蔡志颖,郑艳,张程明,等.2024.基于逻辑回归法的浙江省低涡型暴雨落区预报研究[J].暴雨灾害,43(1):32-44. CAI Zhiying, ZHENG Yan, ZHANG Chengming, et al. 2024. The potential falling area forecast for rainstorm induced by vortex in Zhejiang Province based on logistic regression algorithm [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):32-44 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-009

基于逻辑回归法的浙江省低涡型暴雨落区预报研究

蔡志颖[1],郑艳[2],张程明[1],段晶晶[1,3],吴俊杰[1],肖王星[1]
(1. 浙江省宁波市气象台,宁波 315000;2. 浙江省宁波市镇海区气象局,宁波 315200;
3. 中国气象局上海台风研究所,上海 200030)

摘　要: 大气低涡是造成我国南方地区暴雨洪涝的重要天气系统,大气低涡背景下的暴雨突发性、局地性强,其发生时间、强度和落区一直是气象预报业务的难点。为提高浙江省暴雨预报准确率,本文利用1979—2020年浙江省逐日格点降水观测数据和美国国家环境预测中心气候预测系统再分析数据集,首先分析了浙江省内近42 a由大气低涡造成的区域性暴雨事件(以下简称低涡型暴雨)的气候特征;然后将850 hPa垂直速度、水汽通量散度、速度散度、低空急流、切变线以及700 hPa垂直速度作为预报因子,基于"配料法"并结合逻辑回归方法构建了低涡型暴雨落区预报模型;最后基于该模型利用2021年欧洲中期天气预报中心预报产品进行暴雨落区预报,并使用同期实况降水进行了系统性检验和天气过程检验。结果表明,该模型总体性能较好,提前24 h和12 h时效的暴雨预报能力均有提升,可将12%的准确率和20%左右的命中率分别提升至14%和40%附近,漏报率从75%以上降至60%附近,但存在着一定程度的空报。

关键词: 浙江省;低涡型暴雨;配料法;逻辑回归;落区预报
中图法分类号: P456.8　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-009

The potential falling area forecast for rainstorm induced by vortex in Zhejiang Province based on logistic regression algorithm

CAI Zhiying[1], ZHENG Yan[2], ZHANG Chengming[1], DUAN Jingjing[1,3], WU Junjie[1], XIAO Wangxing[1]

(1. *Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo* 315000; 2. *Ningbo Zhenhai Meteorological Bureau, Ningbo* 315200;
3. *Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai* 200030)

Abstract: The atmospheric low-level vortex is an important weather system that causes rainstorm and flood in southern China. The vortex induced rainstorm is sudden and local, and its occurence time, intensity and falling area have always been difficult for meteorological forecasting. In order to improve the accuracy of rainstorm prediction in Zhejiang Province and improve the localization application of the prediction model, based on daily precipitation data of Zhejiang Province from 1979 to 2020 and reanalysis dataset from the National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System, climatic characteristics of the heavy rain in Zhejiang Province induced by low-level vortex is studied, the vortex induced rainstorm in Zhejiang mostly occurs in the rainy season and has obvious interannual variation characteristics. Then, the 850 hPa vertical velocity, water vapor flux divergence, velocity divergence, low-level jet, shear line and 700 hPa vertical velocity are used as ingredient factors, and the potential falling area forecast for heavy rain induced by vortex is constructed by using logistic regression algorithm. Finally, the forecast products of the European Medium-Range Weather Prediction Center are used to forecast the rainstorm falling area based on this model, and the actual data of the same period are used for systematic test and weather process test. Results show that the overall performance of the model is good, and the rainstorm prediction ability of 24 h and 12 h ahead is improved, which can increase from 12% accuracy and 20% to around 14% and 40% respectively, and the omission rate drops from more than 75% to around 60%, but there is a certain degree of empty report. The forecast model of Zhejiang Province based on logistic regression method has a good indicator for the prediction of such rainstorm areas, and is of great significance for meteorological disaster prevention and mitigation.

Key words: Zhejiang; rainstorm induced by vortex; ingredients method; logistic regression algorithm; falling area forecasting

收稿日期: 2023-01-29;**定稿日期**:2023-08-13
资助项目: 浙江省宁波市重点研发计划暨"揭榜挂帅"项目(2023Z139);浙江省宁波市自然科学基金项目(2018A610210);浙江省宁波市气象局一般项目(NBQX2023001B)

第一作者: 蔡志颖,主要从事天气预报服务研究。E-mail: nbqx_czy@163.com
通信作者: 张程明,主要从事天气预报服务研究。E-mail: 171429617@qq.com

引 言

浙江省濒临东海，属亚热带季风气候，水汽充沛，不仅受西风带天气系统的影响，还受低纬度台风和东风系统影响，加之浙闽地区丘陵、山脉地形作用，局地对流旺盛，一年四季均有暴雨出现。每年暴雨及其引发的次生灾害都会造成巨大的经济损失和人员伤亡，甚至出现人员伤亡。因此，提高浙江省暴雨预报水平具有十分重要的作用。

早期暴雨预报方法，主要是基于天气图的预报，预报员利用地面、高空天气图识别各类天气系统，再根据气温、水汽等各方面条件，进行未来的暴雨落区及雨量预报；至20世纪90年代，天气图方法基本被数值天气预报方法所代替。尽管数值模式对系统性降水或暴雨预报有了很大提高，但由于暴雨突发性、局地性强，模式暴雨预报的准确率与实况仍相差较远(朱占云等，2017；高守亭等，2018；罗亚丽等，2020)。21世纪初，“配料法”在国外发展较快，已处于业务应用阶段，常用于暴雨洪涝、降水和强对流天气预报中(Lin et al., 2001；Wetzel, 2001)，“配料法”最早由Doswell等(1996)提出，他认为可从暴雨形成的基本要素，动力、热力、高低空配置等方面，将一些关键物理量因子结合起来，分析这些要素的正确搭配并建立暴雨预报模型。之后“配料法”在国内得到推广并使用(来小芳等，2007；刘勇等，2015；隋亚男等，2021)。俞小鼎(2011)认为，将基于构成要素的方法变成针对某一天气要素(比如暴雨)的客观预报技术是可行的，但关键在于挑选合适的构成要素。欧坚莲等(2011)选取环境场、水汽和不稳定条件为配料因子，利用“配料法”构建出广西有、无持续性暴雨的预报模型；李俊等(2006)基于“配料法”得出了梅雨锋暴雨潜势预报模型；张萍萍等(2012)也将“配料法”应用于湖北梅雨期和盛夏期的暴雨预报中，并指出这种方法在当地汛期气象服务中发挥了重要作用，能较好地做出暴雨落区预报。

浙江省暴雨主要集中在春夏季，其中梅汛期暴雨和台风暴雨是最主要的暴雨类型，又以梅汛期暴雨频率最高(王镇铭等，2013)。梅汛期期间，东移的西风带大气低涡系统(如西南涡、江淮气旋等)常给浙江造成区域性暴雨天气，但数值模式对这类大气低涡系统造成的区域性暴雨(以下简称低涡型暴雨)预报存在不足，量级、落区都难以把握(丁凡，2021；毛程燕等，2021)。因此及时、准确地做好低涡型暴雨落区预报，建立一套客观、自动化的预报模型，对实际防灾、减灾工作意义重大。过往学者采用一个或几个低涡个例，从水汽、动力、不稳定条件等方面对暴雨成因进行分析研究，得到了一些有意义的研究成果(吴琼等，2014；张芹等，2014；刘煦等，2019；吴琼等，2021；颜佳任等，2021；云天等，2022)。如，郝丽萍等(2016)认为高原水平切变线上风切变的大小对持续性西南涡暴雨起重要作用。Wang和Liu (2017)强调低空急流、暖湿平流对西南涡移动及暴雨的影响。张晓红等(2016)诊断分析了一次江淮气旋暴雨过程，发现暴雨落区位于气旋移动左前侧，低层强辐合和旋转对暴雨形成至关重要。陈筱秋等(2016)认为江淮气旋引起的上升运动及地形抬升作用对强降水也十分重要。但由于样本个例少，基于个例分析所得结论的普适性在不同低涡型暴雨事件中有所不足，在不同地区的适用也有一定局限。因而有必要通过对大量低涡型暴雨发生时的气象条件(如暴雨发生时的环境条件、影响天气系统和中尺度系统结构等)进行分析，研究总结出浙江省低涡型暴雨影响要素及此类暴雨落区预报方法，以提高暴雨的业务预报水平。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文的研究资料包括：(1) 1979—2020年美国国家环境预测中心气候预测系统再分析数据集(National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis, NCEP CFSR)，具体包括各等压面上的经纬向风速、位势高度、大气比湿和温度场，数据覆盖全球范围，水平分辨率为0.5°×0.5°，时间分辨率为6 h。(2) 格点降水资料取自浙江省气象局和水利厅联合发布的历史降水量资料整编库，空间分辨率为0.01°×0.01°，涵盖浙江省及周边区域08—08时(北京时，以下同)的逐日累计降水量数据。

1.2 研究方法

1.2.1 低涡型暴雨的客观识别

采用Qin等(2017)和Lu (2017)提出的基于最外围闭合等值线的低涡区域识别方法。具体以逐日4次850 hPa位势高度场为识别要素，将局地位势高度低值初步定义为低涡中心，从中心点向外搜索最外围闭合等高线并以最后一圈闭合等值线内的区域作为低涡影响区。若低涡影响区有位于浙江省部分时，便将该低涡定义为影响浙江的低涡(以下简称影响低涡)。参照牛若芸等(2018)对我国95°E以东地区区域性暴雨的定义，并结合浙江省格点降水资料分辨率，给出浙江省区域性暴雨的定义：日累计降水量达暴雨(≥50 mm)以上量级的格点数≥750个，且这些格点相连成片。此处“相连成片”是指该区域内的每一个格点都至少有另外一个格点与之相连接(包含对角相连)。当浙江省某一天内出现区域性暴雨且同时段内有影响低涡出现，

便将该影响低涡称为致暴低涡(黄文彦等,2019;2020),当日为低涡型暴雨日,属一次低涡型暴雨事件。

1.2.2 低空切变线的客观识别

大气低涡往往伴有低空切变线,且在低涡底部多有低空西南风急流,作为对暴雨天气发生有重要作用的天气尺度系统,本文参照杨雪艳等(2018)的做法也对这两类天气系统进行客观识别并作为浙江省低涡型暴雨的预报着眼点。切变线是低空风场上具有气旋式切变的风场不连续线(朱乾根等,2000)。客观分析时,采用马嘉理和姚秀萍(2015)提出的江淮地区切变线客观识别方法。具体利用850 hPa纬向风的经向切变、相对涡度和纬向零风速线3个客观判据,表达如下

$$\begin{cases}\dfrac{\partial u}{\partial y}<0\\ \xi>0\\ u=0\end{cases} \tag{1}$$

其中,u为纬向风速,ξ为垂直方向上的相对涡度,y为南北向坐标。实际计算中,可能不存在u=0的网格点,那u=0的位置便通过南(u>0)、北(u<0)两点坐标线性插值后得到。最后利用贝塞尔曲线拟合同时满足以上条件的点(王家润等,2010),形成客观识别的切变线。由于低空切变线为天气尺度,并常与大范围内的降水天气联系(姚秀萍等,2022),在客观分析浙江省内有无切变线影响时,规定其经度方向上跨度至少有2°。

1.2.3 低空急流轴的客观识别

气象业务中,常把850 hPa上风速超过12 m·s^{-1}的极大风速带称为低空急流。客观识别低空急流时,采用王毅等(2013)和王萍等(2018)提出的识别方法,但该方法仅针对偏南风。具体方法为,逐个判断每个网格点风速是否大于12 m·s^{-1},这样的风速符合点要相连成片,记录成片区内满足条件的格点总数N。N表示急流的范围,当N超过一定阈值时便认为极大风速带内有急流。对识别出的极大风速带进行风场结构分析。首先计算极大风速带内的最大风速点,对应风向为急流风向。按经验,急流轴可分为经、纬向型两种,如果急流风向呈经(纬)向,便认为急流轴为经(纬)向。当急流呈经(纬)向时,在极大风速带内搜寻每个纬(经)线上风速最大值所对应的经(纬)度,最后通过贝塞尔曲线将这些离散经、纬度点拟合成一条光滑的急流轴线。对于0.5°×0.5°的CFSR数据,N取为18。

通过以上三种客观识别方法识别出低涡型暴雨、低空切变线和低空急流,形成了1979—2020年浙江省逐年的低涡型暴雨数据集,数据集中包含所有致暴低涡信息(如发生时间、低涡中心经纬度、尺寸、中心强度)及任一低涡型暴雨个例有无受到低空切变线或急流系统的影响信息。

2 低涡型暴雨的统计特征

统计发现,1979—2020年浙江省共出现528次低涡型暴雨,平均每年12.5次。低涡型暴雨日数年际变化较大,1999年发生次数最多,达25次;其次是1983年,达22次;2003年最少,仅3次低涡型暴雨过程(图1a)。从低涡型暴雨频数的逐月分布(图1b)看,5—7月最易出现低涡型暴雨,以6月最多,有167次,5月次之,达83次。这主要是由于此时的冷、暖空气常对峙于江淮流域,江淮地区正值梅雨季且多静止锋活动,大气水汽含量充沛,为区域性暴雨的发生提供了有利的环境条件(朱乾根等,2010)。

3 低涡型暴雨个例分析

暴雨预报过程中,可根据水汽、不稳定和抬升条件判断暴雨系统的发生、发展过程(张小玲等,2010)。为挑选浙江省低涡型暴雨天气中有代表性的物理量参数,以2020年6月29—30日的一次区域性暴雨为

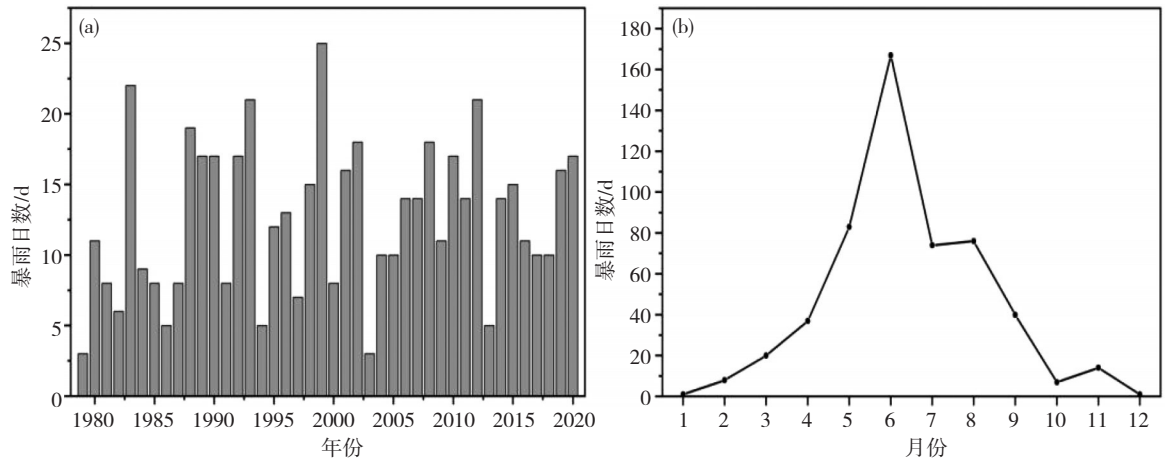


图1 1979—2020年浙江省低涡型暴雨日的年际变化(a)和低涡型暴雨日数的月变化(b)

Fig.1 (a) Interannual and (b) monthly variation of vortex induced rainstorm days in Zhejiang from 1979 to 2020

例，诊断分析暴雨发生时的水汽、不稳定和动力抬升条件，以明确相关的配料因子。

3.1 暴雨实况及环流特征

2020年6月29日08—30日08时，在一次江淮气旋东移过程中，浙江中部普遍出现暴雨及大暴雨天气(图2a)，尤其是浙江西部的衢州市，大部分地区出现了大暴雨，有89个区域气象观测站超过100 mm。从29日20时500 hPa高空图(图3a)可见，华北地区有一明显冷涡，浙江省位于冷涡底部的平直偏西气流中，西太平洋副热带高压(以下简称副高)位于25°N以南，呈东西

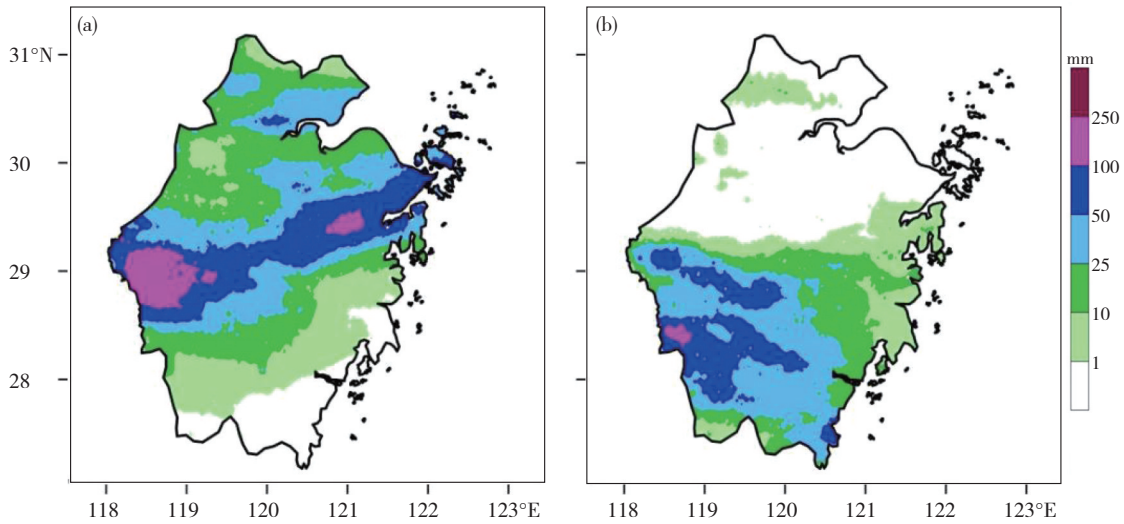


图2 浙江省2020年6月29日08—30日08时(a)、6月30日08—7月1日08时(b)降雨量的空间分布

Fig.2 The spatial distribution of precipitation in Zhejiang from (a) 08:00 BT 29 June to 08:00 BT 30 June and (b) 08:00 BT 30 June to 08 BT 1 July 2020

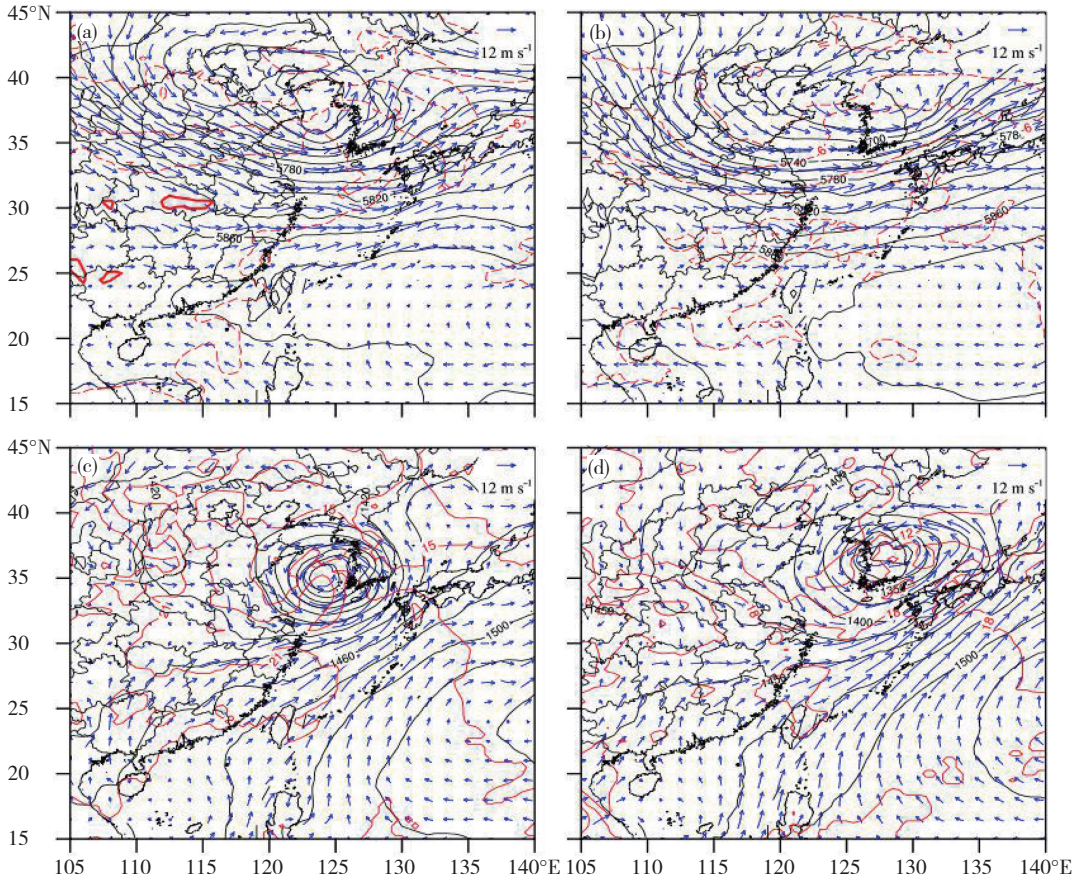


图3 2020年6月29日20时(a、c)和6月30日08时(b、d) 500 hPa (a、b)、850 hPa (c、d)位势高度场(黑色等值线，单位：gpm)、温度场(红色等值线，单位：℃)及风矢量场(蓝色箭矢，单位：m·s⁻¹)合成图

Fig.3 Geopotential height (black solid line, unit: gpm), temperature (red solid line, unit: ℃) and wind vector filed (blue barb, unit: m·s⁻¹) of (a, b) 500 hPa and (c, d) 850 hPa at (a, c) 20:00 BT 29 and (b, d) 08:00 BT 30 June 2020

带状分布并延伸至华南地区。850 hPa上(图3c),低涡气旋已入海,浙江省为暖区控制,主要为西南气流,在浙江北部江苏、安徽一带存在西北风和西南风的切变,降水大值区位于切变线南侧。

30日,雨区有所南压且雨量减弱(图2b),主要降水区落于衢州南部,仅5个气象观测站超过100 mm。当日08时(图3b),高空冷涡东移至朝鲜半岛上空,环流径向度有所加大,浙江省北部转西北风,有冷空气南下。副高势力明显减弱,主体移至海上。850 hPa低空低涡东北向移至128°E附近,浙江省温度明显降低,西南风减弱且位置南压(图3d),这与30日主要降水区南落相对应(图2b)。

3.2 水汽条件

充足的水汽是暴雨发生、发展的基本条件。图4a—b分别给出29日08—30日02时和30日08—7月1日02时的平均水汽通量散度、水汽通量和比湿的空间分布,可见29日浙江北部水汽含量充沛,比湿基本在14 g·kg^{-1}左右,源源不断的水汽从南海输送至浙北地区,并伴有明显的水汽通量散度辐合,大值区位于浙江西部和浙江沿海地区(图4a),这与当天出现的大暴雨区域基本吻合(图2a)。30日(图4b),虽然浙江省水汽含量仍较高,但由于风速减小,水汽输送明显减弱。水汽辐合区位于浙江西部,但位置较29日偏南。从118.5°E处的经向剖面可见,29日浙江中部(29°—31°N) 500 hPa层以下有显著的水汽通量大值,最强可达24 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1},该区域也对应着明显的水汽通量散度辐合(图4c);与29日相比,30日浙江省水汽通量明显减弱且强中心南移,强水汽通量散度辐

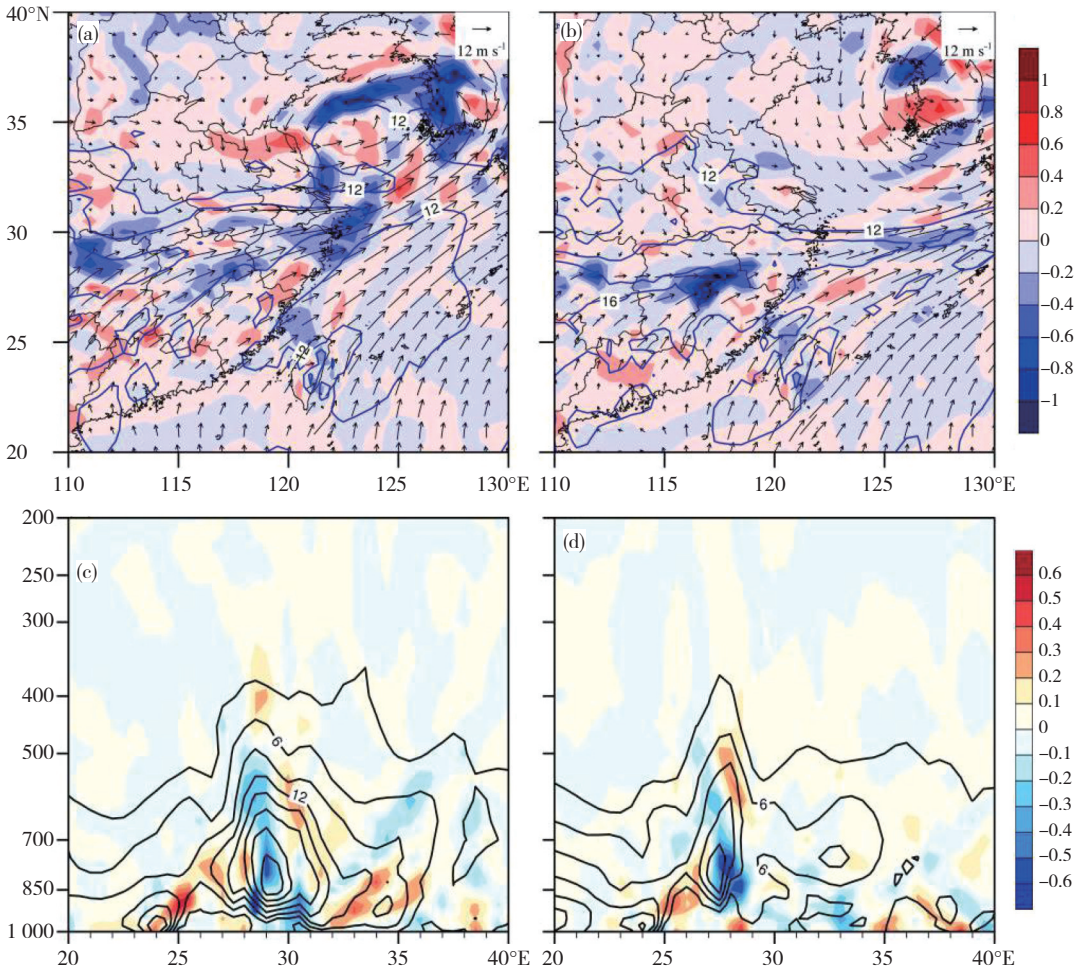


图4 2020年6月29日08—30日02时(a、c)和6月30日08—7月1日02时(b、d)的平均水汽通量(箭矢,单位:g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})、水汽通量散度(阴影,单位:10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})和比湿(等值线,单位:g·kg^{-1})空间分布(a、b)以及沿118.5°E的水汽通量(等值线,单位:g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})和水汽通量散度(阴影,单位:10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1})的经向垂直剖面(c、d)

Fig.4 (a, b) The spatial distribution of averaged water vapor flux (vector, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}), water vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}), specific humidity (contour, unit: g·kg^{-1}), and (c, d) the water vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}), water vapor flux (contour, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) along the meridional vertical section at 118.5°E from (a, c) 08:00 BT 29 June to 02:00 BT 30 June 2020 and (b, d) 08:00 BT 30 June to 02:00 BT 1 July 2020

合区出现在28°N附近，浙江中部低空转为水汽通量散度辐散区(图4d)，不利于降水的发生。

3.3 动力条件

垂直速度是表征大气垂直输送的物理量。从此次暴雨过程主要降水点(118.5°E，29°N)垂直速度的高度-时间剖面(图5)可见，29日20时前，对流层低层主要为垂直速度正值区，对应下沉运动，29日20时起转为上升气流，之后不断加强，在30日02时达到最大并延伸至200 hPa高度，与此次主要降水时段相吻合(毛程燕等，2021)，强烈的垂直上升运动将有利于暴雨天气的发生。30日08时后，上升气流明显减弱且仅在低空存在，对应降水将趋于减弱。从各高度上的速度散度随时间演变看，对流层低层850 hPa以下呈现“+-+”分布，最强速度散度辐合区出现在30日02时，29日20时—30日08时，对流层中高层500 hPa以上转为较深厚的辐散区，这将进一步加强高空抽吸作用，利于上升运动向更高层次拓展。

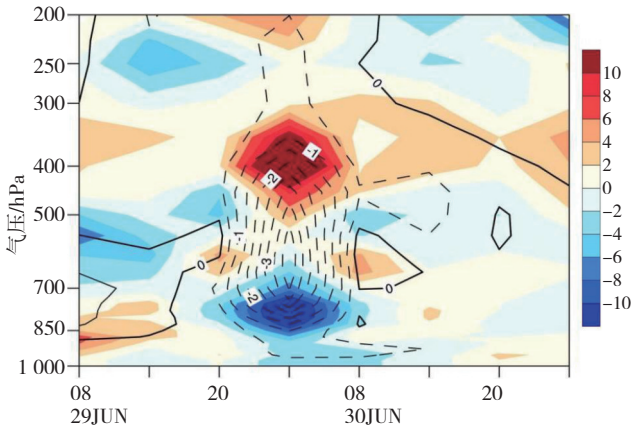


图5 2020年6月29日08—7月1日02时主要降水点(118.5°E，29°N)的垂直速度(等值线，单位：Pa·s^{-1}，实线为正值，虚线为负值)和速度散度(阴影，单位：10^{-5} s^{-1})时间-高度剖面图

Fig.5 The heigt-time cross section of vertical velocity (contour, unit: Pa·s^{-1}, solid line is positive, dashed line is negative) and velocity divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) at mainly precipitation points (118.5°E, 29°N) from 08:00 BT 29 June to 02:00 BT 1 July 2020

3.4 热力不稳定条件

*K*指数是综合反映对流层中低层大气热力、层结稳定性和水汽条件的物理量。*K*指数越大，将越有利于产生强对流或暴雨天气(杨雪艳等，2018)。从29、30日的平均*K*指数的空间分布看，29日*K*指数大值区主要分布在浙江北部，普遍在38 ℃以上，局部可达40 ℃(图6a)，而30日浙江省*K*指数有所减小且明显南压(图6b)，对浙江西南部的暴雨天气有一定的指示作用(图2b)。

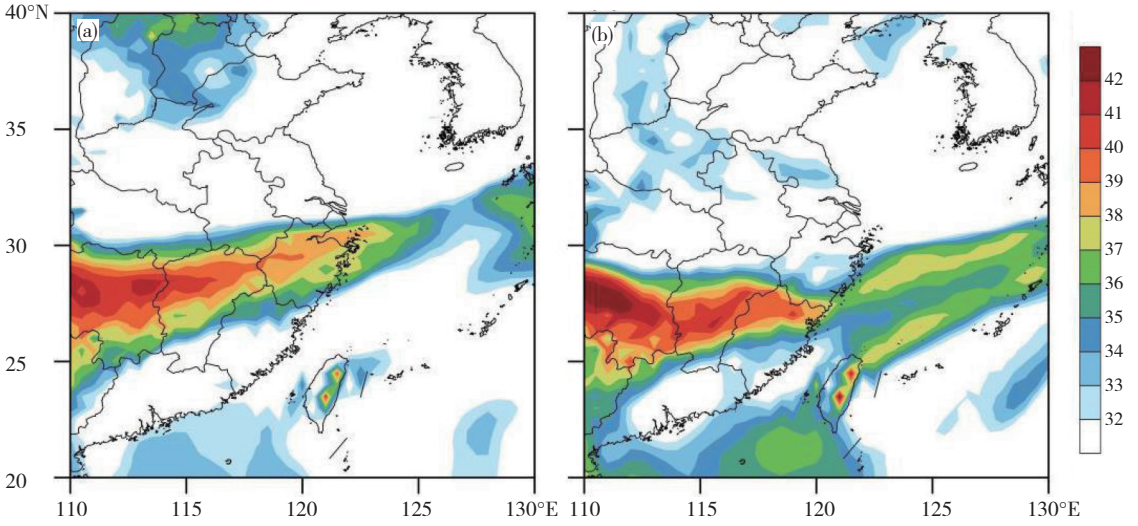


图6 2020年6月29日(a)和30日(b)平均*K*指数(阴影，单位：℃)空间分布

Fig.6 The spatial distribution of averaged *K* (shaded, unit: ℃) index on (a) 29 June and (b) 30 June 2020

3.5 低空急流和低空切变线

暴雨天气事件中，低空急流不仅是水汽输送带，也可在低空激发上升运动，为暴雨的发生提供动力不稳定条件。据统计，在江淮地区梅雨期内有70%以上的天数会出现低空急流，其中79%的低空急流有暴雨，而浙江省约84%的大暴雨天气过程也与低空急流有关(王镇铭等，2013)。作为影响暴雨的天气尺度系统，低空切变线附近常伴随风的辐合，可产生上升运动，不稳定能量的释放将有利于暴雨的发生(林宗桂等，2011；刘建勇等，2012)。曾欣欣(2004)指出，造成浙江省暴雨的4类主要天气形势中有2类是切变型。图7给出6月29日14时和30日08时客观算法识别的低空切变线和急流主轴线。此次暴雨过程中，低涡中心及其两侧的切变线位置偏北(图7a)。在29日14时，低涡南侧存在一支从江西伸向东海的西南风急流，浙江北部风速达急流强度，最强风速可超22 m·s^{-1}。30日08时(图7b)，随着低空低涡东北向移动，切变线和低涡南侧大风速带逐渐远离浙江省，但在江西省中部却有

一条纬向型急流发展，暴雨易出现在急流出口区的左前侧。

因此，选取850 hPa水汽通量、水汽通量散度、垂直速度、K指数以及低空急流和切变线等作为此次暴雨天气的影响要素加以分析，这些物理量能较好地表征此次降水系统中的水汽、动力抬升以及不稳定条件。

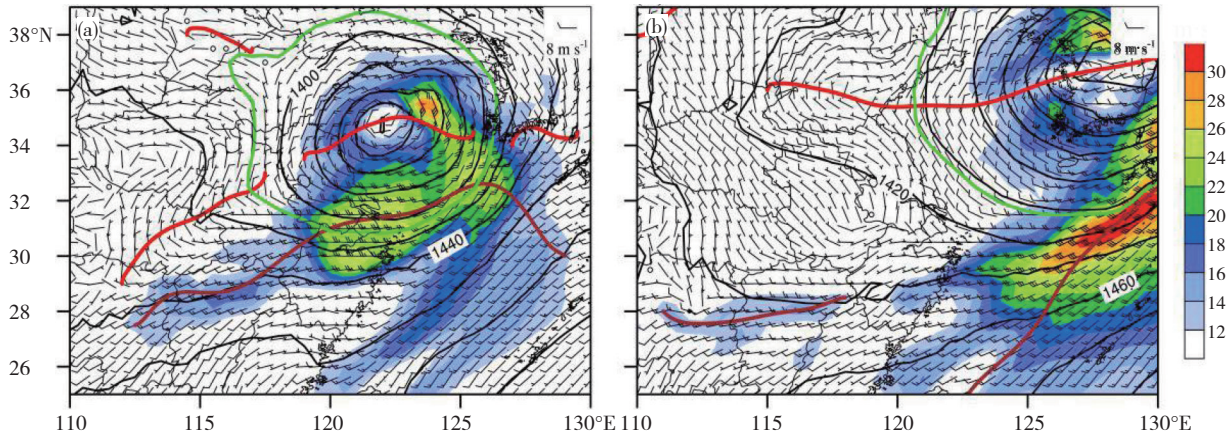


图7 2020年6月29日14时(a)和30日08时(b)850 hPa风矢量(阴影，单位：m·s^{-1})、位势高度场(等值线，单位：gpm)的空间分布(棕线、红线和绿线分别表示客观识别的急流主轴线、切变线和低涡边界)

Fig.7 The spatial distribution of 850 hPa wind (shaded, unit: m·s^{-1}), geopotential height (contour, unit: gpm) and objectively recognized jet main axis (brown) and shear line (red) at (a) 14:00 BT and (b) 08:00 BT 29 June 2020. The green line is the objectively identified low-vortex boundary

4 配料因子选取及预报模型构建

虽然对低涡型暴雨个例的诊断分析可揭示各物理量对暴雨发生的作用，但普适性可能不足。因此为确定每类物理量参数与低涡型暴雨的联系，采用点双列相关分析(麦哲宁等，2022)计算不同物理量因子与暴雨天气的相互关系，具体物理量见表1。需要注意的是，在进行暴雨二分序列相关性分析时，利用双线性插值方法将CFSR数据插值为0.1°×0.1°分辨率，浙江省格点降水也间隔0.1°采样。计算发现，与浙江省低涡型暴雨相联系的主要物理量包括850 hPa垂直速度、700 hPa垂直速度、850 hPa水汽通量散度以及850 hPa速度散度，其相关系数分别为−0.240 3、−0.196 6、−0.194 8和−0.171 5，其余物理量的相关系数均小于0.15。与850 hPa、700 hPa垂直速度存在较强相关性，也表明浙江省低涡型暴雨需要较深厚的上升运动。虽然相关系数最大仅−0.24，但这主要是由于总样本格点量过大，且暴雨天气本身是小概率事件。

对浙江省低涡型暴雨发生时，850 hPa上有无切变线和急流进行识别，只要一日四次记录中有任一时刻出现切变线或急流，便认为当日的低涡型暴雨受到切变线或急流影响(马嘉理和姚秀萍，2015)。由于网格分辨率的改变，N取为90。统计发现，在1979—2020年的528次低涡型暴雨过程中，有329次个例在浙江省存在急流轴线(占比62.3 %)，246次个例存在切变线(占比46.6 %)，但两者同时存在的情形较少，仅140例。

综上，本文选取850 hPa垂直速度、700 hPa垂直速度、850 hPa水汽通量散度、850 hPa速度散度、850 hPa低空急流和切变线作为浙江省低涡型暴雨的6个配料因子进行后续分析。

表1 浙江省低涡型暴雨主要物理量因子

Table 1 Mainly factors related to heavy rain induced by vortex in Zhejiang Province

水汽因子	热力稳定度因子	动力抬升因子
比湿	K指数	散度
相对湿度	对流有效位能	垂直速度
水汽通量散度	850—500 hPa温差	

注：每个物理因子均分为850 hPa、700 hPa以及500 hPa三个层次进行计算

在暴雨或强天气的二分类预报中，逻辑回归模型是一种简单高效、应用广泛的分类模型(白晓平等，2018；王坤等，2020；郑婧等，2020)，其回归结果被限制为0或1，表征某事件发生的可能性。本文利用该模型描述以上6个配料因子与低涡型暴雨天气是否发生之间的关系，将出现暴雨天气定义为1，未出现定义为0。以P表征暴雨发生的概率，其取值范围为[0，1]。由于低空急流或切变线影响的是一定空间范围，构建模型时，对这两个因子采取“有无”判别，即在一日四次记录中，识别低涡影响下浙江省内有无出现低空急流或切变线系统。若存在，则省内所有网格点均赋值

为1，反之为0(杨雪艳等，2018)。将一日当中省内各网格点850 hPa最强水汽通量散度辐合、速度辐合，700 hPa和850 hPa最强上升速度以及有、无切变线和急流系统组成配料气象因子矩阵，将是否为暴雨点构成响应因子矩阵，最终得到逻辑回归模型。配料气象因子与P可构建如下回归方程

$$\ln\frac{P}{1-p}=\alpha+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+\beta_4X_4+\beta_5X_5+\beta_6X_6 \tag{2}$$

式中 $X_i(i=1，2，\cdots6)$ 为6个配料气象因子，$\beta_i(i=1，2，\cdots6)$ 为对应因子的回归系数，α 为常数项。最终每个格点上的概率P可由(3)式计算得到，各字母含义同(2)式。

$$p(i,j)=\frac{\exp(\alpha+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+\beta_4X_4+\beta_5X_5+\beta_6X_6)}{1+\exp(\alpha+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\beta_3X_3+\beta_4X_4+\beta_5X_5+\beta_6X_6)} \tag{3}$$

低涡型暴雨概率预报产品采用计算空报FAR (R_{FA})、漏报MIS (M_{IS})、命中POD (P_{od})以及准确TS (T_S)率四种方法进行检验(王坤等，2020；朱岩等，2021；刘莹等，2020)。其中FAR和MIS，评分范围在[0，1]，数值越小表明预报结果越好，0为完美预报。TS和POD，评分范围在[0，1]，值越高代表预报效果越好，1为完美预报。各具体计算公式如下

$$R_{FA}=\frac{N_B}{N_A+N_B} \tag{4}$$

$$M_{IS}=\frac{N_C}{N_A+N_C} \tag{5}$$

$$P_{OD}=\frac{N_A}{N_A+N_B} \tag{6}$$

$$T_S=\frac{N_A}{N_A+N_B+N_C} \tag{7}$$

式中N_A为正确预报格点数，N_B为空报格点数，N_C为漏报格点数。由于本文是格点化的概率预报，所以检验过程中，也实行格点化(点对点)检验。若概率预报中的格点出现暴雨且实况吻合，便认为此次预报正确。

逻辑回归模型中，默认选择P=0.5作为分割点，但由于浙江省低涡型暴雨点(56 835个)远少于非暴雨点(450 400个)，即类别不平衡明显，因此需要对分割点进行调整(白晓平等，2018；王坤等，2020)。在暴雨预报兼顾“宁空勿漏”的原则下，可容忍增大FAR以减少MIS和提高POD、TS。图8给出不同分割点下，各评价指标的变化曲线，可见当分割点P取0.1时，POD达0.5，TS在0.4左右，随着分割点取值的增大，TS和POD评分明显降低，MIS明显增加。因此取0.1作为低涡暴雨回归预报模型的分割点。

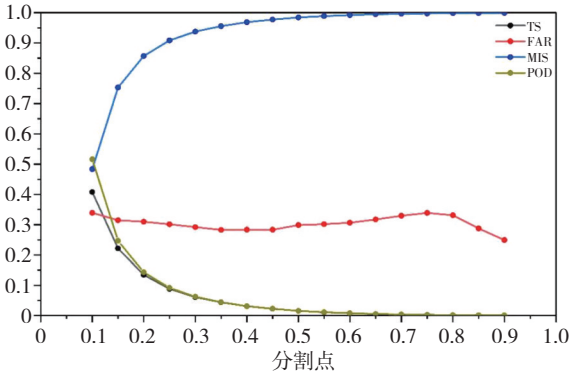


图8 不同分割点下TS、FAR、MIS和POD的变化曲线

Fig.8 The curve of TS、FAR、MIS and POD under different dividing points

5 预报模型的业务试验及检验

由于欧洲中期天气预报中心ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)预报产品在实际业务应用中更为广泛，且对大气形势场预报效果更好(张夏琨，2017；毛程燕等，2021；钱磊等，2022)，因此在2021年1—12月将低涡型暴雨预报模型与ECMWF细网格数值预报产品相结合进行了业务化运行。按照如下步骤，每日运行两次以提供08时(20时)起报的24—48 h (12—36 h)暴雨落区预报产品。

(1) 气象因子配料预处理：在制作每日08时(20时)起报的24—48 h (12—36 h)暴雨落区预报产品时，首先计算并选取关注日内ECMWF预报产品(空间分辨率0.125°×0.125°，时间分辨率为3 h)8个时次内浙江省850 hPa上各格点出现的最强速度辐合、水汽通量散度辐合、垂直上升速度和700 hPa最强上升速度。其次利用切变线和急流主轴客观方法识别关注日内8个时次中浙江省内有、无出现低空急流或切变线。最终在省内每个网格点上构成低涡暴雨预报模型所需的6个配料因子。

(2) 与临界分割点比较：将6个配料因子值代入回归模型并计算省内各格点上的暴雨概率值P，并将P值与临界分割点比较，当P≥临界分割点时，认为可出现暴雨，否则无暴雨。

(3) 消空处理：为降低预报模型空报率且充分利用数值预报产品，借助模式预报降水量进行了暴雨消空处理。对于任一格点，如果关注日内ECMWF预报的24 h降水量≥30 mm时，则认为该点有暴雨，否则无暴雨(杨雪艳等，2018)。

5.1 系统性检验

为验证模型的可预报性，将回归预报模型应用于2021年所有的低涡型暴雨天气过程中。借助低涡识别方法对造成浙江省区域性暴雨的个例进行了识别，全年共出现23次低涡型暴雨，较常年平均(12.5次)偏

多一倍。这23次个例分别出现在5月10—11日、5月19—20日、5月20—21日、5月22—23日、5月23—24日、6月11—12日、6月19—20日、6月20—21日、6月27—28日、6月28—29日、6月29—30日、6月30—7月1日、7月2—3日、7月31—8月1日、8月11—12日、8月12—13日、8月13—14日、8月14—15日、8月15—16日、8月16—17日、8月17—18日、9月7—8日、10月20—21日。图9给出每日08时(20时)起报的24—48 h (12—36 h)数值模式和回归预报结果检验评分。可见,不论超前24 h或12 h,ECMWF模式对2021年低涡型暴雨的预报TS和POD都较低,分别在12%和20%左右,MIS高达75%以上。每日08时起报的24—48 h模式暴雨预报效果(TS为12.7%)略优于20时起报的12—36 h模式预报(TS为11.2%),这与丁凡(2021)对ECMWF细网格产品在山东境内气旋降水过程中的检验结果相一致。采用回归预报模型后(图9a),08时起报的24—48 h暴雨预报,虽然FAR略有上升,但MIS明显减少,减少至60%左右,TS和POD提升明显,分别可达14.2%和39.5%。在20时起报的12—36 h回归预报情形下(图9b),FAR和MIS均有所降低,TS和POD明显提高,POD达40.9%。相较而言,20时起报的12—36 h回归预报改善效果要优于08时起报的24—48 h回归预报提升效果,即提前12 h的预报改善效果要优于提前24 h,这可能与临近时刻下,数值模式对大气环流描述的准确性有关,如低涡气旋中心、低空急流或切变等(丁凡,2021)。总的来说,回归预报模型能明显降低MIS、显著提高POD,这对防灾减灾工作非常有意义(杨雪艳等,2018),也表明了该模型在实际业务中可有较高的参考和应用价值。

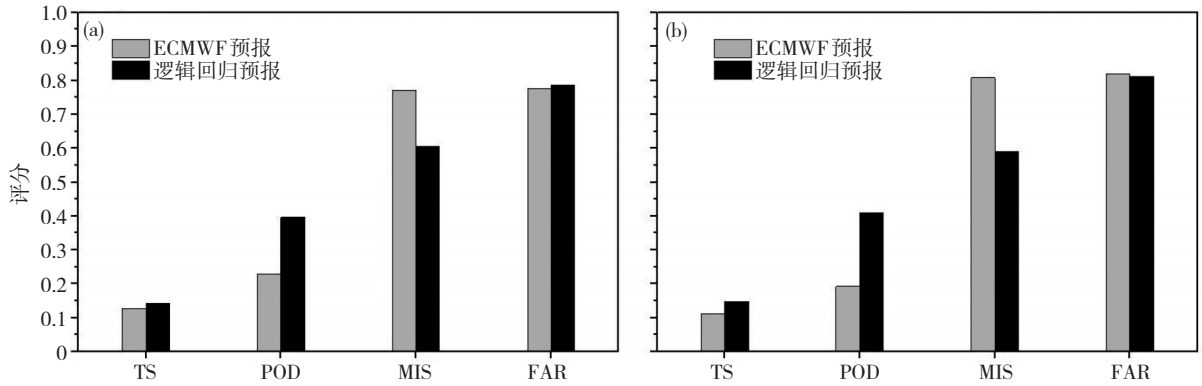


图9 2021年浙江省低涡型暴雨过程中ECMWF数值预报及回归模型预报在每日08时起报的24—48 h (a)、20时起报的12—36 h (b)暴雨预报检验评分

Fig.9 The score of low-level atmospheric vortex heavy rain based on logistic regression and ECMWF forecast model in 2021, with results initialized at (a) 08:00 BT of forecast period of 24 h to 48 h and 20:00 (b) BT of forecast period of 12 h to 36 h

5.2 天气过程检验

针对2021年6月29—30日浙江省发生的一次低涡型暴雨天气过程,由于ECMWF模式前期预报的暴雨量级、落区都显著偏弱,导致对该过程预估不足。研究选取该个例对低涡型暴雨预报模型进行天气过程检验。从28日08时起报的29日降水量空间分布看,ECMWF模式预报暴雨主要出现在衢州市和温州北部,虽然对120°E以西的暴雨落区有所体现,但对浙江中南部出现的暴雨天气未有反映(图10a),在浙江省内的MIS为42.9%。从评价指标看,预报TS和POD分别为27.6%和57.1%。采用回归预报模型后(图10b),对6月29日的暴雨落区预报有明显改进,可成功预报出浙江中南部的暴雨落区,虽然FAR略有上升,但TS评分提高近4%,POD提高至88.9%,MIS降低至11.1%。因此回归预报模型可超前24 h对此次过程进行很好的暴雨落区预报。

而28日20时起报的29日模式暴雨落区与实况相比差异较大(图10c),与28日08时的模式预报结果相比(图10a),暴雨落区南移,对衢州出现的暴雨天气未有反映,进而导致MIS和FAR有所上升,POD和TS明显降低,POD仅31.7%,MIS高达68.3%。采用回归预报模型后(图10d),暴雨预报落区明显扩大,对实况暴雨区的反映能力有所增强,但在浙江西南部也考虑了大片暴雨区。从评价指标看,相较ECMWF预报,回归预报模型也提高明显,虽然FAR有所上升,但POD提升超1倍,MIS和TS也有大幅下降和提高。此次过程中,从回归预报模型在超前24 h(图10a、b)和12 h(图10c、d)的暴雨预报提升效果看,临近时刻起报场的提升效果将更为明显。这可能与临近时刻下数值模式的形势、要素预报更为准确有关。综合看来,该方法可在短期上较好地预报低涡型暴雨落区,对日常业务具有一定参考价值。

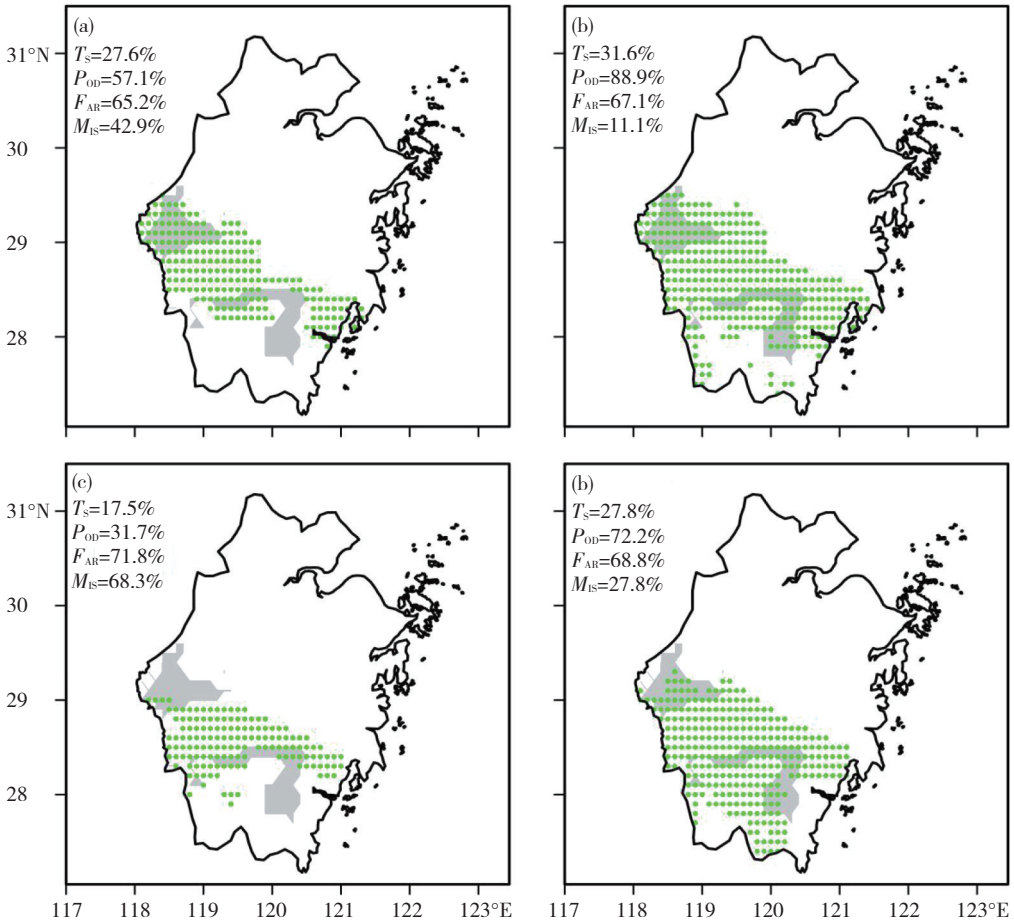


图10 2021年6月28日08时(a, b)、20时(c, d)起报的ECMWF模式降水预报(a, c)及回归模型预报(b, d) (灰色阴影区为29日实况暴雨区，绿色打点区为预报暴雨点)

Fig.10 (a, c) The ECMWF and (b, d) regression model rainstorm forecast initialized at (a, b) 08:00 BT and (c, d) 20:00 BT 28 June 2021 (where the gray shadow area is the actual rainstorm area on 29 June, and the green dot area is the forecast rainstorm point)

6 结论与讨论

本文选取近42 a浙江省逐日格点降水数据和CFSR再分析数据，分析了浙江省低涡型暴雨的气候特征，并依据暴雨发生、发展的基本条件，基于“配料法”并结合逻辑回归方法研究了低涡型暴雨落区预报技术，得到如下主要结论：

(1) 浙江省内低涡型暴雨多出现在梅雨季(5—7月)，其中以6月为最多，且低涡型暴雨发生次数具有明显的年际变化特征。

(2) 基于各类物理量因子与暴雨的相关性分析，综合考虑水汽、热力稳定度、动力抬升条件，最终挑选了6个气象因子作为低涡型暴雨概率预报方程的自变量，分别为850 hPa垂直速度、700 hPa垂直速度、850 hPa水汽通量散度、850 hPa速度散度、850 hPa低空急流和切变线。

(3) 基于暴雨预报物理因子，采用逻辑回归方法建立了暴雨概率预报方程，利用TS、POD、MIS和FAR对2021年低涡型暴雨预报效果进行了检验，发现临界概率阈值取为0.1既能保证MIS、FAR不太大，又能使得TS、POD较高，有着较高的预报准确率。

(4) 在提前24 h和12 h时效上，将回归预报模型与ECMWF模式物理量预报产品相结合进行了业务化运行，取得了较好的预报效果。无论是系统性检验还是天气过程检验，2021年低涡型暴雨预报业务应用效果检验表明，基于回归预报的低涡型暴雨预报可提高TS评分和POD，并明显降低FAR和MIS，在实际业务中可有较高的参考和应用价值。

虽然数值模式对大气物理量场的预报效果将直接影响回归预报模型的表现，但将本文预报模型同样用于NCEP-GFS预报场，发现模型较模式预报仍有提升，且在每日20时的12—36 h暴雨落区预报产品上提升更显著，即可提前12 h时效做出较好的决策服务。依据不同的气候再分析资料进行建模，逻辑回归方程系数会有所区别，但预报效果的优劣主要取决于业务预报模式对要素场的预报，在这方面ECMWF预报更具优势，模型应用在ECMWF产品上的预报效果也更佳。由于本文仅是浙江省低涡型暴雨落区预报方法

的初步探究，仍存在不足之处。如，研究并未考虑复杂地形对降水的增幅作用，所使用的再分析资料分辨率有限，未深入考虑低空低涡影响背景下，低空急流或切变线与浙江省内暴雨空间分布的关系等等，未来还将进行深入的分析研究工作。

参考文献(References)：

白晓平,靳双龙,王式功,等.2018.基于Logistic回归和多指标叠加的短时强降水预报模型[J].气象科学,38(4):553-558. Bai X P, Jin S L, Wang S G, et al. 2018. The forecast models of short-time heavy precipitation based on logistic regression and multi-index superposition [J]. Journal of the Meteorological Sciences,38(4):553-558 (in Chinese). doi:10.3969/2017jms.0086

陈筱秋,王咏青.2016.基于NCEP资料的一次东移引发暴雨的江淮气旋结构特征分析[J].暴雨灾害,35(1):53-60. Chen X Q, Wang Y Q. 2016. Structure and mechanism analysis of a Jiang-huai cyclone with an eastern path and heavy rain based on NCEP data [J]. Torrential Rain and Disasters,35(1):53-60 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.01.008

丁凡.2021.ECMWF细网格数值预报产品对山东气旋降水的预报能力检验[J].内蒙古气象,5:9-12. Ding F. 2021. Inspection of the EC-MWF-Thin forecasting capability of the cyclone precipitation in Shandong [J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia,5:9-12 (in Chinese). doi:10.14174/j.cnki.nmqx.2021.05.002

高守亭,周玉淑,冉令坤.2018.我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J].大气科学,42(4):833-846. Gao S T, Zhou Y S, Ran L K. 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(4):833-846 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17277

郝丽萍,周瑾,康岚.2016.西南涡暴雨天气过程分析和数值模拟试验[J].高原气象,35(5):1182-1190. Hao L P, Zhou J, Kang L. 2016. Weather analyses and numerical study of southwest China vortex and its induced heavy rainfall [J]. Plateau Meteorology,35(5):1182-1190 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00046

黄文彦,孙燕,卢楚翰,等.2019.近40年夏季江苏引发暴雨的江淮气旋统计分析[J].气象, 45(6):843-853. Huang W Y, Sun Y, Lu C H, et al. 2019. Statistical analysis of Jianghuai cyclone causing Jiangsu regional heavy rain in summer nearly 40 years [J]. Meteorological Monthly,45(6):843-853 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.010

黄文彦,孙燕,卢楚翰,等.2020.春季江淮气旋及影响的统计分析[J].气象与环境科学,43(1):43-51. Huang W Y, Sun Y, Lu C H, et al. 2020. Statistical analysis of Jiang-huai cyclone and its influence in spring [J]. Meteorological and Environmental Sciences,43(1):43-51 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2020.01.006

李俊,李武阶,廖移山.2006.基于"配料"的梅雨锋强降水预报方法[J].气象,32(9):3-8. Li J, Li W J, Liao Y S. 2006. An ingredients-based methodology of forecasting heavy rain of Meiyu front [J]. Meteorological Monthly,32(9):3-8 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.09.001

来小芳,张艳玲,陆汉城,等.2007."配料法"用于长江下游暴雨预报[J].南京气象学院学报,30(4):556-560. Lai X F, Zhang Y L, Lu H C, et al. 2007. An ingredients-based methodology for forecasting rainstorm in the lower reaches of the Yangtze river [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology,30(4):556-560 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2007.04.018

林宗桂,林开平,李耀先,等.2011.一个高空槽前中尺度对流系统发生发展过程和机制研究[J].气象学报,69(5):770-781. Lin Z G, Lin K P, Li Y X, et al. 2011. A study of the development process of a mesoscale convective system ahead of a upper-level trough and its mechanism [J]. Acta Meteorological Sinica,69(5):770-781 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2011.068

刘建勇,谈哲敏,张熠.2012.梅雨期3类不同形成机制的暴雨[J].气象学报,70(3):452-466. Liu J Y, Tan Z M, Zhang Y. 2012. Study of the three types of torrential rains of different formation mechanism during the Meiyu period [J]. Acta Meteorological Sinica,70(3):452-466 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.038

刘煦,马艳,凌艺,等.2019.不同低层湿度条件下青岛两次气旋暴雨过程分析[J].气象科技,47(5):818-829. Liu X, Ma Y, Ling Y, et al. 2019. Analysis of two cyclone heavy rain processes with different low-level humidity conditions in Qingdao [J]. Meteorological Science and Technology,47(5):818-829 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20180590

刘莹,肖递祥,陈莹.2020.基于短时强降水概率预报的模糊检验试验[J].高原山地气象研究,40(4):16-21. Liu Y, Xiao D X, Chen Y. 2020. Fuzzy verification test of probabilistic forecast of short-term heavy precipitation [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,40(4):16-21 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2020.04.003

刘勇,郭大梅,姚静,等.2015.配料法在暴雨精细化预报中的应用[J].干旱气象,33(3):514-520. Liu Y, Guo D M, Yao J, et al. 2015. Application of ingredients-based forecasting methodology to refine rainstorm forecast [J]. Journal of Arid Meteorology,33(3):514-520 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-03-0514

罗亚丽,孙继松,李英,等.2020.中国暴雨的科学与预报:改革开放40年研究成果[J].气象学报,78(3):419-450. Luo Y L, Sun J S, Li Y, et al. 2020. Science and prediction of heavy rainfall over China: Research progress since the reform and opening-up of the People's Republic of China [J]. Acta Meteorological Sinica,78(3):419-450 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.057

马嘉理,姚秀萍.2015.1981—2013年6—7月江淮地区切变线及暴雨统计分析[J].气象学报,73(5):883-894. Ma J L, Yao X P. 2015. Statistical analysis of the shear lines and torrential rains over the Yangze-Huaihe river region during June-July in 1981—2013 [J]. Acta Meteorological Sinica,73(5):883-894 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.065

麦哲宁,许东蓓,肖天贵,等.2022.成都市短时强降水概率预报方法初探[J].高原山地气象研究,42(1):127-134. Mai Z N, Xu D B, Xiao T G, et al. 2022. Preliminary study on probability forecasting of flash-heavy-rain in Chengdu [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,42(1):127-134 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2022.01.018

毛程燕,荆思佳,潘欣,等.2021.浙江一次江淮气旋后部强对流暴雨过程诊断研究[J].热带气象学报,37(4):530-540. Mao C Y, Jing S J, Pan X, et al. 2021. Diagnostic research of severe convective rainstorm event at the back of a Jiang-huai cyclone in Zhejiang province [J]. Journal of Tropical Methorology,37(4):530-540 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2021.051

牛若芸,刘凑华,刘为一,等.2018.1981—2015年中国95°E以东区域性暴

雨过程时、空分布特征[J].气象学报,76(2):182–195. Niu R Y, Liu C H. Liu W Y, et al. 2018. Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to the east of 95°E in China during 1981—2015 [J]. Acta Meteorological Sinica,76(2):182–195 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017092

欧坚莲,黎金水,刘国忠.2011.“配料法”用于广西桂东片持续性暴雨预报[J].气象研究与应用,32(2):21–25. Ou L J, Li J S, Liu G Z. 2011. Ingredients–based methodology for forecasting continuous rainstorm in eastern Guangxi [J]. Journal of Meteorological Research and Application,32(2):21–25 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–8411.2011.02.006

钱磊,邱学兴,郑淋淋,等.2022.基于降水空间分布相似的最优集成降水预报及其检验[J].暴雨灾害,41(3):324–335. Qian L, Qiu X X, Zheng L L, et al. 2022. Prediction and test of optimal integrated precipitation based on similar spatial distribution of precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):324–335 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022.03.009

隋亚男,闫敏慧,董方有.2021.基于物理量“配料法”的黑龙江省暴雨预报研究[J].灾害学,36(3): 203–207. Sui Y N, Yan M H, Dong F Y. 2021. Forecasting heavy rains in Heilongjiang based on “Ingredients–based Methodology” with physical quantities [J]. Journal of Catastrophology, 36(3):203–207 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000–811X.2021.03.035

王家润,赵南松,华文元,等. 2010. 分段连续三次Bezier曲线控制点的构造算法[J].计算机工程与应用,46(22):190–193. Wang J R, Zhao N S, Hua W Y, et al. 2010. Construction of cubic Bezier continuous subsection curve’s control points [J]. Computer Engineering and Applications, 46(22):190–193 (in Chinese). doi:10.3778/j.issn.1002–8331.2010.22.056

王坤,蒋宁,李敏,等.2020.基于SMOTE算法和逻辑回归模型算法的江苏短时强降水潜势预报[J].科学技术与工程,20(28):11447–11454. Wang K, Jiang N, Li M, et al. 2020. The potential forecast for short–term heavy precipitation in Jiangsu province based on Smote and Logistic regression combination algorithm [J]. Science Technology and Engineering,20(28):11447–11454 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671–1815.2020.28.008

王萍,王琮,王迪.2018.低空急流识别及急流轴自动绘制方法研究[J].气象,44(7):952–960. Wang P, Wang C, Wang D. 2018. Research on low–level jet identification and automatic drawing method [J]. Meteorological Monthly,44(7):952–960 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2018.07.011

王毅,代刊,黄小玉.2013.高、低空急流的客观识别及其初步应用[J].天气预报技术总结专刊,5(5): 46–50. Wang Y, Dai K, Huang X Y. 2013. Objective identification of high and low jet and its initial application [J]. Weather Forecast Review,5(5):46–50 (in Chinese)

吴琼,陈圣劼,白杨,等.2021.一次江淮气旋大暴雨的诊断分析和数值模拟[J].气象科学,41(1):86–98. Wu Q, Chen S J, Bai Y, et al. 2021. Diagnostic analysis and numerical simulation of a heavy rainstorm associated with Jianghuai cyclone [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 41(1):86–98 (in Chinese). doi:10.12306/2020jms.0029

吴琼,钱鹏,郭煜,等.2014.江苏一次持续性梅雨锋暴雨过程诊断与分析[J].气象科学,34(5):549–555. Wu Q, Qian P, Guo Y, et al. 2014. Diagnosis and mesoscale analysis on a continuous Meiyu front heavy rainfall process of Jiangsu province in July 2012 [J]. Journal of the Meteorological Sciences,34(5):549–555 (in Chinese). doi:10.3969/2013jms.0045

王镇铭,杜惠良, 杨诗芳. 2013. 浙江省天气预报手册[M]. 北京:气象出版社. Wang Z M, Du H L, Yang S F. 2013. Zhejiang province weather forecast manual [M]. Beijing:Meteorological Press (in Chinese)

颜佳任,王伟健,张红华,等.2021.2019年江苏两次江淮气旋暴雨大风过程分析[J].气象研究与应用,42(2):83–88. Yan J R, Wang W J, Zhang H H, et al. 2021. Analysis of two rainstorm and gale processes of Jianghuai cyclone in Jiangsu Province in 2019 [J]. Journal of Meteorological Research and Application,42(2):83–88 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45–1356/P.2021.2.16

杨雪艳,秦玉琳,张梦远,等.2018.基于“配料法”的东北冷涡暴雨预报研究[J].大气科学学报,41(4):475–482. Yang X Y, Qin Y L, Zhang M Y, et al. 2018. Forecast of heavy rain caused by the northeast cold vortex using “ingredients method” [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 41(4):475–482 (in Chinese). doi:10.13878/j,cnki.dqkxxb.20171116001

姚秀萍,张霞,马嘉理,等.2022.东亚夏季副热带平原和高原地区切变线特征的对比研究[J].气象学报,80(4):604–617. Yao X P, Zhang X, Ma J L, et al. 2022. Comparative study on the characteristics of shear lines in the subtropical plain and plateau areas of East Asia in summer [J]. Acta Meteorological Sinica,80(4):604–617 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.024

俞小鼎.2011.基于构成要素的预报方法—配料法[J].气象,37(8):913–918. Yu X D. Ingredients based forecasting [J]. Meteorological Monthly, 37(8):913–918 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:QXXX.0.2011–08–002

云天,王宁,刘子琪,等.2022.东北冷涡减弱阶段强对流天气特征及触发机制分析[J].沙漠与绿洲气象,16(1):24–31. Yun T, Wang N, Liu Z Q, et al. 2022. Characteristics and trigger mechanism of severe convection weather during the declining northeast cold vortex [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(1):24–31 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2022.01.004

曾欣欣,钮学新,杜惠良.2004.浙江省暴雨的天气气候分析[J].科技通报,20(5):397–401. Zeng X X, Niu X X, Du H L. 2004. The heavy rainfall synoptic climate analysis in Zhejiang province [J]. Bulletin of Science and Technology,20(5):397–401 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001–7119.2004.05.006

张华龙,伍志方,肖柳斯,等.2021.基于因子分析的广东省短时强降水预报模型及其业务试验[J].气象学报,79(1):15–30. Zhang H L, Wu Z F, Xiao L S, et al. 2021. A probabilistic forecast model of short–time heavy rainfall in Guangdong province based on factor analysis and its operational experiments [J]. Acta Meteorological Sinica,79(1):15–30 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.076

张萍萍,龙利民,张宁,等.2012.“分型配料法”在湖北省暴雨预报中的应用研究[J].热带气象学报,28(5):771–776. Zhang P P, Long L M, Zhang N, et al. 2012. Applications of typing ingredients–based methodology to heavy rainfall forecasting in Hubei province [J]. Journal of Tropical Meteorology,28(5):771–776 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–4965.2012.05.018

张芹,徐桂华,王晓立,等.2014.山东春季一次江淮气旋暴雨过程的诊断分析[J].山东气象,34(4):12–17. Zhang Q, Xu G H, Wang X L, et al. 2014. Diagnostic analysis of a Jianghuai cyclone rainstorm process in Shandong in spring [J]. Journal of Shandong Meteorology,34(4):12–17

(in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.issn1005-0582.2014.04.003

张夏琨.2018.2017年12月至2018年2月T639, ECMWF及日本模式中期预报性能检验[J].气象,44(5):713-718. Zhang X K. 2018. Performance verification of medium-range forecasts by T639, ECMWF and Japan Models from December 2017 to February 2018 [J]. Meteorological Monthly,44(5):713-718 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.013

张晓红,罗静,陈兴,等.2016.一次春季江淮气旋形成发展特征及暴雨诊断分析[J].气象,42(6):716-723. Zhang X H, Luo J, Chen X, et al. 2016. Formation and development mechanism of one cyclone over Changjiang-Huaihe river basin and diagnostic analysis of rainstorm [J]. Meteorological Monthly,42(6):716-723 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.007

张小玲,陶诗言,孙建华.2010.基于"配料"的暴雨预报[J].大气科学,34(4):754-766. Zhang X L, Tao S Y, Sun J H. 2010. Ingredients-based heavy rainfall forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 34(4):754-766 (in Chinese)

郑婧,夏侯杰,陈娟,等.2020.基于ECMWF模式的定量降水客观订正方法[J].高原气象,39(4):830-839. Zheng J, Xia H J, Chen J, et al. 2020. Objective correction method for quantitative precipitation forecasting based on ECMWF model [J]. Plateau Meteorology,39(4):830-839 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00116

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2010.天气学原理与方法(第四版)[M].北京:气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 2010. Principles and methods of meteorology, fourth edition [M]. Beijing:Meteorological Press (in Chinese)

朱岩,翟丹华,吴志鹏,等.2021.基于Xgboost算法的短时强降水预报方法[J].气象科技,49(3):406-418. Zhu Y, Zhai D H, Wu Z P, et al. 2021. A method of short-duration heavy rain forecast based on Xgboost algorithm [J]. Meteorological Science and Technology,49(3):406-418 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20200216

朱占云,潘娅英,骆月珍,等.2017.浙江省水库流域面雨量的多模式预报效果分析与检验[J].气象与环境科学,40(3):99-106. Zhu Z Y, Pan Y Y, Luo Y Z, et al. 2017. Analysis and test on multi-model prediction of Reservoir basin area rainfall in Zhejiang province [J]. Meteorological and Environmental Sciences,40(3):93-100 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.03.015

Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting:An ingredients-based methodology [J]. Weather and Forecasting,11(4):560-581. doi:10.1175/1520-0434(1996)011<0560:FFFAIB>2.0.CO;2

Lu C H. 2017. A modified algorithm for identifying and tracking extratropical cyclones [J]. Advances in Atmospheric Sciences,34(7):909-924. doi:10.1007/s00376-017-6231-2

Lin Y L, Chiao S, Wang T A, et al. 2001. Some common ingredients for heavy orographic rainfall [J]. Weather and Forecasting,16(6):633-660. doi:10.1175/1520-0434(2001)016<0633:SCIFHO>2.0.CO;2

Qin Y J, Lu C H, Li L P. 2017. Multi-scale cyclone activity in the Changjiang River-Huaihe River valleys during spring and its relationship with rainfall anomalies [J]. Advances in Atmospheric Sciences,34(2):246-257. doi:10.1007/s00376-016-6042-x

Wetzel S W. 2001. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation [J]. Weather and Forecasting,16(1):156-167. doi:10.1175/1520-0434(2001)016<0156:AOIBMF>2.0.CO;2

Wang X, Liu Y. 2017. Causes of extreme rainfall in May 2013 over Henan province: the role of the southwest vortex and low-level jet [J]. Theoretical and Applied Climatology,129(1-2):701-709. doi:10.1007/s00704-017-2054-4

(责任编辑 闵爱荣)