

TY01 和 O02 两种海面空气动力 粗糙度方案的比较

潘玉萍, 沙文钰

(解放军理工大学气象学院军事海洋系, 江苏 南京 211101)

摘 要: 本文采用美国国家浮标站 (44008) 2003 年 1~3 月的资料, 通过 COARE 算法 (版本 2.6b), 比较了 O02 和 TY01 这两种海面空气动力粗糙度长度的参数化方案。通过对摩擦速度、拖曳系数、海面粗糙度及风应力等物理因子的计算得出: 在粗糙的海面上, TY01 和 O02 两种参数化方案的计算结果是比较一致的。在考虑浪的信息方面, TY01 和 O02 都是很好的参数化方案。它们都可以适用于不同的风速条件, 适用于各种尺度的海洋及湖泊。但是这两种方案在处理幼波时存在不连续的缺点。并且, 对于风速较小的光滑海面, 尽管它们计算的结果较一致, 但是仍然存在偏差。据此, 本文的结果对于理论分析和数值计算如何正确使用上述两种海面空气动力粗糙度参数化方案, 可提供必要的参考价值。

关键词: 浮标 TY01 方案; O02 方案; 海面空气动力粗糙度; 风应力

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2004) 01 - 0056 - 09

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 (ECMWF, 1988, Oncley, S. P and Dudhia, J., 1995)。因此, 在过去的二十年中, 人们日益关注如何更好地描述海表面动量交换。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 (Monin and Obukhov, 1954) 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。典型的计算海面粗糙度的参数化方案是应用所谓的 Charnock 关系式: $z_0 = z_{ch} u_*^2 / g$, 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。例如, Charnock (1955), Smith (1988), Yelland and Taylor (1996, 以下简称 YT96), Zeng et al. (1998)。目前许多试验研究表明, 海面粗糙度与海浪的特征有关 (Merzi and Graf 1985, Toba et al. 1990, Donelan et al. 1993, Oost et al. 2002)。然而, 由于所作的观测试验不同, 所在的海域及浪的分布特征也都不同, 有的

试验则因为观测资料分散,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。最近, Taylor 和 Yelland (2001) 指出海面粗糙度 z_0 与波高和波陡密切相关, 并给出了参数化方案(以下称为 TY01)。研究表明该方案可以适用于各种不同的领域, 如开阔的洋面、湖泊或造波水池。在比较波陡与波龄对粗糙度影响时指出, 波陡的作用是主要的。而 Oost 等人(2002, 以下称为 O02) 在对 ASGAMAGE 试验的分析中指出, 海面粗糙是关于波龄和磨擦速度的函数, 相对于波陡, 波龄的作用是显著的。目前, 这两个公式都已被包含于最新版的 COARE (Coupling Ocean Atmosphere Response) 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的浮标资料, 来比较 TY01 和 O02 这两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 1993 年由 Fairall 及 Bradley 等人在 LKB 算法上的一个发展。V1.0 包括了一些对 LKB 源程序资料的修改, 如风粗糙度长度的测量, 强对流廓线函数及低速阵风等。V2.0 包括了冷表层物理过程及日间海表面附近的增暖过程, 还有由于降水而引起的动量通量、显热通量的变化, 及对潜热通量的 Webb 校正。V2.5b 重新调整了传输系数至 6%, 以保证与潜热通量协方差保持更好的一致, 试验证明该调整对各种海域效果都较好。V2.6a 在 V2.5b 的基础上又做了如下改变: (1) 廓线函数对流部分的经验常数变化为与直接观测廓线相匹配。(2) Kansas 稳定廓线函数由 Beljars 及 Holtslag (1991) 代替, 它能更好的适合 SHEBA 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 和 Taylor 1996 年研制的公式, 以下简称 YT96。(4) Liu 等 1979 年的海面空气动力粗糙度关系式被一个简单的适用于 COARE 及几个附加的通量资料和 HEXMAX 资料的关系式取代。(5) 使用 Richardson 数改善了初始猜想, 稳定度迭代循环由 20 降为 3。(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 校正的需要。V2.6bw 是当前最终版本, 补充了浪的信息资料。

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:

$$u_* = \frac{k\sqrt{u^2 + w_g^2}}{[\ln(z/z_0) - \psi_m(\zeta)]} \quad (1)$$

其中 w_g 是阵风速度, 稳定度函数由 Businger-Dyer 模式给出:

$$\text{不稳定条件下, } \psi_m(\zeta) = \ln\left[\left(\frac{1+x}{2}\right)^2 \frac{1+x^2}{2}\right] - 2\arctan(x) + \frac{\pi}{2}, \text{ 这里 } x = (1 - 16\zeta)^{1/4} \quad (2)$$

$$\text{稳定条件下, } \psi_m(\zeta) = -5\zeta; \text{ 这里 } \zeta = z/L_0. \quad (3)$$

$$\text{Fairall et al. (1996b) 利用方程(4~5)计算了对流比例系数 } w_g = \beta w_*; \quad (4)$$

其中 β 为经验常数，在 COARE 中取值为 1.2。

$$w_*^3 = \frac{g}{\theta} \left[\frac{H}{\rho_a C_{pa}} + 0.61 \theta \frac{LE}{\rho_a L_e} \right] z$$

(5)

其中 H 和 LE 分别为感热和潜热通量， g 是重力加速度， ρ_a 是湿空气密度， C_{pd} 是干空气比热， L_e 是蒸发潜热， θ 是空气温度， z 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 算法中提供了三种海面空气动力粗糙度参数化方案：YT96、TY01 和 O02。由于 YT96 没有考虑到浪的影响，所以本文在这里暂不做比较，而只讨论后两种方案 TY01 和 O02 在实际应用中的适用性。具体的参数化形式见表 1。由表 1 可知，两个公式都有一公共项 $0.11 \gamma/u_*$ ，它代表光滑流部分的总体空气动力学粗糙度，可见是没有任何异议的。而对于粗糙流部分的海面粗糙度 TY01 和 O02 分别给出了不同公式。TY01 认为波高和波陡是影响较大的重要因子，而 O02 认为波龄相对其它因子更为重要。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 TY01 和 O02 两种参数化方案

O02 方案	$z_0 = \frac{25}{\pi} I_w \left(\frac{u_*}{c_w} \right)^{4.5} + 0.11 \frac{\gamma}{u_*}$	其中： $\frac{u_*}{c_w}$ 是波龄参数； $\frac{h_w}{I_w}$ 是波陡； $t_w = 0.729 u_{10N}$ $h_w = 0.018 \times u_{10N}^2 (1 + 0.015 u_{10N})$ $I_w = c_w \times t_w$ ； $c_w = g \frac{t_w}{2\pi}$
TY01 方案	$z_0 = 1200 h_w \left(\frac{h_w}{I_w} \right)^{4.5} + 0.11 \frac{\gamma}{u_*}$	

2.3 资料

本文采用的资料是美国国家浮标站 (44008) 从 2003 年 1 月 1 日 00 时至 3 月 31 日 23 时，共 2155 h 的观测资料(缺测时次除外)。该站点位于(40.5°N, 69.43°W)大西洋东北部离岸 50km 处。观测资料包括距海平面 5m 高处的每小时的水平风速、风向，距海平面 4m 高处的每小时的空气温度、露点温度及海平面气压、海表 0.6 m 深处温度、明显波高和主要波周期，这些逐时资料见图 1。由图可知，当风速增大时，相应的明显波高也随之增大，海表面气压相应降低。平均风速为 8.69 m/s，最大风速为 19.2 m/s，发生在 2 月 17 日 22 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 5.8 °C，平均空气温度为 2.32 °C，最高海表温度为 8.7 °C，最高空气温度为 11.5 °C。平均明显波高为 2.34 m，最大波高为 7.56 m。平均主要的波周期为 8.02 s，最大波周期为 14.3 s。由于观测资料中已提供了明显波高和主要波周期的资料，因此，我们在模式中直接利用观测资料进行计算，而不采用其提供的公式计算。

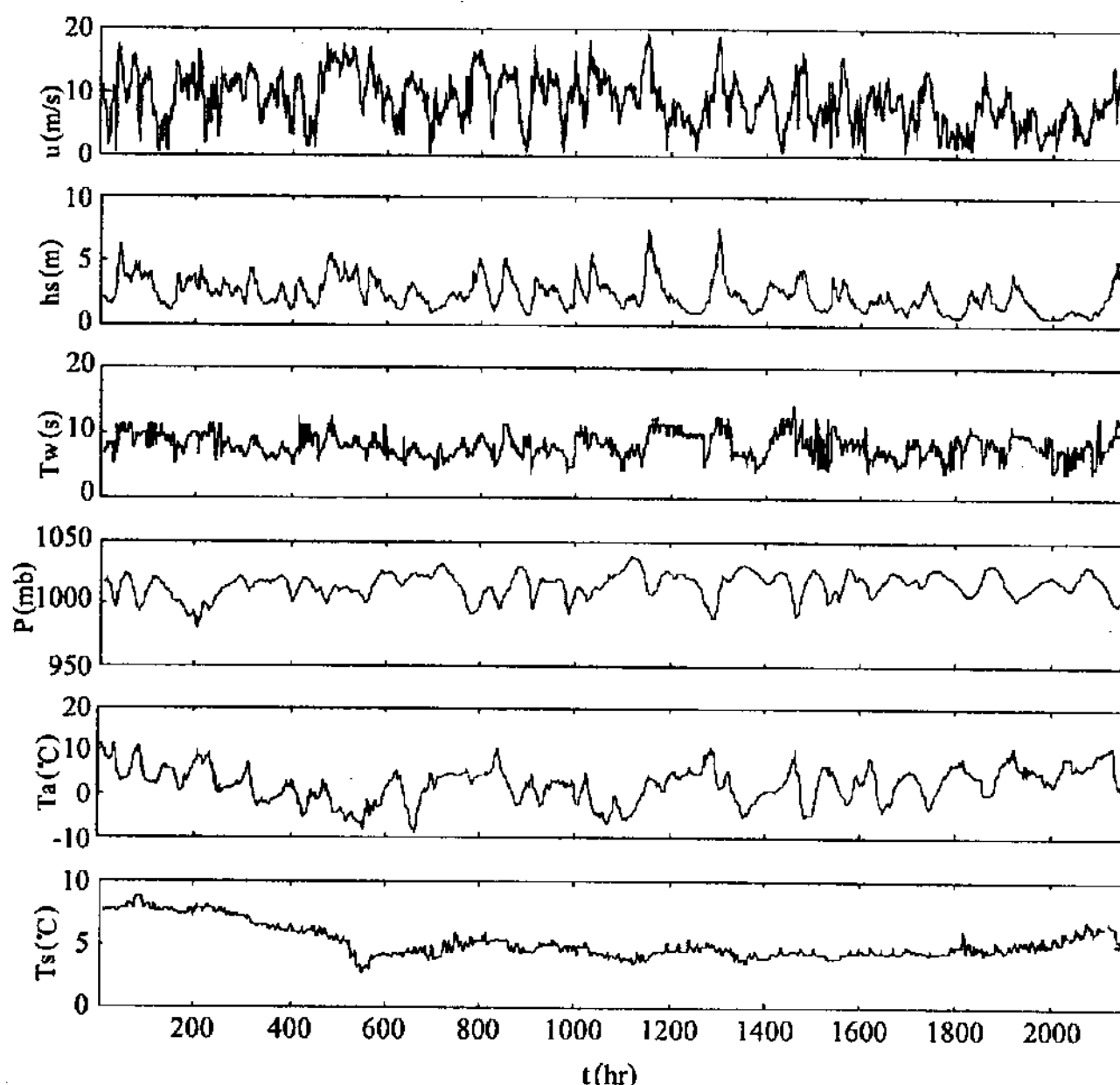


图1 2003年1月1日00时至3月31日23时各观测资料的逐时分布
(其中 u 海表风速、 h_s 明显波高、 T_w 主要波周期、 P 海表气压、 T_a 空气温度和 T_s 海表温度)

3 TY01 和 O02 海面空气动力粗糙度参数化方案的比较

3.1 TY01 和 O02 方案的相互比较

为了保证对两种参数化方案的比较,我们在模式的设置中除了给定的参数化方案不同外,其他的设置都全部相同。由图2可知,摩擦速度 u_* 、拖曳系数 $C_d(=u_*^2/u_{10}^2)$ 、海表粗糙度 $z_0(=z_{ch}u_*^2/g)$ 及风应力 $\tau(\rho u_*^2)$ 随着海面10m高的风速 u_{10} 的分布。摩擦速度与海面10m高的风速基本上呈线性分布。并且,TY01和O02方案在风速 $u_{10} \leq 15\text{m/s}$ 时,保持着很好的一致性。在风速 $u_{10} > 15\text{m/s}$ 时,两种方案的偏差才开始增大。我们计算了这两种方案下的线性回归方程,得出TY01和O02方案在摩擦速度的计算上较一致,分别是 $u_{*TY} = 0.0418 u_{10}$, $u_{*O} = 0.0422 u_{10}$ 。拖曳系数随着海面10m高的风速分布略分散,但可以看到TY01和O02方案计算的结果还是较一致的,尤其是在风速不是很大 $u_{10} \leq 15\text{m/s}$ 的情况下。海表粗糙度 z_0 在风速 $u_{10} \leq 10\text{m/s}$ 时,两种方案的计算结果保持较好的一致,而在风速 $u_{10} > 10\text{m/s}$ 时,粗糙度 z_0 的偏差开始增大,在风速 $u_{10} > 15\text{m/s}$ 时,图中的点较分散,偏差较大。风应力 τ 随着海面10m高的风速 u_{10} 呈二次曲率分布。两种方案的结果有很好的一致性,与其他几个参数类似,在风速较大 $u_{10} > 15\text{m/s}$ 时,开始出现偏差。

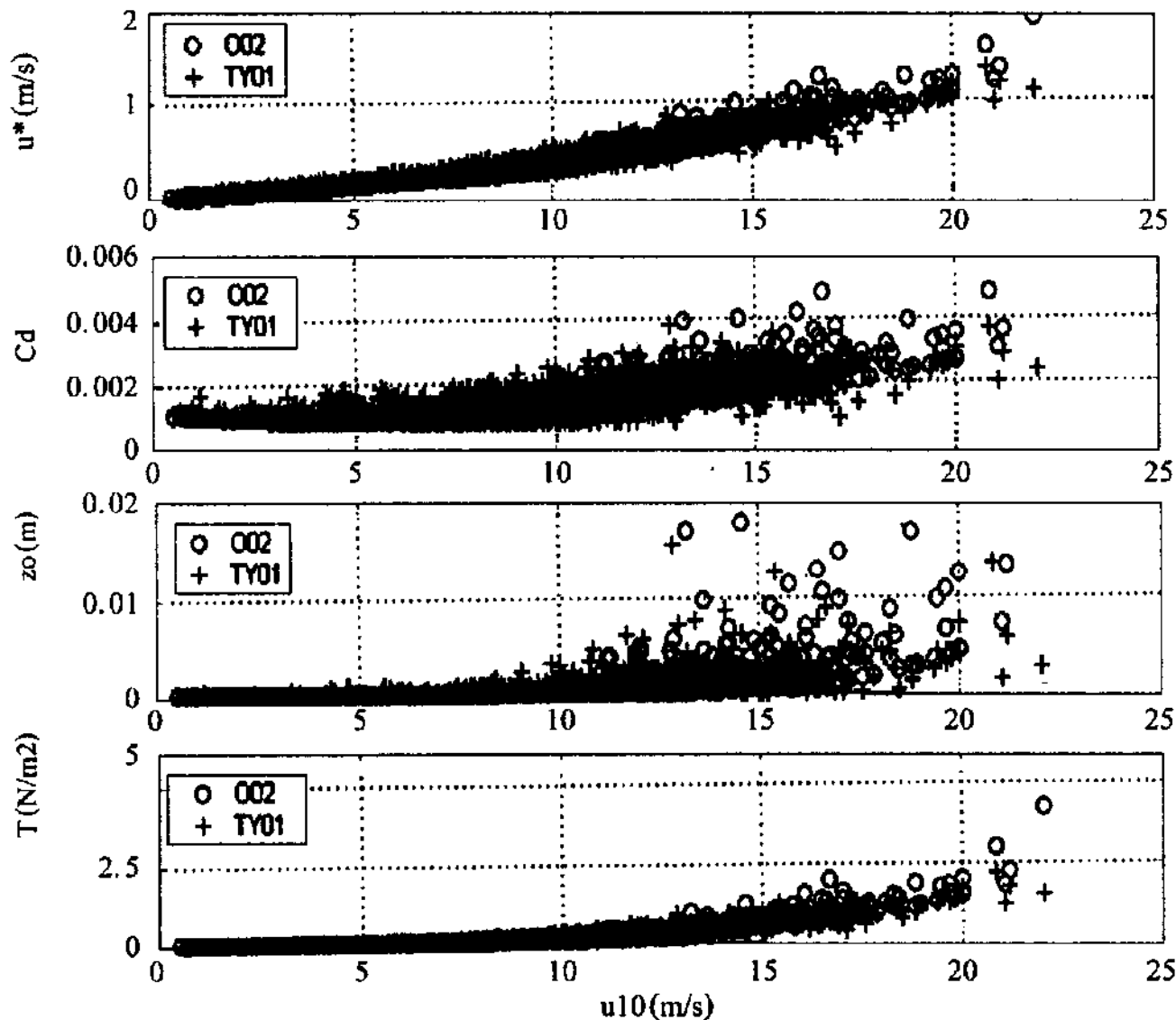


图2 摩擦速度 u_* 、拖曳系数 C_d 、粗糙度长度 z_0 及风应力 τ 随 10m 高风速的分布

图3给出了“1:1”散点分布图,以相互比较 TY01 和 O02 两种参数化方案。从摩擦速度来看,当 $6\text{m/s} \leq u_{10} \leq 18\text{m/s}$ 时,两种方案计算的结果有较好的一致性。当 $u_{10} < 6\text{m/s}$ 时, TY01 的计算结果略高于 O02 的计算结果。而当 $u_{10} > 18\text{m/s}$ 时, O02 的计算结果又偏高于 TY01 的计算结果。从 TY01 对 O02 的线性回归方程来看 $\mu_{*O} = 1.0099 \mu_{*TY}$ 。当 $u_{10} > 18\text{m/s}$ 不考虑时,线性回归方程为: $u_{*O} = 1.0049 u_{*TY}$ 。可见, TY01 和 O02 两种参数化方案在小到中等风速情况下,计算摩擦速度的结果还是较一致的。另外从统计上来看,正常标准误差估计(以下简称 NSEE)可以表示为: $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{\sum_{i=1}^n B_i^2}}$, 其中 A_i 是 B_i 的估计值,

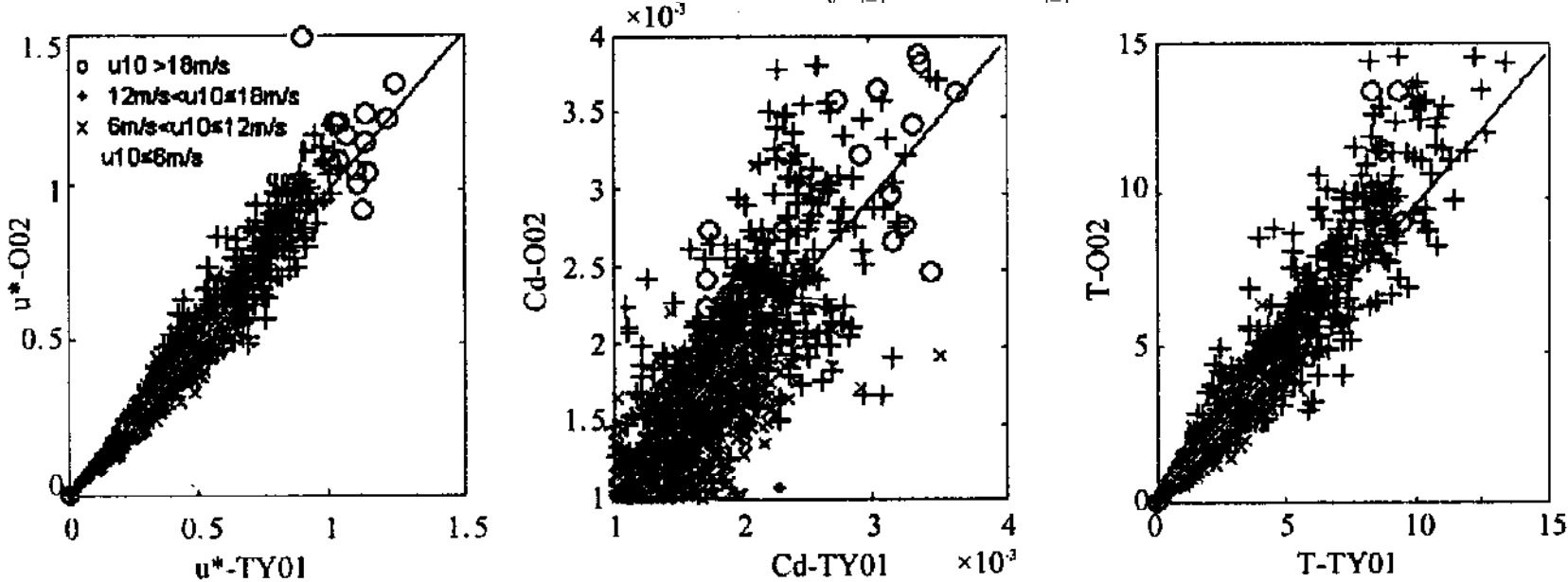


图3 两种方案对摩擦速度 u_* 、拖曳系数 C_d 及风应力 τ 计算的相互比较

n 代表计算点的个数。这里 O02 对 TY01 的摩擦速度的 NSEE 是 12.15%，可见，二者在拟合线性回归方程时，虽然回归系数接近 1，但统计上 NSEE 还是有一定偏差的。从拖曳系数 C_d 的比较来看，两种方案的计算结果偏差略增大，当 $u_{10} = 12\text{m/s}$ 时，TY01 略高于 O02。当 $u_{10} > 12\text{m/s}$ 时，O02 略高于 TY01。总的来看，两种方案计算的结果相对于等值线基本对称。从 TY01 对 O02 的线性回归方程来看， $C_{dO} = 0.9599 C_{dTY}$ 。当 $u_{10} > 18\text{m/s}$ 不考虑时，线性回归方程为： $C_{dO} = 0.9530 C_{dTY}$ 。可见，在拖曳系数的计算中 TY01 的计算结果略高于 O02 的计算结果。这里 O02 对 TY01 拖曳力系数的 NSEE 是 22.43%，二者在对拖曳系数的计算中，偏差还是较大的。从风应力 τ 的分布来看，虽然计算值的分布仍有些分散，两种方案计算的结果基本一致。在 $u_{10} \leq 6\text{m/s}$ 时，TY01 的计算结果还是略高于 O02 的计算结果。从 TY01 对 O02 的线性回归方程来看， $\tau_O = 1.0896 \tau_{TY}$ 。当 $u_{10} > 18\text{m/s}$ 不考虑时，线性回归方程为： $\tau_O = 1.0695 \tau_{TY}$ 。这里 O02 对 TY01 的风应力的 NSEE 是 29.98%。由上述比较可知，TY01 和 O02 两种参数化方案在计算摩擦速度时，有较好的一致性，在计算拖曳系数和风应力时次之。因为本文主要讨论的就是两种不同的海表粗糙度的参数化方案在实际海洋中的应用。虽然这两种粗糙度方案形式上差别很大，但可以看到，用这两种方案计算的摩擦速度，拖曳系数及风应力都是比较一致的，结果差别不是很大。

3.2 TY01 和 O02 方案的相关比较

从以上的比较可知，TY01 和 O02 两种参数化方案在计算摩擦速度、拖曳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参数（即：波龄的倒数）与波陡之间的相关情

况。由图 4 可知，在不同的风速下，波龄参数与波陡之间存在着较好的相关性，相关系数为 0.8537。若 u_{10}

6m/s 时的光滑海面不考虑，只考虑粗糙流部分，波龄参数与波陡之间的相关性更好，相关系数为 0.9540。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 O02 两种参数化方案的计算结果比较一致。在考虑浪的信息方面，TY01 和 O02 都是很好的参数化方案。它们都可以适用于不同的风速条件，适用于各种尺度的海洋及湖泊。是目前国际上较先进的研究海表面总体空气动力学粗糙度的参数化方案。

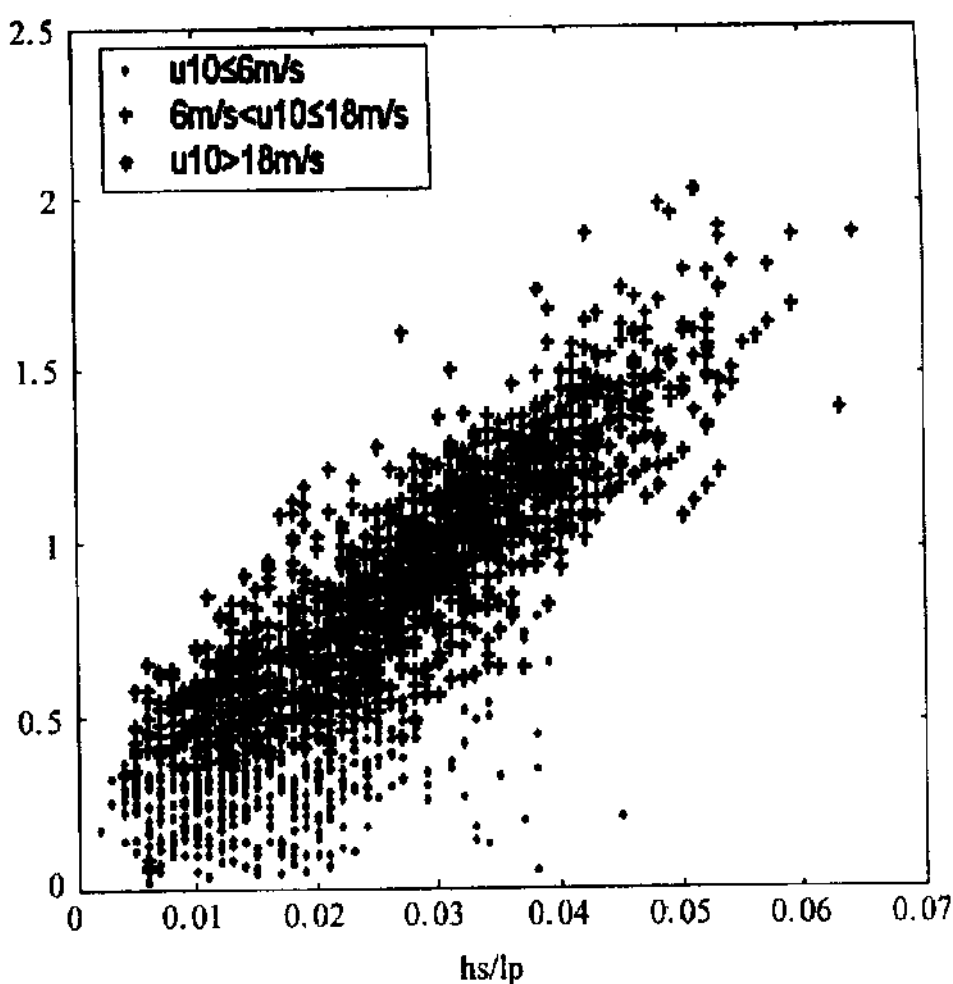


图 4 波龄参数与波陡之间的关系

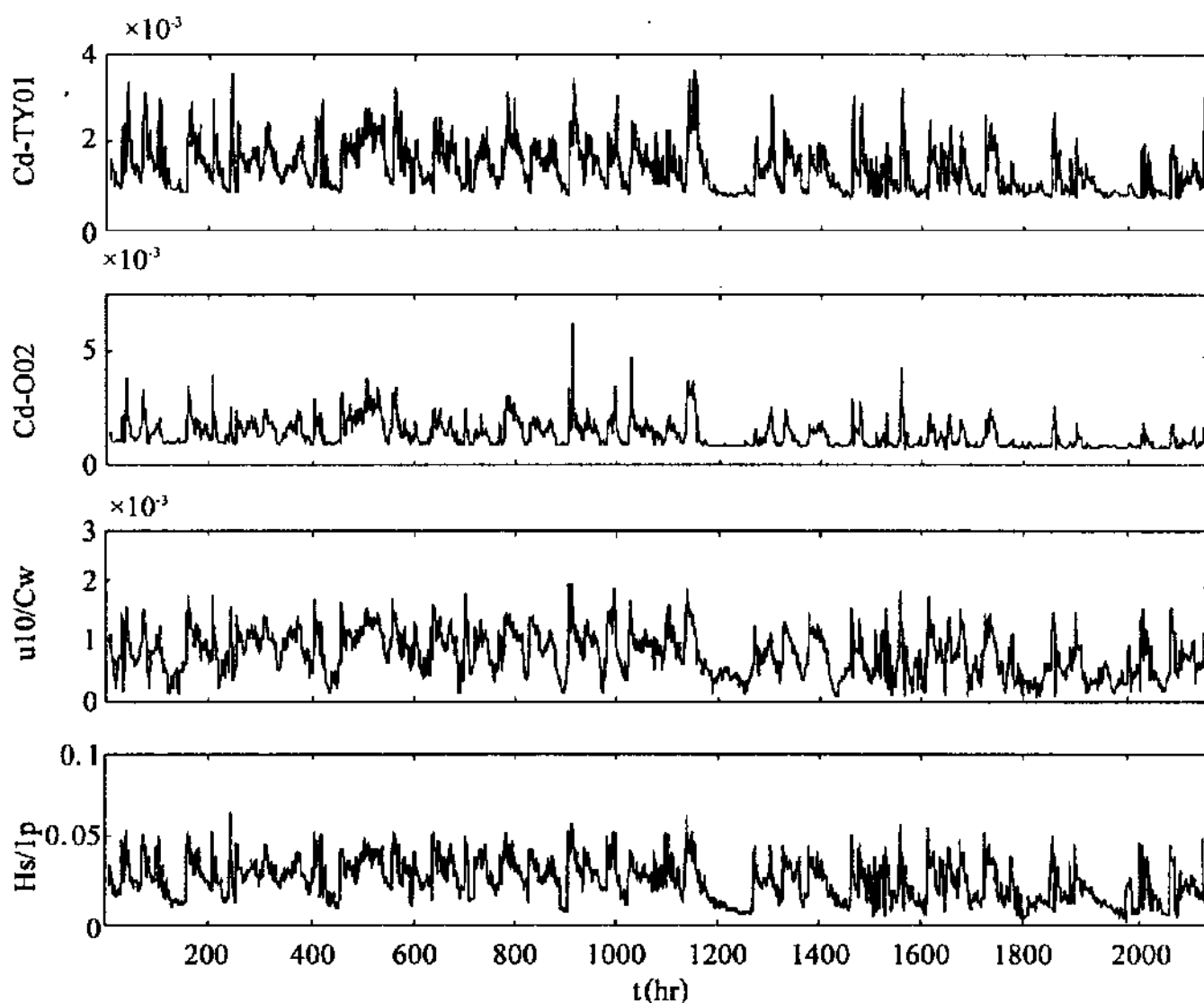


图 5 拖曳系数、波龄参数及波陡随时间的分布

4 讨论

以上对 TY01 和 O02 两种参数化方案作了比较, 虽然这两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 5 分别是由 O02 和 TY01 方案计算出来的拖曳系数随时间的变化, 以及波龄和波陡随时间的变化图。由图可知, TY01 方案计算出来的拖曳系数在风速从极小变到极大时, 出现不连续现象。这种现象在 O02 方案中也存在, 但是与 TY01 相比, 却要平缓的多。而且在某些时间 TY01 方案中拖曳系数出现不连续, 而在 O02 方案中却是连续的。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。而且这种不连续一般都发生在波龄最小, 波陡最大时。比较风速与风向的变化, 这种刚生成的风浪大都发生在冷空气爆发前后, 风速由最小增至最大, 风向突然改变方向时, 这时风浪开始生成, 并迅速成长, 波陡较大, 此时海表面的拖曳系数也较大, 粗糙度自然也大。可见, O02 和 TY01 方案计算出来的拖曳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。在我们的实际工作中, 我们并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两种方案在这种情况下的有效性。另外, 这两种方案被适用于各种风速条件, 包括风很小 $u_{10} < 6\text{m/s}$ 。因为这两种方案主要是考虑粗糙海面的粗糙度长度, 对于风速很小的光滑海面, 尽管它们计算的结果较一致, 但是仍然存在偏差。

5 结论

本文采用美国国家浮标站 2003 年 1~3 月的资料,通过 COARE 算法,测试了 O02 和 TY01 这两种海面空气动力粗糙度长度的参数化方案。通过对摩擦速度、拖曳系数及风应力等物理因子的计算,得出以下结论:

(1) TY01 方案与 O02 方案在计算摩擦速度、拖曳系数及风应力等物理因子时,通过 NSEE 误差估计分析,得出二者有很好的一致性。

(2) TY01 方案与 O02 方案之所以有很好的一致性,主要是因为波陡与波龄参数之间存在较好的相关性。TY01 方案粗糙海面部分的粗糙度长度主要与波陡有关,而 O02 方案粗糙海面部分的粗糙度长度主要与波龄参数有关。波陡与波龄参数之间的较好的相关性,决定了 TY01 方案与 O02 方案在计算海面风应力时有较好一致性。

(3) TY01 方案与 O02 方案在风速从极小变到极大,风向突然转向有幼波生成时,会出现不连续现象。但是与 TY01 方案相比,O02 方案却要平缓的多,而且在某些时间 TY01 方案中物理因子出现不连续,而在 O02 方案中却是连续的。

(4) 虽然这两种方案被适用于各种风速条件,但是因为这两种方案主要是考虑粗糙海面的粗糙度长度,对于风速很小的光滑海面,尽管它们计算的结果较一致,但是仍然存在偏差。

(5) 文中计算的结果对于今后理论分析和实际数值计算,如何正确使用上述两种海面空气动力粗糙度参数化方案时提供必要的参考价值。

致谢: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。

参考文献:

- [1] Charnock H. Wind Stress on Water Surface, Quart [J]. Roy Meteorol. Soc. 1955,81: 639~640.
- [2] Donelan M A, et al. On the dependence of sea surface roughness on wave development [J]. Phs. Oceanogr, 1993 ,23: 2143~2149.
- [3] ECMWF, Parameterization of fluxes over land surfaces. Workshop Proc, ECMWF, Reading, England, 392.
- [4] Fairall C W, E F Bradley, et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes for TOGA COARE [J]. Geophys. Res. 1996 ,101: 3747~3764.
- [5] Fairall C W, J E Hare, et al. Preliminary results from the ETL open ocean air-sea flux database. Proc. 11th Conference on Interaction of the Sea and Atmosphere, AMS, 14~18 May 2001, San Diego CA, 2001, 5~8.
- [6] Merzi N and W H Graf. Evaluation of the drag coefficient considering the effects of mobility of the roughness elements. Ann. Geophys. 1985 ,3 :473~478.
- [7] Oncley, S. P and Dudhia, J; Evaluation of Surface Fluxes from MM5 Using Observations, Mon. Wea. Rev. 1995,123: 3344~3357.
- [8] Oost W A, et al. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE. Tech. Report 2001-5, Royal Dutch Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, The Netherlands, 2001 ,30.
- [9] Smith. Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature [J]. Geophys. Res. 1988,93 :15467~15472.
- [10] Taylor P K and M J Yelland. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves [J]. Phys. Oceanography, 2001 ,31: 572~590.

- [11] Toba , et al. Wave dependence on sea-surface wind stress [J]. Phys. Oceanogr. 1990 , 20 :705~721.
- [12] Wang Q and D P Eleuterio. A Comparison of Bulk Aerodynamic Methods for Calculating Air-Sea Fluxes. The Proceedings of Ninth Conference on Mesoscale Processes, Fortlauderdale, FL, American Meteorological Society, 55~58.
- [13] Yelland M.and P K. Taylor, Wind stress measurements from the open ocean [J]. Phys. Oceanography, 1996,26,541~558.
- [14] Zeng X, et al. Comparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using the TOGA COARE and TAO data [J]. Clim, 1998,11, 2628~2644.

A COMPARISON OF TY01 AND O02 SEA SURFACE AERODY- NAMIC ROUGHNESS SCHEMES

PAN Yu-ping, SHA Wen-yu

(The College of Meteorology , the Institute of Science and Engineering of the P. L. A., Nanjing 211101, China)

Abstract : The data, collected at the American National Data Buoy 44008 from January 1 through March 31, 2003, are used to test sea surface roughness schemes by using the COARE bulk parameterization scheme. The aim of this study is to better understand the sensitively of the buoy-derived surface momentum fluxes to choices of surface roughness parameterization and the range of applicability of the two schemes (TY01 and O02). Because the stability dependence scheme is fixed in our calculation of the surface stress, the differences in the modeled results of surface stress should be caused by different determination of roughness length. Our results show that the similarity between TY01 and O02 for this particularly measurements as a result of strong correlation between the wave steepness and the wave age. We also found that O02 scheme may experience numerical problems in case of extremely young waves while the YT01 scheme frequently resulted in discontinuity in the neutral drag coefficients for young waves.

Key words : Buoy TY01 ; O02 ; sea surface aerodynamic roughness scheme ; wind stress