

COARE 算法中 3 种海面空气动力粗糙度方案的比较

潘玉萍^{1,2}, 闵锦忠¹, 沙文钰^{1,2}

(1 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044; 2 解放军理工大学 气象学院军事海洋系, 江苏 南京 211101)

关键词: 浮标; COARE; 海面空气动力粗糙度; 风应力

中图分类号: P731.26 文献标识码: A 文章编号: 0253-4193(2005)03-0163-07

1 引言

众所周知, 风浪的增长、风暴潮及大气环流等重要海洋天气过程都与海气表面的动量交换密切相关^[1]. 因此, 在过去的 20 a 中, 人们日益关注如何更好地描述海气表面动量交换. 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粗糙度.

Monin-Obukhov 相似理论很好地描述了稳定度的依赖关系, 然而如何精确地确定海面空气动力粗糙度至今仍然是研究热点. 经典的计算海面粗糙度的参数化方案是采用 Charnock 关系式^[2]: $z_0 = z_{ch} u_*^2 / g$, 其中, g 是重力加速度, u_* 是摩擦速度, z_{ch} 是 Charnock 参数. 在不同研究中, 在有限风浪区或湖泊条件下, Charnock 参数的取值也不相同. Yelland 等^[3] 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 m/s 之间就取为一线性公式. 许多试验研究表明, 海面粗糙度与海浪特征有关^[4-11]. 然而, 由于所做的观测试验不同, 所在的海域及浪的分布特征也都不相同, 有的试验因为观测资料分散, 至今还没有一个明确、普遍适用于各个海域的关系式, 因此进一步试验研究明确二者之间的关系是十分必要的. Taylor 等^[8] 2001 年指出海面空气动力粗糙度 z_0 与波高和波陡密切相关, 并给出了参数化方案, 以下称该方案为 TY01. 而 Oost 等^[9] 2002 年指出, 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 O002. 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, 它代表了最先进的求解海气表面动量交换的方法. 因此, 本文的主要目的是通过 COARE 算法, 利用美国国家浮标站(44008)的浮标资料, 来比较 YT96, TY01 和 O002 这 3 种海面空气动力粗糙度参数化方案的适用性.

2 方法与资料

2.1 COARE 算法

COARE 算法是基于 Monin-Obukhov 相似理论, 根据 TOGA COARE 的资料分析, 在 Liu 等^[13] 算法上又有了改进. V3.0 包括了如下改进: (1) 廓线函数对流部分的经验系数变化为与直接观测廓线相匹配. (2) Kansas 稳定廓线函数由 Beljaare 及 Holtslag^[14] 代替, 它能更好地适合 SHEBA (Surface Heat Budget of the Arctic) 项目中在北极冰帽控制下的新廓线资料. (3) Charnock 参数由一个固定值 0.011 变为 Yelland 等^[3] 1996 年研制的公式(见表 1). (4) Liu 等^[13] 1979 年的标量粗糙度关系式 $[f_x(R_r)]$ 被一个简单适用于 COARE 及 HEXMAX (Humidity Exchange Over the Sea Main Experiment) 试验资料关系式 $z_{0q} = \min(1.1 \times 10^{-4}, 5.5 \times 10^{-5} R_r^{-0.6})$ 取代, R_r 为粗糙雷诺数. 在微风条件下轻微降低了水汽和热传输系数. (5) 使用总体雷诺

收稿日期: 2004-02-15; 修订日期: 2004-10-18.

基金项目: 江苏省气象灾害重点实验室项目(KLME050210).

作者简介: 潘玉萍(1973—), 女, 黑龙江省北安市人, 博士, 从事物理海洋与海气相互作用方面研究. E-mail: pyp@nanjing@163.com

数: $R_{ih} = -\frac{gz}{T} \frac{\Delta\theta_v}{u^2}$, 其中 T 为空气温度, $\Delta\theta_v$ 为虚位温, u 为高度 z 处的平均风速. 改进了初始假定, 使该算法更有效地适用于数值模式. (6) 潜热通量重新规定为与混合比有关的项, 而不是水汽密度, 以排除 Webb^[15] 校正的需要. (7) 补充了矢量粗糙度受浪的影响部分, 引进了 TY01 和 OO02 方案, 以供不同使用者需求. V3.0 是当前最新版本, 具体详见文献[16].

这里我们只是简单地介绍关于摩擦速度的计算. 粗糙度长度 z_0 与给定风廓线高度 z 之间的通量廓线为:

$$u^* = k \sqrt{u^2 + w_g^2} \sqrt{\ln(z/z_0) - \Psi_m(\zeta)}, \quad (1)$$

其中, u^* 是摩擦速度; $k=0.4$, 是 von-Karman 常数; w_g 是阵风速度; 稳定度函数 $\Psi_m(\zeta)$ 由 Businger-Dyer^[17] 模式给出:

不稳定条件下,

$$\Psi_m(\zeta) = \ln \left[\left(\frac{1+x}{2} \right)^2 \left(\frac{1+x^2}{2} \right) \right] - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

其中 $x = (1-16\zeta)^{1/4}$.

稳定条件下,

$$\Psi_m(\zeta) = -5\zeta, \quad (3)$$

其中 $\zeta = z/L$, L 为 M-O 稳定度长度.

Fairall^[16] 利用以下关系式计算了无量纲的垂直速度, 即:

$$w_g = \beta u^*, \quad (4)$$

其中 β 为经验常数, 取值为 1.2;

$$w_g^3 = \frac{g}{\theta} \left[\frac{H}{\rho_a C_{pa}} + 0.61 \theta \frac{LE}{\rho_a L_e} \right] z_i, \quad (5)$$

其中, H 和 LE 分别为感热和潜热通量, ρ_a 是湿空气密度, C_{pa} 是干空气定压比热, L_e 是汽化潜热系数, θ 是位温, z_i 是对流边界层高度.

2.2 海面空气动力粗糙度参数化方案

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 OO02. 在这 3 种方案中, 只有 YT96 应用的是 Charnock 关系, 其余 2 种方案都与海况有关. 具体的参数化形式列于表 1. 其中 U_{10} 为海面 10 m 高风速, h_s 为有效波高, t_w 为有效波周期, c_w 为有效波相速, l_p 为波长, U_{10N} 为中性层结下海面 10 m 高风速, h_s/l_p 为波陡, c_w/u^* 或 c_w/U_{10} 为波龄, ν 为分子黏性系数. 由表 1 可知, 3 个公式都有一公共项 $0.11\nu/u^*$, 它代表光滑流情况的动

力粗糙度, 可见对于光滑流部分 3 种方案是一致的, 而对于粗糙流部分的海面粗糙度三者分别给出了不同形式. 本文在此主要讨论粗糙流部分的海面空气动力粗糙度参数化形式.

表 1 YT96, TY01 和 OO02 三种参数化方案

方案名称	公 式
YT96	$z_0 = \frac{z_{ch} u^2}{g} + 0.11 \frac{\nu}{u^*}$ $z_{ch} = \begin{cases} 0.011 & U_{10} \leq 10 \text{ m/s} \\ 0.011 + \frac{0.007(U_{10}-10)}{8} & 10 \text{ m/s} < U_{10} \leq 18 \text{ m/s} \\ 0.018 & U_{10} > 18 \text{ m/s} \end{cases}$
TY01	$z_0 = 1.200 h_s \left(\frac{h_s}{l_p} \right)^{4.5} + 0.11 \frac{\nu}{u^*}$ <p>其中, $h_s = 0.018 \times U_{10N}^2 (1 + 0.015 U_{10N})$, $l_p = c_w \times t_w$; $c_w = g t_w / 2\pi$; $t_w = 0.729 U_{10N}$</p>
OO02	$z_0 = \frac{25}{\pi} l_p \left(\frac{u^*}{c_w} \right)^{4.5} + 0.11 \frac{\nu}{u^*}$

2.3 资料

本文采用的资料是美国国家浮标站(44008), 从 2001 年 12 月 4 日 16 时至 2002 年 3 月 31 日 23 时, 共 2 810 h 的观测资料(缺测时次除外). 该站点位于大西洋东北部(40°5'N, 69°43'W) 离岸 50 km 处, 水深达 62.5 m. 观测资料包括距海平面 5 m 高处的水平风速、风向, 距海平面 4 m 高处的空气温度、露点温度及海平面气压、海表 0.6 m 深处温度、有效波高和有效波周期. 这些逐时资料见图 1.

由图 1 可知, 当风速增大时, 相应的有效波高也随之增大, 海平面气压相应降低. 平均风速为 8.24 m/s, 最大风速为 20.7 m/s, 发生在 2002 年 1 月 13 日 17 时. 冬季海表面温度相对空气温度较高, 且海水温度变化较空气温度变化小. 平均海表温度为 7.88 °C, 平均空气温度为 6.24 °C, 最高海表温度为 12.2 °C, 最高空气温度为 15.2 °C. 平均有效波高为 2.26 m, 最大波高为 7.53 m. 平均有效波周期为 8.1 s, 最大波周期为 14.3 s. 由于观测资料中已提供了有效波高和有效波周期的资料, 因此我们在模式中直接利用观测资料进行计算, 而不采用 Taylor 等提供的公式计算.

3 YT96, TY01 和 OO02 参数化方案的比较

3.1 3 种参数化方案的相互比较

为了保证对 3 种参数化方案进行比较, 在模式

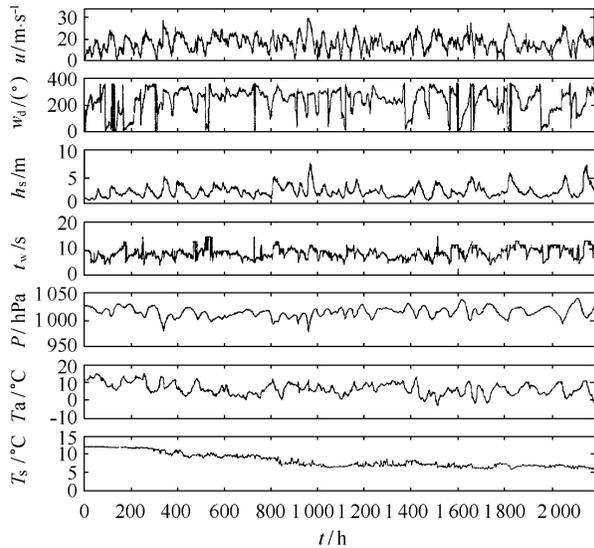


图1 2001年12月4日16时至2002年3月31日23时观测资料的逐时分布

u, w_d 分别为海面10 m高度上风速、风向, h_s 为有效波高, t_w 为有效波周期, P 为海平面气压, T_a 为海面空气温度, T_s 为海表温度

的设置中除了给定参数化方案不同外, 其他设置全部相同. 图2为摩擦速度 u^* 、曳力系数 $C_d (= u^{*2} / U_{10}^2)$ 、粗糙度长度 $z_0 (= z_{ch} u^{*2} / g)$ 及风应力 $\tau (= \rho u^{*2})$ 随海面10 m 高风速的分布. 由图2可知, 摩擦速度与10 m 高风速基本上呈线性关系. 并且, 3种方案在风速 $U_{10} \leq 15$ m/s 时一致性很好. 在风速 $U_{10} > 15$ m/s 时, 偏差开始增大, 尤其是 TY01 和 OO02 方案, 点的分布明显分散. 我们计算了这3种方案下摩擦速度对 U_{10} 的线性回归方程, 分别为 $u^*_{TY} = 0.050U_{10} - 0.10$, $u^*_{OO} = 0.054U_{10} - 0.14$, $u^*_{YT} = 0.045U_{10} - 0.07$. 可见 OO02 和 TY01 相对于 YT96 偏高. 曳力系数和粗糙度长度随10 m 高风速分布较分散, 但在风速 $U_{10} \leq 10$ m/s 下, 3种方案的计算结果仍比较一致, YT96 方案由于没有考虑浪的资料, 计算结果分散程度最小. 风应力随10 m 高风速呈二次曲率分布, 3种方案计算结果都较好, 与其他几个参量相似, 在风速 $U_{10} > 15$ m/s 时, 开始出现偏差.

图3给出“1:1”散点分布, 以相互比较3种参数化方案. 从摩擦速度来看, 当 $U_{10} \leq 12$ m/s 时, 3种方案计算结果比较一致. 当 12 m/s $< U_{10} < 18$ m/s 时, TY01 与 OO02 相对一致, 比 YT96 略偏高. 当 $U_{10} > 18$ m/s 时, OO02 又略偏高于 TY01. 从三者相互比较的拟和斜率来看, $u^*_{TY} = 1.11u^*_{YT}$, $u^*_{OO} = 1.22u^*_{YT}$, $u^*_{OO} = 1.06u^*_{TY}$. 当不考虑 $U_{10} > 18$ m/s 情况时, 拟和斜率为: $u^*_{TY} = 1.10u^*_{YT}$, $u^*_{OO} =$

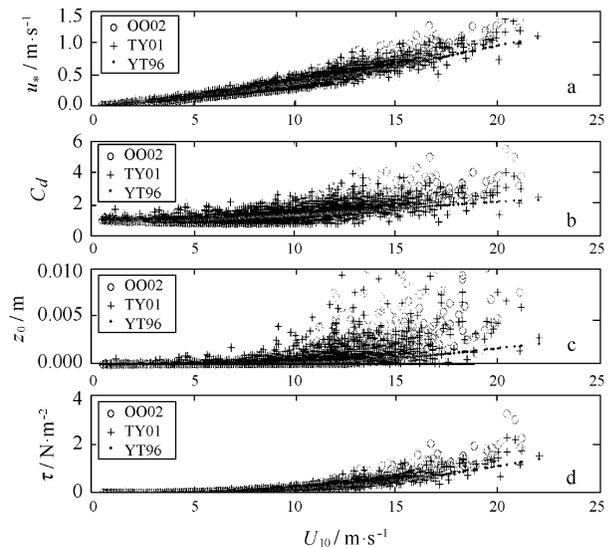


图2 物理参量随海面10 m 高风速的分布

a 摩擦速度, b 曳力系数, c 粗糙度长度, d 风应力

$1.18u^*_{YT}$, $u^*_{OO} = 1.03u^*_{TY}$. 可见, 3种方案在风速小于18 m/s 时, 计算的摩擦速度更一致些. 另外从统计上看, 归一化标准误差估计(以下简称 $NSEE$)

可表示为: $NSEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{\sum_{i=1}^n B_i^2}}$, 其中, A_i 是 B_i 是估计值, n 代表计算点的个数. 这里

OO02 和 TY01 对 YT96 摩擦速度的 $NSEE$ 是 17.41% 及 14.80%, OO02 对 TY01 摩擦速度的 $NSEE$ 是 13.34%. 可见, 三者拟和线性回归方程时, 虽然回归系数都接近1, 但统计上 $NSEE$ 还是有一定偏差的. 从曳力系数的比较来看, 3种方案的计算结果偏差较大. 当 $U_{10} \leq 6$ m/s 时, TY01 略高于 YT96 和 OO02 的结果. 当 $U_{10} > 6$ m/s 时, OO02 和 TY01 方案计算的结果明显高于 YT96 方案的结果, 而 OO02 和 TY01 方案计算的结果在 6 m/s $\leq U_{10} \leq 18$ m/s 时相对于等值线基本对称. 在 $U_{10} > 18$ m/s 时, OO02 的结果又明显高于 TY01 的结果. 从三者间的拟和斜率来看, $C_{dOO} = 2.04C_{dTY}$, $C_{dTY} = 1.46C_{dYT}$, $C_{dOO} = 0.95C_{dTY}$. OO02 和 TY01 对 YT96 曳力系数的 $NSEE$ 是 29.22%, 27.02%, OO02 对 TY01 曳力系数的 $NSEE$ 是 23.77%. 从风应力的比较来看, 当 $U_{10} \leq 12$ m/s 时, 3种方案都较一致. 当 $U_{10} > 12$ m/s 时, OO02 和 TY01 偏高于 YT96. 从三者的拟和斜率来看, $\tau_{OO} = 1.52\tau_{YT}$, $\tau_{TY} = 1.22\tau_{YT}$, $\tau_{OO} = 1.20\tau_{TY}$. 这里 OO02 和 TY01 对 YT96 风应力的 $NSEE$ 是 63.36%, 34.50%; OO02

对 TY01 的风应力的 $NSEE$ 是 40.75%。可见, 3 种方案在对风应力的计算中偏差还是较大的, 尤其是 OO02 与 YT96 方案之间。由上述比较可知, 3 种参数化方案在计算摩擦速度时, 有较好的一致性, 在计

算曳力系数和风应力时次之。由于 OO02 过高估计了 u^* , C_d 和 τ , 因此在不考虑海浪时推荐使用 YT96 方案, 考虑海浪时使用 TY01 方案。

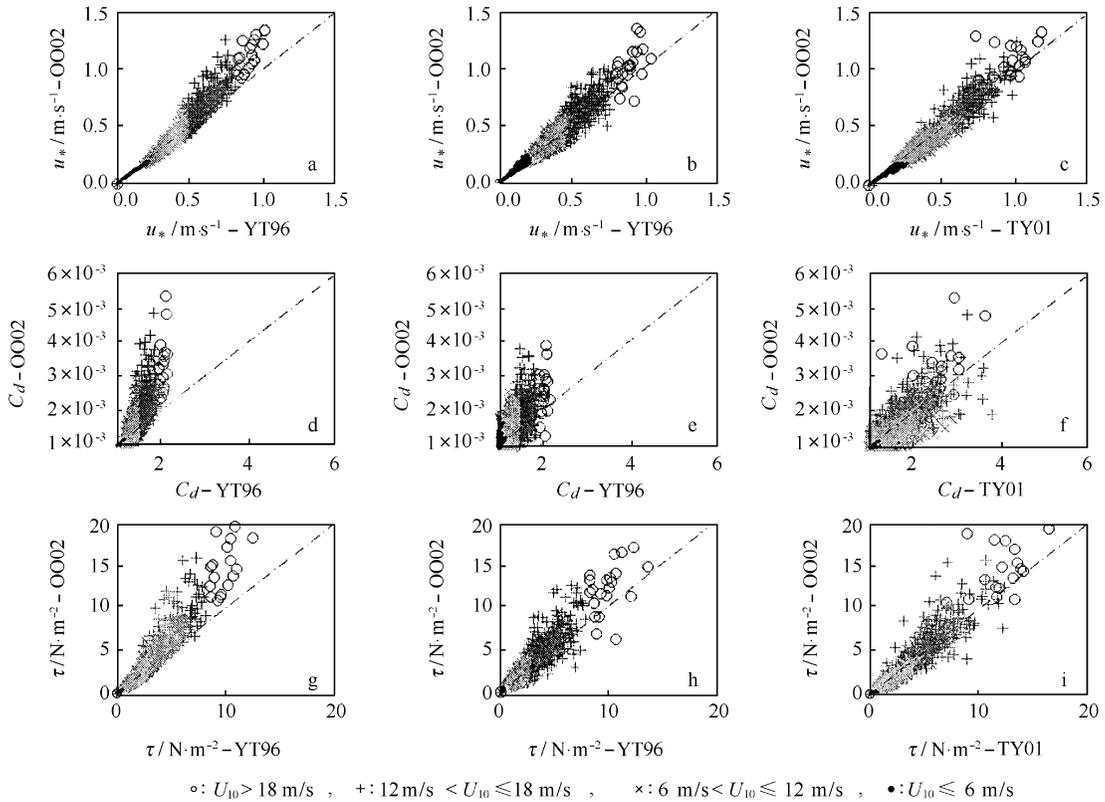


图3 3种方案对摩擦速度 u^* 、曳力系数 C_d 及风应力 τ 计算的相互比较

3.2 大风过程分析

选取 2001 年 12 月 18 日 16 时至 19 日 16 时及 2002 年 1 月 13 日 12 时至 14 日 12 时两次大风过程进行分析, 比较大风情况下, 3 种海面粗糙度方案的适用性, 见图 4。由图 4a, b 可知, 在 2001 年 12 月 18 日 18 时及 2002 年 1 月 13 日 17 时平均风速达到最大, 分别为 19.2 m/s 及 20.7 m/s, 最大阵风速度为 24.4 m/s 及 26.0 m/s, 风向均为 WNW。而在风速开始增大的前一个小时, 平均风速都为 7~9 m/s, 风向为 SW 或 SE。从波龄倒数及波陡随 10 m 风速变化 (见图 4c, d) 来看, 随着风速的增加, 波龄明显减小, 波陡增加, 二者与风速为线性关系。可见, 在冷空气爆发前后, 风速由微风增至最大, 风向突然改变方向, 这时幼波开始生成, 并迅速成长, 波陡较大, 此时海表面的曳力系数也较大, 粗糙度自然也大。由图 4e, f 可知, 3 种海面粗糙度方案在计算摩擦速度及

风应力时, OO02 方案在风速大于 20 m/s 时明显高于 TY01 及 YT96 方案, 而在 $U_{10} \leq 20 \text{ m/s}$ 时, OO02 与 TY01 计算的结果相近。YT96 方案在 $U_{10} > 15 \text{ m/s}$ 时相对其他二者偏小。

3.3 TY01 和 OO02 方案的相关比较

从以上的比较可知, TY01 和 OO02 两种参数化方案在计算摩擦速度、曳力系数和风应力时都有较好的一致性。究其原因, 在此我们比较了两种参数化方案的波龄倒数与波陡之间的相关情况。由图 5 可知, 在不同的风速下, 波龄倒数与波陡之间存在着较好的相关性, 相关系数为 0.83。若 $U_{10} \leq 6 \text{ m/s}$ 时的光滑海面不考虑, 只考虑粗糙流部分, 波龄倒数与波陡之间的相关性更好, 相关系数为 0.95。可见, 在粗糙海面上, 波陡越大, 对应的波龄越小。因此, 在粗糙的海面上, TY01 和 OO02 两种参数化方案的计算结果比较一致。

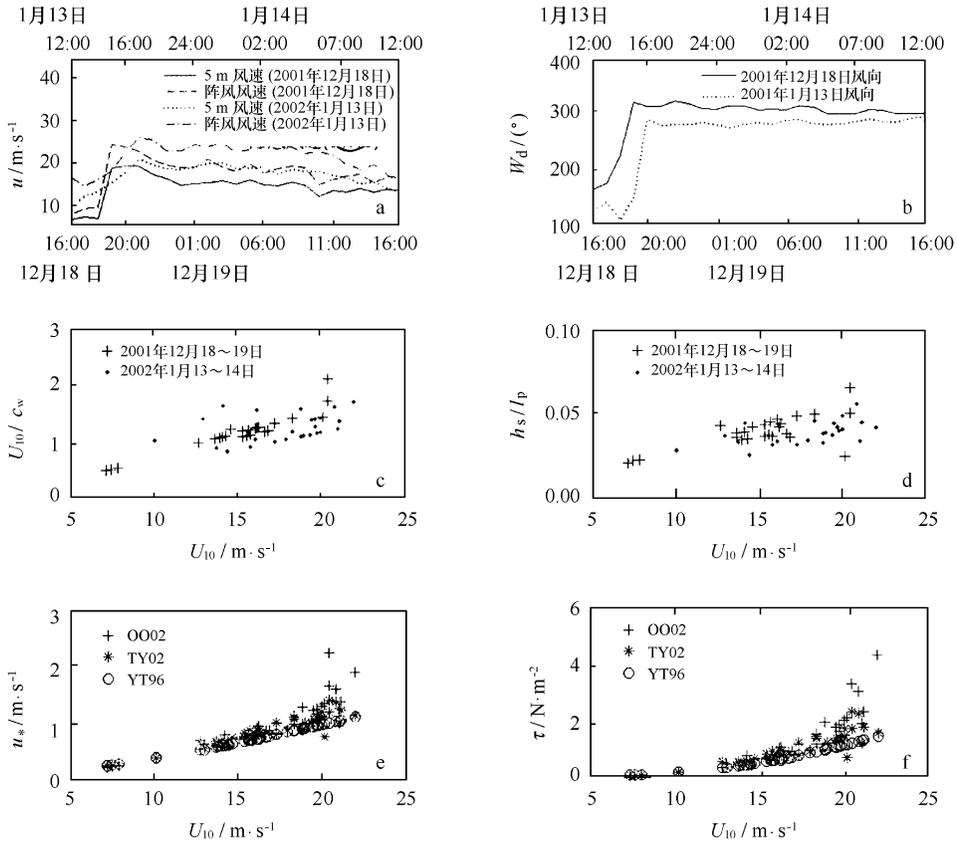


图4 2001年12月18日及2002年01月13日两次大风过程
a. 风速, b. 风向, c. 波龄倒数, d. 波陡, e. 摩擦系数, f. 风应力随10 m 风速变化

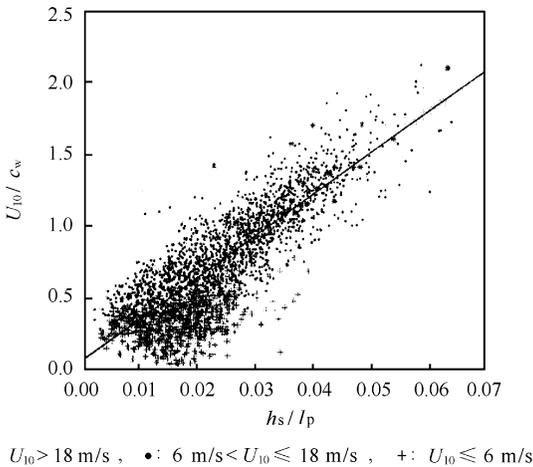


图5 波龄倒数与波陡之间的关系

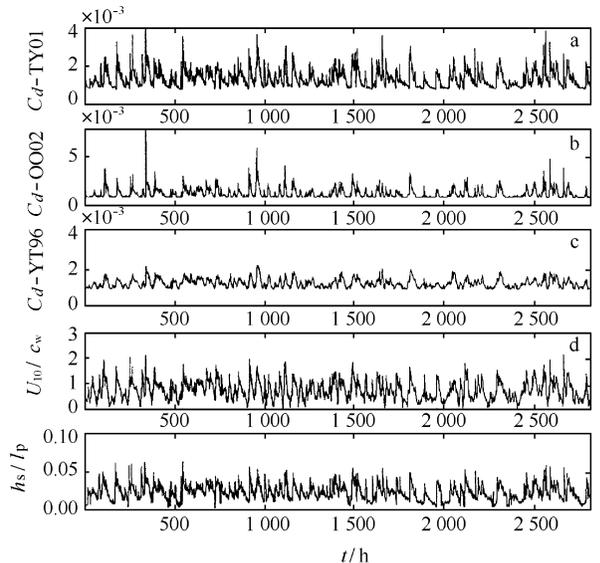


图6 物理参量随时间的分布

a. OO02 方案计算的曳力系数, b. TY01 方案计算的曳力系数,
c. YT96 方案计算的曳力系数, d. 波龄倒数, e. 波陡

4 讨论

以上对 YT96, TY01 和 OO02 方案作了比较, 虽然这 3 种方案对该数据计算的结果较好, 但还是有一些细微的区别. 图 6 给出由 YT96, OO02 和

TY01 方案计算出来的曳力系数随时间的变化, 以及波龄倒数和波陡随时间的变化图. 由图可知,

TY01 方案计算出来的曳力系数在风速从微弱开始增大时, 出现不连续现象. 这种现象在 OO02 方案中也存在, 但是与 TY01 相比, 却要平缓得多, 而且在某些时间 TY01 方案中曳力系数出现不连续, 而在 OO02 方案中却是连续的. YT96 方案中曳力系数随时间的变化基本上是连续的. 从波龄和波陡随时间的变化图中, 也可以见到这种不连续现象. 而且这种现象一般都发生在波龄最小, 波陡最大, 有幼波开始生成时. 可见 TY01, OO02 和 YT96 方案计算出来的曳力系数随时间不连续的现象, 主要是由于波龄和波陡随时间变化的不连续性. 在实际工作中, 我们不希望看到这种不连续现象, 因为它同时反映了该方案在处理这种幼波时存在缺点, 遗憾的是我们没有直接测量的湍流资料来评估这几种方案在这种情况下下的有效性. 待获得实测的湍流资料, 可进一步分析各种方案的优劣.

5 结论

本文采用美国国家浮标站(44008) 2001 年 12

参考文献:

- [1] ONCLEY S P, DU DHIA J. Evaluation of surface fluxes from MM 5 using observations[J]. *Mon Wea Rev*, 1995, 123: 3 344—3 357.
- [2] CHARNOCK H. Wind stress on water surface[J]. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1955, 81: 639—640.
- [3] YELLAND M J, TAYLOR P K. Wind stress measurements from the open ocean[J]. *J Phys Oceanogr*, 1996, 26: 541—558.
- [4] 汪炳祥, 陈伯海. 海面阻力系数模式的探讨[J]. *海洋学报*, 1996, 18(1): 99—106.
- [5] 汪炳祥, 李国璋, 陈伯海. 海面粗糙度的分析[J]. *海洋学报*, 1997, 19(5): 20—28.
- [6] SMITH S D. Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature[J]. *J Geophys Res*, 1988, 93: 15 467—15 472.
- [7] DONELAN M A, DOBSON F W, SMITH S D. On the dependence of sea surface roughness on wave development[J]. *J Phys Oceanogr*, 1993, 23: 2 143—2 149.
- [8] TAYLOR P K, YELLAND M J. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves[J]. *J Phys Oceanogr*, 2001, 31: 572—590.
- [9] 王 伟. 海洋白浪与海面摩擦速度的直接同步测量及其结果分析[J]. *海洋学报*, 1991, 12(5): 638—647.
- [10] 姚华栋, 姜达雍. 热带西太平洋耦合海气系统物理量特征分析[J]. *海洋学报*, 1994, 16(6): 40—48.
- [11] 程 展, 吴少华. 近海区域海气温差对海气动量交换的影响[J]. *海洋学报*, 1996, 18(6): 26—33.
- [12] OOST W A, KOMEN G J, JACOBS C M J. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAM AGE[J]. *Bound-Layer Meteor*, 2002, 103: 409—438.
- [13] LIU W T, KATSAROS K B, BUSINGER J A. Bulk parameterization of the air-sea exchange of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface[J]. *J Atmos Sci*, 1979, 36: 1 722—1 735.
- [14] BELJAARS A C M, HOLTSLAG A A M. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models[J]. *J Appl Mete*, 1991, 30: 327—341.
- [15] WEBB E K, PEARMAN G I, LEUNING R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 85—100.
- [16] FAIRALL C W, BRADLEY E F, HARE J E. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE[J]. *J Climate*, 2003, 16: 571—591.
- [17] BUSINGER J A, WYNGAARD J C, IZUMI Y. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer[J]. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 181—189.

月 4 日至 2002 年 3 月 31 日资料, 通过 COARE 算法, 比较了 3 种最新海面空气动力粗糙度参数化方案. 通过对摩擦速度、曳力系数及风应力等物理因子的计算, 得出以下结论:

(1) 在 $U_{10} \leq 12$ m/s 时, YT96, TY01 和 OO02 方案的计算结果是比较一致的, 而在风速较大时, OO02 过高估计了 u^* , C_d 和 τ , 因此在不考虑海浪时推荐使用 YT96 方案, 考虑海浪时使用 TY01 方案.

(2) 波陡与波龄参数之间较好的相关性, 决定了 TY01 和 OO02 方案在 $U_{10} \leq 18$ m/s 时计算 u^* , C_d 和 τ 时相对一致.

(3) TY01, OO02 方案在处理幼波时有不连续现象, 主要是由于波龄倒数和波陡随时间变化的不连续性造成的, 实际应用时需注意.

本文得到了美国海军研究生院高志球博士的悉心指导, 在此谨致诚谢.

Intercomparison of three sea surface aerodynamic roughness schemes in COARE algorithm

PAN Yu-ping^{1,2}, NIN Jin-zhong¹, SHA Wen-yu^{1,2}

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology Nanjing 210044, China*; 2. *The College of Meteorology, the Institute of Science and Engineering of the P. L. A., Nanjing 211101, China*)

Key words: buoy; COARE; sea surface aerodynamic roughness; wind stress