

湛志刚,王婷,汪瑛,等. 广东省后汛期强对流天气潜势预报方法研究[J]. 气象,2011,37(8):936-942.

广东省后汛期强对流天气潜势预报方法研究^{*}

湛志刚¹ 王 婷² 汪 瑛¹ 冯业荣¹

1 广东省气象台, 广州 510080

2 广东省气候中心, 广州 510080

提 要: 利用 2007—2008 年两年 7—10 月广东后汛期强对流天气出现时的雷达资料、对应的 GRAPES 模式资料以及地市台站上报的强对流天气发生的实况,把瞬时大风 $>17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、冰雹、龙卷作为强对流发生的依据,对上述数据进行整理。根据广州热带海洋研究所中尺度模式的输出 GRAPES 资料,结合雷达 CAPPI 数据,计算单体的各层风速、温度、湿度、有效位能等环境特征量,将单体特征和模式计算的单体环境场要素以及强对流发生实况,通过多元逐步回归方法建立后汛期强对流天气潜势预报方程,据此对发生于广东省后汛期强对流天气(如雷雨大风、冰雹和龙卷风)进行 0~1 小时临近预报。用预报成功率(POD)、虚假警报率(FAR)和关键成功指数(CSI)衡量方法的预报性能。共有 5540 个有效样本参与回归计算,31 个因子中有 12 个引入了回归方程,建立的预报方程在阈值取为 0.26 时,得到的预报成功率 *POD* 为 0.73,虚假警报率 *FAR* 为 0.61,关键成功指数 *CSI* 为 0.338,各项指标均要好于前汛期预报性能;从实际的预报能力来看,在后汛期强对流潜势预报中,后汛期强对流潜势预报方法得到的空报率和漏报率都要低于前汛期,预报效果较好,可用于广东后汛期的强对流天气潜势预报中。

关键词: 强对流天气潜势, 对流单体, 多普勒天气雷达, 中尺度模式

Research on Methods of Convective Weather Potential in the Later Flood Season of Guangdong

CHEN Zhigang¹ WANG Ting² WANG Ying¹ FENG Yerong¹

1 The Central Meteorological Observatory of Guangdong, Guangzhou 510080

2 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080

Abstract: The radar data and GRAPES model data and convective weathers such as thunderstorm wind gusts, hails and tornados simultaneously from surface automatic meteorological stations or human observations from July to October in 2007 and 2008 were collected. Outputs of mesoscale numerical weather prediction (NWP) model of Guangzhou Institute of Tropic and Marine Meteorology of CMA were used to calculate the thunderstorm environment characteristics such as CAPE, winds, temperatures, instabilities etc. NWP variables, radar data together with convective events were incorporated into a statistic development dataset. Based on this dataset and the multiple regression approach, a convective weather potential forecasting method was developed to forecast the probability of a convective cell that could produce convective weathers within 0—1 hour. Scores as POD (probability of detection), FAR (false alarm ratio) and CSI (critical success index) were used to evaluate the performance of the method. The 12 of 31 predictors were chosen into the multiple regression equation. For a threshold value of 0.26, the method for a sample of 5540 cases produces forecast scores as follows: *POD*=0.73, *FAR*=0.61, *CSI*=0.338, which are better than results from the early rainy season of Guangdong (April to June) in 2004. This indicates that the convective weather potential forecasting can be a tool to the nowcasting of severe convective weathers in the

* 广东省气象局科研课题(2008A02)资助

2010 年 7 月 20 日收稿; 2010 年 12 月 13 日收修定稿

第一作者: 湛志刚,主要从事热带气象研究和短期天气预报. Email: Luckyer2001@163.com

later flood season of Guangdong.

Key words: convective weather potential, convective cell, Doppler weather radar, mesoscale numerical model

引言

强对流天气指出现短时间强降水、雷雨大风、龙卷风、冰雹和飏线等现象的灾害性天气,它具有突发性、强度大、持续时间短的特点,因此难以预报。强对流天气的临近预报技术主要包括雷暴识别追踪和外推预报技术、数值预报技术以及以分析观测资料为主的概念模型预报技术等。雷暴识别追踪和外推预报技术的缺陷是预报时效较短,准确率也不是很高,数值预报技术发展很快但对于强对流预报效果还不理想,概念模型预报技术主要是通过综合分析多种中小尺度观测资料,包括雷达和气象卫星资料等,在此基础上建立雷暴发生、发展和消亡的概念模型,再结合数值模式分析预报和其他外推技术的结果,然后建立雷暴临近预报的专家系统,检验和定性评估也表明概念模型专家系统的临近预报的准确率最高,时效也最长,是临近预报技术未来发展的主要趋势之一^[1-3]。为此,国内不少专家也都沿此方向做了些研究,郝莹等^[4]用 T213 数值预报产品计算的物理量进行雷暴潜势预报;吴庆梅等^[5]用 MM5 输出资料计算对流参数,并用北京地区 20 个雷暴个例对其使用效果进行了检验;陈艳等^[6]通过对对流有效位能的计算检验发现其对强对流天气的预报发生有较好的指示作用;赵秀英等^[7]和高守亭等^[8]也分别把与动力、热力都相关的风暴强度指数、里查森数用于强对流发生机制的研究。

广东地理纬度偏低,是强对流的多发地带;春夏交接的 4—6 月份是广东的龙卷风、冰雹、雷雨大风等强对流天气的多发季节。目前对华南区域强对流研究也较多^[9-11],但大多数都是单一从雷达回波特征或数值模式方面来做分析,为此在 2005—2006 年 Feng 等^[12]利用广州热带海洋研究所研发的中尺度模式的输出 GRAPES 资料,结合雷达 CAPPI 数据,计算单体的各层风速、温度、湿度、有效位能等环境特征量,将单体特征和模式计算的单体环境场要素以及强对流发生实况,通过多元逐步回归方法建立前汛期强对流天气潜势预报方程,开发了针对广东前汛期(4—6 月)强对流天气潜势方法,据此对发生

于珠江三角洲的前汛期强对流天气(如雷雨大风、冰雹和龙卷风)进行 0~1 小时临近预报,预报效果较好。然而广东地处东亚季风区,在前汛期(4—6 月),来自南海和孟加拉湾的暖湿气流与西风带的冷空气常交绥于华南地区,为强对流天气的产生提供有利的大尺度环流背景;到了后汛期(7—10 月),副热带高压脊线北抬到 30°N 附近,华南上空盛行偏东风,受低纬度的热带系统影响,珠江三角洲地区也容易出现暴雨和雷雨大风等强对流天气,因此在不同的季节,产生强对流天气的环流背景有明显的差异^[13]。从近年的测试也发现前汛期强对流潜势预报方法对前汛期的强对流预报效果不错,但对后汛期强对流预报效果较差,主要原因是由于前汛期和后汛期不同的天气背景差异导致在系统预报中涉及的逐步回归方程不能满足要求,为此有必要专门针对后汛期开发一种强对流天气潜势预报方法。文章在前人总结的预报指标基础上,重新收集后汛期实况以及雷达和模式资料来建立适合于广东后汛期的强对流天气潜势预报方法,据此对发生于广东省后汛期强对流天气(如雷雨大风、冰雹和龙卷风)进行 0~1 小时临近预报。

1 资料选取和方法设计

1.1 资料选取

收集了 2007—2008 年 7—10 月的广东省上空 3 km 的 CAPPI 回波强度拼图,根据回波强度分为 15 个等级,1~5 dBz 定义为 1,6~10 dBz 定义为 2,以此类推,71~75 dBz 定义为 15,总共就是 15 个等级,按照格点 400×500,分辨率为 0.02°方式数据化雷达图,最终每张雷达图都能读到 400×500 个点资料,每 6 分钟一张雷达图,扫描区域涵盖了整个广东省。强对流实况来自地方台站的上报资料,包括强对流发生的时间、地点和类型,从统计来看,剔除海上的强对流记录,在 2007—2008 年 7—10 月期间广东省范围内总共有 14078 个强对流记录,其中大都以出现大于 17 m·s⁻¹ 的瞬时大风为主。文章采用了广州热带海洋研究所针对华南气候特点开发的中

尺度模式 1 小时 1 次的输出资料,网格点为 0.12×0.12 ,用于计算一些强对流发生地的环境动力和热力参数作为潜势预报方法的候选因子。

1.2 潜势预报方法设计

后汛期潜势预报方法设计上依然沿用建立前汛期强对流潜势预报方法的思路。强对流的发生在雷达图上表现为具有一定强度和面积的强回波,将这种有可能引起强对流天气的回波称为单体。当找到的单体在时间和空间上与强对流实况对应时,则认为这次强对流过程由单体引起。雷达回波每 6 分钟 1 张图,1 个小时 10 组数据,对应指强对流发生的那个小时内单体中心到强对流发生地的距离小于 60 km,如果一个强对流和多个单体都满足这种对应关系,取距离最近、时间间隔最小的单体作为对应单体。在单体的识别过程中,依然选用强度大于 50 dBz 和面积大于或等于 64 km^2 的雷达回波定义为单体,在 2007—2008 年 7—10 月总共找到的单体为 5540 个。找到单体以后,采用广州热带海洋研究所的中尺度模式来计算可能影响广东地区强对流发

生的环境动力和热力参数(如三维风速、垂直风切变、对流凝结高度等动力参数和温度、冷暖平流、湿度、 K 指数、 $CAPE$ 、 SI 指数热力参数(表 1)。

将回波单体的性质特征(单体的强度、面积等)和环境动力及热力参数作为候选因子,进行归一化处理;强对流实况作为因变量,将资料数据集随机选取 $2/3$ 用于建立逐步回归方程,留取剩下的 $1/3$ 作为检验样本。如果潜势方程的预报效果能够通过检验,那么建立的潜势方程能够用于广东地区后汛期强对流的预报。

2 潜势预报方法的建立

2.1 潜势预报方法研究

沿用前汛期强对流潜势预报方法的思路,引入了单体中心附近的环境特征量,总共有 31 个候选因子入选,包括单体的性质和单体中心附近的三维风速、温度和垂直风切变、 K 指数、 $CAPE$ 、 SI 指数和对流凝结高度等。根据雷达回波资料和有时间对应的中尺度模式资料,整理出 5540 个样本,将样本资料分成两部分,随机选取 $2/3$ 的样本(3693 个)用来建立回归方程,剩下的 $1/3$ 样本(1847 个)用来检验所建立预报方程的预报效果。回归方程中有单体和强对流对应的事件 y 就取为 1,否则取为 0,31 个备选因子作为自变量 x_i 建立形如 $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i$ 。建立的逐步回归方程为: $Y = -0.249 + 0.008u_{850} - 0.01u_{700} - 0.006u_{200} + 0.008v_{850} + 0.011v_{500} - 0.006V_{700} + 0.026V_{500} - 0.005V_{200} + 903.216VOR_{700} + 0.009REFLTY - 0.001CAREA_{50} + 0.014CAREA_{60}$ 。

最后有 12 个因子引入了回归方程,他们分别是回波单体的最大强度和 $> 50 \text{ dBz}$ 强度的及大于 60 dBz 强度的面积,850 hPa u 分量和 v 分量,700 hPa 的 u 分量和水平合成风速 V ,500 hPa 的 v 分量和水平合成风速 V ,200 hPa 的 u 分量和水平合成风速 V ,700 hPa 的涡度 VOR 。从入选因子可知,后汛期引起强对流的因子不仅包括回波单体的性质,更多的是大气动力条件等环境场影响因子。

2.2 前汛期与后汛期强对流潜势预报方程的差异

表 2 给出了前汛期与后汛期强对流潜势预报方程的入选因子及其相应的权重系数。可以发现,雷

表 1 强对流天气潜势方法中的候选因子

Table 1 Candidate predictors for the convective weather potential forecasting method

环境因子:	
$V_{850}, V_{700}, V_{500}$	850,700 和 500 hPa 风速
$u_{850}, u_{700}, u_{500}, u_{200}$	850,700,500 和 200 hPa 东西风分量
$v_{850}, v_{700}, v_{500}, v_{200}$	850,700,500 和 200 hPa 南北风分量
$u_{500-850}, u_{200-500}$	500~850 hPa 和 200~500 hPa 东西风切变
$v_{500-850}, v_{200-500}$	500~850 hPa 和 200~500 hPa 南北风切变
DIV_{850}, DIV_{500}	850 和 500 hPa 散度
VOR_{500}	500 hPa 涡度
$T_{850-500}$	850 和 500 hPa 的温度差
$T_{500-200}$	500 和 200 hPa 的温度差
$RH_{850+700+500}$	850, 700 和 500 hPa 的平均相对湿度
TOTALS	$T_{850} + TD_{850} - 2T_{500}$
K	K 指数 $[= T_{850} - T_{500} + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700})]$
CAPE	对流有效位能
SI	沙氏指数
LCL	抬升凝结高度
雷达风暴单体因子:	
REFLTY	单体最大反射率
CAREA ₅₀	单体回波强度大于 50 dBz 的面积
CAREA ₅₅	单体回波强度大于 55 dBz 的面积
CAREA ₆₀	单体回波强度大于 60 dBz 的面积

达风暴单体因子在两种方程上都有一定的表现,无太大差异,说明强对流大多数还是发生在有明显强的回波情况下;不同的是后汛期强对流潜势预报方程中没有热力方面的参数,很大程度上是因为后汛期强对流主要是与热带天气系统的活动有关,强对流天气发生在潮湿不稳定的热带海洋气团内,大气在温湿方面基本都能满足,只需要动力条件足够就

可能促发强对流产生,因此在方程中动力参数所占的比重相对更大一些;而前汛期强对流天气主要出现在热带海洋气团与极地气团之间的过渡带(锋面)附近,直接或间接地与大气的斜压性有关,因此不仅要求达到一定的水汽条件,更要求大气在斜压性上有所表现,因此对大气的湿度及高低层温差方面就表现得更为重要。

表 2 前汛期与后汛期强对流潜势预报方程的各入选因子及其相应的权重系数

Table 2 The selected predictors and corresponding weight coefficients in the equation in the early rainy season and the later flood season respectively

系数	后汛期方程(权重系数)		前汛期方程(权重系数)	
	a_0		a_0	
雷达风暴单体因子		0.249		8.53
	REFLTY	0.009	REFLTY	0.0593
	CAREA ₅₀	0.001	CAREA ₅₅	-0.0022
	CAREA ₆₀	0.014		
环境因子(动力参数)	VOR ₇₀₀	903.216	DIV ₈₅₀	-1273.07
	u_{850}	0.008	VOR ₅₀₀	1158.06
	u_{700}	-0.01	$v_{500-850}$	-0.011
	u_{200}	-0.006	u_{700}	0.018
	v_{850}	0.008	u_{500}	0.024
	v_{500}	0.011	V_{850}	-0.03
	V_{700}	-0.006	V_{500}	-0.033
	V_{500}	0.026		
	V_{200}	-0.005		
			$T_{500-200}$	-0.0616
	环境因子(热力参数)			$RH_{850+700+500}$
			K	0.022
			LCL	-0.0085

2.3 潜势预报方法检验

用 POD , FAR 和 CSI 来检验预报方程,它们的定义如下:

POD :测中概率(probability of detection)

$$POD = x / (x + y)$$

FAR :虚假报警率(false alarm ratio)

$$FAR = z / (x + z)$$

CSI :关键成功指数(critical success index)

$$CSI = x / (x + y + z)$$

其中: x 为剧烈天气被成功预报的次数, y 为剧烈天气被错误预报为非剧烈天气的次数, z 为非剧烈天气错误预报为剧烈天气的次数。

图 1 为 2/3 的回归样本算出的 POD , FAR 和 CSI 的变化曲线,预报阈值(convective weather potential, CWP) 值的变化范围在 0~0.5 之间,随着 CWP 的增大, POD 呈下降趋势,表明阈值取得越大,漏报的就越多; CSI 的变化存在峰值,在峰值附

近对应的 POD 较高而 FAR 较低,在峰值附近预报效果最好。将 1/3 的检验资料带入预报方程, POD , FAR 和 CSI 的变化趋势与回归样本的基本一致(图 2)。综合回归样本和检验样本的 CWP 和 CSI 的变化趋势,取 $CWP = 0.26$,相应的回归样本的 $CSI = 0.338$, $POD = 0.73$, $FAR = 0.61$;此时检验结果与回归效果基本一致(图 2),两者都能在

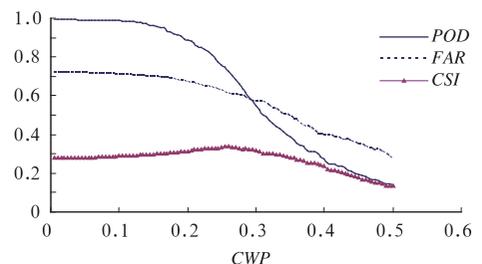


图 1 回归样本的 POD , FAR 和 CSI 随阈值 CWP 的变化曲线

Fig. 1 The POD , FAR and CSI of regression sample change with CWP

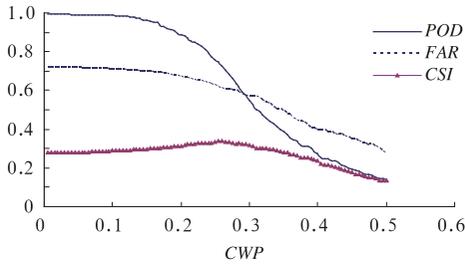


图 2 检验样本的 POD , FAR 和 CSI 随 CWP 的变化曲线

Fig. 2 The POD , FAR and CSI of examination sample change with CWP

CSI 较高的情况下保持高的 POD 和较低的 FAR 。

表 3 是前汛期^[12]和后汛期强对流潜势预报方法分别得到的 POD , FAR 和 CSI 的对比,可以发现,后汛期强对流潜势预报方法得到的预报成功率 $POD=0.73$ 比前汛期潜势预报方程得到的 POD 略低 0.02, 虚假警报率 $FAR=0.61$ 却比原先值降低 0.06, 关键成功指数 CSI 为 0.338, 也大于前汛期潜势预报方程得到的关键成功指数 0.295, 总的来说回归效果较好, 建立的后汛期的强对流天气潜势预报方法, 可用于后汛期强对流潜势预报中。

表 3 前汛期和后汛期强对流潜势预报方法分别得到的 POD , FAR 和 CSI 的对比

Table 3 The POD , FAR and CSI of the convective weather potential forecasting method in the early rainy season and the later flood season respectively

	前汛期强对流潜势预报 ^[12]	后汛期强对流潜势预报
POD	0.75	0.73
FAR	0.67	0.61
CSI	0.295	0.338

3 前汛期与后汛期的潜势预报方法的实际预报能力对比

3.1 空报率和漏报率的对比

分别利用前汛期的潜势预报方程和后汛期的潜势预报方程来计算潜势预报结果, 再与强对流出现的实况进行比较, 发现新建立的后汛期的潜势预报方程对后汛期强对流的空报率和漏报率都要比前汛期的潜势预报方程低(表 4), 明显地提高了强对流预报的精度。

表 4 前汛期和后汛期强对流潜势预报方法的预报效果对比

Table 4 The potential forecasting results in the early rainy season and the later flood season

空报情况	前汛期潜势预报方程 $CWP > 0.195$	后汛期潜势预报方程 $CWP > 0.26$
预报出现次数	2276	1843
实况出现次数	500	799
空报次数(空报率)	1776(78%)	1044(57%)
漏报情况	前汛期潜势预报方程 $CWP < 0.195$	后汛期潜势预报方程 $CWP < 0.26$
未达到预报阈值次数	3264	3697
实况出现次数	1011	712
漏报次数(漏报率)	1011(31%)	712(19%)

3.2 强对流个例预报实例

图 3 是 2007 年 7 月 28 日 07 时 20 分(北京时)的两张雷达回波拼图, 分别是用前汛期强对流潜势预报方法和后汛期强对流潜势预报方法做的强对流潜势预报。可以看出, 单体识别法在从化县和紫金县境内共找到了 2 个单体(图 3 中的小圈, 下面同上), 前汛期潜势预报方法算出 2 个单体的 CWP 值分别为 0.314 和 0.372(图 3a), 以 $CWP \geq 0.195$ 判断该单体即将要发生强对流, 而预报阈值 $CWP < 0.195$ 则认为单体为非强对流单体, 2 个单体 CWP 值均大于 0.195, 而本时刻只有一个强对流实况, 即在从化镇太平二中出现 $18.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的瞬时大风, 因此前汛期强对流潜势预报方法在从化境内的强对流单体预报准确, 而在紫金县境内的的强对流单体预报为空报; 后汛期强对流潜势预报方法在上述两个地方得到的 CWP 值分别为 0.284 和 0.071(图 3b), 后汛期强对流预报阈值 $CWP < 0.26$ 认为单体为非强对流单体, 因此对于从化境内的强对流单体预报也准确, 并准确地剔除了紫金县境内的非强对流单体, 效果好于前汛期强对流潜势预报方法。

图 4 是 2008 年 7 月 20 日 10 时 12 分(北京时)两张雷达回波拼图, 也是分别用前汛期强对流潜势预报方法和后汛期强对流潜势预报方法做的强对流潜势预报。这次过程可以看出, 分别在怀集、清远、从化境内共找到了 4 个单体(图 4), 前汛期潜势预报方法算出 4 个单体的 CWP 值分别为 0.014, 0.057, 0.095 和 0.109, 均小于阈值 0.195(图 4a), 如果按前汛期强对流潜势预报方法来预报, 此 4 个单体均为非强对流单体, 而本时刻却在上述地区附近

存在 4 个强对流实况(表 5),后汛期强对流潜势预报方法在上述 4 个地方得到的 CWP 值分别为 0.382,0.344,0.276 和 0.3(图 4b),均大于后汛期

强对流出现的阈值 0.26,准确地将此 4 个强对流区域预报出来,效果明显好于前汛期强对流潜势预报方法。

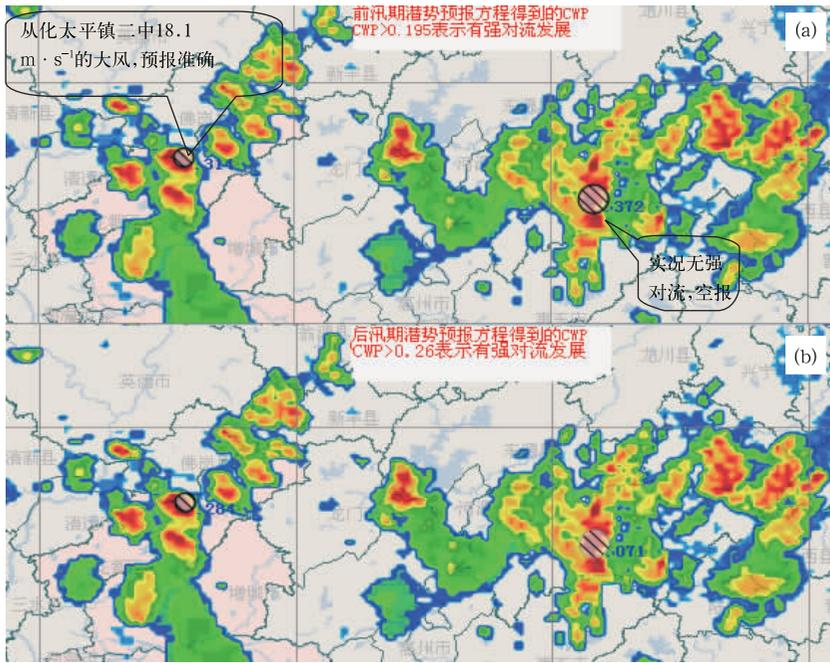


图 3 2007 年 7 月 28 日 07 时 20 分强对流过程单体预报
(a) 前汛期潜势预报方程; (b) 后汛期潜势预报方程

Fig. 3 The potential forecasting results of strong convective weather at 07:20 BT 28 July, 2007 by the early rainy season equation (a) and the later flood season equation (b)

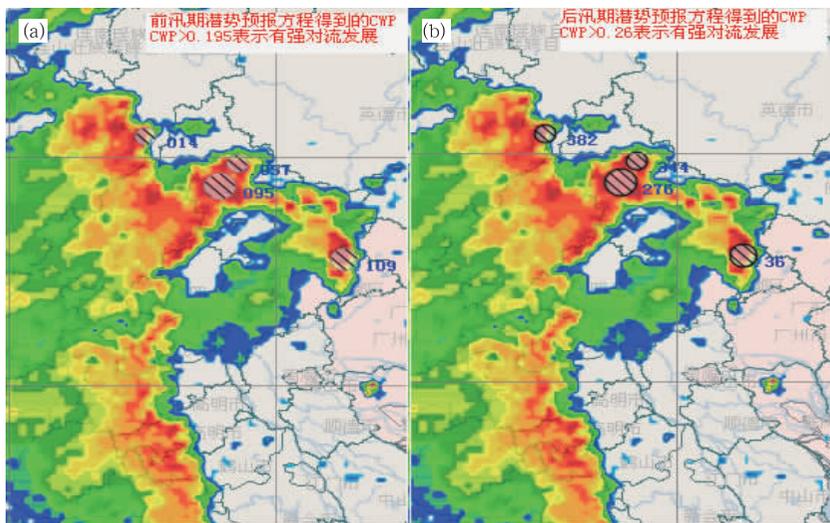


图 4 2008 年 7 月 20 日 10 时 12 分强对流过程单体预报
(a) 前汛期潜势预报方程; (b) 后汛期潜势预报方程

Fig. 4 The potential forecasting results of strong convective weather at 10:12 BT 20 July, 2008 by the early rainy season equation (a) and the later flood season equation (b)

表 5 2008 年 7 月 20 日 10 时 12 分强对流过程实况

Table 5 The strong convective weather
at 10:12 BT 20 July, 2008

强对流发生地	实况经度/°E	实况纬度/°N	强对流 /m·s ⁻¹
从化温泉中学	113.65	23.61	17.8
怀集凤岗镇政府	112.35	24	17.2
四会黄田水利会	112.52	23.4	22.7
清远气象局	113.05	23.65	18.1

4 结 论

使用新一代多普勒天气雷达、强对流实况和中尺度模式输出资料,基于珠三角前汛期强对流潜势预报方法的研究基础上,针对广东省后汛期不同的天气气候背景,建立了广东后汛期强对流潜势预报方法,主要研究结果如下:

(1) 根据强对流实况、回波单体和中尺度模式的时间对应关系,收集 5540 个样本、总共 31 个强对流影响因子建立逐步回归方程,12 个影响因子入选。建立的逐步回归方程为: $Y = -0.249 + 0.008u_{850} - 0.01u_{700} - 0.006u_{200} + 0.008v_{850} + 0.011v_{500} - 0.006V_{700} + 0.026V_{500} - 0.005V_{200} + 903.216VOR_{700} + 0.009REFLTY - 0.001CAREA_{50} + 0.014CAREA_{60}$ 。

(2) 通过对前汛期和后汛期强对流潜势预报方程的对比,后汛期强对流潜势预报方程中没有热力方面的参数,很大程度上是因为后汛期强对流主要是与热带天气系统的活动有关,强对流天气发生在潮湿不稳定的热带海洋气团内,大气在温湿方面基本都能满足,只需要动力条件足够就可能促成强对流产生,因此在方程中动力参数所占的比重相对更大一些。

(3) 回归样本和检验样本的 CSI , POD 和 FAR 变化曲线表明:当阈值取为 0.26 时,预报效果最好,相应的回归样本 $CSI = 0.338$, $POD = 0.73$, $FAR =$

0.61; 检验效果也与回归结果基本一致,效果较好。

(4) 从前汛期与后汛期的潜势预报方法的实际预报统计对比来看,在后汛期强对流潜势预报中,后汛期强对流潜势预报方法空报率和漏报率都比前汛期强对流潜势预报方法更低,预报效果更好,给出了 2 个预报实例也说明后汛期强对流潜势预报的实际预报效果要更好。

参 考 文 献

- [1] 陈明轩. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展[J]. 应用气象学报, 2004, 15(6): 754-766.
- [2] Wilson J W, Megenhardt D L. Thunderstorm initiation organization and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines[J]. Mon Wea Rev, 1997, 125: 1507-1525.
- [3] Wilson J W, Roberts R, Mueller C. Sydney 2000 forecast demonstration project: Convective storm nowcasting[J]. Weather and Forecasting, 2004, 19: 131-150.
- [4] 郝莹, 姚叶青, 陈众, 等. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究[J]. 气象, 2007, 33(1): 51-56.
- [5] 吴庆梅, 付宗钮, 郭虎, 等. MMS 模式输出对流参数的效果检验[J]. 气象, 2006, 32(4): 24-28.
- [6] 陈艳, 寿绍文, 宿海良, 等. 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.
- [7] 赵秀英, 吴宝俊. 风暴强度指数 SSI[J]. 气象, 2005, 26(5): 55-56.
- [8] 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.
- [9] 刘峰. 一次强对流天气过程的诊断分析和数值模拟[J]. 气象, 2008, 34(2): 18-24.
- [10] 曾小团, 梁巧倩, 农孟松, 等. 交叉相关算法在强对流天气临近预报中的应用[J]. 气象, 2010, 36(1): 31-40.
- [11] 李向红, 唐熠, 郑传新, 等. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 61-71.
- [12] FENG Yerong, WANG Ying, PENG Taoyong, et al. An algorithm on convective weather potential in the early rainy season over the Pearl River Delta in China[J]. Advances in atmospheric sciences, 2007, 24(1): 101-110.
- [13] 林良勋, 冯业荣, 曾琮, 等. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006, 206-207.