中国科学: 地球科学 2020 年 第 50 卷 第 5 期: 711 ~ 718
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

成熟台风的“云陀螺”模型及移动路径数值模拟

黄小刚[1*], 李湘成[1†], 程小平[1], 张晨曦[2], 丁菊丽[1]

1. 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101;
2. 中国人民解放军92664部队, 海阳 265100
* 通讯作者, E-mail: huangxiaogang17@nudt.edu.cn
† 通讯作者, E-mail: lixiangcheng18@nudt.edu.cn

收稿日期: 2019-01-25; 收修改稿日期: 2019-09-15; 接受日期: 2019-10-08; 网络版发表日期: 2020-02-18
国家自然科学基金项目(批准号: 41675058、41775055)资助

摘要 台风移动的路径特征大多来自于最佳路径集资料的分析, 由于其时间间隔多为6h或3h, 因此不能体现台风运动的小尺度特征. 为了更精细地揭示台风运动过程, 将成熟台风最大风速半径内的密蔽云体视作刚体, 并将其定义为“云陀螺”. 台风云陀螺一方面围绕自身的轴线自旋, 一面围绕垂直轴作进动, 通过引入陀螺运动力学原理, 推导出了台风云陀螺的轨迹计算模型. 分析发现, 台风的运动是一种在引导气流作用下的平移运动上叠加进动运动, 在外力矩作用下其轨迹呈现出旋进的固有特征. 台风最大风速半径越小, 切向风速越大或外力矩越大, 都可以使旋进特征越明显. 这些结论通过真实台风过程的高时间分辨率数值模拟得到了验证, 对加深针对台风运动过程的认识具有积极的意义.

关键词 台风, 云陀螺, 路径, 旋进

1 引言

台风是影响中国最严重的自然灾害之一, 平均每年约有7个台风登陆中国, 其伴随的狂风、暴雨和风暴潮等灾害性天气, 常常给中国造成巨大的经济损失和人员伤亡(Liu等, 2009), 准确的台风路径和强度预报是做好防台减灾工作的基础.

目前, 人们已经认识到台风的移动是环境场中多个天气系统相互作用的结果, 在正压动力框架下, 台风被近似看作一个“点涡”, 其运动主要受到环境场气流的引导作用(Chan, 1984). 同时由于地转涡度的存在和纬向分布的不均匀, 使得台风在β效应作用下向西北方向运动(Holland, 1983). 这种基于正压动力学的台风运动过程, 其物理机制实质是由于环境气流的非线性平流输送与背景场涡度线性分布的共同作用下, 台风涡旋向涡度倾向变化最大的区域移动, 观测记录表明台风运动的正压动力学理论可以成功解释约70%的台风运动过程(Chan, 2005).

20世纪90年代以来有学者提出, 台风结构的垂直变化和台风内部对流运动伴随的潜热释放也会对台风的运动造成影响, 从而将台风运动从正压动力框架开始转变为在斜压动力框架下开展研究. 斜压情形下台

中文引用格式: 黄小刚, 李湘成, 程小平, 张晨曦, 丁菊丽. 2020. 成熟台风的“云陀螺”模型及移动路径数值模拟. 中国科学: 地球科学, 50: 711–718, doi: 10.1360/SSTe-2019-0020
英文引用格式: Huang X, Li X, Cheng X, Zhang C, Ding J. 2020. Mature typhoon “cloud gyro” model and numerical simulation study. Science China Earth Sciences, 63: 749–756, https://doi.org/10.1007/s11430-019-9523-6

© 2020 《中国科学》杂志社

风运动的物理过程变得更加复杂，需要再考虑垂直风切变和其相伴随的水平温度梯度(Wu和Emanuel, 1993)，以及台风云体内的凝结潜热释放(Wang和Holland, 1996). 为了综合考虑台风涡旋的动力特征和热力学结构对台风运动的影响，引入了位涡的倾向变化来表征台风的移动，研究表明台风运动趋向于位涡倾向变化的大值区(Wu和Wang, 2000; Chan等, 2002). 环境场基本气流和台风的环流结构影响位涡的平流输送过程, 台风云体内的潜热释放会导致位涡的增加, 因此预报台风运动的关键在于对引导气流、台风结构和台风内对流运动的准确预报. 随着研究的深入和业务预报模式的发展，台风路径和强度预报水平得到了显著提高(Peng等, 2017), 但近年来其提高的幅度在明显减缓, 科学家也发出这样的疑问, 即台风路径预报水平是不是到了一个瓶颈(Landsea和Cangialosi, 2018)?

目前关于台风运动的研究大多都是基于涡旋动力学，着眼于台风内部的动力和热力学结构与环境场气流之间的相互作用，该理论框架下所得到的台风路径特征也得到了基于长时间间隔取样(如间隔6h或3h)的台风路径数据的证实，然而这种长时间取样数据体现的是台风运动的宏观特征，无法反映台风运动的小尺度脉动. 地球作为一个局地角速度分布不均匀的自转球体，台风这类具有倒圆锥形形状特征同时又是在旋转坐标系下的强烈旋转涡旋，必然存在某种由于自身形状及旋转特征而导致的固有运动.

吴恒强(1989)曾经利用陀螺规则进动原理讨论了台风路径的摆动问题，受限于当时高时空分辨率卫星观测资料的缺少以及计算机模拟技术的限制，其研究结论并不十分明确，在理论推导上也未考虑外力矩的影响. 同时有研究表明，在较大的环境风垂直切变影响下，台风高低层的涡旋中心并非垂直对齐，这种斜压性表现为台风旋转轴的倾斜，从而导致台风涡旋存在进动运动，台风旋进过程中所伴随的湿对流非对称分布的变化会对台风的发生发展产生影响，甚至进动周期决定了台风快速增强发生的时间(Zhang和Tao, 2013; Tao和Zhang, 2014), 同时在实际台风个例的高时空分辨率模拟中，也发现台风运动过程中存在明显的旋进特征(Nolan等, 2013)，但是文中关于台风进动对台风路径的影响并未进行详细讨论. 本文将台风最大风速半径内的密蔽云体视作一个宏观的旋转云盘，参考陀螺力学原理，利用“云陀螺”模型推导台风运动的轨迹方程，通过数值模拟进行验证，从而揭示台风运动中精细的固有运动特征.

2 台风运动分析

2.1 台风云陀螺定义

发展成熟的台风在其最大风速半径至眼墙附近范围内, 是接近圆形的密蔽紧实云体, 因此可认为台风内核云体近似刚体(Emanuel, 1991)，在台风轴对称假设下, 以台风各层中心的连线为旋转轴, 已有研究表明台风运动过程中台风各层中心的连线呈倾斜状态，因此其在旋转过程中一面围绕自身的轴线作自旋，一面围绕垂直轴作进动，由于台风形状和运动与陀螺相似, 因此将其视作一个作逆时针旋转的圆盘状“云陀螺”. 但台风水平尺度与垂直尺度之比约为10^2量级，这使得台风的半径和体积对运动过程有显著影响，同时台风为逆时针旋转，而陀螺多为顺时针旋转，这些差异使得台风的运动不能照搬陀螺运动力学的结论，需在此基础上推导台风“云陀螺”的运动力学模型，从而分析讨论台风运动的自有特征.

2.2 台风运动的进动特征和角速度

如图1所示，参考陀螺运动力学原理(刘延柱, 2009)，以台风云陀螺的质心为原点，选择其旋转轴Z'轴为主轴坐标轴，一方面云陀螺以角速度$\boldsymbol{\omega}_1$(称作移动角速度)绕Z'轴自旋，另一方面Z'轴以角速度$\boldsymbol{\omega}_2$(称作进动角速度)绕Z轴转动. 台风的这种运动体现了陀螺特性，即轴对称刚体绕旋转轴旋转，且旋转轴在惯性空间可改变方位时所表现出来的特殊力学现象. 在不考虑外力的情况下，具有这种特性的物体将做规则进动, 也就是物体绕旋转轴旋转，同时旋转轴以不变的章动角围绕角动量矢量匀速进动的这种规则的运动形式.

因此台风路径就表现为在引导气流下的平移运动上叠加进动运动, 其运动路径曲线可表示为式(1)(钮学新, 1992):

$$\begin{cases} x(t) = A\cos(\omega_2 t + \delta) + ut, \\ y(t) = A\sin(\omega_2 t + \delta) + vt, \end{cases} \tag{1}$$

式中, A为进动振幅, δ为初始位相, u、v为纬向和经向基本引导气流. 即以$(u^2+v^2)^{\frac{1}{2}}$为速度, 以$t\mathrm{g}^{-1}(u/v)$为方

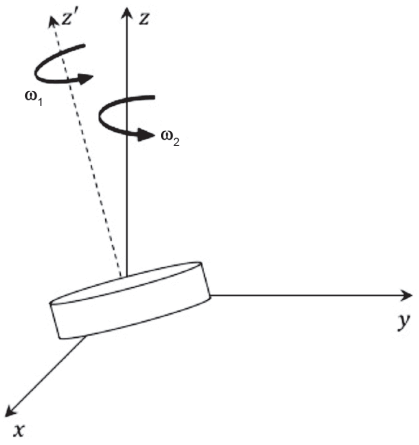


图 1　台风旋转轴和铅直轴示意图

向的匀速直线运动基础上，叠加以A为进动振幅的圆周运动. 因此台风的移动路径特征由其进动角速度和引导气流决定.

2.3　台风运动的自旋角速度

根据陀螺运动力学原理，台风云陀螺在绕旋转轴旋转的过程中，其运动可分解为三部分(刘延柱, 2009)，首先是自转，设云陀螺中心为O，距离中心为r的某点的切向风速为v_t, 则台风自转角速度为$\boldsymbol{\omega}_r=\frac{v_t}{r}\mathbf{k}$, $\boldsymbol{\omega}_r$仅代表台风不移动时的自转角速度. 同时由于地球曲率的影响，当台风以大小为C的移速沿南北方向运动时，从地心看去台风实际上是在某一地球大圆上移动，因此台风在此过程中会获得一个指向路径左边的角速度$\boldsymbol{\omega}_C$, 其表达式为$\boldsymbol{\omega}_C=-\frac{C}{R}\mathbf{i}$, R为地球半径. 第三个部分是台风从地球的自转中获得的牵连角速度$\boldsymbol{\omega}_\varphi$, 在某一纬度$\varphi$处，牵连角速度可表示为地球自转角速度$\boldsymbol{\omega}_o$沿地表铅直方向($\mathbf{k}$)的角速度分量$\boldsymbol{\omega}_Z$和向北方向($\mathbf{j}$)的角速度分量$\boldsymbol{\omega}_N$的矢量和，其表达式为: $\boldsymbol{\omega}_\varphi=\boldsymbol{\omega}_Z+\boldsymbol{\omega}_N=\omega_0\sin\varphi\mathbf{k}+\omega_0\cos\varphi\mathbf{j}$. 因此台风云陀螺自旋过程的角速度$\boldsymbol{\omega}_1$是三个角速度分量和合成, 即

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}_1&=\boldsymbol{\omega}_r+\boldsymbol{\omega}_C+\boldsymbol{\omega}_\varphi\\&=|\boldsymbol{\omega}_C|\mathbf{i}+|\boldsymbol{\omega}_N|\mathbf{j}+\left(|\boldsymbol{\omega}_r|+|\boldsymbol{\omega}_Z|\right)\mathbf{k}\\&=-\frac{C}{R}\mathbf{i}+\omega_0\cos\varphi\mathbf{j}+\left(\frac{v_t}{r}+\omega_0\sin\varphi\right)\mathbf{k},\end{aligned}\tag{2}$$

$\boldsymbol{\omega}_1$的方向是沿旋转轴的方向, 其方向余弦可表示为

$$\cos\langle\boldsymbol{\omega}_1,\mathbf{i}\rangle=\frac{|\boldsymbol{\omega}_r|}{|\boldsymbol{\omega}_1|},\cos\langle\boldsymbol{\omega}_1,\mathbf{j}\rangle=\frac{|\boldsymbol{\omega}_C|}{|\boldsymbol{\omega}_1|},\cos\langle\boldsymbol{\omega}_1,\mathbf{k}\rangle=\frac{|\boldsymbol{\omega}_\varphi|}{|\boldsymbol{\omega}_1|}.$$

这也证实台风云陀螺的旋转轴与铅直轴并不重合，而是存在一个夹角，即台风旋转轴存在倾斜的现象.

2.4　台风运动的进动角速度

台风云陀螺自旋的同时倾斜的旋转轴在绕垂直轴作进动, 在此运动过程中实则是具有3个转动自由度的绕定点转动, 根据刚体运动力学原理, 其可以分解为依一定顺序绕连体坐标轴的3次有限转动(刘延柱, 2009).

假设台风云陀螺的连体坐标系由初始位置$(O-\zeta\varsigma\eta)$出发到达$(O-x_2y_2z_2)$, 则其运动可分解为绕ζ轴转动ψ角到达$(O-x_0y_0z_0)$位置，绕后绕x_0轴转动ϑ角到达$(O-x_1y_1z_1)$位置，最后绕z_1轴转动ϕ角到达$(O-x_2y_2z_2)$位置，其中欧拉角ψ、ϑ、ϕ分别为进动角、章动角和自旋角. 若台风云陀螺的连体坐标系由初始位置$(O-\zeta\varsigma\eta)$出发到达$(O-x_2y_2z_2)$转动的角度无限小, 则各欧拉角的增量分别为$\Delta\psi$、$\Delta\vartheta$、$\Delta\phi$, 那么瞬时角速度$\boldsymbol{\omega}$可分解为绕z_0、x_1、z_2各轴转动角速度的矢量和:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}&=\lim_{\Delta t\to0}\left(\frac{\Delta\psi}{\Delta t}\mathbf{k}_0+\frac{\Delta\vartheta}{\Delta t}\mathbf{l}_1+\frac{\Delta\phi}{\Delta t}\mathbf{k}_2\right)\\&=\dot{\psi}\mathbf{k}_0+\dot{\vartheta}\mathbf{l}_1+\dot{\phi}\mathbf{k}_2.\end{aligned}\tag{3}$$

将上式投影到连体坐标系$(O-x_2y_2z_2)$中，并考虑到规则进动中台风旋转轴以不变的章动角($\dot{\vartheta}=0$)绕垂直轴旋转，则台风云陀螺在旋转坐标系中的瞬时角速度可表示为进动角速度ω_2和自旋角速度ω_1的矢量和:

$$\boldsymbol{\omega}=\dot{\psi}\mathbf{k}_0+\dot{\phi}\mathbf{k}_2=\omega_2\mathbf{k}_0+\omega_1\mathbf{k}_2.$$

其分量形式为

$$\begin{aligned}\omega_x&=\omega_2\sin\vartheta\sin\phi,\\\omega_y&=\omega_2\sin\vartheta\cos\phi,\\\omega_z&=\omega_2\sin\vartheta+\omega_1.\end{aligned}$$

根据角动量的计算公式:

$$\mathbf{L}=\mathbf{J}\cdot\boldsymbol{\omega},$$

其中$\mathbf{L}$为旋转角动量，$\mathbf{J}$为台风云陀螺绕定点O转动的

惯性张量. 若选取旋转坐标系为主轴坐标系, 则可得“云陀螺”绕质心O点转动的角动量$\mathbf{L}$在旋转坐标系中表示为

$$L_x = J_{xx}\omega_2\sin\vartheta\sin\phi,$$
$$L_y = J_{yy}\omega_2\sin\vartheta\cos\phi,$$
$$L_z = J_{zz}(\omega_2\sin\vartheta + \omega_1).$$

再根据旋转坐标系中的角动量定理

$$\frac{\tilde{\mathrm{d}}\mathbf{L}}{\mathrm{d}t} + \boldsymbol{\omega}\times\mathbf{L} = \mathbf{M}, \tag{4}$$

其中$\mathbf{M}$为外力矩项, 以x轴上的分量为例:

$$\frac{\tilde{\mathrm{d}}L_x}{\mathrm{d}t} + \omega_y L_z - \omega_z L_y = M_x, \tag{5}$$

将角动量和瞬时角速度代入, 整理得

$$M_x = \left[-J_{zz}\omega_2\omega_1\sin\vartheta\left(1 + \frac{J_{xx}-J_{zz}}{J_{zz}}\frac{\omega_2}{\omega_1}\cos\vartheta\right)\right]\sin\phi. \tag{6}$$

同理可得

$$M_y = \left[-J_{zz}\omega_2\omega_1\sin\vartheta\left(1 + \frac{J_{xx}-J_{zz}}{J_{zz}}\frac{\omega_2}{\omega_1}\cos\vartheta\right)\right]\cos\phi, \tag{7}$$

$$M_z = \frac{\mathrm{d}L_z}{\mathrm{d}t} + \omega_x L_y - \omega_y L_x = 0. \tag{8}$$

由此可得

$$\mathbf{M} = J_{zz}(\boldsymbol{\omega}_2\times\boldsymbol{\omega}_1)\cdot\left(1 + \frac{J_{xx}-J_{zz}}{J_{zz}}\frac{\omega_2}{\omega_1}\cos\vartheta\right), \tag{9}$$

其标量形式为

$$|\boldsymbol{\omega}_2|^2 + \frac{J_{zz}|\boldsymbol{\omega}_1|}{(J_{xx}-J_{zz})\cos\vartheta}|\boldsymbol{\omega}_2| = \frac{|\mathbf{M}|}{(J_{xx}-J_{zz})\cos\vartheta\sin\vartheta}. \tag{10}$$

在不受外力矩作用的情况下, 即$|\mathbf{M}| = 0$, 解得进动角速度的表达式:

$$|\boldsymbol{\omega}_2|^* = \frac{J_{zz}|\boldsymbol{\omega}_1|}{(J_{zz}-J_{xx})\cos\vartheta}. \tag{11}$$

在受到外力矩作用时, 即存在$|\mathbf{M}|$时, 式(10)为一元二次方程, 求其解, 可导出进动角速度的表达式:

$$|\boldsymbol{\omega}_2| = \frac{|\boldsymbol{\omega}_2|^* + \sqrt{|\boldsymbol{\omega}_2|^{*2} - \dfrac{4|\mathbf{M}|}{(J_{xx}-J_{zz})\cos\vartheta\sin\vartheta}}}{2}, \tag{12}$$

式中, $|\boldsymbol{\omega}_2|$为台风不受外力矩作用下的进动角速度. 将其代入式(1), 即可求得台风的运动轨迹.

可以看出, 台风进动运动是由于地球局地角速度分布不均对台风涡旋运动的影响而导致的一种固有运动特征, 而影响台风进动运动的关键因子则包括切向风速、台风半径以及台风所受引导气流和外力矩等.

3 影响台风运动的关键因子分析

3.1 试验设置

利用式(1)建立台风路径模拟模式并进行时间积分, 模式初值设置包括: 台风云陀螺半径r=80km, 该半径处切向风速v_t=30m s^{-1}, 引导气流为u=−20m s^{-1}、v=5m s^{-1}, 纬度φ=20°N, 时间步长dt=2min, 积分时长为48h. 试验分别研究切向风速大小、台风半径、引导气流和外力矩对台风运动的影响.

3.2 不考虑外力矩条件下切向风速大小对台风路径的影响

台风切向风速大小表征台风云陀螺旋转的快慢, 分别取台风最大风速半径80km处的切向风速v_t=30m s^{-1}、40m s^{-1}和50m s^{-1}.

从图2可以看出, 在不受外力矩作用时, 台风的进动运动在台风运动路径上并未呈现出“回旋”的现象, 而是一种“波动状”运动. 这是由于在不受外力矩作用时, 台风的进动角速度比较小, 不足以抵抗引导气流的拖曳效果, 所以台风运动的“旋进性”不明显, 此时“波动性”显著.

随着切向风速的增大, 台风运动路径波动的波长随之减小, 波动周期也随之减少, 但是波动之间波谷处的曲率随之增大, 即台风运动愈发趋向于“回旋性”.

3.3 不考虑外力矩条件下台风半径大小对台风路径的影响

给定台风所在纬度、云陀螺边缘的切向风速以及引导气流, 通过改变台风云陀螺半径r来研究台风大小对其作规则进动运动的影响. 图3为分别取r=50km、80km、100km时的台风轨迹模拟曲线.

由图3可以看出, 随着台风最大风速半径的减小, 台风波动型移动路径的波长随之减小, 波动周期也随之减小, 但是波动之间波谷处的曲率随之增大, 波动运动愈发趋向于旋进运动.

实质上, 台风云陀螺切向风速和台风半径的改变

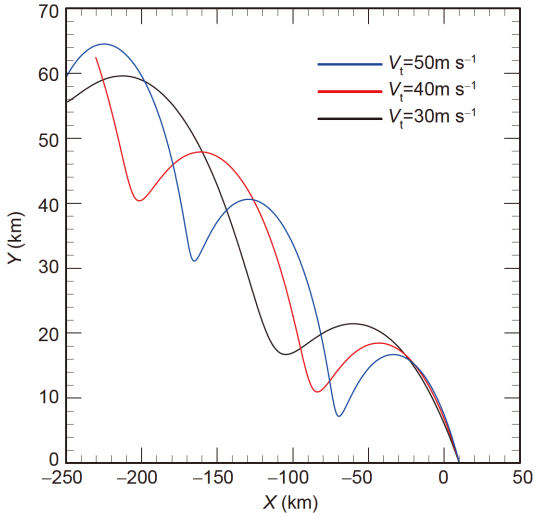


图 2　不同最大切向风速下的台风运动轨迹模拟曲线

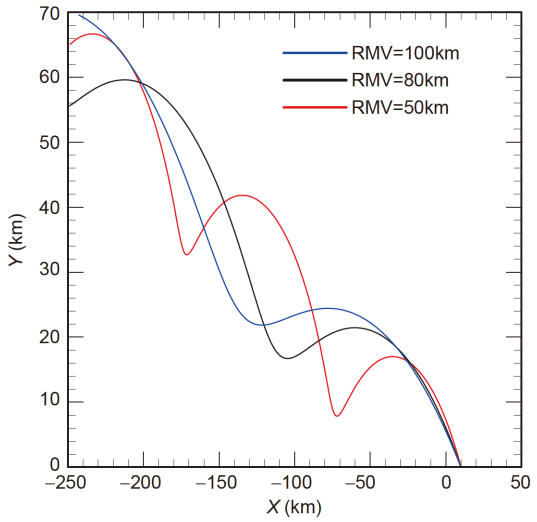


图 3　不同最大切向风速半径下的台风运动轨迹模拟曲线

导致了台风的自旋角速度的变化, 由式(11)可知会进一步导致台风“云陀螺”的进动角速度变化. 因此可得出如下结论:

在台风运动不受外力矩作用, 并且台风的自旋角速度较小时, 台风的进动运动在台风运动路径上并不呈现出“回旋”的现象, 而是一种“波动状”运动. 随着台风自旋角速度的增大, 导致台风的进动角速度增大, 从而使得台风运动路径波动的波长随之减小, 波动周期也随之减少, 但是波动之间波谷处的曲率随之增大, 即台风运动愈发趋向于“回旋性”. 当台风自旋角速度大于某一临界值时, 台风运动路径就会出现“回旋”的现象, 由波动运动演变成旋进运动.

3.4　不考虑外力矩条件下引导气流对台风路径的影响

因为引导气流的向西速度分量要远大于向北速度分量, 并且变化范围更大, 因此给定台风所在纬度、台风云陀螺边缘的切向风速、台风云陀螺半径和引导气流的向北分量条件下, 通过改变引导气流的纬向速度u来研究引导气流对台风作规则进动运动的影响. 图4为u=−10m s^{-1}、−15m s^{-1}、−20m s^{-1}、−25m s^{-1}时的台风运动模拟轨迹.

可以看出, 引导气流不仅决定了台风的平移运动, 而且还对台风的进动运动存在一个拖曳的效果. 当引导气流的纬向速度越大时, 平移运动产生的拖曳效果越明显, 台风运动路径波动的波长随之变长, 波动之间波谷处的曲率随之减小, 但是由于进动角速度没有改变, 所以波动周期不变; 当引导气流的速度越小时, 平移运动产生的拖曳作用减弱, 此时台风的旋进运动会变得愈发明显, 台风运动路径能呈现出“回旋”现象.

3.5　外力矩对台风路径的影响

当存在外力矩作用时, 由式(12)可得台风进动角速度的计算公式. 定义其中的$\frac{4|\mathbf{M}|}{(J_{xx}-J_{zz})\cos\vartheta\sin\vartheta}$一项为力矩作用项. 对于台风云陀螺所受到的外力矩, 可理解

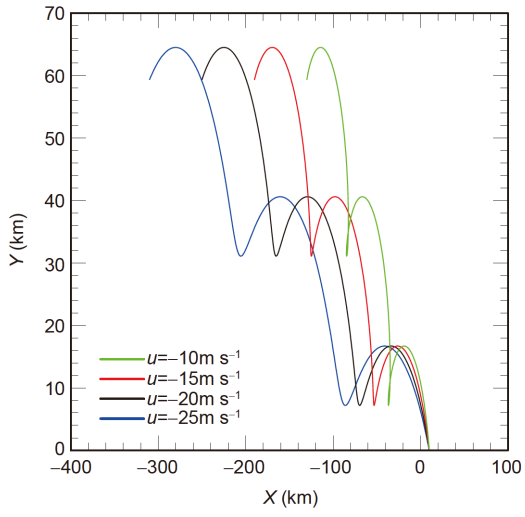


图 4　不同引导气流条件下台风运动轨迹模拟曲线

为是环境场气流的突变对台风运动的影响. 目前还没有关于台风云陀螺所受力矩的精确计算方法, 所以根据不同背景下的台风运动粗略估计台风的力矩作用项的数量级为10^{-5}~10^{-3}. 通过改变力矩作用项的量级来研究其对台风运动的影响. 图5为分别取力矩作用项的量级为10^{-5}、10^{-4}和10^{-3}时的台风运动模拟曲线来说明不同外力矩作用对台风路径的影响, 其中右侧小图为局部放大.

当存在一个外力矩作用于台风云陀螺时, 台风运动由波动运动转变成十分明显的旋进运动; 外力矩作用越大, 其运动路径表现为波折较多的回转, 回转频数明显增多, 回转周期变短.

在真实台风运动过程中, 其受到的外力矩是一直存在的, 因此台风路径在高时间分辨率条件下体现出来的运动特征应该是以回旋运动为主. 特别是在突然转向过程中, 伴随着引导气流的变化, 其回旋特征应越显著.

4 高时间分辨率条件下台风路径模拟验证

4.1 模拟验证试验设计

选取2008年第13号台风Sinlaku(0813)为研究对象, 从路径上看Sinlaku台风在台湾以东海域经历了明显的突然转向过程, 这种转向过程体现了环境场突然变化, 也即作用于台风的外力矩发生变化. 同时在选取的模拟时段中台风经历了双眼墙形成和眼墙替换过程, 在此过程中会出现台风最大风速减小且最大风速半径突然加大的现象, 这利于研究验证前文所述台风切向风速和半径变化对路径的影响.

模拟采用WRF3.5模式, 模拟区域采用四重双向嵌套, 由外向内的水平分辨率分别为45、15、5、1.67km, 网格格点数分别为171×151、202×202、205×205、301×301. 其中, 内两层使用移动网格. 垂直坐标为坐标, 垂直方向分层43层, 模式顶层气压为50hPa. 初始场采用NCEP1°×1°再分析资料, 初始时刻使用了涡旋重定位方法(van Nguyen和Chen, 2011), 模拟时间从2008年9月9日06:00UTC至9月13日06:00UTC共96h, 积分每5min输出并保存一次. 采用美国地球物理流体力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics, GFDL)开发的相关脚本求取模拟台风中心路径和强度(Biswas等, 2018).

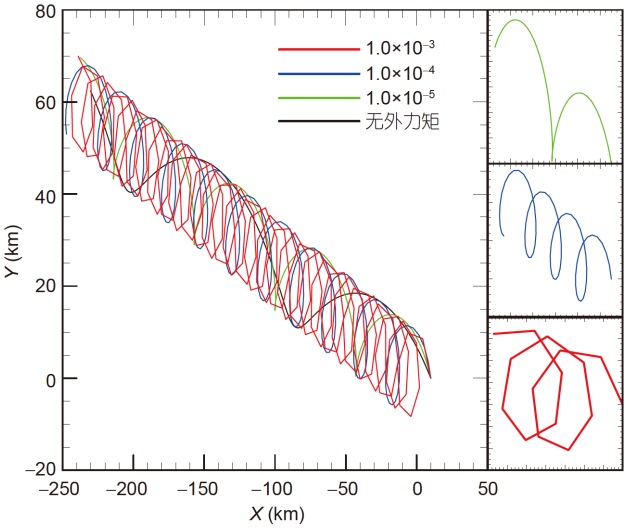


图 5 有外力矩作用下的台风轨迹模拟曲线
右侧小框为局部放大

4.2 模拟验证结果分析

从图6可见, 模拟过程中Sinlaku台风的运动分为三个阶段, 分别是北偏西, 转向和向北运动. 在高时间分辨率条件下, 台风的路径在整个过程中都呈现出明显的旋进特征, 在转向时刻, 其旋进更加复杂, 符合图5所示外力矩越大, 回转频数越多的结论. 在转向完成后北行的阶段, 随着台风稳定向北运动, 其受到的外力矩逐渐减小, 其旋进特征逐渐减弱. 从图7可见, 在模拟时长约有60h后, 台风的最大切向风速减小, 同时最大风速半径明显增加, 由3.2和3.3节的分析可知, 台风的自旋角速度减小, 进而导致台风的进动角速度减小.

从图8可见可以将环境场引导气流随时间演变过程分为三个阶段, 即较小的引导气流、引导气流接近为零以及引导气流逐渐增大的过程. 根据上节的分析, 其路径应分别表现为旋进较明显、旋进显著加强以及旋进减弱甚至表现为波动的特征, 图6中台风转向前, 旋进运动逐渐加强, 在转向后至北行阶段时又呈现出由旋进运动逐渐向波动运动过渡, 这些特征与之前的理论分析是相一致的.

5 结论

本文把台风最大风速半径内的密蔽云体视作近刚体转动的圆形云盘, 通过建立台风“云陀螺”模型, 指出

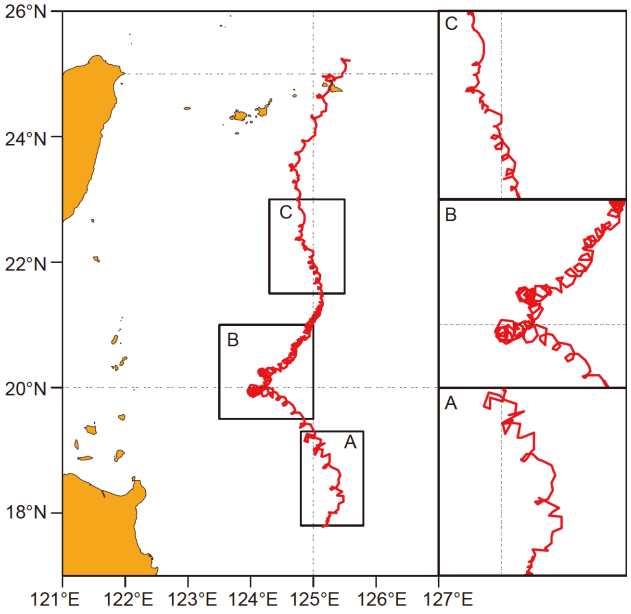


图 6　台风Sinlaku高时间分辨率模拟路径

时间间隔2min, A、B、C为局部放大

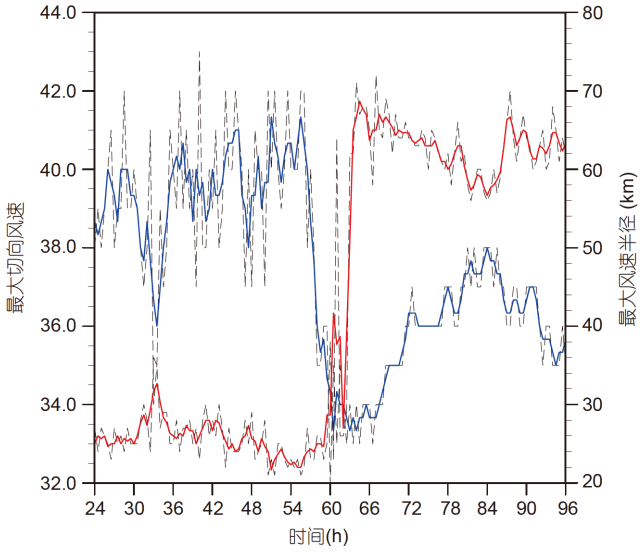


图 7　最大切向风速和最大风速半径随时间变化曲线

最大切向风速中蓝色实线为滑动平均; 最大风速半径中红色虚线为滑动平均

台风绕旋转轴自旋, 同时旋转轴以不变的章动角围绕角动量矢量匀速进动, 使得台风运动存在一种固有的圆周运动, 其运动具有陀螺特性. 将陀螺规则进动的原理应用在台风运动上, 并通过旋转坐标系中的角动

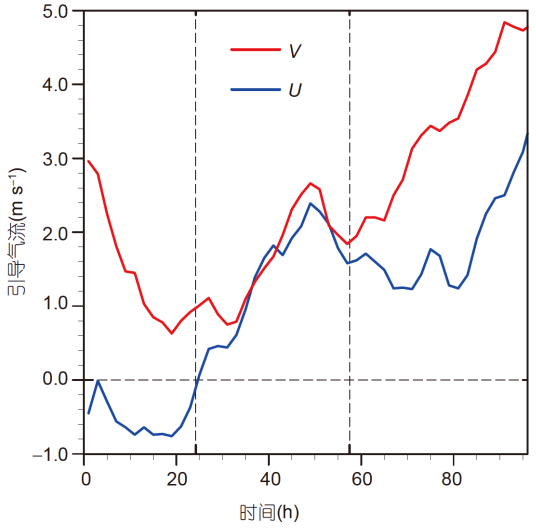


图 8　环境场引导气流随时间变化曲线

竖虚线分割出的三部分分别表示台风转向前、转向过程中和转向后

量定理推导出无外力矩作用和有外力矩作用两种情况的台风进动角速度计算公式, 最终得到台风运动轨迹的计算模型. 通过本文的理论推导和敏感性试验分析, 可得出如下结论:

(1) 在无外力矩作用时, 即背景场环流形势比较稳定时, 台风进动角速度决定于台风的自旋角速度; 当有外力矩作用时, 即背景场环流形势发生突变, 台风进动角速度会进一步增大, 让台风的进动运动更加显著.

(2) 不同的台风进动角速度以及不同的引导气流速度都会使得台风运动路径呈现出“波动性”或“回旋性”的变化. 随着台风最大风速半径的减小或切向风速的增加, 进动角速度也不断增大, 在此过程中台风运动路径由“波动性”更趋向于“回旋性”, 且进动周期不断减小. 引导气流则主要对台风运动的产生拖曳作用, 当引导气流速度较小时, 台风进动运动的“回转性”显著; 随着引导气流速度增加, 拖曳作用增强, 台风进动运动趋向于“波动性”, 甚至趋于水平.

上述结论得到了真实台风个例的高时间分辨率模拟验证, 随着高时空分辨率卫星观测的进步和台风定位定强技术的发展, 相信从卫星资料分析中也能达到同样的结论, 这对我们深入分析台风的运动特征, 进一步改进台风预报模式和技术都是有着积极的意义.

参考文献

刘延柱. 2009. 陀螺力学. 北京: 科学出版社. 4–13

钮学新. 1992. 热带气旋动力学. 北京: 气象出版社. 138–140

吴恒强. 1989. 试用陀螺规则进动原理讨论洋面上台风路径的摆动. 广西气象, 4: 1–6

Biswas M K, Stark D, Carson L. 2018. GFDL Vortex Tracker Users Guide Version 3.9a

Chan J C L. 2005. The physics of tropical cyclone motion. Annu Rev Fluid Mech, 37: 99–128

Chan J C L. 1984. An observational study of the physical processes responsible for tropical cyclone motion. J Atmos Sci, 41: 1036–1048

Chan J C L, Ko F M F, Lei Y M. 2002. Relationship between potential vorticity tendency and tropical cyclone motion. J Atmos Sci, 59: 1317–1336

Emanuel K A. 1991. The theory of hurricanes. Annu Rev Fluid Mech, 23: 179–196

Holland G J. 1983. Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect. J Atmos Sci, 40: 328–342

Landsea C W, Cangialosi J P. 2018. Have we reached the limits of predictability for tropical cyclone track forecasting? Bull Amer Meteorol Soc, 99: 2237–2243

Liu D, Pang L, Xie B. 2009. Typhoon disaster in China: Prediction, prevention, and mitigation. Nat Hazards, 49: 421–436

van Nguyen H, Chen Y L. 2011. High-resolution initialization and simulations of typhoon Morakot (2009). Mon Weather Rev, 139: 1463–1491

Nolan D S, Atlas R, Bhatia K T, Bucci L R. 2013. Development and validation of a hurricane nature run using the joint OSSE nature run and the WRF model. J Adv Model Earth Syst, 5: 382–405

Peng X, Fei J, Huang X, Cheng X. 2017. Evaluation and error analysis of official forecasts of tropical cyclones during 2005–14 over the Western North Pacific. Part I: Storm Tracks. Weather Forecast, 32: 689–712

Tao D, Zhang F. 2014. Effect of environmental shear, sea-surface temperature, and ambient moisture on the formation and predictability of tropical cyclones: An ensemble-mean perspective. J Adv Model Earth Syst, 6: 384–404

Wu C C, Emanuel K A. 1993. Interaction of a baroclinic vortex with background shear: Application to hurricane movement. J Atmos Sci, 50: 62–76

Wu L G, Wang B. 2000. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion. Mon Weather Rev, 128: 1899–1911

Wang Y, Holland G J. 1996. The beta drift of baroclinic vortices. Part II: Diabatic vortices. J Atmos Sci, 53: 3737–3756

Zhang F, Tao D. 2013. Effects of vertical wind shear on the predictability of tropical cyclones. J Atmos Sci, 70: 975–983

(责任编委: 孟智勇)