

不同海况下六种湍流通量参数化方案的对比分析

胡艳冰¹, 高志球², 沙文钰¹, 曹丽霞³, 兰伟仁³

(1. 解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

3. 总参气象水文中心, 北京 100081)

摘 要: 利用前人给出的表面波浪动力试验中的部分观测资料, 通过六种不同的湍流通量参数化方案, 分别计算了不同海面波浪状况所对应的摩擦速度。结果表明: 海面状况对计算结果有显著影响, 六种参数化方案计算的摩擦速度相对涡动相关法 (EC) 直接测量值的偏差纯风浪海面状况下, 较交叉涌浪或反向涌浪海面状况时小得多。并且在纯风浪海面状况下, 当近海层大气处于不稳定层结时, Dyer74 方案计算的摩擦速度相对 EC 直接测量值的归一化误差最小, 仅为 8.47%, 能够较好的估计近海层摩擦速度。在稳定层结条件下, 当整体 Richardson 数小于 0.1 时, 除 Businger71 方案外, 其它五种方案的计算误差接近且较小。

关键词: 摩擦速度; 参数化方案; 海面状况

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2007) 2 - 0009 - 08

1 引言

半个多世纪以来, 作为近地层研究的基础, Monin-Obukhov^[1] 相似理论被广泛应用于估算近地层湍流通量交换。在这一理论基础之上, 众多学者依据不同试验资料和分析方法, 相继提出了一系列湍流通量输送系数参数化方案。其中 1971 年 Businger 等^[2] (下文简称为 Businger71) 首先根据 Kansas 州的观测资料, 提出了动量通量和热量通量的普适函数。随后 1974 年 Dyer^[3] (Dyer74) 在总结和回顾之前学者工作的基础之上, 对 Businger71 方案中的部分系数给出了不同取值。1988 年 Holtslag 和 De Burin^[4] 利用位于荷兰 Cabauw 地区气象塔的试验资料, 针对稳定大气层结, 提出了应用于夜间稳定近地层陆面模式中的动量和热量普适函数, 1991 年 Beljaars 和 Holtslag^[5] 5 (B&H91) 对热量普适函数进行了改进。以上这几种参数化方案均是在观测资料的基础上给出普适函数, 然后通过循环迭代求解湍流通量。这些方案一方面受到观测地点下垫面性质和观测仪器精度的限制; 另一方面, 在计算通量时必须通过循环迭代逐步逼近, 从而花费大量计算机 CPU 时间, 尤其对于高分辨率大范围网格的数值模拟计算而言更是如此。Louis^[6] 于 1979 年根据整体 Richardson 数和稳定度参数 ($\zeta=z/L$, L 为 Monin-Obukhov 长度) 之间的隐含关系, 直接对湍流输送系数进行参数化。1982 年, Louis 等^[7] (LTG82) 又通过数值试验对 1979 年方案中部分参数和表达式进行了改进。至今为止, LTG82 参数化方案因其

收稿日期: 2006-08-01

基金资助: 国家自然科学基金重点项目“北极苔原和海冰地区边界层物理过程的观测研究 (40333032)”和自然科学基金项目“土壤水分垂直运动对不同陆地表面能量平衡的影响 (40575007)”联合资助。

作者简介: 胡艳冰 (1979-), 女, 博士, 主要从事海洋环境与海洋气象研究

公式简单且无需循环迭代的特点而被广泛的应用于大气模式中^[8],包括美国海军全球和区域模式以及欧洲中心中尺度天气预报 GCM 模式等^[9~11]。此后,Launiainen^[12](Launiainen95)于1995年给出了整体 Richardson 数和稳定度参数之间的关系,在此基础上,应用相似理论根据普适函数求解湍流通量时,即可有效避免循环迭代。最近,2002年 Wang 等^[8](Wang02)指出 Louis 方案中存有不足,并提出新的湍流通量输送系数参数化方案。

海气界面间的动量、热量和水汽湍流通量输送对于海气耦合模式而言十分关键^[13]。不同的参数化方案应用到海气耦合模式中会对计算结果带来很大差异。然而在模式中对比这些参数化方案存在一定困难,即:(1)我们无法区分模拟结果的偏差是由于近地层参数化不足还是由模式其它的部分引起的;(2)近地层以上的大气性质随着近地层通量的变化而变化。所以,独立于模式之外,对比分析这些参数化方案具有十分重要的意义^[14]。本文选择 Donelan 等^[13]1997年给出的海表面波浪动力试验中的部分观测资料,应用以上参数化方案计算摩擦速度,并与应用涡动相关法得到的直接测量值进行对比,探讨海面波浪状况以及参数化方案的选择对计算结果的影响。

2 资料和计算方案介绍

2.1 资料介绍

本文选取的海面观测资料直接取自1997年 Donelan 等^[13]中的表1。在参考论文中对海面波浪动力试验中所涉及的船舶航线、浮标位置、观测仪器以及当时的天气状况等都进行了详细的介绍,并对观测资料的可信度进行了深入分析,将其中可供进一步使用的部分列表给出。表中所列的资料为1991年1月19日~3月9日期间两次集中观测的126个记录,资料平均的时间间隔为17分钟,主要包括12m 风速、10m 中性风速、气温、海表温度、气压、Monin-Obukhov 长度、由涡动相关法(EC)直接测量的摩擦速度、由惯性耗散法(ID)估算的摩擦速度以及有效波高等要素。根据涌浪与风浪的相对方向,Donelan 等^[13]将海面状况分为以下四种类型:(1)纯风浪(pure wind sea);(2)同向涌浪(following swell sea);(3)交叉涌浪(crossing swell sea);(4)反向涌浪(counter swell sea)。其中,各类型海面状况所对应的资料总数分别为27、10、46以及43。

2.2 计算方案

根据 Monin-Obukhov^[1]相似理论,近地面层中风速廓线表达式为:

$$u = \frac{u_*^*}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z}{L}\right) + \psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right) \right] \quad (1)$$

其中, k 为 Von Karman 常数, u_* 为摩擦速度, z_0 空气动力学粗糙度, z 为测量高度,本文依据 Donelan 等^[13]观测资料取其为12m, u 为 z 高度上的水平风速。 L 表示 Monin-Obukhov 长度, $L = u_*^2 \theta / (kg \theta_*)$, θ 和 θ_* 分别表示位温和特征位温。 ζ 表示稳定度参数, $\zeta = z/L$ 。

ψ_m 表示动量普适函数。

动量湍流通量表达式为：

$$\tau = -\overline{\rho u'w'} = \rho u_*^2 = \rho C_M u_*^2 \quad (2)$$

C_M 表示动量整体输送系数(也称拖曳系数)。结合公式(1)、(2)可以得到摩擦速度的计算公式为：

$$u_*^2 = C_M u_*^2 = \frac{k^2 u_*^2}{[\ln(z/z_0) - \psi_m(z/L) + \psi_m(z_0/L)]^2} \quad (3)$$

根据观测资料中海温、气温、气压以及风速值由下式计算整体 Richardson 数 Ri_B ：

$$Ri_B = \frac{gz\Delta\theta_v}{\theta_v u_*^2} \quad (4)$$

考虑到 Donelan 等^[13]所给出的资料中不包括波龄以及波陡等波浪要素,本文选用 Yelland and Taylor (1996) (简称为 YT96)^[15] 计算动力学粗糙度,其表达式为：

$$Z_0 = Z_{ch} u_*^2/g, \text{ 其中: } z_{ch} = \begin{cases} 0.011 & u \leq 10\text{m/s} \\ 0.011 + \frac{0.007(u-10)}{8} & 10\text{m/s} < u \leq 18\text{m/s} \\ 0.018 & u > 18\text{m/s} \end{cases} \quad (5)$$

根据(4)、(5)式计算得到的 Richardson 数和空气动力学粗糙度,分别采用 Businger71、Dyer74、LTG82、B&H91、Launiainen95 以及 Wang02 等六种方案计算摩擦速度。各参数化方案的理论基础和计算特性有所不同,其中,Businger71、Dyer74 和 B&H91 方案均是在观测试验的基础上,依据 Monin-Obukhov 相似理论给出不同形式的动量通量普适函数 ψ_m ,计算中将其代入(3)式并通过循环迭代首先求解 Monin-Obukhov 长度,进而得到 u_* ; LTG82 和 Wang02 方案则是为适应数值模拟的需要而提出的,这类方案直接对湍流通量输送系数进行参数化,从而有效避免了循环迭代,其中 LTG82 是以 Businger71 为基础建立的,Wang02 则是在 LTG82 基础上的进一步发展;Launiainen95 方案直接给出了稳定度参数 ζ 与整体 Richardson 数之间的计算关系,从而避免通过循环迭代求解 Monin-Obukhov 长度,然后分别采用不稳定条件下 Dyer74 和稳定条件下 B&H91 方案的普适函数代入(3)式求解 u_* 。各方案的具体表达式请参阅文献[2 ~ 8]。

3 计算结果与误差分析

首先对观测资料的特性进行分析。图 1 为 10m 中性风速(U_{10N})、波高(H_s)、EC 方法直接测量摩擦速度(u_{*EC})和 ID 方法估算摩擦速度(u_{*ID})的时间序列。可以看出, U_{10N} 变化范围为 3 ~ 15m/s,介于轻风到中等风速之间。 H_s 变化范围为 0.72 ~ 3.41m。 u_{*EC} 和 u_{*ID} 均介于 0.1 ~ 0.7m/s 之间。将观测资料分别代入公式(4)和(5)计算得到整体 Richardson 数

(Ri_B)和空气动力学粗糙度(z_0)随时间的变化(见图 2)。从图 2a 中可以看出 94%的 Ri_B 集中在 $[-0.1 \sim 0.1]$ 范围以内,少数 Ri_B 小于-0.1 的点对应航次为 221、223 的观测记录。从图 2b 中可以看出 z_0 主要集中在量级为 10^{-4} m 左右,即 $z/z_0 \approx 10^5$,其中 z 如上已述及,为测量高度,取 12m。

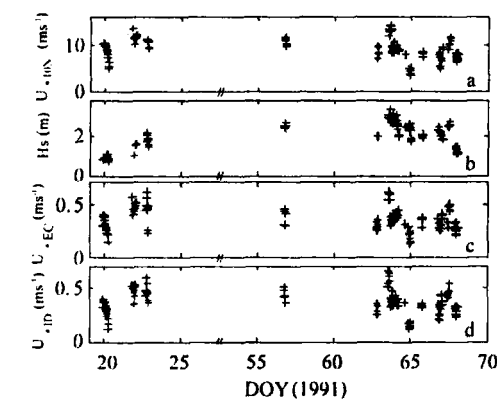


图 1 观测得到的 10m 中性风速(U_{10V})、波高(H_s)、由 EC 方法测量的摩擦速度(U_{*EC})和由 ID 方法估算的摩擦速度(U_{*ID})随时间的变化

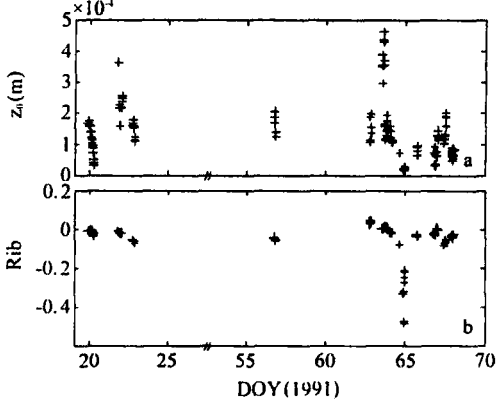


图 2 根据观测资料计算得到的粗糙高度(z_0)和整体 Richardson 数(Ri_B)随时间的变化

Donelan 等^[13]指出,传统的 ID 方法建立在平稳状态以及能量“串极”理论成立的基础上,因而对于非平衡波浪条件下动量输送的估算存在一定不足。故本文选用 EC 直接测量值(U_{*EC})作为参考来探讨以上六种参数化方案在不同海况下对 u_* 的计算结果。

图 3 ~ 6 分别对应为纯风浪、同向涌浪、交叉涌浪以及反向涌浪四种海面状况下,以上六种方案计算的 u_* 与 U_{*EC} 的 1:1 散点分布图,其中,“+”对应于不稳定层结条件,“○”对应稳定层结条件。可以看出,海面状况和层结稳定度对各参数化方案的计算结果均有着显著影响。

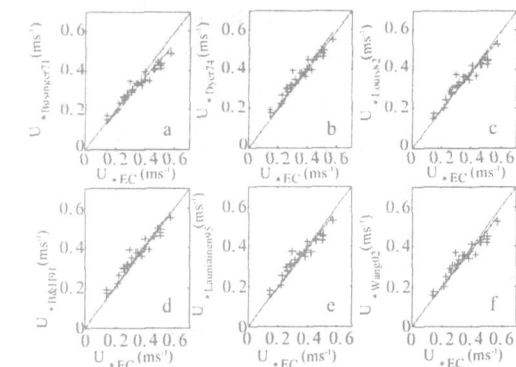


图 3 纯风浪条件下六种方案计算的摩擦速度值和 EC 直接测量值 1:1 散点图,其中 (+)表示不稳定层结,(○)点表示稳定层结

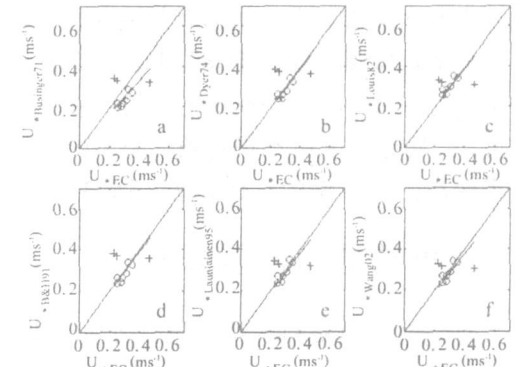


图 4 同向涌浪条件下六种方案计算的摩擦速度值和 EC 直接测量值 1:1 散点图,其中 (+)表示不稳定层结,(○)点表示稳定层结

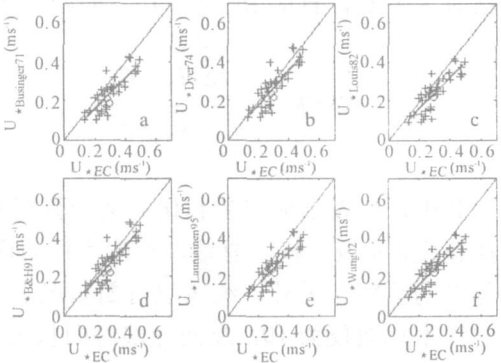
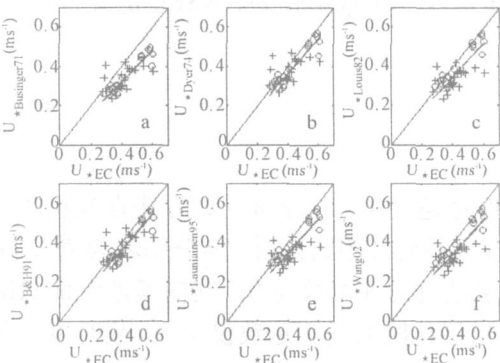


图5 交叉涌浪条件下六种方案计算的摩擦速度值和EC直接测量值1:1散点图,其中(+)表示不稳定层结,(O)点表示稳定层结

图6 反向涌浪条件下六种方案计算的摩擦速度值和EC直接测量值1:1散点图,其中(+)表示不稳定层结,(O)点表示稳定层结

分别将根据1:1散点图拟合得到的直线斜率与1相减,即得到各个方案在不同海面状况下计算值相对观测值的偏差(见表1)。其中,由于同向涌浪海面状况下的样本资料总数仅为10,因而没有对该种海面状况进行讨论。

表1 不同海面状况下六种方案计算的相对偏差(其中正值表示高估,负值表示低估)

	Businger71	Dyer74	LTG82	B&H91	Launiainen95	Wang02
Pure wind sea	-10%	2%	-6%	2%	-1%	-5%
Crossing swell	-21%	-10%	-15%	-10%	-10%	-15%
Counter swell	-22%	-12%	-21%	-12%	-11%	-21%

从表1中可以看出,海面状况对各参数化方案计算效果的影响十分显著。在纯风浪海面状况下,各方案的估算偏差整体较小,其中Businger71方案偏差最大,低估达到10%;Dyer74和B&H方案略有高估;Launiainen95方案略有低估;LTG82和Wang02方案的低估略小于Businger71方案。当海面存在交叉涌浪或者反向涌浪海面状况时,存在普遍性低估且低估较纯风浪海面状况明显偏大,其中Businger71方案低估最显著为21%,其次为LTG82和Wang02方案,Dyer74方案和Launiainen95方案的低估最小为10%。产生这种显著普遍性低估的可能原因有两点:第一,受观测资料限制,本文采用YT96^[15]方案计算空气动力学粗糙度,该方案仅仅考虑了风速(其中也隐含了纯风浪)的作用,但是没有计入波陡、波龄等波浪要素的影响,因此,尤其在轻风条件下,当风速影响较小,涌浪作用较显著时,计算的粗糙高度值偏低^[16];第二,Donelan等^[13]指出,航次221、223、239所对应的12个记录的可信度存在疑问,而这部分记录均对应的海面状况均为反向涌浪,即观测资料本身也带来了一定误差。

为进一步了解以上六种参数化方案在不同海面状况下的计算结果相对EC直接测量值的离散程度,我们参考Gao等^[8]给出的误差分析方法,分别计算了对应不稳定和稳定

层结时各方案计算的 u_* 相对 u_{*EC} 的归一化标准差 (NSEE) (见表 2)。NSEE 定义为：

$$NSEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^n (C_i)^2}}$$

(6)

其中， L_i 表示应用参数化方案计算得到的摩擦速度 u_* ， C_i 表示 EC 方法直接观测的摩擦速度， n 表示样本总数，对应不同海面状况下稳定和不稳定时， n 分别取为表 2 中括号里的数字。另外，纯风浪海面状况下稳定层结时的样本数为 0，同向涌浪海面状况下的样本总数仅为 10，反向涌浪海面状况下稳定层结时的样本总数仅为 4，故对以上几种情况均没有计算其归一化误差。

表 2 不同海面状况对应于不稳定层结和稳定层结条件下的六种方案计算的 u_* 相对 u_{*EC} 的 NSEE

NSEE		Businger71	Dyer74	LTG82	B&H91	Launiainen95	Wang02
Pure wind sea	Unstable (27)	12.51%	8.47%	9.99%	8.47%	9.51%	10.37%
Crossing swell	Unstable (25)	25.26%	18.62%	24.40%	18.62%	22.77%	24.58%
	Stable (21)	21.41%	10.90%	10.75%	10.89%	10.32%	10.54%
Counter swell	Unstable (39)	25.84%	20.24%	26.42%	20.24%	24.02%	25.95%

从表 2 中可以看出，在不稳定条件下，各参数化方案计算的摩擦速度相对 EC 直接测量值的归一化误差，纯风浪海面状况下最小，交叉涌浪状况下次之，反向涌浪状况下最大。其中，在纯风浪条件下 Dyer74 方案的计算误差最小，仅为 8.47%；海面存在交叉涌浪和反向涌浪时，相对而言，同样有 Dyer74 方案的计算误差最小，分别为 18.62% 和 20.24%，但是相对纯风浪条件下，误差明显增大。在稳定条件下，由于样本总数的限制，仅讨论了交叉涌浪海面状况时各方案计算结果的归一化误差。可以看到，除 Businger71 方案计算误差明显偏大为 21.41%，其它五种方案的计算误差均在 10% 左右。

4 结论

我们在利用前人给出的表面波浪动力试验中的部分观测资料时，通过对摩擦速度的计算，对比分析了 Businger71、Dyer74、LTG82、B&H91、Launiainen95 以及 Wang02 这六种湍流通量参数化方案，得出以下几点结论：

(1) LTG82、Launiainen95 和 Wang02 方案在计算中均能有效避免循环迭代，节省计算机 CPU 时间，能够适应数值计算的需要。但是，这几种方案均是以 Businger71、Dyer74

或者 B&H91 方案的基础上建立的,其理论基础和适用范围受到一定制约。

(2) 空气动力学粗糙度的计算对参数化方案的计算结果有一定影响。当有涌浪存在时,海面空气动力学粗糙度的计算中必须考虑波陡、波龄等波浪要素的影响,否则应用各参数化方案计算摩擦速度均会产生普遍性低估。现在已经有不少学者研究海面空气动力学粗糙度依赖于波龄或波陡,如 Oost and Oost^[17] (2004) 和 Yelland and Taylor^[18] (2002),由于本文所用数据库中并没有该参数的资料,从而制约了更深入的研究。

(3) 从计算精度上来看,在不稳定条件下,Dyer74 方案的计算精度较其他方案略高,尤其是纯风浪海面状况时,Dyer74 方案能够很好的估算摩擦速度,相对观测值的归一化误差仅为 8.47%;在稳定条件下,除 Businger71 方案的计算误差明显偏大,其它五种方案的计算误差接近。另外,由于在稳定条件下样本总数较少,且理查孙数的变化范围集中在 [0 0.1] 以内,因而有待于选用更多的海上观测资料对在稳定条件下各参数化方案的计算精度做进一步对比分析。

参考文献:

- [1] Monin A S and A M Obukhov. Basic Regularity in turbulent mixing in surface layer of the atmosphere. Akad Nauk SSSR Geofiz Inst Tr, 1954,24 :163 ~ 187.
- [2] Businger J A, J C Wyngaard, Y Izumi and E F Bardley. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. J Atmos Sci, 1971,28 :181 ~ 189.
- [3] Dyer A J. A review of flux-profile relationships. Boundary-Layer Meteorol, 1974, 7 : 363 ~ 372.
- [4] Holtslag A A M, H A R De Bruin. Applied Modeling of the nighttime surface energy balance over land. J App Meteorol, 1988,27 :689 ~ 704.
- [5] Beljaars A C M, A A M Holtslag. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. J App Meteorol, 1991, 30 :327 ~ 341.
- [6] Louis J F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. Boundary ~ layer Meteorol, 1979,17 :187 ~ 202.
- [7] Louis J F, M Tiedtke and J F Geleyn. A short history of the operational PBL-parameterization at ECMWF. Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization, Shinfield Park, Reading, Berkshire, UK, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 1982,59 ~ 79.
- [8] Wang S P, Q Wang and J Doyle. Some improvements to Louis surface parameterization, paper presented at 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. Am Meteorol Soc, Wageningen, Netherlands, 2002.
- [9] Gao Z (高志球), L G Bian (卞林根), X J Zhou (周秀骥). Measurements of turbulent transfer in the near-surface layer over a rice paddy in China. J Geophys Res, 2003,108 (D13) :4387 ~ 4399.
- [10] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Proceedings of ECWMF Workshop on Parameterization of fluxes over land surfaces. Eur Cent for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, England, 1988,392.
- [11] Miller M J, A C M Beljaars, and T N Palmer. The sensitivity of the ECMWF model to the parameterization of evaporation from the tropical ocean. J Climate, 1992,5 :418 ~ 434.
- [12] Launiainen J. Derivation of the relationship between the Obukhov stability parameter and the bulk Richardson number for flux-profile studies. Boundary-Layer Meteorol, 1995, 76 :165 ~ 179.
- [13] Donelan M A, W M Drennan, K B Katsaros. The air-sea momentum flux in conditions of wind sea and swell. Journal of Physical Oceanography. 1997,27 :2087 ~ 2098.
- [14] Gao Z (高志球), N Chae, J Kim, J Hong, T Choi and H Lee. Modeling of surface energy partitioning, surface temperature and soil wetness in the Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2). J Geophys Res, 2004, 109. D06102, doi :10.1029/2003JD004089.
- [15] Yelland M and P K Taylor. Wind stress measurements from the open ocean. J Phys Oceanogr, 1996, 26, 541 ~ 558.

- [16] Gao Z Q (高志球), Wu, S M Liu. Test of the Louis scheme and COARE algorithm for friction velocity in different wind-sea/swell regimes. *Acta Oceanologica Sinica (海洋学报英文版)*. 2005, 24 (4): 20 ~ 28.
- [17] Oost W A and E M Oost. An Alternative approach to the parameterization of the momentum flux over the sea. *Boundary-Layer Meteorol.* 2004, 113, 411 ~ 426.
- [18] Yelland M and P K Taylor. Wind stress measurements from the open ocean. *J Phys Oceanogr.* 1996, 26, 541 ~ 558.

Comparison of the six turbulent flux parameterization schemes in different wind-sea/swell regimes

HU Yan-bing¹, GAO Zhi-qiu², SHA Wen-yu¹, CAO Li-xia³, LAN Wei-ren³

1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 China; 2. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081 China; 3. PLA Center of Meteorology and Hydrology, Beijing 100081 China)

Abstract : The friction velocities in different wind-sea/swell regimes are calculated by using six different turbulent flux parameterization schemes, where the data collected from the surface wave dynamics experiment are used. The results show that, compared with the friction velocities directly measured by eddy-covariance method in different wind-sea/swell regimes, all parameterization schemes estimate friction velocity in pure wind sea regime better than those in both crossing swell and counter swell regimes. Furthermore, under pure wind sea regimes, when the atmosphere near the sea surface is unstable, the normalized error of Dyer's scheme on friction velocity is the least, only of 8.47%. Under stable conditions, beside the scheme of Businger, the normalized error of the other five schemes are closely and less.

Key words : friction velocity ; parameterization scheme ; wind-sea/swell regime