

基于主客观环流分型的强降水数值预报MODE检验 ——方法及其在2019年暖季东北地区的应用

齐铎^{1,4,5*} 崔晓鹏^{1,2,3,4**} 陈力强³ 黄丽君^{1,4} 刘松涛⁵ 卜文慧⁵ 王承伟⁵

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

4 中国科学院大学, 北京 100049

5 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150030¹

摘要: 本文构建了基于主客观环流分型的强降水数值预报空间检验(MODE)方法框架, 并利用该框架对欧洲中期天气预报中心全球模式(ECMWF)和中国气象局区域中尺度数值天气预报模式(CMA_MESO)的2019年暖季东北地区强降水预报进行检验。结果表明: 2019年暖季东北地区54个强降水日的环流型可分为: 西风槽型(15个)、副高影响型(13个)、急流型(5个)、西部(12个)和东部冷涡型(9个)。其中, 西风槽型和急流型以区域性强降水为主, 模式对其强降水发生与否的预报能力强, TS评分较高; 西部、东部冷涡型强降水的局地性强, 模式对其强降水发生与否的预报能力差, TS评分低; 副高影响型也以区域性强降水为主, 模式对其强降水发生与否的预报能力也比较强, 但是对其强降水质心位置、强度、面积等属性预报偏差较大, TS评分也相对较低。另外, 从两种模式预报性能对比看, CMA_MESO对强降水强度和面积预报较实况普遍偏强, 虽然其预报的TS评分一般高于ECMWF, 但其对强降水预报的空报率也都比ECMWF大, 对强降水的属性预报偏差一致性一般也低于ECMWF, 其预报的可订正性整体上不及ECMWF。

关键词: 主客观融合环流分型, 东北冷涡客观识别, 强降水, 数值预报, MODE检验

文章编号: 2022107A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期 2022-06-27; 网络预出版日期

*作者简介 齐铎, 女, 1988年出生, 博士研究生, 主要从事暴雨研究。E-mail: qiduo@mail.iap.ac.cn

**通讯作者 崔晓鹏, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项(A类) XDA23090101, 中国气象局沈阳大气环境研究所基本科研业务费重点项目2020SYIAEZD4, 国家重点研发计划项目2018YFC1507305, 中国气象局创新发展专项项目 CXFZ2021Z034, 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 LH2022D021, 黑龙江省气象局智能网格预报及数值模式释用创新团队

Funded by The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA23090101), The Institute of Atmospheric Environment of China Meteorological Administration (Grant No. 2020SYIAEZD4), National Key Research and Development Program (Grant No. 2018YFC1507305), Key Scientific and Technology Research and Development Program of China Meteorological Administration (Grant No. CXFZ2021Z034), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (Grant No. LH2022D021), Numerical Weather forecasting and its Application of Heilongjiang Meteorological Bureau Innovation Team

Evaluation method of numerical heavy precipitation prediction based on subjective and objective circulation classification as well as method for object-based diagnostic evaluation: application and testing over northeast China during the warm seasons of 2019

Duo QI^{1, 4, 5*}, Xiaopeng CUI^{1, 2, 3, 4**}, Liqiang Chen³, Lijun Huang^{1, 4}, Songtao Liu⁵, Wenhui Bu⁵,
and Chengwei Wang⁵

1 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 Heilongjiang Meteorological Observatory, Harbin 150030, China

Abstract: Based on Subjective and Objective Circulation Classification, a framework of method for object-based diagnostic evaluation (MODE) is developed for numerical forecast of heavy rainfall, and this framework is used to verify the heavy rainfall forecast by the global forecast model of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the regional mesoscale forecast model of the China Meteorological Administration (CMA_MESO) in Northeast China during the warm season of 2019. The results show that 54 heavy rainfall days in Northeast China in the warm season of 2019 can be divided into trough pattern (P1), Western Pacific Subtropical High (WPSH) pattern (P2), jet pattern (P3), western Northeast China Cold Vortex (NCCV) pattern (P4), and Eastern NCCV pattern. Among the 5 synoptic patterns above, P1 and P3 are dominated by regional heavy rainfall, and the numerical model has strong predictability for the occurrence of heavy rainfall with higher Threshold Score (TS). The heavy rainfall in P4 and P5 is locality, and the numerical model has poor predictability with lower TS. The P2 is also dominated by regional heavy rainfall. However, the forecast deviation for the location, intensity, area of the heavy rainfall is relatively larger, and the TS is also lower. In addition, from the comparison of CMA_MESO and ECMWF, CMA_MESO is generally stronger than the actually intensity and area of heavy rainfall. The TS and false alarm rate (FAR) of CMA_MESO for heavy rainfall are both generally higher than that of ECMWF. The forecast deviation of CMA_MESO has less consistent, and the predictability of CMA_MESO is generally lower.

Keywords: Subjective and objective circulation classification, NCCV objective identification, Heavy rainfall, Numerical weather forecast, MODE

1 引言

我国东北地区的强降水过程历时短、雨强大、突发性和局地性强(朱乾根等, 2000), 受东北冷涡、副热带高压、西风槽、热带气旋等多种天气系统和复杂下

垫面共同影响，降水形成机理复杂，降水强度和强降水落区预报难度大。数值预报是业务部门开展强降水预报的重要手段，但由于模式初始场质量、物理过程参数化和动力框架等诸多方面存在的不足，常造成东北地区强降水数值预报结果与实况相比出现较大偏差。开展东北地区强降水数值预报精细化检验评估，对数值预报模式改进和数值预报产品客观订正至关重要。

降水数值预报检验方法众多，与 TS（Threat Score）、ETS（Equitable Threat Score）等传统评分检验方法相比，基于对象的空间检验方法（如基于对象的诊断评估方法 MODE，Method for Object-based Diagnostic Evaluation）可提供降水位置、强度、面积和形状等多方面预报偏差的具体信息，有助于更好的认识模式预报性能，近年来得到广泛应用（尤凤春等，2011；Jolliffe and Stephenson，2012；刘凑华和牛若芸，2013；薛春芳和潘留杰，2016；Ji et al.，2019）。研究表明，全球模式对强降水预报常偏弱，而对流可分辨模式对强降水预报则往往偏强（宇如聪等，2021；Liu et al.，2021）；不同的全球或区域数值预报模式对我国不同区域雨带位置的预报几乎均表现出一致偏西的特征（Ji et al.，2019；符娇兰等，2016；宇如聪等，2021）。以往相关研究工作大多聚焦我国华南、西南以及江淮地区的强降水，对东北地区强降水数值预报偏差特征的分析相对较少，且缺乏对不同环流背景下东北地区强降水数值预报性能的检验评估。不同环流背景下，降水形成机理不同（Luo et al.，2016；黎慧琦等，2019；Rao et al.，2019；Yan et al.，2019；Wang et al.，2020），降水数值预报偏差特征也会存在差异，深入分析不同环流背景下的强降水数值预报偏差，对数值模式改进和强降水业务预报，均具有重要的参考价值。

对强降水环流背景的分类识别可采用主观分型、客观分型和主客观融合环流分型等多类方法。主观环流分型方法（符娇兰等，2016；Luo et al.，2016）依据分型者经验，可对一定数量的环流样本进行分类识别，但较难实现大样本的分型统计，且分型标准差异大，缺乏客观和统一性，分型结果的代表性和适用性对分型者经验与样本数量有很强的依赖性；客观环流分型方法分型标准较为统一，且可实现对大样本的统计分型（赵洋洋等，2013；黎慧琦等，2019；Rao et al.，2019；Yan et al.，2019；Wang et al.，2020），但较难根据具体天气过程特点和分型者主观经验开展细致的分型识别，例如，中高纬度高压脊（阻塞高压）之间可出现

低压槽，亦可出现切断低压（朱乾根等，2000），低压槽和切断低压对应的强降水特点和机理有所不同，客观环流分型对低压槽和切断低压较难细致区分，影响相关降水机理研究；主客观融合环流分型方法可以一定程度上融合上述主、客观分型方法优势，规避两者不足，对于特点鲜明的天气系统（如东北冷涡等），可根据其天气学特点和已有认识，定义量化指标进行识别，对于难以用指标量化的天气型，则可采用客观环流分型方法进行识别和分型处理，同时，对客观分型结果也可以实施主观校验，进而给出更为准确、细致和具有代表性与适用性的环流分型结果。

本文聚焦强降水数值预报产品检验评估的现实需求，将主客观融合环流分型与强降水数值预报客观检验评估（MODE 检验等）相结合，构建了基于主客观环流分型的强降水数值预报 MODE 检验方法（Evaluation method of Numerical Heavy Precipitation Prediction based on Subjective and Objective Circulation Classification as well as Method for Object-based Diagnostic Evaluation，简称 ENHPP_SOCC-MODE），并将其应用到 2019 年暖季东北地区强降水数值预报检验中，对比和评估东北地区暖季不同环流背景下，欧洲中期天气预报中心（ECMWF）全球模式降水预报和中国气象局区域中尺度数值天气预报模式（CMA_MESO）降水预报的偏差特征和预报性能，为降水数值预报检验评估提供方法，为提升强降水数值预报能力提供参考。本文第 2 节介绍基于主客观环流分型的强降水数值预报 MODE 检验方法及其在东北地区应用时所用数据和具体流程等；第 3 节给出 2019 年东北地区暖季强降水日主客观融合环流分型结果；第 4 节给出全球和区域数值模式降水预报空间分布和分级评分检验结果；第 5 节给出全球和区域数值模式强降水预报 MODE 检验结果；最后一节为结论和讨论。

2 资料和方法

2.1 资料

（1）**站点降水实况数据**：2019 年暖季（5-9 月）， 38°N – 54°N ， 115°E – 135.5°E 范围内，国家气象信息中心提供的国家级地面观测站的 24 小时（08-08 时，北京时间）累积降水量，站点分布如图 1 所示。强降水日定义：若某国家级站点出现降

水、且 24 小时累积降水量超过 50 mm，则定义为一次强降水日；据此，在东北地区 2019 年暖季共筛选出 55 个强降水日，用于本文后续环流分型和检验评估研究；所提取的强降水日中，2019 年 9 月 7 日受 1913 号热带气旋“玲玲”直接影响，东北地区的降水类型主要为热带气旋降水，鉴于研究时段内相关降水类型样本极少，为避免对研究结果的可能影响，剔除该强降水日。

以下如无特殊说明，涉及时间均为北京时，时间范围皆为 2019 年暖季 54 个强降水日对应的时段。此外，下面用到的格点降水实况数据和降水数值预报数据所选的空间范围与图 1 保持一致。

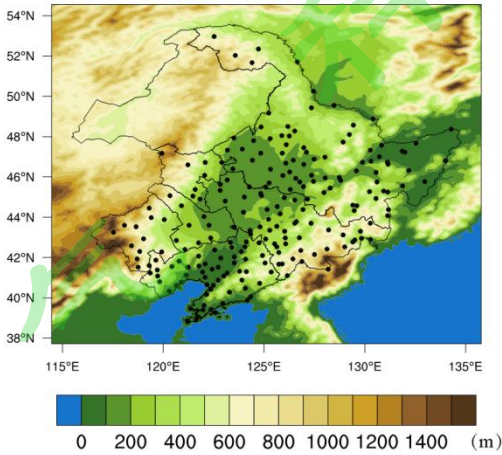


图 1 东北地区国家级地面气象观测站分布。

Fig. 1 Distribution of the national meteorological observing stations in northeast China.

(2) 格点降水实况数据：MODE 检验需要格点化的降水实况，本文选取国家气象信息中心提供的 5 km 空间分辨率格点降水融合数据（CMPA，CMA multi-source precipitation analysis）（潘旻等，2015；宇婧婧等，2015；潘旻等，2018；师春香等，2019；龙柯吉等，2020），作为降水数值预报产品检验分析中的格点降水实况。

(3) 降水数值预报数据：考虑到可用时效等问题，选取每日 20 时起报的 12-36 小时（24 小时）累积降水量数值预报产品，用于本文研究。包括：欧洲中期天气预报中心（the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，简称 ECMWF）全球模式降水预报产品（空间分辨率 0.125°）和中国气象局区域中尺度数值天气预报模式（CMA_MESO）降水预报产品（空间分辨率 9 km）。为了检验需要，利用双线性插值方法，将上述数值模式预报数据插值到 CMPA 格点降水实况数据的对应网格上。

(4) 再分析数据：(a) 强降水日 08 时， 20° - 60° N， 100° - 140° E 范围内的 ERA5 再分析资料（空间分辨率 0.25° ），物理量包括：位势高度、风场、温度场、比湿场等，用于环流分型和环流背景合成分析；(b) 因为冷涡是大尺度天气系统，以往研究定义的客观识别方法（黄丽君和崔晓鹏，2022）都基于分辨率较粗（水平分辨率 2.5° 、时间分辨率 6 小时）的 NCEP/NCAR 再分析数据，因为客观识别结果对资料依赖很大，所以本文也选择用 35° - 60° N， 115° - 145° E 范围内 NCEP/NCAR 再分析数据来进行东北冷涡客观识别，所需的要素包括：每日四个时次（08、14、20、02 时）的 400-850 hPa 位势高度场和温度场。

2.2 ENHPP_SOCC-MODE 检验方法流程及在东北地区的应用

本文聚焦强降水数值预报产品检验评估的现实需求，将主客观融合环流分型与强降水数值预报客观检验评估相结合，构建了基于主客观环流分型的强降水数值预报 MODE 检验方法（简称 ENHPP_SOCC-MODE），并应用于 2019 年暖季东北地区的强降水数值预报检验。ENHPP_SOCC-MODE 方法及在东北地区的应用流程如图 2 所示。

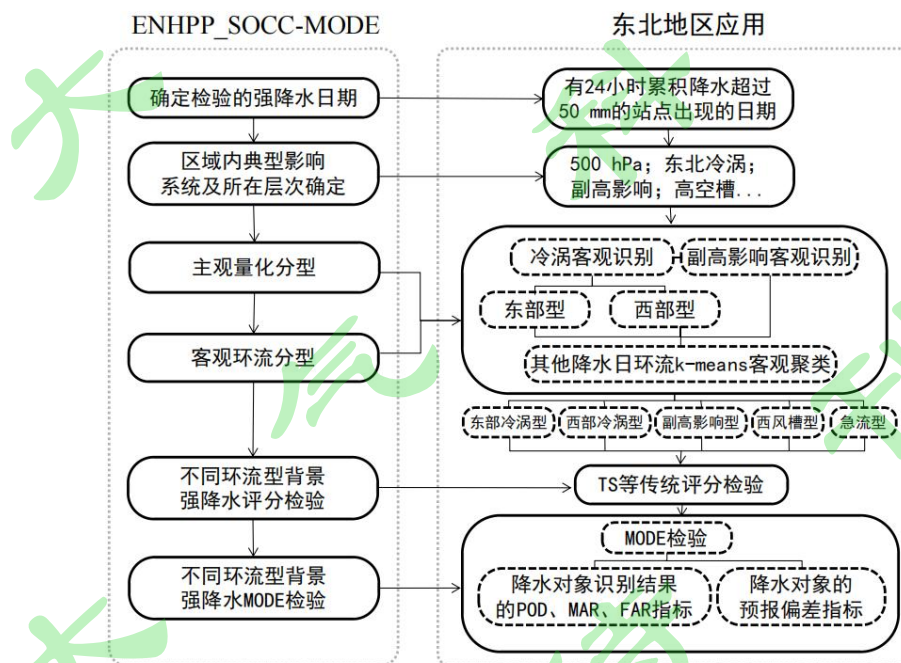


图 2 ENHPP_SOCC-MODE 检验方法在东北地区应用流程图。

Fig. 2 Application flow of ENHPP_SOCC-MODE in northeast China.

涉及的具体方法简述如下：

(1) 东北冷涡型强降水日判识和分类

参考黄丽君和崔晓鹏(2022)定义的东北冷涡客观识别和追踪算法,对2019年暖季的东北冷涡过程进行客观识别和追踪,进而得到2019年暖季54个强降水日中,受东北冷涡过程影响的强降水日(共21日)。过去的研究认为,西部型冷涡基本对应于冷涡的初生发展阶段,此阶段冷涡槽前的东南象限一般是高低空急流的汇合处、高能舌所在区和上升速度的大值区,该区域降水概率高达70%,多区域性强降水发生;而东部型冷涡则对应于冷涡的衰减消亡阶段,冷涡后部的冷空气极易引发中尺度对流系统频繁活动,在冷涡西北象限产生局地性短时强降水,落区和强度预报难度较冷涡前部更大,极端强降水产生的灾害更难预防(郑秀雅等,1992;孙力等,2010;郑媛媛等,2011;余文韬等,2015;张弛等,2019;袁美英等,2020;从靖等,2021;杨罍和王黎娟,2021;刘丹玲和王黎娟,2022)。因此,本文将东北冷涡型强降水日进一步划分为西部冷涡型和东部冷涡型:计算强降水日08、14、20、02四个时次中,有东北冷涡出现时次的冷涡中心平均位置,将平均位置位于 124°E 以西的东北冷涡强降水日定义为西部型(共12个),将平均位置位于 124°E 以东的东北冷涡强降水日定义为东部型(共9个,其中有两个东部冷涡型强降水日冷涡中心平均位置重合,都位于 125°E 、 52.5°N),具体如图3所示。

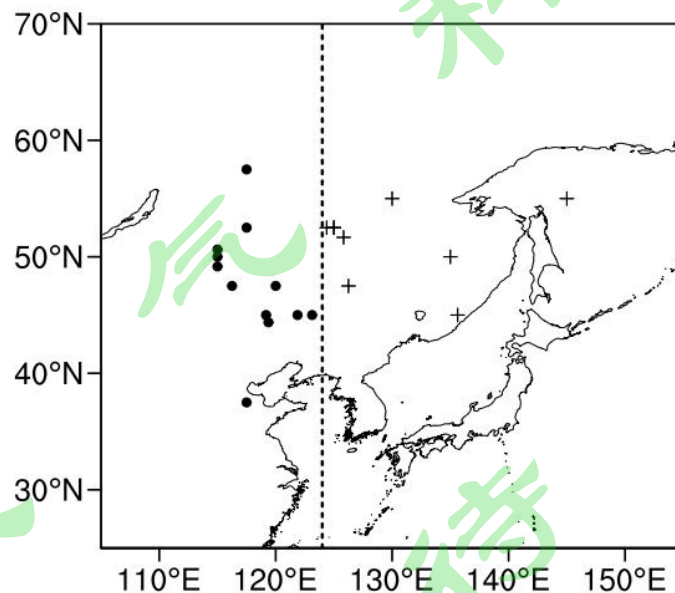


图3 受东北冷涡影响的强降水日冷涡中心平均位置分布。(黑色圆点代表西部型,黑色十字代表东部型,长虚线代表 124°E 的位置)

Fig. 3 Distribution of the average locations of Cold Vortex center on the heavy rainfall days

effected by NCCV. (black dots and crosses represent the western and eastern pattern NCCV respectively and the dashed line indicates the location of 124°E)

(2) 副热带高压影响型强降水日判识

副高位置是中国东部雨带季节性移动的标志，当副高脊线北跳至 30° N 以北时，一般对应东北雨季的开始（朱乾根等，2000）。将东北冷涡强降水日以外的 33 个强降水日做进一步筛选，将强降水日 08 时 500 hPa 高度场（125° -135° E 范围内）上 588 位势什米等值线北缘主体位于 35° N 以北的强降水日，定义为副高影响型强降水日（共计 13 个）。

(3) k-means 客观分型方法

利用 k-means 方法（Philipp et al., 2014; Fang et al., 2021），基于欧式距离最小化原则，对剩余的强降水日 08 时的 500 hPa 位势高度场进行聚类分型。k-means 聚类需要给定分型数，基于轮廓系数（Silhouette Coefficient）（Rousseeuw, 1986）的分析，最终确定将剩余 20 个强降水日分成 2 类时分型效果最佳。其中，第一类为西风槽影响型（共 15 个），而另外一类的西风槽经向度大，等高线密集、斜压性强，且在低层（850 hPa）存在从 25° N 以南的我国东部沿海延伸至东北区域的低空急流，因此本文将其实定义急流型（共 5 个）。

(4) TS 评分以及降水对象预报的命中率（POD）、虚警率（FAR）和漏报率（MAR）

参考 Jolliffe and Stephenson（2012），将 TS 评分定义为，

$$TS = N_A / (N_A + N_B + N_C) \quad (1)$$

式中， N_A 为预报正确的格点数； N_B 为漏报的格点数； N_C 为空报的格点数。TS 数值在 0-1 之间变化，数值越大、评分越高，代表预报效果越好。

类似地，定义降水对象的命中率（POD）、虚警率（FAR）和漏报率（MAR）：

$$POD = N_A / (N_A + N_C) \times 100\% \quad (2)$$

$$FAR = N_C / (N_A + N_C) \times 100\% \quad (3)$$

$$MAR = N_B / (N_A + N_B) \times 100\% \quad (4)$$

式中， N_A 、 N_B 、 N_C 含义与 TS 中类似，但非相应的格点数量，而是 MODE 检验结果中相应的降水对象数量。

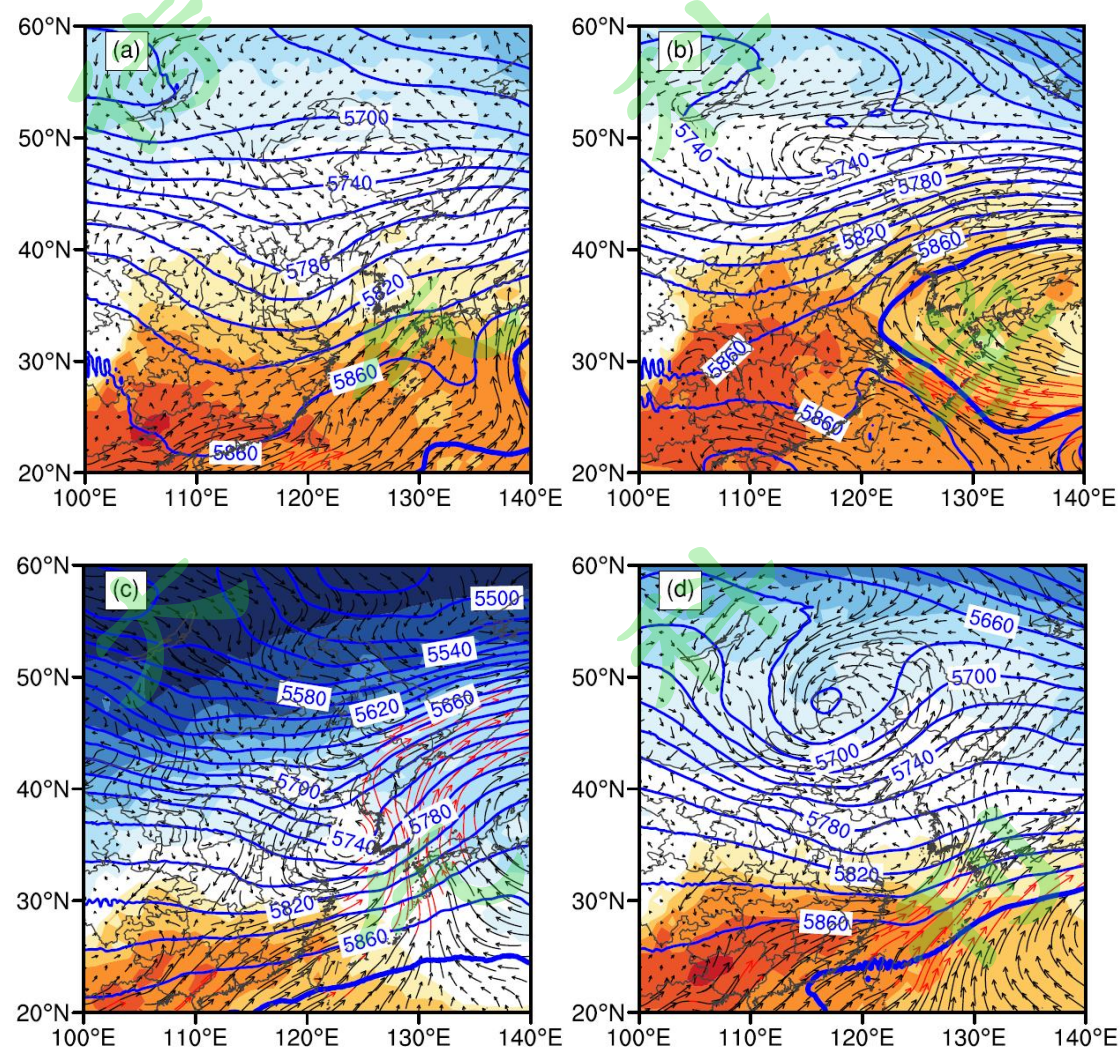
(5) MODE 检验方法

基于对象的诊断评估方法 MODE (尤凤春等, 2011; Jolliffe and Stephenson, 2012; 刘凑华和牛若芸, 2013; 薛春芳和潘留杰, 2016) 为了从降水场中准确提取连续降水分布作为降水对象, 首先, 对降水场利用卷积方法进行一定尺度的空间平滑, 以便利用连通域提取算法提取降水对象的空间边界, 并借助识别的降水空间边界, 对边界范围内的降水场进行还原, 分别获得预报场和观测场中的降水对象; 进而, 通过质心距离指标, 对预报场与观测场中的对象进行匹配和合并; 最后, 比较预报场和观测场中对象的面积、质心位置、强度、形状 (降水对象的长轴与短轴长度比)、长轴、短轴等属性差异。本文选择其中的质心位置、面积、强度 (降水对象的中位数强度) 和形状等 4 种属性来分析强降水预报的偏差特点。

3 环流分型结果

利用上述主客观融合环流分型方法, 将 2019 年暖季东北地区 54 个强降水日发生时的环流背景分为: 西风槽型 (15 个, 图 4a)、副高影响型 (13 个, 图 4b)、急流型 (5 个, 图 4c)、西部冷涡型 (12 个, 图 4d) 和东部冷涡型 (9 个, 图 4e) 等五种类型。其中, 西风槽型中的低压槽位于东北地区西南侧, 东北地区东部处于西风槽前西南气流控制中, 西部受槽后偏北气流影响 (图 4a), 从格点最大日降水量和日平均降水量分布看 (图 5a、b), 降水主要分布在西风槽前, 整体上呈东北-西南带状分布, 较强降水主要集中在槽前的辽宁中北部、吉林中南部、黑龙江东南部和呼伦贝尔东北部; 副高影响型 (图 4b) 的副高强盛, 脊线位于 30°N 以北, 副高西北侧的东北地区上游存在东北-西南走向西风槽, 受副高影响, 暖湿空气活动明显偏北, 850 hPa 上, 340 K 假相当位温等值线控制范围最北可达黑龙江东南部, 充沛的暖湿气流与西风槽带来的北方冷空气在副高外围相互作用, 产生强降水 (图 5b、d), 该型强降水范围和强度整体上均大于西风槽型 (图 5a、b), 但强降水中心位置分布与西风槽型相比更为分散; 急流型 (图 4c) 中, 东北地区东部存在相对显著的低空急流, 有利于水汽向北输送, 进而辐合抬升, 东北地区东部出现东北-西南带状分布的区域性强降水 (图 5e、f); 西部冷涡型 (图 4d) 中, 东北地区整体上位于东北冷涡前部, 而东部冷涡型 (图 4e) 的冷涡中心位于东北地区的北部偏东区域; 与前三种类型相比, 两类冷涡型强降水的分布极为分散 (图 5g-j), 其中, 西部冷涡型 (图 5g、h) 的强降水分

布相对更广，几乎遍布整个东北地区，而东部冷涡型的强降水主要集中在黑龙江和吉林附近（尤其前者），此外，在区域西南侧和西侧亦有分布；东北冷涡影响（东部冷涡型和西部冷涡型）下，分散性对流降水特征显著，强降水出现位置随机性更强，因此平均日降水量（图 5h, j）较其他三种类型（西风槽型、副高影响型和急流型）明显偏小（图 5b, d, f），但依然可以出现日降水量达 100 mm 以上的强降水中心（图 5g, i），此两类强降水局地性强、预报难度更大。



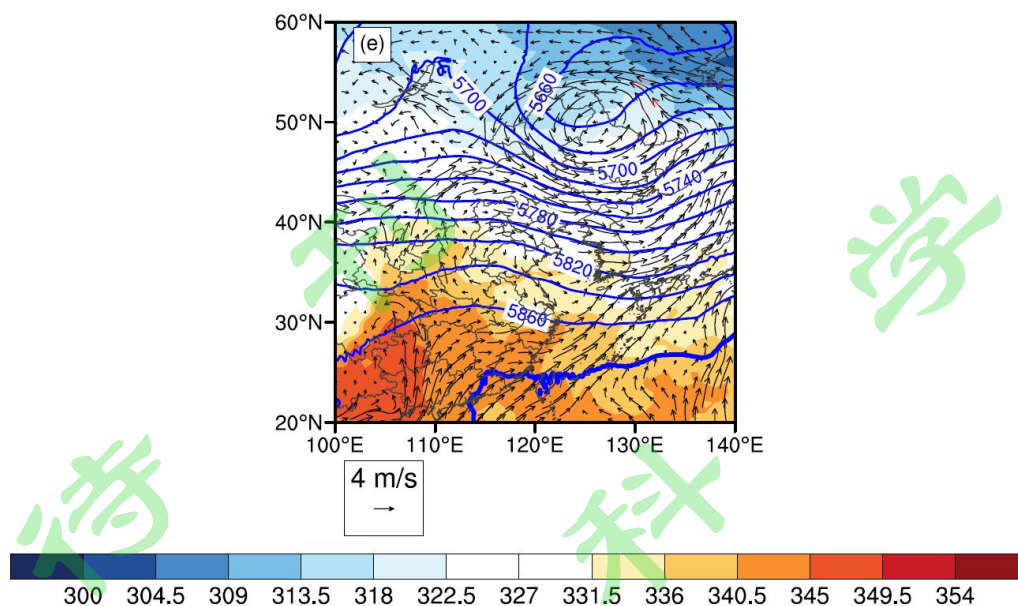


图 4 不同环流型合成的强降水日 08 时 500 hPa 高度场（蓝色等值线，单位：位势米，蓝色粗实线代表 5880 位势米等值线）、850 hPa 风场（矢量，单位：m/s，红色代表风速大于 8 m/s）和假相当位温（阴影，单位：K）。

（a）西风槽型、（b）副高影响型、（c）急流型、（d）西部冷涡型和（e）东部冷涡型。

Fig. 4 Composition of 500 hPa geopotential height (blue line; units: gpm; 5880 gpm contour is represented by the bold line), 850 hPa wind vectors (units: m s^{-1} ; red and black vectors represent wind speeds more than 8 m s^{-1} and less than 8 m s^{-1} , respectively) and 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature (shaded, units: K) at 0800 LST of the heavy rainfall days in Synoptic Patterns.

(a) Trough pattern (P1); (b) Western Pacific Subtropical High (WPSH) pattern (P2);

(c) Jet pattern (P3); (d) Western NCCV pattern (P4); (e) Eastern NCCV pattern (P5);

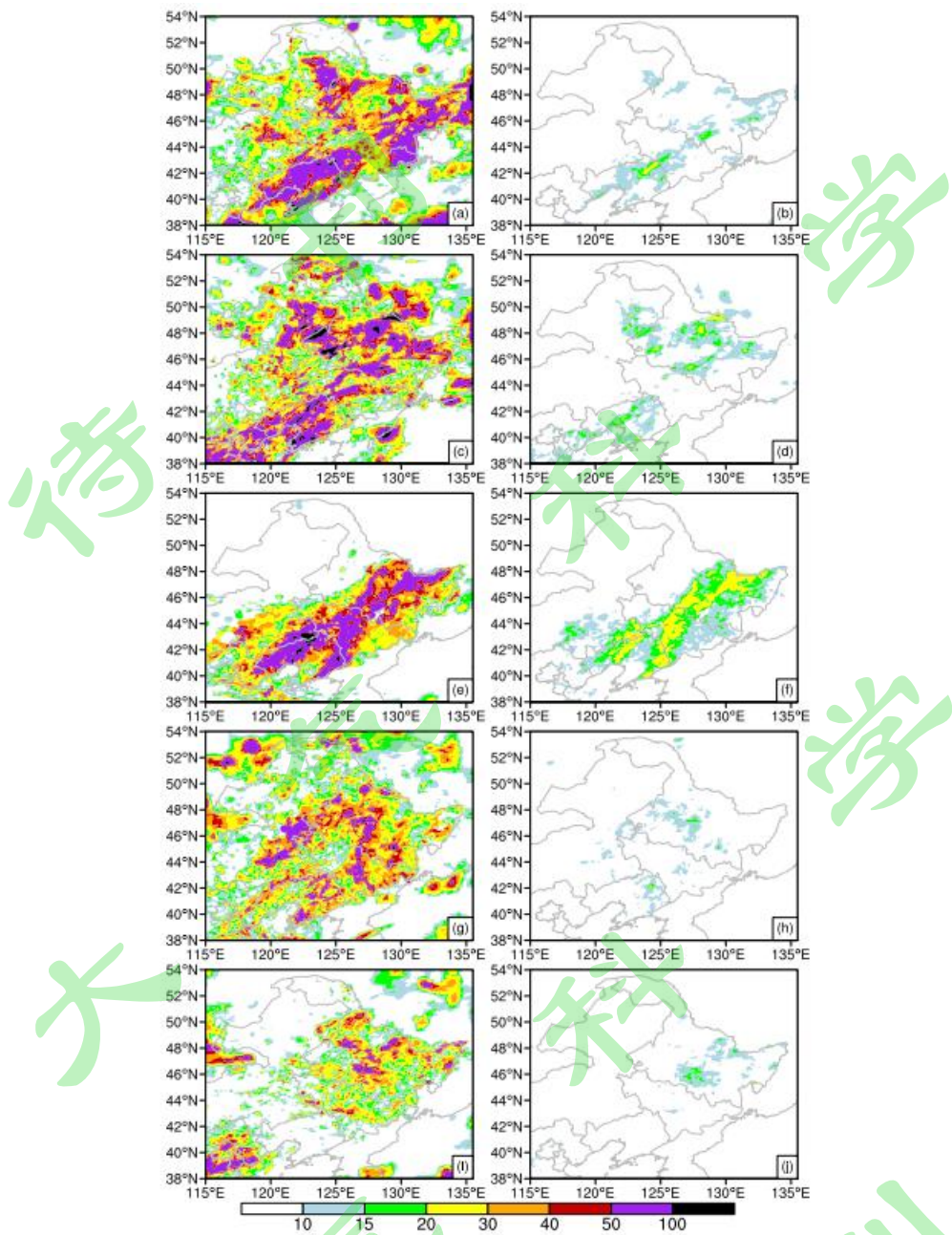


图 5 不同环流型强降水日的格点最大日降水量 (a、c、e、g、i) 以及不同环流型强降水日合成的平均日降水量 (b、d、f、h、j) (单位: mm)。

(a、b) 西风槽型、(c、d) 副高影响型、(e、f) 急流型、(g、h) 西部冷涡型和 (i、j) 东部冷涡型。

Fig. 5 Composition of maximum (a、c、e、g、i) and averaged (b、d、f、h、j) daily rainfall amount at each grid point of the precipitation product on the heavy rainfall days in Synoptic Patterns.

(a,b) P1; (c,d) P2; (e,f) P3; (g,h) P4; (i,j) P5;

4 数值模式降水预报空间分布和分级评分检验

对所有 54 个强降水日而言, ECMWF 全球模式降水预报 (图 6) 和 CMA_MESO 区域中尺度模式降水预报 (图 7) 与实况 (图 5) 相比, 整体上均表现为对降水范围预报较实况偏大的特征, 尤其是 CMA_MESO 区域中尺度模式。从不同环流型强降水日看, 数值预报的西风槽型 (图 6a, b 和图 7a, b) 和急流型 (图 6e, f 和图 7e, f) 强降水落区和整体走向与实况 (图 5) 大体一致; 副高影响型 (图 6c, d 和图 7c, d) 中, 两个模式对副高外围边缘雨带的落区预报与实况 (图 5c, d) 接近, 但在副高西北侧与槽相互作用区域的预报偏差较大, ECMWF 全球模式在此处存在一定程度空报, 而 CMA_MESO 模式预报的落区偏北, 强度较实况略偏弱。东北冷涡影响下的强降水预报与其他三种环流型下强降水预报效果相比 (图 5-7), 预报偏差明显更大; 对于西部冷涡型强降水, 两个模式对冷涡北部东风回流降水的预报 (图 6g, h 和图 7g, h) 均较实况 (图 5g, h) 偏强、范围偏大, 此外, 两模式均能较好预报出西部冷涡型东南部的强降水, 但 ECMWF 全球模式预报偏弱、漏报偏多, 而 CAM_MESO 模式预报偏强、空报多 (图 6g, h 和图 7g, h); 对于东部冷涡型强降水, 两模式的预报 (图 6i, j 和图 7i, j) 偏差比西部冷涡型更大。

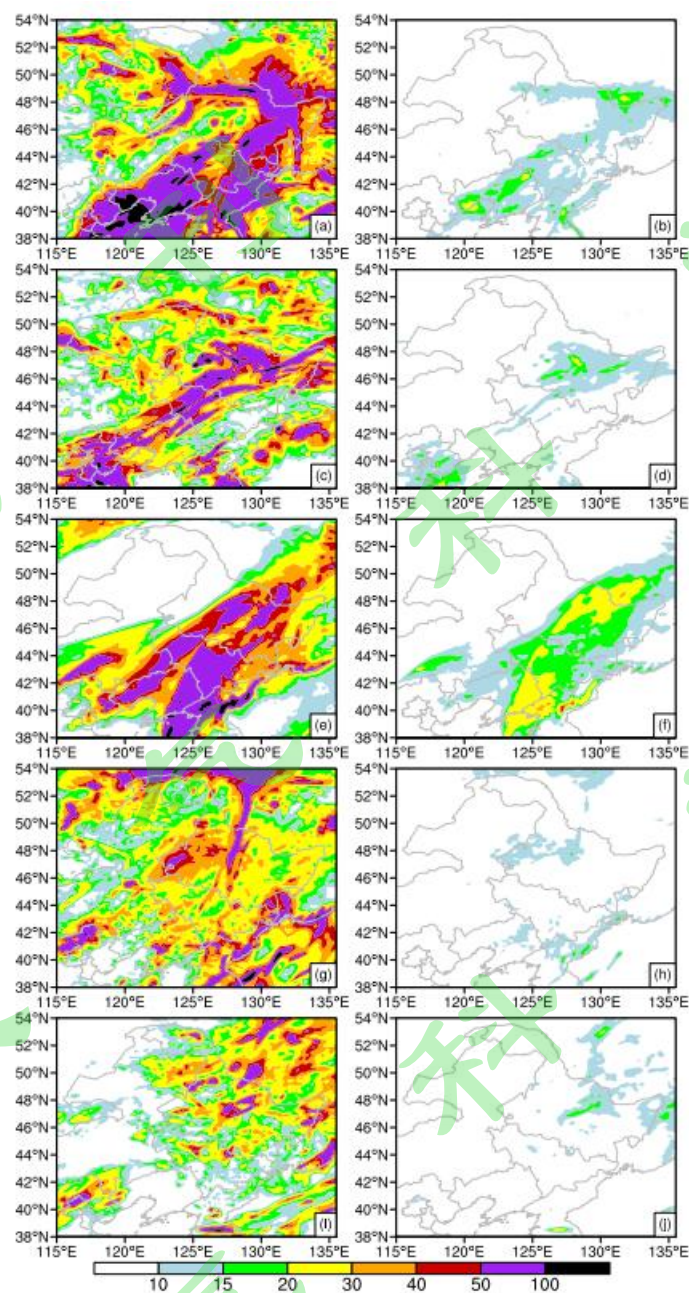


图6 同图5，但为 ECMWF 全球模式的预报结果。

Fig. 6 As in Fig. 5, but for the forecast of the European Centre for Medium-Range Weather
Forecasts (abbreviated by ECMWF) Model.

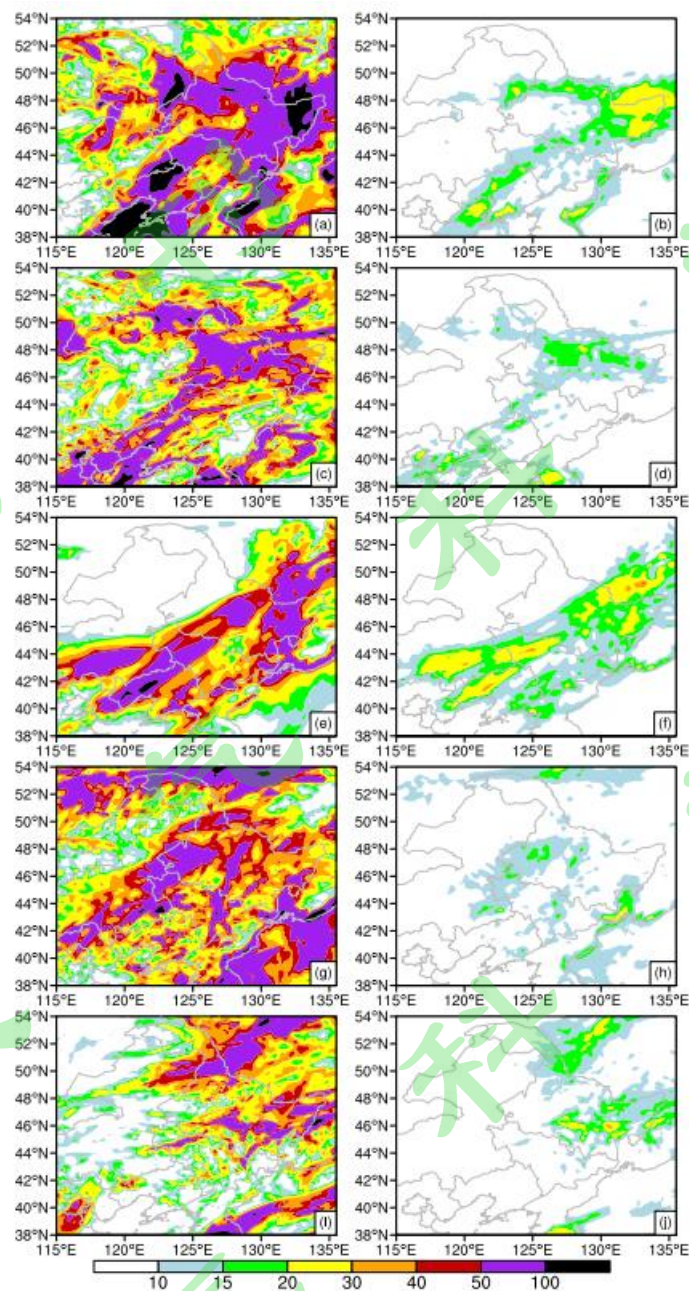


图 7 同图 5，但为 CMA_MESO 区域中尺度模式的预报结果。

Fig. 7 As in Fig. 5, but for the forecast of the China Meteorological Administration (CMA)

Regional Mesoscale Model (abbreviated by CMA_MESO).

为方便分析，将西风槽型、副高影响型、急流型和西部与东部冷涡型分别记为 P1、P2、P3、P4 和 P5 型。两模式对不同环流型强降水日大雨和暴雨（为方便描述，以下将大雨和暴雨统称为强降水）预报的分级 TS 评分如图 8 所示，ECMWF 全球模式（图 8a，b）和 CMA_MESO 区域模式（图 8c，d）对 P1 和

P3 型强降水的预报效果相对较好，而对 P2、P4 和 P5 型的强降水预报效果偏低，这与前述定性分析（图 5-7）基本一致；从两个模式对所有强降水日强降水预报 TS 评分整体对比看，CMA_MESO 区域模式预报的 TS 评分一般优于 ECMWF 全球模式。

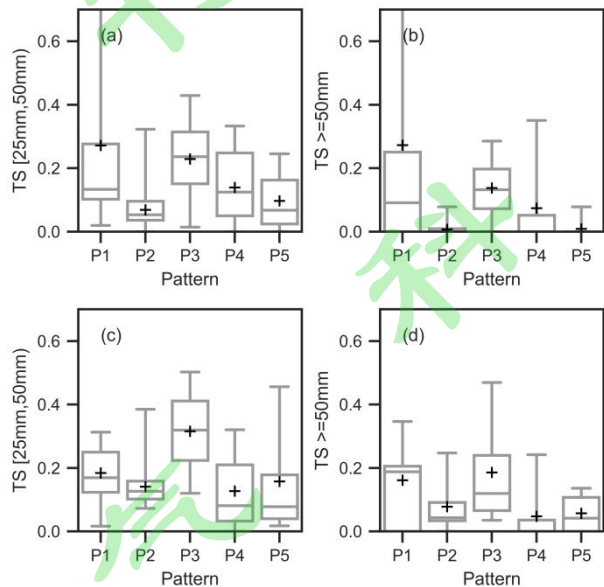


图 8 不同环流型（P1-5）强降水日，ECMWF 全球模式(a、b)和 CMA_MESO 区域中尺度模式(c、d)预报的大雨（a、c）与暴雨（b、d）量级降水的 TS 评分箱型图。

Fig. 8 Box plot of the Thread Score of ECMWF (a,b) and CMA_MESO(c,d) in the rank of the daily precipitation amount more than 25 mm and less than 50 mm (a,b) and greater than 50mm (b,d) on the heavy rainfall days in Synoptic Patterns.

5 数值模式降水预报MODE检验

借助日平均降水量和最大日降水量空间分布定性对比（图 5-7）和点对点客观评分检验（图 8），可从整体上认识降水数值预报偏差特征和不同环流型影响下的强降水预报效果，而基于对象的 MODE 检验方法对实况降水和降水数值预报产品的定量化对比评估，可提供更为丰富的信息。MODE 检验主要包括两部分：一部分是考察模式对于降水对象的预报能力；另一部分是对模式能够预报出的那部分降水对象的属性预报偏差的评估。因此，本小节利用 MODE 检验评估结果，根据 MODE 检验中模式对实况降水对象预报的命中率（POD）、虚警率（FAR）和漏报率（MAR）指标以及位置、强度、面积和形状属性的偏差特征，

开展强降水数值预报产品的分型 MODE 检验。

从各环流背景下模式对于实况降水对象的整体预报能力上看（表 1），全球模式对 2019 年暖季东北地区强降水日的预报效果优于区域模式，前者对降水对象预报的命中率（POD）和虚警率（FAR）明显优于后者，而两模式对降水对象的漏报率（MAR）相当；但同时两个模式对东北地区强降水的预报效果都有不小的改进空间，体现在对降水对象预报的命中率偏低（全球模式相对较好，但也低于 60%）、虚警率偏高（全球模式为 44.6%），同时存在一定程度的漏报（漏报率约 39%）。不同环流背景下，两个模式对 P2 型强降水对象预报效果相对最好（全球模式命中率可达 68.4%，虚警率和漏报率降为 31.6%），其次为 P1 型；对于全球模式，预报效果排在第三位的是 P3 型强降水，而对于区域模式则是 P4 型强降水预报效果排在第三。整体上看，无论是全球模式，还是区域模式，对 2019 年东北地区暖季东北冷涡型强降水对象的预报效果均相对较差，对于 P5 型强降水对象，区域模式预报命中率仅为 25.5%，虚警率却高达 74.5%，漏报率也达到了 50%，而对于 P4 型强降水对象，全球模式预报命中率低至 37.5%，虚警率高达 62.5%，漏报率也达到 54.5%。前三种环流型（P1-3 型）背景下，降水一般以范围相对较大的区域性降水为主，数值预报模式对其发生与否具有相对较好的可预报性，而东北冷涡影响下（P4-5 型），模式强降水预报准确率较低，通过对 ECMWF 全球模式和 CMA_MESO 区域中尺度模式形势场预报进行普查发现，两种模式都能很好的预报东北冷涡系统的发生，这与过去的研究（Liu and Wang, 2022）结论相似，而强降水可预报性较低的原因除了模式对冷涡位置和强度预报与实况存在偏差外，还因冷涡型强降水更多表现为较强的局地性和突发性特征，这为数值模式对冷涡型强降水的可预报性带来巨大挑战。图 9 进一步给出了全球模式和区域模式对不同环流背景下 2019 年暖季东北地区每个强降水日中强降水对象预报 POD、FAR 和 MAR 分布，其特征与表 1 中的整体特征相似。

表 1 2019 年暖季东北地区强降水分型 MODE 检验 1——降水对象预报的 POD、FAR 和 MAR。

Tab. 1 Classification of the heavy rainfall days and the Method of Object-based Evaluation (MODE) on the warm season of 2019 in northeast China: probability of detection (POD)、false alarm rate (FAR) and missed alarm rate (MAR) of the rainfall object.

	POD (%)	FAR (%)	MAR (%)
ECMWF	55.4	44.6	39.0
CMA_MESO	44.7	55.3	39.8
ECMWF-P1	56.6	43.4	37.5
CMA_MESO-P1	50.0	50.0	40.0
ECMWF-P2	68.4	31.6	31.6
CMA_MESO-P2	53.7	46.3	30.1
ECMWF-P3	50.0	50.0	50.0
CMA_MESO-P3	33.3	66.7	57.1
ECMWF-P4	37.5	62.5	54.5
CMA_MESO-P4	41.7	58.3	50.0
ECMWF-P5	41.5	58.5	45.2
CMA_MESO-P5	25.5	74.5	50.0

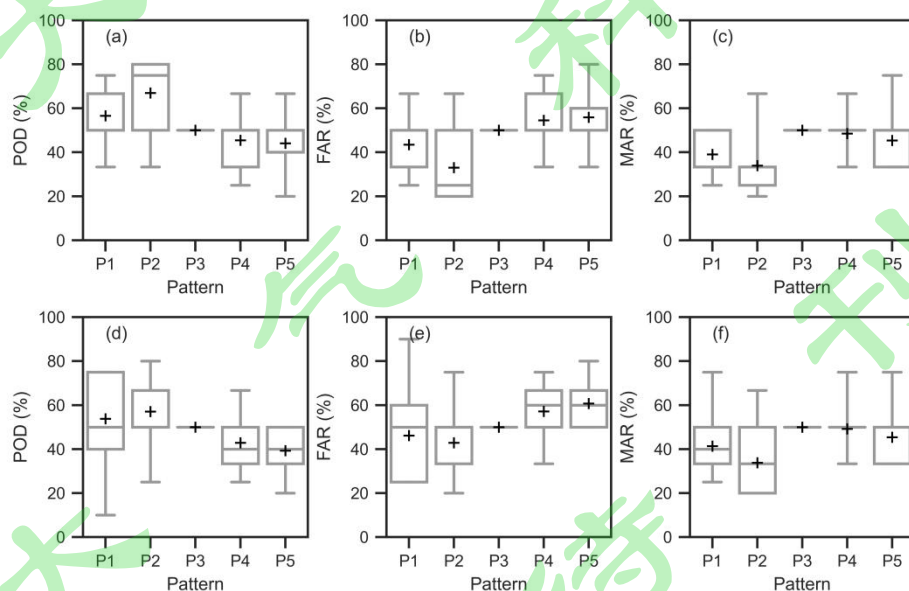


图 9 ECMWF 全球模式(a、b、c)和 CMA_MESO 区域中尺度模式(d、e、f)对不同环流型 (P1-5) 中各强降水日的降水对象预报效果箱型图 (单位: %)。

(a、d) POD; (b、e) FAR; (c、f) MAR;

Fig. 9 Box plot of the object POD (a, d), FAR(b, e) and MAR(c, f) of ECMWF (a, b, c) and CMA_MESO (d, e, f) on the heavy rainfall days in Synoptic Patterns.

环流背景和数值模式类型等都会对数值预报偏差特征造成影响，同时，模式预报偏差的标准差越小，偏差平均值越能代表模式的系统性偏差特征（符娇兰等，2016；危国飞等，2017），相关统计研究结果对于预报员更好地利用数值预报结果开展降水预报具有重要和实用的参考价值。下一步依据不同模式预报的相同环流型、相同属性偏差中，标准差最小的原则，选择预报偏差参考意义最大的一种模式的相关属性预报，进一步分析模式对 5 种环流型的强降水位置、强度、面积和形状等的预报偏差特征。

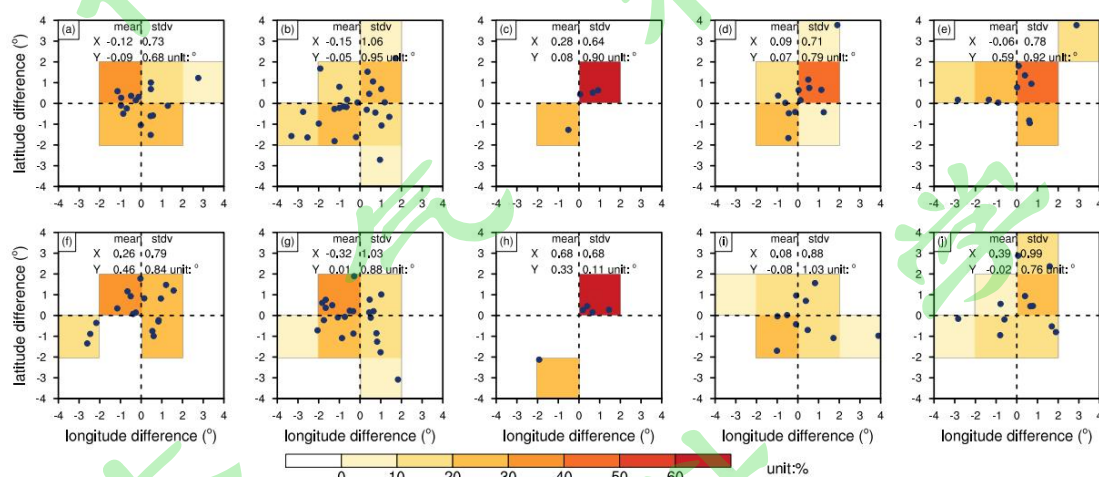


图 10 不同环流型（P1-5）背景下，ECMWF 全球模式(a、b、c、d、e)和 CMA_MESO 区域模式（f、g、h、i、j）预报与实况的经向（X）/纬向(Y)距离偏差（散点，单位：°），以及偏差频次百分比（阴影，单位：%）。各小图上方数值含义：X、Y 分别对应±2° 经向、纬向偏差的相关统计量（单位：°），左侧数值代表平均值（mean），右侧数值代表标准差（stdv）。

Fig. 9 Distribution of the object location deviation (scatter; units: °) and sample percentage (shaded; units: %) of ECMWF (a, b, c) and CMA_MESO (d, e, f) on the heavy rainfall days in Synoptic Patterns. The numerical values on the top of the plots represented the zonal (X) and meridional (Y) mean deviation (left) and standard deviation (right) between -2° and +2°.

从两个模式预报的位置偏差特征（图 10）来看，经、纬向偏差大多集中在±2° 范围内（样本数占比都超过 80%），将偏差在±2° 以外的点视为异常值，仅计算偏差在±2° 范围内样本的位置偏差平均值和标准差，在各型中选择标准

差最小的模式结果分析该型的位置偏差特征。另外，将偏差 $\pm 2^\circ$ 的范围划分为东北、东南、西南、西北4个方向，当某一方向上的样本数在该型所有样本数中占比大于40%，将该方向定义为该型的主导方向，如果4个方向中样本数占比都不超过40%，则选择东（东北、东南两个方向样本占比的和，以下类似）、南、西、北方向中样本数占比最大的方向作为主导方向。模式对于P1、P3和P4环流型位置预报偏差标准差相对小，特别是ECMWF全球模式的预报偏差离散度更小，都在 1° 以内，其中ECMWF对P1环流型强降水位置预报较实况偏西的样本数占比为56%，P3、P4环流型预报偏东北的样本数分别为80%和45%；其他两种环流型位置预报偏差离散度相对较大，对于P2环流型强降水CMA_MESO区域模式预报位置偏差一致性相对更高，预报位置较实况偏西的样本数占比为55%；而对于P5环流型强降水，ECMWF预报位置偏差一致性略高，预报位置较实况偏北的样本数占比为60%。以往对西南和江淮地区降水数值预报位置偏差的统计研究（Ji et al., 2019；符娇兰等，2016；宇如聪等，2021）指出，模式降水预报位置偏差更多表现出偏西、偏北的特点，与本文中东北地区的模式预报偏差表现存在差异；这种差异可能源于模式对不同地区主导环流背景和降水系统刻画能力的不同，如Liu and Wang（2022）就在2020年强梅雨过程中东北冷涡预报偏差影响梅雨锋降水预报偏差机制的研究中发现，高分辨率气候模式对东北冷涡位置预报偏北从而导致锋区位置和强降水落区预报偏北。本文前述MODE检验结果中，两种冷涡型强降水预报位置偏北的特征与Liu and Wang（2022）研究中发现的冷涡及降水位置预报偏差特征十分相似。因此，不同天气背景下，强降水偏差特征可能存在明显差异，而系统把握这些偏差特征，将有助于预报员借助数值模式开展更好的强降水预报。

强度（面积）预报的绝对偏差（预报与实况之差的绝对值）会随着降水强度（面积）增强（增大）而增大，本文中所有可以匹配的降水对象的强度（面积）预报的绝对偏差和降水对象在实况中对应的强度（面积）之间的相关系数可达0.79（0.88），可通过0.001（0.001）的显著性检验，即较弱（较小范围）的降水对象，模式对其绝对强度（面积）预报偏差的数值也会相对较小；所以，用偏差占比来表示相应的偏差特征更具可比性，同时，数值模式预报检验的最终目的是为模式预报订正提供参考，因此，用强度（面积）偏差在预报强度（面积）中

的占比来定义相应偏差比，可更方便地对数值预报结果进行直接订正和调整。

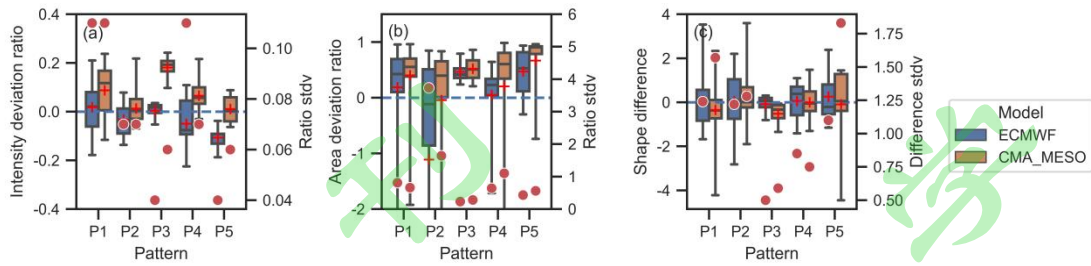


图 11 不同环流背景（P1-5）下，ECMWF 全球模式（蓝色）和 CMA_MESO 区域模式（棕黄色）预报对象属性偏差（箱线图，左侧坐标轴）、偏差平均值（红色十字，左侧坐标轴）和偏差的标准差（红色圆点，右侧坐标轴）。

（a）强度偏差比（预报对象强度与实况对象强度的差值在预报对象强度中所占比例）；（b）面积偏差比（同强度偏差比，但为面积特征）；（c）形状偏差（预报对象形状与实况对象形状的差值）；

Fig. 11 Box plot of the object intensify deviation ratio (a), area deviation ratio(b) and shape difference (c) of ECMWF (blue) and CMA_MESO (brown) on the heavy rainfall days in Synoptic Patterns. (the boxes, red crosses and red dots indicate distribution of mean and standard of the deviation, respectively)

从全球和区域模式预报强度偏差比的分布（图 11a）看，P3 和 P5 环流型，ECMWF 全球模式降水强度预报的偏差离散度更小，强度偏差一致性更高，其中，对 P3 环流型降水强度的预报与实况具有很好的一致性；而尽管 P5 环流型降水预报的 TS 评分不高，但全球模式对不同降水对象强度预报偏低的程度大体一致，基于此，在实际业务预报中，在原有降水预报强度基础上增加约 0.1 倍，即可得到与实况更为一致的强度预报结果。对于 P4 环流型强降水，CMA_MESO 区域模式强度预报的偏差离散度相对小于全球模式，预报以偏强为主，偏强样本占比约为 75%。ECMWF 全球模式对 P1、P2 环流型降水强度预报偏差的离散度略低于 CMA_MESO，P1 型 ECMWF 预报较实况偏强的样本占比约 56%，P2 型预报 ECMWF 较实况偏低的样本占比 75%。两模式对不同环流型强降水对象面积的预报均以偏大为主（图 11b），P2 环流型略有不同，两模式对其面积预报偏差的离散度均较大，这主要源于模式对该环流型背景下某些降水对象的面积预报较实况偏小（仅占实况面积的 1/4 左右，图略），而这种情况在其他环流型中较少见。对于 P1 环流型，CMA_MESO 区域模式预报的强降水面积偏差离散度小于

ECMWF，预报面积偏大的样本所占比例超过 88%；第 3 环流型中，ECMWF 全球模式强降水面积预报偏差的离散度相对更小，且表现出面积预报较实况一致偏大的系统性偏差，因此，在实际业务预报中，根据平均值为 0.5 的面积偏差比，将全球模式预报的强降水落区面积缩小一半，可进一步提升相关预报效果；对于 P4、P5 环流型，同样是 ECMWF 面积预报偏差离散度更小，预报的强降水面积较实况强降水面积偏大的样本数所占比例分别为 82%和 89%，其偏差特征对预报订正参考价值大。雨区形状定义为降水落区的长轴与短轴长度的比值，数值越大，代表雨区越狭长，越小代表雨区越近圆形。不同环流型中，降水落区形状预报偏差特征如图 11c 所示，总体而言，ECMWF 全球模式和 CMA_MESO 区域模式的形状预报偏差离散度均相对较小（尤其第 3 环流型），但预报雨区形状较实况更趋狭长和更近圆形的比例大体相当，平均形状偏差均接近 0，系统性偏差不明显。

根据上述对降水对象属性偏差特征的分析可知，ECMWF 和 CMA_MESO 对于各种天气型降水的形状预报偏差特征都不明显，对位置、强度、面积属性的最佳预报及其特征偏差和占比进行归纳，如表 2。整体而言，对 5 种环流型的 3 种降水对象属性的预报中，ECMWF 偏差离散度小的情况更多，其预报的系统性偏差特征相对更明显，可订正能力更强。

表 2 2019 年暖季东北地区强降水分型 MODE 检验 2——降水对象位置、强度、面积预报偏差离散度最小的模式、特征偏差及特征偏差占比。

Tab. 2 Classification of the heavy rainfall days and the Method of Object-based Evaluation (MODE) on the warm season of 2019 in northeast China: the best model for the object feature forecast, deviation characteristics and its percentage.

	位置			强度			面积		
	模式	方向	占比	模式	偏差	占比	模式	偏差	占比
P1	ECMWF	西	56%	ECMWF	偏大	56%	CMA_MESO	偏大	88%
P2	CMA_MESO	西	55%	ECMWF	偏小	65%	CMA_MESO	偏大	75%
P3	ECMWF	东北	80%	ECMWF	偏大	75%	ECMWF	偏大	100%
P4	ECMWF	东北	45%	CMA_MESO	偏大	75%	ECMWF	偏大	82%
P5	ECMWF	北	60%	ECMWF	偏小	100%	ECMWF	偏大	89%

6 结论与讨论

本文将主客观融合环流分型与强降水数值预报客观检验评估相结合,构建了基于主客观环流分型的强降水数值预报 MODE 检验方法 (ENHPP_SOCC-MODE),并将其应用于 2019 年暖季东北地区强降水数值预报的检验评估中,该方法有助于细致检验和评估数值预报模式对不同地区、不同环流背景下强降水的预报能力,帮助预报员更好了解数值预报偏差特征,做出更好的强降水预报。其在 2019 年暖季东北地区强降水数值预报检验评估应用中的主要结论如下:

(1) 2019 年暖季东北地区强降水日环流背景可分为:西风槽型(15 个)、副高影响型(13 个)、急流型(5 个)、西部冷涡型(12 个)和东部冷涡型(9 个)五种。其中,两类冷涡型强降水局地性强,TS 评分低,模式对强降水发生与否的预报准确率低。西风槽型和急流型降水走向为东北-西南向带状分布,TS 评分高,因降水范围大,模式对于此两类天气型强降水发生的可预报性高。副高影响型降水范围同西风槽型和急流型一样,都相对较大,模式能够预报强降水的发生,但是对其强降水位置、强度、面积等属性特征预报与实况相比偏差较大,所以 TS 评分仍较低。

(2) 传统评分检验结果表明,CMA_MESO 对强降水预报 TS 评分一般高于 ECMWF;从 MODE 检验结果上看,CMA_MESO 对强降水发生的空报率一般都高于 ECMWF,命中率一般都低于 ECMWF,对强降水强度(面积)预报偏强(大)的样本数占比明显高于 ECMWF;对于不同环流型,ECMWF 对强降水位置、强度和面积等属性预报偏差离散度小于 CMA_MESO 的情况更多,预报偏差中系统性偏差占比大,其预报偏差的可订正能力更强,而 CMA_MESO 的预报偏差表现出更多的随机性,不易对其预报进行订正;CMA_MESO 的强降水 TS 评分相对较高,但从空间检验结果上看,预报效果却不及 ECMWF,这是源于 CMA_MESO 对强降水的空报更多,而包括 TS 评分在内的二分类评分在一定程度上会奖励空报的特点造成的,因此这也是要进一步发展空间检验的原因。

相比传统的点对点评分检验,MODE 检验可以提供不同环流型强降水位置、强度、面积和形状的细致偏差统计信息,找出系统性偏差特征(符娇兰等,2016;

危国飞等, 2017), 为数值预报偏差订正提供重要参考依据, 辅助预报员更好地利用数值预报结果开展降水预报。值得指出的是, 本文仅分析了 2019 年暖季东北地区的强降水样本, 样本数量相对偏少(尤其是急流型强降水样本仅为 5 个), 未来需要收集更多强降水样本, 沿用本文思路, 开展进一步深入分析; 此外, 仅从统计评分角度尚不足以得到更深入的结论, 后续还需要针对不同的天气型背景下的强降水开展诊断工作, 了解不同天气系统下数值模式的真实预报性能及预报偏差的产生原因, 特别是针对受西部、东部冷涡型影响的强降水过程, 深入研究冷涡位置和强度偏差对强降水预报偏差的影响和定量贡献, 为模式改进和强降水预报的客观订正提供支撑。尽管如此, 本文研究仍可为相关机理研究和预报提供一定参考; 鉴于东北冷涡影响的频繁性以及当前数值模式对东北冷涡影响下强降水预报的突出瓶颈难题, 加强东北冷涡背景下强降水形成机理的深入研究、改进数值预报模式、挖掘预报思路、构建有效预报方法迫在眉睫。

致谢: 感谢匿名审稿人以及邹强利博士在论文修改中提出的宝贵意见。预报检验中部分内容应用了国家气象中心刘凑华老师开发的开源检验包 (MetEva), 感谢刘凑华老师在检验包使用过程中提供的无私帮助。

参考文献 (References)

- 从靖, 吴振玲, 田笑, 等, 2021. 海河流域东北冷涡背景下的降水预报订正研究[J]. 气候与环境研究, 26(5): 556-568. Cong J, Wu Z L, Tian X, et al., 2021. Correction of Precipitation Forecast under the Northeast Cold Vortex in the Haihe River Basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 556-568. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20144
- Fang Y H, Chen H S, Lin Y, et al., 2021. Classification of Northeast China Cold Vortex activity paths in early summer based on k-means clustering and their climate impact[J]. Adv Atmos Sci, 38(3): 400-412. doi: 10.1007/s00376-020-0118-3
- 符娇兰, 宗志平, 代刊, 等, 2014. 一种定量降水预报误差检验技术及其应用[J]. 气象, 40(7): 796-805. Fu J L, Zong Z P, Dai K, et al., 2014. Application of a verification method on bias analysis of quantitative precipitation forecasts[J]. Meteor Mon, 40(7): 796-805. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.07.003
- 黄丽君, 崔晓鹏, 2022. 2000~2019 年东北冷涡统计特征及其影响期间的降水分布[J]. 大气科学, 待刊. Huang L J, Cui X P, 2021. Statistical characteristics of the Northeast China Cold Vortex and its impact on precipitation distribution from 2000 to 2019[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, In press. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21227
- 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.
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2012. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science, Second Edition[M]. New York: Wiley, 274.
- 黎慧琦, 崔晓鹏, 李琴, 等, 2019. SANDRA 法对北京小时强降水扰动环流场的分型研究[J]. 气候与环境研究, 24(4), 445-454. Li H Q, Cui X P, Li Q, et al, 2019. Anomaly based classification study of synoptic patterns

- associated with hourly heavy rainfall over Beijing by SANDRA method[J]. Climatic and Environmental Research, 24(4): 445-454. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18046
- 刘凑华,牛若芸.基于目标的降水检验方法及应用[J].气象,2013,39(06):681-690. Liu C H, Niu R Y. Object-based precipitation verification method and its application [J].2013, 39(06):681-690. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18046
- 刘丹玲,王黎娟,2022. 一次初春东北冷涡的结构特征及其降水成因[J]. 大气科学学报, 45(3) : 456-468. Liu D L, Wang L J, 2022. Analysis on the structural characteristics of an early spring cold vortex event in northeastern China and the formation mechanism of vortex precipitation[J]. Trans Atmos Sci, 45(3) : 456-468. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200727001
- Liu C, Sun J H, Yang X L, et al., 2021. Evaluation of ECMWF precipitation predictions in China during 2015–18[J]. Weather and Forecasting, 36(3): 1043-1060. doi: 10.1175/WAF-D-20-0143.1
- Liu D L, Wang L J, 2022. Evaluation of the CAMS-CSM Model in predicting a Northeast Cold Vortex Event at the early Onset of 2020 Mei-yu season[J]. Atmospheric Research. Online. doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106430
- 龙柯吉,谷军霞,师春香,等,2020. 多种降水实况融合产品在四川一次强降水过程中的评估[J]. 高原山地气象研究, 40(02): 31-37. Long K J, Gu J X, Shi C X, et al., 2020. Quality assessment of several merged precipitation products in a heavy rainfall process in Sichuan[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 40(2): 31-37. doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2020.02.005
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al., 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. Journal of Climate, 29(24): 8703-8719. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0057.1
- 潘昶,谷军霞,宇婧婧,等,2018. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报, 76(5): 755-766. Pan Y, Gu J X, Yu J J, et al., 2018. Test of merging methods for multi-source observed precipitation products at high resolution over China. Acta Meteorologica Sinica, 76(5): 755-766. doi: 10.11676/qxxb2018.034
- 潘昶,沈艳,宇婧婧,等,2015. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验. 气象学报, 73(1): 177-186. Pan, Y, Shen Y, Yu J J, et al., 2015. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method[J]. Acta Meteorologica Sinica, 73(1): 177-186. doi:10.11676/qxxb2015.010
- Philipp A, Beck C, Huth R, et al., 2014. Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software[J]. International Journal of climatology, 36(7): 2673-2691. doi: 10.1002/joc.3920
- Rao X N, Zhao K, Chen X, et al., 2019. Influence of synoptic pattern and Low-Level wind speed on intensity and diurnal variations of orographic convection in summer over Pearl River Delta, South China[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 124(12): 6157-6179. doi: 10.1029/2019JD030384
- Rousseeuw p, 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis[J]. journal of computational and applied mathematics, 20, 53-65. doi: 10.1016/0377-0427(87)90125-7
- 师春香,潘昶,谷军霞,等,2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 77(4): 774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al., 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteorologica Sinica, 77(4): 774-783. doi: 10.11676/qxxb2019.043
- 孙力,隋波,王小明,等,2010. 我国东北地区夏季暴雨的气候学特征[J]. 气候与环境研究, 15(6): 778-786. Sun L, Sui B, Wang X M, Liu S, 2010. Climatic Characteristics of the Summer Hard Rain in the Northeastern Part of China[J]. Climatic and Environmental Research, 15(6): 778-786. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2010.06.07
- Wang C L, Zhao K, Huang A N, et al., 2020. The crucial role of synoptic pattern in determining the spatial distribution and diurnal cycle of heavy rainfall over the South China Coast[J]. Journal of Climate, 34: 1-47. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0274.1
- 范国飞,刘会军,潘宁,等. 2021. 台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用[J]. 大气科学, 45(1): 195–204. WEI Guofei, LIU Huijun, PAN Ning, et al. 2021. Real-Time Correction Method for Numerically Modeled

- Typhoon Tracks and Its Integrated Application [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 195–204. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.19237
- 薛春芳, 潘留杰, 2016. 基于 MODE 方法的日本细网格模式降水预报的诊断分析[J]. 高原气象, 35 (2): 406–418. Xue C F, Pan L J, 2016. Diagnostic analysis of precipitation forecasting from Japan thin-grid model based on MODE[J]. Plateau Meteorology, 35(2): 406–418. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00010
- Yan Y, Miao Y C, Guo J P, et al., 2019. Synoptic patterns and sounding-derived parameters associated with summertime heavy rainfall in Beijing[J]. International Journal of Climatology, 39(3): 1476–1489. doi: 10.1002/joc.5895
- 杨赓, 王黎娟, 2021. 5—9 月不同类型东北冷涡的统计特征及成因[J]. 大气科学学报, 44(5): 773–781. Yang B, Wang L J, 2021. Statistical characteristics and causes of different types of northeast cold vortex from May to September[J]. Trans Atmos Sci, 44(5): 773–781. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200708001
- 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. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2011.12.004
- 宇婧婧, 沈艳, 潘旻, 等, 2015. 中国区域逐日融合降水数据集与国际降水产品的对比评估[J]. 气象学报, 73(2): 394–410. Yu J J, Shen Y, Pan Y, et al., 2015. Comparative assessment between the daily merged precipitation dataset over China and the world's popular counterparts[J]. Acta Meteorologica Sinica, 73(2): 394–410. doi: 10.11676/qxxb2015.033
- 宇如聪, 李健, 陈昊明, 等, 2021. 中国降水日变化[M]. 北京: 科学出版社, 229. Yu R C, Li J, Chen H M, et al., Diurnal variation of precipitation over China[M]. Beijing, China: Science Press, 229.
- 余文韬, 吴振玲, 何群英, 等, 2015. 天津天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社. Yu W T, Wu Z L, He Q Y, et al., 2015. Weather Forecasting Method Handbook for Tianjin (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 袁美英, 徐南平, 周秀杰, 等, 2020. 中国东北地区短波低槽型对流性暴雨[M]. 北京: 气象出版社. Yuan M Y, Xu N P, Zhou X J, et al., 2020. Impact of Shortwave low trough on convective rainstorm in Northeast China(in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 张弛, 王咏青, 沈新勇, 等, 2019. 东北冷涡背景下飑线发展机制的理论分析和数值研究[J]. 大气科学, 43(2): 361–371. Zhang C, Wang Y Q, SHEN X Y, et al., 2019. Theoretical Analysis and Numerical Study on the Development Mechanism of Squall Line in the Northeast Cold Vortex[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 43(2): 361–371. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1806.18101
- 赵洋洋, 张庆红, 杜宇, 等, 2013. 北京“7.21”特大暴雨环流形势极端性客观分析[J]. 气象学报, 71(5), 817–824. Zhao Y Y, Zhang Q H, Du Y, et al., 2013. Objective analysis of the extreme of circulation patterns during the 21 July 2012 torrential rain event in Beijing[J]. Acta Meteorol Sin, 71(5): 817–824. doi: 10.11676/qxxb2013.066
- 郑秀雅, 张廷治, 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社. Zheng X Y, Zhang T Z, 1992. Rainstorm in Northeast China [M], Beijing: China Meteorological Press. (in Chinese).
- 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等, 2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象, 37(7): 795–801. ZHENG Y Y, YAO C, HAO Y, et al., 2011. The Short Time Forecasting and Early Warning Research on Severe Convective Weather Under Different Types of Large Scale Circulation Background[J]. Meteor Mon, 37(7): 795–801. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2011.7.003
- 朱乾根, 林瑞锦, 寿绍文, 等, 2000. 天气学原理 (第三版) [M]. 北京: 气象出版社, 185–195. Zhu Q G, Lin R J, Shou S W, et al., 2000. Theories and techniques of synoptic meteorology, 3th ed [M]. Beijing, China: Meteorological Press, 185–195pp.