

光流法在台风路径预报检验与订正中的应用

朱智慧¹ 陈智强¹ 喻自凤²

(1 上海海洋中心气象台, 上海 201306; 2 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030)

摘要 本文在台风路径预报检验与订正方面引入了光流法, 结果表明: ①利用光流检验方法, 可以将位势高度场的预报误差分解为强度、位移和角度 3 种误差场, 实现整个误差场的量化。利用位移和角度误差场即可进行台风路径预报的检验和订正。②从“莫兰蒂”台风过程可以看到, 对相同的过程, 不同数值模式一般表现不同。对一次台风过程可以连续跟踪不同数值模式的预报偏差, 从中发现预报稳定性最好的模式, 再利用这个模式的位移和角度误差进行台风路径预报的订正, 这也是提高台风路径准确度的一个有效途径。

关键词 光流法; 检验; 台风路径; 预报

中图分类号: P456.5 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190006 **文献标识码:** A

引言

光流是计算机视觉领域中的重要概念, 在图像处理领域, 光流的研究^[1-4]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”, 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觉领域外, 还被应用于军事、医学、交通等多个领域。

在气象领域, 光流法主要应用于强对流天气临近预报^[5-6]。此外, Marzban 等^[7]利用光流法检验了中尺度预报系统的海平面气压预报, 发现光流场提供了数值模式预报误差方面非常有用的信息。但是, 目前还没有相关研究将光流法应用到台风路径预报和订正方面。

2016 年 9 月 15 日 03:00, 台风“莫兰蒂”正面登陆厦门翔安, 给福建多地造成极为严重的损失。9 月 14 日, 在“莫兰蒂”登陆前 24 h, 主要预报中心对外公布的登陆点在福建厦门到广东汕尾一带沿海, 存在范围准确, 但精细化水平不高的问题。

尽管数值模式对台风路径的预报能力在逐年提高, 但仍存在较大误差^[8-10], 有效利用这些误差也是提高台风路径预报准确度的一个重要手段, 目前, 在

台风路径预报方面有很多种方法^[11-14], 但没有哪种方法占有绝对优势。本文分析了光流法在数值预报检验和台风路径预报方面的应用, 计算了“莫兰蒂”期间 ECMWF(简称 EC)和 T639 的预报误差, 并利用这些误差改进了“莫兰蒂”路径预报结果, 为台风路径预报检验和订正提供了一种新的思路。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所使用的资料为: ①中国气象局 Micaps 系统中 EC 和 T639 的 500 hPa 位势高度 24 h 预报场和对应时次的分析场, 时间为 2015—2018 年。②中央气象台“莫兰蒂”定位资料, 时间为 2016 年 9 月 11 日 08:00 至 9 月 15 日 08:00。

1.2 光流检验计算方法

本文使用文献^[15]的光流场计算方法 LK(Lucas-Kanade)。

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

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

对数值模式检验而言, 用 I_0 和 I_t 代表同一时次

($dt = 0$) 的气象要素 I 的观测场和预报场, 方程变为:

$$I_o(x, y) = I_f(x + dx, y + dy) \quad (2)$$

但是, 数值预报结果相对于实况, 不仅有位置的偏移, 还有强度偏差, 因此需要考虑强度的变化, 根据 Marzban 等^[7]的研究, LK 方程改进为:

$$I_o(x, y) = I_f(x + dx, y + dy) + A(x, y) \quad (3)$$

其中, $A(x, y)$ 代表 (x, y) 点上预报场相对观测场的附加强度误差。将 $I_f(x + dx, y + dy)$ 进行一阶泰勒展开, 即:

$$I_o(x, y) = A(x, y) + I_f(x, y) + \frac{\partial I_f}{\partial x} dx + \frac{\partial I_f}{\partial y} dy \quad (4)$$

令 $u = dx, v = dy$, 则得到光流约束方程:

$$I_x u + I_y v + A = dI \quad (5)$$

其中, (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, 即:

$$\begin{bmatrix} I_x & I_y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ A \end{bmatrix} = dI \quad (6)$$

其中, I_x 和 I_y 分别代表 I_f 在 x 和 y 方向的梯度, $dI = I_o - I_f$ 代表观测场与预报场的差值。

光流场需要求解的变量有 3 个: u, v 和 A , 而光流约束方程只有一个, 因此从基本光流方程出发求解光流场是一个不确定问题, 必须引入附加的约束条件。根据 Lucas 和 Kanade^[15]的计算方法, 选取以某一点为中心的一个小区域, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} & 1 \\ I_{x2} & I_{y2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{xn} & I_{yn} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dI_1 \\ dI_2 \\ \vdots \\ dI_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

记

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

则:

$$\mathbf{MU} = \mathbf{b} \quad (9)$$

只要求解 \mathbf{U} , 就可以得到 3 个变量 u, v 和 A 的解。

使用最小二乘法计算 \mathbf{U}

$$\mathbf{U} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{b} \quad (10)$$

在求得 u, v 之后, 可以将 u, v 转化为极坐标系表示:

$$\begin{aligned} u &= r \cos \theta \\ v &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 极径 r 和角度 θ 分别代表位移和角度误差, 表征天气系统偏移的距离和方向。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光流检验场和强度、位移、角度 3 种误差场, 其中, 角度误差指极坐标系下的角度。对台风路径预报而言, 只需关注位移和角度误差。

2 光流检验模拟

作为应用光流法进行数值预报检验的示例, 首先在理论上利用两个圆的方程进行模拟:

$$\begin{aligned} I_{oi,j} &= x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2 \\ I_{fi,j} &= (x_{i,j} - a)^2 + (y_{i,j} - b)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中, I_o 代表观测场, I_f 代表预报场。 $x \in [-15, 15]$, $y \in [-10, 10]$ 。 i, j 代表第 i 行、第 j 列的格点。 $a = 2 + (i - 1) \times 0.01$, $b = 2 + (j - 1) \times 0.01$, 分别代表 i, j 处的格点在 x 和 y 方向的偏移距离, a 和 b 的数值随 i 和 j 而变化。取 x 和 y 方向的空间步长为 0.2, 构造了两个 151×101 格点数的二维空间场。

$$i = 1, 2, \dots, 151$$

$$j = 1, 2, \dots, 101$$

可得 $a \in [2, 3.5]$, $b \in [2, 3]$ 。

可以预期得到的检验结果为:

位移误差。 I_o 和 I_f 结构相似, 只是 I_f 相对 I_o 向右上方发生偏移, 并且偏移的距离随 i, j 的增大逐渐增大, 位移误差为 $[\sqrt{a_{\min}^2 + b_{\min}^2}, \sqrt{a_{\max}^2 + b_{\max}^2}]$, 即位于 $[2, 5]$ 。

角度误差。偏移角度可用下式求得

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

其中, $\frac{b}{a} \in [\frac{4}{7}, \frac{3}{2}]$, I_f 相对 I_o 向右上方发生偏移, 求得偏移的角度 $\theta \in [\arctg(\frac{4}{7}), \arctg(\frac{3}{2})]$, 数值为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。

图 1 是观测场(蓝色曲线)和预报场(红色曲线)的模拟结果、观测场和预报场之间的光流检验场(箭头)以及强度、位移、和角度 3 种误差场。图 1a 中, 箭头的长短代表预报偏移的距离(位移误差), 箭头的方向代表预报偏移的方向(角度误差)。从图 1c 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,数值为 2~6(无量纲量)。从图 1d 看到,角度误差为 20°~70°,即偏向东北向。利用光流检验方法计算的位移和角度误差与理论分析比较吻合。

台风是一个近似圆形的强的热带气旋。其中,

台风眼为中心气压最低之处,其形状大部分呈圆形或椭圆形,是确定台风路径的关键。利用光流检验方法可以较好的量化台风中心附近的预报误差,从而为路径预报检验与订正提供依据。

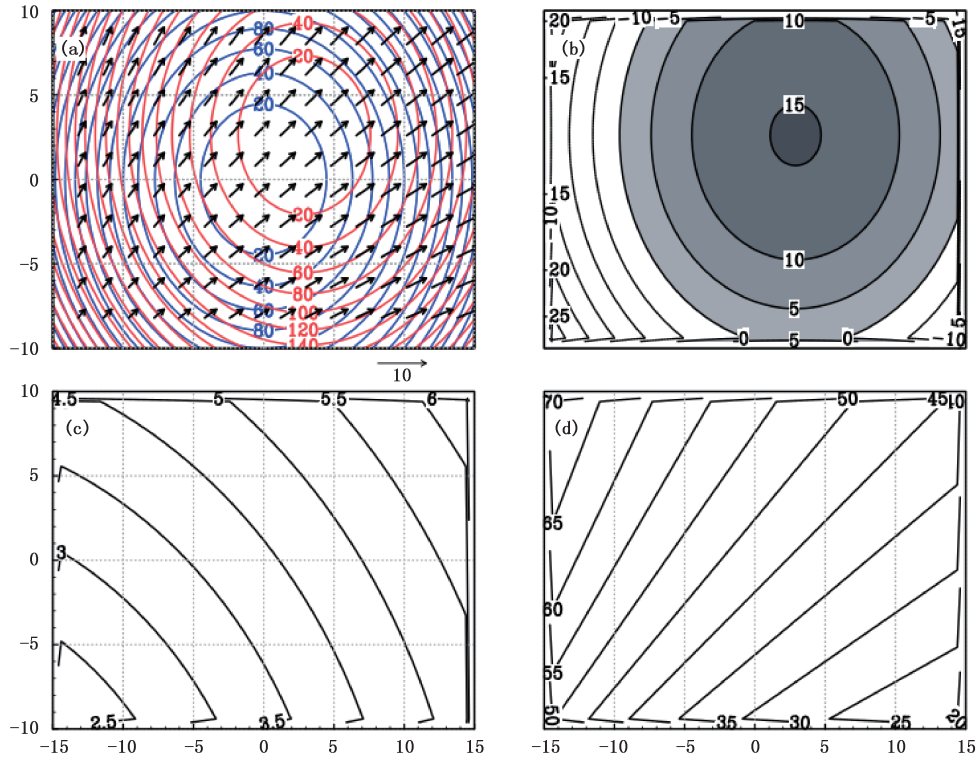


图 1 模拟场的光流检验场(a)以及强度(b)、位移(c)和角度(d)误差场

(图 a 中箭头表示光流场,红线代表预报场,蓝线代表观测场;图 b 中阴影区代表预报比实况偏弱)

3 光流检验方法的应用

3.1 个例预报

利用光流场计算方法,求解 2016 年 9 月 12 日台风“莫兰蒂”影响期间 EC 和 T639 的 500 hPa 位势高度场 24 h 预报的光流检验场、位移和角度误差场。从图 2 中可以看到,对 9 月 12 日 20:00 的预报,在位移误差方面,EC 对台风“莫兰蒂”的预报位移误差为 0.5 个经纬距,对西风槽为 0.4~1.0 个经纬距,对西太平洋副热带高压为 0.6~1.0 个经纬距。T639 对台风“莫兰蒂”的预报位移误差为 1.0 个经纬度左右,对西风槽的预报误差为 0.6~2.8 个经纬距,对西太平洋副热带高压为 0.6~1.4 个经纬距。从位移误差看,EC 的预报效果要好于 T639。在角度预报误差方面,这一时次 EC 和 T639 对“莫兰蒂”的预报具有较大的差异,EC 预报偏西南,而 T639 预报偏东北。

3.2 统计分析

利用光流检验方法计算 500 hPa 位势高度场的位移和角度误差场,取台风中心附近 4 个格点的误差平均代表数值模式对台风区域的预报误差,统计了 2015—2018 年登陆中国的多个台风(表 1)的 EC 和 T639 的 24 h 预报位移和角度误差,结果见图 3。

表 1 2015—2018 年进行检验统计的台风

2015 年	1509 灿鸿、1510 莲花
2016 年	1601 尼伯特、1604 妮姐、1614 莫兰蒂、1616 马勒卡、1617 鲑鱼、1618 暹芭、1621 莎莉嘉、1622 海马
2017 年	1702 苗柏、1707 洛克、1709 纳沙、1710 海棠、1713 天鸽、1714 帕卡、1716 玛娃
2018 年	1808 玛莉亚、1810 安比、1812 云雀、1814 摩羯、1818 温比亚、1822 山竹

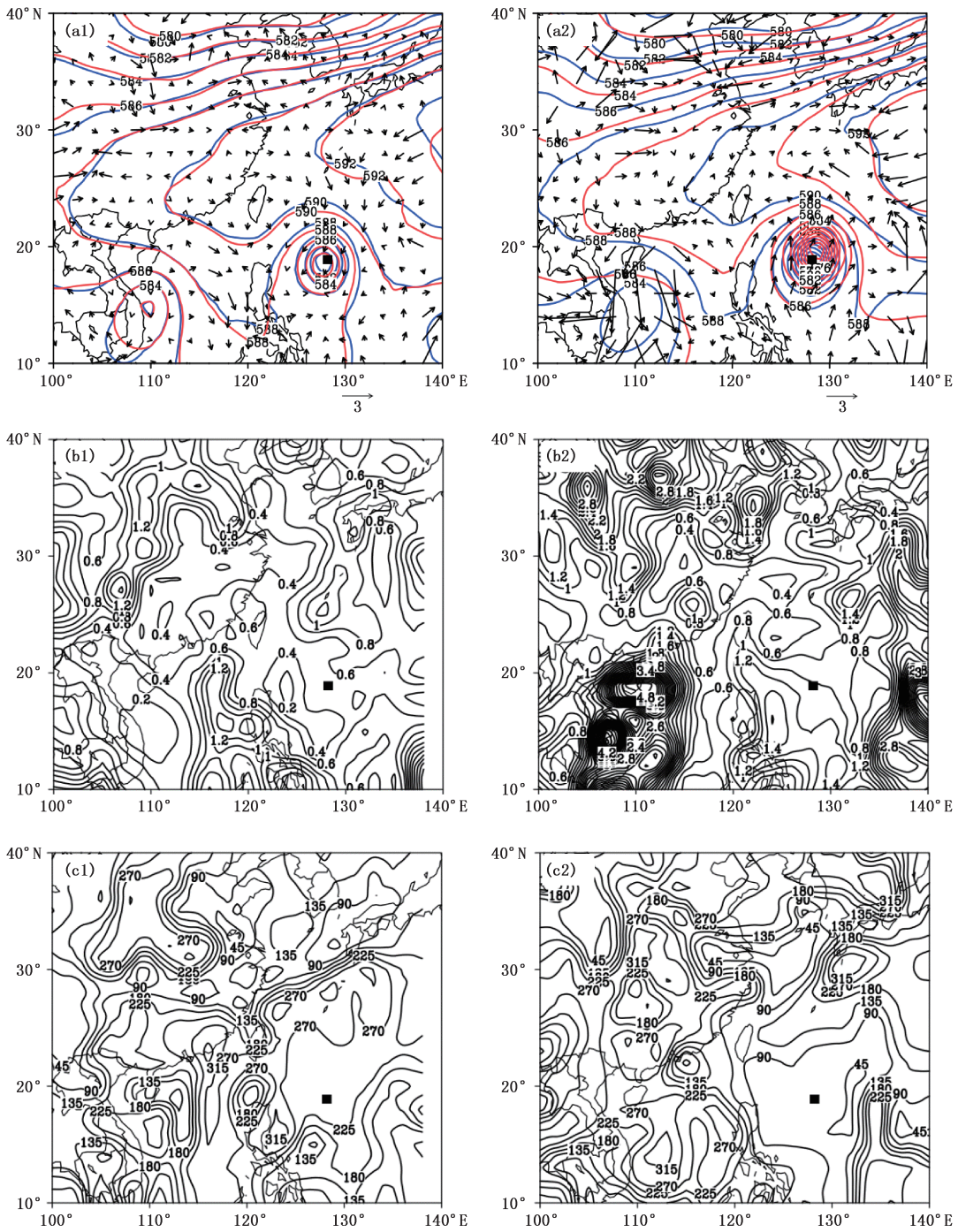


图 2 2016 年 9 月 12 日 20:00 EC(a1,b1,c1)和 T639(a2,b2,c2)500 hPa 高度场 24 h 预报检验

(图 a1、a2:光流检验场,蓝色为位势高度分析场,红色为预报场;图 b1、b2:位移误差场,单位:1 经纬距;

图 c1、c2:角度误差场,单位:°,极坐标系;黑色方框为 9 月 12 日 20:00 台风中心位置)

从图 3 可以看到,EC 的位移误差主要为 0~1 经纬距,大部分集中在 0.5 经纬距,而 T639 模式的位移误差比较分散,0.5~1.5 经纬距的数值较多。EC 的角度误差 60°~90°和 150°~210°的数值较多,

说明 EC 预报偏北和偏西的次数较多。T639 的角度误差在各个角度上较平均,180°左右的角度误差相对较多,说明 T639 预报偏西的次数也较多。两个数值模式的位移和角度误差统计结果表明,某个

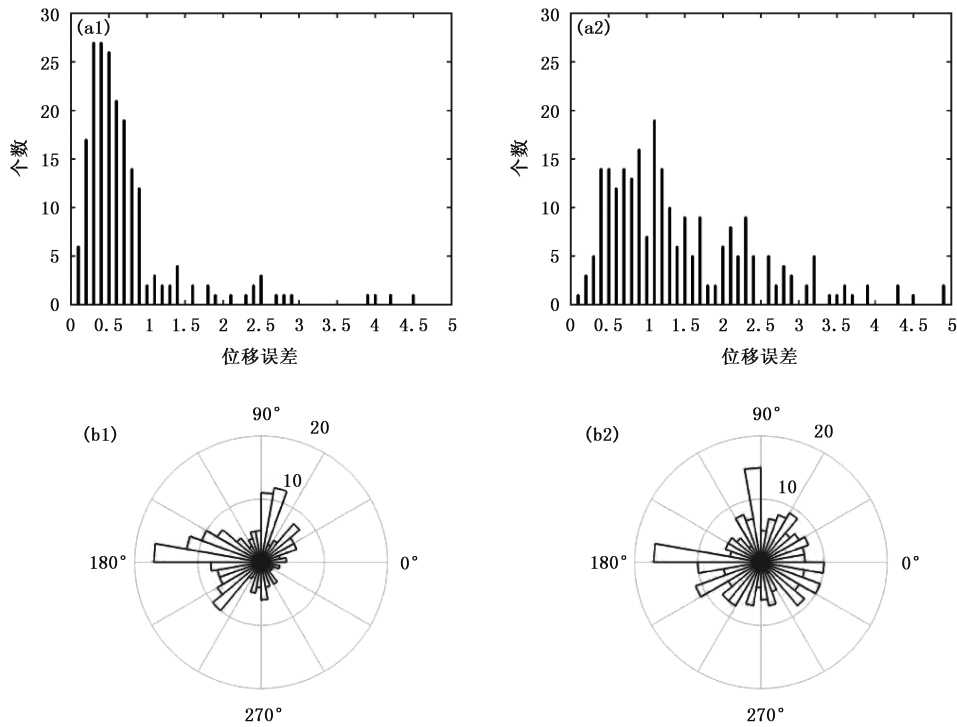


图 3 2015—2018 年 EC(a1,b1)和 T639(a2,b2)台风路径 24 h 预报位移和角度误差
(图 a1、a2:位移误差,单位:1 经纬距;图 b1、b2:角度误差,单位:°,极坐标系)

模式在台风路径预报方面并没有固定的系统性误差,而是在不断变化的,在实际预报中,无法用固定的数值进行台风路径的预报订正。

4 基于光流检验的台风路径订正预报

根据前面的分析,数值模式在台风路径预报方面没有固定的误差,无法事先给定订正方案,为此本文针对一次台风过程,连续跟踪数值模式不同时次台风路径预报误差,通过分析误差的稳定性,选取最优模式,并在此基础上进行台风路径预报订正。本文选取 1614 号台风“莫兰蒂”进行了基于光流检验的台风路径订正预报应用分析。

计算 2016 年 9 月 11 日 20:00 至 14 日 08:00 EC 和 T639 的 24 h 预报位移和角度误差,见图 4。从图 4 看到,对位移误差(单位:1 经纬距),EC 的 24 h 预报表现一直比较稳定且数值较小,为 0.3~0.4 经纬距;T639 位移偏差变化较大,11 日 20:00 为 2.0 经纬距,12 日 08:00 至 13 日 20:00 较小,为 0.4~0.8 经纬距,14 日 08:00 增大至 2.4 经纬距。对角度误差(单位:°),两个模式也存在较大的差别,EC 在 11 日 20:00 和 12 日 08:00 角度误差为偏北,

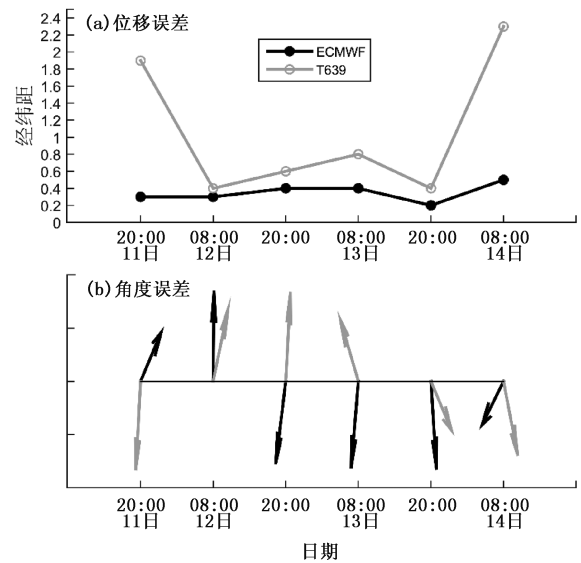


图 4 2016 年 9 月 11 日 20:00 至 14 日 08:00 EC 和 T639 对台风“莫兰蒂”中心预报的位移(a)和角度(b,极坐标系)误差随时间变化
(黑色代表 EC,灰色代表 T639)

12 日 20:00 之后开始稳定偏南到西南;T639 的角度误差则变化较大,依次出现偏南、偏北、偏东南的

角度误差。可见,EC 在角度误差方面有更好的稳定性,路径预报可参考性更大。基于以上的分析,利用 EC 的预报进行“莫兰蒂”路径的订正,可以取得更好的预报效果。

采用 EC 的位移和角度误差对“莫兰蒂”路径进行订正,假设在 x (即东西向)和 y 方向(即南北向)调整的距离为 dx 和 dy (单位:经纬距),取 13 日 20:00 和 14 日 08:00 的位移和角度误差分别计算 dx 和 dy ,取两个时次 dx 和 dy 的平均进行“莫兰蒂”24 h 预报中心位置的订正,得:

$$dx = 0.14$$

$$dy = 0.32$$

图 5 给出了 14 日 08:00 起报的“莫兰蒂”模式预报、光流订正和实况路径,可以看到,经过光流检验订正,“莫兰蒂”的登陆点预报在金门县及厦门市,与实况十分吻合。

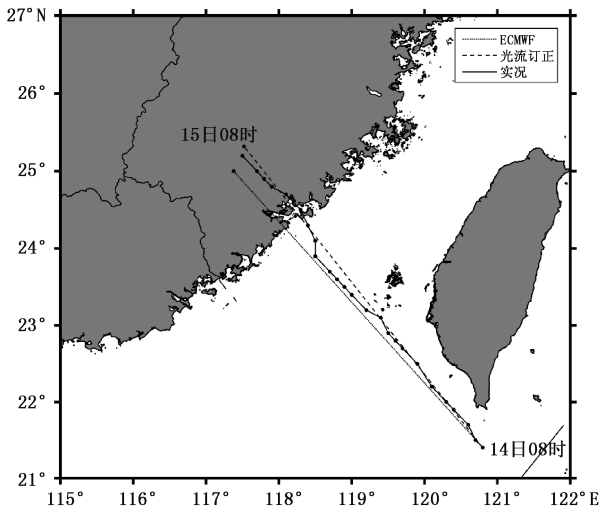


图 5 2016 年台风“莫兰蒂”模式预报、光流订正和实况路径 (14 日 08:00 起报)

5 结论与讨论

本文分析了光流法在台风路径预报中的应用,对 2016 年第 14 号台风“莫兰蒂”期间 EC 和 T639 的 500 hPa 高度场预报进行了检验,并利用位移和角度误差检验结果进行了“莫兰蒂”路径订正预报,主要得出以下结论:

(1)利用光流法,可以将预报场相对于观测场的预报误差分解为强度、位移和角度 3 种误差场,为分析数值模式对台风、副高、槽脊等天气系统的预报偏

差提供定量参考。

(2)利用光流检验技术,可以连续跟踪数值模式的预报偏差,从 2016 年 9 月 11 日 20:00 至 14 日 08:00 EC 的 24 h 预报位移误差都比 T639 要稳定且数值较小,12 日 20:00 至 14 日 08:00 EC 的角度误差一直稳定偏南到西南,因此 EC 模式的“莫兰蒂”路径预报可参考性更大。利用光流检验结果进行“莫兰蒂”路径订正,预报结果与实况十分吻合。对某次过程可以连续跟踪不同数值模式的预报偏差,从中发现预报稳定性最好的模式,再利用这个模式的位移和角度误差进行台风路径预报的订正,这也是提高台风路径准确度的一个有效途径。

本文主要分析了台风“莫兰蒂”过程中光流法的应用,该方法的实际应用价值还有待更多台风过程的检验,随着该方法的不断完善,其在台风路径预报方面可以发挥重要作用。

参考文献

- [1] Barron J L, Fleet D J, Beauchemin S S. Performance of optical flow technique [J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 12(1): 43-77.
- [2] Camus T. Real-time quantized optical flow [J]. Real-Time Imaging, 1997, 3: 71-86.
- [3] McCane B, Novins K, Crannitch D, et al. On benchmarking optical flow [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 84: 126-143.
- [4] Weber J, Malik J. Robust computation of optical flow in a multi-scale differential framework [J]. Int J Comput Vision, 1995, 14: 67-81.
- [5] 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[J].北京大学学报(自然科学版),2008,44(5):751-755.
- [6] 吴剑坤,陈明轩.基于雷达回波区域跟踪算法的临近预报技术进展[J].气象科技,2018,46(05):899-909.
- [7] Marzban C, Sandgathe S. Optical flow for verification [J]. Weather and Forecasting, 2010, 25: 1479-1494.
- [8] 余锦华,唐家翔,戴雨菡,等.我国台风路径业务预报误差及成因分析[J].气象,2012,38(6):695-700.
- [9] 吴俞,麻素红,李勋,等. GRAPES_TYM 模式对 TC 路径及环境引导气流预报检验分析[J].气象科技,2016,44(6):937-948.
- [10] 文永仁,戴高菊,龚月婷,等.我国台风路径突变研究进展[J].气象科技,2017,45(6):1027-1035.
- [11] 刘宇迪,王斌,侯志明.最优决策法在台风路径集成预报中的运用[J].热带气象学报,2003(2):219-224.
- [12] 张守峰,钱传海,高拴柱,等.热带气旋路径预报概率圆应用[J].气象科技,2010,38(2):159-164.

- [13] 钱奇峰, 张长安, 高拴柱, 等. 台风路径集合预报的实时订正技术研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(5): 905-910.
- [14] 袁杰颖, 陈永平, 潘毅, 等. 台风路径集合化预报方法的优化[J]. 海洋预报, 2017, 34(2): 37-42.
- [15] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]// Proc Imaging Understanding Workshop, DARPA, 1981: 121-130.

Application of Optical Flow Method to Verification and Correction of Typhoon Track Forecast

Zhu Zhihui¹ Chen Zhiqiang¹ Yu Zifeng²

(1 Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201306; 2 Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030)

Abstract: This paper introduces the application of the optical flow method to the verification and correction of typhoon track forecast. The results show that: (1) By using the optical flow verification method, the prediction error of the geopotential height field can be decomposed into three error fields: intensity, displacement, and angle, and the quantization of the whole error field can be realized. The verification and correction of typhoon track forecast can be carried out by using the displacement and angle error fields. (2) As can be seen from the process of Typhoon Meranti, different numerical models, for the same process, generally behave differently. In the same typhoon process, the forecast deviation of different numerical models can be continuously tracked, and the model with the best forecast stability can be found. Then the displacement and angle errors of this model can be used for typhoon track forecast correction, which is also an effective way to improve the typhoon track forecast accuracy.

Keywords: optical flow method; verification; typhoon track; forecast