

海浪效应对海面粗糙度的影响研究

王晨迪¹, 单宇光² (1. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101; 2. 93250 部队, 辽宁瓦房店 116322)

摘要 基于日本气象厅 22001 号浮标站与美国国家浮标数据中心提供的 41008 号浮标站观测资料, 利用 Smith88、YT96、TY01 和 O02 这 4 种海面粗糙度方案研究中高风速条件下真实海浪效应对海面粗糙度的影响; 同时, 利用浮标数据和 COARE3.0 算法, 比较中高风速条件下缺乏真实海浪信息时, 自主设计的有效波高、谱峰周期参数化方案与 COARE3.0 自带的 Taylor01 波浪特征量参数化方案计算海面粗糙度的效果。结果表明, 无论哪种浮标资料, 不考虑真实海浪效应的 2 种方案 (Smith88 和 YT96) 均比考虑真实海浪效应的 2 种方案 (O02 和 TY01) 计算出的粗糙度偏低, 说明在中高风速条件下必须要考虑真实海浪效应对海面粗糙度的影响。此外, 初步证实了自主设计的波浪特征量参数化方案在缺乏真实海浪信息时, 计算效果优于 COARE 3.0 算法自带的 Taylor01 波浪特征量参数化方案。

关键词 浮标数据; COARE 3.0 算法; 海面粗糙度

中图分类号 S16 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)06-022-04

Effects of the Wave on the Roughness of Sea Surface

WANG Chen-di¹, SHAN Yu-guang² (1. College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101; 2. The 93250 Troop, Wafangdian, Liaoning 116322)

Abstract Based on the observation data of 22001 and 41008 buoy station provided by Japan Meteorological Agency and US National Data Center (NDBC), surface roughness schemes (Smith88, YT96, TY01 and O02) were used to research the effects of wave on sea surface roughness for moderate to high wind speed. At the same time, when lacking real waves information under moderate to high wind speed conditions, the self-designed significant wave height, dominant wave period parameterization scheme and Taylor01 wave characteristics parameterization scheme in COARE 3.0 were used to calculate the effects of sea surface roughness by using buoy data and the COARE 3.0 algorithm. Results showed that the sea surface roughness calculated by two schemes without considering the waves (Smith88, YT96) were lower than that calculated by two schemes considering the waves (O02, TY01), indicating that we must consider the effect of the waves on the sea surface roughness under the moderate to high wind speeds. In addition, we preliminary confirmed that our scheme was better than Taylor01 scheme when lacking the waves.

Key words Buoy data; COARE 3.0 algorithm; Sea surface roughness

海面粗糙度对海气相互作用有重要影响, 它通过影响海气界面间动量、热量和水汽通量的交换影响着大气的演变以及海洋对大气的响应。海浪作为存在于大气和海洋交界面上的小尺度海洋运动现象, 直接参与海气界面上的动量、热量和物质交换, 海浪的强度和传播影响了海面粗糙度的分布^[1]。大量研究表明, 海面粗糙度不仅依赖于风速, 还与波浪状态有关。近几十年来, 各国科学家发展了一系列考虑真实波浪状态的海面粗糙度方案。Taylor 等^[2]联合 HEXMAX、RASEX 及 Anctil 等^[3]在 Ontario 湖测得的实测数据获得了海面粗糙度与有效波高和波陡的关系 (简称 TY01 方案)。Oost 等^[4]根据北海 Dutch 观测平台获得的实测数据得到了海面粗糙度与波龄的关系 (简称 O02 方案), 这 2 种考虑真实海浪状态的海面粗糙度方案已包含在最新的 COARE3.0 算法中。此后很多研究都延续将海面粗糙度描述成与波龄相关的函数^[5-8]。当有效波高和谱峰周期缺省时, COARE 3.0 算法根据 Taylor 等^[2]提出的方案利用海面 10 m 风速 U_{10} 对有效波高和谱峰周期进行参数化 (简称 Taylor01)。

然而, 现有的大气模式中大多数海气界面层参数化方案仍然假设海面粗糙度在数值上只是关于风速的函数, 而与波浪无关。鉴于海面粗糙度与摩擦速度、拖曳系数以及动量通量 (也称风应力) 相互之间是等价关系, 这样的假设也就意味着拖曳系数和动量通量随风速的增加而增加。这在强风条件下 (海面 10 m 风速超过 30 m/s) 可能会导致对动量通量的

高估而使模式的预报效果变差, 甚至导致对物理机制的误判^[9], 而在中高风速条件下 (海面 10 m 风速介于 10~30 m/s 之间) 又可能因为没有考虑真实海浪效应而造成对海面粗糙度和动量通量的低估^[10]。因此, 在数值预报模式中充分考虑波浪效应对海面粗糙度的影响是合理描述海气界面间能量交换亟需解决的问题之一。因此, 笔者基于日本气象厅 22001 号浮标站与美国国家浮标数据中心 41008 号浮标站提供的浮标资料, 研究中高风速条件下真实海浪效应对海面粗糙度的影响; 同时, 利用浮标数据和 COARE3.0 算法, 比较中高风速条件下缺乏真实海浪信息时自主设计的有效波高、谱峰周期参数化方案与 COARE3.0 自带的 Taylor01 参数化方案计算海面粗糙度的效果。

1 材料与方法

1.1 资料来源 由于浮标数据可以同时提供海面风速、有效波高和波周期等资料, 且直接在海上进行测量, 不受陆地和船舶的影响, 一般被认为是气象海洋观测数据的标准^[11]。因此, 研究中利用资料分别来源于: ①日本气象厅 (JMA) 在东海海域布设的 5 个固定浮标站, 可以提供 7.5 m 高处风速、风向, 气温、湿球温度、海平面气压、海表 (1、50、100 m) 深处的水温、波高、波周期等 11 个变量 (时间间隔 3 h), 其中 1990 年 7 月 31 日之前提供的是采用上跨零点方法获得的平均波高和平均波周期^[11], 而 1990 年 8 月 1 日以后提供的是有效波高和谱峰周期^[12]。该资料于 2009 年 6 月最新公布, 由日本气象厅进行质量控制。②美国国家浮标中心 (NDBC) 41008 站, 该站点位于大西洋西北部, 水深达 19.5 m。观测资料包括据海平面 5 m 高处的水平风速、风向, 距海平面 4 m

基金项目 国家自然科学基金项目 (41205004, 41230421, 41105065, 41105075)。

作者简介 王晨迪 (1992-) , 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向: 中尺度气象学。

收稿日期 2016-01-29

高处的空气温度、露点温度、海平面气压、海表 0.6 m 深处水温,有效波高、谱峰周期等(时间间隔 1 h)。该资料由美国国家浮标中心进行质量控制,既能提供 45 d 左右的实时数据,也能够提供历史数据。

1.2 CORAE 算法 COARE 算法是基于 Monin-Obukhov 相似理论,根据 TOGA COARE(Tropical ocean global atmosphere program and coupled ocean-atmosphere response experiment)的实测资料分析,在 Liu 等^[13]算法基础上的改进,V3.0 较前一版 V2.5 又进行了 7 项改进,其中包括增加了海面粗糙度受海浪特征量影响的选项,引入了 TY01 和 O02 2 种考虑真实海浪信息的海面粗糙度方案。V3.0 是当前最新版本,具体详见文献[10]。

$$\left\{ \begin{aligned} \psi_u &= (1-f)\psi_{uk} + f\psi_c, f = \zeta^2 / (1 + \zeta^2) \\ \psi_{uk} &= 2\ln\left[\frac{X+1}{2}\right] + \ln\left[\frac{X^2+1}{2}\right] - 2\arctan(X) + \pi/2, X = (1-15\zeta)^{1/4} \\ \psi_c &= 1.5\ln\left[\frac{y^2+y+1}{3}\right] - \sqrt{3}\arctan\left[\frac{2y+1}{\sqrt{3}}\right] + \pi/\sqrt{3}, y = (1-10.15\zeta)^{1/3} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中, $\zeta = z/L$, L 为 Obukhov 长度。

利用 COARE3.0 总体通量算法,可以在已知风速、海温、气温、比湿或相对湿度、气压、观测高度、有效波高、谱峰周期(海浪特征量缺省时默认采用 Taylor01 方案计算)的前提下,直接迭代确定各种近地层特征尺度值,包括 u_* 、 z_0 、 ζ 、 ψ_u 等,再根据以下公式确定风速廓线:

$$u(z) = u_* [\ln(z/z_0) - \psi_u(\zeta)] / \kappa \quad (4)$$

1.3 海面粗糙度方案 Smith88 方案^[14]应用的是 Charnock 关系式,只考虑了海浪对海面粗糙度 z_0 气候平均意义上的影

响,未考虑真实的海浪特征,但该方案在现有的蒸发波导模型中应用最为广泛。

响,未考虑真实的海浪特征,但该方案在现有的蒸发波导模型中应用最为广泛。

$$\psi_u = -[(1 + \zeta) + 2/3(\zeta - 14.28)/\exp(c) + 8.525], c = \min(50, 0.35\zeta) \quad (2)$$

在不稳定条件下,利用 Businger - Dyer^[16]关系式 ψ_{uk} 以及自由对流限制方程 ψ_c :

响,未考虑真实的海浪特征,但该方案在现有的蒸发波导模型中应用最为广泛。

YT96^[15](默认)、TY01^[2]和 O02^[4]这 3 种方案中,只有 YT96 延续使用了 Charnock 关系式,并将 Charnock 参数由固定值 0.011 变为一个与风速有关的变量,其余 2 种方案都与真实海况有关。以上 4 种参数化方案的具体形式见表 1。波浪特征量之间满足标准深水重力波关系:

$$C_p = gT_p / (2\pi); L_p = C_p \times T_p \quad (5)$$

表 1 海面粗糙度方案
Table 1 Schemes of sea surface roughness

方案 Scheme name	公式 Formula	方案 Scheme name	公式 Formula
Smith88	$z_0 = \alpha u_*^2 / g + 0.11\nu / u_*$, 其中 $\alpha = 0.011$	TY01	$z_0 = 1\ 200\ h_s (h_s / L_p)^{4.5} + 0.11\nu / u_*$
YT96	$z_0 = z_{ch} \frac{u_*^2}{g} + 0.11 \frac{\nu}{u_*}$ $z_{ch} = \begin{cases} 0.011, U_{10} \leq 10\text{ m/s} \\ 0.011 + 0.007(U_{10} - 10)/8, 10\text{ m/s} < U_{10} \leq 18\text{ m/s} \\ 0.018, U_{10} > 18\text{ m/s} \end{cases}$	O02	$z_0 = 25L_p (u_* / C_p)^{4.5} / \pi + 0.11\nu / u_*$

注: U_{10} 为海面 10 m 高度处的风速, ν 为动力黏滞系数, h_s 为有效波高, C_p 为有效波相速, C_p / u_* 为波龄, L_p 为有效波长, T_p 为谱峰周期(谱极大值对应的周期), h_s / L_p 为波陡。
Note: U_{10} was the wind speed at 10 m sea surface, ν was coefficient of dynamic viscosity, h_s was significant wave height, C_p was phase velocity of effective wave, C_p / u_* was wave age, L_p was effective wave length, T_p was dominant wave period (corresponding period to the maximum spectrum), h_s / L_p was wave steepness.

1.4 海浪特征量参数化方案 在 COARE3.0 算法中,当有效波高和谱峰周期缺省时,默认采用 Taylor01 方案(表 2)对它们进行参数化,其中 U_{10n} 为中性层结条件下海面 10 m 高度

处的风速(由于 $U_{10} \approx U_{10n}$, 实际应用中一般近似采用 10 m 处风速 U_{10})。此外,前期利用我国东部海域的实测资料也发展了一种新的有效波高、谱峰周期参数化方案。

表 2 海浪特征量参数化方案
Table 2 Parameterization schemes for the sea wave properties

方案 Scheme name	有效波高 Significant wave height h_s // m	谱峰周期 Dominant wave period T_p // s
Taylor01	$h_s = 0.018 \times U_{10n}^2 (1 + 0.015 U_{10n})$	$T_p = 0.729 U_{10n}$
自主设计方案 Self-designed scheme	$h_s = 1.0369 \exp(0.0187 U_{10})$	$T_p = \sqrt{2\pi h_s / g} / (0.0018 U_{10} + 0.0039)$

2 结果与分析

2.1 对 22001 站的结果分析 从图 1、图 2 可以看出,对于 10~20 m/s 的中高速条件,S88 方案计算的粗糙度 z_0 最低,改进后的 YT96 方案将 Charnock 参数定义成风速的分段函数,因此在中高速风速范围内计算的 z_0 明显高于 Smith88 方案的计算结果。但是,与考虑真实海浪效应的 TY01、O02 方案相比,YT96 方案对 z_0 的增长作用是非常微弱的。当风速超过 12 m/s 时,TY01 和 O02 方案计算的 z_0 开始显著高于考虑海浪气候平均效应的 YT96 和 Smith88 方案,但同时数据的离散程度也显著增加。

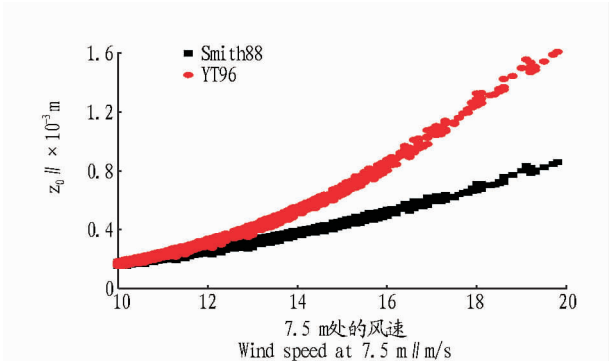


图 1 Smith88 和 YT96 方案计算的 z_0 随风速的变化特征
Fig.1 The variation characteristics of z_0 calculated by Smith88 and YT96 with wind speed

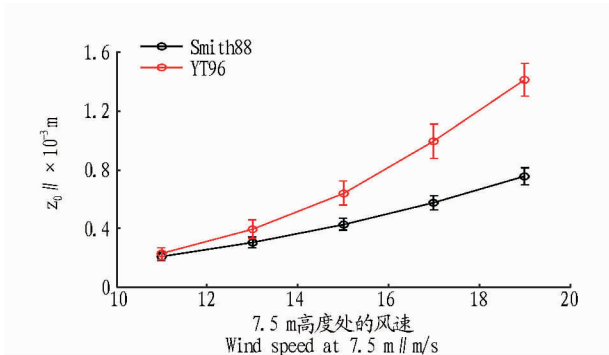


图 3 各风速区间内 4 种方案计算的 z_0 分析
Fig. 3 The predicted values of z_0 calculated by four schemes in different wind speeds

2.2 对 41008 站的结果分析 为了进一步证明以上结果,又选取了处于美国东海岸的 41008 站进行分析处理。从图 4 可以看出,在中高速风速条件下,对于只考虑海浪气候平均效应的 Smith88 和 YT96 方案,Smith88 方案算出的海面粗糙度小于将 Charnock 参数定义成风速的分段函数的 YT96 方案;当考虑真实海浪效应时,O02 和 TY01 显著高于前二者,O02 方案计算的 z_0 均值增长速度最快,其次是 TY01 方案,再次是 YT96 方案,增长最慢的是 Smith88 方案。

2.3 对 COARE 算法的改进结果

将自主设计的海浪特征量参数化方法引入 COARE3.0 算法中,采用 O02 海面粗糙度方案计算海面粗糙度,比较中等风速条件下自主设计的参数化方案与 COARE 3.0 算法自带的 Taylor01 海浪特征量参数化方案的适用性。由表 3 可

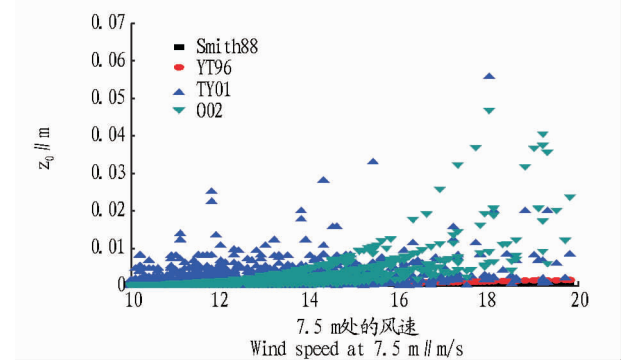


图 2 不同海面粗糙度方案计算的 z_0 随风速的变化特征
Fig. 2 The variation characteristics of z_0 calculated by different sea surface roughness schemes with wind speed

知,风速在 12~18 m/s 范围内时,自主设计的海浪特征量参数化方案的计算效果较好。

将风速划分为 10~12、12~14、14~16、16~18、18~20 m/s 5 个风速区间,计算各风速区间内不同粗糙度方案计算的 z_0 均值及偏离均值的标准差。从图 3 可以看出,随着风速的增加,O02 方案计算的 z_0 均值增长速度最快,其次为 TY01 方案,再次为 YT96 方案,增长最慢的是 Smith88 方案。此外,随着风速的增加,TY01 和 O02 方案计算的 z_0 的离散程度也急剧增加。这一方面可能是由于高速条件下产生的浪流、海洋泡沫对观测仪器的侵蚀和破坏作用使得资料本身的精度受到影响,另一方面可能是由于海面粗糙度方案在高速条件下对观测误差更加敏感。

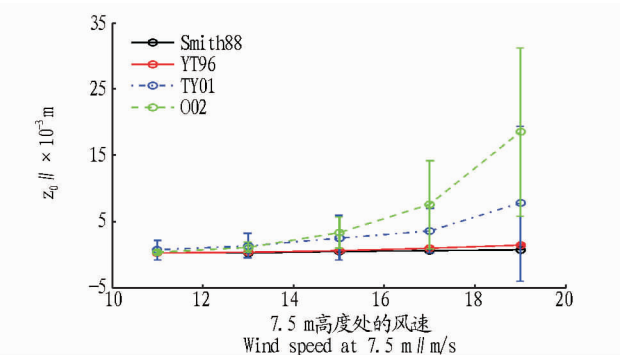


图 3 各风速区间内 4 种方案计算的 z_0 分析
Fig. 3 The predicted values of z_0 calculated by four schemes in different wind speeds

表 3 2 种海浪特征量参数化方案计算海面粗糙度的均方根误差
Table 3 The RMSE of sea surface roughness calculated by two sea wave properties parameterization schemes

风速范围 Range of wind speed//m/s	样本数 n Sample number	Taylor01	自主设计方案 Self-designed scheme
10~12	499	0.000 5	0.000 5
12~14	180	0.001 0	0.001 0
14~16	41	0.002 5	0.002 3
16~18	5	0.005 3	0.004 8

注:均方根误差 = $\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2 / (n-1)}$, 其中 x_i 为预测值, x_i^* 为实测值, n 为样本数。
Note: Root-mean-square error = $\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*)^2 / (n-1)}$, x_i was predicted value, x_i^* was measured value, and n was sample number.

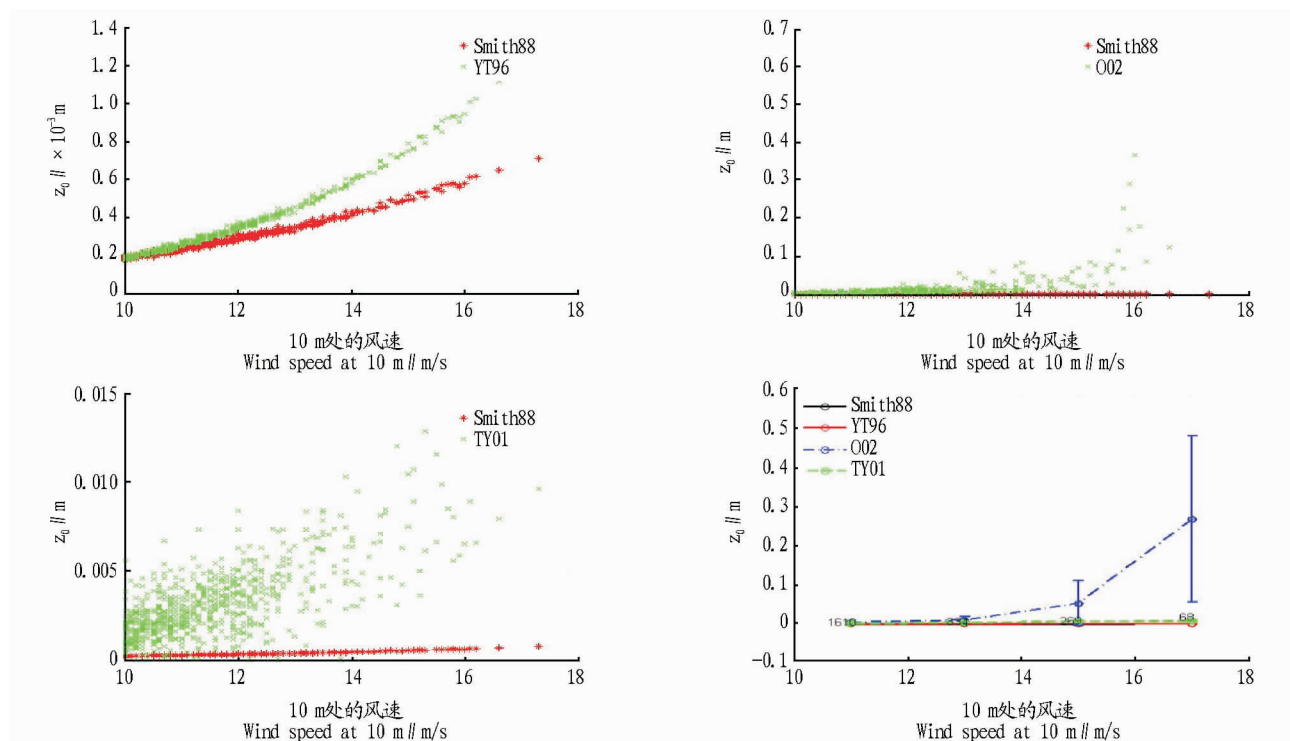


图 4 不同海面粗糙度方案计算的 z_0 随 10 m 风速的变化特征

Fig. 4 The variation characteristics of z_0 calculated by different sea surface roughness schemes with 10 m wind speed

3 小结

笔者基于日本气象厅 22001 号浮标站与美国国家浮标数据中心提供的 41008 号浮标站观测资料,利用 Smith 88、YT96、TY01 和 O02 这 4 种海面粗糙度方案研究中高速下真实海浪效应对海面粗糙度的影响,同时利用浮标数据和 COARE3.0 算法,比较中高速下缺乏真实海浪信息时自主设计的有效波高、谱峰周期参数化方案与 COARE3.0 自带的 Taylor01 参数化方案计算海面粗糙度的效果,得出以下结论:

(1) 无论用哪种浮标资料都发现不考虑真实海浪效应的 2 种方案 (Smith88 和 YT96) 都比考虑真实海浪效应的 2 种方案 (O02 和 TY01) 计算出的海面粗糙度偏低,说明在中高速条件下必须要考虑真实海浪效应对海面粗糙度的影响。

(2) 随着风速的增大,4 种方案的混乱程度变大。究其原因,一方面可能是由于高速条件下产生的浪流、海洋泡沫对观测仪器的侵蚀和破坏作用使得资料本身的精度受到影响,另一方面可能是由于海面粗糙度方案在高速条件下对观测误差更加敏感。

(3) 对影响结果的分析表明,中高速条件下必须考虑真实海浪效应,不然会造成海面粗糙度的低估,在缺乏真实海浪信息时候,自主发展的方案优于 COARE 3.0 算法自带的 Taylor01 方案。当然,进一步的验证工作仍需继续开展,寻找误差规律来实现进一步改进方案的目的。

参考文献

[1] 关皓,周林,王汉杰,等.有限区域大气-海浪耦合模式的建立及海表粗糙度参数化试验[J].海洋学报,2008,30(4):30-38.

- [2] 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 (2): 572-590.
- [3] ANCTIL F, DONELAN M A. Air-water momentum flux observations over shoaling waves[J]. J Phys Oceanogr, 1996, 26: 1344-1353.
- [4] OOST W A, KOMEN G J, JACOBS C M J, et al. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during AS-GAMAGE [J]. Bound-layer meteor, 2002, 103(3): 409-438.
- [5] JONES I S E, TOBA Y. Wind stress over the ocean[M]. NY: Cambridge University Press, 2001: 52-53.
- [6] DRENNAN W M, TAYLOR R K, YELLAND M J. Parameterization the sea surface roughness[J]. Phys Oceanogr, 2005, 35: 835-848.
- [7] GAO Z Q, WANG Q, WANG S P. An alternative approach to sea surface aerodynamic roughness[J]. J Geophys Res, 2006, 111: 221080.
- [8] 潘玉萍, 沙文钰, 王巨华, 等. 发展新型的海面空气动力学粗糙度参数化方案[J]. 自然科学进展, 2007, 17(8): 1069-1077.
- [9] DONELAN M A, HANS B K, REUL N, et al. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong wind[J]. Geophys Res Lett, 2004, 31, L18306, doi: 10.1029/2004GL019460.
- [10] FAIRALL C W, BRADLEY E F, HARE J E. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE Algorithm[J]. J Climate, 2003, 2: 571-592.
- [11] EBUCHI N, KAWMURA H. Validation of wind speeds and significant wave heights observed by the TOPEX altimeter around Japan[J]. Journal of oceanography, 1994, 50: 479-487.
- [12] Format_moored_buoy [EB/OL]. [2015-12-20]. http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/vessel_obs/data-report/data/S2/buoy/format.
- [13] LIU W T, KATSAROS K B, BUSINGER J A. Bulk parameterization of air-sea exchanges of heat and water vapor including the molecular constraints at the interface[J]. J Atmos Sci, 1979, 36: 1722-1735.
- [14] SMITH S D. Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature[J]. Journal of geophysical research atmospheres, 1988, 93(C12): 15467-15472.
- [15] YELLAND M, TAYLOR P K. Wind stress measurements from the open ocean[J]. Journal of physical oceanography, 1996, 26(4): 541-558.
- [16] BELJAARS A C M, HOLTSLAG A A M. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models[J]. Journal of applied meteorology, 1991, 30: 327-341.