

曾淑玲, 巩崇水, 赵中军, 等. 动力-统计方法在 24 小时雷暴预报的应用[J]. 气象, 2012, 38(12): 1508-1514.

动力-统计方法在 24 小时雷暴预报的应用^{*}

曾淑玲¹ 巩崇水¹ 赵中军² 李 旭¹ 周甘霖¹ 王式功¹ 尚可政¹

¹ 兰州大学大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

² 中国人民解放军 92493 部队中心气象台, 葫芦岛 125000

提 要: 利用 T213 数值预报产品, 计算了多个对流参数, 应用事件概率回归方法分别建立了全国 690 个基本站 4—9 月的 24 h 雷暴潜势预报方程, 并根据 TS 评分值最大的原则确定了雷暴发生预报的临界概率, 针对 2010 年 4—9 月进行试预报。研究表明: (1) 基于 T213 输出产品计算得到的对流参数物理意义明确, 与雷暴有无事件相关系数较高, 对雷暴潜势预报方程贡献很大。(2) 雷暴潜势预报方程对区域性雷暴的预报指示性较强, 尤其对于雷电频发的地区效果更好。(3) 690 个站 TS 评分平均值为 0.24。

关键词: 雷暴, 预报, 动力-统计方法

The Application of Dynamical-Statistical Method to 24-h Thunderstorm Forecast

ZENG Shuling¹ GONG Chongshui¹ ZHAO Zhongjun² LI Xu¹
ZHOU Ganlin¹ WANG Shigong¹ SHANG Kezheng¹

¹ Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change of Ministry of Education,
College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

² The Central Meteorological Observatory of PLA 92493 Unit, Huludao of Liaoning 125000

Abstract: Based on the T213 numerical forecast products and many convective parameters calculated, the 24 h thunderstorm potential prediction formulas are set up for 690 national meteorological stations from April to September by using event probability regression method. At the same time based on the TS score maximum principle, the critical probability of occurrence of thunderstorm forecast is defined and the forecasts for April—September 2010 are focussed. The results show that, (1) the convective parameters based on T213 output product calculation have clearly physical meaning, and are highly related with the occurrence of thunderstorms, making significant contributions to the forecast formulas. (2) Thunderstorm potential prediction formulas are stronger indicators to regional forecasts of thunderstorms, especially to lightning striking areas. (3) The average TS score for 690 stations is 0.24.

Key words: thunderstorm, forecast, dynamical-statistical method

引 言

雷暴是伴有雷击和闪电的局地对流性天气, 也

是强对流天气中出现频次最高的天气现象, 雷击能造成人员伤亡, 建筑物和输电、通信设施的破坏, 雷暴也是影响航空运输的重要因素, 其分析和预报一直以来都是气象业务的难点。雷暴的预报方法很

* 国家科技支撑计划(2009BAC53B02 和 2007BAC29B03)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106034)共同资助
2011 年 7 月 30 日收稿; 2012 年 1 月 14 日收修定稿

第一作者: 曾淑玲, 主要从事现代天气预报技术和干旱天气气候方面的研究. Email: cengshl07@163.com

通信作者: 王式功, 主要从事极端天气气候、现代天气预报技术和医疗气象学方面的研究. Email: wangsg@lzu.edu.cn

多,其中包括天气学方法、指标判定法和数值模式方法以及这些方法相结合的综合预报方法。

针对单站预报来说,天气型方法和预报指标判定相结合的方法较为常用,孙明生等^[1]将影响北京地区的大尺度环流型进行划分,并根据出现和不出现强天气的环流系统特征、结构和物理量概括出概念模式,同时结合物理量参数采用判别树方法对北京地区强天气进行了预报。杨仲江等^[2]利用探空资料、地面观测资料和历史天气图首先分析了上海地区的雷暴天气型,然后利用天气型、K 指数、沙氏指数以及对流有效位能,采用逐步消空法进行雷电的潜势预报识别,取得较好效果。吴蓁等^[3]基于构成要素预报的方法,结合常规观测资料、卫星云图和雷达资料对构成河南地区雷暴的要素进行分析可提前几小时进行雷暴短时预报。对于区域性的雷暴或者全国范围的雷暴,因为涉及空间范围大,落区预报法和数值模式方法较为常用。雷暴天气属于小概率事件,预报难度高。要提高强对流天气预报的准确性,对强对流天气发展机制的研究很有必要。强对流天气类型的发展很大程度上取决于其所处环境尺度的大小,各种对流参数从不同侧面反映了环境特性,对预报对流是否发展及预报其天气类型都有一定的帮助。李勇等^[4]对 2006 年 5—9 月的雷暴天气和物理量指数进行分析,发现在雷暴发生时有三个高概率区,每个区域对应的物理量值相对集中出现在某一范围。周后福等^[5]基于探空资料计算了 K 指数等多个稳定度指数和能量指标,给出了强对流天气的短时预报指标。叶爱芬等^[6]采用相关统计分析的方法对利用探空资料计算的对流有效位能的大小和强降水、雷雨大风的关系。基于大气探测技术和大气动力学理论以及计算机技术的发展,数值预报迅猛发展,中尺度模式在模拟中尺度对流风暴等方面有了很大进展,利用中尺度数值模式输出的物理量和计算的各种对流参数,对雷暴的预报有较好的意义。刘伟等^[7]用中尺度数值模式 MM5 的结果计算分析雷暴发生发展过程中对流活动指数的变化,指出对流有效位能和抑制能量对兰州中川机场雷暴预测具有较好的指示意义。李耀东等^[8]指出综合了动力和能量参数,尤其是随着高分辨率中尺度和风暴模式的发展,根据模式输出的对流动力和能量参数将会有广泛的应用前景。

随着大气监测手段的提高和计算机技术的发展,多普勒天气雷达和闪电定位仪为雷暴的预警和研究提供了很好的条件和手段,一些台站总结出了雷暴天气发生的雷达回波特征,并应用于实际预报,取得较好效果^[9-10]。目前针对雷暴的临近预报,利用多普勒雷达和高分辨率模式可以成功地模拟某些雷暴天气过程,且用于临近预报,廖玉芳等^[11]研究建立了适用于常德地区的基于单多普勒天气雷达产品的强对流天气预报方法,但是这种预报时效还比较短。随着交通运输的大力发展,出于航空、公路和铁路运输的保障以及防灾减灾的需要,都对雷暴的短期预报提出了更高的要求,尤其是全国范围内的局地定点准确预报对于交通运输的安全保障和雷电灾害的防灾减灾具有重要意义。当前雷暴的短期预报,以主观分析的落区预报为主。同时,由于决定雷暴是否发生的中小尺度条件一般在发生前几个小时才显现出来,所以雷达等先进的探测手段也很难提前获取对 24 h 短期预报有用的中小尺度信息。大尺度的业务数值模式集合同化了各种观测资料作为初始场,对未来天气进行预报。对于基本要素场的预报已经达到了较高准确度。虽然对中小尺度系统的描述仍然不足,但是对于温度场、水汽场等要素预报已经达到了很高的准确度,而低层水汽,高低空的冷暖条件等要素与雷暴的发生均有密切关系。

本文从雷暴的短期预报需求出发,基于大尺度的模式输出量,计算多个与雷暴发生有关的水汽、稳定度和能量参数,并选取这些物理量作为预报因子,建立它们与雷暴天气的统计关系。同时,由于在不同的站点,与雷暴发生密切相关的因子各不相同,所以分站对全国 690 个站 4—9 月份雷暴事件进行事件概率回归,得到 690 个站点的回归方程,一方面通过对数值预报产品的释用实现了单站单点的定量预报,另一方面,将 690 个站的预报结果综合在一起,亦可得到全国及区域性雷暴预报结果。

1 资料及方法

本文使用的资料为国家气象中心中期数值预报模式 T213 模式 12:00(世界时)起报的预报结果以及全国 690 个观测站的雷暴实况观测资料。T213 模式分辨率为 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$,预报时效 72 h 内为

12 h 间隔,72~240 h 为 24 h 间隔。

预报对象是全国 690 个基本站的雷暴有无,站点分布如图 1 中所示,按照 MICAPS 资料中地面资料的站点区域分为 50~59 共 10 个区,预报时效为 24 h。

本文中采用的事件概率回归方法^[12],是美国气象学家 Miller 于 1964 年在作局地航空站气象要素预报时提出的。我国气象学家也曾利用事件概率回归的方法进行降水的有无预报^[13]、雾的消散与否预报^[14],证明预报准确度较高,雷暴发生预报(雷暴出现与否)也是只有两个状态的变量,和晴雨、雾的消散与否等要素有共同的特点,因此利用事件概率回归方法预报雷暴,是值得尝试的。这种方法的基本思想是将因子和预报量看成随机事件,把预报量 Y 与各因子事件之间的关系看成是各前期因子已经出现的条件下,事件 Y 出现与否的关系。在本文的应用中,首先将雷暴出现与否转化为 0,1 化变量,再通过逐步回归方法建立与预报因子之间的概率回归预报方程。建立回归方程的过程中,采用双重检验逐步回归方法进行建模。选取的建模时段为 4 月 1 日至 9 月 30 日。

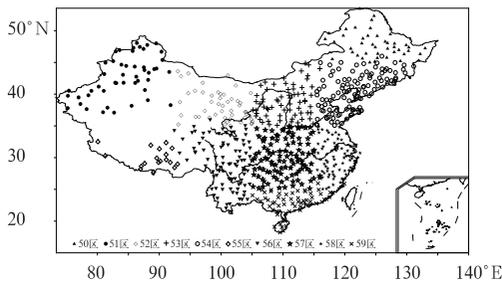


图 1 预报站点分布图

Fig. 1 Distribution map of forecast sites

2 预报流程的设计

2.1 预报因子的选取

预报因子的选取思路是要把影响雷暴可能发生的因子充分合理地体现出来。在空间上选取每个站点周围 9 个格点的模式直接输出量作为预报因子,并用双线性插值将站点所在位置的基本要素加入预报因子库。在时间上,本文雷暴的预报时效是 24 h,

选取的因子是预报时效前后 2 个时段,即选取 00、12、24、36 和 48 h 的 T213 预报要素作为因子。在要素上,分为基本因子和扩展因子,基本因子是 T213 模式的直接输出结果,扩展因子是通过模式基本要素诊断得到的和雷暴发生关系密切的物理量。雷暴天气是一种典型的强对流性天气,其发生一般需要三个条件:水汽条件、不稳定条件、抬升条件。其中描述抬升条件的因子较为复杂,因为抬升力可来自于天气尺度系统(如锋面、气旋等的上升运动),或中尺度系统(如中尺度切变线、辐合线等强上升运动),或地形抬升作用(迎风坡抬升、背风波的波动等)和局地加热不均(海岸、湖岸与海洋、湖泊加热不同)等造成的上升运动。由于中小尺度系统以及局地热力、地形的抬升触发因子很难获取,本文中的抬升条件只采用了大尺度的垂直速度来描述,而对水汽条件和不稳定条件分别选取了扩展因子。选取的扩展因子如下所述。

(1) 描述水汽条件的因子

水汽条件是雷暴发生的必要条件之一,低层的暖湿水汽向高层运输的过程中,遇到冷空气,凝结或凝华产生积雨云,继而产生对流性雷暴云团。在因子的选取中,描述水汽条件的基本因子有比湿和相对湿度,此外,又增加了表 1 中所示的露点温度、温度露点差和水汽通量散度作为扩展因子,低层的露点温度就可以代表水汽条件,低层的温度露点差描述了低层空气的饱和程度,水汽通量散度描述了某一点水汽的集中程度,常被用于暴雨或强对流预报中。

表 1 水汽相关的扩展因子及其定义

Table 1 Extended factors related to water vapor and their definitions

预报因子名称	缩写	定义
2 m,925 hPa,850 hPa 露点温度	$T_d(2\text{ m};925\text{ hPa};850\text{ hPa})$	T_d
2 m,925 hPa,850 hPa 温度露点差	$T-T_d(2\text{ m};925\text{ hPa};850\text{ hPa})$	$T-T_d$
850 hPa,700 hPa 水汽通量散度	$QVDIV(850\text{ hPa};700\text{ hPa})$	$\nabla \cdot (Vq)$

(2) 描述不稳定条件的因子

不稳定的大气中易发生对流运动。天气诊断分析中时常需要分析大气的的不稳定性,描述不稳定条件的因子在建立预报模型的过程中必不可缺。不稳

定条件的分析,可以计算各种稳定度指数或通过求 $T-\ln p$ 图上的不稳定能量面积来表示。文中所用

的稳定度指数如表 2 中所示。

表 2 稳定度指数相关的扩展因子及其定义
Table 2 Extended factors related to stability index and their definitions

预报因子名称	缩写	定义
VT 指数	VT	$VT = T_{850} - T_{500}$
CT 指数	CT	$CT = T_{d850} - T_{500}$
全总指数	TT	$TT = VT + CT$
K 指数	KI	$KI = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$
A 指数	AI	$AI = T_{850} - T_{500} - [(T_{850} - T_{d850}) + (T_{700} - T_{d700}) + (T_{500} - T_{d500})]$
地面抬升指数	$LI_{surface}$	平均气块从地面沿干绝热线上升,到达凝结高度后再沿湿绝热线上升至 500 hPa 所具有的温度与 500 hPa 的环境温度的差值
沙氏指数 (850—500 hPa)	$SI_{850 \rightarrow 500}$	850 hPa 等压面上的湿空气沿干绝热线抬升,到达抬升凝结高度后再沿湿绝热线上升至 500 hPa 所具有的气块温度与 500 hPa 的环境温度的差值
沙氏指数 (700—400 hPa)	$SI_{700 \rightarrow 400}$	700 hPa 等压面上的湿空气沿干绝热线抬升,到达抬升凝结高度后再沿湿绝热线上升至 400 hPa 所具有的气块温度与 400 hPa 的环境温度的差值
$\Delta\theta_{se}$	$\Delta\theta_{se}$	$\Delta\theta = \theta_{se500} - \theta_{se850}$

温度层结随高度总是变化的,为了估计层结曲线对从底部上升的气块可能产生的总影响,引入了大气不稳定能量。要将气块抬升到自由对流高度,必须对气块做功,做功的大小和从气块起始位置到抬升凝结高度的状态曲线与层结曲线之间的面积成正比。这块面积为负面积,即对流抑制能量,底层的气块能否发生对流取决于是否能够获得克服对流抑

制能量所需要的能量。在自由对流高度到平衡高度间,层结曲线和状态曲线围成的正面积,与气块可从正浮力做功获得的能量成正比,即对流有效位能。对流有效位能从理论上反映出对流上升运动可能发展的最大强度。对流有效位能和对流抑制能量^[15]是强对流天气分析预报的重要参数,具体定义如表 3 所示。

表 3 不稳定能量相关的扩展因子及其定义
Table 3 Extended factors related to unstable energy and their definitions

预报因子名称	缩写	定义
对流有效位能	CAPE	当气块重力和浮力不相等时,气块从自由对流高度上升至平衡,一部分位能可以转化为垂直运动的动能。 $CAPE = g \int_{z_{LFC}}^{z_{EL}} \frac{T_{VP} - T_{VE}}{T_{VE}} dz$
最大对流有效位能	BCAPE	把 θ_{se} 最大值所在层次作为起始抬升高度计算的对流有效位能
对流抑制能量	CIN	气块获得对流潜势必须超越的临界值 $CIN = g \int_{z_{LFC}}^{z_S} \frac{T_{VP} - T_{VE}}{T_{VE}} dz$

注: z_{LFC} : 自由对流高度, z_{EL} : 平衡高度, z_S : 气块起始高度, T_{VP} : 气块虚温, T_{VE} : 环境虚温。

从空间、时间和要素三方面选择的预报因子总数达到了几千个,首先要进行因子的精选,选择的方法是分别计算各个因子与 0,1 化雷暴实况的 F 统计值,然后按照 F 统计值的大小进行排序,只选择 F 值较大的前 100~300 个因子作为精选因子。

2.2 事件概率回归模型的建立

本文中建立模型所用的样本是 2003—2007 年 4—9 月的资料。

用 2.1 中筛选得到的精选因子和 0,1 化的雷暴

之间进行逐步回归计算,最后分别得到 690 个地面站 4—9 月 24 h 的雷暴潜势预报方程。

本文中每个站都是在同样类型的预报因子基础上建立预报方程,由于逐步回归最后得到的是对预报对象最优的因子组合建立预报方程,因此不同预报方案最终入选方程的预报因子可能会存在差异,所以有必要对方程中最终入选的因子进行分析。表 4 中给出了事件概率回归方程中预报因子的入选情况和在雷暴潜势预报方程中出现最多的因子排名以及各因子出现频次的百分比。从表 4 中可以看出,在方程的预报因子中排在前面的主要是反映水汽含量的因子和反映动力条件的垂直速度因子以及反映不稳定条件的不稳定能量和稳定度指数,这与实际预报经验相符。从因子所占比例也可以看出,基于从大量因子选出的因子建立的事件概率回归方程,其预报因子物理意义鲜明。

表 4 预报因子统计

序号	因子	占总因子的百分比/%
1	比湿	22
2	相对湿度	18
3	垂直速度	8
4	对流有效位能	8
5	最大对流有效位能	5
6	对流抑制能量	5
7	风速	5
8	CT 指数、A 指数、K 指数	5
9	抬升指数、沙氏指数	4
10	925 hPa 温度露点差	3

2.3 事件概率回归的预报判据

通过 2.2 中建立的预报模型,将方程中各因子对应的值代入相应的事件概率回归方程,即可求出回归估计值 Y^* , Y^* 就是雷暴发生的概率值,因为概率值在 0,1 之间,因此,当方程值小于 0 时取 Y^* 值为 0,当方程值大于 1 时, Y^* 值取为 1。那么当雷暴发生概率估计值达到多少时,可预报 $y=1$ 即雷暴事件的出现。本文采取的方法是:找出建模的样本和试预报的样本中 Y^* 的最大值 Y_{\max} 和最小值 Y_{\min} ,然后从最小值 Y_{\min} 开始,取一较小步长 ΔY ,假定 $Y_{\text{opt}} = Y_{\min} + \Delta Y$ 为判断雷暴事件是否发生的临界值,对所有样本进行 0,1 化预报。然后对每个不同的临界值下的预报值进行 TS 评分,然后循环 Y_{opt} ,直到 Y_{opt} 等于 Y_{\max} 为止,最后找出 TS 评分达到最大时的 Y_{opt} 作为最优的预报判据。

2.4 自动化客观预报

基于 2.2 和 2.3 中建立的模型和寻找得到的事件概率回归最优临界值,预报时,首先通过网络自动获取 T213 模式数据,对模式数据分站进行提取,并进行站点插值,然后计算 2.1 中提到的多个对流相关因子,因子计算完成后,读取各个站的 24 小时雷暴潜势预报方程进行 Y 估计值的计算,最后根据 2.3 中得出的最优 0,1 化预报判据,当预报量大于临界判别值时报有雷暴发生,否则判断没有,从而实现雷暴的 0,1 化预报。对 690 个站循环进行,最后得到了 690 个基本站的 24 h 雷暴发生预报。

3 预报结果效果检验

3.1 总体效果检验

按照上述建立的模型对 2010 年 4—9 月进行 24 h 雷暴发生预报,采用的效果评定方法为 TS 评分检验,即 $TS = A / (A + B + C)$,其中 A 为雷暴天气预报准确次数, B 为漏报次数, C 为空报次数。图 2 中给出了全国 10 个分区各自平均的 TS 评分值,从图中可以看出,TS 平均值最高的区域是 59 区(华南地区),平均 TS 评分为 0.4,58 区(华东地区)、56 区(高原东部、西南地区)次之,平均 TS 评分接近 0.3,50 区(东北地区北部)、55 区(西藏地区)和 57 区(华中地区)第三,最低的是 52 区(西北地区东部),TS 评分值为 0.2。这和雷暴的地理分布和地理条件是有关系的,因为沿海地区水汽充沛,不稳定能量反应清楚,可预报性大一些,历史上雷暴发生次数较多,而西北地区水汽少,不稳定能量从积累到释放突发性强,可预报性小一些。除了 51 和 52 区之外,各区雷暴预报 TS 平均值都在 0.2 以上,

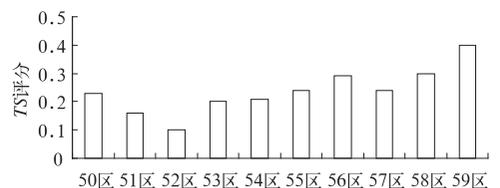


图 2 2010 年 4—9 月 50~59 区雷暴 24 小时预报结果 TS 评分

Fig. 2 TS scores of 24 h thunderstorm forecast results in 50—59 regions from April to September 2010

全国 600 多个站的 TS 平均值为 0.24。何立富等^[16]对国家级强对流潜势预报业务进展进行检验评估,其中对 2010 年 4—9 月国家级预报产品进行客观检验,得出 48 h 预报 24 h 间隔的雷暴预报的 TS 评分为 0.23。由此可见,利用本文中的事件概率回归方法建立的预报模型进行预报与当前业务中使用的方法比较,客观化、自动化程度较高,研究结果相比较略好。

3.2 个例试验分析

以上分析表明,事件概率回归对于雷暴预报有较好的预报效果,为了进一步直观地说明,下面给出几个个例分析。

图 3 中给出了 2010 年 5 月 9 日的 24 h 雷暴发生预报和 5 月 10 日雷暴实况。2010 年 5 月 9 日的雷暴预报结果显示,在未来 24 h,有两个雷暴可能发生的区域,一个是西南地区中北部和华南地区,一个是东北地区南部,5 月 10 日的实况结果表明,雷暴预报的区域与实况区域基本一致,但在青藏高原东部和西南地区存在较多的空报漏报情况。图 4 中给出了 2010 年 6 月 27 日 24 h 雷暴预报和 6 月 28

日的实况,6 月 27 日预报结果显示,未来 24 h 在我国大部分地区,包括新疆西部、青藏高原中东部、内蒙古东部和东北地区以及长江以南大部分地区都有成片雷暴区域出现,28 日实况对比发现,2010 年 6 月 27 日的 24 h 雷暴潜势预报在新疆西部地区存在较多漏报,长江以南地区存在较多空报,但是落区基本一致。图 5 是 2010 年 8 月 20 日的雷暴预报和实况结果,预报结果显示在华北、黄淮、江淮、江汉地区和西南、华南地区都有区域性雷暴发生,预报的落区与实况基本一致,在西南和河套地区存在较多空报。

从上面的几个个例实验表明,事件概率回归模型预报的雷暴区域与实况较为一致,但是在单站预报上空漏报是无法避免的,分析原因主要有三个:(1)雷暴发生受水汽、不稳定条件和抬升机制等天气学条件的影响,但是同时也有局地性和突发性的特点,增加了预报难度。(2)虽然本文中尽可能多地考虑了水汽和不稳定条件,对于抬升条件,很难选取合适的因子,预报模型中考虑不够。(3)雷暴的实况存在一定的漏测,因为雷暴的观测大部分是以人工观测为主,所以主观性较强,现在的闪电定位仪自动观测,可以获得更为准确和精细的雷暴实况资料。雷

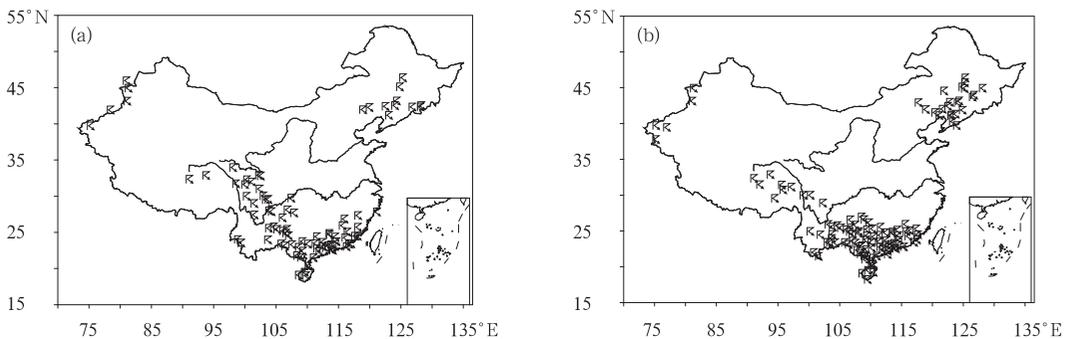


图 3 2010 年 5 月 9 日 24 h 雷暴预报(a)和未来 24 h 雷暴发生实况(b)

Fig. 3 The future 24-h thunderstorm forecast (a) and observations (b) on May 9, 2010

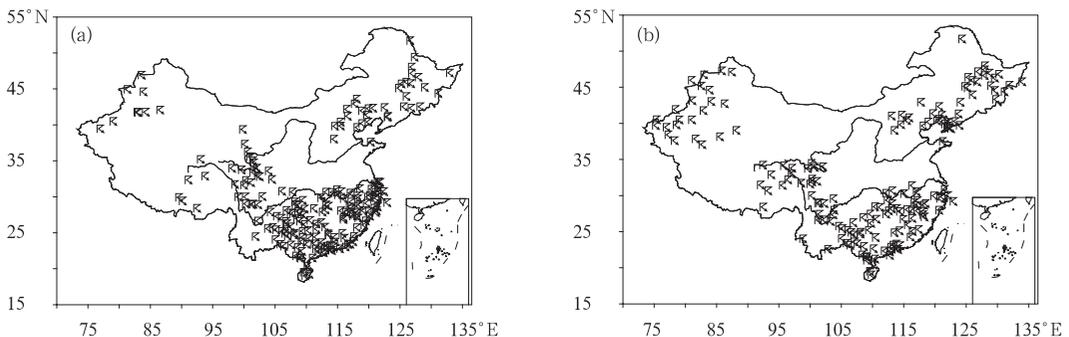


图 4 2010 年 6 月 27 日未来 24 h 雷暴预报(a)和未来 24 h 雷暴发生实况(b)

Fig. 4 The future 24-h thunderstorm forecast (a) and observations (b) on June 27, 2010

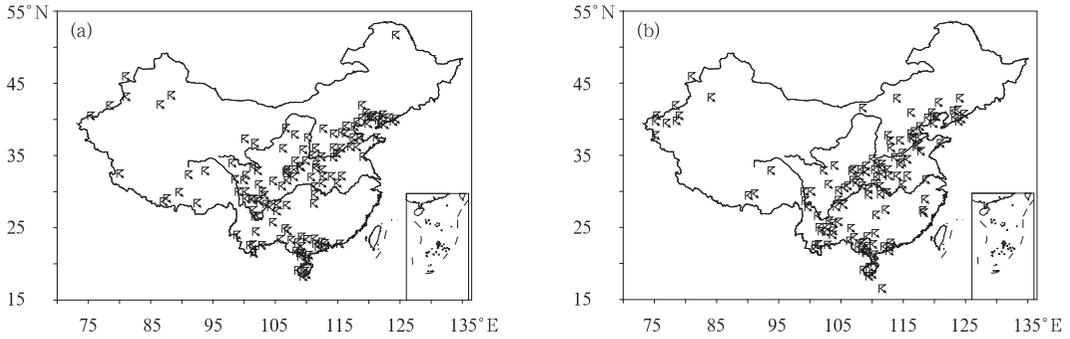


图 5 2010 年 8 月 20 日未来 24 h 雷暴预报(a)和未来 24 h 雷暴发生实况(b)

Fig. 5 The future 24-h thunderstorm forecast (a) and observations (b) on August 20, 2010

暴的发生本身是小概率事件,空报和漏报都难以避免,所以,在用本文的回归模型预报之前,加入局地总结的天气学分型和物理量消空经验作为判据首先进行消空然后进行预报是减少空报的有效方法,另外,寻找对于雷暴发生有明确指示意义的预报因子,可以改进预报模型,减少漏报。

4 总结和讨论

本文基于动力-统计的方法,利用 T213 数值预报产品资料,建立了雷暴潜势预报的 24 h 事件概率回归预报模型,并对全国 600 多个站 2010 年 4—9 月的 24 h 雷暴预报和实况进行了对比分析,得出了以下结论和讨论。

(1)基于 T213 预报产品计算得到的对流参数物理意义明确,与雷暴有无事件相关系数较高,在雷暴潜势预报方程贡献很大。

(2)雷暴发生实况和雷暴预报的结果对比分析表明:基于动力-统计的事件概率回归方法的预报效果对区域性雷暴的预报指示性较强,尤其对于雷电频发的地区效果更好。

(3)基于大尺度模式的输出产品,对数值预报产品进行解释和应用,在单站雷暴发生预报及全国和区域性雷暴预报方面可取得较好效果。

参考文献

[1] 孙明生,汪细明,罗阳,等.北京地区强对流天气展望预报方法研究[J].应用气象学报,1996,7(3):336-343.

[2] 杨仲江,唐晓峰.逐步消空法在上海雷电潜势预报中的应用[J].气象科学,2009,29(6):810-814.

[3] 吴秦,俞小鼎,席世平,等.基于配料法的“08.6.3”河南强对流天气分析和短时预报[J].气象,2011,37(1):48-58.

[4] 李勇,孔期.2006年5—9月雷暴天气及各种物理量指数的统计分析[J].气象,2009,35(2):64-70.

[5] 周后福,邱明燕,张爱民,等.基于稳定度和能量指标作强对流天气的短时预报指标分析[J].高原气象,2006,25(4):716-722.

[6] 叶爱芬,伍志方,肖伟军,等.对流有效位能在强对流预报中的应用研究[J].热带气象学报,2006,22(5):484-490.

[7] 刘伟,高艳红.能量参数在中川机场雷暴预测中的应用[J].高原气象,2007,26(4):791-797.

[8] 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):401-409.

[9] 张一平,王新敏,牛淑贞,等.河南省强雷暴地闪活动与雷达回波的关系探析[J].气象,2010,36(2):54-61.

[10] 王彦,唐熠,赵金霞,等.天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J].气象,2009,35(5):91-96.

[11] 廖玉芳,潘志祥,郭庆.基于单多普勒天气雷达产品的强对流天气预报预警方法[J].气象科学,2006,26(5):564-571.

[12] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社,1990:69-74.

[13] 赵声蓉,赵翠光,邵明轩.事件概率回归估计与降水等级预报[J].应用气象学报,2009,20(5):521-529.

[14] 高洁,刘端次,靳英燕.用事件概率回归方法预报咸阳机场辐射雾消散[J].气象,2005,31(4):81-83.

[15] 刘健文,郭虎,李耀东,等.天气分析预报物理量计算基础[M].北京:气象出版社,2005:91-143.

[16] 何立富,周庆亮,湛芸,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.