

赵培娟, 吴蓁, 郑世林, 等. 河南省强对流天气诊断分析预报系统[J]. 气象, 2010, 36(2): 33-38.

河南省强对流天气诊断分析预报系统^{* 1}

赵培娟 吴 蓁 郑世林 范学峰 李朝兴

河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 强对流预报是天气预报的难点, 为了提高预报强对流、特别是预报区域性强对流天气的预报能力, 应用河南省 1995—2004 年的气象观测资料作分析样本, 并计算多个大气动力和热力学参数。经过统计分析、诊断分析, 选择预报能力强、指示性好的大气动力或热力学参数作为强对流天气的预报因子, 采用加权集成建立预报方程。应用计算机技术自动实现从数据采集、物理参数计算、预报因子临界值判别、诊断预报方程运算, 到以 MICAPS 图形方式输出预报结果, 建立了河南省区域强对流天气预报系统。该系统为预报员提供了一种科学客观的参考依据, 在近两年的业务运行中取得了比较理想的预报效果, 提升了河南省强对流天气的预报能力。

关键词: 强对流, 动力参数, 热力参数, 诊断分析, 预报系统

Diagnostic Analysis and Forecasting System of the Severe Convective Weather in Henan Province

ZHAO Peijuan WU Zhen ZHENG Shilin FAN Xuefeng LI Chaoxing

Meteorological Observatory of Henan Province, Zhengzhou 450003

Abstract: Severe convection is a difficult problem in the weather forecast. For the purpose of increasing the forecasting ability of severe convective weather, especially the local severe convective weather, we have calculated lots of dynamical and thermal parameters by using the analysis model of meteorological observing data from 1995 to 2004 in Henan Province. By statistic and diagnostic analyses we chose better atmospheric dynamical or thermal parameters of forecasting ability and indexes as severe convective forecasting predictors, and then established a forecasting equation by using weighted integrating. We applied computer technology to realize auto-collecting data, calculating physical parameters, distinguishing threshold value of predictor and operating diagnostic forecasting equation to output forecast conclusions by means of MICAPS figure at last. Based on these we have built the forecasting system of local severe convective weather of Henan. This system has offered a scientific and objective reference for the forecasters and gotten quite perfect predicting effect in the operational running in the latest two years, thus lifted the forecasting ability of severe convective weather in Henan.

Key words: severe convection, dynamical parameters, thermal parameters, diagnostic analysis, forecasting system

引言

强对流天气是河南省春夏发生频率较高的灾害

性天气之一, 其中冰雹、雷雨大风和短时暴雨是最常见的三种天气现象。随着社会经济的快速发展, 强对流天气所带来的危害会更严重。因此加强强对流天气预报技术的研究, 建立预报方法或预报系统, 提

* 2007 年度公益性行业(气象)科研专项 GYHY(QX)2007-6-12 资助

2008 年 2 月 20 日收稿; 2009 年 11 月 18 日收修定稿

第一作者: 赵培娟, 主要从事短期预报业务. Email: juanzi2064@126.com

高河南省强对流天气的预报能力,是十分必要的。长期以来国内外气象学者对强对流天气的产生机制和预报方法进行了许多有意义的探索。彭治班等^[1]研究指出,在对流活动中热力不稳定决定了对流发展的强度,而动力作用对触发对流起重要作用。许多人应用诊断分析来探讨强对流的天气特点、物理特征以及发生的机理。如施望芝等^[2]分析了 NWP 产品在强对流天气诊断分析中的应用,得出了强对流天气落区、落点及降水性质与各要素之间预报场和值的关系。许爱华等^[3]对江西出现的 11 次强对流天气过程的热力和动力条件进行了合成诊断分析,总结出暖区强对流发生发展的形势背景、热力、动力、水汽条件。曹晓岗等^[4]对强暴雨过程的热力和动力条件进行诊断分析,提出预报着眼点。刘贵萍^[5]应用客观诊断分析方法对贵阳一次强对流降水进行诊断分析,得出强对流发生的物理条件。为了进一步说明强对流天气发生、发展的环境,新的对流参数不断被提出并应用于研究和预报业务。李耀东等^[6]分析了各种动力、能量参数在强对流应用中的状况及业务预报中应注意的问题。郝莹等^[7]、陈艳等^[8]、符长锋等^[9]分别对对流参数在雷暴潜势预报及在大暴雨中的扩展应用方面进行了研究。一些预报方法或预报系统也陆续建立。李耀东等^[10]以 MM5 和 T106 模式产品综合多指标叠套建立了强对流天气落区预报方法。杜秉玉等^[11]应用中尺度模式输出产品、雷达、云图、自动雨量资料结合预报员经验,建立了上海地区强对流天气短时预报系统。

关于强对流的研究和预报方法虽有一些,但尚不能满足各地的需要。由于受地域等因素的影响,不同区域强对流产生的条件会有差异。因此探讨河南省强对流天气客观预报方法是十分必要的。应用近 10 年河南省气象观测站的探空资料计算了 40 多个大气热力和动力参数,通过对这些参数进行检验和诊断分析,建立河南省区域强对流天气预报系统。

1 资料与样本

根据 1995—2004 年 5—9 月河南省 118 个气象站的观测资料,确定强对流天气样本。观测站出现冰雹或报表备注中有冰雹记录的作为一个冰雹样本;观测站出现 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或风自记中出现 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 记录(即 7 级以上大风)定为一个大风样本;观测站满足 R_{1h} (1 小时雨量) $\geq 20 \text{ mm}$ 作为一个短

时暴雨样本。

普查 1995—2004 年 10 年间的气象资料,统计满足以上标准的个例,并经过点聚分析,确定出河南省区域性冰雹、大风和短时暴雨的样本标准。即:若相邻 5 站以上出现冰雹,或有 3 站连片或连线出现冰雹,确定为一次区域性冰雹,10 年间共有样本 22 个。某片区域内有较为集中的 6 站出现 7 级以上大风,确定为一次区域性大风,10 年间共有样本 40 个。满足在某片区域内有 8 站连片出现短时暴雨,确定为一次区域性短时暴雨,10 年间共有样本 54 个。

用于强对流天气分析的大气动力、热力学参数共有 46 个,略去常用参数,其他参数如下:大气排熵指数、高低空湿熵差动平流、高低空热成平流最大不稳定能量变率、条件-对流稳定度指数、200~700 hPa 非地转风涡度差值、700~300 hPa 差动涡度平流、边界层上部平均广义位温的高熵舌、边界层上部广义位温的高熵平流、风暴风力热力学估算、0℃层与 570 hPa 气压差、中下层水汽比、最有利抬升指数。

为了诊断分析的方便和分县预报的需要,首先应用 Cressman 逐步订正法^[12]将探空报插值到 $70 \text{ km} \times 70 \text{ km}$ 的正方形网格点上,Cressman 逐步订正法是一种距离权重法, R 为观测站到网格点之间的距离, R_1 为搜索半径,权重函数为 $W_i = (R_1^2 - R^2)/(R_1^2 + R^2)$ 。计算出各网格点上的物理量值后,再采用二元三点插值方法将计算所得到的各个物理量值插值到河南省 118 个县站。即设给定的矩形区域上的 $n \times m$ 个节点在两个方向上的坐标分别为 $x_0 < x_1 < x_2, \dots, < x_{n-1}, y_0 < y_1 < y_2, \dots, < y_{m-1}$, 相应的函数值为: $Z_u = Z(x_i, y_j)$, $i = 0, 1, \dots, n-1$, $j = 0, 1, \dots, m-1$, 选取最靠近插值点 (u, v) 的三个节点,应用二元三点插值公式

$$Z(x, y) = \sum_{i=p}^{p+2} \sum_{j=q}^{q+2} \left(\prod_{\substack{k=p \\ k=i}}^{p+2} \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \right) \left(\prod_{\substack{l=p \\ l=j}}^{q+2} \frac{y - y_l}{y_j - y_l} \right) Z_u$$

即可得到插值点 (u, v) 处的近似值。

2 动力、热力学参数的诊断分析

区域性强对流天气都是在适合其发生发展的大气环境中产生的,有其特定的环流背景,在一些物理量场上会有相应的反映。通过对强对流天气落区及其周围物理量场特征及变化的诊断分析,可确定不

同物理参数对强对流天气的预报能力。

2.1 物理参数预报能力的检验及预报因子确定

将每一个区域强对流样本,与其出现前 36~12 小时的物理量(动力、热力学参数)场相对应,逐个分析物理参数的空间分布特征与 3 种强对流天气落区

的对应关系,从中选出对某一种强对流天气落区有指示性的物理量。统计分析结果表明有 17 个参数对冰雹、10 个参数对雷雨大风、11 个参数对短时暴雨的落区预报能力较强、指示性好,确定为预报因子(表 1、表 2、表 3)。

表 1 冰雹预报因子、临界值与权重系数

Table 1 Hail forecasting factor, thresholds and weighting coefficients

物理量名称	物理量单位	临界值		权重系数	
		20:00	08:00	20:00	08:00
大气排熵指数	$10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -5	≤ -10	3	1
高低空湿熵差动平流	$10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -6	≤ -9	1	3
高低空热成平流最大不稳定能量变率	$10^{-2} \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -35	≤ -40	1	2.5
条件-对流稳定度指数(CCI)	K	≤ -10	≤ -9	2.5	2
SWEAT 指数	/	≥ 100	≥ 129	1	2.5
低层水平螺旋度(1000~700 hPa)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^2$	≥ 58	≥ 58	4	2.5
风的垂直切变(850~500 hPa)	$10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	≥ 18	≥ 17	2.5	2.5
1000 hPa 高度梯度	$10^{-5} \cdot \text{gpm} \cdot \text{m}^{-1}$	≥ 6	≥ 6	3	1
风暴风力热力学估算	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	≥ 47	≥ 47	2	2
0 °C层与 570 hPa 气压差	hPa	≥ 20	≥ 20	3	3.5
中下层水汽比(QI)	/	≥ 5	≥ 5	3	2.5
边界层上部平均广义位温的高熵舌	K	≥ 95	≥ 95	2	1.5
低空平均水汽通量(1000~550 hPa)	$10^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	≥ 3	≥ 3	1	2
低空平均水汽通量散度(1000~600 hPa)	$10^{-9} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ 0	≤ 0	2.5	1.5
低空平均 θ_{se}	K	≥ 320	≥ 320	2	2
最(大)有利抬升指数(BLI)	°C	≥ 3	≥ 3	2	1.5
850~500 hPa V 分量垂直切变	$10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	≥ 12	≥ 12	2	1.5

表 2 大风预报因子、临界值与权重系数

Table 2 Gale forecast factor, thresholds and weighting coefficients

物理量名称	物理量单位	临界值		权重系数	
		20:00	08:00	20:00	08:00
大气排熵指数	$10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ 0	≤ 0	3	2
高低空湿熵差动平流	$10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -10	≤ -10	1.5	1.5
高低空热成平流最大不稳定能量变率	$10^{-2} \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -60	≤ -50	2	2
条件-对流稳定度指数(CCI)	K	≤ -120	≤ -90	4	3
条件-对流稳定度指数(CCI)	K	≤ -9	≤ -10	2.5	3
SWEAT 指数	/	≤ -26	≤ -26	4	4
SWEAT 指数	/	≥ 200	≥ 140	4	2
SWEAT 指数	/	≥ 280	≥ 280	4	4
低层水平螺旋度(1000~700 hPa)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^2$	≥ 30	≥ 30	2.5	2
低层水平螺旋度(1000~700 hPa)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^2$	≥ 65	≥ 65	4	4
风的垂直切变(850~500 hPa)	$10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	≥ 20	≥ 20	2.5	2.5
风的垂直切变(850~500 hPa)	$10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	≥ 40	≥ 35	4	4
1000 hPa 高度梯度	$10^{-5} \cdot \text{gpm} \cdot \text{m}^{-1}$	≥ 6	≥ 6	1.5	2
风暴风力热力学估算	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	≥ 40	≥ 40	2	2
1000~700 hPa 差动涡度平流	10^{-10}s^{-2}	≤ -20	≤ -20	2.5	2.5
1000~700 hPa 差动涡度平流	10^{-10}s^{-2}	≤ -33	≤ -33	4	4

表 3 短时暴雨预报因子、临界值与权重系数

Table 3 Short-term rainstorm forecast factor, thresholds and weighting coefficients

物理量名称	物理量单位	临界值		权重系数	
		20:00	08:00	20:00	08:00
大气排熵指数	$10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -10	≤ -10	3.5	3.5
高低空湿熵差动平流	$10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -10	≤ -10	2.5	2.5
		≤ -15	≤ -20	4	4
高低空热成平流最大不稳定能量变率	$10^{-2} \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -10	≤ -10	2	2.5
		≤ -40	≤ -40	4	4
条件-对流稳定度指数(CCI)	K	≤ -8	≤ -8	1	2
		≤ -12	≤ -14	3.5	3
风的垂直切变(850~500 hPa)	$10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	≥ 20	≥ 20	1	1
		≥ 33	≥ 24	3	4
可降水 24 小时变量	mm	≥ 15	≥ 15	7	7
低层水平螺旋度(1000~700 hPa)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^2$	≥ 50	≥ 60	4	4
700~300 hPa 差动涡度平流	10^{-10}s^{-2}	≤ -10	≤ -10	3	1
200~700 hPa 非地转风涡度差值	10^{-5}s^{-1}	≤ -3	≤ -3	3	3
低空平均 ω	$10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -10	≤ -10	3	3
高空平均 ω	$10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$	≤ -10	≤ -10	3	3

2.2 预报因子临界值与权重系数的确定

诊断分析中发现,每个物理参数只有当它达到一定的值域时,才会对强对流天气的出现有贡献。对于任何一个物理量,当大多数样本都能够与大于(或小于)该参数的某个值联系起来时,此值即确定为临界值,亦即预报的起报值。经统计分析,得到冰雹、大风和暴雨预报因子的临界值(表 1、表 2、表 3)。

诊断分析中发现每个物理参数在强对流天气出现中所起的作用大小是不同的。为区分各物理参数贡献的大小,根据各参数与强对流天气落区对应关系的密切程度及出现的频率,分别赋予不同的权重系数。在诊断分析中发现达到临界值的物理参数与强对流落区有三种对应关系:强对流天气区包含在物理量绝对值大值区,且天气区远小于物理量区,称之为一级对应;强对流天气区包含在物理量绝对值大值区,天气区略小于物理量区,称之为二级对应;强对流天气区与物理量绝对值大值区正好吻合,称之为三级对应。显然,满足后两种对应关系的物理量对强对流落区的指示性更强。因此根据统计结果,对满足二级、三级对应关系且出现频次高的物理参数赋予较大的权重(表 1、表 2、表 3)。

3 预报方程

使用前面所选的预报因子和确定的权重系数分

别建立三种强对流天气的预报方程。

预报方程为 $y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_i x_i$, 式中 i 为下标,表示预报因子的个数。 a_i 为权重系数, x_i 为预报因子。区域性冰雹预报方程中 i 为 17,雷雨大风的预报方程 i 为 10,短时暴雨预报方程中 i 为 11。当某个物理参数达到其临界值时记为 1,否为 0。前一天 20 时和当天 08 时计算结果 $y \geq 19$ 重叠的区域即为冰雹、大风的潜势预报落区。其中短时暴雨预报由三个时次预报结果的重叠区给出(流程图所示)。此处 $y \geq 19$ 是根据方程对历史个例进行回代,拟合率大于 70% 的统计结果。

4 预报流程

预报流程图(图 1)。

5 预报效果检验

2006 年 6—8 月,该系统进行了业务试验,检验结果:区域性冰雹、大风、暴雨的有无预报准确率分别达到 81.6%、85.1% 和 61.5%。4 次区域大风以及两次局地大风预报效果良好。8 次区域性暴雨报对 6 次,漏报 1 次,1 次对漏各半。2007 年 5—8 月该系统在业务运行中,对暴雨和大风均有较好的指示性,大暴雨过程无一漏报。7 月下旬和 8 月中旬,有两次天气形势表现出有利强降水的特征,主观预报有区域性暴雨过程,但实况为空报。而这两次该

系统均未报区域强降水,与实况一致。图 2 为 2007 年夏季未出现区域性冰雹,该系统有一些空报。年夏季暴雨预报个例,图 3 为大风预报个例。近两

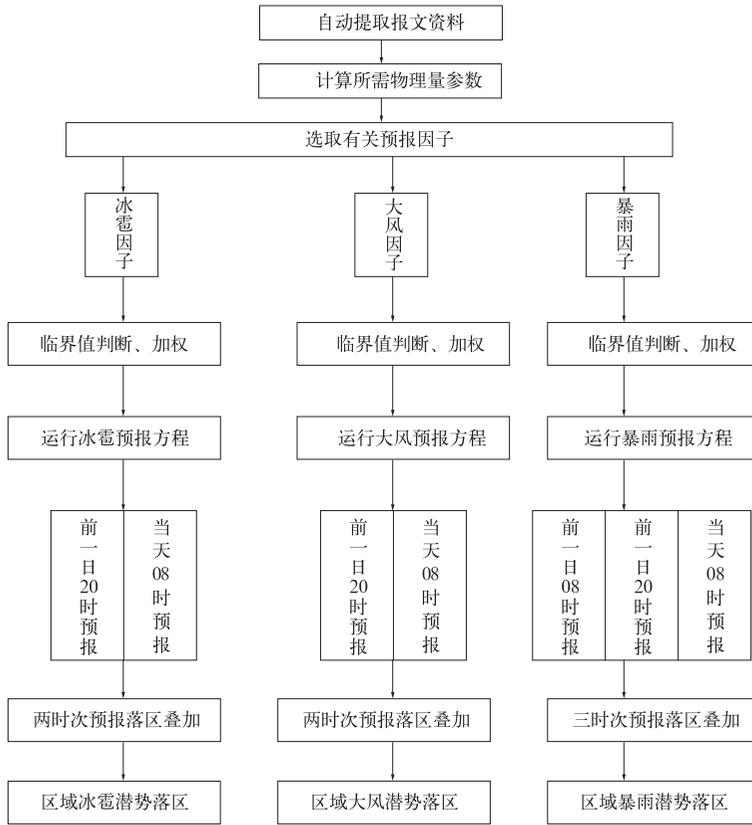


图 1 预报流程图

Fig. 1 Forecast flowchart

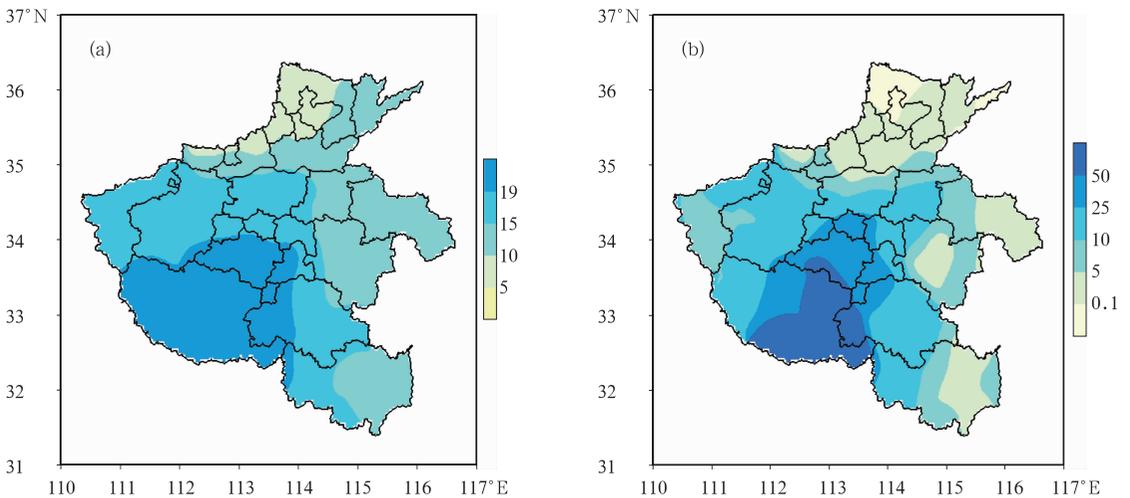


图 2 2007 年 6 月 18 日 08 时 24 小时暴雨(≥ 19)预报(a), 2007 年 6 月 18 日 08 时至 19 日 08 时降水实况(b)

Fig. 2 24-hour rainstorm (≥ 19) prediction on June 18, 2007 (a) and actual precipitation during 08 BT 18 to 08 BT 19 June 2007 (b)

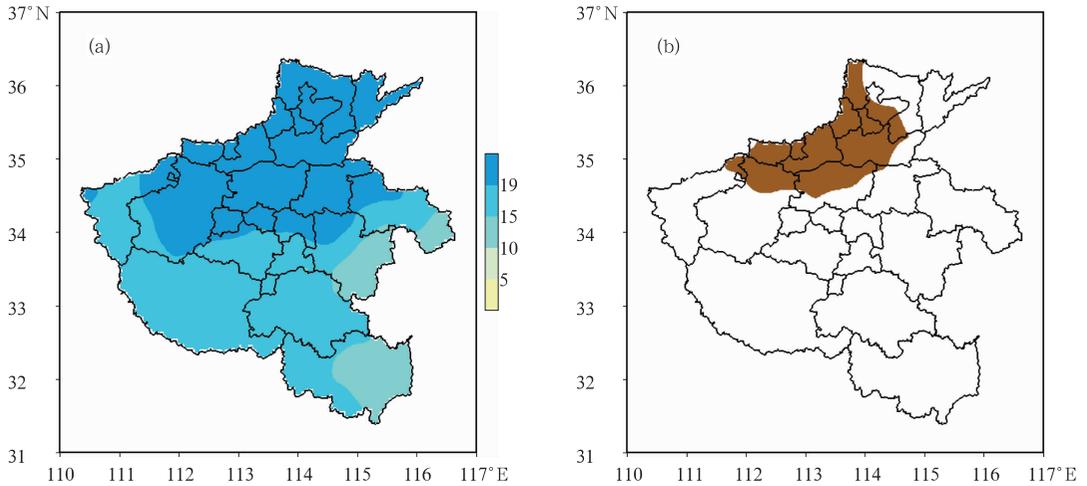


图 3 2007 年 7 月 29 日 08 时 24 小时大风(≥ 19)预报(a),2007 年 7 月 29 日大风实况(阴影)(b)

Fig. 3 24-hour gale (≥ 19) prediction on July 29, 2007 (a) and actual gale (shadow) on July 29, 2007 (b)

6 结论

应用大气热力、动力学参数,对河南省近 10 年出现的区域性冰雹、雷雨大风、短时强降水进行诊断分析,选择预报能力强的参数作预报因子,采用加权集成法,分别建立区域性冰雹、雷雨大风和短时强降水的客观预报方程,并通过计算机技术实现预报过程的自动化,建立起《河南省强对流天气诊断分析预报系统》。该系统每天在 08:00、20:00(北京时)探空资料出来后,自动完成数据采集、物理参数计算、预报因子临界值的判别、诊断预报方程的计算,并及时输出 MICAPS 图形预报结果,在近两年的实时业务运行中取得了良好的预报效果。预报员在该系统对强对流天气潜势预报的基础上,应用卫星云图资料、乡镇雨量和雷达监测等资料制作短时临近预报,大大提高了河南省强对流天气的预报能力和强对流天气的预报预警能力。

参考文献

[1] 彭治班,刘健文,郭虎,等.国外强对流天气的应用研究[M].

北京:气象出版社,2001.

- [2] 施望芝,崔春光,谌伟,等. NWP 产品在强对流天气诊断分析中的应用[J]. 北京:气象科技,2006,34(2):124-126.
- [3] 许爱华,张瑛,刘献耀. 江西“暖区”强对流天气的热力和动力条件诊断分析[J]. 气象,2001,27(5):30-34.
- [4] 曹晓岗,王田民,尹洁,等. 江西区域强暴雨的热力和动力条件诊断分析[J]. 气象,1996,22(4):37-40.
- [5] 刘贵萍. 贵阳一次强对流降水过程的诊断分析[J]. 气象,2005,31(2):55-58.
- [6] 李耀东,刘健文,高守亭. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究. 气象学报,2004,62(4):401-409.
- [7] 郝莹,姚叶青,陈焱,等. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究. 气象,2007年,33(1):51-56.
- [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] 符长锋,李任承,赵振东,等. 广义相当位温及其扩展应用. 气象,2006,32(3):11-17.
- [10] 李耀东,对流能量计算及强对流天气落区预报技术研究[J]. 应用气象学报,2004,15(1):10-20.
- [11] 杜秉玉,官莉,姚祖庆,等. 上海地区强对流天气短时预报系统[J]. 南京气象学院学报,2000,23(2):242-250.
- [12] 蔡秀华,曹鸿兴. 资料插值的进展[J]. 气象,2005,31(8):3-7.