

预估偏差法集合化台风路径概率预报

刘莹^{1,2}, 潘毅^{1,2}, 陈永平^{1,2}, 袁杰颖^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 基于2012—2016年发生在西北太平洋我国24 h警戒线内的所有台风资料,在预估偏差台风控制路径预报结果的基础上,统计台风控制路径预报位置与实测位置之间的预报距离误差,得到台风落入概率相对于无量纲预报误差的经验分布公式。进一步的,分偏快、偏慢、偏左、偏右对各偏离方向分别建立偏台风落入概率相对于无量纲预报误差的经验分布公式。使用该方法对2017年全年的台风进行后报,并比较落入概率预报结果与实际落入概率之间的误差,结果证明二者有较好的一致性。

关键词: 集合化预报; 预估偏差; 控制路径; 扰动路径; 概率分析

中图分类号: P457.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2019)03-0018-06

1 引言

台风是一种具有很强破坏力的海上热带气旋^[1],我国沿海是遭受台风灾害最为频繁的地区之一。台风给沿海地区带来强风、暴雨和风暴潮灾害,深入内陆则易引起山洪、滑坡、泥石流等次生灾害。台风的精确预报对于海岸防灾有至关重要的作用,其中台风的路径预报是台风预报难点所在^[2]。但是,由于台风等极端天气事件具有高度的不确定性,预判路径与实际移动路线往往存在偏差。

为了降低不确定性因素给数值预报带来的误差,相关领域的学者提出了集合化预报方法^[3-4]。但这种集合化方法对预报样本的数据量要求很大,计算过程时耗长,有人提出可以将不同模式下的预报结果作为一个整体来考虑,采用多模式集合的方法进行预报,即多模式集合预报^[5]。Krishnamurti等^[6]最早提出一种将多个单一的预报模式进行集合的多模式集合预报方法,即超级集合预报。研究发现,模式自身的不确定性对预报误差的影响不能忽

略^[7],多模式集合预报可以改善各单一模式存在的缺陷,预报效果优于单个模式或多模式的简单平均^[8-11]。但此种方法其各个独立模式的权重因子在选择训练期样本时具有较大依赖性。

河海大学团队丁雪霖等^[12]提出了一种利用近期多次台风过程的预报结果,在传统静态训练法上进行优化的滑动训练法。但在对个别台风的预报中,可能会出现某些时刻预报误差偏大的现象。因此,河海大学团队袁杰颖等^[13]引入预估偏差法,基于对各机构对单次台风过程预报中的偏差进行统计分析,通过动态训练方式不断更新权重因子及预报偏差,从而得到更可靠的预报结果。这种方法具有需要数据量少和稳定性高等优点,但缺少概率预报的概念,如难以给出80%保证率的预报范围等。

为了解决此问题,进一步完善预估偏差预报方法,本文在预估偏差集合化预报方法的基础上,对2012—2016年发生在西北太平洋24 h警戒线内的所有台风(2017年台风资料留作验证),统计各台风路径预报位置与实测位置之间的预报距离误差,得

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-09-20。

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20181309);河海大学中央高校基本科研业务费项目(2018B43514)。

作者简介: 刘莹(1996-),女,硕士在读,从事海岸防灾研究。E-mail: zeldayliu@163.com

通讯作者: 潘毅(1985-),男,副教授,博士,从事海岸防灾研究。E-mail: panyi@hhu.edu.cn

到台风落入概率相对于无量纲预报误差的经验分布公式。然后以极坐标表示,统计实测台风中心位置相对于预估偏差法控制路径预报位置的空间位置,得到分方向细化的落入概率分布规律。以得出的概率误差分布规律对2017年全年的台风进行后报,并与实际偏离位置进行比较,发现二者有较好的一致性。

2 预估偏差法简介

预估偏差法(Error-Estimation Ensemble, EEE)的核心思想是利用当前时刻和上一时刻的实测值和预报值的线性延伸预估下一时刻的预估偏差^[13],据此修正预报结果和权重赋值,最后进行集合化合成。其计算方法如图1所示,利用当前时刻和前一时刻的实测值、预报值和下一时刻的预报值,来推求更接近真值的修正预报值。

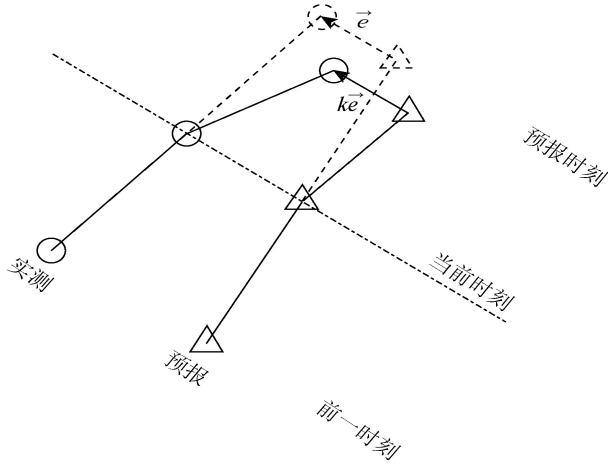


图1 预估偏差示意图

各机构预报修正值利用预估偏差得到,可用数学表达式写为:

$$\vec{P}_i = \vec{P}_{0i} + k \cdot \vec{e}_i \quad (1)$$

式中: \vec{P}_i 为第 i 个机构修正预报位置矢量; \vec{P}_{0i} 为第 i 个机构原始预报值位置矢量; k 为经验参数; \vec{e}_i 为第 i 个机构对应的预估偏差。

各机构修正预报值的权重同样利用该“预估偏差”,可写为:

$$\alpha_i = \frac{1/|\vec{e}_i|}{\sum_{i=1}^N (1/|\vec{e}_i|)} \quad (2)$$

式中: α_i 为第 i 个机构的权重系数; N 为参与集合化计算的预报机构个数。

将得到的权重系数与对应机构的修正预报值相乘,最后将各机构的预报结果进行集合平均,得到集合化预报结果,其计算公式如下:

$$\vec{P}_e = \sum_{i=1}^N \alpha_i \vec{P}_i \quad (3)$$

式中: \vec{P}_e 为基于预估偏差的集合预报结果,也称控制路径^[13]。

在一次台风过程中,各预报机构通常会不断更新预报路径,如间隔6 h、3 h、1 h等,只要在某个时刻,所有参与集合化计算的预报机构都发布了路径预报,那么该时刻便可依据各预报机构的预报结果进行预估偏差集合化预报工作,由于预估偏差集合化预报基本无计算机时的消耗,在预报时效上可实现与各预报机构的一致。

3 预估偏差控制路径误差分布

为了在控制路径的基础上进行概率预报,利用预估偏差法对2012—2016年期间历史台风进行后报,统计进入中国24 h警戒圈内的控制路径预报位置与实际位置之间的预报误差,进行误差距离概率分布的统计。

3.1 气象资料

控制路径预报所采用的气象资料包括中国气象局、中国台湾气象局、日本气象厅和美国气象局2012—2016年期间发布的台风路径预报资料和台风路径实测资料。其中2012、2013、2014、2015、2016年分别有25、31、23、27、26次影响我国沿海的台风过程。预报时效分别为24 h、48 h和72 h,每6 h更新一次预报成果。

3.2 预报距离误差概率分布

首先,利用预估偏差法对2012—2016年的历史台风进行后报,比较台风实测位置和预估偏差法控制路径后报结果,对进入中国24 h警戒圈内的台风路径预报位置与实测位置之间的无量纲预报距离误差进行统计。台风中心实测位置与预估偏差法后报位置之间的距离用 D 表示,各预报机构的预估

偏差进行加权平均得到的平均误差用 D_e 表示,则 D/D_e 为无量纲预报误差, D_e 的表达式见式(4)。对每次预报时的无量纲预报距离误差进行概率分布的统计分析,即可得到台风落入概率相对于无量纲预报误差的经验分布。

$$D_e = \sum_{i=1}^N \alpha_i e_i \quad (4)$$

在24 h、48 h和72 h预报时效下,将台风落入概率相对于无量纲预报误差的经验分布绘制于图2—4,图中纵轴 P_{in} 为无量纲预报误差小于某数值时落入概率。分别对24 h、48 h和72 h预报时效下的落入概率分布进行曲线拟合,得到的经验关系由式(5)、(6)和(7)表示。进行落入概率的点绘需要满足两个条件,一个是计算采用的预报机构必须都进行对应预报时效的预报(不同预报机构会根据台风的强度发布不同预报时效的预报路径),一个是在预报时效以内也必须有实测台风位置的发生(即台风没有停止编号)。因此,在图2—4中随着预报时效的增长,可用的数据点依次减少。

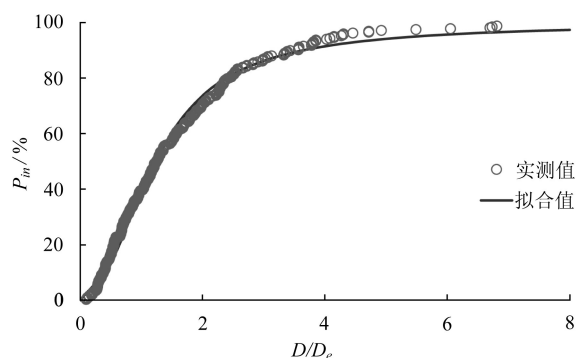


图2 24 h无量纲预报误差的落入概率分布

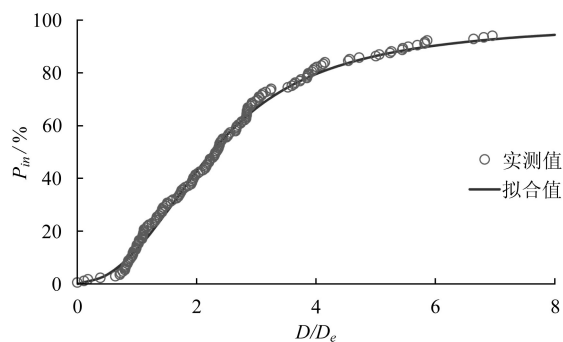


图3 48 h无量纲预报误差的落入概率分布

$$P_{in} = \frac{200}{\pi} a \tan(0.70 \cdot (D/D_e)^{1.70}) \quad (5)$$

$$P_{in} = \frac{200}{\pi} a \tan(0.21 \cdot (D/D_e)^{1.92}) \quad (6)$$

$$P_{in} = \frac{200}{\pi} a \tan(0.05 \cdot (D/D_e)^{2.24}) \quad (7)$$

3.3 分方向的预报距离误差分布

上一节的概率预报方法仅考虑了预报的距离误差,而忽略了预报误差在空间的分布特征。而在很多集合化预报中,会根据控制路径计算偏左、偏右、偏快、偏慢的扰动路径^[14];事实上,台风实际位置相对于控制路径位置的偏离量在空间上的分布不得而知,因此按照偏左、偏右、偏快、偏慢进行概率预报能够进一步提高集合化预报精度。

本研究主要在24 h预报时效下进行分方向的距离误差分布研究,原因有二:一方面,24 h预报结果是防汛工作所关注的重要参数,对其预报精度的要求高于48 h和72 h,另一方面,如图2—4所示,48 h、72 h预报时效内本身可用的数据点较少(原因见3.2小节),如在现有数据的基础上进一步分方向讨论则会由于数据点过少导致结果缺少统计学意义的代表性。以台风路径前进方向+90°方向为极轴建立极坐标,以当前时刻的预估偏差控制路径预报位置为原点,以预报距离误差和“预估偏差”的加权平均值的比值为极径,统计24 h预报时效下实测台风中心位置相对控制路径预报位置的极坐标位置。以此方法统计2012—2016年所有进入中国24 h警戒线的台风路径极坐标位置分布,如图5所示。

将所有台风数据点按照偏左、偏右、偏快、偏慢分类,分别计算其对应的无量纲预报误差,采用上一节同样的统计方法,可以得到24 h预报时效下落

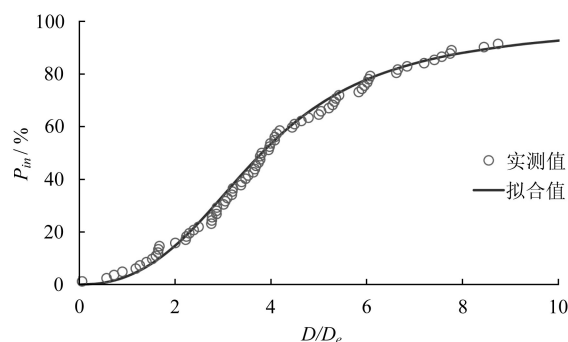
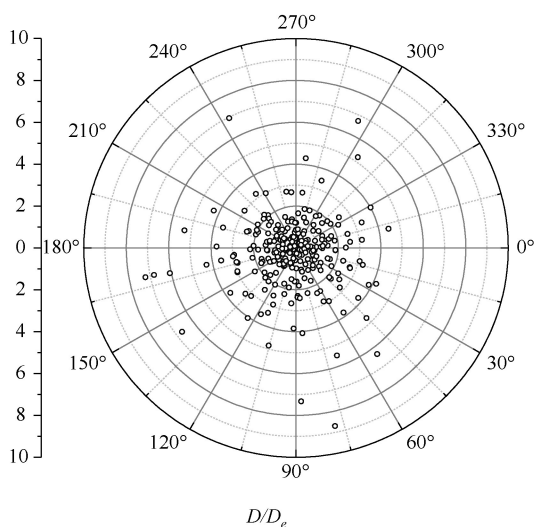


图4 72 h无量纲预报误差的落入概率分布

入概率相对于无量纲预报误差的分布关系,见图6—9。对应的落入概率公式见式(8)—(11)。

偏左:

$$P_{in} = 200\pi a \tan(0.58 \cdot (D/D_e)^{1.72}) \quad (8)$$



偏右:

$$P_{in} = \frac{200}{\pi} a \tan(0.51 \cdot (D/D_e)^{1.90}) \quad (9)$$

偏快:

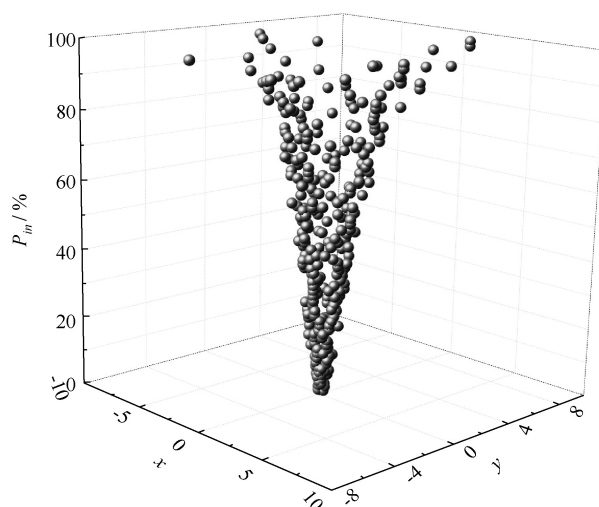


图5 无量纲预报误差的空间位置分布

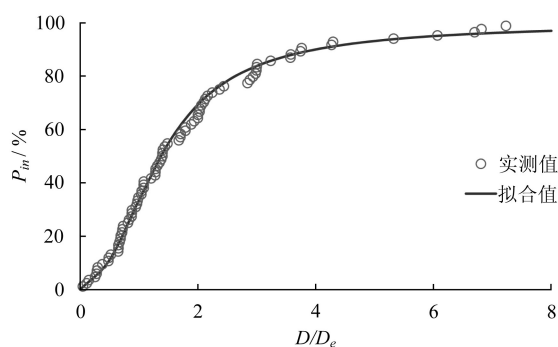


图6 偏左无量纲预报误差的落入概率分布

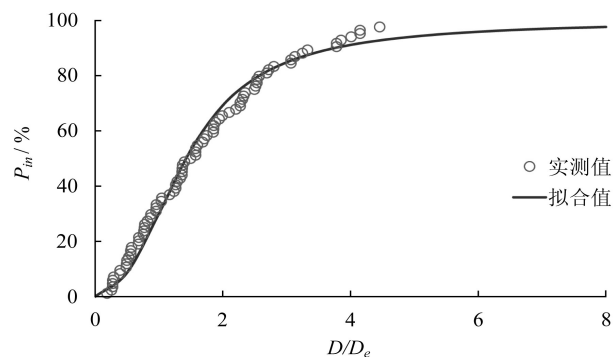


图7 偏右无量纲预报误差的落入概率分布

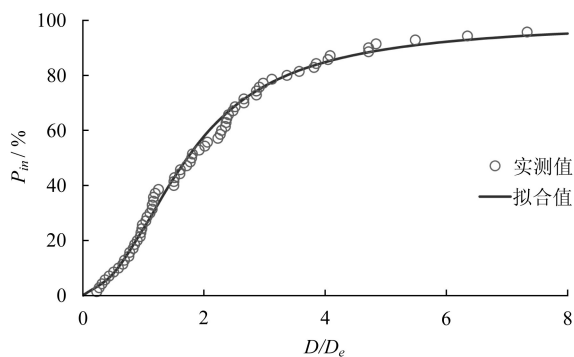


图8 偏快无量纲预报误差的落入概率分布

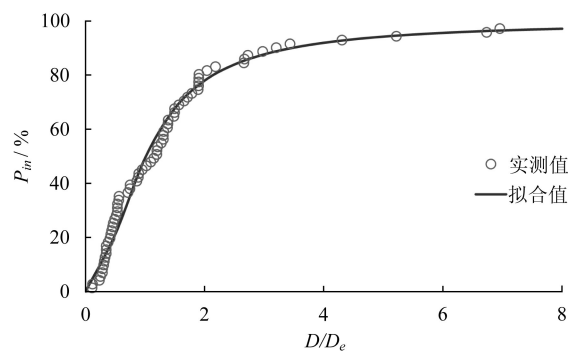


图9 偏慢无量纲预报误差的落入概率分布

$$P_{in} = \frac{200}{\pi} a \tan(0.40 \cdot (D/D_e)^{1.68}) \quad (10)$$

偏慢:

$$P_{in} = \frac{200}{\pi} a \tan(0.98 \cdot (D/D_e)^{1.50}) \quad (11)$$

3.4 预报距离误差概率分布特征分析

从图2可以看出,随着无量纲预报误差 D/D_e 的增加,落入误差概率圆内的台风数据点越来越多,落入概率也越来越大。但其增加速率是越来越慢的,当 $D/D_e = 6$ 时,落入概率基本等于1,此时基本所有的台风样本数据点都落在概率圆内。

通过对图4—7的比较可以知道,当 D/D_e 小于3.8时,偏慢概率比其他3个象限的落入概率要高,偏快概率最低,偏左和偏右概率基本接近。当 D/D_e 大于3.8时,偏右落入概率最大,偏快概率仍为最低。在此之后,4个象限的落入概率逐渐接近,并在 D/D_e 约为6时基本都达到落入概率为100%。基于此,可以对前述基本概率预报方法进行优化,考虑预报误差在空间上的分布特征,从而得到台风四条扰动路径的具体位置分布,提高台风预报的估算精度。

4 台风路径概率预报验证

对2017年影响我国沿海的19次台风过程进行后报(仅统计24 h圈内部数据),给定特定的发生概率,代入相对应的落入概率公式可得到 D/D_e 计算值。又已知各个机构预报预估偏差进行加权平均得到的概率圆半径和偏离方向上的实际误差距离,可以得到 D/D_e 实测值。将计算无量纲误差与实际无量纲误差对比分析,可以统计出落入概率。

24 h预报时效下的总概率(不分方向)预报验证如表1所示。由表可知,24 h预报时效下,给定落入概率与统计落入概率基本一致,证明了台风路径概率预报方法的有效性。对其进一步分方向进行路径概率预报验证,预报结果与误差列于表2。分方向概率预报结果与总概率(不分方向)预报结果相比误差略大,这是由于本身2017年影响我国的台风过程较少,进行分方向讨论后数据点个数太少,降低了其统计学上的代表性;但总体来说,与实际落入概率相比,总概率预报(不分方向)和分方向的路径概率预报均表现出较好的预测精度。

表1 总概率预报验证(不分方向)

给定落入概率/%	D/D_e 计算值	统计落入概率/%	误差/%
50	1.23	42.86	7.14
60	1.49	55.00	5.00
70	1.83	65.36	4.64
80	2.39	77.86	2.14
90	3.65	93.93	-3.93

表2 概率预报验证(分方向)

偏离方向	给定落入概率/%	D/D_e 计算值	统计落入概率/%	误差/%
偏左	50	1.37	75.00	-25.00
	60	1.65	75.00	-15.00
	70	2.03	100.00	-30.00
	80	2.64	100.00	-20.00
	90	4.00	100.00	-10.00
偏右	50	1.43	50.00	0.00
	60	1.69	58.33	1.67
	70	2.03	58.33	11.67
	80	2.58	75.00	5.00
	90	3.76	83.33	6.67
偏快	50	1.73	33.33	16.67
	60	2.09	55.56	4.44
	70	2.58	55.56	14.44
	80	3.37	77.78	2.22
	90	5.12	88.89	1.11
偏慢	50	1.01	50.00	0.00
	60	1.25	50.00	10.00
	70	1.59	50.00	20.00
	80	2.14	100.00	-20.00
	90	3.46	100.00	-10.00

5 结论与展望

本文基于预估偏差集合化方法,进一步考虑预报误差的分布规律,通过分析历史台风(2012—2016年我国24 h警戒线内的所有台风)预报误差的空间分布规律,实现了不同的无量纲预报误差概率圆内的落入概率预报。在此基础上,对概率预报进一步细化,分方向建立预估偏差法预报控制路径的无量纲预报误差—落入概率空间分布的经验公式。

对2017年我国24 h警戒线内的所有台风进行偏离概率后报,后报结果与偏离结果的统计值吻合较好。因为台风事件具有高度的不确定性,通常难以精确预报,本文为台风路径的概率预报提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 科学出版社, 1979.
- [2] 娄小芬, 楼茂园, 罗玲, 等. “菲特”台风路径和强度预报难点分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(1): 10-19.
- [3] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction[J]. Tellus, 1969, 21(6): 739-759.
- [4] 杜钧, 陈静. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革[J]. 气象, 2010, 36(11): 1-11.
- [5] 陈静, 陈德辉, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展[J]. 应用气象学报, 2002, 13(4): 497-507.
- [6] Krishnamurti T N, Kishtawal C M, LaRow T E, et al. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble[J]. Science, 1999, 285(5433): 1548-1550.
- [7] Buizza R, Barkmeijer J, Palmer T N, et al. Current status and future developments of the ECMWF ensemble prediction system[J]. Meteorological Applications, 2000, 7(2): 163-175.
- [8] Zhang Z, Krishnamurti T N. Ensemble forecasting of hurricane tracks[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(12): 2785-2795.
- [9] Zhi X F, Zhang L, Bai Y Q. Application of the multi-model ensemble forecast in the QPF[C]//International Conference on Information Science and Technology. Nanjing, China: IEEE, 2011: 657-660.
- [10] Zhi X F, Lin C Z, Bai Y Q, et al. Superensemble forecasts of the surface temperature in Northern Hemisphere middle latitudes[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(5): 569-574.
- [11] Zhi X F, Qi H X, Bai Y Q, et al. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(1): 41-51.
- [12] 丁雪霖, 陈永平, 顾茜. 2013年西北太平洋台风路径集合预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 361-365.
- [13] 袁杰颖, 陈永平, 潘毅, 等. 台风路径集合化预报方法的优化[J]. 海洋预报, 2017, 34(2): 37-42.
- [14] 王培涛, 于福江, 刘秋兴, 等. 福建沿海精细化台风风暴潮集合数值预报技术研究及应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(5): 7-15.

Probability prediction of typhoon track based on error-estimation ensemble forecast

LIU Ying^{1,2}, PAN Yi^{1,2}, CHEN Yong-ping^{1,2}, YUAN Jie-ying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China)

Abstract: A probability prediction method for possible location of typhoon tracks is provided in this paper. Based on all typhoon forecast data within the 24-hour warning line over the Northwestern Pacific during 2012-2016 and introduction of the error-estimation ensemble forecast method, the distance error between forecast and measured position of typhoon track during forecast period is calculated. The total probability distribution of typhoon errors that fall within error probability circle can be obtained, and the empirical formula is established. Furthermore, the empirical formula of deviation probability distribution is set up to further refine the probability of different deviation directions, which is fast, slow, left and right. A hindcast of typhoons in 2017 is conducted using the probability prediction method. It is found that the error between probability forecast results and actual deviation probability shows significant consistency.

Key words: ensemble forecast; error-estimation ensemble; control path; disturbance path; probability analysis