

基于对流参数的雷暴潜势预报研究

郝 莹 姚叶青 陈 焱 边富昌

(安徽省气象台, 合肥 230031)

提 要: 为提高雷暴天气的潜势预报能力,在统计分析安徽省雷暴形成天气条件的基础上,利用 2003—2004 年 T213 资料,选取与雷暴相关性好的对流参数作为预报因子。并在考虑因子季节变化特征的基础上,分别用判别分析法和指标叠加法制作雷暴潜势预报,结果表明指标叠加法优于判别分析法。最后用指标叠加法试报了 2005 年 3—8 月的雷暴,临界成功指数 $CSI=69.4\%$,命中率 $POD=89.5\%$,虚假报警率 $FAR=24.4\%$,分区预报准确率也较高。另外,试报期间的区域性冰雹、雷雨大风全部命中,可见该方法对冰雹、雷雨大风也有较好的指示意义。

关键词: 对流参数 判别分析法 指标叠加法 临界成功指数

Thunderstorm Potential Trend Forecast Based on Convection Parameters

Hao Ying Yao Yeqing Chen Yan Bian Fuchang

(Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031)

Abstract: In order to improve thunderstorm potential forecast ability, on the basis of statistics and analysis of thunderstorm-forming weather conditions in Anhui Province, the convection parameters were selected from the T213 data during 2003 to 2004 as forecast factors. By considering the seasonal variation characteristics of the factors, the thunderstorm trend is forecasted with the discrimination analytical method and index accumulation method. The result indicates that the latter method excels the former. Finally, the index accumulation method was used to forecast the thunderstorm from March to August in 2005, the result is that Critical Success Index (CSI) is 69.4%, Percent Of Doom (POD) is 89.5%, False Alarm Rate (FAR) is 24.4%, and the accuracy of regional forecast is better. Besides, regional hail and thunderstorm with strong wind

安徽省十一五科技攻关项目“06013140B”、中国气象局新技术推广项目“CMATG2006M02”、安徽省局科技带头人基金项目“淮河流域强对流天气监测预警研究”共同资助。

收稿日期:2006 年 8 月 8 日; 修定稿日期:2006 年 10 月 27 日

during the testing period are all forecasted correctly. It is obvious that this method has better indicative significance to forecast the hail and thunderstorm with strong wind.

Key Words: convection parameters discrimination analytical method index accumulation method critical success index

引 言

雷暴是强对流天气的一种,是安徽省发生频率较高的灾害性天气之一,全省 79 个县市的年平均雷暴日数均超过 20 天,且大别山区和江南普遍大于 30 天,其中屯溪高达 53 天。根据民政部门信息:近 10 年来,强对流天气造成安徽省平均每年 283 万人受灾、25 人死亡,直接经济损失高达 10.2 亿元,且随着社会经济的迅速发展,强对流天气所造成的经济损失还将不断增加。因此加强对雷暴天气的分析与研究,提高雷暴天气的监测预报能力,对防灾减灾和服务工农业生产有十分重要意义。为此,国内外许多学者对雷暴形成机制和预报方法进行了许多有意义的研究,研究认为,雷暴是中尺度对流活动发展的结果。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及决定风暴类型起重要作用。为了表述强对流天气发生、发展的环境,经常用到各种对流参数,而物理意义明确的能量、动力和热力稳定度参数最为常用,新的对流参数不断被提出并应用于研究及预报业务^[1]。陈艳等^[2]曾指出对流有效位能对强对流天气的发生有较好的指示作用。赵秀英等^[3]和高守亭等^[4]也分别把与动力、热力都相关的风暴强度指数、里查逊数用于强对流发生机制的研究。本文在前人研究的基础上,进一步分析对流有效位能、归一化对流有效位能、密度加权平均垂直风切变、涡生参数、风暴强度指数、粗里查逊数、总指数等反映热力、动力以及两者平衡的对流参数,用于雷暴的潜势预报。

1 雷暴发生的基本条件

国内外研究认为,下述 3 个条件有利于雷暴的发生、发展和维持:

(1) 层结不稳定。理论和实践都证明不稳定的层结有利于强对流性天气的发生^[5]。Colman 的分析表明,条件性对称不稳定(CSI)在雷暴的产生中起了重要作用^[6]。早在 50 年代,人们提出大量表示条件性不稳定的指数,例如:沙氏指数 *SI* 和抬升指数 *LI*,1970 年代又引入对流有效位能 *CAPE*^[7],最近又引入了归一化有效位能 *NCAPE*^[8] 及最佳对流有效位能 *BCAPE*。

(2) 较好的低空水汽条件。湿度的铅直分布影响到层结稳定度,低层湿空气的存在是雷暴产生的一个有利条件^[9]。

(3) 有适当的触发因子。当高空环流形势、水汽条件、对流稳定度 3 个条件适合的情况下,一旦有切变、冷锋、强对流天气区等触发因子入侵启动,则非常有利于雷暴天气的发生。

经过对安徽省雷暴日的普查分析,发现安徽省雷暴发生与国内外的研究结果基本一致。

2 预报因子的选取与筛选

2.1 资料和雷暴天气标准

经统计,安徽省的雷暴一般出现在午后到傍晚,且通过对比分析,采用 14 时的资料计算预报效果好于 08 时。因此选用 2003—2004 年 T213 的 08 时 6 小时预报场即 14 时

的数值预报产品计算相关物理量,网格距为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$,并用距离权重法插值到全省 79 个气象站点上。另外,为了便于分析,规定有 3 个站或以上发生雷暴天气,为区域性雷暴日。

2.2 预报因子的选取

在对安徽省雷暴形成机制分析的基础上,选取 11 个与雷暴有关的对流参数(见表 1)。分别求出它们和雷暴的单相关系数,得到表 1 中的结果。因发生和不发生雷暴的总样本数为 24649 个, $\alpha=0.05$ 时,查表得相关系数 $r=0.1946$ 。由此可见对流有效位能和由其衍生的两个参数、抬升指数 LI 、沙氏指数、 K 指数、风暴强度指数、粗里查逊数和雷暴相关性较好,其中 $CAPE$ 、 $BCAPE$ 两个参数相关系数 >0.3 ,对雷暴有较好的指示意义。而垂直风切变、总指数、涡生参数和雷暴的关系并不密切。因此选取相关系数大于 0.2 的 8 个因子作为预报因子,但 $CAPE$ 、 $NCAPE$ 、 $BCAPE$ 物理意义相似,根据预报因子的不可重复性原理,只选取其中一个作为预报因子,最终的预报因子为:对流有效位能、沙氏指数、抬升指数、 K 指数、风暴强度指数、粗里查逊数。另外,在对样本的统计分析中,发现总指数和 300hPa 风速是较好的雷暴消空指标,一般 $TT < 25$ 时雷暴不会出现。

表 1 对流参数和雷暴的相关系数

	对流参数	相关系数
稳定度 指标	对流有效位能($CAPE$)	0.341
	归一化对流有效位能($NCAPE$)	0.296
	最佳对流有效位能($BCAPE$)	0.339
	沙氏指数(SI)	-0.262
热力 指标	抬升指数(LI)	-0.293
	热力指标总指数(TT)	0.187
	K 指数(KI)	0.261
动力 指标	密度加权平均垂直风切变(SHR)	0.139
	0-4km 垂直风切变(SHR_{0-4})	0.118
	涡生参数(VGP)	0.114
热力、动力 综合指标	风暴强度指数(SSI)	0.256
	粗里查逊数(BRN)	0.219

高空风速过大同样不利于强对流天气的产生,夏季 $V_{300} > 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、冬季 $V_{300} > 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 强对流不会发生,因此选用 TT 、 V_{300} 作为消空因子。

3 预报因子的物理意义和特征

3.1 预报因子的物理意义

沙氏指数、抬升指数表示气层的不稳定程度,负值越大,气层越不稳定。对流有效能为在自由对流高度之上,气块可从正浮力作功而获得的能量,表示大气浮力不稳定能量的大小,就几何意义而言对流有效位能正比于 $T-\log p$ 图上的正面积,和 SI 、 LI 反映单层的浮力不同,对流有效位能则是气块浮力能的垂直积分量,更能反映大气整体结构特征^[10]。 K 指数在反映气层不稳定程度的同时考虑了中低层的水汽条件。大量的数据实验表明:强对流可以发生在弱的垂直风切变结合强的位势不稳定或相反环境中,即垂直风切变和位势不稳定存在着某种平衡关系。Esman 和 Klemp 据此引入了粗里查逊数的概念^[11]。粗里查逊数包含了动力和热力参数,反映了强风暴发生时动能和热力能量之间平衡关系,其对强对流发展趋势预测是一个较好的物理量。Turcotte 与 Vigneux^[12] 在采用点聚图方法检验强雷暴与非强雷暴发生情况下的浮力能风切变分布时发现,采用风切变的自然对数与线性的浮力能可以较好地地区分强雷暴与非强雷暴,他们从而提出了风暴强度指数(SSI), SSI 作为一个经验的物理参数,它表达了浮力能和垂直风切变之间的线性关系。选取的因子(表 2)基本能反映出雷暴发生的天气条件。

3.2 预报因子的特征

要用预报因子进行雷暴预报,首先必须

表 2 预报因子及其计算公式

预报因子	计算公式
沙氏指数/ $^{\circ}\text{C}$	$(T - T_s)_{500}$
K 指数/ $^{\circ}\text{C}$	$(T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700}$
对流有效位能/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{CAPE} = g \int_{z_c}^{z_e} \frac{\theta_v}{\theta_{vs}} dz$
抬升指数/ $^{\circ}\text{C}$	$(T_s - T)_{500}$
粗里查逊数	$2 \times \text{CAPE} / (U^2 + V^2)$
风暴强度指数	$100[2 + 0.276 \ln(\text{SHR}) + 2.011 \times 10^{-4} \times \text{CAPE}]$
总指数/ $^{\circ}\text{C}$	$T_{850} + T_{d850} - 2T_{500}$

先了解预报因子自身的特征。经过统计,发

现预报因子均有很明显的季节特征,见表 3。它们的季节变化趋势大致相同,呈正弦型或余弦型, LI 、 SI 在夏季达到谷值,其余因子则在夏季达到峰值。但是各因子在发生雷暴时和不发生雷暴时的平均值的差值随季节变化的趋势却略有不同, CAPE 、 SSI 、 BRN 越到夏季平均值的差值越大,而 LI 、 SI 、 KI 则在春季时差值最大,到了夏季反而差异减小。在预报中考虑了因子的季节变化。

表 3 各因子在雷暴发生时和不发生时的季节平均值

因子 是否雷暴日	$\text{CAPE}/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$		SSI		BRN		$LI/^{\circ}\text{C}$		$SI/^{\circ}\text{C}$		$KI/^{\circ}\text{C}$	
	是	否	是	否	是	否	是	否	是	否	是	否
2—4 月	87.8	24.4	44.6	40.9	8.8	5.2	6.8	11.6	5.4	11.1	24.9	7.1
5 月	321.4	47.5	39.7	32.9	32.1	6.8	1.2	6.13	1.9	5.9	28.1	19.5
6—8 月	778.9	318.9	42.2	30.9	186.9	99.3	-2.2	1.2	-0.1	2.1	33.5	27.5
9—10 月	689.0	143.4	41.2	25.0	189.7	50.5	-1.3	4.5	0.7	5.9	30.9	17.7

4 使用判别分析法、指标叠加法进行雷暴潜势预报

4.1 用判别分析法进行雷暴预报

利用数值预报资料计算出上述 6 个预报因子和 2 个消空因子。根据 2003 和 2004 年 6—8 月资料,利用逐步判别分析法建立夏季雷暴预报方程,方程建立过程中剔除了粗里查逊数和风暴强度指数,得到方程为:

$$Y = 0.3651 KI + 0.0177 \text{CAPE} - 0.9968 LI + 2.0381 SI$$

Y 的阈值为 21.82, 即当 $Y \geq 21.82$ 时,认为将发生雷暴,当 $Y < 21.82$ 时,则认为不产生雷暴。对此方程进行历史拟合,得出该方程的临界成功指数 $\text{CSI} = 25.33\%$, 命中率 $\text{POD} = 86.36\%$, 虚假报警率 FAR 为 73.61%, 可见此方程对雷暴有一定的预报能力,但空报过多。在此基础上进一步对方程进行显著性检验,得到 $F = 1.25$, 查 $\alpha = 0.05$ 显著水平, $F_{\alpha} = 1.26$, F 略小于 F_{α} , 故认为所判

别的两类总体差异不显著。因此该方程不能满足实际雷暴预报业务的需要。

4.2 用指标叠加法进行雷暴预报

由于用统计预报方法空报偏多,于是试用指标叠加法进行预报:

首先,对样本用 KI 、 SI 、 LI 、 TT 、 V_{300} 5 个因子进行消空。消空条件为 ① $TT \leq 25^{\circ}\text{C}$, ② KI 小于不发生雷暴时的平均值, ③ SI 、 LI 在 7—8 月同时大于 5 或在其他月份时同时小于不发生雷暴时的平均值, ④ 300hPa 风速在 3—6 月大于 $50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 或在 7—10 月大于 $25\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。样本满足以上任一条件,就被消去。

其次,对消空后的样本逐站判断预报因子的值,并根据季节确定阈值(见表 3)。在某季节中,当预报因子大于其在该季发生雷暴时的平均值的记为 1, 小于不发生雷暴时的平均值的记为 -1, 处于两者之间的记为 0。

最后,将全省未被消空的测站的 6 个预报因子相加,得到各测站的累加值,只要有一

个站的加值 $N \geq 2$, 就预报当天有雷暴发生。

用此方法对 2003、2004 年的雷暴进行历史拟合, 两年间共有 137 个区域性雷暴日, 报对 119 个, 漏报 18 个, 空报 20 个, 临界成功指数 $CSI = 75.80\%$, 命中率 $POD = 86.86\%$, 虚假报警率 $FAR = 14.39\%$ 。并且可通过加值 N 的不同来确定雷暴发生的概率, 如果 $N = 6$, 则出现雷暴的概率为 100% ; $N = 5$ 时概率为 94% ; $N = 4$ 时概率为 93% ; $N = 3$ 时概率为 90% , 随着以后样本的增加, 概率值可能会有所调整。

4.3. 用指标叠加法试报 2005 年 3—8 月的雷暴

用指标叠加法试报安徽省 2005 年 3—8 月的雷暴。期间共有 38 次区域性雷暴, 用本预报方法报对 34 次, 漏报 4 次, 空报 11 次, 则临界成功指数 $CSI = 69.4\%$, 命中率 $POD = 89.5\%$, 虚假报警率 $FAR = 24.4\%$ 。有较好的雷暴潜势预报能力。

对检验结果进一步分析, 发现该方法在夏季的预报准确率远高于春季。6—8 月 23 个雷暴日仅空报 2 次、漏报 2 次, 而春季 15 个样本中就空报了 9 次、漏报 2 次。

另外, 该方法对区域性的雷雨大风(规定当天为雷暴日且有大风出现为雷雨大风天气)、冰雹也有一定的预报能力。统计了安徽省在 2005 年 3—8 月出现的 17 次强对流天气, 用该预报方法报对了 16 次, 漏报 1 次, 该漏报样本为 1 个站雷雨大风。区域性的雷雨大风、冰雹全部命中, 可见此方法对雷雨大风、冰雹也有较好的指示意义。

4.4 分区预报检验

在预报出的区域雷暴日这个大尺度背景下, 进一步制作分区预报并对其检验。按照雷暴发生频率的高低将安徽省划分为 4 个区域, 分别为淮北、江淮之间、大别山区和江南。

规定: 用指标叠加法预报, 当某区有一个站符合 $N \geq 2$, 则预报该区域有雷暴; 当某一区域内有一个站实况出现雷暴, 则该区有雷暴。检验期间淮北共出现 23 次雷暴, 共报对 21 次, 空报 3 次, $CSI = 80.8\%$ 。江淮之间出现 28 次, 报对 23 次, 空报 3 次, $CSI = 74.2\%$ 。江南共出现雷暴 23 次, 报对 21 次, 空报 4 次, $CSI = 77.8\%$ 。大别山雷暴发生 26 次, 报对 21 次, 空报 1 次, $CSI = 77.8\%$ 。可见用指标叠加法进行的分区预报准确率较高。其中淮北的准确性最高, 江淮之间的准确性最低。进一步分析预报落区得知, 春季的预报落区较实况落区偏大, 而夏季时预报落区较实况落区偏小。

5 小 结

(1) 对流有效位能 $CAPE$ 、归一化对流有效位能 $NCAPE$ 、最佳对流有效位能 $BCAPE$ 、抬升指数 LI 、沙氏指数 SI 、 K 指数、风暴强度指数 SSI 、粗里查逊数 BRN 和雷暴相关性较好, 其中 $CAPE$ 、 $BCAPE$ 两个参数相关系数 > 0.3 , 对雷暴有较好的指示意义。而垂直风切变 SHR 、总指数 TT 、涡生参数 VGP 和雷暴的关系并不密切。

(2) 在考虑了预报因子季节特征的基础上, 对比使用判别分析法、指标叠加法进行雷暴潜势预报并分别对历史进行拟合, 结果证明指标叠加法效果明显优于判别分析法。

(3) 采用指标叠加法试报了 2005 年 3—8 月的雷暴, $CSI = 69.4\%$ 、 $POD = 89.5\%$ 、 $FAR = 24.4\%$ 。而且区域性的雷雨大风、冰雹全部预报正确, 可见此方法除了对雷暴有较高的预报能力, 对雷雨大风、冰雹也有很好的指示意义。在全省分区预报中, 淮北、江淮之间、大别山区和江南 4 个区域的预报准确率也较高, CSI 分别为 80.8% 、 74.2% 、 77.8% 、 77.8% 。

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] 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):56-61.
- [3] 赵秀英,吴宝俊. 风暴强度指数 SSI[J]. 气象,2005,26(5):55-56.
- [4] 高守亭,孙淑清. 应用里查逊数判别中尺度波动的不稳定[J]. 大气科学,1986,10:171-182.
- [5] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文. 天气学原理和方法[M]. 北京气象出版社,1983,310-318.
- [6] Colan, B. R. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: A climatology[J]. Mon. Wea. Rev. 1990,118:1103-1121.
- [7] Moncrieff, M. W., M. J. Miller. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc,1976,102:373-394.
- [8] Blanchard, D. D. Assessing the vertical distribution of convective available potential energy[J]. Wea. Forecasting, 1998, 13:870-877.
- [9] Miller, R. C. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central[J]. AWS Tech. Rep. 200(rev), Air Weather Service, Scott AFB, IL, 1972.
- [10] 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[J]. 气象学报,2004,62(4):402-40.
- [11] Weisman, M. L., klemp, J. B. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears[J]. Mon. Wea. Rev. 1984,112:2479-2489.
- [12] Turcotte V, Vigneux D. Severe thunderstorms and hail forecasting using derived parameters from standard RAOBS data[C]. Preprints, Second Workshop on Operational Meteorology Halifax, NS, Canada. Atmospheric Environment Service/Canadian Meteor and Oceanogr Soc, 1987, 142-153.