台风“艾克”(2008)的海面风场模型研究

何源首[1,3], 王恩康[2], 李建伟[1,3], 安 伟[1,3], 宋莎莎[1,3], 靳卫卫[1,3], 王梦晓[1,3]

(1. 中海油能源发展股份有限公司 安全环保分公司, 天津 300452;
2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;
3. 中海油能源发展股份有限公司 海上油田安全环保重点实验室, 天津 300452)

摘 要: 台风风场模拟的准确性对台风风场后报工作具有重要意义，目前通过参数模型构建台风边界层的海面风场是较快速且常用的方法之一。以 2008 年侵入墨西哥湾的大西洋第 8 号台风“艾克”为例，选取多种参数模型对比研究台风风场模拟的效果。实验结果表明，台风风场模型的选择对台风风场模拟效果具有显著影响。采用 Jelesnianski-1 风廓线模型即可较好地再现“艾克”台风风场的时空特征；此外，具有可变系数的 Holland 等气压模型风场和 Miller 等风廓线模型风场则具有较好的适用性，通过调整可变系数使得参数风场的风廓线贴合实际台风案例。整体而言，基于理想模型的参数风场能基本反映台风核心区域的海面风场特征，但对外围背景风场模拟效果不甚理想，而分析及再分析风场数据则能较好地反映台风外围的背景风场，因此采用参数风场与分析及再分析风场融合的方式构建台风风场，可显著提高台风“艾克”风场的数值模拟效果。

关键词: 台风“艾克”(2008); 参数风场模型; Holland 模型; NDBC 风场; CCMP 风场; 墨西哥湾
中图分类号: P731.2; P447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3682(2024)02-0104-12
doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20240308002
引用格式: 何源首, 王恩康, 李建伟, 等, 2024. 台风“艾克”(2008)的海面风场模型研究[J]. 海岸工程, 43(2): 104-115. HE Y S, WANG E K, LI J W, et al, 2024. Research on sea surface wind field model of Hurricane IKE (2008)[J]. Coastal Engineering, 43(2): 104-115.

台风(Hurricane/Typhoon/Cyclone，按生成区域分名称不同)是由热带或副热带洋面上的大气扰动发展生成的强烈大气涡旋风暴，是具有超强破坏力的灾害性天气系统。依据 GB/T 19201—2006《热带气旋等级》(中国气象局政策法规司, 2006)并参考蒲福风力分级(Beaufort scale, 1805)，持续最大风速达到 12 级(风速大于 32.7 m/s)以上的热带气旋(Tropical Cyclone)即为台风(Lu et al, 2021)。多数台风生成后会侵入大洋边缘海和人类活动频繁的近岸海域，并对其过境的海洋和大气环境产生显著影响(Guan et al, 2018; Hu et al, 2019; 方神光等, 2023)，其中由台风引起的海面大风和近海台风浪破坏力巨大，常常给沿海地区造成巨大的经济和社会损失(Ismayilov et al, 2016; Valsamidis et al, 2021)，台风风场的研究对海洋油气勘探开发、海上油气平台设施安全、防台风险评估及防灾减灾工作等均具有十分重要的意义。

台风伴随强降雨、雷暴、大风等恶劣天气并造成海面高海况条件，而高海况下海面风场的准确遥感反演难题尚未得到很好的解决(李大伟, 2016)，这使得准确大面观测的台风风场数据十分缺乏，相关研究主要通过数值模拟方法获取特定海区的台风风场数据。相比于复杂的台风三维数值模型

收稿日期: 2024-03-08
资助项目: 中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司科技项目(HFKJ-AH-AHY-2023-14); 中海油能源发展股份有限公司科技项目(HFZXKT-JN2021-04); 中国海洋石油集团有限公司科技项目(CNOOC-KJ 135 KJXM NFAH 2021-01)
作者简介: 何源首(1991—)，男，工程师，博士，主要从事海洋环境大数据与环境影响数值模拟方面研究. E-mail: hysiocas@163.com

(王 燕 编辑)

方案，通过台风参数风场模型可十分简便地构建二维参数风场，快捷地完成台风海面边界层风场的后报工作(李建等, 2013)，该方法对软硬件资源要求少，经济适用性好。台风参数风场是依据台风的特征参数如中心气压 P_c、最大风速 V_{max} 和最大风速半径 R 等，通过构建台风剖面的风廓线模型或者气压模型生成的台风海面风场(陈洁等, 2009)。

目前，国内外有代表性并得到广泛应用的主要气压模型包括 Bjerknes 模型(1921 年)、Takahashi 模型(高桥浩一郎, 1939)、Fujita 模型(Fujita, 1952)、Schloemer 模型(Schloemer, 1954)、Jelesnianski 模型(Jelesnianski, 1965)和 Holland 模型(Holland, 1980)等；风廓线模型主要包括 Rankine 模型(Rankine, 1869)、Jelesnianski-1 模型(Jelesnianski, 1965)、Jelesnianski-2 模型(Jelesnianski, 1966)、Miller 模型(Miller, 1967)、Chen-1 模型(陈孔沫, 1990)、Chen-2 模型(陈孔沫, 1992)、Chen-3 模型(陈孔沫, 1994)、Willoughby-1 模型(Willoughby et al, 2004)和 Willoughby-2 模型(Willoughby et al, 2006)等，它们都描述了台风海面风速从台风中心到台风边缘的变化。Rankine、Jelesnianski-1 和 Miller 等风场模型均采用了分段函数(两段)的形式，使上述风场模型的风廓线在最大风速半径附近存在风速突变的特点。以 Jelesnianski-2 和 Chen-3 为代表的风场模型采用单函数的形式给出台风剖面的廓线，避免了台风最大风速附近过渡不平滑的问题。以 Holland 和 Miller 为代表的风场模型则可对台风最大风速外围风速衰减区的风廓线进行调整，虽然其相比于固定风廓线模型具有一定优势，但一些台风在其风眼区、最大风速区和外围衰减区的风速递变规律十分复杂，单函数模型无法同时满足这类台风在不同区段的风速拟合需求。以 Willoughby-1 模型为代表的风场模型则采用三段函数的方式，通过在风眼区和外围衰减区之间增加风速衔接区，避免了最大风速附近风速过渡不平滑的缺点，并且进一步改善了台风风速廓线在不同区段的拟合效果。Willoughby 等(2006)在 Willoughby-1 模型的基础上，进一步提出了台风外围风廓线的双指数参数模型，即 Willoughby-2 模型，该模型可实现通过调节 2 个 e 指数参数，改变台风外围风廓线在靠近最大风速区和远离最大风速区的递变规律，从而得到更好的台风风廓线的拟合效果(Willoughby et al, 2006; 李建等, 2013)。

本文旨在通过对比不同简易台风参数风场模型的特征，总结不同台风参数风场及构建方案的主要特点，并以大西洋墨西哥湾的台风“艾克”为例，进行台风风场模型准确性的定量研究，以期为台风参数风场构建方案的准确性提供有效的研究参考案例。

1　数据与方法

1.1　台风“艾克”

台风“艾克”是 2008 年大西洋第 8 个获得命名的热带气旋，其持续时间从 2008 年 9 月 1 日到 15 日。台风“艾克”带来的大风、风暴潮和降雨在古巴和美国墨西哥湾沿岸造成了大范围的破坏，并直接导致 103 人死亡，亦被称为有观测记录以来登陆美国沿岸并造成严重经济损失和社会影响的台风之一(NHC, 2014; Ismayilov et al, 2016)。台风“艾克”的最佳路径数据等台风参数资料来自美国台风中心(National Hurricane Center, NHC)的官方网站(http://www.nhc.noaa.gov/data/)，其最佳路径如图 1 所示。

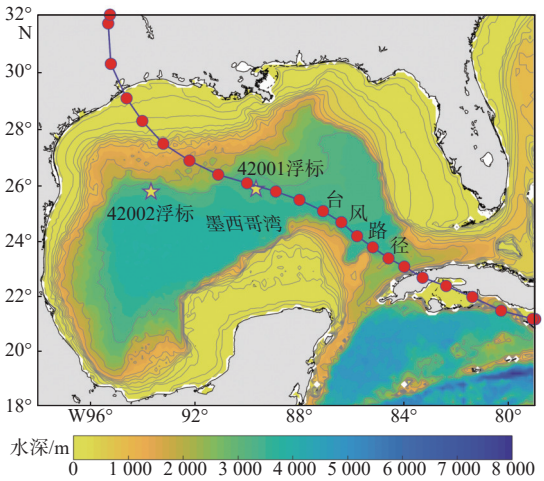


图 1　台风“艾克”最佳路径及浮标位置

Fig. 1　The optimal track of Hurricane IKE and the buoy positions

1.2 风场数据

用于模型风场输出结果对比的观测数据来源于美国国家浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC)的 42001(89°39′27″W, 25°53′16″N)和 42002(93°39′58″W, 25°47′24″N)两个浮标数据(http://www.ndbc.noaa.gov/)，浮标位置如图 1 所示。42001 浮标紧靠台风中心路径，其穿过台风“艾克”的最大风速圈，记录的数据可真实反映台风“艾克”最大风速半径附近的风速变化；42002 浮标则相对远离台风最大风速半径，位于台风风速由最大风速向外递减的区域，该浮标记录了台风“艾克”在最大风速半径外围的风速变化信息。

用于风场融合方案的 CCMP(Cross Calibrated Multi-Platform)卫星分析风场数据来源于美国国家宇航局旗下的遥感系统(Remote Sensing Systems)提供的 CCMP V2.0 数据集(http://www.remss.com/)，时间覆盖范围为 1987 年 7 月 10 日至 2019 年 4 月 29 日；ECMWF 模式再分析风场数据来源于欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的第五代全球模式再分析风场数据集 ERA5(http://www.ecmwf.int/)，时间覆盖范围为 1979 年至今。两种数据均被广泛应用于全球海面风场的研究中(Hersbach et al, 2018; Mears et al, 2019)。

1.3 台风风场构建方案

本研究通过对比分析国内外常用台风参数模型特征，选取特征显著的 Jelesnianski-1、Willoughby-2、Rankine、Takahashi、Schloemer、Bjerknes、Miller 和 Holland 八种典型模型进行对比分析研究。在以上参数风场的构建过程中，本文对台风的最大风速半径 R 的计算方法均统一默认采用美国东海岸台风最大风速半径常用经验公式(Willoughby et al, 2006)：

$$R = 46.4\mathrm{e}^{-0.015\,5V_{\max}+0.016\,9\varphi}, \tag{1}$$

式中：$V_{\max}$ 为台风最大风速；φ 为台风中心的纬度。

受自身移动及大气中其他天气系统等多方面因素的影响，实际台风海面风场及气压场呈显著的不对称特征(Shapiro, 1983; 谢鎏晔等, 2012)。台风移行风场反映了台风的整体移动对台风风场的贡献，圆形风场和移行风场叠加可对圆对称风场进行修正，近似模拟出实际台风的不对称结构(台风前进方向右侧风速较强，左侧风速较弱)。此外，阎秉耀等(1984)仅考虑了圆形流场中描述气块运动轨迹曲率的梯度风方程，Meng 等(1995)仅考虑梯度风场及摩擦作用也模拟出了台风的不对称结构。由于叠加方案的应用更简便，所以相比其他方案得到了更广泛应用。本文着重分析圆形参数风场的选择对台风风场数值模拟的影响，台风风场均采用圆形参数风场和移行风场叠加的方案，移行风场模型则均采用 Jelesnianski 模型(Jelesnianski, 1965)，对应数学模型如下：

$$\vec{V}_2 = \begin{cases} \vec{V}_s \dfrac{r}{r+R} & 0 \leqslant r < R \\ \vec{V}_s \dfrac{R}{r+R} & r \geqslant R \end{cases}, \tag{2}$$

式中：r 为计算格点与台风中心距离；$\vec{V}_2$ 为距离台风 r 处的移行风速矢量；$\vec{V}_s$ 为台风移动速度矢量。

圆形风场与移行风场通过如下矢量合成即可近似得到台风在海面边界层的二维矢量风场：

$$\vec{V} = C_1 V_1 \begin{bmatrix} -\sin(\theta+\beta) \\ \cos(\theta+\beta) \end{bmatrix} + C_2 \vec{V}_2, \tag{3}$$

式中：θ 为计算位置和台风中心的连线与 x 轴的夹角；β 为流入角，即圆对称风场风向与海面实际风向的夹角，统一参数化为 15°，考虑流入角后圆对称风场的流速风向与切线方向不再平行，而是由切线方向偏转 β 指向台风圆心；C_1、C_2 为订正系数；V_1 为圆形风场风速；$\vec{V}_2$ 为移行风场风速矢量。

对于融合风场方案，采用以往研究(李建等, 2013; 王宁等, 2020)中的常用方法，相关公式表示如下：

$$\vec{V}_{\text{int}} = \vec{V}(1-e) + e\vec{V}_{\text{m}}, \tag{4}$$

式中：$\vec{V}_{\text{int}}$为融合风速矢量；$\vec{V}_{\text{m}}$为分析风速矢量或再分析风速矢量；e 为权重系数，且 $e = C^4/(1+C^4)$，其中 $C = r/nR$，$n = 9$。

1.4　误差定量计算

本文采用平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)定量评估模型风场输出结果的准确性，4 个指标的计算公式为：

$$\text{ME} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i), \tag{5}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|P_i - O_i|, \tag{6}$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{|P_i - O_i|}{O_i}, \tag{7}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}, \tag{8}$$

式中：P 为模拟数据值；O 为观测数据值。

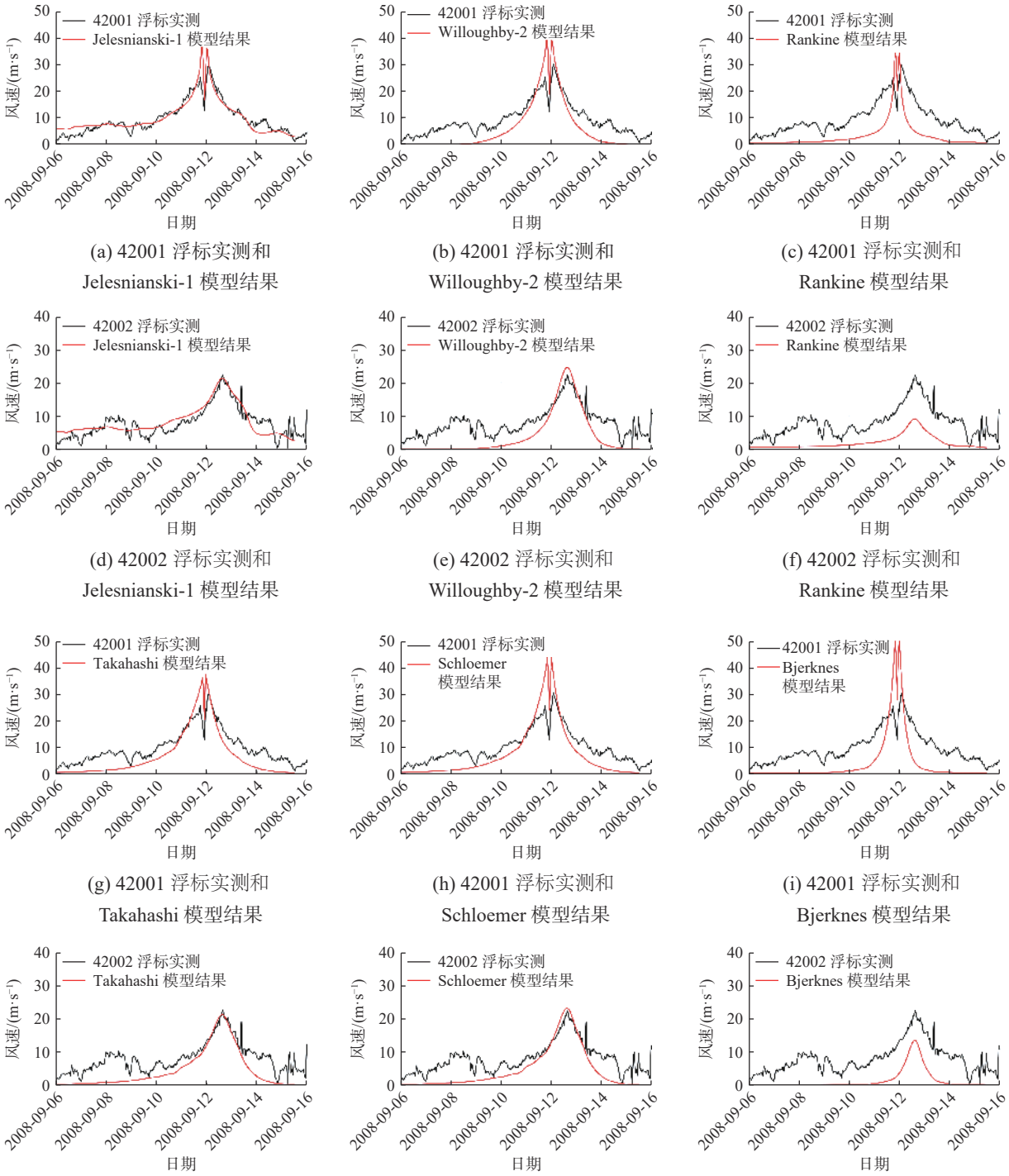
2　台风风速模拟结果分析

42001 和 42002 浮标站记录了海面风速等海气连续观测数据。将由不同风场模型构造的参数风场分别与浮标实测数据进行比对，其中参数风场选取了特征显著的 Jelesnianski-1、Willoughby-2、Rankine、Takahashi、Schloemer、Bjerknes、Miller 和 Holland 八种风场模型，构建得到的风场空间分辨率为 0.25°×0.25°，时间分辨率为 1 h，不同参数风场与浮标观测风场的对比结果如图 2 至图 4 所示。

风廓线模型方面，Jelesnianski-1 参数模型对“艾克”台风的风场有较好的模拟效果，42001 和 42002 两个浮标处观测风速的变化趋势及风速大小均能得到较好的反映(图 2)。Rankine 模型构造的参数风场在 42001 浮标处的风速在台风过境前后的变化则较尖锐，在远离台风最大风速半径圈的 42002 浮标处的模型风速则显著偏小。这与 Rankine 模型的风廓线函数在最大风速半径附近的变化率大、而在台风外围风速偏低的特点(陈孔沫, 1990)一致。气压模型方面，Takahashi 模型对“艾克”台风的风场模拟效果相对较好，在受台风强烈影响时间前后 42001 及 42002 站点处的模拟风速曲线与实测数据吻合度较高，但在逐渐远离台风影响的过程中，模拟风速与实测值的偏差也逐渐加大。Bjerknes 模型得到的模拟风场则在最大风速区 42001 站点处的风速明显偏大，在最大风速区外围的 42002 站点处的风速显著偏小。需要特别指出的是，Willoughby-2 模型在本文的实验中采用 Willoughby 等提出的默认回归参数方案(适用于美国海域)(Willoughby et al, 2006)，模拟结果对“艾克”台风的风场模拟效果依然不够理想，鉴于该模型为双 e 指数的三段函数模型，变化规律较为复杂，计划未来开展针对性研究工作，对 Willoughby-2 多参数的最佳设置方案进行深入的定量研究，以达到最优效果。

与 Jelesnianski-1 模型同类的风场模型相比，Miller 风廓线模型和 Holland 气压模型可通过调整风场函数中的参数进而改变风速廓线与实际台风风速的拟合程度，这是其他参数模型所不具备的特点。Miller 模型中的 x 系数越大，Holland 模型中的 B 系数越大，则台风最大风速半径处的气压梯度力越大，从而得到的台风气压剖面和风速剖面越陡峭，模拟台风风场在最大风速半径附近的风速衰减越快(Holland et al, 1980; 杨万康等, 2017)。图 3 和图 4 的结果也直观地表明了上述特征，当 Miller 模型中 x 取 0.5、Holland 模型中 B 取 0.5 时，模拟风速和实测值吻合度较高。这表明“艾克”台风的风速剖面在台风最大风速区外围具有非常慢的风速衰减特征，受益于台风观测方法和数据资料的不

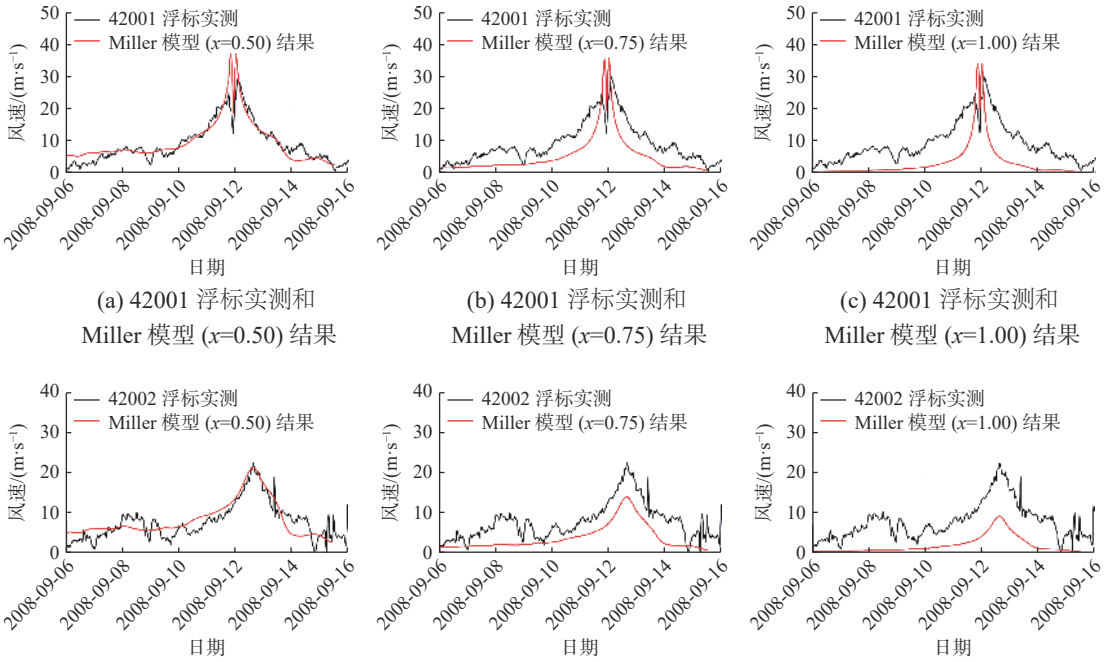
断丰富(王岩峰等, 2023)，“艾克”台风的这一特性也曾在 Zhang 等(2018)针对该台风的雷达观测研究中被明确指出。



(a) 42001 浮标实测和 Jelesnianski-1 模型结果
(b) 42001 浮标实测和 Willoughby-2 模型结果
(c) 42001 浮标实测和 Rankine 模型结果
(d) 42002 浮标实测和 Jelesnianski-1 模型结果
(e) 42002 浮标实测和 Willoughby-2 模型结果
(f) 42002 浮标实测和 Rankine 模型结果
(g) 42001 浮标实测和 Takahashi 模型结果
(h) 42001 浮标实测和 Schloemer 模型结果
(i) 42001 浮标实测和 Bjerknes 模型结果
(j) 42002 浮标实测和 Takahashi 模型结果
(k) 42002 浮标实测和 Schloemer 模型结果
(1) 42002 浮标实测和 Bierknes 模型结果

图 2 Jelesnianski-1、Willoughby-2、Rankine 风廓线模型及 Takahashi、Schloemer、Bjerknes 气压模型风速与浮标实测风速对比

Fig. 2 Comparisons between the wind speed derived from models (Jelesnianski-1, Willoughby-2, Rankine, Takahashi, Schloemer, Bjerknes) and the wind speed measured by buoys

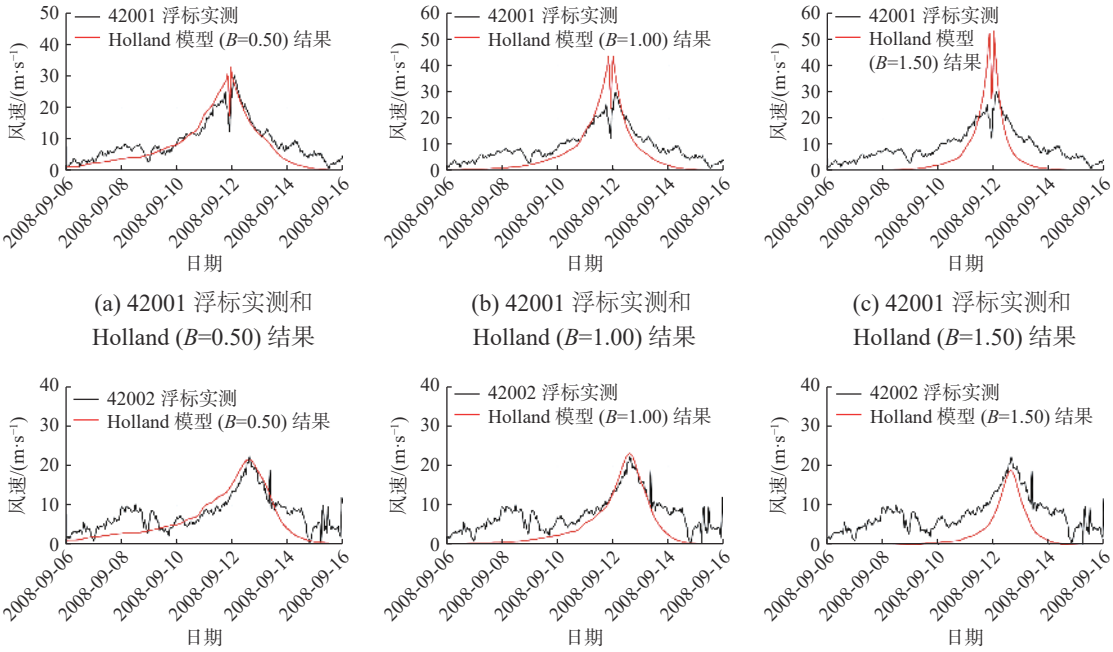


(a) 42001 浮标实测和 Miller 模型 (x=0.50) 结果　(b) 42001 浮标实测和 Miller 模型 (x=0.75) 结果　(c) 42001 浮标实测和 Miller 模型 (x=1.00) 结果

(d) 42002 浮标实测和 Miller 模型 (x=0.50) 结果　(e) 42002 浮标实测和 Miller 模型 (x=0.75) 结果　(f) 42002 浮标实测和 Miller 模型 (x=1.00) 结果

图 3　不同 *x* 系数条件（*x*=0.50、*x*=0.75、*x*=1.00）下 Miller 风廓线模型风速与浮标观测风速对比

Fig. 3　Comparisons between the wind speed derived from Miller model under the conditions of different *x* coefficients (*x*=0.50, *x*=0.75, *x*=1.00) and the wind speed measured by buoys



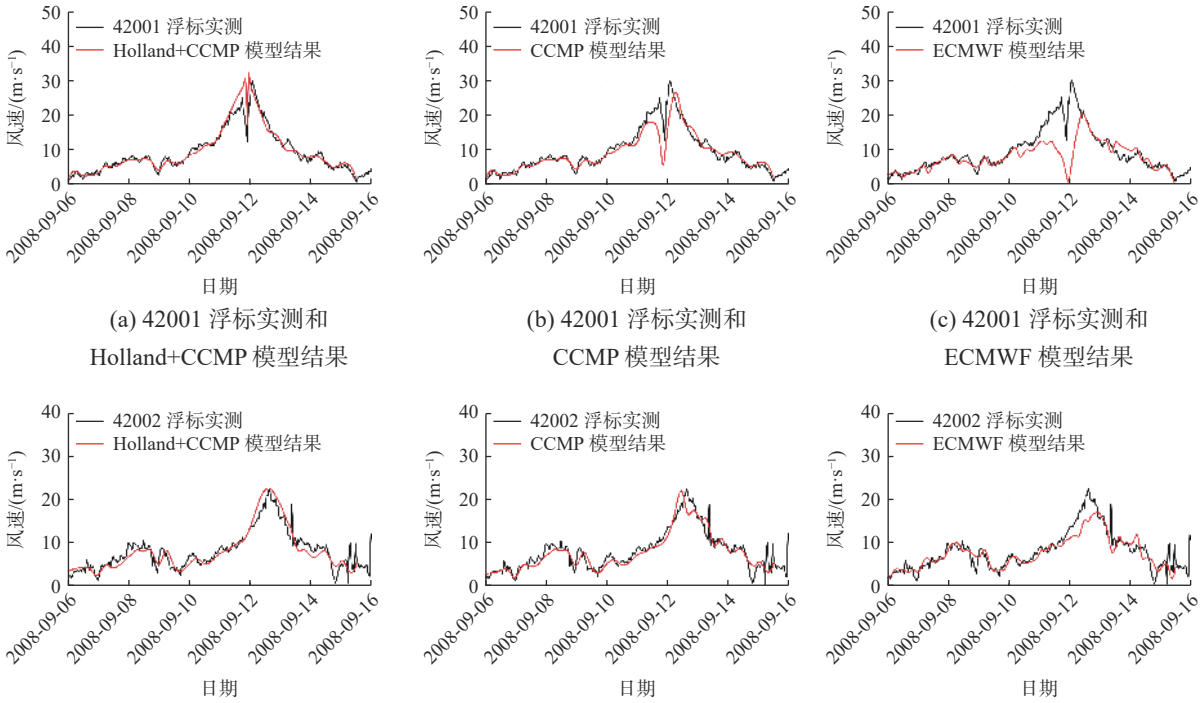
(a) 42001 浮标实测和 Holland (B=0.50) 结果　(b) 42001 浮标实测和 Holland (B=1.00) 结果　(c) 42001 浮标实测和 Holland (B=1.50) 结果

(d) 42002 浮标实测和 Holland (B=0.50) 结果　(e) 42002 浮标实测和 Holland (B=1.00) 结果　(f) 42002 浮标实测和 Holland (B=1.50) 结果

图 4　不同 *B* 系数条件（*B*=0.50、*B*=0.75、*B*=1.00）下 Holland 气压模型风速与浮标观测风速对比

Fig. 4　Comparisons between the wind speed derived from Holland model under the conditions of different *B* coefficients (*B*=0.50, *B*=0.75, *B*=1.00) and the wind speed measured by buoys

随着卫星大面观测数据的广泛应用，较多研究采用融合卫星大面观测数据和分析与再分析风场数据的方法进行台风风场的模拟(Hope et al, 2013; 李建等, 2013; Wang et al, 2018)。本文也选取了CCMP 和 ECMWF 这 2 种常用的海面分析风场数据进行了“艾克”台风的风场模拟对比，同时还采用CCMP 风场为背景风场融合 Holland 模型风场的混合风场方案(Holland+CCMP)进行了对比实验，结果(图 5)表明，CCMP 和 ECMWF 风场数据提取的风速变化序列与 42001 和 42002 站点处的风速观测结果吻合度较高，但是，在“艾克”台风核心区过境期间，分析数据和观测数据的偏差显著增加，这与卫星在高海况下的海面风速观测偏差加大有关(李大伟, 2016)。混合风场方案(Holland+CCMP)在台风内部高风速的核心区采用模型风场，在台风外围则采用 CCMP 分析风场数据(王宁等, 2020)，这种方案明显提高了台风风场的模拟效果。



(a) 42001 浮标实测和 Holland+CCMP 模型结果
(b) 42001 浮标实测和 CCMP 模型结果
(c) 42001 浮标实测和 ECMWF 模型结果
(d) 42002 浮标实测和 Holland+CCMP 模型结果
(e) 42002 浮标实测和 CCMP 模型结果
(f) 42002 浮标实测和 ECMWF 模型结果

图 5 Holland + CCMP、CCMP 和 ECMWF 风场风速与浮标观测风速对比

Fig. 5 Comparisons between the wind speed derived from Holland+CCMP, CCMP, ECMWF and the wind speed measured by buoys

3 误差定量分析

不同台风风场模型方案模拟结果与 42001 和 42002 浮标观测数据误差对比见表 1 与表 2。总体而言，风廓线模型和气压模型输出的风速数据一般存在较大误差；可变参数模型输出风场可通过调整参数减小误差；卫星再分析风场在高风速区间的模拟效果较差，但在最大风速半径外围的模拟准确性较高；采用混合方案的台风风场模拟效果最好。

在固定参数的台风模型中，Jelesnianski-1 模型有较优异的表现，Jelesnianski-1 风场模型模拟的台风风场在 42001 和 42002 浮标处的平均绝对误差分别为 2.16 和 2.08 m/s, 平均相对误差分别为 16.25% 和 24.04%；模拟效果与 2 种常用的卫星风场和融合方案风场接近，表现出较优异的模拟效果。这可能与台风“艾克”在最大风速半径外围风速衰减较慢的特征有关，Jelesnianski-1 属于外围风速衰减较

慢的模型，同样外围衰减较慢的 Takahashi 气压模型的风场模拟结果也相对较优。以上结果表明，在了解实际台风风场特征的前提下，选取合适的简单台风参数模型也可实现台风风场快速且较准确的数值模拟。

表 1　风场模型方案输出结果与 42001 浮标站观测误差的定量对比

Table 1　Quantitative comparison of errors between the results derived from different models and the results observed at buoy station 42001

风场类型		ME/(m·s^{-1})	MAE/(m·s^{-1})	MRE/%	RMSE/(m·s^{-1})
风廓线模型	Rankine	7.97	9.16	69.76	9.58
	Jelesnianski-1	**0.37**	**2.16**	**16.25**	**3.51**
	Willoughby-2	2.36	5.17	44.82	6.09
	Miller (*x*=0.50)	**0.26**	**2.27**	**16.88**	**3.80**
	Miller (*x*=0.75)	5.16	6.48	50.00	6.92
	Miller (*x*=1.00)	6.40	7.02	74.19	7.76
气压模型	Bjerknes	6.23	9.82	77.66	10.79
	Takahashi	2.22	4.59	40.13	5.49
	Schloemer	0.99	5.09	41.61	6.55
	Holland (*B*=0.50)	**0.45**	**2.80**	**24.70**	**3.62**
	Holland (*B*=1.00)	1.00	5.09	41.59	6.55
	Holland (*B*=1.50)	3.64	7.99	64.07	9.37
分析/再分析/混合风场	CCMP	1.18	2.32	15.00	3.62
	Holland+CCMP	**−0.45**	**1.62**	**10.99**	**2.62**
	ECMWF	3.26	4.49	27.38	7.18

注：字体加粗内容为风场模型结果与 42001 浮标观测误差较小或同类型方案中较其他模型计算结果更好的案例。

表 2　风场模型方案输出结果与 42002 浮标站观测结果对比

Table 2　Quantitative comparison of errors between the results derived from different models and the results observed at buoy station 42002

风场类型		ME/(m·s^{-1})	MAE/(m·s^{-1})	MRE/%	RMSE/(m·s^{-1})
风廓线模型	Rankine	7.46	7.46	70.67	7.82
	Jelesnianski-1	**−0.36**	**2.08**	**24.04**	**2.45**
	Willoughby-2	2.93	4.02	45.56	4.59
	Miller (*x*=0.50)	4.72	4.72	44.86	5.06
	Miller (*x*=0.75)	6.13	6.13	75.90	6.71
	Miller (*x*=1.00)	2.93	4.02	45.56	4.59
气压模型	Bjerknes	7.98	7.98	80.23	8.16
	Takahashi	**2.74**	**2.95**	**33.79**	**3.77**
	Schloemer	2.15	2.92	32.57	3.71
	Holland (*B*=0.50)	**−0.02**	2.65	**28.32**	**3.16**
	Holland (*B*=1.00)	2.15	2.92	32.59	**3.71**
	Holland (*B*=1.50)	5.59	5.59	60.71	5.94
分析/再分析/混合风场	CCMP	0.32	1.23	10.70	1.70
	Holland+CCMP	**−0.08**	**1.36**	**12.18**	**1.76**
	ECMWF	0.97	1.65	13.77	1.91

注：字体加粗内容为风场模型结果与 42002 浮标观测误差较小或同类型方案中较其他模型计算结果更好的案例。

在可变参数的台风风场模型中，Miller 风廓线模型取 x=0.50 时，最大风速区外围风场和 Jelesnianski-1 趋于一致，在 42001 和 42002 浮标处的平均绝对误差分别为 2.27 和 4.72 m/s，平均相对误差分别为 16.88% 和 44.86%；Holland 气压模型取 B=0.5 时，最大风速区外围风场衰减显著减缓，模拟效果也明显提升，42001 和 42002 浮标处风场模拟的平均绝对误差分别为 2.80 和 2.65 m/s，平均相对误差分别为 24.70% 和 28.32%。以上变参数模型的台风风场模拟误差较 Jelesnianski-1 稍大，但明显优于大部分固定参数模型。以上结果表明可变参数的台风模型通过调整参数，可以达到适应不同风速衰减特性的台风，达到相对较准确的数值模拟效果。

混合风场与卫星及再分析风场数据的对比显示，常用混合风场方案（Holland+CCMP）在 42001 和 42002 浮标处的风速平均绝对误差分别可降至 1.62 和 1.36 m/s，平均相对误差分别可降至 10.99% 和 12.18%，混合风场模拟的准确性在最大风速区内部得到明显提升，在最大风速区外围的模拟效果变化较小。

4 结 语

本研究以 2008 年入侵墨西哥湾的台风“艾克”为例进行台风海面风场数值模拟准确性的对比研究，定性总结了各类风场的特点，并定量评估了不同台风风场方案对台风“艾克”海面风场模拟的准确性，实验结果表明台风海面风场模型方案的选择对台风风场模拟的准确性有显著影响。

气压模型与风廓线模型的模拟效果没有明显的优劣区别，不同台风风场模型对台风风场模拟效果差异较大。Jelenianski-1 模型属于台风外围风速衰减较慢的类型，因此气压模型和风廓线模型中外围衰减较慢的模型都有较好的模拟效果。应用 Jelesnianski-1、Miller（x=0.50）和 Holland（B=0.50）等简单台风参模型即可对台风“艾克”的风场进行较高准确性的模拟，风速误差与 CCMP、ECMWF 等分析风场数据结果接近。在实现台风海面风场快速、简便且较准确的数值模拟方面，台风参数模型依然具有应用潜力。

Holland、Miller 等变参数模型对不同台风具有更好的适应性，此类模型可以通过调整可变参数改变台风剖面气压或风速分布曲线的形状，使得参数风场的风廓线贴合实际台风案例，从而改善台风海面风场模拟效果。需要指出的是，实际台风的风廓线变化特征更复杂多变，此类模型在参数给定后，风廓线变化趋势即固定，并不总能保证最优的模拟效果，更灵活的多参数台风参数模型还有待开展更深入的研究。

总体而言，基于理想模型的参数风场能基本反映台风核心区域的海面风场特征，但在最大风速区外围背景风场的模拟效果上较差，而分析及再分析风场数据则能较好地反映台风外围的背景风场，因此采用参数风场与分析及再分析风场融合的方式构建台风风场，可显著提高台风风场的数值模拟效果。本研究结果可为台风风场的快速构建提供参考。

参考文献 (References)：

陈洁, 汤立群, 申锦瑜, 等, 2009. 台风气压场与风场研究进展[J]. 海洋工程, 27(3): 136-142. CHEN J, TANG L Q, SHEN J Y, et al, 2009. Advances in typhoon wind field and pressure field[J]. The Ocean Engineering, 27(3): 136-142.

陈孔沫, 1990. 一种新的台风风场分布模式[J]. 海洋科学, 12(3): 1-5. CHEN K M, 1990. A new model of typhoon wind field distribution[J]. Marine Sciences, 12(3): 1-5.

陈孔沫, 1992. 新的台风风场计算方法[J]. 海洋预报, 9(3): 60-65. CHEN K M, 1992. A new method calculating typhoon wind field[J]. Marine Forecasts, 9(3): 60-65.

陈孔沫, 1994. 一种计算台风风场的方法[J]. 热带海洋, 13(2): 41-48. CHEN K M, 1994. A computation method for typhoon wind field[J]. Tropic Oceanology, 13(2): 41-48.

方神光, 喻丰华, 王世俊, 2023. 基于浮标站观测的伶仃洋河口湾极端风暴潮动力响应过程——以1822号台风“山竹”为例[J]. 海岸工程, 42(2): 149-161. FANG S G, YU F H, WANG S J, 2023. Dynamic response process of extreme storm surge in the Lingdingyang Estuary based on the observations at buoy stations: taking Typhoon 1822 (Mangkhut) as the example[J]. Coastal Engineering, 42(2): 149-161.

高桥浩一郎, 1939. 台风域内に於ける气压はひ风速の分布[J]. 气象集志, 17(11): 417. TAKAHASHI K, 1939. Distribution of wind velocity in the coastal area[J]. Kagami Satoshi, 17(11): 417.

李大伟, 2016. 高海况海面风场的微波反演技术及海洋对热带气旋响应的遥感观测研究[D]. 青岛: 中国科学院大学. LI D W, 2016. Microwave scatterometer wind retrieval under high sea state and remote sensing of ocean responses to tropical cyclones[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences.

李建, 侯一筠, 孙瑞, 2013. 台风模型风场建立及其模式验证[J]. 海洋科学, 37(11): 95-102. LI J, HOU Y J, SUN R, 2013. Surge model caused by 0814 Typhoon and mold wind field established[J]. Marine Sciences, 37(11): 95-102.

王宁, 侯一筠, 李水清, 等, 2020. 1979—2018年间山东半岛沿岸台风浪危险性分布的数值模拟研究[J]. 海洋与湖沼, 51(4): 861-868. WANG N, HOU Y J, LI S Q, et al, 2020. Numerical simulation of the Hazard distribution of typhoon waves in 1979-2018[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 51(4): 861-868.

王岩峰, 王冠琳, 林劲松, 等, 2023. 热带气旋海上观测进展[J]. 海洋科学进展, 41(1): 1-23. WANG Y F, WANG G L, LIN J S, et al, 2023. Progress in ocean observation of tropical cyclones[J]. Advances in Marine Science, 41(1): 1-23.

谢鎏晔, 2012. 台风风场与波浪场的数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学. XIE L Y, 2012. Numerical simulation of typhoon wind field and waves[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.

阎秉耀, 1984. 台风梯度风场模式[J]. 海洋预报服务, 1(2): 12-16. YAN B Y, 1984. A gradient wind model of typhoon[J]. Marine Forecast Service, 1(2): 12-16.

杨万康, 尹宝树, 尹小飞, 等, 2017. 基于Holland风场的台风浪数值计算[J]. 水利水运工程学报, 38(4): 28-34. YANG W K, YIN B S, YIN X F, et al, 2017. Numerical calculation and research of typhoon waves based on Holland wind field[J]. Hydro-Science and Engineering, 38(4): 28-34.

中国气象局政策法规司, 2006. 热带气旋等级: GB/T 19201—2006[S]. 北京: 中国标准出版社. Policy and Regulation Department, China Meteorological Administration, 2006. Grade of tropical cyclones: GB/T 19201—2006[S]. Beijing: Standards Press of China.

FUJITA T, 1952. Pressure distribution within typhoon[J]. Geophysical Magazine, 23: 437-451.

GUAN S D, LI S Q, HOU Y J, et al, 2018. Increasing threat of landfalling typhoons in the western North Pacific between 1974 and 2013[J]. International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation, 68: 279-286.

HERSBACH H, DE ROSNAY P, BELL B, et al, 2018. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP[R/OL]. [2024-03-08]. https://doi.org/10.21957/tkic6g3wm.

HOLLAND G J, 1980. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 108: 1212-1218.

HOPE M E, WESTERINK J J, KENNEDY A B, et al, 2013. Hindcast and validation of Hurricane IKE (2008) waves, forerunner, and storm surge[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 118: 4424-4460.

HU P, LIU Y H, HOU Y J, 2019. Studies on marine dynamic disasters[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 37(6): 1791-1794.

ISMAYILOV O, ANDREW S A, 2016. Effect of natural disasters on local economies: forecasting sales tax revenue after hurricane IKE[J]. Journal of Contemporary Eastern Asia, 15(2): 177-190.

JELESNIANSKI C P, 1965. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. Monthly Weather Review, 93(6): 343-358.

JELESNIANSKI C P, 1966. Numerical computations of storm surges without bottom stress[J]. Monthly Weather Review, 94(6): 379-394.

LU X Q, YU H, YING M, et al, 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38: 690-699.

MEARS C A, SCOTT J, WENTZ F J, et al, 2019. A near-real-time version of the Cross-Calibrated Multiplatform (CCMP) ocean surface wind velocity data set[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124: 6997-7010.

MENG Y. MATSUI M, HIBI K, 1995. An Analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 56: 291-310.

MILLER B I, 1967. Characteristics of hurricanes: analyses and calculations made from measurements by aircraft result in a fairly complete description[J]. Science, 157: 1389-1399.

National Hurricane Center (NHC), 2014. Tropical cyclone report: hurricane IKE (AL092008) 1-14 September 2008[R/OL]. [2024-03-08]. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2008&basin=atl.

RANKINE W J M, 1869. On the thermal energy of molecular vortices[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 25(2): 557-566.

SCHLOEMER R W, 1954. Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okechobee, Florida[R/OL]. Hydrometeorological Report (Govt. Printing Office, 1954-05, No. C30.70: 31)[2022-08-29]. https://www.zhangqiaokeyan.com/ntis-science-report_other_thesis/020711577878.html.

SHAPIRO L J, 1983. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 40: 1984-1998.

VALSAMIDIS A, FIGLUS J, RITT B, et al, 2021. Modelling the morphodynamic evolution of Galveston beach, Gulf of Mexico, following Hurricane IKE in 2008[J]. Continental Shelf Research, 218: 104373.

WANG N, HOU Y J, LI S Q, et al, 2018. Numerical simulation and preliminary analysis of typhoon waves during three typhoons in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 37(6): 1805-1816.

WILLOUGHBY H E, RAHN M E, 2004. Parametric representation of the primary hurricane vortex. part I: observations and evaluation of the Holland (1980) model[J]. Monthly Weather Review, 132: 3033-3048.

WILLOUGHBY H E, DARLING R W, RAHN M E, 2006. Parametric representation of the primary hurricane vortex. part II: a new family of sectionally continuous profiles[J]. Monthly Weather Review, 134: 1102-1120.

ZHANG G S, PERRIE W, 2018. Effects of asymmetric secondary eyewall on tropical cyclone evolution in hurricane IKE (2008)[J]. Geophysical Research Letters, 45: 1676-1683.

Research on Sea Surface Wind Field Model of Hurricane IKE (2008)

HE Yuanshou[1,3], WANG Enkang[2], LI Jianwei[1,3], AN Wei[1,3], SONG Shasha[1,3], JIN Weiwei[1,3], WANG Mengxiao[1,3]

（1. *Safety & Environmental Protection Branch*, *CNOOC Energy Technology & Services Ltd.*, Tianjin 300452, China;
2. *First Institute of Oceanography, MNR*, Qingdao 266061, China;
3. *Key Laboratory of safety & Environmental Protection of Offshore Oil Field*, *CNOOC Energy Technology & Services Ltd.*, Tianjin 300452, China）

Abstract: The accuracy of hurricane wind field simulation is of great significance to the hindcast of hurricane wind field. At the present, it is one of more rapid and commonly used methods to construct sea surface wind field of hurricane boundary layer through numerical modeling. By taking IKE, the 8th Atlantic hurricane that invaded the Gulf of Mexico in 2008, as an example, multiple parameter models are selected to compare and study the accuracy of hurricane wind field simulation. The results indicate that the selection of hurricane wind field model has significant influence on the accuracy of hurricane wind field simulation, and the Jelesnianski-1 model can be used for reproducing well the spatio-temporal characteristics of the wind field of Hurricane IKE. In addition, the models with variable coefficients, such as the Holland model and the Miller model, have also good applicability. By adjusting the variable coefficients, the wind profile of the wind field can conform well to that of the actual hurricane. Generally, the wind field constructed based on the ideal models can basically reflect the characteristics of the sea surface wind field in the core area of the hurricane, but the background wind field in the outer area of the hurricane cannot be reflected ideally. However, the analysis or reanalysis wind field data can reflect well the background wind field in the outer area of the hurricane. Therefore, the integration of the wind field data derived from numerical models with the analysis or reanalysis wind field data can significantly increase the numerical simulation accuracy of the sea surface wind field of Hurricane IKE.

Keywords: Hurricane IKE (2008); model of parameter wind field; Holland model; NDBC wind field; CCMP wind field; Gulf of Mexico

Received: March 8, 2024