

西北太平洋热带气旋强度统计 释用预报方法研究

胡春梅¹ 余 晖² 陈佩燕²

(1. 重庆市气象台, 401147; 2. 上海台风研究所)

提 要: 为了提高西北太平洋地区热带气旋(TC)强度预报准确率, 在气候持续预报方法基础上, 考虑气候持续性因子、天气因子、卫星资料因子, 以TC强度变化为预报对象, 运用逐步回归统计方法, 建立西北太平洋地区24、48、72小时TC强度预报方程。通过不同的分海区试验(远海区域、华东近海、华南近海), 证明回归结果较好。逐一分析选入因子发现: 气候持续性因子在方程中相当重要; 同时对远海区域和华东近海而言, 海温影响也不容忽视, 对华南近海而言, 反映动力强迫作用的因素也较为重要。卫星资料的加入, 对回归结果略有改进。用“刀切法”作独立样本检验, 与气候持续法比较, 预报误差明显减小。

关键词: 热带气旋 强度预报 逐步回归

Statistical Prediction Scheme of Tropical Cyclone Intensity in Northwest Pacific

Hu Chunmei¹ Yu Hui² Chen Peiyan²

(1. Chongqing Meteorological Observatory, 401147; 2. Shanghai Typhoon Institute)

Abstract: A stepwise regression method with tropical cyclone intensity change as the dependent variable is developed on the basis of the climatology and persistence (CLIPER) forecast scheme. The predictors are involved in climatology persistence, synoptic predictors, infrared satellite data. Regression is performed on 24-, 48-, 72-hour forecasts for three different sea areas in Northwest Pacific. The climatology persistence predictors as important factors are chosen in regression equations, another predictors are some synoptic predictors

with the dynamical forcing effect and the maximum potential intensity (MPI) which is calculated by sea surface temperature. The independence test by a jackknife procedure shows an improvement over CLIPER scheme. Infrared satellite predictors could improve the prediction accuracy on some forecast interval.

Key Words: tropical cyclone intensity prediction stepwise regression

引言

热带气旋 (Tropical Cyclone, 简称 TC) 强度预报一直是 TC 研究的难点问题^[1]。Jarvinen^[2]基于气候持续性预报因子用统计回归方法改进 TC 强度预报方案 SHIFOR (Statistical Hurricane Intensity Forecast)。DeMaria^[3]对大西洋地区改进 SHIPS (Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme) 飓风强度预报方案。DeMaria^[4]改进 SHIPS 方案, 提出新的预报 TC 强度的统计-动力模式。Knaff^[5]将 TC 强度预报时效延长到 5 天。针对西北太平洋地区 Fitzpatrick^[6]建立 TIPS (Typhoon Intensity Prediction Scheme) 方案。蒋乐贻^[7]仅考虑气候持续性因子对西北太平洋地区建立 TC 强度统计预报方程。

基于以上研究, 本文改进西北太平洋地区 TC 强度预报方案, 以提高 TC 强度预报精度, 并探讨影响 TC 强度变化的主要因素。文中考虑预报因子包括气候持续性因子、天气因子、卫星资料 (TBB) 因子。

1 资料及方法

1.1 资料

应用 1996—2002 年 JTWC (the Joint Typhoon Warning Center) 的最佳路径资料和中国气象局的台风年鉴资料, 及相应时段的 NCEP 大尺度风、温、高度场 (每 6 小时一次) 和周平均海温资料, 以及 TBB 卫星资料。建立方程时, 天气因子是从 NCEP

分析场上读取, 业务预报中, 从欧洲中心 (ECMWF) 的预报场上获取。

1.2 方法及样本

采用逐步回归统计方法, 预报对象是预报时刻与起报时刻 TC 中心最大风速差, 预报因子包括: 气候持续性因子、天气因子、TBB 因子。天气因子包括起报时刻、预报时刻、起报时刻到预报时刻每 24 小时一次的变化量。逐步回归中, 回归方程通过显著水平 $\alpha=0.001$ 的 F 检验。采用“刀切法”进行独立样本检验。

将西北太平洋分为 3 个海区 (华南近海、华东近海、远海区域) 建立预报方程, 近海标准规定为: (20°N、120°E)、(30°N、130°E)、(35°N、140°E) 三点连线, 华南近海为 120°E 以西近海区, 其他近海区域为华东近海。预报时刻为: 24 小时、48 小时、72 小时。仅考虑达到热带风暴强度的样本 (中心最大风速 $\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 登陆样本不考虑。

1.3 主要预报因子

9 个气候持续性因子: 起报时刻 TC 中心最大风速 (简称 V), 起报时刻 TC 中心纬度 (简称 LAT), 起报时刻 TC 中心经度 (简称 LON), TC 中心最大风速前 12 小时变化 (简称 V12), TC 中心纬度前 12 小时变化 (简称 LAT12), TC 中心经度前 12 小时变化 (简称 LON12), TC 中心最大风速前 24 小时变化 (简称 V24), TC 中心纬度前 24 小时变化 (简称 LAT24), TC 中心经度前 24 小时变化 (简称 LON24)。

12 个天气因子: TC200hPa 相对涡动角

动量通量辐合^[6] (简称 REFC), 200hPa 与 850hPa 环境风垂直切变 (简称 VWS), 200hPa 高空纬向风 (简称 U200), 850hPa 平均涡度 (简称 VOR850), 850hPaTC 内区散度 (简称 DIV850), 200hPaTC 外区散度 (简称 DIV200), TC 移速的纬向分量 (简称 CMV), 最大可能强度 (Maximum Potential Intensity)^[6] (简称 MPI), 850hPa 以 TC 移速方向分开左右半圆温度差 (简称 AT850), 500hPa 高度值 TC 中心与环境差 (简称 AH500), 850hPaTC 中心 2 个经纬距内找到的最大涡度中心纬度值 (简称 TCY), 850hPaTC 中心 2 个经纬距内找到的最大涡度中心经度值 (简称 TCX)。

13 个 TBB 卫星资料因子: 1~1.5℃ 环平均温度 (简称 TBB1), 对 TBB1 做前 24 小时平滑 (简称 TBB2), 1~1.5℃ 范围 1~10 波叠加振幅平均 (简称 TBB3), 对 TBB3 做前 24 小时平滑 (简称 TBB4), 200km 以内 TBB 小于 -20℃ 的象素个数 (简称 TBB5), 40km 以内 TBB 极大值^[8] (简称 TBB6), 444km 以内 TBB 小于 -55℃ 的象素个数 (简称 TBB7), 0~111kmTBB 平均值^[9] (简称 TBB8), 111~333kmTBB 平均值 (简称 TBB9), 0~333kmTBB 平均值 (简称 TBB10), 0.4℃ 环平均 TBB^[10] (简称 TBB11), 1.2℃ 环平均 TBB (简称 TBB12), 1.5℃ 环平均 TBB (简称 TBB13)。

2 没有卫星资料的回归结果

2.1 远海区域

在没有加入卫星资料时, 对远海区域的样本做分组试验, 一类是与高空槽作用的样本 ($REFC \geq 10\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{day}$), 后称大 EFC; 另一类是没有与高空槽作用的样本 ($REFC < 10\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{day}$), 后称小 EFC。再将总体样本拟和建方程与分类结果比较, 后称综合。

大 EFC 类回归结果较好 (表 1), 复相关系数均达到 0.8 以上。各预报时刻选入因子中均选入气候持续性因子中心最大风速 (V) 和由海温算出的最大可能强度 (MPI), 在 48、72 小时预报中, 这两个因子方差贡献较大。另外, 不同的预报时刻, 回归方程还选入不同的反映动力强迫作用的天气因子。

表 1 大 EFC 选入因子方差贡献及回归结果

选入因子 / 预报时间	24 小时 (106)	48 小时 (59)	72 小时 (28)
V	0.490	0.338	0.634
MPI	0.036	0.119	0.162
TCY	0.047	NA	NA
AH500	NA	0.097	0.131
VOR850	NA	NA	0.070
复相关系数	0.834	0.900	0.931
剩余标准差	3.684	5.041	5.127

注: 括号内为拟合样本数, NA 为方程中没有选入

小 EFC 类样本数较大 (1908~1355 个样本), 但回归结果 (表略) 却不如大 EFC 类好, 复相关系数分别为: 24 小时 0.75、48 小时 0.83、72 小时 0.8, 选入因子比大 EFC 的多。24 小时预报, 共选入 8 个因子 (4 个气候持续性因子和 4 个天气因子)。48 小时预报选入 10 个因子 (2 个气候持续性因子、8 个天气因子)。72 小时预报选入 11 个因子 (2 个气候持续性因子和 9 个天气因子)。方差贡献最大的仍然是气候持续性因子 V。

为了与分类结果比较, 将所有远海区域样本拟合。回归结果 (表略) 与小 EFC 的相似, 24 小时预报, 与小 EFC 的结果基本相同, 选入因子中多 1 个天气因子。48 小时预报, 选入 8 个因子 (2 个气候持续性因子和 6 个天气因子)。72 小时预报与小 EFC 的回归结果基本相同。各因子方差贡献大小也基本与小 EFC 类相同。

进一步比较综合与分类所建预报方程的优劣, 用“刀切法”进行独立样本检验, 结

果发现，两种预报方程得到的预报误差基本相同。虽然大 EFC 的回归结果好，但可能由于样本偏少，故并没有显示出比综合方程预报能力更好。

2.2 华东近海

华东近海样本数较少，没有再分类建方程，仅将所有样本进行拟合（表略）。与远海区域综合类的回归结果比较，复相关系数变小，在 0.68 到 0.73 之间；选入因子变少，24 和 48 小时预报选入 4 个因子，72 小时预报选入 3 个因子。各时刻均选入气候持续性因子 V。24 小时方差贡献最大的是 MPI，48 和 72 小时方差贡献最大的均是 V。值得一提的是，24 小时预报还选入天气因子 REFC。

2.3 华南近海

华南近海也不再分类建方程。华南近海回归结果与前两海区比较明显不同的是：复相关系数随预报时刻延长越来越小（24 小时 0.70、48 小时 0.69、72 小时 0.64）。24 小时预报选入 6 个因子，3 个天气因子和 3 个气候持续性因子；48 小时选入 4 个因子；72 小时选入 2 个天气因子。24 小时方差贡献最大的是气候持续性因子 V，48 和 72 小时方差贡献大的均是天气因子。

3 加入卫星资料回归结果

加入卫星资料 TBB 后，样本数有所变化。为了比较方便，考虑相同的样本，将远海区域作为一个整体重新拟合，不再分类。没有考虑 TBB 资料时，与前面的综合类样本回归结果基本相同，在此不再赘述。加入卫星资料后（表 2），各时刻复相关系数略有增大。选入因子比较，24 小时预报选入 2 个 TBB 因子，一个因子是反映 TC 眼壁对流强度对称特征，另一个是反映 TC 非对称特性；48 小时选入 1 个 TBB 因子（反映 TC 整体对流强度）；72 小时选入 2 个 TBB

因子。24 和 48 小时预报 TBB 因子的方差贡献较大，而 72 小时预报 TBB 因子的方差贡献较小。

表 2 远海区域回归结果比较

预报时刻	有无卫星资料	复相关系数	剩余标准差
24 小时(1683)	无 TBB	0.744	5.172
	有 TBB	0.761	5.017
48 小时(1424)	无 TBB	0.828	6.851
	有 TBB	0.842	6.595
72 小时(1138)	无 TBB	0.860	7.273
	有 TBB	0.870	7.028

注：括号内为样本数

华东近海在加入 TBB 因子后，24 小时预报回归结果没有变化；48 小时复相关系数变小，共选入 3 个因子，1 个 TBB 因子和 2 个天气因子；72 小时复相关系数增大，仅选入 2 个因子，其中 1 个为 TBB 因子。在回归方程中，48 和 72 小时预报选入的 TBB 因子方差贡献最大。

加入 TBB 因子后，华南近海 24 和 72 小时预报的回归结果没有明显变化；48 小时预报复相关系数增加约 0.1，48 小时预报选入 6 个因子，其中有 1 个 TBB 因子。

从以上 3 个海区加入 TBB 因子的回归结果看，如果回归方程中选入 TBB 因子，回归结果略有改善，但总体改变不明显。从选入方程的 TBB 因子看，反映 TC 眼壁对流强度对称特征的 TBB 因子 3 个海区都有选入，表明 TC 眼壁的对流强度对 TC 的强度变化有影响。

4 误差分析

用“刀切法”进行独立样本检验。样本数与建方程时相同（表 3），不论是否加入 TBB 因子，3 个海区平均误差均较小。加入 TBB 因子后，远海区域的误差略有减小；华东近海 24 和 48 小时误差无明显变化，72 小时平均误差减小，但样本数太少没有代表

意义；华南近海 24 和 72 小时预报平均误差基本相当，48 小时预报误差减小近 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。独立样本检验结果表明，是否加入 TBB 因子误差变化不明显，但如果回归方程中选入 TBB 因子，预报结果略有改进。

表 3 误差分析

预报时刻	加入资料	远海区域		华东近海		华南近海	
		平均误差	RMSE	平均误差	RMSE	平均误差	RMSE
24 小时	无 TBB	4.00	5.19	3.88	5.11	3.90	4.92
	有 TBB	3.89	5.04	3.88	5.11	4.13	5.17
48 小时	无 TBB	5.48	6.95	6.31	7.57	5.85	7.32
	有 TBB	5.44	6.81	6.15	7.73	5.33	6.49
72 小时	无 TBB	5.87	7.39	10.00	11.66	5.64	7.06
	有 TBB	5.71	7.12	5.75	7.22	5.64	7.06

注：RMSE 为误差的均方差，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

为了进一步说明所建方程的预报能力，将 2000—2002 年样本与 CLIPER（气候持续法）预报结果比较（表 4 为远海区域，其他两个海区结果没有在表格中列出）。由以上检验结果发现，是否加入 TBB 因子误差差异不大，所以直接用没有加入 TBB 因子的预报方程与 CLIPER 结果相同样本比较。总体上讲，本文所建方程得到的预报误差比 CLIPER 法的小，预报结果较 CLIPER 法有明显改进，特别是预报时效较长时。48 小时预报误差比 CLIPER 的小 $2.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，72 小时约小 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表 4 远海区域误差与 CLIPER 法比较
(误差单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

预报时刻	预报方法	平均误差	RMSE
24 小时(500)	CLIPER	4.81	6.25
	无 TBB	3.88	5.17
48 小时(419)	CLIPER	7.51	9.31
	无 TBB	5.32	6.94
72 小时(331)	CLIPER	8.11	10.02
	无 TBB	5.56	7.18

5 应用 ECMWF 资料预报结果

用欧洲中心预报场资料后报，由于保存

资料原因，后报样本数少，所以远海区域采用综合类预报方程。因为 TBB 资料不能及时获取，所以 3 个海区均用没有加入 TBB 因子的方程。将远海区域样本与 CLIPER 法预报结果比较（表 5），24 和 48 小时预报误差比 CLIPER 的小，特别是 48 小时预报比 CLIPER 的误差小 $5.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，但 72 小时的误差却与 CLIPER 的相当，这可能因为现有的 72 小时数值预报产品误差较大，读取到的天气因子信息不够准确。将华东和华南近海样本完全考虑时，CLIPER 的平均误差变小，而本文预报方法误差增大，24 和 48 小时预报仍是比 CLIPER 误差小，但 72 小时预报却比 CLIPER 的结果更理想。

表 5 远海区域误差比较

预报时刻	24 小时 (22)	48 小时 (17)	72 小时 (13)
考虑天气因子	4.74	6.33	15.50
CLIPER 法	6.27	11.65	15.15

单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，括号内为样本数

6 结论及讨论

6.1 结论

本文建立了西北太平洋区域 TC 的强度预报方程，回归结果及独立样本检验结果如下：

(1) 在没有加入 TBB 因子时，远海区域的回归结果较好。远海区域选入的天气因子大部分为反映动力强迫作用的因子，但选入因子方差贡献最大的是气候持续性因子（TC 中心最大风速），另一影响此海区 TC 强度变化的重要因素是海温。近海区域的回归结果较远海区域的略差。华东近海 24 小时预报海温仍然是重要影响因子，但随着预报时刻的延长，表征高层外流特征及反映 TC 非对称程度的天气因子变得更为重要；另外，24 和 48 小时预报选入反映与槽作用大小的因子（REFC）及垂直切变。华南近

海区域选入因子少,选入一些反映动力强迫作用的因子,如850hPa平均涡度,此因子在48小时预报时方程方差贡献最大。

(2) 加入TBB因子后,远海区域复相关系数略有增大,各预报时刻均有TBB因子选入,主要选入的是表征TC眼壁对流强度的因子。近海区域加入TBB因子后,回归结果变化不明显,华东近海48和72小时预报及华南近海48小时预报有TBB因子选入,均为反映TC眼壁对流强度的因子。一般情况下,TBB因子对回归结果略有改进,但并不是每个预报时刻都有TBB因子选入。

(3) 独立样本检验,平均误差较小。将2000—2002年样本与CLIPER法比较,各海区的误差都比CLIPER的小,如远海区域72小时预报比CLIPER的误差约小 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。用欧洲中心的预报产品对2004年的部分TC后报,与CLIPER法比较,24和48小时预报误差比CLIPER的小,但72小时却是CLIPER结果稍好。

6.2 讨论

从以上结论看出,在气候持续性因子基础上考虑天气因子,分区建立预报方程在一定程度上改进了TC强度预报结果。然而,从后报试验结果发现,72小时的预报结果相对于CLIPER法并没有明显改进,这主要是由于时效较长的大尺度环境场的预报产品精度不够,将增大天气因子信息读取的误差,导致TC强度预报误差增大,所以应进一步尝试用不同的预报产品。

在后报试验中,近海区域的预报结果比远海区域的差,可能因为在建立近海方程时,没有考虑陆地因素的影响。所以在改进预报方程时,应充分考虑陆地影响因素。

在预报因子中加入TBB因子是本文的一个新尝试。但从误差比较看,加入TBB因子后,方程预报能力并没有明显提高,这

应该与计算的TBB因子有关,文中用到的TBB因子均与TC的强度相关性好,而与TC的强度变化(本文预报对象)相关性较差,故进一步发展预报方案时,将考虑更多与强度变化相关性好的TBB因子。

参考文献

- 1 林良勋,梁巧倩,黄忠. 华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析[J]. 气象, 2006, 32(2): 14-18.
- 2 Jarvinen, B. R. and C. J. Neumann. Statistical forecasts of tropical cyclone intensity change. NOAA Tech. Memo [J]. NWS NHC-10, 1979: 22.
- 3 DeMaria M, J Kaplan. A Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic basin [J]. Wea Forecasting, 1994, 9: 209-220.
- 4 DeMaria, M. and J. Kaplan. An Updated Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) for the Atlantic and Eastern North Pacific basins [J]. Wea. Forecasting, 1999, 14: 326-337.
- 5 John A Knaff, Mark DeMaria, C R Sampson, J M Gross. Statistical, 5-day tropical cyclone intensity forecasts derived from climatology and persistence [J]. Wea. Forecasting, 2003, 18: 80-92.
- 6 Fitzpatrick, Patrick J. Understanding and Forecasting Tropical Cyclone Intensity Change with the Typhoon Intensity Prediction Scheme (TIPS) [J]. Wea. Forecasting, 1997, 12: 826-846.
- 7 蒋乐贻. 西太平洋台风强度气候持续预报方法, 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集 [C]. 2004: 3-51—3-52.
- 8 Velden C S, T Olander. Evaluation of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity from digital geostationary satellite infrared imagery [J]. Wea. Forecasting, 1998, 13: 172-186.
- 9 Gentry, R. Cecil, Rodgers, Edward, Steranka, Joseph, Shenk, William E. Predicting Tropical Cyclone Intensity Using Satellite-Measured Equivalent Blackbody Temperatures of Cloud Tops [J]. Mon Wea Rev, 1980, 108(4): 445-455.
- 10 王瑾, 江吉喜. 热带气旋强度的卫星探测客观估计方法的研究, 新世纪气象科技创新与大气科学发展-热带气旋与季风 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 79-86.