

# 海气动量通量研究综述

冯兴如<sup>1,2,3</sup>, 李水清<sup>1,2,3</sup>, 尹宝树<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 海气界面动量通量也称为风应力, 是海流和表面海浪的主要驱动力, 是海洋从大气获得动量的重要途径。因此, 合理可靠的海洋表面风应力的参数化对于海洋、大气和波浪以及气候模式的准确预报都具有非常重要的科学意义和实用价值。对风应力拖曳系数的参数化是风应力参数化的主要内容。近来的观测发现, 风应力拖曳系数随着风速的增加出现了先增后减的趋势, 同时还与海面的波浪状态以及海流有关。基于观测或理论分析, 目前已经得到了一系列的风应力拖曳系数计算方法或公式, 有的考虑了海浪的作用, 有的没有, 但这些方案大都是适合中低风速, 在高风速下的适用性还有待检验。本文回顾了目前在海气动量通量观测和参数化方面的研究进展, 并建议应增加高风速下风速、海流以及海浪等的同步观测, 以进一步完善风应力参数化方案。

**关键词:** 海气动量通量; 风应力拖曳系数; 参数化方案; 海浪

**中图分类号:** P732.6    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-3096(2018)10-0103-07

**DOI:** 10.11759/hyxx20180725001

海气界面的动量通量, 也称为风应力, 是海洋与大气相互作用研究的核心内容之一, 是海洋与大气耦合数值模式的一个重要参数。海气动量通量不仅是上表层动力过程(海流、海浪)的动力来源, 还可以通过海洋内部的动力和热力调整过程进一步影响深层海水<sup>[1]</sup>。海洋表面风应力, 反映了海洋与大气这两种流体间的摩擦拖曳作用, 合理可靠的海洋表面风应力的参数化对全球气候变化研究、局地海洋和大气过程模拟以及极端天气灾害预警<sup>[2-3]</sup>都有重要的科学意义和社会实际应用价值。

在风应力观测中, 大部分研究采用自上而下的方法(up-bottom), 即在海面上方进行测量, 其中涡相关法和惯性耗散法是自上而下观测方式的两种基本手段。前者是通过雷诺分解将风速分解为平均项和脉动项, 然后计算脉动项协方差, 它作为一种直接的湍流观测方法具有坚实的数理基础; 后者是建立在湍动能方程的基础上利用湍流惯性区间(2~5 Hz)观测数据反推海气通量的方法, 由于湍流高频远在浮标、船体晃动范围之外, 因此较多地应用在移动平台上。通常情况下, 海气通量的观测要求位于大气边界层以内, 根据常通量层假设, 观测高度处的通量就是边界层的通量。此外也有研究采用自下而上的

方法(bottom-up), 利用海面下方的海流和温盐数据反推海面风应力<sup>[4-5]</sup>, 该方法特别适用于高风速情形。目前由于观测技术的局限性, 难以实现大区域空间范围内的风应力观测, 定点的局部观测数据主要用于风应力的参数化方案研究。

在进行大尺度空间区域范围风应力的估算时, 通常采用块体公式:

$$\tau = \rho U_*^2 = \rho C_d U_{10}^2 \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为空气密度,  $U_*$  为摩擦速度,  $U_{10}$  为平均海面 10 m 高度处的风速,  $C_d$  为风应力拖曳系数。由此可见, 风应力的参数化变为如何确定风应力拖曳系数。

以往的研究指出, 中性边界层条件下, 近地(海面)层平均风速对高度的变化满足对数规律, 即:

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776016, 41606024)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41776016, 41606024]

作者简介: 冯兴如(1984-), 男, 山东菏泽人, 副研究员, 博士, 从事海洋动力过程的研究, 电话: 0532-82898931, E-mail: fengxingru07@qdio.ac.cn; 尹宝树, 通信作者, 研究员, 主要从事海洋动力过程及其环境效应研究, 电话: 0532-82898502, E-mail: bsyin@qdio.ac.cn

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

式中,  $U$  为高度  $z$  处的风速,  $z_0$  为海面粗糙度,  $\kappa$  为 Von Karman 常数(约为 0.4)。这样由公式(1)和公式(2)便可以得到:

$$C_d = \kappa^2 \left[ \ln\left(\frac{10}{z_0}\right) \right]^{-2} \quad (3)$$

这样, 风应力拖曳系数和海面粗糙度就是一一对应的。在过去的几十年里, 已有许多针对风应力拖曳系数或海面粗糙度的研究<sup>[6-19]</sup>, 这些研究或基于观测, 或基于理论分析, 研究成果丰富, 得到了一系列风应力拖曳系数计算方法或公式。近来的观测发现, 风应力拖曳系数随着风速的增加出现了先增后减的趋势<sup>[20]</sup>, 同时还与海面的波浪状态有关系。已有的计算方法中, 有些公式只适用于中低风速, 有些公式虽然能基本得到高风速下风应力拖曳系数变化的大体规律, 但没有考虑海浪等的影响。目前也有既包含随风速变化的观测特征也考虑了波浪影响的计算公式, 但非常缺乏(尤其是在像台风这种高风速环境下)实测资料的检验。原因是台风条件下的海上风速等的观测资料非常少, 尤其是台风条件下海浪、海流和风速的同步观测极其少。因此, 目前对于像台风这种高风速下的风应力拖曳系数的计算, 还没有权威的参数化方案。

海面风应力的准确计算对于模拟和预报海洋和大气之间的动力过程非常重要。风应力拖曳系数的准确参数化是准确计算风应力的关键因素, 对于风应力拖曳系数的研究可基于实验室观测或者野外观测, 也可通过理论分析手段开展。本文重点回顾在海面风应力拖曳系数研究方面的进展。

## 1 海面风应力拖曳系数随风速的变化

早在 1935 年, Rossby 和 Montgomery<sup>[21]</sup>利用在德国进行的观测, 将海面风应力拖曳系数  $C_d$  确定为一个常数 0.001 3, 此值只适用于中低风速。Deacon<sup>[22]</sup>在分析观测数据时发现, 风应力拖曳系数对风速具有依赖性, 在中低风速的条件下随风速是递增的; 但 Alamaro 等<sup>[23-24]</sup>基于水槽数据的分析得出, 风应力拖曳系数在风速大于 25 m/s 时随风速的增加而减小; Powell 等<sup>[20]</sup>利用在大量热带气旋期间下落的 GPS 探空器测得的风廓线, 计算得到了高风速下风应力拖曳系数随风速的变化, 结果也表明, 当风速

大到一定程度(>33 m/s), 风应力拖曳系数随着风速增加会减小。同样, Donelan 等<sup>[25]</sup>在分析水槽的观测数据后发现, 在高风速下(>33 m/s)风应力拖曳系数达到一个饱和值(约为 0.002 5), 不再随风速的增大而增大。赵中阔等<sup>[26]</sup>利用近岸海上观测平台观测资料, 分析了台风“黑格比”期间的观测数据, 计算了风应力拖曳系数随风速的变化, 发现风应力拖曳系数的极值出现在风速为 24~28 m/s 之间。Zhao 等<sup>[18]</sup>基于海上观测平台资料, 研究了台风期间风应力拖曳系数的变化特征, 发现近岸的风应力拖曳系数比深海要大, 同时与风应力拖曳系数极值对应的风速也比深海更小, 作者将这种现象归因于浅水效应, 并拟合出了同时依赖于风速和水深的拖曳系数计算公式。Bi 等<sup>[17]</sup>同样基于海上观测平台资料, 研究了高风速下近岸的风应力拖曳系数, 在 5~10 m/s 的风速时, 风应力拖曳系数随风速递减, 之后随着风速增加, 直到 18 m/s 时达到最大 0.002, 之后又随着风速减小, 该饱和风应力拖曳系数小于 Powell 等<sup>[20]</sup>以及 French 等<sup>[27]</sup>的结果, 同时该饱和风应力拖曳系数对应的风速为 18 m/s, 也小于其他研究所观测到的 30~35 m/s。

## 2 海浪对海面风应力拖曳系数的影响

海气动量交换是海洋与大气耦合过程的一种体现, 海气界面间的动力过程会对海气动量通量进行调制。海浪是海气界面间最为显著的动力过程之一, 在实际海洋中, 海浪通常以风浪和涌浪的混合形式存在, 风浪是由局地风直接强迫形成的, 而涌浪是那些其他海区传来的或当地风减小(或转向)后海面上遗留下来的波浪。研究表明, 大气向海洋传递的能量绝大多数由风浪直接吸收, 风浪逐渐成长并可以明显改变大气向海洋的动量和能量传递<sup>[28-29]</sup>, 风浪中短波部分对海表空气动力粗糙度起主要贡献<sup>[30-31]</sup>。

在海面粗糙度的计算中考虑风速的影响, Charnock<sup>[32]</sup>根据量纲分析提出了著名的 Charnock 关系:

$$gz_0 / U_*^2 = \alpha \quad (4)$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $U_*$  为摩擦风速,  $z_0$  为海面粗糙度,  $\alpha$  为 Charnock 参数。

许多学者依据不同的实验和外海观测数据给出了不同的 Charnock 参数<sup>[6, 33-34]</sup>, 每一种 Charnock 数对应一种线性依赖于风速的风应力拖曳系数计算公式。基于风浪谱的相似性, Stewart<sup>[35]</sup>提出了推广的

Charnock 关系, 将 Charnock 参数写成波龄的函数, 之后 Masuda 和 Kusaba<sup>[36]</sup>又提出了 Charnock 参数与波龄的一种指数形式, 被不同学者采用并得出了不同的结论<sup>[7-8]</sup>。Zhao<sup>[12]</sup>给出了一种同时考虑与风速和波浪状态参量成线性关系的拖曳系数表达式, Guan 和 Xie<sup>[14]</sup>将对数廓线理论和 Charnock 关系结合起来, 利用 3/2 指数律<sup>[37]</sup>得到了拖曳系数对于风速的准线性依赖关系, 其斜率为依赖于波陡的函数。这些研究所得出的风应力拖曳系数的计算公式仍然是适用于中低风速的, 采用外推的方法来计算得到的高风速下的风应力拖曳系数与观测不符。

基于 Powell 等<sup>[20]</sup>的现场观测资料和有限饱和悬浮湍流层的湍动能(turbulent kinetic energy, TKE)平衡分析, Makin<sup>[38]</sup>根据抗阻定律给出了高风速下的风应力拖曳系数计算公式, 但该公式没有考虑波浪状态的影响。之后 Liu 等<sup>[16]</sup>基于适用于中低风速的 Jones 和 Toba<sup>[39]</sup>的 SCOR(Scientific Committee on Oceanic Research)关系和 Makin<sup>[38]</sup>的考虑了高风速下水滴层对海面风应力影响的关系式, 得到了一个适用于各种风速条件下的海面动力粗糙度计算公式, 该计算公式同时考虑了波浪状态和海面飞沫的影响, 计算得出的风应力系数能较好地覆盖前人已发表的野外和实验室的观测结果。但因为前人的观测数据中, 很少有台风条件下风速剖面 and 波浪的同步观测数据, 该公式的计算结果能覆盖前人的观测结果, 但不能精确地验证该公式。Shi 等<sup>[19]</sup>提出一种新的可用于各种风速并依赖于波浪状态的风应力拖曳系数计算方法, 也是需要更多观测数据的验证。He 等<sup>[40]</sup>最近的研究也显示, 波浪状态和海面飞沫对海气界面的动量通量具有重要影响。

此外, Gao 等<sup>[15]</sup>基于 HEXMAX(Humidity Exchange over the Sea Main Experiment)实验数据, 采用量纲分析的方法得出了海面粗糙度、摩擦速度以及风应力拖曳系数与波浪参数和风速的关系式, 之后又利用 3 种不同水深情况下的观测数据对该研究成果进行了检验<sup>[41]</sup>。研究发现: 在中等风速下, 海面粗糙度对波浪和风速的依赖关系在浅水和开阔海域有很大的不同, 并且建议在计算海面粗糙度时, 根据不同的水深采取不同的处理方式。Wang 等<sup>[42]</sup>利用不同数据库, 检验了 6 种风应力拖曳系数的计算公式, 发现这些计算公式在低风速(<12 m/s)时计算的系数与实测值较吻合, 但是当风速较大时, 偏差就会很大, 之后该研究基于相似理论、考虑海浪的

Charnock 关系和 Toba 的 3/2 幂律关系, 得到了一个新的拖曳系数计算方案, 改善了风速大于 12 m/s 时的计算偏差, 但该公式仍限在 <20 m/s 时适用, 没有经过更高风速海况的检验。

波龄、波陡等描述风浪成长状态的特征参量, 常被用来参数化海表动力粗糙度或拖曳系数<sup>[13, 15, 43]</sup>。Drennan 等<sup>[44]</sup>和 García-Nava 等<sup>[45]</sup>分别通过现场观测数据检验了该类型的参数化方案。他们得出了相似的结论: 在纯风浪情形或涌浪存在并不显著时, 以波龄或波陡为参数的模型相比仅以风速为参数的模型能更好地描述海气动量通量; 然而当涌浪显著存在时, 它们都不适用。涌浪通过压强向边界层中输送动量, 在湍流谱中诱导一个与涌浪同频率的谱峰。观测<sup>[46-47]</sup>显示这种影响可达数十米且谱峰远在惯性区间之外, 此时采用惯性耗散法计算的动量通量仅仅对应着风浪的贡献而不包含涌浪对边界层的影响。如 Pan 等<sup>[48]</sup>发现涌浪情况下的惯性耗散法和涡相关法计算得到的动量通量存在明显差别, 两种方法之差是涌浪波陡和波龄的函数<sup>[47, 49]</sup>。

鉴于涌浪存在下海气动量通量的参数化方法仍有很大的不确定性, 涌浪对海气动量通量的影响过程成为大家探讨的前沿热点问题。目前认为涌浪的影响机制主要有以下两种:

#### (1) 涌浪对风浪平衡域短波的调制作用

涌浪可以通过波浪轨道上流体质点的运动, 来调制风浪平衡域内短波粗糙度, 进而改变海气动量通量, 海气动量通量又反作用于风浪短波形成反馈, 形成海气界面的动力耦合过程<sup>[50-51]</sup>。García-Nava 等<sup>[52]</sup>通过现场观测和理论分析发现, 当涌浪与风相对传播时, 风浪短波平衡域能谱密度被抑制, 风应力相对于纯风浪情形明显减弱, 并且这一影响随着风速的增大而增大。随后 Potter<sup>[53]</sup>在另一海区也观测到相似的特征现象, 他的研究结果进一步表明, 这一影响与涌浪能量相对风浪能量的比例有关, 当涌浪能量两倍于风浪能量时, 风应力拖曳系数的量值差异可达 37%。在台风高海况情形下, 涌浪方向和强度特征存在明显的空间分布变化, 拖曳系数随涌浪特征呈现明显的空间变化<sup>[54]</sup>, 并且与风浪波龄、涌浪传播方向、水深等参量呈现相关性<sup>[18, 55]</sup>。

#### (2) 涌浪诱导的气流扰动

涌浪本身可以通过轨道运动诱导海表气流, 形成浪致应力, 对海气动量通量产生影响<sup>[56-57]</sup>。观测和理论研究结果表明<sup>[30, 58]</sup>, 当涌浪与海表风传播方向

相同并且涌浪传播相对较快时,涌浪可以在低层大气诱导形成气流扰动,加强表层风速并改变风速轮廓线分布,形成海洋向大气的动量输运;而如果涌浪与风向传播方向相反,则可能促进大气向海洋的动量输运。Pan 等<sup>[48]</sup>观测分析发现,涌浪与海表风相对传播时,涌浪增强了海气动量通量,这一影响与涌浪波陡、涌浪谱峰相速和风速有关;当涌浪与海表风切向传播时,可以使得风应力方向偏离风速方向<sup>[59]</sup>。上述研究认为涌浪的诱导作用机制主要存在于低风速(风速小于 5 m/s)、波龄较大的情形,然而近来有观测发现,在中等风速条件下(8~10 m/s),涌浪也可以对海气动量通量产生显著影响,这一影响与涌浪有效波高和波陡有关<sup>[47, 49]</sup>。

### 3 海流对海面风应力拖曳系数的影响

海流对风应力也会有一定的影响。Kara 等<sup>[60]</sup>研究了在全球大洋范围内海流和海浪对风应力拖曳系数的影响,在该研究中,风应力拖曳系数的计算考虑了海流流速和波浪的轨道速度与风速的相对速度。结果显示,考虑海面流的影响,可以使拖曳系数在全球范围内变化大概 2%左右。之后 Deng 等<sup>[61]</sup>采用同样的方法计算了考虑海流速度和波浪诱导的速度对海面风应力的影响。

### 4 结语

通过对比目前的研究可以发现,在高风速下,不同观测得出的结论虽有相似性,但却有很大不同,例如风应力拖曳系数达到最大时对应的风速不同,风应力拖曳系数的极值也不同,这些可能是由于地形、海浪等各种因素综合影响的结果。风应力拖曳系数会受风速、海流、海浪以及受海浪状态影响的飞沫的影响。同时 Zou 等<sup>[62]</sup>的研究显示,大气稳定度也是一个必须考虑的因素。但是由于缺乏台风这种高风速条件下的同步观测,各种计算方法在高风速条件下的适用性仍需进一步的探讨。

#### 参考文献:

[1] Jing Zhao, Wu Lixin. Seasonal variation of turbulent diapycnal mixing in the northwestern Pacific stirred by wind stress[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(23): L23604.  
[2] Peng Shiqiu, Xie Lian, Pietrafesa L J. Correcting the errors in the initial conditions and wind stress in storm surge simulation using an adjoint optimal technique[J].

*Ocean Modelling*, 2007, 18(3-4): 175-193.  
[3] Li Funing, Song Jinbao, He Hailun, et al. Assessment of surface drag coefficient parametrizations based on observations and simulations using the Weather Research and Forecasting model[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2016, 9(4): 327-336.  
[4] Jarosz E, Mitchell D A, Wang D W, et al. Bottom-up determination of air-sea momentum exchange under a major tropical cyclone[J]. *Science*, 2007, 315(5819): 1707-1709.  
[5] Zou Zhongshui, Zhao Dongliang, Tian Jiwei, et al. Drag coefficients derived from ocean current and temperature profiles at high wind speeds[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2018, 70(1): 1463805.  
[6] Wu Jin. Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions—A revisit[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(5): 727-740.  
[7] Donelan M A. Air-sea interaction[C]//Méhauté B L, Hanes D M. *The Sea: Ocean Engineering Science*. New York: Wiley-Interscience, 1990, 239-292.  
[8] Toba Y, Iida N, Kawamura H, et al. Wave dependence of sea-surface wind stress[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, 20(5): 705-721.  
[9] Smith S D, Anderson R J, Oost W A, et al. Sea surface wind stress and drag coefficients: The HEXOS results[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 60(1-2): 109-142.  
[10] Johnson H K, Højstrup J, Vested H J, et al. On the dependence of sea surface roughness on wind waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28(9): 1702-1716.  
[11] Taylor P K, Yelland M J. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(2): 572-590.  
[12] Zhao Dongliang. A note on wave state dependence of sea-surface roughness[C]//Proceedings of the Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002, 74-80.  
[13] Drennan W M, Graber H C, Hauser D, et al. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C3): 8062.  
[14] Guan Changlong, Xie Lian. On the linear parameterization of drag coefficient over sea surface[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(12): 2847-2851.  
[15] Gao Zhiqiu, Wang Qing, Wang Shouping. An alternative approach to sea surface aerodynamic roughness[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D22): D22108.  
[16] Liu Bin, Guan Changlong, Xie Lian. The wave state

- and sea spray related parameterization of wind stress applicable from low to extreme winds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C11): C00J22.
- [17] Bi Xueyan, Gao Zhiqiu, Liu Yanggang, et al. Observed drag coefficients in high winds in the near offshore of the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(13): 6444-6459.
- [18] Zhao Zhongkuo, Liu Chunxia, Li Qi, et al. Typhoon air-sea drag coefficient in coastal regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(2): 716-727.
- [19] Shi Jian, Zhong Zhong, Li Xunqiang, et al. The influence of wave state and sea spray on drag coefficient from low to high wind speeds[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2016, 15(1): 41-49.
- [20] Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones[J]. *Nature*, 2003, 422(6929): 279-283.
- [21] Rossby C G, Montgomery R B. The layer of frictional influence in wind and ocean currents[J]. *Physical Oceanography and Meteorology*, 1935, 3(3): 101.
- [22] Deacon E L. Aerodynamic roughness of the sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67(8): 3167-3172.
- [23] Alamaro M. Wind wave tank for experimental investigation of momentum and enthalpy transfer from the ocean surface at high wind speed[D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2001, 79.
- [24] Alamaro M, Emanuel K A, Colton J, et al. Experimental investigation of air-sea transfer of momentum and enthalpy at high wind speed[C]//25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego, CA: American Meteor Society, 2002, 2.
- [25] Donelan M A, Haus B K, Reul N, et al. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(18): L18306.
- [26] 赵中阔, 梁建茵, 万齐林, 等. 强风天气条件下海气动量交换参数的观测分析[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(6): 899-904.  
Zhao Zhongkuo, Liang Jianyin, Wan Qilin, et al. Observational analysis of air-sea momentum exchange in strong wind condition[J]. *Journal of Tropical Meteorology*. 2011, 27(6): 899-904.
- [27] French J R, Drennan W M, Zhang J A, et al. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part I: Momentum flux[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(4): 1089-1102.
- [28] Wang Wei, Huang Ruixin. Wind energy input to the surface waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(5): 1276-1280.
- [29] He Hailun, Chen Dake. Effects of surface wave breaking on the oceanic boundary layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(7): L07604.
- [30] Grare L, Lenain L, Melville W K. Wave-coherent airflow and critical layers over ocean waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2013, 43(10): 2156-2172.
- [31] Tamura H, Drennan W M, Sahlée E, et al. Spectral form and source term balance of short gravity wind waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(11): 7406-7419.
- [32] Charnock H. Wind stress on a water surface[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1955, 81(350): 639-640.
- [33] Charnock H. A note on empirical wind-wave formulae[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1958, 84(362): 443-447.
- [34] Garratt J R. Review of drag coefficients over oceans and continents[J]. *Monthly Weather Review*, 1977, 105(7): 915-929.
- [35] Stewart R W. The air-sea momentum exchange[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1974, 6(1-2): 151-167.
- [36] Masuda A, Kusaba T. On the local equilibrium of winds and wind-waves in relation to surface drag[J]. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, 1987, 43(1): 28-36.
- [37] Toba Y. Local balance in the air-sea boundary processes. I. On the growth process of wind waves[J]. *Journal of Oceanography*, 1972, 28(3): 109-121.
- [38] Makin V K. A note on the drag of the sea surface at hurricane winds[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 115(1): 169-176.
- [39] Jones I S F, Toba Y. *Wind Stress Over the Ocean*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [40] He Hailun, Wu Qiaoyan, Chen Dake, et al. Effects of surface waves and sea spray on air-sea fluxes during the passage of typhoon Hagupit[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(5): 1-7.
- [41] Gao Zhiqiu, Wang Qing, Zhou Mmingyu. Wave-dependence of friction velocity, roughness length, and drag coefficient over coastal and open water surfaces by using three databases[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(5): 887-894.
- [42] Wang Juanjuan, Song Jinbao, Huang Yansong, et al. On the parameterization of drag coefficient over sea surface[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(5): 68-74.
- [43] Pan Yuping, Sha Wenyu, Zhu Shouxian, et al. A new parameterization scheme for sea surface aerodynamic roughness[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(11): 1365-1373.
- [44] Drennan W M, Taylor P K, Yelland M J. Parameterizing the sea surface roughness[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(5): 835-848.

- [45] García-Nava H, Ocampo-Torres F J, Hwang P A. On the parameterization of the drag coefficient in mixed seas[J]. *Scientia Marina*, 2012, 76(S1): 177-186.
- [46] Soloviev Y P, Kudryavtsev V N. Wind-speed undulations over swell: field experiment and interpretation[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 136(3): 341-363.
- [47] Höglström U, Sahlée E, Smedman A S, et al. Surface stress over the ocean in swell-dominated conditions during moderate winds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, 72(12): 4777-4795.
- [48] Pan Jiayi, Wang D W, Hwang P A. A study of wave effects on wind stress over the ocean in a fetch-limited case[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C2): C02020.
- [49] Sahlée E, Drennan W M, Potter H, et al. Waves and air-sea fluxes from a drifting ASIS buoy during the Southern Ocean Gas Exchange experiment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C8): C08003.
- [50] Kudryavtsev V N, Makin V K. Coupled dynamics of short waves and the airflow over long surface waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C12): 3209.
- [51] Donelan M A, Haus B K, Plant W J, et al. Modulation of short wind waves by long waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C10): C10003.
- [52] García-Nava H, Ocampo-Torres F J, Hwang P A, et al. Reduction of wind stress due to swell at high wind conditions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C11): C00J11.
- [53] Potter H. Swell and the drag coefficient[J]. *Ocean Dynamics*, 2015, 65(3): 375-384.
- [54] Holthuijsen L H, Powell M D, Pietrzak J D. Wind and waves in extreme hurricanes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C9): C09003.
- [55] Donelan M A, Curcic M, Chen S S, et al. Modeling waves and wind stress[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C11): C00J23.
- [56] Kahma K K, Donelan M A, Drennan W M, et al. Evidence of energy and momentum flux from swell to wind[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(7): 2143-2156.
- [57] Zou Zhongshui, Zhao Dongliang, Zhang J A, et al. The influence of swell on the atmospheric boundary layer under nonneutral conditions[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, 48(4): 925-936.
- [58] Song Jinbao, Fan Wei, Li Shuang, et al. Impact of surface waves on the steady near-surface wind profiles over the ocean[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 155(1): 111-127.
- [59] Kudryavtsev V N, Makin V K. Impact of swell on the marine atmospheric boundary layer[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(4): 934-949.
- [60] Kara A B, Metzger E J, Bourassa M A. Ocean current and wave effects on wind stress drag coefficient over the global ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(1): L01604.
- [61] Deng Zengan, Zhao Dongliang, Wu Kejian, et al. Impacts of wave and current on drag coefficient and wind stress over the tropical and northern Pacific[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2008, 7(4): 373-378.
- [62] Zou Zhongshui, Zhao Dongliang, Liu Bin, et al. Observation-based parameterization of air-sea fluxes in terms of wind speed and atmospheric stability under low-to-moderate wind conditions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122(5): 4123-4142.

# Review of research on momentum flux through air-sea interface

FENG Xing-ru<sup>1, 2, 3</sup>, LI Shui-qing<sup>1, 2, 3</sup>, YIN Bao-shu<sup>1, 2, 3, 4</sup>

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Received:** Jul. 25, 2018

**Key words:** momentum flux; wind stress drag coefficient; parameterization method; ocean waves

**Abstract:** The momentum flux of the air-sea interface, also known as wind stress, is the main driving force of ocean currents and surface waves, and is an important mechanism by which the atmosphere conveys momentum to the ocean. Therefore, reasonable and reliable parameterization of the ocean surface wind stress has vital scientific significance and practical value for ensuring accurate predictions by ocean, atmosphere, wave, and climate models. The parameterization of the wind stress drag coefficient is the main factor in wind stress parameterization. Recent observations indicate that the wind stress drag coefficient increases at first and then decreases with increase in wind speed, and it is also related to the wave state of the sea and current. Based on the observation or theoretical analysis, a series of methods or formulas for calculating the drag coefficient of wind stress have been obtained. Some of these consider the effect of sea waves, and some do not, but most of these schemes are suitable for moderate and low wind speeds. However, their applicability at high wind speed remains undefined. In this paper, we review current research progress in the observation and parameterization of the sea-air momentum flux. Based on our findings, we suggest that the synchronous observation of wind speed, sea current, and sea waves should be conducted to further improve the parameterization of wind stress.

(本文编辑: 罗 璇 丛培秀)