

台风异常路径的模拟(II) ——CD 方法^{*}

林 緬, 李家春

中科院力学所环流室, 北京 100080

摘要: 我们提出采用等值线动力学(CD)方法研究台风的运动, 讨论了在不同的环境引导气流下, 台风的非对称内部结构对台风异常路径的影响. 为了证明该方法的可行性, 我们以 Yancy (9012) 台风为例, 模拟了台风从 8 月 20 日到 22 日的运动. 数值计算结果表明, 这一方法能定性地描述台风打转趋势.

关键词: 台风; 异常路径; 等值线动力学(CD)方法

分类号: O354 **文献标识码:** A

引 言

影响台风预报精度的主要原因是由于台风移动路径的异常. 台风的运动受许多因素的制约, 比如, 环境引导气流, 下垫面的情况以及台风内部结构等等, 这些因素使得台风的运动复杂多变. 八十年代初期的研究发现, 台风的非对称内部结构是导致它路径异常的主要因素, 尤其是在弱环境引导场中, 后来一些气象学家通过模拟台风的运动证实了这一点. 例如, Kurihara (1992)^[1] 假设 Andrew 飓风的初始场为非对称, 计算了飓风的走向 ..., 同时, 陈联寿(1992)^[2] 在模拟 ABE 台风时也作了这一假设. 他们的数值计算结果表明, 恰当的初始非对称结构假设能够很好地提高预报精度.

我们这里关心的焦点是台风的内部非对称结构形以后台风的走向. 虽然台风的运动已经从许多角度进行过讨论, 但是缺乏对台风运动物理机制的了解仍然是关键所在. 所以在该文中我们用涡动力学方法讨论一个非对称结构的台风在弱环境流场中如何运动, 并且应用等值线动力学(CD)方法分析了两涡之间的相互作用. 最后, 我们通过模拟 Yancy 台风的路径证实了这一方法的可行性.

1 CD 方法

在第一部分中, 我们已经讨论了如何用 Rankine 涡系来代替一个对称的或非对称台风, 所以台风的运动趋势至少在定性上可以用该涡系的运动方向来表示. 首先我们引入 Zabusky^[3] 提出的 CD 方法模拟 Rankine 涡的运动. 所谓的 CD 方法, 即解涡量为常数的初值问题, 它把二维的面积分简化成一维的线积分.

为了研究台风运动的物理机制, 我们不考虑台风内部非对称结构形成的原因. 假设正压

* 收稿日期: 1996.07.29; 修订日期: 1998.08.15
基金来源: 国家科技攻关项目资助课题(85.906.07)
作者简介: 林緬(1960~), 女, 博士

模型, 则 Euler 方程为:

$$\xi_x + u\xi_x + v\xi_y = 0, \tag{1.1}$$

$$\Delta\phi = -\xi \tag{1.2}$$

在有限区域内, 涡度 ξ 为常数, 其中流函数 ϕ 可以写成:

$$\phi(x, y) = -\frac{1}{2\pi} \int dS \xi(\zeta, \eta) \log \frac{r}{R}, \tag{1.3}$$

这里, $dS = d\zeta d\eta$, $r^2 = (x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2$, ζ, η 是随体坐标, $\log(r/R)$ 为 Poisson 方程 (1.2) 的 Green 函数, 用 Green 公式可以把上式中的面积分化成线积分, 这样整个涡块的运动趋势可以通过等值线的运动来描述.

假设在涡块内有一内接 N 边形逼近涡边界, 其 n 个节点在边界上, h_n 代表 n 和 $n+1$ 点之间的距离, 其长度随时间变化, 那么涡边界的运动速度为:

$$u = \frac{1}{2\pi} \sum [\xi_n] \int \log \left(\frac{r}{R} \right) [x \cos \theta_n - y \sin \theta_n] dS_n \cdot$$

对每一 h_n 来说:

$$(\Delta u_n) = \frac{1}{4\pi} \frac{[\xi_n]}{h_n} \left\{ \log \left(\frac{r}{R} \right)^2 + (1 - \mu_n h_n^{-1} \beta_n) \log q_n - 2 + 2(1 - \mu_n^2)^{1/2} \left[\frac{r_n}{h_n} \tan^{-1}(\beta_n) \right] \right\} \quad (n \neq 1, N), \tag{1.4}$$

当 $n = 1$ 和 $n = N$ 时:

$$\begin{aligned} (\Delta u_1) &= \frac{1}{2\pi} [\xi_1] h_1 \left[\log \left(\frac{h_1}{R} \right) - 1 \right], \\ (\Delta u_N) &= \frac{1}{2\pi} [\xi_N] h_N \left[\log \left(\frac{h_N}{R} \right) - 1 \right], \end{aligned} \tag{1.5}$$

这里:

$$\begin{aligned} [\xi_j] &= \xi_0 - \xi_1, \quad q_n = \frac{1}{h_n} - 2 \left(\frac{h_n}{r} \right) \mu_n + \left(\frac{h_n}{r_n} \right)^2 g_i \\ \beta_n &= \left(\frac{h_n}{r_n} \right) (1 - \mu_n^2)^{1/2} \sqrt{\left[\frac{1}{\zeta} \left(\frac{h_n}{r_n} \right) \mu_n \right]}. \end{aligned}$$

在 $p+1$ 时刻, 第 m 点坐标为:

$$x_m^{p+1} - y_m^{p+1} = 2\Delta t \sum (\Delta u_{nm})^p (x \cos \theta_n + y \sin \theta_n). \tag{1.6}$$

我们采用中心蛙跳的格式, 同时时间步长必须满足以下条件:

$$\Delta t < \min \left\{ h_n / \max |u(x_n, y_n)| \right\}. \tag{1.7}$$

下面我们考虑一个典型的两涡模型, 两涡的强度相等, 旋转方向相同. 初始位置分别在 $(0, C/2)$ 和 $(0, -C/2)$, 这里 C 代表两涡中心在初始时刻的距离. 应用 (1.4) 式我们分别计算了四个不同间距情况下, 两涡的相互作用. 从图 1 我们可以看出, 当 C 减少时, 涡边界的变形速度加快. 其变化趋势类似于两台风相互作用时的情形. 作为算例, 下面我们讨论双涡组成的不对称台风的移动.

2 双涡系的运动

为了分析环境引导气流场对台风运动的影响, 我们假设涡系和环境场之间没有相互作用. 环境场为均匀东(西)风带或无环境场, 涡系为一气旋主涡和一反气旋次涡, 给定两涡的参数和真实台风同数量级, 无量纲化参数列在表 1 中.

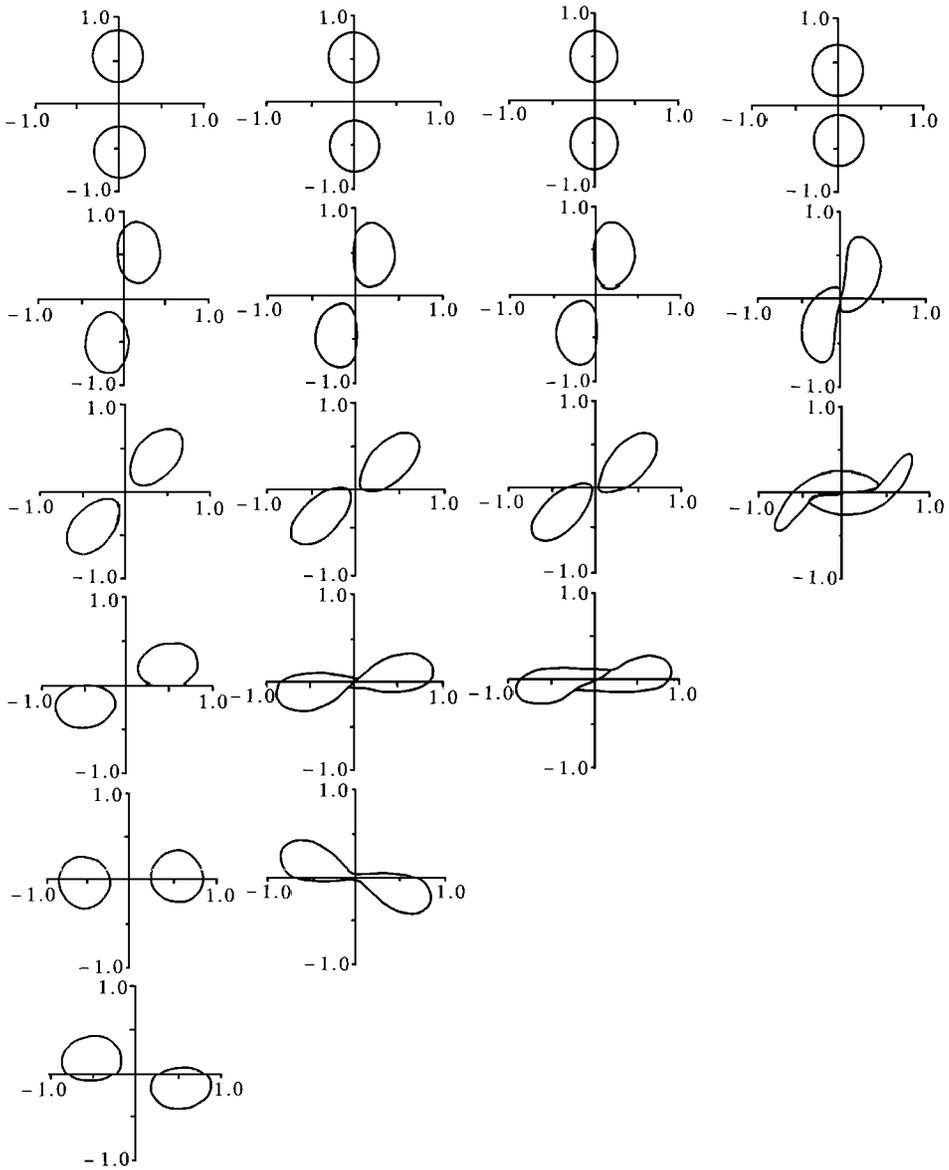


图 1 两涡的相互作用(当 $t = 0, 0.4, 0.9, 9.9, 14.9$; $c = 1.10, 1.02, 1.00, 0.8$)

表 1

长度	$L = 100 \text{ km} = 10^6 \text{ m}$	时间	$T = 24 \text{ h} = 8.64 \times 10^4 \text{ s}$
速度	$V = L/T = 11.57 \text{ m/s}$	涡度	$\xi = 1/T = 0.0000115/\text{s}$

给出几组无量纲化以后的涡参数(表 2)•

表 2

两涡中心距离 C	0.1 0.2 0.3
主涡涡度 ξ_p	-20
次涡涡度 ξ_s	5 10 15
环境场速度 V	0.01 0.1 0.2

表 3

U	路径
$U \gg D\xi/C$	近似于直线
$U > D\xi/C$	蛇形
$U < D\xi/C$	打转

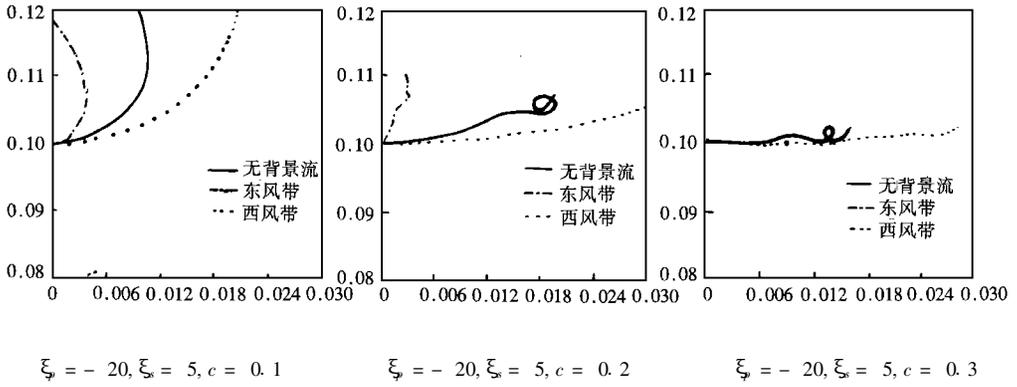


图 2(a) 在不同背景下,当两涡间隔离变化时主涡路径曲线

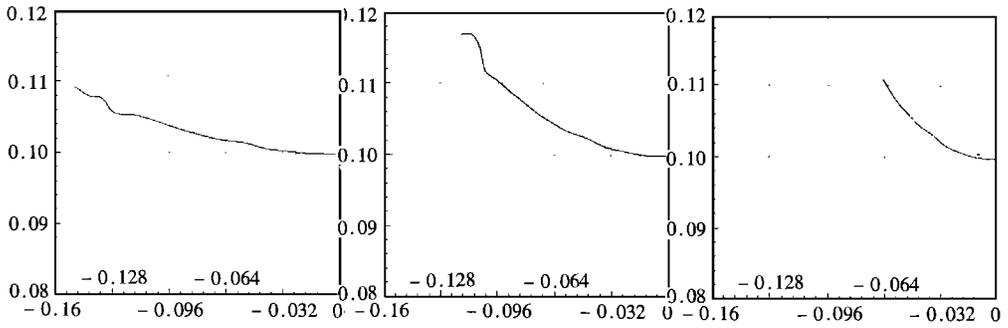


图 2(b) 当两涡相对强度变化时主涡路径曲线

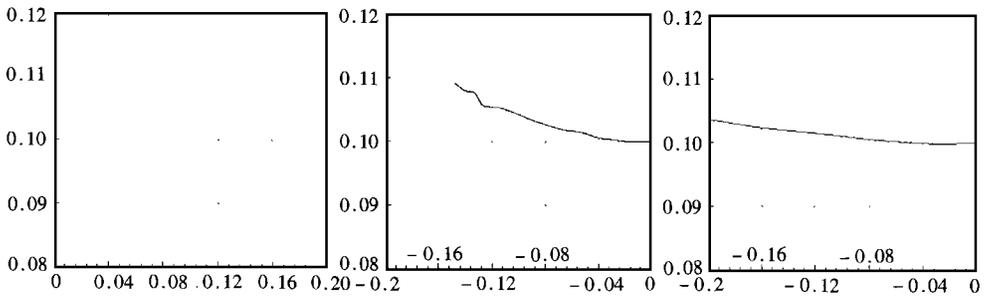


图 2(c) 当背景场强度变化时主涡路径曲线

考虑三种情况下主涡在 48h 内的移动路径: (1) 改变两涡的距离; (2) 改变两涡的相对强度; (3) 改变环境场的强度。

在弱环境中,如果两涡的相对强度保持不变,无论是在东风带还是在西风带,主涡的打转频率随着两涡间距的减少而增加,路径由平缓逐渐开始打转。这一现象可以认为是随着间距的减少,流场非对称性表现愈来愈明显(图 2a)。我们同时计算了无环境场的情况,结果类

似。比较图 2(a) 中三种背景场的路径曲线, 我们发现, 处于东风带的台风路径比处于西风带的更加敏感, 这是因为次涡的旋转方向和东风走向相反, 两者之间存在着相互制约, 而在西风带中它们之间是相互叠加的关系。如果两涡的距离 C 保持不变, 那么当次涡强度增加时, 主涡打转半径减小, 也就是说, 随着次涡强度的增加主涡路径经历了从直线到打转的过程(图 2b)。

在强环境场中, 主涡路径类似于单涡情形呈近似直线状(图 2c)。因此我们说台风路径不仅和环境场的大小有关, 同时在弱环境场下还受到涡相对强度以及两涡间距的影响。

为了得到定量的并且简单易行的判据, 我们又用离散涡的方法, 通过点涡模型讨论, 得到在次涡较弱并且离主涡较远时的近似解析解^[4]。我们的结论是在均匀环境 U 下:

1)

$$\omega \propto \frac{\xi_0 D_p^2}{C^2},$$

$$r \propto \frac{\xi_0^2 D_0^2}{\xi_s^2 D_p^2},$$

这里 ω 是打转频率, r 是打转半径, D_p, D_s 分别代表主涡和次涡的初值直径。

2) 均匀环境场 U 和路径的关系(见表 3):

为了证明 CD 方法模拟台风路径的可行性, 下面我们以 Yancy 台风(9012) 为例, 选取 500hPa、900819 零点的观测数据为起始点, 预测其随后的运动, 并与实际路径作比较。

3 模拟 Yancy 台风路径

Yancy 台风是 1990 年开始由美国、前苏联、日本等国家联合观测的 7 个目标台风之一, 它在台湾岛附近形成, 最后在我国的福建省登陆, 其路径如图 3 所示。

选 8 月 20 日零时的观测数据为初始场, 由此时的速度流场图发现一气旋和一反气旋, 首先采用第一部分中介绍的方法, 我们可以得到合适的涡参数来代替这个台风, 然后, 如何选环境场成为关键问题。为了估计引导气流的大小, 我们把现场观测数据作了一些处理。由于这些观测数据已经包括台风的影响, 为了得到实际引导气流场, 应该抠去台风速度场。由董克勤和 Neumann 的大量统计表明, 西北太平洋(包括南海)的台风路径预报以用 500 或 700hPa 层上的地转风作为引导气流效果为最好, 所以我们可以从某一时刻的 500hPa 高度场, 获得求台风影响区域平均高度场, 将它从实测场中减去, 即可以得到一个近似的扣去台风影响后的引导气流高度场, 并可以计算引导气流的速度场, 作为台风运动的背景流场。这一过程可以写成^[5]:

$$V(r)_{\text{steer}} = V(r)_{\text{obs}} - \sum V(r)_{\text{ave}}^{(n)} t^{(n)},$$

这里 $V(r)_{\text{ave}}$ 是平均速度, t 是第 n 个气旋的单位切向矢量, n 代表在该区域内的气旋和反气

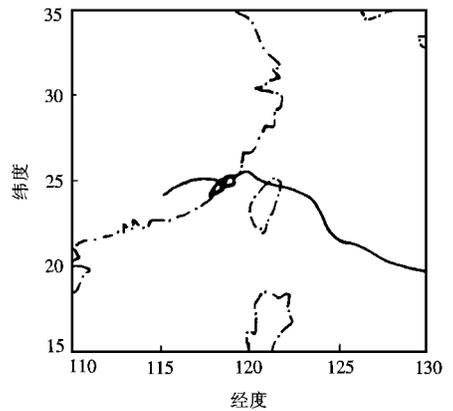


图 3 Yancy 台风路径

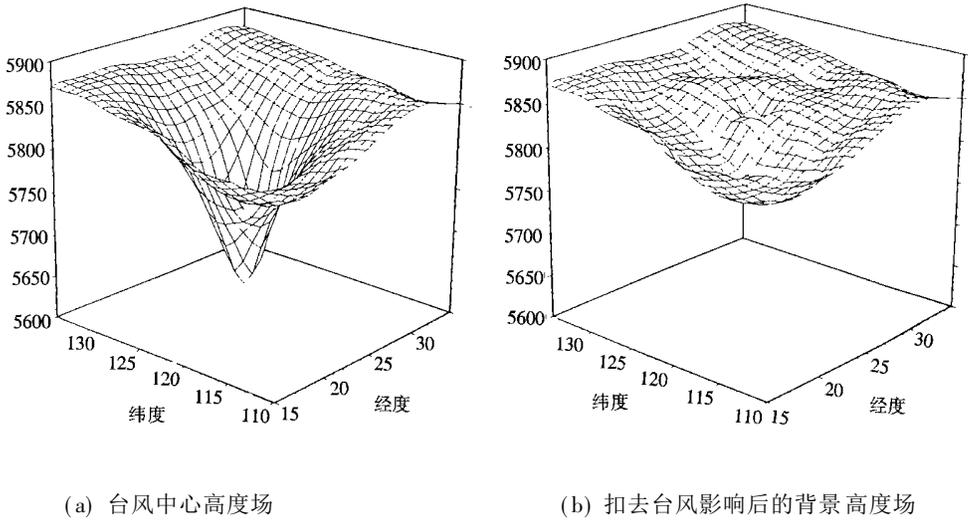


图 4 Yancy 台风 8 月 19 日零时

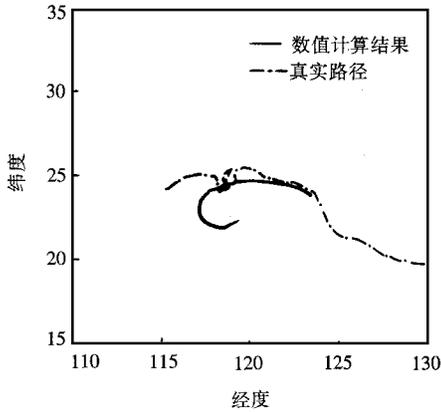


图 5 计算结果和实际路径比较

旋数量。图 4 (a) 和图 4 (b) 分别绘出了 19 日零时的高度场和扣去台风影响后的环境高度场。

假设主涡中心可以看成是台风的中心并且引导气流在短时间内没有变化。用上一节介绍的方法, 我们模拟了 20 日到 22 日的路径(如图 5 所示)。可以看出, 在开始的 24 小时之内, 即 20 日零点到 21 日零点, 计算结果和实际路径非常接近, 22 日台风开始打转, 模拟结果趋势和实际情况也基本一致。大约在 23 日左右, 台风在福建省浦田附近出现两次打转, 数值模拟与之有差异。从初始观测数据可以知道, 这时台风内部已形成三个涡, 两涡模拟已不能描述此时的台风结构。在另一篇文章里, 我们将详细讨论这一情况。

4 结 论

最后, 我们总结三个主要结论如下:

1) 我们应用 CD 方法计算了涡块的运动并从定性和定量的角度讨论了台风路径。比较这些结果, 我们发现打转频率和主涡强度成正比, 和两涡距离的平方成反比。

2) 我们定性地得出推论, 在弱环境中, 台风的运动更加敏感, 另外得到一判断台风何时开始打转的判据。

3) CD 方法可以用于模拟真实台风的运动。根据第一部分和以上所介绍的方法, 我们可以方便地预测一至两天的台风走向。方便和快捷正是这一方法的优越所在。其可靠性取决于环境流场和初始不对称台风结构确定的准确程度。

总之, 应用涡动力学方法预测真实台风路径是非常有用的。然而, 我们应该看到正压模型比较简单, 有时应考虑斜压效应, 在一些情况下, 需要采用三涡模型模拟台风路径。

致谢 作者曾与陈联寿、范永祥教授进行过有益的讨论, 谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] Kurihara Y. Advanced modeling of tropical cyclones[A]. Proc. INSU/WMO Symposium on Tropical Cyclone Disasters[C]. 1992, 190~ 201
- [2] Chen L S, Xu X D. An overview on tropical cyclone disaster and preliminary study [A]. In: J Lighthill Z Zheng G Holland K Emanuel, eds, I on "SPECTRUM_90" Tropical Cyclone Disaster [C], Beijing University Press, 1992, 31~ 44
- [3] Zabusky N J. Contour dynamics for the Euler equations in two dimensions[J]. J Computational Physics, 1979, **30**:96~ 106
- [4] Dong K, Neumann C J. The relationship between typhoon motion and environmental geostrophic flow, Mon Wea Rev, 1986, **114**: 115~ 122
- [5] Li J C, Kwok Y K, Fung J C H. Vortex dynamics in the studies of looping in tropical cyclone tracks [Z]. TR 95_6_3, HKUST 1995

Simulation of Typhoon's Anomalous Track (II) —— CD Method

Lin Mian Li Jiachun

Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, P R China

Abstract: Contour dynamics (CD) method for the motions of typhoon is presented in this paper. The effect of asymmetric inner structure on the typhoon's anomalous track has been discussed in different environmental steering. To demonstrate the feasibility of the method, the track of Typhoon Yancy (9012) is concerned with. The numerical results show that the method can describe the tendency of looping qualitatively.

Key words typhoon, anomalous track, contour dynamics (CD) method