

王新敏,张霞,徐文明,等. T213/T639 数值产品在河南省雷电潜势预报中的释用[J]. 气象,2011,37(5):576-582.

T213/T639 数值产品在河南省 雷电潜势预报中的释用^{*}

王新敏^{1,2} 张霞² 徐文明² 鲁坦²

1 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 郑州 450003

2 河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 利用河南省地面观测站 1960—2005 年的雷暴观测资料分析了全省雷暴活动的时空分布特征。根据雷暴活动特征和雷暴天气产生的环境场条件,基于 T213/T639 数值模式输出产品计算了多个大气动力、热力参数,经诊断及相关性分析后选取与地闪关系较好的对流稳定度指数、850 hPa 假相当位温、400~850 hPa 垂直风切变等 5 个参数作为预报因子,采用 ADTD 地闪定位资料和 T213/T639 数值模式输出产品,分别建立雷电潜势预报模型。雷电潜势预报方法于 2008—2009 年在河南省汛期业务中应用评估表明,基于 T213/T639 数值产品的雷电潜势预报技术方法可以为河南省雷电天气的落区预报提供客观定量的参考和依据,且两者都对低槽切变型预报效果最好。

关键词: T213/T639 数值产品, 雷电, 潜势预报, 显著性检验, 评估

Interpretation and Use of T213 and T639 Output Products on the Lightning Potential Forecast in Henan

WANG Xinmin^{1,2} ZHANG Xia² XU Wenming² LU Tan²

1 CMA/Henan Key Laboratory of Agrometeorological Ensuring and Applied Technique, Zhengzhou 450003

2 Henan Provincial Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: The thunderstorm data from surface observation station from 1960 to 2005 are used to analyze the temporal and spatial characteristics of thunderstorm activities in Henan. According to the activity characteristics and the environmental conditions of the thunderstorm, plenty of the atmospheric dynamical and thermal parameters are calculated based on the numerical products from T213 and T639. Through the diagnostic analyses and correlative analyses, 5 parameters with better relation to the ground flash are picked as forecasting indexes, that is, the convective stability index, the pseudo-equivalent potential temperature on 850 hPa, and the vertical wind shear between 400 hPa to 850 hPa and so on. Then, the ADTD ground flash monitoring data and the numerical models T213 and T639 output data, are utilized to establish the model for the lightning potential forecast. The potential forecast method is used in the operation during the flood period from 2008 to 2009, and the assessment result shows that the lightning potential forecasting method based on the numerical data of T213 and T639 can provide objective and quantitative reference and basis for the lightning occurring area forecast of Henan and the forecasting effects for the trough and shear pattern are both good based on models T213 and T639 to different weather patterns.

Key words: T213 and T639 numerical products, lightning, potential forecast, significance test, assessment

* 河南省气象局重点科研项目“雷电潜势预报系统及预警技术研究”(Z200703)资助
2010 年 3 月 2 日收稿; 2010 年 7 月 25 日收修定稿
第一作者:王新敏,从事天气分析及预报. Email:hnwxm@cma.gov.cn

引 言

雷电已经被联合国列为“最严重的十种自然灾害之一”,常与短时暴雨、瞬时大风、冰雹、龙卷等灾害性天气伴随。国内外学者从研究闪电特性、闪电结构以及雷电与大气热力、动力条件的关系入手,取得了诸多进展^[1-15]。Brook 等^[1]指出风切变与地闪特别是正地闪有很强的相关关系;Rust 等^[2]研究强风暴发现负地闪分布在强降水核心区。Krehbiel 等^[3]发现与闪电活动相联系的负电荷区主要源地在 $-25 \sim -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (或 $-20 \sim -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$),表明云中的带电与云中的冰相过程相联系。Reap^[4]对阿拉斯加地区雷电预报的研究表明产生雷电的基本先决条件是:要求存在大范围的层结不稳定以及由局地风场和湿度提供的辐合。Ravi 等^[5]对比研究表明,多元回归方法对试验资料集和独立资料集始终都能得出较好的结果,是在业务运用中一种有潜力的预报方法。郟秀书等^[6]对青藏高原地区的闪电活动和层结状况的关系进行了研究。张义军等^[7]对 6 次不同云系电特性和回波研究认为,除不稳定能量外, $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层和 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度以及两者之间的高度差、 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层与云顶的高度差也是表征雷暴动力和电特性的重要参量;雷暴中的电活动与对流活动成正相关;郑栋等^[8]研究了多个大气不稳定参数与北京地区闪电活动的关系,并得出这些不稳定参数与闪电活动具有较好相关性的结论。但是由于监测手段的限制,加上对雷电形成机理的认识还不深入,对于雷电落区和强度的预报研究^[16-18]进展较为缓慢。目前国内对于雷电天气的定量预报研究成果比较有限。数值模式提供了丰富的物理量要素分析及预报产品,且可靠性、稳定性明显提高,已广泛应用于暴雨、强对流等灾害性天气的分析及预报。T639 模式作为 T213 的升级已经在业务中应用,并具有较好的应用前景。河南省气象台从 2006 年开始基于 T213 资料建立了河南省雷电潜势预报模型制作 24 小时雷电概率预报产品,取得了较好的效果,2009 年又将 T639 模式应用于雷电潜势预报,与 T213 并行制作雷电概率预报产品。

1 资料和方法

雷暴日资料和定义:资料来源于河南省气象信

息化资料,为河南全省 119 站人工观测的雷暴日,年代为 1960—2005 年,日界为 20:00 至次日 20:00。定义某站 1 日出现一次雷暴即为该站一个雷暴日,1 日有 3 站雷暴连片即为一个区域雷暴日。

ADTD 地闪定位资料:2004—2008 年为河南省电力部门 11 个站 ADTD 资料(见表 1)。2009 年 6 月,根据中国气象局监测预警工程安排,在开封、焦作、濮阳、商丘、宝丰、西华、正阳、南阳布设了 8 套 ADTD 型雷电探测设备,利用已有的中心站服务器,构建了气象部门自有的雷电探测系统。该系统将电力部门的三门峡站和前期郑州市气象局布设的登封站纳入其中。ADTD 资料日界均为 00:00—23:59。

表 1 河南省电力部门闪电探测站点经纬度

Table 1 The location of lightning monitoring stations subordinated to the electric power department of Henan

序号	站点	纬度/ $^{\circ}\text{N}$	经度/ $^{\circ}\text{E}$
1	安阳	36.1085	114.3274
2	焦作	35.2211	113.2413
3	三门峡	34.7956	111.1678
4	洛阳	34.6652	112.3821
5	开封	34.7758	114.3381
6	商丘	34.4246	115.637
7	宝丰	33.8727	113.0383
8	周口	33.6093	114.6498
9	南阳	33.0107	112.533
10	信阳	32.1151	114.0736
11	驻马店	33.0003	114.0153

T213/T639 资料:T213/T639 资料空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,时间分辨率分别为 6 h 和 3 h 间隔。起报时间每日两次分别是 08:00 和 20:00。T213 为 2004 年以来的资料,T639 仅为 2009 年。采用多元回归分析方法。

2 河南省雷电活动特征简介

2.1 河南省雷电活动空间分布

通过对河南全省 119 个地面观测站 1960—2005 年历年逐月雷暴日数信息化资料统计发现:河南多年平均雷暴日数为 19.4~33.0 d,雷暴日数最少为宜阳站(19.4 d),其次为新郑、郟县,最多为西峡站(33.0 d)。全省有 3 个明显的雷暴活动中心,分别是河南省的太行山地、伏牛山地和大别山地区(图 1)。

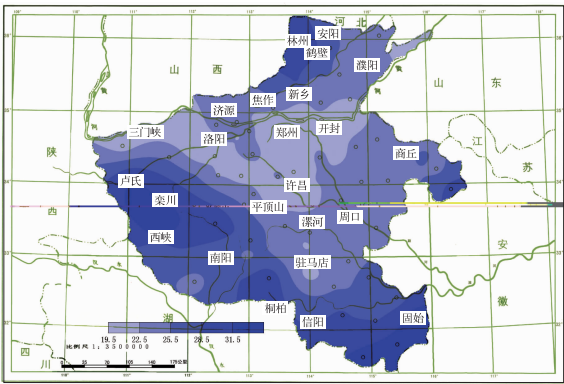


图 1 河南省多年平均雷暴日地理分布
Fig. 1 The geographical distribution of the annual average days of thunderstorm in Henan

2.2 河南省雷电活动的季节变化和日变化

河南省一年四季均有雷暴发生,夏季(6—8月)雷暴活动最为频繁,占全年雷暴日数的 75%;其次为春季(3—5月)和秋季(9—11月),分别占全年雷暴日数的 17%、7%;冬季雷暴出现的次数最少,仅占全年的 1%。从雷暴的月分布来看,7月雷暴活动最多,占全年的 35%;8月次之,占 25%;6月占 16%;11月至次年2月雷暴发生的概率很小。

根据河南省气候区划图,绘制代表站多年平均雷暴日逐月变化曲线(图2)。分析发现,北中部的3

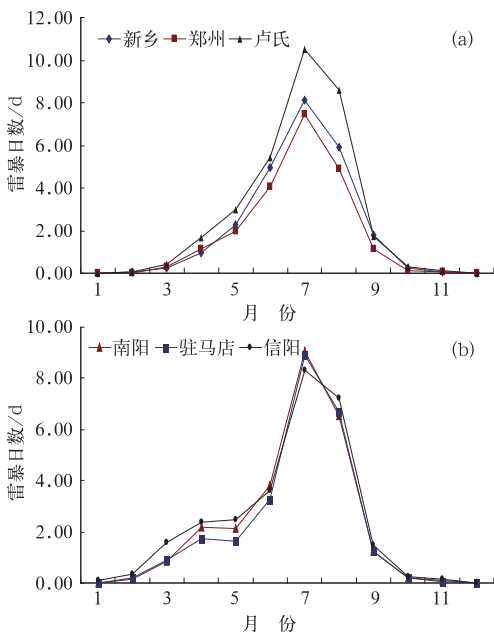


图 2 河南省 6 个代表站多年平均雷暴日逐月变化曲线
Fig. 2 The monthly variation of the annual average days of thunderstorm in the 6 representative stations of Henan

个代表站(新乡、郑州、卢氏)雷暴日的月变化趋势一致,南部 3 站(南阳、驻马店、信阳)的雷暴日的月变化趋势一致,南北代表站两类曲线有显著差异的月份为 3—4 月。3 月,南部雷暴活动迅速发展,至 5 月维持一个平台期;而北部雷暴活动自 4 月以后才呈现上升趋势,较南部偏晚 1 个月,这个特征与南部较早进入多雨期且汛期相对较长的基本气候特征相吻合。

使用 2004—2006 年 6—8 月 ADTD 地闪定位资料,统计了河南闪电频数逐时变化规律,如图 3 所示,闪电发生的时段具有明显的日变化,早晨至上午是低谷,午后开始增强到 17—18 时达到高峰,一直持续活跃到前夜,说明雷电活动与强对流天气的发生时间吻合。

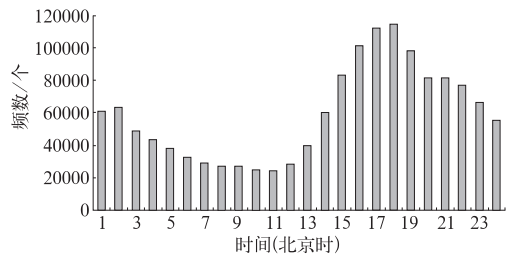


图 3 1 日中闪电频数逐时变化曲线
Fig. 3 The averaged hourly variation of the lightning times in a day based on the data of years 2004—2006

3 基于 T213/T639 数值产品的雷电潜势预报模型

根据河南省雷电活动特征,选取雷电活动相对集中的 6—8 月进行研究。本方法最初的研究采用的是 T213 数值产品,2009 年, T639 数值产品下发后,借助于 T213 模式的研究思路和方法,用 T639 数值模式输出产品进行了建模。本文以 T213 资料的释用为例进行方法介绍。

由于河南省雷电发生时段主要在午后开始持续到前夜,2004—2006 年 T213 资料只有 20 时。因此根据雷电出现时段,选取雷电样本日当天 20:00 的 T213 模式分析场要素作为雷电潜势预报的初始场与当日 20:00 至次日 20:00 的闪电密度进行相关分析和建模,2004—2006 年共选取样本 118 个;采用 2007 年的样本共 112 个进行检验。

3.1 闪电资料的网格化和日界处理

研究表明,闪电密度(或闪电频数)可以反映闪

电活动的强度,也是雷电防护中一个重要的参量。

采用 ADTD 地闪定位资料,资料范围为河南省内(31°~37°N、110°~117°E)。将上述全省范围内的闪电资料处理成逐日的闪电密度(以闪电频数表示)网格资料,网格距取 1°×1°,以每个格点为中心点,取半径为 50 km 的区域 1 日内闪电个数总和表示该格点上的闪电密度(单位:个)。

ADTD 资料时段取每日 20:00 至次日 20:00,与数值分析预报产品时段相一致,处理后的资料可以存贮为 MICAPS 第 4 类数据格式。

3.2 雷电日的挑选

首先,根据计算的闪电密度,剔除河南省范围内 1 日中各个格点上闪电个数均为 0 的日期,剩余的日期作为初选的雷电日。

接着对初选的雷电日进行二次筛选,滤掉那些特别孤立(不成片)且孤立的格点上闪电密度<50(个)的日期。

另外,根据雷电与降水的高相关性,结合人工观测雷暴日资料,将人工观测无雷暴且又无降水的雷

电日剔除,最后得到的样本即入选为雷电日样本。

3.3 预报因子的选取

依据雷电学原理,雷暴产生需满足大气层结不稳定、水汽、抬升力三个条件,选取 19 个要素作为初选因子。这些要素表征了大气的环流场特征如湿度条件、热力条件、层结稳定度条件、动力抬升机制等等,包括:中低层(500 hPa、850 hPa)的散度、低层(850 hPa)的湿度、700 hPa 的温度、温度露点差、中低层的垂直上升运动、低层和高层的风、温度平流等。同时,还计算了与强对流活动相联系的一些气象参数,如对流稳定度指数、位势稳定度指数、风的垂直切变、差动温度平流等。通过计算各要素及参数与闪电密度的相关系数,并进行了相关系数的显著性检验,最终选取相关性较好的 5 个预报因子,分别是对流稳定度指数、850 hPa 假相当位温、700 hPa 温度、850 hPa 垂直速度、400~850 hPa 垂直风切变(相关系数见图 4),建立 24 小时雷电潜势预报的多元回归方程。

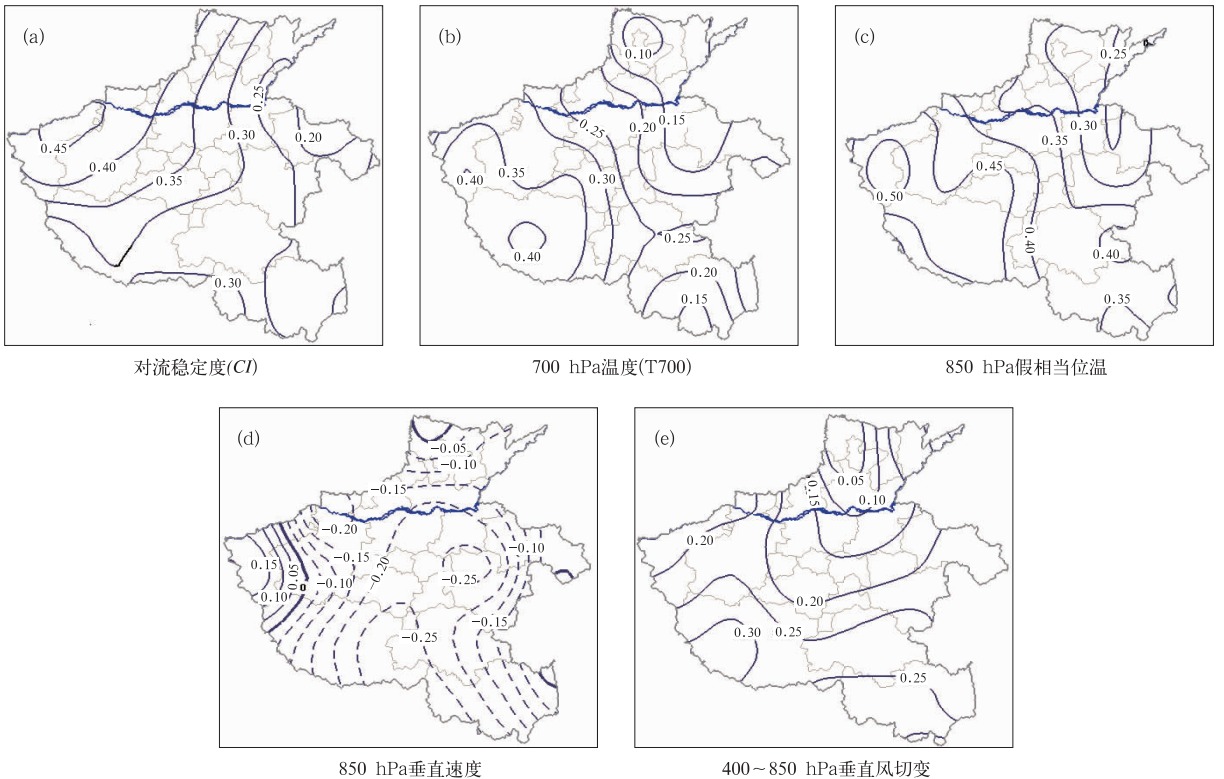


图 4 5 个预报因子与闪电密度的单相关系数

(a) 对流稳定度指数; (b) 700 hPa 温度; (c) 850 hPa 假相当位温; (d) 850 hPa 垂直速度; (e) 400~850 hPa 垂直风切变
Fig. 4 The single correlation coefficients between the lightning density and 5 forecast indexes, that is, (a) the convective stability index, (b) the temperature on 700 hPa, (c) the pseudo-equivalent potential temperature on 850 hPa, (d) the vertical velocity on 850 hPa, and (e) the vertical wind shear between 400 hPa to 850 hPa

为检验计算的相关系数是否显著,据文献[19],采用 t 检验法。即在原假设 $H_0(\rho=0)$ 的条件下,统计量 $t = \sqrt{n-2} \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}$ 遵从自由度为 $n-2$ 的 t 分布。本次共参与建模的样本长度 $n=118$,当 $\alpha=0.05$,自由度 $n-2=116$ 时, $t_{\alpha}=1.98$,如果 $|t| > t_{\alpha}$,认为相关系数显著。为简便起见,可利用 t_{α} 求得一个临界的相关系数 r_c ,当 $|r| > r_c$ 时,认为相关系数显著。经计算, $r_{c,0.05}=0.18$ 。由前面计算的相关系数可知,相关性较好的 5 个因子大部分格点上的相关系数都在临界值 ($r_c=0.18$) 之上。

3.4 多元回归方程的建立

3.4.1 因子的 0,1 化处理

通过与雷电日样本一一对应的各因子分析,对于每一个预报因子,取一合适的临界值进行 0,1 化处理。各因子 0,1 化临界值如表 2。

表 2 各因子 0,1 化临界值

Table 2 The critical threshold for each forecast index

因子名称	临界值
对流稳定度指数 (x_1)	$x_1 \geq 6$ °C 时取值 1, 否则取 0
850 hPa 的假相当位温 (x_2)	$x_2 \geq 75$ °C 时取值 1, 否则取 0
700 hPa 的温度 (x_3)	$x_3 \geq 10$ °C 时取值 1, 否则取 0
850 hPa 的垂直速度 (x_4)	$x_4 \leq -5 (10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1})$ 时取值 1, 否则取 0
400~850 hPa 的垂直风切变 (x_5)	$x_5 \geq 1.5 (10^{-3} \text{ s}^{-1})$ 时取值 1, 否则取 0

将样本日的各个格点上雷电密度 < 50 时取 0, 否则取为 1。

3.4.2 方程系数的求取

采用最小二乘法进行多元回归分析。雷电概率预报中选用了 5 个预报因子,制作的是 $31^{\circ} \sim 37^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 117^{\circ} \text{E}$ 范围内每个格点上的概率预报方程。因此,此范围内共计 56 个格点上每个格点上的方程为 $y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5$, 每个格点上分别有 6 个不相同的方程系数和 5 个不相同的预报因子值。计算后的数值为雷电发生的概率潜势,因概率在 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,取 Y 值为 1。经回代分析后,取雷电概率预报值 $\geq 55\%$ 的区域为雷电可能发生的区域。

3.4.3 方程的显著性检验

利用复相关系数进行方程的显著性检验^[16],可用复相关系数求得 F 值,当显著水平 $\alpha=0.05$ 时,

$F_{\alpha}=2.31$,从 F 检验分布上看,省内除东南部小部分区域外,大部分地区方程是显著的(图略)。

3.4.4 效果检验

用 2004—2006 年的资料对所建雷电概率预报方程进行回代,雷电概率预报准确率在 $62\% \sim 88\%$ (图略)。利用 2007 年 6—8 月 T213 资料进行试报,资料集共 112 天,全省概率预报的准确率为 $70\% \sim 95\%$,其中黄淮之间的预报准确率基本在 80% 以上(图略)。检验结果表明,利用数值预报提供的要素产品进行雷电的概率预报是可行的,其预报结果可为河南省的雷电预报提供客观定量的参考依据。

4 业务应用情况

4.1 2008—2009 年预报结果评估

2008 年,基于 T213 产品的雷电概率预报方法正式投入业务化运行。2009 年,基于 T213 产品的雷电概率预报方法继续在业务中应用,同时对 T639 数值产品在雷电概率预报中进行了释用。

表 3 给出了省内 6 个代表站 2008—2009 年 6—8 月的雷电天气的 TS 评分;2009 年 6—8 月 6 个代表站在不同天气型下雷电天气概率预报的 TS 评分见表 4;表 5 是 2009 年 6—8 月低槽切变型(14 例)雷电天气概率预报的评估结果。

表 3 2008—2009 年 6—8 月 6 个代表站雷电概率潜势预报的 TS 评分 (%)

Table 3 The TS scores of the lightning probability forecast during June to August, 2008—2009 (unit: %)

站名	2008 年 (基于 T213)	2009 年	
		基于 T213	基于 T639
郑州	26.7	19.8	21.8
新乡	25.4	18.3	17.1
卢氏	38.0	37.7	3.9
南阳	36.0	25.3	21.6
驻马店	34.8	24.0	18.7
信阳	44.7	32.6	30.4

2008 年,基于 T213 数值产品的雷电概率预报 TS 评分全省 119 站中,有 17 站 TS 低于 10% ,总体 $20\% \sim 45\%$ 。2009 年,基于 T213 数值产品的雷电概率预报 TS 评分全省仅有 7 站低于 10% ,其余站为 $20\% \sim 40\%$ (6 个代表站的预报正确率为 $64.9\% \sim 82.8\%$);基于 T639 产品的雷电概率预报全省 TS 评分为 $10\% \sim 30\%$,正确率为 $60\% \sim 80\%$ (省内 6 个代

表 4 2009 年 6—8 月 6 个代表站在不同天气型下雷电概率潜势预报的 TS 评分 (%)

Table 4 The TS scores of the lightning probability forecast for different weather patterns during June to August, 2009 at 6 representative stations (unit: %)

站名	低槽切变型 T213/T639	副高边缘型 T213/T639
郑州	17.4/12.5	41.7/10
新乡	32.6/8.4	22.9/10
卢氏	72.3/10	33.3/0
南阳	64.4/48.5	23.8/25.4
驻马店	54.2/53.5	12.2/4.6
信阳	64.1/70	24.3/19.1

表 5 2009 年 6—8 月低槽切变型(14 例)全省 119 站平均的雷电概率潜势预报的评估 (%)

Table 5 The average assessment (%) of the lightning probability forecast for the trough and shear pattern during June to August, 2009 at 119 stations of Henan Province

模式	TS	空报率	漏报率	正确率
T213	42.9	50.6	23.8	60
T639	27.9	30.3	65.7	64.8

表站 2008—2009 年 6—8 月的 TS 评分见表 3)。

通过对河南省雷暴日(2002—2005 年 321 个个例)高空形势特征的分析归纳总结,将河南雷暴天气型分为:低槽切变型、冷涡型、副高边缘型三类,所占比例分别为 50.4%、21.2%、28.3%,说明低槽切变型最多。2009 年 6—8 月 14 次低槽切变型(6—7 月)、4 次冷涡型(6 月上中旬)、14 次副高边缘型(7 月中下旬—8 月)6 个代表站雷电天气的概率预报产品的 TS 评分表明:无论是 T213 还是 T639,都对低槽切变型预报效果最好,其次是副高边缘型(冷涡型

由于个例太少代表性不高,见表 4)。两个模式都对副高边缘型空报较多,对冷涡型漏报较多。低槽切变型产生的雷电天气系统性强且移动规律好,范围较大,是评分较高的主要原因;冷涡型出现雷电的范围较小,局地性强易造成漏报;副高边缘型空报较多的主要原因是动力、热力条件容易满足。

对低槽切变型,全省 119 站平均的 TS 评分 T213、T639 分别为 42.9%、27.9%,平均正确率分别为 60%、64.8%,空报率分别为 50.6%、30.3%;漏报率为 23.8%、65.7%(见表 5)。

2009 年汛期,两个模式的释用效果评估结果表明,T213 空报较多,但漏报较低;T639 空报较 T213 低,但漏报较 T213 高(表 3、表 4 和表 5),这与建模时所选的预报因子、因子阈值及模式对不同要素的预报准确性等因素有关,基于 T639 模式的预报 TS 评分略低于 T213 模式,可能与 T639 模式产品下发时间短,用于建模的资料序列较短预报模型代表性较差有较大关系,但评估结果同样表明,T639 模式释用的预报正确率较 T213 模式高。在今后的业务运行中,随着资料序列的增加,会不断改进完善预报模型,逐步提高雷电概率预报准确率。

4.2 2009 年个例分析

2009 年 8 月 16 日下午到夜间,受副热带高压边缘西南气流影响,河南省大部地区出现雷电天气(图 5c)。上午,T213 模式的雷电概率潜势预报(16 日 08:00 至 17 日 08:00,图略)未来 24 小时内河南省的西部、南部将有雷电(雷电概率 $\geq 55\%$);同时次

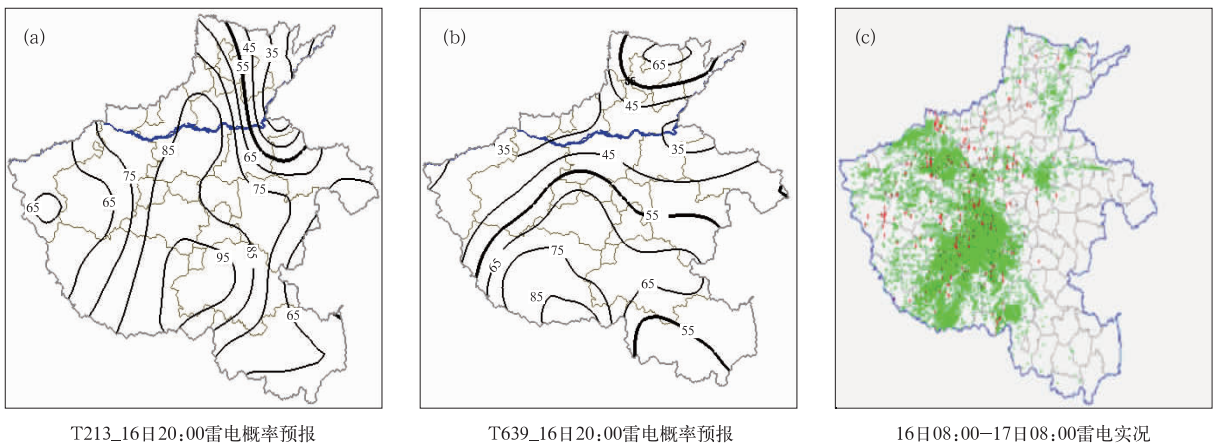


图 5 2009 年 8 月 16 日雷电个例预报及实况(黑色加粗线表示雷电概率 55% 的等值线)

(a) T213_16 日 20:00 雷电概率预报; (b) T639_16 日 20:00 雷电概率预报; (c) 16 日 08:00—17 日 08:00 雷电实况
Fig. 5 The real lightning (c) and the probability forecasts on August 16, 2009 by two models T213 (a) and T639 (b)

的 T639 模式的雷电概率预报(图略),仅有河南省西南部小范围内雷电活动出现的概率达到预报阈值。下午,两个模式的雷电概率预报(16 日 20:00 至 17 日 20:00)达阈值的范围扩大(如图 5),实况是河南省的西南部 16 日下午首先出现雷电,随后雷电扩展至省内大部,而且西南部是雷电密度高发区。根据天气形势演变,参考雷电概率潜势预报结果,预报员于 16 日中午发布了雷电预报并在 14:20 首次发布了雷电黄色预警信号,20:25 继续发布内容为“当天夜里雷电活动将会持续”的雷电黄色预警信号。对本次个例 T213、T639 模式 20:00 雷电概率预报 119 站评估表明 TS 平均得分分别为 63%、27%;空报率分别为 27%、13%;漏报率分别为 9.2%、45%。

5 结论与讨论

(1) 河南省雷电活动有 3 个明显中心,分别是河南省的太行山地、伏牛山地和大别山地区;省内一年四季均有雷暴发生的可能,夏季(6—8 月)雷暴活动最为频繁,且雷电发生的时段具有明显的日变化,早晨至上午是低谷,午后开始增强到 17—18 时达到高峰,一直持续活跃到前半夜。

(2) T213/T639 提供了时空分辨率较高的要素预报产品,可应用于雷电潜势预报的方法研制。雷电与对流稳定度指数、850 hPa 的假相当位温、700 hPa 的温度、850 hPa 的垂直速度、400~850 hPa 的垂直风切变等因子的相关性较好。

(3) 对不同天气型下的雷电潜势预报结果检验评估表明,无论是 T213 还是 T639,都对低槽切变型预报效果最好,其次是副高边缘型,冷涡型由于个例太少代表性不高有待进一步检验。两个模式都对副高边缘型空报较多,对冷涡型漏报较多。低槽切变型产生的雷电天气系统性强且移动规律好,范围较大,是评分较高的主要原因;冷涡型出现雷电的范围较小,局地性强易造成漏报;副高边缘型空报较多的主要原因是动力、热力条件容易满足。

(4) 对两个模式产品在 2009 年汛期雷电潜势预报中释用效果评估发现, T213 空报率较高而 T639 漏报率较高, T639 模式的 TS 评分略低于 T213 模式(T639 模式产品下发时间短,用于建模的序列资料较短),但 T639 模式正确率则高于 T213 模式。

(5) 2008—2009 年两年的业务运行结果和个

例对比分析表明,该研究对河南省的雷电落区具有较好的预报能力,可供预报员制作雷电预报预警时参考。今后还需要不断改进完善预报模型,逐步提高雷电概率预报准确率。

参考文献

- [1] Brook M, Nakano M, Krehbiel P. The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorm[J]. *J Geophys Res*, 1982, 87:1207-1215.
- [2] Rust W D, MacGoman K B, Arnold R T. Positive cloud to ground lightning flashes in severe storms[J]. *Geophys Res Lett*, 1981, 8:791-794.
- [3] Krehbiel P R, Brook M, McCrog R A. Analysis of the charge structure of lightning discharge to ground[J]. *J Geophys Res*, 1979, 84:2432-2456.
- [4] Reap R M. Climatological characteristics and objective prediction of thunderstorms over Alaska[J]. *Wea Forecasting*, 1991, 6:309-319.
- [5] Ravi N, Mohanty U C, Madan O P, et al. Forecasting of thunderstorms in the pre-monsoon season at Delhi[J]. *Meteor Appl*, 1999, 6:29-38.
- [6] 鄯秀书, Ralf Toumi. 卫星观测到的青藏高原雷电活动特征[J]. *高原气象*, 2003, 22(3):288-293.
- [7] 张义军, 华贵义, 言穆弘. 对流和层状云系电活动、对流及降水特性的相关分析[J]. *高原气象*, 1995, 14(4):298-402.
- [8] 郑栋, 张义军, 吕伟涛, 等. 大气不稳定性参数与闪电活动的预报[J]. *高原气象*, 2005, 24(2):196-203.
- [9] 薛秋芳, 孟青, 葛润生. 北京地区闪电活动及其与强对流天气的关系[J]. *气象*, 1999, 25(11):15-19.
- [10] 许爱华, 李玉塔, 郑婧, 等. 两次致灾雷电天气过程对比分析[J]. *气象*, 2008, 34(4):71-78.
- [11] 冯桂力, 王俊, 牟容, 等. 一次中尺度雷暴大风过程的闪电特征分析[J]. *气象*, 2010, 36(4):68-74.
- [12] 林开平. 福建省汛期暴雨天气雷电特征的个例分析[J]. *南京气象学院学报*, 1999, 22(2):155-163.
- [13] 孙军, 周兵, 宗志平, 等. 重庆开县雷击事件天气背景分析[J]. *气象*, 2010, 36(3):70-76.
- [14] 王婷婷, 王迎春, 陈时轩, 等. 北京地区干湿雷暴形成机制的对比分析[J]. *气象*, 2011, 37(2):142-155.
- [15] 雷雷, 孙继松, 魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. *气象*, 2011, 37(2):136-141.
- [16] 蔡晓云, 宛霞, 郭虎. 北京地区对流云天气闪电特征及短时预报[J]. *气象*, 2003, 29(8):16-21.
- [17] 郝莹, 姚叶青, 陈焱, 等. 基于对流参数的雷电潜势预报研究[J]. *气象*, 2007, 33(1):51-56.
- [18] 罗树如, 毛连海, 胡新华. 雷电落点概率和强度预报方法初探[J]. *气象与减灾研究*, 2008, 31(2):65-69.
- [19] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京:气象出版社, 2002.