

陆琛莉,李海军,宋刘明,等,2018.一次“梅中返春”稳定性持续暴雨过程的预报失误分析[J].气象,44(1):132-141.

# 一次“梅中返春”稳定性持续暴雨 过程的预报失误分析\*

陆琛莉 李海军 宋刘明 何 斌

嘉兴市气象局,嘉兴 314050

**提 要:** 使用 NCEP-FNL 资料对杭州湾一次稳定性持续暴雨过程进行分析,发现冷暖气流在浙江不断交绥形成持续降雨,低层冷空气和东南暖湿气流的不断增强,使大气斜压扰动发展,锋区降雨增强,暴雨发生。此次过程,由于数值模式预报出现偏差而导致杭州湾 24 h 大雨、暴雨预报出现较大失误。检验结果,GFS 模式 36 h 预报时效内对冷暖系统预报较好,但对低层锋区的风场预报有偏差,从而对中低层辐合、水平锋生和水汽输送产生影响,大雨、暴雨落区出现偏差。另外,模式对杭州湾南岸冷空气影响预报偏弱也是暴雨漏报的一个重要因素。稳定性降雨预报中,预报员需重视模式在预报临近时刻的调整,根据实况监测和雨带的移动、演变对冷暖气流影响作甄别,从而及时调整降雨落区和影响时间,对预报做出有益修正。

**关键词:** 稳定性持续暴雨,预报失误分析,模式检验,预报修正

**中图分类号:** P456,P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.011

## Analysis of Forecast Error in a Continuous Heavy Rain Event During the Spring-Like Plum Rain Season

LU Chenli LI Haijun SONG Liuming HE Bin

Jiaxing Meteorological Office of Zhejiang, Jiaxing 314050

**Abstract:** Using NCEP-FNL data, we analyzed a continuous heavy rain process in Hangzhou Bay, and found that the constant intersection of cold and warm flows in Zhejiang Province caused the continuous rainfall. The increase of low-level cold air and southeast warm and humid air resulted in the development of baroclinic atmosphere disturbance, the enhancement of rainfall in the frontal area and the occurrence of heavy rains. Due to the deviation of the numerical model forecast, a large error occurred in the 24 h forecast of heavy rainfall in Hangzhou Bay during this process. The test results showed that the GFS model is better for the prediction of the cold and warm system in 36 h lead time, but has an error for the wind forecast in the low-level front, which affected the convergence, horizontal frontogenesis and the transportation of water vapor in the low-middle layer, leading to the deviation of falling area of heavy rain and rainstorm. In addition, it is also an important factor in the rainstorm forecast error that the model is weak in forecasting cold air in the south bank of Hangzhou Bay. Therefore, for rainfall stability forecast, forecasters need to attach importance to model adjustment in the prediction at adjacent time, and judge the influence of cold and warm air flow according to actual monitoring and the movement and evolution of rain belt, so as to timely adjust the rainfall zone and influence time and make an effective correction to forecasts.

**Key words:** continuous heavy rain, forecast error analysis, model test, forecast correction

\* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-030)和嘉兴市科学技术局公益类项目(2014AY21013)共同资助

2017年2月27日收稿; 2017年11月30日收修定稿

第一作者:陆琛莉,主要从事气象预报预测服务工作. Email:jxzoe@163.com

## 引言

杭州湾地处长江中下游,东邻海洋,水汽条件丰富,是冷暖气流南北交绥的地区,产生暴雨条件有利,每年6月中旬至7月中旬梅汛期期间暴雨、大暴雨频繁出现,常常造成不同程度的洪涝灾害,因此梅汛期强降水和暴雨预报一直是研究的热点(丁一汇等,2007;赵玉春等,2007)。现阶段对于暴雨的各类研究开展很多,暴雨同云团的自组织过程(Luo and Luo,2008)、风垂直切变(赵玉春和王叶红,2012)、海陆锋环流(何群英等,2011)等不同要素联系紧密,有学者侧重从大气环流特征方面对暴雨进行研究(姚晨等,2010),也有专门从西南涡、切变、水汽、物理量诊断等方面进行对比分析研究(宗志平等,2013;周明飞等,2014;杨学斌等,2015;丁一汇和胡国权,2003),及运用对实测资料的分析 and 数值模式模拟两种手段(张晓红等,2009;张羽等,2010;赵玉春,2011)对暴雨形成机理进行研究。我国迄今对于梅汛期暴雨的天气模型、梅雨锋的结构和维持机理以及梅雨锋上中小尺度系统发展演变研究都取得了很大进展(倪允琪和周秀骥,2005),梅雨锋是多尺度、不同高度层天气系统共同作用的产物(周宏伟等,2011;郑婧等,2014)。随着观测技术的发展和数值模式的完善,数值模式预报目前已成为暴雨预报业务工作的主要手段(李丹等,2009;梁生俊等,2013),但受限于观测精度和资料分辨率,数值模式对暴雨预报,尤其是对梅雨期暴雨预报的不确定性为业务工作带来了不小的困扰,暴雨预报准确率的提高至今仍是实际工作的一个难点。

2015年浙江6月7日入梅,7月12日出梅,期间受副热带高压(以下简称副高)南北摆动影响,降雨频繁,共经历了三轮集中降雨,其中7月3—8日,在冷暖气流持续交汇下,浙中北地区出现第三轮集中降雨,5—6日杭州湾地区出现持续暴雨,雨量中心主要在杭州湾及南岸,杭州、绍兴、宁波等市多地出现100 mm以上强降雨。对于此次过程,各家数值模式预报调整较大,而当时细雨绵绵、气温下降,雨强不大,也对预报员产生一定的心理错觉,没有警惕暴雨会悄然发生,因而造成较大范围的错漏报。为提高大雨、暴雨的预报质量,本文对此次稳定性持续暴雨过程的环流背景和物理过程进行分析,鉴于数值模式预报是该类业务预报的基础,文章将对数

值模式预报场进行诊断和检验,为今后类似预报服务提供借鉴。

## 1 天气实况和预报情况

### 1.1 天气实况

2015年7月4—8日,受冷空气影响杭州湾地区气温出现持续下降,大部分地区日平均气温连续5天低于22℃,其中6日(次日小暑节气)多地最高气温跌破20℃,湖州德清最高气温仅17.8℃,浙北绝大部分地区的日均气温、日最高气温创下7月历史新低,出现历史罕见的“梅中返春”(即入梅后出现连续5天日平均气温低于22℃,再次返回进入气象意义上的春季),7月“冷夏”。期间受冷暖气流交汇影响,浙江出现持续降雨,其中5—6日杭州湾地区出现持续暴雨,绍兴、宁波部分地区48 h累积雨量高达150~200 mm。从浙江省12 h实况雨量演变图(图1)可以看到,此轮强降雨从浙西南地区发展北上,雨量主要集中在杭州湾南岸,5—6日降雨增强,雨带北抬,雨量中心经杭州湾入海,杭州湾南岸出现大范围持续暴雨,北岸6日出现暴雨。

分析4—7日位于杭州湾南北两岸的慈溪、海盐及西部杭州逐小时降雨实况(图2),此次降雨在杭州湾西部率先发展,5日早晨杭州降雨开始增强,05:00起小时雨量大都持续在2 mm以上,下午降雨减弱;5日傍晚杭州湾两岸降雨同时发展,北岸海盐出现1小时2 mm以上降雨并持续至6日15:00,南岸慈溪2 mm以上降雨主要发生在5日17:00—22:00和6日05:00—12:00;6日傍晚雨带南压,海盐、杭州降雨减弱,但南岸慈溪又出现短时“较强”降雨。5—6日,杭州湾地区降雨总体均匀,两岸雨型分布基本都为单峰型,小时雨强普遍只有1~3 mm,最大也仅6~9 mm,这与梅汛期前两轮暴雨时,浙江出现的20~30 mm小时雨强降雨明显不同。此轮降雨中受冷空气影响气温下降,虽然小时雨强不大,但由于持续时间长,多地累计日雨量普遍达暴雨。

### 1.2 预报情况

在此轮大雨、暴雨过程中,杭州湾周边气象台站出现了较大范围的错漏报,检验4—6日该地区四家气象台站16:00发布的城镇报文24 h降雨预报准

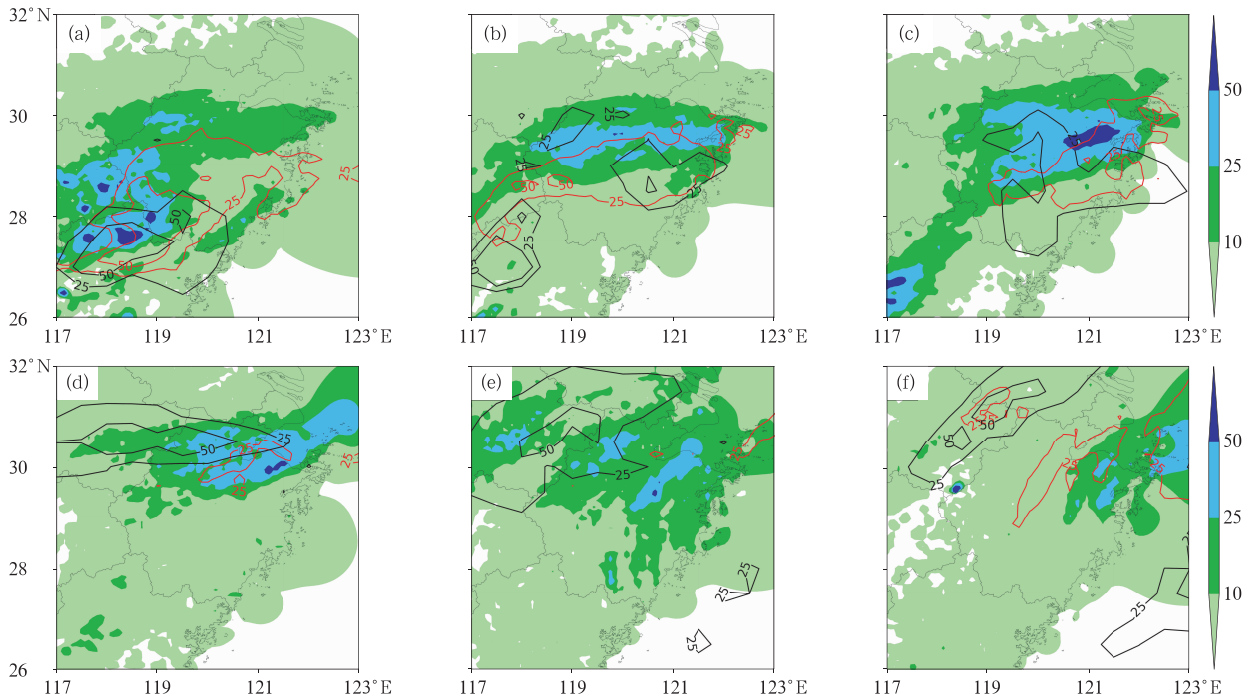


图 1 2015 年 7 月 4—7 日浙江省逐 12 h 实况雨量和模式预报图

(a) 4 日 20:00, (b) 5 日 08:00, (c) 5 日 20:00, (d) 6 日 08:00, (e) 6 日 20:00, (f) 7 日 08:00  
 (彩色阴影为实况雨量分布, 雨量为前 12 h 降雨累积量, 单位: mm; 红线、黑线分别为 EC 模式和 GFS 模式大雨、暴雨预报线; 模式初始场资料时间均为 08:00, 预报时效分别为 24 和 36 h)

Fig. 1 Map of 12 h observed rainfall and model forecast in Zhejiang during 4—7 July 2015

(a) 20:00 BT 4, (b) 08:00 BT 5, (c) 20:00 BT 5, (d) 08:00 BT 6, (e) 20:00 BT 6, (f) 08:00 BT 7  
 (Color shading is the distribution of observed rainfall, accumulated in the first 12 h, unit: mm; red line and black line are the forecast lines for heavy rains by EC model and GFS model respectively; the data time for the initial field of the model is 08:00 BT, and the forecast lead time is 24 h and 36 h respectively)

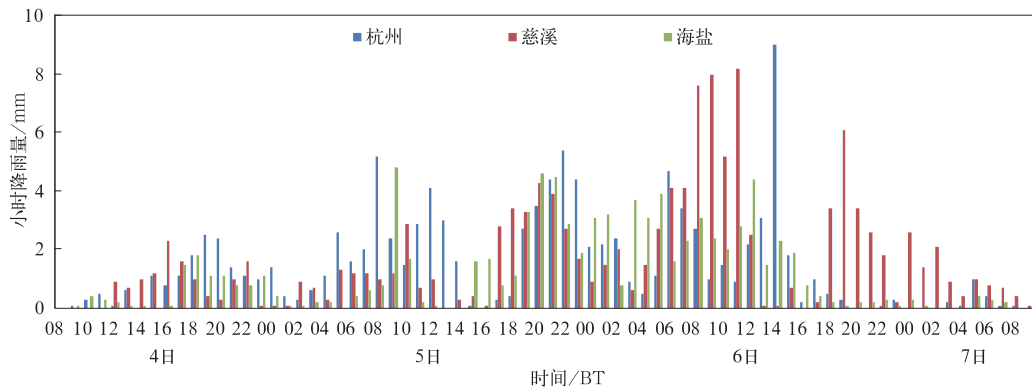


图 2 2015 年 7 月 4—7 日杭州、慈溪、海盐逐小时降雨变化

Fig. 2 The hourly rainfall changes in Hangzhou, Cixi and Haiyan during 4—7 July 2015

确率, 4 日嘉兴、杭州预报次日阵雨, 实况出现中雨和大雨, 绍兴、宁波预报次日中雨, 实况出现暴雨; 5 日各站都预报次日中雨, 实况嘉兴、宁波、绍兴出现大雨, 杭州出现暴雨; 6 日 4 站均预报次日中雨, 实

况除宁波出现大雨外, 其余站都只出现小雨。整体而言, 5—6 日雨带北抬发展时, 台站预报较实况偏弱, 共有 7 站次大雨、暴雨出现漏报; 6—7 日过程南压将近结束时, 杭州湾西部北部地区降雨预报较实

况偏强。

为便于比较,图 1 同时给出了日常预报参考较多,并且在 4—6 日下午预报时可获取的最新 EC、GFS 模式(08:00 初始场)24 h、36 h 大雨、暴雨预报线(图中红黑实线),可以看到,此轮过程中,数值模式对大雨、暴雨等强降水落区的预报,与实况比较出现一定偏差,如 5 日降雨发展北抬中,GFS 模式预报大雨、暴雨中心整体偏南,杭州湾南岸大雨、暴雨漏报;6 日雨带东移减弱,EC 模式预报大雨范围偏小,减弱较快,而 GFS 模式预报雨带主体偏西,东移缓慢;7 日雨带东移南压,两家模式预报大雨区仍滞留在杭州湾(或以西),造成一定范围的空报。

总体而言,对杭州湾 6 日大雨、暴雨过程,GFS 模式预报较为稳定,4—5 日都持续预报杭州湾两岸有大雨,杭州湾西部将出现暴雨,5 日下午 GFS 模式对暴雨落区略有东调,雨量调整与实况分布相对较接近。而 EC 模式对杭州湾地区的 24 h 累积雨量预报较 GFS 模式预报偏弱,仅预报了杭州湾两岸有大雨,无暴雨,且 5 日下午预报大雨落区和范围都略有调小,与实况变化不相符。因此,两家模式对杭州湾南岸的暴雨都出现了漏报,但对杭州湾北岸及西部的暴雨,GFS 模式预报相对较为准确。

本轮持续大雨、暴雨过程中,各地气象台站的预报与数值模式预报有一定的相似性,或者说,由于数值模式预报出现偏差而导致杭州湾周边气象台站 24 h 大雨、暴雨预报出现较大失误。

## 2 预报过程回顾

在降雨预报服务中,当地台站预报员主要参考 EC、GFS 等全球数值模式给出的形势场分析,并根据卫星云图和雷达等最新监测资料,研判过程的发生发展,最后结合实况及地面气象要素预报(如雨量预报等)做出预报结论。以嘉兴市气象台为例,对 3—5 日的预报服务过程做一回顾。3—4 日,预报员根据数值模式大气环流形势做出分析,北方冷空气不断下滑,在 30°N 与偏西气流汇合发展形成槽切变,杭州湾北岸受辐合上升运动影响,未来 2~3 天将多阴雨天气。参考 EC、GFS 数值模式预报,低层 850 hPa 水汽影响偏南、相对湿度高于 80% 的湿区主要在杭州湾南岸浙中北地区,4—5 日杭州湾北岸

将处于主雨区北缘,故而预报有时有雨。4 日后期浙西南中低层切变北移,5 日杭州湾地区辐合将增强,因此预测降雨也将增强,但由于模式预报“莲花”台风登陆菲律宾后向偏西方向移动,低层湿区主体仍集中在杭州湾南岸,且 EC 与 GFS 两家全球模式都预报此次过程的雨量中心将分别经金华、宁波、台州等地入海,大雨落区较偏南,杭州湾北岸地区雨量仅 10 多毫米,因此预报员分析 5 日杭州湾北岸辐合增强降雨发展,但由于水汽输送不利,大雨、暴雨出现困难,雨量量级总体为中等。然而 5 日,随着台风转向北移,两家全球模式对次日 850 hPa 湿区预报都有明显北调,相对湿度高于 90% 的高湿区影响到达杭州湾北岸,同时长江下游、太湖流域 850 hPa 温度冷槽都有预报在增强。受冷暖空气交汇影响,杭州湾降雨将发展,但当时细雨绵绵,雨强不大,年轻的当班预报员对此没有引起警惕,仍主要参考 EC 模式延续前期思路,预报嘉兴地区 5 日夜间至 6 日有中雨。这时领班预报员却敏感到当天气温在 13 时以后出现快速下降,14—15 时嘉兴气温下降 0.8℃,气温日变化出现反常,并超过模式预报 14—17 时的气温下降幅度,地面冷空气势力很有可能在增强,而副高在短时间内也不存在南退的条件,未来受冷暖气流交绥影响的锋区降雨将增强,嘉兴有可能出现大到暴雨天气。在临时增加会商之后,17:00 对社会发布更正预报,5 日夜里到 6 日嘉兴地区有中到大雨局部暴雨,实况全市出现大雨局部暴雨,下文重点对 6 日过程(即 5 日)预报失误进行分析。

## 3 大气环流背景和预报失误分析

### 3.1 大气环流背景

2015 年 7 月上旬,欧亚地区经向环流发展,500 hPa 高纬呈现“两槽一脊”形势,东亚大槽逐渐减弱北缩至鄂霍茨克海,贝加尔湖高压脊增强,中纬度不断有小槽东移。4 日 08:00,北方冷空气在高压脊两侧同时蓄积,受长江下游低槽后部西北气流引导,东北冷空气快速南下,中低层切变发展,降水开始。5 日 08:00 西北冷空气从河套进入长江中游(图 3b),使中纬度小槽发展,槽后冷空气不断沿西北气流南下。与此同时,在“莲花”、“灿鸿”、“浪卡”

台风作用下,西太平洋副高脊线长时期稳定在  $23^{\circ}\text{N}$  附近,冷空气南下受阻,缓慢东移,因而受西南暖湿气流与冷空气的共同影响下,浙江发生持续降雨。

700 hPa 上,4 日有西南急流从江西输送至浙江,浙江中部至杭州湾南岸处于低空急流的左前侧;5 日 08:00 杭州湾北岸东北气流增强,切变发展(图 3c),同时低层 850 hPa 受偏东气流影响,沿海不断有冷空气补充加入(图 3d),江南倒槽长时间维持和加强。5 日夜间,“莲花”台风在菲律宾北部沿海转向西北方向移动,受其影响,6 日 08:00 浙东南沿海转一致东南气流,因此受低层东南暖湿气流与偏东冷急流的共同影响,大气斜压扰动发展,锋区降雨增强,同时由于东南暖湿气流携带来自海洋源源不断的水汽输送,降雨持续时间长,暴雨发生。6 日白天“莲花”台风转偏北方向移动,受其北上影响,杭州湾雨带维持偏北。

高层(200 hPa),4—5 日南亚高压东移,浙北上空由高压北侧西北气流逐渐转为副热带西风急流南侧入口区(图 3a),5 日 14:00 杭州湾西部出现  $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  强辐散中心(图略)。高层强辐散,有利于天气尺度系统发展。6 日 08:00,200 hPa 冷槽东移,副热带西风急流减弱,高层出现负的辐合中心,因而降雨发展减弱。

因此,由于副高稳定维持,北方冷空气在东移南下过程中,与西南暖湿气流在浙江不断交绥形成持续降雨。受低层冷空气和东南暖湿气流的共同影响,大气斜压扰动发展,锋区降雨增强,暴雨发生。高层辐散使降雨增强,中低层东南暖湿气流的水汽和热量输送,使暴雨发展并持续。稳定的行星尺度天气系统(副高)和有利的高低层天气尺度系统的相互发展配合是 7 月 5—6 日杭州湾地区出现持续暴雨的有利环流背景。

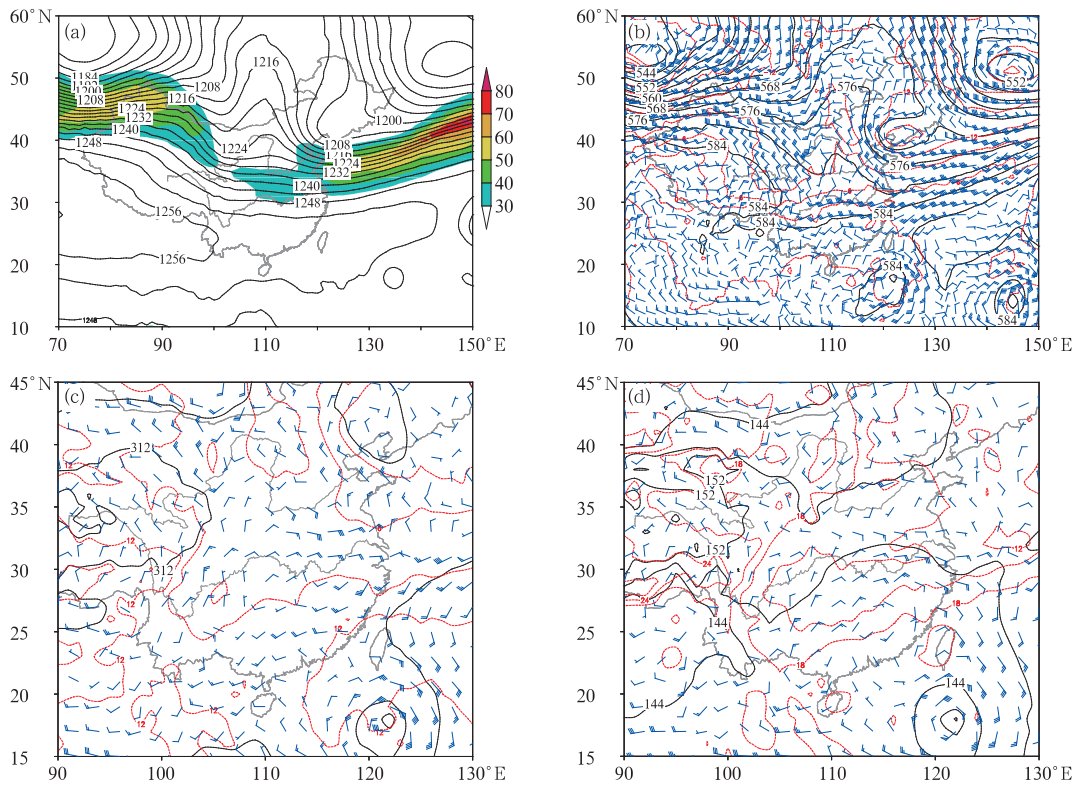


图 3 2015 年 7 月 5 日 08:00 大气环流形势图

(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa

(黑色实线为高度场;蓝色为风矢量;红色虚线为温度场;图 3a 中彩色阴影为  $>30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  急流区)

Fig. 3 Maps of atmospheric circulation situation at 08:00 BT 5 July 2015

(a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa

(Black solid line indicates height, blue indicates wind vector, red dotted line indicates temperature field,

color shadow in Fig. 3a indicates the wind velocity is more than  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

### 3.2 预报失误分析

此次暴雨过程降水均匀,范围较大且局地特征不显著,但是数值模式对此次过程预报调整较大,杭州湾大雨、暴雨预报出现整体失误。相比较而言,6日暴雨过程,GFS模式预报较EC预报稳定,对杭州湾地区的大雨、暴雨落区预报、调整相对较好,因此文章将主要对5日预报服务过程中参考使用、预报较好的GFS模式预报误差进行检验和诊断,为今后类似过程服务提供参考和借鉴。

#### 3.2.1 形势预报误差检验

稳定性持续降雨与大尺度环流背景的持续稳定有关,对500 hPa形势高度场进行预报误差检验,模式对东亚地区大尺度天气系统预报总体不错,东亚大槽、贝加尔湖高压脊及副高、台风等主要天气系统的预报与实时分析场都较为相符,预报误差主要集中在高压脊、低压槽及副高的强弱差异上。图4是模式预报5日20:00和6日08:00 500 hPa高空形势图与NCEP-FNL实时分析场的对比,可以看到模式对500 hPa槽脊系统的预报随着预报时效的临近而调整较好。模式对此次过程的大尺度系统预报误差主要集中在两个地方,一个是对华北平原和江淮地区正在减弱的高压脊预报,分析场减弱较模式预报调整快,模式使用3日20:00、4日08:00和20:00初始场资料计算得到的高压脊预报都维持较强,但5日下午使用5日08:00初始场资料得到的12 h最新预报场(即5日20:00),浅脊减弱出现了比较大的调整。对比同期风场、温度场预报(图略),长江中游北侧有冷空气侵入,110°E中纬度冷槽发展,槽前西南气流明显增强,江淮高压脊减弱,冷平流增强。

同时,模式预报在朝鲜半岛还残留一个572 dagpm闭合小低压,北方冷空气影响仍维持较强。

另一个预报误差比较明显的地方是模式对西太平洋副高的预报,GFS模式预报总体偏弱,虽然随着预报时效的临近,海上588 dagpm预报线一直在向东调整,但直到临近的12和24 h最新预报中,副高预报仍略偏东,从而影响到“莲花”台风的预报位置也较分析场偏东。

#### 3.2.2 风场预报误差检验

进一步对低层风场进行检验发现,模式虽然对副高588 dagpm线预报有系统偏差(预报偏东),但此次过程模式对低层冷暖系统(冷高压和台风)环流预报总体较好,对冷暖气流的交绥位置预报也不错,并且随着预报时效的临近,模式对台风环流预报有调整,调整接近于实时分析场。以5日下午获取的最新12和24 h(即5日08:00初始场预报5日20:00、6日08:00)预报结果为代表(图5),可以看到,模式除对台风中心位置及中心附近的风场预报与分析场较接近之外,还对江苏北部的冷高压环流,以及处于冷高压底部,长江入海口附近的东北偏东急流预报都较好,与分析场较接近,但是预报6日08:00位于两环流系统之间(图5b右蓝色圈),杭州湾附近的东南偏东气流预报与分析场略有差异,风速预报较分析场略偏弱。此外,对于冷暖气流汇合后影响江西、湖南方向的东北偏北气流的风速预报也有偏差(图5b左蓝色圈),模式预报风速较分析场偏弱。故而,此次稳定性降雨过程中,因模式对低层冷暖系统交汇区的风场预报有偏差,从而影响动力辐合和水汽输送,造成对杭州湾降雨预报的偏弱。

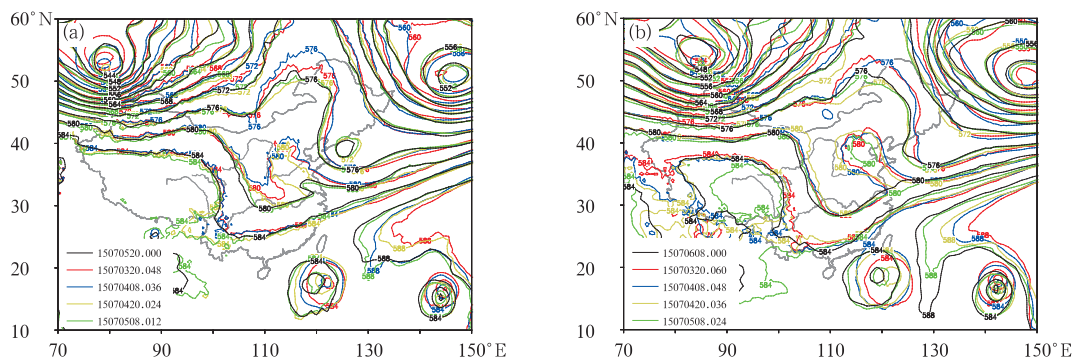


图4 2015年7月5日20:00(a)和6日08:00(b)500 hPa高度场预报检验(单位:dagpm)

Fig. 4 Test for 500 hPa height prediction at 20:00 BT 5 (a) and at 08:00 BT 6 (b) July 2015 (unit: dagpm)

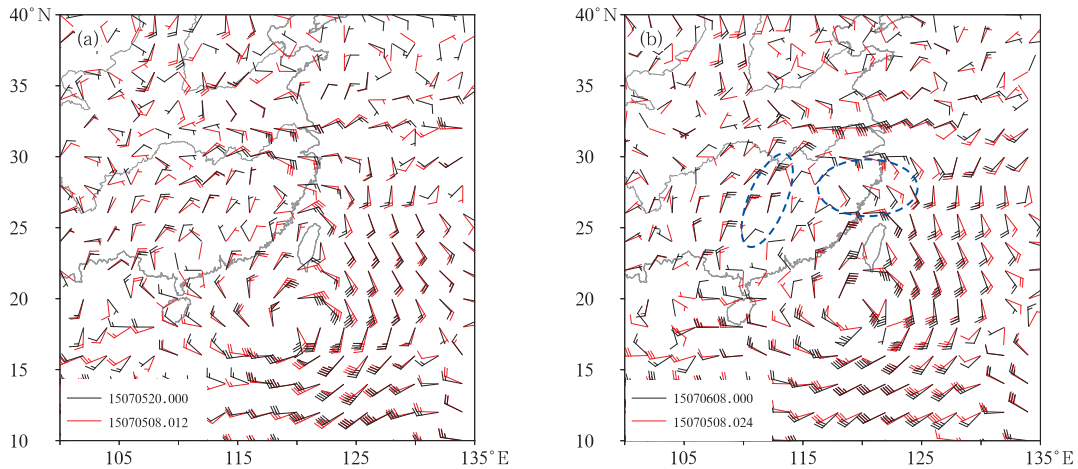


图 5 2015 年 7 月 5 日 20:00(a)和 6 日 08:00(b)850 hPa 风场预报检验  
(初始场资料时间为 5 日 08:00)

Fig. 5 Test for wind prediction at 20:00 BT 5 (a) and is 08:00 BT 6 (b) July 2015  
(Initial field data time is 08:00 BT 5 July)

### 3.2.3 物理量诊断及预报误差检验

风场、温度场的变化将导致水汽辐合(散)、锋生增强(减弱),从而影响降水过程的发展和减弱。锋生函数可以从定量的角度来分析具体的天气现象、气象要素的变化状况(朱乾根等,2007),梅雨期降雨过程中空气湿度较大,上升下沉运动可近似看成湿绝热过程,所以取  $\theta_{se}$  为气象参数来计算锋生函数(陶诗言等,2008)。其计算式为

$$F_1 = \left( \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left( \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$F_2 = - \frac{1}{|\nabla \theta_{se}|} \left( \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (2)$$

$$F_3 = \frac{1}{|\nabla \theta_{se}|} \left[ \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{d\theta_{se}}{dt} \right) + \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{d\theta_{se}}{dt} \right) \right] \quad (3)$$

式中,  $F_1$  表示水平锋生,  $F_2$  表示垂直锋生,  $F_3$  表示非绝热加热对锋生的作用,  $F = F_1 + F_2 + F_3$  表示总锋生(简称锋生)(朱乾根等,2007)。简单起见,本文主要对水平锋生的实况和预报场进行诊断和检验。

#### 3.2.3.1 实况物理量诊断

以 NCEP-FNL 分析资料代表实况场,对此次过程物理量进行诊断(图略),在假相当位温垂直剖面上,杭州湾总体为下低上高,层结较为稳定,暴雨主要由稳定降水产生,发生在低层假相当位温  $\theta_{se}$  梯度密集区。涡度场变化显示,杭州湾 5 日持续较强降雨主要受 700 hPa 江淮切变线影响产生,6 日

700 hPa 正涡度发展减弱,低层 850 hPa 气旋性涡度增加,降雨持续。

从图 6 可以看到,5 日 20:00、6 日 08:00 杭州湾地区都受  $\theta_{se}$  低值槽区影响,长江口 32°N 附近有明显的  $\theta_{se}$  低值中心,中低层冷空气受东北气流影响南下,杭州湾两岸  $\theta_{se}$  等值线较密集,700 和 850 hPa 杭州湾至长江口 2 个纬距内  $\theta_{se}$  梯度分别达 0.05 和 0.1 K · km<sup>-1</sup>,锋区影响至杭州湾南岸。受东北气流和西南、东南气流共同影响,杭州湾低层辐合较强,5 日 20:00 700 hPa 辐合中心为 60 × 10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup>,6 日 08:00 850 hPa 辐合增强,杭州湾南岸出现 30 × 10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup> 的辐合区。因此受温度平流和水平风场辐合的共同影响,5 日 20:00 至 6 日 08:00 杭州湾地区总体锋生增强,其中 5 日 20:00 杭州湾北岸 700 hPa 出现 3 × 10<sup>-9</sup> K · m<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup> 水平锋生中心,6 日 08:00 杭州湾南岸 850 hPa  $F_1$  锋生 2 × 10<sup>-9</sup> ~ 3 × 10<sup>-9</sup> K · m<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>。此外,与中低层锋生发展较一致的还有水汽辐合增强,5 日 20:00 杭州湾 700 hPa 出现 6 × 10<sup>-8</sup> g · s<sup>-1</sup> · cm<sup>-2</sup> · hPa<sup>-1</sup> 水汽通量辐合中心,6 日 08:00,杭州湾南岸 850 hPa 水汽通量辐合数值 > 2 × 10<sup>-8</sup> g · s<sup>-1</sup> · cm<sup>-2</sup> · hPa<sup>-1</sup>, 都有明显的辐合,在中低层水平锋生和水汽输送辐合的共同作用下,杭州湾北岸降雨增强,南岸持续。

#### 3.2.3.2 预报物理量场的诊断和检验

对 5 日预报时可获取的模式最新预报场(4 日 20:00、5 日 08:00 初始场)分别进行物理量诊断(图 7),可以看到,5 日 20:00 700 hPa(图 7a~7d)

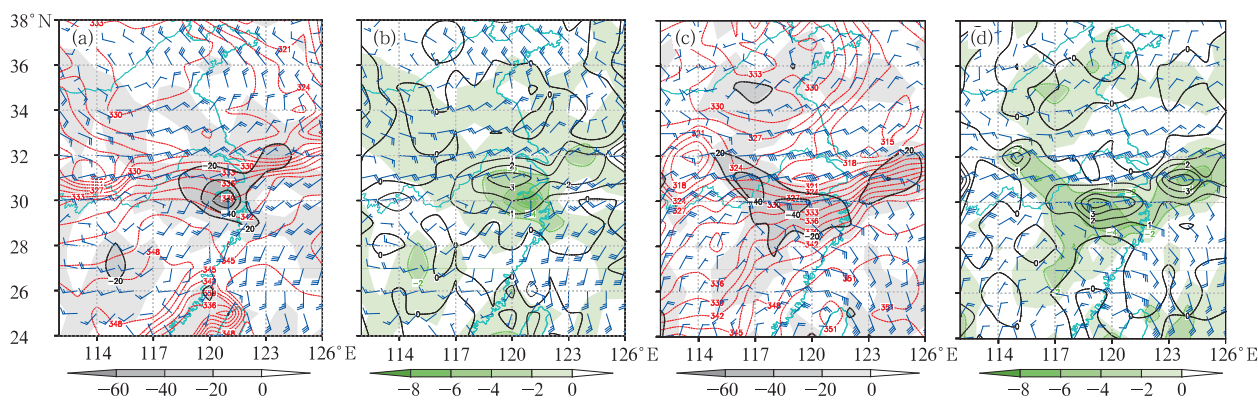


图6 2015年7月5日20:00 700 hPa(a, b)和6日08:00 850 hPa(c, d)FNL分析资料物理量诊断图

(a, c) 假相当位温与散度、风场叠加图

(红色虚线为假相当位温  $\theta_{se}$ , 单位: K; 灰色阴影为散度辐合, 单位:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ );

(b, d) 水汽通量散度与  $F_1$  锋生、风场叠加图

(黑色实线为  $F_1$  锋生, 单位:  $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 绿色阴影为水汽通量散度辐合, 单位:  $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

Fig. 6 FNL analysis of physical quantity diagnosis at 700 hPa at 20:00 BT 5 (a, b) and at 850 hPa at 08:00 BT 6 (c, d) July 2015

(a, c) overlay chart of pseudo-equivalent potential temperature, divergence and wind

(Red dotted line denotes pseudo-equivalent potential temperature  $\theta_{se}$ , unit: K;

gray shadows are divergence convergence, unit:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ),

(b, d) overlay chart of vapor flux divergence,  $F_1$  frontogenesis and wind

(Black solid line denotes  $F_1$  frontogenesis, unit:  $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; green shadows are convergence of vapor flux divergence, unit:  $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )

模式前 24 和 12 h 预报在长江口 32°N 附近受冷空气影响都有明显的  $\theta_{se}$  低值带,  $\theta_{se}$  低值预报较实时分析场偏强, 而预报杭州湾南岸受  $\theta_{se}$  暖脊影响, 暖脊分布较分析场偏北, 故而杭州湾北岸至长江口  $\theta_{se}$  锋区梯度预报明显较分析场偏强, 而南岸冷空气影响预报明显偏弱, 预报无  $\theta_{se}$  锋区影响。此外, 由于模式预报暖区较强, 杭州湾西部出现偏南风, 江淮切变线位于太湖北翼, 辐合略偏北。前 12 h, 模式预报有所调整, 预报北岸冷空气略有南压, 浙北转受西南气流影响, 切变线南压至太湖南翼杭州湾北岸。因此杭州湾北岸受强  $\theta_{se}$  梯度和水平风场辐合南压影响,  $F_1$  锋生 12 h 预报较 24 h 预报明显增强, 较接近于实时分析场的诊断分布。同时, 模式预报水汽辐合中心也北调至杭州湾北岸, 从而雨量要素预报为北岸较强, 南岸增强, 但仍偏弱。

6 日 08:00 850 hPa(图 7e~7h), 模式预报诊断结果显示, 前 36 h(4 日 20:00 初始场) 预报  $\theta_{se}$  锋区梯度主要在杭州湾北岸, 前 24 h(5 日 08:00 初始场) 预报有所调整, 长江下游  $\theta_{se}$  低值区有向南扩展, 趋向于实时分析场分布, 但预报仍偏弱。杭州湾两

岸受东北气流和东南气流影响, 有明显的辐合增生和水汽输送。综合来看, 6 日 08:00 前 24 h 预报, 杭州湾两岸  $F_1$  锋生调整增强, 而两岸水汽辐合预报与分析场总体差异不大, 故而模式预报杭州湾两岸降雨仍较强。

综上所述, 5 日由于西北冷空气补充东移, 中纬度小槽发展, 槽前西南气流增强, 江淮高压脊减弱, 冷平流增强。由于模式对杭州湾南岸的冷空气影响预报偏弱, 造成切变辐合偏北, 杭州湾南岸降雨偏弱。随着预报时效的临近, 模式对低层冷空气影响预报有正向调整, 调整接近于实时分析场, 从而使雨量要素预报相对有较好的参考作用。

总体而言, GFS 模式对低层冷暖系统的风场预报较好, 但是对冷暖系统交汇区(即锋区)的风场预报有偏差, 从而对中低层辐合、水平锋生和水汽输送产生连锁影响, 造成大雨、暴雨落区出现偏差。在稳定性锋区降雨预报中, 预报员可借助模式物理量诊断资料, 深入了解天气过程的发生发展, 根据地面风场、气温等实况监测资料的变化对预报分析做出有益调整。模式在临近预报时效时, 由于初始场资料

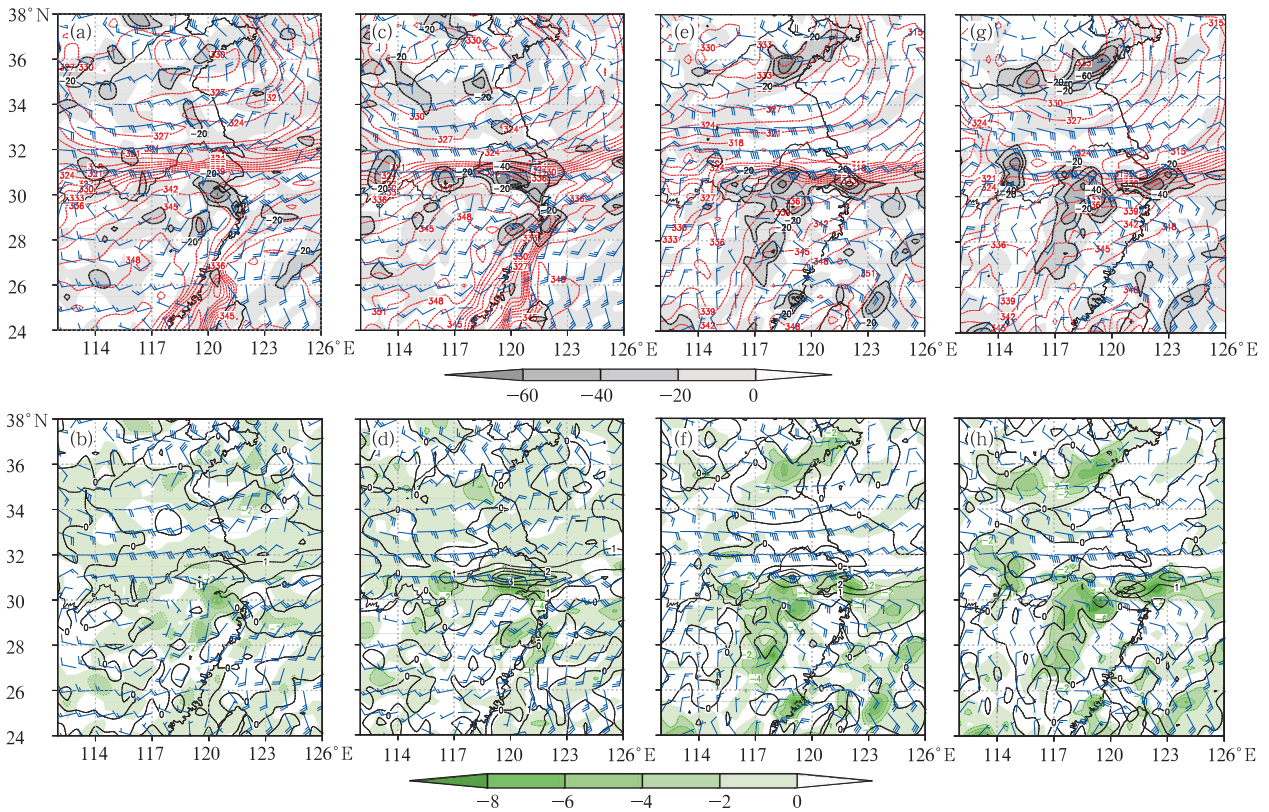


图 7 2015 年 7 月 5 日 20:00 700 hPa(a, b, c, d)和 6 日 08:00 850 hPa(e, f, g, h)模式预报物理量诊断图  
(a, b, e, f) 4 日 20:00 初始场预报图, (c, d, g, h) 5 日 08:00 初始场预报图  
(线条、色块说明同图 6)

Fig. 7 Diagnostic chart of physical quantity by model predictions at 700 hPa at 20:00 BT 5 (a, b, c, d)  
and at 850 hPa at 08:00 BT 6 (e, f, g, h) July 2015

(a, b, e, f) forecast charts of initial field at 20:00 BT 4, (c, d, g, h) forecast charts of initial field at 08:00 BT 5  
(The lines and color blocks are the same as in Fig. 6)

的及时更新,能较快对预报形势作出调整并反映在具体物理量和要素预报上,预报员需重视模式在临近时刻的调整,分析实况雨带的移动、演变与模式预报之间的变化和差异,对冷暖气流的影响变化作甄别,从而及时修正改进降水落区和影响时间,对预报做出调整。

## 4 结 论

(1) 2015 年 7 月 4—8 日,浙北梅雨期间多地出现“梅中返春”、7 月“冷夏”,其中 5—6 日杭州湾出现持续暴雨,此次暴雨发生在稳定的大尺度环流背景下,冷暖气流不断在浙江交绥形成持续降雨。低层冷空气和东南暖湿气流的不断增强,使大气斜压扰动发展,锋区降雨增强,暴雨发生。此次过程,由于数值模式预报出现偏差而导致杭州湾周边气象台

站 24 h 降雨预报总体偏弱,大雨、暴雨漏报。

(2) 分析和检验结果:5 日由于西北冷空气补充东移,中纬度小槽发展,槽前西南气流加强,从而江淮高压脊减弱,冷平流增强。同时,由于“莲花”台风转向偏北方向移动,华东暖区北顶,冷暖辐合增强,雨带北移,杭州湾北岸降雨增强,南岸降雨持续。

(3) 对 GFS 模式高度场、风场 12~60 h 预报时效进行检验,发现此次过程,模式对大尺度环流形势的预报误差主要体现在对江淮高压脊的减弱预报和副高西界上;36 h 预报时效内模式对低层冷暖中心的风场预报较好,对台风中心位置及中心附近的风场预报也较好。随着预报时效的临近,模式对大尺度环流预报和低层冷空气影响预报都正向调整,调整接近于实时分析场。

(4) GFS 模式对低层冷暖系统交汇区(即锋区)的风场预报有偏差,从而对中低层辐合、水平锋生和

水汽输送产生影响,造成大雨、暴雨落区出现偏差。模式对杭州湾南岸冷空气影响预报偏弱是暴雨漏报的一个重要因素。总体而言,在临近预报时效时,由于初始场资料的及时更新,模式能较快对预报形势做出调整,从而使降水预报发生有益变化。持续大雨、暴雨过程中,预报员需重视模式在临近时刻的调整,根据实况监测资料和雨带的演变、移动对冷暖气流影响作甄别,从而及时调整降雨落区和影响时间,发布修正预报。

(5) 此次锋区降雨过程中,虽然模式对雨带主体预报出现一定偏差,但在实际服务中,有经验的预报员抓住降雨主导因素,及时根据实况气温和降雨变化对冷空气影响做出修正,从而对预报做出了有益调整。持续降雨服务过程中,预报员需根据最新气象资料的变化及时调整思路,注意避免预报僵化。

### 参考文献

- 丁一汇,胡国权,2003. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究[J]. 气象学报,61(2):129-145.
- 丁一汇,柳俊杰,孙颖,等,2007. 东亚梅雨系统的天气-气候学研究[J]. 大气科学,31(6):1082-1101.
- 何群英,解以扬,东高红,等,2011. 海陆风环流在天津2009年9月26日局地暴雨过程中的作用[J]. 气象,37(3):291-297.
- 李丹,王昌双,刘伟,2009. 东北冷涡引发的局地暴雨数值模拟研究[J]. 气象与环境学报,25(6):29-33.
- 梁生俊,王培,高守亭,2013. 一次陕西初夏暴雨过程的数值模拟及诊断分析[J]. 气候与环境研究,18(1):12-22.
- 倪允琪,周秀骥,2005. 我国长江中下游梅雨锋暴雨研究的进展[J]. 气象,31(1):9-12.
- 陶诗言,卫捷,张小玲,2008. 2007年梅雨锋降水的大尺度特征分析[J]. 气象,34(4):3-15.
- 杨学斌,代玉田,崔森,等,2015. 山东夏季两次切变线暴雨过程对比分析[J]. 气象科技,43(4):688-696.
- 姚晨,张雪晨,毛冬艳,2010. 滁州地区不同类型特大暴雨过程的对比分析[J]. 气象,36(11):18-25.
- 张晓红,贾天山,胡雯,2009. 2007年淮河流域雨季暴雨多尺度环流分析[J]. 南京气象学院学报,32(2):321-326.
- 张羽,牛生杰,于英华,等,2010. 雷州半岛“07.8”致洪特大暴雨的数值模拟[J]. 大气科学学报,33(1):47-57.
- 赵玉春,2011. 梅雨锋对引发暴雨的中尺度对流系统发生发展影响的研究[J]. 大气科学,35(1):81-94.
- 赵玉春,李泽椿,肖子牛,等,2007. 淮静止梅雨锋连续暴雨个例的位涡反演诊断[J]. 气象学报,65(3):353-371.
- 赵玉春,王叶红,2012. 风垂直切变对中尺度地形对流降水影响的研究[J]. 地球物理学报,55(10):3213-3229.
- 郑婧,孙素琴,吴静,等,2014. 梅雨锋短时大暴雨的多尺度环境场分析[J]. 气象,40(5):570-579.
- 周宏伟,王群,裴道好,等,2011. 苏北东部一次梅雨锋大暴雨过程的多尺度特征[J]. 气象,37(4):432-438.
- 周明飞,杜小玲,熊伟,2014. 贵州初夏两次暖区暴雨的对比分析[J]. 气象,40(2):186-195.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2007. 天气学原理和方法:第4版[M]. 北京:气象出版社:94-99.
- 宗志平,陈涛,徐珺,等,2013. 2012年初秋四川盆地两次西南涡暴雨过程的对比分析与预报检验[J]. 气象,39(5):567-576.
- Luo Z X, Luo C H, 2008. An investigation into effect of randomly distributed small scale vortices on vortex self-organization[J]. Acta Meteor Sin,22(2):143-151.