

# 光流法对2011年“梅花”台风期间500hPa高度场预报的检验释用

朱智慧 黄宁立 浦佳伟  
(上海海洋气象台, 上海 201306)

**摘要:** 利用光流技术, 对2011年台风“梅花”期间ECMWF(简称EC)和T639两个数值天气预报模式的500hPa高度场预报进行了检验和释用。结果发现, EC的24、48和72h预报具有稳定的误差。EC的24h预报强度误差比观测低2~9gpm, 角度误差在180°和240°之间(极坐标系), 也就是西到西南向; EC的48h预报强度误差比观测低8~18gpm, 角度误差同样在180°和240°之间。EC的72h预报强度误差比观测低-25~26gpm, 角度误差在170°和290°之间。作为比较, T639的预报强度和预报角度误差则没有那么稳定。对预报位移误差而言, EC和T639的预报误差都比较稳定。利用基于光流技术的数值预报释用方法, 将24h的预报误差用来订正48h的预报, 结果表明, 订正预报场比预报场本身更近似于观测场。

**关键词:** 光流技术, 台风“梅花”, 检验释用, 位势高度

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.007

## Verification and Application for 500hPa Height Forecasts During the Period of Typhoon MUIFA(1109) Using the Optical Flow Technique

Zhu Zhihui, Huang Ningli, Pu Jiawei  
(Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201306)

**Abstract:** Using the optical flow technique, 500hPa height forecasts of two numerical weather prediction (NWP) models ECMWF (EC for short) and T639 during the period of Typhoon MUIFA(1109) are verified and interpreted. The results show that EC has stable errors in 24h, 48h and 72h forecasts. Its 24h forecast intensities are 2-9gpm lower than observations, and angular errors are between 180° and 240°, which are between west and southwest. Its 48h forecast intensities are 8-18gpm lower than observations, and angular errors are also between 180° and 240°. Its 72h forecast intensities are mainly -25 to 26gpm lower than observations, and angular errors are mainly between 170° and 290°. By contrast, the intensity and angular errors of T639 are not so stable. As for displacement errors, the performances of EC and T639 are both stable. The similar disparities between observation fields and 24h, 48h and 72h forecast fields of the two models also show that EC has better forecasting performances than T639. Finally, an application technique is used to correct the 48h forecast fields according to the 24h forecasts errors. The results show that when the distortion errors of 24h forecasts obtained from the optical flow field are used to correct the 48h forecasts, the correction fields are more similar to the observation fields than the forecast fields themselves.

**Keywords:** optical flow technique, MUIFA, verification and application, geopotential height

### 1 引言

光流是计算机视觉领域中的重要概念, 最早由生物学家Gibson于1950年提出, 在图像处理领域, 光流技术已经被很好地研究<sup>[1-6]</sup>。在空间中, 运动用运动场描述, 二维平面上的一张图像, 由三维空间投影而来,

上面的每一个点都有相应的强度值, 而物体的运动则是通过图像序列中强度的变化来描述的, 空间中的运动场转移到图像上就表现为光流场。光流的研究就是利用图像序列中的像素强度数据的时域变化和相关性来确定各自像素位置的“运动”, 即研究图像灰度在时间上的变化与景象中物体结构及其运动的关系, 它是一种二维瞬时速度场, 携带了大量的三维运动信息和几何结构信息。通过对光流场进行分析, 可以实现对目标的检测和跟踪。目前, 光流场除了应用于图像分割、目标识别和追踪、运动估计等传统的计算机视

收稿日期: 2013年4月16日; 修回日期: 2013年7月29日  
第一作者: 朱智慧(1984—), Email: zzh830830@163.com  
资助信息: 上海市气象局面上项目(MS201211); 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2013-023)

觉领域外，还被应用于军事、医学、交通、天文等多个领域。

在气象领域，韩雷等<sup>[7]</sup>将光流法应用于强对流天气临近预报，结果表明对变化较快的强对流降水天气过程，光流法具有明显的预报优势。数值天气预报模式产生的预报要素空间场在某一层上是二维的格点场，站点观测数据通过插值也可以处理为二维的格点场，因此，应用于图像处理领域的光流技术同样可以用来进行数值模式检验。通过求解预报场和观测场之间的映射函数，可以得到反映两个场吻合程度的光流场，光流场提供了数值模式预报误差方面非常有用的信息<sup>[8]</sup>。Marzban等<sup>[9]</sup>利用光流技术检验了华盛顿中尺度集合预报系统的海平面气压预报，结果表明，通过将光流场分解为强度误差、角度误差和位移误差3种，可以很好地评估模式的预报偏差，另外，利用光流技术检验此中尺度集合预报系统418d长时间序列的海平面气压24h预报，可以定量评估模式的预报性能，研究表明，此中尺度模式在亚热带地区有明显的强度偏差，特别是在南加州地区，研究还发现陆地上一个50km的系统性偏差，这可能是由粗分辨率模式的地形处理造成的。

在2011年第9号超强台风“梅花”的路径预报中，全球各大机构的数值模式都出现了较大的偏差，例如中央气象台先后预报“梅花”将在上海到江苏沿海一带、山东半岛东部沿海及辽东半岛南部沿海登陆，但“梅花”3次都是与中国大陆擦肩而过，在相距80~200km的近海北上。由于数值模式的初始场、参数化等因素的影响，目前数值模式结果还存在一定的偏差和不足。如果一个模式的预报误差相对比较稳定，那么它的预报结果就有较高的参考价值，有效分析和利用这些误差也是提高预报能力的一个重要手段。因此，本文利用光流技术分析了“梅花”期间EC和T639的预报误差，并利用这些误差进行了数值预报的释用，在一定程度上改进了预报结果。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料

本文所使用的资料为：

(1) 中国气象局MICAPS系统下发的EC和T639的500hPa位势高度24，48和72h预报场和对应时次的分析场，时间为2011年8月1日20时至8月8日20时。其中EC资料空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬距，T639资料为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬距。

(2) 中央气象台“梅花”定位报文资料，时间为2011年8月1日20时至8月8日20时。

### 2.2 LK方法计算光流场

光流场的计算方法主要有Horn-Schunck方法<sup>[10]</sup>和LK方法<sup>[11]</sup>。本文使用了LK方法。

考虑一个图像上的像素点 $(x, y)$ ，在 $t$ 时刻的强度为 $I(x, y)$ ，经过一段时间 $dt$ ，该点在图像平面上的位置移动到了 $(x+dx, y+dy, t+dt)$ 。假定它的强度总是不变的，则：

$$I(x, y, t) \approx I(x+dx, y+dy, t+dt) \quad (1)$$

对数值模式检验而言，用 $I_0$ 和 $I_f$ 代表同一时次( $dt=0$ )的气象要素 $I$ 的观测场和预报场，则方程变为：

$$I_0(x, y) \approx I_f(x+dx, y+dy) \quad (2)$$

当场强不假设为常数时，Marzban等<sup>[9]</sup>将LK方程改进为：

$$I_0(x, y) \approx I_f(x+dx, y+dy) + A(x, y) \quad (3)$$

其中， $A(x, y)$ 代表预报场相对观测场的强度误差。将上式进行泰勒展开：

$$I_0(x, y) \approx A(x, y) + I_f(x, y) + \frac{\partial I_f}{\partial x} dx + \frac{\partial I_f}{\partial y} dy + \frac{\partial^2 I_f}{\partial x^2} dx^2 + \frac{\partial^2 I_f}{\partial y^2} dy^2 + \frac{\partial^2 I_f}{\partial x \partial y} dx dy + \dots \quad (4)$$

省略其中二阶及以上的偏导数项，则方程变为：

$$I_0(x, y) \approx A(x, y) + I_f(x, y) + \frac{\partial I_f}{\partial x} dx + \frac{\partial I_f}{\partial y} dy \quad (5)$$

令 $u=dx, v=dy$ ，则上式可写为：

$$I_x u + I_y v + A = dI \quad (6)$$

即：

$$\begin{bmatrix} I_x & I_y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ A \end{bmatrix} = dI \quad (7)$$

其中， $I_x$ 和 $I_y$ 分别代表 $I_f$ 在 $x$ 和 $y$ 方向的梯度， $dI=I_0-I_f$ 代表观测场与预报场的差值。需要求解的参数为 $u, v, A$ 。 $(u, v)$ 称为光流，每个格点上 $(u, v)$ 所构成的矢量场就是光流场。

假设在一个有 $n$ 个点的小窗口内光流是一致的，则：

$$\begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} & 1 \\ I_{x2} & I_{y2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dI_1 \\ dI_2 \\ \vdots \\ dI_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{令 } M = \begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} & 1 \\ I_{x2} & I_{y2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} dI_1 \\ dI_2 \\ \vdots \\ dI_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

则 
$$MU=b \tag{10}$$

$$U = (M^T M)^{-1} M^T b \tag{11}$$

$U$ 即为需要求解的 $u, v, A$ 所组成的向量。将 $u, v$ 转化为极坐标系表示:

$$\begin{aligned} u &= r \cos \theta \\ v &= r \sin \theta \end{aligned} \tag{12}$$

其中的极径 $r$ 和角度 $\theta$ 就分别代表位移误差和角度误差。这样,对某一气象要素 $I$ ,利用光流法就求得了数值模式预报场相对于观测场的3种误差场:强度误差场、位移误差场和角度误差场。

数值预报不可避免的存在预报误差,通过光流技术的检验,可将预报误差分解为强度误差、位移误差和角度误差3种误差并进行量化,如果24h的预报误差被用来订正48h的预报,将对48h的预报起到一定的订正作用,因此本文提出了一种利用光流检验技术进行预报订正的释用方法:

$$I'_{48}(x, y) = A_{24}(x, y) + I_{f48}(x, y) + \frac{\partial I_{f24}}{\partial x} dx_{24} + \frac{\partial I_{f24}}{\partial y} dy_{24} \tag{13}$$

式中,  $I'_{48}(x, y)$ 代表48h预报场的订正场,  $A_{24}(x, y)$ 代表24h预报场的强度误差,  $I_{f48}(x, y)$ 代表48h预报场,  $dx_{24}, dy_{24}$ 分别代表24h预报在 $x, y$ 方向的位移误差。

### 2.3 相似高度计算方法

相似高度<sup>[12]</sup>综合考虑了形相似和值相似,是比较两个样本相似程度的比较有效的方法,因此可以用来检验数值模式预报场和实况观测场的相似程度。其计算方法如下:

$$C_{ij} = \frac{1}{2}(S_{ij} + D_{ij}) \tag{14}$$

其中,

$$S_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |X_{ijk} - E_{ij}|$$

$$D_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |X_{ijk}|$$

$$X_{ijk} = X_{ik} - X_{jk}$$

$$E_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M X_{ijk}$$

式中,  $i, j$ 分别为两个样本序号,  $X$ 表示因子数值,  $M$ 为样本个数,  $C_{ij}$ 越小,表示 $i, j$ 两个样本越相似。

### 3 光流法应用示例

作为应用光流法进行数值预报检验的示例,本文首先利用圆的方程(式15)进行模拟,构造了两个 $201 \times 101$ 格点数的二维空间场。

$$I_{o(i,j)} = x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2, \tag{15}$$

$$I_{f(i,j)} = (x_{i,j} + a)^2 + (y_{i,j} + b)^2 \tag{16}$$

其中,  $x \in [-20, 20], y \in [-10, 10], a = 2 + (i-1) \times 0.02,$

$b = 2 + (j-1) \times 0.01$ 。 $I_o$ 代表观测场,  $I_f$ 代表预报场,由于 $x \in [-20, 20], y \in [-10, 10]$ ,在强度误差方面,越靠近 $x$ 和 $y$ 数值集合的两端,  $I_f$ 相对于 $I_o$ 的误差越大。 $I_o$ 和 $I_f$ 结构相似,只是 $I_f$ 相对 $I_o$ 发生偏移,并且偏移的距离随 $i, j$ 的增大逐渐增大。对偏移角度而言,因为在 $x$ 和 $y$ 方向的偏移距离分别为 $a$ 和 $b$ ,偏移的角度可以用下式求得:

$$\theta = k\pi + \arctg \frac{b}{a} \quad (k = 0, 1, 2) \tag{17}$$

其中,  $a \in [2, 6], b \in [2, 3]$ ,因此 $\frac{b}{a} \in [\frac{1}{3}, \frac{3}{2}]$ ,  $I_f$ 相对于 $I_o$ 都是向左下方偏移,这样偏移角度 $\theta \in [180 + \arctg(\frac{1}{3}), 180 + \arctg(\frac{3}{2})]$ ,数值在200~270之间。

图1是观测场(蓝色曲线)和预报场(红色曲线)的模拟结果,分别给出了观测场和预报场之间的光流检验场(箭头场)以及利用光流法计算的强度、位移和角度3种误差场,同时也给出了这3种误差场的误差统计直方图。从图1a可以看到,利用光流技术很好地表现了预报场相对于观测场的预报误差。从图1b和1e看到,正如所预期的那样,强度误差在整个场的中部较小,而在其他部分则逐渐增大,误差统计显示所有强度误差均为正偏差(即预报比观测偏强),并且数值主要分布在20~50之间。从图1c和1f看到,位移误差随着 $i, j$ 的增加在逐步增大,最大的值出现在场的右上部,误差统计显示预报场相对于观测场,偏移数值主要分布在2~8之间。图1d和1g也准确表现了预报场相对于观测场的偏移方向,数值在200~270之间,即偏向西南向。

### 4 EC和T639模式一次24h预报的光流检验对比分析

利用2.2节介绍的光流场计算方法,将EC和T639模式的500hPa位势高度预报场和对应时次的观测场代入公式中,就可以求得某一时次数值预报的光流检验场、强度误差场、位移误差场和角度误差场。从图2和图3中可以看到,对8月3日20时的预报而言,在强度误差方面,EC对台风“梅花”的强度预报略偏强,对西太平洋副热带高压和西风槽的预报则略偏弱,T639对台风“梅花”和西风槽的预报都偏强,对西太平洋副热带高压的预报同样偏弱。在位移误差方面,EC对台风“梅花”的预报位移误差为0.5~1个经纬距,对西太平洋副热带高压和西风槽的预报位移误差比较小,在0.5个经纬距左右,而T639对台风“梅花”的预报位移误差在1个经纬度左右,对西太平洋副热带高压和西风槽的预报则存在比较大的误差,基本在1~2个经纬距。在角度预报误差方面,EC对台风“梅花”的预报偏西,对西太平洋副热带高压的预报以偏西到西南为主,对西风槽的预报以偏西为主,T639

对台风“梅花”的预报误差也主要是偏西，对西太平洋副热带高压的预报则主要是偏西，对西风槽的预报在槽前主要是偏西南，而在槽附近及槽后则主要是偏北。从强度、位移、角度3个预报误差场的误差统计直方图可以看到，EC的强度误差值（单位：dagpm）主要集中在 $-0.5\sim 0.5$ 之间，范围较小，而T639的强度误差集中在 $-2\sim 2$ 之间，范围较大。EC的位移误差值主要集中在 $0\sim 2$ 之间，且以 $0\sim 1$ 之间的值居多；T639的位移误差集中在 $0\sim 3$ 之间，同样以 $0\sim 1$ 之间的值居多。EC的角度误差值以 $150^\circ\sim 240^\circ$ 之间的值居多，即预报偏西到西南向；T639的角度误差主要分布在 $150^\circ\sim 270^\circ$ 以及 $0^\circ\sim 30^\circ$ 和 $330^\circ\sim 360^\circ$ 之间，即角度误差以偏西到西南向和偏北为主。

## 5 “梅花”影响期间EC和T639模式预报光流检验对比分析

取台风中心附近4个格点的平均误差代表数值模

式对台风区域的预报误差，分别计算了EC和T639模式的24, 48和72h预报强度误差、位移误差和角度误差（表1）。

从表1a看到EC的24, 48和72h预报具有稳定的强度误差，它的24h预报强度误差比观测低 $2\sim 9$ gpm，48h预报强度误差比观测低 $8\sim 18$ gpm，72h预报强度误差比观测低 $-25\sim 26$ gpm，随着预报时效的增加，误差也相应的在增大。作为比较，T639的强度误差表现不稳定，24h, 48h和72h预报强度误差分别为 $-6\sim 29$ ， $-45\sim 46$ ， $-86\sim 4$ gpm，变化都较大。从标准差也可以看出，EC的预报强度误差稳定性更好。

从表1b中可以看到，对预报位移误差而言，EC和T639的24h预报表现都比较稳定，EC为 $0.2\sim 1.1$ 个经纬距，T639为 $0.2\sim 1$ 个经纬距。EC的48h和72h预报位移误差也比较稳定，基本在 $1\sim 2$ 个经纬距。T639的48h和72h预报位移偏差相对对应时次的EC预报表现要

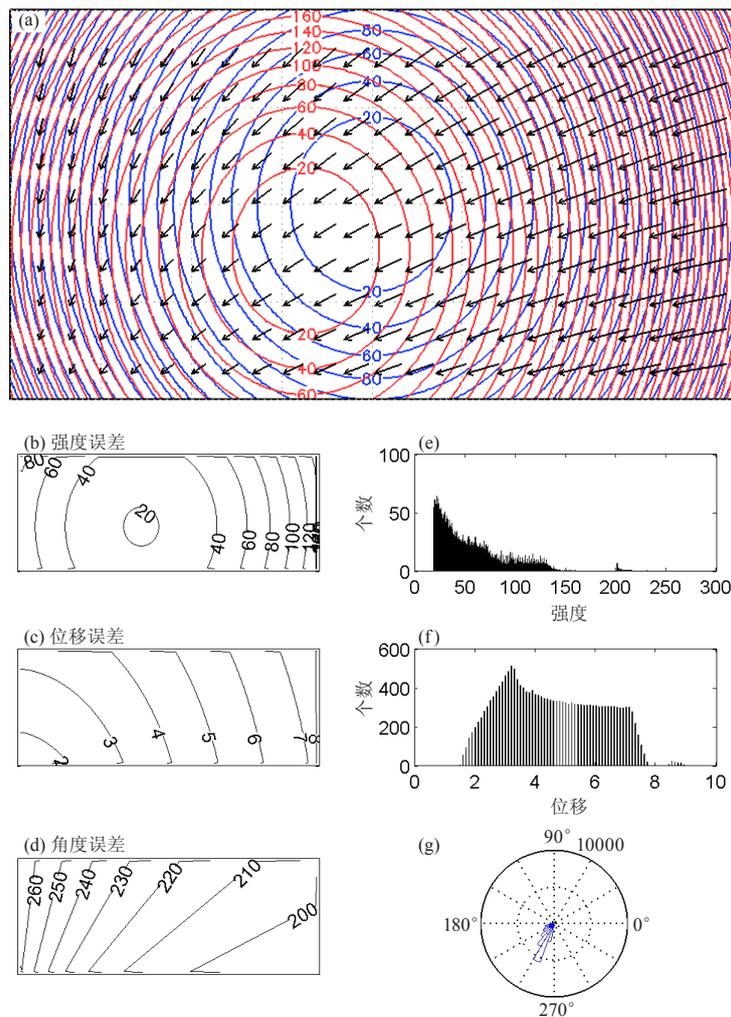


图1 模拟场的光流检验场以及3种误差场。(a)为光流场(蓝色代表观测场,红色代表预报场), (b)、(c)、(d)为3种误差场的空间分布, (e)、(f)、(g)为3种误差场的统计直方图

更好一些，但误差在0.4~1.7以及0.6~2.5个经纬距之间，变化较大。

从表1c可看到EC的24h预报角度误差在180°~240°之间，48h预报角度误差同样在180°~240°之间，72h预报角度误差在170°~290°之间，也就是说，EC的24、48和72h预报角度误差主要是偏向西到西南向。在预报角度误差方面，T639同样表现不稳定，其24h预报角度误差在1—2日主要偏向西北到北，在3—8日则主要偏向西南；48h预报角度误差在1—5日主要偏向西北到偏北方向，而在6—7日则主要偏向西南，8日偏向西北；72h预报角度误差在1—8日主要偏向西北到偏北方向。从标准差也可以看出，EC的预报角度误差稳定性更好。

### 6 光流法订正释用结果分析

计算1—8日EC和T639模式的24、48和72h 500hPa

预报场与分析场的相似离度（表2）。可以看到，EC和T639的24h预报与实况的相似度最好，两个模式24、48和72h预报尽管存在误差，但相似离度变化不大，也就是说，两个模式对整个高度场的预报都比较稳定。另外，EC的24、48和72h预报都要比T639表现更好。

从前面的分析来看，模式的预报往往具有一些相对稳定的误差，如果将模式的24h预报误差用来订正48h预报，将能够使模式预报结果更接近实况。利用前面介绍的订正方法，计算了48h预报场和订正后的48h预报场与分析场的相似离度（图4）。可以看到，对EC和T639两个模式，在2—8日，订正后的48h预报场与分析场的相似离度比订正前基本都有所减小，这说明，将光流技术计算的24h预报场误差用来订正48h预报场是一种有效的方法。

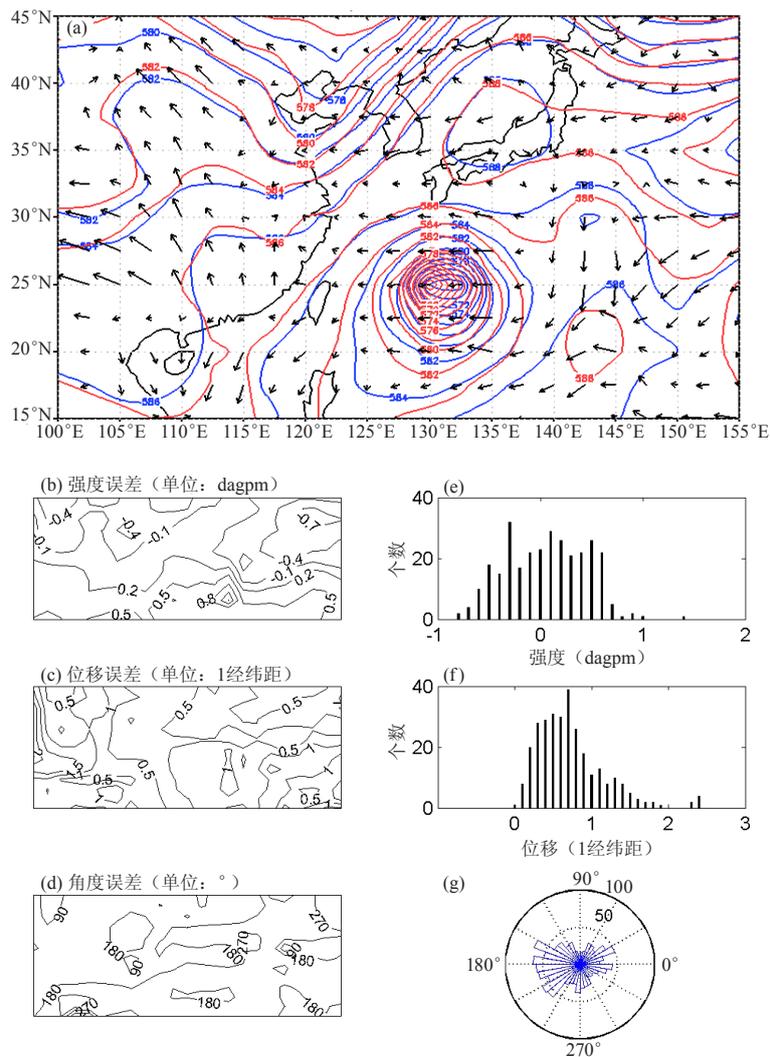


图2 与图1类似，是EC模式2011年8月3日20时500hPa 高度场24h预报检验

## 7 结论与讨论

### 7.1 结论

利用光流技术对台风“梅花”期间EC和T639模式的500hPa高度场预报进行了检验和释用，主要得出以下几点结论：

(1) 利用光流技术，可以很好地表征预报场相对于观测场的预报误差，并将误差分解为强度、位移和角度3种误差场，在反映不同模式对一次天气过程的预报效果和特点方面具有较高的实用价值。

(2) 在预报误差方面，光流技术提供了EC和T639两个数值预报模式对台风区域预报的有用信息。EC的24、48和72h预报具有稳定的误差。EC的24h预报强度误差为2~9gpm，角度误差在180°~240°之间，也就是西到西南向。EC的48h预报强度误差为8~18gpm，角度误差同样在180°~240°之间；EC的72h预报强度误差比观测低-25~26gpm，预报角度误

差在170°~290°之间。作为比较，T639的预报强度和预报角度误差则相对不那么稳定。

(3) 两个模式24、48和72h的预报场与对应的分析场的相似离度表明，EC比T639具有更好的表现。当通过光流技术得到的24h预报误差被用来订正48h预报时，订正预报场比预报场本身更近似于观测场。

(4) 利用光流检验技术，可以连续跟踪数值模式的预报偏差，通过长时间序列的统计分析，有助于发现数值模式的系统误差，从而为改进数值模式的预报性能提供必要的参考。

### 7.2 讨论

通过本文的研究，发现光流技术是一种比较有效的数值检验方法，未来在应用中还需要注意，对于海平面气压、位势高度等空间连续场的检验，光流技术应用起来比较简便，但对降水这样的不连续场，因为涉及到边界问题，光流检验技术还没有很好的应用，

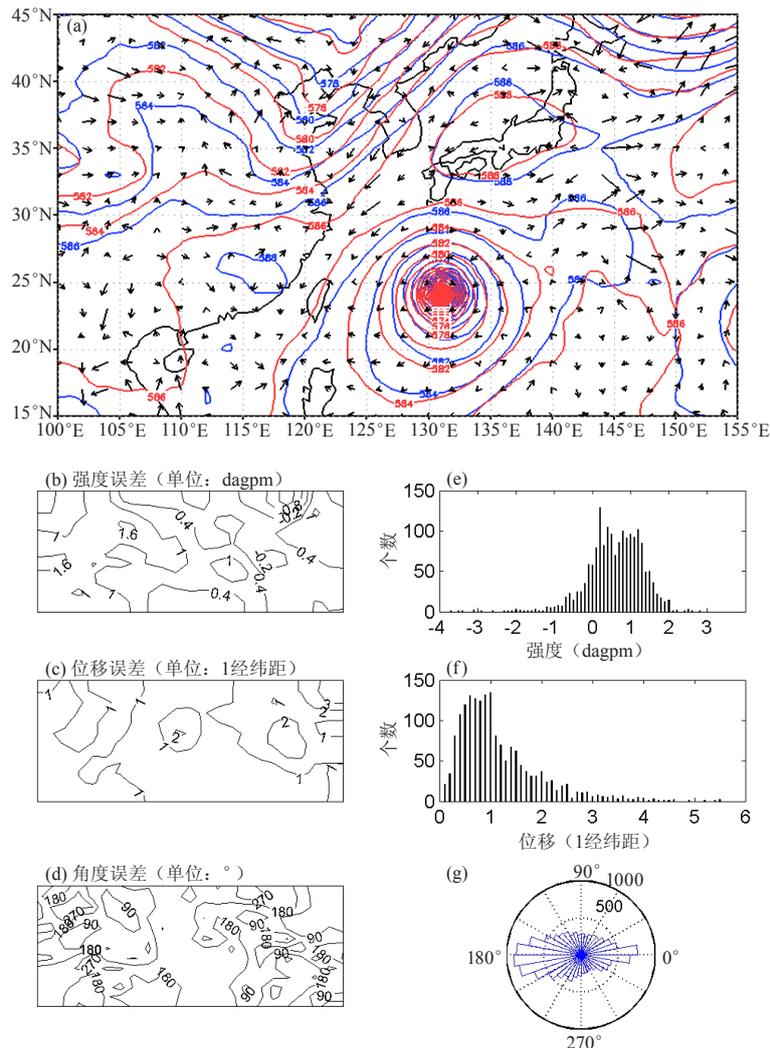


图3 与图1类似，是T639模式2011年8月3日20时500hPa高度场24h预报检验

表1a EC和T639模式24, 48和72h预报强度误差 (单位: dagpm)

时间	EC模式			T639模式		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h
2日20时	0.5	1.8	2.3	0	0.6	-1
3日20时	0.5	1.4	2.6	0.6	0.8	-0.6
4日20时	0.2	1.3	2.2	-0.6	-0.1	-0.9
5日20时	0.2	0.8	1.4	1.9	-0.5	-0.3
6日20时	0.6	1	0.8	1.9	2.9	0.4
7日20时	0.7	1.7	0.9	2.2	4.6	-0.8
8日20时	0.9	1.5	-2.5	2.9	-4.5	-8.6
标准差	0.2	0.4	1.5	1.1	2.5	2.9

表1b EC和T639模式24, 48和72h预报位移动误差 (单位: 1经纬距)

时间	EC模式			T639模式		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h
2日20时	0.8	0.9	1.3	1	1	1
3日20时	0.7	1.6	1	0.6	1.7	0.8
4日20时	0.7	1.1	1.8	0.2	0.9	1.5
5日20时	0.8	1.2	1.5	0.3	0.4	0.9
6日20时	0.6	2.2	2.6	0.3	0.5	0.6
7日20时	0.2	1.5	1.8	0.3	0.8	0.6
8日20时	1.1	1.4	1.3	0.9	1.1	2.5
标准差	0.3	0.4	0.6	0.3	0.4	0.6

表1c EC和T639模式24, 48和72h预报角度误差 (单位: °)

时间	EC模式			T639模式		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h
2日20时	213	198	193	344	345	314
3日20时	186	204	170	214	4	23
4日20时	238	198	210	124	318	12
5日20时	201	234	209	227	36	353
6日20时	189	239	235	124	236	300
7日20时	214	197	246	220	214	244
8日20时	203	202	288	195	317	316
标准差	15.1	17.4	35.4	76.4	122.4	130.9

表2 EC和T639模式24, 48和72h预报场与观测场的相似离度

时间	EC模式			T639模式		
	24h	48h	72h	24h	48h	72h
2日20时	0.37	0.67	0.99	0.73	1.13	1.73
3日20时	0.49	0.75	1.15	0.68	1.24	2.21
4日20时	0.42	0.64	0.99	0.66	1.12	1.71
5日20时	0.39	0.67	0.89	0.70	1.17	1.45
6日20时	0.39	0.61	0.78	0.67	1.04	1.51
7日20时	0.42	0.70	0.99	0.68	1.04	1.41
8日20时	0.43	0.79	1.20	0.77	1.25	1.63

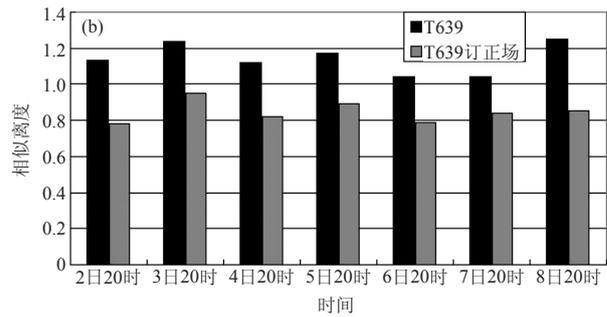
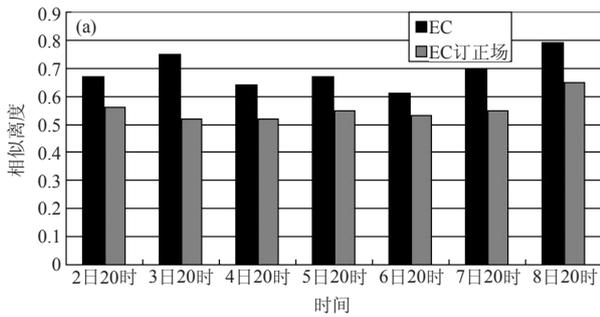


图4 2011年8月2—8日EC (a) 和T639 (b) 的48h预报场与订正场的相似离度比较

这需要进一步的研究。

参考文献

[1] Barron J L, Fleet D J, Beauchemin S S. Performance of optical flow technique. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 12(1): 43-77.

[2] Camus T. Real-time quantized optical flow. *Real-Time Imaging*, 1997, 3: 71-86.

[3] Hwang S H, Lee U K. A hierarchical optical flow estimation algorithm based on the interlevel motion smoothness constraint. *Pattern Recognition*, 1993, 26: 939-952.

[4] Kearney J K, Thompson W B, Boley D L. Optical flow estimation: An Error Analysis of Gradient-Based Methods with Local Optimization. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9: 229-244.

[5] McCane B, Novins K, Crannitch D, et al. On benchmarking optical flow. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 84: 126-143.

[6] Weber J, Malik J. Robust computation of optical flow in a multi-scale differential framework. *Int J Comput Vision*, 1995, 14: 67-81.

[7] 韩雷, 王洪庆, 林隐静. 光流法在强对流天气临近预报中的应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(5): 751-755.

[8] Marzban C, Sandgathe S, Lyons H, et al. Three Spatial Verification Techniques: Cluster Analysis, Variogram, and Optical Flow. *Weather and Forecasting*, 2009, 24: 1457-1471.

[9] Marzban C, Sandgathe S. Optical Flow for Verification. *Weather and Forecasting*, 2010, 25: 1479-1494.

[10] Horn B K P, Schunck B G. Determining Optical Flow. *Artificial Intelligence*, 1981, 17: 185-203.

[11] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision (darpa). In: *Proceedings of the 1981 DARPA Image Understanding Workshop*, April 1981.

[12] 李开乐. 相似离度及其使用技术. *气象学报*, 1986, 44(2): 174-182.