

丰满度在台风“贝碧嘉”强度预报保障中的应用及启示

吴玉琴, 钟 剑, 孙一妹, 高雅文, 钱 景

中国卫星海上测控部, 江苏 江阴

收稿日期: 2025年8月5日; 录用日期: 2025年9月1日; 发布日期: 2025年9月8日

摘 要

2413号台风“贝碧嘉”是1949年以来登陆上海最强的台风。本文利用数值预报产品、卫星反演资料, 引入热带气旋丰满度, 应用于“贝碧嘉”两次快速增强过程和引起的风场要素订正预报, 分析丰满度和“贝碧嘉”强度之间的预报相关性。主要结论包括: 1) “贝碧嘉”两次快速增强过程, 丰满度都能较好地表征其强度变化。2) “贝碧嘉”引起的风场要素预报订正中, 引入丰满度能较好地提高要素预报准确率。3) “贝碧嘉”生命史周期内, 其强度变化与丰满度具有显著正相关, 相关系数达0.83, 时序变化上, 丰满度的增长较“贝碧嘉”强度的增加提前6小时左右。业务化保障中, 可利用6小时前的丰满度来订正台风的强度预报, 进一步提升台风强度预报的准确率。

关键词

“贝碧嘉”, 热带气旋丰满度, 预报误差, 相关系数

The Application and Enlightenment of Tropical Cyclone Fullness in the Intensity Forecast of “Bebinca”

Yuqin Wu, Jian Zhong, Yimei Sun, Yawen Gao, Jing Qian

China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin Jiangsu

Received: Aug. 5th, 2025; accepted: Sep. 1st, 2025; published: Sep. 8th, 2025

Abstract

Typhoon Bebinca was the strongest typhoon to make landfall in Shanghai since 1949. This paper utilizes numerical forecast products and satellite-derived data, innovatively introducing the concept

文章引用: 吴玉琴, 钟剑, 孙一妹, 高雅文, 钱景. 丰满度在台风“贝碧嘉”强度预报保障中的应用及启示[J]. 海洋科学前沿, 2025, 12(3): 176-183. DOI: 10.12677/ams.2025.123018

of tropical cyclone fullness, which is applied to the two rapid intensification processes of Bebinca and the correction of wind field element forecasts caused by it. The forecast correlation between fullness and the intensity of Bebinca is also analyzed. The main conclusions are as follows: 1. During the two rapid intensification processes of Bebinca, the fullness was able to effectively characterize its intensity changes. 2. In the correction of wind field element forecasts caused by Bebinca, the introduction of fullness significantly improved the accuracy of element forecasts. 3. Throughout the life cycle of Bebinca, its intensity changes were significantly positively correlated with fullness, with a correlation coefficient of 0.83. In terms of temporal sequence, the increase in fullness preceded the increase in Bebinca intensity by about 6 hours. In operational forecasting, fullness data from 6 hours prior can be used to correct the intensity forecasts of typhoons, thereby further enhancing the accuracy of typhoon intensity forecasts.

Keywords

“Bebinca”, Tropical Cyclone Fullness, Forecast Error, Correlation Coefficient

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

台风作为我国面临的重大自然灾害之一，每年侵袭沿海地区时总会引发极端天气现象和次生灾害链式反应，其携带的强风、强降水与风暴潮不仅直接威胁人民安全，更通过连带效应造成严重社会经济损失。准确的台风预报是有效防御的前提，由于台风路径与强度演变具有高度复杂性，其精准预测始终是气象业务体系中的核心挑战。

过去几十年中，随着观测资料种类和精度的提高以及数值模式性能的发展，对台风路径预报起到了显著的进步[1]-[4]，尤其是近几年数值预报对路径确定性预报和集合预报平均的预报精度都有了大幅提高，但对强度的预测仍有较大的不足，特别是强度出现突变(含增强与减弱)阶段。

前人的研究指出，热带气旋(也称台风)强度主要受内核区域的动力、热力过程影响[5]-[9]，同时，外围环境，如垂直风切变[10]-[12]，高层反气旋及槽脊系统等与热带气旋的相互作用也会对内核区域风场产生影响。热带气旋的风场结构极大地影响了其潜在的破坏性，强度、内核尺度和外围尺度均为风场结构的重要组成部分。目前的研究多将这三方面分开讨论，而忽略了热带气旋结构的整体性。WU [13]最近的一个统计工作中发现相当一部分台风会出现快速收缩领先快速增强的现象。Tan [14]-[16]等通过研究大量热带气旋的强度与尺度之间的关系，发现他们内核尺度与强度呈负相关，外围尺度与强度呈正相关。谈哲敏院士根据热带气旋尺度和强度的这一变化特征，定义了热带气旋丰满度这一个新的量来表征热带气旋的强度与结构之间的变化关系。据统计，68%以上的热带气旋在出现丰满结构后开始快速增强，这对预报台风强弱变化具有明显的指示作用，这一结果能有效弥补数值模式对热带气旋强度预报的不足。全球变暖条件背景下，近岸快速增强的台风数量明显增加，强度的突变更进一步增加了数值模式对台风强度预报的误差，影响沿海城市防台决策和海上船舶安全。

台风发展过程中关键动力学、热力学过程以及与环境之间的相互作用影响机理认识不足的前提下，数值模式对台风强度的预报性能难以在短期内提升，而台风强度与其潜在破坏程度紧密相关。为了提升对台风强度的预报预警能力，需引入新的量来订正和优化模式对台风强度的预报误差。本文针对2024年13号台风“贝碧嘉”的强度预报过程，引入热带气旋丰满度用于订正和优化数值模式对“贝碧嘉”的强

度预报、分析“贝碧嘉”不同发展阶段强度变化的机理,并利用统计学方法分析热带气旋丰满度和“贝碧嘉”强度之间的变化关系。

2. “贝碧嘉”天气过程介绍

2024年9月10日,2413号台风“贝碧嘉”在西北太平洋热带海域(12.4°N, 145.4°E)发展生成,之后沿副热带高压外围,向西北方向移动,强度缓慢加强。9月14日23时加强为台风级,并进入东海北部海域,随后强度继续增强。9月16日07时30分前后以强台风级(42 m/s, 14级, 955 hPa)在上海浦东临港新城沿海登陆,是1949年以来登陆上海的最强台风。

“贝碧嘉”登陆后继续向西偏北方向移动,强度缓慢减弱,9月16日11时前后以台风级移入江苏省境内,也是1949年以来进入江苏的最强台风,其后横穿太湖流域,途经苏州、无锡、常州、镇江和南京等地,于9月17日0时35分从南京浦口区移出江苏,在江苏境内停留约13小时,强度维持台风级至强热带风暴级(见图1)。

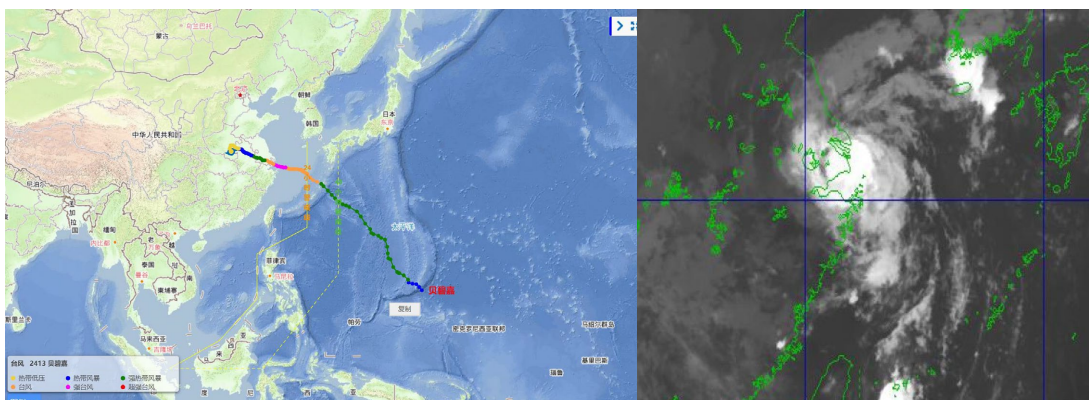


Figure 1. The track of “Bebinca” after landfall (left) and the satellite cloud image at 08:00 on September 16 (right)
图 1. “贝碧嘉”登陆后路径(左)和9月16日08时卫星云图(右)

台风“贝碧嘉”对无锡的影响主要集中在9月16日,区域加密自动气象站观测日极大风,无锡观测最大阵风达到12~13级,“贝碧嘉”还给无锡大部分地区带来了暴雨到大暴雨天气过程(见图2)。

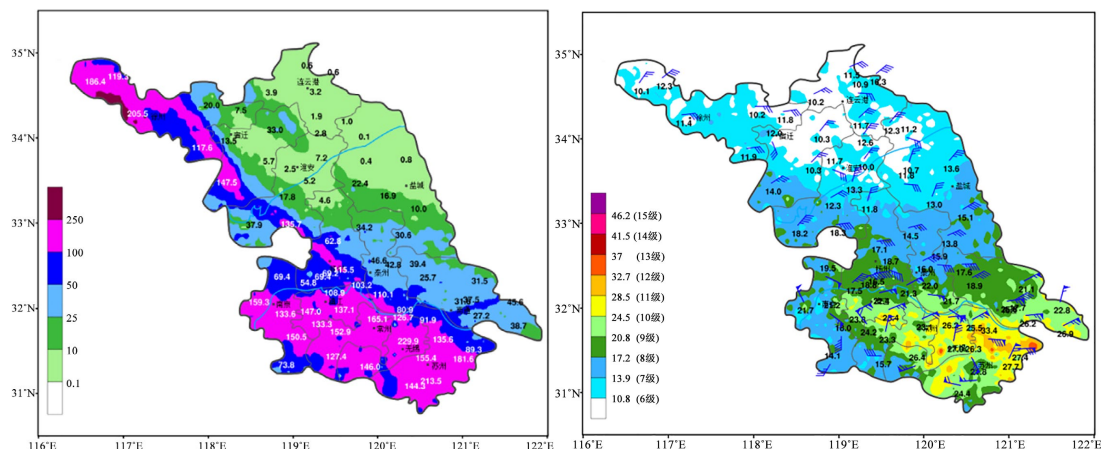


Figure 2. Observational facts in Jiangsu from September 15 to 16
图 2. 9月15日~16日江苏观测实况

3. 资料和方法

3.1. 资料介绍

本文所用资料包括日本葵花 9 号卫星云图、欧洲和美国数值预报产品(10 m 高度海面风场等), 洋面风场资料来自多源卫星洋面风分析平台(MTCSWA, <https://rammb-data.cira.colostate.edu/>), 综合多源卫星反演数据、飞机观测和云型特征, 用兰金涡旋进行拟合修订, 并加入风暴移动特征综合计算的热带洋面风场分布, 包含逐 6 小时台风中心位置、内核区和外围区风场分布特征等要素。

3.2. 方法介绍

基于绝对角动量守恒原理, 台风增强的快慢和眼墙收缩的快慢相对应。热带气旋的内核尺度(通常取最大风速半径)和外围尺度(通常取风速达 17 m/s 的风圈半径)之间的区域包含了强风和旺盛的对流雨带, 是影响台风强度演变的关键区域。一般来说, 热带气旋的内核尺度较小(大)时, 低层入流较强(弱), 当热带气旋外围尺度较小(大)时, 外围的绝对角动量较小(大), 因此风速最强的内核尺度越小、外围风圈尺度越大, 表明低层入流强且外围绝对角动量大, 导致眼墙外围较大的绝对角动量内输, 有利于强热带气旋的形成。

Tan [14]-[16]等定义的热带气旋丰满度(*TCF*)可有效衡量气旋强度、尺度配置和涡度结构之间的关系, 综合考虑台风内核、外围尺度大小来确定台风的强度, 它的具体算法为外围风圈与内核之间组成圆环的环宽(*DR*), 占外围环圈的比例, 其表达式如下:

$$TCF = \frac{DR}{R17} = 1 - \frac{RMW}{R17}$$

其中: *DR* 为台风外围风圈与内核之间组成圆环的环宽; *RMW* 为台风当前时刻最大风速半径; *R17* 为台风当前时刻风速达 17 m/s 的风圈半径。当这个比例越大时, 意味着台风越“丰满”, 强度也更大。

4. “贝碧嘉”强度预报

热带气旋强度是衡量其潜在破坏性的重要指标[11], 最大持续风速(*Vmax*)和最低中心气压(*MLSP*)是衡量热带气旋强度的两个主要手段。Tan [14]-[16]等整合热带气旋内核及外围风场的特征, 突破了使用单一尺度变量探究强度和风场结构联系的局限性, 提出了热带气旋丰满度的概念。统计结果表明, 热带气旋丰满度与强度发展之间相关性较好, 且热带气旋强度增长较丰满度的增长有一定的时间滞后性, 这在一定程度可以订正模式对台风强度的预报误差, 但目前还缺乏业务化的应用。

在“贝碧嘉”预报保障中持续跟踪其结构丰满度的变化, 订正数值模式对其强度的预报结果。选取“贝碧嘉”部分时次海面反演风场特征图(见图 3), 9 月 11 日 08 时~14 时(北京时, 下同), “贝碧嘉”内核半径变化不大, 外围风场半径(风速达 17 m/s 以上区域)出现快速增加, 丰满度由 0.14 增加至 0.6, “贝碧嘉”强度从热带风暴(中心最大风速 9 级)增加至强热带风暴级别(中心最大风速 10 级)。“贝碧嘉”这一阶段强度的快速增加是由于外围风场半径的增加导致外围绝对角动量输入增加并通过低层入流向台风内核输送能量, 台风强度相应增加。

9 月 13 日 20 时~14 日 14 时, “贝碧嘉”出现内核半径的收缩, 外围风场半径扩张, 结构丰满度由 0.24 增加至 0.69, “贝碧嘉”强度从强热带风暴级(10 级)增加至台风级(12 级)。“贝碧嘉”这一阶段强度的快速增加是由于内核尺度缩小, 导致其惯性稳定度增加, 有利于加热效率, 同时还伴随低层入流和外围绝对角动量输送的增加, 促使其强度的快速增加。上述两个阶段热带气旋丰满度与“贝碧嘉”强度变化呈现一致性, 同时, 这两种物理过程导致的“贝碧嘉”强度的增加丰满度均有较好的表现。

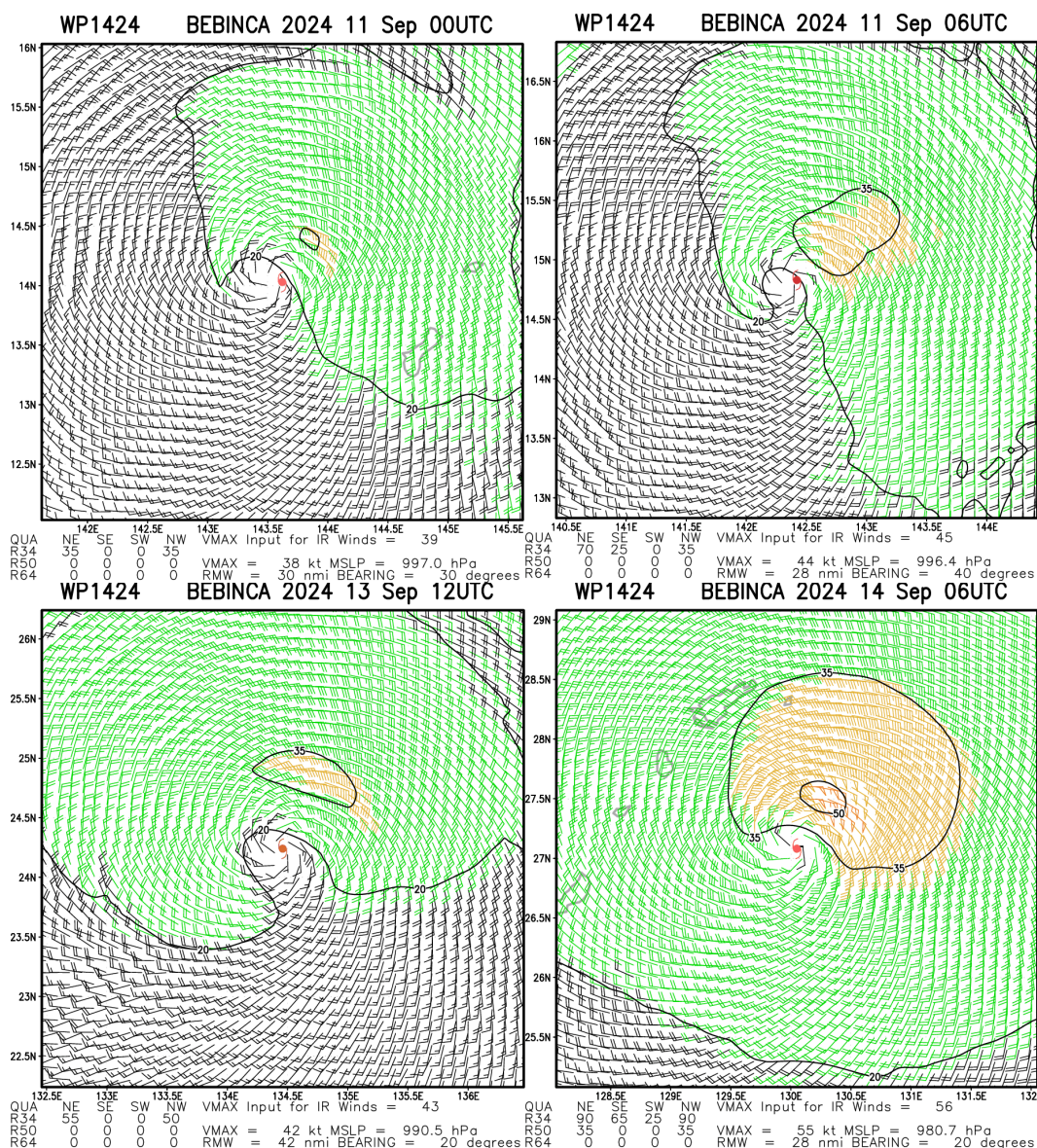


Figure 3. Distribution of the wind field structure of “Bebinca” at 00:00 on September 11 (a), 06:00 on September 11 (b), 12:00 on September 13 (c), and 06:00 on September 14 (d) (in UTC).

图 3. 9 月 11 日 00 时(a)、11 日 06 时(b)、13 日 12 时(c)、14 日 06 时(d) “贝碧嘉” 风场结构分布(世界时)

“贝碧嘉”的强度直接影响防台关键区域的风、浪和降水等要素预报，在“贝碧嘉”的保障中结合丰满度变化趋势订正数值模式的要素预报。图 4 分别为 2024 年 9 月 14 日 08 时和 9 月 15 日 08 时美国国家环境预报中心(简称 NCEP)发布的数值预报产品中 10 米平均风场的分布情况，预报结果表明无锡地区受“贝碧嘉”影响最强时刻(9 月 16 日 14 时)地面 10 米平均风力均维持在 7~8 级左右。

利用“贝碧嘉”丰满度分别对两个起报时次要要素结果进行订正。9 月 14 日 08 时、14 日 17 时、14 日 20 时、15 日 08 时、15 日 11 时、15 日 14 时，“贝碧嘉”丰满度分别为 0.7、0.74、0.8、0.8、0.83、0.88。结合不同时段丰满度持续增长的趋势预计未来“贝碧嘉”强度会持续加强，在数值模式基础上不断调整 10 米风场的预报结果。9 月 14 日 17 时订正模式预报结果，预计 16 日无锡地区受“贝碧嘉”影响平均风力增加至 7~8 级，陆地及沿江江面阵风可达 9~10 级；9 月 15 日 17 时根据丰满度持续增长趋势，进一步

将无锡地区受“贝碧嘉”影响地面风力增加至平均风力可达 8-9 级，阵风可达 10~11 级，这与 9 月 16 日观测实况基本一致。

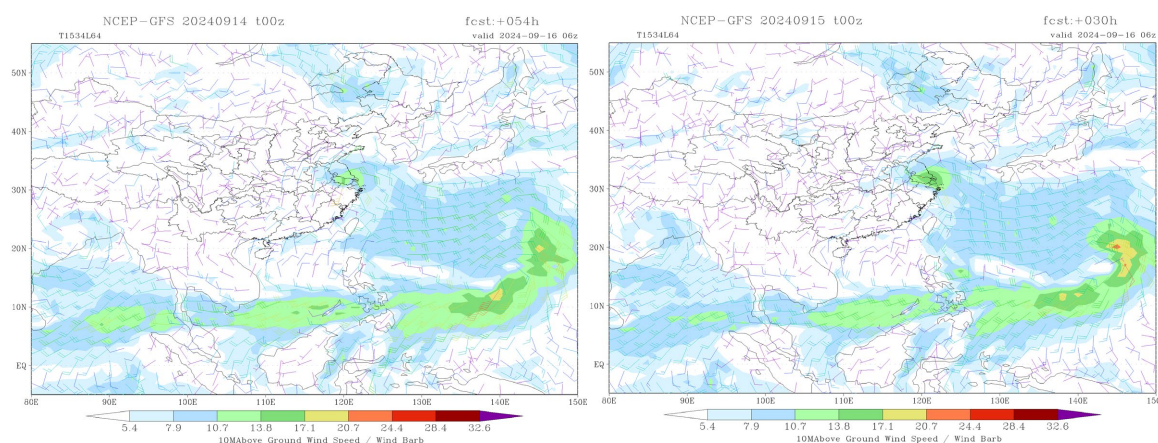


Figure 4. The 10-m marine wind field forecast for 14:00 on September 16, initialized at 08:00 on September 14 and 08:00 on September 15, from the U.S. numerical prediction model

图 4. 9 月 14 日 08 时和 15 日 08 时起报 16 日 14 时美国数值预报产品 10m 高度海面风场

鉴于“贝碧嘉”结构丰满度与其强度变化的趋势一致性，进一步分析丰满度与强度变化之间的时间相关性。从 9 月 10 日 08 时~16 日 08 时“贝碧嘉”最低气压、最大风速、丰满度逐 6 小时分布(见图 5)可以看出，“贝碧嘉”丰满度与最大风速的变化趋势基本一致，且最大风速的增加较丰满度的增加有一定的时间滞后性。例如，9 月 11 日 20 时(北京时，下同)丰满度开始增加，9 月 12 日 02 时最大风速开始增加；9 月 13 日 20 时丰满度快速增加，9 月 14 日 02 时最大风速开始增加，可以看出丰满度的增加较最大风速的增加有 6 小时左右的提前量。这一结果表明可以利用丰满度的变化趋势预判未来台风强度的增减趋势。

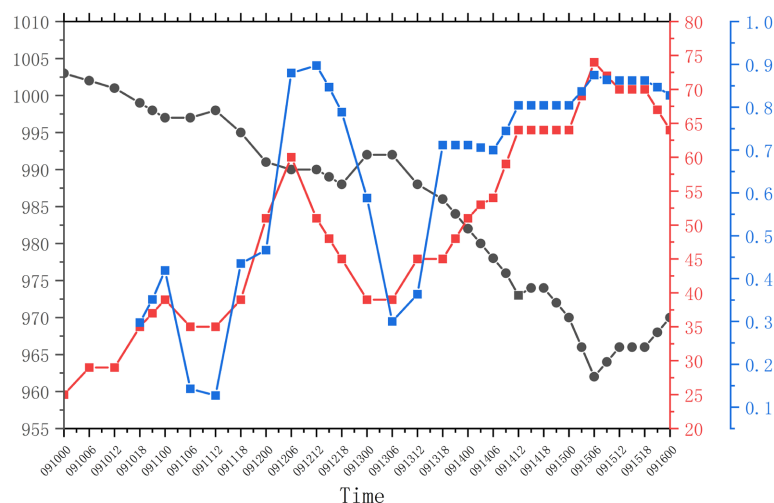


Figure 5. Distribution of the minimum central pressure (black), maximum wind speed (red), and fullness (blue) of Typhoon “Bebinca” from 08:00 on September 10 to 08:00 on September 16 (in UTC)

图 5. 9 月 10 日 08 时~16 日 08 时“贝碧嘉”最低气压(黑色)、最大风速(红色)、丰满度(蓝色)分布(世界时)

为建立统计学意义上的最大风速与丰满度之间的相关关系,对最大风速、丰满度进行线性拟合(见图6),从拟合分析结果可以看出两者随时间的变化曲线近似平行,随时间变化的斜率一致,计算两者之间相关系数可达 0.83,表明两者存在显著线性正相关。后续可以将丰满度用于订正数值模式对台风强度预报的偏差。

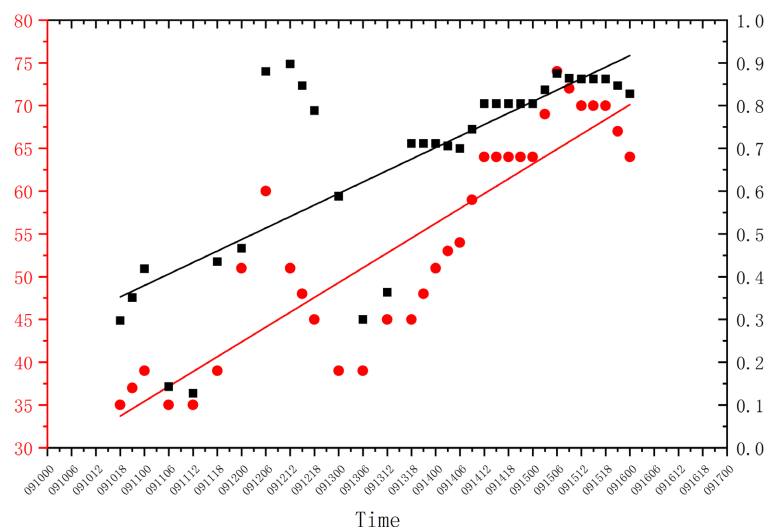


Figure 6. Distribution of the linear fitting results of the maximum wind speed (red) and fullness (black) of Typhoon “Bebinca” from 08:00 on September 10 to 08:00 on September 16 (in UTC)

图 6. 9 月 10 日 08 时~16 日 08 时“贝碧嘉”最大风速(红色)、丰满度(黑色)线性拟合结果分布(世界时)

5. 结论

本文针对 2024 年 13 号台风“贝碧嘉”预报保障天气过程,利用数值预报产品、多源卫星反演热带洋面风场资料,引入热带气旋丰满度这一物理量,应用于订正和优化模式对“贝碧嘉”的强度预报以及引起的风场要素订正预报,并利用统计学方法分析热带气旋丰满度和“贝碧嘉”强度之间的相关性。主要结论包括:

- 1) 热带气旋丰满度能表征低层入流和外围绝对角动量输送这两种物理机制导致的“贝碧嘉”强度增加,两者变化趋势上呈现高度一致性。
- 2) 利用丰满度变化趋势来订正“贝碧嘉”引起的风场要素预报,能较好的提高风场要素预报的准确率。
- 3) 对“贝碧嘉”生命周期内强度变化与丰满度变化进行统计分析,两者相关系数达 0.83,呈现显著的正相关,时序变化上丰满度的增长较“贝碧嘉”强度的增加提前 6 小时左右,这一变化趋势能用于订正和优化模式对“贝碧嘉”强度的预报误差。

后续将进一步加强丰满度在业务中的实际应用,研究丰满度在不同强度等级、不同生命史期间对台风强度预报的订正作用。

参考文献

- [1] Burpee, R.W., Aberson, S.D., Franklin, J.L., Lord, S.J. and Tuleya, R.E. (1996) The Impact of ω Dropwindsondes on Operational Hurricane Track Forecast Models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 925-933. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0925:tioodo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0925:tioodo>2.0.co;2)

- [2] Tuleya, R.E. and Lord, S.J. (1997) The Impact of Dropwindsonde Data on GFDL Hurricane Model Forecasts Using Global Analyses. *Weather and Forecasting*, **12**, 307-323. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0307:tioddo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0307:tioddo>2.0.co;2)
- [3] Kurihara, Y., Bender, M.A. and Ross, R.J. (1993) An Initialization Scheme of Hurricane Models by Vortex Specification. *Monthly Weather Review*, **121**, 2030-2045. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<2030:aisohm>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<2030:aisohm>2.0.co;2)
- [4] Franklin, J.L., Black, M.L. and Valde, K. (2003) GPS Dropwindsonde Wind Profiles in Hurricanes and Their Operational Implications. *Weather and Forecasting*, **18**, 32-44. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<0032:gdwpih>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<0032:gdwpih>2.0.co;2)
- [5] Black, M.L. and Willoughby, H.E. (1992) The Concentric Eyewall Cycle of Hurricane Gilbert. *Monthly Weather Review*, **120**, 947-957. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<0947:tcecoh>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<0947:tcecoh>2.0.co;2)
- [6] Guinn, T.A. and Schubert, W.H. (1993) Hurricane Spiral Bands. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **50**, 3380-3403. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<3380:hsb>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<3380:hsb>2.0.co;2)
- [7] Schubert, W.H., Montgomery, M.T., Taft, R.K., Guinn, T.A., Fulton, S.R., Kossin, J.P., *et al.* (1999) Polygonal Eyewalls, Asymmetric Eye Contraction, and Potential Vorticity Mixing in Hurricanes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **56**, 1197-1223. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1197:peacca>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1197:peacca>2.0.co;2)
- [8] Kossin, J.P. and Eastin, M.D. (2001) Two Distinct Regimes in the Kinematic and Thermodynamic Structure of the Hurricane Eye and Eyewall. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 1079-1090. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1079:tdritk>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1079:tdritk>2.0.co;2)
- [9] Kuo, H., Chang, C., Yang, Y. and Jiang, H. (2009) Western North Pacific Typhoons with Concentric Eyewalls. *Monthly Weather Review*, **137**, 3758-3770. <https://doi.org/10.1175/2009mwr2850.1>
- [10] Frank, W.M. and Ritchie, E.A. (2001) Effects of Vertical Wind Shear on the Intensity and Structure of Numerically Simulated Hurricanes. *Monthly Weather Review*, **129**, 2249-2269. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<2249:covwso>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<2249:covwso>2.0.co;2)
- [11] Emanuel, K., DesAutels, C., Holloway, C. and Korty, R. (2004) Environmental Control of Tropical Cyclone Intensity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**, 843-858. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<0843:ecotci>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<0843:ecotci>2.0.co;2)
- [12] Knaff, J.A., Seseske, S.A., DeMaria, M. and Demuth, J.L. (2004) On the Influences of Vertical Wind Shear on Symmetric Tropical Cyclone Structure Derived from Amsu. *Monthly Weather Review*, **132**, 2503-2510. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<2503:otiovw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<2503:otiovw>2.0.co;2)
- [13] Wu, Q. and Ruan, Z. (2021) Rapid Contraction of the Radius of Maximum Tangential Wind and Rapid Intensification of a Tropical Cyclone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **126**, e2020JD033681. <https://doi.org/10.1029/2020jd033681>
- [14] Guo, X. and Tan, Z. (2017) Tropical Cyclone Fullness: A New Concept for Interpreting Storm Intensity. *Geophysical Research Letters*, **44**, 4324-4331. <https://doi.org/10.1002/2017gl073680>
- [15] Guo, X. and Tan, Z. (2022) Tropical Cyclone Intensification and Fullness: The Role of Storm Size Configuration. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL098449. <https://doi.org/10.1029/2022gl098449>
- [16] Tan, Z., Lei, L., Wang, Y., Xu, Y. and Zhang, Y. (2022) Typhoon Track, Intensity, and Structure: From Theory to Prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, **39**, 1789-1799. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2212-1>