

朱娟,张立凤,张铭.检验全球数值预报模式的相似度等指标.气象科学,2018,38(2):221-228.

ZHU Juan,ZHANG Lifeng,ZHANG Ming.Similarity and distance for verification of global numerical models.Journal of the Meteorological Sciences , 2018,38(2):221-228.

## 检验全球数值预报模式的相似度等指标

朱娟<sup>1,2</sup> 张立凤<sup>2</sup> 张铭<sup>2</sup>

(1 海洋环境专项办 基地筹建办, 北京 100081; 2 国防科技大学 全军危险性天气监测预警研究中心/气象海洋学院,南京 211101)

**摘要** 本文依照泛函形式并考虑了球面经纬网格的特点, 定义了用于全球数值模式效果检验的指标: 距离、距平相似度和倾向相似度, 给出了相应的计算方法, 并以全球 WRF 模式为例, 检验了该模式的中期预报效果。所得结论如下: 指标距离、距平相似度和倾向相似度物理意义明确, 易于理论分析, 考虑了球面经纬网格的特点, 检验准确度高, 具有普适性, 能方便应用于球面经纬网格输出的数值模式检验。指标距离、距平相似度的检验结果分别与传统检验指标均方根误差、距平相关系数相一致, 该指标还可直接用于向量场(如风场)的整体检验。本文的全球 WRF 模式所做的检验表明, 对本文个例, 该模式的全球 500 hPa 中期天气形势预报在第 7 d 及之内皆可用, 5 d 及之内预报效果更佳。

**关键词** 全球数值模式; 统计检验; 距离; 相似度

**分类号:** P456.7

**doi:** 10.3969/2017jms.0007

**文献标识码:** A

## Similarity and distance for verification of global numerical models

ZHU Juan<sup>1,2</sup> ZHANG Lifeng<sup>2</sup> ZHANG Ming<sup>2</sup>

(1 Base Construction Preparation Office of Special Office of Marine Environment, Beijing 100081, China;

2 Significant Weather Monitoring and Early Warning Research Center of the Whole Army/College of Meteorology  
and Oceanography,National University of Defense Technology,Nanjing 211101, China)

**Abstract** The new statistics for verification of global numerical models, distance, anomaly similarity and tendency similarity are introduced in functional way in this paper and takes the global characteristics into consideration. The effect of the three indexes for global numerical models is verified and the corresponding calculation method is given in the paper. The forecast results of global WRF model are taken as an example to evaluate its ability to predict weather system of medium-range. Results show as follows: the new statistics have explicit physical meanings, convenient for theoretical analysis and taking the characteristic of numerical model with spherical meridian grid into consideration. Thus, they have high accuracy and are universal. They can be easily used for verification of numerical models with output in spherical latitude and longitude grid. The calculation results of new statistics are compared with typical statistics (anomaly correlation coefficient and root-mean-square error, which are suggested by World Meteorological Organization). The calculations of new statistics are consistent with that of typical ones. The new statistics can also be used for the verification of vectors, like wind field. The calculation results of new statistics of global WRF show that the prediction of global geopotential height is usable in seven days and better in five days for the example in this article.

**Key words** Global numerical models; Statistical test; Distance; Similarity

收稿日期(Received):2016-10-23;修改稿日期(Revised):2017-02-14; 网络出版日期(Published on-line):2017-10-18

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20171018.1624.016.html>

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41375063)

通信作者(Corresponding author):张立凤(ZHANG Lifeng).zhanglf@yeah.net

## 引言

全球大气数值预报模式通常用于制作中期天气预报、延伸期环流预报和短期气候预测。由于预报时效较长,故对模式框架的守恒性、模式时间积分<sup>[1]</sup>的稳定性、差分格式<sup>[2]</sup>的精度要求较高。因此模式检验<sup>[3-4]</sup>是全球数值预报模式发展的重要环节,其检验的内容和方法是模式研究的一项重要工作。当前模式的检验除了对天气形势图、降水分布图等做出直观比较<sup>[5]</sup>外,更多的是引入各种指标采用统计方法进行定量评估<sup>[6-8]</sup>;后者因物理意义明确,客观性强,故在模式检验中不可缺少。对于中期预报效果的检验,最常见的是采用 WMO 推荐的均方根误差(Root-mean-square Error,  $E_{\text{RMS}}$ )和距平相关系数(Anomaly Correlation Coefficient, ACC)这两个指标<sup>[9-10]</sup>来实施。全球数值预报模式预报结果的输出通常采用球面经纬网格。这样做的好处是表现直观、使用方便。然而在球面经纬网格的剖分中,其单元网格面积有所不同,在低纬面积较大,高纬面积则较小,故单元网格的格点预报值及其预报误差的权重在球面上是随纬度而不同的(因格点的预报值和预报误差实际是该格点所处网格面积的平均值,而纬度不同的格点该网格面积是不同的);但这点在均方根误差和距平相关系数的计算公式中都未被考虑。此外以上的两个指标仅适用于标量场,对于向量场(如风场等)则不能方便的直接运用。为此本文从“流”(flow)的概念出发,采用泛函形式,在全球范围内定义了距离、距平相似度和倾向相似度这 3 个用于模式检验的指标<sup>[11-12]</sup>,给出了其在球面经纬网格上的计算公式;并以全球 WRF 模式为例,检验了该模式中期形势预报的效果,并与均方根误差和距平相关系数的检验结果做了对比。当前在气候研究领域中已广泛使用 EOF 分解方法<sup>[13]</sup>,在天气诊断领域中该方法也开始试用<sup>[14]</sup>。在检验球坐标输出的数值预报中,对预报结果的 EOF 各模态的预报误差分析,采用以上指标则更有其方便之处,详见后文。

## 1 球面上的泛函

一个空间点上的函数(物理量场,包括标量和向量,如位势高度场  $\Phi$ ,风场  $\mathbf{V}$  等)随时间  $t$  的变化,在数学上称为“流”(flow)<sup>[11-12]</sup>。在  $p$  坐标系下球面经纬网格上的函数可表示为  $F \equiv F(t, \varphi, \lambda, p)$ , 这里  $t$  为时间,  $\varphi$  为纬度,  $\lambda$  为经度,  $p$  为气压。在给定某

一时刻的某等压面上(以下均讨论此种情况),取全球面或部分球面并记为  $S$ , 则有  $(\lambda, \varphi) \in S$ 。在  $S$  上对两个空间点上的函数(物理量场)  $F_1 \equiv F_1(\varphi, \lambda)$  和  $F_2 \equiv F_2(\varphi, \lambda)$ , 可分别定义其内积和范数<sup>[11-12]</sup>为:

$$(F_1, F_2) = \frac{1}{S} \iint_S F_1 \cdot F_2 ds , \quad (1)$$

$$\| F \| = (F, F) \frac{1}{2} , \quad (2)$$

(2) 式中略去了下标 1 或 2。(1) 式中的  $ds$  为球面上的微面积元, 当采用经纬网格时有  $ds = a^2 \cos \varphi d\lambda d\varphi$ , 其中  $a$  为地球半径。 $F$  在球面  $S$  上的平均值为  $\iint_S F ds / S$ 。

## 2 距离及其计算

球面上两个函数(物理量场)  $F_1 \equiv F_1(\varphi, \lambda)$  和  $F_2 \equiv F_2(\varphi, \lambda)$  之差的范数可称为距离<sup>[11]</sup>:

$$E = \| F_1 - F_2 \| = ((F_1 - F_2), (F_1 - F_2))^{\frac{1}{2}} , \quad (3)$$

距离是一个泛函,其值反映了这两个物理量场之间的差异程度,距离越大,两者相差就越大,距离为 0, 则表示两者完全相同。这样距离就能用于数值模式的检验,以考察模式预报的物理量与实况物理量之间的相差程度,即两者在预报范围内绝对误差的大小。

对于球面经纬网格离散数据,若(3)式中  $F_1$  和  $F_2$  为标量,则距离的计算公式为:

$$E = \| F_1 - F_2 \| \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F_{1i,j} - F_{2i,j})^2 \cos \varphi_j}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \cos \varphi_j}} , \quad (4)$$

上式中:  $i, j$  分别为纬向、经向格点序列号,且有  $i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$ ; 而  $M, N$  则分别是纬向、经向所剖分的网格段数,  $\varphi_j$  是格点  $j$  处的纬度。

若(3)式中  $F_1$  和  $F_2$  为向量,如风场  $\mathbf{V}_1 = u_1 \mathbf{i} + v_1 \mathbf{j}$  和  $\mathbf{V}_2 = u_2 \mathbf{i} + v_2 \mathbf{j}$ , 这里  $\mathbf{i}, \mathbf{j}$  为球面上的单位向量,则此时距离的计算公式为:

$$E \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(u_{1i,j} - u_{2i,j})^2 + (v_{1i,j} - v_{2i,j})^2] \cos \varphi_j}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \cos \varphi_j}} . \quad (5)$$

### 3 相似度及其计算

#### 3.1 相似度的定义

设  $F_1 \equiv F_1(\varphi, \lambda)$  和  $F_2 \equiv F_2(\varphi, \lambda)$  是球面上的两个函数(物理量场),可定义这两者的相似度<sup>[12]</sup>:

$$R = \frac{(F_1, F_2)}{\|F_1\| \cdot \|F_2\|}, \quad (6)$$

相似度也是一个泛函,易知其值有  $-1 \leq R \leq 1$ ,当  $R=1$  时,物理量场  $F_1$  与  $F_2$  两者空间结构全同;当  $R=-1$  时,两者空间分布态势一样,但位相配置相反;当  $R=0$  时两者相互正交,即两者不相关。 $|R|$  越大表示这两个场相关程度越高,其空间场的分布态势也越接近。

#### 3.2 偏差相似度

任意物理量(气象要素场)都可表示为:其不随时间变化的基本场  $\bar{F}_0$ ,以及随时间变化的对基本场的偏差场(扰动场) $F'$ 这两部分之和;而对模式预报的检验而言,实际上只要检验随时间变化的偏差场的预报效果。这样对预报场  $F_1$  和实况场  $F_2$ ,就可计算其偏差场  $F'_1$  和  $F'_2$  的相似度,此即偏差相似度;其公式同(6)式,仅将该式中的  $F_1, F_2$  分别置换成  $F'_1, F'_2$ ,并以  $R'$  记之。这样就能扣除  $F_1$  和  $F_2$  两者的共同部分,即不随时间变化的部分  $\bar{F}_0$ ,从而提高了模式检验的准确度。

对基本场  $\bar{F}_0$ ,可先给出其已知的参考场  $F_0$ (如气候平均场或预报初始场等),不难证明(证明略):基本场  $\bar{F}_0$  与其参考场  $F_0$  两者在球面上的分布态势完全相同,两者仅相差一个不随时间变化的常数;而此时偏差场为:

$$F' = F - F_0 - \frac{1}{S} \iint_S (F - F_0) ds, \quad (7)$$

在此有  $\iint_S F' ds / S = 0$ ,且确有  $F = \bar{F}_0 + F'$ 。由(7)式可见,偏差场  $F'$  仅是  $F - F_0$  以及其在球面上积分的函数,换句话说, $F'$  仅由  $F - F_0$  来确定。

当参考场  $F_0$  分别取为气候平均场及预报初始场时,则  $F - F_0$  分别为  $F$  相对于该气候平均场的距平以及相对于以该预报初始场为基准的变化趋势,也即倾向;此时预报的  $F'_1$  与实况的  $F'_2$  的偏差相似度可分别称之为距平相似度和倾向相似度;这两者也都是泛函,两者的值分别反映了模式预报物理量的距平及倾向与相应实况的相似性;两者都能用于模式的检验。

#### 3.3 偏差相似度的计算

对于球面经纬网格离散数据,对于标量,参照(3)式,偏差相似度的计算公式为:

$$R' \approx \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F'_{1i,j} F'_{2i,j} \cos\varphi_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F'^2_{1i,j} \cos\varphi_j} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F'^2_{2i,j} \cos\varphi_j}}, \quad (8)$$

在此偏差场  $F'$  的计算公式参照(7)式则为:

$$F'_{i,j} = F_{i,j} - F_{0i,j} - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F_{i,j} - F_{0i,j}) \cos\varphi_j}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \cos\varphi_j}, \quad (9)$$

若偏差场  $F'_1$  和  $F'_2$  为向量,如风场  $V_1 = u_1 \mathbf{i} + v_1 \mathbf{j}$  和  $V_2 = u_2 \mathbf{i} + v_2 \mathbf{j}$ ,则偏差相似度的计算公式为

$$R' \approx \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (u'_{1i,j} u'_{2i,j} + v'_{1i,j} v'_{2i,j}) \cos\varphi_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (u'^2_{1i,j} + v'^2_{1i,j}) \cos\varphi_j} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (u'^2_{2i,j} + v'^2_{2i,j}) \cos\varphi_j}}, \quad (10)$$

偏差场  $V'_1$  的计算公式为:

$$V'_{1i,j} \approx \left[ (u_{1i,j} - u_{0i,j}) - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (u_{1i,j} - u_{0i,j}) \cos\varphi_j}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \cos\varphi_j} \right] i + \left[ (v_{1i,j} - v_{0i,j}) - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (v_{1i,j} - v_{0i,j}) \cos\varphi_j}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \cos\varphi_j} \right] j, \quad (11)$$

$V'_{2i,j}$  的表达式同上,仅需将下标 1 更改为 2。

## 4 上述指标在检验中的应用

本节首先给出上述指标在 EOF 分解中的表达,由此可见该指标在理论分析上的方便之处。然后基于全球 WRF 模式的中期天气预报结果,采用指标距离、距平相似度和倾向相似度来做检验,并与传统统计量即均方根误差和距平相关系数的结果来作比较。

全球 WRF 模式的动力框架与物理过程同区域 WRF 模式<sup>[15]</sup>,不再赘述。在此取该模式的纬向和经向格距为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,对全球而言,以上的  $M, N$  取值为:  $M=720, N=360$ ; 模式垂直分为 27 层,积分时间步长为 180 s; 微物理过程采用 WSM3 方案,长波辐射采用 RRTM 方案,短波辐射采用 Dudhia 方案,近地面层方案采用 Monin-Obukhov 方案,陆面过程采用热量扩散方案,积云参数化方案采用 Kain-Fritsch 方案。模式起报时间为 2010 年 7 月 17 日 00:00(世界时,下同),积分 10 d 至 26 d 12:00,在预报时段中包含了 22 日的南京暴雨过程<sup>[16]</sup>和 2010 年“灿都”台风的登陆过程<sup>[17]</sup>。模式初始场选取 NCEP 逐 6 h  $1^\circ \times 1^\circ$  的资料,检验模式的实况场采用 NCEP 逐 6 h 的  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的资料来代替,检验则对模式输出的 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场来实施。

### 4.1 EOF 分解中上述指标的表达

在固定  $p$  后设真实的物理量为  $F(x, t)$ , 数值预报的同一物理量为  $G(x, t)$ , 在此  $F(x, t)、G(x, t)$  都为偏差场,而  $x \in (\varphi, \lambda)$ 。现将  $F(x, t)$  进行 EOF 分解,有:

$$F(x, t) = f_1(t)\psi_1(x) + f_2(t)\psi_2(x) + \dots + f_j(t)\psi_j(x) + \dots, \quad (12)$$

在此  $\psi_1(x)、\psi_2(x)、\dots、\psi_j(x)、\dots$  为各模态的空间场,  $f_1(t)、f_2(t)、\dots、f_j(t)、\dots$  为各模态有关时间的展开系数即时间系数。由于  $\psi_1(x)、\psi_2(x)、\dots、\psi_j(x)、\dots$  具有正交归一性,构成基底,则  $G(x, t)$  也可按该基底展开。这样有:

$$G(x, t) = g_1(t)\psi_1(x) + g_2(t)\psi_2(x) + \dots + g_j(t)\psi_j(x) + \dots, \quad (13)$$

真实场  $F(x, t)$  与预报场  $G(x, t)$  两者之间的距离为:  $E = \|G - F\| = ((G - F)^2)^{\frac{1}{2}}$ , 其可反映预报场与真实场的绝对误差。将(11)、(12)式代入上述  $E$  的表达式中,在注意到  $\psi_j$  的正交归一性后可得:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (g_i - f_i)^2}, \quad (14)$$

由上式可见真实量  $F(x, t)$  与预报量  $G(x, t)$  之间的距离可方便地用两者的时间展开系数来表示。而(14)式正是这两个时间展开系数序列  $g_i$  与  $f_i$  之间的均方根误差。

真实场  $F(x, t)$  与预报场  $G(x, t)$  两者的偏差相似度为:  $R = (G, F) / (\|G\| \cdot \|F\|)$ , 其反映了该两场的相关程度。将(11)、(12)式代入此  $R$  的表达式中,同样注意到  $\psi_j$  的正交归一性后可得:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n g_i f_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n g_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2}}. \quad (15)$$

由上式可见真实量  $F(x, t)$  与预报量  $G(x, t)$  之间的偏差相似度也可方便地用两者的时间展开系数来表示。而(15)式正是这两个时间展开系数序列  $g_i$  与  $f_i$  之间的相关系数。

### 4.2 采用距离的检验

#### 4.2.1 距离对标量场的检验

对 WRF 模式所预报 1~9 d 的 500 hPa 高度场和相应的实况场,可采用距离来检验其绝对误差,结果见表 1。在全球范围内,两者的距离随预报时效的延长逐渐增加,前 3 d 增加较快,从第 4 d 开始,距离增加的速度稳定维持在 10 左右,但第 8 d 至第 9 d 增加速度又有所减慢。为考察该模式在不同纬度上预报场的绝对误差,现将全球该模式的输出结果分为 5 个纬圈带分别计算与实况的距离,这 5 个纬圈带是:南半球高纬( $90^\circ \sim 60^\circ S$ ),南半球中纬( $60^\circ \sim 20^\circ S$ ),热带地区( $20^\circ \sim 20^\circ N$ ),北半球中纬( $20^\circ \sim 60^\circ N$ ),北半球高纬( $60^\circ \sim 90^\circ N$ )。从计算结果来看(表 1),热带地区的距离要小于中高纬度地区的距离;北半球中高纬地区的距离均小于南半球中高纬地区的距离,南半球高纬的距离最大。

表 1 全球及不同纬圈范围 500 hPa 高度预报场与实况场的距离

Table 1 The distance of predicted and observed 500 hPa geopotential height in the whole world and different latitude circles

| 预报时效<br>/d | 全球<br>范围 | 北半球<br>高纬 | 北半球<br>中纬 | 热带<br>地区 | 南半球<br>中纬 | 南半球<br>高纬 |
|------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 1          | 12.161   | 12.004    | 8.694     | 8.901    | 14.236    | 62.418    |
| 2          | 24.288   | 28.910    | 14.637    | 11.539   | 25.573    | 62.418    |
| 3          | 38.430   | 43.407    | 21.778    | 14.180   | 43.135    | 100.038   |
| 4          | 46.460   | 65.206    | 30.613    | 15.097   | 51.148    | 113.646   |
| 5          | 56.105   | 73.830    | 36.927    | 13.701   | 66.532    | 133.938   |
| 6          | 66.051   | 77.215    | 45.070    | 16.142   | 92.462    | 128.332   |
| 7          | 75.814   | 90.867    | 53.462    | 17.819   | 114.334   | 116.749   |
| 8          | 86.762   | 124.301   | 61.473    | 16.456   | 124.758   | 141.048   |
| 9          | 89.162   | 120.759   | 59.768    | 13.789   | 134.735   | 134.781   |

为了与通常所用的均方根误差进行比较,表2给出了全球及不同纬圈范围模式预报的500 hPa高度场相对实况场的该均方根误差。从表2可见,在全球范围内,该均方根误差随预报时效延长逐渐增大,第7 d到第8 d均方根误差有一个突增过程。从不同纬圈范围来看,在预报的前7 d,南半球中高纬地区的均方根误差均比北半球中高纬地区要大,且两者均方根误差的差值随时间逐渐增大,而热带地区均方根误差相对较小。

表2 全球及不同纬圈范围 500 hPa 高度场的  
均方根误差

Table 2 The root-mean-square error of predicted and observed 500 hPa geopotential height in the whole world and different latitude circles

| 预报时效/<br>d | gpm      |           |           |          |           |           |
|------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
|            | 全球<br>范围 | 北半球<br>高纬 | 北半球<br>中纬 | 热带<br>地区 | 南半球<br>中纬 | 南半球<br>高纬 |
| 1          | 13.806   | 11.228    | 8.817     | 8.905    | 15.166    | 22.398    |
| 2          | 30.205   | 26.694    | 15.390    | 11.537   | 27.480    | 57.117    |
| 3          | 47.089   | 43.777    | 23.401    | 14.175   | 47.757    | 85.735    |
| 4          | 60.567   | 74.488    | 33.203    | 15.102   | 55.453    | 102.915   |
| 5          | 72.181   | 87.715    | 40.172    | 13.726   | 72.400    | 119.075   |
| 6          | 77.274   | 79.622    | 48.677    | 16.170   | 102.279   | 109.736   |
| 7          | 86.493   | 98.695    | 57.603    | 17.876   | 125.908   | 95.740    |
| 8          | 108.297  | 163.358   | 66.423    | 16.547   | 137.070   | 111.331   |
| 9          | 105.896  | 143.937   | 64.336    | 13.881   | 146.169   | 110.968   |

对比表1、2可见,对于同一预报时效,距离与均方根误差两者的差异在热带地区最小,均在0.1 gpm以内,中纬度地区次之,高纬度地区两者的差异最大,但该差异仍在30 gpm以内。这表明虽然球面效应造成了在高纬度两者略有差异,但二者的检验结果还是相当一致的。

#### 4.2.2 距离对向量场的检验

若检验场为向量场,如风场,则距离可按(5)式对其直接检验。这里以850 hPa风场为例,表3给出了其预报场与实况场两者的距离,由该表可见,距离也随着预报时效的延长而增加,在第4 d到第5 d,增加较快,以后又有所减慢,至第9 d,距离增至3.236 m·s<sup>-1</sup>。

#### 4.3 采用距平相似度的检验

##### 4.3.1 距平相似度对标量场的检验

表4给出了采用距平相似度对WRF模式500 hPa高度场预报结果的检验,参照WMO给出的500 hPa高度场距平相关系数≥0.6作为500 hPa中

表3 全球 850 hPa 风场预报场与实况场的距离

Table 3 The distance of predicted and observed 850 hPa wind vector in the whole world m·s<sup>-1</sup>

| 预报时效/d | 全球风场距离 |
|--------|--------|
| 1      | 1.964  |
| 2      | 2.247  |
| 3      | 2.504  |
| 4      | 2.680  |
| 5      | 2.942  |
| 6      | 3.055  |
| 7      | 3.163  |
| 8      | 3.238  |
| 9      | 3.236  |

表4 全球及不同纬圈范围 500 hPa 高度距平相似度

Table 4 The anomaly similarity of predicted and observed 500 hPa geopotential height in the whole world and different latitude circles

| 预报时效/<br>d | 全球<br>范围 | 北半球<br>高纬 | 北半球<br>中纬 | 热带<br>地区 | 南半球<br>中纬 | 南半球<br>高纬 |
|------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 1          | 0.989    | 0.994     | 0.984     | 0.903    | 0.992     | 0.982     |
| 2          | 0.953    | 0.971     | 0.959     | 0.793    | 0.971     | 0.892     |
| 3          | 0.895    | 0.934     | 0.911     | 0.663    | 0.918     | 0.654     |
| 4          | 0.852    | 0.819     | 0.839     | 0.664    | 0.868     | 0.463     |
| 5          | 0.770    | 0.748     | 0.769     | 0.752    | 0.714     | 0.320     |
| 6          | 0.685    | 0.717     | 0.670     | 0.640    | 0.386     | 0.406     |
| 7          | 0.613    | 0.621     | 0.565     | 0.489    | 0.098     | 0.523     |
| 8          | 0.488    | 0.398     | 0.397     | 0.538    | 0.071     | 0.293     |
| 9          | 0.450    | 0.616     | 0.309     | 0.655    | 0.109     | 0.310     |

期天气形势预报可用的指标,在此也取相似度≥0.6作为可用指标。由表4可见:在全球范围,模式对500 hPa形势预报的距平相似度在预报前7 d均大于0.6,预报前5 d大于0.77,预报前4 d大于0.85,这也说明此时全球WRF模式可用的预报时效为7 d。

为了考察全球WRF模式在不同纬度带的预报能力,按照与同表1一样的纬度划分,计算了不同纬圈带内的距平相似度。结果表明(表4),此时除南半球高纬外,500 hPa形势预报至第5 d的距平相似度均在0.7以上,预报效果好;热带和北半球中纬地区可用预报时效可至第6 d,北半球高纬地区,可至第7 d,但南半球高纬的预报仅能用到第3 d,这与表1中北半球中高纬地区的距离小于南半球中高纬地

区的距离相一致。

为了与通常所用的距平相关系数的检验结果做比较,表5给出了全球及不同纬圈500 hPa高度场的距平相关系数。从表5中可见,无论在全球范围还是不同纬圈范围,500 hPa高度场距平相关系数预报可用的时效,都与距平相似度相同,都是全球和北半球高纬度达7 d,热带和北半球中纬度达6 d,南半球中纬度达5 d,南半球高纬度达3 d。

表5 全球及不同纬圈范围 500 hPa 高度场的距平相关系数

Table 5 The anomaly correlation coefficient of predicted and observed 500 hPa geopotential height in the whole world and different latitude circles

| 预报时效<br>/d | 全球<br>范围 | 北半球<br>高纬 | 北半球<br>中纬 | 热带<br>地区 | 南半球<br>中纬 | 南半球<br>高纬 |
|------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 1          | 0.991    | 0.992     | 0.986     | 0.903    | 0.991     | 0.983     |
| 2          | 0.951    | 0.969     | 0.962     | 0.794    | 0.970     | 0.902     |
| 3          | 0.891    | 0.909     | 0.913     | 0.665    | 0.909     | 0.709     |
| 4          | 0.830    | 0.726     | 0.835     | 0.664    | 0.855     | 0.499     |
| 5          | 0.754    | 0.638     | 0.761     | 0.751    | 0.681     | 0.411     |
| 6          | 0.717    | 0.698     | 0.673     | 0.640    | 0.310     | 0.455     |
| 7          | 0.675    | 0.622     | 0.570     | 0.489    | 0.034     | 0.568     |
| 8          | 0.526    | 0.399     | 0.395     | 0.536    | 0.031     | 0.358     |
| 9          | 0.553    | 0.684     | 0.301     | 0.653    | 0.091     | 0.356     |

对比表4、5可见,对于同一预报时效,距平相似度和距平相关系数两者的检验结果相当一致,两者的差异在热带地区最小,中纬度地区次之,高纬度地区最大;在全球范围内,两者在预报的第7 d均大于0.6,说明全球WRF模式对本次天气过程在全球范围所做的中期天气形势预报,在7 d之内均可用。

#### 4.3.2 距平相似度对向量场的检验

同样,若检验场为向量场,如风场,则距平相似度可按(10)式直接对其检验。同样以850 hPa风场为例,表6给出了WRF模式预报全球及不同纬圈带850 hPa风场能力的检验结果,由该表可见,850 hPa风场的距平相似度要小于相应500 hPa高度场的距平相似度,这说明WRF模式预报850 hPa风场的能力要比同期的500 hPa高度场差。因已有的对数值模式预报效果的检验多针对高度场,故对风场检验没有明确的标准。若仍以0.6作为可用标准。在全球范围内,对风场预报的可用时效为4 d。从不同纬圈范围来看,南北半球高纬可用天数还要少1 d,仅有3 d。

表6 全球及不同纬圈范围 850 hPa 风场距平相似度

Table 6 The anomaly similarity of predicted and observed 850 hPa wind vector in the whole world and different latitude circles

| 预报时效<br>/d | 全球<br>范围 | 北半球<br>高纬 | 北半球<br>中纬 | 热带<br>地区 | 南半球<br>中纬 | 南半球<br>高纬 |
|------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 1          | 0.884    | 0.919     | 0.872     | 0.796    | 0.923     | 0.873     |
| 2          | 0.808    | 0.815     | 0.779     | 0.670    | 0.882     | 0.752     |
| 3          | 0.727    | 0.639     | 0.670     | 0.615    | 0.810     | 0.593     |
| 4          | 0.626    | 0.329     | 0.572     | 0.582    | 0.714     | 0.359     |
| 5          | 0.449    | 0.226     | 0.453     | 0.531    | 0.472     | 0.173     |
| 6          | 0.371    | 0.312     | 0.343     | 0.505    | 0.348     | 0.125     |
| 7          | 0.280    | 0.275     | 0.271     | 0.468    | 0.215     | 0.020     |
| 8          | 0.205    | 0.049     | 0.179     | 0.443    | 0.169     | 0.094     |
| 9          | 0.214    | 0.235     | 0.144     | 0.446    | 0.150     | 0.034     |

#### 4.4 倾向相似度的检验

表7给出了采用倾向相似度对全球WRF模式500 hPa高度场的检验结果。若仍然用倾向相似度>0.6作为中期天气形势预报可用的指标,则从表7中可见,在全球范围,倾向相似度在7 d以内均大于0.6,这与以上全球距平相似度的结果相一致。从全球不同纬圈带看,除热带地区可用预报为5 d外,两半球的中、高纬地区可用预报也均达到7 d。倾向相似度大于0.6则表明,此时模式预报的变化趋势与相应实况的变化趋势两者的一致性超过了60%。

表7 全球及不同纬度范围 500 hPa 高度场的倾向相似度

Table 7 The tendency similarity of predicted and observed 500 hPa geopotential height in the whole world and different latitude circles

| 预报时效<br>/d | 全球<br>范围 | 北半球<br>高纬 | 北半球<br>中纬 | 热带<br>地区 | 南半球<br>中纬 | 南半球<br>高纬 |
|------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| 1          | 0.983    | 0.976     | 0.969     | 0.848    | 0.990     | 0.982     |
| 2          | 0.963    | 0.959     | 0.957     | 0.812    | 0.985     | 0.915     |
| 3          | 0.963    | 0.942     | 0.931     | 0.752    | 0.965     | 0.776     |
| 4          | 0.890    | 0.847     | 0.898     | 0.739    | 0.948     | 0.626     |
| 5          | 0.841    | 0.793     | 0.875     | 0.733    | 0.908     | 0.613     |
| 6          | 0.780    | 0.842     | 0.821     | 0.569    | 0.810     | 0.621     |
| 7          | 0.667    | 0.779     | 0.758     | 0.465    | 0.612     | 0.627     |
| 8          | 0.532    | 0.462     | 0.670     | 0.471    | 0.612     | 0.474     |
| 9          | 0.567    | 0.621     | 0.679     | 0.485    | 0.563     | 0.520     |

## 5 结论

(1) 将上述指标与通常用于预报效果检验的均

方根误差和距平相关系数做比较后可见:两者既有相似也有区别。相似主要表现在,距离与均方根误差的数值相近,相似度与距平相关系数也是如此,两者的检验结果具有一致性。差异主要表现在,距离和距平相似度考虑了全球经纬网格剖分中单元网格面积随纬度的变化。经纬网格各格点上的权重不同,此权重为纬度的余弦( $\cos\varphi$ );而均方根误差和距平相关系数的计算中则对格点权重做了等权处理,显然这是一个近似,这也是两者数值在低纬差异非常小而在高纬略有差异的原因。

(2)风场是模式预报的重要物理量,对中高纬天气尺度系统,准地转近似成立,仅对高度场的预报结果进行检验即可;然而对热带地区或中尺度系统,因不存在准地转约束,特别是在低纬地区,气压场水平梯度微弱,必须分析风场。由此可见,风场的整体检验对热带地区和中尺度系统尤为必要。而距离和距平相似度则能从整体上对风场(包括其他向量场)的预报效果实施检验。距离和距平相似度及其计算公式适用于经纬网格输出数值模式的检验,当前几乎所有的模式(包括全球谱模式)都采用经纬网格输出;故采用泛函形式的距离和距平相似度对数值模式的检验具有通用性。

(3)本文依照数学中的泛函形式并考虑了球面经纬网格的特点,定义了用于全球数值模式效果检验的指标:距离、距平相似度和倾向相似度,用其对全球数值模式的效果做了检验,给出了相应的计算方法;还以全球WRF模式为例,检验了该模式的中期预报效果。本文得到以下结论:上述指标距离、距平相似度和倾向相似度物理意义明确,易于理论分析,考虑了球面经纬网格的特点,检验准确度高,具有普适性,能方便用于球面经纬网格输出的数值模式检验;其检验结果分别与传统检验指标均方根误差、距平相关系数相一致,该指标还可直接用于向量场(如风场)的整体检验。

(4)最后要指出的是,本文仅对一个预报10 d的个例考察了上述指标的检验性能和全球WRF模式的中期天气形势预报能力,这是不够的;今后将用更多模式和个例来考察该性能和能力。

## 参 考 文 献

- [1] Bathe K J. Conserving energy and momentum in nonlinear dynamics: A simple implicit time integration scheme. *Comput. Struct.*, 2007, 85(7-8): 437-445.
- [2] QIU Jingmei, SHU Chiwang. Conservative high order semi-Lagrangian finite difference WENO methods for advection in incompressible flow. *J. Comput. Phys.*, 2011, 230(4): 863-889.
- [3] Colette A, Granier C, Hodnebrog Ø, et al. Air quality trends in Europe over the past decade: A first multi-model assessment. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11(22): 11657-11678.
- [4] WANG Xuguang, Barker D M, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 2008, 136(12): 5116-5131.
- [5] 王皓, 郑志海, 于海鹏, 等. 国家气候中心大气环流模式冬季模式误差特征分析. *物理学报*, 2014, 63(9): 099202. WANG Hao, ZHENG Zhihai, YU Haipeng, et al. Characteristics of forecast errors in the National Climate Center atmospheric general circulation model in winter. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2014, 63(9): 099202.
- [6] HU Xiaoming, Nielsen-Gammon J W, ZHANG Fuqing. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2010, 49(9): 1831-1844.
- [7] Appel K W, Gilliam R C, Davis N, et al. Overview of the atmospheric model evaluation tool (AMET) v1.1 for evaluating meteorological and air quality models. *Environ. Modell. Softw.*, 2011, 26(4): 434-443.
- [8] 杨秋明. 2013年长江下游降水低频分量延伸期预报的扩展复数自回归模型. *物理学报*, 2014, 63(19): 199202. YANG Qiuming. Extended complex autoregressive model of low-frequency rainfalls over the lower reaches of Yangtze river valley for extended range forecast in 2013. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2014, 63(19): 199202.
- [9] WMO. Guidelines on performance assessment of public weather services. WMO/TD-No. 1023. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2000.
- [10] 苏海晶, 王启光, 杨杰, 等. 基于奇异值分解对中国夏季降水模式误差订正的研究. *物理学报*, 2013, 62(10): 109202. SU Haijing, WANG Qiguang, YANG Jie, et al. Error correction on summer model precipitation of China based on the singular value decomposition. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2013, 62(10): 109202.
- [11] 《数学手册》编写组. 数学手册. 北京: 高等教育出版社, 1979: 497-499. Writing Group of Mathematical Handbook. Mathematical handbook. Beijing: Higher Education Press (in Chinese), 1979: 497-499.
- [12] 曾庆存, 张东凌, 张铭, 等. 大气环流的季节突变与季风的建立: I. 基本理论方法和气候场分析. *气候与环境研究*, 2005, 10(3): 285-302. ZENG Qingcun, ZHANG Dongling, ZHANG Ming, et al. The abrupt seasonal transitions in the atmospheric general circulation and the onset of monsoons: Part I: Basic theoretical method and its application to the analysis of climatological mean observations. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10(3): 285-302.
- [13] 向喆. 三种对流参数化方案对东亚夏季风的模拟及敏感性分析[硕士论文]. 南京: 解放军理工大学, 2016. XIANG Zhe. Simulation and sensitivity analysis of three convection

- parameterization schemes on summer monsoon in East Asia [ D ]. Nanjing: PLA University of Science and Technology ( in Chinese ), 2016.
- [ 14 ] 于杰, 张继权, 张铭. EOF 分析用于  $\beta$  中尺度暴雨系统的探索. 大气科学, 2014, 38(4) : 795-803.  
YU Jie, ZHANG Jiquan, ZHANG Ming. Study on meso- $\beta$  scale torrential rain with EOF. Chinese Journal of Atmospheric Sciences ( in Chinese ), 2014, 38(4) : 795-803.
- [ 15 ] 邓莲堂. 新一代中尺度天气预报模式——WRF 模式简介//新世纪气象科技创新与大气科学发展——中国气象学会 2003 年年会“城市气象与科技奥运”分会论文集. 北京: 中国气象学会, 2003.  
DENG Liantang. Introduction for a new generation of weather forecasting model of mesoscale-WRF // Proceedings of Subcommittee “Urban Meteorology and Technology Olympics” in 2003 Annual Conference of Chinese Meteorological Society ( in Chinese ). Beijing: Chinese Meteorological Society, 2003.
- [ 16 ] 朱娟, 张立凤, 张铭. 一次对流性强降水过程的分析及诊断. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2016, 17(3) : 270-277.  
ZHU Juan, ZHANG Lifeng, ZHANG Ming. Analysis and diagnosis of convective rainstorm. Journal of PLA University of Science and Technology ( Natural Science Edition ) ( in Chinese ), 2016, 17 (3) : 270-277.
- [ 17 ] 周泓, 金少华, 尤红. 台风“灿都”造成云南强降水过程的水汽螺旋度诊断分析. 气象科学, 2012, 32(3) : 339-346.  
ZHOU Hong, JIN Shaohua, YOU Hong. Diagnostic analysis of moisture helicity for the heavy rainfall processes in Yunnan caused by Typhoon “Chanthu”. Journal of the Meteorological Sciences ( in Chinese ), 2012, 32(3) : 339-346.