

文章编号: 1000-2022(2000) 04-0469-06

应用非对称结构理论制作台风路径预报

田永祥¹, 炎利军¹, 赵远东², 江燕如³

(南京气象学院 1. 大气科学系; 2. 计算机科学与技术系; 3. 气象台, 南京 210044)

摘 要: 阐述应用非对称结构理论作台风路径预报的技术原理。应用该理论较好地预报出 9012 号台风(Yancy)西行、9414 号台风(Doug)转向和 9417 号台风(Fred)登陆。

关 键 词: 非对称结构理论; 预报; 台风路径

中图分类号: P457.8 文献标识码: A

近十年来, 热带气旋的观测分析、数值模拟和理论研究取得显著进展。由于探测技术的进步, 人们获得热带气旋环流区域内的常规和非常规观测资料。观测分析研究揭示了热带气旋结构和运动特征。Marks 等^[1]发现: 在非对称流场中, 热带气旋中心附近存在小尺度涡旋。徐祥德等^[2]发现: 在热带气旋对流层中低层有次天气尺度的涡旋和相应的通风气流, 而通风气流对热带气旋有“引导”作用。观测事实分析深化了对热带气旋移动和发展规律的认识, 印证了理论研究的结果, 并为理论研究提出了新的课题。

Fiorino 等^[3]应用无辐散正压模式模拟热带气旋的运动, 提出了非对称结构理论。即在热带气旋的非对称流场中, 由 β 涡旋决定的通风气流与热带气旋移动密切相关。陈联寿等^[4]、田永祥等^[5,6]研究动力过程(行星涡度平流和相对涡度平流)影响热带气旋非对称结构及其移动的物理机制, 深化了正压涡旋动力学。

Wang 等^[7]、田永祥^[8]、以及 Wang 等^[9]研究斜压过程对热带气旋传播的贡献。结果表明: 涡旋的垂直耦合对其移动有一定影响, 但涡旋的移动仍主要由其内核区的非对称环流所决定。

本文首先阐述应用非对称结构理论制作台风路径预报的技术原理, 然后给出台风个例预报试验结果, 最后指出这种台风路径预报方法存在的问题。

1 技术原理

1.1 通风气流和通风气流矢量

在热带气旋环流区域内, 可以把海平面气压(或位势高度)分解为其轴对称分量和非对称分量^[10]。在非对称海平面气压场中, 热带气旋中心附近存在偶极子型的涡旋对(gyres)。在理想的情况下, 一个反气旋性涡旋位于热带气旋中心以东, 一个气旋性涡旋位于热带气旋中心以西, 两涡旋中心相距 1 000 km 左右。由于这种非对称涡旋的形成与行星涡度平流($-\beta v$)有

收稿日期: 1999-12-21; 改回日期: 2000-05-22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49775259)
作者简介: 田永祥, 男, 1940 年 3 月生, 教授

关,所以称其为大尺度 β 涡旋对(large-scale beta gyres)^[3]。

在热带气旋中心附近,大尺度气旋性、反气旋性涡旋之间有一股较均匀的气流,称为通风气流(ventilation flow)^[3]。由通风气流速度和方向构成通风气流矢量。

观测分析、数值模拟和理论研究结果表明:通风气流与热带气旋移动密切相关。因此,可以应用通风气流方向和速度作为预报热带气旋移向和移速的一个参考指标。

1.2 通风气流矢量的计算

Fiorino 等^[3]提出了一种计算通风气流矢量的方法。在实际应用中,为了充分考虑热带气旋中心附近尺度更小的涡旋对其移动的影响,田永祥^[8]提出了一种改进的计算通风气流的方法,其计算程序简述如下。

(1) 选取以热带气旋中心为圆心、半径为 r 的圆形区域 A 。

(2) 应用公式

$$u_a = - \frac{1}{f \rho} \frac{\partial p_a}{\partial y}, \quad v_a = \frac{1}{f \rho} \frac{\partial p_a}{\partial x}。$$
 (1)

由非对称海平面气压 p_a 分别计算区域 A 内所有网格点上的非对称风速分量 $u_a(x, y, t)$ 和 $v_a(x, y, t)$ 。

(3) 在区域 A 内分别求出 $u_a(x, y, t)$ 和 $v_a(x, y, t)$ 的平均值 $\bar{u}_a(t)$ 和 $\bar{v}_a(t)$ 。

(4) 应用公式

$$V_{vf} = \sqrt{\bar{u}_a^2 + \bar{v}_a^2},$$
 (2)

$$\theta_{vf} = \tan^{-1}(\bar{v}_a / \bar{u}_a)。$$
 (3)

分别计算某一时刻通风气流速度 $V_{vf}(t)$ 和方向 $\theta_{vf}(t)$ 。由 $V_{vf}(t)$ 和 $\theta_{vf}(t)$ 构成通风气流矢量。

1.3 台风路径预报流程

应用非对称结构理论制作台风路径预报流程(图 1)。对于某一沿海省份,选择关键预报区域。应用预报区域内测站的经度、纬度和海平面气压插值求出各网格点的海平面气压。将海平面气压分解为对称和非对称分量。应用(1)~(3)式由非对称海平面气压计算通风气流矢量。由于通风气流与台风移动密切相关,所以可将通风气流方向和速度作为参考指标,做出台风移向和移速的预报。

2 台风个例预报试验

2.1 9012 号台风(Yancy)

9012 号台风于 1990-08-11T 08(北京时)在加罗林群岛以北的洋面上生成。起初它向偏西、西北移动。在 13 日 20 时至 18 日 08 时期间,该台风转向偏西移动。随后它又折向西北移动。19 日 11 时,该台风在台湾基隆登陆后,在台中以北经历了一个小的逆时针打转,于 19 日 20 时

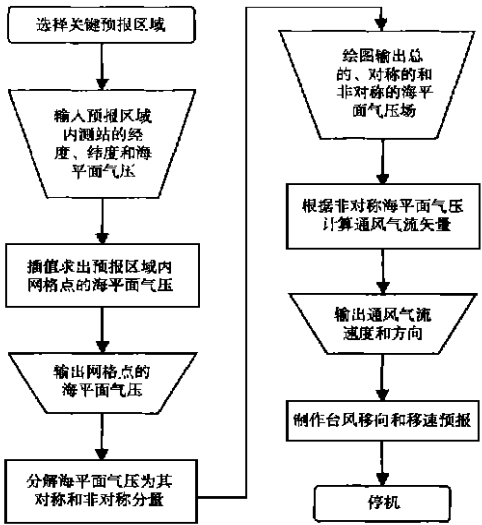


图 1 应用非对称结构理论制作台风路径预报流程

Fig. 1 The flow chart of forecasting typhoon tracks applying the asymmetric structure theory

移入台湾海峡,位于福建泉州以东约 200 km 的海面上(图 2)。其中心气压为 965 hPa,最大风速为 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [11]。

将 19 日 20 时 9012 号台风的海平面气压分解为其对称和非对称分量(图 3)。根据非对称海平面气压计算该台风的通风气流矢量(表 1)。由台风路径资料可以计算出其移向和移速。计算结果表明:该时刻 9012 号台风以 $V_c=3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度向西北偏西移动($\theta=306^\circ$)。由表 1 可知,在半径 r 为 1 000~1 200 km 的圆形区域内,通风气流方向、速度与台风移向、移速基本一致。由图 3b 可见,9012 号台风中心附近的通风气流“引导”它向西北偏西移动。

应用高空 500 hPa 非对称位势高度计算 19 日 20 时 9012 号台风的通风气流矢量。结果表明^[8]:在半径 r 基本相同的圆形区域内,通风气流方向偏离于台风移向的左侧,而通风气流

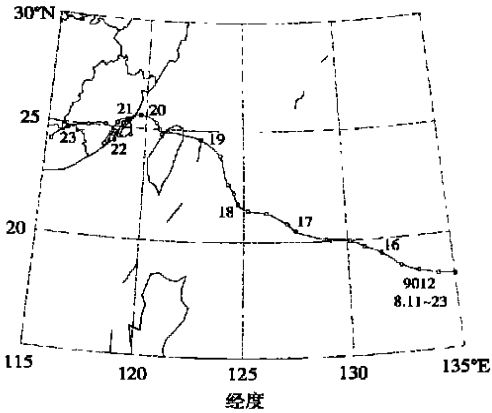


图 2 9012 号台风路径图
Fig.2 The track of Typhoon 9012

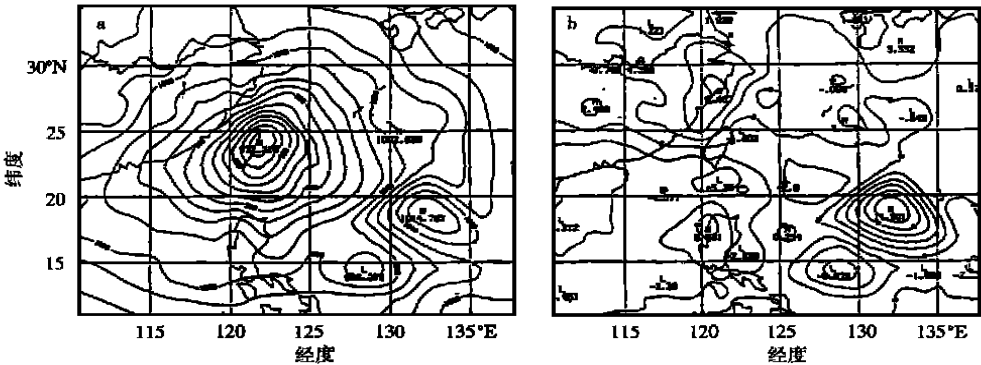


图 3 1990-08-19T 20(9012 号台风) 海平面气压场(a) 和非对称海平面气压场(b) (单位: hPa)
Fig. 3 The sea level pressure(a) and the asymmetric sea level pressure(b)
of Typhoon 9012 at 20:00 BST 19 August, 1990(unit: hPa)

速度大于台风移速。由于高空测站资料相对较少,它不如地面测站资料能更好地描述台风的非对称结构特征,因而造成通风气流与台风移动之间的偏差。

表 1 9012 号、9414 号和 9417 号台风的通风气流流量

Table 1 The ventilation flow vectors of Typhoons 9012, 9414 and 9417

9012 号台风(1990-08-19T 20)			9414 号台风(1994-08-09T 08)			9417 号台风(1994-08-21T 08)		
r/km	$\theta_{\text{d}}/(\text{ }^\circ)$	$V_{\text{d}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	r/km	$\theta_{\text{d}}/(\text{ }^\circ)$	$V_{\text{d}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	r/km	$\theta_{\text{d}}/(\text{ }^\circ)$	$V_{\text{d}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
913	284	2.9	583	14	9.7	638	284	11.7
996	288	2.6	636	15	8.4	696	284	10.1
1079	300	2.4	683	21	7.5	754	285	8.7
1162	306	2.6	742	27	6.9	812	284	8.0
1245	308	2.7	795	32	6.4	870	283	7.3

2.2 9414 号台风(Doug)

9414 号台风于 1994-08-01T 14 在关岛西北约 100 km 的洋面上生成。起初它向偏西移动。5 日 08 时以后转向西北移动。8 日 03~04 时, 该台风在台湾基隆登陆。随后它转向东北偏北移动。9 日 08 时, 该台风移至浙江石浦东南约 100 km 的东海海面上(图 4)。其中心气压为 975 hPa, 最大风速为 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [12]。

将 9 日 08 时 9414 号台风的海平面气压分解为其对称与非对称分量(图 5)。根据非对称海平面气压计算该台风的通风气流矢量(表 1)。应用台风路径资料计算结果表明: 该时刻 9414 号台风以 $V_c=5.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度向东北偏北移动($\theta=28^\circ$)。由表 1 可知, 在半径 r 为 700~800 km 的圆形区域内, 通风气流方向与台风移向基本一致, 而通风气流速度略大于台风移速。由图 5b 可见, 9414 号台风中心附近的通风气流“引导”它向东北偏北移动。

2.3 9417 号台风(Fred)

9417 号台风于 1994-08-14T 02 在马里亚纳群岛以东的洋面上生成。起初它向偏西移动。18 日 08 时以后转向西北移动。21 日 08 时, 该台风移至福建福鼎东南约 250 km 的东海海面上(图 4)。其中心气压为 950 hPa, 最大风速为 $45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [12]。

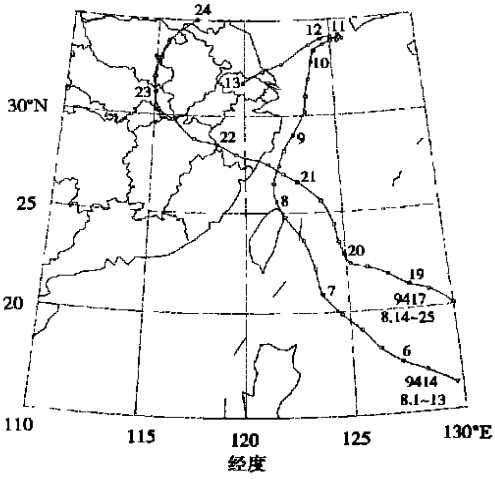


图 4 9414 号和 9417 号台风路径图
Fig. 4 The tracks of Typhoon 9414 and Typhoon 9417

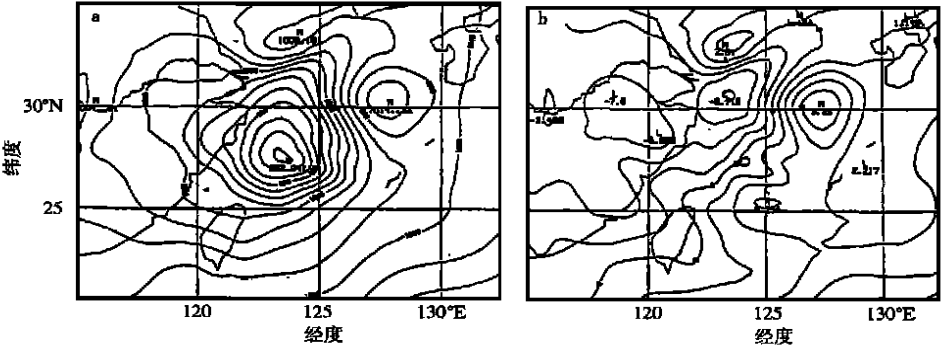


图 5 1994-08-09T 08(9414 号台风) 海平面气压场(a) 和非对称海平面气压场(b) (单位: hPa)
Fig. 5 The sea level pressure(a) and the asymmetric sea level pressure(b) of Typhoon 9414 at 08: 00 BST 9 August, 1994(unit: hPa)

将 21 日 08 时 9417 号台风的海平面气压分解为其对称和非对称分量(图 6)。根据非对称海平面气压计算该台风的通风气流矢量(表 1)。应用台风路径资料计算结果表明: 该时刻 9417 号台风以 $V_c=5.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度向西北偏西移动($\theta=309^\circ$)。由表 1 可知, 在半径 r 为 800~900 km 圆形区域内的通风气流矢量更接近于台风移动矢量。通风气流方向偏离于台风移向的左侧约 20° ; 通风气流速度略大于台风移速。由图 6b 可见, 9417 号台风中心附近的通风气流

“引导”它向西北偏西移动。该台风于 21 日 22~23 时在浙江瑞安登陆。

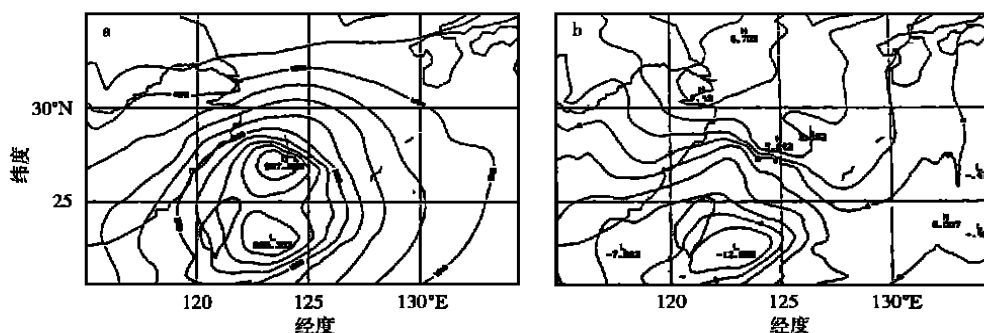


图 6 1994-08-21T 08(9417 号台风) 海平面气压场(a) 和非对称海平面气压场(b) (单位: hPa)

Fig. 6 The sea level pressure(a) and the asymmetric sea level pressure(b)

of Typhoon 9417 at 08:00 BST 21 August, 1994(unit: hPa)

3 结语和讨论

(1) 观测分析、数值模拟和理论研究结果表明: 在热带气旋的非对称流场中, 由 β 涡旋所决定的通风气流与热带气旋移动密切相关。它构成了非对称结构理论的核心内容。

(2) 应用非对称结构理论较好地预报出 9012 号台风西行、9414 号台风转向和 9417 号台风登陆。

(3) 应用高空和地面观测资料进行对比试验表明: 地面的通风气流与台风移动的相关更为密切。因为地面的观测资料较多, 能够更恰当地描述台风的非对称结构。

(4) 不同半径 r 圆形区域内的通风气流与台风移动的相关程度依赖于台风的类型、强度和水平尺度。最佳相关尺度(半径 r)^[8]有待于通过大量台风个例预报试验加以确定。

应当指出, 应用非对称结构理论制作台风路径预报还存在如下一些问题。

(1) 通风气流矢量与台风移动矢量的相关是瞬时相关。应用非对称结构理论制作台风路径预报是在台风非对称结构基本稳定的假定下进行的。台风内部的动力过程和热力过程会使其非对称结构产生突变。在这种情况下, 应用不连续的常规观测资料计算通风气流来预报台风路径会引起误差。可以应用实时的、连续的数值天气预报产品计算通风气流, 从而修正台风路径预报。

(2) 在西北太平洋洋面, 台风环流区域内的测站稀少, 台风中心位置难以准确确定。而台风的非对称环流形势以及通风气流矢量对于台风中心的位置又很敏感。因此, 由台风中心定位误差会导致台风路径预报误差。

(3) 通风气流矢量与台风移动矢量的强相关是在无环境气流的假定下得到的。因此, 应用非对称结构理论制作台风路径预报应当考虑环境气流对台风移动的影响。

参考文献:

- [1] MARKS JR F D, HOUZE JR R A, GAMACHE J F. Dual-aircraft investigation of the inner core of hurricane Norbert, Part : Kinematic structure[J]. J A S, 1992, 49(11): 919~942
- [2] 徐祥德, 陈联寿, 解以扬, 等. TCM-90 现场科学试验台风 FLO “ β 陀螺” “通风流” 非对称动力结构特征[J]. 气象学报, 1996, 54(5): 536~543

- [3] FIORINO M, ELSBERRY R L. Some aspects of vortex structure related to tropical cyclone motion[J]. J A S, 1989, 46(7): 975 ~ 990
- [4] 陈联寿, 罗哲贤. 影响热带气旋结构和运动的两类因子的数值研究[J]. 气象学报, 1996, 54(4): 409 ~ 415
- [5] TIAN Yongxiang, NIU Xuexin. Effect of the linear beta term on movement and development of tropical cyclone[J]. A M S, 1998, 12(1): 50 ~ 62
- [6] TIAN Yongxiang, NIU Xuexin. Effect of the nonlinear term on movement and development of tropical cyclone[J]. A M S, 1998, 12(2): 149 ~ 161
- [7] WANG B, LI X. The beta-drift of three-dimensional vortices: A numerical study[J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(4): 579 ~ 593
- [8] 田永祥. 斜压涡旋中的通风气流与热带气旋移动的关系[J]. 气象学报, 1996, 54(1): 83 ~ 93
- [9] WANG Y, HOLLAND G J. The beta-drift of baroclinic vortices, Part 1: Adiabatic vortices[J]. J A S, 1996, 53(3): 411 ~ 427
- [10] TIAN Yongxiang, LUO Zhexian. Vertical structure of beta gyres and its effect on tropical cyclone motion[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1994, 11(1): 43 ~ 50
- [11] 国家气象局编. 热带气旋年鉴(1990)[R]. 北京: 气象出版社, 1991
- [12] 中国气象局编. 热带气旋年鉴(1994)[R]. 北京: 气象出版社, 1995

Forecasting typhoon tracks applying the asymmetric structure theory

Tian Yong-xiang¹, Yan Li-jun¹,
Zhao Yuan-dong², Jiang Yan-tu³

(1. Department of Atmospheric Sciences; 2. Department of Computer Sciences and Technology;

3. Meteorological Observatory, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: The technical fundament of forecasting typhoon tracks applying the asymmetric structure theory is expounded. The typhoon Yancy's (9012) westward movement, the typhoon Doug's (9414) direction change and the typhoon Fred's (9417) landing are successfully forecasted applying this theory.

Key words: asymmetric structure theory; forecast; typhoon track