

黄小燕, 金龙, 姚才, 等. 夏季南海台风移动路径的一种客观预报方法[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 287-292.

夏季南海台风移动路径的一种客观预报方法

黄小燕^{1,2}, 金龙³, 姚才³, 黄明策²

(1. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 广西区气象台, 广西 南宁 530022;
3. 广西气象减灾研究所, 广西 南宁 530022)

摘要:以 1960—2003 年共 44 a 夏季的 7 月、8 月、9 月西行进入南海海域的台风样本为基础, 综合考虑南海台风移动路径的气候持续因子和数值预报产品物理量因子, 运用条件数方法选取因子并建立回归方程, 进行台风路径预报模型的预报建模研究。通过对比分析发现, 基于条件数方法的南海台风移动路径模型具有较好的预报效果, 7 月、8 月、9 月 3 个月 24 h 台风路径预报的平均距离误差为 153.9 km, 预报能力明显高于目前国内外的其他一些台风路径客观预报方法。该方法的预报精度相对于逐步回归方法有了很大的提高, 相对于气候持续法也为正的预报技巧水平。

关键词:台风路径预报; 条件数分析方法; 逐步回归方法; 气候持续法

中图分类号: P458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)02-0287-06

An Objective Technique for Forecasting Typhoon Motion over South China Sea in Summer

HUANG Xiaoyan^{1,2}, JIN Long³, YAO Cai³, HUANG Mingce²

(1. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China;

2. Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China;

3. Guangxi Research Institute of Meteorological Disasters Mitigation, Nanning 530022, China)

Abstract: Based on the samples of typhoons in July, August and September from 1960 to 2003 over the South China Sea, multivariate regression prediction models of typhoon track for July, August and September developed by using the condition number method in selecting predictors from numerical prediction products and predictors used in the CLIPER model of typhoon track, and prediction experiments indicate that the average error of the three models is 153.9 km, which is smaller than those of objective prediction models currently used in China and western countries. Comparison experiments of new regression models with stepwise regression models and CLIPER models are performed under the conditions of identical modeling and independent samples and identical or almost identical predictor number, and results show that new regression models are superior to the stepwise regression models in prediction accuracy, and the forecast skill of new regression models relative to the CLIPER models is positive.

Key words: typhoon track prediction; condition number method; stepwise regression; CLIPER models

0 引言

台风是影响我国的重要灾害性天气系统之一, 会造成严重的经济损失和人员伤亡, 所以对台风路径的预报, 历来受到人们的关注。对此国内外进行了许多研究, 建立了各种预报方法, 其中最主要的是数值模式的动力预报、客观统计预报和主观经验预

报 3 种方法。由于以统计动力为主的客观预报方法预报精度不断提高, 因而近年来已经成为业务预报服务重要的参考依据之一^[1-6]。

目前气象业务上的台风移动路径客观统计预报方法中, 逐步回归分析是比较成熟的一个预报方案, 被广泛应用于气象随机过程的分析与预测。虽然在建模、预测或控制等领域统计分析的结果很重要, 但

收稿日期: 2005-12-05; 改回日期: 2007-06-07

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(桂攻关 0322022-4)

作者简介: 黄小燕(1978—), 女, 广西崇左人, 硕士, 研究方向为天气预报, gx_huangxy@163.com.

对于回归模型本身的一些假设条件如自变量之间的独立性等也是至关重要的。在台风路径的预报中有很多因素(即自变量)影响台风未来的移动变化,这些因素之间存在着某些相关关系,因而并不是独立的,因此用通常的逐步回归建立的预报方程,就有可能包含一些统计上不显著的预报因子,从而带来比较大的随机误差,也给方程的物理解释带来了困难。另外,对于由通常的逐步回归得到的方程,一般入选因子的原则是根据 F 值自动从众多因子中剔除并入选构建预报模型的因子矩阵,这些入选因子之间不可避免地存在复共线性关系,而复共线性的存在会对预报模型造成影响^[7]。条件数分析方法一般能比较有效地判断预报因子组的复共线性关系严重程度,因此,本文就台风路径预报这一问题,尝试运用条件数方法对夏季南海海域的台风移动路径进行预报建模研究。

1 条件数方法的原理和应用

考虑具有 n 个样本、 p 个自变量($n > p$)的线性回归模型^[4]

$$y_i = \alpha_0 + \beta_{1X_{i1}} + \beta_{2X_{i2}} + \dots + \beta_{pX_{ip}} + \varepsilon_i, \quad (1)$$
$$E(\varepsilon) = 0, \quad D(\varepsilon) = \sigma^2,$$
$$\text{cov} = \sigma^2 I, \quad i = 1, \dots, n.$$

当(1)式存在复共线性关系时,将会严重影响到模型的预报能力,从这个意义上说,诊断并排除复共线性的存在是非常重要的。关于复共线性的诊断以及复共线性严重程度的度量,已经提出了许多方法,主要有特征分析法、条件数法、方差扩大因子法等^[7]。其中条件数分析方法能比较好地诊断出自变量之间的复共线性严重程度,而且计算方法简单易行。设 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$ 为 $X'X$ 的由大到小排列的 p 个特征根,则 $X'X$ 的条件数定义为

$$k = \frac{\lambda_1}{\lambda_p}. \quad (2)$$

从式(2)可以直观看出 $X'X$ 特征根的散布程度,从而判断出自变量间的复共线性是否存在及其严重程度。对于一般的实际预报建模问题,预报因子组的条件数太大会产生较严重的复共线性关系,导致预报方程的预报能力下降。但是文献[8]关于复共线性的诊断方法研究也指出, k 值“大”到什么程度一定存在复共线性关系还不能完全肯定。利用条件数较小的因子组合进行预报建模是否可以获得更好的预报效果,是本文需要进一步讨论的问题,为此,在南海台风路径预报研究中进行了试验。

2 夏季南海区域台风移动路径的预报试验和对比分析

2.1 资料及研究对象

本文在采用条件数方法进行台风移动路径预报建模研究时,台风资料采用中国气象局编辑出版的1960—2003 年共 44 a 的《台风年鉴》资料,以及 NCEP/NCAR 全球再分析逐日高度场格点资料,格距为 $\Delta\theta \times \Delta\lambda = 2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 对应经、纬向格点分别为 73、144。海域范围是指 $102.5^\circ \sim 123.0^\circ \text{E}$, $10.0^\circ \sim 23.5^\circ \text{N}$ 的南中国海海域,研究对象为夏季 7 月、8 月、9 月西行进入或生成于该区域内具有 48 h 以上生命史的台风,并规定台风从进入该海域范围的第一点开始,每间隔 12 h 作为一个统计样本。将 1960—1989 年 30 a 的台风个例作为建模样本,1990—2003 年 14 a 的台风个例作为独立样本进行预报试验,这样所得到各月的建模样本和独立预报样本个数如表 1 所示。

表 1 各月建模样本和独立预报样本个数

Table 1 The size of modeling and independence samples of typhoon track prediction models for July, August, and September

	7 月	8 月	9 月
建模样本(1960—1989 年)	330	462	490
独立预报样本(1990—2003 年)	154	151	163

2.2 预报因子的初选

根据气候持续法原理^[9,12]以及各月的台风建模样本资料,以相关系数达到 0.15 以上作为标准来选取气候持续因子,并以达到或超过 0.01 显著性水平作为入选标准。最终得到与经度有关的预报因子为 7 月 12 个,8 月 11 个,9 月 15 个;与纬度有关的预报因子 7 月 38 个,8 月 13 个,9 月 25 个。

数值预报产品物理量因子的选取是在台风周围 15×15 个格点范围内,通过与预报对象进行场相关普查,将成片(≥ 10 个格点)稳定的高相关(相关系数 ≥ 0.3)格点作为预报因子的选择区,在区内选 3 个相邻格点的最大平均值作为该相关区的代表值,作为待选因子。另外对与预报对象相关好但符号相反(相同)的两个相邻或相近区域,将这两个区域的代表值相减(相加),获得组合预报因子。预报因子经过组合后,集中的信息就更多,同预报量的相关性也就更好。预选因子时,以达到或超过 0.01 显著性水平为入选标准,最终得到各月经、纬度的物理量预报因子。待选因子中包含了数值预报产品的各种物

理量场, 包括各层的位势高度、水汽通量、等压面比湿、湿度、风场、涡度、涡度平流及各层的差值等。

2.3 南海台风移动路径预报

以所选出各月的台风建模样本的经、纬度分别作为预报对象, 进行基于条件数选取因子的逐步回归预报建模研究。在确定预报建模的入选因子时, 首先把已选出的所有因子(即持续因子和物理因子)中与预报量相关最好的 2~ 3 个因子作为重要因子选出。一般所优选的因子与预报量的相关系数都较高, 对预报量未来的发展变化有着很好的指示作用, 因此在建立方程时可作为重要因子优先入选方程。其余的因子进一步用条件数方法来进行挑选, 具体确定预报因子的步骤如下:

(1) 在全部 7 月台风经度的持续因子和数值预报产品物理量因子共 43 列(已经去除重要因子)中任选两列, 记为 X_1, X_2 , 令 $X = (X_1, X_2)$, 计算 $X'X$ 对应的特征根, 并用条件数的原则考察它们之间复共线性的严重程度。若两者之间条件数比值较大, 说明复共线性较大, 则只选用其中一个因子, 否则将两个因子全部选入模型中去。

(2) 在剩下的 41 个因子阵中任选一个构成新的设计阵 $X = (X_1, X_2, X_3)$, 计算其特征根和条件数, 同样考察它们之间的复共线性严重程度。若存在较大的复共线性现象, 模型中不选择 X_3 ; 否则将 X_3 也选到模型中去。

(3) 按上述步骤, 一直到将 43 个因子中所含复共线性较小的变量全部选择完毕。最后将被选择的变量构成新的设计阵 X , 然后用最小二乘法求解相应的回归系数。

以 k 值等于 500 为因子最终的入选界限, 这样根据筛选确定的预报因子分别建立了 7 月、8 月、9 月台风移动路径的经度和纬度的 24 h 回归预报方程(限于篇幅这里只列出 7 月的预报方程式)。

$$Y_{24(7)} = 11.2356 + 0.0059x_{32}^* + 0.026x_{7-}$$

$$\begin{aligned} &0.0865x_{12}^* + 0.0094x_{33}^* - 0.0479x_{8-} - \\ &0.0037x_{31}^* + 0.0256x_{2+} + 94.3871x_{28}^* + \\ &94.3923x_{23}^* - 0.0013x_{34}^* - 0.0067x_{14}^* - \\ &0.0575x_{29}^* - 94.3573x_{25}^* + 2.9484x_{1-} - \\ &2.0349x_{11} + 94.4689x_{26}^*, \\ &(\sigma = 1.5301, R = 0.9318)。 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} X_{24(7)} = &3.3409 + 0.0086x_{33}^* - 19.2891x_{5+} + \\ &0.0019x_{8+} + 0.0059x_{60}^* + 0.0047x_{5}^* - \\ &0.0035x_{58}^* + 0.0039x_{61}^* + 0.0249x_{4+} + \\ &0.0045x_{56}^* - 0.0139x_{24} + 0.0076x_{28} + \\ &0.0941x_{13}^* - 0.0076x_{25} - 0.0025x_{57}^* + \\ &178.8577x_{1-} - 177.0504x_{18} - 0.9617x_{33}, \\ &(\sigma = 0.9839, R = 0.9359)。 \end{aligned} \tag{4}$$

式中 σ 表示剩余标准差, R 表示复相关系数, $*$ 表示物理量预报因子, 其余因子为气候持续预报因子。如(3)式中, x_{32}^* 为物理量预报因子, 它表示 700 hPa 涡度场。而 x_{7-} 为气候持续预报因子, 表示台风间隔 6 h 的前 12 h 纬向加速度。

利用预报方程式, 对 1960—1989 共 30 a 的 7 月、8 月、9 月的台风样本进行了建模预报, 表 2 给出了各月建模样本的拟合情况。从表 2 可以看到, 7 月经度拟合的绝对误差 1.119 9°, 纬度 0.751 3°。采用台风路径业务预报的常用计算式

$$\Delta X = \sqrt{\Delta Y_{24}^2 + \Delta X_{24}^2} \times 110。 \tag{5}$$

可以将预报经度和纬度的误差换算成距离单位。(5)式中, 110 km 是一个经(纬)度的大致距离。实际工作中, 预报与实况两点间的距离(即预报误差)可用如下公式精确计算。

$$\begin{aligned} \Delta S = &6371 \times \arccos\{\sin\phi_1 \sin\phi_2 + \\ &\cos\phi_1 \cos\phi_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2)\}。 \end{aligned} \tag{6}$$

式中 6371km 是地球半径, ϕ_1, λ_1 是第 1 点的经度、纬度; ϕ_2, λ_2 是第 2 点的经度、纬度^[13]。通过(5)式计算得到, 采用条件数方法所建立的台风路径预报

表 2 条件数分析方法各月建模样本拟合结果

Table 2 The simulation results of modeling samples using the condition number method for July, August, and September

月份	经度		纬度		距离/km
	绝对误差/(°)	相对误差/%	绝对误差/(°)	相对误差/%	
7	1.119 9	1.002 8	0.751 3	3.789 6	148.3
8	1.149 5	1.022 8	0.802 6	4.126 9	154.2
9	0.974 2	0.867 6	0.693 0	3.886 6	131.5

模型对 7 月的 330 个建模样本的拟合误差为 148. 3 km。同样的方法分别对 8 月和 9 月台风移动的经度和纬度进行建模, 所得结果如表 2 所示。

进一步利用预报方程分别对 1990—2003 年共 14 a 的 7 月、8 月、9 月 3 个月的南海台风个例进行独立样本预报检验。为了与实际预报工作相一致, 同样以(3)~(4)式为基础进行逐次预报。即 7 月根据 1960—1989 年的 330 个样本建立的预报方程, 预报第 331 个独立样本, 再用前 331 个样本建模预报第 332 个, 以此类推, 直到用 483 个样本建模对最后第 484 个样本进行预报。表 3 给出了 1990—2003 年采用条件数方法所建立的台风路径预报模型对 7 月、8 月、9 月南海台风移动经度和纬度的预报结果。

由表 3 可见, 运用条件数方法进行的热带气旋路径预报方法 24 h 预报的平均距离误差分别为: 7 月 162. 1 km, 8 月 145. 9 km, 9 月 153. 8 km。统计得到 3 个月的平均预报误差为 153. 9 km, 这比国家“八五”热带气旋攻关项目所规定的 24 h 路径预报误差 200 km 的考核目标有了较大的改进^[13], 比近几年我国的各种客观预报方法 24 h 预报平均距离误差 178. 8 km(2004 年热带气旋定位和预报精度评定, 上海台风研究所, 第五届全国台风及海洋气象专家工作组第三次会议文件汇编)减小了近 25 km。Aberson 等^[9] 2003 年利用较精确的气象卫星和探测飞机观测数据及传统的气候持续预报因子, 分别建立的两个西北太平洋热带气旋路径气候持续法回归预报模型, 24 h 预报的平均距离误差为 177. 7 km 和 188. 9 km, 误差要大于本文所用方法。

2.4 与逐步回归方法的对比分析

逐步回归分析是目前统计预报中比较成熟的一个预报方案, 是分析和研究气象随机过程的重要工具^[14]。为了更客观地分析运用条件数分析方法建立的方程所预报的热带气旋路径效果, 将其与逐步回归方法所建立方程的预报效果进行对比分析。同

样以前面所确定的气候持续预报因子以及数值预报产品物理量预报因子为基础, 为保证对比的合理性, 设定合适的 F 值来控制入选回归方程的因子数, 使方程所入选的因子数与条件数分析方法所建立方程的因子数相同或是相近。

这样对于 7 月的 46 个预报因子, 设定 $F=0.6$, 方程入选 17 个预报因子(条件数方程所建立的方程因子数为 16 个):

$$\begin{aligned} Y_{24(7)} = & 12.0990 + 2.8486x_1 - 0.4562x_3 - \\ & 0.0445x_8 + 2.2307x_{10} - 1.9494x_{11} + \\ & 0.5684x_{12}^* - 0.1065x_{15}^* - 0.0119x_{17}^* + \\ & 0.0309x_{18}^* - 0.0203x_{19}^* - 0.1532x_{12}^* + \\ & 0.0533x_{13}^* + 211.5974x_{19}^* + 211.5587x_{20}^* - \\ & 211.4980x_{24}^* - 211.4532x_{26}^* - 0.0984x_{29}^*, \\ & (\sigma = 1.481\,940, R = 0.936\,457). \end{aligned} \tag{7}$$

对于纬度的 100 个因子, 设定 $F=2.5$, 可得预报方程:

$$\begin{aligned} X_{24(7)} = & 26.793\,5 + 2.088\,4x_1 - 2.250\,1x_4 + \\ & 1.943\,1x_6 + 20.106\,2x_{27} - 8.704\,9x_{30} - \\ & 1.170\,5x_{33} - 0.054\,0x_{35}^* + 0.064\,3x_{13}^* + \\ & 0.284\,9x_{21}^* + 0.072\,2x_{22}^* - 0.128\,3x_{27}^* + \\ & 0.038\,3x_{35}^* + 0.169\,5x_{41}^* - 0.217\,4x_{48}^* + \\ & 0.486\,6x_{52}^* - 0.069\,2x_{59}^* + 0.015\,9x_{61}^*, \\ & (\sigma = 0.890\,452, R = 0.947\,907). \end{aligned} \tag{8}$$

式(7)和式(8)中经度和纬度方程都分别入选了 17 个预报因子, 这与条件数入选方程的因子数相接近。和条件数方法建立的预报方程所作的独立样本预报检验完全一样, 用这两个方程对 1990—2003 年 14 a 的 26 个热带气旋共 154 个独立样本进行预报检验, 所得预报距离结果为 174. 8 km。这样在预报样本和预报次数相同的条件下, 传统的逐步回归方法的热带气旋路径预报距离误差比运用条件数分析方法后所得结果大了近 12. 7 km。

同样对 8 月和 9 月, 分别设定不同的 F 值可得

表 3 条件数分析方法各月独立样本预报结果

Table 3 The prediction results of independence samples using the condition number method for July, August, and September

月份	经度		纬度		距离/km
	绝对误差/(°)	相对误差/%	绝对误差/(°)	相对误差/%	
7	1.199 6	1.071 1	0.856 4	4.103 3	162.1
8	0.913 2	0.820 5	0.961 6	4.687 6	145.9
9	1.209 1	1.059 8	0.701 7	3.549 3	153.8

各月经度和纬度的预报方程。利用预报方程式分别对 8 月和 9 月热带气旋移动的经度和纬度进行独立样本预报检验, 结果如表 4 所示。

对表 4 进行统计得到, 应用传统的逐步回归方法建立方程所预报的热带气旋路径 3 个月的平均距离误差高达 229.2 km, 条件数方法 3 个月的预报误

差为 153.9 km, 比逐步回归方法的预报距离误差减少了近 75 km。分析原因可以发现, 传统的逐步回归方法根据 F 值从众多的预报因子中自动剔除和确定因子来建立预报方程, 而未考虑分析这些入选预报因子之间所存在的复共线性干扰, 从而影响了方程的预报效果。

表 4 逐步回归方法各月 24 h 独立样本预报结果

Table 4 The 24 h prediction results of independence samples using the stepwise regression for July, August, and September

月份	经度		纬度		样本数	距离/km
	绝对误差/(°)	相对误差/%	绝对误差/(°)	相对误差/%		
7	1.280 8	1.143 4	0.941 1	4.535 3	154	174.8
8	1.253 8	1.129 8	2.585 0	12.944 7	151	316.0
9	1.366 1	1.195 7	1.205 0	6.176 2	163	200.4

2.5 与气候持续预报方法(CLIPER)的对比分析

目前气候持续法(CLIPER)是国内外运用较为广泛的台风路径客观预报方法之一^[9-12], 一般认为 CLIPER 方法是评估预报模式技巧的标准^[15]。一个新的预报方案能否应用于实际预报, 关键是看它的预报能力是否能与 CLIPER 方案相当或者与 CLIPER 方法比较是否具有正的预报技巧水平。为了保证对比的合理性, 各月台风的建模样本和独立预报样本与条件数方法所选用的相一致, 预报因子以前面所选出的气候持续预报因子为基础进行建模预报。运用公式

技巧水平 = $\frac{\text{方案 A} - \text{方案 B}}{\text{方案 A}} \times 100\%$ 。(9)

其中方案 A、B 分别代表 CLIPER 方法和本文所提出的预报方法所预报的台风移动路径的距离误差。可以得到本文所应用的新方案相对于相同时次气候持续法(PC)的预报技巧水平分别为: 7 月 3.15, 8 月 6.17, 9 月 5.07, 即各月预报均为正技巧。说明综合考虑数值预报产品物理量因子并应用条件数选取预报因子的台风移动路径客观预报模式是有一定的预报技巧水平的, 因而可以应用于实际预报。

3 结论与讨论

(1) 在夏季南海区域台风路径的因子初选中基于各种影响要素, 在传统考虑的气候持续因子的基础上加入了数值预报产品物理量因子, 这既包含了反映预报量前期的强度、位置变化等重要因素, 又包含了大气环境场物理量中对预报量有影响的外部因子, 从而在因子矩阵中增加了更为丰富的预报信息,

试验结果表明加入物理量因子后的预报结果比只考虑气候持续预报因子的气候持续法预报效果要好, 即预报技巧水平相对于目前广泛使用的气候持续法为正的技巧。

(2) 利用条件数方法较有效地计算分析了因子间的复共线性关系, 更好地从众多初选因子中选择合理的预报因子组合, 较好地克服传统的多元回归方程中预报因子间的复共线性关系, 并抑制由此所带来各种不同的噪声影响, 预报精度比传统的逐步回归预报方程有了较大的提高。

(3) 在试验过程中, 根据实际业务预报需要, 逐次进行建模预报, 便于今后模式能直接应用于实际的业务预报。在按月建立预报模式时, 还充分考虑了重要因子对预报量的指示作用, 并与条件数所确定的因子矩阵进行组合建立方程进行建模预报, 使精度进一步提高, 且模型的样本数较大, 预报效果较为稳定。

在研究过程中发现, 虽然入选预报方程的预报因子组中, 预报因子间存在复共线性关系的程度可以通过自变量的条件数计算结果定性分析得出, 但是当条件数大到一定程度后, 条件数数值的进一步增大或减小是否能度量自变量的复共线性程度变化, 目前还没有理论上的分析结论, 因此这也为利用条件数的计算结果预报方程的复共线性关系作进一步的定量分析带来困难, 这也有待于更进一步深入研究。

参考文献:

[1] 田永祥, 赵远东. 应用非对称结理论制作台风路径预报[J].

南京气象学院学报, 2000, 23(4): 469-474.

[2] 朱永祺, 程戴晖. 热带气旋路径动力释用预报的集合预报方案[J]. 气象科学, 2000, 20(3): 229-238.

[3] 陈书驰, 胡广隆. 台风移动路径数值预报的影响因子初探[J]. 气象科学, 2000, 20(1): 57-64.

[4] 张胜军, 徐祥德, 姚文清. 适应性非对称人造台风方案对热带气旋路径的模拟预报[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 525-531.

[5] 王栋梁, 梁旭东. 台风数值模拟中 bogus 涡旋四维变分同化的研究[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(4): 502-510.

[6] 周霞琼, 张秀珍, 端义宏, 等. 滞后平均法(LAF)在热带气旋路径集合预报中的应用[J]. 气象科学, 2003, 23(4): 410-417.

[7] 陈希儒, 王松桂. 近代回归分析原理方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 217-226.

[8] 胡庆军. 诊断复共线性的新方法[J]. 数学的实践与认识, 1995(4): 55-62.

[9] Sim D A, Charles S R. On the predictability of tropical cyclone tracks in the northwest Pacific basin[J]. Mon Wea Rev, 2003, 131(7): 1491-1497.

[10] 吴中海, 徐一鸣, 李多武, 等. 西北太平洋台风路径预报的气候持续性模式[C]// 气象科学技术刊集 (台风), 1983.

[11] 谢玲娟. 南海台风路径预报的气候、持续性模式[J]. 海洋预报, 1989, 6(2): 20-30.

[12] Sim D A. Five day tropical cyclone track forecasts in the north Atlantic basin[J]. Wea Forecasting, 1998, 13(4): 1005-1015.

[13] 中国气象局. 台风业务和服务规定[M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 2001: 45-102.

[14] 康金章, 鹿世瑾. 数值预报和数理统计预报会议文集[C]. 北京: 科学出版社, 1974: 129-141.

[15] 钟元, 胡波. 综合评估环境场影响的热带气旋路径客观相似预报模式[J]. 热带气象学报, 2003, 19(2): 147-156.