

何立富,周庆亮,谌芸,等. 国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估[J]. 气象,2011,37(7):777-784.

国家级强对流潜势预报业务进展与检验评估^{*}

何立富 周庆亮 谌芸 唐文苑 张涛 蓝渝

国家气象中心,北京 100081

提 要: 为了推动我国现阶段天气预报业务向专业化和精细化方向发展,国家气象中心自 2009 年组建了强天气预报中心并开展了国家级强对流落区潜势预报业务。开发了基于加密自动气象站 WS 报、全国闪电定位监测网、FY 系列卫星以及雷达组网等多种实况观测资料的强对流实时监测产品,制定了基于 MICAPS 3.0 业务平台的《中尺度天气分析规范》,研发了基于全球模式 T639 以及区域中尺度模式 GRAPES-RUC、WRF-EPS 等模式输出量的强对流动力热力参数的诊断分析产品及潜势预报方法,建立了国家级强对流天气实时预报业务并发布雷暴、雷雨大风和冰雹、短时强降水等分类落区预报指导产品。对 2010 年 4—9 月国家级预报产品进行的客观检验结果表明:6 小时间隔雷暴 TS 评分为 18%,短时强降雨为 2.6%,冰雹和雷雨大风为 2.1%;12 小时间隔雷暴 TS 评分为 18.4%,短时强降雨为 4.1%,冰雹和雷雨大风为 1.3%。

关键词: 强对流,重要天气报,GRAPES-RUC,客观检验

Introduction and Examination of Potential Forecast for Strong Convective Weather at National Level

HE Lifu ZHOU Qingliang CHEN Yun TANG Wenyan ZHANG Tao LAN Yu

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: To promote the process of weather forecasting to be more professional and accurate, the potential forecast for predicting severe weather area has been conducted by Severe Weather Prediction Center in NMC since 2009. Real-time products for monitoring strong convective weather based on severe weather report from automatic weather stations, observations from national lightning monitoring network, FY-series satellite and radar networking etc. have been put in use. Criterion for mesoscale weather analysis has been established in MICAPS V3.0 system. The diagnostic products of mesoscale convective system outputted by the application of T639 global model, GRAPES-RUC model and WRF-EPS model have been developed. Guiding products for predicting classified severe weather (thunderstorm, hail and gale) area have also been issued. Prediction qualities were examined and assessed from April to September in 2009. The results show that the 6-hour-interval TS scores of thunderstorm, local torrential rain, and hail and gale are 18%, 2.6%, and 2.1% separately, while 12-hour-interval TS scores for each are 18.4%, 4.1% and 1.3%, respectively.

Key words: strong convective weather, important weather report, GRAPES-RUC, objective assessment

引 言

雷暴、雷雨大风和冰雹、短时强降水等强对流天

气历时短,发展快,破坏性强,是天气预报业务的难点。传统预报方法通常基于典型个例的天气学分型,结合探空图分析来识别对流风暴系统的环境场条件。这种方法主观性强,时空分辨率低,在预报中

* 公益性(气象)行业科研专项“中尺度对流性天气诊断分析方法研究”(GYHY200906003)

2011 年 1 月 5 日收稿; 2011 年 6 月 4 日收修定稿

第一作者:何立富,主要从事天气预报技术研究,Email:helifu@cma.gov.cn

很容易出现空报和漏报。近年来我国气象综合观测体系的建设取得重大进展,中尺度气象观测站网趋于完善,地面自动气象站、多普勒天气雷达、闪电定位系统、风廓线、FY 系列卫星等非常规遥感观测资料在业务中得到普遍应用,对强对流天气实时监测和预警预报能力有明显提高^[1-3]。同时,数值天气预报的分析同化技术也明显提升,利用多普勒天气雷达资料和其他中小尺度观测资料进行数值模式的初始化使得中尺度数值预报模式对风暴系统的预报能力显著加强。部分研究工作表明^[4-8],利用高时空分辨率数值预报模式的输出产品,通过对强对流天气动力热力参数的诊断分析,结合模式输出探空图像的构建和订正,对判断强天气落区具有良好效果。强对流天气落区预报逐步由天气型预报方法向数值模式释用和物理参数诊断分析方向转变。

美国风暴预报中心(SPC)是目前世界上惟一能对全国范围的强对流天气进行警戒和展望预报的国家级预报中心。利用历史资料对 CAPE、风切变、大冰雹指数、强龙卷指数、超级单体综合指数等进行统计分析,总结出这些指数在各类强对流天气中的分布区间,并确定了进行强对流天气类型判断的阈值^[9-12]。近年来,致力于时间尺度从几十分钟到 8 天的强对流天气(龙卷、冰雹和对流性大风)的展望和警戒预报、特别是 1~3 天强对流危险等级展望预报、1~3 天强对流概率展望预报以及 4~8 天强对流展望预报等。

为了推进我国天气预报业务向专业化方向发展,国家气象中心于 2009 年正式组建了强天气预报中心,负责开展国家级中尺度天气分析和强对流天气潜势预报业务。经过近 2 年的业务实践,中尺度天气分析规范已推广至全国,发挥了国家级技术辐射的牵引作用;强对流天气实时监测和预报技术支撑取得了明显进展,国家级强对流天气预报业务“中尺度天气分析”、“强对流天气落区预报”业务技术路线已通过专家论证^[13-15]。

本文在回顾近 2 年国家级强对流天气潜势预报业务进展基础上,重点介绍中央气象台强天气实况监测产品、强对流落区分类预报产品以及基于数值预报输出产品的强对流诊断分析技术和潜势预报方法的开发与应用,并对国家级强对流预报指导产品进行了综合检验与评估,以期对我国强对流天气预报能力的现状有清晰的认识。

1 国家级强对流天气潜势预报业务的进展

1.1 中尺度天气分析的业务化

中尺度天气分析是指通过对各种高空和地面观测资料、雷达和卫星等遥感探测资料、数值预报输出资料等分析中尺度对流系统及其发生发展的环境场条件。一般而言,中尺度天气分析通常包括三个部分:天气图分析、探空图分析和中尺度对流系统分析。天气图分析是指通过对地面、高空以及自动站观测资料的分析和数值预报相关参量的分析,寻找中尺度对流系统发生发展的各种环境场条件,以确定强对流天气发生的潜势(图 1);探空分析则利用探空资料,侧重分析中尺度对流系统发生发展的局地垂直环境场特征,以在短时效内确定中尺度天气发生的潜势;中尺度对流系统分析则主要利用雷达和卫星等遥感探测资料对中尺度系统的结构、发生发展进行分析,以判断强对流天气发生的特定区域和确切时间。

2009 年,国家气象中心开始组织《中尺度天气分析技术规范》的制订,在将近 1 年时间的业务试验中多次与相关试点的省台进行讨论,不断修改和完善;2010 年,《中尺度天气分析技术规范》在全国推广,发挥了国家级技术辐射和牵引作用。2010 年 4 月 1 日起,中央气象台正式开展了中尺度天气分析业务,每天利用实况观测资料和数值预报产品(如 T639 和 GRAPES-RUC)对强对流天气产生的条件——湿度条件、抬升条件、不稳定条件进行综合分析,形成指导产品“强对流天气分析”,通过网站的形式下发给省级台站预报员参考。

1.2 强对流实时监测产品的开发

为满足业务需求,基于常规地面观测和加密自动气象站(2615 站)重要天气报实况资料、中国气象局大气探测中心雷电监测网(图 2a)以及多普勒天气雷达组网、风云卫星系列 FY-2D 与 FY-2E 双星 15 分钟间隔等多种遥感观测资料,国家气象中心于 2009 年先后开发出了逐小时短时强降水($1\text{ h} \geq 20\text{ mm}$)、雷雨大风($\geq 17.1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、冰雹($d \geq 2.5\text{ mm}$)和逐小时或 10 分钟闪电频数以及卫星云图 MCS 自动识别、雷达资料风暴系统自动识别、多

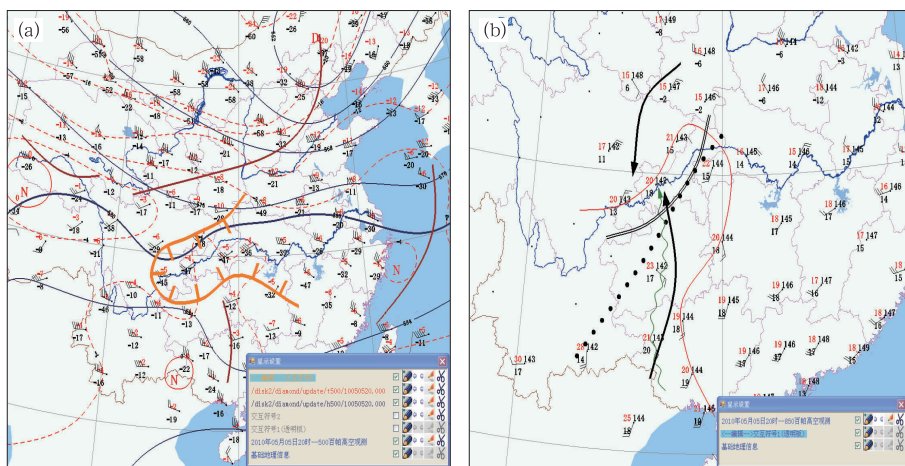


图 1 2010 年 5 月 5 日 20 时实况资料的中尺度分析

(a) 500 hPa (图中粗黄线区为干区); (b) 850 hPa (红线为等温线, 黑点线为暖脊, 绿色波浪线代表显著湿区, 双实线为切变线, 黑色带箭头为显著流线)

Fig. 1 Mesoscale weather analysis at 20:00 BT 5 May 2010

(a) is 500 hPa, thick yellow line stands for dry area; and (b) is 850 hPa, red line for isotherm, black dot line for warm ridge, green wave line represents a remarkable wet area, double solid line for shear line, black with arrows for significant streamline

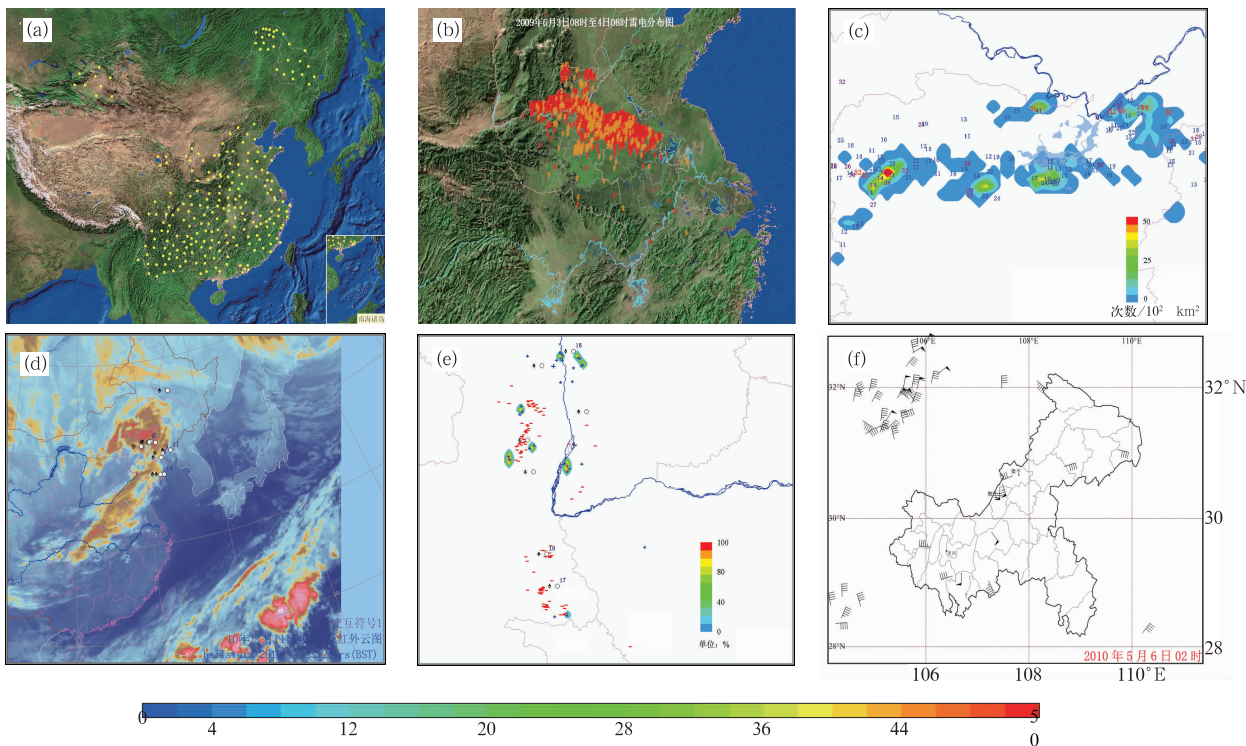


图 2 强对流实时监测产品

(a) 2009 年全国雷电探测网; (b) 2009 年 6 月 3 日 08 时—4 日 08 时雷电监测实况图(红色为正闪, 黄色为负闪); (c) 2010 年 6 月 19 日 13 时 1 h 闪电频数与降雨量叠加(闪电频数值如色标所示, 单位: 次数/10² km²); (d) 2010 年 11 月 11 日 4 时 FY-2E 与强对流实况图; (e) 2010 年 6 月 3 日 13:50 10 分钟正闪比例(阴影)与冰雹实况; (f) 2010 年 5 月 6 日 02 时 8 级以上雷暴大风实况

Fig. 2 Real-time surveillance products of strong convective weather

(a) national lightning monitoring network in 2009; (b) lightning surveillance from 08:00 BT 3 June to 08:00 BT 4 June 2009 (red is positive flash, yellow for negative flash); (c) 1-hour accumulation of rainfall and lightning frequency at 13:00 BT 19 June 2010 (unit: frequency/10² km²); (d) FY-2E satellite picture and occurrence of strong convective weather at 04:00 BT 11 November 2010; (e) the proportion of positive flash in 10 min (shaded) and hail occurrence at 13:50 BT 3 June 2010; (f) above 8-level wind at 02:00 BT 6 May 2010

种资料叠加显示等实况监测产品,形成强对流实时监测的图形和文字产品(如图 2b~2f);并针对逐月和逐旬雷暴、闪电活动、短时强降水、雷暴大风、冰雹的时空分布,每月强对流天气过程实况与灾情统计,编辑每月强对流天气监测公报。

1.3 强对流天气潜势预报业务产品

在 2009 年业务试验工作基础上,2010 年 4 月 1 日起,中央气象台强对流天气落区潜势预报时效延长至 3 天,同时 24 小时内,每天 3 次连续滚动发布雷暴、雷雨大风和冰雹、短时强降水分类落区预报;48~72 小时,制作雷暴和强对流天气落区潜势预报(图 3)。首次开展 6 小时短时预报,强对流天气落区预报的精细化程度有所提高。2010 年 8 月 1 日起,中央气象台“中尺度天气分析”和“强对流落区预报”业务产品正式下发省级台站。

2 国家级强对流天气潜势预报业务的技术支撑

2.1 强对流天气动力热力参数特征分析和潜势预报方法研究

国家气象中心具备利用卫星、雷达资料以及结合中尺度同化分析系统开展强对流短时临近预报业务的技术储备,但业务分工上主要负责 6 小时以上时效的强对流警戒和展望。主要是通过对多种实况观测资料、数值预报模式资料等进行中尺度诊断分析,来开展强对流潜势预报业务。强对流潜势预报技术基本采用以下技术路线,见图 4。

在对实况观测资料和数值预报输出产品进行主

观的中尺度天气分析基础上,为了提高对中尺度对流系统的动力热力条件诊断分析的客观化和精细化水平,强化强对流天气潜势预报的技术支撑,强天气预报中心技术支持科分别针对全球预报模式(T639 和 NCEP)以及中尺度模式(GRAPES-RUC 和 WRF-EPS)等数值预报模式输出量,相继开发完成了 20 余种表征强对流动力热力特征的敏感物理参数客观诊断分析产品。基于 T639 全球模式的动力热力参数时间分辨率为 3 h,空间分辨率 $0.28125^{\circ} \times 0.28125^{\circ}$;国家气象中心研发的 GRAPES 非静力中尺度模式具有良好性能和发展潜力,在此基础上建成了快速更新循环的 3DVAR 中尺度同化与预报业务系统(简称 RUC)。GRAPES-RUC 模式系统除同化常规全球交换资料以外,还对地基 GPS 可降水量观测、自动气象站观测等高时空分辨率的多种非常规观测资料进行同化,为预报雷暴系统的发展消亡提供有力的初值支持。基于 GRAPES-RUC 的 20 种强对流物理参数时间分辨率为 3 h,空间分辨率 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ 。在 MICAPS 业务工作平台上可实时调用的主要敏感动力热力参数包括:强天气威胁指数(SWEAT)、对流有效位能、对流抑制能量、抬升指数、抬升凝结高度、总指数、 0°C 层高度、 -20°C 层高度、风暴相对螺旋度、3 小时 $0\sim 3\text{ km}$ 风暴相对螺旋度变化、 $0\sim 1\text{ km}$ 风切变、 $0\sim 3\text{ km}$ 风切变、 $0\sim 6\text{ km}$ 风切变、地面锋生、 D_{703} 温度直减率、 D_{855} 温度直减率、反射率因子等。

在为强对流预报业务开发上述敏感物理参数的同时,强天气预报中心在强对流潜势分类预报技术方面的研究也取得了阶段性进展。利用大量典型个例的诊断分析结果,通过对我国不同地区强对流天气区域性特征的分析,提取中尺度对流系统发生发

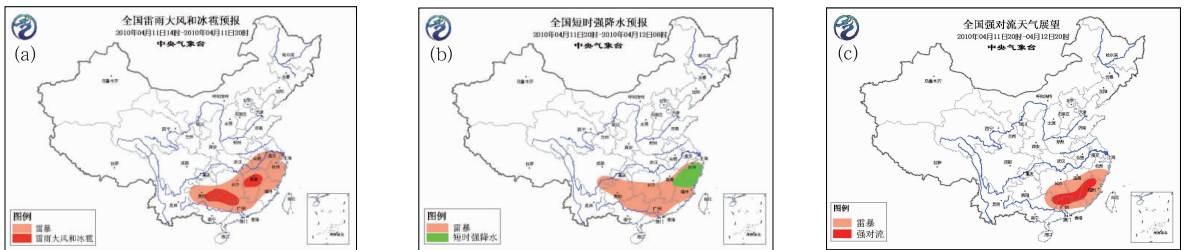


图 3 中央气象台强对流天气落区分类预报产品

(a) 雷雨大风和冰雹预报; (b) 短时强降水预报; (c) 强对流天气展望

Fig. 3 NMC classificatory products for strong convective weather area prediction

(a) thunderstorm gale and hailstone forecast, (b) short-time severe precipitation forecast, and (c) strong convective weather projection

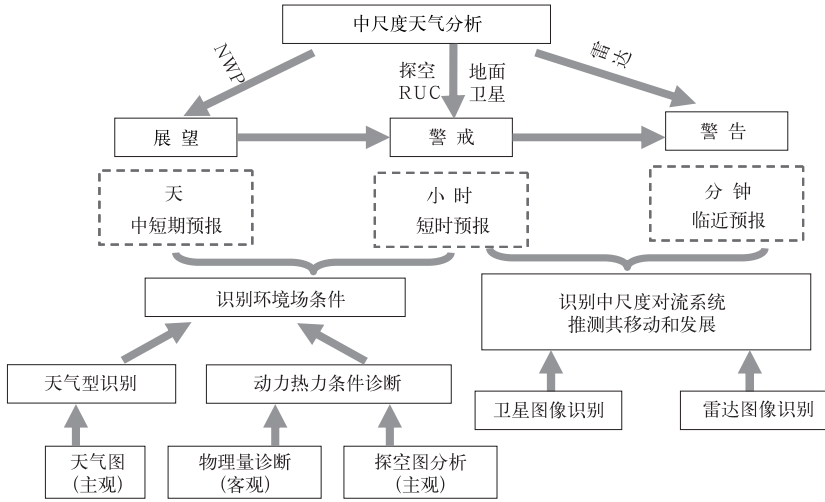


图 4 强对流潜势预报技术路线

Fig. 4 Technical flow chart for severe convective weather potential forecasts

展相同或相近的动力热力特征,采用基于统计理论、叠套法和集合预报等多种诊断分析技术,构建不同地区强对流天气潜势预报指数,为冰雹、对流性大风、短时强降水等落区短期潜势预报业务提供客观方法和技术支持。

例如,对近 8 年华北地区强对流天气敏感物理参数的统计分析显示,BCAPE、0~3 km 风暴相对螺旋度、K 指数、强天气指数(SWEAT)、1~3 km 垂直风切变、可降水量、 $T_{850-500}$ 、 $T_{d850-500}$ 和桑拿指数(SAUD)是华北地区强对流天气的敏感物理参数。

在充分考虑华北地区强对流天气发生发展的物理机制和阈值分析基础上(图 5),选取 3 个敏感物理因子:对流有效位能(CAPE),对流抑制能量(CIN)和桑拿指数(SAUI),可以构建华北地区强对流风险指数。

针对冰雹过程的阈值分析方法如下:首先对 2001—2008 年华北地区冰雹过程进行统计,主要为:发生时间、冰雹直径等;接着利用 NCEP 资料计算每次过程发生前 3 个敏感因子的大小,制作物理参数量值大小与冰雹直径分布的点聚图(图 5a, 5c 和 5e);再根据点聚图分布计算物理参数分布频次,可得出其阈值分布区间及大概率区间(图 5b, 5d 和 5f,柱状标识)。

利用 B08-RDP 区域集合预报产品可构建如下强对流天气风险概率指数:

$$\text{prob}_{\text{severe-weather}} = \text{prob}_{\text{CAPE}} \times \text{prob}_{\text{MCIN}} \times \text{prob}_{\text{SAUI}}$$

该风险概率指数可为强对流天气落区潜势概率预报提供参考依据,但由于指数构建中敏感因子少,

物理意义亦不明确,在业务应用中仍需不断改进。与美国强天气预报中心多种客观技术方法以及构建的具有明确物理机制、动力热力特征融合的大风指数、冰雹指数和龙卷指数相比,仍存在不小差距。进一步集中国内本领域专家联合攻关,加强强对流分类预报专项技术的研发是强天气预报中心未来的重点任务之一。

2.2 探空构建技术

目前我国共有 120 个探空站,每天分别在 08 和 20 时进行两次高空探测,以获取高空大气温度、湿度、气压和风向风速资料,其时空分辨率都不能满足强对流预报业务需求。

为了方便利用探空资料,强天气预报中心在完善探空曲线 $T-\ln p$ 物理量计算准确性的同时,对探空产品进行了二次开发,实现探空分析产品 CAPE, KI, BLI, PWAT 等强对流参数水平分布 1 天 2 次(08/20)在 MICAPS 业务工作平台上实时显示。

为了弥补常规探空观测时空分辨率的不足,强天气预报中心引进了探空构建技术。利用每天 3 h 间隔的地面观测资料,参考临近探空站高空观测资料,假定高空气象要素变化较小,根据最新地面观测的温度湿度等数据来修正 08 时或 20 时的探空观测数据,构建 11、14、17 时以及 23、02、05 时的探空资料,并计算出较合理的对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)等物理量,完成全国一般站以上的地面站(2615 站)探空自动构建产品的开发(图 6)。

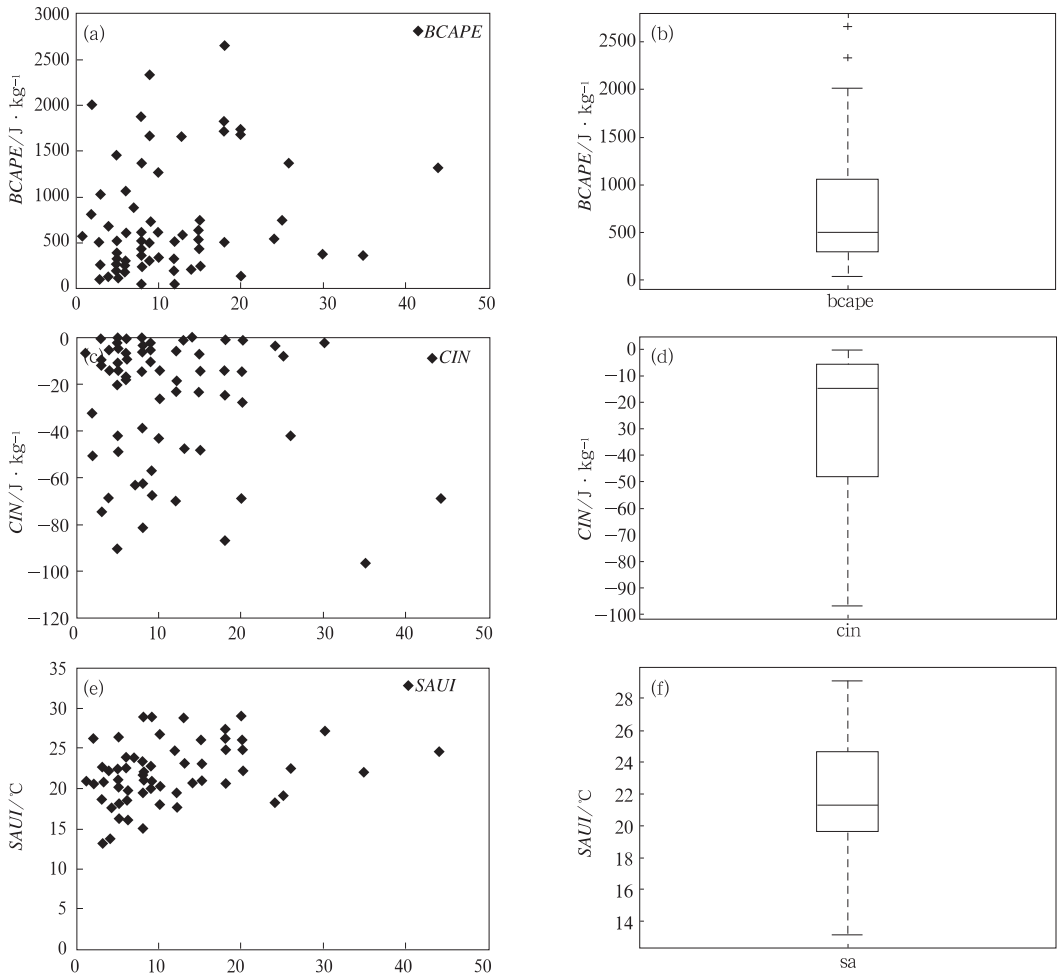


图 5 敏感物理参数的阈值分析

(a), (c), (e) 点聚图; (b), (d), (f) 阈值分布及大概率区间

Fig. 5 Threshold analysis of physical parameters. (a), (c), (e) scatter diagrams, (b), (d), (f) threshold distributions and great probability intervals

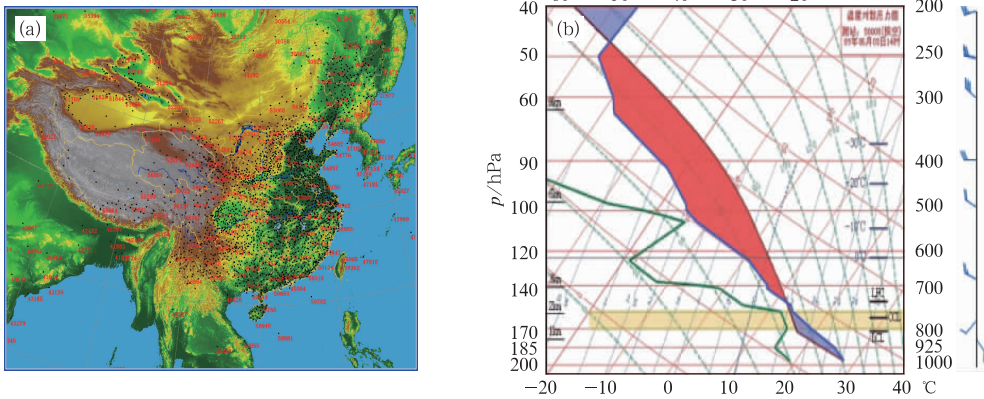


图 6 (a) 全国常规探空站与一般地面站分布; (b) 2009 年 6 月 3 日 14 时商丘(58005) 探空构建图(由徐州 08 时探空与商丘站 14 时地面观测构建)

Fig. 6 (a) The distribution of national conventional radiosonde stations and general ground stations, (b) the sounding chart at 14:00 BT 3 June 2009 in Shangqiu, constructed by the sounding at 08:00 BT in Xuzhou and 14:00 BT in Shangqiu

3 国家级强对流天气落区潜势预报检验评估

对 2009 年 4—9 月主要强对流天气过程 24 小时落区预报进行了主观综合检验,结果显示(图 7),对雷雨大风和冰雹过程,预报效果好的个例占总数的 5%,较好为 49%,对 46% 的个例预报效果不理想;而短时强降水为主的强对流过程,预报效果好于雷雨大风和冰雹为主的过程,预报好及较好的个例占总数的 63%;一般而言,以风雹为主的强对流天气过程中,伴随明显降水的过程预报效果好于降水不明显的风雹过程;南方的强对流过程的预报好于北方强对流的预报,但空报率还是比较大。

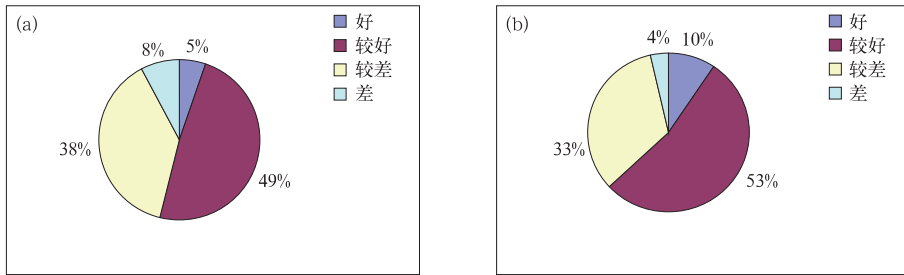


图 7 2009 年 4—9 月风雹过程(a)和短时强降水过程(b)主观预报检验结果
Fig. 7 Test results of subjective forecast on hailstorm weather (a) and torrential rain (b) from April to September in 2009

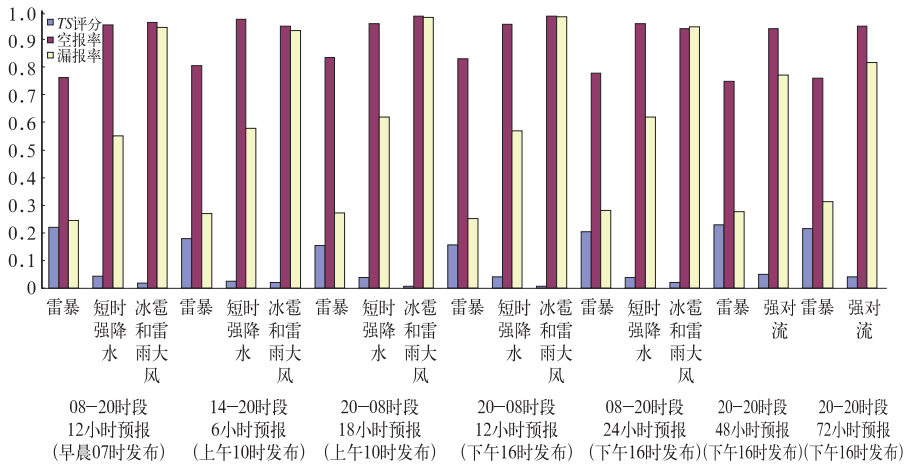


图 8 2010 年 4—9 月中央气象台强对流分类预报产品 TS 评分
Fig. 8 TS scores of classificatory forecast products for predicting strong convective weather area from April to September 2010 in NMC

可见,目前我国国家级强对流潜势业务预报水平仍然偏低,总体水平不及暴雨与大暴雨预报能力,特别是雷雨大风和冰雹的 TS 评分仅为 1.3%~2.1%。强对流业务预报产品精细化程度严重不足,与国外先进水平差距明显。主要瓶颈为:(1)新型遥感观测业务建设相对滞后,导致新资料在强对流天

采用严格“点对点”(评分站点包括全国基准站、基本站和一般站)客观评分方法,对 2010 年 4—9 月中央气象台强对流分类预报产品进行了定量检验,结果表明,24 小时预报,6 小时间隔的雷暴 TS 评分为 18%,短时强降雨为 2.6%,冰雹和雷雨大风为 2.1%;12 小时间隔的雷暴 TS 评分为 18.4%,短时强降雨为 4.1%,冰雹和雷雨大风为 1.3%;48 小时预报,24 小时间隔的雷暴 TS 评分为 23%,强对流落区(雷雨大风、冰雹和短时强降雨)评分为 5%;72 小时预报,24 小时间隔的雷暴 TS 评分为 21%,强对流落区(雷雨大风、冰雹和短时强降雨)评分为 4%。各类预报偏差,主要是空报率大,而对于冰雹和雷雨大风以及 48 和 72 小时的强对流落区预报,漏报率也很大(见图 8)。

气预报中的分析和应用水平不高。例如,我国多普勒天气雷达网、闪电定位观测网最近两年才相对完善,而风廓线雷达布网、GPS 观测网仍在发展或规划中;(2)对强对流天气发生机制缺乏深入理解和认识,对各类强对流天气过程的研究仍处于低水平,缺少主要天气系统空间配置关系、对流天气落区与动

力热力参数叠套的预报概念模型;(3)缺乏方便快捷的强对流天气实时监视平台和集成多种观测工具的资料分析平台,对基于雷达和卫星资料等强对流风暴的识别、跟踪预报以及定量降水估测等技术方法的研发投入不足;(4)在潜势预报技术支撑方面,缺乏有效的中尺度天气分析技术。对历史个例库进行系统而细致的分析,从而提炼和构建能有效表征对流性质的物理参数与预报指标是惟一可行的途径;(5)雷达、卫星、GPS、自动站、风廓线与闪电定位等多种观测资料缺乏有效的融合和集成,对多种非常规观测资料的融合分析和变分同化技术尚处在起步阶段,缺乏足够的技术支持为中尺度数值预报模式提供更为准确、包含丰富中尺度信息的初始场。

4 总结与讨论

本文回顾了近 2 年国家强对流天气预报业务方面取得的进展,重点介绍了中央气象台强天气实况监测产品和强对流落区分类预报产品以及基于数值预报模式输出产品的强对流诊断分析技术和预报方法的开发与应用,并对国家级强对流预报指导产品进行了综合检验与评估。主要表现在以下几方面。

(1) 开发了基于加密自动气象站重要天气报、全国闪电定位监测网以及多普勒天气雷达组网、风云卫星系列 FY-2D 与 FY-2E 双星 15 分钟间隔等多种遥感观测资料的强对流实时监测产品。

(2) 制定了基于 MICAPS 业务平台的中尺度天气分析规范,开展了包含天气图分析、探空图分析和中尺度对流系统分析等构成的中尺度天气分析业务;建立了国家级强对流天气实时预报业务流程并发布雷暴、雷雨大风和冰雹、短时强降水等分类落区预报的指导产品。

(3) 开发了基于全球数值预报模式 T639、NCEP 以及区域中尺度模式 GRAPES-RUC、WRF-EPS 等模式输出量的多种强对流物理参数的诊断分析产品;引进了探空构建技术,利用每天 3 小时间隔的地面观测资料,参考临近探空站高空观测资料完成了全国一般站以上的地面站(2615 站)探空自动构建产品的研发;在强对流潜势分类预报技术方面的研究也在逐步深入,部分研发工作取得了阶段性进展。

(4) 对 2010 年 4—9 月国家级预报产品进行的综合检验结果表明:6 小时间隔雷暴 TS 评分为 18%,短时强降雨为 2.6%,冰雹和雷雨大风为 2.1%;12 小时间隔雷暴 TS 评分为 18.4%,短时强

降雨为 4.1%,冰雹和雷雨大风为 1.3%。

通过本文的工作,以期对我国强对流天气预报能力的现状有清晰的认识。现阶段我国强对流天气业务专业化发展处在起步阶段,无论预报时效、预报准确率和技术支撑能力等与发达国家相比仍存在不小差距。在预报技术研发方面,利用历史资料提取敏感动力热力因子,通过统计分析,总结出这些指数在各类强对流天气中的分布区间,并确定进行强对流天气类型判断的阈值,从而构建具有明确物理意义并反映强对流本质特征的冰雹指数、大风指数和超级单体综合指数等将是一项巨大的挑战。进一步整合国内本领域专家联合攻关,开展强对流分类预报专项技术的研发是强天气预报中心未来的重点任务之一。

参考文献

- [1] 秦丽,李耀东,高守亭,等.北京地区雷暴大风的天气—气候学特征研究[J].气候与环境研究,2006,11(6):754-762.
- [2] 何立富,陈涛,湛芸,等.大气探测资料在中尺度暴雨中的分析和应用[J].应用气象学报,2006,17(suppl.):88-97.
- [3] 金永利,张蕾.北京地区一次降雪过程和冰雹微物理特征[J].气象,2002,28(1):18-25.
- [4] 王华,孙继松,李津,等.2005 年北京两次强冰雹天气的对比分析[J].气象,2007,33(2):49-56.
- [5] 刘还珠,王维国,邵明轩,等.西太平洋副热带高压影响下北京区域性暴雨的个例分析[J].大气科学,2007,31(4):727-734.
- [6] 梁爱民,张庆红,申红喜,等.北京地区雷暴大风预报研究[J].气象,2006,32(11):73-80.
- [7] 何立富,陈涛,周庆亮,等.北京“7.10”暴雨 β -中尺度对流系统分析[J].应用气象学报,2007,18(5):655-665.
- [8] 陈艳,寿绍文,宿海良.CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用[J].气象,2005,31(10):56-60.
- [9] Benjamin S G, D\v{e}v\{e}nyi D, Weygandt S S, et al. An hourly assimilation-forecast cycle[J]. Mon Wea Rev, 2004, 132:495-518.
- [10] Doswell C A III, Rasmussen E N. The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations[J]. Wea Forecasting, 1994, 9:625-629.
- [11] Rotunno R. The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics[J]. J Atmos Sci, 2000, 57:1452-1472.
- [12] 陈德辉,沈学顺.新一代数值预报系统研究进展[J].应用气象学报,2006,17(6):773-777.
- [13] 郑永光,张小玲,周庆亮,等.强对流天气短时临近预报业务进展与挑战[J].气象,2010,36(7):33-42.
- [14] 张小玲,张涛,刘鑫华,等.中尺度天气的高空地面综合图分析[J].气象,2010,36(7):143-150.
- [15] 周庆亮.美国强对流预报主观产品现状分析[J].气象,2010,36(11):95-99.