

台风前部龙卷风的一般特征 及其萌发条件的初步分析

沈 树 勤

(江苏省气象台)

提 要

天气实践表明: 台风前部有强烈的对流活动, 它们经常是强雷暴和龙卷的孕育地和集中地。分析1962—1984年发生在江苏境内台前龙卷过程表明: 龙卷产生在台风的一定部位, 一般在台风运动方向的右前象限, 并且与台风强度变化等因素有关。

本文还利用中尺度涡度方程, 初步分析台前龙卷风萌发的原因。并指出: 台前的强对流云团中, 涡度方程倾斜项的作用是龙卷涡旋萌发的重要条件之一。

一、引 言

本文首先分析了1962—1984年在江苏境内产生的11个台(风)前(部)的龙卷过程。统计表明: 龙卷产生与台风所在位置、强度等有关, 并初步分析其形成条件。

龙卷是一种小尺度的天气现象, 一般认为不是热带天气现象, 因而台风并不具备龙卷发生的条件, 所以对它产生的物理条件还不完全了解⁽¹⁾⁽²⁾。在文献[2]中对于台风龙卷生成的机制作了推测: 台风龙卷与低层风的强垂直切变有密切关系, 一般热力稳定度可能不起重要作用, 因而动力因子的作用大于热力因子的作用。到达沿岸的和正在填塞的台风可迅速出现地面冷心, 这导致建立低层风的强垂直切变, 最后生成龙卷。

本文利用中尺度涡度方程进行分析, 指

出倾斜项 $\left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \wedge \text{grad } w' \right]_z$ 的作用是龙卷产生的重要条件之一。显见低层风的强垂直切变与上述推测结果是一致的。但需要强调指出, 中尺度的垂直速度的水平梯度是不可忽略的一个重要参数。这两项必须同时参与,

共同作用, 成为萌发龙卷涡旋的重要条件。因本文探讨江苏台前龙卷是在台风外围强对流天气背景下产生的。所以热力因子的作用也是不可忽视的。它是有别于在台风内产生龙卷的上述推测条件的。

二、江苏省台前龙卷的一般特征

天气实践表明: 7—9月是台风影响江苏的盛季, 相应地台前龙卷也发生在这个季节里。根据1962—1984年各月统计 (见表1), 得出如下几点结果:

(1) 在台风前部影响江苏境内的龙卷过程, 23年中共有11次, 平均约为两年一遇。台前龙卷虽然较少, 但它所造成的灾害是十分严重的, 甚至有的超过台风的直接影响。

(2) 台前龙卷均发生在7—9月份, 其中以8月份最多, 占64%; 9月份最少, 仅有一次 (1962年9月6日)。

(3) 由于龙卷的发生在地点上和时间上的非连续性, 所以一次龙卷过程有几个龙卷活动。统计表明: 11次龙卷过程有18个龙卷活动。其中 (1974年9月12日) 一次过程就有3个龙卷活动。

(4) 江苏台前龙卷一般出现在台风登陆

表 1 1962—1984年台风前部龙卷统计

序号	时 (年、月、日、时)	龙卷活动 地 点	台风 编 号	台风登陆 地 点	台风(7) 路 径
1	62.7.23.16 ³⁵ —夜里	海安,如皋	6205*	台湾恒春 福建福鼎	北上中路
2	62.9.6下半夜	启东	6214*	台湾花莲 福建连仁	北上东路
3	65.8.19.15 ³⁰ —15 ⁴³	潭阳	6513*	台湾宜兰 福建福清	北上东路
4	65.8.20下午	武进、溧阳	6513*	台湾宜兰 福建福清	北上东路
5	71.8.10.16 ⁵⁸ —17 ⁰⁹	高淳	7117		沿海活动
6	72.8.3.16 ⁰⁰	常熟	7207	浙江平阳	北上中路
7	73.7.16.17 ⁰⁸	灌南	7303*	山东海阳	沿海活动
8	74.7.19.16 ⁰⁰	新沂	7410	台湾宜兰 浙江温岭	北上中路
9	74.8.12.22 ⁰⁰ —23 ⁰⁰	响水、涟水、 大丰	7412	福建惠安	北上中路
10	74.8.13.15 ³⁰ —17 ⁰⁰	灌云、灌南、 响水	7412	福建惠安	北上中路
11	84.8.31夜里	建湖、盱眙	8411	广东惠来	北上中路

* 为中心附近风力 ≥ 12 级的强台风

减弱时期(占84%)；仅有两次在台风沿海活动时期(1971年8月10日和1973年7月16日)。其中在福建沿海登陆的,出现龙卷最多(占54%)；台风登陆后以北上类路径出现龙卷为最多。

表2统计还表明：一般龙卷出现在台风开始登陆迅速减弱阶段。6小时中心气压平均减弱3.2hPa,最大下降11.0hPa；近中心最大风力平均减弱 $4.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；最大减弱 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，只有1974年8月13日这次台风,6小时中心气压和近中心风力没有大的变化。

表2 6小时台风中心气压和近中心最大风力变化

项 目	中心气压	近中心风力
最大值	下降11hPa	减弱 $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
最小值	少变	少变
平均值	下降3.2hPa	减弱 $4.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

但该时段亦是台风减弱为低气压阶段。

以台风中心为原点,用地理坐标表示(图1),台风龙卷一般位于方位角340—50度、半径为230—1050km的扇形区域中。而7303号和7117号台风是海上北上转向类,台前龙卷并不出现在这一扇形区域中。

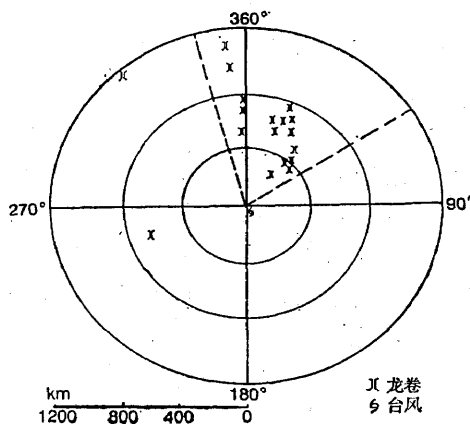


图1 台风与龙卷位置关系

台风前部的龙卷一般位于台风运动方向的右前象限0—60度(图2)。由于有两个台风在沿海活动,所以龙卷分别出现在它的左前象限25度和左后象限55度。

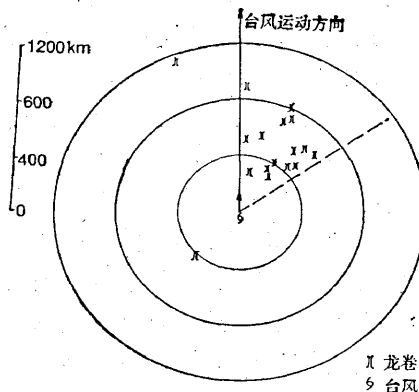


图2 台风移向与龙卷位置关系

台风龙卷不但在江苏发生,在其他地方也经常发生。据上海统计,在1962—1971年上海地区共产生23个台风龙卷⁽²⁾；大西洋83个到达美国海岸的飓风有25%出现龙卷⁽²⁾；对影响日本的西太平洋台风的龙卷统计,每个台风平均有2.3个龙卷产生⁽²⁾。

为了认识龙卷风及其萌发条件, 本文利用中尺度涡度方程, 初步探讨其成因。

三、方程的简单讨论及其倾斜项的作用

把要素分解成扰动量和基本量(环境场)之和。即:

$$F = \bar{F} + F' \quad (1)$$

式中 $\bar{F}$ 为基本量, F' 为扰动量, 以(1)式的形式将各要素代入原始水平运动方程组减去基本量所满足的方程组, 同时用

$$\pi = \frac{c_p \theta_0}{A} \left(\frac{P}{1000} \right)^{A R / c_p} = \frac{c_p \theta_0}{A \theta} T$$

$$\theta' \ll \theta_0, \quad \bar{\theta} / \theta_0 \approx 1, \quad \frac{\partial \pi'}{\partial z} \gg \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial x}$$

$$\left(\text{或} \frac{\partial \pi'}{\partial z} \gg \frac{\partial \bar{\pi}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

等关系式后, 得到中尺度扰动问题的水平运动方程组:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u'}{\partial t} + u' \frac{\partial u'}{\partial x} + v' \frac{\partial u'}{\partial y} + w' \frac{\partial u'}{\partial z} + \bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} \\ & + u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial u'}{\partial y} + v' \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w' \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \\ & = - \frac{\partial \pi'}{\partial x} + f v' + F_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v'}{\partial t} + u' \frac{\partial v'}{\partial x} + v' \frac{\partial v'}{\partial y} + w' \frac{\partial v'}{\partial z} + \bar{u} \frac{\partial v'}{\partial x} \\ & + u' \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial v'}{\partial y} + v' \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + w' \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \\ & = - \frac{\partial \pi'}{\partial y} - f u' + F_y \end{aligned} \quad (4)$$

上式中 θ 为位温, θ_0 为未扰动位温 $\bar{\theta}$ 的平均值。 F_x , F_y 为摩擦项, 其他为常见符号,

并取 $\bar{w} \equiv 0$

对(4)式求 $\frac{\partial}{\partial x}$, 对(3)式求 $\frac{\partial}{\partial y}$

后, 两式相减。在没有考虑摩擦和柯氏力作用的假设情况下, 使用关系式 $(5) D' \gg \bar{D}$ 并据各项量级估计, 简化得中尺度涡度方程:

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} = - \vec{v} \cdot \nabla \xi' - \xi \cdot D' + \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial u'}{\partial z} \right) \cdot \right.$$

$$\left. \frac{\partial w'}{\partial y} - \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v'}{\partial z} \right) \frac{\partial w'}{\partial x} \right] \quad (5)$$

$$\text{式中 } D' = \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \quad \bar{\xi} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$

$$\xi' = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y}$$

$$\vec{v} = \vec{\bar{v}} + \vec{v'} \quad \xi = \bar{\xi} + \xi', \text{ 其他为常见符号。}$$

方程(5)右边的第1项是平流项, 是大尺度的流场对中尺度涡度的水平输送, 它造成中尺度涡度的重新分布。第2项是散度对大尺度涡度场的作用, 它可调节中尺度涡度的强度。第3项称之为倾斜项, 它显然是大尺度水平风的垂直切变和中尺度的垂直速度水平变化相互作用, 造成涡度场的变化。其物理实质是具有强垂直切变情况下, 由于垂直速度水平分布不均匀, 致使水平动量的垂直输送快慢各不相同, 从而引起水平风场的横向和纵向的变化。在研究大尺度涡度局地变化时, 倾斜项往往很小, 而被忽略, 对龙卷涡旋而言, 它在强对流天气背景下产生的。据有关资料

表明, 它的量级 $O\left(\frac{\partial \xi'}{\partial t}\right)$ 为 $10^{-4} - 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,

而 w' 可达到 $10 - 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [3,4]。当大尺度场上出现强垂直切变, 同时中尺度的垂直速度水平分布很大时, 它们的矢量积, 可达到龙卷涡旋的数量级。因此, 可以认为顺斜项是龙卷涡旋萌发的重要条件之一。由5式第3项得:

$$\begin{aligned} C &= \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial u'}{\partial z} \right) \frac{\partial w'}{\partial y} - \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial v'}{\partial z} \right) \frac{\partial w'}{\partial x} \\ &= \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \wedge \text{grad} w' \right]_z \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{或: } C = \left| \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right| \cdot \left| \text{grad} w' \right| \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

(6) 式表明: 大尺度风场随高度的变化矢
 $\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}\right)$ 与中尺度垂直速度的水平梯度($grad w'$) 的矢量在Z轴上的投影是萌发龙卷涡旋的重要条件之一。由(7)式可知, 其大小由两矢量的夹角 α 决定(见图3)。

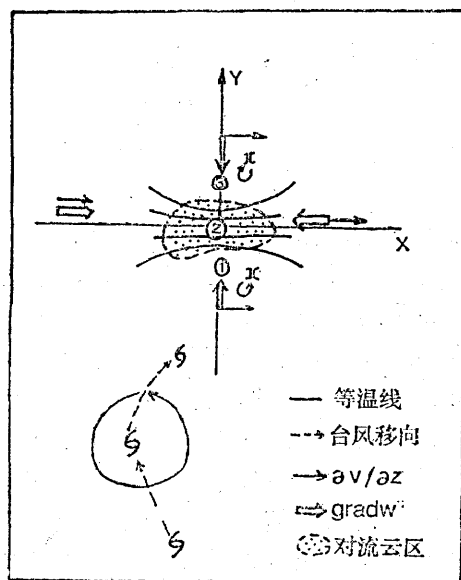


图3 台前龙卷萌发诊断图

(1) 在1区, $\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}$ 和 $grad w'$ 交角为正, 当 α 是直角时, C 值为最大, 可以产生气旋性龙卷涡旋。

(2) 在2区 $\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}$ 和 $grad w'$ 交角为负, C 值亦为负值, 可产生反气旋性龙卷涡旋。

(3) 在3区, 强上升气流虽然很大, 但 $\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}$ 与 $grad w'$ 平行, α 为零。因此龙卷涡旋并不产生在上升气流最强的地方。

上节统计事实也表明, 江苏境内所发生的台前龙卷都是在台风外围发生的, 与北方冷空气南侵与台前暖湿空气相遇有关(见图4), 显见, 冷暖空气的相遇, 势必造成温度梯度的加大, 层结不稳定加强, 引发强对流天气。而 $\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}$ 是大尺度参数, 显然它又与热成风有关。据准地转情况下的热成风的表达式(6)可近似地写为:

$$C = \left[\left(-\frac{g}{fT} \nabla T \times \vec{K} \right) \times grad w' \right]_z \quad (8)$$

在正压大气中, 没有风的垂直切变, 据(8)式, C 项值为零, 这表明在热带地区很难生成龙卷涡旋。但在低纬台风内出现龙卷涡旋除了在低层垂直方向有时出现适宜的切变外, 与 $(\xi \cdot D')$ 项还有关系, 因台风的存在说明涡度是足够大了。当眼壁附近中尺度的辐合很强时, 也可产生龙卷涡旋。

江苏的台前龙卷涡旋是在台风外围发生的, 所以龙卷涡旋形成条件与(8)式相关更好些。在存有 $grad w'$ 的大值条件下, 大尺度的垂直切变与斜压锋区有关, 它决定于温度的梯度值。即与热成风一致。 $\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}$ 是平行于等压面上的等温线, 而且低温区位于切变矢的左方, 高温区位于右方。得到与图3的相同结果。统计得到江苏境内的台前龙卷均为右旋龙卷, 这可能因为在锋区和台风运动的右前方之间, 即图3的1区, 存在高温高湿的能量积累区, 提供龙卷孕育地和集中地。图4是1974年8月12日20时(北京时)850hPa高空图。7412号台风在福建惠安登陆后减弱, 20时其中心位于南昌南部, 它的右前方为一暖脊, 暖中心在上海, 其值为20°C, 江苏东部 $T - T_d = 2 - 3^\circ\text{C}$ 且增温1°C左右, 处于暖湿气流中, 台风的西北侧为冷槽, 并有规律地向东南方向移动, 与暖湿空气形成锋区。大气层结处于不稳定状态。大的形势背景是有利于出现强对流天气的。这与实况是相一致的。12时本省西部就出现强雷雨。以后自西南向东北移动。同时我们发现20时850hPa高空图上, 在上海, 射阳为一致的偏南大风, 风力为 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 地面图上从赣榆到大丰县为一弱风场, 平均风速仅 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 21—22时, 大丰县(22时30分出现龙卷)风力在 $2-3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。地面到850hPa的风切变约为 $1 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$, 据雷雨云的走向知 $\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}$ 与 $grad w'$ 之间的夹

角至少为 45° ，由此可以判断生成龙卷是气旋式的。其具体值的确定（即C值），因目前难于获得 $grad w'$ 的实测资料，尚存困难。但可以从云图上或雷达回波上间接作一定性判断，在强对流云团分层显示中，其灰阶梯度最大的地方，或者强对流回波中，回波强度梯度最大的地方。观测表明这些地方容易形成冰雹、龙卷等强对流天气^[6]，若再与大尺度的 $\partial v / \partial z$ 一起考虑，综合判断，对龙卷等强对流天气的短时预报是有裨益的。

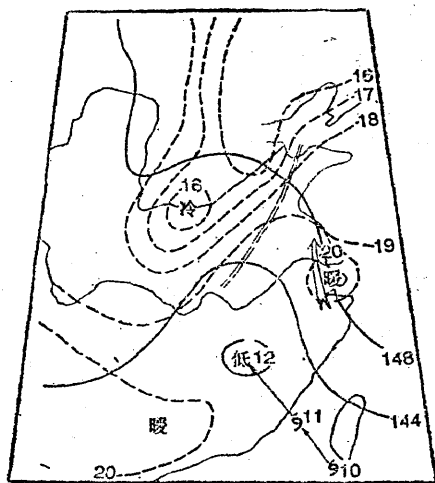


图4 1974年8月12日20时850hPa高空图
双断线为槽线 双箭头为大风轴线

四、结果与讨论

1. 影响江苏境内的台风前部龙卷大约为两年一遇，均产生在7—9月份台风影响江

苏的盛季，其中以8月份为最多。

2. 台风外围有强烈的对流活动区，是龙卷的孕育地和集中地。一般是在台风运动方向的右前象限中；在台风的 $340-50^\circ$ 的方位角， $230-1050\text{km}$ 的扇形区中。

3. 大部分台风前部龙卷出现在台风登陆迅速减弱阶段，其中台风在福建沿海登陆为最多。

4. 根据中尺度涡度方程的分析：台前龙卷萌发的重要条件之一是倾斜项的作用。台风外围 $\partial v / \partial z$ 和 $grad w'$ 正相关区可出现气旋性龙卷，反相关区可出现反气旋性龙卷；在正压大气或者强上升运动中心反而不利于龙卷的形成。

5. 台风前部龙卷生成条件比较复杂，本文提出的只是一个方面，有待今后深入探讨。

参考文献

- [1] 北京大学地球物理系气象教研室，天气分析和预报，科学出版社，1980。
- [2] 陈联寿，丁一汇，西太平洋台风概论，科学出版社。
- [3] 藤田哲也，龙卷气旋及其相联的钩状回波的形成和移动机制（中译本），雷达气象译文集，中央气象局研究所，1974。
- [4] Γ、H、古特曼，中尺度气象过程非线性理论引论（中译本），科学出版社，1976。
- [5] 杨国祥，中小尺度天气学，气象出版社，1983。
- [6] 邹进上等，大气物理基础，气象出版社，1982。
- [7] 江苏省气象局预报课题组，江苏省重要天气分析和预报，气象出版社，1988。

Analysis of the general characteristics and genesis conditions of tornado in front of typhoon

Shen Shuqin

(Meteorological Observatory, Jiangsu Province)

Abstract

Weather events show that severe convective activities usually appear in front of a typhoon which frequently initiate severe thunderstorms and tornadoes. Analyses on the processes of tornadoes in front of typhoons

*在本文完成过程中，得到周曾奎、郑和文同志的指导和帮助，在此致谢。

taking place in Jiangsu Province from 1962 to 1984 show that a tornado is forming in certain position where is always along the right-front side in the direction of the typhoon movement, and associated with the typhoon intensity and other factors. In this paper we also analyse the genesis factors of the tornado in front of a typhoon by means of meso-scale vorticity equation. We point out that the slopes $\left(\frac{\partial v}{\partial z} \wedge \text{grad } w\right)_z$ in vorticity equation is one of the important conditions of the tornado cyclone's genesis in severe convective clouds in front of a typhoon.