

刘维成, 苟尚, 傅朝. 2015. 雷达资料在高原东北侧雷电预警中的应用. 气象, 41(10):1253-1259.

雷达资料在高原东北侧雷电预警中的应用^{*}

刘维成 苟尚 傅朝

兰州中心气象台, 兰州 730020

提 要: 利用 LD-II 闪电定位仪资料和兰州 CINRAD/CC 雷达资料, 对甘肃中部 2011 和 2012 年夏季对流性降水过程中雷达回波单体与雷电活动之间的对应关系进行分析, 提取反映较好的雷达产品特征量, 建立雷电预警方案。结果表明, 35 dBz 回波顶高(ET)突破 -10°C 层高度和 40 dBz 回波顶突破过 -10°C 层高度等 2 个指标的雷电预警效果较好, 预警时间可分别平均提前 23 和 16 min; 垂直累积液态含水量(VIL)可作为判断雷电发生的充分条件, 但其值应小于 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ET 大于 10 km 预警雷电发生, 预警时间可提前平均为 7 min。利用建立的雷电预警方案对 2013 年的个例进行效果检验分析, 结果表明该方案在雷暴天气具有较好的预警效果。

关键词: 雷达, 闪电定位, 雷电预警

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.008

Application of Radar Data in Lightning Warning over the Northeast of Tibetan Plateau

LIU Weicheng GOU Shang FU Zhao

Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020

Abstract: Based on the LD-II lightning locator and Lanzhou CINRAD/CC radar datasets, the relationship between the radar echo parameter and lightning activity area was analyzed using the summer precipitation cases in the central of Gansu Province in 2011 and 2012 respectively. Then, the key characteristics of the radar data were summarized and a lightning warning program was established. The results show that the echo top of 35 dBz and 40 dBz reflectivity above the height of -10°C layer can be used in the lightning warning, which can make the prediction time of lightning warning be 23 and 16 minutes in advance respectively. Vertically integrated liquid (VIL) with values less than $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ can be utilized as a sufficient condition to judge whether thunderstorm will occur. Generally the warning should be 7 minutes earlier than the occurrence of lightning when the echo top (ET) exceeds 10 km. The lightning warning program was tested using the cases in 2013, and the result indicates that this program has a good effect on the thunderstorm warning.

Key words: radar, lightning location, lightning warning

引 言

如何利用常规观测资料和非常规观测资料得出

雷暴天气的规律, 并对雷电的发生做出准确的预报预警, 是当前研究的热点和难点。雷电与对流性天气过程有关, 而天气雷达是对流云观测的最佳手段, 因此研究雷电活动与雷达回波参数的关系对于雷电

* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2015-080)、气象关键技术集成与应用重点项目(CMAGJ2013Z09)和气象关键技术集成与应用面上项目(CMAGJ2015M62)共同资助

2014 年 7 月 6 日收稿; 2014 年 12 月 15 日收修定稿

第一作者: 刘维成, 主要从事雷达资料应用及数值预报研究工作. Email: gsluwc@163.com

的预报预警具有重要意义。Buechler等(1990)通过研究美国的雷暴个例,提出利用 -10°C 层高度处的回波强度和回波顶高2个阈值建立雷电预警指标; Mosier等(2011)通过统计分析67384个对流单体,指出在 -15 和 -20°C 层高度至少两次连续体扫都能探测到30 dBz雷达回波可以作为雷电预警指标,检验发现该指标的临界成功指数为68%;中国气象科学研究院雷电临近预警系统(CAMS-LNWS)(孟青等,2009;吕伟涛等,2009)采用双回波强度阈值和某等温度高度层上的回波强度阈值,结合闪电定位资料预报未来雷电发生概率;彭丽英等(2007)研究发现,广东中部地区负闪电和雷达回波强度存在着一定的统计关系,高负闪频数既不发生在最强回波区,也不发生在弱回波区,而是发生在较强回波区;易笑园等(2009)、石玉恒等(2012)、张一平等(2014)分别对不同雷暴系统的雷达回波特征做了分析,找出了雷暴天气预警指标;刘冬霞等(2010)分析中尺度对流系统的闪电活动变化特征发现负地闪主要集中在雷达回波大于40 dBz区域,而正地闪分布在30~40 dBz的回波范围中。

由于不同地区的气候特征差异很大,雷电预警指标也各不相同,本文结合青藏高原东北侧地区的气候特征,对比分析雷暴天气的雷达回波和闪电活动的相关特性,试图找出适合本地的雷电预警指标,并能通过实际业务检验。

1 资料来源和雷电预警检验方法

1.1 资料来源和选例

雷达资料来源于甘肃省兰州市的CINRAD/CC型新一代天气雷达($36^{\circ}00'36''\text{N}$, $103^{\circ}51'3''\text{E}$, 2189.65 m),有效探测范围为150 km(图1),库长为300 m,扫描方式为VCP21,即5~6 min扫描14个仰角(第1至14层扫描仰角分别为 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 5.3° 、 6.2° 、 7.5° 、 8.7° 、 10.0° 、 12.0° 、 14.0° 、 16.7° 、 19.5°)。文中采用资料为经过雷达基数据插值后得到的回波等高平面位置显示(Constant Altitude Plan Position Indicator, CAPPI)产品,高度分别率为21层(分别为0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、5.5、6、7、8、9、10、12、14、15.5、17和19 km),其具体算法和实现见文献(肖艳姣等,2006)。

闪电资料来源于甘肃中部地区的LD-II型雷电定位系统,其探测原理是以测量雷击甚低频电磁脉冲到达不同基站雷电定位仪的时间差作为定位基础,精确地测定出闪电发生的地理位置,系统共有5个单站探头(分别位于永登、靖远、临夏、定西和兰州)和1个分析处理器(位于兰州),采用授时型GPS作时间基准,时间精度达 $0.1\ \mu\text{s}$,探测距离可达600 km,定位误差小于500 m,探测数据中包括闪电发生序号、时间、经度、纬度、闪电强度、陡度、电荷量和类型等。

不同温度层高度来自兰州市榆中观测站($35^{\circ}52'\text{N}$, $104^{\circ}9'\text{E}$, 1875.4 m)的常规探空数据。各观测站点的详细分布见图1。

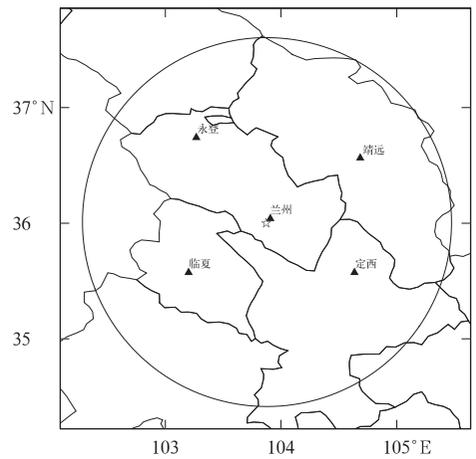


图1 试验区域

(☆为雷达观测站点,圆圈为雷达观测范围150 km,▲为闪电定位仪分布站点)

Fig. 1 Experimental zone

(☆ represents the radar station, circle is for the 150 km radar detection range, ▲ are lightning locator sites)

本文中选取的单体个例为2011年5—8月和2012年5—8月间发生在甘肃中部地区的17次对流性降水过程个例,将组合反射率因子 ≥ 35 dBz的回波确定为单体,并按照雷达观测时间间隔(5~6 min)分别将17次个例解析为多个单体样本,即1个雷达观测时间间隔中出现的单体视为1个单体,17次个例可确定单体样本95个。考虑到闪电定位仪观测的误差,将对应闪电发生区域出现5次以上的单体视为雷暴单体,其余的单体则为非雷暴单体,最终确定雷暴单体(发生闪电)样本59个和非雷暴单体(未发生闪电)样本36个,其简要情况汇总见表1。

表 1 个例说明

Table 1 Case description

编号	发生日期/年月日	发生时间/BT	单体个数	单体属性	最大反射率/dBz	地闪次数
1	20110703	15:36—23:24	10	雷暴单体	45	121
2	20120510	16:12—18:24	6	雷暴单体	43	108
3	20120520	20:48—23:48	7	雷暴单体	43	180
4	20120521	01:00—01:24	2	雷暴单体	41	15
5	20120708	08:42—08:48	2	雷暴单体	38	6
6	20120720	14:42—22:36	9	雷暴单体	45	83
7	20120729	21:06—23:54	10	雷暴单体	46	126
8	20120730	01:06—01:36	3	雷暴单体	48	49
9	20120813	19:36—23:54	6	雷暴单体	48	96
10	20120816	23:00—23:54	4	雷暴单体	41	22
11	20110703	13:06—14:06	5	非雷暴单体	39	—
12	20120510	15:36—18:00	7	非雷暴单体	44	—
13	20120520	21:18—21:54	3	非雷暴单体	35	—
14	20120708	05:36—08:18	7	非雷暴单体	39	—
15	20120720	13:42—14:12	4	非雷暴单体	38	—
16	20120729	21:06—22:24	4	非雷暴单体	37	—
17	20120813	11:48—12:42	6	非雷暴单体	39	—

1.2 雷电预警检验方法

$$CSI = \frac{A}{A+B+C} \times 100\% \quad (3)$$

通过分析雷达产品特征量及与雷电活动区的对应关系,利用列联表的方法对每个产品特征量进行雷电预警可靠性检验分析,具体分类、检验方法如下。

表 2 雷电预警检验分类表

Table 2 Test classification in lightning warning

预警	实况		
	有雷暴	无雷暴	总数
有雷暴	A	B	A+B
无雷暴	C	D	C+D
总数	A+C	B+D	A+B+C+D

成功预警率(Probability of Detection, POD)表示在实况观测中,雷电预警成功的百分比,其值介于 0~1,数值越大越接近成功预警,定义为

$$POD = \frac{A}{A+C} \times 100\% \quad (1)$$

预警虚报率(False Alarm Ratio, FAR)表示在雷电预警中虚报的百分比,其值介于 0~1,数值越小越接近成功预警,定义为

$$FAR = \frac{B}{A+B} \times 100\% \quad (2)$$

临界成功指数(Critical Success Index, CSI)表示在整个雷电预警事件中(包括正确预警、虚报预警和漏报预警)正确预警的百分比,其值介于 0~1,数值越大越接近成功预警,定义为

2 雷电活动与不同高度回波强度的关系

观测发现,闪电主要活动中心与过冷云层有关联,云地闪电负电荷区主要源地位于-25℃~-5℃等温度高度层(陈渭民,2006)。因此,在甘肃中部不同的地理位置和气候特征背景下,本文提出 12 个雷电预警的回波强度随高度分布特征量(表 3)进行检验分析,根据闪电定位资料中发生地闪的时间和地理位置,分别统计所选个例中对应地闪时段的雷达回波体扫资料进行云地闪预警的效果,从中得出一

表 3 不同预警指标

Table 3 Different warning indicators

预警指标编号	特征回波强度/dBz	特征等温度高度层/℃
1	30	-10
2	35	-10
3	40	-10
4	45	-10
5	25	-15
6	30	-15
7	35	-15
8	40	-15
9	20	-20
10	25	-20
11	30	-20
12	35	-20

个最好的指标。

通过对 95 个单体中 20、25、30、35、40 和 45 dBz 雷达回波顶高在单体发展演变过程中的统计,结合各单体发生当日探空的 -10 、 -15 和 -20 °C 层高度进行分析,绘制成图 2。从图 2a 可以看出,所有雷暴单体中 30 dBz 回波顶高都能突破 -10 °C 层高度,35、40 和 45 dBz 回波顶高突破这一高度的雷暴单体所占比重逐渐下降,只有 26% 的雷暴单体中 45 dBz 回波顶高突破该高度。而对于非雷暴单体中,30 dBz 及以上的回波顶高突破 -10 °C 层高度所占比重较雷暴单体要小的多,40 和 45 dBz 回波顶高突破该高度的非雷暴单体各只有 1 次个例;对于

-15 °C 层(图 2b),其结果与 -10 °C 层相类似,但该层统计的回波强度均较突破前一个高度层的回波强度小 5 dBz,在该层上雷暴单体与非雷暴单体的区别较大在 35 dBz 回波顶高,两者突破这一高度所占比重分别占其各自单体总数的 77% 和 23%。对于 -20 °C 层(图 2c),其结果与前 2 层的统计也一致,同样的该层统计的回波强度均较突破 -15 °C 层高度的回波强度小 5 dBz,雷暴单体与非雷暴单体的随回波强度的增大,其顶高突破该层的单体比例逐渐减小,且非雷暴单体中突破该层的单体比例总是比雷暴单体中突破该层的单体比例小,但对于两者的区分在该层却没有明显的指标。

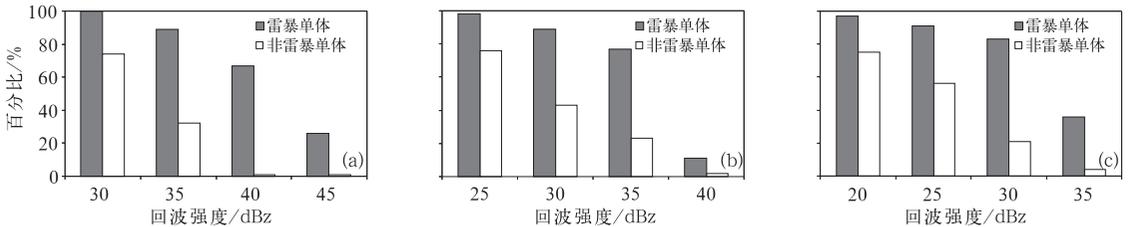


图 2 单体不同回波强度顶高突破 -10 °C (a)、 -15 °C (b) 和 -20 °C (c) 等温度高度层百分比

Fig. 2 Percentage of the echo top (ET) above the height of -10 °C layer (a), -15 °C layer (b), -20 °C layer (c)

表 4 不同指标预警结果检验

Table 4 Test results of the different warning indicators

回波强度	-10 °C				-15 °C				-20 °C			
	POD	FAR	CSI	T_f /min	POD	FAR	CSI	T_f /min	POD	FAR	CSI	T_f /min
20 dBz	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00	0.23	0.77	29
25 dBz	—	—	—	—	1.00	0.34	0.66	33	0.95	0.18	0.79	23
30 dBz	1.00	0.29	0.71	34	0.97	0.31	0.68	24	0.90	0.08	0.83	18
35 dBz	0.98	0.20	0.79	23	0.91	0.16	0.78	17	0.83	0.04	0.80	13
40 dBz	0.94	0.13	0.82	16	0.75	0.08	0.70	12	—	—	—	—
45 dBz	0.58	0.09	0.53	13	—	—	—	—	—	—	—	—

利用列联表的计算结果,检验分析在选取的 95 次单体个例中不同指标开展雷电预警的实际效果统计(表 4)。从中看出,对于某一温度层,POD 随着突破该温度层高度的回波强度阈值的增大而减小,同时随着某一温度层的增高,利用同一回波强度阈值突破该温度层预警雷暴的 POD 也逐渐减小;但是,随着回波强度阈值增大和温度层的增高,FAR 值也是呈现下降趋势。两者共同所反映的趋势表明,将雷电产生的条件范围设置较为宽广时,其成功预警率就会很高,但其虚报率也会很高,将雷电产生的条件范围设置较为狭窄时,其成功预警率就会下降,但其虚报率也会下降;同时也表明,回波强度阈

值越大、各温度层越高,即对应对流活动越强烈时,触发雷电的条件也越充足,雷电预警的虚警率 FAR 就会很小。因此,要想找到一个最为合适的预警指标,必须权衡各个指标的不同表现(POD、FAR、CSI),分析表 4 可以看出 35 dBz 回波顶高突破 -10 °C、40 dBz 回波顶高突破 -10 °C 和 35 dBz 回波顶高突破 -15 °C 等 3 个指标预警效果较好,3 个指标成功预警率 POD 分别为 0.98、0.94 和 0.91,且 3 个指标虚警率 FAR 均不超过 0.2。引入预警提前时间(T_f)的概念,其定义为雷达回波出现预警指标的时间与首次地闪发生时间的的时间间隔,3 个指标的预警提前平均时间分别为 23、16 和 17 min。综

合考虑 3 个指标的预警效果,选取 *CSI* 较大的 2 个指标(35 dBz 回波顶高突破 -10°C 层、40 dBz 回波顶高突破 -10°C 层)为雷电的预警指标。

3 雷电活动与 *VIL* 的关系

垂直累积液态含水量 (Vertically Integrated Liquid, *VIL*) 产品表征在降水云团中,某一确定的底面积的垂直柱体内液态水总量分布,它反映的是反射率因子的垂直累积,代表了风暴的综合强度,*VIL* 值随着反射率因子的增强而增强,是判别强降水及其降水潜力、强对流天气造成的暴雨、暴雪和冰雹等灾害性天气的有效工具之一。

统计 95 次对流单体的 *VIL* 值分布情况发现(表 5),雷电活动区 *VIL* 值的变化没有明显的规律,无论雷暴单体还是非雷暴单体 *VIL* 值几乎全部小于 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,其余的雷暴单体其 *VIL* 分布在 $10 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,非雷暴单体几乎没有大于

$10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,但有两例非雷暴单体 *VIL* 值位于 $35 \sim 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。李南等(2006)对此解释为暴雨天气过程其整层的水汽含量很高,有利于凝结成降水,中低层水汽充足,对流并不需发展太高就可以完成凝结降水;但冰雹等天气过程只是下层的水汽含量高,高层水汽含量很低,有利于对流不断向上发展,产生冰相粒子和过冷水滴,而不至于在中层由于水汽饱和而产生降水,过早地释放了能量,从而丧失了形成冰相粒子所需要的水汽和很低的温度条件,不利于闪电的形成,因此雷电预警中 *VIL* 不能太小,否则水汽量不足,也不能过大,在达到冻结高度之前便会凝结降水而无法在更高处产生大量的冰相粒子和电荷。

本文分析表明,对于雷电预警 *VIL* 值指示意义较小,其指标不是必要条件,可以将其作为判断雷暴是否发生的一个充分条件,即在其他条件满足时,只要 *VIL* 值大于 0 即可判断为雷暴发生,但其值也不宜过大,统计发现以小于 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 为宜。

表 5 不同 *VIL* 的雷暴单体和非雷暴单体数目(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Table 5 The number of thunderstorm and non thunderstorm with different *VIL* (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

	0~5	6~10	11~15	16~20	21~25	26~30	31~35	36~40	41~45	46~50	51~55
雷暴单体	26	23	5	3	1	0	0	0	0	0	0
非雷暴单体	21	13	0	0	0	0	0	2	0	0	0

4 雷电活动与回波顶高的关系

回波顶高(Echo Tops, *ET*)产品显示海平面以上回波强度值等于某一门限值(目前设定为回波 $\geq 18.3 \text{ dBz}$)时对应的最高高度。一般而言,对流的强弱在一定程度上和回波伸展的高度有关,因此 *ET* 产品能反映降水过程的发展情况,并可用来判断降水的性质,分析估计雷达探测范围内不同地区的对流发展与否以及对流相对强弱的情况。

统计 95 个单体中不同回波顶高的雷暴单体和非雷暴单体个数分布(表 6),可以看出所有的雷暴单体其 *ET* 值均大于 7 km,主要分布区域为 $10 \sim 12 \text{ km}$,占总雷暴单体数目的 76%,有 20%的雷暴单体

ET 值在 $12 \sim 17 \text{ km}$;对于非雷暴单体,*ET* 值主要分布在 $7 \sim 10 \text{ km}$,占总非雷暴单体数目的 67%, $5 \sim 7 \text{ km}$ 区间是另一个非雷暴单体数目占比的峰值区域,在此区间有 9 个雷暴,占有所有非雷暴单体的 25%,剩余的非雷暴单体其 *ET* 分布在 $10 \sim 12 \text{ km}$,*ET* 值为 12 km 以上和 5 km 以下均没有单体分布。同时可以发现,雷暴单体与非雷暴单体 *ET* 值的区间分布有明显区别,以 10 km 高度为阈值,*ET* 值在 10 km 以上的雷暴单体占总雷暴单体的 97%,而 *ET* 值在 10 km 以下的非雷暴单体占总非雷暴单体的 92%,这充分说明了回波发展的高度是闪电发生的一个重要条件,闪电的发生需要较高的云顶,云顶越高云内上升气流越强烈,观测表明,发生闪电伴随有很强的上升气流,闪电活动开始的时间与大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强上升气流相

表 6 不同 *ET* 的雷暴单体和非雷暴单体数目(单位:km)

Table 6 The number of thunderstorm and non thunderstorm with different *ET* (unit: km)

	0~5	6~7	8~10	11~12	13~15	16~17
雷暴单体	0	0	2	45	7	5
非雷暴单体	0	9	24	3	0	0

一致(陈渭民,2006),另一方面,回波顶高越小上升气流越弱,发生闪电的几率越小。

表7列出了应用10 km ET 指标进行雷电预警的结果检验分析,通过分析,可以看出这一指标的预警效果很好,成功预警率 POD 在0.90以上,且虚警率 FAR 很小,综合评价(临界成功指数 CSI)为0.87,可以确定10 km ET 为预警雷电发生的一个很好的指标,并且该指标可以单独使用,这与 Gre-million 等(1999)的结论相类似,只是后者的指标比本文提出的指标低0.5 km。但该指标的预警提前时间较短, T_f 平均为7 min,这意味着在雷达回波上首次出现这一指标,1个体扫结束后单体对应区域就会出现闪电。

表7 10 km ET 雷电预警结果检验

Table 7 Test result in the lightning warning with 10 km ET

	POD	FAR	CSI	T_f/min
$ET=10$ km	0.92	0.06	0.87	7

5 雷电预警方案的建立与个例检验

依据上述提取的雷电预警指标,经过对各指标的预警效果做进一步分析后,雷电预警的具体方案和步骤归纳如下:

(1) 确定特征回波强度达到的温度层高度。依据计算当天08时(北京时)的探空资料,获取计算区域的0、-10和-15℃温度层高度,判断35和40 dBz回波顶高是否突破0和-10℃温度层高度。如果35 dBz回波顶高突破这两层,则说明在28 min后该单体对应区域雷电发生几率较大,若在1个体扫结束后40 dBz回波顶高突破-10℃层高度则可以判定该体扫结束10 min后单体对应区域会发生雷电。

(2) 确定回波顶高。通过计算得到的回波顶高 ET ,判断其值是否大于10 km,若满足此条件则可确定该次体扫结束后 $ET>10$ km的单体对应区域雷电发生几率很大。

(3) 判断垂直累积液态含水量。据前文所知, VIL 值对于雷电活动区没有明显规律,用此指标是为进一步降低雷电预警的虚警率。该指标其值只要大于0即可判断雷电将会发生,但同时也要判断其值是否小于 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

综合以上三个方面,将雷暴天气雷电预警的具体流程表述为图3。

为检验上述已形成的雷电预警方案效果,本文选取了2013年6、7月发生在甘肃中部地区的几次强对流天气过程,从中挑选出对流单体16个作为独立检验样本,其中包括雷暴单体12次,非雷暴单体4次。表8列出了所有检验样本的雷电预警效果。

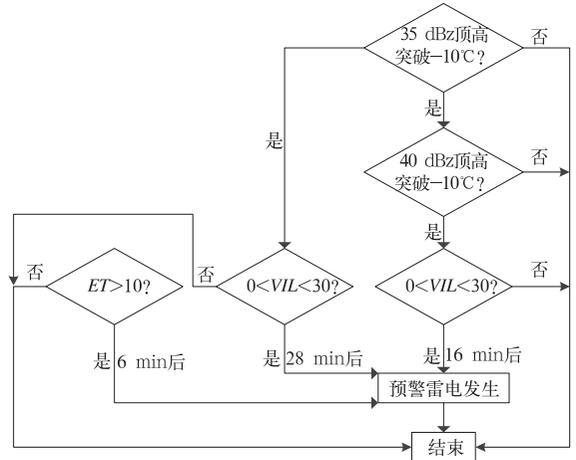


图3 雷电预警流程图

Fig. 3 Flow chart of lightning warning

表8 雷暴预警的个例检验结果统计

Table 8 Statistics of test results in thunderstorm warning

样本时间/年.月.日	预警效果			样本总数 (雷暴/非雷暴)
	正确	空报	漏报	
2013.6.19—6.20	3	1	0	4(3/1)
2013.7.3—7.4	6	1	1	8(6/2)
2013.7.31	3	0	1	4(3/1)

样本检验过程中,根据雷电预警方案识别出雷暴单体11个、非雷暴单体4个。通过闪电定位资料的实际对比检验,发现识别出的雷暴单体中有2个单体没有发生闪电,而在识别出的非雷暴单体中却有2个单体发生了闪电,其余的单体识别结果均正确。在预警时间方面,3次过程雷暴单体发生闪电的时间在预警时间之内的有7个,发生闪电时间没有在预警时间之内的有2个。图4为2013年7月4日强对流的20:18—20:48雷电预警位置与实况叠加显示。

分析其中出现4个单体预警结果与闪电实况结果不符合的情况,导致可能原因是从探空观测获取的温度层高度与雷暴发生时相应的温度层高度不一致。整体评价来看,从已有的检验结果中可以说明该方案在雷暴天气具有较好的预警效果,无论是对雷电的落区预警还是雷电发生的预警提前时间都有不错的表现。

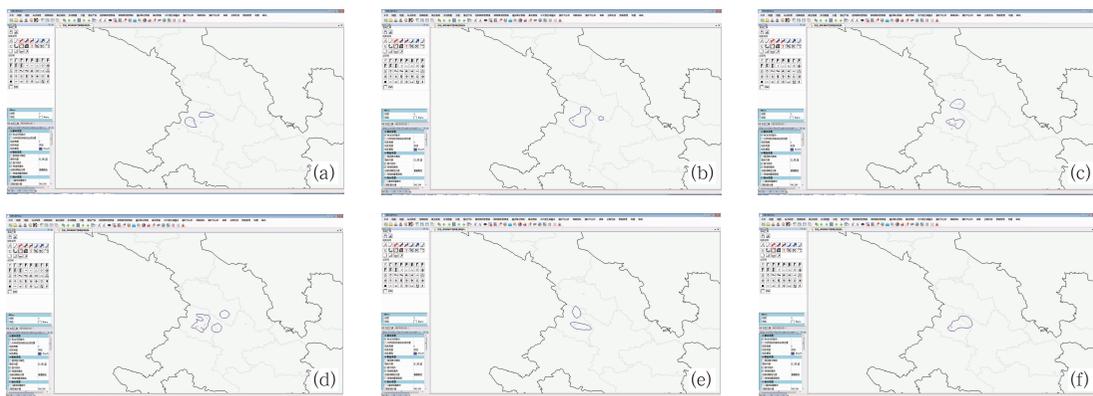


图 4 雷电预警结果与闪电实况叠加显示

(a) 20:18, (b) 20:24, (c) 20:30, (d) 20:36, (e) 20:42, (f) 20:48

Fig. 4 Overtapping display of the result of lightning warning and monitored lightning

(a) 20:18, (b) 20:24, (c) 20:30, (d) 20:36, (e) 20:42, (f) 20:48

6 结 论

选取 2011 和 2012 年夏季发生在甘肃中部地区的 17 次对流性降水过程的 95 个单体样本,分析每个样本的雷达产品特征量与闪电活动区的对应关系,提取反映较好的预警指标,建立雷电预警方案,并通过实际检验。主要有以下结论:

(1) 通过分析选取的 12 个回波强度随高度分布特征量指标,综合考虑各指标的预警效果,发现 35 dBz 回波强度顶高突破 -10°C 层高度和 40 dBz 回波强度顶高突破 -10°C 层高度等 2 个指标在雷电预警效果较好,两者的临界成功指数 *CSI* 分别为 0.79、0.82,预警提前时间分别为 23 和 16 min。

(2) 分析雷电活动区与雷达回波 *VIL* 对应关系,发现 *VIL* 值对于雷电预警指示意义不大,但可以将其作为判断雷暴是否发生的一个充分条件,即在其他条件满足时,只要 *VIL* 值大于 0 即可判断为雷暴发生,但其值不能超过 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(3) 雷电活动区与回波顶高 *ET* 的对应关系分析表明,10 km *ET* 为预警雷电发生的一个很好的指标,并且该指标可以单独使用,预警提前时间平均为 7 min。已形成的雷电预警方案对 2013 年的个例进行效果检验分析,结果表明该方案在雷暴天气具有较好的预警效果。

参考文献

陈渭民. 2006. 雷电学原理(第二版). 北京:气象出版社,144-256.

刘冬霞, 郗秀书, 冯桂力. 2010. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究. 大气科学, 34(1): 95-104.

吕伟涛, 张义军, 孟青, 等. 2009. 雷电临近预警方法和系统研发. 气象, 35(5): 10-17.

李南, 魏鸣, 姚叶青. 2006. 安徽闪电与雷达资料分析及机理初探. 热带气象学报, 22(3): 265-272.

孟青, 张义军, 吕伟涛, 等. 2009. 雷电临近预警系统的运行试验. 气象, 35(4): 20-24.

彭丽英, 万齐林, 王谦谦, 等. 2007. 广东中部地区雷电和 CINRAD 雷达回波的统计关系. 热带气象学报, (2): 171-176.

石玉恒, 张义军, 郑栋, 等. 2012. 北京地区雷暴的雷达回波特征与闪电活动的相关关系. 气象, 38(1): 66-71.

吴乃庚, 林良助, 冯业荣, 等. 2013. 2012 年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析. 气象, 39(4): 410-417.

肖艳姣, 刘黎平. 2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究. 气象学报, 64(5): 647-657.

易笑园, 宫全胜, 李培彦, 等. 2009. 华北飊线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标. 气象, 35(2): 34-40.

张一平, 俞小鼎, 孙景兰, 等. 2014. 2012 年早春河南一次高架雷暴天气成因分析. 气象, 40(1): 48-58.

Buechler D E, Goodman S J. 1990. Echo size and asymmetry: Impact on NEXRAD storm identification. J Appl Meteor, 29: 962-969.

Gremillion M S, Orville R E. 1999. Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center. Florida: A study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D. Wea Forecasting, 14: 640-649.

Mosier R M, Schumacher C, Orville R E et al. 2011. Radar nowcasting of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas. Wea Forecasting, 26(2): 199-212.