

风浪状态对海面粗糙度影响*

史剑^{1,2} 蒋国荣¹

(1. 解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101; 2. 解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室 南京 210007)

摘要 风浪状态参数常用于对海面粗糙度的参数化。中等风速条件下考虑风浪状态参数影响的海面粗糙度参数化方案常存在自相关效应, 本文通过分析实测数据得到了无量纲粗糙度随波陡变化的参数化方案, 该方案能够有效去除自相关效应; 高风速下风浪状态对海面粗糙度仍存在影响, 文中基于新得出的中等风速下的海面粗糙度参数化方案, 考虑海面飞沫悬浮层的影响, 建立了适用于高风速条件下的海面粗糙度参数化方案, 该海面粗糙度方案同样考虑了波陡的作用, 将该方案计算出的理论值与实测数据进行比对, 发现随着波陡的变化, 理论值基本涉及测量值的覆盖范围, 说明新建立的高风速条件下海面粗糙度方案对海面风浪状态具有较好的敏感性, 且该方案能够较合理地描述海气界面之间动量传输。将新提出的适用于高风速下的海面粗糙度方案加入到海浪数值模式中, 模拟飓风 Ivan 产生的台风浪, 利用浮标数据进行验证, 结果显示模拟的有效波高相对模式默认方案具有较高的精度, 说明采用本文新建立的适合高风速的海面粗糙度方案能够改进海浪模式的台风浪有效波高模拟结果。

关键词 风浪状态; 海面粗糙度; 高风速条件

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20150700185

海面粗糙度是海气界面过程研究的重要参数, 准确地估计海面粗糙度对模拟和预报海洋、大气环境要素和现象非常重要。波浪状态对海面粗糙度产生影响, 由于测量的局限性, 海浪状态对海面粗糙度的影响研究起初在中低风速条件下开展(Guan *et al.*, 2004; Shi *et al.*, 2011)。目前, 运用在海浪数值模式和通量算法中的海面粗糙度均为中等风速条件下得出(Tolman *et al.*, 1996; Fairall *et al.*, 2003; Smith *et al.*, 2014)。Charnock(1955)在空气动力学粗糙度的基础上提出了无量度粗糙度, 或称 Charnock 数, 科学家们经过研究认为 Charnock 数与风浪状态有密切的关系, 但该类型海面粗糙度考虑风浪状态的参数化方案一直存在争论, Donelan(1990)和 Drennan 等(2003)认为 Charnock 数随波龄的增加而减小, 而 Toba 等(1990)认为 Charnock 数随波龄的增加而增大。

此外, 采用何种风浪参数对中等风速条件下的海面粗糙度进行参数化也存在一定争议, Masuda 等(1987)提出用波龄对无量纲粗糙度进行参数化,

Taylor 等(2001)提出了一个新的利用波陡参数的无量纲粗糙度参数化方案。最近, Guan 等(2004)认为相对波龄、波陡参数能更好地描述中低风速下拖曳系数。Shi 等(2011)利用现有实验室和外海测量数据详细分析了各种风浪参数对海面拖曳系数的参数化能力。可见, 风浪状态与中等风速下海面粗糙度之间的确存在关系, 但其关系的确定性存在争议, 特别是采用何种风浪参数还需进一步的研究。

随着风速增加, 海面产生飞沫水滴, 影响海气界面处各种物理过程(Zhao *et al.*, 2006; 赵栋梁, 2012; 史剑等, 2013; Soloviev *et al.*, 2014)。Powell 等(2003)指出海面粗糙度在风速大于 40m/s 时粗糙度的值相对 Charnock(1955)的值小。Moon 等(2007)采用海浪边界层模式来研究台风条件下海浪对海气动量通量的影响, 结果表明风速大于 30m/s 时海面粗糙度的值小于飓风模式中的值。高风速下海浪状态依然影响着海面粗糙度, Shi 等(2009)利用新的飞沫生成函数重新计算了海气界面的动量通量, 指出在风速大于 30m/s 时

* 江苏省自然科学基金项目, BK20131066 号; 国家自然科学基金项目, 41106014 号。史剑, 博士, E-mail: seairing@163.com
收稿日期: 2015-07-15, 收修改稿日期: 2015-08-30

海气之间的动量通量依然受海浪状态的影响。刘斌(2007)推导出高风速下依赖波龄的海面粗糙度参数化方案, 并指出 Powell 等(2003)和 Donelan 等(2004)测量的高风速下海面拖曳系数和粗糙度值相对离散, 这主要是风浪引起。因此, 在高风速条件下风浪状态对海面粗糙度的影响不可忽视。

1 海面粗糙度参数化方案

1.1 中等风速下海面粗糙度参数化方案

Charnock 数为常数意味着海面粗糙度只与风速有关(Charnock, 1955), 即只考虑了风向海洋中输入能量, 而忽略了构成海表面粗糙元的风浪。自由海面风浪的起伏, 影响贴近海表面的空气动力场, 改变海气界面处的动量通量。因此, 不仅海面风速会影响海面粗糙度, 风浪状态同样会影响海面粗糙度的大小。

Masuda 等(1987)提出了关于 Charnock 数与波龄关系的一种简单的广义形式,

$$\frac{gz_0}{u_*^2} = A \left(\frac{C_p}{u_*} \right)^B \quad (1)$$

其中 $\frac{gz_0}{u_*^2}$ 为 Charnock 数, 常用 α 表示; A 和 B 是回

归系数, $\frac{C_p}{u_*}$ 被称为波龄参数, 常表示为 β_* (通常

$\frac{C_p}{U_{10}}$ 也被称为波龄, 用 β 表示)。

研究者们指出式(1)存在自相关效应(Drennan *et al.*, 2003, Shi *et al.*, 2011), 因为在方程两边均存在摩擦速度 u_* , 并且摩擦速度 u_* 的变化要比 C_p 的变化快, 所以该方程表示的波龄随无量纲粗糙度变化趋势很有可能主要是 u_* 的变化造成的。为了克服这种由于摩擦速度 u_* 产生的缺点, Donelan(1990)提出了一个新的参数-均方根波高 σ 来无量纲化海面粗糙度,

$$\frac{z_0}{\sigma} = A \left(\frac{C_p}{u_*} \right)^B \quad (2)$$

另有研究者利用有效波高 H_s 变量来无量纲化海面粗糙度(Drennan *et al.*, 2003),

$$\frac{z_0}{H_s} = A \left(\frac{C_p}{u_*} \right)^B \quad (3)$$

在式(2)和式(3)中, 在采用均方根波高和有效波高对海面粗糙度进行无量纲化时, 由于波高随着波龄的增加而增加, 则无量纲粗糙度必定会随波龄的增加而减小, 因此, 无量纲海面粗糙度随波龄的变化

中波高起到了一定的作用。

Taylor 等(2001)提出了一个新的无量纲粗糙度参数化方案, 该方案利用波陡进行参数化,

$$\frac{z_0}{H_s} = A \left(\frac{H_s}{L_p} \right)^B \quad (4)$$

其中, L_p 是海浪谱峰对应的波长, $\frac{H_s}{L_p}$ 为风浪参数波陡, 常以 δ 表示。

式(4)依然利用有效波高对海面粗糙度进行参数化, 公式两边均存在有效波高参数, 存在自相关效应, 也就是说, Taylor 等(2001)提出的由波高无量纲化的粗糙度随波陡参数的变化中波高也有贡献。对(2)、(3)和(4)式的分析表明, 由波高对粗糙度进行无量纲化均可能存在虚假的自相关效应。

综上所述, 风浪状态对海面粗糙度的影响是客观存在的, 但无量纲海面粗糙度和风浪参数的参数化关系存在诸多不完善, 为避免自相关效应的影响, 本文建议海面粗糙度参数化方案采用式(5),

$$\frac{gz_0}{u_*^2} = f \left(\frac{H_s}{L_p} \right) \quad (5)$$

由于式(5)左右两边没有完全相同的参数, 以该形式进行海面粗糙度参数化, 不存在自相关效应。

1.2 高风速条件下海面粗糙度参数化方案

Makin(2005)给出了适用于高风速条件下的海面粗糙度,

$$z_0 = c^{1-1/\omega} \alpha^{1/\omega} \frac{u_*^2}{g} \quad (6)$$

其中 $c = gh/u_*^2$ 与飞沫层厚度 h 有关的参数, 可看作无量纲的飞沫层厚度, α 为 Charnock 数, ω 为飞沫层中对数风廓线的修正参数, $\omega=1$ 时说明飞沫对海面粗糙度无影响, ω 越小则飞沫层对海面粗糙度的影响越大。将式(5)中 Charnock 数代入式(6)中, 可以得到考虑波陡影响的海面粗糙度,

$$z_0 = c^{1-1/\omega} \alpha(\delta)^{1/\omega} \frac{u_*^2}{g} \quad (7)$$

其中, $c = h \frac{g}{u_*^2}$ 为与飞沫层厚度 h 相关的参数。

Makin(2005)认为飞沫层厚度 h 为有效波高的十分之一, 于是,

$$c = \frac{H_s}{10} \frac{g}{u_*^2} \quad (8)$$

引入 Toba(1972)的 3/2 指数律关系,

$$H_* = B_* T_*^{3/2} \tag{9}$$

其中, $H_* = gH_s/u_*^2$, $T_* = gT_s/u_*$, $B_* = 0.062$, H_s 为有效波高, T_s 为有效波周期, 基于有效周期和谱峰周期的转换关系, 得到,

$$T_s = 0.91 \times 2\pi / \omega_p \tag{10}$$

结合式(8)、(9)和(10), 得到风浪条件下 c 与波陡参数之间的关系,

$$c = 5.15 \times 10^{-2} \delta^{-3} \tag{11}$$

由此, 可得到能够适用于高风速条件下的, 考虑风浪状态影响的海面粗糙度参数化方案,

$$z_0 = (5.15 \times 10^{-2} \delta^{-3})^{1/\omega} \alpha(\delta)^{1/\omega} \frac{u_*^2}{g} \tag{12}$$

式(12)充分考虑了飞沫悬浮层影响, 是式(6)在高风速条件下的应用, 下一节中将利用实测数据对式(12)中考虑波陡参数影响的 Charnock 数 $\alpha(\delta)$ 进行参数化, 并确定 ω 的取值, 从而得到适于高风速条件下的海面粗糙度的具体表达形式。

2 结果与分析

2.1 基于测量测数据参数化海面粗糙度

为了确定(12)式中的 $\alpha(\delta)$ 的具体形式, 本文选取实验室和海外测量数据 9 个数据集进行参数化, 来自实验室的数据有 Hamada(1963)、Toba(1972)、Kunish(1963)、Kunish 等(1966)、Banner 等(1998), 来自海外观测数据有 Kastaros 等(1992)、Geernaert 等(1986)、Janssen(1997)、Johnson 等(1998)。利用最小二乘法对资料进行分析处理, 如图 1 所示。

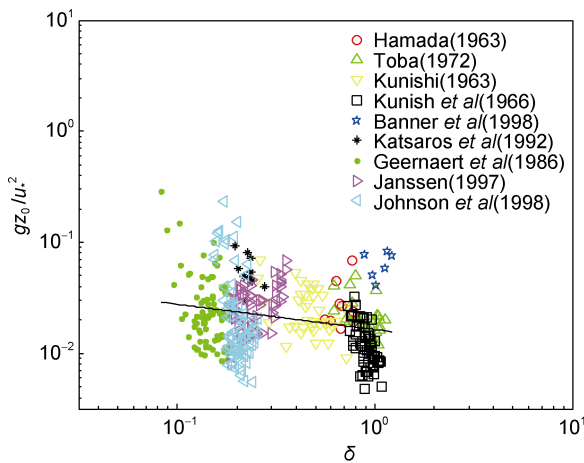


图 1 无量纲海面粗糙度 gz_0/u_*^2 与波陡参数 δ 的关系
Fig.1 Relationship between dimensionless sea surface roughness gz_0/u_*^2 and wave slope parameter δ

经过分析, 得到无量纲粗糙度 gz_0/u_*^2 与波陡参数 δ 的参数化关系式为,

$$\alpha(\delta) = \frac{gz_0}{u_*^2} = 0.01\delta^{-0.24} \tag{13}$$

式(13)为中等风速下的无量纲粗糙度参数化方案, 由公式可知无量纲海面粗糙度随着波陡的增加而减小, 文中将该方案简称为 S15M。为了检验 S15M 参数化方案的准确程度, 以下将利用块体算法 COARE (Fairall *et al*, 2003)和 FETCH 试验数据(Drennan *et al*, 2003)对式(13)计算的摩擦速度进行验证。验证试验中利用 COARE 算法中集成的 Taylor 等(2001)(简称 T01)、Oost 等(2002)(简称 O02)提出的两种依赖风浪状态的海面粗糙度参数化方案进行比对, 以评估 S15M 计算海气通量的效果, 其中, T01 方案具体形式如下,

$$z_0/H_s = 1200(H_s/L_p)^{4.5} \tag{14}$$

O02 方案的具体形式如下:

$$z_0/L_p = 25/\pi(u_*/C_p)^{4.5} \tag{15}$$

图 2 显示了 COARE 算法采用三种无量纲粗糙度参数化方案计算出的海面摩擦速度与测量值的散点对比情况。从图中可初步判断, O02 方案计算出的结果与测量结果相差最大, T01 和 S15 接近。

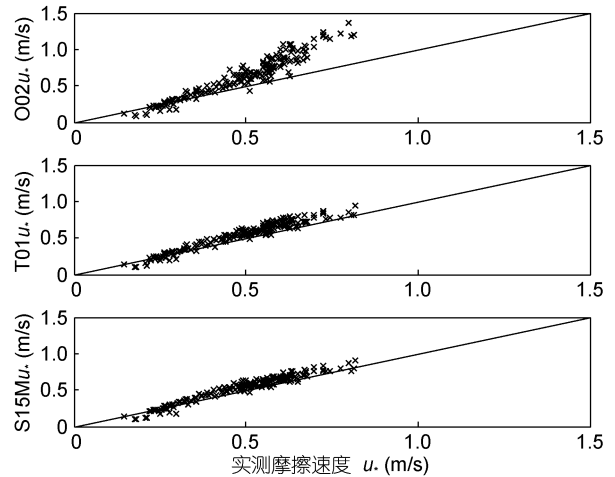


图 2 计算出的海面摩擦速度(实线)与测量得到的海面摩擦速度(x号的对比
Fig.2 Calculation (solid line) and observation (symbol x) of sea surface friction velocity

为了定量分析计算结果的误差, 本文选择三个统计误差进行分析, 即均方根误差 Root Mean Square Error(RMSE)、平均绝对误差 Mean Absolute

Error (MAE)、平均相对误差 Mean Relative Error(MRE), 以及相关系数 Correlation coefficient (CC), 如表 1 所示, RMSE 表示为 E_{RMSE} , MAE 表示为 E_{MAE} , MRE 表示为 E_{MRE} , CC 表示为 R 。

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2} \quad (16)$$

$$E_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - B_i| \quad (17)$$

$$E_{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - B_i}{B_i} \right| \quad (18)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (B_i - \bar{B})^2}} \quad (19)$$

其中, A_i 是 B_i 的估计值。

表 1 COARE 算法采用三种无量纲海面粗糙度方案计算出的海面摩擦速度的误差统计

Tab.1 Statistics of error in sea surface roughness friction velocity calculated by COARE algorithm in three dimensionless sea surface roughness schemes

误差名称	方案名称		
	O02	T01	S15M
$E_{RMSE}(m/s)$	0.2120	0.0770	<u>0.0609</u>
$E_{MAE}(m/s)$	0.1483	0.0537	<u>0.0388</u>
$E_{MRE}(\%)$	29.41	13.19	<u>10.90</u>
R	<u>0.9607</u>	0.9356	0.9362

表 1 列出三种海面粗糙度计算出的海面摩擦速度值误差, 其中下划线表示为三个方案中最优结果。由表可知三种误差 S15M 方案表现最好, 而它的相关系数较 O02 方案差, 但 O02 方案的其他三种误差均最差。因此认为, S15M 方案总体上要比 COARE 算法中的 O02 和 T01 更加适合计算海气之间动量通量。

2.2 高风速下海浪状态对海面粗糙度的影响

将参数化得到的式(13)代入式(12), 可以得到适用于高风速下的海面粗糙度具体表达形式,

$$z_0 = (5.15 \times 10^{-2} \delta^{-3})^{1-1/\omega} (0.01 \delta^{-0.24})^{1/\omega} \frac{u_*^2}{g} \quad (20)$$

现将式(20)简称为 S15H 方案, S15H 方案充分考虑了波陡对海面粗糙度的影响, 其中 ω 函数来源于 Barenblatt(1979)的理论, 当风速较高时, 海面上方由于飞沫水滴的存在会形成一个飞沫悬浮层, 该飞沫悬浮层中的风速分布可表达为,

$$u(z) = \left(\frac{u_*}{\kappa \omega} \right) \ln \frac{z}{z'_0} \quad (21)$$

其中, ω 函数满足 $\omega = \frac{a}{\kappa u_*} < 1$; a 为飞沫水滴下落末速度; $\kappa(=0.4)$ 是 von Karman 常数; 边界条件 $u(z = z'_0) = 0$, z'_0 是飞沫悬浮层中的局地粗糙长度。

$\frac{u_*}{\kappa \omega}$ 是飞沫悬浮层中风廓线的斜率。Barenblatt(1979)认为当 $\omega = 1$ 时, $z'_0 = z_0$, 海面飞沫悬浮层中飞沫水滴的影响可以忽略, 此时上式(21)变为经典风廓线理论公式,

$$u(z) = \left(\frac{u_*}{\kappa} \right) \ln \frac{z}{z_0} \quad (22)$$

Makin(2005)认为 $\omega = \min(1, a_{cr} / \kappa u_*)$, a_{cr} 是指在飞沫水滴开始对海面粗糙度产生影响时的飞沫水滴下落末速度, 其根据 Powell 等(2003)的观测数据确定其估计值为 0.64m/s, Makin(2005)认为这是一个貌似合理的值, 因为该值对应的仅仅是初始半径为 80 μ m 的飞沫水滴。为增强 a_{cr} 取值的理论支撑, 本文采用 Andreas(1990)给出的飞沫水滴在接近海面时的下落末速度与飞沫水滴初始半径的关系式(23)计算 a_{cr} ,

$$a_{cr} = \frac{2r_0^2 g}{9\nu_a [1 + 0.158(2r_0 a_{cr} / \nu_a)^{2/3}] \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} - 1 \right)} \quad (23)$$

其中, r_0 是飞沫初始半径, ρ_s 是海水密度, ρ_a 是大气密度, $\nu_a = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 是空气运动学粘性系数。采用牛顿迭代法对水滴接近海面时的下落末速度与水滴初始半径的关系进行计算, 当飞沫水滴初始半径为 80 μ m 时, 可以得到 a_{cr} 的值为 0.72m/s。由此可以得到 S15H 方案的完整表达形式。

图 3 显示了不同波陡条件下海面粗糙度 z_0 随摩擦速度 u_* 的变化情况, 图中带有误差条的圆圈数值由 Powell 等(2003)中的图 3a 和图 3b 得来, 考虑图 3a 中风速对应的摩擦速度值误差相对较小, 在处理过程中暂不考虑这种误差带来的影响。由图 3 可知, Makin(2005)提出的粗糙度参数化方案没有考虑风浪状态对海面粗糙度的影响, 式(20)在此基础上有了改进, 在不同波陡条件下基本能够涉及 Powell 等(2003)的实测海面粗糙度值的覆盖范围, 说明式(20)充分考虑了波浪状态的影响。海面粗糙度在摩擦速度为 1.8m/s, 对应 Powell 等(2003)测量的风速约为 33m/s 左右时, 之后由于飞沫作用随着风速的增加, 导致海面粗糙度开始减小。

值得注意的是, 在出现粗糙度最大值之前, 若风速确定, 海面粗糙度随着波陡的增加而减小; 在粗糙度最大值之后, 若风速一定, 经过一个狭窄的过渡区, 海面粗糙度随着波陡增加而增大。由于波陡和波龄存在负相关关系, 这一现象也可以用对应的波龄解释。

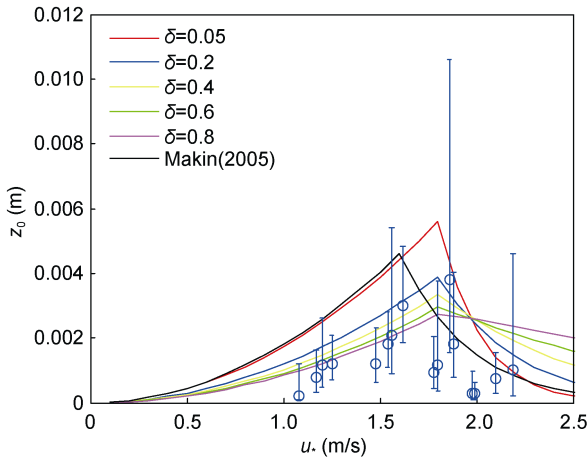


图 3 海表面粗糙度与海面摩擦速度的关系。各彩色实线为不同波陡时 S15H 方案的值, 黑色实线为 Makin (2005) 的值, 带有误差条的圆图为 Powell 等(2003) 测量值

Fig.3 Relationship between sea surface roughness and sea surface friction velocity. Color lines represent the S15H results of different wave slopes; black line indicates the roughness in Makin (2005). The cycles with error bar represent the observational data in Powell *et al* (2003)

2.3 海面粗糙度对台风浪数值模拟影响

为了进一步检验 S15H 参数化方案的适用性, 将该方案加入到海浪数值模式 WAVEWATCH III (Tolman *et al*, 1996) 中进行台风浪模拟。选取的个例为 2004 年的飓风 Ivan。Ivan 生存时间较长、路径复杂, 选取其由南向北经过墨西哥湾的时段进行研究。如图 4 所示, Ivan 在 2004 年 9 月 14 日 0 时左右进入墨西哥湾, 16 日 8 时左右登陆美国。

用以验证模拟的台风浪要素的数据采用美国国家浮标数据中心 National Data Buoy Center (NDBC) 提供的浮标资料, 由于部分公开的浮标站在 2004 年 9 月 14 日至 2004 年 9 月 16 日期间较多数据缺测, 因此仅选取 42019、42036、42038、42039 四个浮标数据。如图 4 所示, 五角星所示为这 4 个浮标的位 置, 它们分布在飓风移动路径的两侧。

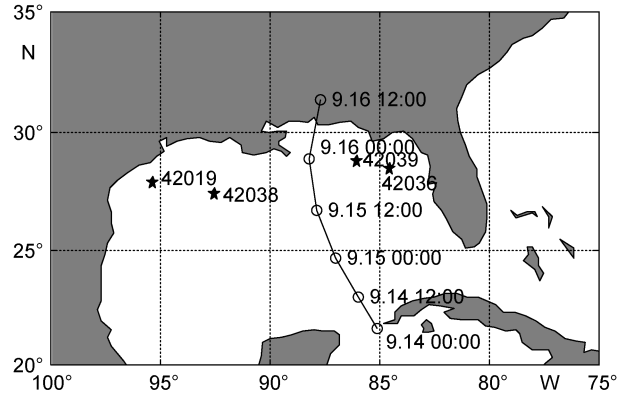


图 4 飓风 Ivan 的移动路径和浮标位置

Fig.4 The trajectory of Hurricane Ivan and the buoy (stars) locations

本文采用美国飓风研究部 Hurricane Research Division (HRD) 热带气旋观测系统的高分辨率风场, 该风场时间分辨率为 3—6h, 空间分辨率为 6km×6km, 该数据已被 Moon 等(2007)、Fan 等(2009)证明该台风风场不存在被低估的现象, 但该风场数据覆盖的范围仅为围绕台风中心 8°×8°。为了充分考虑外围风场产生的海浪的影响, 外围风场采用 QSCAT/NCEP 混合风场, 该混合风场空间分辨率为 0.5°×0.5°, 时间间隔为 6h, 覆盖了 0°—360°E、88°S—88°N 的范围。将这两个组合的风场在时、空上进行插值(Fan *et al*, 2009), 构建时间分辨率为 15min 的混合风场, 以驱动海浪模式模拟台风浪。文中具体的试验方案设计如表 2 所示, 其中 T96 方案为 WAVEWATCH III 模式中默认方案, M05 方案为 Makin(2005)提出的粗糙度参数化方案。

表 2 试验方案
Tab.2 Experimental designs

试验编号	试验概述
EXP1	采用 T96 方案进行台风浪模拟
EXP2	采用 S15H 方案进行台风浪模拟
EXP3	采用 M05 方案进行台风浪模拟

HRD 热带气旋观测系统提供的 Ivan 飓风高分辨率风场资料的时间范围是 2004 年 9 月 14 日 21 时至 16 日 15 时。由于时间较短, 文中利用 2004 年 9 月 13 日 0 时至 14 日 21 时的 QSCAT/NCEP 混合风场启动模式。

表 3 中, 有下划线的数据表示为三个试验中最优结果。由表可知, 试验 EXP2 中的各种误差值与试验 EXP3 的较接近, 但各种误差的最优值在试验 EXP2 中最多, 表明相对其他 2 个海面粗糙度方案, 试验

EXP2 中的 S15H 海面粗糙度参数化方案能够较好地模拟飓风 Ivan 的台风浪有效波高, 同时说明在模拟

台风浪时应尽量采用考虑风浪状态影响的海面粗糙度方案。

表 3 EXP1 至 EXP3 试验模拟出的有效波高误差统计
Tab.3 Statistics of error in significant wave height simulated in experiments EXP1 to EXP3

名称	误差名称	浮标名称			
		42019	42036	42038	42039
EXP1	$E_{RMSE}(m)$	0.367	0.72	1.22	2.40
	$E_{MAE}(m)$	0.46	0.78	0.97	1.35
	$E_{MRE}(\%)$	19.29	17.52	29.84	18.44
EXP2	$E_{RMSE}(m)$	0.13	0.32	0.62	0.73
	$E_{MAE}(m)$	0.32	0.43	0.61	0.67
	$E_{MRE}(\%)$	13.20	11.33	19.59	11.35
EXP3	$E_{RMSE}(m)$	0.15	0.34	0.58	0.82
	$E_{MAE}(m)$	0.31	0.50	0.66	0.72
	$E_{MRE}(\%)$	13.79	11.90	21.06	11.57

3 讨论

考虑海面粗糙度与海面拖曳系数 C_d 存在一一对应的关系(Makin, 2005),

$$C_d = \kappa^2 \left(\ln \frac{z}{z_0} \right)^{-2} \quad (24)$$

因此, 基于式(24)可将海面粗糙度转化为海面拖曳系数, 通过分析海面拖曳系数随风速的变化, 进一步确认本文提出的海面粗糙度参数化方案的合理性。图 5 所示为由式(24)计算出的不同波陡条件下海面拖曳系数随风速的变化关系。

不同条件下测量的海面拖曳系数存在一定程度的离散, 由图 5 可知, 式(24)在不同波陡条件下均能够涉及这些离散点, 说明波浪状态对海面拖曳系数存在影响, 且在风速达到 30—40m/s 时海面拖曳系数发生衰减, 该结论与 Powell 等(2003)相似。波浪状态与海面拖曳系数的关系在图 5 中与图 3 类似, 即当风速小于 40m/s 时, 海面拖曳系数随波陡参数增大而减少, 当风速大于 40m/s 时海面拖曳系数随波陡参数增大而增大, 说明波浪状态与海面粗糙度或拖曳系数的关系随着风速增加会发生变化, 产生这一现象主要原因是由于当风速达到一定值时, 波浪破碎产生飞沫水滴的作用明显增强, 并且飞沫水滴随波龄增加, 抑制了波浪对海面粗糙度或海面拖曳系数的影响, 最终使得海面粗糙度或海面拖曳系数随波龄的增加而减小(史剑等, 2013), 对应为海面粗糙度或海面拖曳系数随波陡的增加而增大。

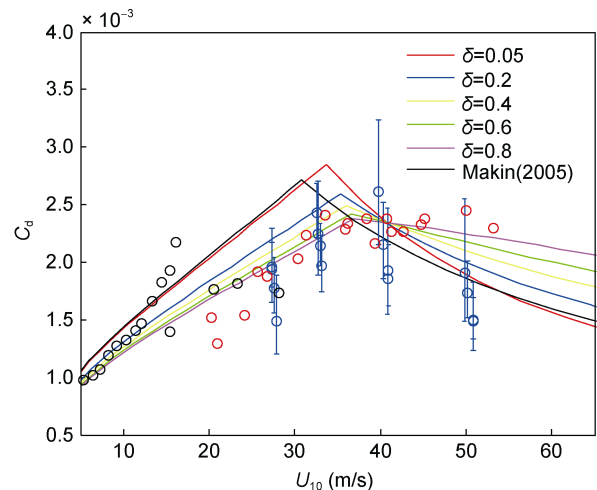


图 5 海表面拖曳系数与风速的关系

彩色实线为不同波陡时 S15H 方案的值, 黑色实线为 Makin(2005) 的值, 带有误差条的蓝色圆圈为 Powell 等(2003)测量值, 红色圆圈为 Donelan 等(2004)测量值, 黑色圆圈为 Black 等(2007)测量值

Fig.5 Relationship between sea surface drag coefficient and wind speed

Color lines represent the S15H results of different wave slopes. The black line is the roughness in Makin (2005). Blue cycles with error bar indicate the observation of Powell *et al* (2003), red ones for Donelan *et al* (2004), and black ones for Black *et al* (2007)

4 结论

本文通过理论分析, 发现采用波陡参数对海面粗糙度参数化能够有效避免自相关现象, 并基于外海和实验室测量数据, 得到了中等风速条件下的无量纲海面粗糙度与波陡的关系式 S15M。利用块体算法 COARE 和 FETCH 试验数据对 S15M 方案进行验

证, 结果显示该方案计算海面摩擦速度较块体算法 COARE 默认的两个依赖波浪状态的海面粗糙度参数化方案更好, 说明 S15M 方案能够很好地计算出中等风速条件下海气界面的动量通量。

在中等风速下海面粗糙度关系式 S15M 的基础上, 考虑飞沫悬浮层的影响, 建立了适用于高风速条件下的海面粗糙度参数化方案 S15H, 该粗糙度方案同样采用波陡参数进行参数化, 基于此考虑了风浪状态的影响。文中分析了 S15H 在不同波陡条件下海面粗糙度随摩擦速度变化的规律, 以及由 S15H 得到的海面拖曳系数随风速的变化规律, 发现在未出现飞沫时, 海面粗糙度随着波陡的增大而减小, 但当出现飞沫后, 海面粗糙度逐渐随着波陡增大而增大。将理论值与测量数据进行比对, 发现 S15H 方案相对于经典的海面粗糙度 M05 方案有了明显改进, 计算值随着波陡的变化基本涉及测量值覆盖范围, 说明高风速条件下海面粗糙度需要考虑风浪状态的影响。将 S15H 方案加入 WAVEWATCH 模式中, 模拟 Ivan 飓风产生的台风浪有效波高, 结果较采用海浪模式默认方案和 M05 方案更接近测量值, 说明将 S15H 方案运用到海浪模式中进行台风浪模拟具有一定的可靠性。

参 考 文 献

- 史 剑, 周 林, 杨隆颖, 2013. 高风速下海洋飞沫水滴对拖曳系数的影响. *物理学报*, 62(3): 39201
- 刘 斌, 2007. 大气-海浪耦合模式的物理基础及数值研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 27—29
- 赵栋梁, 2012. 海洋飞沫及其对海-气相互作用影响的研究进展. *地球科学进展*, 27(6): 624—632
- Andreas E L, 1990. Time constants for the evolution of Sea spray droplets. *Tellus*, 42(5), doi: 10.1034/j.1600-0889.1990.t01-3-00007.x
- Banner M L, Peirson W L, 1998. Tangential stress beneath wind-driven air-water interfaces. *J Fluid Mech*, 364, 115—145
- Barenblatt G I, 1979. *Similarity, Self-Similarity and Intermediate Asymptotics*. New York, USA: Consultants Bureau Press, 218
- Black P G, D'Asaro E A, Sanford T B *et al*, 2007. Air-Sea exchange in hurricanes: synthesis of observations from the coupled boundary layer air-Sea transfer experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 88(3): 357—374
- Charnock H, 1955. Wind stress on a water surface. *Quart J Roy Meteor Soc*, 81(350): 639—640
- Donelan M A, 1990. Air-Sea interaction. In: Le Mehaute B, Hanes D M eds. *The Sea: Ocean Engineering Science*. New York, USA: Wiley-Interscience Press, 239—292
- Donelan M A, Haus B K, Reul N *et al*, 2004. On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. *Geophys Res Lett*, 31(18): L18306
- Drennan W M, Graber H C, Hauser D *et al*, 2003. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas. *J Geophys Res*, 108(C3): 8062
- Fairall C W, Bradley E F, Hare J E *et al*, 2003. Bulk parameterization of air-Sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm. *J Climate*, 16(4): 571—591
- Fan Y L, Ginis I, Hara T *et al*, 2009. Numerical simulations and observations of surface wave fields under an extreme tropical cyclone. *J Phys Oceanogr*, 39(9): 2097—2116
- Geernaert G L, Katsaros K B, Richter K, 1986. Variation of the drag coefficient and its dependence on Sea state. *J Geophys Res*, 91(C6): 7667—7679
- Guan C L, Xie L, 2004. On the linear parameterization of drag coefficient over Sea surface. *J Phys Oceanogr*, 34(12): 2847—2851
- Hamada T, 1963. An experimental study of development of wind waves. *Rep Port Harbour Tech Res Inst*, 2: 1—41
- Janssen J A M, 1997. Does wind stress depend on Sea-state or not? -a statistical error analysis of HEXMAX data. *Boundary-Layer Meteorol*, 83(3): 479—503
- Johnson H K, Højstrup J, Vested H J *et al*, 1998. On the dependence of Sea surface roughness on wind waves. *J Phys Oceanogr*, 28(9): 1702—1716
- Katsaros K B, Atakturk S S, 1992. Dependence of wave breaking statistics on wind stress and wave development. In: Banner M L, Grimshaw R H J eds. *Breaking Waves, Proc. IUTAM Symposium*. Sydney, Australia: Springer-Verlag Press, 119—132
- Kunish H, 1963. An experimental study on the generation and growth of wind waves. *Bull Disas Prev Res Inst Kyoto Univ*, 61: 1—41
- Kunish H, Imasato N, 1966. On the growth of wind waves by high-speed wind flume. *Bull Disas Prev Res Inst. Kyoto Univ, Annals*, 9: 1—10
- Makin V K, 2005. A note on the drag of the Sea surface at hurricane winds. *Boundary-Layer Meteorol*, 115(1): 169—176
- Masuda A, Kusaba T, 1987. On the local equilibrium of winds and wind-waves in relation to surface drag. *J Oceanogr Soc Japan*, 43(1): 28—36
- Moon I-J, Ginis I, Hara T *et al*, 2007. A physics-based parameterization of air-Sea momentum flux at high wind speeds and its impact on hurricane intensity predictions. *Mon Wea Rev*, 135(8): 2869—2878
- Oost W A, Komen G J, Jacobs C M J *et al*, 2002. New evidence for a relation between wind stress and wave age from measurements during ASGAMAGE. *Boundary-Layer Meteorol*, 103(3): 409—438
- Powell M D, Vickery P J, Reinhold T A, 2003. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. *Nature*, 422(6929): 279—283
- Shi J, Zhao D L, Li X Q *et al*, 2009. New wave-dependent formulae for Sea spray flux at air-Sea interface. *J Hydrodyn*, 21(4): 573—581
- Shi J, Zhong Z, Li R J *et al*, 2011. Dependence of Sea surface drag coefficient on wind-wave parameters. *Acta Oceanol Sin*, 30(2): 14—24
- Smith R K, Montgomery M T, Thomsen G L, 2014. Sensitivity of tropical-cyclone models to the surface drag coefficient in different boundary-layer schemes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(680): 792—804
- Soloviev A V, Lukas R, Donelan M A *et al*, 2014. The air-Sea

- interface and surface stress under tropical cyclones. *Sci Rep*, 4: 5306, doi: 10.1038/srep05306
- Taylor P K, Yelland M J, 2001. The dependence of Sea surface roughness on the height and steepness of the waves. *J Phys Oceanogr*, 31(2): 572—590
- Toba Y, 1972. Local balance in the air-Sea boundary processes: I. on the growth process of wind waves. *J Oceanogr Soc Japan*, 28(3): 109—120
- Toba Y, Iida N, Kawamura H *et al*, 1990. The wave dependence of sea-surface wind stress. *J Phys Oceanogr*, 20(5): 705—721
- Tolman H L, Chalikov D, 1996. Source terms in a third-generation wind wave model. *J Phys Oceanogr*, 26(11): 2497—2518
- Zhao D L, Toba Y, Sugioka K-I *et al*, 2006. New Sea spray generation function for spume droplets. *J Geophys Res*, 111(C2): C02007, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JC002960/pdf>

THE INFLUENCE OF WIND WAVE STATE ON SEA SURFACE ROUGHNESS

SHI Jian^{1, 2}, JIANG Guo-Rong¹

(1. *College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*; 2. *State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China*)

Abstract Wind wave parameters are often used to calculate the sea surface roughness. In a moderate wind speed condition, there is an auto-correlation effect in sea surface roughness parameterization scheme when wind wave state is considered. We developed a dimensionless roughness parameterization scheme in relation to wave slope parameter with observational data, in which the auto-correlation effect can be avoided. In high wind speed however, wave state can still affect sea surface roughness. In the new parameterization scheme in consideration of spray suspension layer at surface, a new sea surface roughness can be used in high-wind speed condition, and parameterized by wave slope parameter too. The theoretical sea surface roughness and observational data agree largely with each other, indicating sensitivity of sea surface roughness to wind wave state. The new scheme can describe momentum flux at air-sea interface more reasonably. We applied the scheme in high wind speed status and integrated it into a wave model, with which typhoon wave generated from hurricane Ivan was modeled. Comparison to buoy data, the modeled significant wave height matched well. Therefore, the new scheme can improve typhoon wave height simulation in a wave model.

Key words wind wave state; sea surface roughness; high wind speed condition