doi:10.11676/qxxb2015.029 气象学报

基于 NCEP/GFS 资料的中国东部地区雷暴预报研究*

李 娜[1,2] 冉令坤[1] 孙建华[1] 李耀东[3]
LI Na[1,2] RAN Lingkun[1] SUN Jianhua[1] LI Yaodong[3]

1. 中国科学院大气物理研究所,北京,100029
2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室,南京,210044
3. 北京航空气象研究所,北京, 100085
1. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
3. *Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing* 100085, *China*

2014-10-23 收稿,2015-01-05 改回.

李娜, 冉令坤, 孙建华, 李耀东. 2015. 基于 NCEP/GFS 资料的中国东部地区雷暴预报研究. 气象学报, 73(3):459-470
Li Na, Ran Lingkun, Sun Jianhua, Li Yaodong. 2015. Research of the thunderstorm forecast in East China based on the NCEP/GFS data. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(3):459-470

Abstract A study of a relatively long period (12 - 24 h) regional thunderstorm forecast is carried out based on the GFS analysis and the forecasting data from NCEP (National Centers for Environmental Prediction). The prediction factors in this study come from the convective indices that are often used to examine the dynamic and thermodynamic environments of thunderstorm occurrence. With the highest CSI (critical success index) as a criterion, the discriminant analysis method and stepwise regression method are used to build the optimal thunderstorm model for each grid in the forecasting region. Therefore, thunderstorm models and the corresponding critical values for the discrimination of the thunderstorm occurrence would change with the location so that the local environment and climate background of the thunderstorm occurrence can be considered. The newly-built thunderstorm forecast method that ensembles the convective parameters (called "ECTF" method) is used for the prediction of the two thunderstorm processes which respectively occur on June and September 2012. The results show that this method can basically predict the area of thunderstorm in East China. Further, to discriminate occurrence of thunderstorm and torrential rain effectively and objectively, the "Ensemble Dynamic Factors precipitation Forecasting method (EDFF)" is introduced. The EDFF method performs well on the diagnosis and tracing of severe precipitation, while the ECTF method is more capable of reflecting the convective weather, such as flash floods, hail, high wind and so on. Extracting the advantages of these two methods, they are integrated and an "integrated dynamic factors-convective parameters severe weather forecasting method" is built, which can be used in the forecast of precipitation and thunderstorm and can also discriminate, to some extent, among the precipitating thunderstorm, the non-precipitating thunderstorm and the non-thunderstorm precipitation.

Key words Convective parameters, Thunderstorm, Dynamic factors, Torrential rainfall

摘 要 基于来自美国国家环境预测中心(NCEP)的 GFS(Global Forecasting System)分析及预报场资料,将多个能够表征雷暴发生动力、热力环境的对流因子作为预报因子,通过费希尔判别准则及逐个引入因子法,建立集合多个对流参数的雷暴预

* 资助课题:中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05)、国家重点基础研究发展计划项目(2013CB430105)、北京市自然科学基金项目(8142035)、国家自然科学基金项目(41175060)、南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室开放课题(KLME1408)。
作者简介:李娜,主要从事中尺度动力学和数值模拟研究、变形场研究等。E-mail:lina@mail.iap.ac.cn
通讯作者:冉令坤,主要从事中尺度动力学、强对流和波流相互作用研究。E-mail: rlk@mail.iap.ac.cn

报模型,从而进行较长时效(12—24 h)的区域性雷暴预报。依据临界成功指数(CSI)最高的原则,建立最优预报模型,不同地区所选用的对流参数不同,雷暴模型预报雷暴发生与否的临界值也不同,从而不仅能够得到较好的集合多个对流参数的雷暴区域性预报,还能充分考虑不同地区雷暴发生的地域性特点和气候背景。将建立的预报方法应用于2012年6和9月的两次强对流过程的预报,发现雷暴预报模型较好地预报出两次过程的雷暴落区。进一步,为了能够在强天气预报中客观有效地区分出雷暴与暴雨区,引入集合动力因子暴雨预报方法。集合动力因子暴雨预报方法在诊断和追踪强降水的发展演变中表现凸出,而集合对流参数雷暴预报方法则对包含短时强降水、冰雹、大风等在内的对流性天气有较好反映,综合两套预报方法各自的优势,建立了集成动力因子-对流参数强天气预报方法,用于降水和雷暴的预报,同时对雷暴加降水型、雷暴无降水型、降水无雷暴型等强天气进行区分预报。对中国多个典型城市的预报效果分析发现,该方法不仅能够较好地预报出较长时效(24 h)的雷暴和降水落区,对区分降水雷暴、无降水雷暴和无雷暴降水也表现出一定的能力。

关键词 对流参数,雷暴,动力因子,暴雨

中图法分类号 P457.9

1 引 言

雷暴,特别是伴有强风、冰雹、暴洪等发生的强雷暴是当代大气科学中备受关注的自然现象之一,这不仅是由于雷暴作为一种多发的中小尺度天气现象与社会生产和人民生活有着密切联系,也是由于(强)雷暴是许多天气灾害的直接制造者,是不可忽视的威胁社会和人民生命财产安全的因素(陶诗言等,1979;陈洪滨等,2012)。对雷暴的预测预警在现阶段主要基于探空、雷达等观测外推及数值模式预报,其中,数值模式既包含模式本身的预报,也包含数值结果的延伸释用。然而,雷暴预报时效目前普遍集中在0—6 h (Johns, et al, 1992;Obsty, 1992; Wilson, et al, 1998;彭治班等,2001;廖晓农等,2007;雷蕾等,2011),而6 h以上的雷暴预报还未能真正实现(陈明轩,2004;俞小鼎等,2012)。这一方面是由于雷暴具有突发性和局地性特点,而线性外推及高分辨率的数值模式无法长时间追踪到支撑其发展的主要因素,另一方面受观测误差和参数化过程的影响,尽管数值模式的准确率及分辨率不断提高,中小尺度雷暴的结构和发展仍然无法得以再现(俞小鼎等,2012)。如何获得6—24 h甚至更长时效的雷暴预报是目前亟待解决的科学问题之一。为了获得较长时效的包含强风、冰雹、暴洪等天气在内的雷暴预报,除了进一步开发和完善数值模式对中小尺度系统的预报能力外,目前研究基于数值模式对大尺度天气形势能够较好预报的特点还发展了指标叠套法、逐步消空法等统计释用方法。李耀东等(2004)以中国国家气象中心T106模式1995—1997年的预报场和区域MM5模式输出产品为基础,将低层温度露点差、K指数、对流有效位能、沙氏指数等多个指标叠套进行了24 h综合多指标叠套强天气预报试验;曾淑玲等(2012)利用T213数值预报产品计算多个对流参数,通过事件概率回归方法建立了全中国690个基本站4—9月的24 h雷暴潜势预报方程。

随着雷暴有无临近预报技术的日趋成熟,强天气类型(暴雨、短时强降水、冰雹、大风等)的预报得到重视,如何区分暴雨与强对流、如何区分强雷暴中的不同天气型也是目前强天气预报的重点和难点。雷蕾等(2011)利用探空资料研究了北京地区夏季强对流天气类别的判别与预报,其分析结果表明,0℃、-20℃层高度、500和850 hPa温差、逆温层高度及对流有效位能、K指数等的6 h变量等能够比较明显区分冰雹(雷暴大风)和暴雨天气。在该研究基础上,为了弥补探空资料时空分辨率的不足,雷蕾等(2012)进一步探索了中尺度数值模式对强对流天气分类预报的可能性,验证了利用北京地区中尺度快速更新循环同化预报系统(BJ-RUC)进行强对流天气概率预报及强对流天气的分类概率预报的可能性。暴雨与强对流天气均为中国夏季典型的强天气型,二者既相互联系,又有所区别(丁一汇等,1981;王笑芳等,1994)。例如,暴雨一般需要非常充足持久的水汽供应,水汽在低层大量辐合(张小玲等,2004),而强对流天气对水汽的要求则比暴雨要低,且中上层冷平流对强对流天气的发生、发展起着非常重要的作用;但造成局地暴雨的短时强降水本身又是强对流天气的一种形式(孙建华等,2002),暴雨与强对流天气均需要不稳定、水汽供应及触发等条件,加之暴雨、强对流天气发生过程的复杂性和多样性,使得通过分析强天气发生环境来进行强天气诊断预报的过程变得复杂,增加了准确预报强天气的

难度。

针对以上科学问题,文中主要开展了以下两点研究:(1)为了获得较长时效的雷暴预报,利用判别分析法、逐步回归法等统计学方法,基于来自美国国家环境预测中心(NCEP)的 GFS(Global Forecasting System)长时效预报场资料(192 h),建立集合多个对流参数的雷暴预报模型,并对中国东部地区雷暴进行试验性预报;(2)为了能够在强天气预报前客观有效地区分暴雨与强对流,引入高守亭等(2013)提出的集合动力因子暴雨预报方法,将该方法与集合对流参数的雷暴预报进行集成,从而探讨该集成方法对暴雨与雷暴区分型预报的可能性。基于非均匀饱和湿空气理论及中尺度波流相互作用理论建立起来的集合动力因子预报方法能够较好地追踪和预报暴雨落区,而文中所建立的集合对流参数雷暴预报方法则在雷暴预报中更具优势,将二者进行集成,不仅能够得到暴雨与雷暴预报,还可对无降水雷暴、降水雷暴、无雷暴降水等天气型进行区分预报。

2　资料介绍

用于计算对流参数的资料包括 2009—2010 年 6—9 月来自 NCEP 的 GFS 分析场资料及 2012 年 6—9 月 GFS 预报场资料,其中,分析场时间分辨率为每日 4 次(00、06、12、18 时,世界时,下同),空间分辨率为 0.5°×0.5°(约 50 km),垂直层次 26 层,预报场时间分辨率为 3 h,预报时效为 192 h(8 d)。

所用的雷暴资料来自中国气象局的 MICAPS 地面观测。根据《地面气象电码手册》(寿绍文,2006),雷暴的判别依据是:现在天气现象的电码值等于 17(闻雷,但观测时测站没有降水)、18(观测时或观测前 1 h 内有飑)、19(观测时或观测前 1 h 内有龙卷)、27(观测前 1 h 有冰雹或冰粒,或霰,或伴有雨)、29(雷暴)、91—99(91—94:观测前 1 h 内有雷暴,观测时无雷暴而有降水;95—99:观测时有雷暴和降水);过去现象的电码值为 9(雷暴)。

3　集合对流参数雷暴预报方法

3.1　方法介绍

对流参数是一类能够表征雷暴或强对流发生动力、热力环境的参数,包括对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)等能量参数,抬升指数、K 指数等稳定度参数,强天气威胁指数、瑞士指数等综合动热力效应的参数等,目前的许多雷暴预报均是基于这些参数(刘健文等,2005;张建春等,2014)。单个参数仅能表征雷暴发生的某些动、热力环境,为了使雷暴预报更加有效,通常可将这些参数进行叠套或集合(李耀东等,2004;郝莹等,2007)。文中选用判别分析法作为预报雷暴发生与否的基本方法,以温度露点差、可降水量、对流有效位能、对流抑制能量、抬升指数、修正 K 指数、深对流指数、微下击暴流指数、对流稳定度指数、总指数、条件稳定度指数、条件对流稳定度指数、强天气威胁指数、大风指数、能量螺旋度、粗理查森数、风暴强度指数、瑞士指数 00、瑞士指数 12、粗理查森切变、干暖盖强度指数等 21 个对流指数作为预报因子,通过 2009—2010 年 6—9 月 GFS 分析场资料计算预报因子,并找出预报因子与雷暴类别的相关规律,建立预报模型,最后选择合适的判别规则(即判别临界值),通过判别某时刻观测或模式输出的预报因子所属类别作出雷暴预报(Stensrud, et al, 1997;孔玉寿等,2010)。

将雷暴发生时的观测值定为 1,未发生雷暴的观测值定为 0,这样,对雷暴的分析与预报关键在于确定预报因子的临界值,使其能够准确区分雷暴发生与否。采用费希尔判别准则对预报因子进行二级判别。设 $y_k^{\mathrm{A}}(k=1,2,\cdots\cdots,n_{\mathrm{A}})$ 表示无雷暴产生的判别函数值,$y_k^{\mathrm{B}}(k=1,2,\cdots\cdots,n_{\mathrm{B}})$ 表示有雷暴发生的判别函数值,n_{A} 和 n_{B} 分别为无雷暴和有雷暴发生的时次数,则费希尔准则可表示为

$$\lambda=\frac{(\overline{y^{\mathrm{A}}}-\overline{y^{\mathrm{B}}})}{\sum_{k=1}^{n_{\mathrm{A}}}(y_k^{\mathrm{A}}-\overline{y^{\mathrm{A}}})^2+\sum_{k=1}^{n_{\mathrm{B}}}(y_k^{\mathrm{B}}-\overline{y^{\mathrm{B}}})^2}=\mathrm{Max} \tag{1}$$

上式遵循以下两个准则,(1)无雷暴和有雷暴发生的判别函数值对应的时次点各自比较集中;(2)两类不同的时次点之间距离越远越好。将费希尔准则应用于初选的 21 个预报因子(对流参数),并比较不同因子间的 λ 值,λ 越大的预报因子对雷暴的判别分析能力也越强。确定预报因子后,便可建立雷暴预报模型

$$y=c_1x_1+c_2x_2+c_3x_3+\cdots+c_mx_m \tag{2}$$

式中,y 为判别函数,(x_1,x_2,x_3) 为预报因子,即对流参数,m 为引入的预报因子数。上述预报模型建立后,通过确定判别临界值 y_c,便可对雷暴是否发

生作出判断：当 $y<y_c$ 时，雷暴发生；$y\geqslant y_c$，雷暴不发生。

在经典的判别分析法基础上，文中所做的几点改进包括：(1)因引入不同的预报因子，建立的雷暴预报模型不同，对雷暴的预报效果也不同，为了能够建立最优的雷暴模型，将预报因子按照 λ 值从大到小逐个引入雷暴预报模型，并计算不同预报模型对2009—2010 年 6—9 月雷暴的临界成功指数(CSI)，最后选取 CSI 最大的雷暴模型作为某一地区的最终雷暴预报模型；(2)受气候和地形等的影响，中国华南、华东、华北及东北等地区雷暴发生的条件与频次均存在显著差异，考虑到这一点，对中国东部地区(21°—48°N，108°—127°E)每个格点均利用上述方法建立相应的雷暴预报模型，即不同格点具有不同的雷暴预报模型和不同的判别临界值，这实际是运用了统计方法将不同地区发生雷暴时的条件差异考虑进了模型中。值得注意的是，由于许多对流参数需要 850 hPa(约 1500 m)及以下边界层的资料，而 GFS 资料为等压面资料，不包含地形因素，致使许多参数在较高地形地区无法计算或很难准确计算，因此，目前该研究主要集中在中国东部地形较为平坦的地区；(3)判别临界值 y_c 的确定也是影响雷暴预报的一个关键因子(王秀明等，2012)，目前确定判别临界值的方法主要是加权平均法和历史拟合率最高法，加权平均法较容易实现，但当雷暴发生次数 n_A 与未发生次数 n_B 差距悬殊时，用该种方法确定的判别临界值显然不准确；历史拟合率最高法比加权平均法要复杂，原则上需要计算每一个判别函数值，并利用点聚图法确定判别临界值，这样做对单个地区实现较为容易，但对整个东部地区则工作量很大。因而，本研究依照历史拟合率最高的原理，同样以预报临界指数最高为原则确定判别临界值，这样做算法上虽然比加权平均法复杂，但比历史拟合率最高法简单有效。

3.2 预报试验

图 1 为 2012 年 6 月 3 日中国华北及东北地区的一次强对流过程。6 月 3 日 12 时，观测的雷暴发生带主要位于东北及华北地区(图 1a)，呈东北—西南走向，覆盖陕西、山西、河北、北京、天津、内蒙古中部、辽宁、吉林及黑龙江等省、直辖市。中国华南地区广西东南部也有小块的雷暴发生。以 GFS 预报场资料计算的集合多个对流参数的雷暴预报模型较好地预报了该次过程的雷暴落区(图 1b、c)。12 h 预报中，除辽宁地区存在一些漏报，华北陕西、山西、天津、河北、北京等地的雷暴落区均得到较好反映。24 与 12 h 预报在大部分地区具有很大相似性，但在辽宁省的 24 h 预报效果反而要高于 12 h 预报。

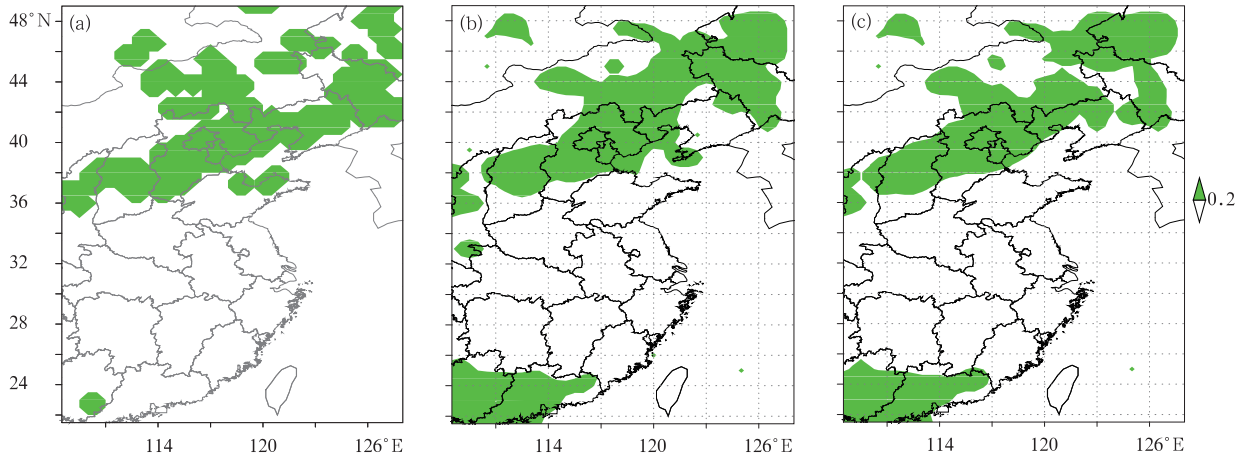


图 1 2012 年 6 月 3 日 12 时雷暴发生地区的(a)观测、(b)12 h 及(c)24 h 预报

(为了区分雷暴发生区(绿色区域，数值为 1)与未发生区(数值为 0)，色阶取 0.2)

Fig. 1 (a) Observation, (b) 12 h and (c) 24 h forecast of the thunderstorm area at 12: 00 UTC 3 June 2012

图 2 为 2012 年 9 月 19 日中国东部地区的另一次雷暴过程。06 时，主要的雷暴区位于中国华北山西、河北、河南 3 省交界的区域，其次为内蒙古东北部。对比图 2a—c 可知，集合对流参数的雷暴预报

方法在 12 和 24 h 预报中均能较好地抓住山西、河北、河南 3 省交界的主雷暴区,但在山东西部和河南南部存在一些空报,这主要是由于该地区从环境上看可能已经达到对流发生的条件,但在 06 时还未观测到。12 时,华北主雷暴区范围有所扩大,山东、河南、安徽和江苏 4 省均开始有雷暴发生。对比图 2d—f,集合对流参数的 12 h 和 24 h 雷暴预报较好地反映了该地区雷暴的发生,但在山西地区存在漏报,这很可能和图 2d 中不仅包含 12 时的当前雷暴发生地区,还包含过去 6 h 内出现的天气现象有关(见第 2 节),随着雷暴系统的东移,12 时,山西地区雷暴发生环境有所减弱,因而预报中未有体现。

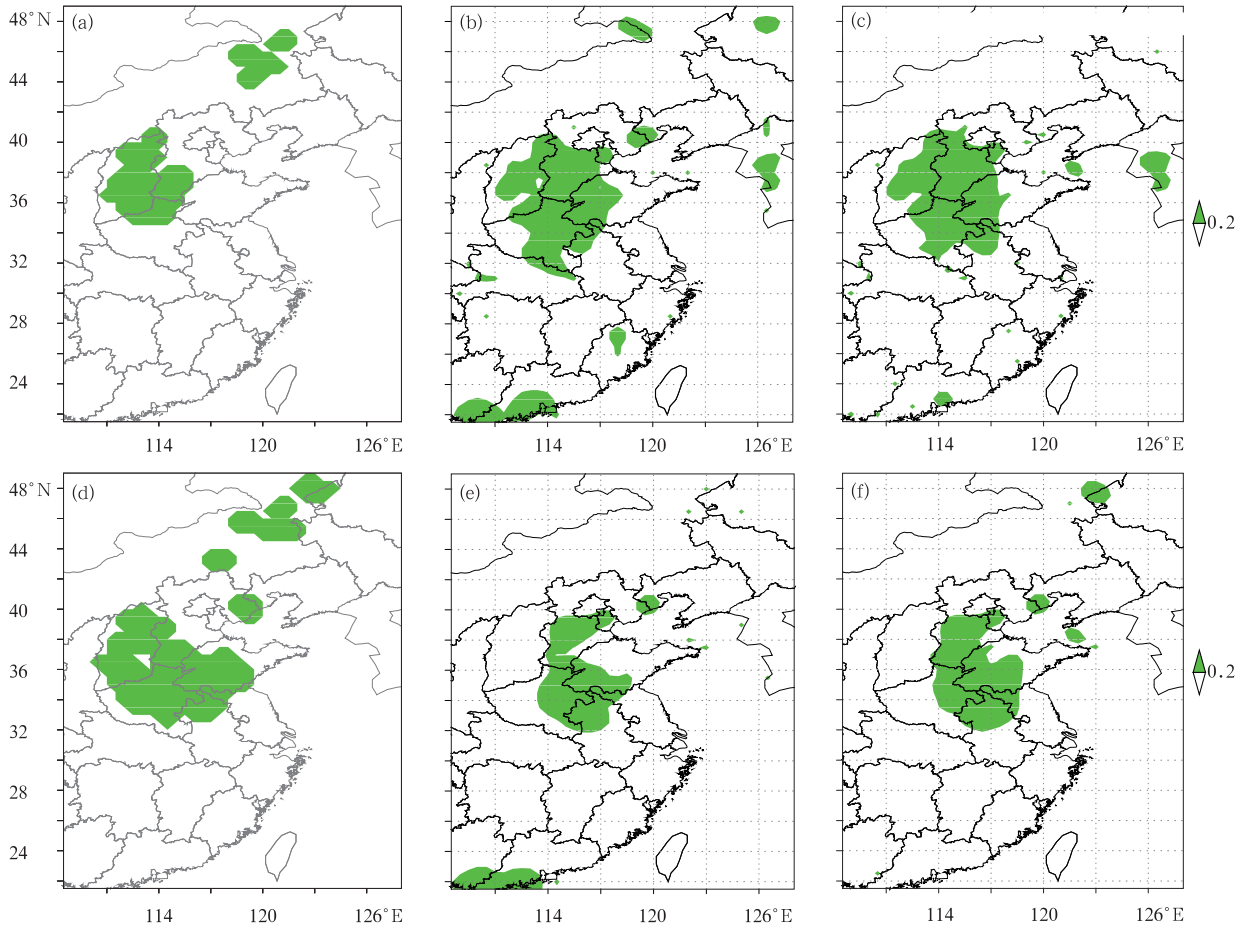


图 2　2012 年 9 月 19 日 06 时(a—c)和 12 时(d—f)雷暴发生地区的(a、d)观测、(b、e)12 h 及(c、f)24 h 预报
(绿色区域为雷暴发生区,色阶同图 1)

Fig. 2　(a, d) Observation, (b, e) 12 h and (c, f) 24 h forecast of the thunderstorm area at 06: 00 UTC (a－c) and 12:00 UTC (d－f) 19 September 2012

4　集成动力因子-对流参数的强天气预报方法

充足的水汽供应、足够的不稳定能量积累以形成强烈持久的上升运动是暴雨发生的重要条件(Schultz, et al, 1999;张小玲等,2010)。为了描述暴雨发生的热力学特点,通常采用相当位温代替位温来表征降水大气的温湿特性和不稳定度(Emanuel, 1994)。相当位温假定空气块中的水汽能够全部达到饱和凝结降落,释放潜热加热大气,而实际大气即使有降水发生也是非均匀饱和的(周玉淑等,2010),相当位温的这种假定弱化了降水大气与非降水大气的区别。为了表征实际大气的非均匀饱和特征,Gao 等(2004)将权重系数引入到凝结潜热函数中定义了广义位温,根据大气本身的湿度特性,对于干大气,广义位温退化为位温,对于饱和湿大气,广

义位温等同于相当位温,即空气块中的水汽全部凝结,而对于未饱和湿空气块,则通过权重系数假定只有部分水汽凝结。因能够显著区分降水大气和非降水大气的温湿特性,在广义位温基础上提出了多个物理意义明确、包含丰富大气动热力信息的动力因子,例如 Gao 等(2004)利用广义位温代替位涡中的位温得到了广义位涡,与位涡和湿位涡相比,广义位涡与降水有更加密切的关系;Ran 等(2013b)为了在降水诊断分析中使涡度矢量的三维信息均能体现出来,提出了斜压力管涡度和位势力管涡度等;此外,Ran 等(2013a)还将广义位温和广义位涡引入到波-流相互作用理论,从而提出了位涡波作用密度,通过波作用密度追踪强波活动性,从而诊断和追踪降水。这些基于非均匀饱和湿空气和中尺度波流相互作用的动力因子被广泛应用于降水的追踪与诊断中。

"集合动力因子强降水预报方法"适合强降水的追踪与预报,而本研究所建立的"集合对流参数雷暴预报方法"则适合普通雷暴及有短时强降水、冰雹、大风等强雷暴的预报,将两套预报方法结合,不仅能够用于雷暴和强降水的预报,同时还可将降水雷暴、无降水雷暴及无雷暴降水等强天气型进行区分预报。如图 3 所示,黄色区为集合动力因子指示的降水落区,绿色区为集合对流参数雷暴预报模型指示的雷暴区,当二者有重叠时(图 3a),则重叠区域有对流性短时强降水发生,降水区除短时强降水区以外的地区则为普通强降水,雷暴区内有无冰雹、大风等天气发生则可根据对流参数及雷达回波等做进一步判断;当二者没有重叠时(图 3b),则雷暴区内无短时强降水发生,仅需判断是否有冰雹、大风等天气发生;当雷暴区包含在降水区中时,则雷暴区内有强降水发生,进而判断是否有冰雹、大风等天气发生(图 3c);当降水区包含在雷暴区中时,则可确定短时强降水的发生区,但冰雹、大风等其他强天气还需进一步判断(图 3d)。基于以上原理,可将"集合动力因子强降水预报方法"与"集合对流参数雷暴预报方法"进行集成,从而发展"集成动力因子-对流参数强对流预报方法",该方法的具体结构如图 4 所示。该预报方法整体包含 4 个步骤:数值模式输出的预报场资料下载整理,动力因子和对流参数计算,集合动力因子降水预报方程及集合对流参数雷暴预报模型计算和图形显示,从而得到强降水和雷暴预报,根据所得到的强降水及雷暴预报对降水雷暴、无降水雷暴及无雷暴降水进行分型预报。值得注意的是,在通过集合动力因子与集合对流参数区分出雷暴中的短时强降水区后,还需进一步对除短时强降水以外的强天气类型进行判断,由于这类天气属于小概

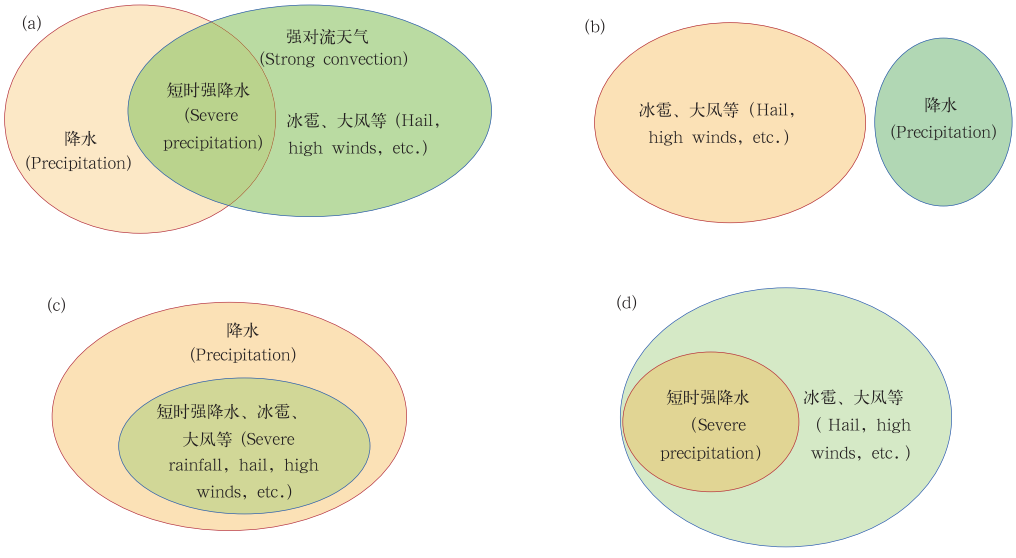


图 3 集成动力因子-对流参数强对流预报方法基本原理

Fig. 3 Conceptual maps for the integrated dynamic factors-convective parameters strong convection forecasting method

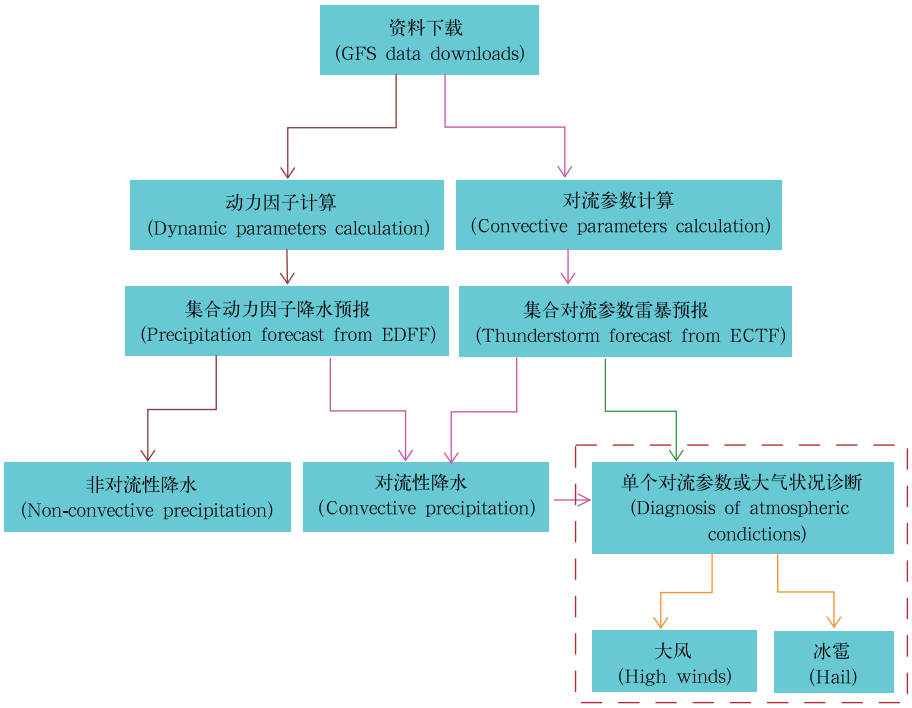


图 4　集成动力因子-对流参数强对流预报方法结构及流程

Fig. 4　Flow diagram for the integrated dynamic factors-convective parameters strong convection forecasting method

率事件,因此可以通过雷暴落区首先确定关键区,再利用探空、雷达及卫星等对是否有冰雹、大风等其他强天气产生进行预报(该部分内容目前未包含在内,未来可进一步加强)。

图 5 为集成动力因子-对流参数强对流预报方法对 2012 年 6 月 3 日的这次强天气过程的预报结果。中国北方东北—西南走向的雷暴结构前沿和后部出现了强降水(图 5a),其中,前沿的降水也具有东北—西南走向的带状结构特点,强降水中心位于河北、辽宁交界的近海区,雷暴区后部的降水位于内蒙古中部,强度较前部小。集成动力因子-对流参数雷暴预报方法得到的 12(图 5b)和 24 h(图 5c)预报对中国北部的雷暴和降水有良好反应,报出了陕西、山西、河北、北京、天津及内蒙古中部的雷暴,同时基本抓住了雷暴区前沿发生的强对流性降水,但也注意到,该方法对区域性的系统性降水反映能力较高,而对局地突发性的小范围降水预报有待提高,其未能较好反映雷暴区域后部内蒙古中部及前侧山东沿海的降水区。

2012 年 6 月 3 日在中国南方也有雷暴发生,范围较小,集中在广西与广州交界区,雷暴内虽然有降水,但强度较小。此外,在湖南地区还出现了无雷暴的降水,6 h 累积降水超过 10 mm(图 5a)。12 和 24 h预报的雷暴落区也基本出现在两广地区,且雷暴区内有强度较小的降水出现,但广东地区存在雷暴的过度预报,这可能和该地区经常处于雷暴发生的有利条件(高湿高温)下有关,从而使该方法对当前的大气状况出现误判。除了两广地带的雷暴降水区,该方法对湖南中部的无雷暴降水区也有较好的预报效果,但强度偏低,且在江西出现了过度预报。通过该个例可以发现,“集成动力因子-对流参数强对流预报方法”对降水、雷暴、雷暴降水、无降水雷暴、无雷暴降水等 5 种强天气型有一定的反映能力,且能够得到这 5 种天气型较长时效的预报(24 h)。

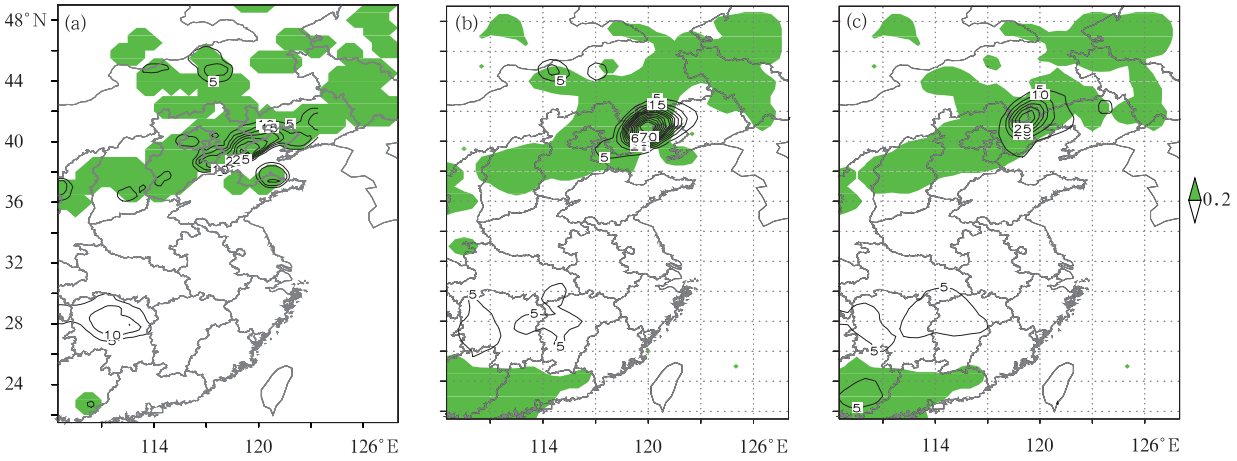


图 5 2012 年 6 月 3 日 12 时降水和雷暴发生区的(a)观测与集成动力因子-对流参数强对流预报方法(b)12 h 和(c)24 h 预报结果

(黑色实线为降水量,绿色区域为雷暴发生区,色阶同图 1)

Fig. 5 (a) Observation, (b) 12 h forecast, and (c) 24 h forecast of thunderstorms and precipitation at 12: 00 UTC 3 June 2012 (The black line is the rainfall amount and the green shaded areas are thunderstorm areas)

5 预报效果试验

表 1 给出了“集成动力因子-对流参数强对流预报方法”对 2012 年 6—9 月中国一些典型城市的 24 h降水预报的 ETS 评分、雷暴预报 ETS 评分、雷暴临界成功指数、雷暴空报率和雷暴探测率。可见该方法得到的24 h降水预报 ETS 评分均在 0.1 以上,最高为徐州地区,0.268,最低为南京地区,0.101;雷暴预报的 ETS 评分较降水预报略高,均在 0.12 以上,最高为天津地区,0.346,最低为沈阳地区,0.123,天津同时也是雷暴临界成功指数最高和空报率最低的地区。值得注意的是,北京毗邻天津,但该方法对两个地区的雷暴和降水却表现出了显著差异,这很可能和北京地区的特殊地形有关。北京三面环山,其东南面是向渤海平缓倾斜的平原,西面则是太行山余脉,北面有燕山和军都山,海拔高度变

表 1 “集成动力因子-对流参数强对流预报方法”对中国典型城市 2012 年 6—9 月的 24 h 降水预报 ETS 评分、雷暴预报 ETS 评分、雷暴临界成功指数、雷暴空报率和雷暴探测率

Table 1 The 24 h accumulative precipitation ETS score, thunderstorm ETS score, false ratio, critical success index and detectivity of the thunderstorm forecast during the whole summer of 2012 (June－September) of the integrated dynamic factors-convective parameters strong convection forecasting method in the typical cities of China

	降水 ETS 评分	雷暴 ETS 评分	雷暴临界成功指数	雷暴空报率	雷暴探测率
北京	0.117	0.132	0.380	0.551	0.710
天津	0.175	**0.346**	**0.502**	0.387	0.736
南京	0.101	0.309	0.454	0.453	0.727
盐城	0.144	0.295	0.446	0.515	0.848
徐州	**0.268**	0.217	0.346	0.596	0.707
杭州	0.263	0.256	0.436	0.380	0.594
上海	0.219	0.278	0.419	0.523	0.776
温州	0.103	0.148	0.436	0.513	0.807
长沙	0.151	0.139	0.284	0.712	0.951
合肥	0.208	0.150	0.242	**0.758**	**1**
武汉	0.111	0.235	0.417	0.551	0.854
南昌	0.175	0.197	0.415	0.569	0.919
沈阳	0.210	0.123	0.283	0.676	0.69

注:数值下划线表示每列中的最低值,粗体字表示最高值。

化剧烈,从而使北京多突发性的局地雷暴,而目前方法中的降水和雷暴预报都还不能包含地形要素在内(未来将发展),导致北京地区雷暴和降水的 ETS 评分都较低。另外还可注意到,合肥地区有最高的雷暴探测率,即其预报出所有 2012 年的雷暴,然而其空报率也是最高的,这表明,该方法在某些地区有必要在雷暴预报之前进行消空处理,从而使雷暴临界成功指数提高(未来将发展)。

表 2 给出了"集成动力因子-对流参数强对流预报方法"对中国典型城市 2012 年雷暴、降水、降水雷

表 2　"集成动力因子-对流参数强对流预报方法"对中国典型城市 2012 年 6—9 月的 24 h 雷暴、降水、雷暴加降水、雷暴无降水、降水无雷暴 5 个天气型的预报成功率

Table 2　The 24 h forecast success ratios for the five weather types of thunderstorm, precipitation, precipitating thunderstorm, non-precipitating thunderstorm and non-thunderstorm precipitation during the whole summer of 2012 (June－September) of the integrated dynamic factors-convective parameters strong convection forecasting method in the typical cities of China

	共 480 个时次	雷暴	降水	雷暴＋降水	雷暴无降水	降水无雷暴
北京	预报出现次数	115	40	19	50	1
	实际出现次数	162	66	38	124	28
	成功率	0.710	0.606	0.5	0.403	0.036
天津	预报出现次数	103	47	25	39	3
	实际出现次数	140	79	54	86	25
	成功率	0.736	0.595	0.463	0.453	0.12
南京	预报出现次数	88	33	14	31	5
	实际出现次数	121	76	51	70	25
	成功率	0.727	0.434	0.275	0.443	0.2
盐城	预报出现次数	95	44	29	25	5
	实际出现次数	112	69	50	62	19
	成功率	0.848	0.638	0.58	0.403	0.263
徐州	预报出现次数	65	29	16	35	3
	实际出现次数	92	48	31	61	17
	成功率	0.707	0.604	0.516	0.574	0.176
杭州	预报出现次数	98	52	13	55	22
	实际出现次数	165	85	53	112	32
	成功率	0.594	0.612	0.245	0.491	**0.688**
上海	预报出现次数	83	41	11	41	14
	实际出现次数	107	78	44	63	34
	成功率	0.776	0.526	0.25	0.651	0.412
温州	预报出现次数	146	85	42	45	17
	实际出现次数	181	124	86	95	38
	成功率	0.807	0.685	0.488	0.474	0.447
长沙	预报出现次数	78	54	20	30	23
	实际出现次数	82	75	36	46	39
	成功率	0.951	0.72	0.556	0.652	0.590
合肥	预报出现次数	52	38	10	20	10
	实际出现次数	52	51	14	38	37
	成功率	1	0.745	**0.714**	0.526	0.270
武汉	预报出现次数	105	67	37	31	17
	实际出现次数	123	88	62	61	26
	成功率	0.854	0.761	0.597	0.508	0.654
南昌	预报出现次数	124	56	25	52	16
	实际出现次数	135	89	62	73	27
	成功率	0.919	0.629	0.403	**0.712**	0.593
沈阳	预报出现次数	69	91	32	13	21
	实际出现次数	100	107	45	55	62
	成功率	0.69	0.850	0.711	0.236	0.339

注:数值下划线表示每列中的最低值,粗体字表示最高值。

暴、无降水雷暴、无雷暴降水5种强天气型的预报成功率,主要来关注降水雷暴、无降水雷暴和无雷暴降水3种强天气型。由表2可见对这3种小概率天气事件,此方法都有一定的预报能力。对比3种天气型,除武汉外,无降水雷暴发生的频次都要高于降水雷暴,而无雷暴降水发生的频次最低,说明中国夏季降水大部分都是伴随雷暴发生的强对流性降水,降水雷暴型最高预报成功率可达0.714,位于合肥;无降水雷暴型可达0.712,位于南昌;无雷暴降水也可达0.688,位于杭州,但杭州也是对降水雷暴预报成功率最低的城市,沈阳对无降水雷暴的预报成功率最低,而北京则对无雷暴降水预报的成功率最低。对于这些小概率事件较高的预报成功率也可能意味着较高的空报率,因而未来仍然有必要将消空技术加入到该方法中。

6 结 论

基于来自美国NCEP的GFS分析及预报场资料,将可降水量、对流有效位能、抬升指数、K指数等多个能够表征雷暴发生动力、热力环境的对流因子作为预报因子,通过费希尔判别准则及逐个引入因子法,建立集合多个对流参数的雷暴预报模型,从而进行较长时效(12—24 h)的雷暴预报。依据临界成功指数最高的原则,将成功因子逐个引入到预报模型中,并从中选取临界成功指数最高的模型作为该格点的最优预报模型。在雷暴模型区分雷暴发生与否的临界值建立上,将每一个预报值均看做可能的临界值,并比较对应的临界成功指数,最终选取指数最高的临界值作为该区域最终的预报临界值。通过该方法,不同地区所选用的对流参数有所不同,雷暴模型预报雷暴发生与否的临界值也有所不同,从而不仅能够得到较好的集合多个对流参数的雷暴区域性预报,还能有效考虑不同地区雷暴发生的地域性特点和气候背景。将建立的预报方法应用于2012年6和9月的两次强对流过程的预报中,发现雷暴预报模型较好地预报出两次过程的雷暴落区。

进一步,引入"集合动力因子强降水预报方法",考虑到"集合动力因子强降水预报方法"适合强降水的追踪与预报,而"集合对流参数雷暴预报方法"适合普通雷暴及有短时强降水、冰雹、大风等强雷暴的预报,将二者结合,建立了"集成动力因子-对流参数强对流预报方法",用于雷暴和强降水的预报,同时将降水雷暴、无降水雷暴及无雷暴降水等强天气型进行区分预报。将该方法应用于2012年6月3日的强天气预报中发现,该方法不仅能够较好地预报出较长时效的(24 h)雷暴和降水落区,对区分降水雷暴、无降水雷暴和无雷暴降水也表现出一定的能力:预报得到的雷暴落区和降水落区均与实际具有较高一致性。分别计算中国典型城市的降水和雷暴的ETS评分发现,24 h降水预报ETS评分均在0.1以上,最高可达徐州地区的0.268,最低为南京地区的0.101;雷暴预报的ETS评分较降水预报略高,均在0.12以上,最高为天津地区的0.346,最低为沈阳地区的0.123,天津同时也是雷暴临界成功指数最高和空报率最低的地区。对中国典型城市2012年降水雷暴、无降水雷暴、无雷暴降水3种强天气型的预报成功率进行分析发现,对这3种小概率天气事件,方法都有一定的反映能力,降水雷暴型最高预报成功率可达合肥的0.714,无降水雷暴型可达南昌的0.712,无雷暴降水也可达杭州的0.688。

通过该项研究,期望能够为关注中尺度天气预报的研究人员、工作在一线的预报员提供参考和工具,尤其是在一些重大活动的举行、卫星发射、飞机调度等需要较长时效天气预报的这些关乎国家和人民生活的方面得到应用,也期望能够从一定程度上进一步提高中国对突发性中尺度天气的预报能力。

参考文献

陈洪滨,朱彦良. 2012. 雷暴探测研究的进展. 大气科学,36(2):411-422. Chen H B, Zhu Y L. 2012. Review on the observation investigation of thunderstorms. Chin J Atmos Sci, 36(2): 411-422 (in Chinese)

陈明轩,俞小鼎,谭晓光等. 2004. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展. 应用气象学报,15(6):754-766. Chen M X, Yu X D, Tan X G, et al. 2004. A brief review on the development of nowcasting for convective storms. J Appl Meteor Sci, 15(6): 754-766 (in Chinese)

丁一汇,章名立,李鸿洲等. 1981. 暴雨和强对流天气发生条件的比较分析. 大气科学,5(4):387-397. Ding Y H, Zhang M L, Li H Z, et al. 1981. A comparative study on the occurrence conditions of heavy rainfall and severe convective weather. Sci Atmos Sinica, 5(4): 387-397 (in Chinese)

高守亭,冉令坤,李娜等. 2013. 集合动力因子暴雨预报方法研究. 暴雨灾害,32(4):289-302. Gao S T, Ran L K, Li N, et al. 2013. The "Ensemble Dynamic Factors" approach to predict rainstorm. Torr Rain Dis, 32(4): 289-302 (in Chinese)

郝莹，姚叶青，陈焱等. 2007. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究. 气象，33(1)：51-56. Hao Y，Yao Y Q，Chen Y，et al. 2007. Thunderstorm potential trend forecast based on convection parameters. Meteor Mon，33(1)：51-56 (in Chinese)

孔玉寿，钱建明，臧增亮等. 2010. 统计天气预报原理与方法. 北京：气象出版社，565pp. Kong Y S，Qian J M，Zang Z L，et al. 2010. Principle and Method of Statistical Weather Forecasting. Beijing：China Meteorological Press，565pp (in Chinese)

雷蕾，孙继松，魏东. 2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别. 气象，37(2)：136-141. Lei L，Sun J S，Wei D. 2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing. Meteor Mon，37(2)：136-141 (in Chinese)

雷蕾，孙继松，王国荣等. 2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. 气象学报，70(4)：752-765. Lei L，Sun J S，Wang G R，et al. 2012. An experimental study of the summer convective weather categorical probability forecast based on the rapid updated cycle system for the Beijing area (BJ-RUC). Acta Meteor Sinica，70(4)：752-765 (in Chinese)

李耀东，高守亭，刘健文. 2004. 对流能量计算及强对流天气落区预报技术研究. 应用气象学报，15(1)：10-20. Li Y D，Gao S T，Liu J W. 2004. A calculation of convective energy and the method of severe weather forecasting. J Appl Meteor Sci，15(1)：10-20 (in Chinese)

廖晓农，俞小鼎，谭一洲. 2007. 14 时探空在改进北京地区对流天气潜势预报中的作用. 气象，33(3)：28-32. Liao X N，Yu X D，Tan Y Z. 2007. Improvement of convective weather forecasting with enhanced 1400 BST sounding data. Meteor Mon，33(3)：28-32 (in Chinese)

刘健文，郭虎，李耀东等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础. 北京：气象出版社，253pp. Liu J W，Guo H，Li Y D，et al. 2005. Calculations of the Weather Analysis and Forecasting Parameters. Beijing：China Meteorological Press ，253pp (in Chinese)

彭治班，刘健文，郭虎等. 2001. 国外强对流天气的应用研究. 北京：气象出版社，414pp. Peng Z B，Liu J W，Guo H，et al. 2001. Application Research of Severe Convection Abroad. Beijing：China Meteorological Press，414pp (in Chinese)

寿绍文. 2006. 天气学分析. 北京：气象出版社，361pp. Shou S W. 2006. Weather Analysis. Beijing：China Meteorological Press，361pp (in Chinese)

孙建华，赵思雄. 2002. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究Ⅰ：引发暴雨的β中尺度对流系统的数值模拟研究. 大气科学，26(4)：541-557. Sun J H，Zhao S X. 2002. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 Record heavy rainfall of South China. PartⅠ：A numerical simulation study of meso-β convective system inducing heavy rainfall. Chin J Atmos Sci，26(4)：541-557 (in Chinese)

陶诗言，丁一汇，周晓平. 1979. 暴雨和强对流天气的研究. 大气科学，3(3)：227-238. Tao S Y，Ding Y H，Zhou X P. 1979. Research on heavy rainfall and strong convective weather. Chin J Atmos Sci，3(3)：227-238 (in Chinese)

王笑芳，丁一汇. 1994. 北京地区强对流天气短时预报方法的研究. 大气科学，18(2)：173-183. Wang X F，Ding Y H. 1994. Study on method of short-range forecast of severe convective weather in Beijing area. Chin J Atmos Sci，18(2)：173-183 (in Chinese)

王秀明，俞小鼎，朱禾. 2012. NCEP 再分析资料在强对流环境分析中的应用. 应用气象学报，23(2)：139-146. Wang X M，Yu X D，Zhu H. 2012. The applicability of NCEP reanalysis data to severe convection environment analysis. J Appl Meteor Sci，23(2)：139-146 (in Chinese)

俞小鼎，周小刚，王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报，70(3)：311-337. Yu X D，Zhou X G，Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. Acta Meteor Sinica，70(3)：311-337 (in Chinese)

曾淑玲，巩崇水，赵中军等. 2012. 动力-统计方法在 24 小时雷暴预报的应用. 气象，38(12)：1508-1514. Zeng S L，Gong C S，Zhao Z J，et al. 2012. The application of dynamical-statistical method to 24-h thunderstorm forecast. Meteor Mon，38(12)：1508-1514 (in Chinese)

张建春，王海霞，陶祖钰. 2014. 对流有效位能预报能力的统计分析. 暴雨灾害，33(3)：290-296. Zhang J C，Wang H X，Tao Z Y. 2014. Statistical analysis of predicting skill of convective available potential energy. Torr Rain Dis，33(3)：290-296 (in Chinese)

张小玲，陶诗言，张顺利. 2004. 梅雨锋上的三类暴雨. 大气科学，28(2)：187-205. Zhang X L，Tao S Y，Zhang S L. 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the meiyu front. Chin J Atmos Sci，28(2)：187-205 (in Chinese)

张小玲，陶诗言，孙建华. 2010. 基于“配料”的暴雨预报. 大气科学，34(4)：754-766. Zhang X L，Tao S Y，Sun J H. 2010. Ingredients-based heavy rainfall forecasting. Chin J Atmos Sci，34(4)：754-766 (in Chinese)

周玉淑，朱科峰. 2010. 湿大气的广义位温与干大气位温及饱和湿大气相当位温的比较. 气象学报，68(5)：612-616. Zhou Y S，Zhu K F. 2010. Comparisons between the generalized potential temperature in the moist atmosphere and the potential temperature in the dry atmosphere and the equivalent potential temperature in the saturated moist atmosphere. Acta Meteor Sinica，68(5)：612-616 (in Chinese)

Emanuel K A. 1994. Atmospheric Convection. New York：Oxford University Press，592pp

Gao S T，Wang X R，Zhou Y S. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow. Geophy Res Lett，31(12)：L12113

Johns R H，Doswell C A. 1992. Severe local storms forecasting.

Wea Forecasting, 7(4): 588-612

Obsty F P. 1992. Operations of national severe storms forecast center. Wea Forecasting, 7(4): 546-563

Ran L K, Li N. 2013a. PV-based wave-activity density and its application to tracing heavy precipitation. Meteor Atmos Phys, 123(1-2): 33-50

Ran L K, Li N, Gao S T. 2013b. PV-based diagnostic quantities of heavy precipitation: Solenoidal vorticity and potential solenoidal vorticity. J Geophys Res, 118(11): 5710-5723

Schultz D M, Schumacher P N. 1999. The use and misuse of conditional symmetric instability. Mon Wea Rev, 127(12): 2709-2733

Stensrud D J, Cortinas J V, Brooks H E. 1997. Discriminating between tornadic and nontornadic thunderstorms using mesoscale model output. Wea Forecasting, 12(3): 613-632

Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. 1998. Nowcasting thunderstorms: A status report. Bull Amer Meteor Soc, 79(10): 2079-2099