

钱燕珍, 孙军波, 陈佩燕, 等. 2013. 用数值预报释用方法做近海及登陆热带气旋强度预报. 气象, 39(6): 710-718.

# 用数值预报释用方法做近海及登陆 热带气旋强度预报<sup>\* 1</sup>

钱燕珍<sup>1</sup> 孙军波<sup>2</sup> 陈佩燕<sup>3</sup> 张程明<sup>1</sup>

1 浙江宁波市气象台, 宁波 315012

2 浙江慈溪市气象局, 慈溪 315300

3 上海台风研究所, 上海 200030

**提 要:** 这是一个对 GFS 数值预报产品进行解释应用的方法。将支持向量机(SVM)回归方法应用于近海和登陆热带气旋(TC)的强度预报。从其本身强度, 影响范围内气象因子情况, 地形因子等三个方面, 设计相关因子, 建立预报模式, 用来预报 12、24、36、48、60 和 72 h 的 TC 强度。总体上模式强度预报结果与中央气象台的预报结果相近, 优于气候持续法的预报; 趋势预报优势明显, 可高出 7~12 个百分点。表明可以成为台风强度预报的另一个工具, 投入业务应用。

**关键词:** 近海台风, 登陆台风, 强度预报, 支持向量机方法, 数值预报释用

中图分类号: P456

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.06.007

## Interpretation Method of Numerical Weather Prediction for Intensity Forecast of Offshore and Landing Tropical Cyclones

QIAN Yanzhen<sup>1</sup> SUN Junbo<sup>2</sup> CHEN Peiyan<sup>3</sup> ZHANG Chenming<sup>1</sup>

1 Ningbo Meteorological Observatory of Zhejiang Province, Ningbo 315012

2 Cixi Meteorological Office of Zhejiang Province, Cixi 315300

3 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

**Abstract:** This is an interpretation technique for numerical weather prediction (NWP) products of GFS. In this paper the support vector machine (SVM) was employed to forecast the intensity of offshore and landing tropical cyclones (TC). According to the TC intensity, meteorological environment and topographical factors, we designed related factors and built a forecasting model which was used to forecast the intensities of TC in 12, 24, 36, 48, 60 and 72 hours. The predicting precision by SVM is closer to the forecast by the National Meteorological Centre of CMA and all predictions are superior to that by the method of climate persistence. The trend prediction of TC has obvious advantages and can improve forecast precision by 7%–12%. All these indicate that SVM is a better method and can be applied to TC intensity forecast in operations.

**Key words:** offshore typhoon, landing typhoon, intensity prediction, support vector machine (SVM), interpretation of numerical weather prediction

\* 上海台风基金项目(2009ST08)和国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB421504)共同资助  
2012年6月19日收稿; 2012年9月22日收修定稿  
第一作者: 钱燕珍, 从事天气预报和服务及相关技术的研究. Email: qian-y-z@163.com

## 引言

目前国内外各预报中心一直致力于热带气旋(TC)强度业务预报的改进(陈联寿,2006;许映龙等,2010)。但由于影响台风强度变化的因素众多,且十分复杂,在相关资料或数值模式(特别是海气耦合台风数值预报模式)没有大幅度改善之前,利用相关研究成果以及业务预报中积累的经验,提取与TC强度变化密切相关的因子,应用动力统计方法进行TC强度预报仍然是一个十分重要的课题(端义宏等,2005)。近几年国内已有多项研究工作与此相关,如利用欧洲中期预报场及气候持续预报因子建立的统计释用预报方法(简称STC)(胡春梅等,2006)、气候持续预报方法(简称TICP)(余晖等,2001)和针对南海TC的基于遗传-神经网络的TC强度预报方法(姚才等,2007)以及用统计方法分析气候持续因子、起报时刻天气因子、当前及未来TC可能影响区域海温等因子做热带气旋强度预报(Chen et al, 2011; 宋金杰等, 2011)。近海及登陆TC强度变化受地形等下垫面情况影响而变得异常复杂,然而在目前准业务运行和业务运行的台风强度预报方法中,除部分方法在建模时一定程度上考虑了近海样本外,并没有对这类样本进行特殊的处理,导致该类样本预报误差较大(李英等,2004)。但是近海及登陆TC的强度预报准确性对防灾减灾的影响更为直接,因此更为重要。

Vapnik等(1963)提出的统计学习理论(Bretherton,1992)是一种专门的小样本理论,基于这一理论近年提出的支持向量机(Support Vector Machines,SVM)方法,避免了人工神经网络等方法中网络结构难以确定、过学习和欠学习以及局部极小等问题,为解决非线性问题提供了一个新思路。SVM回归方法是依据支持向量(关键样本)来建立最终的决策函数,这一特征与基于确定因子的权重系数来明确表达各个因子的权重组合与预报对象变化的常规统计方法(如逐步回归、卡尔曼滤波和神经网络)有显著的区别。SVM方法考究的是因子群构造的样本空间与预报对象的关系,单个因子与预报对象是否具有显著相关并不重要,而且不需要很大的样本数(陈永义等,2004;冯汉中等,2004)。

气象上用SVM方法做各种要素预报以及数值

释用预报,已有了许多尝试(黄崇福等,1995),如温度预报,能见度预报,降水预报,台风影响时的风力预报(熊秋芬等,2008;钱燕珍等,2012;黄丽娜等,2009)等,取得了很好的效果和应用。我们试图利用SVM方法,对相对稳定的环境场数值预报结果进行解释应用,结合TC自身情况,从距离角度来考虑地形对热带气旋不同阶段强度的影响等,做近海及登陆TC的强度预报,并把预报结果分别与中央气象台的预报结果和气候持续法预报结果进行比较。

## 1 资料和TC强度预报思路

使用1999—2009年 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的NCEP再分析场资料,来自台风年鉴的路径、强度资料以及经纬度分辨率 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的地形资料。其中1999—2008年用于建立模型,2009年资料作为独立样本,检验模型的预报能力。用2009和2010年14个TC的GFS数值预报产品和中央气象台对TC路径的预报产品来检验模型的实际业务预报水平。

建模的TC,一天取4个时次样本。选择进入第一警戒线以后强度在热带风暴以上的TC,从进入第一警戒区开始到在警戒区内刚减弱为热带低压这个时次,包括减弱为热带气压时的头一个时次,这中间所有02、08、14和20时次的强度资料,作为样本。整理资料后,拟合建模资料共计有115个TC,2009年的检验TC是13个。对2009和2010年中央台编号“200904”,“200907”,“200908”,“200913”,“200915”,“200916”,“201002”,“201003”,“201004”,“201006”,“201007”,“201010”,“201011”和“201013”共14个TC进行实

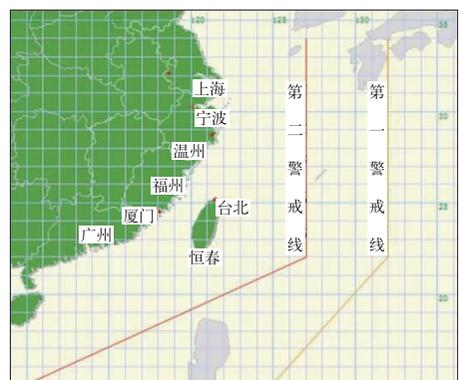


图1 热带气旋警戒线示意图

Fig. 1 Warning region of tropical cyclones

际业务应用检验。

强度预报模式不直接对预报时次的 TC 强度进行预报,而是预报该时次相对与实况的强度增量。根据 TC 强度变化的一些机理和平时预报经验,从 TC 本身强度、影响范围内的环境场气象要素以及地形资料,寻找相关因子,利用 TC 实况资料,NCEP 再分析场资料,应用支持向量机径向基函数的方法分别对 12、24、36、48、60 和 72 h 共 6 个预报时次,建立预报模型。在实际预报工作中,利用数值预报结果,就可以实现近海及登陆 TC 的 72 h 内强度预报。

## 2 相关因子设计和计算

### 2.1 从三个方面设计相关因子

#### (1) TC 本身强度

包括实况的近中心最大风速、最低气压和中心所在位置的经纬度。

#### (2) TC 影响范围内的气象要素因子

影响范围内,包括 1000、925、850、700 和 500 hPa 共 5 层各网格点上的温度、相对湿度、绝对涡度、垂直上升速度、两分钟平均风速,以及 925~500 hPa 的位势高度和海平面气压。

各 TC 的影响范围直径通常从五、六百千米到两千多千米(陈联寿等,1979)。由于目前还没有明确的 TC 影响范围数据,且每个 TC 差别很大,为便于计算,统一设定每个 TC 影响范围的半径为 8 个经纬度。

#### (3) 地形因子

包括 TC 中心到大陆海岸线的距离,TC 中心到台湾的距离,影响范围内各网格点的海拔。

### 2.2 相关因子计算

根据相关因子的计算方法,可分为点因子和面因子。

#### 2.2.1 点因子计算

点因子主要是单个标量,不涉及 TC 的影响范围。包括:TC 中心的经纬度、TC 中心附近实况最大风速和最低气压等。

TC 中心到大陆海岸线的距离:计算 TC 中心到最近海岸线的距离,若 TC 中心在海洋上,则设定为正,若在陆地上,则为负。

TC 中心到台湾的距离:以台湾的地理中心点(23.58'32"N、120.58'25"E)作为台湾地理位置的代表,计算 TC 中心到台湾地理中心点的距离。

表 1 相同时次 TC 近中心最大风速与标量因子的相关系数

Table 1 The correlation coefficient of maximum wind speed near TC center and scalar factors at the same time

标量因子	相关系数
经度	0.320
纬度	-0.058
到台湾距离	0.171
到大陆海岸线距离	0.339

#### 2.2.2 面因子计算

面因子,主要是场变量在影响范围内的累计平均值。一般认为:各变量对 TC 中心强度的影响,随着格点到 TC 中心距离的增大而减小。加入距离权重系数,计算影响范围内相关因子的累计平均值。

计算公式:

$$\bar{T}_s = \frac{1}{2\pi R} \int_0^{2\pi} \int_0^R f(r) T dr d\theta$$

式中, $T$  为相关因子, $r$  是以 TC 中心为圆心,网格点到圆心的距离, $R$  为 TC 影响范围半径,设定为 8 个经纬度。

网格差分计算:

$$\bar{T}_s = \frac{1}{M} \sum_i^M F(r) T_i$$

式中, $M$  为影响范围内的格点数, $F(r)$  为气象要素对 TC 强度的影响函数。

目前有关气象要素对 TC 强度的影响,随影响半径变化的具体规律研究较少。现设定 4 个影响函数,粗略探索其影响程度随半径的变化情况。

(1)  $F(r) = 1$  即:相关因子在影响范围内所有网格点上的平均值。假定相关因子对 TC 中心强度的影响程度不随影响半径变化。

(2)  $F(r) = 1 - \frac{r}{R}$  假定相关因子对 TC 中心强度的影响程度随影响半径线性减小。

(3)  $F(r) = 1 - (\frac{r}{R})^{1/2}$  假定相关因子对 TC 中心强度的影响程度随影响半径增大而加速递减。

(4)  $F(r) = 1 - (\frac{r}{R})^2$  假定相关因子对 TC 中心强度的影响程度随影响半径增大而减速递减。

### 2.3 因子相关性分析

从 TC 本身、环境场因素和地形因素三个方面出发,共构造了 44 个因子,通过对 44 个预报因子和所预报各时次的极大风速、最低气压相关性分析,表明绝大部分因子可以通过置信度为 0.05 的  $F$  检验。

对 TC 近中心最大风速(最低气压的相关系数也类似,不再列举)与同一时次的相关因子做相关性分析,结果如表 2。根据影响程度随半径的 4 种变化情况的相关性分析,选定该要素最合适的影响程度随半径的变化模型。大多数相关因子都选用影响程度随影响半径增大而减速递减的第四种模型。

由表 2 可见,TC 内力的惯性作用主要体现在

表 2 TC 的近中心最大风速与因子相关系数的 4 种计算方法比较

Table 2 Comparison of the 4 calculation methods for the correlation between maximum wind speed near TC center and its factors

相关因子	格点平均(1)	线性减小(2)	加速递减(3)	减速递减(4)	选取的因子
海拔	-0.324	-0.331	-0.330	-0.332	4
海平面气压	-0.151	-0.105	-0.096	-0.111	1
海平面 24 h 变压	-0.199	-0.272	-0.250	-0.289	4
925 hPa 位势高度	-0.116	-0.208	-0.185	-0.224	4
850 hPa 位势高度	-0.105	-0.189	-0.167	-0.205	4
700 hPa 位势高度	-0.077	-0.135	-0.117	-0.148	4
500 hPa 位势高度	-0.017	-0.071	-0.059	-0.080	4
1000 hPa 气温	0.218	0.118	0.113	0.118	1
925 hPa 气温	0.114	0.059	0.055	0.061	1
850 hPa 气温	0.107	0.040	0.037	0.040	1
700 hPa 气温	0.164	0.030	0.046	0.048	1
500 hPa 气温	0.147	0.039	0.037	0.038	1
1000 hPa 相对湿度	-0.181	-0.288	-0.268	-0.301	4
925 hPa 相对湿度	0.153	0.102	0.117	0.089	1
850 hPa 相对湿度	0.127	0.138	0.137	0.135	2
700 hPa 相对湿度	0.053	0.056	0.055	0.054	2
500 hPa 相对湿度	0.012	0.105	0.088	0.115	4
1000 hPa 垂直速度	-0.047	-0.094	-0.080	-0.104	4
925 hPa 垂直速度	-0.181	-0.338	-0.308	-0.352	4
850 hPa 垂直速度	-0.162	-0.309	-0.284	-0.318	4
700 hPa 垂直速度	-0.171	-0.302	-0.280	-0.331	4
500 hPa 垂直速度	-0.175	-0.306	-0.281	-0.319	4
1000 hPa 风速	-0.505	0.581	0.581	0.587	4
925 hPa 风速	-0.453	0.533	0.533	0.540	4
850 hPa 风速	0.394	0.476	0.476	0.484	4
700 hPa 风速	0.334	0.431	0.431	0.440	4
500 hPa 风速	0.238	0.354	0.354	0.364	4
1000 hPa 涡度	0.033	0.256	0.185	0.310	4
925 hPa 涡度	0.050	0.270	0.204	0.317	4
850 hPa 涡度	0.034	0.248	0.186	0.292	4
700 hPa 涡度	0.008	0.225	0.161	0.271	4
500 hPa 涡度	0.007	0.247	0.180	0.294	4
925 hPa 24 h 变高	-0.190	-0.266	-0.243	-0.283	4
850 hPa 24 h 变高	-0.174	-0.250	-0.227	-0.268	4
700 hPa 24 h 变高	-0.153	-0.231	-0.208	-0.249	4
500 hPa 24 h 变高	-0.155	-0.240	-0.216	-0.258	4
1000 hPa 24 h 变温	0.179	0.225	0.225	0.232	4
925 hPa 24 h 变温	0.146	0.204	0.204	0.215	4
850 hPa 24 h 变温	0.131	0.114	0.144	0.151	4
700 hPa 24 h 变温	0.014	0.031	0.048	0.058	4
500 hPa 24 h 变温	-0.007	0.010	0.010	0.018	4

36 h 以内,TC 本身因素和地形因素在这一时段作用大一些。随着预报时效的延长,相邻时段气象要素的差值与 TC 强度变化的相关性明显增强,36 h 后成为主要影响要素,也就是 36 h 后环境场的影响对 TC 强度的变化起主导作用。

## 2.4 相关因子的进一步筛选

以上相关性分析都是同一时次的,现对各相关因子分别在实况和预报两个时次的值,与预报时次的

TC 中心强度相对实况时次的增量做进一步分析。

选择 TC 中心的实况最大风速和最低气压,实况和预报两个时次的 TC 中心的经纬度、海拔和到海岸线的距离,每种气象要素在不同层次中相关性最好的 1~2 个,以及同一个相关因子在预报时次的值和实况时次的值的差(预报时次的值减实况时次的值),共计 44 个相关因子。不同预报时次的相关性计算结果数值不同,但相差不多,其中各因子与 72 h 最大风速增量的相关性结果如表 3,其他表略。

表 3 各因子与最大风速 72 h 增量的相关性

Table 3 The correlation between the increment of maximum wind speed near TC center in 72 h and the factors

编号	相关因子	相关系数	编号	相关因子	相关系数
X <sub>1</sub>	实况经度	0.391	X <sub>23</sub>	预报 1000 hPa 温度	0.361
X <sub>2</sub>	实况纬度	-0.220	X <sub>24</sub>	预报 1000 hPa 相对湿度	-0.230
X <sub>3</sub>	实况最低气压	0.676	X <sub>25</sub>	预报 925 hPa 垂直上升速度	-0.173
X <sub>4</sub>	实况最大风速	-0.677	X <sub>26</sub>	预报 700 hPa 垂直上升速度	-0.181
X <sub>5</sub>	实况到大陆海岸线距离	0.464	X <sub>27</sub>	预报 1000 hPa 风速	0.376
X <sub>6</sub>	实况海拔	-0.271	X <sub>28</sub>	预报 925 hPa 风速	0.306
X <sub>7</sub>	实况海平面气压	0.159	X <sub>29</sub>	预报 1000 hPa 涡度	0.043
X <sub>8</sub>	实况 925 hPa 位势高度	0.274	X <sub>30</sub>	预报 925 hPa 涡度	0.036
X <sub>9</sub>	实况 1000 hPa 温度	0.066	X <sub>31</sub>	经度差	-0.216
X <sub>10</sub>	实况 1000 hPa 相对湿度	0.000	X <sub>32</sub>	纬度差	-0.186
X <sub>11</sub>	实况 925 hPa 垂直上升速度	0.365	X <sub>33</sub>	到大陆海岸线距离差	-0.215
X <sub>12</sub>	实况 700 hPa 垂直上升速度	0.295	X <sub>34</sub>	海拔差	-0.227
X <sub>13</sub>	实况 1000 hPa 风速	-0.428	X <sub>35</sub>	海平面气压差	-0.424
X <sub>14</sub>	实况 925 hPa 风速	-0.460	X <sub>36</sub>	925 hPa 位势高度差	-0.482
X <sub>15</sub>	实况 1000 hPa 涡度	-0.363	X <sub>37</sub>	1000 hPa 温度差	0.379
X <sub>16</sub>	实况 925 hPa 涡度	-0.412	X <sub>38</sub>	1000 hPa 相对湿度差	-0.223
X <sub>17</sub>	预报经度	0.090	X <sub>39</sub>	925 hPa 垂直上升速度差	-0.446
X <sub>18</sub>	预报纬度	-0.312	X <sub>40</sub>	700 hPa 垂直上升速度差	-0.392
X <sub>19</sub>	预报到大陆海岸线距离	0.244	X <sub>41</sub>	1000 hPa 风速差	0.639
X <sub>20</sub>	预报海拔	-0.300	X <sub>42</sub>	925 hPa 风速差	0.655
X <sub>21</sub>	预报海平面气压	-0.215	X <sub>43</sub>	1000 hPa 涡度差	0.366
X <sub>22</sub>	预报 925 hPa 位势高度	-0.192	X <sub>44</sub>	925 hPa 涡度差	0.404

从计算结果分析得到:

(1) 0~12 h 时段的 TC 强度变化过程中,温度、湿度等环境因子在实况时段比同一时次的相关性更大,说明 TC 强度变化有较大的惯性,外界环境场因子的变化至少需要 24 h 以后才能较大程度地改变 TC 强度。

(2) 影响范围内的风速、涡度和垂直速度等因子一定程度上体现了 TC 的整体强度,因而在相同时次,其与 TC 中心强度的相关性比不同时次的更好。

(3) 相同因子在不同时次的差值,随着预报时次的增大,相关性也在增大。在长时效的 TC 强度预报中,需要更多的考虑影响环境的变化,其本身的

强度次之。

## 3 模型的建立和拟合

### 3.1 支持向量机方法建模

支持向量机的函数回归模式的核函数采用径向基函数,训练工具采用台湾大学林智仁等开发的 LibSVM 软件中的  $\nu$ -SVM 回归模式。径向基函数的表达式为:

$$\exp(-0.15 \times |\mathbf{U} - \mathbf{V}_i|^2)$$

其中, $\mathbf{U}$  为预报因子向量, $\mathbf{V}_i$  为支持向量。

根据各因子的相关性、物理意义的主观分析和多次试验,对不同时刻的 TC 近中心最大风速和最低气压分别建立相关预报模型(表 4)。由表 4 可

见,每个时次,中心最大风速和最低气压增量预报因子都有一些不同,但几乎都包含了 TC 自身因子、地形因素和环境场因子。

表 4 TC 强度预报模型采用的因子和训练参数

Table 4 The factors and parameters of the model used in TC intensity prediction

预报要素	预报时效/h	预报因子	SVM 训练参数 (C,ν)	支持向量数占 样本总数的比例/%
最大风速	12	$X_1, X_1, X_5, X_6, X_{19}, X_{23}, X_{24}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	11, 0.475	86.0
	24	$X_1, X_1, X_5, X_6, X_{19}, X_{37}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	30, 0.65	100
	36	$X_1, X_1, X_5, X_6, X_{19}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	77.5, 0.625	100
	48	$X_1, X_1, X_5, X_6, X_{18}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	82.5, 0.55	100
	60	$X_1, X_1, X_5, X_6, X_{18}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	55, 0.2	52.8
	72	$X_1, X_1, X_5, X_6, X_{41}, X_{42}, X_{39}, X_{36}$	12.5, 0.475	66.9
最低气压	12	$X_1, X_3, X_5, X_6, X_{19}, X_{23}, X_{24}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	17.5, 0.4	76.5
	24	$X_1, X_3, X_5, X_6, X_{19}, X_{37}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	62.5, 0.45	86.2
	36	$X_1, X_3, X_5, X_6, X_{19}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	72.5, 0.725	100
	48	$X_1, X_3, X_5, X_6, X_{18}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	102.5, 0.275	63.0
	60	$X_1, X_3, X_5, X_6, X_{18}, X_{41}, X_{42}, X_{36}$	102.5, 0.175	47.6
	72	$X_1, X_3, X_5, X_6, X_{41}, X_{42}, X_{39}, X_{36}$	67.5, 0.45	84.8

### 3.2 模型拟合

模型的拟合训练结果如表 5。

由表 5 可见,不管是风速拟合的复相关系数,还是气压拟合的复相关系数,都是很高的,说明所选因子有很好的代表性,可以作为支持向量模型预报的

因子。各个时次的风速绝对值误差都不是很大,而且随着预报时效的增长,误差并没有明显增大。误差的标准差也同样不是很大,随着预报时效的增大也没有明显增大。气压的拟合也呈现了同样的效果,拟合的绝对值误差和标准差都不是很大,并且随着预报时效的增长,误差没有明显增大。

表 5 各时次 TC 强度拟合结果

Table 5 The fitting results of TC intensity of each time

编号	预报时效/h	风速拟合的 绝对值误差 /m·s <sup>-1</sup>	风速拟合误差的 标准差 /m·s <sup>-1</sup>	风速拟合的 复相关系数	气压拟合的 绝对值 误差/hPa	气压拟合误差的 标准差 /hPa	气压拟合的 复相关系数	样本数
1	12	1.08	1.90	0.9521	2.38	3.71	0.9366	1761
2	24	1.04	2.41	0.9699	2.41	4.07	0.918	1532
3	36	1.13	2.78	0.9754	2.69	5.81	0.9643	1313
4	48	0.90	2.46	0.9855	4.15	5.29	0.9791	1111
5	60	2.75	3.21	0.9759	5.03	5.92	0.9807	927
6	72	3.43	4.68	0.9613	2.93	5.27	0.9934	758

### 4 独立样本检验

使用 2009 年 13 个进入模型所规定范围内的 TC 的实况路径资料和 NCEP 再分析场资料,对预报模式可能达到的最佳预报能力进行检验,如表 6。

由表 6 可见,12 h 极大风速绝对值误差接近 3 m·s<sup>-1</sup>,中心最低气压绝对值误差接近 5 hPa,还是比较小的。风速误差最大出现在 60 h 预报,极大风速绝对值误差 5.17 m·s<sup>-1</sup>,中心最低气压绝对值

误差最大出现在 72 h,值是 8.90 hPa,总体上检验结果还是比较好的。

### 5 业务检验

#### 5.1 强度预报的业务检验

对 2009—2010 年 14 个 TC 进行业务检验。数值预报资料使用的 GFS 预报资料。预报结果与同时次的中央气象台预报、气候持续法预报结果比较,

总体误差如表 7 和表 8。

由表 7 和表 8 可见：

(1) 本模式的预报效果与稳定性均优于气候持续法。

(2) 本模式和中央气象台的预报比较, 48 h 及之前的效果略差, 72 h 的预报略好于中央气象台。

总体效果略差于中央气象台, 但差距不大。

本模式与中央气象台对各个 TC 的具体预报效果(图略)互有高低, 相差不是很大。极大风速的预报结果比较接近; 近中心最低气压 48 h 之前, 略差于中央气象台的预报, 其他时次比较接近。与气候持续法相比, 多数个例都优势明显。

表 6 2009 年各时次 TC 强度独立检验结果

Table 6 Independent test for TC intensity prediction of each time in 2009

编号	预报时效/h	风速检验的	风速检验误	风速检验的	气压检验的	气压检验误	气压检验的	样本数
		绝对值误差	差的标准差		复相关系数	绝对值误差		
		/m·s <sup>-1</sup>	/m·s <sup>-1</sup>		/hPa	/hPa		
1	12	3.07	3.88	0.6001	5.19	6.69	0.5756	1761
2	24	3.93	4.85	0.7933	6.78	8.75	0.7563	1532
3	36	4.41	5.72	0.8252	7.40	9.60	0.8302	1313
4	48	4.88	6.13	0.8189	8.58	10.58	0.8295	1111
5	60	5.17	6.36	0.8078	8.58	10.43	0.8372	927
6	72	4.45	5.67	0.8525	8.90	11.04	0.8459	758

表 7 三种预报方法对 TC 各时次的近中心最大风速的预报误差

Table 7 The prediction errors of maximum wind speed near TC center predicted by three prediction methods

预报时效/h	本模式		中央气象台		气候持续法		样本数
	标准差	平均绝对值误差	标准差	平均绝对值误差	标准差	平均绝对值误差	
	/m·s <sup>-1</sup>						
12	3.94	4.85	/	/	3.99	5.40	183
24	5.28	6.34	4.13	5.31	6.52	8.03	144
36	6.26	7.69	/	/	7.77	9.26	117
48	6.47	7.71	4.57	6.18	7.87	9.87	92
60	6.87	8.23	/	/	7.95	9.89	55
72	6.12	7.22	6.49	8.20	9.37	10.73	51

表 8 两种预报方法对 TC 各时次的最低气压的预报误差

Table 8 The prediction errors of lowest pressure predicted by two prediction methods

预报时效/h	本模式		中央气象台		样本数
	平均绝对值误差/hPa	标准差/hPa	平均绝对值误差/hPa	标准差/hPa	
12	6.26	8.33	/	/	187
24	8.56	10.99	7.05	9.23	144
36	10.50	13.13	/	/	120
48	10.73	13.46	8.07	11.05	92
60	11.31	14.08	/	/	70
72	11.42	13.91	12.92	16.32	51

## 5.2 强度变化趋势的业务检验

对于 TC 强度变化的趋势的判断, 在实际的 TC

预报服务工作中, 也有较大意义。通过比较 TC 预报强度变化趋势(增强还是减弱)与实际变化趋势一致性, 也能反映预报模式的好坏。现定义:

$$\text{预报趋势一致率} = \frac{\text{预报变化率趋势与实况变化趋势一致的时次数}}{\text{总的预报时次数}} \times 100\%$$

计算结果如表 9。

从表 9 可见, 对 TC 强度变化趋势的预报, 本模

式要优于其他两种方法。尤其是长时效的趋势预报, 效果更好, 可高出 7~12 个百分点。

表 9 三种预报方法对 TC 中心最大风速和最低气压的各时次的预报趋势一致率

Table 9 The prediction coincidence rate of maximum wind speed and lowest pressure near TC center by three prediction methods

预报时效/h	本模式		中央气象台		气候持续法
	最大风速预报 一致率/%	最低气压预报 一致率/%	最大风速预报 一致率/%	最低气压预报 一致率/%	最大风速预报 一致率/%
12	60.7	61.0	/	/	51.9
24	75.7	76.4	76.4	75.0	61.2
36	76.9	79.2	/	/	67.5
48	83.7	88.0	75.1	76.1	71.7
60	84.8	77.1	/	/	69.1
72	82.4	76.5	65.2	66.7	71.1

### 5.3 台风及以上级别 TC 和靠近大陆 TC 的业务检验

鉴于实际业务中,对大强度 TC 的关注度更高。现对 TC 实况强度达到台风及以上(近中心最大风速 $\geq 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )时次的近中心最大风速预报误差进

行统计(表 10),比较三种预报方法间的差异。

由于 TC 近海和登陆影响比较大,现对各 TC 实况位置出现在  $15^\circ\text{N}$  以北, $121^\circ\text{E}$  以西的以大陆为主体区域内各时次的距离预报误差统计分析(表 11),比较三种预报方法间的差异。

表 10 三种预报方法对近中心最大风速 $\geq 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的各时次的最大风速预报误差

Table 10 The prediction errors of maximum wind speed over  $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  near TC center predicted by three prediction methods

预报时效/h	本模式		中央气象台		气候持续法		样本数
	平均绝对值 误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	标准差 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均绝对值 误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	标准差 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均绝对值 误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	标准差 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
24	6.557	6.791	4.229	5.397	7.111	7.241	70
48	7.055	7.563	5.347	6.818	9.592	8.313	49
72	6.475	7.368	8	9.52	12.15	7.709	24

表 11 三种预报方法对实况位置出现在大陆及附近 TC 的最大风速预报误差

Table 11 The prediction errors of maximum wind speed of TC near and on the land predicted by three methods

预报时效/h	本模式		中央气象台		气候持续法		样本数
	平均绝对值 误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	标准差 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均绝对值 误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	标准差 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均绝对值 误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	标准差 $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
24	5.086	6.179	3.657	4.567	6.414	7.977	108
48	6.879	8.135	4.156	5.596	6.948	8.85	77
72	6.23	7.303	6.13	7.465	9.486	10.764	46

对于近中心最大风速 $\geq 32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和大陆主体区域内的 TC 强度预报(表 10 和表 11),本模式与中央气象台预报的差异总体上接近,48 h 及之前,差于中央气象台的预报,72 h 略优于该预报。总体上都明显优于气候持续法的预报。

## 6 结 论

本工作针对近海和登陆 TC,用支持向量机方法对 GFS 数值预报产品进行解释应用,做强度预

报。在构造预报因子时,考虑了数值预报相对稳定的环境场因子,TC 自身因子,地形因子(从距离角度来考虑地形对热带气旋不同阶段强度的影响)等,用来预报 12、24、36、48、60 和 72 h 的 TC 强度。实际业务应用检验,6 个时效风速预报业务检验误差的标准差分别是:4.85、6.34、7.69、7.71、8.23 和  $7.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均绝对值误差分别是:3.94、5.28、6.26、6.47、6.87 和  $6.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;气压预报业务误差标准差分别是:8.33、10.99、13.13、13.46、14.08 和  $13.91 \text{ hPa}$ 。平均绝对值误差:6.26、8.56、10.50、

10.73、11.31 和 11.42 hPa。通过各种分析可以得到:

(1)本模式的强度预报效果总体上比中央气象台的强度预报效果略差,但差距不大。24 和 48 h 时效预报,中央台预报效果略好;72 h 预报,本模式的效果略优。从强度变化趋势预报的效果来看,本模式相比中央气象台的预报有较明显优势,尤其是长时效的趋势预报,效果更好,可高出 7~12 个百分点。说明本强度预报模式在实际台风预报工作中具有应用价值。

(2)通过和气候持续法的预报效果比较,本模式从预报效果和稳定性等方面均优于气候持续法。

(3)本预报模式的预报精度主要取决于 GFS 数值预报产品,因而随着数值预报产品精度的提高,模式的预报准确率也能进一步提高。

## 参考文献

- 陈联寿,丁一汇. 1979. 西北太平洋台风概论. 北京:科学出版社:1-491.
- 陈联寿. 2006. 热带气旋研究和业务预报技术的发展. 应用气象学报, 17(6):672-681.
- 陈永义,俞小鼎,高学浩,等. 2004. 处理非线性分类和回归问题的一种新方法(I)——支持向量机方法简介. 应用气象学报, 15(3):345-354.
- 端义宏,余晖,伍荣生. 2005. 热带气旋强度变化研究进展. 气象学报, 63(5):636-645.
- 冯汉中,陈永义. 2004. 处理非线性分类和回归问题的一种新方法(II)——支持向量机方法在天气预报中的应用. 应用气象学报, 15(3):355-365.
- 胡春梅,余晖,陈佩燕. 2006. 西北太平洋热带气旋强度统计释用预报方法研究. 气象, 32(8):64-69.
- 黄崇福,王家鼎. 1995. 模糊信息优化处理技术及其应用. 北京:北京航空航天大学出版社.
- 黄丽娜,林笑茹,曾华,等. 2009. 西北太平洋台风累积动能的气候特征. 气象, 35(9):44-50.
- 李英,陈联寿,王继志. 2004. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征. 气象学报, 62(2):167-179.
- 钱燕珍,孙军波,余晖,等. 2012. 用支持向量机方法做登陆热带气旋站点大风预报. 气象, 38(3):302-308.
- 宋金杰,王元,陈佩燕,等. 2011. 基于偏最小二乘回归理论的西北太平洋热带气旋强度统计预报方法. 气象学报, 69(5):745-756.
- 熊秋芬,曾晓表. 2008. SVM 方法在降水预报中的应用及改进. 气象, 34(12):90-95.
- 许映龙,张玲,高拴柱. 2010. 我国台风预报业务的现状及思考. 气象, 36(7):43-49.
- 姚才,金龙,黄明策,等. 2007. 遗传算法与神经网络相结合的热带气旋强度预报方法试验. 海洋学报, 29(4):11-19.
- 余晖,薛宗元. 2001. 若干统计方法预测影响华东地区热带气旋年频数的对比试验. 上海:大气科学研究与应用.
- Bretherton C S. 1992. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. J Climate, 5(6):541-560.
- Chen Peiyan, Yu Hui, Chan Johnny C L. 2011. A western North Pacific tropical cyclone intensity prediction scheme. Acta Meteor Sin, 05:611-624.
- Vapnik V, Lerner A. 1963. Pattern recognition using generalized portraits. Avtomatikai Telemekhanika, 24:774-780.