

黄奕武,高拴柱,钱奇峰. 2016. T639 台风预报误差与环境场变量的相关分析和回归分析. 气象, 42(12):1506-1512.

# T639 台风预报误差与环境场变量的 相关分析和回归分析<sup>\*</sup>

黄奕武 高拴柱 钱奇峰

国家气象中心, 北京 100081

**提 要:** 利用国家气象中心全球谱模式 T639L60(简称 T639)数值预报结果和上海台风研究所整编的台风最佳路径数据, 基于 2009—2010 年的样本, 分析了西北太平洋和南海台风的环境场预报变量与路径预报误差的相关性, 利用线性回归分析, 建立了 T639 台风中心预报误差与环境风整层垂直切变、400 hPa 台风环流强度的 24~120 h 各预报时效线性预估模型(建模样本数分别为 299、232、170、117 和 84 个), 并利用 2011 年的样本对模型进行了检验(检验样本数分别为 182、146、117、85 和 61 个)。初步结果表明, 环境风垂直切变与路径误差呈正相关, 台风各层环流强度与路径误差大致呈负相关, 其中 400 hPa 上的负相关性最明显; 由环境风垂直切变与 400 hPa 台风环流强度建立的线性预估模型能对路径预报误差作出定性估计, 其中 24 h 预报时效的预估模型有较好的预估效果。

**关键词:** 垂直切变, 台风环流强度, 相关分析, 台风预报误差预估

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.12.008

## Correlation and Regression Analysis of Typhoon Forecast Errors and Ambient Variables by T639

HUANG Yiwu GAO Shuanzhu QIAN Qifeng

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** The correlation between environment forecast fields and track forecast errors of typhoons in Northwestern Pacific Ocean and South China Sea was analyzed by using the output data in 2009 and 2010 from T639, which is the global spectrum model of National Meteorological Centre, and the best track data from Shanghai Typhoon Institute of CMA. With regression method, a linear track error estimate model was built for the T639 typhoon track forecast errors at lead time from 24 h to 120 h with whole layer vertical shear of environment and typhoon circulation intensity at 400 hPa (with samples of 299, 232, 170, 117 and 84, respectively). The estimate model was examined with the data in 2011 (with samples of 182, 146, 117, 85 and 61, respectively). The preliminary results illustrated that the typhoon track forecast error is positively correlated to ambient vertical wind shear, but being negative correlation with typhoon circulation intensity in each layer, which is most obvious at 400 hPa. The linear prediction model built with the whole layer vertical shear and typhoon circulation intensity at 400 hPa is able to perform estimation to track errors qualitatively, with a preferable result for the 24 h lead time forecast.

**Key words:** vertical shear, typhoon circulation intensity, correlation analysis, estimation to typhoon track forecast error

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006008)资助

2015 年 10 月 9 日收稿; 2016 年 9 月 29 日收修定稿

第一作者: 黄奕武, 主要从事台风与海洋天气预报工作. Email: huangyiwu@cma.gov.cn

## 引言

台风路径预报是台风降水预报的一个很重要的参考依据。由于数值预报存在不确定性,评估台风路径预报结果的可信度成为台风预报中不可避免的问题。对于台风预报结果的可信度预估,本质上是可预报性研究的范畴。Frandrich 等(1989)用非线性系统分析方法研究了澳大利亚早期热带气旋路径的可预报性。有作者用集合预报的结果诊断出台风变性过程对台风及其下游可预报性的影响(Harr et al, 2008; Anwender et al, 2008)。高拴柱等(2009)利用 MM5 模式模拟分析了“麦莎”台风的可预报性。

目前,集合预报是分析可预报性的一种可行的方法。由集合预报得到的台风路径概率预报产品,直观地体现了台风路径的集合发散程度,对台风路径的可信度和可预报性都有明确的指示意义。在当前的数值预报业务中,确定性预报仍然是很重要的一部分。目前,我国的确定性业务预报模式是 T639 模式。与国外的确定性预报全球模式相比,T639 的预报性能具有可比性(蒋星等,2011;刘一,2014;尹姗,2016)。相对于前一版本的业务全球模式 T213, T639 模式在台风预报部分方面表现出一定的优势。对异常路径台风的预报,T639 模式能较好地预报出环流形势的突然调整;但对西行及北上台风,T639 模式的路径预报误差仍偏大(麻素红等,2012;翟安祥等,2016;余锦华等,2012)。因此,对 T639 模式的台风路径确定性预报结果进行可信度预估,对于 T639 模式确定性预报结果的应用具有重要意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据资料

本文所用数据资料为 2009—2011 年 5—10 月每日 2 次(08、20 北京时)的 T639 全球模式分析场和预报场,台风实况位置采用中国气象局上海台风研究所整编的台风最佳路径数据集。由于最佳数据集的台风定位记录起止时间比业务定位有所拓展,在台风生命史的初期和末期其环流很弱的时候均有定位,而对于模式中较弱台风的定位实际上有较大不确定性,故对预报台风的考察时段仍以业务记录

起止时间为准。当模式预报场中的台风环流因地形或非对称结构导致某个时效的定位不确定时,该时效及其下一时效(个别变量的计算涉及两个时次的定位)的预报样本将被剔除。

### 1.2 台风环境引导气流的计算

台风环境引导气流的计算采用高拴柱(2001)所提到的方法:以台风中心为几何中心,分别在东、西、南和北四个方向设定四个矩形区域,矩形区域的规格分别为  $1^\circ \times 14^\circ$ ,台风中心与矩形有一定的距离(图 1)。利用公式:

$$u_g = -g \frac{z_{\text{north}} - z_{\text{south}}}{f_0 D} \quad (1)$$

$$v_g = g \frac{z_{\text{east}} - z_{\text{west}}}{f_0 d \cos \Phi_0} \quad (2)$$

式中, $z_{\text{north}}$ ,  $z_{\text{south}}$ ,  $z_{\text{east}}$  和  $z_{\text{west}}$  分别为某等压面上,台风中心以北、南、东和西的四个矩形区域内的平均位势高度, $\Phi_0$  为台风中心位置的纬度, $f_0$  为科氏参数, $D$  为南北矩形区域距离。从而得到的地转风  $u_g$ ,  $v_g$  分别为环境风气流的東西分量和南北分量。以气压差为权重,将各层地转风加权求平均,得到的平均值作为台风的环境引导气流。

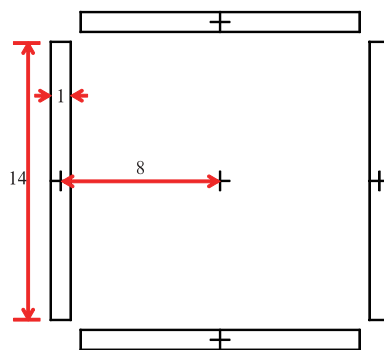


图 1 引导流计算的高度场截取区域  
(以一个经纬度为单位)

Fig. 1 The chosen areas on height field  
for calculating steering flow  
(With a latitude and longitude as the unit)

### 1.3 环境风垂直切变的计算

台风环境风垂直切变采用 DeMaria 等(2005)的算法:计算以台风中心为圆心、半径在 200~800 km 之间的环形区域内风的平均值作为该层次的环境风,200 与 850 hPa 环境风的矢量差为整层环境风垂直切变,200 与 500 hPa 矢量差为高层环境风

垂直切变,500 与 800 hPa 矢量差为低层环境风垂直切变。

1.4 环流强度的计算

台风某高度层上的环流强度算法:为了去除台风非对称结构的影响,本文的台风环流强度仅考虑台风的切向风分量,而不采用传统意义上的最大风速值来表征。本文取台风某高度层上最大风速圆环带内切向风的平均值来表征台风在该高度层上的环

流强度。

2 相关性分析

为了筛选出与预报误差相关性较好的环境场因子,对 T639 自 2009—2010 年汛期(5—10 月)预报场的台风环境场进行计算。最终各预报时效获得的样本数见表 1。

表 1 样本数及相关性显著临界值

Table 1 The sample numbers and significant critical values

预报时效/h	12	24	36	48	60	72	96	120
样本数	298	299	266	232	199	170	117	84
0.05 显著性水平检验临界值	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.18	0.21

对发生在 2009—2010 年汛期的所有台风样本,求取 T639 全球模式的台风路径预报误差与其预报

移动速度、预报引导气流速度、预报整层环境风垂直切变等要素的相关系数(表 2)。

表 2 T639 台风路径预报误差与各变量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between typhoon track forecast error and variables of T639

各要素	预报时效/h							
	12	24	36	48	60	72	96	120
移动速度	0.13	0.11*	0.02*	-0.03*	-0.07*	-0.07*	0.06*	0.32
引导流速度	0.18	0.23	0.21	0.15	0.08*	0.08*	0.11*	0.36
整层垂直切变	0.15	0.27	0.29	0.25	0.20	0.22	0.28	0.52
高层垂直切变	0.12	0.18	0.19	0.20	0.21	0.20	0.24	0.43
低层垂直切变	0.05*	0.20	0.24	0.17	0.08*	0.12*	0.19	0.44

注:带\*号数字表示未通过显著性水平检验。  
Note: \* represents values which have not passed the significance test.

如表 2 所示,T639 台风预报路径误差与其预报移速的相关系数在多个预报时效上未能通过 0.05 的显著性水平检验,且相关性在不同预报时效上存在正负更替。这使得预报移动速度与预报误差的关联性较难确立。预报误差与预报引导气流速度的相关性大致呈正相关,但仍有三个预报时效的相关系数未通过显著性水平检验。相较而言,预报误差与环境风整层和高层的垂直切变的各预报时效相关系数均通过显著性水平检验。这表明在某种程度上,环境风整层或高层垂直切变较大的台风,T639 路径预报误差相对较大;环境风整层或高层垂直切变较小的台风,T639 路径预报误差相对也较小。总体而言,环境风整层垂直切变与台风路径预报误差的相关性高于其高层的垂直切变,低层的垂直切变的相关性在部分预报时效未通过显著性水平检验,因而不明显。

除环境场影响台风路径预报外,台风本体的环流强度是一个不可忽略的因素。不同强度的台风在垂直方向上伸展的高度不同,台风在各层受环境场作用的权重也不同。表 3 中列出了预报场 200 hPa 以下台风各层环流强度与预报误差的相关系数。结果显示,两者相关性基本表现为负相关,大部分相关系数的绝对值大于显著临界值,但 96、120 h 时效中 600 hPa 以下层次均出现未通过显著性检验的相关系数。从各预报时效平均相关系数对比来看,400 hPa 上的负相关性最显著(-0.253),其次是 300 hPa(-0.248)和 500 hPa(-0.237)。这表明台风本体环流强度对路径预报误差的指示作用在 400 hPa 及其附近的层次上更具代表性。随着预报时效的增长,台风强度预报误差变大,这可能是导致指示作用变差的原因之一。

表 3 台风路径预报误差与预报场各层台风环流强度的相关系数

气压/hPa	预报时效/h							
	12	24	36	48	60	72	96	120
1000	-0.25	-0.17	-0.14	-0.13	-0.13*	-0.15*	-0.13*	-0.09*
925	-0.28	-0.21	-0.16	-0.16	-0.16	-0.18	-0.15*	-0.10*
850	-0.28	-0.22	-0.17	-0.17	-0.18	-0.20	-0.14*	-0.12*
700	-0.29	-0.23	-0.18	-0.19	-0.19	-0.22	-0.15*	-0.16*
600	-0.29	-0.24	-0.20	-0.21	-0.20	-0.23	-0.17*	-0.20*
500	-0.30	-0.26	-0.22	-0.22	-0.21	-0.24	-0.20	-0.25
400	-0.29	-0.27	-0.23	-0.22	-0.22	-0.25	-0.23	-0.32
300	-0.28	-0.25	-0.22	-0.20	-0.21	-0.22	-0.23	-0.37
200	-0.26	-0.22	-0.19	-0.17	-0.19	-0.16	-0.20	-0.35

注:带 \* 号数字表示未通过显著性水平检验。

Note: \* represents values which have not passed the significant test.

### 3 误差预估方程

假设 T639 台风路径模式预报误差  $Err$  与影响因子  $x_1, x_2, \dots, x_n$  存在一定的线性关系,误差估计方程可表示为:

$$Err = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (3)$$

根据前文的相关性分析,选取与预报误差相关性最好的两个因子,即预报场环境风垂直切变大小和 400 hPa 台风环流强度,作为影响因子。为保留 2011 年的误差数据以便检验,仅用 2009 和 2010 年的数据进行多元线性回归分析(黄嘉佑,2004)。24 h 预报时效的样本数  $n=299$ 。通过回归分析得到 T639 模式 24 h 预报误差回归方程如下:

$$Err_{24h} = 134.10 + 3.89x_1 - 1.82x_2 \quad (4)$$

式中  $x_1, x_2$  分别表示 24 h 预报场中的台风环境风垂直切变和 400 hPa 台风环流强度。

回归方程(4)的回归方差与实际误差的方差分别为:

$$s'^2_{24h} = 1081.3, \quad s^2_{24h} = 8714.3$$

统计量:

$$F = \frac{R^2/p}{(1-R^2)/(n-p-1)} = 20.96$$

式中,分子自由度  $p=2$ ,分母自由度为  $n-p-1=296$ 。在 0.05 显著性水平检验下,其显著临界值为  $F_\alpha=1.21$ 。 $F>F_\alpha$ ,因此回归方程(4)是显著的。

将 2011 年的 24 h 预报场因子(样本数 182)代入回归方程(4),得到估计误差与实际误差散点图(图 2),其相关系数达到 0.48。

以同样的方法分别对 48、72、96 和 120 h 预报

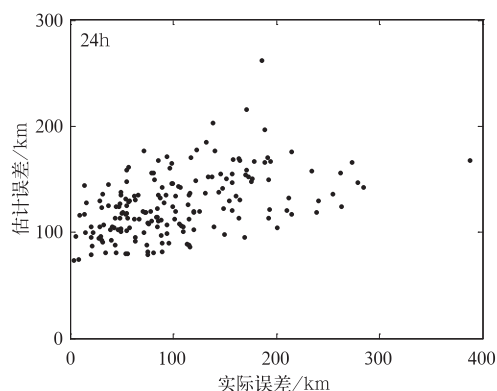


图 2 24 h 时效估计误差与实际误差散点图

Fig. 2 Scatter diagram of estimated errors and real errors in 24 h forecast

误差作线性回归分析,因子均为各自预报时效下的预报场垂直切变大小和 400 hPa 台风环流强度,样本数分别为 232、170、117 和 84。得到的回归方程分别为:

$$Err_{48h} = 208.48 + 5.96x_1 - 2.30x_2 \quad (5)$$

$$Err_{72h} = 342.27 + 6.65x_1 - 4.17x_2 \quad (6)$$

$$Err_{96h} = 416.51 + 11.15x_1 - 5.41x_2 \quad (7)$$

$$Err_{120h} = 497.29 + 24.01x_1 - 8.45x_2 \quad (8)$$

经检验,这四个方程及其因子均通过 0.05 的显著性水平检验。

将 2011 年的预报场因子(48~120 h 样本数分别为 146、117、85 和 61 个)分别代入式(5)~(8)这几组回归方程,得到估计误差与实际误差散点图(图 3)。它们的相关系数分别为 0.21、0.19、0.47 和 0.38。与 24 h 的结果相比,48~120 h 的估计误差与实际误差相关性较低。尽管 96 和 120 h 的相关系数比 48 和 72 h 大,但从图 3 来看,96 和 120 h 预估误差在大值区有比实际误差偏低的倾向。

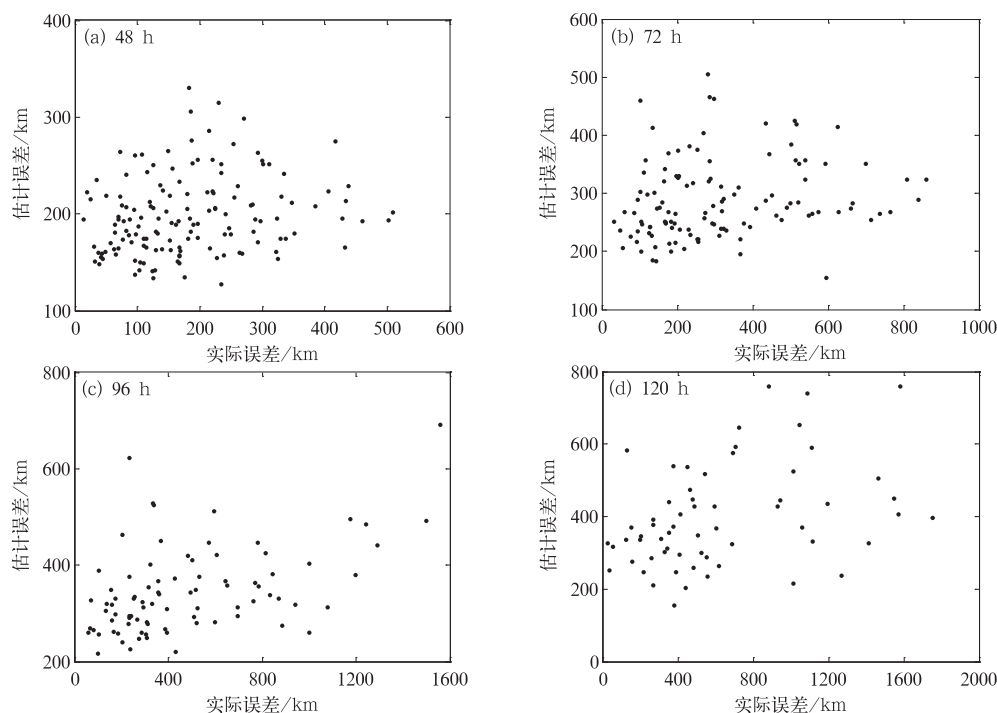


图 3 48~120 h(a~d)预报时效估计误差与实际误差散点图

Fig. 3 Scatter diagrams of estimated errors and real errors in 48–120 h (a–d) forecasts

#### 4 个例分析

在 2011 年 24 h 误差估计的结果中,1102 和 1111 号台风分别是估计效果较好和较差的个例,估计误差与实际误差相关系数分别为 0.76 和 0.01,偏差绝对值平均分别为 29.0 和 61.7 km(图 4)。

从两个台风的环境垂直切变和 400 hPa 环流强

度(图 5)来看,1102 号台风的环境垂直切变与实际预报误差变化趋势大体一致,而 400 hPa 环流强度则呈反相变化。这种趋势关系正好与 24 h 误差预报方程中的变量系数对应,在该方程里,环境垂直切变系数为正,400 hPa 环流强度系数为负。而在 1111 号台风中,环境垂直切变和 400 hPa 环流强度的变化既不与实际预报误差趋势一致,也不呈反相变化。

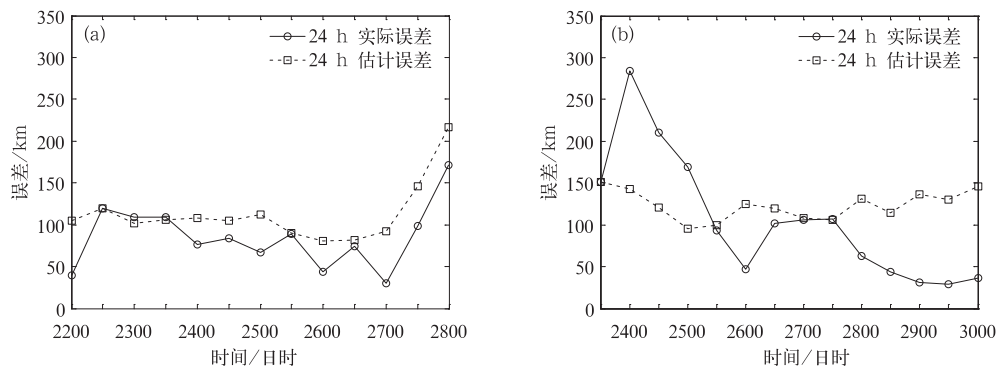


图 4 1102 号(a)和 1111 号(b)台风 24 h 预报时效估计误差与实际误差

Fig. 4 Estimated errors and real errors in 24 h forecast of Typhoons 1102 (a) and 1111 (b)

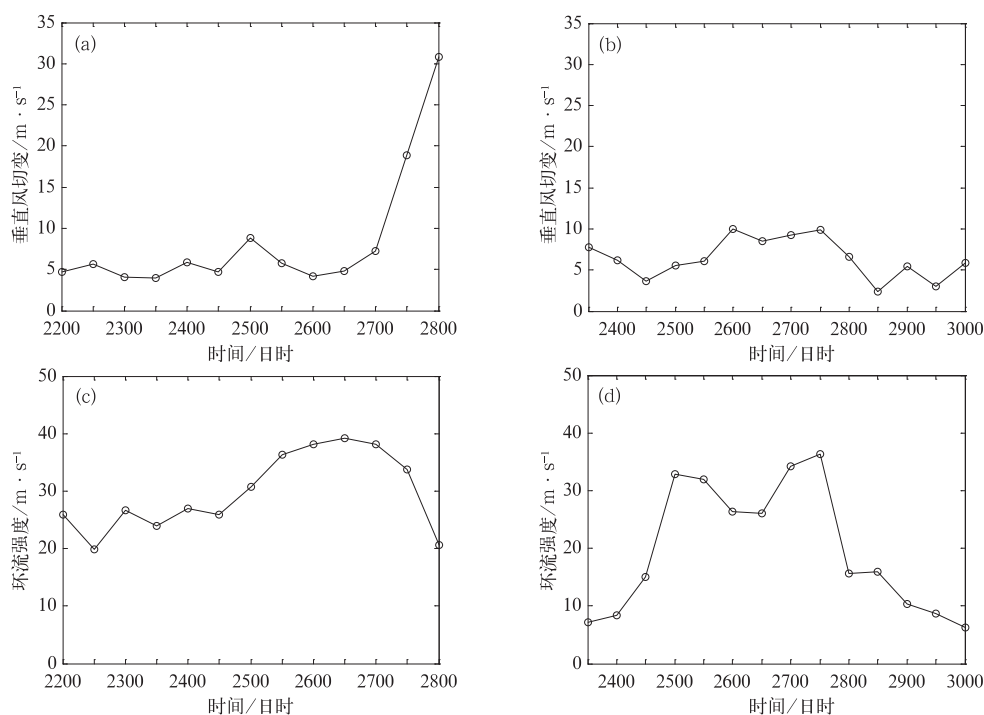


图 5 1102 号(a,c)和 1111 号(b,d)台风环境垂直切变(a,b)和 400 hPa 环流强度(c,d)

Fig. 5 Whole layer vertical shear (a,b) and 400 hPa circulation intensity (c,d) of Typhoons 1102 (a,c) and 1111 (b,d)

从更大范围的环流场来看(图 6),1102 号位于副热带高压西南沿,整个生命史过程中主要受副热带高压和西风带引导。而 1111 号台风生成初期,其东侧已有 1112 号的胚胎存在,从其预报路径来看,

1111 号台风的移动明显受 1112 号台风的本体环流影响。在影响 1111 号预报路径的诸多因子中,1112 号台风是一个独立且不可忽略的非常规因子。

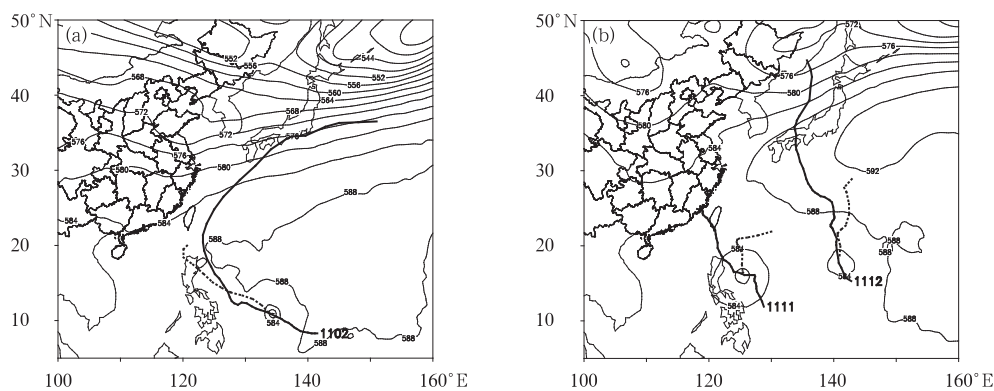


图 6 台风生成初期(a,1102 号:5 月 23 日 00 时;  
b,1111 号:8 月 25 日 00 时)500 hPa 高度 T639 分析场  
(黑粗线为最佳路径,点虚线为该时次起报的预报路径)

Fig. 6 The analysis height field at 500 hPa of T639 at the early stage of Typhoons 1102 (a, 00:00 BT 23 May) and 1111 (b, 00:00 BT 25 August)  
(Black thick line shows the best track, dotted line shows forecast track initiated at the corresponding time)

## 5 结论与讨论

(1)利用2009—2010年的T639模式预报场对台风路径预报误差和各预报物理量进行了相关性分析,发现台风预报路径误差与预报垂直切变有正相关。即在某种程度上,垂直切变较大的台风预报效果也倾向于较差。预报场中的台风环流强度与预报误差存在负相关,即较弱的台风环流倾向于产生较大的预报误差。

(2)利用相关性较大的两个因子(环境垂直切变和400 hPa台风环流强度)对台风预报误差建立了不同时效的线性回归误差预估方程。利用预估方程对2011年T639模式台风预报误差的估计效果显示,影响因子的线性组合能对预报误差作出定性的估计,其中24 h预报时效的估计误差与实际误差具有较好的相关性。

(3)个例分析的结果表明,在复杂的环流形势下(如双台风),存在环境垂直切变和台风环流强度以外的影响台风移动的重要因子,即由双因子构建的预估方程在体现影响台风路径的要素和机制方面尚不完善。

从物理意义上理解,引导流是台风移动的主导因素,是环境场在各层对台风本体引导的综合结果。对于环境场垂直方向上流场变化单一(垂直切变小),台风强度较强的情况,各层的引导作用相对均一,台风移动对台风强度的敏感度较低;而在环境场垂直切变较大的情况下,各层环境流场对台风的引导作用差异较大,对台风垂直伸展高度很敏感,使得台风移动对台风强度很敏感。而模式对台风强度预报误差问题长期存在。在这种背景下,用环境垂直切变和台风环流强度建立台风路径误差预估模型,有助于理解模式对台风路径预报的性能和规律,有助于判断不同条件下模式的台风路径预报结果的可信度,对主观预报有指导意义。

综上所述,由环境垂直切变、400 hPa台风环流

强度与预报误差通过线性回归得到的误差预估方程是可用的,但在较复杂的环流条件下仍然具有局限性。受资料所限,本文的相关分析及建模验证只是基于2009—2011年的T639模式预报场,所得结果是初步的。基于更长年限资料更多样本,探讨更多影响因子,从而构建更可靠、更具使用价值的预估方程,有待在更深入的研究中解决。

## 参考文献

- 高拴柱. 2001. 环境地转基本气流的计算及热带气旋运动与其偏差的统计分析. 热带气象学报, 17(2): 155-162.
- 高拴柱, 孟智勇, 杨贵名. 2009. 台风麦莎渤海转向的可预报性研究. 气象, 35(2): 8-14.
- 黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法(B). 北京: 气象出版社.
- 蒋星, 蔡蓂宁. 2011. 2011年6—8月T639、ECMWF及日本模式中后期预报性能检验. 气象, 37(11): 1448-1452.
- 刘一. 2014. 2013年9—11月T639、ECMWF及日本模式中后期预报性能检验. 气象, 40(2): 247-252.
- 麻素红, 吴俞, 瞿字祥, 等. 2012. T213与T639模式热带气旋预报误差对比. 应用气象学报, 23(2): 167-173.
- 瞿安祥, 麻素红, 张进. 2016. T639全球模式的台风初始化方案升级试验. 气象, 42(6): 664-673.
- 尹姗. 2016. 2015年12月至2016年2月T639、ECMWF及日本模式中后期预报性能检验. 气象, 42(5): 637-642.
- 余锦华, 唐家翔, 戴雨茜, 等. 2012. 我国台风路径业务预报误差及成因分析. 气象, 38(6): 695-700.
- Anwender D, Harr P A, Jones S C. 2008. Predictability associated with the downstream impacts of the extratropical transition of tropical cyclones: Case studies. Mon Wea Rev, 136: 3226-3247.
- DeMaria M, Mainelli M, Shay L K, et al. 2005. Further improvement to the statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS). Wea Forecast, 20: 531-543.
- Franedrich K, Leslie L M. 1989. Estimates of cyclone track predictability. I: Tropical cyclones in the Australian region. Q J R Meteor Soc, 115: 79-92.
- Harr P A, Anwender D, Jones S C. 2008. Predictability associated with the downstream impacts of the extratropical transition of tropical cyclones: Methodology and a case study of Typhoon Nabi (2005). Mon Wea Rev, 136: 3205-3225.