电网致灾性强降水短临预报评估方法研究

陈笑[1,2]，何晓凤[1]，肖擎曜[1,2]，武正天[1,2]，韩乐琼[1,2]

1 华风气象传媒集团有限责任公司，北京 100081

2 北京玖天气象科技有限公司，北京 100081

提 要：针对电网行业关注的致灾性强降水预报性能的综合评估问题,利用京津冀地区主汛期（2019 年 6-9 月）强降水事件的专业气象服务效果检验,分别从降水目标识别与目标匹配两个角度对应用 MODE（Method for Object-Based Diagnostic Evaluation）方法检验短临预报产品进行了深度剖析。结果表明：京津冀主汛期强降水主要集中在午后至前半夜，雨强大、范围小、漏报多、空间特征预报难；短临预报的强降水频次日变化的相关系数为 0.78-0.94，范围日变化的相关系数为 0.6-0.82，移动路径和雨强的预报效果略优于落区的预报效果，预报时效越短，强降水事件及其空间特征的预报能力越好；本文定义的综合性预报评估方法可弥补传统检验方法的不足，发掘预报的应用潜力与局限性，为精准专业气象服务提供参考。

关 键 词： MODE 检验，京津冀强降水，短临预报评估，电网专业气象服务

Research on Comprehensive Evaluation Method of Disaster-inducing Heavy Precipitation Nowcast for Power Grid

CHEN Xiao[1,2] HE Xiaofeng[1] XIAO Qingyao[1,2] WU Zhengtian[1,2] HAN Leqiong[1,2]

1 Huafeng Meteorological Media Group Co., Ltd., Beijing 100081

2 Beijing Jiutian Weather Science and Technology Co., Ltd.., Beijing 100081

Abstract: Model forecast performance and forewarning service validity of disastrous heavy precipitation have been among the chief concerns in professional meteorological service. In view of these concerns, the evaluation of the power-grid-system-oriented meteorological forewarning for heavy precipitation in the main flood season (June-September, 2019) in Beijing-Tianjin-Hebei region is chosen as an example, in order to carry out in-depth analysis on

资助课题：国家重点研发计划(2018YFC1507801)
第一作者：陈笑，工程师，主要从事数值模式预报产品解释应用，Email：275134698@qq.com
通讯作者：何晓凤，正研级高工，长期从事数值预报解释应用及专业气象服务，Email：hexf@cma.gov.cn

using MODE (Method for Object-based Diagnostic Evaluation) in the inspection of short-term forecast and nowcast from two aspects, namely, target recognition of precipitation and target matching of precipitation. The results have shown that the heavy precipitations in the main flood season of Beijing-Tianjin-Hebei region were mainly concentrated from afternoon to the first half of the night, which were characterized by big in precipitation intensity, small in range, easy false-alarms, and difficulty in predicting their spatial characteristics; The correlation coefficient of diurnal variation of the heavy precipitation frequency of short-term forecast and nowcast ranged from 0.78 to 0.94, while that of the diurnal variation of range was from 0.6 to 0.82. The forecast effect of moving path and rainfall intensity was slightly better than that of the falling area. The shorter the forecast time, the better the forecast effect of heavy precipitations and their spatial characteristics; The comprehensive forecast evaluation method put forward in the paper can make up for the shortcomings of traditional inspection methods, which can explore the potential and limitations of forecast, and provide reference for accurate and specialized meteorological services.

Key words： MODE，heavy precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei region，short-term forecast evaluation，power grid specialized meteorological service

《气象》待刊

资助课题：国家重点研发计划(2018YFC1507801)
第一作者：陈笑，工程师，主要从事数值模式预报产品解释应用，Email：275134698@qq.com
通讯作者：何晓风，正研级高工，长期从事数值预报解释应用及专业气象服务，Email：hexf@cma.gov.cn

引言

随着全球气候变暖和城市化进程的加快，极端降水天气频发（罗伯良等，2008；苏布达等，2006）,对人类生产、生活造成很大影响，尤其是短历时强降水因其发生时间短、降水量大且位置相对集中，对许多行业的防灾避灾带来巨大困难，比如：北京 721 暴雨，造成了北京电网许多变电站发生积水进而导致电力设施损毁，产生了巨大经济损失。电网为提高应对突发性强降水的防灾决策能力，开始将短临降水预报产品引入到其生产系统中，对电网高影响降水过程进行实时监测和滚动预报，这对于电网提高防灾决策能力具有重要意义。然而不同预报精度的短临预报产品产生的价值是不同的，采用何种方式评价短临预报产品的精度是个值得探讨的问题。

近年来，我国的短临天气预报技术取得了显著进步,为客观、全面的评估短临模式的强天气预报效果，相继发展了多种类型的检验方法，其中，业务上常用的是 TS 评分、均方根误差、平均偏差、相关系数等适用于常规天气检验的传统方法,该方法要求预报与实况在空间与强度上严格一一对应,但实际应用时,某些行业和决策方案对预报的落区和范围具有一定容余度,而传统检验的结果会忽略降水的空间连续性、低估预报的可用性,同时也无法给出预报失误的原因。因此,针对时空尺度小、生消移动快和发生概率小等特点的强天气预报，空间检验方法逐渐发展起来（Davis et al，2009；Skok et al，2010；Johnson et al，2013；戴建华等，2013；潘留杰等，2015；李佳等，2016；王新敏和栗晗，2020）。

MODE（Method for Object-Based Diagnostic Evaluation,MODE）是空间检验方法中一种典型的特征法，王国荣等（2014）指出它可克服传统检验方法对空间位置的过度依赖以及 TS 评分的“双重惩罚”等不足。多个学者的研究表明（尤凤春等，2011；王雪莲等，2013；刘凑华和牛若芸，2013；曲巧娜等，2019）,MODE 检验评估方法将降水场看作是由多个天气系统相伴随的降水目标组成,对预报和观测场中的降水目标进行识别和匹配,从降水落区的位置、形态、走向、强度等方面给出客观比较,能够提供更加详细定量的具有一定天气学含义的检验信息,更加全面的反映模式降水预报的性能。

随着 MODE 方法的发展成熟,在气象部门的降水空间检验业务中应用越来越多，但很少有研究对预报产品在不同行业高影响事件中的效果进行评估，因而陈笑等（2018）基于该方法探讨了其检验电网强风高影响事件的适用性,，并将 MODE 的关键参数取值与不同行业用户的承灾能力、决策方案的时空冗余度等相结合，可较好的评估出预测产品在特定行业应用场景下的预报能力，但该工作仅基于一个大风个例展开，无法分析出基于大量电网

高影响强风过程空间检验参数的统计特征，故不能深入的揭示某类预报产品对某个行业场景的应用价值。此外，并未探索其在电网高影响暴雨过程检验中的适用性，因此，本文考虑了京津冀地区短时强降水的主要特点及其对电网用户的影响,将 MODE 主要检验参数的取值与电网业务的特点相结合，分别基于 MODE 检验过程中目标识别与目标匹配的计算结果,研究了降水目标个数、大小、强度的日变化规律性以及降水落区、范围、走向、中心雨强的预报偏差等参数的统计特征，揭示了 RMAPS-IN 短临预报系统对 2019 年京津冀地区主汛期强降水事件的预报效果,以期为用户评价短临预报预警效果提供一种合理、全面的检验方法,为检验者充分解释应用 MODE 检验结果提供一种更精细的评估流程,为短临预报模式性能的改进提供有效参考，并为行业气象预报人员科学使用短临预报产品提供一定的客观依据。

1 预报与实况降水场数据

RMAPS-IN 是中国气象局北京城市气象研究所基于华北区域多源观测资料（雷达、自动气象站）及多系统产品（RMAPS-ST 数值模式产品、VDRAS 临近预报风场）融合集成技术、动力降尺度技术、复杂地形模式订正技术拓展研发的短临实时融合分析和预报系统，在 2016 年正式投入业务运行，逐 10 分钟启动 1 次，更新 1km×1km 空间分辨率的三维气象要素客观分析产品和未来 0-12 小时地面要素及降水集成预报产品（杨璐等，2019；穆启占，2016；王国荣等，2019），基于各数据资料的到报时间以及计算机资源的使用情况，预报产品大概滞后 10～15 分钟左右。RMAPS-IN 系统主要有 4 个模块（降水、温度、湿度和风），不同种类观测资料通过不同功能模块输入 RMAPS-IN 进行融合分析,其中降水模块首先基于雷达和自动站观测资料，采用融合技术得出格点定量降水估测（QPE），然后计算出降水预报的移动矢量，配合模式预报的引导风场，得出降水的外推预报。宋林烨等（2019）通过一种新的雷达本地化定量气候较准算法改进了 RMAPS-IN 系统降水分析产品的质量,此算法的核心是基于长时间序列的资料对雷达定量降水估测进行气候尺度的误差约束，检验结果表明，经校准后，绝大部分气象站点位置的雷达定量降水估测更接近自动气象站观测值，各项偏差减小 50%，且降水结构细致，雷达定量降水估测的准确度显著提升，由此，用 RMAPS-IN 的降水分析产品作为本研究的实况场是可靠的 。解小寒等（2018）的评估检验结果显示，RMAPS-IN 系统的高分辨率三维实况分析场质量良好，其短临预报在地形复杂的山洪地质灾害隐患地区的短临预警服务上具有一定优势,王国荣等（2019）也指出，基于

RMAPS-IN 多种诊断因子的对流发展集合概率在强弱两种天气背景下，都能较好的反映对流系统在临近时段的发展趋势。

本研究的实况降水场为 RMAPS-IN 的逐时格点实况分析数据,预报降水场为 RMAPS-IN 的 1 小时及 2 小时短临预报数据,检验时段为 2019 年 6 月 1 日 00 时-9 月 30 日 23 时（北京时）,检验区域为京津冀地区（37.4°～42.7° N,113.2°～119.4° E）。

2 预报效果评估方法

2.1 评估流程概述

对电网用户而言，首先关注预报产品在固定区域内对某种特定阈值事件的综合预报能力，因此，本研究在识别出所有实况场强降水目标和预报场强降水目标的基础之上，定义了预报准确率、空报率和漏报率等指标，并结合降水目标个数、大小及强度的日变化规律,对短时强降水的预报敏感性、降水频率、影响范围及中心雨强的日变化趋势进行宏观预报能力分析，进而揭示产品的综合预报能力；此外，由于电网用户关注一定强度之上的强降水事件，相对更看中降水的落区位置预报，对降水的影响范围以及时间偏差具有一定的冗余能力，因此，本文在匹配实况场和预报场中强降水目标对的基础上，又定义了目标对匹配率和整场空间预报评分（OTS）指标，并结合匹配成功目标对的质心距离、面积比、交集比、轴角差、强度比的频率和空间分布,对降水的落区位置、形态走向、中心雨强等特性进行精细化预报能力分析。

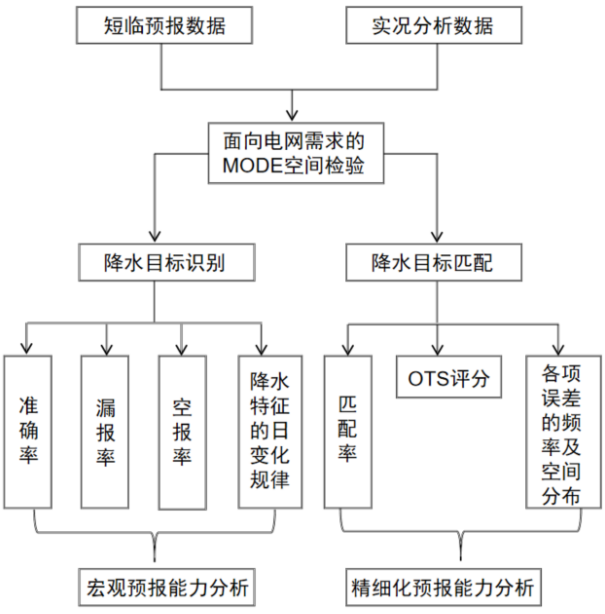


图 1 评估流程图

Fig.1 Evaluation Flow Chart

2.2 主要方法介绍

2.2.1 MODE 关键参数选取

MODE 方法将检验要素作为空间上连续的目标体识别出来,模拟人的主观判断,用模糊逻辑算法分析预报与实况场的空间特性差异,进而分析预报结果的误差来源。基于之前对 MODE 检验中各关键参数的深入探讨,发现：为适度聚焦检验目标并客观表达预报的空间误差,检验过程中应综合考虑预报和实况的水平分辨率、用户对该类强天气预报误差的空间和时间容余度等并结合电网用户业务特点,合理选择卷积半径（R）、检验阈值（T）、空间误差诊断量权重（W）、空间特征综合匹配阈值（I）以及强度百分位比值等关键参数（陈笑等，2018）。

本研究对上述 5 种检验参数的选取依据如下：

（1）卷积半径 R

原始场中的细碎小目标物会对强天气事件的检验造成干扰，设置卷积半径进行二维空间滤波，会使原始数据场更加平滑和连续，因此，卷积半径 R 的大小决定了检验场降水目标的最小面积和粗糙度。

本研究检验区域的空间分辨率为 1km,格点范围为 588×688，雷暴云团的最小尺度一般为 2km，为突出大范围、影响较强的集中降水区域,应过滤掉破碎的小尺度降水,此外,通过大量试验发现,R 取 4 时,对目标的平滑效果最好（图略）,既能降低其形状的复杂度,又能最大程度上保留其主要空间特征。

（2）检验阈值 T

通过选取检验阈值，筛选不同强度的事件，使重点关注的强天气事件特性更加显著，阈值 T 的确定需要考虑气象要素对用户的影响。

每小时达到 10mm、20mm、40mm 以上量级的降水对电网变电站的影响较大，因此，分别选取以上 3 种量值作为本研究中的空间检验阈值 T。

（3）空间误差权重 W

根据降水目标的位置、走向以及范围这 3 种空间特征类别，在本研究中，分别选取质心距离、轴角差、边界距离、面积比、交集比作为计算目标对空间综合匹配度的 5 项空间误差因子，然后确定每个误差因子的计算权重 W（表 1），权重的大小代表了误差因子对降水目标匹配度的影响大小，最后应用模糊逻辑算法，综合考虑这 5 种空间误差，定量计算出每个目标对中两个单体间的匹配度，这是目标对最终能否成功匹配的依据。

《气象》待刊

空间误差权重 W 应基于强天气事件的空间特点以及电网对预报空间误差的容忍度确定，本研究中的 5 项空间误差因子权重系数的选取及依据如表 1 所述。

表 1　5 项空间误差因子的权重设置

Table 1 Weight setting of 5 spatial error factors

空间特征类别	降水落区位置	降水系统走向	降水影响范围		
空间误差因子	质心距离	轴角差	边界距离	面积比	交集比
权重系数 W	4	3	1	1	1
配置依据	强降水目标相对检验区域较小（图 2），且电网用户对降水落区位置的预报要求较高，因此，降水落区位置应为计算目标空间匹配度的首要因子	京津冀暴雨目标的空间形态和走向特征明显，西南-东北与西北-东南向椭圆形态的暴雨目标出现频次较高，分别为 53%及 39%（图 3），降水系统走向的预报准确与否对电网灾害防控的意义较大，因此，应为计算目标空间匹配度的次要因子	对模式性能有较高要求的强降水影响范围应作为短临预报检验的考量因素之一，但电网用户对强降水的影响范围预报又有一定冗余度，因此，降水影响范围的 3 种误差因子权重均设为 1		

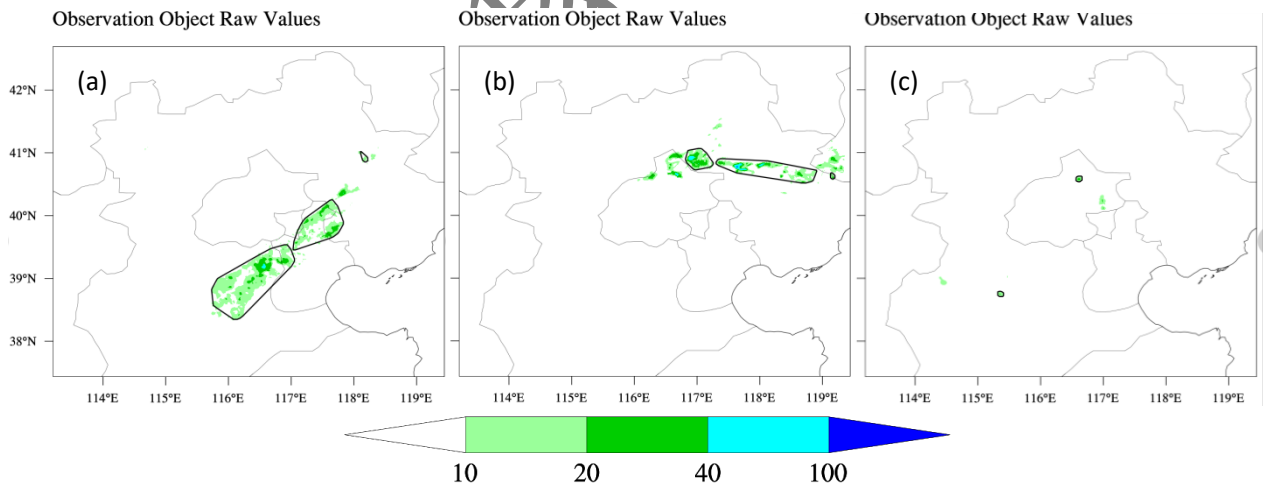


图 2 三种典型形态走向特点的实况暴雨目标物示意图（填色单位：mm）：（a）2019 年 7 月 5 日 19 时：西南--东北走向，（b）2019 年 7 月 25 日 18 时：西北--东南走向，（c）2019 年 7 月 27 日 17 时：近似圆形

Fig.2 Illustrations of three typical rainstorm patterns in real case(units:mm) ：

录用稿件

(a)2019-07-05-19 BJT:Southwest-Northeast;(b)2019-07-25-18 BJT:Northwest --

Southeast;(c)2019-07-27-17 BJT:rounded;

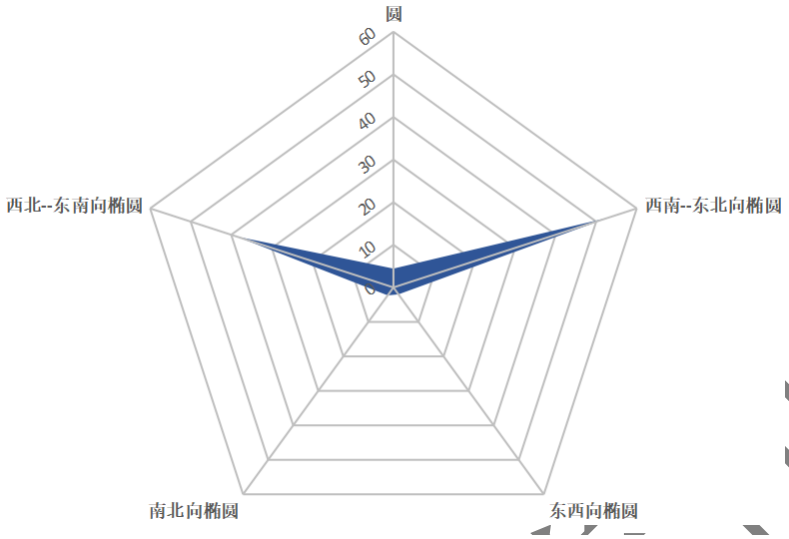


图 3 实况场暴雨目标物 5 种形态走向的频率玫瑰图（轴值为出现频率,单位为%）

Fig.3 The frequency rose diagram for five patterns of rainstorms in real case

（4）空间特征综合匹配阈值 I

计算出空间匹配度之后，还需要确定一个匹配度阈值 I，若空间匹配度达到此阈值之上，则目标对匹配成功，否则，匹配不成功，I 的大小决定了检验标准的高低，I 越大，表明对强天气事件的预报精度要求更高，因此，I 的选取主要取决于检验者或用户对该强天气事件预报能力和预报准确度的要求。

通过大量试验发现,空间综合相似度为 0.7 以上的目标对,其预报与实况的降水落区位置、影响范围、形态走向等空间特性最接近,最符合检验者的主观判断,由此,本研究中的匹配阈值 I 取 0.7。

（5）强度百分位比值

在用 MODE 方法进行检验计算的过程中，一般会将每个降水目标内部的所有格点降水量值从小到大排列，然后对预报和实况场中匹配成功的目标对分别做 10、25、50、75、90 分位上的强度比值，在本研究中，选取 90 分位值作为降水强度的评判参数，根据比值的大小评估空间特征相似的降水目标的雨强预报效果。

2.2.2 宏观预报评估指标定义

顾问等（2015）针对强降水的研究中,将单站/格点上连续发生 n 小时以上的强降水定义为一个短持续或长持续强降水事件,本研究考虑降水要素的空间连续性,基于 MODE 识

别出的降水目标个数,将 1 小时内发生空间连续的强降水定义为一个短时强降水事件,其不同量级事件的具体定义如表 2 所示：

表 2 短时强降水事件定义

Table 1 Defination of short time heavy precipitation

项目	定义
暴雨事件	基于 MODE 方法在实况场或预报场中识别出 1 个或以上小时累积降水量≥10mm 的目标物
大暴雨事件	基于 MODE 方法在实况场或预报场中识别出 1 个或以上小时累积降水量≥20mm 的目标物
特大暴雨事件	基于 MODE 方法在实况场或预报场中识别出 1 个或以上小时累积降水量≥40mm 的目标物

针对上述短时强降水事件,基于常规降水检验中的 TS 评分、空报率及漏报率算法,定义如下事件检验指标：

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \times 100\% \quad (1)$$

$$PO = \frac{NC}{NA + NC} \times 100\% \quad (2)$$

$$FAR = \frac{NB}{NA + NB} \times 100\% \quad (3)$$

上述公式中,TS 为事件预报成功指数,PO 为事件漏报率,FAR 为事件空报率；NA 为预报和实况场中同时出现短时强降水事件的时次,NB 为预报场出现短时强降水事件,但实况场中没出现的时次,NC 为实况场中出现短时强降水事件,但预报场中没出现的时次。

2.2.3 精细化预报评估指标定义

（1）匹配率

为大致评估预报场与实况场降水目标的匹配情况,定义如下检验指标：

$$MS = \frac{ND}{NA} \times 100\% \quad (4)$$

上述公式中,MS 是在短时强降水事件预报准确的基础上,预报与实况降水目标的匹配率；NA 为预报和实况场中同时出现短时强降水事件的时次,ND 为预报与实况场中有匹配成功目标对的时次。

《气象》待刊

（2）OTS

在 MODE 检验中，通常用 MMI（The median of maximum interest）代表整场的空间预报能力，其计算方法是：预报场识别出 n 个对象，实况场识别出 m 个对象，预报场中每个对象（Fi）都有 m 个观测场对象与之匹配，对应 m 个相似度值，取其最大值作为 Fi 的最优相似度，同理对实况场做类似计算，将预报与实况场中每个对象的最优相似度合并成一个数组，取该数组的中值作为本场检验的综合相似度（MMI）。但是，不考虑目标对成功匹配的个数与目标的影响范围，仅用所有目标对相似度的中位数代表整场的预报效果在某些情况下不合理，例如：有一个面积较大的降水目标对，其相似度为 0.9，另有若干面积较小的目标对的相似度均不足 0.5，那么整场的 MMI 值可能不超过 0.6，这对关注大面积降水事件的用户显然是不适用的。

因此，本研究基于 MODE 检验结果中的降水目标匹配个数、目标对面积以及目标对匹配度评分，计算能够科学量化空间预报准确性的 OTS（object-based threat score）指标（Johnson et al，2011；Ji et al，2020），其意义在于，对于一次强降水事件而言，匹配的目标对越多，或高评分目标对的降水影响面积越大，其整场的综合空间预报评分（OTS）越高，计算公式如下：

$$OTS = \frac{\sum_{p=1}^{p} I^{p}(a_f^p + a_o^p)}{A_f + A_o} \quad (5)$$

上述公式中，p 是匹配目标对的个数，A_f、A_o 分别为预报场和实况场中降水目标的总面积，a_f^p、a_o^p（p=1,2,3....、p）分别为第 p 个匹配目标对的预报目标面积和实况目标面积，I^p 为第 p 个匹配目标对的匹配度评分。

3 检验结果分析

3.1 基于降水目标识别的宏观预报能力分析

空间上连续并对电网用户造成影响的短时强降水事件随着降水量级的增加，发生概率显著降低，虽然特大暴雨事件的发生频率较低，但其短时内降水强度更大，变电站积水下渗的速度更快，抢修难度更大，对电网设备造成的损失也更严重，此外，短时强降水事件的预报概率比实际发生概率略偏高（表 3），表明短临预报系统对暴雨及以上强降水事件的抓取比较敏感，存在空报现象。

表 4 为三种短时强降水事件的预报准确率、漏报率及空报率。结果表明，降水强度越

大的事件,预报准确率越低,空报及漏报率越高,空报率普遍大于漏报率,且随着降水强度增加,预报准确率的降幅及空报、漏报率的增幅均增大,空报率的增幅大于漏报；此外,1 小时的预报效果明显优于 2 小时的预报效果,表示随着预报时效的增加,短临预报性能下降,准确率降低,空报及漏报均增加,且漏报的增幅大于空报。

表 3 实况与预报场发生短时强降水事件的频率对比

Table 2 Frequency of short time heavy precipitation occurrences in observations vs forecasts

检验场	暴雨事件	大暴雨事件	特大暴雨事件
实况	26%	16%	5%
1 小时预报	27%	18%	8%
2 小时预报	27%	18%	8%

表 4 不同等级短时强降水事件的预报准确率、漏报率及空报率

Table 3 Forecast accuracy rate, omission rate and false report rate of different short time heavy precipitation occurrences

	暴雨事件			大暴雨事件			特大暴雨事件		
检验指标	ACC	PO	FAR	ACC	PO	FAR	ACC	PO	FAR
1 小时预报	72%	14%	19%	64%	17%	27%	32%	37%	61%
2 小时预报	64%	21%	23%	52%	28%	34%	21%	57%	70%

从实况降水场的日变化特征来看（图 4）,随着暴雨量级的增加,目标物的个数和平均面积逐渐减小,但不同量级暴雨目标物个数及面积的日变化趋势基本一致:午后至前半夜的降水目标较多，暴雨、大暴雨及特大暴雨的个数分别在 16 时、15 时及 14 时达到最大,后半夜至上午的降水目标相对较少；后半夜至上午（00 时--10 时）的降水目标平均面积相对午后至前半夜（12 时--23 时）较大,凌晨左右降水目标面积可达最大。暴雨及大暴雨目标的个数及降水面积的日变化趋势的预报效果较好,预报与实况的相关系数基本大于 0.6（图 4（a1,a2,b1,b2））,最好可达到 0.94（图 4（a1））,随着暴雨量级的增加,预报性能逐渐减弱,对特大暴雨的预报效果较差,其预报与实况降水的日变化均为负相关(图 4(a3,b3))；

预报场中降水个数峰值出现的时刻较实况明显滞后，午后至前半夜，降水目标个数与平均面积的预报误差相对较大，预报的降水面积普遍偏大，1 小时的降水目标个数及面积的预报效果明显优于 2 小时。

从实况降水强度的日变化特征来看（图 5），随着暴雨量级的增加，降水目标内最大雨强的波动性增大，但不同量级暴雨目标的最大雨强的日变化趋势基本一致：午后至前半夜，降水较强，暴雨、大暴雨及特大暴雨的最大雨强分别在 15 时、16 时及 17 时达到最大，后半夜至上午，降水较弱且波动相对平稳。从降水预报效果来看，三种暴雨目标降水强度日变化趋势的预报效果较好，预报与实况的相关系数基本大于 0.6，且预报场中雨强峰值出现的时刻与实况相差不大，但预报对暴雨及大暴雨目标内的最大降水强度普遍高估（图 5（c1，c2）），且在午后的预报绝对误差较大，对后半夜至上午特大暴雨目标内的最大降水强度略有低估（图 5（c3）），1 小时的雨强预报效果明显优于 2 小时。

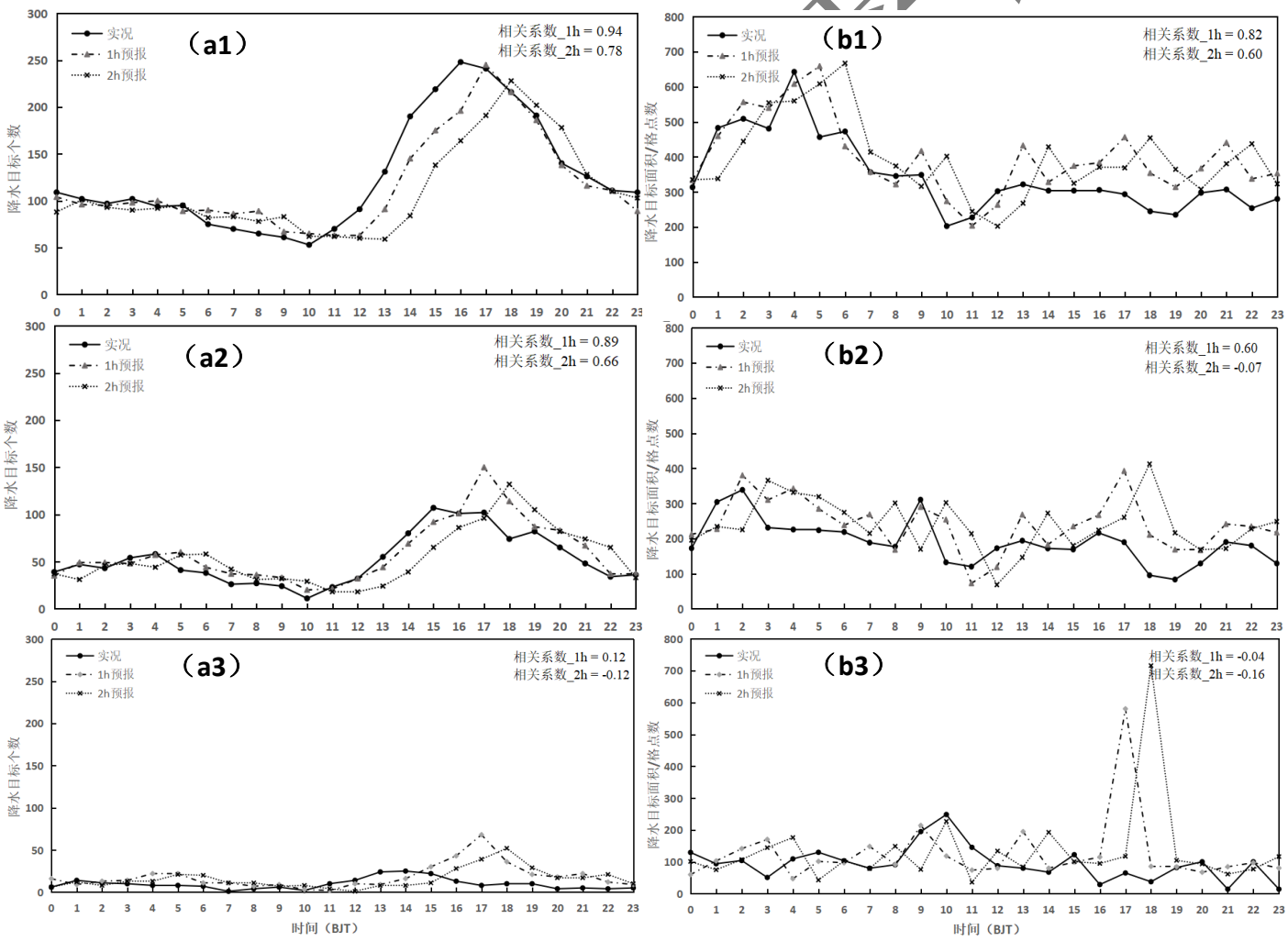


图 4 实况及预报场不同量级降水目标个数（a1、a2、a3）及面积（b1、b2、b3）日变化趋势（面积单位为格点数）：（a1,b1）暴雨目标，（a2,b2）大暴雨目标，（a3,b3）特大暴雨目标

Fig. 4 The diurnal variation trend of rainstorms' number and area in observations vs forecasts: (a1, b1) rainstorms greater than 10mm, (a2, b2) rainstorms greater than 20mm, (a3, b3) rainstorms greater than 40mm

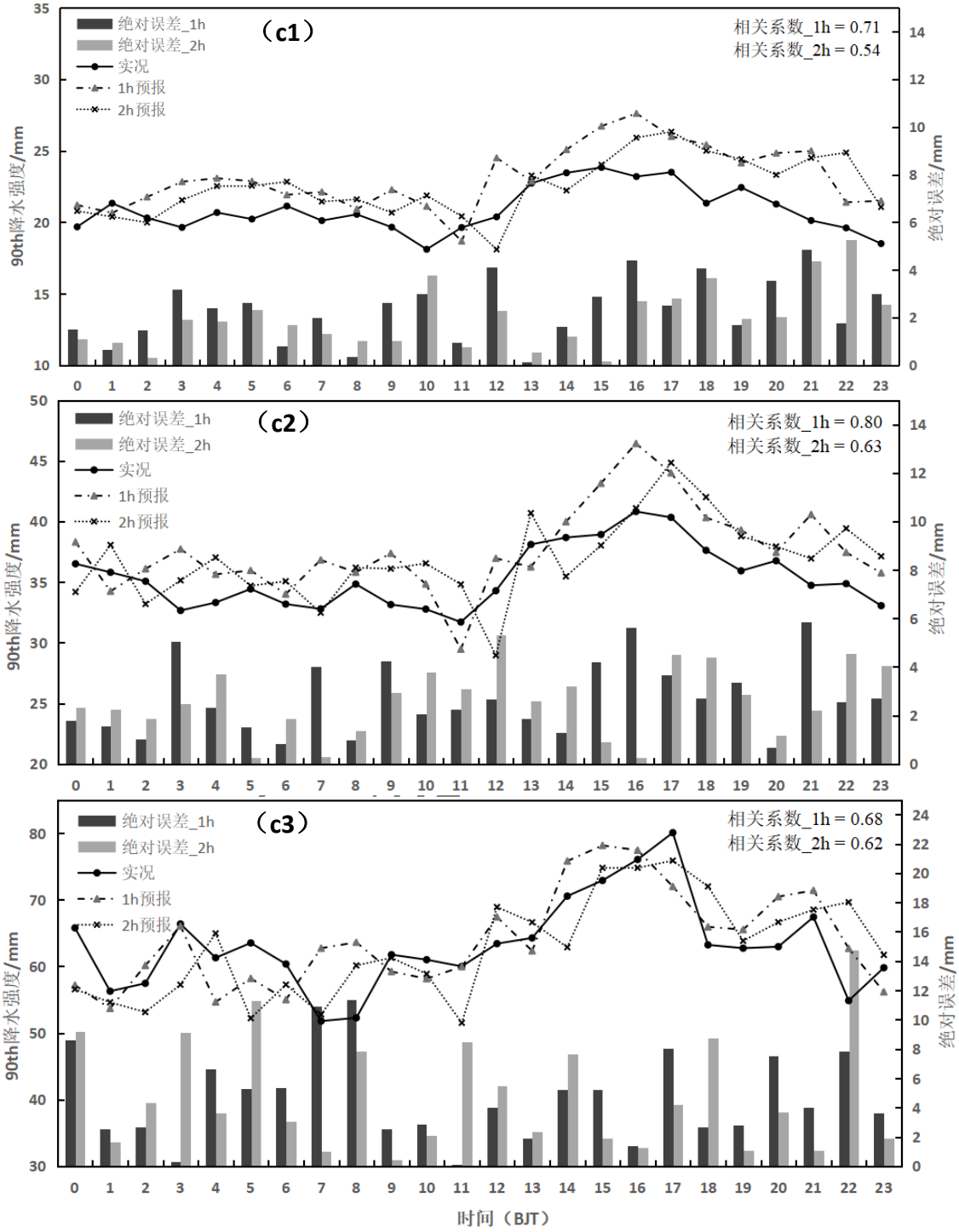


图 5 实况及预报场不同量级降水目标内 90 分位降水强度日变化趋势（曲线图为降水强度，柱状图为预报绝对误差）：（c1）暴雨目标，（c2）大暴雨目标，（c3）特大暴雨目标

Fig.5 The diurnal variation trend of rainstorms' intensity in the 90th percentile in observations vs forecasts:(c1)rainstorms greater than 10mm, (c2)rainstorms greater than 20mm, (c3)rainstorms greater than 40mm

综上所述,京津冀主汛期强降水的主要特征是：夏季午后至前半夜,由于近地面温度较高湿度较大,热力及动力条件配合较好,发生对流性强降水的概率较大,这种强降水的特点是降水集中且雨强较大,后半夜至次日上午,发生东北冷涡或副高外围暖湿气流等引起的系统性强降水的概率较大,这种强降水的特点是降水影响范围较广,雨强相对强对流暴雨较弱。

此外，短临预报模式的宏观预报能力主要表现出以下基本特征：短临预报对影响电网安全的强天气比较敏感,对同一种暴雨事件的空报普遍大于漏报,且随着降水等级的增加,空报的增幅大于漏报,但随着短临预报时效的增加,漏报的增幅大于空报；短临模式对强降水日变化趋势的整体预报效果较好,但随着降水量级及预报时效的增加,预报性能逐渐减弱,且对午后对流性强降水存在漏报,对其降水面积及强度预报偏大。

3.2 基于降水目标匹配的精细化预报能力分析

表 5 为不同等级短时强降水的目标匹配率,其计算公式如 2.2.3 节公式（4）所示,匹配率越高,可大致表明降水目标空间特征（落区位置、形态走向以及影响范围等）的预报效果越好。统计结果显示,1 小时短临预报场可对 80%暴雨目标物的空间特征预报较准确,2 小时短临预报场可对 48%暴雨目标物的空间特征预报较准确,此后,随着降水量级的增加,降水目标的匹配率逐渐降低。

图 6 为 1 小时与 2 小时预报场 OTS 的日变化趋势,其计算公式如 2.2.3 节公式（5）所示,OTS 越接近 1,表明整个短时强降水场的空间预报效果越好。从图中可以看出,1 小时预报场的 OTS 一般在 0.65-0.8 之间,2 小时预报场的 OTS 基本为 0.6 以下,短临 1 小时的空间预报效果明显优于短临 2 小时,此外,凌晨至夜间 23 时,OTS 逐渐降低（图 6 中蓝色及橙色趋势线）,表明午后的强降水空间预报效果相对于后半夜至上午较差。

表 5 不同等级短时强降水的目标匹配率

Table 4 Matching rate of different short time heavy precipitation targets

检验场	暴雨目标	大暴雨目标	特大暴雨目标

1 小时预报	80%	70%	53%
2 小时预报	48%	31%	20%

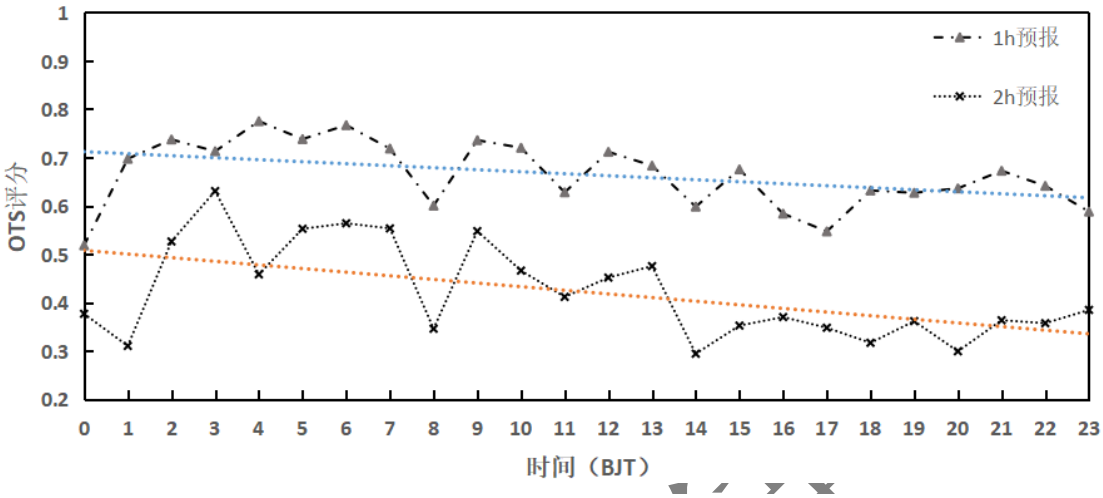


图 6　1 小时与 2 小时预报场 OTS 的日变化趋势（蓝色虚线为 1 小时预报场的趋势线，橙色虚线为 2 小时预报场的趋势线）

Fig.6 The diurnal variation trend of OTS in 1 hour and 2 hour forecast field (Blue dotted line:1 hour forecast, Orange dotted line:2 hour forecast)

基于以上短时强降水空间预报能力的整体评价结果，下文仅对 1 小时短临预报场中暴雨目标对的强度及各项空间预报误差进行统计分析。

图 7 为预报场与实况场中匹配成功的暴雨目标对强度及各项空间误差的频率分布图。由统计结果可知，暴雨目标的空间走向及中心雨强的预报效果较好，61%的匹配目标对的轴角差小于 30°，42%的匹配目标对的强度比大于 0.8；暴雨目标影响范围的预报效果一般，50%的匹配目标对的面积比大于 0.6，表明预报场对降水影响区域的预报偏大或偏小较多；暴雨目标落区位置的预报效果一般，48%的匹配目标对的质心距离不超过 10km，且多数集中在 5-10km 之间，目标对的质心距离与目标本身的空间尺度有关，相同预报能力下，目标空间尺度越大，质心距离越大，结合本研究中目标物平均空间尺度的频率分布可知（图略），有 55%的暴雨目标的空间尺度为 10km 以内，这表明，预报场中有近一半暴雨目标的落区位置在实况降水的影响区域之外，此外，29%的匹配目标对的交集比大于 0.8，23%的匹配目标对的交集比小于 0.2，这表明，有近四分之一暴雨目标与实况暴雨区域相近却不相交。

根据表 6 中各项空间及强度误差对应的预报优劣的分级标准，重点对北京主汛期暴雨事件的各项空间及强度特征的不同等级预报效果进行空间统计分析（图 8），图中的标记

点为所有暴雨目标的质心位置，绿色、蓝色、红色分别代表预报的好、中、差三级。整体上看,平原地区的暴雨预报效果优于西部及北部山区,其中,海拔较高的山区及山前平原地区（昌平、海淀、房山东部）暴雨目标的落区位置、降水范围、中心最大雨强等预报效果较差（图 8（a,b,c））,这表明山地地形对暴雨的触发、加强、削弱及消亡可能有一定的影响；房山--顺义一带暴雨目标的影响区域和走向的预报效果较差（图 8（a,d））,结合前文对降水目标物形态走向的统计结果,发现,北京地区夏季易受副高西北侧冷暖气流交汇的影响,形成自西南向东北移动的强降水过程；此外,通州地区强降水的影响范围及中心最大雨强的预报效果较差（图 8（a,b））,这可能是由于降水目标东移过程中,热力及动力条件配合较好造成局地降水加强。

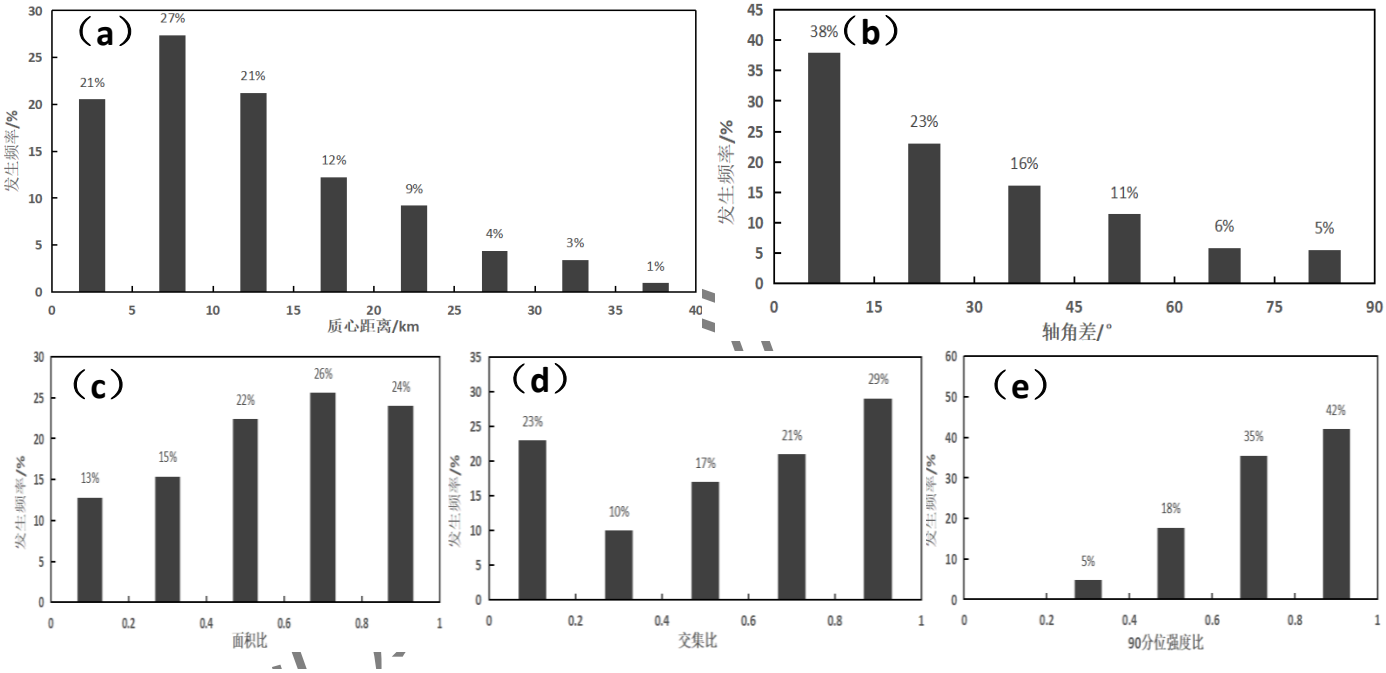


图 7　1 小时短临预报场中暴雨目标对的空间误差及降水强度误差频率分布：

（a）质心距离，（b）轴角差，（c）面积比，（d）交集比，（e）90 分位强度比

Fig.7 Frequency distribution of rainstorm target pairs' spatial and precipitation intensity error in 1 hour forecast field(a)Centroid distance, (b)Angle difference, (c)Area ratio, (d)Intersection area ratio, (e)90 percentile intensity ratio

表 6　各项空间及强度误差对应的预报优劣的分级标准

Table 5　Grading standard of the spatial and precipitation intensity error

预报优劣等级	好	中	差

质心距离/km	0-5	5-25	＞ 25
轴角差/°	0-15	15-60	＞ 60
面积比	0.8-1	0.4-0.8	＜ 0.4
交集比	0.8-1	0.4-0.8	＜ 0.4
90 分位强度比	0.8-1	0.4-0.8	＜ 0.4

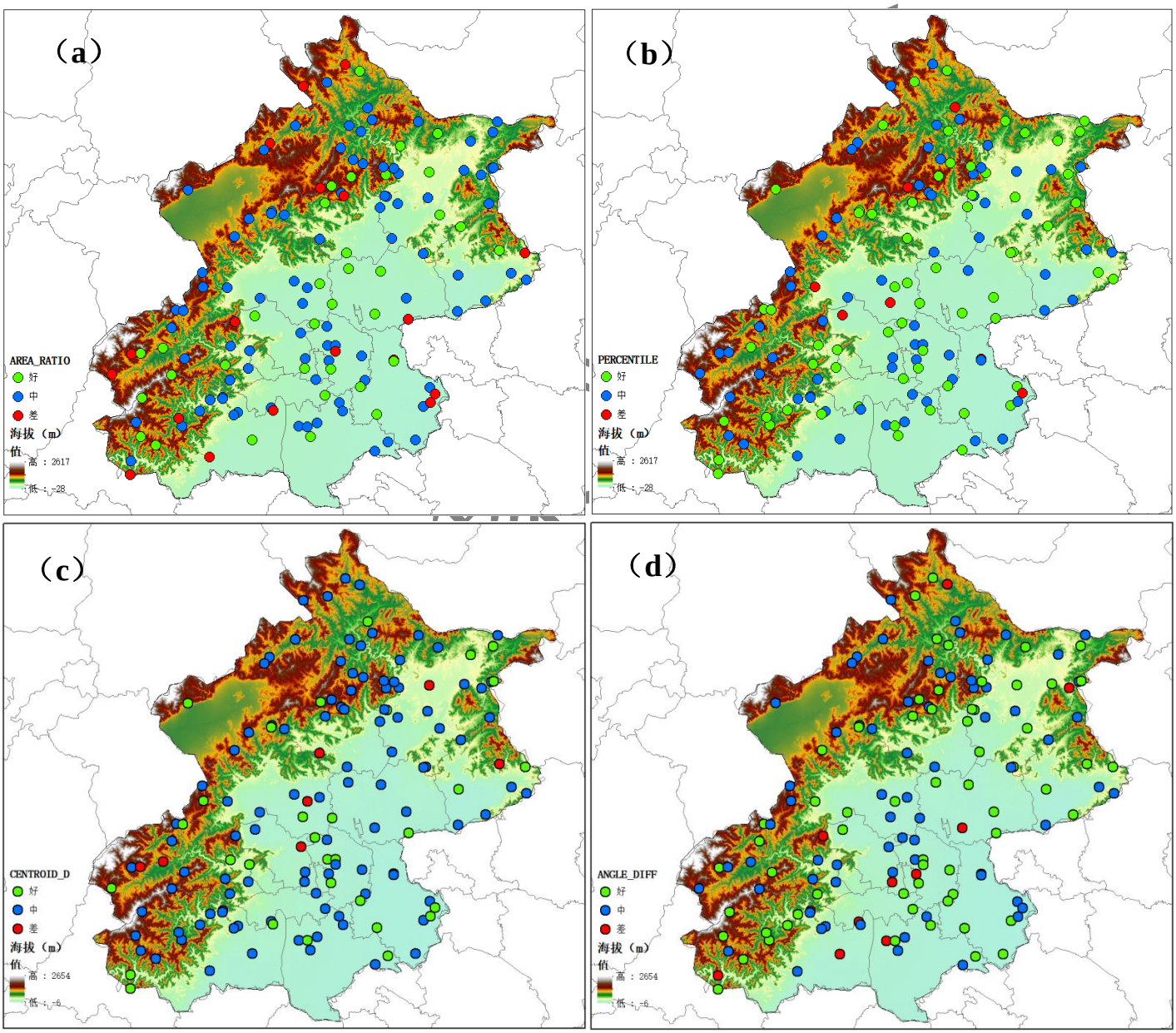


图 8 北京地区暴雨目标各项空间及强度特征的不同等级预报效果空间分布图：（a）降水影响区域，（b）中心雨强，（c）落区位置，（d）形态走向

Fig.8 Spatial distribution of rainstorm targets with different spatial and intensity characteristics in Beijing area: (a)Area of precipitation, (b)Central intensity of precipitation, (c)Central location of precipitation, (d)Shape of precipitation

综上所述,短临预报模式的精细化预报能力主要表现出以下基本特征:短临预报模式对午后强降水的整体空间预报性能相对后半夜至次日上午较差，对强降水移动路径及中心最大雨强的预报效果略优于对降水影响范围及落区位置的预报效果；北京地区山地地形以及平原局地强对流触发、加强、削弱或消亡的降水目标的整体预报效果相对较差,由西南方向移入北京的系统性强降水的移动路径和降水区域的预报效果相对较差。

4 讨论与结论

为了满足电网用户对致灾性强降水过程预报的应用需求，帮助其寻找更合适的短临预报产品，本文将 MODE 方法与 RMAPS-IN 高分辨率实况分析和预报产品相结合，定义了一个以事件预报准确率、空报率、漏报率、降水特征日变化规律、匹配率、OTS、各项误差的频率和空间分布为主的综合性预报评判指标体系，并基于 MODE 核心检验参数，提出了一套面向电网用户的致灾性强降水目标识别和匹配参数阈值，在此工作基础上，开展了京津冀地区 2019 年汛期的强降水事件检验，得到以下结论：

1、京津冀主汛期强降水走向主要有西北-东南和西南-东北两种,午后至前半夜的降水范围较小、频次和雨强较大，后半夜至次日上午的降水范围较大、雨强较小；

2、强降水事件的 1 小时短临预报准确率达到 72%，2 小时准确率达到 64%，空报率普遍高于漏报率，漏报多发生于午后；短临预报对强降水频次日变化趋势的预报相关系数为 0.78-0.94，对强降水范围日变化趋势的预报相关系数为 0.6-0.82；

3、强降水空间特征的 1 小时短临预报能力评分可达 0.65-0.8，2 小时评分一般在 0.6 以下；总体上，午后至前半夜的强降水空间预报效果相对较差，短临预报对强降水移动路径和雨强的预报效果略优于降水落区的预报效果。

RMAPS-IN 短临预报系统对一般强降水事件比较敏感，但由于其源于实况外推，未考虑强降水的生消过程，因此，对山地地形影响或午后局地热量积聚触发的强降水不敏感，存在漏报或空间预报误差较大的情况。对此，除却改进产品预报性能，应针对短临预报产品的局限性，为电网用户提供专业定制化精准气象服务，如重点关注降水云团翻山后的变化趋势，或在夏季午后高温时段，注意防范平原地区局地触发的短时强降水。

参考文献

陈笑, 赵东, 何晓凤, 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. Chen X, Zhao D, He X F, et al, 2018. Evaluation and analysis of model forecast performance of high wind based on MODE method[J]. Meteor Mon, 44(8): 1009-1019 (in Chinese).

戴建华, 茅懋, 邵玲玲, 等, 2013. 强对流天气预报检验新方法在上海的应用尝试[J]. 气象科技进展, 3(3): 40-45. Dai J H, Mao M, Shao L L, et al, 2013. Applications of a new verification method for severe convection forecasting and Nowcasting in Shanghai[J]. Adv Meteor Sci Technol, 3(3): 40-45 (in Chinese).

顾问, 谈建国, 常远勇, 2015. 1981-2013 年上海地区强降水事件特征分析[J]. 气象与环境学报, 31(6): 107-114. Gu W, Tan J G, Chang Y Y, 2015. Characteristics of heavy rainfall events in Shanghai region from 1981 to 2013[J]. J Meteor Environ, 31(6): 107-114 (in Chinese).

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. Li J, Chen B D, Xu T, 2016. Application of the object-based verification method for high resolution NWP[J]. Desert Oasis Meteor, 10(5): 1-9 (in Chinese).

刘凑华, 牛若芸, 2013. 基于目标的降水检验方法及应用[J]. 气象, 39(6): 681-690. Liu C H, Niu R Y, 2013. Object-based precipitation verification method and its application[J]. Meteor Mon, 39(6): 681-690 (in Chinese).

罗伯良, 张超, 林浩, 2008. 近 40 年湖南省极端强降水气候变化趋势与突变特征[J]. 气象, 34(1): 80-85. Luo B L, Zhang C, Lin H, 2008. Characteristics of climatic changes and catastrophe of extreme precipitation in Hunan in recent 40 years[J]. Meteor Mon, 34(1): 80-85 (in Chinese).

穆启占, 2016. RMAPS-IN 数值模式产品研发及其在气象服务中的应用[D]. 兰州: 兰州大学. Mu Q Z, 2016. Developing products from RMAPS-IN numerical weather prediction system and their application in weather service[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese).

潘留杰, 张宏芳, 陈小婷, 等, 2015. 基于邻域法的高分辨率模式降水的预报能力分析[J]. 热带气象学报, 31(5): 632-642. Pan L J, Zhang H F, Chen X T, et all, 2015. Neighborhood-based precipitation forecasting capability analysis of high-resolution models[J]. J Trop Meteor, 31(5): 632-642 (in Chinese).

曲巧娜, 盛春岩, 范苏丹, 等, 2019. 基于目标对象检验法的多种模式强降水能力的比较[J]. 气象, 45(7): 908-919. Qu Q N, Sheng C Y, Fan S D, et al, 2019. Comparison of the multi-model forecasts for severe precipitation based on the object verification[J]. Meteor Mon, 45(7): 908-919 (in Chinese).

宋林烨, 陈明轩, 程丛兰, 等, 2019. 京津冀夏季雷达定量降水估测的误差统计及定量气候校准[J]. 气象学报, 77(3): 497-515. Song L Y, Chen M X, Cheng C L, et al, 2019. Characteristics of summer QPE error and a climatological correction method over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Meteor Sin, 77(3): 497-515 (in Chinese).

苏布达, 姜彤, 任国玉, 等, 2006. 长江流域 1960-2004 年极端强降水时空变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2(1): 9-14. Su B D, Jiang T, Ren G Y, et al, 2006. Observed trends of precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960 to 2004[J]. Adv Climate Change Res, 2(1): 9-14 (in Chinese).

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. Wang G R, Chen M, You F C, et al, 2014. Method for object-based diagnostic evaluation and its application[J]. Meteor Sci Technol, 42(4): 652-656 (in Chinese).

王国荣, 平凡, 翟亮, 2019. 一种基于数值模式诊断自适应的北京地区对流性降水临近集合预报新方法[J]. 大气科学, 43(4): 895-914. Wang G R, Ping F, Zhai L, 2019. A new method of adaptive convective precipitation ensemble nowcasting based on the numerical model diagnosis over Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 43(4): 895-914 (in Chinese).

王新敏, 栗晗, 2020. 多数值模式对台风暴雨过程预报的空间检验评估[J]. 气象, 46(6): 753-764. Wang X M, Li H, 2020. Spatial verification evaluation of typhoon rainstorm by multiple numerical models[J]. Meteor Mon, 46(6): 753-764 (in Chinese).

王雪莲, 解以扬, 李英华, 等, 2013. 基于对象的诊断评估方法(MODE)降水预报检验[J]. 安徽农业科学, 41(21): 9027-9029. Wang X L, Xie Y Y, Li Y H, et al, 2013. Precipitation verification of method for object-based diagnostic evaluation[J]. J Anhui Agri Sci, 41(21): 9027-9029 (in Chinese).

解小寒, 王勇, 郭倩, 2018. 具有复杂地形适应能力的 INCA 短临预报系统介绍[J]. 气象科技进展, 8(3): 70-76. Xie X H, Wang Y, Guo Q, 2018. Introduction to the INCA Nowcasting system with complex terrain adaptability[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(3): 70-76 (in Chinese).

杨璐, 陈敏, 陈明轩, 等, 2019. 高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究[J]. 气象学报, 77(2): 243-255. Yang L, Chen M, Chen M X, et al, 2019. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather[J]. Acta Meteor Sin, 77(2): 243-255 (in Chinese).

尤凤春, 王国荣, 郭锐, 等, 2011. MODE 方法在降水预报检验中的应用分析[J]. 气象, 37(12): 1498-1503. You F C, Wang G R, Guo R, et al, 2011. The application analysis of MODE method to the rainfall forecast test[J]. Meteor Mon, 37(12): 1498-1503 (in Chinese).

Davis C A, Brown B G, Bullock R, et al, 2009. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC spring program[J]. Wea Forecasting, 24(5): 1252-1267.

Ji L Y, Zhi X F, Simmer C, et al, 2020. Multimodel ensemble forecasts of precipitation based on an object-based diagnostic evaluation[J]. Mon Wea Rev, 148(6): 2591-2606.

Johnson A, Wang X G, Xue M, et al, 2011. Hierarchical cluster analysis of a convection-allowing ensemble during the hazardous weather testbed 2009 spring experiment. Part II: ensemble clustering over the whole experiment period[J]. Mon Wea Rev, 139(12): 3694-3710.

Johnson A, Wang X G, Kong F Y, et al, 2013. Object-based evaluation of the impact of horizontal grid spacing on convection-allowing forecasts[J]. Mon Wea Rev, 141(10): 3413-3425.

Skok G, Tribbia J, Rakovec J, 2010. Object-based analysis and verification of WRF model precipitation in the low- and midlatitude Pacific Ocean[J]. Mon Wea Rev, 138(12): 4561-4575.

《气象》待刊

《气象》待刊