

文章编号: 1004-4965 (2004) 02-0129-08

一种台风海面非对称风场的构造方法

黄小刚, 费建芳, 张根生, 陆汉城

(解放军理工大学气象学院大气科学系, 江苏 南京 211101)

摘 要: 针对台风数值预报中由于采用对称模型而导致预报误差的现实, 通过引入非对称分布的台风最大风速、最大风速半径等因子, 在得到台风报告中7级风和10级风的半径的基础上, 利用最佳权系数方案来得到非对称的台风外围风速分布因子, 从而对 Chan and Williams 1987 年提出的切向风廓线方案进行改造, 进而得到了台风海面非对称风场的计算式。检验表明, 该方法能够描述台风海面风场的非对称分布, 具有较好的应用前景。

关 键 词: 台风; 最大风速半径; 风向内偏角; 海面风场

中图分类号: P444

文献标识码: B

1 引 言

台风是发生在热带洋面上的天气系统, 观测资料十分稀少, 同时台风是属于中- α 尺度的天气系统, 受网格尺度和观测资料的影响, 数值模式客观分析场中的台风往往表现为一个弱扰动, 强度和位置与实况有很大的差异, 因此客观分析不足以描述数值天气预报模式所需要的热带气旋环流结构^[1], 于是人们采用人造台风的方法(台风 Bogus 技术)在初始场中加入一个基本反映台风结构的人造台风涡旋, 这是台风数值预报的关键之一, 其中台风海面风场是需要计算的重要物理量。

目前, 国内外各台风预报中心的台风风场模型多用对称风场, 一是通过经验公式, 首先计算出海平面气压场的分布, 其中被认为比较好的而又广泛应用的是藤田公式和 Myers 公式^[2~4]; 二是通过某种形式的切向风廓线直接得到台风的风场分布, 其中以 Chan and Williams 1987 年提出的切向风廓线方案为代表^[5~7]。这些方案中, 都要用到最大风速和最大风速半径等参数, 由于在实际计算中, 将这些参数取为常数, 因此只能反映圆对称的理想台风结构, 而不能反映不同台风结构的气压和风场分布。

关于台风的非对称性, 国内外已有很多的研究。陈孔沫^[8]用一根热带气旋外围的等压线替代难以确定的最大风速半径, 可以避免使用最大风速半径产生的误差, 只是外围等压线

收稿日期: 2002-12-06; 修订日期: 2003-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40175012)资助

作者简介: 黄小刚(1977-), 男, 四川泸县人, 在读博士生, 主要从事台风预报的研究。

预报场位置的确定还比较复杂,国外 Zou^[9]利用对称的台风模型通过四维同化方法得到非对称的初始场,从而得到较好的预报效果,但是由于技术并不完善以及将耗费大量的机时,目前还不能用于业务预报,因此,发展一个易于计算的非对称台风风场模型,具有重要的实际意义。

2 非对称风场方案

本文非对称风场方案是在 Chan and Williams 1987 年提出的利用台风切向风廓线来构造台风区域的水平风场方案的基础上得到的,方程如下

$$v(r) = v_{\max} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right) \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^b \right] \right\} \quad (1)$$

其中, $v(r)$ 为切向风, $v_{\max}$ 为近地面最大风速, $r_{\max}$ 为最大风速半径, b 为控制台风外围风速分布的因子, b 越小, 台风外围的风强度减小越慢。式中 $v_{\max}$ 、 $r_{\max}$ 、 b 取为常数, 因此, 通过此方案只能得到对称涡旋。

为了求得非对称的涡旋, 本文假定实际台风域内最大风速和最大风速半径是随方位角变化的。如图 1, 假设实线代表实际台风最大风速点的连线, 同时, 我们从简单的对称台风模型如藤田公式出发, 可求出具有统一台风中心的多组圆对称的等风速线, 对 A 点而言, 总会有一条等风速线 (如图中虚线) 与其相交, 且 A 点风速值与等风速线值相等, 则该圆形等风速线的半径就是 A 点处的最大风速半径。

2.1 最大风速半径计算式

以台风中心为极点的、静止台风域内任一空气质点的平面极坐标水平运动方程组^[10]为

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} + fu + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial q} + F_q \\ \frac{du}{dt} - fv - \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + F_r \end{cases} \quad (2)$$

其中, u 为径向速度, v 为切向速度, ρ 为大气密度, $f = 2w \sin \Phi$ 为科氏参数, w 为地球自转角速度, Φ 为 (r, θ) 处的纬度。 F_θ 和 F_r 分别为 θ 和 r 方向的摩擦力, 假定台风呈稳态, 即 $du/dt = dv/dt = 0$, 在圆形气压场假设下 $\partial p / \partial q = 0$, 从而得到力的平衡方程 (图 2)

$$\begin{cases} \frac{v^2}{r} + fv = \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} - F_r \\ \frac{u \cdot v}{r} + fu = F_q \end{cases} \quad (3)$$

由上图可见, 由于下垫面的摩擦阻力作用, 实际风将向等压面内侧偏离 β 角度, 称为风向内偏角, Φ_1 为摩擦阻力偏离风速反方向的角度, 一般取为 38° ^[11], 取摩擦系数为 k 。

式 (3) 中 r 是讨论点所处的流线曲率半径, 假定台风域内各质点以相同的速度 v_s 沿某一方向移动时, r 与该质点移动的轨迹曲率半径 r' 的关系^[12]为

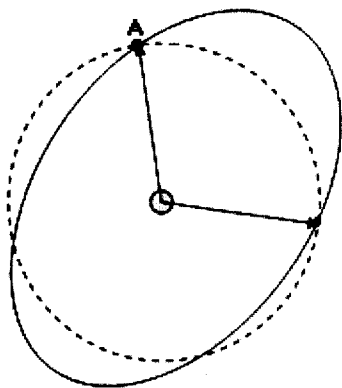


图1 本文方案示意图

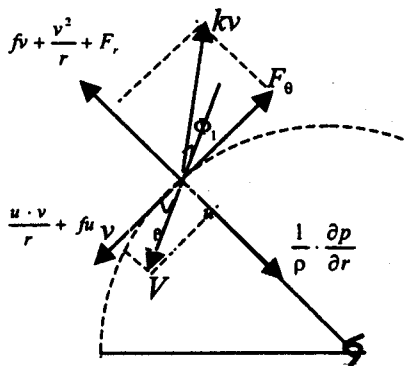


图2 台风中的作用力

$$\begin{aligned} r' &= r \cdot \frac{v}{v + v_s \cos \alpha} \\ v_r &= v - v_s \cos \alpha \\ v_q &= u + v_s \sin \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

式中 u 、 v 分别为静止热带气旋的切向和径向速度， v_θ 、 v_r 分别为移动热带气旋的切向和径向速度， α 为台风移动方向与流线的夹角，规定逆时针方向为正(图3)。

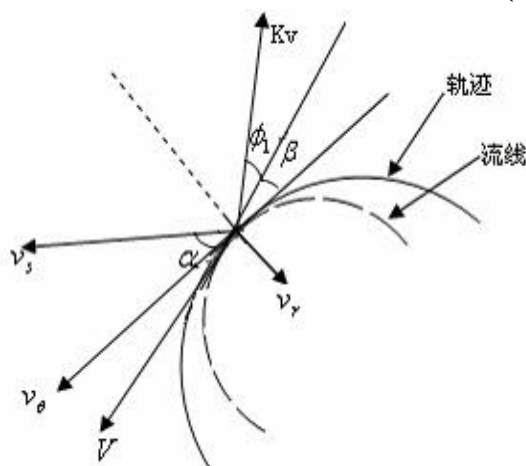


图3 台风诸元基本关系示意图

由图3 可得如下关系

$$\begin{aligned}
 v &= V \cdot \cos b \\
 u &= V \cdot \sin b \\
 F_q &= kV \cos(\Phi_1 + b) \\
 F_r &= kV \sin(\Phi_1 + b)
 \end{aligned} \tag{5}$$

如图 1, 取通过 A 点的台风域内圆对称气压模式由藤田公式决定, 则域内任意空气质点处

$$\begin{aligned}
 p &= p_\infty - (p_\infty - p_0) / \sqrt{1 + 2 \cdot (r'/r_{\max})^2} \\
 \frac{dp}{dr'} &= \frac{2(p_\infty - p_0) \cdot r'}{r_{\max}^2} (1 + 2 \cdot (r'/r_{\max})^2)^{-3/2}
 \end{aligned} \tag{6}$$

其中, p_0 为台风中心气压, p_∞ 为台风外围气压, p 是到台风中心距离为 r' 处的气压。式中 p_0 与所讨论点半径 r' 和方位角 q 无关, p_∞ 和 $r_{\max}$ 只与 q 有关, 而与 r' 无关。在圆形气压场域内, $\partial p / \partial q = 0$, 取讨论点处于点 A, 即最大风速点 $v_{\max}$ 处, 此时 r' 等于 $r_{\max}$, 则式 (6) 变为

$$\begin{aligned}
 p &= p_\infty - 3^{-1/2} (p_\infty - p_0) \\
 \frac{dp}{dr'} &= \frac{2 \cdot 3^{-3/2} (p_\infty - p_0)}{r_{\max}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

将状态方程

$$p = r k_c T \tag{8}$$

代入式 (3) 替换大气密度 r , 并令

$$A = \frac{2 \cdot 3^{-3/2} k_c T (p_\infty - p_0)}{p_\infty - 3^{-1/2} (p_\infty - p_0)} \tag{9}$$

式中 k_c 为气体常数, T 为海面气温, 将式 (7)、(9) 代入式 (3), 得

$$\begin{cases} \frac{v_{\max}^2 \cos^2 b}{r_{\max}} + \frac{v_{\max} v_s \cos a \cos b}{r_{\max}} + f v_{\max} \cos b = \frac{A}{r_{\max}} - k v_{\max} \sin(\Phi_1 + b) \\ \frac{v_{\max}^2 \sin b \cos b}{r_{\max}} + \frac{v_{\max} v_s \cos a \sin b}{r_{\max}} + f v_{\max} \sin b = k v_{\max} \cos(\Phi_1 + b) \end{cases} \tag{10}$$

假定最大风速 $v_{\max}$ 已知, 当热带气旋静止时, 其移动速度 v_s 等于零, 得到静止热带气旋的风向内偏角 b 和最大风速半径 $r_{\max}$ 为

$$\begin{aligned}
 b &= \arctan \left[\frac{k \cos \Phi_1 (A - v_{\max}^2)}{A (k \sin \Phi_1 + f)} \right] \\
 r_{\max} &= \frac{A - v_{\max}^2 \cos^2 b}{k v_{\max} \sin(\Phi_1 + b) + f v_{\max} \cos b}
 \end{aligned} \tag{11}$$

式中参数 $v_{\max}$ 取为台风报告中的最大风速。

当热带气旋移动时, 消去式 (10) 中的 $r_{\max}$, 令

$$\begin{aligned} a &= A^2(k \sin \Phi_1 + f) + k^2 \cos^2 \Phi_1 (A - v_{\max}^2)^2 \\ b &= 2kAv_{\max}v_s \cos a \cos \Phi_1 (k \sin \Phi_1 + f) \end{aligned} \quad (12)$$

$$c = k^2 v_{\max}^2 v_s^2 \cos^2 a \cos^2 \Phi_1 - k^2 \cos^2 \Phi_1 (A - v_{\max}^2)^2$$

$$\text{得} \quad a \cdot \sin^2 b + b \cdot \sin b + c = 0 \quad (13)$$

$$\text{有解} \quad \sin b = -\frac{b}{2a} \pm \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (14)$$

取式(14)的正解代入式(10), 得到移动热带气旋的风向内偏角 b 和最大风速半径 $r_{\max}$ 的计算公式为

$$\begin{aligned} b &= \arcsin\left(-\frac{b}{2a} \pm \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right) \\ r_{\max} &= \frac{A - v_{\max}^2 \cos^2 b - v_{\max}^2 v_s \cos a \cos b}{kv_{\max} \sin(\Phi_1 + b) + fv_{\max}^2 \cos b} \end{aligned} \quad (15)$$

2.2 最大风速

台风任意方向的最大风速 $v_{\max}$ 由环流最大风速 $v'_{\max}$ 和台风移速 v_s 两部分组成^[13]。最大环流风速与方向无关, 故静止时任意方向的最大风速是相等的。当移动时假定所有方向最大风速的最大值 (v_{a_0}) 为已知, 且方向与移动方向相同, 那么环流风速最大值表示为

$$v'_{\max} = v_{a_0} - v_s \quad (16)$$

任意方向 a 的最大风速 $v_{\max}$ 表示为

$$\begin{aligned} v_{\max} &= \sqrt{v_q^2 + v_r^2} \\ v_q &= v'_{\max} \cos b + v_s \cos a \\ v_r &= v'_{\max} \sin b + v_s \sin a \end{aligned} \quad (17)$$

b 取为静止热带气旋最大风速半径处的风向内偏角。

2.3 参数 b 的求取

在国内外的台风报告中, 台风结构参数包含有中心最低气压, 近中心最大风速, 30 knots (约 15.4 m/s) 和 50 knots (约 25.7 m/s) 风半径 r_{30} 、 r_{50} 等。这样, 在通过本文方案求得随方位角变化的最大风速和最大风速半径后, 我们可以利用式(1)去拟合 30 knots 或 50 knots 风和最大风速区分布来求得 b

$$\ln \left[\frac{v_1}{v_{\max}} \cdot \frac{r_{\max}}{r_1} \right] = \frac{1}{b} \cdot \left[1 - \left[\frac{r_1}{r_{\max}} \right]^b \right] \quad (18)$$

其中, v_1 、 r_1 分别取为 v_{30} 、 r_{30} 或 v_{50} 、 r_{50} , 这样我们可以分别得到 b_1 和 b_2 , 设其方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 , 则非对称参数 b 为

$$b = (1 - w^*) \cdot b_1 + w^* \cdot b_2$$

其中, w^* 为最佳权系数, 取为^[14]

$$w^* = \frac{s_1^2}{s_1^2 + s_2^2}$$

在求得随方位角变化的最大风速 $v_{\max}$ 、最大风速半径 $r_{\max}$ 和参数 b 后, 利用式 (1) 就能求得非对称风场。

3 计算检验

3.1 资料来源

本文采用的资料来自国家气象中心 T_{106} 数值预报分析场, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。以及台风警报所提供的台风中心位置、气压、中心附近最大风速, 以及移向、移速、50 knots 和 30 knots 风半径等 (表 1)。

表 1 9914 号热带气旋的基本要素

日期	纬度 / $^\circ\text{N}$	经度 / $^\circ\text{E}$	最大风速 / ms^{-1}	中心气压 / hPa	移向 / $^\circ$	移速 / ms^{-1}
1999.10.6.00	18.5	118.9	35.0	970.0	288.0	3.25

3.2 计算实例

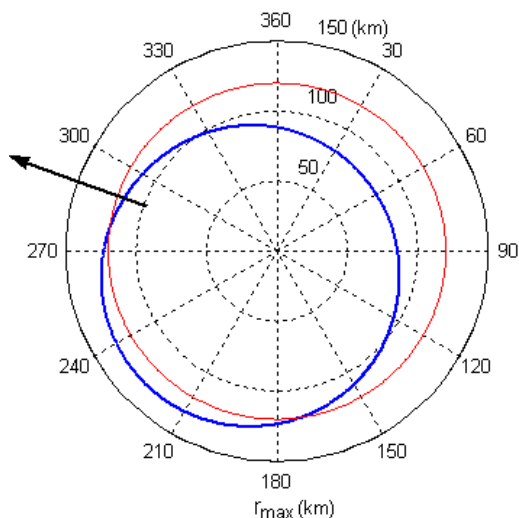


图 4 台风域内最大风速半径随方位角分布
粗实线表示非对称分布, 细实线表示最大风速半径取为常数 120km, 箭头表示台风移向。

选取 9914 号热带气旋个例, 利用改进前的式(1)计算中, 令 $v_{\max} = 35 \text{ m/s}$, $r_{\max} = 120 \text{ km}$, $b = 0.46$ 。计算区域为 $25^\circ \times 25^\circ$, 分辨率为 0.3125° , 网格数为 81×81 。

由图 4、5、6 可见, 采用本文方案后, 台风域内最大风速、最大风速半径和参数 b 随方位角均呈现非对称分布, 在台风移向的右后侧, 出现最大风速的极大值和最大风速半径的极小值, 同时图 3 表明, 风速在台风移向的右后侧减弱速度比左前侧要慢, 这与观测事实和经典台风理论^[15]是吻合的。

图 7 和图 8 验证了以上的分析, 同时本文方案改进了传统对称风场计算方案无法解决的台风风场计算分布域偏大的缺点, 使之更加符合观测实际。

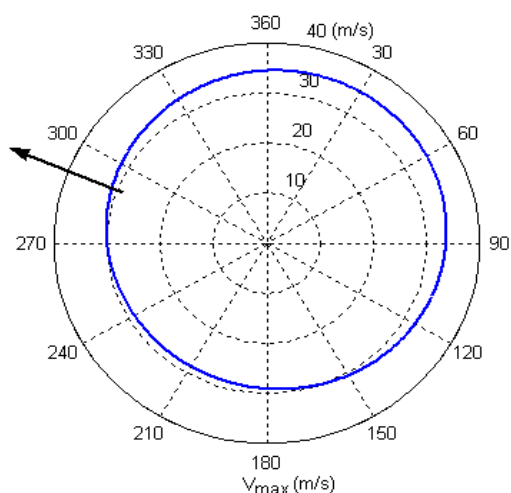


图5 台风域内最大风速随方位角分布
箭头表示台风移向。

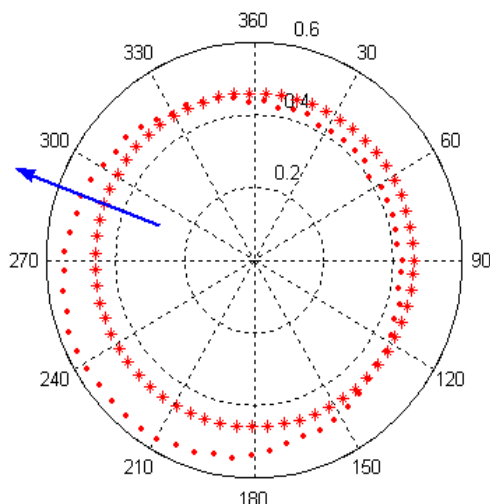


图6 参数 b 随方位角分布
“*”表示参数 b 取为常数 0.46, “•”表示
参数 b 由本文方案求取, 箭头表示台风移向。

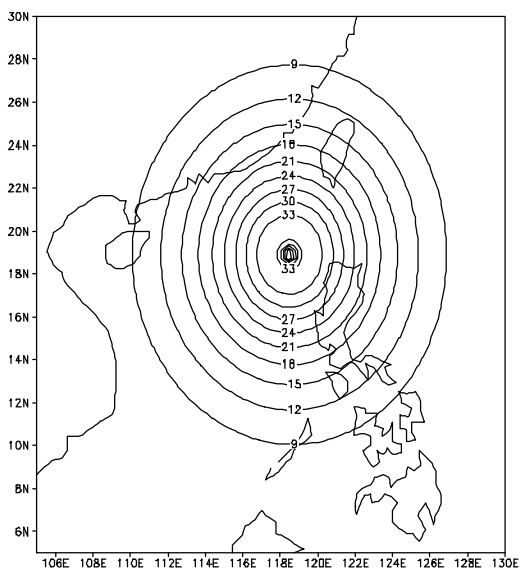


图7 由式(1)求得的台风域内对称风速分布

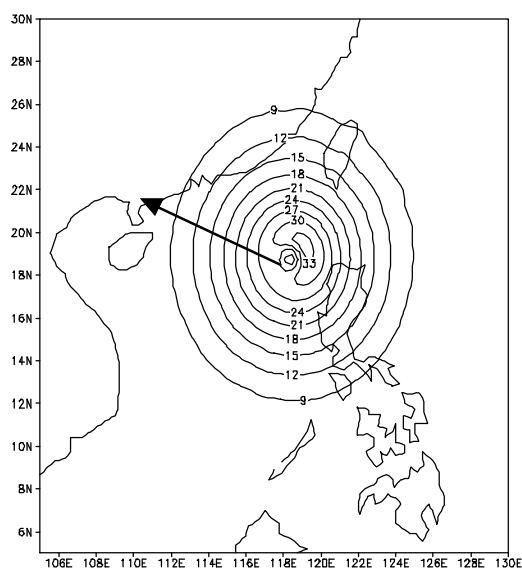


图8 由本文方案求得的台风域内非对称风速
分布 箭头表示台风移向。

4 结 论

(1) 本文提出的台风域内风场的计算方法包括计算从台风中心到外围各个方向的最大风速、最大风速半径以及控制台台风外围风速分布的参数 b 。该方法认为台风海面风场是由无数个圆形气压场决定的风场中的一点所叠加而成的, 计算结果反映了台风海面风场的非对称结构, 避免了由于最大风速、最大风速半径及参数 b 取为常数带来的误差。

(2) 本文方案计算方便, 所需资料易得, 所得结果与理论和实际符合, 利于实际应用。本方案还需在实际台风模式中进行预报试验, 这是我们即将进行的工作。

致 谢: 本文在完成过程中得到胡邦辉副教授的热情帮助, 在此深表谢意!

参 考 文 献:

- [1] LESLIE L M, HOLLAND G J. On the bogussing of tropical cyclones in numerical models: a comparison of vortex profiles[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 1995, **56**: 101—110.
- [2] IWASAKI, NAKANO H, SUGI M. The performance of a typhoon track prediction model[J]. *J Meteor Soc Japan*, 1987, **85**: 555—570.
- [3] MATHUR M B. The National Meteorological Center's quasi-Lagrangian model for hurricane prediction[J]. *Mon Wea Rev*, 1991, **119**: 1419—1447.
- [4] 王国民, 王诗文, 李建军. 一个人造台风方案及其在移动套网格模式中的应用[J]. *热带气象学报*, 1996, **12**: 9—17.
- [5] FIORINO M, ELSBERRY R L. Some aspects of vortex structure in tropical cyclone motion[J]. *J Atmos Sci*, 1989a, **46**: 975—990.
- [6] WANG Yu-qing. On the bogussing of tropical cyclones in numerical models: the influence of vertical structure[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 1998, **65**: 153—170.
- [7] 孟志勇. 台风和暴雨数值模拟初值影响问题的研究及技术方案设计[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2001.
- [8] 陈孔沫. 台风海面最大风速的计算[J]. *海洋学报*, 1989, **11**: 31—41.
- [9] ZOU X, XIAO Q. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme[J]. *J Atmos Sci*, 2000, **57**: 836—860.
- [10] 钮学新. 热带气旋动力学[M]. 北京: 气象出版社, 1992. 12—14.
- [11] 福地章. 海洋气象讲座[M]. 东京: 株式会社成山书堂, 1975. 44.
- [12] 吕美仲, 彭永清. 动力气象学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 92.
- [13] 胡邦辉, 谭言科. 海面热带气旋域内风速分布[J]. *大气科学*, 1999, **23**: 316—322.
- [14] 孙仲康. 雷达数据数字处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. 175.
- [15] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979. 485—488.

CONSTRUCTION OF WIND SPEED IN TYPHOON ON OCEAN SURFACE

HUANG Xiao-gang, FEI Jian-fang, ZHANG Gen-sheng, LU Han-cheng

(Institute of Meteorology, PLAUST, Nanjing 211101, China)

Abstract: In this paper, we first adopt the asymmetric maximum wind velocity and radius of the maximum wind velocity formulas, and then use the optimal coefficient scheme to get the parameter which controls the distribution of the typhoon wind outer structure with the consideration of real 30 knots and 50 knots wind radius. In addition, we improve the tangential wind profile scheme of typhoon brought forward by Chan and Williams (1987) and then typhoon ocean surface asymmetric wind speed is shown. The experiment shows that this method can describe the asymmetry distribution of wind speed in typhoon over the ocean surface and would have a broad prospect for operational practice.

Key words: typhoon; maximum wind velocity radius; inner deflection angle of wind direction; wind speed of ocean surface