均值平方误差	F 值	显著性水平
回归模型	1	2557.82	2557.82	1799.36	0.
残差	829	1178.44	1.4215		
总计	830	3736.26			

由表 1 可知, 回归系数及常数项的标准误差分别为 0.0666 和 0.2384; t 统计量分别为 42.4189 和 -1.2385; 显著性水平分别为 0 和 0.2159; 由 t 验

证可知, 回归系数及常数项在其置信区间内显著. 决定系数及调整决定系数分别为 0.6846 及 0.6842, 说明回归模型对样本数据的拟合程度较好; 在对方

差估计中, 回归平方和、残差平方和、观测值与拟和值之差总的平方和分别为 2557.82, 1178.44 及 3736.26; 自由度分别为 1, 829 及 830, 均值平方误差分别为 2557.82 及 1.4215;  $F$  值为 1799.36, 非常大, 拒绝支持小概率事件的零假设, 认为在显著性水平为 0 下,  $x$  和  $y$  之间的线性相关关系显著.

### 3 敏感性分析

#### 3.1 粗糙度长度 $z_0$ 对摩擦速度的敏感性

由粗糙度长度  $z_0 = \frac{10}{\exp(ku_{10}/u^*)}$ , 可见粗糙度与

Carman 常数  $k$ ,  $u_{10}$  和  $u^*$  有关, 参考 Johnson 等<sup>[15]</sup> 做法, 假设  $k$ ,  $u_{10}$  和  $u^*$  的误差分别为  $\Delta k/k$ ,  $\Delta u_{10}/u_{10}$  及  $\Delta u^*/u^*$ , 则粗糙度的误差为  $\Delta z_0/z_0$ , 有:

$$\frac{\Delta z_0}{z_0} + 1 = \exp \left\{ \frac{-k/\sqrt{C_D}}{(1 + \Delta u^*/u^*)} \cdot \left[ \frac{\Delta u_{10}}{u_{10}} + \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta k}{k} \frac{\Delta u_{10}}{u_{10}} - \frac{\Delta u^*}{u^*} \right] \right\} \quad (8)$$

由于  $k$  取为常数 0.4, 且  $u_{10}$  测量误差较小, 一般  $< 2\%$ , 因此考虑粗糙度的误差主要来源于  $u^*$ .  $C_D$  取为本文试验资料的平均值 0.0012, 假设  $u^*$  存在  $\pm 10\%$  的误差, 则粗糙度长度误差  $\Delta z_0/z_0$  就可达到 185%, 如果  $u^*$  存在  $\pm 5\%$  的误差, 则粗糙度长度误差  $\Delta z_0/z_0$  就可达到 73%, 可见粗糙度长度对摩擦速度是非常敏感的, 而对计算摩擦速度的准确性就要求较高, 否则  $u^*$  较小的误差就会导致  $z_0$  较大的误差.

#### 3.2 粗糙度长度 $z_0$ 对波龄的敏感度

波龄的误差可写为:

$$\frac{\Delta(c_p/u^*)}{c_p/u^*} = \frac{\Delta c_p/c_p - \Delta u^*/u^*}{1 + \Delta u^*/u^*} \quad (9)$$

假设  $c_p$  的误差忽略不计, 如果  $u^*$  存在  $\pm 10\%$  的误差, 则波龄存在的误差为  $(-9\% - 11\%)$  由(9)式, 波龄的误差要小于波相速及摩擦速度的误差. 因此, 粗糙度长度与阻力系数是关于波龄的函数, 在计算中还可降低粗糙度长度与阻力系数的误差.

由本文粗糙度长度与波龄的公式可得,

$$\frac{\Delta z_0}{z_0} + 1 = \left[ 1 + \frac{\Delta(c_p/u^*)}{c_p/u^*} \right]^{-2.82} \left[ 1 + \frac{\Delta h_s}{h_s} \right] \quad (10)$$

只考虑波龄对粗糙度长度的影响, 由(9)式, 如果  $u^*$  存在  $\pm 10\%$  的误差, 则波龄存在的误差为  $(-9\% - 11\%)$ , 粗糙度长度存在的误差为  $(-25\% - 30\%)$ ; 如果  $u^*$  存在  $\pm 5\%$  的误差, 则波龄存在的误差为  $(-4.8\% - 5.3\%)$ , 粗糙度长度存在的误差为  $(-13.6\% - 14.8\%)$ . 与摩擦速度存在相同误差情况下, 粗糙度长度存在的误差要小得多.

### 4 海面粗糙度长度方案的验证

#### 4.1 资料与方法

为了进一步检验本文发展的海面粗糙度长度参数化方案的适用性, 选择 1985 年 12 月在北海的 FPN 平台上的试验资料验证. 北海的 FPN 平台距德国海湾西南部 65km, 水深 30m, 该试验主要为了评估风速变化较大情况下风应力及雷达散射仪反向散射特征. 试验仪器、装备及资料详见文献[16]. 在 116 个观测时次内, 12 月 4 日至 6 日 06 时主要盛行偏 S 和 WS 风, 最大风速为 6 日 04 时  $16.22\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 继而风向转为西北, 风速也增至最大, 为  $24.43\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 6 日 17 时风速逐渐减小, 至 21 时风速减为最小且改变风向为 SSW 风. 冬季大气温度较低, 海气温差相对较小, 当风暴来临时, 大气剧烈降温, 海气温差为正. 有效波高随着风速的增加而增加, 至 6 日 10 时有效波高增至最大 7.08m.

#### 4.2 COARE 算法

COARE 算法是基于 Monin Obukhov 相似理论, 在 Liu 等<sup>[17]</sup> 算法上的又一突破. V3.0 是当前最终版本, 是在 V2.6a 的基础上又补充了浪的信息资料. 具体详见文献[5].

COARE 算法中提供了 3 种海面空气动力粗糙度参数化方案: YT96、TY01 和 O02. 其中只有 YT96 应用的是 Charnock 关系, 其他方案都与海面浪的状况有关. 具体的参数化形式详见文献[18].

#### 4.3 结果分析

把本文发展的海面粗糙度参数化方案引入 COARE 算法中, 计算北海 FPN 平台试验摩擦速度、曳力系数及动量通量等, 与利用涡动相关法实

测的结果相比较, 并与 COARE 算法中几种方案 (TY01, O02 及 YT96) 计算结果相比较, 检测本文方案的适用性. 如图 2 为几种方案计算的摩擦速度与实测的摩擦速度的散点分布. 我们计算了它们之间的线性回归系数, 分别为:  $u_{*ed} = 0.899u_{*TY}$ ,  $u_{*ed} = 1.045u_{*YT}$ ,  $u_{*ed} = 0.784u_{*O}$  及  $u_{*ed} = 1.007u_{*NEW}$ . 可见, O02 和 TY01 方案较高估计了摩擦速度, YT96 方案略偏低估计了摩擦速度, 而本文方案计算的结果与实测结果最接近. 归一化标准误差

差  $\left\{ \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2} \right\}$ , 其中  $A_i$  为估计值,  $B_i$  为真值 及均方根误差估计如表 3, 也同样得到本文方案

计算的结果与实测最一致.

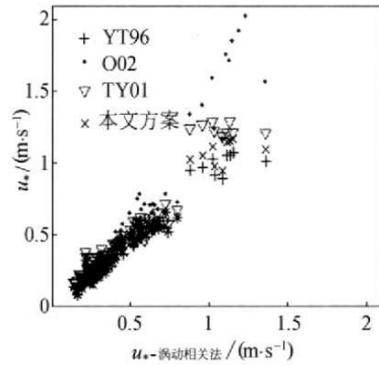


图 2 4 种方案计算  $u_*$  与实测  $u_*$  散点分布

表 2 4 种方案计算的  $u_*$ ,  $C_d$  及  $\tau$  的归一化标准误差及均方根误差

	$u_* / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		$C_d \times 10^{-3}$		$\tau / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	
	NSEE	rms	NSEE	rms	NSEE	ms
YT96	0.1219	0.0623	0.2414	0.384	0.2432	0.1084
TY01	0.1820	0.0931	0.3764	0.599	0.4032	0.1797
O02	0.3350	0.1713	0.6060	0.965	1.0374	0.4623
New	0.1188	0.0607	0.2407	0.380	0.2310	0.1029

## 5 海面粗糙度方案在风浪耦合嵌套模式中的应用

将本文发展的海面粗糙度方案应用于我们自行研制的风浪耦合嵌套模式中, 选取湛江港 3 次历史台风资料, 计算碓洲岛海浪与实测浪高相比较, 验证该方案的适用性.

### 5.1 模式简介

风浪耦合嵌套模式由热带气旋风场和气压场模式和 SWAN 海浪模式组成.

**5.1.1 热带气旋气压场与风场模型** 热带气旋气压场和风场采用我们<sup>[1]</sup>自行研制的方法, 即不对称气压模型计算海面气压场, 并根据梯度风原理计算海面风场, 而在热带气旋外围则采用 NCAR 资料或气象数值预报产品提供风场, 同时辅以同时段的单站资料进行同化所得. 通过模型风场提供初始场,

利用实际观测资料对该初始场进行订正, 可以较为准确合理地给出实际台风风场.

**5.1.2 SWAN 海浪模式** 海浪模式采用的是物理过程考虑比较全面的第三代 SWAN 模式, 风浪的增长仍采用线性增长和指数增长两种情况, 对于风浪的指数增长, 这里只采用 Komen<sup>[19]</sup> 表达式, 粗糙度由本文方案给出. 耗散作用主要考虑白帽、底摩擦作用及其深度诱导破碎所引起的能量耗散.

### 5.2 计算区域选取及边界条件和初始条件

对湛江港的计算, 包括两个分析计算区, 一个是粗网格的大区, 另一个是细网格的小区. 大区是整个南海, 它足够大, 可以覆盖影响湛江港的全部热带气旋强风作用区域. 小区是湛江海域, 包括湛江港及其附近海域. 网格采用的是自适应曲线网格. 南海区域最大网格为 80 km, 湛江港网格大小为 400 m 左右, 如图 3.

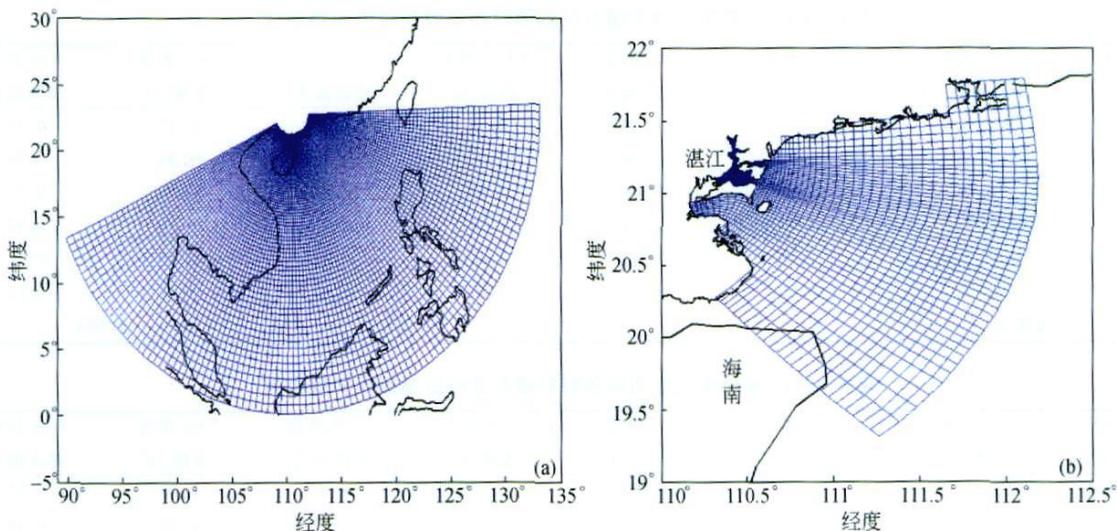


图 3 南海(a)和湛江港(b)曲线网格

(1) 开边界条件

大区将南海视为封闭海域，小区的开边界由大区模拟的水位变化给定。

(2) 初始条件

除开边界外，计算区域采用零初始条件，由静止开始积分。

5.3 海浪模拟结果检验

由于湛江港没有海浪观测站，所以对海浪的检验，本文选用碣洲岛海洋水文观测站的海浪实测数据与模拟海浪结果进行比较。目前海洋观测站的海浪观测采用的是每日 4 次定时观测，即 08 时、11 时、14 时和 17 时。由于海浪观测受海洋和气象条件影响大，经常有缺测现象，使得观测记录不连续。因此，会出现对应于增水最大值时刻无海浪观

测值的情况。为了对海浪进行有效地检验，这里选用风暴开始显著影响该测站时刻起比较检验浪高，计算海浪模拟值与实测值的相对误差。

表 3—5 分别为三次热带气旋个例影响碣洲岛海浪的实测值与预报值，其中海浪的预报分别采用了 YT96、O02 和本文研制的海面粗糙度参数化方案，由于 TY01 方案在计算海浪时有明显偏差，这里暂不讨论。由表可知，利用本文方案计算的碣洲岛海浪有效波高与实测有效波高最接近，平均误差最小，O02 方案计算的有效波高明显偏大；YT96 方案由于在计算中不考虑海况对风场的影响，计算的有效波高最大，平均误差也最大。另外，由三次热带气旋个例可以看出，海浪的有效波高在 0.6—3.8 m 之间，对于海面粗糙情况下，本文方案的计算结果最好。

表 3 7818 号热带气旋期间各时刻碣洲岛海浪预报值和观测值

时间 (日、时)	观测 浪高/m	O02 预报 浪高/m	O02 预报 浪高误差	YT96 预报 浪高/m	YT96 预报 浪高误差	New 预报 浪高/m	New 预报 浪高误差
30: 08	2.9	2.62	-0.88	2.63	-0.87	2.61	-0.9
30: 11	2.7	2.73	-0.77	2.74	-0.76	2.67	-0.81
30: 14	2.1	2.76	0.26	2.77	0.27	2.71	0.21
30: 17	1.8	2.85	0.45	2.85	0.45	2.80	0.39
01: 08	1.9	3.83	1.73	3.90	1.8	3.53	1.57
01: 11	2.5	4.19	1.19	4.28	1.28	3.71	0.94
01: 14	3.3	4.49	-0.01	4.61	0.11	3.93	-0.31
02: 08	3.8	4.91	0.61	5.09	0.79	4.01	0.04
02: 11	3.5	4.76	0.66	4.95	0.85	3.86	0.09
02: 14	2.6	4.08	0.88	4.25	1.05	3.33	0.42
平均误差			0.744		0.823		0.568

表 4 8208 号热带气旋期间各时刻碓洲岛海浪预报值和观测值

时间 (日、时)	观测 浪高/m	O02 预报 浪高/m	O02 预报 浪高误差	YT96 预报 浪高/m	YT96 预报 浪高误差	New 预报 浪高/m	New 预报 浪高误差
16: 14	0.6	0.22	0.38	0.21	0.39	0.15	0.45
16: 17	0.6	0.32	0.28	0.32	0.28	0.34	0.26
17: 08	1.8	2.54	0.74	2.54	0.74	2.46	0.66
17: 11	2.2	2.94	0.74	3.00	0.8	2.64	0.44
17: 14	2.4	2.75	0.35	2.82	0.42	2.40	0
17: 17	2.2	2.58	0.38	2.62	0.42	2.22	0.02
平均误差		0.478		0.508		0.305	

表 5 9713 号热带气旋期间各时刻碓洲岛海浪预报值和观测值

时间 (日、时)	观测 浪高/m	O02 预报 浪高/m	O02 预报 浪高误差	YT96 预报 浪高/m	YT96 预报 浪高误差	New 预报 浪高/m	New 预报 浪高误差
21: 14	1.3	0.41	0.89	0.41	0.89	0.33	0.97
21: 17	1.1	0.85	0.25	0.85	0.25	0.62	0.48
22: 08	3.4	4.66	1.26	4.83	1.43	3.83	0.43
22: 11	3.8	4.65	0.85	4.82	1.02	3.89	0.09
22: 17	2.4	4.83	2.43	5.03	2.63	3.52	1.12
23: 08	1.7	1.01	0.69	1.00	0.7	1.03	0.67
23: 11	1.4	0.96	0.44	0.97	0.43	0.99	0.41
平均误差		0.973		1.050		0.596	

## 6 结论

由量纲分析导出无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$  与波龄有关, 综合利用 6 个不同条件试验资料, 共同验证 Charnock 参数  $z_{ch}$  与无因次粗糙度长度  $z_0/h_s$  对波龄的依赖性, 建立粗糙度长度回归模型, 得到以下结论:

(1) 讨论了粗糙度长度对摩擦速度和波龄的敏感度, 得出: 粗糙度长度对摩擦速度是非常敏感的, 粗糙度长度是波龄的函数, 在计算中还可以降低误差。

(2) 把本文研制的粗糙度方案引入到 COARE (V3.0) 算法中, 选择 1985 年北海的 FPN 平台上的试验资料, 检验本文发展的海面粗糙度长度参数化方案的适用性。得出: O02 和 TY01 方案较高估计了摩擦速度, YT96 方案略偏低估计了摩擦速度, 而本文研制的方案计算结果与实测结果最接近。

(3) 将本文研制的粗糙度方案应用于风浪耦合嵌套模式中, 选取湛江港 3 次历史台风资料, 计算碓洲岛海浪与实测浪高相比较, 验证该方案具有较好的适用性。

## 参 考 文 献

- Toba Y, Ebuchi N. Sea surface roughness length fluctuating in concert with wind and waves. *J Oceanogr Soc Japan*, 1991, 47(3): 63-79
- Dickinson RE, Hendersin Sellers A, Rosenzweig C, et al. Evapotranspiration models with canopy resistance for use in climate models: a review. *Agric for Meteorol*, 1991, 54(4): 373-388
- 周明煜, 李诗明, 钱粉兰, 等. 我国大陆地区和近海海域能量收支分别及其季节变化的数值模拟研究. *地球物理学报*, 2002, 245(3): 319-329
- Launiainen. Derivation of the relationship between the Obukhov stability parameter and the bulk Richardson number for flux profile studies. *Boundary Layer Meteorol*, 1995, 76(2): 165-179
- Fairall CW, Bradley EF, Rogers DP, et al. Young. Bulk parameterization of air sea fluxes for TOGA COARE. *J Geophys Res*, 1996b, 101(C2): 3747-3764
- Donelan M, Dobson FW, Smith SD, et al. On the dependence of sea surface roughness on wave development. *J Phys Oceanog*, 1993, 23(9): 2143-2149
- Yelland M, Taylor PK. Wind stress measurements from the open ocean. *J Phys Oceanogr*, 1996, 26(4): 541-558
- Zeng X. Inter comparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using the TOGA COARE and TAO data. *J Clim*, 1998, 11(10): 2628-2644
- Taylor PK, Yelland M J. The dependence of sea surface roughness

- ness on the height and steepness of the waves. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31(2): 572—590
- 10 Oost WA, Komen GJ, Jacobs CMJ, et al. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE. *Bound Layer Meteor*, 2002, 103(3): 409—438
- 11 沙文钰, 杨支中, 冯 芒, 等. 风暴潮、浪数值预报. 北京: 海洋出版社, 2004
- 12 Charnock H. Wind stress on water surface. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1955, 81(350): 639—640
- 13 Anctil F, Donelan MA. Air water momentum flux observations over shoaling waves. *J Phys Oceanogr*, 1996, 26(7): 1344—1353
- 14 张子范, 李家春. 风浪发展对海面阻力系数的影响. *中国科学, A 辑*, 1998, 28(1): 53—61
- 15 Johnson HK, Hojstrup J, Vested HJ, et al. On the dependence of sea surface roughness on wind waves. *J Phys Oceanogr*, 1998, 28(9): 1702—1716
- 16 Geernaert G L. On the importance of the drag coefficient in air sea interactions. *Dyn Atmos Oceans*, 1987, 11(1): 19—38
- 17 Liu WT, Katsaros KB, Businger JA. Bulk parameterization of the air sea exchange of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface. *J Atmos Sci*, 1979, 36(9): 1722—1735
- 18 沙文钰, 潘玉萍. 用 COARE 算法测试四种最新海面空气动力粗糙度方案. *自然科学进展*, 2004, 14(2): 196—200
- 19 Komen GJ, Hasselmann S, Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind sea spectrum. *J Phys Oceanogr*, 1984, 14(8): 1271—1285

## 欢迎订阅 2008 年度《中国科学基金》(中英文版)

《中国科学基金》(双月刊)、《Science Foundation in China》(半年刊)是国家自然科学基金委员会的委刊,是以基础研究和应用基础研究为背景的综合指导性期刊,主要报道和介绍国家自然科学基金委员会出台的各种重要的政策和文件通告,每年公布“优先资助领域”;介绍国家自然科学基金各类资助项目的研究进展和优秀成果;科学基金管理的研讨和重要信息,每年公布重大、重点科学基金项目批准情况、重点优秀项目的结题情况等.《中国科学基金》中英文期刊是对外展示科学基金工作一个窗口,为科学家提供信息,为研究和决策部门提供参考.

### 主要栏目

**学科进展与展望** 刊登各学科领域最新进展;报道和评述科学重大战略问题和国内、外重要科学成就.

**成果介绍** 及时报道国家自然科学基金资助项目取得的优秀成果.

**基金纵横** 探讨基础研究和科学基金管理工作中若干问题及建议等.

**科学论坛** 基础学科发展规划及科学管理的战略讨论.

**资料与信息** 国家自然科学基金委员会发布的各种文告、资料及信息等.

**订阅价格:** 中国科学基金: 90.00 元; Science Foundation in China: 50.00 元

### 联系方式

**联系电话:** 010 62327204; **传真:** 010 62326921; **邮编:** 100085

**通信地址:** 北京海淀区双清路 83 号 国家自然科学基金委员会杂志社

**联系人:** 刘俐 程宇

**E mail:** chengyu@nsfc.gov.cn

**银行户名:** 国家自然科学基金委员会科学基金杂志社

**开户银行:** 中国工商银行北京北太平庄支行 **帐号:** 0200010009200062483

**订阅截止日**为 2008 年 1 月 20 日

