

陈笑,赵东,何晓风,等,2018.基于MODE对模式预报强风风场的检验分析[J].气象,44(8):1009-1019.

基于MODE对模式预报强风风场的检验分析*

陈笑¹ 赵东² 何晓风² 沈历都³ 申双和¹ 宋丽莉² 刘善峰⁴

1 南京信息工程大学,南京 210044

2 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

3 沈阳区域气候中心,沈阳 110166

4 国家电网河南省电力公司电力科学研究院,郑州 450052

提 要: 基于专业气象服务领域十分关注的模式强风预报性能的客观检验和致灾性强风预警服务效果的合理性判别问题,利用一次强风过程对电网专业气象预警服务效果的检验示范,探讨基于目标(面向对象)的诊断检验方法(Method for Object-Based Diagnostic Evaluation, MODE)对强风事件检验的适用性。通过对强风空间检验的各个关键参数的选择确定、匹配分析,发现:(1)MODE 检验的卷积半径、诊断量权重和匹配阈值等参数的选择,将影响检验目标的适度聚焦和误差表达的客观性,因此需要综合考虑预报和实况场的水平分辨率、用户对该类强天气预报误差的空间和时间冗余度等;(2)MODE 检验可较好地量化给出模式预报的整体效果,包括:强风落区的范围大小和位置偏差、强风过程的时间相位差等,从而可量化判别出模式在各个时刻的空报和漏报区域以及对强风过程移动速度和生命周期长度的预报性能。

关键词: 强风风场,MODE 检验,参数合理取值

中图分类号: P456, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.08.003

Evaluation and Analysis of Model Forecast Performance of High Wind Based on MODE Method

CHEN Xiao¹ ZHAO Dong² HE Xiaofeng² SHEN Lidu³

SHEN Shuanghe¹ SONG Lili² LIU Shanfeng⁴

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

3 Shenyang Regional Climate Centre, Shenyang 110166

4 HNEPC Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052

Abstract: Model forecast performance and forewarning service validity of disastrous high wind have been among the chief concerns in industrial meteorological services. In view of these concerns, evaluation of the power-grid-system-oriented meteorological forewarning for a high wind event was chosen as an example in order to demonstrate the applicability of Method for Object-based Diagnostic Evaluation (MODE) for high wind events. Through the determination of the MODE crucial parameters and the object matching process, we found that (1) convolution radius, pairwise attributes weight and matching threshold are crucial to the identification of interest objects and the objectivity of error analysis. As a result, comprehensive considerations should be paid to the spatial resolution of forecast/observation grid data and user-specified spatial and temporal error redundancy. (2) General forecast performance can be depicted quantitatively by MODE,

* 国家自然科学基金项目(41405012)和国网2016年度科技项目(52170216000A)共同资助

2018年3月15日收稿; 2018年6月7日收修定稿

第一作者:陈笑,主要从事数值预报检验和专业气象服务研究. Email:275134698@qq.com

通信作者:赵东,主要从事可再生能源与电力气象研究. Email:zhaodong@cma.gov.cn

including the deviation of high wind location, range extent and temporal phase, so as to detect the area of false alarm and missing report every hour, and assess the forecast performance of moving speed and life cycle of high wind objects.

Key words: high wind field, MODE (Method for Object-based Diagnostic Evaluation), reasonable values of parameter

引 言

网格化数值模式预报产品是现代气象预报预警业务服务的重要基础(杨波等,2017)。对模式预报效果的客观检验和各项性能的评估,是改进模式能力、提升模式产品可靠性的重要依据,也为预报员、专业机构或用户选择模式产品及进行有效订正提供参考(马东行,1981;程正泉和廖代强,2012;潘留杰等,2014;漆梁波,2015)。

目前对数值预报的检验多是以气象站实测数据或客观分析为真值的客观统计检验,也被称为传统检验,包括连续变量检验方法(相关系数、均方根误差等)和两分类预报检验方法(Threat Score, TS)、ETS(Equitable Threat Score)、预报偏差(Bias Score)、误警率(False Alarm Ratio)等,综合使用可以评估数值模式预报结果准确性的整体表现。曹春燕等(2017)在传统定量检验方法的基础上提出了一系列雷达降雨预报形状检验的量化指标,包括预报区域重叠比例 $Ratio_p$, 实况区域重叠比例 $Ratio_o$, 雷达降雨预报区域的形状与实况降雨区域形状的相似度系数,针对区域面积检验的指标 $FAR_{面积}$ 、 $POD_{面积}$ 、 $TS_{面积}$, 研究表明,这种形状验证法和指标能够更好地反映雷达降雨的预报效果。但是,传统检验方法虽然客观且定量,却难以精准评估数值模式(特别是高分辨率模式)对不同天气系统或中小尺度天气事件空间分布特征的预报性能(姜勇强等,2006;郑永光等,2010;Jolliffe and Stephenson, 2005),也缺乏对预报误差来源的细致解析能力,因此,空间检验方法应运而生并逐步应用于检验业务。

空间检验法在关注传统技巧评分的同时,更加注重预报和实况在空间上不同尺度的差异。潘留杰等(2014)将空间检验方法分为两大类,一类是通过计算不同空间尺度上的统计评分获取不同尺度上的预报性能和预报技巧的检验方法(邻域法/模糊法、尺度分离法),另一类是通过分析预报对象和实况对

象的空间特性(位置、形状、大小和强度)差异诊断预报误差属性(特征法/属性判别法、空间形变法)。

基于目标(面向对象)的诊断检验方法(Method for Object-Based Diagnostic Evaluation, MODE)就是空间检验方法中的一种典型的特征法,并且已在国外有较多研究探索和应用。Davis et al(2006)使用美国国家环境预报中心(NCEP)的实况分析资料对 WRF 模式的降水预报做了空间目标检验,认为通过人工干预的自动化技术可以代替手动评估来识别检验目标,并指出基于目标的诊断检验可对模式性能和预报误差来源给出整体结论;Brown et al(2004)认为面向对象的诊断检验方法可以识别空间预报误差来源及类型,并可将这些有效信息反馈给开发人员,从而改进预报模式;Micheas et al(2007)以短时临近降水预报检验为例,将预报误差分解为若干个属性,包括落区(位置)、形状、大小、方向和强度,每个部分都有单独的权重,由此可得出不同的误差类型,若预报员看中暴风雨的落区,则将位置权重上调使其高于其他部分。

空间检验技术在我国的研究应用也逐渐增多,王国荣等(2014)应用 MODE 方法对 2013 年 8 月 11 日北京地区的一次局地强降水过程进行了空间检验并与传统检验结果做了对比,检验结果表明,模式对降水位置及强度的预报较准确,相对于传统 TS 评分,MODE 检验结果更能真实地反映预报的效果。李佳等(2016)研究指出,MODE 方法在高分辨率模式雷达回波预报检验中也具有很高的实际应用价值。

本文以一次强风天气过程对电网输电线路的高影响预警为例,采用 MODE 方法对该强风过程的预报效果进行空间检验,并结合强风对输电线路的影响特征和用户防御能力调研,探讨 MODE 空间检验方法在强风预报检验中的应用技巧和效果,以期专业气象服务十分关注的强风预报提供一种全面、客观的检验方法,并为用户评价强风预警结果的科学性提供一种量化方法,同时也为进一步改进模式

预报性能提供有效的信息。

1 数据来源和处理

1.1 模式预报风场数据

GDFS(Grid Data Forecast System)是为开展专业气象服务研发的一套格点化多模式集成预报系统,其输出产品包括风、温、湿、降水、气压等多种要素,水平分辨率为 $0.025^{\circ}\times 0.025^{\circ}$,时间间隔为 1 h,系统每日运行两次。GDFS 目前已经业务化运行超过 2 年,主要面向电网、铁路、石化、水电等用户提供专业气象服务。该系统以 ECMWF 和 GRAPES 的区域模式产品为基础输入数据,并基于对全国 6 万多个自动站观测资料的误差动态估算,客观确定了不同预报时效和不同空间位置上的集成权重。EC-WMF 是欧洲中心的高分辨率全球业务模式,其产品的水平分辨率为 $0.125^{\circ}\times 0.125^{\circ}$,预报时效为 10 d,时间间隔为 3 h,每日更新两次。GRAPES_Meso 是我国自主研发的新一代业务化区域数值模式,目前其业务版本已更新到第 4 代,水平分辨率为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,预报时效为 84 h,时间间隔为 1 h,每日更新两次,基于该模式建立的快速循环预报系统,目前每天业务运行 8 次,可以很好地模拟出高低空环流形势和主要天气系统(陈建萍,2005;章建成和刘奇俊,2006;徐双柱等,2007)。对地面观测资料进行快速循环同化能够不断更新模式的背景场,形成更准确的初始场,进而有效提高模式对局地强对流天气系统的预报效果(王平等,2017)。

本研究考虑强风对输电线路的影响,选取一次典型的强风过程,对 GDFS 预报的 10 m 高度的逐小时风场预报进行空间检验。模式起报时间为 2017 年 2 月 28 日 20 时,检验时段为 2017 年 3 月 1 日 08—17 时(涵盖了此次强风的整个过程),检验区域为河南省区($32^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$)。

1.2 实况分析风场数据

实况分析风场由中国气象局公共气象服务中心业务化运行的 PMSC_LAPS 系统生成,该产品空间分辨率为 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$ 。其实况分析产品是以 LAPS(Local Analysis and Prediction System)为基础,经过本地化调整后,以 T639 模式为背景场,融合了全国 4 万多个地面自动站、雷达、卫星等资料

(李超等,2017)。检验所用实况分析风场的时段、范围及高度与 GDFS 模式预报场完全一致。

2 检验方法和过程

2.1 MODE 空间检验

强风或强降水等天气过程,在空间上通常表现为不均匀或不连续分布,MODE 空间检验可通过关键气象要素的阈值设定,从预报和实况气象要素场中筛选出满足阈值的强天气目标,进而对预报和实况场筛选出的强天气目标进行目标对匹配和分析,再对强天气目标的特征参数(如质心距离、轴角差、面积比、长短轴差等)进行合理配置,采用模糊逻辑算法,计算每组目标对的匹配度参数、独立属性及匹配目标对的诊断量,从而诊断出预报场和实况场的空间特性差异及模式预报误差属性。美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)已将 MODE 方法集成到 MET(Model Evaluation Tools)系统中,本研究主要基于 MET6.0 版本的 MODE 检验工具开展相关研究。

2.2 MODE 主要步骤及参数选取

2.2.1 筛选检验对象

(1) 平滑处理

原始场往往存在很多细碎的小目标物,且目标物边缘粗糙,对强天气事件检验造成不必要的干扰,因此需要做适当的平滑处理。平滑处理相当于二维空间的滤波过程,以滤掉破碎孤立的小目标物,突出重要的大面积强事件目标。MODE 默认目标物为圆形卷积核,以卷积半径(R)为平滑处理的关键参数,以格点的倍数定量表达 R 。 R 越大,目标边缘平滑效果越明显,但同时也会滤掉直径小于 R 的目标,因而识别出来的目标个数也越少,同理, R 取值过小,目标边缘平滑度降低,也保留了更多的小目标,难以突出范围相对较大的强天气目标。

图 1 展示了该次强风过程中第 10 时和 12 时两个时次的 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的实况场在 R 不同取值条件下对检验目标的平滑效果影响。

可以看出, R 取值 2 时(图 1a,1d),检验范围中存在较多破碎的孤立目标,难以清晰地突出主要目标;而 R 取值 6 时(图 1c,1f),检验区域中的目标大大减少,虽然主要目标平滑度增加了,但滤掉了尺度

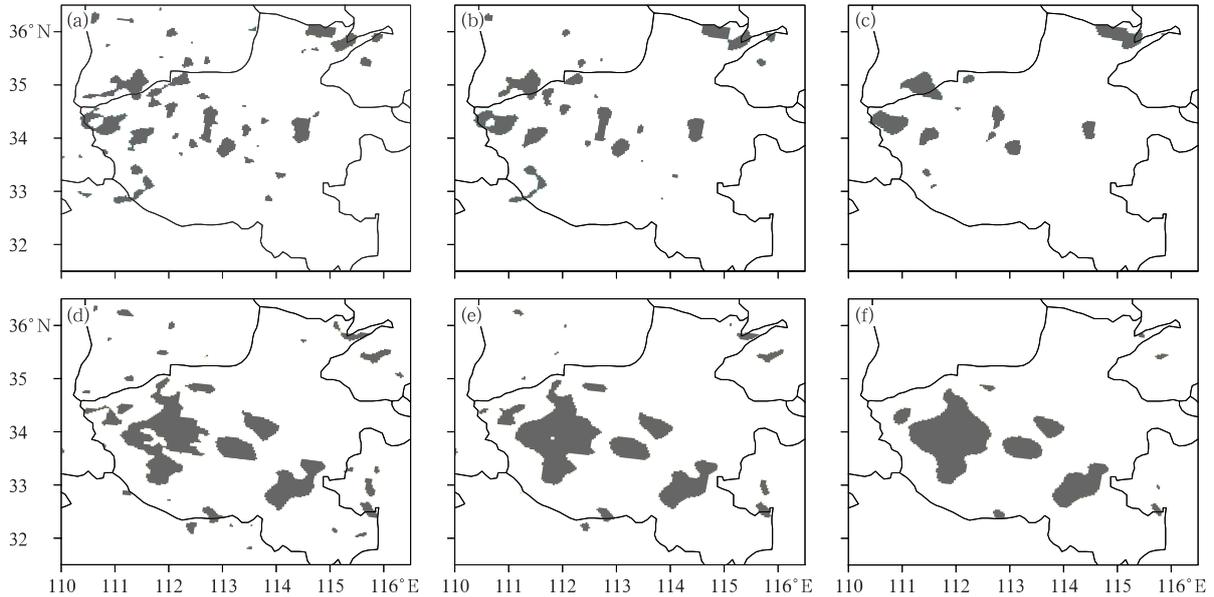


图 1 10 时(a,b,c)和 12 时(d,e,f)实况场的对象识别分布图
(a,d) R 为 2 个格点, (b,e) R 为 4 个格点, (c,f) R 为 6 个格点

Fig. 1 Distribution of identified objects in 10:00 BT (a, b, c) and 12:00 BT (d, e, f) observation fields
(a, d) $R=2$, (b, e) $R=4$, (c, f) $R=6$

达到 18 km 的强风目标,不利于捕捉具有一定影响的强风局地分布的细节。通过对电网强风预警服务的大量实践和用户调研,结合河南输电线路强风影响敏感程度和防灾能力冗余度,在此选择 R 取 4 时(图 1b,1e)的平滑处理效果,可适当减少零碎目标干扰,同时能够聚焦和抓住强风过程的关键特征,两者可以达到较为理想的平衡点,能够较好地满足用户的防御应急要求。

(2) 阈值确定和掩膜场构成

根据强天气事件对某特定载体(在此为输电线路)的影响特征,确定关键气象要素阈值 T ,并从预报和实况要素场中筛选出拟需检验的强天气目标。根据电网故障记录,平均风速达到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 及以上时就可能发生由异物侵扰导致的跳闸放电事故,故将 T 值设为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 2 给出了经过阈值筛选之后的某一时刻的强风目标示意图,图中的预报场(图 2a)和实况场(图 2b)的绿色区域为达到 T 值的格点区域。

为了清晰地表达强风目标,并为下一步聚焦主要目标,需要构造出掩膜场 $M(x, y)$,采用以下公式:

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & C(x, y) \geq T \\ 0, & C(x, y) < T \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 和 y 为格点坐标; $C(x, y)$ 表示平滑之后的原始场中某个格点上的要素值。

将要素值 $\geq T$ 的格点赋值为 1,其余格点赋值为 0,即构成掩膜场 $M(x, y)$ 。

(3) 重构场生成

为客观反映检验目标的量值大小,需要将预报和实况的初始场原始值 $f(x, y)$ 重新赋到掩膜场 $M(x, y)$ 中,以掩膜场与初始场的乘积得到重构场 $F(x, y)$,其计算公式为:

$$F(x, y) = M(x, y)f(x, y) \quad (2)$$

2.2.2 目标单体空间属性参数计算

定量描述目标单体的空间属性,是量化空间检验的基础。为定量表达、分析其空间属性,需要分别计算出描述目标单体的空间属性参数,主要包括:面积、质心、轴角、复杂度、经纬度、强度百分位数和长短轴长度等,通过定量计算和分析预报和实况重构场中每一个目标单体的空间属性参数,可得到该次强风过程的关键特征以及整体的空间检验效果。

图 2 和图 3 给出了预报场和实况场中检验目标的部分空间属性示意图,对目标的空间属性参数进行逐一说明:

面积:是指目标物的范围(图 2 绿色区域),通常以格点数进行量化表达;

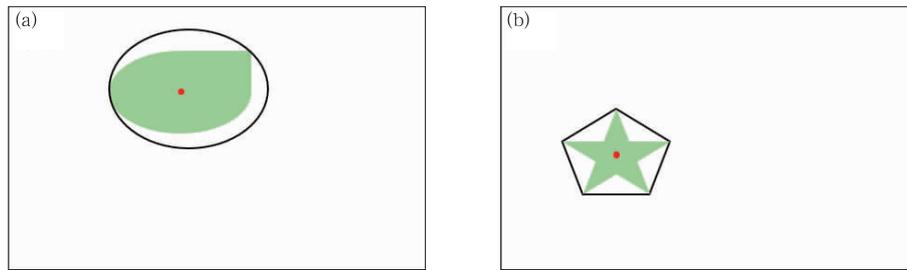


图 2 预报场(a)和实况场(b)中的目标空间属性示意图
(绿色表示目标物,中间的点表示质心,实线表示凸包)

Fig. 2 Sketch maps of spatial attributes for objects in
(a) forecast and (b) observation fields
(green area: object, dot: centroid, solid line: convex closure)

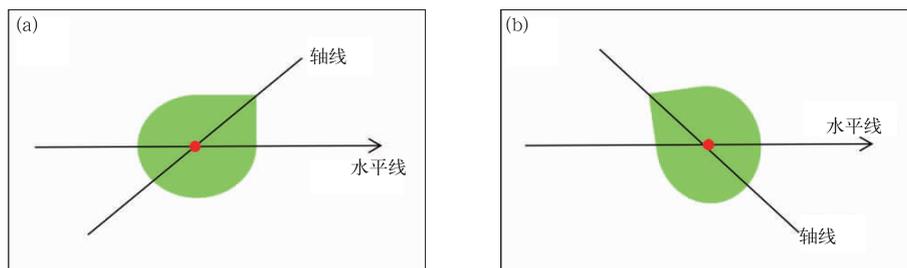


图 3 两种不同情况轴角示意图:(a)正角,(b)负角
(绿色表示目标物,轴线上的点为质心)

Fig. 3 Sketch maps of two different axis angles (a) positive angle, (b) negative angle
(green area: object, dot on the axis: centroid)

质心:是指目标物的几何中心(图 2 绿色区域中心的点)。如果目标只有一个对称轴,质心在轴上,如果目标有两个对称轴,质心为两轴的相交点;

长短轴长度:是用一个面积最小,周长最小的矩形将目标物圈起来,其中矩形的长宽即为目标物的长短轴,其长度用格点数表示;

轴角:是目标物对称轴与东西向水平轴线所成的锐角(图 3),用来整体评估一个目标的空间走向;

凸区域:是指在其内部范围内任选两点,连接它们的直线段完全在该区域内,使凸区域面积达到最小的边界线即为凸包,如图 2 中实线所示,凸包将形状不规则的目标物圈起来并使其成为面积最小的凸区域,凸包用以计算单目标的复杂度和目标对的凸包距离;

复杂度:是衡量目标的形状结构复杂程度的属性参数,如图 2 中两个目标物的复杂度用凸包内白色区域面积占整个凸包区域面积的比值来表示;

经纬度:目标物质心的经度和纬度;

强度百分位数:将目标物内部的要素量值从最

小到最大值排列,分别对预报和实况两个场各目标做 10、25、50、75、90 分位上的强度比值,根据比值的大小评估预报量值效果的好坏。

2.2.3 目标对匹配度计算

以上为预报场和实况场中目标单体的独立空间属性,模式场中的任一目标单体和实况场中的任一目标单体可组成一个目标对。MODE 在目标对的匹配中,计算了很多关于表征目标的几何与空间关系的属性,诸如质心距离、边界距离、凸包距离、轴角差、面积比、交集比、复杂度比、强度百分位比等,在下文中,将这些量定义为目标对的匹配属性诊断量。应用模糊逻辑算法,综合考虑这 8 个诊断量,可定量判断每个目标对中的两个单体之间的匹配度,这是目标对最终能否匹配成功的依据。匹配度参数的计算公式如式(3)所示:

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^M C_i W_i F_{i,j}}{\sum_{i=1}^M C_i W_i} \quad (3)$$

式中, M 是诊断量个数, j 是目标对的序号 ($1 \sim n$), i 是诊断量的序号 ($1 \sim 8$), F 是目标对的某个诊断量的匹配度函数 (范围为 $0 \sim 1$), W_i 是诊断量的权重系数 (总和为 10), C_i 是诊断量可信度函数 (用来调整属性的匹配度贡献, 使得匹配度因子具有动态权重)。

对满足目标对匹配的 I 参数, 需要根据检验需求预设阈值, 该阈值大小决定了目标对匹配的难易程度, I 参数越大, 匹配条件越紧, 意味着对该事件检验要求的精度越高, 因此, I 参数的确定, 主要取决于承载体或用户对该强天气事件的预防能力和对预报准确度的要求, 现阶段通常取 I 的阈值为 0.65, $I \geq 0.65$ 即认为目标对匹配成功。

式(3)中各空间属性参数的诊断量权重系数 W_i 是影响匹配度 I 大小的重要参数, 需要根据强天气事件对承载体或用户影响的重要程度来确定。在本案例中, 考虑到两种情况, 质心距离很近但不相交 (图 4a) 以及质心距离很远但有交集 (图 4b), 对输电线路的抗风响应和安全运维而言, 强风预报的影响范围和落区的命中率最为重要, 以边界相切或者相交者优先匹配 (图 4b)。因此边界距离参数的权重系数最大取为 3。此外表达该预报效果的轴角差、面积比和交集比等参数的权重系数取值也相对较大, 取为 2, 而质心距离的影响较弱, 因而权重取值为 1; 凸包距离、复杂度比对空间目标匹配的影响程度最弱, 则其权重系数取为 0; 强度百分位比在事件强度分析中单独对比, 对空间目标匹配的影响未做考虑, 故权重为 0。

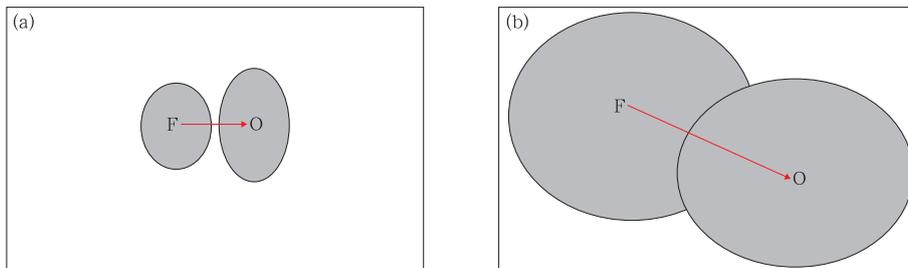


图 4 预报场与实况场中对象匹配的不同情况示意图

(a) 两目标相近不相交, (b) 两目标质心较远但相交

(F 表示预报场目标, O 表示实况场目标, 箭头为质心距离)

Fig. 4 Two different matching situations for object pair in forecast and observation fields

(a) non-intersected object pair with small centroid difference,

(b) intersected object pair with larger centroid difference

(arrows: the centroid differences, F: short for forecast, and O: short for observation)

2.2.4 检验对象的优化

目标对匹配成功后, 往往还存在部分孤立、散乱的单目标, 需要分别对预报场和实况场中的孤立目标进行优化合并, 将若干单目标合并成一个对象簇。目标合并有三种途径: (1) 通过模糊逻辑算法将匹配目标合并; (2) 设定一个合并阈值, 将满足阈值条件的所有单目标合并; (3) 在匹配参数中设定一个附加合并, 例如预报场中的两个单目标都与实况场中的同一个目标成功匹配, 则将预报场两个单目标合并。

2.2.5 优化后目标对的特征参数计算

对最终确定的待检验目标对再分别计算其诊断量属性参数, 并基于此结果, 分析模式预报效果及性能, 探讨预报产品的误差属性, 如: 位置偏差以及强度偏差等。

3 空间检验结果分析

3.1 强过程时间相位差分析

图 5 为 2017 年 3 月 1 日河南大风的初期、中期和消散期的预报场与实况场的空间目标匹配分布图。筛选平均风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的格点区域, 在卷积半径、检验阈值、诊断量权重、匹配度阈值和优化合并方式等各个参数确定的基础上, 筛选出了预报场和实况场中满足匹配度阈值要求的目标对, 图 5 中以相同颜色标注, 深蓝色且无黑色边框的是未达到匹配阈值的目標。

09 时, 实况场显示河南西部已有零星大风目标

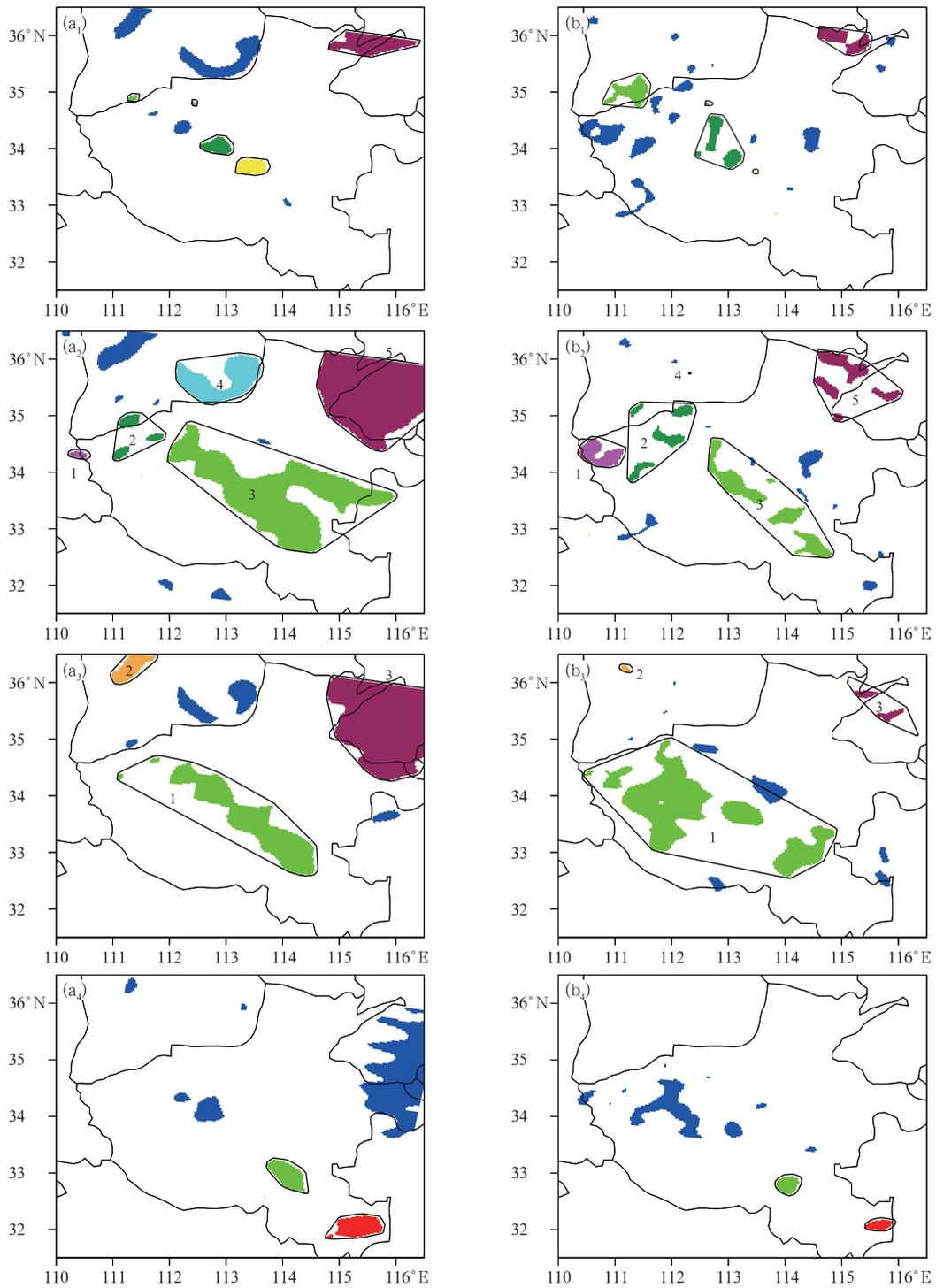


图 5 预报场(a)和实况场(b)大风发展初期(a₁, b₁)、中期(a₂, b₂, a₃, b₃)和消散期(a₄, b₄)目标匹配分布图

(a₁, b₁) 10 时, (a₂, b₂) 11 时, (a₃, b₃) 12 时, (a₄, b₄) 14 时

Fig. 5 Spatial distribution of matching objects of (a) GDFS forecast and (b) PMSC_LAPS observation wind fields

(a₁, b₁) the initial stage: 10:00 BT, (a₂, b₂, a₃, b₃) metaphase: 11:00–12:00 BT, (a₄, b₄) end stage: 14:00 BT

物出现,而预报场中,河南尚未出现目标物;10时,实况场的强风目标物继续增多,预报场中也开始出现较多强风目标物但数量和范围上明显少于实况场,导致实况场有较多目标单体未能找到匹配对象;11时和12时,大风的影响范围明显扩大,同时,实况场和预报场的匹配度较高(11时匹配出5组目标对,12时匹配出3组目标对,仅有个别目标物未找到匹配对象),但两场还存在一定的相位差,预报场中大风范围在11时发展到最大,而实况场中则是12时发展到最大;13—14时,两场中大风均开始减弱,匹配度较高;15时,预报场中大风目标基本消失,而实况场中尚存在较多散点目标。

综上所述,GDFS对本次大风过程的预报表现出3个特征:(1)模式较好地刻画出了此次大风的发生发展过程,把握住了事件发生的大致时段、影响范围等关键特征,尤其是大风影响最强的中期(11—12时)和消散期(13—14时)预报效果较好,模式预报的强风目标在落区、走向和形状及移动方向等方面均与实况场有较好的一致性;(2)与实况相比,模式预报结果存在一定的时间相位差,主要表现在模式预报的强风过程生命期略偏短,发展过程偏快,预报场强风过程生命期为6h(10—15时),实况场强风过程生命期为10h(08—17时);(3)在强风过程发展前期(09—10时),预报场与实况场的匹配度较低,主要原因是强风位相滞后。

3.2 强过程的最大风速空间预报能力分析

考虑到电网用户应对输电线路强风破坏时,会更关注最大风速的影响区域,因而,在此重点考察最大风速出现的区域准确性。

将该强风过程的预报场(10—15时共6个时次)和实况场(08—17时共10个时次),分别求取整个过程中每个格点上的风速最大值,组成最大风速的格点风场(图6),再采用MODE方法,对预报与实况最大风速风场的匹配度进行分析。

图6显示,此次强风过程的预报和实况最大风速场共匹配出5组目标对,其中在河南范围内有3组(目标对1、2、3),河南区域外有两组(目标对4、5)。目标对1,位于河南西部,预报与实况落区一致,但预报场目标物的范围偏小;目标对2,在两场中都是范围最大的目标,预报场与实况场的整体分布模态基本一致,但模式预报在该目标的东北部有一定范围的空报,在西南部则存在一定程度的漏报;目标对3位于河南东南部,模式对大风的落区、走向和形状都有很好的预报表现;目标对4和5,位于河南区域外,模式预报落区表现较好,但是预报场范围略偏大,存在一定程度的空报。图中深蓝色的目标物表示未匹配的目标,主要出现在实况场中,说明模式在这些区域内存在漏报。

进一步对图6中的各目标对的匹配度及诊断量进行计算,给出空间检验的量化判别(表1):目标对1的空间综合匹配度为0.85,位置接近,走向几乎一致,但预报场目标物的短轴偏短,面积略偏小,说明模式对西部山区的强风有漏报现象;目标对2的空间综合匹配度为0.85,预报场目标物的面积及形状与实况场的一致性较好,但预报场目标物的质心与实况场匹配对象的质心相距较远,说明模式在该范围内空报和漏报并存;目标对3的匹配度最高,其空间综合匹配度为0.90,模式对大风范围的位置、走向、形状以及风速量值的预报表现非常出色;

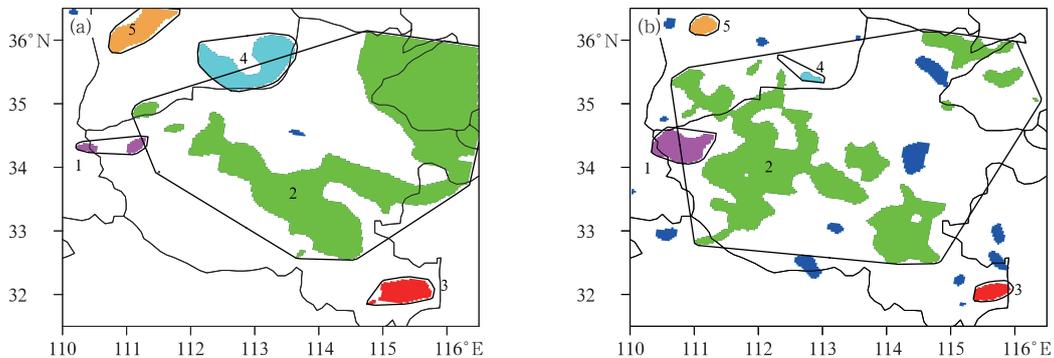


图6 过程最大风速预报场(a)和实况场(b)的目标匹配分布图

Fig. 6 Spatial distribution of matching objects in process maximum wind speed of (a) GDFS forecast and (b) PMSC_LAPS observation wind fields

表 1 过程最大风速预报场(F)与实况场(O)匹配目标的诊断量值
Table 1 Attributes of matching objects of process maximum wind speed in GDFS forecast field (F) and PMSC_LAPS observation field (O)

诊断量	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5
轴角差/°	3.86	27.41	6.62	50.03	12.78
面积比(F/O)	0.30	0.80	0.47	0.07	0.29
交集比(交集面积/最小目标面积)	0.79	0.42	0.73	1.00	0.87
质心距离/格点	0.56	52.40	10.00	8.11	2.40
F 长轴/格点	34.23	165.95	33.92	46.62	39.60
O 长轴/格点	30.32	172.52	20.57	26.40	14.72
F 短轴/格点	10.49	132.42	15.55	32.26	16.91
O 短轴/格点	21.16	134.20	11.19	7.68	11.72
综合匹配度(I)	0.85	0.85	0.90	0.73	0.84

目标对 4 的空间特征评分最低,综合匹配度为 0.73,存在较多空报;目标对 5 的空间综合匹配度为 0.84,也存在空报。

通过前述分析发现,GDFS 对此次大风过程整体预报效果较好,但是在时间上和空间上都存在一定的误差,选择误差最大且大风发展最强盛的 11 时(图 5a₂,5b₂)和 12 时(图 5a₃,5b₃),分别探讨模式在平原和山区的预报空间及强度误差特征。

表 2 给出了 11 时和 12 时各自目标对的属性参数,结合图 5 可知,11 时,目标 3、5 处于地势平坦的平原地区,目标 1、2、4 地处河南西部及北部山区;12 时,1 为西部山地东部平原目标,2 是山区目标,3 是平原目标。结合分析表中数据可知,不论在 11 时还是 12 时,所有目标对的综合匹配度 I 都 >0.7 ,表明模式的空预报性能总体表现较好,但是从各自目标对的地形特点来看:山区目标对的匹配度低于平原目标对;山区目标对之间的面积比偏大或偏小,表明既有较大空报也有较大漏报,且其预报场与实况场之间的轴角差明显大于平原目标对。从目标形态和大小等特征来看,模式对平原地区的预报优于山

区预报。

强度百分位数表示要素量值从最小到最大值的分布情况,图 7 为预报场与实况场各匹配目标对在 10、25、50、75、90 分位数上的风速比值曲线。11 时实况场中的目标 4 仅存在 1 个格点,无法进行风速量值分布的比较,因此对其不作强度预报误差分析。由 11 时风速比值曲线(图 7a)可知:预报场的风速值整体低于实况场(除 10 分位上的目标对 1 和目标对 2 之外),但在 10 分位数上的风速值与实况相近,在 90 分位数上的大值风速明显偏低,以上现象在目标对 1 和目标对 2(山区对象)中体现的尤为明显。由 12 时风速比值曲线(图 7b)可知:目标 1 和 3 在风速高值分布区间,预报低估更显著,而目标 2 的预报场对风速强度的预报效果较好,可见,平原地区的目标,其强度预报存在明显低估,山区目标强度预报较好,而同时覆盖平原和山区的目标 1,也存在明显低估,这是由于对西部山区的漏报及在平原区域的低估双重因素决定的。

两个时次综合来看,在大风发展的强盛阶段,预报对平原目标低估,对山区目标漏报;在大风发展阶

表 2 GDFS 预报场(F)与实况场(O)11 时和 12 时匹配目标的空间诊断量值
Table 2 Spatial attributes of matching objects in GDFS forecast field (F) and PMSC_LAPS observation field (O) at 11:00 BT and 12:00 BT

诊断量	11 时					12 时		
	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 5	目标 1	目标 2	目标 3
质心距离/格点	10.38	12.83	9.73	18.05	18.04	25.57	4.03	13.52
边界距离/格点	0	0	0	0	0	0	0	0
轴角差/°	10.35	0.04	22.58	22.77	17.31	14.97	67.49	23.43
面积比(F/O)	0.18	0.59	3.85	806	5.26	0.61	10	20
交集比(交集面积/最小目标面积)	0.64	0.22	0.87	1.00	0.9	0.49	0.88	1.00
综合匹配度(I)	0.76	0.75	0.84	0.71	0.80	0.83	0.70	0.77

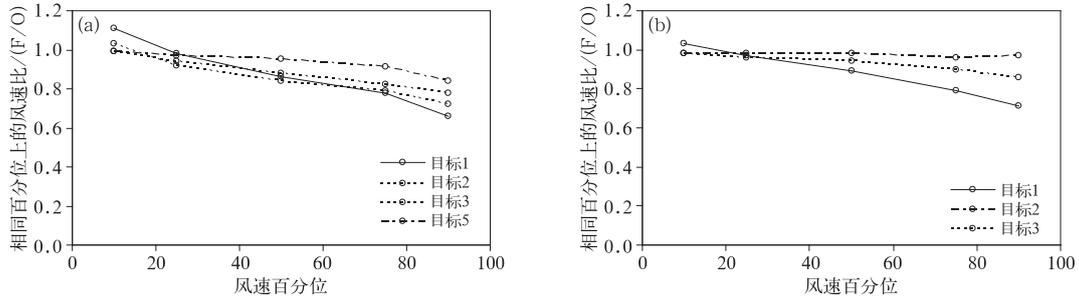


图 7 GDFS 预报场(F)与实况场(O)11 时(a)和 12 时(b)匹配
目标在各风速百分位上的风速比

Fig.7 Wind speed ratio of forecast to observation for different percentile
ranks at 11:00 BT (a) and 12:00 BT (b)

段,平原目标强度预报较好,山区目标仍存在漏报。

综合以上分析结果,GDFS 对河南西南部山区的强风预报范围偏小,且命中率较低,这些强风可能是由于冷空气大风和地形叠加后局地风速增大明显所致,此外,对于平原地区,预报范围偏大,但命中率较高。

4 结论和讨论

MODE 是一种客观定量的综合空间检验方法,在面向专业服务需求的检验应用中,应充分考虑气象要素对用户的影响,针对用户所关注的天气事件,重点从时间、空间两个维度全面评估模式的预报性能,其中的几个关键检验参数需与用户关注致灾事件的指标相结合,才能客观得出对用户有价值的检验结论,为用户使用预报产品提供依据。

本文以 GDFS 系统预报场和 PMSC_LAPS 系统实况场为基础,采用 MODE 空间检验方法,以 2017 年 3 月 1 日发生在河南的一次大风过程为例,探索了面向电网专业气象服务的致灾强风过程的空间检验方法,得到以下结论:

(1) 应用 MODE 方法进行空间检验时发现,关键参数的设置与用户关注的检验指标关系密切;检验阈值 T 的选取首先应考虑气象要素对用户的影响,一般应取会对用户设备设施或户外作业产生不利影响的要素下限值,因此这就需要气象服务人员用户的业务有深入的了解;卷积半径 R 应根据所关注的天气事件尺度以及模式格点分辨率选取,既要保留重要强事件过程,又不可被太多无关细碎目标干扰;参与综合匹配度 I 值计算的各诊断量的权重也应根据检验目的或者用户的关注点确定,若更

关注预报结果的空间分布特征,则提高与空间分布有关的诊断量的权重,若更关注预测强度,则提高与强度有关的诊断量权重;在判断目标对匹配度时, I 的阈值应根据检验目的并通过大量试验确定,不可一概而论。

(2) MODE 对河南强风过程的空间检验结果显示,整体上模式对空间目标物的落区及走向预测能力较强,但对河南西部山区的强风区有漏报,在东北部平原区则有较大范围空报,并存在强度低估的普遍现象;时间检验表明,模式能预报出此次强风过程,并且发展、强盛和消亡大体发生时间相近,但预报与实况存在一定的时间相位差,这些误差主要出现在此次过程的最强时段(11—12 时),同时,预报的大风发展初期相对实况滞后,而消散期偏早。由于模式产品存在空间和时间上的误差,所以需要用户在具体应用时,对预测产品进行有针对性的订正,如对重点关注山区的漏报现象,可通过临近 3 小时预报等手段弥补该类问题。但是上述结论只源于本文一个个例,仍需进行大量类似个例检验才能得到普遍适用的产品订正意见。

参考文献

- 曹春燕,陈凯,陈元昭,等,2017.基于形状匹配的雷达临近预报误差评价计算方法[J].气象,43(8):987-997.
- 陈建萍,2005.全球区域同化预报系统的使用及其数值模拟[J].江西气象科技,28(2):23-26.
- 程正泉,廖代强,2012.数值天气预报模式产品在预报业务中的应用[J].广东气象,34(4):1-5,9.
- 姜勇强,张维桓,周祖刚,2006.模式水平分辨率提高对一段大暴雨预报结果的影响[J].高原气象,25(6):1071-1082.
- 李超,唐千红,陈宇,等,2017.多源数据融合系统 LAPS 的研究进展及其在实况数据服务中的应用[J].气象科技进展,7(2):32-38.

- 李佳,陈葆德,徐同,2016.目标检验方法在高分辨率数值天气预报检验中的应用[J].沙漠与绿洲气象,10(5):1-9.
- 漆梁波,2015.高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展[J].气象,41(6):661-673.
- 马东行,1981.数值天气预报的发展与展望[J].气象科技,9(6):5-8.
- 潘留杰,张宏芳,王建鹏,2014.数值天气预报检验方法研究进展[J].地球科学进展,29(3):327-335.
- 王国荣,陈敏,由凤春,等,2014.基于对象诊断的空间检验方法(MODE)[J].气象科技,42(4):652-656.
- 王平,王晓峰,张蕾,等,2017.地面观测资料在快速更新同化系统中的敏感性试验[J].气象,43(8):901-911.
- 徐双柱,张兵,谌伟,2007. GRAPES 模式对长江流域天气预报的检验分析[J].气象,33(11):65-71.
- 杨波,郑永光,蓝渝,等,2017.国家级强对流天气综合业务支撑体系建设[J].气象,43(7):845-855.
- 章建成,刘奇俊,2006. GRAPES 模式不同云物理方案对短期气候模拟的影响[J].气象,32(7):3-12.
- 郑永光,张小玲,周庆亮,等,2010.强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J].气象,36(7):33-42.
- Brown B G, Bullock R R, Davis C A, et al, 2004. New verification approaches for convective weather forecasts[C]// Proceedings of the 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Hyannis: American Meteorological Society.
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: application to convective rain systems[J]. Mon Wea Rev, 134(7):1785-1795.
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2005. Comments on "Discussion of verification concepts in forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science"[J]. Wea Forecasting, 20(5):769-800.
- Micheas A C, Fox N I, Lack S A, et al, 2007. Cell identification and verification of QPF ensembles using shape analysis techniques [J]. J Hydrol, 343(3/4):105-116.