

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201901048

台风风场简化理论模型的对比研究*

裴正南^{1,2}, 李孙伟¹, 李 炜³

(1. 清华大学深圳研究生院海洋科学与技术学部, 广东 深圳 518055; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 台风风场模型的研究对于台风风场极值风速、巨浪的精确预报以及与之相关的灾害评估研究是极具现实意义的。系统介绍了Kepert提出的台风风场线性解析模型和Foster提出的基于相似理论求解的半解析模型。在Kepert解析模型的基础上进行改进, 引入沿高度变化湍流扩散系数模型和受速度影响的拖曳系数模型, 用半解析的方法对风场进行求解。借助Dropsonde现场观测台风风速剖面数据对本文提出改进模型的准确性进行验证。利用三种理论模型对实测海上台风表面风场进行模拟, 与H*wind风场数据进行比较, 验证不同模型之间的差别, 并定量分析不同模型对台风表面风场特性的模拟能力。

关键词: 气象灾害; 台风; 风场模型; 风速分布; 表面风场预测

中图分类号: X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0265-11

Comparative Study among Various Parameterizations on the Modelling of Tropical Cyclone Wind Field

PEI Zhengnan^{1,2}, LI Sunwei¹, Li Wei³

(1. Division of Ocean Science and Technology, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. PowerChina Huadong Engineering Cooperation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to investigate the dynamics and to predict the development of tropical cyclones (TC) boundary layer, theoretical and engineering models depicting the TC boundary layer flow are of great academic and practical interests. The engineering models have been widely utilized in the prediction of TC intensity, storm surge simulation and TC induced damage evaluation. Two widely accepted semi-theoretical models, including the analytical model proposed by Kepert and the similarity model by Foster, are reviewed systematically in the present study. An improved height-resolving model is proposed on the basis of Kepert's model, where the turbulent diffusivity and drag coefficient parameterizations are incorporated. The improved model is validated through comparison with the observational data gathered from typhoon reconnaissance projects. Utilizing a set of archived over ocean surface wind field information provided by the H*wind database, rigorous comparisons among the three

* 收稿日期:2019-01-24;修回日期:2019-05-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51608302;51579227)资助

作者简介:裴正南(1995—),男,硕士研究生。主要从事台风边界层风场的研究。E-mail:pzn16@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:李孙伟(1982—),男,讲师,博士。主要从事台风边界层风场、海上风能开发以及城市风环境的研究。

E-mail: li.sunwei@sz.tsinghua.edu.cn

models are performed to examine their capability for accurately estimating the intensity, inflow angle, asymmetric characteristics and spatial distribution of the TC surface wind field.

Keywords: meteorological disaster; typhoon; wind field model; wind velocity distribution; surface wind prediction

引言

热带气旋(Tropical Cyclone)是形成在温暖洋面上的中尺度灾害性天气系统,一般在西北太平洋地区被称为台风,而在东北太平洋及大西洋地区被称为飓风。沿海地区一般人口密集,台风及其引发的地表强风、暴雨和风暴潮往往会引起结构破坏、经济损失和人员伤亡。中国是受台风风致灾害影响最为严重的国家之一,每年登陆台风数量高,且平均登陆强度有增大的趋势^[1]。随着经济进一步发展,人口、财产进一步向沿海地区倾斜,诸如粤港澳大湾区的世界级湾区涌现,对于台风特性的研究显得愈发关键。

台风风场的模拟被广泛运用于近地范围极值风速、巨浪预报以及与之相关的灾害评估研究中^[2]。根据台风风场求解方法的不同,台风风场模型可大致分为解析模型、半解析模型和数值模型三类。解析模型多是在原始N-S方程的基础上进行简化(省略非线性项、控制方程及边界条件线性化处理等),从而直接得到台风边界层风场风速分布的解析解,相关的研究主要有文献^[3-5]。半解析模型的控制方程相对更接近物理实际,相较于解析模型可以考虑非线性项、竖向对流项、沿空间变化的参数等对台风风场结构的影响^[6-8]。数值模型基于流体动力学和热力学对台风演变进行描述,主要有中小尺度模型MM5^[9]和中尺度气象研究模型WRF^[10]等。与解析模型、数值模型相比,半解析模型同时具备精确、计算效率高的特点,更适合工程应用。

台风表面风场的模拟是极具现实意义的。一方面,近地范围是人类生产活动和主要建筑设施的集中区域,台风及其引起的地表强风往往是引起风致灾害损失的主要因素,表面风速被广泛作为预报台风强度的主要指标^[11]。另一方面,台风风场作为输入条件被广泛运用于风暴潮、浪的预测以及灾害评估等研究中^[2]。相关研究^[12-14]指出,风暴潮、浪的模拟对所输入的台风表面风场十分敏感,当采取观测的风场作为输入条件,目前的风暴潮模型往往可

以输出准确的后报结果。美国国家海洋局台风研究所(NOAA hurricane research division)基于多平台的观测数据,分析重现了各台风海上10 m高度处二维平均风场(即H*wind数据库),H*wind被视为目前最全面的海上台风表面风场数据库,被用于台风风场的模拟预测^[15]以及后报研究^[16]中。

本文在Kepert解析模型的基础上引入沿高度变化湍流扩散系数模型和与速度相关的拖曳系数模型,用半解析的方法对风场进行求解。借助Dropsonde在现场观测得到的风速剖面数据对改进模型的准确性进行验证。然后将不同风场理论模型的模拟结果与H*wind数据进行比较,验证不同模型之间的差别。

1 现有风场模型

台风风场边界层理论模型求解在顶部梯度风场和底部边界条件共同作用下台风边界层风场的平均流分布。其中梯度风场为气压分布或梯度风速分布,底部边界条件则为海气动量交换方程。考虑随台风移动的圆柱坐标系下不可压流体的初始Navier-Stokes方程:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + w \frac{\partial u}{\partial z} - v \left(f + \frac{v}{r} \right) = \\ \quad - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + w \frac{\partial v}{\partial z} + u \left(f + \frac{v}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, (u, v, w) 为沿柱坐标系 (r, λ, z) 各方向的风速分量; K 为湍流动量交换系数; f 为科里奥利参数; ρ 和 p 分别为空气密度和气压。

1.1 Kepert 线性高度解析模型(K01)

J. Kepert^[4]提出了面向台风边界层风场的线性解析模型,并对台风内部超梯度风的特性进行了研究。在控制方程式(1)的基础上引入梯度风平衡方程,略去竖向对流项、二次高阶项,可以得到简化线

性方程组:

$$\begin{cases} \frac{V_g}{r} \frac{\partial u}{\partial \lambda} - v' \left(f + \frac{2V_g}{r} \right) = K \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{V_g}{r} \frac{\partial v'}{\partial \lambda} + u \left(f + \frac{V_g}{r} + \frac{\partial V_g}{\partial r} \right) = K \frac{\partial^2 v'}{\partial z^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, V_g 为对应的梯度风速; v' 为切向风速分量的扰动项, 定义为 $v - V_g$; K 为湍流动量交换系数, 模型推导中将其假定为常数。

动力气象学中经典 Ekman 螺线模型^[17]的求解底部通常采用无滑移边界 ($u=0$; $v' = -V_g$)。J. Kepert^[4]在推导过程中引入更符合下垫面物理实际的半滑移边界条件, 并对其进行线性化处理, 求解得出台风边界层风场风速分布的解析表达式。风场解包含三个分项, 因台风气旋引起的对称项、与下垫面相互作用引起的两个非对称项:

$$\begin{cases} u(\lambda, z) = \sqrt{\frac{\alpha'}{\beta'}} \operatorname{real} \left(\sum_{k=-1}^1 A_k \exp \left(-\frac{(1+i)z}{\delta_k} \right) \right) \\ v'(\lambda, z) = \operatorname{imag} \left(\sum_{k=-1}^1 A_k \exp \left(-\frac{(1+i)z}{\delta_k} \right) \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\alpha' = \frac{1}{2K} \left(f + \frac{2V_g}{r} \right), \beta' = \frac{1}{2K} \left(f + \frac{V_g}{r} + \frac{\partial V_g}{\partial r} \right) \quad (4)$$

其中, α' 和 β' 的分子分别对应梯度风的绝对角速度和绝对涡度的垂直分量; A_k 和 δ_k 分别表征风场水平角度分布和竖向分布的参数。

1.2 Foster 相似理论模型(F09)

考虑轴对称梯度风场驱动下的台风边界层平均流, R.C. Foster^[6]提出了相对应的相似理论模型。基于稳态条件、中性层结和轴对称风场的假定, R.C. Foster^[6]对式(1)进行简化:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} - v \left(f + \frac{v}{r} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} + u \left(f + \frac{v}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

与式(1)相比, 式(5)略去了沿角度的微分项。选取适当的长度、速度和湍流耗散尺度对式(5)进行无量纲化处理, 可以得到一组无量纲形式的微分方程组, 给定对应的边界条件即可用数值方法求出对应解。除此之外, F09 模型中考虑了随风速变化的拖曳系数 (C_d)、沿空间变化的湍流动量交换系数 (K), 并系统讨论了不同的 K 模型对计算结果的影响。

2 改进风场模型

2.1 改进模型(M-I)

在线性高度解析的模型 K01 的基础上, 考虑沿高度变化的 $K(z)$, 控制方程式(2)应改写为:

$$\begin{cases} \frac{V_g}{r} \frac{\partial u}{\partial \lambda} - v' \left(f + \frac{2V_g}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{V_g}{r} \frac{\partial v'}{\partial \lambda} + u \left(f + \frac{V_g}{r} + \frac{\partial V_g}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(z) \frac{\partial v'}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (6)$$

引入变量 ω , 则有:

$$2\gamma \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} + 2i\sqrt{\alpha\beta} \omega - \frac{\partial K(z)}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z} - K(z) \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} u + iv \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(f + \frac{2V_g}{r} \right), \beta = \frac{1}{2} \left(f + \frac{V_g}{r} + \frac{\partial V_g}{\partial r} \right), \gamma = \frac{V_g}{2r} \quad (9)$$

分离变量法将 ω 关于角度进行傅里叶展开:

$$\omega(\lambda, z) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k(z) e^{ik\lambda} \quad (10)$$

将式(10)代回式(7)中:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} [2i(\gamma k + \sqrt{\alpha\beta}) a_k(z) - K'(z) a_k'(z) - K(z) a_k''(z)] e^{ik\lambda} = 0 \quad (11)$$

给定边界条件, 使得方程组有唯一确定的解:

$$(u, v) \Big|_{z=0} = (0, 0)$$

$$K_s \frac{\partial \vec{U}_{10}}{\partial z} = C_d \vec{U}_{10} \Big|_{z=0} \quad (12)$$

式中, K_s 和 C_d 为底部边界高度处 (本文对应 10 m 高度) 的湍流耗散系数和拖曳系数; \vec{U}_{10} 为对应局部风速矢量。行进速度远小于梯度风速时, 底部边界条件的表达式可以线性化处理为:

$$\begin{cases} C_d V_g (u(0) + u_t) = K_s u'(0) \\ C_d V_g (V_g + 2v(0) + 2v_t) = K_s v'(0) \end{cases} \quad (13)$$

式中, (u_t, v_t) 分别为台风行进速度在径向和切向的速度分量, 具体可以表示为:

$$\begin{cases} u_t = U_t (e^{i\lambda} + e^{-i\lambda}) / 2 = U_t \cos \lambda \\ v_t = U_t (e^{i\lambda} + e^{-i\lambda}) * i / 2 = i U_t \sin \lambda \end{cases} \quad (14)$$

因为 K 不为常数, 原有解的形式在此处是不适用的。且对于任一沿高度变化的 K 函数, 给出控制方程的解析形式解也不现实。本文采用半解析的方法求解, 将未知解的实部、虚部分开处理:

$$a_k(z) = a_{kr}(z) + ia_{ki}(z) \quad (15)$$

$$\begin{cases} a_{kr}''(z) = -\frac{K'(z)}{K(z)} a_{kr}'(z) - \frac{1}{K(z)} 2(\gamma k + \sqrt{\alpha\beta}) a_{ki}(z) \\ a_{ki}''(z) = -\frac{K'(z)}{K(z)} a_{ki}'(z) + \frac{1}{K(z)} 2(\gamma k + \sqrt{\alpha\beta}) a_{kr}(z) \end{cases} \quad (16)$$

对底部边界条件(13)进行改写,可以得到不同傅里叶级数对应的边界条件,见表1。借助数值方法,可以得到:

表1 底部边界条件

Table 1 Bottom boundary conditions

阶数(式17)	底部边界条件表达式分拆结果
$k=1$	$\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} a_{1r}(0) + \frac{(1 - \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}) U_t}{2} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \frac{K_s}{C_d V_g} a'_{1r}(0); a_{1r}(0) = \frac{K_s}{C_d V_g} a'_{1r}(0)$
$k=0$	$a_{kr}(0) = \frac{K_s}{C_d V_g} a'_{kr}(0); a_{ki}(0) + V_g = \frac{K_s}{C_d V_g} a'_{ki}(0)$
$k=-1$	$\sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} a_{-1r}(0) + \frac{(1 + \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}) U_t}{2} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \frac{K_s}{C_d V_g} a'_{-1r}(0); a_{-1r}(0) = \frac{K_s}{C_d V_g} a'_{-1r}(0)$
$ k \geq 2$	$a_{kr}(0) = \frac{K_s}{C_d V_g} a'_{kr}(0); a_{ki}(0) = \frac{K_s}{C_d V_g} a'_{ki}(0)$

$$\begin{cases} u = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} * \text{real} [a_{-1}(z) e^{-ikz} + a_0(z) + a_1(z) e^{ikz}] \\ v = \text{imag} [a_{-1}(z) e^{-ikz} + a_0(z) + a_1(z) e^{ikz}] \end{cases} \quad (17)$$

对于 $|k| \geq 2$, 解出 $a_k(z) = 0$ 。得到风场解仅包含傅里叶变换中的前三项谱函数,其他的高阶项被消去。

底部边界条件(式(12))引入的拖曳系数 C_d 是表征海气动力交换的物理参数。观测研究^[18-19]认为拖曳系数的取值与对应局部风速(U_{10})相关,因此模型求解问题是耦合的(参数输入取决于需要求解的风速值)。采用迭代的方法进行求解,具体而言,给定一个初始的表面风场并求解出对应的 C_d 场,据此

求解出风速分布的解,再将这一步得到的表面风速场作为输入条件进行下一步计算,直至收敛(判断准则:所求解空间范围内,前后两步求解出相同位置处表面风速的最大相对偏差小于 10^{-6}),模型计算流程具体如图1所示。

2.2 改进模型(M-I)验证

Dropsonde是针对台风边界层风场可靠的直接观测手段^[23]。借助侦察飞机由1.5~3 km高度范围投放,设备以大约10 m/s的速度竖直向下运动并以2 Hz的频率返回位置坐标、风速、温度、密度等参数,如图2所示。选取2009年8月18日观测得到腿

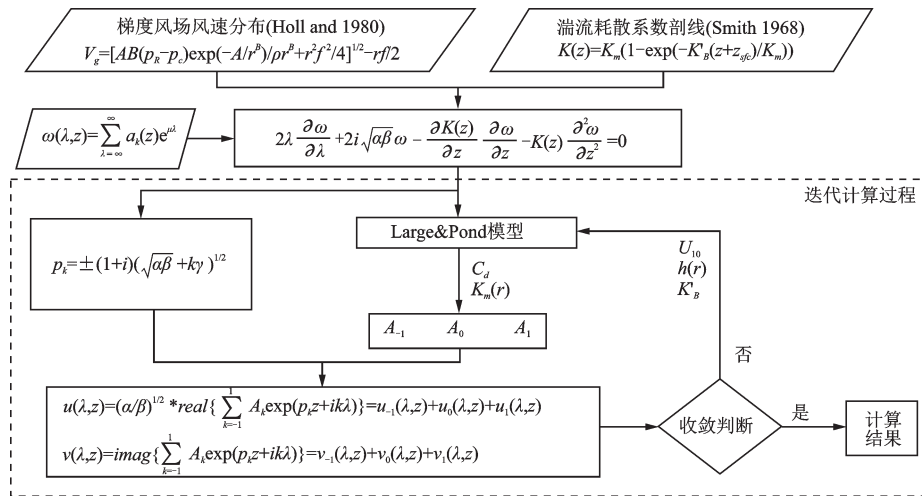


图1 计算流程图

Fig.1 Flow chart for model calculation



图2 NRD-41型Dropsonde^[25-26]
Fig. 2 NRD-41 Dropsonde^[25-26]

风Bill竖向风速剖面数据作为参照,对改进模型风场模拟结果的准确性进行讨论。

根据Dropsonde投放位置、Dropsonde数据合格性、梯度飞机观测数据等条件,本研究共筛选出6条风速剖面进行对比,各个测点相对台风中心的位置如图3所示,箭头表示台风行进的方向(东偏南61.03°)。侦察飞机观测得到的风速、风压数据作为顶部边界条件输入到改进模型(M-I)中,并输入

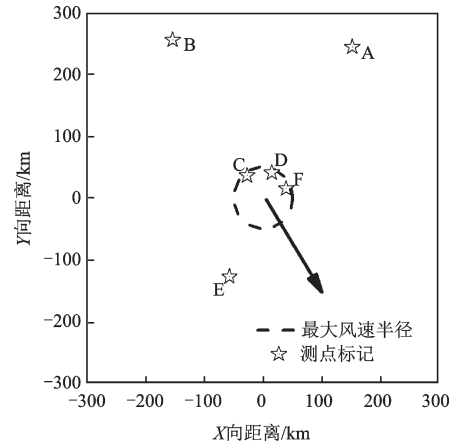


图3 测点位置(1 000 m高度)

Fig. 3 The storm-relative position of each sonde as it fell through a height of 1 km and the storm motion

Dropsonde相对台风中心的位置坐标,由此计算得到对应的平均风速剖面。

图4是M-I模型计算结果与实测风速剖面的对比示意,表2则是各个测点处模型计算结果与实测数据的平均偏差,可以认为,改进模型(M-I)能够很好地表征台风边界层风场(沿高度方向)的空间特性。

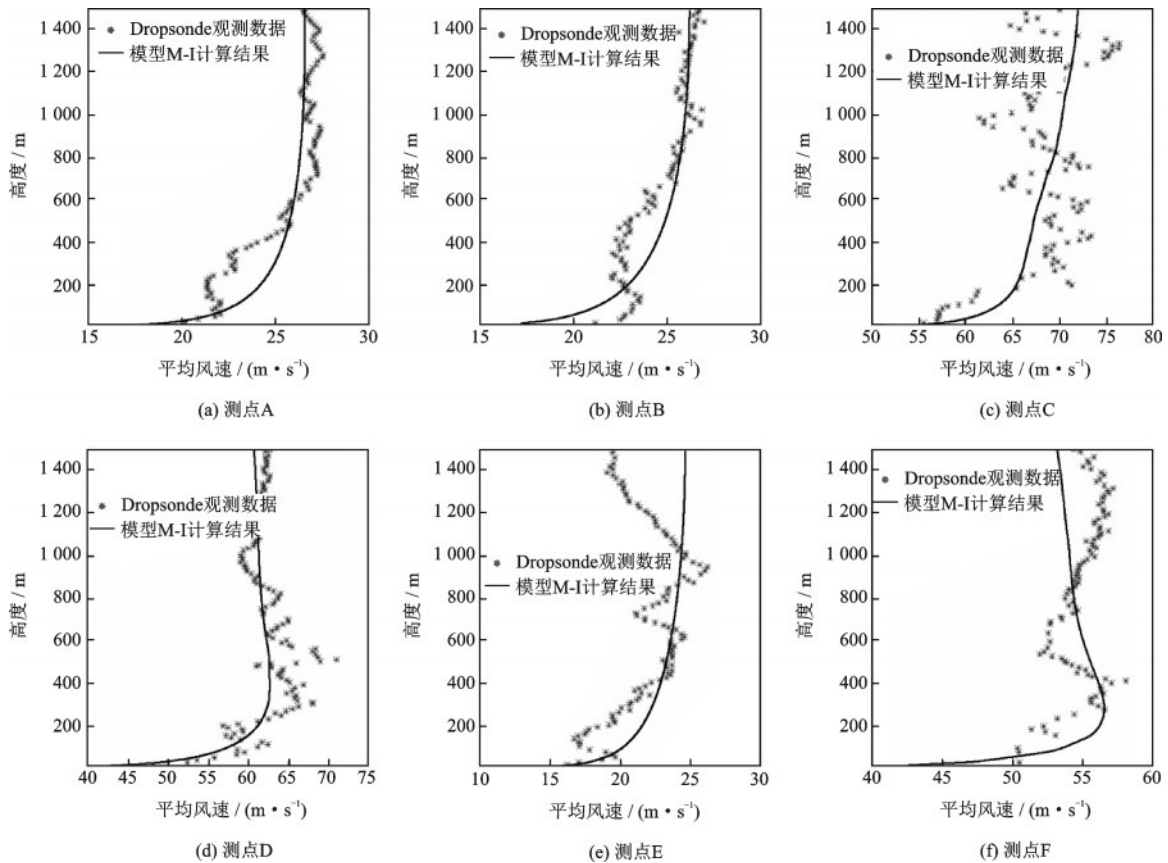


图4 风速剖面对比

Fig.4 Comparison between the estimated vertical profiles of wind speed and Dropsonde results

表2 风速剖面对比

Table 2 Comparisons between wind profiles

测点编号	平均偏差/(m·s ⁻¹)	平均偏差率/%
A	0.23	1.2
B	0.23	1.0
C	0.35	0.8
D	-1.10	-1.7
E	1.48	0.08
F	-0.48	-0.08

3 表面风场计算讨论

相比于K01模型, M-I模型在两个方面进行了改进:其一,更符合台风风场物理实际的湍流参数化方案;其二,迭代求解的方法对拖曳系数与局部风速的耦合进行处理,得到更贴近实际的台风边界层风场分布。相比于模型F09, M-I模型采用了不同的简化方法对初始N-S方程进行处理。F09模型的简化控制方程虽然保留了竖向对流向和非线性项,但控制方程中舍去了风速沿角度的微分项;此外,因为直接用数值方法求解,在计算中发现F09模型的计算效率也要低于改进模型M-I和解析模型K01。

H*wind是由美国国家气象海洋局(NOAA)飓风研究所基于多平台观测数据处理得到的海上二维平均表面风场资料。选择2005年7月16日1330UTC飓风EMILY的H*wind数据作为参照,分别采用前述三个模型对风场进行模拟计算,并对计算结果进行对比分析。

3.1 计算参数确定

计算过程中剔除环境气压梯度、行进速度的影

响,按照式(14)将行进速度的分量直接叠加到计算结果中。顶部梯度风场采用G.J.Holland^[20]提出的解析公式进行描述,相关参数取值通过对飞机测量数据拟合得到,图5(a)是G.J.Holland^[20]公式对实测风压数据的拟合结果。基于梯度向心力、科里奥力和气压梯度平衡的假设,由气压公式可以求解出梯度风速表达式^[20]:

$$V_g = [AB(p_R - p_c)\exp(-A/r^B)/\rho r^B + r^2 f^2/4]^{1/2} - rf/2 \quad (18)$$

式中, p_R 、 p_c 分别为环境气压和台风中心气压; A 、 B 为G.J.Holland公式引入的参数; r 为距离台风中心的径向距离。

图5(b)是表达式与实测数据的对比,可以看出二者是比较吻合的。

至于湍流扩散系数 K , K01模型中 K 取值为常数, F09和M-I模型中的均采用近地范围内沿高度增加,一定高度范围后 K 保持不变的曲线^[21]进行描述:

$$K(z) = K_m [1 - \exp(-K'_B(z + z_{sf})/K_m)] \quad (19)$$

式中, K_m 为 K 的最大值,根据相关研究[4, 6, 22]中的取值,定为 $100 \text{ m}^2/\text{s}$; K'_B 为 K 为在下表面的斜率,根据莫宁-奥布霍夫相似理论, $K'_B = ku^*$,其中 k 为冯卡门常数(取为0.4), u^* 为下表面的摩阻风速; z_{sf} 为下表面的高度,此处取为 10 m 。

拖曳系数(C_d)是表征海气动量交换的一个重要参数。现场观测^[18-19]认为 C_d 在一定风速范围内随风速线性增加(一般认为 10 m 高度处风速低于 25 m/s)。K01模型中的 C_d 取为常数, F09和M-I模型则考虑了与局部风速相关的 C_d 取值,采用在气象学领域广为接受的Large&Pond模型^[18]:

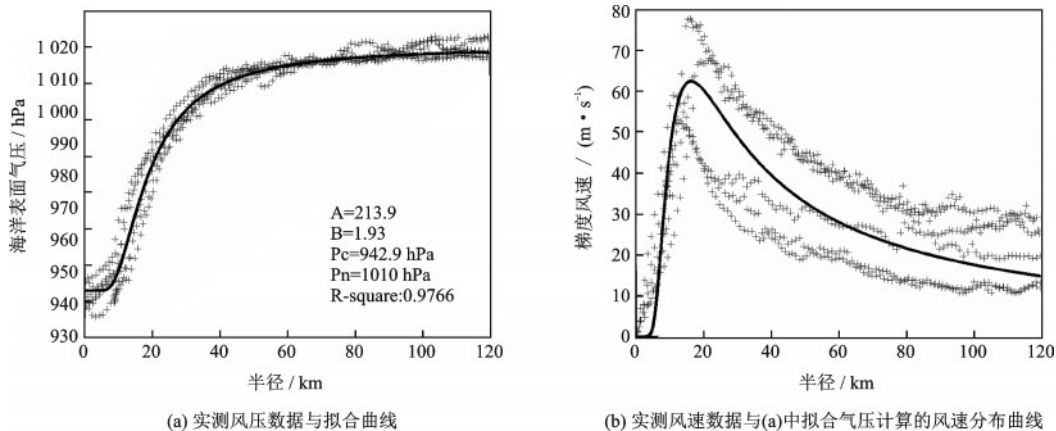


图5 风压数据拟合结果

Fig.5 Application of the Holland model to the radial distribution of the sea level pressure observations

$$C_d = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-3} & 4 \leq U_{10} \leq 11 \text{ m/s} \\ [1.2 + (U_{10} - 11) \times (1000 C_{d\max} - 1.2) / 14] \times 10^{-3} & 11 \leq U_{10} \leq 25 \text{ m/s} \\ C_{d\max} & U_{10} \geq 25 \text{ m/s} \end{cases} \quad (20)$$

$$C_{d\max} = (0.088 \text{RMW} + 17.66) \times 10^{-4} \quad (21)$$

$$(0.0019 \leq C_{d\max} \leq 0.0025)$$

式中, $C_{d\max}$ 为拖曳系数的最大值; 式(21)为基于对1997~2003年间的Dropsonde台风数据统计分析得到 $C_{d\max}$ 与最大风速半径的关系式^[23]。

3.2 计算结果

基于表面风场强度、入流角度、非对称性、平均风速剖面等指标, 对不同模型的计算结果进行讨论。

(1) 表面风场强度

图6为H*wind和不同模型计算得到的表面风场速度分布云图。结合NOAA提供的台风路径数据, 此段时间台风行进方向与X方向的角度为157.35°(沿逆时针方向为正)。图6(a)可见, H*wind二维风场风速整体分布存在明显的东北-西南向梯度, 即东北侧的风速要明显大于西南侧。参照图6(b~d), F09计算得到的风场对于这种整体不对称性的模拟要略微优于K01和M-I模型, 后两者虽然对最大风速相对位置模拟和H*wind一致, 但是整体风场体现出更明显的西-东梯度, 即得到的风场相对于实测风场旋转了一定角度。出现这种差异的原因可能是F09模型控制方程略去了沿角度的微分项, 其余两个模型中则采用了不同的简化方法。

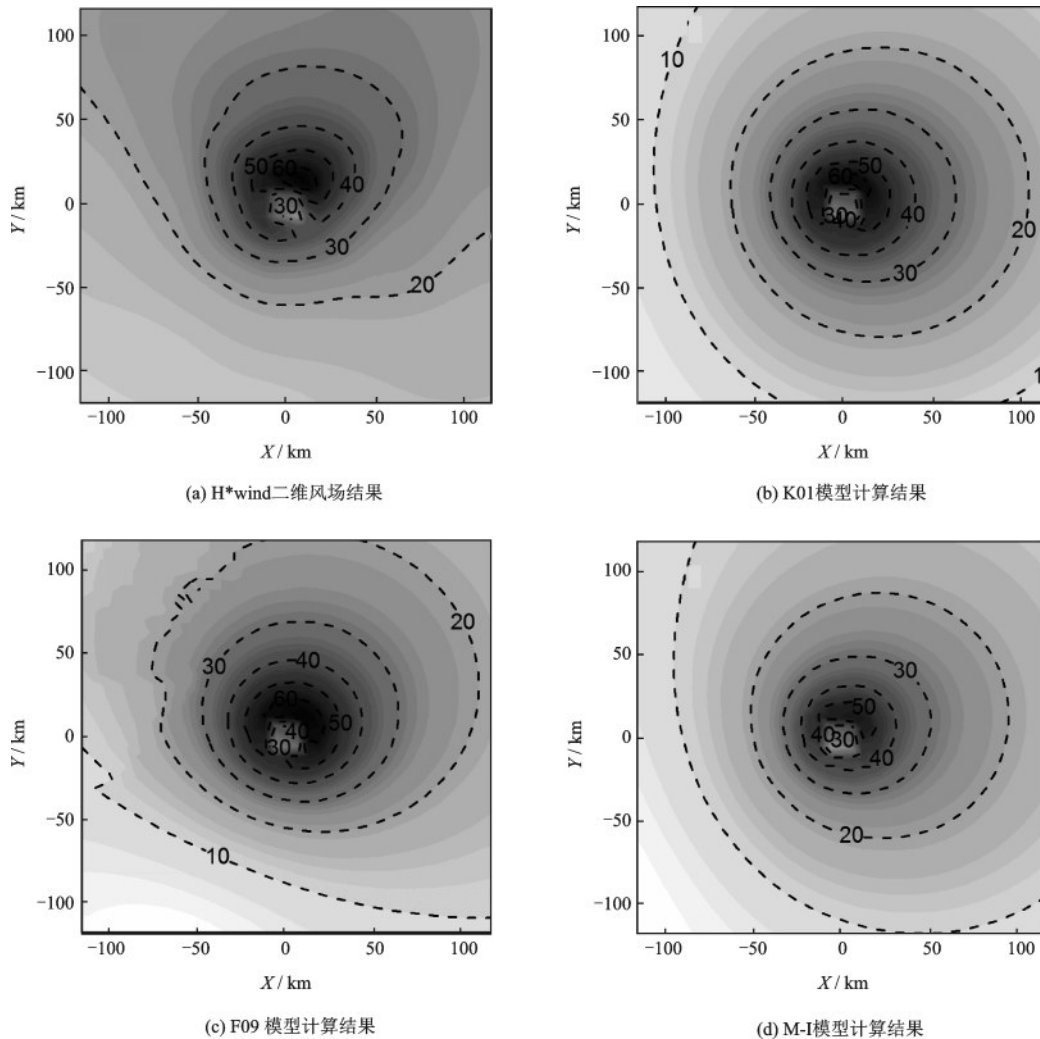


图6 表面风场速度分布云图

Fig. 6 Surface wind distribution

分别计算最大风速半径范围(0.75~1.25 rmw),台风风眼外部范围(1.00~2.00 rmw)表面风速的平均值,并与H*wind结果进行对比,见表3。对比发现,在相同的参数设定条件下,常值K在近地范围内高估了实际的湍流扩散系数,也引起了K01模型对于表面风速的高估。F09模型因为在控制方程中考虑了非线性项如竖向对流项的影响,计算得到的表面风速相对高于另两个模型。M-I模型考虑了沿高度变化的K,此处计算得到最大风速半径范围的表面风速和H*wind最为接近,但是因为控制方程中省略了非线性项,计算结果存在一定低估。

表3 表面风速对比

Table 3 Comparison of the surface wind

模型	0.75~1.0 rmw	1.0~2.0 rmw
H*wind	43.79 (±0.0%)	43.79 (±0.0%)
K01	55.14 (+11.0%)	45.85 (+5.0%)
F09	57.51 (+16.0%)	48.45 (+11.0%)
M-I	47.51 (-4.0%)	38.80 (-11.0%)

(2) 入流角度

入流角 α_{SR} 定义为径向风速分量和切向风速分量比值的反正切值($\alpha_{SR}=\tan^{-1}(u/v)$),表征径向入流风速的相对大小。需要注意的是,此处计算的入流角是剔除行进速度分量后的结果。

图7(a)为H*wind二维风场中各数据点处入流角沿径向距离的分布,图7(b~d)则是不同模型计算得到的结果。H*wind结果中入流角绝对值随着径向距离的增加逐步增大,K01模型和改进模型M-I的计算结果都很好的体现了这一空间分布特性,而F09计算的入流角度绝对值相对实测数据和其他模型的结果均较小,并且在径向距离较大时出现了一定的离散。为了定量说明不同模型之间的差异,选择最大风速半径范围(0.75~1.25 rmw)、台风眼外部范围1(1.0~2.0 rmw)、台风眼外部范围2(1.0~3.0 rmw)三个范围,对各自范围内计算得到的入流角样本做平均,具体数值见表4。F09模型计算得到的入流角平均值相对于H*wind数据的偏差(分别为-73.54%、-72.36%、-76.09%)明显大于

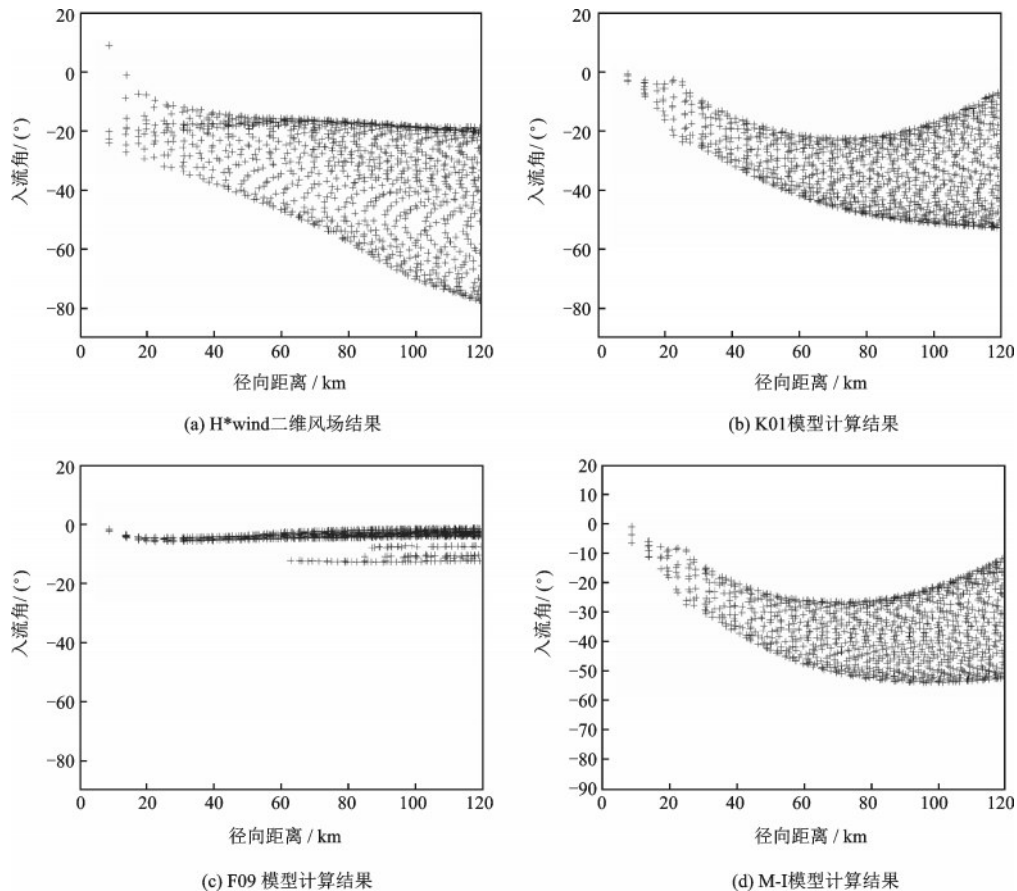


图7 入流角沿径向的分布

Fig. 7 Radial distribution of the inflow angle

表 4 入流角度平均值对比

Table 4 Comparison of the averaged inflow angle

取值范围	H*wind		K01		F09		M-I	
	α_{SR}	α_{SR}	偏差	α_{SR}	偏差	α_{SR}	偏差	
0.75~1.25 rmw	-18.10°	-8.40°	-53.60%	-4.79°	-73.54%	-11.86°	-34.48%	
1.0~2.0 rmw	-20.80°	-18.45°	-11.30%	-5.75°	-72.36%	-23.07°	+10.91%	
1.0~3.0 rmw	-23.25°	-29.23°	+2.26%	-5.56°	-76.09%	-34.11°	+46.71%	

注:偏差是相对于绝对值而言的,偏差为负则表示计算结果的角度绝对值小于H*wind的参照值

K01模型(分别为-53.06%、-11.30%、+2.26%)和M-I模型(分别为-34.48%、+10.91%、+46.71%)的结果,也表明F09模型在预测表面风场时存在对入流风速的整体低估。K01模型和M-I模型计算得到的入流角和观测数据比较一致,其中在最大风速半径范围内,M-I模型计算得到的入流角平均值要更接近观测值,而在台风眼外较大范围K01模型的偏差要更小。

(3) 风场非对称性

本部分讨论风场整体风速沿角度的分布,主要是距离台风中心半径120 km以内的范围。考虑到作为参照的H*wind数据仅为一个时间段内的风场,区分台风眼壁内外风速进行讨论数据点较少不具有统计意义,此处对比不就数据点在台风风场的相对区域进行区分。图8(a)为H*wind风场各数据点风速随角度的分布散点图,体现了表面风场风速

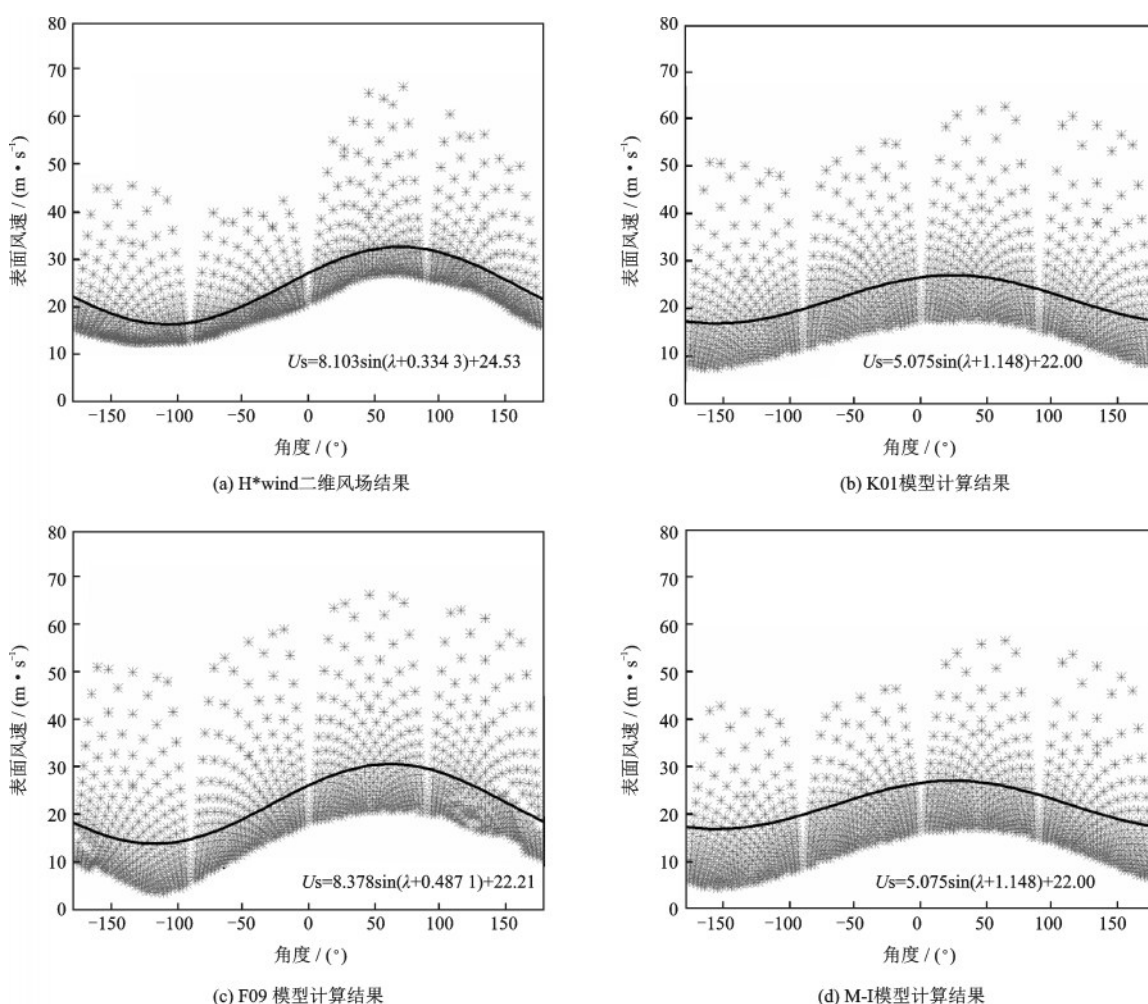


图 8 表面风速(叠加行进速度分量)沿角度的分布

Fig. 8 Azimuthal distribution of the surface wind speed(using earth-relative winds)

注:角度以墨卡托坐标系中X轴正方向为0°,逆时针为正

强度的整体范围以及随角度变化的整体趋势。采用三角函数对风速进行拟合可以看出,风速沿角度的分布主要体现低频的波动性,这和理论推导过程中(如式(17))高阶傅里叶谱函数为零的结论相符合。图8(b~d)则是三个不同理论模型得到的表面风场和拟合结果。拟合函数的振幅表征风场整体范围表面风速的波动强度,根据拟合结果(参见图8中拟合公式),F09模型计算得到的振幅(8.378 m/s)和H*wind(8.103 m/s)结果比较接近。对比拟合正弦曲线的相位,F09模型计算结果和H*wind结果比较接近,也表明K01模型和改进模型M-I计算得到的风场相对H*wind结果整体存在一个角度偏差(与图6结果一致)。

(4) 平均风速剖面

平均风速剖面表征平均风速沿高度变化的规律。H*wind数据只给出了表面二维场的风速分布,并未给出沿竖向的风速测量值,因此本部分只就不同模型的计算结果进行对比并讨论其差异。图9是

不同模型计算的平均风剖面对比,分别取台风最大风速半径周围(0.75~1.25 rmw)和最大风速半径外(1.0~3.0 rmw)两个区域的风速剖面进行平均处理。对比K01和M-I,近地范围内不同的K取值使得两个模型计算得到该范围内的风速结果存在较大的差异。特别的,近地范围内假定为常数的K使得K01模型计算得到的表面风速要明显大于M-I;此外M-I模型得到的风速剖面在近地范围内大致遵循对数律,这与实测研究^[23-24]的结论是比较相符的,而常值K的假定导致了K01模型得到的风剖面在近地范围内不遵循经典的对数律。K01模型和M-I模型计算得到的梯度风速高度比较一致,并且也随着半径的增大梯度风速高度也随之增加,F09模型中得到的梯度风速高度较两者更低,并且随半径的相关性不太明显。K01模型中认为梯度风速高度大致与 $\sqrt{2K/I}$ 同一量级,这一结论也在Vickery等基于Dropsonde的研究^[23]中得到了验证,而改进模型M-I也很好的体现了这一特性。

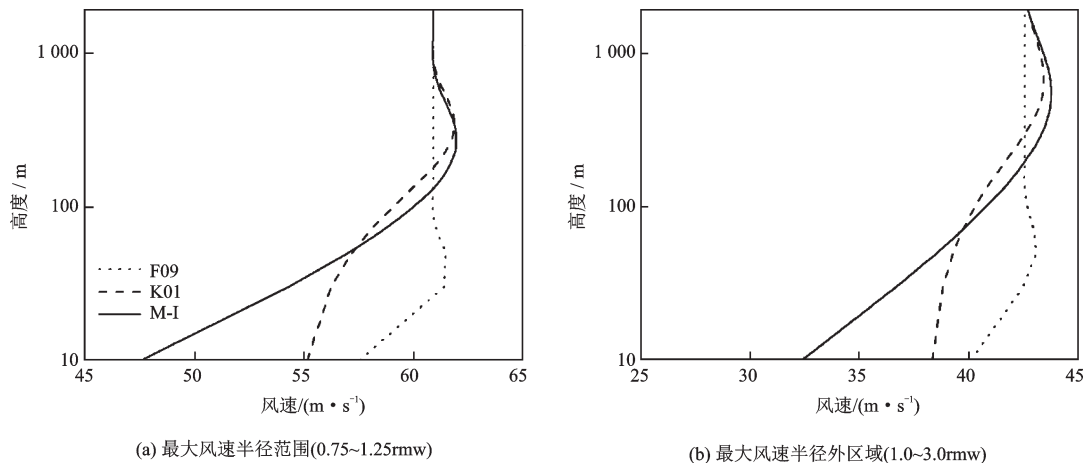


图9 平均风速剖面对比

Fig.9 Comparisons of the mean wind profiles obtained by various models

4 结 论

引入沿高度变化的湍流动量交换系数模型和风速相关的拖曳系数模型,提出了改进的半解析理论模型,并借助飓风Bill的Dropsonde观测数据对改进模型的准确性进行了验证。分别采用三个现有台风风场理论模型对实测风场进行计算模拟,参照NOAA提供的H*wind表面风场数据,基于表面风场强度、入流角度、非对称性和平均风速剖面四个指标对不同模型的计算结果进行对比讨论:

(1)K01模型中常值K的假定造成了对近地范围K的高估,会引起对表面风速的高估。在本文的输入参数条件下,改进模型M-I对于表面风速的计算结果较其他两个模型更接近H*wind数据。

(2)在考虑半径范围内,H*wind数据入流角度绝对值随半径的增大而增加。K01模型和M-I模型的计算结果都较好的体现了这种半径相关性,F09模型计算得到的入流角整体偏小。

(3)考虑整体表面风速沿角度的分布,F09模型计算得出的风速波动幅度和相位都较其余两个模型更接近H*wind结果,K01和M-I模型计算得到

的风场相对 H*wind 风场结果整体存在一个角度偏差。

(4)常值 K 的假定导致 K01 模型计算结果中近地范围内风速沿高度的分布不满足经典的对数律。改进模型对于超梯度风特性的描述很好的和 K01 模型保持一致。

参考文献:

- [1] 康斌. 我国台风灾害统计分析[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(2):36-40.
Kang B. Statistical analysis of typhoon-related disaster in China[J]. China Flood And Drought Management, 2016, 26(2):36-40. (in Chinese)
- [2] Vickery P J, Masters F J, Powell M D, et al. Hurricane hazard modeling: the past, present, and future[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(7-8): 392-405.
- [3] Meng Y, Matsui M, Hibi K. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1995, 56(2-3):291-310.
- [4] Kepert J. The dynamics of boundary layer jets within the tropical cyclone core. Part I: Linear theory[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(17): 2469-2484.
- [5] Snaiki R, Wu T. A linear height-resolving wind field model for tropical cyclone boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 171: 248-260.
- [6] Foster R C. Boundary-layer similarity under an axisymmetric, gradient wind vortex[J]. Boundary-layer Meteorology, 2009, 131(3): 321-344.
- [7] Fang G, Zhao L, Cao S, et al. A novel analytical model for wind field simulation under typhoon boundary layer considering multi-field correlation and height-dependency [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 175: 77-89.
- [8] Kepert J, Wang Y. The dynamics of boundary layer jets within the tropical cyclone core. part II: nonlinear enhancement[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58(17): 2485-2501.
- [9] Chen S S, Price J F, Zhao W, et al. The CBLAST-Hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere - wave - ocean models for hurricane research and prediction[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(3): 311-318.
- [10] Corbosiero K L, Wang W, Chen Y, et al. Advanced research WRF high frequency model simulations of the inner core structure of Hurricanes Katrina and Rita (2005)[C]//Proceedings of the 8th WRF User's Workshop, Boulder, CO, USA:[s.n.], 2007: 11-15.
- [11] Klotz B W, Jiang H. Examination of surface wind asymmetries in tropical cyclones. part i: general structure and wind shear impacts [J]. Monthly Weather Review, 2017, 145(10): 3989-4009.
- [12] Houston S H, Shaffer W A, Powell M D, et al. Comparisons of HRD and SLOSH surface wind fields in hurricanes: Implications for storm surge modeling [J]. Weather and Forecasting, 1999, 14(5): 671-686.
- [13] Westerink J J, Luettich R A, Feyen J C, et al. A basin-to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to southern Louisiana [J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(3): 833-864.
- [14] Bunya S, Dietrich J C, Westerink J J, et al. A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave, and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model development and validation[J]. Monthly weather review, 2010, 138(2): 345-377.
- [15] MacAfee A W, Pearson G M. Development and testing of tropical cyclone parametric wind models tailored for midlatitude application—preliminary results[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, 45(9): 1244-1260.
- [16] Powell M D, Murillo S, Dodge P, et al. Reconstruction of Hurricane Katrina's wind fields for storm surge and wave hindcasting[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(1): 26-36.
- [17] 赵鸣. 大气边界层动力学[M].北京:高等教育出版社, 2006:276-277.
Zhao M. Dynamics of atmospheric boundary layer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 276-277. (in Chinese)
- [18] Large W G, Pond S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds [J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11(3): 324-336.
- [19] Petersen G N, Renfrew I A. Aircraft-based observations of air - sea fluxes over Denmark Strait and the Irminger Sea during high wind speed conditions [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the Atmospheric Sciences, Applied Meteorology and Physical Oceanography, 2009, 135(645): 2030-2045.

(本文责编:赵霞)

(下转第 286 页)